

磁気共鳴表面スキャナー：生きた牛やトンネルの計測を目ざして

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地圏資源環境研究部門 物理探査研究グループ

上級主任研究員 中島 善人

1. 特許第5170617号 片側開放型磁気回路
2. 特許第5294230号 脂肪交雑の識別、定量方法及び脂肪交雑の非侵襲計測装置
3. 特許第5196480号 片側開放型多重円筒磁気回路
4. 特願2022-095132 脂肪の脂肪酸構成割合の計測装置及び方法（未公開特許）
5. 特開2020-139797 片側開放型磁気共鳴装置のための磁気回路
6. 特開2021-124285 脂肪含有率等の計測装置及び方法
7. Nakashima, Y. (2015) Development of a Single-Sided Nuclear Magnetic Resonance Scanner for the In Vivo Quantification of Live Cattle Marbling. Applied Magnetic Resonance, 46, 593-606. <http://dx.doi.org/10.1007/s00723-015-0657-4>
8. Nakashima, Y. (2019) Non-Destructive Quantification of Lipid and Water in Fresh Tuna Meat by a Single-Sided Nuclear Magnetic Resonance Scanner. Journal of Aquatic Food Product Technology 28, 241-252. <https://doi.org/10.1080/10498850.2019.1569742>
9. Nakashima, Y. (2020) Development of a hand-held magnetic resonance sensor for the nondestructive quantification of fat and lean meat of fresh tuna. Journal of Food Measurement and Characterization. 14, 2947-2955. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00539-5>
10. Nakashima, Y. and Shiba, N. (2021) Nondestructive measurement of intramuscular fat content of fresh beef meat by a hand-held magnetic resonance sensor. International Journal of Food Properties. 24, 1722-1736. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1999261>
11. Nakashima, Y., Sawatsubashi, T. and Fujii S. (2022) Nondestructive quantification of moisture in powdered low-rank coal by a unilateral nuclear magnetic resonance scanner. International Journal of Coal Preparation and Utilization. 42, 1421-1434. <https://doi.org/10.1080/19392699.2020.1722656>
12. 中島善人、柴 伸弥 (2021) 牛枝肉のモモ抜きの非破壊検査用磁気共鳴スキャナーの開発. 食肉に関する助成研究調査成果報告書（公益財団法人伊藤記念財団） vol39, 15-21. <https://www.itokenen-zaidan.or.jp/publication/>
13. 中島善人 (2021) 磁気共鳴表面スキャナーによる原位置・非破壊センシング. GREEN NEWS（出版元: 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門） no.74, p.5. https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/gn/green_news74.pdf

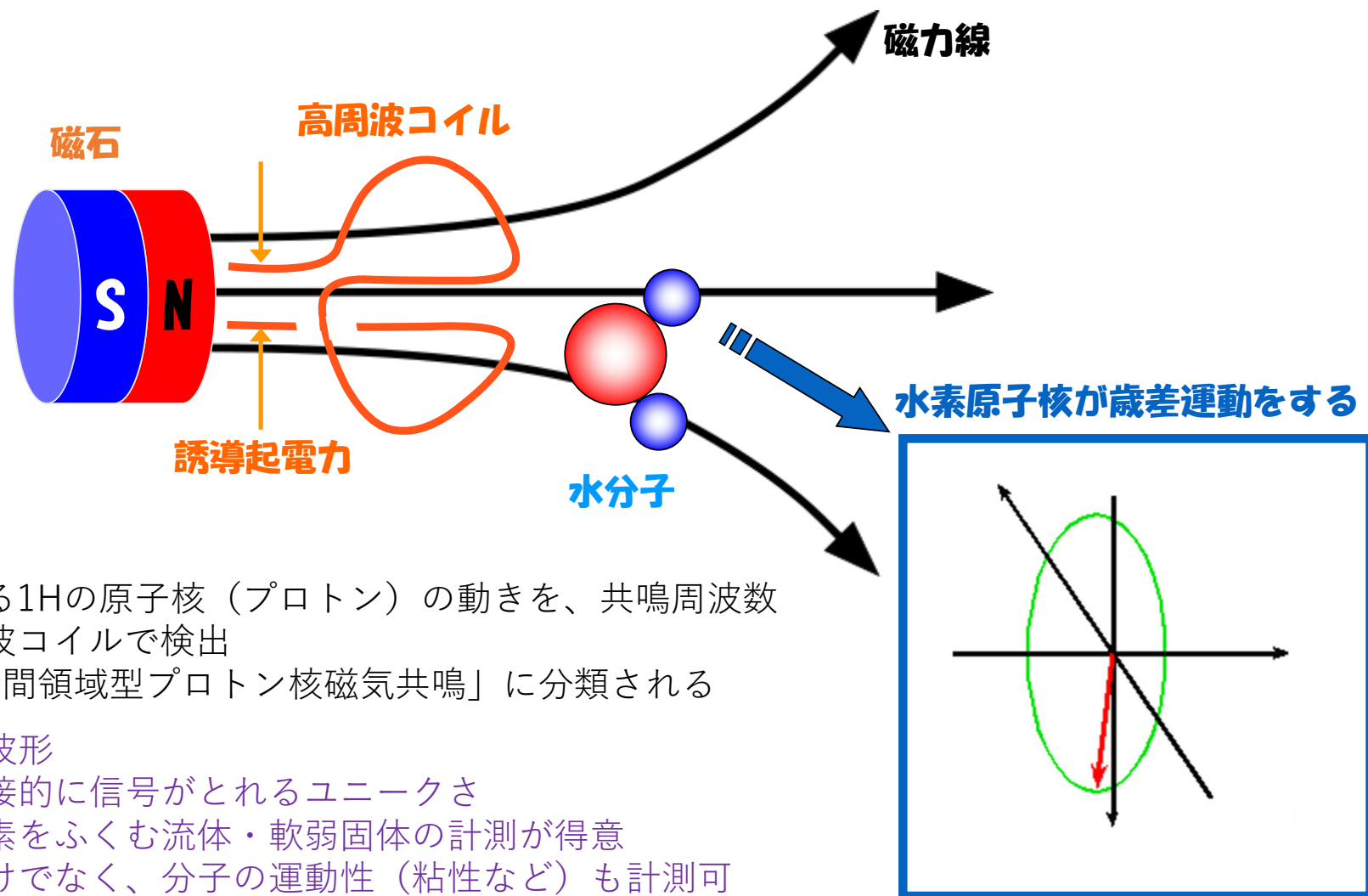
関連特許・文献リスト (Reference List) つづき

14. 中島善人 (2021) 磁気共鳴物理探査を用いたセンシング技術の農水分野へのスピンオフ. 地圏資源環境研究部門十大ニュース 2020 (出版元: 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門) p.5. https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/tbn/green_tbn2020.pdf
15. 中島善人 (2015) 牛の霜降り状態がNMR でわかる!? —片側開放型NMR が拓く新たな可能性. 月刊「化学」, 70, 25-28. <https://staff.aist.go.jp/nakashima.yoshito/bin/kagaku2015.pdf>
16. 中島善人 (2018) WEB 版ブルーバックス. 「牛の霜降り具合」を生きたまま10秒で計測する核磁気共鳴装置! <http://gendai.ismedia.jp/articles/-/56418>
17. 産総研プレスリリース(2015). 牛の霜降り状態を計測できる核磁気共鳴スキャナーを開発 https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2015/nr20150518/nr20150518.html
18. 産総研LINK (産総研広報誌) (2018) no. 18, 4月号 https://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_link/no_18/no_18_full.pdf
19. 中島善人, 宇津澤 慎 (2008) 核磁気共鳴表面スキャナーの農業土木への応用にむけて. 水土の知 (農業農村工学会誌) 76, 795-799. https://doi.org/10.11408/jjsidre2007.76.9_795
20. 中島善人 (2005) NMR表面スキャナー コンクリートの新しいメンテナンス技術の提案. 産総研TODAY vol.5, No.10, 32-33.

著者関連のwebサイト

1. 個人HP <https://staff.aist.go.jp/nakashima.yoshito/myhome.htm>
2. Google Scholar (文献DB) <http://scholar.google.co.jp/citations?user=aQXoRtsAAAAJ&hl=ja&oi=ao>
3. Web of Science (文献DB) <http://www.researcherid.com/rid/A-1504-2010>
4. ResearchGate (研究系SNS) <https://www.researchgate.net/profile/Yoshito-Nakashima>
5. ORCID (研究者DB) <https://orcid.org/0000-0002-8491-367X>

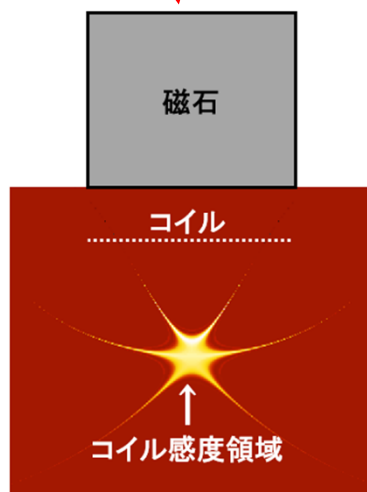
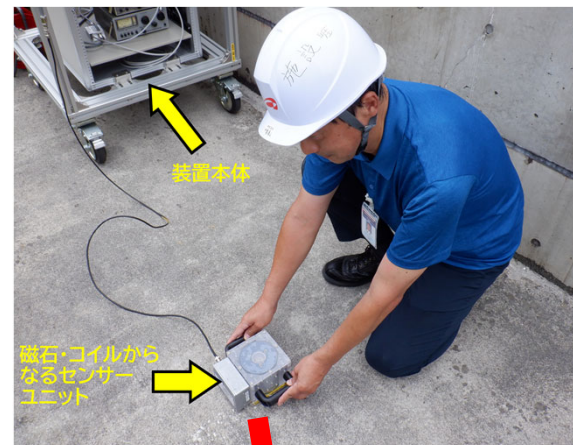
プロトン磁気共鳴(Magnetic Resonance, MR)とは？



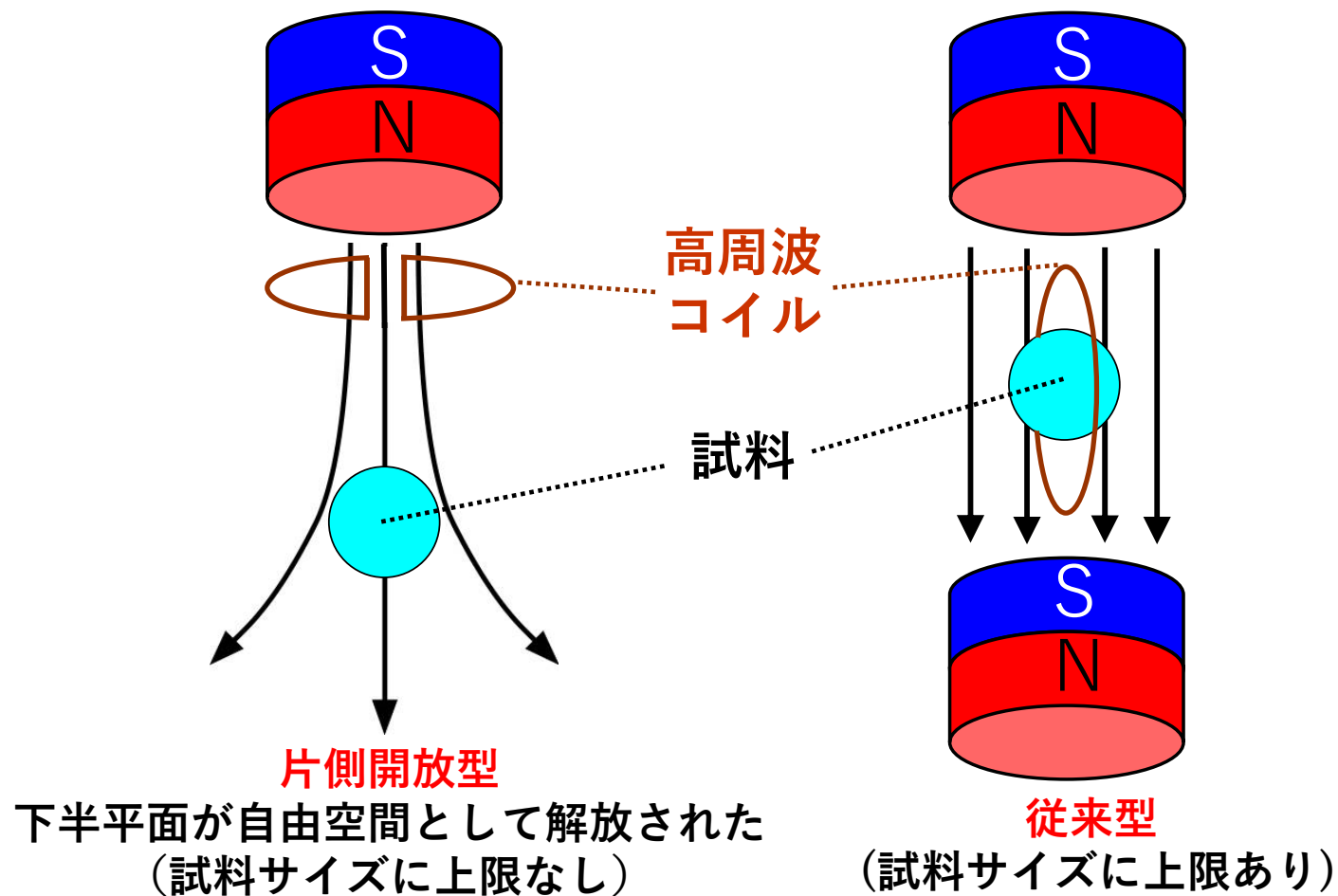
- ✓ 磁石の静磁場で歳差運動する 1H の原子核（プロトン）の動きを、共鳴周波数のラジオ波で制御し、高周波コイルで検出
- ✓ 本研究のMRは、「低磁場時間領域型プロトン核磁気共鳴」に分類される
- ✓ 生データはプロトン横緩和波形
- ✓ プロトンを含む分子から直接的に信号がとれるユニークさ
- ✓ 水・油・ゴム・ゲルなど水素をふくむ流体・軟弱固体の計測が得意
- ✓ プロトンのモル数の定量だけでなく、分子の運動性（粘性など）も計測可

「片側開放型」磁気共鳴表面スキャナーの勘所 (Ref 15)

片側開放型センサーでコンクリート床を計測するイメージ



磁石とコイルを「片側開放型」という特殊な構造にすれば、どんなに大きな物体でもその表面を非破壊・非侵襲でスキャンできる！



磁気共鳴表面スキャナーの原理：まとめ

長所 片側開放型の恩恵として、以下のことが原位置で非破壊・非侵襲・非接触で計測できる

- ✓ 水・油・ゴム・ゲルなど軽水素原子($1H$)をふくむ軟弱な物質**全般**を計測可能
- ✓ プロトンを含む分子の定量が可能
- ✓ 生データに含まれるプロトン緩和時間は分子運動の活発性を反映しているので、分子識別・拡散係数・流速・多孔質媒体であれば空隙サイズ分布や透水係数推定の可能性
- ✓ メンテフリーな小型の希土類永久磁石を使えば、軽量でポータブルで実用的な計測系が構築可能

何に適用するか？
アイデアはみなさま次第です！

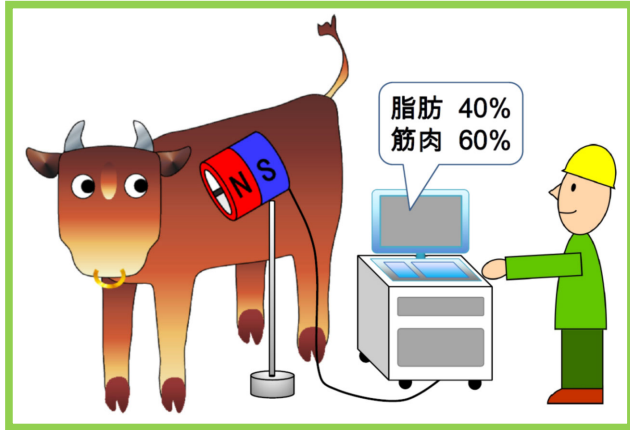


短所 片側開放型のデザインの代償として高周波磁場と静磁場が弱く不均一になるので、以下の困難がともなう

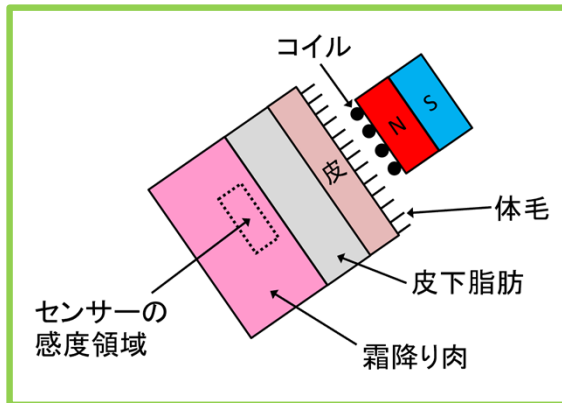
- ✓ 氷のような堅い固体や、ガスのような低密度物質は計測困難
- ✓ 深い探査深度の部位を少ない信号積算回数で計測するとS/Nが悪い（この改善が開発の勘所. Refs 1-6）
- ✓ 金属容器中の水や油は計測困難（しかしスチールコード入りタイヤを計測した文献あり。炭素繊維中の水を計測した文献もあり）
- ✓ イメージングやスペクトロスコピーは得意ではない（しかし成功した文献はある）
- ✓ プロトン以外の核は感度が低いので研究例は少ない（ $19F$ の計測文献はある）
- ✓ 探査深度はせいぜい数cm（センサーを1トンに大型化すれば探査深度約1mを実現した文献あり）
- ✓ 一部位の計測所要時間は短くても数秒必要

個人的な強み ✓ 磁気共鳴表面スキャナーを継続して研究・開発しているのは、国内でおそらく私一人です

生きた牛の霜降り計測をめざして(Refs 7, 10, 12, 15-18)



生きた肉用牛の霜降り計測のイメージ (Ref 14)

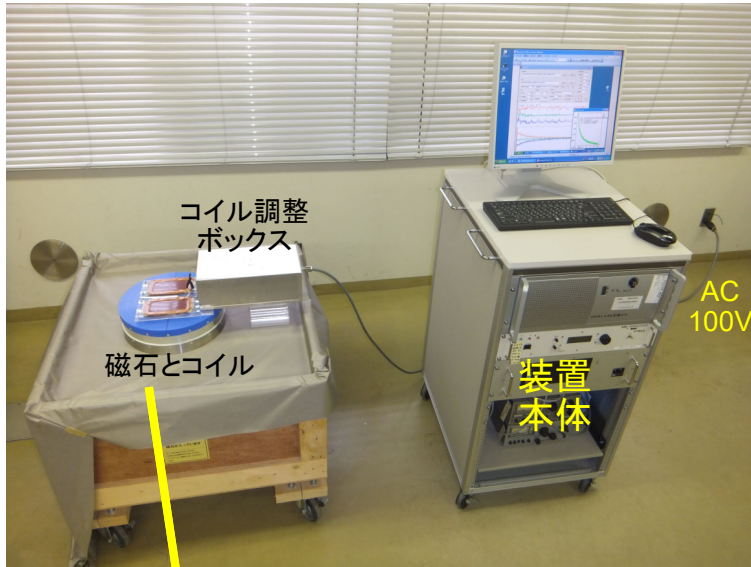


上の図の拡大図 (牛の体の断面 Ref 4)

- ✓ 霜降り度は、肉質等級＝価格を決定するが、既存の超音波イメージングなどでは、と畜前に非侵襲で定量計測が困難。
- ✓ もしも、生きたまま、牛の霜降りの正確な定量装置ができれば、早く仕上げるための給餌法開発や出荷時期の最適選択に貢献できる。 ← **ブランド牛の品質維持、ひいては農家の増収につながる**

- ✓ 磁気共鳴法は脂肪分子由来の信号をプロトン横緩和データから抽出できるので、脂肪含有率を定量計測できる。
- ✓ しかし、牛の全身用のMRIは、たとえ製作できたとしても非常に高価。しかも重たいので、各地の畜舎を移動しては使えない。
- ✓ いっぽう片側開放型で製作できれば、体表から約3cm奥の部位（サーロインや僧帽筋）を計測できる低価格＆ポータブルな装置（左図のイメージ）が作れそうだ。
- ✓ プロトタイプは完成し、ラボ実験で基本動作を確認済み
- ✓ 現在は、現場（牛舎）で使えるシステムの組み上げ中

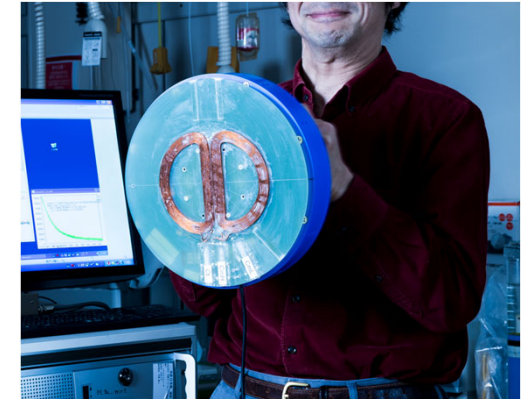
生きた牛の霜降り計測をめざして：プロトタイプは完成 (Refs 7, 10, 18)



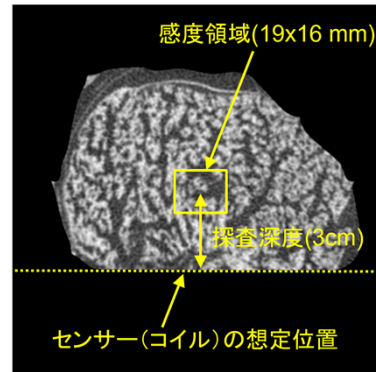
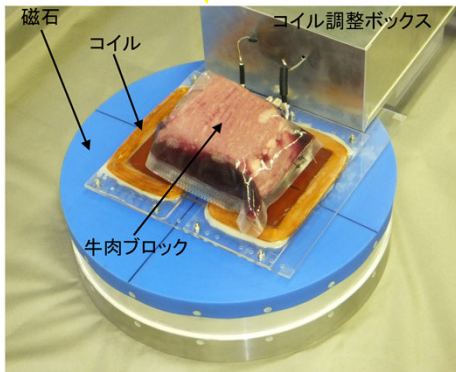
- ✓ 探査深度3 c mのプロトタイプは完成して、ラボでは良好な計測精度を確認
- ✓ しかし磁石が43 k g もあって重たく、牛舎で使いづらい

- ✓ 牛舎で使える、より軽量の15 k g タイプを試作したので、現在試運転にむけて作業中

- ✓ 実用機の開発にむけて、予算獲得や生牛の提供をふくめて、協業相手を募集中

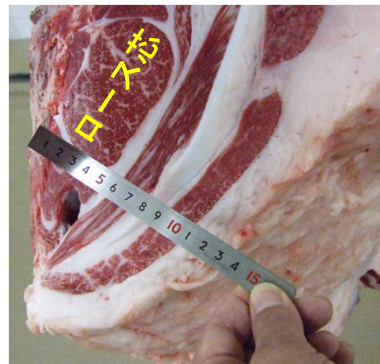


探査深度3 c mの15 k g 磁石を開発した（システムに組み込み中）



黒毛和牛ブロック（ロース）のX線CT画像

- ✓ 探査深度1～3 c mでは、枝肉の表面から第6－7肋間のロース芯はスキャンできない

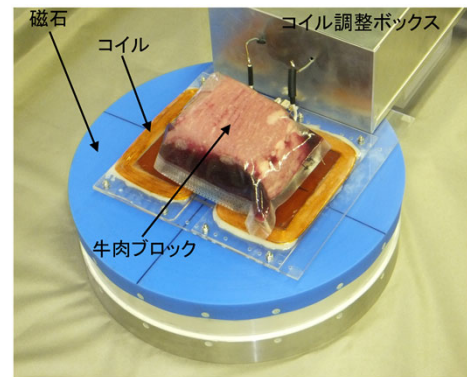


探査深度1 c mの軽量5 k g も開発 8

探査深度3 c mのプロトタイプ（しかし磁石は43 k g）

プロトタイプのラボでの性能確認実験 (Ref 7)

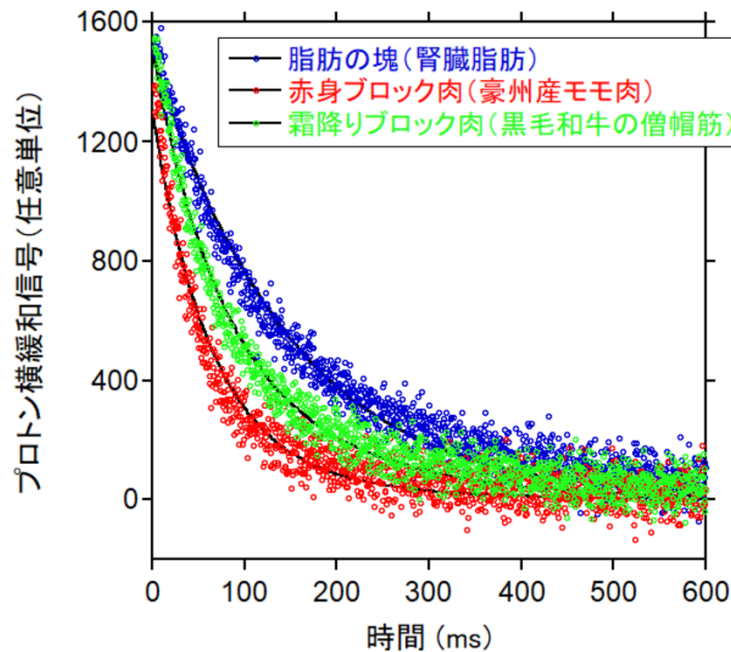
- ✓ 脂肪分子のプロトンと赤身中の水分子はプロトン横緩和の時定数が2～3倍異なるので、両者を識別できる。
- ✓ 「霜降りの程度」とは両者の混合比率なので、プロトン横緩和信号を解析すれば、霜降りの定量が可能
- ✓ 牛肉ブロック（ほぼ赤身～みごとな霜降り）を14個、ラボで計測。
- ✓ 誤差4.7 wt%で脂肪の磁気共鳴スキャンに成功した←牛舎での実用化に向けた朗報



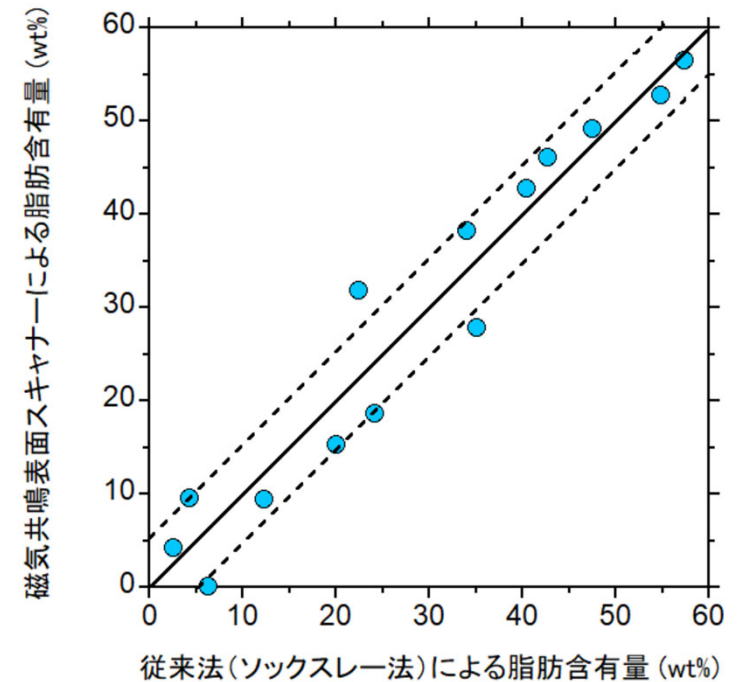
探査深度3cmのプロトタイプ（磁石重量43kg）



黒毛和牛の霜降り
（僧帽筋）

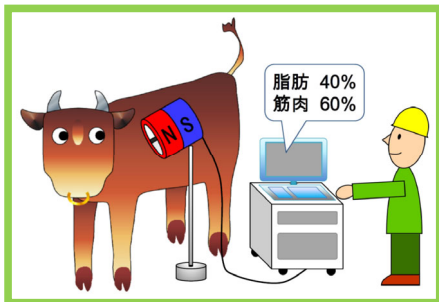


左上の大型磁石で得られた生データの例。1サンプルの計測所要時間10秒

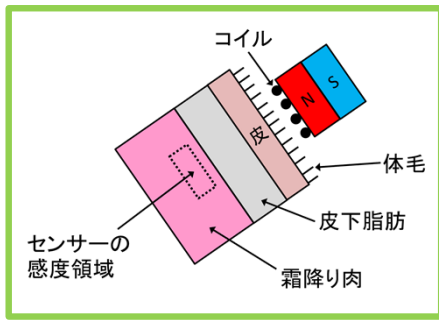


プロトタイプの計測精度。14サンプルの根平均二乗誤差は、4.7 wt%

生きた牛の非侵襲霜降り計測をめざして：他の計測法との比較



磁気共鳴表面スキャナーによる牛の霜降り計測のイメージ(Ref 14)



上の図の拡大図（牛の体の断面 Ref 4）

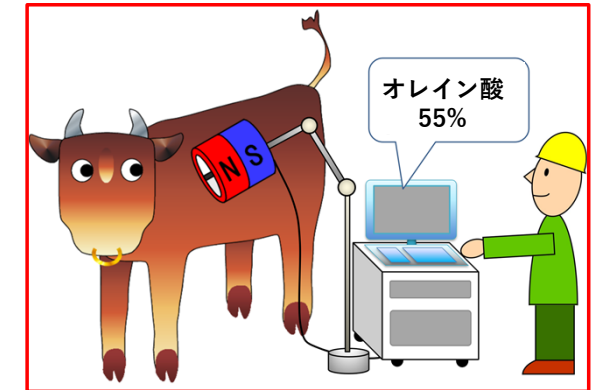
	感度領域はコンパクトか？	脂肪分子の定量性は？	装置価格は？	装置の操作性は？
磁気共鳴表面スキャナー	○2cm ³ 程度。そこ以外から信号は来ない	○脂肪由来のプロトン信号を識別	△（2千万円くらい？）	○（鎮静剤や麻酔は不要。1部位を十秒ほどで計測）
近赤外	×（体毛、皮、皮下脂肪の影響あり）	○	○（数百万）	○
電気伝導	×（体毛、皮、皮下脂肪の影響あり）	×（生データは電気伝導度）	○	○
超音波イメージング	○	×（エコー画像の定量判読は高難度）	○（数百万）	△（ゲル塗布や剃毛の前処理が必要）

ビジネスモデル候補→

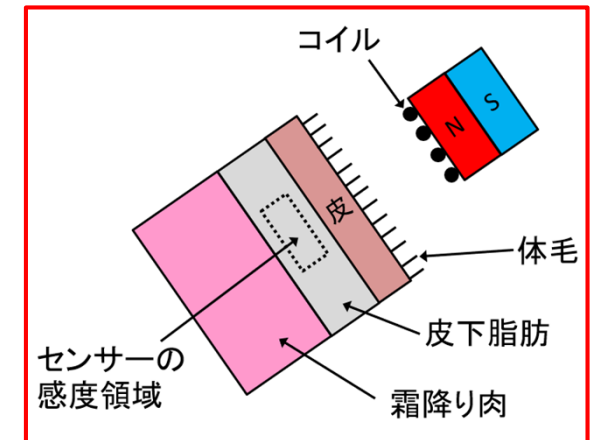
- ✓ 農家単位ではなく、ブランド牛の共進会単位での購入
- ✓ 計測請負会社が全国の牛舎や魚市場を行脚して、計測サービスをする

生きた牛のオレイン酸含有量計測をめざして(未公開特許 Ref 4)

- ✓ 霜降り度つまり脂肪含有量のみならず、脂肪の質すなわちオレイン酸などの不飽和脂肪酸含有量も、風味・口溶けの良さひいては牛肉の価格を支配する重要な特性
- ✓ 高く売れる家畜つまり不飽和脂肪酸を多く含む家畜を肥育する手法を開発するには、いちいちと畜して枝肉の断面を分析しては効率が悪い。非破壊・非侵襲で生体を、畜舎で子牛から出荷直前の成牛段階までの数年間を連続的に計測して、血統・運動・給餌の質と量などの影響を丁寧に分析する方が効率的
- ✓ しかし、生体の不飽和脂肪酸の量を非破壊・非侵襲で精度よく定量できる計測方法はない。たとえば近赤外分光法では、牛の体毛・皮ごしに皮下脂肪の非破壊・非侵襲分析をすることは困難である
- ✓ 不飽和脂肪酸は飽和脂肪酸にくらべて分子運動が活発である（融点が低い）。分子運動の活発さは、プロトン横緩和時間に反映されるので、片側開放型プロトン核磁気共鳴法を用いれば、生きた牛の体毛・皮ごしに不飽和脂肪酸の含有量計測ができそうだ（右図）。



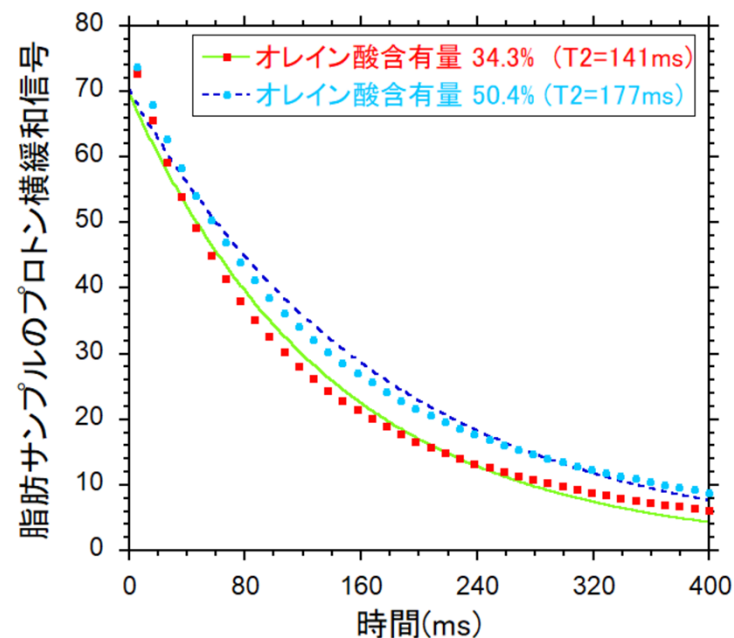
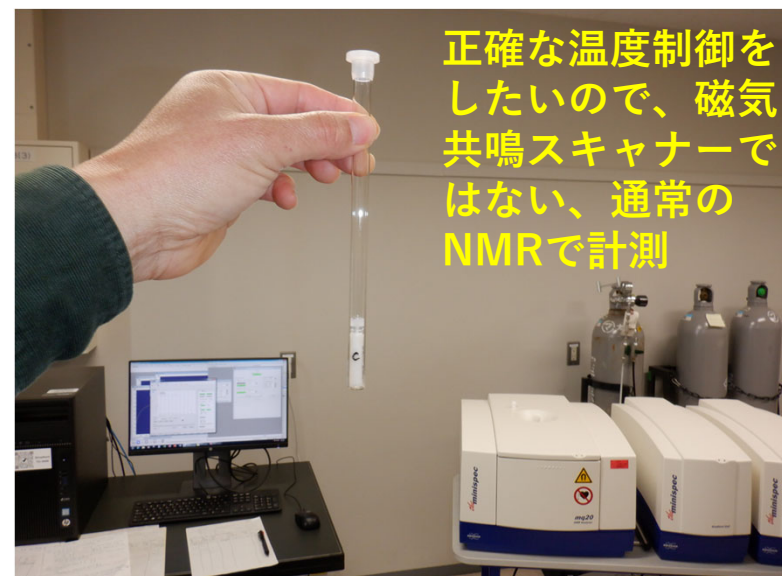
生牛の皮下脂肪を計測するイメージ (Ref 14)



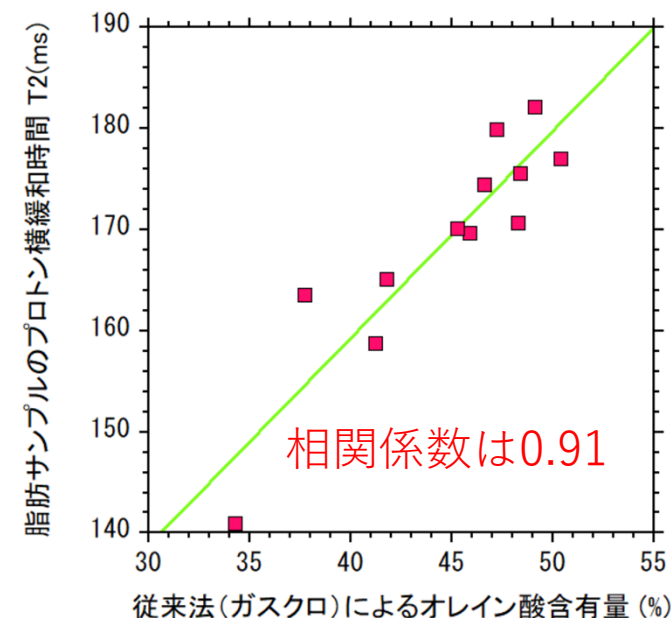
上の図の拡大図（牛の体の断面 Ref 4）

生きた牛のオレイン酸含有量計測をめざして(未公開特許 Ref 4)

- ✓ 牛脂サンプルのプロトン横緩和時間 (T2)を、40°C (牛の体温) で計測
- ✓ 並行して、従来法 (ガスクロマトグラフィー法) で脂肪酸組成を分析
- ✓ その結果、両者に高い相関があることを発見
- ✓ つまり、磁気共鳴計測でプロトン横緩和時間を計測すれば、オレイン酸などの不飽和脂肪酸の含有量を推定可能



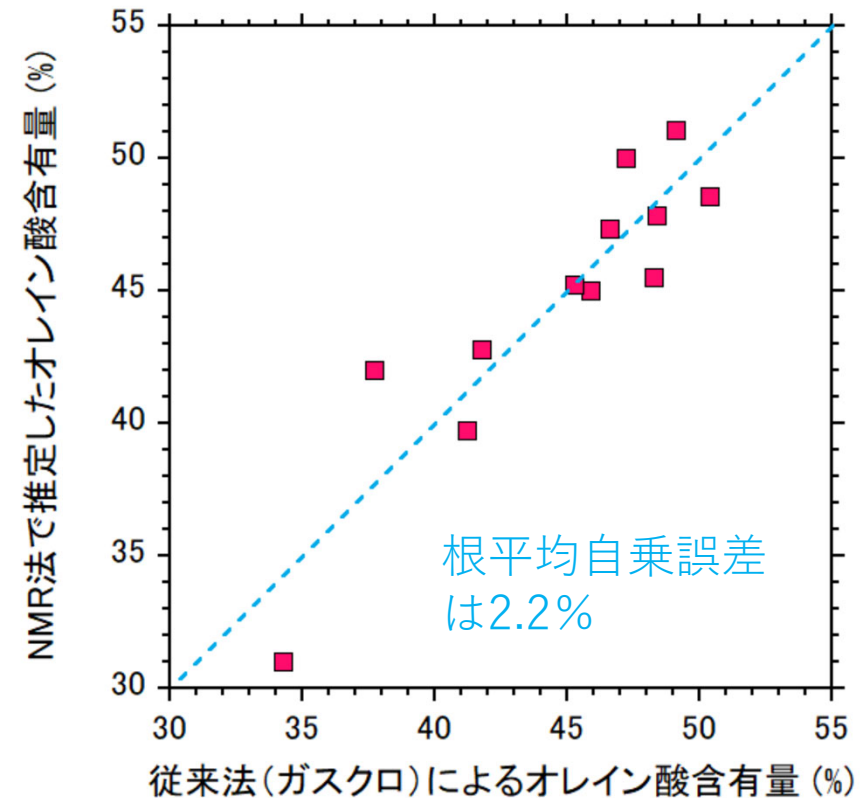
牛脂サンプルの計測結果。オレイン酸含有量が高いと、T2 (減衰の時定数) は大きくなる



12個の牛脂サンプルに関する、従来法で分析したオレイン酸含有量とプロトン横緩和時間との相関

生きた牛のオレイン酸含有量計測をめざして(未公開特許 Ref 4)

- ✓ 従来法（ガスクロマトグラフ法）とくらべて、計測誤差を2.2%に抑えることができた。これは、近赤外分光法による枝肉のむき出しの肉断面の計測精度と同レベルである。
- ✓ 全不飽和脂肪酸含有量、一価不飽和脂肪酸含有量についても同様に良好な計測誤差であった。
- ✓ よって、磁気共鳴スキャナーによる生体の肉用牛の不飽和脂肪酸含有量の非破壊・非侵襲計測への可能性が開けた
- ✓ 次の研究ステップは、脂肪交雑状態の肉の不飽和脂肪酸計測精度の確認、そして生牛での実地試験



前スライドの図で、その検量線をもちいて縦軸をオレイン酸含有量に換算したもの

生きた牛の計測をめざして：課題と期待

実用化に向けた課題

- ✓ 現状はプロトタイプ。もっと改造したい（生データのS/N改善、システム小型・軽量化など）
- ✓ 現状はブロック肉しか計測していない。牛舎で生きた牛を計測したい（生きている組織の計測、血流の影響評価、牛舎のノイズレベル評価など）。
- ✓ 以上を達成するために、予算獲得や生牛の提供をふくめて、協業相手を募集中
- ✓ 人材育成（磁気共鳴物理学&畜産というまったく異なる方面に詳しい人材の育成。なお、講演者は今年度末に現所属先を定年退職の予定）。

企業への期待・希望（ひとつのビジネスモデルとして）

- ✓ 計測機器のメーカーに対して、特許技術移転と人材育成を期待・希望。
- ✓ その人材が、全国の牛舎や魚市場やトンネルを行脚して、計測サービスをこなす。あるいはブランド牛の共進会に機器を売り込んで定期メンテナンスや計測指導を行う。

私は15年以上かけて0を1に育て上げました。
今後は外部の方と協業して、1を10，100，1000に育てたい。

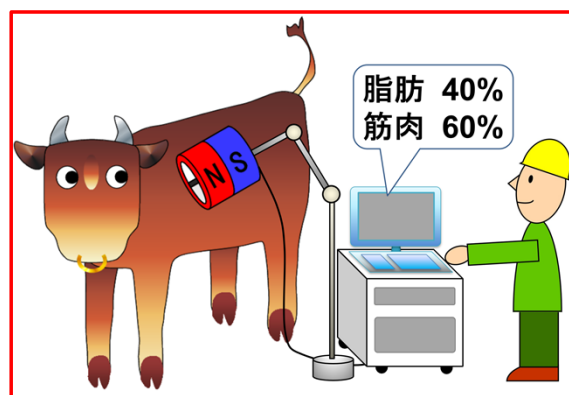
研究プランを1枚にまとめたチラシ:肉用牛の場合 磁気共鳴スキャナーによる肉用牛のブランド化への貢献

【概要及び想定される成果】

概要：日本が誇る黒毛和牛の霜降り（脂肪含有量）やオレイン酸含有量を生きたまま計測できる世界初の磁気共鳴スキャナーを開発し、ご当地和牛のブランドを高めることで農家の高収益化に貢献。

想定される成果：最短肥育のための飼料選択や、霜降りやオレイン酸含有量がベストな状態での出荷時期選択への貢献を通して、高い霜降りレベルやオレイン酸含有量を保証するブランド牛の品質維持、ひいては農家の収益向上に貢献。

【詳細】



磁気共鳴スキャナーによる、生きた牛の霜降りの非侵襲計測風景のイメージ (Ref 17)

- 霜降り（脂肪含有量）やオレイン酸含有量は牛肉の食味や価格を支配するので、農水産物のブランド化・高付加価値化のカギ
- しかし、従来技術の近赤外や超音波では生きた牛の霜降りの定量計測は困難
- 産総研のシーズ技術である磁気共鳴スキャナーを使えば、磁石を大型化して探査深度を3 cmまで深くすることで、生きた牛のサーロインの部位の脂肪含有量やオレイン酸含有量を計測できる可能性
- 連携先と協業し、高く売れる霜降り状態、オレイン酸含有量状態を効率よく達成するための計測ツールとして使い、ご当地和牛ブランドの維持・高度化、畜産農家の収益改善に貢献したい



探査深度1cmのマグロのトロのスキャナーは開発済み (Ref 9)



探査深度1cmの牛肉の霜降りスキャナーも開発済み (Ref 10)



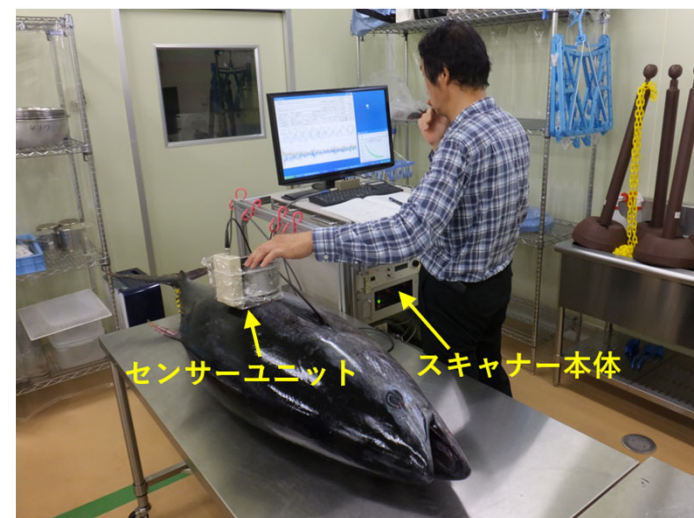
探査深度3cmの生きた牛用のプロトタイプを製作中 (Ref 16)

【工程表】

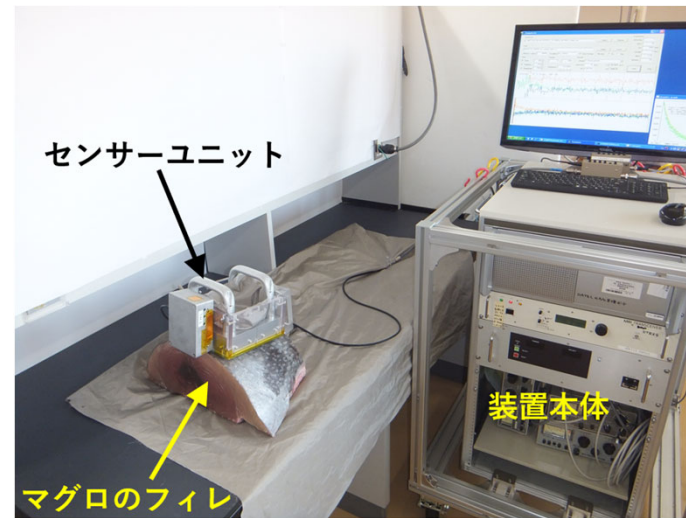
令和4年度	5年度	6年度	7年度	8年度	9年度～
研究パートナー探し、補足的な室内実験	プロトタイプのスキャナー (Ref 16) について、牛舎で試運転&問題洗い出し		プロトタイプの問題を解決した実用機の設計と新規製作。連携先の牛舎で本格的に運転。一連の成果を民間企業などに技術移転		

クロマグロの脂肪含有量の計測 (Refs 8-10,14)

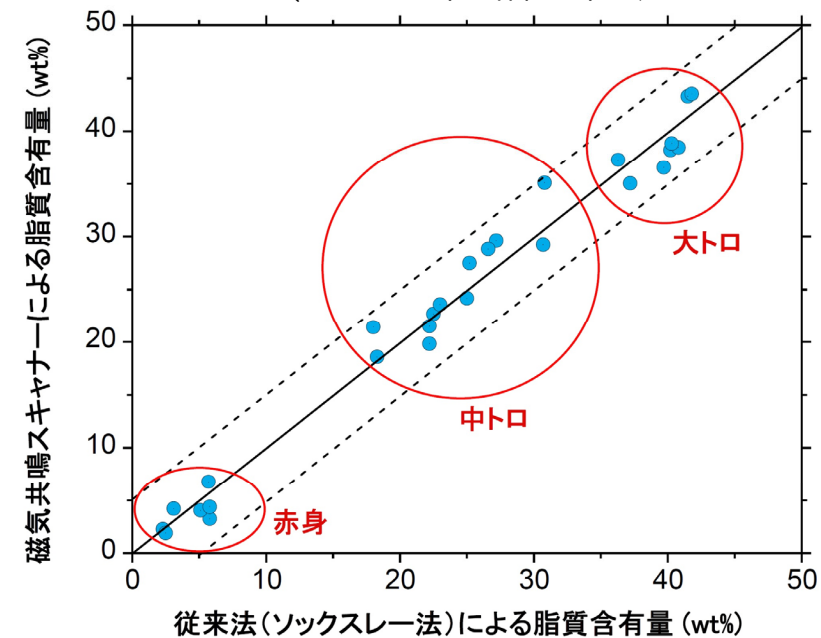
- ✓ マグロなど魚介類の脂質含有量も、食味ひいては価格を左右する重要な特性.
- ✓ 鱗・皮・皮下脂肪の影響を受けずに、その奥にある可食部の肉の部位について、脂質を非破壊定量できる手法へのニーズあり（近赤外や電気伝導法では対応困難）.
- ✓ 計測原理は牛肉と同じ。水分子と脂肪分子のプロトン横緩和時間の差異を利用
- ✓ 探査深度12mm、重さ6kgのセンサーで、マグロのブロック肉を27カ所計測。1部位の計測所要時間は100秒。脂質含有量を1.9 wt%の誤差（根平均二乗残差）で定量できた
- ✓ 魚市場や養魚場で全身スキャンを行えば、大トロの具合を評価できる可能性（適正な価格評価、給餌の改善に貢献）



磁気共鳴スキャナーによる天然クロマグロの計測風景。探査深度は6mmしかない。



左図のセンサーを探査深度12mmに改良したシステムで、養殖クロマグロのブロック肉を計測。



左図の改良センサーによる計測結果。27カ所計測の誤差は 1.9 wt%

トンネル壁内部の欠陥検出をめざして(Refs 13, 14, 19-20)

- ✓ 老朽化したコンクリート建造物中の空洞にたまった水は、鉄筋腐食や凍結による亀裂進展のリスク
- ✓ コンクリート壁の奥に隠れている水分子を直接定量できる原位置・非破壊計測法はない
- ✓ 磁気共鳴表面スキャナーならば、壁表面から数mm～数cm深部の水分子の定量計測が可能
- ✓ 凍結・融解モニタリングにも使える（凍ると信号消失するので）
- ✓ 老朽化メンテだけでなく、打設した生コンの養生過程（水和反応）モニタリングもできる(Ref 19)



磁気共鳴表面スキャナーによるコンクリート壁内部の空洞（水で満たされた状態）の検出風景のイメージ。装置本体は省略。



探査深度1cmのプロトタイプを試運転風景

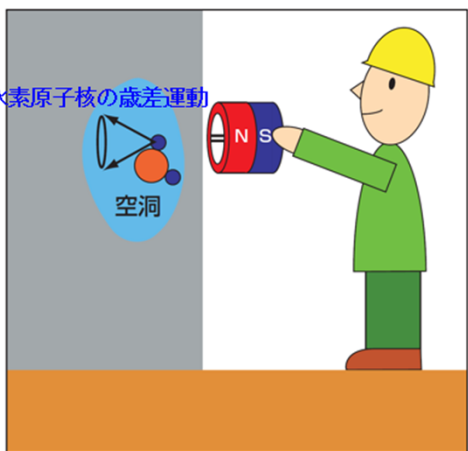
注意点：

- 1部位の計測に数十秒～数分かかる
- 探査深度が浅い（磁石サイズによるが、5mm～3cm）
- （水のない）乾燥した空洞からは信号が出ない
- 鉄筋の近傍では磁場がゆがむので計測困難（不可能ではない）
- 本体装置はポータブルだが、やや大型（左図の半分以下にはダウンサイジングできそう）

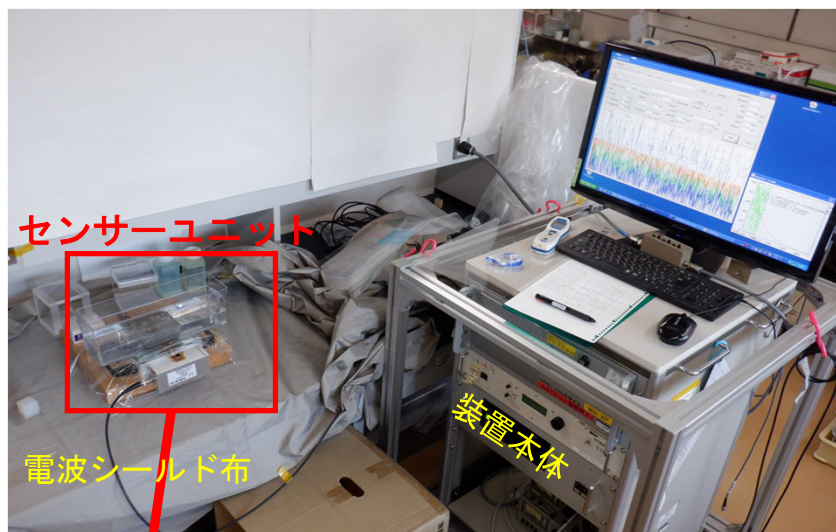
トンネル壁内部の欠陥検出をめざして（つづき）

豆板・ジャンカや隠れた表面気泡を模擬した空洞（スリット）のあるモルタルの室内計測に成功

①実験風景と計測したモルタル供試体



上の状況の室内模擬実験

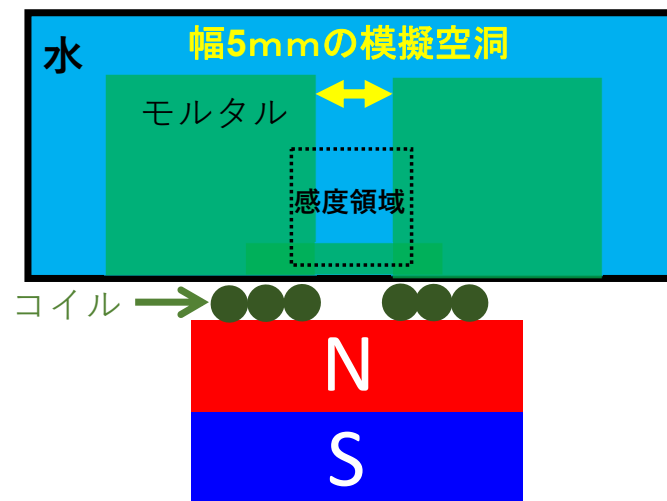


水で満たされたスリットのあるモルタル



スリット（模擬空洞）
のあるモルタル供試体。
細骨材あり。

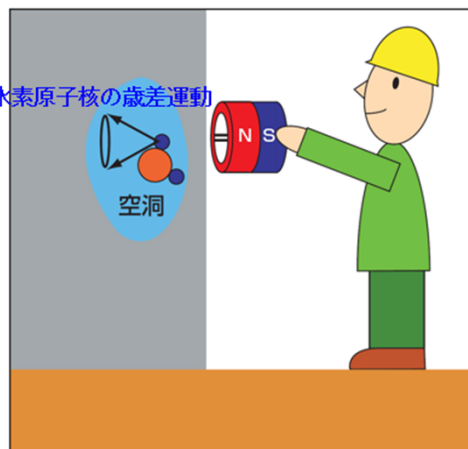
②実験の模式図



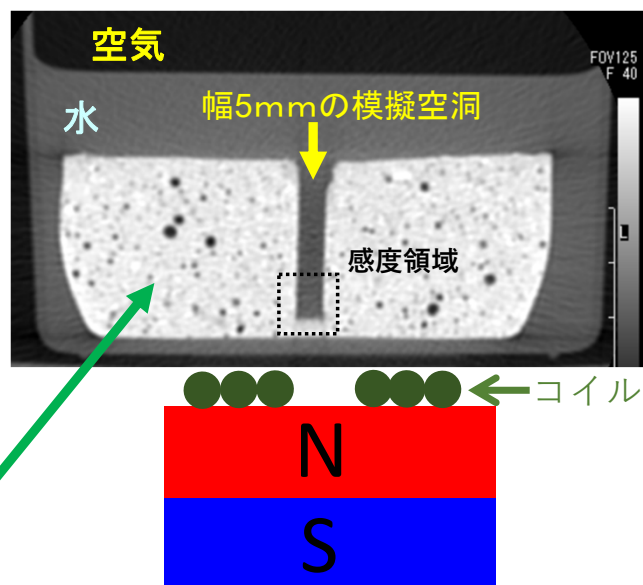
健全モルタル部分は19 vol%H₂Oある
はずであるが、健全なコンクリート
の微小空隙（ミクロン・サブミクロ
ンサイズ）中の水の信号を遮断する
計測モードで実施している

トンネル壁内部の欠陥検出をめざして（つづき）

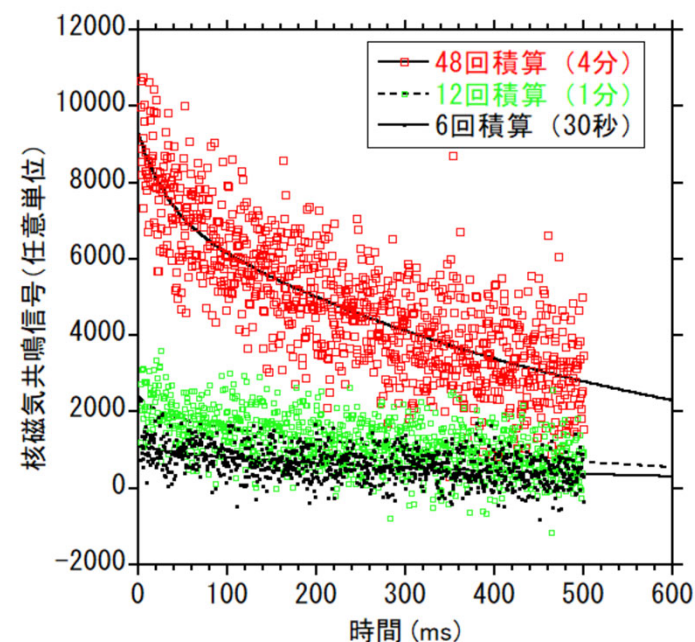
③スリット（模擬空洞）のあるモルタル供試体のX線CT画像



上の状況の室内模擬実験をした



④プロトン横緩和信号の生波形の例 5秒間隔で48回の信号積算をした場合、 計測所要時間は5x48 sec = 4分



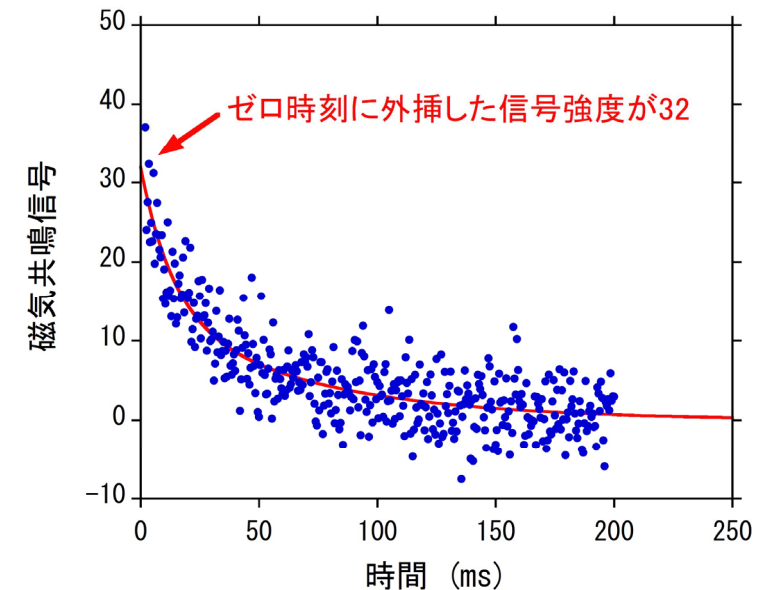
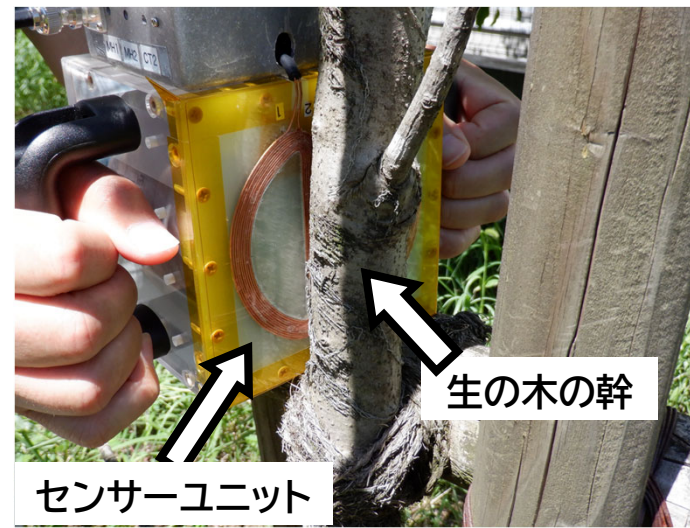
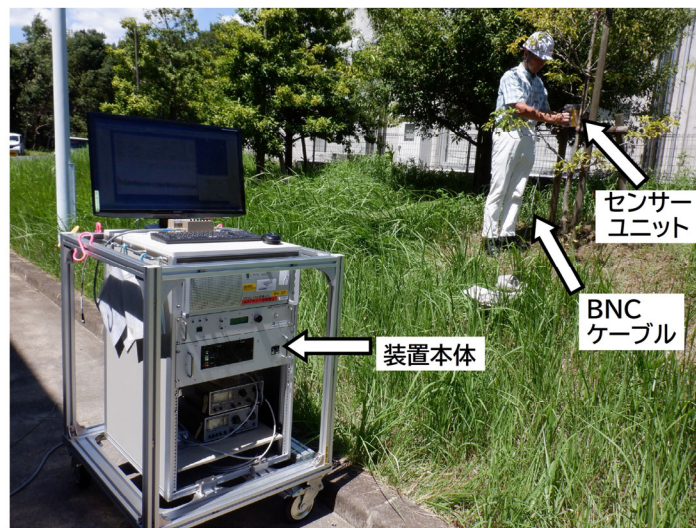
左のサンプルの計測生データ

1. ゼロ時刻に外挿した信号値が、感度領域の水のモル数に比例
2. 別途行ったバルク水タンクの実験データで規格化すれば、感度領域の体積含水率が分かる
3. 結果として、信号積算回数48, 12, 6回のデータから算出した感度領域の体積含水率は、それぞれ 38.5, 36.8, 34.6 vol%。これは、X線CT画像と比べれば、もっともらしい値である

結論：プロトタイプは、数mm以上のサイズの空洞中の水を数十秒から数分で検出できる

生きた樹木の水分の原位置計測 (Ref 13)

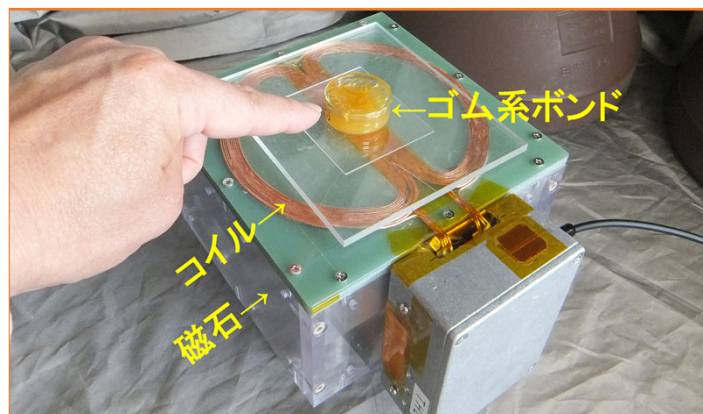
- ✓ 樹木の水分含有量は、生理状態を把握するための基礎データだが、磁気共鳴センサーのようなコンパクトな感度領域を持つ非破壊センシング法は他にない。
- ✓ 振幅データを解析して、生木としてもっともらしい値（体積含水率**32 vol%**）を得た（下図）
- ✓ 減衰時定数データ（下の赤線の場合は**14 ms**と**67 ms**の2つ）は、植物病理状態の把握に使える可能性
- ✓ 凍害の原位置診断にも使える可能性（凍結するとH₂O由来の磁気共鳴信号が消失する）
- ✓ 非破壊・非接触診断が要求されるご神木・天然記念物の健康診断に使える可能性



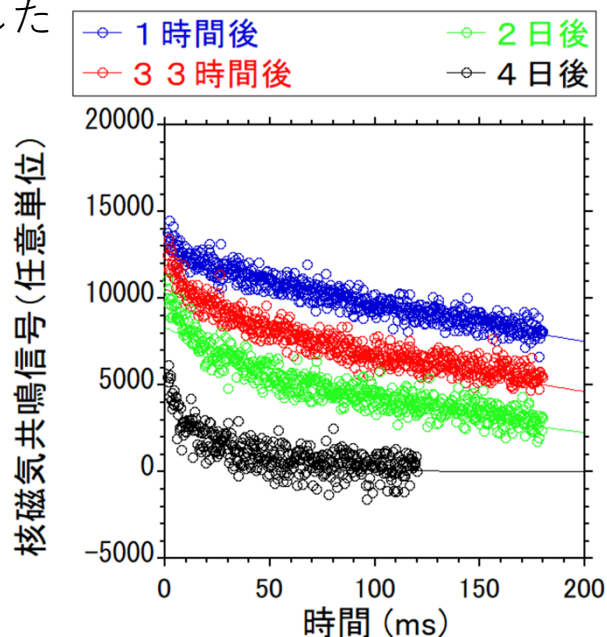
計測結果（計測所要時間は5秒）。時刻ゼロに外挿した値が体積含水率(vol%)になるように縦軸を校正してある。

接着剤やセメントの固化過程のモニタリング

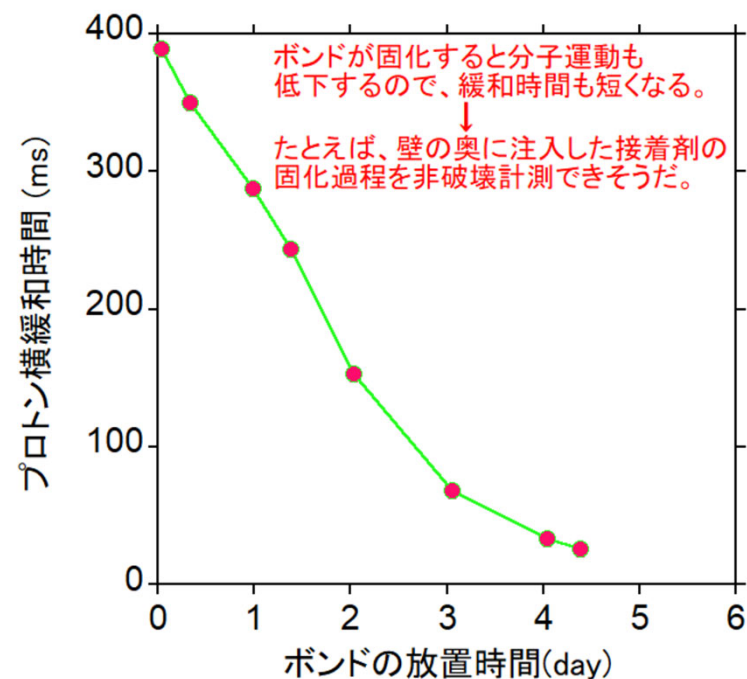
- ✓ 建設現場などで、対象の奥深くに注入した接着剤が固化しているか（強度発現しているか）どうかを知るための非破壊計測法へのニーズがあると思われる
- ✓ プロトン横緩和時間は、分子運動の激しさの尺度なので、磁気共鳴スキャンなら接着剤の固結過程を追跡可能
- ✓ 市販のゴム系ボンドがセンサーユニットの上で固化する様子を室内実験で追跡し、プロトン横緩和時間がボンドの固結とともに短くなっていくことを確認できた
- ✓ 水で混練したセメントの固化（養生過程の水和反応）のモニタリングにも成功している（室内実験。Ref 16）
- ✓ 天然ゴムの太陽光による劣化も検出した



透明アクリルスペーサーに置いたカップの中でボンドが固化中（センサーユニットはマグロに使用したのと同じ）



緩和波形データの例。減衰の時定数（プロトン横緩和時間）がどんどん短くなっていく

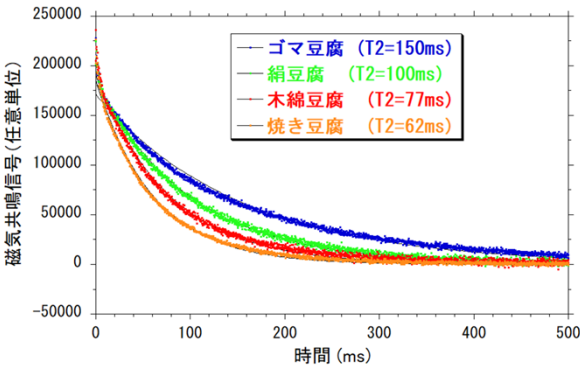


数日間のモニタリング結果の総括 21

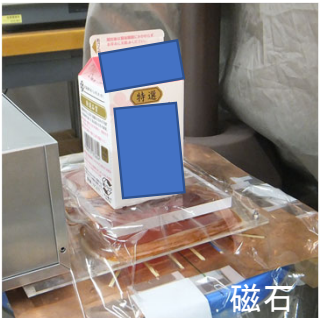
他にもいろいろ計測しました



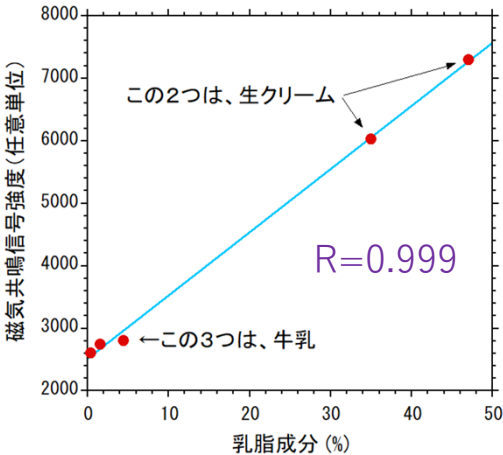
①豆腐計測中



豆腐計測結果。堅い豆腐ほどプロトン横緩和時間（T2）が短い

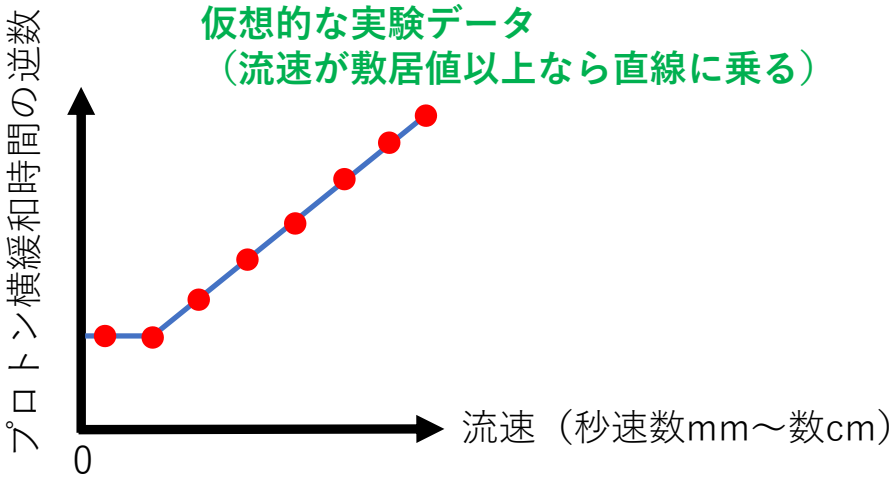
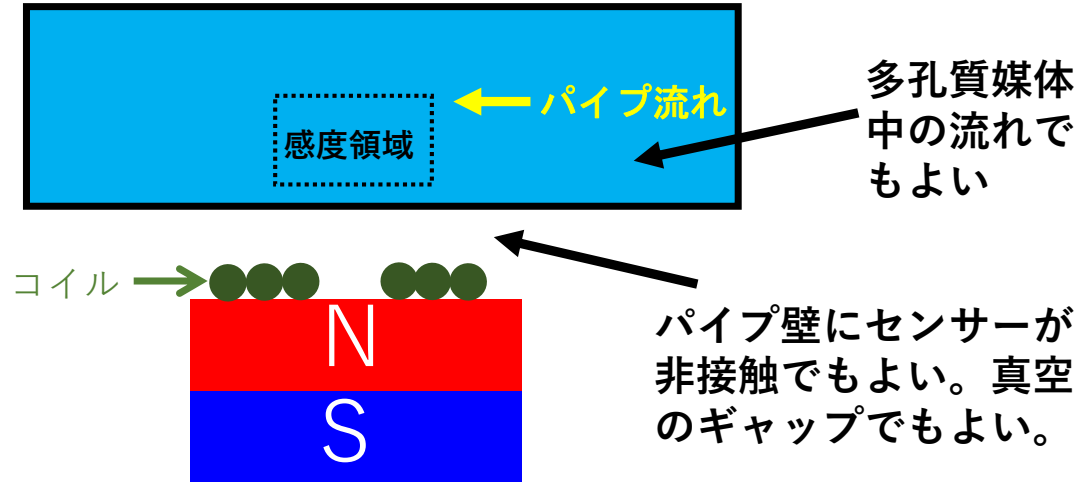


②牛乳パック計測中



牛乳・生クリームの乳脂分析の結果

③プラントにおける水や油の流速の非接触計測（イメージ）



ご静聴ありがとうございました

牛、マグロ、コンクリート、樹木、ボンドなどの例を紹介しましたが、これに限定されません。

何に適用するかは、みなさまのアイデア次第です

特長

- ✓ 水・油・ゴム・ゲルなど軽水素原子($1H$)をふくむ軟弱な物質**全般**を計測可能
- ✓ 感度領域にある、プロトンを含む分子のモル数の定量
- ✓ 分子運動の活発さの尺度であるプロトン緩和時間データを使えば、分子の識別・拡散係数・流速、さらに多孔質媒体であれば空隙サイズ分布や透水係数の推定も

注意点

- ✓ 氷のような堅い固体や、ガスのような低密度物質は計測困難
- ✓ 金属容器中の水や油は計測困難（しかしスチールコード入りタイヤを計測した文献あり。炭素繊維中の水を計測した文献もあり）
- ✓ イメージングやスペクトロスコピーは得意ではない（しかし成功文献はある）
- ✓ プロトン以外の核は感度が低いので計測例は少ない（ $19F$ の計測文献はある）
- ✓ 探査深度はせいぜい数cm（センサーを1トンに大型化して探査深度約1mを実現した文献あり）

まずは、お気軽にご相談ください

お問い合わせ先

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
スタートアップ推進・技術移転部
技術移転室

TEL : 029-862-6158
e-mail : aist-tlo-ml@aist.go.jp