

平成27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.45

長崎県工業技術センター

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

長崎県工業技術センター研究報告
Z01401

平成二十七年 度

目 次

1. ワイドギャップ半導体パワーデバイス導入による 高効率かつ小型・軽量の電力変換装置の開発	1
電子情報科 主任研究員 中 川 豪	
グリーンニューディール技術開発支援室 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	
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 科 長 永 石 雅 基	
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 主任研究員 山 口 典 男	
2. 電気・電子機器のノイズ対策技法の確立	6
グリーンニューディール技術開発支援室 室 長 兵 頭 竜 二	
電子情報科 主任研究員 田 尻 健 志	
電子情報科 主任研究員 中 川 豪	
グリーンニューディール技術開発支援室 参 事 神 田 誠	
3. 機械装置知的遠隔監視装置の開発	10
機械システム科 科 長 田 口 喜 祥	
4. 機械フレームの軽量化設計支援ソフトウェアの開発	15
機械システム科 主任研究員 小 楠 進 一	
5. 非接触による光学的非破壊計測技術の開発	18
電子情報科 科 長 下 村 義 昭	
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	23
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. 微小球共振光センサーを用いた微生物迅速検出装置の開発	28
電子情報科 主任研究員 田 尻 健 志	
食品・環境科 主任研究員 松 本 周 三	
九州大学大学院 教 授 今 任 稔 彦	
徳島大学大学院 教 授 原 口 雅 宣	
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	33
応用技術部 部 長 藤 本 和 貴	
9. 県内企業の製品化技術を高めるための支援技術の確立	36
工業材料科 科 長 瀧 内 直 祐	

1 0. 精密プレス加工の高精度化に関する研究開発	41
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
グリーンニューデール技術開発支援室 専 門 幹	田 口 勝 身
所 長	馬 場 恒 明
1 1. 連成統合シミュレーション技術の開発と普及支援（第1報）	43
工業材料科 専門研究員	重 光 保 博
1 2. 耐熱性高分子の機能化とフィルム材料への応用	46
工業材料科 主任研究員	市 瀬 英 明
1 3. 県北の農水産物を利用した九十九島オリジナルな食品の開発	49
食品・環境科 専門研究員	晦 日 房 和
食品・環境科 主任研究員	玉 屋 圭
つくも食品株式会社 代表取締役	緒 方 誠 治
有限会社草加家 代表取締役	高 木 龍 男
させばパール・シー株式会社 取 締 役	原 田 誠一郎
させばパール・シー株式会社 販売課係長	辻 佳代子
1 4. 皮膚中の自家蛍光測定技術の開発	53
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一

ワイドギャップ半導体パワーデバイス導入による 高効率かつ小型・軽量の電力変換装置の開発

(省エネに貢献するグリーンエネルギー対応新型電源装置の開発)

電子情報科 主任研究員 中 川 豪
グリーンニューディール技術開発支援室 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
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 科 長 永 石 雅 基
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 主任研究員 山 口 典 男

近年、電気エネルギーを効率良く利用する省エネ技術の推進、太陽光・風力・水力といった再生可能エネルギーの活用など、省エネルギーと環境に配慮したグリーンイノベーションといわれる技術開発が求められている。こうした動きに応えるため、当センターではパワーエレクトロニクスに関する研究開発に着手した。パワーエレクトロニクスは、電力用の半導体パワーデバイスを用いて電力変換・蓄電・送電・電力機器の制御を行う技術で、電気自動車や省エネ家電、IT 機器、スマートハウスなどと応用範囲は幅広く、エネルギーを有効に利用し省エネ化するために重要な技術となる。本研究では、超低消費電力、高耐圧、高速・高温動作性など優れた特性を持つ SiC (シリコンカーバイド)^[1,2] パワーデバイスを県内に先行導入し、エネルギー使用効率が高くコンパクトな電力変換装置を開発することを目的とした。

研究事業の最終年度となる平成27年度は、SiC パワーデバイスを導入した降圧形および双方向型の DC-DC コンバータの設計および試作を行い、(1) デジタル制御による出力電圧の安定化、(2) SiC パワーデバイス導入による高効率化、(3) 窯業技術センターで開発した輻射活用型放熱器との融合による小型化について検証した。

1. 緒 言

コンバータやインバータと呼ばれる電力変換装置の変換効率を低下させる主な要因は、パワーデバイスで発生する損失である。Si (シリコン)を基板材料とした既存のパワーデバイスでは、低損失・高効率化には材料物性的に限界が見え始めており、SiCやGaN^[3] (ガリウムナイトライド)、ダイヤモンド^[4]といったワイドギャップ半導体と呼ばれる次世代の電力用半導体を導入することでこの損失を極限まで低減し、省エネ化を一層推進することが望まれている。

表1に、SiとSiCの代表的な物性値を示す。六方晶の4H-SiCは、Siに比べて禁制帯幅が3倍、絶縁破壊電界が約10倍と大きく、また、電子飽和速度は2倍、熱伝導率は3倍以上もの物性値を持っている。そのため、超低損失、高耐圧、高速・高周波動作性、高温動作性など、パワー半導体としてSiよりも優れた性能を有している。SiCパワーデバイスを導入した各種電力変換装置は主に大手電機メーカーや半導体メーカー、大学等による国主導の大型プロジェクト等で研究・開発され量産化も進んでいる。一方、県内企業では自社製品に対するSiC導入への強いニーズはあるものの、主にコストと技術的な問題でその導入には至っていない。

そこで本研究では、SiCパワーデバイスを県内に先行導入し、最適動作させるための回路方式および制御方式を開発することで、エネルギー使用効率が高くコンパクトな電力変換装置の実現を目指している。平成26年度には、SiC-SBD (ショットキーバリアダイオード)を導入した降圧形DC-DCコンバータの設計・試作と評価、および電源回路シミュレーションによる電力損失の解析を実施し、SiCパワーデバイス導入による損失低減と小型化の効果について検証した^[5]。

最終年度の平成27年度には、SiC-MOSFETおよびSiC-SBDを導入した双方向DC-DCコンバータを開発し、デジタル制御による出力電圧の安定化とSiC導入による高効率化、輻射放熱技術との融合による小型化を実現した。

表1. Si と SiC の物性値の比較

	Si	4H-SiC
禁制帯幅(eV)	1.1	3.3
絶縁破壊電界(MV/cm)	0.3	2.8
電子飽和速度(cm/s)	1.0	2.2
熱伝導率(W/cmK)	1.5	4.9

2. デジタル制御による出力電圧の安定化

2-1. DC-DCコンバータの試作および特性評価

試作した降圧形DC-DCコンバータの外観と変換効率のスイッチング周波数依存性の実測およびシミュレーション結果を図1に示す。定格入出力電圧は $48\text{V} \Rightarrow 24\text{V}$ （デューティ比：50%）で、電力容量を50Wとした。スイッチング周波数を20kHzから160kHzまで変化させており、各周波数に応じてインダクタンスおよび入出力キャパシタンスの値を最適化している。シミュレーションでは、電源回路シミュレータの校正係数を調整することで、実動作環境に近い状態でのシミュレーションへと合わせ込みを行った。既存のSi-MOSFETおよびSi-FRDを用いた場合は、スイッチング周波数が高くなるにつれてスイッチング損失が増大するため、変換効率が低下している。一方、SiC-MOSFETおよびSiC-SBDを導入した場合は、SiC-SBDにおいてリカバリ電流がほとんど発生せずにスイッチング損失がほぼゼロとなるため、高周波化に伴う損失増大がみられない。さらにSiC-MOSFETの導入によって高周波動作が可能となり、その結果、スイッチング周波数を160kHzまで高にした場合、85%（Si）から95.5%（SiC）に高効率化、即ち70%の電力損失削減を実現している。また、それぞれ最大効率を得られたスイッチング周波数（Si：40kHz、SiC：160kHz）における実測結果を比較しても、92%（Si）から95.5%への高効率化を実現できている。さらに、SiCパワーデバイスを用いて試作した降圧形DC-DCコンバータの容積は 172cm^3 で、Siパワーデバイスを用いた場合の 728cm^3 に対して76%の小型化を実現した。これは、作動周波数の高周波化によってコイルやコンデンサ等の受動部品を小さくできたことが大きく寄与している。

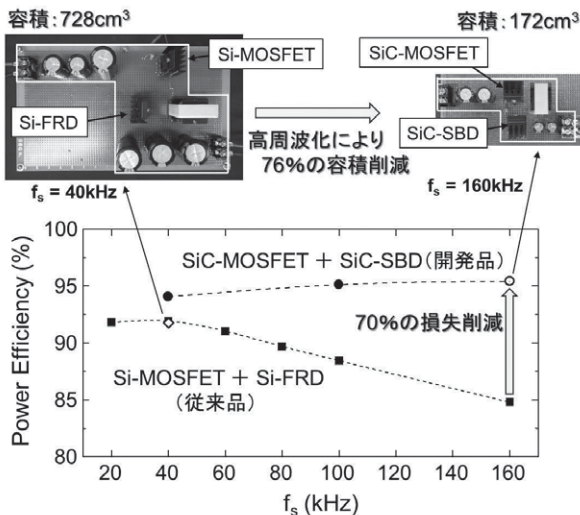


図1. 試作した降圧形 DC-DC コンバータの外観と変換効率のスイッチング周波数依存性

2-2. 制御ゲインの選定と出力特性の評価

次にコンバータの出力電圧をフィードバックし、デジタル演算およびパルス幅変調制御を行うため、DSP（デジタルシグナルプロセッサ）を用いた制御方式を開発した。コンバータの出力電圧をAD変換器でデジタル信号に変換し、出力を安定化させるためのPID演算処理を行う。その結果をもとにPWM（パルス幅変調）信号を生成し、駆動回路を通してパワーMOSFETのオン/オフを制御する。平成26年度には、コンバータの出力電圧を検出する前置増幅器の設計と出力特性の評価、およびAD変換器によってコンバータの出力電圧をデジタル信号に変換する際の補正処理を行った^[5]。平成27年度は、出力の安定化を図るためにPID制御ゲインの最適化を行った。

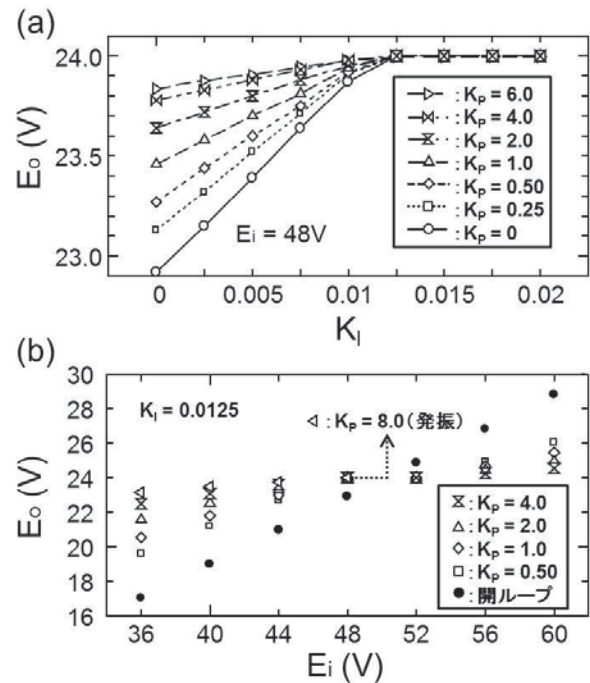


図2. (a) 積分ゲインと (b) 比例ゲインの選定

図2に、積分ゲインと比例ゲインを変化させて出力電圧をシミュレーションした結果を示す。図2(a)の横軸は積分ゲイン(K_i)を、縦軸はSiCパワーデバイスを導入したDC-DCコンバータの出力電圧（目標値：24V）をそれぞれ示している。比例ゲイン(K_p)を0から6.0まで変化させているが、いずれの条件においても出力電圧の偏差をなくし目標値に安定化させるためには、積分ゲインが0.0125以上必要であることが分かる。そこで次に、積分ゲインを0.0125で固定し、比例ゲインを0.5から8.0まで変化させながら入出力特性を評価した。図2(b)の横軸はコンバータの入力電圧を、縦軸は出力電圧をそれぞれ示している。開ループ特性と

の比較から明らかなように、比例ゲインの増大に伴って、入力電圧を変化させても出力電圧が目標値付近で安定化していくのが分かる。しかしながら、比例ゲインを8.0まで大きくすると出力電圧の発振が確認された。

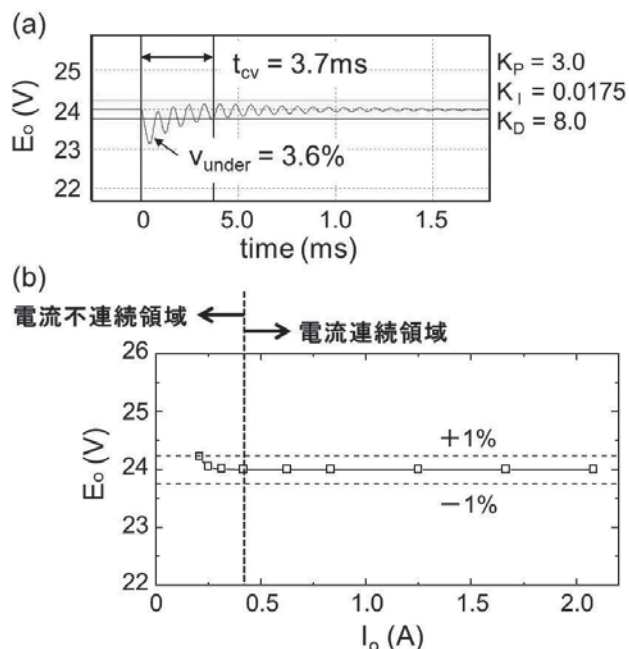


図3. (a) 過渡特性のシミュレーション結果、および (b) 出力電圧の安定性の実測結果

図2の結果をもとに比例ゲインおよび積分ゲインを調整し、微分ゲイン(K_D)も加えて、過渡特性のシミュレーションを実施した。図3(a)の横軸は時間、縦軸はコンバータの出力電圧である。出力電流を0.312A（定格の15%）から2.08A（定格値）までステップ変化させた場合の過渡応答特性を評価した結果、比例ゲイン：3.0、積分ゲイン：0.0175、微分ゲイン：8.0の条件において、出力電圧が目標値(24V)の $\pm 1.0\%$ 以内に収まるまでの収束時間は3.7msと短く、また、アンダーシュートも定格出力電圧の3.6%と低く抑えることができた。そこでSiCパワーデバイスを用いて試作したDC-DCコンバータに前置増幅器、DSP、駆動回路を接続し、デジタル制御でコンバータ出力電圧の安定性について評価した。図3(b)の横軸はコンバータの出力電流を、縦軸は出力電圧をそれぞれ示す。試作したコンバータでは、定格電流値の20%を臨界電流に設計しており、それを下回ると電流不連続領域、即ちリアクトル電流が不連続な状態となる。そのため、電流不連続領域においては出力電圧が異常上昇して出力が不安定となる。図3(b)より、出力電流を2.08A（定格値）から0.208A（定格の10%）まで徐々に下げていった場合、電流不連続領域においても出力電圧は

目標値(24V)の $\pm 1.0\%$ 以内に収まっているのが分かる。以上より、デジタル制御の導入によって、コンバータ出力電圧の安定化を実現した。

3. SiCパワーデバイス導入による双方向DC-DCコンバータの高効率化

これまでの結果をもとに、SiCパワーデバイスを導入した双方向型のDC-DCコンバータを設計・試作した。図4に回路構成を示す。昇圧及び降圧動作用のSiC-MOSFETとSiC-SBDをそれぞれ並列に接続しており、検出した出力電圧をデジタル値に変換してPID演算を行う。演算結果をもとに生成したパルス幅変調信号でSiC-MOSFETを駆動させ、コンバータ出力の安定化を図っている。

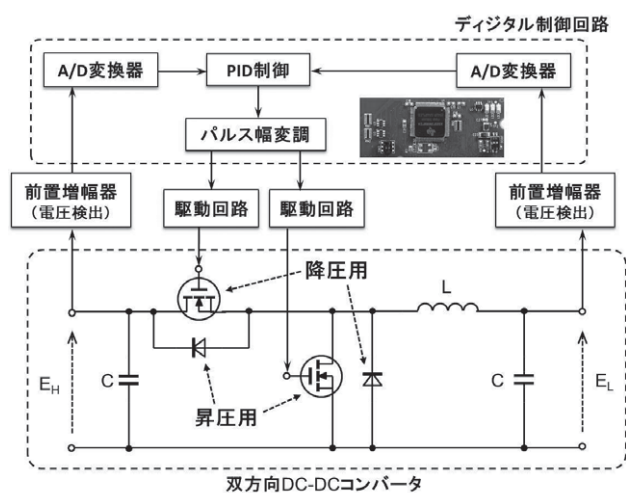


図4. 双方向 DC-DC コンバータの回路構成

図5(a)に試作機の外観を示す。SiCパワーデバイスを搭載したこの試作機は、出力電力を500W、スイッチング周波数を160kHzで設計し、電力変換部のみを実装した拡張用の別基板(出力電力：500W)を接続して並列運転させることで、電力容量を拡大できる仕様とした。定格入出力電圧は200V $\Rightarrow$ 100V（デューティ比：50%）で、定格出力電流を2.5A（昇圧）および5A（降圧）、インダクタンスを320 μ H、入出力キャパシタンスをそれぞれ220 μ F、330 μ Fに設定した。輻射を活用した放熱器を用いるため、他の電子部品への輻射熱の影響を抑える目的で、主な熱源となるパワーデバイスのみ基板の裏面側に配置している。

一方、比較用にSiパワーデバイスを搭載した基板(出力電力：250W、スイッチング周波数：40kHz)も設計・試作した。Siを用いた場合には、定格出力電流を1.25A(昇圧)および2.5A（降圧）、インダクタンスを1250 μ H、入出力キャパシタンスをそれぞれ820 μ F、1000 μ Fに設定した。

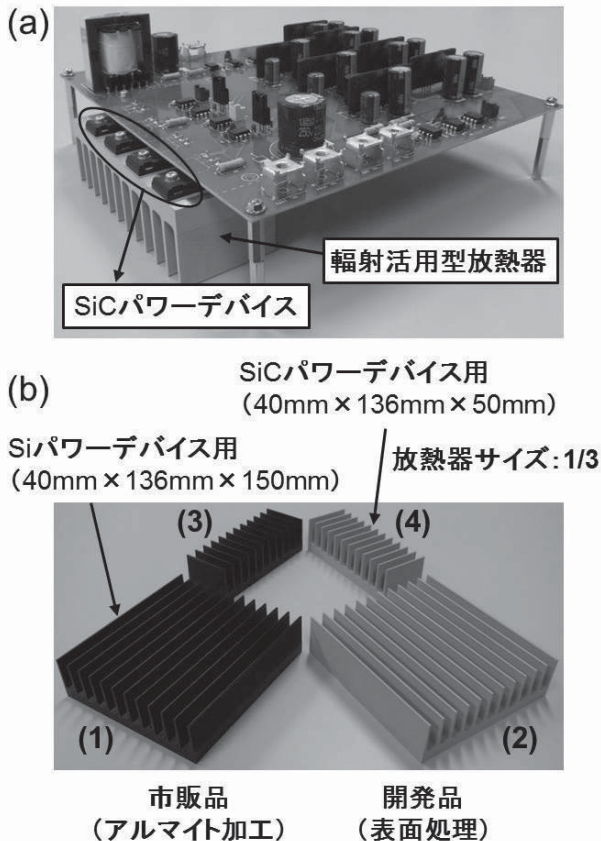


図5. (a) 試作機および (b) 放熱器の外観

図5 (b)には、放熱特性の評価に用いた4種類((1)～(4))の放熱器の外観を示している。図中(1)と(2)の放熱器サイズは、高さ:40mm (フィン高さ:30mm) × 136mm × 150mmで、(3)と(4)の放熱器サイズは、高さ:40mm (フィン高さ:30mm) × 136mm × 50mmであり、容積が1/3となっている。また、(1)と(3)の放熱器は市販のアルマイト加工品、(2)と(4)の放熱器は輻射率を向上させるための表面処理を施した開発品である。SiCもしくはSiパワーデバイスを搭載した試作機では、それぞれ電力容量も発生する損失も異なるため、コンバータの消費電力をシミュレーションで算出することで放熱器のサイズを見積もった。

図6に昇圧および降圧動作させた場合の変換効率について、既存のSiパワーデバイスを搭載した回路と比較した一例を示す。コンバータの負荷率を定格の100%から8%まで変化させ、変換効率を計測した。使用した放熱器は、Siの場合は図5 (b)中(1)に示したアルマイト加工された市販品で、SiCの場合は図5 (b)中(4)の表面処理を施した開発品であり、放熱器の容積は1/3となっている。Siでは出力電力:250W、スイッチング周波数:40kHzであるのに対し、SiCでは出力電力:1kW (2並列運転)、スイッチング周波数:

160kHzで動作させている。図6より、最大効率はSiが85.0% (昇圧)および82.3% (降圧)であるのに対し、SiCでは93.7% (昇圧)および92.5% (降圧)となっており、58%の損失削減効果を得ることができた。これにより、双方向DC-DCコンバータにおいて出力電力:1kW以上、変換効率:90%以上、スイッチング周波数:150kHz以上という本研究事業の目標値を達成した。

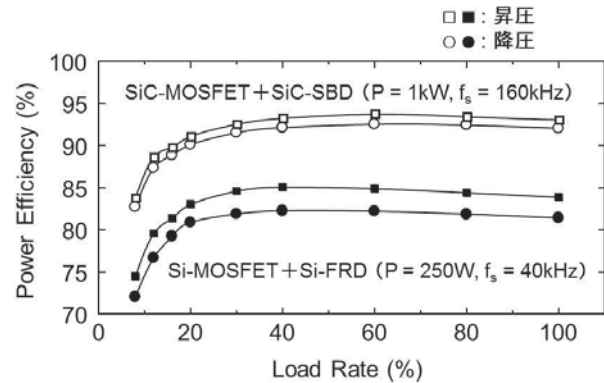


図6. 変換効率の負荷特性

4. 輻射活用型放熱器との融合による小型化

4-1. 放熱特性の評価

最後に、当センターで開発したSiC導入双方向DC-DCコンバータと、窯業技術センターで開発した輻射活用型放熱器を融合させ、電力変換装置全体の小型化について検証した。図7に試作機の放熱特性を評価した結果を示す。ここでは、図5 (b)に示した4種類の放熱器の番号と、図7の表中に記載した番号が対応している。まずは図5 (b)中(1)のアルマイト加工品と、同一形状/同一サイズの図5 (b)中(2)の表面処理品を用い、これらをSiパワーデバイスを搭載した双方向DC-DCコンバータに取り付け、スイッチング周波数:40kHzで動作させた場合の温度計測を実施した。温度計測を実施した箇所は、パワーデバイス(Si-MOSFETもしくはSiC-MOSFET)のパッケージ表面と、放熱器の表面である。ここでいう放熱器の表面とはパワーデバイスと接触する面のことであり、熱伝導の効果を低減させず、かつ、条件を合わせるために、アルマイト加工も表面処理も行っていないアルミ素地となっている。また、放熱特性を評価するにあたり、ファンは使用せず自然空冷とし、放熱器のフィン側は開放空間としている。

図7のグラフは、横軸にコンバータの消費電力を、縦軸左に室温(27℃)からの温度上昇値を、縦軸右に温度をとっている。図7より、パワーデバイス表面と放熱器表面のいずれにおいても、市販のアルマイト加工

品に比べて、開発した表面処理品を用いた場合の方が温度上昇を抑制できている。そこで次に、Si用の放熱器に比べ容積が1/3である図5(b) - (3)のアルマイト加工品と図5(b)中(4)の表面処理品を用い、これらをSiCパワーデバイスを搭載した双方向DC-DCコンバータに取り付け、スイッチング周波数：160kHzで動作させた場合の温度上昇値を計測した。図7より、放熱器の容積が1/3になったことでグラフの傾きは大きくなっているものの、開発した表面処理品を用いることで市販のアルマイト加工品と比較して温度上昇を抑制できることが確認された。放熱のメカニズムには「伝導」、「対流」、「輻射」がある。いずれの放熱器もパワーデバイスの接触面は未処理であるため、「伝導」の効果に差異はないと言える。窯業技術センターによる評価によれば、輻射率については、黒アルマイト加工品が0.82であるのに対し、表面処理品では0.88と向上している。輻射率の増大に伴い輻射熱抵抗は減少するが、対流熱抵抗はほぼ一定となるため「対流」の効果にも差異はないと言える。以上より、開発した表面処理を施すことによって「輻射」による放熱効果が増大し、市販のアルマイト加工品に比べて、温度上昇を約9%低減することができた。

4-2. 小型化の検証

図7に、コンバータを定格出力で動作させた場合の温度計測結果を併せて示している。SiとSiCを比較すると、SiCパワーデバイスの導入により電力損失を低減できるため、コンバータの出力電力が2倍、放熱器の容積が1/3であるにも関わらず、定格出力動作時の放熱器表面温度は同等(Si：68.9℃、SiC：68.7℃)で、パワーデバイスのパッケージ表面温度を約13℃低減(Si：107.2℃⇒SiC：94.4℃)することができている。電力変換回路と放熱器に加え、制御回路、前置増幅器、駆動回路、内部電源回路(±15V生成用)全てを考慮した場合、試作機を並列運転させることで出力電力を3kWまで拡大すると、SiCパワーデバイスおよび輻射活用型放熱器の導入により、双方向DC-DCコンバータ全体の容積を1/4以下に小型化できることが試算され、小型化についても本研究事業の目標値を達成することができた。

また、図7の結果に加えて、SiCパワーデバイス自体が高温動作性に優れていることを踏まえると、放熱器をさらに小型化できる可能性も十分にあると言える。

放熱器	温度計測位置	SiC搭載基板 (500W)	Si搭載基板 (250W)
アルマイト加工	パワーデバイス表面	(3) $\diamond$	(1) $\bullet$
	放熱器表面	$\blacktriangle$	$\blacksquare$
表面処理	パワーデバイス表面	(4) $\diamond$	(2) $\circ$
	放熱器表面	$\triangle$	$\square$

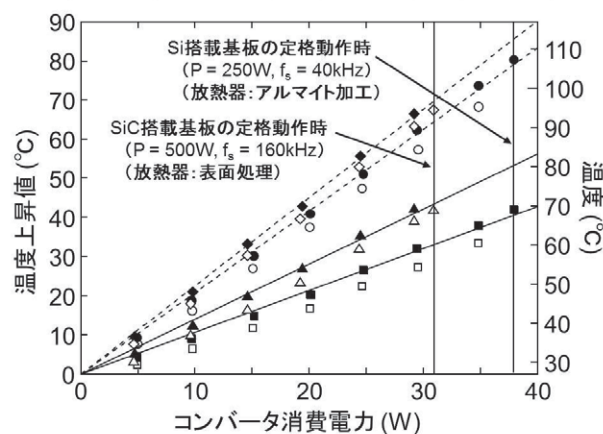


図7. 放熱特性の評価結果

5. 結 言

本研究事業では、SiCパワーデバイスとデジタル制御技術を導入した双方向DC-DCコンバータを開発し、既存のSiパワーデバイスを用いた場合と比較して、58%の電力損失削減を達成した。また、窯業技術センターで開発した輻射活用型放熱器と融合させることで、1/4以下への小型化が可能であることを示した。開発した双方向DC-DCコンバータは、家庭内直流バスや蓄電池の充放電などに応用可能である。今後は、県内企業への技術移転を行いながら、事業化に向けた取り組みを進めていく予定である。

参考文献

- [1] 松本寿彰、田井裕通、四戸孝：東芝レビュー Vol. 63 No. 11 (2008) .
- [2] 荒井和雄：Synthesiology Vol. 3 No. 4 (2010) pp. 259-271.
- [3] 田村聡之：Panasonic Technical Journal Vol. 58 No. 1 (2012) .
- [4] 茶谷原昭義、空野由明、坪内信輝、山田英明：Synthesiology Vol. 3 No. 4 (2010) pp. 272-280.
- [5] 中川豪、兵頭竜二、神田誠、阿部久雄、山口典男：平成26年度長崎県工業技術センター研究報告書 No44, pp. 5-7, 2015.

電気・電子機器のノイズ対策技法の確立

グリーンニューディール技術開発支援室 室長 兵頭 竜二
電子情報科 主任研究員 田尻 健志
電子情報科 主任研究員 中川 豪
グリーンニューディール技術開発支援室 参事 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。

初年度である平成27年度においては、新しい機器の内、PSE評価機器のマニュアル整備の準備として、日々の始業点検などに用いる擬似装置を製作した。そして、この擬似装置をターゲットとしたPSE評価試験を題材に、マニュアル整備を行った。また、電磁ノイズ対策技法の一助として、デジタル制御型の機器から放射されるクロック周波数に関連するノイズを低減する方法として、基準信号（クロック）の周波数に揺らぎを持たせる技法について調査を行い、その発信機の試作開発を行った。

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。

本研究事業は、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。

本研究事業の初年度である平成27年度は、導入された新しい機器の内、電気安全性を評価する機器（PSE評価機器）につてのマニュアル整備を行った。また、デジタル制御型の機器からクロック周波数に関連して放射される電磁ノイズの軽減方法について、初歩的な検討を行った。

2. 方法

2.1 PSE評価機器の機器利用マニュアルの整備

PSE評価機器は、試験対象機器の絶縁性能やアース導通性能などの試験を行う。これらは、高抵抗や低抵抗の測定であり、高電圧や大電流を伴う試験となる。従って、試験そのものへの安全性の確保と、試験結果の信頼性維持のためには、合格となる試験モデルと不合格となる試験モデルを準備して安全に正しい合否判定を得られるか否かを確認することが重要となる。

そこで、PSE評価機器のマニュアル整備の準備として、まず日々の始業点検などに用いる試験治具を設計・製作した。試験治具としては、(1)疑似装置、(2)低抵抗試験治具、(3)高抵抗試験治具の3つとした。

そして、これらの試験治具を用いたPSE評価機器の始業点検やPSE評価試験を題材にして、利用者向けの簡単な機器利用マニュアルの整備を行った。なお、対象となるアース導通試験器はTOS6200^[1]、耐電圧・絶縁抵抗試験器はTOS5302^[2]、漏電電流試験器はTOS3200^[3]であり、全て菊水電子工業(株)製である。

2.2 周波数に揺らぎを持つクロック信号の生成

デジタル制御型の機器は、基準信号であるクロック信号に同期して作動する。このため、このクロック信号に起因する電気ノイズを強く発散することがある。これは、一定の安定性を持った周期的な信号であるクロック信号を用いるために生じる懸念である。

このため最近では、敢えて安定性を無くしたスペク

トラム拡散型のクロック信号を用いることで、デジタル制御型の機器から放射されるクロック周波数に関連する放射ノイズを低減する技法が用いられることがある。

そこで、基準信号(クロック信号)の周波数に揺らぎを持たせる技法について調査を行い、その発信機の試作を行った。

3. 結果と考察

3.1 P S E 評価機器の機器利用マニュアルの整備

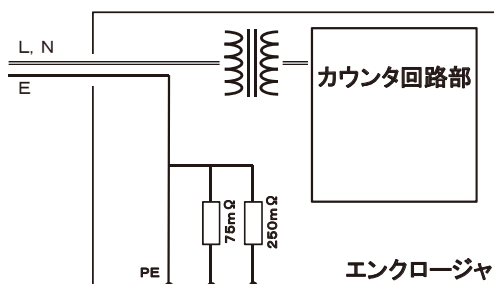
1) 試験治具の設計・製作

図1から図3は、製作した試験治具であり、それぞれ、(1)疑似装置、(2)低抵抗の試験治具、(3)高抵抗の試験治具である。

疑似装置(図1)は、P S E 関係の試験や来年度以降のノイズ試験などにも利用できよう、電源トランスで絶縁した電源回路部と簡単なカウンタ回路部で構成した。カウンタ回路部は、24.5454MHzのクロックを分周した10Hzを基準信号とした同期カウンタ回路である。また、商用電源への接続にはアース線付きの電源ケーブルを使用する様にしており、アース導通試験用に、抵抗値を変えた端子(0Ω 、 $75m\Omega$ 、 $250m\Omega$)をアース線に接続している。



(a) 外観



(b) ブロック図

図1 疑似装置

図2は、低抵抗の試験治具である。主は $500m\Omega$ (100W型)の大電力用メタルクラッド型抵抗器であるが、万が一の異常発熱に備えて放熱器に取り付けている。

図3は、高抵抗の試験治具である。絶縁抵抗の測定は、 $G\Omega$ オーダの抵抗値を測定することになる。しかも例えば、 $1G\Omega$ の前後で合否判定を行う場面などが想定される。このため、回路構成を工夫し、その接続ポイントの選び方によって、 $900M\Omega$ 、 $1G\Omega$ 、 $1.1G\Omega$ などの測定が可能な構成とした。

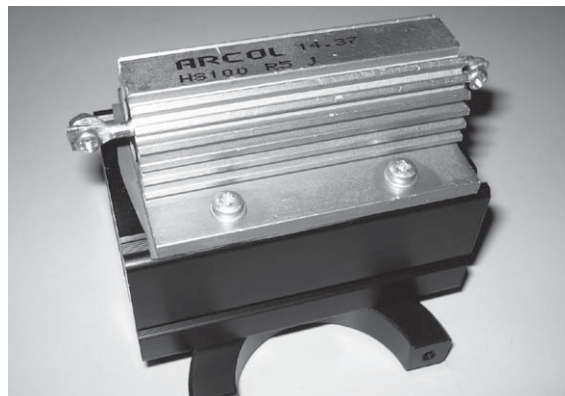
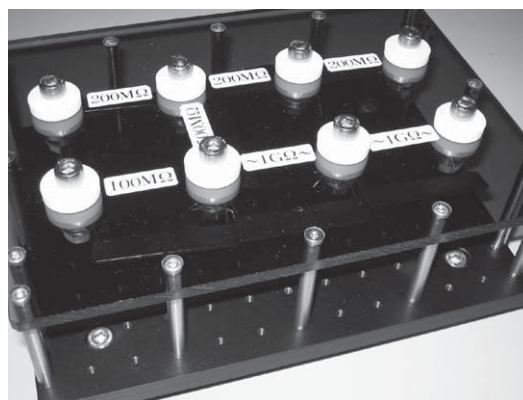
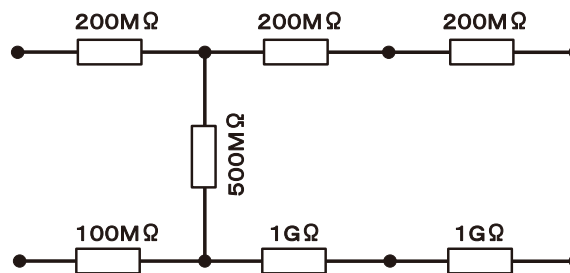


図2 低抵抗の試験治具



(a) 外観



(b) 回路図

図3 高抵抗の試験治具

2) 機器利用マニュアルの整備

図4はアース導通試験器について、図5は耐電圧・絶縁抵抗試験器についての、整備されたマニュアルに基づく始業点検の様子を示している。

アース導通試験器では、特定の閾値(例、100mΩ)をもって合格か不合格かの判定を行う。従って、始業点検では、この閾値近傍での合否判定の正さを確認することが必要となる。このため、図1に示した疑似装置のアース線と接続された抵抗値とを利用して、その始業点検を行う。

耐電圧・絶縁抵抗試験器でも同様に、特定の閾値(例、1GΩ)が用いられる。このため、図3に示した高抵抗試験治具を用いて、その始業点検を行う。

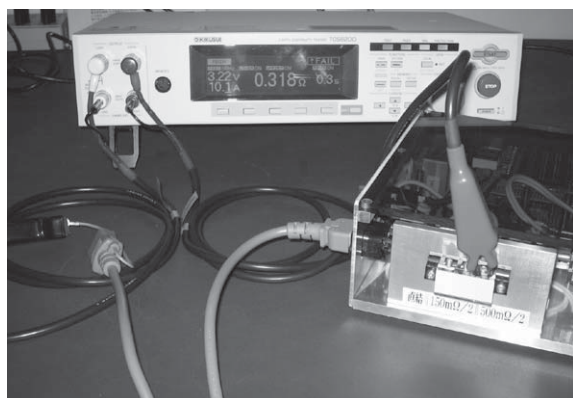


図4 アース導通試験器の始業点検

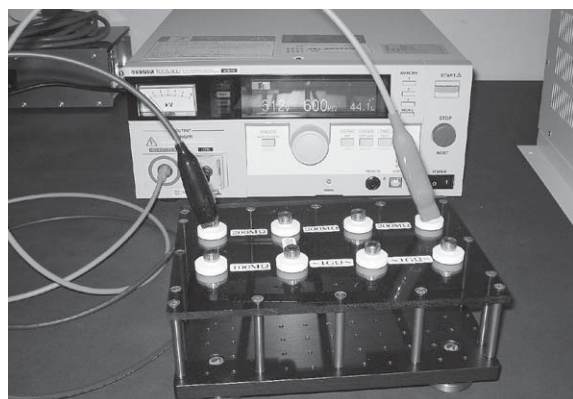


図5 耐電圧・絶縁抵抗試験器の始業点検

3.2 周波数に揺らぎを持つクロック信号の生成

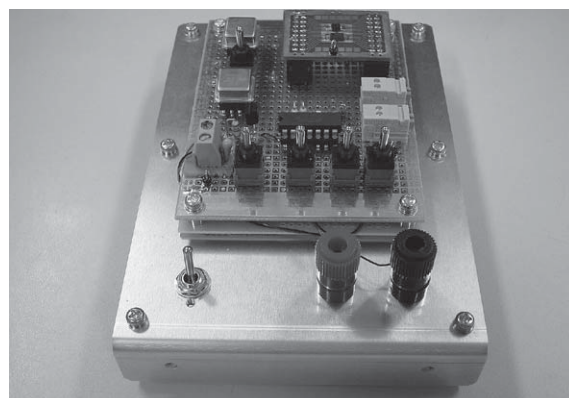
図6は、スペクトラム拡散クロック生成器の試作例である。この生成器は、8MHzまたは10MHzの発信信号に対して、テキサス・インスツルメンツ社製のスペクトラム拡散機能付きクロック・バッファを用いて、揺らぎを与えることができる構成となっている。

図7は、その作動状況を示している。同図(a)は、

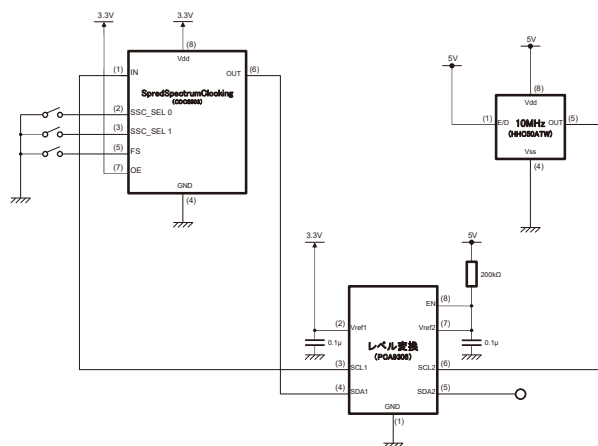
8MHzの水晶発振器からの出力信号のスペクトル解析の結果である。発信周波数である8MHzに鋭いスペクトルのピークがあることが確認できる。

同図(b)は、スペクトラム拡散機能を作動させた場合の、その出力信号のスペクトル解析の結果例である。この図から、入力信号である8MHzにピークがあるが、同図(a)と比較してその尖頭値が低減されていることがわかる。それに伴い、8MHzを中心にそのスペクトルが広がっていることが見て取れる。

このことから、スペクトラム拡散機能が期待どおりに機能していることが確認できる。



(a) 外観



(b) 回路図

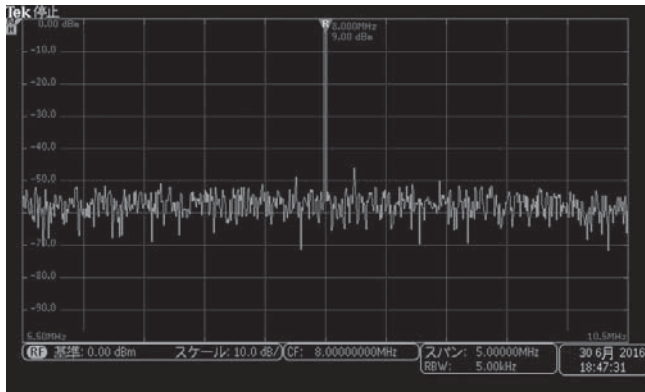
図6 スペクトラム拡散クロック生成器

4. 結 言

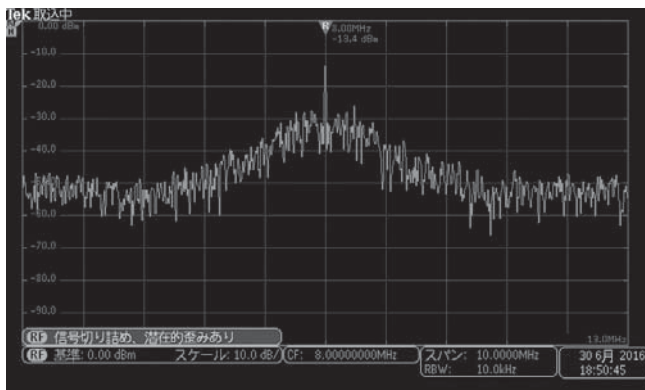
PSE評価機器のマニュアル整備の準備として、日々の仕業点検などに用いる疑似装置を設計・試作した。そして、この疑似装置をターゲットとしたPSE評価試験を題材に、マニュアル整備を進めた。今後は、対象機器を順次増やし、最終的には予定の8機種全てについてマニュアル整備を行う予定である。

リーケージカレントテスト TOS3200.

- [4] Texas Instruments Incorporated, CDCS503 Clock Buffer/Clock Multiplier With Optional SSC, <http://www.tij.co.jp/tihome/jp/docs/homepage.tsp> (Accessed 9 Dec. 2015).



(a) 通常の発信状態



(b) スペクトラム拡散の状態

図7 クロック生成器の作動状況

また、デジタル制御型の機器から放射されるクロック周波数に関連するノイズを低減する方法として、基準信号(クロック)の周波数に揺らぎを持たせる技法について調査を行い、その発信機の試作開発を行った。今回の確認実験では、生成された信号のスペクトルが期待どおりに拡散していることは確認できたが、この信号を組み込み機器などの基準信号とした場合、本来の機能が正常に働くか否か、あるいは不要な電磁放射がどのような挙動を示すか、などは確認できていない。これらの課題の評価については、今後の取り組みとして予定している。

参考文献

- [1] 菊水電子工業(株)、2013. ユーザーズマニュアル
アース導通試験器 TOS6200 TOS6210.
[2] 菊水電子工業(株)、2014. ユーザーズマニュアル
耐電圧／絶縁抵抗試験器 TOS5300 TOS5301
TOS5302.
[3] 菊水電子工業(株)、2013. ユーザーズマニュアル

機械装置知的遠隔監視装置の開発

機械システム科 科 長 田 口 喜 祥

県内中小製造業では、生産性を上げるため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、NC 工作機械を用いて機械加工を行っている企業では、工作機械の稼働状況、工具摩耗や交換時期、不具合の発生を遠隔監視して早急に対策を行いたいとの要望が強い。これまでは、複数の機械装置を担当者が個別に確認し、対策を行っていたが、ICT の技術を応用することで、複数の機械装置の状況を遠隔監視する装置開発が可能である。そこで、本研究では、既存の NC 工作機械に後付け可能な装置を用いて、工作機械の状態をセンサにより計測し、センサ情報の履歴を解析することで、工具交換時期などを予測する知的遠隔監視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、生産性を上げるため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、NC 工作機械を使用している企業では、少人数で複数の NC 工作機械を動かすことにより生産効率を上げることが可能であるため、工作機械の稼働状況、工具摩耗や交換時期、不具合の発生を遠隔監視し対策を行いたいとの要望が強い。

近年、工作機械を対象として品質工学の一手法である MT 法 (Mahalanobis-Taguchi Method) を用いてオンラインで取得したセンサ情報を基に、機械装置の寿命を予測することが試みられている^[1]。この手法は有望であるが、既存の工作機械に用いる場合、複数のセンサ装置を取り付け、取り付けた工作機械に対応した解析をすることが求められる。

そこで、本研究では、県内企業が保有している既存の NC 工作機械に、追加設置可能なセンサユニットを工場内に設置し、センサユニットからの情報を集計するサーバユニットを試作し、複数のセンサユニットから収集した情報から工具交換時期などを予測することを特徴とする知的遠隔監視装置の開発を行うことを目的とする。

このような知的遠隔監視装置を開発するために、平成25年度は、複数のセンサ情報を収集するための多チャンネルセンサユニットを試作した。平成26年度は、多チャンネルセンサユニットのデータを収集し管理するサーバユニットの試作を行った。平成27年度は、センサユニット、サーバユニットで構成される知的遠隔監視装置を用いて、機械装置から集めたデータを時系列と共に記録し、工具交換時期の予測を行うプログラム開発を行った。また、実験により有効性を確認にした。

2. システム構成

開発する知的遠隔監視装置のシステム構成を図1に示す。各種センサで取得する信号はコンピュータボードとセンサ処理回路で構成されたセンサユニットで取得し、Ethernetによりサーバユニットに送られる。サーバユニットではデータ収集、保存、メール送信などを行うサーバプログラムを起動しており、複数のセンサユニットで取得した各種データの管理を行う。また、距離画像センサやTVカメラなどの画像センサはサーバユニットに直接接続されており、センサユニットから送られてきたセンサデータと複合して処理を行うことで異常の発生を予測し、メールなどで通知する。

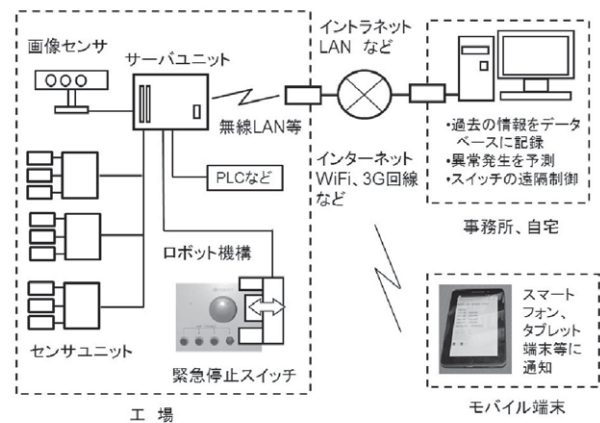


図1 知的監視装置のシステム構成

さらに、収集したデータから機械装置を緊急停止させる必要があると判断した場合は、メールなどで通知を行うと共に、サーバユニットから直接もしくはセンサユニットを介して機械装置の制御を行うプログラマブルロジックコントローラ (Programmable Logic Controller、通称シーケンサと呼ばれる。以下PLCと記

す。)や機械装置のスイッチを動かすロボット機構へ緊急停止信号を送信する機能を有する。

3. センサユニット

回線使用コストを考えると、センサユニット自体で取得したセンサ情報を事前に処理し、情報量を減らすことが求められる。また、安価なコンピュータボードを使用する場合、演算速度やAD変換器のサンプリング速度が問題となり、多チャンネルでのセンサ情報を処理することは難しい。

そこで、試作するセンサユニットは、電流波形なども計測するために高速なサンプリング周波数に対応する高速センサユニットと複数個所のデータを同時に収集することを想定し、安価なコンピュータボードを用いて複数チャンネルへの対応を可能にした多チャンネルセンサユニットの2種類を開発した。

高速センサユニットは、センサ信号を増幅した後、すぐにコンピュータボードでAD変換を行い、その後の処理は全てデジタル演算処理で行った。

一方、多チャンネルセンサユニットは、全ての処理をコンピュータボードによるデジタル処理で行うのではなく、一部の信号処理をアナログ演算回路で実現することで、低機能なコンピュータボードでも多チャンネルのセンサ情報を同時に取得することを試みた。さらに、アナログ演算回路を設計するとき問題となる、使用する部品のばらつきや使用時間による性能変化に対応するため、品質工学の手法^[2]を導入して多チャンネルセンサユニットを開発した。

一例として、工作機械の主軸電流を計測する多チャンネルセンサユニットの設計手法について述べる。このユニットはクランプ式のCT電流センサで取得した電流信号をアナログ演算回路により増幅、絶対値への変換、平滑化した後、コンピュータボードのAD変換器で読み込み、平均電流と相関がある積算値を算出する。表1に示すアナログ演算回路の設計パラメータである抵抗値、コンデンサの容量などを制御因子とし、表2に示すアナログ演算回路で問題となる外乱ノイズを誤算因子として、L18直交表を用いて図2の要因効果図を作成した。

要因効果図を基にアナログ演算回路を設計し、平均電流と相関がある積算値を算出し、クランプ電流計で計測した値との相関について調べた。実際に流れている電流をセンサユニットとクランプ電流計で計測し、センサユニットで取得した平均電流と相関があると考えられる積算値とクランプ電流計で計測した電流値の

相関を調べた。相関図を図3に示す。積算値とクランプ

表1. 制御因子

	1	2	3
負荷抵抗位置	A	B	-
ケーブル長	小	中	大
抵抗1	小	中	大
抵抗2	小	中	大
抵抗3	小	中	大
抵抗4	小	中	大
コンデンサ1	小	中	大
処理手法	A	B	C

表2. 誤差因子

最良条件	ノイズ無
最悪条件	ノイズ有

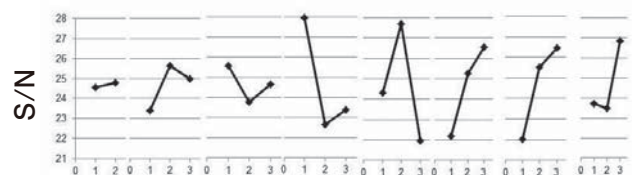


表1に基づく制御因子

図2. 要因効果図

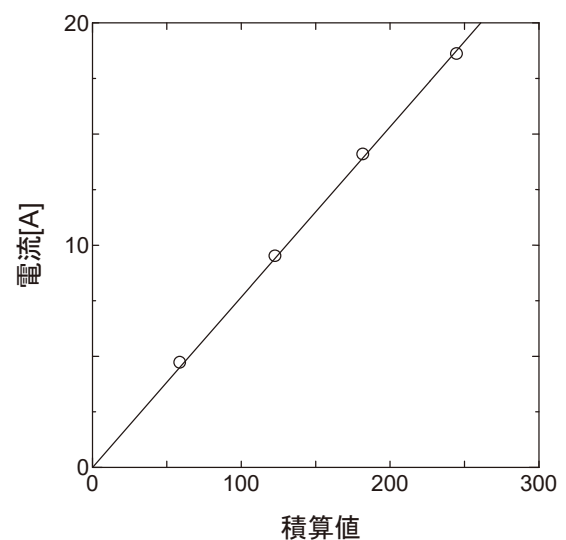


図3. 積算値と電流の相関図

電流計で計測した電流値について回帰分析を行ったところ、決定係数 R^2 は0.999であり、開発した多チャンネルセンサユニットを用いて、電流を計測可能であることが明らかとなった。

4. ロボット機構

監視を行っている機械装置の不具合を検出した場合、緊急性を伴わない不具合であれば電子メールなどの通知で十分であるが、過負荷や異常温度上昇など緊急性を伴う異常を検出した場合は、直ちに機械装置を停止するなどの処理を行うことが必要になる。通常の機械装置はPLCにより制御されているため、PLCに、外部からの信号により機械装置を停止する機能が有る場合は、監視装置からこの機能を用いること機械装置を停止することが可能となる。

しかし、PLCに外部からの信号により機械装置を停止する機能が無い、PLCへのユーザーからのアクセスが禁止されている、もしくはPLCに関する情報が得られない場合は、この方法により機械装置を制御することは難しい。

一方、ほとんどの機械装置は緊急時に手動により装置を強制停止させるためのエマージェンシースイッチやブレイカースイッチなどが取り付けられている。そこで、監視装置からの信号によりエマージェンシースイッチやブレイカースイッチの操作を行うロボット機構を開発することで、緊急停止動作を実現することとした。

開発したロボット機構は、スライドスイッチの操作を想定したスライドロボット機構と、押しボタンスイッチの操作を想定した押しボタンロボット機構の2種類である。試作したスライドロボット機構の写真を図4に、ブレイカースイッチにスライドロボット機構を取り付けたときの写真を図5に示す。



図4 スライドロボット機構

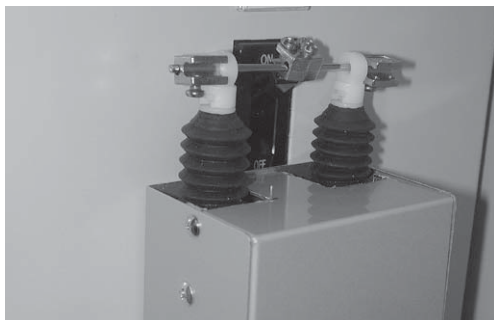


図5 スライドロボット機構(取り付け時)

スライドロボット機構を、ブレイカースイッチなどに取り付けることで、機械的にブレイカースイッチの制御を行うことが可能となる。今回、スライドロボット機構で使用したアクチュエータは、自動車のドアロック用スライド型アクチュエータで、電源電圧DC12V、消費電流4Aでストローク22mmのものを2セット用いた。スライドロボット機構の制御はワンボードコンピュータとモータードライバICを用いて試作した。

一方、押しボタンスイッチを想定した押しボタンロボット機構の試作も同様に行った。試作した押しボタンロボット機構の写真を図6に、取り付けたときの写真を図7に示す。

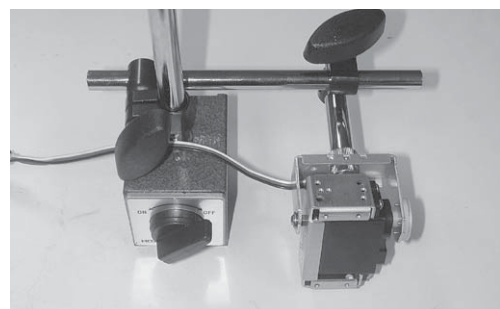


図6 押しボタンロボット機構

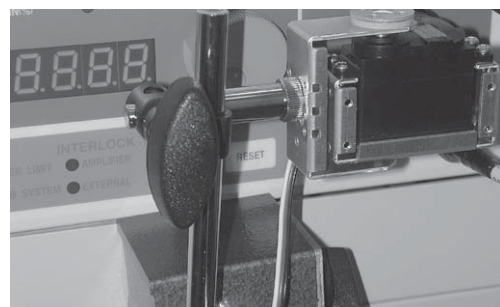


図7 押しボタンロボット機構(取り付け時)

今回、押しボタンロボット機構のアクチュエータとして、ラジコン用のサーボモータを利用した。ラジコン用のサーボモータは、数多くの種類が市販されており、大きさ、トルク、速度を対象とするスイッチに合わせて選定することが容易である。また、比較的安価で入手性も良いという特徴がある。今回は、コストを考慮し、ラジコン用サーボモータ1個で押しボタンスイッチを操作することとした。マグネットクランプにラジコン用サーボモータを取り付け、ラジコン用サーボモータの回転運動により押しボタンを作動させることとした。また、ラジコン用サーボモータの制御はワンボードコンピュータを用いてパルス信号を生成することで行った。

5. サーバユニット

サーバユニットは、複数設置されたセンサユニットからの情報を収集する機能、距離画像センサや画像センサから情報を読み取る機能、各種センサから送られてきたデータを基に特徴量を検出し複合処理して不具合予測を行う機能、不具合予測の結果をスマートフォンや携帯電話などに通知する機能が求められる。今回は、距離画像センサ(Microsoft Kinect v1^[3])のデータを処理可能なWindows7 32bit Home PremiumをOSとして用いるサーバユニット1と、Webカメラのみに対応する安価なRaspberry Pi B+マイコンボード^[4]を用いたサーバユニット2の2種類を試作した。試作したそれぞれのサーバユニット仕様を表3に示す。

表3 試作サーバユニットの仕様

	サーバユニット 1	サーバユニット 2
CPU	Intel Core i7 950 3.06GHz	ARM1176JZF-S 700 MHz
OS	Windows7 32bit Home Premium	Raspbian
画像センサ	Kinect V1 Web カメラ	Web カメラ
緊急停止信号の出力方法	センサユニット 経由で出力	センサユニット 経由および GPIO 出力端子

サーバユニット1の写真を図8に示す。サーバユニット1はEPSON製パソコンEndeavor NP25S にWeb、メール、FTPなどのサーバソフトをインストールすることで構築している。



図8 サーバユニット1 (Windowsコンピュータ)

一方、サーバユニット2は、安価なRaspberry Pi B+

マイコンボードを用いた。距離画像センサの接続はできないが、電気信号を出力可能なGPIO端子を搭載しているという特徴がある。そのため、直接緊急停止信号をGPIOから出力することが可能であり、機械装置の制御を行っているPLCに制御信号を直接送信できるという利点がある。

なお、Raspberry Pi B+マイコンボードは、電源切断時には、シャットダウンコマンドを実行しOSを停止した後に電源を切断しなければ、SDカードのデータが壊れて起動できなくなる場合がある。このような不具合を防ぐために、Raspberry Pi B+マイコンボードの電源をワンチップマイコン(Microchip社製 pic12F675)により制御する電源制御装置を製作して対策した。

試作した電源監視装置の構成を図9に、電源監視装置を組み込んだサーバユニット2の写真を図10に示す。電源制御装置は、電源スイッチの位置をワンチップマイコンで監視し、電源スイッチが切りから入りに変わった時に、Raspberry Pi B+マイコンボードにDC5V電源を供給する。一方、電源スイッチが入りから切りに変わった時は、Raspberry Pi B+マイコンボードへシャットダウン信号を送信し、シャットダウン処理終了後に電源を切る。なお、Raspberry Pi B+では、起動時にシャットダウン信号を監視し、シャットダウン信号を検出したら、シャットダウンを実行するプログラムを自動実行させている。

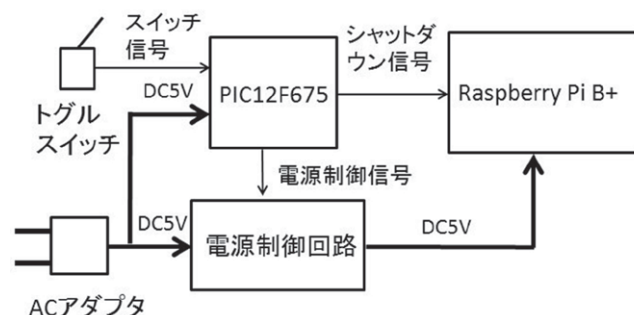


図9 電源制御装置の構成

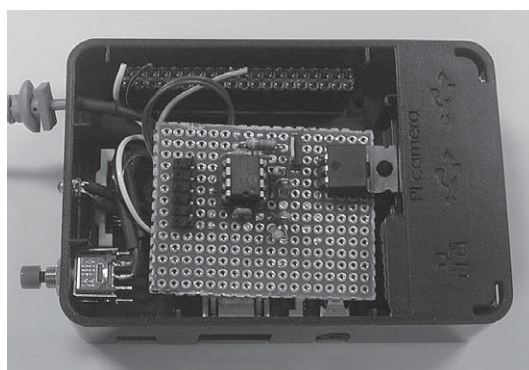


図10 サーバユニット2 (Raspberry Pi B+)

6. 予測監視プログラム

センサユニットおよびサーバユニットで構成される知的監視装置を用いて工具交換時期を予測するために予測監視プログラムを開発した。予測監視プログラムはMicrosoft社製Visual Studio 2010で開発し、サーバユニット1もしくは別に設置したWindowsパソコン上で作動する。なお、開発言語はC#を用いた。

開発したプログラムは、サーバユニットで収集したセンサデータを用いて工具交換時期を予測する機能を有する。工具交換時期を予測するために、工具が切削対象物から受けるエネルギーが工作機械主軸の消費電力と相関があるとの仮定のもとに、電力と時間の積算が規定値を超える前に工具交換の警告信号を発生するプログラムを開発した。開発したプログラムの起動画面を図11に示す。図11は高速センサユニットを用いて、工作機械の主軸電流を計測しているときの画面であり、高速センサユニットを用いた場合、電流波形の観測も可能となる。一方多チャンネルセンサユニットを用いた場合は電流の平均値を基に処理を行う。

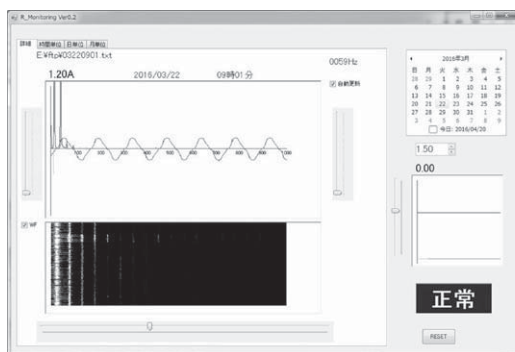


図11 予測監視プログラム

7. 実験

開発した知的監視装置の有効性を評価するために実験を行った。まず、図12に示した卓上型ボール盤(Hozan K-21)に図13に示すφ2.0mmのアルミカッターを取り付け、アルミ板(材質：A1050A)に穴を空ける。

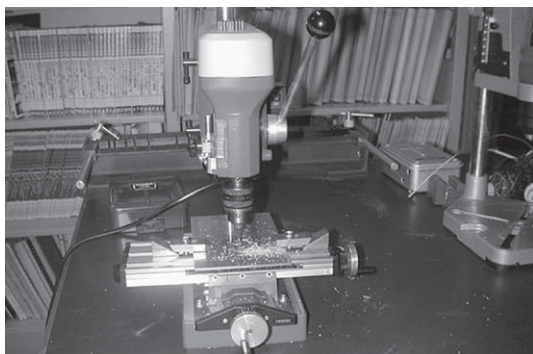


図12 実験に用いたボール盤



図13 アルミカッター

事前に工具に異常が発生し、工具交換を行う必要がある電力と時間の積算を実験により調べた後に、閾値を予測監視プログラムに入力し、工具交換時期の予測が可能かの実験を実施した。実験の結果、図14に示したように提案した手法により工具交換時期の予測が可能であることを確認した。



図14 工具交換時期予測実験

8. 結言

NC工作機械の工具交換時期を予測する知的遠隔監視装置を開発した。開発した知的監視装置を用いることで、工具交換時期の予測、NC工作機械の稼働時間の管理、不具合の通知などを行えることを確認した。

新たに実施する研究では、本研究の成果を基に、振動データを用いた予測の高精度化を行う予定である。

文献

- [1] 加藤, 堀口, 前田他: MT法による主軸寿命予知システムの開発(第2報), 品質工学研究発表大会 論文集20, pp.206-209, 2012.
- [2] 田村: よくわかるMTシステム, 日本規格協会, ISBN978-4-542-51133-0, 2009.
- [3] 川西, "Kinect for Windows SDK beta 概要", http://download.microsoft.com/download/0/7/5/07571244-F612-4936-8D0F-E6EE2839C7AE/20110711TF_UX_hiroyuk.PDF, Accessed 2011.
- [4] <https://www.raspberrypi.org/>, Accessed 2013.

機械フレームの軽量化設計支援ソフトウェアの開発

(最適化ソフトウェア開発のための API の整理と開発環境の構築)

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 上で作動する安価な最適化ソフトウェアが見当たらない。機能を限定することで最適化ソフトウェアを安価に提供できると考えられるため、機械フレームに限定し、Solidworks 上で作動する最適化ソフトウェアを開発し、中小企業に提供することを目的とした開発を実施している。本年度は、最適化ソフトウェアを効率良く開発するために、サンプルソフトウェアを作成し、開発における注意点を明確にした。

1. 背景

国内の 3 次元 CAD/CAE 市場は伸びており^[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、多くの製造業者が、工業技術センターが実施している Solidworks の実習セミナーに参加しており、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。

この最適化の自動化のために、サイバネット社の Optimus^[4]、テラバイト社の Genesis^[5]などの最適化ソフトウェアが存在するが、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、中小企業が使用することは困難である。

そこで、機械フレームに機能を限定し Solidworks 上で作動する最適化ソフトウェアを開発し、これを県内企業に提供することを目的とした。

2. 課題抽出と解決方法

Solidworks 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は、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) を用いて、開発を進めることが効率的である。

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 basic または 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。

ここで、開発する最適化ソフトウェアの概念図を図 1 に示す。開発する最適化ソフトウェアは、機械フレー

ムに限定した初期モデルを元に、「形状パラメータの決定」、「解析の実行」、「形状と解析条件の変更」を繰り返し、最適モデルを決定する。さらに、この最適モデルを用いて、「作図」を行う。

本研究の研究スケジュールを、表 1 に示す。1 年目である本年度は、「解析の実行」機能や「形状と解析条件の変更」機能、および、「作図」機能を効率良く作成・編集するため、表 2 の項目で API を分類し、ソフトウェアの開発環境を構築した。

なお、表 2 中アセンブリとは、複数の部品や他のアセンブリ (サブアセンブリ) で構成されたものであり、フィーチャーとは、組み合わせることにより部品を構成する基本形状のことである。

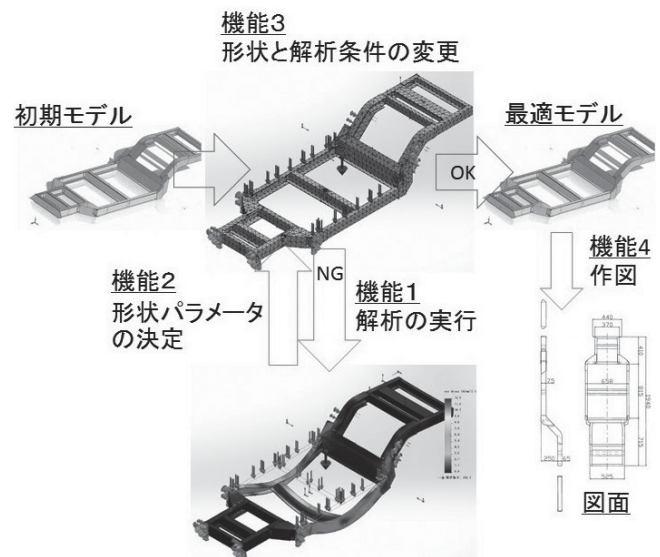


図 1 最適化ソフトウェアの概略図

表1 研究スケジュール

1年目	APIの分類と開発環境の構築
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改良

表2 APIの整理項目

A	部品編集
B	アセンブリ編集
C	フィーチャー内の巡回
D	フィーチャーツリー内の巡回
E	属性の追加
F	図面作成
G	シミュレーション

3. 計算実験

(1) 形状の変更・作図

「形状の変更・作図」機能の開発における注意点を明確にするため、表2のAからFまでのAPIを用いて、表3のサンプルソフトウェアを作成した。なお、開発環境は、表4のとおりVisual studio 2013 Communityを使用し、開発言語は、ネット上でサンプルコードが多いVisual Basicを使用している。

表3 サンプルソフトウェア

a	プリミティブな部品の自動作成
b	部品の自動組立
c	部品のサーフェスの巡回による色の変更
d	デザインツリーの巡回によるフィレットの抑制
e	NCプログラムの生成
f	規則に基づいた自動作図

表4 開発環境

OS	Windows 7 Pro (64bit)
開発環境	Visual studio 2013 Community
SDK	SOLIDWORK API SDK 2013
言語	Visual Basic

(2) 解析条件の変更・解析の実行

「解析条件の変更・解析の実行」機能は、Solidworks上で作動しているSolidworks SimulationにもAPIを用いてアクセスする必要がある。

前述同様、これらの機能の開発における注意点を明確にするため、表2のGのAPIを用いて、構造解析を自動的に実施するサンプルソフトウェアを作成した。なお、開発環境は、表5のとおりであり、2015年7月に、

Visual studio 2015 Communityがリリースされたので、これに乗り換えている。また、最適化ソフトウェアの開発には、Visual C#も使用する予定なので、これを使用した。

表5 開発環境

OS	Windows 7 Pro (64bit)
開発環境	Visual studio 2015 Community
SDK	SOLIDWORK API SDK 2013
言語	Visual C#

4. 結果と考察

(1) 形状の変更・作図

表2のサンプルソフトウェアを作成し、動作検証を行った結果、AからFまでのサンプルソフトウェアがSolidworks上で正常に作動することを確認した。例として、図2から図5に、サンプルソフトウェア「プリミティブな部品の自動作成」の動作を示す。

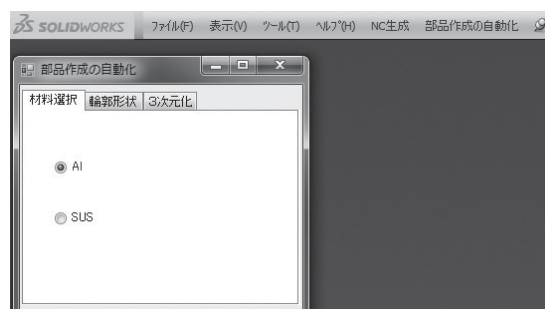


図2 材料の設定

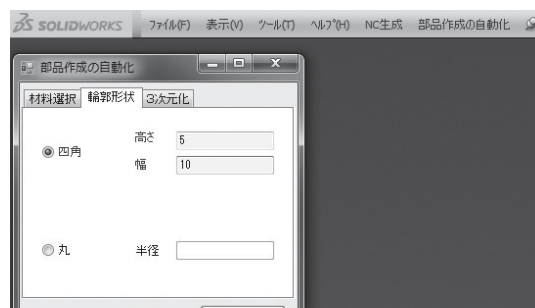


図3 輪郭形状の設定

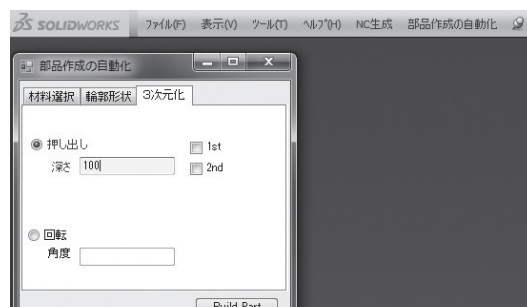


図4 厚みの設定

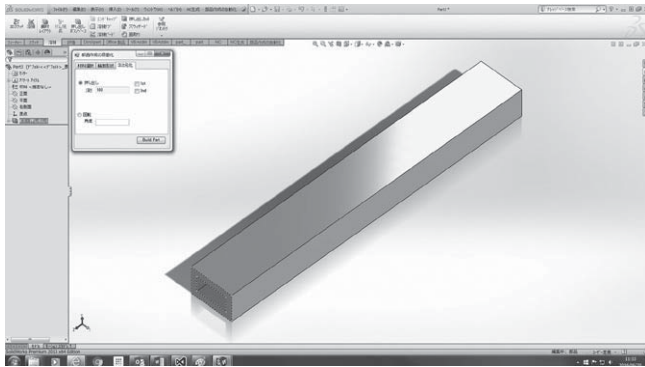


図5 3次元モデルの生成

これにより、最適化ソフトウェアの「形状の変更」機能や「作図」機能を効率よく開発できるようになった。さらに、県内企業の要望に応じて、Solidworksのインタフェースの簡略化や設計の一部の自動化を支援できるようになった。また、サンプルソフトウェアの作成において、以下のことが分った。

① Visual studio 2013で開発したアドインソフトウェアをデバックする際、開発したソフトウェアをSolidworksに登録する必要がある。Visual studio 2013で.NET Framework 4.0を使用した場合、開発したソフトウェアをSolidworksに登録することができるが、他のバージョンの.NET Frameworkの場合登録できない。

② Solidworks のアドインソフトウェアの開発において、Solidworks の動作が不安定になり、Solidworks をアンインストールし、再インストールしなければならないことがある。しかし、Windows に2015/7/15 付けのMicrosoft アップデート「Windows 7 for x64-Based Systems 用セキュリティ更新プログラム KB3072630」が適用されていると、正常にインストールできない。よって、このアップデートを削除する必要がある。

(2) 解析条件の変更・解析の実行

構造解析を自動的に実施するサンプルソフトウェアを作成し、動作検証を行った結果、サンプルソフトウェアがSolidworks Simulationにアクセスし、構造解析を実施することができた。これにより、最適化ソフトウェアの「解析条件の変更」機能や「解析の実行」機能を効率よく開発できるようになった。また、サンプルソフトウェアの作成において、以下のことが分った。

① SolidWorks SimulationのアクティブアドインやスタートアップがONになっている状態で、SolidWorks Simulationを立ち上げようとする、立ち上げコマンドがキャンセルされず、フリーズ

してしまう。よって、事前にアクティブアドインやスタートアップをOFFにしておく必要がある。

② OSをwindows8.1に変更した際、開発したソフトウェアが実行できなかったことがあった。今後、この原因を明確にする必要がある。

5. 結 論

以下に、本開発のまとめを示す。

- (1) 最適化ソフトウェアの「形状の変更」機能、「作図」機能を効率よく作成・編集できるようになった。また、これらの開発における注意点が明確になった。
- (2) Solidworks Simulationにアクセスする、最適化ソフトウェアの「解析条件の変更」機能、「解析の実行」機能を効率よく作成・編集できるようになった。また、これらの開発における注意点が明確になった。
- (3) 今後は、最適化ソフトウェアを開発するとともに、新しい最適化手法を提案する。

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-vQodIesMEw> (2015/3/2 アクセス)
- [4] 「optimus」 <<http://www.cybernet.co.jp/optimus/>> (2015/3/14アクセス)
- [5] 「Genesis概要」
<<http://www.terrabyte.co.jp/GENESIS/genesis1.htm>> (2015/3/14アクセス)

非接触による光学的非破壊計測技術の開発

電子情報科 科 長 下 村 義 昭

長崎県独自の非破壊計測手法である TFDRS 法 (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy) は光散乱や複数成分等による吸収の影響を受けない特徴を有しており、食品の品質測定や生体の組成計測等その適応範囲は非常に広い。しかし、試料表面と測定部との接触が十分ではない場合に表面から反射する光の影響を受けて大きな測定誤差が生じてしまう。そこで、本開発では TFDRS 法をベースに試料表面から反射する光と組成の情報を持つ試料内部からの反射光を分離する測定手法を検討した。その結果、試料内部からの反射光は多重散乱を受けて偏光状態が解消され、偏光子を用いた方法により試料表面から反射する光と分離することが可能であることを実験的に検証した。さらに、偏光子を用いた TFDRS 法ベースの非破壊計測手法によりもみ米でも実用的な測定精度が得られることを確認した。

1. 緒 言

近赤外分光法^[1]は1960年代に小麦粉の水分の測定方法として米国で考案され、今日では果実を初めとする食品の品質管理、さらには医療診断とその適用範囲は広がり非破壊・非侵襲計測における重要な分析手法となっている。これまでの近赤外分光法では試料からの反射スペクトルを計測し、その2次微分値と成分濃度を関連付ける検量線を多変量解析により作成して成分濃度を定量してきた。こうした微分処理を行うには連続したスペクトルデータが必要なためハロゲンランプと分光器を備えた計測システムが要求される^[2,3]。

一方、我々はこれまでに果実糖度の非破壊計測を目的に空間分解分光法^[4]をベースとした非破壊計測手法を提案した^[5,6]。1本の光照射ファイバーと2本の受光ファイバーを基本構成とする本計測手法をTFDRS法 (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy) と呼ぶ^[6]。

TFDRS法では、図1に示すように1本の光照射ファイバーを用いて果実にレーザー光を照射する。果実に照射されたレーザー光は果実内部で散乱と吸収を繰り返し、その反射光の一部が2本の受光ファイバーで受光される。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^[5]。

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

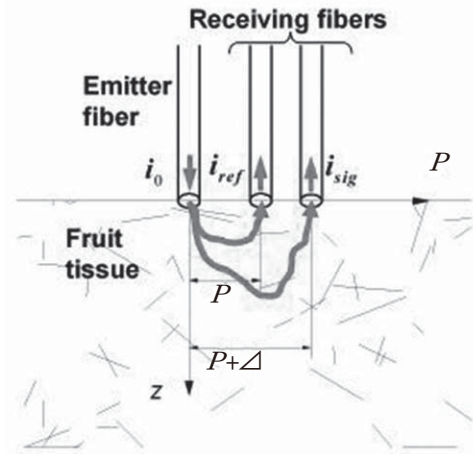


図1 TFDRS法の概略図。1本の光照射ファイバーを用いて果実にレーザー光を照射し、反射光の一部が2本の受光ファイバーで受光される。

ここで、 $R(\lambda_1)$ 、 $R(\lambda_2)$ 、 $R(\lambda_3)$ はレーザー光の波長 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 は検出距離 ρ や Δ の変化、あるいは果実個々で異なる散乱係数による散乱光路長の変化等に左右されない物理量で果実糖度との直線相関を示す^[5,6]。さらに、脂肪、水分、たんぱく等の光吸収に起因する複数因子 C_k ($k=1 \cdots m$) が含まれる穀物や生体では、複数の相対吸光度比 γ_k ($k=1 \cdots n$, $n \geq m$) を用いた下記の(2)式により、

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_k \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ \vdots \\ a_{k0} \\ \vdots \\ a_{m0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & & & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & \cdots & a_{kn} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_k \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

各組成 C_k を同時に計測することができる^[7]。

これらの特徴を有するTFDRS法を用いることにより、半導体レーザーや発光ダイオード等の離散スペクトル光源を用いた果実や穀物などの食品の品質や生体組成等の非破壊・非侵襲計測が可能となる^[5, 8]。図2はTFDRS法をベースに商品化に成功した携帯型糖度計を示す。本装置では、光源に近赤外領域の発光ダイオードを使用し、重量200g(電池重量含む)と世界最軽量を実現している。また、TFDRS法を用いることで、これまでの品種毎や収穫時期に応じた検量線の更新作業が不要となった他、太陽光などの影響を補正する外乱光補正機能を搭載することで、屋外での使用が可能となった。

しかし、TFDRS法では測定誤差の原因となる試料表面から直接反射する光の影響を防ぐために光を照射する測定部を試料に必ず接触させる必要がある。このため、既に商品化した携帯型糖度計を自動搬送の選果ラインに適用する場合、果実と測定部の接触状態を常に監視・調整する必要がある。また、穀物等、他の食品や生体の組成計測でも試料表面の凹凸が大きく測定部との接触が十分ではない場合にも表面から直接反射する光の影響を受けて大きな測定誤差が生じてしまう。

そこで、本開発ではTFDRS法をベースに試料表面から直接反射する光と試料組成の情報を持つ内部からの反射光を分離する測定手法を検討した。

2. 研究内容と結果

2.1 偏光解消を利用した非破壊計測手法

試料表面からの反射光と組成の情報を持つ試料内部からの反射光を分離する手法の概要を図3に示す。水平方向($\parallel$)に偏光した入射光 $I^0_{\parallel}$ は試料表面からの反射光 $I^s_{\parallel}$ と多重散乱の影響をうけた試料内部からの反射光 $I^i (= I^i_{\perp} + I^i_{\parallel})$ に分かれる。試料表面からの反射光 $I^s_{\parallel}$ は入射光と同じ水平方向に偏光しているため、水平方向($\parallel$)の偏光成分をブロックするように配置された偏光子($\perp$)により試料表面からの反射光 $I^s_{\parallel}$ はブロックされる。一方、内部反射光 I^i は多重散乱により偏光状態が解消され、垂直方向の偏光成分 $I^i_{\perp}$ のみが偏光子を透過して検出される。しかしながら、TFDRS法をベースに偏光子を透過した内部反射光 $I^i_{\perp}$ のみを用いた非破壊計測を実現するには、内部反射光の偏光状態が完全に解消された条件($I^i_{\perp} = I^i_{\parallel}$)が必要となる。

図4に偏光状態を評価する分光偏光リメータ(Poxispectra、東京インスツルメンツ社製)の概略図を示す。



図2 TFDRS法をベースに商品化した携帯型糖度計。光源に発光ダイオードを使用し、重量200gと世界最軽量を実現した。

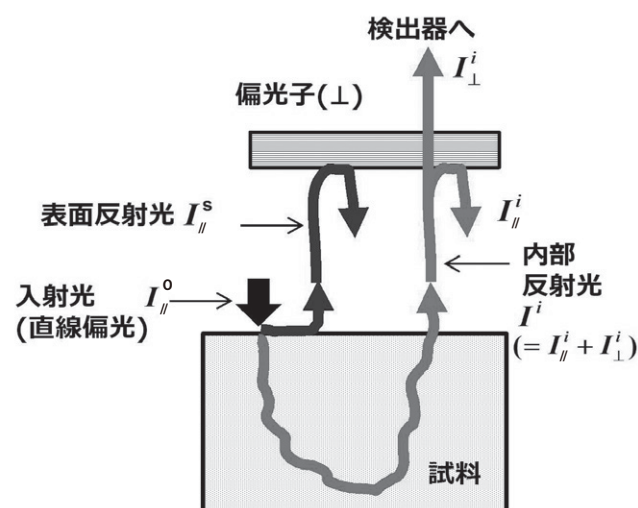


図3 偏光解消を利用した非破壊計測手法。入射光と同じ偏向方向の表面反射光は偏光子でブロックされる。一方、偏光解消した内部からの反射光は一部が偏光子を透過して検出される。

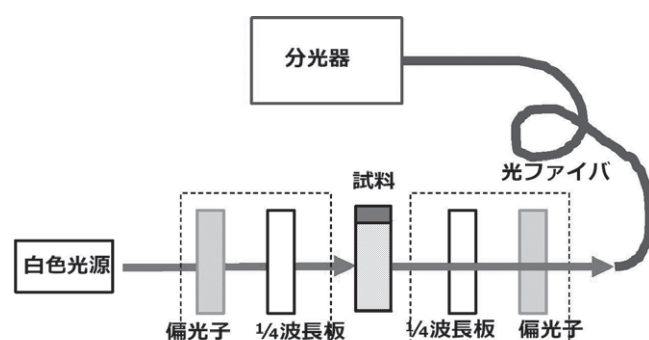


図4 ストークス偏光リメータの概略図。白色光源からの光を偏光子と1/4波長板で特定の偏光状態にして試料に照射する。試料からの透過光を再び1/4波長板と偏光子を介して分光器で検出してストークススペクトルの波長依存を測定する。

キセノン光源 (HPX2000、オーシャンオプティクス社製) からの光を偏光子と1/4波長板で特定の偏光状態にして試料に照射し、試料からの透過光を再び1/4波長板と偏光子を介して分光器 (Blackcomet型、ステラネット社製) で検出する。1/4波長板と偏光子を光軸周りに任意の角度で回転させることによりストークスベクトル $S^{[9]}$ を測定することができる。ストークスベクトル S は4つの成分 (I, Q, U, V) で表され、 I は入射光の強度、 Q は水平と垂直の直線偏光成分の差、 U は ± 45 度方向の直線偏光成分の差、 V は右回りと左回りの円偏光成分の差をそれぞれ表す。偏光状態の解消状態は下記式で定義される偏光解消度 DDP で定量化され、完全に偏光解消された場合に DDP は1となる^[9]。

$$DDP = 1 - \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (3)$$

図5に入射光を直線偏光とした場合の多重散乱による偏光解消度 DDP を測定した結果を示す。ここでは、粒径600 nmのポリスチレン溶液を3種類のセル長 L (1 mm, 2 mm, 4 mm) と2種類の濃度 (0.15 wt%, 0.25 wt%) で400 ~ 700 nmの波長範囲で測定した。横軸に示した等価散乱係数 $\mu_s' (\text{mm}^{-1}) \times \text{セル長 } L (\text{mm})$ の増加に伴い、偏光解消度 DDP は1に近づき、入射光の偏光状態が完全に無偏光状態になっている。

以上の結果から、果実や生体等の測定では等価散乱係数 μ_s' に応じて十分な検出距離を設定することで試料内部からの反射光の偏光状態を完全に無偏光な状態にすることができる。これにより、図3に示した偏光子を用いた手法により試料表面から反射する光と試料組成の情報を持つ試料内部からの反射光を分離した非破壊計測が可能となる。

2.2 偏光子を用いた検証実験

図6にTFDRSをベースとした反射率の計測システムを示す^[6]。光源に繰り返し周波数5 kHz, パルス幅100 ns以下、平均出力約60 mWの電子制御波長可変Ti: sapphireレーザーを用いた。レーザーの発振波長域は750 ~ 1060 nm (スペクトル幅1 nm以下) で、音響光学波長変換フィルター (Acousto-Optical Tunable Filter: AOTF) を用いることでレーザー光の波長・出力を機械的な駆動部無しで電子的に制御することができる。図中に示した検出プローブの中心に配置した光照射ファイバーを介してレーザー光を試料に照射し、一部試料からの反射光を検出プローブ中心から所定の半径

の2つの円周上に配置した16本の受光ファイバーで受光した。半径毎8本の受光ファイバーで集めた各反射光 i_{ref} , i_{sig} をそれぞれのInGaAs PINフォトダイオードで検出し、プリアンプで増幅した。この検出信号を2位相のロックインアンプで検出し、16 bitのAD変換ボードでサンプリング (5 ksps) した。入射光の波長を750 ~ 1060 nm の範囲を1 nmステップで掃引し、各波長の反射率 $R = i_{\text{sig}} / i_{\text{ref}}$ を50 msの時間間隔で平均した。

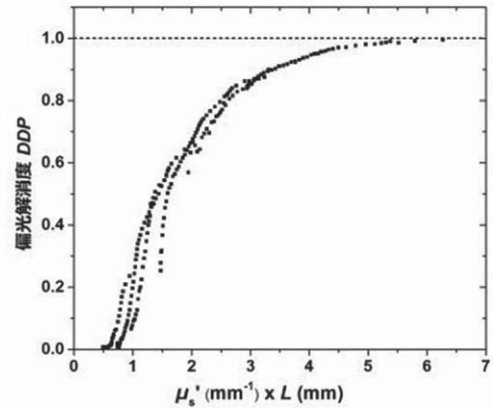


図5 ポリスチレン溶液を透過した光の偏光解消度。散乱係数 μ_s' と光路長 L の積の増加に伴い偏光解消度は1に近づく。

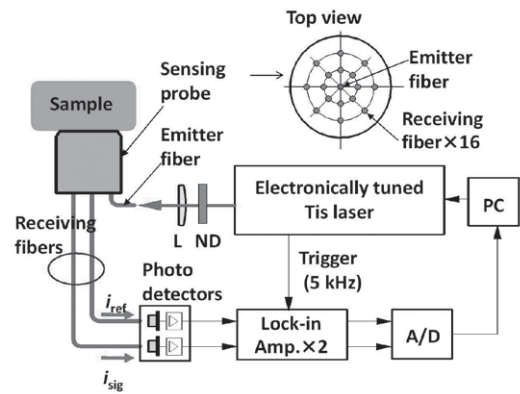


図6 TFDRS法をベースとした測定装置の概略図。光源に波長域750 ~ 1060nmの波長可変Ti: sapphireレーザーを使用した。検出プローブの中心に配置した光照射ファイバーからレーザー光を試料に照射し、光照射ファイバーを中心とした2つの円周上に配置した受光ファイバーで反射光を受光する。

図7は図6に示した手法により測定した(a)白米と(b)もみ殻付の米 (以下もみ米) の反射スペクトルを示す。図中の複数の反射スペクトルは同一サンプルを攪拌して複数回測定した結果である。白米ではサンプルの攪拌を行っても同じ形状の反射スペクトルを示している

が、もみ米では著しく反射スペクトルの形状に違いが生じている。これはもみ米では白米に比べて粒径が大きく、図8に示すように凹凸の大きな試料表面から反射する光の影響を受けたと考えられる。

図9に偏光子の無し(a)と有り(b)で同一サンプルを攪拌して複数回測定したもみ米の反射スペクトルを示す。偏光子には図10に示したワイヤグリッド偏光フィルム(WGF、旭化成イーマテリアルズ社製)を用いた。本偏光フィルムは樹脂を基材にAlのワイヤグリッド面が形成されており、可視から赤外までの広い波長範囲で利用できる。偏光子を用いることにより図9(a)に見られる反射スペクトルの形状の著しい乱れが低減されている。これは試料内部からの反射光が多重散乱を受けて偏光状態が解消されたことにより、偏光子を用いた方法により試料表面から直接反射する光と分離できたことを示している。図11は図9に示したもみ米の反射スペクトルから式(2)によって推定したもみ米の水分量とたんぱく質量を示す。偏光子が無い場合には、水分量で $\pm 8.5\text{wt}\%$ 、たんぱく質量で $\pm 4.8\text{wt}\%$ の推定値のばらつき(平均値)が生じている。一方、偏光子により表面からの反射光の影響を低減することで水分量、たんぱく質量の推定値のばらつき(平均値)は $\pm 0.4\text{wt}\%$ まで低減されほぼ実測値と同じ値が得られている。以上のことから、偏光子を用いたTFDRS法ベースの非破壊計測手法によりもみ米でも実用的な測定精度が得られることが検証された。

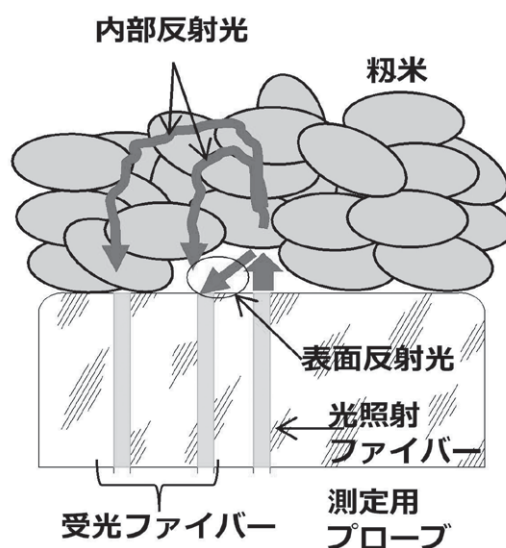


図8 もみ米表面からの反射光。この表面反射光が受光ファイバーで検出されてもみ米の反射スペクトルに乱れが生じてしまう。

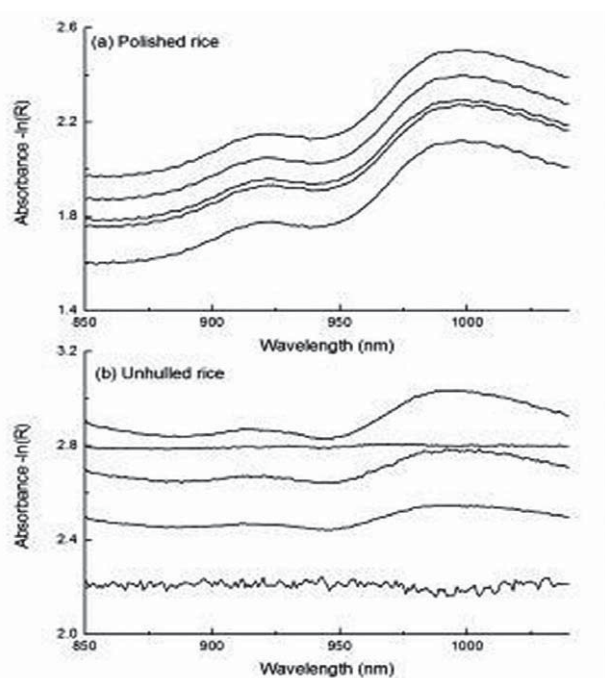


図7 (a) 白米と(b) もみ米の反射スペクトル。白米、もみ米とも同一のサンプルを攪拌して複数回測定した。

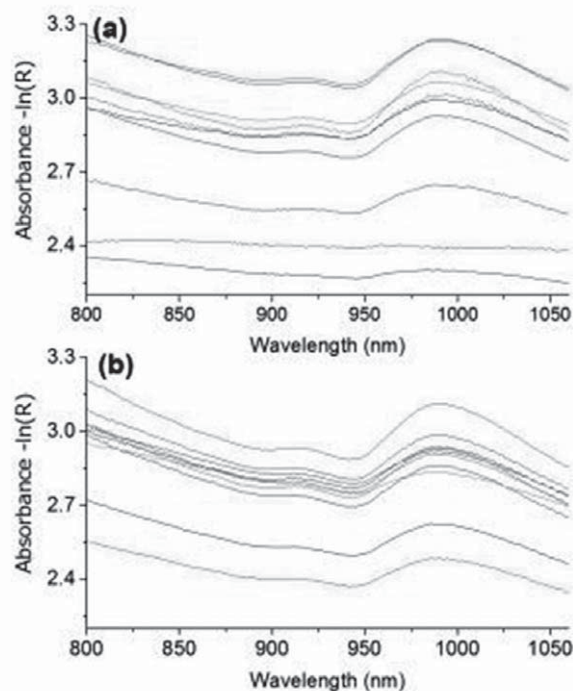


図9 (a) 偏光子無し、(b) 偏光子有りでそれぞれ測定したもみ米の反射スペクトル。同一サンプルを攪拌して複数回測定した。偏光子を用いることにより図9(a)に見られる反射スペクトルの形状の著しい乱れが低減されている。

3. 結 言

本開発ではTFDRS法をベースに試料表面から直接反射する光と組成の情報を持つ試料内部からの反射光を分離する測定手法を検討した。その結果、試料内部からの反射光は多重散乱を受けて偏光状態が解消され、偏光子を用いた方法により試料表面から直接反射する光と分離することが可能であることを実験的に検証した。さらに、偏光子を用いたTFDRS法ベースの非破壊計測手法によりもみ米でも実用的な測定精度が得られることを確認した。

参考文献

- [1]尾崎幸洋, 河田聡編:日本分光学会測定法シリーズ32 近赤外分光法(学会出版センター, 東京, 1996).
- [2]S. Saranwong, J. Sornsrivichai, and S. Kawano: J. Near Infrared Spectrosc. 11 (2003) 175.
- [3]森本進:非破壊計測シンポジウム講演要旨, 19 (2003) p. 31.
- [4]M. G. Nichols, E. L. Hull, and T. H. Foster: Appl. Opt. 36 (1997) 93.
- [5]下村義昭, 岡田龍雄:レーザー研究 33(2005) 620.
- [6]下村義昭:レーザー研究 39(2011) 233.
- [7]Y. Shimomura, S. Miki, T. Tajiri, and H. Tanaka:Proc. of IEEE/LEOS Annual Meeting, 274-275 (2009).
- [8]下村義昭, 田中精史, 立石賢二:レーザー学会 第378回研究会報告, RTM-08-29 (2008) 1.

- [9]C.F.Bohren and D. R. Huffman,Absorption and Scattering of Light by Small Particles (Wiley, New York, 1998).

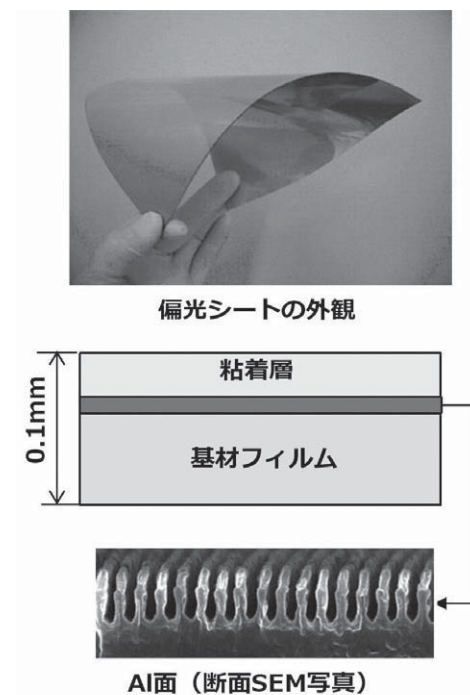


図10 ワイヤグリッド偏光シートの外観と断面図。

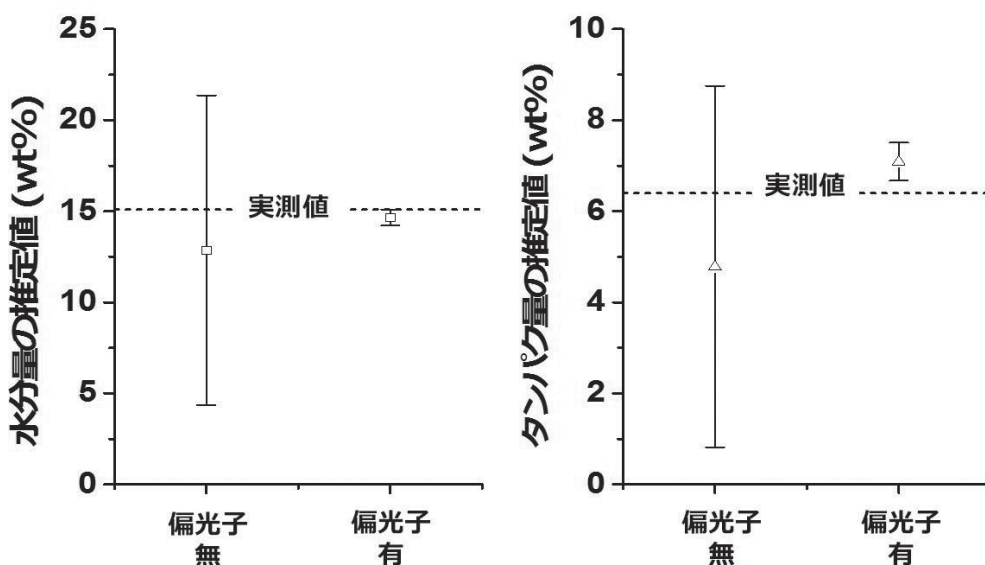


図11 TFDRS法により推定したもみ米の水分量とたんぱく質量。偏光子が無い場合には、水分量で $\pm 8.5\text{wt}\%$ 、たんぱく質量で $\pm 4.8\text{wt}\%$ の推定値のばらつき(平均値)が生じている。一方、偏光子により表面からの反射光の影響を低減することで水分量、たんぱく質量の推定値のばらつきは(平均値)は $\pm 0.4\text{wt}\%$ まで低減され、ほぼ実測値と同じ値が得られた。

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

長崎の主要なお土産品として、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活性化を図ることを目的とする。

本研究開発の2年度目である平成27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、デジタル製造技術を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名）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活性化を図ることとした。

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2年目となる平成27年度は、県産米の「にこまる」を原料としたペースト製造と、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」は、市販されている県産米を使用した。米をあらかじめ洗淨し、水切りした米に対して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、沸騰水で 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量(ml) 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。0.5% 濃度のセルラーゼで処理した炊飯米 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% 分添加し、50℃で 30 分間反応させた。その後、沸騰水で 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量(ml) を測定した。さらに、米の糖化程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. 2 デジタル製造技術を活用した新規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 切削加工機	
モデル形式	ワイヤ、サーフェス、ソリッド	切削方式	CNC3 軸切削加工
モデリング方式	フィーチャベース	機械的分解能	0.002mm/step
モデリングカーネル	342 × 342 × 200mm	造形サイズ	305 × 305 × 105mm
モデリング機能	ソリッド / サーフェスモデリング	送り速度	7 ~ 3,000mm/min (X,Y 軸)、 7 ~ 1,800mm/min (Z 軸)
入出力形式	IGES,STEP, Parasolid,STL	スピンドル回転数	4,500 ~ 15,000rpm

2. 2. 2 性能試験

本システムが新規菓子型製作に十分な性能を持つかの評価を行うため、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等と成型品の細部の再現性の試験を行った。

(1) 菓子形状の構築

菓子の押し型の場合、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である細部の詳細部分から構成されることが大半である。そこで、ベース部分は、大域的な自由曲面で表現し、詳細部分は特徴曲線を抽出し、それを軌道とする盛り上がりを表現する細かな断面が掃引される形状により表現することとする。その際、細部の断面は半径 0.75mm の加工工具で再現できる大きさとした。以上により構築した口砂香形状を図2 に示す。

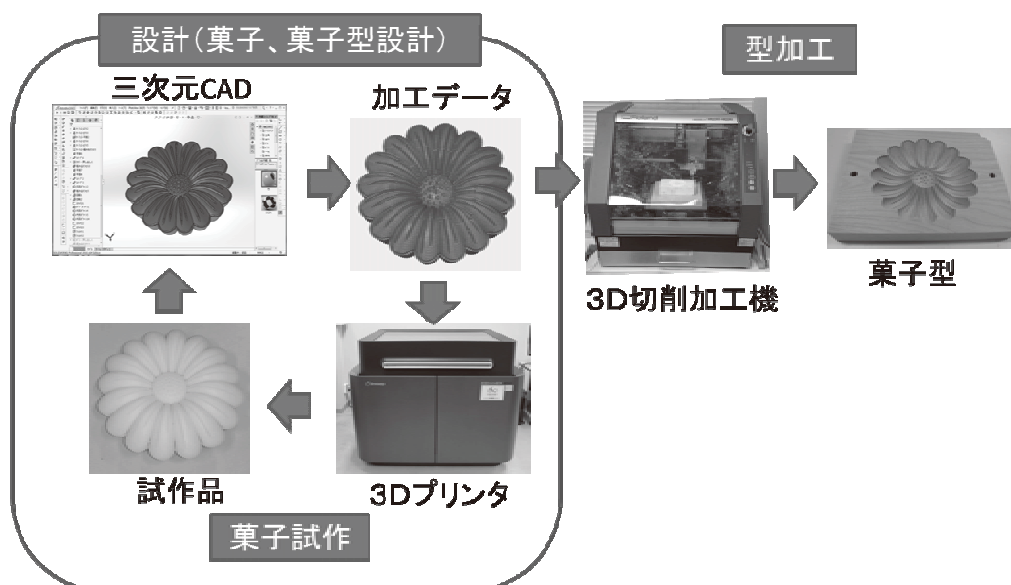


図1 システム構成

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3に示す。

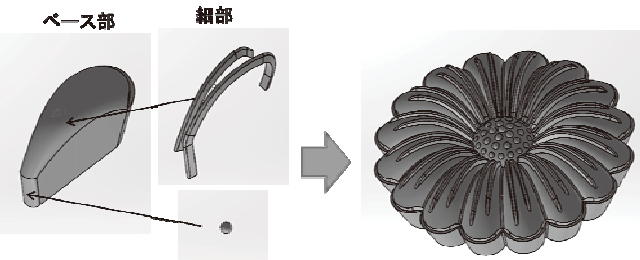


図2 口砂香形状のモデリング

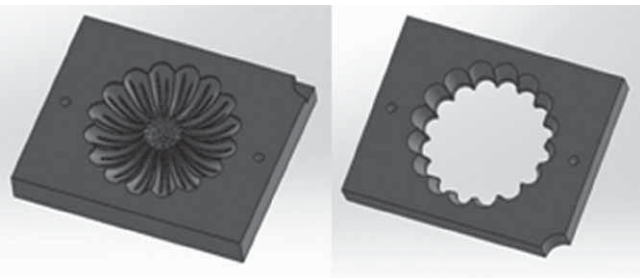


図3 口砂香菓子型形状(左:下型、右:上型)

(2) 菓子型の加工実験と細部の再現性試験

菓子型の加工は、材質としては、食品の型として使用可能な、木型としてがば桜と樹脂型としてポリアセタールを使用した。それぞれの加工データを表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の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。

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) R0.75 ボールエンドミル
切削速度 mm/min	荒) 450 (仕上げ) 450
スピンドル回転数 rpm	荒) 9,750 仕上げ) 9,750
切込み量/パス 間隔	荒) 0.30 / 1.20 仕上げ) 0.10 / 0.10
材質 ポリアセタール	
加工工具	荒) R1.5mm ボールエンドミル 仕上げ) R0.75 ボールエンドミル
切削速度 mm/min	荒) 450 (仕上げ) 450
スピンドル回転数 rpm	荒) 10,000 (仕上げ) 10,000
切込み量/パス 間隔	荒) 0.11 / 0.90 仕上げ) 0.10 / 0.10

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
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、0.1%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が、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た。

3.1.2 糖化酵素を用いた米ペースト製造法の検討

上記2.1.1で検討した、0.5%濃度のセルラーゼを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

ぜである「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(%)	エキス 量(ml)	デンプンの糖化 (A ₅₂₀)
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 量の増加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 0.5% 濃度でほぼ一定レベルに達していた。本結果からは、α -アミラーゼを用いた米ペースト 製造には、0.5% 以上の酵素剤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(%)	エキス 量(ml)	デンプンの糖化 (A ₅₂₀)
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 のように、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、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、本酵素剤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と 考えられた。

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. 2 加工と細部の評価

図4 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7 に示すとおり である。

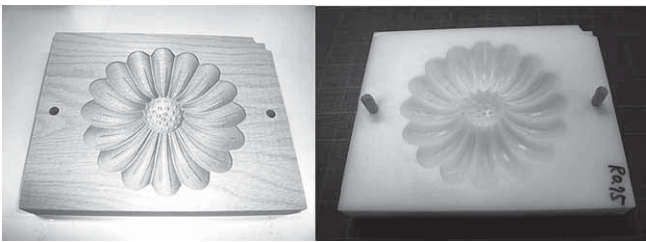


図4 菓子型(左 がば桜、右 ポリ アセタール)

表7 切削加工時間

材質	がば桜	ポリ アセタール
荒加工 min	258	515
仕上げ加工 min	1,174	1,174

図4 に示す菓子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5 に示す。

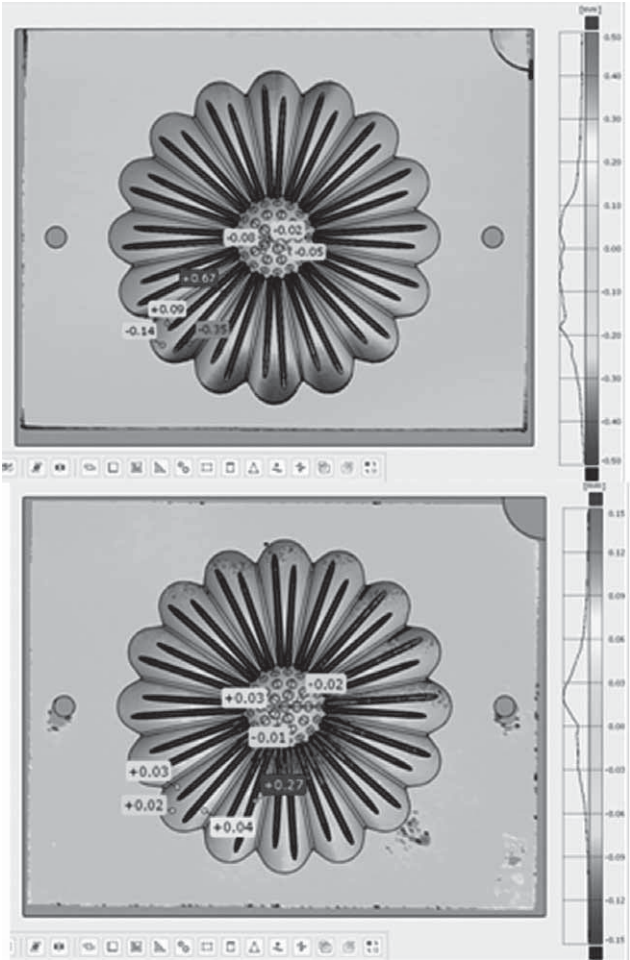


図5 偏差マップ(上 がば桜、下 ポリ アセタール)

ポリ アセタール樹脂の場合は、細部以外の滑らかな箇所に対応する地点の距離は 0.05mm 以下に収まっており、形状の滑らかさが十分に再現されていることがわかる。がば桜の場合は、部分的に 0.1mm 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が、0.5mm 以下には収まっており、菓子型としては十分な形状再現性である。この菓子型を用いて、実際に菓子を型どりした結果を図6 に示す。表面が滑らかに再現されていることがわかる。



図6 型取りした結果 左 がば桜、右 ポリ アセタール)

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。
今後は、反応時間などの酵素反応条件を検討し、米ペーストの製造法を確立する。
- 2) 三次元 CAD 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が確認できた。
今後は、得られた結果を元に、既存型、破損型、新規型への適応を行い、型の保存や活用を進める。

微小球共振光センサーを用いた微生物迅速検出装置の開発

電子情報科	主任研究員	田 尻 健 志
食品・環境科	主任研究員	松 本 周 三
九州大学大学院	教 授	今 任 稔 彦
徳島大学大学院	教 授	原 口 雅 宣

食品産業において、食品の安心安全の観点から、微生物汚染を未然に防止する自主検査が要望され、各社の製品特性に合わせた迅速・簡便で安価な検査方法の導入が必要とされている。本研究では微生物汚染物質を検出できるセンサーチップを作製し、高感度・迅速（リアルタイム）に検査できる光学検査法と融合することで、汚染された食材を20分以内で判別する自主検査用の迅速装置の開発を進めている。本報では、昨年度に構築した微生物汚染の判定システムを小型化した卓上型検出装置を開発し、ポリスチレン微小球（直径10 μm ）の散乱光スペクトルを、Mie散乱理論により評価した。また、散乱光から取得する共振ピーク波長を高感度・高精度にするため、平面基板の凹溝上に微小球を配置する検出方法について検証した。

1. 緒 言

食品の微生物検査は、厚生労働省が定める法定検査に加えて自主検査が実施されており、各社の衛生管理体制に合わせた効率良いスクリーニング検査を進める必要がある。また、食品業界にとって食の安全に係る事故は、企業のブランドイメージの失墜につながるようになるため、衛生管理体制を強化し事故を防止することが重要となっている。しかし、現在の微生物検査で主として利用される培養法は、食材から採取した細菌を培養して判定するため、結果が判明するまで最低でも2～10日を要している。また、スクリーニング検査に用いる迅速法も判定精度を上げるために培養法が併用され、精度と迅速性は不十分である。さらに、検査には専門的知識を有する専任の検査員が必要であり、検査の効率化や経費削減を進める企業にとっては、迅速で正確な検査を低コストで実現できる方法が求められている。

そこで本研究では高感度で培養前の迅速な判定を実現するために抗原抗体反応を利用した微小球センサーチップの開発、および、このセンサーチップに付着した微生物汚染物質を判定する光学判定システムの開発を進めている。

センサーチップで使用する微小球センサーは、ある条件下で微小球に光を入射すると、微小球内を周回する電磁波モードが発生し、特定波長の入射光が強く散乱されることが分かっている^[1]。この周回する特有の電磁波モードは、ウィスパーリング・ギャラリー・モード（Whispering Gallery Mode、以下WGモード）と呼ばれており、微小球表面状態（屈折率、コート厚み）に非

常に敏感である。このため、本研究ではこれらの特性を利用することで、微小球表面に付着した汚染物質を高感度に判定できるセンサーチップと検出装置の開発を行う。

本報では、昨年度に構築した微生物汚染の判定システムを小型化した卓上型検出装置を開発し、ポリスチレン微小球（直径10 μm ）の散乱光スペクトルをMie散乱理論と実験の両面で検証した。また、散乱光から取得する共振ピーク波長を高感度・高精度にするため、平面基板の凹溝上に微小球を配置する検出方法を考案し検証した。

2. 実験方法

2.1 卓上型検出装置の構成

平成26年度では、油浸対物レンズの全反射-減衰配置により単一の微小球を励起し、散乱光を検出する微生物汚染の判定システムを構築した。また、抗体、さらに抗原が結合した微小球の表面状態を散乱光スペクトルにより検証した^[2]。平成27年度は、構築した判定システムを基に、検査現場への持ち込み可能な卓上型の検出装置を開発した。

図1に示すように、検出装置はブレッドボード（W600mm×D450mm）上に、励起光源である白色光源（ENERGETIQ社製、LDLS白色光源EQ-99、 $\lambda=170\sim 2100\text{nm}$ ）と各光学部品素子を配置し、外乱光を遮蔽する暗箱（W370×D230×H300mm）内に微小球の観測部を設置した。白色光源からの励起光は、波長カットフィルタにより可視光領域のみを透過させ、偏光子（グラントムソンプリズム、GTPC-10-25AN）を90°回転す

ることで、ランダム偏光からTEとTMの偏光方向を選択した。また、暗箱の入光部にNDフィルタを設置し、励起光の光量調整と外乱光の入射を防止した。また、図2に示すように、微小球はCCD画像を確認しながら励起し、散乱光の検出時には暗箱内の前扉を閉じて測定する構造とした。

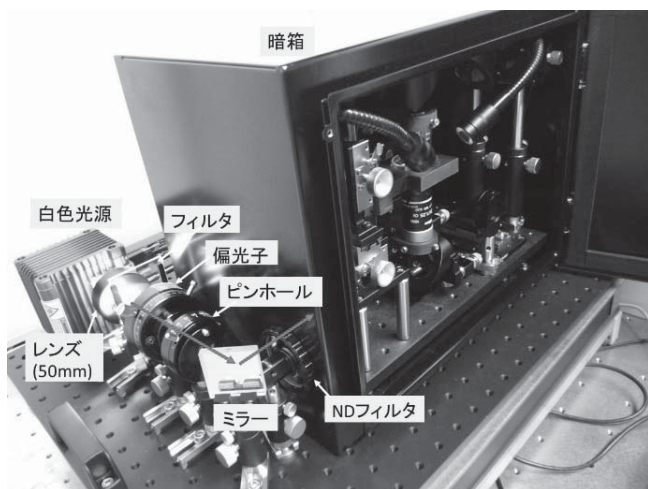


図1 卓上型検出装置の入光部

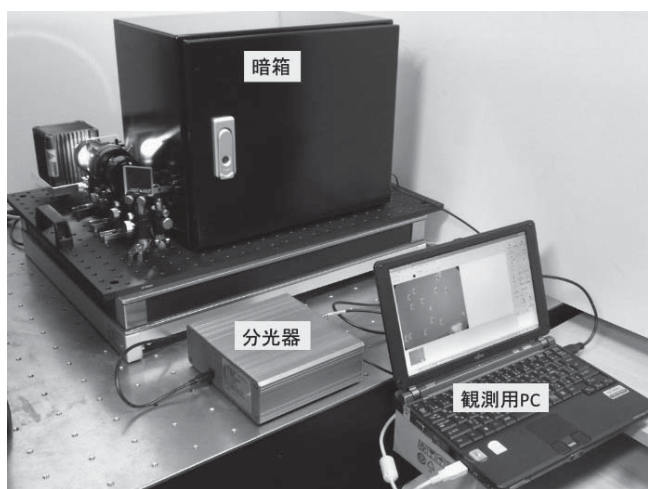


図2 微小球の観察および計測

図3に示すように、暗箱内では油浸対物レンズ(CFI 100×H、NA 1.25)を倒立型に設置し、XYZステージに設置したガラスベースディッシュの底面ガラスに全反射-減衰配置で入射した。カバーガラス上に配置した微小球は、エバネセント光により励起されWGモードの情報を含んだ散乱光を発生した。この散乱光を検出用する対物レンズ(CF IC EPI Plan SLWD 50×A、WD=13.8mm)は、XY方向に調整できるため、励起用の油浸対物レンズと光軸を調整した。検出用の対物レンズで受光した散乱光は、光ファイバーで導光させて

分光器で検出した。また、顕微鏡用USBデジタルカメラシステム(SCORP-ON-Direct USB、130万画素)を設置し、Y軸方向にミラーを移動することで、微小球の観察と計測を切替えた。

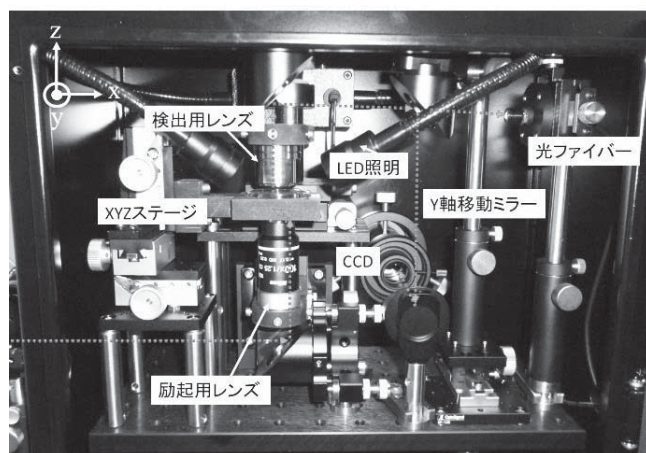


図3 暗箱内部の構造

2.2 卓上型検出装置の評価方法

図4に示すように、実験に使用したポリスチレン微小球(直径 $10\mu\text{m}$ 、屈折率1.59)は、周囲を純水($100\mu\text{L}$)で満たし、上部をカバーガラス(サイズ $24\times 24\text{mm}$ 、厚み $0.12\text{-}0.17\text{mm}$)で封止した後、散乱光を検出した。集光した励起光を標的の微小球のみに作用させることで、基板表面の付着物質や溶液中の不純物質による迷光を抑えた検出ができた。本検出装置では、油浸対物レンズの後焦点面に平行光を入射し、微小球径以下に集光した。また、微小球にWGモードを励起し、散乱光にTE偏光とTM偏光に対応した周期的な共振ピーク波長を確認した。なお、昨年度に構築したシステムと同等の性能を有しているか評価するため、 $580\sim 610\text{nm}$ の散乱光を分光器(PMA50)で検出し、Mic散乱理論の散乱断面積により共振ピーク波長の位置を検証した。

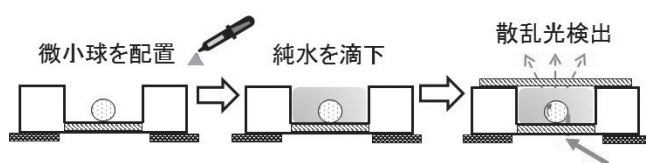


図4 微小球のWGモード評価

2.3 微小球共振光センサーの高感度・高精度化

微小球表面で抗原抗体反応が起こると、共振ピーク波長がスプリットし、S/N比とシフト量の精度が悪く

なる現象が確認された^[3]。図5 (a)は微小球を励起するスポット位置を示している。図5 (b)はTE偏光のみで微小球を励起しているが、(3)の斜め方向入射になると、TE偏光とTM偏光に対応した共振ピーク波長が同時に検出された。微小球を周回するWGモードがXZ平面に対して約45°傾いているために、TE偏光とTM偏光が同時に励起されたと推測する。このため、抗原抗体反応が起ると、微小球を周回するWGモードの方向が変化することが考えられる。さらには、抗原抗体反応により接触面が増加することで、微小球を配置しているカバーガラス側へ光が放射され、共振ピーク波長の強度が減少することが考えられる。

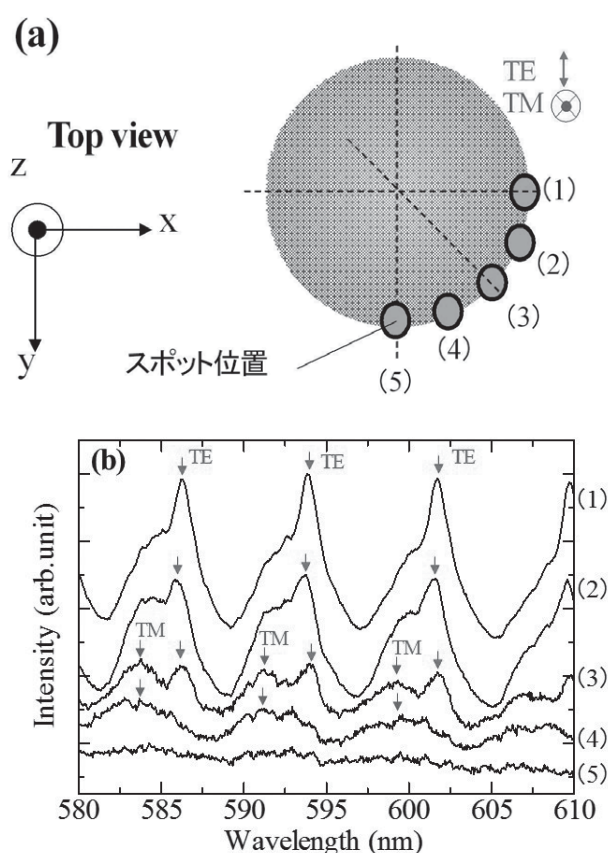


図5 共振ピーク波長のスプリット

そこで、図6に示すように、微小球とカバーガラスとの接触面を無くすため、マニピュレータシステムにハードメタルツール(先端径 $5\mu\text{m}$)を設置し、カバーガラスに球径の半分程度の凹溝形状の溝を切削した。次に、図7に示すように、シングル電極(先端径 $10\mu\text{m}$)に取り換え、切削した凹溝上に微小球を移動した。図8は、凹溝上に微小球を配置した模式図であるが、WGモードの軌道が基板と接触しなくなり、抗原抗体反応後の標的物質の増加による影響を抑えることがで

きる。なお、凹溝上に配置した微小球は切削方向(-X方向)にエバネセント光を作用させ、共振ピーク波長のスプリット現象や強度減少について検証した。検出部に滴下した分解酵素(β -Galactosidase)溶液の量は $100\mu\text{L}$ 、濃度は 10g/mL で15分間反応させた。

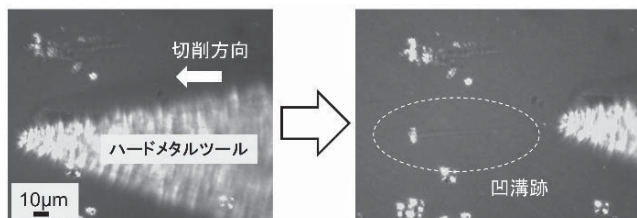


図6 凹溝形状の切削

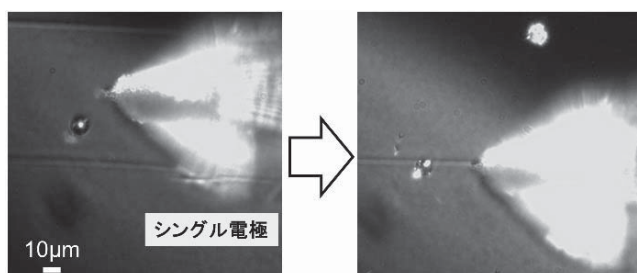


図7 凹溝への微小球の移動

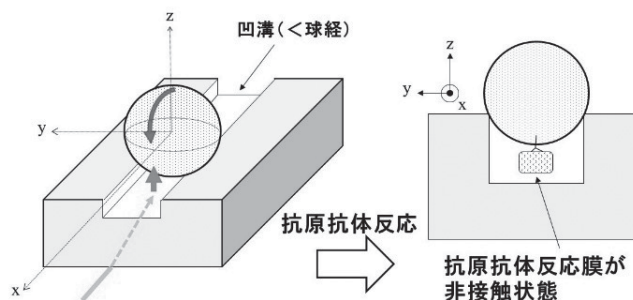


図8 凹溝上における微小球の表面状態

3 結果と考察

3.1 卓上型検出装置の性能評価

図9は、白色光源を励起用の油浸対物レンズで集光した状態を示すが、スポット径が微小球の直径以下に集光していることを確認できた。標的の微小球のみから散乱光を検出できるため、S/N比率が向上し、明瞭なWGMのピーク波形を検出することが可能となった。

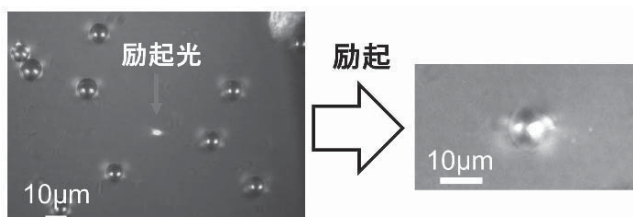


図9 微小球の励起状態

図10 (a)と(b)は、実験で取得した散乱光スペクトル、および、Mie理論による散乱断面積を示している。これらの縦軸強度は、ピーク波長の最大値によってそれぞれ規格化した。図10 (a)に示すように、TE偏光とTM偏光に対応した共振ピーク波長が検出され、各共振ピーク波長の間隔は7~8nmと確認できた。また、TE偏光の共振ピーク波長は、TM偏光の共振ピーク波長より2~3nm長波長側に確認できた。次に、図10 (b)に示すように、散乱断面積のピーク波長を図10 (a)の実験値で取得した共振ピーク波長にフィッティングさせると、微小球の直径(d)は10.04 μm 、微小球の屈折率(n_s)は1.59、周囲媒体(純水)の屈折率(n_{water})は1.33となり、ポリスチレン微小球の仕様と一致した。このため、図10 (a)で取得した周期的な散乱光ピーク波長は、ポリスチレン微小球を周回するWGモードであり、本検出装置が昨年度に構築したシステム^[2]と同等の性能を有することを確認できた。

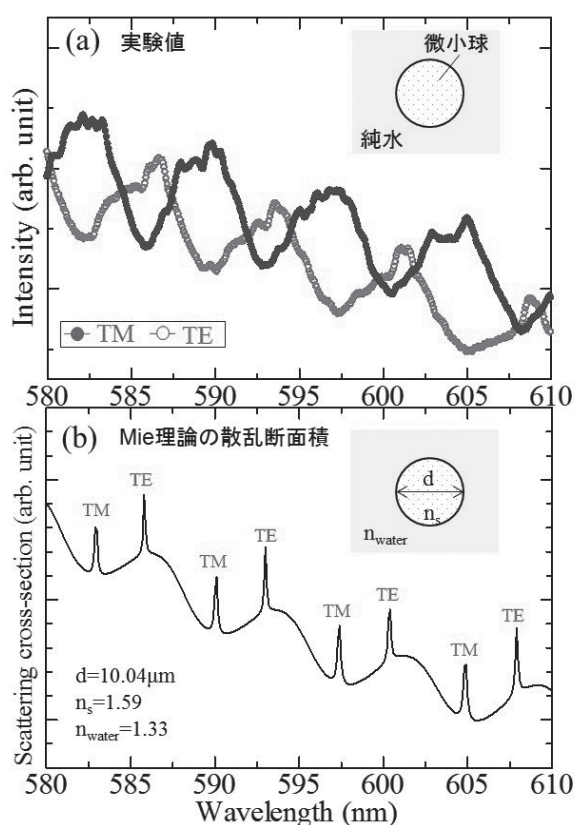


図10 微小球の共振ピーク波長

なお、本検出装置の仕様では、共振ピーク波長のシフト量を1nmの波長分解能で検出しており、判定時間は8分、検出下限濃度は5 $\mu\text{g/mL}$ となった。この検出下限濃度を守川らの酵素蛍光法^[4]^[5]により、大腸菌群の個数に変換すると 10^6CFU/mL と推定できた。さらに

は、分光器の波長分解能を1nm以下で検出することで、 10^5CFU/mL 以下の判定も可能となり、食品衛生法で規定する微生物の自主検査に対応できると考えられる。

3.2 凹溝上の微小球共振光センサーの評価

図11に示すように、凹溝上に配置した微小球に切削方向(-X方向)へのエバネセント光を作用させたところ、散乱光は発生しないため、凹溝が鏡面状態に切削できていることを確認できた。

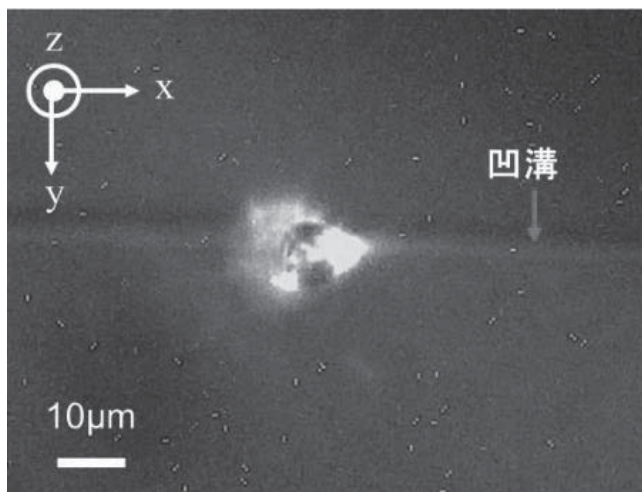


図11 凹溝上における微小球の励起

図12 (a)と(b)は、実験で取得した抗原抗体反応後の散乱光スペクトル、および、Mie理論による散乱断面積を示している。図12 (a)の基板の上に配置した微小球をTE偏光で励起すると、TE偏光の他にTM偏光に対応した共振ピーク波長も同時に検出された。一方、凹溝上に配置した微小球は、励起した偏光の共振ピーク波長のみが検出され、さらには、共振ピーク波長の強度が2倍程度になることを確認できた。これらは、微小球の表面が基板と接触しないために、球表面を周回するWGモードの方向が変化せず、放射損失も抑えていることが考えられる。

次に、図12 (b)に示すように、散乱断面積のピーク波長を図12 (a)の実験値で取得した共振ピーク波長にフィッティングさせると、微小球の直径(d)は10.04 μm 、微小球の屈折率(n_s)は1.59、周囲媒体(純水)の屈折率(n_{water})は1.33となり、ポリスチレン微小球の仕様と一致した。さらには、抗体と抗原の厚みは30nm、屈折率は1.50と算出でき、これらの数値は抗体と抗原が結合した大きさと屈折率にほぼ一致した^[6]~^[11]。

このため、凹溝上へ微小球を配置する本計測手法は、共振ピーク波長のシフト変化を高感度・高精度に評価

し、微量な標的物質への検査に利用できることがわかる。

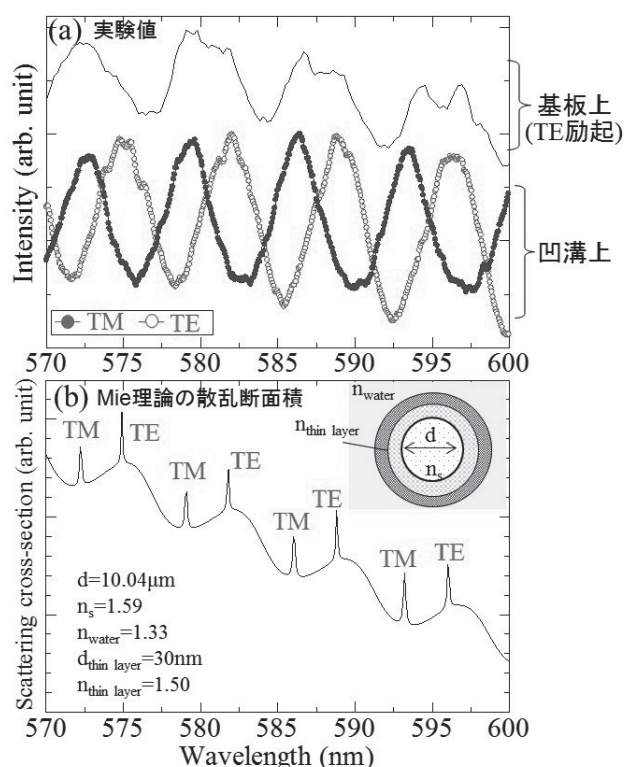


図12 凹溝上に配置した微小球のWGモード

4. 結 言

微小球共振センサーを利用した卓上型検出装置を開発し、溶液中で微小球を周回するWGモードを確認することができた。微小球の散乱光から取得した共振ピーク波長は、Mie散乱理論の散乱断面積と一致し、微小球表面への汚染物質の吸着判定評価が可能であることがわかった。波長分解能を1nmで検出している現状の本検査装置の仕様では、大腸菌群の産生する分解酵素(β -Galactosidase)を8分で判定し、検出下限濃度は $5 \mu\text{g/mL}$ となる。分光器の波長分解能を高めることで、食品衛生法で定める 10^5CFU/mL 以下の微生物の迅速判定が可能であることがわかった。また、共振ピーク波長を高感度・高精度に検出する手法として、凹溝上に微小球を配置することで、抗原抗体反応後の共振ピーク波長のスプリットと放射損失を抑えることができた。今後、検査装置の実用・事業化を図るためには、標的となる検査対象物から夾雑物を取り除き、シフト量の再現性を高めていく必要がある。また、微小球共振センサー技術を活用することで、環境・健康・医療分野への応用展開も図っていく。

参考文献

- [1] 福井萬壽夫, 大津元一, 光ナノテクノロジーの基礎, オーム社 (2003)
- [2] 田尻健志, 松本周三, 今任稔彦, 原口雅宣, 長崎県工業技術センター研究報告, No44, pp. 24-27 (2015)
- [3] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto, and M. Haraguchi, IEEE Sensors 2014 Conference Proceedings, pp. 641-644 (2014)
- [4] 守川彰, 古川誠司, 酵素蛍光法を用いた大腸菌群数計測装置の開発, 環境システム計測制御学会誌, 9 (2), pp. 127-132 (2004)
- [5] 守川彰, 上山智嗣, 古川誠司, 河相好孝, 石田稔郎, 大腸菌群数計測装置を用いた高効率オゾン消毒システムの開発, 水環境学会誌, 30, 3, pp. 139-144 (2007)
- [6] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto, and M. Haraguchi, Anal. Sci., 30, 799-804 (2014)
- [7] X. Fan, I. M. White, S. I. Shopova, H. Zhu, J. D. Suter, and Y. Sun, Anal. Chim. Acta, 620, 8 (2008)
- [8] J. Voros, Biophys. J., 87, 553 (2004)
- [9] L. F. Pease III, J. T. Elliott, D. Tsai, M. R. Zachariah, and M. J. Tarlov, Biotechnol. Bioeng., 101, 1214 (2008)
- [10] Y. H. Tan, M. Liu, B. Nolting, J. G. Go, J. G. Hague, and G. Y. Liu, ACS Nano, 2, 2374 (2008)
- [11] T. Skalova, J. Dohnalek, V. Spiwok, P. Lipovova, E. Vondrackova, H. Petrokova, J. Duskova, H. Strnad, B. Kralova, and J. Hasek, J. Mol. Biol., 353, 282 (2005)

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)

応用技術部 部長 藤本和貴

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する。

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. 緒言

本研究では、組込み技術、センサネットワーク技術、ビッグデータ解析を要素技術として、その応用技術開発を行う。

組込み技術は産業用・家庭用の機器で電子制御・計測を行うもの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、応用分野が広い技術である。汎用コンピュータ(PC等)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。

また、センサネットワーク技術は数多くのセンサを配置して有機的に結合し、協調して動作する技術であり、環境・機器の計測・制御に用いる技術である。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・土壌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。収集した多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. 目的

本研究では、センサネットワークおよびビッグデータ解析を応用した計測・解析システムの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。

具体的には以下のものを行う。

- ・センサネットワークを介したデータ収集
計測機器に通信機能を組み込んでデータの収集を行うシステムを構築する。計測対象は温度・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。
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する。
- ・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

タを蓄積し、解析を行うシステムの構築を行う。解析のためのサーバとして、ローカルサーバを構築する手法とクラウド上のサーバを利用する方法を検討する。

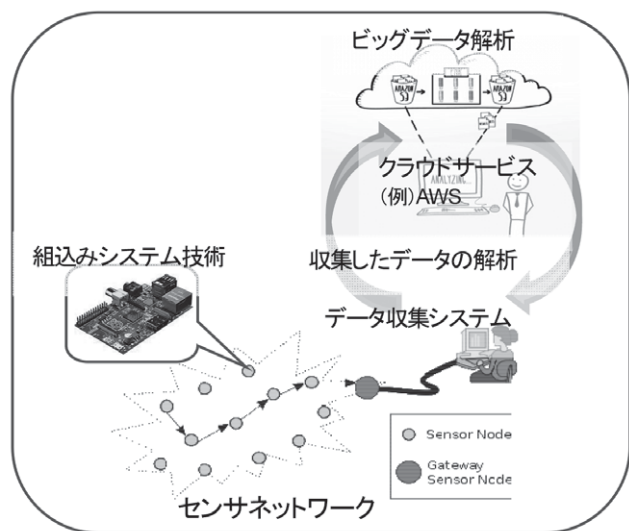


図1 センサネットワークおよびビッグデータ解析

3. 実験

平成27年度はセンサネットワークの試作、クラウドサーバへの送信実験を行った。

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。

3.1 センサユニットおよびサーバユニットの試作

図2に示すセンサユニットおよびサーバユニットを試作した。

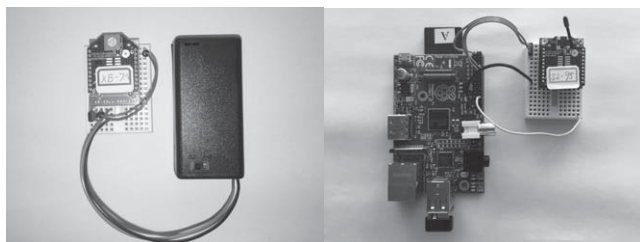


図2 センサユニットおよびサーバユニット

センサユニット（子機）はDigi International社のXBee^[1]を使用している。XBeeは2.7～3.3Vの直流電源で駆動でき、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。アナログ入力は0～1200mVの範囲で入力可能であるので、対応する電圧範囲の出力が可能なセンサであればXBeeのアナログ入力に直接接続することが可能であり、今回の実験では温度センサLM61BIZを使用している。また、電源は電池（単3×2本）により供給している。

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^[2]を使用している。OSにはRaspbianを使用し、センサユニットのXBeeとの通信のためにRaspberry Piのシリアル入出力(UART)にXBeeを接続し、XBeeの電源(3.3V)もRaspberry Piから供給している。XBeeとの通信プログラムはC言語あるいはpythonを使用しており、オープンライブラリであるXBee-2.1.0およびlibxbee3^[3]を使用している。

通信試験においては、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。送信するプログラムはXBeeの識別子(Node Identifier)を読みだす'NI'コマンド、XBeeに接続されている入出力の状態を読みだす'IS'コマンドを使用し、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た。また、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。

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3に3点のXBeeの温度を継続して計測した例を示す。

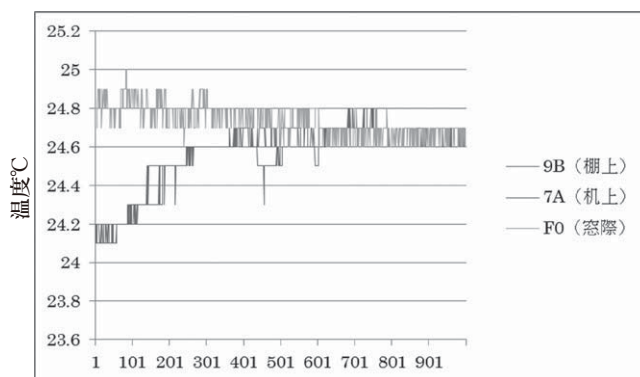


図3 通信試験の計測例

3.2 クラウドサービス

収集したデータを蓄積・解析するために、ローカルに設置したサーバおよびクラウド上のサーバを検討した。

ローカルサーバについてはPCベースのハードウェアを利用してOSにLinux (Ubuntu)を導入し、解析ツールとしてHadoopの導入・設定を行った。

クラウドサービスの活用については、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、AWS (Amazon Web Services)、Nifty Cloud等の商用のクラウドサービスの利用の検討を行い、いくつかの機能の試用を行った。人が操作するためのWebインターフェイスからの設定、および、組み込み機器からの起動方法としてプログラムからの起動方法であるCLI^[4] (Command Line Interface)の検討を行った。

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MQTT (MQ Telemetry Transport)を検討し、商用に提供されているクラウドサーバへの送信試験を行った。

試験に用いた試作システムの構成を図4に示す。

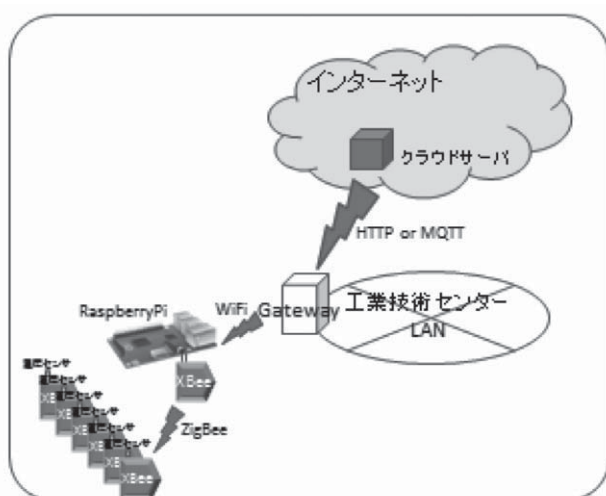


図4 試作システムおよびクラウドサービスの利用

ハードウェアについては、通信テストで用いたサーバユニットおよびセンサユニットとほぼ同様の構成であるが、収集したデータをクラウド上のサーバへ送信するために、サーバユニットのRaspberry PiにWiFiインターフェイスを装着し、工業技術センターのLAN上に設置した無線ルータにWiFi通信により接続して、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。

サーバユニット上のプログラムは、Linux (Raspbian)

上で動作するpythonにより作成しており、ライブラリとして、XBeeからの通信についてはlibxbee3を、クラウドへの通信はurllib2^[5]をそれぞれ使用している。

クラウドサーバには株式会社スカイディスク (<https://skydisc.jp/>)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・読出が可能である。

4. 結果

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を増やした際のサーバユニットへの通信について、6パケット/秒の通信頻度においても通信に支障はなかった。しかし、サーバユニットからクラウドサーバへ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、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を検討する必要がある。

今後は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。

参考

- [1] Digi International 社 XBee 製品紹介 : <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions>
- [2] Raspberry Pi Foundation : <https://www.raspberrypi.org/>
- [3] libxbee3 : <https://github.com/attie/libxbee3>
- [4] AWS CLI : <https://aws.amazon.com/jp/documentation/cli/>
- [5] urllib2 : <https://docs.python.org/2.7/library/urllib2.html>

県内企業の製品化技術を高めるための支援技術の確立

(研究開発成果の県内企業への技術移転事業)

工業材料科 科 長 瀧 内 直 祐

平成26年度から新たな取り組みとして、工業技術センターが保有する研究ポテンシャル・研究成果を県内中小企業に対し即効的に技術移転するための補完研究および技術移転活動を経常研究として行っている。

平成27年度は、「水溶性ミスト装置に関する技術支援および事業化」の項目について取り組みを行った。

1. 緒 言

平成26年度から新たな取り組みとして、工業技術センターがこれまでにに行った研究の成果や、既に保有している研究ポテンシャル・技術的知見・ノウハウなどを県内の中小企業に対し即効的に技術移転するための補完研究および技術移転活動を経常研究として行っている。

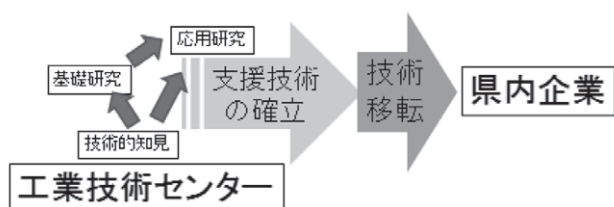


図1 技術移転活動

平成27年度は、「水溶性ミスト装置に関する技術支援および事業化」の項目について、技術移転活動、補完研究、普及活動等の取り組みを行った。

当所が保有する上記の項目の分野は、当所が他と差別化できる研究ポテンシャルを有しており、技術移転段階にある。また、大手企業が手を出さないニッチ領域であり、個々にカスタマイズが必要な特異性がある先端領域である。本事業では、研究成果の補完研究により県内企業への技術移転を行うとともに、さらに普及を図るために、研究会・セミナーを開催する。

2. 実施内容

本事業の具体的な実施内容として、個別の企業の開発に対応する技術移転・技術支援の活動と、広い範囲の方へ技術普及を行うための活動を行った。いずれの活動においても、県内外の大学や産業技術総合研究所等の研究機関や産業支援機関との連携を行っている。

2.1 技術移転・技術支援

個別の企業の開発に対応するために、県内企業への企業訪問を実施して企業における課題を抽出し、その課題をさらに検討するための現地技術支援、掘り起こした課題を解決するための共同技術開発を実施し、解決法の提案を行った。さらに、ユーザごとの環境に合わせた条件設定・最適化のために補完研究を実施した。この技術支援や共同技術開発において、工業技術センターが保有している設備を利用する設備開放を行い、ものづくり試作加工支援センターの設備の他、多くの設備の利用を行った。

2.2 技術の普及

工業技術センターが開発・保有している技術を広く普及するために、関連する内容の技術普及セミナー・研究会等を開催した。関連する研究会としては、長崎技術研究会の中の材料加工技術研究会である。

3. 結 果

具体的活動として以下のものを行った。

3.1 技術移転・技術支援

企業訪問等を実施して企業における課題を抽出し、その課題を更に検討するための現地技術支援、課題を解決するための共同技術開発を実施した。それぞれの実施件数等は以下のとおりである。

・ 現地技術支援	7回
・ 共同技術開発	4件
・ 補完研究	1件

これにより実施した技術移転・技術支援の中で具体的事例を紹介する。

- ・ 水溶性ミストによる切削加工実験(株式会社新田鉄工所)を行い、新規の水溶性ミストによる技術支援を行った。

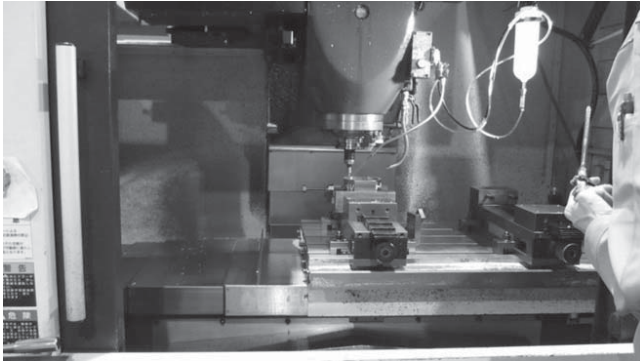


図2 切削加工実験

- ・金属加工仕上げ脱脂洗浄システムの開発(株式会社テクニカル・データ)

切削油剤等の脱脂を行うため、脱脂洗浄システムの開発を行い、脱脂洗浄の技術支援を行った。



図3 脱脂洗浄

- ・脱脂液の開発(株式会社新田鉄工所)

グリス等の脱脂を行うため、脱脂液の開発を行い、脱脂洗浄の技術支援を行った。

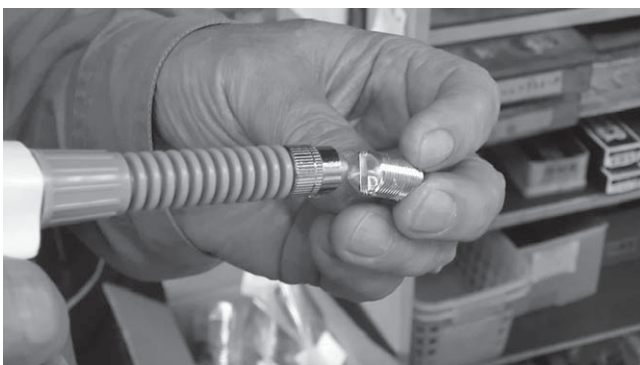


図4 脱脂液

3.2 技術の普及

工業技術センターが開発・保有している技術の普及を図るために、関連する技術分野の内容を広い範囲の方に知っていただくための技術普及セミナー・研究会を計3回開催し、参加者は延103名であった。関連する研究会としては、材料加工技術研究会である。

3.3 補完研究

3.3.1 緒言

長崎県内には、金属加工業の中小企業が多数存在しており、工作機械、切削工具等の進歩により、切削加工技術の高度化が進んでいる。しかし、金属系難削材料は、切削加工に長い時間を要し、工具寿命が短い等、非効率的な加工作業となっている。また、切削油剤の使用による作業環境の悪化、塩素系油剤の焼却時に発生するダイオキシンが問題になっているため、切削油剤の使用量を減らす要望が益々強くなっているのが現状である。そこで、本研究は、環境問題等を考慮して、切削油剤を使用しない冷却方法を検討し、切削工具の劣化防止及び適切な加工面粗さを得ることを目的とする。

筆者らは、難削材料の切削加工性の向上を目的として、高クロム鋳鉄、Cr-Ni耐熱合金(45%Cr30%Ni合金)、インコネル、チタン合金、ステンレス鋼等における切削加工性について報告^{[1]~[8])}を行った。

平成27年度は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(3枚刃、4枚刃)の水溶液A(界面活性剤を添加した水溶液)ミストを用いたステンレス鋼(SUS304)のエンドミル切削加工実験を行い、水溶液B(発泡剤を添加した水溶液)ミスト、油ミスト、切削油剤ミスト、切削油剤を用いた時の工具の摩耗状況、加工面(表面)粗さについて、比較検討を行った。

3.3.2 実験方法

実験は基本的に前報^{[8])}と同様とした。実験装置は、汎用フライス盤(牧野フライス製KVJP55)を用いた。被削材は、ステンレス鋼(SUS304)を使用した。エンドミル切削工具は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(ねじれ角50°、φ8、3枚刃)、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(ねじれ角30°、φ8、4枚刃)を使用した。エンドミル切削加工条件は以下のとおりである。

- ・切削速度100m/min
- ・送り速度0.03mm/刃
- ・軸方向切り込み量 10mm

- ・半径方向切り込み量 0.5mm
- ・工具突き出し長27mm
- ・切削加工方法(側面切削、ダウンカット)

水溶液Aミスト、水溶液Bミスト、油ミスト、切削油剤ミスト、切削油剤を用いてエンドミル切削加工実験を行った。切削油剤は、JX日鉱日石エネルギー製ユニソルプルEM-H(20倍希釈)を使用し、切削油剤ミストも同じ切削油剤を使用した。水溶液Aは、界面活性剤0.5g/蒸留水500ml(pH9.0)である。水溶液Bは、発泡剤2.0g/蒸留水500ml(pH9.0)である。水溶液Aミスト、水溶液Bミスト、切削油剤ミストの噴霧量は20 ml/分である。油ミスト(切削油)はブルーベ植物性切削油LB-1を使用し、噴霧量4ml/時間である。

切削工具の摩耗(最大の逃げ面摩耗幅、チップング幅等)については、工具顕微鏡(×30)(ニコン製MM-11B)を用いて、所定加工パスごとの工具刃先における最大の逃げ面摩耗幅等を測定した。さらに、加工面における表面粗さ(最大高さRz)は、加工面の両端より20mmの所を、それぞれA部、B部とし、その中心部の切削工具の進行方向をX方向、切削工具の軸方向をY方向として、超精密表面形状粗さ測定機(アメテック製PGI1200)を用いて測定した。

なお、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具の刃先における逃げ面摩耗幅が100 μm 以上になるか、工具刃先が欠損した場合、エンドミル切削加工実験を終了した。

3.3.3 実験結果

(1) TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(3枚刃)の切削加工実験

図5は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(3枚刃)の切削加工実験における工具刃先の逃げ面摩耗幅と切削距離との関係を示す。図中の○印は水溶液Aミスト、◇印は水溶液Bミスト、□印は油ミスト、▽印は切削油剤ミスト、△印は切削油剤の結果である。油ミスト、切削油剤は、逃げ面摩耗幅が著しく増大し、水溶性ミストAミスト、水溶液Bミスト、切削油剤ミストは逃げ面摩耗幅が抑制された結果となった。

図6は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(3枚刃)の切削加工実験における表面粗さ(Rz)と切削距離との関係を示す。図中の○印は水溶液Aミスト、◇印は水溶液Bミスト、□印は油ミスト、▽印は切削油剤ミスト、△印は切削油剤の結果である。図中の表面粗さ(Rz)の値は、Y方向(工具の軸方向)の表面粗さ(Rz)の値を示す。なお、Y方向(工具の軸方向)の表面粗さ(Rz)は、工具軌跡の影響のため、X方向(工具の進行方向)の表面粗さ(Rz)に比べて、高い値を示した。

表面粗さ(Rz)は、切削油剤を使用した場合に約4 μm 以上であり、水溶液Aミスト、水溶液Bミスト、切削油剤ミスト、油ミストを使用した場合に約4 μm 以下であった。

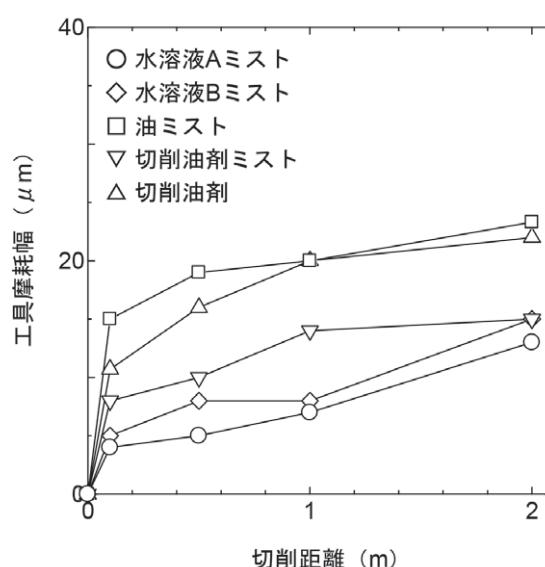


図5 切削距離と摩耗幅との関係

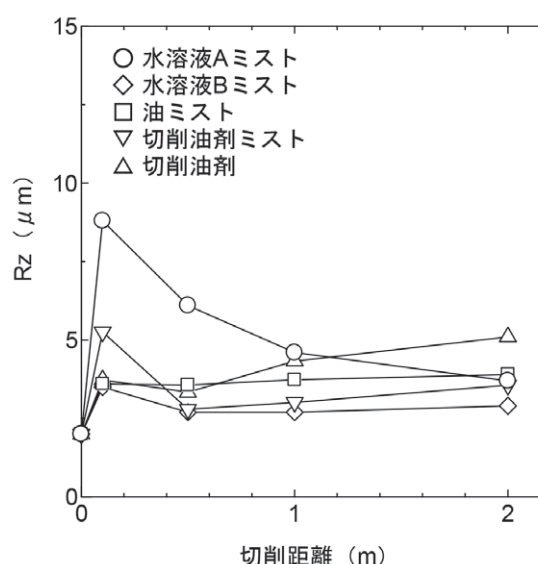


図6 切削距離と表面粗さ(Rz)との関係

(2) TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(4枚刃)の切削加工実験

図7は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(4枚刃)の切削加工実験における工具刃先の逃げ面摩耗幅と切削距離との関係を示す。図中の●印は水溶液Aミ

スト、◆印は水溶液Bミスト、■印は油ミスト、▼印は切削油剤ミスト、▲印は切削油剤の結果である。切削距離2mにおける逃げ面摩耗幅は、水溶液Aミスト水溶液Bミスト、油ミストを使用した場合、逃げ面摩耗幅が約20 μm であったが、切削油剤を使用した場合は逃げ面摩耗幅が約10 μm であった。

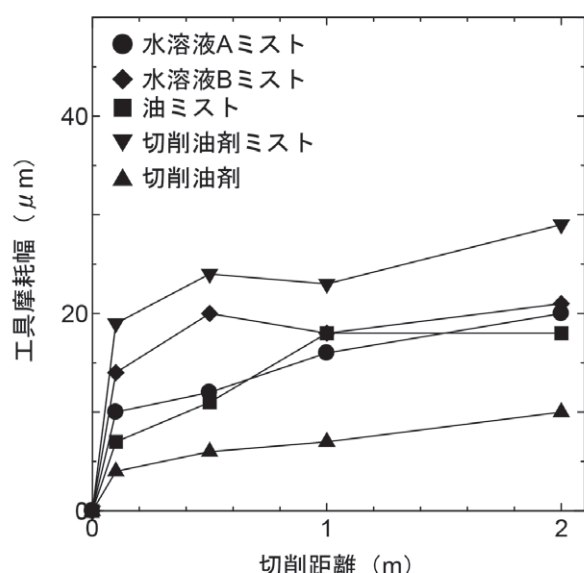


図7 切削距離と摩耗幅との関係

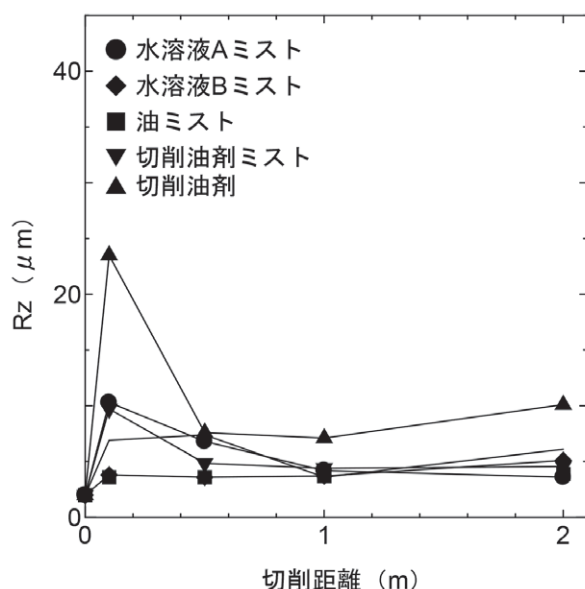


図8 切削距離と表面粗さ(Rz)との関係

図8は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(4枚刃)を用いた切削加工実験における表面粗さ(Rz)と切削距離との関係を示す。図中の●印は水溶液Aミスト、◆印は水溶液Bミスト、■印は油ミスト、▼印は切削油剤ミスト、▲印は切削油剤の結果である。なお、表面粗さ(Rz)は、前述の結果と同様にY方向(工具の軸

方向)の表面粗さ(Rz)の値を示す。切削距離2mにおける表面粗さ(Rz)は、切削油剤を使用した場合の約10 μm に対して、水溶液Aミスト、水溶液Bミスト、切削油剤ミスト、油ミストを使用した場合は約6 μm 以下であった。

3.3.4 結言

TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(3枚刃、4枚刃)において、水溶液A(界面活性剤を添加した水溶液)ミストを用いたステンレス鋼(SUS304)のエンドミル切削加工実験を行い、水溶液B(発泡剤を添加した水溶液)ミスト、油ミスト、切削油剤ミスト、切削油剤を用いた時の工具の摩耗状況、加表面粗さ(最大高さRz)について、比較検討を行った。その結果は、以下のとおりである。

- (1) TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(3枚刃)において、水溶液Aミストは、工具摩耗幅が最も小さく、良好な結果が得られた。
- (2) TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(4枚刃)において、水溶液Aミストは、表面粗さ(最大高さRz)が最も良好な結果が得られた。
- (3) 水溶液Aミストを使用した場合、3枚刃と4枚刃において、3枚刃の工具摩耗幅が小さく、最も良好な結果が得られた。

4. 結 言

本事業では、工業技術センターが保有している研究成果・研究ポテンシャル等を即効的に県内企業へ技術移転する取り組みを行った。

具体的には、企業訪問により課題を抽出し、その課題をさらに検討するための現地技術支援、掘り起こした課題を解決するための共同技術開発を実施した。さらに、研究成果を県内企業が活用するためにユーザごとの環境に合わせた条件設定・最適化のために補完研究も行った。この技術支援や共同技術開発において、工業技術センターが保有している設備を利用する設備開放を行い、ものづくり試作加工支援センターの設備の他に多くの設備の利用を行った。また、開発・保有している技術を広く普及するために、関連する内容の技術普及セミナー・研究会等を開催した。

今後は本研究の成果をさらに進展し、県内企業への普及を促進するために、今回の対象とした技術分野については新たな研究テーマ(県単独経常研究)へ継続することとし、精密プレス加工の高精度化に関する研究開発(H27～H28)に取り組んでいく。

謝 辞

本研究の遂行において、ご協力頂いた株式会社テクニカル・データ 松永康人代表取締役、株式会社新田鉄工所松尾良弘代表取締役社長に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 瀧内直祐：長崎県工業技術センター研究報告23 (1996) 134
- [2] 瀧内直祐、松永一隆：長崎県工業技術センター研究報告30(2002) 51
- [3] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告34(2005) 51
- [4] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告35(2006) 43
- [5] 瀧内直祐：長崎県工業技術センター研究報告41 (2012) 43
- [6] 瀧内直祐：長崎県工業技術センター研究報告42 (2013) 31
- [7] 瀧内直祐、福田洋平、三木伸一：長崎県工業技術センター研究報告43(2014) 32
- [8] 瀧内直祐、福田洋平、三木伸一：長崎県工業技術センター研究報告44(2015) 35

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 事	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、金型における油剤の脱脂等、金型の長寿命化を目的として、平成27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。また、金型の寿命延長、機能向上を目的として、金型へのDLC膜コーティングについて検討した。

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、医療・福祉・バイオ関連、電池等が挙げられる。

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。そこで、本研究は、金型の長寿命化を目的として、平成27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。

2. 実験方法

2.1 油剤、グリースの脱脂実験

脱脂実験は、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)を用いた。接触角の測定装置は、接触角計(協和界面科学(株)製)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。噴霧量は、20ml/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

基材として合金工具鋼SKD11を用い、鏡面研磨した後、日本電子工業(株)製ラジカル窒化装置JRN-4040VSを用いて窒化した。その後、PSII法によりDLC膜コーティングを行った。

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、ミストはミスト方法による脱脂方法である。

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
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、ミストはミスト方法による脱脂方法である。

表より市販の脱脂液、エーテル類、アルコール類、界面活性剤液及び発泡液は、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浸漬方法よりもミスト方法が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。

表2 グリースの脱脂実験結果

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

グリースの脱脂実験後、蒸留水の接触角を測定した。表3は、脱脂実験後、蒸留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、ミストはミスト方法による脱脂である。なお、予備実験の結果、エタノールで超音波洗浄した基板では、蒸留水の接触角は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)を塗布した試料(炭素鋼)における蒸留水の接触角は85.8°であった。

脱脂実験後、水洗し、乾燥をした状態で蒸留水の接触角を測定した。

表3 脱脂実験後の蒸留水の接触角

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

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、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蒸留水の接触角と同程度であった。界面活性剤液及び発泡液で脱脂した場合、グリースが除去された表面になった結果が得られた。グリースの脱脂において、界面活性剤液及び発泡液のミスト方法は、有効であると考えられる。

3.3 DLC膜コーティング

図1に、DLC膜コーティングしたSKD11基材について、密着強度を評価するために、ロックウェルCスケールにて試験した後の圧痕の写真を示す。圧痕周辺にDLC膜の剥離は見られておらず、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る。

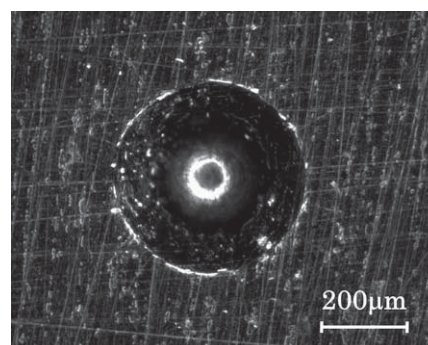


図1 DLC膜をコーティングしたSKD11のロックウェル試験後の圧痕

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蒸留水の接触角測定を行った。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、市販の脱脂液は浸漬方法による脱脂が最も有効である結果となった。界面活性剤液、発泡液はミスト方法による脱脂が最も有効である結果となった。
- (2) グリースの脱脂実験において、界面活性剤液、発泡液はミスト方法による脱脂が最も有効である結果となった。界面活性剤液、発泡液のミスト方法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蒸留水の接触角と同程度であった。
- (3) DLC膜コーティングの前処理としてラジカル窒化を行うことにより高い密着強度が得られた。

参考文献

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

連成統合シミュレーション技術の開発と普及支援（第1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、昨年度実施した「連成解析システム」の整備状況および利用活動に関して報告する。

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。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。

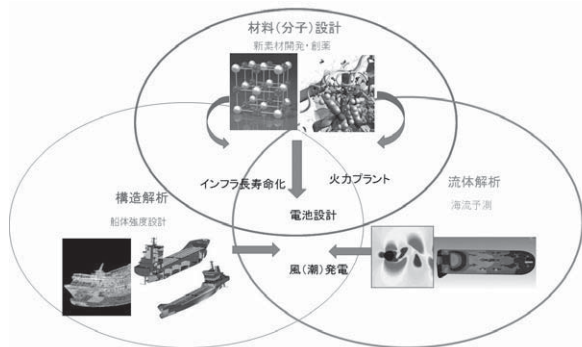


図1 連成解析のイメージ図

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台と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。

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。

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

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。

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ー「Blademodeler」、メッシャー「TurboGrid」による効率的なモデリング・メッシュングが可能である。

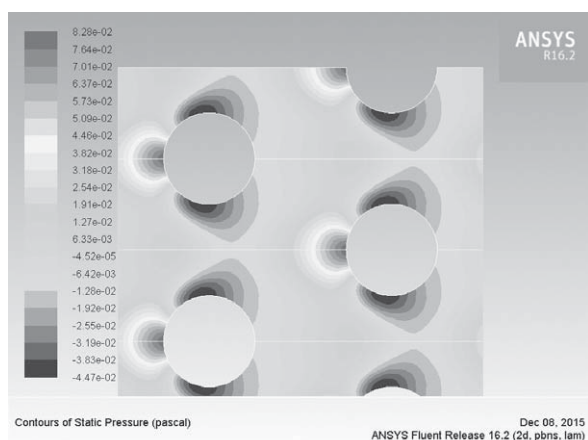


図3 流体解析例

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。

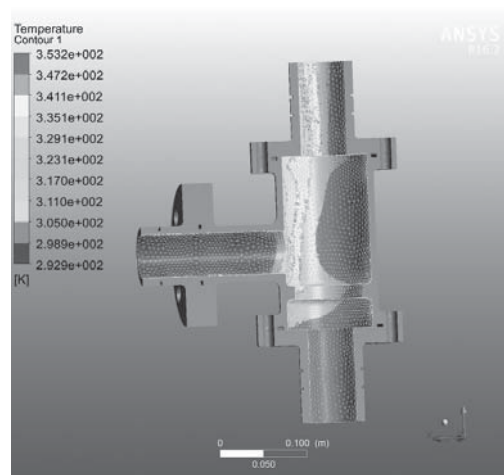


図4 連成解析の例：1way-FSI + 2way-FSI

2.4 普及支援：研究会の開催

ANSYSソフトウェアの機能は多岐にわたり、その全機能を包括的に把握しつつ、地場企業へスムーズな技術支援を図るため、関連技術研究会を合計4回実施した(第1回：ANSYS全般、第2回：構造解析機能、第3回：流体解析機能、第4回：構造-流体連成解析機能)。今後も、CAE技術情報の積極的発信とスキルアップを図るため、技術研究会を積極的に企画する。



図5 連成解析システム講演会

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。

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。これまでに、ポリイミド樹脂にポリベンゾオキサジン等の熱硬化性樹脂を複合化することにより、耐熱性改善に効果が高いことを見出している。平成 27 年度は、ベース樹脂となるポリイミド樹脂に複合する熱硬化性樹脂の開発を目指した。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、フィルム化が可能性あり、かつ耐熱性と可とう性を両立することがわかった。

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ック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]~[4]}。近年はとりわけ、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、等業界ニーズの高い「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を開発する。とくに、これまでの研究において、ポリイミド樹脂とポリベンゾオキサジンなどの熱硬化性樹脂を複合化することにより耐熱性改善に効果が高いことを見出している。よって、本研究ではベース樹脂となるポリイミド樹脂に複合する熱硬化性樹脂、そのなかでも高耐熱性と可とう性に優れたポリベンゾオキサジンの開発を目指した。

2. 実験方法

2.1 試料及び試薬

本研究において使用したポリベンゾオキサジン原

料、及び溶媒類は全て市販品を精製、又は蒸留することなくそのまま使用した。図1に使用したモノマーの構造と略号を示す。

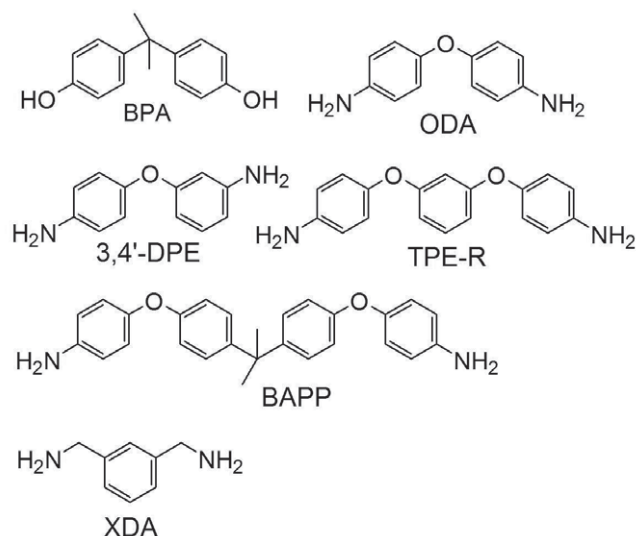


図1 モノマーの構造と略号

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類を仕込み、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に例示する。

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。

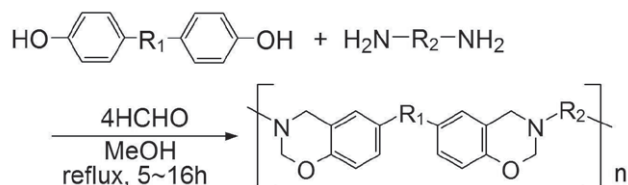


図2 本合成系の反応式

2.3 ポリベンゾオキサジンフィルムの作製

前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50 μm になるように調整した。塗布後、送風乾燥機を用いて80 $^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ にて1時間、170 $^{\circ}\text{C}$ にて1時間、200 $^{\circ}\text{C}$ にて1時間、そして240 $^{\circ}\text{C}$ 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 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 $\times$ 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 $^{\circ}\text{C}$ 、移動相流量: 0.6ml/min

【重量減少温度(T_{d5} 、 T_{d10})、及び540 $^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ /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 $^{\circ}\text{C}$ 時点における重量の割合を540 $^{\circ}\text{C}$ 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 $\times$ 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 $^{\circ}\text{C}$ ~200 $^{\circ}\text{C}$)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 $^{\circ}\text{C}$ /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 $\times$ 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 $^{\circ}\text{C}$ /minとした。

3. 結果と考察

ポリベンゾオキサジン硬化物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フィルムとして得られた。従来のモノマー型ベンゾオキサジンは一般的にフィルム化が困難で、たとえフィルム化できたとしても脆くて折り曲げることはできないものが多かった。一方、本研究におけるオリゴマー型ベンゾオキサジンで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。

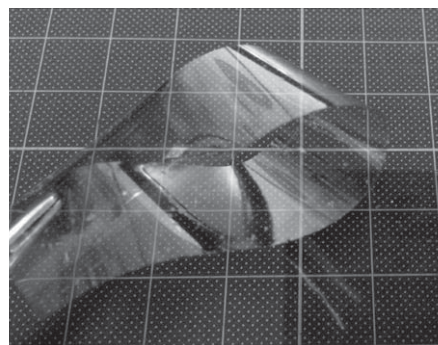


図3 ポリイミド樹脂フィルム(一例)

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弱の高分子量体だった。全ての系でゲルが生じることなく、NMPなどの極性溶媒に対して易溶性を示した。 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。その一方で、 CTE はXDAを用いた系が最も小さく、常温から200 $^{\circ}\text{C}$ 程度の共有結合の切断(熱分解)をとまない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	Td ₅ [°C]	Td ₁₀ [°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にビスフェノール類をBPAに固定して、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(充填)効果が高いためと考えられた。

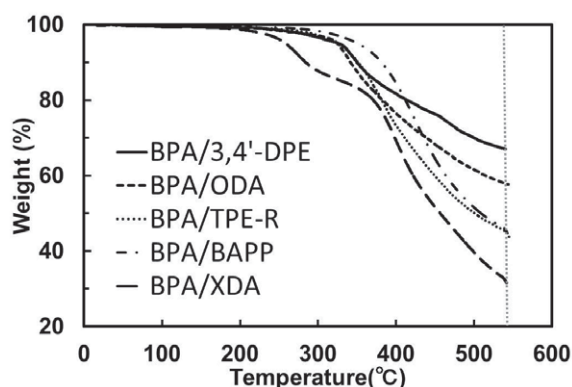
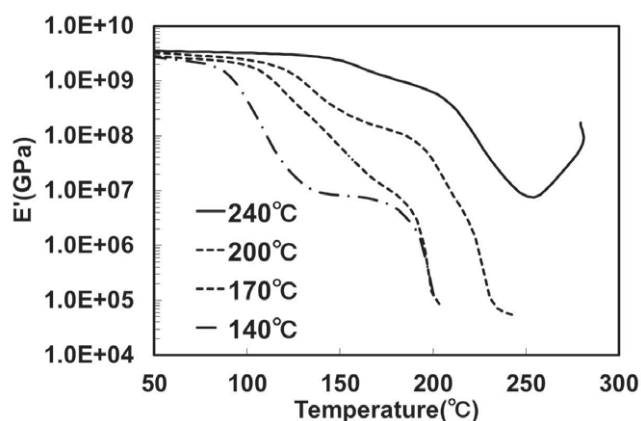
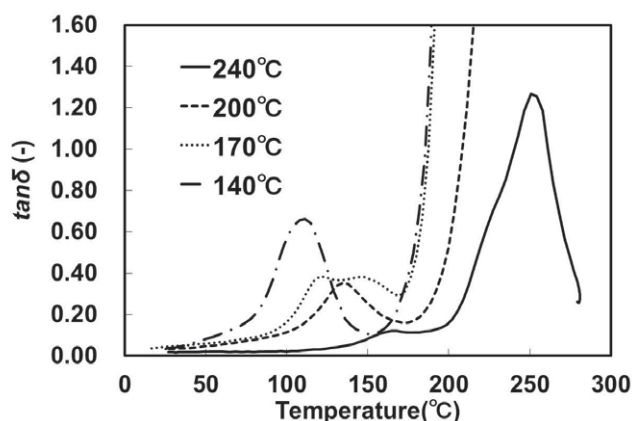
図4 硬化物の熱重量減少曲線
(BPA/TPE-R系ポリベンゾオキサジン)

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℃で熱処理したものは、100℃付近で急激に E' が低下し、ポリイミド樹脂等と複合することをせずに、単独でのフィルム接着剤としての可能性が示唆された。

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では、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 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)

4 結 言

- 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。
- 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。
- 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。
- 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。

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)

県北の農水産物を利用した九十九島オリジナルな食品の開発

(アコヤ貝肉のプロテアーゼ処理によるエキスの開発)

食品・環境科 研 究 員	晦 日 房 和
食品・環境科 主任研究員	玉 屋 圭
つくも食品株式会社 代表取締役	緒 方 誠 治
有限会社草加家 代表取締役	高 木 龍 男
させばパール・シー株式会社 取 締 役	原 田 誠一郎
させばパール・シー株式会社 販売課係長	辻 佳代子

県北の豊かな農水産物を利用して、これまで同地域の小串トマトをベースとしたレトルト商品「小串トマト鍋スープ」を開発した。また、九十九島パール・シー リゾートは長崎県を代表する観光地であり、真珠養殖が盛んなことから、このリゾートの土産物にふさわしいオリジナル商品として真珠層粉末を用いた製菓「真珠のたまてばこ」を開発した。一方、真珠養殖後、母貝であるアコヤ貝の貝肉が大量に廃棄され、この未利用資源の活用が望まれていた。本研究では、このアコヤ貝肉をタンパク質分解酵素（プロテアーゼ）で処理したエキスの調味素材への利用を検討するため、エキス中の遊離アミノ酸、及びその味覚の分析を行った。その結果、エキスは呈味性アミノ酸を含み、苦味雑味や旨味コクの味覚に関与していることが明らかになった。

1. 緒 言

九十九島は、208の島々が点在する風光明媚な海域であり、昭和30年に西海国立公園の指定を受けている。このような素晴らしい県北の環境と、豊かな農水産物があることから食・観光の振興のために九十九島オリジナルな食品の開発が地元リゾート会社から要望されていた。そこで本研究は、県北地域の食品・観光産業の振興と活性化に寄与するために、地元食材を用いて加工食品の開発に取り組んだ。

1.1 県産農水産物を利用した「小串トマト鍋スープ」の開発^[1]

県北地域の東彼杵郡川棚町小串郷で作られている小串トマトは、塩トマトの一種で糖度が高いことが知られている。しかしながら、青果出荷を行えない規格外品も多く、その有効利用が望まれていた。また、同郡は県内一の緑茶の産地（東彼杵町）であるばかりか、タマネギ（波佐見町）などの収穫も多い。そこで、トマト等の食材の有用成分、及びレトルト加工法の検討を行い、小串トマトをベースにした鍋用スープの開発を試みた。小串トマト、パプリカ（北松浦郡小値賀町）はピューレとし、タマネギはカットして殺菌のために加熱処理を行い使用まで凍結保存した。九十九島産イリコ・アゴ（佐世保市）及び緑茶から作った出汁に、先に凍結保存したトマト・パプリカ・タマネギの食材を加えオリジナルなレトルトスープを試作した。本品は、

食材が本来持っていた美味しさに加え、有用成分（ポリフェノール、リコピン）及び抗酸化能を有していた。これらの研究をつくも食品（株）と共同で行い、県産農水産物100%使用した「小串トマト鍋スープ」を開発した（写真1）。



写真1 小串トマト鍋スープ

1.2 九十九島オリジナル製菓「真珠のたまてばこ」の開発^[2]

九十九島では豊かな海を利用して真珠の養殖がさかに行われている。そのため地元リゾートから食・観光の振興のため真珠に絡んだオリジナルな商品の開発を要望されていた。我々は、真珠養殖の母貝であるア

コヤ貝の貝殻真珠層粉末を化粧品原料として使用した経緯があることから¹³⁾、食品への応用を検討した。

食品分野において貝殻真珠層粉末は既存添加物になっているが、あまり使用された例がないため各種試験を行いながら安全性を調べ、同真珠層粉末と、県内食材を取り入れて九十九島の真珠にちなんだ製菓の開発を行った。真珠層粉末及び県産食材を取り入れ何度も試作と試食を行いながら、真珠を連想させる白・黒の丸いフォルムの2種類の製菓を開発した。これらは真珠層粉末と大村産おからを加えた生地、黒ゴマを混ぜ小豆を入れたものと(黒色)、壱岐産の柚子とピーナッツペーストを使用したもの(白色)である。試作品の細菌及び物性試験を行った結果、室温で3カ月間安定であることを確認した。以上のように、写真2に示す九十九島のオリジナル製菓「真珠のたまてばこ」を(有)草加家、及びさせぼパール・シー(株)と共同で開発した(2個・6個入り)。



写真2 真珠のたまてばこ

1.3 アコヤ貝肉のプロテアーゼ処理によるエキスの開発

真珠養殖後、貝殻と一緒にアコヤ貝肉も年間約200トン以上排出されている。貝柱だけは、生食用として一部流通しているが、貝肉は廃棄されているのが現状である。

本研究では、未利用資源であるアコヤ貝肉に2種類の微生物由来のタンパク質分解酵素(プロテアーゼ)を反応させ、遊離するアミノ酸の測定、並びに生成されるエキスの味を味覚センサーで調べることにより、調味液などへの応用の可能性を検討した。

2. 研究材料及び方法

2.1 研究材料

アコヤ貝は九十九島産(佐世保市)で、真珠養殖後の貝柱を除いた貝肉を使用した。

タンパク質分解酵素はヤクルト薬品工業株式会社製で、以下の2種を使用した。*Aspergillus oryzae* 由来で中性プロテアーゼのパンチダーゼMP(酵素力価80,000ユニット/g、以降MPと略す)と、*Bacillus amyloliquefaciens* 由来で中性プロテアーゼのアロアーゼAP-10(酵素力価100,000ユニット/g、以降AP10と略す)である。

2.2 アコヤ貝肉の酵素分解

アコヤ貝は2枚貝で、貝肉表面にかなりのヌメリが存在しているため十分水洗し凍結後、ミキサーにより粉碎した。貝肉には細菌等の汚染が考えられたので、オートクレーブで120℃、15分間殺菌処理(以降、熱処理と呼ぶ)した貝肉粉碎物を用いて酵素反応を行った。反応液は、熱処理貝肉粉碎物20gに殺菌水と酵素を加えて60mlとした。酵素は反応液mlあたり2,000ユニットになるように加え、反応は、45℃、44時間軽く振盪して行った。各反応サンプルは100℃、10分加熱して酵素反応を止めた。その後、18,000回転、30分遠心し上清を得た。この遠心操作を再度行い、上清を回収し酵素分解エキスサンプルとした。また、熱処理貝肉に酵素を加えていないものを同様の操作で得たエキスを比較対象(コントロール)とした。

2.3 ホルモール窒素量の測定

酵素分解によって遊離したアミノ酸は、しょうゆ分析法によりそのホルモール窒素を測定した¹⁴⁾。

2.4 酵素分解エキス中のアミノ酸分析

エキスのアミノ酸分析は、Waters社のACQUITY UPLC-Rを用いた肉中の遊離アミノ酸分析法を一部改変して行った。各酵素分解エキス1gを秤量し、0.1N HClで10mlに定容した。その0.5mlに同量のヘキサンを加え混合して5,000回転、5分遠心して上層のヘキサンを除去した。下層の水溶液を回収し、その100 μ lに300 μ lのアセトニトリルを加え混和液を調製した。その混和液20 μ lにAccQ・Tag Ultra derivatization Kit(Waters製)のBuffer(140 μ l)及び誘導化試薬(40 μ l)を加え55℃、10分反応させ、その反応物1 μ lを供した。カラムはACCQ-TAG TM ULTRA C18、サイズ径2.1 $\times$ 100mm(Waters製)、アミノ酸標準液は和光純薬製の

タイプH、B及びAN-2を使用した。

2.5 味覚センサーによる解析

味の測定は、以下の手順で行った。熱処理貝肉の各酵素分解エキスを10ml取り純水で100mlに希釈し、ろ紙でろ過して味の測定に用いた。酵素分解エキスの味の測定はインテリジェントセンサーテクノロジー製の味認識装置TS-5000Zを用いた。5種類のセンサを用いて、味覚項目の先味である旨味、塩味、酸味、苦味雑味、渋味刺激、一方、後味の旨味コク、酸性苦味、渋味を基準液(30mM塩化カリウム、0.3mM 酒石酸水溶液)を無味点「0」として算出した。また、酵素分解をしていないサンプルを比較対象(コントロール)とした。

3. 結果および考察

3.1 熱処理貝肉酵素分解エキスのホルモール窒素量

アコヤ貝肉には、成分組成上10%以上のタンパク質が含まれていることから¹⁾、プロテアーゼ処理によりアミノ酸が遊離することが予想された。そこで、熱処理貝肉に対し、2種類の酵素を反応させ、そのホルモール窒素量を測定した。

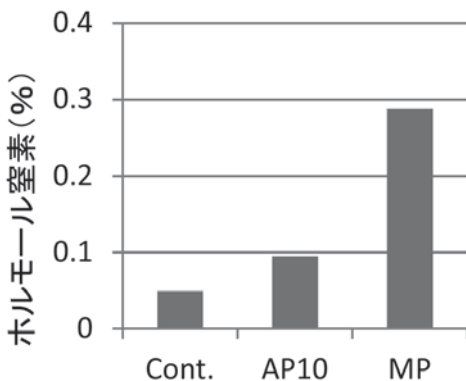


図1 酵素分解エキスのホルモール窒素量

その結果を図1に示すが、いずれの酵素分解において遊離アミノ酸の由来の窒素が認められた。コントロール(0.049%)と比較して、AP10分解エキスでは0.095%と2倍、MP分解エキスでは0.288%と約6倍のホルモール窒素が存在することがわかった。なお、MPの場合と比較してAP10の分解量が低い、この原因のとして、微生物による酵素分解能力の違いによるものと考えられた。

3.2 酵素分解エキス中のアミノ酸の測定

表1にエキスの遊離アミノ酸を調べた結果を示しているが、アコヤ貝由来のタウリン(Tau)が、全てにお

いて133～147 mg/100g存在していた。また、アミノ酸の総量はコントロールで293.47 mg/100g、AP10反応で445.07 mg/100g、MP反応では1993.98 mg/100g存在しており、図1のホルモール窒素量の結果を反映していた。なお、AP10ではMPと比較するとアミノ酸量は少ないが、コントロールのものより増加していることから、酵素反応は起きていることが確認できた。

MP及びAP10酵素分解エキスから味覚に関係するアミノ酸を調べたところ、甘味成分のGly、Ala、また、旨味成分のAsp、Glu、さらに、苦味成分のArg、Lys、Val及びLeu等のアミノ酸が含まれていることがわかった。

表1 熱処理貝肉の酵素分解エキス中のアミノ酸

アミノ酸	コントロール mg/100g	AP10 mg/100g	MP mg/100g
His	0.00	0.00	43.57
Tau	147.66	146.12	133.7
Ser	4.66	13.00	109.87
Arg	10.47	11.29	189.37
Gly	30.86	30.56	85.04
Asp	8.92	26.38	124.51
Glu	28.49	38.31	190.3
Thr	2.35	4.92	120.33
Ala	11.98	15.24	109.02
Pro	5.31	7.81	58.34
Orn	0.75	8.25	7.64
Cys	28.44	38.70	35.09
Lys	3.48	5.00	170.15
Tyr	2.08	6.89	47.68
Met	1.44	13.75	58.61
Val	2.33	13.88	135.66
Ile	1.84	11.64	109.11
Leu	2.41	33.21	165.87
Phe	0.00	20.12	100.12
総量	293.47	445.07	1993.98

3.3 酵素分解エキスの味覚センサーによる解析

熱処理貝肉に対し、2種類の酵素を反応させたエキスの味覚を測定した。味の対象となるのは先味の苦味雑味・旨味、後味の旨味コクの3種類であり、それ以外の塩味、酸味、渋味刺激、酸性苦味、渋味はマイナス値を示し、基準液(0の無味点)よりも味がないことになるため評価対象から外した。

表2に熱処理貝肉酵素分解エキスの結果を示している。まず、苦味雑味のコントロール(5.53)と比較してMP分解エキス(3.22)、AP10分解エキス(1.53)と減少した。次に、旨味ではコントロール(7.45)と比較してAP10分解エキスは2.45と減少したが、MP分解エキスだけは8.71と増加することがわかった。さらに旨味コ

クは、コントロールの0.88に対しAP10分解エキ스는2.38と約3倍、MP分解エキ스는1.68と約2倍増加した。

表2 熱処理貝肉酵素分解エキスの味覚

プロテアーゼ	苦味雑味	旨味	旨味コク
コントロール	5.53	7.45	0.88
AP-10	1.53	2.45	2.38
MP	3.22	8.71	1.68

以上の結果から、アコヤ貝肉を用いたAP10及びMP分解エキ스는、いずれも先味の苦味雑味を抑え、後味の旨味コクを増加させる効果がみられ、特に、MP分解エキ스는先味の旨味を増加させることが明らかになった。

これまでアコヤ貝肉の酸・酵素分解による遊離アミノ酸について報告されているが²⁾、味についての官能が主流であった。今回、味覚センサーで調べ、苦味雑味・旨味・旨味コクの3つの味覚を数値化して比較したところ、熱処理貝肉を用いたMP分解エキスが優れた呈味性を有すると考えられた。併せて、実際の官能試験でも同様の結果となった。

4. 結 言

これまで県北の農水産物及び未利用資源を用いてオリジナルな食品の開発に取り組んだ。その結果、2商品と貝エキスの試作品が開発できた。まず、「小串トマト鍋スープ」の特長は、100%長崎県産農水産物を使用しており、食品添加物は不使用である。また、レトルト処理で常温保存が可能で、小串トマトの甘味性がある。さらに、ポリフェノール、リコピン等の抗酸化作用のある物質を含む。次に、「真珠のたまてばこ」の特長は、真珠を連想させる白色・黒色の丸いフォルムの製菓で、真珠層粉末を生地に使用した九十九島パール・シーリゾートのオリジナル商品である。

今回、未利用資源の有効活用としてアコヤ貝肉のプロテアーゼによる酵素分解エキスを試作した。分解エキス中の遊離アミノ酸には呈味性に関与するGly、Asp、Glu、Alaが含まれていた。さらに、味覚センサーで調べたところ、MP分解エキ스는苦味雑味を抑え、旨味・旨味コクを増加させる効果があることから、調味エキスへの有用性が高いと考えられた。

謝 辞

本研究を行うにあたり、研究材料のアコヤ貝を提供して頂きました金子真珠養殖株式会社及び田崎真珠株式会社に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 晦日房和等：長崎県工業技術センター研究報告 No.43、pp55-58 (2013)
- [2] 晦日房和等：長崎県工業技術センター研究報告 No.43、pp57-59 (2014)
- [3] 晦日房和等：長崎県工業技術センター研究報告 No.40、pp50-51 (2010)
- [4] 財団法人日本醤油研究所編：しょうゆ試験法、pp19-21 (1985)
- [5] 前田正道：長崎県工業技術センター研究報告、No.5、pp107-110 (1990)

皮膚中の自家蛍光測定技術の開発

食品・環境科 主任研究員 三 木 伸 一

生体測定では、採血や皮下埋め込みを要することなく、非破壊、非侵襲で測定できることが望ましい。また、近年、ウェアラブル（身に付ける）端末がトレンドとなっており、小型化、低コスト化も求められている。こうしたなか、LED等の安価な光源の進展もあり、光を使った計測が健康管理の有力な手段の一つとなっている。

光を用いた計測手法は多数あるが、本研究では、生体の内在物質から発光する蛍光（自家蛍光）に着目する。蛍光は、特定の波長の光（励起光）により励起された物質が、別の波長（励起光より長波長）の光を放出する現象で、励起光と蛍光の波長が一致する物質は限られるので、高い選択性を有する。

一方、生体組織に含まれる物質は多種多様で、また、その構造は複雑である。そのため、発光した光を単に検出するだけでは、目的成分以外の情報が含まれ、正確に測定できない。本研究では、分光分析等による光学特性（蛍光、散乱、吸光）の測定データを基に光伝播シミュレーションを実施し、皮膚等の散乱体の蛍光測定技術の確立を目指す。具体的には、蛍光性タンパク（糖化生成物）、脂質など、夾雑成分、散乱成分を含んだサンプルを調整し、これらの吸光及び蛍光に関する光学特性を調べるとともに、拡散近似やモンテシミュレーションなどの解析法による理論検証を実施し、誤差要因の洗い出しとその補正方法を検討した。

1. 緒 言

ヘルスケアに関する測定機器は、体を傷つけないこと、簡便であること、などが機器の仕様として要求される。そのため、人体への影響が少なく、化学的な前処理が不要な光技術の利用が効果的であり、脂肪、タンパク、血糖などの測定や、癌診断や組織活性の評価、老化の評価などに光計測が用いられている^[1]。

一方、生体の強い多重散乱性により生体を伝播する光は散乱し、分光情報はゆがめられる。そのため、生体内の物質量を正確に測定することは容易ではない。生体計測においては、多重散乱の影響を如何に補正するかが肝要である。

筆者らは、これまでに散乱補正技術を用いた近赤外光の吸光分析に取り組んできた^[2]。散乱補正技術は、分析値の確からしさの向上に加え、適用する光情報の最適化、最小化につながり、分析装置の小型化、簡便化の実現に資する。また、近赤外域の光は「生体の窓」と呼ばれる透過性の高い光であり、体を傷つけることなく、生体内部の情報を取得できる。しかしながら、近赤外光は非破壊計測の有用なツールであるが、C-HやO-Hなどの分子振動の倍音、結合音からなるブロードな吸収特性に基づくことから、測定できる対象には限りがある。

本研究では、これまでの生体計測、散乱補正技術等のノウハウ、知見を、蛍光測定へと応用する。蛍光性を有する生体物質の中には、生体にとって重要な役割

を持ち、健康状態の指標となるものが数多く存在する。蛍光は、特定の波長の光（励起光）により励起された物質が、別の波長（励起光より長波長）の光を放出する現象である。励起光及び蛍光の波長が一致する物質は稀であることから、蛍光測定は高い選択性を有し、また、微弱な光を検出できる特徴も併せ持つ。一方、生体組織に含まれる物質は多種多様で、励起光や蛍光波長域における夾雑物質の吸光や発光の重なりや、前述の多重散乱による分光情報の歪みなどに起因して、目的成分の量を正確に測定することは難しい。

本研究では、近年注目されている蛍光性を有する糖化タンパク質をターゲットとし、より正確な皮膚の蛍光測定技術の確立を目指す。まずは、吸光、蛍光、散乱の観点から分光データの取得及び疑似モデル等による解析等を行い、支配的な誤差要因となる物質を洗い出した。次に、得られた分光データを基に拡散近似やモンテカルロシミュレーション等を実施し、誤差要因の補正法について検討した。

2. 実験方法

2.1 試薬

分光特性の検証用として、市販のタンパク質、アミノ酸、グルコース等の試薬を用いた。また、生体の散乱性を疑似するため、イントラリピッド（脂質）を用いた。

2.2 蛍光性物質の調整

蛍光性を示す糖化タンパク質を調整するために、ヒト血清アルブミンにグルコースを添加し、緩衝溶液を用いて中性及びアルカリ条件とした後、60℃で数日インキュベーションし、糖化タンパク質を生成した。また、比較に用いるため、蛍光性を示すアミノ酸であるトリプトファン溶液を調整した。

2.3 分光測定

分光スペクトルは紫外可視分光光度計、蛍光光度計を用いて測定した。紫外可視分光光度計の測定波長の範囲は200～1000nmとした。蛍光分光光度計においては、220～750nmの波長範囲の三次元蛍光スペクトルを取得した。

3 結果と考察

3.1 吸光

吸光に関する光学特性を評価するため、紫外～可視域にかけて生体の構成成分の吸光係数を調べた。測定結果の中から生体計測の妨げになることが予想されるメラニン及びヘモグロビン、コラーゲン、また、主要成分の水分の吸光スペクトルを示す(図1)。ヘモグロビンについては酸化型及び還元型があり、酸化型の比率を60%として換算している。メラニンの吸光係数については、不溶性で分光光度計による正確な測定ができないため、外部データベースの近似式^[3]を用いた。生体には多くの水が存在するが、可視、紫外域の吸光係数は相対的に小さく、水の影響はほぼ無視できる。また、コラーゲンの吸収の影響も小さい。一方、ヘモグロビン、メラニンは蛍光の発光領域に吸収があるため、蛍光測定に影響を与えと考えられる。

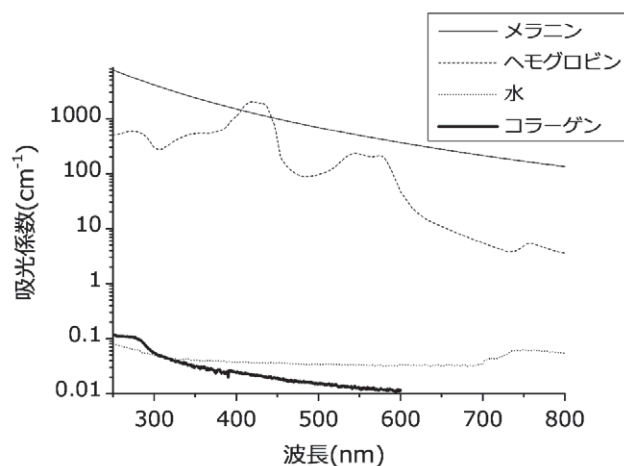


図1 生体成分の吸光係数

3.2 散乱

次に散乱について考察する。濁りのない溶液は、入射光の強度と透過光の強度との間に一般にランベルト・ベールの法則が成り立ち、所定のセルに入れた溶液の透過率を分光光度計などで調べることで含有成分量を推定できる。一方、人体などの不透明体(散乱体)に光が入射されると四方八方に光を放出する現象(散乱)が生じる。このとき、入射された光は、散乱を繰り返しながら伝播し(多重散乱)、この伝播した光の一部が吸収や発光に使われる。したがって、光の強度測定だけでは、得られる情報が何に起因しているかわからない。図2に同一濃度のトリプトファン溶液(蛍光溶液)に散乱性を有する種々の濃度のイントラリピッド(脂質)を添加し、蛍光光度計で測定した蛍光スペクトルの結果を示す。同一濃度の蛍光溶液においても、散乱性が大きくなると明らかに蛍光強度が小さくなるのがわかる。このことは、測定部位が異なる(散乱性が異なる)と、含まれる目的成分の量が同じでも、得られる測定結果が異なることを意味する。また、測定部位が同じでも、個人差が大きい場合、同様に測定値に影響する。言い換えれば、散乱の影響を受けない測定方法の確立は、測定値の確からしさにつながる。

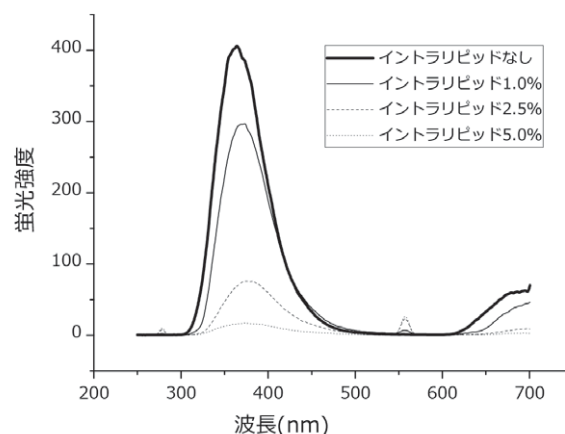


図2 散乱性の異なる蛍光スペクトル

散乱の補正方法を検討するため、まず、生体の散乱係数を求める。散乱係数は、単位長さあたりに散乱によって消失する光の割合を示す。補正には複数の波長による情報が必要なので、表皮付近の散乱係数を求めた文献^[4]を参考に、拡散近似、ミー理論を用いて波長ごとの散乱係数を推量した(図3)。

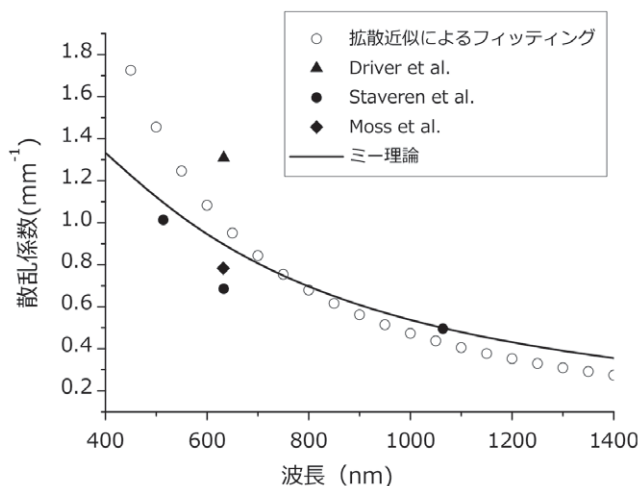


図3 散乱係数の算出

この得られた散乱係数から皮膚のスペクトルモデルを作成し、ヘモグロビン／メラニン比及び散乱係数が定量できるか検討した。筆者らは、特定の波長における吸光度を組み合わせ、散乱に依存しない定量アルゴリズムを開発した実績がある。ヘモグロビン／メラニン比においても、400～800 nmの波長のうち、550 nm、660 nmの二つの波長を軸に、複数の波長の吸光度を用いて、散乱に影響なく高い相関を示す関数($F(\lambda)$)を導出できた(図4)。また、散乱係数と高い相関を示す関数($F'(\lambda)$)の導出も併せて行った(図5)。これらの結果から、複数の波長を用いて、散乱体の蛍光測定において誤差要因になる散乱及び吸光成分の量を推定できることを明らかにした。

3.3 蛍光

最後に蛍光に関する誤差要因について考える。初めに、励起、蛍光の波長範囲や強度を明らかにするため、糖化タンパク質とアミノ酸溶液の3次元蛍光分析を実施した。図6 Aにトリプトファン、図6 Bに糖化タンパク質(ヒト血清アルブミン)の蛍光スペクトルを示す。これらは同一濃度であるが、トリプトワンの蛍光は強く、糖化タンパク質の蛍光は弱いことがわかる。なお、アルカリ性と中性条件で糖化タンパク質を生成させたが、生成速度は違いがあるものの、検討した条件化において蛍光スペクトルに大きな差異はなかった。

例示したトリプトファンと糖化タンパク質については、励起や蛍光の波長が異なるので、バンドパスフィルターなどを用いて光学的に容易に分離できる。一方、測定対象において目的物質と類似の励起、蛍光波長をもつ物質が含まれている場合、散乱や吸収の影響を最

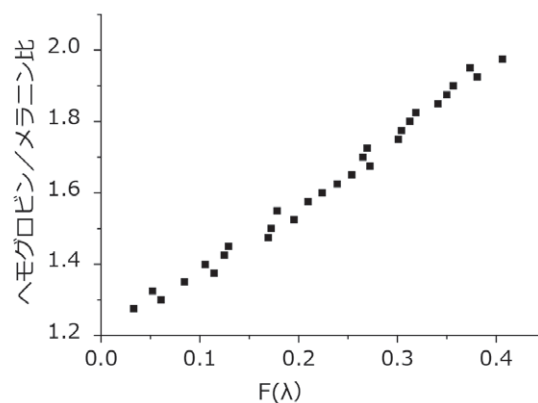


図4 ヘモグロビン／メラニン比の推定

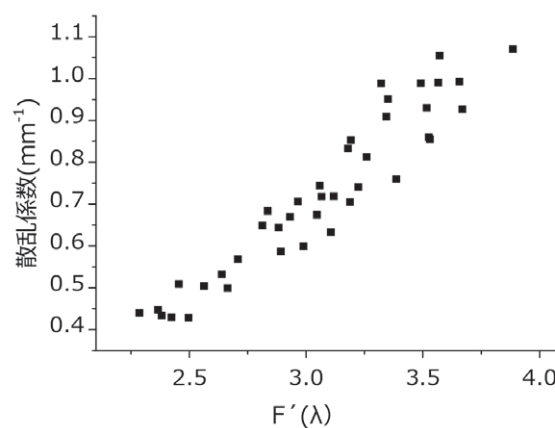
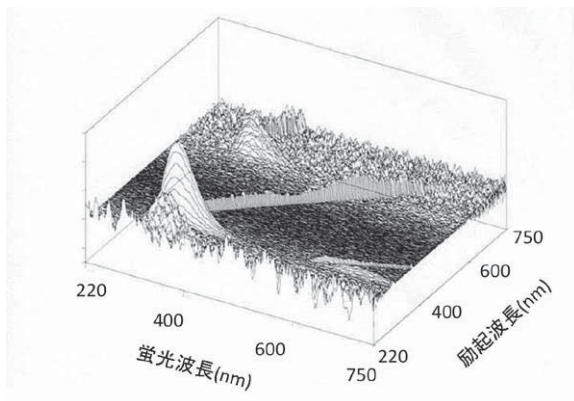


図5 散乱係数の推定

小化できても、その蛍光が測定の誤差となる。当然のことながら、生体には、糖化タンパク質と類似の蛍光特性を示すものも存在している。これらのスペクトルは完全には一致しないので、分解能が高い分光器を用いれば、目的成分を分離することは可能と考えられるが、一般的に高性能な分光器は高額である。そこで、解決の一助となるべく、生体中で蛍光がどのような伝播挙動を示すか、モンテカルロシミュレーションを実施した。モンテカルロシミュレーションは乱数と確立分布を利用して問題を解く方法で、散乱体における光子の空間的なふるまいを明らかにできる。生体に含まれる物質は一樣ではなく、局所的に存在していることが多いため、モンテカルロシミュレーションによる空間情報は有益であると考えた。得られた結果を図7に示す。図7 Aは光を散乱体に入射したときの蛍光の伝播の様子で、図7 Bは特定の位置における蛍光の伝播の様子である。詳細は省くが、これらの結果に基づき

A トリプトファン



B 糖化タンパク質

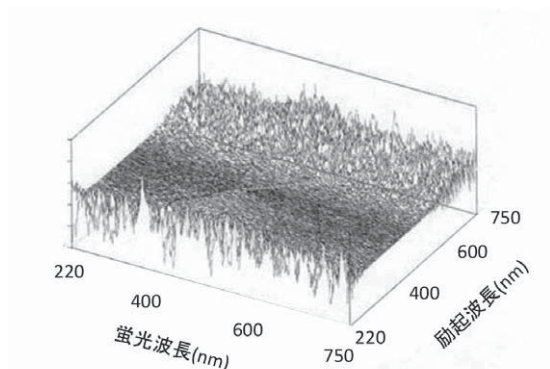


図6 三次元蛍光スペクトル

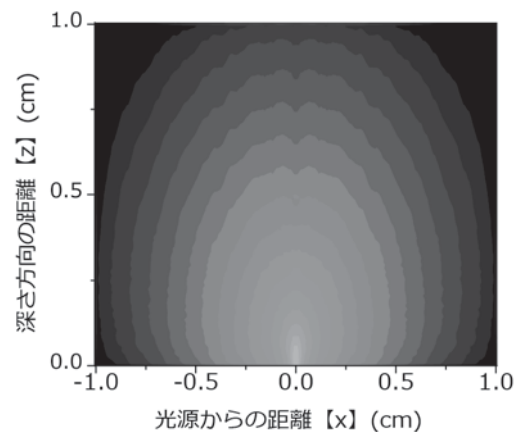
表皮に含まれる目的成分以外の蛍光の影響をより小さくする受光方法について検討を行い、一定の成果を得た。

4. 結 言

本研究では、吸光、蛍光、散乱の観点から疑似生体モデル等を用いて分光データの取得、解析等を行い、支配的な誤差要因となる物質を洗い出した。吸光については、ヘモグロビン、メラニンが影響すると考えられ、その存在比及び散乱係数を推定できることを示した。また、蛍光においては、スペクトルに影響を与える他の物質の蛍光挙動をシミュレーションし、その影響を最小化する手法を創案するに至った。

本研究で得られた結果は、生体の蛍光測定装置開発に資するものであるが、例えば、LEDを用いる場合は、その中心波長の尤度などが問題になる。このため、実用的には、より詳細なデータ取得が不可欠である。現在、光学特性値を評価する装置開発を進めており、具体的な装置構成等について検討していく。

A 蛍光の伝播(全体)



B 特定の位置における蛍光の伝播

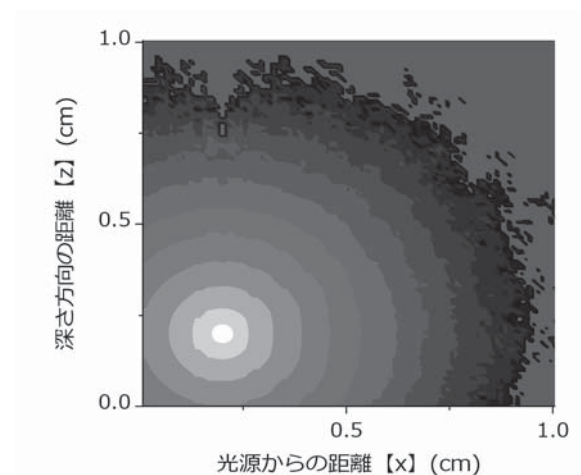
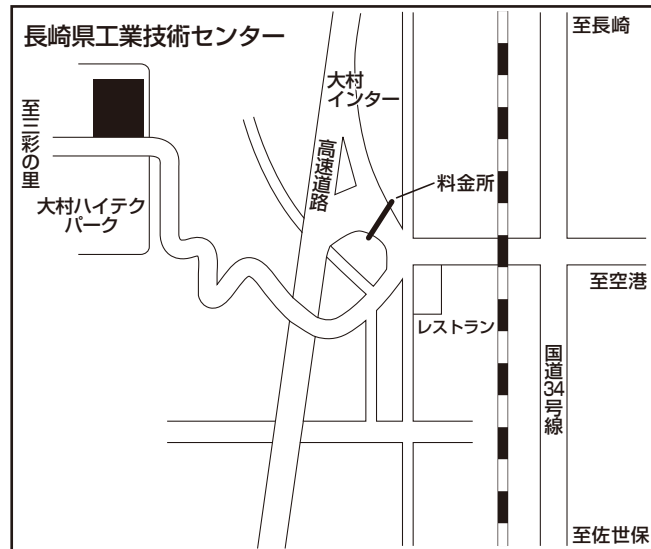


図7 モンテカルロシミュレーションによる光の伝播

参考文献

- [1] 小川誠二, 上野照剛, 非侵襲・可視化技術ハンドブック, (株)エヌ・ティー・エス (2003)
- [2] S. Miki, Y. Shimomura, Pittcon 2009 Conference Proceedings, 920-5 (2009)
- [3] Oregon Medical Laser Center, Optical
- [4] Absorption of Melanin, <http://omlc.org/spectra/melanin/> (アクセス日:2015.05.07)
- [5] H.J.Staveren, C.J.M.Moes, J.van Marle, S.A.Prahl and M.J.C.van Gemert, Appl.Opt. 30, 4507-4514 (1991)

位 置 図



- 大村駅より車で10分
- 長崎空港より車で13分
- 大村ICより車で3分

発行日：平成28年 8 月31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。