

平成24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.42

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 環境養殖技術センター 養殖技術科 科 長 山 本 純 弘	
長崎県総合水産試験場 水産加工開発指導センター 加工科 科 長 岡 本 昭	
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 科 長 阿 部 久 雄	
長崎県窯業技術センター 環境・機能材料科 専門研究員 永 石 雅 基	
2. 複合センサを用いた遠隔監視装置の開発	3
機械システム科 科 長 田 口 喜 祥	
3. 超小型軽量薄膜材料マニピュレータの開発	8
機械システム科 主任研究員 入 江 直 樹	
長崎大学大学院 教 授 石 松 隆 和	
4. 微細ピンの自動測定システムの開発	11
機械システム科 主任研究員 小 楠 進 一	
5. 高性能な非破壊「糖・酸度計」の実用機開発	14
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	16
電子情報科 主任研究員 堀 江 貴 雄	
電子情報科 科 長 指 方 顕	
協和機電工業株式会社 事業開発部電子技術プロジェクト グループ長 酒 井 寿美雄	
7. 食品に含まれる微生物の簡易検出装置の開発	19
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	24
研究企画課 課 長 兵 頭 竜 二	

9. DLC 膜形成技術開発と精密産業への展開	27
所 長	馬 場 恒 明
ファインコーティング株式会社 代表取締役社長	古 田 英 司
ダムシュタット工科大学 教 授	W. Ensinger
10. 精密機械加工における環境に優しい冷却システムの開発	31
工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
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1報）	35
工業材料科 主任研究員	重 光 保 博
12. ポリイミド樹脂の高機能化とフィルム基板への応用	38
工業材料科 主任研究員	市 瀬 英 明
佐世保工業高等専門学校 教 授	古 川 信 之
13. 複雑形状部品の高効率加工技術の開発	41
工業材料科 研 究 員	福 田 洋 平
工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
14. 県産地域資源を活用した調味料素材の開発	43
食品・環境科 主任研究員	玉 屋 圭
食品・環境科 主任研究員	芋 川 あゆみ
食品・環境科 研 究 員	前 田 正 道
15. 長崎乳酸菌ライブラリーを活用した加工食品の開発	46
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	芋 川 あゆみ
食品・環境科 主任研究員	玉 屋 圭
	食品製造企業

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	環境養殖技術開発センター	養殖技術科 科 長	山 本 純 弘
	水産加工開発指導センター	加 工 科 科 長	岡 本 昭
	長崎県窯業技術センター	環境・機能材料科 科 長	阿 部 久 雄
		専門研究員	永 石 雅 基

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。我々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ている。

本研究開発の1年目である本年は、輸送想定魚のアンモニア排泄量の評価を行い、その結果を用いた活魚輸送装置（試作機）の製作を行った。

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年前から中国市場へ輸出を行っているが、航空便を利用した輸出のため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。

本研究では、活魚を長時間輸送する際の収容条件等を把握し、効率よく運搬できる装置を開発することで海外への活魚出荷を実現する技術の開発を目指した。

2. 実験材料及び実験方法

2.1 実験材料および使用機器

飼育実験には、長崎県総合水産試験場にて種苗生産され、同試験場にて飼育された約1kgのクエを用いた。

クエの飼育実験には、平成21年度に製作した活イカ輸送装置（飼育水槽容量200L）の、電解槽と反応槽を変更したものを用いた。電解槽と反応槽は当センターで開発試作したもの^[2]で、電解後の陽極水と陰極水を

分離できる構造となっている。

2.2 実験方法

クエの飼育実験は、クエ20個体（合計重量20.5kg、収容密度10.2%）を個別収容かごに収容し、飼育水温18℃で飼育水槽内に空気曝気を行いながら、前述した活イカ輸送装置（飼育水量200L）で、閉鎖循環にて7日間実施した。

実験開始から72時間（3日目）までは電解を行わず、得られたアンモニア濃度のデータはクエのアンモニア排泄量を評価するために利用した。その後の4日間は昼間だけ適切な電流値で電解を行なって、飼育水中のアンモニアを除去しながらクエの状態を観察した。

自動制御装置（試作機）と活魚輸送装置（試作機）は、クエの飼育実験から得られたデータを基に、海水浄化装置の能力を決定し、入札によって選定された県内企業に対して仕様を提示して委託製作を行った。

3. 結果と考察

3.1 クエの飼育実験

飼育期間中のDOは6.7～7.5 mgO/Lで推移し、問題無いことを確認した。飼育水中のアンモニア濃度は、電解を行わなかった72時間後に13ppmまで上昇した（図1）。この結果から、18℃におけるクエのアンモニア排泄量を評価した。18℃におけるクエのアンモニア排泄量を評価する実験は、本実験も含めて計3回行い、その値を海水浄化装置の能力決定に利用した。

その後、電解装置を稼働させて脱アンモニアを行った。電解を行なっている間は飼育水中のアンモニア濃度が減少し、電解停止後は上昇するという挙動を示し、実験終了まで9～13ppmの間で推移した。

実験終了後、実験に使用したクエは全数生存しており、蓄養水槽(かけ流し)に戻しても活力ある状態であることを確認した。

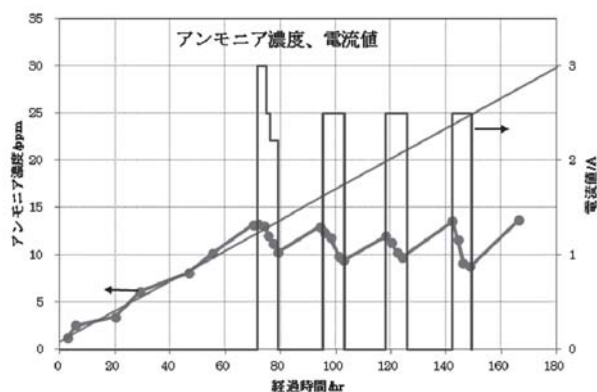


図1 クエの飼育期間中のアンモニア変化

3.2 自動制御装置(試作機)の製作

本装置(図2)は、電源・制御部とアンモニアと次亜塩素酸の自動測定部から構成されている。電源・制御部は、活魚輸送装置を構成する機器毎にブレーカを設置し、輸送期間中における飼育水中のアンモニア濃度と次亜塩素酸濃度、電流値、電圧、飼育水温、流量等のデータを記録し、自動測定部にて収集されたデータを基に電解槽を制御する機能を有する。自動測定部は、循環ラインの2ヶ所のアンモニア濃度の測定と、飼育水槽に戻る直前の次亜塩素酸濃度を一定時間毎に自動で計測し、制御部に送信する機能を有する。

3.3 活魚輸送装置(試作機)の製作

飼育水槽容量200Lの装置(図3)を2基製作した。本装置は、18℃で20kgのクエを1週間飼育するために必要となる機能を有し、飼育水槽、排水タンク、冷却装置、電解による脱アンモニア装置、泡沫分離装置、物理濾過、循環ポンプ、曝気装置、無停電電源装置、および前記した自動制御装置(試作機)で構成されている。輸送水槽には空気抜き弁を設置して空気を排出する構造としており、輸送中の水槽内の空気層をできるだけ少なくして飼育水の揺れを抑制し、輸送中の振動のストレスをできるだけ輸送魚に与えないように工夫した。また、1基には長崎県窯業技術センターが開発した光触媒ユニットを装備している。

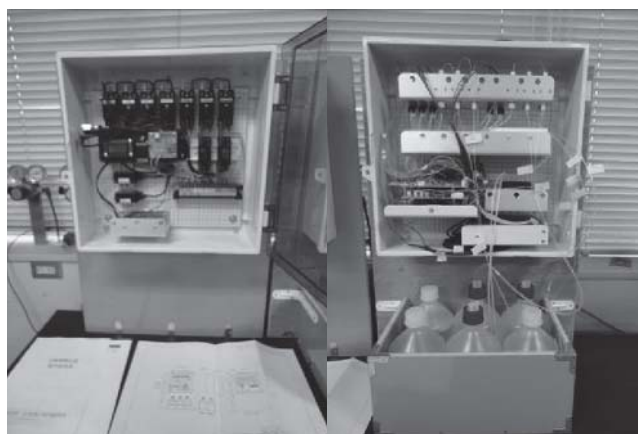


図2 製作した自動制御装置(試作機)の外観
左：電源・制御部、右：自動測定部



図3 製作した活魚輸送装置(試作機)の外観

4. 結 言

本事業は、これまで実施してきた海水魚を閉鎖循環系で飼育するための技術開発成果を活魚輸送に活用するもので、本事業終了後に実用化されることを目指している。

今年度は、平成25年度に実施予定の海外への活魚輸送実験に使用するための活魚輸送装置試作機の製作を行った。

本事業2年目となる平成25年度は、この輸送装置試作機を使って中国への活魚輸送実験を行う予定としている。

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、黒川由美：長崎県工業技術センター研究報告、40、52-55(2010).

複合センサを用いた遠隔監視装置の開発

機械システム科 科長 田 口 喜 祥

機械装置、移動ロボット、農業用ロボットなどの動作異常を離れた場所で把握したいという要望がある。従来このような要望に対して、TVカメラの映像による異常判別や、センサでの計測値を基にした異常判別が行なわれていた。一方、人間が機械装置の異常を調べる場合は、目視による観察と同時に作動音や振動などにも気を配り、総合的に判断して異常診断を行っている。そこで本研究では、画像情報と複数のセンサ信号の情報を複合して処理することで異常を検出する遠隔監視装置の開発を行った。実証試験の結果、有効性を確認した。

1. 諸 言

NC工作機械、天井クレーン、移動ロボット、農業用ロボットなど、常時人間が監視することが難しい機械装置が正常に動作しているかを把握したいという要望がある。このような要望を実現する手段としてTVカメラの映像を用いる手法や、特定のセンサを用いて現象を観察する手法が知られている。画像から異常を検出する手法としては、大津により提案された高次自己相関(High order local autocorrelation、以下HLACと記す)特徴^[1]や、これを動画像に対応できるように拡張した立体高次局所自己相関(Cubic higher order local autocorrelation、以下CHLACと記す)特徴^[2]と部分空間法を組み合わせた異常検出法が多く使用され、成果を上げている。

一方、人間が機械装置の異常を調べる場合、目視による観察と同時に機械の作動音や振動などを観察し、総合的に判断して装置が正常に動作していることを確認している。

そこで本研究では、画像情報と同時にセンサ信号からの情報を取得し、コンピュータにより複合処理を行うことで異常を検出し、携帯電話やスマートフォンに通知を行うことで、異常を遠隔地で検出可能な遠隔監視装置の開発を行うことを目的とする。そのために、平成22年度は、複合センサを用いた遠隔監視装置の基本となる画像からの特徴量の抽出と異常検出を行うプログラムの開発を行った。平成23年度は、各種センサを複合して処理する装置を開発するために必要な複合処理プログラムの開発を行った。また、開発したプログラムを、画像と距離画像を同時に取得できるKinectセンサ^[3]に応用した。Kinectセンサは、もともとはゲーム機用のモーションセンサとして発売されたが、リアルタイムで画像と距離画像を取得可能であり、安価に入手できるため、認識用センサやロボット用センサとして応用するための研究が数多くなされている^{[4] - [6]}。

平成24年度は、複合センサを用いた遠隔監視装置のデモ装置を製作するとともに、県内企業の要望に合わせた改良を行い、実証試験を行った。

2. システム構成

開発する遠隔監視装置のシステム構成を図1に示す。画像はTVカメラで取得し、センサ信号はワンチップコンピュータなどで構成された信号処理装置で前処理を行った後、パソコンへ送られる。パソコンではTVカメラで取得した画像から特徴量を抽出し、信号処理装置から得られたセンサ信号の特徴量と複合して処理することで異常を検出する。異常を検出した場合は、スマートフォンや携帯電話に電子メールなどで通知する。

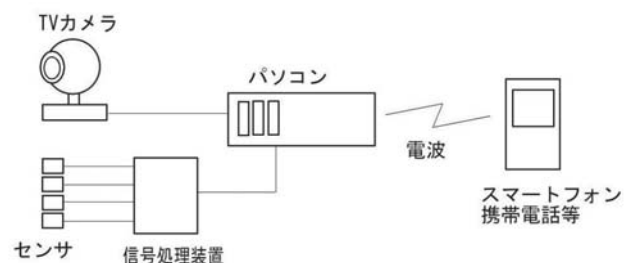


図1 遠隔監視装置のシステム構成

このような監視装置を開発するために、以下に示す3種類の異常検出プログラムを開発した。

- 1) 画像からの異常検出
- 2) 画像と距離画像からの異常検出
- 3) 画像とセンサ信号からの異常検出

それぞれについて以下に詳しく記述する。

2.1 画像からの異常検出

初めに、画像から異常を検出するプログラムについて

て検討を行った。検討の結果、汎用性の高さから大津により開発されたHLAC^[1]を用いて画像から特徴点を抽出し、HLACの特徴ベクトルと部分空間法を組み合わせ異常を検出するプログラムを開発することにした。取得した画像を差分処理した後、ラプラシアンフィルタやCANNYフィルタにより境界抽出を行い、その後二値化処理をして、得られた二値画像からHLAC特徴を求めた。HLAC特徴は図2に示す25個の画像マスク^[1]を用いて25次元のベクトルを抽出することで取得する。25次元の特徴ベクトルを取得後、統計的手法により判別関数^[7]を導出して異常の検出を行った。

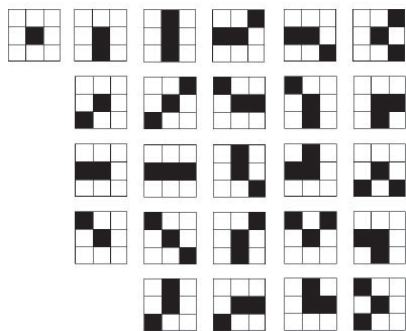


図2 二値化画像に対するマスクパターン

HLACで取得する特徴量は、図2に示した3×3ピクセルの画像マスクにより取得するが、画像のサイズによってはテクスチャ情報による判定のみが実施され、形態情報が十分に反映されない可能性が考えられる。そこで、画像ピラミッド^[8]の手法を用いて解像度が異なる3枚の画像からHLACを用いてそれぞれ25次元の特徴ベクトルを抽出し、合計75次元のベクトルにより判定を行うこととした。このときの画像の画素数はそれぞれ640×480、320×240、160×120とした。教師画像から画像ピラミッドとHLAC特徴を75次元のベクトルとして抽出し、部分空間法により教師画像との違いを異常の評価指標として検出した。また、同様に動画に対応したCHLAC^[2]を用いて251次元の特徴ベクトルを抽出し異常を検出するプログラムの試作を行った。

2.2 画像と距離画像からの異常検出

平成22年11月にマイクロソフト社から発売されたKinectセンサ^[3]は、もともとはゲーム機用のモーションセンサであるが、リアルタイムで画像と距離画像を取得可能であるうえ、安価に入手できるため、認識用センサやロボット用センサとして使用するための研究が数多くなされている^{[4] - [6]}。そこで、開発していた画像から異常を検出するプログラムを、画像と距離画

像を同時に取得できるKinectセンサに適用する試みを行った。Kinectセンサで取得した画像(画素数: 640×480)および距離画像(画素数: 640×480)は、USB2.0でパソコンに送られる。パソコンでは画像および距離画像を複合処理し、異常と判断したらその時点での画像を記録し、あらかじめ設定しておいたスマートフォンや携帯電話へ通知を行う。試作した監視装置システムの概要を図3に示す。

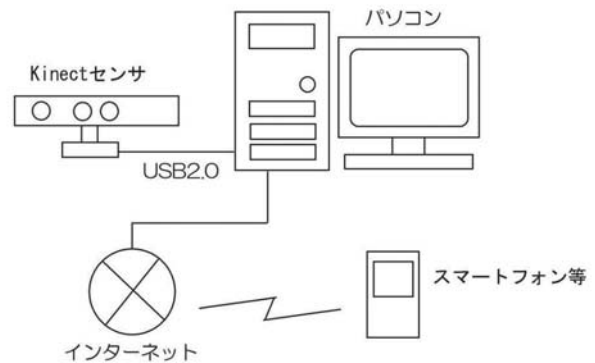


図3 Kinectセンサを用いた監視装置

画像のみを用いて異常を検出する場合、背景画像の影響や明るさの変化による影響を受ける可能性が高い。しかし、距離画像を用いれば、これらの影響を受けずに対象物を抽出することが可能になると考えられる。ただし、距離画像のみでは監視対象の形状情報の取得は可能であるが、表面のテクスチャ情報を取得することができない。そこで、画像と距離画像の双方から特徴を抽出し、異常を監視する複合処理プログラムを製作することとした。

開発当初、画像と距離画像双方からCHLACを用いてそれぞれ251次元の特徴ベクトルを抽出し、合計502次元の特徴ベクトルから異常の監視を行えないか試みた。しかし、502次元の特徴ベクトル処理に要する計算量が膨大となり、リアルタイムでの監視を実現するには至らなかった。そこで、動作に関連する情報は距離画像のみからでも取得可能であると考え、距離画像からCHLACを用いて251次元の特徴ベクトルを抽出し、画像は静止画として処理しHLACを用いて25次元の特徴ベクトルを抽出して処理することとした。まず、Kinectセンサから取得した画像、距離画像を縮小処理した後、それぞれ差分を求め、二値化処理後、CHLAC特徴とHLAC特徴に基づく276(251+25)次元の特徴ベクトルを求める。取得した特徴ベクトルを用いて通常動作の部分空間を求めるために主成分分析を行い、直交補空間への射影成分の距離を算出し異常であ

るかどうかの指標にした^[7]。開発した画像と距離画像から異常を検出するプログラムのフローチャートを図4に示す。

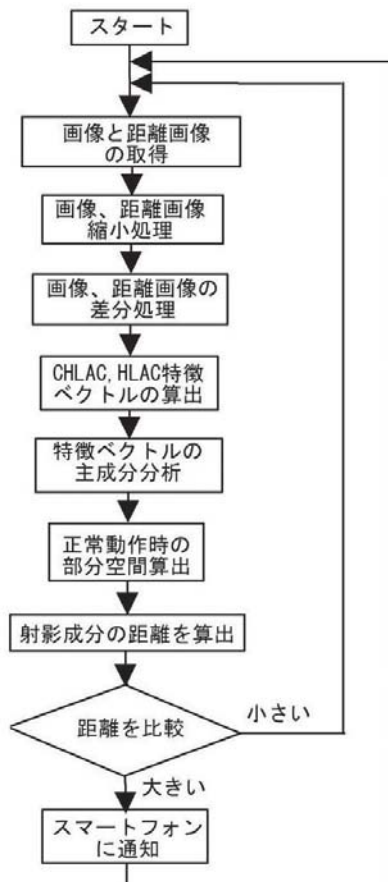


図4 画像と距離画像による異常検出

2.3 画像とセンサ信号を用いた異常検出

画像とセンサ信号を用いて異常検出する場合は、TVカメラの他に各種センサで取得したデータを前処理する信号処理装置を用いる。信号処理装置とパソコンはイーサネットに接続し、データの授受を行うことが可能となっている。また、インターネットにも接続が可能であり、監視対象である機械装置の異常を検出し、事前に設定されているアドレスへ警告メールを通知することができる。

信号処理装置は、オープンソース、オープンハードウェアのマイコンボードであるArduino^[9]を用いて開発した。Arduinoには、イーサネットに接続するための拡張基板であるEther Shieldが発売されており、無償ライブラリも用意されている。イーサネットを用いてパソコンにセンサ情報を効率的に送るために、信号処理装置では、各種センサで取得したデータから特徴ベクトルを抽出するなどの前処理を行う。

前処理の一例として、電流の計測について記述する。

電流の計測はカレントトランス(以下CTと記す)からの出力をオペアンプでレベル変換した後、信号処理装置のAD変換器で読み込むことで行う。交流モータの電流を計測したときの信号例を図5に示す。

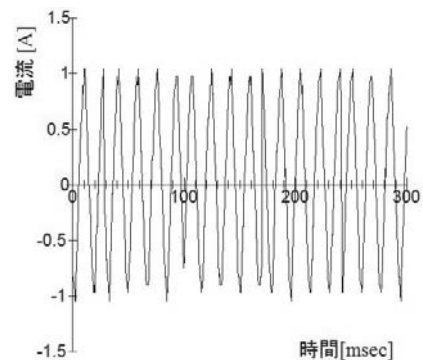


図5 電流信号の例

CTを用いて計測した電流信号はノイズの影響などにより変動があり、そのまま特徴ベクトルとして使うことは難しい。そこで、信号の絶対値を1秒間積算処理した積算値を特徴ベクトルとして用いることを考えた。図6に計測した積算値とクランプ電流計での実測電流との相関結果を示す。最少二乗法を用いて1次関数で近似したところ、積算値と実測電流の寄与率は99.96%と十分高かったので、積算値を電流の特徴ベクトルとして用いることとした。

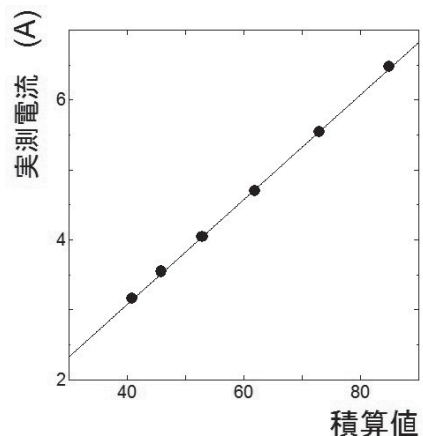


図6 積算値と実測電流の相関

3. 実験

複合センサを用いた遠隔監視装置として、画像と距離画像を複合して処理するKinectセンサを用いた監視装置と画像とセンサ信号を複合して処理する監視装置を試作した。装置の有効性を確認するためにそれぞれの監視装置で実験を行った。実験の結果を以下に記述する。

3.1 Kinectセンサを用いた監視

Kinectセンサを用いた監視装置を評価するために、入室管理を対象とした実験を実施した。部屋のドア部分の画像および距離画像を、Kinectセンサを用いた監視装置で取得し入退出の監視を行った。ほとんど人の入退出がない状態で装置を動かすことで入退出がない状態を正常値として記憶させ、入退出があった場合電子メールで通知を行わせた。監視中の画像および距離画像の例を図7に示す。



(a)監視画像



(b)監視距離画像

図7 Kinectセンサによる監視画像の例

監視中に取得した特徴ベクトルのヒストグラムを図8に示す。なお、図8では縦軸に特徴ベクトル、横軸に時間、濃度で頻度を表している。距離画像から取得したCHLAC特徴のヒストグラムに変動が多いのは、測定対象物の境界で発生する距離画像のノイズ成分の影響であると考えられる。これらの特徴ベクトルを基に異常の検出を行った結果を図9に示す。ここでは、事前に設定した閾値を超えた場合に入退室があったと判断している。画像のみの監視装置では、監視が難しいとされている明るさの変化が大きい環境での評価を行った。明るさの変化が激しいと考えられる日没前1時間から3時間の監視を行わせた結果、開発した装置では入退出の回数を間違いなく監視できた。

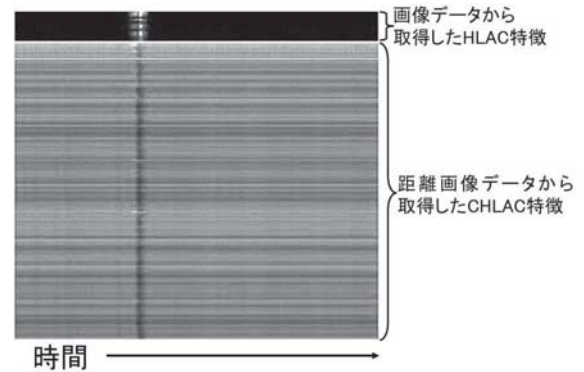


図8 特徴ベクトルのヒストグラム



図9 異常検出結果

3.2 画像とセンサ信号の複合監視

開発した装置の有効性を確認するために卓上ボール盤の監視を行うデモ装置を試作し実験を行った。試作した監視システムデモ装置の写真を図10に示す。穴あけ作業を繰り返し行い、正常動作時の画像および電流値の特徴ベクトルから通常動作の部分空間を求めた。監視プログラムの動作画面を図11に示す。実験の結果、卓上ボール盤の過負荷などの異常を検出し通知を行えることを確認した。

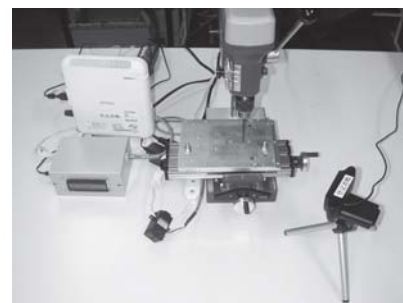


図10 試作監視システム



図11 監視プログラム動作画面

4. 実証試験

試作した遠隔監視システムデモ装置で有効性が確認できたので、実際の工場で使用されている機械に対して効果があるか確認するための実証試験を実施した。実証試験として県内企業で使用しているNC工作機械の監視を行った。監視対象のNC工作機械の写真を図12に示す。



図12 NC工作機械での実証試験

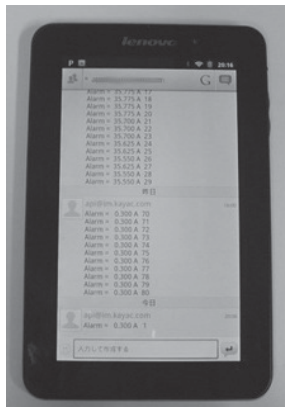


図13 タブレット端末での監視

実証試験を行うための打ち合わせの結果、試作していた監視装置を基に以下に示す機能を満足するための改良を行うこととなった。

- 1) 装置を安価にするため、センサ信号のみで監視を行う。
- 2) 異常の通知はGoogle talkにより行う。
- 3) 異常状態の緊急度を分けて通知する。
- 4) 一定時間以上異常状態を検出したら機械を停止する。

上記機能を搭載した遠隔監視装置をNC工作機械に取り付け、実証試験を行った。タブレット端末で異常通知を受けたときの画面例を図13に示す。

約6箇月の実証試験の結果、開発した装置によりNCプログラムのミスによる過負荷、工具摩耗による過負荷、NCプログラムの終了などを遠隔監視できることを確認した。

5. 結 言

複数のセンサ信号を複合処理することで異常を自動検出してスマートフォンなどへ通知を行う複合センサを用いた遠隔監視装置を開発した。Kinectセンサを用いることで画像と距離画像により監視を行う遠隔監視装置と、画像とセンサ信号を複合処理して監視する遠隔監視装置を試作した。試作した監視装置をもとに、現場の要望に合わせた改良を実施した。約6箇月間の実証試験を行い有効性を確認した。今後、開発した装置を使用する現場に合わせて改良し、多くの県内企業の要望に沿った遠隔監視装置を提案していきたい。

文 献

- [1] 大津, "パターン認識における特徴抽出に関する数理的研究", 電子技術総合研究所研究報告, pp.31-45, 1998.
- [2] 南里, 大津, "複数人動画からの異常動作検出", 情報処論, 46(SIG_15(CVIM_12)), pp.43-50, 2005.
- [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] 栗原, 岡部, 尾内, "Kinectセンサを用いた物探し支援システムの試作", Proceedings of WISS2011, 2011.
- [5] L. Xia, C.-C. Chen, and J. K. Aggarwal, "Human Detection Using Depth Information by Kinect", Proceedings of HAU3D, pp.15-22, 2011.
- [6] 鄭, 石橋, 倉爪, 岩下, 長谷川, "4台のKinectを搭載した全方向計測ロボットによる環境計測", Proceedings of RSJ2011, 103-4, 2011.
- [7] 田中, 垂水, 脇本: パソコン統計解析ハンドブック2多変量解析編、共立出版ISBN4-320-01331-X、1984.
- [8] N.Nomoto, Y.Shinohara, T.Shiraki, T.Kobayashi, N.Otsu: A New Scheme for Image Recognition Using Higher-Order Local Autocorrelation and Factor Analysis, MVA2005 IAPR, pp16-18, 2005.
- [9] <http://www.arduino.cc/>, Accessed 2010.

超小型軽量薄膜材料マニピュレータの開発

機械システム科 主任研究員 入 江 直 樹
長崎大学大学院 教 授 石 松 隆 和

近年、ノート型パーソナルコンピュータや携帯電話の高性能化、小型薄型化に伴い、内装する電子デバイスの高性能化、小型薄型化も進んでいる。多くの電子デバイスメーカーは電子デバイスの小型薄型化が進むにつれ、その取り扱いに繊細な作業を必要とし製造工程は増加する傾向にある。これは生産の効率化を阻むハンドリング問題と呼ばれ、長崎県内においても顕在化されつつある。これを受けて、本研究は傷、ゴミ、汚れを付けずに小型で薄く、その材質から非常に脆性の高い水晶素板をハンドリングできる独自のマニピュレータを開発することで生産工程の効率化を図ることを目的とする。平成24年度においては、非接触式チャックを用いた水晶素板の把持、運搬装置について研究開発を行い、その有効性について検証を行った。

1. 緒 言

近年におけるパーソナルコンピュータや携帯電話の普及は目覚しく、小型、薄型化は進み、内装する水晶発振子などの電子デバイスもよりいっそうの小型、薄型化を求められている。例えば、長崎県は水晶発振子の製造、販売を行っているメーカーを有し、その製造工程においては水晶発振子を構成する水晶素板の脆性の高さから、僅かな衝撃による破損を避けるべく精細な取扱いを必要とし精神的にきつい人手作業となっている。これは水晶素板に限らずウエハなどにおいても同様であり、電子デバイス製造分野における共通の課題として生産の効率化を阻むハンドリング問題と呼ばれている。本問題は、今後更なる電子デバイスの小型、薄型化が進むにつれ、更に顕在化してゆくことが予想されている^[1]。

本ハンドリング問題を鑑み、本研究では様々な自動組立やロボットを用いた自動化システム^[2]の中で、ワークを優しく取扱うことができる非接触式チャックを活用し水晶素板をハンドリングする研究開発を行う。平成24年度においては、小型で薄く、その材質から非常に脆性の高い水晶素板をワーク対象とし、非接触式チャックを備えた把持運搬装置を開発評価することにより有効性を検証した。

2. 実験方法

2.1 非接触式チャックを備えた把持運搬装置

2.1.1 把持運搬装置の構成

図1に非接触式チャックを備えた把持運搬装置の構成を示す。水晶素板の把持を行う非接触式チャック、リニアモータを駆動源とし非接触式チャックを重力方向へ駆動するZ軸駆動ユニット、また、電動スライダ

によりX軸方向へZ軸駆動ユニットを運搬する構成としている。

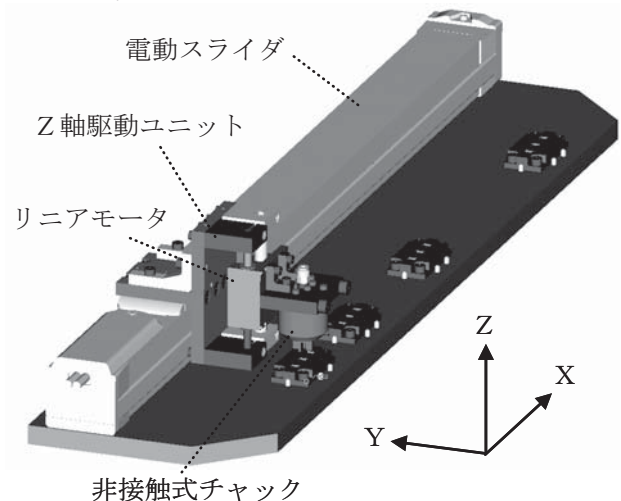


図1 把持運搬装置の構成

2.1.2 把持運搬装置のシステム構成

図2に把持運搬装置のシステム構成を示す。制御装置はノート型パーソナルコンピュータ(NEC製 FC-N22A/CX6WS)を用いた。ノート型パーソナルコンピュータは、コンプレッサから非接触式チャックへの空気供給をON/OFF制御する電磁弁の駆動指令をI/Oボードを介して行い、Z軸駆動ユニットの駆動源であるリニアモータ(FAULHABER製)のコントローラへの駆動指令、また、Z軸駆動ユニットをX軸方向へ駆動するX軸駆動ユニットの駆動源となる電動シリンダ(ミスミ製)のコントローラへ駆動指令を行う。Z軸方向とX軸方向における所望の停止位置と加減速運転パターンは、予め各コントローラに入力しておきオープン制御を用いて水晶素板の把持運搬についての運動を行った。

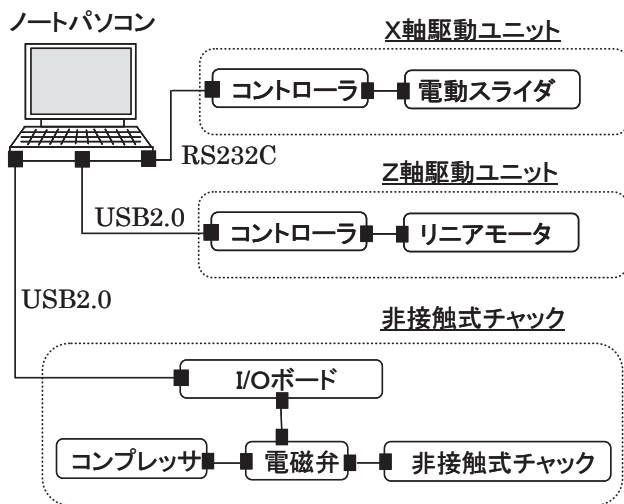


図2 把持運搬装置のシステム構成

2.1.3 非接触式チャックの構成と作動原理

非接触式チャックは、空気をワークに向かって噴出することにより、ワークを空中に浮遊した非接触の状態にて懸垂保持する機能を有する。非接触式チャックの方式としてベルヌーイの方法を利用したもの^[3]や、旋回流を利用したもの^[4]が報告されている。

本研究においては、比較的小型のワークに対して実績を有するベルヌーイの方法を利用した非接触式チャックを用いて実験を行った。図3に本非接触式チャックの構成を示す。噴出口から噴出した空気はワークに衝突し作動面とワークとの間隙から流出する。作動面とワークとの間隙が大きい場合、作動面とワークとの間隙を通る高速急流による減圧作用により、本間隙が負圧となりワークを引き寄せる吸引力を生じる。これを受けて、ワークは引き寄せられ、作動面との間隙が小さくなると、クッション室の圧力は急激に上昇し、ワークを引き離す反発力を生じる。本吸引力と反発力を繰り返し、ワークを空中に浮遊した非接触の状態にて懸垂保持を行う。

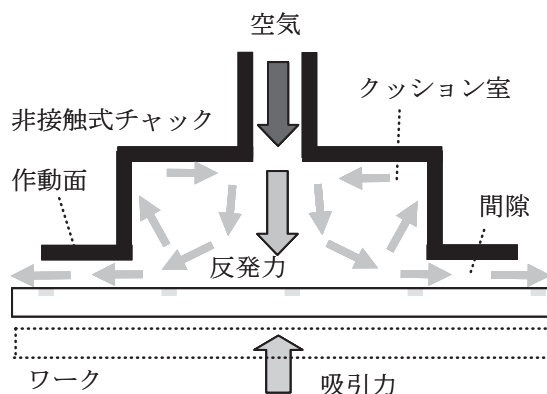


図3 非接触式チャックの構成

2.2 水晶素板の把持実験

試作した非接触式チャックの裏面形状を図4に示す。また、本非接触式チャックを用いた把持実験の手順を次に示す。①Z軸駆動ユニットを用いて本非接触式チャックを水晶素板へ近づける。②電磁弁を介して空気を非接触式チャックへ供給することにより水晶素板を非接触状態にて把持する。③把持状態を保ったまま、Z軸駆動ユニットを用いて反重力方向へ約50mm移動する。④水晶素板を把持した位置へ移動し、電磁弁により供給している空気を止め、水晶素板を初期位置へ設置する。⑤反重力方向へ水晶素板を把持していない状態で約50mm移動する。以上の動作を繰返す実験を行った。なお、本研究報告において使用した水晶素板は、生産工程を考慮しレジスト付きである。

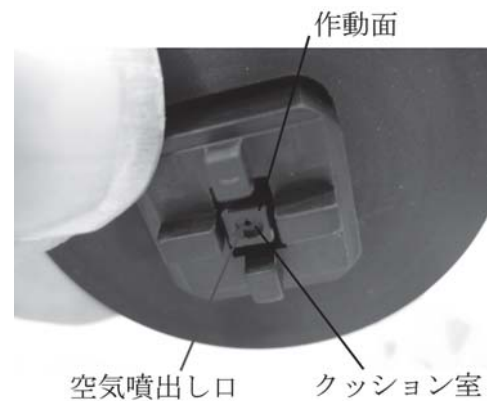


図4 試作した非接触式チャックの外観

2.3 水晶素板の運搬実験

試作した把持運搬装置を図5に示す。非接触式チャックを用いて水晶素板を把持し、その後、加減速運転による慣性力を負荷する運搬実験を行った。図6に本実験におけるX軸方向への加減速運転パターンを示す。急発進、急停止を繰り返すことにより慣性力による衝撃を大きくし、水晶素板の落下を招きやすいパターンとしている。

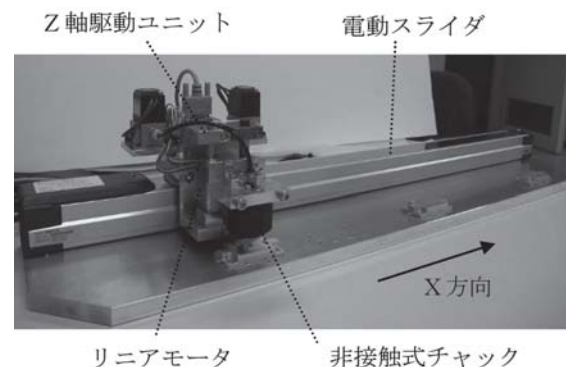


図5 試作した把持運搬装置の外観

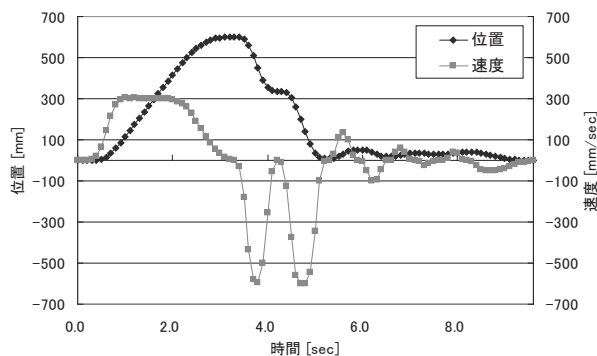


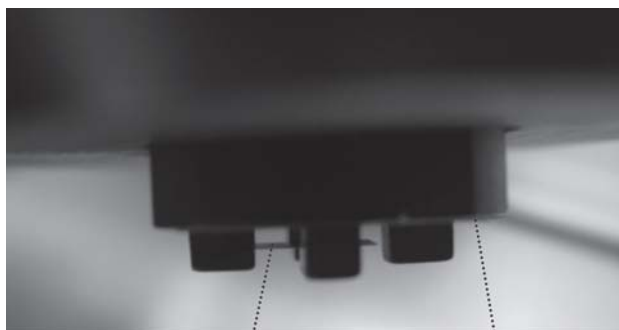
図6 本実験に用いた加減速運転パターン

3. 結果と考察

3.1 水晶素板の把持実験結果と考察

図7に本非接触式チャックを用いて水晶素板を非接触状態にて把持した状況を示す。本把持実験を10回繰返し、水晶素板の破損の有無を目視により評価した結果、破損は見受けられなかった。

非接触式チャックへ供給する空気はコンプレッサを用いて圧縮しているが、その騒音や省エネルギー化の観点から、より少ない空気量で所望の把持性能を得ることが重要となる。必要最小限の空気量を見極め可能な評価方法を検討していく必要がある。



水晶素板 非接触式チャック

図7 非接触式チャックを用いた水晶素板の把持

3.2 水晶素板の運搬実験結果と考察

図6に示す加減速運転パターンを10回繰返し、水晶素板の落下や破損の有無について評価を行った。その結果、落下は無く、目視による破損についても見受けられなかった。

水晶素板の運搬は効率的な面から、より速い動作を求められ、それに伴い加減速運転時に発生する慣性力もより大きくなり、水晶素板の落下や破損を招き易くなる。必要とする非接触式チャックの把持力を確保しながら、供給する空気量を最小化する方法を検討してゆく必要がある。

4. 結 言

本研究の成果について以下に要約する。

- 1) ベルヌーイの方法を利用した非接触式チャックを用いて、レジスト付きの水晶素板を把持する実験を行い、破損することなく着脱可能であった。
- 2) 非接触式チャックを用いてレジスト付きの水晶素板を把持し、運搬装置を用いて所望の加減速運転による慣性力を負荷した結果、水晶素板は非接触式チャックからの落下や破損を招くことなく把持状態を維持可能であった。

以上から、非接触式チャックを用いてレジスト付きの水晶素板を破損することなく所定の位置へ運搬し設置するハンドリング作業を行えることを確認し、人手による作業の代替を担える可能性を示した。

今後、レジストを塗布していない水晶素板を対象とした把持、運搬実験を実施してゆく予定にある。

参考文献

- [1] 中村：先端半導体用封止材料の技術動向，パナソニック電工技報，Vol. 56, No.4, 9-16, 2008.
- [2] 吉田：さまざまなチャッキングシステムと最新技術，機械設計，Vol. 40, No.15, 18-31, 1996.
- [3] 吉田：非接触搬送機器NCTシリーズー噴出エアによる非接触搬送，油空圧技術，Vol. 42, No.4, 24-28, 2005.
- [4] 黎、徳永 蔡、船木、川嶋、香川：旋回流を用いた非接触搬送系に関する研究(第1報 ボルテックス・チャックの基礎特性)，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 38, No.1, 1-6, 2007.

微細ピンの自動測定システムの開発

機械システム科 主任研究員 小 楠 進 一

微細な機械部品の自動測定の要望は多い。例えば、微細な径を持つ円柱体(微細ピン)は、ＩＣチップをセラミック基板に取り付けるための穴を製作するために必要であり、この微細ピンの径の測定は、微細ピンを加工する上で不可欠である。しかし、加工現場のような粉塵が舞う環境で微細ピンの径を測定する場合、市販されている非接触式の自動測定機を用いて、精密に径を測定することは困難である。そこで、本研究では、粉塵などの測定環境に影響を受けにくい接触式の自動測定システムを開発することを目的とした。開発１年目の平成２４年度は、輸送ユニットと測定ユニットの製作・評価を行った。

1. 緒 言

微細な機械部品の自動測定の要望は多い。例えば、微細な径を持つ円柱体(微細ピン)は、ＩＣチップをセラミック基板に取り付けるための穴を製作するために必要であり、この微細ピンの径の測定は、微細ピンを加工する上で不可欠である。

しかし、加工現場のような粉塵が舞う環境で微細ピンの径を測定する場合、市販されている非接触式の自動測定機^[1]は、粉塵がレーザを遮るために、精密に測定することは困難である^[2]。また、一般的な接触式の測定機^[3]そのままでは、自動測定することは困難である。

そこで、本研究では、接触式の自動測定システムを開発することを目的とする。

2. 自動測定システムの開発方法

可能な限りコスト低減を配慮して選定した部品を用いて、自動測定システムを設計した。設計した自動測定システムの組立図を図1に示す。

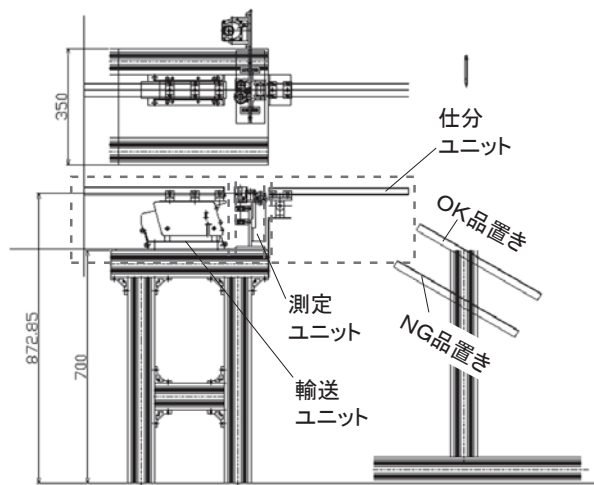


図1 自動測定システムの組立図

図1に示すとおり、自動測定システムは、輸送ユニット、測定ユニット、仕分けユニットからなる。自動測定システムにおける測定方法を説明するため、測定ユニットの詳細図を図2に示す。

まず、工作機械により加工された微細ピンは、落下して、輸送ユニットの前進フィーダーに集められる。前進フィーダーの先には、図3の穴が空いたストッパーがあり、穴を通過させることで1本づつ微細ピンを測定ユニットに送ることが可能である。

次に、輸送ユニットから送られてきた微細ピンは、測定ユニットの2つのローラーに挟まり、微細ピンの位置はローラーにより制御される。ローラーの回転制御により指定位置にきた微細ピンは、測定プローブに挟まれ、径が測定される。ここで、測定プローブは、普段はコンプレッサーにより負圧がかけられているために開いており、負圧が開放された際にバネの力により閉じることになる。

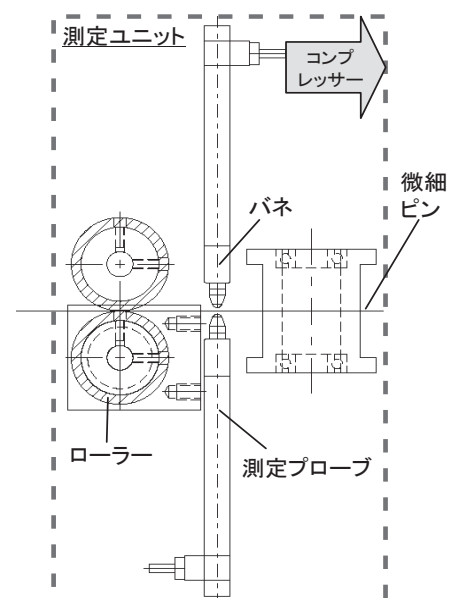


図2 測定ユニットの詳細図

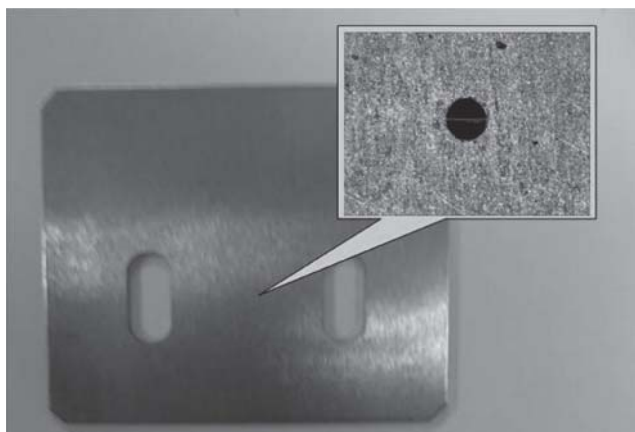


図3 ストッパー

今年度は、図1と図2にもとづく設計図を作成し、輸送ユニットと測定ユニットの試作を行った。図4、図5に開発した試作機を示す。

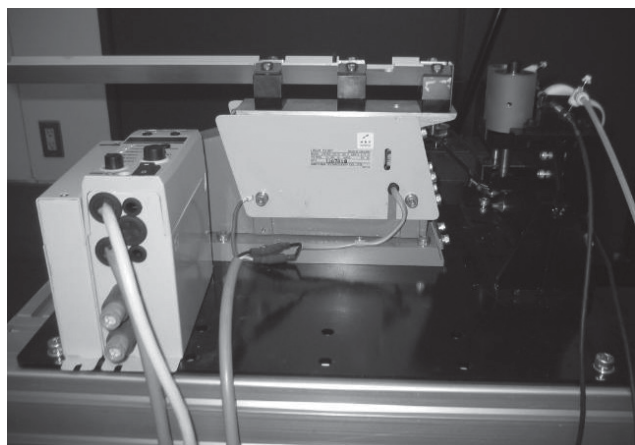


図4 開発した試作機(正面)

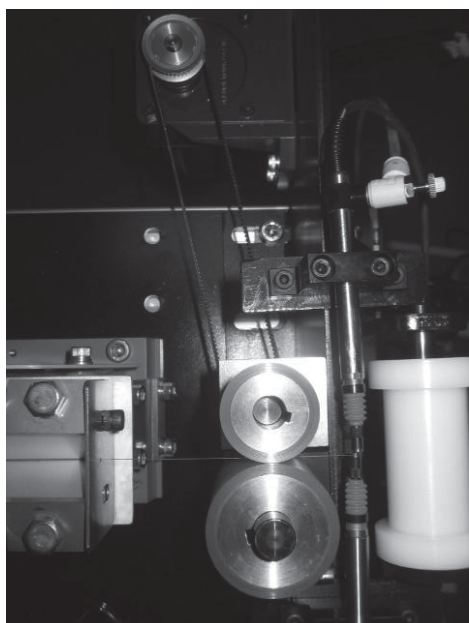


図5 開発した試作機(上面)

3. 自動測定システムの評価方法

試作した輸送ユニット、および、測定ユニットの性能を評価した。評価方法を以下に示す。

3.1 輸送ユニット

輸送ユニットの懸念事項として、微細ピンは0.2gととても軽いので、前進フィーダーを用いて微細ピンを十分な速度で搬送できないことが考えられた。そこで、どのくらいの周波数で加振すれば、微細ピンを十分な速度で搬送することが可能か確認するため、前進フィーダーの周波数と微細ピンの前進速度の関係を確認した。

3.2 測定ユニット

測定ユニットの懸念事項として、前進フィーダーやローラーの条件によっては、微細ピンがローラーをうまく通過しない可能性があった。そこで、微細ピンのローラー通過に対して、前進フィーダーの振動周波数、ローラー周速度が与える影響を評価した。

さらに、測定ユニットの評価のために、リファレンスとなる微細ピンの径を20回測定した。このとき、ローラーによって搬送された微細ピンは、測定中は停止するものとし、評価を行った。

4. 自動測定システムの評価結果と考察

評価内容と評価結果を以下に示す。

4.1 輸送ユニット

実験結果を図6に示す。図6に示すとおり、周波数を105Hz～115Hzとすることで、微細ピンを十分な速度(微細ピンの加工速度より10mm/s以上)で搬送できることが確認できた。

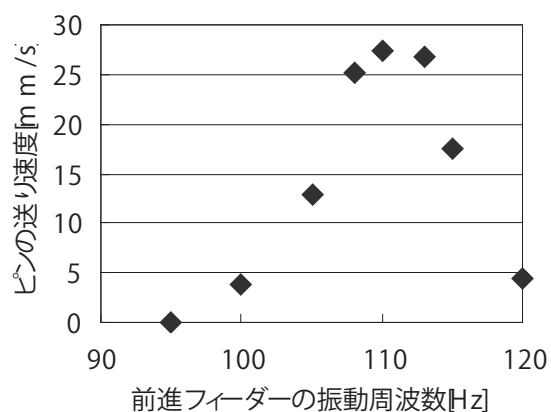


図6 前進フィーダーの振動周波数が、微細ピンの移動速度に与える影響

4.2 測定ユニット

微細ピンのローラー通過に対して、前進フィーダーの振動周波数、ローラー周速度が与える影響を評価した結果、ローラー周速度、フィーダー周波数に影響を受けず、微細ピンはローラー部を問題なく通過していくことが確認できた。

また、リファレンスとなる微細ピンの径を20回測定した結果、標準偏差は $S_{20}=3.70\mu\text{m}$ であった。ばらつきが大きい原因は、測定プローブの固定ジグ、および、固定ジグを拘束する機構にあると考えられる。そこで、今後、測定プローブの固定ジグが同一平面上にあるように機構を変更する予定である。

5. 結 言

本研究において、以下のことが分かった。

- 1) 試作した輸送ユニットにおいて、周波数が105 ～ 115Hz に設定すれば、微細ピンを十分な速度 (10mm/s以上) で搬送することができる。
- 2) 測定ユニットにおいて、前進フィーダーの周波数が100 ～ 110Hz、ローラーの周速度が30 ～ 160 mm/sであれば、問題なく微細ピンはローラーを通過していく。
- 3) 測定プローブの固定機構を変更する必要がある。

参考文献

- [1] 非接触・高精度レーザ測長システム レーザスキャンマイクロメータLSM, (株)ミットヨカタログ2010.
- [2] 沢辺雅二, 精密加工・計測における環境制御管理技術の課題, 精密工学会, 2002(9), 1137-1143.
- [3] (株)ミットヨHP <http://www.mitutoyo.co.jp/products/micrometer/sotogawa.html>, accessed June 3 2013.

高性能な非破壊「糖・酸度計」の実用機開発

電子情報科 専門研究員 下村 義昭

果物の高品質・ブランド化では果物個々の品質管理が重要となる。また、柑橘類では糖度と僅か1%前後の微量な酸度が味を左右する重要な品質項目となる。光を用いて糖度と微量な酸含量を正確に非破壊計測するには、果実による光散乱の影響と果実の内部温度による光吸収への影響をそれぞれ排除する必要がある。本開発ではこれまでに光散乱の影響を受けない独自の非破壊計測技術をベースに糖・酸度と同時に果実の内部温度も計測する新たな手法を考案した。また、本手法について実験・理論両面で検証した結果、果実の成分濃度に加えて温度を実用精度で同時計測できること確認した。

1. 緒言

近赤外分光法^[1]は1960年代に小麦粉の水分の測定方法として米国で考案され、今日では果実を初めとする食品の品質管理、さらには医療診断とその適用範囲は広がり非破壊・非侵襲計測における重要な分析手法となっている。いずれの分野においても、光を強く散乱する散乱体の成分分析を目的としている。

光学的に透明な媒質の場合、散乱の影響を受けない為、吸光度からランベルト・ベールの法則を用いてその成分を簡単に定量することができる。しかしながら、散乱体では照射した光の反射光量が吸収と散乱の影響を同時に受ける為、反射光量から吸収成分のみを分離することは難しく、単純には反射スペクトルから成分を定量することができない。そこで、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、著者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た^[2]。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 (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy)法と呼ぶ。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]。

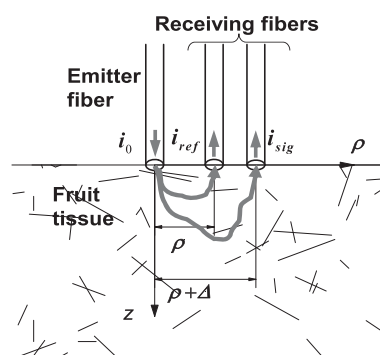


図1 TFDRS法の概略図。1カ所から光を照射し、異なる2カ所で内部からの拡散反射光を受光する。

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

ここで、 $R(\lambda_1)$ 、 $R(\lambda_2)$ 、 $R(\lambda_3)$ はレーザー光の波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 での反射率をそれぞれ表す。相対吸光度比 γ は果実糖度と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^[2,3]。

しかしながら、水を多く含む果実や生体等では相対吸光度比 γ が測定部位の温度の影響を受けて変化してしまう。これは、主成分となる水の吸収係数が温度によって変化するためである。こうした温度変化を放射温度計等で表面温度を測定し補償することも可能であるが、被検体を室温に馴染ませて表面と内部の温度を同じにする必要がある。しかしながら、微量な血液成分や酸含量等を測定する場合、僅かな表面と内部の温度差でも大きな測定誤差となるため、被検体を室温に馴染ませた程度では実用的な精度の実現は難しい。

そこで、本研究ではこれまでに提案したTFDRS法をベースに測定対象の内部温度で補償する成分濃度の非破壊計測技術の開発を目的としている。尚、本報告では平成24年度に実施した内容について報告する。

2. 研究内容と結果

2.1 波長可変レーザーを用いた実験装置

図2にTFDRS法をベースとした反射率の計測装置の概略図を示す^[2]。光源に繰り返し周波数5 kHz、パルス幅100 ns以下、平均出力約60 mWの電子制御波長可変Ti: sapphireレーザーを用いた。検出プローブの中心に配置した光照射ファイバーを介してレーザー光を果実に照射し、一部果実からの反射光を検出プローブ中心から半径の異なる2つの円周上に配置した複数の受光ファイバーで受光した。半径毎に集めた各反射光 i_{ref} 、 i_{sig} をフォトダイオードで検出し、2位相のロックインアンプで増幅した後にAD変換した。レーザー光の波長を1 nmステップで900 - 1070 nm の範囲で掃引しながら各波長の相対反射率 $R = i_{sig} / i_{ref}$ を一定の時間間隔で平均して算出した。

また、果実サンプルとしてリンゴを皮付きのまま用いた。果実サンプルの温度は室温と同じ温度に馴染ませることで設定した。各サンプルは反射率測定後に放射温度計で測定部表面の温度を測定し、その後測定箇所を中心に表皮から $\phi 35 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ の形状にくり抜き、その果汁の糖度を屈折糖度計で測定した。

2.2 実験結果と考察

図3 (a)に4つの相対吸光度比 γ の一次多項式により果実糖度を推定した結果を示す。横軸の糖度は市販の屈折糖度計を用いて測定した値(Brix%)である。また、4つの相対吸光度比では λ_1 、 λ_2 をそれぞれ900 nm、980 nmとし、波長 λ_3 に930 nm、960 nm、1020 nm、1040 nmをそれぞれ用いた。果実糖度の測定精度は0.41 Brix%(理論値0.31 wt%)と果実温度の影響を受けることなく実用的な精度での糖度測定が可能であることが検証された。

次に、糖度推定で用いた上記の波長と相対吸光度比 γ により果実温度を推定した結果を図3 (b)に示す。横軸の温度は放射温度計で測定した果実の表面温度である。本来は内部温度と比較すべきであるが、ここでは果実温度を室温に馴染ませて測定しており、内部温度と表面温度の違いは小さいものと考えた。果実温度の測定精度は0.34 °C (理論値0.38 °C) とほぼ理論通りの結果が得られた。

3. 結 言

本研究では測定対象の内部温度の変化に左右されない成分濃度の非破壊計測手法についてTFDRS法をベースに検討した。その結果、TFDRS法により得ら

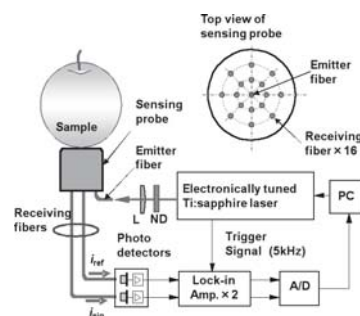


図2 TFDRS法をベースとした反射率の計測装置の概略図。

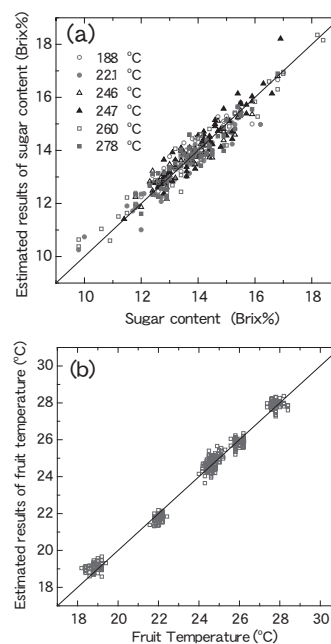


図3 TFDRS法を用いた果実糖度(a)と果実温度(b)の推定結果。

れる相対吸光度比 γ を複数用いた一次多項式により果実の内部温度に影響されない果実の成分濃度の非破壊計測が可能であること、さらには内部温度の推定も可能であることを理論・実験の両面で検証した。また、本開発で提案した非破壊計測手法は測定対象の内部温度の影響を直接補償する手法で、表面と内部の僅かな温度差でも大きな測定誤差を生じる微量な血液成分や酸含量等の測定で特に有効となる。

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

協和機電工業株式会社 事業開発部電子技術プロジェクト グループ長 酒 井 寿美雄

無人搬送技術は生産現場を中心に広く普及しているが、これらの多くはレールの敷設など大掛かりなインフラ整備を必要としている。これら従来型の搬送技術は大量生産を目的とする大規模工場では使われてきたが、県内の中小規模工場では多品種少量生産型の事業が多いことから生産ラインが頻繁に変更されるため、導入が困難であった。本研究では平成21年度から平成23年度にかけて実施した経常研究「環境変動に対応した移動システムの開発」において開発したガイドレス無人搬送システムをベースに、①3D認識&位置センサシステム、②自動積み下ろし機構、③非接触充電システムの3つを開発する。平成24年度は各項目について1次試作を行い、基本的な動作検証を行った。

1. 緒 言

無人搬送車(AGV)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。

海外の開発例として、2004年から米国国防高等研究計画局(DARPA)による無人自動車レースが開催され、2007年には市街地を模擬したコースを、GPS、レーザーレンジファインダ、ステレオビデオカメラ等のセンサ情報をワークステーションでリアルタイム処理し、信号などの交通法規と他車両を自律回避しながら走行する移動ロボットが実現されている。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自律移動システムを開発する。工場内での車両位置センサとして、レーザー式ポジショニングセンサ、障害物検出用として

レーザーレンジファインダを利用し、これらの情報を複合的に用いることで、目標地点へ、途中の障害物を回避しつつ移動するシステムを開発する。

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本研究では、①低価格3D認識位置センサシステム、②自動積み下ろし機構、③非接触充電システム、の3つの技術シーズを開発する。平成24年度はこれら3つの課題について試作をおこなった。

2. レーザー位置センサシステム

これまで工業技術センターで試作した車両では海外製のレーザー式ポジショニングセンサを使用していたが、コストが高いことが課題となっている。本研究では国産の低価格レーザーレンジファインダを利用し、独自の位置検出プログラムを開発することで位置センサシステムを実現することとした。

2.1 センサおよび雲台

用いたレーザーレンジファインダは検出範囲が270度であるため、そのままでは後方の90度範囲が死角となる。リフレクタを用いた位置検出システムでは、常に3個以上のリフレクタが検出される必要があるため、リフレクタマップを生成する際に、多数配置する対応策が考えられる。しかしながら、実際の現場環境では、

位置によってセンサ後方の位置にしかリフレクタが設置できない状況がしばしば存在する。そこで本研究では、レーザレンジファインダを水平、上下に首振り可能とする自動雲台上に設置し、360度方向のリフレクタ検出に対応することとした。試作したセンサシステム外観を図1に示す。また諸元を表1に示す。



図1 レーザー位置センサシステム

表1 レーザー位置センサシステム諸元

寸法	100(L)×165(W)×320(H)
センサ検出角度	270 度
水平首振り範囲	-180 度~+180 度
上下首振り範囲	-30 度~+30 度
データ更新頻度	40Hz
位置更新頻度	~8Hz(Core2Duo 2.0GHz 使用時)
センサ通信方式	TCP/IP
雲台通信方式	RS232C
プログラム言語	C#

2.2 位置検出アルゴリズム

使用するレーザレンジファインダの測定原理はTOF(Time of Flight)方式、検出範囲は270度、検出分解角度0.25度、探知距離30mとなっている。また同時に各測定ポイントでの物体からのレーザ反射強度を取得可能である。さらに一度のレーザ照射に対し、複数回の反射データを取得することも可能であり、これらのデータを利用してガラスや雨などの誤検出除去に利用できる。

本システムでは白ケント紙を用いた検出距離と反射強度の関係式を求め、検出距離から推定した反射強度よりも一定割合以上の反射強度を示す物体をリフレクタ候補データとしている。このままではガラス等の透明物体などを誤検出してしまうことから、さらに複数回の反射が確認できた個所はガラス等の透明物体と判定し、リフレクタ候補から除去する処理を行っている。

フィルター処理を施すことでリフレクタをX,Yからなる座標データとして表現し、位置検出はこの座標データの照合によって行う。

あらかじめ環境中に配置したリフレクタ座標の集合をマップデータ、ある瞬間にレーザレンジファインダで得られたリフレクタ座標の集合を検出データとする。まず両データともに、任意のリフレクタ座標を基準としたときの、他のリフレクタ座標までの距離と方向を計算し記録する。この計算を全リフレクタ座標を基準として計算し、その結果を距離方向データとする。得られたマップデータの距離方向データと、検出データの距離方向データを比較すると、マップデータ側と検出データ側のリフレクタの対応を求めることが可能である。すなわち、各リフレクタがうまく対応すれば距離方向データの相違は閾値以内となる。

対応が決定すれば、あとは平行移動量と回転角度を求めることで座標を推定することが可能である。以上のアルゴリズムを本研究ではC#言語で実装し、クラス化した(図2)。



図2 位置検出プログラム

3. 自動積み下ろし機構

省エネ、低コストのマテハンとして産業界では、近年からくり機構が応用されている。そこで本研究においても、なるべく高価なモータやセンサを用いない積み下ろし機構を開発することとした。今年度はその要素技術として安価な機構を試作した。

3.1 プーリー式ソレノイド機構

低価格のアクチュエータとして、ソレノイドがある。単純な構造のため低コストであるが、可動範囲が狭い欠点がある。そこで、ワイヤーとプーリーを用いた増幅機構により、動作範囲を拡大した。これにより、動作範囲を6倍にすることが可能となった。しかしながら、内部構造が複雑であるため、動作時の損失が大きく、最終出力が低下する問題が発生した。同時に製作コストが高いことから、より低コストかつ効率のよい手法を試みることにした。

3.2 リンク式ソレノイド機構

動作抵抗を減らすため、てこの原理で動作量を6倍にする機構を試作した。動作試験を実施したところ、最終出力も十分であり、製作コストも半分以上になることが確認できたため、本方式を採用することとした。

4. 非接触充電システム

充電ステーション外観を図3、充電ステーション諸元を表2に示す。

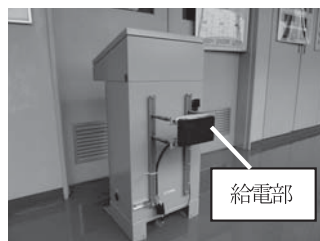


図3 充電ステーション



図4 非接触充電の様子

表2 充電ステーション諸元

寸法	900×400×400
電源	3相 200V
非接触給電能力	24V20A
非接触充電距離	最大 100mm
充電対応電池	専用リチウムポリマー電池
保護機能	過充電保護

牽引式ガイドレス無人搬送車のドッキングの様子を図4に示す。充電ステーション給電部と無人搬送車受電部を接近させることで非接触充電可能である。非接触充電モジュールの仕様から、給電部と受電部間が30mmのとき、およそ10Aの充電電流が確保できる。そこで本システムでは充電ステーションに30mmまで接近させるドッキングシーケンスを作成した。

無人搬送車は左右2軸差動方式を採用しているため、真横方向への移動は不可能である。ある程度接近した際に横方向へずれていた場合、特性上位置修正することが困難である。そこでドッキング時には充電ステーションから600mm離れた座標へ一旦向かい、その後給電プローブに正面からアプローチする制御を行っている。さらに200mm以内まで接近後はレーザ式位置センサの位置計測モードを静的な計測モードに切り替え厳密な計測をおこなう。これによって距離30mmまで接近し非接触充電可能となった。

5. 結 言

平成24年度は平成23年度までに試作した搬送車をベースとして、レーザ式位置センサシステム、自動積み下ろし機構、非接触充電システムについて要素技術を試作した。

これらの要素技術の評価と改良を引き続き実施していく予定である。またこれらの機能は高機能搬送システムやサービスロボットシステムの基盤技術として今後県内企業と製品化を検討していく。

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, 原祥亮, 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, 114-6, 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

食品に含まれる微生物の簡易検出装置の開発

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

食品の生産から流通、消費にいたる各局面で安全・安心のため微生物検査は重要であり、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を判定できるプローブの開発及び、高感度・迅速（リアルタイム）に検査できる光学システムを構築することで、培養法を不要とした自主検査用の簡易型検出装置の開発を進めている。本報では食品の衛生指標菌の一つである大腸菌群をターゲットに選び、使い捨て可能な検査方法を考案し、20分以内で判定できる検査装置（システム）を開発した。

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、各社の製品特性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理念、コンプライアンスに係ることになるため、衛生管理体制を強化しリスクを防止することは重要になっている。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、食材中や食材表面などの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・簡易・安価で正確な検査体制が求められている。

そこで本研究では、微生物を検出できるプローブの開発及び、高感度・迅速（リアルタイム）に検査できる光学技術を構築することで、培養法を不要とした自主検査用の簡易型検出装置（システム）の開発を進めている。プローブで使用する微小球センサーは、入射光を球内で周回させ感度を増強させることが可能であり、従来の技術に比べ検出感度を数十倍以上に増幅することが可能である。このため、微小球表面に局在した高感度の光（近接場光）を利用し、培養前の微生物を検出すれば、数十分から数時間で誰でも簡単に判定することが可能となる。また、マイクロサイズの微小球センサーを大量生産することで、通常の抗原抗体反応で利用されるプリズムセンサー（表面プラズモン共鳴センサー）よりも一個当たりのコストを下げることも可能となる。

本報では、微生物汚染を判定するセンサー部に、抗体を固定化した直径 $10\mu\text{m}$ のポリスチレン微小球（以下、PS微小球）を組み込んだ顕微分光システムを開発した。また、システムの評価として、センサー部に大腸菌群が産生する分解酵素の β ガラクトシダーゼ（ β -galactosidase）を滴下し、散乱光スペクトルの変化を検証した。

2. 実験方法

2.1 単一微小球の検出システム

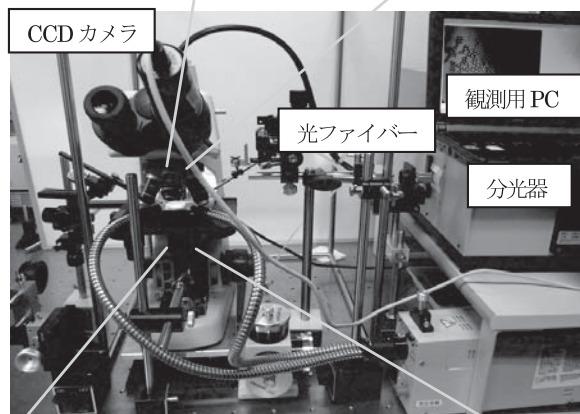
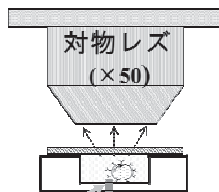
平成23年度までに、微小球の励起に油浸対物レンズを利用した近接場光（エバネセント）の励起システムを構築し、単一微小球の励起とその散乱光を検出するシステムの構築を行なった^{[1], [2]}。最終年度となる平成24年度は検出精度を向上させるため、図1に示すように、PS微小球がある検出部をカバーガラス（厚み 0.17mm ）で封止し、測定中における水分の蒸発を抑えることで、経時変化による観測部の焦点のズレや散乱光強度のバラつきを抑えた。

最終的には図2に示すように単一のPS微小球に光を効率よく入射できる励起方法と、PS微小球からの散乱光を観測しながら計測できる散乱光検出方法を組み合わせた顕微分光システムを構築した。測定する単一のPS微小球はCCDカメラで確認しながら選別する。散乱光は対物レンズで集光した後、光ファイバーで導光し分光器でリアルタイムに検出した。



図1 PS微小球の検出部

散乱光検出法



励起方法

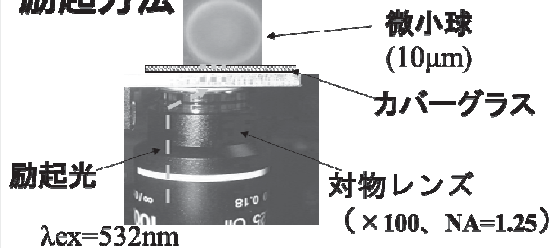


図2 単一微小球の計測システム

2.2 蛍光PS微小球センサー

図3に示すように微小球に光を入射すると、ある条件下で球を周回する電磁波モードが発生し、入射光が強く散乱されることが分かっている^[3]。本測定ではこ

の周回する電磁波モードであるウィスパーリング・ギャラリー・モード(Whispering Gallery Mode、以下WGモード)の変化を検出することでPS微小球の表面状態を検証する。また、汚染物質の吸着判定として、PS微小球の表面上に抗体を固定化し、抗原抗体反応による変化を確認した。

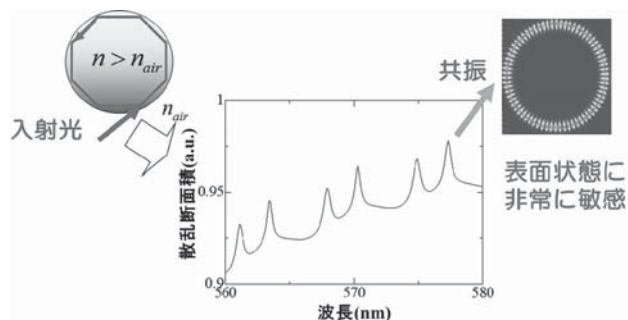


図3 WGモード

実験で使用したPS微小球は、直径 $10\mu\text{m}$ の色素がドープされた蛍光微小球である。552nmの波長で励起すると580nmを中心波長とした蛍光を発する。また、PS微小球表面に固定化する抗体は食品企業の自主管理で検査頻度の高い大腸菌群に絞り、大腸菌群が産生する分解酵素の β ガラクトシダーゼ(β -galactosidase)に対する抗体(Anti- β -galactosidase)を選択している^[2]^[4]。

2.3 酵素(β -galactosidase)吸着の評価方法

図3に示すようにPS微小球にWGモードが励起されると、ある特定波長に鋭い共鳴ピーク信号が確認される。WGモードはPS微小球の球径や表面の屈折率情報を非常に高感度に検知することが可能である。そこで、図4に示すように、抗体(Anti- β -galactosidase)を固定化したPS微小球に酵素(β -galactosidase)を吸着させ、WGモードの共鳴ピーク信号の変化を検出することで、吸着する酵素(β -galactosidase)の判定が可能か検証を行った。

本実験では、波長532nmのTM偏光でPS微小球を励起し、560～580nmの蛍光波長帯域からWGモードのピーク信号を検出している。単球と光の相互作用の理論解析には、Mie散乱理論から算出した散乱断面積を用いた。また、図5に示すように抗体を固定化したPS微小球は図1の検出部に滴下する。その後、0～1mg/mlに濃度調整した酵素溶液(β -galactosidase)をPS微小球へ滴下し、散乱光のスペクトルを検出した。

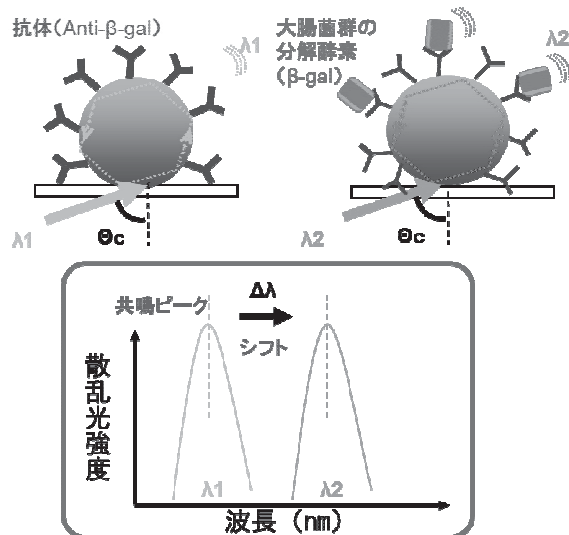


図4 WGモードシフトによる判定

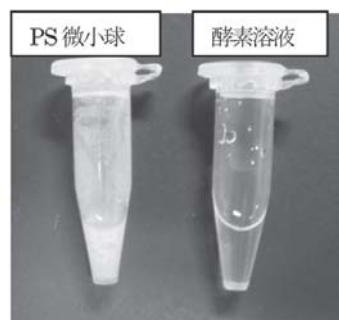


図5 抗体を固定化したPS微小球と酵素溶液

3. 結果と考察

3.1 PS微小球の観測

図6はカバーガラスで封止した時の純水中のPS微小球の測定の様子を示したものである。暗視野照明により純水中におけるPS微小球の観測が可能となった。また、図1で示したカバーガラスの封止によりPS微小球への励起光量を弱くしても検出が可能となり、PS微小球が発する蛍光時間を延ばすことができた。

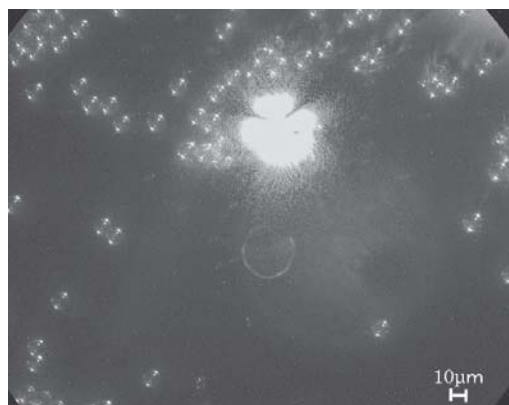


図6 PS微小球の測定

3.2 酵素濃度によるWGモードの評価

図7は、2.1で構築した単一微小球の検出システムにより、純水中におけるPS微小球の散乱光を検出したスペクトルである。抗体のみが固定化している図7(a)では、蛍光の波長帯域(560～615nm)の中に周期的な共鳴ピーク信号を確認することができ、単一のPS微小球からWGモードを検出できていることが分かる。また、空気中のPS微小球の散乱光スペクトルと比較すると、共鳴ピークが長波長側へシフトしているのを確認した。このシフト変化が起きる時間は15～20分程度であった。さらに、濃度が異なる酵素溶液(β-galactosidase)を滴下し、抗原抗体反応後のスペクトルを検出したところ、酵素濃度が高くなるに従い共鳴ピーク信号が長波長側へシフトしているのを確認した。

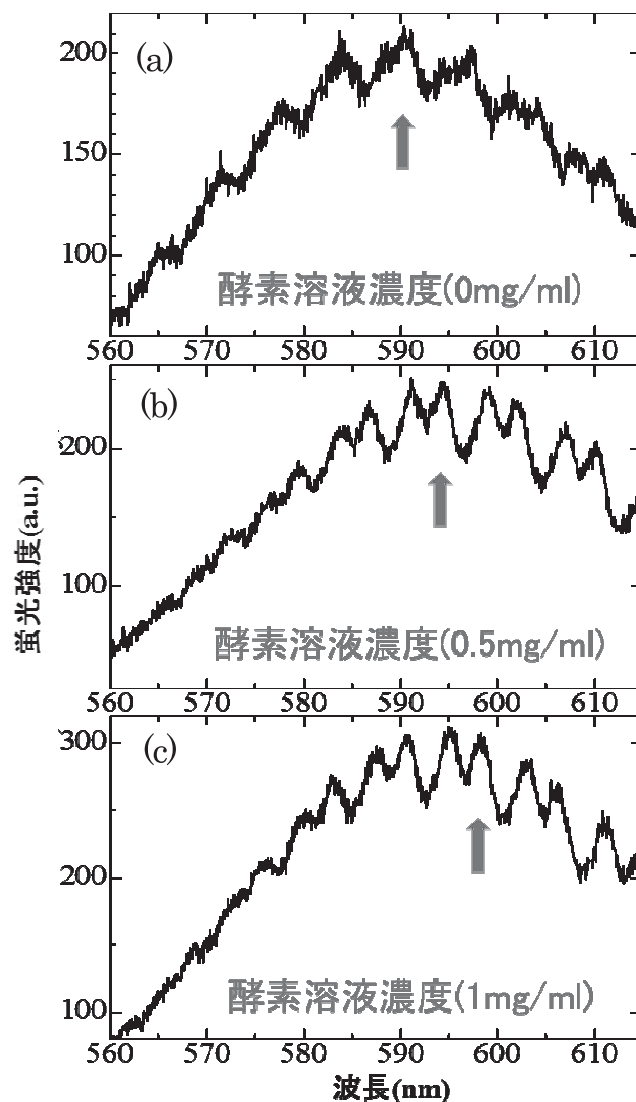


図7 PS微小球の散乱光スペクトル変化

そこで、図8に示すように、Mie散乱理論の散乱断面積のフィッティングにより、抗原抗体層の厚みと屈折率の評価を行い、共鳴ピークシフトが抗原抗体反応に起因するものか検証を行った。

図8(a)は直径10 μm のPS微小球の屈折率を1.55、水の屈折率を1.33としてフィッティングした結果、抗体層の屈折率は1.50と見積もることができた。溶液中におけるPS微小球の屈折率はHimmelhausら^[5]の報告より1.50となっている。また、タンパク質の屈折率はFanら^[6]の報告では1.50、Voros^[7]の報告からは1.35~1.6となるため、本実験で算出した値とほぼ一致していることが分かった。

図8(b)(c)は抗原抗体層の厚みをフィッティングした時のスペクトルであるが、この結果より、抗原抗体層の厚みは30~70nmとなり、屈折率の値は1.50となることが推定された。抗体と酵素の屈折率が同じ値となったため、WGモードのピーク信号のシフトはPS微小球の直径の増加に起因していることが考えられる。

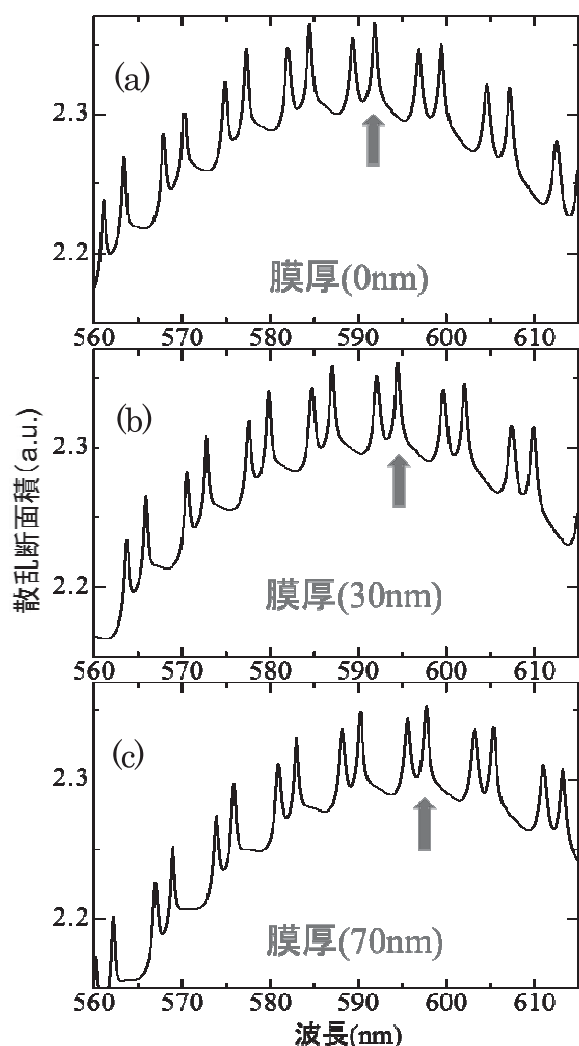


図8 散乱断面積によるシフト計算

3.3 WGモードのスプリット信号の評価

図7(b)(c)に示すように酵素溶液(β -galactosidase)を滴下し、PS微小球上で抗原抗体反応が起きると、共鳴ピークがスプリットする新たなモードが発生していることを確認した。一方、図9のように抗体が固定化してないPS微小球では酵素溶液(β -galactosidase)を滴下しても、共鳴ピーク信号にスプリットが起きず、新たなモードが発生しないことを確認した。

このため、共鳴ピークのスプリットはPS微小球の表面上で酵素(β -galactosidase)と反応した時に発生するモードであることが考えられる。PS微小球表面上で酵素(β -galactosidase)が結合するとPS微小球の半径が Δr 増加し、周回するWGモードの光路長が Δl 増加し、共鳴する波長も $\Delta \lambda$ 増加すると仮定する。抗原抗体反応後のスプリット幅(2.4~3.3nm)より、光路長の増加(Δl)を算出したところ、約200~270nmと推定された。また、 $\Delta r = \Delta l / 2\pi$ の関係式より、PS微小球の半径の増加(Δr)を算出すると約30~40nmとなった。酵素(β -Galactosidase)のサイズは構造によっても異なるが、Skalovaら^[8]が分析した報告では、直径が30~60nmとなっている。このため、本実験から算出した値とほぼ一致していることが分かり、共鳴ピーク信号のスプリットは酵素サイズに起因していることが考えられる。また、この結果よりスプリット信号を確認することでPS微小球の表面に吸着した酵素(β -Galactosidase)を容易に判定できることが分かった。

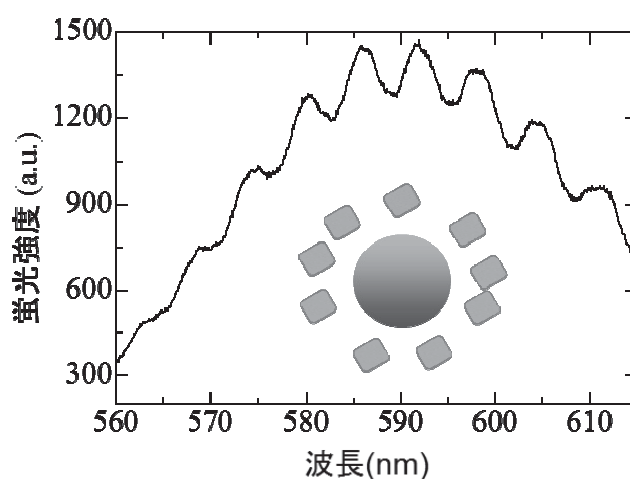


図9 抗体が固定化してない散乱光スペクトル

4. 結 言

微生物汚染(大腸菌群)を判定するプローブとして、抗体を固定化したPS微小球プローブを組み込んだ顕微分光装置(システム)を作製した。大腸菌群が産生す

る分解酵素の β ガラクトシダーゼ(β -galactosidase)と抗原抗体反応させたところ、PS微小球からのWGモードの散乱光スペクトルの変化を20分以内で確認することができた。また、酵素濃度を変えたWGモードのスペクトルシフト量より、抗原抗体層の厚みは30～70nm、屈折率は1.50と推定された。さらに、抗体を固定化したPS微小球のみ、スペクトルピーク部にスプリットモードが発生し、このモードがPS微小球表面上の酵素吸着に起因していることを確認できた。今後はこの開発した検査手法を応用することで、小型で安価なバイオセンサー装置の完成を目指していく。

参考文献

- [1] 田尻健志, 松本周三, 原口雅宣, 今任稔彦, 長崎県工業技術センター研究報告, No40, pp.27-29(2011)
- [2] 田尻健志, 松本周三, 原口雅宣, 今任稔彦, 長崎県工業技術センター研究報告, No41, pp.31-33(2012)
- [3] 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)
- [4] T.Tajiri, S.Matsumoto, T.Imato, T.Okamoto, and M.Haraguchi: Ext.Abstr, Seventh International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE7), p221 (2013).
- [5] M.Himmelhaus, S.Krishnamoorthy, and A.Francois: Sensors 10 6257 (2010).
- [6] X.Fan, I.M.White, S.I.Shopova, H.Zhu, J.D.Suter, and Y.Sun: Anal. Chim. Acta 620 8 (2008).
- [7] J.Voros: Bio. Journal 87 553 (2004)
- [8] 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).

高感度な植物蒸散量計の開発

研究企画課 課長 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。このため、柑橘栽培などの農業現場では、灌水管の判断材料とするため、緑葉の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蒸散量測定デバイスを開発し、柑橘緑葉の気孔からの水分蒸散量を実用精度で計測できる安価な装置を試作開発することを目標とする。

研究事業の第1年度目となる平成24年度は、①既存の電子計測技術による蒸散量の計測実験、②柑橘緑葉に適したプローブ構造の検討、③光計測技術による蒸散量計測技術の開発検討、に取り組んだ。

1. 緒 言

果実育成期間中の水分ストレスを適切に管理すれば収穫果実の糖度を増すことができる^[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が行われる^[1]。

また一方で、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。このため、柑橘栽培などの農業現場では、灌水管の判断材料にできる、緑葉の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する。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する。

研究事業の第1年度目となる平成24年度は、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するため、①既存の電子計測技術による蒸散量の計測実験、②柑橘緑葉に適したプローブ構造の検討、③光計測技術による蒸散量計測技術の開発検討、に取り組んだ。

2. 開発検討の方法

2.1 柑橘緑葉に適したプローブ構造の検討

柑橘緑葉に適したプローブ構造を考案するため、図1に示す概念の実験治具を製作して、実験と検討を行う。なお、現段階では光計測技術を活用した新しい蒸散量計測用デバイスを開発中であるため、係る実験は既存の電子計測デバイスを用いることとする。

実験治具は、2つの計測チャンバを持ち、それぞれ内部に計測デバイスを固定する。そして、計測を行わないときにのみ開放する換気口を設けるとともに、片

方の計測チャンバにのみ開口部を設ける。

実験治具による計測実験は、この開口部を緑葉裏面によって塞ぎ、両方の計測チャンバ内の相対湿度の時間変化を測定することで行う。

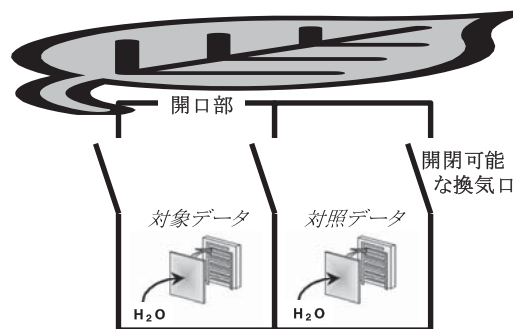


図1 実験治具の概念図

2.2 光計測技術による蒸散量計測技術の検討

閉じられた空間である計測チャンバの中に緑葉裏面の気孔から蒸散する水分が供給され続けられれば、計測チャンバを満たす空気中の水分量は飽和状態に向かって上昇する。そして、その水分が、いずれは気孔からの蒸散を阻害することが推測される。

従って、ここでは、計測チャンバ内を満たす空気から水分を常に取り除き、葉からの蒸散を阻害することなく蒸散量を計測できる手法を検討する。

3. 結果と考察

3.1 実験治具の製作

図2は製作した実験治具の外観であり、その概略仕様を表1に示す。

それぞれの計測チャンバは、みかん緑葉の幅を考慮して、開口部の直径をφ19mmとした。また、治具の構造上の制限から容積は12.49mLとなった。計測チャンバは1軸スライド上に固定されており、それをスラ

イドすることで計測チャンバの開閉、ならびにサンプルとなる緑葉の把持が可能となっている。

既存の電子計測デバイスには、SensirionのDigital Humidity Sensor、SHT75^[2]を用いた。このセンサは、温度： $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度： $\pm 1.8\% \text{RH}$ の精度で計測することができる。

また、この実験治具は制御用の電子回路を搭載しており、2つの計測チャンバ内の温度と湿度を、1秒間隔で同期して測定した上で、シリアル・ポートを通じて印字出力可能となっている。

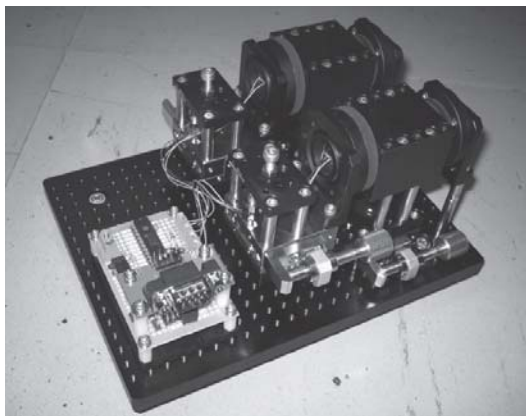


図2 実験治具の外観

表1 実験治具の仕様

項目	内容
測定チャンバ	容積：約12.49mL、開口： $\phi 19\text{mm}$ 、数：2
使用センサ	SHT75, Digital Humidity Sensor, Sensirion
測定項目と範囲	温度： $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度： $\pm 1.8\% \text{RH}$
測定間隔	1秒間隔

3.2 既存電子計測デバイスによる蒸散量計測の試み

図3は、気温が 30.8°C 、相対湿度が58.1%の雰囲気下において、片方の計測チャンバの開口部に湿らせた濾紙をサンプルとして把持させて、測定実験を行った結果例である。

この結果から、サンプルである湿らせた濾紙を把持した計測チャンバでは、測定を開始してから数十秒で急速に相対湿度が上昇し、後の変化が緩やかになることが確認できる。このことから、計測チャンバ内を満たす空気中の水分量によって、湿らせた濾紙からの水分の蒸散が阻害されていることが確認できる。

また、同一雰囲気下で、サンプル緑葉を把持した実験も行ったが、計測チャンバ内の相対湿度に顕著な変化は見られなかった。この原因は、サンプル緑葉の蒸散が、既に雰囲気中の相対湿度と平衡状態にあること

が原因と考えられる。

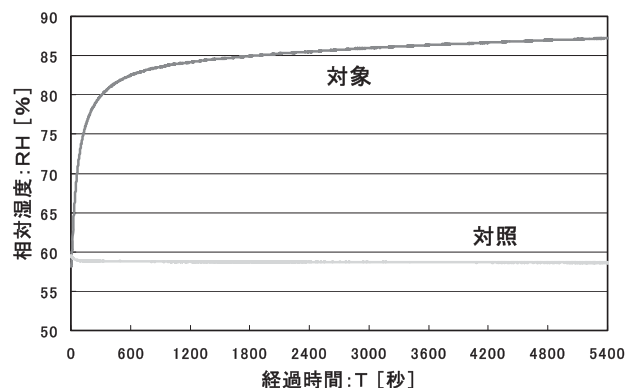


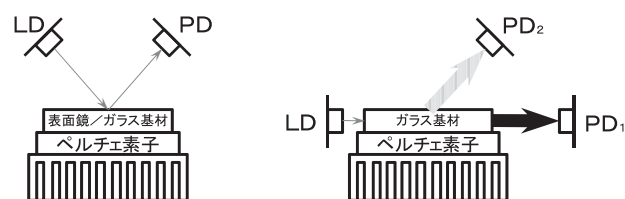
図3 測定結果例(サンプル; 湿らせた濾紙)

3.3 光計測技術による蒸散量計測技術の検討

図4(a)は、従来からある露点計の基本原則を示している。露点計測は、鏡面を温度制御しながら徐々に冷却し、結露が生じたときの正確な鏡面温度を知ることで行われる。

この方法は、結露を生じさせることから、空気中の水分を除去する能力が示唆される。しかしながら、緑葉から水分が供給され続けた場合、露点が増加することになる上、やはり計測チャンバ内を満たす空気中の水分量は飽和状態となる。

そこで、この報告では、図4(b)に示す構造の計測デバイスを提案する^[3]。提案のデバイスでは、ペルチェ素子などで冷却され続けているガラス基材に、横から光を導入する。導入された光は、その殆どが対向する光検出器に到達する。しかし、ガラス基材の表面に結露が生じれば、その結露量に応じて光がガラス基材表面に漏れ出し、上方に位置する光検出器にも到達する。そこで、これら2つの光検出器が捉えた光量の変化を調べることで、結露量を推定する。この方法であれば、ガラス基材表面に生じる結露の量が時間とともに増加することから、計測チャンバ内を満たす空気中の水分量が飽和することを回避できると考えられる。なお、この手法を応用した蒸散量計測技術については、既に特許出願を行った。



(a) 露点計の基本構成 (b) 新規開発品の基本構成

図4 新しい計測デバイスの基本構成

4. 結 言

柑橘の栽培現場では、日中は高温多湿になっていることが容易に想像される。また、栽培の過程において、肥料や薬剤の散布なども行われる。

従来の相対湿度などの計測には、空気中の水分量を計測する高分子抵抗式や高分子容量式などの電子デバイスを用いたものが多い。しかしこれらは、温度補正が必要、低湿度で感度が低下する、結露で特性が劣化する、有機溶剤に弱い、などの弱点がある。また、鏡面冷却式露点計測法は、測定結果に高い信頼性がある反面、鏡面冷却温度の正確な制御が必要となり、比較的装置が高価であるという欠点がある。

従って本事業では、柑橘緑葉の気孔からの蒸散量を測定することに適した新たな測定手法として、時々刻々増加する結露量を連続して測定し、その増加量から水分蒸散量を推定する手法の開発を進めている。本年度は、その第1段として、プローブ構造の検討や光計測技術を活用した新しい蒸散量計測技術の開発検討などに取り組んだ。

今後は、本年度の成果を活用し、実用精度で柑橘緑葉の気孔からの水分蒸散量を計測する安価な装置の開発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] Sensirion, SHT75 - Digital Humidity Sensor (RH&T), <http://www.sensirion.com/> (Accessed 4 Jan. 2013).
- [3] 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.

DLC 膜形成技術開発と精密産業への展開

所 長 馬 場 恒 明
ファインコーティング株式会社 代表取締役社長 古 田 英 司
ダムシュタット工科大学 教 授 W. Ensinger

精密機械部品の特性を向上させ、他に対する製品の競争力をつけるには加工技術に加え部材の高機能化が必要であり、これを付与するための部材表面へのダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜を代表とする機能性薄膜形成、イオン注入およびラジカル窒化による表層改質に関する研究開発を行った。精密金型への耐摩耗性・離型性付与を目的として、化学気相蒸着(CVD)法では通常困難な高硬度DLC膜を作製するために、プラズマソースイオン注入(PSII)によるDLC膜作製時の高周波グロー放電併用の効果について調べた。また、原料ガス種の効果について調べるために、エチレンガスによるDLC膜作製を行った。さらに金型の表面硬化およびDLC膜コーティングの前処理としてのラジカル窒化について調べた。

1. 緒 言

DLC膜は高硬度、低摩擦係数、化学的に不活性など各種材料の保護膜として優れた特性を有していることから、産業において注目され、また応用化が進みつつある。応用分野は、工具、金型、自動車などの輸送機械、電子デバイス印刷用マスクなど多くの分野であり、今後さらに広がることが期待されている。本研究では、精密機械部品、精密金型へのDLC膜コーティングによる機能性付与を目的として、要素技術として保有しているプラズマソースイオン注入(PSII)法を用いてDLC膜作製技術を開発した。

なお、本研究は平成22年度から平成24年度までの3年間の計画で行っており、本報は平成24年度の実施研究内容についてまとめたものである。本報では、プラズマソースイオン注入(PSII)法による精密金型へのDLC膜コーティングを目的として、CVD法では通常困難な高硬度DLC膜を作製するために、PSII法によるDLC膜作製時の高周波グロー放電併用の効果について調べた。また、金型の表面硬化およびDLC膜コーティングの前処理としてのラジカル窒化について調べた。

2. 実験方法

2.1 高周波グロー放電を併用したDLC膜作製

DLC膜コーティング時のプラズマ密度を上げることを目的として、パルス電圧を印加する試料ホルダに平行平板対極を設置し、これに100Wの高周波を印加することによりグロー放電プラズマを生成させ、同時に0.5から3.0kVのDCバイアス電圧を印加した。原料ガスにはアセチレン(C_2H_2)ガスを用いた。基板にはシリコンウエハを用いた。

2.2 エチレンプラズマソースイオン注入によるDLC膜作製

シリコンウエハを基板として用いた。プラズマ原料にエチレン(C_2H_4)ガスを用いた。所定のガス流量を真空チャンバーに導入しながら、デューティサイクル1%で電圧-5～-18kVのパルス電圧と、これに重畳して-1.5～-3.0kVのDC電圧をバイアス電圧として基板ホルダに引加することによりプラズマの生成とDLC膜の作製を行った。原料ガスによる違いを調べるために、所定の成膜条件でメタン(CH_4)およびアセチレン(C_2H_2)ガスを用いた成膜も行った。

2.3 ラジカル窒化による表面改質

表面処理に用いた装置は日本電子工業(株)製ラジカル窒化装置JRN-4040VSである。基板には、鏡面研磨した種々の鋼材を用いた。窒化温度は450℃から550℃の間で、窒化時間は6時間である。窒化にはアンモニアガスおよび水素ガスを用いた。ラジカル生成のためにDCグロー放電を用いた。

2.4 表層分析および特性評価

PSII法により作製した薄膜の表面形態観察には走査型電子顕微鏡(SEM)および原子間力顕微鏡(AFM)を用いた。生成した膜の膜厚測定には断面SEMを用いた。表層の組成および化学結合状態の分析にはオージェ電子分析(AES)、二次イオン質量分析(SIMS)、Mg K α 線を励起源としたX線光電子分析(XPS)およびエネルギー分散型X線分析装置(EDS)を用いた。またDLC膜の構造解析にはラマン分光を用いた。水素濃度分析には弾性反跳散乱法(ERDA)を用いた。

表層の特性評価として、DLC膜の硬度測定には最大荷重200 μN としたインデンテーション法を用いた。また、トライボロジー特性を評価するために、直径6mmのWCボールを用い、ボール・オン・ディスク試験機を用いて、荷重1Nでの摩擦係数を測定した。ラジカル窒化処理した基板については、マイクロビッカース硬度計により硬度測定を行った。

3. 結果と考察

3.1 高周波グロー放電を併用したDLC膜作製

平行平板型対極を用いた高周波グロー放電とPSII法の併用により、密着性に優れた硬度30GPaの高硬度、平均粗さ0.23nmの平滑な付きまわりの良いDLC膜が得られた。

3.2 エチレンプラズマソースイオン注入によるDLC膜作製

図1に C_2H_2 ガスをプラズマ原料として用いたときのDLC膜厚に及ぼす基板に引加するパルスバイアス電圧の効果を示している。なお、パルス条件を3種類変化させた結果を示している。パルスバイアス電圧上昇に伴い成膜速度は単調に上昇していることがわかる。また、パルス条件依存性については、パルス周波数が変わっても成膜速度に及ぼす効果は小さい。このことは、パルス電圧が高い方がプラズマ密度が高くなることパルス周波数が変わってもデューティサイクルを1%と一定にしているために、成膜時間におけるパルスオンタイムが同じであることから、成膜速度に違いが見られなかったと考えられる。

基板に引加しているDCバイアス電圧が成膜速度に及ぼす影響を図2に示している。本成膜法は基板に印加したバイアス電圧によりプラズマを励起しているの

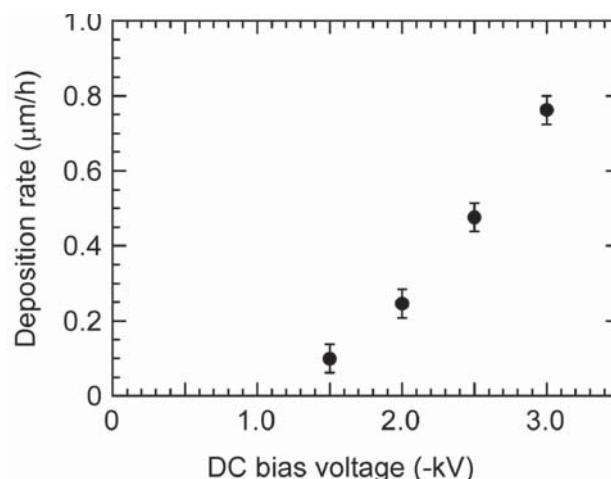


図2 成膜速度のDCバイアス電圧依存性

で、DC電圧増加に伴い励起するためのエネルギーが高くなることによりプラズマ密度が高くなり、原料エチレンガスの分解とイオン化、およびラジカル化が進行することにより成膜速度が高くなったと考えることができる。

何れの条件で生成したDLC膜の表面も、SEM観察できる倍率では平滑であり、形態は見られなかった。図3にパルス電圧-15kVで作製したDLC膜について、AFMで観察した結果を示している。非常に平滑であり、イメージ全体の平均粗さは0.428nmであった。

本研究で用いているPSII法はCVDを基本としているため、原料炭化水素ガスに含まれている水素が膜の化学結合をターミネートするかたちで含まれている。従って、水素濃度が高くなると膜硬度は低下する。水素濃度の絶対値はERDAで測定することができる。図4には、メタン(CH_4)およびアセチレン(C_2H_2)ガスを用い、同一条件で作製したDLC膜中のERDAにより得られた水素濃度を示している。何れの原料についても

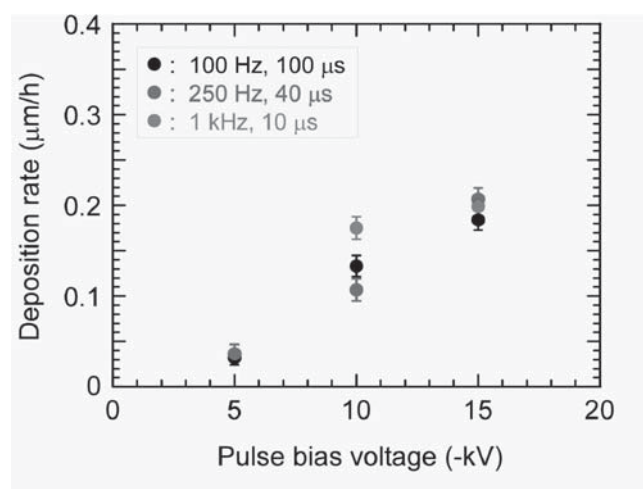


図1 成膜速度のパルスバイアス電圧依存性

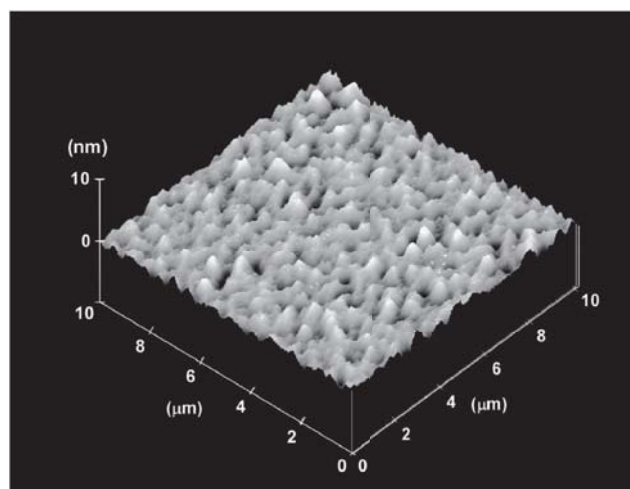


図3 DLC膜のAFMイメージ

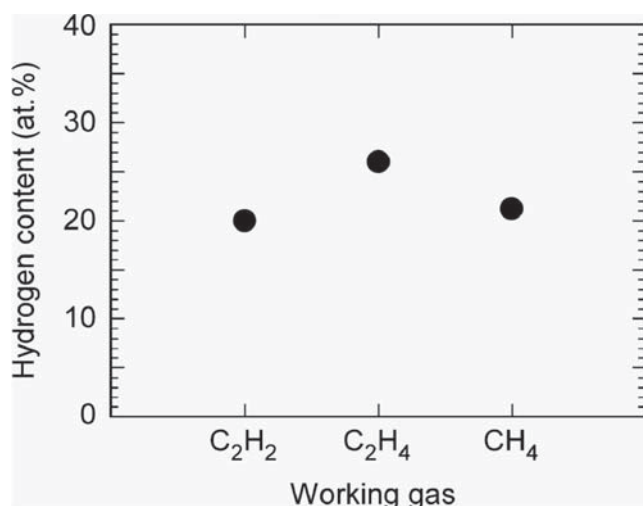


図4 DLC膜中の水素濃度

20～25 at.%の範囲にあり、原料ガス中の水素濃度依存性は見られない。CH₄ガスは最も多く水素を含んでいるのに対し、膜中の水素濃度が低いことについては、次のように考えることができる。負のバイアス電圧で吸引加速された分子イオンが基板表面に衝突したとき、運動エネルギーが放出される。これの多くが衝突したイオン自体に与えられ、分子イオンを分解する。ガス分子がそのままイオン化したとすると、メタンには炭素原子が1個しかないために、分子を構成する化

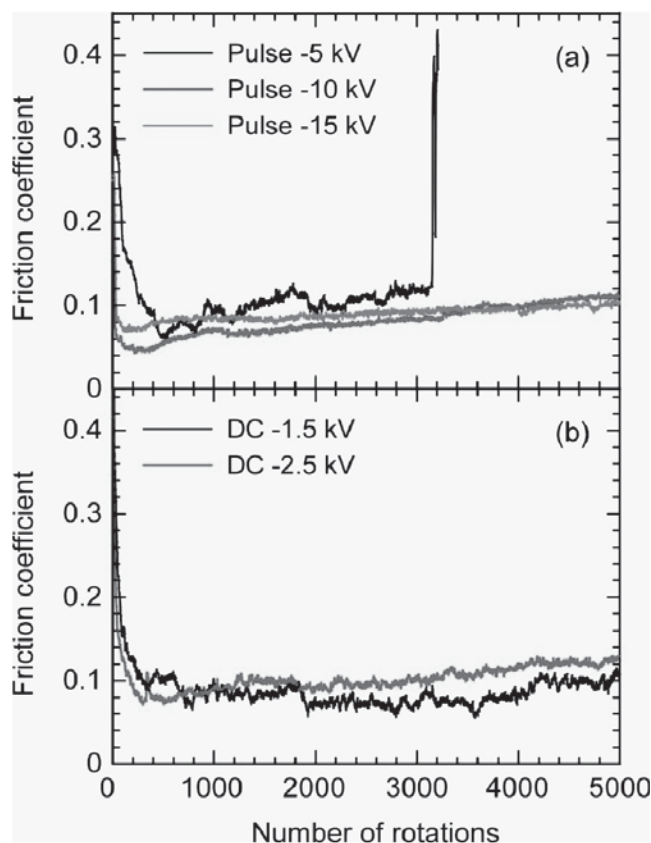


図5 DLC膜のボール・オン・ディスク試験結果

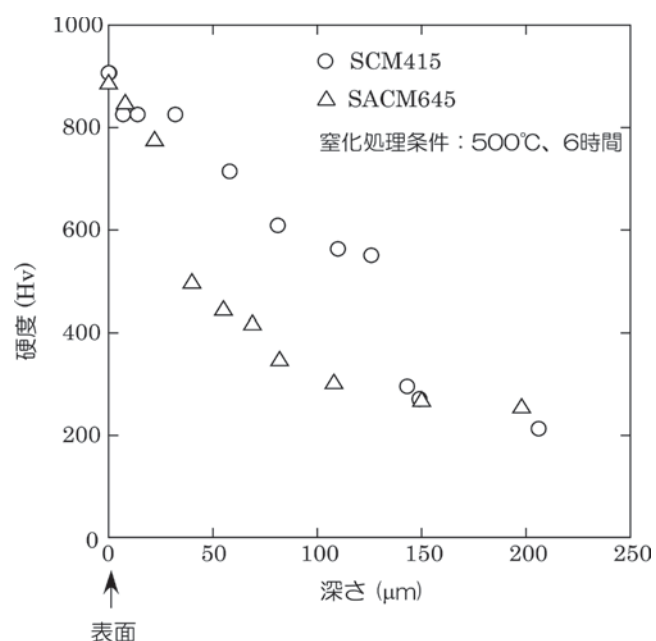


図6 試料断面における硬度

学結合当たりのエネルギーは、質量数が12と高い炭素を1個しか含まないCH₄が最も高い。また、C-Hの結合エネルギーはC=C結合およびC≡Cより小さいために、C-Hの解離が進み水素分子として排出されたことによると考えることができる。

図5にボール・オン・ディスク試験により調べた摩擦係数変化を示している。バイアス電圧による違いについては、パルス電圧が-5kVのとき回転数約3200回で摩擦係数が急激に高くなっており、これは膜の剥離に起因するものである。PSII法では成膜初期のイオン注入効果による良好な密着性が期待できるが、パルス電圧が低くなると注入効果が低くなり、試験の途中で剥離したものと考えられる。その他の膜については、摩擦係数0.1あるいはこれ以下の低い値が得られた。

3.3 ラジカル窒化による表面改質

温度500℃で窒化処理したクロムモリブデン鋼であるSCM415およびSACM645について、試料断面を図6に示す。何れの試料も表面近傍は、未処理の硬度Hv200程度からHv900程度まで約4倍高くなっていることがわかる。内部になるに従い窒素濃度が減少するために硬度も減少し、深さ約100 μmまで硬化が見られる。50 μm程度の間では硬化の程度に違いが見られる。これは、材質による窒素の拡散係数の違いを反映しており、窒素原子と親和性があるアルミニウムを含むことによる窒素のトラップ効果によるものと考えられる。

種々の鋼材について、ラジカル窒化による硬度の

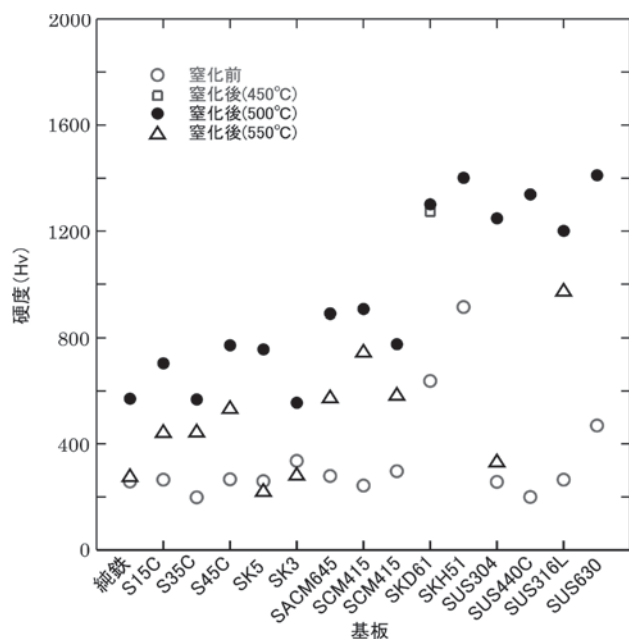


図7 ラジカル窒化した鋼材の硬度

変化を図7に示している。いずれの鋼材についても、500℃での窒化処理により硬度が2～6倍に増えていることがわかる。550℃では、軟化を伴うアニールが同時に起こっているためか、硬化されないか硬度増加の割合が小さいことがわかる。

4. 結 言

本研究において、DLC膜の精密産業への応用を目的として、管内壁へのDLC膜コーティング、マイクロレンチへのDLC膜コーティング、RFアシストグロー放電を併用した方法、およびアンバランスドマグネトロン(UBM)スパッタ法とPSII法によるDLC膜作製について検討し、膜構造、膜組成および機械的特性について調べた。以下に研究結果を要約する。

- (1) ホローカソード放電を用いることにより、内径9、5および4mmのステンレス鋼内壁へのDLC膜コーティングが可能である。
- (2) 10 μ m幅の種々アスペクト比を有するレンチに対し、成膜条件を調整することにより、上面と側面での膜厚比0.61のDLC膜コーティングが可能となった。
- (3) 高周波グロー放電を併用した成膜法により作製したDLC膜について、硬度約30GPaの高硬度が得られた。これらの膜の摩擦係数は0.05程度と非常に低い。
- (6) UMBスパッタ法とPSII法を複合した成膜法により、金属中間層を必要としない高密着性のDLC膜が得られた。また、アルゴンガスに加えメタンガスを添加する

ことにより、摩擦係数を0.05程度低くすることができる。

(7) 種々の鋼材について、ラジカル窒化処理温度と硬度の関係が明らかとなった。最大6倍の硬化が可能であり、表面のスパッタによる粗化も小さい。

精密機械加工における環境に優しい冷却システムの開発

工業材料科 科長 瀧 内 直 祐

長崎県内の金属加工業では、環境問題等を考慮した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。材料の高機能化、多様化等により、ステンレス鋼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切削油剤を使用しない冷却方法を検討することを目的として、平成23年度の切削油剤およびミストを使用した炭素鋼(S45C)のエンドミル切削加工に引き続き、冷却方法として圧縮空気をを用いたステンレス鋼(SUS304)、炭素鋼(S45C)のエンドミル切削加工実験を行った。切削油剤、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。また、被削材の種類(S45C、SUS304)の違いによる検討も行った。

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た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] ~ [14]}を行った。

平成23年度のTiAlNコーテッド超硬エンドミル工具を使用した炭素鋼(S45C)のエンドミル切削加工に引き続き、平成24年度は同工具を用いて、ステンレス鋼(SUS304)、炭素鋼(S45C)の圧縮空気をを用いたエンドミル切削加工実験を行い、切削油剤、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。また、被削材の種類(S45C、SUS304)の違いによる比較検討も行った。

2. 実験方法

実験は基本的に前報^[14]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)、炭素鋼(S45C)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($\phi 8\text{mm}$ 、4枚刃、ねじれ角 30°)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)

圧縮空気、切削油剤、ミストの方法でエンドミル切削加工実験を行い、ミスト(切削油)はブルーベ植物性切削油(LB-1)、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(X30)(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(R_z)は、加工面の両端より 20mm の所を、それぞれA部、B部とし、その中心部の切削工具の進行方向をX方向、切削工具の軸方向をY方向として、超精密表面形状粗さ測定機(アメテック製PGI1200)を用いて測定した。

なお、TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具の刃先における逃げ面摩耗幅が $100\mu\text{m}$ 以上、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 ステンレス鋼の切削加工実験

図1は、ステンレス鋼(SUS304)の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○印はミス

ト、△印は切削油剤、□印は圧縮空気を用いた時の結果である。ミスト、圧縮空気を使用した場合のいずれも、切削距離0.5mにおいて、工具表面のコーティング膜が剥離した。

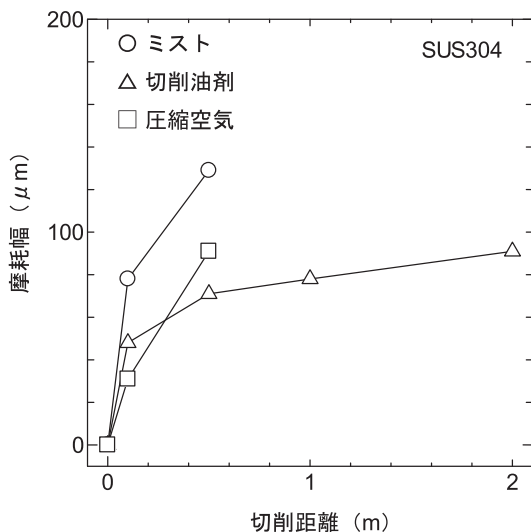


図1 切削距離と摩耗幅との関係

図2は、ステンレス鋼(SUS304)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○印はミスト、△印は切削油剤、□印は圧縮空気を用いた時の結果である。前述の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。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。

表面粗さ(Rz)は、切削距離0.5mにおいて、圧縮空気を使用した場合に約4μm以上であり、ミスト、切削油剤を使用した場合のいずれも、約3μmであった。

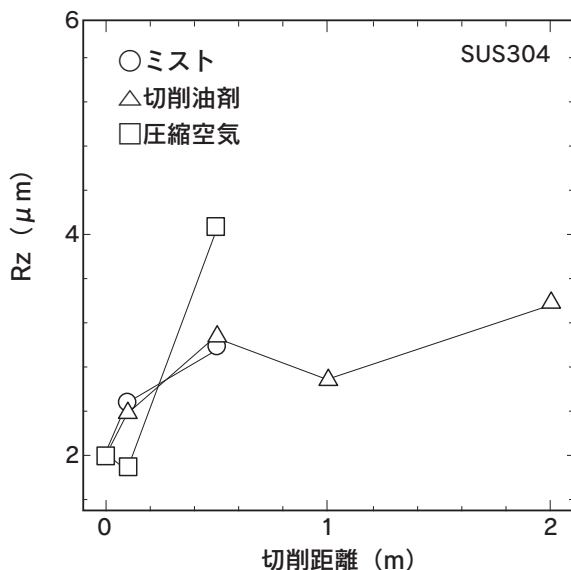


図2 切削距離と表面粗さ(Rz)との関係

3.2 炭素鋼の切削加工実験

図3は、炭素鋼(S45C)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○印はミスト、△印は切削油剤、□印は圧縮空気を冷却方法に用いた時の結果である。

切削距離2mにおいて、ミスト、切削油剤を使用した場合のいずれも逃げ面摩耗幅が約80μmであったが、圧縮空気を使用した場合は逃げ面摩耗幅が約40μmであった。

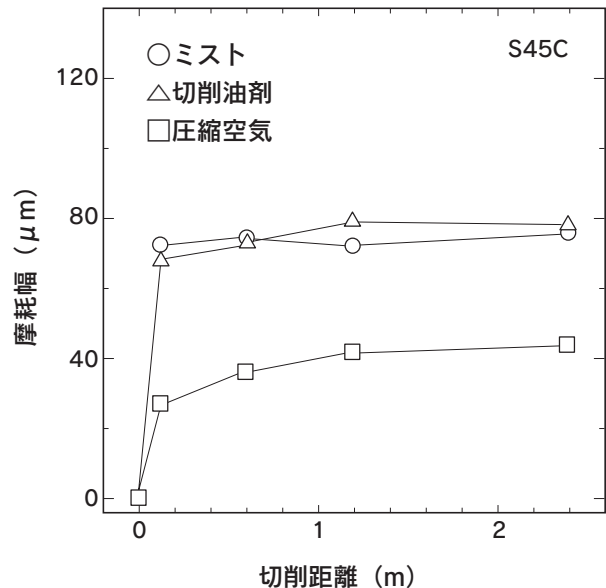


図3 切削距離と摩耗幅との関係

図4は、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○印はミスト、△印は切削油剤、□印は圧縮空気を用いた時の結果である。

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、表面粗さ(Rz)は、圧縮空気、切削油剤を使用した場合のいずれも、約3μmに対して、ミストは、約1μmであった。

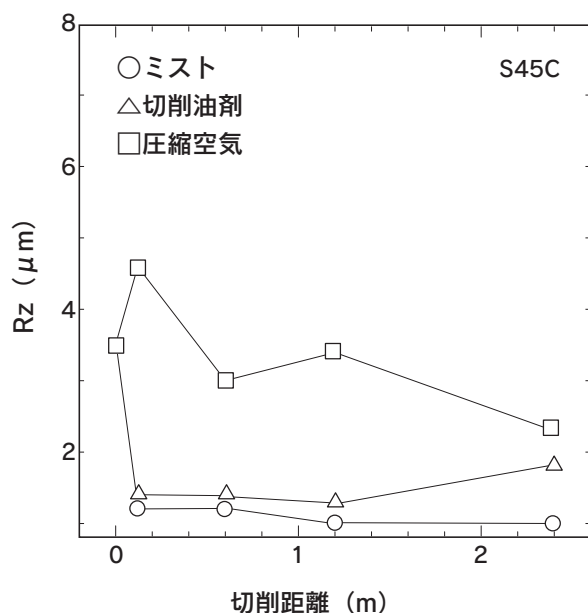


図4 切削距離と表面粗さ(Rz)との関係

3.3 圧縮空気を用いた時の炭素鋼、ステンレス鋼における工具刃先の逃げ面摩耗幅、表面粗さとの関係

図5は、圧縮空気を用いた時の炭素鋼(S45C)、ステンレス鋼(SUS304)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、炭素鋼(S45C)、■印は、ステンレス鋼(SUS304)の結果である。ステンレス鋼(SUS304)では切削距離0.5mで工具表面のコーティング膜の剥離が発生し、工具摩耗が著しく大きい結果となったが、炭素鋼は工具表面の剥離等が発生しなかった。

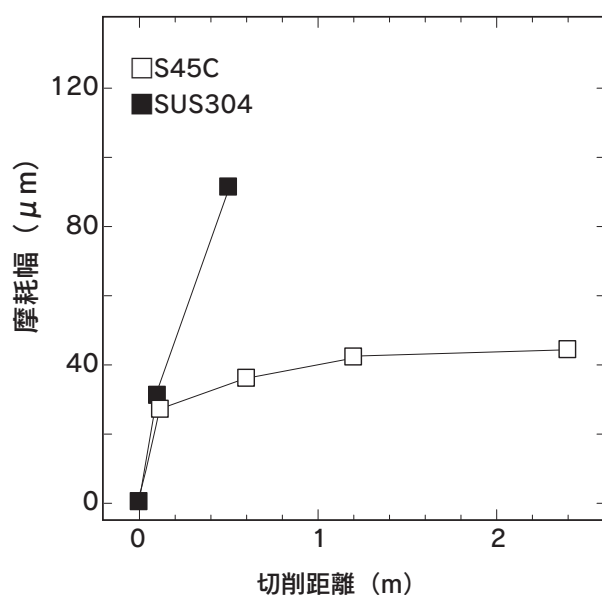


図5 切削距離と摩耗幅との関係

図6は、圧縮空気を用いた時の炭素鋼(S45C)、ステンレス鋼(SUS304)における表面粗さ(Rz)と切削距離との関係を示す。図中の□印は炭素鋼(S45C)、■印はステンレス鋼(SUS304)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0.5mにおいて、ステンレス鋼(SUS304)の表面粗さ(Rz)は、約4μmに対して、炭素鋼(S45C)の表面粗さ(Rz)は、約3μmであった。

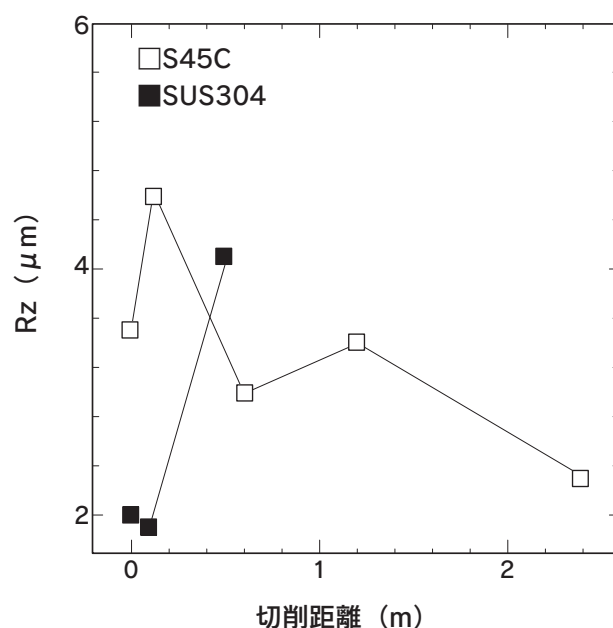


図6 切削距離と表面粗さ(Rz)との関係

4. 結 言

TiAlNコーテッド超硬エンドミル工具を用いてステンレス鋼(SUS304)、炭素鋼(S45C)のエンドミル切削加工実験を行い、冷却方法として切削油剤、ミスト、圧縮空気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。また、被削材の種類(S45C、SUS304)の違いによる比較検討も行った。その結果は、以下のとおりである。

- (1) ステンレス鋼(SUS304)において、切削油剤を使用した場合に工具摩耗、表面粗さ(Rz)ともに良好な結果が得られた。ミスト、圧縮空気を使用した場合に工具表面のコーティング膜が剥離した。
- (2) 炭素鋼(S45C)において、工具摩耗は圧縮空気を使用した場合に良好な結果が得られ、表面粗さ(Rz)はミストの方が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
(1995)134
- [2] 瀧内直祐：長崎県工業技術センター研究報告24
(1996)108
- [3] 松永一隆、瀧内直祐：長崎県工業技術センター研究報告27(1999)30
- [4] 瀧内直祐、松永一隆：長崎県工業技術センター研究報告30(2001)51
- [5] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告31(2002)54
- [6] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告32(2003)53
- [7] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告34(2004)51
- [8] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告35(2005)43
- [9] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告36(2006)41
- [10] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告37(2007)38
- [11] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告38(2008)28
- [12] 瀧内直祐、太田泰平：長崎県工業技術センター研究報告39(2009)37
- [13] 瀧内直祐：長崎県工業技術センター研究報告40(2010)37
- [14] 瀧内直祐：長崎県工業技術センター研究報告41(2011)43

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1報)

工業材料科 主任研究員 重 光 保 博

近年、バイオ分野へのシミュレーション技術の応用を通じて、*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。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、グラフィックプロセッシングユニット（GPU）を用いた分子動力学（MD）シミュレーション高速化のベンチマークテストを行った。

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プロセスにおいて、成否を決める大きな要因である。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ため、構造基盤薬物設計(SDBB)やインフォマティクス解析との融合によって、リード化合物の合理的選択が試みられている。SDBBはリード化合物の最適化手法として広く普及しており創薬現場で活用されている。

前段の研究事業「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22年度～平成24年度)」では、インシリコ創薬の前段研究として、タンパク質サイズの巨大高分子の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的とした。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、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。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。その具体的適用例として、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]。

本報告では、コンシューマー普及版のNVIDIA @ GeForce GTXシリーズを用いて、コストパフォーマンスの高いMDシミュレーションに向けた簡単なベンチマークテストを行った。グラフィック処理用コプロ

セッサー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(General-Purpose GPU)。GPUの特徴は、階層構造のストリームマルチプロセッサ(SM)によってSIMD命令が効率よく実行されるとともに、CPUよりも一桁大きいメモリバンド幅を有するため、分岐命令が入らない単純計算効率はCPUと比較して格段に向上する。MDシミュレーションは、GPGPUの先駆的導入分野であり、活発な研究がおこなわれている^[2]。

2. 手法

2.1 計算環境(ハードウェア)

GPUマシンは、Intel@i7 2700KベースのNVIDIA@ GTX570/GTX580/GTX570x2を使用した。比較CPUマシンとして、Xeon E5620x2(2.4GHz:4x2=8core), X5650 x2(2.66GHz:6X2=12core)を使用した。(図1)



図1 使用したクラスター計算機

2.2 計算環境(ソフトウェア)

MDシミュレーションにはAMBER ver.12を用いた。シミュレーションは全てCent OS ver.6.2上で行った。GPU用APIはCUDA ver.4.2を使用した。(表1)

AMBERでは、計算速度と計算精度の制御モードとして、SPFP(all calculations performed by single precision)/ SPDP (single precision for the entire calculations with the exception of SHAKE done in double precision)/ DPDP(all calculations performed by single precision)が用意されており、それぞれで実行して比較した。

表1 ベンチマークテストのソフトウェア環境

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

2.3 MDシミュレーションを実行した系

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MDシミュレーションで追跡した。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2)

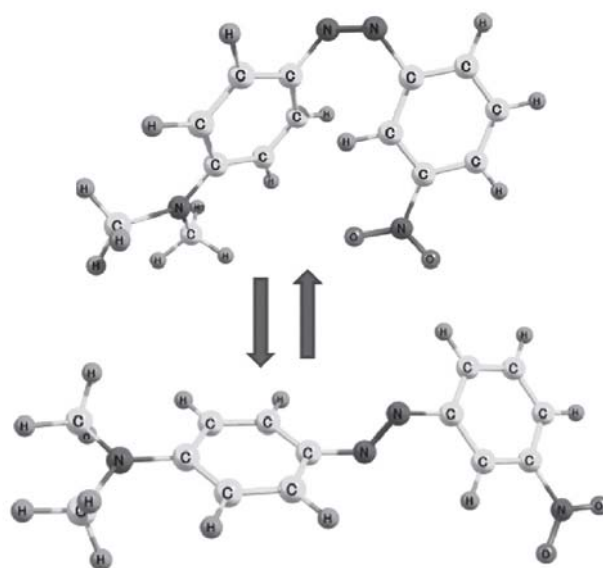


図2 DNAB分子のCis-Trans異性化反応

3. 結果と考察

表2にGPUとCPUパフォーマンス比較を示す。CPUのDPDPとの比較で、GPUのSPFP/SPDPでは約一桁、DPDPモードでも約2倍のGPU優位性が認められる。よく知られているとおり、GeForceシリーズでは倍精度計算性能は単精度計算性能と比較して大きくパフォーマンスが抑えられている。GTX580を例にとると、理論性能比(倍精度:0.2TFLOPS, 単精度:1.58TFLOPS)だが、本ベンチマークではDPDPモードはSPDPモードの1/2-1/3程度の速度低下にとどまっている。また、twin GTX 570の効果は、AMBERのCUDAコードが最適化されていないために単純に2倍の性能は出していない。GPUメモリバンド幅やPCI-Express (ver.2)バンド幅がボトルネックと考えられる。以上のベンチマークは、AMBER website上にあるNPTアンサンブルMDシミュレーション結果と同様な傾向を示している^[3]。

DPDPモードでのCis-Trans異性化に伴う-C-N=N-C-振り角変化を図3に示す。SPFP, SPDPでは、400ns付近からシステムが崩壊して温度や圧力が発散した。両ケースとも、単精度計算の蓄積誤差が長時間MDの結果露呈したと考えられる。GPUの長所である高速単精度計算と計算精度の保証の両立には注意が必要である。

本報告の簡単なベンチマークによって、MDシミュレーションの大規模化・精密化に対してGPGPUが有効であることを実証した。GPUは急速な発展途上にあり、GTX GeForceシリーズ最新のTitanは1TFLOPSを超える倍精度計算性能を有しておりパーソナル環境で

の大規模MDシミュレーションが身近になることが期待される。マイクロ秒～ミリ秒の超長時間MDシミュレーションに関して種々のmetadynamics法が開発されており、GPGPUと融合したMD加速技法によって^[4]、インシリコ創薬技術の今後の発展が期待される。

表2 各マシン上で実行したDNAB分子の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

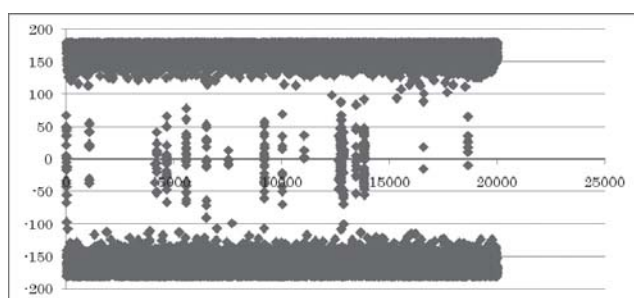


図3 MDシミュレーションによる-C-N=N-C-振り
角の変化

4. 参考文献

- [1] Y.Shigemitsu, Quantum chemical study on molecular-level affinity of DJ-1 binding compounds, Int.J.Quant. Chem. 113(4), pp.574-579 (2013)
- [2] D.Xu, M.Williamson, R.Walker, Advancements in Molecular Dynamics Simulations of Biomolecules on Graphical Processing Units, Ann.Rep.Comp.Chem., Vol.6, pp.3-17 (2010)
- [3] AMBER 12 Benchmarks by M.Wu and R.Walker.
URL: <http://ambermd.org/gpus/benchmarks.htm>
- [4] Pierce, L.C.T.; Salomon-Ferrer, R.; de Oliveira, C.A.F.; McCammon, J.A.; Walker, R.C., "Routine access to millisecond timescale events with accelerated molecular dynamics.", Journal of Chemical Theory and Computation, 8(9), 2997-3002 (2012)

ポリイミド樹脂の高機能化とフィルム基板への応用

工業材料科 主任研究員 市 瀬 英 明
佐世保工業高等専門学校 教 授 古 川 信 之

ポリイミド樹脂は、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危惧されている。このようなことから、ポリイミド樹脂には「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）、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ポリイミド樹脂を開発する。最終的に、県内企業と共同でフレキシブル銅張積層板を試作し、密着試験等の実証評価を行う。平成24年度は、ポリイミド樹脂と熱硬化性樹脂の分子複合材料を合成検討し、熱特性、及び透湿度などを検証した。その結果、ポリイミド樹脂とある種の熱硬化性樹脂を複合することにより、ガラス転移温度が向上すること、また透湿を抑制する効果があることがわかった。

1. 緒 言

ポリイミド樹脂は、卓越した耐熱性、耐薬品性に加えて優れた機械強度、電気特性を有するため、エレクトロニクス、各種産業用機械、航空宇宙などの分野において高性能部材として広範に用いられている。とくに、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危惧されている。そこで、本研究では、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

本研究において使用したポリイミド原料、及び溶剤等は、市販品の試薬をそのまま用いた。

2.2 ポリイミド／熱硬化性樹脂複合体ワニスの調製

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、内温が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3時間の攪拌を続け、ポリアミック酸溶液として得た。次に、共沸溶媒としてキシレンを添加し、系外へ水を連続的に留去させながら180℃にて5時間加熱イミド化した。その後、200℃にてキシレンを完全に留去させてポリイミド溶液を得た。

ポリイミド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、ポリイミド／熱硬化性樹脂複合ワニスとして得た。

2.3 ポリイミド／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20～30μm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。加熱条件は、100℃×1時間→150℃×1時間→200℃×1時間→250℃×1時間→300℃×2時間とした。放冷後、金枠から外して、ポリイミド／熱硬化性樹脂複合フィルムとして得た。

2.4 測定と分析

【動的粘弾性】動的粘弾性測定機(エスアイアイ・ナノテクノロジー(株)製、EXSTAR DMS6100)により行った。得られた損失正接($\tan \delta$)のピーク温度をガラス転移温度とした。

【透湿度】JIS Z0208“防湿包装材料の透湿度試験方法”に基づき、カップ法により行った。測定条件は、吸着

剤：塩化カルシウム、温度：25±0.5℃、相対湿度90±2%、試料直径：60mm、測定時間：24hとした。

3. 結果と考察

図1に得られたポリイミド樹脂フィルムの例を示す。今回試作したフィルムはいずれも淡褐色透明で可とう性に優れるものだった。一般に硬直な熱硬化性樹脂を複合すると、脆性が増し、フィルム成形性を悪化させることが多い。しかし、本実験系において、いずれのフィルムの成膜性は良好だった。



図1 ポリイミド／熱硬化性樹脂複合フィルム

図2にポリイミド/熱硬化性樹脂複合フィルムの貯蔵弾性率(E')、及び損失正接(tan δ)の温度依存性を、表1にガラス転移温度(T_g)を示す。ポリイミド(PI)単体と比較して、複合材硬化前では貯蔵弾性率E'が若干低温側にシフトした。これは低分子量成分である未硬化の熱硬化性樹脂の存在により可塑化されたことに起因すると考えられる。また、硬化後については、PI単体と比較してT_gは向上した。これはPI溶液中で熱硬化性樹脂が硬化し、三次元ネットワークを形成したためと推測される。

PI単体と比較して、熱硬化性樹脂を複合化するとT_gは向上したが、複合化率を23.1%まで上昇するとT_gは低下に転じた。これは、PIと熱硬化性樹脂のネットワーク形成(分子複合)が十分に進行していないため、または過剰な熱硬化性樹脂が分子複合に関与できず、全体としてPI単体よりもT_gの低い熱硬化性樹脂側に引きずられた結果と考えられる。

なお、今回試作したフィルムの化学的耐熱性は、熱重量分析の結果より、いずれの複合化フィルムも5%重量減少温度が450℃を超えていた。このことから、鉛フリーハンダリフロー工程等で求められる耐熱性は十分有していると判断できる。

ポリイミド/熱硬化性樹脂複合フィルム複合材の透

湿度は、表2のとおり、熱硬化性樹脂の複合化率の上昇にともない低下した。これは、熱硬化性樹脂を複合化することにより、フィルム形成分子の自由体積が減少したためと推測される。

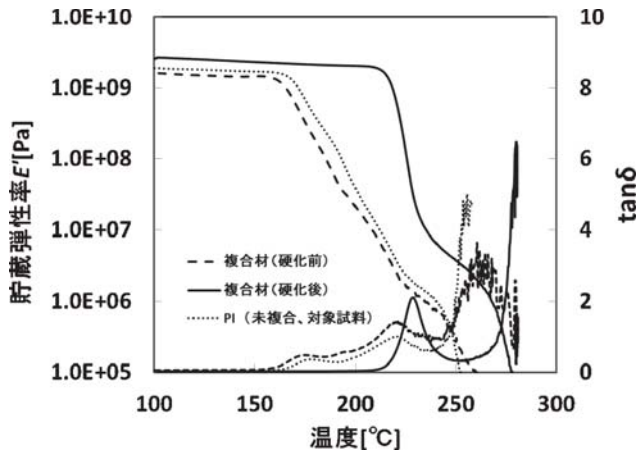


図2 ポリイミド/熱硬化性樹脂複合フィルムの動的粘弾性測定結果

表1 ポリイミド/熱硬化性樹脂複合フィルムのガラス転移温度

試作 No.	熱硬化性樹脂 複合化率[wt%]	T _g [°C]
1	0 (対照)	220
2	9.1 (硬化前)	221
3	9.1 (硬化後)	229
4	16.7 (硬化後)	229
5	23.1 (硬化後)	226
参考	熱硬化性樹脂単体 (硬化後)	211

表2 ポリイミド/熱硬化性樹脂複合フィルムの透湿度

試作 No.	熱硬化性樹脂 複合化率[wt%]	透湿度 [g/m ² ・24h]
1	0 (対照)	40.01
3	9.1	36.16
4	16.7	27.48
5	23.1	16.07

4 結 言

1) 今回試作したフィルムは、脆性の高い熱硬化性樹脂

を複合化しても、成形性、可とう性ともに良好であった。

- 2) ポリイミド樹脂に熱硬化性樹脂を複合化することにより、ガラス転移温度が上昇した。
- 3) ポリイミド/熱硬化性樹脂複合フィルムの5%重量減少温度はいずれも450℃を超えており、エレクトロニクス分野において求められる十分な耐熱性を有していた。
- 4) ポリイミド樹脂に熱硬化性樹脂を複合化することにより、透湿度が抑制された。

参考文献

- [1] 横田力男, 安藤慎治ら: “最新ポリイミド”, エヌ・ティー・エス (2010)
- [2] 古川信之: 接着, 49, pp.15-26 (2005)

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。

そこで本研究では、産業界からの要求が厳しい加工コストの削減に寄与するため、単位時間当たりの除去体積が大きく、かつ工具摩耗量が小さくなる最適切削条件の決定手法確立を図る。平成24年度は、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ため、エネルギー解法を用いた幾何学解析プログラムを作成した。

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を加工する場合、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。

そこで本研究では、ボールエンドミル切削の最適切削条件の決定手法確立を図る。平成24年度は、ボールエンドミルの切れ刃に生じる負荷をモニタリングするための幾何学解析プログラムを作成し、切削実験との比較による評価を実施した。

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)、刃当り送り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(ξ, γ)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。

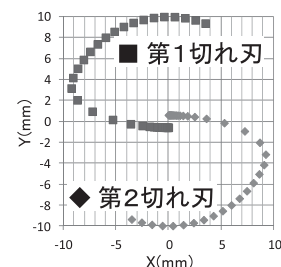


図1 切れ刃座標(X-Y)

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。

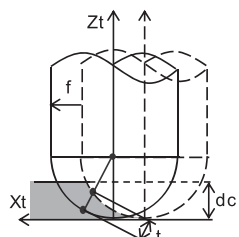


図2 切削厚さt

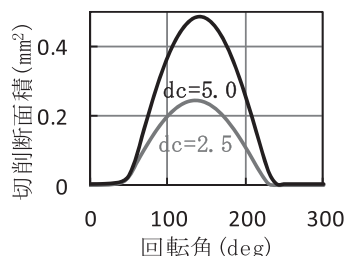


図3 切削断面積

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モデルの集積ととらえる。
- 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。

3. 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

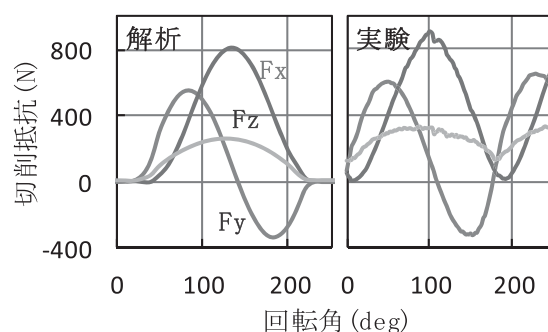


図4 溝切削における解析及び実験結果

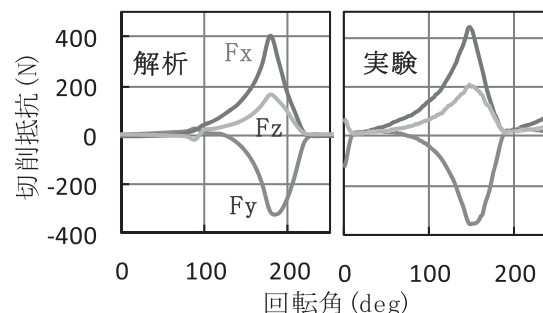


図5 ピックフィード切削における解析及び実験結果

4. 結言

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ためのプログラムを作成し、解析結果と実験結果との良好な一致を確認した。

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)

県産地域資源を活用した調味料素材の開発

食品・環境科 主任研究員 玉 屋 圭
主任研究員 芋 川 あゆみ
研究員 前 田 正道

本研究では呈味性の高い調味料素材の開発を目的として、県産水産物を原料とした酵素分解エキスを調製し、エキス生成、タンパク質分解に関する項目を測定した。

1. 緒 言

本県はちゃんぽん、そうめん、うどんなどの麺類が特産品としてあげられ、県外にも広く販売されている。その一方で、県産の麺類の美味しさを引き出す高品質のだし・スープの開発が期待されており、優れた呈味性を有する調味料素材・エキスの開発が望まれている。

本県は豊富な農水産物に恵まれており、トビウオ、椎茸など核酸系化合物^[1]、アミノ酸^[2]などの旨味成分を含むものが多く生産されている。

本研究では、旨味成分を含む県産農水産物を酵素分解処理に供することにより、呈味性に優れた調味料素材を開発する。さらに、これら麺類に適したスープ・だしを製造するための素材を味認識装置などの測定技術により開発する。今年度は、トビウオを原料とした酵素分解エキスを調製した。

2. 実験方法

酵素は至適pHが異なる市販製品4種(表1)を使用した。原料として市販の乾燥トビウオ粉末を使用した。粉末2～3 gに10倍量の熱水を添加し、各酵素の至適pHに調整(酸性; 4.0、中性; 7.0、塩基性; 10.0)した。次いで、酵素を添加し、反応(3時間、各酵素の至適温度(40～50℃))を行った。沸騰水中で10分間加熱し反応を停止し、ろ過・残さの洗浄を行った。回収したろ

液を濃縮・乾燥し、粉末サンプルを得た。

エキスの評価は原料からの生成率、遊離アミノ酸量を示すホルモール窒素量を測定することにより行った。ホルモール窒素はしょうゆ試験法記載の方法^[3]により測定した。

味測定は以下の手順で行った。酵素分解エキスの乾燥粉末0.1 gを熱水100 ml中で5分間攪拌し、ろ過により得られた試料を味測定に用いた。比較対象については、熱水抽出エキスの乾燥粉末を用いて同様に調製し、測定に供した。酵素分解エキスの味測定にはインテリジェントセンサーテクノロジー製の味認識装置TS-5000Zを用いた。旨味、苦味雑味、旨味コク、苦味後味の4種の味を測定した。

平均ペプチド鎖長はTNBS(2, 4, 6-トリニトロベンゼンスルホン酸)法^[4]により測定した。酸加水分解前後の試料25 μ l (6 mg/ml)に対して、0.1 M TNBS溶液25 μ lを添加し、37℃で20分間反応させた。次いで、分光光度計により416 nmでの吸光度を測定した。加水分解前の吸光度をAb、分解後の吸光度をAaとしたときのAa/Abの比を平均ペプチド鎖長とした。なお、酸加水分解は1%フェノールを含む6 M塩酸を用いて150℃、3時間反応を行った。

3. 結果と考察

①エキス生成率の算出

各酵素によるエキスの生成を検討するために、エキス生成率を以下の式により算出した。

エキス生成率(%) = (酵素分解により得られたエキス乾燥粉末/原料の乾燥重量) × 100

表2に示すように、エキス生成率は塩基性のプロテアーゼが最も高い値(72.9%)を示し、続いて中性プロテアーゼのうち1つが高い値(63.6%)を示した。トビウオ乾燥粉末から調製した熱水抽出エキスの生成率は17.3%であり、いずれの酵素によるエキスも生成率が

表1 検討に使用した酵素

酵素種類	至適pH	由来
酸性	4.0	<i>Aspergillus sp.</i>
中性1	7.0	<i>Aspergillus sp.</i>
中性2	8.0	<i>Aspergillus sp.</i>
塩基性	10.0	<i>Bacillus licheniformis</i>

高かったことから、酵素分解法は熱水抽出よりも効率の良いエキス製造法であることが示された。

**表2 トビウオからの熱水抽出及び
酵素分解エキスの生成率**

処理方法	エキス生成率 (%)
熱水抽出	17.3
酸性	54.5
中性1	49.9
中性2	63.6
塩基性	72.9

②ホルモール窒素量の測定

各種の酵素分解エキスに含まれるホルモール窒素を測定した結果(表3)、いずれの酵素分解エキスにも遊離アミノ酸が含有されていることが示された。トビウオに含まれるタンパク質がプロテアーゼの作用により遊離アミノ酸にまで分解されていることが示された。中でも2種の中性プロテアーゼが高い値を示し、トビウオタンパク質からアミノ酸が多く生成されていることが明らかになった。エキス生成率とあわせて考えると、中性プロテアーゼがアミノ酸を多く含むエキスを生成していることが示唆された。

**表3 トビウオ酵素分解エキスの
ホルモール窒素量**

酵素種類	ホルモール窒素量 (%)
酸性	3.63
中性1	4.39
中性2	4.62
塩基性	2.61

③トビウオ酵素分解エキスの味測定

トビウオ酵素分解エキスの呈味性を評価するために、味認識装置による味の測定を行った。その結果、苦味及び旨味センサーに応答が見られ、両センサーの先味と後味について測定値(表4)が得られた。

表4 トビウオ酵素分解エキスの味測定

処理方法	苦味 先味	旨味 先味	苦味 後味	旨味 後味
熱水抽出	13.3	7.2	2.7	5.2
酸性	6.6	7.2	0.8	5.4
中性1	10.4	9.6	1.5	4.8
中性2	8.5	8.3	0.9	4.8
塩基性	13.6	10.0	1.9	4.7

エキスの旨味に関しては、苦味先味、旨味の先味・後味の数値が対応している。まず、低濃度の苦味物質由来の旨味を示す苦味先味については、塩基性プロテアーゼが高値(13.6)を示し、熱水抽出エキス(13.3)と同等の値を示した。旨味先味については、塩基性及び中性1が中でも高い値(中性1; 9.6、塩基性; 10.0)を示し、熱水エキス(7.2)よりも強い旨味を示すことが判明した。コクを示す旨味後味については、酵素分解エキス群では大きな差異はなく、ほぼ同等値であり、熱水抽出と同程度のコク味であることがわかった。次に、苦味そのものを示す苦味後味に関しては、どの酵素分解エキスも熱水抽出物より数値が低く、トビウオ由来の苦味が抑制されていることが推察された。

味測定の結果から、旨味が高く、かつ苦味の低い数値を示した塩基性のプロテアーゼによる分解エキスが優れた呈味性を有すると考えられた。塩基性エキスのホルモール窒素量は他のエキスよりも低値であり、遊離アミノ酸の生成が少ないことが考えられた。しかしながら、旨味やコクを有する低分子のペプチドが生成されている可能性も想定されることから、次いで平均ペプチド鎖長を測定した。

④エキスの平均ペプチド鎖長測定

TNBS法により、各酵素分解エキスの平均ペプチド鎖長を測定し、トビウオタンパク質の分解程度を検討(表5)した。

表5 トビウオ酵素分解エキスの平均ペプチド鎖長

	平均ペプチド鎖長
酸性	1.23
中性1	1.33
中性2	1.34
塩基性	2.39

酸性ならびに中性のプロテアーゼによる分解物は、ペプチド鎖長がそれぞれ1.2から1.4の範囲にあったのに対して、塩基性による分解物の値は2.39と、他種酵素の2倍程度であった。この結果は、酸性や中性のプロテアーゼ分解物では、トビウオ由来のタンパク質が遊離アミノ酸レベルにまで分解されているのに対して、塩基性プロテアーゼ分解物では2個以上のアミノ酸が結合したペプチドを中心としていることが示唆された。

塩基性酵素による分解物が示すホルモール窒素が低値にもかかわらず、高い呈味性を有していた結果は、低分子のペプチドが旨味などを呈している可能性を示していた。今後は、本分解物に含まれるペプチド化合物の含量、呈味性などを明らかにする予定である。さらに、トビウオの酵素分解エキスの製造に関しては、エキス生成率の高さ、他の酵素分解エキスとは異なるペプチド性化合物を含有していることなどから、塩基性プロテアーゼを選択した。

4. 結言

本研究の目的は、農水産物を原料とした調味料素材を開発することである。呈味性を有するアミノ酸、ペプチドを豊富に含有するエキスを製造するために、食品工業用酵素を用いてトビウオタンパク質の分解を試みた。至適pHが異なる市販酵素を用いて製造した酵素分解エキスをエキスの生成率、ホルモール窒素量、味認識装置により味測定を行うことにより検討した。その結果、塩基性プロテアーゼによる酵素分解エキスが優れた呈味性を示した。今後は、本酵素分解エキスに含まれる遊離アミノ酸、低分子ペプチドの存在量を測定し、エキスの有用性を明らかにしていく。

参考文献

[1]大町睦子： 焼あごのだし汁に関する研究、活水論文集第28集, 29-37 (1985)

[2]河合美佐子： 味を決めるアミノ酸、生物工学会, 89 (11), 679-682 (2011)

[3]財団法人日本醤油研究所編：しょうゆ試験法、19-21 (1985)

[4]中村通ら： 日本食品科学工学会、38、377－383 (1991)

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	芋 川 あゆみ
食品・環境科	主任研究員	玉 屋 圭
食品製造企業		

戦略プロジェクト研究「長崎県産物由来の植物性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進展させる必要がある。本研究では、まず乳酸菌の性質として重要とされる消化液に対する耐性を、人工の胃液、腸液を用いて調べ、生体内での生存率及び有用性が期待される菌株の選抜を行った。

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「長崎県産物由来の植物性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ともに、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進展させる必要がある。

そこで得られた乳酸菌の中から、分離源の異なる株や有機酸、アミノ酸の産生に特徴がある株を選抜し、人工胃液、腸液への耐性を調べた。乳酸菌の消化液に対する耐性は、生菌としての腸内での健康機能を期待する際に求められる特徴の一つと言える。

また、人工消化液耐性試験に供した菌株の遺伝子解析を行い、菌種の同定を行った。

2. 実験方法

2.1 乳酸菌の人工消化液耐性試験

熊谷ら^[1]及び中川ら^[2]の報告を参考に人工胃液(胃酸)耐性試験及び人工腸液(胆汁酸)耐性試験を10菌株について行った。

2.1.1 胃液耐性試験

MRS液体培地5 mlに各乳酸菌を植菌し、37℃、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及び3.0、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℃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。生菌数の測定にはMRS寒天培地を用いた。

2.1.2 腸液耐性試験

0.2 μmのフィルターで滅菌ろ過した胆汁末溶液を、終濃度0、0.2、0.4%になるよう加えたMRS液体培地4.9 mlに、25%パンクレアチン液0.05 ml、上記、胃酸耐性試験により人工胃液処理(pH 3.0、37℃、3時間)した乳酸菌懸濁液0.05 mlを加えた。37℃でインキュベートし、48時間後までの600 nmのODを測定し、増殖の様子を調べた。

2.2 乳酸菌の同定

乳酸菌をMRS培地 1 mlで37℃、48時間嫌気培養し、

5,000×g で遠心し菌体を回収した。TEN(TE beffer -0.1 M NaCl)で2回洗浄し、bacteria genomicPrep Mini Spin Kit (GEヘルスケア社製)を用いてTotal DNAを調製した。

16S rRNA をコードする1500 bpの遺伝子は、各0.5 μM の27f primer (forward)、1525r primer (Reverse)を用いて^[3] Takara EX Taq酵素で反応した。反応条件は、ABJ社のサーマルサイクラーモデル9700を用いて96℃、5分、96℃、30秒、58℃、20秒、72℃、90秒を30サイクル、72℃、4分行い、4℃で冷却した。

反応物を1.5%低融点アガロース(プロメガ社製、タイプLMP)に供し、電気泳動後1500 bpに相当するDNAバンドを切り出した。アガロースからのDNAの溶出はMiniElute Gel Extraction Kit (キアゲン社製)を用いて行った。

得られたDNAの sequence は、BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing kit (ABJ社製)を用いて、primer はforward側5'より27f、fE1L、f2L、f2L'、f3L、f4Lの6種類、一方Reverse側は5'より1525r、r4L、r3L、r2L'、r1L、rE1Lの6種類を使用した。反応条件は、96℃、2分、96℃、10秒、50℃、5秒、60℃、4分を25サイクル、4℃で冷却した。

反応物をエタノール沈殿、Hi-Di Formamide 溶解、熱処理を行い、サンプルをGenetic Analyzer 310 (ABJ社製)に供した。ForwardおよびReverseからの配列を各々繋ぎ、GenetexソフトウェアによりReverse配列をcomplementary配列に置き換えてForward配列と一致するのを確認した。

最終的に決定したDNA配列を基にDNA Data Bank of Japan (DDBJ) のBlastを用いてホモロジー検索することにより菌株の同定を行った。

3. 結果及び考察

pH 3.0の人工胃液処理においては、処理後3時間までに乳酸菌生菌数の急激な減少は見られなかった。図1にpH 2.5の人工胃液処理時間と乳酸菌生菌数の一例を示した。消化物が胃を通過するまでに、比較的に早いもので2~3時間程度と言われているが、3時間後における生菌数が初発菌数の70%以上を示した菌株が10菌株中2菌株見られた。

図2に胆汁末濃度ごとの培養液のOD、つまり乳酸菌の増殖曲線の一例を示した。胆汁末濃度が0.4%のとき、24時間後までにODが0.8程度まで上昇し、良好な増殖を示した菌は6菌株で、半数以上が胆汁酸に耐性を有することが明らかとなった。

上記、胃液に強い耐性が見られた2菌株も併せて胆汁酸耐性を有しており、生菌として腸まで到達し、腸内で増殖する可能性を有していることが示唆された。また、それらの菌が*Lactobacillus plantarum*等の植物由来乳酸菌であることが明らかとなった。

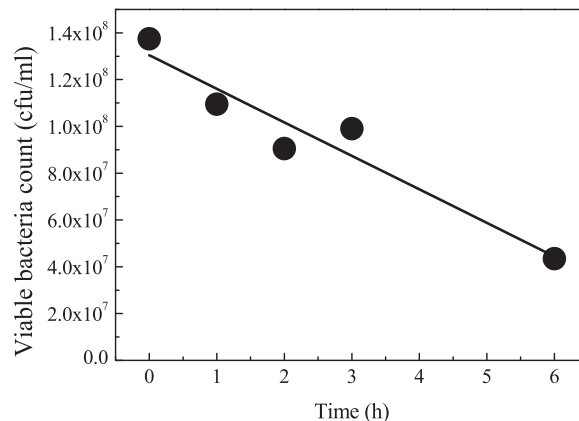


図1 人工胃液処理時間と乳酸菌生菌数

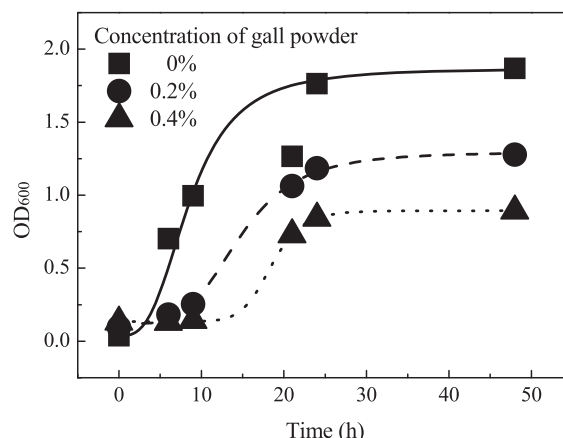


図2 人工腸液処理時間と乳酸菌培養液のOD

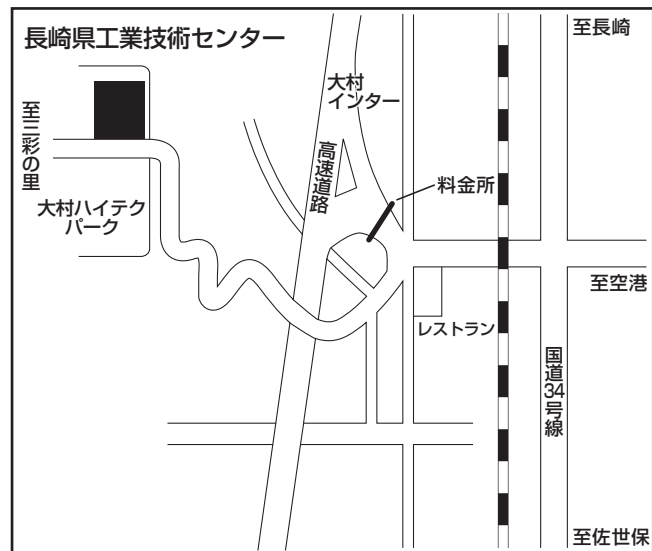
4. 結言

人工消化液耐性試験を行った10菌株のうち2菌株が胃液、胆汁酸両方に対して耐性が見られた。これらの菌は健康機能性が期待され、食品加工への展開が期待される。今後は農水産物への加工特性に関する試験を行い、加工食品への応用が可能か検討を行う。

参考文献

- [1]熊谷武久, 他, 日本食品科学工学会誌, Vol. 48, No. 9, pp. 677-683 (2001)
- [2]中川良二, 他, 日本食品科学工学会誌, Vol. 52, No. 3, pp. 140-143 (2005)
- [3]篠田吉史, 他, 島津評論, Vol. 57, No. 1-2, pp. 121-132 (2000)

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25年 8 月30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。