2025

ISSN 2760-4675

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER of SAGA

研究報告書

2025
NO.34

佐賀県工業技術センター

佐賀県

目　次

共 同 研 究

佐賀県産酒のブランド力向上を目指した技術体系の構築（第３報）・・・　澤田　和敬　・・・ 1

ブルーカーボン資材及び高タンパク質素材としての海苔の利用展開（第２報）
・・・　柘植　圭介　・・・ 5
吉村　臣史
（佐賀大学農学部）木村　圭
（佐賀大学農学部）吉田　和広
（佐賀大学農学部）川村　嘉応

大気圧プラズマ表面処理の製造工程適用技術の開発（第１報）
－多数個処理用プラズマリアクターの開発－　・・・　河合　信次　・・・11
円城寺　隆志
平井　智紀
（佐賀大学理工学部）猪原　哲

多波長近接場光を用いた工具刃先高さ位置の非接触ナノスケール検出に関する研究（第１報）
・・・　寺山　裕　・・・15
（九州工業大学知的システム工学研究系）カチョーンルンルアン・パナート
緒方　晃輝

戦略的試験研究

金属製品の長寿命化を目的とした切削加工法－DEM 法－の実用化研究（第１報）
・・・　永石　尚昭　・・・21
帆秋　圭司
田栗　有樹
（株式会社香田製作所）香田　和則

経　常　研　究

機能性食品・コスメ原料に関する評価技術の確立及びその応用に関する研究（第３報）
・・・　柘植　圭介　・・・27
（宮崎大学農学部）山崎　正夫
（宮崎大学工学教育研究部）菅本　和寛

環境に優しい水性塗料用紫外線吸収剤に関する研究（第４報）
－バイオマス由来 UVA の併用による耐光性向上評価－　・・・　久間　俊平　・・・33
田栗　有樹
帆秋　圭司
矢野　昌之
（大阪公立大学大学院工学研究科）小畠　誠也

環境に優しい水性塗料用紫外線吸収剤に関する研究（第５報）
－紫外線吸収剤含有マイクロカプセルの水性塗料添加剤としての適用検討－
・・・　田栗　有樹　・・・37
帆秋　圭司
久間　俊平
矢野　昌之

データ解析による生産設備の保全に関する研究（第２報）　・・・　大坪　昭文　・・・43
中野　太郎

家具商品開発における生成 AI の活用手法に関する調査研究（第１報）
・・・　佐藤　彰　・・・47
辛川　洋介

萌芽的独創研究

醸造副産物を活用した美容製品の開発に関する研究　・・・　岩元　彬　・・・53
柘植　圭介
（宮島醤油株式会社）尾上　亜美

再資源化燃料を用いた新規ハウス加温システムに係る環境影響評価
・・・　帆秋　圭司　・・・59
（イマリ・ホットエアタービン）山田　義人

共　同　研　究

佐賀県産酒のブランド力向上を目指した技術体系の構築（第３報）

食品コスメ部
澤田和敬

佐賀県産の新たな酒米品種である佐賀酒 73 号の清酒醸造への適性を３ヶ年にわたって検証した．その結果，佐賀酒 73 号の物理的特性は製造にほとんど影響を与えなかった．令和６年，令和７年と多くの原料米が高温障害により原料米の溶解性の低下，老化性が亢進した中，いずれの収穫年度において，佐賀酒 73 号は原料米の吸水性が高く，製麹での保湿性や醪での高い溶解性などの米の登熟期の高温の影響が小さい特性を示した．また，佐賀酒 73 号を用いた仕込みによって得られた製成酒は官能評価もおおむね好評であり，清酒への醸造適性が高いことが示唆された．

1. はじめに

佐賀県では酒造好適米の品種として，山田錦，さがの華，西海 134 号，レイホウが栽培され，加工用米の品種として，さがびよりが栽培されており多くの蔵元で使用されている．

これらの原料を用いた本県産清酒は純米酒を中心に消費者の認知度が向上する一方，県産原料米の産地間の品質のバラつきや安定供給に課題があった．

近年，米の登熟期に高温障害を受けた原料米のデンプン側鎖のアミロペクチンが長鎖化し，デンプンの溶解性の低下及び老化性が亢進することによる原料米の保湿性の低下が酒造現場の重要課題となっている[1～5]．そこで，県産原料米の品質向上及び安定生産を目的に佐賀県，JA さが，県酒造組合で佐賀県酒米プロジェクトを発足した．

本プロジェクトでは，平地に比べ気温が低く朝晩の寒暖差がある，中山間地での栽培適応性について検討し，溶解性の改善など品質向上の面では一定の成果を得た．しかし，中山間地の酒米の圃場の面積拡大の余地は限定的であるため，県内の蔵元へ高品質な酒造好適米を安定供給する目的で平地の圃場で夏の高温に耐えうる品種の開発に重点的に取り組む必要があることがわかった．

佐賀県農業試験研究センターが育種した品種について，工業技術センターと農業試験研究センターが育成の早期の段階から栽培適性と醸造適性に優れる品種の選抜を行った．その結果，大粒で心白が線状心白であり高度搗精が可能な稈長が短く倒伏しにくく多収性も見込まれる，小スケールの試験で吸水性が高く溶解性に優れる佐賀酒 73 号を選抜した[6]．

佐賀酒 73 号を新たな酒造好適米として普及するには，原料米の物理的特性が製造工程に及ぼす影響について検討する必要がある．そこで，県農業試験研究センターの圃場で収穫した佐賀酒 73 号を用い，令和５年度から７年度に実製造スケールでの評価を行った結果について報告する．

表１　仕込み配合（令和６年度）

	酒母	添	仲	留	計
総米（kg）	36	96	186	282	600
掛米（kg）	24	78	150	228	480
麹米（kg）	12	18	36	54	120
汲水（L）	44	114	246	386	790

2. 実験方法

2.1 実験材料

原料米は佐賀県農業試験研究センターの圃場で収穫した佐賀酒 73 号を用いた．

2.2 原料米の醸造適性評価

令和５年度に，収穫した佐賀酒 73 号（精米歩合 50%）の、麹米適性評価を県内酒造メーカー３社で，掛米適性評価を県内酒造メーカー２社で評価した．

令和６年度に，収穫した佐賀酒 73 号及び県内で収穫された山田錦（精米歩合 55%）を用い，県内酒造メーカーで総米 600kg の仕込みを行った．仕込み配合を表１に示す．なお，佐賀酒 73 号は佐賀県農業試験研究センターで栽培したものを無償提供し，山田錦は県内酒造メーカーが購入したものを使用した．

佐賀酒 73 号の仕込みは，種麹，酵母及び洗米・吸水などの各種製造工程の指標を山田錦の条件と同一条件とし，米質の比較を行うために酵素剤の使用を控えた．

製成酒は県内酒造関係者による香味の官能評価を実施し，その評点について Excel の分析ツールによりｔ検定を行った．

令和７年度に，収穫した佐賀酒 73 号（精米歩合 60%）を使用し総米 770kg の仕込みを行った．仕込み配合を表２に示す．

3. 実験結果及び考察

3.1　佐賀酒 73 号の麹米及び掛米適性評価（令和５年度産の原料米を用い、令和５年度に実施）

表３に佐賀酒 73 号の麹米としての評価を，表４に佐賀酒 73 号の掛米としての評価を示す．粒の大

きさは多品種並みあるいは大きいという評価であった．心白は１社が小さいという評価であったが，その他４社は大きいという評価であった．吸水は２社が吸水しやすい，２社が吸水しにくい，1 社が多品種並みという評価であり，酒造メーカーの洗米時の水温や水質によって評価が分かれた．蒸米のやわらかさは，山田錦とさがの華の中間程度であり，蒸米のさばけは概ね高評価であった．

麹米適性評価では，製麹時の作業性など山田錦と同等の性質を示し，麹米として問題なく使用できる評価を得た．また，掛米は蒸米後，放冷機やエアシューターなどを用いて仕込みが行われるため，ベルトコンベアやクラッシャへの付着，エアシューターのロッカーバルブでの詰まりが生じることが懸念された．D 社及び E 社では放冷機のベルトコンベアの詰まり及びクラッシャへの付着は見られなかった．また，E 社ではエアシューターを利用し，仕込みを行ったがロッカーバルブでの詰まりは全く生じなかった．

麹米及び掛米適性試験の結果より，佐賀酒 73 号は県内酒造メーカーの仕込み設備で問題なく使用できることが確認できた．

3.2 県産山田錦と比較した佐賀酒 73 号の醸造適性評価（令和６年度産原料米を用い令和６年度に実施）

表５に製麹工程における麹米の水分等の変化を示す．洗米時は山田錦と同等の吸水率であったが，蒸し前の水分は山田錦のほうが高かった．しかし，蒸し後以降出麹まで佐賀酒 73 号のほうが山田錦よりも水分が高く，令和５年に実施した製麹適性評価における「製麹時の乾燥」の結果と同様であった．このことから，佐賀酒 73 号は製麹工程において水分の保持力が山田錦よりも高い特性を有することが明らかになった．このことから，佐賀酒 73 号を用い，高品質な麹を製麹する際は，原料米の吸水を詰めるあるいは切り返しを行うことで目的に応じた麹に仕上げることが可能と示唆された．

表６に製造事績及び一般成分分析を示す．清酒製造における原料米の溶解性の判断基準である最高ボーメは佐賀酒 73 号のほうが山田錦よりも高く，追水を行うことができた．一方，山田錦は原料米の溶解性が低く，追水を行うことができなかった．

令和６年産の原料米は，溶解性が低く，酵素剤を使用することで原料米の溶解性の矯正を行う必要があった．本試験では当初酵素剤を添加せずに米質の比較を行う計画であったが，想定以上に山田錦の溶解性が悪く，最高温度前後でも溶解する見込みが見られなかったため，醪 13 日目に酵素剤を添加した．

粕歩合は山田錦が 59.0%に対し，佐賀酒 73 号が 54.1%，純アルコール収得量は，山田錦が 281L/白米 t，佐賀酒 73 号が 297L/白米 t であり，令和６年産の佐賀酒 73 号は同一収穫年度の山田錦よりも原料利用率が高かった．また，適切な酵素剤の使用により原料利用率が向上することが推測された．図１に酒造関係者による官能評価の結果を示す．香りの評価では山田錦よりも有意に評価が高かった（*p＜0.05）．

表２　仕込み配合（令和７年度）

	酒母	添	仲	留	計
総米（kg）	48	123	239	360	770
掛米（kg）	32	100	194	290	616
麹米（kg）	16	23	45	70	154
汲水（L）	57	146	316	493	1012

表３　佐賀酒 73 号の麹米適性（令和５年度）

	A 社	B 社	C 社
粒の大きさ	大きい	他品種並み	大きい
心白	大きい	他品種並み	小さい
吸水	吸水しやすい	吸水しにくい	さがの華並み
蒸米の柔らかさ	柔らかい	他品種並み	さがの華並み
蒸米のさばけ	良い	良い	良い
製麹時の作業性	良い	良い	良い
製麹時の乾燥	山田錦並み	乾燥しにくい	山田錦並み
麹の破精込み	山田錦並み	他品種並み	山田錦並み
麹米適性	使用可能	使用可能	使用可能

表４　佐賀酒 73 号の掛米適性（令和５年度）

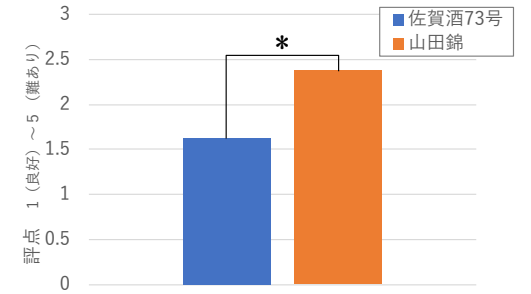
	D 社	E 社
粒の大きさ	さがの華並み	大きい
心白	大きい	山田錦並み
吸水	吸水しにくい	吸水しやすい
蒸米の柔らかさ	山田錦とさがの華の中間	
蒸米のさばけ	良い	やや悪い
放冷	問題ない	問題ない
掛米適性	使用可能	使用可能

表５　製麹工程における麹米の水分等の変化（令和６年度）

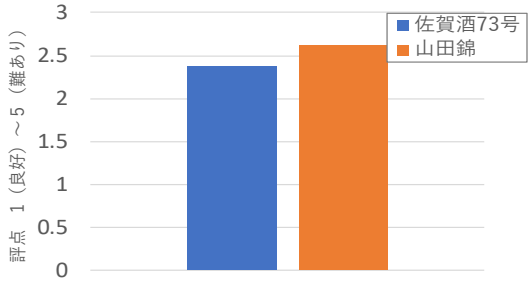
品種		洗米	蒸前	蒸後	もみ上げ	盛り	出麹	枯らし
佐賀酒 73 号（２等）	水分(%)	-	27.9	29.5	31.1	30.9	27.9	8.1
	吸水率(%)	132.0	131.5	-	-	-	-	-
山田錦（２等）	水分(%)	-	29.0	28.4	27.4	28.8	23.3	10.1
	吸水率(%)	132.5	132.0	-	-	-	-	-

表６　製造事績及び一般成分分析（令和６年度）

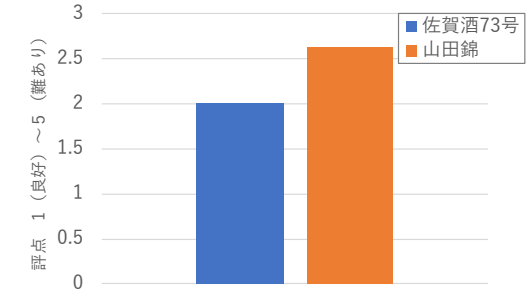
品種	留即汲水歩合(%)	醪 最高Be	醪 最高温度(℃)	総汲水歩合(%)	粕歩合(%)	純 Alc. 収得量(L/白米 t)	検定時 Alc.(%)	日本酒度	酸度	アミノ酸度
佐賀酒 73 号（２等）	131.6	6.46	11.7	135.0	54.1	297	16.33	+1.11	1.3	1.1
山田錦（２等）	131.6	5.80	12.3	131.6	59.0	281	16.33	+1.99	1.3	1.0



（A）香りの評価



（B）味の評価



（C）総合評価

図１　酒造関係者による官能評価

佐賀酒 73 号は山田錦に比べ，醪での原料米の溶解性が高かったことから，酵母が香気成分を生成する際に必要なグルコース等の成分が醪中に多く溶出されていたと示唆される．

香り，味，総合評価いずれの評価項目においても佐賀酒 73 号のほうが山田錦よりも高い評価であり，官能的にも優れ，山田錦と同様の操作で清酒製造に問題ないことが確認できた．

3.3　佐賀酒 73 号の醸造適性評価（令和 7 年度産の原料米で令和 7 年度に実施）

令和７年産佐賀酒 73 号を用いた醪のＢ曲線を図２に，アルコールの経過を図３に示す．表７に製造事績及び一般成分分析の結果を示す．

原料米への高温障害を考慮し，留即の汲水歩合を131.4％に設定し，タンパク分解系の酵素剤を1000kg当たり25g使用した．ここで，α－アミラーゼやグルコアミラーゼなどデンプン分解系の酵素剤は使用しなかった．佐賀酒73号はBMD値が40を超え，醪での溶解性がよく，アルコールの経過も順調であり，追水操作を行うことができ，総汲水歩合は175.6%，粕歩合は37.1％と優れた溶解性を示した．

出来上がった製成酒の官能評価を行ったところ，「甘味が複層的」「ジューシー感あり」「エステルの華やかさがよい」「味わいの骨格がしっかりしている」「旨味・味が良い」といった評価であった．

令和7年度の実地醸造試験において，醸造適性及び製成酒の官能評価の結果から，佐賀酒73号は実製造に使用可能であるという結果を得た．

表７　製造事績及び一般成分分析（令和７年度）

	留即汲水歩合（%）	醪		総汲水歩合（%）	上槽前 Alc.（%）	上槽前日本酒度	粕歩合（%）	アルコール収得量（L/白米ｔ）
		最高 Be	最高温度（℃）					
佐賀酒 73 号	131.4%	8.2	12.2	175.6%	15.64	+1.14	37.1	370.6

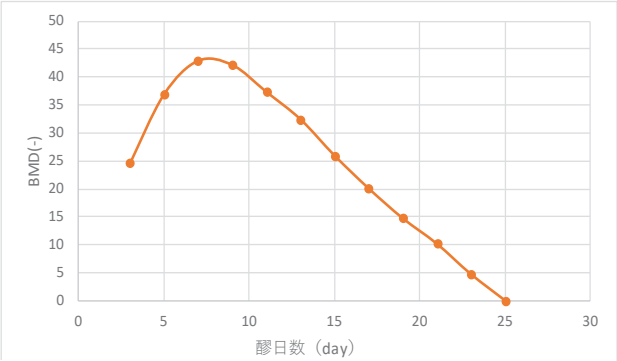


図２　Ｂ曲線

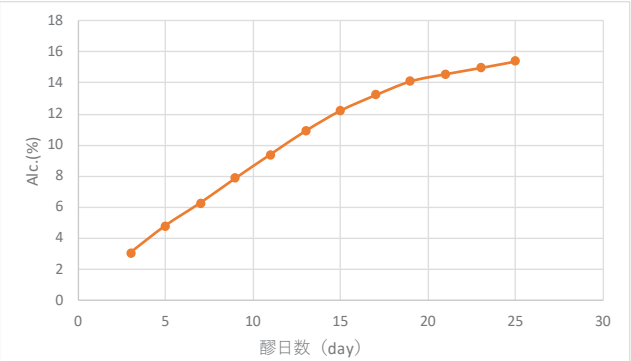


図３　アルコールの経過

4. おわりに

本研究では，県農業試験研究センターが育種した佐賀酒 73 号の清酒の醸造適性を３ヶ年にわたって検証した結果，佐賀酒 73 号の物理的特性は製造にほとんど影響を与えなかった．また，佐賀酒 73 号は令和６年，令和７年と多くの原料米が高温障害により，溶解性が低下している中，原料処理時の吸水性が高く，製麹での保湿性や醪での高い溶解性などの特性を示した．

令和６年以降に発生した全国的な米不足により，食用米の販売価格が高騰したことで，酒米から食用米への転作が進み，酒造メーカーの原料米の確保は一層厳しい状況になった．そのような状況において，佐賀酒 73 号は山田錦に比べ，稈長が短く倒伏しにくい，千粒重が大きく反収が高いといった特徴を有し，米農家の酒米栽培のハードルが下がることが期待される．また，佐賀酒 73 号が普及することで，酒造メーカーの原料米確保の問題解決につながることが期待される．

佐賀酒 73 号の香味に与える影響等は未だ不明な点が多いことから，令和８年度以降佐賀酒 73 号の栽培適性を評価するため大規模栽培試験を実施する．この大規模栽培試験で収穫した原料米を用い県内酒造メーカー10 社で行う醸造試験により得られた製成酒の官能評価等を行い，共通する香味を探索することで，佐賀酒 73 号の特徴的な香味を明らかにしたい．

本研究を遂行するにあたり，ご協力いただいた佐賀県酒造組合様，蔵元の皆様，佐賀県農業試験研究センターの皆様に深く感謝申し上げます．

参考文献

1)　岡崎直人，君塚敦，木崎康造，小林信也．(1989)．酒造原料米の醸造適性と気象条件の関係．日本醸造協会誌，84(11)，800-806.
2)　小関卓也，奥田将生，米原由希，八田一隆，岩田博，荒巻功，橋爪克己．(2004)．イネ登熟期の高温が酒造適性に及ぼす影響．日本醸造協会誌，99(8)，591-596.
3)　奥田将生，橋爪克己，上用みどり，沼田美子代，後藤奈美，三上重明．(2010)．イネ登熟期気温と酒造用原料米のデンプン特性の年次・産地間変動．日本醸造協会誌，105(2)，97-105.
4)　奥田将生，上用みどり，高橋圭，後藤奈美，高垣幸男，池上勝，鍋倉義仁．(2013)．イネ登熟期が記録的な猛暑となった平成 22 年産米のデンプン特性及び蒸米酵素消化性.
5)　奥田将生．(2015)．酒造用原料米のデンプン分子構造と酒造適性 (3)：イネ栽培時の気象条件と酒造用原料米の酒造適性.
6)　森則子，本多優志，田淵翔伍，藤浦淳次，佐賀県農業試験研究センター．(2026)．試験研究の成果 58-62.

ブルーカーボン資材及び高タンパク質素材としての海苔の利用展開（第２報）

食品工業部
柘植圭介　吉村臣史
佐賀大学農学部
木村圭　吉田和広　川村嘉応

海藻や植物プランクトンなど，海の生物の作用で海中に取り込まれて貯留する炭素のことをブルーカーボンと称する.「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（経済産業省）」に基づき，佐賀県の特産品であるノリのブルーカーボン資材としての可能性を追求することを目的として，高炭素吸収能を示すノリ品種の選抜を試みた．併せて，海藻の中でも格段に高いタンパク質含量であるノリの栄養学的特徴に着目し，高窒素吸収能を示す品種の選抜を試みるとともに，高タンパク質食品素材としてのノリの新たな活用を志向して，ノリを原料とした動物資源フリー食品（Plant Based Food ; PBF）の展開可能性についても検討を行った．その結果，保有株 18 種の中から，ブルーカーボン資材と PBF の両方に適するノリとして，CFMSⒶF2 及び U-51Ⓟを選抜した．この 2 株は，成長性，炭素含有率及び窒素含有率のいずれにおいても高値を示した．CFMSⒶF2 株は，共同研究機関において色落ち耐性変異株として作出された株であり，この株を核としたブルーカーボン向けノリ品種の作出が期待された.

１．はじめに

経済産業省が 2020 年 10 月に策定した「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 [1]」では，産業政策とエネルギー政策の両面から成長が期待される 14 の重要分野について実行計画が策定されている．重要分野のうち「9 食料・農林水産業 [1]」では，大気中の温室効果ガスを回収・除去する「ネガティブエミッション」に向けた森林及び木材，海洋等の活用に関する目標が具体化され，海藻や光合成プランクトン等の海洋生態系による炭素貯留（ブルーカーボン）の大きなポテンシャルが期待されている.

同戦略には，ブルーカーボンに関する今後の取組として, 2023 年度までに海藻藻場による CO_2 の吸収・貯留量の計測方法を確立し，国連気候変動枠組条約等への反映を目指すとともに，産・官・学による藻場・干潟の造成・再生・保全の一層の取組を推進することが明記されている．さらに，海藻等の商業利用を進めるとともに，カーボンオフセット制度を利用した収益化を図り，CO_2 吸収を自律的に推進する計画である.

日本には古来より海藻類の食文化があり，海苔（スサビノリ ; 以下ノリと称する）をはじめ，コンブやワカメなど約 100 種類の海藻が食されているといわれている．海藻類の生産量は年間 33 万 6 千トン（生重量, 2021 年）に達し [2], なかでもノリの生産量が最も多く，年間約 22 万 9 千トンを占める.

有明海沿岸域は干満差が 6 m にも達する遠浅の干潟で, 潮間帯に自生するノリの養殖に適した地形である．そのため海苔の養殖が盛んに行われ，特に佐賀県は全

表１　ノリの都道府県別生産量

都道府県	生産量 (生重量; t)
宮城	12,782
千葉	3,173
神奈川	390
愛知	6,977
三重	5,400
大阪	71
兵庫	46,034
岡山	5,487
広島	1,926
山口	242
徳島	1,191
香川	6,432
愛媛	1,023
福岡	45,071
佐賀	56,938
長崎	221
熊本	35,767
大分	58
鹿児島	112
有明海合計	138,055
総計	229,294

令和3年海面漁業生産統計調査（農林水産省）より抜粋

国でもトップの生産量を誇る（表 1）.

本研究では，ブルーカーボンの資材としてのノリの有用性に着目し，その炭素吸収能を把握するとともに，高い炭素吸収能を示すノリ品種の選抜を試みた.

併せて，海藻の中でも格段に高いタンパク質含量であるノリの栄養学的特徴に着目し，窒素吸収能が高い品種の選抜を試みるとともに，高タンパク質食品素材としてのノリの新たな活用を志向して，ノリを原料とした動物資源フリー食品（Plant Based Food ; PBF）の展開可能性についても検討を行った．PBF の主要なタンパク質源としてノリのみを用いた場合，ノリを高配合しなければならず，結果的に原料コストの上昇やノリ独特の風味の発現を招いてしまう．そこで，植物性原料として佐賀特産の高オレイン酸大豆「HO1 号」も採り入れて，PBF のモデル食品を設計した.

ここで，HO1 号とは，佐賀大学が育種開発 [3]したオリーブオイル並みに高いオレイン酸含量（総脂肪酸の 80 %以上）の油脂を生産するダイズ品種である．リノール酸含量が従来品種の 10 分の 1 以下と極めて低いため，従来品種と比較して高い酸化安定性を示す．また，大豆特有の青臭みの原因物質である *n*-ヘキサナールがほとんど発生しないことも明らかになっている．HO1 号のこのような特性を活用することで，酸化安定性や風味に優れた PBF が調製できると考えられる.

２．実験方法

2.1 供試株の選定

佐賀大学で管理している 250 以上のノリ株を対象に，高成長性，色素変異性，色落ち耐性を指標として各株の大まかな特徴に基づき 24 株を選定した．さらに問題なく成熟し，かつ培養終期まで維持できた 18 株を選定し（表 2），培養試験に供した.

表 2　供試株

番号	株管理名	純系	備考
1	CFMSⒷF1Ⓟ	○	色落ち耐性株
2	G9HG		高成長
3	D-56-O	○	緑芽
4	S18正常1Ⓟ	○	佐賀大学基準株
5	野間3号Ⓟ	○	
6	U51Ⓟ	○	実験株
7	CFMSⒶ		色落ち耐性株、元株
8	CFMSⒷ		色落ち耐性株、元株
9	A-混Ⓟ		
10	S-18正常IIⓅ	○	佐賀大学基準株
11	オオバグリーン	○	
12	佐賀6号②Ⓟ	○	
13	CFMSⒶF2		色落ち耐性株、2代選抜
14	前の株 A-混	○	
15	橙Ⓟ	○	橙色芽
16	J-22R-1Ⓟ	○	赤色芽
17	佐賀1号Ⓟ	○	
18	G9Ⓟ	○	

2.2 培養試験

ノリ葉状体の特性を比較するためには，糸状体を培養して大きく育て，さらに成熟させることでタネ（殻胞子）を放出させ，その殻胞子から葉状体世代の培養に移るという手順が必要になる．そこで，糸状体で長期保存しているノリ 18 株を，①糸状体培養→②カキ殻糸状体培養→葉状体培養の順に培養した．各培養期の条件を以下に示した.

①糸状体培養 : 培地として人工海水 SF-1 に SWM-Ⅲ改変培地（表 3）を添加した強化海水を用い，白色 LED を 50 μmol photons m^{-2} s^{-1} で照射した．明暗周期は 12L / 12D の中日条件に設定し，18℃で培養した．培養容器として腰高シャーレを用い，培養期間は 1–2 ヶ月間とした.

②カキ殻糸状体培養 : 大きく育った糸状体を裁断し，カキ殻上に静置培養することで，糸状体をカキ殻に穿孔させ，カキ殻表面に海苔糸状体が十分繁茂するまで，

表 3　SWM-III 改変培地組成

A液	
$NaNO_3$	85 g
$NaHPO_4$ ・ $12H_20$	18 g
Na_2EDTA	5.58 g
$FeCl_3$ ・ $6H_20$	0.19 g
B液	
H_3BO_4	6.183 g
MnCl2 ・ $4H_20$	1.0885 g
$ZnCl_2$	54.5 mg
$CoCl_2$ ・ $6H_2O$	2.38 mg
$CuCl_2$ ・ $2H_2O$	17 μg
pH7.5	

海水 1 LにA液とB液を各2 mLずつ添加



図 1　カキ殻糸状体培養の様子

カキ殻が黒いノリ糸状体で覆われている

再度 1–2 ヶ月間 18℃で培養した（図 1）．十分に育った後は，カキ殻糸状体を培養容器ごと 26℃に調整し，1 ヶ月の高温処理を行った．その後，カキ殻糸状体を培養容器ごと 18℃に戻すことで，ノリ糸状体を成熟させ，胞子嚢の形成を促した．

③葉状体培養：18℃培養 1 週間程度で殻胞子放出が確認された株をカキ殻ごとマリンフラスコ内に移し，培養糸を入れて通気攪拌培養して，ノリの殻胞子を培養糸に付着させた（図 2）．顕微鏡下で培養糸に十分量の殻胞子が付着したことを確認した後，フラスコ内に培養糸を戻し，培養糸ごと殻胞子を培養した．殻胞子の培養開始日を 0 日目とし，全ての株を 45 日間培養することで各株の葉状体試料とした．この間，5 日に 1 回の培地の交換を行い，30 日目には酸処理をすべての株で実施した．酸処理条件は以下の通り；培養したノリ葉体を 0.5%クエン酸含有培地に 90 秒浸して処理し，その後 SF-1 人工海水で 2 回洗浄した．ノリの培養状況を表 4 に，培養終盤のノリ葉状体を図 2 に示した．

2.3 炭素/窒素含量分析

葉状体を 45 日間培養後，1 株あたり 20 枚の葉状体を不作為に取り出して葉長，葉幅を測定し，写真撮影を行った．その後，葉状体の水分をペーパータオルで吸水し，各葉をマイクロチューブに入れて，分析するまで - 80℃で保存した．炭素/窒素 (C/N) 測定試料においては，葉状体を凍結乾燥し，燃焼式窒素/炭素タンパク質分析装置（Sumigraph NC-Trinity，住化分析センター）にて C/N 含量を測定した．1 株あたりの反復数は 3 とした（n=3）．

2.4 PBF モデル食品の試作

PBF のコンセプトにご同意いただいた２社の佐賀県内の食品製造企業と協力し，各企業のアイデアを取り入れて海苔及び高オレイン酸大豆 HO1 号を高配合するモデル食品を試作した．

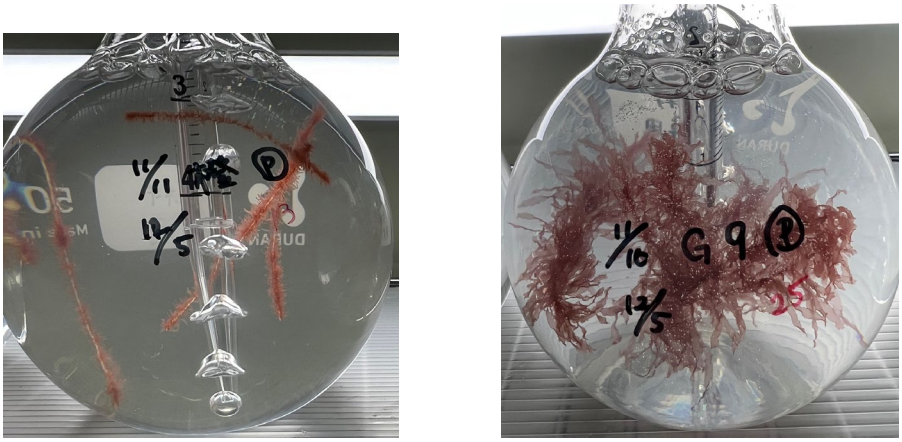


図２　葉状体培養の様子

左：培養初期，右；培養終期

表４　選定したノリ株の培養状況

	株名	糸状体培養 開始日	高温処理 開始日	成熟培養 開始日	葉状体培養 0日目	スケールアップ （500mL）	酸処理日	培養終了日
1	CFMSⒷF1Ⓟ	2022/3/15	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/13	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/27
2	G9 HG	2022/5/11	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/12	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/26
3	D-56-O	2022/5/11	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/11	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25
4	S18正常 IⓅ	2022/6/15	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/11	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25
5	野間3号Ⓟ	2022/5/11	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/12	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/26
6	U51Ⓟ	2022/6/15	2022/8/30	2022/10/4	2022/10/11	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25
7	CFMSⒶ	2022/1/19	2022/8/30	2022/10/19	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10
8	CFMSⒷ	2022/3/15	2022/8/30	2022/10/19	2022/10/28	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/12
9	A-混	2022/3/15	2022/8/30	2022/10/19	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10
10	S-18正常 IIⓅ	2022/5/25	2022/8/30	2022/10/19	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10
11	オオバグリーン	2022/6/16	2022/9/7	2022/10/19	2022/10/28	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/12
12	佐賀6号②Ⓟ	2022/6/21	2022/9/7	2022/10/19	2022/10/26	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10
13	CFMSⒶF2	2022/3/15	2022/8/30	2022/11/3	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/25
14	前の株　A－混Ⓟ	2022/3/15	2022/8/30	2022/11/3	2022/11/12	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/27
15	橙Ⓟ	2022/1/19	2022/8/30	2022/11/3	2022/11/11	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/26
16	J-22R-1Ⓟ	2022/1/19	2022/8/30	2022/11/3	2022/11/11	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/26
17	佐賀1号Ⓟ	2022/6/21	2022/9/7	2022/11/3	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/25
18	G9Ⓟ	2022/6/17	2022/9/7	2022/11/3	2022/11/10	2022/11/25	2022/12/10	2022/12/25

３．結果及び考察

3.1 培養試験結果（成長性）

培養終期まで維持できた 18 株について，表 4 のスケジュールで 1 サイクル 6 株ずつ培養することで，最終的に 18 株全ての葉状体試料を得た．各株について，ランダムに 20 枚の葉の葉長と葉幅を測定した結果，表 5 に示すように，株ごとに葉のサイズ特性が大きく異なっていた．平均葉長については，最小 17.57 mm から最大 161.66 mm と，約 10 倍の差が生じ，長い方から順に ”CFMSⒶF2”, ”U-51Ⓟ”, ”前の株 A-混Ⓟ” となった．平均葉幅についても，最小 1.51 mm から最大 17.55 mm と，約 10 倍以上の差が生じ，広い方から順に”前の株 A-混Ⓟ”，”佐賀 6 号②Ⓟ”，”G9HG”となった．葉長の大きい株と葉幅の広い株は必ずしも一致しなかった為，各株の平均長幅比 [葉長／葉幅] を算出した結果，最小 1.54 から 24.58 と，長く伸びやすい株と丸く広がりやすい株が存在することが明らかになった．長幅比は，大きい方から順に”橙Ⓟ”，”CFMSⒶF2”，”U-51Ⓟ”となった．

葉状体の高成長性は，炭素吸収性に優れるノリを選抜するうえで重要な特性である．ノリは細胞層が 1 層であり，葉の厚さは大差ないと考えられることから，葉面積が大きいことがこの特性を満たすことに繋がる．しかしながら，各株で葉の面積を正確に計測することは極めて難しいため，本研究では海苔の葉を楕円と仮定し，葉長と葉幅から楕円の面積を算出することで，便宜的な葉の面積とした．

概算葉面積の平均値は，最小 24.58 mm^2 から最大 1733.52 mm^2 と，大差が生じ，面積の大きい方から順に”前の株 A-混Ⓟ”，”CFMSⒶF2”，”U-51Ⓟ”となった．葉面積を指標にブルーカーボン資材として活用の見込まれるノリを選定すると，”前の株 A-混-P”，”CFMSⒶF2”，”U-51-P”となる．しかしながら，”前の株 A-混-P”に関しては，幅広い葉の特徴を有することから，養殖ノリと同様に網などに付着させて育てる場合には，隣の葉に干渉してしまうことが栽培上のデメリットとなることも予想される．このことから，”前の株 A-混-P”は，網などの基質に固定しないバイオリアクター等での生育に適しており，養殖同様に網を基質に用いる場合には，”CFMSⒶF2”及び”U-51Ⓟ”が適していると結論づけられた．

3.2 培養試験結果（炭素/窒素含有率）

続いて，選定した海苔株について C/N 測定を行った．平均窒素含有率については，最小 3.66 %から最大 6.85 %の株が存在した（図 3）．含有率が 6 %以上の株は，大きい方から順に”オオバグリーン”，”CFMSⒷ”，”CFMSⒶF2”，”S-18 正常ⅡⓅ”，”U-51Ⓟ”，”佐賀 6 号②Ⓟ”，”S18 正常ⅠⓅ”であった．平均炭素含有率については，最小 32.32 %から最大 38.75 %の株が存在した（図 4）．含有率が 36 %以上の株は，大きい方から順に”A-混”，”佐賀 6 号②Ⓟ”，”U-51Ⓟ”，”S-18 正常ⅡⓅ”，”オオバグリーン”，”G9Ⓟ”，”橙Ⓟ”，”CFMSⒶF2”となった．しかしながら，全ての株において，炭素含有率には大きな差は無く，多くの株で 35 % 程度以上の

表 5　選定したノリ株の培養結果（成長指数）

	株名	U-51Ⓟ	S-18正常ⅠⓅ	D-56-O	G9HG	野間3号Ⓟ	CFMSⒷF1Ⓟ	S-18正常ⅡⓅ	佐賀6号②Ⓟ	A-混
葉長	平均値	127.65	23.73	51.94	17.57	55.70	49.88	45.61	23.16	22.01
	標準偏差	21.65	8.30	16.39	6.96	21.27	13.88	18.20	11.70	6.97
葉幅	平均値	12.25	3.57	6.49	12.42	9.02	8.75	8.93	14.84	9.06
	標準偏差	2.03	0.96	1.78	3.35	2.80	2.05	2.22	5.74	1.03
長幅比	平均値	10.86	7.18	8.17	1.40	6.67	5.71	5.07	1.54	2.46
	標準偏差	3.51	3.30	2.02	0.24	3.20	0.86	1.22	0.33	0.77
葉面積	平均値	1215.01	67.27	279.98	186.66	397.63	360.80	343.95	314.97	156.73
	標準偏差	217.15	33.27	192.33	131.55	228.22	194.60	234.38	297.89	55.81

	株名	CFMSⒶ	CFMSⒷ	オオバグリーン	佐賀1号Ⓟ	G9Ⓟ	CFMSⒶF2	J-22R-1Ⓟ	橙Ⓟ	前の株 A-混Ⓟ
葉長	平均値	26.04	30.10	40.60	30.96	90.33	161.66	18.07	20.25	117.34
	標準偏差	5.03	6.08	17.52	7.83	12.92	37.65	3.63	4.39	42.49
葉幅	平均値	6.19	8.50	9.08	5.83	9.93	9.84	2.48	1.51	17.55
	標準偏差	1.99	2.08	2.03	1.22	1.83	1.87	0.32	0.44	4.52
長幅比	平均値	4.46	3.68	4.52	5.47	9.38	16.89	7.42	24.58	6.67
	標準偏差	1.29	0.89	1.60	1.53	2.09	4.75	1.92	10.38	1.32
葉面積	平均値	129.96	204.48	301.51	143.45	708.09	1254.08	35.22	24.58	1733.52
	標準偏差	67.55	80.19	196.68	55.12	186.86	374.43	8.33	10.38	1189.64

網掛けの赤色が濃い方が高値を，青色の濃い方が低値を示す．

図3　選定したノリ株の培養結果（窒素含有率）

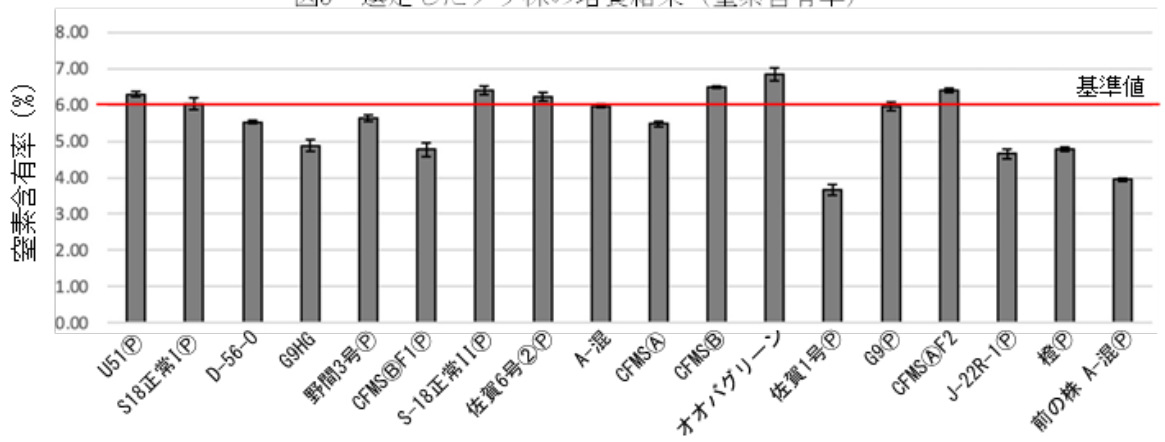


図4　選定したノリ株の培養結果（炭素含有率）

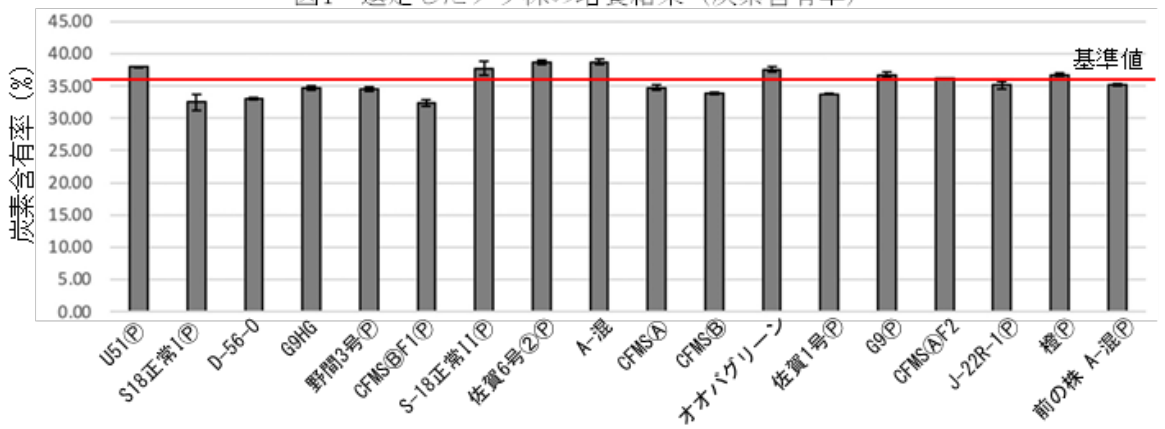


表6　選定した海苔株の培養結果（外観）



値を示していた.

窒素含有率は，海苔の色素及びタンパク質含有量と関連する．つまり，タンパク質含有量が大きければ，窒素含有率も大きくなるため，ブルーカーボン資材としてのみならず，高タンパク質食品原料としての海苔の利活用を考える上では，高窒素含有率性は重要である．

これらの結果を総合的に評価した結果，図 5 に示すように，ブルーカーボン資材と高タンパク質食品原料の両方に適するノリとして，”CFMSⒶF2”及び”U-51Ⓟ”を選抜した．なお，”CFMSⒶF2”は，色落ち耐性変異株として佐賀大学において作出された株であり，本研究により本株の新規有用性が見出された．今回試験した海苔株の外観を表 6 に示す.

3.3 PBF モデル食品の試作

佐賀県内企業のご協力により試作した PBF モデル食品「えごま生姜味噌の海苔はさみスナック」及び「Yasai Bou Nori」をそれぞれ図 6 及び図 7 に示した．「えごま生姜味噌の海苔はさみスナック」は，えごま生姜味噌を 2 枚の焼成板海苔で挟んで乾燥させたもので，味噌の原料として高オレイン酸大豆 HO1 を使用している．また，「Yasai Bou Nori」は，大豆水煮と焼成海苔粉末を生地に練りこみ焼き上げたもので，いずれの試作品も動物性原料は不使用である．今後はこれらの食品に含まれる海苔由来の成分含量やタンパク質含量を分析し，PBF としての優位性を明示する計画である.

４．おわりに

本研究では，ブルーカーボン資材としてのノリの有用性に着目し，高炭素吸収能を示すノリ品種の選抜を試みた．併せて，海藻の中でも格段に高いタンパク質含量であるノリの栄養学的特徴に着目し，高窒素吸収能を示す品種の選抜を試みるとともに，高タンパク質食品素材としてのノリの新たな活用を志向して，ノリを原料とした動物資源フリー食品（Plant Based Food；PBF）の展開可能性についても検討を行った.

その結果，長期保存株 18 種の中から，ブルーカーボン資材と PBF の両方に適するノリとして，CFMSⒶF2 及び U-51Ⓟを選抜した．この 2 株は，成長性，炭素含有率及び窒素含有率のいずれにおいても評価した中ではトップクラスの数値であった. 今後は, CFMSⒶF2 及び U-51Ⓟの栽培適性や栄養学的指標を詳細に調査し，ブルーカーボン資材に適したノリ品種の作出を目指していく．また，試作したモデル PBF 食品について，今後は栄養学的調査を実施し，PBF としてのポテンシャルを明示していくことで，ノリの PBF への応用に展開する予定である.

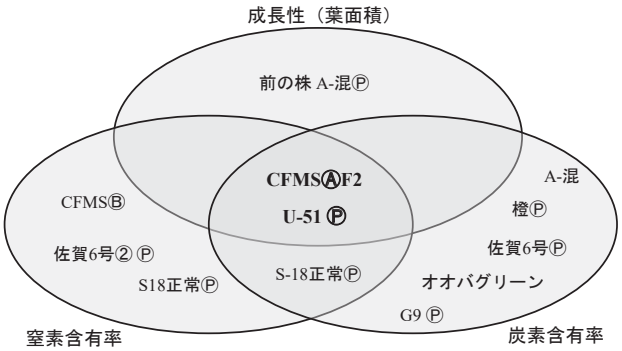


図 5　成長性及び窒素／炭素含有率を指標としたブルーカーボン資材としてノリ株の選抜



図 6　えごま生姜味噌の海苔はさみスナック



図 7　Yasai Bou

右図左側が ”SOY & NORI”

本研究の遂行にあたりご協力を賜った井手食品有限会社　鶴恵美子氏，有限会社たたら　多々良珠枝氏に多大なる感謝を申し上げる．本当にありがとうございました.

参考文献

1) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf
2) 政府統計・海面漁業生産統計調査 http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html
3) 穴井豊昭，突然変異体を用いたダイズの油脂成分改変，日本食品科学工学会誌，70 (1), 47–51 (2023)

大気圧プラズマ表面処理の製造工程適用技術の開発（第１報）

—多数個処理用プラズマリアクターの開発—

材料環境部
河合信次　円城寺隆志　平井智紀
佐賀大学
猪原哲

様々な形状，材質，特性に対応する大気圧プラズマ表面処理技術の実現を目指し，電源を安価なネオン変圧器とし，同時に多数個の改質対象物を処理するためのリモート式アルゴン（Ar）プラズマリアクターを検討した．プラズマ分光測定器を用いて開発した大気圧プラズマ発生装置の Ar プラズマの発光スペクトルを測定した結果，プラズマ中に親水性付与などの表面改質に重要な役割を担う活性酸素種（ROS）を確認し，プラズマリアクターの改良や表面改質処理の条件検討のための基盤となる技術的知見を構築した．また，5 個の噴射口を有する多数個処理用プラズマリアクターを用いた表面改質実験により，ポリプロピレン（PP）樹脂板表面の 5 か所を同時に親水性に改質できることが確認でき，大気圧プラズマ表面処理の効率化に繋がる結果を得た．

1. はじめに

佐賀県工業技術センターでは令和 2 年度より真空装置を必要とせず，かつ処理温度が低い大気圧非熱平衡プラズマ（以下，大気圧プラズマという）を用いた表面処理技術に着目し，樹脂表面への非晶質炭素の成膜に関する研究開発に取り組んでいる．また，研究成果を応用し，佐賀県内企業に対し接着性や印刷性の向上などを目的とした表面改質に関する技術支援を行っている．これまでに安価なネオン変圧器をプラズマ用電源として，発熱を抑制した大気圧プラズマ生成装置を開発し，樹脂表面への親水性付与や印刷性向上を実現させた[1)-6)]．

しかし，大気圧プラズマ表面処理技術を企業が製造工程へ導入するためには複数の製品やサイズが大きい製品の広い範囲を一度に処理する必要がある．また，大気圧プラズマ技術に対して，濡れ性の改善，密着性や接着性の向上など表面改質への要望が強く，改質対象物の形状，材質，特性に対応できることが求められている．

本研究では，様々な形状，材質，特性に対応する大気圧プラズマ表面処理技術の実現を目指し，ネオン変圧器プラズマ用電源を用いて，改質対象物を同時に多数個処理するためのリモート式アルゴン（Ar）プラズマリアクターを検討した．Ar プラズマの発光分光測定によりプラズマ中の分子，活性種，イオンの状態を測定した．改質対象物を同時に多数個処理するためのプラズマリアクターを試作し，ポリプロピレン（PP）樹脂表面におけるプラズマ処理効果を検証した．本報ではこれらの結果について述べる．

2. 実験方法

2.1 プラズマの状態診断

(1) 成膜用リモート式プラズマリアクター

非晶質炭素の成膜用に開発したリモート式プラズマリアクター[2)-4)]により Ar プラズマを生成させた．1 つのネオン変圧器（レシップ製，ALPHANEON M-5）プラズマ電源を用いて，いくつのプラズマリアクターからプラズマが生成できるか検討した．

ネオン変圧器を用いたリモート式プラズマリアクターの構造を図 1 に示す．なお，その特徴については，先行研究[2)-4)]に記載している．

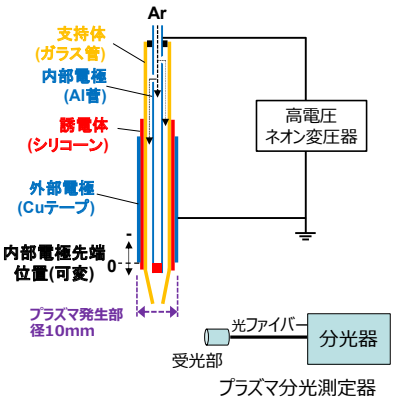


図 1　成膜用プラズマリアクター

(2) プラズマの発光分光測定方法

表面処理に大きな影響を与えるプラズマ中の分子，活性種，イオンなどの反応性を診断するために用いた光ファイバー型プラズマ分光測定器（Avantes 製，AvaSpec-VARIUS 4K）を図 2 に示す．本装置はプラズマの紫外，可視及び近赤外領域の発光を光ファイバーを用いて分光する測定器であり，プラズマの状態を乱すことなく非接触で発光スペクトルを測定可能である．プラズマ分光測定器は図 1 の位置に配置し，成膜用リアクターの先端に生成したジェット状のプラズマを分光測定した．

2.2 多数個処理用プラズマリアクター

5 個の噴射口を有するプラズマリアクター試作品の構造を図 3 に示す．リアクターにおける発熱と短絡の対策として，絶縁管（ガラス管）よりも比誘電率が低いシリコーンゴムを用いて，ガラス管全体を覆った．金属電極には銅（Cu）テープを用い，高電圧を印加する内部電極をガラス管内の上部に，アース用の外部電極を噴射口の外周にそれぞれ設置した．実際に印加した電圧は高電圧・電流測定装置（テクトロニクス&フルーク製，P6015 プローブ，MSO 2-BW-200）により測定した．



図 2　光ファイバー型プラズマ分光測定器



図 3　多数個処理用プラズマリアクターの構造

3. 結果及び考察

3.1 プラズマ中の活性酸素種の生成

リモート式成膜用リアクターにおいてネオン変圧器により 9kV, 20kHz の交流電圧を印加し、Ar 流量を 6L/min とし，ドラフトチャンバー（ダルトン製，MDF15MM-ASAAA-B0T）の中で Ar プラズマを生成させた．光ファイバー型プラズマ分光測定器により得られた発光スペクトルを図 4 に示す．695nm から 795nm において観測された輝線スペクトル帯は放電ガスである Ar に起因する発光であり，プラズマ中に生成した励起 Ar 原子からの発光であると考えられる [7]．また，波長 300nm から 400nm において観測された 3 つの発光（337nm，357nm 及び 380nm）は，大気中の窒素（N_2）に起因する発光であり，窒素分子イオンからの発光であると考えられる [8]．

さらに，図 4 では 309nm にヒドロキシルラジカル（OH ラジカル）からの発光 [9]，777nm, 844nm 及び 913nm に原子状酸素（O）からの発光 [10]を確認した．OH ラジカル及び O は活性酸素種（ROS）の一種であり，PP 樹脂表面を親水性に改質する役割を担っている．この結果より，プラズマ分光測定器を用いることでプラズマの反応性を評価することができ，今後のプラズマリアクターの改良や表面改質の処理条件をより詳細に検討できる基盤となる技術的知見を構築できた．

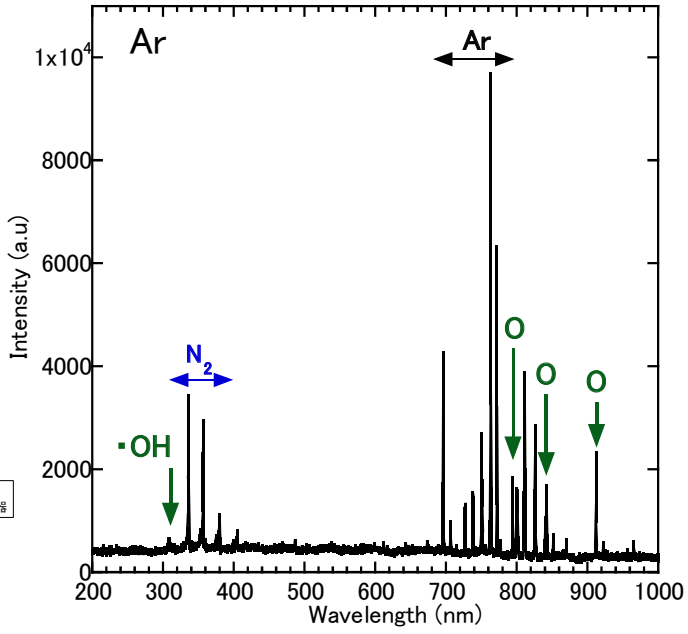


図 4　Ar プラズマの発光スペクトル

3.2 多数個処理

前述のArプラズマ中のROSを確認したことから，同時に多数個の PP 樹脂表面をプラズマ処理するために，1 つのネオン変圧器に対し，これまで開発した成膜用リアクター（図 1）のアレイ化を試みた．成膜用リアクター2 個をアレイ化した結果，図 5 に示すとおり 2 つのプラズマが生成できた．また，成膜用リアクターを 3 個にしてアレイ化を試みたが，3 つのプラズマは生成できなかった．このことから，ネオン変圧器 1 個に対し，アレイ化できる成膜用リアクター数は 2 個が限界であることが分かった．

そこで, プラズマへの投入エネルギーを分散化し，効率的にプラズマを生成させるために，図 3 に示す 5 個の噴射口を有する多数個処理用プラズマリアクターを用いて，ネオン変圧器プラズマ用電源により 9kV 及び 20kHz の交流電圧をリアアクターに印加し，Ar を 6L/min で導入した．図 6 は生成した 5 つのプラズマであり，同時に PP 樹脂表面の 5 か所にプラズマを照射することができた．また，この実験でプラズマを 5 秒間照射した PP 表面の親水性を接触角計（協和界面科学製, DMe211）により測定し，表面処理の効果を検証した．図 7 に PP 表面の未処理及びプラズマ処理後の水接触角度の結果を示す．図 7(a)の未処理では接触角が 110˚であり撥水性を示している．一方，プラズマ処理後の図 7(b)では，接触角が 30˚（5 か所の平均値）に低下し 5 か所とも親水性を表した．この結果より，試作した 5 個の噴射口を有するプラズマリアクターが, PP 表面の 5 か所に親水性を付与できたことから，1 つの安価なネオン変圧器でもリアクターの設計構造により多数個処理が可能であることが検証できた．



図 5　成膜用プラズマリアクター2 個アレイ化による 2 つのプラズマ生成

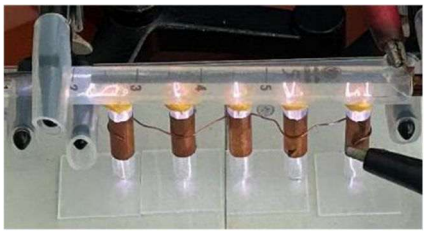
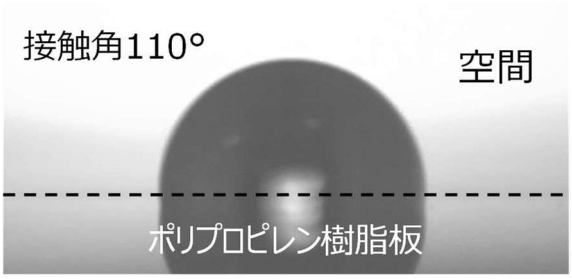
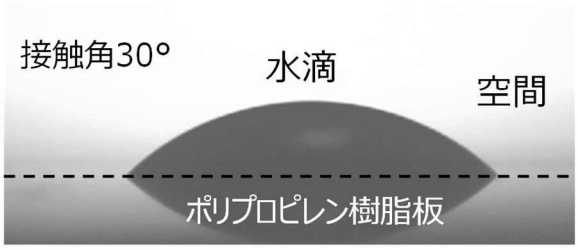


図 6　多数個処理用プラズマリアクターによる 5 つのプラズマ生成



(a) 未処理



(b) プラズマ処理後

図 7　PP 表面の水接触角測定

4. おわりに

本研究では様々な形状，材質，特性に対応する大気圧プラズマ表面処理の実現を目指し，プラズマの状態を分光測定し，同時に多数個製品のプラズマ処理を目的として，ネオン変圧器を電源とする多数個処理用プラズマリアクターの開発に取り組んだ結果, 次のことを明らかにした．

(1) 光ファイバー型プラズマ分光測定器により，Ar プラズマの状態を評価した結果，表面改質に重要な役割を担う ROS の生成を確認した．

(2) 5 個の噴射口を有するリモート式多数個処理用リアクターを試作し, 5 つの噴射口からプラズマを生成させるとともに，PP 樹脂板の 5 か所に表面改質機能の親水性を付与できた．

以上のことより，プラズマリアクターの改良や表面改質処理条件をより詳細に検討できる基盤となる技術的知見を構築した．また，安価なネオン変圧器をプラズマ用電源として用いても，リアクターの設

計構造によって同時に多数個のプラズマ処理ができることを検証した.

今後は，噴射口数をさらに増やした多数個処理用プラズマリアクターの試作，処理面積を増やしたプラズマリアクターの試作，放電ガスとして乾燥空気を用いた場合の表面処理効果の評価に取り組む予定である.

本研究を実施するにあたって使用した高電圧・電流測定装置及びドラフトチャンバーは公益財団法人JKA の補助により導入した.

参考文献

1) 河合信次，平井智紀，円城寺隆志，令和２年度佐賀県工業技術センター研究報告書, No.29, 65-68 (2021).
2) 平井智紀，河合信次，円城寺隆志，江口良寿，三沢達也，令和３年度佐賀県工業技術センター研究報告書，No.30, 5-10 (2022).
3) 平井智紀，円城寺隆志，河合信次，江口良寿、三沢達也，令和４年度佐賀県工業技術センター研究報告書，No.31, 5-9 (2023).
4) 円城寺隆志，平井智紀，河合信次，江口良寿，三沢達也，令和４年度佐賀県工業技術センター研究報告書，No.31, 11-14 (2023).
5) 河合信次，円城寺隆志，平井智紀，三沢達也，令和５年度佐賀県工業技術センター研究報告書，No.32, 1-5 (2024).
6) 河合信次，円城寺隆志，平井智紀，令和６年度佐賀県工業技術センター研究報告書, No. 33, 25-30 (2025).
7) 柴原大輝，安田八郎，藤井直斗，栗田弘史，静電気学会誌, Vol. 34, No. 1, 2-7 (2010).
8) 高村紀充，王斗艶，浪平隆男，秋山秀典，静電気学会誌, Vol. 38, No. 1, 22-27 (2014).
9) H. Okabe, J. Chem. Phys. **169**, 6642-6650 (1980).
10) 中條稔也，大山龍一郎，東海大学紀要工学部, Vol. 53, No. 1, 29-34 (2013).

多波長近接場光を用いた工具刃先高さ位置の非接触ナノスケール検出に関する研究（第１報）

生産技術部
寺山　裕
九州工業大学大学院 情報工学研究院
知的システム工学研究系 先進機械分野
カチョーンルンルアン・パナート
緒方　晃輝

超精密加工の高能率化を実現するためには，工具の刃先高さ位置（工具長）やワーク加工面形状の高精度な機上計測が重要である．機上計測として，接触式は小径工具刃先の破損などの課題があり，近年は非接触式が注目されている．九州工業大学では，測定基準面から数百ナノメートルのみ発生する近接場光を用いて，工具刃先高さ位置をナノスケール精度で非接触に検出する手法を提案していた．本研究では，九州工業大学と同手法に関する共同研究を行い，小径工具の刃先高さ位置を数値化するモデルを確立し，様々な工具での検証および検出深度の拡大を目指している．本報では，工具のみならず小径スタイラスの先端高さ位置の測定を試み，測定精度を検証した．その結果，基準面から 120 nm の範囲において±20 nm（2σ）の不確かさで先端高さ位置が測定可能であった．また，先端の早期検知による基準面への接触防止のために，検出深度を拡大する必要があった．そこで，近接場光を励起光とした落射光場を，基準面上の蛍光溶液を用いて形成し，基準面に接近するスタイラス先端を観測した．その結果，基準面から約 200 μm の深度での検出を実証できた．

1. はじめに

高性能かつ微細な光学製品，医療機器，半導体製造装置の構成部品を生産するため，製造業では金型や微細な部品を，高品質に加工する技術が求められている[1-3]．特に非球面レンズ用金型では，形状精度 0.05 μm PV 程度，表面粗さ 1 nm Ra 以下が要求される．

一般に精密加工には数値制御式加工機が用いられ，ワーク原点を基準とした工具刃先位置の三次元移動量（加工パス）が，図面や設計値に基づいて数値で厳密に指令されている．しかし，前段取りでの加工誤差や作業者の取付け誤差によるワーク面変位に加え，工具の刃先高さ位置（工具長）は主軸の熱膨張・工具摩耗現象[4]，回転時の工具振れなどで随時変動している．そこで，これら要因による加工誤差を低減するために，ワーク座標系を相対基準にした工具刃先高さ位置，並びにワーク面形状を加工前に工作機械上（以降，機上）で高精度に測定し補正する技術が重要である[5]．

特に超精密加工環境下で用いられる小径工具の刃先高さ位置を測定する場合，接触式計測では刃先が破損する恐れがあるため，非接触式計測（レーザ方式，撮像方式）が用いられている．しかし，光学的な回折限界が要因となり，小径工具の刃先高さ位置の繰返し測定精度は実質±1 μm 程度である．そこで，非接触かつ高精度に工具刃先の高さ位置を測定するために多数の研究が進められており，レーザ回折光を用いて工具先端と被加工物表面間の距離を計測する手法[6]や，ダイヤモンド工具刃先の表面から発生させた近接場光に被加工物が侵入した時の散乱光を検出する手法[7]，加工対象となるガラス材内部で近接場光を発生させ加工状態を監視する手法[8]などが提案・検証されている．しかし，いずれも 100 nm 以下の精度で安定して計測する技術は未だ確立されていないため，工具刃先の高さ位置をナノスケール精度かつ非接触に計測する技術が求められている．

また，超精密加工では研磨・修正等の最終仕上げ加工に先んじて，超精密切削による補正加工が行われている．補正加工前に，切削加工後のワーク形状誤差を把握するために，加工機からワークを取外し，

三次元測定機などの専用測定機で高精度に形状が測定されている．しかし，大型または複雑な形状のワークの測定では，測定時間短縮の観点から，機上計測が有効な場合がある [9-11]．スタイラスを用いた接触式の形状計測の場合，先端径や先端高さ位置（スタイラス長）が基準器（マスターボール、ブロックゲージ等）で校正される．しかし，現状機上計測における「スタイラス長の測定・校正」は，図 1 のように，主軸に取り付けられた基準工具とブロックゲージを用いて手動で校正されているため，作業者による操作精度のばらつきが測定誤差を引き起こす要因となっている [12]．ゆえに，工具刃先高さ位置計測と同様に，高精度にスタイラス先端高さ位置を機上で自動計測する技術が求められている．

そこで，我々は多波長近接場光を用いて小径工具の刃先高さ位置を，ナノスケール精度かつ非接触で計測する手法を確立してきた [13-16]．しかし，スタイラスの先端高さ位置の測定は十分に検証されていなかった．また，同技術の実用化を目指すにあたって，測定時間の短縮が課題であるが，工具の高速移動による基準面への接触・折損の恐れがボトルネックとなっていたため，刃先の検出深度拡大が求められている．

本報では，同手法の数値化モデルの確立を目指すと同時に，小径スタイラス先端の高さ位置測定を検証した．また，工具刃先の検出深度をマイクロメートルスケールに拡大するために，近接場光で励起された蛍光溶液から発生する蛍光落射光場を活用した手法を検証した結果を報告する．

2. 小径スタイラス先端高さ位置の測定原理

図 2 に近接場光の発生原理を示す．レーザ光を高屈折率 n_{high} 媒質（例えば，ガラス基板など）側から低屈折率 n_{low} 媒質（例えば，大気など）側に向けて入射角 θ_i（θ_i>臨界角 θ_c=arcsin[n_{low}/n_{high}]）の全反射条件で照射する．この時，自由空間伝搬をしない近接場光と呼ばれる光が，基準面近傍（境界面から数百ナノメートル程度）のみに局在して発生する [13-15]．この近接場光の光強度 I_{ev} は式(1)の通り，基準面から垂直の高さ z 方向へ指数関数的に減衰する．

$$I_{ev}(z,\lambda) = I_{ev}(z_0) \times \exp\left[-\frac{z}{z_\zeta(\lambda)}\right] \qquad (1)$$

ここで，λ はレーザ光波長を表し，$I_{ev}(z_0)$は表面での光強度,すなわち照射レーザの光強度そのものである．また $z_\zeta(\lambda)$は，しみこみ深さ距離定数（近接場光強度が $I_{ev}(z_0)/e$ になる時の高さ; e はネイピア数）であり，式(2)に示すように，照射するレーザ光波長 λ と入射角 θ_i，各媒質の屈折率 n に依存して定められる．

$$z_\zeta(\lambda) = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{(n_{high})^2 \sin^2\theta_i - (n_{low})^2}} \qquad (2)$$

次にスタイラスの先端高さ位置の非接触測定原理を示す（図 3）．この近接場光内へ侵入したスタイラスの先端から散乱光が発生する．この散乱光強度

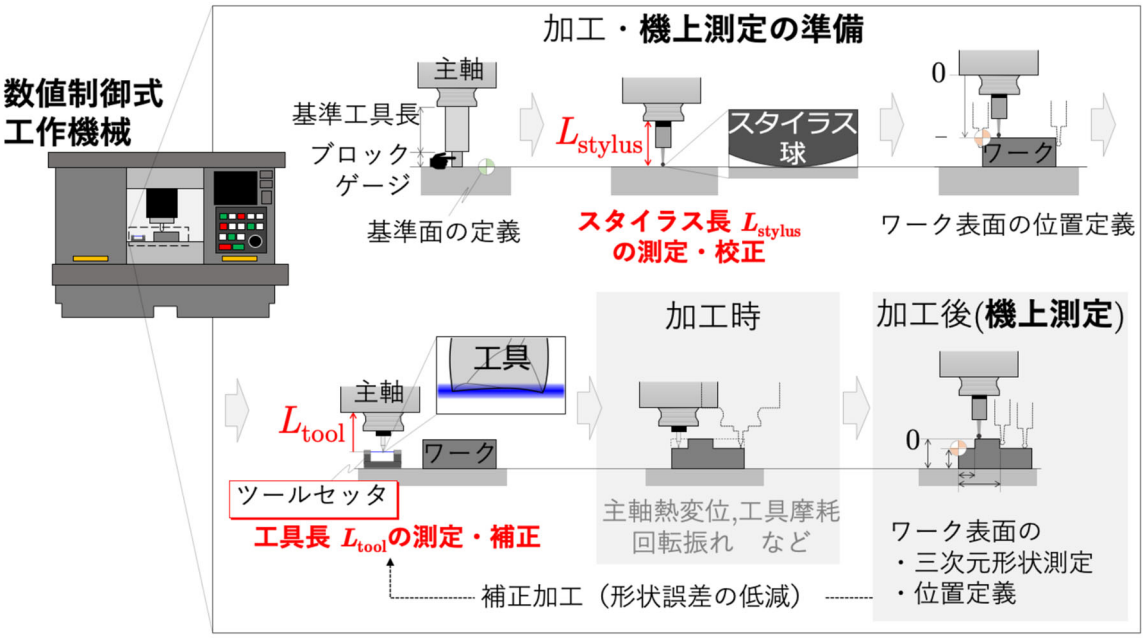


図 1　工具刃先高さ位置（工具長）およびスタイラス先端高さ位置（スタイラス長）の機上計測の必要性

$I_{sc}(z_{tip})$は，スタイラスの先端高さ位置 z_{tip}，すなわち先端と基準面間の距離に依存し，式(3)に示すように近接場光の光強度分布に比例する．

$$I_{sc}(z_{tip}) = KI_{ev}(z_0) \times \exp\left[-\frac{z_{tip}}{z_\zeta(\lambda)}\right]$$
$$= I_{sc}(z_0) \times \exp\left[-\frac{z_{tip}}{z_\zeta(\lambda)}\right] \quad (3)$$

ここで，K は近接場光強度から散乱光強度への換算係数であり，波長に依存した各材質の光学特性やカメラの感度（量子効率）が反映される．主要たるスタイラスの先端高さ位置 z_{tip} は式変形により，式(4)で求められる．

$$z_{tip} = z_\zeta \log_e\left[\frac{I_{sc}(z_0)}{I_{sc}(z_{tip})}\right] \quad (4)$$

しかしながら，これまでの単波長光源による計測のみでは，基準面におけるスタイラス先端からの散乱光強度 $I_{sc}(z_0)$が接触時まで未知なため，絶対的な高さ位置を測定するには先端を接触させる必要があり，小径工具の刃先が破損する恐れがある．

そこで，本手法を応用し，多波長の近接場光を用いた小径スタイラスの先端高さ位置を高精度に測定する手法を図 4 に示す．レーザ光の波長ごとに近接場光のしみ込み深さ距離定数 $z_\zeta(\lambda)$が異なるため，先端からの散乱光検出タイミングや散乱光量比によって，先端高さ位置 z_{tip} を高精度に検出できる．レーザ光波長が λ_1, λ_2 の場合のスタイラスの先端からの散乱光量は，式(5), (6)と表せる．

$$I_{sc}(z_{tip}, \lambda_1) = KI_{ev}(z_0, \lambda_1) \times \exp\left[-\frac{z_{tip}}{z_\zeta(\lambda_1)}\right] \quad (5)$$

$$I_{sc}(z_{tip}, \lambda_2) = KI_{ev}(z_0, \lambda_2) \times \exp\left[-\frac{z_{tip}}{z_\zeta(\lambda_2)}\right] \quad (6)$$

式(5)と(6)を連立させると，式(7)が定式化され，基準面からのスタイラスの先端高さ位置 z_{tip} は，既知数 $z_\zeta(\lambda)$と，カメラで検出された散乱光量 $I_{sc}(\lambda_1)$と $I_{sc}(\lambda_2)$ の比のみで，換算係数なく測定できる．

$$z_{tip} = \frac{z_\zeta(\lambda_1)z_\zeta(\lambda_2)}{z_\zeta(\lambda_1)-z_\zeta(\lambda_2)} \log_e\left[\frac{I_{sc}(\lambda_1)}{I_{sc}(\lambda_2)}\right] \quad (7)$$

3. 小径スタイラスの先端高さ位置測定

3.1 多波長近接場光による先端高さ位置測定手法

多波長近接場光を用いて，小径スタイラスの先端高さ位置をナノスケール精度で非接触に計測する手法の基礎検証を試みた．製作した装置を図 5 に，光学系の各種実験パラメータを表 1 に示す．小径スタイラスはピエゾアクチュエータに取付けて，ナノメートル精度で先端をガラス基準面に接近させた．近接場光内にスタイラス先端が侵入すると，先端から散乱光が発生し，光学系で集光･結像され，撮像素子で先端が可視化された．

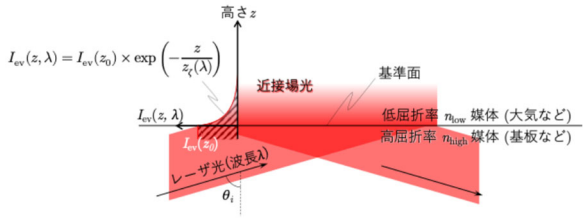


図 2　近接場光の発生

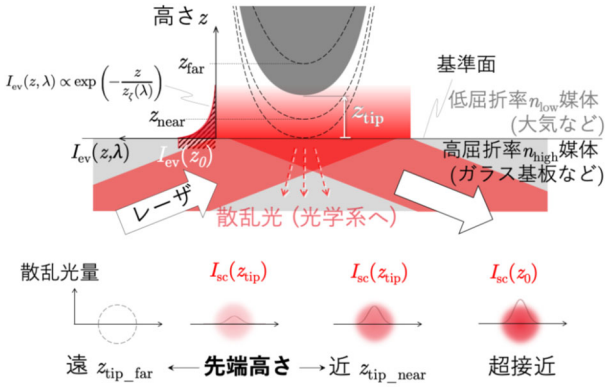


図 3　小径スタイラスの先端検出原理

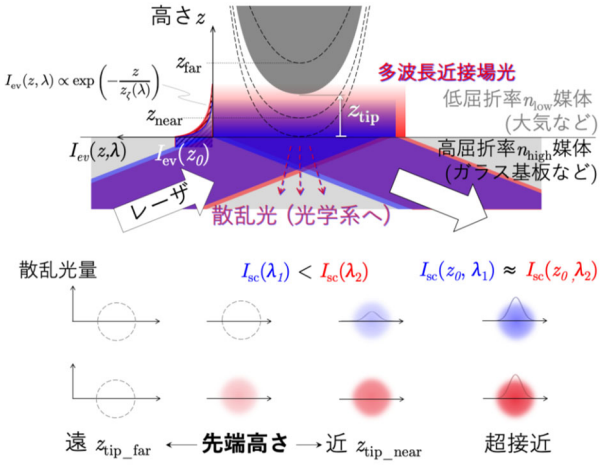


図 4　小径スタイラスの先端高さ位置測定原理

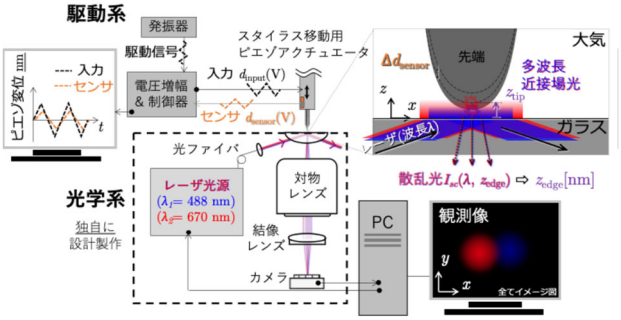


図 5　実験装置（駆動系・光学系）の概要図

3.2　スタイラスの先端高さ位置測定結果

先端直径 0.1 mm のスタイラスを，ピエゾアクチュエータを用いてガラス基準面へ，変位量 d_{input} [nm] の指示で接近させた．同時に，アクチュエータ内部に搭載されたひずみゲージで，実質的なアクチュエータの変位量 d_{sensor} [nm]を測定した．一方，光学系ではスタイラスの先端から発生した散乱光を検出した．この散乱光量をもとに，式(7)を用いて，スタイラスの先端高さ位置 z_{tip} を算出し測定した．

背景ノイズ除去後の観測像およびスタイラスの先端高さ位置結果を図 6 に示す [17]．撮影条件は露光時間 25 ms，撮影速度 40 fps であった．本実験では，スタイラスの先端高さ位置が，基準面から 120 nm の範囲まで±20 nm（2 σ）の不確かさで測定された．このことから，本手法が工具の刃先高さ位置測定 [13-16] のみならず，スタイラスの先端高さ位置測定にも有効であることが確認された．

4.　蛍光落射光場による工具先端の検出深度拡大

4.1　工具刃先のマイクロスケール検出原理

散乱光に基づく工具の刃先高さ位置測定に加え，検出深度を拡大するために，図 7 に示すような近接場光を励起光とした落射光場を形成する [18]．この光場を形成するために，基準面上に蛍光溶液（励起波長 λ_{ex}，蛍光波長 λ_{em}）を満たす．この溶液内の蛍光成分は，波長 λ_{ex} の“近接場光” および ”近接場光内に在る物質からの散乱伝播光”で励起され [19]，蛍光波長 λ_{em} の落射光場が発生する．この光場の照明範囲は，近接場光領域のみならず，蛍光済の分子が溶液内で放射的に拡散移動する領域も含まれる [20]ため，近接場光外に及ぶ刃先検出が期待される．

蛍光落射光場内で工具刃先は図 8 のように検出される [18]．刃先が基準面に接近すると，光源となる蛍光溶液の体積が刃先−基準面間で減少するため，刃先直下が周囲に対して相対的に低蛍光領域となる．

表１　実験パラメータ

Laser illumination		(λ_{blue})	(λ_{red})
- wavelength λ	nm	488	670
- incident angle θ_i	deg	50	
- penetration depth z_ζ		69	94
CMOS camera			
- pixel size	μm^2	5.48 × 5.48	
- exposure time	ms	25	
- recording speed	fps	40	
Optical system			
- total magnification		30×	
- numerical aperture		0.4	

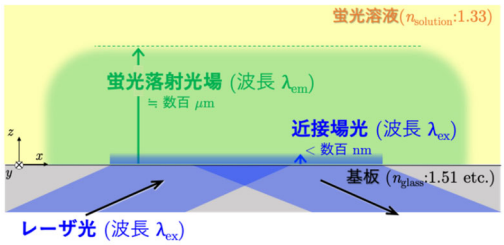


図 7　近接場光による蛍光落射光場の発生

この領域では周囲より暗い蛍光像が得られる．つまり，刃先の蛍光像の明暗を観測することで，近接場光外に拡大された深度で工具刃先を検出できる．

4.2　検出深度の拡大検証結果

波長 450 nm のレーザ光源で近接場光を発生させ，ガラス基板上の蛍光溶液（励起波長 λ_{ex}: 450 nm，蛍光波長 λ_{em}: 530 nm）を励起し，蛍光させることで落射光場を形成した．基礎検証として直径が 0.3 mm のスタイラス先端を，ガラス基準面の上方数百 μm から約 50 μm ごとに基準面へマイクロメータで接近させた．基準面から数マイクロメートル近傍では，過接触防止のため，ピエゾアクチュエータでナノ変位制御した．

撮像した結果を図 9 に示す．検証した結果，蛍光

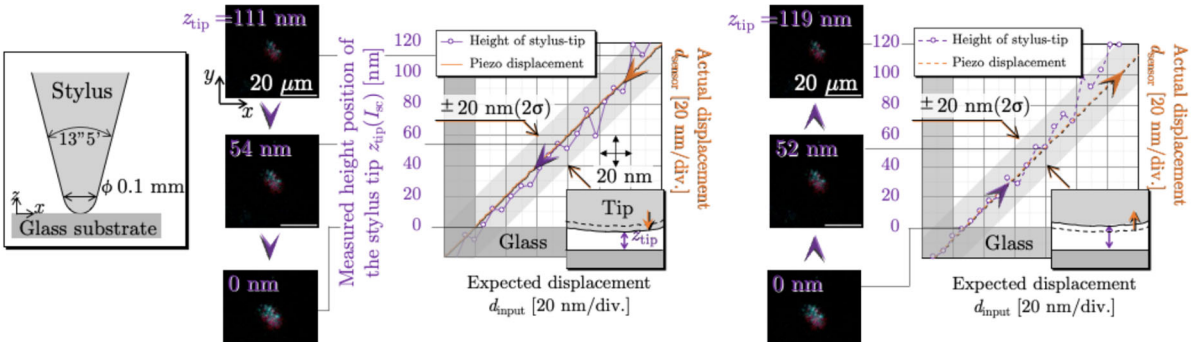


図 6　スタイラスの先端高さ位置測定結果 [17]

落射光場でのスタイラス先端の検出深度は約 200 μm であることが明らかとなり，近接場光による検出深度である 200～300 nm[16]と比較して，大幅に拡大させることができた．

将来的には，多波長近接場光による基準面ナノスケール近傍における工具刃先高さ位置計測と，蛍光落射光場によるマイクロスケール深度での検出を，複合して同時に行うことができると期待される．

5. おわりに

多波長レーザ光源による近接場光を用いて，小径工具の刃先から発生した散乱光量を検出し，工具刃先高さ位置をナノスケール精度で非接触に計測する手法の確立を目指した．

本報では，ワーク座標系の定義やワーク表面形状の測定に用いられる，計測用スタイラスに着目した．特に超精密加工において，複雑な三次元形状の接触測定時には，形状追従性に優れた小径スタイラスが用いられる．この時，測定の信頼性を確保するために，確立されたトレーサビリティに基づいて，先端高さ位置（スタイラス長）を基準器で校正し，補正を行うことは極めて重要である．

そこで，小径スタイラス先端の高さ位置計測への本手法の適用性を基礎検証した．本実験では，直径 0.1 mm のスタイラス先端高さ位置が算出され，基準面から 120 nm の高さ範囲において，±20 nm (2σ)の不確かさで測定されることが確認できた．したがって，マイクロ工具のみならず，小径スタイラスに対しても，本手法が有効であることが確認された．

また，近接場光外におよぶ深度でスタイラス先端を検出するために，近接場光を励起光とした落射光場を形成した．この落射光場は，ガラス基準面上に満たされた蛍光溶液（励起波長 450 nm，蛍光波長 530 nm）を励起した際の蛍光で形成された．検出深度の基礎検証として，先端直径 0.3 mm のスタイラスを用いて実験した結果，蛍光落射光場を適用することで基準面から約 200 μm の深度でスタイラス先端が検出され，検出深度を近接場光外にまで拡大できたことが確かめられた．

今後は，超精密加工で用いられる多結晶ダイヤモンド（PCD）工具の光学的特性評価や，測定誤差要因などについて検討し，本手法の基礎検証を進めたい．

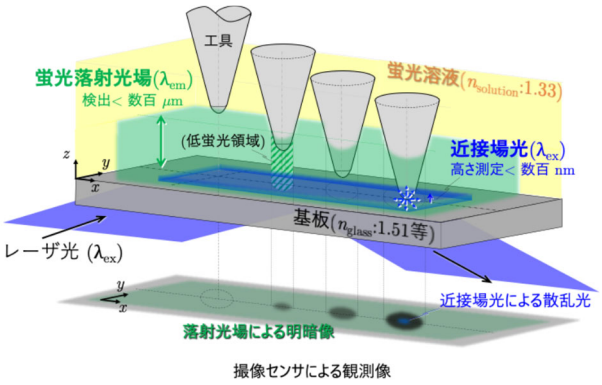


図 8　蛍光落射光場による工具刃先およびスタイラス先端の検出原理

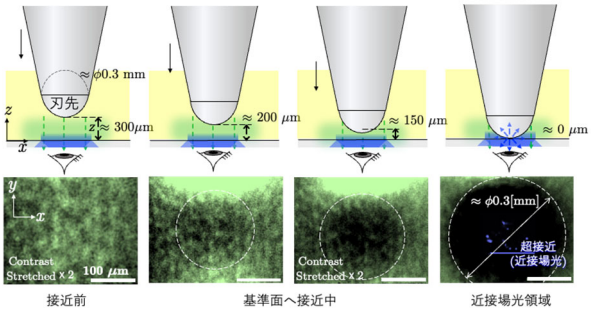


図 9　スタイラス先端の検出・観測像 [18]

参考文献

1) 高谷裕浩: 非接触機上計測のこれまでと展望，精密工学会誌, 90 巻, 5 号 (2024) pp.387-393.
2) 福田将彦: 自動車用精密部品の超精密加工を支える機上測定，精密工学会誌, 85 巻, 7 号 (2019) pp.628-631.
3) 村中昌幸: プラスチックレンズの成形加工，成形加工, 16 巻, 11 号 (2004)
4) 北嶋孝之，奥山繁樹，由井明紀: ダイヤモンド工具によるコバルトレス超硬合金の微細 V 溝プレーナ加工，砥粒加工学会誌, 58 巻, 2 号(2014) pp.34-39
5) 樋口庸介: 5 軸加工機における工具刃先位置測定，芝浦技報, 30 巻 (2024) pp,60-62.
6) カチョーンルンルアンパナート，木村景一，鈴木恵友: レーザ回折光による高速回転中の工具先端と被加工物間の距離計測, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集 (2010) pp.765-766.
7) 吉岡勇人，井手隼人，澤野宏，新野秀憲: 光学的手法を用いた工具－工作物接触状態検知に関する研究, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会公演論文集 (2012) pp.829-830.

8) 高畑直輝, 柿沼康弘, 青山藤詞郎: ガラスの微細加工における切削状態モニタリング技術の開発, 2009 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (2009) pp.567-568.
9) 佐藤遼, 高偉: 加工機上における精密計測, 砥粒加工学会誌, 67 巻, 6 号 (2023) pp.329-332.
10) 大西 孝, 鈴木 浩文, 山本 雄士, 森脇 俊道, 沖野 正, 守安 精, 山形 豊: 非球面形状のオンマシン計測システムの開発（第 1 報）-接触型オンマシン計測システムの高精度化-, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2006 年度精密工学会秋季大会 (2006) pp.217-218
11) 高増潔, 高橋哲: 次世代製造を支える形状測定技術の進化と課題, 計測と制御, 64 巻, 6 号 (2025) pp.361-366.
12) 森 茂樹, 神戸 礼士, 松下 哲也: 工作機械におけるタッチプローブ長の自動校正システムの開発, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2025 年度精密工学会秋季大会 (2025) pp.75-76.
13) 井上智樹, カチョーンルンルアンパナート, 鈴木恵友: 近接場光を応用した工具刃先検出法の確立−工具先端位置検出精度の検討−, 第 24 回精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集 (2017) pp.9-10.
14) 甲斐 雅貴, カチョーンルンルアンパナート, 鈴木恵友: 近接場光を応用した工具刃先計測の数値シミュレーションによる散乱光特性の評価 – 第二報: 工具材への金属モデルの適用-, 2021 年度精密工学会春季大会学術講演会公演論文集 (2021) pp.635-636.
15) カチョーンルンルアンパナート, 鈴木恵友, シンソムブーン カウィー, 井上智樹: 超近接スイッチ, 特開 2019-164205, 2019.9.26 公開.
16) 寺山裕, カチョーンルンルアンパナート: 令和 6 年度佐賀県工業技術センター研究報告書, No.33 (2025) pp.77-81.
17) Y. Terayama, K. Ogata, P. Khajornrungruang, Y. Ohta: Nanoscale Noncontact Detection and Measurement of Micro-Tool-Edge height Position by using Evanescent light, Proc. of the 11th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (2025) OS13-13.
18) 緒方晃輝, 寺山裕, 太田有紀, カチョーンルンルアンパナート: エバネッセント光場・落射光場観測を併用した工具長検出の検証−蛍光の落射光場生成−, 2026 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (2026) pp.195-196.
19) 鈴木健史: バイオイメージングで知っておくべき蛍光顕微鏡の基礎, 札幌医科大学大学院医学研究科 医学研究入門セミナー, p.7.
20) 木下修一: 生命科学を理解するための蛍光の基礎, 分光研究, 63 巻, 1 号 (2014) p.37.

戦略的試験研究

金属製品の長寿命化を目的とした切削加工法-DEM 法-の実用化研究（第１報）

材料環境部
永石尚昭　帆秋圭司　田栗有樹
株式会社香田製作所
香田和則

本研究では，切削時に加工部に生じる表面変質層を利用し，ステンレス鋼を高強度化する加工技術(DEM 法)の確立を目指している．DEM 法がオーステナイト系ステンレス鋼の耐食性に及ぼす影響を明らかにするために，DEM 法によって加工された SUS316L のアノード分極特性を電気化学測定により取得し，通常加工品と比較した．その結果，両者のアノード分極特性に差が認められなかったことから，DEM 法は SUS316L が本来有する耐食性に影響を及ぼさないことが示唆された．すなわち，DEM 法はステンレス鋼の耐食性を損なうことなく加工部の耐久性の向上を実現する切削加工技術であることを示した．

1. はじめに

金属や樹脂に代表される機械材料を目的の形状に加工するために，製造現場では様々な機械加工法が用いられている．中でも旋削，転削，穴あけ加工に代表される切削加工は，塑性加工，鋳造，鍛造といった他の加工法と比較してミクロンオーダーの高精度な仕上げが可能である．この高い寸法精度と表面品質により，3D プリンタに代表される積層造形技術技術が普及しつつある現在においても，自動車，航空，医療，電子機器などの幅広い産業分野で不可欠な基盤加工技術と言える．

切削加工では加工表面近傍に塑性変形や加工硬化を伴う変質層が形成される [1]．この変質層は，もとの材料よりも高い硬度を示し，強度向上に寄与する可能性があるが，変質層を積極的に利用した加工設計は十分に確立されておらず，実用化のためにはその形成条件と機械的性質，耐食性などの環境強度への影響を体系的に評価する必要がある．

我々は上述の変質層を意図的に形成および残留させることで，加工部を高強度化する切削加工技術「Durability Enhancement Machining (以下, DEM 法)」を提案している．オーステナイト系ステンレス鋼(以下，γ-SUS）を対象とした検証では，加工部をもとの材料の硬さの約 2 倍まで高硬度化できることに加え，さらに圧縮残留応力を付与できることが明らかとなった．さらに，DEM 法によって加工された部分における各種機械的性質を実験的に評価した結果，①疲労強度の向上，特に応力集中部での顕著な改善 [2]，②耐塩化物応力腐食割れ性の向上 [3]，③耐摩耗性の向上 [4,5]，④耐孔食性を損なうことなく高強度化可能 [6]，が確認された．これらの結果は，切削加工における変質層を積極的に利用した新しい高強度化手法としての有効性を示している．実用化が進めば，回転運動や往復運動により繰返し荷重がかかる機械部品，摺動部，さらには引張応力が作用した状態で腐食環境に曝される部材を DEM 法で製造することで，従来はショットピーニングや表面改質処理を必要としていた長寿命化を，追加処理なしに低コストで達成できる可能性がある．

本報では，DEM 法加工面の 5%硫酸水溶液中におけるアノード分極特性を電気化学測定により取得し，DEM 法がγ- SUS の酸性溶液中における耐食性に及ぼす影響を実験的に評価した結果を報告する．

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は固溶化熱処理を施したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 丸棒ϕ 20mm を用いた．化学成分(mass%)は 0.024C-0.53Si-1.32Mn-0.036P-0.017S-12.05Ni-17.25Cr-0.16Co であり，代表的な機械的性質は耐力$\sigma_{0.2}$＝270MPa，引張強さσ_B＝574MPa，ビッカース硬さ 179HV0.01, 平均結晶粒径は 24μm である．

2.2 試験片形状

図 1 に試験片形状および寸法を示す．評価面の仕上げ状態が異なる 3 種の試験片(a)TP-1(DEM 法適用試験片，研磨なし)，(b)TP-2 (DEM 法適用試験片，研磨あり)，(c)TP-3(通常加工試験片)を調製した．図 2 にそれぞれの調製手順を示す．TP-1 は丸棒端面を

DEM 法で加工し, 切り落として試験片としたものである. TP-2 は TP-1 と同じく DEM 法で加工したものだが，旋削加工の際に残る周方向加工痕を除去する目的のためにわずかにダイヤモンドスラリでバフ研磨したものである．これまでの研究でこの程度の研磨では DEM 法によって生じた表面変質層は除去されないことが分かっている．

TP-3 はディスク状薄型砥石で湿式切断したのち，ダイヤモンドスラリでバフ研磨したものである．供試材が本来持っている分極特性を示すと考えられ，TP-3 の分極曲線と TP-1，TP-2 の分極曲線を比較することで，γ-SUS の耐食性におよぼす DEM 法の影響を明らかにできると考えた．それぞれの試験片の粗さをレーザー顕微鏡(オリンパス株式会社製 OLS-4100)で測定した結果，TP-1：R_a = 0.21μm，R_z = 2.03μm，TP-2：R_a = 0.02μm，R_z = 0.11μm，TP-3：R_a = 0.01μm，R_z = 0.06μm であった．

図 1 に示した各試験片の断面に対して硬さ試験および組織観察を行うために，試験片中心軸を通る面を回転砥石で湿式切断後，導電性を有する熱硬化性樹脂に埋包し，エメリー紙，ダイヤモンドスラリ，コロイダルシリカ懸濁液を用いて鏡面に研磨した．

金属組織観察および試験面の観察には走査電子顕微鏡(株式会社日立ハイテク製 SU5000)を用いた．加速電圧は 15kV とし，反射電子検出器を用いた．また，エネルギー分散型蛍光エックス線検出器(AMETEK 株式会社製 Octane Elect Super)を用いて試験面にみられた介在物の元素分析を行った．

硬さ試験にはマイクロビッカース硬さ試験機（株式会社フューチュアテック製 FM-ARS9000）を用いた．負荷試験力は 5gf，保持時間は 10 秒とした．加工面から深さ 10μm の位置を開始点とし，材料内部に向かって複数列の硬さを測定し，深さ方向硬さ分布を取得した．

2.3 アノード分極測定法

アノード分極測定は，日本産業規格「ステンレス鋼のアノード分極曲線測定方法 JIS G0579 (2012)」に規定されている試験 A 方法[7]を参考にして実施した．

測定は，電気化学測定システム（明電北斗株式会社製　HZ-7000）と専用ガラス電解槽（明電北斗株式会社製　HX-102）を用いて行った．ガラス電解槽を温浴し，測定中の溶液温度を 30℃に保った．対極は白金電極，参照電極は銀-塩化銀電極をそれぞれ用い，参照電極と電解槽は，寒天を封入したルギン管を通じて塩橋を行った（図 3）．

自作した樹脂製ホルダの導電部と試験片裏面を導電ペースト(藤倉化成株式会社製)で接着し導通を確保した．試験面の最終露出部分が 100mm^2 となるように残りの部分をシリコン樹脂で被覆した．シリコン樹脂硬化後，600 番研磨紙で最終露出部分を湿式研磨し，蒸留水およびエタノールで入念に洗浄して室温にて乾燥させた．上述の処理後，12 時間以上経過したものを用いることに統一した．本測定前に，高純度アルゴンガス脱気された 30℃，5% H_2SO_4 水溶液に 10 分間浸漬後，試験片の電位を−0.65V(AgCl)に設定し，10 分間のカソード処理を行った．本測定における電位走引速度は 20mV/min で，自然電位から 1.15V(AgCl)に達するまで電位を走査させた．

上述の方法を用いた場合に取得されるステンレス鋼のアノード分極曲線の例を図 4 に示す．本研究では分極曲線から得られる以下の 5 つの特性値を評価指標とした．

(i) E_{corr}：自然電位 (V)
(ii) E_p：不働態化電位 (V)
(iii) i_{crit}：不働態化電流密度 (μA/cm^2)
(iv) $i_{0.4}$：+0.4V における電流密度 (μA/cm^2)
(不働態化維持電流密度)
(v) $i_{1.0}$：+1.0V における電流密度 (μA/cm^2)

一般的に，高い耐食性を有する材料ほど(i) E_{corr} および(ii) E_p は高く，(iii) i_{crit}, (iv) $i_{0.4}$, (v) $i_{1.0}$ は低い傾向にある．TP-1, TP-2, TP-3 の三種類の試験片のアノード分極曲線から得られる(i)～(v)の値を比較することで，耐食性の優劣を決定した．

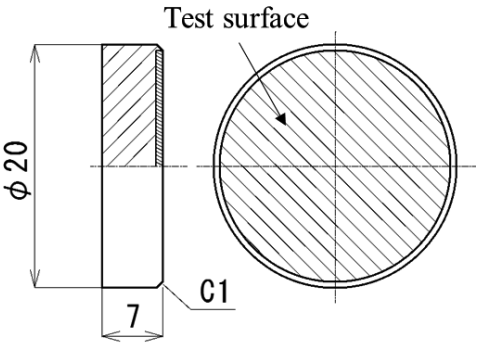


図 1　試験片の形状および寸法

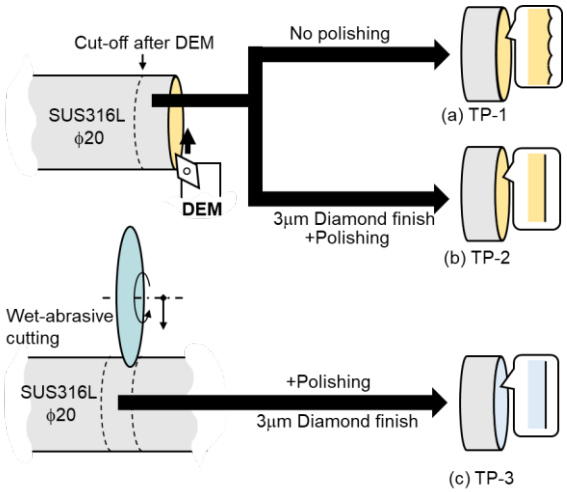


図 2　試験片調製手順

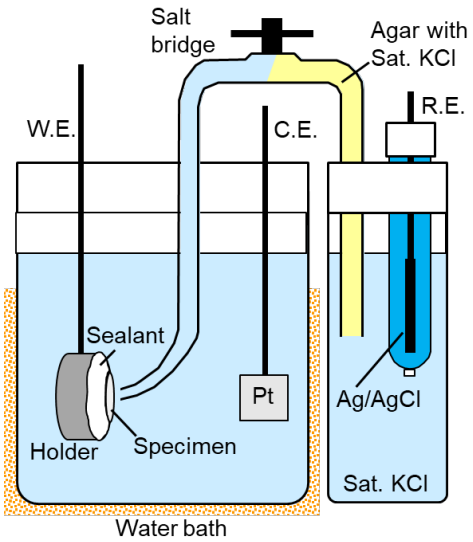


図 3　電気化学測定装置の概略図

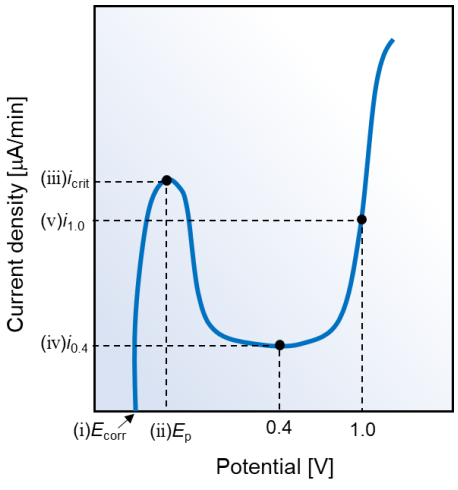


図 4　アノード分極曲線の例

3. 結果および考察

3.1 試験片の硬さと断面組織

図 5(a)に TP-1 および TP-3 の断面硬さ分布を示す．縦軸にビッカース硬さ，横軸に加工面からの深さをとって整理した．TP-2 は TP-1 の加工面をわずかに研磨したのみであり，硬さ分布は TP-1 と同一であったため図示を省略した．

硬さ分布に着目すると，TP-1 では加工面近傍において顕著な硬さ上昇が認められ，深さ方向に進むにつれて初期硬さへと漸近した．硬さの変化は加工面から約 200 μm の範囲に限定され，最高硬さは 335 HV であった．一方，TP-3 では加工面と内部で硬さが一定であり，切断・研磨による加工影響が生じていない供試材本来の状態を示している．

図 5(b), (c)に断面ミクロ組織を示す．TP-3（図 5(c)）では加工面と内部組織に差異は認められず，硬さ分布の結果と整合する．これに対し TP-1（図 5(b)）では，加工面直下において結晶粒界が不明瞭となり，結晶粒が著しく変形・微細化している領域が確認された．さらに，結晶粒内には複数方向のすべり線が観察され，複数のすべり系が活動したことを示唆している．これらの観察結果を総合すると，TP-1 における硬さ上昇は，加工面直下で生じた強い塑性変形およびそれに伴う結晶粒微細化に起因すると考えられる．

3.2 アノード分極曲線

図 6(a)に TP-1, TP-2 および TP-3 のアノード分極曲線を示す．各試験片の分極曲線を活性領域，不働態化領域，および過不働態化領域に区分して整理し

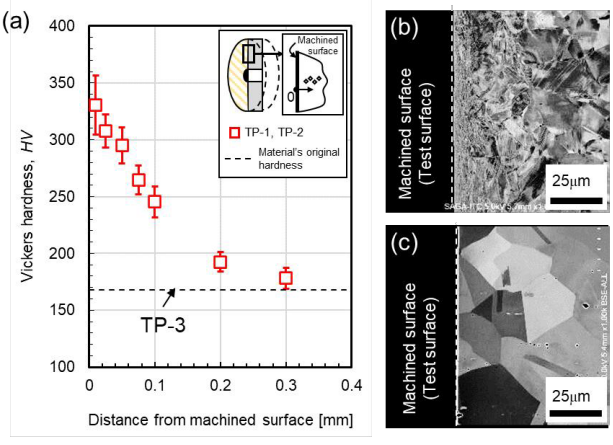


図 5　試験片の硬さ分布，断面組織
(a)硬さ分布，(b)断面組織：TP-1，
(c)断面組織：TP-3

た．活性領域は自然電位から不働態化電位（第 1 ピーク）まで，不働態化領域は電流密度が急減した後に一定値を示す領域と定義した．

これらの領域に基づいて挙動を比較した結果，電流密度の変化傾向や不働態化の開始電位に顕著な差はみられなかった．なお，第 1 ピーク前後で TP-1 の電流密度がわずかに高くなったのは，試験片表面粗さが大きいことが影響したと考えられる．

さらに，各分極曲線から得られた特性値 (i)～(v) を比較した結果を図 6(b) ,(c)に示す. いずれの試験片も同等の特性値を示しており，有意な差は確認されなかった．

Menezses らは，ショットピーニング処理によって表面にナノ結晶層を形成し，高硬度化した SUS316L の 0.5M-H_2SO_4 水溶液中におけるアノード分極挙動を調査した結果，処理材の腐食電位は未処理材と同等であったものの，不働態化領域においてショットピーニング処理材の方が低い不働態化電流密度を示すことを報告している [8]．この結果は，ショットピーニング処理によって結晶粒界密度が向上することで，密着性が高く安定した不働態被膜が形成され，耐食性が向上したことを示唆している．また，Yazdani らも同様に, ショットピーニングによる耐食性の向上を示唆する結果を報告している [9]．

図 5 に示すとおり, DEM 法で加工された TP-1 および TP-2 の表面組織は, TP-3 と比較して明らかに結晶粒が微細化しており，それに伴う高硬度化が確認された．この表面状態は，ショットピーニング処理材ほど強い処理ではないものの，類似した特徴を有するので，TP-1，TP-2 は TP-3 に比べ高い耐食性を有することが期待されたが，アノード分極挙動には有意な差は認められず，同等の耐食性であるという結果となった．

この結果は，DEM 法がγ- SUS 本来の耐食性を損なうことなく高強度化を実現できる技術であることを示しており，実用上きわめて有望である．

一方，耐食性の維持にとどまらず耐食性の向上という新たな機能を付与できる技術へと発展するには，本実験で耐食性の向上には至らなかった要因を深掘りし，対応策を検討する必要がある．

Tsutsumi らは，LPBF(Laser Powder Bed Fusion，3D プリンティング技術の一種)で造形した SUS316L の耐食性を電気化学的に評価し，板材や丸棒などの一般的な溶製材と比較して，LPBF 材が非常に優れた耐食性を示すことを報告している [10]．その理由として，局部腐食挙動は介在物（MnS）の存在形態に

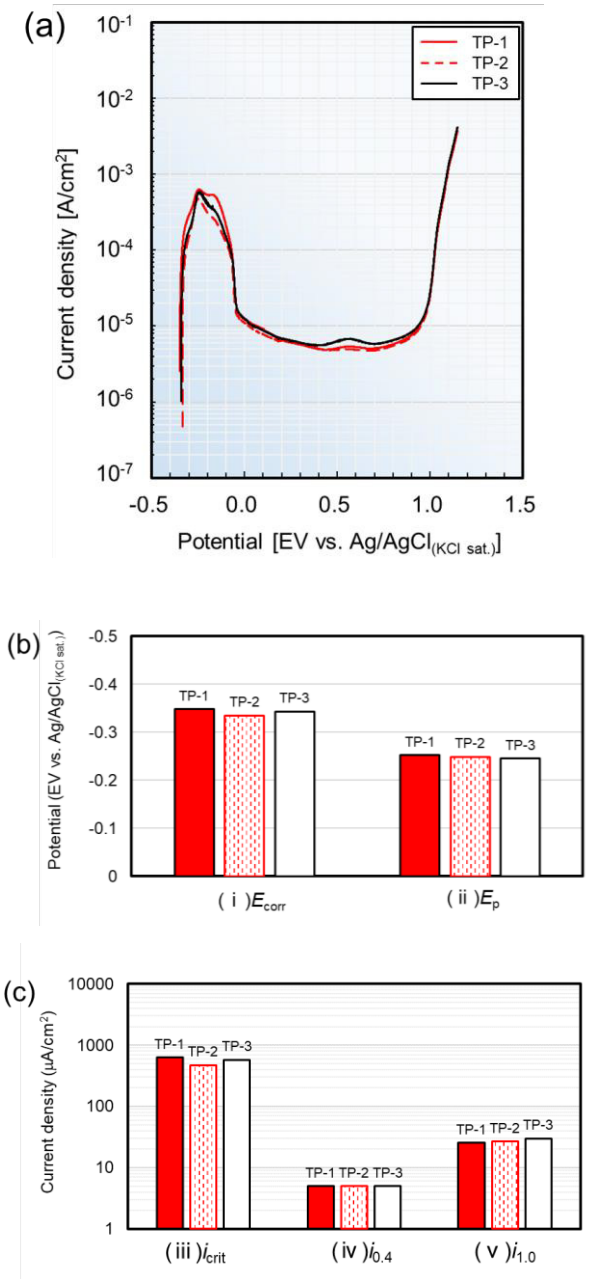


図 6　アノード分極曲線測定結果
(a)アノード分極曲線，(b)特性値(電位)，
(c)特性値（電流密度）

強く支配されることを指摘しており，LPBF 材では造形時の急熱／急冷により介在物の大きさが 100 nm 以下に抑えられるため，腐食起点になりにくく，結果的に耐食性に優れると説明している．また，結晶方位や粒界密度は耐食性に大きな影響を及ぼさないことも示している．

本研究では，各試験片における介在物の分布および形態を詳細に観察した． 図 7 に，各試験片の試験前表面を電子顕微鏡で観察した結果を示す. TP-2 で

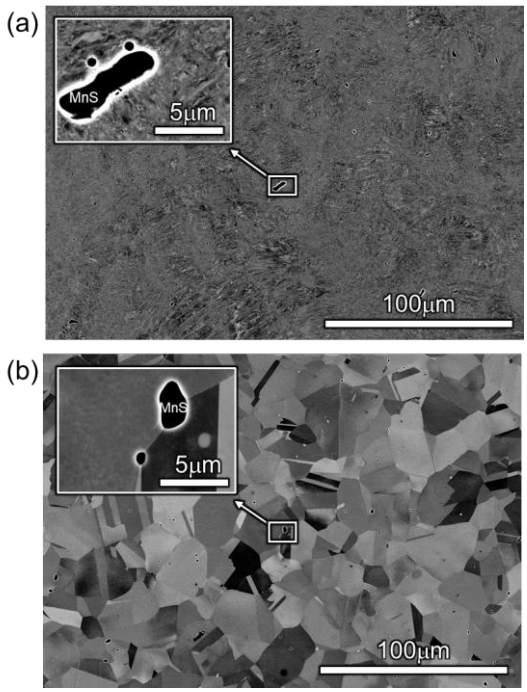


図 7　試験面観察結果(試験前の状態)
(a)TP-2，(b)TP-3

は表面組織が微細化していたものの，介在物の種類や分布状態は TP-3 と同等であった. このことから，DEM 法による加工では結晶粒の微細化や高硬度化は生じるものの，介在物の存在形態は変化せず，その結果として耐食性に差が現れなかったと考えられる.

前述のショットピーニング処理材に関する報告[8,9]では，介在物の存在状態までは評価されていないものの，ショットピーニングは DEM 法よりも強い加工であるため，介在物が微細化・破砕された可能性がある． この点を踏まえると，ショットピーニング材で耐食性が向上した背景には，介在物の存在形態の変化が寄与したことが想定される.

以上のことから, DEM 法の加工条件を見直すことで材料中に元来存在する介在物を微細化できれば，高強度化と耐食性の向上を両立できる可能性があるため，今後検討を進めて行きたい.

4. おわりに

DEM 法加工面の 5%硫酸水溶液中におけるアノード分極特性を電気化学測定により取得し, DEM 法がγ- SUS の酸性溶液中における耐食性に及ぼす影響を実験的に評価した. その結果，DEM 法加工された試験片は，通常加工された試験片と同等の分極挙動を示し，DEM 法がγ- SUS 本来の耐食性を損なうことなく高強度化を実現できる技術であることを示しており，実用上きわめて有望であると言える. DEM 法の加工条件を見直すことで材料中に元来存在する介在物を微細化できれば，高強度化と耐食性向上を両立できる可能性があるため，今後検討を進めて行きたい.

最後に，本研究で使用したレーザー顕微鏡，マイクロビッカース硬さ試験機，自動研磨機，走査電子顕微鏡は電源立地地域対策交付金により導入した機器である.

参考文献

1) R. Hikiji, E. Kondo, N. Kawagoshi, M. Arai, Transactions of the JSME Series C 66 (2000) 2423–2428.
2) N. Nagaishi, K. Hoaki, Y. Taguri, T. Hirai, 佐賀県工業技術センター　研究報告書 (2022) 11–16.
3) N. Nagaishi, K. Hoaki, T. Hirai, K. Koda, 佐賀県工業技術センター　研究報告書 (2023) 25–29.
4) N. Nagaishi, K. Hoaki, K. Koda, Transactions of the JSME (in Japanese) 92 (2026) 25–00163.
5) N. Nagaishi, K. Hoaki, K. Koda, 佐賀県工業技術センター　研究報告書 (2024) 7–11.
6) N. Nagaishi, K. Hoaki, Y. Taguri, K. Kouda, 佐賀県工業技術センター　研究報告書 (2025) 31–36.
7) 日本産業規格調査会, ステンレス鋼のアノード分極曲線測定方法　JISG0579(2012), 2012.
8) M.R. Menezes, C. Godoy, V.T.L. Buono, M.M.M. Schvartzman, J.C. Avelar-Batista Wilson, Surf. Coat. Technol. 309 (2017) 651–662.
9) F. Yazdani, S.M. Rabiee, R. Jamaati, Heliyon 10 (2024).
10) Y. Tsutsumi, T. Ishimoto, T. Oishi, T. Manaka, P. Chen, M. Ashida, K. Doi, H. Katayama, T. Hanawa, T. Nakano, Addit. Manuf. 45 (2021).

経　常　研　究

機能性食品・コスメ原料に関する
評価技術の確立及びその応用に関する研究（第３報）

食品コスメ部
柘植圭介
宮崎大学農学部
山崎正夫
宮崎大学工学教育研究部
菅本和寛

九州北西部に多く自生する芳香性樹木アオモジの機能性食品化を目指し，アオモジ葉 80%エタノール抽出物の分画及び in vitro の系での機能性を検証した．疎水性吸着樹脂を用いてアオモジ葉抽出物を分画し，各画分の抗炎症作用及びα-グルコシダーゼ阻害活性を評価した．抗炎症作用は，マクロファージの LPS 誘導型 NO 産生抑制作用を指標とした．その結果，アオモジ抽出物より，NO 産生阻害作用を有し，比較的疎水性が高い画分と，α-グルコシダーゼ阻害活性を有し，kaempferol の rhamnose 配糖体を多く含む画分を得た．これらの結果は，アオモジ抽出物における新たな生理機能性の明示と活性物質の同定につながる有用な知見であると考えられた．

1. はじめに

アオモジ（*Litsea cubeba*；図 1）は，クスノキ科ハマビワ属の落葉小高木で，九州以南から中国，マレーシア，インドに分布する[1]．別名「ショウガノキ」「コショウノキ」とも呼ばれ，花，果実，葉，幹，根のそれぞれにレモンのような芳香がある．中国や東南アジア諸国では，果実から精油を抽出して香料にしたり，果実そのものを「馬告（マーガオ：台湾）」「木姜子（ムージャンズ：中国貴州省）」と称し，香辛料や食油に加工したりして幅広く食されている．佐賀県や長崎県はアオモジの生育密度が高く，山間道路の法面や雑木林の明るい場所に多くみられる雑木である．しかし，アオモジは 3～4 月の花期に芳香を発する樹木として身近に知られてはいるものの，国内ではほとんど利用されてこなかった．

近年，アオモジ葉の生理機能性に関する研究が進展している．アオモジ葉には水溶性多糖類やポリフェノール類が多く含まれ，強い抗酸化性を有する[2]．また，葉の乾燥粉末の摂取がラットの血清ペントシジン濃度を低下させ，生体内の抗糖化にはたらく[2]ことや，血清脂質濃度を低下させ，脂質代謝を改善[3]すること，エタノール抽出物がマクロファージにおける caspase−1 や IL−1β 分泌の抑制を介して NLRP3 インフラマソームの活性化を抑える[4]こと等が報告されている．これらの知見は，アオモジ葉が，メタボリックシンドロームの基礎疾患である糖・脂質代謝異常の予防に役立つ機能性食品の有望な素材である可能性を示唆している．



図 1　アオモジ

一方，糖尿病等の慢性疾患の病態形成に，「慢性炎症」が深く関わっていることが注目されている[5]．慢性炎症では，酸化ストレスなどの刺激を受けた臓器の細胞から放出される自己由来の成分（内因性リガンド）が，マクロファージ等の細胞に発現する Toll 様受容体（TLR）により認識されて，恒常的な炎症反応を誘導すると考えられている．

また，消化管の糖質分解酵素のはたらきを阻害して糖類の分解を抑え，体内への吸収を穏やかにすることで食後血糖値の上昇を抑え得ることが知られている．これらのことから，マクロファージが引き起こす炎症抑制や，糖質分解酵素の一種である小腸由来 α-グルコシダーゼの阻害をターゲットにした食品由来の抗メタ



図２　アオモジ葉（蒸煮前）

ボリックシンドローム因子の探索が盛んに行われている．

以上の背景から，アオモジの機能性食品化を目指し，佐賀県産アオモジ葉のマクロファージ誘導による炎症抑制作用及びα-グルコシダーゼ阻害活性について評価した結果を報告する．

2. 実験方法

2.1 試料の調製

佐賀県太良町に自生するアオモジより葉（図 2）を採取し，スチームコンベクションオーブン（(株）エフエムアイ UNOX XV-706ONE）にて 95℃-4 分間蒸煮した後に熱風乾燥機（木原製作所製 SM10S-EH-DPC）にて乾燥温度 45℃で乾燥した．乾燥葉を粉砕機にて粉砕したものをアオモジ葉乾燥粉末とした．

2.2 抽出物の調製

アオモジ葉 80%エタノール抽出物は以下のように調製した．アオモジ葉乾燥粉末を 40 g 秤量し，80%エタノール水溶液を 4 L 添加して約 3 時間攪拌した．撹拌液を 4℃, 10,000×g で 30 分間遠心分離し，上清を 0.45 μm フィルターを使って吸引濾過した後，残渣に 80%エタノール水溶液を 4 L 添加した．その後約 3 時間攪拌し，4℃, 10,000×g で 30 分間遠心分離した後，上清を 0.45 μm フィルターを使って吸引濾過した．その後濾液をエバポレーターで濃縮して凍結乾燥させ，乾燥物重量，すなわち抽出物重量を秤量した．この操作を繰り返して必要量の抽出物を調製し，-30℃で冷凍保存した．

2.3 分画

疎水性吸着剤によるアオモジ葉 80%エタノール抽出物の分画を行った．抽出物を 50 g 秤量し，20%エタノール溶液 10 L に溶解させた後，スチレン-ジビニルベンゼン系合成吸着剤である HP-20（500 cm^3）を充填したカラム（内径 5 cm, 高さ 100 cm）に通液して素通り画分を得た．その後，カラムに吸着した物質を，エタノールの濃度を 20%から 100%まで 20%刻みで段階的に上げてそれぞれ 2 L ずつ通液し，順次溶出させた．さらにアセトンを 2 L 通液し，アセトン溶出画分を得た．

これらの画分はエバポレーターを用いて濃縮して乾固し，表 1 のように番号を振り分け，収率も併せて記載した．

表1　分画物の収率及び細胞への添加濃度

Fr.No.	説明	収率 (%)	細胞への添加濃度（終濃度, μg/mL）			
			濃度1	濃度2	濃度3	濃度4
0	カラムを素通りした分画物	43.6	87.2	43.6	21.8	10.9
1	20% エタノール溶出画分	3.7	7.4	3.7	1.9	0.9
2	40% エタノール溶出画分	10.2	20.5	10.2	5.1	2.6
3	60% エタノール溶出画分	2.6	5.3	2.6	1.3	0.7
4	80% エタノール溶出画分	2.3	4.6	2.3	1.2	0.6
5	100% エタノール溶出画分	6.7	13.3	6.7	3.3	1.7
6	アセトン溶出画分	2.8	5.6	2.8	1.4	0.7

細胞への添加濃度は、分画前の抽出物相当で200 (濃度1), 100 (濃度2) , 50 (濃度3), 25 (濃度4) μg/mLになるよう調整した。

2.4 抗炎症作用

抗炎症作用は既報[6]に準じて 96 well マイクロプレートを用いた細胞試験で評価し，エンドトキシンであるリポ多糖（LPS）の誘導によりマウスマクロファージ様細胞 RAW 264.7 が産生する炎症性物質（一酸化窒素：NO）の産生阻害の程度を抗炎症の指標とした．培地として，Glutamine, Phenol Red, Sodium Pyruvate 含有 D-MEM (High Glucose) 500 mL に Penicillin-Streptomycin-Amphotericin B を添加し，使用直前に 10%になるように fetal bovine serum（FBS）を加えたものを用いた．培養環境は 37℃，5% CO_2 とした．

NO 産生試験では以下に従って実施した．96 well マイクロプレートに，細胞懸濁液を細胞密度 1.0×10^5 cells/cm^2 になるように 1 well あたり 50 μL ずつ添加し，24 時間培養した．次に，分画物を培地に添加し，24 時間処理後に終濃度 100 ng/mL となるように LPS を添加し，さらに 24 時間処理した．培養終了後，$NaNO_2$ 溶液を標準物質として，Griess 法によって NO 産生量を定量した．分画物の培地への添加濃度は，各画分の収率を抽出物中の存在量とみなし，抽出物の添加濃度として 200, 100, 50 及び 25 μg/mL 相当になるよう調整した（表 1）．Dunnett 法により，各群における LPS 群との有意差を統計解析した．

2.5 α-グルコシダーゼ阻害活性

各画分の α-グルコシターゼ阻害活性は，以下により測定した．アオモジ葉の分画物を秤量し，1 ml のジメチルスルホキシド（DMSO）に溶解させた分画物サンプル溶液を調製した．96 well マイクロプレートに滅菌超純水，リン酸カリウム緩衝液，DMSO，サンプル溶液（10 mg/mL）及び α-グルコシターゼ溶液を加え，well

内をよく混合した．インキュベーターにマイクロプレートを入れて 37℃で 5 min 加熱した．さらに，1.0 mM pNPG 及び 1.0 mM pNPG を 60 µl 加えて well 内をよく混合し，401 nm の吸光度を測定した．サンプル量が足りず，評価できなかった Fr. 6 を除くすべての画分を評価した．ポジティブコントロールとして，食後血糖値の上昇を抑える医療用の α-グルコシダーゼ阻害剤である acarbose を用いた．

2. 6 LC-MS

精密質量に関する情報が得られる Orbitrap 型質量分析装置（Thermo Fisher 製 Q Exactive）を用いた高速液体クロマトグラフィー-質量分析（LC-MS）により，アオモジ葉抽出物及び分画物の分析を行った．分析条件は表 2 に従った．

3. 結果及び考察

3. 1 抗炎症作用

RAW264.7 の LPS 誘導 NO 産生試験のうち，Fr. 0 から Fr. 3 までの結果を図 3 に，Fr. 4 から Fr. 6 までの結果を図 4 に示す．NO 産生試験では，Fr. 0 及び Fr. 4 の 2 画分が，全ての濃度において LPS 群と比較して有意に NO 産生量を減少させ，Fr.1, 2 及び Fr. 6 は高濃度側で LPS 群と比較して有意に NO 産生量を減少させた．Fr. 3 及び Fr. 5 は NO 産生に影響を認めなかった．

予備的な試験において，熱水抽出物より 80%エタノール抽出物の方が強い NO 産生阻害を示すことを明らかとしており（データ示さず），アオモジ葉抽出物中の活性成分は，やや極性の低い物質と想定していた．本試験において，Fr. 6 に濃度依存的な活性を見出したことから，この画分に比較的低極性の活性成分が存在すると推察される．また，Fr. 0, 1 及び 2 でも活性が確認されており，複数の活性成分が存在していることが示唆された．Fr. 0, 1 及び 2 は Fr. 6 に比べると比活性は低く，Fr. 6 に高い抗炎症特性を持つ化合物が存在することが示唆された．

Fr. 5 の高濃度添加を除き，すべての画分において，相対生細胞数は LPS 群との差異が観察されず，分画物の細胞毒性は概ね低いものと判断された（データ示さず）．

表2　LC-MS条件

HPLC	Vanquish (Thermo Fisher Scientific)
MS	Q Exactive plus (Thermo Fisher Scientific)
Column	Cadenza CDC18, i.d.2 x 250 mm (Imtakt Co.) at 40dC
Mobile phase	A: water/formic acid = 100/0.1 (v/v) B: acetonitrile/formic acid =100/0/1 (v/v) B10% (0 to 2.5 min), B10-100% with linear gradient to 25 min, B100% to 30 min
Flow rate	0.2 mL/min
PDA detection	200-400 nm
MS detection	ion source: ESI, polarity: positive/negative

3. 2 α-グルコシダーゼ阻害活性

分画物の α-グルコシダーゼ阻害活性を表 3 に示した．Fr. 3 に，医薬品である acarbose と同等の α–グルコシターゼ阻害活性があることが認められた．このことから，Fr. 3 に強力な α-グルコシターゼ阻害活性を示す化合物が含まれている可能性が考えられた．

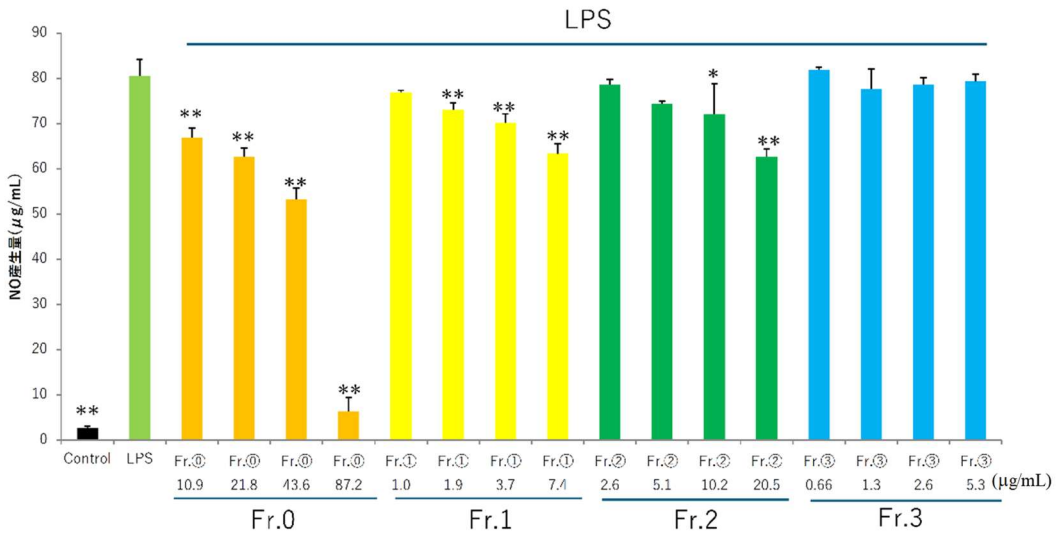


図3　RAW264.7細胞のLPS誘導型NO産生に及ぼす
アオモジ葉抽出物由来画分の影響 (Fr.0～Fr.3)
Data are statistically significant at $P < 0.05$*, 0.01**

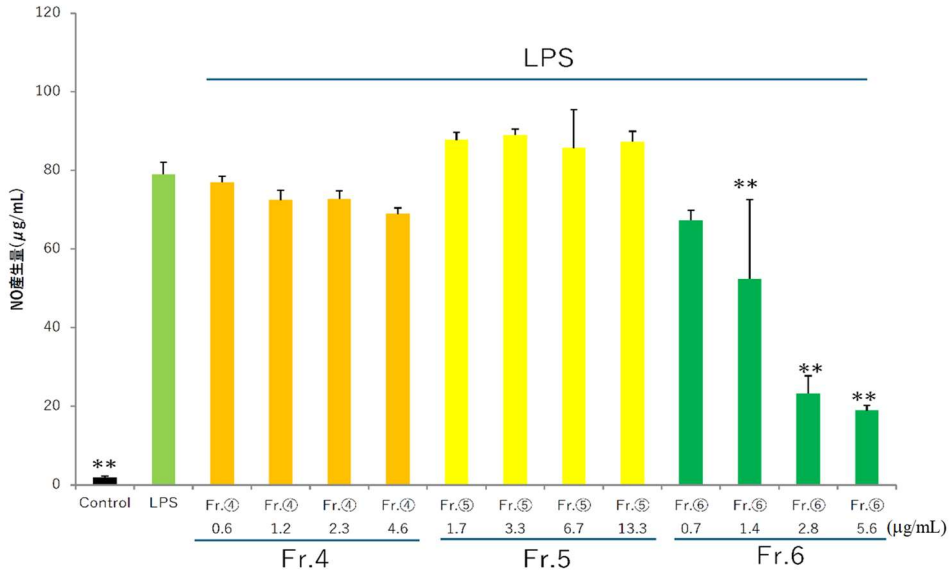


図4　RAW264.7細胞のLPS誘導型NO産生に及ぼす
アオモジ葉抽出物由来画分の影響 (Fr.4～Fr.6)
Data are statistically significant at $P < 0.05$*, 0.01**

表3　アオモジ葉分画物の
α-グルコシダーゼ阻害活性

Fr.No.	酵素阻害活性 (%)
0	10.3
1	No inhibition
2	12.2
3	48.7
4	29.5
5	2.5
acarbose	46.4

3. 3 LC-MS

分画物を用いた in vitro 試験では，Fr.3 と Fr.6 にそれぞれ強い α–グルコシダーゼ阻害活性および抗炎症作用が観察された．そこで，高速液体クロマトグラフィー-質量分析法（LC-MS）を用いて，各画分の成分分析を実施した．

強い α–グルコシダーゼ阻害活性を有する Fr. 3 の LC-MS によるクロマトグラムを図 5 に示した．Fr. 3 の主要なピークは，PDA 検出及び MS のネガティブモードで保持時間 10～20 分の間にまとまって観察された．また，各ピークの MS スペクトルにおける主要な m/z 観察結果から，ピーク成分のモノアイソトピック質量を得た．

この情報から組成式推定を行った結果，Fr.3 には kaempferol 配糖体と推定される多数のピークが検出された．そのうち，afzelin (kaempferol 3-O-rhamnoside) と kaempferitrin (kaempferol 3,7-O-dirhamnoside)は，標準物質とピーク保持時間及び MS/MS スペクトルが一致し，それらの物質の含有が強く支持された．他の未同定ピークについても，rhamnose の質量と一致する neutral loss が観察されたため，Fr. 3 は，kaempferol の rhamnose 配糖体を多く含む画分であることが示唆された．

次に，強い NO 産生阻害作用を有する Fr. 6 の LC-MS によるクロマトグラムを図 6 に示した．Fr. 6 の主要なピークは，MS のポジティブモードで保持時間 24～34 分の間にまとまって観察された．これらのピークのうち，ブランク試料（溶媒のみ）にも同レベルで検出されたものは Fr. 6 由来ではないと判断された．保持時間 24.1 分のピークは，試料においてのみ際立って観察されたため，このピークは試料由来の成分であると判断された．

このピーク（P1 と称する）の MS/MS スペクトルのプロファイルは，図 7 に示すように同一の m/z である alpinetin（7-Hydroxy-5-methoxyflavanone）に酷使していたが，保持時間に隔たりがあった．このことから，P1 は alpinetin ではないが，hydroxyl methoxyl flavanone のような，alpinetin と類似した構造を有する化合物であると推察された．

しかしながら，Fr. 6 においては，MS のネガティブモードでも試料由来と思われる複数のピークが検出されたため（データ示さず），Fr. 6 は多成分の混合物であり，今後さらなる構造解析が必要と思われた．

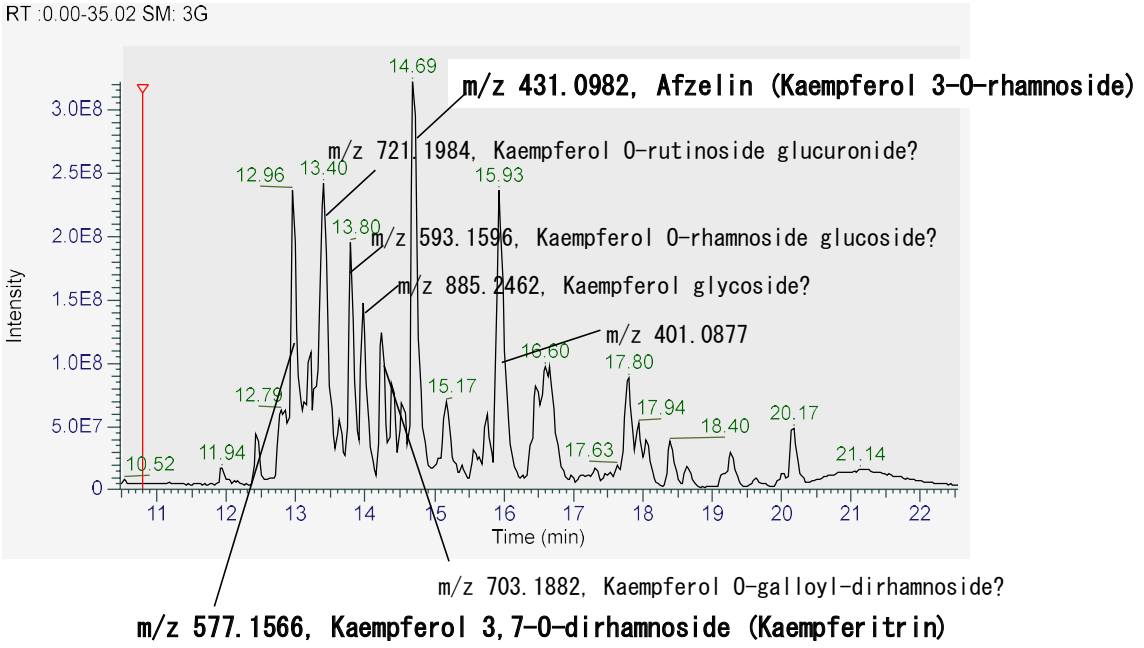


図5　アオモジ葉抽出物由来Fr.3のLC-MSクロマトグラム
（ネガティブイオンモード検出）

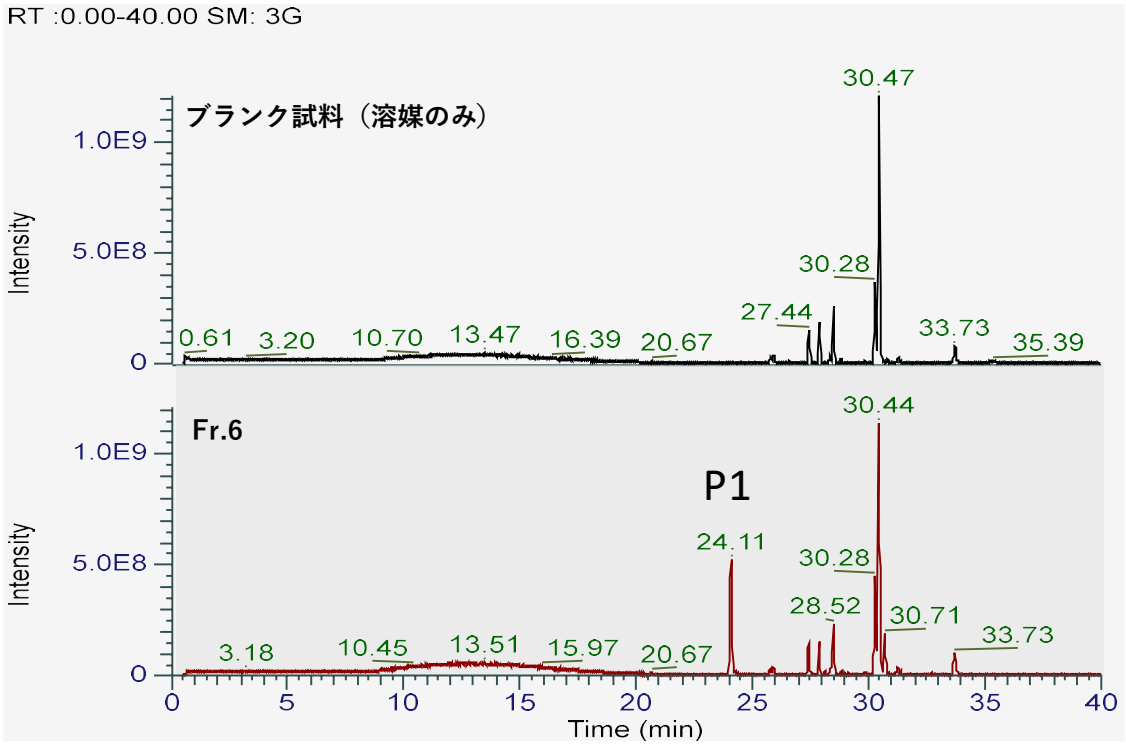


図6　アオモジ葉抽出物由来Fr.6のLC-MSクロマトグラム
（ポジティブイオンモード検出）

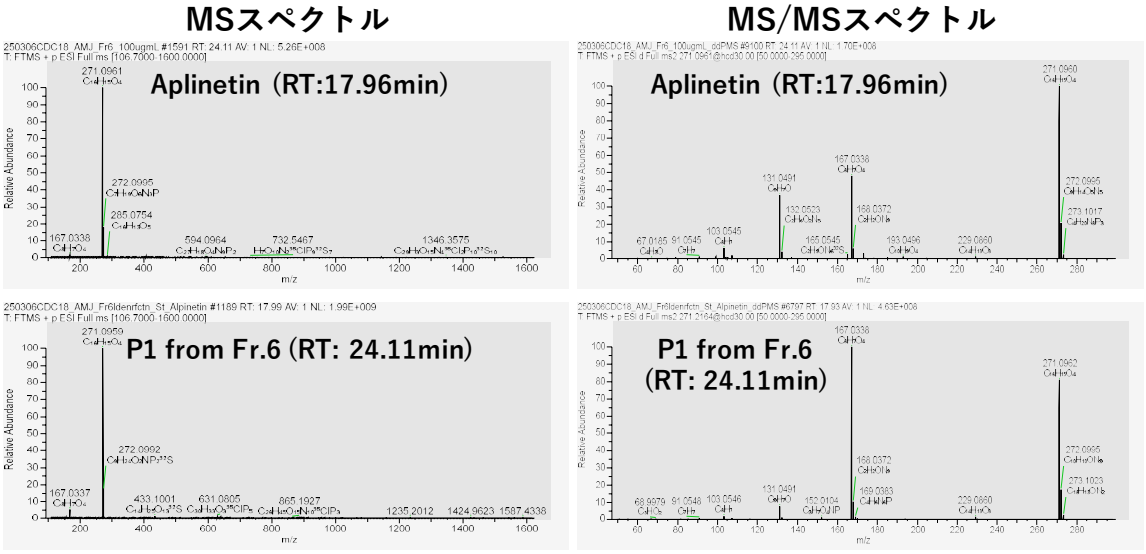


図7　Alpinetin及びFr. 6において検出されたP1のマススペクトル
P1とAlpinetinのMS/MSスペクトルの両方において
m/z 91.05, 103.05, 131.05, 167.03, 229.09が観察される

4. おわりに

アオモジはレモンのような芳香が特徴の植物で，これまで東南アジアを中心に，香辛料や精油など，香りを特徴とする製品に広く用いられている．一方，日本国内において，アオモジ葉については，ハーブティーとして上市されているものの，食品としての活用は限定的であった．近年の研究の進展によりアオモジ葉の生理機能性が明らかとなり，機能性食品の原料としての利用可能性が期待されている．

既報において，アオモジ葉には抗酸化物質であるポリフェノール類が多く含まれ，含水エタノールを用いることによりこれらの成分が多く抽出されることを明らかにしたが，その詳細は不明であった．

本試験によってアオモジ葉抽出物を分画し，その生理活性を in vitro で評価することにより，特定の画分に生理活性が観察され，含有成分に関する情報を得ることができた．これらを以下にまとめる．

1) アオモジ葉抽出物から，α-グルコシダーゼ阻害活性を有する画分を得た．この画分は afzelin や kaempferitrin 等の，kaempferol の rhamnose 配糖体を多く含むことが示唆された．
2) アオモジ葉抽出物から，マクロファージの LPS 誘導型 NO 産生阻害を有する比較的低極性の画分を得た．この画分において，hydroxyl methoxyl flavanone の存在が示唆された．

これらの知見は，アオモジ葉を原料とした機能性食品を開発するうえで有用な情報と考えられる．今後は，本知見を踏まえ，他の研究機関とも連携しながらアオモジの種々の生理機能性や加工条件について検討を進める．また，有効成分の特定化に向けて研究開発を進展させる予定である．

なお，本研究に使用したイオントラップ型高速液体クロマトグラフ質量分析装置は電源立地地域対策交付金により導入した．

参考文献

1) 北村ら，原色日本植物図鑑，保育社, 545 (1979).
2) 古場ら，アオモジ葉の機能性に関する研究，長崎県立大学 令和 3 年度学長裁量研究成果報告書（様式３号）3−3.
3) Asija et al, Study on Hypolipidaemic activity of *Litsea cubeba* leaves in rats, *Chemistry Research Journal*, 7(2):100-115 (2022).
4) Wong et al, The leaves of the seasoning plant *Litsea cubeba* inhibit the NLRP3 inflammasome and ameliorate dextran sulfate sodium-induced colitis in mice, *Front. Nutr. Sec. Nutr. Immunology*, 9 (2022).
5) 小川佳宏，眞鍋一郎，大島正伸，竹田潔編，慢性炎症-多様な疾患の基礎病態，実験医学増刊．羊土社 (2011).
6) 柘植圭介，鶴田裕美，佐藤真佐恵，吉村臣史，海藻由来脂質における抗炎症作用の解明とその活用 (2) -スサビノリにおける抗炎症性脂質の特定-．平成 25 年度佐賀県工業技術センター報告, 19-28 (2014).

環境に優しい水性塗料用紫外線吸収剤に関する研究（第４報）

―バイオマス由来 UVA と合成 UVA の併用による耐光性向上効果―

材料環境部
久間俊平　田栗有樹　帆秋圭司
矢野昌之
大阪公立大学大学院工学研究科
小畠誠也

近年，気候変動等の環境問題を背景に，カーボンニュートラルの実現と産業競争力の強化が同時に求められている．このような中，県内の家具・木工，建築，塗料分野では，環境負荷が低く，木質感を損なわない水性クリア塗料が求められており，耐候性の向上と環境負荷の低減が必要である．本研究では，バイオマス資源に含有され紫外線吸収能を有するルチンを活用するため，合成 UVA との併用技術を検討した．その結果，ルチンを単独利用する場合と比較し，塗膜の耐光性をさらに向上できることを確認した．

1. はじめに

近年，気候変動や地球温暖化等の環境問題から，カーボンニュートラルの達成と同時に産業競争力を高める取組みが重要になってきている．国においては「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定されており，佐賀県においても，GX（グリーントランスフォーメーション）の推進に取り組んでいる．

このような中，県内の家具・木工，建築，塗料業界では，低環境負荷でありながら，木質感を損なわない塗料が求められている．水性クリア塗料は，木質感を損なわず VOC（揮発性有機化合物）排出量も少ないため低環境負荷であるが，耐候性に課題がある．また，持続可能なバイオマス資源由来材料の利用等, より一層の環境負荷低減に対する要求がある．

木材用水性塗料の耐候劣化の原因は，紫外線や熱及び水による分解，水分吸収に伴う木材の寸法変化による塗膜剥離や割れ等が考えられる．特にクリア塗料は紫外線を透過させるため基材の木質部まで劣化するため，塗装物の耐候性に対し更に影響を与える [1].

当センターでは環境に優しい木材用水性塗料の耐候性向上を目指して研究を行っており, これまでに, 木材用水性塗料の機能性添加剤の中で，撥水度と初期の保色性に対して紫外線吸収剤（UVA）の影響が大きいことを明らかにした [2]．また，水性塗料の更なる環境負荷の低減を実現するため，柑橘類やアスパラガス等，県内において未利用のバイオマス資源に含有され，紫外線吸収能を有する芳香族化合物であるルチン [3]を微粒子化し分散した塗料の耐候性について検討を行った結果，耐候性試験初期において変色抑制効果を有することを明らかにした [4].

本報では，ルチンをより効果的に活用する方法として，光の透過波長が異なる合成 UVA と組み合わせる手法を検討した．ルチンと合成 UVA の透過波長が異なるため，ルチンだけでは紫外線遮蔽が不十分な波長域を合成 UVA が補い，変色抑制効果の更なる向上が期待できる．今回は，耐候劣化の主因である紫外線に対する耐光性を詳しく評価するため，水噴霧を伴わない促進耐光性試験を実施した．

2. 実験方法

2.1 試薬

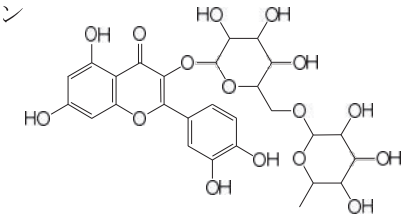
バイオマス由来 UVA としてルチン（富士フイルム和光純薬製，濃度 90%以上）を多検体粉砕機（ヴァーダー・サイエンティフィック製, MM 500 VARIO）にて微細化（平均粒径：260 nm）して使用した．また，ルチンと光透過波長が異なる合成 UVA としてトリアジン系 UVA（BASF 製，Tinuvin 479 DW，UVA 濃度 20wt%）を用いた．バイオマス由来の樹脂成分及び水分散剤としてキチンナノファイバー[5]（以下キチン NF，スギノマシン製，BiNFi-s，SFo-20002，濃度 2%）及びセルロースナノファイバー[6]（以下 CNF，中越パルプ工業製，nanoforest-S B-SB1，竹原料，濃度 1.02%）を選定した．ここで，ルチン，キチン NF を構成するキチン及び CNF を構成するセルロースの構造式を図 1 に示す．その他，希釈溶剤はイオン交換水（以下，IEW）を使用した．

2.2 塗料の調製

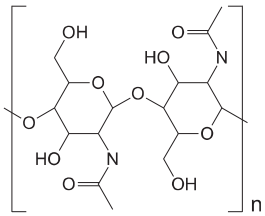
樹脂成分，UVA，IEW のうち，3 種以上を混合振

盪し，種々の水性塗料を調製した．それらの組成を表 1 に記載する．なお，CNF 及びキチン NF 分散液は水を多量に含有しているため，塗料の固形分濃度は 1.5%程度である．

(a)　ルチン



(b)　キチン



(c)　セルロース

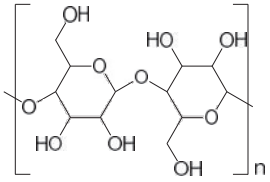


図 1　構造式

表 1　塗料の組成（wt%）

試料名	キチン NF 分散液	CNF 分散液	ルチン	合成 UVA	IEW
塗料①	50.0	-	0.5	-	49.5
塗料②	50.0	-	-	0.5	49.5
塗料③	50.0	-	0.5	0.5	49.0
塗料④	-	98.0	0.5	-	1.5
塗料⑤	-	98.0	0.5	0.5	1.0

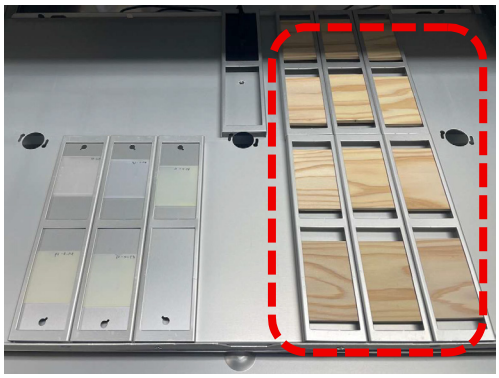


図 2　試験片の設置状況（赤枠内）

2.3 試験片

塗膜の透過率変化を計測するため，50 mm×50 mm の石英ガラス（厚さ1mm）に，バーコーター（松尾産業製，Select-Roller　L60，OSP-120）を用いて，塗料を 1回塗布し乾燥させた．

また，促進耐光性試験による色差変化を計測するため，75mm×50mmのスギ板（板目，厚さ5mm，研磨紙＃240で研磨）に，塗料を片面のみに1回塗布（刷毛，塗布量100g/m^2 ）し乾燥させた．

2.4 光透過率測定

塗膜の光透過率測定には，紫外可視分光光度計（島津製作所製，UV-3600）及び積分球（島津製作所製，ISR-3100）を用いた．ここで，紫外線領域（300-400 nm）での光透過率が低いほど，塗膜が紫外線を遮蔽するため塗装物の耐光性は向上する．

2.5 促進耐光性試験

促進耐候性試験機（Q-Lab 製，Q-SUN Xe-3-HSE）を用いて促進耐光性試験を行った．試験条件は，JIS K 5600-7-7（キセノンランプ法，サイクル C）に基づき，光学フィルタをウィンドウフィルター（Q-Lab 製，Window-Q），放射照度を 50 W/m^2（300-400 nm），ブラックパネル温度を 63 ℃，試験槽空気温度を 38 ℃，相対湿度を 50%に設定して実施した．試験槽内への試験片の設置状況を図 2 に示す．耐光性の評価として試験開始前，50 時間，100 時間，200 時間経過時の色差変化を測定した．

2.6 色差測定

色差（ΔE^*ab）の評価のために，$L^*a^*b^*$色空間における明度 L^*，色度 a^*，b^*について，試験片毎に 4 か所ずつ測色計（コニカミノルタジャパン製，CM-700d）により測定し，平均値を計算に用いた．それぞれの塗装後の木材試験片を基準に，促進耐光性試験を実施した後の試験片の変化量$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$を求め，計算式(1)から色差を算出した．色差（$\Delta E^*ab$）は値が小さいほど色変化が小さい．

$$\Delta E^*ab = [\,(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\,]^{1/2} \quad \cdots (1)$$

3. 結果及び考察

3.1 光透過率の評価

ルチンを含む塗料①，合成 UVA を含む塗料②，そして両方を含む塗料③の透過率を図 3 に示す．

紫外線領域（300-400 nm）において，塗料①（ルチンを含有）は，320 nm 付近で最も高い透過率を示す一方，塗料②（合成 UVA を含有）は 320 nm 付近で紫外線を最も強く遮蔽する特性を示した．そし

て，塗料③（ルチンと合成 UVA 併用）は塗料①及び塗料②に比べ光透過率が最も低い．

この結果から，ルチンを単独で使用する場合と比べて，ルチンと合成 UVA を併用することで紫外線遮蔽が強化され，より高い耐光性が期待できる．

3.2 色差の評価

促進耐光性試験における塗装試験片（スギ材）の色差変化を図 4 に示す．樹脂成分をキチン NF とした塗料①（ルチンを含有）を塗布した試験片，塗装していない試験片と比較して色差は低下した．さらに，塗料③（ルチンと合成 UVA 併用）では，塗料①よりも色差は低下した．

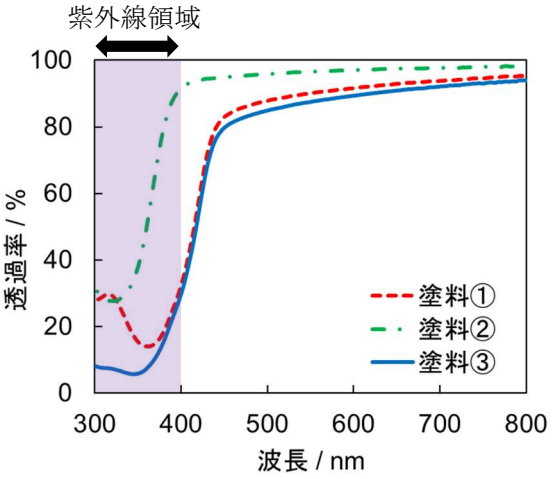


図 3　塗料の光透過率

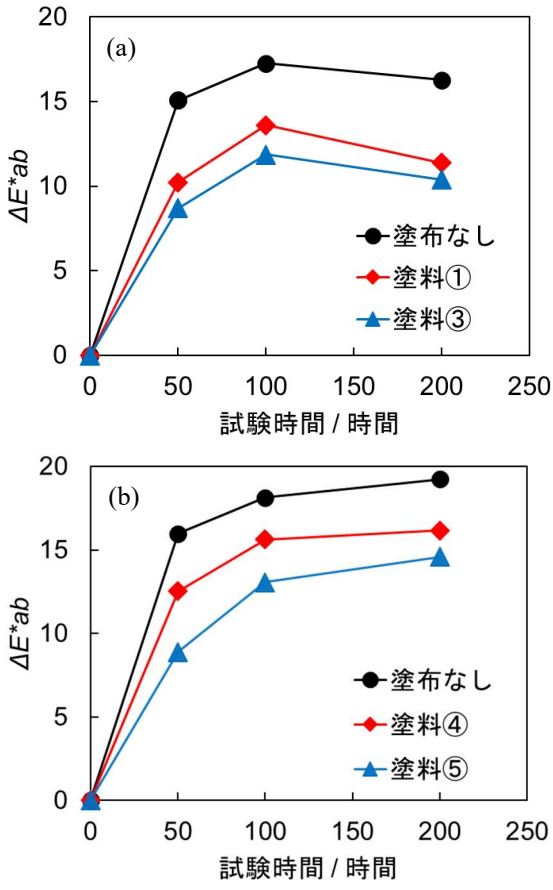


図 4　促進耐光性試験による色差変化
(a) キチン NF，(b) CNF

樹脂成分を CNF とした場合でも同様の傾向が見られ，塗料④（ルチンを含有）と，塗料⑤（ルチンと合成 UVA 併用）を塗布すると色差は大きく低下し，特に塗料⑤でより低くなった．

これらの結果から，樹脂成分が異なってもルチンと合成 UVA を併用することで色差が低下することが確認でき，耐光性試験による色変化をより効果的に抑制できることが明らかとなった．

4. おわりに

本研究ではルチンの効果的な利用技術として，ルチンと光透過率が異なる合成 UVA との併用について検討した結果，紫外線領域で塗膜の光透過率を低下させることができた．また，促進耐光性試験を実施した結果，さらに木材の変色が抑制され，耐光性向上につながる効果が確認できた．

今後は，更なる低環境負荷を目指すため，合成 UVA を代替した塗料の開発を目指す．また，市販用の下塗り塗料としての耐候性向上効果については，促進耐候（光）性試験に加えて，屋外暴露試験により検証する．

本研究を実施するにあたって使用した多検体粉砕機，紫外可視分光光度計，促進耐候性試験機は電源立地地域対策交付金により導入した．

参考文献

1) 木口実，改訂版木材の塗装，木材塗装研究会編，海青社, 235-237 (2010).
2) 久間俊平，田栗有樹，帆秋圭司，平井智紀，矢野昌之，福元豊，佐賀県工業技術センター研究報告書, No.29, 41-45 (2021).
3) Yongfang Qian, Mengjie Qi, Laijiu Zheng, Martin W. King, Lihua Lv, Fang Ye, Materials, Vol.9, No.7, 504 (2016).
4) 久間俊平，帆秋圭司，矢野昌之，田栗有樹，佐賀県工業技術センター研究報告書，No.33，55-59 (2025).
5) 伊福伸介，工業材料, Vol.65, No.8, 52-56 (2017)
6) (a) 矢野浩之，今井友也，工業材料，Vol.65，No.8，18-23 (2017). (b) 近藤哲男，工業材料，Vol.65，No.8, 40-45 (2017).

環境に優しい水性塗料用紫外線吸収剤に関する研究（第５報）

−紫外線吸収剤含有マイクロカプセルの水性塗料添加剤としての適用検討−

材料環境部
田栗有樹　帆秋圭司　久間俊平
矢野昌之

水性塗料の環境負荷低減に寄与することを目的として，紫外線吸収剤(UVA)としてバイオマス資源に含まれるケルセチン及びフェルラ酸に注目し，これらを塗膜中で長期に渡り保持するため，マイクロカプセルに含有させた UVA 含有マイクロカプセルの開発を行った．これをポリビニルアルコール（PVA）水溶液に分散させフィルムとしたときの耐光性及び杉材に塗装し屋外暴露試験を行ったときの色相変化から，マイクロカプセル中でのケルセチン，フェルラ酸の安定性及び紫外線遮蔽能を評価した．その結果，フェルラ酸，ケルセチンともにマイクロカプセルに含有されることで，紫外線吸収剤として利用できる可能性を見出した．

1. はじめに

近年，気候変動や地球温暖化等の環境問題から，カーボンニュートラルの達成と同時に産業競争力を高める取組みが重要になっている．国においては「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定されており，佐賀県においても，GX（グリーントランスフォーメーション）の推進に取り組んでいる．

このような中，県内の家具・木工，建築，塗料業界では，低環境負荷でありながら，木質感を損なわない塗料が求められている．水性クリア塗料は，木質感を損なわず VOC（揮発性有機化合物）排出量も少ないため低環境負荷であるが，耐候性に課題がある．また，持続可能なバイオマス資源由来材料の利用等，より一層の環境負荷低減に対する要求も高まっている．

木材用水性塗料の耐候性劣化の原因は，紫外線や熱及び水による分解，水分吸収に伴う木材の寸法変化による塗膜剥離や割れ等が考えられる．特にクリア塗料は紫外線を透過させるため基材の木質部まで劣化が容易に進行し，塗装物の耐候性に対し更に影響を与える[1)]．

当センターでは環境に優しい木材用水性塗料の耐候性向上を目指して研究を行っており，バイオマス資源由来原料を用いた木材用水性塗料の機能性添加剤の研究から，撥水度と初期の保色性に対して紫外線吸収剤（UVA）の影響が大きいことを明らかにした[2)]．また，高強度・高比表面積・分散性向上等の様々な特性を有するセルロースナノファイバー（CNF）[3)]をバイオマス資源 UVA と併用することで，木材用水性塗料の更なる環境負荷の低減を目指した研究も進めてきた[4) 5)]．

UVA は，紫外線の強いエネルギーを吸収し熱として放出することで，塗膜成分や木材成分を劣化・分解することを防ぎ，塗膜や木材を保護する役割を果たす[6)]．そのため長時間の紫外線照射にも安定であること，塗料中で分散性に優れること，さらに塗膜からの滲出などによる流出がないことが望まれる．

昨年度は，UVA を塗料成分から隔離し塗膜中で長期に渡り保持することを目的として，バイオマス資源由来 UVA であるケルセチンとフェルラ酸を樹脂製マイクロカプセル（MC）に封入し，UVA 含有マイクロカプセルを合成した[7)]．本年度はこの UVA 含有 MC の紫外線照射下における安定性の評価，屋外用水性塗料の添加剤として適用可能性について検討した結果を報告する．

2. 実験方法

2.1 UVA 混合マイクロカプセルの合成

メチロールプロパントリメタクリラート（3.4 g），2,2’-アゾビス（4-メトキシ-2,4-ジメチルバレロニトリル）(0.06 g)の混合物に，UVA（フェルラ酸またはケルセチン）のトルエン(0.4 g)溶液を加えスターラーで 10 分間攪拌した．この混合溶液を 4wt% PVA 水溶液（26 ml）へ滴下し，室温で 10 分，60℃で 1 時間攪拌しながら重合させた．得られた固体を単離し，イオン交換水及びエタノールで洗浄後，65℃で一晩乾燥させて目的物の UVA 混合 MC を得た．これらの合成に用いた UVA の種類，添加量及び試料番号を表 1 に示す．

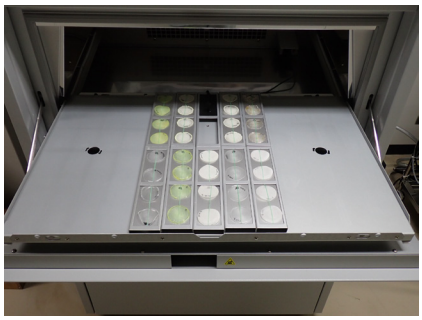
表 1　UVA 混合 MC について

MC 番号	UVA の種類	添加量 / g
A-1	フェルラ酸	0.02
A-2	フェルラ酸	0.05
B-1	ケルセチン	0.02
B-2	ケルセチン	0.05

表 2　促進耐候性試験の試料について

試料番号	UVA の種類
（ア）	フェルラ酸
（イ）	A-1
（ウ）	A-2
（エ）	ケルセチン
（オ）	B-1
（カ）	B-2

(a)



(b)



図 1　(a)促進耐光性試験の様子,
(b)屋外暴露試験の様子

2.2 UVA 混合 MC の促進耐光性試験

試験に用いた試料の試料番号及び UVA の種類については表 2 に示した．10 wt% PVA 溶液に UVA 混合 MC（0.16 g）を分散させ，60℃で一晩乾燥させることにより促進耐候性試験用のフィルムを作製した．比較対照として，ケルセチンとフェルラ酸 (1.0 mg) を 10 wt% PVA 溶液に分散させたフィルムを作製した．得られたフィルムに紫外線を照射し，照射時間

表 3　屋外暴露試験の試料について

試料番号	UVA の種類	混合割合 / wt%
X-1	A-2	0.5
X-2	A-2	2.0
X-3	フェルラ酸	0.5
X-4	フェルラ酸	2.0
Y-1	B-2	0.5
Y-2	B-2	2.0
Y-3	ケルセチン	0.5
Y-4	ケルセチン	2.0
Z	―――	―――

0, 24, 48, 72, 96, 190, 336 時間時点で拡散透過測定を行った. 拡散透過測定には, 紫外可視分光光度計（(株) 島津製作所製, UV-3600）に積分球付属装置を設置して測定した．紫外線照射は促進耐候性試験機（Q-Lab 製, Q-SUN Xe-3-HSE）を用い，放射照度 50 W/m^2, ブラックパネル温度 63℃，槽内温度 38℃，相対湿度 50%の条件にて行った．促進耐候性試験機への試料設置の様子を図 1(a)に示した.

2.3 屋外暴露試験

屋外暴露試験の試料番号, UVA の種類及び混合割合については表 3 に示した．UVA 混合 MC を 4wt% PVA 水溶液に表 3 の混合割合となるように分散させ, 230 番の耐水研磨紙で研磨した杉板（縦 150×横 70×厚さ 10 mm）に刷毛で塗布量 2.6 g となるように塗布し, 屋外暴露用の試験片を作製した. 対照として, 4wt% PVA 水溶液のみを塗布した試料を同時に試験した（表 3，試料 Z）.

塗布材は, 佐賀県工業技術センター (33°16’24.8’’N – 130°16’19.8’’E）において，令和 8 年 1 月 7 日から南面約 30 度に保持した状態で屋外暴露を行った (図 1(b))．試験開始 1, 3, 7, 10, 15, 20, 27,57 及び 72 日目にレーザー顕微鏡 (オリンパス (株) 製, OLS-4100) 及びデジタルカメラにて試料表面の観察及び測色計（コニカミノルタジャパン（株）製，CM-700d）にて色差を計測した.

2.4 色差測定

色差（ΔE*ab）は L*（明度），a*（赤み）及び b*（黄み）を測定し，試験前の各値を基準とした変化量（ΔL*，Δa*及びΔb*）から式（1）により算出した．測定条件は，光源を D65，視野角を 10 度，測色部の直径を 8 mm とし，1 試料につき 2 箇所の平均値を測定値とした.

$$\Delta E^*ab = \{(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2\}^{1/2} \quad \cdots (1)$$

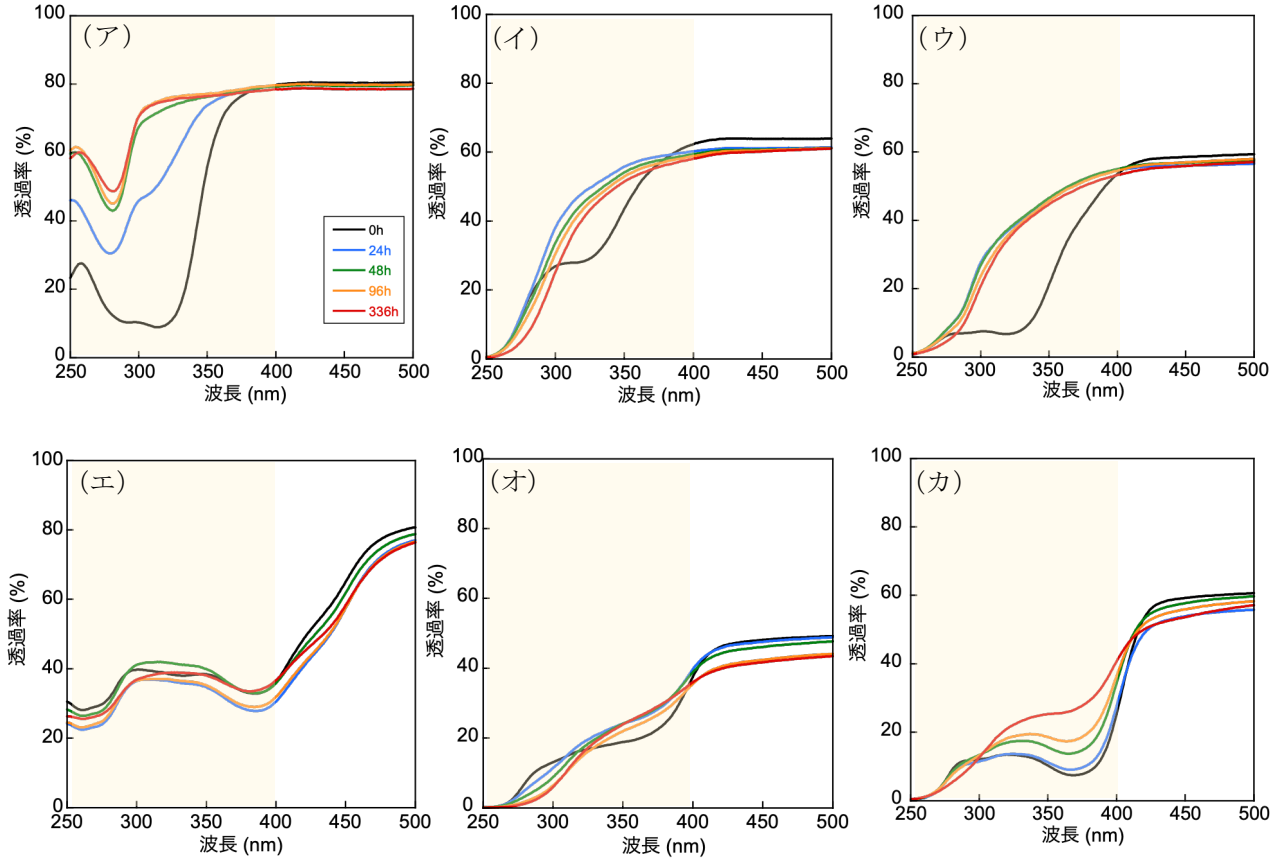


図２　促進耐光性試験による拡散透過スペクトルの経時変化

UVA の種類:（ア）フェルラ酸，（イ）A-1，（ウ）A-2，（エ）ケルセチン，（オ）B-1，（カ）B-2

3. 結果及び考察

3.1 UVA 混合 MC について

促進耐光性試験前後の UVA 混合 MC は，前報[7]にて報告したとおり，球状である．また，粒子径はレーザー顕微鏡画像から計測し，約 20 μm を中心とした 5 μm～50 μm の分布を持つことを確認した．

3.2 UVA 混合 MC の促進耐光性評価

木材の劣化を誘起する主な要因は紫外線であることが知られていることから，本研究では 250~400 nm の紫外線吸収特性について注目した．促進耐光性試験前後の拡散透過スペクトルを図 2 に示した．透過率（縦軸）が低いほどその波長の光をよく吸収することを示す．（ア）(UVA：フェルラ酸）は紫外線照射前には 370 nm より短波長側で透過率が低下し，約 320 nm で最も低くなった．紫外線照射直後から透過率が上昇し始め，336 時間後には 280 nm 付近のみとなった．フェルラ酸自身は，紫外可視吸収スペクトルにおいてエタノール中で 280～320 nm に強い吸収を示すことが報告されており[8]，このことから紫外線照射前の 320 nm 付近の低い透過率はフェルラ酸によるものと考えられる．また，フェルラ酸は紫外線照射により異性化し吸収帯が低波長シフトするとされており[9]，本実験でも同様の挙動が観察されたと考えられる．(イ）(UVA：A-1）及び（ウ）(UVA：A-2）においては，紫外線照射前は 320 nm 付近及び 250nm で最も透過率が低くなったが，24 時間後にはフェルラ酸の特徴である 320 nm 付近の紫外線吸収が消失したものの，300 nm 以下では低い透過率を維持した．このスペクトルは，フェルラ酸の水酸基をアシル化した化合物のエタノール中における紫外可視吸収スペクトルに類似しており，紫外線照射に伴いフェルラ酸と MC 成分が反応していることが示唆される[10]．

（エ）(UVA：ケルセチン）は，紫外線照射前には 500 nm より短波長側へ向かって透過率が低下し，380 及び 260 nm 付近での低い透過率が特徴的である．試験期間を通してスペクトルに大きな変化は見られなかった．一方，（オ）(UVA：B-1）及び（カ）(UVA：B-2）においては，紫外線照射時間の経過に伴い，380 nm 付近の透過率が上昇するものの，（エ）と比べる

と紫外線領域の透過率が低く維持された．また，290 nm 付近の透過率が減少する傾向が見られた．ケルセチンは極性溶媒中において紫外線照射により構造変化が生じ，375 nm の吸収極大が 295 nm にブルーシフトすることが報告されている[11]．これらのことから，MC 中でも紫外線照射により構造変化が生じていることが予想される．

屋外用塗料の UVA には 300 から 400 nm 付近の紫外線に安定であることが求められるが，MC 中のケルセチンはこの条件を満たすことを確認できた．

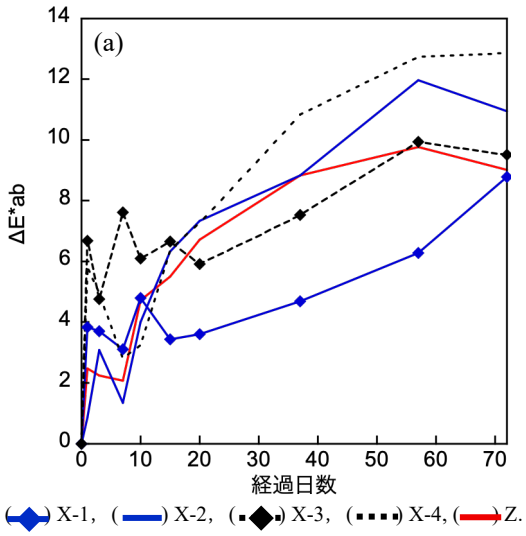
3.3 UVA 混合 MC の屋外環境における耐候性の検討

屋外環境に晒された塗膜中での UVA 含有 MC の耐久性を検討するために，屋外暴露試験を行った．PVA 塗膜は無色透明のため紫外線が木材まで到達し，木材を劣化させ，その様子が木材の変色として現れる．そこで，塗膜中に紫外線からの遮蔽効果が高い UVA があれば，木材へ到達する紫外線量が抑えられる．そこで，UVA 含有 MC の UVA としての有効性を確認するために，試験試料の色差変化の様子を観察した．

暴露期間全体に渡る色差の変化を図 3 に示した．図 3(a)フェルラ酸含有塗膜では，72 日経過後においても X-1 は Z と同等の色差変化であることが確認された．X-2, X-4 に対して X-1, X-3 の方が色差を抑制していることから，フェルラ酸含有量には紫外線遮蔽効果が最大になる最適な添加量があると推測される．図 3(b)ケルセチン含有塗膜では，MC への取り込み有無で色差に大きな差がみられ，Y-3 及び Y-4 の方が色差を抑制した．

フェルラ酸は紫外線に晒されると 300 から 400 nm の紫外線遮蔽効果を消失することを促進耐光性試験で確認している．しかし，屋外暴露試験においては，特に X-1 で良好な結果が得られており，この原因についてはまだ明らかとなっていない．しかし，X-3 に比べてフェルラ酸の含有量が少ない X-1 で屋外暴露 72 日目まで色差抑制効果が見られたことは興味深い結果であった．

促進耐光性試験から，ケルセチンは紫外線に安定であることがわかっている．屋外暴露試験においてもこの結果が示された．図 4 に Y-1 から Y-4 のレーザー顕微鏡による屋外暴露 1 日目の表面観察の結果を示す．Y-1 及び Y-2 は UVA 含有 MC の粒子がまばらに分散し，Y-3 及び Y-4 は黄色のケルセチン粉末が木材表面に隙間なく分散している．このことから，木材表面における分散状態の違いにより Y-3 及び Y-4 は物理的に木材母材表面へ到達する紫外線量



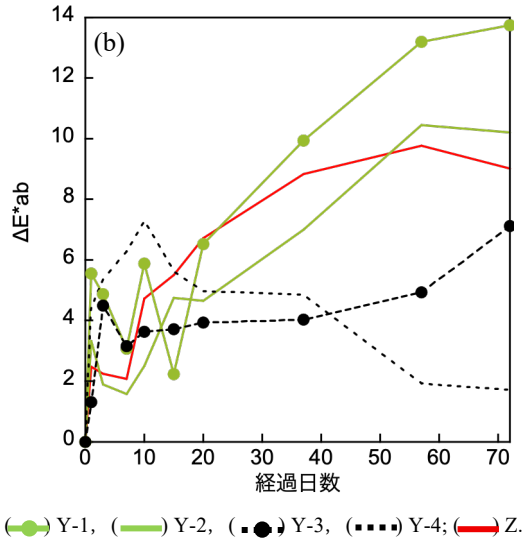


図 3　屋外暴露試験による色差の経時変化
(a)フェルラ酸含有塗膜，(b)ケルセチン含有塗膜

が少ないことも，色差が抑制された要因の一つと考えられる．

4. おわりに

バイオマス資源由来 UVA としてケルセチン及びフェルラ酸を用いた UVA 含有 MC について，屋外用木材水性塗料への適用可否を検討するために促進耐光性試験及び屋外暴露試験を行った．

促進耐光性試験では，フェルラ酸は MC への含有を問わず紫外線照射により構造変化し，UVA として採用した根拠である 320 nm の紫外線吸収能が失われたが，300 nm 以下では低い透過率を維持した．ケルセチンは紫外線に安定であるが，MC 中では構造変化を伴いゆっくりと透過率が上昇するものの，紫

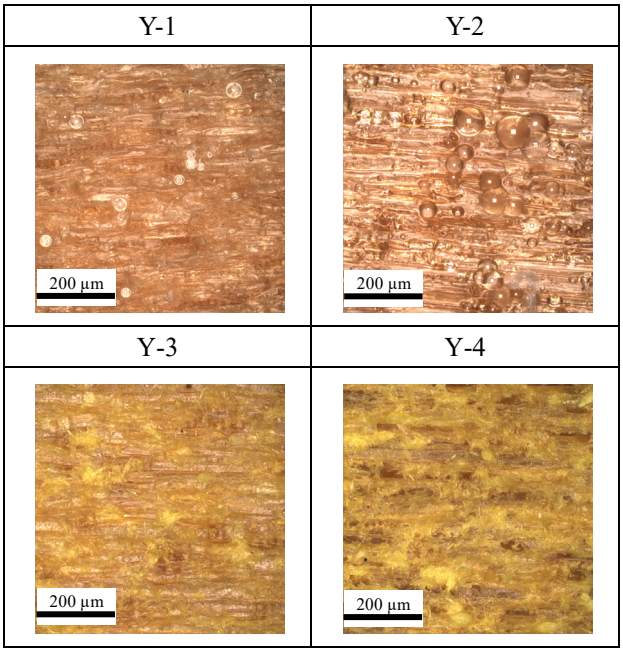


図４　レーザー顕微鏡観察（屋外暴露１日）

外領域（250~400 nm）の紫外線吸収能は保持されることがわかった.

屋外暴露試験では, フェルラ酸を MC に含有することで色差が抑制されることを確認し，紫外線遮蔽効果を発現するフェルラ酸の最適量があるものと推定された．ケルセチンは，MC 含有状態では紫外線遮蔽効果が確認できなかった．しかし，ケルセチンは MC 中でも紫外線に安定であることが確認できていることから，今後，MC 中への取り込み量を増加させることができれば，紫外線遮蔽効果も向上する可能性があると考えられる.

昨年度から, UVA の塗膜中での安定に保持する試みとして多孔質 MC への UVA の担持方法の検討, UVA 含有 MC の塗料添加剤への適用可否について検討を行ってきた．その結果，UVA 含有 MC は，難水溶性化合物が多いバイオマス資源 UVA を水性塗料へ分散させる方法として有用であることを確認できた.

一方, MC への UVA の含有量が少ないことなどの改善すべき点も明らかとなった.

本研究に使用した促進耐候性試験機，紫外可視分光光度計及びレーザー顕微鏡は電源立地地域対策交付金で導入した.

参考文献

1) 木口実, 改訂版木材の塗装, 木材塗装研究会編, 海青社, 235-237 (2010).
2) 久間俊平, 田栗有樹, 帆秋圭司, 平井智紀, 矢野昌之, 福元豊, 佐賀県工業技術センター研究報告書, No.29, 41-45 (2021).
3) (a) 矢野浩之，今井友也，工業材料，Vol.65, No.8, 18-23 (2017). (b) 近藤哲男，工業材料, Vol.65, No.8, 40-45 (2017).
4) 久間俊平, 帆秋圭司, 矢野昌之, 平井智紀, 田栗有樹, 佐賀県工業技術センター研究報告書, No.31, 47-51 (2023).
5) 久間俊平, 帆秋圭司, 矢野昌之, 田栗有樹, 佐賀県工業技術センター研究報告書, No.32, 41-45 (2024).
6) (a) 飛田成史，小林敦，吉原利忠，島田博文，オレオサイエンス，第 7 巻第 9 号 363-370 (2007). (b) 高木功男，色材協会誌. 44(10), 483-490 (1971).
7) 田栗有樹, 帆秋圭司, 久間俊平, 矢野昌之, 佐賀県工業技術センター研究報告書, No.33, 61-65 (2024).
8) 森 一ら，和歌山県工業技術センター，平成 20 年度研究報告書，p.15.
9) Thibaut Istasse, et al., Aanalytical Chemistry Insights, 11, 49-57 (2016).
10) (a)森 一ら，和歌山県工業技術センター，平成 20 年度研究報告書，p.4.
11) Stefano Dall'Acqua, et al., Molecules, 17, 8898-8907 (2012).

データ解析による生産設備の保全に関する研究（第 2 報）

生産技術部
大坪昭文　中野太郎

製造業において，生産設備の摩耗や疲労・劣化による不具合は避けられない現象である．従来，熟練技術者が装置の稼働音を聞く，あるいは掌で振動を感じるといった官能評価によって機器類の不調を捉え維持管理を行っていたが，信頼性・再現性に課題があった．また，少子高齢化に伴う人手不足や技能伝承問題が深刻化し，属人的な保全活動の維持が困難になってきており，IoT や AI などを活用した設備保全の省力化や自動化の必要性が高まっている．本研究では，生産設備の動力源として用いられる三相誘導電動機の状態診断技術の高度化を図るため，位相情報を含んだ電圧・電流波形データを計測・収集可能なエッジデバイスを試作し，重量物搬送用コンベア装置へ本デバイスを設置した．また，稼働データ収集を行う計測システムを構築して，実機における有効性を確認した．

1. はじめに

製造業において，主要な装置に故障が発生すると，修理のために生産ラインを長時間停止せざるを得ず，納期の遅延や生産計画の変更等，企業の生産活動に多大な影響を及ぼす．一方，生産設備の摩耗，疲労および劣化による不具合は避けられない現象であるため，従来は，熟練技術者による装置の稼働音の聴診や振動の触診等の官能評価によって，機器類の状態監視および維持管理が実施されてきた．しかしながら，これらの手法には信頼性および再現性の確保に課題がある．また，少子高齢化に伴う人手不足や技能伝承問題が深刻化し，属人的な保全活動の維持が困難になってきており，IoT（Internet of Things）や AI（Artificial Intelligence）などを活用した自動化や設備保全が急務とされている．

本研究では，三相誘導電動機（三相交流モータ）の電圧・電流波形などの生産設備稼働データに基づき，故障や劣化といった装置異常の予兆検知に関わる技術開発を行う．本年度は，位相情報を含む電圧・電流波形を計測・収集するエッジデバイスを試作開発し，重量物搬送用コンベア装置へ本デバイスを設置した．更に現場でのデータ収集を行う計測システムを構築して，実環境での有効性を確認した．

2. 計測システムの構築

2.1 交流電流・電圧測定用 IoT デバイスの開発

工場や生産現場では多くの設備機器が電力で稼働しており，ファン，ポンプ，搬送機などの動力源として用いられる三相誘導電動機は，生産効率の観点から安定した連続運転が求められる．しかし，長時間使用されることにより，動力源であるモータあるいは駆動機構が劣化すると，トルクやインピーダンスの変化，ローターとステータ間のエアギャップ変動などが発生し，モータの電流に微小な信号変化が生じることが予想される．このような変動を高感度に検出するために，電圧および電流波形をデジタルデータとして蓄積・分析し，装置の各種状態を診断することが，保全効率の向上に寄与するものと考えられる．

設備に用いられる駆動モータの多くは交流電源で動いており，電気信号は周期的に変化している（西日本では 60Hz）．これらの信号波形をデジタルデータとして取得するには，機器に供給される電源線に電流および電圧測定用アナログセンサを取り付け，電源周波数に対して十分に高いサンプリングレートを持つ計測デバイスが必要となる．

2.2 電流センサ

電流センサには，シャント抵抗型，CT（カレントトランス）型，ホール素子型等があるが，ここでは安価で機器の電源線に取り付けやすい CT 型を採用する（図 1）．センサからの電流値はシャント抵抗で電圧値に変換するが，プラス/マイナスの周期的なアナログ信号（図 2）なので，電流波形としてデジタル信号に変換（AD 変換）するためにはプラス領域に底上げ（オフセット電圧を加算）する電子回路が必要であり [1]，図 3 に示すように同じ値の抵抗 2 個で直流電源電圧を分圧し電流センサのグランド側につな

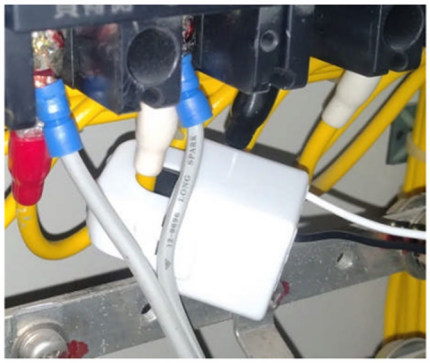


図 1　CT 型電流センサ

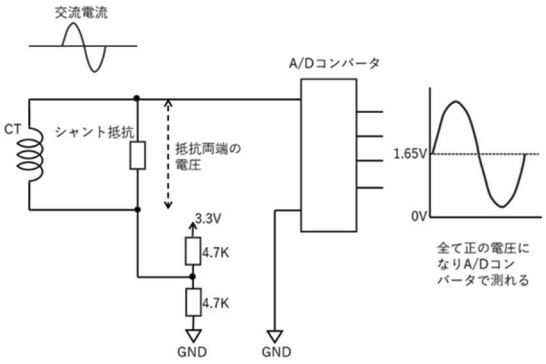


図 3　交流電流波形の測り方

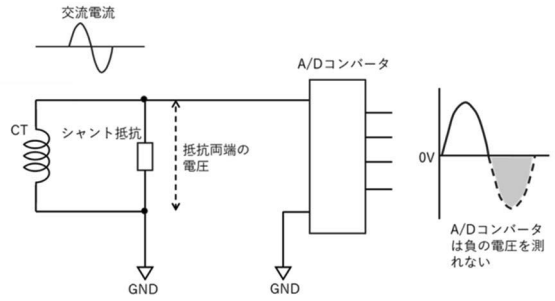
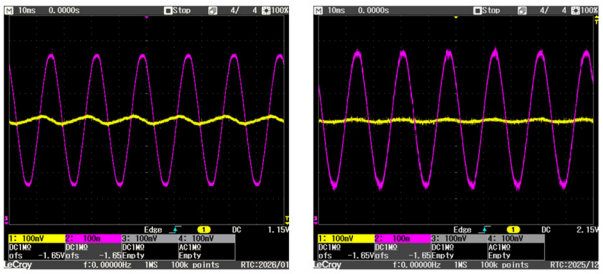


図 2　交流電流測定原理



(a) コンデンサ 0.1μF　　(b) コンデンサ 10μF

図 4　基準電圧のオフセット脈流対策

げる. ここで 200V 用電気ヒーターの電源線に CT 型電流センサを取り付け，シャント抵抗 50Ω の両端の波形をオスロスコープ（LeCroy 製 WaveJet 354A）で確認した（図 4(a)）. 電流波形（マゼンタ色）は 60Hz 周期として観察されたが，オフセット電圧には安定化のため 0.1μF のコンデンサを入れていたにもかかわらずオフセット電圧を加算したゼロＶ波形（黄色）に脈流が見られた．コンデンサを 10μF まで増やし脈流を減らしている（図 4(b)）が，基準値の傾向としてデータ収集しておくこととする.

2.3 電圧センサ

交流電圧波形を測定するためにはトランスを用いてマイコンに入力できる電圧レベルに変換し，電流波形計測と同様にオフセット電圧を加算する電子回路が必要となる．ここでは交流 200V をマイコンの電源電圧 Vcc のレベルへ変換する市販の交流用電圧センサ（ZMPT101B）を利用する. 本センサの動作確認のため 200V 用電気ヒーターを用いて，その電源線の交流電圧計測外観を図 5 に示すとともに，その波形をオシロスコープで観測した（図 6）. 200V 入力波形（黄色）に対し出力波形（マゼンタ色）とには位相のずれが見られる．これは交流用電圧センサの回路における２段の反転増幅とバンドパスフィルタの結果と考えられる. 200V 用電気ヒーターにおける電流センサと電圧センサからの波形をオシロスコープで確認した（図 7，電圧は黄色：電流はマゼンタ色）. 電気ヒーターは電気回路素子としては抵抗なので，原理的に電流と電圧の位相差は生じないが，電圧センサの特性から周期のずれが生じているため，収集した波形データを分析する際はこの位相差を考慮する必要がある.

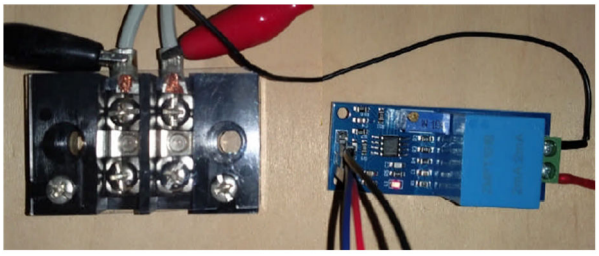


図 5　交流電圧計測の外観

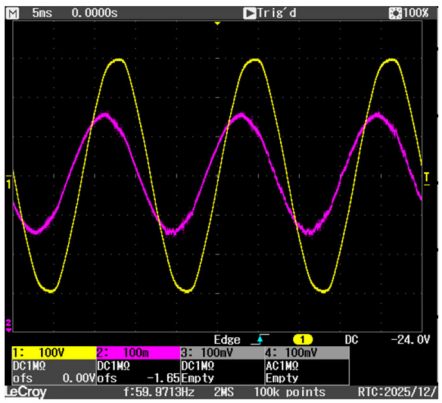


図 6　AC200V 交流電圧の入力波形（黄色）と
出力波形（マゼンダ色）
2 回の反転増幅により位相が 2π 弱遅れている

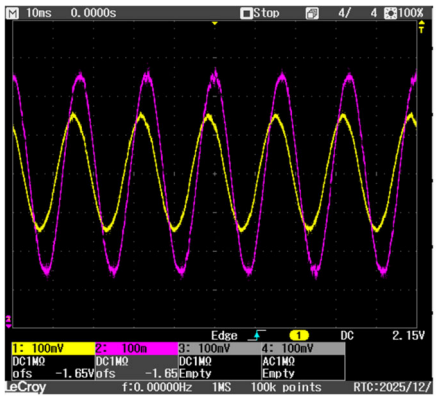


図 7　センサ出力後の電圧（黄色）と電流（マ
ゼンダ色）のアナログ波形

3. IoT デバイスの設計製作

交流電流センサから２個，交流電圧センサから１個，計３個のアナログ信号をデジタルデータ化するため A/D 変換を行う IoT デバイスを設計製作する．ここでは，マイコンに M5Stack Basic [2)]を採用する．このマイコンは WiFi の通信規格が利用できるため昨年度構築した API サーバ[3)]に送信可能であり，CPU はデュアルコアの ESP32，フラッシュメモリ 16 MB SPI を搭載し高速なプログラム実行が可能である．また，Grove インターフェース（汎用コネクタ）をはじめ，I2C，SPI 規格などに対応し拡張性に優れており様々な IoT アプリケーションの開発に広く利用できる．プログラミングの統合開発環境（IDE）としては，Microsoft 社の Visual Studio Code（VS Code）を使用し C++言語で開発した．

マイコンの M5Stack Basic の A/D 変換用入力ポートが２個だったため，別途 AD 変換 IC として入力数８チャンネル 12 ビットの分解能をもつ MCP3208 を用いる．MCP3208 は SPI 通信インターフェースにより M5Stack Basic から制御することができる．図 8 に交流電流・電圧波形計測用 IoT デバイス回路図を，図 9 に交流電流・電圧波形計測用 IoT デバイスの外観を示す．なお，M5Stack Basic とのインターフェース用にオリジナルの拡張基板を設計試作して，電流センサ，電圧センサ，および AD 変換 IC などを配置した．

交流電源の周波数は 60Hz（西日本の場合）なので，その周期は約 16.7m 秒である．1 周期の波形を 20 点で離散化するために約 800μ 秒間隔でサンプリングした．測定時間は 50 周期分の約 0.8 秒とする．電流についてはオフセットした基準値と実際の測定値を，電圧については実際の測定値を，1 サンプリングで３回 A/D 変換することになる．M5Stack Basic では約 0.8 秒間計測した後，３つの波形を液晶上にグラフ表示している．グラフ表示するのに時間を要するため結果として約 1 秒間隔での波形観測となる．また，直近の 50 周期分のデータを 30 秒間隔で API サーバへ WiFi 経由で送信している．サーバ側では受信したデータをファイルとして保存している．

計測した 200V 用電気ヒーターにおける電流と電圧の波形の例を図 10(a)に示す．オシロスコープでの観測（図 7）の際と同様に電流と電圧の波形に位相差が見られる．図 10(b)は電流と電圧の波形の位相差を補正して同位相にした場合である．企業の工場や生産現場で電動機が使用されている場合，負荷変動で位相差（力率）を観測する必要が出てくることが考えられるので，分析の際の前処理として考慮する必要がある．

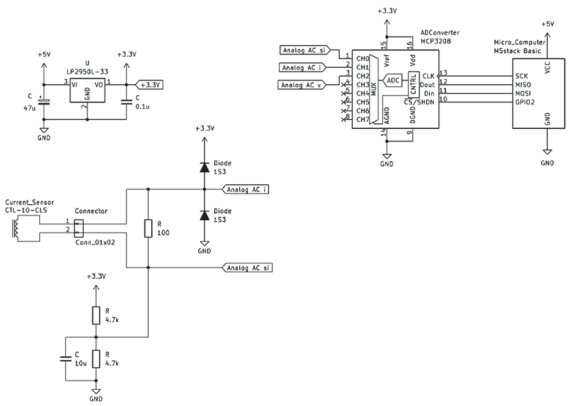


図 8　交流電流・電圧波形計測用
IoT デバイス回路図

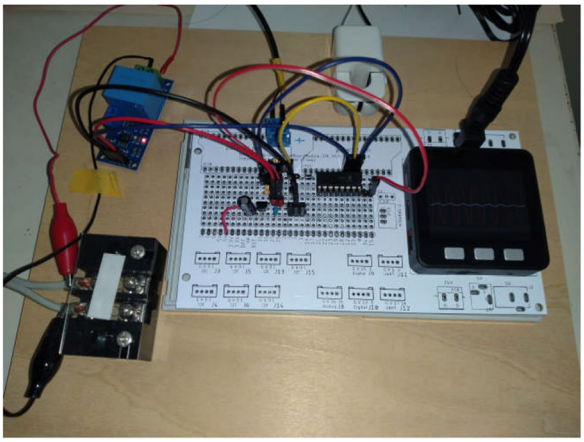
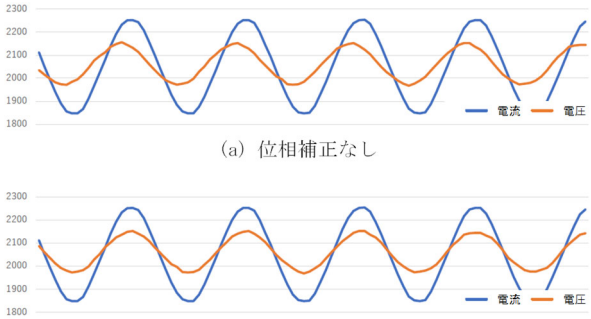


図 9　交流電流・電圧波形計測用
IoT デバイス回路の外観



（a）位相補正なし

（b）電圧波形を19/21サンプリング進めたもの

図 10　A/D 変換後の電流電圧波形比較

4. おわりに

本研究では，三相誘導電動機の状態診断に向けた電圧・電流波形の解析技術の高度化を目的とし，位相情報を保持した波形データを収集する IoT エッジデバイスの開発に取り組んだ．従来，電気信号の計測システムは高価な専用機器に依存することが多く，生産現場への導入にはコスト面での課題があった．そこで，CT 型電流センサと小型電圧センサ（ZMPT101B）を組み合わせることで，低コストかつ電源線への取り付けの容易性を確保した．また，マイコンの性能とデータ送信効率のバランスを考慮し，M5Stack Basic と外部 AD 変換 IC（MCP3208）を用いた構成により，800μ 秒間隔（1 周期約 20 点）のサンプリングで波形計測しながら，液晶ディスプレイによる現場での波形確認機能と WiFi による定期的なデータ送信機能を実装した．

開発にあたっては，電流センサのオフセット電圧に脈流が生じるという回路設計上の課題を，コンデンサ容量の最適化により緩和できることを実験的に確認した．また，電圧センサの位相特性に起因する電流波形との位相差を定量的に把握し，データ解析前処理において位相補正が可能であることを示した．これらの検討により，計測データの信頼性向上に向けた具体的な設計指針を得ることができた．

実際に 200V 電気ヒーターを用いた検証実験において，約 0.8 秒間（50 周期分）の連続波形を 1 秒間隔で観測し，30 秒間隔でサーバへ送信するという実環境での運用が可能であることを確認した．特に，純抵抗負荷においても位相差が検出されたことから，センサ特性を考慮したデータ補正の重要性が明らかとなった．

現在，開発したデバイスを重量物搬送用コンベア装置に設置し，実稼働データの収集を継続している．今後は，収集した電圧・電流データに基づき，波形の微小変動から異常の兆候を検知する解析技術の開発に取り組む予定である．

参考文献

1) 電流センサ：下島健彦, IoT 開発スタートブック，昭和情報プロセス株式会社，137-166（2019）
2) M5StackBasic, https://docs.m5stack.com/ja/core/basic
3) 中野太郎，大坪昭文，データ解析による生産設備の保全に関する研究（第 1 報），佐賀県工業技術センター研究報告書，2025，No.33，p.67-70.

家具商品開発における生成 AI の活用手法に関する調査研究（第１報）

諸富デザインセンター
佐藤彰　辛川洋介

本調査研究では，諸富家具産地における商品開発力の向上及び効率化を目的として，デザイン思考を用いた商品開発のプロセスに基づき，過去に産地企業と共同で取り組んだ家具開発と同じプロセスで生成 AI を活用した家具開発を実施し，その有用性について比較検証を行った．なお，本報における対象プロセスは，デザイン思考に基づく開発プロセスのうち「共感」から「言語によるアイデア創出」までとした．比較検証した結果，生成 AI は所要時間の大幅な短縮に加え，複数のアウトプットを同時に生成できることや，多角的な視点による上位概念での問題の再定義が可能であることが確認された．特に，問題定義のリフレーミング（問題の再定義）及びアイデア創出のプロセスにおいては，発想の幅を広げる手段として，産地企業の商品開発への活用に有効であることが示唆された．

1. はじめに

近年，AI 技術の急速な進展に伴い，生成 AI ツールの活用が多様な分野において拡大している．プロダクトデザインやグラフィックデザイン，パッケージデザインなどの分野においても，生成 AI の活用が進んでおり，商品開発力の向上や効率化が期待されている．また，商品開発やマーケティングの分野では，商品やサービスの対象となるユーザー像を年齢・性別・職業・生活スタイル・価値観などから，具体的に設定した仮想の人物モデルである「ペルソナ」を基に商品を開発する手法が広く用いられている．最近では，生成 AI により実在の人物のように作成された，詳細で高精度な人物モデルである「AI ペルソナ」が活用されており，ユーザーニーズの把握など，商品開発における商品力の向上や効率化を図る手法として注目されている．

一方，佐賀県を代表する地場産業である諸富家具産地の企業においては，商品開発に関する知識や経験を有する人材が限られており，3DCAD や CG 等のデジタルツールを活用できる人材も不足している．また，人材育成や商品の企画開発の体制整備に十分なリソースを割くことが難しい状況にある．

そこで，本調査研究では，家具の商品開発において生成 AI を活用する有用性を検証し，諸富家具産地の企業にその活用方法を普及することを目的とする．本報では，過去に産地企業と共同で取り組んだ家具開発と同じプロセスで生成 AI を活用した家具開発を実施し，両者を比較した結果を報告する．

2. 検証方法

デザイン思考を用いた家具開発研究 [1)-3)] の成果に基づき，過去に産地企業と家具開発を行った時と同じプロセスで生成 AI を活用した家具開発に取り組んだ．産地企業と開発した家具は商品化に至り，現在も販売されていることから，その有用性が確認されている．

そこで，この家具開発における各プロセスでのアウトプット（所要時間，出力数，多様性）をベンチマークとして位置付けて比較検証した．表 1 に過去に産地企業と取り組んだ開発プロセスと実施内容の概要を示す．本年度は，全プロセスのうち，言語によるアイデア創出（コンセプト段階）までを対象範囲とした（表 1 赤枠部）．

生成 AI を活用した家具開発では，学習データに起因する著作権侵害及び入力内容が学習に利用されるリスクを回避するため，公的な統計データや独自のマーケティングデータに基づいて構築された生成 AI ツール（サービス）の AI ペルソナを使用した．

3. 家具開発の実施内容と結果

本章では，産地企業との家具開発と生成 AI を活用した開発による実施内容とその結果を示すとともに，比較検証において設定した統一条件を示す．

3.1 産地企業との共同による家具開発

3.1.1 実施体制

産地の家具メーカーにおける経営，設計，小売，営業，製造の各部門に所属する 6 名によりチームを

表１　開発プロセスと実施内容

プロセス	実施内容
(1) 共感	① 事実の収集
	② 本質的課題の抽出（仮説化）
(2) 問題定義１	解決すべき問題を定義
(3) 問題定義２	リフレーミング （多角的な視点で問題を捉え直し，上位概念で再定義）
(4) アイデア創出	① 言語によるアイデア創出 （コンセプト段階）
	② ビジュアルなアイデア創出
(5) プロトタイプ	ラフモデル等の作製によるアイデアの有用性の確認
(6) テスト	使用・体験用プロトタイプによる検証及びフィードバックの取得

編成し，当センター職員１名のファシリテーションのもと実施した（図１）.

3.1.2 実施テーマ

「リビング及びその周辺空間」を対象フィールドとし，潜在ニーズを満たす新規性のある商品の開発をテーマとした.

3.1.3 実施時間

「共感プロセス」から「アイデア創出プロセス（言語によるアイデア創出）」に至るまでに要した時間は約 20 時間であった（期間は約１ヶ月間）.

3.1.4 各開発プロセスの実施内容と結果

(1) 共感プロセス（事実の収集，本質的課題の抽出）

「リビング及びその周辺空間」を対象フィールドとし，自宅や知人宅等において，観察・インタビュー・体験により事実に関する情報を収集した．チームが捉えた全ての事実を言語化したものを表２に示す.

これらの情報を基に，「仕事や家事等で忙しい人は，部屋をきれいに片づけたいが，常に持ち出すものを仕舞い込むかたちで収納することは毎日できないのでは？」という仮説を本質的課題として抽出した.

(2) 問題定義プロセス１（解決すべき問題の定義）

抽出した本質的課題に基づき，解決すべき問題を「日常的に使用する物を，どうすればきれいに収納することができるか.」と定義した.

(3) 問題定義プロセス２（リフレーミング）

定義した問題が表層的な内容に留まっていたため，多角的な視点で捉え直し，上位概念に基づき再定義した．その結果，「日常的に使用する物の収納を，どうすれば無理なく習慣化できるか.」と定義した.

(4) アイデア創出プロセス（言語による創出）

言語によるアイデア創出を行い，「身近にある」「気軽に置ける」「圧迫感がない」などのキーワードを基に，「椅子に物を置くような感覚で使用できる収納アイテム」というコンセプトを創出した.

3.2 生成 AI を活用した家具開発

本調査研究では，産地企業との家具開発と生成 AI を活用した開発を比較するため，対象フィールドは

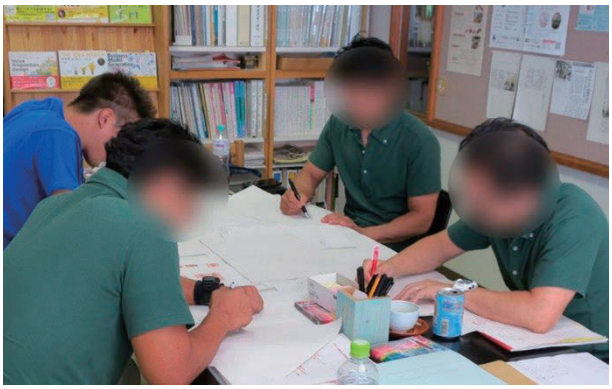


図１　産地企業メンバーによる実施の様子

表２　事実として入力した情報

- 脱いだ服やカバン・バッグがソファの上に乗っている.
- バッグを壁のフックに吊り下げている.
- バッグをリビングの床に置いたままにしている.
- どれだけ片づけてもすぐ散らかる.
- 家に帰ってきて，身に着けている小物は，そのままオープン棚の上に置く.
- 外から帰ってきて，脱いだ服もズボンもチェアの背もたれに無造作に掛ける.
- チェアの上にバッグを置いている.
- ベッドの上に服や財布やスマートフォン，鍵，こどものおもちゃなどが無造作に置かれている.
- ソファの上に畳んだ服が置かれている.
- 通勤の車の中にバッグは置きっぱなしにしている.
- 鍵，財布をダイニングテーブルの上に無造作に置きっぱなしにしている.
- 財布，スマートフォンはデスクの上に置きっぱなしにしている.
- メガネと時計をオープンシェルフの棚の上に置いている.
- ダイニングテーブルの上に子供たちの荷物を置いている.
- キッチンカウンターの上に時計を置いている.
- バッグをチェアの上に置いてから中身の出し入れをしている.
- ダイニングテーブルの上に手帳や文房具を置いている.
- バッグは床に置きたくない.
- 使いたいものが近くにあったらいいと思う.
- 楽に片づけたい.
- カバンの置き場所に困っている.

同様に「リビング及びその周辺空間」とした．また，生活スタイル，性別，年齢，家族構成，価値観等の異なる AI ペルソナを 17 人選定し，同一の開発プロセスとプロンプトを用いて実施した（図 2）．各プロセスにおける指示は一度のみ実施した．表 3 に実施したプロセス及びプロンプトの概要を示す．

3.2.1 実施体制

当センター職員 1 名により行った．

3.2.2 実施時間

「共感プロセス」から「アイデア創出プロセス（言語によるアイデア創出）」までに要した時間は，プロンプト入力作業時間を除き，AI ペルソナ 1 人あたり約 20 秒であった．

3.2.3 各開発プロセスの実施内容と結果

実施結果については，選定した 17 人の AI ペルソナのうち代表例として，以下の 1 人の AI ペルソナにおける出力結果を示す．

＜AI ペルソナの代表例のプロフィール＞

- 年齢：53 歳
- 性別：男性
- 居住地：東京都心近郊のマンション
- 家族構成：妻及び子ども 2 人の 4 人家族
- 職業：医薬品メーカーの営業職
- 役職：部内のリーダー的立場
- 価値観：健康及び安定志向
- ライフスタイル：仕事と家庭生活に加え，運動や趣味（ゴルフ）を日常的に楽しむ．

(1) 共感プロセス（事実の収集，本質的課題の抽出）

使用した生成 AI サービスに入力可能な画像数（行動観察の写真）に制限があり，画像選定に伴うバイアスを排除するため，産地企業との家具開発で収集した事実と同じテキストベースの情報を入力した（表 2）．また，本質的課題の抽出には「○○な人は，本当は○○したいのでは？」という定型文を用いた．

その結果，日常的に使用する物の置き方に関する行動傾向として，「使用後すぐに手の届く位置へ一時的に配置する」「収納行為を後回しにする」といった特徴が整理され，それに対応する潜在ニーズとして，「手間なく置ける定位置の確保」や「迷わず使用できる収納環境の構築」等が抽出された．生成された実際のアウトプットを以下に示す．

- 「脱いだ服やカバンをソファやチェアに置いてしまう人は，本当は“すぐ手に取れる，片付けやすい定位置”を作りたいのでは？」
- 「家に帰ってきて小物を棚やテーブルに無造作に置く人は，本当は“手間なく置けて，すぐ使える収納”を求めているのでは？」
- 「バッグの置き場所に困っている人は，本当は“清潔で，迷わず置ける専用スペース”を欲しいので

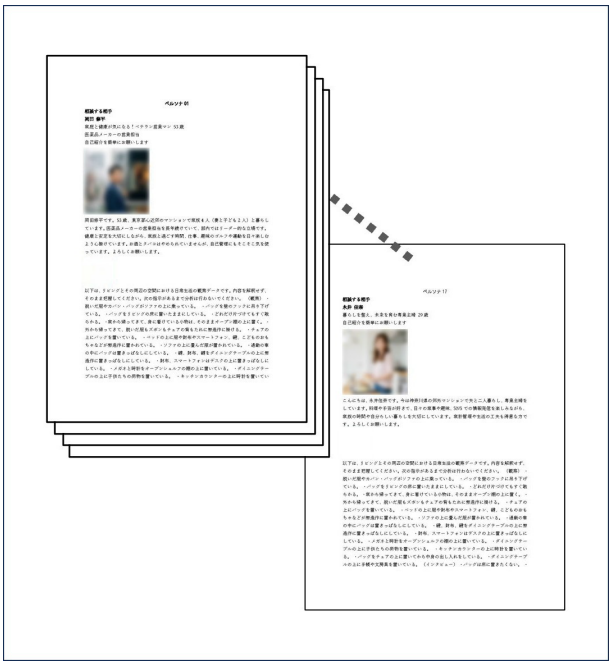


図 2　AI ペルソナへの実施結果（イメージ）

表 3　実施したプロセスとプロンプト

プロセス	実施内容	プロンプト
(1)共感	①事実の収集（入力内容は表 2 のとおり）	以下は，リビングとその周辺の空間における日常生活の観察データです．内容を解釈せず，そのまま把握してください．次の指示があるまで分析は行わないでください．
	②本質的課題の抽出	上記の観察データをもとに，「○○な人は，本当は○○したいのでは？」という形式で，本質的課題を抽出してください．
(2)問題定義 1	解決すべき問題を定義	上記で抽出した本質的課題それぞれについて，「どうすれば○○できるか．」という形式で，問題定義を作成してください．
(3)問題定義 2	リフレーミング	上記の問題定義それぞれについて，視点や前提を変えてリフレームしてください．
(4)アイデア創出	言語によるアイデア創出（コンセプト段階）	上記のリフレームされた問題定義それぞれについて，解決するための具体的なプロダクト案を提案してください． 実際の利用シーンがイメージできる，現実的な内容としてください．

は？」

(2) 問題定義プロセス１（解決すべき問題の設定）

抽出した本質的課題に基づき,「どうすれば○○できるか.」という形式で問題を定義させた.その結果,収納のしやすさ，即時性，衛生性等の観点から複数の問題が定義された．生成された実際のアウトプットを以下に示す.

・「どうすれば,すぐ手に取れて片付けやすい定位置を作れるか.」
・「どうすれば,手間なく置けてすぐ使える収納を実現できるか.」
・「どうすれば,清潔で迷わず置けるバッグの専用スペースを用意できるか.」

(3) 問題定義プロセス２（リフレーミング）

定義された解決すべき問題が表層的であったため,「どうすれば○○できるか.」という定型文を用いて多角的な視点による上位概念での問題の再定義（リフレーミング）をさせた.

その結果,「行動動線との整合」や「使用の習慣化」,「生活感の許容」といった上位概念に基づく問題へと再定義された．生成された実際のアウトプットを以下に示す.

①「どうすれば，すぐ手に取れて片付けやすい定位置を作れるか.」に対する再定義
・「どうすれば,家族みんなが自然とその場所に置きたくなる仕組みを作れるか.」
・「どうすれば，動線の中で無理なく“置く・取る”が完結するスペースを設計できるか.」
・「どうすれば，散らかしてもストレスが少なく，すぐリセットできるルールを作れるか.」

②「どうすれば，手間なく置けてすぐ使える収納を実現できるか.」に対する再定義
・「どうすれば,使う頻度や用途ごとに最適な“置き場”を分けられるか.」
・「どうすれば，見た目を気にせず，生活感のある収納を許容できるか.」
・「どうすれば，置きっぱなしでも機能的な“見せる収納”として成立させられるか.」

③「どうすれば，清潔で迷わず置けるバッグの専用スペースを用意できるか.」に対する再定義
・「どうすれば,バッグのサイズや形状に合わせてフレキシブルに対応できる置き場を作れるか.」
・「どうすれば，家の中でも“外と中”を分けて衛生面を意識した収納を設けられるか.」
・「どうすれば,帰宅後のルーティンに自然と組み込める“バッグ置き場”をデザインできるか.」

(4) アイデア創出プロセス（言語による創出）

リフレーミング後の問題定義に対し，それぞれを解決する具体的なプロダクト案を提案させた．出力はビジュアルや仕様には踏み込まず，利用シーンを想定したコンセプトレベルに留めた.

その結果，動線上での使用を前提とした収納家具や，可変性・柔軟性を備えた収納システム，衛生面に配慮した置き場の提案など，複数のコンセプトが生成された．これらはいずれも，日常行動の延長上で無理なく使用できることを重視した提案であった.生成された実際のアウトプット例を以下に示す.

（問題定義）
「どうすれば，家族みんなが自然とその場所に置きたくなる仕組みを作れるか.」
（プロダクト案）
マグネット式多機能収納ボード（玄関～リビング動線用）
・玄関からリビングへの動線上に設置する大きめのマグネットボード.
・服やバッグ，鍵，スマホなど，よく使うアイテムを“ポン”と掛けたり置いたりできるフックやトレイが自由に付け替えられる.
・家族それぞれの名前ラベルやアイコンで“自分の場所”を作れるので，帰宅後に自然とそこに置く習慣ができる.
・例えば，帰宅したら家族が順番にボードへバッグやコートを掛けて,必要なものをすぐ取れる.

（問題定義）
「どうすれば，使う頻度や用途ごとに最適な“置き場”を分けられるか.」
（プロダクト案）
用途別オープン棚＋トレイセット（リビング・ダイニング兼用）
・リビングやダイニングの壁面に，用途別に区切られたオープン棚とトレイ（例えば「仕事」「学校」「趣味」など）を設置.
・使うものを棚ごとに分けて置くことで，探す手間もなくなり,使った後はトレイごと戻すだけ.
・棚は見せる収納としてデザイン性もあり，生活感を許容しつつ機能的.
・例えば，仕事用バッグは“仕事トレイ”へ，子供のランドセルは“学校棚”へ置くだけ.

（問題定義）
「どうすれば，バッグのサイズや形状に合わせてフレキシブルに対応できる置き場を作れるか.」
（プロダクト案）

高さ・幅調整可能なバッグスタンド&除菌トレー（玄関・リビング入口用）

・玄関やリビング入口に，バッグのサイズや形状に合わせて高さ・幅を調整できるスタンドを設置.
・バッグを置く部分には除菌シートや抗菌トレーがセットされていて，帰宅後に置くだけで衛生面も安心.
・バッグの定位置が目立つので，迷わず置く習慣ができる.
・例えば，通勤バッグは玄関のスタンドへ置き，帰宅時に除菌してからリビングへ持ち込むか，そのまま置いておく.

4. 結果及び考察

本章では,産地企業との家具開発と生成 AI を活用した開発について，各開発プロセスにおける所要時間，出力数及び多様性の観点から比較した結果を示すとともに，その特徴について考察する.

4.1 所要時間の比較

共感プロセスからアイデア創出プロセス（言語による創出）までに要した時間を表 4 に示す．生成 AI を活用した場合，産地企業による実施と比較して，短時間でアウトプットを得ることが可能であった.

また，産地企業では，関係者間のスケジュールや他業務との調整が必要であり，実施に約 1 ヶ月間要したのに対し,生成 AI では短時間での実施が可能であった．加えて，産地企業での実施においては，1 人あたり 20 時間の作業であっても，6 人で実施する場合には延べ 120 時間分に相当する．このことからも，時間短縮の効果は非常に大きいと考えられる.

表 4　所要時間の比較

プロセス	産地企業	生成 AI (1 ペルソナ)
(1) 共感 （本質的課題の抽出）	約 6 時間	約 5 秒
(2) 問題定義 1 （解決すべき問題の定義）	約 4 時間	約 5 秒
(3) 問題定義 2 （リフレーミング）	約 4 時間	約 5 秒
(4) アイデア創出 （言語によるコンセプト）	約 6 時間	約 5 秒
所要時間合計	約 20 時間	約 20 秒
所要期間	約 1 カ月	―

4.2 出力数の比較

本事例における各プロセスにおける出力数の比較を表 5 に示す．生成 AI は，単一の入力情報から複数の本質的課題及び問題定義を同時に生成することが可能であり，リフレーミング及びアイデアについても定義した各問題に対して複数提示された．一方，産地企業による実施では，問題定義プロセス以降の出力が限定される傾向が見られた.

表 5　出力数の比較

プロセス	産地企業	生成 AI (1 ペルソナ)
(1) 共感 （本質的課題の抽出）	6	3
(2) 問題定義 1 （解決すべき問題の定義）	1	3
(3) 問題定義 2 （リフレーミング）	1	9
(4) アイデア創出 （言語によるコンセプト）	1	12

4.3 多様性の比較

本事例における出力内容の多様性について整理した結果を表 6 に示す．生成 AI では，異なる視点から複数のアウトプットが出力された．特に，リフレーミングにおいては，行動，空間，心理など複数の観点から問題が再定義された．一方，産地企業による実施では，問題定義プロセス以降のアウトプットの広がりが十分に得られなかった.

5. おわりに

本調査研究では,家具商品開発における生成 AI の活用方法について，産地企業の開発プロセスを基準に同一条件で比較検証を行った結果,生成 AI は所要時間の大幅な短縮や複数のアウトプットの同時生成,多角的な視点による問題定義において有効であり，特にリフレーミング及びアイデア創出段階の発想の幅を広げる手段として有用であることが示唆された.

一方，産地企業による実施では，問題定義プロセスにおける出力数や多様性の面で限定的な傾向が見られたものの，実際の生活実態や経験に基づいた具体性の高いコンセプトが創出されており，実現性の観点で重要な役割を果たしていると考えられる.

以上より,生成 AI は商品開発の初期段階における発想支援に有効であり，人間の知見と組み合わせて活用することで，産地企業の商品開発力の向上及び効率化が期待される.

今後は，後続プロセスへの活用について検証を進めるとともに，産地企業における実践的な導入手法

表 6　多様性の比較

プロセス	産地企業	生成 AI （選定したペルソナ）
(1) 共感 （本質的課題の抽出）	・効率よく使える ・簡単に使える ・手の届くところに置ける ・分かりやすい ・快適に使える ・動線に合っている	・効率よく使える ・簡単に使える ・手の届くところに置ける ・分かりやすい ・快適に使える ・動線に合っている ・清潔に保てる
(2) 問題定義 1 （解決すべき問題の定義）	・きれいに収納する	・片付けやすくする ・手間を減らせる ・すぐ使える ・清潔に保てる ・置き場所を分かりやすくする
(3) 問題定義 2 （リフレーミング）	・片付けを習慣にする	・自然に置きたくなる仕組みにする ・動線の中で完結できる収納にする ・すぐにリセットできるようにする ・用途や頻度に応じて配置できるようにする ・生活感を気にしないで見た目をよくする ・サイズや形に合わせて使えるようにする ・片付けを習慣にする
(4) アイデア創出 （言語によるコンセプト）	・斜めに立てかける収納アイテム	・マグネット式多機能収納ボード ・用途別オープン棚（トレイ付き） ・サイズ調節可能なバッグスタンド

の検討及び普及に取り組む予定である.

参考文献

1) 佐藤彰, 辛川洋介, 川口比呂志. 諸富家具産地におけるデザイン思考を活用した新たな商品開発手法の構築（第 1 報）, 平成 28 年度研究報告書, 2017, No.25, p.37-43
2) 佐藤彰, 辛川洋介, 川口比呂志. 諸富家具産地におけるデザイン思考を活用した新たな商品開発手法の構築（第 2 報）, 平成 29 年度研究報告書, 2018, No.26, p.51-57
3) 佐藤彰, 辛川洋介, 川口比呂志. 諸富家具産地におけるデザイン思考を活用した新たな商品開発手法の構築（第 3 報）, 平成 30 年度研究報告書, 2019, No.27, p.47-53

萌芽的独創研究

醸造副産物を活用した美容製品の開発に関する研究

食品コスメ部
岩元彬　柘植圭介
宮島醤油株式会社
尾上亜美

食酢発酵時に形成する酢酸菌膜の美容効果を評価するため，酢酸菌膜エキスのヒト線維芽細胞由来エラスターゼへの影響を調べた結果，酢酸菌膜エキスは濃度依存的にエラスターゼ活性を阻害した．続いて，酢酸菌膜エキス成分中のエラスターゼ活性阻害因子を特定するため，簡易ゲル濾過カラム及び固相抽出カラム，低分子用サイズ排除クロマトカラムを用いて分画したところ，172-556 Da の Fraction 14 に強いエラスターゼ活性阻害作用を認めた．LC-MS を用いた成分の分析の結果，Fraction14 には 2-4 個のアミノ酸からなるペプチドが多く含まれることが示された．なかでも，ピークエリアの大きかった A，P，S，L からなるペプチドに着目し，合成した 8 個のペプチドのエラスターゼへの影響を評価したところ，SLPA と SLPA が著しいエラスターゼ活性阻害を示した．また，LC-MS/MS を用いた解析では，Fraction 14 中に SLPA が検出された．これらの結果から，酢酸菌膜エキスがエラスターゼ活性を阻害することを見出し，その活性成分の一つは SLPA ペプチドであることを明らかにした．本研究によって，酢酸菌膜がシワやタルミの原因となるエラスチン分解を抑制する効果を有する可能性を示すことができた．

1. はじめに

佐賀県では，地域創生の取り組みとして，「美と健康に関するコスメティック産業を集積させ，コスメに関連する自然由来原料の供給地となることを目指すコスメティック構想」を推進しており，当センターでも県内素材の美容効果の検証を行ってきた．その結果，イチゴ葉エキスやレンコンポリフェノールが炎症性サイトカインやコラゲナーゼ産生を抑制することや[1-3]，キヌアがコラーゲン産生増強効果や分解阻害効果を有すること[4]，褐藻綱ノコギリモクが抗炎症成分 Sargahydroquinoic acid や Sargaquinoic acid を含むこと等を見出してきた[5]．

また，近年では地域資源そのものだけでなく，微生物発酵により，美容機能を高めた発酵化粧品が注目されている．発酵化粧品成分としてはコウジ酸やグルコシルセラミドなどがよく知られるが[6,7]，最近はライスパワーエキスなど地域の伝統産業を活かした発酵化粧品原料が開発されるようになってきた[8]．

食酢は，古くから調味料として広く親しまれている発酵食品であり，伝統的な製造方法として静置発酵法が知られている．静置発酵法は，発酵液の表面に酢酸菌が膜を形成し，酸素を取り込みながら緩やかに発酵が進行する発酵法であり，製造された食酢はまろやかな風味であることが特徴である．

静置発酵法では，チリメン状の薄い菌膜形成が発酵に適するが，酢酸濃度の上昇による低 pH 環境への耐性機構として，発酵の進行に伴い菌膜が厚く形成することがある．一般に，発酵を終えた菌膜は廃棄されるが，厚く成長した菌膜には酢酸菌体に加えて多糖類やアミノ酸をはじめとする多様な成分が含まれており，サスティナブル素材としての活用が期待される．

酢酸菌膜の美容分野での利用については，構成成分の一つであるバクテリアセルロースが，美容成分を浸透・保持するためのフェイスマスク基材等，物理的担体として研究されているが[9-11]，酢酸菌膜そのものの美容機能性については明らかになっていない．

そこで，本研究では酢酸菌膜エキスの肌のシワ形成やハリ低下を引き起こすヒト真皮由来エラスターゼへの影響を評価することにより，化粧品原料としての有用性を評価した．

2. 実験方法

2.1 酢酸菌膜エキスの調整

酢酸菌膜は宮島醤油株式会社の食酢製造時に形成した酢酸菌膜を使用した．酢酸菌膜エキスは，凍結乾燥した酢酸菌膜に 20 倍量の水を加え，撹拌した後

に遠心して得られた上澄み液を濃縮乾燥することにより得た．エラスターゼ活性阻害率の測定には，特定濃度に水で調製した酢酸菌膜エキスを用いた．

2.2 酢酸菌膜エキスの分画

酢酸菌膜エキスを分子量の大きさを指標にEcono-Pac 10DG columns (Bio-rad) を用いて分画した．まず，カラムを 20 mL の水で平衡化した後，3 mL の酢酸菌膜エキスを添加した．その後，4 mL の水を加え，6 kDa 以上の Fraction H を回収した．続いて，4 mL の水を新たに添加し，得られた濾液を Fraction L1 とした．この操作を繰り返し，Fraction L2，L3，L4 を回収した．

また，酢酸菌膜エキスを分子の疎水性相互作用を指標に固相抽出法を用いて分画した．まず，メタノールを用いて固相抽出樹脂（Sep-Pak Vac C18, 2 g（Waters））を活性化し，水で平衡化した後に酢酸菌膜エキスをアプライした．カラムを水で洗浄後，メタノールの濃度を 20, 40, 60, 80, 100% (v/v)と上げ，30 mL の溶媒で順次溶出させた．溶出液はそれぞれ，Fraction 20%Me，40%Me，60%Me，80%Me，100%Me とした．

分画液は乾燥し，固形物を所定濃度になるように溶解させ，エラスターゼへの影響評価に使用した．

2.3 サイズ排除クロマトグラフィーによる分画

試料溶液は，精密ろ過の後，表 1 に示すサイズ排除クロマトグラフィーの条件で分析した．LC（Prominence, Shimadzu）は，サイズ排除クロマトグラフィーカラム（Superdex peptide HR 10/30, GE Healthcare）を用いて実施した．検出は UV 214 nm で行った．

2.4 LC-MS を用いた成分分析

試料溶液は，精密ろ過の後，LC-MS に供した．LC（Vanquish UHPLC, Thermo Fisher Scientific）は，ODS カラムを用いた逆相クロマトグラフィーにより実施し，移動相は 0.1%ギ酸含有水と 0.1%ギ酸含有アセトニトリルの 2 液混合系によるグラジエント溶離とした．検出は LC 部のフォトダイオードアレイ (PDA) 検出とオービトラップ MS 検出（Q Exactive, Thermo Fisher Scientific）の両方で行った．LC-MS の条件の詳細は表 2 に示した．

得られたデータは低分子データ解析ソフトウェア Compound Discoverer（Thermo Fisher Scientific）による化合物推定解析を実施した．検出されたピークの主要 MS 及び MS/MS スペクトル情報と MS スペクトルライブラリー（mzCloud, Metabolika 及び Chem Spider）とのマッチングを行った．

2.5 ヒト線維芽細胞エラスターゼ活性阻害率の測定

線維芽細胞からエラスターゼを含む粗酵素液を調製するため，コンフレントに培養したヒト新生児由来線維芽細胞を剥離し，リン酸生理食塩水 (PBS(-)) で 2 回洗浄した後，2.0×10^6 cells/mL となるように 0.5%Triton-X100 溶液（TCI）を加えた．室温で 30 分静置後，10,000*g* で 5 分間遠心分離し，得られた上澄み液を粗酵素液とした．

96well プレートに 25 µL の試料溶液，50 µL の 5 mM Suc-Ala-Ala-Ala-pNA/1mM フッ化フェニルメチルスルホニル（PMSF）含有 0.1M トリス塩酸緩衝液（pH8.0），25 µL の粗酵素液を加え，37℃で 2 時間インキュベートした．その後，マイクロプレートリーダーを用いて 405 nm の吸光度を測定し，エラスターゼ活性阻害率（式（1））を算出した．

$$[\text{エラスターゼ活性阻害率 \%}] = \left(1 - \left(\frac{[A_{Sample}] - [A_{Negative}]}{[A_{Positive}] - [A_{Negative}]}\right)\right) \times 100 \quad (1)$$

表１　サイズ排除クロマトグラフィー条件

HPLC	装置	Prominece (Shimadzu)
	カラム	Superdex peptide HR 10/30 (GE Helthcare)
	移動相	Acetonitrile/water/trifluoroacetic acid = 30/70/0.1 (v/v/v)
	流速	0.6 mL/min
	カラム温度	40°C
	検出器	UV 214 nm

表２　LC-MS 条件

HPLC	装置	Vanquish (Thermo Fisher Scientific)
	カラム	Cadenza CDC18 (2 mm I.D. x 250 mm with guard) (Imtakt Corp.)
	移動相	A: Water/HCOOH = 100/0.1 (v/v) B: Acetonitrile/HCOOH = 100/0.1 (v/v) B 3%(0 to 5 min) ,B 3-40% with linear gradient to 5-45 min, B 100% to 45.5-60 min
	検出	MS &MS/MS
	注入量	3 µL
MS	装置	Q-exactive（Thermo Fisher Scientific)
	イオン源	ESI
	極性	Positive ion mode
	検出	Orbitrap
	m /z範囲	134-1,500 m/z

ここで，$[A_{sample}]$は酢酸菌膜エキス等の試料を添加した場合の吸光度を，$[A_{positive}]$はコントロールにおける吸光度を，$[A_{negative}]$は粗酵素液を添加しない場合のコントロールにおける吸光度を示している．

2.6 統計解析

得られたデータは，GraphPad PRISM 11 (GraphPad Software Inc.)を用い，*student's t* test もしくは one-way ANOVA で解析した．

3. 結果及び考察

3.1 酢酸菌膜エキスのエラスターゼ活性への影響

酢酸菌膜エキスのヒト線維芽細胞エラスターゼへの影響を検討した．その結果，酢酸菌膜エキスは濃度依存的にエラスターゼ活性を阻害した（図 1）．また, IC50（標的の活性を 50%にする濃度）は 320 μg/mL であった．

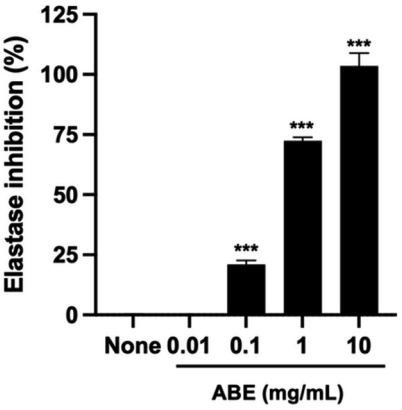
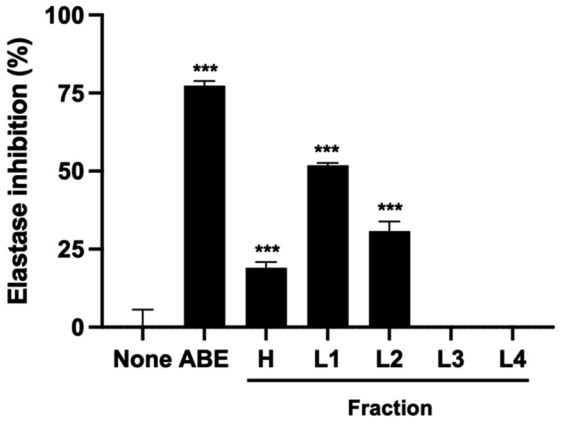


図 1　酢酸菌膜エキスのエラスターゼ活性阻害
ABE：酢酸菌膜エキス．測定値は 3 点の平均値であり，エラーバーは標準偏差を示す. ***p<0.001 vs None を示す.

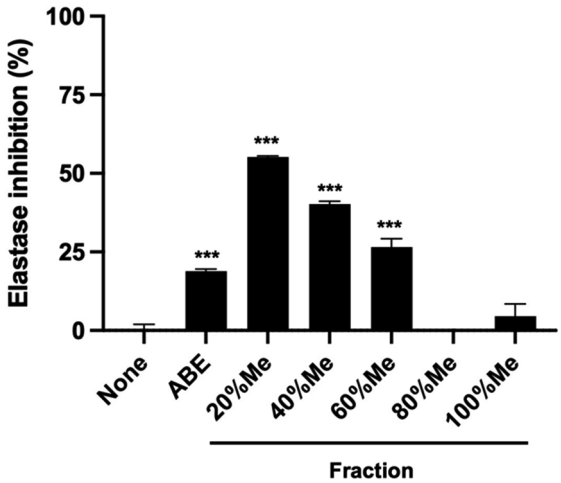
3.2 酢酸菌膜エキスの分画

酢酸菌膜エキスに含まれるエラスターゼ活性阻害因子の特徴を調べるため，簡易ゲル濾過カラムを用いて分子量を指標に成分を分画した．Fraction H は 6 kDa 以上で，Fraction L1 から L4 になるにつれ，含まれる成分の分子量は小さくなる．これらの画分のエラスターゼへの影響を調べたところ, Fraction H, L1, L2 が活性を阻害し，特に Fraction L1 は最も高い阻害率を示した（図 2A）．

続いて，Fraction 1 を固相抽出により分画し，エラスターゼへの影響を調べたところ，Fraction 20%Me, 40%Me, 60%Me の順で有意にエラスターゼ活性を阻害し，特に 20%Me は最も高い阻害率を示した（図 2B）．



（A）簡易ゲル濾過カラムによる分画



（B）固相抽出カラムによる分画

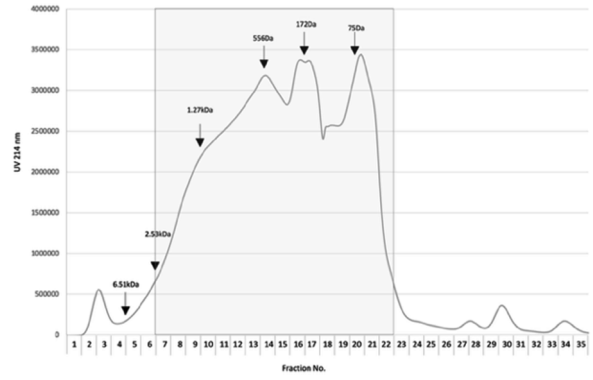
図 2　酢酸菌膜エキス画分のエラスターゼ活性阻害
（A）ABE : 1mg/mL，Fraction H，L1-L4 : 2.5% (v/v)（B）ABE : 0.1 mg/mL，20-100%Me：0.1mg/mL．測定値は 3 点の平均値であり，エラーバーは標準偏差を示す. ***p<0.001 vs None を示す.

3.3 サイズ排除クロマトグラフィー解析

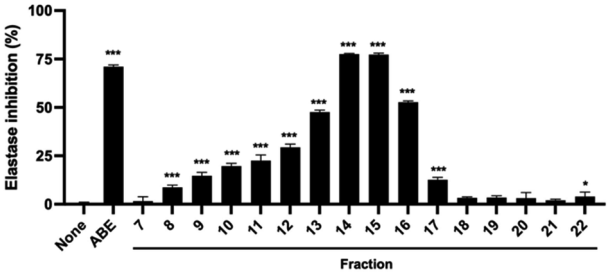
Fraction 20%Me に含まれる成分の分子量を調べるため，サイズ排除クロマトグラフィーに供したところ, 図 3A に示すようなクロマトグラムが得られた．特に大きなピークが存在する Fraction 7-22 を回収し，エラスターゼへの影響を調べたところ，Fraction 14 と 15 が強くエラスターゼ活性を阻害した（図 3B）．そのため，172-556 Da 付近の Fraction 14，15 にはエラスターゼ阻害活性因子が多く含まれるものと推察された．

3.4 LC-MS 解析

回収率の高かった Fraction 14 に着目し, LC-MS を用いて含有成分の分析を行った．分析結果を Compound Discoverer に供し，同定されたピークのうち，[Fraction 13/Fraction 14] 比が 0.5 より小さいものから，Area 値が大きい 5 つのピークを選抜し，構造



（A）クロマトグラム



（B）エラスターゼ活性阻害率

図 3　サイズ排除クロマトグラフィー画分のエラスターゼ活性阻害

ABE：1 mg/mL．測定値は 3 点の平均値であり，エラーバーは標準偏差を示す. *p<0.05，**p<0.01，***p<0.001 vs None を示す.

表 3　LC-MS により推定された成分

No.	Name	Formula	m/z	Area
1	Pregablin	$C_8H_{17}O_2$	160.13295	1622552579
2	Ala-pro-ser-leu	$C_{17}H_{30}N_4O_6$	387.22307	1499895647
3	Leu-leu	$C_{12}H_{24}N_2O_3$	245.18546	1396541927
4	Leu-gly-leu	$C_{14}H_{27}N_3O_4$	302.20675	1081311696
5	Pro-val-val	$C_{15}H_{27}N_3O_4$	314.20654	950134213
6	Arg-pro	$C_{11}H_{21}N_5O_3$	272.17116	817671910

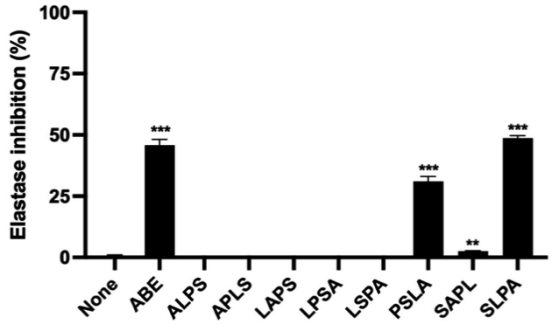
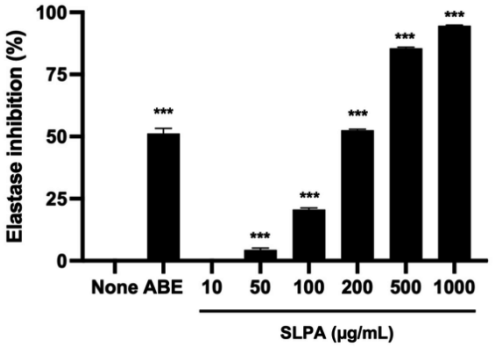


図 4　合成ペプチドのエラスターゼ活性阻害

ABE：1 mg/mL．ペプチド：200 μM．測定値は 3 点の平均値であり，エラーバーは標準偏差を示す. **p<0.01，　***p<0.001 vs None を示す.



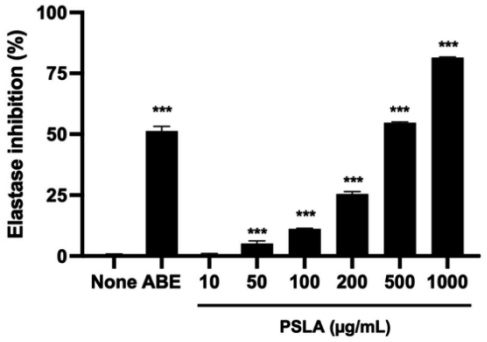


図 5　SLPA と PSLA のエラスターゼ活性阻害

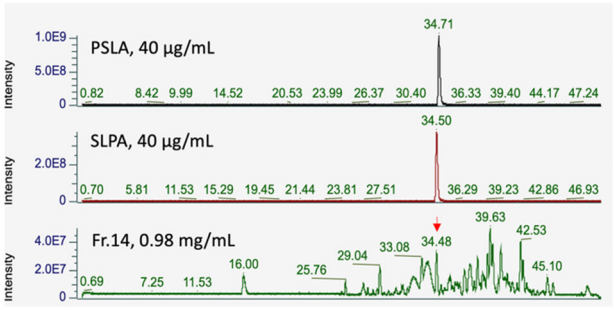
ABE：1 mg/mL．測定値は 3 点の平均値であり，エラーバーは標準偏差を示す. ***p<0.001 vs None を示す.

推定した．表 3 に示すように，上位 6 つのうち 5 つはいずれも 2 から 4 個のアミノ酸からなるペプチドであった.

そこで, 最も Area 値が大きかった A（Ala）, P（Pro）, S（Ser），L（Leu）からなるペプチドに着目し，無作為に 8 つのペプチドを合成し，エラスターゼへの影響を調べた. その結果, SLPA と PSLA がエラスターゼ活性を阻害し，特に SLPA が強い阻害作用を示した（図 4）．また，SLPA 及び PSLA は濃度依存的にエラスターゼ活性を阻害し, IC50 値はそれぞれ 208.4 μM，395.1 μM であった（図 5）.

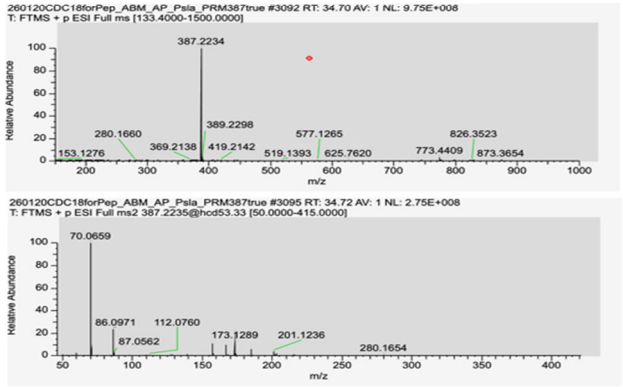
続いて，LC-MS を用いて Fraction 14 に SLPA と PSLA が含まれるか解析したところ，保持時間 34.48 のピークのマススペクトルが SLPA と考えられた（図 6A）．また，MS/MS 解析したところ，Fraction 14 と SLPA のフラグメントに m/z 187.108（Pro-Ala）と推定されるペプチドが検出された（図 6B）．そのため，Fraction 14 に SLPA が含まれることが示唆された. また, ピークの Area 値から算出された Fraction 14 の SLPA 量は 2.51 mg/g であった.

食酢の美容機能については，韓国の穀物酢 15 種

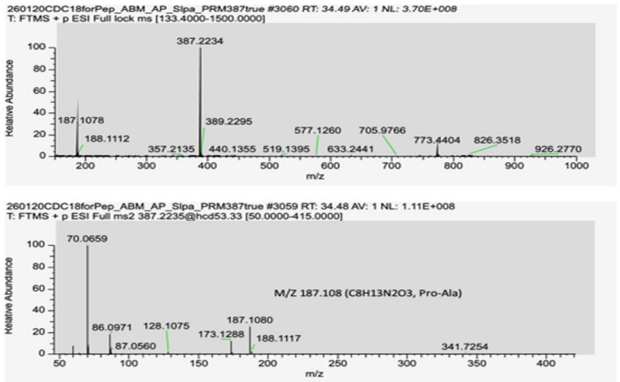


（A）MS（陽イオンモード）検出

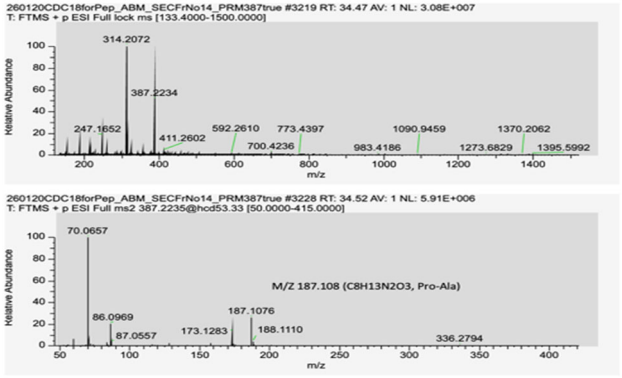
PSLA 40 µg/mL



SLPA 40 µg/mL



Frac.14 0.98 mg/mL



（B）MS/MS 検出

図 6　Fraction 14 の LC-MS/MS 分析

類及び柿酢 14 種類がコラゲナーゼ及びチロシナーゼを阻害し，穀物酢においては遊離アミノ酸含量とこれらの阻害作用に相関性があることや[12]，食酢の原料にアントシアニンを豊富に含む紫黒米を使用した紫黒米酢が抗酸化活性に優れることが報告されているがエラスターゼ活性の阻害作用については報告されていない[13]．

また，ペプチドのエラスターゼ活性阻害について，クルミ（*Juglans regia* L.）の FFVPF（Phe-Phe-Val-Pro-Phe）がエラスターゼ活性を阻害することや[14]，ウシエラスチン加水分解物中の Gly，Ala，Val，Pro を含むペプチドが高いエラスターゼ阻害活性を示し[15]，バイオインフォマティクス解析からエラスターゼと Gly，Ala，Val，Pro，特に Gly と Ala に対して高い親和性を示すことが報告されている[16]．これらの知見から，本研究で特定した酢酸菌膜エキス中のエラスターゼ活性阻害ペプチドは SLPA であり，Pro や Ala が含まれるため，エラスターゼに結合することにより，酵素活性を阻害したことが示唆された．

4. おわりに

本研究では，食酢製造時に形成される酢酸菌膜から抽出エキスを作製し，美容効果を検証した．その結果，酢酸菌膜エキスはヒト線維芽細胞エラスターゼ活性を阻害し，肌ハリの維持やシワの形成予防といったアンチエイジング効果を有することが示唆された．さらに，酢酸菌膜エキスを分画し，エラスターゼへの影響を評価したところ，SLPA がエラスターゼ活性を阻害することを見出した．したがって，酢酸菌膜エキス中の有効成分の一つは SLPA であることが明らかになった．

今後は，酢酸菌膜エキス及び SLPA のヒト皮膚への有効性を調べることにより，より美容効果が明確になることが期待される．

なお，研究を実施するにあたって使用したイオントラップ型高速液体クロマトグラム質量分析システム（LC-MS）及びマイクロプレートリーダーは，電源立地地域対策交付金で導入した機器である．

参考文献

1) 柘植圭介, 岩元彬, 松浦洋一, 霜尾毅, 植田義敬, 田中一平, 竹田健太郎, イチゴ葉の化粧品・美容食品サスティナブル原料化に関する研究, 2022, 令和 4 年度佐賀県工業技術センター研究報告書
2) 山内良子，岩元彬，吉村裕美，柘植圭介，炎症性サイトカイン産生抑制用の組成物，2020，特許

第 6667773 号
3) Iwamoto A, Yamauchi R, Oogai S, et al. Lotus root extract inhibits skin damage through suppression of collagenase production in vitro. *Cytotechnology*. 2022;74(2):309-317.
4) 岩元彬，柘植圭介，鶴田裕美，三田かおり，コラゲナーゼ活性阻害用組成物及びコラーゲン産生促進用の組成物，2022，特開 2022-139538
5) 柘植圭介，岩元彬，鶴田裕美，山内良子，藻類の産業利用に関する可能性研究（第 2 報），2018，平成 30 年佐賀県工業技術センター研究報告書，19-31.
6) 伊賀和宏，横田紗綾，中井大助，中山秀夫，陳科榮，コウジ酸の顔面黄ぐすみに対する改善効果，西日本皮膚科，3(77)，244-249(2015)
7) Miyagawa M, Fujikawa A, Nagadome M, Kohama K, Ogami T, Kitamura S, Kitagaki H, Glycosyl-ceramides purified from the japanese traditional non-pathogenic fungus aspergillus and koji increase the expression of genes involved in tight junctions and ceramide delivery in normal human epidermal keratinocytes. Fermentation, 5(2), 43(2019)
8) 松野孝祐，徳山孝仁，大久保明，徳山孝，各種機能性を有する米発酵エキスの研究開発，化学と生物，2(57)，129-133(2019)
9) Perugini P, Bleve M, Redondi R, Cortinovis F, Colpani A, In vivo evaluation of the effectiveness of biocellulose facialmasks as active delivery systems to skin. *J Cosmet Dermatol*. 19(3), 725–735(2020)
10) Fonseca D.F.S., Vilela C., Pinto R.J.B., Bastos V., Oliveira H., Catarino J., Faísca P., Rosado C., Silvestre A., Freire C. Bacterial nanocellulose-hyaluronic acid microneedle patches for skin applications: In vitro and in vivo evaluation. Mater. *Sci. Eng. C*. 118(2021)
11) Oliveira TJ, Segato TCM, Machado GP, Grotto D, Jozala AF, Evolution of bacterial cellulose in cosmetic applications: an updated systematic review. *Molecules*. 27(23), 8341(2022)
12) Yu HH, Jang S-W, Kim E, Kim J-C, Jang M, Quality status and skin-related functional properties of traditional korean fermented vinegars. *Foods*, 14(15), 2728, (2025)
13) 水野裕一、宮島清一、加藤富民男、柘植圭介、焼酎麹を用いた色調および呈味性を改良した紫黒米酢の製造、生物工学会誌、7(100)、346-353(2022)
14) Xiong Y, Peng P, Chen SJ, Chang M, Wang Q, Yin SN, Ren DF, Preparation, identification, and molecular docking of novel elastase inhibitory peptide from walnut (Juglans regia L.) meal. Food Chem, 5(100139), (2022)
15) Liu Y, Su G, Zhou F, Zhang J, Zheng L, Zhao M, Protective effect of bovine elastin peptides against photoaging in mice and identification of novel antiphotoaging peptides. *J Agric Food Chem*. 66(41), 10760-10768(2018)
16) Taddese S, Weiss AS, Neubert RH, Schmelzer CE. Mapping of macrophage elastase cleavage sites in insoluble human skin elastin. *Matrix Biol*. 27(5), 420-428(2008)

再資源化燃料を用いた新規ハウス加温システムに係る環境影響評価

材料環境部
帆秋圭司
イマリ・ホットエアタービン
山田義人

本研究では，再資源化燃料（RPF）を用いた新規ハウス加温システムの環境負荷低減効果をライフサイクルアセスメント（LCA）手法を用いて定量的に評価した．LCA 評価の結果，佐賀県唐津市のハウスみかん栽培用ビニルハウス 1 棟（3a）における 7 年間のライフサイクル全体における温室効果ガス（GHG）排出量は 199.2 t-CO_2eq となった．これは従来の A 重油加温機と比較して約 21%（52.6t-CO_2eq）の GHG 排出削減効果があることが明らかとなった．このことから，新規加温システムは，廃棄物の有効利用による循環型社会の形成と施設園芸分野におけるカーボンニュートラル化を進める有効な手法であることが示唆された．

1. はじめに

現在，世界全体で気候変動への対応が喫緊の課題となっている．2015 年 12 月にパリ協定が採択されたことを受け，世界各国・地域は温室効果ガス（以下，GHG）排出量削減に向けた目標を掲げ，2050 年のカーボンニュートラル実現に向けた対応を加速させている．

日本においても，2020 年 10 月に「2050 年カーボンニュートラル」を宣言し，2021 年 10 月には「地球温暖化対策計画」を策定，2030 年度において GHG を 46%削減（2013 年度比）することを目指すと表明した．その後，同計画は 2025 年 6 月に改訂され，2050 年までの「ネット・ゼロ」実現に向け，2035 年度に 60%削減，2040 年度には 73%削減（いずれも 2013 年度比）という野心的な目標を定めた [1]．これにより，関係府省庁や企業等と連携し，脱炭素と経済成長の同時実現に向けた施策が講じられている．

これらの動向を受け，農林水産省では農林水産業の CO_2 ゼロエミッション化を目指し，2021 年 5 月に「みどりの食料システム戦略」を策定した．同戦略では，2050 年までに化石燃料を使用しない施設への完全移行を掲げており，施設園芸においては，従来の A 重油燃焼式暖房機から，GHG 排出の少ないヒートポンプやカーボンニュートラルなバイオマス燃料等への導入推進が図られている．

しかしながら，かつて A 重油と比較して安価とされていた電力や LPG の価格は，近年上昇傾向にある．また，木質ペレット等のバイオマス燃料については，暖房機自体の導入コストが高額である点や，運用・メンテナンス面での課題から，普及が十分に進んでいないのが現状である．

イマリ・ホットエアタービンでは，廃棄物系バイオマスや廃プラスチック，古紙，廃木材等を原料とした再資源化燃料である RPF（Refuse Paper & Plastic Fuel）に注目し，従来の A 重油を燃料とする施設園芸用温風暖房機に代わる次世代の施設園芸用加温機として RPF を燃料とした「Multi-waste fuel ハウス加温機」（図 1）の開発を行っている．

本研究では，製品の資源採取から製造，流通，使用，廃棄に至る全過程における環境影響を定量的に把握する手法であるライフサイクルアセスメント（以下，LCA）を用い，イマリ・ホットエアタービンが開発した新規ハウス加温システムの環境負荷低減効果について評価を行った．



図 1　Multi-waste fuel ハウス加温機

2. 評価手法

2.1 目的及び調査範囲の設定

本研究の目的は，従来の A 重油を燃料とする施設園芸用温風暖房機から，RPF を使用する新規加温システムへ移行した場合の環境負荷低減効果を，LCA 手法を用いることにより GHG 排出量を定量的に明らかにすることである．

本評価における機能単位は,「佐賀県唐津市におけるハウスみかん栽培用ビニルハウス 1 棟（3a）に対し，7 年間にわたって温熱供給を行うこと」と定義した．

評価対象期間は，農業用加温設備（ボイラー等）の法定耐用年数[2)]に従い，7 年間と設定した．

2.2 システム境界

評価対象となるシステム境界を図 2 に示す．装置の原料調達から製造・組立，ビニルハウスへの輸送（伊万里市～唐津市浜玉町），使用段階，および廃棄・リサイクルに伴う輸送と処分（～唐津市鎮西町）に至る「Cradle to Grave（ゆりかごから墓場まで)」を対象とした．

また，燃料として使用する RPF については，その製造工程（佐賀市富士町）から輸送，および加温機での燃焼段階を評価範囲に含めた．なお，以下の項目については，環境影響が極めて軽微，あるいは両システム間で差異が生じないと判断し，システム境界から除外（カットオフ）とした．

・装置の製造組立工程

組立に要するエネルギー消費量が，ライフサイクル全体に対して極めて僅かであるためカットオフとした．

・燃焼灰の処分

RPF の燃焼に伴い発生する焼却灰は，全量を佐賀県みやき町の工場へ輸送し，工業材料の原料として再資源化される．しかし，ライフサイクル全体における焼却灰の発生重量は極めて少なく，工場への輸送に伴う環境負荷（GHG 排出量）は全体に対して無視できるほど微小であることから，カットオフとした．

・ハウスみかんの栽培管理に係る資材等

本研究の主たる目的は新旧の加温システム間の比較評価である．そのため，肥料，農薬，用水等の栽培に係る投入物，ならびにビニルハウス本体の資材および維持管理に伴う環境負荷については，両システムにおいて同等（差異がないもの）とみなし，カットオフとした．

2.3 ライフサイクル影響評価の算定手法

本研究では, ISO 14040/14044 規格に準拠した LCA の手法を用い，以下の手順で GHG 排出量の算定を行った．

(1) インベントリ分析（データの収集）

算定に用いる各プロセスの活動量は，以下のとおり収集した．

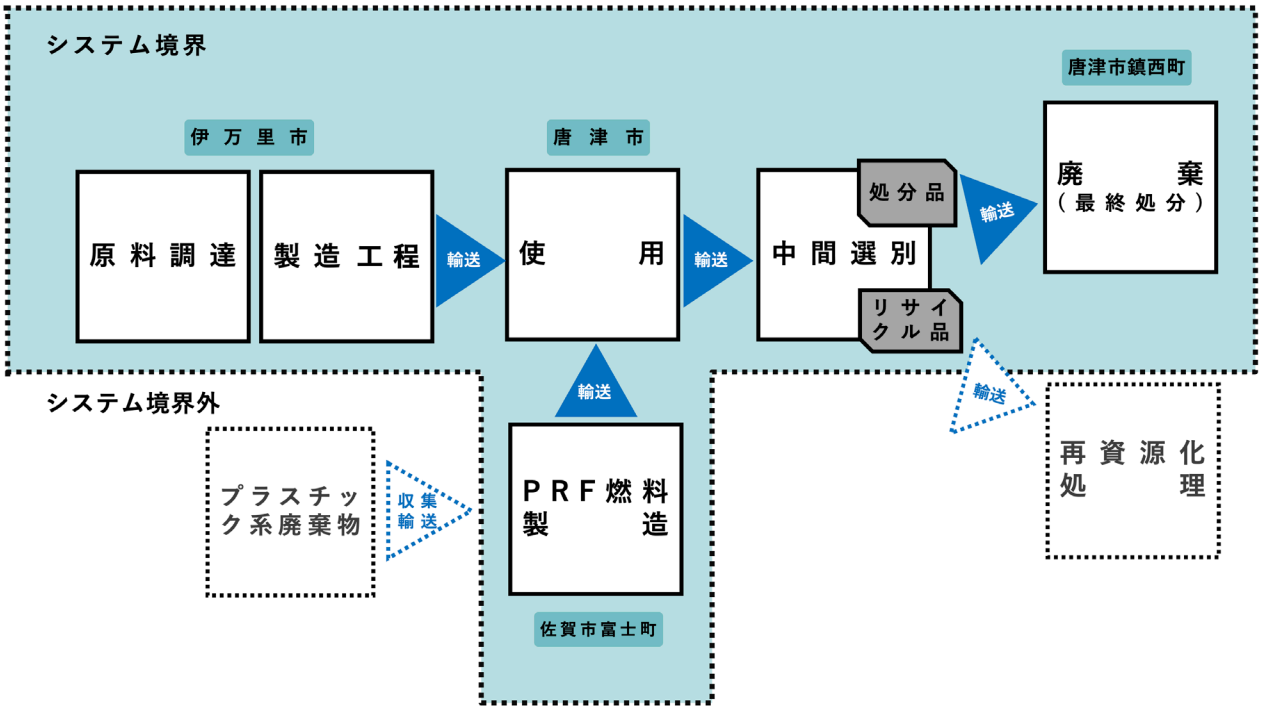


図 2　新規加温システムのシステム境界

・1 次データ
　新規加温機の原材料構成，部品重量，および製造プロセスにおける詳細データについては，イマリ・ホットエアタービンからの提供資料および実測値を用いた．
・2 次データ
　各工程間の輸送距離，RPF の製造プロセス，および廃棄処分にかかる活動量については，事業者へのヒアリングおよび既存の文献値に基づき設定した．
・使用段階の燃料消費量
　本研究の実施段階において，新規加温システムを用いた実証試験データが得られなかったため，使用段階における RPF の消費量は，2008 年佐賀県果樹試験場の研究成果情報に示された A 重油の使用量（9,605L/年）を基準とした．具体的には，A 重油と RPF それぞれの低位発熱量に基づく熱量換算を行い，必要な熱量を賄うために要する RPF の重量を算出して活動量とした．

(2) 環境影響評価（GHG 排出量の算出）

収集した活動量に対し，ライフサイクルインベントリデータベース「IDEA Ver.3.5.1」に収録された排出原単位を乗じる積上げ法により，ライフサイクル全体における GHG 排出量を算出した．

影響評価においては，「IPCC 2021 GWP 100a without LULUCF」を採用し，各排出ガス成分の影響を CO_2 相当量換算（CO_2eq）として統合・評価した．

3. 結果および考察

3.1 新規加温システムの GHG 排出量

図 3 に新規加温システムにおける各プロセス別にまとめた GHG 排出量の評価結果を示す．

結果より，新規加温システムのライフサイクル全体における GHG 排出量を算定した結果，機能単位あたり「199.2 t-CO_2eq」となった．

最も排出量が大きかったのは「使用（RPF 燃焼）」段階であり，全体の約 79.1%にあたる 157.6 t-CO_2eq を占めた．次いで，燃料である「RPF 製造」段階が 39.1 t-CO_2eq で,全体の約 19.6%となった．これら燃料に関連するプロセス（RPF の製造・輸送・使用）の合計は 197.5 t-CO_2eq に達し，ライフサイクル全体の約 99%が燃料由来の負荷であることが明らかとなった．

一方，加温機本体の「原料調達」は 1.66 t-CO_2eq であり，製造工程から廃棄に至る装置自体のライフサイクル負荷は極めて限定的であった．

また，各プロセス間の輸送に伴う負荷は，合計で約 0.8 t-CO_2eq で全体の約 0.4%に留まった．

3.2 A 重油加温機との比較評価

従来の A 重油加温機と新規加温システムの使用段階における GHG 排出量の比較結果を図 4 に示す．

比較にあたっては，同一の熱供給量を条件とし，

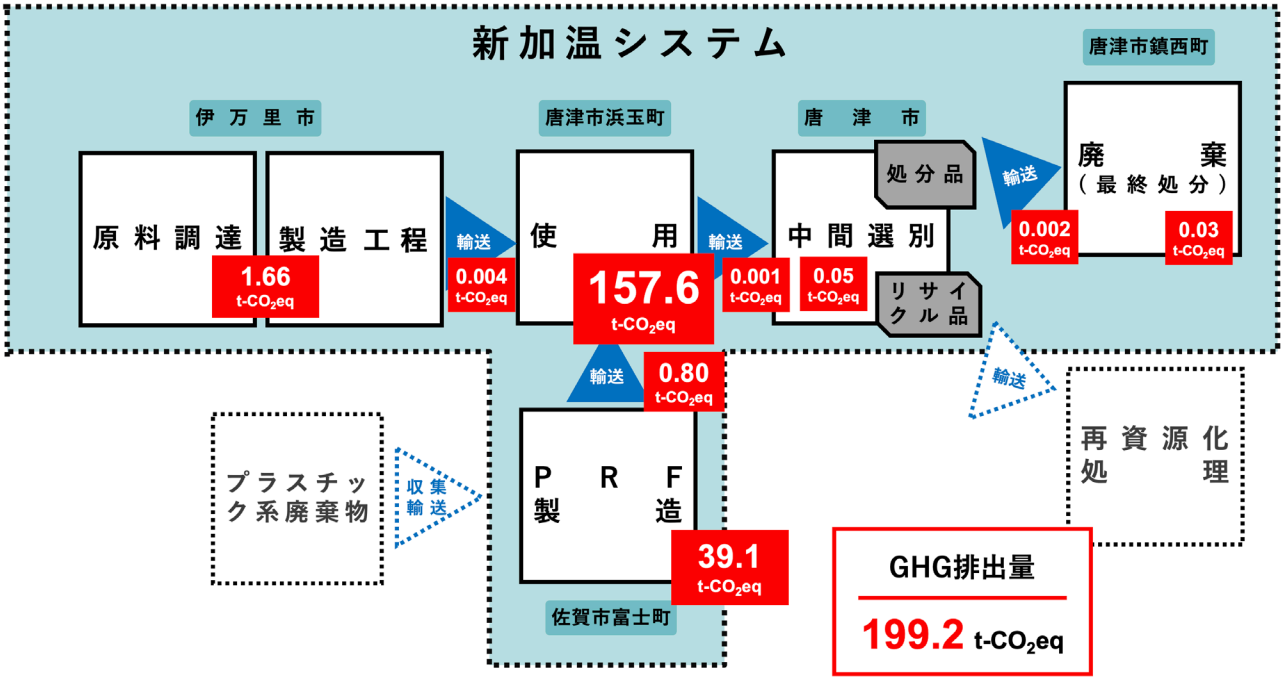


図 3　新規加温システムの GHG 排出量算出結果

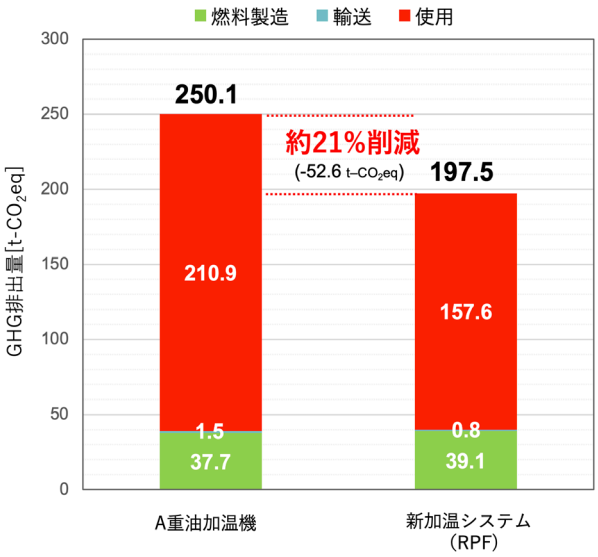


図４　使用段階における GHG 排出量の比較

A 重油の製造（大分県大分市），海上・陸上輸送，および使用（燃焼）の各プロセスを算定した．算定の結果，従来システムのライフサイクル GHG 排出量は 250.1t-CO_2eq となり，新規加温システム（燃料由来分 197.5 t-CO_2eq）へ移行することで，約 52.6 t-CO_2eq（21%）の削減が可能であることが明らかとなった．

3. 3 排出量削減の要因分析

新規加温システムへの LCA 評価の結果，GHG 排出量削減に最も寄与したのは「使用（燃焼）」段階であった．これは，RPF に含まれるバイオマス成分（古紙・木くず等）がカーボンニュートラルとして扱われることで，同じ熱量でも A 重油と比較して GHG 排出量が少ないことによるものと考えられる．また，燃料の製造段階では RPF の GHG 排出量が微増するものの，輸送段階においては，製油所から輸送を伴う A 重油に対し，県内資源を活用する RPF は輸送に係る負荷が低いことから，エネルギーの地産地消による優位性が示された．さらに，本来廃棄物として処理（焼却・埋立）されるはずの廃プラスチックや古紙を燃料化しエネルギーとして有効利用することで，社会全体の廃棄物処理負荷を間接的に低減している点も，本システムの重要な環境貢献と言える．

4. おわりに

本研究では，イマリ・ホットエアタービンが開発した次世代の施設園芸用加温機「Multi-waste fuel ハウス加温機」について，LCA を用いて環境負荷低減効果について評価を行った．

LCA 評価の結果，佐賀県唐津市におけるハウスみかん栽培用ビニルハウス 1 棟（3a）に対し，7 年間の温熱供給を行うことによる GHG 排出量は 199.2 t-CO_2eq となった．

また，従来の A 重油加温機と比較して，使用段階で約 21.0%（52.6t-CO_2eq）の GHG 排出削減効果が見込まれることが明らかとなった．

このことから，RPF を用いた新規加温システムは，施設園芸分野におけるカーボンニュートラル化を推進する上で有効な選択肢であることが示唆された．

本評価はビニルハウス 1 棟という限定的なスケールでの試算であるが，本システムが地域の複数施設へ導入された場合の波及効果も期待される．新規加温システムが地域全体に広がることで，より多くの GHG 排出削減に貢献できる可能性がある．

今後は，LCA 評価の精度を更に向上させるため，実栽培環境下での実測に基づいた RPF 使用量や燃焼効率の検証，および通年でのデータ取得を進めることが必要である．

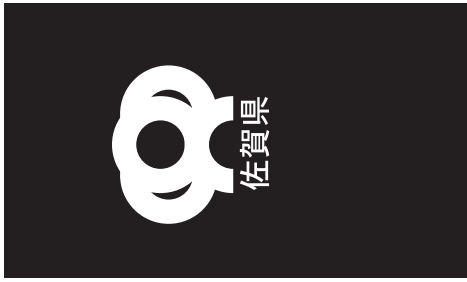
参考文献

1)　地球温暖化対策計画（2025年6月改訂），内閣官房・環境省・経済産業省 (2025) ．
2)　財務省令第十五号,減価償却資産の耐用年数等に関する省令．

令和７年度　佐賀県工業技術センター　研究報告書

発　行　　令和８年１０月
発行所　　佐賀県工業技術センター
〒849-0932
佐賀県佐賀市鍋島町八戸溝 114
TEL：0952-30-8161　　FAX：0952-32-6300
URL：https://www.saga-itc.jp/
報告書は上記 URL でもご覧いただけます。

印　刷　　日之出印刷株式会社
〒849-0921
佐賀県佐賀市高木瀬西 6 丁目 11 番 5 号
TEL：0952-31-7177　　FAX：0952-32-1516


佐賀県