ISSN 0919-6676
CODEN:SFHPFE

# 試 験 研 究 報 告

## 平成２５年度

福島県ハイテクプラザ
FUKUSHIMA TECHNOLOGY CENTRE

# 平成２５年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告

## 目　　次

### ○技術開発業務

#### 成長産業基盤技術高度化支援事業


１　微細金型作製技術の検討 ……………………………………………… 6
　技術開発部生産・加工科　安齋弘樹　本田和夫　小野裕道
　技術開発部工業技術科　宇津木隆宏

２　マルチスケールＣＡＥによる製品開発手法の確立（第２報）……………… 8
　技術開発部工業材料科　工藤弘行　菊地時雄　光井啓
　矢内誠人　五十嵐雄大


#### ハイテクプラザ放射線研究開発事業


１　放射線を遮蔽するプラスチックの開発……………………………… １２
　技術開発部プロジェクト研究科　菊地時雄
　技術開発部工業材料科　矢内誠人　菅野雄大

２　県産農産物の食品加工における放射性物質の動態解明と低減技術の開発…１５
　会津若松技術支援センター醸造・食品科　小野和広　星保宜　中島奈津子


#### 再生可能エネルギー関連産業創出プロジェクト事業


１　浅部地中熱利用システムの開発…………………………………… １９
　技術開発部工業材料科　五十嵐雄大　伊藤弘康　小柴佳子
　技術開発部生産・加工科　大内繁男　吉田英一
　技術開発部プロジェクト研究科　加藤和裕
　学校法人日本大学工学部　伊藤耕祐
　有限会社住環境設計室　影山千秋


#### 産業廃棄物減量化・再資源化技術支援事業


１　未利用農産物等の機能性成分を活かした加工技術の開発……………… ２３
　会津若松技術支援センター醸造・食品科　佐藤光洋　星保宜　小野和広
　中島奈津子


#### いのちを守ろう！農作業安全対策推進事業


１　簡易型転落・転倒警報装置の開発………………………………… ２７
　技術開発部生産・加工科　高樋昌　兼子純一
　農業総合センター　青田聡　大野光

## 受託研究事業


1　材料科学的なアプローチによる厚板鍛造の高度シミュレーション技術の確立（第３報）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３１
（経済産業省　戦略的基盤技術高度化支援事業）
技術開発部工業材料科　工藤弘行　五十嵐雄大
林精器製造株式会社　大沼孝　遠藤一成　佐藤幸伸 他
国立大学法人茨城大学　鈴木徹也　永野隆敏　岩瀬謙二

2　太径締結部品のミクロ加工制御技術の確立（第２報）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・３５
（経済産業省　戦略的基盤技術高度化支援事業）
技術開発部工業材料科　工藤弘行　光井啓　五十嵐雄大
伊藤弘康　小柴佳子　菅野雄大
東北ネヂ製造株式会社　関口龍一郎　江幡卓典 他
国立大学法人茨城大学　鈴木徹也　永野隆敏

3　水溶性チタン酸バリウム前駆体を用いた高性能ＰＴＣサーミスタの開発・・・３９
（独立行政法人科学技術振興機構JST復興促進センター　復興促進プログラムA-STEP探索タイプ）
技術開発部工業材料科　宇津木隆宏
国立大学法人山形大学　松嶋雄太

4　組織解析を用いた窒素吸収処理品に求められる機能特性の高度化・・・・・・・４１
（独立行政法人科学技術振興機構JST復興促進センター　復興促進プログラムマッチング促進タイプⅠ）
技術開発部工業材料科　光井啓　鈴木雅千　小柴佳子
林機器製造株式会社　大沼孝　渡部隆司　佐藤幸伸
深山茂

5　生体分子のセンシングデバイスへ応用可能なマイクロ流路用金型の作製技術開発（第２報）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４５
（独立行政法人科学技術振興機構JST復興促進センター　復興促進プログラムマッチング促進タイプⅡ）
技術開発部生産・加工科　安齋弘樹　本田和夫　小野裕道
技術開発部工業材料科　宇津木隆宏
株式会社エム・ティ・アイ　元井泰二郎　元井広樹　齊藤伸寿
志賀直子
独立行政法人産業技術総合研究所　鳥村政基　丹羽修　黒澤茂
栗田僚二　加藤大　愛澤秀信
谷英典

6　マルチスケール計算材料科学の応用による鋳造製品の高強度・高じん化組織制御技術の確立（第１報）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・４８
（独立行政法人科学技術振興機構JST復興促進センター A-STEPハイリスク挑戦タイプ（復興促進型））
技術開発部工業材料科　工藤弘行　光井啓　五十嵐雄大
菅野雄大
株式会社会津工場　吉田幸男　酒井優　梁取典也
渡部哲夫

7　シートベルトのセンサ化による運転者挙動解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５２
（公益財団法人タカタ財団　平成２５年度研究助成）
技術開発部生産・加工科　浜尾和秀

8　着用快適性に優れた防刃用衣料素材の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・５７

（中小企業庁　ものづくり中小企業・小規模事業者試作開発等支援補助金）
福島技術支援センター繊維・材料科　東瀬慎　佐々木ふさ子
東和株式会社　佐藤恵一

## 共同研究事業

1　ネットワークオンチップ構成における高位合成に関する研究……６１
（独立行政法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業）
技術開発部生産・加工科　吉田英一
公立大学法人会津大学　齋藤寛　宮囿悟　竹内信一

# ○企業支援業務

## がんばれ福島！産業復興・復旧支援事業

### ものづくり復興支援事業（技術開発）

1　ニッケル合金劣化材の炭化物再固溶化……６４
技術開発部工業材料科　光井啓　鈴木雅千　小柴佳子

2　電子基板のメッキ仕様がはんだ接合信頼性に与える影響について……６７
技術開発部工業材料科　矢内誠人　鈴木雅千　伊藤弘康
いわき技術支援センター機械・材料科　三瓶義之

3　クラッド接点の電気伝導解析及び熱解析……７０
技術開発部生産・加工科　大内繁男
技術開発部工業材料科　工藤弘行

4　ＦＰＧＡを用いた電源装置の表示機能の検討……７３
技術開発部生産・加工科　高樋昌　大内繁男

5　切削工具寿命の判定……７６
技術開発部生産・加工科　小野裕道　齋藤俊郎　安藤久人
ＬＳＩクーラー株式会社　阿部信博

6　有機栽培転換を促進する微生物資材の開発……７９
技術開発部プロジェクト研究科　渡邊真　池田信也
株式会社ＪＭＣ　佐藤雅人

7　落花生の乾燥調整方法の改良による品質向上……８１
会津若松技術支援センター醸造・食品科　星保宜　小野和広　佐藤光洋
株式会社おくや　松﨑健太郎
会津農林事務所喜多方農業普及所　高倉麻紀

8　蜂蜜の香りを生かしたミードの作製技術の開発……８４
会津若松技術支援センター醸造・食品科　山下慎司　深倉宏崇　菊地伸広
鈴木賢二
有限会社峰の雪酒造場　佐藤謙信

9　磐城杉を使用した高級割り箸の開発……８６
会津若松技術支援センター産業工芸科　遠藤知里
株式会社磐城高箸　高橋正行

１０　県産ヒノキにおけるヤニ防止技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９０
　　会津若松技術支援センター産業工芸科　　遠藤知里　橋本春夫
　　株式会社正木屋材木店　　大平宏之

１１　端面部の仕上げ技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９３
　　いわき技術支援センター機械・材料科　　緑川祐二
　　東洋シャフト株式会社　　奥田要一　齋藤厚　諸岡重道

１２　シーム溶接における接合部の高品質化技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９５
　　いわき技術支援センター機械・材料科　　佐藤善久
　　クリナップ株式会社湯本工場　　渡辺明伸

１３　硫酸バリウム（福島加工品）を用いた放射線遮蔽材料の開発・・・・・・・・・・・・・９７
　　いわき技術支援センター機械・材料科　　吉田正尚
　　竹原化学工業株式会社　　鈴木伸一

用語解説（本文下線）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９９

# 微細金型作製技術の検討

Examination for fabrication technique of mold with micro pattern

技術開発部生産・加工科　安齋弘樹　本田和夫　小野裕道
技術開発部工業材料科　　宇津木隆宏

ゴム、および樹脂製マイクロ流路デバイスの作製には金型が必要であり、ハイテクプラザでは、マイクロめっき法により幅数十μm、高さ数十μm程度の凸形状を作製する技術を開発してきた。しかしながら、段差付流路や細胞培養等の目的で流路深さが数百μm以上必要となる金型については、本方法では作製が困難である。そこで、マイクロめっき法と光造形を組み合わせることにより、マイクロメートルとミリメートルが混在した金型作製方法の検討を行った。この結果、マイクロめっきによるパターン形成後に光造形を行うことで複数の高さが混在した形状が作製可能となり、金型としての利用も確認できた。

Key　words:マイクロ流路デバイス、金型、光造形

## １．緒言

次世代医療では、微量の血液等で分析が行われるマイクロ流路デバイスの実用化が研究されている。また、近年では細胞培養や分子をトラップするために異なる深さ流路を配置した高機能チップの検討も行われている。これまで、ハイテクプラザにおいては、図１に示すフォトリソグラフィとめっきを組み合わせたマイクロめっき法により幅数十μm、高さ数十μmの微細形状を作製する技術開発を行ってきた。これにより、機械加工では作製困難な形状についても短時間で作製することが可能となり、射出成形用金型としての利用も行ってきた。図２に作製した金型の一例を示す。

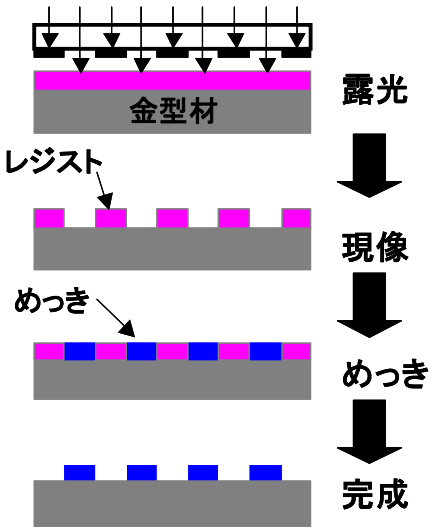



図１　マイクロめっき法

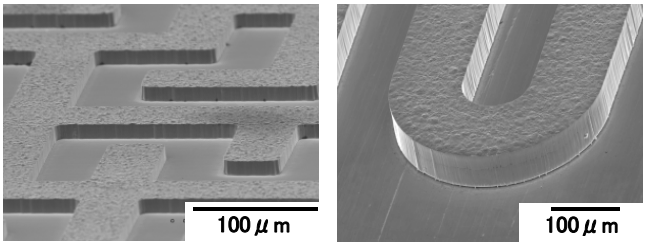



図２　試作した金型の例

一方で、マイクロ流路デバイスにおいても、細胞培養などの目的で一部の流路の高さが数百μm以上必要な形状の要求もある。しかしながら、マイクロめっき法では、厚いレジストをパターニングすることが困難なため、高さが数百μm以上の形状を形成することが難しい。

そこで本研究では、マイクロめっき法と機械加工等を組み合わせることで、マイクロメートルサイズの形状と、ミリメートルサイズの形状が混在した金型の作製技術について検討した。

## ２．実験内容

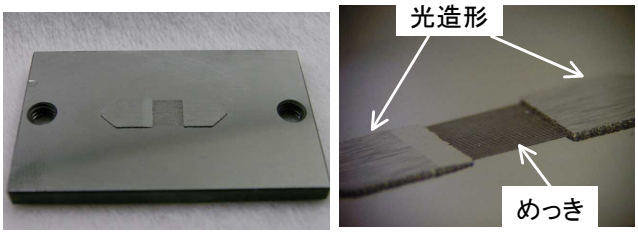
### ２．１．　光造形との組み合わせ

ミリメートルサイズの形状を作製する方法として、金属焼結型の光造形を組み合わせることで、金型の作製を行った。光造形装置は、松浦機械製作所のLEMEX Avance-25を用いた（加工は上記装置を所有している（株）エービーで行った）。この装置の特徴としては、光造形と共に切削加工も同一ステージで行えることである。今回は、マイクロめっき法により微細形状を作製した後に、この形状の両端、もしくは上面に光造形により形状を付加した。今回用いた金属材料は、SUS420J2相当品であり、粒子のサイズは50μm未満である。

### ２．２．　めっき両端への形状付加

作製した形状は、段差付マイクロ流路デバイスを想定したものである。マイクロめっき法により幅50μm、高さ30μm、長さ4000μmの形状を150μm間隔で30本配置し、その両端に幅5mm、高さ0.3mm、長さ6mm（一部テーパ）の形状を光造形により付加した。

図３に作製した形状を示す。めっきと光造形のつなぎ部分も問題なく作製できているが、光造形の側面について今回の形状では切削加工ができないため、表面が粗くなっている。成形不良が予想されたため、形状を確認したのみで射出成形は行わなかった。



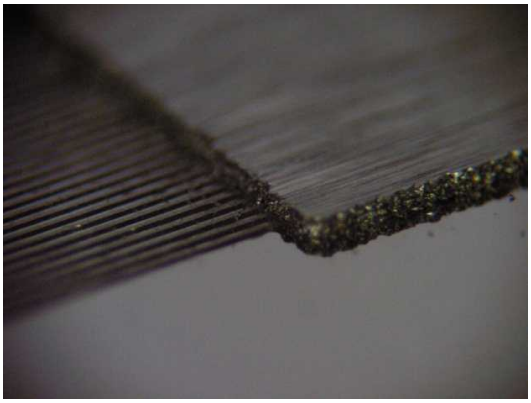
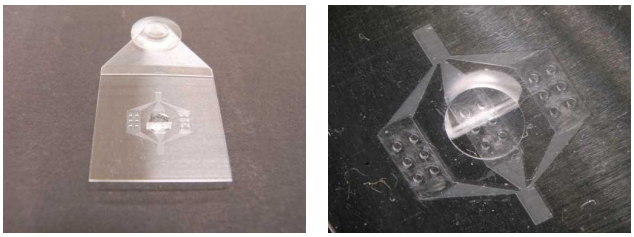



図３　試作した金型（めっき両端）



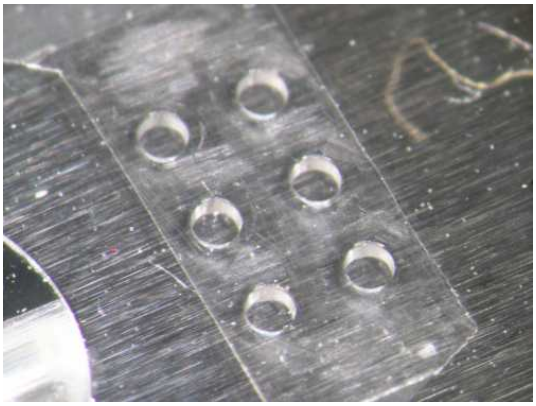


図５　成形品

### ２．３．めっき上への形状付加

作製した形状は、細胞培養用マイクロ流路デバイスを想定し、流入後３つに分離し、それが１つにまとまり流出される形状であり、分離部分に細胞の培養を行うウエルを配置した。マイクロめっき法により幅１㎜、高さ30μm、長さ2㎜の流入・流出部、幅2㎜、高さ30μm、長さ4㎜の分離部分を作製後、分離部分上に直径500μm、高さ200μmの柱を1㎜ピッチで6個の形状を光造形により付加し、上面、および側面を切削加工した。

図４に作製した金型を示す。上面、および側面を切削したことで、表面が滑らかになっている。

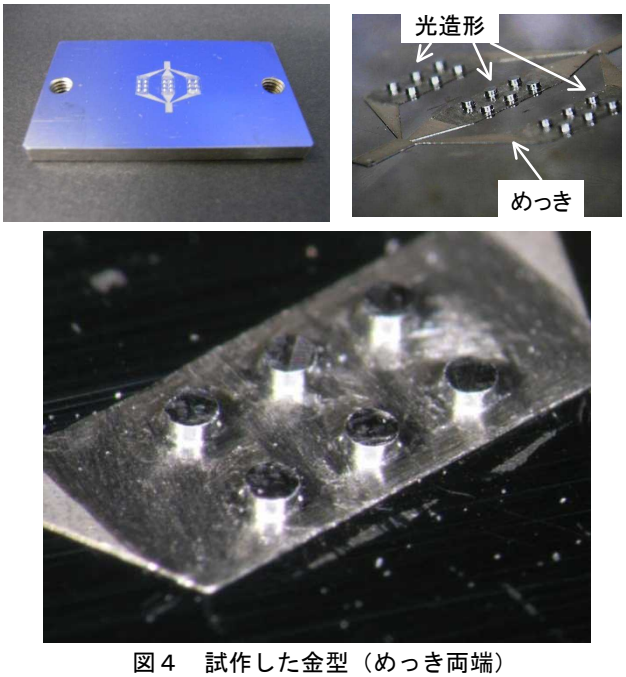





図４　試作した金型（めっき両端）

本金型を用い、ハイテクプラザ所有の微細成形機Microsystem50により成形を行った。樹脂はCOP樹脂（日本ゼオン製ZEONOR1060R）を用い、熱サイクル成形（射出時131℃、型開時87℃）により実施した。成形品の写真を図５に示す。成形は数十ショットまでであるが、剥離等も発生せず、金型として利用できる可能性を確認した。

しかしながら、成形品には切削痕が転写しており、また一部にピットも見られることから、鏡面が必要なものへの利用にはさらなる検討が必要である。

## ３．結言

本研究では、マイクロめっき法と光造形を組み合わせることでマイクロメートルの形状とミリメートルの形状が混在した金型作製技術について検討を行い以下の結果を得た。

（１）マイクロめっき法により微細形状作製後、光造形によりめっき両端、もしくは上面に形状を付与することが可能であることを確認した。

（２）光造形のみでは、表面が粗く金型としての利用は困難であるが、切削加工と組み合わせることで金型としての利用が可能である。

今回は、ハイテクプラザ所有の金型の制約により、光造形で作製した形状の高さを0.3㎜程度としたが、さらに高くすることは可能であり、作製できる形状の範囲が広がった。今後は実製品への適用を図る予定である。

# マルチスケール CAE による製品開発手法の確立（第 2 報）

Establishment of the Product Development Technique by Multi-Scale Simulation (2nd Report)

技術開発部工業材料科　工藤弘行　菊地時雄　光井啓
矢内誠人　五十嵐雄大

複雑な現象を効率良くシミュレーションすることが期待できるマルチスケールＣＡＥ技術に関連する要素技術を調査し、各分野に共通する技術課題の解決に有効な利活用手法を提案した。一例として、X 線 CT によるはんだ接合部のイメージベースモデリングを実施し、環境試験の一部を CAE に置き換える「バーチャル環境試験」の利用検討を行った。

Key　words:CAE、マルチスケール

## １．緒言

過去数十年、コンピュータ・シミュレーション技術は急速で継続的な発展を遂げ、学術分野ではシミュレーションによる仮想実験が一般的になるなど、実験科学、理論科学に並び、シミュレーション科学として「第 3 の科学」の地位を確立している。産業分野においても、コンピュータ技術を用いて、ものづくりの効率化を狙う CAD/CAM/CAE などコンピュータ援用技術が普及して十数年が経つ。近年では、計測や分析の分野でも、X 線 CT 装置、非接触 3 次元形状測定装置や、電子線後方散乱解析(EBSD)など組織解析装置もコンピュータの性能向上に支えられ、その活用範囲を大きく広げている。

近い将来、これら計測・分析技術とシミュレーション技術をさらに発展・融合した「マルチスケール CAE」技術の活用が期待される。この技術は複数のスケールの CAE を連携する、あるいは、シミュレーション技術を中心に複数のスケールの情報を連携させる技術であり、複雑な現象を効率良く、正確に解析することが期待されている。2013 年のノーベル化学賞は「複雑な化学システムのためのマルチスケールモデルの開発」に対して与えられたが、この技術はマルチスケール CAE 技術の先駆けとして知られる。

我々の研究グループがマルチスケール CAE の適用を検討しているのは、材料科学分野、特に構造材料のミクロ構造への適用である。近年、分析技術やシミュレーション技術の進歩により、ナノ、ミクロレベルの挙動・特性とマクロ的な特性との関係性を定量的に把握することが可能になりつつあり、ブレークスルーの期待が高まっている。製造業では、これまで品質管理や不良対策のために、材料のミクロ構造の観察や分析をすることが多かったが、マルチスケール CAE 技術が確立されれば、それらの観察・分析を組織制御や強度保証に活用することが期待できる。

しかし、マルチスケール CAE 技術を実際のものづくりに活用するには、まだまだ解決するべき課題が多い。例えば、CAE 技術は先進的なものが多く、専門性が高いため、各技術に精通し有効な組み合わせを見出すコーディネータ的な役割を担うべき人材が不足していることや、技術を必要とする企業と技術を保有する技術者の接する機会が無いことが挙げられる。

これらの課題解決のため、本研究では、共通的な基盤技術である「マルチスケール CAE 技術」の高度化を目指し、要素技術の調査や利用提案、研究テーマ立案を行った。また、県内企業での速やかな実用化のため、ハイテクプラザが運営する研究会の活動と一体の研究として実施する。

## ２．マルチスケールCAE関連の要素技術

### ２．１．　要素技術マップの作成

昨年度に引き続き、マルチスケール CAE に関する要素技術の情報収集を行い、材料科学分野におけるマルチスケール CAE 技術に関連する要素技術マップの最新版を作成した。図 1 に横軸をスケール軸、縦軸を手法軸とし、各要素技術を該当する位置に配置した要素技術マップを示す。手法軸は、ツールとして重要な実験ベースとシミュレーションベースを配置した。実験ベースに関しては、重要度の高いイメージベースの技術を区別して配置した。枠中を塗りつぶした要素技術は当研究グループ内で利用可能である。枠の色が緑のものはハイテクプラザ内にて、枠の色が赤いものは所外の研究者の協力で利用可能である。

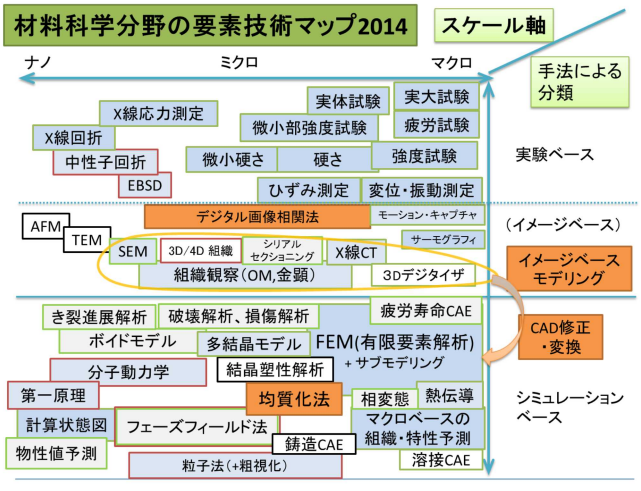



図１　材料科学分野の要素技術マップ2014年版

熱処理 CAE、溶接 CAE、鋳造 CAE は、加工プロセスの種類による表現で異質なものだが、マルチスケール CAE 技術と関わりが深いため追記した。

## ２．２． 要素技術の概要

昨年度はマップに示した要素技術の中で重要度の高い６つのシミュレーションベースの技術（有限要素法、均質化法、結晶塑性解析、分子動力学、フェーズフィールド法、計算状態図・物性値計算技術）を紹介した。

今年度は県内企業での実用に向けて、より重要と見られる実験ベース技術を中心に、９つの技術に関して、その概要と技術動向を記載する。

(1) シリアルセクショニング・・・断面ミクロ組織観察と研磨を繰り返すことで連続的に得られた断面写真から、ミクロ組織の 3 次元構造情報を得る手法。研磨方法として機械研磨と FIB(集束イオンビーム)による方法がある。多結晶体に対しては EBSD の併用が有効である。

(2) 3D/4D 組織解析技術・・・シリアルセクショニングなどで得られた 3 次元のミクロ組織情報を 3D 組織情報と呼ぶ場合がある。非破壊解析である放射光 CT（コンピュータ断層撮影）による手法では 3D 組織の経時変化を把握することができ、併せて 4D 組織情報と呼ばれる。これらは、特性発現や組織制御に関わる極めて重要な情報であるが、測定の手間がかかるため、学会などでデータベース化し、学術研究に活かそうとする動きもある。このようにデータを活用した設計型の材料科学研究は、最近では「マテリアルズ・インフォマティクス」と呼ばれる。また、実在組織の解析情報だけでなく、フェーズフィールド法など CAE の計算結果も 3D/4D 組織情報の一つとして考える取組みも増えている。

(3) サーモグラフィ・・・工業製品に対する熱伝導解析では、熱伝達係数や発熱量などが不明の場合が多い。製品内部の温度測定は困難であるため、測定可能な表面の温度分布や温度変化を測定した後に、複数の入力パラメータによる CAE 解析の結果と見比べて、不明なパラメータを同定する「逆解析」「逆同定」という手法が実用的である。このような使用目的では、高精度な温度分解能、時間分解能が求められる。

(4) デジタル画像相関法・・・非接触でひずみ測定や変位測定を行うための画像処理手法で、変形前後のデジタル画像の微小領域の相関性から変形前後の同一箇所を特定し、変形量、変位量を把握する。デジタル画像の 1 ピクセルの 1/100 程度の微小な変位を測定することができる。

(5) 3 次元デジタイザ・・・3 次元形状を測定するための装置で 3 次元スキャナとも呼ばれる。近年、注目されるのは、CCD カメラを利用し、非接触で高速測定できるタイプである。精度はやや低いものの数分程度の短時間で広範囲の分布情報を得ることができるのが特徴である。

(6) CAD 修正・変換技術・・・3D プリンタの流行により周辺分野である CAD データの修正・変換に関する技術の重要性が認識されている。例えば、3 次元デジタイザで得られるデータは測定点の座標情報の集まりである「点群」データであるため、3D プリンタ出力用のデータを作成する場合、これをサーフェス CAD データである STL 形式に変換する必要がある。さらに、データに欠落や不備があると 3D プリンタ出力できないため、データの修正も必要である。このように実製品から CAD データを作成することをリバース・エンジニアリングと呼ぶ。近年では、CAE 解析の入力データを作成することも増えている。この場合、データの品質にする要求が高いため、CAD データを修正・変換の重要性が高まる。

(7) モーション・キャプチャ・・・工業製品の故障、トラブルは、衝撃・振動現象などの動的現象をきっかけとする場合が多い。CAE 解析は、製品間の接触状態や固定状態の影響によって、解析精度が低下する。これを補うため、実現象の座標、運動情報を把握する必要があるが、非接触測定であるモーション・キャプチャ技術であれば、製品の挙動に影響を与えることなく、短時間で分布情報を把握可能である。動的現象に対しては、1 秒で数百～数千コマの画像撮影が可能なハイスピードカメラの利用が望ましい。

(8) マクロベースの組織・特性予測技術・・・一般的な有限要素解析の範疇で、熱伝導・相変態解析との連成解析を行い、結果として得られた熱履歴と相変態特性データを照合することにより、形成される組織の割合や特性を予測する技術。鍛造、熱処理、溶接、鋳造 CAE に共通して利用されている。

(9) 粒子法・・・物体を質量を持った多数の粒子としてモデル化する計算手法で、主に流体の運動に適用される。比較的新しい技術で工業的利用は限定的である。

## ２．３．電子部品・実装技術分野における要素技術の利活用提案

企業での実用化を促進するために、分野ごとに共通課題を整理し、利活用手法を提案した。本報告では、電子部品・実装技術分野における提案を記載する。

近年、電子部品・実装技術分野では、(1)電子部品

の微小化、高集積化、(2)鉛フリーはんだや導電性接着剤、セラミックス基板など新規材料や新規実装技術の採用、(3)自動車内 ECU(電子制御ユニット)に代表されるように、従来より厳しい温度、振動下での性能要求などにより、長期信頼性の確保が困難になっている。従来の環境試験、故障解析では長時間・高コストを要するようになり、開発上のボトルネックになることが多くなっている。

そこで、このような課題の解決に有効とみられる要素技術と、その連携手法を図２に図示し、概要を以下に記載する。

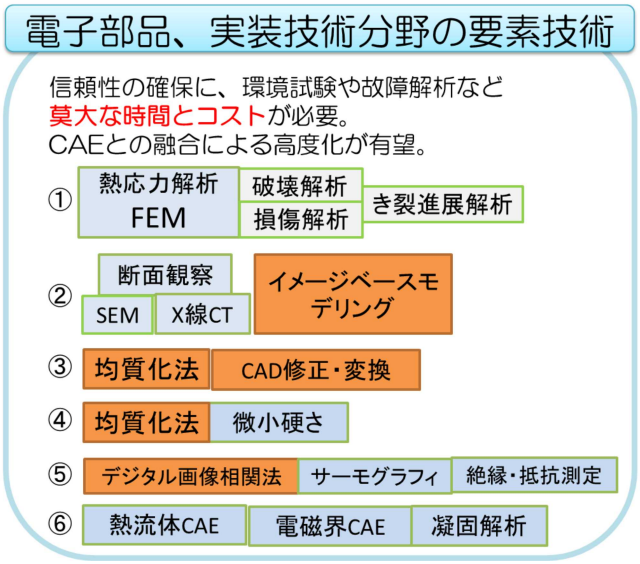



**図２　電子部品分野に適用可能な要素技術と連携手法**

① 熱応力解析の高度化

電子部品の最も代表的な故障メカニズムは、温度サイクルを受けて生じる熱応力の繰り返しによる疲労破壊である。実製品では、はんだ接合部で破壊することが多いが、破壊は部品とはんだの界面で生じるため、外観から判断することができない。CAE 熱応力解析を行えば、熱サイクルを受けた際の応力状況を可視化することができ、故障解析に有用な情報を得ることができる。疲労破壊は亀裂の発生と進展という過程を経る複雑な現象であるが、近年では、市販ソフトでも亀裂の発生、進展を解析することが可能であり、温度サイクル数と製品の損傷の程度の関係を基に寿命を予測する解析も実施可能である

② イメージベース・モデリング

熱応力解析により、はんだ形状やボイドの存在が応力分布に大きく影響することが明らかになっているが、溶融・凝固の過程を経て形成されるはんだ形状は、CAD データが存在しない複雑な曲面形状であるため、実製品を X 線 CT、断面写真、SEM などで測定し、得られた画像データからモデルを作成する「イメージベースモデリング」の必要性が高い。

③ 大規模解析モデルの作成

多層基板や BGA 実装部などをそのまま忠実にモデリングすると、解析モデルが非常に巨大化し、モデル作成や解析時間が長期化してしまう。このため、BGA 部などの周期的な構造を均質化法により単純形状に簡易化したり、CAD ソフトの機能により簡易モデル作成を迅速化する提案がなされている。

④ 物性値の同定

電子部品では多種多様な材料が使用されるが、クリープ特性、粘弾性を発現する材料が多い。これらは CAE 分野で利用実績が少なく、材料特性試験も難易度が高い。

また、めっき層や接合部、接着剤は、製品や部位により材料物性が大きく変動することが多い。当研究グループでは、均質化法や微小硬さ測定により解析に必要な物性値を推定する技術を検討している。

⑤ 実製品との比較検証

CAE 解析の妥当性を検証する際に、実製品の変形挙動、温度変化や電気特性を測定し、両者の結果を比較する必要がある。当研究グループでは、非接触ひずみ測定を用いた変形挙動把握や電気特性測定による亀裂進展過程の把握を検討している。

⑥ 連成解析への発展

実製品の温度は、周囲流体の温度や流れの影響を受ける。また、パワーモジュールなどは自身のジュール発熱が問題になる。

一般には、何らかの仮定を基に解析することが多いが、これらの影響を正確に考慮するには、熱流体 CAE、電磁界 CAE と計算結果をやり取りする連成解析が必要である。

上記の内、主に①～④の実施に向け、ハイテクプラザでは、25 年度に経済産業省「新産業創出基盤強化事業」にて「イメージベース/マルチスケール CAE システム」を導入した。本装置は、モデル作成を行う「Simpleware」、モデル修正・変換を行う「SpaceClaim」、構造解析、熱伝導解析を行う「ANSYS Mechanical」、均質化・局在化解析を行う「ANSYS Multiscale.Sim」の 4 ソフトから構成され、イメージベース・モデリングと CAE 解析を連続的におこなうことができる。

本装置は、材料分野におけるミクロ構造や医療分野における生体構造のモデル作成や変形挙動の可視化、特性予測などへの活用も期待される。

### ２．３．　電子部品はんだ実装部への適用事例

上記の技術のうち、イメージベース・モデリングの

実例を示す。対象にしたのは図３に示すチップ部品のはんだ接合部であり、マイクロフォーカス X 線 CT 装置（TOSCANER-FTC32251）を用いて得られた測定データを基に Simpleware にてモデル作成を実施した。

結果を図４に示す。大きなボイドや形状の乱れが確認された。これらは応力分布や寿命性能に大きく影響を与えると見られるため、この形状データを用いることにより、CAE 解析精度が向上すると見られる。

当研究グループでは、電子部品の寿命のばらつきの大半は、はんだや欠陥の形状寸法や材料特性のばらつきに起因するものと推測しており、これらを反映する高精度な CAE 解析による故障の発生予測を目指している。これが可能になれば、大量のサンプルに対して試験を実施し、統計的に寿命予測する従来の環境試験に代わる、「バーチャル環境試験」とも言える、新しい信頼性保証手法が確立できると考える。

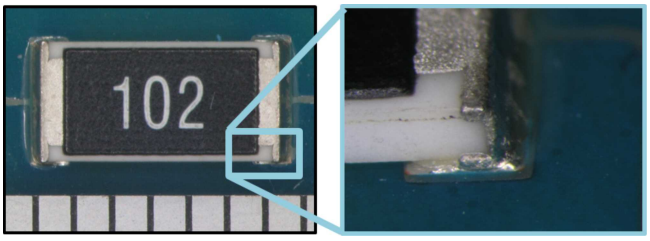



図３ 測定対象としたチップ部品（左）とはんだ接合部（右）

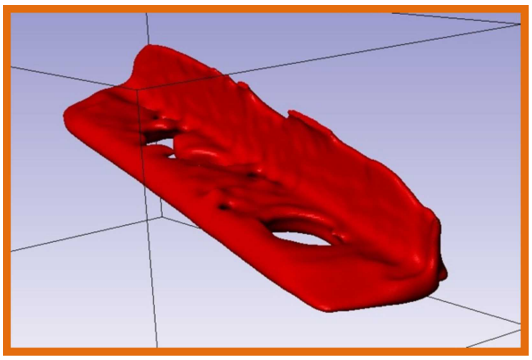


図４　CADデータ化されたはんだ接合部
（チップ部品や電子基板などは非表示）

### ２．４．　バーチャル環境試験の利用検討

一般に環境試験は設計段階や出荷前に実施される。設計段階では、電子部品や材料の選択、基板構造や部品の配置、実装手法などについて、様々な条件や組み合わせを検討し、最適化が図られる。この段階では、温度試験などの環境試験を長時間、故障が発生するまで行い、次に故障解析にて故障位置の特定と故障のメカニズムの解明をすることで、設計を改善するというサイクルを複数回繰り返す。通常、環境試験は 1 か月程度かかるため、設計段階には数か月が必要となる。

これら設計段階の信頼性確保に関し、近年、注目度を増しているのが HALT（Highly Accelerated Life Test：高加速寿命試験）である。HALT では、通常の環境試験より厳しい温度変化と振動荷重を段階的に徐々に負荷を高めて与え、故障発生までの評価を行う試験である。用途によっては、通常、1 か月以上かかる試験を数時間、数日で行うことができ、開発期間の大幅な短縮が期待できる。欧米で先行した技術であり、国内ではあまり普及していないことや、試験コストが高いことが課題である。

これに対し、当研究グループは、設計段階でのバーチャル環境試験の利用を提案する。バーチャル環境試験では、はんだ形状やボイドの存在の影響を定量化したり、様々な部品や材料特性、試験条件の組合せの CAE 解析を実施することにより、あらかじめ設計案を絞り込むことで、早期に要求仕様を満たす設計、製品を得ることができ、開発期間短縮とコスト削減を両立できると思われる。

## ３．結言

本研究では、マルチスケール CAE 技術を製造業における製品開発などで活用する手法を検討し、以下の結果を得た。

(1) 材料科学分野の要素技術マップを作成し、鋳造分野や電子部品・実装技術分野など分野別の提案を実施した。電子部品・実装技術分野を例に、技術課題の解決に有望と見られる利活用手法について報告した。

(2) 25 年度に導入した「イメージベース/マルチスケール CAE システム」の利用例として、はんだ接合部のモデル作成と熱応力解析により、環境試験の一部を CAE に置き換える「バーチャル環境試験」の利用を検討し、開発初期・試作段階の設計検証に適用することで、開発期間の短縮に有効となる可能性を見出した。

これらの成果は、ハイテクプラザが運営する研究会の活動などを通して公表するとともに、今後の事業提案、研究テーマ立案に活用する予定である。

本報告では電子部品・実装技術分野でのマルチスケール CAE の活用法について記載しているが、鋳造、射出成形、FRP 成形、鍛造、熱処理、金属プレス、溶接、電子部品・実装技術、巨大構造物の設計・製造など幅広い分野で活用が期待できる。特に、鋳造分野については、研究期間中に競争的研究資金の獲得に至ったため別途報告しているので、ご参照いただきたい。

# 放射線を遮蔽するプラスチックの開発

Development of the plastic which covers radiation

技術開発部プロジェクト研究科　菊地時雄
技術開発部工業材料科　矢内誠人　菅野雄大

放射線を遮蔽するプラスチックの開発のため、樹脂に鉛フリーはんだを混練し、サンプルを作成した。セシウム137の標準線源を用いて遮蔽能力を確認したところ、開発品は板厚3㎜（比重1.85）で鉛0.5㎜と同等の遮蔽能力が確認できた。この技術とノウハウを東北ポリマー(株)と(株)森重製作所に技術移転を行い、商品開発を行っている。

Key words:鉛フリーはんだ、放射線、遮蔽、摩耗、微細分散

## １．緒言

福島第一原子力発電所の事故により、福島県民は見えない放射線の恐怖におびえており、一刻も早い対応が求められている。

プラスチックに放射線を遮蔽する機能を持たせるためには、金属粉末や金属酸化物などの固体微粉末無機化合物をプラスチック中に混合・分散させる手法が用いられる。一般に、放射線強度 $I_0$ が、密度 $\rho$ 厚さ d の物質を透過し、$I$ に減衰したとすると、$I_0$ と $I$ との関係は（１）式により表される[1)]。つまり、材料開発のポイントは、いかにして密度 $\rho$ を大きくするかで左右される。

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot d) = I_0 \exp(-\mu_m \cdot \rho \cdot d) \quad (1)式$$

**$\mu$** ：線吸収係数 （密度ρに比例）
**$\mu_m$**：質量吸収係数
一定の波長のX線（エネルギー一定）に対して
物質ごとに決まった値
（X線のエネルギーによって値は異なる）

今回、遮蔽プラスチックを開発するにあたり、技術を早く広く県内中小企業に広めることを念頭に、入手困難な材料・高価な装置・特定の企業しか保有しない技術等を用いることはせずに、県内プラスチック製造業者が通常に所有している機器で対応可能な手法とした。本開発品において、樹脂に金属を混練するのは、他社製品と変わらないが、金属粉末ではなく鉛フリーはんだを用いることとした。これには大きく２つの利点が上げられる。１つは、鉛フリーはんだの融点（220 ℃）が樹脂の成形温度（200 ～ 300 ℃）に近いことがあげられる。これは、混練中にはんだが溶解し、金属粉末とは異なり機器を摩耗させることがないため、新たな設備投資は不要になる。もう１つは、溶融金属の粘度が低いことが上げられる。溶融金属の粘度は樹脂のそれに比べ、$10^5$ ～ $10^7$ ほど小さい。このことは鉛フリーはんだも同様である。そのために、金属粉末や金属酸化物などとは異なり混練中の機器のトルク上昇はほとんど無く、また流動性もほとんど変わらないため成形不良も起こりにくくなる。

今回、短期間で企業に技術移転するというコンセプトにおいて開発した遮蔽プラスチックについて報告する。

## ２．実験

### ２．１．材料

樹脂は、電気化学工業社製透明 ABS（デンカ ABS CL-301）を用いた。

鉛フリーはんだは、比重 7.38（スズ 95.5wt%, Ag4wt%, Cu0.5wt%）を用いた。混練には、インゴットをフライス盤で切削し、切粉にして用いた。

### ２．２．混練

混練は、東洋精機製作所社製バッチ式２軸同方向回転型混練機ラボプラストミルCを用いた。樹脂と鉛フリーはんだを所定量投入し、バレル温度 240 ℃、ローター回転数 50rpm.、混練時間 5 分で行った。

### ２．３．Ｘ線透過実験

Ｘ線の遮蔽実験は、IT コントロールズシステム社製Ｘ線ＣＴスキャン TOSCANER-32300 $\mu$ を用い、管電圧 60 ～ 200keV の間で透過率を測定した。

### ２．４．標準線源を用いた遮蔽実験

一般社団法人福島放射線総合研究所の協力で、島津製作所社製 Radiation Counter RMS-60（図１）を用いて放射線遮蔽率の測定を行った。用いた標準線源（日本アイソトープ協会）を表１に示した。

表１　実験に用いた標準線源

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| γ線源 | $^{137}Cs$ | 0.662MeV | $9.85\times10^5$Bq | (2012/03/16) |
| β線源 | $^{90}Sr$ | 0.546MeV | $1.00\times10^4$Bq | (2010/01/06) |
| β線源 | $^{204}Tl$ | 0.764MeV | $1.00\times10^4$Bq | (2010/01/06) |

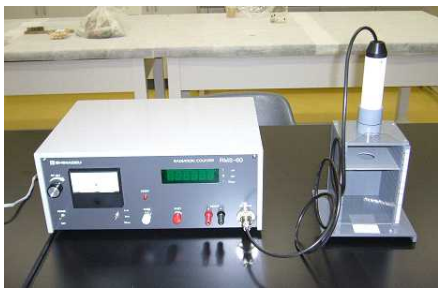


図1　測定装置図

## ３．結果および考察

### ３．１．微細分散メカニズム

２軸混練押出機を用いて、透明 ABS と鉛フリーはんだを混練し、比重 1.46,1.85 のサンプルを試作し、プレス成形により約 0.5mm の板状の試験片を作成し、数枚重ねて遮蔽実験のサンプルとした。

図２は、比重 1.85 のサンプルの液体窒素中の破断面である。5mm × 10mm 程度の切削粉であった金属が１μ m 程度の微粒子に分散しているのが観察された。

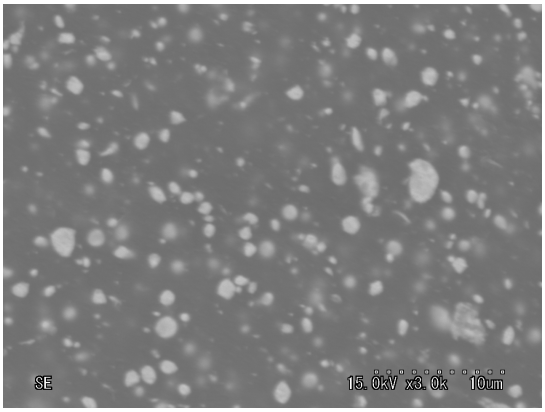



図2　試作品（ρ1.85）破断面のSEM写真

微細分散のメカニズムは以下のように説明される。混練時、樹脂（高粘度）中の鉛フリーはんだ(低粘度)はせん断場の速度勾配により内部で回転しながら楕円形に変形（図３）する。樹脂が伸長変形する動きに伴い、鉛フリーはんだも伸長し端からちぎれ、樹脂中に分散（図４）するものと考えられる。

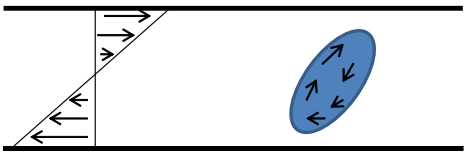


図3　せん断場における樹脂中の溶融金属の変形

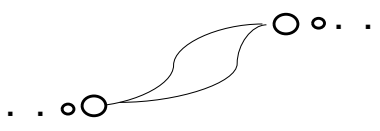


図4　分散のイメージ

図５は、樹脂と鉛フリーはんだを直径 10mm、240℃のシリンダーに投入し、直径 2mm のキャピラリーから押し出した樹脂ストランドの光学顕微鏡写真である。粒径の大きな金属から小径の金属がちぎれて分散している様子が観察された。

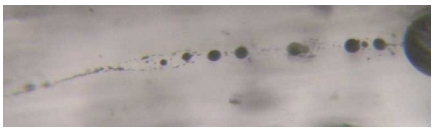


図5　微細分散のモデル実験

### ３．２．Ｘ線遮透過験結果

図６は、X線管電圧 100keV における開発品板厚とX線透過率のグラフである。板厚が厚いほど、密度が高いほど、X線の遮蔽能力は高くなることが解る。また密度から金属の体積含有率を求めるとρ 1.46 で 5vol%、ρ 1.85 で 10vol%であった。充填体積に比例して遮蔽能力が向上することが解った。

図７は、X線管電圧を変えた場合の透過率のグラフである。サンプルはρ 1.85、厚さ 3mm を用いた。

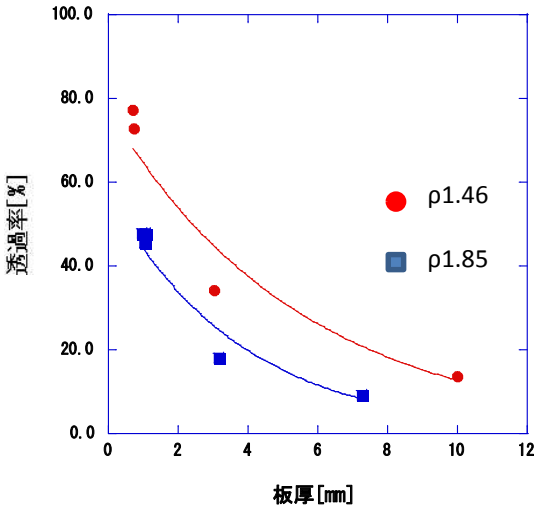



図6　試作品板厚とX線透過率

管電圧が 150keV あたりから透過率が飽和しているようにも見えるが、管電圧が高くなればなるほど遮蔽能力が低くなるのが解る。

### ３．３．　標準線源を用いた透過率実験結果

試作品の遮蔽能力を調べるため、X線の透過実験を行い、（１）式に示したように遮蔽能力は材料密度（フィラー添加量）と板厚に比例することがわかった。

しかし、いま県内で問題になっているのは、セシウム 137 由来のγ線による高い空間放射線量である。このγ線の遮蔽能力を確認するため標準線源（表１）を

用いて透過実験を行った。結果を表２に示した。数値は透過率である。開発品板厚 3mm は、鉛 0.5mm とほぼ同等の性能であることが解った。開発品の鉛フリーはんだ体積含有率は 10vol.%であるため、金属は 0.3mm 分の厚さとなる。鉛の 0.5mm に対して試作品のそれは 0.3mm と性能が良いように見られるが、2.7mm の残りの樹脂による減衰も寄与しているものと考えられる。

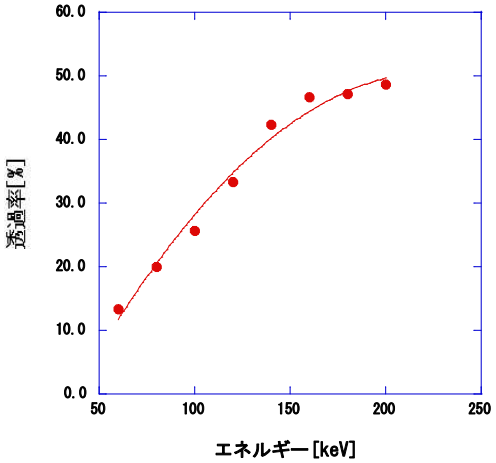



図７　X線エネルギーとX線透過率

表２　標準線源による透過率

| | Sr | Tl | Cs |
|---|---|---|---|
| 試作品 3mm ρ1.85g/cm$^3$ | 15% | 30% | 81% |
| Al 0.5mm | 30% | 35% | 84% |
| Pb 0.5mm | 15% | 35% | 79% |

### ３．４．　他社との比較

樹脂に無機化合物や金属粉末などを混練し、放射線遮蔽能力を向上させる手法は、既知の事実であり特許には抵触しない [2),3),4)] ため、各社いろいろな組み合わせの材料を開発している。中でも信頼できる大手２社との比較を表３に示した。Ａ社の比重 4.5 の硫酸バリウム品に比べて比重 19.3 のタングステン品の性能が極端に優れていないのは、価格と性能と機器の摩耗を考慮して、添加量を少なくしているためと思われる。Ｂ社品は添加物を公表していないが製品比重 2.0 を公表している。開発品のそれは 1.85 とＢ社品に近く遮蔽能力もそれに近いものと考えられる。

Ａ社，Ｂ社品は遮蔽性能を上げるためフィラーの添加量を上げると、材料粘度が上昇し成形しにくくなるため、添加量は限られてくる。試作品の場合成形温度で鉛フリーはんだが溶融するため樹脂粘度は上昇しないので成形には有利になるものと考えられる。

遮蔽材の性能を上げるためには、添加物を多くすることが必要であるが、遮蔽材の価格は上昇する。今回用いた鉛フリーはんだの価格は 5000 ～ 8000 円であった。樹脂中の溶融はんだの添加量であるが、岩倉[5)]、野口 [6),7)] らの報告によれば、30vol%程度までは微分散することが報告されており、添加量はこの範囲で性能と価格により決定することが望ましいものと考える。

表３　遮蔽材の比較

| | A社 | A社 | B社 | 試作品 |
|---|---|---|---|---|
| フィラー | 硫酸バリウム | タングステン | ― | 鉛フリーはんだ |
| フィラー比重 | 4.5 | 19.3 | ― | 7.8 |
| 製品比重 | ― | ― | 2.0 | 1.85 |
| γ線50%遮蔽板厚 | 60mm | 30mm | 42mm | ― |

## ４．結言

今回、開発・販売・普及を短期間で企業が行えるように、特許に抵触しない方法で、鉛フリーはんだを樹脂に混練した放射線遮蔽材の開発を行った。開発品（比重 1.85）の放射線遮蔽能力確認するため、セシウム 137 のγ線標準線源を用いて測定したところ、板厚 3mm で 0.5mm の鉛と同等の性能を確認した。この開発品の性能は表３の市販他社品と同等と考えられた。

本技術を東北ポリマー(株)（プラスチックと鉛フリーはんだとの混練）と、(株)森重製作所（混練した遮蔽材料の射出成形）に技術移転を行った。


### 謝辞

標準線源を用いたγ線遮蔽実験に協力いただいた一般社団法人　福島放射線総合研究所　理事長内田明様に感謝いたします。


### 参考文献


1) 日本複合材料学会編、複合材料ハンドブック、培風館、P. 431（1989）
2) 特開2003-255081
3) 特開2003-28986
4) 特許第4883808号
5) 岩倉、佐藤、成形加工’90，P. 111-112（1990）
6) 野口、中川、エレクトロニクス実装学会誌，377-384, vol. 2, No. 5(1999)
7) 野口、成形加工学会誌、238-241, vol. 12, No. 5 (2000)

# 県産農産物の食品加工における放射性物質の動態解明と低減技術の開発

## －ダイズの加工条件が放射性セシウムに及ぼす影響－

## Dynamics and Reduction Technology of Radioactive Cesium During Food Processing of Farm Products from the Fukushima Prefecture

### - Effect of Soybean Processing Condition on the Dynamics of Radioactive Cesium -

会津若松技術支援センター醸造・食品科　小野和広　星保宣　中島奈津子

ダイズ加工における放射性物質の影響を防ぐためには、放射性物質が含まれていない原料を使用することが第一であるが、万一含まれていた場合を想定し、本研究では、放射性セシウムを含むダイズを用い、それらを加工した場合における放射性セシウムの動態について調査するとともに、低減方法について検討した。その結果、浸漬処理では、有機酸の添加により、原料ダイズから放射性セシウムの溶出が高まった。有機酸の種類により除去率は異なり、クエン酸よりも乳酸の方が高かった。一方、加熱処理では、処理後の豆の硬さが同じとなる条件で比較した場合、蒸すよりも煮た方が、また加圧煮よりも無圧煮の方が除去率が高かった。無圧煮の場合、4 時間処理後の放射性セシウム濃度は、蒸留水に比べ、0.2 M NaCl 溶液では半分以下だった。

以上の結果、ダイズに含まれる放射性セシウム濃度は、浸漬および煮熟処理により、原料ダイズの 2 割以下となり、各処理の際、有機酸や塩類を用いることにより除去率が高まることが明らかとなった。

Key　words : ダイズ、放射性セシウム、塩化ナトリウム

## １．緒言

東日本大震災に伴う原発事故の影響により、本県農産物の一部は放射性物質による汚染を受けた。現在、多くの農産物は厚生労働省マニュアルに従った分析において検出下限未満 [1]であるが、県産農産物を原料とした加工食品はいまだ風評に苦しんでいる企業が少なくない。加工食品における放射性物質の影響を防ぐためには、検出下限未満の原料を使用することが第一であるが、放射性物質が含まれていた場合を想定し、食品製造における各加工段階の放射性物質の動態を解明し、さらに低減技術を開発することは重要と考えられる。以上のような背景から、本研究では、放射性セシウムを含むダイズを試料とし、各加工段階における放射性セシウム濃度を調査し、製造条件がダイズの放射性セシウム濃度に及ぼす影響について検討した。

## ２．実験方法

### ２．１．　供試材料

ダイズは、2012 年に福島県内で栽培された「タチナガハ」を供試した。

### ２．２．浸漬処理

浸漬処理は、原料ダイズに対し 5 倍量の溶液を加え、15 ℃で 16 時間行なった。浸漬後、1 時間水切りし、粉砕した試料を分析に供した。浸漬溶液は、蒸留水、塩化ナトリウム（ 以下、NaCl ）、炭酸水素ナトリウム（ 重曹 ）、酢酸、乳酸、クエン酸を適宜調製して用いた。各処理は 3 反復で行った。

### ２．３．蒸煮処理

加熱処理は、5 倍量の蒸留水にて 15 ℃で 16 時間吸水させたダイズを用い、無圧煮、半煮半蒸、加圧蒸、加圧煮法 [2] により処理した。無圧および加圧煮処理では吸水ダイズに対し 5 倍量の蒸留水、適宜濃度を調製した塩化ナトリウム、塩化カリウム、グルコース（ 以下 Glu ）溶液を加え、無圧煮は 6 時間まで、また加圧煮の場合 117 ℃・5 分間処理した。各処理は 3 反復で行った。

### ２．４．味噌の仕込み

5 倍量の蒸留水にて 15 ℃で 16 時間吸水させたダイズを用い、無圧煮、半煮半蒸、加圧蒸、加圧煮法により処理したダイズを冷却後、水分 48 %、麹歩合 10 割、食塩濃度 12 %（耐水食塩濃度 20 %）となるよう白米麹、食塩を混合し、発酵型味噌の仕込みを行った。一部の味噌には仕込み時に酵母を添加し、30 ℃で 60 日間熟成させた。無圧煮の場合、加熱の際、0.2 M NaCl 溶液を用いた試験区を設けた。

### ２．５．分析方法

各処理後のダイズおよび処理溶液を回収し、水分は常圧加熱乾燥法（130 ℃・2 時間）、放射能はゲルマニウム半導体検出器（ キャンベラ製　GC3020 ）および NaI シンチレーション検出器（ ＥＭＦジャパン(株)製　EMF211 ）を用いたγスペクトロメトリーにより放射性セシウム（ $^{134}Cs$+$^{137}Cs$ ）濃度を測定した [3]。

## ３．実験結果及び考察

### ３．１．浸漬処理方法がダイズの放射性セシウム濃度に及ぼす影響

図 1-1、1-2 に、各方法で浸漬処理した際の残存す

るセシウム濃度を、蒸留水を 100 とした時の相対値で示した。

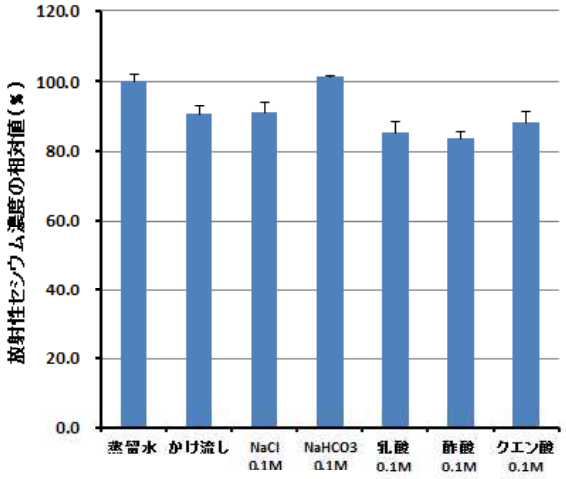



**図1-1 浸漬処理方法がダイズの放射性セシウム濃度に及ぼす影響**

1) 原料ダイズに対し5倍量の溶液を加え、15℃で16時間行なった。

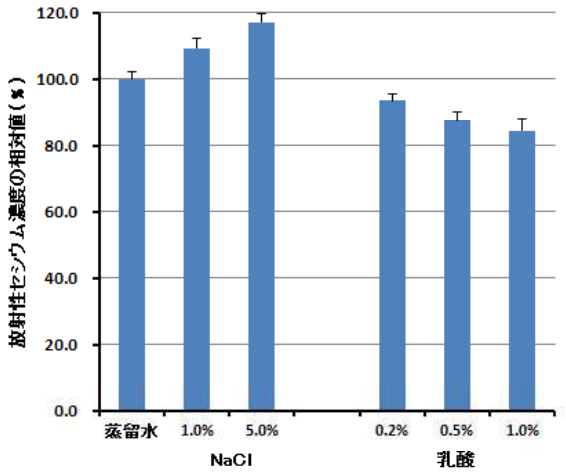



**図1-2 浸漬処理方法がダイズの放射性セシウム濃度に及ぼす影響**

蒸留水に比べ、炭酸水素ナトリウムは大差なかったのに対し、かけ流し、0.1 M NaCl および各有機酸を添加した区では、放射性セシウムの溶出が高まった。また、有機酸の種類により溶出の程度が異なり、クエン酸よりも、乳酸や酢酸の方が大きい傾向があった。一方、図 1-2 に示したように、NaCl 濃度が高まると、逆に蒸留水よりも放射性セシウム濃度が高い結果となった。この原因として、溶液の浸透圧により、ダイズの吸水が抑えられ、かえって溶出されにくくなることが考えられる。一方、有機酸の場合、濃度が高まるにつれ、放射性セシウムの溶出が高まった。

以上の結果から、浸漬処理においては、かけ流し、0.1 M NaCl および有機酸の添加により、放射性セシウムの溶出が高まった。また、有機酸の種類により溶出の程度が異なり、クエン酸よりも、乳酸や酢酸の方が大きい傾向があった。一方、NaCl の場合、溶出を期待して過度に濃度を高めると、かえって溶出しにくくなることが明らかとなった。

### 3．2．蒸煮方法がダイズの放射性セシウム濃度に及ぼす影響

図 2 に無圧煮で加熱した時のダイズ中の放射性セシウム濃度の変化を示した。

無圧煮の場合、時間の経過とともに濃度が低下し、60 ～ 120 分までは急激に、それ以降漸減する傾向が見られた。味噌にした場合の適度な硬さと考えられる 4 時間後の濃度は、浸漬ダイズの約 38 %だった。

一方、1 M Glu 添加区では蒸留水と大差なかったが、塩類を添加した試験区は、いずれも放射性セシウムの溶出が高まり、240 分後の濃度は蒸留水に比べ、半分以下となった。

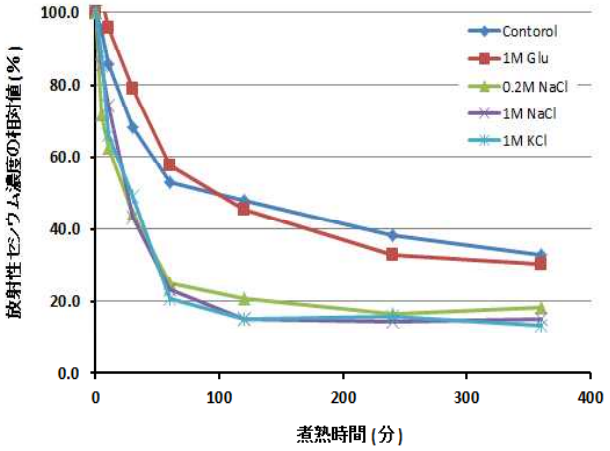



**図2 無圧煮によるダイズの放射性セシウム濃度の変化**

1) 浸漬大豆に対し5倍量の溶液で16時間行なった。

図 3 に無圧煮以外の各蒸煮方法を加えた、各処理後のダイズ中の放射性セシウム濃度の変化を示した。

無圧煮以外の方法では、ほぼ硬さが同じである無圧煮の 4 時間と、加圧煮の値を比較すると、加圧煮よりも無圧煮の方がより低い値となった。それ以外の方法では、加圧煮に次いで半煮半蒸、加圧蒸の順だった。

また、無圧煮と同様、加圧煮の場合も、塩化ナトリウムや塩化カリウムの添加により、放射性セシウムの溶出は高まったが、これら塩類の濃度が高まると、かえって放射性セシウムが溶出しにくくなる傾向が見られた。これは浸漬試験の場合と同様、濃度が過度に高まると、浸透圧により、ダイズ中に溶液が充分に入っていかないためと考えられる。

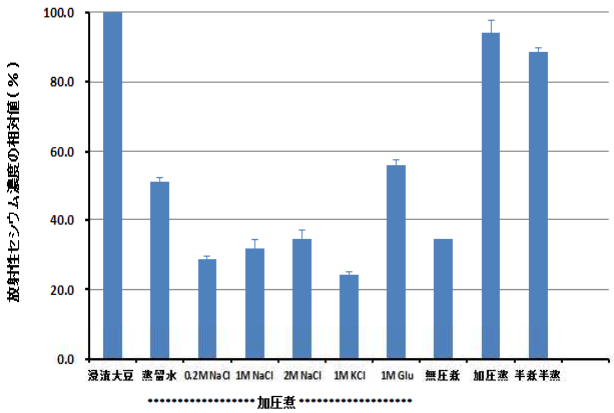



図3 加熱処理方法がダイズの放射性セシウム濃度に及ぼす影響

1) 加圧蒸：蒸熟（ 117℃ 0.8kg/cm2 ）13分間保持 → 脱圧
2) 半煮半蒸：無圧煮（5分間）→湯切り →蒸熟（0.8kg/cm2）13分間保持→脱圧
3) 加圧煮：煮熟（ 117℃ 0.8kg/cm2）5分間保持 → 脱圧 → 湯切り
4) 無圧煮：4時間

以上の結果から、無圧煮の場合、時間の経過とともに濃度が低下し、NaCl 添加により放射性セシウムの溶出が高まり、120 分経過以降はほぼ平衡に達した。0.2 M NaCl 添加区の 240 分後の濃度は蒸留水に比べ、半分以下となった。一方、無圧煮以外の方法では、ほぼ硬さが同じである無圧煮の 4 時間後と、加圧煮の値を比較すると、加圧煮よりも無圧煮の方がより低い値となった。それ以外の方法では、溶出の大きさは、加圧煮＞半煮半蒸＞加圧蒸の順となった。

### ３．３．味噌の仕込

図 4 に水分 48 %、食塩濃度 12 %（耐水食塩濃度 20 %）となるよう仕込んだ味噌の放射性セシウム濃度を示した。蒸煮方法によるダイズの放射性セシウム濃度に及ぼす影響について示した３．２．の結果をほぼ反映する結果となった。酵母の添加の有無は、味噌の放射性セシウム濃度に影響を及ぼさなかった。

これらの結果から、最終製品として味噌を仕込んだ場合、ダイズの処理を無圧煮で行なった方が放射性セシウムの溶出が大きく、さらにその際、0.2 M NaCl を添加することにより、半分以下となることが明らかとなった。

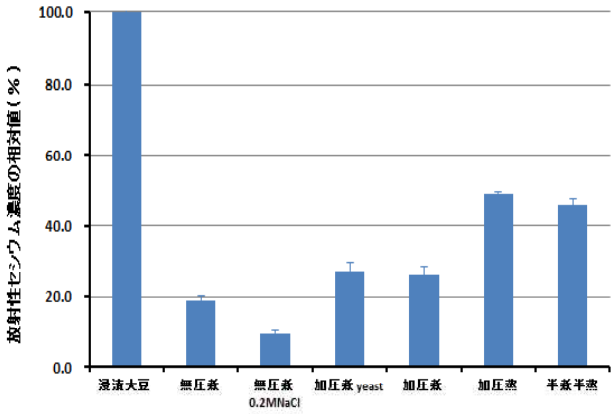



図4 加熱処理方法の異なる味噌の放射性セシウム濃度

### ３．４．放射性セシウムの移行

放射性セシウムを含むダイズと、含まないダイズを同時に蒸煮処理した際の処理後の放射性セシウム濃度を図 5 に示した。

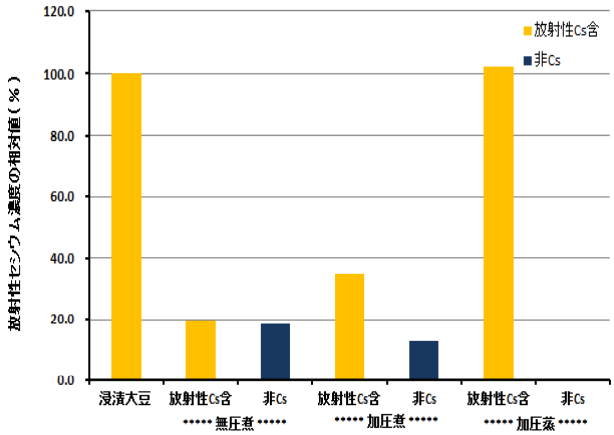



図5 放射性セシウムを含むダイズと、含まないダイズを同時処理した時の移行

無圧煮の場合、処理後の放射性セシウム濃度は、放射性セシウムを含むダイズと含まないダイズとで大差なかった。また加圧煮では、放射性セシウムを含むダイズは、処理後の濃度が約 35 %だったのに対し、処理前は放射性セシウムを含まないダイズの処理後の濃度は約 13 %で、4 割程度移行した。一方、加圧蒸では、放射性セシウムの移行は認められなかった。

### ３．５．加工計数

ダイズを各蒸煮方法で味噌に加工した場合の加工計数を図 6 に示した。ダイズに含まれる放射性セシウム濃度は、浸漬処理により原料ダイズの 36 %、また、無圧煮、加圧煮、半煮半蒸、加圧蒸の各処理により、それぞれ 13、19、33、35 %、さらにそれらを味噌に加工した場合、各 7、10、17、18 %となり、各処理の際、有機酸や塩類を用いることにより除去率が高まる

ことが明らかとなった。　　1

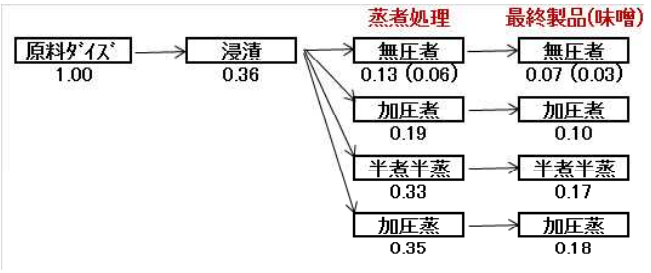



**図6 ダイズの加工計数**

1）加工計数 ＝ 加工品の放射能濃度 ／ 原材料の放射能濃度

## ４．結言

放射性セシウムを含むダイズを用い、それらを加工した場合における放射性セシウムの動態について調査した。その結果、浸漬処理では、有機酸の添加により、原料ダイズから放射性セシウムの溶出が高まった。有機酸の種類により溶出の程度は異なり、クエン酸よりも乳酸や酢酸の方が大きい傾向があった。一方、加熱処理では、処理後の硬さが同じとなる時間で比較した場合、蒸すよりも煮た方が、また加圧煮よりも無圧煮の方が除去率が高かった。無圧煮の場合、4時間処理後の放射性セシウム濃度は、0.2 M NaCl 溶液では蒸留水に比べ半分以下となった。

以上の結果から、ダイズに含まれる放射性セシウム濃度は、浸漬および煮熟処理により、最終的に味噌に加工した場合、原料ダイズの 1 割以下となり、各処理の際、有機酸や塩類を用いることにより除去率が高まることが明らかとなった。

**参考文献**

1) 福島県ホームページ
（http://www.new-fukushima.jp/monitoring/map.php ）
2）みそ技術ハンドブック：全国味噌技術会（1995）
3)「食品中の放射性物質の試験法について」（ 食安発 0315 第 4 号、平成 24 年 3 月 15 日 ）別添「食品中の放射性セシウム検査法」

# 浅部地中熱利用システムの開発

## －ミニモデルによる最適な熱交換井間隔の検討－

Development of a Shallow Depth Ground Source Heat Pump System

-Study of best distance between the ground source heat exchanger by a miniature model-


| | |
|---|---|
| 技術開発部工業材料科 | 五十嵐雄大　伊藤弘康　小柴佳子 |
| 技術開発部生産・加工科 | 大内繁男　吉田英一 |
| 技術開発部プロジェクト研究科 | 加藤和裕 |
| 学校法人日本大学工学部 | 伊藤耕祐 |
| 有限会社住環境設計室 | 影山千秋 |



再生可能エネルギーの１つである地中熱を利用したヒートポンプは一般の空気熱源ヒートポンプと比較して効率が高く、省エネや節電効果が期待できるが、熱交換井の掘削費用が高価であり、普及が足踏みしている。そこで本研究は熱交換井に鋼管杭を用いた浅部地中熱利用システムの開発について浅層地下における熱特性を調査するため、ミニモデルによる実験およびコンピュータシミュレーション解析を行った。その結果、浅部地中熱利用による地下温度変化は交換井中心より約 1m の範囲で生じるとの知見を得た。



Key words:　再生可能エネルギー　地中熱　浅部 浅層　ヒートポンプ　シミュレーション


## １．緒言

日本は高度経済成長による産業の目覚ましい発展を遂げる一方で、電力使用量も比例して増加した。それに伴い、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスによる地球温暖化現象が深刻になった。そこで注目されたのが、再生可能エネルギーである。地中熱は再生可能エネルギーの一種で、地下数mから 100 m程度に存在する熱エネルギーである。一般的に地下 10 mより浅い層は気温の影響を受け季節により変動するが、それより深い層では恒温となる。地中熱利用では、この地下に存在する熱をくみ上げるために「熱交換井」とよばれる採熱用の井戸を掘削する必要がある。熱交換井から汲み上げた熱は一般にヒートポンプで熱をポンプアップし冷暖房や給湯などに利用する。これを地中熱ヒートポンプと呼ぶ。地中熱ヒートポンプは最近になり注目を浴びつつあるが、普及は拡大しておらず、その要因の１つは熱交換井の掘削コスト高である。

そこで、本研究は地下浅部を利用した「浅部地中熱利用」システムの開発およびその利用方法、設計基準の策定を目的とし、浅部地中熱利用システムを模したミニモデルを用いて地中温度変化およびその温度分布を測定し、住宅耐震用基礎杭による浅部地中熱利用における最適な杭間隔を検討した。また、コンピュータシミュレーションを用いてミニモデルと同条件の実大モデルを再現し有限要素法による熱解析を行い、ミニモデルとの差異について検討した。

## ２．実験方法

### ２．１．ミニモデルの作成

ミニモデルの模式図を図 1 に示す。ミニモデルは実サイズの 1/10 となるよう設計した。長さ 1100mm、幅 660mm、高さ 830mm の FRP 製タンクに川砂を充填し地盤を模した。その際、FRP タンクは周囲の温度変化の影響を受けにくいよう 6 面を断熱材で覆った。この地盤モデルの中心およびその左右 300mm の位置に、熱交換井を模して内径約 20mm 長さ 600mm の一端を閉じた鋼管を配した。鋼管内部は不凍液で満たした。鋼管には U チューブを模した内径 2mm のポリエチレン製チューブを長さ 500mm まで挿入し、往水および環水ヘッダーを模した内径 19mm のホースへと接続した。また、タンクの底には地中温度を再現するためホースを配し任意の温度の水を循環させ、温調できる構造とした。さらに外気温度を再現するためタンク上面に水槽を設け、温調できる構造とした。また、地中熱の採熱を行うチューブ内循環液を任意の温度とするため、温調ポンプでバッファタンク内の液を循環させた。液の循環は空気圧で送液するダイヤフラムポンプで行い、任意の流量を実現できる構造とした。なお、循環液に係る配管についても断熱材で覆い、外気の熱の影響を受けにくい構造とした。

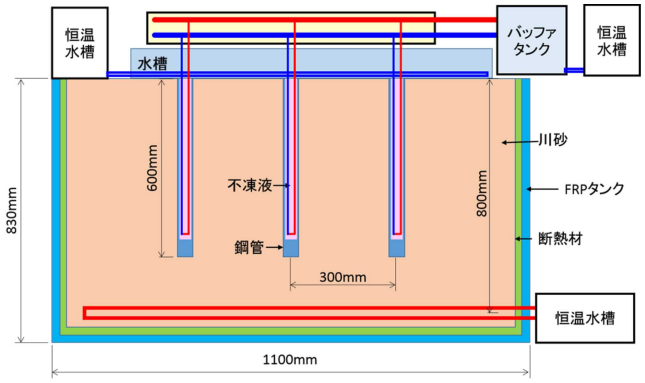



図1　ミニモデル模式図

### ２．２．ミニモデルによる採熱実験

１．１．で作製したミニモデルを利用して浅部地中熱利用の暖房利用時の再現実験を行った。ミニモデルにおける地下温度は日本大学工学部内で行われた過去の実験結果より 15 ℃とし、表面温度は郡山の冬季の平均気温を参考に液温度を 0.2 ℃に設定した。また、採熱循環液をミニモデル中央の熱交換井のみ循環し、1 本の熱交換井が周辺の土中へ与える影響を正確に把握できる構造とした。また、循環液は文献の 1 次側還水温度を参考にバッファタンク温度を 2 ℃とした。[1)] ミニモデル土中温度が定常状態となったところで実験を開始した。日本大学工学部の過去の実験によると、ミニモデルが 1/10 の場合、時間が 100 倍となる結果が出ていることを参考に、循環時間は 10 分間とし、実時間で 1000 分（約 16 時間）となるよう設定した。また、循環部について循環液の往還それぞれの温度を測定した。

### ２．３．コンピュータシミュレーションによる解析

ミニモデルによる再現実験との比較を行うため、コンピュータシミュレーションを用いてミニモデルと同等の地質および採熱構造を有する実大スケールモデルを再現した。シミュレーションソフトは地下水流れや地下の熱輸送を解析する有限要素解析ソフト FEFLOW（DHI-WASY）を使用した。初期条件として、郡山市の冬季における地中温度を再現し、表面温度を固定温度境界条件として浅部地中熱採熱解析を行った。シミュレーションモデルを図 2、モデル概要、初期・境界条件を表 1 に示す。条件に設定した値は文献等を参考にしたほか、土壌水分および間隙率については実測した値を採用した。[2)3)]

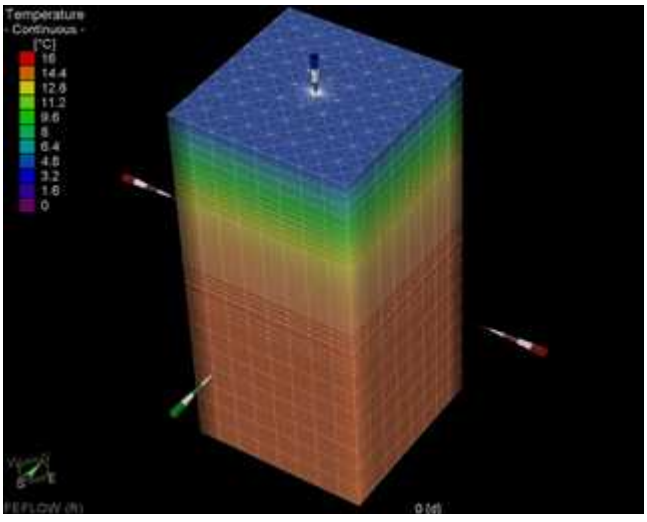



図2　シミュレーションモデル（中心に熱交換井を設定）

表1　モデル概要およびパラメータ値

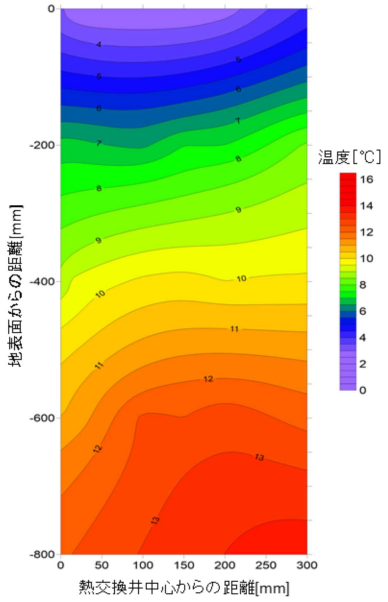
| | |
|---|---|
| 間隙率[%] | 38 |
| 熱容量[MJ/m$^3$·K] | 4.919 |
| 熱伝導率[W/m·K] | 1.35 |
| レイヤー数 | 55 |
| エレメント数 | 120010 |
| 変温層深度 | 0-8m(45レイヤー) |
| 恒温層深度 | 8-16m(10レイヤー) |

## ３．実験結果

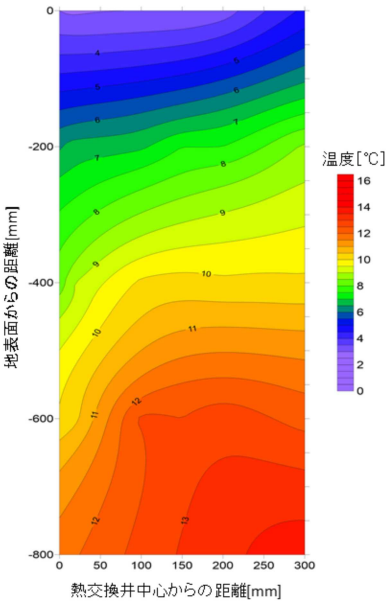
### ３．１．ミニモデルにおける採熱時温度変化

浅部地中熱利用の再現実験の結果を図 3 に示す。横軸は熱交換井中心からの距離を示す。(a)は、再現実験前のミニモデル内の温度分布である。再現前の状態から若干管内部が周辺と比較して温度が低いことがわかる。これは、地表面温度を再現するために設置した水槽により熱交換井が冷却され、それに伴い熱交換井内の不凍液が対流することで冷却されたと考えられる。この温度低下のような熱交換井周辺の環境変化は、実際には外気による冷却のほか、太陽による入熱、家屋による断熱などの様々な因子が関与して起きる複雑な現象であることが予想される。また、一般の地中熱利用のように不易層から採熱する場合は、熱交換井の直径に対し長さが十分に大きいため外気による冷却等の影響は無視できるが、浅部地中熱利用の場合は、熱交換井直径に対する長さが一般的地中熱利用と比較して小さいため、熱交換井内の熱対流を考慮する必要がある。さらに、地表からの冷却だけでなく、熱交換井より深い地下からの入熱についても同様のことが言える。

図 3(b)は 10 分後の地中温度分布である。時間経過とともに、熱交換井を中心として、周辺の地盤が冷却されていく。例えば、熱交換井中心から 50mm、深度 600mm の位置では、約 12 ℃あった温度が 10 分間の運転によって 11 ℃程度まで低下している。運転前と 10 分間運転後の温度分布を比較すると、深度が深くなるにつれて温度変化量が大きくなるがことがわかる。これは、循環液と土壌温度差が関係し、表層は温度差が小さいため熱交換量が小さく、深部では温度差が大きいため熱交換量が大きくなると考えられる。また、温度変化が生じているのは交換井中心から約 100mm 程度までで、100mm より外では温度変化がほとんど見られない。よって、ミニモデルでの 10 分間の運転（実時間 1000 分、約 16 時間）程度の採熱による熱の影響は熱交換井中心から 100mm 程度であることがわかった。




（a） 開始前

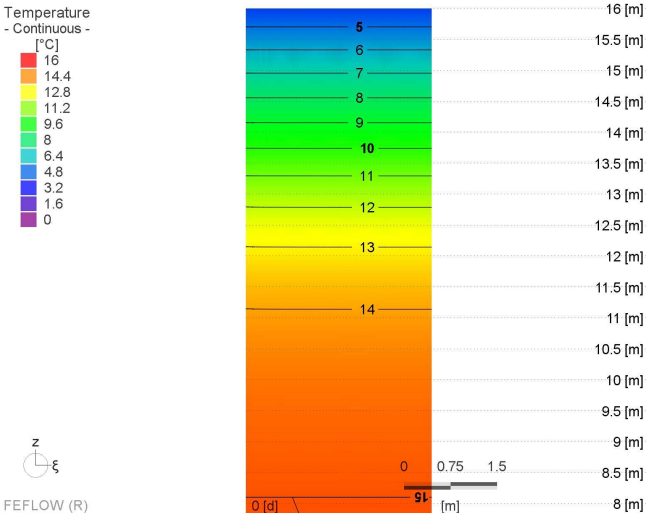



（b） 10分後

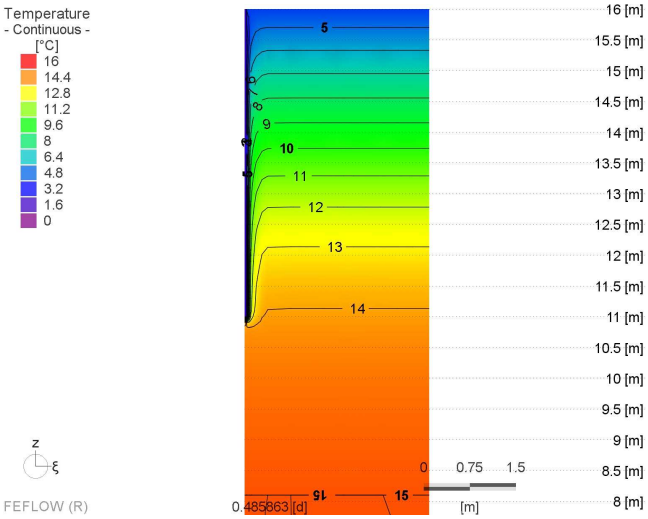
図3 ミニモデルの地中温度変化

### 3．2．シミュレーションによる解析

シミュレーションによる解析結果を図 4 に示す。シミュレーションは実大スケールで行ったため、100 倍の時間で考え、実験開始前および 1000 分後の温度変化をミニモデルと比較した。まず、(a)は開始前の状況である。ミニモデルでは熱交換井を中心に若干の温度低下があったが、シミュレーションでは深度ごとの温度は一定で井戸内部においてもその状況は同じであった。これは、熱交換井モデルが液体として扱っていないことで、熱対流を生じないことや、モデルの関係上、0m,8m,16m のレイヤーに固定温度境界を設け、かつ外部との熱の授受が全くないことが要因と考えられる。次に(b)を見ると、ミニモデルでの実験結果と同様に熱交換井周辺の温度が低下している。また、温度低下がみられる範囲は交換井中心から約 1m で、ミニモデルで得られた 100mm（実大スケールで 1m）と同様の結果を得られた。ミニモデルとシミュレーションモデルを比較すると、1）初期条件に差異があること、2）シミュレーションはモデルが簡略化されていること、3）ミニモデルは断熱していても必ず外部との境界で熱収支が存在すること等のため、結果を単純に比較することは困難であるが、両者ともに、浅部地中熱利用の熱影響が管中心から 1m という結果については、一定の定量性があると考えられる。なお、本報告書のシミュレーション結果およびミニモデルによる再現結果は 1 日のみ運転した場合の結果であり、運転停止から次の運転開始までの地中温度の回復状態によっては、熱交換井中心から半径 1m 以上での温度低下が生じることが予想される。




（a） 開始前




（b） １０００分後

図４ シミュレーションによる地中温度変化

## ４．結言

浅部地中熱システムの１つの重要な設計項目である鋼管杭の設置間隔についてミニモデルによる地中熱利用再現実験およびシミュレーションによる再現実験を行い検討した。その結果、以下の知見を得ることができた。

(1) 浅部地中熱利用ミニモデルを作製し、利用時の地中の状態を再現することができた。
(2) ミニモデルにおいて、運転前の地中温度は熱交換井付近が周辺土壌よりも低下した。
(3) ミニモデルを利用した 10 分間の採熱実験で、地中の温度低下は熱交換井中心から半径 100mm の範囲であった。これは実大スケールでは 16 時間の運転で 1m の範囲に影響があると考えられる。
(4) FEFLOW を用いて、ミニモデルと同等の浅部地中熱利用時の地下温度変化を確認した。
(5) シミュレーションの結果、ミニモデルと同様に管中心より半径 1 mの範囲においてのみ温度低下が見られた。

本報告書の結果は、1 日分の運転を想定した場合におけるデータである。実際には夏季および冬季それぞれ 90 日程度の運転が予想される。また、1 年を通して温暖または寒冷な地域では季節ごとの運転期間が異なるため、地中の熱バランスが変化する恐れもある。今後、ガイドラインの作成やミニモデルの実用性の検証には、通年を想定した繰り返し運転による再現実験や、運転バランスをあえて崩した再現実験などを行う必要がある。現在、地中熱利用ポテンシャルを評価するソフトウェアが比較的安価に販売されているが、水平方向からの採熱のみを考慮した計算方法で、浅部地中熱のように上下面からの熱影響を考慮する必要があるモデルには対応はしていない。また、本研究において利用した FEFLOW は非常に高価で、簡単に入手できないものであることから、安価で簡易的な浅部地中熱に特化したシミュレーションソフトまたは、ミニモデルが必要である。本研究で作製したミニモデルは標準的な川砂を利用したが、例えば、粘土や礫質などの場合も簡単に再現できる構造とする必要がある。今後の浅部地中熱利用システムの利用促進のためには、ポテンシャル評価ソフトやミニモデルの単純化および高精度化、ガイドラインの策定が急務となる。

### 参考文献


1) 北海道大学地中熱システム工学講座　地中熱ヒートポンプシステム　p11,2007
2) 岡垣、斎藤　湿った砂の熱伝導率：不定常熱流法による測定　 p117,1957
3) 吉岡真弓　福島大学大学院地球熱システム特論講義資料

# 未利用農産物の機能性成分を活かした加工技術の開発

Development of the processing technique utilized the functional ingredient of unused farm products

会津若松技術支援センター醸造・食品科　佐藤光洋 星保宜 小野和広 中島奈津子

農産物の出荷調整残渣として４種類の未利用農産物等(アスパラガス切り下、ソバ末粉、トマト摘果果実及び製あん粕)について機能性成分を測定し、正品と比較した。食物繊維は、すべての未利用農産物等において正品より多く含まれていた。また、アスパラガス切り下では糖類、ソバ末粉ではルチン及び総ポリフェノール、トマト摘果果実ではペクチン総量、製あん粕では総ポリフェノールがそれぞれ多く含有していた。また、アスパラガス切り下のピューレを試作したが、食物繊維が多く加工技術の改善が必要である。

Key　words:出荷調整残渣、未利用農産物、機能性成分、加工方法

## １．緒言

農産物を出荷する共選場等で、農産物は出荷規格に調整されるため、残渣が発生する。現状、残渣は事業者が処分料を支払って取扱業者が処分している。例えば、全農福島県本部アスパラガス広域選果施設では、年間搬入量の10%相当である約40トンの出荷調整残渣が発生しており、処分方法に苦慮している。

一方では、大塚ら[1)]により農産物出荷調整残渣に含まれる機能性成分を活かした加工品開発が研究されている。

そこで、農産物出荷調整残渣や加工食品製造時に発生する廃棄物（以下「未利用農産物等」という）に含まれる機能性成分を把握し、機能性成分を多く含有する未利用農産物等を活用した、新たな加工品開発の検討を行った。

## ２．実験方法

### ２．１．供試材料

供試材料は、アスパラガス出荷調整時に発生する残渣（以下、「アスパラガス切り下」という)、ソバ製粉時に発生する末粉及びトマト生産時に発生する摘果果実のほか、あん製造時に排出される製あん粕の計4種類とした。アスパラガス切り下は、全農福島県本部アスパラガス広域選果施設で排出したものを供試した。ソバ末粉は、福島県内で生産・収穫され、製粉業者が製粉時に排出したものを供試した。トマト摘果果実は、福島県南会津郡南会津町においてトマトの生産過程で摘果した果実を供試した。製あん粕は、あん製造業者がカナダ産小豆を原料とし、こしあん製造時に発生したものを供試した。

### ２．２．機能性成分の測定及び正品との比較

未利用農産物等の機能性成分を把握するため、表1に示す項目を測定した。

アスパラガス切り下、トマト摘果果実及び製あん粕は、真空凍結乾燥後、粉砕して試料とした。アスパラガス、トマト及びあんの正品も、同様に処理して試料とした。ソバは、末粉を粉砕して試料とし、正品はそのまま試料とした。

食物繊維は、Prosky-AOAC法標準法[2)]に従い、試料をαーアミラーゼ、プロテアーゼ、アミログルコシダーゼにより順次分解し、重量法により測定した。

糖は、試料を80%エタノールで抽出し、エタノール留去後にろ過して、高速液体クロマトグラフィーで測定した。

イヌリンは、試料を80%エタノールで抽出し、残渣を熱水抽出後、高速液体クロマトグラフィーで測定した[1)]。

ルチンは、試料を90%メタノールで抽出後、高速液体クロマトグラフィーで測定した。

総ポリフェノールは、試料を90%メタノールで抽出後、Folin-Ciocalteu法により測定した。

アミノ酸総量、γ―アミノ酪酸及びグルタミン酸は、試料を80%エタノールで抽出し、エタノール留去後にろ過し、アミノ酸自動分析計で測定した。

ペクチン総量は、常法によりAIS（アルコール不溶性物質）を得て、さらにWSP（水溶性ペクチン)、PSP（ヘキサメタリン酸可溶性ペクチン）及びHSP（塩酸可溶性ペクチン）に分画し、カルバゾール法で測定した[3)]。

あわせて、未利用農産物等の正品についても同様の項目を測定し、未利用農産物等の測定値と比較した。

**表１　機能性成分の測定項目**

| 供試材料 / 測定項目 | アスパラガス | | ソバ | | トマト | | あん | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 切り下 | 正品 | 末粉 | 正品 | 摘果 | 正品 | 粕 | 正品 |
| 食物繊維 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 糖 | ○ | ○ | | | | | | |
| イヌリン | ○ | ○ | | | | | | |
| ルチン | ○ | ○ | | | | | | |
| 総ポリフェノール | | | ○ | ○ | | | ○ | ○ |
| アミノ酸総量 | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | |
| γーアミノ酪酸 | | | | | ○ | ○ | | |
| グルタミン酸 | | | | | ○ | ○ | | |
| ペクチン総量 | | | | | ○ | ○ | | |

注)○印の項目を測定

### ２．３．機能性成分を活かした加工技術の検討

上記２．２で得られた測定値の比較から、機能性成分が多く含有している項目に着目し、加工品を試作した。

## ３．実験結果及び考察

### ３．１．機能性成分の測定及び正品との比較

機能性成分の分析値を表2に示す。

表2の結果より、全ての未利用農産物等において食物繊維は正品を上回っていた。アスパラガスにおいて、イヌリンはアスパラガス切り下と正品がほぼ同等の値だった。ルチンは正品が48mg/100gFWとアスパラガス切り下の2.7倍程度、アミノ酸総量は正品が45.7mg/100gFWとアスパラガス切り下の1.3倍程度それぞれ多く含有していた。トマトのグルタミン酸は、正品が43mg/100gFWとトマト摘果果実の5倍程度多く含有していた。

図1は、あんの食物繊維を比較したもので、製あん粕が29.1g/100gFWと正品の2.5倍程度多く含有していた。

図2は、アスパラガスの糖を比較したもので、アスパラガス切り下が2.3g/100gFWと正品の2倍程度多く含有していた。

図3は、ソバのルチンを比較したもので、ソバ末粉が38.5mg/100gFWと正品の2.6倍程度多く含有していた。

図4は、ソバの総ポリフェノールを比較したもので、ソバ末粉が1,048mg/100gFWと正品の3.4倍程度多く含有していた。また、図5はあんの総ポリフェノールを比較したもので、製あん粕が66mg/100gFWと正品の1.3倍程度多く含有していた。

図6は、トマトのγーアミノ酪酸を比較したもので、トマト摘果果実が51.5mg/100gFWと正品の1.8倍程度多く含有していた。

図7は、トマトのペクチン総量を比較したもので、トマト摘果果実が507mg/100gFWと正品の1.5倍程度多く含有していた。

今回の結果から、アスパラガスのイヌリン、ルチン及びアミノ酸総量ならびにトマトのグルタミン酸を除く6項目において、未利用農産物等が正品より機能性成分を多く含有していることが判明した。

表２　未利用農産物と正品の機能性成分

| | | 食物繊維 | 糖 | | | | イヌリン | ルチン | 総ポリフェノール | アミノ酸 | | | ペクチン | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | フルクトース | グルコース | スクロース | 合計 | | | | γーアミノ酪酸 | グルタミン酸 | 総量 | WSP | PSP | HSP | 総量 |
| | | (g/100gFW) | | | | | | (mg/100gFW) | | | | | | | | |
| アスパラガス | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 切り下 | 太 | 2.9 | 1.40 | 0.90 | 0.20 | 2.50 | 0.15 | 11 | | | | 363 | | | | |
| | 中 | 3.6 | 1.40 | 0.80 | 0.23 | 2.43 | 0.16 | 21 | | | | 359 | | | | |
| | 細 | 3.7 | 1.10 | 0.60 | 0.19 | 1.89 | 0.18 | 24 | | | | 335 | | | | |
| 正品 | 太 | 2.7 | 0.80 | 0.31 | 0.14 | 1.25 | 0.17 | 38 | | | | 459 | | | | |
| | 中 | 2.9 | 0.80 | 0.25 | 0.15 | 1.20 | 0.16 | 56 | | | | 433 | | | | |
| | 細 | 2.9 | 0.70 | 0.15 | 0.08 | 0.93 | 0.14 | 50 | | | | 479 | | | | |
| ソバ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 末粉 | 石臼 | 34.9 | | | | | | 47 | 949 | | | | | | | |
| | ロール | 30.5 | | | | | | 30 | 1,148 | | | | | | | |
| 正品 | A | 20.0 | | | | | | 22 | 486 | | | | | | | |
| | B | 8.1 | | | | | | 7 | 126 | | | | | | | |
| あん | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 粕 | | 29.1 | | | | | | | 66 | | | | | | | |
| 正品 | | 11.4 | | | | | | | 49 | | | | | | | |
| トマト | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 摘果 | 変空き果 | 2.1 | | | | | | | | 54 | 9 | | 59 | 209 | 251 | 518 |
| | 正常果 | 2.1 | | | | | | | | 49 | 5 | | 70 | 180 | 246 | 496 |
| 正品 | | 1.5 | | | | | | | | 28 | 43 | | 89 | 154 | 96 | 338 |

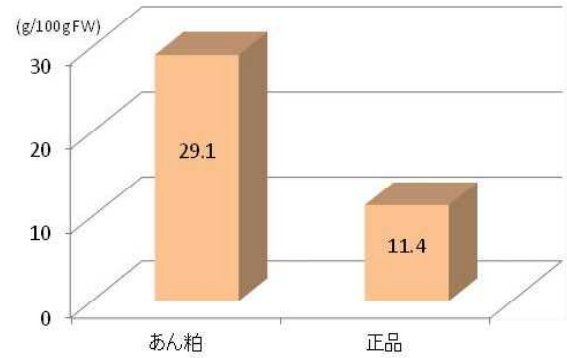



図１　食物繊維の比較（あん）

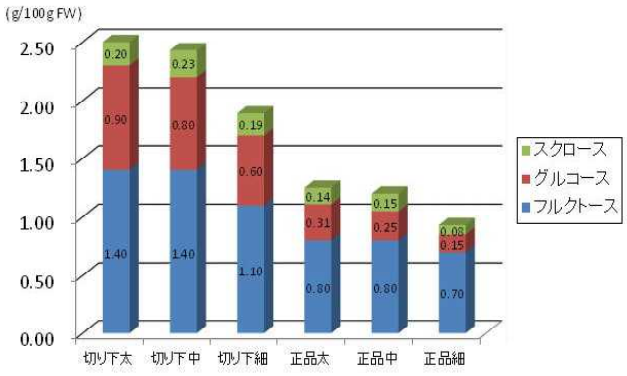



図２　糖の比較（アスパラガス）

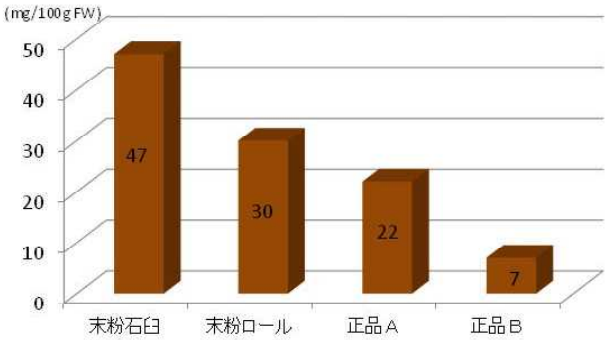



図３　ルチンの比較（ソバ）

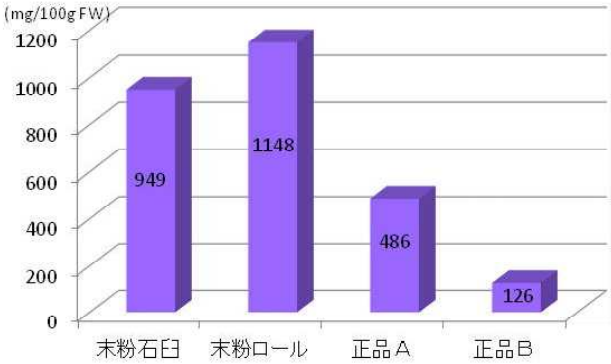



図４　総ポリフェノールの比較（ソバ）

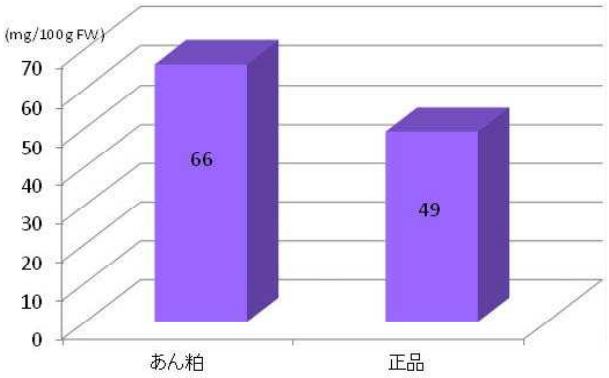



図５　総ポリフェノールの比較（あん）

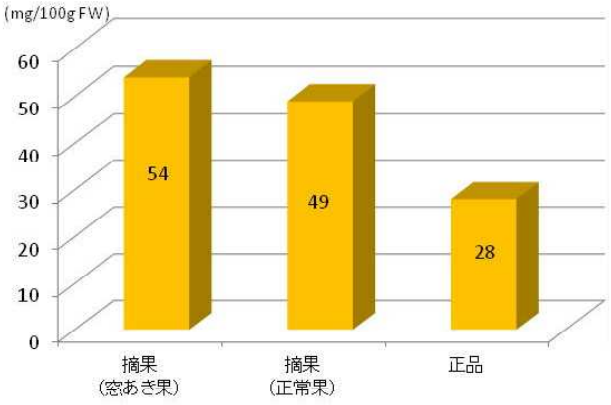



図６　γ－アミノ酪酸の比較（トマト）

図７　ペクチン総量の比較（トマト）

### ３．２．機能性成分を活かした加工技術の検討

上記３．１により、未利用農産物等の機能性成分等が正品よりも上回った項目のうち、会津地方で県内生産量の95%を占め、加工技術開発による廃棄量削減が見込めるアスパラガス切り下を原料に、ピューレを試作した。ピューレ加工工程を図8に、試作結果を図9にそれぞれ示した。

加工工程は、橋口ら[4]の方法を参考に行った。アスパラガス切り下を水洗し、ペーパータオルで水気を拭き取り後、80℃10分間ブランチングした。その後、カッターミキサー（株式会社愛工舎製作所製　K55E）で粉砕後、酵素製剤（天野エンザイム株式会社製 セルラーゼAアマノ3及び同社製ペクチナーゼ）を0.1%、0.3%及び0.5%w/wの3種類でそれぞれ添加し、50℃の恒温水槽で4時間酵素処理後、80℃20分酵素失活させ、放冷した。

その結果、酵素製剤の添加割合を試験した3種類全ての方法において、アスパラガス切り下の繊維が残る状態であり、ピューレに求められる滑らかさが足りなかった。その後、それぞれの酵素製剤を1.0%w/wまで増量して同様の処理を行ったが、ピューレに繊維が残る結果となった。

図８　ピューレ加工工程

図９　ピューレ加工したアスパラガス切り下
（左からセルラーゼ及びペクチナーゼ
をそれぞれ0.1%、0.3及び0.5%w/w添加）

## ４．結言

未利用農産物等において機能性成分等を測定し、正品と比較した。その結果、6項目において正品を上回る機能性成分を含有していることが判明した。農産物については、気候変動や栽培条件など機能性成分に影響する要因があるため、アスパラガス及びトマトで引き続き測定し、正品と比較して機能性成分の動向を把握する。

また、未利用農産物等の機能性成分を活かした加工品開発については、アスパラガス切り下を原料として酵素製材（セルラーゼ及びペクチナーゼ）を用いたピューレ加工を試みたが、繊維質が残る結果となり、酵素製材や製造工程に課題を残した。今後は酵素製剤の種類や添加量を再考するとともに、加工方法の改善を検討していく。あわせて、アスパラガス切り下ではドレッシングやソース等の発酵調味料等、ソバ末粉では煎餅や餃子の皮等、トマト摘果では漬物、あん粕では食物繊維が豊富な加工品について、外部有識者の助言指導等をもとに加工品の試作を進めていく。

**謝辞**

本研究を遂行するにあたり、未利用農産物等を快く提供いただいた企業各社に感謝申し上げます。

また、加工技術の検討において、ご指導とご助言を賜りました福島学院大学短期大学部　食物栄養学科長　河野圭助氏ならびに株式会社山際食彩工房　代表取締役　山際博美氏に深謝いたします。

**参考文献**

1) 大塚省吾、藤倉潤治、西村直道、塩田昌彦、廣嶋淳一、鎌田英宏、安中俊彦、山田卓良、平井秀明、米澤末廣，「未利用資源であるアスパラガス調整残渣の加工食品への有効活用」，北農，**78-2**，pp139-143(2011)．
2) 中山行穂，「食物繊維の構造と機能(1)化学構造と分析法」，生活衛生，**35-1**，pp. 32-37(1991)．
3) 日本食品化学工学会　新・食品分析法編集委員会編：ペクチン，新・食品分析法，p575-587(1996)．
4) 橋口亮、山口ゆかり，「酵素処理したアスパラガス茎部の利用について」，長崎女子短期大学紀要，**37**，pp. 8-11(2012)．

# 簡易型転落・転倒警報装置の開発

Development of a simplified device to alert the tractor tumble and fall

技術開発部生産・加工科　高樋昌　兼子純一
農業総合センター　青田聡　大野光

農作業における乗用トラクタでの転倒・転落事故を予防するために、後付で使用する簡易型の転倒・転落警報装置の開発を行った。本年度は、トラクタからの振動対策として防振シートの効果の確認と、スマートフォンアプリ等で転倒検出し、緊急事態を第三者に通報する緊急事態伝達装置の実証実験を行った。その結果、防振シートの効果はあまり期待できないことがわかった。また、緊急事態伝達装置は角度検出装置がトラクタの振動の影響を受けるものの、角度検出装置を振動の少ない場所に設置するなどすることにより、転倒信号を発煙筒・警告音緊急事態伝達装置に送り、発煙・発音することを確認した。さらに、新たな緊急事態伝達装置として回転灯・警告音発生装置の開発を行い、動作を確認した。

Key　words:農作業、乗用トラクタ、Arduino、3軸加速度センサ

## １．緒言

全国における農作業に伴う死亡事故は毎年 400 件前後発生[1]しており、横ばい状態である。本県においても農作業中の事故は毎年 15 件前後発生しており、乗用トラクタによる事故が 43%を占め最も多くなっている。そのうち転落・転倒が 55.6%を占め、その発生状況は全国高位となっている。（H12 ～ H21 年度：福島県農林水産部農業担い手課調べ）[2]

また、死亡者を年代別に見ると 60 歳以上の割合が 83.7%を占めており、高齢化社会の加速に伴い高齢作業者の増加が見込まれ、更なる事故増加が想定される。

さらに事故を増やしている要因として、「農業機械による農作業は 1 人で行うことが多く、事故発生から発見までの時間は発生直後が最も多いが、発生後 2 ～ 3 時間で発見されている場合も多く、場合によっては 5 時間以上経てから」[3]という状況が報告されている。

このことから、危険な状況を喚起し転落・転倒を防止する警告装置を開発することは、農作業死亡事故の減少に対する効果が大きいと考えられる。また、事故発生後、早期発見されれば生存の可能性も高まるため、事故現場での事故発生の伝達に加え敷地内等比較的近い場所の第三者に伝達する装置を開発することで救命の可能性を高めることができる。

本事業ではこれまでにハイテクプラザが角度検出手法や緊急事態伝達手法を検討し、この結果に基づき農業総合センターとアサヒ電子株式会社が共同でスマートフォンアプリ「転倒・警告用アプリケーション」（以下アプリ）を開発した。開発したアプリを図１に示す。本アプリは登録したメールアドレスに転倒通報するもので、本県ホームページで公開されている。

本報告では、角度検出装置の検出精度を向上させる目的で振動対策を実施した。また、緊急事態伝達手法を補完する目的で、発煙筒・警告音を用いた緊急事態伝達装置を作製しスマートフォンから転倒信号を発煙筒・警告音緊急事態伝達装置に送り、発煙・発音するかどうかを確認した。さらに、ハウス内等の閉鎖空間における作業者単独事故（酸欠・一酸化炭素中毒による気絶等）を想定し、対作業者向け緊急事態伝達装置として作業者が転倒した等の緊急事態を音と光で知らせる回転灯・警告音発生装置を作製し動作を確認した。

**図１　転倒警告アプリ（通常・警告画面）**

## ２．実験装置の構築

### ２．１　防振実験

本報告では、ほ場への出入り等低速移動を想定しているため、農業機械の移動速度が遅い状態において、転倒警報に対する設定角度を超えたかどうかを検出することに条件を絞り込んでいる。従って、角度検出は昨年度と同様に加速度センサを用いる手法をとった。

加速度データのフィルタ処理を式（１）に、角度算出式を式（２）に示す。

$$H(z)=k_1\frac{a_{10}+a_{11}z^{-1}+a_{12}z^{-2}}{1+b_{11}z^{-1}+b_{12}z^{-2}}\times k_2\frac{a_{20}+a_{21}z^{-1}+a_{22}z^{-2}}{1+b_{21}z^{-1}+b_{22}z^{-2}} \quad \cdots（１）$$

H:フィルタ伝達関数(出力 Y,入力 X として H=Y/X)
$z^{-1}$,$z^{-2}$:遅延素子（それぞれ 1,2 サンプル遅延）
a,b,k:フィルタ係数（カットオフ周波数による）

$$\theta = \frac{180}{\pi}tan^{-1}\frac{gy}{\sqrt{gx^2+gz^2}} \quad \cdots（２）$$

$\theta$ :トラクタ横方向の傾き

gx:重力加速度のトラクタ前後方向成分
gy:重力加速度のトラクタ左右方向成分
gz:重力加速度のトラクタ垂直方向成分

角度はフィルタ通過後の加速度データを用いて算出する。フィルタのカットオフ周波数は昨年度と同様に 0.5Hz とした。

図２に本研究で使用した角度検出装置を示す。

角度検出装置において、マイコンは Smart Project が製造する Arduino UNO を用いた。3 軸加速度センサはスイッチサイエンス社製 ADXL345 ブレークアウトボードを用いた。また、外部機器と通信できるように Bluetooth モジュールを搭載した。なお、ジャイロセンサ使用による振動抑制は見られなかったため、ジャイロセンサは使用していない。

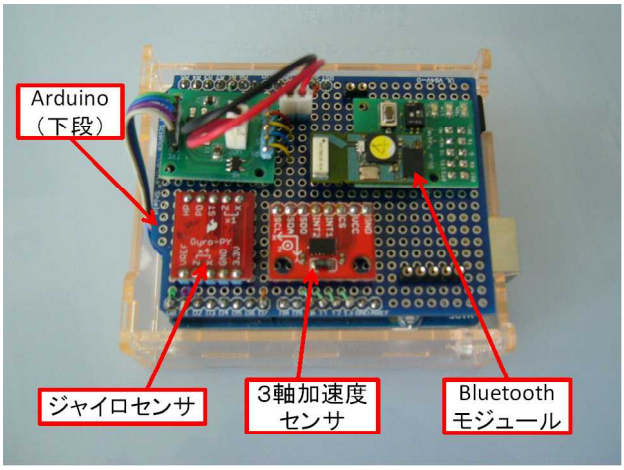



図２　角度検出装置

物理的に振動を抑制する目的で、防振シートとして（株）エクシールコーポレーションのゲルタックシート GT-5-100（サイズ 100mm × 100mm × 10 ㎜：ウレタンゲル）を角度検出器下部に装着し抑制効果を確認する実験を行った。図３に防振シート装着実験風景を示す。角度検出装置は振動の大きいトラクタ前方に取付け、マイコンへの角度データの取り込みは 20msec ごとに行った。

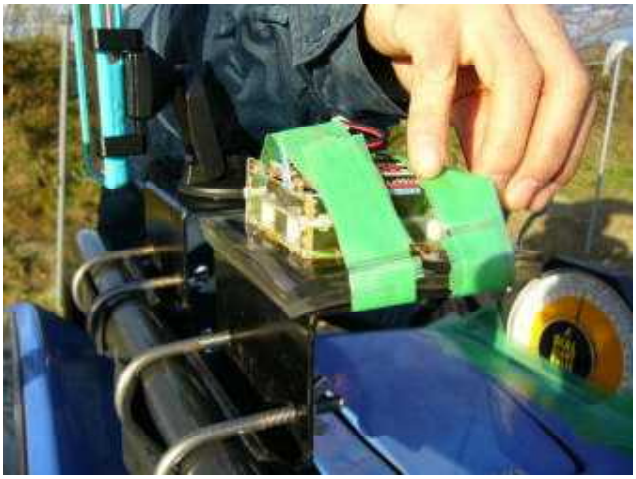


図３　防振シート装着実験

## ２．２　緊急事態伝達装置実験

まず、トラクタに発煙筒・警告音緊急事態伝達装置を取り付け、実証実験を行った。角度検出は、スマートフォン搭載の 3 軸加速度センサを用い、スマートフォン内の CPU で角度を算出したのち設定角度を超えた場合画面に警告表示をさせる。また、角度検出方向は 2 方向（前後左右）とした。図４に発煙筒・警告音緊急事態伝達装置を実装した様子を示す。本装置はスマートフォンと連携し、事故現場で煙と音により緊急事態を通報する。

図４　発煙筒・警告音緊急事態伝達装置を実装

次に、発煙筒から代わる伝達装置として回転灯・警告音発生装置を試作した。図５に回転灯・警告音発生装置の外観を示す。本装置は「転倒警告アプリ」と連動するものであり、パトライト、警報ブザー、WiFi 送受信装置で構成されている。給電は AC100V とし、自宅周辺やできるだけ人目のつくところに配置して作業者の異常を知らせることを想定している。例えばハウス内作業者の胸ポケットに「転倒警告アプリ」のインストールされたスマートフォンを入れておけば、作業者の単独事故や急病などで倒れて動けない状態でも転倒通報が行えるため、迅速な対応が期待できる。

図５　回転灯・警告音発生装置

## ３．実験結果

### ３．１　防振実験

既存開発装置に対する物理的振動抑制実験を行った。実験は農業総合センター内実験路（最大傾斜角約 28 度）で行い、トラクタを速度 2km/h 程度で実験路を走行させ、角度データを収集した。図６に防振シートを装着しない場合、図７に防振シートを装着した場合の角度検出の状態を示す。

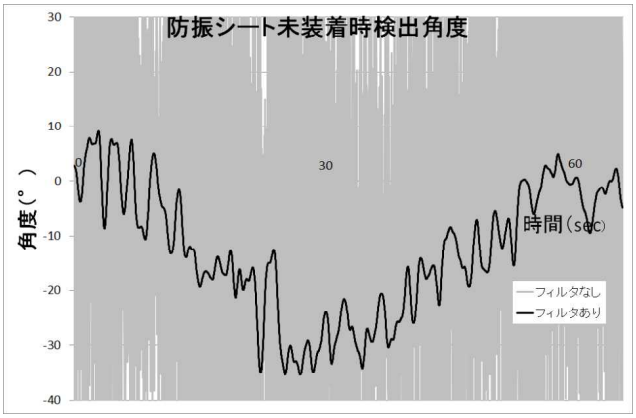



図６　防振シート未装着時の検出角度

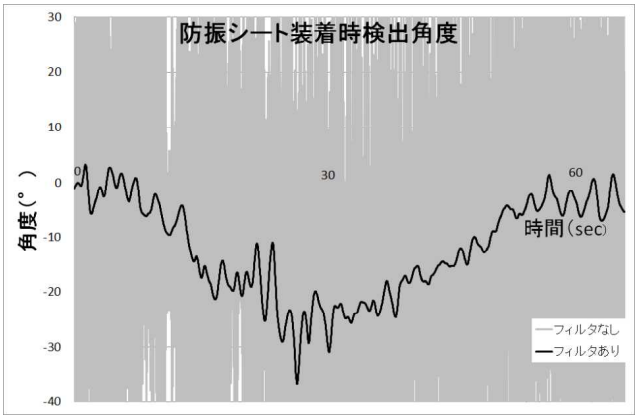



図７　防振シート装着時の検出角度

図６のフィルタありと図７のフィルタありを比較すると、防振シートを装着した場合、若干振動の影響が抑制されていることがわかるが、大幅に抑制されているわけではない。また、フィルタなしの場合ほとんどその差がない。これは、防振シートの厚さが 10mm と厚めではあったが、トラクタ振動の周波数成分（数 Hz が支配的）と防振シートの除振特性があっていなかったためと思われる。これにより、防振シートが高価なこともあり防振シートでの振動対策は検討から除外することとした。

### ３．２　緊急事態伝達装置実験

発煙筒・警告音緊急事態伝達装置の実証実験を行った。図８に発煙筒・警告音緊急事態伝達装置の動作確認風景を示す。実験は農業総合センター職員立会いの下実施し、防振シートの実験と同じ実験路を利用した。

図８　発煙筒・警告音緊急事態伝達装置の動作確認

最大傾斜地点に進入する直前にブザーが鳴動し、連動して発煙筒に着火することが確認でき、第三者に知らせる方法として有力である事がわかった。なお、本装置は安全面の懸念があるため、回路構成等は掲載していない。

次に回転灯・警告音発生装置については卓上実験を行い、WiFi による無線到達距離を確認したところ、見通しで 50m 程度とやや短いためアクセスポイントの利用などの方法を検討する必要がある。今後、農業総合センターで実証試験を行い改善を図る予定である。

## ４．結言

本報告では既存開発装置に対する物理的振動抑制実験と発煙筒・警告音緊急事態伝達装置および回転灯・警告音発生装置の動作確認を行った結果、以下のことがわかった。

１．昨年度製作した角度検出装置に対し、物理的振動抑制実験では、防振シートによる振動抑制は大きな効果がないことがわかった。アプリによる振動対策フィルタや角度検出用のセンサー自体の再検討が必要である。

２．発煙筒・警告音緊急事態伝達装置をトラクタに装着し動作確認を行い、転倒状態として設定した角度を超えた場合の発煙筒の着火、ブザーの鳴動が確認できた。しかし、安全上の問題から本手法の開発は停止することとした。

３．回転灯・警告音発生装置の動作確認では、WiFi による無線通信は 50m 程度の距離では有効だったものの、それ以上では通信できないことが分かったため、今後通信可能距離を延ばす手法を検討することとした。

**参考文献**

1）農林水産省農作業安全対策　ホームページ、http://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_kikaika/anzen/index.html

2)福島県農林水産部農業担い手課ホームページ、
http://wwwcms.pref.fukushima.jp/
3）独立行政法人　農業・食品産業技術総合研究機構
農作業安全情報センターホームページ
http://www.naro.affrc.go.jp/org/brain/anzenweb/index.html

# 材料科学的なアプローチによる厚板鍛造の高度シミュレーション技術の確立(第 3 報)

Establishment of the Advanced Simulation Technolody of Plate Forging by Material Science Aproach (3rd Report)

技術開発部工業材料科　工藤弘行　五十嵐雄大
林精器製造株式会社　大沼孝　遠藤一成　佐藤幸伸
国立大学法人茨城大学　鈴木徹也　永野隆敏　岩瀬謙二

サーボプレスによる板鍛造加工において、従来の多数回の試作に代わるバーチャル試作を、全工程に渡って実現するため、現物融合型デジタルエンジニアリング技術や、材料科学的アプローチによる変形特性予測技術を盛り込んだ工程設計システムを構築した。その結果、成形工程数や工程設計日数をおよそ半減することが可能となった。

Key words:CAE、板鍛造、サーボプレス、マルチスケール、材料科学

## 1. 緒言

厚板鍛造は、板厚 2 ～ 8 ㎜程度の板材を素材とする板成形加工と、バルク材を素材とする鍛造加工を融合した加工であり、切削など他加工からの工法転換による低コスト化が期待されている。しかし、厚板鍛造は板成形に比べ CAE 技術の蓄積が極めて少ないため、経験やノウハウに頼った多数回の試作が必要となり、低コスト・短納期化の実現は困難となっている。

本研究開発の対象となる製品群は、大ひずみ、複雑形状の加工と多数回の焼きなましが特徴で、工程を重ねる度に金属組織や変形特性が大きく変動する。これに対し、塑性加工 CAE では、金属のミクロ組織情報を直接反映できず、試験が必要となるマクロな機械的特性を通して間接的にしか反映できない。通常は、素材時点の材料特性を用いるが、本開発品では後半工程の解析精度が低下することが懸念される。

このような課題に対し、近年、材料科学分野では、中性子回折や EBSD など組織解析技術の向上や、シミュレーション技術の進歩により、ミクローマクロ・スケール間の連携が現実味を帯びており、マルチスケール CAE によるブレークスルーへの期待が高まっている。

本研究では、材料科学的アプローチを特徴とする CAE 技術を確立し、後半工程の実サンプル（現物）の形状計測・組織解析情報をフィードバックさせることで、解析効率と解析精度を両立する実用的なシミュレーション技術の開発を目指した。

本研究は経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業によるもので、3 年間の研究期間を終了した。

## 2. 試験方法および評価手法

### 2. 1. 成形性試験の内部情報の可視化

25 年度は最終年度となることから、量産品への実用化をいち早く進めるため、成形性試験は製品形状試験片を対象とした。図 1 に成形性試験の分類を記載するが、各試験にはそれぞれ一長一短があるため、状況に応じて複数を使い分けるのが望ましい。

具体的な対象品として、ステンレス(SUS304 系)製の腕時計金属筐体を選択した。ステンレスは加工硬化が大きいことが特徴で、金型にかかる負担が大きく、金型が破壊する「型割れ」が生じる。これに対応するため、研究対象の材料としてステンレスを、不良現象として「型割れ」を追加した。本研究の手法は、材料科学的アプローチを特徴としており、汎用性が高いため、ステンレスについては、材料モデルやパラメータの変化、「型割れ」については発生場所やタイプの異なる破壊として体系的に取り扱うことが可能である。

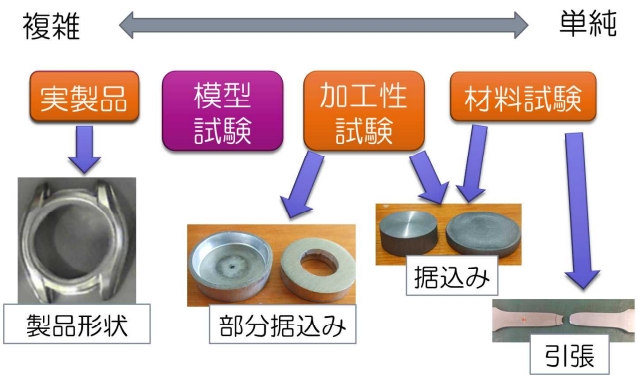



図 1　成形性試験の分類

### 2. 2. 製品形状試験片における技術課題の整理

製品形状試験片における技術課題を整理した結果、CAE 解析モデルの精度や規模、形状データ、材料特性データの 3 点が挙げられた。

(1) CAE 解析は、24 年度までは図 2 に示した軸対称形状の「部分据え込み」を対象としていたため、2 次元解析で十分であったが、製品形状では図 3 に示すような 3 次元解析が必要となる。サーボプレスでは、1 度のプレスで複数回の上下を繰り返すプログラムモーションやコイニングモーションを利用するが、実加工時間が数秒に及ぶため、これらのモーションに対する解析では、計算の時間が長期化したり、解析モデルが巨大化し、細密なモデルでの計算は困難である。

(2) 形状データに関しては、素材や金型に熟練工の手直しの修正があり、CAD データの存在しないものが存在することが明らかになった。

(3) 材料特性データに関しては、焼きなまし以後の実サンプルは、焼きなまし条件によって様々な組織変化や変形特性変化することが分かっており、2 工程目以降の CAE にて、どのような材料特性で計算すべきかが課題である。

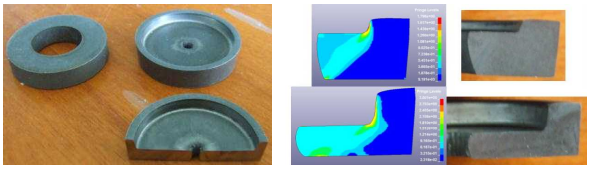


図２ 部分据え込試験のサンプルと２次元解析の例

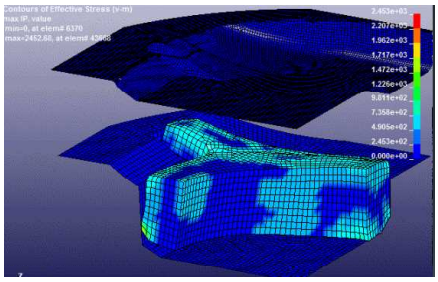


図３ 製品形状を対象とした３次元解析の例

これらの課題を解決するため、(1) CAE 解析モデルに関しては CAD 変換・修正ソフトを、(2) 形状データに関しては現物融合型デジタルエンジニアリング技術を、(3) 材料データに関しては材料科学的アプローチによる変形特性予測技術を適用した。

### ２．３．ＣＡＤ変換・修正ソフトの利用

製品形状は軸対称形状を基本とするが、一部、特異的な形状を持ち、多くの不良はその部分で生じるため、その周辺で R 部の付与などの手修正を行う。25 年度に導入した CAD 変換・修正ソフト「SpaceClaim」により、素材ブランク形状から部分モデルを作成した。図４は、その手法を示したものであり、CAD モデルを平面で分割したり、エッジ部に R 形状を付与するなど、CAE の前準備作業を簡便に実施することが可能となり、従来より精密な要素分割モデルの作成が実現した。本解析では角部形状が計算の安定性にも悪影響を及ぼしたため、R 形状を付与することにより安定した解析が可能となった。

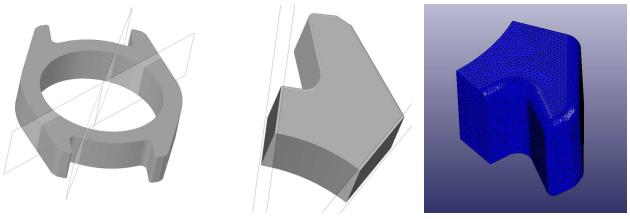


図４ 部分モデルの作成手順の例

### ２．４．現物融合型デジタルエンジニアリング技術

現物融合型デジタルエンジニアリング技術は、精密工学会の専門委員会で提案されたもので、3 次元形状測定技術などにより、現物（実製品）のデジタル情報を取得し、CAD、CAE などのデジタルエンジニアリングで活用するものである。本研究では、金型に対しては３次元デジタイザを、被加工材に対しては X 線 CT を利用した手法を適用した。

X 線 CT によるモデル作成には、25 年度にハイテクプラザに導入された「イメージベース/マルチスケール CAE システム」内の「Simpleware」を利用した。このソフトでは、X 線 CT で撮影された実製品のデータから CAD モデル作成を行うことが可能である。最大の特徴は、CAE 解析の前準備にあたる要素分割まで可能な点である。実製品の観察では、ノイズなどが生じる場合があるため、単一ソフトで各種画像処理と要素分割を行うことで、最適な撮影条件、処理条件を効率良く見出すことが可能である。

### ２．５．材料科学的アプローチによる変形特性予測

後半工程の材料特性に関しては、焼きなましによるミクロ組織の変化、特に結晶粒径や硬さの変化に着目し、中間スケールの材料モデル「粒界強化多結晶モデル」を介して、ミクロ組織情報をマクロスケールの塑性加工 CAE へフィードバックする手法を確立し、変形特性の予測を行った。

### ２．６．工程設計システムの構築と効果の検証

前述の技術を盛り込んだ工程設計システムを構築し、成形工程数や工程設計日数削減の効果を検証した。

## ３．試験結果と考察

### ３．１．　現物融合型デジタル技術の利用例

図５に金型修正部のモデリング例を示す。測定は宮城県産業技術総合センターが所有する３次元デジタイザ（COMET5）を利用した。この例では、現物と設計 CAD データで相違のある部位が一部であったため、修正部（図５右の青部）のみを現物から CAD データ化し、その他は設計 CAD データと合成する手法とした。３次元デジタイザの測定データは点群データと呼ばれる測定点の座標データの集まりであるため、数式で面形状を表現する CAD データに変換するには、専用のソフトを利用する必要がある。

本技術は、CAE 解析のためのモデル作成だけでなく、測定結果自体で成形の良否を判断したり、金型加工用のデータ作成にも有効であることが確認できた。例えば、焼付き・かじりが頻発していた「打ち出し工程」における金型は、熟練工が独自のノウハウで手修正をしており、図面化することができていなかったが、

３次元デジタイザにより、暗黙知を可視化し、形式知化することが可能となり、熟練工の修正も含めた形状の CAD データを作成することでができた。

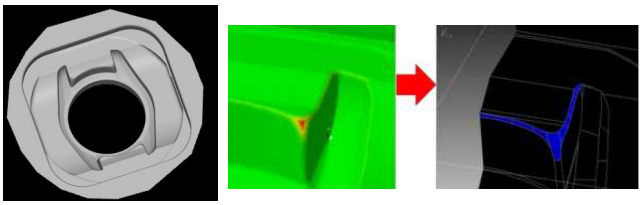


図５　金型修正部のモデリング例

図６に、X 線 CT による被加工材のモデリング例を示す。金型は、面の形状情報、サーフェスデータで十分な場合が多いが、本研究で対象とする被加工材は表面と裏面に特徴形状を持つ厚みのある形状であるため、面と面のつながりの情報も含めたソリッドデータが必要であり、X 線 CT 撮影によるモデリングが有効である。本研究では X 線の透過能の制限から、製品の４分の１の部分を対象とした。この結果、バリ形状など微細な形状まで再現可能であることを確認した。

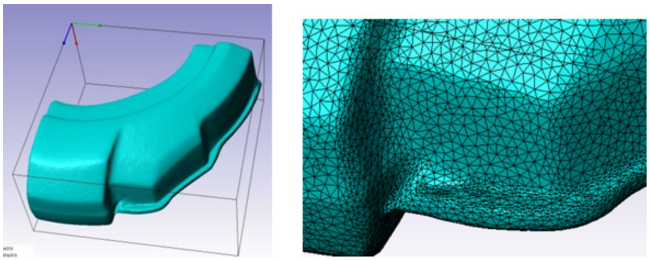


図６　X線CTによる被加工材のモデリング例

### ３．２．塑性加工ＣＡＥによる３次元解析

前項までの技術などにより実施した３次元解析の例を図７に示す。被加工材は CAD 修正ソフトによって作成した部分モデルであり、仮想的な切断面には対称境界条件を設定している。図８に視点を変更した加工後の製品形状（図左）と塑性ひずみ分布（図右）を示す。細密な要素分割により形状の細部の表現が向上し、成形の良否を形状で判断できる。また、割れ発生位置と塑性ひずみ最大位置が一致しており、塑性ひずみに基づく不良発生の評価も可能である。

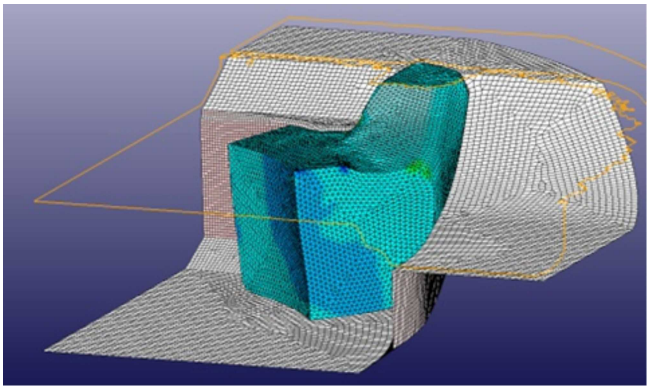


図７ 部分モデルに対する３次元解析例（上型非表示）

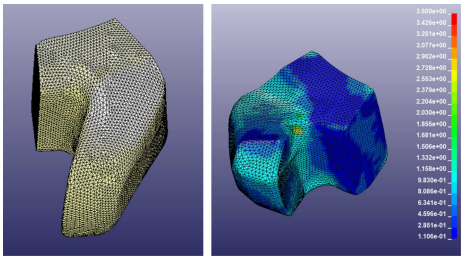


図８ 加工後の製品形状（左）と塑性ひずみ分布（右）

また、図９に示す部位の形状に着目すると、しわの発生を表面形状の凹凸として評価可能である。図中央は仮想的な切断表示、図右は切断面のみを表示した例である。これら多彩な後処理により、成形の良否に関する判断が可能となる。

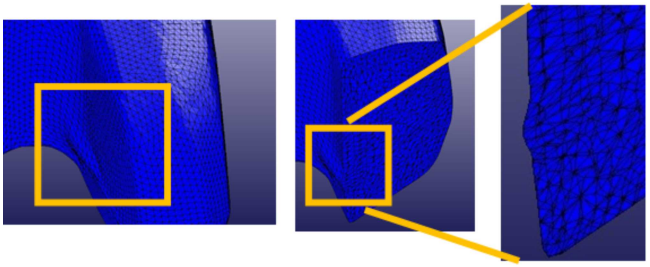


図９（左）しわ発生部（中央）仮想切断表示　（右）切断面

塑性加工 CAE では、金型と被加工材との間に摩擦などの接触条件を設定して計算を行っている。図１０に、接触部の可視化の一例として、金型と被加工材の隙間の距離を表す「コンタクト・ギャップ」の計算例を示す。図右の青部は、ほぼ完全に接触している部分、緑～黄色部は 0.2 ～ 0.3 ㎜程度離れている部分を示す。これらにより、被加工材が金型の隅まで行き渡らない「欠肉」の発生などを評価することができる。

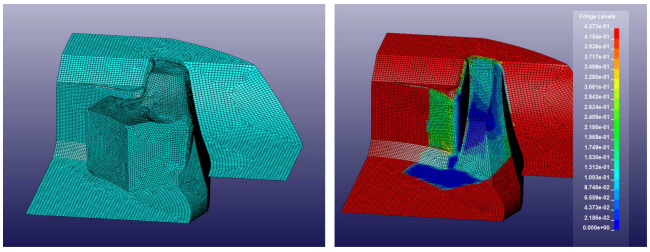


図10 コンタクトギャップの評価例　（右がコンタクト・ギャップ分布図で、左は同じ時点の変形図）

### ３．３．　材料科学的アプローチによる変形特性予測

本研究では、図１１に示す粒界近傍強化モデルによる均質化法を用いて塑性変形特性を予測する手法を検討した。このモデルでは、粒界近傍領域を粒内とは異なる高い耐力を持つ材料として扱い、強化領域の幅を粒径によらず一定の 10 μｍ程度と仮定した。塑性加工 CAE は、連続体力学に基づくため、材料を均質体と扱い、引張試験結果から現象論的に変形特性を決定するのに対し、本モデルは、ミクロ的に不均質な結晶体構造から、均質体としてマクロな平均の特性を数値解析的に予測して変形特性を決定するものである。

図１２に、結晶粒径 50、70、100、200、400 μｍの場合の応力－ひずみ曲線を示す。この結果、粒径が小さいほど、耐力点が上昇する結果が得られた。多結晶の金属材料では、結晶粒径の（-1/2）乗に比例して耐力が上昇するという「ホール-ペッチの関係」が知られる。図１３に示すとおり、本モデルによる計算結果は、高い相関で「ホール-ペッチの関係」を満たしており、本モデルの有効性を確認することができた。

多結晶体における粒界強化（結晶粒微細化強化）のメカニズムは、結晶粒界近傍に転位密度の高い領域が形成されるためとの考えが主流となっている。本モデルの粒界近傍領域は、転位密度の高い領域に対応している。本研究グループでは、各部位の寸法や、ミクロ特性を分子動力学やナノスケール硬さから求めたり、モデルの発展として析出物を追加する取り組みを行っている。この手法では、４つの強化機構（固溶強化、加工硬化、析出強化、粒界強化）全てを統一的なモデルで扱うことができる点が特徴である。

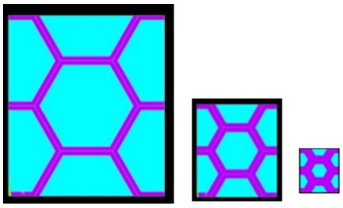


図11 粒界近傍強化モデル（粒径200、100、50μｍ）
（紫が粒界近傍の強化領域で、粒内より耐力が高い）

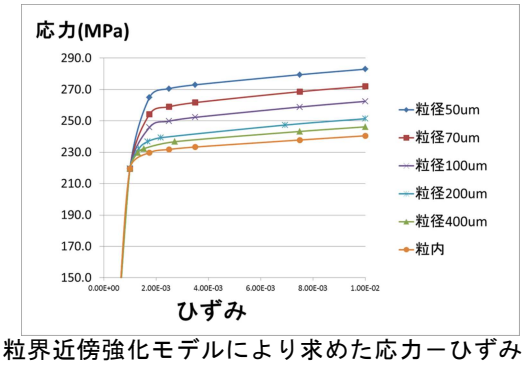



図12 粒界近傍強化モデルにより求めた応力－ひずみ曲線

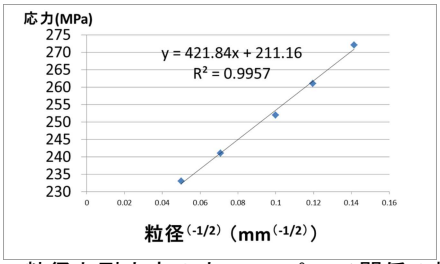



図13　粒径と耐力点のホール-ペッチ関係の検証

本研究では、茨城大学にて、チタン材を対象に、焼きなまし後の EBSD 測定を行った。図１４に示す通り、温度条件に応じて、平均結晶粒径が変化する傾向を定量化しているため、これと粒界近傍強化モデルを組み合わせることにより、2 工程目以降の材料特性を推定し、解析精度を向上したり、焼きなまし条件を最適化することも可能と見られる。

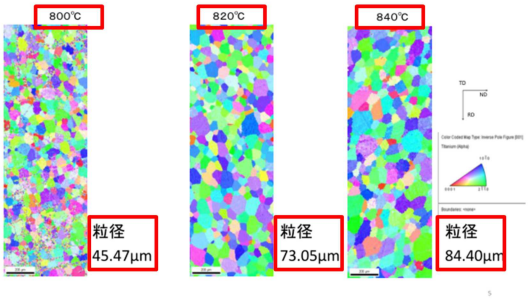



図14 焼きなまし後のチタン材に対するＥＢＳＤ解析結果

## ３．４．工程設計システムの改善効果の検証

表１に本研究の成果として構築した工程設計システムによる工程設計日数削減効果を示す。目標の 1/3 には達しないものの大幅な短縮が実現した。 図１５に成形工程数の削減効果を示す。こちらも目標の 1/3 に及ばないが、半数程度に削減することができた。

表１　工程設計に要する日数

| | 金型設計 | 電極加工 | 金型加工 | プレス加工 |
|---|---|---|---|---|
| 従来 | 15日 | 15日 | 20日 | 10日 |
| 目標 | 12日 | 金型工程で保証 | 7日 | 1日 |
| 結果 | 15日 | 金型工程で保証 | 7日 | 3日 |

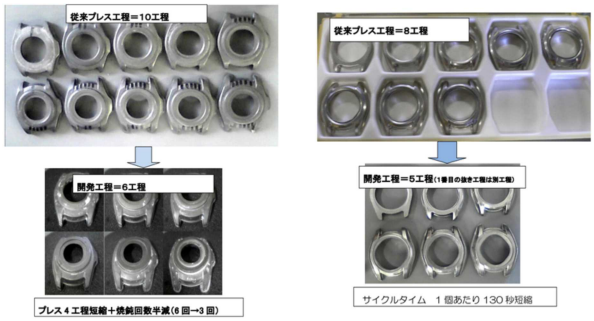



図15 成形工程数の削減（左）チタン材（右）ステンレス材

## ４．結言

サーボプレスによる厚板鍛造に関するシミュレーション利用技術を検討し、以下の成果を得た。今後はこれらの技術を量産工程に本格導入する予定である。

(1)　実サンプル情報をフィードバックさせることで、解析効率と解析精度を両立する実用的なシミュレーション技術を確立し、工程設計日数と成形工程数をおよそ半減することに成功した。

(2)　材料科学的アプローチとして、極めて簡単な仮定に基づく「粒界近傍強化モデル」を用いて、ホール－ペッチ関係を表現することに成功した。これにより、実組織の観察と硬さ測定に基づく変形特性予測が可能となる。全ての金属材料に応用できる極めて汎用性の高い技術であり、幅広い応用を見込んでいる。

# 太径締結部品のミクロ加工制御技術の確立（第 2 報）

Establishment of the Microstructure Control Technolody of Large Bolt Parts (2nd Report)

技術開発部工業材料科　工藤弘行　光井啓　五十嵐雄大　伊藤弘康
小柴佳子　菅野雄大
東北ネヂ製造株式会社　関口龍一郎　江幡卓典
国立大学法人茨城大学　鈴木徹也　永野隆敏

本研究開発では、風力発電プラントなどでの利用が想定されるφ 40mm 以上の太径ボルトの開発を目的とする。25 年度は鍛造 - 熱処理一体 CAE システムを導入し、変形や熱履歴の算出ならびに組織予測、特性予測を行った。種々の解析例から解析精度向上のための手法を検討し、高温下の塑性変形特性、相変態特性、熱伝達係数の 3 つのパラメータの重要性を確認した。さらに、階層構造を持つ焼き戻し組織を対象にしたミクロ組織モデルによる特性予測技術を併用する手法に関して追加的な検討を行った。

Key words : 加工熱処理、改良オースフォーム、ミクロ組織制御、組織予測、特性予測

## １．緒言

ボルトは最も歴史の古い機械部品のひとつであり、その性能は、ほぼ限界に達している。例えば、強度に関しては、水素脆化による遅れ破壊のため、強度 1000MPa 級が実用上の限界になっている。また、太径化については焼入れ性の問題から、JIS ではφ 39 mm までしか規定していない。これ以上の性能を要求する場合、焼入れ性を確保するための高価な素材や、追加の試験が必要になるため、短納期・低コストを望む川下企業のニーズに応えることができない。

本研究では、太径化の限界へ挑戦し、風力発電プラントなどで利用が想定されるφ 40 ㎜以上の 1000MPa 級太径ボルトの開発を目標とする。上記の課題解決のため、①太径ボルトへの加工熱処理技術、②組織・特性の予測が可能な鍛造 - 熱処理一体 CAE 技術、③強度保証技術などの要素技術の確立を目指す。コスト面も含めた製品化への可能性から、実用化が有望な鋼種として SCM440、SNCM439 の 2 つを対象とする。

加工熱処理は、熱間加工と熱処理を連続的に一体化して行う処理の総称であり、工程を削減しながら良好な特性が期待できる。加工熱処理を工業製品製造に適用する際に課題となるのは、変形挙動や組織変化が素材製造に比べて著しく複雑になる点である。この課題を解決する切り札として期待されるのが、鍛造や熱処理に特化したシミュレーション（CAE）技術である。特に着目されるのは、「鍛造 - 熱処理一体 CAE」技術である。従来は鍛造と熱処理を別々のソフトで解析をしていたこともあり、前工程や素材からの履歴の影響を無視して理想化した状態の解析をしていたため、解析精度が低かった。「鍛造 - 熱処理一体 CAE」は、同一ソフトで前工程の解析結果を引き継いで計算するため、計算開始時点で組織や特性、残留応力状態が部位ごとに異なる状況を反映することが可能で高精度の解析を実現できる。これらは極めて計算負荷の大きい解析であるが、IT 技術の進歩に支えられ実用レベルに達している。さらに、近年では、素材の切断工程から、製造後の強度特性予測や耐久寿命予測まで引き継いで解析する「全工程解析」への発展も提案されている。

本研究は、経済産業省の戦略的基盤技術高度化支援事業によるもので、実施年度は 24 ～ 26 年度である。25 年度は、東北ネヂ製造(株)で導入した熱間鍛造サーボプレス機により、従来工程のブラッシュアップを図るのと並行して、ラボレベルの熱処理試験や CAE 技術を活用し、加工熱処理について、特性向上効果や量産工程へ適用の可能性の検討を行った。本報告では、25 年度に導入した鍛造-熱処理一体 CAE システムの解析結果を中心に記載する。

## ２．試験方法および評価手法

### ２．１．組織制御の方針の検討

加工熱処理は一般熱処理と異なる特徴を持つため、組織制御と強度特性発現の観点から、どのような最終組織を狙うべきか検討を行った。

### ２．２．　鍛造 - 熱処理ＣＡＥ技術による解析

25 年度は、前年度に立案した CAE システム（図 1 参照）のうち、「鍛造 - 熱処理一体 CAE」を導入した。解析ソフトは（株）NTT データエンジニアリングシステムズの「Simufact.forming」である。

「鍛造 - 熱処理一体 CAE」は、①鍛造・熱処理、②組織予測、特性予測の２つのプロセスからなる。

前半の①鍛造・熱処理の解析では、構造解析と熱伝導解析に相変態解析も加えたもので、金型、被加工材の形状、材料特性、鍛造モーション、冷却条件などを入力し、変形や熱履歴を算出する。

後半の②組織予測、特性予測では、①で計算された熱履歴と相変態特性を表す CCT 図から、どのような組織が得られ、最終的にどのような強度特性を発現するかの予測を行う。

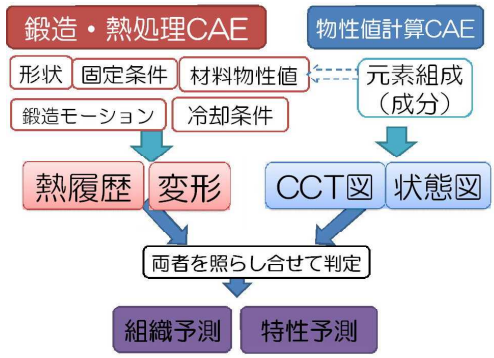



図1　加工熱処理に対応するCAEシステム

### 2．3．ＣＡＥ利活用技術の高度化

CAE 解析の最大の利点は試作回数の削減や熱処理条件の最適化が可能となる点である。対象とする東北ネヂ製造(株)の量産工程に関する解析について、解析精度を高める必要があるため、CAE 解析技術を高度化や、CAE に入力するパラメータを高精度化する手法について検討した。

## 3．試験結果と考察

### 3．1．　組織制御の方針検討

加工熱処理は、加工するタイミングや狙いとする相変態、組織、特性により様々に分類される。現在、実用化されている、あるいは実用化に近いのが、①鋼板圧延における制御圧延、制御冷却(TMCP 処理)、②熱間鍛造の発展としての制御鍛造、③熱処理を省略したタイプの非調質鋼の製造、④プレス加工におけるホットスタンピング、⑤改良オースフォームの 5 つである。それぞれ狙いとする組織と強度特性を表 1 に示す。①TMCP 処理と③非調質鋼の製造は鉄鋼メーカーの鋼板製造工程に用いられるもので、その他は工業製品の製造工程に用いられるものである。

表1　加工熱処理の組織と特性

| 処理の種類 | 狙いとする組織 | 狙いとする特性 | |
|---|---|---|---|
| | | 強度（MPa） | 伸び(%) |
| 制御圧延、制御冷却(TMCP処理) | フェライト、パーライト | 400～600 | 20~30 |
| 制御鍛造 | 微細粒 フェライト＋パーライト | 600～800 | 10~20 |
| 非調質鋼の製造(熱処理省略タイプ) | 微細粒パーライト＋析出強化 | 700～900 | 8~15 |
| | ベイナイト | 800~1100 | 8~15 |
| ホットスタンピング（ダイクエンチ） | マルテンサイト | 1500 | 5~8 |
| 改良オースフォーム＋焼戻し | 焼戻しマルテンサイト | 1000~1500 | 15~20 |

本研究開発では、狙いとする特性や組織から、ボルト製造に用いる熱処理として「改良オースフォーム」を選定する。改良オースフォームは、一般焼入れでは得られない微細な階層構造を持つマルテンサイト組織を得られるのが特徴である。研究事例としては、独立行政法人 物質・材料研究機構(NIMS)が超鉄鋼プロジェクトの 1 テーマとして強靭鋼の開発を行ったのが代表的なものであり、SCM440 を対象に 800 ℃、50 % 加工により 1500MPa 以上の強度を得ることに成功した他、疲労、水素脆化に対して良好な特性を得るなど注目すべき成果を得ている[1)]。締結部品は素形材に近い形状を持つことから、改良オースフォームの実用化の期待度が大きく、同研究でもφ 22mm の 1800MPa 級ボルトに関する応用研究を実施している。

図 2 は改良オースフォームにおける CCT 図の模式図である。CCT 図は冷却曲線と相変態曲線から構成され、冷却時に生じる相変態を図示したものである。熱処理は相変態により狙いの組織を得ることが目的であるため、CCT 図は熱処理条件設定の判断に利用される。改良オースフォームは、$A_{C3}$ 点以上のオーステナイト安定領域で一定時間保持後、加工(図中波線部)した直後に冷却を行う。冷却曲線がマルテンサイト変態開始線（図中緑線）やベイナイト変態開始線（図中青線）にぶつかると変態が開始する。冷却速度が十分大きければ、狙いのマルテンサイト変態が生じるが、太径品の中心などでは冷却速度が不足し、一部ベイナイト変態が起こり特性が低下する。

25 年度に従来工程のサンプルの調査を行った結果、φ 40 ㎜を超える太径品では、中心まで完全なマルテンサイト変態を得るのは困難であること、また比較的低温で生じる下部ベイナイトは強度とじん性を兼ね備えるため、20 ～ 30 %程度までは許容できる可能性を確認した。よって、今後はベイナイト組織の活用も追加検討することとした。

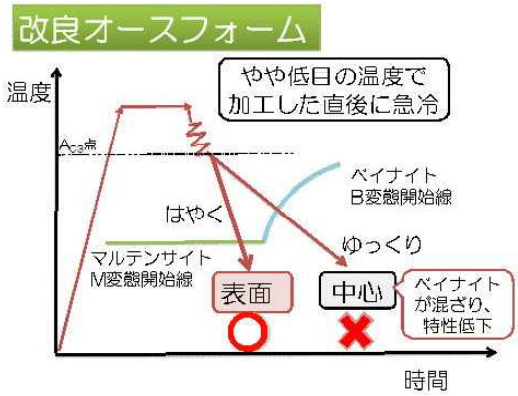



図2　　改良オースフォームのCCT模式図

### 3．2．鍛造-熱処理ＣＡＥ技術による解析

本報告では、実製品で使用される材料データなどが不明のため、保有するデータベースから SCr420 鋼の材料特性データ、一般的な油焼入れによる熱伝達率データを用いて、従来工程、すなわち、熱間鍛造と熱処理を別工程とする工程の CAE 解析の結果を紹介する。

はじめに、前半の鍛造・熱処理解析では、第 1 工程のボルト頭部の熱間鍛造を対象とする。熱間加工が材料の変形抵抗を減らす目的とすることからも分かる通り、温度や加工速度により、材料の変形抵抗は変化する。これらの特徴を材料変形特性の「温度依存性」、「ひずみ速度依存性」と呼ぶ。CAE ではこれらの依

存性を正確に反映するため、ソフト内に材料データベースを内蔵する。変形抵抗を表現する曲線は、フローカーブと呼ばれる。図３はフローカーブの温度依存性を示した例である。この鋼種では、温度とひずみ速度の組み合わせについて 100 種類以上の試験結果のデータを保有する。変形抵抗の正確性は、塑性加工 CAE の精度に直結するため、非常に重要である。

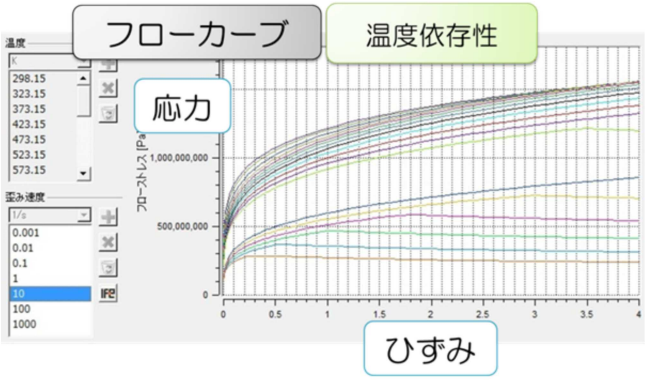



図３　フローカーブの温度依存性

ボルト頭部は六角形断面を持つが計算時間短縮のため、解析モデルは２次元軸対称モデルを用いた。図４は荷重変動を荷重 - 変位グラフで示したもので、グラフ中の代表点における変形状態も併せて図示した。変形状態は相当塑性ひずみ分布で示しており、加工終了時では相当塑性ひずみが 0.6 ～ 1.4 までの領域が多い。プレス機では加工荷重の上限が決まっており、加工の可否の判断などで荷重予測の役割は大きい。図中、急激な荷重の増加が生じたのはボルト頭部の側面が金型と接触した時点に相当することが分かった。

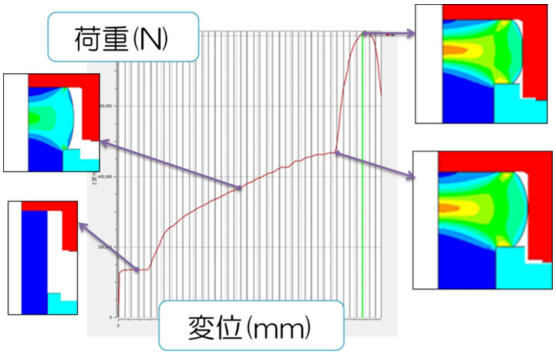



図4　プレス荷重－変位図と各時点の変形挙動

次に、第 2 工程として焼入れ工程の解析結果を示す。ここで、解析モデルとして、第 1 工程の解析結果を利用するのが、「鍛造-熱処理一体 CAE」の最大の特徴である。本解析では、再加熱の焼入れを対象とするため、形状データのみを引き継ぐが、改良オースフォームなどの加工熱処理の場合は、追加して塑性ひずみや残留応力を引き継いで計算する。

熱処理解析では、熱に関わる入力パラメータの内、熱伝導係数、比熱など、ほとんどが材料固有の物性値なのに対して、材料と周囲の流体（空気や冷却剤）との間の(対流)熱伝達係数だけは同一の材料であっても冷却剤の種類や撹拌の状況により大きく変動することに注意しなければならない。さらに、熱処理における冷却では、蒸気膜の形成、沸騰、対流の発生などの過程を経るため、冷却速度は変動する。熱処理 CAE では、熱伝達係数を温度依存の特性として扱うことで、この挙動を表現するのが一般的である。図５左は水冷、油冷、空冷の場合の熱伝達係数の例である。図５右は各冷却剤の冷却曲線 [2] であり、両者は対応関係にある。

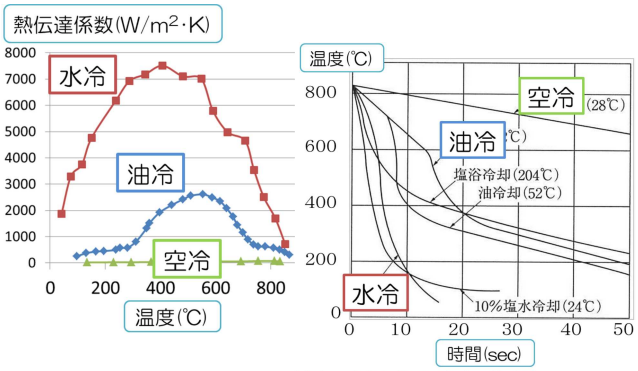



図5　各冷却剤の熱伝達係数と冷却曲線

図６は、熱履歴の計算結果例であり、図中右上に示した中心から表面にかけて均等分割した５地点など代表点の結果である。熱処理の目安として良く利用される 500 ℃に達する時間で表現すると、表面で 13 秒に対し中心で 50 秒となるなど、定量的な情報を得ることができる。

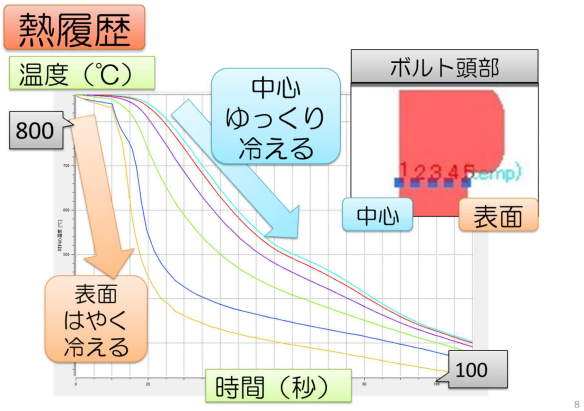



図6 ボルト頭部の各点における熱履歴（冷却曲線）

次に、後半の組織予測、特性予測について述べる。ここでは、熱履歴と CCT 図を照らし合わせる作業を行う。両者はいずれも、温度 - 時間グラフであるため、直接比較が可能である。また、鋼材では元素組成、組織による熱伝導係数の変化は僅かであるため、鋼種が変わっても熱履歴曲線はほぼ変化しない。よって、鋼種を変更した場合は、CCT 図のみを変更しての判断が有効である。図７は物性値計算 CAE「JMat Pro」により予測した SNCM439 の CCT 図に、図６の熱履歴

曲線の結果を重ねたもので、ボルトの中心と表面の冷却曲線の間の領域を半透明赤色で示した。CCT 図の冷却曲線は冷却速度一定の場合の記載だけであるのに対し、実際の冷却速度は変動するため、熱処理 CAE では温度－時間換算則による補正や独自のデータベースの利用を行っている。

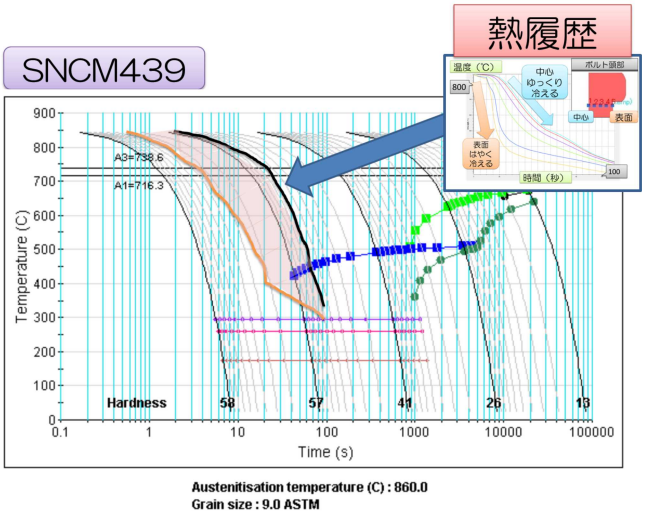



図7　ボルト頭部の各点における熱履歴（冷却曲線）

焼入れ性試験にて、焼入れの成否の判断の目安としてマルテンサイト組織 50 %に相当する硬さが用いられるように、工業製品では、複数の相で構成される部位の特性が重要となる。熱処理 CAE は組織の割合を相分率として定量的に算出できる。図８左はボルト頭部のマルテンサイト分率の結果で、表面近くが 90 %程度、中心では 65 %程度である。

特性予測は、組織予測で得られた相分率と相自体の硬さを基に、複合則と呼ばれる重み付き平均による硬さの予測を基本としている。鉄鋼材料では、マルテンサイト、ベイナイト、オーステナイト、フェライト、セメンタイトの 5 つの相を対象とする。図８右が特性予測結果であり、表面で 56HRC 程度、中心で 47HRC 程度の硬さと分かる。焼入れ処理で得られた組織ではマルテンサイトの影響が支配的であり、組織予測と特性予測は類似の分布となる。

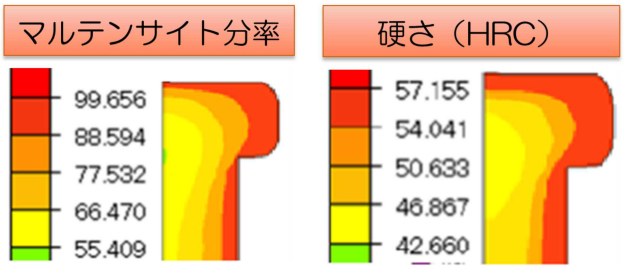



図8　組織予測結果（左）と、特性予測結果（右）

### ３．３．ＣＡＥ利活用技術の高度化

種々の条件での結果から、変形抵抗、CCT 線図、熱伝達係数などの入力パラメータが解析精度に大きく影響することが分かったため、精度向上のための手法を検討した。この結果、加工フォーマスタと物性値計算 CAE を併用して、変形特性、CCT 図を得ることや、熱処理時の被加工材の温度測定から熱伝達係数の逆同定を行う手法が有望と判断した。

また、現状の鍛造 - 熱処理一体 CAE で計算できるのは相分率までであり、焼戻し時の析出物の分散状態の予測や結晶粒径変化などは計算することができない。そこで、不明な情報を補足する観点から、本研究グループが開発した「ナノスケール硬さ測定を併用したミクロ組織モデルによる特性予測技術」を適用することとした。この特性予測技術を用いると、特性発現のメカニズムを明らかにすることで組織制御の方針を明確化することが可能である。（図９参照）

改良オースフォームでは、熱間鍛造時の動的再結晶、結晶粒内の変形帯形成が生じる[3] 他、冷却時の相変態特性が一般熱処理と異なることが知られており、本項目で述べた技術の活用が重要と考える。

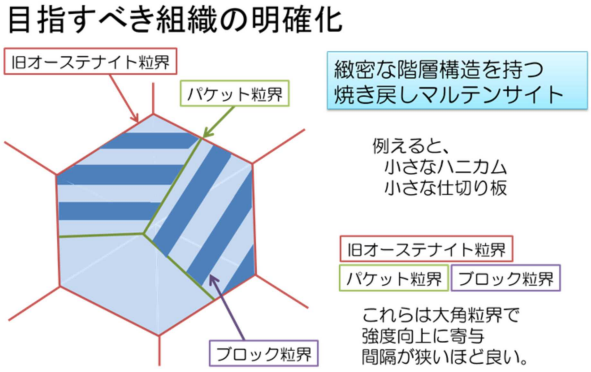



図9　本研究が目指す組織制御

## ５．結言

25 年度導入した鍛造-熱処理一体 CAE を用いた検討により、以下の成果を得た。これらは次年度以降の研究計画に反映する。

(1) CAE 解析精度に影響が大きい要因が、変形抵抗、熱変態特性（CCT 図）、熱伝達係数の 3 つであることを特定し、精度向上の手法を立案した。

(2) 鋼種の違いが熱履歴曲線に与える影響が非常に小さく、鋼種変更の検討に関しては、CCT 図の違いのみに着目しての判断が有効であることを確認した。

参考文献

１）長井 寿，超鉄鋼－強度 2 倍×寿命 2 倍の実力と可能性，日刊工業新聞社
２）新・知りたい熱処理，不二越熱処理研究会，ジャパンマシニスト社
３）日本熱処理協会編，熱処理技術便覧，日刊工業新聞社

# 水溶性チタン酸バリウム前駆体を用いた高性能 PTC サーミスタの開発

Development of high performance PTC thermistor
by utilizing the water soluble barium titanate precursor.

技術開発部工業材料科　宇津木隆宏
国立大学法人山形大学　松嶋雄太

混合性の良い水溶性前駆体法によるチタン酸バリウムの合成技術を応用し、ストロンチウム、鉛、カルシウム、ケイ素、ランタン、マンガンを含むチタン酸バリウム系の均一な前駆体を作製した。これを焼結して円盤状の PTC サーミスタを作製し、微量成分であるケイ素、ランタン、マンガン添加量と焼結体の電気的特性について評価を行った。

Key words:水溶性チタン　前駆体　チタン酸バリウム、PTC、サーミスタ

## １．緒言

バッテリーの大電流・大容量化に伴い、過電流を防止するための PTC サーミスタが重要となっている。また、サーミスタ素子自体は小型化・多品種化が進んでおり、小回りの利く粉末調製技術が求められている。しかし近年のサーミスタは積層化や非鉛化の研究が主流で、従来の単板型 PTC サーミスタの性能向上や少量・多品種に対応した生産技術に関する研究はあまり行われていない。

本研究では水溶性前駆体法による $BaTiO_3$ の合成技術[1]を多成分系に応用することを試みた。具体的には Sr,Pb,Ca,La,Si,Mn が添加された $BaTiO_3$ 系前駆体を作製し、これをか焼して PTC サーミスタ用原料粉末とするものである。この手法を用いることで固相混合よりも混合性の良い粉末が得られるため、焼結後の高性能化が期待される。また、固相混合よりもコストは高いが少量・多品種の合成には向いている。本報では作製プロセスと焼結後の電気的特性について記す。

## ２．実験

### ２．１．原料

#### ２．１．１．安定なTi水溶液の作製

安定な Ti 水溶液の作製については Kakihana らの方法[2]に準拠した。100 mmol の金属チタン（粒径 45 μm）を 250 mL の過酸化水素水と 40 mL のアンモニア水で溶解させた後、250 mmol のクエン酸（無水）を加えた。これを加熱・振とうして未反応の過酸化水素を除去した後、水で希釈して 1 L 定容とした。Ti 濃度については ICP 発光分析装置により決定した。

#### ２．１．２．Ba, Sr, Pb, Ca, La, Mnの原料

Ba,Sr,Pb,Ca 源としては酢酸バリウム、酢酸ストロンチウム 0.5 水和物、酢酸鉛 3 水和物、酢酸カルシウム 1 水和物をそれぞれ用いた。

La 源としては硝酸ランタン 6 水和物 3.4 g を $HNO_3$ に溶解させ、水で希釈して 1M $HNO_3$ で 100 mL 定容とし、ICP 発光分析装置により La 濃度を決定したものを用いた。

Mn 源としては濃度が既知の市販のマンガン標準液（Mn:1000 mg/L）をそのまま用いた。

#### ２．１．３．安定なSi水溶液の作製

安定な Si 溶液の作製については Takahahi らの方法[3]に準拠した。オルトケイ酸テトラエチル 0.1 mol とポリプロピレングリコール 0.4 mol を大気中で 60 ℃、80 h 混合した後、硝酸を少量加えてから水で希釈して 100 mL 定容とした。Si 濃度については ICP 発光分析装置により決定した。

### ２．２．前駆体の作製

２．１．の原料を用い、焼結後に所定の成分比を有するペロブスカイト型化合物$(BaSrPbCa)TiO_3$:La,Mn,Si となるように分取した後、アンモニアで pH を 8 として原料を完全に溶解させた。この水溶液を冷凍庫で凍結させてから真空凍結乾燥機により水分を除去して前駆体を作製した。

### ２．３．焼結体の作製

２．２．で得た前駆体を大気中で 750 ℃、 2 h か焼して有機物をほぼ除去した。これにバインダーであるポリビニルブチラール（エタノールで溶解）をか焼粉に対し 2 %(w/w)添加して乾燥させたものを 50 ～ 200 μm に分級した（なお、この状態が商業的な PTC サーミスタ用混合粉末となるものである）。

この混合粉末約 35 mg を直径 5 mm の金型で一軸加圧成形し、大気中で 1320 ℃、1 h 焼結して PTC サーミスタの焼結体を作製した。

### ２．４．電気的特性

２．３．で得た円盤状の PTC サーミスタ焼結体の上下面に In-Ga 金属を塗布し電極を形成した。恒温槽とデジタルマルチメータを用いて温度に対する電気抵抗の変化を調べた。

### ２．５．比較試料

水溶性前駆体法との性能比較のため、固相法による試料も作製した。原料には市販の $BaTiO_3$（水熱法）、$SrTiO_3$（水熱法）、$PbCO_3 2Pb(OH)_2$,$CaCO_3$,$TiO_2$,$SiO_2$ を用い、La,Mn については２．１．２．に示す水溶液を用いた。

これらを所定の成分比で分取し、バインダーであるポリビニルブチラールとともにポットミルで湿式混合し、乾燥・分級したものを混合粉末とした。

## ３．結果と考察

### ３．１．Si添加量と室温での電気抵抗

Si 添加量と室温（25℃）での電気抵抗の関係を図１に示す。Si は焼結助剤として機能し、最適な添加量で室温での電気抵抗が下がることが知られている。本系においては水溶性前駆体法と固相法両方で Si 添加量が 0.5 %（w/w）の時に最も低い電気抵抗を示した。この結果は水溶性前駆体法は Si の分散において固相法を上回るようなメリットはないが、前駆体形成時に Si が遍在して電気抵抗に悪影響を及ぼすようなデメリットも無いということを示唆している。なお、水溶性前駆体法と固相法で La の添加量が異なっているが、これは作製法の違いにより最適な添加量が異なるためである。室温抵抗については水溶性前駆体法で La が約 0.4 mol%、固相法で La が約 0.2 mol %の時に最も低くなることから本実験ではこの添加量を用いた。

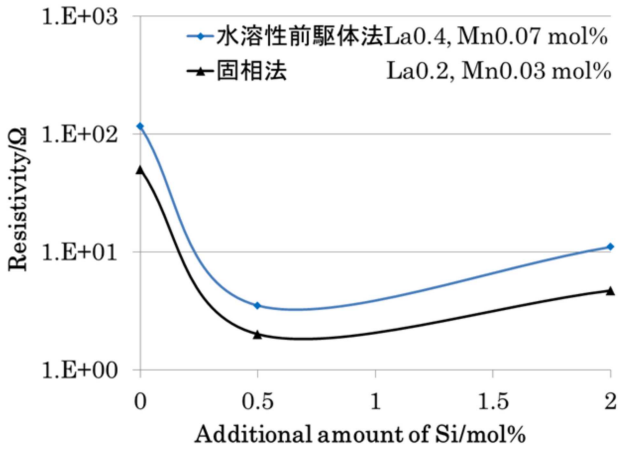



図１　Si添加量と室温（25℃）での電気抵抗

### ３．２．Mn添加量とPTC特性

室温から 200 ℃付近まで温度を変化させた時の電気抵抗を図２に示す。水溶性前駆体法で Mn の添加量を 0 mol %から 0.03 mol%に増やした場合、室温での電気抵抗が低くなり、キュリー温度付近での急激な電気抵抗増加（ジャンプ特性）も良くなった。しかし添加量を 0.03 mol%から 0.06 mol%まで増やした場合、室温での電気抵抗は高くなり、ジャンプ特性はやや悪化した。また、Mn の添加量が 0.03 mol %の場合の水溶性前駆体法と固相法の電気抵抗を比較すると、ジャンプ特性の点で水溶性前駆体法が劣っていることがわかった。

大気中で焼結した PTC サーミスタでは、Mn を添加することで室温での電気抵抗は高くなるものの、ジャンプ特性が良くなることが知られている。また、Park らにより Mn は粒界に偏析することが報告されている[4]。水溶性前駆体法で Mn を添加してジャンプ特性が良くならなかった理由として、前駆体の均一性が良いため、焼結時に Mn の粒界偏析が起こらなかった可能性が考えられる。対策として、か焼後に Mn を添加する方法が考えられるが、仕込時に Mn を添加するのと異なり、プロセス途中での粉末のロスや、か焼粉中に残る炭酸基や水酸基の重量を考慮した Mn の添加を行う必要があり簡単ではない。

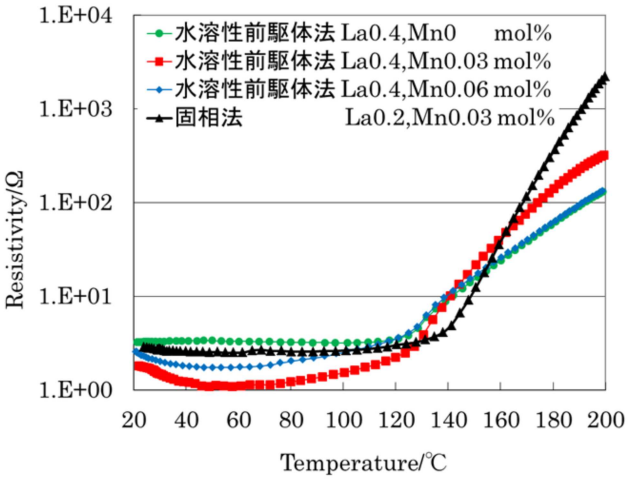



図２　温度と電気抵抗

## ４．結言

所定の成分比の $(BaSrPbCa)TiO_3$:La,Mn,Si 水溶性前駆体を作製し、これを焼結することにより PTC サーミスタを作製した。これにより以下の知見を得た。

Ⅰ．既往の水溶性 Ti,Si 化合物の技術と Ba,Sr,Pb,Ca の酢酸塩、La,Mn の硝酸塩を組み合せることにより均一な前駆体を得られることがわかった。

Ⅱ．焼結体の室温での電気抵抗は固相法かそれ以下の値が得られるものの、ジャンプ特性は固相法に及ばなかった。これは Mn 添加によるジャンプ特性改善の効果が出なかったことによるものである。

### 参考文献


1）K.Iwase et al. *J.Sol-Gel.Sci.Technol*. 2012, **64**, p.170-177.
2）M.Kakihana et al. *Inorg.Chem*. 2001,**40**, p.891-894.
3）N.Takahashi et al. *J.Ceram.Soc.Jpn*. 2009, **117**, p.313-315.
4）M.B.Park et al. *J.Am.Ceram.Soc*. 2001, **84**, p.1937-1944.

# 組織解析を用いた窒素吸収処理品に求められる機能特性の高度化

## －２種類のフェライト系ステンレス鋼における窒素吸収挙動の組織解析－

Upgrading Material Properties Required for Nitrogen Absorption Treatment Products using Microstructural Analysis

- Microstructural Analysis of Nitrogen Absorption Behavior on Two Ferritic Stainless Steels-

技術開発部工業材料科　光井啓　鈴木雅千　小柴佳子
林精器製造株式会社　　大沼孝　渡部隆司　佐藤幸伸　深山茂

現在、ステンレス製腕時計メーカーでは、腕に接触するケース裏面に生じる錆や携帯中に生じる傷で美観を損なうという課題を抱えている。一方、医療機器メーカーにおいても、硬度を必要とする部品に用いたマルテンサイト系ステンレス鋼部品の溶接部や微細傷周辺の滅菌処理による錆・シミや、取扱いによるキズ・変形が課題となっている。本研究では、鋼材の流通性を考慮した、窒素吸収処理による低コスト型高強度・高耐食性ニッケルフリーステンレス鋼の開発に取り組み、実製品への適用を想定した材料選定および熱処理条件の適正化を行い、製品化に有望な材質および処理条件を選定することができた。

Key　words：窒素吸収処理、ニッケルフリー高窒素ステンレス鋼、腕時計部品、医療用工具

## １．緒言

腕時計ケースに使用される材料は、耐食性を重視した SUS316L 等のオーステナイト系ステンレス鋼が主流となっているが、ニッケルによる金属アレルギーや腕に接触するケース裏面に生じる錆、携帯中に生じる傷で美観を損なうという課題を抱えている。また、医療機器メーカーにおいても、硬度を必要とする部品に用いたマルテンサイト系ステンレス鋼部品の溶接部や微細傷周辺の滅菌処理による錆・シミや、取扱いによるキズ・変形が課題となっている。いずれの分野においても、高硬度で高耐食性を有するステンレス鋼に対するニーズが高まっていると言える。

近年、Ni の代わりに窒素を 1 %以上固溶させることにより従来のオーステナイト系ステンレス鋼に比べて高強度・高耐食性を有することが明らかになり Ni フリー高窒素ステンレス鋼の開発が注目されている。窒素を固溶させる方法としては窒素ガス加圧式エレクトロスラグ再溶解(ESR)法[1, 2]や固相窒素吸収処理[3-5]、メカニカルアロイング(MA)法[6]などがある。

現在、ハイテクプラザと林精器製造（株）は固相窒素吸収処理法に着目し、腕時計部品および医療用工具の研究開発を行っている。固相窒素吸収処理は鋼の表面あるいは全体に対して窒素雰囲気で行う固溶化熱処理であり、その利点は窒素を含む高強度オーステナイト相あるいはマルテンサイト相より加工・成形しやすいフェライト系ステンレス鋼の状態で加工した後に行う２次的な熱処理方法であるという点である。しかし、製品形状と求められる特性、使用するフェライト系ステンレス鋼の成分によって、窒素吸収処理の条件を詳しく検討する必要があり、研究コストと製品化への迅速性に欠けることから、製造プロセスとして実用化するには研究開発プロセスの迅速化が課題であった。

そこで、本研究では、平衡状態図と拡散現象を組み合わせた組織解析手法による低コスト型高強度・高耐食性窒素ステンレス鋼の製品化を試みている。本報告では、２種類のフェライト系ステンレス鋼における窒素吸収挙動の組織解析結果と製品化に有望な材質および処理条件の選定結果を報告する。

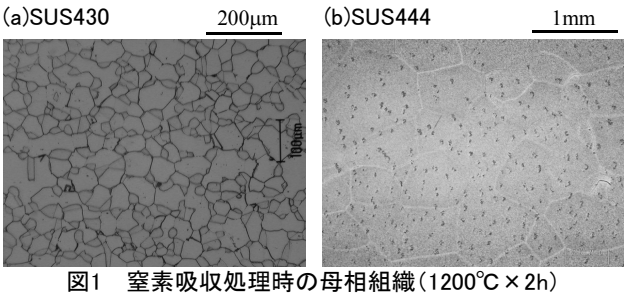



図1　窒素吸収処理時の母相組織（1200℃×2h）
(a)SUS430、(b)SUS444.

## ２．窒素吸収挙動の組織解析

### ２．１．　窒素吸収処理温度における母相組織

本研究では、JIS 規格でフェライト系ステンレス鋼と規定されている SUS430 および SUS444 における窒素吸収挙動の組織解析を行った。図 1 に 1200 ℃× 2h の窒素吸収処理を行った SUS430 および SUS444 の母相組織を示す。SUS430 の母相組織は平均粒径で 25 μ m と微細であるのに対し、SUS444 では約 810 μ m と粗大化していた。ここで SUS430 の母相結晶粒はフェライト（α）相とオーステナイト（γ）相の混相組織であるが、両相合わせた平均粒径を求めた。図 2 に示すように、素材粒の結晶粒径は両鋼種ともほぼ同じであるが、SUS430 は高温長時間熱処理でも素材(未処理)の粒径とほぼ同程度の平均結晶粒径を持っている。一方、SUS444 は昇温過程で著しく粗大化し、等温保持中にはそれ以上粒成長しないという特徴が

ある。

図 3 に両鋼材における熱処理温度に対する母相組織中の各相モル分率の変化を、図 4 に両鋼材の組成を基本とした窒素濃度に対する縦断面計算状態図を示す。SUS430 および SUS444 の組成は代表値として、それぞれ Fe-17%Cr-0.1%C-1%Mn-0.75%Si および Fe-18.5%Cr-2%Mo-0.025%C-1%Mn-1%Si-0.2%Nb を設定した。いずれの鋼種も常温(900 ℃以下)ではα相主体の組織を呈している一方、窒素吸収処理を行う高温域での SUS430 の組織は図 3(a)および 4(a)に示すようにγ相分率が最大 0.4 となり、2 相混相組織となることがわかる。α相は体心立方(BCC)格子の結晶構造を持ち、面心立方(FCC)構造のγ相と比較して原子配列が疎であるため原子の拡散が速く、高温では結晶粒が粗大化しやすい。そのため SUS444 は昇温過程で著しく粗大化したと考えられる。一般的に混相組織は互いに結晶粒粗大化を抑制する効果があるので、SUS430 では昇温時にγ相が析出することで組織が微細化した後、高温長時間の熱処理でも組織が著しい粗大化はなかったと考えられる。

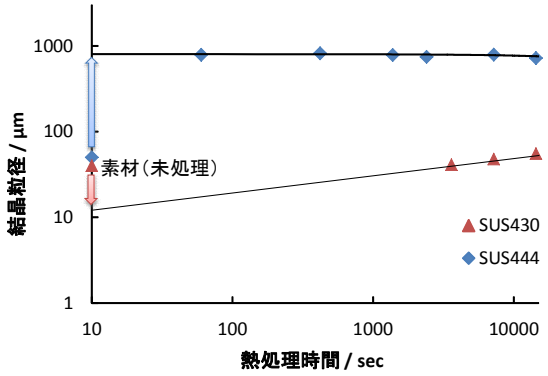



図2 1200℃保持中の母相組織の成長

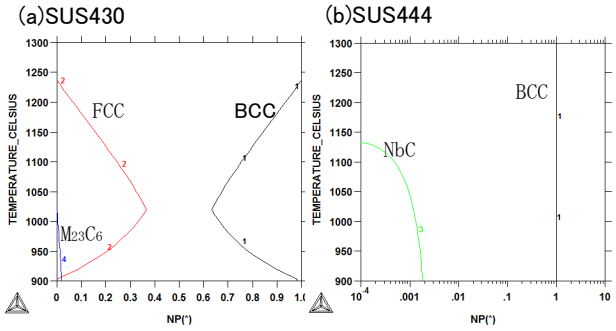



図3 熱処理温度に対する母相組織中の各相のモル分率.(a)SUS430、(b)SUS444.(BCC:フェライト(α)、FCC:オーステナイト(γ)、$M_{23}C_6$、NbC:炭化物)

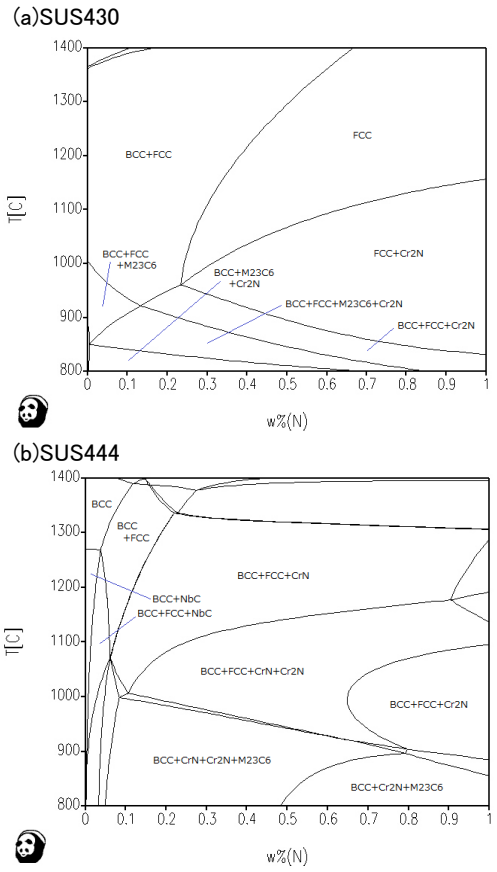



図4 縦断面計算状態図.(a)SUS430、(b)SUS444.

## 2．2．窒素吸収層の成長速度

α相はγ相より窒素の固溶度が小さいため、窒素吸収処理を行うと窒素濃化に伴いα→γ変態が起きる。図 5 に示すような表面層が形成され、これを窒素吸収層と呼ぶ。本研究では、処理温度は 1200 ℃一定とし、種々の雰囲気圧力および処理時間における窒素吸収層の厚さ変化を求めた(図 6)。ここで、SUS430 は母相組織がα＋γの 2 相となるため、窒素吸収層と母相γとの区別がつけられない。SUS430 については表面近傍のα相が確認できない領域を窒素吸収層と判断して厚さを求めている。固相中の窒素原子の平均拡散距離は Fick の第 2 法則より時間の平方根に比例する。横軸に時間の平方根を取ると窒素吸収層厚さは直線関係を示すことから、窒素吸収層の成長は窒素原子の拡散律速現象であることが示唆される。同じ処理条件で比較すると SUS430 の層厚さは SUS444 の約 1.5 倍となる。SUS430 は結晶が微細で粗大化しないため、粒界を介して窒素が内部に拡散しやすい。また、γ相がすでに析出しているためα相分率が小さく、α→γ変態に費やされる窒素量は少なくて済むと考えられる。Thermo-Calc を用いて計算した SUS430 および SUS444

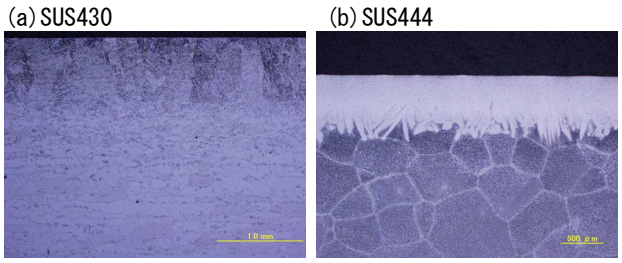



図5 0.4MPa, 1200℃×2hにおける窒素吸収層.
(a)SUS430、(b)SUS444

のα相への窒素固溶量はそれぞれ 0.048%および 0.074 %、γ相への窒素固溶量はそれぞれ 0.290%および 0.651%となり、SUS430 は本質的にγ相に変態しやすい、すなわち窒素吸収層を形成しやすいことが示唆される。また、SUS444 は図 6 において最小２乗法で窒素吸収層厚さを 0 μ m まで外挿すると原点(処理時間=0sec)まで帰着しない。すなわち窒素吸収が始まってから窒素吸収層であるγ相に変態するまでの変態遅れがあると言える。これも、同じくα相の窒素の固溶度が関連しており、γ変態に必要な窒素がα相に固溶するまで核生成が起きないためであると考えられる。

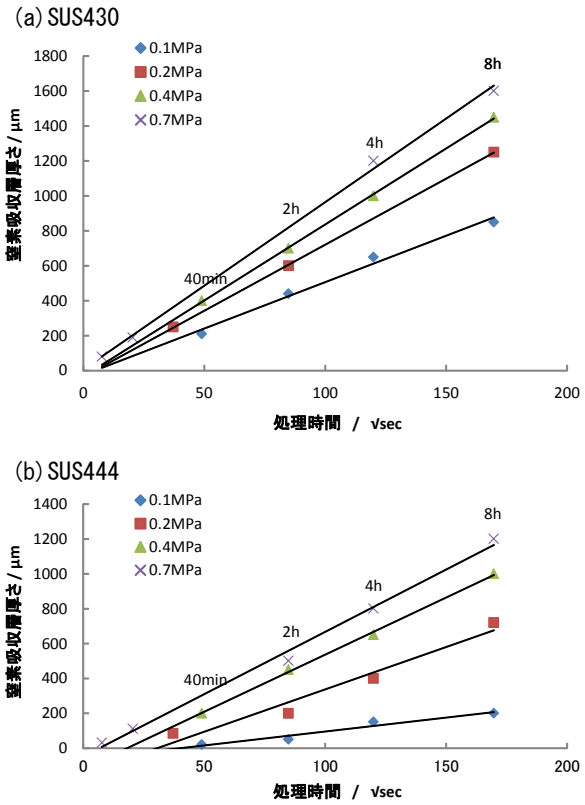



図6 1200℃における窒素吸収層の成長.
(a) SUS430、(b) SUS444

## ３．製品化のための材質および処理条件の選定

本研究では、上述したような組織解析手法を用いて、腕時計部品、医療用工具それぞれに求められる機能特性を把握し、それぞれの用途に合った組織構成とするための材質および窒素吸収処理条件の選定を行った。その結果を表 1 および 2 に示す。

腕時計部品において有望な開発材 2 種のうち A-2 は耐食性も表面硬度も良好なため、H26 年度に試作品での評価を行う予定である。

医療用工具においては、やすりおよびドリルそれぞれ機能特性ニーズを分析し、それらを満足する素材と処理条件の選定を行った。また、現在、試作品での性能テストを行っている段階である。

表1　腕時計部品における材料選定結果

| | SUS316L | 開発材A-1 | 開発材A-2 |
|---|---|---|---|
| Niｱﾚﾙｷﾞｰ | △：Ni含有 | ◎：Niﾌﾘｰ | ◎：Niﾌﾘｰ |
| 硬度 | △：やや軟 | ◎：高硬度 | ○：硬い |
| 耐食性 | ◎：高耐食 | △～○：良 | ◎：高耐食 |
| 材料入手性 | ○：高価 | ◎：安価 | △：流通性 |

表2　医療用工具における材料選定結果

| | SUS420J2 | 開発材B-1 | 開発材B-2 |
|---|---|---|---|
| 硬度 | ◎：高硬度 | ◎：高硬度 | ◎：高硬度 |
| 耐食性 | △：やや悪 | ○：良好 | ○：良好 |
| 靭性 | ◎：良好 | — | 未評価 |
| 適用検討製品 | | やすり | ドリル |

## ４．結言

低コスト型高強度・高耐食性窒素ステンレス鋼の製品化を目的として、平衡状態図と拡散現象を組み合わせた組織解析手法により、製品化に有望な材質および処理条件の選定を行った。

２種類のフェライト系ステンレス鋼における窒素吸収挙動の組織解析を行い、以下の知見を得た。

1) 窒素吸収処理温度において母相組織α＋γ2相となる場合、母相組織の粗大化は著しく抑制される。
2) α→γ変態に費やされる窒素量すなわちγ-α溶解度差が小さいほど窒素吸収層の成長速度は速い。
3) 窒素吸収層の成長は時間の平方根と直線関係を示す。固相中の窒素原子の平均拡散距離は時間の平方根に比例することから、窒素吸収層の成長は窒素原子の拡散律速現象であると考えられる。

以上の知見をもとに、処理条件の適正化を図り、腕時計部品および医療用工具の製品化に有望な材質および処理条件の選定を行った。本年度の研究成果をもとにH26年度は試作品での評価を行う予定である。

## 謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構・復興促進プログラム(マッチング促進)により行われた。

### 参考文献

1) T. Tsuchiyama, H. Ito, K. Kataoka and S. Takaki:

*Metall. Mater. Trans. A*, 34A(2003), 2591.

2) N. Nakamura and S Takaki: *ISIJ Int*., 36(1996), 922.

3) J. Menzel, W. Kirschner and G. Stein: *ISIJ Int*., 36(1996),893.

4) G. Balachandran, M. L. Bhatia, N. B. Ballal and P. K. Rao: *ISIJ Int*., 40(2000), 478.

5) D. Kuroda, T. Hanawa, T. Hibaru, S. Kuroda and M. Kobayashi: *Mater. Trans*., 44(2003), 1577.

6) T. Tsuchiyama, H. Uchida, K. Kataoka and S. Takaki: *ISIJ Int.*, 42(2002), 1438.

# 生体分子のセンシングデバイスへ応用可能なマイクロ流路用金型の作製技術開発（第２報）

Development of micro-patterned molds used in microfluidic chips for measurement of biomolecules


技術開発部生産・加工科　安齋弘樹　本田和夫　小野裕道
技術開発部工業材料科　宇津木隆宏
株式会社エム・ティ・アイ　元井泰二郎　元井広樹　齊藤伸寿　志賀直子
独立行政法人産業技術総合研究所　鳥村政基　丹羽修　黒澤茂　栗田僚二
加藤大　愛澤秀信　谷英典



ゴム、および樹脂製マイクロ流路デバイスの作製には金型が必要であるが、研究段階ではレジスト型、量産段階では電鋳型と各段階毎に使用される金型が異なっているため、各段階毎に金型の評価が必要となる。そこで、本研究では金型基板上に直接フォトリソグラフィとめっきを組合せることで、研究段階から量産段階まで使用可能な、安価で耐久性を有する金型の作製技術の開発を行った。今年度は、複雑形状を持つ金型の作製技術開発、および試作したマイクロ流路デバイスの評価を行った。その結果、□20μm、アスペクト比2程度の穴を有する構造体が作製でき、試作したデバイスも機能を満たすことが分かった。



Key　words:マイクロ流路デバイス、金型、めっきの密着性


## １．緒言

マイクロ流路デバイスは、環境計測やバイオ分野において、従来ビーカー等で行っていた化学反応や化学分析を、幅数十から数百μm、深さ数十μm程度の溝を用いて行うもので、反応時間の短縮や溶液量が少なくて済むといったメリットがある。素材としては、研究段階では、ガラス、シリコン、ポリジメチルシロキサン（以下、PDMS）、樹脂等が用いられ、量産段階では、PDMS、樹脂等が多く用いられる。ここで、PDMSや樹脂で作製するには金型が必要となるが、研究段階では安価なレジスト型が、量産段階では耐久性を有する電鋳型が用いられる。各段階毎に異なる金型が用いられるため、研究から試作・量産に移行する際に金型の仕様変更が必要となり、製品化が遅れる要因の一つとなっている。

そこで研究では、研究から量産まで対応可能な安価、かつ耐久性を有する金型の作製技術の開発を行った。本報では、複雑形状を有する金型作製、および作製した金型の評価としてマイクロ流路デバイスの作製を行ったので報告する。

## ２．実験内容

### ２．１．　複雑形状を有する金型の作製

本研究で目標としているマイクロ化学チップを作製するためには、広い面積に幅数十μm、高さ数十μmの凸形状を複数有する金型が必要となる。本研究では、図１に示すように、金属基板上に直接フォトリソグラフィとめっきを行うことで、幅数十μm、高さ数十μmの微細形状を作製する方法を検討した。これは、フォトリソグラフィにより金型基板上にレジストをパターニングし、その後電気めっきを行う方法である。

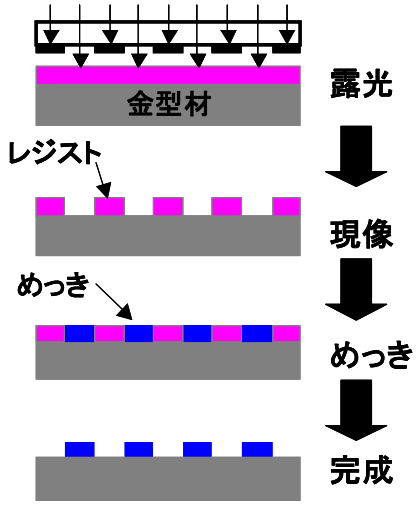



図１　本研究の作製法

始めに、フォトリソグラフィにより金型基板上にレジストをパターニングし、その後電気めっきを行う。レジストは絶縁物のため、露出した金属面にのみ、金属が析出し形状が作製される。この方法では、金型基板に直接めっきを行うため、短時間での作製が可能である。フォトレジストは厚膜形成が可能な化薬マイクロケム（株）のＳＵ－８を用い、ニッケルめっきにより数十μmの膜厚を形成した。めっき条件については前報で検討しており、この結果を基にめっき条件を最適化している。

本報では、複雑形状を有する金型として、□20μm、および□50μmの角穴を各2000個以上配置した構造体の作製を行った。穴を有する金型を作製するには、金属基板上にレジストで凸形状を作製する必要があるが、□20μm、□50μmのレジストの柱（孤立形状）は剥離しやすいため、金属基板上に密着層を形成後に、ＳＵ

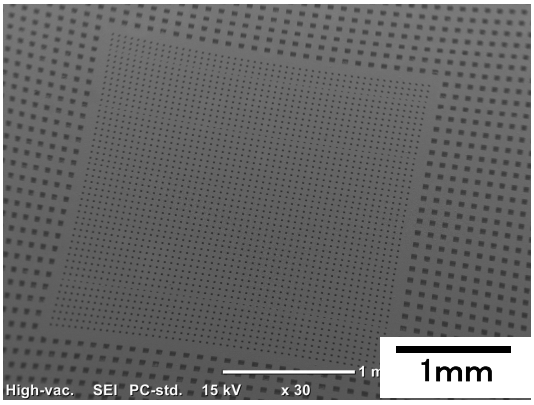



図２　試作した金型

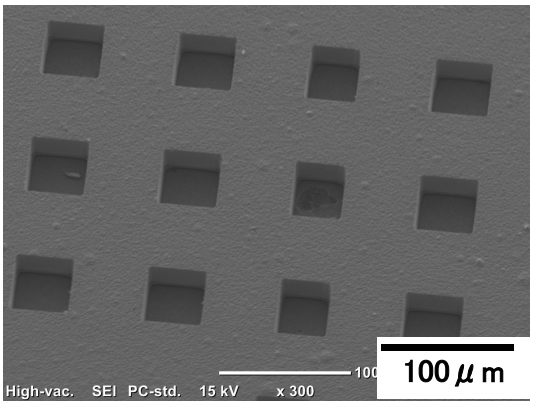



図３　試作した金型（□50μm部の拡大）

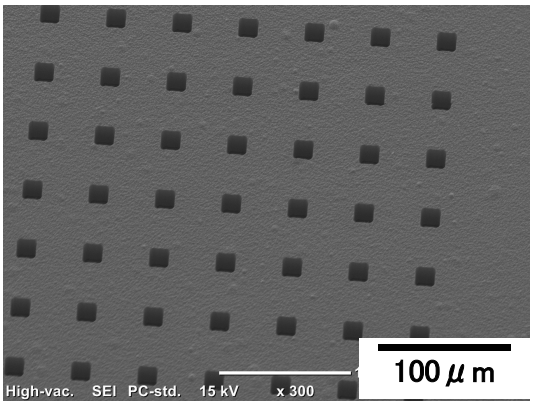



図４　試作した金型（□20μm部の拡大）

－８をパターニングし、電気めっきを行った（現在も研究を継続中であり、レジスト条件、およびめっき条件についての説明は控える）。

その結果、□20μmの角穴を2500個、□50μmの角穴を3680個配置した金型を作製できた。金型のＳＥＭ写真を図２から図４に示す。穴の深さは30μmから50μmで、穴の塞がり等も生じておらず問題なく作製することができた。

### ２．２．マイクロ流路デバイスの評価

次に、薬剤に含まれる生体夾雑物質の濃度管理を行う生体分子センサについて検討を行った。生体分子の検出方法は、マイクロ流路内に生体分子を捕捉可能な直径100μm程度の微粒子を堰き止め、この微粒子に生体分子を捕捉後、さらに酵素修飾した生体分子認識分子を微粒子上に捕捉し、最終的に基質を導入した際に生成される生成物の量を電気化学測定により測定することにより、生体分子の濃度を測定する方法である。そのため作製するマイクロ流路デバイスは、電気化学測定に用いる電極を流路内に配置した形状であることに加え、流路内に直径100μm程度の微粒子を充填可能な堰き止め構造が必要となる。

今回は、堰き止め部分の深さを150μm程度、検出部の深さを40μm程度の段差付き流路とし、流路形状を検討することで、微粒子を均一に充填することを目的とし、PDMSによりデバイスを試作した。試作したデバイスの外観を図５に示す。流路形状を検討することで図６に示すように微粒子を均一に充填することが出来た。

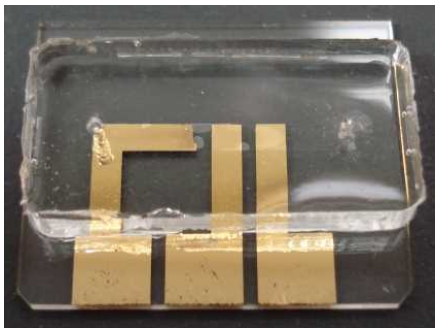


図５　試作したデバイスの外観

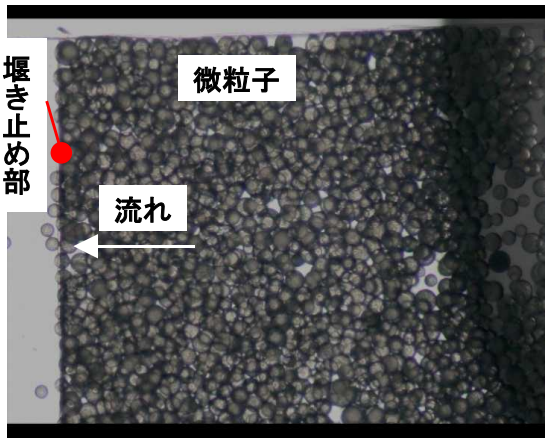



図６　堰き止め部の拡大図（形状の最適化後）

## ３．結言

本研究では、研究から量産まで対応可能な安価、かつ耐久性を有するマイクロ流路金型の作製技術の開発を行った。本報では、複雑形状の作製方法の検討、および作製したマイクロ流路デバイスの評価を行い、以下の結果を得ることが出来た。

（１）密着層、およびめっき条件を検討することで、□20μm、アスペクト比2程度の角穴を2500個配置した構造体を作製することが可能となった。

（2）段差付マイクロ流路デバイスの形状を最適化することで、直径100μmの微粒子を均一に充填することが可能となった。

以上の結果をもとに、今後は試作したマイクロ流路デバイスを用いたタンパク質の濃度測定等、デバイスの開発にも取り組む予定である。

本研究は（独）科学技術振興機構復興促進プログラム（マッチング促進）により実施した。

# マルチスケール計算材料科学の応用による
# 鋳造製品の高強度・高じん化組織制御技術の確立（第 1 報）

Establishment of Toughening Method of Casting Products by Multi-Scale Computational Materials Science (1st Report)

技術開発部工業材料科　工藤弘行　光井啓　五十嵐雄大　菅野雄大
株式会社会津工場　吉田幸男　酒井優　梁取典也　渡部哲夫

鋳造製品の弱点である強度・じん性の弱点を克服するため、予め最適な組織を特定し、制御の方針を明確化することを特徴とする高強度・高じん化組織制御手法の提案を行う。このために必要な要素技術として、①マルチスケール的な観点の導入による強度試験の高度化、②組織観察、硬さ測定からの情報をフィードバックしたミクロ組織モデルの作成、③均質化法を用いた弾塑性有限要素解析による機械的特性予測について検討した。

Key words:CAE、マルチスケール、計算材料科学、ミクロ組織制御、機械特性予測、強度信頼性

## １．緒言

自動車分野では、燃費と衝突安全性を両立するために車体フレームなどの構造部材でプレス加工品の高強度化が順調に進んでいる。これに対し、鋳造品は強度、じん性が低いことから用途拡大が進んでいない。しかし、プレス加工に対する鋳造の優位点である形状の設計自由度が高く、低コストである点を生かしつつ、強度・じん性を現状より高めることができれば、部品全体の重量・強度・コストでプレス加工品を上回り、一部の製品の代替が狙えると期待されている。

鋳造品の強度信頼性に関する課題としては、①実製品と異なるテストピースにより強度試験が行われる場合が多く、実製品の実体強度が不明確なまま強度設計されるという「強度評価・強度設計」に関する課題と、②組織と強度の相関性が曖昧なまま経験的な理解にとどまり、試行錯誤的な製造手法に頼らざるを得ない「組織制御」に関する課題の２つが挙げられる。

上記課題に対応可能な技術シーズとしてハイテクプラザでは、材料科学分野における「マルチスケール CAE」技術に注目している。この技術は、シミュレーション技術を中心に複数スケールの情報を連携する技術である。材料科学分野では、近年、中性子回折や EBSD など分析技術の向上や、フェーズフィールド法、結晶塑性解析などシミュレーション技術の進歩、コンピュータの計算能力の向上により、マルチスケール CAE 技術の実用化の兆しが見えつつある。

本研究では、（１）製品～テストピース～ミクロ組織など複数のスケールの強度評価を関連付ける「マルチスケール強度試験」など強度試験の高度化と（２）ミクロ組織の変形挙動とマクロな強度特性との関係性をシミュレーションで明らかにする「計算材料科学」を発展的に融合させることで、組織制御の方向性を明確にすることにより、鋳造品の低コスト・高強度・高じん化を実現することを目標とする。

25 年度は、光学式非接触ひずみ測定の利用検討や、ミクロ組織モデルによる特性予測を実施した。

本研究提案は、ハイテクプラザが運営する研究会活動と一体の可能性研究として実施された成長産業基盤技術高度化支援事業「マルチスケール CAE による製品開発手法の確立」の成果として立案されたものである。独立行政法人科学技術振興機構（略称 JST）の研究成果最適展開支援プログラム A-STEP ハイリスク挑戦タイプ（復興促進型）25 年度第 2 回公募の採択を受け、25 ～ 26 年度にかけて研究を行う予定である。

## ２．試験方法および評価手法

### ２．１．　鋳造分野における要素技術の整理

図１に別途実施された研究「マルチスケール CAE による製品開発手法の確立」で調査した鋳造分野における要素技術について示し、各手法の概要や近年の技術動向などを記載する。本研究ではこの中から３つの手法を採用した提案を行っている。

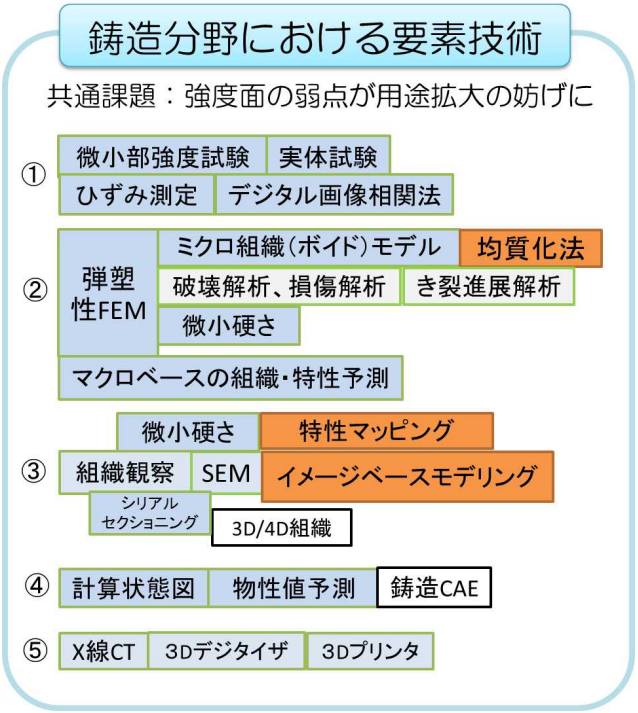



図１　鋳造製品に適用可能な要素技術と連携手法

①強度試験の高度化

鋳造製品は部位ごとに組織、強度が異なり、連続的に変化する場合が多く、妥当な強度設計を行うには、実製品の一部から採取した実体試験が望まれる。小型製品の場合、直径あるいは板厚が 5 ㎜以下の微小部強度試験が必要となるが、引張試験が困難となるため曲げ試験が有望である。ひずみ測定に関しても、デジタル画像相関法による非接触ひずみ測定が必要となる。

②均質化法を用いた弾塑性有限要素解析による機械特性予測

鋳造組織における強度発現のメカニズムは、後付けの解説にとどまり、最適なミクロ組織は不明である。均質化を用いた CAE 解析により、ミクロ組織・特性を基に材料全体、平均としてのマクロ特性を予測することができ、最適な組織を明確にした上で組織制御が可能となる。均質化法は、FRP 材料の弾性解析に対する利用が中心であったが、近年、弾塑性解析に対応する汎用 CAE ソフトが市販されており、金属材料の塑性変形挙動の予測への応用が期待される。さらに、要素単位での破壊や損傷の判定を行う破壊解析・損傷解析、あるいは、き裂進展解析などへ発展することで、弾性変形→塑性変形→破壊に至る全過程の挙動を高精度で予測する解析が現実的になってきている。

③ミクロ組織モデルの作成

前項の特性予測解析の成否を握るのはその準備段階であるミクロ組織モデル作成であるため、 組織観察で得られた写真などをそのままモデル化する「イメージベース・モデリング」が有望である。また、組織観察と研磨を交互に繰り返すシリアル・セクショニングにより 3 次元組織を得る応用も広がっている。

④熱力学計算に基づく鋳造 CAE の高度化

鋳造では、凝固や相変態という過程を経て組織が形成される。近年、これら形成される組織の安定性を、熱力学計算により予測する計算状態図や物性値予測技術が広がっている。鋳造材は多くの元素が含まれるため、組織形成過程は元素組成の影響が強い。これらの技術で計算された物性値を用いた鋳造 CAE では、高精度な凝固解析や湯流れ解析を実現した上に、ミクロ組織予測や特性予測解析を行うことも可能である。

⑤次世代デジタルエンジニアリング技術の活用

経済産業省では、3D プリンタによる砂型製造を行うことで超複雑形状の鋳造品を効率良く生産する「超精密三次元造形システム技術開発プロジェクト」や、X 線 CT 技術により大型製品の形状測定を行う「次世代３次元内外計測」など、鋳造分野での利用が有望視される技術に関する事業を実施している。

## ２．２．強度試験の高度化（マルチスケール強度試験と非接触ひずみ測定）

本研究では、前項①で記載した強度試験の高度化として、マルチスケール強度試験を行う。部品製造を行う企業では製品スケールの破壊試験を行うのは困難であるため、図２に示すように、製品の破壊危険位置から微小試験片を採取して試験する「微小部強度試験」が有効である。この考えを発展させれば、製品としての強度は、特定部位のミクロ組織の良し悪しによって左右されることが明確になり、最終的に、ミクロ組織による強度保証を実現できると考える。

これらの強度評価に有効と思われるのが CCD カメラで得られたデジタル画像を基に、「デジタル画像相関法」と呼ばれる画像処理技術による非接触ひずみ測定である。本報告では、測定例として、JIS 4 号試験片の引張試験に対する測定結果を記載する。

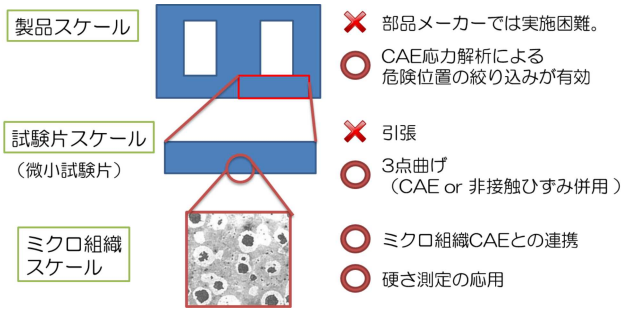



図2　マルチスケール強度試験の概念図

## ２．３．FCDミクロ組織モデルの作成

③ミクロ組織モデルの作成例として、図３にフェライトとパーライトが混在するブルズアイと呼ばれる球状黒鉛鋳鉄（FCD）組織に対するモデリング例を示す。この例では、FCD 組織を球状黒鉛、フェライト、パーライトの 3 材料からなる複合材料として扱う。

ミクロ組織の変形特性の決定に関しては、微小硬さ測定を併用する手法を立案し「硬さ測定に基づく特性マッピング」手法と命名した。本手法では各組織、各地点で測定された硬さの数値に応じて、その部位の材料変形特性のカーブを設定するものである。測定原理から、硬さは耐力と極めて高い相関性があり、解析精度の向上が期待できる。今後、実組織を対象とした引張試験、硬さ測定、CAE 解析により、手法の妥当性を検証する予定である。

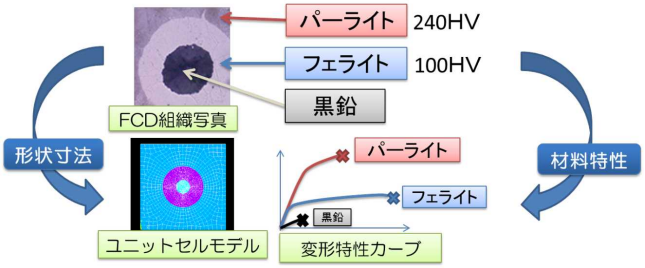



図3　FCD組織に対するモデル作成手法の概念図

### ２．４．ミクロ組織モデル解析による特性予測

図４に②均質化法を用いた弾塑性有限要素解析による機械的特性予測の概念図を示す。モデル全体に変形を与えることでマクロ特性（応力ーひずみ曲線）が得られ、耐力点の予測が可能となる。一方、各地点のミクロ変形挙動も同時に算出可能である。各地点の変形はそれぞれの材料に応じた応力ーひずみ曲線（図中、パーライトは赤、フェライトは青）に沿って進行する。組織中のある点で、ミクロ特性の限界の伸びに達するとその部位で破壊が生じたと判定でき、計算を停止し、その時点のマクロ特性グラフから組織全体としての強度や破断伸びを予測する仕組みである。

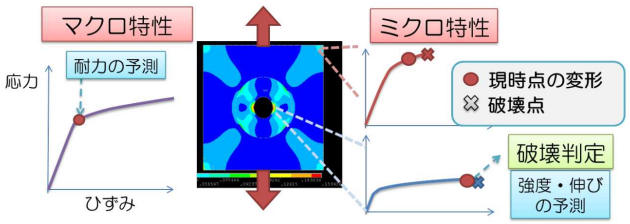



図4　ミクロ組織モデル解析による特性予測手法の概念図

### ２．５．ミクロ組織モデルを活用した組織制御

図５にミクロ組織解析モデルを活用した組織制御の例を示す。溶湯の元素組成が決まっている場合、約3.5%の全炭素量の内、黒鉛と基地組織への分配比率を想定することで、例えば、FCD 組織を基地組織がS60C 相当の材料で第 2 相が体積含有率 10%の黒鉛である複合材料として理想化して理解することができる。鋳鉄の破壊は、鋳造欠陥など局部的な弱点の存在により、欠陥が無い組織が持つ理想限界の前に破断することが知られる。本モデルは、欠陥の無い理想化された組織の特性に対応する。

鋳鉄における熱処理では炭素の拡散により黒鉛と基地組織との間で炭素の移動が生じるが、本モデルでは、炭素拡散による影響を、黒鉛の体積含有率、黒鉛直径の変化や基地組織の平均元素組成の変化、黒鉛周辺の基地組織の変化として考慮することが可能である。基地組織は炭素鋼に近い組成と見られるが、強度特性に関する既存のデータベース、知見が豊富であるため、それらを活用することにより、効率的に特性向上に繋がる組織制御を立案、探索することが期待できる。

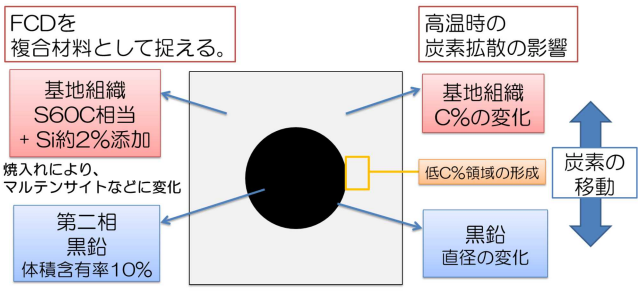



図5 ミクロ組織モデルにおける熱処理時の組織変化の考慮

## ３．試験結果と考察

### ３．１．　非接触ひずみ測定の利用例

従来技術のひずみゲージ測定が点情報、伸び計による測定が例えば 50 ㎜区間の平均値情報の測定なのに対し、非接触ひずみ測定では、広範囲の情報、分布情報を得ることができる点が利点である。

図６に引張試験時のひずみ測定例として、全伸び3%時点と破断直後の結果を示した。図中のカラーマップはひずみ測定結果であり、グラフは試験片中心線上のひずみ分布を示したものである。全伸び 3%の時点では、試験片直線部は一様なひずみ分布であるが、途中から一部分のみ、ひずみが増大し、その部位が破断する過程を確認することができた。

JIS に規定される破断伸びは試験前後の試験片の 50 ㎜区間の長さの変化により算出する（この例では 8 %）。鋳造材の破断伸びは、ばらつきが大きいが、これは破断位置の影響によるものである。破断部近傍のひずみが大きいため、この領域が標点間に完全に含まれるかどうかで破断伸びは大きく変動する。

これに対し、我々が提案する非接触ひずみ測定による手法は、破断位置によらず破壊点での限界ひずみを評価する（この例では、約 12 %）。本手法では破断位置による影響を低減できるだけでなく、破壊の発生に関して、より本質的な強度評価を実現し強度試験を高度化することが期待される。本研究では、26 年度に非接触ひずみ測定システムを導入予定である。

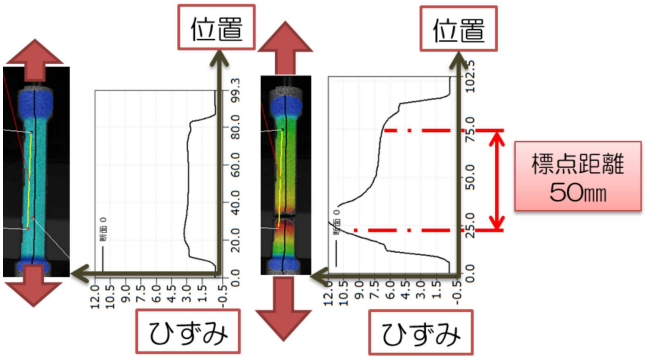



図6　引張試験に対する非接触ひずみ測定結果
（左）伸び3%時　（右）破断直後

### ３．２．　FCDミクロ組織モデル解析よる計算結果

本項目では FCD を対象とする 3 次元解析の例を報告する。FCD では黒鉛が球形状であるため 2 次元解析ではなく、3 次元解析の必要性が高い。図 7 に、黒鉛直径を 30 μ m、基地組織がオールフェライトの場合の解析モデルを示す。解析モデルは対称性を考慮し、ユニットセルの 1/8 部分を対象とした。一般的な FCD 材料では黒鉛の体積含有率（以下、黒鉛体積率）は約 10 %であることが知られる。黒鉛体積率の影響を調べるため、体積率 8、10、12 %のモデルに対し解析を行った。対称面と反対側の面は平行を保つ境界条件と

し、Z 軸方向（紙面上下方向）に全ひずみ 5%まで強制変位として変形を与えた。

この結果、図７（右）相当塑性ひずみ分布図に示す通り、XY 平面上の黒鉛と基地組織の境界にて応力（ひずみ）集中部(塑性ひずみ 8%)、その上部の低ひずみ領域（塑性ひずみ 0%）、さらに原点の対角上にも高ひずみ領域が形成されるなど、不均一なひずみ分布を持つことが確認できた。破壊は、局所的に過大な変形が生じた部位をきっかけに進行するため、このような不均一なひずみ分布の把握は、強度発現や破壊メカニズムの解明のために極めて重要である。

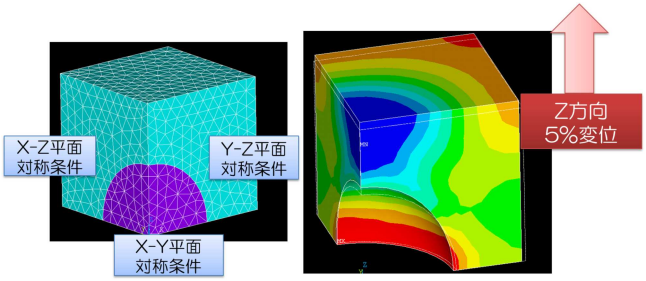



図7（左）FCD1/8モデル（右）相当塑性ひずみ分布

次に、図８に黒鉛体積率を変化させた場合の応力-ひずみ曲線を、表２に曲線から読み取れるヤング率、0.2 %耐力点、加工硬化率を示す。加工硬化率は、全ひずみ 2%から 5%の区間の相当応力増分と相当塑性ひずみ増分の比率により求めた。表１には黒鉛率が 8%から 12%まで変化する場合の各パラメータの変動幅と 10%の値を基準とする変動率も併せて記載した。この結果、黒鉛体積率が減ると、全てのパラメータが増加することが分かったが、加工硬化率は、他の２つに比べて変化の幅が小さい。

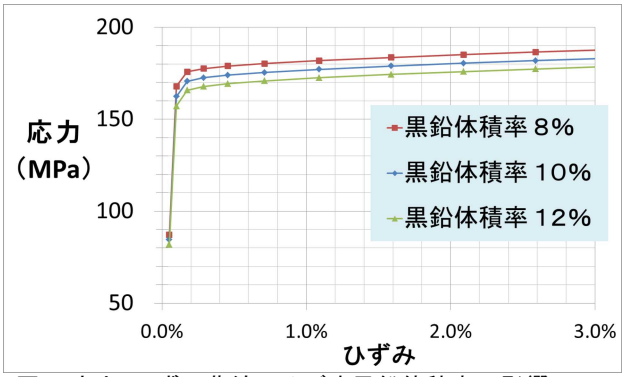



図8 応力-ひずみ曲線に及ぼす黒鉛体積率の影響

表１　変形特性に及ぼす黒鉛体積率の影響

| 黒鉛体積率 | ヤング率（GPa） | 0.2%耐力（MPa） | 加工硬化率（MPa） |
|---|---|---|---|
| 8% | 174.5 | 177.7 | 254.7 |
| 10% | 169.0 | 172.7 | 252.5 |
| 12% | 163.7 | 167.9 | 248.6 |
| 変動幅 | 10.8 | 9.8 | 6.2 |
| 変動率 | 6.4% | 5.6% | 2.4% |

塑性変形がある程度進むと、ヤング率の影響はほぼ無くなるため、変形挙動は 0.2%耐力の影響が支配的になると見られる。これを確認するため、図９に各黒鉛体積率において、同一のマクロ平均応力(183MPa)に対するひずみ分布を示した。この結果、黒鉛体積率、あるいは 0.2%耐力の変化は、塑性変形の進行に大きく影響を与えることが確認できた。

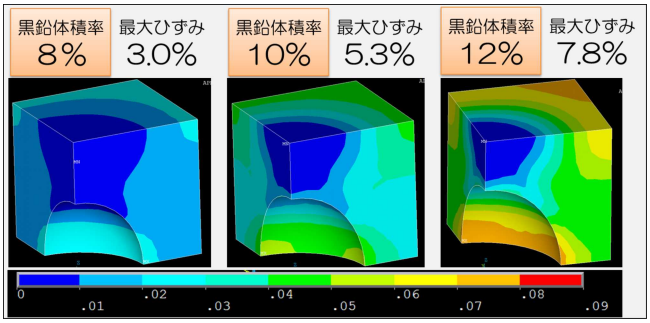



図9 黒鉛体積率が塑性変形の進行に及ぼす影響
（同一のマクロ平均応力に対する相当塑性ひずみ分布）

このようにミクロ組織モデルに対する CAE 解析を行うことで、ミクロ組織スケールでの変形の進行の様子を定量的に把握することができる。これらの結果と実在組織のミクロ組織に対する分析結果を照合することで、強度発現のメカニズムを明らかにし、強度向上を実現する最適なミクロ組織を判断することが期待できる。このためには、CAE の解析精度が課題になるが、本研究では、ミクロ組織に対してデジタル画像相関法を適用したミクロ組織スケールでのひずみ測定も検討しており、解析結果の妥当性検証を行う予定である。

## ４．結言

本研究では、鋳造品の低コスト・高強度・高じん化を目標とする。25 年度は、主に各要素技術の適用方法について検討を行った。26 年度は、これらの技術を実際の鋳造製品に適用していく予定である。

(1) 鋳造分野の共通課題を整理し、その解決に有効な要素技術の利活用手法の提案を行った。

(2) 非接触ひずみ測定を利用することで、引張試験時の局部伸びや、曲げ試験時の破断伸びが評価可能であること、破断伸びの評価において、ばらつきの低減が期待できることを確認した。

(3) FCDミクロ組織モデルを用いた強度特性予測により、ミクロ組織が材料全体のマクロ特性に与える影響を定量化することが可能となった。

# シートベルトのセンサ化による運転者挙動解析

The Motion Analysis of the driver by using Sensors installed in the Seatbelt

技術開発部生産・加工科　浜尾和秀

シートベルトに小型の角速度センサを設置し、運転中のぼんやり時に運転者がする動作（首こっくり、首振り）をセンサから得られる時系列信号から分類推定の検討を行った。方法は、時系列信号を分割し動作特徴量として教師あり機械学習（SVM、Real AdaBoost、Random Forest）によって分類推定し、分類の可能性を示した。動作毎の動的時間伸縮法による DTW 距離を計算し、DTW 距離から動作分類可能であることを示した。センサデータを、インターネットを介しデータベースに集約する環境を構築した。

Key words:機械学習、SVM、Real AdaBoost、Random Forest、DTW、ビッグデータ、シートベルトセンサ

## １．緒言

2013 年版「交通安全白書」[1]によると、交通事故による死亡者数は 12 年連続で減少した。死亡者数の減少は、シートベルトの着用率の向上や交通安全思想の普及徹底などが要因と報告している。

しかし、交通事故原因の内訳では、漫然運転が 16.3%(699 件)[2]と一番多い原因となっており、交通安全に対する思想面だけでなく、車両から運転者への物理的な安全運転に係る補助が必要と考えられる。漫然運転とは、考え事をしながらの運転、ぼんやりしながらの運転のことを言う。

運転者のモニタリングには、シートベルトに設置した空気流センサを用い、一定時間毎（10 秒毎）に試行動作を行って得られる体圧情報から抽出した動作特徴量から、パターン認識手法により運転者の運転姿勢推定を行う方法 [3]が提案されている。他には、赤外線カメラによる運転者眼画像から運転者の状態推定を行う方法、運転者の心拍を取得して運転者の状態推定を行う方法が提案されている。時系列波形の解析手法では、時系列波形から固定窓を滑走させることにより部分系列を多数生成し、k-means 等でクラスタリングを行いパターン抽出する、部分時系列クラスタリング(STSC)手法 [4]が提案されている。

本稿は、漫然運転の中のぼんやりしながらの運転を招く要因の一つである、疲労や睡眠不足による覚醒度低下（居眠り、ぼんやり）に注目し、その動作をシートベルトに設置した角速度センサの出力値から、機械学習及び動的時間伸縮法による検出を検討した。

## ２．運転者挙動データの取得

### ２．１．　シートベルトのセンサ化

運転者の動作特徴を取得するために、運転動作を妨げず計測用に運転者に特別な拘束や侵襲をしないセンシングが必要と考えられる。そこで、運転時は必ず着用するシートベルトに、小型の 3 軸角速度センサを図１に示す各部位に、シートベルトの長手方向に Y 軸が向く方向(B、C)及び X 軸が向く方向(A)にそれぞれ設置し、運転者動作時の特徴を時系列データとして取得した。これによって運転動作に支障がなく、体に密着しての動作特徴の取得に期待ができる。

図１　センサを設置したシートベルト

### ２．２．データ格納について

シートベルトからの動作データはスマートフォンを介してインターネットにあるデータベースに集約される。システム構成を図２に示す。

本システムは、運転者の動作をデータベースに集約

図２　シートベルトからのデータを外部データベースへ集約

することで、別システムで同時に集約される緯度・経度、車速などの情報と突き合わせることで、特定の動作が多い場所、車速、時間帯などを分析によって見いだし運転負荷推定が行える環境を構築した。

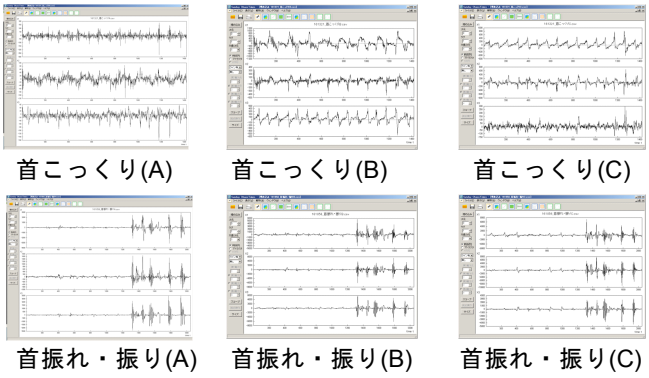
### ２．３．　動作の角速度時系列データ

表１に示す試行動作について、運転者の任意タイミングにより試行した際の３軸角速度時系列データを取得した。

表1　運転者試行動作

| | 動作内容(動作名) | 有効回数 |
|---|---|---|
| (a) | (1) 前後に頭をゆらす(首こっくり) | 16 |
| | (2) 後部座席へ手を伸ばす(後部座席へ2) | 12 |
| | (3) グローブボックス及びオーディオへ手を伸ばす(グローブボックス･オーディオ) | 8 |
| | (4) 座り直す(座り直し) | 8 |
| | (5) 頭を前後左右にゆらす･頭を振る(首振れ･振り) | 12 |
| (b) | (1) 前後に頭をゆらす(首こっくり) | 15 |
| | (2) 後部座席へ手を伸ばす(後部座席へ) | 20 |
| | (3) エアコンダイヤルへ手を伸ばす(エアコンダイヤル) | 20 |
| | (4) グローブボックスへ手を伸ばす(グローブボックス) | 20 |
| | (5) 座り直す(座り直し) | 20 |
| | (6) 頭を振る(首振り) | 20 |

また、覚醒度低下（居眠り、ぼんやり）時に表れる動作が「首こっくり」、「首ふり」であるので、本稿の目的である「居眠り」「ぼんやり」の検出のために、「首こっくり」、「首ふり」の動作に着目することにした。その試行動作の時系列角速度データを図３に示す。




上段：X 軸、中段：Y 軸、下段：Z 軸
サンプリング：20ms、角速度レンジ：±250dps
試行(a)の動作結果を表示

図3　各位置における3軸角速度センサの時系列波形

### ２．４．　検討手法

本稿では、取得した各動作のデータを用い、次のアプローチで動作分類推定を行った。

初めに、試行動作の開始から終了までの全時系列データについて k-means クラスタリングにより、動作の分類を行った。

次に、取得した時系列波形を数回のサンプリング毎に単純分割することで特徴量データとした。このデータは、動作を表す様々な部分データを含むものと予想され、容易で現実的なデータ特徴量の取得方法である。

そして教師あり機械学習の内、アルゴリズムが異なる 3 手法（SVM、Real AdaBoost、Random Forest）により様々な部分データを含む特徴量データから動作分類推定を試みた。なお教師あり機械学習とは、多種多様なデータの中から、規則性・パターン・知識を発見し、現状の把握や将来の予測をする方法である。また動作毎のデータ波形に対し、動的時間伸縮法（DTW）を用いた動作分類について併せて検討した。DTW とは、2 つの信号波形間の距離を最小化するように時間軸方向に信号波形長を伸長させ、対応点を見つけ距離を算出するものである。

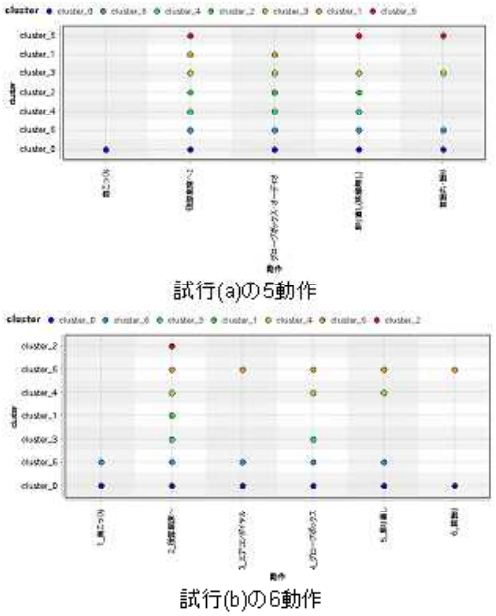
## ３．運転者挙動データの分類推定

### ３．１．時系列信号の特徴量

「首こっくり」の動作特徴は、図３から明瞭に表れているのが肩部センサ C の X 軸である。

本稿では、肩部センサ C の X 軸角速度に着目し、その動作の識別を検討した。

各試行動作の始めから終わりまでの全時系列 X 軸角速度データを k-means クラスタリングした結果、図４に示すように 7 つの分類で試行動作を区分けできた。この結果から、X 軸角速度データから動作を分類できる可能性が示唆された。




7分類で全動作を区分けできた．動作「後部座席へ」は全クラスタ成分を持つと考えられる．

図4　試行動作のk-meansクラスタリング

### ３．２．機械学習による分類

角速度時系列データは、事前に角速度値の± 20 [dps]は 0[dps]として、0[dps]付近の微少な変動を取り除き、4-移動平均により急峻な変動をならす処理を行った。

機械学習をするための特徴量データとするため、時系列データを単純に一定サンプリング間隔で分割することにした。Real AdaBoost による 2-交差検定を試行(a)データに対して行い、データ長 20 サンプリング毎

の分割が適合率及び再現率共に最も良い結果を示した。このことから、特徴量データは、角速度時系列データを 20 サンプリング間隔で分割したものとした。

試行(a)データを教師データとし、試行(b)データをテストデータとして SVM、Real AdaBoost、Random Forest で機械学習による動作推定を行った。そのクロス集計結果を表２に示す。なお「首こっくり」及び「首振り」を表２ではそれぞれ「Kokkuri」及び「Kubifuri」と表した。

**表２　教師データを用いたテストデータの推定結果**

SVM (Support Vector Machine)

| pred. | Kokkuri | No |
|---|---|---|
| Kokkuri | 36 | 108 |
| No | 36 | 607 |

| | |
|---|---|
| 適合率 | 0.25 |
| 再現率 | 0.50 |
| F値 | 0.33 |
| 判別率 | 0.82 |

| svm.pred. | Kubifuri | No |
|---|---|---|
| Kubifuri_fure | 0 | 0 |
| No | 126 | 661 |

| | |
|---|---|
| 適合率 | – |
| 再現率 | 0.00 |
| F値 | – |
| 判別率 | 0.84 |

Real AdaBoost

| ada.pred. | Kokkuri | No |
|---|---|---|
| Kokkuri | 25 | 118 |
| No | 47 | 597 |

| | |
|---|---|
| 適合率 | 0.17 |
| 再現率 | 0.35 |
| F値 | 0.23 |
| 判別率 | 0.79 |

| ada.pred. | Kubifuri | No |
|---|---|---|
| Kubifuri_fure | 2 | 7 |
| No | 124 | 654 |

| | |
|---|---|
| 適合率 | 0.22 |
| 再現率 | 0.02 |
| F値 | 0.03 |
| 判別率 | 0.83 |

Random Forest

| rf.pred. | Kokkuri | No |
|---|---|---|
| Kokkuri | 29 | 132 |
| No | 43 | 583 |

| | |
|---|---|
| 適合率 | 0.18 |
| 再現率 | 0.40 |
| F値 | 0.25 |
| 判別率 | 0.78 |

| rf.pred. | Kubifuri | No |
|---|---|---|
| Kubifuri_fure | 0 | 0 |
| No | 126 | 661 |

| | |
|---|---|
| 適合率 | – |
| 再現率 | 0.00 |
| F値 | – |
| 判別率 | 0.84 |

クロス集計について

| | 真の値(正) | 真の値(負) |
|---|---|---|
| 推定結果(正) | TP | FP |
| 推定結果(負) | FN | TN |

適合率：正と推定したデータのうち実際に正であるものの割合。
再現率：実際に正であるもののうち、正であると推定されたものの割合。
F値：推定精度の評価指標。適合率と再現率の調和平均。
判別率：データ総数の中での正確推定の割合。

推定精度の評価指標である F 値は、値が高い程推定性能が良いことを意味するが、「首こっくり」動作では SVM が 3 つの機械学習手法の中で最も良い結果となった。「首振り」動作では推定ができなかった。

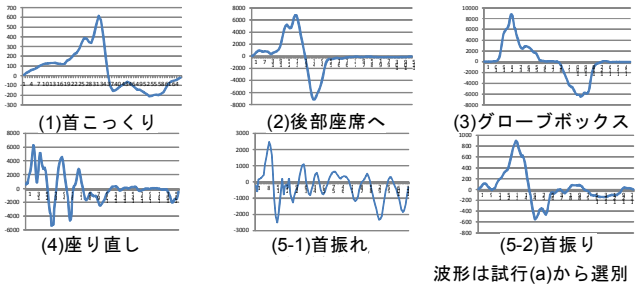
「首振り」に関しては、テストデータと動作が部分的に一致しない動作を学習データとしてしまったことが原因と考えられる。

「首振り」の試行(a)の学習データは、頭を前後・左右方向にこっくりする動作及び覚醒させる際の頭を振るそれぞれの動作が混在したデータとなっていたためである。テストデータは覚醒させる際の頭を振る動作だけのデータとしたため、教師データとしては十分な識別が得られなかった可能性がある。

## ４．３．動的時間伸縮法(DTW)について

前節では、動作時系列データを、データ長 20 サンプリングとして単純分割したデータを特徴量データとして機械学習で分類推定したが、本節では、一動作波形に注目し、動作波形パターンの類似度を時間軸方向の伸縮具合を調整して計算する動的時間伸縮法(DTW:Dynamic Time Warping)を用い、その距離を計算した。

表１の各試行動作から、肩部センサ C の X 軸角速度データから動作時の波形を抽出する。岡田等[5]は、零点交差法(zero-up crossing method)による機械的な分節化を行っているが、本稿のデータでは「首こっくり」動作以外は複数回 zero を区切るため、1 回の零点交差法では対応できない。そのため、試行(a)及び試行(b)の各データから、一動作の始まりと終わりまでを手動で分節化した。代表的な波形を図５に示す。




波形は試行(a)から選別

**図５　動作毎の代表的な波形**

図５から、各動作の DTW による距離の結果を表４に示す。DTW 距離は、波形が似ている程小さい距離に計算される。

表３から各動作毎の DTW 平均距離は明確に異なったことから、時系列信号から動作を分類できる可能性が示唆された。しかしながら、一動作波形の分節化の自動化には課題がある。

**表３　動作毎のDTW距離**

| 試行(a) | (1)首こっくり | (2)後部座席へ2 | (3)グローブボックス・オーディオ | (4)座り直し | (5-1)首振れ | (5-2)首振り |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 有効波形 | 16 | 12 | 8 | 8 | 5 | 6 |
| DTW距離平均 | 2,814.4 | 75,117.5 | 67,222.7 | 171,192.9 | 71,392.2 | 17,225.0 |
| 標準偏差 | 1,053.3 | 28,290.0 | 29,936.8 | 63,199.8 | 11,553.9 | 5,120.6 |
| 最小距離 | 1,350.3 | 28,402.3 | 29,680.0 | 74,707.5 | 57,408.0 | 7,412.0 |
| 最大距離 | 7,962.8 | 151,965.8 | 123,016.3 | 300,630.5 | 104,455.5 | 28,885.0 |

| 試行(b) | (1)首こっくり | (2)後部座席へ | (3)エアコンダイヤル | (4)グローブボックス | (5)座り直し | (6)首振り |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 有効波形 | 15 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| DTW距離平均 | 6,413.9 | 65,307.0 | 11,113.9 | 26,524.3 | 35,510.5 | 9,866.6 |
| 標準偏差 | 2,276.0 | 14,825.7 | 3,043.7 | 10,476.7 | 11,630.5 | 2,272.5 |
| 最小距離 | 2,020.3 | 35,171.8 | 4,179.0 | 12,459.5 | 12,456.5 | 4,213.3 |
| 最大距離 | 16,838.8 | 137,450.3 | 23,518.0 | 77,214.5 | 76,227.0 | 18,612.5 |

他の分節化方法には、音声信号処理で一般的に用いられる時系列信号をパワースペクトル情報でクラスタリング後、波形レベルの分節化を行う方法も考えられる。しかし計算コストの増加によりリアルタイム性を失う可能性が生じる。

## ５．考察

機械学習による分類推定で誤検出が多かった原因は、図６の※に示すように単調増加・単調減少波形は「首

こっくり」以外の動作でも同様の波形部分がある。データ長 20 サンプリングによる単純分割であっても、この単調増加・単調減少波形部分のみを切り出した特徴量データが多数発生しているものと推測される。

このため、図５でわかるように、「首こっくり」波形の振幅は、他の動作波形の振幅と比べ著しく小さく、波形のピーク付近であっても他の動作波形の単調増加・単調減少波形に隠れ十分な特徴量として機械学習の識別に当てはまらなかったことが考えられる。

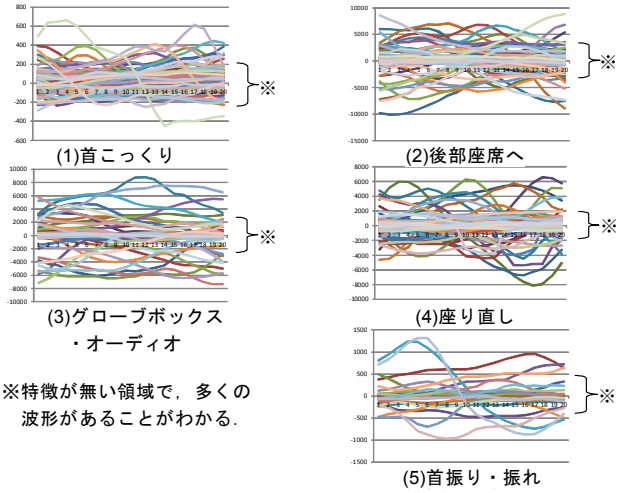



図６　データ長20の動作毎波形の重畳

動作波形の凸状部分又は凹状部分の大きく変動しているピーク部分に特徴量が大きく表れると考えられ、この変化部分だけを特徴量として抽出した分類推定の向上も検討課題である。

DTW による分類では、波形の分節化の課題に対し他のアプローチとして、代表的な波形を問合せ波形として予め保持し、データストリームからのシーケンスマッチングで提案されている SPRING[6] などによる動作推定方法も考えられる。

データ格納では、センサのサンプリングは 20ms であるが、全データをリアルタイムにデータベースに集約するためには、今回のシステムでは送信側計算機上の問題で通信処理が間に合わなかった。

対応方法として、(1) ある一定時間のデータをバッファリングし、通信の都合良い時に一括してデータベースにアップする方法、(2) 分類推定は車両内マイコンで処理し、結果をその都度データベースにアップする方法、が考えられる。計算コストの高さに課題があるが、運転者への注意喚起など車両内での情報利用、リアルタイム性を考えると (2) の手法が望ましいと考えられる。しかしながら、分析前の生データをデータベースに格納し、豊富な計算資源を用いて分析し、その結果を運転者へ通信を介し注意喚起ができる (1) の手法も有益と考えられる。

データ通信の方法についても、引き続き検討を要する。

## ６．結言

本稿では、シートベルトに装着した角速度センサにより、運転者の動作について分類推定を機械学習及び DTW によって検討した。

機械学習では、動作時系列信号をデータ長 20 サンプリングで単純分割した特徴量データから、SVM、Real AdaBoost、Random Forest によって分類推定した。この結果 SVM が「首こっくり」では最も良い推定結果を得た。しかし F 値が 0.33 であり高い性能を示すことはできなかった。

分類推定の向上には、特徴量データ抽出の方法の中で、波形の変化が大きいピーク付近だけを抽出する方法等の検討が必要である。また、個人差による動作波形振幅の違い、変化速度の違いを吸収できるように、より多くの学習データ収集も必要である。

DTW では、一動作波形を手動抽出して分節化し DTW 距離を得た。その結果 DTW 平均距離は明確に異なったことから、時系列信号から動作を分類できる可能性が示唆された。しかし一動作波形の分節化の自動化には課題があるため、データストリームからのシーケンスマッチングで提案されている方法等の検討が必要である。

最後に、シートベルトからの動作データをスマートフォンを介しインターネットにあるデータベースに集約するシステムを構築した。このシステムによって、運転者の運転負荷推定分析を可能とした。

今後は、複数センサ利用も考慮した運転動作の分類推定の向上を引き続き進め、シートベルトに容易に装着できる実用的な運転負荷推定システムの構築を目指す。

## 謝辞

平成２５年度タカタ財団研究助成「ドライバーによる事故要因の定量的メカニズムの解明」（代表：いわき明星大学　櫻井俊明）の分担として実施されたものである。関係者のご支援に感謝の意を表する。

### 参考文献

1) 内閣府：平成 25 年版交通安全白書,p5, http://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/h25kou_haku/index_pdf.html（2013）
2) 警察庁：交通事故統計（平成 26 年 1 月末）, http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001117400（2014）
3) 今井章博,時津直樹,小栗宏次：シートベルトからの体圧変化情報に基づくドライバの運転姿勢推定,電気学会論文誌 C,130 巻 12 号,pp.2118-2123（2010）.

4) E. Keogh, J. Lin, and W. Truppel. Clustering of time series subsequences is meaningless: Implications for previous and future research. In Proc. IEEE Intl. Conf. on Data Mining, pp.115-122.（2003）
5) 岡田将吾,人見謙太郎,チャンドラシリ ナイワラ,呂有為,新田克己:車載センサログの時系列データマイニングに基づく運転挙動の分析, 情報科学技術フォーラム講演論文集 11th,pp. 387-390（2012）
6) 櫻井保志,Christos Faloutsos,山室雅司:ダイナミックタイムワーピング距離に基づくストリーム処理 ,電子情報通信学会論文誌. D,92（3）,pp.338-350 （2009）

# 着用快適性に優れた防刃用衣料素材の開発

The Development of the knife-stab-resistant composite having ventilation property and excellent wearing comfortableness

福島技術支援センター繊維・材料科　東瀬慎　佐々木ふさ子
東和株式会社　佐藤恵一

警察、警備等ほど危険度が高くない職業では、危険を想定した重く分厚い防刃衣料(6～8kg/㎡)を常時着用し続けることは、体力的、日常的にも厳しく、特に夏場の高温、高湿時には、ムレ感、ベタツキ感による不快感が長時間の着用を困難なものにしている。そこで防刃性と着用快適性（軽量性、柔軟性、通気性）に優れた衣料素材の開発に取り組んだ

Key　防刃衣料　着用快適性

## １．緒言

生活環境の24時間化を背景に深夜犯罪の件数は増加傾向にある。深夜営業の店舗（コンビニ、ファーストフード等）の従業員や、深夜のセキュリティ管理をする従業員に対しても、刃物から身の安全を守り、危険回避をするための簡易な防刃衣料(突き刺し抵抗性≧150N/㎜)が幅広く求められている。

一方で、労働安全分野（農林、鉄鋼、造船等）に働く作業者は、常に切創事故の危険に曝されており、特に災害対策従事者は劣悪な作業環境の中で、長時間装着可能な着用快適性（目付≦4kg/㎡、生地厚≦5㎜、通気性≧20ml /㎠･sec）に優れた防刃用衣料素材を必要としている。また、スポーツ、レジャー分野では、突発的な衝突、落下、転倒等からアスリートやプレーヤーを守り、着用時の競技動作や放湿、発汗を妨げない防護衣料は未だ開発されていない。

本事業では日常生活において長時間の着用を可能とする着用快適性（柔軟性、軽量性、通気性）と、万が一の身の安全を確保する防刃性を兼ね揃えた衣料素材の開発を目指した。

具体的には、従来技術で達成することが出来ない、防刃性（突き刺し抵抗性≧150N/㎜）と着用快適性（目付≦4kg/㎡、生地厚≦5㎜、通気性≧20ml/㎠･sec）を兼備する衣料素材の開発を目的とした。

## ２．防刃用衣料素材の作成

### ２．１．　防刃用構成糸の作成

高強力繊維の表面に熱可塑性ポリウレタン樹脂の皮膜を形成（押出成型）し、図１に示す防刃用構成糸を作成した。この樹脂皮膜を構成糸の固定手段として用いることで、従来の編織工程を割愛することが可能である。さらに構成糸には耐衝撃性、耐摩耗性、防水性が付与される。

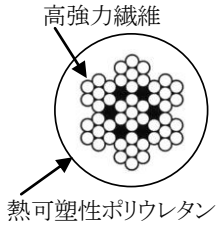



図１ 防刃用構成糸断面

表１　防刃用構成糸の材質

| | 構成糸① | 構成糸② | 構成糸③ | 構成糸④ |
|---|---|---|---|---|
| 材質 | SUS304 | SUS304 | p-Aramid | PBO |
| 素線構成(本) | 7×7 | 7×7 | 4 | 4 |
| 素線径 | 1.0 mm | 1.0 mm | 2040D | 2040D |
| 仕上外径(mm) | 1.5 | 2.0 | 1.0 | 1.0 |

表１に示すとおり防刃用構成糸の材質は、高強力繊維（ステンレス繊維（SUS304)、ポリパラフェニレンベンズオキサゾール（PBO）繊維（商標名ザイロン)、パラ系アラミド繊維（商標名テクノーラ）を使用した。ステンレス繊維の線径は 1.0㎜ とし、構成は 7 本×7 本ストランドの交差撚りであるため、各素線同士が点接触となり、通常の平行撚りとは異なり極めて屈曲性に優れたフレキシブルな防刃用衣料素材が期待できる。

さらに熱可塑性ポリウレタン皮膜により、紫外線の影響を受けやすいアラミド繊維や PBO 繊維、特に湿度の影響を受けやすい PBO 繊維の物性低下も防止することが出来る。

### ２．２．　構成糸の配列

防刃用構成糸の配列は、経緯１本間隔とし写真１に示すように構成糸を複数本引き揃えた配列とした。

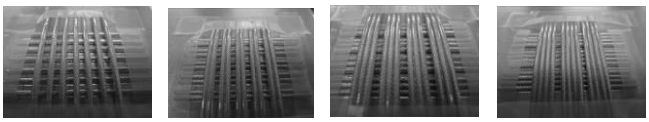


写真１　構成糸の組織配列

### ２．３．　構成糸の固着

指定のメッシュ、目開きで経緯方向に構成糸を配置し、交接点を編織せずに 200℃で固着を行い 100㎜ 四方の防刃用衣料素材を作成した。交接点の固着は繊維組織間のズレ、

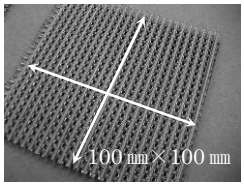



写真２　防刃用衣料素材

移動の抑制を目的とする一方で、交接点の高さを芯線同士が接触しない範囲内において、元の高さの 75%～85%で固着することで柔軟度を保つことを特徴とした。

### ２．４．　高防刃化

より高い防刃性能を得るために画像処理付き積層材料縫合機を使い、構成糸④で作成した防刃用衣料素材の表面に、高強度座金（材質：SK5、外径 6mm、内径 2mm、厚さ 0.5mm）を連結するように縫合した。（試作⑪）

写真 3　高防刃化（試作⑪）

## ３．測定方法

### ３．１．　測定用刃物

NIJ（米国国立司法研究規格）Standard-0115.00 P1 規格に準拠した刃物を作成した。また市販のペディナイフ（関孫六 2000ST ペディナイフ 刃渡 120mm AB-5256）を使用した。

写真 4　左：NIJ Standard-0115.00 P1 と右：市販ペディナイフ

### ３．２．　静的突き刺し試験

図 2 に示す間隔 5mm の台座の上に防刃用衣料素材を載せ、万能抗張力試験機（shimadzu AGS-10KNG）を一定速度 20mm/min の圧縮モードで測定用刃物（NIJ Standard-0115.00 P1）を防刃用衣料素材に垂直に進入させ、貫通時の最大強度(N)を測定した。

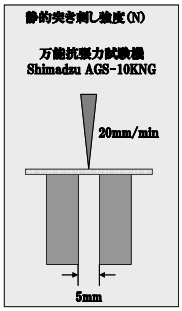



図 2　静的突き刺し試験

### ３．３．　動的突き刺し試験

図 3 に示す動的突き刺し試験機を使用し、バッキング材の構成は NIJ（米国国立司法研究規格）Standard-0115.00 規格より厚み約 6mmのゴム（ショア硬度Ａ45～50）を 2 枚積層し、厚み約 30mmのポリエチレンフォーム（ショア硬度Ａ14）を１層、厚み約 6mmのネオプレンスポンジ（ショア硬度 A20～30）を 1 層の計４層を積層した。

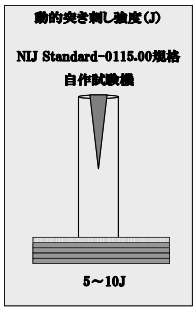



図 3　動的突き刺し試験

次に所定のエネルギー量を示す高さから、円柱状の重りに取り付けた測定用刃物（NIJ Standard-0115.00 P1 及び市販ペディナイフ）を防刃用衣料素材に垂直に自由落下させ測定用刃物の貫通量(mm)を測定した。

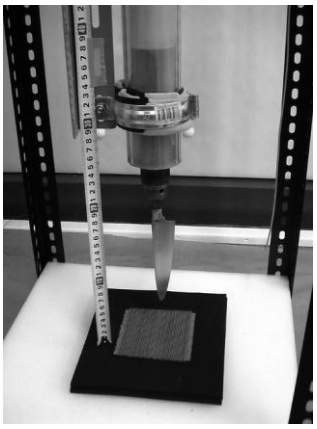


写真 5　動的突き刺し試験機

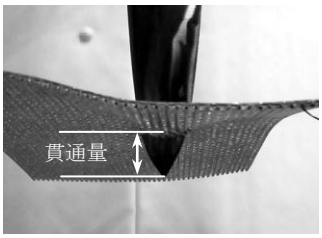



写真 6　貫通量の定義

### ３．４．　通気度試験（フラジール形法）

通気度は JIS L 1096（フラジール形法）により測定を行い、素材の内外気相が防刃用衣料素材を介して通過できる度合い(ml/cm²･sec)を測定した。

### ３．５．　柔軟度試験

防刃用衣料素材の対角線を水平な治具の端辺に固定し、素材の端点をφ10mm の丸棒で垂直方向へ 50mm 押し込んだ時の最大荷重(N)を測定した。

## ４．結果と考察

組織配列と防刃性の関係を検討するため、構成糸②を使った配列（試作①～⑦）を作成した。その模式図とセンチメートル間密度（本数/cm）を図 4 に示す。経緯の構成糸を直交に固着する利点として、編織工程では達成できない高いセンチメートル間密度を得ることが出来る。比較例として、試作③と同じ経緯 1 本間隔で、構成糸①を使用したセンチメートル間密度 2.5 本/cm の試作⑧と構成糸③、④を使用したセンチメートル間密度 5 本/cm の試作⑨、⑩を作成した。（■：構成糸、□：空隙）

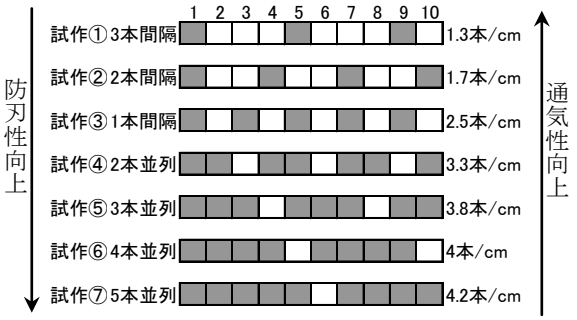



**図 4　構成糸②の組織配列とセンチメートル間密度**

次に試作①～⑦について測定用刃物（NIJ Standard-0115.00 P1）を使用した静的突き刺し強度(N)と通気度(ml/㎠･sec)の関係を図 5 に示す。

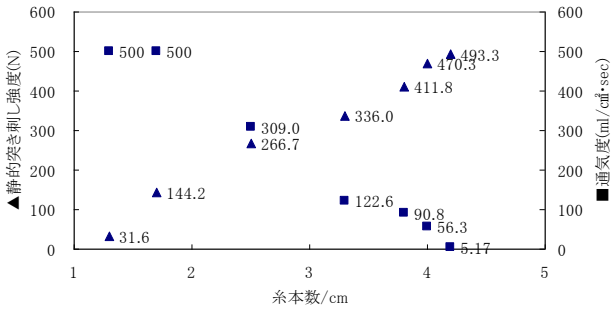



**図 5　静的突き刺し強度と通気度の関**

センチメートル間密度の増加と共に、静的突き刺し強度は向上するが、逆に通気度は減少するため、防刃性と通気性は相反関係にある。作成した防刃用衣料素材は厚みが約 3㎜ あり、単位厚みあたりの突き刺し強度を求めると 11～164N/㎜ となる。

ただし、試作①②はメッシュ間隔が大きく、無荷重でも刃先が裏面に飛び出る危険性があり、実用性に乏しいものとなった。よって実用上防刃性が期待できるのは試作③～⑦と考えられる。

次に試作①～⑦の静的突き刺し強度(N)と目付(kg/㎡)の関係を図 6 に示す。

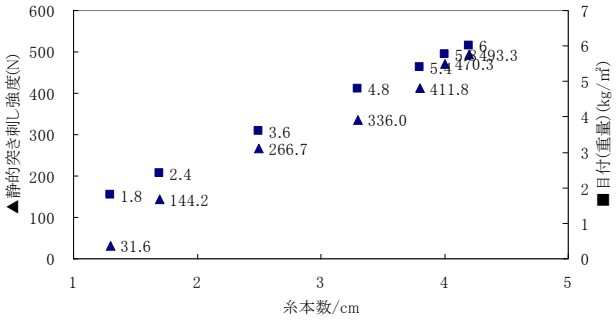



**図 6　静的突き刺し強度と目付の関**

センチメートル間密度を上げることで防刃性は向上するが、目付も同様に重くなる。防刃性を優先すると着用時の軽量性が犠牲となる。

次に試作①～⑦の通気度(ml/㎠･sec)と柔軟度(N)の関係を図 7 に示す。

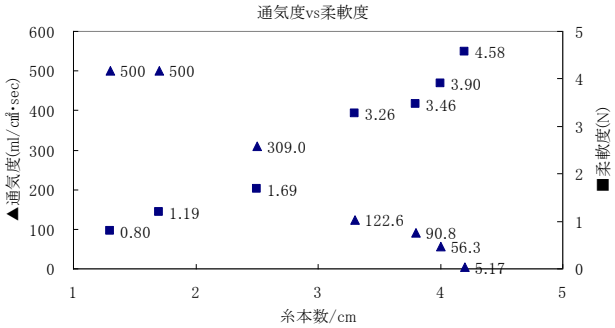



**図 7　通気度と柔軟度の関係**

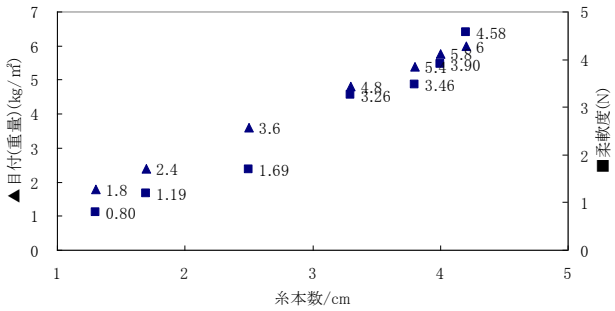



**図 8　目付と柔軟度の関係**

通気性の数値が高いほどムレ感、ベタツキ感の抑制に効果があり着用時の快適性が保持される。逆に数値が小さいと空気の流れが妨げられ、換気が生じにくくなり体表面での熱交換が不十分となり着用者の不快感が増大する傾向にある。よって着用快適性を考慮すると、夏場の着用環境や発汗、運動量が多い用途では十分な通気度(≧200ml/㎠･sec)が必要となる。また柔軟度は値が小さいほど柔らかく、大きいほど硬い性質を表す。柔軟度が 3 以下であれば着用しても素材は柔らかく衣料として加工可能な範囲内であるが、3 を超えると曲げ難くなり、さらに 4 を超えると硬く衣料としては不適な素材となる。よって着用時の動作を妨げない柔軟度(≦3N)の確保が必要となる。

次に試作①～⑦の目付(kg/㎡)と柔軟度(N)の関係を図 8 に示す。センチメートル間密度が増加すると共に、目付量も増加し、逆に柔軟度は減少することを表している。軽量で柔軟な防刃用衣料素材とするためには、目付(≦4kg/㎡)が適切な範囲と考えられる。

一方、構成糸①、③、④を使用した試作⑧、⑨、⑩と高防刃化した試作⑪について諸物性を表 2 に示す。同条件の試作③と⑧を比較すると皮膜厚の違いによる静的突き刺し強度の差が顕著に出た。固着時の樹脂量が繊維組織のズレ､移動を抑制していると考えられる。試作⑪は金属座金による高防刃化と柔軟度が期待できるが、目付量がやや重く軽量性が犠牲となる。

次に試作①～⑪(試作⑧除く)の測定用刃物（NIJ

Standard-0115.00 P1）を使用した場合の、動的突き刺し試験(二枚または四枚積層)の結果を表 3 に示す。自由落下のエネルギー量は 3～12J の範囲で行った。結果の合否は、NIJ Standard-0115.00 の Mode1 規格より、貫通量が 7mm 以内を合格と判断した。

また測定用刃物（関孫六 2000ST ペディナイフ 刃渡 120mm AB-5256）を使用した場合の、動的突き刺し試験(一層)の結果を表 4 に示す。試作③は 12J のエネルギー量で貫通量は 5mm であった。試作⑨は 3J 程度が許容範囲である。

## ５．結言

本技術の防刃素材は、組織による抑制力が期待できない密度の粗いメッシュ状組織の場合でも、交接点の固着により繊維組織間のズレや移動を抑制することが可能である。よって従来技術では達成出来なかった軽量で柔軟かつ着用快適性に優れた防刃用衣料素材の製造が可能であると共に、製造面では従来の編織工程を割愛出来るメリットがある。

### 参考文献

１）東瀬慎、佐々木ふさ子他：“機能性アパレル衣料副資材の開発”、H21 年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告、p.27-30、2010

２）特許 4566265「防刃用衣料素材」東瀬、佐々木

表 2　試作⑧⑨⑩⑪の諸物性

| | 構成 | センチメートル間密度(本/cm) | 静的突き刺し強度(N) | 通気度 (ml/㎠･sec) | 柔軟度(N) | 目付(kg/㎡) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 試作⑧ | 構成糸① | 2.5 | 163.7 | 500 以上 | 1.35 | 2.7 |
| 試作⑨ | 構成糸③ | 5.0 | 25.6 | 355 | 0.1 以下 | 0.8 |
| 試作⑩ | 構成糸④ | 5.0 | 35.9 | 357 | 0.1 以下 | 0.8 |
| 試作⑪ | 構成糸④<br>＋金属座金 | 5.0 | 656 | 171 | 1.06 | 5.1 |

表 3　NIJ Standard-0115.00 P1 による動的突き刺し試験結果

| | センチメートル間密度 (本/cm) | 自由落下エネルギー(J) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 6 | 9 | 12 |
| 試作③×2 | 2.5 | 0 | 11 | 16 | 18 |
| 試作④×2 | 3.3 | 0 | 4 | 7.5 | 9 |
| 試作⑤×2 | 3.8 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 試作⑥×2 | 4.0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 試作⑦×2 | 4.2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 試作⑨×4 | 5.0 | 0 | 10.5 | 15 | 18 |
| 試作⑩×4 | 5.0 | 0 | 0 | 0 | 9 |
| 試作⑪×1 | 5.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 4　市販ペディナイフによる動的突き刺し試験結果

| | センチメートル間密度 (本/cm) | 自由落下エネルギー(J) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | 6 | 9 | 12 |
| 試作③×1 | 2.5 | 0 | 0 | 2 | 5 |
| 試作⑨×1 | 5.0 | 8 | 12 | － | － |
| 試作⑩×1 | 5.0 | 0 | 9 | － | － |

# ネットワークオンチップ構成における高位合成に関する研究

Research for high level synthesis of network on chip structure

技術開発部生産・加工科　吉田英一
公立大学法人会津大学　　齋藤寛　宮囿悟　竹内信一

近年、車載 ECU(Electronic Control Unit)をまとめてメニコアシステム上で実現する統合化 ECU が研究されている。本研究では、ネットワークオンチップ(NoC)システムにリアルタイム OS を移植した車載向け NoC プラットフォームを構築して、高位合成ツールでタスク割り当てした車体制御アプリケーションを動作させて実証実験を行った。また、OS を使用した場合のオーバーヘッドを評価するため、アプリケーション動作時のメモリ消費量について比較を行った結果、少ないオーバーヘッドで実装できることが分かった。

Key　words: NoC、リアルタイム OS、プラットフォーム、高位合成

## １．緒言

マイコンを搭載した車載コンピュータ（ECU）は現行の自動車一台当たり数十個使用されているが、ハイブリッド車や電気自動車などの次世代自動車では ECU 数がさらに増加しており、ソフトウェアやハードウェアの実装方法が課題となっている。これらの問題の有力な解決策として、本研究では図 1 に示すようなネットワークオンチップ（NoC）プラットフォームの活用を提案する。

集積回路の微細化による性能向上の限界を打ち破る技術の一つとして、コア間の通信を共通バス方式ではなく、簡易ネットワークによるパケット転送で実現する NoC 方式[1)2)]が研究されている。

本研究では多数のコアが適応的に協調動作して異種多様なタスクを効率よく実行できる NoC システムを活用したプラットフォームを構築し、車載制御系システムにおいて実証することを目指す。

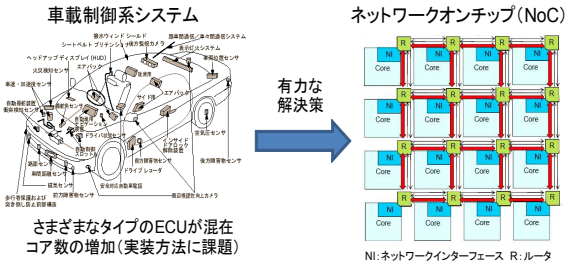



図１　NoCプラットフォームの活用

会津大学グループは、プラットフォーム上で動作するアプリケーションソフトウェアの配置やスケジューリングを行う高位合成技術の開発と評価用 NoC プラットフォームの実装を担当し、ハイテクプラザは NoC システムへのリアルタイム OS 移植とアプリケーションプログラムの実装を担当した。

NoC ハードウェア上に、ソフトウェアを動作させる基盤となるリアルタイム OS などの基本ソフトウェアを搭載した NoC プラットフォームを構築して、OS 搭載時のオーバーヘッド等について評価を行った。

## ２．車載制御系システムの実証実験

### ２．１．　車載モデル向けNoCプラットフォームの構築

これまでの研究では FPGA　内に 3x3NoC システムを実装し、μ ITRON4.0 仕様リアルタイム OS である TOPPERS/JSP を移植して NoC プラットフォームを構築した。また、高位合成ツールによりタスク配置された PID 制御プログラムを NoC プラットフォーム上で動作させて、デバッグや検証を行ってきた。

今年度はこれまでの研究成果を基に、車載モデル向け NoC プラットフォームを構築し、車載制御系システムを動作させて実証実験を行った。

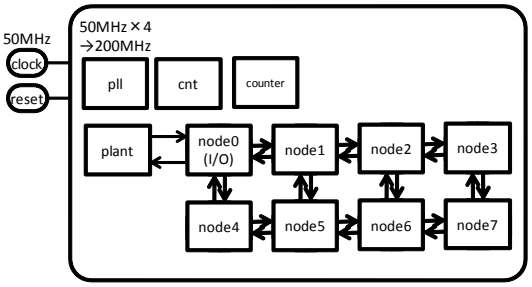



図２　車載モデル向けNoCプラットフォームのハードウェア構成

車載制御系システムの実証実験では、4 輪独立制御に基づく統合車体制御アプリケーションを使って検証を行うこととした。アプリケーションを実行する NoC プラットフォームのハードウェアは、ECU を模擬した 4x2 NoC システム、車体を模擬した plant ノード、入力クロックを 4 逓倍する PLL 回路、各ノードの起動タイミングを合わせるためのリセットカウンタ、処理時間計測用のカウンタで構成した。構築した NoC プラットフォームのハードウェア構成を図 2 に示す。StratixIV GX を搭載した FPGA 基板を使用して動作を確認した。50MHz の入力クロックを 4 逓倍して 200MHz で動作させた。

4x2 NoC システムは 8 個のプロセッサノードを搭載しており、1 個のプロセッサノードは NiosII/f コア、

96kB のオンチップメモリ、JTAG UART、タイマ、ネットワークインターフェースブリッジ回路、汎用 I/O ポートで構成されている。図３にプロセッサノードの構成を示す。各ノードはネットワークインターフェース（NI）ブリッジ回路を介してルータと接続して通信を行う。

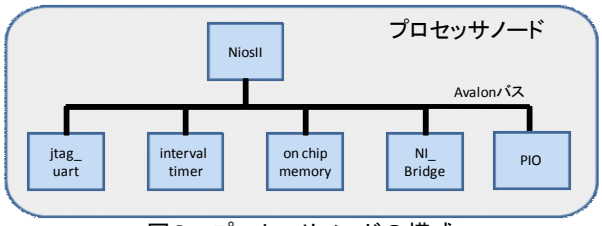



図３　プロセッサノードの構成

NiosII プロセッサコアをターゲットにして、リアルタイム OS である TOPPERS/JSP を移植して、車載モデル向け NoC プラットフォームを構築した。JSP カーネルを動作させるための最小構成はプロセッサ、64kB 程度のメモリ、タイマ、シリアル出力の JTAG UART であるが、各ノードはこの最小構成を満足しており、回路の修正を行うことなく JSP カーネルの移植を行った。メモリ容量は、車体制御アプリケーション動作や FPGA のメモリ制約を考慮して、96kB のオンチップメモリを搭載した。

## ２．２．　車体制御モデル

自動車メーカのソフトウェア開発では Simulink モデルが多用されており、本研究においてもアプリケーションプログラムの C 言語ソースコードは Simulink 記述の車体制御モデルから自動生成した。
実証実験で使用する車体制御モデルはコントローラ（ECU）モデル、プラント（車体）モデル、ドライバ操作情報、ECU 入力、ECU 出力で構成されている。モデルの全体像を図４に示す。

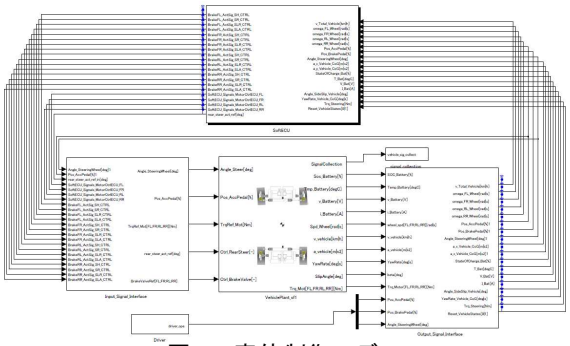


図４　車体制御モデル

このモデルは４輪に駆動モータを搭載した電動車両を想定して設計されており、運転者が意図した挙動に近づけるように車体運動制御を行うモデルである。これらの制御を行うため、駆動用モータ、バッテリ、ブレーキ制御、後輪操舵、統合制御用のコントローラにより構築されている。統合制御コントローラは運転者の操作に応じて各輪のトルクを制御し、車体の走行状態と目標奇跡を比較して目標に一致するように車体を制御する。

Simulink 記述のコントローラ（ECU）モデルを図５に示す。この Simulink モデルからタスクとして定義したい部分をサブシステム化してＣコードを自動生成し、車載向け NoC プラットフォームのノード 1 からノード７のコードを生成した。

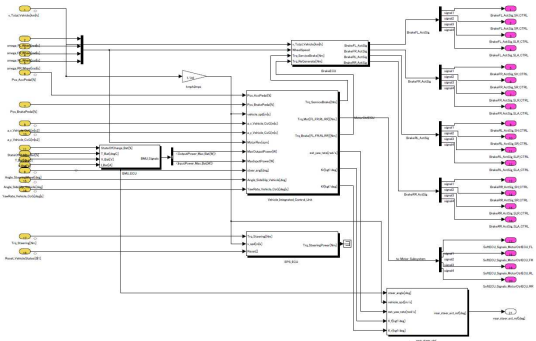


図５　コントローラ（ECU）モデル

開発した高位合成ツールは、タスクの概算実行時間やノード間通信時間、概算メモリ消費量を考慮して、ハードウェアや処理時間等の制約を満足しつつアプリケーション全体の概算実行時間やメモリ消費量を最小化するタスク分割処理を行う。

車体制御モデルから高位合成ツールによりタスクグラフを作成し、タスク割り当てを行った。また、車体制御アプリケーションの C 言語ソースコードを自動生成した。

タスクとして定義したい部分を Simulink レベルでサブシステム化したコントローラ（ECU）モデルを入力として、生成したタスクグラフを図６に示す。

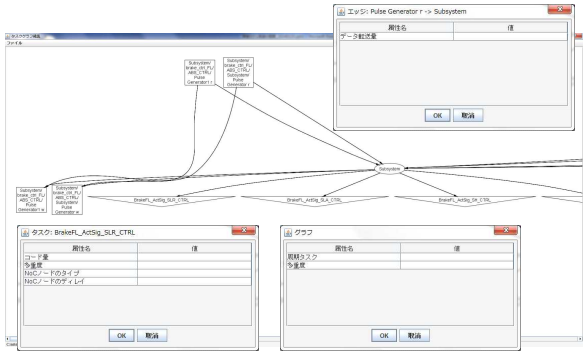


図６　タスクグラフ

高位合成ツールによる 4x2　NoC システムの 8 ノードにおけるタスク割り当て結果を図７に示す。図７は横軸にノード０からノード７、縦軸に時間経過を取ったときのタスク割り当てとタスク間のデータのやりとりを表している。丸枠で囲んだ関数が RTOS 上に実装したタスクである。

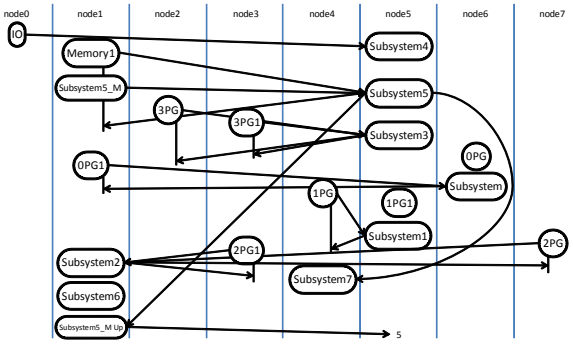



図7　タスク割り当て

## 2．3．車体制御アプリケーションの動作実験と評価

1．1で構築した車載モデル向け NoC プラットフォームに、2．2で生成した車体制御アプリケーションのタスクを実装して実験を行った。

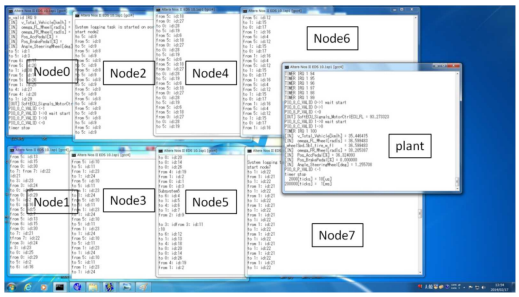



図8　車体制御アプリの動作

StratixIV GX 搭載の FPGA ボードを使用して動作を確認した。図8に NoC プラットフォーム上での車体制御アプリケーション動作を示す。8 ノード上のタスクが並列に動作して、トルクなどの車体制御値を制限時間内に計算処理できていることを確認した。

また、NoC プラットフォーム上に RTOS を搭載して車体制御アプリケーションを動作させた場合と、OS を搭載せずに動作させた場合のメモリ使用量と RTOS 実装時のメモリ増加量を比べたところ、表1のような結果となった。

表1　RTOS実装時のメモリ増加量

| | Node1 | Node2 | Node3 | Node4 | Node5 | Node6 | Node7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OSあり | 52384 (約51.1KB) | 40444 (約39.5KB) | 42044 (約41.1KB) | 44228 (約43.2KB) | 78660 (約76.8KB) | 47016 (約45.9KB) | 40444 (約39.5KB) |
| OSなし | 46868 (約45.8KB) | 38812 (約37.9KB) | 39192 (約38.3KB) | 41096 (約40.1KB) | 75024 (約73.3KB) | 43952 (約42.9KB) | 38812 (約37.9KB) |
| 増加量 | 5516 (約5.3KB) | 1632 (約1.6KB) | 2852 (約2.8KB) | 3132 (約3.1KB) | 3636 (約3.5KB) | 3064 (約3.0KB) | 1632 (約1.6KB) |

RTOS を搭載した場合、メモリ使用量がカーネルやタスクのスタックサイズ分増加するが、1 ノードあたり 4 ～ 8 タスク動作では 1.6kB ～ 5.3kB 程度の増加量と少ないオーバーヘッドで実装できることが確認できた。

## 3．結言

本年度は高位合成ツールによりタスク分割した車体制御アプリケーションを、RTOS を移植した NoC プラットフォームで動作させて実証実験を行った。その結果、4x2 NoC の 8 プロセッサノードで並列に動作するアプリケーションタスクが正常に動作することを実証できた。また、RTOS の TOPPERS/JSP を移植して各ノードのタスクを実行し、OS を使用しない場合と同様の処理が行えることを確認した。

NoC プラットフォームに RTOS を搭載した場合のメモリ増加量を評価したところ、1.6kB ～ 5.3kB 程度の少ないオーバーヘッドで RTOS とアプリケーションを実装できることが確認できた。

本研究は（独）科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業に採択された「ディペンダブルネットワークオンチッププラットフォームの構築」（研究代表：国立情報学研究所）における会津大学グループの研究課題の1つとして、会津大学とハイテクプラザの共同研究により実施した。

## 参考文献

1) 松本敦　ほか：“非同期式ネットワークオンチップの回路レベル検証技術の構築”、情報科学技術フォーラム講演論文集 8(1)、pp.519-520、2009

2) 松谷：“Network-on-Chip 最前線　～研究の始め方から最新動向まで～”
http://casfukuoka.is.env.kitakyu-u.ac.jp/files/matsutani_kyushu2008.pdf

# ニッケル合金劣化材の炭化物再固溶化

Solution Treatment of Carbide in Deteriorated Nickel Alloy

技術開発部工業材料科　光井啓　鈴木雅千　小柴佳子

耐熱ニッケル合金（NCF800H）は、非常に良い耐クリープ特性を有している一方で、高温で長時間使用を続けると耐酸化性・熱衝撃特性の劣化の危険性を孕んでいるため定期的なメンテナンスが必要とされる。しかし、大型部材では交換コストが高額となるため、設備寿命をどれだけ延長できるかが課題となる。本事業では、炭化物およびγ'相の再固溶化熱処理による劣化材の再生使用の可能性について検討を行った。その結果、1000 ℃以上に加熱することで両相とも再固溶することがわかった。

Key words :　耐熱ニッケル合金, 再固溶化熱処理, 組織制御, $M_{23}C_6$ 炭化物, γ'相（$Ni_3(Al,Ti)$）

## １．緒言

耐熱ニッケル合金である NCF800H は高温における酸化抵抗（耐酸化性）が大きいだけでなく、高温強度（特にクリープ強度）、耐食性が優れることからボイラーや化学プラント、熱処理炉の材料として用いられる。図 1[1]の TTP(Time-Temperature-Precipitation)線図に示したように、高温で長時間使用中に $M_{23}C_6$ 炭化物とγ'相（$Ni_3(Al,Ti)$）が順次析出するのが本合金の特徴である。粒界に析出した炭化物が結晶粒の粗大化を抑制する(ピンニング効果)とともに、γ'相の粒内析出硬化によるクリープ強度の経時的上昇が、高温で長時間使用し続けることを可能にしている[2]。

一方で、当該部材で危険性の高い事故としては、粒界に炭化物が析出することによる粒界の耐食性劣化と、部材自体の大きな自重により発生する内部応力が及ぼす高温下での粒界酸化型の応力腐食割れである。また、熱衝撃が加わるような不慮の事象が発生した場合に、炭化物のみの影響であれば、弾性変形あるいは塑性変形により内部応力の緩和が起きるが、γ'相の析出硬化によりそれらの変形が起きにくくなると、粒界に応力が集中しクラック進展を助長する熱衝撃破壊の危険性も孕んでいる。図 1 より 600 ℃という使用温度はそれらの危険性が最も高い環境であることがわかる。

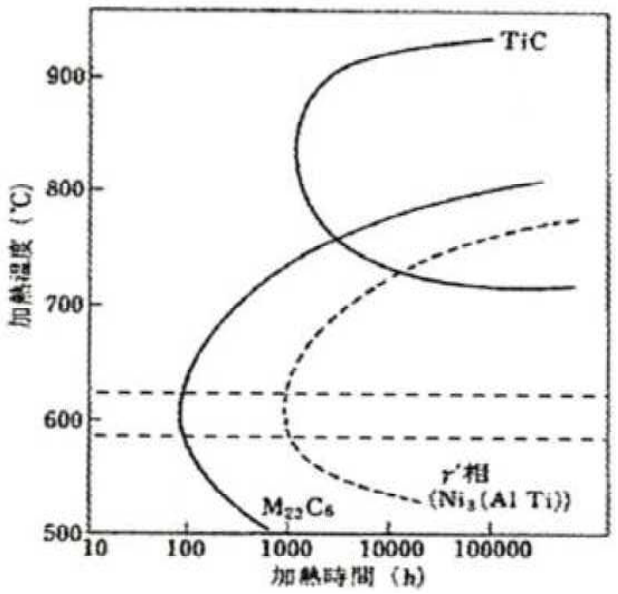



図1　NCF800系のTTP線図[1]

NCF800H を使用する大型部材では、新規材料への交換コストが多額であり、最低でも 5 年（40,000 時間）以上の使用が理想であるが、比較的早い段階で耐酸化性や熱衝撃特性の劣化が始まってしまう（約 10,000 時間で強度が 2/3 ～ 1/2 に落ちる）ため、メンテナンスにより設備寿命をどれだけ延長できるかが課題となっている。その方策としては、より耐熱性のある高級材料に変更するか、劣化材を再生使用するかが挙げられるが、本研究では劣化材の再生使用について検討を行った。

## ２．実験方法

### ２．１．　再固溶化熱処理

約 2 年間 400 ～ 600 ℃の環境下で使用されたプラント製品(使用済劣化材)から約 15mm 角の試験片を切出し、大気熱処理炉で 800、1000、1200 ℃の熱処理を行った。800 ℃は $M_{23}C_6$ およびγ'相が溶解すると考えられる最低温度である。また、1000 ℃は高温で析出する TiC が溶解消失すると考えられる最低温度で、1200 ℃は素材の溶体化処理温度（1100 ～ 1170 ℃急冷）を想定して設定した。5 分および 30 分間の等温保持した後、水冷または空冷により室温まで冷却した。また、比較材として、S45C 及び SUS304 を 1200 ℃で 15 分間の等温保持した後、空冷により室温まで冷却した。

### ２．２．　観察

上記 2.1.に示すように大気熱処理炉を使用しているため、固溶化熱処理による表面酸化が懸念される。これについて、熱処理後の表面酸化状況と断面からの酸化被膜厚さの確認を行った。

また、再固溶化が完了しているか組織観察で確認を行った。

### ２．３．　硬度測定

上記 2.2.に示すようにして試料断面の組織を現出した後、結晶粒界をまたがないよう結晶粒の中心を選んで硬度測定を行った。島津製作所製マイクロビッカース硬度計（HMV-2ADW）にて荷重 200gf × 15 秒間の試験条件の下、5 点平均で硬度を求めた。

## ３．実験結果

### ３．１．　熱処理後の表面酸化状態の比較

高温熱処理により表面酸化が生じる。その度合いは、図 2(a)−(c)に示すように当然ながら高温および長時間であるほど大きい。しかしながら、NCF800H は 1200 ℃× 30 分でも激しい酸化は起きず、酸化被膜の厚さは数μ m 程度であった。比較試験として、S45C および SUS304 を 1200 ℃で 15 分間の等温保持したものの酸化被膜厚さを観察した。図 2(d)に示すように S45C では激しい酸化により酸化被膜の脱落が起き、正確な厚みは求められなかったが、0.5mm 以上形成していると考えられる。一方、SUS304 においても図 2(e)に示すように一部酸化被膜の脱落が見られ、最大 30 μ m 程度の酸化被膜が確認された。

以上より、NCF800H は、大気環境下で高温熱処理しても、30 分程度の短時間であれば表面酸化は比較的少なく、材質への影響は大きくないと考えられる。

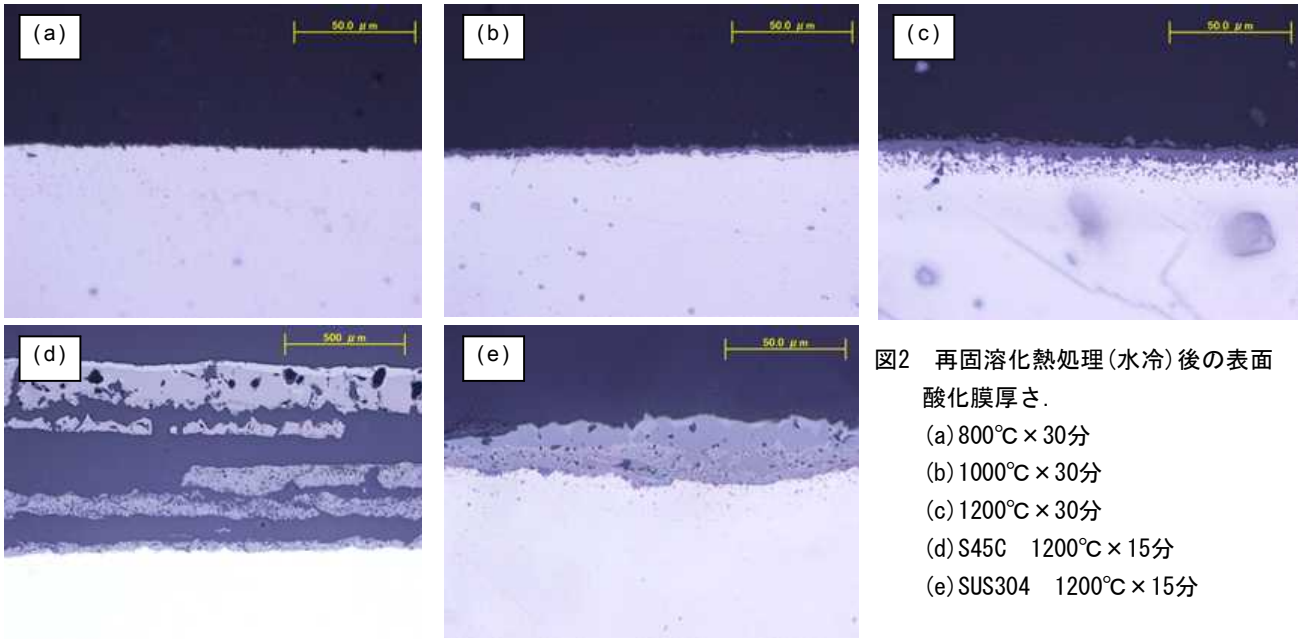



図2　再固溶化熱処理(水冷)後の表面酸化膜厚さ.
(a) 800℃×30分
(b) 1000℃×30分
(c) 1200℃×30分
(d) S45C　1200℃×15分
(e) SUS304　1200℃×15分

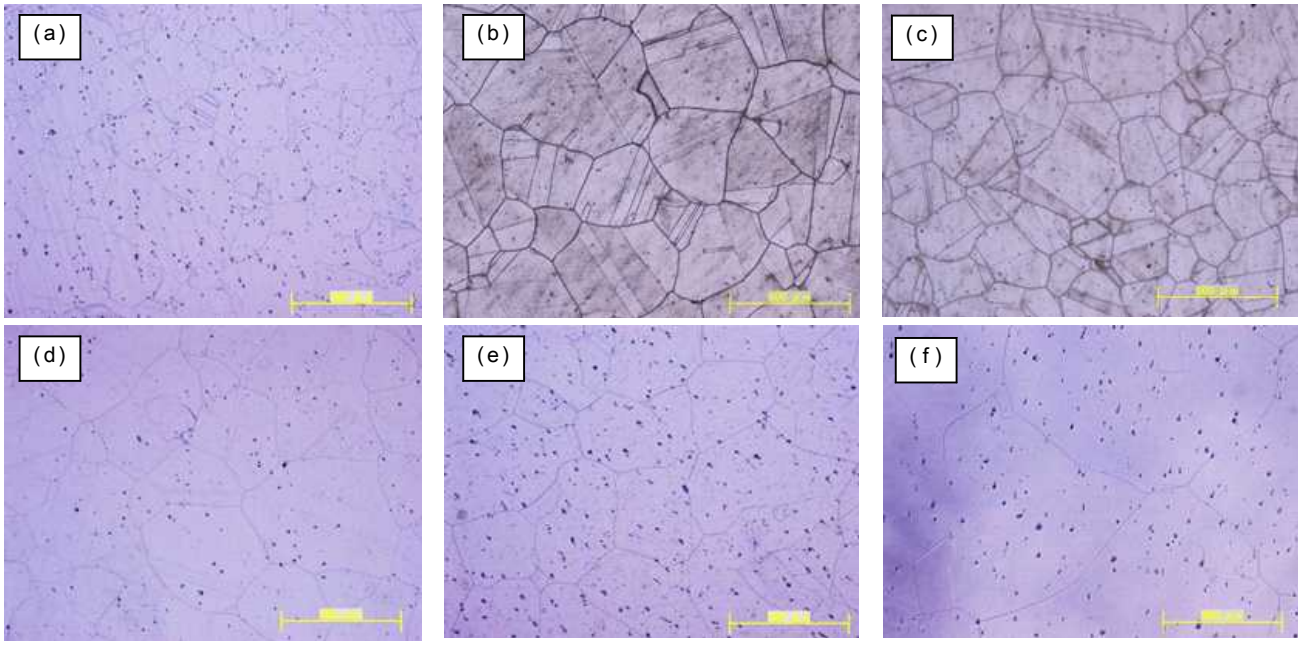



図3　再固溶化熱処理(水冷)後の断面ミクロ組織.　(a)未使用材、(b)使用済劣化材
(c) 800℃×30分、(d) 1000℃×30分、(e) 1200℃×5分、(f) 1200℃×30分

500 μ m

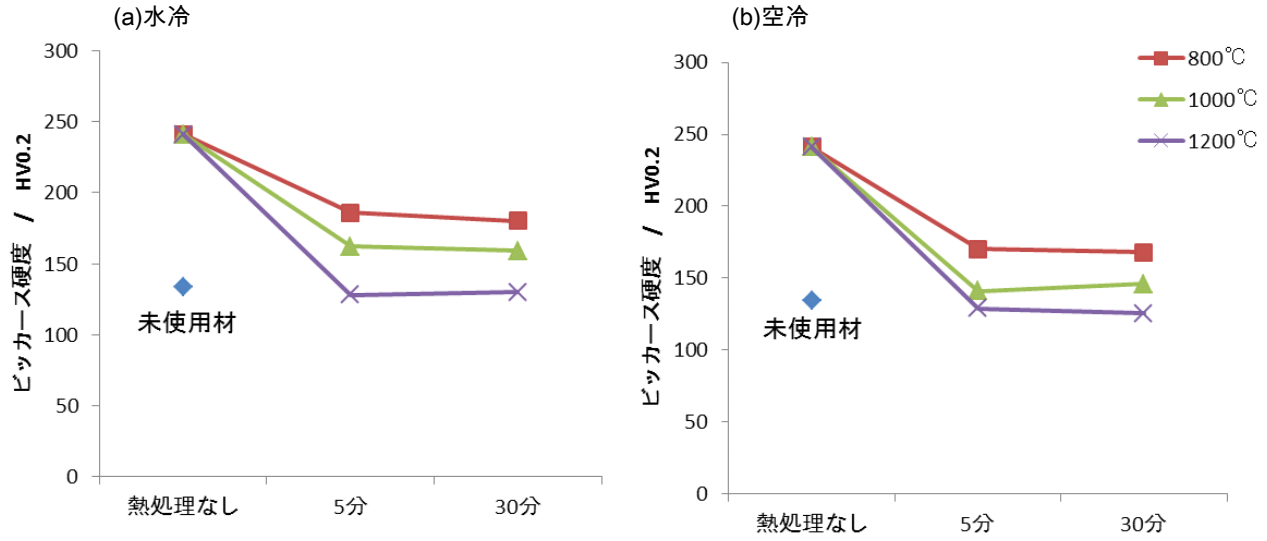



図4　固溶熱処理による硬度変化.　(a)水冷、(b)空冷

### 3．2．　断面ミクロ組織の比較

図 3 に組織観察結果を示す。図 3(b)に示すように、使用済劣化材（熱処理なし）ではエッチングにより粒界がはっきりと浮かび上がっており、鋭敏化していることが確認できる。これを 800 ℃で 30 分熱処理を行っても粒界がはっきりしている。すなわち、800 ℃では鋭敏化が十分に解消されないと言える。炭化物が完全に溶解し鋭敏化が解消される熱処理温度は 1000 ℃以上であるが、図 3(e)および 3(f)に示すように、高温長時間の熱処理では、炭化物が溶解消失すると粒界ピンニング効果がなくなるため、結晶が粗大化してしまう点に注意する必要がある。

紙面の関係上、本報告では水冷品のみを示したが、再固溶化熱処理における冷却速度（水冷、空冷）の違いについては大きな差異は見られなかった。冷却速度が遅いと鋭敏化を起こしやすいと言われているが、今回の試験サンプルのサイズ（約 15mm 角）において空冷程度の冷却速度ではほとんど影響がないと考えられる。

### 3．3．　硬度測定結果

図 4 に示すように、未使用材の硬度が 134HV であるのに対し、使用済劣化材（熱処理なし）は 241HV と硬化している。これは前述したようにγ'相の析出硬化によるものである。γ'相は 800 ℃以上になると溶解消失し、さらに 1200 ℃で熱処理すると、その他の炭化物も完全に溶解消失するため未使用材と同じ硬度まで下がる。約 5 分以上の熱処理で硬度変化はほとんど起こらないことから、5 分程度で相変化は完了していると考えられる。

## 4．結言

使用済材料に対し再固溶化熱処理を行うことで、組織改変が可能であることを確認した。温度は 1000 ℃以上、時間は 5 分以上で改善が見込めると考えられる。また、本研究で調査したサンプルの大きさ（約 15mm 角）では、ミクロ組織に対する冷却速度の差（水冷と空冷）は現れなかった。

実製品における再固溶化熱処理では、析出物の溶解とともに結晶粗大化も起こるため強度低下が懸念される。したがって、短時間で熱処理を終了させることが肝要であるとともに、引張試験あるいは曲げ試験により再固溶化処理後の強度試験を行うことが望ましい。また、冷却速度についても同様に、実製品レベルで調査を行う必要がある。

### 参考文献

1) ステンレス協会編：ステンレス鋼便覧(第 3 版), 日刊工業新聞社(1995), p.235.
2) NIMS 物質・材料データベース　クリープデータシート.

# 電子基板のメッキ仕様がはんだ接合信頼性に与える影響について

Influence of the electroless Ni plating surface on the solder joint reliability

技術開発部工業材料科　　矢内誠人　鈴木雅千　伊藤弘康
いわき技術支援センター機械・材料科　三瓶義之

電子基板のはんだ接合部はニッケルメッキで形成され、その表面が接合反応に大きく寄与する。一方、ニッケルメッキ表面を保護するため、最表面は金メッキとなることが多い。このため、ニッケルメッキ表面の情報を得ることは難しい。本研究では、はんだ接合で不具合を起こした基板と通常の基板のニッケルメッキ表面について、成分分析、表面形状の比較を行った。その結果、不具合を起こしたニッケルメッキ表層のリン濃度が高く、ニッケルメッキの表面形状、色調が正常品と異なることが明らかとなった。

Key　words:電子基板、はんだ、ニッケルメッキ、表面分析

## １．緒言

電子機器は小型化が急速に進行し、ほとんどの工業製品に搭載されるようになった。これにより、機械的な故障ではなく、電子機器の故障により製品に不具合が生じることが多くなった。

電子機器の寿命は電子基板と電子部品の接合部分、すなわち、はんだによる接合部の寿命によるところが大きい。はんだ接合技術も進歩し続けており、電子機器の寿命を延ばすべく、より信頼性の高い接合方法が検討されている。しかし、はんだ接合の不具合は慢性的に発生しており、製造工程において重大な問題となっている。

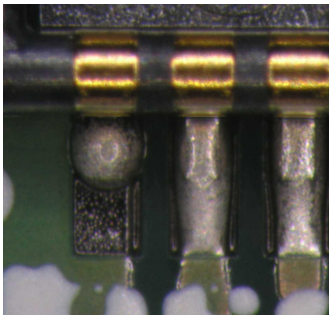


**図1　はんだ接合不良**

電子基板のはんだ接合部分には、銅パターンの上に無電解ニッケルメッキ、金メッキされているものがある。この場合、電子部品のはんだ接合は、はんだ中のスズと電子基板のニッケルとの反応によって行われる。加熱により溶融したはんだがニッケルに接触することでニッケル表面とスズとの間で金属間化合物を形成し、接合が完了する。ニッケル表面ははんだ接合で重要な役割を果たすため、酸化を防ぐ目的で表面に金メッキがされている。しかし、この仕様においてはんだ接合がうまくいかないブラックパッドと呼ばれる不具合が発生することがある。これは、ニッケル表面にリンの濃化層が存在し、スズ-ニッケル間の金属間化合物がうまく形成されないため、はんだ接合が失敗するという事例である。無電解ニッケルメッキ上の金メッキはニッケルとの置換反応で形成される。すなわち、ニッケルメッキ表面のニッケルが溶出し、金が析出する。このプロセスにおいて、ニッケルメッキ表面からニッケルが溶出するため、表面のリンの濃度が相対的に増加する。この反応が過剰に生じた場合、前述のブラックパッドが生じるとされている[1)]。ニッケルとスズの金属間化合物層ははんだ接合の接続信頼性に大きな影響を与えるため、ニッケルメッキ表面の評価は非常に重要である。

しかし、電子基板のはんだ接合部表面は金メッキであり、ニッケルメッキ表面は金メッキの下側になってしまう。このため、分析機器を用いたニッケルメッキ表面の評価は非常に困難であった。従来ははんだ接合した試料の断面観察で金属間化合物層を確認したり、メッキの状態を確認したりするが、ブラックパッドを起こした基板の解析を行っても良品と差を見つけることが困難であった。これは反応に寄与する部分がニッケル表面の極薄い部分である為であり、研磨作業でこの部分を観察するのは難しい。また、断面観察の場合、試料の一部を切り取ってみているに過ぎないため、目的とする観察位置かどうか不明なことが多い。

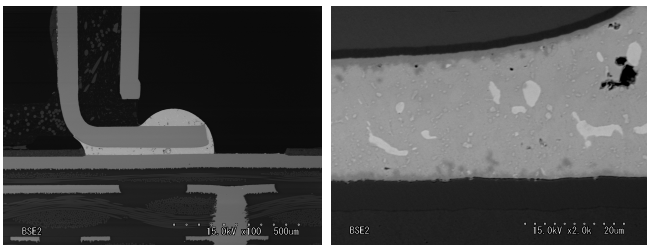


**図2　はんだ接合不良部の断面観察（SEM画像）**

本研究では、はんだ接合の信頼性に大きな影響を起こすニッケルメッキ表面の評価を行った。従来の断面からの観察ではなく、金メッキを取り除き、ニッケルメッキの表面の状態を評価することを目的とした。

## ２．研究内容

表面から内部を分析する手法として、①エックス線

光電子分光法（XPS）による深さ方向分析、②イオンミリング装置により、物理的に金メッキを除去した基板のニッケルメッキ表面分析、③ヨウ素系試薬により、化学的に金メッキを除去した基板のニッケルメッキ表面分析を行った。分析対象は、はんだ接合過程においてブラックパッドと思われる不具合を起こした部品実装済みの基板（NG 基板）と、不具合の起きていない部品実装済みの基板（OK 基板）を比較して評価した。基板内にははんだ接合されていないメッキ部分が存在したため、この部位を上記 3 種の方法で処理して分析を行った。

### ２．１．XPSによる深さ方向分析

XPS は、試料の極表面の元素の情報を得ることができる分析である。イオンスパッタリングと分析を交互に行うことにより、試料の深さ方向の元素分析が可能である。OK 基板、NG 基板それぞれの元素存在比を図３、図４に示す。いずれも最表面に金が検出され、金の割合が減少すると共にニッケルの検出強度が増加する傾向が見られた。リンはニッケルと共に増加し、ピークを迎えた後に一定値へ収束している。これよりニッケル表面のリン濃化層の存在が確認された。

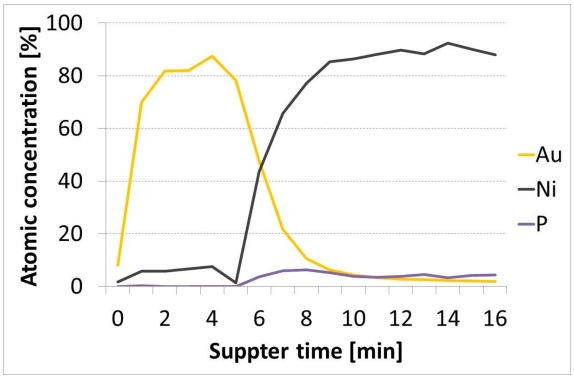



図３　OK基板のXPS分析結果

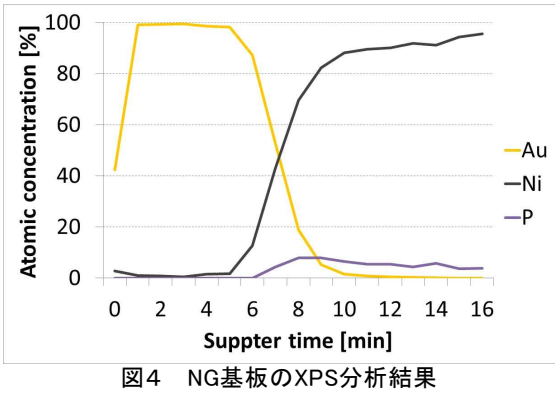



図４　NG基板のXPS分析結果

### ２．２．イオンミリング装置で処理した基板のニッケルメッキ表面分析

イオンミリング装置は、試料にアルゴンイオンビームを照射することで、表面の細かなキズや歪みを取り除くことができる。変形、過熱などの過大な負荷を試料に与えないため、内部の情報を得るには非常に有効な前処理装置である。イオンミリング装置で金メッキを除去した試料の SEM 観察画像を図５に示す。金メッキの除去は目視で試料を確認し、色の変化で判断した。いずれの基板も、ニッケルメッキの析出に由来すると思われる結晶粒界のようなものが確認された。OK 基板は粒界が明瞭に観察できたのに対し、NG 基板では薄くしか確認されなかった。さらに、NG 基板では細かな黒色の点が多く見られた。これは置換金メッキの際の過剰なニッケル溶出で生じた孔食によるものと推定される。

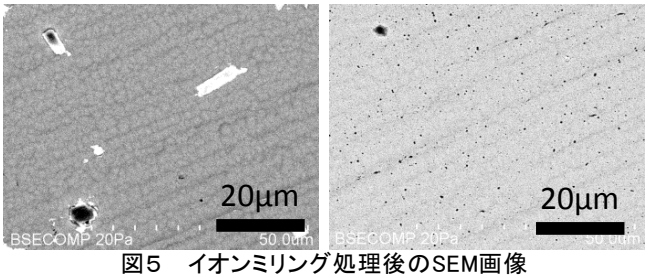



図５　イオンミリング処理後のSEM画像
（左：OK基板、右：NG基板）

### ２．３．ヨウ素系試薬で処理した基板のニッケルメッキ表面分析

金は三ヨウ化物イオンと錯体を形成することで溶解することが知られている。そこで、三ヨウ化物を含む市販の希ヨードチンキを使用して金メッキの除去を試みた。金メッキ除去後のはんだ接合部の実体顕微鏡写真、SEM 写真を以下に示した。図 6 より、金メッキ除去後のニッケルメッキ表面は黒く、NG 基板の方が色が黒く感じられた。ブラックパッド現象は、はんだをはじいた部分のニッケル表面が黒くなっていることが名前の由来であり、今回の現象はそれを示唆するものであると考える。図 7 より、OK 基板、NG 基板の表面状態に差が見られ、OK 基板はニッケルの結晶粒が明瞭なのに対し、NG 基板はほぼ平滑な表面で直線状に孔食が進行したような状況が確認された。ニッケルメッキの表面の形状の違いはニッケルの析出工程に起因すると考えられる。しかし、ニッケルの表面形状とメッキ工程の関係はまだ明らかになっていない。既報 [2)] では、はんだ接合強度はニッケル表面形状と表層のリン濃化層の厚さが複雑に影響するとしている。

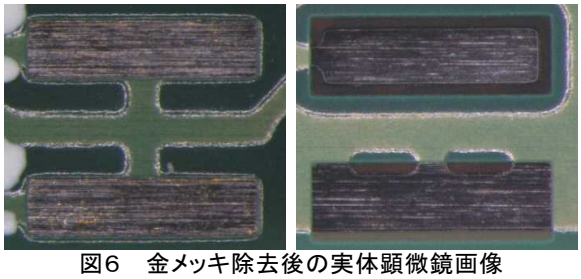


図６　金メッキ除去後の実体顕微鏡画像
（左：OK基板、右：NG基板）

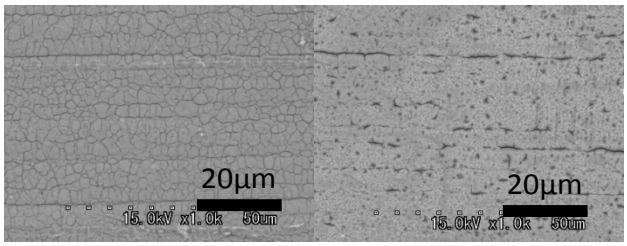



図7　金メッキ除去後のSEM画像
（左：OK基板、右：NG基板）

### ２．４．ニッケルメッキ表層のリン濃度の比較

上記で行ったニッケルメッキ表層のリン濃度を比較するため、ニッケルに対するリンの割合（P/Ni）をXPS で測定した。

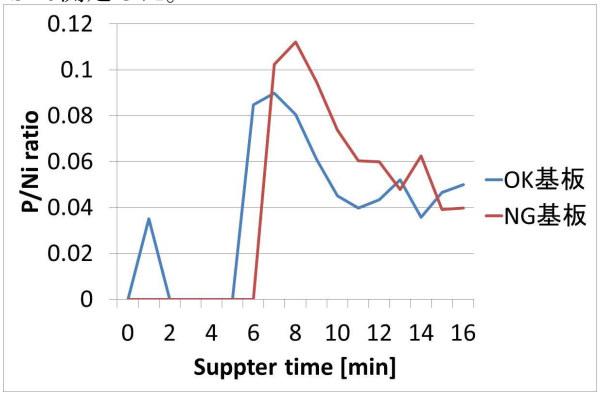



図8　XPSにおけるリン−ニッケル比

表1　各分析におけるリン−ニッケル比

| | XPS 極大値 | XPS 一定値 | イオンミリング | 試薬除去 |
|---|---|---|---|---|
| OK基板 | 0.09 | 0.05 | 0.07 | 0.16 |
| NG基板 | 0.11 | 0.05 | 0.06 | 0.19 |

XPS 分析において一定値を示した比率は無電解ニッケルメッキの平均的なリン濃度と思われる。極大値は置換金メッキの析出に伴うニッケルの溶出によるリンの濃化と思われる。イオンミリングによる結果はXPS の極大値と一定値の中間である。これより、イオンミリングの分析位置はニッケルメッキ表面よりやや内部であることが分かる。一方、ヨウ素系試薬による結果は XPS の極大値より高い値を示した。三ヨウ化物イオンによる金の溶解の際、ニッケルを共に溶出させている可能性が考えられるが、その影響は少なく、金のみを効率よく除去できていることが確認された。

リン - ニッケル比の比較を行うと、NG 基板の方がOK 基板よりも高い値を示した。しかし、その差はわずかであり、有意な差とは言いにくい。同様に、表面の色調においても違いはわずかであった。ニッケルメッキの状態については、表面の形状、孔食の深さ方向で差が見られた。以上の結果より、はんだ接合不良はニッケルメッキ表面のリン濃度だけではなく、ニッケルメッキの表面形状、孔食状態と相関があると思われる。リンの濃度が高いとはんだ接合部の強度が低下することはすでに報告 [3),4)] されており、表面のリン濃度も重要な情報である。ニッケルメッキの表面形状や孔食状態はメッキの析出プロセス（メッキ条件、添加剤等）に起因すると思われ、無電解ニッケルメッキ工程がはんだ接合部の信頼性に大きな影響を与えることが示唆された。

## ３．結言

はんだ接合部の不具合解析のアプローチとして、従来からの断面観察ではなく表面からのアプローチを行った。断面観察よりも多くの情報が得られ、電子基板の評価に非常に有用である。はんだ接合反応に影響を与えるニッケルメッキ表面の分析を行ったところ、表面のリン濃度が高いことが明らかになり、NG 基板の方がわずかに高い傾向が見られた。また、ニッケルメッキ表面の形状、孔食深さが異なることが明らかとなった。これらはニッケルメッキの析出工程によるものと思われる。はんだ接合部の信頼性は、はんだ接合プロセスだけでは確保できず、電子基板のメッキ品質に影響を受けることが示唆された。

### 参考文献

1) 菅沼克昭：”はじめての鉛フリーはんだ付けの信頼性”、株式会社工業調査会、2005
2) 山本智之ら：”はんだ接合強度に及ぼす無電解ニッケル - 置換金めっきプロセスの影響”、エレクトロニクス実装学会誌、pp.339-344、2003
3) 杉崎敬ら：“BGA はんだ接合に及ぼす無電解 Ni/Au 処理の影響”、エレクトロニクス実装学会誌、pp.124-127、2001
4) 杉崎敬ら：“無電解 Ni/Au 処理基板への Sn-Ag および Sn-Ag-Cu はんだボールの BGA 接合性比較”、エレクトロニクス実装学会誌、pp.272-277、2002

# クラッド接点の電気伝導解析及び熱解析

The electro-conduction analysis and heat-conduction analysis for clad type contacts

技術開発部生産・加工科　大内繁男
技術開発部工業材料科　　工藤弘行

エアコンのコンプレッサ等の過電流保護に使用するプロテクタのクラッド接点に、クラッド間の剥離が生じるという問題が生じている。本研究の提案企業では、クラッド間に剥離が生じる原因として、クラッド内の欠陥の影響、特に通電による発熱が生じた場合の影響に着目している。クラッド内の欠陥が、クラッド間の剥離にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするため、CAE を使用した電気伝導解析と熱解析を行った。

Key　words:CAE、電気伝導解析、熱解析、連成解析、熱応力

## １．緒言

提案企業の北光金属株式会社は、過電流保護用プロテクタに使用するクラッド接点を製造している。クラッド接点は４層クラッド構造を持つが、素材である金属板材をクラッド接合してクラッド材とした後に、プレス打抜き工程を経て製品形状を得る。現在、クラッド型接点のクラッド間にて剥離が生じるという問題が顕在化しているが、そのメカニズムは不明である。提案企業は、通電による発熱が生じることで、クラッド内の欠陥から剥離が広がる危険性に着目している。しかし、内部欠陥や、製品内部の通電、発熱の状況は外部から観察できないため、その仮説の検証が出来ない状況である。

そこで本研究では、上記の課題を解決するため、CAE による電気伝導・熱解析により内部挙動を可視化し、欠陥がクラッド間の剥離の進展に及ぼす影響を明らかにすることで、仮説の妥当性を検証した。

## ２．ＣＡＥを使った解析

### ２．１．　解析対象の形状

クラッド型接点が使用されている過電流保護用プロテクタは図１に示すような構造をしており、抵抗体からクラッド接点を通り固定接点に電流を流す。過電流が流れた場合には、抵抗体の温度が上昇しバイメタルが反ることで、クラッド接点同士が離れることにより、電流の流れを阻止する仕組みである。

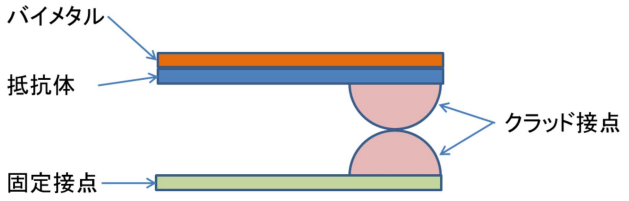



図１　クラッド接点を使用したプロテクタ

クラッド接点は、図２に示すように底面から鉄、銅、銀、銀合金の順に４層の金属で構成される。提案企業の想定によると、欠陥は底面から３層目の銀層に生じ、その形状はφ 100 μ m の円柱形状と見られる。CAE による解析では、欠陥部にはエアが充填されているとし、クラッド接点はφ 5mm の円柱形状とした。

図２　クラッド接点のクラッド構造

### ２．２．電気伝導解析

クラッド内の欠陥の影響を調べるため、クラッド内に欠陥が存在する場合と存在しない場合について CAE を使用し抵抗損の解析を行った。

印加条件を変えて、直流電圧を印加した場合の定常解析と、交流電圧を印加した場合の過渡解析を行った。それぞれの解析での印加電圧は、クラッドボタン型接点の使用条件からの推定により表１のように仮定した。印加点の位置は、解析対象モデル上面の中心点から対称に、0mm、± 1mm、± 2mm とし、印加点の大きさはφ 100 μ m とした。

表１　印加電圧条件

| 定常解析 | 過渡解析 |
|---|---|
| 直流240[V] | 交流240[V] 周波数50[Hz] 半周期 |

定常解析と過渡解析より、銀層の抵抗損を求めたが、抵抗損は印加点の位置には依存しないことが分かった。欠陥が有る場合と無い場合の銀と銀合金の境界の抵抗損について、定常解析結果を図３に、過渡解析結果を図４に示す。欠損の位置は、抵抗損が最も大きかった印加点の直下とした。図４の抵抗損は、抵抗損が最も大きかった印加電圧のピーク値での抵抗損である。どちらの解析結果も、欠陥の周辺で欠損のない場合に比べて抵抗損が大きいことを示している。クラッド接点の上面の印加点から底面に向かって電流が流れるが、欠陥のインピーダンスが銀に比べて大きいため、電流

が欠陥を避けて底面に流れようとして、欠陥周辺に電流が集中することにより、欠陥周辺で抵抗損が大きくなると思われる。

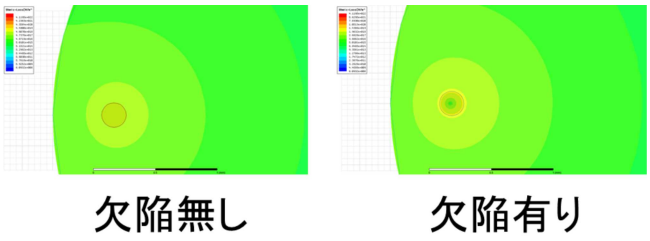



図３　定常解析による抵抗損

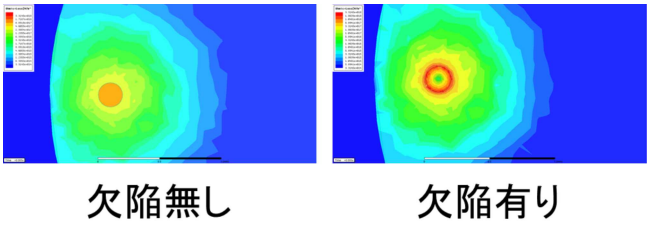



図４　過渡解析による抵抗損

次に、欠損寸法と抵抗損の関係について、解析を行った。抵抗損の解析は過渡解析で行い、欠損の直径を 10 μ m、50 μ m、100 μ m、200 μ m で行った。印加電圧はピーク値とした。銀層と銀合金層の境界の抵抗損を解析結果を、図 5 に示す。

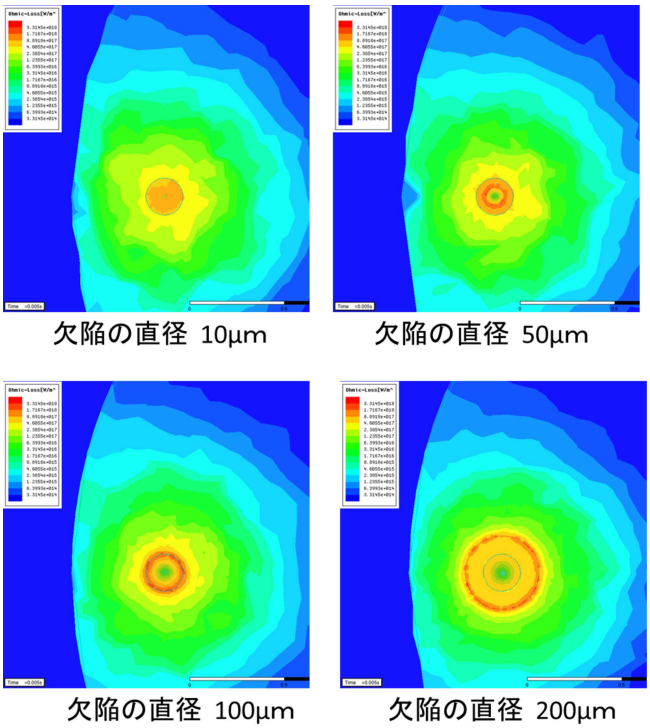



図５　欠陥寸法と抵抗損の関係

図５の解析結果から、欠陥寸法が小さい場合には、欠陥周辺の抵抗損が小さいことがわかった。これは、欠陥寸法が小さい場合、欠陥を避けて欠陥周辺を流れる電流が少ないことが原因と思われる。

## ２．３．熱伝導解析

熱伝導解析は瞬間的な発熱後の温度分布の変化を知るため、過渡解析を実施した。解析モデルは、電気伝導解析と同様に、φ 5mm の円柱形状とし、対称性を考慮し 1/2 モデルにて 3 次元解析を行った。材料特性として、4 層の材料ごとに熱伝導係数、密度、比熱を設定した。これらは材料固有の物性値であるため、提示された物性値の他、既存のデータを引用した。境界条件としては、初期温度、発熱条件、熱伝達係数を設定した。初期温度は 40 ℃ならびに 100 ℃とした。

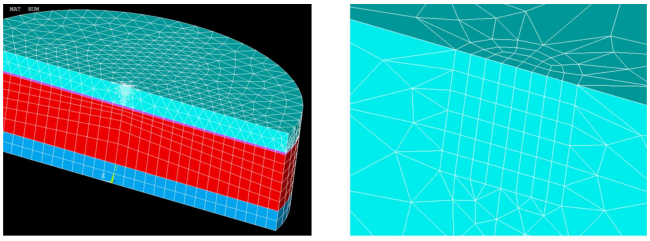



図６　解析モデル

発熱条件、熱伝達係数は、材料固有の物性値ではなく、状況に応じて変動するパラメータであり、実現象と整合性のある数値を決定する必要がある。このため、複数のパラメータの組み合わせにて試算を行い、実現象の温度測定結果などとの整合性から入力パラメータを決定する「逆解析手法」を用いた。物体と周囲の流体（この場合は空気）の間の熱を受け渡しに関するパラメータである熱伝達係数については、10W/K･m$^2$ とし円柱側面に設定した。

発熱条件は、上面表面にφ 100 μ m、高さ 100 μ m の円柱内領域で体積発熱し、1msec 後に 1000 ℃程度に達する想定とした。複数の試算をした結果、体積発熱 1.4E14W/m$^3$ と決定した。1msec 以降は発熱をゼロとして、30msec までの温度変化を計算した。この計算のため、ANSYS のリスタート解析機能を用いた。

図７は発熱後 3msec、ならびに 25msec 経過時の結果である。本製品の 4 層の熱伝導率の差は小さいので温度はほぼ放射状の分布となる。25msec 経過後には製品内の温度がほぼ一定となることが分かった。

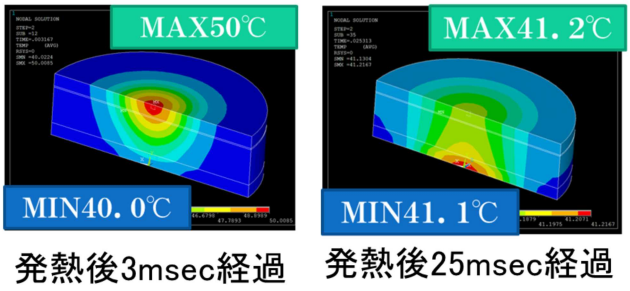



図７　発熱後の温度分布

次に、銀層の欠陥の影響を調べるため、φ 100 μm～φ 1mm の欠陥が存在する場合の解析を実施した。この結果、φ 100 μm程度の欠陥では温度分布に与える影響は小さいものの、φ 1mm 程度の欠陥になると温度分布に大きな影響を及ぼし、図８に示すように亀裂上部と下部で、90 ℃程度の大きな温度差が生じる瞬間もあることが分かった。

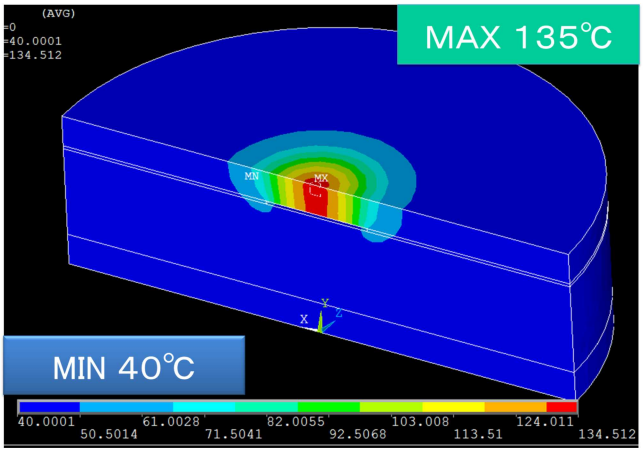
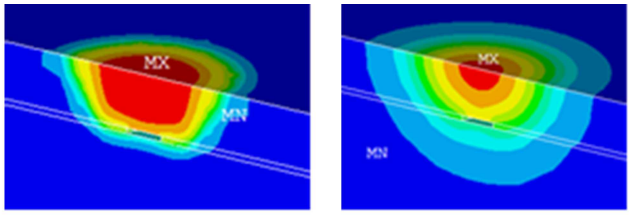



図８ 欠陥が存在する場合の温度分布
（φ１㎜欠陥の中心直上で発熱した場合）

### ３．３．連成解析

前項までの解析はそれぞれ電磁解析、熱解析という単一の物理現象に関するものであるが、近年、二つ以上の物理現象の相互作用を計算する連成解析（あるいは協調解析とも呼ばれる。）がコンピュータの計算能力の向上により、広く利用されるようになっている。工業製品では、複数の物理現象が関与し合う複雑な現象が問題となるケースが多いが、これまでは解析条件を単純化して CAE 解析を行うことが主流であった。

図４で明らかになった欠陥周辺に電流が集中する影響を調べるために実施した電磁 - 熱 連成解析の結果を図９に示す。欠陥寸法はφ 100 μ m とした。解析を簡易化するため、図４の結果を参考に欠陥周辺に抵抗損と比例し、最高到達温度 1000 ℃となる体積発熱を設定した。図９左発熱後 0.01msec 経過時では、電気伝導解析の抵抗損と類似の分布を示すのに対し、図９右 1msec 経過時では、放射状の分布となる。以上より、欠陥寸法φ 100 μ m では、温度分布に及ぼす影響は小さいことが確認できた。




発熱後0.01msec経過　　発熱後1msec経過

図９ 欠陥周辺の電流集中が温度分布に及ぼす影響

次に、温度上昇に伴う材料の熱膨張により生じる熱応力を計算するために実施した熱 - 構造 連成解析の結果を図１０に示す。本解析では、ヤング率、熱膨張率の温度依存性は考慮せず、室温時の値を用いた。解析条件は、図８のφ 1mm の欠陥の中心直上で発熱し、欠陥上下で約 90 ℃の温度差が生じた場合とした。図１０左は Y 方向変位分布図であるが、熱膨張により行き場を無くした欠陥上部の部材が上方に 1.46 μ m 膨らむことが確認できる（変位スケール 100 倍の強調表示）。図１０右は、破壊にかかわる引張側の最大主応力の分布図であるが、欠陥先端の応力集中により最大 103MPa が生じている。欠陥上方を持ち上げるような変形の結果、欠陥を開くような「モード I」タイプの応力になっていることや、材料内部より強度が低い銀 - 銅界面で最大応力が発生することを考えると、剥離進展に繋がりかねないレベルであると判断できる。

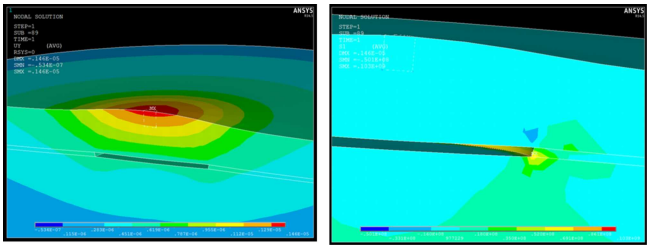


図１０ 熱応力解析の結果
（左：y方向変位分布図、右：最大主応力分布図）

## ３．結言

クラッド接点の銀層における欠損がクラッド間の剥離に及ぼす影響を調べるため、電気伝導解析と熱解析を実施した。

(1) 電気伝導解析では、銀層に欠陥がある場合、欠損がない場合に比べて欠損周辺で抵抗損が増加すること、欠損が小さい場合には抵抗損の増加が大きくならないことを確認した。

(2) 熱解析では、瞬間的な発熱を与えた後の温度変化を解析し、無欠陥の場合、放射状の分布となり、25msec 後には製品内はほぼ同一温度になることを確認した。

(3) 連成解析の結果、φ 100 μ m 程度の欠陥では、発熱 1msec 後には放射状の温度分布になり、剥離の進展に及ぼす影響が無いことを確認した。また、φ 1mm のき裂が存在する場合は、欠陥部で最大 103MPa の熱応力が生じ、剥離につながる可能性があることを確認した。

# FPGA を用いた電源装置の表示機能の検討

Examination of the Display function of the electric power unit with FPGA

技術開発部生産・加工科　高樋昌　大内繁男

応募企業では、自社で開発している電源装置の動作状況を表面パネルのランプのみで表してきた。しかし、客先からの要求もあり、動作状況を液晶ディスプレイに表示できるように改良を加え、表示内容をプログラムなどで柔軟に変更する必要がでてきた。そこで、市販の FPGA 開発ボードを用い、キャラクター型の液晶ディスプレイに対し電源装置の測定値を表示する回路を設計した。また、TOPPERS/JSP による表示プログラムにより動作するシステムを構築した。

Key　words:FPGA、液晶ディスプレイ、TOPPERS/JSP

## １．緒言

応募企業である有限会社エイチ・エス・エレクトリックでは、スパッタリング用電源や直流安定化電源などを設計・開発、組み立て、販売を行っており、製造装置メーカから高い評価を得ている。応募企業で開発している電源装置は、動作状況を表面パネルのランプの点灯・消灯のみで表してきたが、客先から、電圧の状況をリアルタイムで確認したいとの要求があり、液晶ディスプレイや７セグメント LED に表示できるように改良を加える必要性が発生している。また、将来的にさまざまな電源の状態値を表示できるようにするため、表示内容はプログラムなどで柔軟に変更できるように拡張性を持たせたいとの要望があった。

一方、応募企業では FPGA を用いた回路設計の実績はあるが、OS 等を用いた外部デバイス（液晶ディスプレイなど）の活用の実績は少なかった。そこで、市販の FPGA 開発ボード[1)]を用い、

（１）キャラクタ型の液晶ディスプレイに対し電源装置の測定値を表示する回路の設計

（２）TOPPERS/JSP を用い、表示する値を適宜変更できる表示プログラムを作成し動作確認

を行った。

## ２．システムの構築

市販の FPGA 開発ボードを用い、FPGA 開発ボードに接続されたキャラクタ型液晶ディスプレイ（LCD）に対し、外部の電圧確認用実験装置の電圧を表示するシステムを構築した。電圧確認用実験装置は LED を点灯させ可変抵抗で明るさを変更する簡単なものとし、電圧は LED 素子の両端電圧を測定した。なお、応募時の要求では測定電圧の表示が最優先事項であったため、本開発では電圧表示に特化したが、FPGA に取り込むことができる信号であれば電圧に限らず表示可能である。

FPGA で処理する信号はデジタル値であるが、電圧測定など、センシングされた外部信号の多くがアナログ値である。したがって FPGA を利用する場合、アナログ／デジタル変換（A/D 変換）は必須である。通常 FPGA 自体に A/D 変換機能が備わっていることはなく、A/D 変換器を別途用意する必要がある。本開発でも A/D 変換器（8 ビット）を用意し、測定電圧値を A/D 変換した。また、A/D 変換器を介して FPGA にデータを取り込むため、FPGA に対して A/D 変換器も外部デバイスとなるため、A/D 変換器用 FPGA インターフェースを用意した。なお、LCD 用インターフェースは FPGA 開発環境に準備されている。

図 1 に開発システムのブロックを示す。

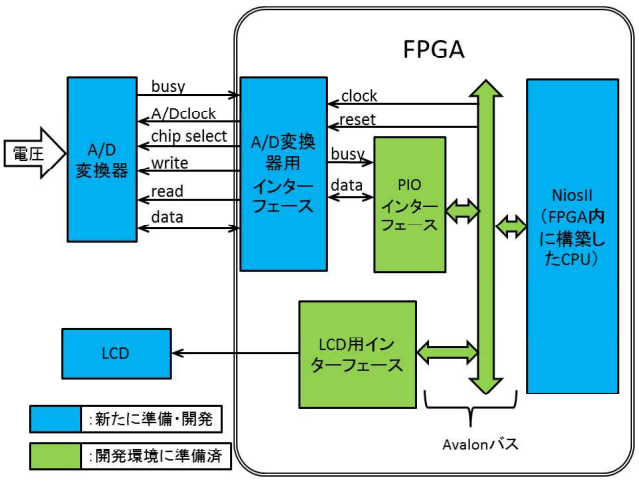



図1　開発システムブロック

開発システムでは、外部センサ等のアナログ信号を A/D 変換器に入力し、A/D 変換後のデジタルデータを、開発した A/D 変換器用インターフェースを介して CPU に取り込む。CPU ではリアルタイムマルチタスク OS を用いて開発したアプリケーションを動作させ、取り込んだデジタルデータを LCD インタフェースを介して LCD に表示させる。

図 2 に A/D 変換器の変換タイミングを示す。通常、変換タイミングは A/D 変換器のデータシートに掲載されているため、データシートを入手後変換タイミングに従い図 3 の状態遷移を導き出し、A/D 変換器用インタフェースを作成した。CPU とインターフェースを FPGA 上に配置したシステムを図 4 に示す。

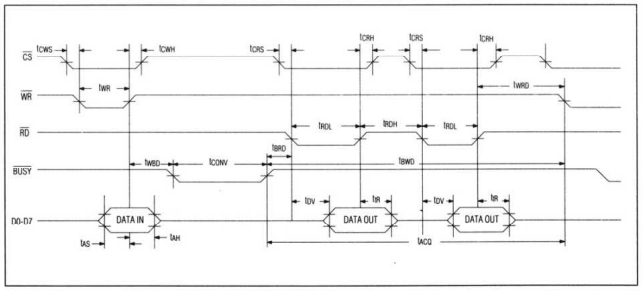



図2　A/D変換タイミング

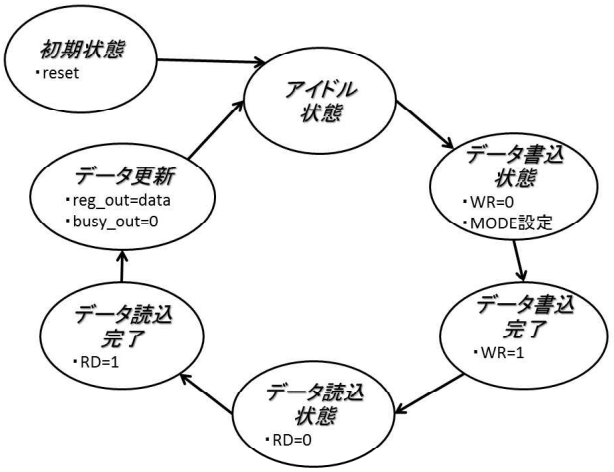



図3　A/D変換器用インタフェースの状態遷移

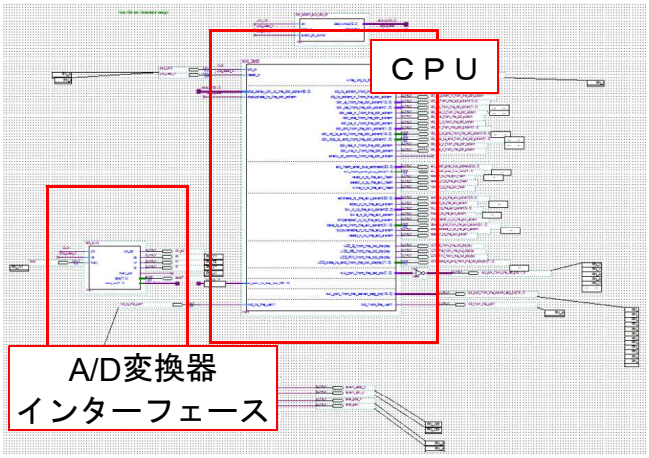



図4　FPGA上に配置したシステム

図 4 は結線の実態情報など、開発に必要な情報がすべて含まれたものである。　図 5 にアプリケーションブロックを示す。

アプリケーションは非常にシンプルで、デジタルデータの読込みタスクと LCD に表示するためのデータ変換・表示タスクの 2 つだけである。読込みタスク、変換・表示タスクはユーザの希望するタイミングを設定し周期的に起動させている。

変換・表示タスクの変換処理は、読込んだデジタルデータを数値データに変換した後、さらに数値データを表示可能な文字列に変換している。また、デジタルデータを数値データに変換するには、デジタルデータと数値データを 1 対 1 対応させたテーブルを用いるか、

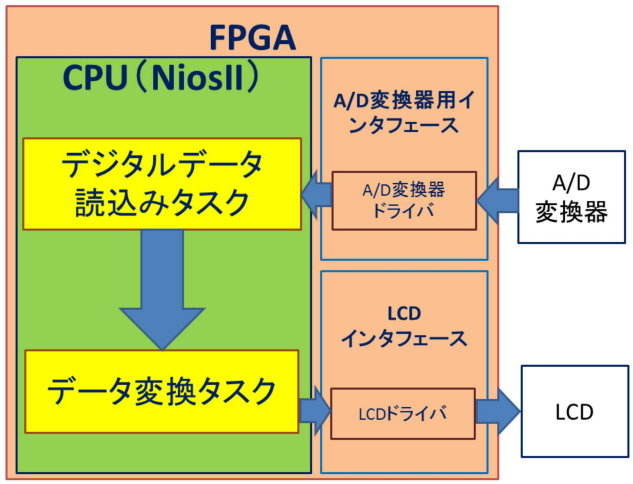



図5　アプリケーションブロック

変換式を用いることが多い。組込み分野では、複雑な数式を用いると作成したアプリケーションのファイルサイズが巨大になるためテーブルを利用するのが一般的だが、本開発では 1 次式で変換可能であるため図 6 に示す通り実測をもとに導いた変換式（1）を用いた。

$$V=4.8742 - 0.0153 \times x \quad (\text{A/D 値}) \quad \cdots \quad (1)$$

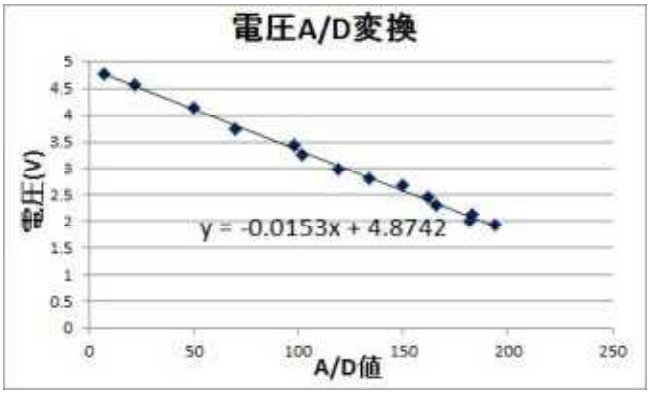



図6　電圧のA/D値

なお、0 ～ 5V を 8 ビット A/D 変換する場合の理想的な式は V=5.0 － 5.0 ／ 256 × x（A/D 値）となるが、実際のシステムでは誤差が入るため、実測による数式導出が現実的である。

## ３．実験

図 7 に本開発で構築したシステムの概要を示す。FPGA 開発ボードは Altera 社の NiosII 開発ボード（StratixII：EP2S60F672C3）を用いた。A/D 変換器は MAXIM 社の MAX155（8 ビット）を用いた。電圧表示には 2 段 16 ケタ表示の LCD（FPGA 開発ボード附属）を用いた。アプリケーションは TOPPERS/JSP（1.4.3）を用いて作成した。なお、FPGA 側の電源電

圧は 3.3V、A/D 変換器側の電源電圧は 5V であるため、FPGA と A/D 変換器間にバッファを設けた。測定電圧は、LED に接続した可変抵抗を変化させ、LCD に電圧値を表示させながらテスタで測定した。

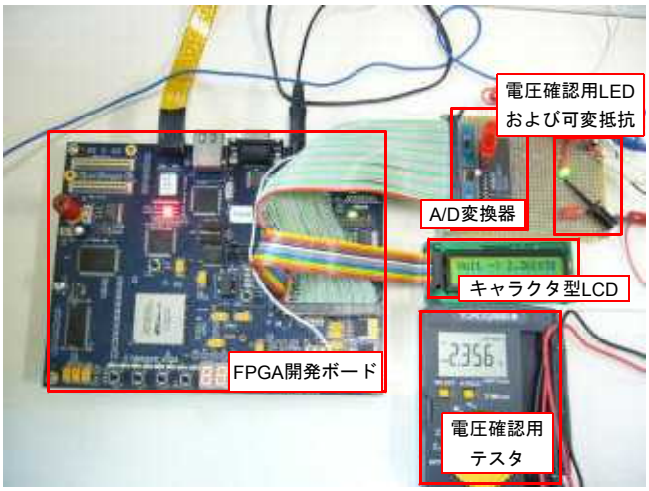



図7　実験システム概要

図 8 に表示状況を示す。テスタによる測定においてそれぞれ 2.36V、3.78V の時、LCD 表示は 2.36V、3.77V となっていることがわかる。また、電圧によって輝度が変化していることがわかる。

図8　電圧変化による表示

## ４．結言

市販の FPGA 開発ボードを用い、外部回路の電圧値を LCD に表示する回路を設計し、その表示回路に対し TOPPERS/JSP で作成した表示プログラムにより電圧値を表示させた。その結果、テスターで測定した実測値と同様の値を表示することができた。

本開発では、電源電圧の状態値の例として LED の両端電圧を測定対象とした。センサーの多くは電圧もしくは電流の変化をセンサー値として出力するが、最終的に電圧に変換して取扱うことになる。FPGA を利用する場合、A/D 変換器ごとに FPGA とのインターフェースを用意する必要があるが、A/D 変換器のデータシートを参照し状態遷移を記述できれば比較的容易にインターフェースを作成できることが分かった。

また、アプリケーションは A/D 変換データを物理データに再変換する式などを適切に導き出せれば容易に作成できることが分かった。

応募企業では、インターフェース作成の技術は持っているため、FPGA とインターフェースの合成方法、FPGA への CPU の構築方法、アプリケーションの作成方法を技術移転すれば、製品へ応用することが十分に可能である。また、今後応募企業において、本開発を足掛かりに、FPGA からの外部デバイス利用技術を蓄積していくことが可能となったと考えられる。

本開発で得たシステム構築技術は、センサーデータの表示に限らず、センサーデータを FPGA に取り込む部分を利用できれば、測定・制御装置など幅広い分野への応用が可能である。

### 参考文献

1)Nios Development Board Stratix II Edition Reference Manual
http://www.altera.co.jp/literature/manual/mnl_nios2_board_stratixII_2s60_rohs.pdf

# 切削工具寿命の判定

Study on the evaluation method for tool life judgments

技術開発部生産・加工科　小野裕道　齋藤俊郎　安藤久人
ＬＳＩクーラー株式会社　阿部信博

総形工具による切削加工は、チッピングなどの工具損傷による刃先の乱れが工作物形状に転写され、表面粗さも悪化するため、加工不良を発生させてしまう。対策として、工具を定期的に交換することが求められるが、工具損傷は工具材種やコーティングの有無、被削材の材種、加工条件の影響を受けるため、工程ごとに管理する必要がある。工具損傷の評価項目を検討し、加工実験による工具寿命の判定を行った。

Key　words: 総形工具、工具寿命、チッピング

## １．緒言

申請企業である LSI クーラー株式会社は、アルミ合金材から切削加工によりヒートシンクを製造している。このヒートシンクは大きさが約 100mm × 200mm × 50mm のかまぼこ型の中空の部品で、断面形状は図 1 に示すように曲率半径の違う円弧をつなげた形状をしており、この部分を総形のエンドミルにより切削加工を行っている。

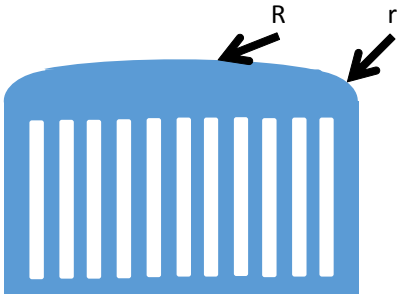



図1　ヒートシンク断面形状

総形工具による切削加工は、加工したい断面形状と同じ切れ刃形状の工具を用いれば、廉価な工作機械で容易に複雑な形状を生産できる利点がある。その反面、工具にチッピング等の工具損傷が生じた場合、製品の対応した部分に傷や表面粗さの悪化等が生じる。このため工具摩耗を把握し、定期的に工具を交換する必要があるが、総形工具は形状が複雑になりがちであり一般的な工具に比べ高価で、再研磨も割高であり、工具の再研磨の回数を減らしたいという要望がある。

本研究では、この総形工具による加工不良の原因について考察を行い、工具寿命を把握するための加工実験を行った。

## ２．加工不良観察

### ２．１．削り残しの観察

申請企業において、量産する予定のアルミ合金製ヒートシンクの試作を行ったところ、工作物の加工面に図 2 に示す工具送り方向に沿ったスジ状の傷が見られた（図中の赤枠内）。非接触三次元測定装置（三鷹光器(株)製 NH3-SP）により傷の形状測定を行ったところ、幅数十 μm、高さ数 μm の凸形状の削り残しであった。

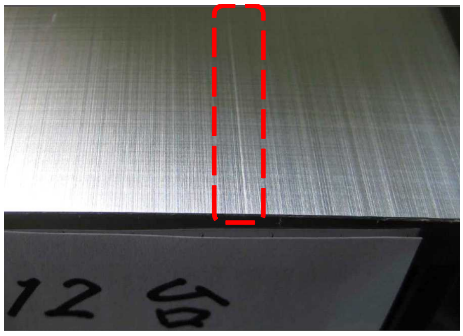



図 2 加工面削り残しの外観

この加工を行ったエンドミルの削り残し付近の切れ刃を観察すると、6 枚の切れ刃のうち 1 枚に図 3 に示すチッピングが観察された。この部分を非接触三次元測定装置で断面形状を測定すると、図 4 に示す幅 46μm、深さ 6μm ほどの窪みとなっており、工作物の削り残しと幅がほぼ一致したため、これが傷の原因であると推察された。

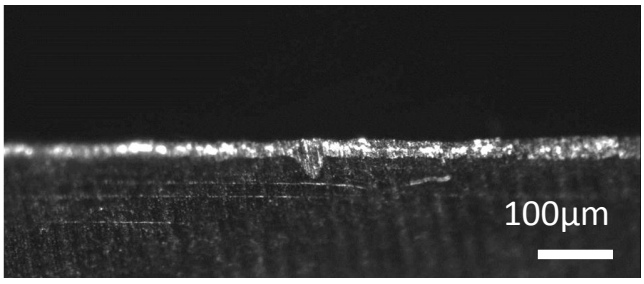



図 3 エンドミル刃先チッピング

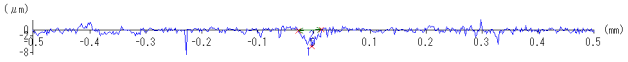


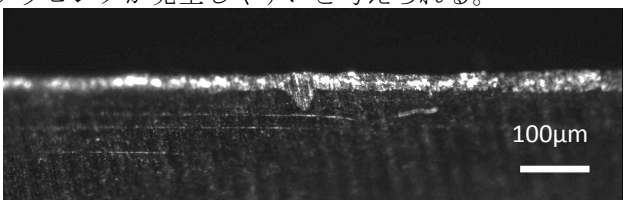

図 4 工具チッピング断面形状

### ２．２．工具摩耗測定法の検討

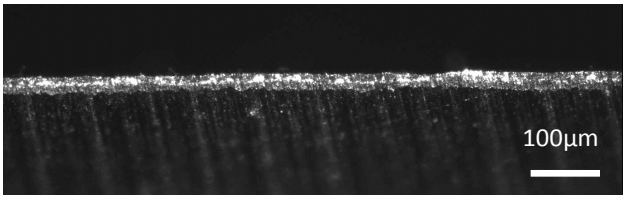
一般に工具の摩耗は、すくい面のクレーター摩耗や

逃げ面摩耗幅などを測定し定量化する。この総形エンドミルは切れ刃のチッピングが加工不良の原因であったものの、チッピングは突発的に発生し把握することが難しいため、逃げ面摩耗と切れ刃断面形状の測定を行った。

逃げ面摩耗を工具先端側とシャンク側で観察した結果を図 5 に示す。どちらも摩耗幅に差は見られないものの、チッピングは工具先端部に多く見られる傾向があった。特にこの総形工具は、刃長が長く切削抵抗が大きくなることから、ビビリが発生しやすく先端側のチッピングが発生しやすいと考えられる。




(a)　工具先端側（チッピング部）




(b) 工具シャンク側

図 5　ハイス工具逃げ面摩耗

加工前およびヒートシンク 120 台加工後の、工具先端から 20mm の位置における切れ刃断面形状の測定結果を図 6 に示す。この断面形状から、逃げ面側の摩耗が工具寿命の把握に有効であることが分かる。

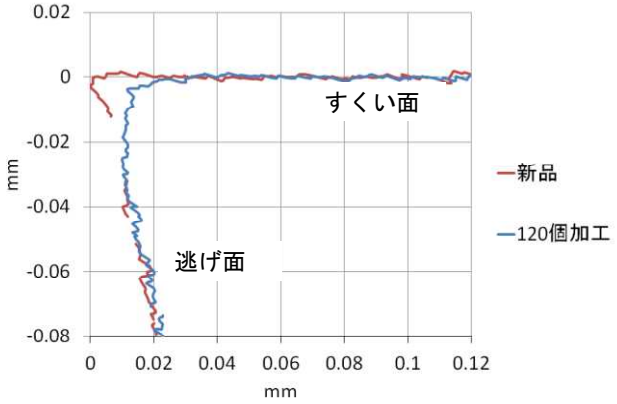



図 6 総形エンドミル工具切れ刃断面形状

## 3．加工実験

### 3．1．実験内容

工具のチッピングは工具剛性の不足によるビビリ振動が要因の一つである。そこで加工実験では、工具の剛性向上のため図 7 に示すように、工具とホルダを一体型とし、中仕上げ、仕上げ加工を行った。

工作機械は LSI クーラー株式会社保有の CNC 加工機（ブラザー工業(株)製）を使用した。主軸のシャンク型式は BT30 のテーパーシャンクである。

表 1 に示す条件で中仕上げ加工、仕上げ加工の順で加工を行い、60 台まで 20 台加工するごとに工具顕微鏡（(株)ニコン製 MM-40/2T）で工具切れ刃のチッピングを観察し、非接触三次元測定装置により、工具先端側より 20mm の切れ刃の断面形状を測定した。また、目視により加工面の傷の有無を検査した。

図 7 総形エンドミル工具

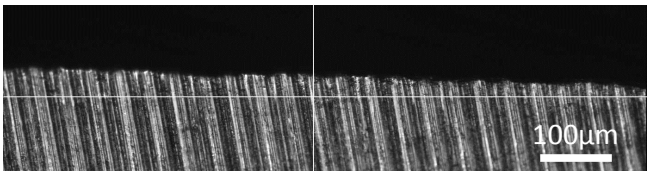
表 1 加工条件

| 加工条件 | 中仕上げ | 仕上げ |
|---|---|---|
| 加工機 | CNCタッピングセンタ(ブラザー工業(株)製) | |
| シャンク | BT30 | |
| 工作物 | アルミ合金 | |
| 工具 | 一体型ハイス総形エンドミル<br>ノンコート Φ30mm 6枚刃 | |
| 冷却 | 水溶性クーラント | |
| 切削速度 | 1,130m/min （12,000rpm） | |
| 送り速度 | 600mm/min<br>（8.0μm/刃） | 120mm/min<br>（1.6μm/刃） |
| 切り込み | 25μm | 5μm |
| 加工方法 | ダウンカット | |

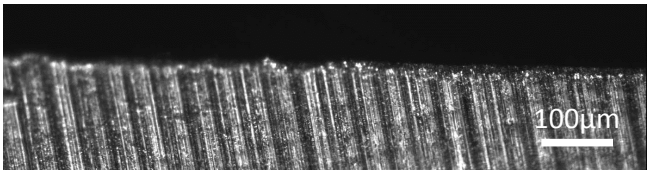
### 3．2．実験結果

工具の切れ刃のチッピングを観察したが、幅 10μm を超えるような大きなチッピングは観察されなかった。逃げ面摩耗比較するため、加工前と 60 台加工後の切れ刃の観察画像を図 8 に、断面形状を図 9 に示す。いずれも大きな摩耗は見られなかった。

工具切れ刃の曲率半径とチッピングの数、削り残しの数を表 2 に示す。加工前から 60 台加工までは同じ工具、120 台加工は別の工具である。また、加工台数と逃げ面摩耗幅を図 10 に示す。加工前の逃げ面摩耗幅は 0μm であることから、20 台加工後に工具摩耗は 20μm を超えることがわかる。表 2 の切れ刃の曲率半径をみると、切れ刃の摩耗が徐々に進展していることがわかる。




(a) 加工前




(b) 60 台加工後

図 8 逃げ面摩耗

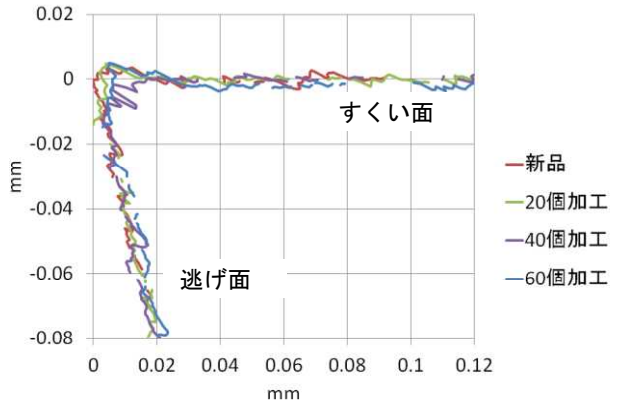



図 9 切れ刃の断面形状

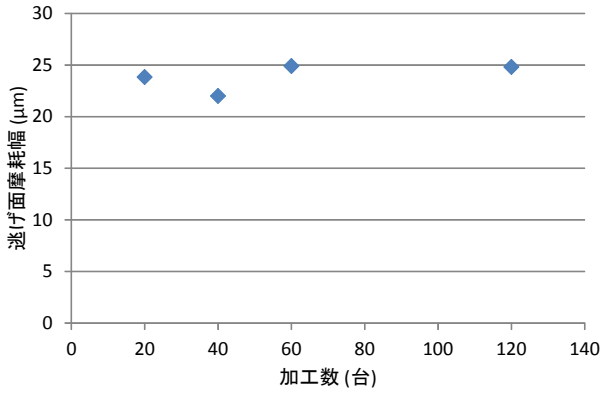



図 10 加工台数と逃げ面摩耗幅

表 2 加工実験結果

| 加工<br>台数 | 切れ刃<br>曲率半径 | チッピング数 | 削り残し数<br>（目視） |
|---|---|---|---|
| 加工前 | 3.5μm | -- | -- |
| 20台 | 8.9μm | 0 | 0 |
| 40台 | 7.4μm | 0 | 0 |
| 60台 | 13.6μm | 0 | 0 |
| （別工具）<br>120台 | 24μm | 2 | 0 |

## ４．考察

この総形エンドミルは、刃長が長く切削抵抗が大きく、形状も複雑なためビビリ振動が起こりやすい傾向にある。また、一般のエンドミルに比べねじれが小さいことから、切削抵抗の変動が大きく、工具のビビり振動が励起されチッピングが起こりやすいと考えられる。

加工実験では、工具とホルダを一体にすることで工具剛性を向上させ、工具のチッピング摩耗を抑制する効果があったと考えられるが、加工実験の台数が工具の寿命に対し少なく、チッピングの発生に至らなかったため、引き続き加工実験を続ける必要がある。

また、切削速度や工具切込、一刃あたりの送り、工作物の固定法等の加工条件によって、工具摩耗量が変わるため、他の加工条件で同様の加工実験を行い、チッピングに至る加工台数を把握することが必要である。

## ５．結言

本研究では、総形エンドミルの工具寿命を判定するため、加工実験を行い次の結言を得た。

(1) 工作物表面のスジ状の削り残しは、エンドミルのチッピング摩耗が原因と推察された。

(2) 工具寿命の判定のため、工具切れ刃の観察と断面形状測定を行い、逃げ面摩耗が工具摩耗量の把握に有効でることを確認した。

(3) 工具ホルダ一体型工具により工具寿命加工実験を行い、20 台加工毎の工具チッピング数、切れ刃曲率半径、削り残しの有無を観察したが、60 台まで加工してチッピングは視認されなかった。

# 有機栽培転換を促進する微生物資材の開発

Development of microbe materials acceleating change to organic farming soil.

研究開発部プロジェクト研究科　渡邊真　池田信也
株式会社ＪＭＣ　佐藤雅人

慣行栽培から有機栽培へ転換できるような微生物資材を検討するため、福島県天栄村・二本松市の慣行栽培と有機栽培の水田土壌を採取し細菌群集構造解析を行った。その結果慣行栽培水田土壌に存在する細菌群が同じであること、有機栽培水田土壌では天栄村、二本松市のいずれにおいても慣行栽培土壌と比較して特異的なピークを確認することができた。また、微生物資材を試験的に投入した慣行栽培水田土壌では、微生物資材を投入することによって水田中の細菌群が変化したことを確認した。

Key　words:微生物群集構造解析　T-RFLP 法

## １．緒言

震災後、福島県産米の付加価値を上げるため慣行栽培から有機栽培へ転換しようとする農家が増えてきている。依頼企業は、短い期間で栽培土壌を有機栽培用に転換するための微生物資材を検討していた。そこで、どのような微生物が資材として有効なのかを確認するため、県内の慣行栽培を行っている水田土壌と有機栽培を行っている水田土壌の微生物相の違いを、群集構造解析により調べた。また、依頼企業が利用を検討している微生物資材を慣行栽培水田へ試験的に投入し、投入する前後の細菌群集の変化や、慣行栽培土壌や有機栽培土壌の細菌群集との違いを調べた。

## ２．試験方法

### ２．１．　供試検体

群集構造解析のための土壌サンプルの採取は、慣行栽培を行っている水田については天栄村 2 地点・二本松市 2 地点の計 4 地点、有機栽培を行っている水田については天栄村 1 地点・二本松市 3 地点の計 4 地点で行った（表 1）。サンプリング時期は平成２５年７月１９日～８月２０日の約 1 か月間であった。

また、主に 3 種類の微生物を混合培養した微生物資材を試験的に投入した二本松市内の慣行栽培水田について、投入前後の土壌を採取した。

表1　土壌サンプル

| No. | 場所 | 栽培法 |
|---|---|---|
| No.1 | 天栄村 | 有機栽培 |
| No.2,3 | 〃 | 慣行栽培 |
| No.4,5,6 | 二本松市 | 有機栽培 |
| No.7,8 | 〃 | 慣行栽培 |
| No.9 | 二本松市 | 微生物資材投入前 |
| No.10 | 〃 | 微生物資材投入後 |

### ２．２．細菌群集構造解析

採取した土壌からの全 DNA 抽出には ISOIL for Beads Beating（ニッポンジーン製）を用いた。T-RFLP 法[1)]により細菌群集構造解析をするために、16SrRNA 領域の PCR を行う際にはフォワードプライマー側に蛍光色素（青のピークとして検出）を付与したものを使用した。PCR 産物は制限酵素 HaeIII で消化し、消化物とサイズスタンダード(赤のピークとして検出)を混合して 310GeneticAnalyzer（アプライドバイオシステムズ製）でキャピラリー電気泳動を行った。

## ３．結果と考察

### ３．１．慣行栽培水田土壌中の細菌群

慣行栽培を行っている天栄村と二本松市の水田土壌中に存在する細菌群集を調べた。T-RFLP 法では細菌の種類が異なると異なる位置にピークが現れるため、ピークパターンを比較することにより細菌群集の違いを調べることができる。図１より、天栄村２地点のピーク（青）は共通しており、図２より二本松市２地点のピーク(青)も共通していた。また、図１と図２を比較したところ天栄村と二本松市のピークパターンは等しく、これら４地点の慣行栽培を行っている水田土壌に存在する細菌群が同じであることがわかった。

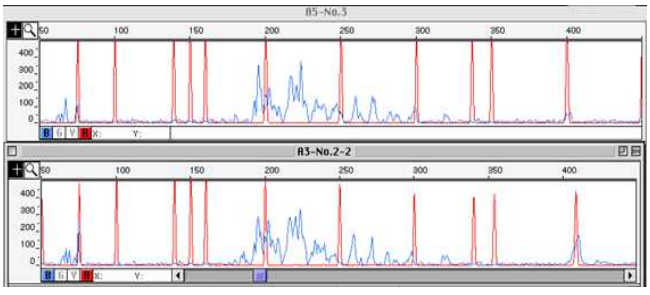


図１　天栄村慣行栽培水田の土壌中から得られた細菌類のピークパターン
上段：No.3、下段：No.2

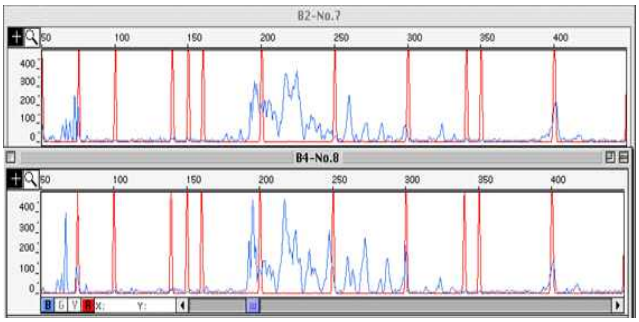



**図２　二本松市慣行栽培水田の土壌中から得られた細菌類のピークパターン**
**上段：No. 7、下段：No. 8**

### ３．２．有機栽培水田土壌中の細菌群

図３より天栄村１地点と二本松市３地点の有機栽培を行っている水田土壌中に存在する細菌群を比較したところ、4 地点の有機栽培土壌のピークはほぼ同じであったが、特異的なピーク(図 3 中の矢印)も確認することができた。

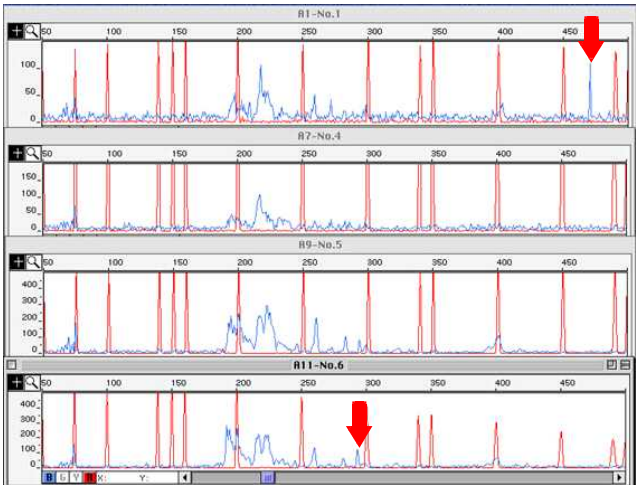



**図３　有機栽培水田の土壌から得られた細菌類のピークパターン**
**上段よりNo. 1、No. 4、No. 5、No. 6　図中の矢印は供試した有機栽培土壌に確認された特異的なピーク。**

### ３．３．慣行と有機栽培水田土壌中の細菌群の比較

図３の有機栽培を行っている 4 地点の土壌に共通するピークは、図１・図２の慣行栽培水田土壌のピークにすべて存在していた。しかし、３．２．で述べた特異的なピークは慣行栽培土壌には存在しておらず、今回供試した有機栽培土壌特有のものであることがわかった。

### ３．４．微生物資材投入前後の細菌群の比較

二本松市の慣行栽培をしていた水田に微生物資材を投入し、投入前後の土壌の細菌群集解析を行った（図 4）。

資材投入前の細菌群は、図１・図２にある他の地域の慣行栽培水田の細菌群とよく似たピークパターンを示していた。一方、投入後のピークパターンでは、資材投入前に強く現れていたピークが投入後に減少していたり、資材投入後にピークが強く現れているものがあった。このことにより、微生物資材を投入することによって水田中の細菌群が変化したことがわかった（図 4 中の矢印）。

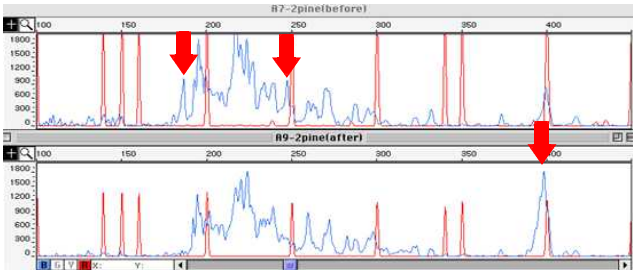



**図4　微生物資材を投入する前後の細菌類のピークパターン**
**上段：No. 9、下段：No. 10　投入前に強く表れていたピーク（上段中の矢印）は投入後に弱まっており、投入後に強くなったピークがあった（下段中の矢印）。ピークの強弱はその細菌数の増減に関係する。**

## ４．結言

慣行栽培と有機栽培を行っている水田から土壌を採取し、T-RFLP 法による細菌群集構造解析を行った。その結果、慣行栽培の 4 地点の地域間差は確認できなかった。有機栽培水田と慣行栽培水田の比較では、有機栽培水田に特異的なピークを検出された。今回は、それぞれ検体数が少ないため、それらが有機栽培水田に特異的にみられる細菌であるか断定することはできなかった。

また、微生物資材を投入した水田の細菌群集構造解析を行い、資材投入前後で細菌群が変化していることを確認した。ただし、投入後一度きりのサンプリングであるため、複数回のサンプリングを行い細菌群集の定着を確認する必要があると思われる。

依頼企業は、微生物資材を投入して慣行栽培を行っていた水田を有機栽培に転換しようと試みているが、上述のようにまだデータが不足している状態であり、今後、商品化する場合は、継続した試験が必要と考えられる。

### 参考文献

1) 大庭広輔：“T-RFLP 法による土壌微生物群集の多様性解析”、土と微生物、Vol.64　No.1,pp.41-48、(2010)

# 落花生の乾燥調整方法の改良による品質向上

Increasing Quality by the Improvement of the Peanut Dry Preparation Method

会津若松技術支援センター醸造・食品科　星保宜　小野和広　佐藤光洋
株式会社おくや　松﨑健太郎
会津農林事務所喜多方農業普及所　高倉麻紀

食味の良い落花生を生産するためには、莢付きのまま時間をかけて自然乾燥するのが良いとされているが、会津地域では収穫後天気の悪い日が多く、乾燥不良による品質低下が問題となっている。そこで、乾燥機を用いた乾燥期間の短縮および品質向上について検討した。成分および食味試験の結果から、収穫直後に脱莢しても品質に大きな差はなく、30℃の加熱乾燥により、従来と同程度の品質を確保しながら、乾燥期間が短縮されることが分かった。さらに１ヶ月程度の自然乾燥により品質の向上が図られ、差別化商品の開発にもつながるものと考えられた。

Key　words : 落花生、乾燥、食味

## １．緒言

落花生は収穫後、加温や除湿など短期間で乾燥すると食味が低下するとされており、主産地の千葉県では、収穫後、茎葉付きのまま１ヶ月以上、ほ場で乾燥することが推奨されている[1)]。

一方、会津地域では収穫後の乾燥期に当たる 11 月は、秋雨や低温などによりほ場での乾燥が期待できないため、収穫後ビニールハウス内に２週間程度、茎葉付きのまま干しているが、乾燥不足によるカビの発生、ハウスへの運搬労力などが問題となっている。

そこで、本研究では、乾燥期間の短縮によるカビの発生防止および早期出荷、収穫直後の脱莢（莢を茎葉から外すこと）による省力化を目指し、収穫後の乾燥調製方法について検討した。あわせて、乾燥後の焙煎方法についても、その温度や時間を検討した。

## ２．実験方法

### ２．１．　乾燥方法の検討（試験１）

#### ２．１．１．　供試材料

材料には、喜多方市熱塩加納町のほ場で採取された落花生（品種名：ナカテユタカ）を用いた。

#### ２．１．２．　処理方法

乾燥方法は次の３種類とした。

○自然乾燥：茎葉付きのままの状態で、ほ場に隣接したビニールハウス内に干して乾燥させた。

○通風乾燥：脱莢した後、ナイロンメッシュの袋に入れ、喜多方市塩川町の施設で常温除湿乾燥機（DAG（Dry Air Generator）、ヤンマー株式会社製）により湿度 70%に設定して乾燥させた。

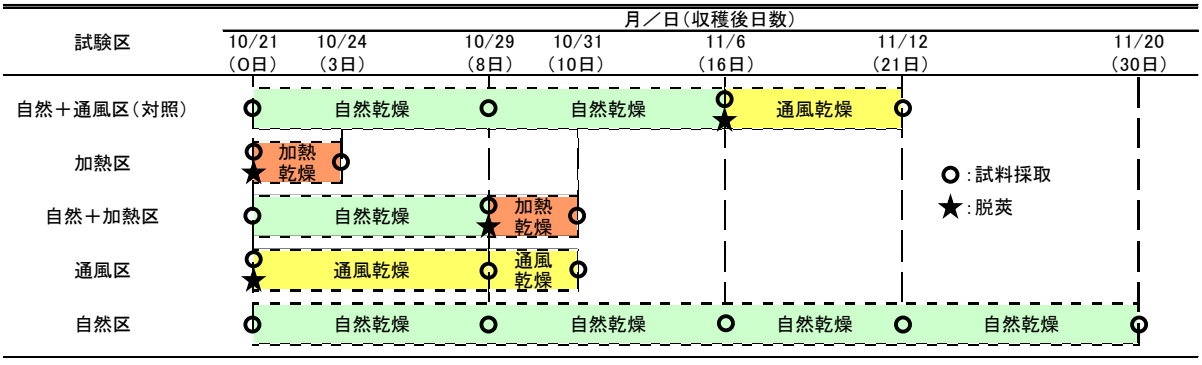
○加熱乾燥：脱莢した後、ナイロンメッシュの袋に入れ、喜多方市新町の施設で大紀式黒大豆乾燥機（大紀産業株式会社製）により 30℃運転８時間、停止４時間の間欠運転を行って乾燥させた。

試験区は、表１に示したように、従来行ってきた自然乾燥２週間＋通風乾燥処理を対照区（「自然＋通風区」）とし、加熱乾燥により乾燥期間を最大限に短縮する「加熱区」、自然乾燥を１週間設けながら加熱乾燥により仕上げる「自然＋加熱区」、加熱を避けて乾燥期間の短縮をねらった「通風区」、自然乾燥のみによる食味向上を期待した「自然区」の合計５区を設定した。

脱莢は、加熱区と通風区では収穫後すぐに行い、自然＋通風区と自然＋加熱区では、自然乾燥が終了して機械乾燥する前に行った。

なお、自然区以外は、子実の水分含量が 10%以下になった時点で乾燥終了とした。

表１　試験区の設定



### ２．１．３．　試験方法

採取した試料は、莢を剥き、子実をフードプロセッサーで細断して分析に供した。

水分含量は、試料５ｇを加熱乾燥機により 130℃で２時間乾燥させ、放冷後重量を測定して求めた。

ショ糖含量は、試料を 80%エタノールで抽出後、ヘキサンで脱脂し、エタノール留去後ろ過し、高速液体クロマトグラフィー(日本分光(株))で以下の条件で測定した。カラム：Mightysil $NH_2$（4.6mmID×250mm 粒径 5μm、関東化学(株))、移動相：75%アセトニトリル、流速：1.0ml/min、検出器：RI、カラム温度：30℃、インジェクション：10μl。

デンプン含量は、エタノール抽出残渣に 0.5N塩酸を加えて加水分解し、生成したグルコース量をフェノール硫酸法で測定し、係数 0.9 を乗じて算出した。

粗タンパク含量は、ケルダール法により測定した全窒素量に、窒素－タンパク質換算係数（落花生 5.46）を乗じて求めた。

粗脂肪含量は、ソックスレー・エーテル抽出法で測定した。

食味試験は、各処理区の試料を 60 分ほど焙煎し、自然＋通風区を対照とし、食味の良否について－２（劣る）～＋２（優る）の５段階で評価を行った。パネリストは、落花生生産者、喜多方農業普及所職員など 10 名であった。

### ２．２．　焙煎方法の検討（試験２）

### ２．２．１．　供試材料および焙煎方法

材料には、試験１の自然＋加熱区の落花生を使用した。

焙煎は回転式焙煎機（合資会社笹川鉄工所製）により行い、慣行処理として弱火で１時間乾燥したもの（低温焙煎、対照）と、強火で 30 分焙煎したもの（高温焙煎）の２処理とした。

### ２．２．２．　試験方法

２．１．３．と同様とした。なお、食味の良否については、両処理を比較し、－１（劣る）～＋１（優る）の３段階で評価を行った。

## ３．実験結果および考察

### ３．１．　乾燥方法の検討（試験１）

子実の水分および成分含量の推移を表２に示した。

水分含量が乾燥終了の目安とした 10%以下になるまでに要した日数は、加熱区が３日と最も早く、自然＋加熱区と通風区はほぼ同じ 10 日であった。自然＋通風区と自然区は、16～21 日であったが、両区で大きな差は見られず、本年のような気象状況では通風乾燥処理をしなくても、20 日程度で乾燥が終了するものと考えられた。

表2 落花生子実の水分および成分含量の推移

| 項目 | 処理区 | 収穫後日数(日) 0 | 3 | 8 | 10 | 16 | 21 | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 水分（%） | 自然＋通風区 | 41.9 | － | 15.1 | － | 11.8 | **8.8** | － |
| | 加熱区 | 41.9 | **9.1** | － | － | － | － | － |
| | 自然＋加熱区 | 41.9 | － | 15.1 | **9.8** | － | － | － |
| | 通風区 | 41.9 | － | 12.0 | **9.7** | － | － | － |
| | 自然区 | 41.9 | － | 15.1 | － | 11.8 | 8.4 | **8.8** |
| ショ糖（%DW） | 自然＋通風区 | 3.6 | － | 4.5 | － | 3.7 | **4.9** | － |
| | 加熱区 | 3.6 | **4.8** | － | － | － | － | － |
| | 自然＋加熱区 | 3.6 | － | 4.5 | **5.0** | － | － | － |
| | 通風区 | 3.6 | － | 4.8 | **4.8** | － | － | － |
| | 自然区 | 3.6 | － | 4.5 | － | 3.7 | 5.6 | **5.9** |
| デンプン（%DW） | 自然＋通風区 | 10.3 | － | 8.7 | － | 8.9 | **8.8** | － |
| | 加熱区 | 10.3 | **5.3** | － | － | － | － | － |
| | 自然＋加熱区 | 10.3 | － | 8.7 | **8.0** | － | － | － |
| | 通風区 | 10.3 | － | 8.1 | **8.2** | － | － | － |
| | 自然区 | 10.3 | － | 8.7 | － | 8.9 | 8.9 | **8.1** |
| 粗脂肪（%DW） | 自然＋通風区 | 43.2 | － | 48.0 | － | 49.6 | **49.3** | － |
| | 加熱区 | 43.2 | **47.8** | － | － | － | － | － |
| | 自然＋加熱区 | 43.2 | － | 48.0 | **47.7** | － | － | － |
| | 通風区 | 43.2 | － | 47.6 | **47.8** | － | － | － |
| | 自然区 | 43.2 | － | 48.0 | － | 49.6 | 48.0 | **48.8** |
| 粗タンパク（%DW） | 自然＋通風区 | 25.3 | － | 23.4 | － | 24.7 | **24.3** | － |
| | 加熱区 | 25.3 | **24.4** | － | － | － | － | － |
| | 自然＋加熱区 | 25.3 | － | 23.4 | **22.3** | － | － | － |
| | 通風区 | 25.3 | － | 25.1 | **24.1** | － | － | － |
| | 自然区 | 25.3 | － | 23.4 | － | 24.7 | 19.8 | **23.1** |

※ 数値の＿（下線）は乾燥方法を変更した日（自然＋通風区：16日後、自然＋加熱区：8日後）を示す。
※※：太字は乾燥終了時の数値を示す。

ショ糖含量は、各区で日数の経過にしたがい増加する傾向が見られ、乾燥終了後には自然＋通風区と加熱区、自然＋加熱区、通風区は５%前後でほぼ同じだったが、自然区はおよそ６%と高い値を示した。この値は、千葉県で行われている、１ヶ月以上ほ場で乾燥したものとほぼ同じであった[2)]。

デンプン含量は、各区で収穫以降減少したが、特に加熱区、自然＋加熱区、通風区は脱莢後に減少する傾向が見られた。一方、脱莢までの期間が長い自然＋通風区と自然区は、いったん減少した後はほとんど変化がなかった。

粗脂肪および粗タンパク含量は、収穫後それぞれ増加、減少したが、日数が経過しても変化はなく、各区で大きな差はなかった。

次に、乾燥が終了した各区の落花生を焙煎した試料について、食味試験を行った結果を表３に示した。

いずれの区の食味も、対照とした自然＋通風区に対して同等か優ると判断され、特に自然区は良い結果となった。このことは、ショ糖含量が自然区で明らかに高く、他の区はほぼ同じであったことと符合していた。

鈴木は、加熱や除湿により落花生の水分を急激に減少させることは、デンプンからショ糖への転換期間を

表3 乾燥条件の異なる落花生の食味

| | 食味の評価（人数） 劣る (−2) | やや劣る (−1) | 同じ (0) | やや優る (+1) | 優る (+2) | 平均点数 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 自然＋通風区（対照） | — | — | — | — | — | — |
| 加熱区 | 0 | 0 | 7 | 2 | 1 | +0.4 |
| 自然＋加熱区 | 0 | 4 | 1 | 4 | 1 | +0.2 |
| 通風区 | 1 | 2 | 0 | 6 | 1 | +0.4 |
| 自然区 | 0 | 1 | 2 | 2 | 5 | +1.1 |

パネリスト：10名

短縮させることになり、その結果としてショ糖含量、食味の低下を引き起こすとしている[2)]。今回の試験結果では、収穫直後からの加熱乾燥でも品質・食味には対照区と差が見られなかった。これは、対照区の自然乾燥期間が、鈴木は１ヶ月半だったのに対し、本試験ではおよそ２週間と短く、より短縮した試験区との差が小さかったためと考えられた。

また、収穫直後の脱莢について、鈴木は茎葉部からの炭水化物の転流が遮断されるため、デンプン含量は低下するものの、適切な乾燥方法をとれば品質・食味には問題がないとしている。本試験でも、収穫直後に脱莢した加熱区、通風乾燥区では低い値を示したが、最終的な品質には差がなかった。

このように、従来からの乾燥期間の短縮は問題ないものと判断された一方で、より自然乾燥期間の長い自然区は品質、食味ともに従来よりも良好な結果となった。自然乾燥にはビニールハウスや、茎葉付きの落花生を運搬する労力が必要となるが、生産者全てがそれらを確保できるとは限らない。さらに、落花生は砂糖や塩、味噌などにより味付けをした豆菓子にも利用されるため、用途に応じた乾燥方法を用いるのが良いと思われる。すなわち、菓子用は乾燥期間の短い方法で行い、落花生自体の味が重要となる「から付き落花生」には、期間の長い自然乾燥法を用いることが合理的と考えられた。

### ３．２．　焙煎方法の検討（試験２）

焙煎温度および時間を変えた落花生について、成分含量と食味試験の結果を表４，表５に示した。

成分含量は、ショ糖含量が高温焙煎でやや高いものの、ほとんど差が見られなかった。ただし、高温焙煎では焦げた莢が見られ（図１）、これらを規格外とした場合の正品率は明らかに低かった。

食味試験では、処理間で差が見られなかったが、これは高温焙煎による焦げを「香ばしい」ととらえるか、「焦げ臭い」ととらえるかによる、好みの違いが表れたものと考えられた。いずれにしても、商品の均質性を考えた場合、今回の高温・短時間の焙煎方法では問題があるものと考えられる。

表4　焙煎条件の異なる落花生の品質

| 焙煎条件 | 水分 | 成分含量（%DW） | | | 正品率 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | ショ糖 | 粗タンパク | 粗脂肪 | |
| | （%） | | | | （%） |
| 低温焙煎（対照） | 1.8 | 4.5 | 22.8 | 49.4 | 91.5 |
| 高温焙煎 | 1.6 | 5.0 | 23.8 | 49.6 | 72.1 |

表5　焙煎条件の異なる落花生の食味

| 焙煎条件 | 食味の評価（人数） | | | 平均点数 |
|---|---|---|---|---|
| | 劣る（−1） | 同じ（0） | 優る（+1） | |
| 低温焙煎（対照） | — | — | — | — |
| 高温焙煎 | 4 | 2 | 4 | 0 |

パネリスト：10名

図１　焙煎後の落花生（円は焦げた莢の拡大図）

## ４．結言

（１）乾燥方法の検討

収穫直後に脱莢し、30℃前後の加熱乾燥を行っても、従来のものと品質・食味に大きな差はなく、乾燥期間を２週間以上短縮できると考えられた。これにより、ハウスへの運搬労力が軽減され、栽培者ならびに栽培面積の増加が見込まれるとともに、豆菓子の早期製造、出荷が可能となり、秋の観光シーズンにおける販売額の増加が期待される。さらに、「から付き落花生」用として、ビニールハウスで一ヶ月自然乾燥させることにより、１ヶ月半ほ場で乾燥させた落花生と同程度の食味を誇る、高品質な落花生を生産できる可能性が示唆された。

（２）焙煎方法の検討

高温焙煎では、短時間で香ばしく仕上がるが、規格外品の発生も見られるため、従来の低温焙煎が安定しているものと考えられた。

### 参考文献

1）千葉県 HP：
http://wwwp.pref.chiba.lg.jp/pbmgm/12zukan/rakkasei.html

2）鈴木一男：“落花生子実の収穫後のショ糖含量の推移と乾燥条件が子実の品質・食味に及ぼす影響”、千葉農総研研報、7、p63-67（2008）

# 蜂蜜の香りを生かしたミードの作製技術の確立

Production Technology of Mead Having Honeylike Aroma

会津若松技術支援センター醸造・食品科　山下慎司　深倉宏崇　菊地伸広　鈴木賢二
有限会社峰の雪酒造場　佐藤謙信

会津特産「栃の木蜂蜜」のみを原料とした蜂蜜酒「ミード」が現在製造販売されており、好評を得ている。その一方で、酵母由来と考えられる日本酒様の香りが指摘されている。

そこで、より高品質の「ミード」製造技術の開発のために使用酵母の検討を行った。その結果、清酒用酵母 K-901 と比較し、ワイン用酵母である OC-2 と Maurivin B で官能試験、香気成分ともに日本酒様の香りが低減された。官能試験の蜂蜜らしさおよび総合評価においては OC-2 が特に優れていたが、本製造法は大量の酵母を必要とすることから乾燥酵母として流通している Maurivin B が利便性では優れていると考えられた。

Key words:蜂蜜酒、ミード、ワイン酵母

## １．緒言

蜂蜜を発酵させた蜂蜜酒「ミード」はワインやビールと同様に古代より存在し、ヨーロッパを中心に愛飲されている。また、ハネムーン（蜜月）の語源であり、ブライダル関連の商品開発が望まれている。通常、ミードは蜂蜜に麦芽や穀類、果汁などを加えて作られるが、当所では蜂蜜のみを原料としたミードの製造管理技術を確立し、既存製品との差別化を図った [1)]。現在、この技術を用いたミードが製造販売され、好評を博している。その一方で、市場から日本酒様の香りが強いとの声も出ている。これは蜂蜜のみを原料とした際の窒素不足による発酵停止を補う目的で清酒用酵母を大量に添加しているためだと考えられる。そこで、本研究では香りの改善を行い、より蜂蜜らしいミード製造技術を開発するために使用酵母の検討を行った。

## ２．実験方法

### ２．１．　供試酵母

液体培養清酒用酵母 2 菌株（K-901、K-701）、液体培養ワイン用酵母 2 菌株（OC-2、KW-3）、ワイン用乾燥酵母 3 菌株（PDM、Maurivin B、Platinum、マウリ社製）を用いた。酵母密度は $1.0 \times 10^8$ cells/mL（以後等倍量）で使用し、また、ワイン用乾燥酵母 3 菌株は $2.0 \times 10^8$ cells/mL（以後 2 倍量）でも行った。

### ２．２．小仕込試験

原料蜂蜜は会津産「栃の木蜂蜜」（ハニー松本製）を水で Brix 25 に調製したものを用いた。小仕込試験は 1 段仕込で行い、アルコール濃度 11 %前後まで 15 ℃で発酵した。遠心分離(9,000 rpm 5 min)にて上槽後、オムニテストフィルター(ポアサイズ 0.4 μ K.TSUKAMOTO 社製)で濾過し、63 ℃達温にて火入れを行い、分析・官能試験まで - 5 ℃にて保存した。

### ２．３．モロミ及び製成酒成分分析

Brix の測定は屈折糖度計（ATAGO 社製）、アルコール濃度の分析はアルコメイト AL-2 型（理研計器株式会社製）を用いた。また、香気成分の定量はヘッドスペースオートサンプラー Tekmar 7000（Tekmar 製）を付属したガスクロマトグラフ GC-353 型（ジーエルサイエンス製）を用いて、ヘッドスペース法により分析した。酸度およびアミノ酸度は、国税庁所定分析法 [2)] に従って分析した。

### ２．４．官能評価

官能評価は K-901 で作ったミードを基準におき 5 点法（1:優～ 3:基準～ 5:難）にて評価し、平均点を算出した。パネラーは当所職員および峰の雪酒造場社員の計 14 名（♂９、♀５）で行った。

## ３．実験結果及び考察

アルコール濃度到達日数及び製成酒成分分析結果を表 1 に示す。

### ３．１．アルコール濃度到達日数

アルコール濃度が 11 %前後になるまでの日数は使用酵母により異なった。前報で使用した K-901 では 14 日を要した。一方、PDM と Platinium を 2 倍量使用したものでは両方とも 7 日、等倍量使用したものではそれぞれ 10 日、11 日と短い日数でアルコール濃度 11 %に到達した。

### ３．２．酸度・アミノ酸度

酸度は液体培養した酵母に比べ、乾燥酵母を使用すると総じて高くなった。特に乾燥酵母を 2 倍量添加したものでは発酵期間は短いが酸度はさらに高くなった。アミノ酸度はほとんどの酵母で同程度であったが、Platinium を使用したミードでは等倍量、2 倍量とも他の数倍の高さとなった。

### ３．３．香気成分

日本酒様の香りとされるイソアミルアルコールは K-901 と比べ、OC-2、等倍量・2 倍量の Maurivin B で

表1　アルコール濃度到達日数および製成酒成分分析

| | 使用酵母 | 日数 | アルコール | Brix値 | 酸度 | アミノ酸度 | 香気成分(ppm) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | イソアミルアルコール | 酢酸イソアミル | カプロン酸エチル |
| 清酒用 | K-901 | 14 | 11.1 | 13.6 | 3.4 | 0.1 | 98.53 | 0.67 | 0.37 |
| | K-701 | 19 | 10.8 | 13.4 | 3.4 | 0.2 | 111.64 | 0.58 | 0.39 |
| ワイン用 | OC-2 | 15 | 11.2 | 13.2 | 3.3 | 0.2 | 74.88 | 0.22 | 0.21 |
| | KW-3 | 19 | 10.6 | 12.8 | 3.5 | 0.2 | 150.61 | 0.20 | 0.29 |
| ワイン用乾燥酵母等倍量 | PDM | 10 | 11.7 | 12.8 | 4.7 | 0.1 | 167.95 | 0.21 | 0.33 |
| | Platinium | 11 | 11.0 | 14.8 | 5.1 | 0.5 | 220.05 | 0.45 | 0.23 |
| | Maurivin B | 19 | 10.5 | 14.0 | 4.9 | 0.2 | 80.48 | 0.09 | 0.10 |
| ワイン用乾燥酵母2倍量 | PDM | 7 | 11.8 | 13.0 | 6.0 | 0.2 | 217.99 | 0.36 | 0.38 |
| | Platinium | 7 | 11.7 | 13.0 | 5.7 | 0.6 | 150.34 | 0.31 | 0.23 |
| | Maurivin B | 15 | 11.4 | 13.8 | 5.7 | 0.3 | 88.44 | 0.41 | 0.22 |

表2　使用酵母による官能評価の比較

| | 使用酵母 | おいしさ | 蜂蜜らしさ | 日本酒様の香り | 総合 |
|---|---|---|---|---|---|
| 清酒用 | K-701 | 2.9 | 2.8 | 2.9 | 2.9 |
| ワイン用 | OC-2 | 2.5 | 2.8 | 2.7 | 2.4 |
| | KW-3 | 2.6 | 2.7 | 3.1 | 2.9 |
| ワイン用乾燥酵母等倍量 | PDM | 3.8 | 3.4 | 3.0 | 3.8 |
| | Platinium | 3.5 | 3.5 | 2.9 | 3.5 |
| | Maurivin B | 2.9 | 3.1 | 3.0 | 2.9 |
| ワイン用乾燥酵母2倍量 | PDM | 3.4 | 3.4 | 3.1 | 3.3 |
| | Platinium | 4.1 | 3.8 | 2.7 | 4.0 |
| | Maurivin B | 2.9 | 2.8 | 2.7 | 2.9 |

※ K-901 を基準として比較評価

低い値となった。一方、等倍量の Platinium と 2 倍量の PDM では 2 倍以上高い値となった。吟醸香である酢酸イソアミルとカプロン酸エチルは清酒用酵母で高く、ワイン用酵母では同じかそれ以下となった。

### ３．４．官能評価

使用酵母による官能評価の比較の結果を表 2 に示す。

蜂蜜らしさ、日本酒様の香りは OC-2 や 2 倍量の Maurivin B でよい評価が得られた。また、総合では OC-2 がよく、続いて KW-3、K-701、等倍量・2 倍量の Maurivin B となった。官能評価の結果から OC-2 が最もよい評価であった。乾燥酵母に限定すると、Maurivin B がよく、特に 2 倍量を使用したものがよい結果となった。2 倍量を使用したものはどれも酵母臭が気になるとのコメントがあったが、活性炭を使用することによりある程度除くことが可能なため、特に問題にはならないと考えられた。

## ４．結言

現行の蜂蜜酒「ミード」の改善点である日本酒様の香りを低減するために、使用酵母の検討を行った。その結果、使用酵母により、目的とするアルコール濃度への到達日数、酸度・アミノ酸度は異なった。また、官能評価では清酒用酵母 K-901 と比較して、ワイン用酵母である OC-2、Maurivin B で日本酒様の香りが低減された。香気成分分析でもこれらの酵母は日本酒様の香りとされるイソアミルアルコールの濃度が低い値となっている。総合評価では、特に OC-2 が優れた評価となった。しかし、本製造法は大量の酵母を必要とすることから、OC-2 は乾燥酵母として流通していないため、利便性を考えるのであれば、乾燥酵母である Maurivin B が優れていると考えられた。

### 参考文献


1) 高橋亮、鈴木賢二、櫛田長子、佐藤利也　福島県ハイテクプラザ試験研究報告、pp.81-82(2007)

2) 西谷尚道監修　第四回改正国税庁所定分析法注解、pp.20-24(1993)

# 磐城杉を使用した高級割り箸の開発

Development of high-class half-split chopsticks made with IwakiSugi Japanese cedar

会津若松技術支援センター産業工芸科　遠藤知里
株式会社磐城高箸　高橋正行

磐城杉の価値を高める、新たな高級割り箸製品開発を行った。製品開発にあたり、割り箸の研究、コンセプトの策定、製品およびパッケージのデザイン開発を行った。その結果、「お食い初め用割り箸」を開発することができた。

Key words:磐城杉、割り箸、お食い初め、デザイン

## １．緒言

県内木材関連業界は、地産地消の考えから県産材の利用を推進してきたが、原子力発電所事故による森林被害や風評被害等で業界の低迷が懸念されている。株式会社磐城高箸（以下、提案者という）でも、県産磐城杉を使用した割り箸の製造を行っているが、風評被害への影響が出ているのが現状である。提案者は、これまで風評被害打破のために「希望の架け箸」など復興製品の開発・販売を行ってきたが、震災から数年が過ぎ復興の機運の低迷も見られる。これらを受け、低迷する状況を打破し、更なる県産材の利用促進を目指すため、磐城杉の価値を高める新製品の開発に対する要望が提案者から出された。

そこで、磐城杉の価値の向上を目標とした新製品の開発を行うこととした。また、開発にあたり割り箸における箸先形状の研究も併せて行うこととなった。

## ２．開発

### ２．１．　割り箸の研究

開発に先立ち、割り箸の箸先形状の研究を行った。割り箸は木材文化である日本で古くから広く使用されている製品であり、近年、エコブームからマイ箸の使用に押され一時利用が減少したが、いまだ根強い人気を誇っている。間伐材等の有効利用や洗浄不要のため洗剤・洗浄水を使用しないなどの理由から、環境保全及び持続可能な社会に向けた有効製品として再び注目を集めているものでもある。全国各地さまざまな用途で使用されているため、提案者が製造している利休箸以外にも多くの種類が存在しているため、それらの特徴等の研究を行った。主な割り箸に関する特徴の例は、以下のとおりである。

○元禄箸：角が切り落とされ、溝を入り割りやすくなっているもの。断面は、八角形が二つ並んだ形状。角があるため、麺類等に使用しやすい。

○天削箸：箸の持ち手側が斜めに切り落とされているもの。箸先は丸く加工されている。作用箇所が点となるため、豆腐や魚等を「切る」作業に適している。舌触りが良い形である。

○利休箸：箸の真ん中が最も厚く、端に行くにしたがって細くなっている。箸先断面は円状・楕円状のものがあり、楕円状になるほど「つかむ」作業に適している。提案者は、この種類を採用し製造している。

○丁六箸：中溝も四方の面取りもされていない最もシンプルな形のもの。安価で製造しやすいが、他種より作業のしやすさで劣る形状である。

○丸箸　：利休箸と似た形状であるが、初めから割れている所がそれとは大きく異なる。形状に沿い、断面が円状になっているため持ちやすくつかみやすいが、箸先に円状断面がそのまま残るため舌触りが悪く細かな作業がしにくい。取り分け箸に適した形状である。

など

使いやすさ・持ちやすさ・用途別長所短所等を考慮し、検討を行った。また、価値向上を目標としているため、高級感・上品さ等見た目の影響も重要視した。それぞれの特徴を洗い出し、開発媒体形状の決定はコンセプトに沿い、決定することとなった。

### ２．２．　コンセプトの策定

割り箸の研究と並行して、新たな製品開発におけるコンセプトの策定を行った。本開発は磐城杉の価値を高めることを目的としているため、飲食店等で使用される安価な割り箸ではなく、高級志向製品の開発を行うことを前提とした。そのため、高級割り箸として需要のある使用状況を考察した。

複数候補を検討し提案者と話し合いを行った結果、「磐城杉の価値を高めるお食い初めのための割り箸」をコンセプトとすることが決定した。

※お食い初めとは、

赤ちゃんの生後 100 日を記念したお祝い。煮物や鯛などを用意し、赤ちゃんに食べさせるふりをすることで、「一生食べることに苦労しないように」という願いを込めるもの。

### ２．３．　アイディアスケッチ

割り箸の研究及びコンセプトの策定を通し、箸の形状を利休箸とすることを決定した。提案者は利休箸を製造しており、開発当初、新製品は形状を変更することを予定していたが、使いやすさや形状が持つ上品さから製造中の利休箸の形状が最適であることが判明したため、利休箸を使用し新製品の開発を行うこととなった。形状を変更せず自社が持つ他製品との差別化を図り、コンセプトに沿う製品を開発するため、さまざまなターゲットユーザー、使用シーン、販売環境を想定した。想定した例は、次のとおりである。

例 1) ターゲットユーザー（夫婦）
　　購入目的：子供のお食い初めのため

例 2) ターゲットユーザー（夫婦の両親）
　　購入目的：お食い初めのプレゼントとして

例 3) ターゲットユーザー（夫婦の友達）
　　購入目的：お食い初めのプレゼントとして
　　など

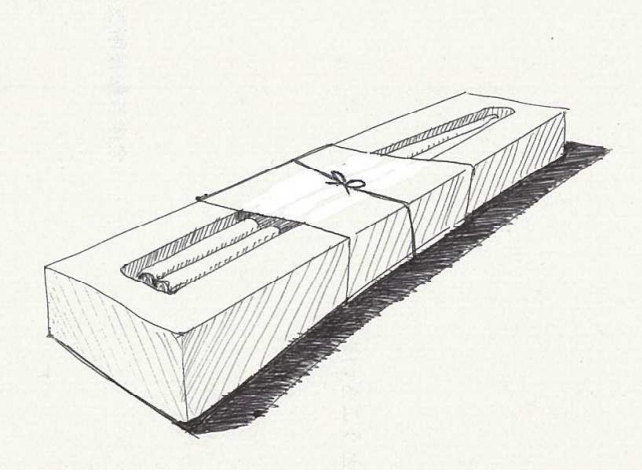


**図1　アイディアスケッチ例**

アイディアスケッチを行うにあたり、高級割り箸として特別感・独自性を持ち合わせることを念頭にいれた。しかし、お食い初めのプレゼントとしての使用も視野に入れるため、特異性が強くならないことも考慮した。また、ターゲットユーザー及び購入目的に合った販売価格となることも考慮した。

その結果、磐城杉を割り箸だけでなくケースとして使用するアイディアを採用することとなった。（アイディアスケッチ例は、図 1 のとおりである。）

### ２．４．　パッケージデザイン開発

アイディアスケッチ作業を受け、磐城杉を使用したケースを有するお食い初め用割り箸を開発することとなり、そのパッケージのデザインを行った。パッケージは、販売環境において消費者の購買意欲を高める有効な手段である。そのため、本開発におけるパッケージもコンセプトに沿い、消費者が手に取りやすいことを念頭に考察した。その中で条件としてあげられる項目は、以下のとおりである。

・磐城杉の価値を高めるものであること
・高級感及び特別感を有すること
・類似製品との差別化を図るため独自性を有すること
・お食い初めという儀式にふさわしいものであること
・お祝いであることが見ただけで解るものであること
・プレゼントとして差支えないものであること
・儀式張り購入意欲を削ぐものでないこと

条件をもとに、パッケージデザインの検討を行った。磐城杉の木目が見えるようパッケージの形状を考察し、材質にはトレーシングペーパーを採用した。製品正面には、お食い初めで使用される料理の具材をイラスト化しあしらった。（イラスト化した具材は、図 2 ～ 4 のとおりである。）また、お祝いとしてのプレゼントであることを伝えるため、水引のイラストを採用することとした。

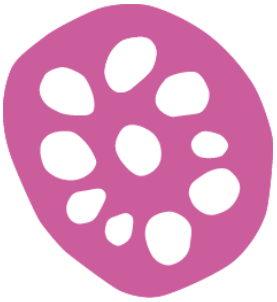


**図2　お食い初め具材イラスト(蓮根)**

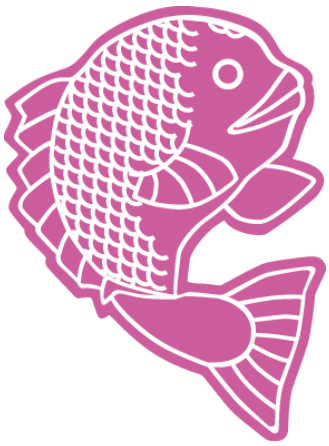


図3　お食い初め具材イラスト(鯛)

図4　お食い初め具材イラスト(米)

## 3．結果

割り箸の研究および新製品開発を行い、デザイン開発を行った結果、「磐城杉の価値を高めるお食い初めのための割り箸」を開発することができた。

図5　おめでた箸(表・裏)

「おめでた箸」
・お食い初め用の箸セット。
・三膳の割り箸がケースに収められているもの。
・お食い初め終了後も飾ることが可能なように、ケース型とした。
・三膳のうち、両端にある箸は両親用、中央に位置する短い箸は子供用となっている。

磐城杉の価値を高めることをコンセプトに、割り箸だけでなくケースにも磐城杉を使用し、木目が見えるようトレーシングペーパーをパッケージの素材として採用している。製品正面には、水引とお食い初めの具材をイラスト化したものをあしらい、日本的なお祝いのプレゼント商品であることが瞬時に伝わるようにした。しかし、日本調すぎると儀式の道具としての仰々しさが全面に出てしまうため、より手の取りやすいものとなるよう軽やかなイラストを採用した。水引の線に抑揚をつけたのは、そのためである。配色も赤ん坊のイメージをそぐわない配色の中から、桜桃色を採用した。

図6　表イラスト

また、パッケージと本体(割り箸・ケース)のイメージが分解してしまう事態を防ぐため、パッケージにあしらったイラストを巻紙にも施し、一体感のある製品とした。製品背面には、製品の説明および提案者の企業情報等を記載している。パッケージ素材をトレーシングペーパーとしたことで上がったコストを、一色刷

り印刷とすることで調節している。そして、正面と背面を一つの印刷物にすることでも、コスト削減を図っている。

本体(割り箸・ケース)とトレーシングペーパーパッケージ、そして透明プラスティックケースで完成体となる。

## ４．結言

風評被害等払拭のため、磐城杉の価値を高める新製品開発を行うことができた。割り箸における飲食店使用以外での需要範囲を拡大するとともに、磐城杉の全国への周知に繋がる新製品の開発となった。

# 県産ヒノキにおけるヤニ防止技術の開発

Development of the resin prevention technology of a hinoki

会津若松技術支援センター産業工芸科　遠藤知里　橋本春夫
株式会社正木屋材木店　大平宏之

木製品に使用される県産ヒノキ材のヤニの滲出を抑える水性塗料の選定を行った。また、ヒノキの木地色に近い塗料開発及び塗装工程の確立もあわせて行った。その結果、県産ヒノキ材などのヤニの滲出を抑える水性塗料の選定や添加剤の使用により、木地仕上げ水性塗料の開発を行うことが出来た。

Key words:県産ヒノキ材、ヤニ、塗料

## １．緒言

東日本大震災と原子力発電所事故を受け、多くの避難者が避難所や仮設住宅に住むことを余儀なくされ、必要最低限のスペースには神棚がないという現状があった。株式会社正木屋材木店（以下、提案者という）はこの状況を知り、神棚がなくてもお札などを収納することができる「kamidana」を開発し製造を始めた。この製品は県産ヒノキ材を使用しており、復興製品として多くのメディアに取り上げられている。しかし、製品の中で図１に示すようなヤニの滲出が発生し問題となっていた。

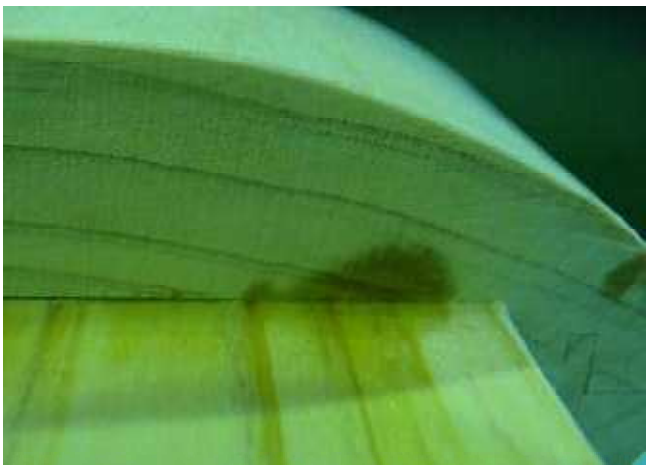


**図1　ヤニの滲出**

そこで、本開発では、提案者からの①製品に加工後の塗装処理があること②木地色で塗装した感じでないこと③簡易な塗装処理であること等の要望を踏まえながら、県産ヒノキ材のヤニ防止技術の開発を行った。

## ２．実験方法

### ２．１．　供試塗料

提案者製品の「kamidana」はヒノキの香りも売りにしていることから、製品後の溶剤臭が残らない水性塗料を用いることとした。そこで、表１に示す１液タイプの水性塗料を２種類及び２液タイプの水性塗料を３種類を選定し、含水率約 17%　の乾燥したヒノキブロック材に刷毛で塗布し供試材を作成した。その水性塗料及び塗布量などによるヤニの滲出防止効果などについて検討を行った。

次に、前記で最も効果が得られた水性塗料を用いて木地色に近い塗装方法の検討を行った。そこで水性塗料の艶消しや着色剤などを添加し、木地色に近い水性塗料及び塗装工程の開発を行った。更に、製品に必要な色合い・手触りなどは、提案者との打ち合わせを行いながら絞り込みを行った。

**表1 供試塗料の種類**

| 番　号 | 塗料の種類 |
|---|---|
| Wa-1 | １液アクリル系水性塗料(アク止め用) |
| Ws -1 | １液アクリル系水性塗料(白木用) |
| D-2 | ２液ウレタン系水性塗料(一般) |
| U-2 | ２液ウレタン系水性塗料(一般) |
| G-2 | ２液ウレタン系水性塗料(一般) |

### ２．２．　ヤニ防止の評価方法

ヒノキ材のヤニの滲出率は非常に少ないことから、ヤニ分が多いヒバ材を用いて予備実験を繰り返し、短時間でのヤニ防止効果が評価できる方法や条件の検討を行った。その結果、木口面からの抽出成分を上質紙へ転写する方法(図２に示す)を採用した。また条件は、木口面に、水で濡らした上質紙をサンドした状態で、温度 75 ℃湿度 95% 恒温恒湿槽中に４時間放置、その後温度 15 ℃湿度 75%で 20 時間放置後、上質紙への転写状態で評価した。。

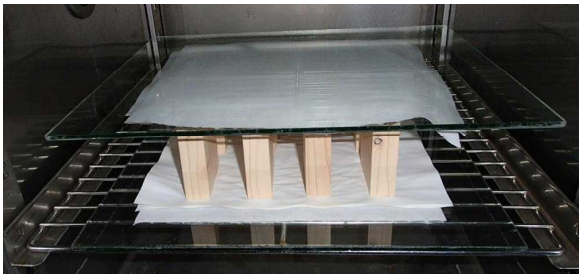


**図2　ヤニの滲出評価方法**

## ３．結果

### ３．１．　予備試験におけるヒバ材のヤニ滲出結果

予備実験としてヤニの滲出し易い材種のヒバ材を用いて行った。ヒバ材は板厚 13 ㎜を４枚張り合わせ、t53 × w64 × L93 ㎜のヒバブロック材全面に供試塗料の５種類を刷毛塗りし、１週間放置したものと無処理材での転写状態の違いによるヤニ防止の評価を行った。

その結果、無塗装材では、ヒバ材木口面にヤニ(抽出成分)が滲出し、上質紙に転写したものを図３に示す。

１液タイプの水性塗料の結果を図４に示す。塗料の水戻りによる上質紙との接着やヤニの滲出も見られた。提案者の製品では塗膜同士が接触する箇所があることから、この水性塗料を不採用とした。

２液タイプの水性塗料の結果を図５に示す。上質紙への転写が薄くなるなど、ある程度ヤニの滲出を抑える効果が見られた。よって、この塗料によるヒノキ材のヤニ防止の検討を行った。

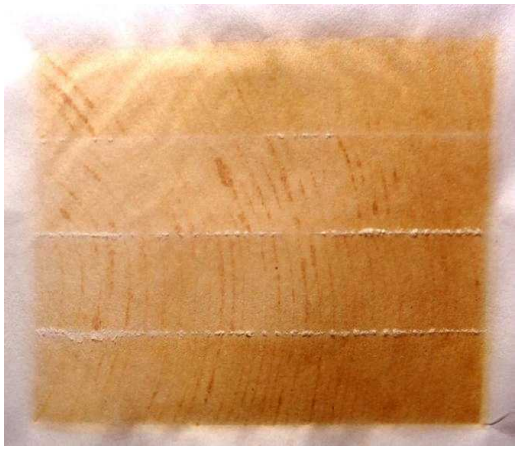


図3　ヒバ無塗装の転写図

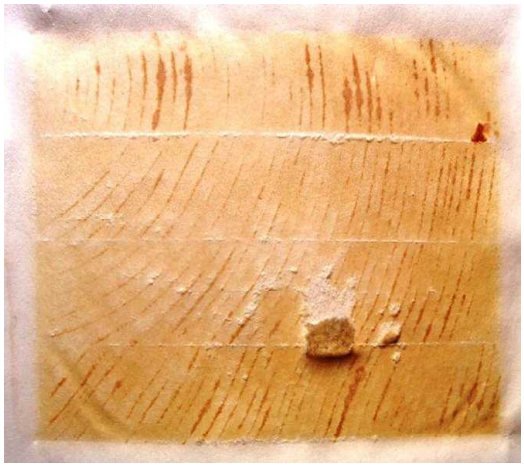


図4　ヒバ1液タイプ塗料の転写図(WS-1)

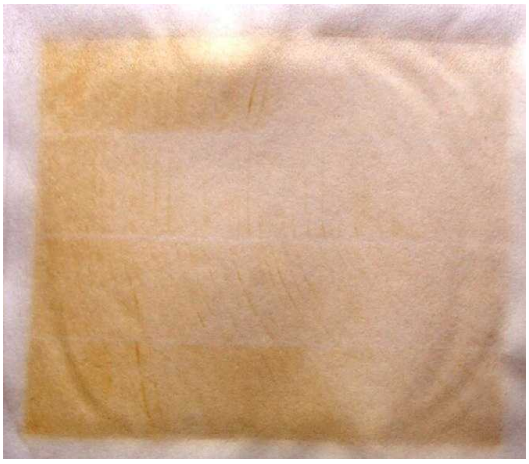


図5　ヒバ2液タイプ塗料の転写図(D-2)

また、予備試験で供試塗料以外の１液シリコーン系水性塗料(白木用)やプレポリマー等の浸透性塗料でのヤニの滲出評価を行ったが、何れも効果が得られなかった。

この予備試験の結果から、２液水性塗料３種類を選定した。

### ３．２．　ヒノキ材のヤニ滲出結果

提案者が要望している製品「kamidana」に適した色合い・質感・手触り等の塗った感じでない木地仕上げ塗装によるヤニの滲出を抑える塗料の開発を目指し、提案者と打ち合わせを行いながら、２液水性塗料の主剤への艶消し剤(セルロース系)及び着色剤等の添加率を絞り込み木地仕上げ水性塗料の検討を行った。それらの中で最も効果的な木地仕上げ水性塗料を用い、県産ヒノキ材の角材からヤニが滲出し易い部分を採取した t24 × w68 × L102 ㎜のブロック材全面に２回塗布したものと無塗装材のものによるヤニ防止の評価試験を行った。

その結果を図６，７に示す。無塗装材の木口面からは、薄いが年輪状にヤニの滲出が転写された。しかし、開発した水性塗料を塗布した木口面においては、ヤニの滲出が見られなかった。よって、県産ヒノキ材のヤニの滲出を抑えるヤニ防止技術と共に、板面の木地仕上げ水性塗料を調合することができた。

これを基に、提案製品「kamidana」に適した効果的な塗装方法の確立と提案を行った。図８にヤニ防止塗装を行った提案製品を示す。

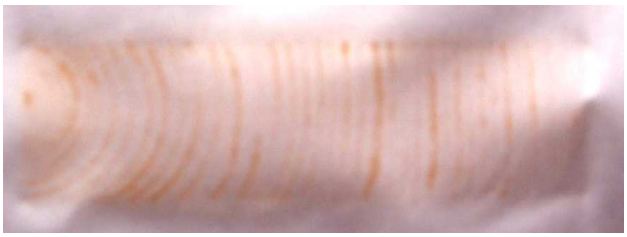


図6　ヒノキ無塗装の転写図

図7　ヒノキのヤニ防止塗料の転写図

図8　提案製品へのヤニ防止塗装

## ４．結言

木製品に使用される県産ヒノキ材のヤニの滲出を抑える水性塗料の選定を行った。また、ヒノキの木地色に近い塗料開発及び塗装工程の確立もあわせて行った。

その結果、県産ヒノキ材などのヤニの滲出を抑える水性塗料の選定や添加剤の使用による木地仕上げ水性塗料の開発ができた。

本開発により、提案製品「kamidana」のヤニ滲出による問題を解決することができた。

また、提案者だけでなく、県内木工企業の中でも課題となっている県産針葉樹材のヤニの滲出に関する問題解決方法が得られ、利用促進を促すものと考えられる。

# 端面部の仕上げ技術の開発

Development of Finish Technology for Parts end face

いわき技術支援センター機械・材料科　緑川祐二
東洋シャフト株式会社　奥田要一　齋藤厚　諸岡重道

ネジシャフト端面部の鋭利形状を仕上げるために、機械化による加工技術を検討した。加工方法を選定し条件などを試行した結果、切削工具を用い短時間（約20秒）で加工仕上げすることができた。

Key　words :　端面仕上げ、面取り、鋭利形状、エッジ、バリ

## １．緒言

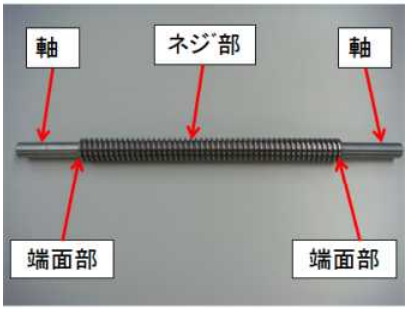
近年の精密機器部品は、高機能・高性能が求められている。一方で、安全性が重要視されており、高い品質基準をクリアしなければならない。例えば、加工装置や位置決めなどの工程で使用される送り用シャフトも、高品質が要求されている。これらの部品などにネジを加工した場合、端面部にバリより強固な鋭利形状が発生することがあり、このままでは動作不良や作業者の怪我を引き起こしてしまう。そのため、現状ではヤスリなどの工具を用いて、手作業で鋭利形状を除去し仕上げている。しかし、熟練者の技能差などにより、品質にバラツキが生じてしまい問題になってきている。

そこで、本研究ではネジシャフト端面に発生した鋭利形状を除去するために、機械化による仕上げ技術の確立を目指した。

## ２．実験方法

### ２．１．試験片

試験片はネジシャフト部品で、図 1-(a)に全体を、図 1-(b)に端面部の鋭利形状部分の写真を示す。この部品にスライダ用ナットをかみ合わせ、ネジシャフトをモータなどで回転させることで、ナットを往復移動や正確な位置合わせをすることができる。




(a)全体

(b)鋭利形状部分

図1　ネジシャフト部品写真

### ２．２．実験方法

図 2 に示すとおり、研磨用装置のテーブル上に、試験片の両端の軸を軸受けで保持し、主軸には切削工具を取り付けて、回転数、回転方向および押付加重などの条件について実験を行った。また、試験片の円周方向の回転および軸方向の送りについては手動で行った。今回使用した切削工具の種類を表 1 に、加工条件を表 2 に示す。全ての切削工具は、正転用で超硬合金製にＴｉＮコーティングしたものである。またエンドカットとは、工具底面に切削刃があるものである。

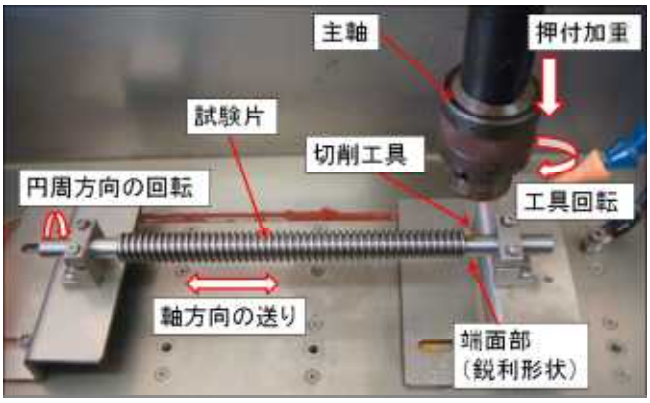



図2　実験方法

表1　切削工具の種類

| No | 外径(mm) | エンドカット有無 |
|---|---|---|
| 1 | φ3.0 | 無 |
| 2 | φ3.0 | 有 |
| 3 | φ6.3 | 有 |

表2　加工条件

| 項　目 | 条　件 |
|---|---|
| 回転方向 | 正転、逆転 |
| 切削速度 (m/min) | 4.2、8.9、17.8 |
| 押付加重 (N) | 5.9、18.1 |

## ３．実験結果及び考察

### ３．１．加工実験

初めに、No.1 の工具で端面の鋭利形状を除去した場合、図 3 に示すように鋭利形状の先端部分は除去できたが、完全には除去できなかった。この工具には、エンドカットがなく工具底面の切削力がないため、こすり付けただけと考えられる。

図3　加工後の写真（No.1工具）
（回転方向:正転、切削速度:4.2m/min、押付加重:5.9N）

一方、エンドカットがある No.2 の工具で実施した場合、図 4 に示すように鋭利形状は完全に除去できた。しかし、高い切削力によりネジ部が垂直に鋭く形成されてしまった。このため、追加で面取り工程が必要になった。

図4　加工後の写真（No.2工具）
（回転方向:正転、切削速度:4.2m/min、押付加重:5.9N）

そこで、No.1 と No.2 の工具の切削力の中間で除去できる方法について検討した。本来正転用の No.3 の工具を逆転させることで、切削力を低下できないかを試した。その結果、図 5 に示すとおりバリは残存したが、概ね良好な形状に仕上げることができた。

図5　加工後の写真（逆回転）
（回転方向:逆転、切削速度:8.9m/min、押付加重:5.9N）

さらに、切削速度の効果について検討した。8.9m/min　→ 17.8m/min に切削速度を速くした場合、図 6 に示すように、バリがなくきれいな形状に仕上がった。

図6　加工後の写真（高速切削）
（回転方向:逆転、切削速度:17.8m/min、押付加重:5.9N）

次に、押付加重の効果について検討した。5.9N → 18.1N に押付加重を重くした場合、図 7 に示すように仕上げ部の距離が長くなり、ネジ山頂の幅も広くなった。これは加重を重くしたことで、より良好で滑らかな形状に仕上げることができた。なお、この仕上げに用した時間は、20 秒程度である。

図7　加工後の写真（高加重）
（回転方向:逆転、切削速度:17.8m/min、押付加重:18.1N）

### ３．２．動作確認

仕上げた試験片に、スライダ用ナットをかみ合わせて動作を確認した結果、スムーズに移動して良好であった。また、仕上げ部を手でなぞったところ、バリなどがなく滑らかな面に仕上がっていた。このため、機械化による品質安定と時間短縮によるコストダウンにつながると考えられる。

## ４．結言

（１）端面部の鋭利形状の仕上げ方法を、切削工具を用いて機械化することができた。
（２）仕上げ後は、バリなどがなく良好な形状にすることができた。
（３）20秒程度の時間で仕上げることができた。

# シーム溶接における接合部の高品質化技術

## －スポット溶接シミュレーションの活用－

Technology of making to high quality of juncture in seam weld.
-Use of spot weld simulation-

いわき技術支援センター機械・材料科　佐藤善久
クリナップ株式会社湯本工場　　渡辺明伸

スポット溶接シミュレーションを活用して、溶接電流と電極加圧力が抵抗溶接のナゲットに与える影響を解析した。また、解析結果を確認するために溶接実験も行った。それらによって、次のような結果を得た。今回の解析では、溶接電流の増加と共にナゲットの直径も大きくなる傾向が示された。同様に、電極加圧力を増加させるとナゲットの直径が小さくなる場合があることが示された。溶接実験では、電極加圧力を低減することで溶接部を改善できる場合があることを確認した。

Key　words:重ねシーム溶接、抵抗溶接法、溶接シミュレーション

## １．緒言

クリナップ株式会社は、板厚が異なる天板とシンクを重ねてシーム溶接する重ねシーム溶接（以下、「シーム溶接」と呼ぶ）を行うことで、ステンレス製流し台を製作している。シーム溶接は、重ねた被溶接材を上下から円盤電極で挟み込み、円盤電極を回転しながら通電することで連続的に溶接する方法である。シーム溶接では、溶融凝固部であるナゲットが被溶接材の界面を中心に形成されることが多い。しかし、図１に示すように、板厚の中心方向に偏ってナゲットが形成されたために被溶接材の接合部が小さくなり、後工程の工数が増加する不具合が発生した。

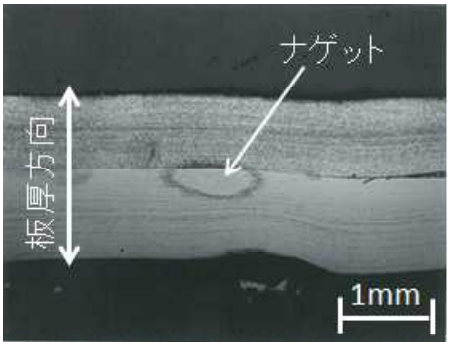



**図1　ナゲットが偏って形成された例**

そこで今回は、被溶接材の界面を中心にナゲットを形成して不具合を解消するため、次のような取り組みを行った。

１）シーム溶接は、抵抗溶接法の一種であるから、同じ抵抗溶接法であるスポット溶接に関する検討からも有効な知見が得られると考えた。そこで、解析ソフトウェアを用いてスポット溶接シミュレーションを行い、溶接電流と電極加圧力がナゲットに与える影響と傾向を解析した。

２）解析の結果を実証するために溶接実験と溶接部断面のマクロ観察を行った。

## ２．スポット溶接シミュレーション

### ２．１．　解析ソフトウェア

スポット溶接用解析ソフトウェアには、の"SYSWELD(2008)"（日本イーエスアイ(株)製）を用いた。"SYSWELD"は溶接・熱処理解析ソフトウェアであり、スポット溶接解析専用のインターフェースである"Spot-welding Advisor"を用いることによって、２軸対称モデルやメッシュの自動生成、ナゲットと熱影響部の大きさ等を求めることができる。

### ２．２．解析と結果

表１に今回の解析に使用した主なパラメータとその設定値を示す。解析に用いたパラメータとその設定は、実際に用いられている加工条件を参考にした。なお、通電時間中の溶接電流値は一定とした。

**表1　解析に使用した主なパラメータと設定**

| | | |
|---|---|---|
| 被溶接材 | シート数 | ２<br>（厚さ 1mm と 0.6mm） |
| | 材　質 | SUS304 |
| 電極 | 材　質 | クロム銅 |
| | 直　径 | 12mm |
| | 先　端 | 1/70（曲率） |
| | 加圧力 | 50 ～ 2000N |
| 溶接電流 | | 1 ～ 9kA |
| 通電時間 | | 20msec |

溶接電流とナゲット・熱影響部の関係を示す解析例を図２に示す。

図２より、溶接電流の増加と共にナゲット・熱影響

部共に直径が増加する結果が示された。また、7kA でナゲットの直径に変曲点が見られる。この点では、図３に示すように、電極間の一部に全て溶融している部分が形成されていることが示された。この場合、電極の加圧によって溶融部分から溶融金属が飛散する散りが発生し、外観不良や溶接欠陥が発生しやすい溶接部となることが予想される。これらの結果を併せて用いることによって、良好な溶接部が得られる電流値の予測にも役立つと考えられる。

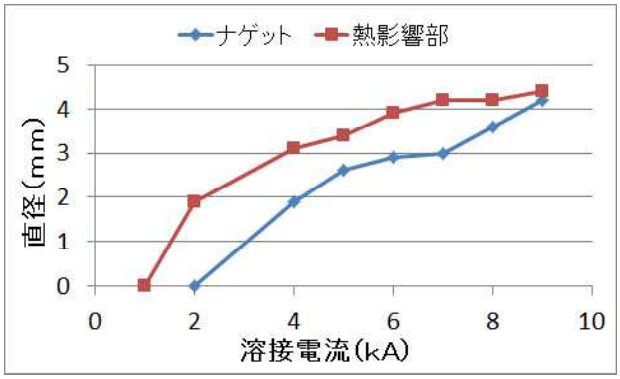



図2　溶接電流が溶接部に与える影響（電極加圧力500N）

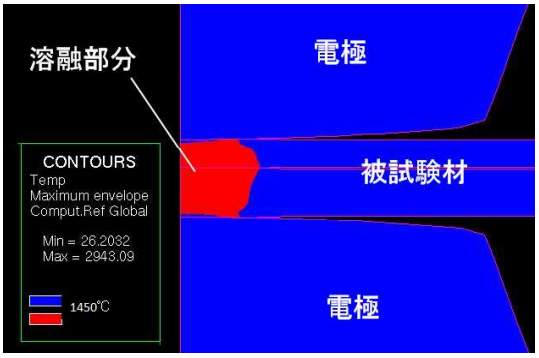



図3　溶融部分の形状を表示した例（2軸対象ﾓﾃﾞﾙ）

図 4 には電極加圧力とナゲット・熱影響部の関係を示す解析例を示す。

900N までは電極加圧力が増加してもナゲットの径はほとんど変化しなかった。しかし、1,000N 以上の加圧力ではナゲットの径は減少し、2,000N では形成されないことが示された。これは、加圧力の増加に伴って被試験材の間の接触抵抗が減少し、ナゲットを形成するために必要な抵抗発熱が得られなかったことを示していると考えられる。これらの結果より、過度な電極加圧力はナゲットの形成を阻害することがあるため、電極加圧力には適当な値があることがわかる。よって、電極加圧力が過大な場合は、それを低減することで溶接部が改善できる場合があると考えられる。一方、ナゲットの直径は被溶接材の界面で最大となり、図 1 のように被溶接材の板厚の中心に形成される例は再現できなかった。

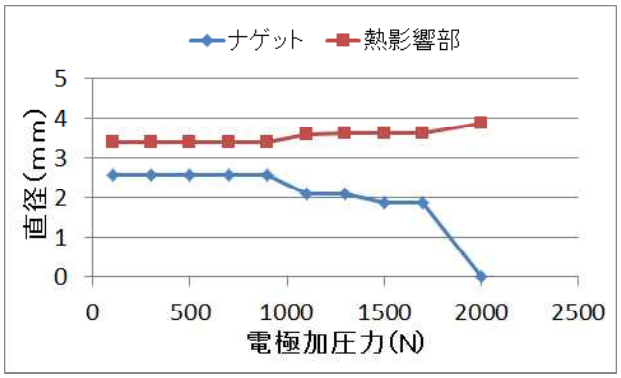



図4　電極加圧力が溶接部に与える影響(溶接電流5kA)

## ３．溶接実験

解析の結果を確認するため、表 1 に示した溶接条件の電極加圧力を変化させて溶接実験を行い、断面のマクロ観察を行った。その結果、電極加圧力を 18 %低減した場合、図５に示すようにナゲットの直径が明らかに増大していることがわかった。また、ナゲットの位置もほとんど被溶接材の界面の中央に形成されていることがわかった。

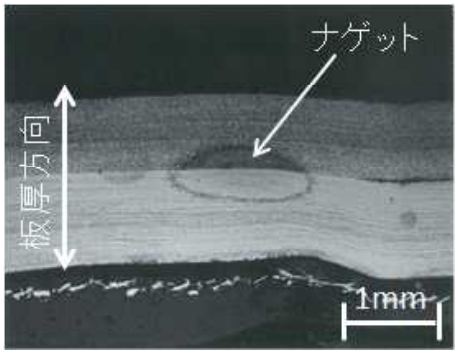



図5　電極加圧力を18%低減した例

## ４．結言

スポット溶接シミュレーションを活用して、溶接電流と電極加圧力が抵抗溶接のナゲットに与える影響を解析した。また、解析結果を確認するために行った溶接実験によって、次のような結果を得た。

（１）今回行った解析では、溶接電流の増加と共にナゲットの直径も大きくなる傾向が示された。

（２）同様に、電極加圧力を増加させるとナゲットの直径が小さくなる場合があることが示された。

（３）溶接実験によって、電極加圧力を低減することで溶接部を改善できる場合があることを確認した。

# 硫酸バリウム(福島加工品)を用いた放射線遮蔽材料の開発

Development of a radiation shield material using Barium sulfate powder（manufactured in Fukushima）

いわき技術支援センター機械・材料科　吉田正尚
竹原化学工業株式会社　鈴木伸一

本研究では、福島県内で加工され製品化される硫酸バリウム粉体を活用し、側溝等の一般的な建築資材であるセメントよりも放射線遮蔽能が高い素材の開発を試みた。硫酸バリウム粉体３種類と硫酸バリウム試薬、セメント３種類の７試料で作製したディスクを標準ガンマ線源と線量計との間に設置し、各試料の線量率の値を測定した。その結果硫酸バリウム純度が90%程度の低価格製品でも鉄粉10%含有セメントと同等の数値を示すことが確認された。また硫酸バリウム粉体を水ガラスと混練し様々な成型品を試作できることが確認できた。

Key　words:放射線遮蔽、セシウム 137 線源、硫酸バリウム粉体、水ガラス

## １．緒　言

東京電力福島第一原子力発電所事故から３年が経過し、その間に雨水によって運ばれた放射性物質が道路の側溝等に集積し、そこに滞留した放射性物質より由来する放射線(主にγ線)による外部被曝を復興・復旧の為に可能な限り低減させる必要がある。すなわち今後、旧警戒区域内を復興・復旧する為には放射線防護対策は必要不可欠な課題である。

一方、提案企業の硫酸バリウム製品は、天然鉱物である重晶石(Barite)を海外から輸入し、福島県内の工場で破砕・造粒し製品化している。この製品の用途は主に無機充填剤（白色顔料など)であるが、また硫酸バリウムは比較的高密度(文献値 4.5g/cm$^3$)材料であるため、その特長から遮音材や医療用Ｘ線造影剤としても利用されている。

そこで本研究では硫酸バリウムの高密度材料という特性に注目し、放射線遮蔽材料の開発を試みた。またその遮蔽能を側溝に使用されている一般的な建築資材であるセメントと比較した。更に硫酸バリウム粉体を成型して放射線遮蔽製品の試作も試みた。

## ２．放射線遮蔽実験

### ２．１．　硫酸バリウム

本研究で用いた硫酸バリウム原料粉体は３種類である。含有される硫酸バリウムの純度と白色度に応じて高価格な白色硫酸バリウム粉体２種(W-6(平均粒径 6 μ m)、W-10(平均粒径 10 μ m))と低価格な有色硫酸バリウム粉体１種(A-200)を用いた。また比較用に硫酸バリウム一級試薬（和光純薬社製）を使用した。

### ２．２．セメント

硫酸バリウムと放射線遮蔽能を比較するセメントには、一般的なポルトランドセメント(東京サンホーム(株)製)で、組成がケイ酸三カルシウム（エーライト $3CaO \cdot SiO_2$）のものを用いた。また硫酸バリウムがどの程度鉄粉を含有したセメントに相当するのか検討するために、鉄粉を 10 ～ 20 %含有したセメント試料も作製した。

図１　使用した硫酸バリウム粉体とディスク

### ２．３．放射線遮蔽実験用ディスク

硫酸バリウム及びセメントの各原料粉体を蛍光Ｘ線分析前処理用の錠剤成型圧縮機で圧粉し、直径 40mm の円盤状にディスク化した試料を放射線遮蔽実験に用いた。

### ２．４．放射線遮蔽実験

実際の放射線遮蔽実験は、線源に放射性セシウム($Cs^{137}$ 放射能 10KBq)を使用し、測定機はＮａＩシンチレーションカウンター(日立アロカ社製 TCS-172B)を用いた。また測定値の外部からの影響を避けるため図２に示す鉛製の放射線遮蔽評価装置の中にプローブと線源を封入し、線源－検出器間の隙間(1cm)にディスク化した試料を入れてその線量率の変化を測定(測定条件は時定数 30 秒で 30 分間)した。

図２　放射線遮蔽実験

## ２．５．実験結果と考察

放射線遮蔽実験の結果を表１に示す。そこで得られた結果を図３の式を用いて半価層を算出することにより各試料の遮蔽能の評価を行った。

表１　放射線遮蔽実験結果

| | 厚さ(mm) | 密度(g/cm3)※ | $BaSO_4$量(%) | $SiO_2$量(%) | 線量率(μSv/h) | 線量減弱率(%) | 半価層(mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 空試験 | * | * | * | * | 0.879 | 100 | * |
| W−10 | 3.557 | 3.9 | 97.3 | 0.33 | 0.817 | 92.95 | 33.72 |
| W-6 | 3.931 | 3.47 | 97.9 | 0.15 | 0.82 | 93.29 | 39.23 |
| A−200 | 3.629 | 3.77 | 96.4 | 1.13 | 0.818 | 93.06 | 34.97 |
| 硫酸バリウム試薬 | 4.871 | 2.82 | 100 | 0 | 0.767 | 87.26 | 24.78 |
| W-6(水ガラス成形品) | 4.946 | 3.44 | 94.7 | 2.27 | 0.811 | 92.26 | 42.56 |
| セメント | 5.471 | 2.01 | * | * | 0.829 | 94.31 | 64.73 |
| 鉄粉10%含有セメント | 4.41 | 2.45 | * | * | 0.794 | 90.33 | 30.06 |
| 鉄粉20%含有セメント | 3.944 | 2.83 | * | * | 0.781 | 88.85 | 23.12 |

※原料粉体を圧縮してディスク化した時の密度

$$I = I_0(1/2)^{x/h}$$

I･･･試料を透過後の放射線の線量率
$I_0$･･･試料を透過する前の放射線の線量率
x･･･試料の厚み
h･･･試料の半価層

図３　半価層の計算式

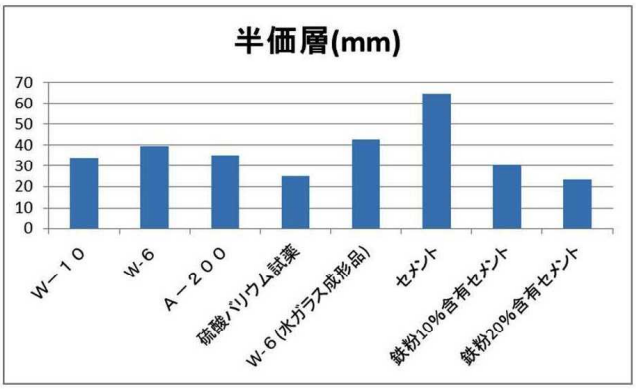



図４　各試料の半価層の比較

その結果、図４の通り半価層は、硫酸バリウム試薬 ＞ W-10 ＞ A-200 ＞ W-6 ＞セメント、の順であった。従って A-200 のように白色度が低く有色なため低価格な製品でも硫酸バリウム純度が 90%程度であれば放射線遮蔽に効果があることがわかった。

また硫酸バリウム粉体の粒径についても検討した。すなわちより高い放射線遮蔽能の向上を目指し、硫酸バリウム固体の文献値密度 4.5g/$cm^3$ に可能な限り近づける為、粒径がより小さい試料 W-6 を使用し、圧粉時の粒子間の空隙率がより小さくなれば、結果的に高密度化して、粒径が大きい試料 W-10 に比べて放射線遮蔽能が高くなると思われた。しかし、放射線遮蔽能はあまり変わらず、結局この程度の小粒化では遮蔽能に寄与しなかった。

更に算出した半価層により、硫酸バリウム粉体の放射線遮蔽能の程度は、鉄を含有したセメントに換算すると、鉄粉 10%含有セメント相当であることがわかった。

## ３．放射線遮蔽製品の開発

硫酸バリウム粉体を圧粉したのみでは衝撃で形状が容易に崩れてしまい実用的とは言えない。そこで粉体を結合剤で固めて成型し放射線遮蔽製品として試作することを試みた。ここで結合剤にはケイ酸ナトリウム水溶液(水ガラス)を用い、粉体と水ガラスを混練し粘土状にしたものを定型容器の型に入れて乾燥し成型体の試作を行った 。

その結果、図５のように煉瓦型や円柱状など様々な形状に成型され、放射線遮蔽製品が試作できた。

しかし、水ガラスを用いて成型した場合、含有する水ガラス成分により放射線遮蔽能は若干低下した。

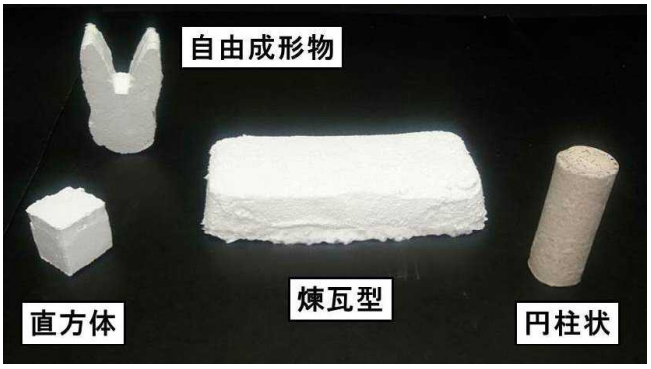



図５　水ガラスによる硫酸バリウム粉体成型品

## ４．結　言

今回の研究で以下の知見が得られた。

（１）硫酸バリウムは一般的な建築資材であるセメントに比べて放射線遮蔽能が高かった。
（２）硫酸バリウム粉体の純度が 90%程度の低価格製品でも放射線遮蔽の効果があった。
（３）粒径 6 ～ 10 μ m の範囲では平均粒径の大小で放射線遮蔽能に大きな差異は無かった。
（４）算出した半価層により硫酸バリウム粉体の放射線遮蔽能は鉄粉 10%含有したセメントに相当した。
（５）硫酸バリウム粉体を水ガラスを用いて成型し放射線遮蔽製品を試作した。

# 用 語 解 説

マルチスケールＣＡＥによる製品開発手法の確立（第 2 報）

**バーチャル環境試験**：温度や振動など外的環境に対する製品の耐性を調べるために実施される環境試験を、コンピュータ・シミュレーションにより仮想的に行うアイデア。製品内部の状況の可視化や、故障メカニズムの解明に役立つと思われる。さらに、可視化やメカニズム解明の結果を通して、サンプル数、試験条件の削減や試験時間の短縮も可能であり、製品開発の短縮にも役立つと思われる。

**HALT**：Highly Accelerated Life Test の略で通常の環境試験より厳しい条件の温度変化と振動荷重をステップ状に徐々に負荷を高めて与え、故障発生までの評価を行う試験のこと。試験目的によっては、通常 1 か月以上かかる試験を数時間で代替することもできる。1980 年代にアメリカで考案された技術で、欧米で自動車分野や PC 分野などを中心に利用されている。また、十年ほど前から、中国、韓国などアジア勢も本格利用を開始している。特に、韓国のサムスン・グループが大量に利用していることが知られ、成長の一因としての見方もある。日本だけが普及していない状況が永らく続いたが、ここ数年、本格導入の兆しが見られる。これは、単にグローバル化への対応だけでなく、HALT に対して理解が進み、HALT が単なる環境試験技術ではなく、設計検証に関する技術という認識が広まったためである。特に、過剰品質が課題とされる国内製品では、設計マージンの最適化による低コスト化を目的とした利用が期待される。

**コンピュータ援用（支援）技術**：CAD/CAM/CAE　に共通する CA（computer-aided）に対応する日本語として、計算機（コンピュータ）援用あるいは支援という表現を用いることが多い。コンピュータ技術を用いて、製造業における設計、製造工程などを効率化する技術の総称として用いる。

**マルチスケール**：科学技術一般に、対象とする現象をどのような寸法（スケール）で捉えるかが重要となる。近年、複数のスケールの解析、シミュレーションを連携して高度化を図ろうとする取り組みが各分野で増え、「マルチスケール（的手法）」との表現が用いられている。

**均質化（法）**：有限要素解析に関する計算手法のひとつで、本来、不均質である材料や構造体の一部を、それと等価な均質体に置き換える手法。解析モデルの規模を縮小し、計算時間を短縮することができる。

**イメージベース/マルチスケールCAEシステム**：昨年度、ハイテクプラザに導入された設備。モデル作成を行う「Simpleware」、モデル修正・変換を行う「SpaceClaim」の 2 ソフトからなるイメージベースモデリング装置と、構造解析、熱伝導解析を行う「ANSYS　Mechanical」と均質化・局在化解析を行う「ANSYS　Multiscale.Sim」の 2 ソフトからなる CAE 解析装置部から構成される。

**故障解析**：主に電子部品を対象に、使用中や製造中に生じた故障や不具合の状況や原因を知るために行われる分析や観察などを中心とした体系的な調査のこと。機械部品では、破壊や腐食など故障のメカニズムが明確である場合がほとんどなのに対し、電子部品では故障のメカニズムや原因の特定が困難な場合が多く、製品の信頼性を確保するため、重要視されている。

**熱応力**：材料の熱膨張率の違いや、物体中の温度分布の違いにより、部品間あるいは部位間で熱膨張の程度に違いを生じることをきっかけとして発生する応力のこと。電子部品は、熱膨張率の異なる多種多様な材料で構成されるため、熱応力が問題になるケースが多い。熱応力は直接測定することが困難であるため、CAE による推定が有効である。

**疲労破壊**：1回の負荷では壊れない小さな負荷であっても、繰り返し負荷されると生じる破壊現象が疲労破壊であり、この特性を調べるための試験が疲労試験である。負荷回数の大小により高/低サイクルに大別され、電子部品では主に温度サイクルによる熱応力を対象とする

ので最大10の4乗回程度の負荷の「低サイクル疲労」に該当する。両者は、試験方法や評価方法に相違点がある。

浅部地中熱利用システムの開発

**地中熱**：再生可能エネルギーの一種で、地下２００ｍまでに存在する熱エネルギー。主に太陽エネルギーが起源とされる。

**不易層**：年間を通して地中の温度がほとんど変化しない地層のこと。

**熱交換井**：地中熱を利用するための井戸。一般には１００ｍ程度の深度で掘削し、井戸に存在する地下水を直接くみ上げたり、Ｕチューブと呼ばれるＰＥ管を埋設し、そこに液を循環させることで熱交換を行う。

**鋼管杭**：軟弱地盤等へ建築を行う場合などの基礎強化を目的とした、先端をドリル形状に加工した鋼管製の杭。地盤に貫入し、基礎と一体化することで耐震補強を行う。

簡易型転落・転倒警報装置の開発

**転倒・警告アプリケーション**：農業総合センターが（株）アサヒ電子との間で共同研究協定を結び開発した android スマートフォン用のアプリケーション。2012/12/11 にプレス発表を行った。

材料科学的なアプローチによる厚板鍛造の高度シミュレーション技術の確立（第 3 報）

**バーチャル試作**：実際の金型製作や試作を行わずに、コンピュータ上で仮想的に試作を行う考え方。一般的なものづくりでは、量産の前に金型や工程が妥当かどうか確認する目的で数回の試作を繰り返すのが普通であるが、時間とコストがかかることが、かねてより問題視されている。バーチャル試作を行うには、前提として解析の精度が確保されている必要がある。

バーチャル試作を行う場合、CAE 解析を行う手間により前工程での負担が増えるが、後工程の無駄を排除することで、工程全体としての効率化が狙えると言われる。この考えは「フロント・ローディング」と呼ばれるもので、CAE 利用のメリットを論じる際に持ち出されることが多い。

**デジタルエンジニアリング技術**：ものづくりの設計、製造などの工程において、CAD などを中心にデジタルデータ、デジタル技術を有効活用して全体を効率化する技術。コンピュータ援用(支援)技術とほぼ同じ意味で用いられる。厚板、厚板鍛造：板厚 2-3 ㎜以上の板素材を厚板と呼ぶ。薄板との対比で用いられる表現。厚板鍛造は、単に板鍛造と呼ばれることも多い。

**板成形**：薄板（概ね板厚 2-3 ㎜以下）を素材とする加工で、自動車のボディの加工が代表例。変形のタイプ別に、絞り、張り出し、曲げ、穴広げの４つに区分されることが多い。塑性加工の中では、CAE 利用技術などの技術蓄積が最も進んでいる分野である。

**鍛造**：棒材などバルク材（金属の塊）を素材とする加工で、変形のタイプ別に据込み、押し出しなどに区分される。板成形に比べて大変形となるのが一般的で、加工性を確保するため、高温下で加工する場合も多い。

**ＣＡＥ**：(Computer Aided Engineering）の頭文字を取ったもので、直訳すると、コンピュータ支援（援用）工学。現在では、より広い意味で、コンピュータ上に製品モデルを作成し、様々にシミュレーションすることを指す。コンピュータシミュレーション、数値解析とほぼ同じ意味で用いられることが多い。

**現物融合型デジタルエンジニアリング技術**：最新の形状計測技術をベースに現物（実製品）とデジタルエンジニアリングを結び付けて、技術の高度化を狙う考え方。東京大学の鈴木宏正

教授が中心となり、精密工学会の現物融合型エンジニアリング専門委員会で情報発信をしている。デジタル技術は世界的な普及が早いため、現場のレベルが高い日本の強みをデジタルエンジニア技術と結びつけることにより、日本ならではの、ものづくり技術の高度化を狙っている。

**３次元デジタイザ**：３次元の形状を測定するための装置で、３次元スキャナとも呼ばれる。近年、注目されるのは、主に、光学式など非接触で短時間で測定できるタイプのものである。伝統的な精密測定分野における３次元測定に比べて精度が低いことが弱点であったが、コンピュータの性能向上により、精度と測定時間が実用レベルに達している。伝統的な手法に対し、一回の測定でエリア情報が得られることから利活用が広まっている。

**粒界近傍強化モデル**：工業的に実用化されている金属材料は多結晶体であるが、結晶粒が微細化されると強度が上昇する。これを結晶粒微細化強化、あるいは粒界強化と呼ぶ。強化のメカニズムとしては、現在では結晶粒界近傍に転位密度が高い領域が形成されることに起因するとの見方が有力である。本グループでは、結晶粒径の大小に問わず粒界近傍の 10 $\mu$ m 程度の領域を結晶粒中心部より強化された材料と仮定する「結晶粒強化モデル」を提案し、ナノスケール硬さや分子動力学を用いて、モデルの妥当性の検証を行い、鉄鋼材料を中心とした応用や、3 次元モデル化を検討している。

**ホール-ペッチ関係**：多結晶金属において、降伏点（あるいは強度）と結晶粒径の(-1/2)乗との間に比例関係があることが知られており、これをホール-ペッチ関係と呼ぶ。全ての金属に当てはまる普遍的な事実として捉えられている。

---

太径締結部品のミクロ加工制御技術の開発

---

**組織予測、特性予測**：従来の熱処理シミュレーションでは、形状変化に着目した利用が多かったが、近年は熱処理の結果として形成される組織を相分率として予測する「組織予測」や、硬さ、強度などを予測する「特性予測」への需要が増えている。

**加工フォーマスタ**：熱間加工や熱処理に関する試験機で、加工中の変形抵抗や熱処理中後の変態点を知ることができる。さらに、組織観察などを併用することで、相変態特性を表すCCT図を得ることができる。

**熱伝達係数の逆同定**：熱処理CAEでは冷却に関する情報として、温度依存性を持つ熱伝達係数を入力する。しかし、実際の焼入れ時の冷却は、蒸気膜の形成や沸騰が生じる複雑な過程を経るため、定型的な試験によって得られたパラメータだけでは十分な解析精度を得ることが困難である。このため、実製品を対象に複数の入力パラメータで計算を行い、計算結果と実製品との組織、硬さの照合から、入力パラメータを求める逆同定手法の利用が有望と見られている。

**水素脆化、遅れ破壊**：高強度ボルトでは、数十年前に、取付け後、数か月から数年後に破壊が生じる「遅れ破壊」が多発した。その後、材料中に拡散性水素が存在することにより強度が低下する「水素脆化」が原因であると判明した。この結果、現在では、強度区分「12.9」(旧 11T、13T)などの使用は事実上制限されている。

**焼入れ性**：焼入れの成否は、マルテンサイト変態が起こるかどうかで決まるが、径が大きい部品では、表面では焼きが入るのに対し、中心では冷却速度不足で焼きが入らない。焼きの入りやすさは、元素組成などにより変わるため、その特性を「焼入れ性」と呼び、焼入れ深さなどにより表現する。

**加工熱処理（TMCP）**：熱間加工と熱処理を連続的に一体化して行う処理の総称で、TMCP(Thermo-Mechanical-Control-Process)とも呼ばれる。工業的には鋼材(厚板)製造での制御圧延・制御冷却が最も普及している。例えば、浮体式洋上ウィンドファーム実証研究では新日鐵住金株式会社が溶接性を高めるため、C%(炭素当量)をできるだけ低減しつつ従来同等の強度を確保したハイテン鋼の製造を、TMCP によって、組織制御することで実現している。

**改良オースフォーム**：加工熱処理の一種で、高温のオーステナイト単相組織に対して変形を与える処理。古くは高合金組成の低温処理にて高強度材の開発が行われたが実用化せず、近年

は、低合金鋼で強度1500MPa程度を目指す利用が研究対象となっており、「改良」オースフォームと区別して呼ばれている。

**マルテンサイト**：焼入れした際に得られる針状の組織。本研究では、ブロック、パケットなどの階層構造を持つ点に着目している。そのままでは硬くて脆いため、焼き戻しを行い、強度と伸びのバランスを調整することがほとんどである。

**ベイナイト**：炭素鋼の場合は等温変態にて生じる組織で、合金鋼の場合では、マルテンサイトが生成する冷却速度の速い領域とパーライトが生成する冷却速度が遅い領域の中間領域でも形成される。その変態機構に関しては今でも不明な点も多いが、特に、下部ベイナイトと呼ばれる組織では、強度とじん性のバランスに優れており、工業的利用が広がりつつある。

**鍛造-熱処理一体CAE**：近年、特定の加工プロセスに特化した「鍛造 CAE」、「熱処理 CAE」などの利用が増えている。従来、これらは別々のソフトとして発展してきたが、鍛造-熱処理一体 CAE」技術は、両者を一体化し、一続きの解析として行う技術である。実際の工業製品では、前工程、あるいは素材からの加工履歴を引き継ぐため、鍛造開始の時点で、部位ごとに状態や特性が異なる。従来の CAE ではこの点を無視して計算したため、解析精度が悪かった。これに対し、数年前から、一体化して利用する提案がなされ、その精度の高さから急激に普及が広がっている。このようなアイデアは、「全工程解析」と呼ばれている。

---

水溶性チタン酸バリウム前駆体を用いた高性能 PTC サーミスタ用原料の開発

---

**PTC サーミスタ**：Positive Temperature Coefficient（＝正の温度係数）の頭文字をとったもの．チタン酸バリウムにキャリアをドープし半導体化させたものは室温付近では比較的低い電気抵抗を示すが、キュリー温度付近（約 120 ℃）で急激に電気抵抗が増大する。この性質を利用して過電流防止素子やセラミックスヒーターなどに用いられる。セラミックス PTC の他にポリマーに導電性フィラーを加えたポリマー PTC も存在する。

**チタン酸バリウム**：化学式 $BaTiO_3$ で表されるペロブスカイト型構造を有するセラミックス。高い比誘電率を有することからコンデンサをはじめとする電子部品の原料として用いられる。

---

生体分子のセンシングデバイスへ応用可能なマイクロ流路用金型の作製技術開発（第 2 報）

---

**ポリジメチルシロキサン（PDMS）**：シロキ酸ポリマーの一種。無色透明で、可視領域の吸収が小さい、自己吸着性という特徴を有している。

---

マルチスケール計算材料科学の応用による鋳造製品の高強度・高じん化組織制御技術の確立

---

**光学式非接触ひずみ測定**：CCD カメラを用いて、非接触でひずみ測定を行う技術。一般的な測定手法であるひずみゲージによる方法が特定の地点の、特定方向の測定しかできないのに対し、エリア情報、二次元情報を得ることができるのが特徴である。

**破断伸び、局部伸び、(一様伸び)**：引張試験において、破断後、分離した試験片を突き合わせて、試験前後の標点距離の変化から算出するひずみ量を、「破断伸び」と呼び、単に、「伸び」と呼ばれることも多い。延性のある材料では、最大荷重に達した後に、くびれを生じ荷重低下が始まる。その後、優先的にくびれ周辺が変形した後に破断する。ここで、最大荷重に達するまでは、試験片の直線部で均一の伸びを示すことから、「一様伸び」と呼ぶ。一方、くびれ発生後、最大荷重点以後の伸びはくびれ近傍の局部変形だけに関係することから「局部伸び」と呼ばれる。「一様伸び」と「局部伸び」の合計が「破断伸び（全伸び)」になる関係がある。板成形では、加工の種類により、どちらの伸びが優勢かで、加工性に影響があるため、重要視される。

**じん性**：材料の破壊に対する抵抗性に関する性能のことで、破壊力学的なパラメータであり、物理的な意味では破壊に必要なエネルギーに当たる。破壊じん性試験によって得られる「破壊じん性値」は、破壊に関して引張強度より厳密な材料物性値であるが、試験・評価が困難であるため、工業的には、シャルピー式などの衝撃試験や引張試験での強度-伸びのバランスでじん性の判断をすることの方が多い。「ねばさ」という表現を用いることもあるが、専門外の人は、粘着性、粘弾性を連想する場合も多く、英語の「toughness：タフネス」の方が誤解が少ないと思われる。

**組織制御**：特定の機能特性を発現させることを目的に、材料や製造条件を制御し、特定のミクロ組織を得ることを積極的に目指す、すなわち、制御しようという考え方。

**マルチスケール強度試験**：本グループの考え方を表現するための造語で、従来、別々の目的で実施されていた「製品試験」、「テストピース試験」、「硬さ試験」をスケールの異なる強度試験として捉え、統一的に連携して実施することにより、強度試験の効率化・高度化を図り、単なる強度評価にとどまらず、組織制御にフィーバックできる情報の獲得を目指している。

**計算材料科学**：材料科学分野におけるシミュレーションの利用拡大を受けて、材料科学分野における計算科学の利用、あるいは、材料科学と計算科学の融合を意味した「計算材料科学」という言葉が定着しつつある。材料科学分野では、計算能力、計算規模の限界のため、その活用の広がりは遅かったものの、計算科学の進歩によるブレークスルーの期待が高まっている。

**デジタル画像相関法**：非接触ひずみ測定に用いられる測定手法で、変形前後のデジタル画像の微小領域の相関性を最適化させることで変形量を把握するもの。実際の測定では、あらかじめ物体表面にランダムパターンを形成することにより測定を行う。

---

着用快適性に優れた防刃用衣料素材の開発

---

**防刃衣料**：刃物等による耐切創性、耐突き刺し性に優れた衣料素材

**着用快適性**：軽量性、柔軟性及び通気性を兼ね備えた衣料素材の特性

---

ネットワークオンチップ構成における高位合成に関する研究

---

**RTOS**：Real-time operating system の略。リアルタイムシステムにおけるアプリケーションのために開発されたオペレーティングシステムのこと。

**ネットワークオンチップ（NoC）**：メニーコアプロセッサ間の通信を共通バス方式ではなく、簡易ネットワークにおるパケット通信で実現したシステムのこと。

**プラットフォーム**：あるソフトウェアやハードウェアを動作させるために必要な基盤となるハードウェアや OS、ミドルウェアのこと。

**高位合成**：設計ツール等で開発されたモデルデータを、C 言語ソースコードに変換し、タスク分割や優先度決定を自動的に行う手法のこと。

**コア**：マイクロプロセッサの中核部分で、演算処理を行うための論理回路などが実装されているところ。

**タスク**：OS から見た処理（プログラム）の実行単位。RTOS では複数タスクが同時に実行される。

**TOPPERS/JSP**：TOPPERS プロジェクトからオープンソースで公開されている $\mu$ ITRON4.0 仕様 OS。

**FPGA**：Field-Programmable Gate Array の略。回路をプログラムのように表記して構築することができるデバイス。デバイスの単価は高価ではあるが、開発コストを抑えることができ汎用性が高いことから近年利用する企業が増えている。

電子基板のメッキ仕様がはんだ接合信頼性に与える影響について

**ニッケルメッキ**：電子基板の接合部は銅パターン上に無電解ニッケル-リンメッキ、金メッキの仕様が多い。ニッケルメッキは銅のはんだ中への拡散を防止する目的、金メッキはニッケルメッキの表面保護のために用いられる。

**XPS**：エックス線光電子分光法（X-ray photoelectron spectroscopy）の略称。サンプル表面にX線を照射し、生じる光電子のエネルギーを測定することでサンプル表面の構成元素と電子状態を分析できる。また、アルゴンエッチングにより深さ方向の元素分布を知ることができる。

**イオンミリング装置**：試料表面にアルゴンイオンビームを照射して試料表面をクリーニングする装置。断面研磨試料表面の細かい傷の除去や試料内部を露出するための前処理として使用することができる。

FPGA を用いた電源装置の表示機能の検討

**FPGA**：Field-Programmable Gate Arrayの略。回路をプログラムのように表記して構築することができるデバイス。デバイスの単価は高価ではあるが、開発コストを抑えることができ汎用性が高いことから近年利用する企業が増えている。

**TOPPERS**：Toyohashi OPen Platform for Embedded Real-time Systemsの略。ITORN仕様のOS等を開発するプロジェクトの名称であり、このプロジェクトで開発されたOSをTOPPERS仕様のRTOSと呼ぶ。

**A/D変換器**：A/Dコンバータ（Analog to Digital converter）とも呼ぶ。センサーなどが出力する連続値（通常は電圧値）をコンピュータが処理できる離散値（デジタル値）に変換する素子。

有機栽培転換を促進する微生物資材の開発

**T-RFLP法**：制限酵素はDNAの特定の塩基配列部位を切断する性質を持つ酵素である。例えば制限酵素の一種であるEcoRIはDNA 上の GAATTCの部分を認識し、GとAの間で切断する。したがって、適切な制限酵素を用いることにより、同じ長さで塩基配列の異なる遺伝子を異なる長さの断片として分離することができる。この原理を用いて微生物群集構造を解析する手法が、T-RFLP（Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism; 末端標識制限酵素断片多型分析）法である。 その原理は以下の通りである。試料中の微生物群集から全DNAを抽出し、rRNA遺伝子上の全細菌に共通な配列を対象としてPCRを行う。この際に蛍光標識したプライマーを使用することにより、生じるPCR産物の末端を蛍光標識する。PCR産物をHaeIIIなどの制限酵素で切断した後、キャピラリー電気泳動装置を用いて電気泳動し、蛍光標識された末端を含むPCR産物を検出する。そして検出されたDNA断片の数や各々のDNA断片の蛍光強度を測定することにより、細菌の群集構造を解析する。T-RFLP法ではDGGE法とは異なり、特定のPCR産物を直接切り出してそのシークエンスを解析することができず、使用する制限酵素の種類によって得られるピークのパターンが変化する。しかしながら、キャピラリー電気泳動装置を用いるために電気泳動操作を自動化できる。また DGGE法に比べて結果の再現性が高く、異なる泳動で得られた結果を容易に比較し考察できるという特徴を持つ。さらに電気泳動により求められる各ピークの位置をもとに、微生物群集の構成種を推定でき、そのためのデータベースの構築も可能である。

**細菌群集構造解析**：あらゆる環境に生息する細菌はそれぞれの代謝を利用して、種々の物質循環（窒素，硫黄，酸素，炭素など）や物質分解、浄化などの役割を担う。したがって、ある環境に生息する細菌群集構造（細菌相，細菌叢とも呼ばれる）は生態系の変化や機構を調べる上で重要な生物的因子の一つである。分子生物学が発展する以前の手法（1980 年

代まで）と言えば、プレート上に形成したコロニーの同定・性状解析を行う培養法が主であった。ところが、1990 年代以降の細菌群集構造解析には、分子生物学的手法が主流となり、特に 16SrRNA 遺伝子をターゲットとするさまざまな方法が開発・利用されている。その理由として、①全細菌が 16SrRNA 遺伝子を保有していること、②塩基配列解読に適した長さ（約 1500bp）であること、③遺伝子配列の置換速度（進化速度）が遅く、系統分類に利用できること、④ユニバーサルプライマーが開発されていること、⑤データベースが構築されていること、などが挙げられる。また、培養法では、存在する細菌のわずか 1 ～ 10%程度しか分離できない（コロニーを形成しない）ことからも、分子生物学的手法が現在の細菌群集構造解析研究に欠かせない手法となっている。

---

蜂蜜の香りを生かしたミードの作製技術の確立

---

**蜂蜜酒「ミード」**：蜂蜜を発酵させたお酒。ヨーロッパでは古くから愛飲されている。通常のミードは蜂蜜に麦芽や穀類、果汁などを加えてつくられる。

---

端面部の仕上げ技術の開発

---

**バリ**：機械加工または成形加工工程において、加工した部品のエッジ部に発生する残留物。

---

シーム溶接における接合部の高品質化技術

---

**ナゲット**：抵抗溶接によって形成された、溶融・凝固部のこと。

**重ねシーム溶接**：重ねた被溶接材を上下から円盤電極で挟み込み、円盤電極を回転しながら通電することで連続的に溶接する方法。通電時の抵抗発熱を利用する抵抗溶接法の一種。

**スポット溶接**：被溶接材を上下から電極で挟み込み、通電することで溶接する方法。通電時の抵抗発熱を利用する抵抗溶接法の一種。

---

硫酸バリウム（福島加工品）を用いた放射線遮蔽材料の開発

---

**硫酸バリウム**：純物質は白色で、用途は主に白色顔料などの無機充填剤である。その他の用途としては比較的に高密度（文献値 4.5g/cm$^3$）な材料でもある為、その特長から遮音材や医療用X線造影剤としても利用されている。

**半価層**：半価層とは放射線を物体に照射した時、物体の吸収により透過放射線強度が半分になる時の物体の厚さのこと。この厚さが薄いほど放射線遮蔽能が高くなる。そのため半価層は放射線遮蔽材の遮蔽能の評価に用いられている。

**水ガラス**：アルカリケイ酸塩の高濃度水溶液。一般的にはケイ酸ナトリウムを水に溶かし加熱することで得られる。性状は水飴状で大きな粘性を持ち、結合剤(陶磁器などの接合)、耐火塗料などとして利用されている。

# 福島県ハイテクプラザ試験研究報告

平成２５年度（２０１３年度）

平成２６年１０月発行

**福島県ハイテクプラザ**
〒963-0297 郡山市待池台一丁目１２番地
代　　表　０２４－９５９－１７４１
企画管理科　０２４－９５９－１７３６
産学連携科　０２４－９５９－１７４１
工業材料科　０２４－９５９－１７３７
生産・加工科　０２４－９５９－１７３８
プロジェクト研究科　０２４－９５９－１７３９
ＦＡＸ　０２４－９５９－１７６１

**福島県ハイテクプラザ福島技術支援センター**
〒960-2154　福島市佐倉下字附ノ川１－３
代　　表　０２４－５９３－１１２１
繊維・材料科　０２４－５９３－１１２２
ＦＡＸ　０２４－５９３－１１２５

**福島県ハイテクプラザ会津若松技術支援センター**
〒965-0006　会津若松市一箕町大字鶴賀字下柳原８８－１
代　　表　０２４２－３９－２１００
醸造・食品科　０２４２－３９－２９７６
産業工芸科　０２４２－３９－２９７８
ＦＡＸ　０２４２－３９－０３３５

**福島県ハイテクプラザいわき技術支援センター**
〒972-8312　いわき市常磐下船尾町字杭出作２３－３２
機械・材料科　０２４６－４４－１４７５（代表）
ＦＡＸ　０２４６－４３－６９５８

編集
福島県ハイテクプラザ　企画管理科
URL http://www4.pref.fukushima.jp/hightech/
E-mail hightech-info@pref.fukushima.lg.jp