

熊本県産業技術センター

研 究 報 告

第 59 号 令和 5 年度

.....
REPORTS OF
KUMAMOTO INDUSTRIAL RESEARCH
INSTITUTE
No.59 2023.4-2024.3
.....

令和 6 年（2024 年） 1 2 月

熊本県産業技術センター
〒862-0901 熊本市東区東町 3-11-38

Published by
Kumamoto Industrial Research Institute
3-11-38, Higashi-machi, Higashi-ku, Kumamoto 862-0901 Japan

熊本県産業技術センター研究報告

第 59 号 (令和 5 年度)

目 次

【技術資料】

ソフトセンサによる計測高度化に関する研究	渡辺秀典	1
	佐藤達哉	
	石橋伸介	
	山口良一	
	松尾英信	
	甲斐彰	
	中川優	
CAE 解析を用いたプレス加工の高付加価値生産を実現するための基礎研究	濱嶋英樹	6
	百田寛	
	池田明弘	
	斎藤幸雄	
	森山芳生	

【転 載】

線吸収材 PEDOT/s-CNF の開発と遮熱窓ガラスへの応用	堀川真希	11
Material stage, Vol. 22, No. 9, (2022)	吉田恭平	
	永岡昭二	

REPORT OF
KUMAMOTO INDUSTRIAL RESEARCH INSTITUTE

Vol. 59 (2023. 4–2024. 3)

CONTENTS

【Technical Reports】

Research on Advanced Sensing with Soft Sensor

WATANABE Hidenori, SATO Tatsuya, ISHIBASHI Shinsuke, YAMAGUCHI Ryoichi,

MATSUO Hidenobu, KAI Akira and NAKAGAWA Masaru 1

High Value-added Production of Press Processing Using CAE Techniques

HAMASHIMA Hideki, MOMOTA Hiroshi, IKEDA Tomohiro, SAITOU Sachio and MORIYAMA Yoshio 6

【Reprinting】

Fabrication of PEDOT/s-CNF as a Heat-Ray Absorber and Their Application

in Thermal Insulating Window Glass

HORIKAWA Maki, YOSHIDA Kyohei and NAGAOKA Shoji 11

Material stage, Vol.22, No.9, (2022)

ソフトセンサによる計測高度化に関する研究

渡辺 秀典*・佐藤 達哉**・石橋 伸介**・山口 良一***・松尾 英信**・甲斐 彰*・中川 優**

* 技術交流企画室（現：ものづくり室）、** 技術交流企画室、*** 技術交流企画室（現：半導体技術室）

Research on Advanced Sensing with Soft Sensor

WATANABE Hidenori*, SATO Tatsuya**, ISHIBASHI Shinsuke**, YAMAGUCHI Ryoichi***, MATSUO Hidenobu**,
KAI Akira* and NAKAGAWA Masaru**

本稿では低コスト、高機能の両立を実現するためソフトセンサを活用した事例を報告する。センサの活用によりDXを推進する事例が増えている一方で、導入コスト、保守の負担などの課題によりDXの導入に至らない事例も存在する。これらの課題に対処するため、本研究では計算科学を取り入れてセンサ機能を向上させるソフトセンサの概念に着目した。安価な汎用センサを複数用意し、機械学習を利用することで、低コストかつ高機能なセンサを実現することが可能となる。本稿ではこの方法により高機能性センサを実現した事例について紹介する。

1. はじめに

情報処理推進機構が公開したDX白書2023の「DX収集事例一覧」では、DX(Digital Transformation)により製造、検査、運転、環境測定の自動化・省力化等を実現した様々な事例が紹介されている¹⁾。これらの事例のように人手不足、技術継承、コスト削減等、企業経営における様々な課題を解決するためにDXを導入する企業が増えている。

DXと一言でまとめられるが、実際には案件ごとに利用技術が異なる。例えば事務手続きのような案件ではOCR(Optical Character Recognition)やRPA(Robotic Process Automation)といった技術が利用される。製造業に焦点を絞ると、IoT(Internet of Things)がDXのために重要な役割を果たしている。DX白書2023のDX収集事例一覧において、製造業に着目すると少なくとも48.6%がIoTを利用していると考えられ、その重要性が伺える。

富士キメラ総研の調査では、DXの国内市場規模は2023年度見込みでは4兆197億円、2030年度予測では8兆350億円と見積もられており、今後もDX推進の動向は継続すると考えられる²⁾。このような動向がある一方で、DX導入には課題がある。DX白書2023において「IoT導入における課題」についての調査結果が示されており、日本企業の場合は上位から「IoTに関する自社の理解が不足している」、「人材の確保が難しい」、「予算の確保が難しい」、「セキュリティやプライバシーに関するリスクがある」、「手軽に利用できるIoT製品・サービスがない」という課題が並んでいる。このうち人材関連の課題については、AIが著しい進化を遂げているため遠くない将来に解決する

可能性がある。また、(1)製造物や製造装置に対するIoTであれば、例えば人が映り込むといった要因を排除しやすい、(2)インターネットに接続しないネットワークを構築することによりリスクを低減できる、といった要因から、製造業は他の業態と比較してプライバシーやセキュリティが課題になる事例は少ないと考えられる。つまり、製造業では、主な課題としてコストが残されることとなる。

製造業においてコストが原因となりDXが遅れている領域はいくつか存在するが、本研究では検査・計測に着目した。検査・計測は不良等を見逃すと問題となるため重要だが、ものが製造されるわけではないためコストをかけたくないというジレンマを抱える特殊な工程である。一方、この領域では導入コスト、メンテナンスコストが高額になる事例が多く存在する。例えば香りを検査する必要がある場合、液体クロマトグラフィー、ガスクロマトグラフィーといった高価な装置が必要となる。また、装置にとっては厳しい環境（腐食しやすい気体にさらされる、高温にさらされる等）に設置される場合は部品交換が頻繁に発生し、計測部品交換のコストのみならず、交換に伴う労力負担、稼働率低下といった様々な負担が増加する。

これらの課題を整理すると、安価かつ高機能（高額装置のような機能を有すること、長期稼働が可能であること等）を両立した検査・計測を実現することができれば、製造業においてDX導入が加速すると考えられる。

このような背景から、本研究では「安価かつ高機能な計測」を可能とするための研究を実施した。先行事例として、センサからの情報と機械学習を組み

合わせることで高度なセンサを実現する、ソフトセンサという概念が存在する³⁾。また、センサではないがHDDなどのストレージの高速化、対障害性向上のためにRAID(Redundant Arrays of Inexpensive Disks)と呼ばれる技術が確立されている⁴⁾。本研究ではこれらの概念を統合、拡張する。RAIDのように複数の安価な汎用センサからデータを取得し、ソフトセンサの要領でそれらのデータを機械学習によって推論する。これらを統合することにより、高額装置に類する機能の実現や対障害性向上の実現を可能とする。本提案の有効性を確認するため2つの適用事例を紹介する。

本稿の構成は以下の通りである。まず第2章では対障害性を考慮したソフトセンサのアーキテクチャを提案し、適用事例を紹介する。また、第3章ではソフトセンサの適用事例を紹介する。最後に第4章において本研究を総括する。

2. RAID とソフトセンサを統合したアーキテクチャ

ここでは先行事例であるソフトセンサ、RAIDについて概説した後、冗長性を考慮したアーキテクチャを提案する。最後にアルコール濃度推定の事例により評価する。

2.1 先行事例：ソフトセンサ

ソフトセンサは直接の計測が困難である事象を間接的な計測から推定する技術である。例えば体温は体の内部温度として定義されるが、非接触温度計は体の表面温度から内部温度を推定している。この例のように、ソフトセンサは身近なところでも広く利用されている。

2.2 先行事例：RAID

RAIDはHDDやSSD等のストレージを複数用意し、データを冗長に保管することで、障害に強いストレージを構築する事ができる技術である。RAIDにはいくつかのレベルが規定されている。RAID0は対障害性がない代わりに高速アクセスが可能、RAID1はディスクアクセス速度や保存可能容量にメリットはないものの対障害性が高い、RAID10やRAID5は対障害性、ディスクアクセス速度、保存可能容量のバランスが良いなど、特性ごとに異なるレベルを割り当てている。いずれもHDDやSSDを単独で利用する場合と比較して有益であるため広く利用されている。

2.3 提案アーキテクチャ：RAISE

本稿では提案するアーキテクチャをRAISE (Redundant Architecture with Inharmonic Sensing Elements:不調和計測要素を用いた冗長アーキテクチャ)と略称する。

RAISEはソフトセンサ、RAIDの概念を統合して計測に活用することを目的としたもので、ソフトセンサによって間接的な計測から真の計測値を推定すると同時に、冗長構成とすることで対障害性を得ることが可能となる。また、安価なセンサを利用し、真値を推定するように機械学習を適用することで、システムの低コスト化が可能となる。例えば特定波長の光の強度を計測する場合、特定の狭い範囲の波長のみ計測するセンサは導入コストが高くなる傾向があるが、広い波長に感度がある汎用センサは安価である。後者のような汎用センサは複数用意しても安価であり、それらのセンサから得られるデータに対して機械学習を適用することで目的の狭い範囲の波長の光の強度が推定可能となる。

RAISEは「Inharmonic」が示すように、同一型番のセンサを並べる必要はない。むしろ、精度良く全く同じ値が返ってくるセンサが複数ある場合、対障害性の点では優れるが高機能性が求められる場面では利益を得られない。高機能性を得るためには意図的に特性が異なるセンサを複数用意するべきである。例えば先程の特定波長の光の測定の場合、感度特性が異なるセンサを複数用意するか、同一センサに特性が異なる光学フィルタを装着するなどして、個々のセンサの感度特性を変更するといった工夫が必要である。

表1 RAISEのレベルと特性

レベル	特性
RAISE0	高機能センサの実現のため、複数のセンサから得られる情報を利用して、機械学習により数値を推論する(ソフトセンサ)。
RAISE1	対障害性向上のため、複数のセンサを配置する。一部のセンサが故障しても残りのセンサで対応する。
RAISE10	RAISE0で構成された高機能センサをRAISE1の要領で複数配置し、機能性と対障害性を両立する。
RAISE5	RAISE0の構成の中に少数のセンサを追加することで、機能性と対障害性を両立する。RAISE10よりセンサ数を少なくすることができる。

RAISEはRAIDと同様に、いくつかの特性を定義することが可能である。本稿では表1のようにレベルと特性を定義する。

RAISEの有効性を確認するため、次節でRAISE5による赤外線方式によるアルコール濃度推定の構成例を紹介する。

2.4 アルコール濃度推定におけるRAISE適用例

アルコール飲料に対するアルコール濃度測定は、厳密な測定方法が存在しているが手間がかかるため、手軽な測定方法が求められている。本研究では呼気に含まれるアルコール濃度を推定する方法としても利用される、NDIR(Non-Dispersive InfraRed)法⁵⁾をRAISE5によって実現できるか検証した。

本事例では密閉容器内の気体中に含まれるアルコール濃度を推定するためのシステムを試作した。図1に外観を示す。赤外線LEDはGL538、OSI5LA5A33A-B、L2388-01、L12170を使用し、赤外線受光素子はS6775-01、S2506-02、S8385-04、S6967、L-51ROPT1D1を使用した。Adafruit QT Pyを利用してLEDの制御およびADCによる受光量の計測を実施した。

容器には10mlの液体を封入し、震とうすることで気体にアルコールが存在する状態を作り出した。受光素子、LEDは光が容器中部の気体領域を通過するよう設置した。このシステムでデータを取得するための処理手順を図2に示す。

検証では、アルコール濃度20度、25度、35度、0度(水)の液体を作成し、それぞれについて100回の測定を実施した。各測定結果のうち、80回分を教師データとして学習に利用し、20回分を検証用データとして評価した。機械学習アルゴリズムはガウス過程回帰を採用した。開発環境としてMATLAB R2023bを使用した。



図1 システム外観図

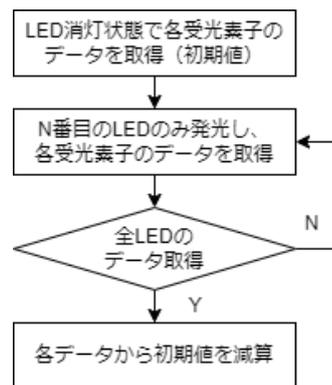


図2 データ取得のフロー

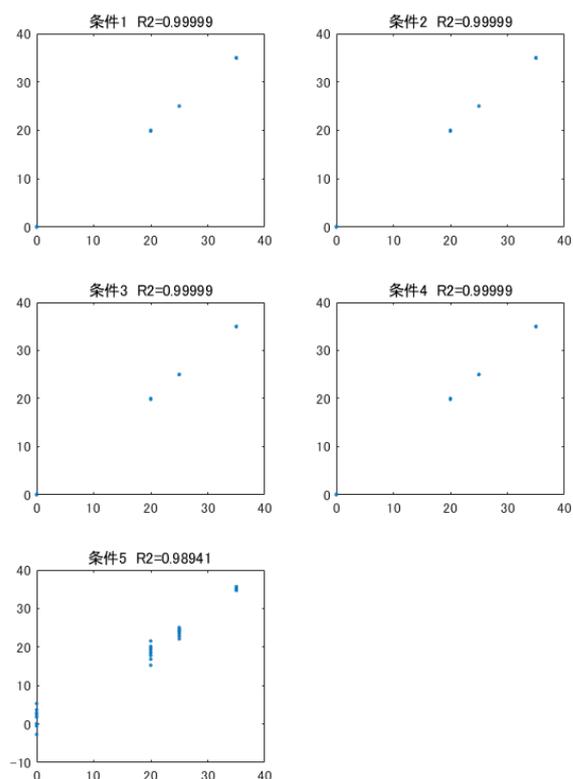


図3 アルコール濃度の推定結果

1つの受光素子が故障し、冗長構成で障害時の暫定運用を行っているという状況を想定するため、受光素子1つのデータを未使用として学習および推定を実施した。各推定結果を図3に示す。横軸は実際の濃度、縦軸は濃度の推定結果である。受光素子1つが使えない状況を想定した条件(条件1:S6775-01なし、条件2:S2506-02なし、条件3:S8385-04なし、条件4:S6967なし、条件5:L-51ROPT1D1なし)においては、条件5を除けば決定係数 $R^2=0.99999$ というよい結果が得られた。条件5のみ決定係数が低くなった要因は、受光素子L-51ROPT1D1が他の素子と比較し、アルコール濃度の推定において良い性能を示しやすい素子であったためであると考えられる。冗長構成ではない場合、LED OSI5LA5A33A-Bと受光素子L-51ROPT1D1

の組み合わせが最善で $R^2=0.99977$ の結果を示した。ただし、条件1~4のようにL-51ROPT1D1を含む構成であれば、素子が増えることで推定精度が向上するという結果が得られた。同時に、L-51ROPT1D1以外のセンサが1つ故障しても高度な計測を継続できるという対障害性を持つことが確認できた。

3. ソフトセンサによる簡易測色計の実現

ここでは安価なセンサおよび機械学習により、測色計と同様の信号を得た事例を概説する。

色を均一に保つ必要がある製造工程が存在することから、色の検査装置が市販されている。CIE XYZ表色系やCIE L*a*b*表色系により数値化されるものが多く存在するが、これらの値を出力する事ができる装置は高価になることがある。また、例えば味噌の製造工程において味噌樽の表面ではなく、深部の色を継続して測定したいといった要望のように、市販の測定装置では設置不可能である場合も存在する。

このような課題に対し、本研究では安価なセンサと機械学習により簡易測色計を構成可能であるか検証した。11波長の色の強度を測定することができるカラーセンサAMS AS7341と機械学習を用いてXYZおよびL*a*b*を学習、推定した。日本色研事業社の新配色カード199b (199色) を学習・評価対象とし、MATLAB R2023bのStatistics and Machine Learning Toolboxが対応している機械学習アルゴリズムであるツリー、SVM(Support Vector Machine)、GPR(Gaussian Process Regressor)、カーネル近似、アンサンブル、NN(ニューラルネットワーク)を用いて、コニカミノルタ社の測色計 CM-2600dが示すXYZ、L*a*b*の値を示すように機械学習を実施、比較した。表2に各機械学習アルゴリズムによる推定結果のRMSE(二乗平均平方根誤差)を示す。

表2 検討した機械学習のモデルおよびCIE XYZとCIE L*a*b*推定精度 (RMSE)

モデル	X	Y	Z	L*	a*	b*
ツリー	2.03	2.50	2.33	2.05	8.89	10.49
SVM	1.17	0.85	0.84	10.60	1.05	1.05
GPR	0.34	0.36	0.35	0.27	0.29	0.40
カーネル近似	12.99	7.10	7.95	4.27	9.23	9.95
アンサンブル	1.42	1.50	2.06	1.63	4.49	4.84
NN	0.33	0.39	0.51	0.29	0.83	0.53

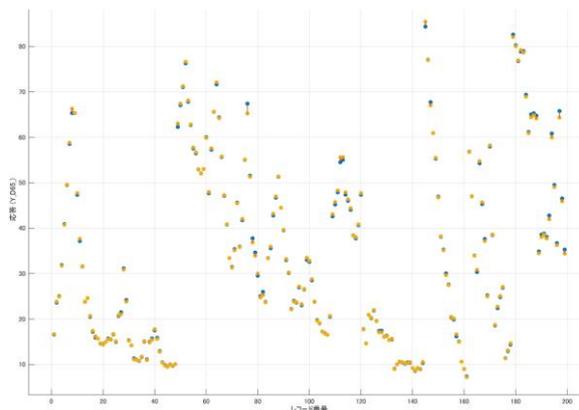


図4 GPRのYの可視化

今回の事例ではGPRが最も性能が良かった。GPRのYについて可視化したグラフを図4に示す。横軸はレコード番号、縦軸はYの値を示す。青点はCM-2600dによる計測値、橙点はGPRによる推定値を示す。GPRは概ねCM-2600dの値に近い値を推定していることが確認された。

これらの結果から、誤差はあるものの安価なセンサと機械学習の組み合わせによりXYZやL*a*b*の値を推定することは可能であると考えられる。

4. おわりに

本研究ではソフトセンサとソフトセンサにRAIDの概念を統合したRAISEの有効性を検討した。アルコール濃度推定、簡易測色計の事例から、RAISE、及びソフトセンサの有効性を確認することができた。

実証実験の事例が少ないことから、さらに実証実験の事例を増やしていくことが今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 独立行政法人情報処理推進機構, DX白書2023
- 2) 株式会社富士キメラ総研プレスリリース, 『2024 デジタルトランスフォーメーション市場の将来展望 市場編/企業編』まとまる (2024/4/10発表 第24034号), <https://www.fcr.co.jp/pr/24034.htm>
- 3) 船津 公人, 金子 弘昌, ソフトセンサー入門 - 基礎から実用的研究例まで -, コロナ社, 2014
- 4) Patterson, David A. and Gibson, Garth and Katz, Randy H., A case for redundant arrays of inexpensive disks (RAID), Proceedings of the 1988 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, Vol. 17, No. 3, pp. 109-116, 1988

- 5) 北川 徹三, 米田 登貴彦, 竹村 直人, 赤外線を使用したガスの新しい測定法, 安全工学, Vol. 16, No. 4, pp. 238-245, 1977

CAE 解析を用いたプレス加工の高付加価値化を実現するための基礎研究

濱嶋 英樹*・百田 寛**・池田 明弘**・齋藤 幸雄**・森山 芳生***

*ものづくり室（現：半導体技術室）、**ものづくり室、***ものづくり室（現：所長室）

High Value-added Production of Press Processing Using CAE Techniques

HAMASHIMA Hideki*, MOMOTA Hiroshi**, IKEDA Tomohiro**, SAITOU Sachio** and MORIYAMA Yoshio***

プレス加工を行う生産現場ではサーボプレスの導入が進んでおり、スライドモーションのCNC制御による加工方法の最適化や製造工程のモニタリングによる生産管理とコンピューターシミュレーション（CAE解析）による工程設計や金型設計を複合的に利用することで、プレス加工の高付加価値化が期待できる。本研究では打抜き加工について、モニタリングに必要なセンシング実験と数値シミュレーションを実施し、その結果について検証を行った。実験結果と解析結果はおおむね一致し、デジタルものづくりを利用した生産技術の高度化へつなげる結果を示した。

1. はじめに

プレス加工を行う生産現場では、インターネットやセンサーを活用するIoT (Internet of Things) 技術を多く搭載したサーボプレスの導入が進んでおり、スライドモーションのCNC制御による加工方法の最適化や製造工程のモニタリングを利用した生産管理など、プレス加工の高付加価値化が期待できる¹⁾。県内企業においても導入は進んでいるが、スライドモーションの効果は素材の変形特性や加工製品の形状によって異なるため、その機能を効果的に活用することは難しい。一方、有限要素法解析（FEM解析）などのコンピューターシミュレーション（CAE技術）は、プレス製品の成形工程や金型の応力状態を可視化するツールとして活用が進み、工程設計及び金型設計の最適化や新しい加工プロセスの開発ツールとしても活用されている。また、AI（人工知能）やDX（Digital Transformation）などを用いた加工情報データの収集と分析及び活用が注目されており、これらの技術（センシング技術）とFEM解析に代表されるシミュレーション技術を融合することで、プレス加工技術の高度化が期待できる。

そこで本研究では、FEM解析を利用した生産前検討の精度向上と加工部から離れた位置に設置したセンサーによるモニタリング技術の高度化を目的とし、打抜き加工についての実験とFEM解析を行い、打抜き荷重やせん断工程の検証を行った。

2. 打抜き加工

プレス加工の一つである打抜き加工は、せん断加工とも呼ばれ、基本的には一對のパンチとダイの工

具間に被加工材をはさみ、プレスで加圧し、被加工材を破断させる加工法である。しかしながら、変形工程に破断（破壊）の工程が含まれるため、そのメカニズムを解析的に解明するのは容易ではない。打抜き加工（せん断加工）の解説については、村川²⁾が詳細に述べているので参考にさせていただきたい。

2.1 実験

使用したブランク材は冷間圧延鋼板SPCC (SPCC材)の厚さ0.8mmを用いた。図1に打抜き加工部の模式図を示す。パンチ径49.92mm、ダイ穴径50mmの金型を用いて打抜き加工を行った。

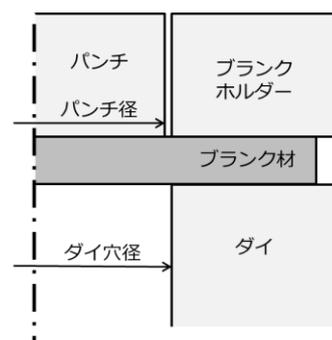


図1 打抜き加工部の模式図

打抜き加工の実験には最大加圧力1500kNのサーボプレス（株式会社アマダプレスシステム製：SDE-1522-SF）を用いた。当機はプレスマシン専用サーボモーターの駆動源とクランク機構を組み合わせた構造のメカニカルサーボプレス機であり、スライド速度を変えることができるため、クランク・リンク・ソフト・プログラム・振り子・コイニング・繰り返し・パルスなど様々なスライドモーションによるプレス

加工が可能である。本実験では、加工部から離れた位置（サーボプレス機本体フレーム）に設置した荷重センサーによる生産工程のモニタリング技術の高度化を目的とし、一つの例としてサーボプレスのスライド速度制御の特性を利用した材料のひずみ速度効果による打抜き荷重への影響を調査した。加工速度を1.25、5、12.5、25、35、50、60、72.5mm/sに設定し、クランクモーションを利用した打抜き加工実験を行った。図2に使用したサーボプレス、図3に使用した打抜き加工の金型を示す。



図2 サーボプレス

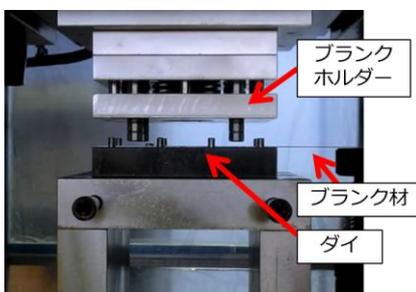


図3 打抜き加工の金型

2.2 FEM 解析

商用ソフトウェアであるANSYS社製ANSYS LS-DYNAを用いて、打抜き加工実験と同形状の解析モデルを作成し、有限要素法解析（FEM解析）を行った。

図4に解析モデルの模式図を示す。円板を打抜く解析を行うため、円板中心軸を対称軸とする2次元軸対称モデルを利用して解析を行った。ブランク材（灰色面）はシェル要素、ダイ（黄線）、ブランクホルダー（緑線）、パンチ（青線）はビーム要素を利用した。ブランク材は外径80mm、厚さ0.8mm、ダイは外径80mm、内径50mm、高さ10mm、ブランクホルダーは外径80mm、内径50mm、高さ10mm、パンチは外径49.92mm、高さ10mmとした。要素サイズは、0.1mmを基本とし、破断が予測されるダイの内角を中心とした10mmの

部分は要素サイズを0.05mmと細かく要素を分割した。図5にダイ内角近傍のブランク材の要素分割、表1に解析に利用した要素数をそれぞれ示す。ブランク材（SPCC材）は弾塑性モデル、ダイ、ブランクホルダー、パンチは剛体でモデル化して解析を行った。

今回の解析では、被加工材と各工具間の接触面はペナルティ法を利用した接触判定を行うため、ANSYS LS-DYNAの接触判定カードであるCONTACT 2D AUTOMATIC SURFACE TO SURFACE³⁾を利用し、摩擦係数は0.1とした。

SPCC材の材料定数は単軸引張試験から得られた応力-ひずみ曲線を使用した⁴⁾。表2に弾性域における材料定数、図6に塑性域の真応力と塑性ひずみの関係をそれぞれ示す。解析における塑性域の材料定数は図6の曲線を多直線で近似する方法により得られる値を用いた。

打抜き加工のような切断を推定する解析では、大矢根⁵⁾やCockcroft and Latham⁶⁾等の延性破壊条件式を組み込むことが多く、解析が複雑になってしまう問題点がある。そこで本解析では、破壊の条件として相当塑性ひずみの限界値（しきい値）を用いる簡易的な解析方法を調査した。相当塑性ひずみの限界値は、単軸引張試験から得ることが難しいため、限界値を0.5、1、1.5、2、2.5、3に変えた解析を実施し、打抜き荷重を検討した。延性破壊条件式については吉田⁷⁾の解説を参照されたい。

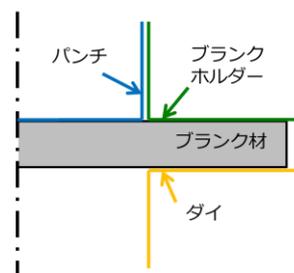


図4 解析モデルの模式図

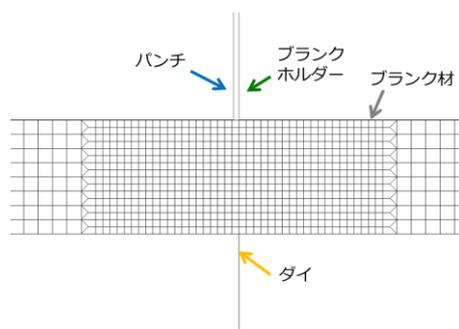


図5 ダイ内角近傍のブランク材の要素分割

部品名	要素の種類	要素数
ブランク材	シェル	3312
ダイ	ビーム	260
ブランクホルダー	ビーム	260
パンチ	ビーム	359

材料定数名	物性値	単位
ヤング率	206	GPa
ポアソン比	0.3	-
降伏応力	195	MPa

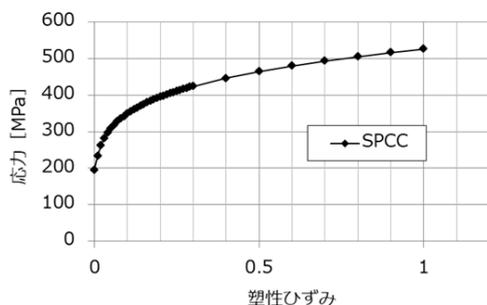


図6 塑性域の真応力-塑性ひずみの関係 (SPCC)

3. 結果及び考察

3.1 実験結果

図7に打抜き加工前後のブランク材を示す。本実験で利用した金型は、長さ300mm、幅58mmの帯板から、1回の加工で50mmの円板を1枚打抜く。打抜きに必要な打抜き荷重を求める式として次の概算式⁸⁾を利用した。

$$Pm = t \cdot l \cdot Ks \quad \dots (1)$$

ここで、 Pm は打抜き荷重、 t は被せん断材の板厚、 l はせん断輪郭長さ、 Ks は被せん断材のせん断抵抗である。文献からせん断抵抗の値は引張強さのおおよそ80%⁹⁾として計算されるため、せん断抵抗270MPa (引張速度5mm/sのときの引張強さ337MPa)として打抜き荷重を計算すると、厚み0.8mm、直径50mmの円板を打抜くときの打抜き荷重は33.9kNとなった。

図8に加工速度5mm/sで打抜き加工した時のサーボプレスに記録された荷重履歴を示す。1020msから荷重が急激に上昇して加工が開始されたことがわかり、1080msで最大荷重51kNに到達した。サーボプレス本体システムに記録されるデータは、サーボプレス機本体のフレームに設置された荷重センサーから出力されるデータになるため、プレス機本体が金型から受ける荷重となる。本実験で使用した金型は、ブ

ランクホルダーが先にブランク材を押さえた後、パンチによりブランク材を打抜く加工になる。そのため、ブランクホルダー力 (帯板を押さえる力) とパンチ荷重 (打抜き荷重) を合わせた荷重を荷重センサーが計測し、プレス機本体に記録される。このことから、打抜き荷重は、最大荷重から急激に荷重が上昇し始める1020ms時の荷重15kNを除いた値の36kNになる。この値は、前述の計算式で求めた値と6%以下の誤差であり、概算式は同等の値を計算できることを示した。

図9に加工速度の違いによる打抜き荷重 (最大値) を示す。1.25~12.5mm/sの遅い加工速度では約36kNであったが、加工速度25mm/s以降は徐々に打抜き荷重は大きくなり、SPCC材はひずみ速度効果を持つ素材であることを示した。前述に比較した打抜き荷重は、打抜き加工速度を合わせるため、通常の試験よりも早い引張速度である5mm/s時の引張強さを測定し、計算式と実験値の比較を行った。打抜き荷重を求める注意点として、一般的な引張試験機で実施できる最大引張速度は10mm/sよりも小さいため、生産で利用するような加工速度30mm/s以上の打抜き加工では、引張試験から得られる引張強さを利用することが難しく、せん断抵抗値を決める方法に注意が必要であることをモニタリングにより明らかにした。

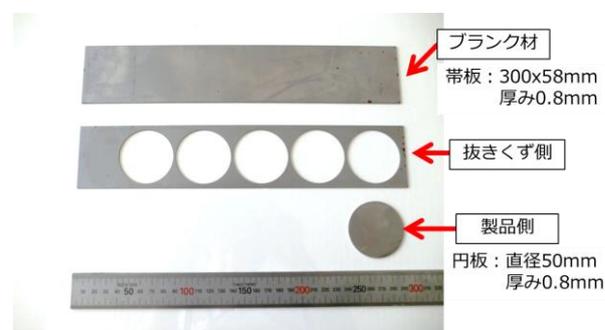


図7 打抜き加工前後のブランク材

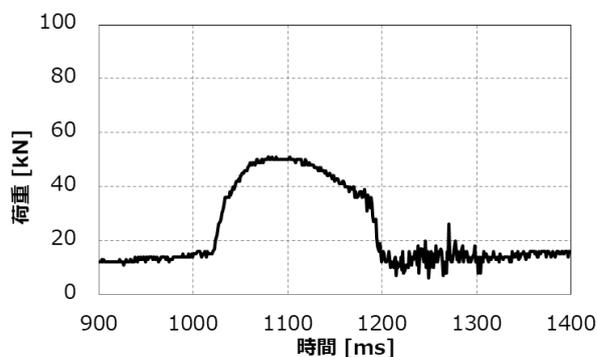


図8 加工速度 5mm/s で打抜き加工した時のサーボプレスに記録された荷重履歴

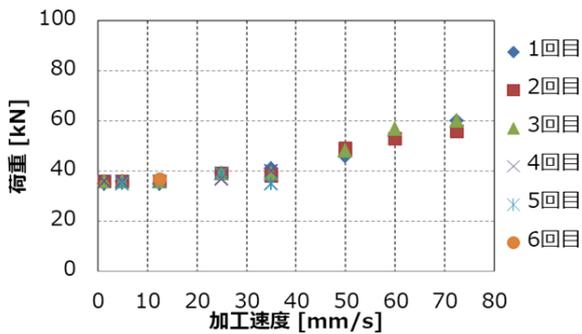


図9 加工速度の違いによる打抜き荷重（最大値）

3.2 FEM 解析結果

図10に相当塑性ひずみ限界値1.5の時の相当塑性ひずみ分布を示す。図に示すように、解析では打抜き加工の際に生じる破断面のだれを形成し、限界値を超える要素が削除され、破断が進む様子を可視化できた。図11に相当塑性ひずみ限界値の違いによる破断形状を示す。板上面から2要素目（板上面から0.1mm）まで破断（要素削除）したときの代表的な各相当塑性ひずみ限界値における相当塑性ひずみの分布を示しているが、限界値0.5、1.0、2.0、3.0（無次元）に対し、パンチの変位はそれぞれ0.105、0.175、0.285、0.375mmとなった。限界値を高くすると、しきい値である限界値に到達するまで要素の変形が進み、パンチ変位も大きくなる結果となった。このことは、相当塑性ひずみの限界値を検討することで延性破壊の現象を簡易的に再現できることを示した。図12に実験と解析の打抜き荷重の比較を示す。縦軸を打抜き荷重、横軸をパンチ変位とし、実験データは荷重が急激に上昇し始めるパンチ位置を原点とした。解析結果は、相当塑性ひずみ限界値が高くなると、完全破断（切断完了）となる変位が大きくなることを示した。最大荷重値も徐々に大きくなり、限界値3.0では実験値と同じ36kNになった。荷重の立ち上がり領域については、実験データの方が緩やかに立ち上がるのに対し、解析では急激に立ち上がった。実験データの立ち上がりが緩やかな理由は、パンチに発生する荷重が金型やプレス機スライドなどのプレス機の部材を経由し、プレス機フレームに取り付けられた荷重センサーで間接的に計測されることに起因するものである。また、相当塑性ひずみ限界値を高くした場合、破断の終盤では荷重値が振動しているようなデータが得られた。この理由は、要素が徐々に大きく変形した後に突然削除されるため、急激な荷重の変化が起きたと思われる。

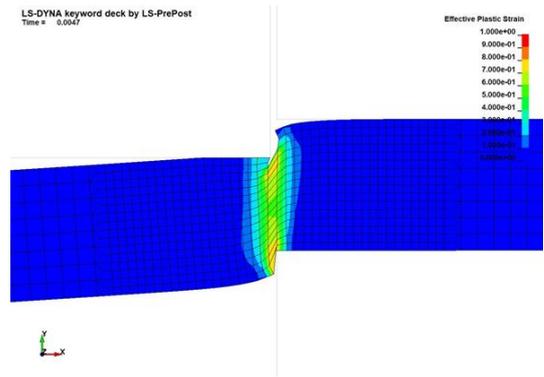


図10 相当塑性ひずみの分布（限界値1.5）

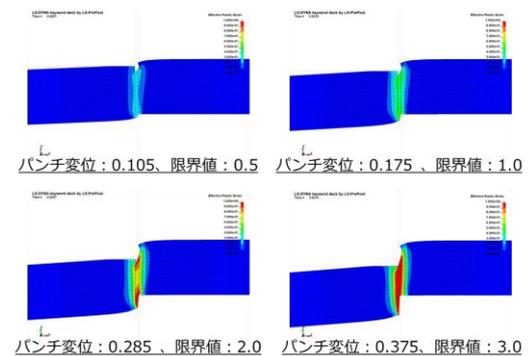


図11 相当塑性ひずみ限界値の違いによる破断形状

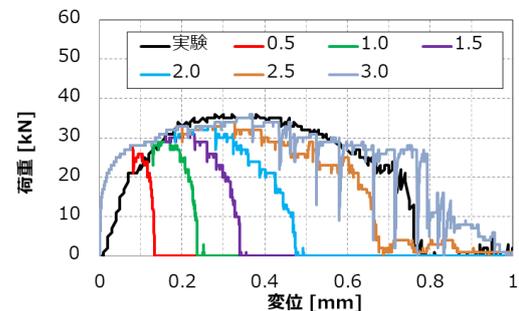


図12 実験と解析の打抜き荷重の比較

4. おわりに

FEM解析を利用した生産前検討の精度向上と加工部から離れた位置に設置したセンサーによるモニタリング技術の高度化のため、サーボプレスを利用した打抜き加工の実験とFEM解析を実施した。その結果について検証を行い、以下の知見が得られた。

- (1) FEM解析では、相当塑性ひずみの限界値を最適化するだけで打抜き工程を再現でき、打抜き荷重が簡単に求められることを明らかにした。
- (2) 打抜きに必要な荷重がスライドモーションの速度である加工速度に影響されること（ひずみ速度依存性）をモニタリング（センシング）により明らかにできた。

なお、本研究は公益財団法人JKA(競輪)の補助を受けて導入した機器（島津製作所株式会社製：AG-250 kNXplus）を一部用いました。

参考文献

- 1) 楊明, プレス技術, vol. 48, No. 11, pp. 18-23, 2010.
- 2) 村川正夫, せん断加工のメカニズム解明および実加工における進歩・展望, FORM TECH REVIEW, Vol. 24, No. 1, pp. 31-50, 2014.
- 3) LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY, LLC (LST, LLC), LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I, LS-DYNA R11.0, 2020.
- 4) 株式会社JSOL, JSTAMP/NV2.16材料データベース, 2018.
- 5) 大矢根守哉, 延性破壊の条件式, 日本機械学会誌, Vol. 75, No. 639, pp. 596-601, 1972.
- 6) Cockcroft, M. G., Latham, D. J., Ductility and Workability of Metals, Journal of the Institute of Metals, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
- 7) 吉田佳典, 延性破壊条件式と延性破壊パラメータ決定法, 塑性と加工 (日本塑性加工学会誌), 第57巻, 第669号, pp. 940-944, 2016.
- 8) 日本金属プレス工業協会編, プレス打抜き加工, 日刊工業新聞社, p. 11, 2002.
- 9) 日本塑性加工学会編, 塑性加工便覧, コロナ社, p. 382, 2006.

熱線吸収材 PEDOT/s-CNF の開発と遮熱窓ガラスへの応用

堀川 真希 熊本県産業技術センター 材料・地域資源室 研究参事
 吉田 恭平 熊本県産業技術センター 材料・地域資源室 研究員
 永岡 昭二 熊本県産業技術センター 材料・地域資源室 研究主幹兼室長
 熊本大学 熊本創生推進機構 客員教授

1 はじめに

内閣府は SDGs の達成に優れた提案を行う自治体を「SDGs 未来都市」として選定している。2018 年以降、熊本県では 8 市町村を数えている。これは 47 都道府県で最多であり、SDGs 認知度ランキングでは熊本県が一位を獲得している¹⁾。熊本県産業技術センターでは、SDGs に関する取り組みの一環として、セルロースナノファイバーを原料に用いた遮熱ガラスの研究開発を推進している。SDGs の 13 番目のゴールである「気候変動について考えよう」を達成するためには、CO₂ の排出削減が必須であり、遮光・遮熱ができるエコガラスは CO₂ 削減に効果的な資材として注目されている。国内の住宅全ての窓ガラスを全てエコガラスにすると、CO₂ 排出量を年間約 1700 万 t 削減でき、この量は 2003 年に日本国内から排出された CO₂ の約 10% に相当するといわれる²⁾。遮熱ガラスは建築窓以外にも、自動車のフロントガラスにも使用されており、冷房効率を上げて燃費を向上させている。

遮光材料として利用されている材料にアンチモン³⁾、インジウム⁴⁾、セシウム⁵⁾ の酸化物がある。これらは近赤外光や赤外光などの熱線を吸収する材料であり、遮熱ガラスに適用される。これらの無機系材料は、製造に 500℃ 以上の焼結が必要であり、大きなエネルギーが消費される。凝集もしやすいため、分散剤の添加などの分散プロセスが必要である。また、アンチモンズ酸化物

やタングステン酸セシウムは人体への影響が懸念されている。一方、インジウムスズ酸化物 (ITO) はレアメタルであり、昨今の政治情勢により安定供給が難しくなっている。

筆者らは、数年前から竹由来のセルロースナノファイバー (CNF) と導電性高分子であるポリ (3,4-エチレンジオキシチオフェン) (PEDOT) の複合化を行い、熱線吸収材料を開発してきた^{6,7)}。CNF の原料である竹は、国内での安定供給が可能であり、また竹の利用は「放置竹林」の問題解決や里山保全にも繋がる。

本稿では、筆者らが開発した熱線吸収材である PEDOT / 硫酸化セルロースナノファイバー (s-CNF) (図 1) の利用方法について紹介する。PEDOT/s-CNF-PVA フィル

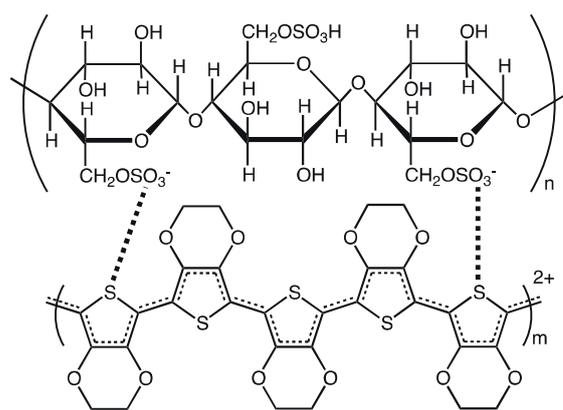


図 1 PEDOT/s-CNF の化学構造

ムを遮熱中間膜に用いた合わせガラスについては、既築集合住宅での実証実験で得られた省エネ効果についても概説する。さらに開発された PEDOT/s-CNF と温度応答性高分子ポリ（*N*-イソプロピルアクリルアミド）（PolyNIPAM）とを組み合わせた自立型温度スイッチング調光ガラスについても、併せて概説する。

2 PEDOT/s-CNF の熱線吸収材への応用

2.1 PEDOT/s-CNF の導電性と熱線吸収性

PEDOT/ポリスチレンスルホン酸（PSS）は水分散溶液であり、大気圧下で用意に成膜できるため、最も商業化に成功した導電性高分子である。奥崎らは極性化合物を添加して成膜し、PEDOT/PSS の配向性を向上させることにより、導電性が 2 桁以上上昇することを確認している⁸⁾。PEDOT のポーラロンおよびバイポーラロンの発現が導電性を高めており、PEDOT の導電性を高めることができれば、近赤外線の吸収を高めることもできる⁹⁾。

筆者らは、剛直な β -1,4-グルカンの骨格を有するセルロースに着目し、s-CNF を調製して、これをドーパントとした PEDOT/s-CNF の開発を行ってきた。セルロー

スの剛直な規則構造に沿って PEDOT を並べることができれば、結晶格子の乱れによる伝導パスの障害を抑制し、導電性の上昇に伴い、熱線吸収を高めることができると考えた^{6,7)}。

2.2 PEDOT/s-CNF の調製と光学特性の評価

竹由来の CNF（中越パルプ工業（株）製、nanoforest）を硫酸化して、s-CNF を調製した。既報に従い、pH 条件を変えてレドックス重合を行い、PEDOT/s-CNF を調製した。pH を変化させて調製した PEDOT/s-CNF 薄膜の光学特性と導電率の関係性を図 2 に示した。PEDOT/s-CNF 薄膜の導電性の上昇に伴い、700 ~ 2000 nm の近赤外および赤外波長領域の光吸収が増大することが確認された。これは PEDOT の共役系の伸張に起因している。図 3 に最大の導電率 10 S/cm^{-1} （pH0.89）を示した PEDOT/s-CNF の TEM 写真を示す。PEDOT/s-CNF は 200 ~ 400 nm 程度の微結晶であることが観察された。

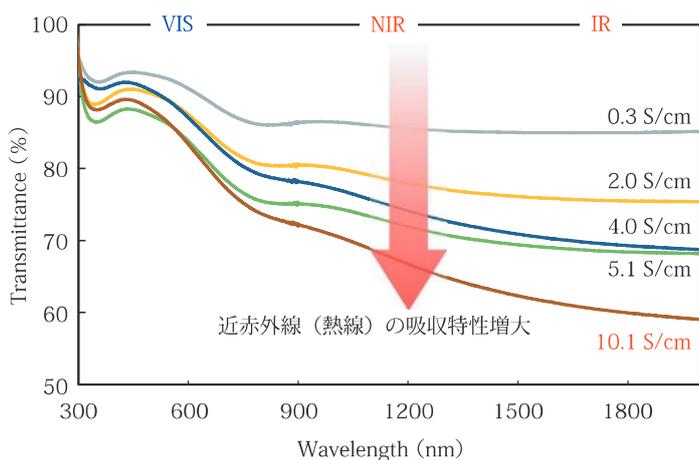


図 2 PEDOT/s-CNF 薄膜の導電性と光学特性

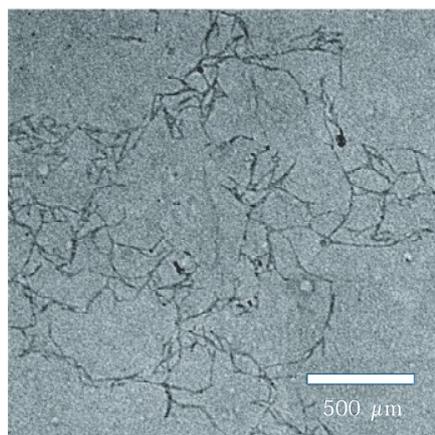


図 3 PEDOT/s-CNF の TEM 写真

3 PEDOT/s-CNF-PVA フィルムを遮熱中間膜に用いた合わせガラス

3.1 PEDOT/s-CNF-PVA フィルムの強度と温度上昇抑制効果

ポリビニルアルコール（PVA）10wt%水溶液に所定量の PEDOT/s-CNF を分散させた溶液を調製した。ドクターブレード法によりガラス基板上に塗布して乾燥させて、膜厚 11 μm の透明フィルム（図 4）を得た。

PEDOT/s-CNF-PVA フィルムの引張強度試験を行った。比較として PVA および PEDOT/PSS-PVA

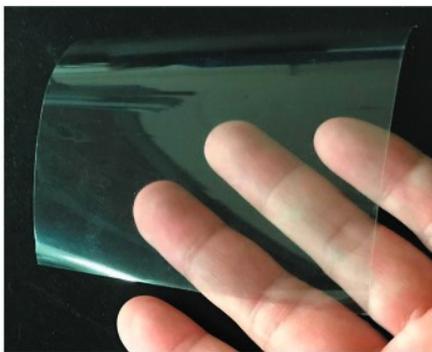


図 4 PEDOT/s-CNF-PVA フィルム

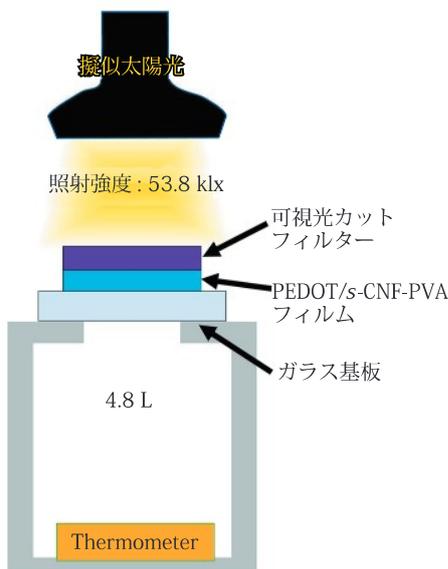


図 5 擬似太陽光を用いた温度上昇モニタリング装置

フィルムも同様に試験した。PVA フィルムおよび PEDOT/PSS-PVA フィルムの引張強度は、それぞれ 22.4 MPa, 22.7 MPa であったのに対して、PEDOT/s-CNF-PVA フィルムは 31.8 MPa と引張強度が 1.4 倍程度大きくなった。s-CNF のファイバーが補強効果に起因しており、合わせガラスの中間膜として利用した場合、ガラスの強度向上にも効果を発揮することが考えられる。

図 5 に示すように、スチレン樹脂製の断熱ボックス（幅 180 × 長さ 180 × 高さ 250 mm, 厚み：18 mm, データロガー付き）の上面の開口部に PEDOT/s-CNF-PVA フィルムガラスを設置し、上部に可視光カットフィルター（400-600 nm カット）を組み込んで、擬似太陽光を 30 分間照射し、ボックス内部の温度モニタリングを行った。図 6 に示すようにガラス板および PVA フィルムガラスは内部温度が 39.7℃ まで上昇したのに対して、PEDOT/s-CNF-PVA フィルムでは 36.7℃ であった。PEDOT の近赤外領域の光吸収により、PEDOT/s-CNF-PVA フィルムでは 3℃ の上昇抑制効果が確認された。

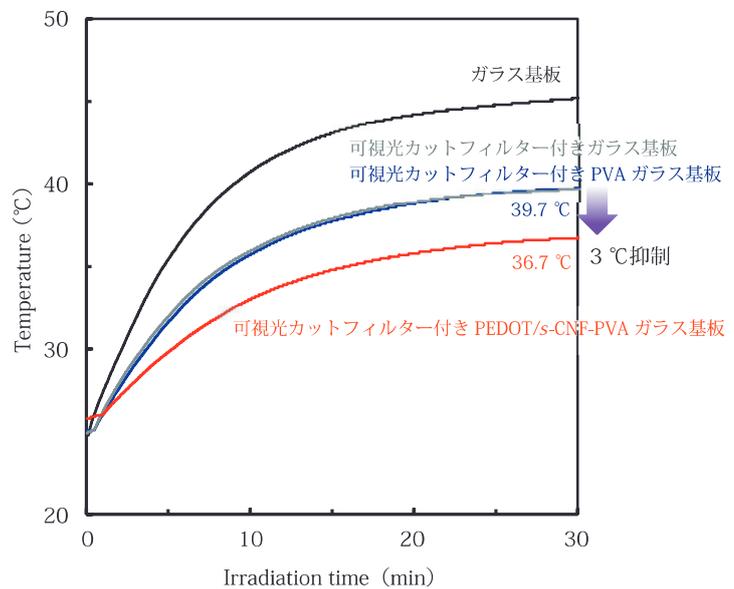


図 6 ガラス基板を設置した温度モニタリングボックス中の温度上昇の挙動
ガラス基板 (—), 可視光カットフィルター付きガラス基板 (—),
可視光カットフィルター付き PVA ガラス基板 (—),
可視光カットフィルター付き PEDOT/s-CNF-PVA ガラス基板 (—)



図7 PEDOT/s-CNF-PVA フィルムを遮熱中間膜とした合わせガラスの作製

3.2 スケールアップの検討～グラビア印刷法による PEDOT/s-CNF-PVA フィルムの作製および合わせガラスの作製

マイクログラビア印刷法により、PEDOT/s-CNF-PVA 塗工液を PET フィルム（厚み 50 mm × 幅 900 mm × 長さ 500 m）に成膜して、PEDOT/s-CNF-PVA コンポジットフィルムを作製した。図7に示すように、ガラス板（厚み 3 mm × 幅 70.3 cm × 高さ 1.56 m）を1層として、EVA フィルム（2層）を設置し、PEDOT/s-CNF-PVA コンポジットフィルム（3層）を重ね、さらに EVA フィルム（4層）配置した。上部からガラス板（5層）を配置し、タッピング後に減圧熱圧着を行い、PEDOT/s-CNF-PVA コンポジットフィルムを遮熱中間膜とした合わせガラスを作製した。

3.3 サッシへの実装と省エネ効果

3.2 で作製した PEDOT/s-CNF-PVA 合わせガラスを窓サッシに組み込み、鹿児島県薩摩川内市の既築集合住宅に設置して、実証実験を行った。これらは（株）日建ハウジングシステムを代表とする 12 機関における環境省

「セルロースナノファイバー活用製品の性能評価事業委託業務」の一環として行われた。本事業では、竹由来の CNF を用いた遮熱塗料、樹脂枠および遮熱窓ガラスの 3 種類の CNF 建材を開発・設置し、住戸の積算電力量を測定・解析することにより、省エネ効果を検証した。3 種類の建材を設置した場合、6～10月の住戸全体のエアコン積算電力量は、比較住戸と比較して、6.5%（26.7 kWh）削減できることが確認された¹⁰⁾。

4 PEDOT/s-CNF 配合の温度応答性材料を中間層に用いた遮光ガラス

4.1 PEDOT/s-CNF 配合の温度応答材料の調製

PolyNIPAM は、下限臨界温度（LCST）を 34℃付近にもち、LCST より高温で白色化し、低温で透明に変化する温度応答性を示す高分子である（図8）。PolyNIPAM は、バイオマテリアルに最も多く利用されているが、LCST の制御は光遮蔽効果に深く関連するため、調光ガラスに応用した例もある¹¹⁾。LCST 以下の温度において、アミド基と水で水素結合を起し、高分子鎖が水和して引き延ばされ、ランダムコイル状になる。LCST より高温ではアミド基と水との水素結合が不安定にな

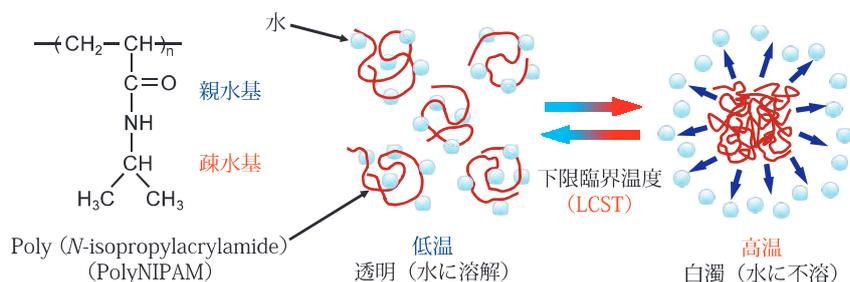


図8 PolyNIPAM の化学構造および LCST 前後での変化

り、アミド基同士の水素結合により脱水和を起し、高分子鎖が凝集したグロビュール状となる。このように PolyNIPAM の温度応答には水が必要であり、水をいかに保持するかが課題であった。また、LCST で膨潤と収縮を繰り返した際の相分離による白色面のムラも課題であった。

本研究では、透明性と高い保水性を併せもつ TEMPO 酸化 CNF を PolyNIPAM と組み合わせることにより、上記の課題を解決した。さらに、PolyNIPAM の通常の LCST である 34℃ よりも低い温度に調整することに

よって、遮熱性能の向上を試みた。LCST は親水性の有機化合物を入れると降下するため、プロピレングリコール (PrG) を 16wt% 添加して LCST を 28℃ に調整した。さらに白色化速度を向上させるために、PEDOT/s-CNF を加えることを検討した。PEDOT/s-CNF を所定量加えて、温度を 24℃ から 32℃ まで変化させながら透過率の測定を行った (図9)。PEDOT/s-CNF 添加による LCST の変化は見られなかったが、可視光 (700 nm) と近赤外光 (1300 nm) の透過率を比較したところ、700 nm の光で LCST 以下の透明時では 10.5%、LCST 以上の白

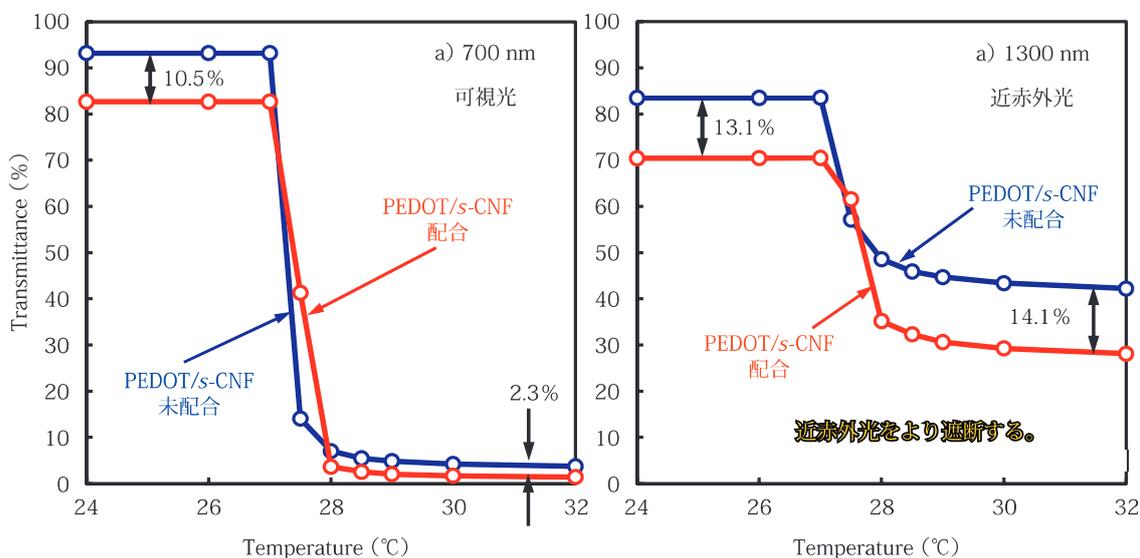


図9 温度変化による可視光 (a: 700 nm) と近赤外光 (b: 1300 nm) における透過率
 Blue line (—): PolyNIPAM + TEMPO-CNF (0.5wt%) + PrG (16wt%)
 Red line (—): PolyNIPAM + TEMPO-CNF (0.5wt%) + PrG (16wt%) + PEDOT/s-CNF (0.01wt%)

色化時では、2.3%低下した。1300nmの光ではLCST以下の透明時では13.1%、LCST以上の白色化時では、14.1%低下した。したがって、PEDOT/s-CNFの添加により、近赤外光がより遮断されていることを確認した。

4.2 遮熱ガラスの作製および遮熱効果

PEDOT/s-CNF配合の温度応答性材料を中間層に用いて遮熱ガラスを作製した(図10)。可視光カットフィルターを用いなかった以外は図5と同様にして、温度上昇モニタリングを行った。サーモグラフィーによる観察を行った。比較として2枚のガラスの間に空気を入れたものでは、ボックス内の温度が表面よりも高くなった。開発したガラスはボックス内と表面の温度が逆転し、PEDOT未配合のもので表面との温度差が18.3℃、PEDOT配合のもので表面との温度差が22.6℃となった。またPEDOT配合のものの方が近赤外光の吸収の影響により、表面温度が高くなった(図11)。

PEDOT/s-CNF未配合のガラスでは、全面白色化時間は191sであったのに対して、PEDOT/s-CNFを配合し

たものは全面白色化時間118sとなり、白色化の速度が1.6倍速くなり、温度応答速度の迅速化を確認した。

温度応答性の遮光ガラスは、常温では光を透過し、気温が上昇した際には、電源を必要とせず温度スイッチングにより、白濁化して遮光することができるため、カーポートや農業用ビニールハウスなど、様々な用途に利用が可能であると考えられる。

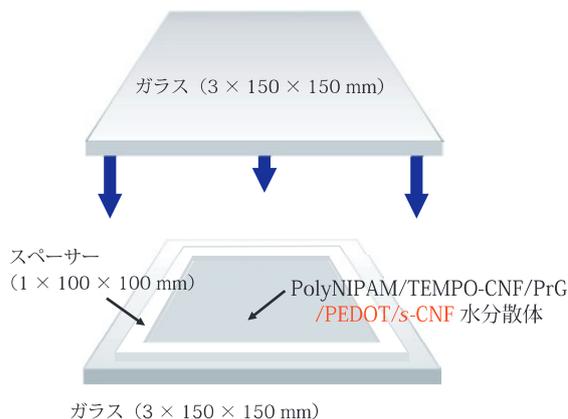


図10 PEDOT/s-CNF配合の温度応答性材料を中間層に用いた遮光ガラスの構造

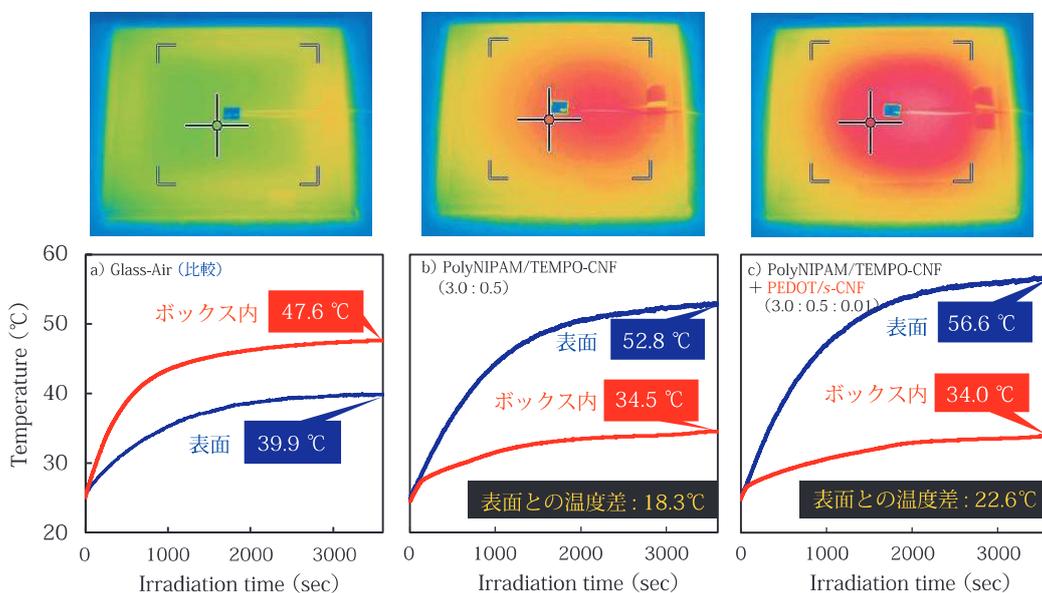


図11 擬似太陽光の照射実験におけるサーモグラフと温度上昇抑制効果

5 おわりに

CNFは、一般的にはガラスファイバーのような構造材としてプラスチックに加えられて利用されていることが多く、この場合はプラスチック中にCNFが10～20wt%と多量に含まれることが特徴である。CNFを多く使用するとコストがかかると指摘を受けることがあるが、本研究のガラス1平方メートルあたりのPEDOT/s-CNF-PVAの使用量は200mgであり、市販の遮光ガラスと同等である。住戸一戸当たり（ガラス4枚分）、30年間で78,000LのCO₂を削減できる試算を行なっている。したがって、PEDOT/s-CNFはわずかな使用量で大きな遮熱効果が得られるメリットがある。建築窓材の用途以外にも、アンチモンフリー、インジウムフリーの環境にやさしい車用の窓材として活用できれば、車のエコ化にも繋がる。このようなあらゆる用途にCNFが活用されて、持続可能な社会の実現に貢献できることを期待する。

謝辞

PEDOT/s-CNF-PVAフィルムを遮熱中間膜に用いた合わせガラスに関する研究は、環境省『セルロースナノファイバー活用製品の性能評価事業委託業務（竹CNFを活用した建材の開発と、既築集合住宅への実装によるCO₂削減効果の実証）』のプロジェクトの一環として実施されたものである。プロジェクトの関係各機関の皆様ならびに本事業特定研究員の河口勉氏（現）（株）熊防メタル）に深謝いたします。

PEDOT/s-CNF配合の温度応答性材料を中間層に用いた調光ガラスの研究の一部は、科学技術振興機構A-STEP産学育成型（JPMJTR21T7）の助成を受けて実施されたものである。本事業特定研究員の上田理香氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 日経BP総合研究所, “新・公民連携最前線”, 都道府県「SDGs認知度」ランキング2022, <https://project.nikkeibp.co.jp/atclppp/PPP/report/091300335/>, (参照2022-10-04)
- 2) 経済産業省産業技術環境分科会, 板ガラス業界の「低炭素社会実行計画」資料, 8-2, 1 (2020)
- 3) T. Abendroth, S. Kaskel et. al., *Thin Solid Films*, 624, 152-159, (2017)
- 4) K. Katagiri, R. Takabatake and K.Inumaru, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5, 10240-10245, (2013)
- 5) C. Li, C. Kang et al., *Mater. Lett.*, 260, 126961-126965, (2020)
- 6) M. Horikawa, S. Nagaoka et al., *J. Mater. Chem. C*, 83, 8881-8887, (2015)
- 7) K. Yoshida, S. Nagaoka, M. Horikawa et al., *Thin Solid Films*, 709, 138221-138228, (2020)
- 8) T. Takano, H. Okuzaki et al., *Macromolecules*, 45, 3859-3865, (2012)
- 9) M. Lai et al., *Phys. Status Solidi A*, 216, 1900025, (2019)
- 10) 平成31年度セルロースナノファイバー活用製品の性能評価事業（竹CNFを活用した建材の開発と、既築集合住宅への実装によるCO₂削減効果の実証）成果報告書, 66, (2019)
- 11) X. Li, C. Liu, S. Feng, N. Fang, *Joule*, 3, 290-302, (2019)

編集委員会

委員長	森山 芳生
委員	松尾 英信
	前田 和輝
	濱嶋 英樹
	野口 サララ
	佐藤 崇雄
	朝長 伸吾
	渡辺 秀典
	吉田 恭平
	川口 真里奈

熊本県産業技術センター研究報告 第59号 令和5年度

編集・発行 熊本県産業技術センター

〒862-0901 熊本市東区東町 3-11-38

TEL: 096-368-2101 (代表)

FAX: 096-369-1938

発 行 者：熊本県
所 属：熊本県産業技術センター
発行年度：令和6年度