

平成28年度

長崎県工業技術センター研究報告

REPORT OF
INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

No.46

長崎県工業技術センター

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

目 次

1. 海洋産業に用いるデジタルデータと電力の非接触式伝送システムの開発	1
次長 兼 グリーンニューディール技術開発支援室長	兵 頭 竜 二
グリーンニューディール技術開発支援室 参 事	神 田 誠
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹	田 口 勝 身
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹	丁子谷 一
グリーンニューディール技術開発支援室 係 長	釘 宮 雄 一
電子情報科 主任研究員	中 川 豪
2. 無線ネットワークを用いた振動監視装置の開発	6
機械システム科 科 長	田 口 喜 祥
3. 機械フレームの軽量化設計支援ソフトウェアの開発	8
機械システム科 主任研究員	小 楠 進 一
4. 大型工作物形状計測のための高精度位置補正技術の開発	12
グリーンニューディール技術開発支援室 兼 機械システム科 係 長	釘 宮 雄 一
5. 光学特性の評価手法確立による非破壊計測装置の応用展開	14
電子情報科 科 長	下 村 義 昭
電子情報科 主任研究員	田 中 博 樹
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一
6. 酵素利用技術とデジタイジング技術の長崎伝統菓子への適用と新製品開発	16
電子情報科 専門研究員	小笠原 耕太郎
食品・環境科 主任研究員	玉 屋 圭
7. 電気・電子機器のノイズ対策技法の確立	23
次長 兼 グリーンニューディール技術開発支援室長	兵 頭 竜 二
電子情報科 主任研究員	中 川 豪
電子情報科 主任研究員	田 中 博 樹
グリーンニューディール技術開発支援室 参 事	神 田 誠
8. センサネットワークとビッグデータ解析を用いた応用技術開発	26
基盤技術部 部 長	藤 本 和 貴
産業技術総合研究所	前 田 龍太郎
産業技術総合研究所	藤 本 淳
産業技術総合研究所	鈴 木 章 夫

9. 精密プレス加工の高精度化に関する研究開発	32
工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
工業材料科 主任研究員	福 田 洋 平
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹	田 口 勝 身
所 長	馬 場 恒 明
10. 熱間鍛造用金型の製作技術の構築	36
工業材料科 主任研究員	福 田 洋 平
所 長	馬 場 恒 明
11. 連成統合シミュレーション技術の開発と普及支援（第2報）	41
工業材料科 専門研究員	重 光 保 博
12. 耐熱性高分子の機能化とフィルム材料への応用	44
工業材料科 主任研究員	市 瀬 英 明
13. 健康維持と美味しさを求めるアクティブシニアのための食品開発	49
食品・環境科 主任研究員	横 山 智 栄
食品・環境科 主任研究員	玉 屋 圭
食品・環境科 主任研究員	松 本 周 三
14. 五島つばき酵母を活用した加工食品の開発	53
食品・環境科 主任研究員	松 本 周 三
食品・環境科 主任研究員	横 山 智 栄
食品・環境科 研 究 員	晦 日 房 和
応用技術部 部 長	河 村 俊 哉
	五島市商工会

海洋産業に用いるデジタルデータと電力の非接触式伝送システムの開発

次長 兼 グリーンニューディール技術開発支援室長	兵 頭 電 二
グリーンニューディール技術開発支援室 参 事	神 田 誠
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹	田 口 勝 身
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹	丁子谷 一
グリーンニューディール技術開発支援室 係 長	釘 宮 雄 一
電子情報科 主任研究員	中 川 豪

本研究は、海洋関連産業の振興に寄与すべく、金属接点を持たない給電部と受電部のコネクタを接続して固定することに特徴を持つ非接触給電技術を開発し、これに海水の影響を受けない光通信技術を付加することで、海面・海中において90%以上の電力伝送効率と45 Mbps以上のデジタルデータ転送速度を実現する小型・軽量な非接触式伝送システムを開発することを目指している。

初年度となる平成28年度は、最終的に1.5 kVAの電力を伝送できるシステムの開発に向けた課題検討のため、500 VAの電力を伝送できるシステムの開発に取り組んだ。また、デジタルデータ伝送については、開発取り組み中の非接触式伝送システムに実装可能な光通信技術の探索を行った。

1. 緒 言

海洋再生可能エネルギー分野で新たな産業を興すとともに、その産業拠点を長崎に形成することの重要性から、県では“ナガサキ・グリーンイノベーション戦略”や“長崎県海洋エネルギー産業拠点形成プロジェクト”が重要な施策として推進されている。

金属接点を持つ接続部品は、錆びや漏電などの問題点があるため、海面や海水中での利用に制限がある。また、水中ロボットや観測ブイ、洋上発電装置などとの接続を行う場合、電力の伝送とともに情報収集やメンテナンスのためのデータ転送が欠かせない。

そこで本研究では、県内製造業者の得意技術を活用して、海洋再生可能エネルギー分野で広く利用可能なデジタルデータと電力を伝送するシステムを開発する。具体的には、むき出しの金属接点を持たない給電部と受電部のコネクタを密着して固定することに特徴を持つ非接触給電技術を開発する。その上で、これに海水の影響を受けない光通信技術を付加することで、海面・海中において90%以上の電力伝送効率と45 Mbps以上のデジタルデータ転送速度を実現する小型・軽量な非接触式伝送システムを開発する。

初年度となる平成28年度は、最終的に1.5 kVAの電力を伝送できるシステムの開発に向けた課題検討のため、500 VAの電力を伝送できるシステムの開発に取り組んだ。また、デジタルデータ伝送については、開発取り組み中の非接触式伝送システムに実装可能な光

通信技術の探索を行った。

2. 方 法

2.1 電力伝送部の開発

標準化が進んでいる電気自動車への非接触給電（充電）では、85 kHz $\pm$ 5 kHzの周波数の交番磁界を使った電力伝送が用いられる方向にある。このため、この周波数域の電磁波の利用について電波法の整備などが進むことが想定されることから、本研究でも85 kHz $\pm$ 5 kHzの周波数の交番磁界を使って電力を伝送する。

図1に電力伝送実験の実験系を示す。図中の給電部、給電コイル、受電コイル、受電部が主要な構成部分となる。給電部はDC/ACインバータであり、入力された直流を85 kHzの交流に変換して給電コイルに供給する。受電コイルで受け取った交流電力は、受電部の全波整流・平滑回路で直流に変換される構成とした。なお、本研究での非接触給電は、基本的に電磁誘導方式とした。

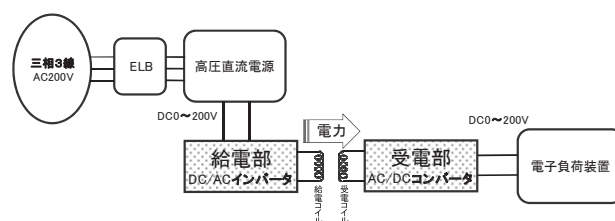


図1 電力伝送実験の実験系

2.2 データ通信機能の実現

電子機器・電気機器や水中ロボットなどの制御には、産業用コンピュータや組込み用小型コンピュータなどが使用されるケースが多い。これらのコンピュータとの通信を考える場合、開発する非接触式伝送システムが提供する通信インタフェースは汎用的なものであるのが望ましい。このため本研究では、LANのインタフェースとして広く普及している100Base-Tのインタフェースの提供を前提とした。

加えて、システム内の電力伝送との干渉が極力無いこと、システム外の他のデータ通信との干渉が無いことなどを条件に、通信方式の選定を行った。

選定した通信方式については、LANの実効速度を知るソフトウェアであるiperf^[1]を用いて、レイヤ2での再送ができない程度の通信負荷となる100 Mbpsのデータ送出速度を指定して、疎通試験を行った。

2.3 嵌合用筐体の試作

研究初年度の試作（500 VAの電力伝送）では、小型化・軽量化よりも、評価実験の容易性、最終的な目標（1.5 kVAの電力伝送）を達成するための課題の明確化などを優先する。

このため、次の条件を加味して、防水機能を有する嵌合用ケースを試作した。

- ・水深1 mでの作動を保証する。
- ・内部が見えるように、透明アクリル等の素材を用いる。
- ・電子回路基板部分は完全気密構造とする。
- ・コイルを巻き付けたコア同士を近接対向させるため、嵌合面は可能な限り薄くする。このためコア部には封止材を充填して均圧構造とする。
- ・嵌合されたコネクタ同士は、機械的に締結（ロック）する構造とする。

2.4 システム作動試験

研究初年度の非接触式伝送システム（電力伝送能力：500 VA）の試作開発後、次に示すものを含め、いくつか作動試験を実施した。

(1) 電力の伝送

入力にAC100Vの商用電源に、出力（負荷）は抵抗器に接続し、非接触で伝送された電力を抵抗性負荷にて消費させ、基本性能や内部温度上昇の確認を行った。

(2) データ通信

前記2.2と同様に、ソフトウェア iperf を用いて、通信エラーレートを評価した。

(3) 気密試験

組立ての完了した嵌合用筐体を数十分間、水に浸漬し、気泡の発生や水の進入の有無について観察した。

(4) EMI 試験

上述(1)と同様の作動条件において、EMI計測室で、試作機からの不要電磁波の放射を測定した。

3. 結果と考察

3.1 電力伝送部の開発

図2(a)に電力伝送部の評価実験の様子を示す。図2(b)は、そのコア部分を拡大したものである。ここでは、嵌合用筐体の基本構造が決定していない段階でコイル部分の設計を行う必要があったため、コア間距離が大きくなっても意図した磁路が形成されるように、E字型コアではなくU字型コアを用いた。

図3には回路の基本構成を示している。給電側の電力変換回路にはハーフ・ブリッジ回路を採用した。また、本試作で用いたコイルのインダクタンスが $30\mu\text{H}$ であったので、合成容量が $0.27\mu\text{F}$ となるコンデンサを直列に接続して、LC共振を用いたソフトスイッチングとなる条件で回路を作動させ、スイッチング損を低減する工夫をした。

図4は、コア間距離に応じた電力伝送量と伝送効率の推移を示している。コア間距離が $0\text{ mm} \sim 8\text{ mm}$ の範囲において、電力の伝送効率は90%以上を達成している。またコア間距離が1 mmの時、受電側の電力が500 Wを超えていることも分かる。



(a) 評価実験の様子 (b) コイルとコア部分

図2 試作した電力伝送部の外観

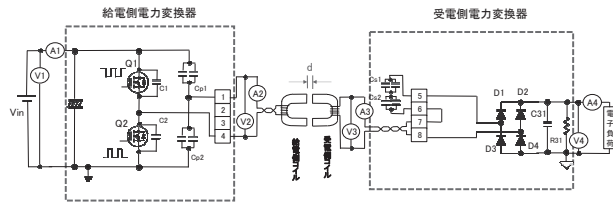


図3 非接触式給電の測定回路

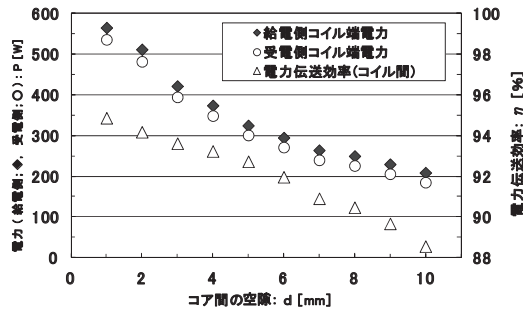


図4 コア間距離に対する電力伝送量と伝送効率

3.2 データ通信機能の実現

開発する非接触式伝送システムは、嵌合面で光路が分断される。この状況で、システム両端に 100Base-T のインタフェースを提供することが要求される。このため、市販の電気／光変換器と光／電気変換器のセットを流用し、100Base-T 通信環境を光通信で延長することを考えた。

市販の光通信機器には、直径が 200 μm 程度のガラス製ファイバを用いるものや、直径が 1 mm 程度の樹脂製ファイバを用いるものなどがある。本研究では、光ファイバの直径が太く、光軸のずれに対して耐性の強い樹脂製ファイバを用いた製品（サンワサプライ製、LAN-POF200）^[2] を選択した。

図5に試験系を、図6に実験評価の様子を示す。LAN-POF200の光インタフェースに接続する長さ約 15 m の光ファイバの途中2箇所を切断し、間に光中継器（CP-C-01）と非接触式伝送システムの嵌合用筐体を模擬したものを配置して疎通試験を行った。

表1は、模擬した嵌合用筐体の空隙距離と、その空隙内の媒質（空気あるいは水）を変えて、通信エラーレートを評価した結果である。この結果、軽微な値のエラーレートにとどまり、大きな通信阻害要因も発見されないことから、両端で 100Base-T のインタフェースの提供が可能であることが確認できる。

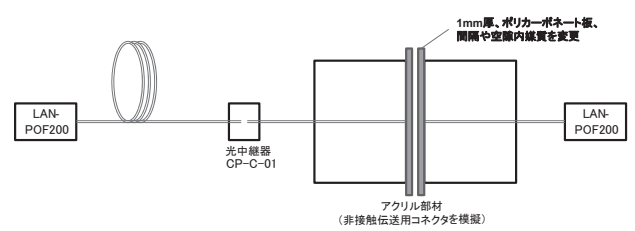


図5 データ通信の試験系

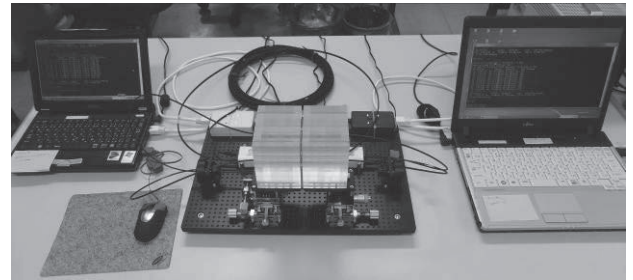


図6 実験評価の様子

表1 疎通試験の結果

空隙距離	空隙内媒質	方向	エラーレート
0 mm (密着)	空気	→	0.049 %, 0.063 %, 0.056 %
		←	0 %, 0 %, 0 %
0.5 mm	空気	→	0.049 %, 0.028 %, 0 %
		←	0 %, 0 %, 0 %
1.0 mm	空気	→	0 %, 0.035 %, 0.13 %
		←	0 %, 0 %, 0 %
0.55 mm	水道水	→	0.028 %, 0.07 %, 0.035 %
		←	0 %, 0 %, 0 %

3.3 嵌合用筐体の試作

嵌合用筐体は水密耐圧構造とするため、厚み 10 mm のアクリル樹脂で試作した。その基本的な構造図を図7に示す。給電部と受電部との嵌合機構は、給電用コアと受電用コアが収容される部分に、取付けができる構造とした。完成した筐体の外観は、図8と図9に含まれている。

給電側の筐体サイズは、突起箇所を含まず $\phi 140 \text{ mm} \times$ 長さ 292 mm であり、総排水量は約 0.468 m^3 であった。重さについては、後に電子基板やコア等を実装した状態で、4.2 kg であった（ただし、封止用樹脂材は除く）。コア収容部については、均圧構造とするために樹脂充填をする予定であるが、現在は性能評価などを円滑に進めるため、実施していない。給電線の引出しは、耐圧ホースに線材を挿入したものを PT 3/8" ソケット・ネジを用いて固定しており、気密状態が保持されている。

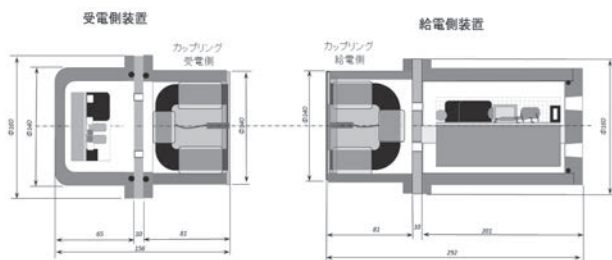


図7 嵌合用筐体 (コネクタ) の構造

3.4 システム作動試験

(1) 電力の伝送

図8に試作品（電力伝送能力：500 VA）の作動試験の様子を示す。

嵌合面を密着させた状態で電力伝送を行った結果、開始直後の給電側消費電力は552.6 W、受電側抵抗性負荷の消費電力は501.4 Wであり、システム全体としての電力伝送効率は90.7%であった。しかし、40分経過後、それらの値は395.5 W、333.2 W、84.2%に低下した。この時、筐体内部のヒートシンク温度は28℃から103℃まで上昇し、電力伝送のキャリア周波数も85.3 kHzから88.3 kHzまで上昇していた。

最終的なシステムの開発では、伝送電力量や効率の低下を防ぐため、内部温度上昇の防止やキャリア周波数の安定性などに配慮する考えである。

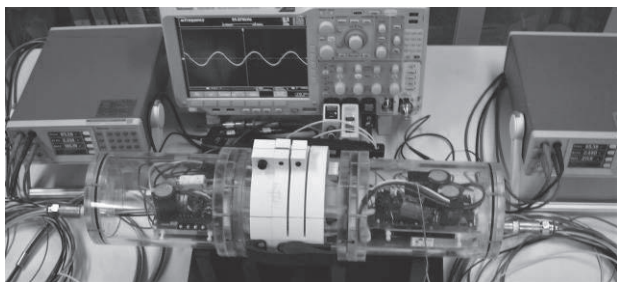


図8 非接触給電システムの電力伝送試験の様子

(2) データ通信

図9は、100Base-T インタフェースを介して両端に接続したパソコンを使用した疎通試験の様子である。

疎通試験の結果、通信不良発生を許容範囲に抑えるためには、

- ・ 光ファイバ端面間の距離は2 mm 以下
 - ・ 嵌合の角度ズレの許容値は $\pm 1^\circ$ 以内
- の条件を満たす必要があることが分かった。

なお、間に用いる光中継器が、通信不良発生を起こす要因になることも確認された。このため、最終的な

システムの開発では、パッシブ型の光中継器は用いず、同一の光通信モジュールを“光／電気変換”＝“電気／光変換”の順序で内挿し、アクティブ型の光中継とする予定である。

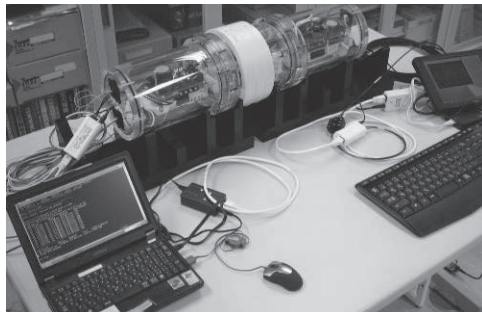


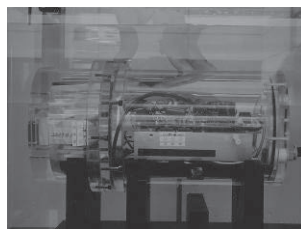
図9 非接触給電システムのデータ通信試験の様子

(3) 気密試験

図10 (a)に浸漬による気密試験の様子を示す。

浸漬開始から10分経過後に、筐体内部への浸水の有無を目視確認した。この結果、浸水は全く見られなかった。

なお、図10 (b)に示すように、給電線の引出し部分に気泡の発生が見られたが、これは継手とケーブル・コンジットとの隙間に残留していた空気であると推察され、気密状態の不良は発見されなかった。



(a) 全体



(b) 引出し部分

図10 給電側コネクタの浸漬試験の様子

(4) EMI 試験

図11は、EMI 計測のために電波暗室内のターンテーブル上に設置した試作品の様子を示している。また、周波数域が30 MHz～1 GHzにおける放射妨害電界強度の測定結果を図12に示す。

測定の結果、主に100 MHz以下の周波数域に比較的強度の強い放射が見られた。CISPR（国際無線障害特別委員会）Pub 11 クラスAの規格を超える箇所は周波数が88 MHz付近に見られたが、規格値に対する余裕は1.8 dBであり、軽微である。最終的な非接触式伝

送システムにおける嵌合用筐体の材料には金属を使用することも考えており、十分に対応可能な範囲である。

また今後は電気自動車への非接触給電等を対象にした安全基準（ICNIRP2010 ガイドライン、1 Hz ～）を参考にした人体曝露量の評価も実施する。

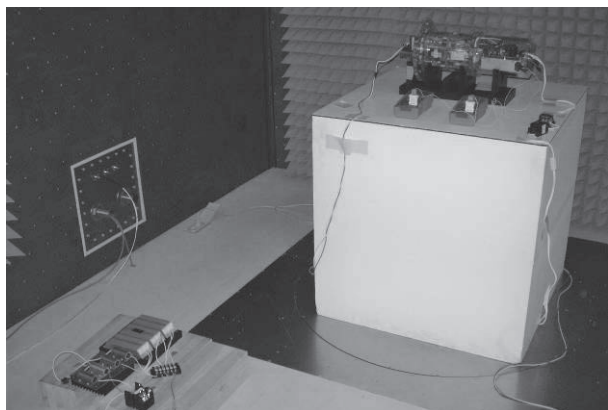


図 1 1 非接触給電システムの EMI 試験の様子

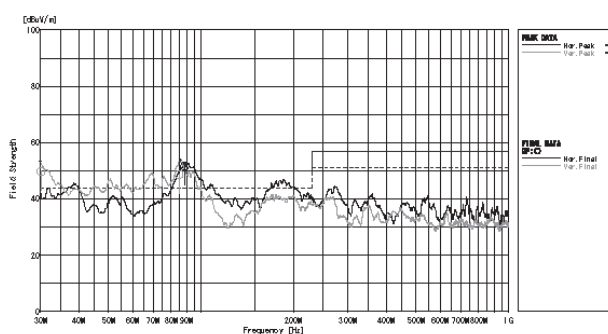


図 1 2 30 MHz ～ 1 GHz での測定結果

4. 結 言

研究事業初年度である平成 28 年度は、電気自動車への非接触給電に関する標準化の状況を考慮して、中心周波数が 85 kHz の高周波電力を用いた非接触給電回路を試作した。評価の結果、効率 90 % 以上、電力容量 500 VA 以上の性能を実現できることを確認した。

デジタルデータ伝送については、市販の電気／光変換インタフェースを流用し、その中間部分（光ファイバ部分）を非接触にした状態（分断した状態）で、システム両端で 100Base-T の通信インタフェースを提供できることを確認した。

また、これらの回路等を実装できる耐圧水密筐体と、給電側と受電側とを位置合せして嵌合締結する機構を試作し、嵌合用筐体とした。

現在は、この嵌合用筐体に非接触給電用の回路などを実装して、詳しい性能評価や水中ロボットへの適用

実験などを進めている。

今後は、1.5 kVA の電力伝送の実現を目指して、新たな給電回路、嵌合用筐体などの開発を進めるとともに、県内企業への技術移転も適宜、進めて行く予定である。

謝 辞

本研究事業を推進するにあたり、長崎大学海洋未来イノベーション機構の山本郁夫教授と長崎大学大学院工学研究科の盛永明啓助教、長崎大学大学院工学研究科の樋口剛教授と横井裕一助教、イサハヤ電子株式会社の徳永秀昭部長と服部慎一郎課長と上野孝太氏、ロボットテクノス株式会社の長嶋豊研究開発部長に、多大なるご協力とご支援を頂いた。

参考文献

- [1] ESnet/ Lawrence Berkeley National Laboratory, The network bandwidth measurement tool, iperf (iperf3), <https://iperf.fr/>, (accessed 1 Jul. 2015).
- [2] サンワサプライ, POF メディアコンバータ DIY キット, LAN-POF200, <https://www.sanwa.co.jp/>, (accessed 9 Sep. 2016).

無線ネットワークを用いた振動監視装置の開発

機械システム科 科 長 田 口 喜 祥

県内中小企業では、生産性を向上させるため、できるだけ少ない人員で多くの機械装置を長時間稼働させたいという要望がある。特に、CNC 工作機械の稼働率を上げることは、利益に直結するため工作機械の稼働状況を監視し、異常の早期検出が求められている。従来、機械装置の異常の検出は人間が目視や音響により判断していた。一方、近年 IoT (Internet of Things: もののインターネット) が話題となっており、この技術を応用することで、機械装置を常時遠隔地から監視することが可能となっている。そこで、本研究では、機械装置に後付けで簡便に取り付けできる無線式の電流および振動の監視モジュールを試作し、試作した監視モジュールで計測したデータを処理することで機械の異常を検出し、モバイル端末に通知を行う装置の開発を行うことを目的とする。

1. 緒 言

県内中小製造業では、生産性を向上させるために、少人数で多くの機械装置を休みなく長時間稼働させたいという要望がある。特に、CNC 工作機械を用いて機械加工を行っている企業では、工作機械の稼働率を上げることは利益に直結するため、工作機械の稼働状況を監視し、異常を早期に検出したいとの要望がある。従来、機械装置の異常は人間が目視により加工状態や製品の状況を観察し、機械装置から異音が発生していないか音により観察することにより行われていた。そのため、機械装置にセンサを取り付け電流や振動データを解析することで自動的に異常を検出する研究が行われてきていた [1]-[3]。

一方、近年 IoT (Internet of Things: もののインターネット) が話題となっており、センサやマイコンボードなど安価な製品が数多く発売されるようになり、インターネット回線を用いた機械装置の遠隔監視を容易に実現することが容易になってきた。そこで、本研究では、IoT 技術を応用し、機械装置に後付けで簡便に取り付けできる無線式の電流および振動の監視モジュールを試作し、試作した監視モジュールで計測したデータを処理することで機械の異常を検出し、モバイル端末に通知を行う装置を開発することを目的とする。

2. システム構成

開発する無線ネットワークを用いた振動監視装置のシステム構成を図 1 に示す。開発する装置は無線監視モジュール・解析モジュールから構成される。無線監視モジュールは、振動データや電流データを計測し、無線ネットワークを用いてデータを送信することができる。解析モジュールは、GPS から時刻同期信号を

み取り、無線監視モジュールに対して時刻同期信号を送信するとともに、無線監視モジュールからデータを収集し、収集したデータを解析することで機械装置の異常や稼働状況を検出する。

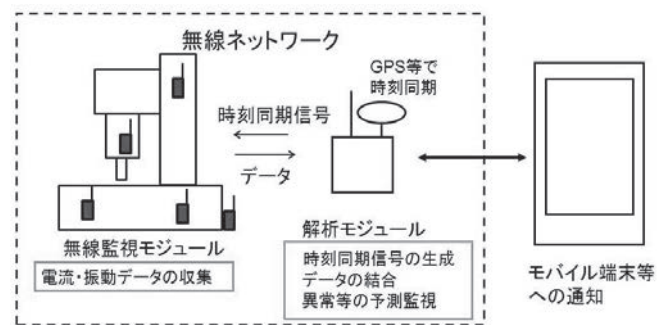


図 1 システム構成

平成 28 年度に試作した無線監視モジュールと解析モジュールについて以下に記す。

3. 無線監視モジュール

開発した無線監視モジュールを機械装置に複数取り付けを想定している。現在、データの収集に使用できる無線通信の規格としては Bluetooth、XBee、LoRa など様々の規格があるが、今回は接続が容易で汎用性が高く無線 LAN として最も多く使用されている WiFi を用いることとした。WiFi を用いて電流データや振動データを収集するためには、通常 WiFi モジュールの他に、振動センサのデータを読み込む AD 変換器を備えデータ処理の演算を行うマイコンが必要となる。この場合、WiFi モジュール、マイコン、センサ処理の回路が必要となり装置が複雑で高価になることが考えられる。そこで、今回は安価に入手可能で、

マイコンとしての利用も可能な中国 Espressif 社の WiFi 無線モジュール ESP-8266^{[4]-[6]} を用いることで、装置の小型軽量と低価格化を目指した。使用した WiFi 無線モジュールの写真を図 2 に示す。

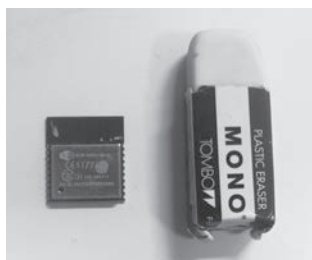


図 2 WiFi 無線モジュール (ESP-8266)

ESP-8266 は設定によりマイコンボードとして広く使用されている Arduino マイコンの統合開発環境でプログラム開発が可能となることが知られている^[6]。Arduino 統合開発環境を用いれば C 言語に近い Arduino 言語でプログラム開発が可能となるが、同期プログラムで遅れが発生する可能性がある。そこで、同期プログラムの一部をアセンブリ言語により記述することで、高速化を図った。なお、ESP-8266 はアメリカ Tensilica 社の Xtensa マイクロプロセッサで動作しているため、Xtensa アセンブリ言語^[7]を Arduino のインラインアセンブラにより記述し、試験を行った。1MHz の矩形波を入力信号とし、この矩形波の立ち上がりを検出し、デジタル IO に出力するプログラムを Arduino 言語とアセンブリ言語を併用したプログラムで比較した。オシロスコープ (Tektronix 製: TDS3014B) の機能により 1 秒間計測して算出した平均値と標準偏差を表 1 に示す。アセンブリ言語を使用することで遅れのばらつきを抑えることができることを確認した。

表 1 矩形波に対する応答遅れ

	平均	標準偏差
Arduino 言語	536nsec	713nsec
アセンブリ言語	410nsec	96nsec

4. 解析モジュール

解析モジュールは、無線監視モジュールから送られてくる電流データ、振動データを収集すると共に解析を行う機能を有する。また併せて、計測の基準となる時刻同期信号を GPS から取得し、無線監視モジュールに送信する機能が求められる。解析モジュールは、

安価で入手可能で GPS とのデータ通信を行うための UART インターフェースおよび WiFi 通信モジュールを搭載している Raspberry Pi 3B マイコンボードを用いて試作を行った。基準となる時刻同期信号は 1 秒ごとに同期信号を出力する機能を搭載した GPS を用いて取得した。今回 GPS モジュールとして GYSFDMAXB (太陽誘電社製) を使用した。試作した解析モジュールの写真を図 3 に示す。

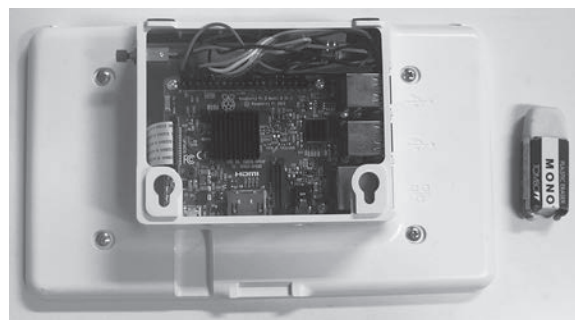


図 3 解析モジュール

5. 結 言

無線監視モジュールと解析モジュールの試作を行った。無線監視モジュールでアセンブリ言語を併用することで同期処理のばらつきの抑制を試みた。今後、複数の無線監視モジュールで収集したデータを解析モジュールで解析し、機械装置の稼働状況、不具合発生の予兆監視を行うプログラムをする予定である。

参考文献

- [1] 三笠, 陳山: 多変量解析による回転機械の状態判定基準値の決定法、SICE 産業論文集 Vol.5, No.12, pp83-89, 2006.
- [2] 大庭 他 4 名: 振動解析に基づく新幹線台車の状態監視、JSME 論文集 (C), 75 巻 757 号、pp93-101、2009-9.
- [3] 近藤 他 3 名: 振動のオクターブバンド分析を用いた車両用ディーゼル機関の異常通知手法、RTRI REPORT Vol.29, No.9, pp17-22, 2015.
- [4] 国野: ESP スタータ・キット × ブレッドボードで作る IoT 実験ボード、トランジスタ技術 2016 年 9 月号、pp 45-53、2016.
- [5] <https://github.com/esp8266/Arduino/>, Accessed 2016.
- [6] <https://www.switch-science.com/catalog/2500/>, Accessed 2016.
- [7] Xtensa Instruction Set Architecture (ISA) Reference Manual/, Accessed 2016.

機械フレームの軽量化設計支援ソフトウェアの開発

(形鋼構造物のための最適化ソフトウェアの試作)

機械システム科 主任研究員 小 楠 進 一

国内では、Solidworks が最も多く使用されている^{[1][2]}が、この Solidworks 上で作動し、形鋼構造物の形状を最適化する安価な最適化ソフトウェアが見当たらない。そこで、この形鋼構造物の形状を最適化するソフトウェアを開発し、このソフトウェアを県内企業に提供することで、県内企業の設計品質の向上を図る。本年度は、試作した最適化ソフトウェアの評価結果を報告する。

1. 緒 言

国内の 3 次元 CAD/CAE 市場は、毎年、7% 伸びており^[3]、国内では、操作性が良い Solidworks が最も多く使用されている^{[1][2]}。また、長崎県においても、工業技術センターで実施している Solidworks の実習セミナーに、多くの製造業が参加しており、今後、普及が進むものと考えられる。

一方、3 次元 CAD/CAE を用いた構造解析の目的は、製品形状の最適化である。この製品形状の最適化では、解析計算と形状修正を繰り返す必要があるが、この最適化を手動で行う場合、多くの時間が必要となる。

最適化の自動化のために、様々な研究^[4]がなされており、流通している製品として、サイバネット社の Optimus^[5]、テラバイト社の Genesis^[6]などの最適化ソフトウェア等が存在するが、Solidworks などの安価な 3 次元 CAD/CAE 上では作動せず、高価であるため、長崎県で多く存在する小規模事業者が使用することは困難である。

そこで、本研究では、形鋼構造物に限定し、形状を最適化するソフトウェアを開発することを目的とした。この最適化ソフトウェアを県内企業に提供することで、県内企業の設計品質の向上を目指す。

本研究の研究スケジュールを、表 1 に示す。1 年目は、Solidworks API の整理と開発環境の構築を行った。2 年目である本年度は、最適化ソフトウェアの試作と評価を行った。

表 1 研究スケジュール

1 年目	API の整理と開発環境の構築
2 年目	最適化ソフトウェアの試作
3 年目	最適化ソフトウェアの修正

2. 試作した最適化ソフトウェア

(1) 目標とする最適化ソフトウェア

目標とする最適化ソフトウェアの概略図を図 1 に示す。この最適化ソフトウェアは、形鋼構造物モデルを対象としたものであり、ユーザーが設定した初期モデル、荷重や拘束などの解析条件をもとに、許容応力範囲内で最小形状となるモデルを提案するソフトウェアである。

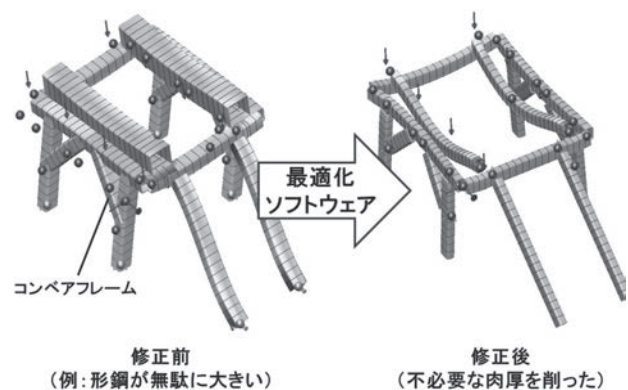


図 1 最適化ソフトウェアの概略図

(2) 最適化ソフトウェアの試作方法

最適化ソフトウェアの開発環境を表 2 に示す。

Windows 7 Pro(64bit) 上で、Visual studio 2015 Community を使い、Visual C# を用いて、最適化ソフトを開発することにした。

また、Solidworks Premium 2015/Solidworks simulation Premium 2015 上で作動する最適化ソフトウェアを効率的に開発するために、Solidworks アプリケーションプログラミングインタフェース (Application Programming Interface : 以後、API と呼ぶ) を使用した。この API は、Solidworks の COM プログラミングインタフェースであり、Visual C# から呼び出すことのできる数多くの関数を持っている。これらの関数を使って、プログラマは、直接、Solidworks の機能を使用することができる。

表2 開発環境

OS	Windows 7 Pro(64bit)
CAD	Solidworks Premium 2015
CAE	Solidworks simulation Premium 2015
開発環境	Visual studio 2015 Community
言語	Visual C#

(3) 最適化ソフトウェアのインタフェース

図2に試作した最適化ソフトウェアのインタフェース（Solidworks であるところのプロパティマネージャページ）を示す。ユーザーは、Solidworks のCAD機能を用いて、初期の形鋼構造物モデルを作成し、Solidworks Simulation のCAE機能を用いて、解析条件の設定、解析の実行を行う。この後、試作した最適化ソフトウェアに許容応力値を入力すると、最適化ソフトウェアは最適化を図り、許容応力範囲内で最小形状となる形鋼構造物モデルを提案する。



図2 最適化ソフトウェアのインタフェース

3. 形鋼1本の形状最適化に対する評価

(1) 評価方法

試作した最適化ソフトウェアを評価するために、角パイプ1本を対象とした形状の最適化実験を行った。図3に、対象となるアルミニウム（A1060）の角パイプ（ $\square 50 \times 100 \times 3.2-600$ ）の初期形状と境界条件の設定位置を示し、モデルの寸法や材料定数など解析条件を表3に示す。なお、対象モデルは、梁モデルとして解析を行った。また、この解析条件のときの応力分布を図4に示す。

図3の角パイプに、表3の解析条件で応力分布を算出した結果、図4に示すとおり、角パイプには最大応力 267.2MPa が生じる。今回、許容応力値を 400MPa としており、最適化ソフトウェアが、適切に、さらに細い角パイプを選定するか評価した。

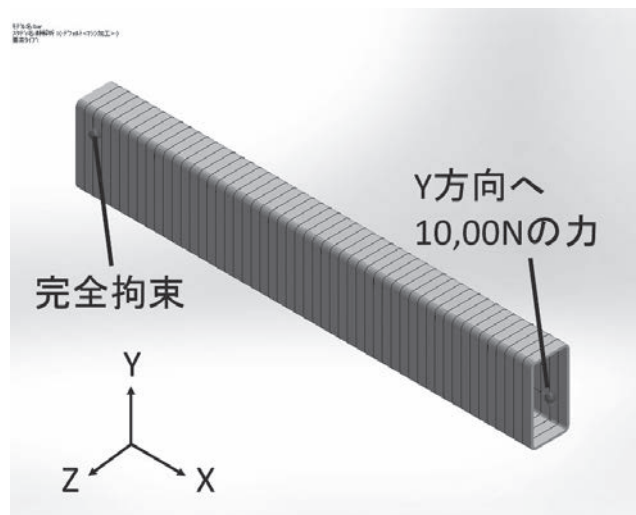
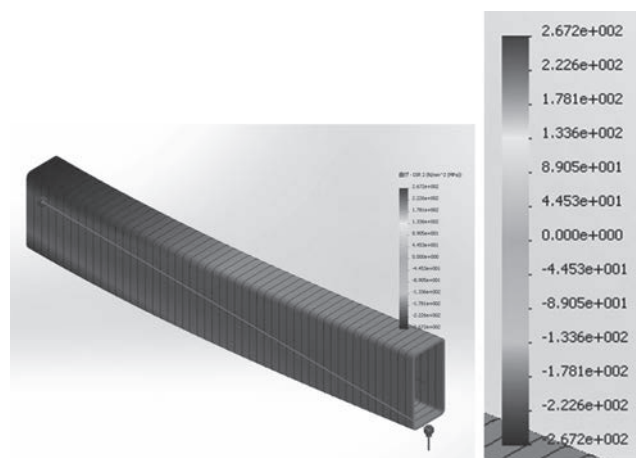


図3 角パイプの初期形状と境界条件の設定位置

表3 解析条件

部材形状[mm]	$\square 50 \times 100 \times 3.2-600$
弾性係数[MPa]	69000
ポアソン比	0.33
拘束条件	片端を完全拘束
荷重条件	片端を 10,000N の力で Y 方向へ

図4 形状変更前の角パイプ
($\square 50 \times 100 \times 3.2-600$) の応力分布

(2) 評価結果と考察

最適化ソフトウェアを使用した結果、角パイプ（□40×80×4.0-600）を選定した。なお、このときの応力分布は、図5に示すとおりであり、最大応力370.4MPaであった。

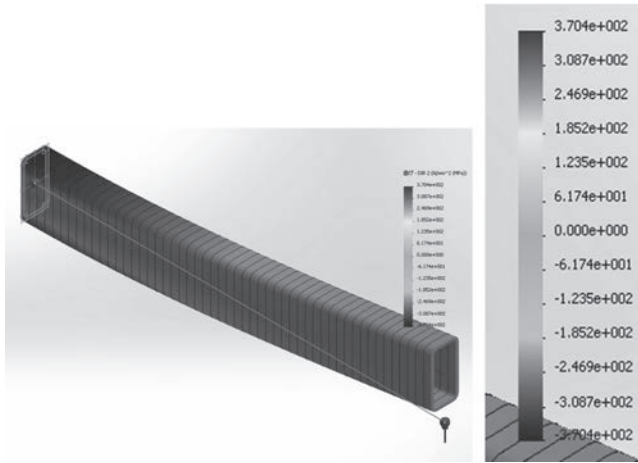


図5 最低化ソフトウェアが提案する角パイプ（□40×80×4.0-600）の応力分布

次に、この角パイプが許容応力範囲で一番小さいことを確認するために、1サイズ小さい角パイプ（□40×80×3.2-600）の応力分布を算出し、最大応力を確認した。このときの応力分布は、図6のとおりであり、最大応力は436MPaであった。これにより、試作した最適化ソフトウェアは、適切に角パイプを選定できることが確認できた。

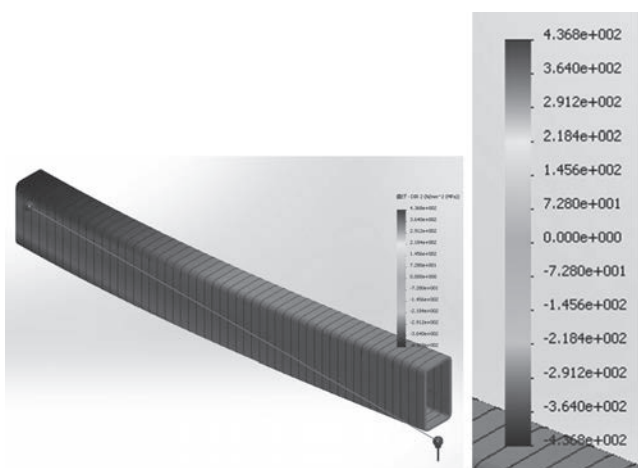


図6 1サイズ小さい角パイプ（□40×80×3.2-600）の応力分布

4. 形鋼構造物の形状最適化に対する評価

(1) 評価方法

試作した最適化ソフトウェアを評価するために、角パイプ4本の形鋼構造物を対象とした形状の最適化実験を行った。

図7に、対象となるSS400の形鋼構造物（□50×100×3.2-1000, □50×100×3.2-500）の初期形状と境界条件の設定位置を示し、モデルの寸法や材料定数など解析条件を表4に示す。なお、対象モデルは、梁モデルとして解析を行った。また、この解析条件のときの応力分布を図8に示す。ここで、この形鋼構造物は、4つの角パイプの断面形状が同じとなるようにモデリングを施しているため、最適化後も、4つの角パイプの断面形状が同じとなる。

図7の形鋼構造物に、表4の解析条件で応力分布を算出した結果、図8に示す通り、形鋼構造物には最大応力1,113MPaが生じる。今回、許容応力値を500MPaとしており、最適化ソフトウェアが、適切に、さらに太い角パイプを選定するか評価した。

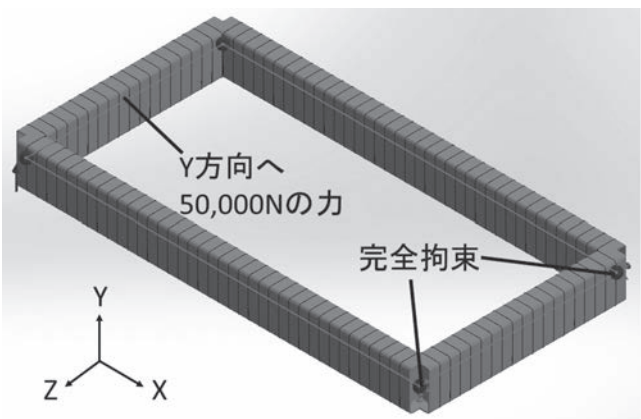


図7 形鋼構造物の初期形状と境界条件の設定位置

表4 解析条件

部材形状[mm]	□50×100×3.2-1000 2個 □50×100×3.2-500 2個
弾性係数[MPa]	210,000
ポアソン比	0.28
拘束条件	2点を完全拘束
荷重条件	梁1つを50,00Nの力でY方向へ

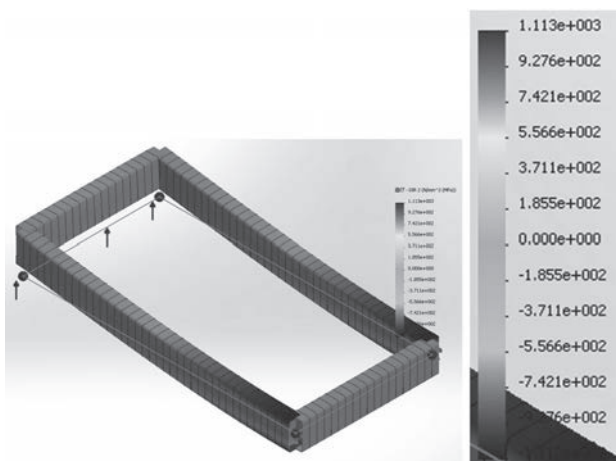


図8 形状変更前の形鋼構造物の応力分布

(2) 評価結果と考察

最適化ソフトウェアを使用した結果、最適化ソフトウェアは、形鋼構造物で角パイプ(□120×60×5.0-1000、□120×60×5.0-500)を選定した。なお、このときの応力分布は、図9に示すとおり、最大応力522MPaであり、許容応力値を少し上回っている。これは、こちらで設定した角パイプの断面係数とSolidworks Simulationが内部で算出する角パイプの断面係数が、少し異なっているのではないかと推測している。今後、見直していきたい。

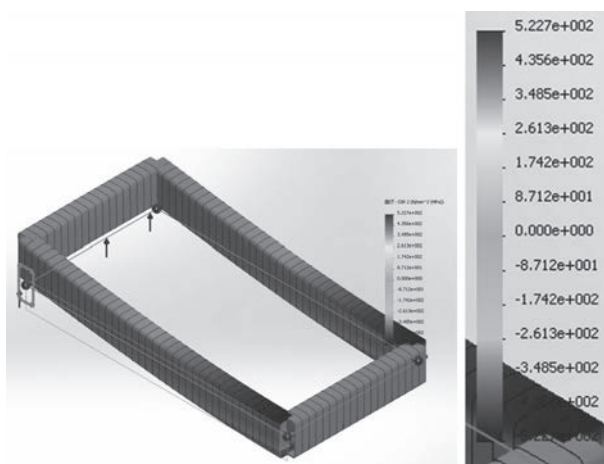


図9 最適化ソフトウェアが提案する形鋼構造物の応力分布

5. 結 言

以下に、試作したソフトウェアの評価結果のまとめを示す。

- (1) 最適化ソフトウェアを試作し、計算フローに問題ないことを確認した。
- (2) 本研究で設定した角パイプの断面係数とSolidworks Simulationが内部で算出する角パイプの断面係数が、少し異なっているのではないかと推測している。今後、見直す必要がある。

参考文献

- [1] 最新で最高の設計環境を実現する SOLIDWORKS ソリッドワークス ,
<<http://jpn.nec.com/solidworks/>>, (2015/4/11 アクセス).
- [2] SOLIDWORKS 実績と将来性 ,
<<http://www.cad-japan.com/products/3dcad/solidworks/result.html>>, (2015/4/11 アクセス).
- [3] 矢野経済研究所 CAE 市場に関する調査結果 2013, <http://www.yanoict.com/report/1601.html?gclid=COaj9cmx_ssCFQF-vQodflesMEW>, (2015/3/2 アクセス).
- [4] 高橋英俊 他; フレーム設計における CAE と品質工学の融合, 品質工学会第 10 回研究事例発表大会講演予稿集, pp38-41, 2002.
- [5] optimus, <<http://www.cybernet.co.jp/optimus/>>, (2015/3/14 アクセス).
- [6] Genesis 概要, <<http://www.terrabyte.co.jp/GENESIS/genesis1.htm>>, (2015/3/14 アクセス).

大型工作物形状計測のための高精度位置補正技術の開発

グリーンニューディール技術開発支援室 兼 機械システム科 係 長 釘 宮 雄 一

長崎県は造船や製缶といった大型工作物の製造が基幹産業となっているが、これら製品の製造途中のブロックはその大きさ故に形状の正確な測定が難しい。そこで本研究では光切断法を用いた自走式形状計測ロボットの製作を目的として、ロボットの自己位置および形状データの高精度位置補正技術の開発を行った。その結果、曲面要素に対して機械学習による推定が有効であることが明確になった。

1. 緒 言

長崎県は造船や製缶といった大型工作物の製造が基幹産業となっているが、これら製品の製造途中のブロックはその大きさ故に形状の正確な測定が難しい。そのため、都度現場合わせて調整をすることになり、生産性と品質の低下を招いてしまっている。

このような大型工作物の形状計測方法として、マーカーと静止画像を組み合わせた形状計測方法やドローンにレーザーレンジファインダーを搭載して形状計測する方法などが試みられている [1]-[3]。しかしながら、既存の方法では広い範囲を計測できるものの、時間がかかる、ドローンの操作が難しい、必要な精度が担保されないなどの問題がある。

そこで本研究では光切断法を用いた自走式形状計測ロボットの製作を目的として、ロボットの自己位置および形状データの高精度位置補正技術の開発のための検討を行った。

2. 検討方法

光切断法はライン状のレーザーを非測定物に照射し、TV カメラで2次元画像を撮影することで高さ方向のプロファイルを取得する手法である。この高さ方向のプロファイルを撮影位置で並べることで点列データとなり、3次元の形状データの取得ができる。今回は、予め3次元測定機（ミットヨ製 LEGEX9106）により X 方向に対する Z 方向の計測を行い（図 1）、形状の特定された非測定物にラインレーザーを照射して得られた画像（図 2）について高さ方向のプロファイルが機械学習により姿勢のずれについて補正できるかを検討した。また、計測を行った対象物を非測定物にし、非測定物にラインレーザーを照射し、TV カメラで撮影した画像から実際の座標を機械学習により推定できるかについて検討した。

今回の検討では、演算量を削減するために、ライン

レーザーの照射面と 3 次元測定機の XZ 平面を一致させることで Y 座標を一定として実験を行った。

三次元測定機で測定した 100 組の (x,z) 座標と、この測定座標に対応した画像から得られる 100 組の (u,v) 座標を教師データ（以下トレーニングセットと呼ぶ）とし、別途測定した 10 組の (u,v) 座標と (x,z) 座標（以下テストセットと呼ぶ）を推定した結果により機械学習の評価を行った。検討を行った機械学習の手法 [4] を表 1 に示す。

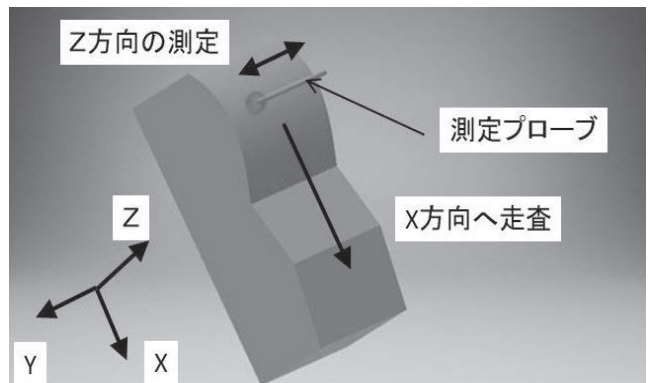


図 1 三次元測定機での測定イメージ

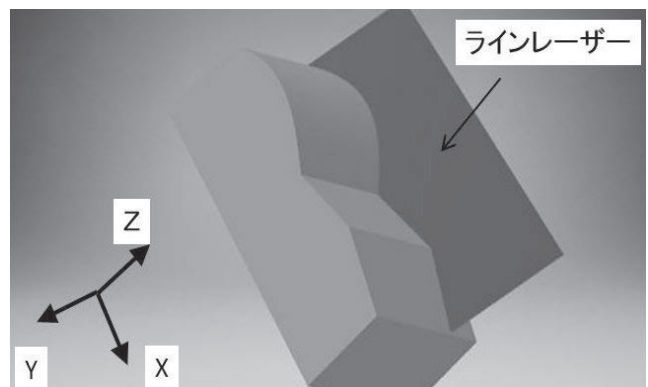


図 2 光切断法の測定イメージ

表 1 検討した機械学習の手法

No	手法	教師データ
1	多項式近似と最小二乗法による推定	あり
2	最尤推定法を用いた回帰分析による推定	あり
3	ベイズ推定	あり

3. 結果

多項式近似と最小二乗法による推定、最尤推定法を用いた回帰分析による推定、ベイズ推定の3種類の機械学習手法を用いてTVカメラで撮影した画像上の (u,v) 座標値から三次元測定機で測定した (x,z) 座標値の推定を行った。それぞれの手法による推定結果を以下に示す。

3.1 多項式近似と最小二乗法による推定

N 個のトレーニングデータに対し、 $M+1 \leq N$ を満たす M 次の近似式を残差平方和が最小になる条件で求めた。このとき、高次の場合には当然誤差が小さくなるが、教師データとして用いなかったデータにより推定をすると誤差が大きくなるオーバーフィッティングが問題となる。実際に今回のデータでは、次数 M が4以上になると推定値の誤差が大きくなることが見受けられた。この手法については直線形状または曲線形状においては比較的良好な結果が得られた。

3.2 最尤推定法による回帰分析による推定

最尤推定法による回帰分析による推定は、あるデータが得られる確率を設定し、そこから最良のパラメータを決定していくことで回帰式の最適化を行う手法である。この手法では教師データを多くすることで多項式近似と最小二乗法による推定と比較してより精度の高い回帰式を得ることができた。また、結果の評価として対数尤度を評価することで回帰式の次数を最適化できることも明確になった。対数尤度の評価では3～4次で誤差が小さくなった。

3.3 ベイズ推定

ベイズ推定はパラメータが一意に決まる最尤推定法に対し、パラメータに対して様々な確率をとる可能性があると考えて、それぞれの値をとる確率を計算する手法である。本手法では教師データのデータ数を増やしながら、観測データの確立分布がどのように変化するかを評価した。結果としては、事前に予想したとおりに教師データのセットを増やすことで確率分布曲線

と教師データが一致することを確認できた。

4. 考察

本検討では3種の機械学習法について光切断法を用いた形状計測への適用を模索した。図1、図2に示すような曲線と直線を組み合わせたものを評価する場合には、事前にエッジ検出をして、各形状要素にデータを切り出すことで比較的良好な学習結果が得られていた。しかし、異なる形状要素を合わせた評価では形状の近似式が凹凸をうまく推定できず、事前にデータ処理が必要ながあった。また、ベイズ推定については非線形のデータについてもトレーニングセットと酷似した形状においては確率分布を評価することで近い値を得ることができた。

5. 結 言

複数の機械学習法を用いた位置補正技術について、既知のトレーニングセット、テストセットによる評価を行い、位置補正に適した手法を探索した。結果としては、既存のエッジ検出と直線近似の組み合わせに比べて、機械学習を用いた手法では曲面要素に対する推定が有効であることが明確になった。ただし、エッジ検出は三次元測定機における測定指示と同様に幾何形状の認識をするために必要で、エッジとエッジの間の要素がどのような形状なのかを効率よく判断し、そのデータに対して複数データを機械学習させることで人間が複雑なアルゴリズムを構築しなくとも補正ができる可能性が示された。

参考文献

- [1] 樋口 他5名：リングレーザとカメラを用いた大型構造物の3次元計測のための Structure from Motion による光切断面の統合、第21回ロボティクスシンポジウム講演予稿集、pp.326-331、2016.
- [2] 甘中 他3名：ステレオカメラを用いた柔軟構造物の三次元振動変形測定法、神戸製鋼技報、Vol.64No2、pp.86-89、2014.
- [3] 前田、眞部：マルチコプター（ドローン）を活用した縦穴洞窟の形状計測、佐世保工業高等専門学校研究報告、第52号、pp8-11、2016.
- [4] 中井：ITエンジニアのための機械学習理論入門、技術評論社、2015.

光学特性の評価手法確立による非破壊計測装置の応用展開

電子情報科 科 長 下 村 義 昭

電子情報科 主任研究員 田 中 博 樹

食品・環境科 主任研究員 三 木 伸 一

光学的手法による非破壊測定装置は農産物の品質管理やヘルスケアにおいて高いニーズと大きな市場規模を持った成長産業として期待されている。また、長崎県が保有する光学的非破壊計測に関するコア技術は携帯型の非破壊糖度計を実現するなど装置の低コスト・小型化で競合製品を差別化できる強力な武器となっている。一方、コア技術を活用した非破壊測定装置の開発では測定光源の波長や測定精度に関する装置仕様を理論と実験の両面で検討する必要があるが、穀物や生体では理論計算に必要な吸収係数等の光学特性の測定が難しく正確な情報が不足している。そこで、本研究では光散乱体の光学特性を正確に測定する手法を確立して穀物や生体等の光学特性のデータベースを構築することを目的としている。本報告では、時間相関単一光子計数法をベースとした時間分解分光による光散乱体の光学特性測定方法と装置について述べる。

1. 緒 言

光学的手法による非破壊計測装置は農産物の品質管理や生体組成計測によるヘルスケアにおいて高いニーズと大きな市場規模を持った成長産業として期待されている。また、長崎県独自の光学的計測技術は携帯型の非破壊糖度計を実現するなど装置の低コスト・小型化で競合製品を差別化できる強力な武器となっている。

非破壊糖度計を実現した計測手法TFDRS (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy) [1] の概略と糖度測定のSN比 η を図1に示す。SN比 η は糖度の測定精度(測定誤差の標準偏差)を ΔC として $\eta = (1/\Delta C)^2$ で定義される。TFDRSでは、果実の表面から光ファイバで光を照射し、反射光の一部を2本の受光ファイバで受光する。受光した2つの反射光量 i_{ref} 、 i_{sig} から反射率 $R = i_{sig} / i_{ref}$ を算出し、下記式で表される相対吸光度比 γ を求める。

$$\gamma(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \frac{\ln(R(\lambda_3)) - \ln(R(\lambda_1))}{\ln(R(\lambda_2)) - \ln(R(\lambda_1))} \quad (1)$$

ここで、 $R(\lambda_1)$ 、 $R(\lambda_2)$ 、 $R(\lambda_3)$ は波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 での反射率をそれぞれ表す。(1)式で表される相対吸光度比 γ は散乱の影響を受けない物理量で果実糖度と良い直線相関を示す。

図1に示したSN比 η の算出では、(1)式の波長 λ_1 、 λ_3 をそれぞれ900 nm、1060 nmとして波長 λ_2 のみを変化させた。SN比 η の実測値(実線)と理論値(点線)

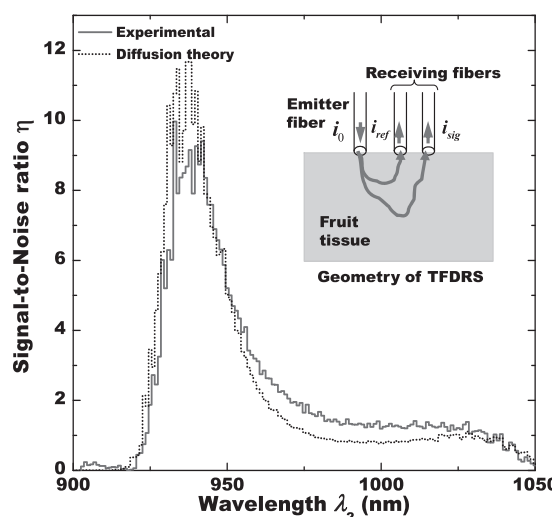


図1 TFDRSの概略とSN比 η の波長依存

は良く一致しており、波長の組み合わせと測定精度を理論的に予測できる。TFDRSにおいて最適な波長を選択し測定精度を理論的に予測するには、吸収係数等の被検体固有の光学特性の情報が必要となる。透明な糖水溶液の散乱体でモデル化できる果実では、後述の手法により光学特性を容易に測定することができる。

一方、穀物や生体では、含まれるタンパク質や炭水化物が不溶性のため、吸収係数等の光学特性の測定が難しく情報が少ない。そこで、本開発では不溶性物質の光学特性を正確に測定する手法を確立し、穀物や生体等の光学特性のデータベースを構築することを目的とした。

2. 研究内容と結果

2.1 TFDRS による光学特性の測定

吸収係数が既知の被検体の場合、散乱係数は TFDRS で得られる反射率の実測値と理論値が一致する値として非線形最小二乗法等により決定することができる。図2はTFDRSを用いて測定したポリスチレン水溶液（粒径500 nm、濃度0.50 wt%）の反射率（●）と理論値（実線）を示す。ここで、ポリスチレン水溶液の吸収係数は水の吸収係数に体積分率を乗じた値とした。反射率の理論値と実測値はその差の相対値が $\pm 1\%$ 以下と良く一致しており、決定された散乱係数 1.062 mm^{-1} ($\pm 0.002\text{ mm}^{-1}$)（波長1000 nm）は粒径等から散乱理論で算出した理論値 1.056 mm^{-1} （波長1000 nm）と良く一致した。

同様に、果実の吸収係数も市販の分光光度計で測定した糖水溶液の吸収係数に体積分率を乗じた値として得ることができるので^[1]、上記手法により果実の散乱係数を得ることができる。一方、不溶性のタンパク質や炭水化物を主に含む穀物や生体では、吸収係数を分光光度計で測定できないため、散乱係数の決定も難しくなる。そこで、本開発では次項で述べる時間分解分光^[2]による散乱係数や吸収係数の測定方法を検討している。

2.2 時間分解分光による光学特性の測定

図1で時間幅が数 ps のパルス光を入射光 i_0 とした場合、反射光 i_{ref} （又は i_{sig} ）のパルス幅は入射光に比べて数100倍と大きくなる。この反射光の時間波形は検出距離や散乱係数等、被検体固有の光学特性の関数として解析的に算出することができる^[2]。これにより、散乱係数等の光学特性を測定した反射光の時間波形と理論値が一致する値として非線形最小二乗法で決定することができる。

図3に時間相関単一光子計数（以下 TCSPC: Time Correlated Single Photon Counting）法をベースに試作した時間分解分光システムの概略を示す。照射光源に繰り返し数80 MHz、パルス幅2 ps 以下の波長可変 Ti:sapphire レーザー（Tsunami, Spectra-Physics 社製）を用いた。被検体からの反射光を光ファイバ（NA=0.22, コア径0.1 mm）で受光し、光検出器 PD1（PHD-400, Becker & Hickl 社製）と PD2（SPD-100-CTE, Micro Photon Devices 社製）で入射光の一部と光ファイバで受光した反射光をそれぞれ検出する。各光検出器からの信号を TCSPC 回路

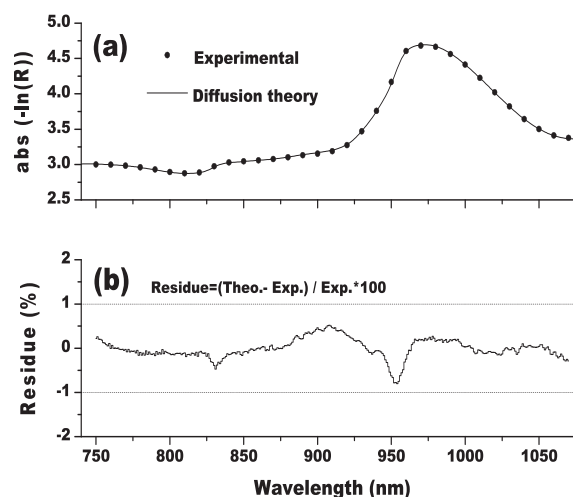


図2 TFDRSを用いて測定したポリスチレン水溶液の反射率と理論値。

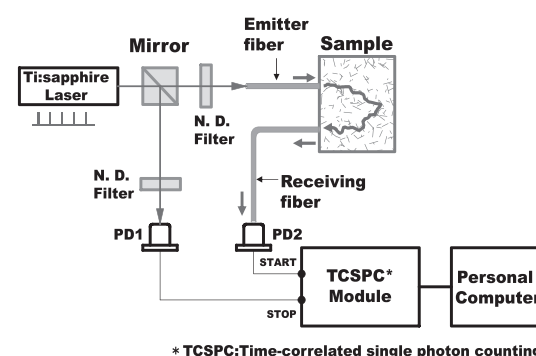


図3 TCSPC法をベースに構築した時間分解分光システムの概略図。照射光源にパルス幅2 ps 以下の Ti:sapphire レーザーを用いた。

（SPC-130EM, Becker & Hickl 社製）に入力してレーザー光の照射から単一光子検出までの時間を測定することにより、反射光の時間波形が得られる。

3. 結 言

本開発では、不溶性物質の光学特性を測定するために、TCSPC法をベースにパルス幅2 ps 以下のチタンサファイアレーザーを測定用光源とした時間分解分光システムを構築した。今後は、光学特性が既知の被検体を用いて本時間分解分光システムの精度評価を行い、穀物や生体を対象に光学特性に関するデータベースを構築する。

参考文献

- [1] 下村義昭：レーザー研究 39 (2011) 233.
- [2] M. S. Patterson, B. Chance, and B. C. Wilson: Appl. Opt. 28 (1989) 2331.

酵素利用技術とデジタイジング技術の長崎伝統菓子への適用と新製品開発

電子情報科 専門研究員 小笠原 耕太郎
食品・環境科 主任研究員 玉 屋 圭

長崎県のお土産品として、県内全域で多数の菓子製造業者により生菓子が製造・販売されているが、その売り上げは年々減少傾向にあり、商品の付加価値を高めるための特徴的な商品開発が地域産業から求められている。そのためには、本県の豊富な地域資源を活用した素材開発、新規商品及び既存商品を改良した商品を成形する菓子型開発、さらに、味・食感測定技術による商品評価が必要となる。そこで、生菓子業界の伝統的な製造方法に、酵素利用技術とデジタル製造技術を導入し、新たな素材と菓子型の開発、商品評価を行うことができる環境を構築することにより、新規商品開発を推進し菓子業界の振興を図ることを目的とする。

本研究開発の最終年度である平成28年度は、県産米の「にこまる」を原料としたペースト製造を行った。また、デジタル製造技術を活用した菓子型開発システムの確立を図るため、新しい商品を型化する技術を構築し、デジタル製造技術を新規菓子型製作に適用した際の性能試験及び実証試験を行った。

1. 緒 言

長崎の地は、江戸時代、シュガーロードの出発地であり、砂糖を利用したお菓子が作られ、現在も、長崎県の主要なお土産品となっている。生菓子の製造業者（長崎県菓子工業組合 組合員数268者）は、県内全域で製造販売を行っている。生菓子の売り上げは平成22年で164億円であるが減少傾向にあり、新しい消費者ニーズに対応した新しい商品開発が望まれている。新商品の開発は、生菓子職人と菓子木型職人のコラボレーションにより実現する。木型職人は高齢化と廃業、特定地域への集約化が進んでおり、新商品に展開する型製作が困難な状況となっている。また、歴史的背景を持つ生菓子店は多数の歴史的木型を保有するが、長年の使用や経年変化による摩耗やひび割れが進み早急な対応が必要となっている。しかし、このような状況では修復は困難で、またそれらを再利用した新しい商品開発も行えていない。一方、本県の地域資源（ビワ、柑橘などの果実、人参、大豆などの野菜など）を用いた菓子製品の開発に対するニーズは絶えず高い。しかしながら、これら県産農産物を加工した素材（ペースト、粉末など）が開発されていないため、県産の地域資源を利用した菓子の開発が進んでいない。

そこで、本研究では、生菓子業界の伝統的な製造方法に、酵素利用技術とデジタル製造技術を導入し、新たな素材と菓子型の開発、商品評価が行える環境を構築することにより、新規商品開発を推進し菓子業界の振興を図ることとした。

酵素利用技術を用いた新たな菓子素材の開発におい

ては、県産の果物・野菜に適用し、原料の味、風味、色を生かした、新たな菓子づくりに利用できる食品素材（ペースト）の開発を行う。また、デジタル製造技術を用いた菓子製造技術の開発では、三次元スキャン並びに三次元プリンタ技術を用いて、既存型から樹脂型を試作・製造し、保存（修復保存）、再利用を試み、さらに、菓子職人が手作業で作成した商品を型化する技術を構築し、新規型による商品開発を行う。

本研究開発の最終年度となる平成28年度は、県産米の「にこまる」を原料としたペースト製造と、新しい商品を型化する技術を構築し、デジタル製造技術を新しい新規菓子型製作に適用した際の性能試験及び評価を行い、デジタル製造技術を活用した新しい菓子型の開発システムの確立を図った。

2. 実験方法

2.1 県産米を利用したペースト製造技術の確立

本研究では、県産の地域資源に酵素処理技術を利用することによりペーストやエキスを製造し、菓子素材としての可能性を検討している。今回は、県産米である「にこまる」を原料としたペースト製造技術を検討した。

2.1.1 セルラーゼを用いた米可溶化技術の検討

米ペースト製造を可能とするために、まず市販のセルラーゼを用いて、炊飯米の可溶化を検討した。セルラーゼは、ヤクルト薬品工業製の「セルラーゼ Y-NC」を用いた。本研究の試料とした「にこまる」には、市

販されている県産米を使用した。米をあらかじめ洗浄し、水切りした後に、米に対して4倍量の水を添加し、30分間浸漬した後に、IHジャー炊飯器（SR-HC102、パナソニック製）により炊飯した。冷却した炊飯米10グラムに対して、セルラーゼ0.1、0.3、0.5、1.0%分を添加し、50℃で3時間反応させた。その後、温度100℃に10分間保持し、酵素反応を停止させた。本反応液を流水中で冷却した後に、遠心処理して得られた上清を採取し、波長410 nmでの吸光度及びエキスを測定し、炊飯米の溶解度を測定した。

2.1.2 糖化酵素を用いた米ペースト製造法の検討

米ペースト製造を目的として、セルラーゼにより可溶化した炊飯米に対して、市販のアミラーゼ関連酵素を用いてペースト製造を行った。酵素剤は、ヤクルト薬品工業製の α -アミラーゼ「ユニアーゼ YM-8」及びグルコアミラーゼ「ユニアーゼ 30」を用いた。2.1.1と同じ方法で調製した炊飯米10グラムに対して、 α -アミラーゼ、グルコアミラーゼそれぞれを0.1、0.3、0.5、1.0%添加し、50℃で30分間反応させた。その後、100℃で10分間処理し、酵素反応を停止させた。

本反応液を流水中で冷却した後に、遠心処理して得られた上清を採取し410 nmでの吸光度及びエキスを測定した。さらに、米の糖化度を検討するために、和光純薬（株）製グルコース CII テストワコーを用いてグルコース量を測定した。

2.1.3 糖化酵素を用いた米ペーストに含まれる糖組成の測定

2.1.2で製造法を確立した米ペーストの糖組成はUPLC装置（Waters, ACQUITY）を使用して測定した。まず、米ペースト20グラムに対して、超純水50 mLを添加し、30分間攪拌を行った後に遠心処理（4,500 rpm、10分間）して得られた上清を測定試料とした。

なお、分析条件は以下のとおりである。

溶離液；75% アセトニトリル溶液

流速；0.1 mL/min

分析カラム；BEH Amide Column（直径2.1 mm×75 mm）

検出器；蒸発光散乱検出器

なお、分析項目としては単糖類のグルコース、二糖類のマルトースを設定し、それぞれの標準品をスタンダードとして測定に用いた。

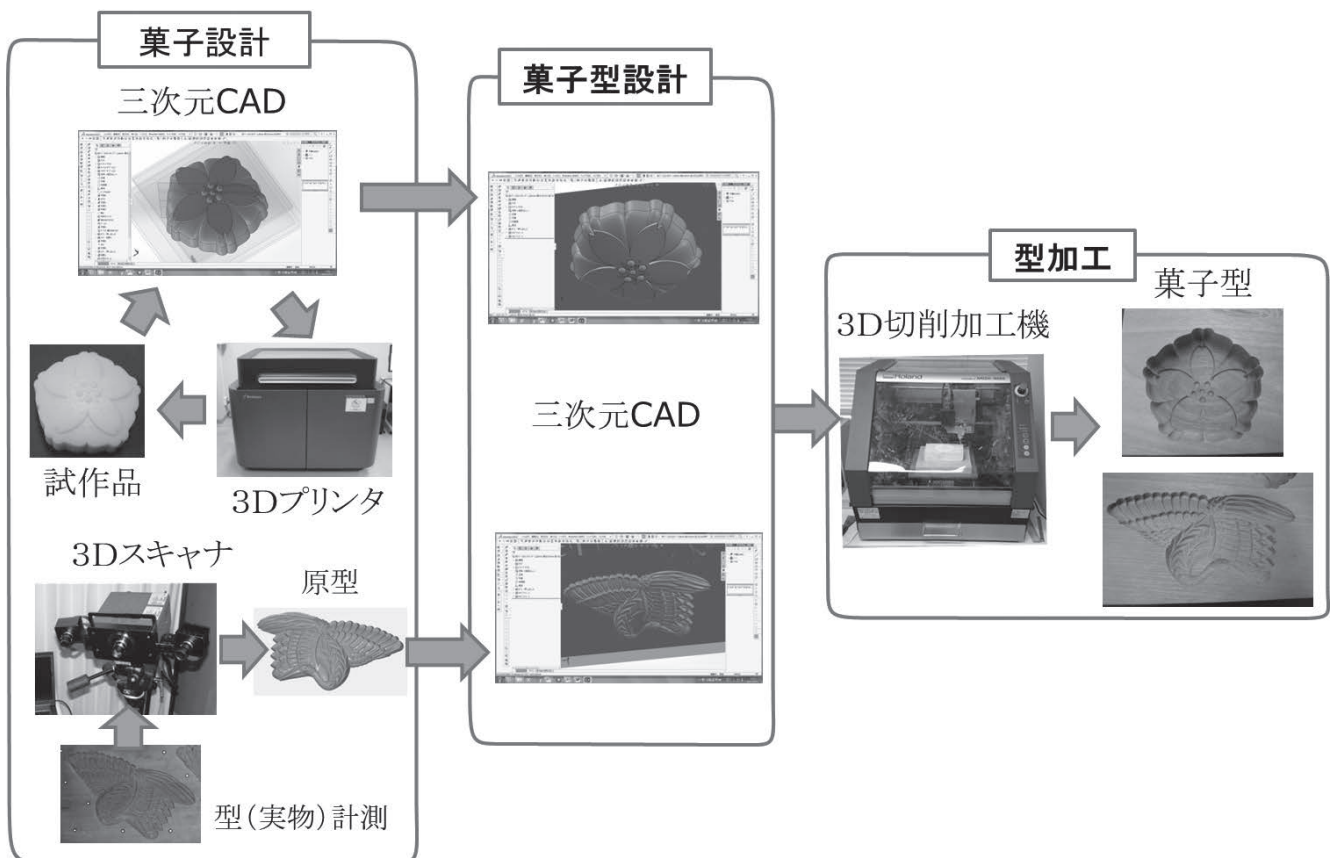


図1 菓子型開発システム構成図

2.2 デジタル製造技術を活用した菓子型の開発システム

2.2.1 システム構成

三次元 CAD 並びに三次元プリンタ技術を用いた菓子型の開発システムのシステム構成を図1に、また、そのスペックを表1に示す。

表1 装置スペック

3DCAD ソフトウェア		3D プリンタ	
モデル形式	ワイヤ、サーフェス、ソリッド	造形方式	インクジェット紫外線硬化
モデリング方式	フィーチャーベース	造形解像度	600dpi (X, Y 軸) 1600dpi (Z 軸)
モデリングカーネル	342×342×200mm	造形サイズ	342 × 342 × 200mm
モデリング機能	ソリッド/サーフェスモデリング	造形精度	±0.1mm
入出力形式	IGES, STEP, Parasolid, STL	積層厚	16 μm、30 μm
3D スキャナ		3D 切削加工機	
測定方式	非接触 CCD カメラ	切削方式	CNC3 軸切削加工
カメラ解像度	800,000画素	機械的分解能	0.002mm/step
測定範囲	125 × 100 × 90mm	造形サイズ	305×305×105mm
測定精度	±0.017mm	送り速度	7～3,000mm/min (X, Y 軸) 7～1,800mm/min (Z 軸)
測定点間距離	0.12mm	スピンドル回転数	4,500～15,000rpm

2.2.2 性能試験

新しい商品を型化する技術を構築し、本システムが新規菓子型製作に十分な性能を持つことを検証するために、口砂香を例にとり、実際の形状構築法の検討と形状構築、口砂香形状から菓子型の成形実験と成型品の細部の再現性を試験した。

(1) 菓子の押し型の形状特徴

押し型の菓子の形状は、なだらかな形状からなるベース部分と細かな盛り上がり／切込み部分である細部の詳細部分から構成される特徴を持つ。

(2) 菓子形状構築法

上記を踏まえ、ベース部分の形状の構築方法は、図3に示すように、上から見た時の輪郭形状に盛り上がり方を与えることにより形状を構築する。

また、輪郭部分詳細部分である細部は、図4に示すように、鋭角や丸みで与える輪郭形状を軌道に沿って掃引した形状で盛り上がりや切込みを与えることにより形状を構築する。

以上により構築した口砂香形状を図5に示す。

口砂香形状が構築できれば、菓子型は、菓子形状を包含する直方体形状から菓子形状を取り去ることにより作成することができる。その菓子型形状を図6に示す。

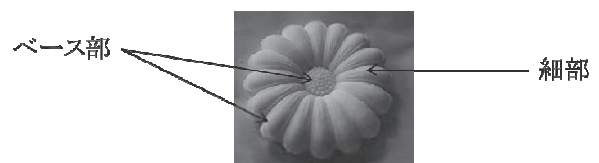


図2 押し型菓子の形状特徴



図3 ベース部分の形状構築



図4 細部の形状構築

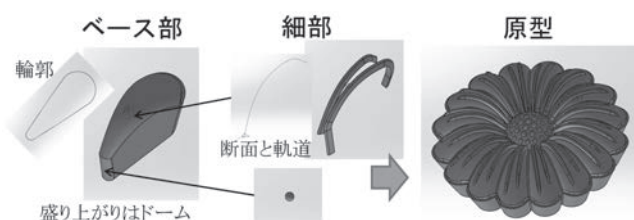


図5 口砂香形状のモデリング

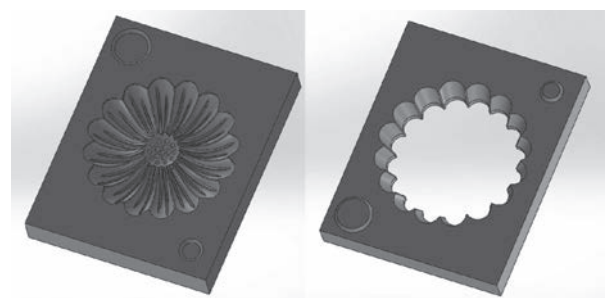


図6 口砂香菓子型形状（左：下型、右：上型）

(3) 菓子型の加工実験と細部の再現性試験

菓子型の材料としては、食品の型として使用可能な木型としてがば桜を使用した。加工データを表2に示す。いずれも、荒加工と仕上げ加工により加工した。

表2 加工条件

材質	がば桜
加工工具	(荒) R1.5mmボールエンドミル (仕上げ) 下型: R0.75mm ボールエンドミル、上型: R1mm ボールエンドミル
切削速度	(荒) 450mm/min (仕上げ) 450mm/min
スピンドル回転数	(荒) 9,750rpm (仕上げ) 9,750rpm
切込み量／パス間隔	(荒) 0.30／1.20mm (仕上げ) 0.10／0.10mm

上記加工条件で菓子型を製作し、元データと菓子型、及び菓子型により成型した口砂香を計測し、元のCADデータとの形状位置（偏差）による比較による評価を行った。

3. 結果と考察

3.1 県産米を利用したペースト製造技術の確立

3.1.1 セルラーゼを用いた米可溶化技術の検討

「にこまる」を炊飯させたものに対して、市販セルラーゼを0.1から1%分添加し酵素分解を行ったところ、添加量が増すほど米は可溶化していることが観察された。さらに、米の酵素分解物から得られた上清の吸光度を測定することにより、可溶化の程度を測定した。

表3 セルラーゼ添加量が米の可溶化に及ぼす影響

セルラーゼ添加 (%)	A ₄₁₀ (白濁度)
0	1.072
0.1	1.827
0.3	1.815
0.5	1.748
1.0	1.762

その結果、セルラーゼを添加すると吸光度は増加し、米の溶解度が進んでいることが判明したが、0.1%添加試料においてA₄₁₀値は最大に達しており、0.3%以上では酵素濃度を高めても吸光度が増加しなかった。

さらに、セルラーゼ反応物から遠心処理により得ら

れたエキスを測定した。

表4 セルラーゼ反応物のエキス量変化

セルラーゼ添加量 (%)	エキス量 (mL)
0	0.2
0.1	4.8
0.3	6.0
0.5	6.6
1.0	6.9

添加したセルラーゼにより炊飯米が可溶化した場合、含有する水分が溶出することから、エキス量は増加するものと考えられる。本結果を見ると、セルラーゼ添加量に伴ってエキス量は増加しており、0.5%添加試料ではほぼ一定に達していた。先述の吸光度により可溶化の程度を検討した結果（表3）は、0.3%濃度で一定レベルに達していることを示しており、本結果と異なるものであった。この差異は、酵素作用により米の可溶化が進行し水分量が増加したため、結果として白濁度が低下したこと由来と考えられた。米ペーストの効率的な製造を達成するためには、セルラーゼ添加量が0.5%程度必要と考察される。

3.1.2 糖化酵素を用いた米ペースト製造法の検討

3.1.1で検討した、0.5%濃度のセルラーゼを作作用させた炊飯米に α -アミラーゼ及びグルコアミラーゼ剤を添加し、米デンプンの糖化を促進することにより、ペーストの製造を試みた。まず、 α -アミラーゼである「ユニアーゼ YM-8」を使用した検討を行った。

表5 α -アミラーゼ添加量が米ペースト製造に及ぼす影響

α -アミラーゼ添加量 (%)	エキス量 (mL)	デンプンの糖化度
0	3.5	0.355
0.1	14.3	1.163
0.3	14.7	1.237
0.5	15.3	1.306
1.0	16.5	1.340

α -アミラーゼ添加量に伴い、エキス量及びデンプンの糖化は進行し、エキス量は1.0%まで増加したのに対して、糖化の程度は添加量0.5%でほぼ一定に達していた。本結果から、 α -アミラーゼを用いた米ペースト製造には、0.5%以上の酵素添加を要すると考え

られた。さらに、セルラーゼ処理した炊飯米にグルコアミラーゼを添加し、同様の検討を行った。

表6 グルコアミラーゼ添加量が米ペースト製造に及ぼす影響

グルコアミラーゼ添加量 (%)	エキス量 (mL)	デンプンの糖化度
0	3.5	0.355
0.1	14.0	1.302
0.3	15.0	1.343
0.5	16.3	1.591
1.0	16.6	1.792

表6からわかるように、グルコアミラーゼの添加量を増加させた場合、得られたエキス量は徐々に増加し、添加量 0.5% でほぼ最大に達していた。また、デンプンの糖化程度は添加量 1.0% まで増加しており、本酵素を用いた米ペースト製造には、0.5% 以上の添加が必要である。

表5及び表6の 520 nm での吸光度値を比較すると、本グルコアミラーゼ添加ペーストが α -アミラーゼ添加物よりも高い数値を示したことから、グルコアミラーゼを使用したペーストが強い甘味を有する可能性が示唆された。

3.1.3 糖化酵素を用いた米ペーストに含まれる糖組成

米ペーストに含まれる糖の組成を測定した結果を表7に示す。まず、セルラーゼ製剤のみを添加した米ペーストでは、グルコースのみが生成していた。この結果は、米細胞壁を構成するセルロースにセルラーゼが作用し、グルコースが遊離した結果と考えられる。3.1.1で、セルロースの作用により炊飯米が可溶化したことを確認しているが、米の可溶化には、セルロースの働き、すなわち細胞壁を溶解しグルコースを生成することが関係していることが示された。

次いで、セルラーゼに加えて α -アミラーゼを作用させたペーストでは、マルトースが多く生成されていた。これは、エンド型酵素である α -アミラーゼの作用により米デンプンからマルトースが生成された結果である。

一方、セルラーゼ及びグルコアミラーゼを添加した試料ではグルコースが多く生成されており、エキソ型

の酵素であるグルコアミラーゼがデンプンに作用した結果である。

さらに、セルラーゼ、 α -アミラーゼ、グルコアミラーゼの3種の酵素を同時に用いたペーストを製造し、糖組成を測定したところ、グルコース及びマルトースが共に生成されており、甘味を高めたペーストを製造できる可能性が示された。

ここで、ペーストの甘味度を算出するために、グルコース、マルトースの甘味度 (0.69、0.46) を用いて計算した結果、セルラーゼのみ添加; 1.4、セルラーゼ、 α -アミラーゼ添加; 13.6、セルラーゼ、グルコアミラーゼ添加; 13.6、セルラーゼ、 α -アミラーゼ、グルコアミラーゼ添加; 18.3 (100 g あたり) であり、3種の酵素を用いたペーストが最も高い甘味度を示した。

以上の結果から、3種の酵素を用いて製造した米ペーストにはグルコース及びマルトースが豊富に含まれていることが判明し、強い甘味を有することが明らかになった。

表7 米ペーストに含まれる糖の組成

	グルコース (g/100 g)	マルトース (g/100 g)
セルラーゼ添加	2.0	—
セルラーゼ, α -アミラーゼ添加	5.3	21.7
セルラーゼ, グルコアミラーゼ添加	17.9	2.8
セルラーゼ, α -アミラーゼ, グルコアミラーゼ添加	19.8	10.1

3.2 加工と細部の評価

(1) 加工結果

図7に試作した菓子型を示す。いずれも、切削加工後の仕上げ処理は行っていない。

加工時間は、表8に示すとおりである。

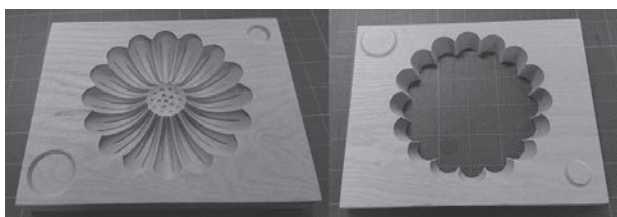


図7 菓子型（左 下型、右 上型）

表8 切削加工時間

	上型	下型
材質	がば桜	がば桜
荒加工 min	143	288
仕上げ加工 min	749	451

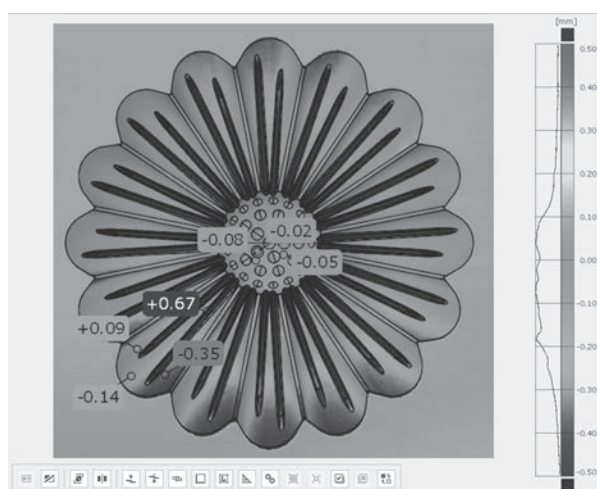


図8 偏差マップ

図7に示す菓子型（下型）の計測データと切削のCADデータを同じ位置に配置し、位置座標値の比較を行った偏差マップを図8に示す。

部分的に0.5mmを超える領域が見受けられるが、これは木材特有の繊維の方向による逆目の影響と考えられる。大半が仕上げ工具の半径0.75mm以下に収まっており、菓子型としては十分な形状再現性である。

（2）菓子形状構築法による原型製作

2. 2. 2（2）で述べた新規菓子形状構築法により作成した例を図9に示す（上図、中図、下図）。

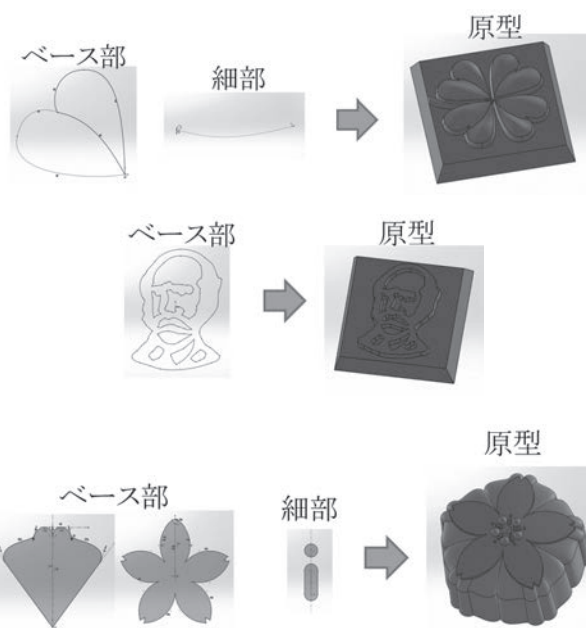


図9 新規原型構築例

（3）適用事例

本菓子型の開発システムにより実際の商品製作に適用した例を示す。ここでは、5月の節句の伝統菓子である鯉菓子の既存の赤鯉の型（赤型）から欠損した黒鯉の型（黒型）について、三次元スキャナによる形状計測と3DCADによる型データ作成により型を製作し、がば桜を切削加工し黒型を作成した。使用した工具は、荒加工 R1.5mm ボールエンドミル、仕上げ加工 R0.5mm ボールエンドミルである。

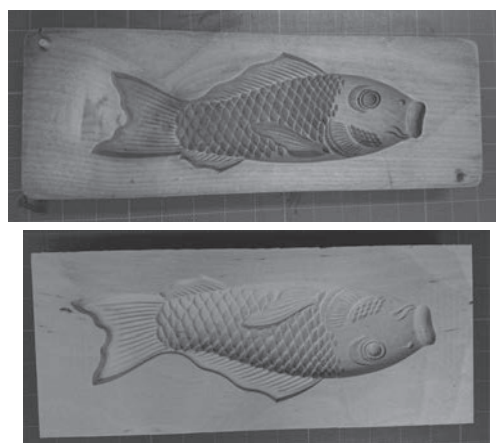


図10 鯉菓子木型（上 既存赤型、下 再現した新規黒型）

形状再現性を評価するために、図10に示す既存型と再現した新規型の計測データを同じ位置に配置し、位置座標値の比較を行った偏差マップを図11に示す。

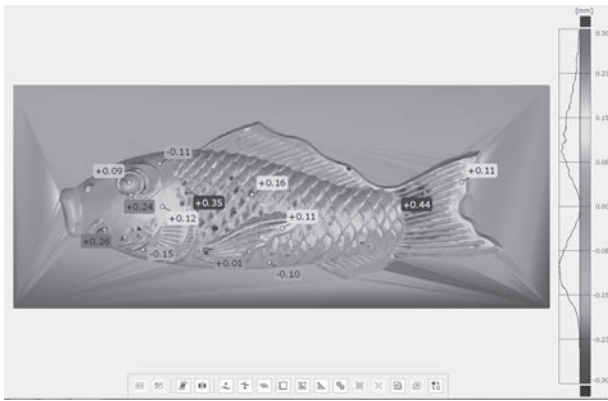


図 1 1 偏差マップ

大半が仕上げ加工工具の半径 0.5mm 以下に収まっており、菓子型として十分な形状再現性であることが確認できた。

既存の赤型と再現された黒型により成形された鯉菓子を図 1 2 に示す。



図 1 2 鯉菓子（赤と黒）

4. 結 言

1) 県産米である「にこまる」を原料としたペースト製造法を検討した結果、炊飯米に対して 0.5% のセルラーゼと 0.5% 以上の α -アミラーゼあるいは同濃度のグルコアミラーゼを添加し、50℃で 3 時間反応させることにより、甘味を有する米ペーストが製造できた。

また、3 種の酵素を用いて製造した米ペーストは、グルコース及びマルトースを豊富に含み、強い甘味を有することが明らかになった。

2) 新規型製作技術として、特徴曲線から立体データを作成する方法を検討し、三次元 CAD、三次元スキャナ並びに三次元切削加工機を活用した菓子型開発システムを構築し、その性能評価を行い、菓子製作で十分活用できる性能を持つこと、さらに、和菓子製作に応用し、実際に活用できることが確認できた。

今後は、県菓子工業組合の組合企業による菓子素

材や型の利用を進め、新製品の開発を推進する。

電気・電子機器のノイズ対策技法の確立

次長 兼 グリーンニューディール技術開発支援室長

電子情報科 主任研究員

電子情報科 主任研究員

グリーンニューディール技術開発支援室 参 事

兵 頭 竜 二

中 川 豪

田 中 博 樹

神 田 誠

工業技術センターに整備された電磁ノイズ試験環境を活用し、県内企業が製造する電子機器の電磁ノイズ試験および試験結果に基づく各種ノイズ対策の試みを行い、電磁ノイズ対策の基本的手法を整理することで、県内電気・電子機器製造業の振興を図ることを目的としている。

このため、導入された機器について、利用者にとって分かりやすい機器利用のマニュアルとノウハウ集の整備や、利用環境の補足整備を進めている。この一環として平成28年度は、電磁ノイズ対策技法の一助として、作動周波数が比較的低いアナログ電子機器から放射される電磁界ノイズの影響を評価する環境の整備を行った。

1. 緒 言

当センターでは平成26年度、平成25年度補正「地域オープンイノベーション促進事業」によって、国際規格であるIEC規格や国内規格の電気用品安全法(PSE)に準じた電気ノイズに対する耐性と安全性を評価する設備(8機種)を導入した。電気ノイズ耐性を評価する機器は、①静電気試験器、②雷サージ試験器、③ノイズ試験器、④ファストトランジェント/バースト試験器、⑤電源電圧変動試験器、の5機種であり、電気安全性を評価する機器は、⑥アース導通試験器、⑦耐電圧・絶縁抵抗試験器、⑧漏電電流試験器、の3機種である。

本研究は、これらの機器を活用して県内企業が製造する電子機器の電磁ノイズ試験および試験結果に基づく各種ノイズ対策を進めるとともに、電磁ノイズ対策の基本的手法を整理することで、県内電気・電子機器製造業の振興を図ることを目的としている。このため、導入された新しい機器について、利用者にとって分かりやすい機器利用のマニュアルとノウハウ集の整備を目指す。また同時に、利便性向上を図るため、利用環境の補足整備も進めることとしている。

本研究の2年度目である平成28年度は、比較的低い周波数で作動するアナログ電子機器から放射される電磁界ノイズの影響を評価する環境の整備を行った。このため、作動周波数が100kHz以下のアナログ電子機器の安全な評価試験を想定し、その機器から放射される電磁界ノイズを効率良く遮断できる小型のシールドボックスを製作した。また同時に、85kHzの交番磁界を放射する発信器も作製し、製作したシールドボッ

クスの性能評価を試みた。

2. 方 法

2.1 シールドボックスの製作

通常のシールドボックスは、ファラデーケージを基本とし、ケージ内面に電波吸収素材を固定することで、主に高い周波数の電磁波の漏洩や侵入を遮断するものである。

本研究事業では、非接触給電技術などに使われる比較的低周波域の交番磁界を遮断する能力を持つシールドボックスを製作した。

このため、既往の文献^{[1]-[5]}で示された情報を参考にして、基本となるファラデーケージを厚みのあるアルミ材で構成し、渦電流損を利用することで低周波域の交番磁界を遮断する方法を採用する。また、必要に応じて、磁気シールド材(パーマロイ材)を貼り付けることで、磁束を遮断する能力を補強できるようにした。

2.2 交番磁界放射器の作製

シールドボックスの評価等に汎用的に使用できる放射器付きの発信器を作製する。

ベースとなる発振器には24.5454MHzの水晶発振器を使用し、分周によって85.227kHzを中心に複数の周波数が得られるようにした。

放射器には、 $\phi 0.2\text{mm}$ のエナメル線を外形 $20\text{mm}\times 25\text{mm}\times 9\text{mm}$ 、内形 $9\text{mm}\times 14\text{mm}\times 9\text{mm}$ に800回巻いた線輪を使用した。

2.3 シールドボックスの簡易性能評価

作製した放射器を、製作したシールドボックスの外で作動させ、放射される磁界を測定することにより、シールドボックスの磁界遮断能力を確認した。

なお、磁界の測定には、FT3470 型 磁界測定器（日置電機株式会社、FT3470-52）を用いた。

3. 結果と考察

3.1 シールドボックスの製作

図1に製作したシールドボックスを示す。

製作には、板厚が6 mm のアルミ板を用いた。内寸は、突起箇所を含まず、横 580 mm×高 380 mm×奥 480 mm である。前面開口扉からは試験対象機器の出し入れや測定用線材の引出しなど、左右の側面扉からも測定用線材の引出しなどが可能である。



(a) 扉を閉じた状態 (b) 扉を開けた状態

図1 試作したシールドボックスの外観

3.2 交番磁界放射器の作製

作製した放射器の外観を図2に示す。放射される交番磁界の周波数は、ディップロータリスイッチで分周器の分周比を切り換えて変更する。放射器に使用した線輪のインダクタンスは、実測の結果 9.56 mH であった。このため、設計中心周波数である 85 kHz で最も効率よく作動させるため、共振用のキャパシタとして合成容量が 368 pF のマイカコンデンサを線輪と直列に接続して使用した。

図3と図4に、線輪両端の電圧波形と線輪に流れ込む電流波形を示す。実測評価の結果、85.227 kHz に分周される設定において、85.225 kHz の正弦波様の電圧波形と電流波形が得られた。

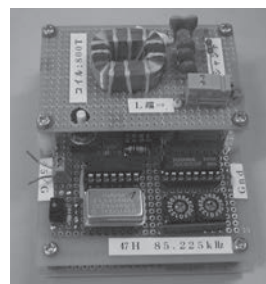


図2 交番磁界放射器の外観

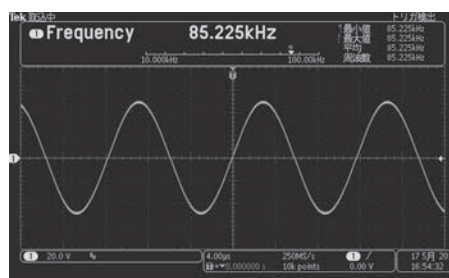


図3 線輪両端の電圧波形

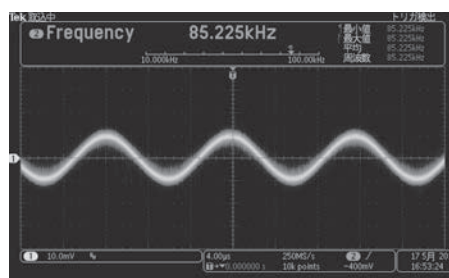
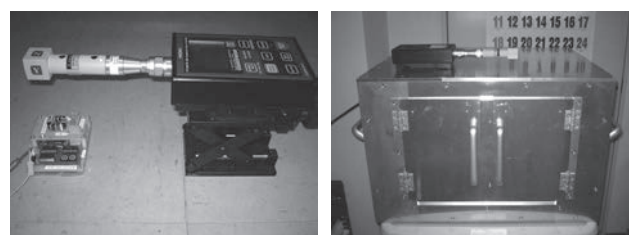


図4 線輪への電流波形（シャント抵抗：1 Ω）

3.3 シールドボックスの簡易性能評価

作製した放射器から発生する磁界を、放射器の線輪と磁界測定器のセンサとの間の距離を変えて、線輪直上で測定した。図5は測定の様子を示す。図5 (a) は、作製した放射器を開放空間に置き、磁界測定器で直接に測定している様子である。図5 (b) は、放射器を試作したシールドボックス内に配置し、このボックス外に漏洩する磁界を測定している様子である。



(a) 障壁無し (b) ボックス利用

図5 放射される磁界の測定の様子

図6に測定結果を示す。横軸は、放射器の線輪の上面端と磁界測定器のセンサの下面端との距離である。図中に●で示されたプロットは図5 (a)における測定値、同じく◇で示されたプロットは図5 (b)における測定値である。

この結果から、試作したシールドボックスが、交番磁界の漏洩を約 1/10 にまで減少させていることが分かる。

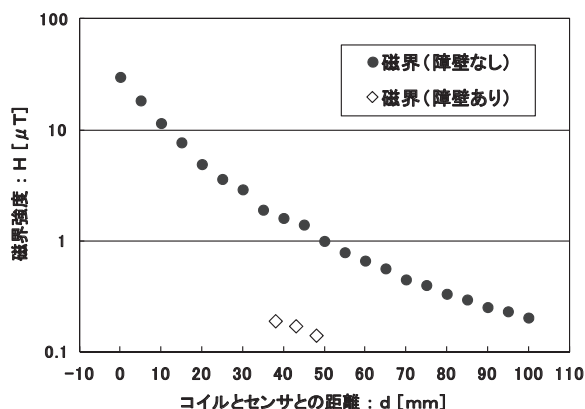


図6 線輪直上における磁界強度

4. 結 言

本研究では、アナログ電子機器から放射される電磁界ノイズの影響を評価する環境整備の一助として、低い周波数の電磁界を遮断する簡易で小型のシールドボックスを製作した。さらに、85 kHz の交番磁界を放射する放射器も作製し、製作したシールドボックスの性能評価を行った結果、漏洩する交番磁界を約 1/10 に低減できることを確認した。

近年標準化が進んでいる電気自動車向けの非接触給電技術は、そのキャリア周波数として 85 kHz を中心周波数とすることが決まりつつある。本研究で整備した環境は、このような電力の非接触伝送に係る電子回路の評価などに利用可能である。

参考文献

- [1] 乾芳彰ほか, 変圧器タンクの漏れ磁界と非磁性金属板シールドのうず電流, 電気学会論文誌B, 98 (11), pp.879–886, 1978.
- [2] 梶原暁, 送電線下の単板構造の磁気遮蔽の研究, 清水建設研究報告, 69, pp.75–80, 1999.
- [3] 村田美久, シールドの方法, 電気設備学会誌, 26(10), pp.760–763, 2006.

- [4] 矢矧宗一郎ほか, 筐体の金属厚みに対する磁界シールド評価, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 通信 (1), 325p, 2015.
- [5] 大戸井慶人ほか, 二層構造とした孔あき金属板の磁界シールド効果の解析, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 通信 (1), 281p, 2017.

センサネットワークとビッグデータ解析を用いた応用技術開発

(組込みシステム技術と無線ネットワーク技術の応用)

基盤技術部	部 長	藤 本 和 貴
産業技術総合研究所		前 田 龍太郎
産業技術総合研究所		藤 本 淳
産業技術総合研究所		鈴 木 章 夫

本研究では、複数のセンサを相互に接続して計測を行うセンサネットワーク技術、組込み技術を用いたデータ収集システムを開発するとともに、収集したデータの解析を行うビッグデータ解析システムを用いた応用技術開発を行い、県内企業への技術移転を行うことを目的とした。

平成27年度はセンサネットワークの基礎となるセンサユニットとデータの収集を行うサーバユニットを試作し、クラウド上のサーバへの通信試験を行った。^[1]

平成28年度はセンサネットワークの拡張、データ収集方法の改良、サーバシステムの改造、クラウド上のサーバへの通信試験を行った。

1. 緒 言

組込み技術は、産業用・家庭用の電子制御・計測を行う機器の多くに用いられている技術であり、生産機械・工場、環境・エネルギー、スマートコミュニティ、医療・介護・見守り、防災など、応用分野が広く、地場産業が新産業へ進出するための基盤技術である。汎用コンピュータと異なり、ハードウェアとソフトウェアが一体となっており、その種類が非常に多いことが特徴である。

センサネットワーク技術は、計測を行うために多くのセンサを配置し、センサ相互に接続してデータの計測・収集を行う技術であり、各センサにおいてデータを計測するとともにセンサ間で自律的にネットワークを構成し、ネットワークの変更や障害に対応して通信環境を維持できることを特徴としている。製造現場や環境・エネルギー分野など広い分野での計測・制御における用途が見込まれて、HEMS (Home Energy Management System)、BEMS (Building Energy Management System)、SEMS (Small Office Energy Management System: 小規模EMS)、スマートグリッド、環境モニタリング、等に用いられる。その中でも特にM2M (Machine-to-Machine) 技術は、コンピュータネットワークに繋がれた機械同士が人間を介在せずに相互に直接情報交換し、自動的に最適な計測・制御が行われるシステムである。

ビッグデータ解析技術は近年急速に注目されている技術である。ビッグデータについては定量的な定義は

ないが、従来のデータベース管理ツールでは処理が困難なほど巨大なデータの集積を指すことが多く、収集・選択・保存・検索・解析・可視化が困難なデータを対象とする。予め有意性を限定してデータを収集・解析・検証していたこれまでの手法から、全件のデータを取得して、傾向・相関を把握することが可能になる。用途例としては、電力センサの計測値から機器の稼働状況の把握・異常の検知を行う、温度・湿度・照度・土壤水分等の環境データから農作物の育成監視・予測を行う、形状・振動等のデータから建築物・構造物の異常検知を行う (インフラマネジメント) 等が想定される。

ビッグデータ解析のためには、容量・処理能力等に考慮したハードウェア・ソフトウェアの構成が必要となり、ハードウェアとしては分散処理システム、クラウド・コンピューティングが、ソフトウェアとしては専用のオープンソースソフトウェア (Hadoop、MapReduce 等) が用いられることが多い。収集した大量のデータ間の関連付けを行い、データの可視化による、異常の予兆検知等に用いる。

いずれの技術も県内企業が関心を持っており、開発の要望があるものであり、県内の地場産業が新産業へ進出するための基盤技術となるものである。^[2]

そこで、本研究では、センサネットワーク技術と組込み技術を用いてデータ収集システムを開発し、収集した大量のデータをクラウド上に送信・保存するシステムを構築することを目的とした。

ビッグデータ解析を応用した計測・解析システムの試作開発を行って技術知見を蓄積し、県内企業への技術移転を行うとともに、実用化のために解決すべき課題であるセンサ・通信の信頼性向上、耐環境性の向上、速度の向上、長期間運用のための駆動電源の確保、新規計測手法の開発等に関する技術開発を行うことを目的とした。

具体的には以下の項目について開発を行い、システムの試作を行った。いずれも IoT (Internet of Things) の基盤技術である。

● センサネットワークを介したデータ収集

計測機能と通信機能を持つセンサデバイスを用い、データの計測・収集を行うセンサネットワークシステムを試作した。計測対象としては温度・湿度・照度・電流・傾斜等を想定し、対象によりセンサを選定するが、本研究ではセンサネットワークの構築とクラウドサーバ上への格納技術の構築を主目的とすることから主に温度センサを用いて計測試験を行った。

開発にあたっては、信頼性と拡張性を考慮してオープンシステム、オープンソースを活用した。

● 収集したデータの蓄積・解析を行うシステムの構築

センサネットワークを介して収集したデータを組み込み用のワンボードコンピュータを用いて収集・解析し、必要なデータを選定してクラウド上のデータベースへ転送するサーバユニットを試作した。

2. 実 験

平成 27 年度は、センサネットワークの基礎となるセンサユニットとデータの収集を行うサーバユニットを試作し、クラウド上のサーバへの通信試験を行った。^[1]

具体的には、計測試験のために無線通信機能を有するセンサユニットおよびサーバユニットを試作し、両者間の通信試験を行った。また、センサユニットで計測したデータをサーバユニットへ送信し、収集したデータをクラウド上のサーバへの送信を行った。そのために必要となるハードウェアと通信プログラムの試作を行った。さらに、複数のセンサを用いた際の負荷試験を行った。

平成 28 年度は、センサネットワークの拡張、データ収集方法の改良、サーバシステムの改造、クラウド上へのサーバへの通信試験を行った。

2.1 センサユニットおよびサーバユニットの試作

図 1 に示すセンサユニットおよびサーバユニットを

試作し、データの収集を行うセンサネットワークシステムを構築した。

センサユニットでは計測機能と通信機能を持つセンサデバイスとしてディジ インターナショナル株式会社^[3]製の通信モジュール XBee^[4]を用いている。また、サーバユニットでは組み込み用ワンボードコンピュータである RaspberryPi^[5]に XBee を接続して使用している。

XBee は自律的にネットワークを構成できる無線デバイスであり、デジタル入出力・アナログ入力・PWM 出力の機能を有しているので、簡易にセンサユニットを構成することができる。

XBee は予め以下のいずれかのモードに設定して使用する。

- センサネットワーク全体を統括する 1 基のコーディネータ
- データ計測を行う複数のエンドデバイス
- データの計測を行うとともに通信の中継を行う複数のルータ

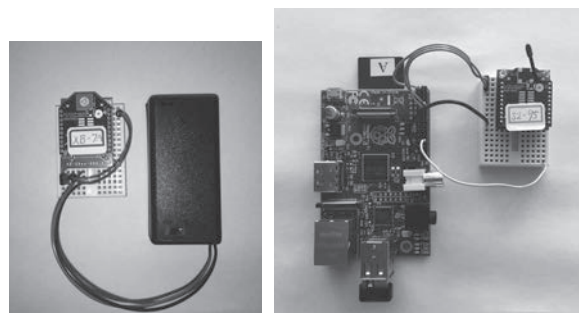


図 1 センサユニットおよびサーバユニット

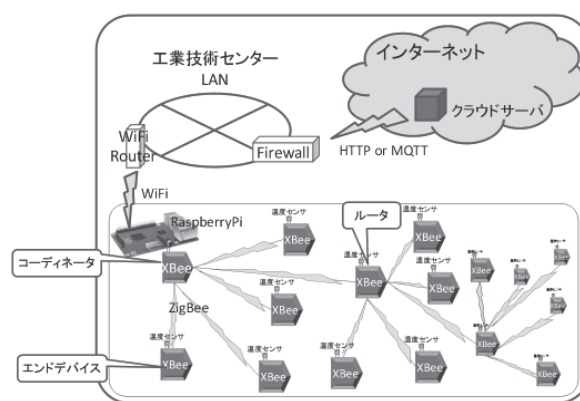


図 2 システム構成

XBee 相互の通信は ZigBee^[6] に準拠した 2.4GHz 帯の無線通信により行われ、コーディネータの機能によりネットワーク構成が自律的に構成される。

XBee は 2.7 ~ 3.3V の直流電源で駆動できるため、

電池（単3×2本）による駆動が可能であり、後述の RaspberryPi からの電源供給による駆動も可能である。また、XBee のアナログ入力 は 0～1200mV の範囲で可能であるので、対応する範囲の電圧出力を有するセンサであれば、XBee のアナログ入力に直接接続することが可能であり、システムの簡略化を図ることができる。今回の実験で主に使用した温度センサ LM61BIZ は-30℃～+100℃の温度を+300mV～+1600mV の電圧として出力するので、-30℃～+60℃の温度を計測可能である。

サーバユニットには、ARM プロセッサを搭載したシングルボードコンピュータである Raspberry Pi（平成27年度は Model A、平成28年度は Raspberry Pi 2 Model B）を使用した。OS には Raspbian を使用し、センサネットワークとの通信のために Raspberry Pi のシリアル入出力（UART）に、コーディネータとして設定した XBee を接続し、XBee の電源（3.3V）も Raspberry Pi から供給している。

サーバユニットの Raspberry Pi に WiFi インターフェイスを装着して、工業技術センターの LAN 上に設置した無線ルータに WiFi 通信により接続し、ここを介してクラウド上のサーバにデータの送信を行った。サーバユニットには以下の機能を持っている。

- センサネットワークを介して送信されるデータを UART に接続した XBee（コーディネータ）から読み出す
- 必要なデータを抽出・選定・整形する
- クラウド上のデータベースへデータを送信する（そのために必要な認証処理を行う）

XBee との通信プログラムおよびクラウド上のサーバへの通信プログラムは C 言語あるいは python により記述し、オープンライブラリである XBee-2.1.0^[7]（現在の最新バージョンは XBee-2.3.1）および libxbee3^[8] を使用している。

2.2 通信試験

通信試験として、サーバユニットからセンサユニットへコマンドを送信し、そのレスポンスをサーバユニット上で確認した。送信するコマンドは以下の2種類を用いた。

‘NI’ コマンド：XBee の識別子（Node Identifier）を読み出す

‘IS’ コマンド：XBee に接続されている入出力の状態を読み出す

‘NI’ コマンドはセンサネットワーク上にある全ての XBee に対し送信されるもので、XBee が固有に持っている 8 バイトの ID が送信される。また、‘IS’ コマンドは特定の XBee の ID を指定して入出力の状態の送信を求めるものであり、指定した XBee に接続されている入出力の状態が送信される。ルータを介さないで直接通信を行うことが出来る XBee の場合は約 12msec で返信される。

いずれも正常に通信が行うことが可能であることを確認し、複数（1～7）の XBee について通信を行うことが可能であることも確認した。

次に、‘IS’ コマンドにより XBee から読み出したセンサデータをクラウドサーバへ送信する試験を行った。

クラウドサーバには株式会社スカイディスク^[9]のセンサクラウド GINGA を利用した。専用に用意されている http インターフェイスを利用して、クラウドサーバ上のセンサ情報（センサの ID、名称、設置場所等）の登録・更新、および、センサ計測データの送信・記録・読出を行った。また、MQTT による AWS Kinesis^[10]への送信を行った。

システムの構成を図3に示す。

なお XBee の設定については、サーバユニットは API Coordinator モード、センサユニットは常時通信を行うことが出来る API Router あるいは間欠動作が可能な API End Device モードを使用している。

図4に3点の温度を継続して計測し、クラウドサーバへの送信を行った際の例を示す。

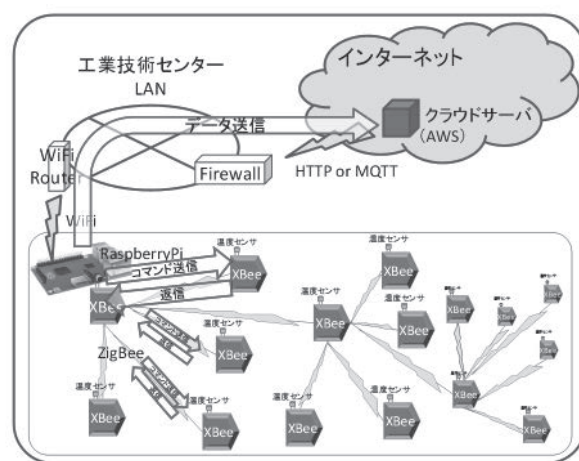


図3 通信試験のシステム構成

基本的な機能に限定したセンサユニットとサーバユニットを試作し、センサ情報の取得と計測データの収集、および、クラウド上のサーバへの通信を行うこと

が可能であることを確認した。

通信プロトコルとして HTTP、MQTT のいずれでも通信を行うことが可能であり、GINGA クラウドへの通信、AWS Kinesis への送信を行うことが可能であった。

また、センサネットワーク上のセンサユニットの数および通信頻度を増やした際のサーバユニットへの通信負荷試験において、6 パケット / 秒の通信頻度においてもセンサネットワークの通信に支障はなかったが、サーバユニットからクラウドサーバへの http プロトコルによる通信においては処理速度が十分ではなかったために、数時間でサーバユニットのメモリがオーバーフローを発生した。センサユニットを減らし、3 パケット / 秒の通信試験においても徐々に通信の遅延が発生し累積していくため、数日でサーバユニットのプログラムが停止した。今後は効率的な通信方法の検討、計測データの種類の拡張と信頼性の向上、長時間運用のための電源の確保を検討するとともに、クラウドの効率的な活用方法を検討していく。

2.3 クラウドサーバへのデータ転送

センサネットワークを介して収集したデータをサーバユニットを用いて解析し、必要なデータを選定してクラウド上のデータベースへ転送するシステムを構築した。

ハードウェアについては、通信試験で用いたセンサユニットおよびサーバユニットとほぼ同様の構成である。

通信試験で用いた 'IS' コマンドによる入力状態の読出しはサーバユニットからセンサユニットへコマンドを順次送って返信を待つポーリング方式であることから、通信に要する時間が長くなる問題がある。そのため、センサユニットの XBee において定期的に計測データを送信する割り込み方式に変更することとし

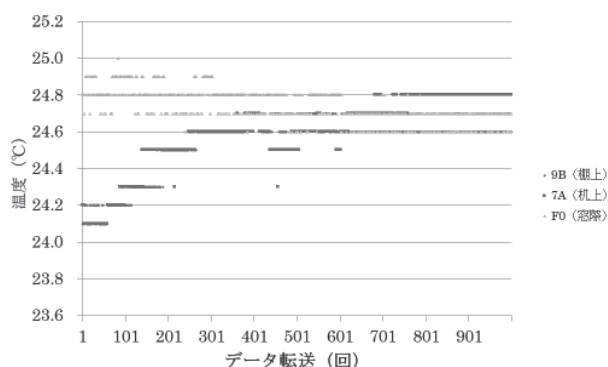


図4 通信試験の計測例

た。具体的には XBee をスリープモード (間欠動作) に設定して、センサからの入力値を定周期 (1 分に 1 回、等) にコーディネータ (サーバユニット) に送信することとした。

サーバユニットではセンサユニットから送信されるデータを受信するごとにクラウドサーバへメッセージとして送信する。送信する内容は、デバイス名 (サーバユニットの名称)、センサ名 (XBee の ID)、データ名 (入力信号名)、データ値 (計測温度値)、時刻とした。

収集したデータの蓄積を行うためのクラウド上のサーバとしては、企業等で導入しやすいクラウドサービスを活用することも目的として、①アマゾン ウェブ サービス ジャパン株式会社の AWS (Amazon Web Services) を利用したサーバ、②マイクロソフト社の Azure^[11] を利用したサーバの 2 つの商用クラウドサービスを用いた。

サーバユニット上で XBee からのデータ読み込みおよびクラウド上のサーバへの通信を行うプログラムは、Linux (Raspbian) 上で動作する python により記述しており、ライブラリとして、XBee からの通信については標準の XBee ライブラリを、クラウドへの通信は urllib2^[12] および Azure SDK をそれぞれ使用した。クラウドサーバへの通信プロトコルとしては、汎用性が高い HTTP (Hypertext Transfer Protocol) と軽量の通信プロトコルである MQTT (MQ Telemetry Transport) を使用した。

試験に用いた試作システムの構成を図 5 に示す。

クラウドサーバでは送信される計測データをデータベースに格納するために、図 6 に示すように Microsoft Azure の複数の機能を組み合わせてシステムを構築している。具体的には、マイクロソフト社の Azure にお

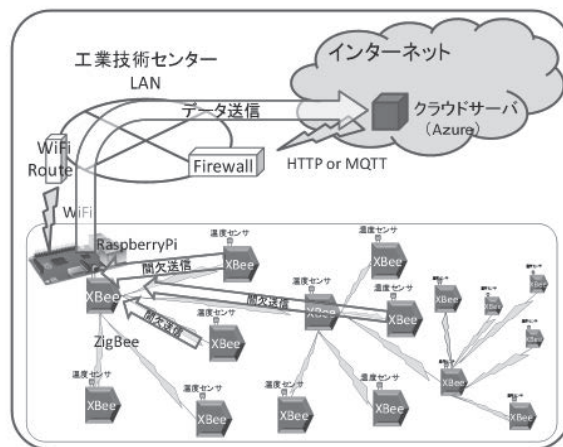


図5 試作システムおよびクラウドサービスの利用

ける IoT Hub、Stream Analytics、SQL Database の機能を組合せて用いた。それぞれの機能を以下に示す。

- IoT Hub：登録済みデバイスからのメッセージを受信し、キューに保存する
- Stream Analytics：IoT Hub からのデータストリームを取り込み、その中から必要な項目を抜き出し、型を指定して SQL Database へ出力する
- SQL Database：クラウド上のリレーショナルデータベース サービスへデータを格納する

IoT Hub はサーバユニットとクラウドサービスとの間でセキュリティで保護された信頼性がある双方向通信を実現するものであり、サーバユニットから Stream Analytics へのメッセージ送信に用いている。その通信内容は専用のプログラム DeviceExplorer を用いて監視することができる。その表示例を図 7 に、送信データの例を図 8 に示す。各データに時刻、デバイス名、センサ名、データ名、データ値が含まれていることが確認できる。

SQL Database に格納した大量のデータは Microsoft SQL Management Studio を用いて管理し、Microsoft が提供する対話型のデータ視覚化ツール表示 PowerBI を用いて表示した。

計測試験の解析例を図 9 に示す。センサユニットに接続した温度センサによるデータ収集とクラウドサーバへのデータ転送を安定的に実施できることを確認した。

3. 結 言

計測機能と通信機能を持つ無線通信ユニット XBee を用いてセンサユニットを試作し、センサユニットを相互に多数接続することによりセンサネットワークを構築した。また、Linux が動作する組込みシステム RaspberryPi を用いてデータ収集とクラウド上のサーバ

へ通信を行うサーバユニットを試作し、これを用いてセンサユニットから送信されるデータを計測してクラウドサーバへの送信試験を行った。

その結果、データ計測およびクラウドサーバへの送信を安定して実施することができるシステムを構築した。しかし、センサ数の増加、計測間隔の短縮に伴う通信量の増加により、サーバユニットの処理能力およびクラウド上のサーバへの転送速度の制約が生じることが確認された。推測される影響は、センサユニットが増加するに伴い、通信の衝突によるデータの欠測が発生すること、サーバの処理能力およびクラウドへの転送速度が不足することである。

また、計測条件によりエンドデバイスおよびルータの電源の確保が必要となるので、今後は産業技術総合研究所等との共同研究により継続して実証試験を行うとともに、県内企業への技術移転を進めていく。

さらに、サーバユニットの RaspberryPi から無線ルータへの接続が途切れるという問題も確認された。これは、XBee 間の通信と WiFi 通信が同じ 2.4GHz 帯を使

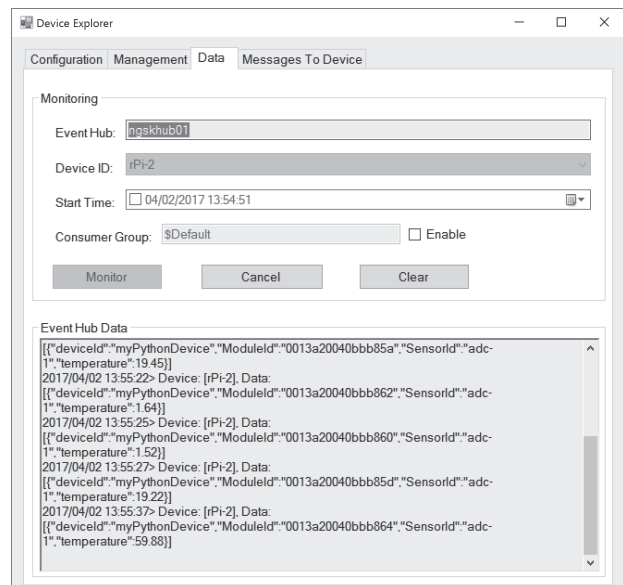


図 7 DeviceExplorer の表示例



図 8 IoT Hub への送信データ例

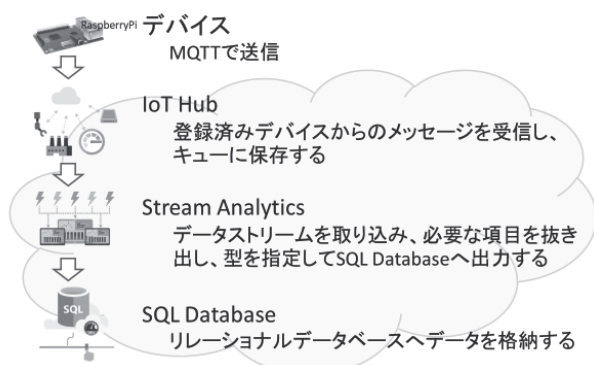


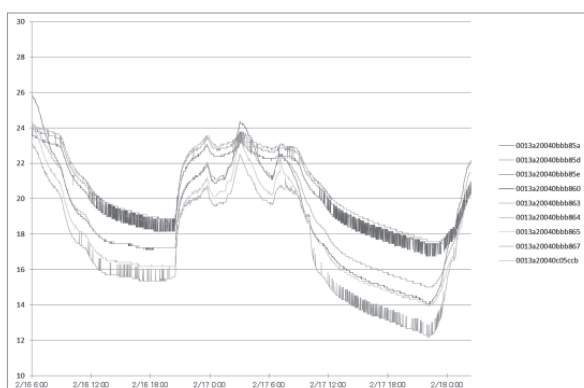
図 6 クラウドサーバのシステム構成

用しているためと推測され、サーバユニットと無線ルータの間の通信に 5GHz の無線 LAN あるいは有線 LAN を使用することとした。

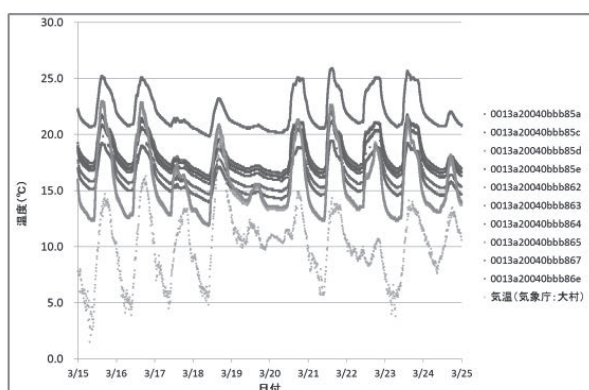
なお、センサユニットからの計測データ送信は定期的かつ非同期に行っているため、センサユニットの数の増加に伴って通信の衝突の確率が徐々に増加する。対策としては、通信の間隔を伸ばすことにより通信の衝突の確率を低減すること、通信間隔をセンサユニットごとにわずかに変えて通信の衝突を継続させないこと等が考えられる。ただし、XBee のように通信の再送機能を実装していないデバイスを用いる場合は、ある程度の欠測を見込んだシステム設計が必要である。

参考文献

- [1] 藤本和貴, 長崎県工業技術センター研究報告, No.45, 33-35 (2016).
- [2] 経済産業省「2016 年版ものづくり白書」
- [3] デイジインターナショナル : <http://www.digi-intl.co.jp/>, Accessed 2016.
- [4] XBee : <http://www.digi-intl.co.jp/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module.html>, Accessed 2016.
- [5] Raspberrypi : <https://www.raspberrypi.org/>, Accessed 2016.
- [6] ZigBee : <http://www.zigbee.org/>, Accessed 2016.
- [7] <https://pypi.python.org/pypi/XBee/2.1.0>, Accessed 2016.
- [8] <https://github.com/attie/libxbee3>, Accessed 2016.
- [9] <https://skydisc.jp/>, Accessed 2016.
- [10] AWS Kinesis : <https://aws.amazon.com/jp/kinesis/>, Accessed 2016.
- [11] Microsoft Azure : <https://azure.microsoft.com/ja-jp/>, Accessed 2016.
- [12] urllib2 : <http://docs.python.jp/2/library/urllib2.html>, Accessed 2016.



(a) 短期



(b) 長期

図9 計測試験の解析例

精密プレス加工の高精度化に関する研究開発

工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
工業材料科 主任研究員	福 田 洋 平
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹	田 口 勝 身
所 長	馬 場 恒 明

長崎県内の金属加工業では、環境問題等を考慮したプレス加工に関する要求が高まっている。また、プレス金型の高機能化、長寿命化と品質安定化が課題である。そこで、環境に優しい金型における油剤の脱脂技術の確立、金型の長寿命化、最適なプレス加工技術の確立を目的として、平成28年度は油剤、グリースの脱脂実験を行い、脱脂液等の比較検討を行った。さらに金型材へのDLC膜コーティング、780MPa級高張力鋼板の深絞り加工について検討した。

1. 緒 言

金属プレス加工技術における主な川下製造業者等の産業分野としては、自動車、情報家電、ロボット等が挙げられる。金属プレス加工技術において、環境配慮、小型化・軽量化や金型の長寿命化への対応は、金属プレス加工技術の高度化及び環境配慮の観点から重要な課題である。

県内企業において、プレス機械等の進歩により、プレス加工技術の高度化が進んでいる。しかし、金型寿命が短く、非効率的な加工作業となっている。また、プレス油剤の使用による作業環境の悪化、金型における油剤の除去が課題である。油剤等の脱脂技術については洗浄剤^{[1]-[4]}の開発が多い。

金型における油剤の環境に優しい脱脂技術の確立、金型の長寿命化、最適なプレス加工技術の確立を目的として、平成28年度は油剤、グリースの除去する脱脂実験、脱脂液等の比較検討を行った。さらに金型材へのDLC膜コーティング、780MPa級高張力鋼板の深絞り加工実験を行った。

2. 実験方法

2.1 油剤、グリースの脱脂実験

脱脂実験では、浸漬方法、ミスト方法を行った。ミスト装置は、扶桑精機製（e-ミスト）、明治機械製作所製（スプレーガン）を用いた。浸漬方法は、油剤及びグリースが付着した試料を3分間浸漬し、脱脂乾燥した後、目視観察を行った。ミスト方法は油剤及びグリース（0.2g）が塗布した試料を3分間噴霧し、脱脂乾燥した後、目視観察を行った。扶桑精機製の噴霧量

は、20ml/分、明治機械製作所製の噴霧量は、60ml/分である。実験で使用した脱脂液は、市販の脱脂液、エーテル類、アルコール類、界面活性剤液、発泡液である。油剤、グリースを塗布した試料は、炭素鋼で形状は直径30mm×長さ10mmである。

2.2 金型材へのDLC膜コーティング

材質SKD11の金型およびシリコンウエハ基材に対し、プラズマソースイオン注入装置を用いてDLC膜をコーティングした。膜厚は約1μmである。図1は、DLCコーティング装置である。

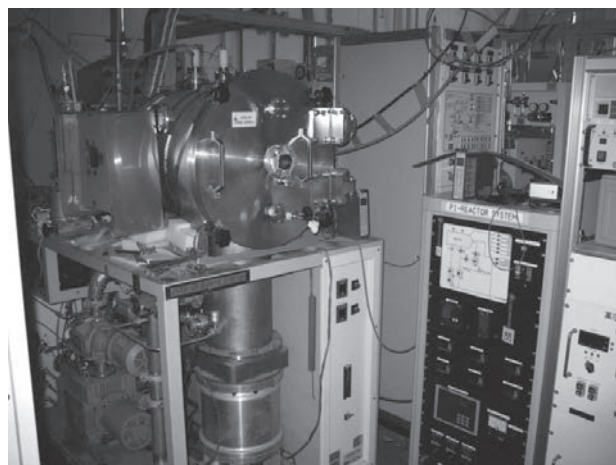


図1 DLCコーティング装置

2.3 780MPa級高張力鋼板の深絞り加工実験

加工実験にはアイダエンジニアリング(株)製のサーボプレス（NC1-800）を使用した。ブランク寸法は、直径55mm、板厚1.0mmである。図2は、サーボプレス

(NC1-800) (平成25年度電源立地地域対策交付金事業)である。

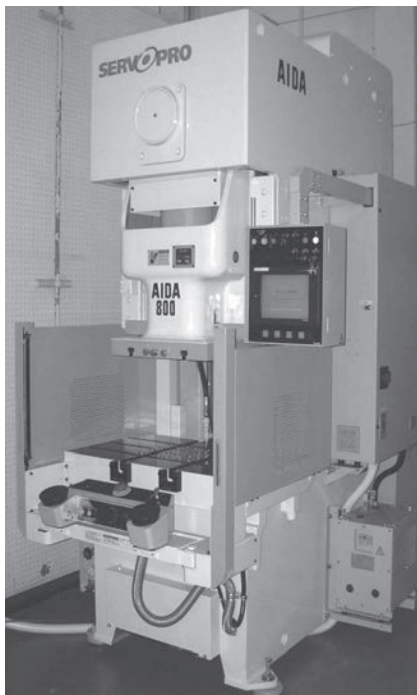


図2 サーボプレス

780MPa 級高張力鋼板の深絞り加工の予備実験において、①～③の課題があった。以下に記述する。

①再絞りによる板厚減少

1工程におけるパンチ R 部の板厚が減少した。

②3工程での縁部の割れ

3工程目、下死点手前約10mmで縁部の割れが発生した。図3は、3工程での縁部の割れを示す図である。



図3 3工程での縁部の割れ

③3工程以降の縦割れ

3工程以降において、縁部の縦割れが発生した。図4は縁部の縦割れが発生した図である。

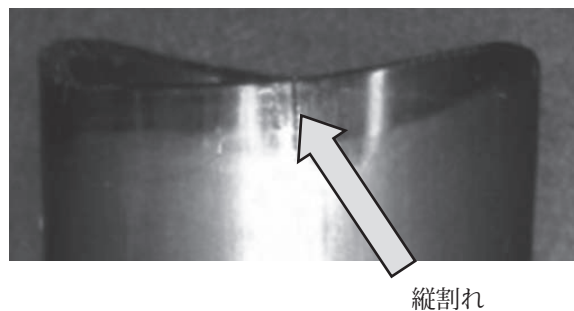


図4 縦割れ

①の課題において、絞り加工後のワークの板厚に影響を及ぼすパンチのクリアランス及びR半径は、塑性加工シミュレーションシステム「DEFORM」による解析を実施し、板厚の減少を抑制することが可能な図5に示すテーパ形状パンチとした。



図5 テーパ形状パンチ

②の課題において、工程の進行によって生じるワーク縁部の割れについては、ダイの入り口に図6に示す「広がり抑え」を設けることで抑制することとした。

③の課題において、クリアランスの最適化を図り、しごきによる縁部の残留応力除去について検討した。

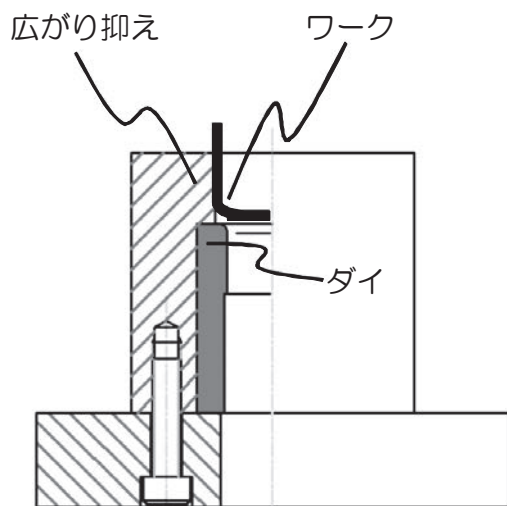


図6 広がり抑え構造

3. 実験結果

3.1 油剤の脱脂実験

油剤の脱脂実験の結果は表1に示す。表中の○印は油剤が付着していない場合、△印は一部油剤が付着している場合を示す。表中の浸漬は、浸漬方法による脱脂方法、ミストAは扶桑精機製装置によるミストの脱脂方法、ミストBは明治機械製作所製によるミストの脱脂方法である。

表より市販の脱脂液は、ミスト方法よりも浸漬方法が良好な脱脂の結果となった。界面活性剤液、発泡液は浸漬方法よりもミストA、ミストBの方法が良好な脱脂の結果となった。脱脂液は揮発性が高いため、ミスト方法による脱脂が有効でないことが推察される。

表1 油剤の脱脂実験結果

溶液	浸漬	ミストA	ミストB
脱脂液	○	△	△
エーテル類	△	△	○
アルコール類	△	△	○
界面活性剤液	△	○	○
発泡液	△	○	○

3.2 グリースの脱脂実験

グリースの脱脂実験の結果は表2に示す。表中の○印はグリースが付着していない場合、△印は一部グリースが付着している場合、×印はグリースが除去できない場合を示す。表中の浸漬は、浸漬方法による脱脂方法、ミストAは扶桑精機製装置によるミストの脱脂方法、ミストBは明治機械製作所製によるミストの脱脂方法である。

表2 グリースの脱脂実験結果

溶液	浸漬	ミストA	ミストB
脱脂液	×	△	△
エーテル類	△	×	○
アルコール類	×	×	×
界面活性剤液	×	○	△
発泡液	×	○	×

表より市販の脱脂液、エーテル類、アルコール類、界面活性剤液、発泡液は、浸漬方法において、グリースの脱脂効果が小さい結果となった。界面活性剤液及び発泡液の脱脂実験はミストAの方法が最も良好な結果となった。市販の脱脂液は揮発性が高いため、ミスト方法による脱脂効果が有効でないことが推察される。

グリースの脱脂実験後、純水の接触角を測定した。表3は、脱脂実験後、純水の接触角を測定した結果を示す。表中の浸漬は、浸漬方法による脱脂方法、ミストAは扶桑精機製装置によるミストの脱脂方法、ミストBは明治機械製作所製によるミストの脱脂方法である。

表3 脱脂実験後の純水の接触角

溶液	浸漬	ミストA	ミストB
脱脂液	85.7°	61.4°	63.7°
エーテル類	71.3°	81.0°	56.2°
アルコール類	86.3°	85.3°	85.0°
界面活性剤液	83.6°	51.8°	64.7°
発泡液	88.8°	51.3°	80.8°

接触角の基板は、炭素鋼で形状は直径30mm×長さ10mmである。なお、予備実験の結果、エタノールで超音波洗浄した試料（炭素鋼）を基板として、純水の接触角は51.0°であった。また、エタノールで超音波洗浄後、グリース（0.2g）が塗布した試料（炭素鋼）における純水の接触角は85.8°であった。

脱脂実験後、水洗し、乾燥した状態で純水の接触角を測定した。

浸漬方法において、エーテル類以外は、接触角が85°以上の値であり、予備実験でのグリースを試料に塗布した接触角と同程度であった。ミスト方法において、ミストAによる界面活性剤液、発泡液の接触角は、約51°であり、グリースを試料に塗布していない状態での純水の接触角と同程度であった。界面活性剤液、発泡液で脱脂した場合、グリースが除去された表面に

なり、ミスト A による界面活性剤液、発泡液の脱脂方法が最も良好な結果が得られた。グリースの脱脂において、界面活性剤液、発泡液のミスト A（扶桑精機製装置によるミストの脱脂方法）の方法は、有効であると考えられる。

3.3 DLC 膜コーティング

シリコンウエハにコーティングした DLC 膜の押込み硬度を測定した結果、14.65 GPa であり、通常の硬度であった。また、ISO26443 のロックウェル圧痕評価基準で class1 の高い密着強度が得られていることがわかった。金型に対しては、立体物形状へのつきまわりは良好であった。

図 7 は、DLC 膜をコーティングしたプレス金型である。



図 7 DLC 膜をコーティングしたプレス金型

3.4 780MPa 級高張力鋼板の深絞り加工結果

テーパ形状パンチと「広がり抑え」を設けたダイを用いて、クリアランスの最適化及びしごきによる縁部の残留応力除去によって、縁部に割れなどを生じることなく、5 工程で 62mm のワーク長を得ることができた。図 8 に各工程におけるワークの写真を、表 4 に各工程におけるワーク長を示す。



図 8 各工程におけるワーク写真

表 4 各工程におけるワーク長

工程	1	2	3	4	5
ワーク長 (mm)	23	32	46	53	62

4. 結 言

市販の脱脂液、エーテル類、アルコール類、界面活性剤液、発泡液における油剤、グリースの脱脂実験を行い、目視観察、グリースの脱脂後における純水の接触角測定を行った。金型材への DLC 膜コーティングの押込み硬度を測定した。780MPa 級高張力鋼板の深絞り加工実験を行った。

その結果は、以下のとおりである。

- (1) 油剤の脱脂実験において、界面活性剤液、発泡液は浸漬方法よりも扶桑精機製装置によるミストの脱脂方法及び明治機械製作所製によるミストの脱脂方法が良好な脱脂の結果となった。
- (2) グリースの脱脂実験において、界面活性剤液、発泡液で脱脂した場合、グリースが除去された表面となり、扶桑精機製装置による界面活性剤液、発泡液のミストの脱脂方法が最も良好な結果が得られた。
扶桑精機製装置のミストによる脱脂後の接触角は、グリースを試料に塗布していない状態での純水の接触角と同程度であった。
- (3) SKD11 の金型に対して、硬度約 15GPa の DLC 膜が密着性良くコーティングでき、立体物へのつきまわりも良好であった。
- (4) 780MPa 級高張力鋼板に対して深絞り加工実験を行い、5 工程で 62mm のワーク長に加工することができた。

参考文献

- [1] 特開平 06-330361 号公報, 1994.
- [2] 特開平 10-046197 号公報, 1998.
- [3] 特開 2000-119693 号公報, 2000.
- [4] 特開 2010-285626 号公報, 2010.

熱間鍛造用金型の製作技術の構築

工業材料科 主任研究員 福 田 洋 平
所 長 馬 場 恒 明

金型を使用している県内企業の多くは金型の設計・製作を県外への外注に頼っており、金型に関するノウハウの蓄積が少なく、現場で起こる様々な課題に対して改善が進まない状況にある。また近年、金型を用いて量産加工を行う自動車産業関連の誘致企業が増えており、それら企業からも県内金型技術の高度化が求められている。

本研究では、本県のコ型技術のボトムアップを図るため、熱間鍛造用金型の①熱処理、②切削加工、③表面処理および④塑性加工解析に関する基礎技術の構築に取り組んだ。

1. 緒 言

本県の産業は、造船やプラントといった大型・単品物の製造が多くを占めており、大型製品向けの溶接や機械加工に関する特徴的な技術の集積がある。しかし、その一方で大量生産に必要な技術の集積は少なく、例えば、自動車産業関連の製造を行う県内の事業所の多くは県外からの誘致企業となっている。

大量生産に必要な技術の一つとして金型の製作技術が挙げられるが、都道府県別の金型製造企業の本社所在地ランキング^[1]において、長崎県は沖縄県に次いでワースト2位となっており、金型に関する技術の集積が少ないことが窺える。そのような状況の中、金型を使用している県内企業の多くは金型の設計・製作を県外への外注に頼っており、現場で起こる様々な課題に対して改善が進まない状況にある。また近年、自動車産業関連の誘致企業からも県内金型技術のボトムアップが求められている。

そこで本研究では、県内ボルトメーカーが使用している熱間鍛造用金型（JIS 規格 :SKD61 相当品）にターゲットを絞り、①熱処理、②切削加工、③表面処理および④塑性加工解析に関する基礎技術の構築を図り、金型の内製化実現に取り組んだ。

2. 熱処理

工具鋼の焼入れは、脱炭防止および光輝性維持の観点から真空熱処理炉もしくはソルトバスを用いた処理が主流である。しかし、いずれの装置も導入コストが高く、熱処理の専門業者でなければ導入メリットを得ることは難しい。そこで、本研究では低頻度の使用でも導入メリットを得ることができるよう、導入コストが安い小型のマッフル炉を用いて熱処理を行った。

2.1 熱処理条件

マッフル炉の使用による最も大きな懸念は脱炭による表面硬度の低下である。そこで、①大気雰囲気、②窒素ガス流通下、③アルゴンガス流通下および④脱炭防止剤を塗付した4条件で焼入れを行い、各条件における表面硬度の低下を評価した。図1は使用したマッフル炉の写真である。ワークは日立金属(株)のDAC3（SKD61 相当品）とし、サイズはφ50mm×30mmとした。熱処理の条件を図2に示す。雰囲気ガスの流入量は5L/h、脱炭防止剤は(株)ダイケミ製のシープロ202を使用した。



図1 マッフル炉

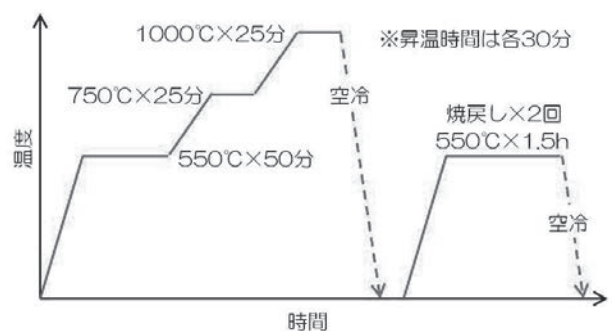


図2 熱処理条件

2.2 熱処理結果

硬度の評価には工具鋼の硬度測定で一般的に使用されるロックウェル硬度計を用いた。硬度の測定結果を図3に示す。ワーク端面を測定面とし、測定結果は4点を測定した平均値である。研削加工により端面を除去していくことで、深さ方向の硬度データを取得した。測定結果を図3に示す。

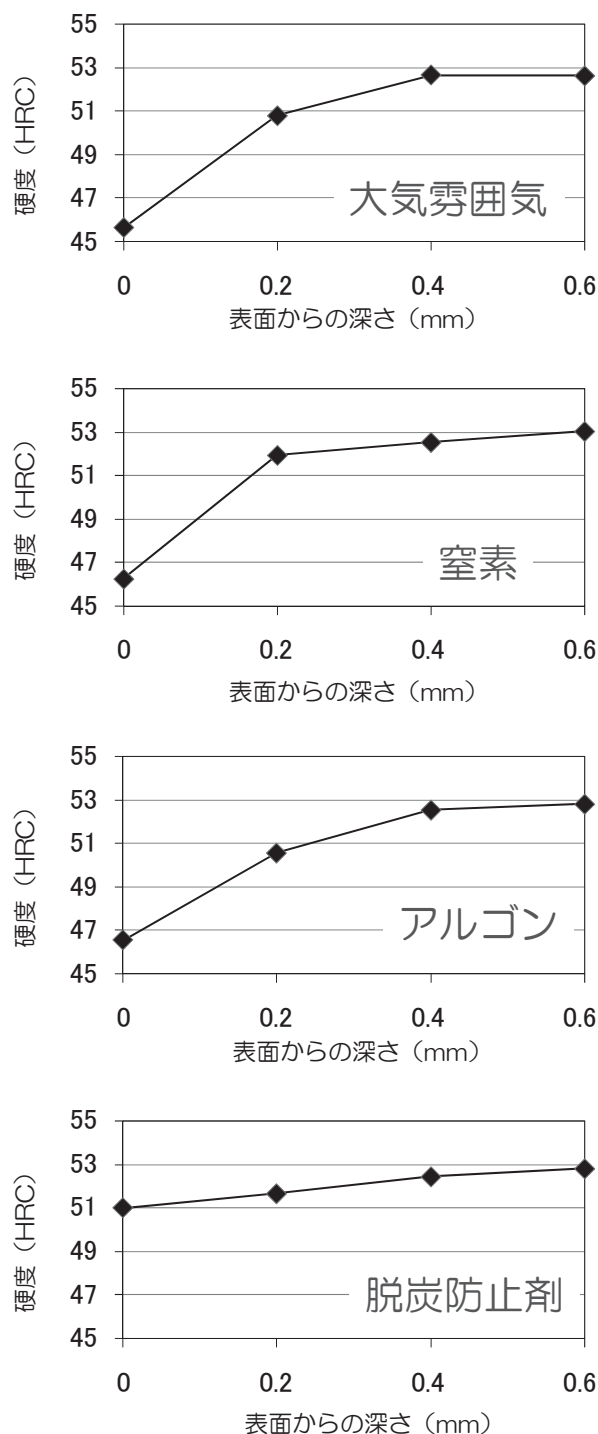


図3 表面硬度の測定結果

測定の結果、大気雰囲気では表面から0.4mmまで脱炭による硬度の低下が確認された。窒素ガス流通下およびアルゴンガス流通下においては、大気雰囲気との大きな差が見られなかった。これは、使用したマッフル炉が十分な気密性を持たず、ガス雰囲気を保つことができないためだと考えられる。脱炭防止剤を塗布した場合、表面硬度はHRC50以上となり、脱炭による表面硬度の低下を抑えることができた。

3. 切削加工

金属材料の加工に用いられる工具鋼は非常に硬く、その切削加工においては、一般的な構造用鋼を加工する場合と異なるノウハウが必要となる。そこで、本研究では熱間鍛造用金型の製作に必要な切削加工ノウハウを蓄積するため、工具鋼のターニング加工実験およびミーリング加工実験を行った。

3.1 CBN工具によるターニング加工実験

CBN（立方晶窒化ホウ素）とは、ダイヤモンドに次ぐ硬度を持つ物質であり、熱に強く、鉄との親和性が低いため工具鋼の切削加工に使用される工具材種である。

工具鋼のターニング加工におけるCBN工具の工具寿命に関するデータを取得するため、3種のCBN工具を用いた切削実験を行った。

実験条件を表1に、実験結果を図4に示す。

実験の結果、最も寿命の長い工具は耐摩耗性重視のBN1000であった。定常摩耗の進行が非常に緩やかで、切削距離16km時点においても逃げ面摩耗幅は110 μ mに抑えられていた。そのためワークの大きさ次第では、熱処理後に荒加工と仕上げ加工を一貫して行うことも十分に可能である。ただし、熱処理後の肌面等の切削時にはチッピングが発生しやすく、前工程の管理が必要となる。

表1 実験条件（ターニング加工）

ワーク	DAC3 (53HRC)
工具	住友電工ハードメタル(株) ノンコートCBN焼結体チップ ・BN1000（耐摩耗重視） ・BN2000（耐欠損重視） コーテッドCBN焼結体チップ ・BNC160
切削速度	150m/min
送り速度	0.1mm/rev
切込み	0.2mm
潤滑	水溶性クーラント

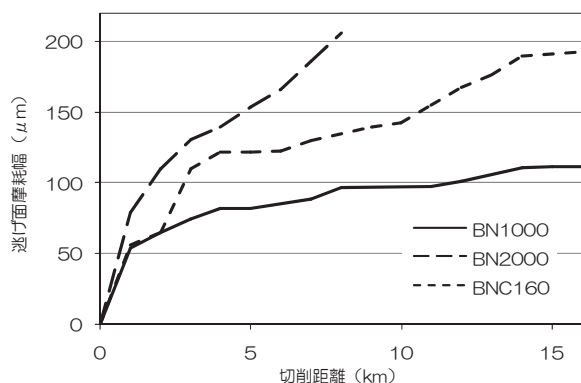


図4 ターニング加工における逃げ面摩耗の進行

3.2 5軸加工によるミーリング加工実験

切削工具向けのコーティング技術の進歩により、放電加工や研削加工によらないコートテッド超硬工具を用いた工具鋼の直彫り加工が浸透してきている。金型は自由曲面を持つ場合が多く、切削加工にはボールエンドミルが使用される。しかし、ボールエンドミル切削は、工具軸と加工面の傾きによって切削に寄与する切れ刃の位置が変化し、実切削条件も変わってしまう。

そこで、4種の2枚刃ボールエンドミルを用いて、工具軸を加工面に対して直角にした場合と、45°傾斜させた場合における切削実験を行った。

実験条件を表2に、工具傾斜0°の実験結果を図5に、工具傾斜45°の実験結果を図6に示す。

工具傾斜0°の場合、いずれの工具も240分におよぶ長時間の加工であったがチッピング等を生じることなく安定的に加工することができた。また最大逃げ面摩耗幅は、工具④が最も狭く良好な結果となった。

一方、工具傾斜45°の場合、いずれの工具も切れ刃に欠損が生じ、欠損に至るまでの切削時間には最大で6倍の差が表れた。これは、工具傾斜0°に比べて切れ刃の実切削速度が速くなったことにより、コーティングの性能が顕著に表れたためと考えられる。工具寿命が最も長かった工具②は、切削時間120分で欠損が確認されたが、切削時間100分まで切れ刃の顕著な摩耗は生じていなかった。そのため、切れ刃の欠損はコーティング層が摩耗し超硬合金の母材が露出したことで生じたと考えられる。

本加工実験により、工具鋼のボールエンドミル切削においては、工具軸と加工面は直角に近いほうが工具寿命の面で良いことが分かった。3軸制御加工機は工具軸が固定されており、工具軸と加工面の傾斜は加工面の形状により決まってしまう。一方、5軸制御加工

機は工具軸と加工面の傾斜を変更することが可能であり、工具寿命を延ばすうえで非常に有効なツールとなる。

表2 実験条件（ミーリング加工）

ワーク	DAC3 (53HRC)
工具	三菱マテリアル(株) ① MP2SB-R3 ② VF2SB-R3 日進工具(株) ③ MSBH230-R3 三菱日立ツール(株) ④ EPBT2060
主軸回転数	10000min ⁻¹
送り速度	2000mm/min (0.1mm/tooth)
軸方向切込み	0.2mm
径方向切込み	0.5mm
工具傾斜	0°, 45° (送り方向に対して直角)
潤滑	MQL

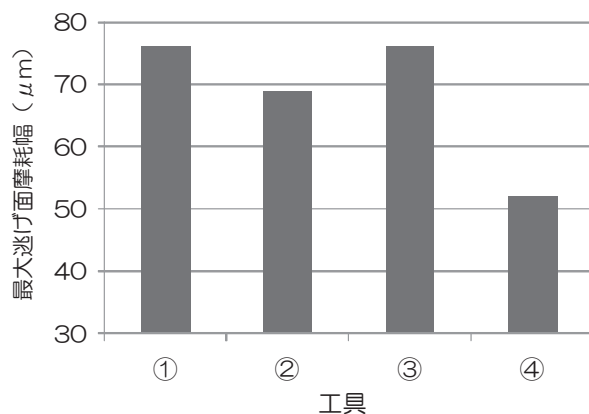


図5 最大逃げ面摩耗幅
(工具傾斜0°、切削時間240min)

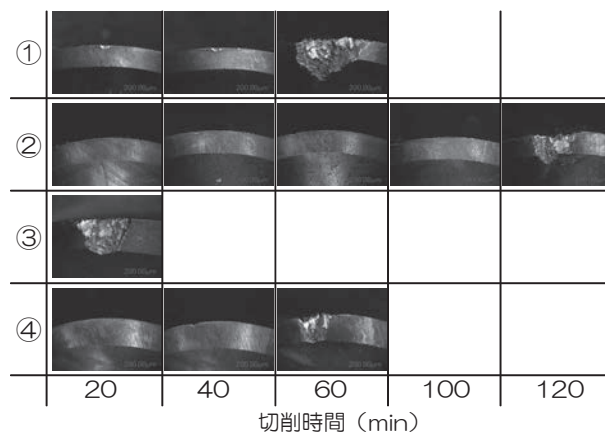


図6 切れ刃の状態（工具傾斜45°）

4. 表面処理

熱間鍛造金型には、高温強度、靱性、耐摩耗性および耐溶着性等が求められる。しかし、工具鋼において高温強度と靱性はトレードオフの関係にあるため、鋼種選定の最適化だけでは大幅な改善効果は期待できない。一方、表面処理の適用によって熱間鍛造用金型の性能を大幅に改善した事例は数多く報告されている。

そこで、六角穴付きボルトの六角穴を鍛造成形するパンチにラジカル窒化処理を施し、鍛造テストによってその効果を検証した。

4.1 ラジカル窒化処理

ワーク材種は山陽特殊製鋼の QD61 (SKD61 相当品) および QDH (SKD61 相当品改良鋼) とし、アンモニアと水素を作動ガスとした直流放電プラズマによって窒化処理を施した。図7にラジカル窒化の処理条件を、表3に窒化後のビッカース硬度測定結果を示す。

深さ方向における硬度分布を簡易的に把握するため、ビッカース硬度測定は HV10、HV5 および HV2 の3条件で実施した。なお、HV の後に続く数値は試験荷重を表し、数値が小さいほど表面近傍のみの硬度を評価することとなる。HV2 の測定結果より、表面から数十 μm の深さでは 1250HV と非常に高い硬度が得られていることが確認された。

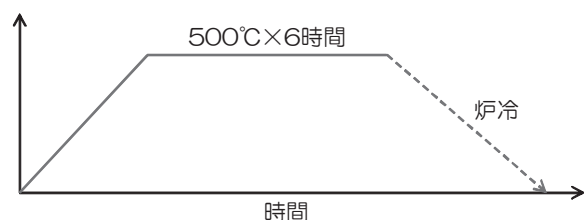


図7 窒化処理条件

表3 窒化後のビッカース硬度測定結果

	QD61	QDH	QD61(窒化)	QDH(窒化)
HV10	657	683	981	967
HV5	695	702	1088	1131
HV2	-	-	1258	1291

4.2 試作パンチによる鍛造テスト

フリクションプレスを用いて、試作したパンチの鍛造テストを行った。ワークは工具摩耗の進行が早く、凝着等のトラブルも生じやすい SUS304 とし、加熱温度は 1000℃ とした。①QD61、②QDH、③QD61+窒化、

および④QDH+窒化の4種のパンチを用いて加工を5ショット実施し、加工後のパンチを評価した。

加工後のパンチのエッジ部写真を図8に示す。また、非接触3次元測定装置(三鷹光器株式会社: NH-3N)を用いて測定したエッジ部のプロファイルデータを図9に示す。

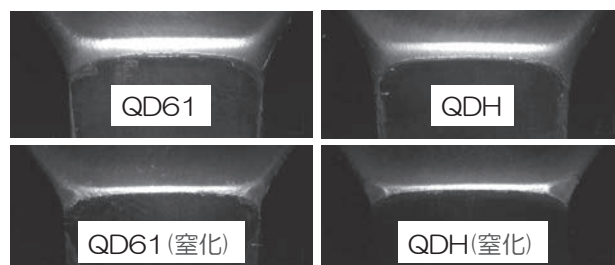


図8 加工後のパンチエッジ部

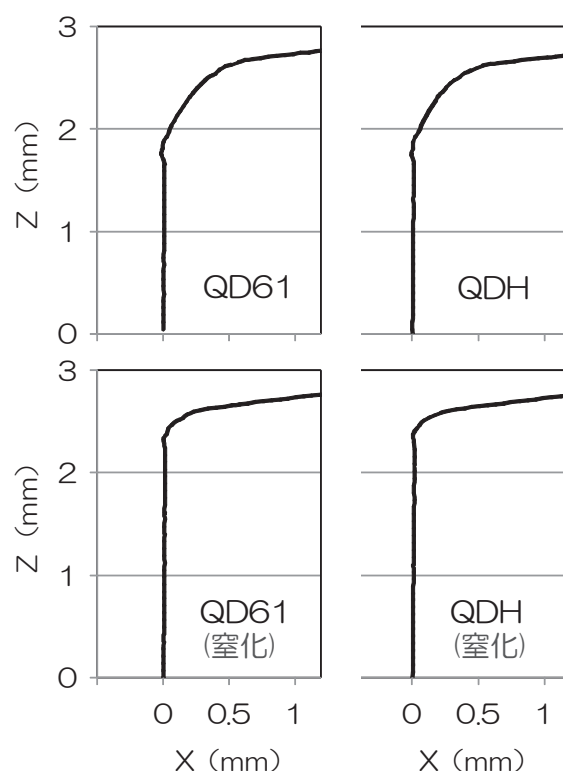


図9 エッジ部のプロファイル計測結果

プロファイルの計測結果において、未処理のパンチはエッジ部に大きなダレが生じている。一方、窒化処理を施したパンチは、エッジ部のダレが非常に小さく、窒化処理が工具寿命の改善に有効であることが確認された。

5. 塑性加工解析

パンチの負荷低減を目的として鍛造時のワーク温度を最適化するため、塑性加工解析シミュレーションシ

システム「DEFORM」による鍛造解析を実施した。解析条件を表4に、解析結果を図10および図11に示す。

表4 解析条件

収束法			
ソルバー 反復方法	共役勾配法		
	直接反復法		
オブジェクト			
ワーク	剛塑性体	SUS304	50000メッシュ
工具	剛体	SKD61	30000メッシュ
オブジェクト間関係			
せん断摩擦	0.3		
熱伝達係数	11 (kW/(m ² ・K))		
加工条件			
パンチ速度	100mm/sec		

図10より、ワーク温度の上昇に伴うワークの軟化によって、1000℃における成形荷重は700℃における成形荷重の約1/2となる。一方、ワーク温度上昇に伴うパンチの温度上昇によって、パンチの軟化が懸念されるが、図11に示す解析結果ではパンチ温度はワーク温度に比例して上昇することなく、ほぼ横ばいであった。そのため、ショット間にパンチを十分冷却できるのであれば、工具寿命はワーク温度が高温であるほうが延びると考えられる。

6. 結 言

本研究では、①熱処理、②切削加工、③表面処理および④塑性加工解析に関する基礎技術の構築を図り、下記の結果を得た。

- ・脱炭防止剤を塗布することで大気雰囲気化の熱処理でも HRC50 以上の表面硬度を得ることができた。
- ・SKD61 相当品のターニング加工において、CBN 工具を用いることによって切削距離 16km 時点における逃げ面摩耗幅を 110μm に抑えることができた。
- ・SKD61 相当品のミーリング加工において、工具軸と加工面は直角に近いほうが工具寿命の面で良いことが確認された。
- ・ワーク材種 SUS304 の鍛造加工において、窒化処理がパンチの工具寿命の改善に有効であることが確認された。
- ・塑性加工解析により、ショット間にパンチを十分冷却できるのであれば、工具寿命はワーク温度が高温であるほうが延びると考えられる。

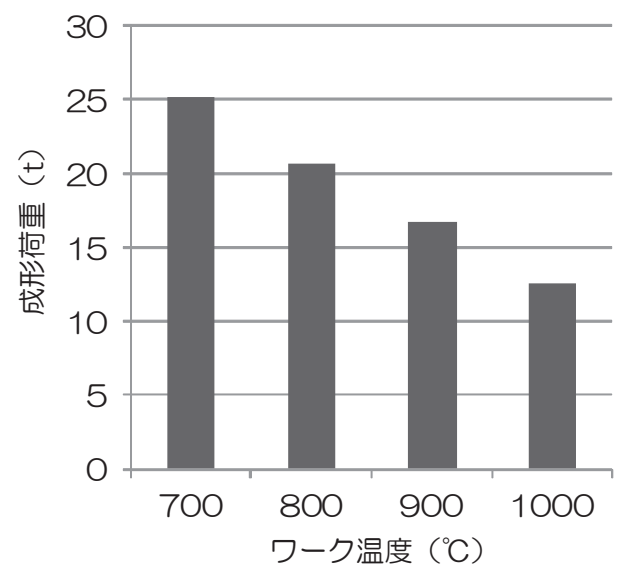


図10 ワーク温度が成形荷重に及ぼす影響

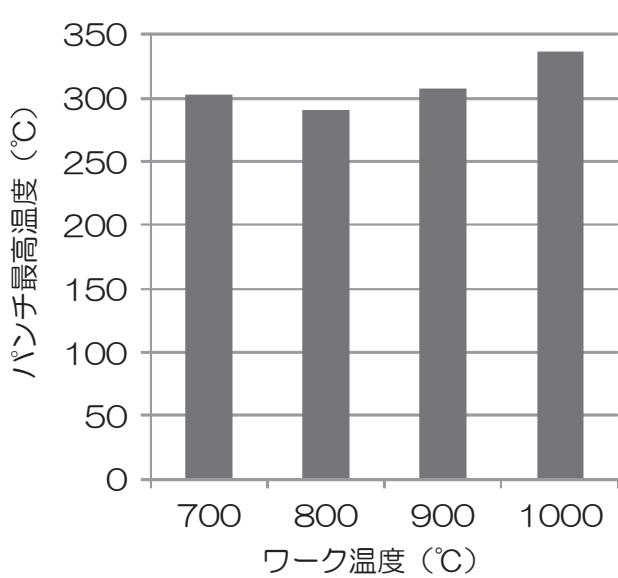


図11 ワーク温度がパンチ最高温度に及ぼす影響

参考文献

[1] 藤川健：大都市圏に立地する金型製造企業の技術的な競争(前編), 型技術, Vol.30 No.5, pp.87-89(2015).

連成統合シミュレーション技術の開発と普及支援（第2報）

工業材料科 専門研究員 重 光 保 博

本県ではその地勢的長所を生かした海洋関連工学・風潮力発電インフラ分野の振興が図られており、コンピューターシミュレーションによる構造解析・流体解析（CAE: Computer Aided Engineering）は重要な役割を果たすと期待される。本事業では、「連成解析システム」を導入・活用して地場 CAE 関連企業の技術支援を行い、あわせて最近注目されている高度な CAE 解析である連成シミュレーション技術開発を行う。以下、「連成解析システム」の概要および昨年度の活用事例である。

1. 緒 言

長崎県では海洋関連工学・再生可能エネルギー工学分野の発展が推進されており、CAE は関連インフラ設計や地理・気象解析へ貢献する先端的技術である。シミュレーション解析を受託ビジネスとする県内 CAE 関連企業は、県内の潜在 CAE マーケットにとどまらず、県外への積極的な展開を実現するため、従来の技術では解析困難な複雑事象を扱うことができる高度なシミュレーション技術を必要としている。

近年、人工知能や IoT 等の技術トレンドと並行してシミュレーション技術のモノづくりへの浸透が進み、シミュレーションは実験の検証にとどまらず、モノづくりを主導する役割を果たしつつある^{[1],[2]}。

平成 27 年に導入した CAE 統合ソフトウェア「ANSYS」^[3]は、従来の CAE 解析機能である構造解析・流体解析・電磁界解析機能を包括的に統合した代表的な CAE 解析ソフトウェアである（図 1 を参照）。ANSYS の特徴として、これらの独立事象解析だけでなく、それらが複雑に絡む事象に対する連成解析も実行することができる。本事業では、ANSYS を活用して地場 CAE 関連企業の技術支援を行い、最近注目されている高度な CAE 解析である連成シミュレーションの先端的技術開発を行う。

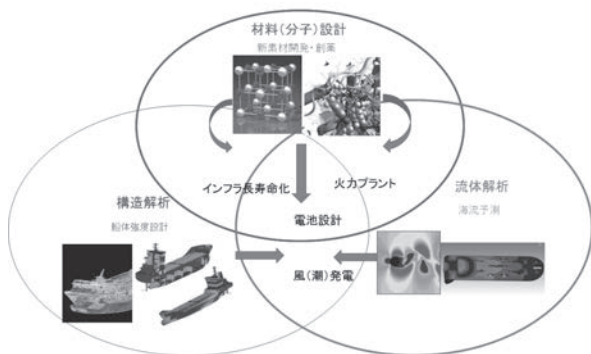


図 1 連成解析のイメージ図

2. 手法・結果・考察

2.1 長崎県工業技術センター「連成解析システム」

本システムは、ANSYS を中核とする統合 CAE シミュレーション装置である。ANSYS は広範な機能を有する CAE モジュール群から構成されており、それらを統一的に使用する GUI 環境「Workbench」を通じて多様な機能をシームレスに使用できる。CAE 解析にとどまらず、物理解析（構造解析、流体解析、電磁界解析）・機構解析（Rigid Body Dynamics）に対して実験計画最適化や設計最適化機能を加味した統合的システムシミュレーションに基づくマルチドメイン解析も可能である。

本システムは、ANSYS ソフトウェアとそれが稼働するハードウェア群（計算サーバー 1 台＋クライアントパソコン 3 台）から構成されている。最大で 16-CPU+GPGPU を用いて 1000 万メッシュ程度の大規模計算を実行可能である（図 2 と表 1 を参照）。

本システムは、平成 27 年度電源立地地域対策交付金（資源エネルギー庁）の支援を受けて導入した。



図 2 連成解析サーバー（VT server E5-2SG-V3）

2.2 統合 CAE ソフトウェア「ANSYS」の構造解析・流体解析

構造解析ソルバー「ANSYS Mechanical」は、構造解析に関する全般的機能を有している。応力・ひずみ解析に加えて、非線形・塑性領域の解析も可能である。FRP/CFRP といった複合材料に対しては、オプションモジュール「ANSYS Composite Prepost」による解析が可能である。

表 1 連成解析システムの構成

ソフトウェア : ANSYS Release 16.2
モデリング :
DesignModeller/Brademodeller
メッシャー : ANSYS Meshing/TurboGrid
ソルバー (構造) : Mechanical/Profes.NLT
ソルバー (流体) : CFD/CFD-Flo
ハードウェア :
サーバー VT server E5-2SG-V3
CPU : Xeon E5-2699 v3 (36 cores)
Main Memory : 256 GB
GPGPU : NVIDIA Tesla K 40
OS : RedHat Linux release 6.6
クライアント Dell Precision T1700

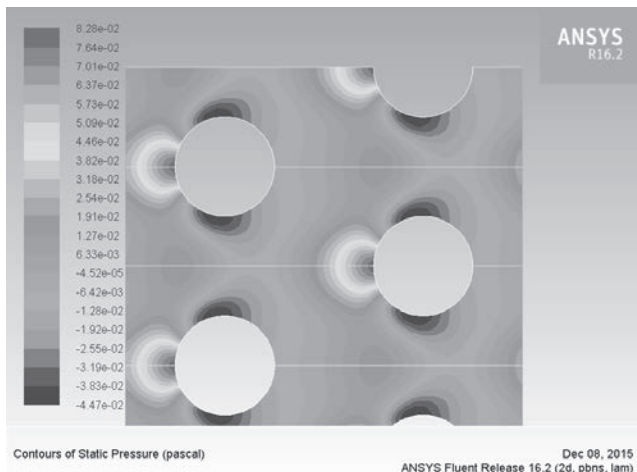


図 3 流体解析例

流体解析については、定評がある Fluent モジュールを包含した「ANSYS CFD」を用いた種々の乱流モデル解析が可能である。ターボ機械のような回転複雑形

状に特化したモデラ「Blademodeller」、メッシャー「TurboGrid」による効率的なモデリング・メッシングが可能である (図 3 を参照)。

2.3 ANSYS の高度な機能：連成解析

マクロ構造体と流体の連成解析は、「ANSYS CFX」を用いて効率的に実行可能である。その際、双方の影響を非回帰的 (1-way) / 回帰的 (2-way) に考慮して求解することができる (図 4 を参照)。

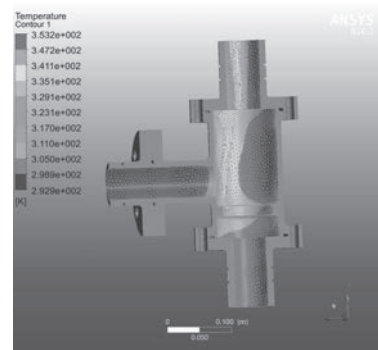


図 4 連成解析の例：1way-FS1 + 2way-FSI

2.4 活用事例：アスピレーターの流体挙動解析

アスピレーターは、ベンチュリー効果に基づいて流体の流れを利用して減圧部位を作り出す比較的小型の装置で、小規模な化学実験室等や医療用途に用いられる。動物組織の体液交換や医療用途でのポンプ代替品としてのアスピレーター活用を考え、アスピレーターの吸引中枢部分に対して流体解析を行い減圧効果を予測した (図 5)。動物組織のモデルとして液体で満たされたバルーンを仮想的に設定し (図 6)、水流変化に対する減圧効果を算出した (図 7, 8)。

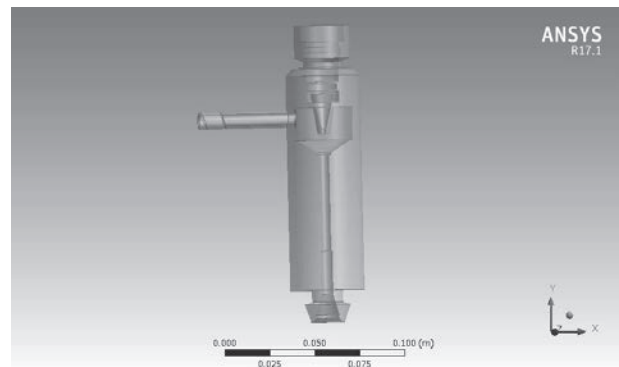


図 5 アスピレーターの減圧部

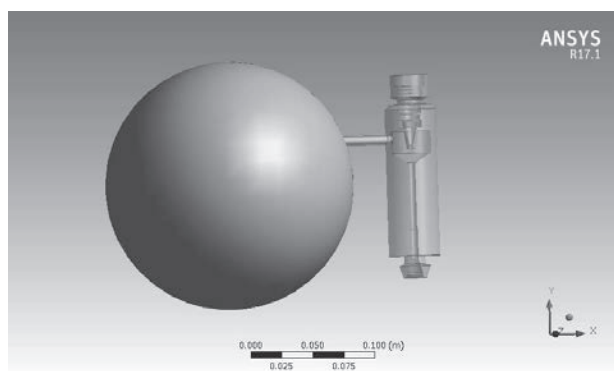


図6 付加したバルーンモデル

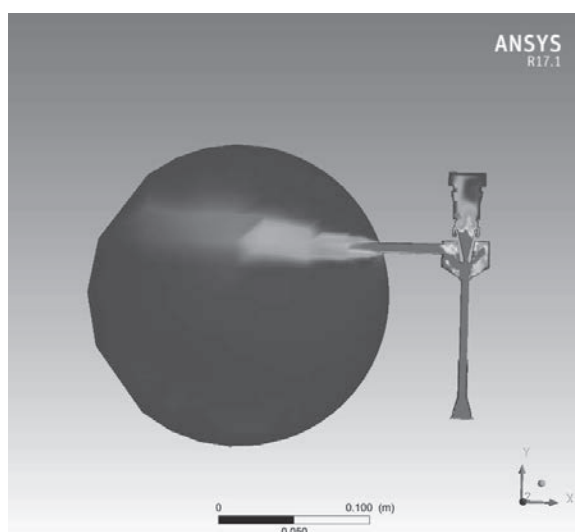


図7 減圧効果の解析 1

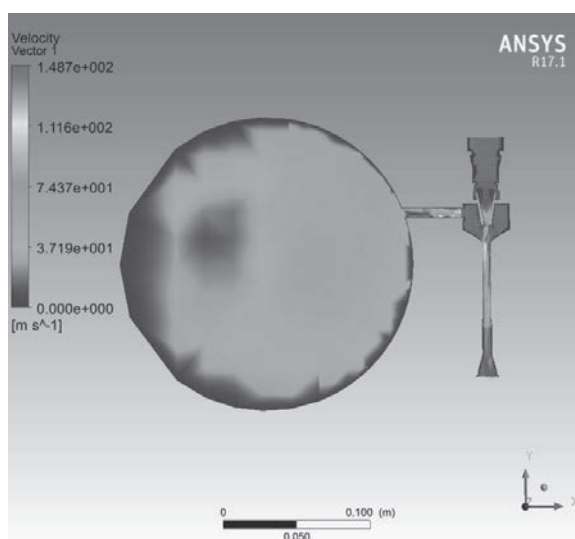


図8 減圧効果の解析 2

3. 結 言

従来の CAE 技術は、マクロ構造体・流体・分子材料が別々の解析ドメインとして独立して解析されてきた。そのため、構造力学・流体力学・化学が複雑にからむ現象、たとえば風潮流発電・化学プラント・触媒・リチウム電池といった事象をシミュレーションすることは困難であった。近年、物理支配方程式が異なる 3 つの事象を連成して解く技術が急速に発展しており、次世代の CAE 技術はマルチフィジックスシミュレーションが主流になると予測される。本県においても、このような技術的潮流を視野に入れた先端機器整備・スキルアップが望まれる。

過去に実施した材料化学シミュレーション研究で得られた知見を活かし^{[4][5][6][7]}、先端的な CAE 技術へと展開するため、県内学術機関・IT ベンチャー企業等との連携を進める。並行して、講習会・セミナー・共同技術開発等を通じて、連成シミュレーション技術の県内企業への普及を進めてゆく。

謝 辞

アスピレーターの流体 - 構造連成解析を実行するにあたり、モデリングおよび実測データをご提供いただいた株式会社コムテック様に感謝いたします。

参考文献

- [1] 元橋 一之 “インダストリ 4.0 に対して日本企業はどう対応するか？” CIAJ JOURNAL, No.2 pp.4 (2016).
- [2] 2013 年版ものづくり白書 (経済産業省 製造産業局ものづくり政策審議室) (2014).
- [3] ANSYS® Release 16.2 (ANSYS, Inc.).
- [4] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、No.32, 57-61 (2003).
- [5] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、No.42, 23-25 (2013).
- [6] Y.Shigemitsu, T.Mutai, H.Houjou and Koji Araki, Phys.Chem.Chem.Phys. 16 (28) 14388 (2014).
- [7] Y.Shigemitsu, Int.J.Quant.Chem. 113(4), 574 (2013).

耐熱性高分子の機能化とフィルム材料への応用

工業材料科 主任研究員 市 瀬 英 明

プラスチックフィルムは、プリンタブル・エレクトロニクス分野において、有望な材料として期待されている。しかし、接着、またはコーティングされる相手材料（主に金属）との熱膨張率の違いから、接合面における剥離や製品の変形が問題になっている。このようなことから、プラスチックフィルムには「高耐熱・低熱膨張性」と「可とう性」（柔軟で良好な折り曲げ特性）の両立が求められている。本研究では、このような業界要望に即したプラスチックフィルム資材を開発する。最終的に、県内企業と共同でフレキシブル銅張積層板などを試作し、密着試験等の実証評価を行う。本年度はポリイミド樹脂に複合するポリベンゾオキサジン合成した。またポリベンゾオキサジンとポリイミド樹脂を複合化し、その複合効果を検証した。その結果、芳香族系ポリベンゾオキサジンにおいて、前駆体をオリゴマーにすることで、単独でのフィルム化が可能であり、かつ耐熱性と可とう性を両立することがわかった。また、ポリイミド樹脂にポリベンゾオキサジンを複合化することにより、耐熱性改善に効果が高いことがわかった。

1. 緒 言

ポリイミド樹脂は、卓越した耐熱性、耐薬品性に加えて優れた機械強度、電気特性を有するため、エレクトロニクス、各種産業用機械、航空宇宙などの分野において高性能部材として広範に用いられている。とくに、ポリイミド樹脂は前駆体のポリアミド酸が有機溶剤に高濃度で溶解し、容易にフィルム化が可能であることから、高性能膜材料、フィルム材料として活用されている^{[1][2]}。近年は特に、プリンタブル・エレクトロニクス分野において期待が高まっている。しかし、接着、またはコーティングされる相手材料（主に金属）との熱膨張率の違いから、接合面における剥離や製品の変形が課題になっている。また、エポキシ樹脂、アクリル樹脂などと比較して接着特性が十分でない場合もあり、用途が限定されてしまう場合もある。

そこで、本研究では接着用途を対象として、業界ニーズの高い「高耐熱・低熱膨張性」と「可とう性」（柔軟で良好な折り曲げ特性）を両立する新規なポリイミド樹脂系のプラスチックフィルム資材の開発を目指した。とくに、これまでの研究において、ポリイミド樹脂と熱硬化性樹脂を複合化することにより樹脂組成物の耐熱性改善に効果が高いことを見出している。本研究では、ベース樹脂とするポリイミド樹脂と複合する熱硬化性樹脂、とくに高耐熱性と可とう性を両立するポリベンゾオキサジンを得ることを目的として、オリゴマー型ベンゾオキサジンの合成を試みた。オリゴマー型ポリベンゾオキサジンについては、構造接着を目的としたエポキシ樹脂との複合効果等について報告^[3]

もあり、ポリイミド樹脂との複合効果も期待される。そこで、合成したオリゴマー型ベンゾオキサジンとポリイミド樹脂を複合化し、その耐熱性に及ぼす効果を調べた。さらに、開発した樹脂組成物を用いて県内企業と共同でフレキシブル銅張積層板を試作した。

2. 実験方法

2.1 試料及び試薬

本研究において使用したベンゾオキサジン（ポリベンゾオキサジンの前駆体）やポリアミド酸（ポリイミドの前駆体）の原料、及び溶媒類は全て市販品を精製、そのまま使用した。図1にベンゾオキサジンの合成に使用したモノマーの構造と略号を示す。

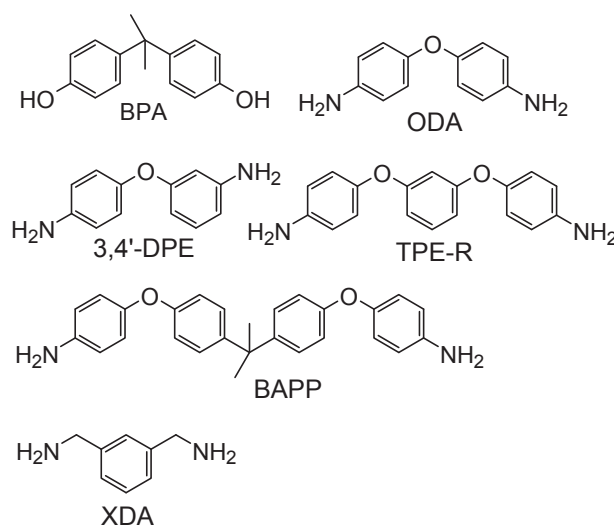


図1 モノマーの構造と略号

2.2 ベンゾオキサジン（ポリベンゾオキサジン前駆体）の合成

300mL 容セパラブルフラスコにビスフェノールとジアミンを仕込み、メタノールに完全に溶解させた。パラホルムアルデヒドを添加し、還流下で所定時間攪拌した。

次いで、反応液を 1500mL の純水に投入し激しく攪拌した。これを濾別することにより、白色粉体を得た。この粉体をイソプロピルアルコールで計 3 回洗浄と濾過を繰り返した。得られた粉体を 60℃ で定温乾燥、次いで真空乾燥することにより、ベンゾオキサジン（ポリベンゾオキサジン前駆体）を白色から淡褐色の粉体として得た。本合成系の反応を図 2 に示す。

生成物は赤外分光分析、及び 1H-NMR により、ベンゾオキサジン環が生成していることを確認した。また GPC 分析（後述）より未反応モノマーが残存していないことを確認した。

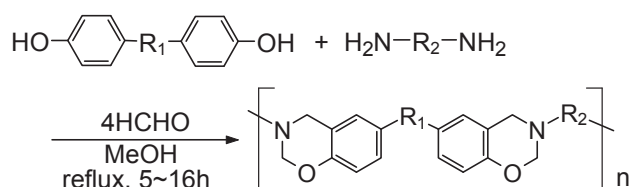


図 2 本合成系の反応式

2.3 ポリベンゾオキサジンフィルムの作製

2.2 節で得たベンゾオキサジンを N-メチルピロリドン (NMP) の 25% 溶液とした。予め攪拌脱泡した溶液を、離型フィルムを貼付したガラス板上に均一に塗布した。塗布厚さは、硬化後のフィルムの厚さが 100 μm になるように調整した。塗布後、送風乾燥機を用いて 80℃ にて 2 時間乾燥した。その後、フィルムを離型フィルムから剥がし、金枠に固定して加熱処理した。加熱処理は、140℃ にて 1 時間、170℃ にて 1 時間、200℃ にて 1 時間、さらに 240℃ にて 1 時間と段階的に温度を上げながら実施した。放冷後、金枠から外して、ポリベンゾオキサジンフィルムを得た。

2.4 ポリベンゾオキサジンとポリイミドの複合化

2.2 節で得たベンゾオキサジンとポリアミド酸の所定量を混合し NMP 溶液とした。以降、2.3 節と同様の操作と熱処理を行い、ポリベンゾオキサジン/ポリイミド複合フィルムを得た。なお、ポリアミド酸は NMP 溶媒中で常法により合成したものを使用した。

原料にはテトラカルボン酸二無水物としてオキシジフタル酸二無水物を、芳香族ジアミンとして 4,4'-オキシジアニリン (ODA)、ビス [4-(3-アミノフェノキシ)フェニル]スルホン (BAPS-M)、及び 3,3'-ジヒドロキシベンゼン (HAB) を 75%、20%、5% のモル濃度で混合したものを使用した。

2.5 測定と分析

【分子量、及び分子量分布】ゲル浸透クロマトグラフィー (GPC) により分析した。分子量は標準ポリスチレンを使用した検量線から換算して算出した。分析条件は以下のとおりとした。カラム: Shodex LF604×3 本、検出器: 紫外可視分光光度検出器、測定波長: 254nm、移動相: THF、カラム槽温度: 40℃、移動相流量: 0.6mL/min

【重量減少温度 (T_{ds} , T_{d10})、及び 540℃ 残渣率 (RW_{540})】熱重量示差熱同時測定により測定した。測定条件は、30mL/min の窒素気流下、昇温速度 10℃/min とした。初期から 5%、及び 10% の重量が減少した温度をそれぞれ 5% 重量減少温度、10% 重量減少温度とした。また、初期重量に対する 540℃ 時点における重量の割合を 540℃ 残渣率とした。

【線熱膨張率 (CTE)】ポリベンゾオキサジンフィルムから長さ 13mm×幅 5mm の短冊状試験片を切出した。チャック間距離 10mm にて引張モードの熱機械測定を行い、熱膨張曲線から平均線熱膨張率 (CTE、50℃～200℃) を求めた。なお、測定に際しては、一旦加熱昇温させた後、常温まで冷却し、再度加熱昇温した。平均熱膨張率 (CTE) は、2 回目の昇温時の TMA カーブを採用した。測定条件は、30mL/min の窒素気流下、初期荷重 10mN、昇温速度 5℃/min とした。

【ガラス転移温度 (T_g)】ポリベンゾオキサジンフィルムから長さ 50mm×幅 5mm の短冊状試験片を切出した。チャック間距離 20mm にて動的粘弾性測定を行い、得られた損失正接 ($\tan \delta$) のピーク温度をガラス転移温度 (T_g) とした。測定条件は 30mL/min の窒素気流下、印加周波数 0.1Hz、昇温速度 5℃/min とした。

3. 結果と考察

3.1 ベンゾオキサジンの合成と硬化フィルムの特性

ベンゾオキサジン合成反応の初期段階において若干の不溶物が生成したが、反応が進行するとともに完全に消失した。これは、ホルムアルデヒドとジアミンによるトリアジンオリゴマーの生成によるものと推測さ

れる。いったん生成したトリアジンオリゴマーは熱的に不安定であるために、時間の経過とともに分解し、反応系内にホルムアルデヒド、及びジアミンとして取り込まれて消失したものと考えられる。オリゴマー型ベンゾオキサジンの合成においては、ゲル生成とその除去が課題となっているが、本合成系においては、全ての合成系でゲルが生じることはなかった。得られたベンゾオキサジンは NMP などの極性溶媒に対して易溶性を示した。

ベンゾオキサジン硬化物（ポリベンゾオキサジン）のフィルムはいずれも図3に示すように可とう性に富んだ褐色透明フィルムとして得られた。フィルム厚さは $100\mu\text{m}$ 程度であった。従来のモノマー型ベンゾオキサジンは脆性が高く、一般的にフィルム化が困難である。たとえフィルム化することができたとしても、非常に脆いために、折り曲げたり、丸めたりすることはできなかった。一方、本研究で得られたオリゴマー型ベンゾオキサジンは、フィルム化することが可能で、かつ容易に折り曲げることができた。

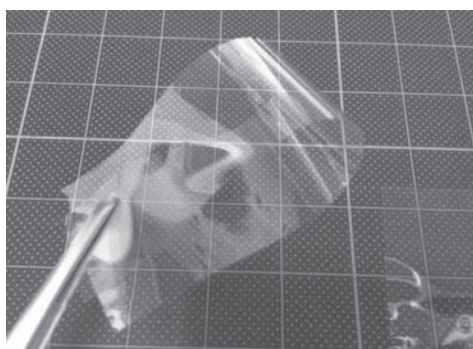


図3 ポリベンゾオキサジンフィルム

表1にベンゾキサジン、及びその硬化物の特性を示す。今回合成したベンゾオキサジンは、分子量は2800から6000弱の高分子量体であった。

T_{d5} と T_{d10} は4環系ジアミンである BAPP を用いたポリベンゾオキサジンが最も高かった。単環系の脂肪族アミン XDA を用いたポリベンゾオキサジンは、 T_{d5} 、 T_{d10} 、及び RW_{540} の何れにおいても最も低い値を示し、化学的耐熱性に乏しいという結果になった。一方、CTE は XDA を用いた系が最も小さく、常温から 200°C 程度の共有結合の切断（熱分解）をとみなわないう温度域においては熱安定性に優れていると考えられる。

表1 ポリベンゾオキサジンの特性

Sample	Mw	T_{d5} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{d10} [$^{\circ}\text{C}$]	RW_{540} [%]	CTE [ppm/K]
BPA / XDA	2813	262	287	32.2	20.7
BPA / 3,4'-DPE	5927	327	350	67.0	26.8
BPA / ODA	4266	325	342	58.0	41.0
BPA / TPE-R	4928	325	352	45.2	69.8
BPA / BAPP	3108	353	383	46.0	39.7

図4にジアミン類を種々変化させたポリベンゾオキサジン硬化物の熱重量減少曲線を示す。 RW_{540} を比較すると、ODA (2環体) > TPE-R (3環体) > BAPP (4環体) の順に高くなった。脂肪族ジアミンの XDA は最も低い値を示した。架橋点間距離が短いものほど化学的耐熱性が高い傾向にあった。このことから、ポリベンゾオキサジンの化学的耐熱性は架橋密度と相関があると考えられる。また、2環系ジアミン同士の比較では、3,4'-DPE > ODA となった。これは、p-p 体よりも p-m 体の方が分子鎖のパッキング度が高いためと考えられる。

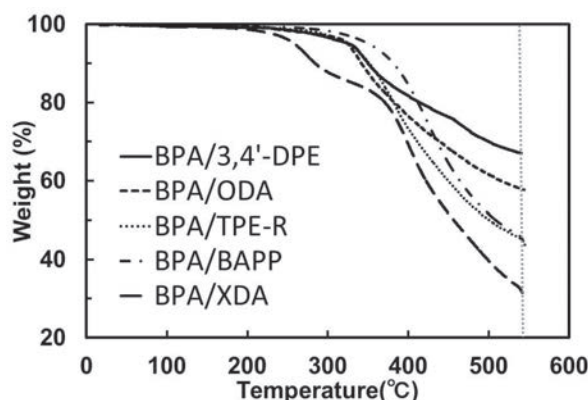


図4 硬化物の熱重量減少曲線
(BPA/TPE-R系ポリベンゾオキサジン)

図5に BPA/TPE-R 系ベンゾオキサジンの熱処理温度と貯蔵弾性率 (E') の関係を示す。熱処理温度が高いものほど硬化が進行し、 E' の転移域が高温側にシフトした。 140°C で熱処理したものは、 100°C 付近で急激に E' が低下し、ベンゾオキサジン単体でのフィルム接着剤としての可能性を示唆するものであった。

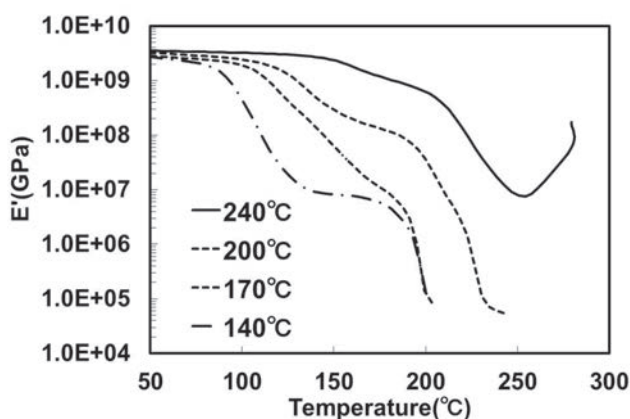


図5 熱処理温度と貯蔵弾性率の関係
(BPA/TPE-R系ポリベンゾオキサジン)

図6にBPA/TPE-R系ポリベンゾオキサジンの熱処理温度と損失正接 ($\tan \delta$) の関係を示す。硬化温度が低いものは、100℃から150℃付近にかけて未硬化部に由来する T_g が観測された。今回加熱硬化条件(1時間)では240℃においても160℃付近に若干の未硬化部に由来する T_g が観測された。なお、硬化部の T_g は251℃だった。

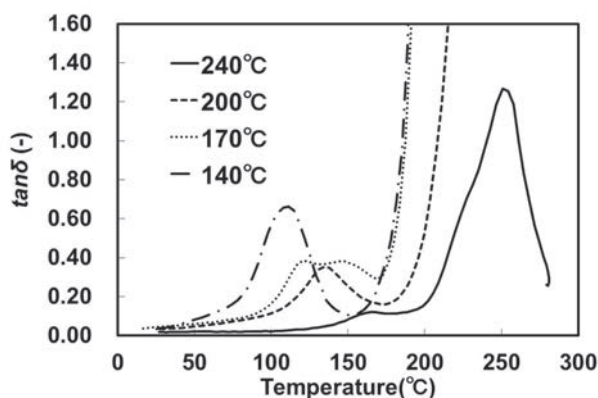


図6 熱処理温度と損失正接の関係
(BPA/TPE-R系ポリベンゾオキサジン)

3.2 ポリベンゾオキサジンとポリイミドの複合化

ポリイミドに対して、ベンゾオキサジンを0%から20%まで添加して複合化フィルムを作製した。ベンゾオキサジンには前節で得たBPA/TPE-R系ベンゾオキサジンを用いた。複合化フィルムの特性を表2に示す。ポリイミド単体の T_g は182℃であるが、ポリベンゾオキサジンとの複合により、これが229℃まで向上した。成形性についても、高濃度、高粘度であるがゆえに成形性に難点があったポリアミド酸に、オリゴマー型ベンゾオキサジンを混合溶解することにより、粘度の低下が実現し、フィルム成形性が向上した。ポリイミド

フィルムの成形にあたっては、環境負荷軽減のために有機溶剤の使用を抑える傾向にある。すなわち、前駆体であるポリアミド酸の溶液濃度を高く設定する傾向にある。高濃度であっても作業性、成形性を低下させることのないオリゴマー型ベンゾオキサジンとの複合は好適と思われる。

表2 複合化フィルムの特性

No.	ベンゾ オキサジン 複合化率	Tg [℃]	成形性
1	0%	182	×～△
2	10%	215	△～○
3	15%	228	○
4	20%	229	○

3.3 フレキシブル銅張積層板の試作

試作したフレキシブル銅張積層板を図7に示す。試作品の樹脂層表面にピンホールが発生した。このピンホールは、ポリベンゾオキサジンの添加率が高いほど生じる頻度が高いことから、ポリベンゾオキサジンに起因するものと推測された。硬化過程に生じる副生ガスに起因すると考えられる。また、このピンホールは硬化温度を下げると低減することを確認した。このような課題が残っているが、可とう性と密着性に優れたフィルムを得ることができた。今後、ピンホール対策のための改良検討を進めていきたい。

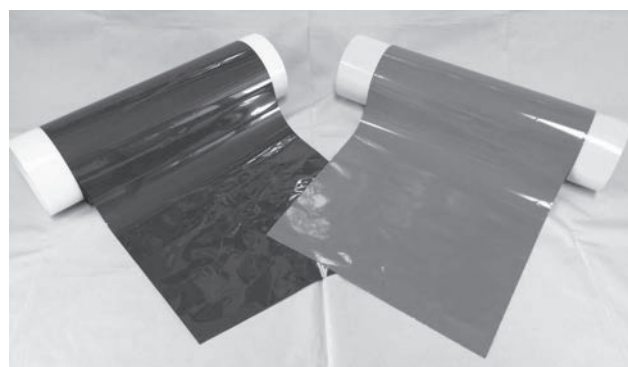


図7 フレキシブル銅張積層板

4. 結 言

- 1) オリゴマー型ベンゾオキサジンの合成過程ではホルムアルデヒド源に粒状のパラホルムアルデヒドを用いることにより、ゲル生成を抑制することができた。
- 2) オリゴマー型ベンゾオキサジンのフィルム成形能は良好であり、可とう性に富んだ硬化物を得た。

- 3) 2環系芳香族ジアミン (3,4'-DPE、ODA) を用いたポリベンゾオキサジンは、540℃ 残渣率が高かった。難燃性向上が期待できる。
- 4) 5% 及び 10% 重量減少温度は、脂肪族ジアミン (XDA) よりも、芳香族ジアミンを用いた系の方が高かった。
- 5) 半硬化状態 (140℃ 加熱) のフィルムは、常温において良好なハンドリング性を有す一方で、100 ~ 150℃ 付近で軟化することがわかった。
- 6) オリゴマー型ベンゾオキサジンを熱可塑性ポリイミドと複合化するとワニス粘度が低下することがわかった。また、ガラス転移温度の向上に寄与することがわかった。
- 7) フレキシブル銅張積層板を試作した。密着性、可とう性等に十分な実用特性を有することを確認した。その一方で、ピンホールの発生について解決すべき課題が明らかになった。

参考文献

- [1] 横田力男, 安藤慎治ら: “最新ポリイミド”, エヌ・ティー・エス (2010).
- [2] 古川信之: 接着, 49, pp.15-26 (2005).
- [3] 市瀬英明, 池田まゆみ, 大塚瑞希, 里見暢子, 古川信之, 竹市力, 構造接着研究シンポジウム講演要旨集, 1, 24 (2016).

健康維持と美味しさを求めるアクティブシニアのための食品開発

食品・環境科	主任研究員	横山 智 栄
食品・環境科	主任研究員	玉 屋 圭
食品・環境科	主任研究員	松 本 周 三

長崎県では全国平均より高い推移で高齢化が進行しており、高齢者向けに健康機能性を有する食品開発が望まれている。ごま豆腐は、原材料にごま由来のセサミンなど機能性成分を多く有する食品であるが、賞味期限の延伸を目的としてレトルト処理すると食感や色などの品質が変化することが課題となっていた。そこで本年度は、レトルトごま豆腐の品質に影響を及ぼす要因について検討した。その結果、加熱時間の長さ、pH およびごま配合量によって、レトルトごま豆腐の品質の変化をコントロールできることが分かった。また、和テイストのスイーツとして、抹茶ごま豆腐の開発にも取り組んだ。レトルト抹茶ごま豆腐は強熱により抹茶の色が褐変してしまうことから、変色の抑制方法について検討した結果、塩化マグネシウムに抑制効果のあることが分かった。

1. 緒 言

日本人の平均寿命と健康寿命との間には約 10 年の差があるといわれている^[1]。高齢者が自立した生活を送るためには、健康寿命を延ばすことが重要であり、阻害要因である生活習慣病の予防に取り組む必要がある。

長崎県は高齢化率が全国平均より高く^[2]、高齢化の進行している地域である。高齢者人口のうちの約 8 割は「アクティブシニア」と呼ばれている元気な高齢者である。この層の市場開拓は食品産業界の課題であり、県内食品製造企業からもアクティブシニア向けの食品開発が強く求められている。

アクティブシニアが健康増進を図るために栄養成分を手軽に摂取する方法として、補助的な食事であるおやつに着目した。栄養機能性を付与したおやつを活用することにより、栄養バランスを整えることができ、生活習慣病の予防へとつながる。長崎県で作られているごま豆腐は甘く、お菓子として食べることも多い。ごま豆腐は抗酸化作用のあるセサミンを多く含むことから機能性おやつにもなり得るが、保存できる期間が冷蔵で 4 日～10 日と短い。保存性の短い食品を長期常温保存可能にするためには、レトルト処理が有効である。しかし、ごま豆腐をレトルト処理すると食感が変化することが課題となっていた。本研究では、この課題を解決するため、レトルト処理条件や原材料の配合割合について検討した。また、和テイストのスイーツは高齢者層にも人気があるが、抹茶ごま豆腐をレトルト処理すると、強熱の影響で抹茶が褐変してしまうことから、変色の抑制方法について検討した。

2. 実験方法

2.1 材料および試薬

甘藷デンプン、ねりごま、グラニュー糖及び抹茶粉末には市販品を使用した。クエン酸（無水）、リン酸水素二ナトリウム（無水）、塩化マグネシウム、L(+)-アスコルビン酸及びレシチン（大豆由来）には特級または一級を使用した。デキストリンは松谷化学工業（株）製非還元分岐デキストリン（DE 7.5 直鎖状を含む）（パインデックス#1）を使用した。水としては純水製造装置（日本ミリポア製 Elix Advantage 3）で生成した純水を用いた。

pH3～pH9 の緩衝液は、0.1mol/L クエン酸と 0.2mol/L リン酸水素二ナトリウムを適宜混ぜ合わせ調製した。

2.2 レトルト処理条件の検討

2.2.1 ごま豆腐の調製

ごま豆腐を以下の配合により調製した。：甘藷デンプン 70g、ねりごま 70g、グラニュー糖 35g、純水 700g を加熱攪拌し、粘性が上昇してからさらに 5 分間加熱攪拌した。100mL ポリプロピレン容器に 100g ずつ分注したものをレトルト用透明パウチに 1 個ずつ入れ、室温下で放冷した。

2.2.2 レトルト処理

2.2.1 で調製した試料を真空度約 30 kPa、シール時間 2.5 秒で真空パックした。レトルト処理にはレトルト殺菌装置（CB-40（株）サムソン製）を用いた。殺菌温度は 110℃、115℃及び 120℃とし、F 値 4 以上を目標とし

て行った。

2.2.3 破断応力測定

クリープメーター (RE2-33005C (株)山電製) を用いて破断応力を測定した。測定条件として、プランジャーはφ16×H250 mmの円柱型を使用し、データ取り込み間隔 0.1sec、測定歪率 70%、測定速度 1mm/sec とした。

解析をクリープメーター用自動解析ソフトウェア (破断強度解析 Windows ver.1 (株)山電製) にて行い、破断応力 (Pa) を求めた。1 試料あたり 3 点測定し、その平均値を求めた。

2.2.4 色調変化の測定

測色計 (CR-13 コニカミノルタ製) を用いて $L^*a^*b^*$ を測定した。1 試料あたり 3 点測定し、その平均値を求めた。

2.3 材料配合割合の影響

配合割合は以下のとおりである。(1) 糖添加量の影響では、甘藷デンプン 10g、ねりごま 10g、純水 100g に対して、グラニュー糖を 0、2.5、5、7.5、10g とした。また、(2) ねりごま添加量の影響では、甘藷デンプン 10g、グラニュー糖 5g、純水 100g、ねりごまを 0、5、10、15、20g とした。調製方法は 2.2 に準じたが、粘性上昇後の加熱攪拌時間は 2 分とした。レトルト処理後、破断応力を測定した。以降のレトルト処理条件は全て 120℃ 15 分とした。

2.4 pH の影響

以下の配合により pH3 ～ pH9 のごま豆腐を調製した。：甘藷デンプン 10g、ねりごま 10g、グラニュー糖 5g、各 pH の緩衝液 100g レトルト処理後、破断応力及び色を測定した。

2.5 抹茶ごま豆腐の開発

2.5.1 pH の影響

以下の配合により pH3 ～ pH9 の抹茶ごま豆腐を調製した。：甘藷デンプン 20g、ねりごま 20g、グラニュー糖 10g、抹茶 1g、各 pH の緩衝液 200g レトルト処理後、破断応力及び色を測定した。

2.5.2 添加物による変色抑制効果の検討

ごま豆腐の前記配合、すなわち甘藷デンプン 10g、ねりごま 10g、グラニュー糖 5g、抹茶 0.5g、純水

100g に対して、塩化マグネシウム (無水) (1 g) を添加、塩化マグネシウム (無水) と L(+)- アスコルビン酸 (0.065g) を添加、デキストリン (0.5 g) を添加及びデキストリン (0.5g) とレシチン (大豆由来) (0.26g) を添加したごま豆腐を試作した。レトルト処理後、色を測定した。

3. 結果および考察

3.1 レトルト処理条件の検討

F 値はレトルト処理 110℃ 66 分で 4.0、115℃ 30 分で 4.3、120℃ 15 分で 4.7 であった。各処理条件による破断応力と色 a^* 値 (赤み) を表 1 に示す。温度によって破断応力に大きな差は見られなかったが、加熱時間が長いほど a^* 値は高くなり赤みが増した。加熱によるメイラード反応やカラメル反応が関与し、褐変したためであると考えられる。硬さと a^* 値が未処理区と近い条件について検討した結果、以降のレトルト処理は 120℃ 15 分で行うこととした。

表 1 レトルト処理温度の破断応力及び色への影響

試験区	破断応力 (kPa)	a^*
未処理	9.6	1.3
110℃-66 分	9.0	2.7
115℃-30 分	8.0	2.3
120℃-15 分	11	2.2

3.2 材料配合割合の影響

糖及びごま配合率の違いによる破断応力の結果を表 2 に示す。糖配合率の違いによって破断応力に大きな差はみられなかった。一方、ごま配合率 14.8% では、対照より破断応力が半分になっており、配合率の増加に伴い破断応力が低下する傾向がみられた。

ごま豆腐は澱粉の網目構造の中にごま由来のたんぱく質や脂質が存在する相分離モデルと推定されている^[3]。使用したねりごまには 61.0% の脂質及び 18.5% のたんぱく質が含まれており、これらがゲルの微細な繊維状構造に影響を与えているものと推察された。

表 2-a 糖配合割合の違いによる破断応力への影響

糖配合率 (%)	破断応力 (kPa)
対照 (配合なし)	9.9
4.0	10
5.9	10
7.7	12

表 2-b ごま配合割合の違いによる破断応力への影響

ごま配合率 (%)	破断応力 (kPa)
対照 (配合なし)	14
8.0	11
11.5	9.7
14.8	7.4

3. 3 pH の影響

pH3 ～ 9 に調整したごま豆腐の破断応力及び色 (a^* 値、 b^* 値) の結果を表 3 に示した。pH5 では pH3 より硬さが 1.8 倍高い。pH 6 のときに a^* 値は最小となり赤味が弱くなったが、pH が小さくなるほど b^* 値が大きくなり黄味の強くなる傾向がみられた。

表 3 pH による破断応力及び色への影響

pH	破断応力 (kPa)	a^*	b^*
3	6.6	4.3	16.3
4	9.9	3.8	16.5
5	12	3.0	14.0
6	11	2.2	11.8
7	8.0	2.6	10.3
8	7.4	4.5	11.3
9	6.7	3.8	11.9

3. 4 抹茶ごま豆腐の開発

3. 4. 1 pH の影響

pH3 ～ 9 に調整した抹茶ごま豆腐の色 a^* 値の変化についての結果を図 1 に示す。全ての pH において、レトルト処理により a^* 値がマイナス (緑) 側からプラス (赤) 側に転じ、pH が高いほど赤味が強くなった。

高温で加熱されることで、抹茶に含まれるクロロフィルがフェオフォルバイドへ変化し、赤褐色となったものと考えられる。

3. 4. 2 添加物による変色抑制効果

添加物を入れた抹茶ごま豆腐におけるレトルト処理後の a^* 値の結果を図 2 に示す。 a^* 値は、レトルト処理前は全てマイナス (緑) であったが、処理後は塩化マグネシウム添加区及びデキストリン添加区のみマイナス (緑) 側の値を示した。

塩化マグネシウムの添加により、クロロフィルからのマグネシウムの離脱を防ぐことで、クロロフィルの分解が抑制されたものと思われる。

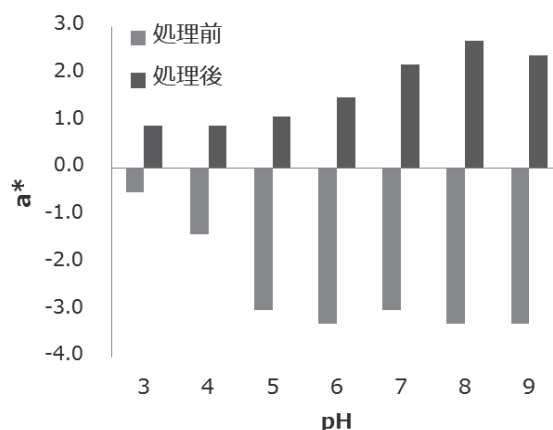
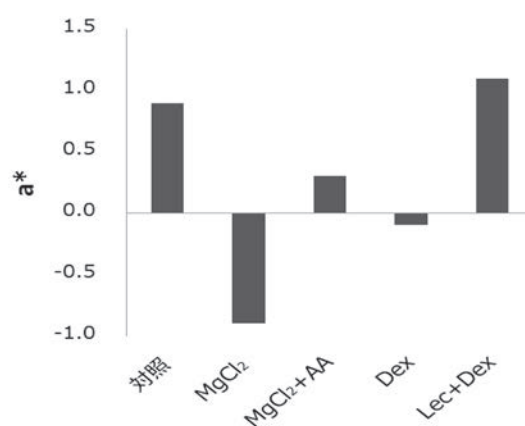


図 1 pH による色の変化



MgCl₂: 塩化マグネシウム、AA: アスコルビン酸、
Dex: デキストリン、Lec: レシチン

図 2 添加物による色の変化

4. 結 言

レトルト処理におけるごま豆腐の褐色化は加熱時間の長さに依存することが分かった。ごまの量や pH によってレトルトごま豆腐の硬さや色をコントロールできることが分かった。レトルト抹茶ごま豆腐の褐変には、抹茶の成分であるクロロフィル分子の配位子であるマグネシウムが、熱により離脱するためであると推察された。これを抑制する方法として、これまでの報告 [4・5] で有効とされる塩化マグネシウムやデキストリンの添加がごま豆腐の変色抑制にも有効であることが分かった。

参考文献

- [1] 平成 27 年版高齢社会白書 (概要版), (2016).
- [2] 国立社会保障・人口問題研究所「日本の地域別将来推計人口」(平成 25 (2013) 年 3 月推計), (2013).
- [3] 佐藤恵美子ほか: 食科工, 42, 737-747, (1995).

- [4] 久下喬ほか：澱粉科学, 21, 151 (1974).
- [5] 中莖秀夫ほか：愛知県産業技術研究所報告, 5, 146-147 (2006).

五島つばき酵母を活用した加工食品の開発

食品・環境科	主任研究員	松 本 周 三
食品・環境科	主任研究員	横 山 智 栄
食品・環境科	研 究 員	晦 日 房 和
応 用 技 術 部	部 長	河 村 俊 哉
		五 島 市 商 工 会

椿の島として有名な五島列島でヤブツバキの花等から *Saccharomyces cerevisiae* が分離され、「五島つばき酵母」と名付けられた。これらの酵母を利用した酒類を開発するため、吟醸香の主要な香気成分である、カプロン酸エチルを高生産する酵母の育種を行った。紫外線照射により変異処理を行った五島つばき酵母を、セルレニン 5 $\mu\text{g/mL}$ を含む YPD 寒天培地で培養し、コロニーを形成したセルレニン耐性株、15 株をカプロン酸エチル高生産候補株として分離した。これらの候補株で麹エキスイ培地を発酵させ、カプロン酸エチル濃度を GC/MS で分析した。その結果、親株よりカプロン酸エチルを高生産する酵母 4 株を分離した。

1. 緒 言

日本有数の椿の島として有名な五島列島は、約 900 万本のヤブツバキが自生しており、椿を活用した地域振興の機運が高まっている。長崎県では、これまでに新規搾油法によるツバキ油やツバキの葉を活かしたツバキ茶の開発を行ってきたが、引き続き、新たな需要を生み出す商品の開発が望まれている。五島市商工会においては、そのような期待を受け、椿に関連する新たな地域資源として、ヤブツバキの花等から複数の酵母、*Saccharomyces cerevisiae* を分離した。これらを「五島つばき酵母」と命名し、酵母を活用した加工食品を開発するため、平成 26 年度から工業技術センターと五島市商工会で共同研究を開始した。

酵母を利用した食品としては、パン、醤油、味噌、酒類等が挙げられる。そのうちの酒類については、近年、販売数量が減少を続けており、消費をいかに取り込むかが課題の 1 つとなっている。幅広い嗜好に対応するために製品を多様化し、さらに市場で販売されている製品との差別化を図る必要がある。その方法の一つとして、新たな酵母の開発が数多く行われている。各県では、地域性を活かした独自酵母の開発が進められており、長崎県においても香気や呈味に特徴を有した酵母の開発が望まれている。そこで、本研究では地域特性を活かしたこの五島つばき酵母を親株にして、吟醸香の主要な香気成分であるカプロン酸エチル高生産酵母の育種を行った。カプロン酸エチルを生産するにはその前駆体であるカプロン酸が必要となるが、セルレニンに耐性を有する株が、カプロン酸をはじめと

した脂肪酸を高生産することが知られている^[1]。よって、セルレニン耐性株の分離及びそれらの菌株からのカプロン酸エチル高生産酵母の選抜を行った。

2. 実験方法

2.1 セルレニン耐性株の分離

親株には五島つばき酵母の中からアルコール耐性が高い菌株を使用した。変異処理は紫外線照射により行った。YPD 液体培地で 30℃、24 時間静置培養した五島つばき酵母を 10⁶ cell/mL になるよう希釈し、直径 45 mm のシャーレに 10 mL 広げてから紫外線を照射した。ピーク波長 256 nm、電力 15W の紫外線ランプを用い、生菌率が 1% 以下になるように、光源からシャーレまでの距離は 18 cm、照射時間は 180 秒間とした。紫外線照射した懸濁液を適宜濃縮して、セルレニン 2 $\mu\text{g/mL}$ を含む YPD 寒天培地に接種し、30℃、48 時間培養した。径の大きいコロニーを形成した菌株を釣菌し、YPD 液体培地で 30℃、24 時間静置培養した。それらを再度、セルレニン 1、3、5 $\mu\text{g/mL}$ を含む YPD 寒天培地に接種し、30℃、48 時間培養した。セルレニン 5 $\mu\text{g/mL}$ 以上でコロニーを形成した菌株をセルレニン耐性株として、-80℃で保存した。

2.2 カプロン酸エチル高生産酵母の選抜

各セルレニン耐性を有する 15 株、親株、きょうかい酵母 901 号を YPD 液体培地 0.5 mL に接種した。30℃、48 時間、静置培養後、遠心分離 (2,000 $\times$ g、5 分間) し、上清を除去した。生理食塩水 1 mL を加えて菌体を洗

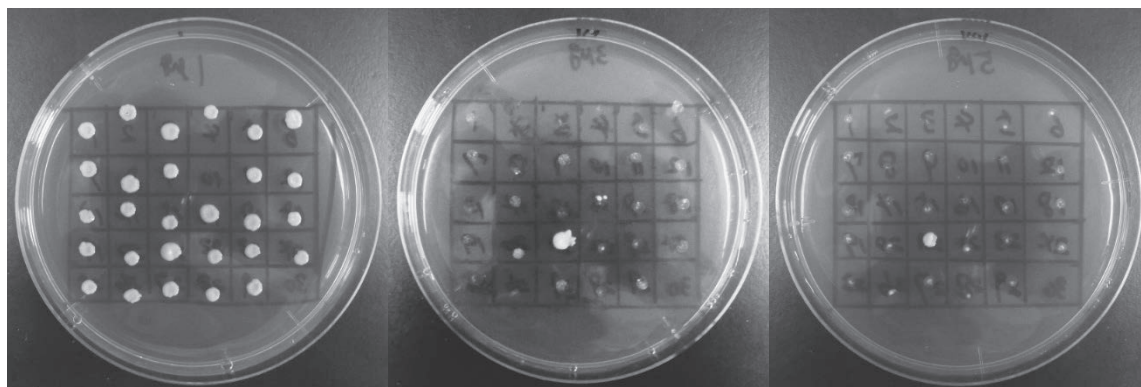


図1 セルレニン耐性株のYPD寒天培地上のコロニー
左からセルレニン濃度1、3、5 µg/mL

浄後、再度、遠心分離（2,000×g、5分間）し、上清を除去した。洗浄は2回行った。沈殿した菌体を最小容量の滅菌水で懸濁し、Brix 20%に調製した麴エキスピ地5 mLに添加した。30℃、14日間、静置培養後、上清をGC/MSで分析した。装置は450GC-240MS system（バリアン）、カラムはInertCap Pure-WAX（内径0.25 mm、長さ60 m、膜厚0.25 µm）（GLサイエンス株）を用いた。カラムオープン温度は50℃で10分間保持し、180℃まで10℃/分、220℃まで20℃/分で昇温し、5分間保持した。注入口温度は220℃、注入方法はスプリット、スプリット比10：1、キャリアガスはHe、流速は1.2 mL/分で分析した。試料は20 mLバイアルに上清0.9 mL、カプロン酸メチルを10%エタノール溶液で0.1 mg/Lに調製した内部標準液0.1 mLを添加した。50℃、20分間保温し、上部気相を900 µL注入した。

3. 結果及び考察

図1に各濃度になるようにセルレニンを添加したYPD寒天培地上における、変異処理株のコロニー形成の様子を示す。セルレニン1 µg/mLでは、候補株の多くが径の大きいコロニーを形成した。濃度が上昇するにつれて増殖が阻害され、セルレニン5 µg/mLでも増殖できる耐性株をピックアップした。この操作を繰り返し、五島つばき酵母から、カプロン酸エチルを高生産する候補株として15株のセルレニン耐性株を分離した。

これらの候補株を用いて、麴エキスピ地での発酵試験を行い、カプロン酸エチル濃度を分析した。その結果を図2に示す。親株である五島つばき酵母を対照としたとき、カプロン酸エチル濃度比が高い4株が得られた。さらに、そのうち3株はきょうかい901号より

明らかに当該生産量が高いことがわかった。

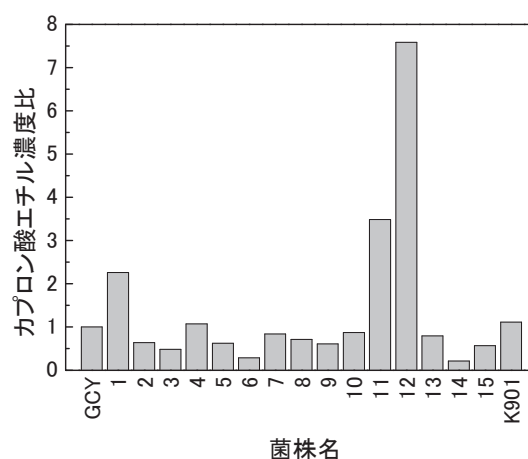


図2 麴エキスピ地液のカプロン酸エチル濃度比
GCY: 五島つばき酵母、K901: きょうかい酵母9号

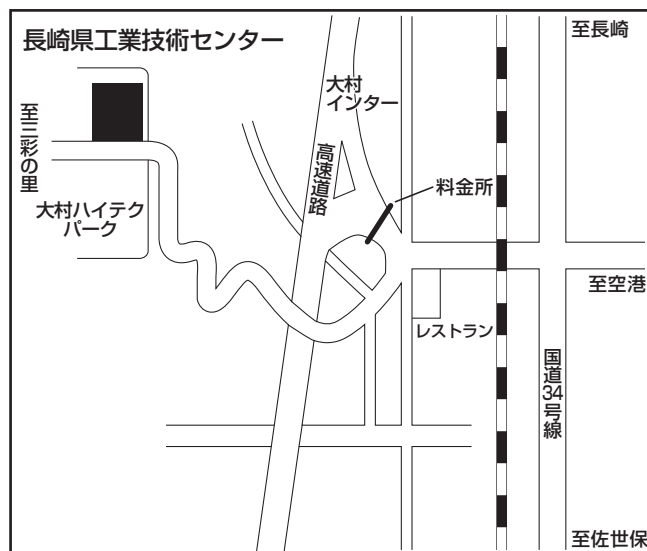
4. 結 言

五島つばき酵母を親株としたセルレニン耐性株から、4株のカプロン酸エチル高生産株を分離することができた。今後はこれらの菌株で小仕込み試験を行い、酒造適性を調べる。また、五島つばき酵母の特徴を調べ、パンや醤油、味噌等、他の発酵食品への適性についても検討する。

参考文献

- [1] E. Ishikawa, N. Hosokawa, Y. Hata, Y. Abe, K. Suganami, S. Imayasu, Agric. Biol. Chem., 55 (8), pp. 2153-2154 (1991).

位 置 図



- 大村駅から車で10分
- 長崎空港から車で13分
- 大村ICから車で3分

発行日：平成29年10月1日

発行所：長崎県工業技術センター

〒856-0026 大村市池田2丁目1303番地8

TEL 0957-52-1133

FAX 0957-52-1136

ホームページ <http://www.pref.nagasaki.jp/section/kogyo-c/>

森林を保護し、地球温暖化を防止するため、
古紙パルプ配合品を使用しています。