

平成26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.44

長崎県工業技術センター

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

目 次

1. 海外輸出に向けた活魚輸送技術の開発	1
食品・環境科 専門研究員 大 脇 博 樹	
長崎県総合水産試験場 水産加工開発指導センター 加工科 科 長 桑 原 浩 一	
長崎県総合水産試験場 養殖技術開発センター 養殖技術科 科 長 山 本 純 弘	
長崎県総合水産試験場 養殖技術開発センター 養殖技術科 主任研究員 横 山 文 彦	
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 専門研究員 秋 月 俊 彦	
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 主任研究員 狩 野 伸 自	
2. 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	5
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 次長 兼 環境・機能材料科長 阿 部 久 雄	
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	
3. 機械装置知的遠隔監視装置の開発	8
機械システム科 科 長 田 口 喜 祥	
4. 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	10
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	
5. 非接触による光学的非破壊計測技術の開発	16
電子情報科 専門研究員 下 村 義 昭	
6. ガイドレス無人搬送システムの開発	18
電子情報科 主任研究員 堀 江 貴 雄	
電子情報科 科 長 指 方 顕	
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	24
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. 高感度な植物蒸散量計の開発	28
グリーンニューディール技術開発支援室 室 長 兵 頭 竜 二	

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	31
	所 長 馬 場 恒 明
機械システム科 主任研究員	小 楠 進 一
応用技術部 部 長	藤 本 和 貴
10. 新規冷却法による高精細加工技術の開発	35
工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
工業材料科 研 究 員	福 田 洋 平
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一
11. 情報創薬を指向した生体分子シミュレーションと可視化技術の展開（第3報）	39
工業材料科 主任研究員	重 光 保 博
12. 耐熱性高分子の機能化とフィルム材料への応用	44
工業材料科 主任研究員	市 瀬 英 明
13. 複雑形状部品の高効率加工技術の開発	47
工業材料科 研 究 員	福 田 洋 平
工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
14. 長崎乳酸菌ライブラリーを活用した加工食品の開発	52
食品・環境科 主任研究員	松 本 周 三
食品・環境科 科 長	河 村 俊 哉
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
食品・環境科 主任研究員	田 畑 士 希
	食品製造企業
15. 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	57
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
有限会社 草加家 代表取締役	高 木 龍 男
させぼパール・シー株式会社 取 締 役	原 田 誠一郎
させぼパール・シー株式会社 販売課係長	辻 佳代子
16. 皮膚中の自家蛍光測定技術の開発	60
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一

海外輸出に向けた活魚輸送技術の開発

		食品・環境科	専門研究員	大 脇 博 樹
長崎県総合水産試験場	水産加工開発指導センター	加工科	科 長	桑 原 浩 一
長崎県総合水産試験場	環境養殖技術開発センター	養殖技術科	科 長	山 本 純 弘
長崎県総合水産試験場	環境養殖技術開発センター	養殖技術科	主任研究員	横 山 文 彦
	長崎県窯業技術センター	環境・機能材料科	専門研究員	秋 月 俊 彦
	長崎県窯業技術センター	環境・機能材料科	主任研究員	狩 野 伸 自

消費者の「魚離れ」が進行し、国民1人1日当りの魚介類摂取量が減少傾向にある一方、経済発展の続くアジア諸国を中心に水産物の輸出は増加傾向にある。東アジアへの長崎県産水産物の輸出拡大は、本県の基幹産業である水産業振興のためにはきわめて効果的な手段である。中国では、鮮魚よりも活魚のニーズが高く、日本産の安全・安心・美味な魚を活魚の状態で輸出できれば、高価格で大量に販売できる可能性は高い。著者らは電解技術を利用した海水魚の閉鎖循環式飼育システムの開発を実施し、高密度で長距離の活イカ輸送システムの開発に成功しており、その技術を応用した長時間の活魚輸送技術の開発を目指した。

本研究開発では、室内飼育試験を実施して輸送魚を高密度で長時間生存させるための条件を見出し、活魚輸送装置を試作して輸送試験を実施した。また、飼育水の pH コントロールや溶存二酸化炭素の除去機能を有する新たな電解槽を開発することを目指した検討を行った。

1. 緒 言

国内における魚介類消費量の減少が続くなど、国内マーケットが小さくなる一方、水産物の輸出は増加傾向にあり^[1]、特に経済成長の著しい東アジアに対しても長崎県産の高品質な水産物の輸出拡大が求められている。鮮魚については、県内の民間企業が20年程前から中国市場への輸出を行っている。鮮度保持の観点から2005年より航空便が利用され、その後輸出量は年々増加して高級品として高値で取引されているが、航空便であるためにその輸出量には限界がある。本県の水産物の消費拡大とブランド化を進めるためには、流通上の輸送・鮮度保持技術の確立が必要であり、新しい輸出のツールとその技術開発が求められていた。

本県では、県内企業、長崎県総合水産試験場、当センターとの共同で、活イカの高密度輸送技術を開発した経緯があり、他県に先駆けた長時間活魚輸送技術の確立が期待されている。

本研究開発では、長崎県総合水産試験場、長崎県窯業技術センター、県内企業と協力して高密度・長時間の活魚輸送を実現するための技術の開発を目指した。そのために、中国市場で求められている魚種を選定して、活魚を長時間輸送する際の収容条件等を把握し、高密度で長時間、高い生存率で運搬できる装置の開発につなげることとした。

2. 試験材料および使用機器

2.1 試験材料と測定機器

電解槽の評価の際には、長崎県総合水産試験場にて種苗生産・育成された約0.5kg/尾のクエを、室内飼育試験と国内輸送試験の際には、県内で漁獲された200～300g/尾のマアジ、および前記由来のクエ0.8～1.6kg/尾を用いた。

室内飼育試験と国内輸送試験には、昨年度改造した200L容の活魚輸送装置(試作機)(以下輸送装置と記述)^[2](図1)を用いた。また、国内輸送試験の際には、平成25年度に委託製作した改造コンテナに輸送装置2基を収容して試験を実施した。

電解槽の評価の際には、山陽電子工業(株)製PSA酸素濃縮装置SO-001Bにて濃縮酸素を供給した。

アンモニアの測定にはWTW社製pHotoFlexを、溶存酸素濃度の測定には飯島電子工業(株)製ID-100を、pHの測定には(株)堀場製作所製LAQUA F-74を、溶存二酸化炭素濃度は(株)東興化学研究所製TiN-9004iを使用した。

2.2 電解槽

2.2.1 電解槽の特徴

今回の試験に使用した電解槽は、当センターで独自に開発したもので、電解槽内の構造を工夫することで陽極側の海水(陽極水)と陰極側の海水(陰極水)を完全

に分離できる構造となっており、イオン交換膜等の膜を使っていないところに特徴がある。

海水の電気分解では、陽極で臭化物イオンや塩化物イオンが酸化されて臭素(Br_2)や塩素(Cl_2)が生成し、それらと水との反応により次亜臭素酸(HBrO)や次亜塩素酸(HClO)という酸化力を有するオキシダントが生成する。飼育魚が排出して飼育水に蓄積する有害なアンモニアを、このオキシダントと反応させることにより窒素に変換して系外に除去することができる。また、その酸化力により、殺菌効果や脱色効果も期待することができる。塩素と水の化学反応式は以下のとおりで、この反応により陽極近傍は酸性となる。



一方、陰極では水素イオンが還元されて水素が生成し、陰極近傍の水素イオン濃度の低下によりアルカリ性(pHが高く)となる。電解条件によっては、高pHでは溶解度が低下するマグネシウムやカルシウムが塩として電極表面に析出してスケールとなる。

陽極と陰極が同一槽内にある電解槽の場合、電極近傍では前記の反応が起こっているが、槽内で陽極水と陰極水が混合されて均一の溶液になって電解槽から排出されることになる。我々は、この従来の電解槽を海水魚の飼育システムに組み込んで脱アンモニアや殺菌、脱色に効果があることを確認してきた。

当センターで開発した陽極水と陰極水を分離できる電解槽では、海水魚の高密度・長時間飼育に対して有意義な次のような機能が付与されることを期待できる。
① pHの下がった陽極水を曝気することで飼育水に蓄積する二酸化炭素を効率よく除去することができる。
② pHの下がった陽極水を系外に排出することで飼育水pHを上げることができる。
③ 陽極側と陰極側の流量を自由に制御することが可能となり、余剰のオキシダントを分解するための活性炭槽容量を下げるができる。

今回の室内飼育試験と国内輸送試験には、図2に示した電解槽を使用した。この電解槽ではスケールの析出による流路の閉塞等の問題が生じたため、新たな構造の電解槽として図3に示した電解槽を開発した。電解槽の構造決定の際には、コンピュータシミュレーションを用いて電解槽内の流れを解析した後、試作して陽極水と陰極水が分離することを確認した。

2.2.2 飼育水のpH調整機能

海水の電気分解では、電極の電解効率の補正は必要なものの、流れた電流値によって生成する酸の量が決



図1 活魚輸送装置（試作機）の外観

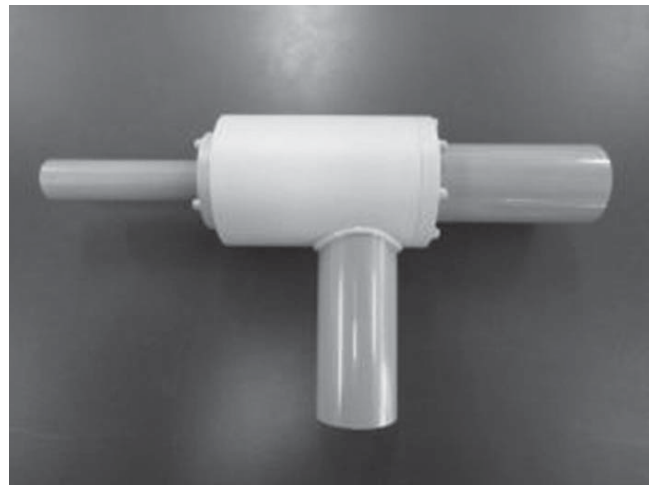


図2 活魚輸送に使用した電解槽の外観



図3 試作した新規電解槽の外観

定され、その際の海水のpH変化も推測することができることを確認している^[3]。

2.2.3 脱二酸化炭素機能

海水のpHは8程度と高く、海水に溶存した二酸化炭素の約85%は重炭酸イオン(HCO_3^-)、約15%は炭酸イオン(CO_3^{2-})となっており、そのまま曝気しても二酸化炭素を除去することは困難であるが、pHを下げて曝気することで溶存する二酸化炭素を効率よく系外に放出できることを確認している^[4]。

3. 試験内容と結果

3.1 クエを用いた新規電解槽の評価

図3に示した電解槽、泡沫分離装置、150L容円形水槽、30L容物理ろ過槽、循環槽、活性炭槽、曝気槽、流量計を備えた閉鎖循環式海水魚飼育システム(図4)を構築し、クエ6kg(飼育水槽容量に対する収容密度4%)を収容して飼育水温を23℃に設定して試験を行った。試験中、飼育水槽中にはPSA酸素濃縮装置で濃縮酸素を供給し、飼育水の溶存酸素濃度を9以上に維持した。飼育しているクエに、飽食するまで給餌した後、アンモニア濃度(飼育水)、pH(飼育水、活性炭前、曝気後)、二酸化炭素濃度(飼育水、曝気後)、飼育水中の溶存酸素濃度を計測した。曝気槽での曝気量は1.0L/minとした。試験は、同じ魚を用いて海水の電解なしとありの2回行い、その比較を行った。試験中の水質変化を図5に示した。

電解なしでは、給餌直後から飼育水のアンモニア濃度が直線的に増加し、16時間後には15ppmに達したため、電解ありの試験への影響を考慮して試験を中断した。電解ありの試験での電解電流値は、飼育水中のアンモニア濃度から浄化に必要な電流値を算出して順次変更しながら試験を実施した。二酸化炭素濃度の縦軸は、試験スタート時の濃度を100%として換算した値とした。

電解なしの場合、経時的にアンモニア濃度が高くなっているのに対して、電解ありの場合にはアンモニア濃度は抑制され、一定の値を維持することができていた。また、電解を停止した18.5時間後以降にはアンモニア濃度が増加に転じていることから、海水電解によって飼育魚の排泄するアンモニアを分解除去できていることが確認された。

飼育水の溶存二酸化炭素濃度は、電解なしの場合は試験終了まで経時的に増加した。電解ありの場合、曝気後は電流値が大きい程低下しており、pHの測定結果

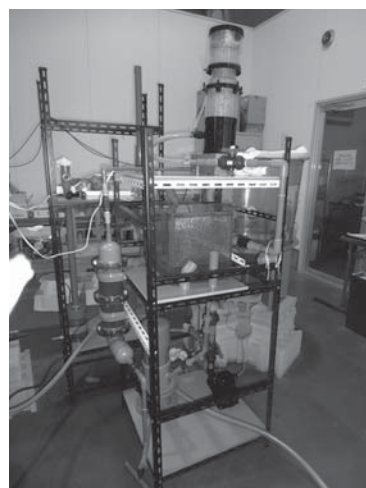


図4 クエの飼育試験に使用した閉鎖循環式海水魚飼育システム外観

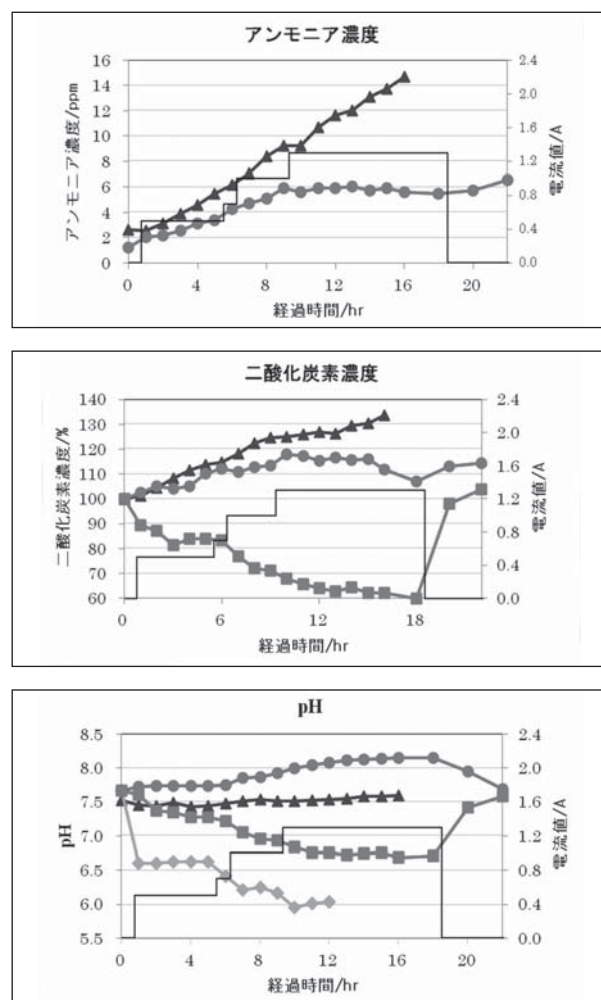


図5 クエ飼育海水のアンモニア濃度、溶存二酸化炭素濃度、pHの変化

▲：電解なし飼育水、●：電解あり飼育水、
◆：電解あり活性炭前、■：電解あり曝気後
—：電流値

とあわせて考察すれば、曝気による溶存二酸化炭素の放出はpHが低い程効率的であることが確認できる。飼育水の溶存二酸化炭素濃度は、試験当初は増加傾向にあったが、電流値の増加に伴ってその増加は抑制され、15時間目以降は低下に転じた。電解を停止した18.5時間後以降には再度増加していることから、陽極水の曝気による二酸化炭素の除去効果が確認された。飼育水のpH変化では、電解なしの場合は経時的に僅かなpH上昇が認められ、アンモニア濃度の上昇により試験を終了させるまでアンモニア濃度と同じように上昇した。電解ありでは、活性炭前のpHが電流値に比例して低下したが、曝気後は活性炭前より高くなり、飼育水pHは徐々に高くなった。

3.2 室内飼育試験結果

今年度の室内飼育試験は、総合水産試験場にてアジ、クエそれぞれ5回、飼育期間は4-6日間で実施した。

その結果、アジは収容密度5%で6日間飼育して生残率99%、クエは収容密度23%で6日間飼育して生残率100%という結果が得られた。試験終了時、試験に供したマアジとクエは目視の確認ではあるが良好な状態であった。

遊泳魚であるアジの飼育では、水槽内の流れの影響が大きいことが確認され、流れを適切に管理することでアジの生残率が高くなることが確認された。

クエは、収容密度が高くなると噛み合いが生じることが確認されたが、個別収容カゴを使用することで噛み合いが防止され、無傷の魚体のまま飼育できることが確認された。また、個別収容カゴを用いることで、クエのアンモニア排泄量が抑制され、海水浄化に対しても有意であることが確認された。

3.3 国内輸送試験結果

昨年度の輸送試験では、長崎から鹿児島までを往復する試験を行ったが、今年度は長崎から東京までを6日間で往復する輸送試験を3回実施した。長崎県総合水産試験場にて2基の輸送水槽にアジとクエをそれぞれ収容し、2時間程度掛け流しを行って水質を安定させた後、閉鎖循環にして海水浄化をスタートした。この輸送装置2基を改造コンテナ内に収容して輸送試験を実施した。長崎県総合水産試験場から博多港まではトレーラーによる陸上輸送、博多港から東京港まではRo-Ro船を用いた海上輸送で、東京港で降ろさずにそのまま逆のルートで長崎県総合水産試験場まで輸送して魚の状態を確認した。

輸送試験では、トレーラー輸送時の振動が予想以上に大きく、FRP製の水槽の破損や水質浄化装置内の部材の落下等による問題が発生したため防振パレットの設置やネジの緩み対策等を実施した。またストレーナの閉塞に伴って電解槽の陰極に多量のスケールが析出して電解がストップする等の問題が発生し、陰極構造の変更、大面積の物理ろ過フィルターの設置等の対策を行った。これらの対策を実施し、クエを収容密度10%で全数生残という結果が得られた。

4. 結 言

新たな機能を有する新規電解槽の開発を行った。隔膜を使わず陽極水と陰極水を分離できること、pHの下がった陽極水を曝気することで飼育水に蓄積する二酸化炭素を除去できること、飼育水のpH制御が可能なことを、クエの飼育試験を実施して確認した。この電解槽は、今後閉鎖循環式の陸上養殖への展開も含めて開発を継続する予定としている。

室内での飼育試験では、高密度・長時間輸送を実現するために必要となる水槽機能が、遊泳魚であるアジと底生魚であるクエは異なっていることが確認できた。遊泳魚であるアジの高密度飼育は非常に困難であったが、水槽内の流れを適切に管理することで可能となった。また、クエでは、個別収容カゴを用いることでアンモニア排泄量が低下することを確認するとともに、噛み合いの防止が可能となった。

当初の予定では、今年度は中国上海への海外輸送試験を実施する予定であったが、諸般の事情により国内輸送試験のみとなった。室内飼育試験では、前記の通り高密度で6日間以上の飼育が実現できたが、輸送試験の振動等の影響により輸送試験は満足のいく結果が得られなかった。アジとクエについて、高密度・長時間飼育するための条件は見出されており、今後、輸送装置の振動対策等を実施することで、高密度・長時間の活魚輸送が実現できるものと考えられた。

参考文献

- [1] 中里靖、Journal of National Fisheries University、61 (1)、27-31(2012)。
- [2] 大脇博樹、山本純弘、岡本昭、阿部久雄、永石雅基：長崎県工業技術センター研究報告、43、1-2(2014)。
- [3] 大脇博樹、山本純弘、岡本昭、黒川由美：長崎県工業技術センター研究報告、40、52-55(2011)。
- [4] 大脇博樹、山本純弘：長崎県工業技術センター研究報告、39、50-51(2010)。

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 次長 兼 環境・機能材料科長	阿 部 久 雄
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な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。本開発では、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の実現を目指している。

本開発の2年目である平成26年度は、SiC パワーデバイスを導入した降圧形 DC-DC コンバータの設計・試作と評価を実施した。また、平成25年度に構築した SiC パワーデバイスのモデルを用いた電力損失の理論解析を行い、実測との両面から SiC 導入による損失低減効果について検証した。また、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、およびデジタル制御回路における AD 変換値の補正を行った。

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。現在はSi(シリコン)を基板材料としたパワーデバイスが主流だが、低損失・高効率化には材料物性的に限界が見え始めている。そこで、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。研究事業の2年目となる平成26年度は、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。

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. SiC-SBDを用いたDC-DCコンバータ

2- 1. 試作および特性評価

試作した降圧形DC-DCコンバータの外観を図1 (a)に示す。電力容量は50Wで、スイッチング周波数を

100kHz、インダクタンスを150 μ Hに設定した。試作に用いたパワーデバイス、Si-MOSFETおよびSiC-SBDである。定格入出力電圧は48V $\Rightarrow$ 24V(デューティ比:50%)で、定格出力電流を2.08A(負荷抵抗:11.52 Ω)、入出力キャパシタンスをそれぞれ680 μ F、1000 μ Fに設定した。図1 (b)に負荷電流 I_{out} を変化させた場合の変換効率の測定結果を示す。測定時には、駆動回路で生成した15Vのパルス電圧をSi-MOSFETのゲート端子に入力している。ここでの変換効率は入力電圧を48Vに固定し、直流電子負荷装置を用いて負荷率を5% ~ 100%まで変化させた場合の入力電流および出力電圧から算出した。比較用として、Si-FRD(ファストリカバリーダイオード)を用いて試作した降圧形DC-DCコンバータ(電力容量: 50W)の特性を併せて示している。Si-FRDを用いた場合は、スイッチング周波数を40kHz、インダクタンスを370 μ Hに設定し、入出力キャパシタンスをそれぞれ1660 μ F、2360 μ Fに設定した。負荷率が60%で最大の変換効率を得られており、Si-FRDを用いた場合は約92%、SiC-SBDを用いた場合は約94%となった。

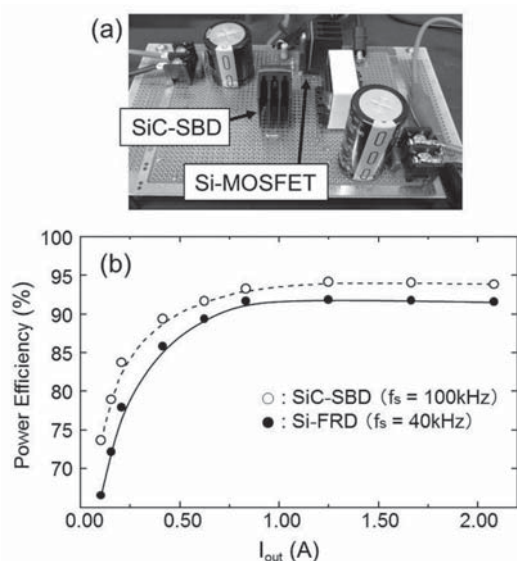


図1. (a)試作した降圧形DC-DCコンバータの外観と
(b)変換効率の負荷電流特性

2-2. SiC導入によるDC-DCコンバータの電力損失低減と小型化の効果

SiC-SBDの導入効果を検証するために、パワーデバイス部で発生する電力損失のシミュレーション解析を実施した。試作機と同仕様の降圧形DC-DCコンバータを設計し、平成25年度に構築したデバイスモデルを用いて損失解析を行った。使用した電源回路シミュレータでは、パワーデバイスの導通損失とスイッチン

グ損失を個別に解析することが可能である。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。

図2に変換効率とスイッチング周波数 f_s の関係についてのシミュレーション結果と実測値を示す。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ている。Si-FRDを用いた場合は、スイッチング周波数 f_s 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-SBDではリカバリー電流がほとんど発生せず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。その結果、スイッチング周波数 f_s を100kHzまで高くした場合、6%の高効率化(88% $\Rightarrow$ 94%)、即ち50%の電力損失削減を実現している。

また、SiC-SBDを用いて試作した降圧形DC-DCコンバータの容積は335 cm^3 で、Si-FRDを用いた場合の728 cm^3 に対して54%の小型化を実現した。これは、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。

以上、SiC-SBDを導入することで、損失の50%低減(スイッチング周波数: 100kHz)と容積の54%削減による小型化を達成した。今後はSiC-MOSFETを導入し、デジタル制御で最適動作させることにより、更なる高効率化と小型化が期待できる。

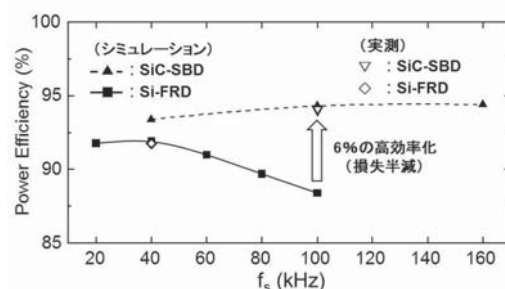


図2. 降圧形DC-DCコンバータの変換効率と
スイッチング周波数 f_s の関係

3. 前置増幅器およびAD変換器

ここまでは開ループでの評価を行ってきたが、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、図3に示す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。また、前置増幅器はコンバータの出力電圧(0V～48V)を電氣的に絶縁するためのフォトカプラ、高周波ノイズを除去するためのローパスフィルタおよび反転増幅器で構成され、コンバータの出力電圧をAD変換器の入力電圧範囲(0V～3.3V)に変換する。図4に、試作した前置増幅器の出力特性を示す。横軸はDC-DCコンバータの出力電圧 E_o を、また縦軸はフォトカプラの出力電圧 V_{PC} (●)と前置増幅器の出力電圧 V_{PA} (▲)をそれぞれ示す。図より、試作した降圧形DC-DCコンバータの定格出力電圧の24V付近で出力電圧 V_{PA} 、 V_{PC} の線形性が保たれており、かつ、出力電圧 V_{PA} がAD変換器の入力電圧範囲(0V～3.3V)におさまっていることが分かる。

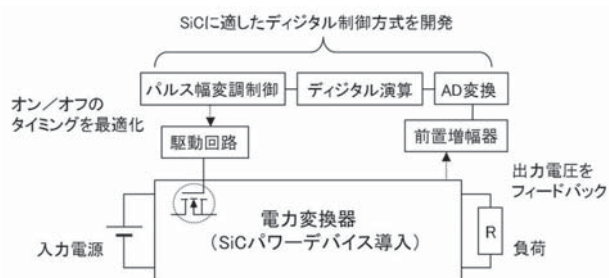


図3. デジタル制御回路の構成

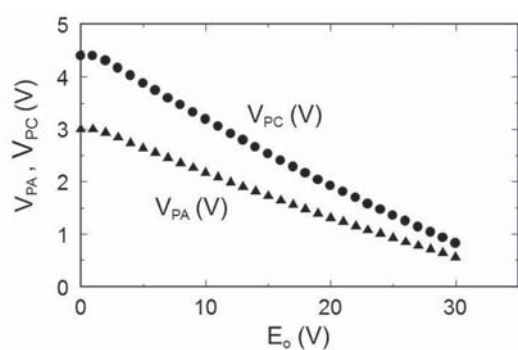


図4. 前置増幅器の出力特性

次に、前置増幅器の出力をAD変換器に入力し、デジタル信号に変換する際の補正処理を行った。図5にコンバータ出力電圧のAD変換値 get_Neo を示す。横軸はコンバータの出力電圧 E_o である。使用したAD変換器は12bitで、デジタル値:0～4095($N_{eo,max}$)をコンバータの出力電圧:0V～48V($E_{o,max}$)に設定した。よって理想値の傾き($N_{eo,max} / E_{o,max} = 4095 / 48$)は85.3125となる。図5より、計測値の近似直線の傾きは-105.86、切片は3765.9となった。よって補正ゲイン(理想値の傾き/計測値の傾き)は-0.8059、補正バイアスは-3765.9と

算出された。以上より、コンバータ出力電圧のAD変換値に補正をかけ、この補正式をAD変換プログラムに反映させた。

【補正式】 $Neo = 0.8059 \times (3765.9 - get_Neo)$

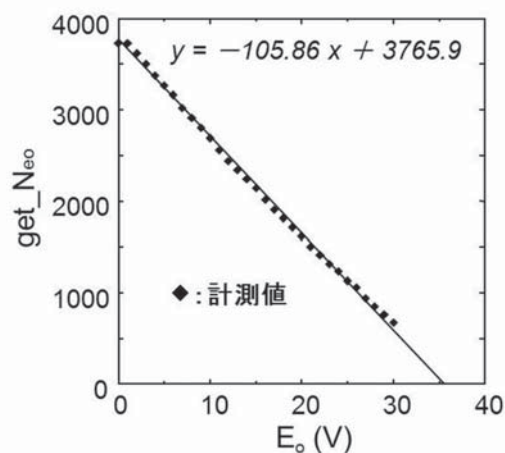


図5. コンバータの出力電圧 E_o のAD変換値 get_Neo

4. 結 言

本事業2年目の平成26年度は、SiC-SBD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タによる電力損失の解析を行い、SiCの導入による損失低減と小型化の効果について検証した。その結果、損失の50%低減(スイッチング周波数:100kHz)と容積の54%削減による小型化を達成した。また、デジタル制御を行うために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。

本事業3年目となる平成27年度は、①SiC-SBDに加えてSiC-MOSFETを導入した双方向DC-DCコンバータの設計・試作と評価を実施する。また、②SiC-MOSFETを最適動作させるためのデジタル制御方式を確立して更なる高効率化と小型化を目指す。

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.

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、不具合の発生を監視して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随時確認し、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で監視する装置開発が可能であると考えられる。そこで、本研究では、既存の NC 工作機械に後付けで取り付け可能な装置により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と工場内に設置し、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品質工学の手法^[2]を応用して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26年度は、平成25年度に試作した多チャンネル型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を試作した。

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複数のセンサユニットで取得し、Ethernetを用いて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、管理、メール送信などを行うサーバプログラムが起動されており、複数のセンサユニットで取得した各種データの収集および管理を実施する。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。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同時に、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。

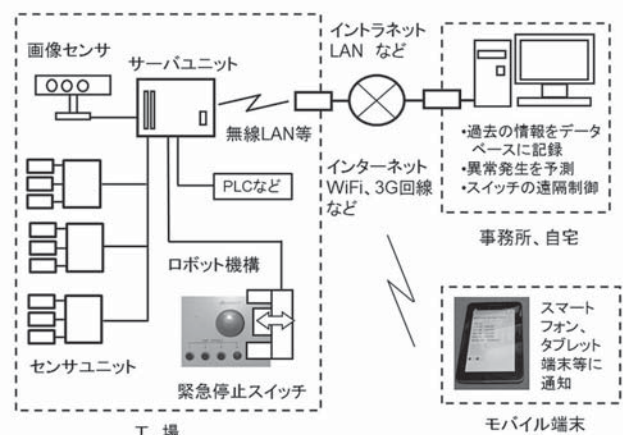


図1 知的監視装置のシステム構成

平成26年度に試作したサーバユニットについて以下で述べる。

3. 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特徴量を検出しセンサユニットから送られてきた信号と複合処理して不具合予測計算を行う機能、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 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1に示す。

表1 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	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

Raspberry Pi B+ マイコンボードを用いたサーバユニットは、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ため、直接緊急停止信号を、機械装置の制御を行っている PLC に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 を停止後に電源を切断しないと、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。そこで、Raspberry Pi B+ マイコンボードの電源を PIC 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対策を行った。電源制御装置は、電源スイッチの位置を PIC マイコンで監視し、電源スイッチが切から入りに変わった時は、Raspberry Pi B+ マイコンボードに DC5V 電源を供給し、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機能を有する。製作した電源監視装置の構成を図2に、Webカメラを接続したサーバユニット2の写真を図3に示す。

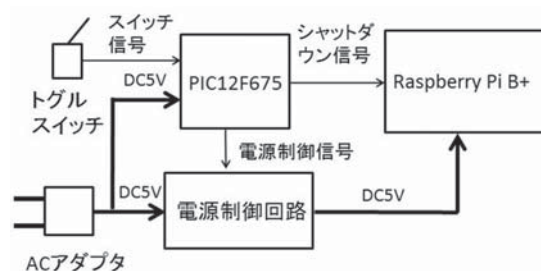


図2 電源制御装置の構成

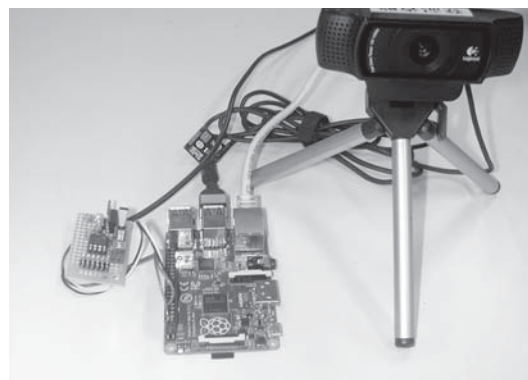


図3 サーバユニット2 (Raspberry Pi B+)

4. 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するために、複数のセンサユニットから送られてくるデータを収集、管理するサーバユニットの試作を行った。試作したサーバユニットは、距離画像センサ Kinect に対応したサーバユニット1と、Webカメラのみの対応であるが安価なサーバユニット2の2種類である。

今後、複数のセンサユニットで収集したデータを基に工具交換時期を予測する装置を開発する予定である。

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.

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。

本研究開発の初年度である平成26年度は、県産地域資源からのエキスを抽出を行った。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人）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が、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、また保有する型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）および利用を試み、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1年目となる平成26年度は、県産地域資源から抽出したエキスの機能性評価と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評価を行い、デジタル製造技術を活用した菓子型の開発システムの確立を図った。

2. 実験方法

2.1 県産地域資源から得られたエキスの機能性評価

2.1.1 試料の調整

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、波佐見町で生産されているバラを原料として、熱水抽出エキスを調製し、その機能性をin vitroで検討することにより、酵素抽出エキスの素材としての可能性を検討した。

本研究で試料としたバラ花びらは重山陶器株式会社より提供された。熱水エキスの製造は、以下のように実施した。4～5月に採取された花びら20gを熱水1L中で10分間攪拌した後、ろ過により得られたエキスを濃縮・凍結乾燥によって乾燥粉末を得た。各種機能性

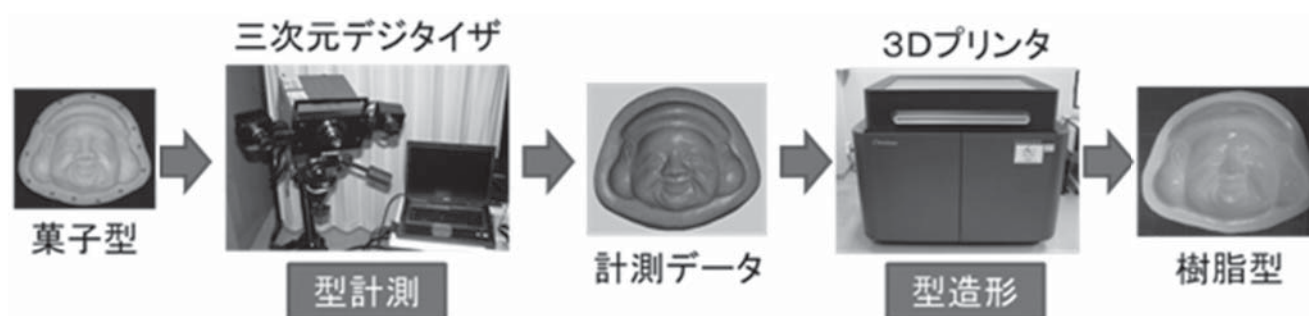


図1 システム構成

の評価にはこの乾燥粉末を用いた。

2. 1. 2 総ポリフェノール量の測定

総ポリフェノール量の測定をフォリン-デニス法^[1]により行った。80%エタノールに溶解させた熱水抽出物100 μ Lに対して、超純水1.6 mLを添加し、次いでフォリン-デニス試薬100 μ L、飽和炭酸ナトリウム溶液200 μ Lを加え、30分間放置した。その後、反応溶液の透過光強度を波長760 nmで測定し、標準物質としてクロロゲン酸を用いて吸光度を算出した。

2. 1. 3 熱水抽出エキスの腓リパーゼ阻害性の測定

ブタ膵臓由来リパーゼ (Type VI-S) 及び腓リパーゼの疑似基質4-methylumbelliferyl oleate (4-MU) はSIGMA製を使用した。活性測定は以下のように実施した^[2]。水に溶解したサンプル25 μ Lをマイクロプレートに添加し、13 mM Tris-HCl containing 0.15 M NaCl and 1.3 mM CaCl_2 (pH8.0) に溶解した基質 (0.1 mM 4-MU) を50 μ L添加した後に、25℃、5分間プレインキュベートした。同じ緩衝液に溶解した酵素溶液 (50 U/mL) を25 μ L添加し、酵素反応を開始した。25℃、30分間反応させた後に、0.1 M クエン酸ナトリウム (pH4.2) 溶液を1 mL添加し、反応を停止させた。リパーゼにより遊離した4-methylumbelliferone量を蛍光光度法 (励起波長; 355 nm、蛍光波長; 460 nm) により測定した。

2. 1. 4 エキスの α -グルコシダーゼ (AGH) 阻害性の測定

ラット小腸アセトンパウダー (SIGMA製) から調製した遊離AGHに対する阻害性を評価^[3]した。アセトンパウダー 1.0 gに人工腸液 (pH6.8) 16 mLを添加し、ホモジナイズ・遠心処理 (10,000 rpm、10分) して得られた上清を酵素液として用いた。水に溶解した熱水抽出物100 μ Lに酵素液40 μ Lを加え、10 mMマルトースあるいは45 mMスクロース溶液760 μ Lを添加し、生成した

グルコース量をグルコースCIIテストワコー (和光純薬製) を用いて測定し、AGH阻害性を測定した。

2. 2 デジタル製造技術を活用した菓子型の開発システム

2. 2. 1 システム構成

三次元スキャン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

三次元デジタイザ		3Dプリンタ	
測定方式	非接触 CCD カメラ	造形方式	インクジェット 紫外線硬化
カメラ 解像度	0.8M pixel	造形 解像度	600dpi(X,Y 軸)、 1600dpi(Z 軸)
測定範囲	125 × 100 × 90mm	造形 サイズ	342 × 342 × 200mm
測定精度	± 0.017mm	造形精度	± 0.1mm
測定点間 距離	0.12mm	積層厚	16 μ m、30 μ m

2. 2. 2 性能試験

本システムが菓子型製作に十分な性能を持つかの評価を行うため、菓子製作において重要となる形状の滑らかさと細部の再現性の試験を行った。

(1) 形状の滑らかさの再現性試験

菓子型から転写された菓子表面がお菓子として十分な滑らかさを持っていることは重要な要素である。そこで、長崎くんちの庭見せのお花菓子として飾られる長崎伝統工芸菓子であるぬくめ細工菓子を例にとり再現性実験を行った。使用した型は、素焼きの恵比寿、大黒の2種類 (図2) である。

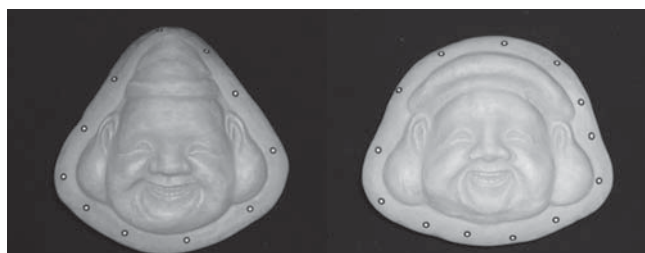


図2 ぬくめ細工菓子素焼き型(左 恵比寿、右 大黒)

これらの型を三次元デジタイザを用いて計測し、計測したデータから3Dプリンタを用いて樹脂型を作製し、樹脂型と樹脂型の元データの形状位置(偏差)を比較することにより評価を行った。樹脂型の積層厚は16 μm で行った。

(2) 精細部の再現性試験

落雁などの型に押し乾燥させて作成する菓子の場合、その木型には彫刻され細部が精細に表現されることが多く、この精細さを再現することは、菓子型において重要な要素である。そこで、特に細かい彫が施されている落雁菓子を例にとり、再現性実験を行った。使用した型は、落雁の鶴と亀の2種類である(図3)。

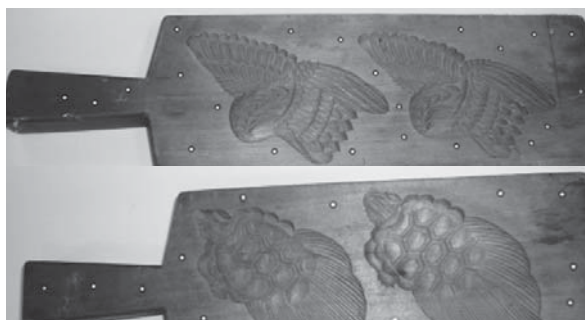


図3 落雁木型(上 鶴、下 亀)

これらの型を三次元デジタイザを用いて計測し、計測したデータから3Dプリンタを用いて樹脂型を作製し、樹脂型と樹脂型の元データの形状位置(偏差)による比較と試作による評価を行った。樹脂型の積層厚は16 μm で行った。

3. 結果と考察

3.1 バラ熱水抽出エキスの機能性評価

3.1.1 総ポリフェノール量の測定

収穫直後の花びらの総ポリフェノール量を測定したところ、1500 (mg/100 g-Fresh Weight)であり、さらにポリフェノールの一種であるアントシアニン量を検討した結果、60 (mg/100 g-F.W.)と判明した。さらに、花びらから調製した乾燥熱水抽出物の総ポリフェノール

量を測定したところ、32.4 g/100 gと高値を示し、アントシアニンも290 mg/100 g程度含有されていた。この結果から、熱水抽出物には、バラ花びらに含まれる有効成分が効率的に抽出されていることが示された。

3.1.2 バラ花びらのリパーゼ阻害性

本バラ品種花びらの有するリパーゼ阻害性を表2に示した。バラ花びら抽出物は115 $\mu\text{g/mL}$ と高い阻害性を有していた。当所でこれまでに研究を行った緑茶とビワ葉を用いた混合発酵茶^[4]と比較すると、5分の1程度の阻害性であった。しかしながら、ヒトでの血中中性脂肪上昇抑制作用を示すと報告^[5]されているリンゴポリフェノールのリパーゼ阻害性は412 $\mu\text{g/mL}$ であり、4倍近く高活性であったことから、本素材についても中性脂肪低下に関わる機能を有する可能性が示唆された。

表2 バラ花びらエキスのリパーゼ阻害性

	IC ₅₀ ($\mu\text{g/mL}$)
熱水抽出物	115

3.1.3 エキスの α -グルコシダーゼ (AGH)阻害性の測定

花びらエキスが有する血糖値上昇抑制作用に関して検討を行うために、AGH阻害性を測定した。その結果、マルターゼ及びスクラーゼ阻害性について、表3に示すようにいずれも優れた阻害性を示し、本バラ品種が血糖上昇抑制作用を有する可能性が示唆された。これまでに当所は発酵茶が血糖値上昇抑制作用^[6]を有することを明らかにしているが、発酵茶の活性値(マルターゼ阻害性; 0.06、スクラーゼ阻害性; 0.20 mg/mL)と比較すると、バラエキスは3分の1程度の活性値であった。また、緑茶カテキンが血糖抑制作用を示すことが数多く報告^[7]されているが、カテキンを高度に含有する緑茶番茶の阻害性を当所で測定(マルターゼ阻害性; 0.18、スクラーゼ阻害性; 0.82 mg/mL)しており、それと比較するとほぼ同程度の活性を有していることが明らかとなった。

表3 バラ花びらエキスのAGH阻害性

	IC ₅₀ (mg/mL)
マルターゼ阻害	0.21
スクラーゼ阻害	0.52

県産バラ花びらを原料とした健康機能性を有する酵素抽出エキスの開発を目的として、収穫直後の花びらから調製した熱水抽出エキスの成分及びin vitroレベルでの機能性を検討した。まず、エキに含まれる総ポリフェノール及びアントシアニン量を測定した結果、これら成分を高度に含有することが明らかになった。さらに、花びらエキスの脂質代謝に及ぼす影響を検討するため、熱水抽出物の腓リパーゼ阻害性を測定した。その結果、熱水エキスは高い活性値を有しており、食後の脂肪吸収抑制作用について報告されている食品素材（リンゴポリフェノールなど）よりも3倍以上高活性であることが示された。この他に、血糖上昇抑制に関連するマルターゼ及びスクラーゼ阻害性についても検討したところ、いずれも優れた阻害性を示し、バラエキスが血糖上昇抑制作用を有する可能性が示された。

以上の結果から、バラエキスは各種の健康機能を示すことが推察され、エキに含まれるポリフェノール成分がこれら機能性と関連することが考えられた。

本研究では、市販酵素による県産地域資源からのエキス抽出を検討している。今回の検討では、バラの熱水抽出エキスが機能性を有することを明らかにできたことから、酵素を用いることにより、成分を高度に含む花びら原料からポリフェノール成分などの機能性成分が効率的に抽出されることが期待できる。

3.2 形状の滑らかさと精細部の評価

(1) 形状の滑らかさ

図4に試作した樹脂型(ぬくめ細工菓子)を示す。いずれも、造形後仕上げ加工は行っていない。

図4に示す樹脂型と造形データ(元の型の計測データ)を同じ位置に配置し、位置座標値の比較を行った偏差マップを図5に示す。

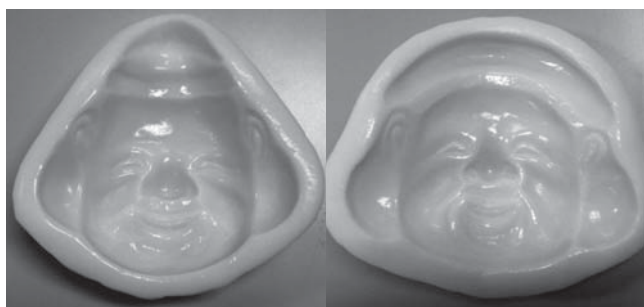


図4 樹脂型(左 恵比寿、右 大黒)

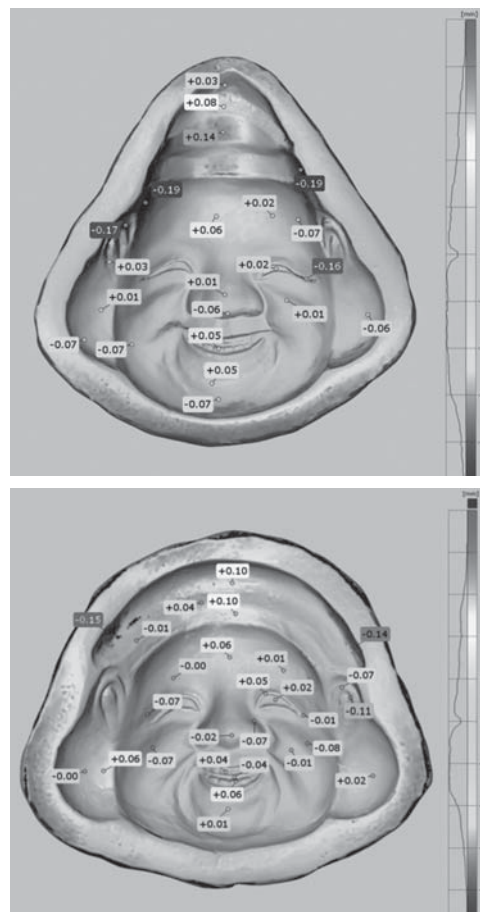


図5 偏差マップ(上 恵比寿、下 大黒)
図中の数値は偏差(mm)

いずれの場合も、細部以外の滑らかな箇所の対応する地点の距離は0.1mm以下に収まっており、形状の滑らかさが再現されていることがわかる。この樹脂型を用いて、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。

(2) 精細部の再現性

図7に試作した樹脂型(落雁)を示す。いずれも、造形後仕上げ加工は行っていない。



図6 型取りした結果(左 恵比寿、右 大黒)

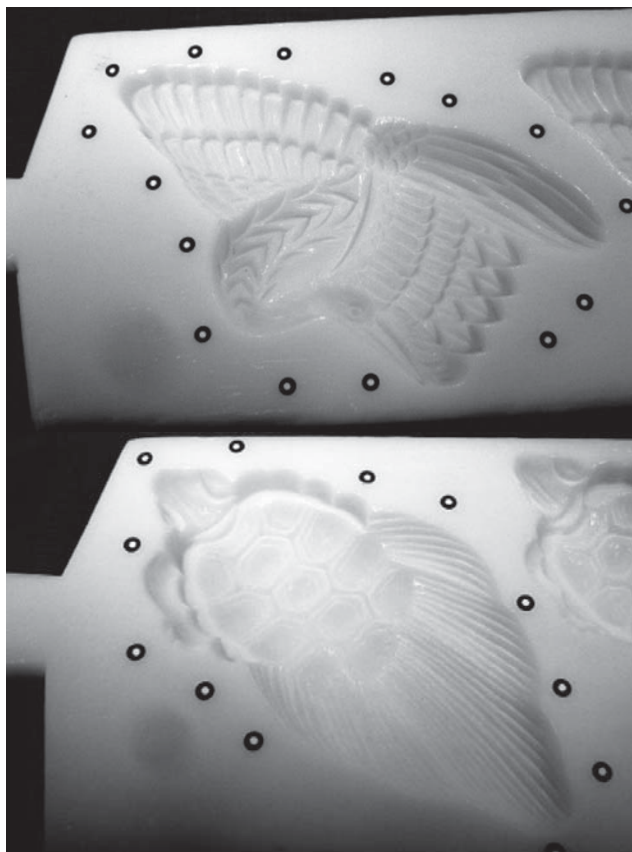


図7 樹脂型(上 鶴、下 亀)

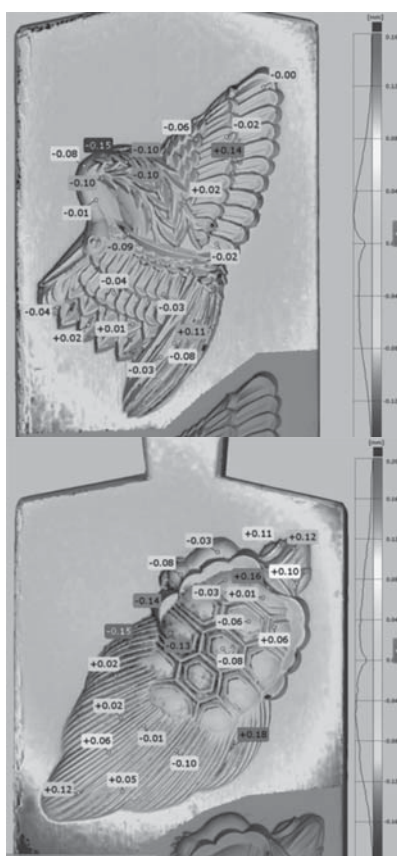


図8 偏差マップ(上 鶴、下 亀)
図中の数値は偏差(mm)

図7に示す樹脂型と造形データ(元の型の計測データ)を同じ位置に配置し、位置座標値の比較を行った偏差マップを図8に示す。

いずれの場合も、精細部が再現されていることが視覚的に確認できる。偏差マップ上も、0.1mm前後に収まっており、システムで型を用いた菓子製作時の再現性は十分にあることが確認できた。

本システムを、長崎の伝統菓子の口砂香の既存型に適応し、実施に口砂香を製作した試作例を図9に示す。

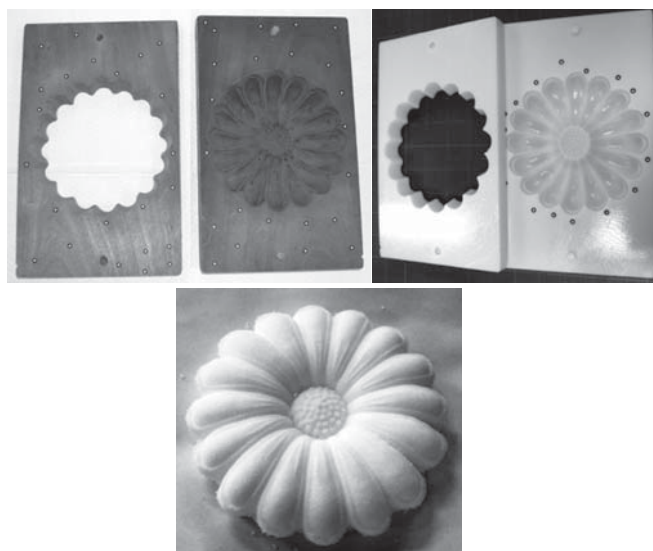


図9 口砂香試作例(上左 元木型、上右 樹脂型、
下 樹脂型で製作した口砂香)

4. 結 言

1) 県産バラ花びらを原料とした酵素抽出エキスの開発を目的として、収穫直後の花びらから調製した熱水抽出エキスの機能性を検討した結果、本エキスはポリフェノール及びアントシアニンを高度に含むことを確認できた。さらに、本エキスが糖及び脂肪の吸収抑制作用を示す可能性が示唆された。本研究では引き続き、市販酵素によるバラ花びらからのエキス抽出を検討し、機能性成分を高度に含むエキス素材の開発を推進する。

2) 三次元デジタイザ並びに三次元プリンタ技術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。

参考文献

- [1] 津志田藤二郎: ポリフェノールの分析法、食品機能分析法、318-322、光琳 (2000)

- [2] L.-K. Han, Y. Kimura, M. Kawashima, T. Takaku: *Int J. Obes.*, 25, 1459 (2001)
- [3] T. Matsui, T. Ueda, T. Oki, K. Sugita, N. Terahara, K. Matsumoto: *J. Agric. Food Chem.*, 49 (4), 1948–1951 (2001)
- [4] 玉屋圭、前田正道、宮田裕次: 茶葉とびわ葉を原料とした高機能性発酵茶の新機能解明と実用化に向けた研究、長崎県工業技術センター報告、40, 7-10 (2010)
- [5] 杉山洋、安江正明、神田智正、庄司俊彦、大竹康之: りんご由来ポリフェノールが脂質代謝に及ぼす影響、日本農芸化学会2006年度大会 (2006)
- [6] K. Tamaya, T. Matsui, A. Toshima, M. Noguchi, Ju Qiu, Y. Miyata, T. Tanaka, K. Tanaka: *J. Sci. Food Agric.*, 90 (5), 779–783 (2010)
- [7] 浅井肇、久保保夫、小川晴子、原往彦、中村耕三: 基礎と臨床, 21, 163-166 (1987)

非接触による光学的非破壊計測技術の開発

電子情報科 専門研究員 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課題がある。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、偏光素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。

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。

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をベースとした非破壊計測手法を提案し^[2]、本方式を用いた世界最軽量の非破壊糖度計の商品化に成功した。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。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^[2]。

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

ここで、 $R(\lambda_{k=1,2,3})$ はレーザー光の波長 $\lambda_{k=1,2,3}$ での反射率をそれぞれ表す。相対吸光度比 γ は果実糖度と

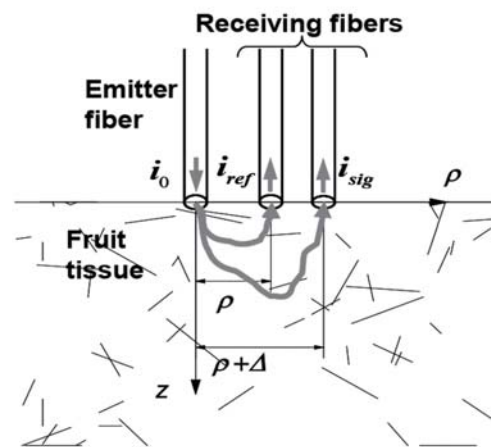


図1 TFDRS法の概略図。

の高い直線相関を有しており、これ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糖度の非破壊計測が可能となる^[3]。

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は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 多重散乱による偏光解消

図2に多重散乱による偏光解消度を測定した結果を示す。試料には数種類の光路長の石英セルに入れた粒径600 nm、重量濃度0.15 wt%のポリスチレン粒子懸濁液を用いた。偏光解消度は分光ポラリメータ(Poxi-spectra、東京インスツルメンツ社製)を用いて波長範囲400～700 nmで測定した。図中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、偏光解消度は1に近づき、入射光の偏光状態が完全に無偏光状態となる。以上の結果から、果実や生体等の測定では等価散乱係数に応じて十分な検出光路長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状態にすることができる。

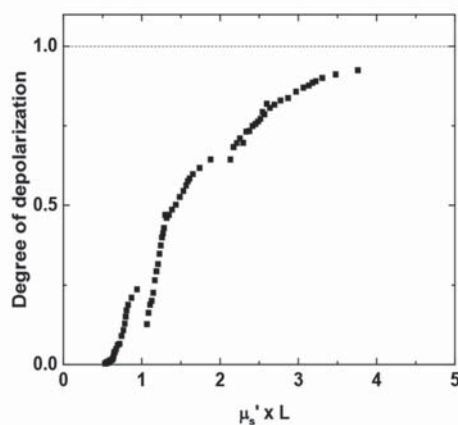


図2 多重散乱による偏光解消度の測定結果。

2.2 非接触による測定方式

図3は図1に示した手法により測定した(a)白米と(b)粳穀付の米(以下粳米)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、粳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。これは粳米では白米に比べて粒径が大きく、凹凸の大きな試料表面から直接反射する光の影響を受けたと考えられる。図4に偏光素子を用いて測定した粳米の反射スペクトルを示す。同一の粳米のサンプルを複数回攪拌して測定したが、図3(b)で見られた反射スペクトルの形状の著しい違いがなくなっている。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、偏光素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。

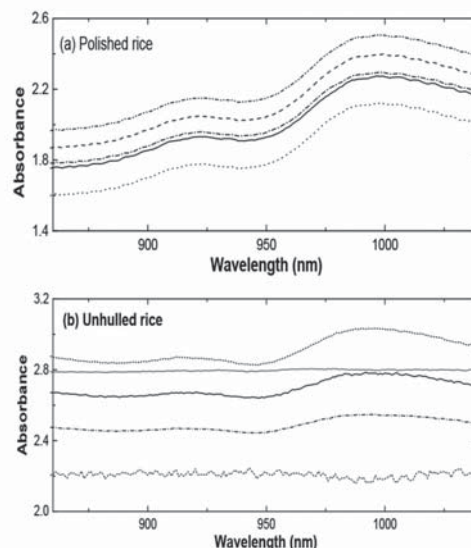


図3 (a)白米と(b)粳米の反射スペクトル。

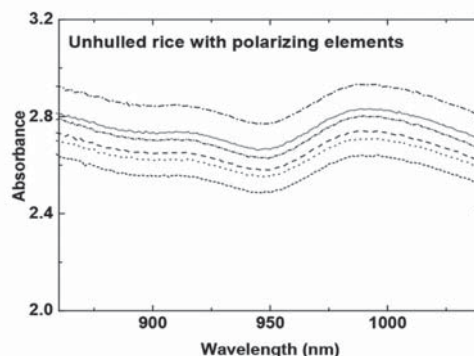


図4 偏光素子を用いて測定した粳米の反射スペクトル。

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、偏光素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。

参考文献

- [1] 尾崎幸洋、河田聡編：近赤外分光法(日本分光学会測定法シリーズ32、学会出版センター、東京、1996)。
- [2] 下村義昭：レーザー研究39(2011) 233。
- [3] 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。

ガイドレス無人搬送システムの開発

電子情報科 主任研究員 堀 江 貴 雄
電子情報科 科 長 指 方 顕

大量生産を行う大規模工場を中心に広く普及している現状の無人搬送システムはレールの敷設など大掛かりなインフラ整備を必要とする。一方、県内では多品種少量生産型の工場が多く、頻繁な生産ラインの変更が必要となるため、これまでの無人搬送システムの導入はコスト面で難しくなる。そこで、本開発では（１）工場内での搬送車両の位置と障害物を検出するレーザー位置センサシステム、（２）搬送時の自動積み下ろし機構、及び（３）全方向移動可能なメカナム走行車両を開発した。さらに、これらを統合して自律移動が可能なガイドレス無人搬送システムを試作し、このシステムの有効性を走行実験によって確認した。

1. 緒 言

AGVと呼ばれる無人搬送車は生産現場を中心として広く普及している。一般にレール軌道を敷設し、その上を走行させる方式、ガイド用のマグネットを床面に貼りつけ、センサで読み取り追従させる方式等が広く使われてきた。また適用される現場は主に大量生産を行なう大規模工場であり、専用走行レーンの特定の経路を往復する、または周回することが基本であった。一方、県内中小工場や倉庫などの現場は多品種少量生産が多く、頻繁に生産ラインレイアウトが変更される。またスペース上の制約から専用の走行レーンを設置することは困難である。

日本国内においては、2007年から自律ロボットによる屋外走行競技であるつくばチャレンジが毎年開催されている。この競技ではロボットにGPS、レーザーレンジファインダ、カメラ等の各種センサを搭載し、観客を含めた周辺環境に一切手を加えず自律移動させることを目標としており、実際の公園内道路を自律移動するなどの成果を挙げている^{[1][2]}。

そこで、本研究ではこれら近年注目されているロボット技術を導入した中小規模工場向けの自律移動システムを開発する。この自律移動システムは搬送車両の位置と障害物を検出するシステムにより、工場内の目標地点まで途中の障害物を回避しながら自律移動する。

平成21年度から平成23年度にかけ、著者らはレーザー式ポジショニングセンサとレーザーレンジファインダを利用した移動システムを開発し、さらに実用化を図るため、県内酒造メーカー出荷倉庫や、事務所内での移動実験、県内外メーカーでのデモンストレーション及びニーズ聞き取り調査を実施してきた^[3]。

事業化を推進するためさらなる低コスト化と付加機

能の充実を目指した本開発では、平成24年から平成25年にかけて、①レーザー位置センサシステム、②自動積み下ろし機構の2つの技術シーズを開発してきた^[4]^[5]。最終年度の平成26年度には、全方向移動が可能なメカナム走行車両を開発し、かつ①、②の技術を統合してガイドレス無人搬送システムを実現した。

2. レーザー位置センサシステム

初年度に試作した首ふり型レーザー位置センサシステムでは、首ふり機構により車両周囲の全方向のリフレクタ検出を可能としたが、首ふり動作時の測定精度の悪化や機構部によるコスト高が問題となる。

そこで、レーザー位置センサシステムの首ふり機構を廃止した固定型のレーザー位置センサシステムを開発した。センサシステムの外観と仕様を図1と表1に示す。また、本センサシステムではセンサ後方90度の死角による情報量低下に起因する認識率の低下を補正する次項のマップ生成アルゴリズムを開発した。



図1 固定型レーザー位置センサシステム

表1 固定型レーザー位置センサシステムの仕様

項目	仕様
寸法	60 mm (L) × 60 mm (W) × 90 mm (H)
センサ検出角度	270 度 (分解能：0.25 度)
センサ検出距離	30 m (精度：± 30 mm (0 m ~10 m) ± 50 mm (10 m ~30 m))
データ更新頻度	40 Hz
位置更新頻度	~ 35 Hz(Corei5 2.5 GHz 使用時)
センサ通信方式	TCP/IP
プログラム言語	C#

2.1 マップ生成アルゴリズム

使用したレーザーレンジファインダは角度の検出範囲が270度であるため、そのままでは後方の90度範囲のリフレクタを検出できず、360度のデータによる地図を生成できない。そこでSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術^{[6][7]}を用いたマップ生成アルゴリズムを開発した。マップ生成アルゴリズムは以下のとおりである。

①最初に、基準となる姿勢(任意座標、任意方角)において、リフレクタのスキャンを行いその配置パターンを基準マップとして登録をおこなう。

②レーザーレンジファインダを搭載した車両を移動・回転させてSLAMによるマップ拡張を実行する。基準マップのリフレクタパターンと今回検出したリフレクタパターンの照合をおこない、座標および方向を認識する。

③基準マップのリフレクタ以外に検出されたリフレクタがあった場合、新規リフレクタ候補として確度情報を+1として仮登録を行う。逆にマップに登録されているにもかかわらず、センサで検出できないリフレクタがあった場合、確度情報を-1とする。

④確度情報が閾値以上となった場合(例：確度情報10以上)、新たなリフレクタとしてマップに登録を行う。逆に確度情報が閾値以下になった場合、間違ったリフレクタ情報としてマップから除去する。

⑤ ①にもどる。

以上の処理①～⑤を繰り返すことにより、マップ生成と位置計測を同時に行うことが可能となり、360度かつ大規模マップの生成が可能となった。

2.2 壁形状計測によるマッチング

強い西日、窓ガラス、金属製の壁材、反射強度の高いポスターなどが原因で、局所的にリフレクタの認識ができない場所では、リフレクタによる認識にかわって、壁形状によるマッチングを行う。リフレクタを判別するには距離と反射強度の情報が必要となるが、壁形状取得では距離データのみでよいことから、比較的安定的な情報を取得することができる。

一方、リフレクタの位置認識が閾値以上の相関がとれた場合には、その時の座標、姿勢および壁形状データを一時保存しておき、壁形状ベースで相対移動座標を計算することで位置認識を継続する。長時間の認識が続いた場合、直線廊下などの単調な特徴を有する環境では誤差が蓄積されるが、短時間であれば十分な追跡が可能となる。

2.3 マップ切り替え機能

SLAMによるマップ生成では認識位置の大幅な失敗によって正確なマップ生成が継続できないことがある。その原因は、環境の特徴によって特定の座標ではリフレクタが極端に認識できないことなどが挙げられる。また、長距離のマップ生成では積算誤差によって徐々にマップがゆがむ等の不具合が発生する。

本システムでは、どのような場所においても確実なマップ生成を可能とするために、一定の距離のマップを生成するごとに、マップを分割することによって、これらの不具合を解消することとした。マップ生成後の位置認識時には、使用する初期マップ番号を明示しておき、著しくマップマッチングの相関が取れない場合には、その他のマップを総当たりでマッチングしてもっとも相関の高いマップを用いて位置認識を継続するアルゴリズムとした。

2.4 リフレクタ数による検出頻度変化

固定型レーザー式位置センサシステムの特性評価として、参照リフレクタ数と認識頻度の関係を調べた。実験室の壁に設置するリフレクタ数を4個、6個、9個と変化させたマップをそれぞれ作成し、各マップを用いて位置認識を実行させたとき、センサで認識できたリフレクタ数を参照リフレクタ数とし、また位置認識プログラムの更新頻度を認識頻度(Hz)とした。測定評価結果を図2に示す。

本システムでは、参照リフレクタ数をベースに計算アルゴリズムが実装されている。また設定個数以上のリフレクタを検出した場合、前回座標と姿勢を基準と

して、センサ検出範囲を予測し、そのうち近いものから設定個数内のリフレクタを選択し、一時的なローカルマップを生成後、認識計算を実行している。実験結果から、本アルゴリズムがマップに登録されたリフレクタ数に関係なく、位置認識時に検出したリフレクタ数が多くなるにつれて、認識速度が低下し、少なければ高速になることが確認された。この結果から今回のハードウェア構成では更新頻度が3Hz未満にならないよう位置検出に用いるローカルマップリフレクタの最大数を10個とした。

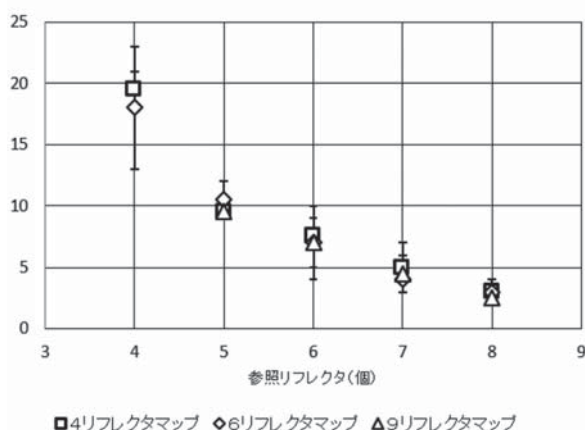


図2 参照リフレクタ数と認識頻度の関係

3. 搬送車両の車両走行実験

開発した固定型レーザー式位置センサーシステムを平成25年度までに開発した2軸差動式搬送車両に搭載して走行性能を確認した。実験室から廊下へ出た後、再び同じ実験室に入り、元の位置に戻る経路を設定する。走行経路は①実験室(Map0)、②実験室入口付近(Map1)、③廊下(Map2)の3つのマップを事前に作成し、マップ上に経路座標10点を設定した。

計測回数総走行距離平均認識頻度リフレクタデータのみで推定した車両位置の測定結果を図3に示す。瞬間的に数m以上移動したと推定して明らかに間違っただ箇所がある。この原因としては、瞬間的にガラスや金属からの反射、日の差し込みなどによって存在していないところにリフレクタが誤検出された、またはマップが異なっている、局所的には似ているパターンがあること、またはその両方が原因で、リフレクタ配置パターンが局所的に似ていることに起因したと推察される。

一方、2.2で述べた壁形状による認識と車輪回転速度から検出したオドメトリ座標を併用して車両位置を

補正した結果を図4に示す。最大で2m程度の測定誤差を含んだものがある。これは車両位置の推定アルゴリズムにおいて、リフレクタのみによる位置検出相関値が特に高い確度である場合、オドメトリによる予測位置よりも優先するためである。

本推定アルゴリズムは予測しない動きの時(例えば外部からの力や大規模なスリップなどで、制御に関係なく本体が一度に動いてしまった場合)に正しい認識を行うことを目的としているが、今後検討の余地があると考えられる。

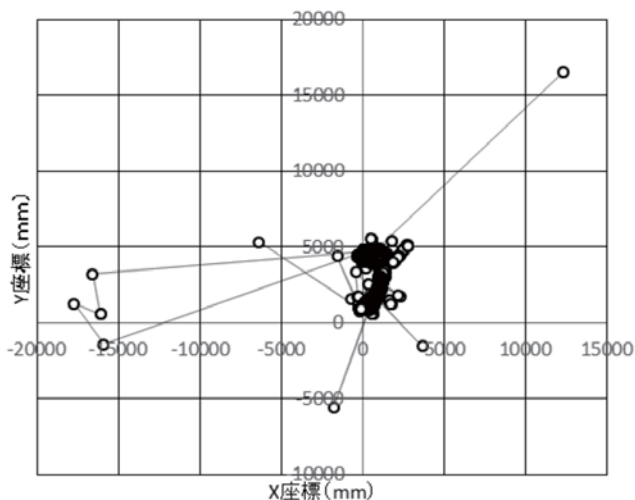


図3 リフレクタ単独による車両位置の測定結果

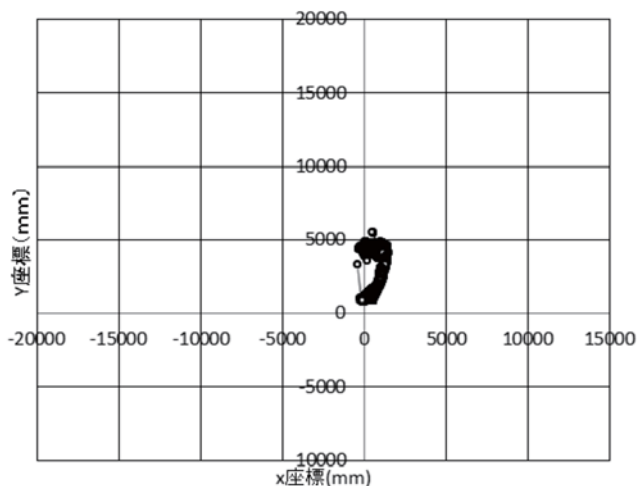


図4 補正処理後の車両位置の測定結果

4. 積み下ろし装置

平成24年度に試作した積み下ろし装置をベースに、動作性向上のための改良を実施した。改良した積み下ろし装置はソレノイドコントローラー(図5)、プッシュ

ロッド機構(図6)、荷卸し用ストッパー (図7)、棚用ストッパー (図8)から構成される。

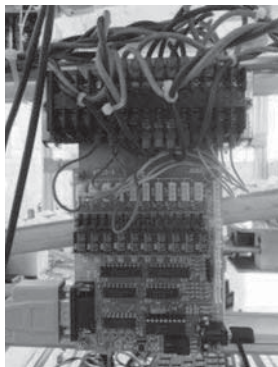


図5 ソレノイド
コントローラー

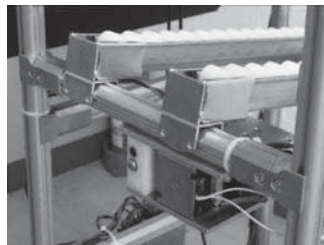


図6 プッシュロッド機構



図7 荷卸し用ストッパー



図8 棚用ストッパー

無人搬送車制御コンピュータから RS232C を介した SCH コマンドによりソレノイドコントローラーの制御をおこなう。動作実験により最大 10 個までのソレノイド機構を制御可能としている。また、搬送車に搭載されるプッシュロッド機構と荷卸し用ストッパーにはソレノイドが内蔵されており、0.1 秒周期で制御される。棚用ストッパーはソレノイドを内蔵しない受動機構であり、荷物棚に設置される。このストッパーは荷物棚の傾斜コンベアに載せられている荷箱が落ちるのを止める役割を持っている。さらに、プッシュロッド機構は最大 75 mm ロッドを突き出すことができる。このロッド先端で棚用ストッパーのボタンを押すことで、ストッパーを解除して荷箱をひとつ取り出し搬送車に乗せることができる。また、荷物を下ろす場合には、荷卸し用ストッパーを解除することで荷受け棚に荷箱を下ろすことが可能となっている。

5. 全方向移動車両

荷物の積み降ろしのため、搬送車両は荷物棚に 30 mm ~ 50 mm まで接近する。平成 25 年度までの開発で採用していた 2 軸差動式車両は、低コストである一方、原理上、車体を真横や斜め方向に平行移動させる

ことができないため、荷物棚へ近接させるには、遠方から緩やかに接近させるか、スイッチバック走行で寄せることが必要となる。そこで、狭所での取り回しを考慮して開発した図 9 の車両では、全方向移動を実現する駆動方法としてメカナムホイール（土佐電子社製、TDAM-0732）を用いた。類似の機構としてオムニホイールがあるが、オムニホイールでは常にホイールの小ローラーが回転し、路面の凹凸乗り越え能力が小ローラーの直径以下に制限される。一方、メカナムホイールは前後進時においては前述の制約がなく、凹凸乗り越えの高い能力を持つ。

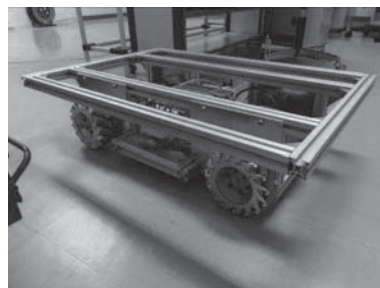


図9 メカナムホイール車両の外観

6. ガイドレス無人搬送車両

前述した全方向移動可能なメカナムホイール車両に自動積み下ろし装置と固定型レーザー位置センサシステムを搭載したガイドレス無人搬送車両の外観と仕様を図 10 と表 2 に示す。メカナム車両の右前、左後ろには検知距離 10 m、検出角度 270 度のレーザーレンジファインダ（北陽電機社製、UST-10LX）をそれぞれ 1 基搭載し、車両周囲 360 度の障害物を検知可能としている。また、車両中央に上下 2 段の傾斜コンベア棚を搭載し、それぞれの段に積み下ろし機構を取り付けて上段、下段独立での積み下ろしを可能としている。さらに、最上部には固定型レーザー位置センサシステム 1 台を搭載した。



図10 ガイドレス無人搬送車両の外観

表2 ガイドレス無人搬送車両の仕様

項目	仕様
寸法	800 mm(L) × 450 mm(W) × 1900 mm(H)
センサ検出範囲	270 度 (分解能 0.25 度)
センサ検出距離	30 m (精度 ± 30 mm (0 m~10 m), ± 50 mm (10 m~30 m))
障害物検知範囲	360 度 (分解能 0.25 度)
障害物検知距離	10 m (精度 ± 40 mm)
荷箱搭載数	2 個
移動方式	メカナムホイール全方向移動
電源	シールド鉛バッテリー 24V
制御 PC	産業用 PC (Corei5 2.5GHz)
プログラム言語	C#

7. ガイドレス無人搬送車両の走行試験

ガイドレス無人搬送車両の動作確認をするため、走行試験を実施した。まず、搬送車両はスタート位置から前進し、荷物棚横まで移動する（図 11(1)、11(2)）。車両右側へ平行移動を行い、荷物棚に 30 mm まで接近したのち、プッシュロッド機構を動作させて、荷物棚の上下に設置してある棚用ストッパーを解除し荷物を積み込む（図 11(3)）。積み込み後、車両左側への平行移動を行い移動経路に復帰後（図 11(4)）、荷受け棚から 500 mm の位置まで移動をおこなう（図 11(5)）。荷受け棚まで 30 mm の位置まで車両左側へ平行移動を行い、荷卸し用ストッパーを動作させ、上下段の荷物を下ろす（図 11(6)）。荷卸し後、車両右側へ平行移動し、荷受け棚から離脱後、スタート位置へ戻るために 180 度方向転換し（図 11(7)）、停車目標位置へ移動した（図 11(8)）。

以上の走行試験時の車両座標を固定式レーザー位置センサーシステムで測定した結果を図 12 に示す。車両は事前に設定した 8 箇所の経路ポイントを正確に通過しており、本研究で開発したシステムは荷物搬送を積み込みから荷卸しまで全自動で行う性能を有することを確認できた。

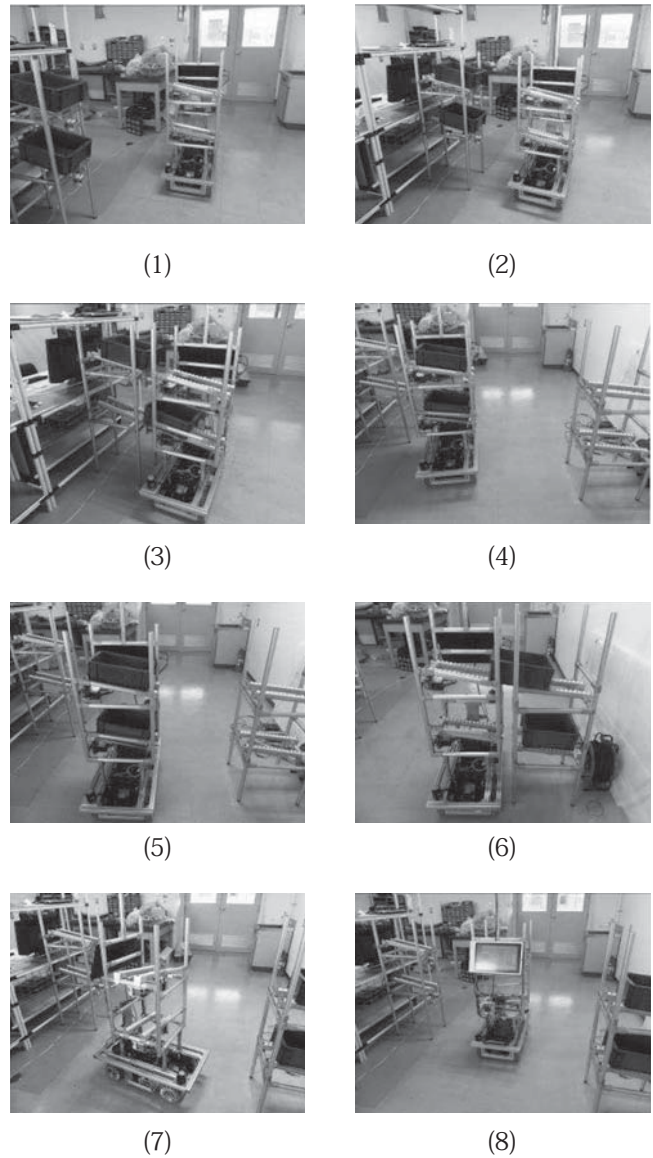


図 11 ガイドレス無人搬送車両の走行試験の様子

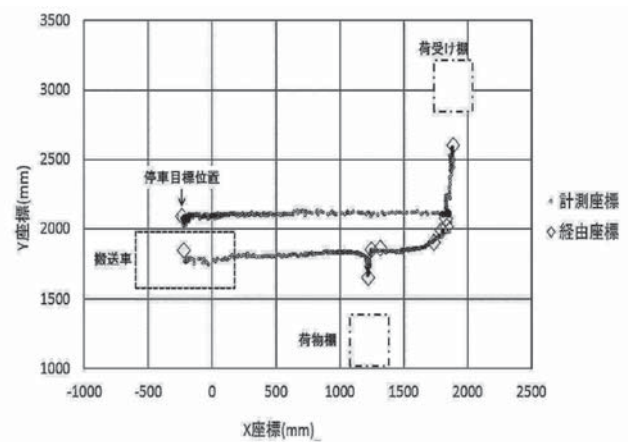


図 12 ガイドレス無人搬送車両の走行経路

8. 結 言

本研究では（１）工場内での搬送車両の位置と障害物を検出するレーザー位置センサシステム、（２）搬送時の自動積み下ろし機構、及び（３）全方向移動可能なメカナム走行車両を開発した。また、これらを統合して積み込みから荷卸しまでを全自動で行うガイドレス無人搬送システムを実現した。

ここで開発した要素技術の応用分野として、工場の生産システムと協調した高機能搬送システム、医療分野でのリネン搬送ロボットやホテルでの荷物搬送ロボットなどのサービスロボットシステム、さらには屋外搬送や除草作業をする農業ロボットなどが考えられる。

参考文献

- [1]「つくばチャレンジ」オーガナイズセッションレポート～実環境のチャレンジから見えてきたもの
<http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2008/01/17/859.html>.
- [2] 坪内孝司, Yoichi MORALES, Alexander CARBALLO, 原祥堯, 油谷篤志, 城吉宏泰, 廣澤敦, 鈴木祐輔, Mehrez KRISTOU, 山口智也, 澤田有希子, 森川直樹, “つくばチャレンジ 2008 における筑波大学知能ロボット研究室「屋外組」の取組み“, 第 9 回 SICE システムインテグレーション部門講演会, 1I4-6, 2008.
- [3] 堀江貴雄, 指方顕, 酒井寿美雄, “光学式位置センサを用いた小型無人搬送車の開発”, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 4G3-3, 2012.
- [4] 堀江貴雄, 指方顕, 酒井寿美雄, “ガイドレス無人搬送システムの開発”, 平成 24 年度長崎県工業技術センター研究報告書 No42, pp.16-18, 2013.
- [5] 堀江貴雄, 指方顕, 酒井寿美雄, “ガイドレス無人搬送システムの開発”, 平成 25 年度長崎県工業技術センター研究報告書 No43, pp. 22-25, 2014.
- [6] 横山和成, 石井雅樹, “測域センサを用いた移動ロボットの環境地図構築及び歪み補正に関する検討”, 計測自動制御学会東北支部第 274 回研究集会, 資料番号 274-8, <http://www.topic.ad.jp/sice/papers/274/274-8.pdf>, 2012.
- [7] 原祥堯, 川田浩彦, 大矢晃久, 油田信一 “測域センサの受光強度付きスキャンデータを用いた移動ロボットののための環境マップ構築”, ロボティクスシンポジウム予稿集 No12, pp. 480-485, 2007.

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。本報では微生物汚染物質を高感度に判定できる微小球センサーに大腸菌群の有する特異な分解酵素(β -Galactosidase)を滴下し、微小球からの散乱光スペクトル変化をMie散乱理論と実験の両面で検証した。また、抗原抗体反応の反応速度論により、単一微小球を使用した散乱光検出システムによる分解酵素の判定時間と検出下限濃度を決定した。

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システムの開発を行う。

本報では、微生物汚染状況を高感度に判定できる微小球センサーとして、直径10 μ mのポリスチレン微小球(以下、PS微小球)を使用した。微小球からの散乱光スペクトル変化をMie散乱理論で解析した散乱断面積と比較することで、PS微小球表面の抗原抗体反応状態を評価した。また、抗原抗体反応の反応速度論により単一微小球の散乱光検出システムによる判定時間と下方検出限界の実用性を検証した。

2. 実験方法

2.1 単一微小球の検出システム

平成25年度では、大腸菌群の産生する分解酵素(β -Galactosidase)に対する抗体(Anti- β -Galactosidase)を固定化した微小球プローブの作製、および、浸対物レンズを使用した全反射減衰配置における単一微小球の励起と散乱光検出システムの構築を行なった^[2]。そこで平成26年度は、検出部へ分解酵素(β -Galactosidase)を滴下し、抗原抗体反応による微小球の表面状態と散乱光スペクトルの関係について検証した。

図1で示すように、油浸対物レンズ(100 $\times$)により、全反射減衰配置で照射された単一PS微小球は、TE偏光とTM偏光に対応するWGモードが励起される。PS微小球は、純水または分解酵素(β -Galactosidase)溶液中に配置されるため、検出部を松浪硝子工業(株)のカバーガラス(サイズ24 $\times$ 24mm、厚み0.12-0.17mm)で封

止し、純水または分解酵素(β -Galactosidase)溶液の蒸発防止と表面張力による厚みムラを均一にした。このため、XY方向に観測部を移動してもCCD観測画像に焦点ズレが発生せず、経時的に安定したスペクトル測定も可能となる。また、微小球の表面状態の情報を含んだ散乱光は、検出用の対物レンズ(50 $\times$)で受光し光ファイバーで導光した後、分光器で検出した。

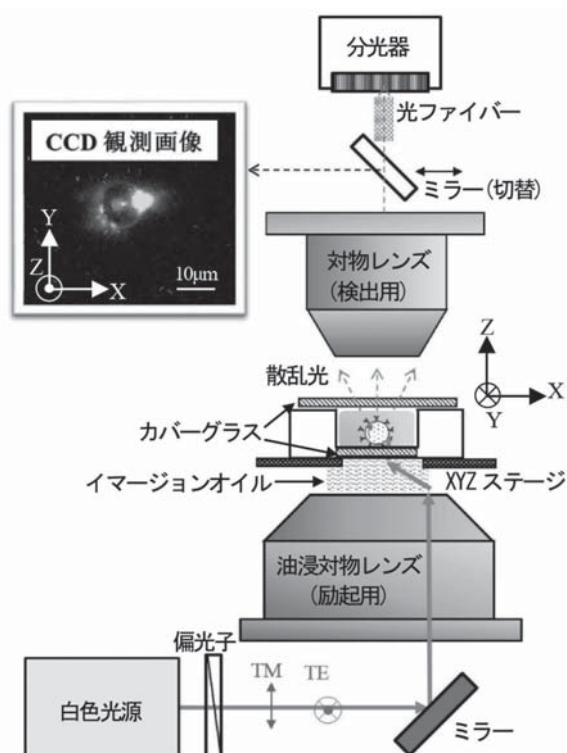
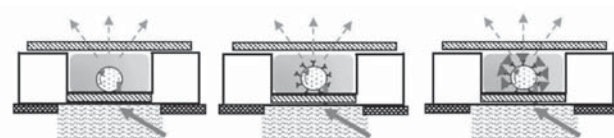


図1 単一PS微小球の評価システム

2.2 PS微小球表面の吸着評価方法

本システムでPS微小球にWGモードが励起されると、散乱光スペクトルの特定波長に鋭い共振波長ピークが確認される。この共振波長ピークはPS微小球の屈折率やサイズに依存している。本測定では、白色光源(ENERGETIQ社製、LDLS白色光源EQ-99、 $\lambda=170\sim 2100\text{nm}$)の580 $\sim 610\text{nm}$ の波長帯域に着目し、TE偏光とTM偏光に対応した周期的な共振波長ピークを検出した。これらの共振波長ピークをMie散乱理論で得られる散乱断面積の波長ピークと比較することにより、微小球表面の吸着状態を評価した。図2に示すように、微小球の表面状態は、(a)微小球のみ、(b)微小球表面に抗体が固定化、(c)微小球表面に抗体と抗原が固定化の3種類を比較した。なお、検出部に滴下した純水または分解酵素(β -Galactosidase)溶液の量は100 μL であり、(c)の酵素溶液(β -Galactosidase)の濃度は

10 $\mu\text{g/mL}$ とした。



(a) 微小球のみ (b) 抗体固定化 (c) 抗原抗体固定化

図2 微小球の表面状態の比較

2.3 抗原抗体反応時間とPS微小球表面の吸着状態

PS微小球表面において、抗原抗体反応による複合体の状態を検証するため、酵素濃度(β -Galactosidase)に対し、時間による共振波長ピークの変化量を比較した。抗原抗体反応の反応速度論では、抗原と抗体の複合体濃度は時間経過に伴い指数関数的に増加するため^[3]、本システムでは、共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ が経時変化 Δt に伴い指数関数的に増加することが予測される。ここで、実験で得られた共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ と経過時間 Δt の関係について反応速度論で得られた下記の非線形曲線関数でフィッティングし、抗原抗体反応の判定時間や検出下限濃度を評価した。

$$y = y_0 + \alpha e^{-(t-t_0)/\tau} \dots (1)$$

ここで、 y と y_0 は共振波長ピークのシフト量とシフト最大量、 α は振幅、 t と t_0 は経過時間と補正時間、 τ は減衰定数を示す。

なお、本システムでは、図3に示すように、検出部にカバーガラスの封止作業が発生するため、酵素溶液(β -Galactosidase)を滴下し、共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ を取得するまでに約2分が経過している。

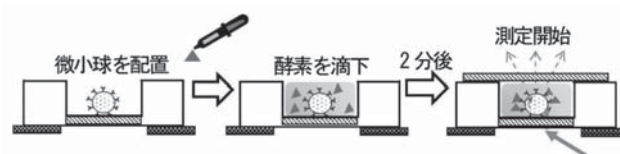


図3 検出部のカバーガラス封止

3 結果と考察

3.1 単一PS微小球からの散乱光スペクトル

図4は、実験で取得したTE偏光とTM偏光のそれぞれの散乱光スペクトルを示す^[4]。散乱光の隣り合う共振波長ピークの間隔は7 $\sim 8\text{nm}$ であり、(1)から(3)へとPS微小球表面に抗体や抗原が固定化するにつれて、共振波長ピークが約1 $\sim 4\text{nm}$ 長波長側へシフトする。

PS微小球表面へ抗体や抗原が固定化することで、微小球の直径や屈折率が変化し、共振波長ピークがシフトしたと考えられる。なお、ここでの縦軸の散乱光強度は、散乱光強度の最大値によって規格化した。

図5は、Mie理論による散乱断面積を示している^[4]。微小球のみ(4)の散乱断面積スペクトルの計算において、PS微小球の直径は $10.04\ \mu\text{m}$ 、微小球と周囲媒体(純水)の屈折率はそれぞれ1.59と1.33とした。PS微小球表面に抗体や抗原が固定化した場合には、抗体層(5)と抗原抗体層(6)のPS微小球モデルを考える。図4(2)、(3)の共振波長ピークを図5(5)、(6)に示した散乱断面積のピーク波長と比較した結果、抗体と抗原の厚みはそれぞれ14nmと16nmと算出できた。また、分解酵素(β -Galactosidase)が高濃度になるにつれて、抗原抗体反応によりPS微小球表面の密度が増加するために、抗原抗体層の屈折率は1.50～1.56と算出できた。これらの数値はタンパク質のサイズと屈折率にはほぼ一致する^{[5]–[9]}。さらに、微小球表面において、抗原抗体層の厚みは30nmであることから抗原と抗体は1:1で反応していることが推測できる。

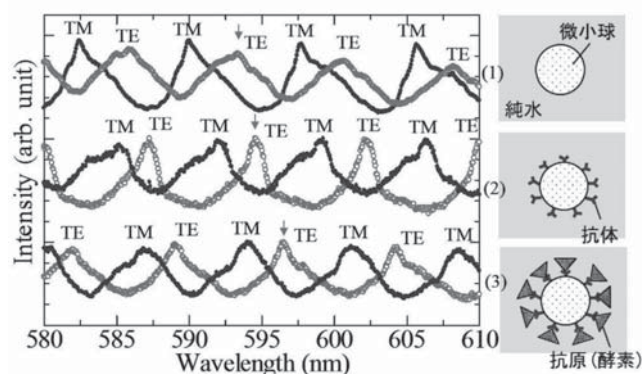


図4 PS微小球の表面状態と散乱光スペクトル

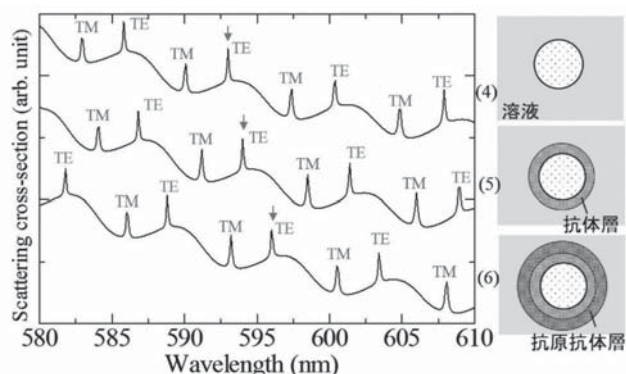


図5 Mie理論により算出したPS微小球の散乱断面積

3.2 抗原抗体反応による共振波長ピークシフト

図6は、抗原抗体反応が開始した後のTE偏光の共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ を示す^[10]。共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ は、図4の(2)のTE偏光に対する共振波長ピーク(587nm)からの変化量である。共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ は、経時変化に伴い指数関数的に増加する。また、滴下する分解酵素(β -Galactosidase)の濃度が高濃度になるにつれて、共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ は短時間に大きく増加する傾向を確認できる。

しかし、分解酵素(β -Galactosidase)の濃度が $10\ \mu\text{g/mL}$ になると、増加する傾きに変化がなくなり、シフト量 $\Delta\lambda$ も飽和しているのを確認できる。これらの変化を(1)式で表される非線形曲線関数でフィッティングして解析した。分解酵素(β -Galactosidase)の濃度が $5\ \mu\text{g/mL}$ 以上では、フィッティング解析の信頼度を示す決定係数(R^2)が $0.82 \sim 0.90$ と高くなるため、微小球表面は時間とともに抗原抗体反応による複合層が形成されていることが予想される。一方、分解酵素(β -Galactosidase)の濃度が $1 \sim 3\ \mu\text{g/mL}$ の低濃度では、決定係数(R^2)が 0.78 以下と低くなり、抗原抗体反応が指数関数的に増加していないことがわかる。さらに、本評価システムで使用した分光器の波長分解能は1nmであるが、共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ が1nm以上となるのは、分解酵素(β -Galactosidase)の濃度が $5\ \mu\text{g/mL}$ 以上の場合である。また、共振波長ピークのシフト量 $\Delta\lambda$ は8分で飽和状態に達するため、微小球表面の抗原抗体反応を安定して検出するには、最低でも8分を要することがわかる。

これらの結果より、本評価システムでは、分解酵素(β -Galactosidase)の検出下限濃度は $5\ \mu\text{g/mL}$ 、検出時間は8分であることがわかる。

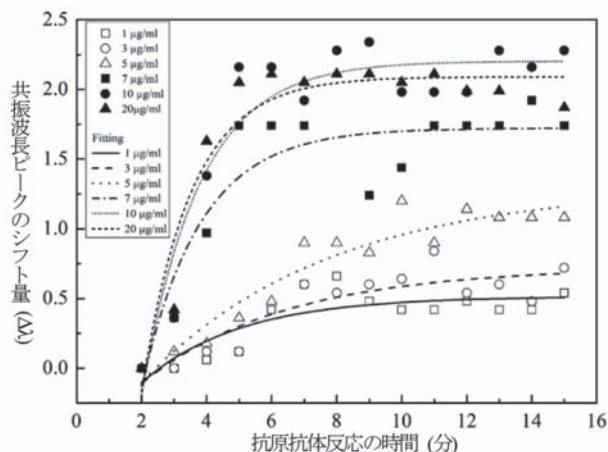


図6 時間変化による共振波長ピークのシフト量

4. 結 言

単一PS微小球の散乱光検出システムにより、大腸菌群の産生する分解酵素(β -Galactosidase)を検出した。Mie理論を利用した散乱断面積の光学モデルにより、微小球表面に固定化した抗体と抗原のサイズはそれぞれ14nmと16nm、そして、抗原と抗体の複合層の屈折率は1.50～1.56と算出できた。また、共振波長ピークのシフト量の安定性と分光器の波長分解能より、本検出システムの判定時間は8分、検出下限濃度は5 μ g/mLであることがわかった。本検出システムは10分以内での判定が可能のため、スクリーニングによって分裂前の汚染菌を迅速に判定検査できる可能性がある。平成27年度は、試作装置を作製し性能評価を進める予定である。

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, No43, pp.26-28 (2014)
- [3] 片倉啓雄, “バイオプロセスシステム: 効率よく利用するための基礎と応用”, 清水浩 編集, シーエムシー出版, 79 (2009)
- [4] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto, and M. Haraguchi, IEEE Sensors 2014 Conference Proceedings, pp. 641-644 (2014)
- [5] X. Fan, I. M. White, S. I. Shopova, H. Zhu, J. D. Suter, and Y. Sun, Anal. Chim. Acta, 620, 8 (2008)
- [6] J. Voros, Biophys. J., 87, 553 (2004)
- [7] L. F. Pease III, J. T. Elliott, D. Tsai, M. R. Zachariah, and M. J. Tarlov, Biotechnol. Bioeng., 101, 1214 (2008)
- [8] Y. H. Tan, M. Liu, B. Nolting, J. G. Go, J. G. Hague, and G. Y. Liu, ACS Nano, 2, 2374 (2008)
- [9] 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)
- [10] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto, and M. Haraguchi, Anal. Sci., 30, 799-804 (2014)

高感度な植物蒸散量計の開発

グリーンニューディール技術開発支援室 室 長 兵 頭 竜 二

植物緑葉の裏面に多くある気孔は、明るいところでは植物の渇き具合の影響を受けて開閉する。一方、高品質な果実の生産では、植物の乾き具合（水分ストレス）などを把握して水管理を徹底することが要求される。このため、柑橘栽培などの農業現場では灌水管理の判断材料として、気孔の開閉状況の把握などが望まれる。

そこで本研究では、光計測技術を活用した新規の蒸散量測定デバイスとして、柑橘緑葉からの蒸散速度を計測可能なデバイスを試作開発し、柑橘緑葉の気孔からの水分蒸散量を実用精度で計測する安価な装置を開発することを目的とした。

研究事業の第3年度目となる平成26年度、本事業では、緑葉の気孔からの水分蒸散量を実用精度で計測する安価な装置を実現するのに必要な、光計測技術を活用した新規の蒸散量測定デバイスを開発した。そして、この測定デバイスを用いた蒸散量計を試作し、それらの評価実験を行った。試作した蒸散量計は、測定結果を6段階に分け、表示器にストレス0からストレス5までの範囲で結果を簡易表示する機能を有しているものである。

1. 緒 言

果実育成期間中の水分ストレスの適切な管理は、収穫果実の糖度の上昇に有効に働く^[1]。このため、高品質果実の生産では水分ストレスを指標とした灌水管理が必要とされる^[1]。

また一方で、植物緑葉の裏面に存在する気孔は、明るいところでは植物の渇き具合の影響を受けて開閉する。このため柑橘栽培などの農業現場では、灌水管理の判断材料とすることが可能な、緑葉気孔からの蒸散量を簡便かつ高感度に測定する測定器が望まれている。

そこで本研究では、光計測技術を活用した新規の測定デバイスとして、柑橘緑葉からの蒸散速度を計測可能なデバイスを試作開発すること。そして、柑橘緑葉の気孔からの水分蒸散量を実用精度で計測する安価な装置を開発すること、を目標とした。

研究事業の第3年度目となる平成26年度は、植物緑葉の裏面から蒸散する水分をペルチェ素子で冷却したガラス板上に連続して強制的に結露させ、その結露量の時間変化を読みとることで、気孔からの蒸散量、あるいは蒸散速度を測定する、新規の計測デバイスを試作開発した。そして、この計測デバイスを用いた蒸散量計を試作し、評価実験を行った。

2. 蒸散量の計測技法と試作した簡易型蒸散量計

2.1 蒸散量測定デバイス

本研究で試作した蒸散量測定デバイスの基本構成を図1に、動作原理を図2示す^{[2], [3], [4]}。

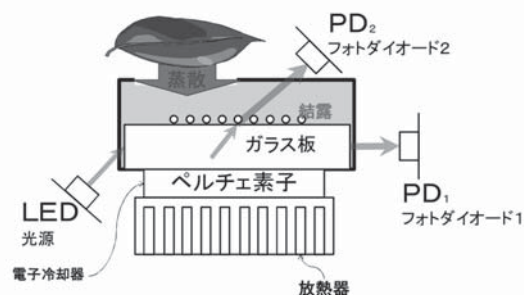


図1 蒸散量測定デバイスの基本構成

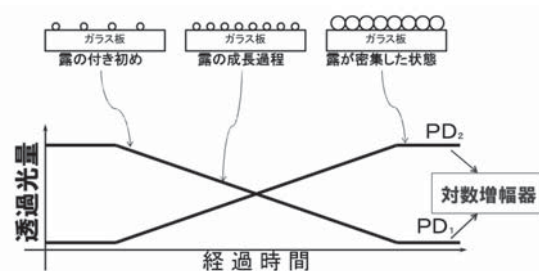


図2 蒸散量測定デバイスの動作原理

このデバイスは、植物緑葉の裏面から蒸散する水分をペルチェ素子で冷却したガラス板上に連続して強制的に結露させる。そして、ガラス板の片方の端面から光を入射し、ガラス板を長手方向に全反射を繰り返しながら透過する光量と、ガラス板表面の結露によって全反射の条件が崩れて表面に飛び出す光量を捉える。図2に例示するように、結露量が時間とともに増加する場合、PD₂が捉える表面に飛び出す光量は時間とともに増加し、PD₁が捉える長手方向に透過する光は時間とともに減少する。捉えられた2つの光量に相

当する電気的な値は、対数増幅器でその比率に変換されて、結露量に対応する値として出力される。

2.2 試作した簡易型蒸散量計

図3に試作した簡易型蒸散量計の外観を示す。この試作機には独立した2つの測定デバイスが実装されている（図4を参照）。片方の測定デバイスは、対照データとして雰囲気気をそのまま測定する。もう片方の測定デバイスは、緑葉などの測定対象物を保持し、サンプルから蒸散する水分を取り込みながら測定する。そして両者の測定結果の差異を比較演算することで、測定対象物である緑葉からの蒸散量あるいは蒸散速度を評価するものである。

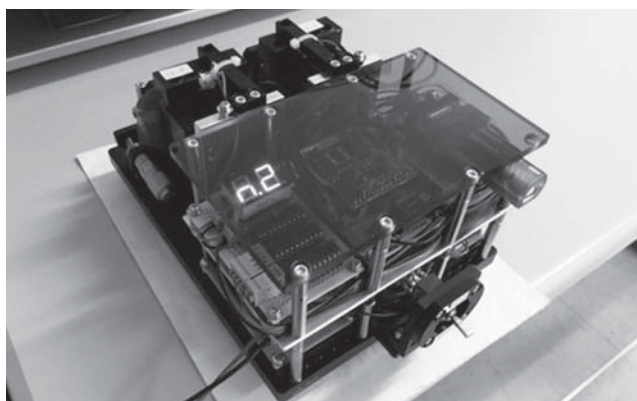


図3 試作した簡易型蒸散量計

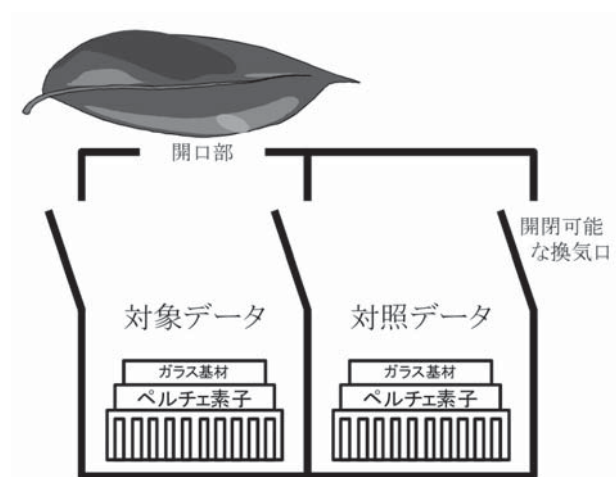


図4 試作した簡易型蒸散量計の構成概要

3. 評価実験の方法

本研究で開発する簡易型蒸散量計の測定対象はウンシュウミカンなど、柑橘類の緑葉である。しかし、研究室での実験の容易性などを考慮して、評価実験に

は身近にある観葉植物であるポトスの葉を用いた。

評価実験ではまず、市販のリーフ・ポロメータ（SC-1、Decagon Devices, Inc 製）を用いて、測定対象である緑葉の気孔コンダクタンスを測定した。その後、図3に示した試作機で、結露量に対応する測定結果として、前述の対数増幅器からの出力値の時間変化を記録した。そして、その最大値や微分値などを気孔コンダクタンスと組み合わせて評価した。

4. 結果と考察

4.1 蒸散量測定デバイス

図5は、測定デバイス内の2つの光検出器が受光量の計測を開始してから、12.5秒後から25.0秒後までの12.5秒間だけ、ペルチェ素子に通電してガラス板を冷却した時の対数増幅器からの出力の時間変化を示している。サンプルとして用いた緑葉は予めリーフ・ポロメータで気孔コンダクタンスを測定した緑葉である。なお、図中で気孔コンダクタンスが0.0 [$\text{m mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$] と示されたプロットは、サンプル葉を把持せずに雰囲気のみを計測した時のものである。

この結果から、雰囲気のみを計測した場合でも、空気中の水分が結露して対数増幅器の出力値が上昇することが分かる。そして、気孔コンダクタンスが大きな値を呈するサンプル葉を計測すれば、その出力値が早くに上昇を始め、最大値も大きくなることが確認できる。また、気孔コンダクタンスが大きなサンプル葉の場合、ペルチェ素子への電流を止めた後も、対数増幅器の出力値が大きい期間が続くことや、出力値が元の状態に戻るまで、言い換えればガラス板上の結露が消失するまで、長い時間を要することも見て取れる。

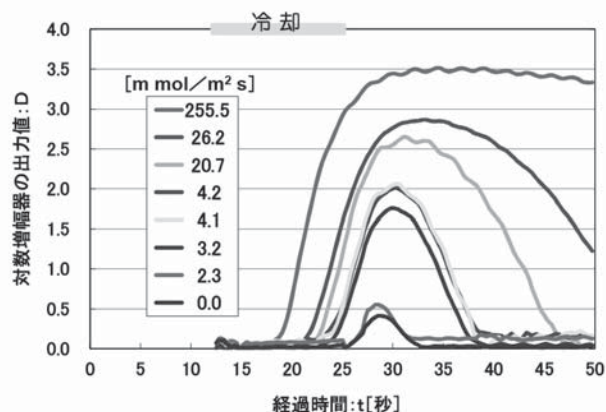


図5 蒸散量測定デバイスの出力例

4.2 試作した簡易型蒸散量計

本研究で開発する簡易型蒸散量計の測定対象はウンシュウミカンなどの柑橘類の緑葉である。通常の栽培においてその気孔コンダクタンスは $0 \sim 10 [\mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$ 程度であり^[4]、 $0 \sim 5.6 [\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$ 程度に相当する。そこで、この領域について、試作開発した簡易型蒸散量計での計測結果とリーフ・ポロメータによる気孔コンダクタンスの測定値とを比較検証した結果例が図6である。

図6は、図5に示した対数増幅器の出力値が上昇を始める時間、最大値の50%となるときの微分係数、および最大の値を用いて、回帰分析によってリーフ・ポロメータで測定した気孔コンダクタンスとの関係を求めたものである。この結果、決定係数： r^2 が0.94の良好な相関関係を示すことが確認できた。

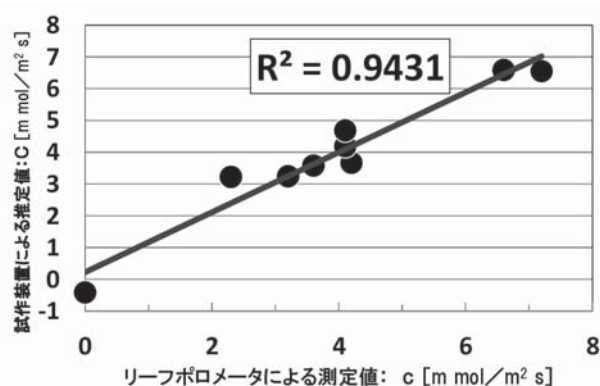


図6 簡易型蒸散量計による気孔コンダクタンスの推定例

試作した簡易型蒸散量計は、現場ニーズを考慮して、極力、構成を簡単なものとしている。また、測定結果についても、気孔コンダクタンスなどの難解な物理的数値で表示するよりも、ストレス強、中、弱、などの段階的な指標を表示することが望ましい、との現場の声もある。

このため、外部とのインタフェースとしては、測定の起動スイッチ、ならびに2桁分の7セグメント表示器のみを搭載している。

測定操作については、サンプルとなる緑葉を測定チャンバに把持した後、測定起動スイッチを操作することで、測定が開始される。現時点では、測定と数値解析に1分程を要するが、数値解析の終了後、ストレス0からストレス5までの6段階で表示器に簡易表示される。

5. 結 言

本研究事業では、ガラス板と簡単な電子回路などで構成して試作開発した簡易型蒸散量計を用いて、柑橘類の通常の栽培において観測される気孔コンダクタンスの値を十分な精度で推定できる見通しを得た。

今後は、県内企業への技術移転を行う中で、実際の果実栽培現場での検証実験や、推定精度の確認なども進め、果実栽培に利活用可能な簡易型測定器の実現を目指す予定である。

参考文献

- [1] 野並, 2001. 植物水分生理学, pp.236 - 257.
- [2] 兵頭, 2013. 植物水分蒸散量の計測方法および装置, 公開特許広報, 特開 2013-050444, 特許庁.
- [3] 兵頭, 2014. 高感度な植物蒸散量計の開発, 平成 25 年度 長崎県工業技術センター研究報告, No.43, 長崎県工業技術センター, pp.29 - 31.
- [4] 兵頭, 2014. 樹木水分ストレス推定の補完に用いる簡易型蒸散量計の開発, システム農学会 2014 年度秋季大会 シンポジウム・一般研究発表会 講演要旨集, システム農学会, pp.33 - 34.
- [5] 星・ほか, 2007. ウンシュウミカン樹における水分状態の簡易把握のための“水分ストレス表示シート”の開発, 園学研, 6 (4), pp.541 - 546.

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)

所 長 馬 場 恒 明
機械システム科 主任研究員 小 楠 進 一
応用技術部 部 長 藤 本 和 貴

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26年度は、以下の3項目について取り組みを行った。

- ①表面技術に関する開発および支援
- ②機構部材の最適設計のための評価手法の確立
- ③センサネットワークと組み込みシステム技術を用いた応用開発

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。

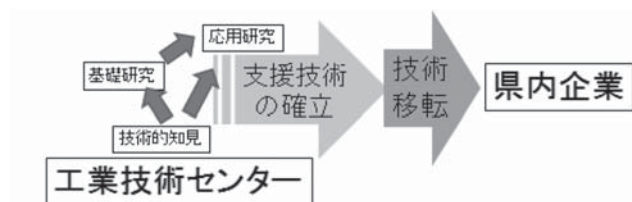


図1 技術移転活動

平成26年度は、以下の3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。

- ①表面技術に関する開発および支援
- ②機構部材の最適設計のための評価手法の確立
- ③センサネットワークと組み込みシステム技術を用いた応用開発

当所が保有する上記の3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的領域である。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・セミナーを開催した。

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、広く企業に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た。

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、当所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

当所が開発・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機能性薄膜技術研究会、生産技術研究会、自動制御技術研究会、および先端的材料技術開発研究会がある。

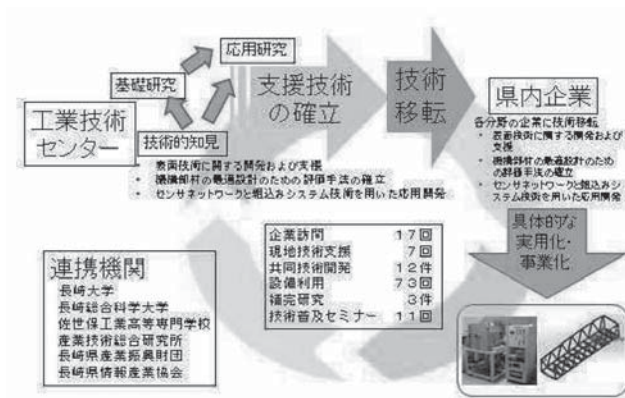


図2 研究開発成果の県内企業への技術移転

3. 結果

実際の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。

- ・ 企業訪問 17回
- ・ 現地技術支援 7回
- ・ 共同技術開発 12件
- ・ 設備利用 73回
- ・ 補完研究 3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いくつか紹介する。

①表面技術に関する開発および支援

・ 企業におけるDLC膜製造装置導入と新規事業への参入(重松工業株式会社)

硬質炭素系膜であるDLC（ダイヤモンドライクカーボン）のコーティング技術を重松工業株式会社に技術移転することにより、企業におけるDLC膜製造装置導入と新規事業への参入の支援を行った。図3に導入した機能性DLC膜コーティング装置を示す。

なお、本開発は、平成25年度補正 中小企業・小規模事業者ものづくり・商業・サービス革新事業による県内企業の取り組みを支援したものである。

・ 切断刃物へのDLC膜適用と製品化
(ファインコーティング株式会社)

DLC膜を肉加工用の切断刃物へ適用することによ

て、刃物の汚れ防止効果を高め、製品化の支援を行った。図4にDLC膜を適用した切断刃物を示す。

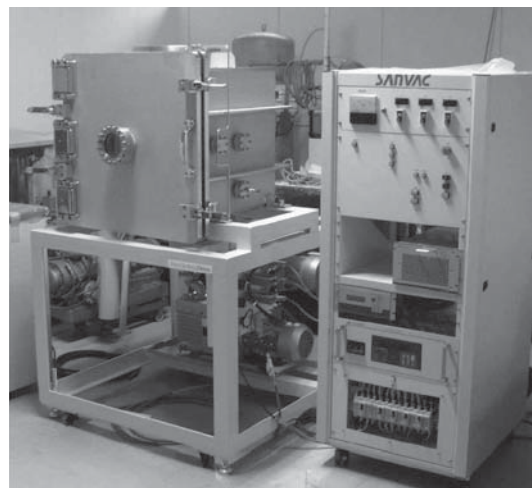


図3 企業に設置された機能性DLC膜コーティング装置

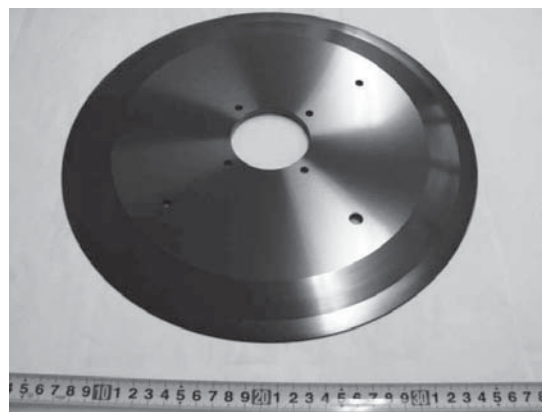


図4 切断刃物へのDLC膜適用

②機構部材の最適設計のための評価手法の確立

・ エンジン式船外機のモータアシストシステムの開発
(有安オート)

エンジン式船外機のモータアシストシステムにおいて、モータアダプタの設計支援・部品の構造解析を行った。

図5にエンジン式船外機のモータアシストの例、図6に構造解析例を示す。

なお、本研究は、平成26年度 海洋技術開発研究委託事業による県内企業の取り組みを支援したものである。



図5 エンジン式船外機の
モータアシストシステム

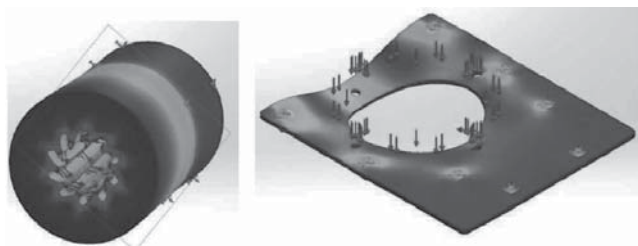


図6 構造解析例

・海上移乗用制動装置の開発(宮本電機株式会社)

海上移乗装置の制動装置において、移乗用の橋の設計支援・構造解析を行った。図7に海上移乗用橋の構造解析の例を示す。なお、本研究の一部は、平成26年度 長崎県産学官連携FSによる県内企業等の取り組みを支援したものである。

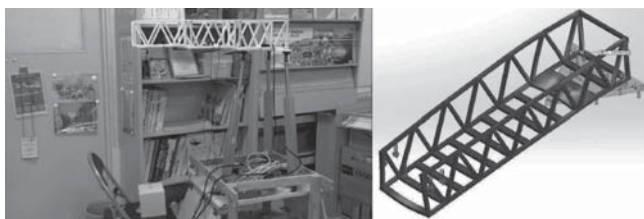


図7 海上移乗用橋の構造解析例

・EV用複雑形状部品の加工技術の開発
(信栄工業有限会社)

EV（電気自動車）用の複雑形状部品であるピニオンラックの加工技術の開発において、加工のためのポストプロセッサの開発、切削加工のためのモデルの修正、ラックのNCプログラムの生成を行った。図8にEVの外観およびピニオンラックの例を示す。

なお、本研究は、平成26年度EV等事業化促進事業費補助金事業による県内企業の取り組みを支援したものである。



図8 EVおよびEV用複雑形状部品

③センサネットワークと組み込みシステム技術を用いた
応用開発

・データ管理サーバ用組み込みシステムの開発支援
(SFKメディカル株式会社)

健康管理用のデータ管理サーバに使用する組み込みシステムの開発支援において、ユーザインターフェイス技術の調査および試作プログラムの作成、電源管理技術の支援などを行った。図9にシステムの概要を示す。

なお、本開発は、平成25年度補正 中小企業・小規模事業者ものづくり・商業・サービス革新事業による県内企業の取り組みを支援したものである。

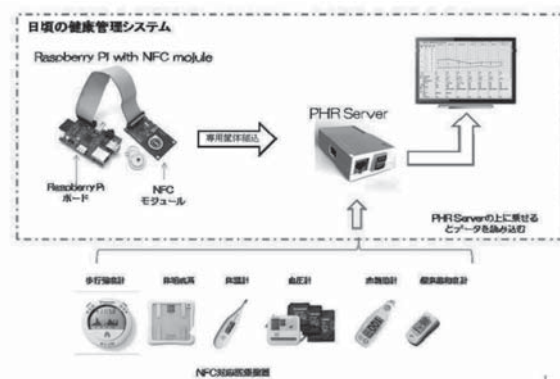


図9 データ管理サーバ用組み込みシステム

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・研究会等を計11回開催し、参加者は延170名であった。関連する研究会としては、機能性薄膜技術研究会、生産技術研究会、自動制御技術研究会、および先端的材料技術開発研究会である。

①表面技術に関する開発および支援

機能性薄膜技術研究会を3回、先端的材料技術開発研究会を3回、計6回開催した。

- ・機能性薄膜技術研究会(H26.7.29、11名)
電解オゾン生成用金属酸化物電極の開発について
- ・機能性薄膜技術研究会(H26.10.23、21名)
DLC膜コーティング技術について
- ・先端的材料技術開発研究会(H26.11.25、29名)
めっき、切削加工、無機材料
- ・先端的材料技術開発研究会(H27.2.17、10名)
機械部品・工具のための表面処理
- ・機能性薄膜技術研究会(H27.2.26、12名)
防錆、潤滑を目的とした表面処理技術
- ・先端的材料技術開発研究会(H27.3.17、10名)

②機構部材の最適設計のための評価手法の確立

3次元CAD/CAEに関する情報提供や操作実習を行う「3次元CAD/CAEセミナー」を2回、走査型プローブ顕微鏡(AFM)の概要説明や操作方法の説明を行うセミナーを1回 開催した

- ・3次元CAD/CAEセミナー (H27.1.22、9名)
- ・3次元CAD/CAEセミナー (H27.1.30、9名)
- ・走査型プローブ顕微鏡セミナー (H27.3.27、17名)



図10 3次元CAD/CAEセミナー

③センサネットワークと組込みシステム技術を用いた応用開発

今後のデータ解析技術開発を目的として、工業技術センターが主宰している長崎技術研究会の部会である自動制御技術研究会において、分科会としてクラウド技術科会を2月に設置し、その活動としてクラウド技術に関する電子情報技術セミナーを開催した(図11)。また、ロボットなどのシステム構築を効率化するのに有効な技術であるRTミドルウェア技術についての講習会を自動制御技術研究会として開催した(図12)。

- ・電子情報技術セミナー(クラウド技術)
(H27.2.20、28名)
- ・自動制御技術研究会(RTミドルウェア講習会)
(H27.3.18、14名)

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3つの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(H27～28)、機械フレームの軽量化設計支援ソフトウェアの開発(H27～29)、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(H27～28)に取り組んでいく。



図11 電子情報技術セミナー



図12 自動制御技術研究会
(RTミドルウェア講習会)

新規冷却法による高精細加工技術の開発

工業材料科	科 長	瀧 内 直 祐
工業材料科	研 究 員	福 田 洋 平
食品・環境科	主任研究員	三 木 伸 一

長崎県内の金属加工業では、環境問題等を考慮して、切削油剤を使用しない冷却方法に関する要求が高まっている。また、材料の高機能化、多様化等により、ステンレス鋼等の難削材料に関する切削加工技術の確立が望まれている。しかし、ステンレス鋼の切削加工の問題点として、工具刃先への凝着、ステンレス鋼の表面における加工硬化等が生じやすく、工具刃先の欠損、加工面の粗さ等の問題がある。そこで、環境問題等を考慮した冷却方法を検討することを目的として、平成26年度はステンレス鋼（SUS304）におけるTiAlNコーテッド超硬エンドミル工具の切削油剤ミストを用いたエンドミル切削加工実験を行い、水溶液ミスト、切削油剤、油ミスト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。

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]~[7]}を行った。

平成26年度はステンレス鋼(SUS304)におけるTiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(A社製、B社製)の切削油剤ミストを用いたエンドミル切削加工実験を行い、水溶液ミスト、切削油剤、油ミスト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。

2. 実験方法

実験は基本的に前報^[7]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)(A社製)、TiAlNコー

テッド超硬エンドミル工具(ねじれ角30°、φ8、4枚刃)(B社製)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)

切削油剤ミスト、水溶液ミスト、油ミスト、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ブル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。水溶液ミストにおける水溶液は、発泡剤20g/蒸留水500cc(pH9.0)である。油ミスト(切削油)はブルーベ植物性切削油LB-1を使用した。

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(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、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100μm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. 実験結果

3. 1 TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(A社製)の 切削加工実験

図1は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(A社製)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。水溶液テストに用いた水溶液は、蒸留水に発泡剤を添加した溶液である。

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、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。

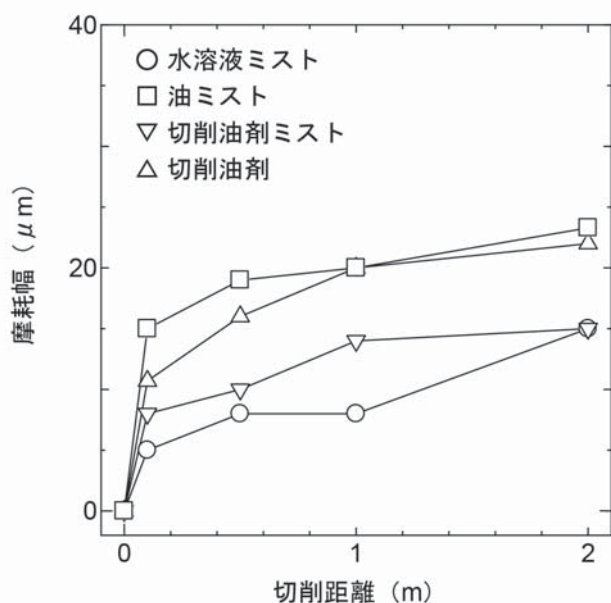


図1 切削距離と摩耗幅との関係

図2は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(A社製)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、油ミスト、切削油剤を使用した場合に約4μm以上であり、水溶液ミストを使用した場合に2.9μm以下であった。切削油剤ミストを使用した場合は3.6μm以下であり、水溶液ミストを使用した場合より表面粗さ(Rz)が大きい結果となった。

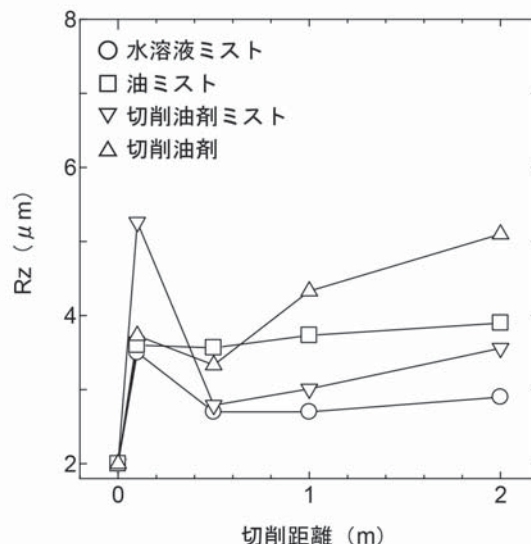


図2 切削距離と表面粗さ(Rz)との関係

3. 2 TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(B社製)の 切削加工実験

図3は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(B社製)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、切削油剤ミストを使用した場合に約30μmであった。水溶液ミスト、油ミストを使用した場合のいずれも、逃げ面摩耗幅が約20μm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10μmであった。

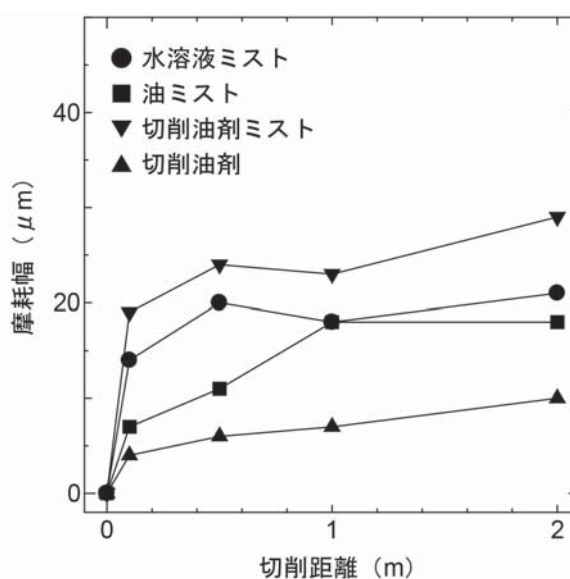


図3 切削距離と摩耗幅との関係

図4は、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(B社製)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 μ mに対して、切削油剤ミスト、水溶液ミスト、油ミストを使用した場合は約5 μ mであった。

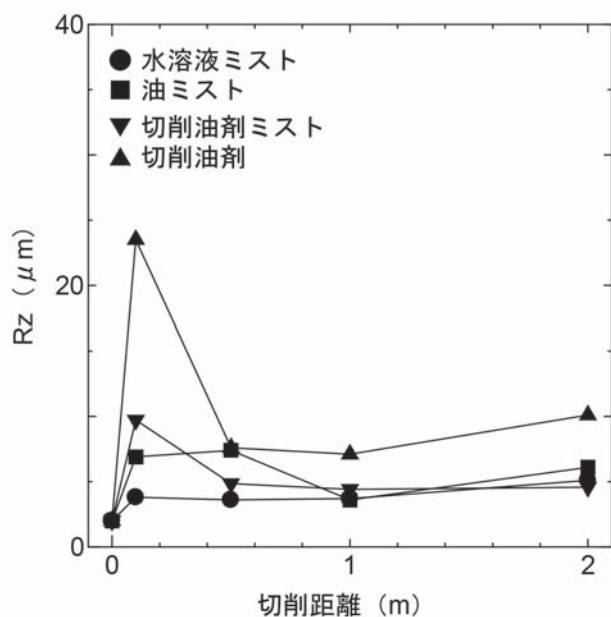


図4 切削距離と表面粗さ(Rz)との関係

3.3 切削油剤ミストにおける切削加工実験

図5は、切削油剤ミストを用いた時のエンドミル工具(A社製、B社製)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A社製(3枚刃)の結果、▼印はB社製(4枚刃)の結果である。

切削距離2mにおける逃げ面摩耗幅は、B社製工具を使用した場合は約30 μ mであり、A社製工具を使用した場合は約15 μ mであった。A社製工具及びB社製工具は、工具表面の剥離等が発生しなかった。

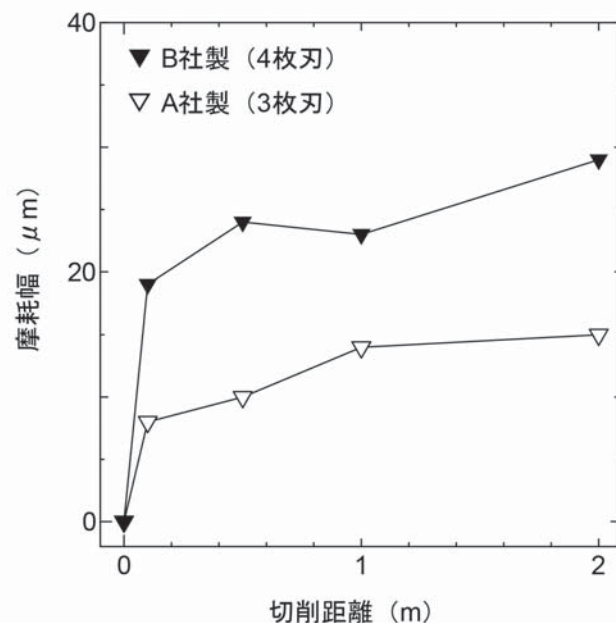


図5 切削距離と摩耗幅との関係

図6は、切削油剤ミストを用いた時のエンドミル工具(A社製、B社製)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A社製(3枚刃)の結果、▼印はB社製(4枚刃)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において、B社製工具の表面粗さ(Rz)は約4 μ m以上であることにに対して、A社製工具の表面粗さ(Rz)は約3 μ mであった。

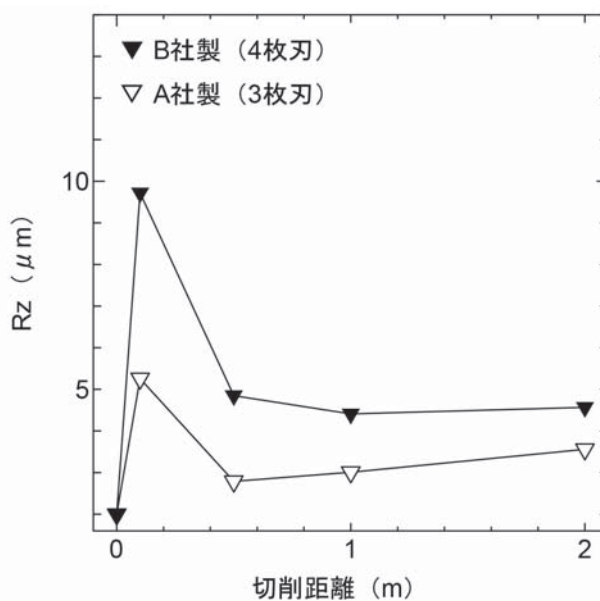


図6 切削距離と表面粗さ(Rz)との関係

4. 結 言

ステンレス鋼(SUS304)におけるTiAlNコーテッド超硬エンドミル工具(A社製、B社製)の切削油剤ミストを用いたエンドミル切削加工実験を行い、水溶液ミスト、切削油剤、油ミスト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。

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(A社製)において、切削油剤ミスト、水溶液ミスト、油ミスト、切削油剤を比較した結果、切削油剤ミストを使用した場合、工具摩耗、表面粗さ(Rz)が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(B社製)において、切削油剤ミスト、水溶液ミスト、油ミスト、切削油剤を比較した結果、切削油剤ミストを使用した場合、表面粗さ(Rz)が良好な結果が得られた。
- (3) 切削油剤ミストを使用した場合、A社製工具(3枚刃)とB社製工具(4枚刃)において、A社製工具(3枚刃)は工具摩耗、表面粗さ(Rz)ともに良好な結果が得られた。

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

情報創薬を指向した生体分子シミュレーションと可視化技術の展開 (第3報)

工業材料科 主任研究員 重 光 保 博

創薬分野でのシミュレーション技術では、in vitro（試験管内）/in vivo（生体内）試験を経る実験的手法を in silico（コンピューター上）で補完する次世代創薬技術が模索されている。長崎県工業技術センターでは、進展著しいシミュレーション技術の導入・環境整備を進めつつ、材料設計・創薬分野との研究融合を進めている。本報告では、タンパク質-薬物相互作用とそのダイナミクスの精密解析を実行する計算機技術およびシミュレーション手法を導入してその有効性を検証し、創薬分野における実験とシミュレーションの融合を目指した取組みを総括する。

1. 緒 言

創薬の出発点となるリード化合物の探索・選択は、（構造最適化→in vitroスクリーニング→臨床試験→市場化）に至る一連の創薬プロセスの成否を決める重要なポイントである。大規模な化合物ライブラリを使ったコンビナトリアルケミストリ+ハイスループットスクリーニングによる大規模網羅的探索は、必ずしも化学的多様性を十分に反映したケミカルスペース探索に結びつかないケースも多い。そのため、化合物データベースをもとに、Hansch-Fujita法に代表される定量的構造活性相関(QSAR)・ファーマコフォアモデリング・構造基盤薬物設計(Structural Based Drug Design: SBDD)等のin silicoバーチャルスクリーニングとの併用によって、リード化合物の合理的探索・選択が試みられている。タンパク質-薬物の親和性指標である結合自由エネルギー予測に基づくSBDDは、手法の汎用性と厳密性の利点から、創薬開発現場で定着しつつある。

前段研究「シミュレーション技術を活用した分子構造基盤薬物設計の研究(平成21年度～平成23年度)」では、創薬シミュレーション実現に向けた技術調査・蓄積を目的とした一連の予備的研究を実施した。タンパク質サイズの巨大高分子のスナップショット電子状態を第一原理的に求める手法・ソフトウェアを使用し、原子電子レベルでの生体高分子の諸性質解明に繋げることを目標とした。タンパク質-薬物相互作用の目安である結合自由エネルギーの定量的予測を目指して、分子シミュレーションに基づき結合自由エネルギー計算の評価を行った。具体的には、分子動力学(MD)計算とフラグメント分子軌道法(Fragment Molecular Orbital: FMO法)を組み合わせ、計算の高速化と定量的計算精度の両立を企図した。適用例として、遺

伝性パーキンソン病に関係する小タンパク質DJ-1に対して、FMO法を用いて全電子計算を実行し、「鍵穴」近傍のアミノ酸残基相互作用解析を行った。さらに、DJ-1と3種の化合物についてドッキングスタディおよびMM(QM)-PBSA法による結合自由エネルギー計算を行い、実験値と比較検討した^[1](図1)。

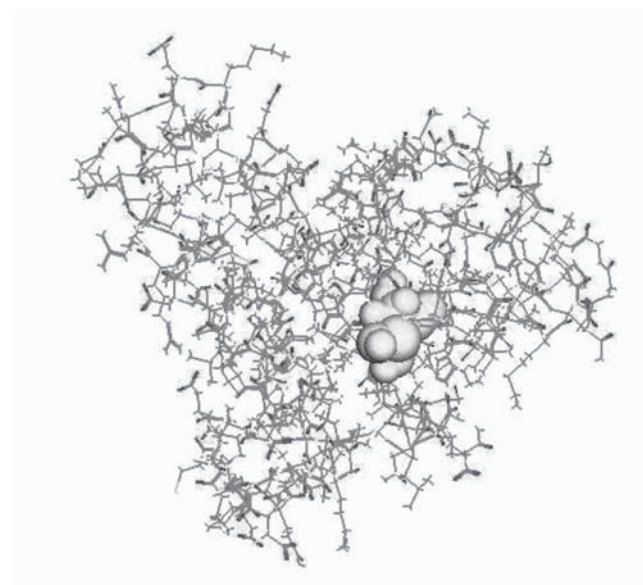


図1 DJ-1(1UCF:chain A)の活性サイト[1]

この前段研究を引き継ぎ、その発展型として本研究を3年間実施した。その総括として、各年度に達成した研究内容およびその意義について報告する。

- (1)平成24年度：GPGPU技術(General-Purpose for Graphical Processing Units)を創薬シミュレーションに適用して、古典的分子動力学法(CMD)のベンチマークテストを行った。
- (2)平成25年度：(タンパク質+薬物)の水和状態ダイナミ

クスを高精度解析する手法として、CP(Car-Parinello)法^[2]を検討した。ピロロキノリチン誘導体をテスト系として選び、CMD法と組み合わせた第一原理分子動力学法(QM/MM-MD)を実行した。

(3)平成26年度：創薬シミュレーションの具体例として、プロテインキナーゼCDK-2と薬理活性化合物ラメラリン^[3]のドッキングシミュレーションを行った。可視化モデルとして三次元造形装置(3Dプリンター)を用いた分子模型を製作し、ドッキング部位の複雑な3次元構造把握に対する有効性を確認した。

2. 手法・結果・考察

2.1 GPGPUを用いたCMDシミュレーションの高速化ベンチマーク^[2]

タンパク質-薬物複合体の構造ダイナミズムを的確に把握するためには、小さな置換基揺らぎから大きなドメイン揺らぎまで含めた解析が必要となる。このため、マイクロ秒～ミリ秒の超長時間CMDシミュレーションが必要となるが、CPUのみで構成された汎用計算機では困難である。

そこで、NVIDIA @GeForce GTXシリーズを用いて、コストパフォーマンスの高いCMDシミュレーションの実現に向けたベンチマークテストを行った(図2)(表1)。グラフィック処理用コプロセッサとして主としてゲーム市場から浸透したGPUは、近年科学技術計算等の汎用用途に急速に普及している。CMDシミュレーションは、GPGPUの先駆的導入分野であり、各種MDソフトウェアがGPGPUに対応している^{[4][5][6]}。



図2 クラスタ計算機(一部)

表1 計算環境

AMBER version	Version. 12 (patch 2 level)
MD mode	SPFP/SPDP/DPDP
CPU	Intel @ core i7 2700K / Xeon E5470x2/X5650x2
GPU	NVIDIA @ GeForce GTX 570/580/570x2
OS	CentOS 6.2
Compiler, Library	Gcc 4.4.6
MPI	Mpich 2.1-5
NVCC	version 4.2
CUDA Driver	version 4.2

4-ジメチルアミノ-4'-ニトロアゾベンゼン(DNAB)のCis-Trans異性化反応をCMDシミュレーションで追跡した(図3)。DNAB分子を含むcubic box内に1566個のTIP3P水分子を配置し、NPTアンサンブル (1atm 300K)でのMDシミュレーションを実行した。NPT制御にはLangevin thermostatを使用した。

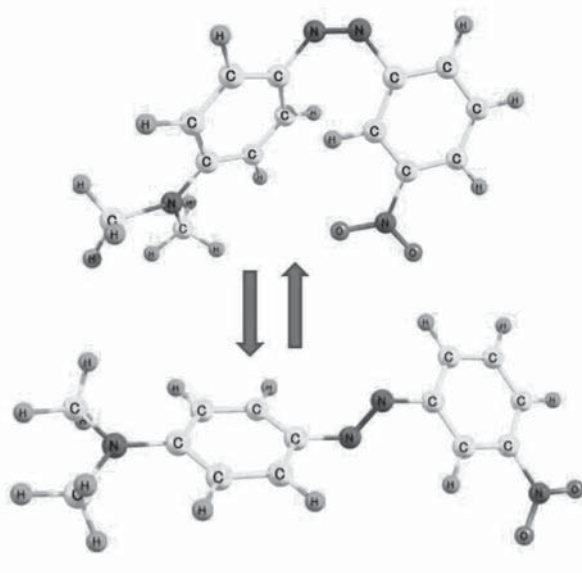


図3 DNABのCis-Trans異性化反応

タイミングデータ(表2)のとおり、GPGPUによって大きな高速化が得られた。全倍精度計算(DPDP)では約2倍、単精度・倍精度混合計算(SPFP, SPDP)では、GPUの長所である単精度計算の高速処理効果のため7-8倍の高速化が得られた。

表2 Cis-Trans異性化タイミングデータ(ns/day)

	SPFP	SPDP	DPDP
i7-2700K	-	-	33.4
E5620 x 2	-	-	30.0
X5650 x 2	-	-	41.4
GTX570	172.5	197.4	70.8
GTX580	167.3	202.4	78.1
GTX570 x 2	234.6	207.4	107.6

SPFPおよびSPDPモードでの長時間計算には注意が必要である。Cis-Trans異性化に伴う-C=N=N-C-振り角変化の20000ステップ(400ns)まで追跡した結果、系が崩壊して温度や圧力が発散した。DPDPモードではこの現象は生じなかった。

DPDPモードのGPGPU計算を用いて、DNABのCis-Trans異性化反応速度定数をCMDシミュレーションから直接求めることを試みた。加速CMD法による biased potential CMDから求めた仮想的反応速度定数を外挿することによって、non-biased potentialでの反応速度定数を求める方法が提案されている^[7]。この方法に従い、Cis-Trans異性化反応速度定数を算出し、実験値と定性的な一致を得た^[8]。

2.2 MDシミュレーションの高精度化に向けたQM/MM-MD計算[9]

CMDシミュレーションは、電子状態変化や化学結合組み換えの記述ができない限界がある。この限界はHartree-Fock法やDFT法のような量子化学計算法で解決できるが、時間発展を追跡する計算量が膨大になるため統計的に十分なサンプリングが困難である。タンパク質-薬物複合体の電子状態変化を考慮しつつ時間追跡を行うことが可能な高精度手法を検討した。活性サイト近傍には第一原理MD法であるCar-Parinello(CP)法[10]を用い、残りの周辺部位をCMDで扱うQM/MM-MD法を検討した。CP法では、核と電子の運動方程式を連立して求解することによって、系の時間発展を効率よく追跡することができる^{[11][12]}。

ベンチマーク対象として、エタノール(EtOH)中のピロロキノリチン誘導体(DIPQ)^[13](図4)の電子スペクトルを予測し、実験値と比較検討を行った。CMDにはGROMACS 4.6.5^[14]、CPにはCPMD 3.17.1^[15]を用い、両者のドッキングにはリンクモジュール「GMX-QMMM」^[16]を用いた。QM(Born-Oppenheimer)/MM-MDは1ps(500 steps)

実行した。基底関数は、ビルトインされたVanderbilt ultrasoft potentialを用いた。トラジェクトリー解析と可視化はVMD^[17]で行った。各スナップショットに対するONIOM、FMO-TDDFT計算は、それぞれGaussian09, GAMESS 2012を用いた(図5)。溶媒を無視した孤立系に対するCASSCF/MS-CASPT2計算には、MOLCAS ver.7.4を用いた。

ONIOM、FMO-TDDFT計算によって、PCMで考慮されない溶質-溶媒間の近接相互作用を考慮した。その結果、吸収スペクトルでは実験傾向と不一致(長波長シフト)、発光スペクトルでは一致する結果(短波長シフト)が予測された。しかし、いずれの場合も、FMO-2とONIOMの差は10nm以内であり、EtOH中の大幅な短波長シフトを再現することはできなかった。選択したスナップショットは、DIPQ-EtOH間の水素結合に不利なポーズであり、十分なスナップショット平均が必要である。

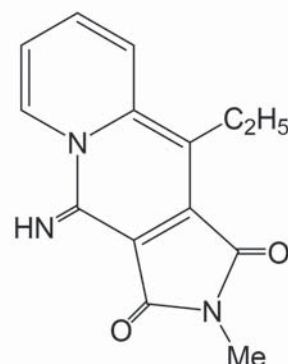


図4 1,3-dioxo-4-imino-pyrrolo[3,4-b]quinolizine

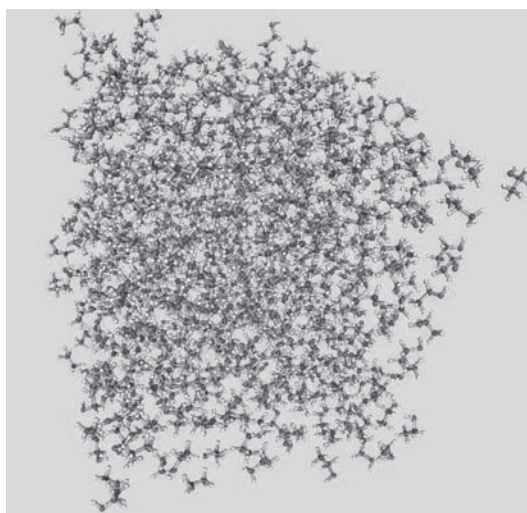


図5 DIPQ-EtOH シミュレーションbox(at 2ps)

2.3 プロテインキナーゼCDK-2とラメラリンのドッキング解析とその可視化モデル

海産天然化合物であるラメラリンは、14-phenyl-6H-[1]benzopyrano[4':3,4,5]-pyrrolo[2.1-a]isoquinolin-6-on骨格を有する化合物の総称であり、抗腫瘍活性をはじめとした種々の生理活性を示す^[3]。

C1-C11回転障壁を増大させた16-メチルラメラリンN誘導体は光学分割が可能となり、(aS)-16-メチルラメラリン(23a)と(aR)-16-メチルラメラリン(23b)がそれぞれ合成されている^[3](図6)。

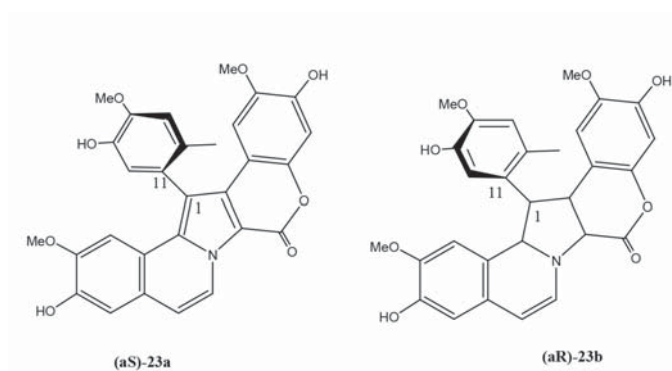


図6 (aS)-16-メチルラメラリン(23a)と(aR)-16-メチルラメラリン(23b)

軸不斉のみが異なる(aS)-(23a)と(aR)-(23b)において、各種プロテインキナーゼ阻害活性が異なることが報告されている。CDK-2に関しては、(aR)-(23b)のみが阻害活性を示し($IC_{50}(nM)=0.067$)、(aS)-(23a)は活性がない($IC_{50}(nM)>10$)ことが明らかにされている^[3]。この実験的知見の違いに関して、力場計算とドッキングシミュレーションによる解析も併せて行われており、ドッキングサイト形状に基づく定性的な考察が行われている^[3]。

本研究は、これらの知見に基づき、CDK-2と(aS)-(23a)/(aR)-(23b)との相互作用様相を定量的に明確にするため、第一原理分子軌道計算法による高精度計算を行った。計算にはFMO法を用いた(HF-FMO/6-31G(d))。

分子構造はX線構造解析から得られた構造をソフトウェアMOE^[18]で最適化した構造を用いて、一点計算を行った。

まず、(aS)-(23a)とCDK-2の複合体では、結合安定化に寄与するアミノ酸残基が存在しない。逆に、Lys-121はrepulsiveに作用し不安定化に寄与すると考えら

れる(図7)。

次に、(aS)-(23b)とCDK-2の複合体では、Asp-137, Asp-78, Lys-81, Lys-75が安定化に大きく寄与している。その一方、(aS)-(23a)と同様にLys-143はrepulsiveに作用し不安定化に寄与すると考えられる。

フラグメント相互作用解析から、(23b)とCDK-2の相互作用が顕著に大きいことが明白であり、この結果は実験的知見^[3]とも一致している(図8)。

3. 結 言

本研究において、創薬分野におけるシミュレーション技術の導入を企図して、計算環境整備・基盤技術習得・学術研究を同時進行的に推進した。

本研究を通じて、創薬分野におけるシミュレーション研究とその活用に関する産学官ネットワーク構築を推進し、創薬分野のシミュレーション技術支援を行う環境構築・技術知見を蓄積することができた。今後、学術機関・情報関連ベンチャー企業等との連携を進めつつ、学術・産業の両面から創薬シミュレーションの展開を図る。

謝 辞

GPGPUを用いたCMD計算の高速化は長崎大学先端計算研究センターの濱田剛准教授に、CDK-2とラメラリンの構造データ・実験的知見は長崎大学工学部の岩尾正倫教授・福田勉助教に、それぞれアドバイスを受けた。

3Dプリンターを用いたCDK-2とラメラリンのドッキング分子模型作製には、当技術センターの小笠原耕太郎専門研究員(電子情報科)・大田剛大研究員(工業材料科)の助力を得た。

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤(C)「動的溶媒効果が及ぼす凝縮系の化学反応についての理論および実験化学的研究」(Grant No. 24550058)により実施した。

参考文献

- [1] Y. Shigemitsu, Int. J. Quant. Chem. 113(4), 574 (2013)
- [2] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、No.42, 23-25 (2013)
- [3] 吉田賢佑、福田勉、石橋郁人、岩尾正倫、Luarent Meijer, Medichem News, 2, 36-41 (2013)
- [4] AMBER 12 Benchmarks by M. Wu and R. Walker.
URL: <http://ambermd.org/gpus/benchmarks.htm>

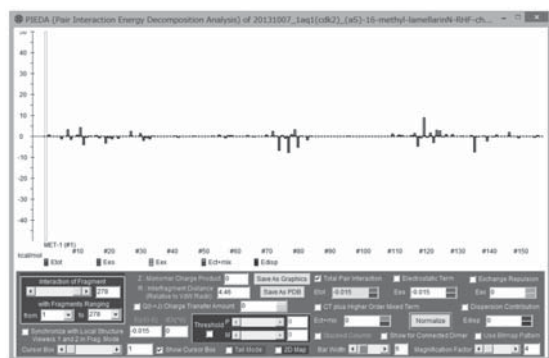
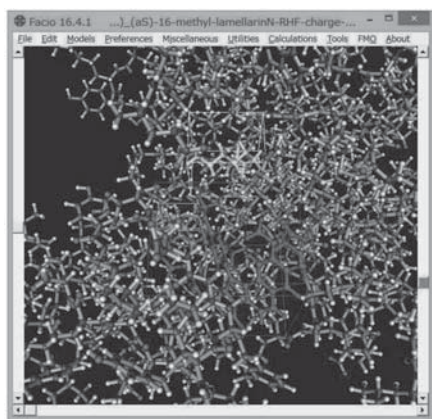


図 7 (aS)-16- メチルラメラリン (23a) と CDK-2
(上図) : (23a) と結合ポケット近傍様相
(下図) : (23a) と各アミノ酸残基間の相互作用

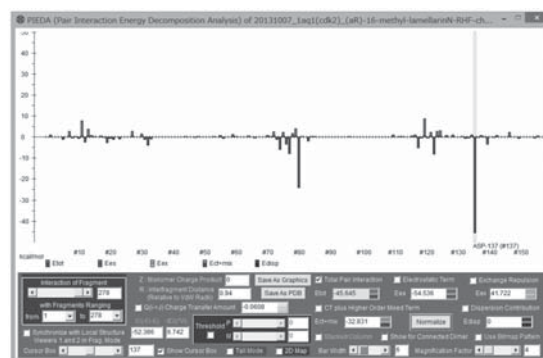
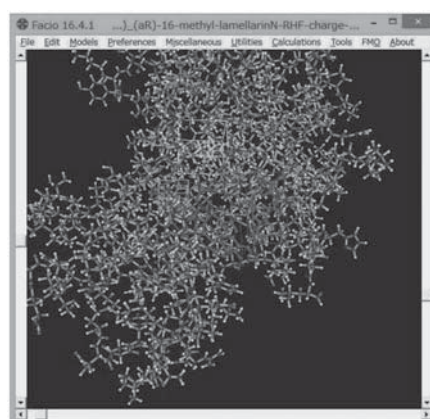


図 8 (aR)-16- メチルラメラリン (23b) と CDK-2
(上図) : (23b) と結合ポケット近傍様相
(下図) : (23b) と各アミノ酸残基間の相互作用

- [5] Hess, B., Kutzner, C., van der Spoel, D., Lindahl, E., J. Chem. Theory Comp. 4(3):435 (2008)
- [6] J. C. Phillips, R.Braun, W.Wang, J.Gumbart, E.Tajkhorshid, E.Villa, C.Chipot, R. D.Skeel, L.Kale, and K.Schulten. Scalable molecular dynamics with NAMD. Journal of Computational Chemistry, 26:1781-1802, 2005.
URL: <http://www.ks.uiuc.edu/Research/namd/>
- [7] D.Hamelberg, J.A.McCammon, Ann.Rep. in Comp. Chem., Vo.2, 221-232 (2006)
- [8] Y.Shigemitsu and Y.Ohga, J.Sol.Chem., Vol.43, Issue 9-10, 1746-1754 (2014)
- [9] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、No.43, 36-41 (2014)
- [10] R. Car and M. Parrinello, Phys. Rev. Lett., 55, 2471 (1985)
- [11] 日本機械学会編、原子分子を用いる数値シミュレーション(コロナ社、1996)
- [12] D.Marx and J.Hutter, ab initio Molecular Dynamics. Basic theory and advanced methods. (Cambridge University Press, 2009)
- [13] M.Hagimori, N.Mizuyama, et al, Heterocycles, 83, 1983 (2011)
- [14] Hess, B., Kutzner, C., van der Spoel, D., Lindahl, E., J. Chem. Theory Comp. 4(3):435 (2008)
- [15] CPMD; <http://www.cpmc.org/>, Copyright IBM Corp 1990-2008.
- [16] GROMACS-CPMD QM/MM; <https://www.tougaloo.edu/academics/divisions/natural-science/research/gromacs-cpmd-qmmm>
- [17] Humphrey, W., Dalke, A. and Schulten, K., J. Molec. Graphics, 14, 33 (1996)
- [18] Molecular Operating Environment (MOE), 2013.08; Chemical Computing Group Inc., 1010 Sherbooke St. West, Suite #910, Montreal, QC, Canada, H3A 2R7, 2015.

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

ポリイミド樹脂フィルムをはじめとした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。平成26年度は、ポリイミド樹脂と熱硬化性樹脂の複合材料を調製し、熱物性等の基礎特性を評価した。その結果、ポリイミド樹脂に熱硬化性樹脂を複合することにより、線熱膨張の抑制が確認された。

1. 緒 言

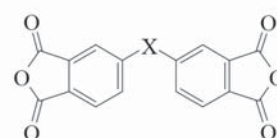
ポリイミド樹脂は、卓越した耐熱性、耐薬品性に加えて優れた機械強度、電気特性を有するため、エレクトロニクス、各種産業用機械、航空宇宙などの分野において高性能部材として広範に用いられている。とくに、主鎖に剛直な芳香複素環を有する耐熱性高分子の多くが、不溶・不融のために加工が難しいなかで、ポリイミド樹脂は前駆体のポリアミック酸が有機溶剤に高濃度で溶解し、容易にフィルム化が可能であることから、高性能膜材料、フィルム材料として活用されている^{〔1〕～〔2〕}。近年はとりわけ、プリンタブル・エレクトロニクス分野において期待が高まっている。しかし、接着、またはコーティングされる相手材料（主に金属）との熱膨張率の違いから、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、用途が限定されている。そこで、本研究では、接着用途を対象として、業界ニーズの高い「高耐熱・低熱膨張性」と「可とう性」（柔軟で良好な折り曲げ特性）を両立する新規なポリイミド樹脂系のプラスチックフィルム資材を開発する。

2. 実験方法

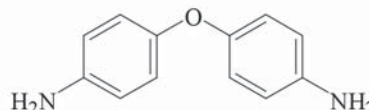
2.1 試料及び試薬

本研究において、ポリイミド樹脂原料のテトラカルボン酸二無水物は市販品をそのまま使用した。ジアミン類も市販品をそのまま使用し、4,4'-オキシジアニリン（以下ODA）、ビス[4-(3-アミノフェノキシ)フェニル]スルホン（以下BAPSM）、及び3,3'-ジヒドロキシベンゼン（以下HAB）を単独、又は任意の割合で混合してポリイミド樹脂原料とした。複合化に用いた熱硬化性

樹脂や各種溶剤類も精製や蒸留をすることなく市販品をそのまま使用した。図1に、本研究で使用したおもな原料の構造と名称、及び略号を示す。

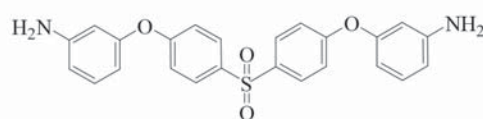


テトラカルボン酸二無水物



4,4'-オキシジアニリン

(ODA)



ビス[4-(3-アミノフェノキシ)フェニル]スルホン

(BAPSM)

図1 使用した原料の構造と名称、及び略号

2.2 ポリアミック酸（ポリイミド樹脂前駆体）の合成、及びポリアミック酸／熱硬化性樹脂複合ワニスの調製

300mL容セパラブルフラスコに所定量のジアミン、及びN-メチルピロリドン(NMP)を仕込んだ。NMP量は、得られるポリアミック酸の濃度が20%になるように調整した。常温で攪拌し、ジアミンを完全に溶解させた後、液温が30℃を超えないよう、所定量のテトラ

カルボン酸二無水物を少量ずつ添加した。窒素雰囲気下で24時間の攪拌を続け、ポリアミック酸溶液を得た。

ポリアミック酸溶液をポリカップに秤量し、熱硬化性樹脂の所定量を添加し、完全に溶解させた。その後、この混合溶液を攪拌脱泡ミキサーで十分に混合・脱泡することにより、ポリアミック酸／熱硬化性樹脂複合ワニスとして得た。

2.3 ポリイミド樹脂／熱硬化性樹脂複合フィルムの作製

前節で得たワニスを、離型フィルムを貼付したガラス板上に塗布した。塗布厚さは、硬化後のフィルムの厚さが20～30 μm になるように調整した。塗布後、送風乾燥機を用いて80℃にて約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、金枠に固定して窒素雰囲気下にて加熱処理した。加熱処理は、100℃、1時間、150℃、1時間、200℃、1時間、及び250℃、2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、ポリイミド樹脂／熱硬化性樹脂複合フィルムを得た。

2.4 測定と分析

【線熱膨張率(CTE)】得られたポリイミド樹脂／熱

硬化性樹脂複合フィルムから長さ13mm×幅5mmの短冊状試験片を切出した。チャック間距離10mmにて引張モードの熱機械測定(島津製作所製、TMA-60を用いた)を行い、熱膨張曲線から平均線熱膨張率(CTE、50℃～200℃)を求めた。測定条件は、30mL/minの窒素気流下、初期荷重10mN、昇温速度5℃/minとした。

【ガラス転移温度(Tg)】前項の熱機械測定において得られた熱膨張曲線の変曲点をガラス転移温度とした。

【可とう性】得られたポリイミド樹脂／熱硬化性樹脂複合材料フィルムを90°折り曲げ、再び広げたときの状態を目視で判定した。ヒビ、割れが生じることなく、元の状態に広げることができたものを○、ヒビ、割れが生じたものを△、完全に割れたものを×と判定した。

3. 結果と考察

図2に得られたポリイミド樹脂／熱硬化性樹脂複合フィルムの例を示す。熱硬化性樹脂の複合化率0%では淡褐色透明を呈した。この透明度は、熱硬化性樹脂と複合することにより低下した。熱硬化性樹脂含有率

20wt%以上では、一部のものを除いて、急激にフィルムが脆化し、フィルム硬化工程において離型できなかった。このため、熱硬化性樹脂含有率15wt%までの試料において特性を評価した。

表1にODPAM/ODA系ポリイミド樹脂をマトリクスとしたポリイミド樹脂／熱硬化性樹脂複合フィルムの特性を、表2にODPAM/BAPSM系ポリイミド樹脂をマトリクスとしたポリイミド樹脂／熱硬化性樹脂複合フィルムの特性を示す。いずれの系においても、熱硬化性樹脂含有率の増加とともに、CTEが抑制されることが確認できた。その一方で、Tgは熱硬化性樹脂含有率によって顕著な変化は見られず、ほぼ一定だった。また、可とう性については、熱硬化性樹脂含有率の増加に従って低下する傾向にあったが、ODPAM/BAPSM系ポリイミド樹脂をマトリクスに用いた場合は、その可とう性の低下が幾分抑制されることがわかった。

今回の複合方法では、CTEが熱硬化性樹脂含有率の増加とともに低下することが確認できたが、Tgはほぼ一定の結果となった。これは、複合化した熱硬化性樹脂がポリイミド樹脂の分子運動を束縛するまでに至っていないことを示唆している。より高い複合効果を発現させるためには、複合方法を検討する必要がある。

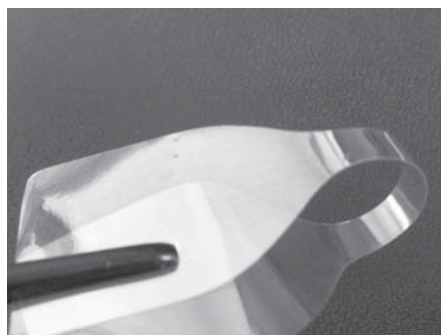


図2 ポリイミド樹脂フィルム(一例)

表1 ポリイミド樹脂／熱硬化性樹脂複合材料フィルムの特性 (ODPAM/ODA系ポリイミド樹脂)

試料 No.	1	2	3	4	5
熱硬化性樹脂含有率 [wt %]	0	2	5	10	15
CTE [ppm]	112	105	95	88	74
Tg [℃]	223	227	228	227	222

可とう性	○	○	△	△	△
------	---	---	---	---	---

表2 ポリイミド樹脂／熱硬化性樹脂複合材料フィルムの特性 (ODPAM/BAPSM系ポリイミド樹脂)

試料 No.	1	2	3	4	5
熱硬化性樹脂 含有率 [wt %]	0	2	5	10	15
CTE [ppm]	82	76	64	61	48
Tg [℃]	231	229	232	232	229
可とう性	○	○	○	△	△

4. 結 言

- 1)ポリイミド樹脂と熱硬化性樹脂を複合することで、線熱膨張係数の低下が確認された。
- 2)熱硬化性樹脂複合率20wt%以上では、フィルムが急激に脆化することを確認した。
- 3)より高い複合効果を得るためには、複合方法に検討の余地あると考えられる。

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)

複雑形状部品の高効率加工技術の開発

工業材料科 研 究 員 福 田 洋 平
工業材料科 科 長 瀧 内 直 祐

インペラー及びタービンブレード等の複雑形状部品の加工には、5軸制御工作機械とボールエンドミルが用いられる。しかし、ボールエンドミルの切削機構は複雑であると共に、切削条件のパラメータとして2軸の工具傾斜が加わるため、最適な工具経路及び切削条件の決定手法が確立されていない。

本研究では、ボールエンドミル切削の幾何学解析及びスクエアエンドミルを用いた切削実験を実施し、切削実験によって得た工具の摩耗進行データと幾何学解析を組み合わせることでボールエンドミルの摩耗予測プログラムを作成した。また、摩耗予測プログラムより得られた知見からインペラーの高効率加工方法を考案した。

1. 緒 言

近年、工作機械及びCAD・CAM技術の進歩に伴い、5軸制御工作機械の普及が進んでいる。5軸制御工作機械は、工作物に対して任意の方向から工具をアプローチさせることができるため、①ワンチャッキングによる多面加工、②アンダーカット部の加工及び③短い工具突出しでの加工が可能となる。これらの特徴によって、加工工程の削減及び高付加価値部品の加工を実現することができる。

インペラー及びタービンブレード等の複雑形状部品の加工する場合、切削工具にはボールエンドミルが用いられる。しかし、ボールエンドミルの切削機構は複雑であると共に、切削条件のパラメータとして2軸の工具傾斜が加わるため、最適な工具経路及び切削条件の決定手法が確立されていない。

本研究では、ボールエンドミル切削における高効率な切削条件を導くため、①切れ刃各部の実切削速度等を算出する幾何学解析プログラムの作成、及び②工具の摩耗進行データを取得するための切削実験を行い、それらを組み合わせることで工具の摩耗予測プログラムを作成する。また、摩耗予測プログラムより得られた知見からインペラーの高効率加工法を考案する。

2. 幾何学解析プログラム

単位時間当たりの除去体積を大きくするためには、切削速度(工具回転数)、1刃当たりの送り量及び切込みを大きくする必要がある。一方、工具寿命を長くするためには、切削速度及び切削厚さを小さくする必要がある。しかし、ボールエンドミル切削では、切れ刃の各位置において切削速度及び切削厚さが異なるとともに、2軸の工具傾斜を付与することによってそれらの値が変化する。そのため、熟練技能者においても切削

現象の把握が困難である。

そこで、ボールエンドミル切れ刃各位置の切削速度及び切削厚さ、そして切れ刃に生じる負荷(切削抵抗等)を簡便に把握するため、笠原らの研究報告^{[1][2]}を基に幾何学解析プログラムを作成した。

解析手順は、①工具切れ刃の定義、②切削断面積(切削厚さ)の計算、③切削抵抗の計算となる。

2.1 工具切れ刃の定義

工具半球部の切れ刃は下記の位置関係にあるとし、工具径D、すくい面傾斜及びすくい面オフセットeの4つのパラメータによって定義する。

- ①先端部の切れ刃は球面上にある。
- ②すくい面は先端で(e,0,0)を通る平面で近似する。
- ③切れ刃はすくい面と球面の交線で表す。

一例とし、図1に2枚刃ボールエンドミル(S-2MB R10: 三菱マテリアル製)を対象として定義した場合の切れ刃位置を示す。

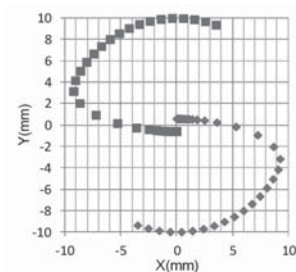


図1 切れ刃座標(X-Y)

2.2 切削断面積の計算

図2に示すように、切れ刃上の任意の一点における切削厚さは、1回転前の切れ刃によって生成された面との法線方向距離とする。ここで得られる切削厚さを切れ刃全域にわたって積分することで、任意の回転角における切削断面積を得ることができる。図3にボールエンドミル(S-2MB R10：三菱マテリアル製)の切れ刃が1枚であると仮定して、送り速度0.1mm/toothの条件で溝切削を行った場合の工具1回転中における切削断面積の変化を示す。

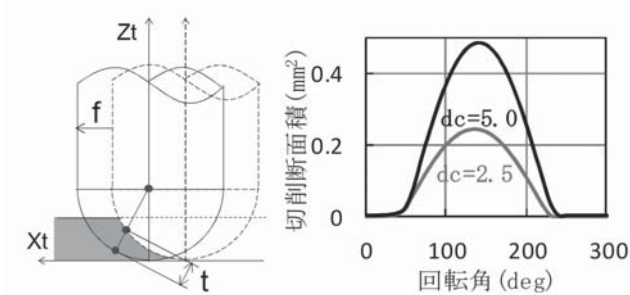


図2 切削厚さ t

図3 切削断面積

2.3 切削抵抗の計算

切削抵抗の計算に用いるモデルの特徴を以下に示す。

- ①切れ刃に沿う全体の変形様式を微小幅の単純せん断面からなる傾斜切削模型の集積ととらえる。
- ②切れ刃にそった有効せん断角、切りくず流出角、せん断速度、切りくず流出速度等の変化を考慮する。
- ③せん断面通過後の切りくず流出速度に基づき、一体で横向きカールを伴う切りくず生成状態を表現する。

このモデルは2変数の関数で表現でき、切れ刃上のある1点の切りくずカール半径と切りくず流出角を与えることで全体の変形様式を定めることができる。そして、全体の変形に要する動力が最も小さくなる条件を解とする。ただし、せん断応力、有効せん断角及びすくい面摩擦角と有効すくい角との関係は2次元切削実験に基づき与えられる。

2.4 解析結果と評価

作成したプログラムを評価するため、切削実験を行った。実験は5軸制御立形マシニングセンタ(株)牧野フライス製作所：D500)を使用し、切削動力計(日本キスラー(株)：9257B)を用いて切削抵抗を測定した。表1に実験条件、図4に溝切削時の解析値と実験結果及び図5にピックフィード時の解析値と実験結果を示す。なお、解析値は1枚刃のみとして計算している。

溝切削時及びピックフィード切削時の実験結果と解析値は良好な一致を示しており、本プログラムによってボールエンドミルの切れ刃に生じる負荷(切削抵抗)をモニタリングすることが十分可能であるといえる。

表1 切削条件

工具	S-2MB R10 (三菱マテリアル)
回転数	320min ⁻¹
送り	0.1mm/tooth
切込み	3.0mm

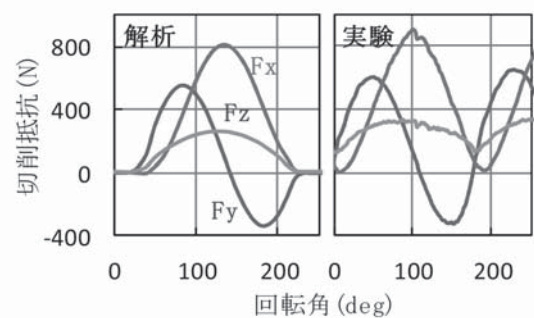


図4 溝切削における解析及び実験結果

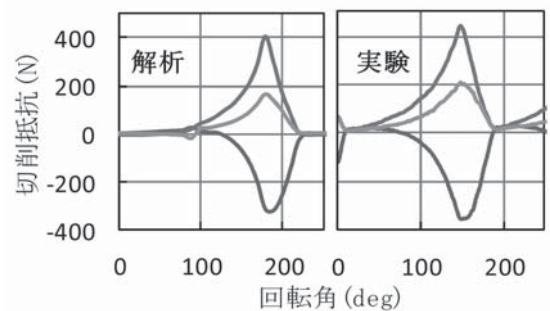


図5 ピックフィード切削における解析及び実験結果

3. 切削実験

幾何学解析プログラムにより任意の切削条件における切れ刃各位置の切削速度及び切削厚さの算出が可能となった。しかし、工具摩耗の進行は切削速度と切削厚さの2パラメータのみで決まるわけではなく、工具材質、ワーク材質、潤滑状態及び工具とワークの接触長さ等によって全く異なる傾向となる。そのため、いかなる加工条件においても実加工時の条件に合わせた切削実験を行い、そこで取得したデータを基に工具の摩耗予測を進める必要がある。今回は、耐熱性及び比強度が高く、切削加工が困難な難削材とされるチタン

合金(Ti-6Al-4V)を被削材と定め、切削実験を行った。

3.1 実験条件

スクエアエンドミルを用いた切削実験によりデータの取得を行った。工具は、びびり振動の発生によるチップング等の損傷を防ぐため、不等リード・不等ピッチの4枚刃エンドミル(VF-MHV0600：三菱マテリアル製)とした。また、工具刃先の冷却のために水溶性クーラントを供給した。実験条件を表2に示す。

表2 スクエアエンドミルによる切削実験の条件

	切削速度 (m/min)	1刃当りの送り量 (mm/tooth)
①	80	0.05
②	40	0.05
③	120	0.05
④	80	0.025
⑤	80	0.075

条件①を標準切削条件とし、切削速度及び1刃当りの送り量を実験パラメータとした5条件を設定した。なお、全ての条件において軸方向切込みは3.0mm、径方向切込みは1.0mmとした。

3.2 実験結果

切削速度が異なる3条件における逃げ面摩耗の推移を図6に、1刃当りの送り量が異なる3条件における逃げ面摩耗の推移を図7に示す。一般的に工具摩耗の推移を示すグラフの横軸は、切削距離、切削時間若しくは除去体積で示される。しかし、本実験は工具の摩耗予測プログラムを作成するためのものであるため、横軸は衝撃回数(1枚の切れ刃が工具に切り込んだ回数)と設定している。切削速度が速くなるほど、また、1刃当りの送り量が大きくなるほど逃げ面摩耗の進行は早く、切れ刃の負荷が大きくなっていることが分かる。切削速度120m/minの条件における逃げ面摩耗幅の推移は、逃げ面摩耗幅が150 μ mを越えたあたりで急激に増加していることから、逃げ面摩耗幅が150 μ mに到達した衝撃回数を工具寿命と設定した。

工具切れ刃のすくい角、逃げ角及びエッジの質は工具摩耗の進行に伴い変化する。そのため、新品の工具で加工を開始した直後の切れ味の良い状態では、1回の切り込みごとに切れ刃に加わる負荷は小さく、工具摩耗が進行して切れ味が低下するに従い切れ刃に加わる負荷は大きくなる。しかし、切れ刃の状態を加工中に把握し管理することは現実的に不可能である。その

ため、加工を開始してから工具が寿命を迎えるまで切削条件は変わらないと仮定し、工具が寿命を迎える衝撃回数の逆数を、1回の切り込みによって切れ刃に加わるダメージと単純化して定義した。各実験条件におけるダメージを図8に示す。

なお、ここで定義したダメージの累積値が1になることで工具は寿命を迎えるが、あくまで切削条件が一定の場合であり、材料疲労の分野で用いられる線形累積損傷則のように複合した切削条件には適用できない。

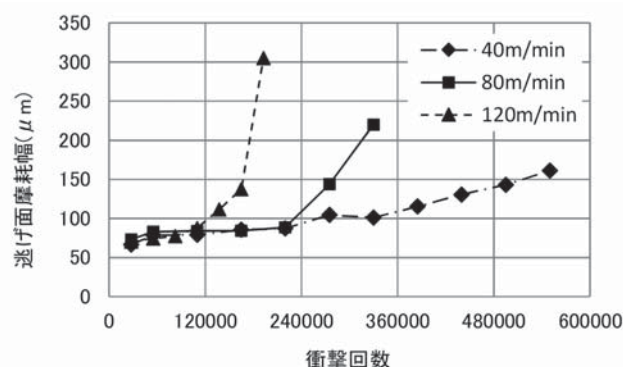


図6 逃げ面摩耗幅の推移(切削速度)

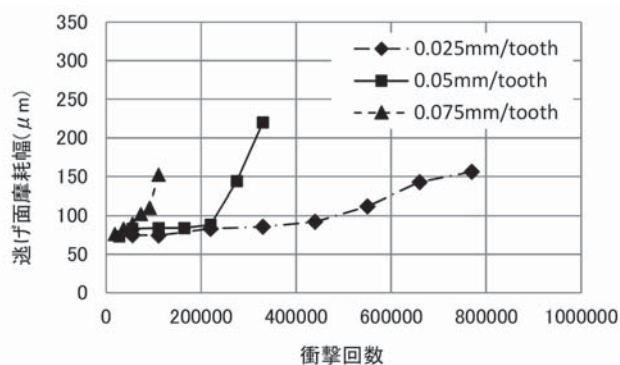


図7 逃げ面摩耗幅の推移(1刃当りの送り量)

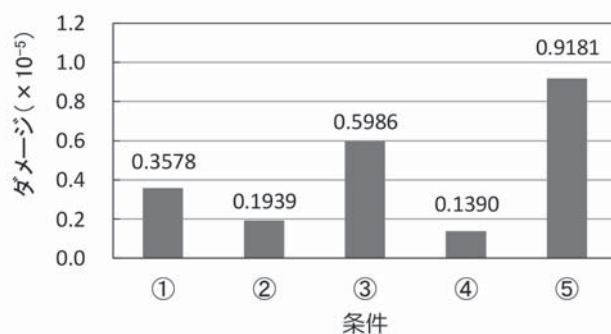


図8 1回の切り込みによる切れ刃のダメージ

4. 工具の摩耗予測プログラム

切削実験の結果を基に工具ダメージの予測式を検討し、幾何学解析プログラムに組み合わせることで工具の摩耗予測プログラムを作成する。

4.1 工具ダメージの予測式

図8に示した実験結果を基とし、図9に切削速度とダメージの関係を示す。実験した切削速度の範囲において、切削速度とダメージの相関は原点を通る直線との良好な近似が確認できた。関係式を図中に示す。

また、1刃当りの送り量が異なる3条件における最大切削厚さを幾何学的に算出し、最大切削厚さとダメージとの関係を示したものが図10である。最大切削厚さとダメージの相関は原点を通る2次の多項式による良好な近似が確認できた。関係式を図中に示す。

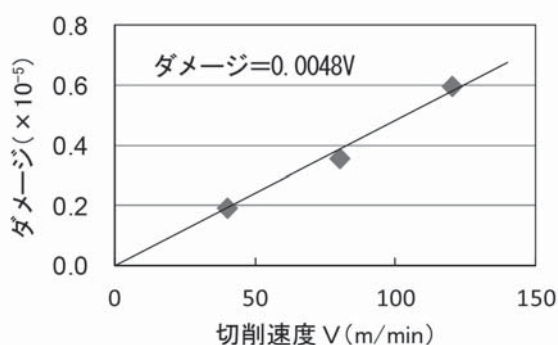


図9 切削速度の影響

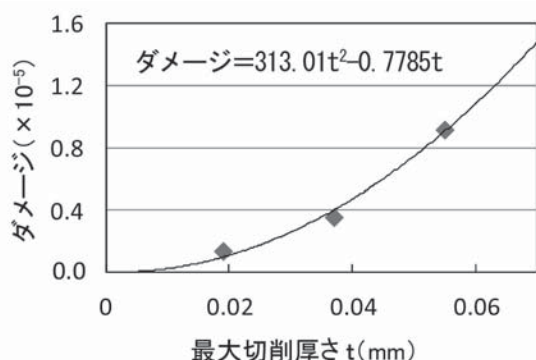


図10 最大切削厚さの影響

今回、切れ刃に加わるダメージは切削速度と最大切削厚さ及び切削長さ(切れ刃がワークに食い込み、抜けるまでの接触長さ)の影響を大きく受けると仮定し、切削速度の影響と最大切削厚さの影響及び切削長さL[mm]を乗じることで工具ダメージを予測するとした。

$$\text{ダメージ} = 0.0048V \times (313.01t^2 - 0.7785t) \times L \quad (1)$$

(1)式により算出したダメージと実験結果により得たダメージの比較を図11に示す。いずれの条件においても実験結果と計算結果には良好な一致が確認できた。

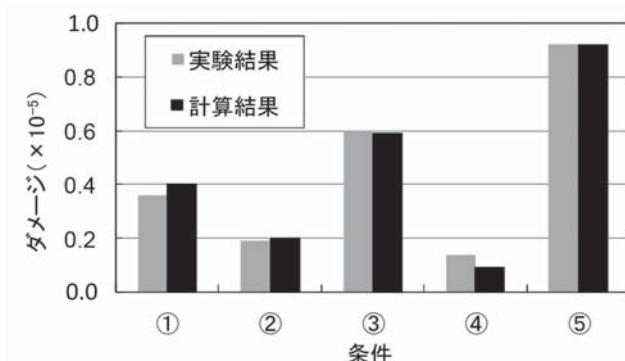


図11 ダメージ計算結果と実験結果の比較

4.2 摩耗予測プログラムの検証

工具ダメージの予測式を幾何学解析プログラムに組み合わせ、ボールエンドミルの工具摩耗予測プログラムを作成した。そして、予測プログラムの予測精度を検証するため切削実験を行い、予測結果と比較した。検証実験の条件を表3に示す。軸方向切り込みは0.5mm、ピックフィードは1.5mmとし、使用した工具は不等カーブ・不等ピッチの4枚刃ボールエンドミル(VF-4SVBR3：三菱マテリアル製)である。なお、リードは送り方向へ工具軸が倒れた角度を示し、リーンはリードに対し直交方向に工具が倒れた角度を示す。

切削実験の結果と摩耗予測プログラムによる計算結果の比較を図12に示す。いずれの条件においても計算結果は実験結果の2倍程度大きい値であった。これは、実験に使用したスクエアエンドミルとボールエンドミルの切れ刃諸元が一致しないことに起因すると考えられる。そのため、最小二乗法によって補正係数を求め計算結果に乗じることとした。補正の結果、実験結果との良好な一致が確認できた。

表3 検証実験の条件

	工具回転数 (min ⁻¹)	送り速度 (mm/min)	リード (deg)	リーン (deg)
①	12000	3200	0	0
②	7000	1820	30	0
③	7000	1820	0	30
④	7000	1820	-30	0

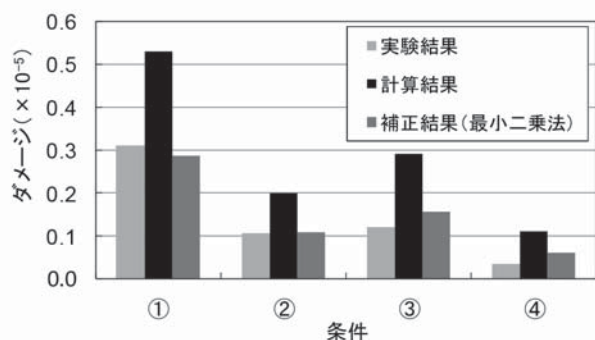


図 1 2 ボールエンドミルのダメージ予測結果

4.3 ボールエンドミル切削の考察

摩耗予測プログラムは切れ刃のダメージ分布を算出することもできる。図 1 3 に切削実験を行った 4 条件のダメージ分布を示す。

図 1 3(a)では、切れ刃の外周側になるほどダメージが加速度的に増加している。これは工具傾斜が無い場合、最外周の切削点は最も切削速度が速く、最も切削厚さが厚く、切削長さも長くなるためである。

それに対して工具傾斜が傾斜した場合、最も切削厚さが厚くなる点と切削長さが長くなる点が分散されるため、工具傾斜が無い場合よりも緩やかなダメージの分布となる。

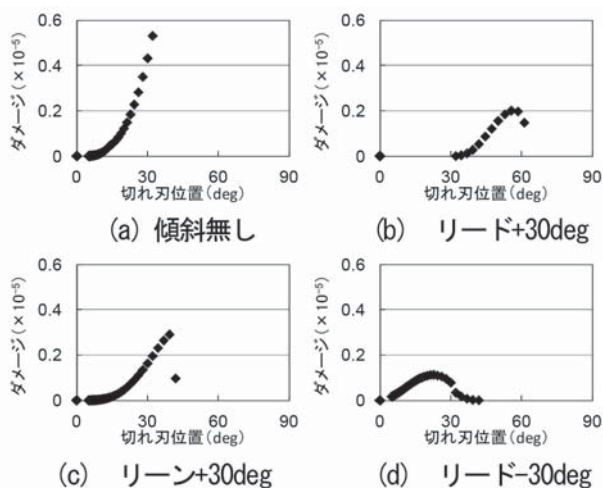
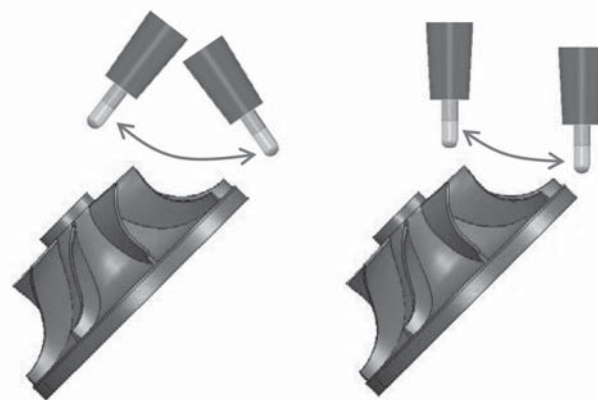


図 1 3 ボールエンドミルのダメージ分布

5. インペラー加工法の提案

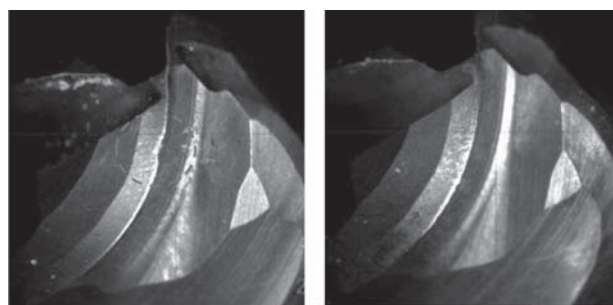
図 1 3 のダメージ分布より、リードがプラスの場合は外周部にダメージのピークが生じ、リードがマイナスの場合は軸中心付近にダメージのピークが生じることが分かった。これをインペラーの加工に応用し、従来の法線ベクトル加工法に対して図 1 4 に示す傾斜軸

一定加工法を提案し、加工実験を行った。図 1 5 に加工後の工具の拡大写真を示す。法線ベクトル加工法においては、切削に寄与する切れ刃の最外周部にダメージが集中し、 $100\mu\text{m}$ 程の逃げ面摩耗が発生している。それに対して傾斜軸一定加工法は工具摩耗が分散されるため、目立った摩耗は観察されなかった。



(a)法線ベクトル加工法 (b)傾斜軸一定加工法

図 1 4 インペラー加工法



(a)法線ベクトル加工法 (b)傾斜軸一定加工法

図 1 5 加工後の工具摩耗

6. 結 言

- (1) 切削抵抗の予測が可能な幾何学解析プログラムを作成し、有効性を確認した。
- (2) 工具の摩耗予測プログラムを作成し、有効性を確認した。
- (3) インペラーの加工法として傾斜軸一定加工法を提案し、有効性を確認した。

参考文献

- [1] 笠原和男ら：ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測(第 1 報), 精密工学会誌, vol.69, No.3, pp.396-401(2003)
- [2] 笠原和男ら：ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測(第 2 報), 精密工学会誌, vol.69, No.4, pp.524-529(2003)

長崎乳酸菌ライブラリーを活用した加工食品の開発

食品・環境科	主任研究員	松 本 周 三
食品・環境科	科 長	河 村 俊 哉
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 一
食品・環境科	主任研究員	田 畑 士 希
食品製造企業		

戦略プロジェクト研究「長崎県産物由来の乳酸菌及び酵母を活用した加工食品の開発」(平成 21 ～ 23 年度)において、長崎県産の発酵食品や農産物から乳酸菌 623 株を分離した。得られた菌の食品に寄与する機能、例えば健康機能性、保存性、呈味性を調べることで有用微生物を獲得した。しかし、乳酸菌をより幅広い製品に対して使用したいという要望があるため、様々な原料及び複数菌での発酵条件検討等を行い、乳酸菌の高度利用、有効活用を行えるよう研究開発を発展させる必要がある。本研究では、MRS 培地で乳酸菌を培養したときの乳酸等の有機酸及び遊離アミノ酸の産生量、または DPPH ラジカル消去活性測定法を用いて調べた抗酸化能試験の結果から、20 菌株を乳酸菌ライブラリーから選抜した。また、そのうちの 10 菌株の糖の資化性及び消化液耐性を調べると共に、実際に食材加工の指標となるように多種類の農産物に乳酸菌を添加し、24 時間後の pH について調べた。さらに、得られた結果を参考に、長崎県内で生産が盛んな農産物を中心に乳酸発酵食品の試作を行った。

1. 緒 言

近年、メタボリックシンドローム等により医療費が増加する中、毎日の食事を通じて健康を維持していくことが重要とされる。県内食品業界においても健康機能に重点が置かれ、また、安心安全の観点から古来より利用される微生物による機能性の付加が望まれている。さらに、地域資源、未利用資源の利用に乳酸菌を含めた微生物の活用は有効であり、付加価値向上のための手段として研究開発が求められている。このことを受けて、平成21～ 23年度戦略プロジェクト研究「長崎県産物由来の乳酸菌及び酵母を活用した加工食品の開発」を行い、県内で生産される発酵食品等から乳酸菌623株を獲得した。これらの菌株の有機酸やアミノ酸産生能を調べ、有用と思われる菌をライブラリーとしてまとめた。しかし、乳酸菌をより幅広い製品に対して使用したいという要望があるため、菌株の特徴をより詳細に調べ、ライブラリーの充実を図ると共に、様々な原料及び複数菌での発酵条件検討等を行い、乳酸菌の高度利用、有効活用を行えるよう研究開発を発展させる必要がある。

そこで、得られた乳酸菌のMRS培地中の有機酸、遊離アミノ酸分析の結果及び1,1-ジフェニル-2-ピクリルヒドラジル(DPPH)ラジカル消去活性測定法を用いた抗酸化能試験の結果から、特徴を有した10菌株を選抜した。それらの乳酸菌について人工消化液耐性試験

を行い、また、発酵可能な食材の指標となるように、糖の資化性試験を行った。さらに、情報をわかりやすく提供するため、実際の食材、今回は多種類の農産物に乳酸菌を添加し、pHの値から発酵の状態について調べた。

2. 実験方法

2.1 有機酸分析及び遊離アミノ酸分析

成分分析及び抗酸化能試験用のサンプルには、MRS 培地に各乳酸菌を植菌後、37℃、48時間嫌気条件下で培養した培養液を遠心分離し、その上清を用いた。有機酸分析はHPLC Waters 660 (ウォーターズ社製)、Waters 431電気伝導度検出器を用い、pH緩衝化法¹⁾で行った。カラムはOrganic Acid(7.8mm × 300 mm × 2)(日本ウォーターズ社製)、カラム温度は40℃、移動相には5 mMp-トルエンスルホン酸水溶液、緩衝液には100 μM EDTA・2Na及び20 mM Bis-Trisを加えた5 mMp-トルエンスルホン酸水溶液を用いて、流速は移動相、緩衝液共に0.8 ml/minとした。サンプルは10倍希釈した後、0.45 μmのフィルターでろ過したものを用いた。遊離アミノ酸分析には0.22 μmのフィルターでろ過したサンプルをアミノ酸分析装置JLC-500 (日本電子社製)に供した。

2.2 抗酸化能試験

抗酸化能試験には、須田らの方法を一部改変したDPPHラジカル消去活性測定法²⁴⁾を用いた。サンプルは12.5倍希釈し、ブランクには純水、コントロールには乳酸菌培養液と同じ処理を行ったMRS培地を用いた。400 μ M DPPH エタノール溶液、0.2 M MES 緩衝液 (pH 6.0) 及びエタノールを同量混合し、96穴プレートに150 μ L分注、サンプル 50 μ Lを加え攪拌し、室温で20分間反応した。その後、マイクロプレートリーダーで520 nmの吸光度を測定した。ブランクに対するDPPHラジカルの消去能を相対比として算出した。

2.3 人工消化液耐性試験

胃液耐性試験は、まず、MRS液体培地5 mLに各乳酸菌を植菌し、37°C、嫌気条件下で24時間培養した。ペプシンを加えたMRS液体培地4.5 mLに、24時間培養後の乳酸菌懸濁液を0.5 mL加えた。MRS液体培地は懸濁液添加時、6 M 塩酸を加え、pH 2.5、ペプシン終濃度0.32%になるよう調製した。懸濁液添加後37°Cでインキュベートし、0、1、2、3、6時間後の生菌数を測定した。生菌数の測定はMRS寒天培地を用いた。

腸液耐性試験には0.2 μ mのフィルターで滅菌ろ過した胆汁末溶液を、終濃度0.4%になるよう加えたMRS液体培地4.9 mLに、25%パンクレアチン懸濁液0.05 mL、pH 3.0の人工胃液処理(37°C、3時間)した乳酸菌懸濁液0.05 mLを加えた。37°Cでインキュベートし、48時間後までの600 nmのODを測定し、増殖曲線を作成した。

2.4 糖の資化性試験

乳酸菌ライブラリーから選抜した菌株について、糖の資化性を調べた。資化性試験はシスメックス・ビオメリユー社製 api 50CHL培地及びapi 50CHを用いて行い、48時間後の結果を採用した。

2.5 農産物発酵試験

農産物はミキサーで粉碎後、約10 mLずつ分け、オートクレーブで110°C、10分間の殺菌を行った。植菌用の乳酸菌は1 mLのMRS培地で嫌気条件下、37°C、24時間培養した。培養液を遠心分離し、上清を除去した。菌体を生理食塩水で洗浄後、最少容量の生理食塩水で懸濁し、植菌した。24時間後のpHを測定し、その値から発酵力を評価した。

2.6 乳酸発酵トマトジュース試作試験

トマトをミキサーで破碎後、80°C、30分間加熱した。1/100量のMRS培地に各乳酸菌を培養し、集菌、生理食塩水で2回洗浄後、最少容量の生理食塩水に懸濁して添加した。37°C、48時間後のpHを確認後、固相マイクロ抽出(SPME) GC/MSで香気成分分析を行った。測定は240-GC/MS (バリアン社製)、カラムはDB-WAXetr (アジレント社製)、長さ60 m、内径0.25 mm、膜厚0.25 μ mを用いた。カラムオープン温度は40°Cで1分間保持、190°Cまで3°C/minで昇温、240°Cまで10°C/minで昇温後、9分間保持した。キャリアガスはHe、流量1.2 mL/min、SPMEはDVB/CAR/PDMS (シグマアルドリッチ社製)を用い、スプリット比は1:1、注入口220°C、検出器240°C、m/z 35-350で分析を行った。

3. 結果及び考察

便宜上、各乳酸菌は番号で記してある。

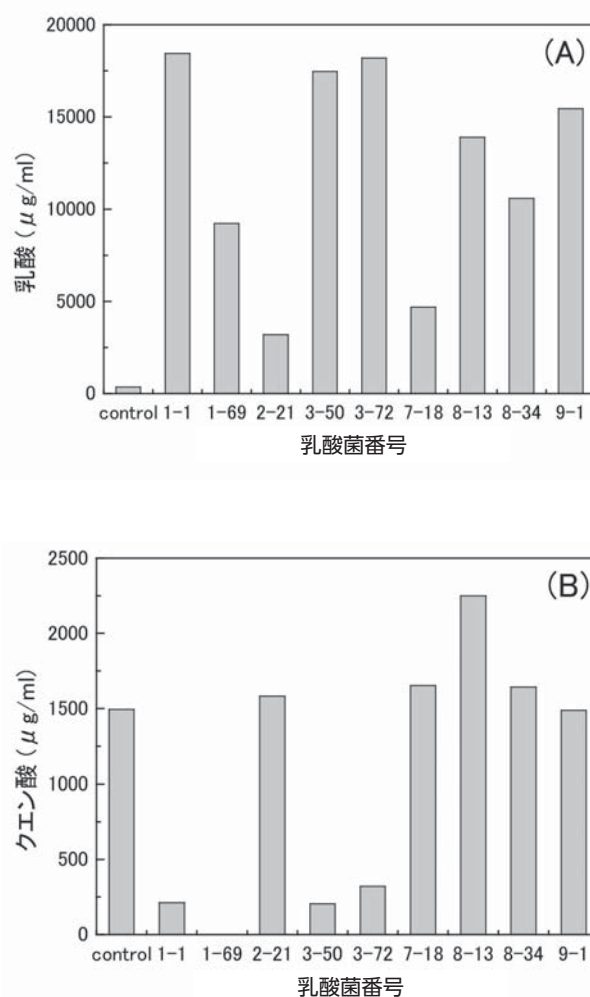


図1 乳酸菌培養液の有機酸含有量
(A) 乳酸、(B) クエン酸

食品加工に利用するため、図1 (A)に示すように乳酸の産生が比較的多い菌を選抜した。(10-16は都合により除いている。)ただし、図1 (B)に示すように乳酸の産生に伴ってクエン酸を消費する菌と消費しない菌があることから、酸味の質や持続時間を変化させるこ

とが期待される。また、クエン酸の減少はジアセチル等の香気成分の生成に影響していることが考えられるため、味だけではなく風味の改善も期待される。

アミノ酸について図2に示す。アスパラギン酸とグルタミン酸の旨味系アミノ酸(A)、グリシン、アラニン、トレオニン、セリン、グルタミンの甘味系アミノ酸(B)、 γ -アミノ酪酸(GABA)の機能性アミノ酸(C)に分けて示した。3-47、3-50、3-72は旨味系、甘味系アミノ酸共に大幅な増加は見られず、逆に消費しているアミノ酸が見られた。一方で8-13、8-34、9-1は多くのアミノ酸が増加しており、味に厚みを持たせる効果が期待された。また、GABAの増強が期待できる乳酸菌も選抜しており、グルタミン酸を多く含む原料については機能性を付加した製品の開発が期待される。

DPPHラジカル消去活性測定試験において、コントロールに対して5%以上の消去率が見られた株を図3に示した。乳酸発酵による抗酸化能の上昇は、乳酸菌の代謝によって産生される複数の物質が要因と考えられているが、未だ明らかになっていない。このことについては、より詳細な成分分析や他の方法での抗酸化能測定も必要と考えられ、今後も検討の継続を要する。

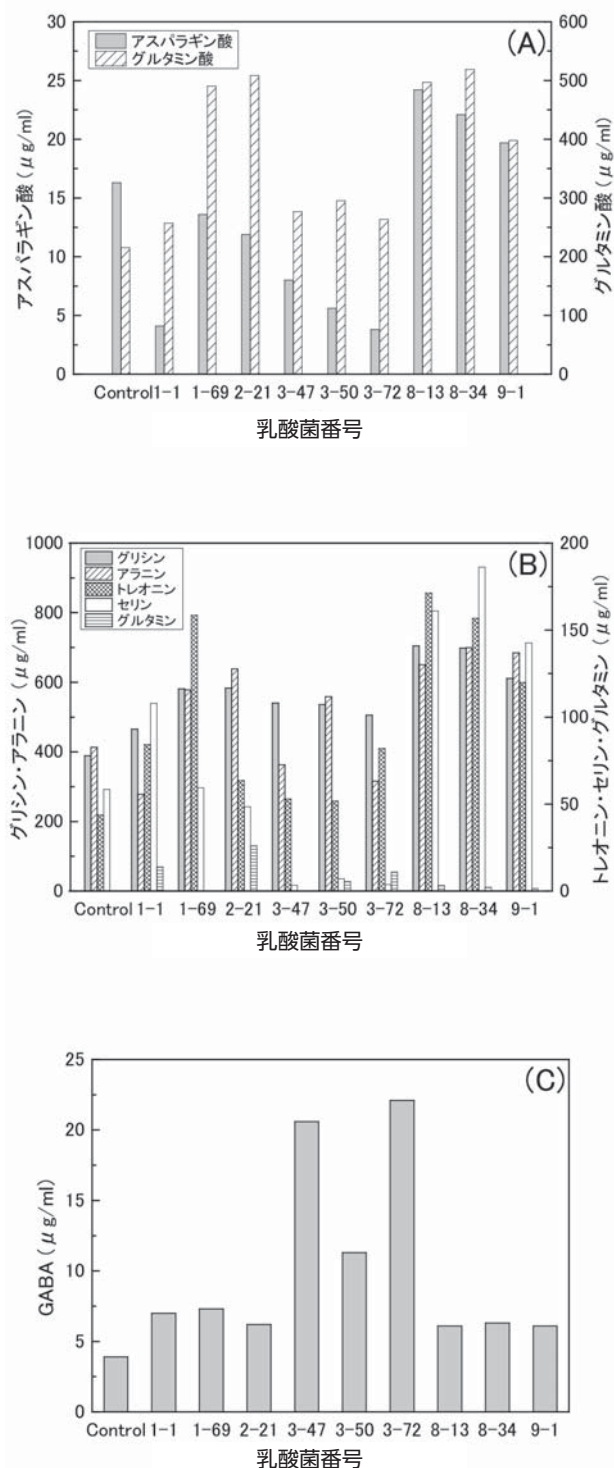


図2 乳酸菌培養液のアミノ酸含量
(A)旨味系アミノ酸、(B)甘味系アミノ酸、
(C)機能性アミノ酸(GABA)

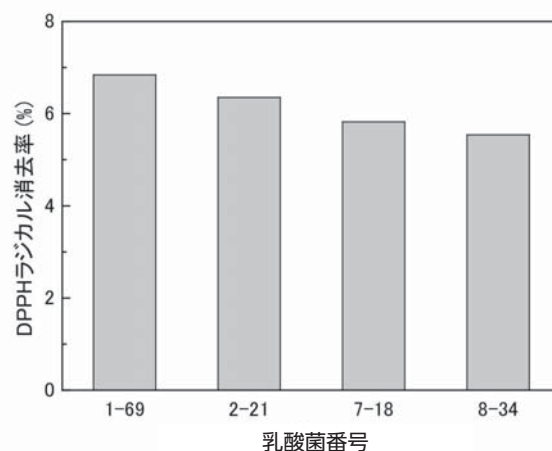


図3 DPPHラジカル消去活性

人工消化液耐性試験のうち胃液耐性試験において、処理後3時間で50%以上の生菌率を示した4株を図4に示した。人工腸液耐性試験では処理後24時間までに顕著に増殖した5株について、その増殖曲線を図5に示した。1-1、3-72、8-34株については、胃液、腸液の両方に耐性が見られ、消化管内での生存及び増殖が可能であり、プロバイオティクス製品開発への利用が考えられる。

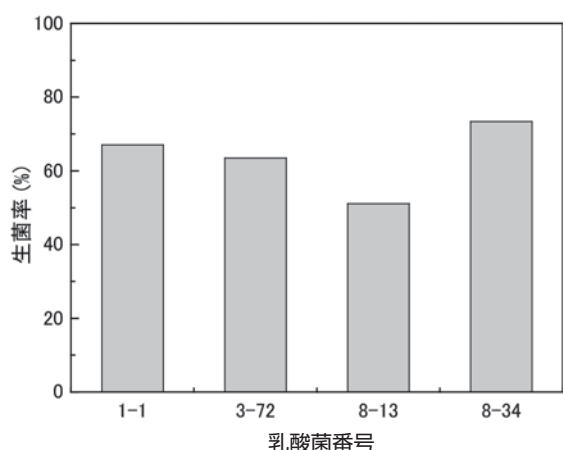


図4 人工胃液処理3時間後の乳酸菌の生存率

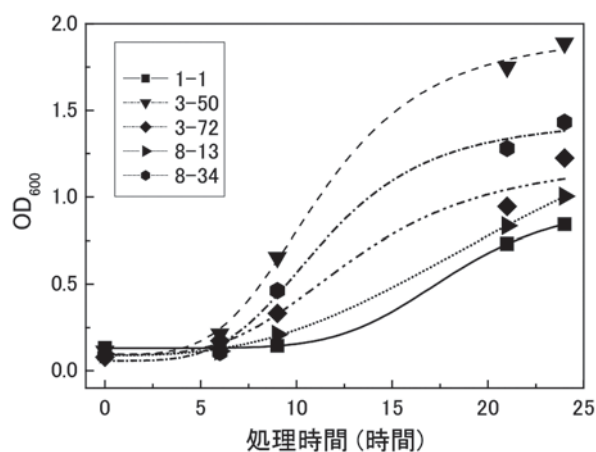


図5 人工腸液処理中のOD600の変化

乳酸菌の糖の資化性について表1に示す。1-1、3-72、10-16は資化できる糖の種類が豊富である。また、これらの菌株は有機酸の生成量が多く、人工消化液に対する耐性も比較的高いことから、発酵力に優れていることがうかがえる。特に、乳酸菌は自らが産生した乳酸によって死滅してしまうため、食品加工時におけるpHの迅速な低下には、糖の資化性と酸に対する耐性は非常に重要と考えられる。表2に示すように実際の食材でも、上記3株の発酵物は発酵開始後24時間以内で食品保存のための一つの目安とされるpH 4.0より低くなっている。

これらの結果からいくつかの菌株を用いて乳酸発酵トマトの試作を行った。48時間後のpHは、そのほとんどが4.0以下となっており、十分に発酵しており、味、

香りにもそれぞれの菌株の特徴が見られた。一例として発酵前のトマトと3-50で乳酸発酵させたトマトとの香気成分を比較すると、図6のようにトマトの青臭みであるヘキサナール及びシス-3-ヘキサナールの減少が見られた。これらの成分はトマトの香気成分の中でも全体の香気に対する寄与率が高いことが知られており、トマトの青臭みが苦手な人にも飲みやすいジュースになっていると言えることができる。ただし、48時間で発酵では酸味が強くなることもあり、今後さらなる改善が必要である。

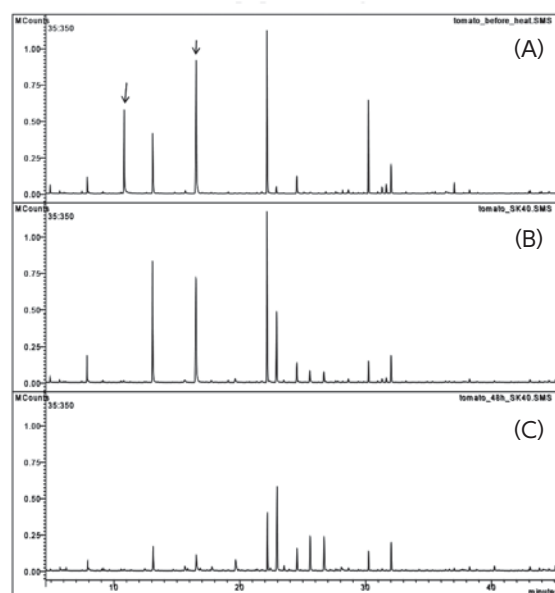


図6 乳酸発酵前後のガスクロマトグラム
(A) 発酵前、(B) 24時間後、(C) 48時間後

4. 結 言

本研究で選抜を行った菌について、その情報を増やし、また、それらを整理することにより、多様な商品開発をおこなうための足掛かりとなった。現在、複数の県内食品企業と商品開発を進めており、長崎乳酸菌ライブラリーを使用した研究開発及び商品開発は広がりを見せている。

今後も長崎乳酸菌ライブラリーを利用した商品開発を提案すると共に、本研究で得た知見を企業へと提供していく。

参考文献

- [1] 林 守正. 島津評論. 1992, 49 (1-2), p. 59-64.
- [2] 須田郁夫. “抗酸化機能 ①分光学的抗酸化機能評価”. 食品機能研究法. 光琳, 2000, p. 218-223.

表1 乳酸菌の糖の資化性

Box No.	1-1	1-69	2-21	3-47	3-50	3-72	8-13	8-34	9-1	10-16
D-Arabinose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Arabinose	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+
D-Ribose	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
D-Galactose	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
D-Glucose	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
D-Fructose	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
D-Mannose	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Inositol	-	-	-	-	-	-	-	-	+	±
D-Mannitol	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+
D-Sorbitol	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
N-Acetyl glucosamine	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Amygdalin	+	-	-	+	+	+	+	+	±	+
Arbutin	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
D-Cellobiose	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
D-Maltose	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
D-Lactose	+	+	-	±	+	+	+	+	-	+
D-Sucrose	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
D-Trehalose	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
D-Raffinose	+	-	-	+	+	+	+	+	-	+
D-Fucose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L-Fucose	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D-Arabitol	±	-	-	-	-	-	-	-	-	±
L-Arabitol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

"+, positive; ±, weak positive; -, negative"

表2 食品素材の発酵試験

Box No.	1-1	1-69	2-21	3-47	3-50	3-72	8-13	8-34	9-1	10-16
ショウガ	◎	×	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	◎
イチジク	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎
ナシ	◎	×	○	◎	◎	◎	○	×	○	◎
スイカ	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎
カボチャ	◎	○	○	◎	◎	◎	○	○	○	◎
ダイコン	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎
キャベツ	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
ナス	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎
ブロッコリー	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎

◎; <pH 4, ○; >pH 4, ×; 変化なし

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 ～ 九十九島パールシー リゾートのオリジナル製菓の開発 ～

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
有限会社 草加家 代表取締役	高 木 龍 男
させぼパール・シー株式会社 取 締 役	原 田 誠一郎
させぼパール・シー株式会社 販売課係長	辻 佳代子

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、このリゾートの土産物にふさわしいオリジナル商品の開発が要望されていた。そこで、この地は古くから真珠養殖が盛んなことから、真珠にちなんだ食品について着目した。真珠母貝であるアコヤ貝の貝殻真珠層粉末は既存添加物であるが、使用例が少ないことから、まず、その規格試験等により安全性を確認した。次に真珠層粉末を用いて製菓の試作を行い、「真珠のたまてばこ」と名付けたオリジナル商品を開発した。

1. 緒 言

九十九島は、本県佐世保港より北へ数十キロメートルにわたるリアス式海岸で、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を地元リゾート会社から要望されていた。

この地域の豊かな海を利用して真珠の養殖がさかんに行われている。しかしながら、真珠の生産に伴い、養殖後、母貝であるアコヤ貝の貝殻が大量に廃棄され、この未利用資源の貝殻の活用も望まれていた。そのため、貝殻真珠層を粉末化し化粧品の開発について報告した^[1]。

一方、食品分野においては、真珠層粉末は貝殻未焼成カルシウム(別名：貝カルシウム)の名称の既存添加物になっている。そこで、食品添加物として使用された例が少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オリジナルな製菓の開発を行った。

2. 研究材料及び方法

2-1 研究材料

柚子は壱岐市、生地に用いた乾燥おからは九一庵食品協業組合(大村市)のものをを用いた。九十九島産(佐世保市)アコヤ貝貝殻真珠層の粉末(平均粒径 $1\mu\text{m}$)は、社会福祉法人 大村パールハイムのものを使用した。

2-2 真珠層粉末の既存添加物としての試験

既存添加物であるアコヤ貝真珠層粉末の試験は、既存添加物自主規格に準じて行った^[2]。内容は、炭酸カルシウム含量、性状、確認試験(カルシウム塩の反応、加熱による変色)純度試験(塩酸不溶物、重金属、ヒ素)、乾燥減量である。

また、急性経口毒性試験はマウスを用いて行った。試験群には真珠層粉末を2000及び300mg/kgを、コントロール群(0mg/kg)には溶媒対照として注射用水を雌雄マウス群(各5匹)に単回経口投与し、14日間観察を行った。

さらに、一般細菌、大腸菌、大腸菌群、酵母、カビ、耐熱性芽胞菌、黄色ブドウ球菌、緑膿菌、サルモネラ属菌、腸炎ビブリオ、及びノロウイルスの微生物試験(11種)を行った。

2-3 試作品の破断強度の測定

(株)山電クリープメーター(型式RE2-33005B)を用いて、最大荷重20Nあるいは200Nのロードセルを使用した。プランジャーは全て同社No.49(V型、幅30mm、底幅1mm)を使用した。条件は、測定速度1mm/sec、格納ピッチ0.1 secで行った。試作品は、脱酸素剤を入れて包装し24及び35℃で保存したものを用いた。1回の試験に試作品を2個用いて測定し、結果はその最大破断荷重の平均値として算出した。

3. 結果および考察

3-1 真珠層粉末の既存添加物及びその他の試験

真珠層粉末の成分分析を行った結果、表1に示すように96%が灰分で残りは水とタンパク質等の有機物で構成されていることがわかった。

表1 真珠層粉末の成分分析

項 目	重量 (%)
水 分	0.5
タンパク質	2.0
脂 質	0.0
炭水化物	1.5
灰 分	96.0

真珠層粉末を食品添加物として使用するために既存添加物自主規格試験を行った結果、炭酸カルシウムを94.9%含むことから、前述した灰分のほとんどが炭酸カルシウムと考えられた。さらに、本試験である確認試験、純度試験及び乾燥減量の結果は、全て検査基準を満たした。

マウスを用いた急性経口毒性試験では、真珠層粉末を最大2000mg/kgを投与した場合でも、異常や死亡例は認められなかった。

さらに、方法2-2記載の11種の微生物試験において陰性であることを確認した。

以上の結果から、真珠層粉末の食品への利用は安全性の面で問題ないと考えられた。

3-2 試作品の特長

開発にあたり、真珠層粉末及び県産食材を取り入れながら、工業技術センター、(有)草加家、させぼパール・シー(株)とで検討し、(有)草加家で試作を繰り返した。同時に試食も行いながら、最終的に写真1に示すように真珠を連想させる丸いフォルムの2種類の製菓を開発した。これらは県内産のおからと真珠層粉末を加えた生地、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。

3-3 試作品の細菌試験

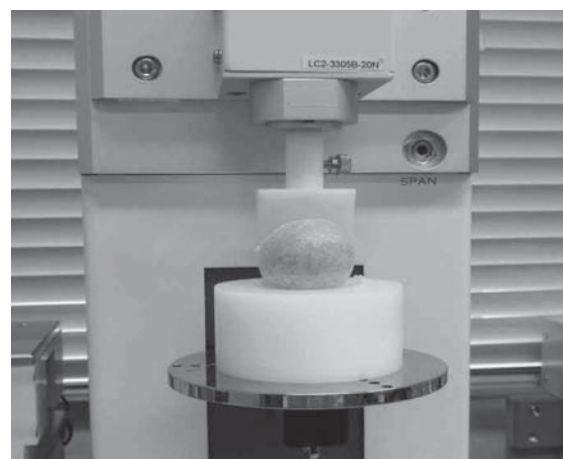
試作品に脱酸素剤を入れて包装後、35℃で保存した。そのサンプルの一般細菌及び大腸菌群試験を月1回の割合で5ヶ月間行った結果、いずれも陰性であること

が判った。同時に、サンプル及び容器の状態も肉眼で見る限り異常がないことを確認した。



写真1 試作した製菓

A



B

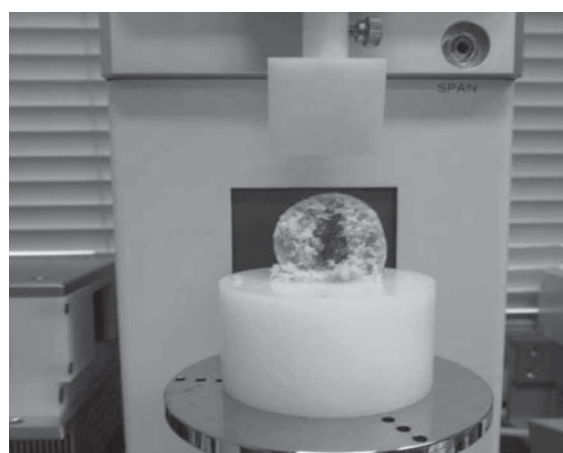


写真2 試作品の破断試験

写真2のA：破断途中、B：破断終了後を示す。

3-4 クリープメーターによる破断試験

試作品の物性を調べるためにクリープメーターによる破断試験を行った。V型プランジャーを上から下へ

移動させ試作品の荷重－歪曲線を測定した(写真2-A、B)。試作品を24及び35℃で2ヶ月保存した場合の結果を図1に示す。横軸の歪率(%)の0はプランジャーが試作品上部に接触している状態であり、100%はプランジャーによって破断が終了し底に達した状態である。一方、縦軸は荷重を示しておりその単位はN(ニュートン)である。歪率90～100%で荷重が急激に上昇しているが、これはプランジャーが底に当たることが原因である。本装置は破断が終了した後、プランジャーが写真2-Bのように自動的に上がるようになっている。上から20%の深さに達した時(歪率20%)にどちらも荷重が最大となった。35℃保存した場合の最大荷重は26Nで、24℃のもの(10N)と比較して2.6倍と高い値を示した。この結果から、保存温度による物性変化があることが推定された。

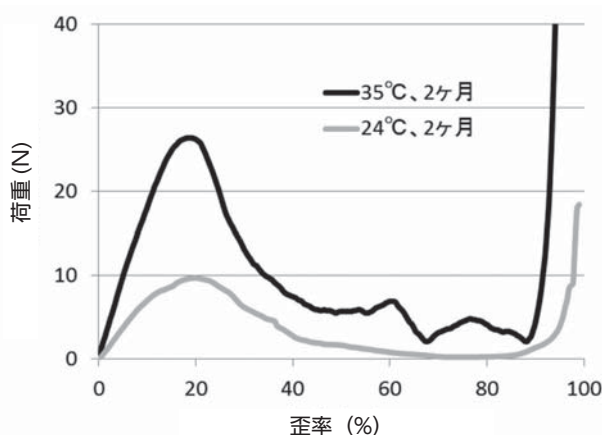


図1 試作した製菓の破断パターン

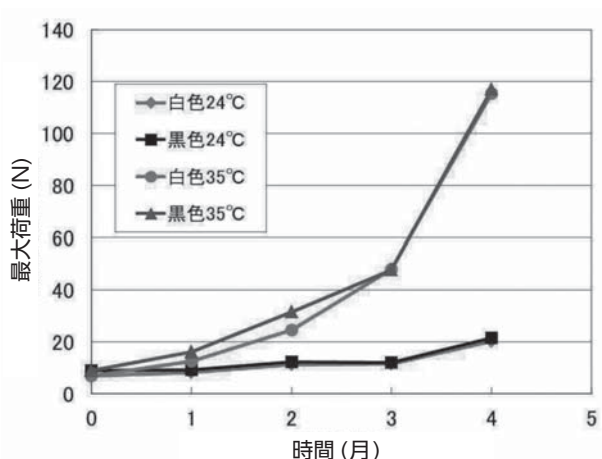


図2 温度及び時間による最大破断荷重の変化

そこで2種類の試作品を24及び35℃で4ヵ月間保存し、毎月測定した最大破断荷重の値をプロットした(図2)。その結果、24℃では白・黒色の製菓共に3ヶ月ま

では最大荷重に変化はなく、4ヵ月になって少し増加した。一方、35℃では24℃と比較して1ヶ月から最大荷重が上昇し、4ヵ月では24℃の場合より約6倍の差があることが明らかになった。実際に試食したところ、35℃のものは24℃のものより硬くなっていた。

以上より、本試作品は高温では物性が変化することから、24℃以下で3ヵ月以内の保存が望ましいと考えられた。

4. 結 言

本研究の結果を基に九十九島パールシーリゾートオリジナルの製菓「真珠のたまてばこ」(2個・6個入り)を開発した(写真3)。



写真3 新商品の真珠のたまてばこ

5. 謝 辞

本研究を行うにあたり、アコヤ貝真珠層粉末を提供して頂きました社会福祉法人 大村パールハイムの田崎 真 理事長にお礼を申し上げます。また、製品化のためにパッケージデザインでご助言を賜りました「テマヒマ」の荒岡 弥生様に感謝いたします。

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.40、pp50-51 (2011)
- [2] 日本食品添加物協会：第4版 既存添加物自主規格、292p (2008)

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

本研究では、分光分析による光学特性（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。そのための基礎的知見として、蛍光性タンパク（糖化生成物）、脂質など、目的物質に加え、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た。また、拡散近似などの解析法による理論的な検証を実施した。

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、生体計測には、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搬する光は散乱し、分光情報はゆがめられる。そのため、生体内の物質を正確に定量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による生体分析に取り組んできた^[2]。散乱補正は、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、簡便化に寄与する。

本研究は、こうした生体計測、散乱補正技術等のノウハウ、知見を、蛍光測定へと活用を図る。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含まれる。平成26年度は、蛍光性を有する糖化タンパク質をターゲットとし、基礎データとなる生体成分の分光データの取得、解析等を行った。

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 吸光スペクトル

吸光に関する光学特性評価を実施するために、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、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

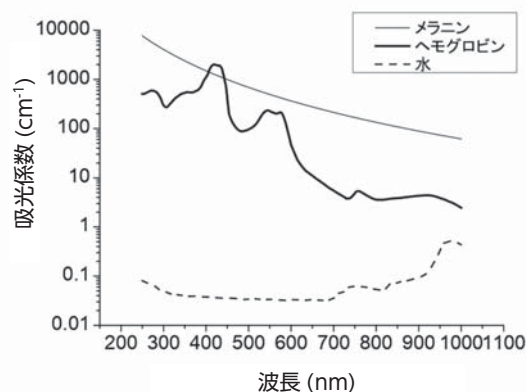


図1 表皮付近の生体成分の吸光係数

は相対的に小さく、水の影響はほぼ無視できる。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る。とりわけ、メラニンは、一部の波長域を除いて、ヘモグロビンより吸光係数は大きく、また、表皮付近の存在量も多いことから、吸光に基づく誤差の支配的要因になることが予想される。

3.2 散乱係数

生体の表皮に含まれる成分及びその量を、人体を破壊して調べることはできないので、疑似サンプルを用いた評価を実施する。人体の散乱性を近似する物質として通常、イントラリピッド(脂質)が用いられる。表皮付近の散乱性とよい一致を示すイントラリピッド濃度を求めるため、所定の濃度のイントラリピッド溶液を調整し、拡散近似、ミー理論を用いて等価散乱係数を求めた(図2)。拡散近似、ミー理論ともに他の文献値^[4]と良い一致を示しており、計算結果の正しさの裏

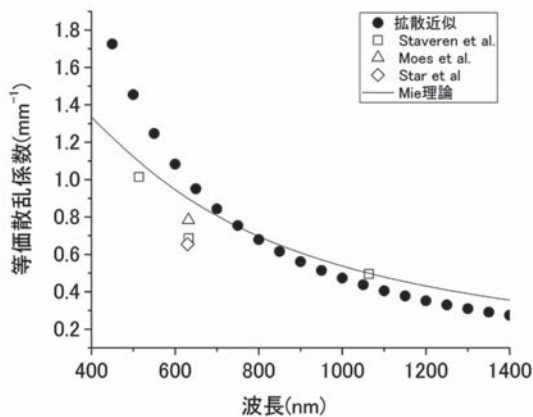


図2 イントラリピッドの等価散乱係数

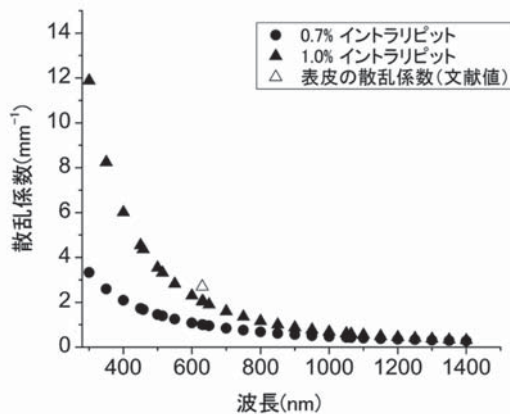


図3 表皮及び濃度の異なるイントラリピッドの散乱係数

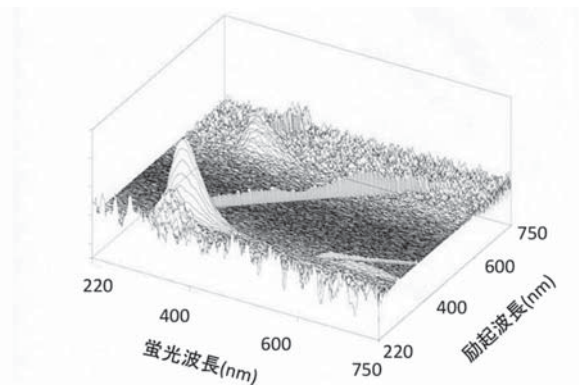
付けとなる。そこで、イントラリピッドの濃度を変化させ、表皮の散乱係数(等価散乱係数に非等方散乱因子を考慮した値)に近い濃度を求めた。イントラリピッド1.0%付近で一致していることから(図3)、表皮を疑似的に表す濃度として1.0%を設定した。

3.3 蛍光検出

糖化タンパク質とアミノ酸の3次元蛍光分析を実施した。図4Aにトリプトファン、図4B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。

糖化タンパク質を正確に定量するには、こうした光学特性の検討結果を踏まえ、夾雑物質の蛍光・吸光の影響、散乱性の違いによる強度低下の影響などを考慮した解析手法を検討する必要がある、現在、これらのデータを用いたシミュレーションに取り組んでいる。

A トリプトファン



B 糖化ヒト血清アルブミン

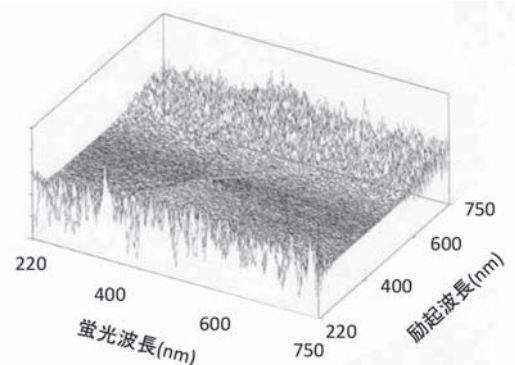


図4 3次元蛍光スペクトル

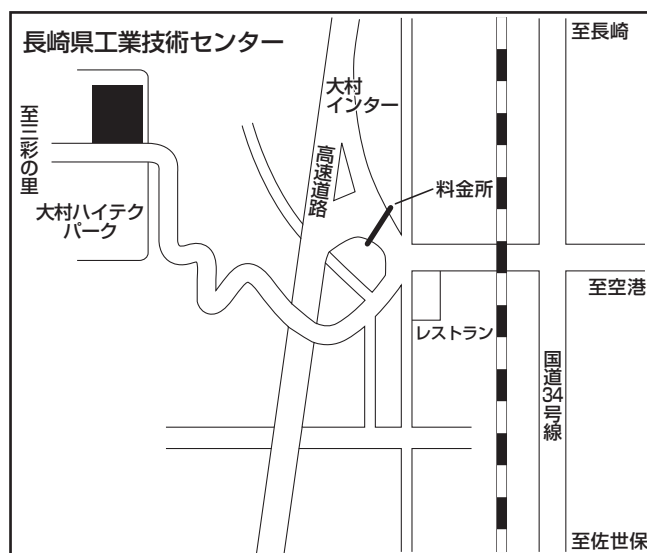
4. 結 言

吸光分析により、生体に含まれる主たる成分の吸光特性、また、散乱係数の測定・計算により、表皮の散乱性と疑似サンプル調整における条件設定、さらには、蛍光分析により、糖化タンパク質とアミノ酸の蛍光性の差異等について知見が得られた。これらの知見、データをもとに、今後、最適な測定システムについて検討を行っていく。

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 Absorption of Melanin, <http://omlc.org/spectra/melanin/> (アクセス日:2015.05.07)
- [4] 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27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。