

イノベーションフォーラム2019 研究発表データシート一覧

ポスター 発表番号	部門・専攻等	発表者	タイトル
1	応用物理学部門	西口 規彦 教授	メビウスの輪の振動の不思議
2	応用物理学部門	内田 努 准教授	ウルトラファインバブルによる凍結抑制技術の開発 (抗氷核活性を利用した農産物の品質保持や凍結制御の技術開発)
3	応用物理学部門	小布施 秀明 助教	物性物理学の観点に基づく量子計算・量子情報に関する研究
4	応用化学部門	長谷川 靖哉 教授	太陽光の波長を変換する農業用シートによる植物育成
5	応用化学部門	石田 晃彦 助教 渡慶次 学 教授	スマートフォンと安価な紙製チップを用いる生産現場向け簡易検査システムの構築
6	応用化学部門	岩村 振一郎 助教	触媒・電極材料製造に向けた多孔体内部への無機ナノ粒子担持技術の開発
7	材料科学部門	池田 賢一 准教授	アルミニウム合金の加工熱処理工程における組織形成機構
8	材料科学部門	大野 直子 助教	酸化物分散強化 (ODS) 鋼中の酸化物粒子形成・成長機構
9	機械宇宙工学部門	永田 晴紀 教授	超小型深宇宙探査機用ハイブリッドキックモータの開発
10	機械宇宙工学部門	小林 一道 准教授	超音波を利用した液体微粒化技術の研究
11	人間機械システム デザイン部門	戸谷 剛 教授	固相－固相の相変化によって蓄熱する蓄熱材
12	人間機械システム デザイン部門	村井 祐一 教授	船舶の高効率空気潤滑による摩擦抵抗低減
13	環境フィールド工学部門	岩崎 理樹 准教授	河川解析ソフトウェア i R I C に関する国際共同プロジェクト
14	量子理工学部門	及川 俊一 准教授	電磁場中の単一荷電粒子の量子力学的ドリフト運動
15	北方圏環境政策工学部門	杉浦 聡志 准教授	災害時における防災拠点の孤立脆弱性分析
16	建築都市空間 デザイン部門	菊地 優 教授	巨大地震に備える次世代高機能免震構造の開発
17	建築都市空間 デザイン部門	越川 武晃 助教	鉄筋コンクリート造建物の耐震性能の飛躍的向上を目指して
18	空間性能システム部門	葛 隆生 准教授	高効率・低コスト地中熱ヒートポンプシステムの研究開発
19	環境創生工学部門	石井 一英 教授	寒冷地域で新たな価値を生むバイオガスプラントシステムの開発
20	環境創生工学部門	佐藤 昌宏 助教	牛ふんバイオガスプラント液肥を用いた微細藻類培養に関する研究
23	エネルギー・マテリアル 融合領域研究センター	國貞 雄治 助教	電子顕微鏡×シュミレーションによる先端材料解析 －機能性材料の省貴金属化－

研究発表データシート

【1】	氏名 西口 規彦 北海道大学大学院（工学研究院）応用物理学部門、応用物理学専攻・教授	
-----	---	---

発表タイトル	メビウスの輪の振動の不思議
サブタイトル	普通の輪と違う振動パターンと振動数の分布

（1）研究者のアピールポイント

固体の原子が集団となって振動すると、音波となって伝播していきます。その振動数は人間の耳には聞こえない $1\text{GHz}\sim 10\text{THz}$ の高振動数です。量子力学では、光を光エネルギー量子として扱い“フォトン”呼ぶのはよく知られていますが、音波の場合も同じく音エネルギー量子として扱い、これをフォトンと似た“フォノン”と呼びます。フォノンは電子と相互作用をし、電気抵抗や超伝導など、様々な物理現象を引き起こします。本研究者は、ナノスケール構造に特有なフォノン状態、さらに電子との相互作用を理論的に明らかにすることに興味を持ち、研究をしています。ここで見つかる特性が新たなデバイスの基本原理となることを夢見ています。

（2）本発表研究の概要

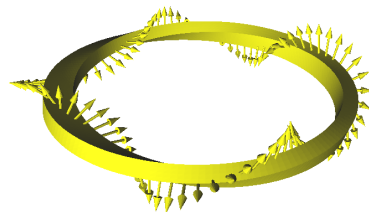
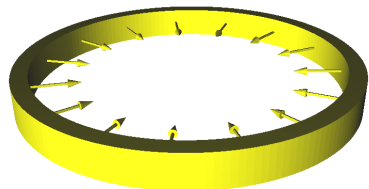
リングは外面と内面からなる輪でありその境目には2つの円があります。一方、半分ねじれた構造をもつメビウスの輪は、外面と内面の区別が無く1つの面から成り立っており、そのためリングのように面を区別する円は1つしか無い不思議な構造をしている。この不思議な構造により電気を通したときに誘導磁場を生じないなど、その性質も大変興味深いものです。物質の性質を決めるのは電子の性質だけでは無く、メビウスの輪の振動も大きく影響しています。この発表では、運動方程式をリーマン幾何学を用いて記述し、さらに xyz アルゴリズムと呼ばれる理論的な方法を駆使し、振動スペクトルと振動パターンを明らかにします。

（3）本研究発表の詳細

ねじれた構造をもつメビウスの輪の振動モードを明らかにします。有限な厚さをもった金やアルミニウムなどの短冊状の金属板を半分捻り両端を接合したメビウスバンドを考えます。この振動に関する運動方程式をリーマン幾何学に基づいて導出します。このような系の解は通常の単純な関数系では表現できないため、xyz アルゴリズム法と呼ばれる手法で、方程式を解きます。ここでは、振動モードの分類と振動数の分布を明らかにするとともに、振動パターンについても明らかにします。低振動数では普通のリングで見られない、ねじれた振動パターンが現れます。振動スペクトルは通常のリングと異なることが分かっています。これにより、低温での比熱異常が期待されます。

（4）本発表の注目点

リングの振動が、その構造がねじれることで得意な性質を持つことになる点が非常に興味深いと思います。以下にその例を示します。



左はリングの膨張収縮の振動パターン、右はメビウスの輪の振動パターンです。構造が捻れているため、基本的な振動パターンが捻れています。振動数の分布も両者で異なります。この他にも異なった振動パターンがあり、大変興味深いものがあります。

研究発表データシート

【2】	内田 努 北海道大学大学院（工学研究院） 応用物理学部門、准教授	
-----	--	---

発表タイトル	ウルトラファインバブルによる凍結抑制技術の開発
サブタイトル	抗氷核活性を利用した農産物の品質保持や凍結制御の技術開発

（１）研究者のアピールポイント

発表者は、「 H_2O の科学」に関する研究者である。これまで、水・氷・クラスレートハイドレート等の物性研究や、細胞の凍結保存研究などを行ってきており、分野横断型の課題に取り組んできている。本発表も、農学研究院の研究者と共同で進めており、研究結果の応用先は工業的なものから食品に係るものまで幅広く期待されている。

（２）本発表研究の概要

水の凍結促進技術として、サブミクロンサイズの微細気泡（ウルトラファインバブル：UFB）の効果を実験的に検討した。UFB による凍結促進効果が顕著であれば、ヨウ化銀や氷核細菌などの添加物に代わって、環境負荷の低い凍結制御技術として利用することが可能になると期待される。本発表では、凍結抑制技術として開発中のポリフェノールも用いて、拮抗する作用同士の相互作用も観察し、凍結促進のメカニズムを考察する。

（３）本研究発表の詳細

<Introduction>

生鮮食料品の鮮度を保持する技術の一つとして、低温貯蔵は重要である。その際、含有水を凍結させるものを冷凍保存、させないものを冷蔵保存と呼び、保存期間や食品の耐凍性に応じて使い分けられている。このように、低温貯蔵技術では水の凍結過程を制御する技術が不可欠である。

水は過冷却しやすい物質であり、凍結過程の制御は比較的困難である。令和元年度ロバスト農林水産工学研究プログラムで進めている「抗氷核活性を利用した農産物の品質保持や凍結制御の技術開発」では、環境親和性の高い物質で凍結過程を抑制・促進する技術を開発することを目的としている。凍結抑制技術としては、一般的に塩やアルコールなど融点を低下させる物質が知られているが、近年では不凍タンパク質など氷結晶の成長を抑制する物質が見いだされている。本研究ではさらに天然由来の機能性物質の開発を目指し、植物が耐凍性を獲得するために生成するポリフェノールを抽出して、その効果を検証している。一方凍結促進技術としては、これまでヨウ化銀や氷核細菌などが知られており、人工降雨（雪）技術が開発されている。しかしこれらの添加物が環境に与える影響を考慮し、より環境親和性の高い物質（技術）の開発が求められている。本研究では、核生成促進効果を含む様々な機能性が報告されている UFB を利用して、水の凍結促進効果の検証を行っている。本研究発表では、UBF の凍結促進効果に関する実験結果と、凍結抑制のために添加したポリフェノールとの相互作用についての結果を紹介する。

<Experimental>

純水（イオン交換水・ $15\text{M}\Omega/\text{cm}$ ）約 1 L を 20°C に保ちながらマイクロバブル発生装置（オーラテック社製 OM-MDG-045）で約 1 時間循環させた後静置し、UFB 含有水を作成した。この UFB 含有水中には、直径 $100\sim 300\text{nm}$ の UFB が 10^8 個/mL の濃度で含まれている¹⁾。外壁に極細線の T 熱電対を張り付けたマイクロチューブに UFB 含有水を 1 mL 分注し、断熱材で分けし

【2】 続き

た冷凍 Box に入れて -20°C の恒温槽内に静置した。熱電対でマイクロチューブの温度を連続的に測定し、データロガーで記録した。この資料が凍結すると、潜熱の放出により昇温するので、その時の温度を凍結温度 (T_f) として記録した。氷結晶の核生成は確率論的現象であるため、実験は 50 回以上行って T_f の累積頻度分布を作成した。純水を用いた T_f の累積頻度分布をコントロールとし、そこからの温度分布のずれで凍結促進効果を評価した。

ポリフェノールの凍結抑制効果との相互作用については、茶カテキン (TC)、タンニン酸 (TA)、オリゴノール (OLG) の 3 種類について調べた。各粉末試料 (純度?、提供元?) を 0.2wt% の濃度で純水中に溶解し、その原液を純水または UFB 含有水で希釈して所定のポリフェノール濃度に調整した試料を作成した。

<Results & Discussion>

UFB 含有水の凍結温度と原水である純水の凍結温度を測定し、累積頻度分布を図 1 に示す。各データとも試行回数は 52 回であり、縦軸は規格化してある。この図から UFB 含有水の凍結頻度は、純水の凍結頻度に比べて高温側にシフトしていることがわかる。すなわち、UFB を含有することで、凍結が促進されたことが示された。

これに対し、ポリフェノールを加えた水の凍結は、基本的に純水の凍結曲線と違いは見られなかった (図 2 白抜き印は、ポリフェノールの一つであるタンニン酸 (TA) を純水に加えた水溶液の凍結曲線である)。

この結果は先行研究示されており 2)、ポリフェノール単独で加えただけでは凍結抑制効果は大きくないことを確認した。

そこで、ポリフェノール添加水に UFB を加えた時に、水溶液の凍結曲線がどのように変化するかを観測した。図 2 の黒塗り印は、TA を加えた水溶液を、同量の UFB 含有水と混合した水溶液の凍結曲線を示す。この結果、

ポリフェノールを添加すると UFB の凍結促進効果が抑えられていることが示唆された。また TA の濃度が濃い方が、その抑制効果が強い傾向にあることがわかった。

<Reference>

1) Uchida, T., Liu, S., Enari, M., Oshita, S., Yamazaki, K., Gohara, K., *Nanomaterials* 6(2), 31-1, 2016. 2) Koyama, T., Inada, T., Kuwabara, C., Arakawa, K., Fujikawa, S., *Cryobio.* 69, 223, 2014.

(4) 本発表の注目点

本研究は、令和元年度「ロバスト農林水産工学研究プログラム」に採択され実施しているものである。農学研究院樹木生物学研究室 (荒川圭太准教授)、生物情報分子解析学研究室 (福士幸治准教授) との連携により、植物由来の抗氷核活性剤の機能解明、UFB の氷核活性特性の評価とそのメカニズムの解明に取り組んでいる。水の凍結制御は、農・畜・水産業品の品質保持技術の開発に不可欠であり、天然物質によって制御することで食品の安全性確保として重要である。

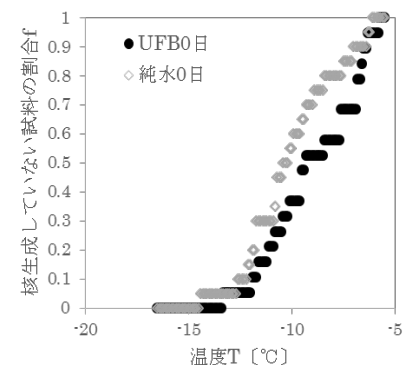


図 1: UFB 含有水と純水の累積度数分布 (生成 0 日の試料を使用)

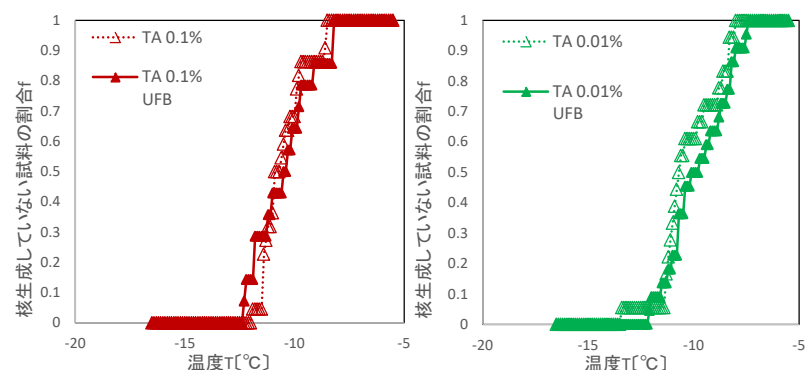
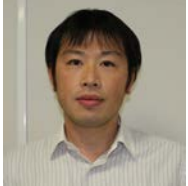


図 2: TA 添加による氷核発生温度の累積度数分布。(左) TA: 0.1 mg/mL、(右) TA: 0.01 mg/mL

研究発表データシート

【3】	氏名 小布施 秀明 北海道大学大学院 工学研究院 応用物理学部門 数理物理工学研究室・助教	
-----	---	---

発表タイトル	物性物理学の観点に基づく量子計算・量子情報に関する研究
サブタイトル	量子ウォークによるアプローチ

(1) 研究者のアピールポイント

トポロジカル絶縁体や不規則電子系など電子物性に関する物性物理学の理論研究を行っています。さらに 10 年ほど前から、このような物性物理学の分野で研究されていた物理現象を、量子情報や量子計算を量子光学系において実現することを目的とした分野横断的な研究にも精力的に取り組んでいます。理論研究のみではなく、理論結果の検証を行うための実験系・実験法の提案も行い、実験グループとの共同研究を行っています。一連の研究の一つは、2017 年に *Nature Physics* に掲載されました。

(2) 本発表研究の概要

物性物理学の分野で盛んに研究されているトポロジカル絶縁体のエッジ状態を、量子光学系で構成される量子ウォークと呼ばれる系で実現することにより、エッジ状態特有の安定性を活用した量子計算・量子情報への応用利用を目指す。今回は、1) 開放量子系に関する研究、2) 量子探索問題に関する研究、3) 量子状態制御に関する研究について発表する。

(3) 本研究発表の詳細

物性物理学の分野では、過去 10 年以上、トポロジカル絶縁体と呼ばれる特殊な電子状態に関する理論・実験研究が盛んに行われている。トポロジカル絶縁体では、物質の内部は絶縁体となり電流が流れないのに対し、物質の端では「エッジ状態」と呼ばれる特殊な状態が現れるため、不純物散乱などによる損失がなく安定な電流が流れるという特異な現象が起きる。このような特殊なエッジ状態は、電子だけではなく、光子や光を用いた系でも生じうる。本研究では、トポロジカル絶縁体で生じるエッジ状態を、量子光学系で構成される量子ウォークと呼ばれる系で実現することにより、エッジ状態特有の安定性を活用した量子計算・量子情報への応用を目指している。具体的な研究は、i) 開放量子系に関する研究、ii) 量子探索問題に関する研究、iii) 量子状態制御に関する研究であるが、今回は主に i) について発表を行う。

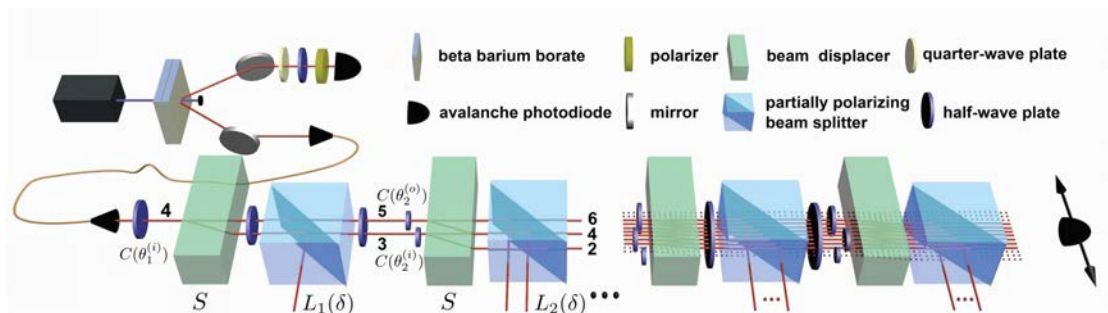


図 1: 開放量子系における PT 対称性の実証実験を行った実験系[Nature Physics 13, 2117(2017)より引用].

【3】 続き

通常の量子力学では、外界からの粒子の流入がないと仮定し、外部から孤立した系に対して理論構築を行う。このような孤立した系では、実験で観測できるエネルギーなどの観測量が実数になることが理論的に保証される。しかし、例えば電流を測定するとき、サンプルの両側に導線をつけ観測しているため、電子の流入がある系となる。このような粒子の流入のある開放量子系に関する様々な理論がこれまでも提案されているが、粒子の流入の影響が強い場合には、粒子の運動を理論的に予測することや、実験的に安定して制御することが困難であった。しかし、1998年に、このような開放量子系でも、粒子の流入と流出が釣り合っている場合、PT対称性と呼ばれる特殊な対称性が存在するため、エネルギーなど観測量が実数に保たれることが理論的に示された。この理論は、粒子の流入と流出の釣り合いのとれた状況に着目することで、孤立系を前提としている量子力学を開放量子系にも応用できる点で画期的であるが、真に量子力学に従う開放量子系に対してPT対称性による記述が可能かどうかは、未解決のままであった。

この問題に対して、我々は流出効果のある量子ウォークに対して、PT対称性が存在する具体的な系を構築した。さらに、PT対称性の存在を示す証拠となる状態として、トポロジカル絶縁体のエッジ状態を用いた。PT対称性を有する流出効果のある量子ウォークに対し、この状態に関する理論解析を行った結果、トポロジカル相に起因するエッジ状態の存在確率のみが時間が経っても減衰しにくくなることが明らかとなった。図1に示す、光学素子により構成される実験系で実験を行ったところ、理論結果を一致した結果を得た。これにより、開放量子系においてもPT対称性による記述が正しいことが明らかとなった。

(4) 本発表の注目点

本研究をさらに発展させることにより、開放量子系や量子力学全般に対するより深い知見を得ることが期待できる。また、本研究結果を応用利用に結びつけることも可能である。今回の実験では特定のエネルギー・特定の場所の光子の減衰効果を抑制できたため、光子に対する量子的なフィルターや減衰器として用いることができる。また、増幅と減衰の効果を含むPT対称な系を将来実現できれば、光子の存在確率の増幅・減衰を安定的に制御可能になり、量子的な光子数の増幅器としての利用も可能になる。さらに、PT対称性を有する開放量子系には、一方向輸送や単一モード増幅など、孤立系には現れない特異な現象が現れることが期待される。この特性を用いることにより、量子コンピューターの実現のために必要な構成デバイス間の情報の量子的な伝達(量子情報輸送)を安定かつ効率的に行う新たな手法などの応用への道が開ける。また、新しい原理に基づくレーザー発振器として利用することも期待できる。

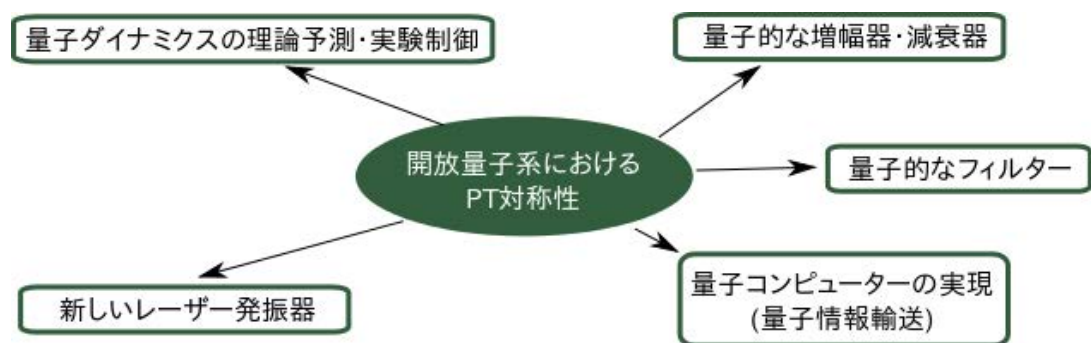


図 2: 応用利用への展望。

研究発表データシート

【4】	氏名 長谷川靖哉 北海道大学大学院（工学研究院）応用化学部門・教授	
-----	--------------------------------------	---

発表タイトル	太陽光の波長を変換する農業用シートによる植物育成
サブタイトル	

（１）研究者のアピールポイント

錯体化学と光化学を専門とし、発光性希土類錯体に関する研究の第一人者である。これまでに学術論文 200 報以上を報告し、特許 70 件を取得している。本発表では、開発した発光性希土類錯体による発光性フィルムを用いた農業への応用研究について紹介する。

（２）本発表研究の概要

植物成長および育成のための光科学技術研究は極めて重要であるが、北海道や海外の大規模型農場で LED などの光源を新たに設置することは設備的かつ経費的に困難である。太陽光の波長を自在に変換できるビニルハウスは、LED のように電力を必要とせず、大規模農場でも有効に使用することができるため、北海道においても実用化の高い研究へと展開できる。本発表では、紫外光を効果的に赤色光へ変換できる「波長変換シート」の開発を行った。具体的には、紫外光を吸収して可視や赤外領域に強発光する希土類錯体を透明フィルムに組み込み、植物育成の鍵となる赤色光を増強させる透明性の高い波長変換シートを開発した。

（３）本研究発表の詳細

本研究では我々が開発した強発光性の希土類錯体を農作物育成へ応用展開した。希土類錯体とは、発光性の希土類イオンに有機分子を取り付けた複合分子のことである。この希土類錯体では、有機分子が効果的に紫外光を吸収して、そのエネルギーを希土類イオンへと渡し（エネルギー移動）、希土類イオンから赤色強発光を放射することができる(図 1)。

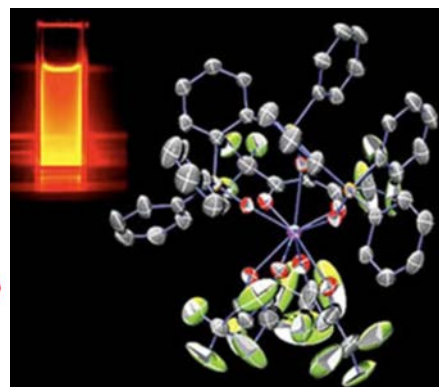
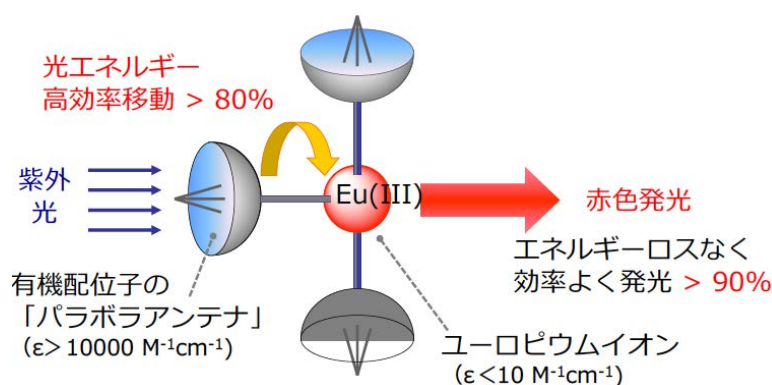


図 1. 発光性希土類錯体の設計図.

【4】 続き

我々の研究グループは、赤色強発光する希土類錯体を含む透明フィルムの作成に成功している。この透明なフィルムは、紫外光照射により赤色発光していることを観測した。さらに、このフィルムを太陽光のもとにさらすと、300nm 付近の紫外光を吸収して、620 nm 付近の赤色光領域の光が増大していることがわかった。つまり、この希土類錯体を含む透明フィルムは、効率よく紫外光のエネルギーを赤色光へと変換することができる。その光エネルギー変換効率は90%程度と見積もられた。開発した農業用フィルムは、可視光領域(400nm から 600nm 付近)を透過し、太陽光と全く同じスペクトルを与えた。したがって、この光波長変換フィルムは紫外光以外の光を全く遮らず、植物の育成を促す赤色光を増大させている(図2)。以上のことから、希土類錯体を用いた発光フィルムは新しい植物育成ビニルハウスとして新規性が高く、植物の育成促進が大いに期待されるので、その農業用ビニルシートに希土類錯体に組み込み、植物の育成試験を行った。例として、ホウレンソウ育成試験では、栄養成分には顕著な変化がないものの、実際には光合成を活性化させ、葉っぱが大きくなることがわかった。

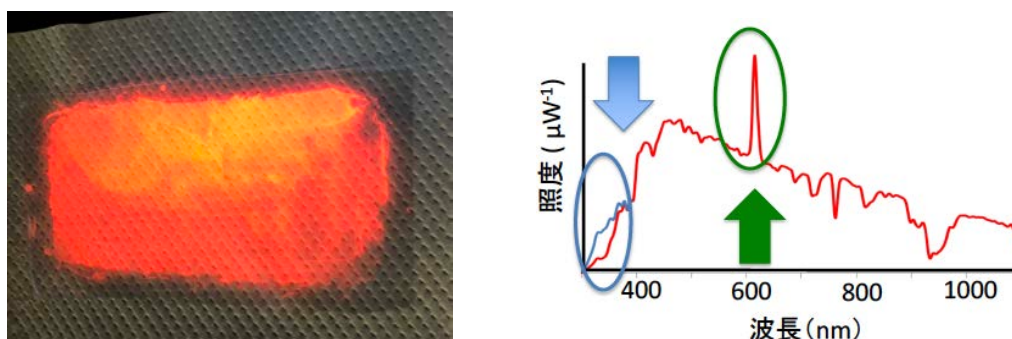


図2. 発光性希土類錯体を塗布したフィルム(左)とフィルムを通した太陽光スペクトル(右)。

(4) 本発表の注目点

本研究は無尽蔵に降り注ぐ太陽光を波長制御(紫外線をカットして赤色光を増大)して、植物成長を促進することを目的としている(図3)。つまり、工学技術を用いた植物育成のための太陽光のロバスト化を行うものであり、農業のロバスト化に大きく寄与すると期待される。

発光性希土類錯体を組み込んだフィルムは、太陽光に含まれる紫外光を光合成に有効な赤色光に変換するので、LEDのように電力を必要としない。また、本研究で用いている希土類錯体は、発光性有機色素よりも耐久性が非常に優れている。したがって、我々が開発した発光性希土類錯体を組み込んだ農業用シートは、環境に優しい農業技術である。太陽光の波長を変換する農業用シートは、人類がかかえる食糧問題・エネルギー問題・環境問題を一挙に解決することができる新たな素材である。

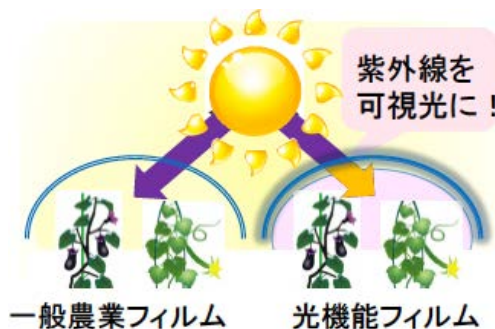


図3. 発光性フィルムを用いた農業技術(左)と植物育成試験の様子(右)。

研究発表データシート

【5】	石田晃彦 北海道大学大学院（工学研究院）応用化学部門・助教 渡慶次 学 北海道大学大学院（工学研究院）応用化学部門・教授	
-----	--	---

発表タイトル	スマートフォンと安価な紙製チップを用いる生産現場向け簡易検査システムの構築
サブタイトル	低価格な高性能検査チップで農林水産業の生産効率向上に貢献

（１）研究者のアピールポイント

私たちのグループは、これまで半導体微細加工技術を用いた超小型自動分析装置の開発に取り組んできました。試料を微細な流路に流し、それにいくつかの処理（例えば、分離、反応、検出）を施す流れ式分析装置です。半導体マイクロチップのように複数の処理機能を小型基板に集積し、マイクロスケールで行うことで、分析を迅速化するとともに試薬消費量を従来よりも大幅に低減することを目指しています。また、ポータブル化し、現場担当者が簡便に分析できるようにすることも目標としています。これまで基板の素材としてシリコン、ガラス、プラスチックを用いてきましたが、価格を下げて普及を図るには限界がありました。そこで、最近、より安価で簡便な分析装置を提供するため、ろ紙を基材とする簡易検査システムの開発を行っています。

（２）本発表研究の概要

今日の農林水産業は、従事者の減少を補うため、客観的な検査データに基づく高効率な生産への転換を迫られています。そのために、手間と費用が大幅に低減された検査法を求められています。私たちのグループは、紙製チップに試料を滴下すると、目的成分の濃度に応じた発色が生じ、それにスマートフォンをかざすと濃度が表示される検査システムの開発を行っています。すでに普及しているスマートフォンを測定器として利用するため検査機器の導入費用が低減され、一つの紙製検査チップに必要な検査工程を集積しているため検査の手間が省かれます。本発表では、このような生産現場での利用に適した簡易検査の技術を紹介します。

（３）本研究発表の詳細

農林水産業の従事者は年々減少傾向にあるため、生産効率を現状よりも大幅に向上させる必要に迫られています。そのため、経験や勘に依存した生産ではなく、客観的データに基づく生産体制を構築することが緊急の課題です。しかし、従来、化学的なデータ（物質の濃度）を取得するには専門的な知識や技術が必要でした。検査を専門機関に依頼しなければならないため、費用が高く、検査結果を得るまでに日数がかかっていました。したがって、極めて安価で、生産者が現場で簡便かつ迅速に検査できる新しい手法が求められます。このような条件に合致するが、私たちのグループが開発してきた紙製チップとスマートフォンを用いる検査システムです。現在、私たちは、企業および研究機関と協力しながら農林水産業の現場向けの検査システムを開発しています。本発表では、この基本技術と応用事例を紹介します。

紙製検査チップは、従来からある試験紙とは異なります。試験紙は測定対象と特異的に反応して呈色するほぼ種類の試薬をろ紙に染み込ませたもので、測定対象のおよその濃度しかわかりません。一方、紙製検査チップは、ろ紙を基材としているところは試験紙と同じですが、上述の

【5】 続き

ような流れ分析とより精密な分析が可能です。紙繊維の毛管作用によって試験液が自動的に流れ、その道筋（流路）が印刷によって形成されています。インクに蠟状物質（ワックス）を用いるため、印刷された（インクがある）ところには水性の液体は浸透しません。また、流路中の紙繊維に吸着や化学結合を利用して試薬（指示薬、抗体、酵素など）を保持させたり、流路の途中に反応槽のようなものを設けたり、懸濁物を除去するろ過機能を付加させたりすることができます。一枚の検査チップに必要なすべての機能を組み込めば、試験液を滴下するだけで、その流れる過程で検査のための工程が完了し、検査結果に相当する信号（例えば、発色）を出力させることができます。検査チップは、切手やキャッシュカード程度の大きさであるため極めて小型で軽量です。試験液を滴下する以外の作業がほとんど不要なため検査がどこでも誰でも可能になります。

一方、測定にはスマートフォンに搭載されたデジタルカメラと専用アプリを使用します。発色したスポットを画像化し、画像解析により画素値を抽出します。画素値と測定対象の濃度の関係式から実際の試料中の濃度を算出します。すでに普及しているスマートフォンを使用するため新たな検査システムを導入する際の費用的障壁が小さくなります。測定操作はスマートフォンを検査チップにかざす程度であるためかなり簡便です。将来、データをクラウドに送ることによりAIを加えたデータの活用が期待されます。

開発事例の紹介

（1）乳牛の妊娠診断用検査チップ

乳牛は一生のうちに人工授精、妊娠、出産、搾乳のサイクルを何度か繰り返します。人工授精が成功せず、不受胎の期間が長いとコストが蓄積するため、約 21 日周期で訪れる次の発情までに妊娠の有無を診断できると、妊娠していない場合に効率的に人工授精ができます。しかし、従来の妊娠診断法は人工授精から1ヶ月弱から数カ月後に行うものでした。そこで、乳牛の乳汁に含まれる黄体ホルモン（プロゲステロン）濃度を簡便かつ迅速に測定できる手法が望まれていました。プロゲステロンは発情とともに増加し、次の発情を迎える数日前に減少しますが、妊娠していると減少しません。この特性を利用すると、プロゲストロン濃度から妊娠の可能性を診断できます。これまでにプロゲステロンを測定するキットはありましたが、専用の測定機器が必要で現場での利用に適したものではありませんでした。そこで、私たちは乳汁を滴下するだけでプロゲステロン濃度を高精度で測定できる紙製検査チップを開発しています。現在、アプリは共同研究中のIT企業から提供されています。

（2）ジャガイモYウイルスの検出チップ

ジャガイモYウイルスは、ジャガイモの品質を低下させるウイルスで、種イモ畑でその感染が認められるとすべての種イモを廃棄しなければなりません。しかし、感染初期は外見から判別することが困難でした。すでに生産者でも検査できるキットが市販されていましたが、高価なため広く普及するには至っていませんでした。そこで、北海道立総合研究機構中央農業試験場と共同でジャガイモYウイルスを検出する紙製チップを開発しました。

（3）魚卵アレルギー物質の検出チップ

魚卵、特にいくらは、食物アレルギー・表示推奨品目に指定されています。しかし、いくらの主要アレルゲンは、肝臓で合成されたあと血流を介して体内を移動後、卵母細胞に取り込まれるため、魚肉の摂取によってもアレルギーを発症する危険性があります。そのため、アレルゲンが含まれない魚肉を提供する生産体制が望まれており、その体制を確立するためにアレルゲンの分布を現場で調査をする手法が不可欠でした。そこで、現在、私たちは本学水産学部と共同で魚卵アレルゲンを検出する紙製検査チップの開発を行っています。

（4）本発表の注目点

紙製検査チップの特長を実感していただけるようサンプル品を展示します。

研究発表データシート

【6】	岩村 振一郎 北海道大学大学院（工学研究院）応用化学部門、 化学工学分野・助教	
-----	---	---

発表タイトル	触媒・電極材料製造に向けた多孔体内部への無機ナノ粒子担持技術の開発
サブタイトル	TiO ₂ /多孔質炭素ナノ複合体の開発

（１）研究者のアピールポイント

材料製造プロセスの開発という着眼点で新規材料の研究を行っている。炭素材料を中心に取扱い、形状制御、細孔導入、表面処理、他物質との複合化などによる材料の高機能化を目指している。得られた材料は電極特性や触媒特性などの応用性能の評価や工業化に向けたスケールアップの検討も行い、実用化を常に意識した研究を進めている。

（２）本発表研究の概要

無機物質など様々な機能性物質は性能向上に向けて、別の担体にナノレベルで担持して用いられることが多い。特性向上のためには微細で均一な担持が必要であるが、現在までに報告されている手法は高コストなプロセスや高価な原料が必要になっている。本研究では量産化可能な多孔質炭素材料を担体に用いて、簡単な装置で実施可能な気相プロセス（減圧液パルス化学気相蒸着法、VLP-CVD 法）を開発し、金属（酸化物）ナノ粒子を均一に担持することに成功した。今回紹介する VLP-CVD 法を用いた TiO₂/多孔質炭素複合体の製造では、メソ・マクロポーラスな炭素材料に微細な TiO₂ ナノ粒子を均一に担持することに成功し、電極材料として高速充放電性能が得られ、光触媒としても高い触媒活性を示した。

（３）本研究発表の詳細

一般的に用いられる連続流通式の CVD 法では担体を仕込んだ反応管に原料ガスを一定流量で流すことで行われる。しかし、反応性が高く、蒸気圧が低い Ti 源を用いた場合、Ti 源ガスを担体の細孔内部まで拡散させることが困難であり、担体粒子の外表面近傍に TiO₂ が偏析してしまう（図 1 左）。一方、我々の開発した VLP-CVD 法は減圧状態の反応管に液体の Ti 源をパルス状に導入することで実施される。液パルス状に導入された Ti 源は瞬時に蒸発し高濃度の蒸気となり、減圧状態の担体粒子の隙間に瞬時に行き渡る。この結果、Ti 源ガスの拡散距離は担体粒子の半径のみであるため、熱分解する前に担体粒子中心部まで拡散することが可能である（図 1 右）。

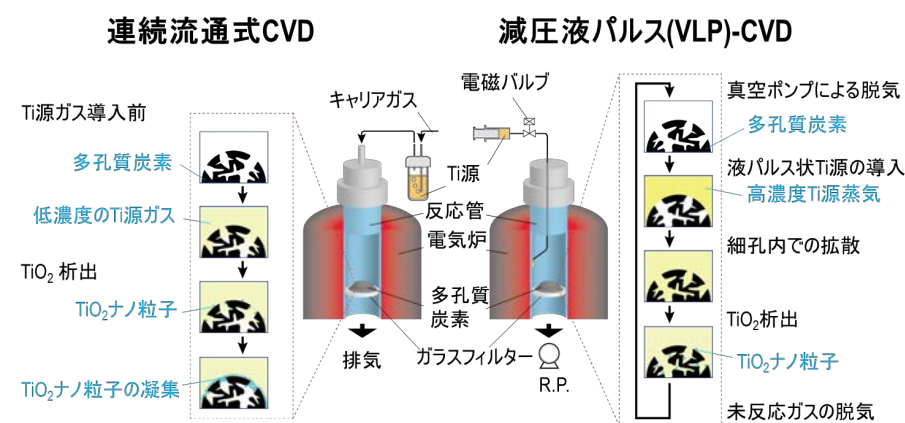


図 1 一般的な連続流通式 CVD 法と VLP-CVD 法の比較

【6】 続き

各種 CVD 法を用いて作製した試料の透過型電子顕微鏡 (TEM) 像を図 2 に示す。比較用の CVD として一定流量でキャリアガスを流した連続流通式 CVD 法と減圧状態の反応管に一定流量の Ti 源のみを導入した減圧連続式 CVD 法の 2 種類を行った。これら 2 種類の比較用の CVD では多孔質炭素担体内部まで Ti 源ガスが拡散できなかったため、外表面近傍に 20~30 nm の比較的大きな TiO_2 ナノ粒子が析出していることが観察された。一方、VLP-CVD 法で得られた試料は担体全体に渡り約 4 nm の小さな TiO_2 ナノ粒子が均一に担持されていることが観察された。これらの結果より VLP-CVD 法は原料ガスが内部まで拡散しにくい担体への担持法として有効であることが明らかとなった。

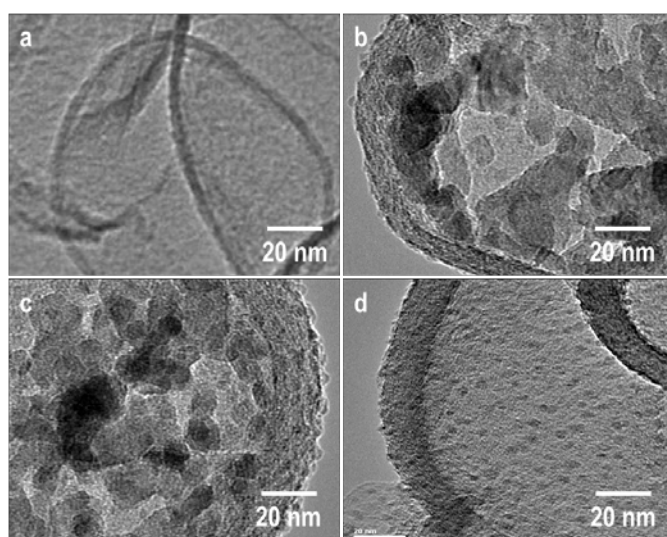


図 2 各 CVD で作製した TiO_2 /多孔質炭素複合体の TEM 像
(a:CVD 前、b:連続流通式 CVD、c:減圧連続式 CVD、d:VLP-CVD)

これらの材料の電極特性を評価したところ、VLP-CVD 法で作製した試料中の TiO_2 ナノ粒子は効率的な導電パスを有しており、電解液との接触面積が大きいため、優れた高速充放電性能を示した。このため、リチウムイオンキャパシタの負極材料等のような新規蓄電デバイスへの応用が期待できる。

また、これらの材料の光触媒特性の評価も行ったところ、他の CVD 法で作製した試料だけでなく、一般的に用いられている含浸法で作製した複合体よりも高い触媒活性が得られることが判明した。このことから、VLP-CVD 法による均一担持技術は触媒材料の開発にも有効であることが判明した。

(4) 本発表の注目点

本発表で紹介する VLP-CVD 法は一般的な加熱炉と真空ポンプなどを組み合わせるだけの安価かつ単純な装置で実施可能な技術である。また、反応管内に瞬時に原料ガスが行き渡るため、装置の大型化による影響もかなり小さい技術と考えられる。このような特徴から本技術は工業規模での利用に非常に適しているといえる。

また、本発表では TiO_2 ナノ粒子の炭素担体への担持について紹介したが、常温で液体であり熱分解することで固体として析出する物質であれば様々な原料を適用可能である。例えば、 SnO_2 や V_2O_5 などの担持にも利用可能であるため、これらを用いた電極材料や触媒としての活用も期待できる。

研究発表データシート

【 7 】	池田 賢一 北海道大学大学院工学研究院・材料科学部門・准教授	
-------	-----------------------------------	---

発表タイトル	アルミニウム合金の加工熱処理工程における組織形成機構
サブタイトル	結晶方位解析に基づく多結晶組織由来の物性解明へ
(1) 研究者のアピールポイント 多くの実用構造材料は、その特性に最適な多結晶組織を得るための加工熱処理等が施されており、特性と組織の関係を明らかにすることは重要です。各種電子顕微鏡法や電子線後方散乱回折法等の結晶方位解析技術を用いて、多結晶材料の組織形成機構ならびに加工熱処理等の材料プロセスに関する諸現象の解明に取り組んでいます。 (2) 本発表研究の概要 本発表研究では、アルミニウム合金の加工熱処理に伴う組織変化・形成挙動を電子線後方散乱回折法による結晶方位解析により明らかにした結果を報告します。自動車用構造材料として実用化されている Al-Mg-Si 系合金を研究対象として、ボディパネル等の成形性が重要な部材において問題点として挙げられるリジングと集合組織成分との関係について説明します。また、微量の添加元素により熱的に安定な析出物が加工熱処理に伴う組織形成にどのように影響があるのかを説明します。 (3) 本研究発表の詳細 結晶性材料の諸特性は、構成する結晶粒の方位関係や粒界性格に依存することが知られています。特にアルミニウム合金では、加工熱処理により回復・再結晶・粒成長が生じることで、成形性等の力学特性に優れた組織を得ることができます。本研究発表では、電子線後方散乱回折 (EBSD) 法を駆使した結晶方位解析を実施しています。EBSD 法とは、走査電子顕微鏡 (SEM) 内で結晶性試料を約 70° 傾斜させ、電子線入射領域の後方散乱回折図形を解析することで、3 次元結晶方位情報を取得できる方法です。以下に各研究内容について示します。 【Al-Mg-Si 合金のリジング発生に及ぼす集合組織の影響】 自動車用ボディパネル材として利用拡大が進められている Al-Mg-Si 合金は、成形加工時にリジングと呼ばれる筋状の表面凹凸が発生することがあり、製品としての美観を損ねるという問題があります。このリジング発生には、板材に形成する立方体方位粒と呼ばれる特徴的な結晶方位を持つ結晶粒のバンド状集合体に関与していることをレーザー顕微鏡と EBSD 法による方位解析結果により明らかにしました。また、板材の加工熱処理工程の熱間圧延→中間焼きなまし→冷間圧延→溶体化処理の各工程の試料について透過電子顕微鏡 (TEM) および EBSD 法を用いて評価し、熱間圧延板に存在する立方体方位粒が最終的にリジングに影響を及ぼすことを見出しました。	

【 7 】 続き

【熱的に安定な粒子が Al-Mg-Si 合金の再結晶挙動に及ぼす影響】

上述した Al-Mg-Si 系合金の成形性を上げるためには、適切な結晶方位分布すなわち集合組織制御が必要です。集合組織制御に有効な手法の一つとして、析出物等の粒子を利用する手法があります。本研究では、熱的に安定な粒子として $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ を晶出や析出で形成させた Al-Mg-Si 系合金を対象としました。析出物等の粒子の分布状態を三次元電子線トモグラフィ法により調査し、加熱中の組織変化を、SEM 用加熱ステージを用いたその場加熱 EBSD 法により評価しました。図 1 は、 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ が存在しない Al-Mg-Si 系合金のその場加熱 EBSD 解析結果です。各温度時間の条件で保持した後の同一領域の結晶方位分布を示しており、同じ色で示されている結晶粒の成長挙動を捉えることに成功しています。詳細な解析の結果、ある特定の結晶方位の存在割合が高くなる傾向が得られました。一方、図 2 に示す $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ を含有する Al-Mg-Si 系合金の場合は、結晶粒が成長する温度が高温側に移動することや加工組織が蚕食された後の結晶粒の成長が抑制されていることがわかりました。また、集合組織がランダム化することも明らかになりました。すなわち、熱的安定な粒子を用いることで多結晶組織を制御できることが示唆されました。

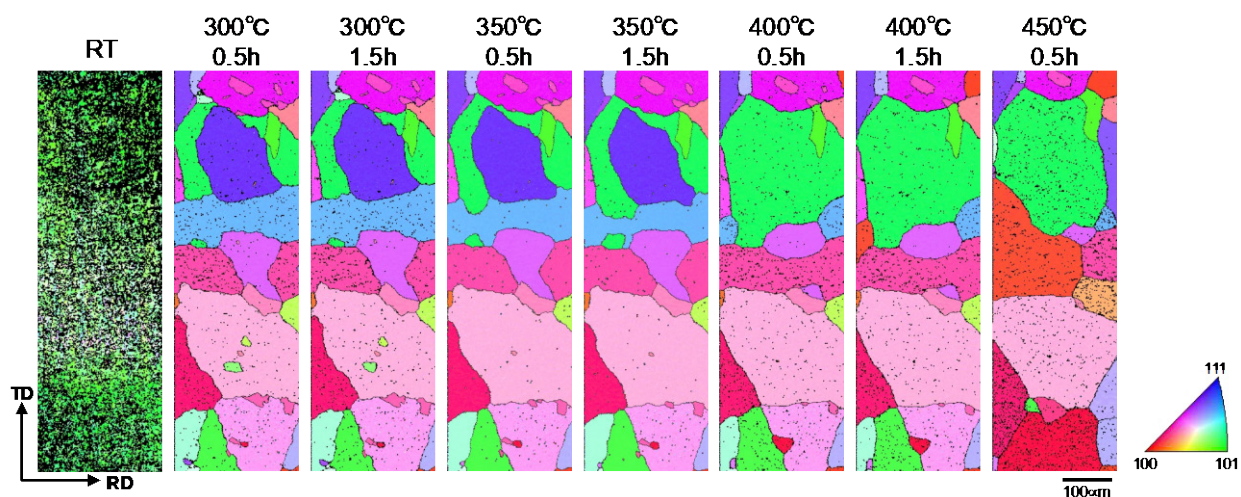


図 1 Al-Mg-Si 系合金のその場加熱 EBSD 解析結果

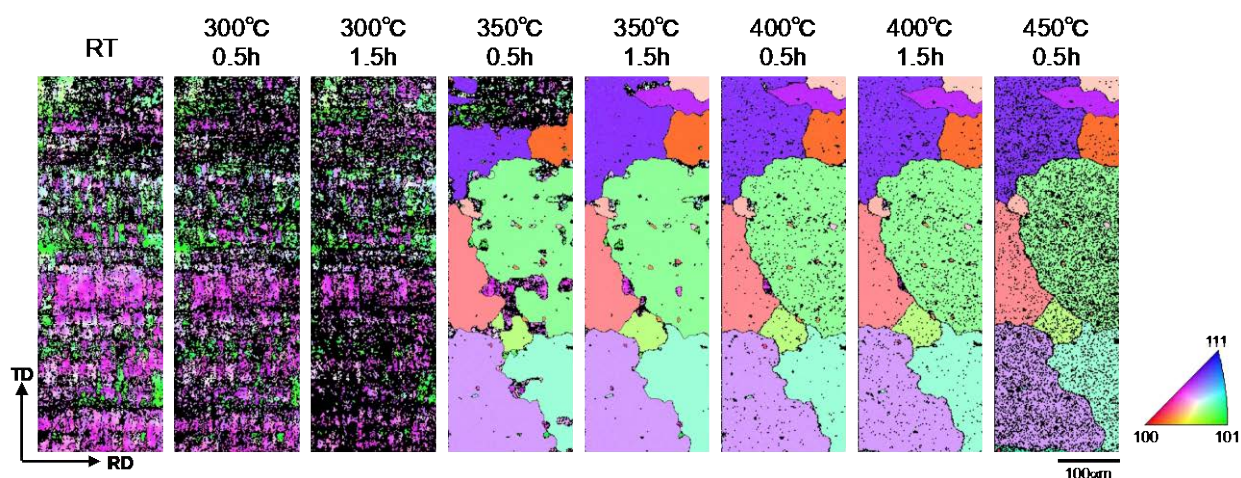


図 2 Sc, Zr 複合添加 Al-Mg-Si 系合金のその場加熱 EBSD 解析結果

(4) 本発表の注目点

本発表では、同一視野における結晶方位分布の変化を捉える手法を用いたことが注目点となります。

研究発表データシート

【8】	大野 直子 北海道大学大学院（工学研究院）部門・助教	
-----	-------------------------------	---

発表タイトル	酸化物分散強化(ODS)鋼中の酸化物粒子形成・成長機構
サブタイトル	

（１）研究者のアピールポイント

専門は金属・原子力材料工学、得意分野は電子顕微鏡をはじめとする微細組織観察を駆使した材料物性評価。2011 年より高温で高強度を保つナノ酸化物粒子分散強化(ODS)合金の開発研究に注力している。

（２）本発表研究の概要

ODS 鋼は数 nm のナノ酸化物粒子(Y_2O_3 等)をマトリクス中に $\sim 10^{23}m^{-3}$ 程度まで緻密に分散させた鋼で、 $700^{\circ}C$ において 1000h 後でも 100MPa 以上のクリープ強度を有する優れた材料である。この鋼を得るためにはメカニカルアロイング(MA)とその後の焼結が必須であるが、製造プロセスにおけるナノ酸化物粒子の形成過程は未だ明確ではない。本研究はナノ酸化物粒子の形成初期課程・および添加元素が粒子サイズに及ぼす影響を明らかにすべく、MA 粉末を幅広い温度範囲で熱処理し、形成された粒子の性質を放射光 X 線小角散乱/回折(SAXS/XRD)・3D アトムプローブ(3DAP)・高分解能電顕(HRTEM)を駆使し解析した。本研究により、メカニカルアロイング(MA)は原料粉末として投入した Y_2O_3 を亜粒界にフラグメント化して閉じ込めること、亜粒界に偏析した Y, O が加熱により Y-O 等の原子クラスターとなり、これを核として高温で結晶性の Y_2O_3 や各種複合酸化物粒子が生成することを世界で初めて明らかにした。

（３）本研究発表の詳細

合金中にナノ酸化物粒子が緻密に形成できるメカニズム、合金添加元素が粒子形成に及ぼす効果は未だに明らかでない。私は ODS 鋼中の酸化物粒子が一般的な焼結温度($850\sim 1150^{\circ}C$)よりも遥かに低い温度から析出することを見出したため、酸化物粒子の形成初期課程を明らかにすべく、MA 粉末を $600\sim 1150^{\circ}C$ の温度範囲で熱処理し、形成された粒子の性質を SAXS/XRD・3DAP・HRTEM を駆使し解析した[1]。Y, O が MA によって導入された粒界/亜粒界に偏析し、一時再結晶前の $600^{\circ}C$ において Y-O、Y-Ti-O の原子クラスターとなり(図 1a)、これを核として $700^{\circ}C$ で結晶性の Y_2O_3 (図 1d)、 $850^{\circ}C$ 以上

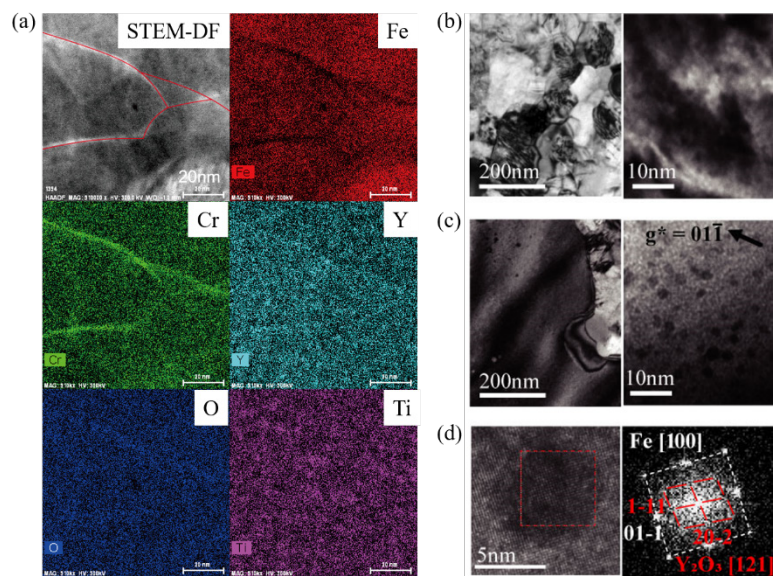


図 1 (a) MA $\rightarrow 600^{\circ}C$, 4h 熱処理後の STEM-EDS マップ。(b)-(d) MA $\rightarrow 700^{\circ}C$, 4h 熱処理後の TEM/HRTEM。(b) 一時再結晶していない部分、(c) 一時再結晶した部分(黒点は酸化物粒子)、(d) 一時再結晶粒に分布する粒子の格子像解析。[1]

【8】 続き

で $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 粒子が生成することを世界で初めて明らかにした。また、数 nm サイズの $\text{Y}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 粒子の生成は母相フェライトとの良好なミスフィットに支配されていることを定量的に示した。

軽水炉・液体金属冷却炉用の耐酸化・耐腐食性を持たせた ODS 鋼の場合は、Al の添加によって酸化物粒子が粗大化する問題がある。

FeCrAl-ODS 鋼は Zr を添加することで酸化物粒子の粗大化を抑制できるが、その理由を明らかにするために、Ti 添加 ODS 鋼と同様の実験・解析を行い、Ti, Al, Zr 添加効果の違いを考察した[2]。Y-Ti, Y-Al 複合酸化物に比べて、Y-Zr 複合酸化物が遥かに低温から析出することを見出し、臨界析出半径・析出核形成エネルギーの小ささが Zr 添加の酸化物粒子微細化効果の理由であることを示唆した。

従来の ODS 鋼は最高 700° C 程度（高速炉）での使用を想定してきており、1000° C 超の環境に長時間晒された場合の酸化物粒子の安定性について体系的に調べられた研究が無いと、原子炉過酷事故を想定した温度範囲で開発材の酸化物粒子成長をシミュレーションし、そのメカニズムを検討した[3]。高速炉用 Ti 添加 9Cr-ODS 鋼と軽水炉用 FeCrAl-ODS 鋼(Zr 添加・無添加)について、真空炉中で 1350° C, 27h までの高温熱処理を施し、透過型電顕による観察を行った結果、酸化物粒子は処理前の 3 倍以上の大きさに成長し、数密度が 1 桁低下した。製造時において FeCrAl-ODS 鋼への Zr 添加は酸化物粒子粗大化を抑制するが、事故時の高温(~1300°C)においては Zr 添加が酸化物粒子の成長を促進することが分かった。粒子サイズ増加の一方で数密度が減少したことを踏まえ、酸化物粒子が高温においてオストワルド則に従って成長すると仮定し、HRTEM によって同定した酸化物の種類を基に、添加元素によって粒子成長速度が異なる理由を、酸化物形成エネルギー・構成元素の拡散係数・固溶限・粒子/マトリクス界面エネルギーの観点から考察した(図 2)。1350° C, 27h の高温保持後は、酸化物粒子/マトリクス界面エネルギーと粒子サイズの間に明瞭な相関が見られなかった(図 2 右)。全ての複合酸化物においてオストワルド成長は Y の固溶限及び拡散係数が律速となる。一方で Zr 添加 FeCrAl-ODS に析出している Y-Zr 複合酸化物($\text{Y}_4\text{Zr}_3\text{O}_{12}$)は、Y-Ti, Y-Al 複合酸化物に比べて高温での安定性が低い(Y_2O_3 - ZrO_2 状態図では 1387°C で分解)。以上から、1000° C を超える高温において Zr 添加 FeCrAl-ODS 鋼の酸化物粒子は、Y-Zr 複合酸化物の低い熱力学的安定性のため、他の酸化物粒子よりも成長し易いと推察した。

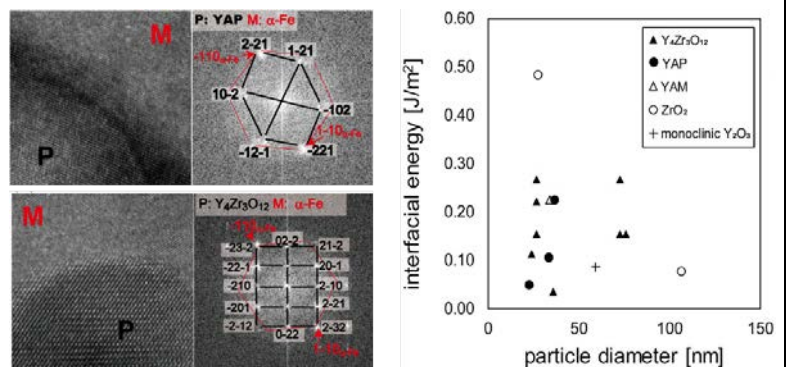


図 2 HRTEM による酸化物同定(左図)と粒子・マトリクス界面エネルギーの分布(右図) [3]

(4) 本発表の注目点

これまで明らかにされていなかった ODS 鋼中のナノ酸化物粒子析出・成長に対する添加元素の影響を、微細組織解析を駆使して熱力学の観点から整理し、モデル化を行った。ODS 鋼の製造プロセスの再現性を得るにあたって、これらの知見は極めて重要であり、合金作製前からの最適な熱処理条件や加工条件の見積もりを可能にするものである。

掲載論文

- [1] Precipitation of oxide particles in oxide dispersion strengthened (ODS) ferritic steels, N. Oono, S. Ukai, Materials Transactions, 59, pp. 1651-1658 (2018).
- [2] Precipitation of various oxides in ODS ferritic steels, N.H. Oono, S. Ukai, K. Tominaga, N. Ebisawa, K. Tomura, Journal of materials science, 54, pp.8786-8799 (2019).
- [3] Growth of oxide particles in FeCrAl- oxide dispersion strengthened steels at high temperature, N. H. Oono, S. Ukai, S. Hayashi, S. Ohtsuka, T. Kaito, A. Kimura, T. Torimaru, K. Sakamoto, Journal of Nuclear Materials, 493, pp.180-188 (2017).

研究発表データシート

【9】	永田 晴紀 北海道大学大学院（工学研究院）機械宇宙工学部門、機械宇宙工学専攻・教授	
-----	--	---

発表タイトル	超小型深宇宙探査機用ハイブリッドキックモータの開発
サブタイトル	

（１）研究者のアピールポイント

当研究室らのグループは、2017 年度に「JAXA 宇宙科学研究所大学共同利用連携拠点・超小型深宇宙探査機用キックモータ研究開発拠点」に採択され、2020 年度末までに 10～20 kg 規模のペイロードに 1 km/s 前後の速度増分を与えるハイブリッドキックモータを開発する計画である。2020 年度からは本学の概算要求（機能強化）事業として採択された「f3 工学研究教育センター」内の組織の一つに位置付けられる計画である。

当研究室は 1996 年の創設以来、新形式ハイブリッドロケットの開発に取り組み、CAMUI 型ハイブリッドロケットの打上げ実証や飛行環境試験への応用などを行ってきた。これらの研究活動を通じて得られたノウハウを活用して超小型深宇宙探査機用ハイブリッドキックモータを開発し、宇宙物理学研究者に広く提供することで、我が国の宇宙科学研究の進展に貢献する計画である。

（２）本発表研究の概要

GTO（静止遷移軌道）まで相乗りで打上げて貰い、近地点で増速して深宇宙へ向かう軌道に移る超小型深宇宙探査機の実現を目指して、超小型深宇宙探査機用ハイブリッドキックモータを開発する。燃料に高密度ポリエチレン、酸化剤に亜酸化窒素を用いる。研究課題は、燃料後退速度予測式の構築、高い燃焼効率を得る燃焼器の開発、およびノズル浸食予測式の開発である。得られた知見から、ペイロード重量および増速度の要求に応じてキックモータの最適設計を得る手法を構築した。

（３）本研究発表の詳細

超小型宇宙機用キックモータはこれまで実用例が無く、現有のキックモータはヒドラジンを燃料とする液体ロケットや固体ロケットに限られ、毒性や安全性の問題から相乗りには適さない。無毒で安全な推進剤を用いるハイブリッドロケットは相乗り宇宙機用キックモータに魅力的な選択肢である。図 1 にハイブリッドキックモータの設計例を示す。相乗りスロットに多く採用されるキューブサット形状に収まり易い形状で設計されている。

本ハイブリッドロケットでは燃料に高密度ポリエチレン、酸化剤に亜酸化窒素を用いる。高い燃焼効率を得るためには燃焼室を適切に設計する必要がある。併せて、燃料形状を適切に設計するためには燃料後退速度を予測することが必要である。地上燃焼実験に用いたモータを図 2 に示す。燃料の下流にはグラファイト製の後方燃焼室を設け、後方燃焼室の容積で滞留時間を調整した。

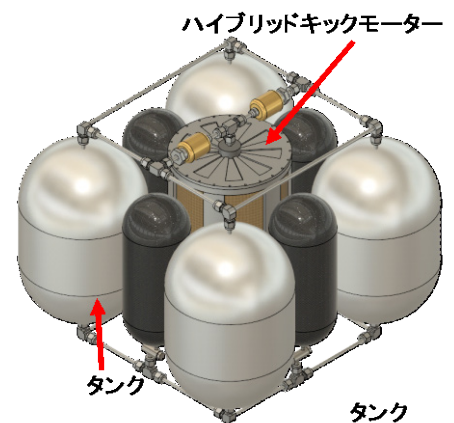


図 1 ハイブリッドキックモータ

【9】 続き

燃焼効率：ロケットの燃焼効率は特性排気速度効率 (c^* 効率) で評価される。後方燃焼室を適切に設計することにより、 c^* 効率を 0.95 以上に出来ることを確認した。

燃料後退速度式：取得した燃料後退速度の例を図 3 に示す。燃料後退速度 $\dot{r}$ は一般的に以下のような式で表される：

$$\dot{r} = a G_{ox}^n$$

ここで、 G_{ox} は酸化剤の流量密度 [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$]、 a および n は実験定数である。幅広い条件でデータを取得した結果、燃料後退速度は O/F (燃料と酸化剤の流量の比) の影響も受けることが判明したため、実験定数 a を O/F の関数として扱うこととした。

ノズル浸食速度：グラファイトノズルは燃焼ガスにより浸食され、ノズルスロート面積が拡大するためノズル開口比が次第に減少する。ノズルを適切に設計するためにはノズル浸食の予測も重要である。特に小型ノズルでは浸食の影響が大きい。当研究室で開発したデータ処理技術である “Nozzle Throat Reconstruction Technique” を用いてノズル浸食データを蓄積し、燃焼中の浸食履歴を高精度で予測することに成功した。

増速度シミュレーション：上記成果により得られた各予測式を用い、与えられた設計条件からキックモータによる獲得速度を予測するプログラムを開発した。設計条件を網羅的に設定して獲得速度を計算し、成績が良いものを採用する最適設計手法を構築した。得られた結果を図 4 に示す。横軸は得られる増速度、縦軸はペイロード質量である。8U から 125U まではキックモータのサイズで、キューブサット形状で体積を表しており、1U は 10 cm 立法の形状を表す。8U は 10 cm×20 cm×40 cm、125U は 50 cm 立法を表す。GTO から 700 m/s 加速すれば月まで、1.2 km/s で火星まで到達可能である。

(4) 本発表の注目点

本研究はキックモータの実機を開発して軌道上実証するまでを目指しており、実機の開発までをカバーする「f3 工学センター」で実施する研究のモデルケースと考えている。

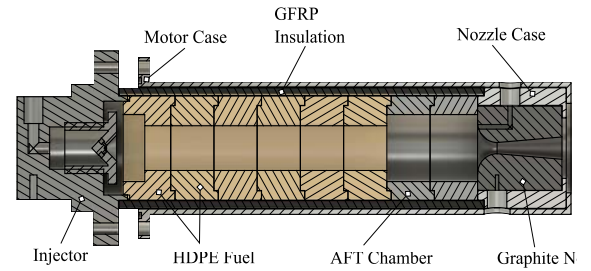


図 2 地上燃焼試験用モータ

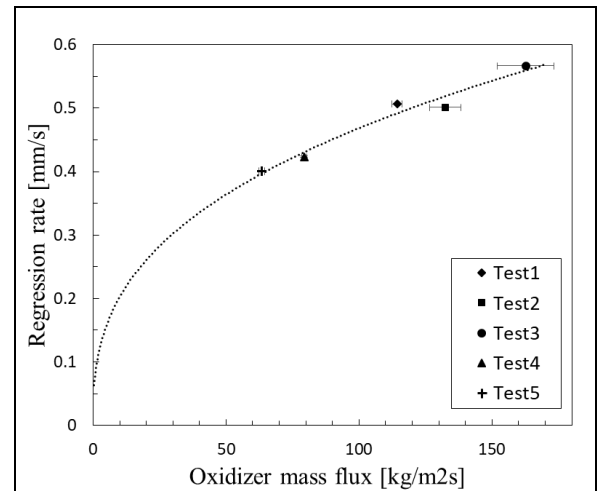


図 3 酸化剤流量と燃料後退速度の関係

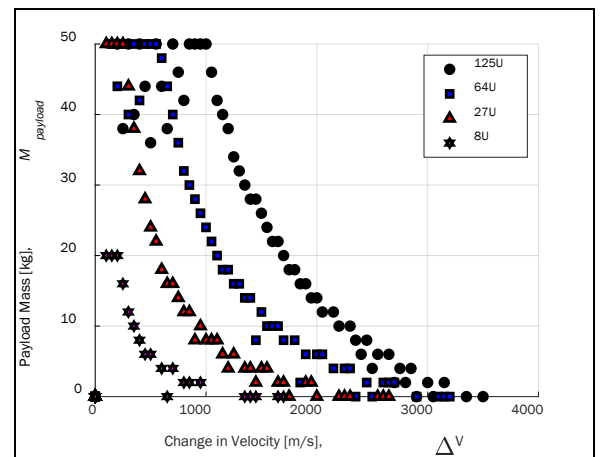


図 4 増速度シミュレーション

研究発表データシート

【10】	小林一道 北海道大学大学院（工学研究院） 機械宇宙工学部門・准教授	
------	---	---

発表タイトル	超音波を利用した液体微粒化技術の研究
サブタイトル	

（１）研究者のアピールポイント

熱・流体力学を用いて、気体・液体が混ざっている「混相流れ」について、特に現在は「気泡（キャビテーション気泡を含む）」、「液滴」に関するダイナミクスを研究対象としています。また、気液界面における熱・物質輸送現象についても分子運動論を用いたミクロスケールから研究を行っています。数値計算を主としていますが、実験的なアプローチも取り組んでいます。時空間的にナノスケールからマクロスケールまでの現象を対象としており、マルチスケールを意識して研究に取り組んでいます。

（２）本発表研究の概要

超音波を用いた液体微粒化は、我々の身近で、また医療・化学・燃焼など多岐にわたる分野で広く使われている現象である。例えば医療の分野では、薬液を経口吸入するネブライザーに利用されており、化学工学の分野では水-アルコール混合液体の分離技術に利用され注目を集めている現象である。また、燃焼工学では効率よく燃料を燃焼させるために、液体微粒化は欠かせない技術である。この液体微粒化現象の物理は長年議論の対象となってきた。現在のところ、超音波による微粒化の主たる要因として(1)超音波により液体表面に生じるキャピラリー波、および、(2)超音波の負圧で液体内部に生成された微小気泡群の崩壊の影響といった2つのメカニズムが示唆されているが、完全には明らかとなっていない。ここで近年の研究により微小気泡の運動が液体微粒化現象に重要であることが明らかとなっており (Simon et al., *Journal of Fluid Mechanics*, 2015), また、我々の研究でも、液体微粒化直前の液体内部に気泡群が収縮・膨張を繰り返していることが確認されてきている。これら研究から液体内の気泡群は液体微粒化の発生について本質的な役割を果たしていると考えられる。

このような背景を踏まえ、本研究では、液体内部気泡核数密度に着目し、液体内の気泡核数をコントロールすることで液体微粒化量を制御することができる、これまでにない新しい発想の液体微粒化技術を提案する。更に、本研究より、未だ解明されていない液体微粒化現象の物理機序の解明も目的としている。

（３）本研究発表の詳細

上述のように、本研究では液体内部気泡核数密度を調整することで、液体の微粒化量をアクティブコントロールすることを目的とし研究を行う。本研究で提案する実験装置を図1に示す。本研究では周波数 1 MHz の集束超音波振動子を用いて研究を行う。

【10】 続き

液体中の溶存酸素量を変えることで、気泡核の有無による微粒化の影響を調べることや、ファインバブル(直径 1 マイクロメートル以下の気泡)を外部より強制的に添加し、その添加量を調整することで気泡核の微粒化への影響について調べる、ファインバブルにはナノックス社のウルトラファインバブルを利用し研究を行っている。本研究により、液体内部気泡核数密度や溶存酸素と液体微粒化量について調査している。

(4) 本発表の注目点

我々の研究室は超高速ビデオカメラを数台所有している。これら高速度カメラを用いた研究によって、超音波照射によって形成された液中内部の気泡の運動を 100 万分の 1 秒の時間解像度で撮影することに成功した。その結果を図 2 に示す。これより、液体微粒化前の液柱先端中央部に、気泡群が存在していることが確認できた。微粒化前の液柱内部において、気泡の存在・運動を高速度カメラで観察した結果は世界初であり、このように気泡群の運動と関連付けて微粒化のメカニズムを研究することは、本研究のオリジナリティである。

また、圧力場などの詳細については、混相流に対する数値解析を利用し、研究を遂行する予定となっている。

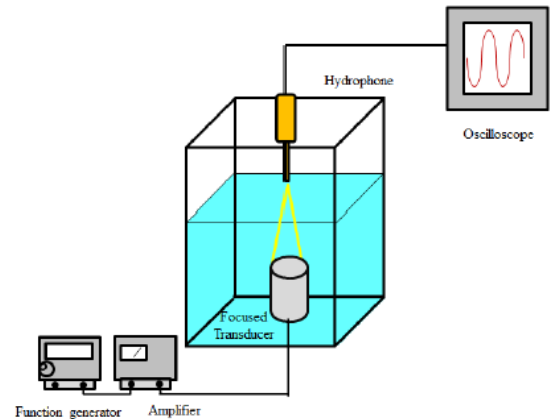


図 1 実験装置概要

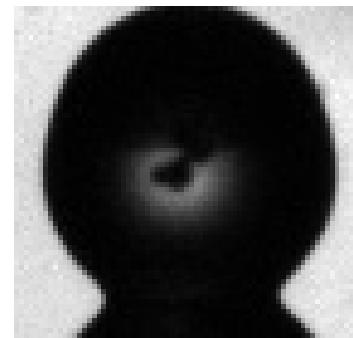


図 2 液体内キャビテーション気泡群
(中心に見える黒い影がキャビテーション気泡群.)

本研究に関連する最近の業績

・数値計算を用いた研究

- (1) K. Kobayashi*, T. Nagayama, M. Watanabe, H. Fujii, M. Kon, Molecular gas dynamics analysis on condensation coefficient of vapour during gas-vapour bubble collapse, **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 852, 1045-1063 (2018).

・実験による研究

- (2) 世古和也*, 小林一道, 藤井宏之, 渡部正夫, 集束超音波と液面の干渉による微細液滴の生成, **混相流**, Vol. 32, 59-64, (2018).

研究発表データシート

【11】	氏名 戸谷 剛 北海道大学 大学院工学研究院 人間機械システムデザイン部門・教授	
------	---	---

発表タイトル	固相-固相の相変化によって蓄熱する蓄熱材
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

- 熱解析, 熱設計, 熱制御, 熱マネジメントが専門です.
- 超小型人工衛星「HIT-SAT」, 「ほどよし1号機」, 「CE-SAT1」, 「Diwata-1」の熱解析・熱設計に協力しました.
- 蓄熱材の開発の他、赤外線乾燥炉へのメタマテリアルの適用に挑戦しています.

(2) 本発表研究の概要

- Trans-1,4-polybutadiene (TPBD), 2-amino-2-methyl-1,3-propanediol(AMP)は、固相-液相の相変化だけでなく、固相-固相の相変化によって蓄熱します.
- TPBD は、超小型衛星用の蓄熱材として、宇宙実証済みです.
- AMP は、質量と冷却時の最低温度を調整することで、放熱タイミングを制御できます.

(3) 本研究発表の詳細

- 図1に温度上昇時における TPBD の DSC カーブを示します. 左側の凹みが固相-固相の相変化による蓄熱を表し、右側の凹みが固相-液相の相変化による蓄熱を表します. TPBD は、固相-固相の相変化によって、80 J/g の熱量を蓄熱します.
- 図2に宇宙実証をするために TPBD が搭載されたほどよし4号機と搭載された TPBD (クリーム色)を持つ蓄熱機を示す. また、図3に示す軌道上での蓄熱機の温度データを示す. 図中のピンク色の楕円部分が蓄熱を、青色の楕円部分が放熱を示し、TPBD は、宇宙空間でも蓄・放熱できることが確認できました. 地球周回軌道上で 2500 回強の蓄・放熱を確認しています.

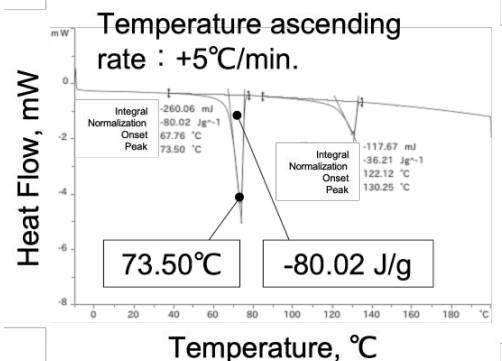


図1 TPBD の DSC カーブ

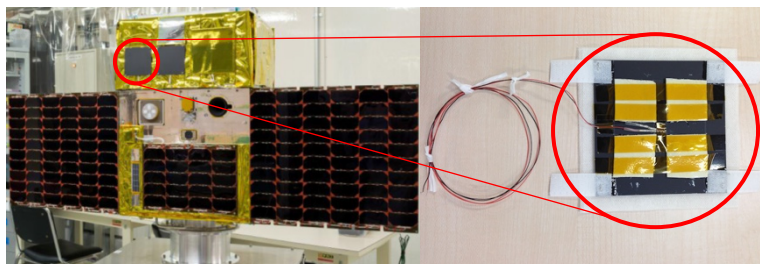


図2 ほどよし4号機 (左) と搭載された TPBD (右)

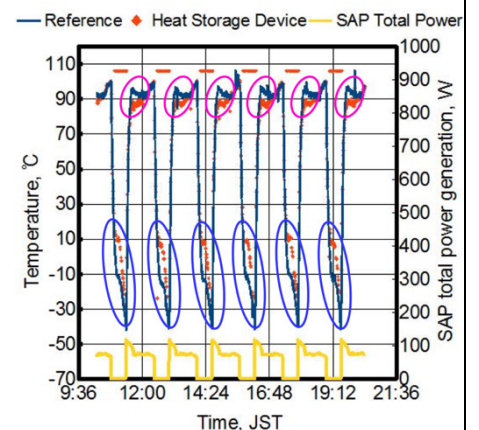


図3 軌道上温度データ

【11】 続き

- 図4にAMPのDSCカーブを示します。図中の赤丸の部分は、AMPが温度上昇中に放熱していることが分かります。(多くの蓄熱材は、温度低下中に放熱します。)つまり、AMPは、熱を必要とする温度上昇中に放熱できる特徴を持ちます。
- 図5は、図4と同様に蓄熱させた後、冷却時の最低温度 $T_{\min}$ を -10°C にした時のDSCカーブです。この図からAMPは、蓄熱後、放熱も蓄熱もしていないことが分かります。正確に言うと図4は、図5のDSCカーブ取得後、 $T_{\min} = -50^{\circ}\text{C}$ に変更した図です。(図5のDSCカーブも描かれています。)つまり、AMPは図5の温度低下中にも、温度上昇中にも蓄熱した熱を保持していたと言えます。
- 図6は、AMP冷却時の最低温度 $T_{\min}$ とAMPの質量を変化させた時の温度上昇中の放熱確率を示します。この図から、AMP冷却時の最低温度 $T_{\min}$ とAMPの質量を調整することで、AMPの放熱タイミングを制御できることが分かります。○の領域では、AMPは温度上昇中に放熱し、×の領域では温度上昇中も温度低下中も蓄熱した熱を放熱しません。
- ×の領域で、放熱させるために、針を刺すなどの衝撃を与えることや種結晶を入れることで、放熱できることも確認しています。

(4) 本発表の注目点

- TPBD, AMPとも固相-固相の相変化によって蓄熱するので、蓄熱材を入れておく容器が不要です。熱の発生部に直接、設置できます。
- TPBDは、既に宇宙実証されており、真空環境下でも蓄・放熱することができます。2500回強の蓄・放熱を確認しています。
- AMPは、多くの蓄熱材と異なり、熱を必要とする温度上昇中に放熱させることができます。
- AMPは、多くの蓄熱材と異なり、蓄熱した熱を温度上昇時にも温度低下時にも保持することができます。
- AMPが保持した熱を、針を刺すことや種結晶を与えることで、放出させることもできます。
- AMPは、冷却時の最低温度 $T_{\min}$ とAMPの質量を調整することで、放熱タイミングを制御することができます。

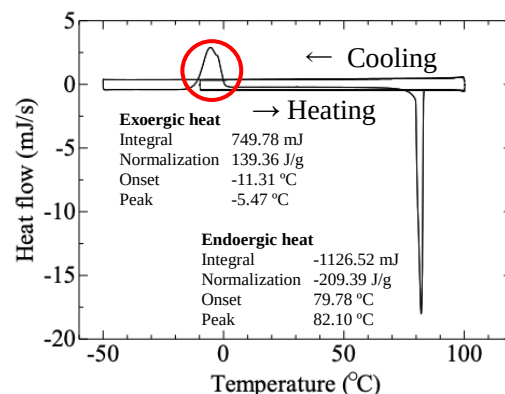


図4 AMPのDSCカーブ 1
 $T_{\min} = -50^{\circ}\text{C}$, 質量: 5.38 mg

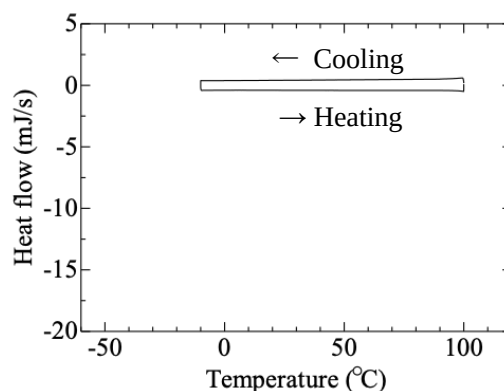


図5 AMPのDSCカーブ 2
 $T_{\min} = -10^{\circ}\text{C}$, 質量: 5.38 mg

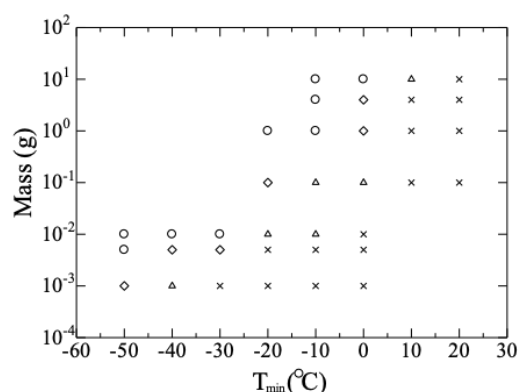


図6 温度上昇中の放熱確率

- : 100%放熱
- ◇ : 50%以上放熱
- △ : 50%以下放熱
- × : 0%放熱

研究発表データシート

【12】	村井 祐一 北海道大学大学院（工学研究院） エネルギー環境システム部門・流れ制御研究室・教授	
------	--	---

発表タイトル	船舶の高効率空気潤滑による摩擦抵抗低減
サブタイトル	流体力学の全てを地球温暖化ガス削減に活かす研究

（１）研究者のアピールポイント

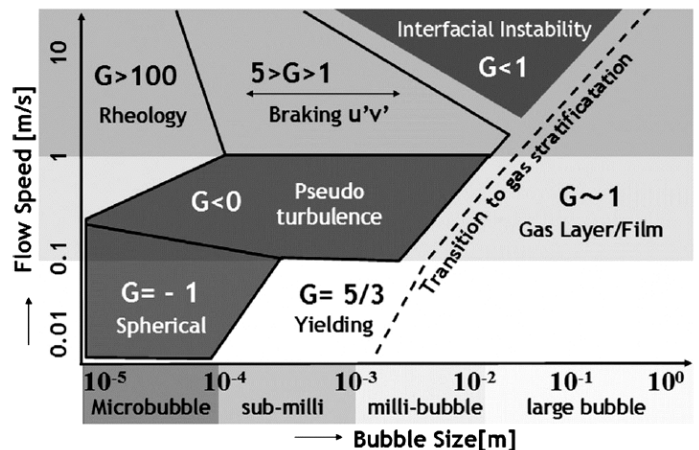
流体力学は 400 年以上の歴史もちながら 21 世紀に入っても解決されていない課題が山積みである。航空機、船舶、自動車、鉄道、ロケットなどの輸送機械に採用される高度な技術は、設計者における流体力学の習熟度に大きく影響される現状がある。新しい技術の開発にもそれが言えることで、私達のグループ、工学部・機械知能工学科・流れ制御研究室では、次世代の風力発電、航空翼の新機能、長距離燃料パイプライン、それに地球の磁場や火山の動きを解明する惑星流体力学の発展にも貢献している。

（２）本発表研究の概要

輸送機械のうち大型船舶の燃費を大幅に向上する技術について紹介する。海運は世界の GDP 総量の増加とともに過去 30 年間で 2 倍に膨れあがった。我が国は海で囲まれ貿易の 98%を船舶に依存しており、船舶技術の発展で世界を牽引してきた。本発表では、北大・流れ制御研究室が開発し世界の船舶に実装が展開している船舶の空気潤滑技術について解説する。

（３）本研究発表の詳細

右図は、過去の多数の論文で発表されているデータに、著者のデータを重ねて、摩擦抵抗低減メカニズム遷移線図なるものを描いたものである。遠目に見ると 2 つの領域に大別される。実用化への二大勢力と呼んでいる。各領域内に G という値を記した。抵抗低減ゲインという量である。境界層内にボイド率 1%の空気を注入すると、抵抗低減が $G\%$ 得られるという定義による。大きな気膜状の空気を作る場合は図の右端にある空気膜法の領域となり、その性能は $G=1$ となる。つまり壁面を空気で



覆った面積分だけ抵抗が減るということである。空気膜法は船底が平らでゆっくりした走行時に機能する。一方、図の左肩には $G > 100$ となるマイクロバブル領域がある。この領域では乱流遷移が遅延する現象や乱流が再層流化する現象などが観測されている。電気分解によるマイクロバブル発生実験では、ボイド率が僅か 0.01%でも 10%もの抵抗低減を得ている。その再現性も複数の研究機関で確認済である。ただし、電気分解に消費する膨大な電力のため、船舶の省エネ目的には乗らない。緊急時に高速化する必要のあるような船種に限られる。この領域のすぐ右側にある $5 > G > 1$ の領域は 100 マイクロから数ミリの気泡による抵抗低減の領域である。この区間では、乱流渦サイズと気泡サイズが同程度となり、気泡群がレイノルズせん断応力生成イベントに直接干渉する。メカニズムを分かりやす

く言うならば、乱流中のスイープやインжекションを、気泡の俊敏な運動によって吸収し、乱流渦の活動を緩和させるということである。気泡の運動による吸収と言っても、形状変形による作用と並進運動による作用に分かれる。いずれも液相にある乱れを一時的に吸収し、時間差をおいてから周囲に再放射するというバネのような効果である。つまり乱れそのものを沈静化するのではなく、乱れがもたらす運動量交換の方向を変化させるというものである。

右図は、微小気泡式の船舶抵抗低減船で著者が研究に関わった船舶の外観写真である。最初は(a)釣り船で、2つの微小気泡発生装置（水中翼負圧型であり日米の特許を2008年に取得、商品名をWAIPとして商品化）を取付け4%の正味省エネを確認した。(b)の客船では10個のWAIPを船底に装着し、16%の燃費削減に成功した。(c)の貨物フェリーでは34個のWAIPを装着し、148日間にわたる商用航路の統計で9%の燃費削減の結果を得た。ここで9%とは148日間で55000リットルの燃料の節約を意味している。(d)の貨物船ではISO規定の船舶性能試験ガイドラインに従った試験の結果、10%の省エネを確認した。(e)は海上安全技術研究所と東海運によるセメント運搬船の試験で、5%の正味省エネを得た。ただしこの例だけWAIPシステムは搭載していない。(f)の大型コンテナ船では124個のWAIPを搭載したが、正味抵抗低減が得られなかった。これはエンジニアの誤操作で、ブローによる過剰空気供給を行ってしまいWAIPの負圧特性を相殺してしまったためである。

この技術は流体力学の詳細な究明が基礎となっており、奥深い話題を多く含んでいることについて述べた。後半では実船応用での成功事例について紹介した。実際に、微細気泡が大型船舶の抵抗を5～15%程度、削減できるという事例は成功例のようであるが、前半の議論における未解明要素の多さを考慮すると、伸びしろ十分の、序盤の成果と言える。IMO（国際海事機関）は長期的数値目標として2050年までに海運分野の温暖化ガスを50%削減したいとしている。この数字は、船舶に太陽光や風力、燃料電池を搭載するといった新技術の結集も含んでいるが、そもそもが抵抗を減らすという根本的な研究こそが目標達成の基軸となるであろう。微小気泡がもつユニークな流体力学が海運のグリーン技術の運命を担っていると言っても決して大袈裟ではない。

（４） 本発表の注目点

- ① 1ミリ未満の小さな気泡が沢山集まることで100m以上長い船舶の省エネに繋がること。
- ② 1つの泡がどのように運動するかという運動方程式の理論の構築が最重要となっていること。
- ③ 秒速5メートル以上で走る船舶の高速乱流境界層内の乱れと気泡が互いに干渉すること。
- ④ 泡の中身は空洞であるからその運動形態はまるで負の質量をもつかのように振る舞うこと。
- ⑤ 泡は乱流の中では自由自在に変形し、その変形能こそが乱流を鎮圧する作用があること。
- ⑥ 泡の表面は海中の不純物や電気化学的性質に影響をうけて不確定な動きをもつこと。
- ⑦ ナビエ・ストークス方程式と気泡の運動方程式が結合して著しく非線形な流れをつくること。
- ⑧ 小さな泡を少ない動力で大量に発生する最新技術を開発し、実装されていること。



(a) Adventure 2 (13m)



(b) Santander Ferry (28m)



(c) New Ferry Misaki (65m)



(d) Filia Ariea (84m)



(e) Pacific Seagull (122m)



(f) Olivear Maersk (224m)

研究発表データシート

【13】	氏名 岩崎 理樹 北海道大学大学院（工学研究院） 環境フィールド工学部門 准教授	
------	---	---

発表タイトル	河川解析ソフトウェア iRIC に関する国際共同プロジェクト
サブタイトル	Changing River Science

（１）研究者のアピールポイント

河川や海岸、深海など、自然界に形成されている地形の変化について研究しています。地球の表面には実に様々な地形が形成されていますが、その成り立ちを理解することは工学的にも非常に重要です。これは、昨今の豪雨災害時に発生する土石流や洪水、氾濫流といった非常に破壊力のある流れにより山地斜面や河川などの形が大きく変化することで、我々に大きな人的、経済的被害を与え続けていることから理解されます。私は、このような自然界において流れと地形変化の相互作用をコンピュータ上でどのように表現し、その予測が可能であるか、といった研究に取り組むと同時に、開発した計算モデルを実際により多くの方が使いやすいように公開するプロジェクトにも参画しています。

（２）本発表研究の概要

本発表では、河川や海洋などの自然界における流れや地形変化を予測するツールである iRIC (international River Interface Cooperative) とそれに関連する国際共同プロジェクトについて紹介します。通常このようなツールは、各分野の研究者が個別に研究開発しており、主として学術論文として発表されますが、実務者がその有効性を理解することや、実際に使用することは大きな困難が伴います。iRIC プロジェクトでは、このような現状に対して、研究者が開発している最先端のモデルをフリーで提供することで、研究分野の成果を速やかに実践的技術として普及させることを狙うだけでなく、モデル開発と普及を通じた国内外の研究者、技術者等との人的交流を促進し、人材育成や技術開発を加速されることも視野に入れています。

（３）本研究発表の詳細

河川における流れや河床変化、河道変遷を予測することは、古くから河川整備上の課題であっただけでなく、近年の近自然、環境といった社会的要請にこたえるためにも重要です。このような背景の下、これまで数十年にわたって土木工学や地形学分野の研究者や技術者によって、流れ—地形変化を理解する研究が世界中で行われ、その一つとして数値計算技術が発達してきました。これらは学術的に大きな成果を上げてきたといえますが、実践的に有用でもある数値計算技術が、実際の現場に同じように浸透しているとは必ずしも言えません。これは、研究段階で開発される多くのモデルに対して、実務者がアクセスできるのは通常学術論文であり、その成果と有用性を実体験として感じる事が容易ではないことも一つの要因といえます。近年、モデルがより高度になると同時に、必要なデータなどもますます大きくなっている現状において、役に立つはずの最先端のモデルを世の中に広く使えるようにすることは、簡単ではありません。

このような現状において、北海道大学清水康行教授とアメリカ地質研究所 Dr. Jonathan Nelson が中心となり立ち上げたのが、iRIC プロジェクトです。この iRIC には、ツールと共同体という二つの大きな役割を持ちます。ツールとしての iRIC は、１）研究者、実務者双方が使いやすい user first に特化した GUI 設計、２）計算モデルを使う上で必要となる前処理、後処理機

【13】 続き

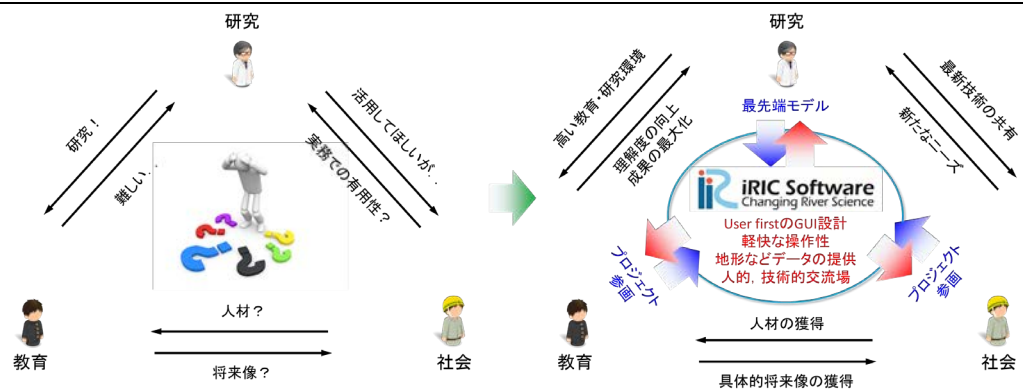


図1 iRIC がもたらす様々な波及効果

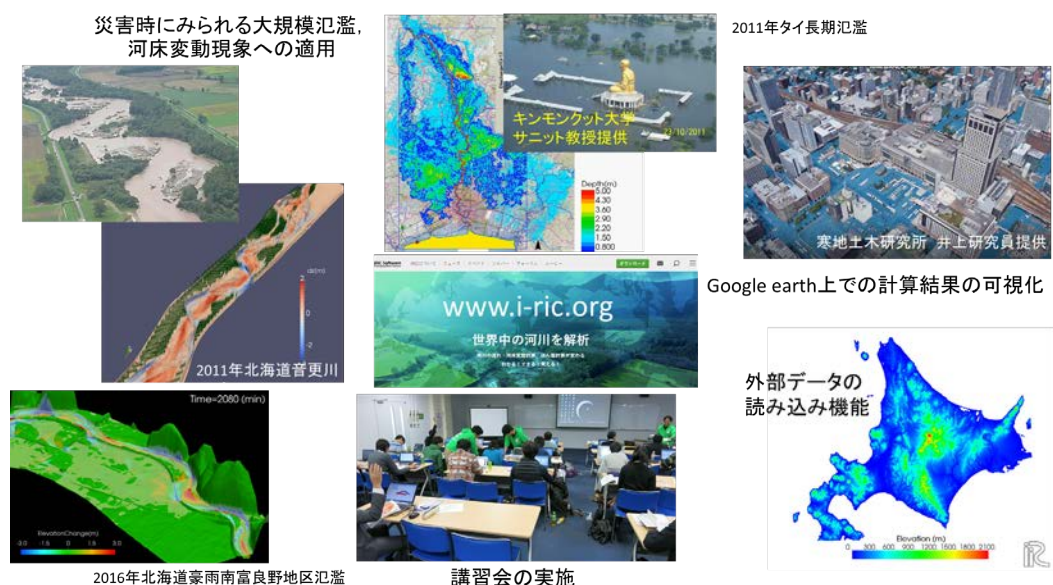


図2 iRIC ソフトウェアの特徴、解析事例など。

能の充実、3) 数値地図情報などのデータ、を提供します。このように計算モデルを使う上で必要な煩雑な処理やデータ収集を iRIC で簡単に扱うことで、研究者や技術者は自らが開発したモデルを iRIC 上で軽快に動かすことができます。さらに、研究者が開発した最先端モデル（河川、津波、土石流、流出、生態モデルなど）を iRIC と同時に提供しているため、実務者や学生など、通常、このようなモデルを使うことができないユーザーでも手軽に利用可能となり、研究成果の迅速な普及が実現します。操作性のよい GUI と高性能のモデルを兼ね備えることに、実際の現場でも有効に利用され始めており、豪雨時の洪水や氾濫被害の解析など極めて緊急性の高い検討においても、多くの適用実績があります。さらに、ツールとしての iRIC を利用することはモデルの有効性を実感することにつながるだけでなく、プロジェクトへの参画を通じて人的交流が促進され、若手技術者や学生などへの教育効果も大いに期待できます。

(4) 本発表の注目点

iRIC プロジェクトは、数値解析技術に関する研究成果を広く使えるようにするツールを提供するという役割だけでなく、iRIC の利用を通じて、シニア若手、学術—民間—行政といった中での人的、技術的な交流、必要されているニーズや、最新技術に関する意見の共有、また次世代を担う学生や若手の教育に関して国際的なプロジェクトとなっていることが特徴です。本プロジェクトが立ち上がってからほぼ 10 年が経過しており、一段とプロジェクトの意義を高め、活動を加速するためには、幅広い分野の関係者や一般の方までを含めて共同体として何ができるかを考える必要があります。ぜひ、様々な立場から本発表についてご意見等頂ければ幸いです。

研究発表データシート

【14】	及川俊一 北海道大学大学院（工学研究院）量子理工学部門 准教授	
------	------------------------------------	---

発表タイトル	電磁場中の単一荷電粒子の量子力学的ドリフト運動
サブタイトル	
（１）研究者のアピールポイント 磁場（および電場）中の高温・高速荷電粒子の量子力学的基本特性を、理論および数値計算により研究しています。また、多体問題の並列アルゴリズムの研究・開発も行っています。 （２）本発表研究の概要 本研究では、古典力学の理論に従わない磁場閉じ込め核融合プラズマの異常拡散現象を量子力学的に説明できないかを理論および数値解析を使って検討しています。 （３）本研究発表の詳細 磁場中で荷電粒子が運動していると粒子は磁場からローレンツ力を受けて磁力線の周りを螺旋運動します。磁力線は電気力線と違い、始まりも終わりもありません（輪ゴムのように自分自身で必ず閉じる）から、他の粒子や壁に衝突しない限りその粒子は特定の磁力線の周りを回り続けます。これがトカマクやヘリカル型磁場閉じ込め核融合装置の閉じ込め原理です。ところが、磁場の強さが場所によって変化していたり、電場が存在していたりすると粒子は磁力線を横切る方向に徐々に移動して行きます。この運動をドリフト運動と呼んでいます。ドリフトの方向が核融合装置の閉じ込め容器壁に向かっていけば閉じ込めは失敗します。さらに、回転運動する荷電粒子は電流を作りますので、アンペールの法則から磁場を作ります。そこで、電磁気学では、回転運動する荷電粒子を等価的な棒磁石で置き換えて説明することがよくあります。ここで、磁場中で回転する荷電粒子が作る棒磁石と普通の棒磁石には決定的な違いがあります。それは、磁場中での棒磁石の向きです。普通の棒磁石の中心を固定して回転できるようにしておいて磁場中に置くと、この棒磁石の N 極は外部磁場の S 極に引かれます。逆の極も同じです。結果として、固定されていない棒磁石は磁場が強い領域に引かれてゆき、最終的に外部磁場を作っている磁極に捕らわれます。これが磁場中の荷電粒子が作る棒磁石では逆で、必ず外部 N 極側に棒磁石の N 極が向き、外部 S 極側に棒磁石の S 極が向きます。このことを荷電粒子は電荷の正負に関わらず反磁性、通常の棒磁石は常磁性を示すと言います。この理由は回転運動の原因であるローレンツ力の向きを考えるとわかります。 荷電粒子の集合体である核融合プラズマは荷電粒子（電子、イオン）の集合体ですから反磁性ですが、反磁性物質であるプラズマは磁場が弱い場所に集まる性質があることになります。プラズマの閉じ込め装置内に閉じ込め磁場を作る電磁石があり、磁場の強さは装置内で三次元的に複雑な分布をしていますので、閉じ込め領域から容器壁に向かって磁場が弱くなっている場所が必ず存在します。反磁性のプラズマ粒子は他の粒子と衝突を繰り返しながら磁場の弱い壁方向に移動して最終的には損失します。つまり、核融合プラズマの磁場閉じ込めは、実際には全ての粒子が漏れる（壁への損失する）前に加熱して一部が核反応を起こさせ、加熱に使ったエネルギーよりも多くのエネルギーを電力（電気エネルギー）として利用しようとするものです。	

【14】 続き

このような現象は古典力学（ニュートン力学、古典論）で理論的に記述することはできますが、古典論で理論的に予測される閉じ込め時間は、実験で確かめられている閉じ込め時間よりも 100 倍以上長く（古典論よりも速く損失する）、「異常、anomalous」であるといわれます。

そこで、私たちは古典論でダメなら量子論／量子力学ではどうか？ということで研究を始めました。古典的には電子や陽子は点電荷ですが、量子力学的には図 1 のようにある程度広がりを持った確率分布として記述されます。磁場中の荷電粒子は回転運動をしながら古典論でよく知られているドリフト速度で徐々に右方向へ移動しながら時間が経てば経つほど広がり（位置の標準偏差）が大きくなっていくことがわかります。この結果は（シュレディンガー方程式の）数値解析ですが、ハイゼンベルクの運動方程式と呼ばれる量子力学の式を解いて、位置の標準偏差がどのように増加してゆくかを理論的に明らかにしました。また、図 2 は一様磁場中で円運動している荷電粒子の回転中心に弱い引力中心が存在する場合にサイクロトロン運動 50 周後の確率密度分布を示す。円周にいくつかの粒子が並んでいるように見えるが、これは単一粒子の確率密度であり、この円は古典サイクロトロン運動の軌道に一致しています。

（4） 本発表の注目点

ここで解説したように荷電粒子は磁場中で広がって行きますので、プラズマの構成粒子は気体というよりも非常に希薄な液体のように振る舞っているはずです。これが理由で古典力学では説明できないプラズマの異常拡散現象が起こっている可能性がありますので、これについて研究を深めていく予定です。

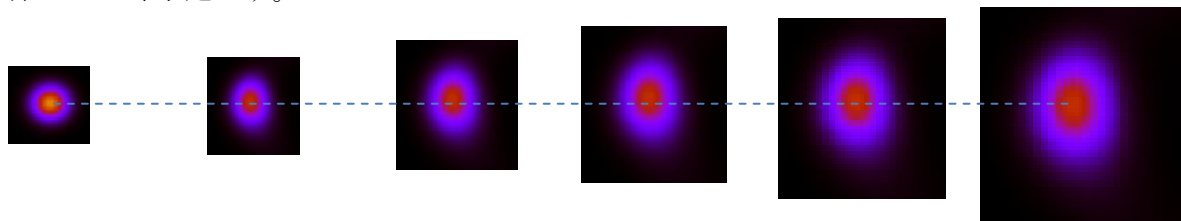


図 1 磁場中で右方向にドリフトする荷電粒子の確率分布の時間発展の数値解析結果。左端は初期分布で、同心円状に分布し中心で最も確率密度が高い。時間が経って一回転したときの確率分布が右隣で、図には 5 回転まで描かれている。

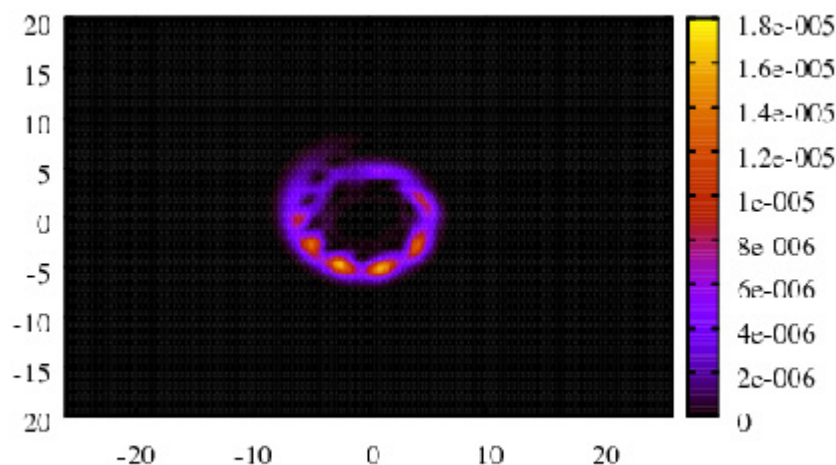


図 2 一様磁場中で円運動している荷電粒子の回転中心に弱い引力中心が存在する場合にサイクロトロン運動 50 周後の確率密度分布。

研究発表データシート

【15】	氏名 杉浦 聡志 北海道大学大学院（工学研究院） 北方圏環境政策工学部門 准教授	
------	---	---

発表タイトル	災害時における防災拠点の孤立脆弱性分析
サブタイトル	孤立しやすい施設の特定と道路網の弱点抽出

（１）研究者のアピールポイント

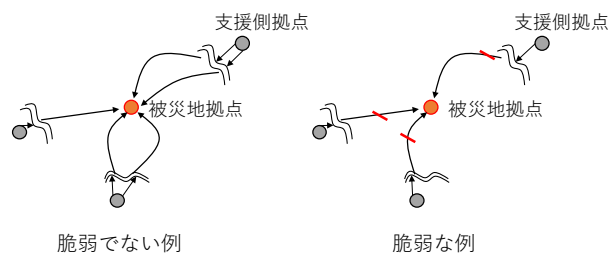
- 建設コンサルタント勤務経験があります
- 地域の道路計画に関する困りごとに直接アプローチする研究に取り組みます。
- 理論的妥当性と実務的可用性の両者を鑑みた研究ができるよう努めます

（２）本発表研究の概要

任意の防災施設の周辺の道路ネットワークが、どれだけ孤立しやすいかを定量的に評価します。具体的には、「最小何箇所の道路区間が不通になったとき、防災施設が孤立するか」を求めます。それに加えて、破壊されると孤立が生じる道路区間を特定する手法を提供します。

（３）本研究発表の詳細

災害時において被災地で孤立が生じると物資の搬入や救急搬送は困難に直面します。復旧、復興の遅れをも招くなど、大きな損失を生じさせます。孤立はいくつかの道路区間が同時に不通となり、1つの経路も確保できないことにより生じます。この研究ではこの孤立が生起する条件に着目して、「最小何箇所の道路区間が不通になったとき、対象とする防災施設が孤立するか」を孤立脆弱性指標と設定し、その値を求める方法を提案します。この孤立脆弱性指標は1-3など値が小さいときには対象の道路網が孤立しやすいことを示し、大きな値になるほど孤立しにくいことを示します。任意の場所を評価対象とできるため、防災施設の配置計画などへの適用が期待できます。また、道路網の孤立脆弱性評価にくわえて、どの道路区間の不通が組み合わされると、最小数で孤立が生じるのかを求めることができます。特定された道路区間は評価対象とした地点の孤立に関する弱点といえます。脆弱性の評価により孤立が生じやすいと評価された場合には、この箇所が特定されることにより、その区間の耐災化など、インフラ防災施策をすべき箇所の検討に使用することができます。



（４）本発表の注目点

- ✓ 任意の防災施設周辺の道路網の孤立脆弱性が定量的にわかる！
- ✓ 孤立を回避するために耐災化すべき道路区間がわかる！
- ✓ 孤立に相対的に頑健な地点を探索することも可能！
- ✓ 比較的大きな道路ネットワークを対象にしても短時間で計算が可能！

研究発表データシート

【16】	菊地 優 北海道大学大学院（工学研究院）建築都市空間デザイン 部門、教授	
------	--	---

発表タイトル	巨大地震に備える次世代高機能免震構造の開発
サブタイトル	究極の免震構造を目指して

（１）研究者のアピールポイント

30 年以上に渡る免震構造の研究開発経験を有し、その研究成果は 2016 年に世界遺産登録された国立西洋美術館の免震化工事（図 1）など、国内外の 200 棟を超える免震建築の設計に適用されています。これまでの免震構造に関する多くの研究成果により、2005 年日本免震構造協会賞、2015 年日本建築学会賞を受賞しました。また、独自の免震装置解析モデルは、オープンソース構造解析システム OpenSees^{*1} を介して世界展開されたことで、免震構造の設計にとって重要な解析手法と位置づけられています。

（２）本発表研究の概要

免震構造は、建物下部に図 2 のような特殊な装置を設置して地震の揺れを建物に伝わりにくくすることで、地震時の建物内の揺れを耐震設計された従来の建物の 1/5 にまで低減することができます。これにより、建物自体の損傷防止だけではなく、建物内の収容物を転倒や落下の被害から守ることもできます（図 3）。2011 年東日本大震災では、免震構造の病院が医療機器の震動被害を免れたことで、被災者の救護活動を継続することができました。

本研究は、地震防災の有効な手段である免震構造を社会に広く普及させるべく、新たな免震構造の提案を目的とします。日本では南海トラフ沿いの巨大地震の発生が懸念される一方で、内陸直下型地震にも頻繁に見舞われています。そのため、海溝型巨大地震による長周期長時間地震動および内陸直下型地震による大振幅パルス性地震動という多様な特性を有する地震動に対して、建築物の安全性の確保と機能性の維持が求められています。本研究では多様な地震動に対しても所要の性能を確実に発揮できる免震構造を「高機能免震構造」と称し、その実現を目指して研究開発を行っています。具体的には、従来の免震構造に①長周期長時間地震動による大変形・多数回繰り返し変形にも性能を維持できる高耐久性と、②大振幅地震動でも限界変形を超えずに加速度低減効果を発揮できる変位抑制という 2 つの機能を与えることで、どのような地震にも対処できる究極の免震構造を実現します。

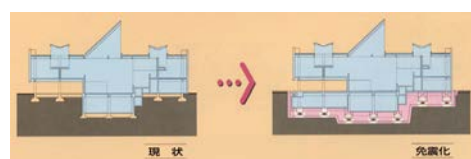


図 1 免震化された国立西洋美術館^{*2}



図 2 免震装置
（積層ゴムのカットモデル^{*2}）

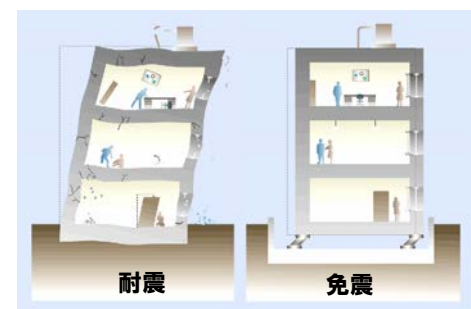


図 3 免震構造のコンセプト^{*2}

^{*2} 資料提供：清水建設、ブリヂストン

【16】続き

(3) 本研究発表の詳細

本研究では、多様な地震動に対処可能な次世代型の高機能免震構造として、①高耐久免震構造と②変位抑制免震構造の2つを並行して開発します。以下にそれらの詳細を説明します。

① 高耐久免震構造

南海トラフ沿いの地震のような海溝型巨大地震では、長周期成分が卓越し継続時間の非常に長い地震動（長周期長時間地震動）の発生が日本各地で予測されています。このような地震で免震構造は、振幅の大きな多数回繰り返し変形を受けます。主要な免震装置である金属プラグ挿入型積層ゴムや弾性すべり支承は、装置内部で地震のエネルギーを熱エネルギーに変換して揺れを抑えますが、長周期長時間地震動では大変形・多数回繰り返し変形による発熱・疲労を要因とする性能劣化が懸念されています。そこで本研究では、発生熱の拡散を促し装置内部の温度上昇を抑える方法として、図4、図5のように装置自体の熱容量の増大（積層ゴム内部鋼板厚やすべり板厚の増大）、プラグ材料やすべり材の材種変更、熱発生源の分散（プラグの複数本化やすべり材の分散配置）による改善効果を実験・解析の両手法により確認しています。

② 変位抑制免震構造

免震構造では低剛性の免震装置を用いて長周期化することで応答加速度を低減しますが、逆に応答変位は増大してしまいます。そうすると、免震建物は周囲の擁壁へ衝突する可能性が高くなり、現状ではダンパー増設や衝撃緩衝材設置などで対処せざるを得ません。本研究で提案する変位抑制免震構造とは、図6のように回転慣性装置による長周期化と硬化型復元力装置による高剛性化を組み合わせた独創的な発想に基づく免震システムです。建物周期は従来の免震構造と同程度となり加速度低減効果は維持でき、大変形時には硬化型復元力により剛性を増加させて変位を抑制し擁壁衝突を回避します。

(4) 本発表の注目点

本研究は、主として日本学術振興会の科学研究費助成事業の2件の基盤研究(A)（2015～2017年度、および2019～2021年度）で実施されています。高耐久免震構造のアイデアのうち、熱源の分散化については2017年度までに性能検証を終えて実用段階に入っています。変位抑制型免震構造については、今年度、図6のコンセプトを縮小模型により確認し、来年度は図7の大型振動台にて実大装置の性能検証を行います。一連の研究成果はOpenSees^{*1}を介して世界展開する計画です。

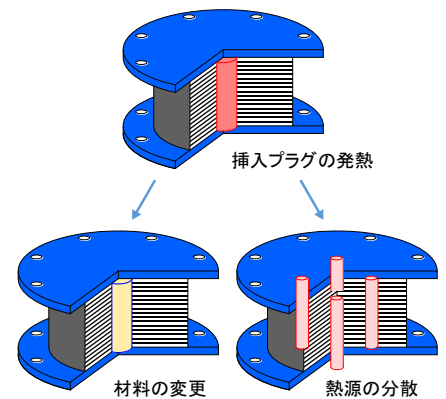


図4 免震積層ゴムの高耐久化

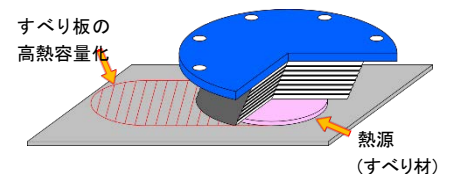


図5 弾性すべり支承の高耐久化

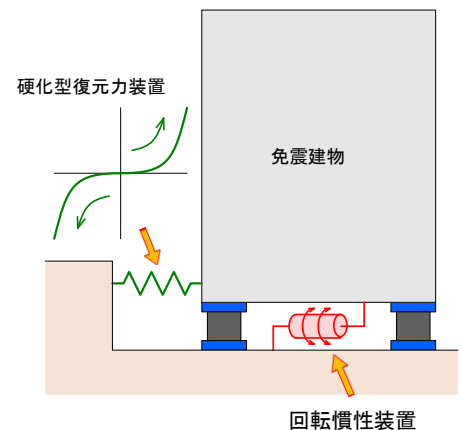


図6 変位抑制免震構造のコンセプト

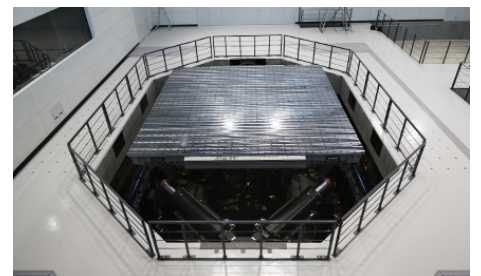


図7 性能確認に用いる大型振動台
(清水建設技術研究所)

^{*1}OpenSees：米国カリフォルニア大学バークレー校で開発・運用されているオープンソース構造解析システム、世界中の研究者が研究成果を相互提供することで最新の解析技術をグローバルに共有できるフレームワーク。

研究発表データシート

【17】	越川 武晃 北海道大学大学院（工学研究院）建築都市空間デザイン 部門・助教	
------	---	---

発表タイトル	鉄筋コンクリート造建物の耐震性能の飛躍的向上を目指して
サブタイトル	

（１）研究者のアピールポイント

鉄筋コンクリート構造（RC）・プレストレストコンクリート構造（PC）といったコンクリート系構造の力学挙動評価に関する研究を行っている。清水建設と北海道大学による共同研究「ロジックス構造材プロジェクト」では、建築構造性能評価を担当している。

（２）本発表研究の概要

本研究は、「ロジックス構造材プロジェクト」によるものであり、新開発の高性能コンクリートを用いた建築物の構造性能を定量的に評価し、これを建築構造設計へ展開することを目的とする。この目的を達成するには、高性能コンクリートの材料開発とともに、その力学挙動を高精度に追跡できるシミュレーション技術が必要となる。本研究では、高性能コンクリートの実験による力学的挙動評価とともに、実験結果を反映させた材料および部材レベルの力学モデルを構築し、さらには構造物レベルのマクロな力学モデルへの展開を図る。図1に、本研究で対象とするコンクリートのスケールを示す。

次フェーズでの着手が見込まれる高性能コンクリートの開発に先立って、今フェーズでは既存するコンクリートを対象に評価法の整備を行った。今年度は、コンクリートの圧縮特性の評価およびモデル化を行うための準備段階として、圧縮载荷試験における計測・制御システムの構築および予備実験等を実施した。

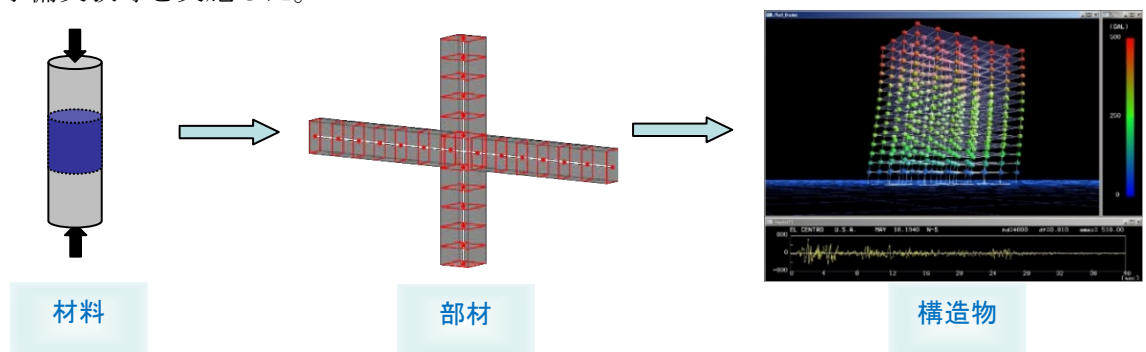


図1 研究対象のスケール

（３）本研究発表の詳細

・コンクリートの一軸圧縮载荷試験制御システムの構築

コンクリートの圧縮強度以降の軟化域での挙動（ポストピーク挙動）を測定するための一軸圧縮载荷試験における制御システムを構築した（図2）。ポストピーク挙動時において常に増加する消散エネルギーを制御対象とした。コンクリートシリンダーを試験体（図3）とした一連の予備実験（図4）によって本システムの動作検証とパラメータ検証を行った。

【17】 続き

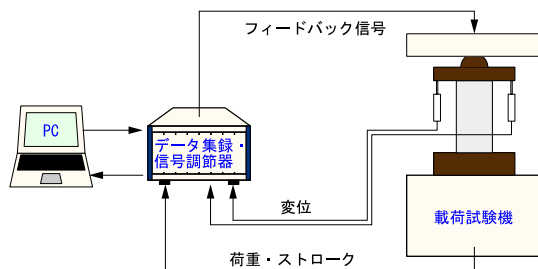


図2 測定・制御システム



(a) 荷重前



(b) 荷重後

図3 コンクリート試験体

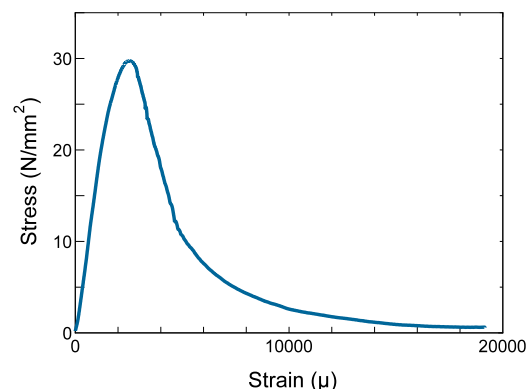


図4 実験結果

・画像解析を用いた非接触型変形計測システムの構築

本計測システムは、試験体高さ方向の圧縮ひずみ分布を取得し、変形が集中している領域の長さを同定することを目的としている。画像解析を用いた非接触型変形計測システムの準備として、画像解析プログラムの作成および動作検証を行った。本システムは、①圧縮荷重試験時のコンクリート試験体をデジタルカメラで撮影する(図5) ②撮影したデジタル画像をPCに取り込んで解析する(図6)の二段階からなる。

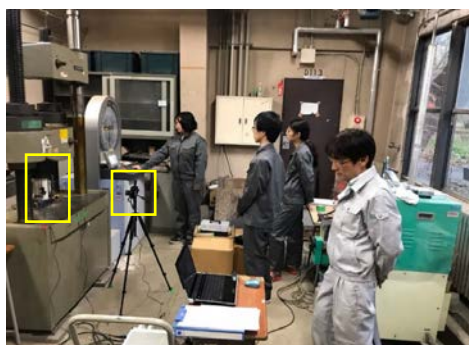
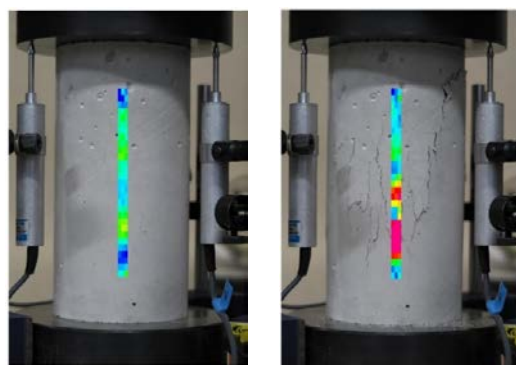


図5 画像撮影の様子



(a) ピーク時

(b) ピーク後

図6 画像解析結果(ひずみ分布)

(4) 本発表の注目点

強度と靱性を向上させた高性能コンクリートは、RC 構造物における現行の耐震設計の体系を大きく変える可能性を有する。コンクリートの圧縮靱性を向上させることができれば、コンクリートの曲げ圧縮破壊先行でも構造物に十分な粘りを期待できるようになるので、補強筋の降伏によらない設計を積極的に選択することが可能となる。このことは降伏後の塑性変形が期待できない新素材の高強度補強筋などの利用にもつながる。本研究は、このような優れた性能と可能性を有するコンクリートの開発に先立って、これを建築物に用いた場合の構造性能を定量的に評価できる手法を整備し、建築構造設計へ展開することを目的とするものである。

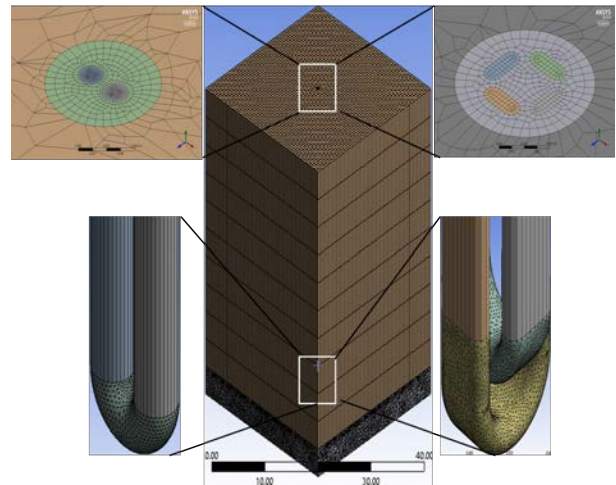
研究発表データシート

【18】	葛 隆生 北海道大学大学院（工学研究院） 空間性能システム部門・空間性能分野・准教授	
------	--	---

発表タイトル	高効率・低コスト地中熱ヒートポンプシステムの研究開発
サブタイトル	
(1) 研究者のアピールポイント 発表者の研究分野は、エネルギー環境工学、建築設備工及び空気調整工学。本発表では、地中熱ヒートポンプシステムに関する研究開発について発表する。これまでの研究成果により産学官連携功労者表彰環境大臣賞（2010）、空気調和衛生工学会論文賞（2010）、日本冷凍空調学会論文賞（2016）など受賞。 (2) 本発表研究の概要 本発表は、2013～2018 年度に NEDO 研究委託として、北海道大学、株式会社日伸テクノ、鉦研工業株式会社、株式会社イノアック住環境、サンボット株式会社、新日鉄住金エンジニアリング株式会社、ジーエムラボ株式会社及び産業技術総合研究所が共同実施した「低コスト・高効率を実現する間接型地中熱ヒートポンプシステムの開発と地理地盤情報を利用した設計・性能予測シミュレーションツール・ポテンシャル評価システムの開発」（研究代表：長野克則教授）の研究成果となる。研究開発では、地中熱ヒートポンプシステムを構成する全ての要素、すなわち地中熱交換器からヒートポンプ、システム制御、設計性能予測ツールおよび、全国ポテンシャル評価を行った。 (3) 本研究発表の詳細 ・ロッド装填、孔内洗浄、抜管工程を自動で行う削孔機及びボアホールの最小掘削断面に対応する扁平 U チューブの開発を行い、試験施工及び数値解析により性能評価を実施した。 ・これまで市場になかった中規模建物導入を想定した高効率の 60kW 級暖冷房用ヒートポンプモジュール及び、30kW 級給湯用ヒートポンプを開発し、設定した目標 COP 性能を達成した。 ・大規模建物での地中熱利用熱回収ヒートポンプシステムと最適制御システムを開発し、大幅な一次エネルギー消費量削減と省エネ化実現できる見込みとなった。 ・一般ユーザーが Web ブラウザで利用可能な地中熱ヒートポンプシステム設計・性能予測ツール「Ground Club Cloud」を開発した。 ・全国をカバーする三次元地盤・地下水データベースを作成し、それに基づく、地中熱利用ポテンシャル評価技術ならびに全国地中熱ポテンシャルマップを完成させた。 ・これらソフト開発までトータルでの研究開発により、その相乗効果により目標とする設置コスト、運用コストが 20 %以上低減の見込みを達成することができた。 (4) 本発表の注目点 地中熱ヒートポンプシステムに係る、ポテンシャル評価から設計、施工、制御のトータルの技術手法について、従来と開発成果を比較しながら、本研究における工学的イノベーション要素をアピールするとともに、地中熱利用をあまり知らない方々にもわかりやすく紹介する発表とする。	



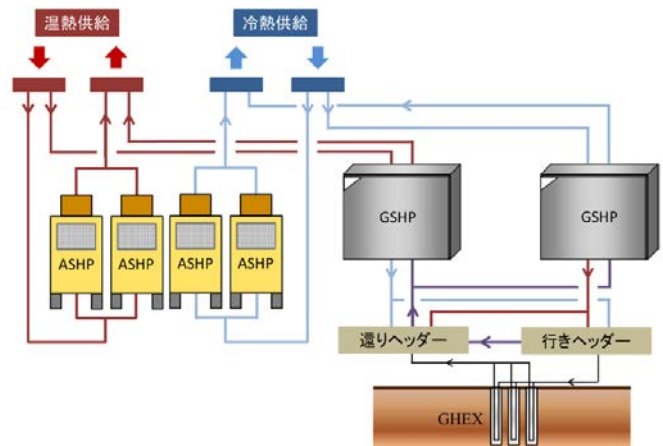
地中熱交換器自動掘削機



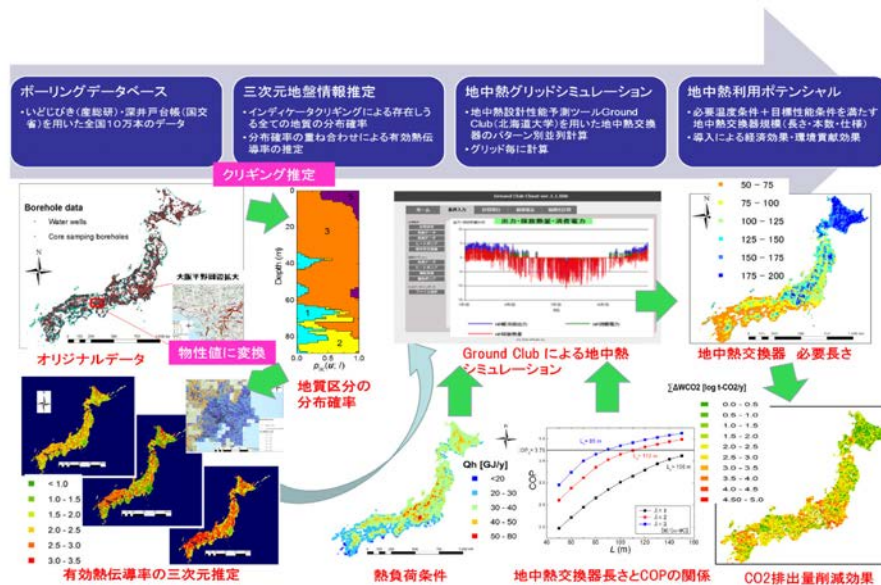
CFD 解析による扁平 U チューブ評価



60W 級ヒートポンプ試作機



熱回収地中熱ヒートポンプシステムイメージ



地中熱利用ポテンシャル評価システム

研究発表データシート

【19】	石井一英 北海道大学大学院工学研究院環境創生工学部門・教授	
------	----------------------------------	---

発表タイトル	寒冷地域で新たな価値を生むバイオガスプラントシステムの開発
サブタイトル	循環共生システムに関する研究

(1) 研究者のアピールポイント

1)環境、2)発展途上国の人々（共に時代を生きる友人）、3)次世代の人々（子、孫）と共生するために 50 年先を見据えた物とエネルギーの「循環」システムのあり方を考えています。

(2) 本発表研究の概要

牛ふんバイオガスプラントは、悪臭の低減など牛ふんの適正処理や良質液肥の生産、バイオガス発電のみならず、熱利用による新たな付加価値も求められている。本発表では、北海道大学農場に設置されているバイオガスプラントの余剰熱を利用した温室プロジェクトについて、特にバイオガスプラントの余剰熱発生状況を解析した結果を報告する。

(3) 本研究発表の詳細

北大農場のバイオガスプラントを対象に、2008 年～現時点までのバイオガス発生量やボイラ運転、各温度等のデータ計測データの解析ツールを作成し、施設園芸等の熱需要にどの程度、対応できるかどうか検討した。

1) バイオガスプラントの計測地点

図 1 に北大農場バイオガスプラントの物質（ふん尿、バイオガス及び温水）フローと計測地点を示す。データは、プラント内のデータロガーにて、40 秒に一度の頻度で記録され、本研究では 2008 年 1 月～2017 年 10 月までのデータを得、解析に用いた。なお、2015 年 3 月以降はセンサ異常等のため記録されたデータに異常が見られたため解析できなかった。

2) 解析結果と今後の課題

月毎の解析結果を図 2 に示す。夏季は放牧のためふん尿投入量が少なくなることから、バイオガス発生量は冬季に多く発生する。発酵槽の加温に必要な熱量はバイオガスによって得られる熱量よりも年間を通じて少ないことから、園芸施設等には熱供給することが可能である。2008 年～2009 年の運転当時は、2,000 Mcal/月～8,000 Mcal/月(図 2 上段緑三角)の熱供給が可能であったが、2008 年と 2012 年のふん尿投入量当たりのバイオガス発生量(biogas yield)を比較すると(図 3 の赤丸)、バイオガス発生量が低下しているため、供給可能熱量が低下していることが分かる。

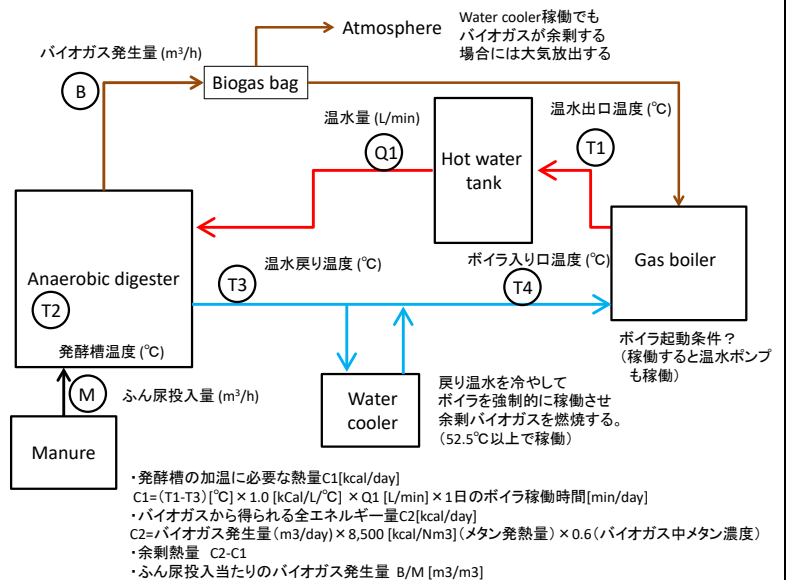


図 1 北大農場バイオガスプラントの計測地点と解析方法

【19】 続き

バイオガス発生量低下の原因として、供給過多による発酵不良や発酵槽温度の低下等が考えられる。2019年3月のボイラ等交換の施設整備終了後、適正な発酵状態の維持、バイオガスプラントの物質・エネルギー収支の正確把握、隣接する園芸施設等の熱需要も含めたトータル計測システム、及びその計測を踏まえた設計ツールの作成を次年度以降行っていく予定である。

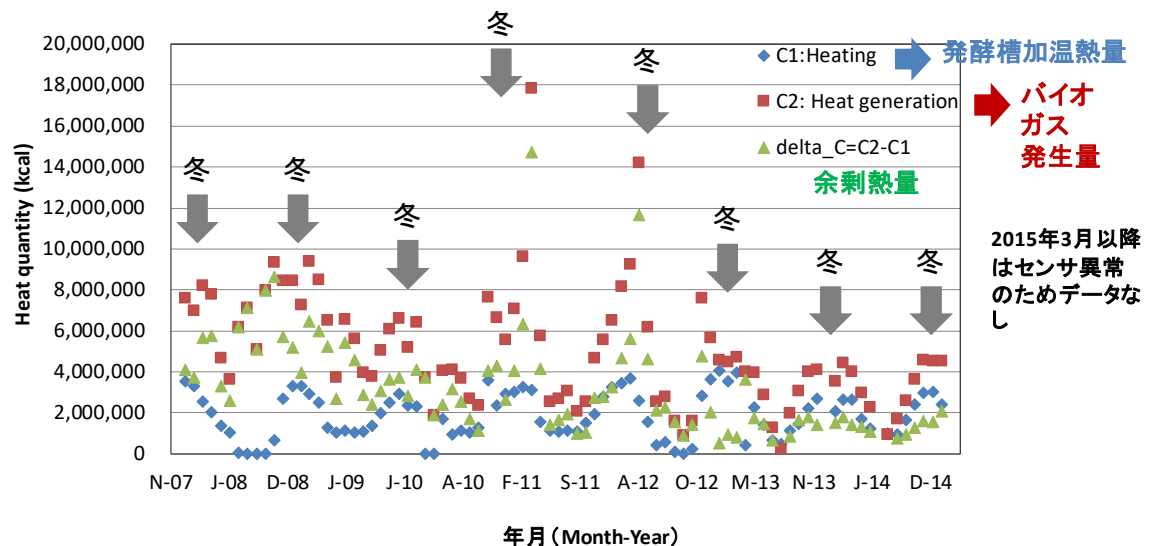


図2 北大バイオガスプラントのエネルギー収支解析結果

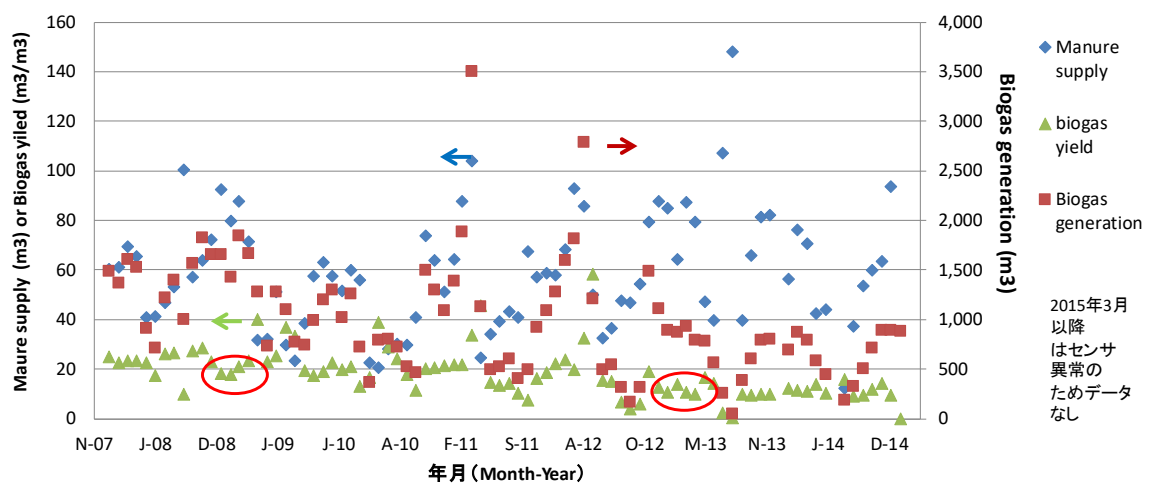


図3 北大バイオガスプラントのふん尿投入量とバイオガス発生量

(4) 本発表の注目点

- ・余剰熱を利用した新たな価値（冬の農業、高付加価値作物の生産など）の可能性
- ・固定価格買取制度（FIT）終了後の新たな収入源の確保
- ・災害時におけるエネルギー自立の可能性
- ・余剰熱利用と最適設計・制御によるバイオガスプラントエネルギー利用効率の最大化
- ・ガスボイラ排ガス投入による熱と CO_2 併給によるさらなるエネルギー利用効率の向上と温室効果ガスネガティブエミッションの可能性
- ・本研究は「北海道大学ロバスト農林水産工学国際連携研究教育」での研究であり、農学研究院（岩渕和則、西邑隆徳）、北方生物圏フィールド科学センター（三谷朋弘）、工学研究院（森太郎、石川志保、石井一英）の共同研究である。

研究発表データシート

【20】	氏名 佐藤昌宏 北海道大学大学院工学研究院環境創生工学部門・助教	
------	-------------------------------------	---

発表タイトル	牛ふんバイオガスプラント液肥を用いた微細藻類培養に関する研究
サブタイトル	
(1) 研究者のアピールポイント 廃棄物の適正処理を物質挙動及び廃棄物の有効利用の観点から評価・改善することを専門としている。社会における課題解決のために、メカニズムの解明と社会実装を念頭に研究・開発を行っている。 (2) 本発表研究の概要 牛ふんのバイオガスプラントから出る液肥中には微細藻類の栄養源となるアンモニア態窒素が高濃度に含まれる。そこで液肥を用いて、微細藻類を大量培養するための培養条件を明らかにするため室内実験を実施した。 ア) 液肥中の着色成分による光の透過阻害の低減 液肥を 50 倍に希釈することにより微細藻類の対数増殖を確認し、消化液培地の光の透過率の目安を明らかにした。 イ) リン酸塩・炭酸塩の添加による比増殖速度の改善 6 日間の培養では、4.53g-IC/g-藻体の無機炭酸量及び 0.84 g-PO₄³⁻/g-藻体のリン酸量により比増殖速度は 0.39~0.47 (d⁻¹) となり無添加に比べて 1.2~1.4 倍に増大した。それ以上の量では著しい増加は見られなかった。 (3) 本研究発表の詳細 <u>背景</u> 牛ふんバイオガスプラントから排出される液肥は、過剰散布による地下水汚染の懸念や十分な散布ができない場合、水処理が必要となる課題があり、新たな有効利用方法が求められている。そこで本研究では、液肥を用いて微細藻類を培養し、バイオマス資源として利用することを目指し、大量培養方法を開発することを目的としている。 <u>実験方法</u> 培地) 乳牛ふん尿バイオガスプラントの液肥（機械的に分離された液分）の 5~100 倍希釈液及び対照として CSi 培地を調製した。北大構内の池から採水した液を微細藻類の植種液として使用した。 培養条件) 光源：蛍光灯 24 時間点灯、光量子密度束：液面で 100μmol/m²/s 程度、温度：約 20℃、105rpm で振とう 無機炭素・リン酸塩添加条件) 無機炭素及びリン源としてそれぞれ、Na₂CO₃、K₂HPO₄を用いた。 光の透過率) 吸光光度計を用いて、蒸留水を入れた石英セルに波長 684nm の光を透過させたときの透過率を 100%として算出 <u>結果と考察</u> ア) 液中の着色成分による光の透過阻害の低減	

【20】 続き

図1に希釈した消化液培地中のTNと対数増殖期の傾き（比増殖速度）の関係を示した。100倍希釈では比増殖速度は、Csi培地より下回り、50倍希釈（ $\lambda_{684,1\text{cm}} = 26.0\%$ ）では増加し、20倍希釈（ $\lambda_{684,1\text{cm}} = 4.7\%$ ）では50倍よりも増加しなかった。なお、5倍希釈消化液では、微細藻類の増殖を検出できなかった。希釈倍率が小さいと微細藻類の利用できる窒素濃度が高くなるため、比増殖速度は増加したと考えられる。50倍、20倍希釈消化液培地（以下、それぞれ50倍培地、20倍培地）において対数増殖が始めるまでの日数は、それぞれ6日と10日である。培養液の深さは初期で2.5cmあるが、毎日4mLの培養液を採取したため、20倍培地では、10日目で培養液の深さは1.3cmまで低下している。それでも表1に示す通り、20倍培地の光の透過率（1cm）は、50倍培地（2cm）よりも低く、培養期間において20倍培地の光の透過率は50倍よりも低く維持されたと考えられる。従って、光の透過率が比増殖速度に影響を与えた可能性はある。しかし、測定ができていないが、窒素以外のリン酸や無機炭素が不足した可能性も考えられる。

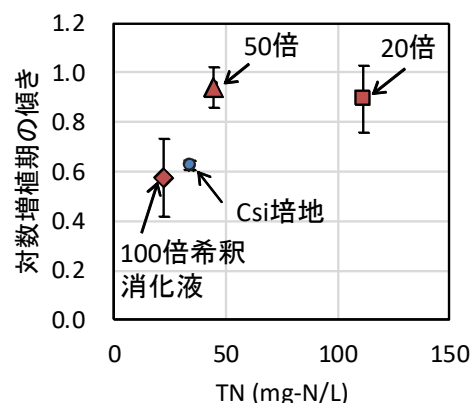


図1 消化液培地のTNと対数増殖時の傾き（比増殖速度）の関係

表1 消化液培地の光の透過率(%)

セルの厚さ cm	Csi培地	消化液の希釈率			
		100	50	20	5
2	99.3	29.1	5.8	0.0	0.0
1	99.2	55.9	26.0	4.7	0.0
0.5	99.7	73.6	50.3	19.5	0.1

イ) リン酸塩・炭酸塩の添加による比増殖速度の改善

図2に6日間培養における比増殖速度と無機炭素（IC）、リン酸（P）の初期量の関係を示した。P量別にみると（図2、左）、4.53g-IC/g-藻体まで比増殖速度は増加したが、それ以上の初期量では顕著な増加せず、14g-IC/g-藻体以上では著しく低下した。すなわち、4.53g-IC/g-藻体までは、ICは十分な存在量であると考えられる。そこで、IC量別にみると（図2、右）、14g-IC/g-藻体以上を除けば、0.84g- PO_4^{3-} /g-藻体まで比増殖速度は増加傾向にあるが、それ以上では明確に増加はしなかった。従って、0.84g- PO_4^{3-} /g-藻体が十分なP量と考えられ、P量が増加しても明確に増加しない理由は、IC量やP量以外の要因が考えられる。無添加系と比較して、上述の十分量以上の系（14g-IC/g-藻体以上を除く）では、比増殖速度は1.2～1.4倍となった。

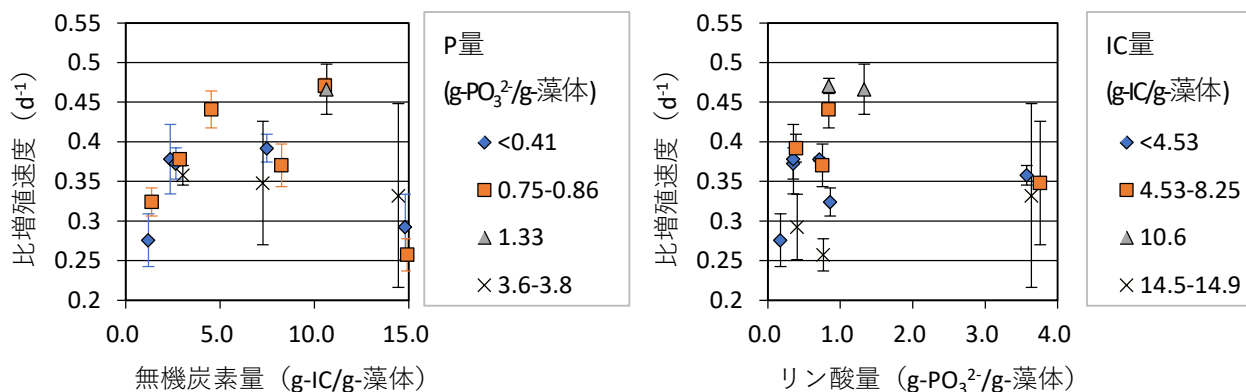


図2 6日間培養の比増殖速度と無機炭素及びリン酸の初期量との関係

(4) 本発表の注目点

- 色度の高く光の透過しない液肥であっても光の透過度（ただし、1cm 石英セル、684nm）が26%に改善すれば、微細藻類を対数増殖させることが可能である。
- リン酸塩・炭酸塩の添加による比増殖速度の改善
- 単一種ではなく、環境中で占有する微細藻類群の培養

研究発表データシート

【23】	氏名 國貞雄治 北海道大学大学院工学研究院 エネルギー・マテリアル融合領域研究センター・助教	
------	--	---

発表タイトル	電子顕微鏡×シミュレーションによる先端材料解析
サブタイトル	機能性材料の省貴金属化

(1) 研究者のアピールポイント

材料の表面や界面における触媒反応や物質の輸送などの現象に着目して研究を行っています。主に第一原理電子状態計算と呼ばれるシミュレーション手法を用いて電子状態を計算することにより、物理現象のメカニズムの解明に取り組んでいます。近年では、透過型電子顕微鏡像シミュレーションや、透過型電子顕微鏡で得られるスペクトルの第一原理電子状態計算による予測も行い、実験とシミュレーションを組み合わせた効率的な材料開発に取り組んでいる。

(2) 本発表研究の概要

近年、貴金属供給環境への不安や材料製造コストの削減のため、各種機能性材料の省貴金属化が必要不可欠となっている。我々は透過型電子顕微鏡とシミュレーションを組み合わせ、材料の特性発現の起源を明らかにし、新規機能性材料の設計指針を得た。本発表では、燃料電池電極触媒の貴金属触媒使用量の削減と長寿命化に関する研究成果を中心に紹介する。特に、材料の電子状態を正確に計算することができる密度汎関数理論に基づく第一原理電子状態計算を用いた材料探索に関する研究を紹介する。



図1 本研究の概念図

(3) 本研究発表の詳細

燃料電池電極触媒には貴金属の白金が用いられており、触媒使用量を削減するため触媒粒子の微細化が試みられている。触媒粒子を微細化することで触媒反応が起こる表面積を増加させることができ、触媒使用量の削減が可能となる。一方、微細化した触媒は担体からの脱落や凝集・粗大化を起こしやすく、長時間の使用に課題が存在する。そこで我々は白金と強く相互作用する新たな触媒担体の開発を目指す。具体的には、図2のように高い比表面積、機械的・化学的安定性を有するグラフェンにアンカーサイトとなる不純物を導入することで、新規触媒担体を設計し、長寿命な原子レベル白金分散触媒を開発した。

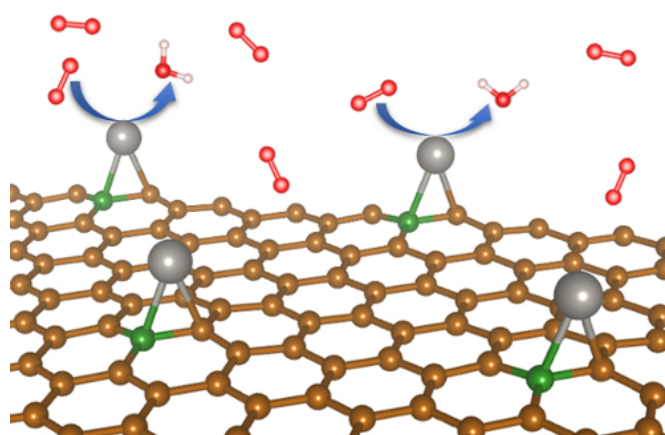


図2 元素置換グラフェン担体担持白金単原子触媒

【23】 続き

第一原理電子状態計算を用い、様々な軽元素を置換したグラフェンと白金原子間の相互作用を評価した。まず、ホウ素や窒素がグラフェン中への置換導入が比較的容易であることを明らかにした。また、置換元素は白金原子のアンカーサイトを形成することを明らかにした。特に、図3上部に示すようにケイ素、リン、硫黄などの近傍において強固な共有結合が形成される。その結果、図3下部に示すように清浄グラフェン上では 100 °Cにおいて $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度の白金原子の拡散係数であったが、置換導入した元素近傍では $10^{-29} \text{ m}^2/\text{s}$ 以下まで低減することが可能であることを明らかにした。これらの結果より、酸素、ケイ素、リン、硫黄置換グラフェンが触媒担体として優れていることを明らかにした。

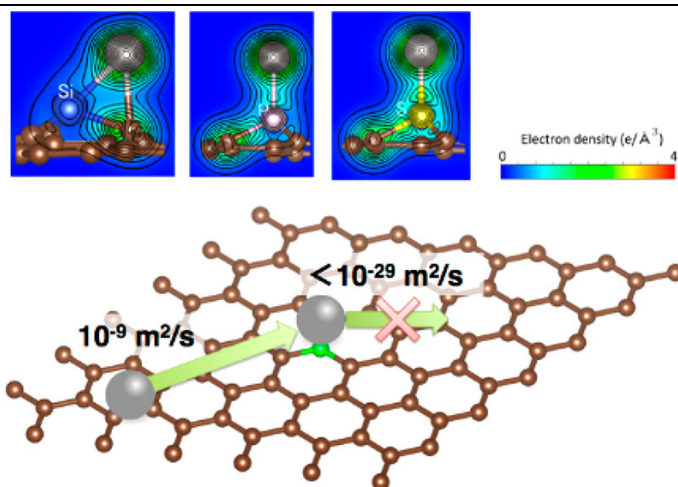


図3 軽元素置換グラフェンによる白金原子の拡散抑制。Reprinted with permission from [S. Hasegawa et al., The Journal of Physical Chemistry C, 121 \(2017\) 17787](#). Copyright 2017 American Chemical Society

上記のシミュレーションは真空中の触媒に相当するものであるが、実際の触媒動作環境では様々な原子・分子が周囲に存在する。そこで燃料電池アノード極を模擬し、水素雰囲気下で白金原子の拡散・凝集特性に与える影響を調査した。まず、水素吸着により、白金原子の軽元素置換グラフェン担体からの脱落が促進されることを明らかにした。また、水素吸着により、白金原子の拡散も促進される傾向が存在する。これらの結果より、図4のように酸素、ケイ素、リン、原子空孔を導入したグラフェンが水素環境下でも凝集や脱離を抑制する効果を維持できることを明らかにした。

これらの設計したグラフェン担体は置換元素の導入が容易ではないことが明らかとなっている。一方、あらかじめ原子空孔をグラフェン中に形成することで置換元素の導入が容易になる。我々は透過型電子顕微鏡を活用し、電子線を照射することにより原子空孔の導入に成功した。

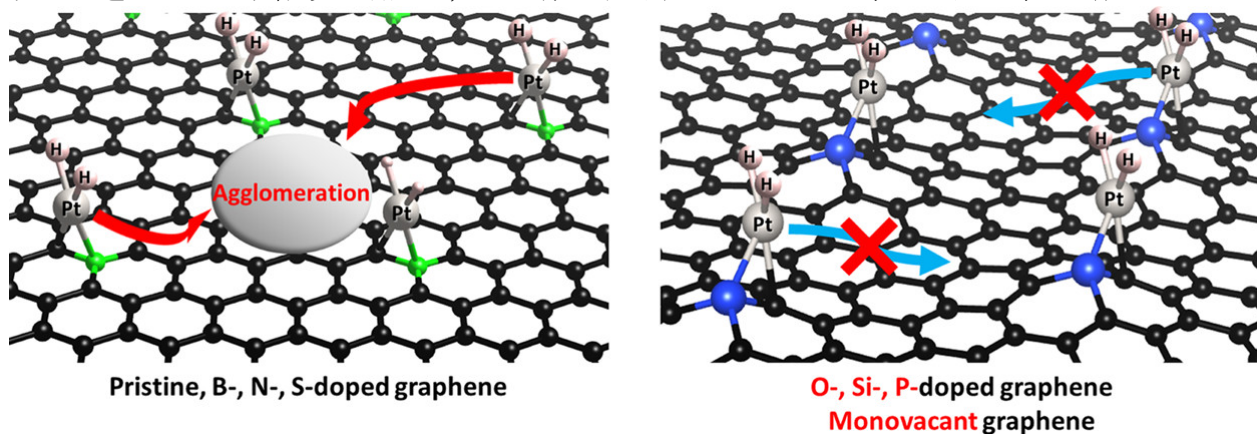


図4 水素雰囲気下での白金原子の拡散・凝集挙動。Reprinted with permission from [S. Hasegawa et al., ACS Omega, 4 \(2019\) 6573](#). Copyright 2019 American Chemical Society

(4) 本発表の注目点

実験のみで大量の候補材料をスクリーニングする場合には、多くの人的・物的コストが必要となる。我々は、第一原理電子状態を活用することで、効率的に材料スクリーニングを行った。また、燃料電池動作環境の雰囲気模擬したシミュレーションを行うことで、より信頼性の高い結果を得ることができた。