

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

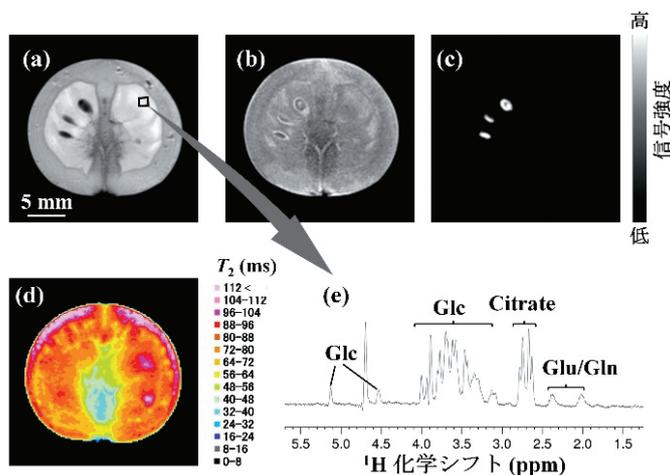
ISSN 1344-8692 Vol. 63, No. 262
2024. 1



◆特集：植物と食品のMRI計測



【左図】梨園場における梨枝の in situ 撮像の様子 【右図】果実計測用モバイル MRI (特集記事「樹木内水移動と果実成長の MRI 計測 (巨瀬勝美)」より)



ミニトマトの MRI データ例 (a) プロトン密度強調画像, (b) 水信号 ($\delta_H = 4.7$ ppm) 選択励起画像, (c) 油脂 ($\delta_H = 1.2$ ppm) 選択励起画像, (d) T_2 分布画像, (e) ^1H -MRS スペクトル (図(a)のゼリー部の四角枠内を測定). (特集記事「農業・食品研究における MRI の活用と展望 (藤原睦也, 関山恭代)」より)

経過日数	46日	66日	82日	94日	101日	103日	105日	107日
外観写真								
水分濃度 ρ ($z = 12$ mm) [g/cm ³]								
ρ ■ 0.203 ■ 0.405 ■ 0.607 ■ 0.809 ■ 1.011 ■ 1.213								

シイタケが発生・成長する際の菌床の外観写真と水分濃度の低下 (特集記事「MRI によるシイタケ発生時の培地の水分濃度計測 (小川邦康, 八島武志, 吉住真理子, 阿部正範)」より)

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

巨瀬 勝美 (株式会社エムアールアイシミュレーションズ)	
藤原 睦也, 関山 恭代 (農業・食品産業技術総合研究機構)	
小川 邦康 (慶應義塾大学), 八島 武志 (石川県農林総合研究センター),	
吉住 真理子, 阿部 正範 (徳島県立農林水産総合技術支援センター) ……………	表紙裏

〈特集：植物と食品の MRI 計測〉

特集「植物と食品の MRI 計測」にあたって ……………	小川 邦康 (慶應義塾大学) ……………	1
樹木内水移動と果実成長の MRI 計測		
……………	巨瀬 勝美 (株式会社エムアールアイシミュレーションズ) ……………	2
農業・食品研究における MRI の活用と展望		
……………	藤原 睦也, 関山 恭代 (農業・食品産業技術総合研究機構) ……………	7
MRI によるシイタケ発生時の培地の水分濃度計測		
……………	小川 邦康 (慶應義塾大学), 八島 武志 (石川県農林総合研究センター),	
	吉住 真理子, 阿部 正範 (徳島県立農林水産総合技術支援センター) ……………	12
米麴の MRI 計測 ……………	小川 邦康 (慶應義塾大学), 前迫 晃一 (石川酒造株式会社)	
	多田 孝清, 石川 文啓 (株式会社 KRI) ……………	18

〈報告〉

日本伝熱学会主催 講習会「計測技術 ～温度計測の基礎と様々な温度センサ～」開催報告		
……………	企画部会産学交流委員会：佐藤 航 (日立), 西 剛伺 (足利大学),	
	近藤 義広 (日立アカデミー), 羽鳥 仁人 (ベテル), 池田 利宏 (ケイデンス),	
	小針 達也 (日立), 小泉 雄大 (ナブテスコ) ……………	22

〈行事カレンダー〉 ……………	25
-----------------	----

〈お知らせ〉

第 61 回 日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集 ……………	26	
International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024		
(IWSEC2024) 開催のご案内 ……………	33	
優秀プレゼンテーション賞 (第 61 回日本伝熱シンポジウム) について ……………	35	
編集出版部会からのお知らせ ……………	36	

〈編集出版部会ノート〉 ……………	39
-------------------	----

Vol.63, No.262, January 2023

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Katsumi KOSE (MRIsimulations Inc.)	
Yoshinari FUJIWARA, Yasuyo SEKIYAMA (National Agriculture and Food Research Organization)	
Kuniyasu OGAWA (Keio University), Takeshi YASHIMA (Ishikawa Agr. and For. Res. Ctr.),	
Mariko YOSHIZUMI,	
Masanori ABE (Tokushima Agric. Forestry and Fisheries Tech. Support Ctr.)	Opening Page

< Special Issue: MRI Measurements in Plants and Food >

Preface to “MRI Measurements in Plants and Food”	
Kuniyasu OGAWA (Keio University)	1
MRI Measurement of Water Transport in Trees and Fruit Growth	
Katsumi KOSE (MRIsimulations Inc.)	2
Trends and Prospects of MRI Application in Agriculture and Food Research	
Yoshinari FUJIWARA,	
Yasuyo SEKIYAMA (National Agriculture and Food Research Organization)	7
Moisture Concentration Measurement of Media During Shiitake Mushroom Development Using MRI	
Kuniyasu OGAWA (Keio University),	
Takeshi YASHIMA (Ishikawa Agr. and For. Res. Ctr.),	
Mariko YOSHIZUMI,	
Masanori ABE (Tokushima Agric. Forestry and Fisheries Tech. Support Ctr.)	12
MRI Measurement of Koji	
Kuniyasu OGAWA (Keio University), Koichi MAESAKO (Ishikawa Brewery Co. Ltd.)	
Takakiyo TADA (KRI Inc.), Hisayoshi ISHIKAWA(KRI Inc.)	18

< Report >

Report on the Lecture “Measurement Technology, Basics of Temperature Measurement and Variety of Temperature Sensors”	
Wataru SATO (Hitachi), Koji NISHI (Ashikaga University),	
Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy), Kimihito HATORI (Bethel),	
Toshihiro IKEDA (Cadence), Tatsuya KOBARI (Hitachi)	
Katsuhiro KOIZUMI (Nabtesco)	22

< Calendar >	25
--------------	----

< Announcements >	26
-------------------	----

< Note from the JHTSJ Editorial Board >	39
---	----

特集「植物と食品の MRI 計測」にあたって

Preface to "MRI Measurements in Plants and Food"

小川 邦康 (慶應義塾大学)

Kuniyasu OGAWA (Keio University)

e-mail: ogawa@mech.keio.ac.jp

非侵襲で内部を計測したいという要望は多い。医療診断が典型的な例である。医療画像診断の一つとして MRI (核磁気共鳴画像法) があり、それは広く普及している。読者の中にも MRI 検査を癌の診断や臓器の画像化のために受けた方がおられるであろう。MRI は身体を円筒形の大型磁石に入れ、体内の水の水素原子核のスピンを外部から照射した共鳴周波数の電磁波によって励起し、スピンから放出される信号を検出することで臓器を画像化する手法である。

MRI は電磁波として受信した信号の強弱から水分量の多少を画像化する。それだけではなく、 T_1 、 T_2 緩和時定数や見かけの拡散係数、水と油を分離して画像化できるという特徴もある。

T_1 緩和時定数は励起された核スピンが励起前の状態に戻るまでの時定数である。 T_2 緩和時定数はスピンが作る磁化の位相が分散し、信号が減衰していく際の時定数である。 T_2 緩和時定数は水分子の移動のしやすさに強く依存して増減する。液体のような自由水であれば T_2 値は長くなり、結合水であれば T_2 値は短くなる。 T_2 値は物体内部の水の拘束状態を示す指標として用いられる。本特集の内の三つの記事では T_2 緩和時定数によって水の状態を計測した結果を紹介している。

内部計測の事例として、本特集では「植物と食品」に焦点を絞った。植物の MRI 計測は 1970 年頃から行われているが、電子デバイスの目覚ましい進展と植物の生態を理解する上で、上述したような MRI の特徴を生かした観測法の重要性が強く認識され、再び活発になっているからである。

その典型例として、MRI を小型化し、屋外に持ち出せるようにすることで、樹木を生育環境のまままで計測することが可能となった。巨瀬勝美氏はそのようなコンパクト MRI を開発し、計測を行った第一人者である。一番目の記事として「樹木内水移動と果実成長の MRI 計測」を執筆頂いた。

食品は人が生きていく上で欠かせない。毎日食べる食品だからこそ、人は安心・安全な食品を高品質で適正な価格で入手できることを求めている。食品に含まれる水や脂質などの多様な成分が味や触感、品質の安定性に重要な影響を及ぼすため、それらの成分の濃度や分布を知ることが求められる。MRI では水素原子核のスピンが結合する分子 (具体的には酸素や炭素) に依存して、その共鳴周波数が数 ppm だけずれる。そのわずかな差を利用して水と油を区別して画像化することができる。この計測法は「化学シフト選択イメージング」と呼ばれる。二番目の記事として藤原睦也氏と関山恭代氏に化学シフト選択イメージングと T_1 、 T_2 緩和時定数による画像化を含めて「農業・食品研究における MRI の活用と展望」を執筆頂いた。

人は菌類のキノコを日常的に食べている。毎日多量のキノコが生産されているが、栽培は経験を基に行われており、キノコの生態が十分に理解された上で栽培されている訳ではない。その原因の一つはキノコ培地の内部が見えないことにある。キノコ栽培では水が重要な役割を担うためシイタケの培地であるほだ木と菌床の内部を MRI で可視化する研究が行われた。シイタケの成長とともに水分濃度がどのように減少していくかを定量的に計測した事例が三番目の記事の「MRI によるシイタケ発生時の培地の水分濃度計測」である。

味噌や納豆、チーズなどの発酵食品は微生物が作る機能性成分を含み、有益な食品とされている。発酵過程では水分量が微生物の活動性に強く影響を及ぼす。日本酒製造の原料である米麴を麴菌が蒸米から作る過程を MRI で計測した事例が四番目の記事の「米麴の MRI 計測」である。

水分濃度や水の移動という視点で植物や食品を捉えれば、これらの記事が伝熱研究にも関わると思われる。水分計測や物質移動に関心を持つ研究者に役立てば幸いである。

樹木内水移動と果実成長の MRI 計測

MRI Measurement of Water Transport in Trees and Fruit Growth

巨瀬 勝美 (株式会社エムアールアイシミュレーションズ)

Katsumi KOSE (MRIsimulations Inc.)

e-mail: katsumi.kose@mrisimulations.com

1. はじめに

MRI 装置 (磁気共鳴イメージング装置) は、1973 年にその原理が提案され[1], 原稿執筆時点で、ちょうど 50 年が経過した。人体用の診断装置は、1980 年頃より世界各地で発表され、現在では、中規模以上の病院には導入され、日常の臨床診断に広く使用されている[2]。MRI は、非磁性物質や非電気伝導性物質に囲まれた液体 (流体) の計測には、極めて有力な手法であるため、人体以外の様々な計測対象への適用も有望である。ところが、人体用の装置をそのまま適用するのは、さまざまな意味で限界があるため、私が所属していた組織 (筑波大学) では、MRI 装置のコンパクト化を行い、計測対象を広げてきた[3,4]。以下に、システムの概要と、屋外における有用な応用例を紹介する。

2. コンパクト MRI の構成と機能

図 1 に、コンパクト MRI の典型的な構成を示す。このシステムは、エレクトロニクスユニットであるシステムコンソールと、磁石・勾配磁場コイル・高周波 (RF) コイルの、いわゆる磁石システムから構成される。

コンソールは、可搬型の 19 インチラックに、産業用 PC、高周波送受信系、勾配磁場コイル電源、高周波送信機から構成される。産業用 PC と敢えて書いたのは、AD 変換ボードやデジタル入出力ボードなどの、いわゆる拡張ボードが、多数収容でき、ラック組み込みにも適しているからである。その他の部分は、自作も可能であるが、市場で調達することも可能である。制御ソフトウェアは、Windows 上で開発されているが、理工学系の研究室ならば、十分に開発可能である。

磁石システムのキーコンポーネントは、永久磁石であり、我々のグループでは、既製 (特注) のものを購入して使用してきたが、世界的には、ネオジウム磁石などを使用して自作する例が多い[5, 6]。勾配

磁場コイルと RF コイルは、磁石と計測対象に合わせて自作することが多い。通常の場合、磁石に比べれば、これらの製作の難易度は低い。



図 1 コンパクト MRI の典型例

3. 樹木内水移動の MRI 計測

梨の萎縮病は、糸状菌が梨に感染し、葉に萎縮症状が発生する病気とされ、特に「幸水」という品種に好発することが知られている。萎縮病は、外見からも、その枝の様子を知ることができるが、実際に、その枝の中で、水分導通がどのようになっているかを知ることは、非常に興味深い。樹木における水分導通は、電極を用いた電気抵抗測定などで計測する手法が知られているが、樹木を傷つけること、定量性に問題があることなどから、これらの問題を克服する手法が望まれてきた。そこで、図 1 に示すコンパクト MRI で測定できるのではないかと思い、筑波大学の梨園場にて、その計測手法の検討を行った [7]。

図 2 に、実際の計測の様子を示す。このように、RF コイルを、高さ 2m 位の位置にある梨の枝に巻き付け、RF シールドを被せた上で、磁石と勾配磁

場コイルが一体となった永久磁石(静磁場強度 0.3T, ギャップ 80mm, 重量 56kg) を, リフトで上昇させて計測を行った. 撮像した「健常」な梨枝の MR 断層画像の一例を図 3 に示す. 撮像に使用したパルスシーケンスは, 2D スピンエコーシーケンスであり, スライス厚は 10mm, 画像視野は 25.6mm 平方, 画像マトリクス数は 128×128, 繰り返し時間 (TR) は 800ms, スピンエコー時間 (TE) は 22ms とした. また, 断層面に垂直な方向の水分子の動きを計測するために, 幅が 6ms, 間隔が 12ms, 強度が 0, 55, 83, 110 mT/m となる勾配磁場パルスを加えて撮像を行った. このときの b value は, 0, 78, 177, 314 s/mm²であった.



図 2 梨園場における梨枝の in situ 撮像

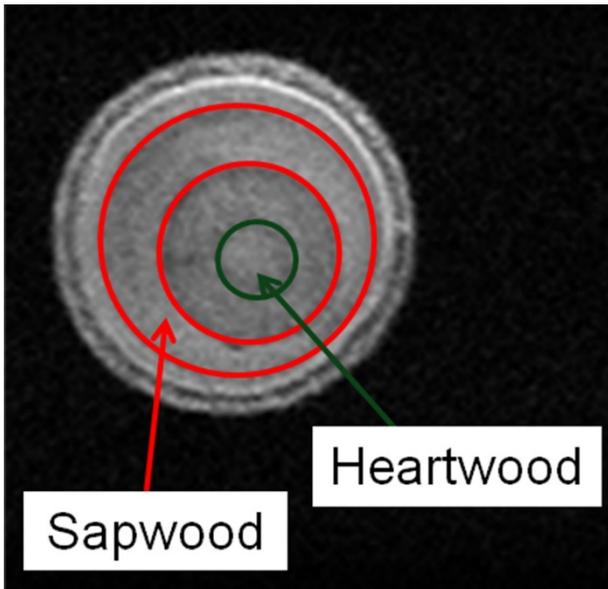


図 3 梨園場で撮像された梨枝の MR 断層画像

この計測における問題点は, 外来ノイズと磁石の温度変化による共鳴周波数の変動である. 外来ノイズに関しては, RF プローブと梨枝を, Cu 製のメッシュで何重にも包み, それを磁石と地面に接地することによって解決した. 枝も同時に包むのは, 枝がアンテナになって, 外来電波を引き込むためである. 磁石の温度変化は, 信号積算 4 回のため 3.2 秒を要する 1 回の位相エンコードステップ毎に, NMR ロックによって共鳴周波数を自動的に追尾することにより解決した. これにより, 計測時間は倍程度になるが, 温度変動の影響のない再現性の良い画像を取得することができた.

以上の手法を用いて, 2 時間の間隔で 24 時間の連続計測を行い, 図 3 に示す心材 (heartwood) と辺材 (sapwood) の部分において, 画像から ADC (apparent diffusion coefficient: みかけの拡散係数) を求めた (図 4). ここで, 「みかけの拡散係数」と書いたのは, この手法で計測される物理量が, 分子拡散だけではなく, 微小流動に伴う水分子の運動を反映するからである. なお, 図 4 の青で示すグラフは, 日射計で計測した日射量を表す.

図 4 に示すように, 辺材における水分子の ADC は, 日射量と共に大きく変化するのに対し, 心材の部分の水分子は, 日射量が変化しても, ほとんど変化しないことが分かる. このように, 正常な枝においては, 日射と共に水分子の通水が行われていることが確認された. なお, この解説では省略するが, 萎縮病の枝においては, 日射量に関係なく, 辺材における ADC が, 健全な枝に比べ, かなり低下していることが明らかとなった. 興味ある方は, 原著論文[7]を参照していただきたい.

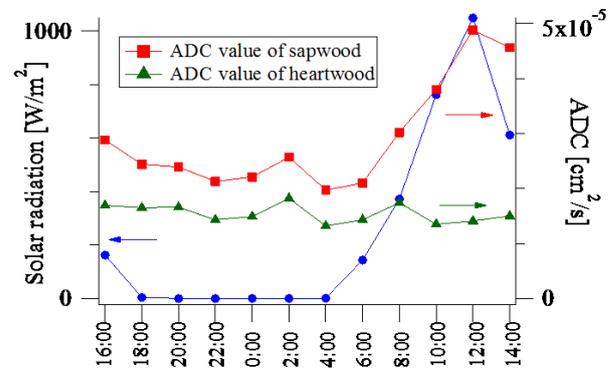


図 4 日照時間と梨枝の ADC の終日変化

4. 果実成長の MRI 計測

NMR 計測や MRI 撮像は、一部の例外を除いて、ほとんど屋内で行われてきた。NMR 計測に関しては、石油の探層など、地中に開けた深い穴の周囲の NMR 計測などに使用されてきたが[10-12]、MRI 撮像に関しては、温室などでの使用に限られてきた[13-17]。これに対し、実験室や温室では、植物のサイズが限られ、実際の自然環境の再現には限界がある。そこで、MRI 装置を屋外で使用するというアイデアが生まれ、その最初の例として、前の節で紹介した梨枝の計測を行った。農産物のもう一つの重要な例が果実である。すなわち、果実の生育過程における MRI 計測により、さまざまな果実の性質を明らかにできる可能性がある。そこで、前のセクションで紹介した梨圃場において、梨の生育過程における梨の NMR パラメタの計測を試みた[18]。

果実の撮像には、均一領域が 10cm 球程度が必要なため、図 5 の中央に示す、ギャップ 16cm、静磁場強度 0.2T の永久磁石磁気回路（当時の住友特殊金属社製）を使用した。磁石のサイズは、幅 501mm、高さ 440mm、奥行き 360mm、重量は約 200kg である。静磁場均一性は、直径 100mm 球状の領域で約 40ppm である。このように、磁石重量が 200kg、コンソールが 100kg 程度、リフトが 100kg 程度あり、長期間にわたって定期的に計測を行うため、研究室から梨圃場まで約 1km 以上の距離を容易に移動する必要がある。よって、これらの装置を、電動台車によって容易に移動できるシステムを開発した(図 5)。



図 5 果実計測用モバイル MRI

図 6 は、実験室において、この装置で撮像した梨果実の画像である。これは、TR=400ms、TE=20ms の 3D スピンエコーシーケンスで撮像したデータセット（撮像視野は 128mm 立方、256 × 256 × 16 画素）の中央断面の画像である。すなわち、スライス厚 8mm、面内画素サイズは 0.5mm である。信号積算回数を 4 回としたため、計測時間は約 1.8 時間であった。このように、この装置が、梨果実を十分に撮像できる性能を有することが分かる。

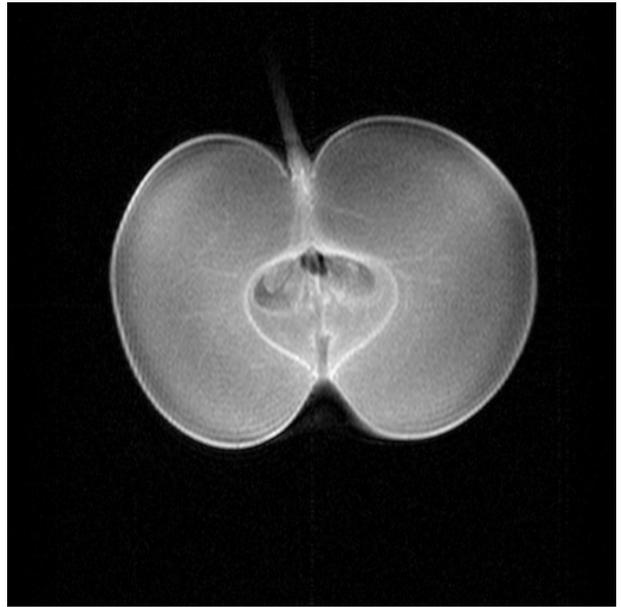


図 6 モバイル MRI で撮像した梨画像

さて、梨果実の成長過程を追跡するにあたり、注意すべきことがある。それは、同一の木に結実する梨果実にも、大きな個体差があるということである。このため、週に 1 回の計測において図 7 に示すよう

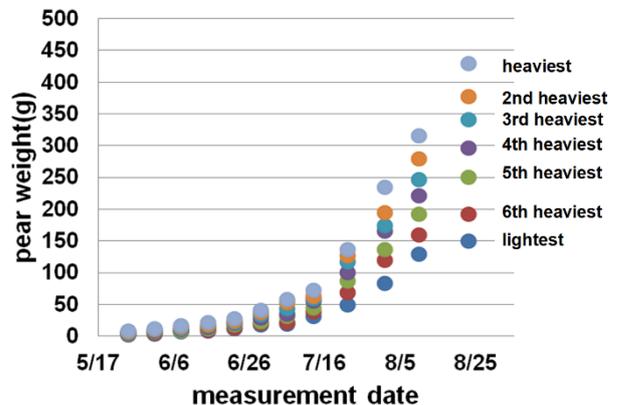


図 7 梨果実の重量の経時変化

に、その実験日で、ほぼ最大の果実とほぼ最小の果実を見出し、その間を等分するような大きさの果実を7個摘果して、それらの緩和時間 (T_1 , T_2) と ADC の計測を行った。このように、同一の木の梨果実も、日照、枝の通水能など、さまざまな要因により、大きな個体差が発生するため、それらを定量化するための工夫が必要である。

このように、結実直後の5月下旬から、ほぼ成長が停止する8月下旬まで、ほぼ毎週、研究室から学内の梨園場に通い、7個の果実に関して、摘果、重量測定、緩和時間計測、ADC計測を行った。なお、NMR計測は、摘果直後に行ったが、前年の予備実験により、摘果前のNMRパラメータと摘果直後のそれらは、誤差の範囲で一致することを確認している。

緩和時間計測は、 T_1 に関しては、inversion recovery法、 T_2 に関しては、CPMG法を使用した。

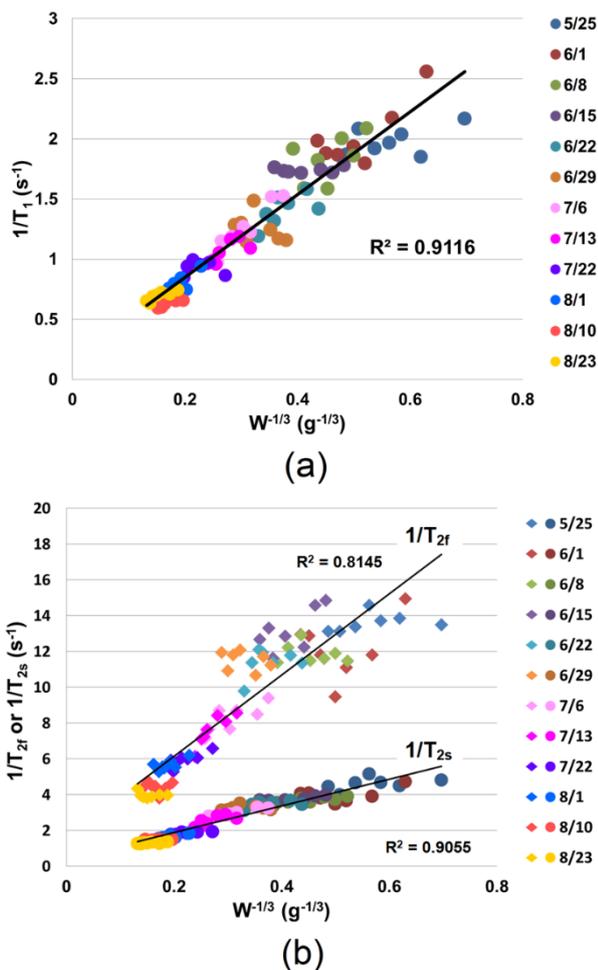


図8 梨果実重量の立方根の逆数に対する T_1 と T_2

T_1 に関しては、1本の緩和曲線でフィッティング可能であったが、 T_2 に関しては、2本の緩和曲線（短い T_2 成分を T_{2f} 、長い T_2 成分を T_{2s} とした：fはfast, sはslowの意味）で良好にフィッティングできた。そこで、果実サイズに対応する果実重量の立方根の逆数に対して、 T_1 の逆数（縦緩和率）と T_2 の逆数（横緩和率）をプロットすると、図8のような結果が得られた。すなわち、果実が小さい程、縦緩和も横緩和も速く、果実が大きい程、縦緩和も横緩和も遅くなる、ということが明瞭に示された。

以上の現象の合理的解釈は、(1)梨果実が結実してしばらく経った後においては、果実細胞の細胞分裂は、ほとんど行われず、各細胞が肥大することにより果実が成長（肥大）する、(2)果実細胞が肥大すると、それに含まれる水分子の熱運動による平均自由行程は比例して増加し、細胞内の壁などへの衝突による核磁気緩和の確率は減少する、(3) T_2 の遅い成分は、果実細胞内の液胞内の水分子によるもの、 T_2 の速い成分は、果実細胞内のその他の部分によるものと思われる、(4)異なる T_2 成分を有する水分子は、磁化移動に伴う交差緩和などにより、単一の T_1 として観察される、となる。これらの解釈は、果実肥大に関する伝統的解釈と一致するものであるが、NMR計測によって実証した例は少ないので、意義のある結果であると結論できる。

5. むすび

MRIの計測系を小型化して可搬型とし、永久磁石を組み合わせるにより、屋外でも計測ができるMRIシステムを可能とし、樹木と果実の二つの例に関して撮像実験を行った。その結果、想像されてはいたものの、明瞭な実験結果がなかった現象に関して、新たな結果を取得することができた。よって、全く未知の現象の解明にも、この手法は有用であると考える。

謝辞

この解説で紹介した研究は、筑波大学農林技術センターの弦間洋教授、瀬古澤由彦助教との共同研究によるものである。また、共同研究者の筑波大学数理解物質系の寺田康彦准教授、(株)エムアールテクノロジーの拝師智之代表、筑波大学大学院修士課程修了の木村武史氏、下家祐人氏には多大な貢献をいただきました。この場を借りて御礼いたします。

参考文献

- [1] Lauterbur PC. Image formation by local induced interactions: examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature* **242** (1973) 190.
- [2] Kose K, Physical and technical aspects of human magnetic resonance imaging: present status and 50 years historical review. *Advances in Physics: X*, **6**, (2021) 1885310.
- [3] 巨瀬勝美編著, コンパクトMRI, 共立出版(2004).
- [4] Kose, K. A History of Compact MRI Systems in Tsukuba (1986–2018). *Appl Magn Reson* **54**, (2023) 1633.
- [5] Wald LL, McDaniel PC, Witzel T, Stockmann JP, Cooley CZ. Low-cost and portable MRI. *J Magn Reson Imaging*. **52** (2020) 686.
- [6] Cooley CZ, Stockmann JP, Witzel T, LaPierre C, Mareyam A, Jia F, Zaitsev M, Wenhui Y, Zheng W, Stang P, Scott G, Adalsteinsson E, White JK, Wald LL. Design and implementation of a low-cost, tabletop MRI scanner for education and research prototyping. *J Magn Reson*. **310** (2020) 106625.
- [7] Kimura T, Geya Y, Terada Y, Kose K, Haishi T, Gemma H, Sekozawa Y. Development of a mobile magnetic resonance imaging system for outdoor tree measurements. *Rev. Sci. Instrum* **82** (2011) 053704.
- [8] A. Nagata, K. Kose, Y. Terada. Development of an outdoor MRI system for measuring flow in a living tree. *J Magn Reson* **265** (2016) 129.
- [9] Terada Y, Horikawa Y, Nagata A, Kose K, Fukuda K. Dynamics of xylem and phloem sap flow in an outdoor zelkova tree visualized by magnetic resonance imaging. *Tree Physiology*, **40** (2020) 290.
- [10] Cooper RK, Jackson JA, Remote (inside-out) NMR. I. Remote production of a region of homogeneous magnetic field, *J Magn Reson* **41** (1980) 400.
- [11] Burnett LJ, Jackson JA, Remote (inside-out) NMR. II. Sensitivity of NMR detection for external samples, *J Magn Reson* **41** (1980) 406.
- [12] Jackson JA, L.J. Burnett, Harmon F, Remote (inside-out) NMR. III. Detection of nuclear magnetic resonance in a remotely produced region of homogeneous magnetic field, *J Magn Reson* **41** (1980) 411.
- [13] Rokitta M, Rommel E, Zimmermann U, Haase A, Portable nuclear magnetic resonance imaging system, *Rev. Sci. Instrum.* **71** (2000) 4257.
- [14] Köckenberger W, Functional imaging of plants by magnetic resonance experiments, *Trends Plant Sci.* **6** (2001) 286.
- [15] Utsuzawa S, Fukuda K, Sakaue D, Use of magnetic resonance microscopy for the non-destructive observation of xylem cavitation caused by pine wilt disease, *Phytopathology* **95** (2005) 737.
- [16] Van As H, Intact plant MRI for the study of cell water relations, membrane permeability, cell-to-cell and long-distance water transport, *J Exp Bot* **58** (2007) 743.
- [17] Windt CW, Soltner H, van Dusschoten D, Bluemler P, A portable Halbach magnet that can be opened and closed without force. *The NMR-CUFF*, *J Magn Reson* **208** (2011) 27.
- [18] Geya Y, Kimura T, Fujisaki H, Terada Y, Kose K, Haishi T, Gemma H, Sekozawa Y. Longitudinal NMR parameter measurements of Japanese pear fruit during the growing process using a mobile magnetic resonance imaging system. *J Magn Reson* **226** (2013) 45.

農業・食品研究における MRI の活用と展望 Trends and Prospects of MRI Application in Agriculture and Food Research

藤原睦也, 関山恭代 (農業・食品産業技術総合研究機構)
Yoshinari FUJIWARA, Yasuyo SEKIYAMA (National Agriculture and Food Research Organization)
e-mail: fujiwaray896@naro.affrc.go.jp, sekiyama@naro.affrc.go.jp

1. はじめに

農産物や食品中の化学成分や水の挙動(分布・局在や運動性など)は、貯蔵生理や加工特性、物性、棚持ち性などに影響する大きな要因だと考えられる。核磁気共鳴(NMR)分光法は、溶液や固体、ゲル状物質など様々な性状の試料に適用可能であり、試料中に含まれる成分の化学構造や運動状態、物理的性質を調べることができる。また、NMR法は定量性に優れ、装置の安定性およびスペクトルの再現性が高く、長期間にわたるデータ比較や追跡調査が可能であるなどの利点もある。従って、様々な性状の試料を扱い、かつ長期間の調査が必要となる農業・食品研究との相性がよいと言える。

NMR現象を利用した分析技術に磁気共鳴画像法(MRI, NMRイメージングとも呼ばれる)がある。MRIは、磁場強度に勾配をかけることでNMR信号に空間分解能をもたせ、非侵襲的に信号を検出することで試料内部の断層画像を得る技術である。MRIが医療診断の現場で実用化されていることは広く認知されているが、農業・食品研究分野でも活用される。主に水の分布や運動性をマッピングして画像コントラストを得ることで、組織構造の観察や物性情報の取得が可能である。

筆者らのグループでは、7.1Tまたは9.4Tの高磁場MRI装置を用いて主に面分解能100~200 μm^2 程度のマイクロイメージングを行っている。筆者らの装置では、最大でも内径30mmのRF(radio frequency, ラジオ波)コイルの中央に試料を設置するため試料サイズに制限があり、目的に応じて試料の選択や調製、保定方向などを工夫している。本稿では、農業・食品研究における近年のMRIの活用事例について、筆者らのグループの取り組みを含めて紹介する。

2. 農業・食品研究における MRI の活用

2.1 農産物・食品の MRI データから得られる情報

農業・食品研究で扱う代表的な MRI データにつ

いて、市販のミニトマトを例に紹介する(図1)。

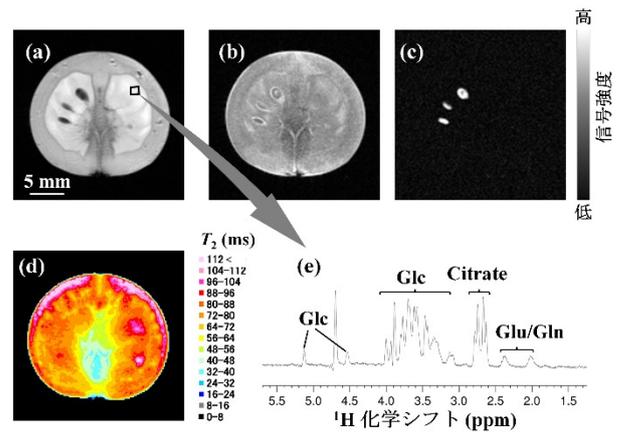


図1 ミニトマトのMRIデータの例。(a) プロトン密度強調画像, (b) 水信号($\delta_{\text{H}} 4.7 \text{ ppm}$) 選択励起画像, (c) 油脂信号($\delta_{\text{H}} 1.2 \text{ ppm}$) 選択励起画像, (d) T_2 分布画像, (e) ^1H -MRS スペクトル(図1aのゼリ一部分の四角枠内を測定)。

MRIでは、主にプロトンのNMR信号強度の違いから画像コントラストを得て、試料内部の解剖学的構造や水分分布などを観察することができる。信号強度は、単位体積あたりのプロトンの量(プロトン密度)や緩和時間の影響を受けて変化する。NMR信号や画像コントラストが得られる原理については、良書や解説が数多くあるのでご参照いただきたい[1]。

組織構造の観察には、プロトン密度強調画像や縦緩和時間(T_1)強調画像、横緩和時間(T_2)強調画像などの強調画像が検出の目的に応じて用いられる。例えばプロトン密度強調画像では、名前の通りプロトン密度の違いを反映した画像コントラストが得られ、例えば図1aの様にも果実内部の詳細な構造が観察できる。農産物や食品のプロトン密度強調画像は、形態の確認や組織同定に用いられ、これを対照画像としてほかの画像について考察することも多い。

各種強調画像が検出可能なプロトンの全ての信号を画像化するのに対し、化学シフト選択的イメージングと呼ばれる手法がある。水と油脂の化学シフト差（約 3.5 ppm）を利用してそれぞれを選択的に検出し、別々にマッピングする技術で、油を多く含む農産物や食品の評価に用いられる[2]。図 1b と 1c では、水が果実中に比較的均一に存在するのに対し、脂質は種子に局在している様子が分かる。なお、種子は水分含量が周辺組織と比べて低いため、プロトン密度強調画像のコントラストでは黒抜きに見える。脂質の選択的マッピングの手法と農産物や植物の解析例については Borisjuk らの総説に詳しく紹介されている[3]。

T_2 緩和時間は農産物や食品中のプロトンの運動性を反映するため、自由水の変化や物性の指標として用いられることが多い。図 1d は、 T_2 緩和時間をマッピングした画像で、前述のプロトン密度強調画像および T_2 強調画像の撮像時に同時に取得できる。一般的に、水の T_2 緩和時間は長いほど運動性は高く、短いほど低いと解釈されるが、生体試料や食品は複数成分の複雑な混合系であり、デンプンやタンパク質などの高分子、糖などの代謝物、微量金属などの影響を受ける。従って、現象の解釈には多面的かつ横断的な考察が必要となる。

磁気共鳴スペクトロスコーピー（MRS）では、MRI の撮像に追加して関心領域の $^1\text{H-NMR}$ スペクトルを得ることができる（図 1e）。なお、本稿では、一般的な溶液 NMR 法で得られる $^1\text{H-NMR}$ スペクトルと区別するために、 $^1\text{H-MRS}$ スペクトルと呼ぶ。本手法では、生体中の主要成分である水の信号を抑制して水信号に隠れた様々な代謝物を検出ことができ、脳やその他の動物組織への活用は一般的になってきた[1, 4]。事例は少ないものの一部植物への応用も試みられており、マメ科のモデル植物 *Medicago truncatula* と根粒菌の共生メカニズムの解析が報告された[5]。内径約 1.5 mm のソレノイド型マイクロコイルを作製し、磁場強度 22.3 T の MRI 装置を用いることで高感度・高分解能を達成し、 $7 \times 7 \times 7 \mu\text{m}^3$ の高解像度で根粒内の根粒菌感染細胞と非感染細胞の識別に成功した。MRS では $200 \times 350 \times 350 \mu\text{m}^3$ の空間分解能で、含窒素同化産物であるベタインやアスパラギンの根粒内局所での検出に成功している。

2.2 農業研究分野における MRI の活用例

農業研究分野においては、MRI で果物や野菜の水分布や運動性を検出し、収穫物の内部損傷[6]、新鮮さ [7]、花芽の休眠 [8]、果実の発育にともなう維管束の発達[9]などの評価が行われてきた。表 1 に、いくつかの研究例をまとめた。

表 1 農業研究における MRI の活用例

解析対象	磁場強度	概要
アボカド	1.5 T	内部損傷の観察
バレイショ	1.5 T	内部障害の観察
トリュフ	1.0 T	鮮度の評価
精米*	7.1 T	吸水特性の評価
ナシの花芽*	7.1 T	休眠生理の解析
サツマイモ*	7.1 T	内部褐変の検出
トマト*	7.1 T	成熟にともなう T_2 変化の解析
サトウキビ害虫*	7.1 T	卵巣発達の検出

*筆者らのグループでの実施例

内部損傷や新鮮さに関する研究では、輸送中の発生が問題になるアボカドの打撲による損傷を肉眼で確認できる前の段階で検出した例や[6]、バレイショ生育中の水不足による内部障害を観察した例[10]、トリュフの新鮮さを水の挙動を定量することで測定した例[7]などが報告されている。また、精米の吸水特性は、その後の加工・調理特性に影響する重要な因子だと考えられ、筆者らのグループでも多くの品種の吸水特性を明らかにしてきた。初期の研究では酒米の山田錦がコシヒカリと比較して吸水が速いことを明らかにし、麹菌が浸透しやすい酒米としての特性が示唆された[11]。また、その後の研究では、吸水速度の違いが酒米に特徴的な心白によって生じていることを、複数品種の比較によって明らかにした[12]。果樹の花芽や果実の形成に関する研究では、MRI で観察されるナシの自由水の増加が水チャンネルおよび開花に関連する遺伝子の発現と同じタイミングで起こることが示された[8]。また、サトウキビ害虫であるケブカアカチャコガネについて、卵巣発達の過程を観察するための撮像条件を決定し、成虫が地上に現れるタイミングと卵巣発達および性成熟との関係を明らかにした[13]。

2.3 食品研究分野における MRI の活用例

MRI を用いた食品研究では、主に水や脂質の局在や運動性およびこれらの経時変化を検出し、調理による状態変化や冷凍時の水の移動のなどが分析されてきた。代表的ないくつかの例を表 2 に示す。

表 2 食品研究における MRI の活用例

解析対象	磁場強度	概要
米飯*	7.1 T	炊飯中に生じる米の内部空洞の解析
スパゲッティ*	7.1 T	水の移動と糊化の解析
天ぷら*	7.1 T	保存中の水の移動の観察
貝(<i>Macrta chinensis</i>)	0.5 T	乾燥過程の評価
牛肉の冷凍	0.5 T	劣化の評価

*筆者らのグループでの実施例

食品中の水分分布や水の運動性は、食感や糊持ち性などの品質に影響する重要な因子だと考えられる。特に、コメやパスタなどのデンプン食品については、MRI による食品中の水分動態の解析が古くから行われてきた。米飯の研究では、もち米と比較して程よい粘り気があり、中国で好まれる低アミロース米の炊き上がりから 120 分後の MRI 画像を測定し、 T_2 緩和時間の解析から、低アミロース米の水の移動性がもち米よりも低く、うるち米よりも高いことを明らかにしている[14]。筆者らのグループでも、うどんやスパゲティなどの麺類やパンの解析を行ってきた。アル・デンテの状態にゆでたスパゲティは、その直径にかかわらず同心円上に水分勾配ができ、室温に放置すると表面から中心に向かって水が移動する。また、スパゲティをゆでた後の T_2 分布の違いと、蛍光顕微鏡画像で観察された糊化の程度の違いは幾何学的によく一致し、糊化の程度はスパゲティの太さによらず沸騰時間に依存することが分かった[15]。ほかには、米粉から作られたグルテンフリーパスタをゆでた後の水分分布の違いについて MRI により明らかにされている[16]。

乾燥やその後の吸水の特性は、長期間の食品保存のためにも重要である。貝を熱風、および天日干しで乾燥、戻した際の水の移動についての研究では、乾燥後水に浸した貝への水の流入量を MRI 画像の信号強度から解析しており、天日干し後の水の流入

が 120 分後に大きく起こるのと比較して、熱風による乾燥後の流入量は 30~60 分と比較的早いタイミングで起こることを明らかにしている[17]。

冷凍に関する研究の一例では、牛肉の冷凍時のドリップロスによる品質劣化について解析している[18]。この研究では、MRI を用いて水の移動度を解析することで、牛肉の筋繊維の損傷による水の自由度の増加が冷凍温度の違いによって異なることを明らかにしている。

化学シフト選択的イメージングは様々な食品の油脂とその分布の評価に使えると期待でき、筆者らは天ぷらの評価について報告した[2, 18]。水および脂質の選択的励起画像では、衣の表面に油が、豆腐や肉、魚などの素材と衣の内側に水が局在している様子がよく分かる。図 2 には魚の天ぷらの例を示す。これらの解析では、衣の加水量を変えると含泡構造が変化することや、揚げてからの時間経過に伴って具材から衣へ水が移動すること、衣表面における油はあまり移動しないことなどが明らかにされた[19]。時間経過にともなう天ぷらの衣の食感の低下は、主に具材からの水分移動に起因することが示唆された。

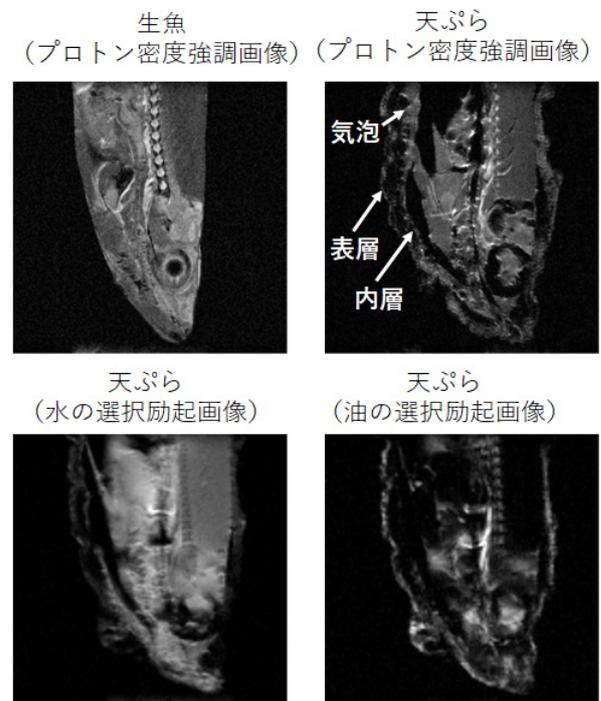


図 2 魚の天ぷらの MRI 画像

3. 当該分野における MRI の可能性とまとめ

以上本稿では、農業・食品研究分野での MRI の活用について、筆者らのグループの取り組みとともに紹介した。高磁場 MRI 装置は装置そのものや維持費が高額であり、また、計測に時間がかかり 1 日で計測できる試料数が制限されるため、幅広い普及という点からは現状では難がある。一方で、少々夢見がちな部分もあるかもしれないが、潜在的な応用場面の可能性を語りたい。

例えば、米の吸水特性は、育種や栽培方法の開発、炊飯器の設計、プログラミングの評価において重要な指標になり得るし、花芽の休眠覚醒に伴う水の挙動が明らかになれば、休眠コントロール技術の開発シーズとなる可能性がある。害虫の卵巣発達の検出による性成熟の見極めは、効果的な防除のタイミングを判別する指標になるかもしれない。また、デンブ加工食品の水分分布や水分動態は、原材料の評価や加工法の開発や調理条件の改良の指標になりうる。

MRI が当該分野でもっと広く活用されるためには、装置やソフトウェアの開発によって、より高解像度のデータがより簡易に、より安価に取得できるようになることが望まれる。MRI 装置は 10 年前と比較しても随分と小型化し、永久磁石を用いた卓上型装置なども進化しているため、今後の期待は大きいと考えている。これらの動向に注視しつつ、農業・食品産業分野との連携を強化しながら、測定技術の高度化とデータ蓄積を行っていきたい。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、科研費基盤 C (20K06066) の助成を受けて実施しました。また、MRI 画像の撮像でご尽力いただいた堀金明美博士、奥田博子氏および共同研究者の皆さまにこの場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 山崎文之, 杉山一彦, 栗栖薫, "Single voxel proton MR spectroscopy による脳病変の診断," *Jpn. J. Neurosurg.*, vol. 18, no. 8, 603-608 (2009).
- [2] 関山恭代, "NMR で農産物・食品を見る～NMR メタボロミクスと MRI 画像解析の活用例～", *オレオサイエンス*, vol. 19, no. 3, 109-116 (2019).
- [3] Borisjuk, L. *et al.*, "Nuclear magnetic resonance imaging of lipid in living plants," *Prog. Lipid Res.*, vol. 52, no. 4, 465-487 (2013).
- [4] Emwas, A. H. *et al.*, "NMR Spectroscopy for Metabolomics Research," *Metabolites*, vol. 9, no. 7, 123 (2019).
- [5] van Schadewijk, R. *et al.*, "Magnetic Resonance Microscopy at Cellular Resolution and Localised Spectroscopy of *Medicago truncatula* at 22.3 Tesla," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, 971 (2020).
- [6] Mazhar, M. *et al.*, "Non-destructive ¹H-MRI assessment of flesh bruising in avocado (*Persea americana* M.) cv. Hass," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 100, 33-40 (2015).
- [7] Galante, A. *et al.*, "Quantitative magnetic resonance imaging technology as an effective tool for monitoring post-harvest decay of *Tuber aestivum ascomata*," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 194, 112069 (2022).
- [8] Saito, T. *et al.*, "Development of flower buds in the Japanese pear (*Pyrus pyrifolia*) from late autumn to early spring," *Tree Physiol.*, vol. 35, no. 6, 653-62 (2015).
- [9] Moriwaki, S. *et al.*, "visualization and quantification of vascular structure of fruit using magnetic resonance microimaging," *Appl. Magn. Reson.* vol. 45, 517-525 (2014).
- [10] Hajjar, G. *et al.*, "MRI investigation of internal defects in potato tubers with particular attention to rust spots induced by water stress," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 180, 111600 (2021)
- [11] Horigane, A. K. *et al.*, "Water penetration into rice grains during soaking observed by gradient echo magnetic resonance imaging," (in English), *J. Cereal Sci.*, vol. 44, no. 3, 307-316 (2006)
- [12] Horigane, A. K. *et al.*, "Moisture distribution in rice grains used for sake brewing analyzed by magnetic resonance imaging," *J. Cereal Sci.*, vol. 60, no. 1 193-201 (2014).
- [13] Fujiwara-Tsujii, N. *et al.*, "Observations of the migration of adult (Coleoptera:

- Scarabaeidae*) from belowground to the soil surface and their reproductive status by MRI," (in English), *Appl Entomol. Zool.*, vol. 48, no. 3, 233-239 (2013).
- [14] Liu, G. *et al.*, "Water migration, texture and oral processing properties of semi-waxy rice during retrogradation," *J. Food. Sci.*, vol. 86, no. 12, . 5100-5106 (2021).
- [15] Sekiyama Y. *et al.*, " T_2 distribution of boiled dry spaghetti measured by MRI and its internal structure observed by fluorescence microscopy," *Food. Res. Int.*, vol. 48, no. 2, 374-379 (2012).
- [16] Marti, A. *et al.*, "Effect of processing conditions on water mobility and cooking quality of gluten-free pasta. A Magnetic Resonance Imaging study," *Food Chem.*, vol. 266, pp. 17-23, (2018).
- [17] Wang, S. *et al.* "Dynamics of water mobility and distribution in Sur clam (*Macra chinensis*) during dehydration and rehydration processes assessed by low-field NMR and MRI," *J. Food Meas. Charact*, vol. 11, no. 3, 1342-1354 (2017).
- [18] Li, X. *et al.*, "Effect of Storage Temperatures on the Moisture Migration and Microstructure of Beef," *J. Food Qual.*, vol. 2018, 1-8 (2018).
- [19] Horigane, A. K. *et al.* "Observation of the structure, moisture distribution, and oil distribution in the coating of tempura by NMR micro imaging", *J. Food Sci.*, vol. 68, no. 6, 2034-2039 (2003).

MRIによるシイタケ発生時の培地の水分濃度計測

Moisture Concentration Measurement of Media During Shiitake Mushroom Development Using MRI

小川 邦康 (慶應義塾大学), 八島 武志 (石川県農林総合研究センター)

吉住 真理子 (徳島県立農林水産総合技術支援センター)

阿部 正範 (徳島県立農林水産総合技術支援センター)

Kuniyasu OGAWA (Keio University), Takeshi YASHIMA (Ishikawa Agr. and For. Res. Ctr.)

Mariko YOSHIZUMI (Tokushima Agric. Forestry and Fisheries Tech. Support Ctr.)

Masanori ABE (Tokushima Agric. Forestry and Fisheries Tech. Support Ctr.)

e-mail: ogawa@mech.keio.ac.jp

1. はじめに

シイタケは日本で毎年約7万トン(2022年)が生産され、その生産量の約1割が原木で、残りの9割が菌床によって栽培されている[1]。原木シイタケは乾物の贈答品としての利用が主であるが、生シイタケでは大きくて形の良いものが高級品として流通している。例えば石川県では「のとてまり」ブランド[2]として高値で取引されている。一方、菌床シイタケは家庭での日常食として広く流通している。

原木シイタケはコナラやクヌギを丸太のまま原木として用い、植菌後に林内で栽培される。ほだ木(植菌後の原木は「ほだ木」と呼ぶ)は自然環境に置かれるためシイタケ菌糸が生育しやすいように生産者はほだ木の水分量に十分な注意を払う。特にシイタケ発生時にはシイタケの成長に多くの水分を必要とするため生産者はほだ木に散水するか、または、ほだ木を浸水させて水分量を高める。



図1 原木によるシイタケ栽培(林内)の様子

その際にシイタケの収穫量を最大にするほだ木の水分量とほだ木内の空気量があり[3-5]、水分量が多過ぎてもシイタケ菌糸が十分に呼吸できずに収穫量が低下する。シイタケは五月雨式に15~20個が発生・収穫されるため、収穫のたびにほだ木の水分量を適切に調節する必要がある。

菌床シイタケはおが粉と米ぬかや小麦ふすまなどの栄養材と水を混ぜた培地を培養袋の中に入れ、滅菌後に植菌されて恒温室内で栽培される。菌床栽培は100~120日の培養期間でシイタケが収穫できる。菌床栽培は原木栽培に比べて短期間で、かつ、自然環境に影響されずにシイタケを栽培できるという利点がある。菌床栽培でも培地の水分量が収穫されるシイタケの寸法や形に大きな影響を及ぼすため生産者は培養袋底部に溜まった水分を排出し、シイタケの発生・収穫時には噴霧するなどして培地の水分量を調整する[6]。

どちらの栽培法でも培地(ほだ木やおが粉)の



図2 菌床によるシイタケ栽培(恒温室内)の様子

水分量が培養期間中のシイタケ菌糸の伸長・増殖とシイタケの収穫量に大きな影響を与える。培地の含水率は電気抵抗法や採取法で計測できるが、それらの手法はほだ木や培地を傷つけ、培地に害菌が侵入する恐れがあるために長期間に渡る継続的な計測には適さない。

MRI（核磁気共鳴画像法）は非侵襲で内部の水分濃度を計測できる。原木栽培ではシイタケ発生時のほだ木内の水分濃度を計測し、シイタケ菌糸がほだ木のどの範囲から水分を集めてシイタケを成長させるかを計測した[7]。また、菌床では植菌から 40 日以降にシイタケ菌糸が伸長・増殖し、シイタケが収穫されるまでの期間の水分濃度を計測した[8]。計測結果から、菌床内の水分濃度が培養日数とシイタケの成長によって大きく増減することが分かった。ここではそれらを紹介する。

2. 培地と栽培環境

2.1 原木栽培

石川県で伐採されたコナラ（樹齢は約 35 年、直径は約 90 mm）を 900 mm の長さに切断しシイタケ栽培用の原木として用いた。冬季に乾燥させた後、3 月に原木表面に穴（内径 12.7 mm、深さ 25 mm）を約 150 mm 間隔で開け、形成菌（菌興 115 号）を穴の中に打ち込んだ。原木は林内（石川県農林総合研究センター、能登地方）で栽培した。9 月下旬から 11 月中旬までほだ木にスプリンクラーで 1 日おきに 1 時間散水した。12 月上旬にほだ木を同センターのハウス内に移動して立てて置き、シイタケを発生させた。

11 月末にほだ木から第一番目の幼子実体が発生した。ほだ木を長さ 30 cm に切り慶大に輸送し

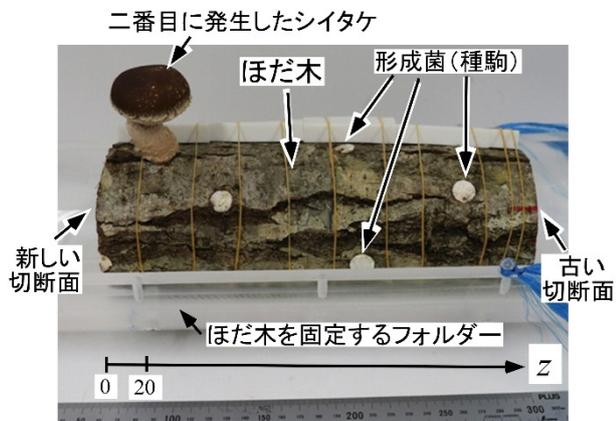


図 3 シイタケが発生したほだ木

て MRI 計測を実施した。ほだ木を浸水させて給水し、三週間後に二番目のシイタケが発生した。図 3 にはその時のほだ木の様子を示す。

2.2 菌床栽培

シイタケ栽培のための培地は広葉樹のおが粉、米ぬか、ふすまを混合して製作した。培地に含まれる水の質量割合は 62 % とした。培地（質量 500 g）を不織布の通気口が付いたポリプロピレン製の培養袋に入れた。培地は蒸気滅菌され、冷却後に菌床上部に種菌（北研 607 号）を植菌した。菌床の寸法は約 100 mm 立方であった。

菌床は培養室（21℃、湿度約 75%）内で培養した。培養日数が 95 日の時に菌床は発生するシイタケの数を抑制するために高温環境に（28℃）に三日間さらされた。高温処理後に菌床から培養袋を取り除き、培養室温度を 17℃ に低下させてシイタケを発生させた。二から五番目のシイタケが発生した菌床の様子を図 4 に示す。



図 4 シイタケが発生した菌床

3. MRI 装置と計測パラメータ

3.1 MRI 装置

MRI 計測装置は 1.1 Tesla ϕ 280 mm 超電導磁石（四肢計測用、JASTEC 製）と MRI コンソールで構成されたシステムを用いた（図 5 参照）。円筒形勾配磁場コイルと円筒形 RF プロブ（内径 ϕ 150 mm）が超電導磁石内に設置された。MRI 計測システムはエム・アール・テクノロジーが製造した。コイルは 17℃ の空気で冷却され、試料温度を 25℃ 以下に保持した。計測対象の水素原子核 ^1H の共鳴周波数は 46.567 MHz であった。

MRI 計測時にほだ木と菌床は位置を固定するためのフォルダーに乗せた。また、乾燥を防ぐためにプラスチックシートで試料全体を覆った。

3.2 計測パラメータ

単純スピネコーをマルチスライスに拡張したシーケンスを用いてMRI計測を行った。スライスにはほだ木を輪切りにする方向(z)とした。画像(x, y)の画素数は128×128ピクセル、計測範囲は170mm×170mm、空間分解能は1.33mm×1.33mm、スライス厚さは原木で10mm、菌床で6mmとした。

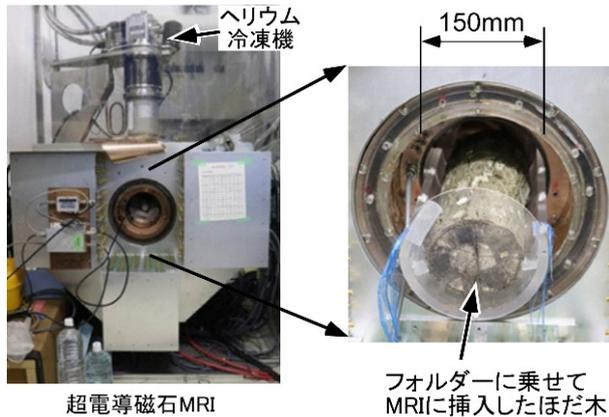


図5 ほだ木を挿入したMRI装置

T_1 , T_2 強調画像は90度励起パルスの繰り返し時間 TR , エコー時間 TE を表1に示す値で計測し、それぞれ8枚と5枚の画像を順次取得した。

表1 T_1 , T_2 強度画像の計測パラメータ

パラメータ	T_1 強調画像	T_2 強調画像
TR [ms]	65, 80, 100, 125, 160, 250, 500, 1500	1500
TE [ms]	11	11, 15, 19, 23, 27

3.3 水分量の空間分布の算出法

MR画像からほだ木または菌床内部の水分濃度の空間分布 $\rho(x, y, z)$ は次式によって算出される。

$$SigInt(x, y, z) = A \rho(x, y, z) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{TR}{T_1(x, y, z)}\right) \right\} \times \exp\left(-\frac{TE}{T_2(x, y, z)}\right) \quad (1)$$

ここで、 $SigInt$ は $TR = 1500$ ms, $TE = 11$ ms で取得された画像の信号強度、 A は装置定数である。 T_1 , T_2 は位置(x, y, z)での T_1 , T_2 緩和時定数である。 T_1 値は TR を変えて得た8枚の T_1 強調画像の各ピクセルでの信号強度 $SigInt(x, y, z, TR)$ を飽和法の指数関数 $\{1 - \exp(-TR/T_1)\}$ で近似することで得られる。 T_2 値は TE を変えて得た5枚の T_2 強調画像の各ピクセルでの信号強度 $SigInt(x, y, z, TE)$ を減衰関数

$\exp(-TE/T_2)$ で近似することで得られる。

水分濃度 $\rho(x, y, z)$ は信号強度と水分濃度を対応付ける校正直線を作成して決定した。その方法は、ほだ木の場合には、ほだ木を2~3 cm³の木片に切断し、質量法で木片内の水分質量を求め、3D形状計測器で木片の体積を計測して木片全体の平均水分濃度を算出してその領域での平均信号強度と対応付けることを行った。

菌床の場合には、菌床が脆くて切断すると形状が保てないために菌床を切断せずに、菌床全体の水分量と菌床全体に渡って積分した信号強度を対応付けることを行った。

4. ほだ木の水分濃度

4.1 ほだ木の水分濃度分布

シイタケが発生したほだ木を二日間隔でMRIにより計測した。図6に第二回目の子実体が成長する過程の外観写真, MRIの信号強度画像, 水分濃度を示した。信号強度画像と水分濃度はシイ

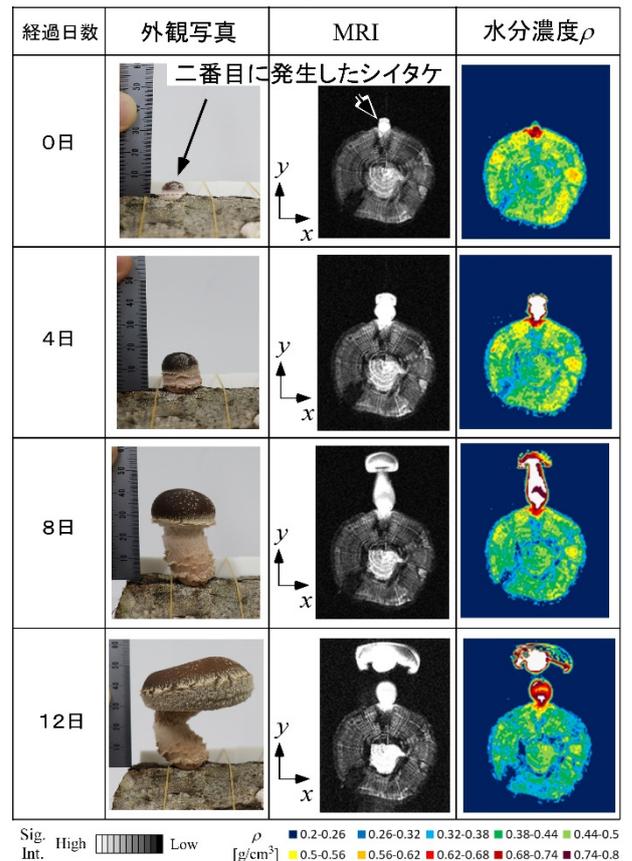


図6 ほだ木に二番目に発生したシイタケ(軸方向位置 $z = 20$ mm)の外観写真, MRIの信号強度画像, 水分濃度分布の時間変化

タケが発生した軸方向位置 ($z = 20 \text{ mm}$) でのほだ木の断面($x, y, z = 20 \text{ mm}$)を示した。ここで、経過日数はシイタケが表面に現れた日を 0 日とした。

シイタケ近傍のほだ木の水分濃度が非常に高く、シイタケの成長とともに辺材部の水分濃度が徐々に低下すること、反対に心材部の水分濃度はわずかな低下に留まることが分かった。発生から 14 日目に収穫されたシイタケの質量は 43 g であった。

4.2 ほだ木の水分濃度の時間変化

図 6 には一断面の水分濃度のみを示したが、同様な計測が軸方向の全領域 ($z = 0 \sim 220 \text{ mm}$) に渡って 10 mm 間隔で取得された。ここでは、ほだ木の水分濃度の変化が大きい辺材部に注目し、断面内での辺材部の平均水分濃度を求めた。その結果を断面平均水分濃度と称して、図 7 にその時間変化を示した。

シイタケ発生直後(経過日数が 0 日)の水分濃度が最も高く、その後はほだ木全体で徐々に低下していった。水分濃度が最も高い領域は二番目のシイタケが発生した領域 ($z = 0 \sim 80 \text{ mm}$) であり、その次に高い領域は一番目のシイタケが発生した領域 ($z = 190 \sim 210 \text{ mm}$) であった。これらの領域にはシイタケの芽となる菌糸塊 #1~6 (オレンジ色の矢印) が発生しており、次の発生に備えてほだ木の水分濃度が高くなっていると推測される。

ほだ木の水分濃度は経過日数とともに全体的に減少した。その中でも特に二番目のシイタケ発生位置の周辺 ($z = 0 \sim 80 \text{ mm}$) の水分濃度は経過日数とともに大きく低下した。この図で経過日数が 16.8 日と示された水分濃度は 14 日目にシイタケが

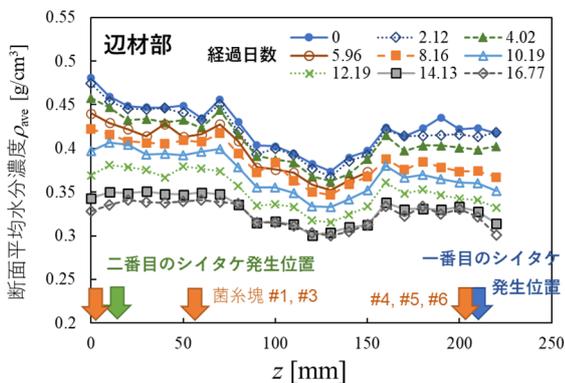


図 7 二番目に発生したシイタケが成長する過程においてほだ木の辺材部で平均化した水分濃度の時間変化

収穫された後に計測された水分濃度である。

4.3 ほだ木の水分濃度の減少速度

図 7 に示した水分濃度を MRI 計測の時間間隔で割ることによって水分濃度の減少速度 $r_{\text{water_sap}}$ を算出した。減少速度のばらつきを抑えるために 9 個のデータを四つのグループ (0~4.0 日, 6.0 日~10.2 日, 10.2 日~14.1 日, 14.1 日~16.8 日) に分け、それぞれ三つの値に最小二乗法を適用して、直線の勾配から減少速度を算出した。

二番目のシイタケが急速に成長する時 (10.2~14.1 日) にその周辺 ($z = 0 \sim 70 \text{ mm}$) で水分濃度の減少速度が特に大きかった。シイタケを収穫した後 (14.1~16.8 日) には減少速度は小さくなった。この結果から、シイタケが成長する際にほだ木全体の辺材部から、その中でも特にシイタケ発生部の周辺からシイタケ菌糸が水を集めてシイタケに水分を供給していると言える。

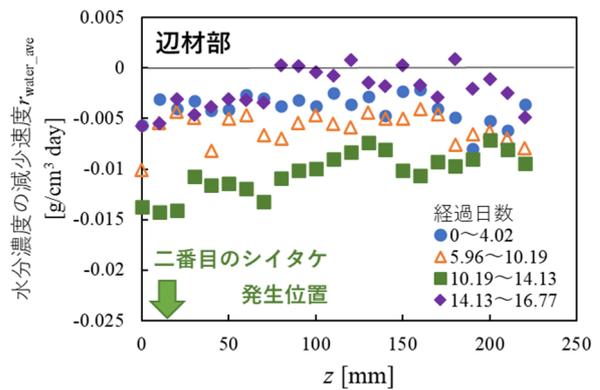


図 8 二番目のシイタケが成長する際の辺材部で平均化した水分濃度の時間変化から算出した水分濃度の減少速度 $r_{\text{water_sap}}$

以上の結果から、原木栽培ではシイタケ発生時に給水を行うことがシイタケの成長には重要であり、ほだ木の全体に、特にシイタケの周辺領域に散水を行うことが有効であると言える。

5. 菌床の水分濃度

5.1 菌床の水分濃度分布

経過日数が 0 日を植菌日として 98 日に菌床からシイタケの芽である原基が発生し、一番目のシイタケに成長した。107 日でシイタケは収穫され、その質量は 29 g であった。続いて二から五番目のシイタケが発生・成長した (図 4 参照)。二番目のシイタケの収穫時の質量は 28 g であった。

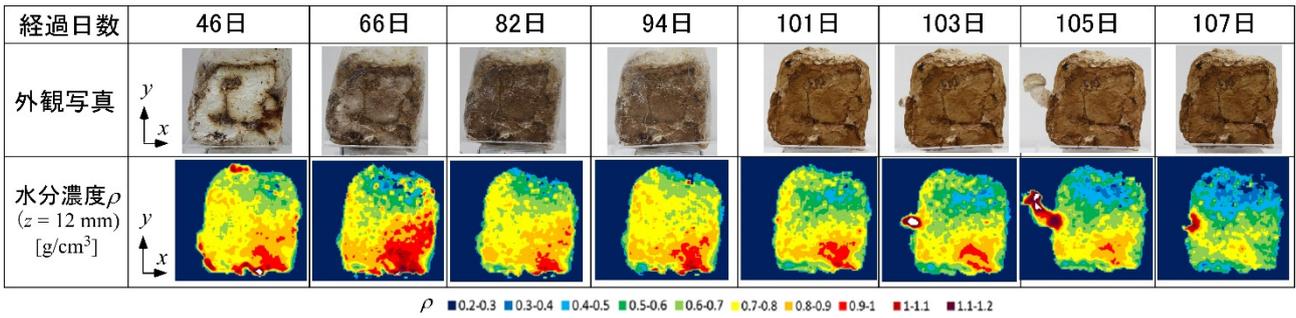


図9 一番目のシイタケが発生・成長する際の菌床の外観写真と水分濃度

図9に一番目のシイタケが発生・成長する際の菌床の外観写真と水分濃度を示す。経過日数が30日程度で培地全体は白いシイタケ菌糸で覆われ、その後、表面は徐々に茶色に褐変する。褐変により菌床表面は固くなり、撥水性が現れる。

菌床の水分濃度は重力で水が沈降するために菌床上部で低く、底部で高い。46～94日での水分濃度はいったん減少し、その後増加した（詳細は後述する）。101日目で左側面から一番目のシイタケが発生・成長するとともに菌床上部の水分濃度が急激に減少し、107日の収穫時には菌床全体の水分濃度が低くなった。このように菌床内部の水分がシイタケに供給されていることが分かる。

5.2 菌床の水分濃度の時間変化

菌床内部の水分濃度の時間変化を把握しやすくするために、図10(a)に示すように、菌床を3×3の9個の領域に分割し、その領域内での水分濃度の平均値を求めた。その結果を図10(b)～(d)に示す。なお、菌床の奥行方向zに対しては厚さ30mmで平均化した。言い換えると、菌床中心に位置する領域#5は一辺が30mmの立方体である。

図10(b)で示すように、菌床上部の領域#4の水分濃度は66日で一旦減少し、その後の94日まで上昇した。左側面の領域#2から一番目のシイタケが発生する頃（100日頃）から水分濃度が低下し始めた。その後は子実体の成長とともに全領域で水分濃度が減少した。

66日で菌床上部の水分濃度が一旦減少し、その後に上昇する原因として以下が考えられる。菌糸が呼吸し、培地を分解することで水が発生し、生成水が重力によって降下するが、経過日数の増加とともに菌糸密度が増加し、菌糸が水を保持できるようになった。もしくは、菌糸活動が活発な菌床では水分発生量が多くなり、菌床上部まで水分

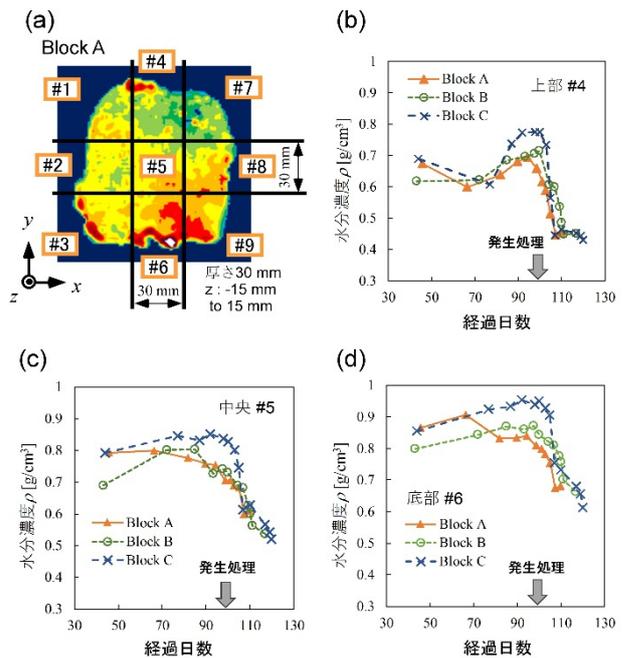


図10 菌床を9個の領域に分割した際の各領域での平均水分濃度の時間変化（3個の菌床：Block A, B, C）

が満ちた。今のところ計測データの不足から原因解明にまでは至っておらず、不明である。

一方、図10(c), (d)に示した菌床中央部の領域#5と下部の領域#6での水分濃度は、経過日数が約90日または培養袋が破られるまで上昇するか、または一定であった。その後にそれらの水分濃度は子実体の発生・成長とともに大きく減少した。

図10には三個の菌床（Block A, B, C）の結果が併記されている。三つの領域（#4～6）でのそれぞれの菌床の水分濃度はほぼ同じ値であり、同じように増減することから、ここで得られた結果には再現性があると言える。なお、三つの菌床で結果のばらつきが生ずる原因として菌糸成長の個体差、

培養室内での場所に依存した温度・湿度の差などが考えられる。

ここでは植菌から第一期のシイタケ収穫までの水分濃度を示した。実際の栽培現場ではシイタケ収穫後に繰り返し菌床を浸水させて給水し、第四期までシイタケを収穫する。その際にシイタケへの給水量がその後の菌糸の生育とシイタケの収穫量に影響を及ぼす。その際の給水量や給水方法などは経験的に行われている。第一期のシイタケ発生・収穫から第四期までの水分計測を行うことでシイタケ菌糸の生育や生態を理解し、シイタケ収穫量を増加させることに寄与できると考えている。

6. おわりに

シイタケは「食べる子実体」の部分しか意識されないが、子実体は孢子を飛散させるための器官に過ぎない。ほだ木や菌床の中に生育している菌糸こそがシイタケ菌の本体である。ほだ木や菌床の内部計測には困難が多いため、シイタケ菌の生態は十分には分かっていない。例えば、菌糸塊・原基は表面に数多く発生するものの、ほんの一部しかシイタケに成長せず、その多くは消滅していく。しかし、なぜ消滅するかについての理由は分かっていない。菌糸塊・原基の消滅はシイタケ菌糸が蓄積している栄養分の量や水分量に関係しているだろうとは推測されるが、それを証拠付ける十分な実験データは現在のところまだない。

シイタケ栽培にとって重要な「菌糸塊・原基」の発生もMRIを使えば可視化できる。水分量の計測と合わせて、MRI計測によってシイタケの生態を理解し、市場価値が高い寸法・形状・味を持つシイタケの収穫量を上げる栽培方法が見出せば、国内でのシイタケ栽培が活性化すると期待している。

謝辞 本研究は生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業（基礎研究ステージ：チャレンジ型）JPJ007097」の支援を受けて行った。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- [1] 農林水産省, 令和4年特用林産物生産統計調査結果(2022)
- [2] 能登原木椎茸「のとてまり・のと115」
<https://www.facebook.com/nototemari/>



石川県ブランドシイタケ「のとてまり」

- [3] 有馬忍, シイタケほだ木の育成段階における水分条件の影響, 大分県きのこ研究指導センター研究報告, 第一号, (1999) 1-28.
- [4] 岸本潤, 本田耕吉, 古川郁夫, 作野友康, シイタケ菌の生育とほだ木水分条件との関係, 鳥取大学農業研究報告, 36 (1983) 43-53.
- [5] Keisuke Tokimoto, Masaki Fukuda, Masatomo Tsuboi, Effect of the physical properties of *Lentinula edodes* bedlogs on fruiting body production, *Mycoscience*, 39 (1998) 217-219.
- [6] 阿部正範, 菌床シイタケの安定生産に関する研究, 徳島県立農林水産総合技術センター森林林業研究所研究報告, 4 (2005) 13-26.
- [7] Kuniyasu Ogawa, Takeshi Yashima, Water concentration and rate of decrease in shiitake cultivation log during fruiting body development, as measured by MRI, *Fungal Biology*, 127 (2023) 1362-1375.
- [8] Kuniyasu Ogawa, Mariko Yoshizumi, Masanori Abe, A non-invasive method for measuring time-series of moisture concentrations in mycelial blocks during shiitake mushroom development using magnetic resonance imaging, *Fungal Biology*, 127 (2023) 1405-1414.

米麴の MRI 計測 MRI Measurement of Koji

小川邦康（慶應義塾大学），前迫晃一（石川酒造株式会社）

多田孝清（株式会社 KRI），石川文啓（株式会社 KRI）

Kuniyasu OGAWA (Keio University), Koichi MAESAKO (Ishikawa Brewery Co. Ltd.)

Takakiyo TADA (KRI Inc.), Hisayoshi ISHIKAWA (KRI Inc.)

e-mail: ogawa@mech.keio.ac.jp

1. はじめに

古来より食べられている味噌、醤油、酢などの発酵食品は麹菌などの微生物の働きによって作られる。麹菌による発酵過程で作られる酵素がタンパク質からペプチドを生産する。ペプチドは人体に有益な機能性成分であるとして特定保健用食品に利用されている[1]。日本酒は米麹と米を原料として酵母によってアルコールが生産された醸造酒である[2,3]。また、医薬品であるペニシリンなどの抗菌性物質製剤の原薬も発酵によって作られる[4]。ここでは、麹菌（黄麹菌 *Aspergillus oryzae*）を蒸米に接種し、日本酒用の米麹を作る製麹過程に注目する。

麹菌は糸状菌で、菌糸の先端から酵素（アミラーゼ、プロテアーゼなど）を放出して蒸米中のデンプンやタンパク質などを分解し、グルコースやアミノ酸などを吸収する[1]。栄養源を基に麹菌の菌糸は生長して蒸米の表面を覆い、内部に入り込んで増殖を続ける。この際の呼吸作用で麹菌は酸素を取り込み、水と二酸化炭素を排出するとともに、最大で約 30kJ/koji-kg h の発熱をする[5]。米麹の温度が 45°C を超えると麹菌の活動性が低下・死滅するため、米麹は通気によって冷却し、アミラーゼが最も生産される 42°C 付近に維持される。通気時に米麹から多量の水分が蒸発し、米麹は徐々に乾燥していき、米麹が乾燥し過ぎると麹菌の活動は低下する。

製麹過程では通気による米麹の冷却と酸素供給を行いながら、アミラーゼの生産量が最大になるように麹室の温度・湿度、麹層の堆積厚さ、通気量、米麹の混合頻度を調整して最適な発酵状態（米麹の水分量と温度）を維持する。この調整が製麹の難しさである[6]。製麹現場では米麹の発酵状態を数値で短時間に把握できる計測法が必要とされている。

米麹の水分量を計測する手法として MRI（核磁気共鳴画像法）を用いた。MRI では米麹に含まれる自由水の量とその T_2 緩和時定数を計測できる。これにより米麹の MR 画像から麹菌が蒸米内に伸長する様子や麹菌の呼吸で生産される自由水が増加する様子が観察された[7,8]。それらを紹介する。

2. 製麹過程

米麹は蒸米を原料として麹室（温度 33°C，湿度 30~35%）内で造られる。その工程を以下に示す。括弧内の数字は①種付け時刻からのおおよその経過時間を示す。図 1 に概要図を示した。

① 引き込みと種付け（0 時間）

蒸米を麹室に引き込み、麹床（4m×1.5m）に広げて 32°C 程度まで放冷し、種麹（孢子）を接種する。その後、蒸米を混ぜる。蒸米を厚さ 20cm に堆積させ、上部に布を被せ、底部はヒーターで加熱する。蒸米の温度は約 32°C に保持し、孢子の発芽を待つ。

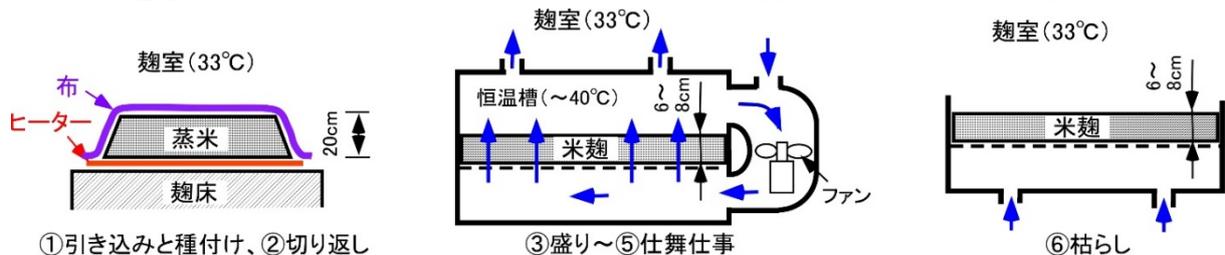


図 1 製麹過程の概要図 ①②：麹床に蒸米（後に米麹となる）を置いて孢子を発芽させる，③～⑤：恒温槽内で麹菌を生長させる，⑥：恒温槽の外周壁を外して米麹を乾燥・冷却する。青矢印は空気の流れ

② 切り返し (8 時間後)

塊になった蒸米の堆積層を上下に反転させ、胞子が付いた蒸米をばらばらにほぐして混合する。再び蒸米を堆積させて保温し、胞子の発芽を待つ。



図 2 ② 切り返しの様子。蒸米をばらばらにほぐして混合する。

③ 盛り (22 時間後)

胞子が発芽し、蒸米表面を麹菌が覆い始める。蒸米の温度は 35°C 程度まで上昇する。蒸米を細かくばらばらにして恒温槽 (7m×1.5m) 内に移し替える。米麴を厚さ 8cm 程度に堆積させ、温度上昇を待つ。

④ 仲仕事 (28 時間後)

米麴の温度は 40°C 程度に上昇する。米麴全体を混合し、恒温槽内での米麴堆積層の領域を広げ、麹層を厚さ 6cm 程度に堆積させる。



図 3 ④ 仲仕事の様子。恒温槽の米麴を混合して領域を広げ、6cm 程度の堆積層とする。

⑤ 仕舞仕事 (33 時間後)

米麴全体を混合する。通風させて米麴の温度を 42~43°C 程度に維持し、12~15 時間発酵させる。

⑥ 枯らし (45 時間後)

米麴の破精込み具合、味、香り、手触りなどを確かめて十分に発酵が進行したと杜氏が判断すれば、保温を止め、恒温槽に外周壁を外し、米麴を冷却・乾燥させる。米麴温度は 33°C まで下がる。

⑦ 出麴 (50 時間後)

米麴を麴室から出して冷蔵庫で保管する。後日、醸造タンクに米麴を投入して、もろみを造る。

3. MRI 装置と計測パラメータ

3.1 MRI 装置

MRI 装置は 1.1 T 110mm AirGap 永久磁石 (NEOMAX エンジニアリング製) とコンソール (DTRX3Plus, エム・アール・テクノロジー製) で構成されるコンパクト MRI (巨瀬氏解説を参照) を用いた。¹H の共鳴周波数は 45.1 MHz であった。

3.2 計測パラメータ

MR 画像は単純スピンエコー法を用いてスライスなしの投影画像とし、高分解能の信号強度画像と水分量計測のための T_1 , T_2 強調画像を取得した。

信号強度画像は 128×128 画素, 撮像範囲は 26mm×20mm, 空間分解能は 0.20mm×0.16mm とした。90 度励起パルスの繰り返し時間間隔 TR は 0.25 s, エコー時間 TE は 7ms, 積算回数 NEX は 32 回とした。計測時間は 17 分間であった。 T_1 , T_2 強調画像は 64×128 画素, 撮像範囲は 26mm×40mm, 空間分解能は 0.41mm×0.31mm とした。 TR , TE , NEX を表 1 に示した。総計測時間は 45 分間であった。

表 1 T_1 , T_2 強調画像の計測パラメータ

パラメータ	T_1 強調画像	T_2 強調画像
TR [ms]	35, 50, 75, 100, 150, 500	500
TE [ms]	4.4	4.4, 5.4, 6.4, 7.4
NEX	8	8

3.3 T_1 , T_2 緩和時定数の算出法

米麴の T_1 緩和時定数の空間分布 $T_1(x, y)$ は TR が 35~500ms の 6 枚の T_1 強調画像を用いて得られる。各画像の同じ位置 (x, y) での信号強度 $SigInt(TR, x, y)$ を飽和法の指数関数である $\{1 - \exp(-TR/T_1)\}$ によって最小二乗近似することで $T_1(x, y)$ を算出した。

同様に、米麴の T_2 緩和時定数の空間分布 $T_2(x, y)$ は TE が 4.4~7.4ms の 4 枚の T_2 強調画像を用いて得られる。各画像の同じ位置 (x, y) の信号強度 $SigInt(TE, x, y)$ を信号の減衰関数 $\exp(-TE/T_2)$ によって最小二乗近似することで $T_2(x, y)$ を算出した。ここで計測される水は T_2 が 4ms 以上と長いためにすべて自由水と考えられる。

3.4 水分量の空間分布の算出法

各ピクセルの T_1 , T_2 緩和時定数と $TR = 500ms$,

$TE = 4.4\text{ms}$ で取得された MR 画像から水分量の空間分布 $\rho(x, y)$ を次式によって算出した。

$$\text{SigInt}(x, y) = A \rho(x, y) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{TR}{T_1(x, y)}\right) \right\} \times \exp\left(-\frac{TE}{T_2(x, y)}\right) \quad (1)$$

ここで A は装置定数である。水分量 $\rho(x, y)$ は奥行方向に積分した投影画像であるため米麴の中心は厚く、水分量が多く算出されることに注意されたい。

4. MR 画像と水分量

4.1 米麴の採取

試料は麴層の上部（表面）と中心部，下部から約 30g を採取した。さらに麴層は $7\text{m} \times 1.5\text{m}$ と広く，場所によって発酵の進行に多少の差異があるため試料は長手方向に 7 か所から採取した。また，種麴を散布せず，布で覆って麴菌が付かないようにした蒸米を対照試料（コントロール）として恒温槽の中に置いて米麴と同じ温度条件で保管した。対照試料は米麴と同じタイミングで採取した。

4.2 米麴の含水率

採取した米麴の一部（約 0.5g）の含水率を質量法によって求めた。その結果を図 4 に示す。米麴は 30 時間まではほぼ一定の含水率であったが，それ以降は米麴の温度が上昇することで乾燥し，含水率が低下した。また，上面の方が含水率は小さい。コントロールの含水率は約 30 時間以降に大きく低下した。

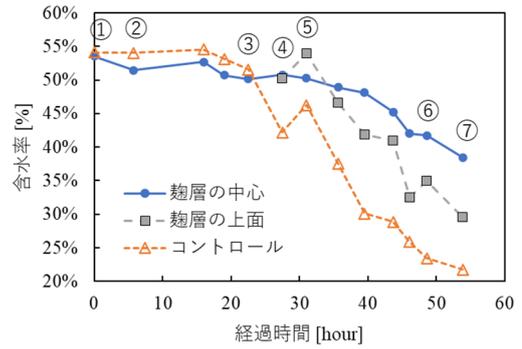


図 4 米麴の含水率の時間変化：麴層の中心，麴層の上面，コントロール（植菌なし）

4.3 信号強度画像，水分量， T_2 緩和時定数

採取した米麴を二列に並べて MRI 計測した。図 5 に上段から順に米麴の外観写真，信号強度画像，水分量， T_2 緩和時定数の空間分布を示す。なお，毎回米麴は取り替えられ，同一の米麴を継続的に計測してはいないことに注意されたい。

③盛りで麴菌が蒸米の表面を覆い始め，信号強度が低下し， T_2 値が減少した。⑤仕舞仕事で蒸米表面はほぼ麴菌が覆い，米麴の粒ごとの信号強度に差が生じ始め，水分量に顕著な差が表れた。麴層表面にあった米麴は乾燥するが，麴層内部に滞在し続けた米麴は生成された水分が蒸発せずに水分量が多いまま維持されると考えられる。また，米麴内部に信号強度の強弱（ムラ）が見られた。ムラが麴菌内部に伸長する様子を示していると考えられる。

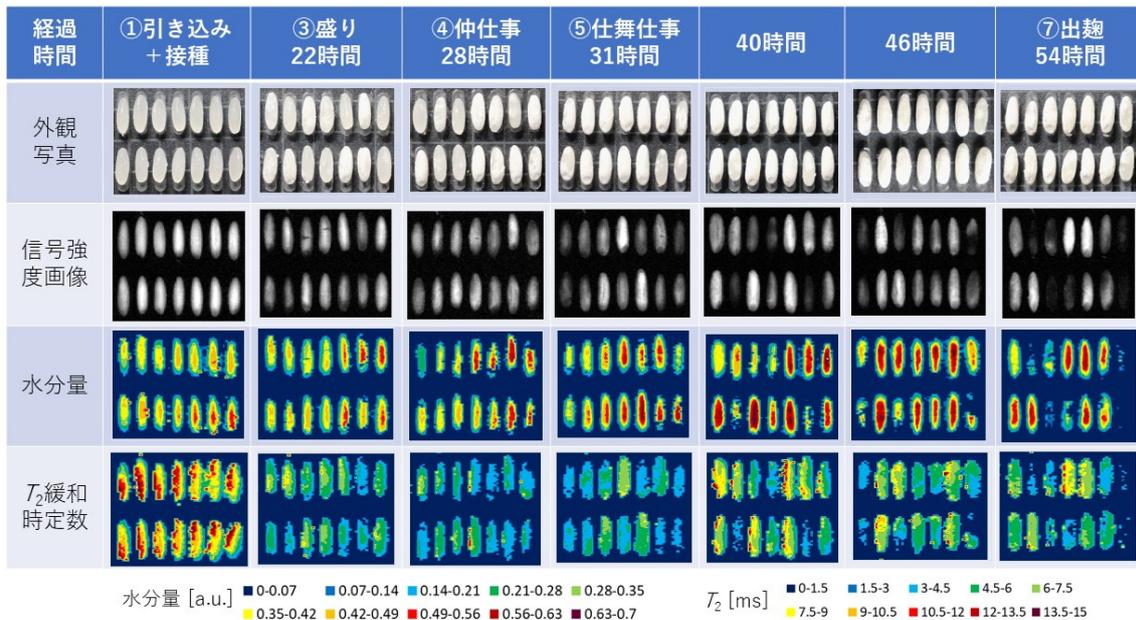


図 5 米麴の外観写真，信号強度画像，水分量分布， T_2 緩和時定数分布の時間変化

4.4 平均 T_2 緩和時定数の時間変化

14 個の米麴の T_2 緩和時定数を平均化し、その時間経過を図 6 に示した。コントロールの T_2 値は時間経過とともに蒸米が硬化するために単調に減少したが、麴菌が蒸米の表面をほぼ覆う④仲仕事から米麴の T_2 値は上昇に転じた。この上昇は麴菌が生成する水が増えて米麴内に溜まり、麴の T_2 値を増加させるためと考えられる。40 時間経過後から T_2 値がほぼ平坦になった。その理由は米麴温度が上昇し、生成された水が蒸発して麴内の水分量がほぼ一定に保たれたためと考えられる。図 5 の水分量と T_2 値の時間変化から上記の説明が裏付けられる。ただし、図 5 に示すように、一部の米麴は乾燥し、 T_2 値が減少していることにも注意が必要である。

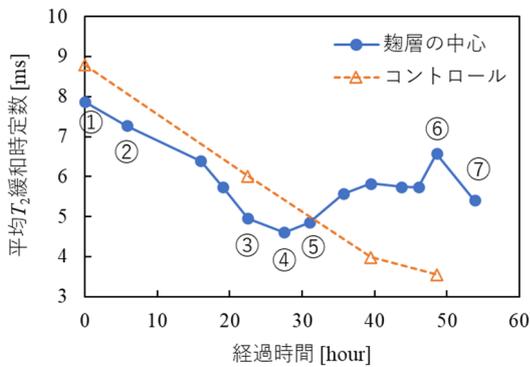


図 6 米麴の平均 T_2 緩和時定数の時間変化

4.5 麴層の水分量分布

一辺 50mm、高さ 65mm の四角柱容器を麴層に押し込み、米麴層をその状態のまま抜き出した。採取は③盛り (22 時間経過) と枯らし前 (46 時間経過) に行った。麴層をスライス厚さ 10mm で MRI 計測し、水分量を算出した。結果を図 7 に示す。麴層外形が四角形でない理由は静磁場のひずみに因る。

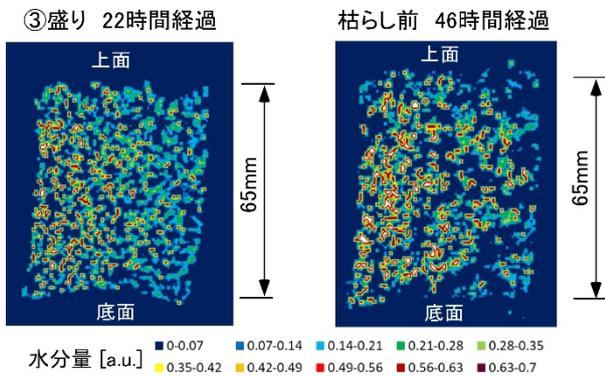


図 7 麴層の水分量分布の時間変化

③盛りでの麴層の水分量は全体としてほぼ同様であった。米麴の粒同士の隙間が多く、その空間の水分量はゼロとして表される。一方、枯らし前の麴層では米麴の隙間は変わらないものの、水分量が低い領域が拡大し、それが麴層全体に分散していた。この領域には乾燥した米麴 (仲仕事, 仕舞仕事での麴層全体の混合に因る) が充填され、低水分量の麴が塊としてある。この結果から麴層の水分の不均一性が発酵の進行とともに顕著になることが分かる。

5. おわりに

米麴の発酵に代表される固体培養は液体培養に比べて発酵の均一性を維持することが難しいという問題点がある。しかし、固体培養ならではの酵素生産性の高さと液体培養では得られない特異的成分がある[7]。それは発酵環境によって変わり、発酵環境を適切に制御することが求められる。ここでは日本酒製造の製麴過程に MRI を用いたが、広く固体培養の計測に MRI が役立てば望外の喜びである。

謝辞 協力頂いた石川酒造株式会社蔵元の石川彌八郎氏, 蔵人の矢崎学氏, 岩井康博氏, 齋藤哲也氏, 佐取幸雄氏, 細淵龍太氏には麴造りの技と知識を教えて頂き、米麴を採取頂きました。感謝致します。

参考文献

- [1] 農林水産省, 日本の食文化に欠かせない「発酵」の世界 *aff*, 11 (2022).
- [2] 日本醸造協会, 最新酒造講本 (2007) 5.
- [3] 国税庁, 酒のしおり (令和 5 年 6 月): 酒税法における酒類の分類及び定義 (2023) 24.
- [4] 厚生労働省, 抗菌性物質製剤に係る安定供給確保を図るための取組方針 (2023) 6
- [5] 村上英也編著, 麴学, 日本醸造協会 (1986) 222.
- [6] 伊藤一成, 無通風箱培養法を利用した固体培養における麴菌の生育と酵素生産に関する研究, *生物工学会誌*, 98-3 (2020) 108-115.
- [7] 小川邦康他, MRI による製麴過程の数値化の試み: 麴の T_2 緩和時定数と MR 画像, *日本醸造学会大会要旨* (2023) 4.
- [8] 小川邦康他, 米麴の MRI 計測, *NMR マイクロイメージング研究会講演要旨* (2023) 11.
- [9] 佐藤和夫, 固体培養法による発酵生産, *日本醸造協会誌*, 87-8 (1992) 558-565.

日本伝熱学会主催 講習会
「計測技術 ～温度計測の基礎と様々な温度センサ～」開催報告
Report on the Lecture "Measurement Technology, Basics of Temperature Measurement and Variety of Temperature Sensors"

企画部会産学交流委員会：佐藤 航（日立）、西 剛伺（足利大学）、近藤 義広（日立アカデミー）、
 羽鳥 仁人（ベテル）、池田 利宏（ケイデンス）、小針 達也（日立）、小泉 雄大（ナブテスコ）
 Wataru SATO (Hitachi), Koji NISHI (Ashikaga University), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy),
 Kimihito HATORI (Bethel), Toshihiro IKEDA (Cadence), Tatsuya KOBARI (Hitachi)
 and Katsuhiko KOIZUMI (Nabtesco)

1. はじめに

毎年、日本伝熱学会の産学交流事業の一環として、企業技術者等の実務に直結したテーマを選択し、日本伝熱学会主催の講習会を開催しています。

今年度は昨年に続き、オンサイトとオンラインのハイブリッド形式で講習会を開催しました。今年度は、様々な温度センサの基礎や実用例について学ぶことを目的とし、「計測技術 ～温度計測の基礎と様々な温度センサ～」として開催しました。11月29日に以下の講義題目で開催し、33名にご参加頂き（オンサイト22名、オンライン11名）、盛況のうちに終えることができました（図1）。

－題目－

- ① 開催の挨拶
- ② 放射温度計の正しい使い方
- ③ 熱電対の正しい使い方（図解で学ぶ熱電回路の動作原理と測定誤差要因）
- ④ サーミスタを用いた温度計測技術及びサーミスタを応用した温度以外の物理量センサ
- ⑤ 光ファイバを用いた温度計測の基礎知識とその事例
- ⑥ 白金測温抵抗体を用いた温度測定の基礎と応用
- ⑦ シュリーレン法を用いた温度場及び流れ場の可視化とその事例
- ⑧ 総合討論

2. 各題目について

②の「放射温度計の正しい使い方」の講義では、中村元教授（防衛大学校）より、放射温度計の基礎として測定原理と測定方式についてご説明いただきました。講演内では実際に小型の赤外線カメラによる温度分布の可視化を実演頂き、実際に計

測する際生じる測定誤差要因をイメージすることができました（図2）。

③の「熱電対の正しい使い方（図解で学ぶ熱電回路の動作原理と測定誤差要因）」の講義では田川正人教授（名古屋工業大学）より、熱電対に関して測定原理、誤差要因、適切な固定方法についてご説明いただきました。熱電対による起電力の関係を図とグラフを用いて整理し、測定原理をわかりやすくご説明いただきました。（図3）。

④の「サーミスタを用いた温度計測技術及びサーミスタを応用した温度以外の物理量センサ」の講義では、野尻俊幸氏（SEMITEC 株式会社）より、サーミスタを用いた温度測定の原理、特徴と



図1 講演会の様子



図2 放射温度計の正しい使い方、
防衛大学校 中村元教授

正しい温度測定方法についてご説明いただきました。さらに、サーミスタを湿度、気圧、ガス濃度など温度以外の物理量計測にも適用できることをご紹介いただきました(図4)。

⑤の「光ファイバを用いた温度計測の基礎知識とその事例」の講義では、塩路珠央氏(住友電気工業株式会社)より、光ファイバを用いた温度計測の原理と、測定の特徴をご説明いただきました。また、実際に光ファイバが産業界で適用されている例を多数ご紹介いただいたことで、具体的な仕様イメージを持つことができました(図5)。

⑥の「白金測温抵抗体を用いた温度測定の基礎と応用」の講義では、藤原秀樹氏(真田 KOA 株式会社)より、測温抵抗体の計測原理、規格、結線方式についてご説明いただきました。さらに白金測温抵抗体の計測の応用例として、風速センサとしての例や、測温抵抗体の活用が期待される領域をご紹介いただきました(図6)。

⑦の「シュリーレン法を用いた温度場及び流れ場の可視化とその事例」の講義では、酒井豊氏(日本カノマックス株式会社)より、温度場と流れ場の可視化を実現する原理と具体的な計測事例をご紹介いただきました。講義の後半では、シュリーレン法を用いた流れ場可視化のデモを実施いただき、どのように計測結果が表示されるか具体的に示していただきました(図7)。

⑧の総合討論では、講義の際に受講者が質問を登録できるようにあらかじめ受講者に質問票を配布、回収し、その内容を講師の先生方からご回答いただくという形式で実施いたしました。時間内に回答しきれないほど多くのご質問をいただき、活発に討論いただきました(図8)。

3. 全体、アンケート結果

参加者の内訳は、70%が企業の方、30%が公的機関の方でした。企業の方が学会の活動に参加する機会となり産学交流委員会の活動目的である産学交流の活性化の一助になったものと思います。

アンケート結果は多くが肯定的なご評価でした。本講習会での学びがご自身の業務に役立てられるという回答が94%となりました。また、今後聴講したいテーマについても多くのご意見をいただきました。今後も実務に役立つ講習会をめざしてアンケートを参考に企画させていただきます。

昨年に続きオンサイトとオンラインのハイブリッドでの開催となりました。オンラインならではの利便性もある一方、オンサイトでは講師の皆様と、あるいは参加者同士で直接交流できるという利点もあり、今後もオンサイト開催を継続していきたいと考えております。



図3 熱電対の正しい使い方(図解で学ぶ熱電回路の動作原理と測定誤差要因), 名古屋工業大学 田川正人教授

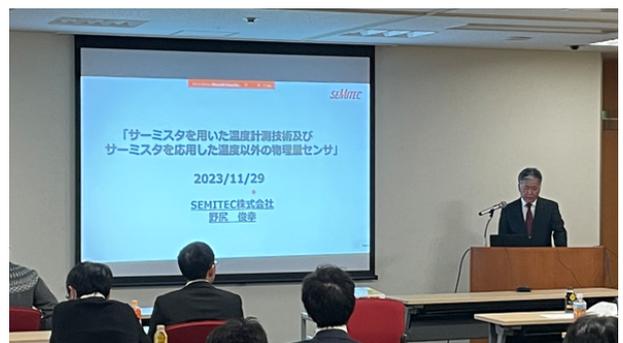


図4 サーミスタを用いた温度計測技術及びサーミスタを応用した温度以外の物理量センサ, SEMITEC 株式会社 野尻俊幸氏



図5 光ファイバを用いた温度計測の基礎知識とその事例, 住友電気工業株式会社 塩路珠央氏

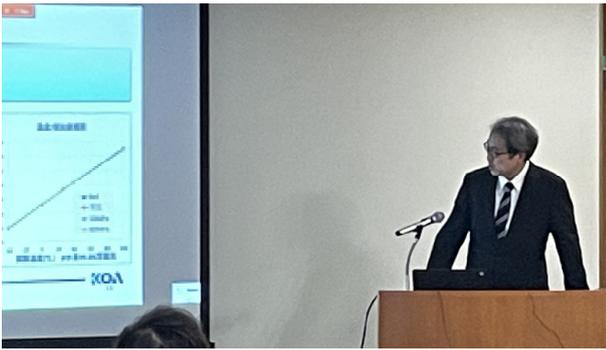


図 6 白金測温抗体を用いた温度測定の基礎と応用,
真田 KOA 株式会社 藤原秀樹氏



図 8 総合討論



図 7 シュリーレン法を用いた温度場及び流れ場の可視化とその実例,
日本カノマックス株式会社 酒井豊氏

4. おわりに

産学交流委員会では、産学交流を促進するための各種イベントを検討中です。本講習会はその中のアイテムの1つとして、来年度もオンサイト開催に向け準備を進めて参ります。詳細が決まり次第ご案内します。

最後に、講師の皆様にはご多忙のところ、資料作成含め、ご講義いただきありがとうございました。紙面をお借りして、改めて感謝申し上げます。

行事カレンダー

本会主催行事

開催日		行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2024年						
5月	29(水) ～ 31(金)	第61回日本伝熱シンポジウム			第61回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局 神戸大学大学院工学研究科 E-mail: symp2024@htsj-conf.org FAX: 078-803-6119	

本会共催、協賛、後援行事

開催日		行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2024年						
1月	15(火) ～ 16(水)	最近の化学工学講習会 72			化学工学会関東支部事務局 吉岡 美希 093-884-3344/kanto@scej.org	
	23(火)	No.23-124 講習会往復内燃機関の研究開発に関わる計測と数値解析技術に関する講習会			(一社)日本機械学会エンジンシステム部門担当 渡邊 watanabe@jsme.or.jp	
	30(火) ～ 31(水)	第52回ガスタービンセミナー			(公社)日本ガスタービン学会 E-mail: gtsj-office@gtsj.org	
3月	4(月)	第5回世界エンジニアリングデイ記念シンポジウム			(公社)日本工学会 eng@jfes.or.jp	
6月	10(月) ～ 12(水)	第29回計算工学講演会			(一社)日本計算工学会 office@jscs.org	
6月	17(月) ～ 18(火)	No.24-10 講演会「第28回動力・エネルギー技術シンポジウム」			(一社)日本機械学会総合企画グループ担当 伊澤 izawa@jsme.or.jp	
7月	19(金) ～ 21(日)	第50回可視化情報シンポジウム			一般社団法人可視化情報学会事務局 office@vsj.jp	

第 61 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 61 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 鈴木 洋

幹事 村川 英樹

開催日： 2024 年 5 月 29 日(水)～31 日(金)

会場： 神戸国際会議場 (<https://kobe-cc.jp/ja/>)

所在地 〒650-0046 神戸市中央区港島中町 6-9-1 電話番号 078-302-5200

アクセス 神戸新交通 ポートライナー「市民広場」駅に直結

神戸国際会議場 交通アクセス (<https://kobe-cc.jp/ja/visitors/access/>)

講演申込締切： 2024 年 1 月 19 日(金)

講演論文原稿提出締切： 2024 年 3 月 15 日(金)

早期参加申込締切： 2024 年 4 月 12 日(金)

ホームページ URL：<https://htsj-conf.org/symp2024/>

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
 - 通常の一般セッション（口頭発表）
 - オーガナイズドセッション（口頭発表）
 - 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分 × セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従って下さい。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 61 回 日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。

【参加費等】

- 参加申込の時期
 - 早期申込：2024 年 4 月 12 日（金）まで
 - 通常申込：2024 年 4 月 13 日（土）以降
- シンポジウム参加費
（同時開催される International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024 共通）

会員一般	早期申込：14,000 円（不課税）	通常申込：17,000 円（不課税）
共催・協賛学会一般	早期申込：15,400 円（税込み）	通常申込：18,700 円（税込み）
非会員一般	早期申込：18,700 円（税込み）	通常申込：22,000 円（税込み）
会員学生	早期申込：8,000 円（不課税）	通常申込：9,000 円（不課税）
非会員学生	早期申込：9,900 円（税込み）	通常申込：11,000 円（税込み）

 - ※ 特別賛助会員は 1 口につき 3 名、賛助会員は 1 口につき 1 名、参加費が無料になります。
 - ※ 名誉会員は参加費が無料になります。
 - ※ 学会員とは、日本伝熱学会会員のことを指します。
 - ※ 講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。
- 講演論文集電子版
講演論文集電子版のみの販売：5,000 円（税込み、シンポジウム後の販売になります。）

【意見交換会】

- ・ 開催日：2024年5月30日(木)
- ・ 会場：ポートピアホテル（〒650-0046 兵庫県神戸市中央区港島中町6丁目10-1）
- ・ 参加費（早期申込締切：2024年4月12日）

一般	早期申込：10,000円（税込み）	通常申込：13,000円（税込み）
学生	早期申込：5,000円（税込み）	通常申込：7,000円（税込み）

【参加登録と参加費等の支払い方法】

- ・ 参加費登録は本シンポジウムのウェブページから行ってください。
- ・ 参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」とします。
- ・ 参加登録および参加費等の支払方法および期限を設定します。（詳細はシンポジウムホームページに掲載します。）

講演申込方法，講演論文集，執筆要綱

【講演申込方法】

- ・ 一般セッションと優秀プレゼンテーション賞セッションの講演者（登壇者），およびオーガナイズドセッションの学生講演者（登壇者）は，日本伝熱学会会員（学生会員，賛助会員，特別賛助会員を含む）に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は，早期参加申込締切までに会員申込と会費納付を行って下さい。（オーガナイズドセッションについては，学生以外の講演者（登壇者）は非会員でも発表可能としますが，会員であることを推奨します。）
- ・ 原則としてウェブによる申込みに限らせて頂きます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力して下さい。ウェブによる申込みができない場合には，実行委員会事務局にお問い合わせ下さい。
- ・ 申込みの際に，一般セッション，オーガナイズドセッション，優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択して下さい。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には，本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第61回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。
- ・ 発表申込み時に，論文要旨（日本語で200～250字）を入力して下さい。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- ・ 講演発表申込みは，講演者1名につき1題目とさせていただきます。
- ・ 講演の採否およびセッションへの振分けは，実行委員会にご一任下さい

【講演論文集電子版】

- ・ 講演論文または講演アブストラクトのいずれかの原稿を，PDFファイルで本シンポジウムのホームページから提出して下さい。
- ・ 従来の講演論文とは別に，当該講演内容を後日原著論文として TSE 以外の学術雑誌等に投稿する場合は，二重投稿にならないように配慮して1ページの講演アブストラクトを提出することができます。
- ・ 講演論文または講演アブストラクトのいずれかの原稿を提出して頂きます。講演論文は A4 サイズで2～6ページ，講演アブストラクトは，A4 サイズで1ページとします。
- ・ 講演論文集として電子版のみを発行し，冊子版は発行しません。
- ・ 講演論文集電子版を参加者に配布します。なお，参加できなかった日本伝熱学会員には，講演論文集電子版をネットからのダウンロードを基本として配布します（ダウンロードが困難な会員は事務局へお申し込みください）。
- ・ 講演論文集は会員を対象にパスワードを配布し，シンポジウム開催日の1週間程前からウェブ上で公開します。従って，特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。

- ・ シンポジウム終了後、一定期間を経て講演論文集のウェブ上での公開を終了します。
- ・ 原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集電子版およびウェブに掲載されません。

【執筆要綱】

- ・ 以下の4つの原稿のうちから選択して執筆して下さい。
- ①講演論文（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション）
 - ②講演アブストラクト（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション）
 - ③Full size manuscript
 - ④Abstract manuscript
- ・ 各原稿の書式の詳細ならびにテンプレートは、シンポジウムのホームページをご参照ください。
 - ・ 論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いてください。講演申込時のデータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります。
 - ・ PDF ファイル作成のためのファイル変換時には、「フォントの埋め込みを行う」を設定してください。提出前に必ず、変換後のPDF原稿を印刷して確認して下さい。

① 講演論文（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション）

表題部分の書式：原稿は、以下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、和文著者名（会員資格、著者名、所属の略記）、英文著者名、英文所属機関・所在地、英文アブストラクト、英文キーワードの順に、幅140mmに収まるようにレイアウトしてください。連名者がある場合には、講演者の前に*印をつけ、英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別してください。

本文の書式：本文は表題部分に続けて、10ポイント明朝体の1段組み（1行50字程度）、1ページ当たり46行を目安として作成してください。

図表：図表中の記号およびキャプションは英語で書いてください。カラー表示が可能です。

参考文献：参考文献は本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号⁽¹⁾で表し、本文の末尾に次のようにまとめて列記してください。

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

例：(1) 伝熱・他2名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

140 mm



原稿の書き方 (和文表題 : Gothic 14pt)

MS-Word の場合 (和文副題 : Gothic 12pt)

Guide for the manuscripts (英文表題 : Times New Roman 12pt)

The case of MS-Word (英文副題 : Times New Roman 12pt)

(1 行あける)

伝正 *伝熱 太郎 (伝熱大) (会員資格 著者名[講演者には*印] (所属略称) : 明朝体 12pt)

(1 行あける)

Taro DENNETSU (英文著者名 : Times New Roman 10pt)

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563

(1 行あける)

(文頭に半角スペース 5 つを挿入する) English abstract (英文アブストラクト : Times New Roman 10pt, 100 語程度)

(1 行あける)

Key Words: Heat Transfer (英文キーワード : Times New Roman 10pt, 3~5 個程度)

(1 行あける)

1. 大見出し

1.1 中見出し 講演論文原稿は A4 サイズで原則 2~6 ページです。講演論文の作成様式は、1 段組×50 字×46 行とし、カラーの使用が可能です。ファイル容量は最大で 2MB までとし、アニメーションは含まないものとします。

① 講演論文の冒頭部分 (表題部分および本文書き出し部分) の書式

② 講演アブストラクト (一般セッション, オーガナイズドセッション, 優秀プレゼンテーション賞セッション)

表題部分の書式 : 原稿は、以下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、和文著者名 (会員資格、著者名、所属の略記)、英文著者名、英文所属機関・所在地の順に、幅 140mm に収まるようにレイアウトしてください。連名者がある場合には、講演者の前に*印をつけ、英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別してください。

アブストラクトの書式 : アブストラクトは表題部分に続けて、10 ポイント明朝体の 1 段組み (1 行 50 字程度)、1 ページ 46 行を目安として作成してください。

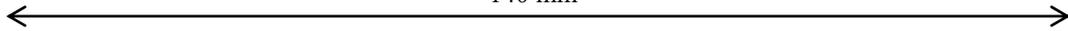
図表 : 図表中の記号およびキャプションは英語で書いてください。カラー表示が可能です。掲載にあたり、他の学術雑誌等との二重投稿にならないように十分に配慮して下さい。

参考文献 : 参考文献は本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号⁽¹⁾で表し、本文の末尾に次のようにまとめて列記してください。

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

例 : (1) 伝熱・他 2 名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

140 mm



原稿の書き方 (和文表題 : Gothic 14pt)

MS-Word の場合 (和文副題 : Gothic 12pt)

Guide for the manuscripts (英文表題 : Times New Roman 12pt)

The case of MS-Word (英文副題 : Times New Roman 12pt)

(1 行あける)

伝正 *伝熱 太郎 (伝熱大) (会員資格 著者名[講演者には*印] (所属
略称) : 明朝体 12pt)

(1 行あける)

Taro DENNETSU (英文著者名 : Times New Roman 10pt)

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563

(1 行あける)

Key Words: Heat Transfer (英文キーワード : Times New Roman 10pt, 3~5 個程度)

(1 行あける)

講演アブストラクト原稿は A4 サイズで 1 ページです。講演論文の作成様式は、1 段組×50 字×46 行とし、原則として章で分ける必要はありません。カラーの使用が可能です。ファイルの容量は最大で 2MB とし、アニメーションは含まないものとします。

② 講演アブストラクトの冒頭部分 (表題部分および本文書き出し部分) の書式

③ Full Size Manuscript

As shown in the square enclosure below, the manuscript is composed of a title, a subtitle, author names, affiliation institutions, locations, abstract and keywords in order, lay out so that it fits within the width of 140 mm. If there are multiple authors, please mark * in front of the speaker and distinguish the affiliation institution and address with superscripted numbers. Following the title part, please prepare the body as a guide with a single column of 10 point Times New Roman, 46 lines per one page. Color display is possible. References should be indicated by numbers with brackets (1) on the right shoulder of cited parts in the text, and should be listed together at the end of the text as follows.

Example: (1) T. Dennetsu et al, J. Thermal Sci. Technol., 12-345(2018), 1234.

The template file of MS-Word format can be downloaded from the symposium's website.

140 mm

Guide for the manuscripts (Main title: Times New Roman 14pt)

The case of MS-Word (Subtitle: Times New Roman 12pt)

(blank line)

Taro DENNETSU (Authors: Times New Roman 12pt, Mark “” at the head of speaker’s name)

(blank line)

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (Affiliations: Times New Roman 10pt)

(blank line)

Abstract of approximate 100 words is written by Times New Roman 10pt. Five blank characters are inserted as the indent.

(blank line)

Key Words: Heat Transfer (Keywords: Times New Roman 10pt, 3 to 5 words)

(blank line)

1. Headline

1.1 Crosshead The manuscript is provided only with an electronic manuscript. The manuscript needs 2 to 6 pages of A4 size. The manuscript forms 1 column × 46 lines, and color can be used. The file size is limited to 2MB at the maximum, and animations cannot be included.

③ Format of English full size manuscript (title part and text export part).

④ Abstract Manuscript

As shown in the square enclosure below, the manuscript is composed of a title, a subtitle, author names, affiliation institutions, locations and keywords in order, lay out so that it fits within the width of 140 mm. If there are multiple authors, please mark * in front of the speaker and distinguish the affiliation institution and address with superscripted numbers. Following the title part, please prepare the abstract as a guide with a single column of 10 point Times New Roman, 46 lines per one page. Color display is possible. References should be indicated by numbers with brackets (1) on the right shoulder of cited parts in the text, and should be listed together at the end of the text as follows.

Example: (1) T. Dennetsu et al, J. Thermal Sci. Technol., 12-345(2018), 1234.

The template file of MS-Word format can be downloaded from the symposium's website.

140 mm

Guide for the manuscripts (Main title: Times New Roman 14pt)

The case of MS-Word (Subtitle: Times New Roman 12pt)

(blank line)

Taro DENNETSU (Authors: Times New Roman 12pt, Mark “” at the head of speaker’s name)

(blank line)

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (Affiliations: Times New Roman 10pt)

(blank line)

Key Words: Heat Transfer (Keywords: Times New Roman 10pt, 3 to 5 words)

(blank line)

The manuscript is provided only with an electronic manuscript. The manuscript needs 1 page of A4 size. Chapters are not necessary. The manuscript forms 1 column × 46 lines, and color can be used. The file size is limited to 2MB at the maximum, and animations cannot be included.

④ Format of English abstract manuscript (title part and text export part).

【ご注意】

- ・ 講演申込みの取消および講演論文原稿の差替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたします
のでご遠慮下さい。
- ・ 講演申込みは共著者の許可を得てから行って下さい。
- ・ 論文題目と著者名が、講演申込み時と論文提出時で相違しないように特にご注意下さい。
- ・ 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクタのみとさせていただきます。
パーソナルコンピュータは各自ご持参下さい。
- ・ 参加費、意見交換会費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- ・ 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認下さい。

【お問い合わせ先】

第 61 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局
神戸大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 村川英樹宛
E-mail : symp2024@htsj-conf.org FAX : 078-803-6119

International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024

(IWSEC2024) 開催のご案内

IWSEC2024 実行委員会
委員長 津島 将司
副委員長 岩井 裕

日本伝熱学会では以下の通り、第61回日本伝熱シンポジウム(2024年5月29日(水)～31日(金)、神戸)にあわせて、「持続可能なエネルギー変換システムに関する国際ワークショップ2024」を開催いたします。本ワークショップでは、持続可能なエネルギー変換システムとして、水素をはじめとする様々なエネルギーキャリア、燃料電池、水電解、二次電池、蓄熱技術などの多様なエネルギー変換システムを主題とし、関連する科学と技術に関する国内外の最先端の研究・開発状況を俯瞰し、将来の展望を議論します。

開催日：2024年5月29日(水)～30日(木)(第61回日本伝熱シンポジウムの第1日目と第2日目)

会場：神戸国際会議場 (<https://kobe-cc.jp/ja/>)

所在地 〒650-0046 神戸市中央区港島中町6-9-1 電話番号 078-302-5200

アクセス 神戸新交通 ポートライナー「市民広場」駅に直結

神戸国際会議場 交通アクセス (<https://kobe-cc.jp/ja/visitors/access/>)

一般講演申込締切：2024年1月19日(金)

一般講演論文原稿提出締切：2024年3月15日(金)

早期参加申込締切：2024年4月12日(金)

ホームページ URL：<https://htsj-conf.org/symp2024/IWSEC2024/index.html>

【ワークショップの形式】

- 講演発表形式は対面での発表として、
 - a) 招待講演
 - b) 一般講演(口頭発表)を実施し、使用言語は英語とします。なお、一般講演の申し込みが多数の場合には、ポスター講演とさせていただきます。
- 講演申込みの方法の詳細については、後日、学会誌または学会ホームページにおいてご案内します。

【参加費等】

- IWSEC2024 参加費(早期申込締切：4/12)

(第61回伝熱シンポジウムへの参加も可能です。)

会員一般(不課税, 早期申込：14,000円, 4/13以降の申込：17,000円)

協賛学会一般(税込み, 早期申込：15,400円, 4/13以降の申込 18,700円)

非会員一般(税込み, 早期申込：18,700円, 4/13以降の申込：22,000円)

会員学生(不課税, 早期申込：8,000円, 4/13以降の申込：9,000円)

非会員学生(税込み, 早期申込：9,900円, 4/13以降の申込：11,000円)

※特別賛助会員は1口につき3名、賛助会員は1口につき1名、参加費が無料になります。

※講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。

- 講演論文集電子版

講演論文集電子版のみの販売：5,000 円（税込み，シンポジウム後の販売になります。）

【意見交換会】

- 開催日：2024 年 5 月 30 日（木）（第 61 回伝熱シンポジウムと共通）
- 会 場：ポートピアホテル（〒650-0046 兵庫県神戸市中央区港島中町 6 丁目 10-1）
- 参加費（早期申込締切：4/12）
一般（早期申込：10,000 円，4/13 以降の申込：13,000 円）
学生（早期申込：5,000 円，4/13 以降の申込：7,000 円）

【お問い合わせ先】

International Workshop for Sustainable Energy Conversion Systems 2024

（IWSEC2024）実行委員会事務局宛

Email: iwsec2024@htsj-conf.org

優秀プレゼンテーション賞（第 61 回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会
委員長 春木 直人

第 61 回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、若手研究者および学生を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開催日：令和 6 年 5 月 29 日（水）シンポジウム第 1 日
- 発表形式：発表者 1 名あたり、発表内容をまとめたポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。
- 対象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、令和 6 年 4 月 1 日現在で 28 歳以下の方、または、申込当日に学生である方。
- 応募資格：発表者は日本伝熱学会の会員（正員・学生員）に限ります。発表者が日本伝熱学会会員でない場合は、早期参加申込締切までに会員申込と会費納付を行ってください。**なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。**
- 応募件数：大学に所属する学生の場合：指導教員あたり 1 名（1 件）
大学以外の研究機関、企業に所属する場合：研究グループあたり 1 名（1 件）
とします。
- 応募方法：第 61 回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の講演申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”を選択し、“指導教員または研究グループ長等”を入力してください。
なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表彰：受賞者はシンポジウム第 2 日の学会総会で表彰されます。



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値のある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット（HP：ホームページ、ML：メーリングリスト）で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

対象	対応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌とHPに掲載、MLでも配信	申込者は、記事を総務担当副会長補佐協議員（ML担当）、広報委員会委員長（HP担当）あるいは編集出版部会長（会誌担当）へ送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による 国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載 （バナー広告のみ、有料）	申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HPバナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：白樫 了（東京大学）：aa21150@iis.u-tokyo.ac.jp
- ・編集出版部会長：佐々木 直栄（日本大学）：sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：櫻井 篤（新潟大学）：sakurai@eng.niigata-u.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：李 敏赫（東京大学）：mlee@mesl.t.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子・山田麻子：office@htsj.or.jp

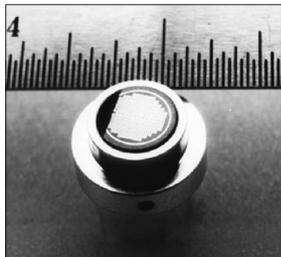
【注意】

- ・原稿は Word ファイルまたは Text ファイルでお願いします。
- ・HP はメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご承願います。
- ・ML では、原則としてテキスト文の送信となります。pdf 等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。
弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。
特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、
熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束 マイクロセンサー



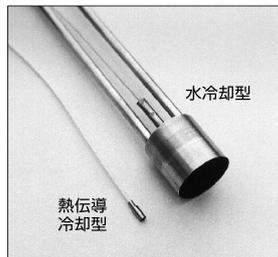
特徴

- 最高速の応答 (約 6μ 秒)
- $850^{\circ}C$ まで外部冷却不要
- 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラバース実験
- タービンレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

サーモゲージ

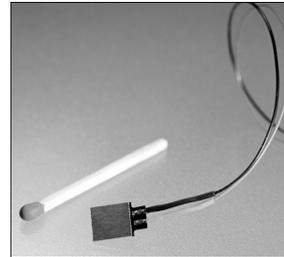


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタントで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国連邦航空局のファイヤー・スモークテスト

gSKIN® 熱流束センサー



「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、 $72m^2$ の広さを持ち、厚さは $0.4mm$ です。レベル-0パッケージの最適化ポリマーと1-レベルパッケージの金属の構造になっています。

使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。



センサテクノ株式会社

URL

www.senstech.jp

〒106-0031 東京都港区西麻布3-24-17 霞ビル4F
TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323

E-mail

info@senstech.jp



■ CAPTEC 社日本総代理店 ■ MEDTHERM 社輸入販売店 ■ ITI 社輸入販売店

当社は、独自の高度技術を持つ、海外メーカーの熱計測機器をご提供致しております。

CAPTEC 社(フランス)

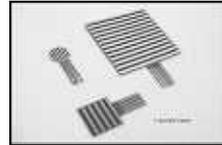
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



サイズ: 5×5mm～300×300mm
厚み: 0.4mm (平面用・曲面用)
温度範囲: -200～200°C
応答速度: 約 200ms
オプション: 温度計測用熱電対内蔵
形状: 正方形・長方形・円形
特注品: 高温用・高圧用・防水加工

輻射センサー



サイズ: 5×5mm～50×50mm
厚み: 0.25mm
温度範囲: -200～250°C
応答速度: 約 50ms
オプション: 温度計測用熱電対内蔵
形状: 正方形・長方形・円形
波長領域: 赤外/可視+赤外

MEDTHERM 社(アメリカ)

MEDTHERM(メドサーム)社は、これまで30年以上にわたり、高品質の熱流計及び超高速応答の熱電対を提供してまいりました。航空宇宙・火災・燃焼分野における豊富な実績を有しています。用途に応じ、様々な形状・仕様の製品を製造可能です。

熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft²sec(フルスケール)
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)
最高温度: 200°C(水冷なし)/1500°C(水冷)
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

応答速度: 50ms以下*
再現性: ±0.5%
較正精度: ±2%
オプション: 輻射窓・視野角指定等

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

本同軸型熱電対は、第1熱電対のチューブの中に第2熱電対ワイヤーが挿入された同軸構造になっています。第2熱電対ワイヤーは、厚み0.0005インチ(約0.013mm)の特殊なセラミックで絶縁コーティングされています。プローブ先端の熱電対接点は、厚み1～2ミクロンの金属皮膜で真空蒸着されており、最高1マイクロ秒の応答速度を実現しています。



【主な用途】
表面温度及び表面熱流束計測
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等
【最小プローブ径】
0.015インチ(約0.39mm)

【熱電対タイプ】
T型(銅/コンスタンタン) -270°C～+400°C
J型(鉄/コンスタンタン) -210°C～+1200°C
E型(クロメル/コンスタンタン) -270°C～+1000°C
K型(クロメル/アルメル) -270°C～+1372°C
S型(白金10%ロジウム/白金) +200°C～+1700°C

ITI 社(アメリカ)

ITI(International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火災強度熱流計など、特殊な用途に対応した製品を提供しています。特注品の設計・製造も承っております。

高温用熱流板



最高温度: 980°C
応答速度: 0.1s
直径: 8mm～25.5mm 厚み: 2.5mm

水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C
応答速度: 0.1s
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm²

当社取扱製品の適用分野

- 伝熱一般
- 温熱環境
- 炉・ボイラー
- 航空宇宙
- 火災
- 燃焼
- 各種エンジン

有限会社 テクノオフィス

〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B
TEL. 045-901-9861 FAX. 045-901-9522
URL: <http://www.techno-office.com>

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

新年あけましておめでとうございます。本年も日本伝熱学会誌「伝熱」をお引き立ていただきますようお願い申し上げます。

部会長として昨年 7 月号の編集出版業務に携わって以来、慢性的な納期遅れを懸念しておりましたが、その背景には「コロナ禍」により加速された「2025 年問題」（団塊世代の後期高齢者化による働き手不足の問題）があり、一朝一夕には解決できない問題であることに気づかされました。12 月の理事会でご助言いただいた皆様にお礼申し上げます。

「行事カレンダー」、「お知らせ」、「事務局からの連絡」など、一刻を争う可能性のある掲載記事内容は、WEB ページで優先的に開示するなどの応急措置を進めながら、希望者には印刷物として会誌を配布する形を残しつつ、電子化への移行を着々と進めなければならぬと考えております。

さて、本号では、小川邦康先生（慶應義塾大学）にお願いして、特集「植物と食品の MRI 計測」を組んでいただきました。MRI 計測の特長を活かして取り組まれている最先端の研究の中から、「植物と食品」に対象を絞った 4 件のご寄稿をいただきました。ご多用中にも関わらずご寄稿下さった皆様に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

佐々木 直栄（日本大学）

Naoe SASAKI (Nihon University)

e-mail: sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 鈴木 洋（神戸大学）

編集出版部会長 佐々木 直栄（日本大学）

委員

（理事） 田之上 健一郎（山口大学）、矢野 健史（東京電力）

（協議員） 小川 邦康（慶應義塾大学）、櫻井 篤（新潟大学）、田中 三郎（日本大学）、大西 元（金沢大学）、岡部 孝裕（弘前大学）、柏木 誠（早稲田大学）、小糸 康志（熊本大学）、志賀 拓磨（産業技術総合研究所）

TSE チーフエディター 鈴木 雄二（東京大学）

TSE 編集幹事 李 敏赫（東京大学）

編集出版部会 連絡先： 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地

日本大学 工学部機械工学科

佐々木 直栄

Phone: 024-956-8695

E-mail: sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp