イノベーションフォーラム2018　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	村上　尚史　講師	「偏光を利用した高コントラスト天文観測技術の開発」
2	応用化学部門	鱒渕　友治　准教授	「窒素を用いた新しい光／電子機能性セラミックス」
3	材料科学部門	大野　宗一　准教授	「コンピュータによる金属材料の設計と製造－材料組織の予測シミュレーション技術の開発－」
4	機械宇宙工学部門	脇田　督司　助教	「パルスデトネーション燃焼器実現に向けたデトネーションイニシエータの開発」
5	人間機械システムデザイン部門	江丸　貴紀　准教授	「ロボット技術・人工知能を活用した農林業支援ロボットの開発」
6	エネルギー環境システム部門	田部　豊　准教授	「北海道におけるCO_2排出量大幅削減のための将来エネルギーシステム解析」
7	量子理工学部門	大沼　正人　教授	「ナノメートルの構造が決める様々な特性～構造材料から食品まで～」
8	環境フィールド工学部門	ヘンリー　マイケル　准教授	「持続可能な世界を実現するための社会インフラの貢献を定量化する新しい分析方法の開発」
9	北方圏環境政策工学部門	鄭　好　助教	「画像処理によるアイスレンズの可視化：土木工学に幅広く応用されている凍結工法時のアイスレンズの定量的かつ即時的評価」
10	建築都市空間デザイン部門	渡部　典大　助教	「積雪寒冷都市の都市デザイン研究」
11	空間性能システム部門	千歩　修　教授	「外壁材料の耐凍害性評価方法」
12	環境創生工学部門	松井　佳彦　教授	「微粒子活性炭による水処理」
13	環境循環システム部門	佐藤　努　教授	「自然に学ぶ汚染水・汚染土壌の浄化法とその化学反応モデリング」
14	エネルギー・マテリアル融合領域研究センター	張　麗華　助教	「水中結晶光合成による金属ナノ酸化物の作製と環境、エネルギー応用」
23	情報理工学専攻	ジョーダン チャールズ　助教	「mplrs と頂点･凸包の並列計算」
24	生命人間情報科学専攻	橋本　守　教授	「非線形ラマン散乱内視鏡の開発－神経を無染色に可視化する内視鏡下手術支援ロボットの新しい眼－」
25	メディアネットワーク専攻	筒井　弘　准教授	「Rejection Criterion for Keyword Recognition System」
26	情報エレクトロニクス専攻	植村　哲也　教授	「次世代高感度磁気センサー応用に向けたナノスケール巨大磁気抵抗素子の開発」
27	システム情報科学専攻	小林　孝一　准教授	「デマンドレスポンスのための電力消費ダイナミクスの確率モデル」

※部門･ センターは大学院工学研究院所属、専攻は情報科学研究科所属となります。

研究発表データシート

【１】	氏名　　村上　尚史 北海道大学大学院工学研究院 応用物理学部門・講師	

発表タイトル	偏光を利用した高コントラスト天文観測技術の開発
サブタイトル	― 太陽系外惑星の探索に向けて ―

（１） 研究者のアピールポイント

さまざまな光技術、特に偏光技術を天文観測に応用する研究を進めています。その対象天体として、「太陽系外惑星」（太陽以外の恒星がもつ惑星、以後「系外惑星」）の観測を目指しています。近年、系外惑星が次々と発見されており、その数は 4000 個に迫ろうとしています。系外惑星研究の究極のマイルストーンは、生命が居住できる環境に、地球に似た惑星を発見することです。地球に似た惑星を観測することができれば、その詳細な分析により生命活動の痕跡（バイオシグナチャー）が発見されるかもしれません。私たちの研究グループは、究極的に「第二の地球」発見を目指した将来の観測技術の研究を行っています。

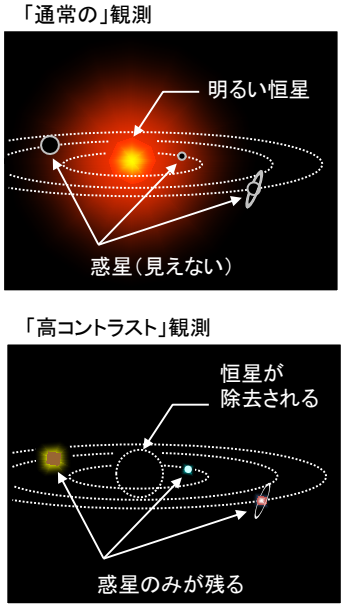


図1: 太陽系外惑星観測の模式図。

（２） 本発表研究の概要

系外惑星、特に地球のような低質量の惑星を観測する上での大きな問題は、すぐそばに存在する主星（恒星）が明るすぎることです。例えば、私たちの太陽系を 10 パーセク（およそ 33 光年）遠方から観測することを考えると、太陽／地球の明るさの比（コントラスト）は 10^{10}にも達すると言われています。このような圧倒的なコントラストを克服するため、明るい恒星を強力に除去する高コントラスト観測技術が必要不可欠です（図 1）。本発表では、私たちの研究グループが開発を進めている独自の高コントラスト観測技術について紹介します。

（３） 本研究発表の詳細

明るい恒星光を除去するための観測装置は「コロナグラフ」と呼ばれ、世界中でさまざまな方式が提案されています。その多くは、恒星からの光波が平面波として入射した場合、恒星光を強力に除去することができます。しかしながら実際には、恒星からの光波面は乱されてしまい、恒星光は除去できずにスペックル状に残ってしまいます。恒星光波面を乱す要因として、地上観測では主に地球大気の揺らぎが挙げられます。大気揺らぎのないスペース観測においても、望遠鏡や観測機器に用いられる光学素子のわずかな凸凹により光波面が乱され、残留スペックル光の原因となってしまいます。これを解決するため、可変形鏡 (DM) や空間光変調器 (SLM) などの光学デバイスを用い、恒星光波面のわずかな乱れを高精度で補正する技術が必要となります（図 2）。

【１】続き

私たちの研究グループでは、偏光を利用したコロナグラフ SPLINE (Savart-Plate Lateral-shearing Interferometric Nuller for Exoplanets) の開発を進めています。SPLINE は、偏光分離プリズム（サバール板）を直交する偏光子で挟んだ、シンプルな構成の横シアリング干渉計です（図 3)。SPLINE に恒星光が入射すると、打ち消し合う光波干渉が生じて恒星光が除去されます。偏光の性質を利用することにより、打ち消し合う光波干渉は波長に依存せずに生じます。したがって、広い観測波長帯にわたる系外惑星観測が可能となります。これにより、系外惑星の像を直接捉えるだけでなく、分光観測などによる詳細な分析も期待できます。図 4 は、白色人工光源を恒星光モデルとして用いた、SPLINE の室内実証試験の結果です。SPLINE により、可視の広い波長帯にわたり、恒星モデル光を強力に除去することに成功しました（惑星探査領域において、10^{-6} ~10^{-7} レベルの除去性能)。しかしながら上述のように、恒星モデル光は完全に除去されずに、スペックル状の残留光が観察されています。

私たちは、この残留スペックル光をさらに除去するため、SPLINE に空間光変調器 (SLM) を導入した光波面補正法を提案しました。図 5 に、提案する光波補正法の計算機シミュレーションを紹介します。光波面補正により、長方形の惑星探査領域にわたり、残留スペックル光が強力に除去されていることが分かります。これまでの計算機シミュレーションにより、10^{-10} レベルの恒星光除去が実証されています。さらに、人工光源を用いた室内試験も行っており、現在では 10^{-8} レベルの性能が実証されています。今後は、「第二の地球」発見が期待される 10^{-10} レベルの恒星光除去を目指し、室内試験を通じた開発を継続したいと考えています。

（４） 本発表の注目点

「第二の地球」観測を実現するため、高コントラスト観測技術に必要とされる光波面補正の精度は λ/10,000 レベル（λ は観測波長）と言われています。これは、可視光での観測において数 10 ピコメートルに相当し、極めてチャレンジングな開発課題です。また、光波面を補正する技術だけでなく、光波の複素振幅情報を高い精度で測定するための波面センシング技術の開発も重要となります。極限性能を追求するこれらの観測技術は、天文分野にとどまらずさまざまな分野へ応用できるものと期待しています。

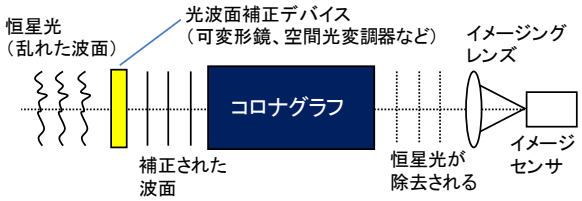


図2: 高コントラスト観測システムの概要。

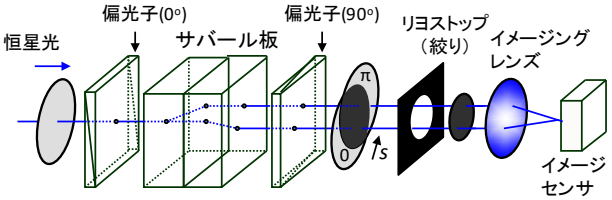


図3: 当研究室で開発中のコロナグラフSPLINEの概要。

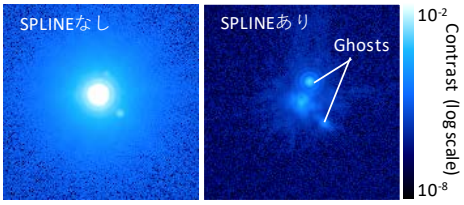


図4: コロナグラフSPLINEの室内実証試験。

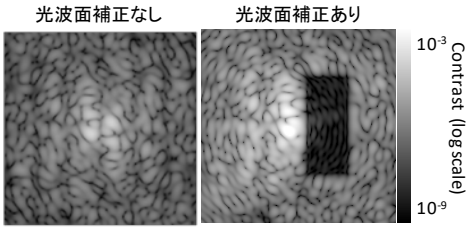


図5: SPLINEにSLMを導入した光波面補正の計算機シミュレーション。

研究発表データシート

【２】	氏名　鱒渕　友治 北海道大学大学院工学研究院 応用化学部門・准教授	

発表タイトル	窒素を用いた新しい光／電子機能性セラミックス
サブタイトル	新規無機材料開発のフロンティア～酸窒化物の創製～

（１） 研究者のアピールポイント

新しい機能性セラミックス材料の創製と機能性解明に関する研究を行っている。従来のセラミックス材料は主に金属酸化物だが、大気中に無尽蔵に存在する窒素に着目し、窒素を含む機能性酸窒化物やシアナミド系新規セラミックス材料を創出している。

（２） 本研究発表の概要

酸化物前駆体をアンモニア気流中で加熱することで、様々な酸窒化物や金属シアナミド化合物を合成した。それらは、構造中に共存する窒化物イオンと酸化物イオンの効果で、金属酸化物とは異なる機能性を有し、新規誘電体や超伝導体、無機顔料や蛍光体などの光・電子機能性セラミックスの新しい候補材料となりうる。本研究発表では、我々のグループで見出した酸窒化物系誘電体やシアナミド系蛍光体について最近の研究成果を発表する。

（３） 本研究発表の詳細

窒化物イオンは酸化物イオンよりも電気陰性度が小さく、金属陽イオンとは共有結合性の結合を形成する傾向がある。そのため、両者を同一化合物に含む金属酸窒化物においては、従来の金属酸化物とは異なり、電気陰性度や結合性の異なる両陰イオンが共存することで特異的な配位多面体や結晶構造が得れるため、従来とは根源的に異なる革新的な機能性が得られることが分かってきた。最近では、可視光応答性の水の完全分解触媒や、無機無害顔料などが様々な研究グループで得られ始めている。

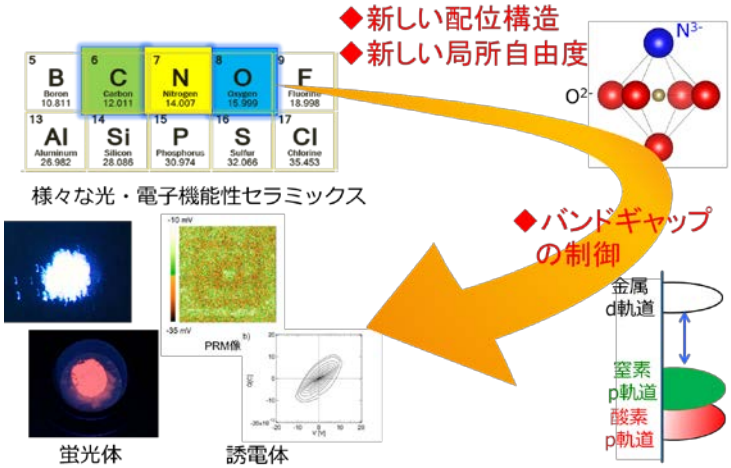


図１　窒素に着目した新規機能性セラミックス材料開発

【２】続き

当研究グループでは、金属酸化物や炭酸塩をアンモニアで窒化する手法で様々な金属酸窒化物やシアナミド化合物を創製し、その機能性と結晶構造を特に陰イオンの分布に着目して明らかにしてきた。例えば、ペロブスカイト型酸窒化物は、温度変化が小さい優れた誘電率をもつ化合物であるが、その誘電性が局所的な窒化物イオンと酸化物イオンのシス型規則配列に起因することを明らかにした。また、この酸窒化物誘電体に関して焼結手法を世界で初めて開発し、その強誘電的な電場応答を緻密なセラミックスを用いて初めて実証した。最近ではペロブスカイト型酸窒化物の単結晶作製手法の開発や、アンモニアを用いない酸窒化物の合成プロセスも開発している。

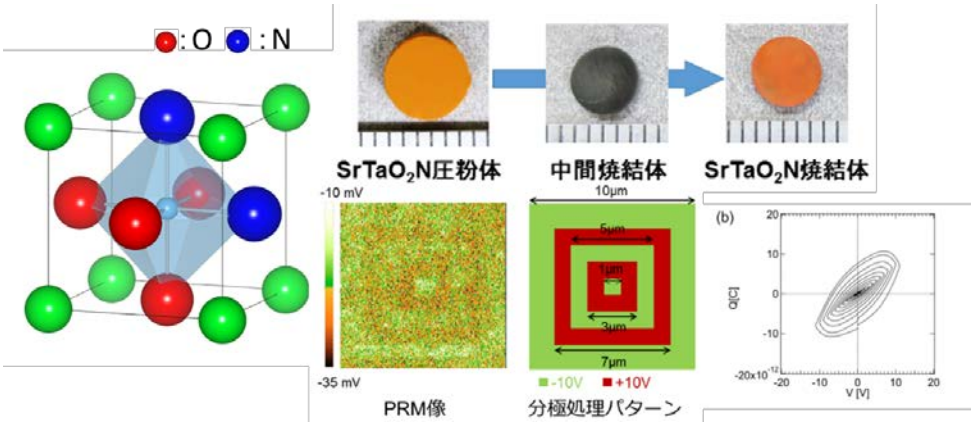


図２　ペロブスカイト型 $SrTaO_2N$ の結晶構造イメージと焼結体を用いた圧電性評価

炭酸バリウムをアンモニアで窒化する手法で、新しい結晶構造を持つバリウムシアナミド（$BaCN_2$）を得た。この化合物は発光中心イオンとして Eu を賦活すると、赤色発光する蛍光体として機能し、室温の発光量子収率は 42%であった。この蛍光体は温度を変化させると大きくその発光波長をシフトさせた。この化合物は Ba^{2+} と $[NCN]^{2-}$ の層状構造を有しており、温度によって大きくその格子定数が変化する、“柔らかい”結晶格子を形成することが発光波長変化の要因と考えられる。圧力印加でも格子定数を変えることが期待でき、感温・感圧力発光デバイスへの応用が期待できる。

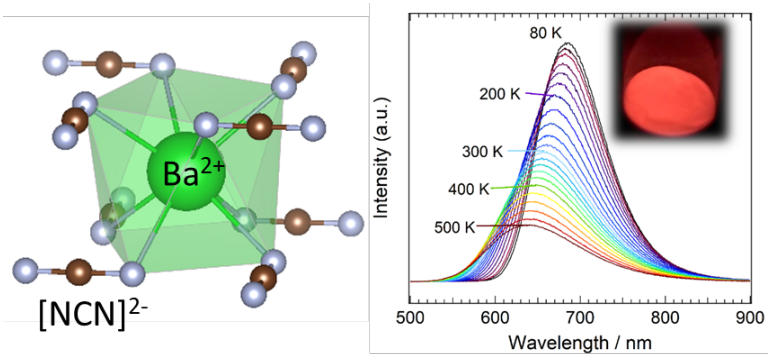


図３　$BaCN_2$:Eu^{2+}の結晶構造と発光スペクトル

（４） 本発表の注目点

従来の機能性セラミックス材料の多くは金属酸化物であり、複数の金属イオンを組み合わせることで様々な機能性が得られてきた。我々は、窒化物イオンに着目し新規酸窒化物やシアナミド系化合物を創製し、その機能性を明らかにしてきた。これら機能性酸窒化物セラミックスは、大気中に無尽蔵に存在する窒素を用いて機能性を得ることから、元素戦略や省資源社会の実現に向けて貢献できる可能性を秘めており、これからの機能性セラミックス材料開発のフロンティアとなる材料群である。

研究発表データシート

【３】	氏名　大野宗一 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	コンピュータによる金属材料の設計と製造
サブタイトル	材料組織の予測シミュレーション技術の開発

（１） 研究者のアピールポイント

金属材料の材料組織学に関する高度な計算技術を開発するとともに、実験、理論、計算、データ科学を併用し、優れた構造材料の製造を達成するための研究を行っています。

（２） 本発表研究の概要

構造材料や機能材料の製造プロセスでは、凝固、熱処理、塑性加工において様々な材料組織が形成し、その材料組織の特徴が材料の特性を決めています。凝固から固相変態までの一連の材料組織変化を予測するシミュレーション法の開発を行っています。

（３） 本研究発表の詳細

金属材料の内部では、顕微鏡レベル（マクロメートル～ナノメートル）のスケールで、多数の結晶相や結晶の欠陥が多様なパターンを形成し、それを材料組織と呼びます。その材料組織の特徴が、金属材料の性質を決めることになるため、材料組織を予測し制御することは大変重要な課題です。金属材料の製造プロセスでは、材料組織が多様に変化します。その材料組織の時間変化を予測する手法の開発と応用を行っています。特に、組織形成シミュレーション手法であるフェーズフィールド・モデルの開発に従事し、拡散相変態を世界最高精度で計算するモデルの開発に成功しています（図１参照）。また、実験的アプローチ、分子動力学法による原子論的アプローチ、さらにはデータ同化、機械学習といった情報科学のアプローチを組み合わせて、種々の合金系における材料組織制御に取り組んでいます。超大規模計算によって組織形成の新しい学理を開拓し、実プロセスの最適化につながる成果を得ています。

（４） 本発表の注目点

また、そのシミュレーション手法は、鋳塊の歩留まり向上、品質向上、材料特性を目的としたプロセス設計において活用された実績があり、現在においてもその応用範囲が拡張しています（図２参照）。既に多くの現象をターゲットにできますが、扱える現象の範囲も年々拡張されています。鉄鋼材料をはじめとする各種金属系構造材料の製造プロセス最適化に用いることが可能です。開発した一部のモデルは、SIP「革新的構造材料」の金属マテリアルズ・インテグレーション・システムに実装される予定です。

【３】続き

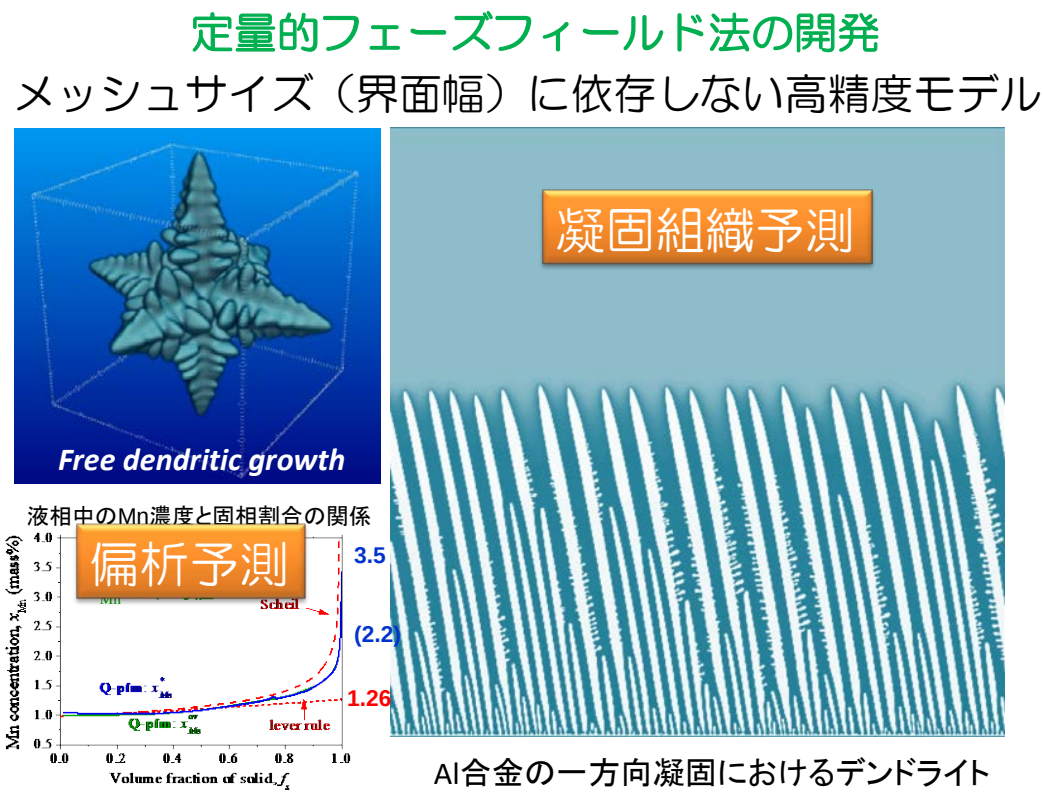


図１　世界最高精度で拡散相変態の組織を予測する手法を用いた計算例

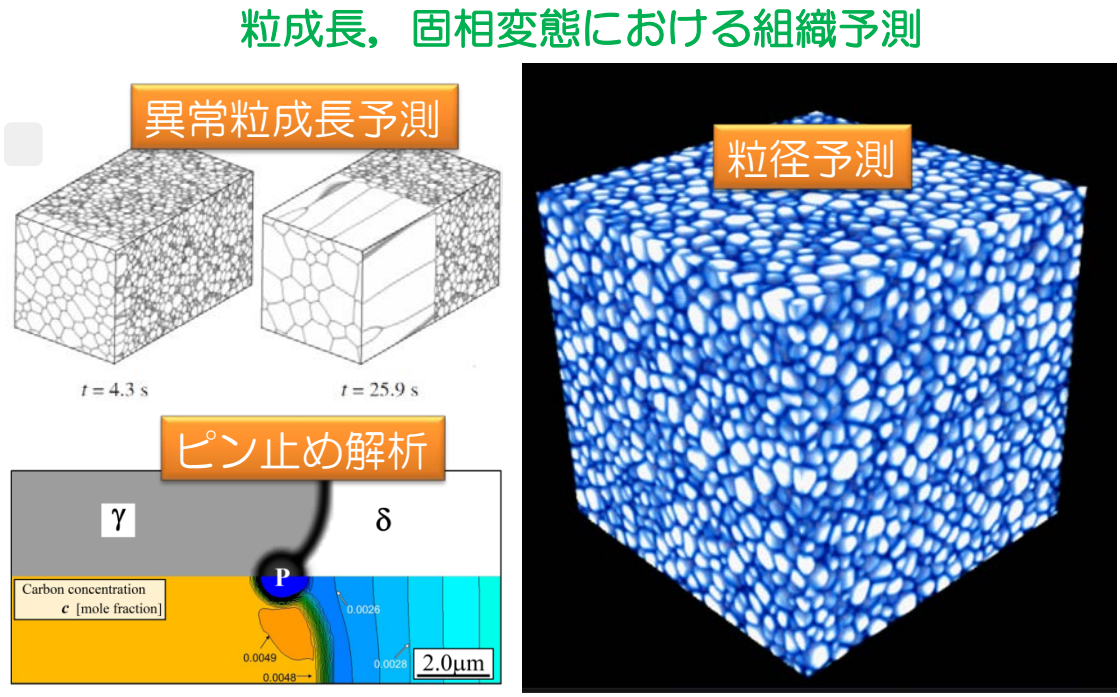


図２　材料製造プロセスにおける種々の相変態現象の計算例

研究発表データシート

【４】	氏名　脇田　督司 北海道大学大学院　工学研究院 機械宇宙工学部門・助教	

発表タイトル	パルスデトネーション燃焼器実現に向けたデトネーションイニシエータの開発
サブタイトル	デトネーション波の反射・再開始による起爆エネルギー評価法

（１） 研究者のアピールポイント

可燃性混合気中を超音速で伝播する燃焼現象であるデトネーション（爆轟）と呼ばれる現象の研究を行っている．デトネーションは水素爆発や粉塵爆発など，爆発時にみられる燃焼現象であるため，これまで安全工学的見地より研究が進められてきた．発表者は基礎研究を通じて，このデトネーション現象を理解しコントロールすることにより，次世代宇宙往還機用のエンジンであるパルスデトネーションエンジンへの応用研究を行っている．

（２） 本発表研究の概要

空気取り込み式パルスデトネーションエンジン（PDE）の実用化のために必要不可欠な技術である，デトネーションの起爆を実現するため，発表者は「反射体を利用したデトネーション起爆機構（イニシエータ）」を提案し開発してきた．本発表では反射体によるデトネーション波の反射・再開始による起爆エネルギー評価法を提案する．

（３） 本研究発表の詳細

発表者はこれまで，パルスデトネーションエンジン（PDE）の実用化に向けて，「反射体を利用したデトネーション起爆機構（イニシエータ）」の開発を行ってきた．デトネーションとは，可燃性混合気中を，先行衝撃波と反応面とが一体となって超音速で自走伝播する燃焼波である．デトネーションを利用した熱サイクルの理論熱効率は，既存のジェットエンジンなどに用いられるブレイトンサイクル（定圧燃焼サイクル）よりも高いことが理論的に示されている．そのため，近年デトネーションを利用した推進機関の研究が盛んに行われており，その例の一つが PDE である．図１に示すように，PDE は片側が閉じた燃焼器でデトネーションを間欠的に起爆して，その既燃混合気を排出することにより推力を得る推進機関である．その特長として，高熱効率であることの他，ジェットエンジンでは必要不可欠な圧縮機構を必要とせず構造が極めて単純であること，地上静止状態においても初期圧縮なしに推力を得ることができること，周波数制御により推力の調整が容易であることなどが挙げられ，地上から宇宙空間までの広範囲な飛行条件下を，単一かつ単純な燃焼器で運用できる革新的な次世代型宇宙往還機用のエンジンとして注目されている．

この PDE の大きな課題の一つとして「デトネーションの起爆」が挙げられる．デトネーションを起爆する方法は様々だが，レーザー点火などによって微小領域に短時間で大きなエネルギーを投入し直接起爆する方法が最も一般的である．しかし，空気を酸化剤とする場合（PDE を大気圏内では空気取り込み式とし

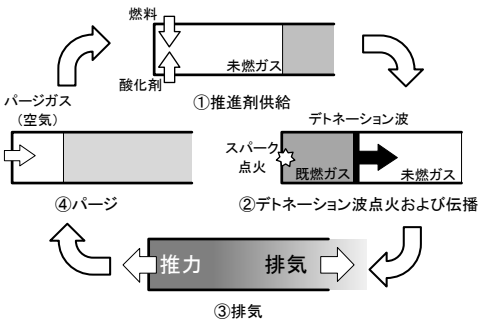


図１　パルスデトネーションエンジン（**PDE**）サイクル

【４】続き

て動作させることを想定した場合），その推進剤の直接起爆エネルギーは，最も起爆しやすい水素を燃料とした場合でも 10kJ オーダーである．よってこの方法では非常に高電圧で大型の起爆装置が必要となり宇宙往還機用途には適さない．一方，エンジン用スパークプラグなどの小さなエネルギー源を用いて点火し，デフラグレーションからデトネーションに加速遷移させる方法（DDT）がある．デフラグレーションは一般的な火炎の伝播形態であるが，管内などの制限された空間では火炎が加速し衝撃波が形成されデトネーションに遷移する．しかし PDE を DDT で起爆する場合，空気を酸化剤と混合気の DDT 距離および時間は極めて長いため，熱効率および作動周波数が低下するという問題がある．また DDT は管の内径が大きいほどその距離と時間が増大し，推力増大を目的として PDE を大口径にした場合，更にデトネーションの起爆が困難となる．

発表者はこの課題に対して，図 2 に示すような「反射体を利用したデトネーション起爆機構（イニシエータ）」を提案し開発してきた．本イニシエータでは，(1) プリデトネータとドライバーガスの利用によるデトネーションの起爆および，(2) 反射体によるデトネーションの反射を利用したデトネーションの伝播促進の 2 点に学術的独自性と創造性がある．(1) ではドライバーガスとして酸化剤に反応性の高い酸素を利用するとともに，直径が小さな管（プリデトネータ）を利用することによって極限まで DDT の距離および時間を減らし直接起爆に近い形でデトネーションを確実に起爆させる．次に起爆したデトネーション波面を消炎させることなく拡大し大口径燃焼器に導くが，この際，拡大させるデトネーション波の中心領域は波面の面積変化（曲率）が極めて大きいため，燃焼によるエネルギー供給が追い付かずデトネーションが消炎してしまう．そこで(2) によって図 2-①の部分でプリデトネータから入射する平面デトネーション波（図 2-A）を反射体に衝突させて強い爆発を起こし拡大する円筒デトネーション波（図 2-B）への伝播促進を行っている．

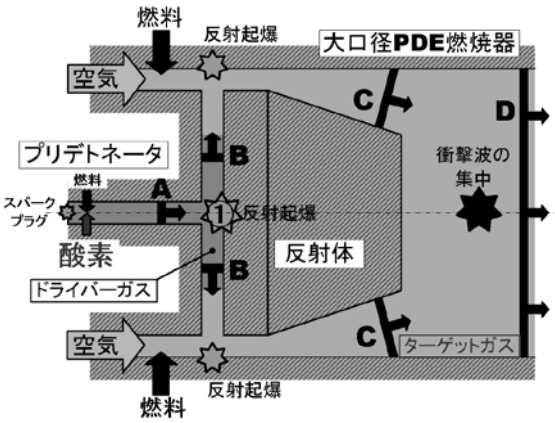


図 2　反射体を利用したデトネーション起爆機構（イニシエータ）

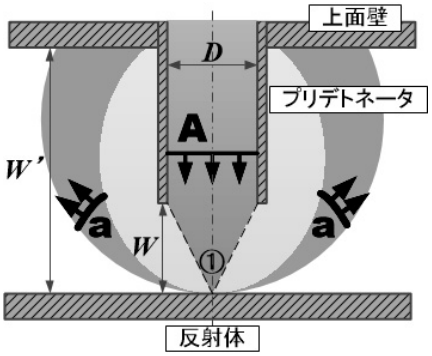


図 3　プリデトネータ突き出し影響

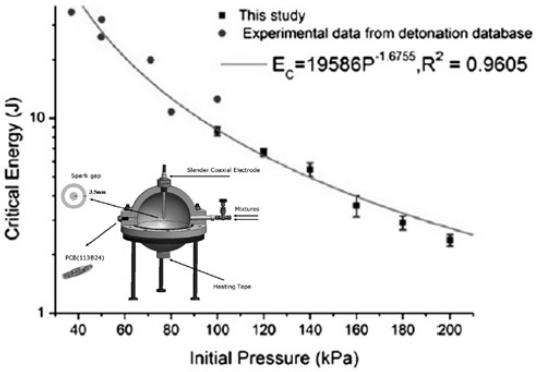


図4　水素-酸素量論混合気の点起爆による臨界エネルギー（Bo Zhangら 2013）

（４） 本発表の注目点

衝撃波の反射や集中によってデトネーションの起爆が促進されることは周知の事実であり，それらを利用した数多くの PDE 燃焼器形状（ラビリンス構造，おわん型の反射壁，多岐管からの爆縮構造）が提案されている．図 2 の①のような，デトネーション波の反射によるデトネーション波の再開始はシュリーレン法等の直接可視化によって現象自体の理解はされており，発表者も水素-酸素量論混合気を用いた実験によって伝播限界条件を明らかにしている．しかし，デトネーション波の反射・再開始による普遍的な伝播条件はいまだ解明されていない．そこで発表者は図 3 に示すようなデトネーションの反射実験と，図 4 に示すような点起爆によるデトネーションの臨界開始エネルギーを比較することにより，デトネーション波の反射・再開始による起爆エネルギー評価法を確立した．

研究発表データシート

【５】	江丸貴紀 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・准教授	

発表タイトル	ロボット技術・人工知能を活用した農林業支援ロボットの開発
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

ロボティクス・ダイナミクス研究室ではロボットの知能化を実現するために SLAM（Simultaneous Localization And Mapping）技術について研究を進めてきた．SLAM とは移動ロボットが未知環境を移動するために，周辺地図を作成と同時に，その地図内におけるロボットの位置・姿勢を推定するという技術であり，この 15 年ほど移動ロボットの研究分野において様々な研究がなされている．正確な地図を構築するためには正確な自己位置推定を必要とし，高精度な自己位置推定には正確な地図が必要であるという 2 つの独立した相互関係が SLAM 問題を困難にしているが，近年，屋内環境においては実用的な手法が提案されている．我々はこれらの手法をインフラ点検や複数ロボットの協調問題に適用すべく研究を行なってきたが，ここ数年は SLAM 技術を活用した農林業支援ロボットの開発に取り組んでいる．本発表では，この取り組みに関して 3 つのトピックスを紹介する．

（２） 本発表研究の概要

農林業に共通する問題点として就業人口の減少と高齢化が急速に進んでおり，さらには農林業にかかるコストの削減が急務になっている．これらの問題を解決するために農林業のスマート化が国策として進められており，例えば H26 年 6 月 3 日の閣議決定として「農業情報創成・流通戦略」が発表されるなどしている．我々は RT（ロボット技術）・IT（情報技術）・AI（人工知能）を活用することによって農林業を機械化できないかと考え，なかでも機械化が進んでいない除草作業に着目している．本発表では，以下の３つのトピックスについて紹介する：①除草作業の機械化に向けた新しい画像処理技術の開発，②斜面のある環境に対応した作業機械の経路生成技術の開発，③林業における下刈の機械化を実現する SLAM 技術．

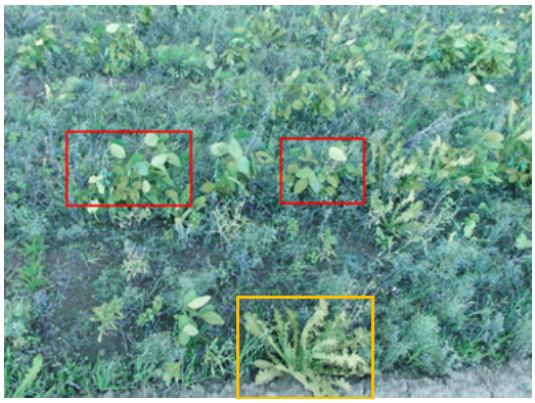
（３） 本研究発表の詳細

世界的に見ても除草ロボットの開発は急務となっており，たとえばルンバ型の除草ロボット「Tertill」が 2018 年 10 月に発売予定，ドイツのボッシュが車載センサの技術を用いた「BoniRob」を開発するなど様々な研究開発事例がある．我々は高度な認識精度を持ち，日本の圃場に投入可能な中小型機を低コストで実現することを目指している．農林業のフィールドで SLAM を行なうことによって，協調作業可能な柔軟性を持ち多機能なロボット群の実現を可能にすべく，上記の概要として挙げた 3 つの課題に分割して研究開発に取り組んでいる．まず農林業環境において SLAM を行なうためには環境中から特徴点を抽出する必要があり，作物そのものを認識して特徴点として認識できれば効率的な除草作業，さらには圃場の精緻な管理が可能になる．そこでこの認識を課題①として設定した．さらに実際の除草ロボットが矩形とは限らない圃場を効率的に作業するために課題②を設定し，これらの知見を林業に応用していくために課題③を設定した．

【５】続き

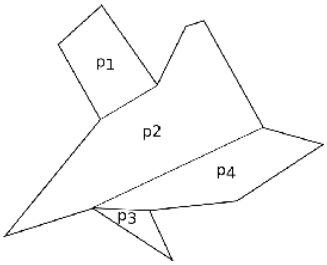
（４） 本発表の注目点

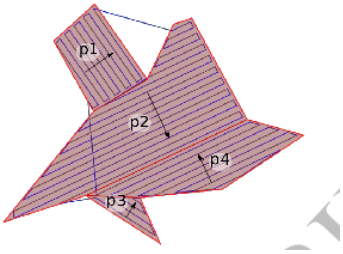
トピックス１） 除草作業の機械化に向けた新しい画像処理技術の開発



除草作業を実現するためには雑草と作物を認識することがまず必要となる．画像処理による作物と雑草の識別を実現するため，人工知能（Artificial Intelligence, AI）の分野で研究が進んでいる深層学習（ディープラーニング）を利用した識別を試みた．植物全体の特徴を学習するのではなく，葉の特徴に着目した学習を行うことで図のような環境において作物（大豆）と雑草（オニノゲシ）を80%の精度で識別することができた．現在は実際の圃場においてデータの取得を進めており，熟練作業者の知見を学習に生かすべく作業者の視線・姿勢の情報をセンサによって獲得し，それらの情報を学習に反映させる新たな学習法を試みている．

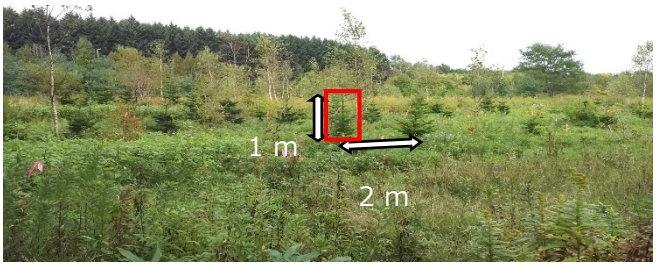
トピックス２） 斜面のある環境に対応した作業機械の経路生成技術の開発





トラクターの自動運転などを実現するために，効率のよい経路を生成するための手法が多く提案されている．しかしながらその多くは右図のように平面における経路生成問題（圃場の地図が与えられたときに，どのような経路でトラクターを動かせば効率的にすべての領域を網羅できるかという問題）を取り扱っており，斜面や起伏のある圃場に対して適用すると誤差が発生する．そこで，トラクターの切り返し回数，作業時間，圃場の有効利用率などを最適化する評価関数を設定し，最適な経路を生成する手法を提案する．応用するフィールドによって切り返しに必要な面積を最小化する，トラクターの運動学を考慮して経路生成する，作業領域がトラクターに牽引される部分なのかブームによって作業される領域なのかによって生成される経路を変化させるなど様々なニーズがあると考えられるため，これらに対応した最適な経路を生成するための技術が必要であると考えている．また，斜度や摩擦の条件が大きく変化する環境において生成された経路に沿ってトラクターや除草機械を精密に制御することも重要な研究課題である．

トピックス３） 林業における下刈の機械化を実現する SLAM 技術



林業の作業は地拵え・植栽・下刈・伐倒・集材など多岐に渡り，一部の作業では高度な機械化が実現している．しかしながら育林初期段階における除草作業の機械化は進んでいない．我々は図のような環境でSLAM 技術を用いることにより除草作業を実現するための手法を提案する．これまでHOG 検出器により対象樹木を検出し，さらに 3 次元センサを用いることにより樹木の 3 次元点群を獲得し，パーティクルフィルタを併用することで樹木の追跡精度を高めている．また，GPS・IMU・EKF による自己位置推定を行なうことにより SLAM の実現を目指している．これらの SLAM 技術を「トピックス１」の画像処理技術と組み合わせることにより，除草作業ロボットの実現を目指している．

研究発表データシート

【６】	田部　豊 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・准教授	

発表タイトル	北海道における CO_2排出量大幅削減のための将来エネルギーシステム解析
サブタイトル	持続可能なエネルギーシステムを北海道から

（１） 研究者のアピールポイント

エネルギー問題，地球温暖化問題の解決に寄与することを大目標とし，専門である機械工学・熱工学・反応を伴う熱物質移動からのアプローチと併せ，本研究のような社会エネルギーシステム解析を行っております．エネルギー自給率 100%以上をまずは北海道で実現し，続いて日本，世界へと発信するために，ぜひ，北海道の皆様で一丸となって大目標を達成して行きましょう．

（２） 本発表研究の概要

図１は，北海道において 2015 年から 2050 年までの CO_2排出量を削減するためのコストを評価したシナリオ解析の一例です．図より，本シナリオでは例えば，期間全体の CO_2排出量の削減率（CO_2排出量に制約を与えないベースケースに対する削減率で，積算削減率と呼ぶ）を約 20%とするために，3%程度のコスト増が必要であることがわかります．ここで，さらに CO_2を削減するためにはコスト増加率が急上昇すること，またグラフ右端の CO_2削減の限界値が積算削減率 38%であることも重要な知見です．これらのコスト増加率の急上昇，CO_2削減率の限界値の原因を明らかにし，効率的な CO_2排出量大幅削減の指針を提示することを目的としております．

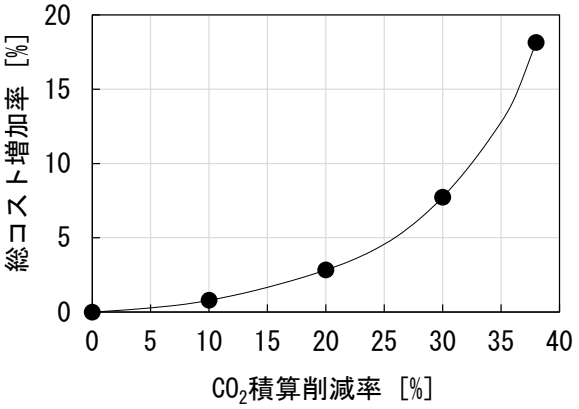


図１　CO_2積算削減率に対するコスト増加割合

（３） 本研究発表の詳細

図１の解析に用いたエネルギーシステム解析モデル MARKAL は，特定の地域に供給される全ての１次エネルギーや利用可能な技術のコストおよび性能のほか，部門ごとの最終需要を入力し，需要を満たしながら特定の期間に亘る総コストが最小となるエネルギーシステム構成を線形計画モデルにより求める解析プログラムです．したがって，得られる結果は入力データなどのシナリオに大きく依存し，北海道の皆様で協力して有益なシナリオを構築していくことが重要となってきます．

上述した結果において，2050 年における CO_2削減割合（2015 年比）は，積算削減率が 38%の限界の場合でも北海道全体として 64%程度に留まっており，日本が目標として掲げている 80%削減（2013 年比）に達していません．これは主に，運輸部門，産業部門での CO_2排出量大幅削減の見通しが不透明なことに起因しています．例えば，運輸部門における電気自動車や燃料電池自動車の大幅普及のための社会システムの構築，製鉄業からの革新的 CO_2大幅削減技術の開発などは，2050 年に向けて急務の課題であることが定量的に示されています．

【６】続き

図２は，電力系統内の発電種別ごとの年間発電量を，CO_2積算削減率 0%のベースケースと 38%について示したものです（原子力発電は再稼働しないシナリオ）．ここで，赤破線は有効に消費された電力量で，それを上回った発電は送電系統等におけるロスのほか，再生可能エネルギーにより過剰に発電した電力に相当しています．積算削減率 38%の場合では，実際に利用された電力量線を越えて発電量が増加し，風力ならびに太陽光発電の大量導入によって余剰となる電力が顕著に増大していることがわかります．これは，図１におけるコスト増加率急上昇の大きな要因となっており，解析ではモデル化されていない余剰電力に対する大容量蓄電池や水素変換して利用する等のシステムの重要性が示されています．

再生可能エネルギーの変動対策技術の有効性を評価するために，筆者らは北海道を基幹送電線により電力融通が可能な 4 地域（道央，道南，道北，道東）に分割，1 時間ごとの発電量および需要量を用いて，それぞれの地域において最適な（コスト最小となる）発電設備，対策技術設備量を求める解析も別途行っています．図３は，2050 年に自然変動電源である風力および太陽光発電によって年間に供給される電力の 80%を賄う場合を想定した際の１月における２つの地域の発電量変化を示したものです．系統電力システムのみを対象とし，大容量バッテリーの導入も考慮しています．本解析から，各種各地域の自然変動電源に対して，相性のよい変動対策技術の評価を行っています．

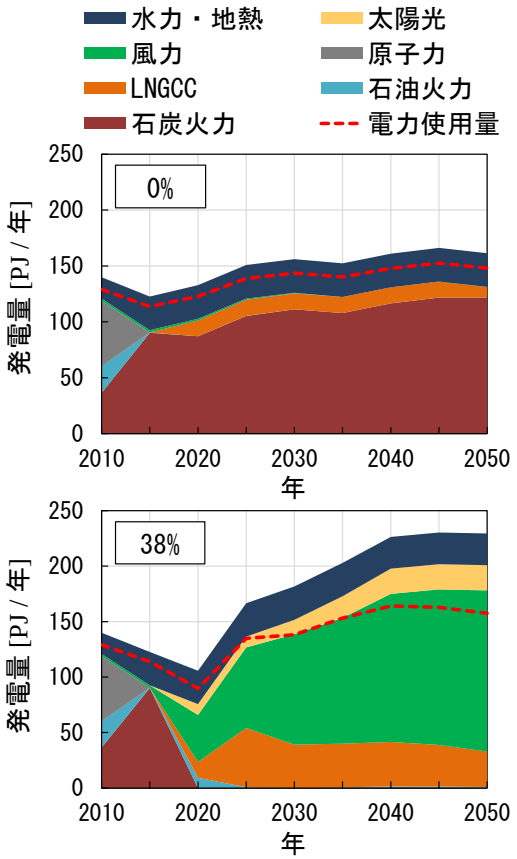
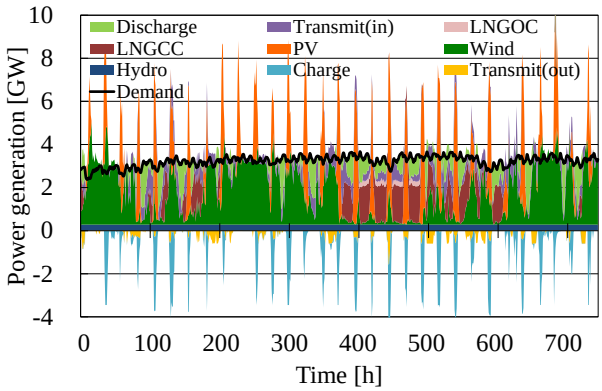
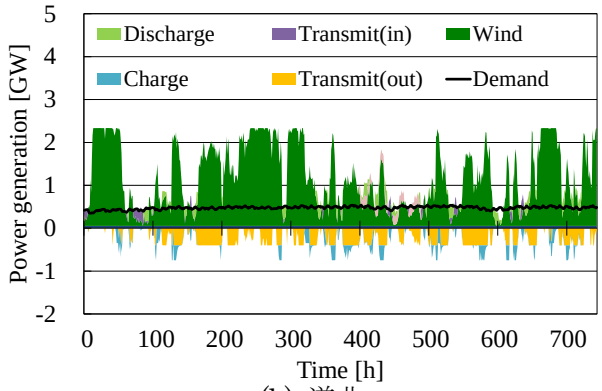


図２　系統電力量の構成変化



(a) 道央



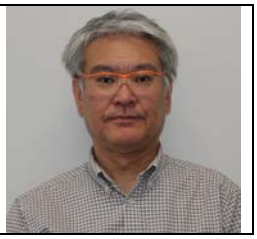
(b) 道北

図３　自然変動電源大量導入時の発電パターン（1 月）

（４）本発表の注目点

機械工学的な観点から数多くの要素技術のバランスをとり，持続可能なエネルギーシステムを設計・創造していく第一歩と本研究を位置付けております．より多くの皆様と一緒に，2050 年を他人事としての未来ではなく自分のこととしてとらえ，北海道で一丸となった協力体制を構築していくことにも貢献していきたいと考えております．

研究発表データシート

【７】	氏名　大沼　正人 北海道大学大学院工学研究院 量子理工学部門・教授	

発表タイトル	ナノメートルの構造が決める様々な特性
サブタイトル	構造材料から食品からまで

（１） 研究者のアピールポイント

「ナノテク」という言葉もかなり普及し、みなさまにも「ものすごく小さいものを取り扱う」というイメージをお持ちの方は多いのではないでしょうか？1 nm（ナノメートル）は１mm の百万分の１の長さです。ニュースで見かける「ナノテク」ではこのサイズの「粒子」を持ち運んだり、合成したりという話題が多いように思います。一方で、人間が作り出す巨大な構造物（鉄鋼材料やセメントなど）や身近な食品の内部にもこのナノサイズの構造が存在しています。目に見える表面の粒子とは異なり、光が通らない物質内部の構造については、薄くスライスした状態で電子顕微鏡により研究されていますが、破壊的な手法であるため、同じ場所のナノ構造変化を継続的に観察することは困難です。X 線や中性子は物質内部を非破壊的に観測できますが、多くの研究はナノメートルの一桁下に相当する原子配列に対して行われており、ナノメートル、特に 1~10nm の「シングルナノ」の情報は意外なほど研究例が少ないのです。我々はこのサイズ領域を得意とする X 線や中性子の「小角散乱法」を用いて、さまざまな物質のナノ構造を調べ、材料特性改善からチーズの作成プロセスへの影響など、「ナノ構造」と「特性」との関連性を検討する研究を進めています。ほとんどの X 線・中性子小角散乱研究は大型施設(日本では Spring-8 や J-PARC などがあります）で行われておりますが、北海道大学にはどちらも工学部構内にある実験施設を使って測定が可能であり、世界的にも類を見ない研究環境が整っております。

（２） 本発表研究の概要

鉄鋼材料を中心とした構造材料のナノ構造とその特性との関係、また、チーズを例に食品内部に存在するナノ構造などについて、小角散乱による解析法の原理とそのメリットを紹介します。

（３） 本研究発表の詳細

X 線回折法は広く普及した構造解析法です。この X 線回折におけるピーク位置が原子面間隔に相当し、ピーク幅は結晶粒径や内部歪みに対応するのはご存知の方も多いと思います。小角散乱も基本的には回折現象と全く同じ原理により生じたピーク幅の解析を行い、粒子サイズを解析する手法です。解析するピークは図１に示したように角度ゼロにピーク中心のある散乱ピークです。角度ゼロでは物質と相互作用せずにそのまま透過した X 線や中性子と散乱ピークは見分けることができませんが、そこから少しずれた位置を観測すると散乱ピークはその原因となる散乱体のサイズに依存して広がるため、見分けることができるようになります。これを図２に示したような配置で測定します。試料を透過させて測定するため、透過した体積全体の平均情報を得ることができます。X 線では測定可能な厚さは鉄鋼材料に対しては約 0.02mm、アルミ合金では 0.5mm、チーズでは 1mm 程度です。ここにビームサイズ直径 0.5mm から 1mm 程度のビームを透過させるため、ビームの透過する円柱状の体積平均情報としてナノ構造を評価できます。また、透過力の強いモリブデン線源を使用しているため、ガラス２枚で構成するセル内に封入し、液体の測定も可能です。この特徴を利用することで牛乳からチーズまで同じ条件で測定可能できます。

【７】続き

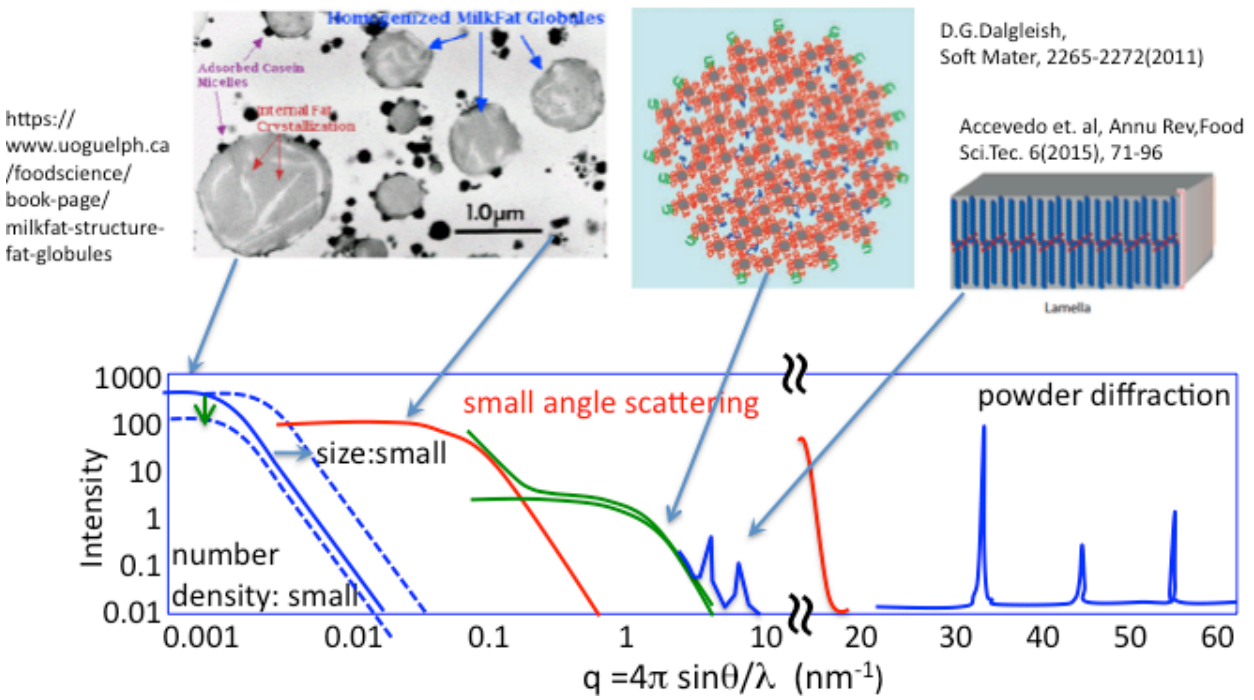


図１　小角散乱測定の概略図。大きな構造は半価幅に相当する肩状の部分がより小角側に出現し、構造が小さくなるほど、その肩の出現位置は q（散乱角度の関数）の大きい方に出現します。

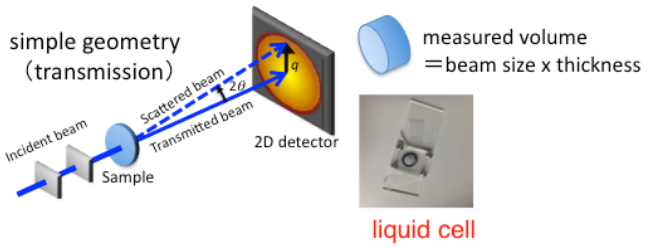


図２　小角散乱測定の測定配置。液体封入セルには牛乳からチーズも入れられます。

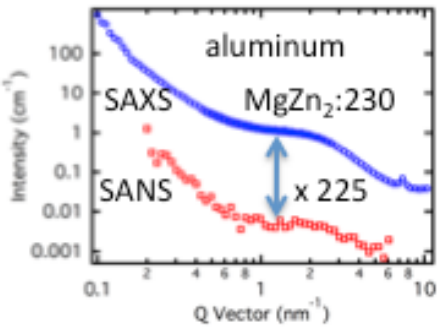


図３　中性子小角散乱(SANS)と X 線小角散乱(SAXS)強度を比較することで、アルミ合金中の析出物相を特定しました。

観測対象はある物質（チーズや鉄鋼材料など）内に存在する「不均質性」、例えば鉄鋼材料中の析出物や穴（ボイド）などです。チーズでは脂肪球やたんぱく質、さらにそれを結びつけるリン酸カルシウムなどが相当します。中性子の透過能は金属系材料にはさらに透過率が大きく、試料厚さ 2mm，ビーム系 10mm 程度の大体積の平均構造としてナノ構造評価が可能です。中性子と X 線では原子ごとの散乱の仕方（散乱長といいます）が異なるため、同じ物質を中性子と X 線の両方を使って観測すると両者の散乱強度の違いから、不均質性の正体（穴なのか、別の相なのか、そこにはどんな原子が含まれるのかなど）が検討可能であり、この技術を使った研究を北大では進めています。

（４） 本発表の注目点

北大工学部は世界でも唯一の中性子散乱施設を有する工学部です。X 線利用にも重点をおいており、両者をバランス良く、適材適所で使用できる点は大規模施設には見られない特徴です。一方で、ビームの上手な利用には測定対象を十分に理解していることが重要です。このため、我々は産業界も含めた外部連携研究に重点を置いて研究を進めております。

研究発表データシート

【８】	ヘンリー　マイケル 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	持続可能な世界を実現するための社会インフラの貢献を定量化する新しい分析方法の開発
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

研究者の専門はサステナブル社会インフラで、建設材料や構造物の持続可性評価やそれらの世界への貢献の定量化に関する研究を学際的な観点から行なっています。

（２） 本発表研究の概要

社会インフラ（ダム、橋梁、道路など）の建設で社会経済開発が進展するが、その建設による環境への影響は建設産業ではほとんど考慮されていません。持続可能な世界を実現するため、三側面である「社会・経済・環境」のバランスを考えながら社会インフラを計画、設計、施工すべきであるが、社会インフラにおけるサステナビリティ評価方法は確立されていないため、合理的な意思決定を行うことができないと言えます。本発表では社会インフラの基礎となるコンクリートに着目し､コンクリートのサステナビリティ評価における三つの話題に関して紹介します:（１）定量的な評価指標枠組みの構築、（２）国際連合が開発した 「持続可能な開発目標」との関連、及び（３）サステナブルな意思決定に対する不確定性解析。

（３） 本研究発表の詳細

コンクリートのサステナビリティを評価する指標枠組みを構築するため、文献調査を行い現在まで報告した定量的な指標を収集し整理しました。結果としては 65 個の指標を発見し、環境側面・経済側面・社会側面との連携を明確にしました。指標同士の関連性を分析した結果、原動力・状態・影響を、それぞれ示す指標に分離し因果関係を明らかにすることができました。

社会インフラの建設におけるコンクリートの利用によってどのように持続可能な世界の実現に貢献できるかということを明確にするため、コンクリートのサステナビリティを評価する指標と「持続可能な開発目標」のターゲット項目との相似性を分析しました。コンクリートは主に目標 9（産業と技術革新の基盤をつくろう)、目標 11（住み続けられるまちづくりを)、および目標 12（つくる責任つかう責任）との関連性が高いことがわかりました。

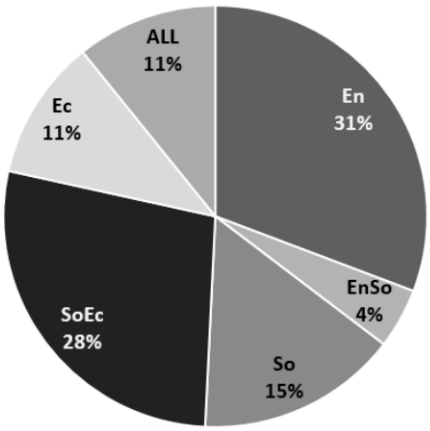
最後に、 よりサステナブルなコンクリートを選択するため、意思決定の不確定の原因になるものを調べ、不確定性解析で原因の影響度を明確にしました。その原因は評価指標選択方法、指標の正規化、指標重要度を表すための重み付け、および指標に対する集成方法であり、その原因の影響は場合によって変わることがわかりました。結果としては、コンクリートのサステナビリティ評価は決定論的ではなく確率的だと考えられます。

【８】続き

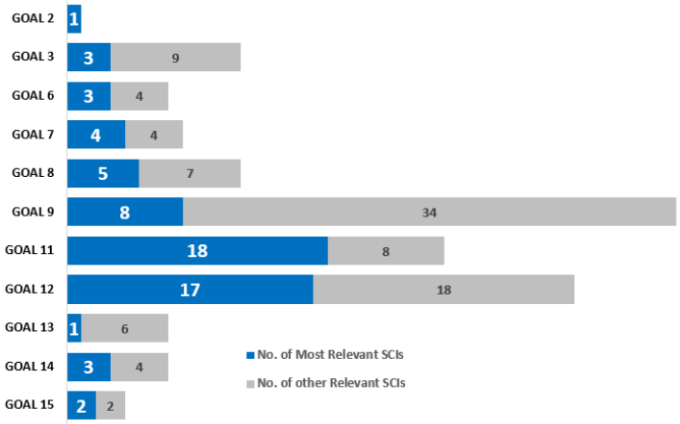
（４） 本発表の注目点

・コンクリートのサステナビリティ評価の指標枠組み：指標の詳細や特徴、他の指標との関連などを紹介します。

・コンクリートと「持続可能な開発目標」の関連性：指標枠組みに基づいて持続可能な世界の実現への貢献を紹介します。

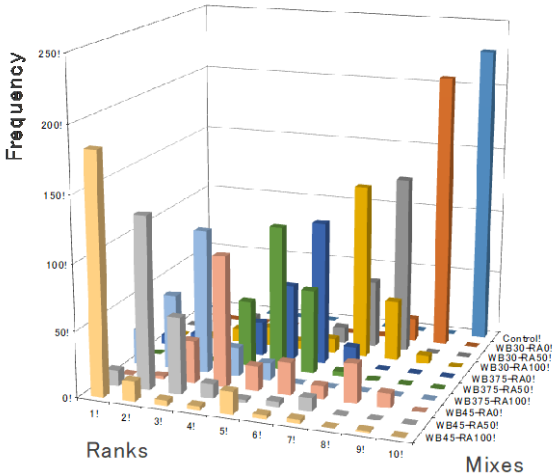


三側面に関連する指標の割合

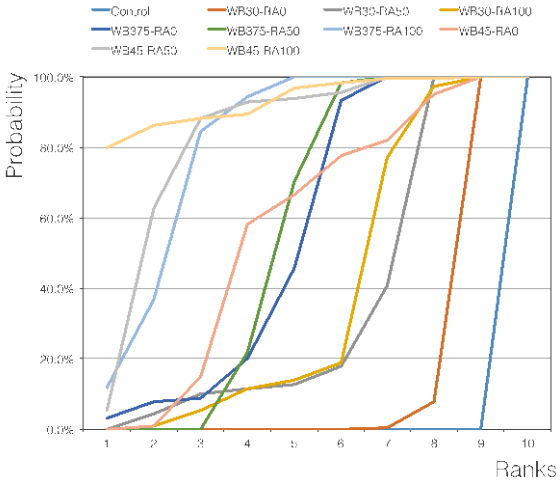


「持続可能な開発目標」に関連性がある指標の度数分布

・コンクリートのサステナビリティ評価における不確定性：評価する際の意思決定に対して不確定性の原因と、それらがサステナビリティ評価に及ぶ影響を紹介します。

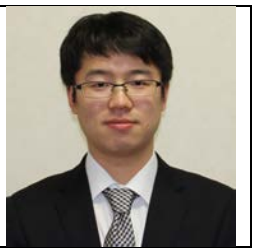


不確定性分析結果によるコンクリートのランキング分布



ランキング分布から計算したそれぞれのコンクリートの超過確率

研究発表データシート

【９】	氏名：　鄭　好 北海道大学大学院　工学研究院 北方圏環境政策工学部門・助教	

発表タイトル	画像処理によるアイスレンズの可視化
サブタイトル	土木工学に幅広く応用されている凍結工法時のアイスレンズの定量的かつ即時的評価

（１） 研究者のアピールポイント

凍土研究について、この研究者は、数値シミュレーションと実験研究、両方もできる。今までは、凍結した土壌の凍上によって生じる変形と応力変化を明確に予測するために、実験方法と数値シミュレーション方法を採用してきた。室内三軸凍上試験の結果を用いて、熱流方向の凍上量と熱流直交方向の応力を詳細に検討する。目標は三次元的な膨張予測に対する検討を行っていきたい。数値シミュレーションには有限要素法と混合ハイブリッド有限要素法を用いて、凍結に伴って生じる熱と水の移動を再現したい。その上で、室内三軸凍上試験からの三次元的な膨張予測式を数値シミュレーションに加えて、三次元凍結現象を解明することを目的とする。

（２） 本発表研究の概要

凍結工法は、特に都市部の地下構造物の建設現場にて、広く適用されている。しかし凍結時には、水分移動を伴う複雑なアイスレンズ生成現象によって、水分移動と凍結応力を引き起こし、周辺の構造物の安全を脅かす。今までのアイスレンズに関する研究は、観察と定性的評価レベルに留まり、十分に研究されていない。よって本研究は、定量かつ即時的評価のために、画像処理法を提案する。

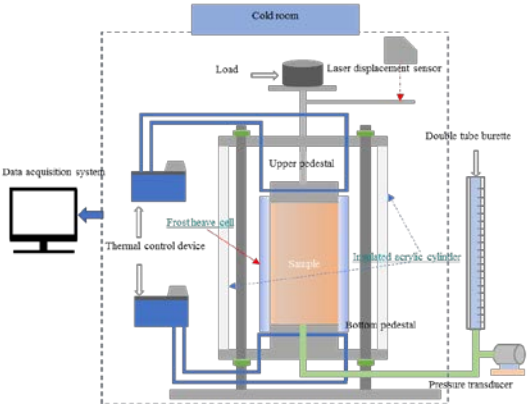
本研究は，凍結実験と画像処理によるアイスレンズの定量かつ即時的評価に着目して、凍結時の水分の移動と分布の科学的解明を目指すものである。特に，アイスレンズの形成と成長、凍結後の含水量及び分布に関わる影響因子のモデルに基づく高精度の予測方法の提案を試みる。これらの成果が、凍結工法や地下構造物の維持における安全監視など、幅広い工学および環境問題に適用できる。

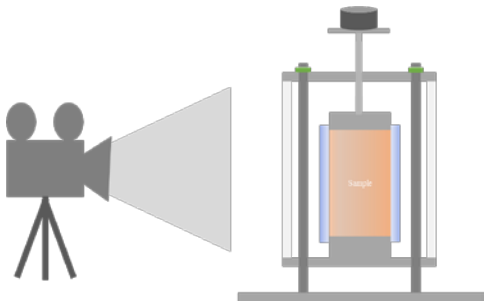
（３） 本研究発表の詳細

本発表は以下の５つ部分で構成されています：

1. 研究背景と目的:画像処理が,アイスレンズの形成メカニズムに対して,有用であるかを評価・検討する

2. 凍結実験装置：室内凍結実験装置は以下のグラフで示される





3．画像処理方法

① 画像のトリミング
② 背景の平滑化
③ ピクセルの輝度値を元に閾値の設定
④ アイスレンズ面積の測定

4．結果と結論

複雑な形状のアイスレンズであっても、この画像処理方法によりアイスレンズの面積を正確に測定できることが実証されている

アイスレンズの分布は含水率を反映することができ、リアルタイムと非破壊的に水の移動を評価するのに役立つ

5．今後の展望

今後は，多方向からの観察と供試体断面の構造把握による 3 次元的な評価を行い，アイスレンズを含む凍土の立体構造モデルを構築することで、3 次元的なアイスレンズの形状把握を行う

（4） 本発表の注目点

本研究は画像処理方法を採用して、アイスレンズの形成と成長を定量かつ即時的に分析することができる。既存の方法と比較して、実験後に試料をスライスし、目視によって定性的観察できる点が有意な改善である。さらに、アイスレンズの形成過程をミクロに観察して、ピクセルレベルで高精度に定量的に分析することができる。これは他に類似研究のない世界でも始めての独創的な試みである。

研究発表データシート

【１０】	渡部　典大 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	積雪寒冷都市の都市デザイン研究
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

■都市住宅学会学生論文コンテスト博士論文部門優秀賞(2018)
：積雪寒冷都市における北方型スマート街区による都市デザイン手法の構築」

■Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Best Paper Award (2016)
： New City Block Design Approaches Incorporating Environmental Assessment for Downtown Districts in Cities with Severe Winter Climates, Norihiro Watanabe, Tsuyoshi Setoguchi, Koya Sato, Takuya Tsutsumi

■NEW IDEA OF NEW CENTURY, Grand Prix (2017)
： URBAN BLOCK DESIGN APPROACH INCORPORATING ENVIRONMENTAL ASSESSMENT FOR WINTER CITY

（２） 本発表研究の概要

都市デザインにおいて、地域の気候に配慮した快適な都市環境の創出は、重要な課題である。特に積雪寒冷都市では、冬の寒さや積雪のため温暖地域とは異なるデザインアプローチが必要である。また近年、エネルギー消費を抑えたサスティナブルな都市づくりが目指されており、都市エネルギーの視点を組み込んだ都市空間像が求められる。本研究では、積雪寒冷都市において風雪環境を改善することにより除雪エネルギーを最小化し、屋内建築エネルギーと一体化した街区空間像である「北方型スマート街区」を開発している。

（３） 本研究発表の詳細

■風雪シミュレーションを用いた北方型スマート街区の開発（図１～３）

高容積高層街区における北方型スマート街区の空間形態を明らかにした。開発方針デザインと

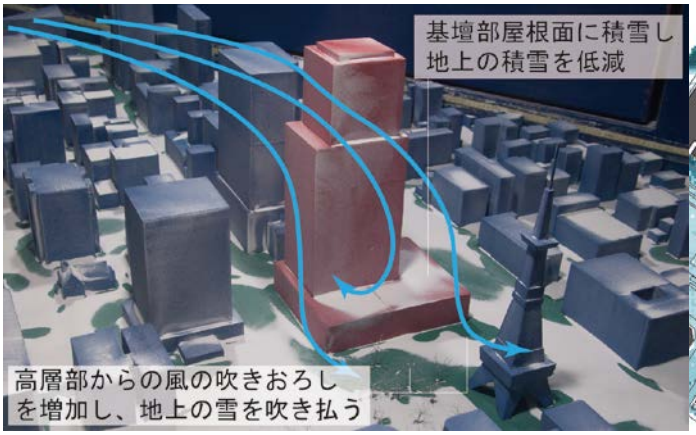


図１　粉体風洞実験による積雪量の把握

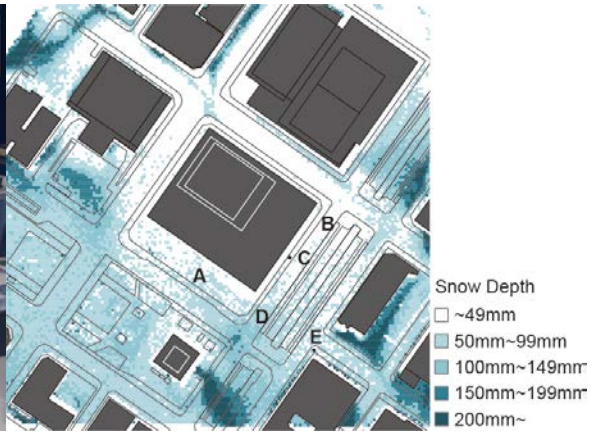


図２　風雪シミュレーション結果

【１０】続き

して、高層共同型、超高層一体型を計画し、環境エネルギー評価を用いて超高層一体型の優位性を示した。また除雪エネルギーが、街区全体の消費エネルギーの約１割に相当し、街区の省エネルギー化において重要であることを明示した。形態ボリュームデザインの検討では、超高層一体型を基本に４つのモデルを計画し、環境エネルギー評価を用いて、大きな基壇部と塔状の高層部で構成し、中層部のない街区空間形態が優位であることを明らかにした。

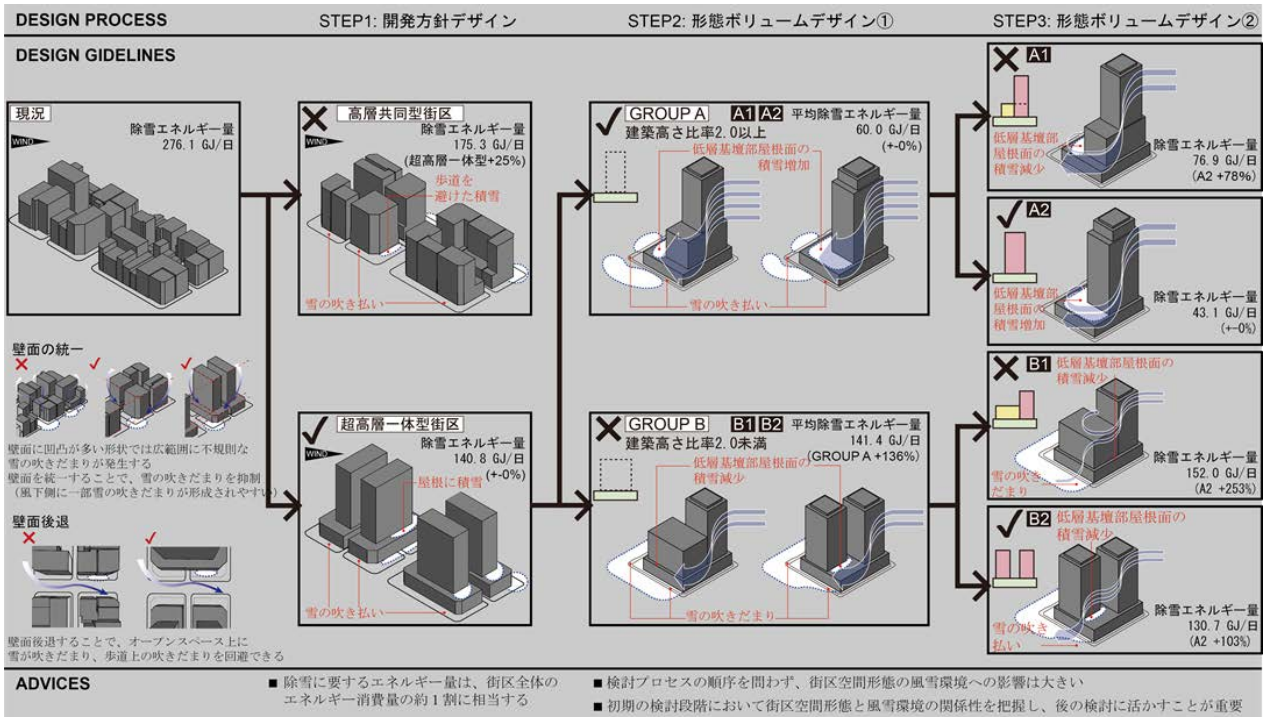


図３　北方型スマート街区都心再開発モデルのデザインプロセスとデザインガイドライン

■積雪寒冷都市の都心オープンスペースにおける微気候と利用行動（図４）

高容積高層街区におけるオープンスペースを対象に、屋外環境の変化と利用行動の関係を屋外実態調査から分析した。寒冷移行期では日射が着座組数に、風速が着座時間に強く影響すること、積雪寒冷期では積雪が歩行の妨げとなる一方で、雪遊びなど冬季特有の行動を促すことを示し、北方型スマート街区のオープンスペースデザインを提案した。

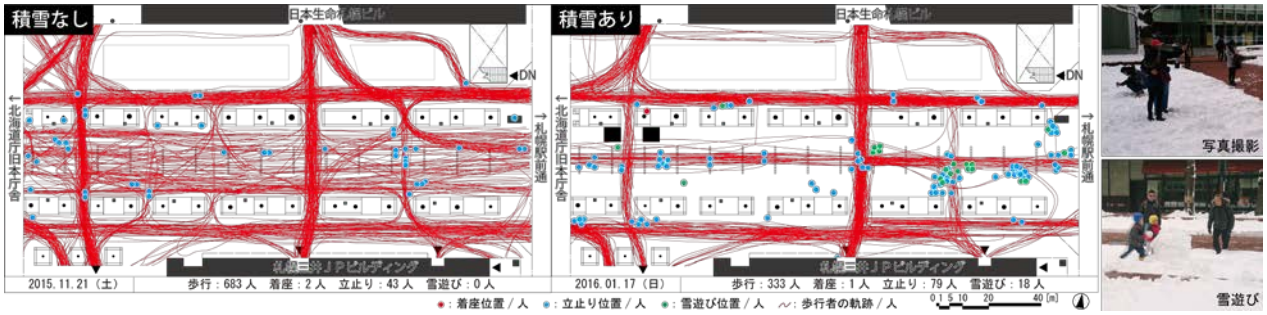


図４　冬季の都心オープンスペースにおける利用行動

（４）　本発表の注目点

本研究は、都市デザインと都市環境評価を融合した新たな都市デザイン手法を明らかにしてる点に特徴がある。本研究で提示する「北方型スマート街区による都市デザイン手法」は、他の積雪寒冷都市のスマートシティの創造に向けたデザイン理念や手法の構築に有用な知見を与えるものである。

研究発表データシート

【１１】	千歩　修 北海道大学大学院　工学研究院 空間性能システム部門・教授	

発表タイトル	外壁材料の耐凍害性評価方法
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

建築材料・施工の研究者である。これまで、コンクリート等の建築材料の凍害に関係する研究を数多く行っている（詳細略）。今回の発表に関連する委員会活動として、日本建築学会 JASS5.26 節 凍結融解作用を受けるコンクリートの執筆（現改定委員会委員）、JIS A 1435 建築用外壁材料の耐凍害性試験方法（凍結融解法）（作成時委員・改定時委員）等がある。

（２） 本発表研究の概要

外壁材料の凍害は積雪寒冷地における大きな問題である。材料の耐凍害性評価方法がないものが多く、評価方法があるものでも評価方法と実環境における耐凍害性の関係は明らかではない。ここでは、耐凍害性評価方法の一つである限界飽水度法に凍結融解時の含水率上昇作用を組み合わせた外壁材料の耐凍害性評価方法について紹介する。

（３） 本研究発表の詳細

コンクリートの耐凍害性評価方法の一つに限界飽水度法がある。この方法は、材料が凍結融解で劣化を生じない限界の飽水度と、材料の吸水性状との比較から材料の耐凍害性を評価するものである。しかしながら、各種材料の凍結融解試験では、試験時に含水率が上昇することが報告されており、耐凍害性を適切に評価するためには凍結融解による含水率上昇を考慮する必要があるものと考えられる。

本研究では、代表的な外壁材料である窯業系サイディング材の仕上面および裏面を吸水面とした片面吸水凍結融解試験を行い、凍結融解時の含水率上昇作用について検討する。また、モデル建物を用いて屋外暴露試験を行い、実環境における含水状態を把握する。これらの結果から耐凍害性の評価方法を提案することを目的としている。

（４） 本発表の注目点

促進凍結融解試験や限界飽水度法などの現在の耐凍害性評価方法は、材料の相互比較を行うものである。このため、これらの評価法は、材料の耐凍害性の絶対的な評価や凍害劣化予測等を行うものではない。すなわち、これらの試験に合格する材料であっても札幌の外壁に使用して凍害劣化が生ずるかどうか、10 年健全な状態を保つものであるかどうか等は不明である。

本発表では、限界飽水度法に凍結融解による含水率上昇作用を組合せた新しい耐凍害施評価方法の考え方を紹介する。将来的には、使用される地域条件・環境条件を考慮した凍害劣化予測を行うことを目指している。

研究発表データシート

【１２】	松井　佳彦 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	微粒子活性炭による水処理
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

水道水質と浄水処理に関して社会実装を念頭においた研究開発を行っています.

（２） 本発表研究の概要

微量有害有機物質の除去には、活性炭を使う方法が効率的といわれていますが、それでもコスト高なためさらなる高効率化が必要です。そこで，直径１マクロメートル以下まで微粒度化した活性炭を製造し, 有害な化学物質を除去するための高効率な浄水処理技術の開発を行っています。微粉砕によって製造された超微粉炭は吸着速度のみならず平衡吸着容量が増加し，膜分離の前処理法として浄水場に導入されつつあります．さらに，通常の急速ろ過方式（凝集沈澱砂ろ過）への適に向けて，微粉炭の残留性に関する研究を行っています.

（３） 本研究発表の詳細

通常の浄水方法では除去できない溶解成分を最も廉価で効率的に除去する方法は活性炭による吸着処理ですが，この吸着処理の高効率化を目指して超微粉炭の研究を行っています．膜分離を適用した浄水が検討され普及され始めたので，粒子サイズを小さくしても分離対応可能なことが研究開始の動機です．ビーズミルを使うことで粒径 200 nm までの超微粉炭（SPAC, superfine powdered activated carbon）が製造されます．粒径は小さくなると吸着の速度が高くなり，短時間の接触時間で吸着除去が可能になります．さらに，SPAC は通常の PAC（powdered activated carbon）よりも吸着容量が大きいことが明らかになりました．吸着平衡状態であること，PAC と SPAC で細孔内分布に違いがないことなどより，粒径が小さくなると平衡吸着量が増加することを確認しました．次は，そのメカニズムとして，吸着質は PAC 粒子の内部に拡散移動せず，外表面付近に吸着すると仮定したモデルで現象が説明できることを示しました．その後，この Shell Adsorption Model を，エネルギー分散型 X 線分光分析や同位体顕微鏡を使った観察で実証しました.

SPAC は膜分離浄水処理の前処理として実用化され，すでに 3 か所以上の浄水場で実稼働していますが，主流の浄水方式である凝集沈澱砂ろ過においては確率的に粒子分離が生じるため，分離性の懸念から SPAC は未適用です．そこで，SPAC を凝集沈澱ろ過処理した際の残留性に関する研究を行っています．その結果，凝集工程に使用するポリ塩化アルミニウム凝集剤の性質と攪拌強度によって SPAC の残留性が異なることを見出し，さらに，SPAC の残留を高度に低減する新規ポリ塩化アルミニウム凝集剤の試作を検討しています.

【１２】続き

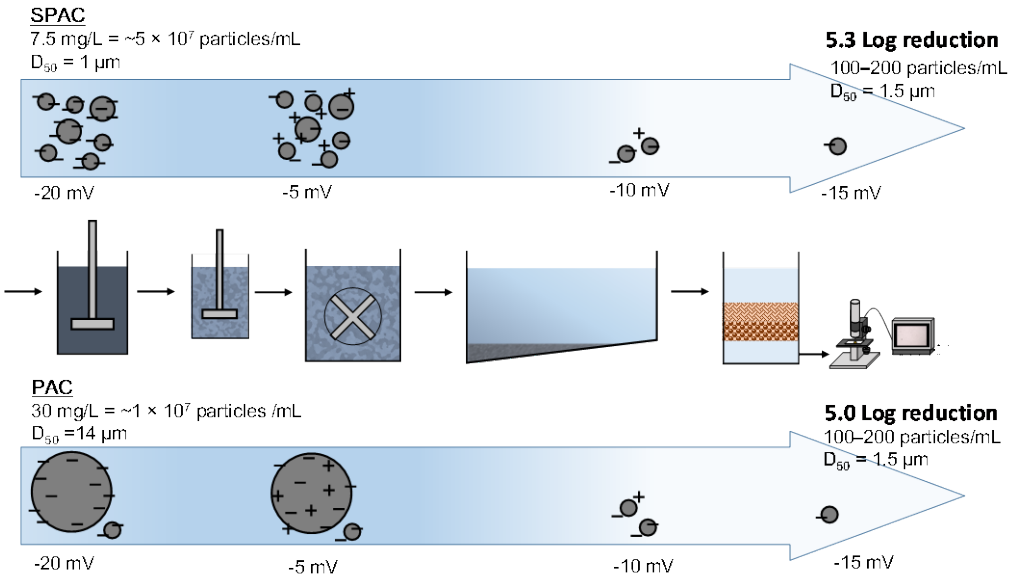


図１　SPAC と PAC の残留性の比較

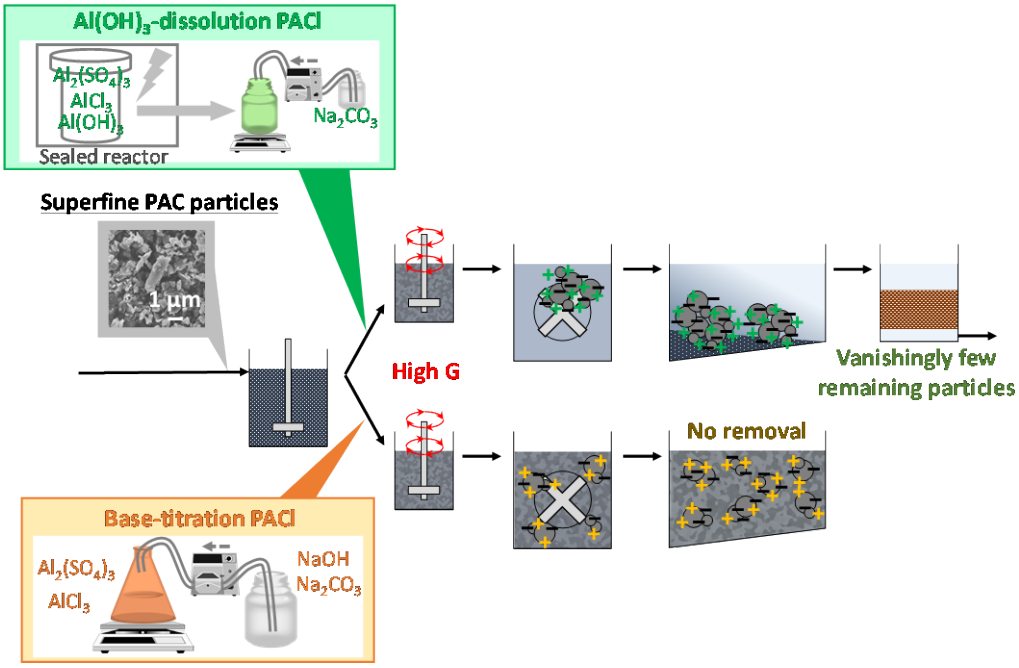


図２　SPAC の残留性を目指した凝集剤と凝集条件

研究発表データシート

【１３】	佐藤　努 北海道大学大学院工学研究院 環境循環システム部門・教授	

発表タイトル	自然に学ぶ汚染水・汚染土壌の浄化法とその化学反応モデリング
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

私は、大学で焼き物の原料でおなじみの**粘土や粘土鉱物の研究**をしていました。そして大学を修了してすぐに、茨城県東海村にある日本原子力研究所に研究員として就職しました。皆さんは、粘土と原子力にどのような関係があるか、お分かりになりますか？実は、原子力発電所や病院、研究所など、放射性物質を扱う所からは放射性廃棄物が発生します。放射性廃棄物は非常に危険なものなので、土壌中や地層中に処分されることが予定されており、水を通さないように、放射性物質を漏らさないようにバリア材として粘土が使用されるのです。日本原子力研究所では、粘土の長期バリア性を評価するために、世界中のウラン鉱山や粘土鉱山に出かけ、処分場と似ている環境で、粘土のバリア性能を調べていました。このような研究は**ナチュラルアナログ**（自然の類似現象）研究と呼ばれています。ナチュラルアナログ研究を重ねるにつれて、お金や労力をかけずに、自然にあるものが地下水を浄化したり、有害物質を漏らさないようにしている事例が数多く見つかりました。様々な有害物質と直面する社会で持続可能な発展を目指すには、粘土のように**「自然から学ぶ」環境浄化材料の開発**が必要だと痛感しました。それ以来、日本のみならず、オーストラリア、オマーン、カンボジア、バングラデシュ、フィリピン、ザンビアなどに学生と出かけ、ナチュラルアナログ研究のレッスンを重ねています。本発表では、私がレッスンを重ねてたどり着いた自**然に学ぶ汚染水・汚染土壌の浄化法**の一例を紹介し、それらの浄化過程をコンピュータで再現する**化学反応モデル**について紹介します。

（２） 本発表研究の概要

自然には自浄作用があります。汚染が問題となっているところは、自浄作用で効くはずの何かの因子が足りないから、自浄作用により汚染が緩和されていないと考えることができます。したがって足りない因子を理解できれば、それを工学的に補うことによって自浄作用をアシストできることになります。本発表では、ヒ素汚染土壌の不溶化とニッケル廃水処理について、自然から学んだ方法について紹介するとともに、その設計に必要となるツールである地球化学反応モデリングについてご紹介します。

（３） 本研究発表の詳細

本邦において、鉛やヒ素、ホウ素などによる土壌や地下水の汚染が問題となっています。また、北海道新幹線やリニア中央新幹線の建設の際には、トンネル工事から発生した“ズリ”の保管場所から重金属類の漏洩が懸念されています。これらの対策には、様々な工法が考えられていますが、対象とする地下水・土壌やズリの多様性のため、試行錯誤による対処が一般的となっており、それらの設計を困難にさせています。また、それらの汚染への対処が高額になれば、汚染地の土地売買や両新幹線の建設工事費も高額になってしまいます。

そこで、本発表では、ヒ素およびホウ素汚染土壌の不溶化とニッケル廃水処理について、自然から学んだ方法について紹介するとともに、不溶化や処理の設計に必要となるツールである地球化学反応モデリングについてご紹介します。

【１３】続き

群馬県のヒ素鉱山では、ヒ素を含んだ鉱石を河床に廃石し、ヒ素は溶質して河川水が環境基準の 30 倍までに高濃度になり、かつ河川水の pH が中性から pH3.5 まで減少しているところがありました。しかし、下流に流れるにしたがって、環境基準以下にまで減少していました。廃石中には鉄も含まれていて、廃石場の下流で黄色の沈殿物があり（図 1)、その黄色の沈殿物は上流から流れてきた溶存鉄が鉄酸化細菌によって酸化されてできた“シュベルトマナイト”で、このシュベルトマナイトが効率よくヒ素を吸着し、河川水が浄化されていることがわかりました。このシュベルトマナイトは準安定相で、安定相図で書いても出現しないそうですが、天然にはこのような準安定相が kinetic phase として普遍的に存在します。このシュベルトマナイトは、廃水中に含まれる溶存鉄を材料としてできた吸着容量の高い吸着材で、ヒ素を吸着すると安定化することもわかりました。これらの情報を基に、現在ではシュベルトマナイトを製品化し、一般に販売しています。また、このシュベルトマナイトは、使用後の澱物を還元的なところに処分すると変化してしまいますが、変化して生成するのは固体の AsS であり、吸着されたヒ素は流れることなく固相中に留まり、その現象は地球化学モデリングでも予想することができます。このシュベルトマナイトは、ヒ素汚染土壌中に添加するだけでヒ素を不溶化できることも実証済みであります。現在では、汚染土壌のヒ素濃度や溶存形態が明らかであれば、汚染土壌 $1m^3$あたり必要なシュベルトマナイトの添加量も地球化学モデリングから求められる状況にあります。

島根県の銅鉱山では、銅や亜鉛を含んだ鉱山廃水が一般河川に混入していますが、坑口から出て一般河川に混入する前に、沈殿物を形成して、銅や亜鉛の溶存濃度が激減しているところがありました。この沈殿物は銅とアルミニウムの複水酸化物である“ハイドロウッドワーダイト“で、この鉱山廃水に溶存アルミニウムが存在していたことから沈殿したものと推察しました（図 2)。つまり、銅と同じような性質を有する重金属イオンも、同様のメカニズムで沈殿処理できる可能性があるということです。そこで、ニッケル廃水にこの「アルミニウム添加法」を適用可能かどうか実験で確かめられたところ、通常のニッケル廃水処理では、薬剤で廃水の pH を 10 にしなければならないところ、「アルミニウム添加法」で pH7 でも浄化可能なことが分かりました。現在では、これらの廃水処理において、地球化学モデリングで、どれくらいのアルミニウムの添加が必要かどうかも計算できる状況にまで成熟しています。

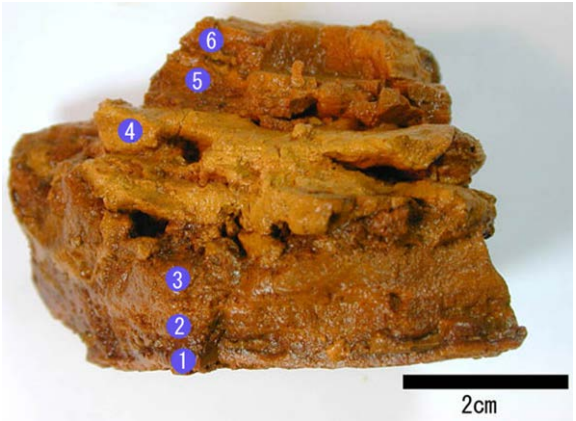


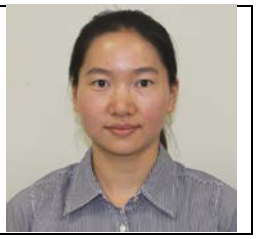
図 1　ヒ素鉱山に流れる河川の河床に
自然に生成したシュベルトマナイト

図 2　銅鉱山廃水坑口で生成した
緑色のハイドロウッドワーダイト

（４） 本発表の注目点

自然で起こっているお金や労力をかけない浄化法を知ること自体、新たな浄化法や浄化材を提案できる重要なレッスンと言えます。しかし、その記述だけで終わってしまえば、それは工学的な仕事とは言えません。レッスンで学び、材料を開発し、それを実際に応用し、コンピュータシミュレーションで浄化の設計や将来予測、見積もりまでできるようにしていることが、佐藤の目指しているしている地球工学です。本日はその一端だけの紹介だけになりますが、自然に学ぶ浄化法の魅力を感じていただけたら幸いです。

研究発表データシート

【１４】	氏名　張　麗華 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	水中結晶光合成による金属ナノ酸化物の作製と環境、エネルギー応用
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

A new pathway for the synthesis of a variety of metal oxide nanocrystallites via submerged illumination in water, called the submerged photosynthesis of crystallites (SPSC), is introduced in our research group. This method is completely different from traditional typical synthetic methods for nanoparticles. The SPSC process requires only light and water and does not require the incorporation of impurity precursors. Moreover, this method is applicable at low temperature and at atmospheric pressure, producing only hydrogen gas as the by-product. These characteristics give rise to the potential application of SPSC as a green technology for metal oxide nanocrystallites synthesis.

（２） 本発表研究の概要

In this presentation, flower-like ZnO and CuO nanostructures and various kinds of iron oxide nanoparticles are fabricated via SPSC method. The photochemistry and the mechanism of the process are elucidated and the application of the product in the fields of environment and energy are discussed.

（３） 本研究発表の詳細

Metal oxide nanoparticles attract considerable interest due to the potential technological application in the fields of medicine, information technology, catalysis, energy storage, and sensing, *etc*. In our previous study, a new pathway for the synthesis of a variety of metal oxide nanocrystallites via submerged illumination in water, called the submerged photosynthesis of crystallites (SPSC) was introduced. This method is completely different from typical synthetic methods for nanoparticles, such as the hydrothermal method, solvothermal synthesis, and chemical vapor deposition.

In the SPSC method, the initial metal is surfaced treated by a submerged liquid plasma process, which creates a metal nano oxide semiconducting layer with surface protrusions. After that, the growth of metal oxide nanocrystallites is assisted by a ‘photosynthesis’ reaction, where the metal surface is irradiated with ultraviolet light in water. Thus, the SPSC process requires only light and water and does not require the incorporation of impurity precursors. Moreover, this method is applicable at low temperature and at atmospheric pressure, producing only hydrogen gas as the by-product. These characteristics give rise to the potential application of SPSC as a green technology of metal oxide nanocrystallites synthesis.

In this presentation, SPSC method was used to synthesis flower-like CuO and ZnO nanocrystallites and various kinds of iron oxides nanoparticles. The morphologes of the obtained nanocrystallites were observed, and the photochemistry and the mechanism of the process are elucidated. Furthermore, the reactions involved in the SPSC process are analyzed

【１４】続き

by monitoring the pH and temperature changes of the water, based on which the role of light in the SPSC process is discussed. Finally, the possible application of the product in environment and energy fields are discussed.

（４） 本発表の注目点

In this presentation, a new pathway of metal oxide nanocrystallites fabrication by photo-assisted growth in pure water is introduced. The flower-like ZnO and CuO nanocrystallites are obtained and the application of them are discussed.

研究発表データシート

【２３】	氏名　ジョーダン チャールズ 北海道大学大学院情報科学研究科 情報理工学専攻・助教	

発表タイトル	mplrs と頂点・凸包の並列計算
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

形式論理とアルゴリズムについて理論と応用両方の視点から情報科学について研究をしている。特に最近は複雑な計算問題を解くためのアルゴリズムの研究とその実装について研究をし、現在普及されている並列計算機、及び大規模なスパコンを効率的に使える並列アルゴリズムに興味を持っている。今回の発表もこのような課題で、千コア以上を使って実際に解ける計算問題を増やして、その実装は他の研究者等も使われている。

今回発表する内容はマギル大学・京都大学の Avis 先生との共同研究である。

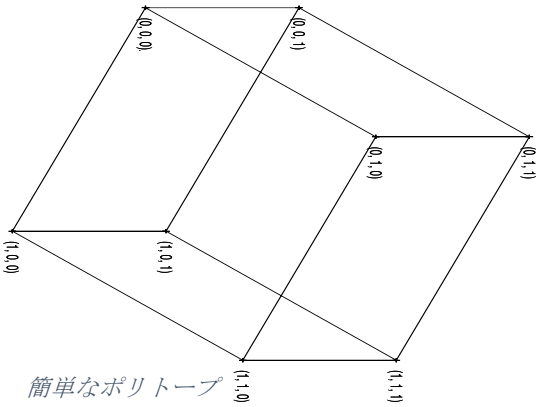
（２） 本発表研究の概要

近年は並列計算機が普及されているが、まだ並列化されていないソフトウェアが多くある。本研究[4]では、ポリトープの頂点・凸包計算を行う lrslib を並列化してフリーソフトの mplrs として実装している。ポリトープの頂点・凸包計算はバイオメカニクスや化学等の応用が数多くあり、応用の一部は[2]で紹介されている。複雑なポリトープの場合は計算が数週間以上かかることがあり、千コアを効率的に使用できる mplrs はすでに量子計算の解析等で利用されている。

また、本研究は lrslib の基礎になる逆探索の並列化に基づいているため、ポリトープの頂点・凸包計算以外にも逆探索に基づくアルゴリズムで用いることができる。例として、同じ手法を三角分割を並列に列挙する mptopcom [5]で利用し、トロピカル幾何学の研究等で応用されている。

（３） 本研究発表の詳細

ポリトープの頂点・凸包計算は計算幾何学の古典的な計算問題で、応用は数多くある。ポリトープは、いくつかの一次不等式を満たす地域（右の簡単な例では各平面を一次不等式で表せる）と定義できるが、いくつかの頂点の凸包という定義もできる（右では角の頂点）。ポリトープの頂点計算とは不等式の定義から頂点での定義を計算することで、凸包計算はその逆の計算になる。



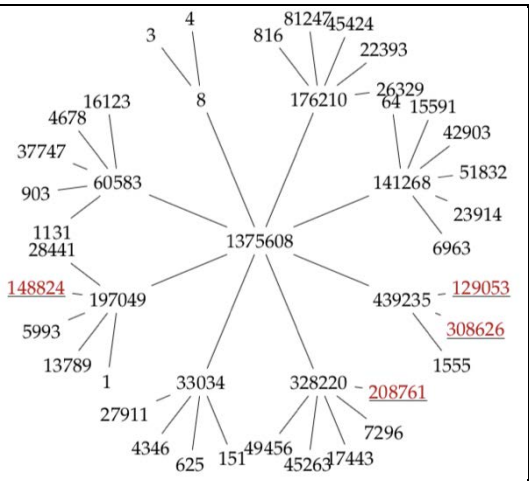
簡単なポリトープ

この計算問題について、主に二つのアルゴリズムが使われるが、本研究ではグラフの逆探索に基づくアルゴリズム[3]が基礎で、lrslib [1]で実装されている。

逆探索は様々な列挙アルゴリズムで利用される手法だが、特徴として省メモリで動作すること、一時停止とリスタートが簡単で、計算がローカルで全体に関するデータ構造が不要等、並列化しやすい特徴が様々知られている。逆探索は基本的に逆探索木と呼ばれる木構造を辿って計算する手法で、その逆探索木を複数個の部分木に分解しそれぞれを並列に辿ることにより並列化できるが、あるノードまで辿っていかないと子ノードがあるかをチェックできない。または、部分木の

【２３】続き

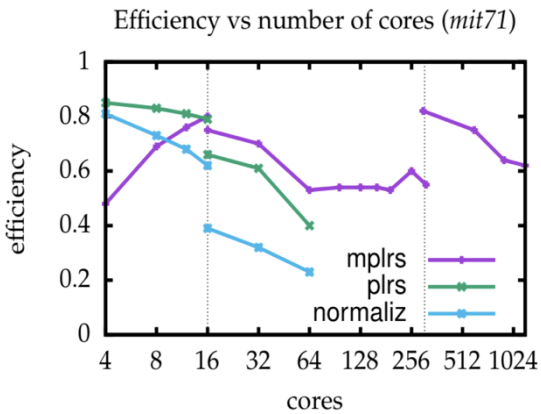
サイズは計算が終わるまでは分からない。逆探索木を一定の深さまで辿ると、その深さの部分木に分け並列に処理できるが、実際の問題ではアンバランスな逆探索木が多い。右では、化学からの頂点計算問題における逆探索木が深さ２まで書かれている。それぞれのノードのラベルはその部分木のサイズになっている。深さ２での部分木のサイズは３から 308626 になり、それぞれのサイズは計算が終わるまで分からない情報になる。



頂点計算におけるアンバランスな逆探索木：部分木のラベルはそのノード数を表す。

本研究では、逆探索木をダイナミックに部分木に分解しながら並列で辿る方法をいくつか比較し、最も効率的な方法が mplrs で実装されている。千コア程度まで効率的にスケールする。mplrs の詳細は[4]で発表している。

近年はポリトープの頂点・凸包を並列に計算するプログラムは lrslib に基づく plrs と他のアルゴリズムを実装している normaliz もある。コアの数を増やしていくと、右のグラフでの比較が得られる。これは化学のある問題に対し、コアを増やした時のスピードアップ／コアの数になり、線が上の方がより良い結果になる。最近の CPU は熱等の条件で自動的に周波数を変更するため、理想的な１は実際に得られない。

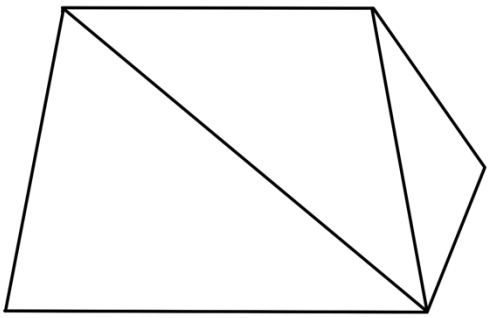


mplrs は他の並列実装よりスケールする

（４） 本発表の注目点

アルゴリズムを理論と応用両方の視点から研究し、古典的な計算問題の並列アルゴリズムを提案・実装し、他の研究者にも使われているプログラムになっている。専門的な計算問題かもしれないが、様々な分野の問題をこのようなモデルで表現することが可能で広く使われている lrslib で公開されている。

逆探索はポリトープ以外にも様々な計算問題で応用されて、列挙問題での利用は特に多い。mplrs での並列化に関する研究はポリトープではなく逆探索に依存するもので、他の計算問題にも適応できる。例えば、最近は他の共同研究で mplrs と同様な手法で逆探索による三角分割の列挙も並列化し、mptopcom を開発している[6]。三角分割を並列に列挙できるプログラムは他に存在せず、数学で使われているプログラムになって、従来列挙できなかった三角分割も得ている。



２次元では三角分割が比較的簡単だが、高次元での列挙は複雑になる

参考文献

[1] Avis. lrs home page. http://cgm.cs.mcgill.ca/~avis/C/lrs.html
[2] Avis. Reverse Search for Enumeration - Applications. http://cgm.cs.mcgill.ca/~avis/doc/rs/applications/index.html
[3] Avis, Fukuda. A pivoting algorithm for convex hulls and vertex enumeration of arrangements and polyhedra. Discrete Comput. Geom. 8, 295–313 (1992)
[4] Avis, Jordan. mplrs: A scalable parallel vertex/facet enumeration code. Math. Program. Comput. 10(2):267–302, 2018.
[5] Jordan, Joswig, Kastner. Parallel Enumeration of Triangulations. Electr. J. Comb. 25(3):P3.6 (2018)
[6] Jordan, Joswig, Kastner. mptopcom home page. https://www.polymake.org/mptopcom

研究発表データシート

【２４】	氏名　橋本　守 北海道大学大学院情報科学研究科 生命人間情報科学専攻・教授	

発表タイトル	非線形ラマン散乱内視鏡の開発
サブタイトル	－神経を無染色に可視化する内視鏡下手術支援ロボットの新しい眼－

（１） 研究者のアピールポイント

無標識に生体分子を高速に可視化する非線形ラマン散乱ラマン散乱を利用したイメージング手法と，その応用研究を行なってきた．これを実現するために，高精度に同期しながら波長走査可能なピコ秒パルスレーザーや，高速なイメージングを実現するマイクロレンズアレイスキャナーを開発し，100 frame/s という，ビデオレートよりも高速なラマン散乱イメージングを実現してきた．

（２） 本発表研究の概要

ラマン散乱は，無染色に分子種・分子構造に関する知見が得られるために，化学分析，物理化学研究，半導体物性研究等に用いられ， 近年になって生体観測への応用が盛んに行われるようになってきた．しかしながら，ラマン散乱は非常に微弱であるために、そのイメージをリアルタイム観測することは困難であった．非線形ラマン散乱を用い，内視鏡下外科手術へと応用可能な，直径 12mm の硬性鏡を開発し，神経を無染色，高速に可視化できることを示した．

（３） 本研究発表の詳細

小さな皮膚切開数カ所から内視鏡や鉗子を挿入して手術を行う腹腔鏡下外科手術は皮膚切開創が開腹手術よりも小さく術後の早期回復が期待できるために，広く用いられるようになってきた．さらに，ダビンチに代表されるロボット制御技術と組み合わせた，内視鏡下手術用医療ロボットが開発されている．ダビンチでは 3D 硬性鏡によって立体像を観察しながら手術を行うが，組織や病変部の識別は，可視反射光を用いた吸収観測および形態観察によって行なっている．それゆえ，内視鏡観察を使って非侵襲に組織，病変部等をより高精度に分別することができれば，手術の信頼性，安全性を向上させることが可能となる．例えば，悪性腫瘍の外科的摘出においては，神経をできるだけ温存して悪性腫瘍を摘出する神経温存術が採用される．直径 1 mm 以上の比較的大きな神経を認識することは容易であるものの，それ以下の末梢神経を見分けることは容易ではない，温存すべき末梢神経の摘出や損傷のために機能障害が引き起こされる場合がある事が指摘されている．

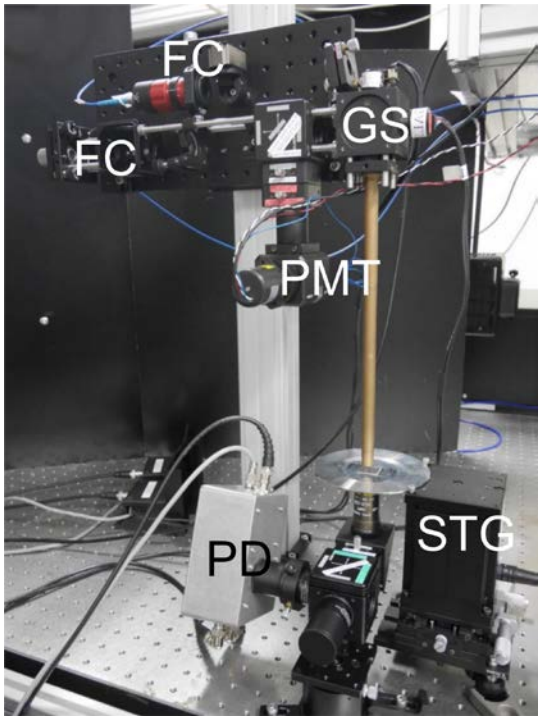


Fig. 1 CARS 硬性鏡ヘッド

【２４】続き

そこで我々は，非線形ラマン散乱現象の一種である CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering) を用いた硬性鏡による神経の可視化を行なっている．CARS は，2 色のパルスレーザーを同時に試料に照射し，2 レーザーの周波数差が，分子の振動と同じ周波数のときに，入射光とは異なる波長の光が発生する現象であり，この CARS を用いた硬性鏡を開発している．Figure 1 に，開発した硬性鏡の写真を示すが，ダビンチで用いられている硬性鏡と同じ径 12 mm の鏡筒を持つ．なお，励起光には，これまで開発してきた高精度同期波長走査ピコ秒レーザーシステム (Fig. 2) を用い，これらの光を光ファイバーを用いて伝送し，後方散乱 CARS 光を光電子増倍管で検出するシステムとなっている．イメージは，ガルバノスキャナによるビーム走査によって得られる．

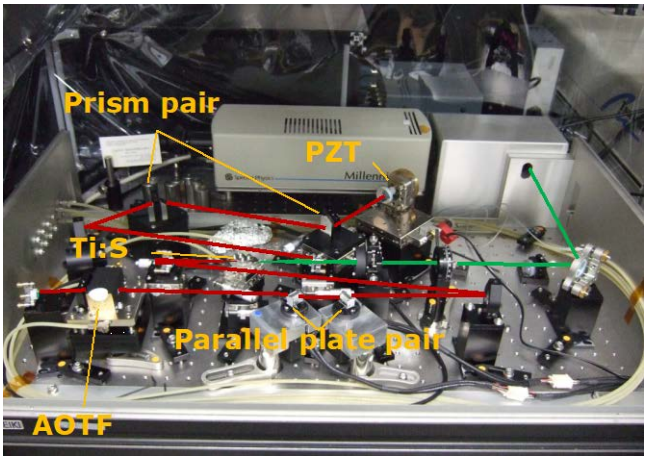


Fig. 2 高精度同期波長走査ピコ秒レーザー

有髄神経は軸索の周囲を脂質に覆われており，脂質に豊富に含まれる CH_2伸縮振動を選択的観測することで有髄神経を可視化することができる．我々はマウスの坐骨神経の非線形ラマンイメージングを行い，一本一本の神経を秒オーダーで観察することができることを示した(Fig. 3)．またウサギの前立腺の周囲を走行する神経を識別・可視化し，染色像(Fig. 4 (a))と同様にうねった構造を持つ神経を無染色に観測できることを示した(Fig. 4 (b))．

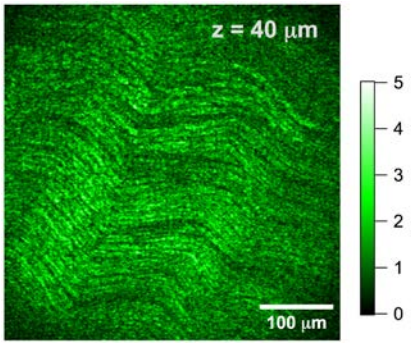


Fig. 3 マウス坐骨神経の CARS イメージング．

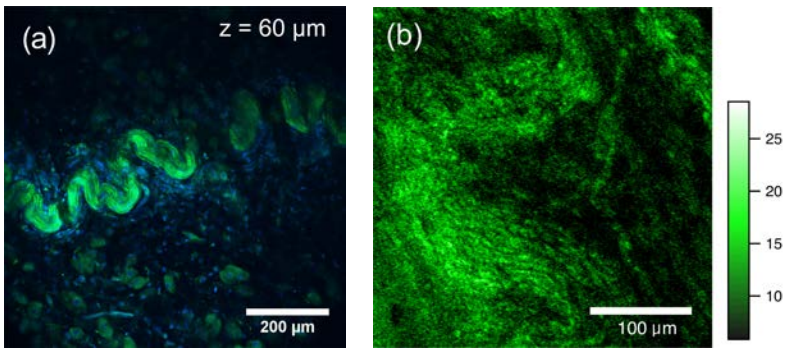


Fig. 4 ウサギ前立腺周辺の末梢神経のの蛍光像(a)と CARS による無染色像(b)．

（４） 本発表の注目点

血管は血液によって容易に見分けられ，リンパ管・リンパ節は，人体への使用が許されている ICG(インドシアニン・グリーン)によって可視化することができるが，予後の機能維持に重要な神経の可視化はこれまで行われていなかった．人体に用いることが許されている色素は多くないため，無染色な神経イメージングが期待されていたが，超短パルスレーザー技術と振動分光により神経の無染色・高速な可視化に成功した．また，高速に振動スペクトル観測が可能となれば，がん組織と正常部位の可視化も可能であると考えている．現在では非常に大掛かりな装置であるが，簡便にしようすることができるようになれば，新しい内視鏡下外科手術の目となりうると考えている．

研究発表データシート

【２５】	氏名 北海道大学大学院（情報科学研究科） メディアネットワーク専攻 准教授 筒井 弘	

発表タイトル	Rejection Criterion for Keyword Recognition System

（１） 研究者のアピールポイント

MIMO-OFDM 高速無線通信システム，雑音に強いフレーズ音声認識システム，高品位画像処理システム，これら無線・音声・画像システムに関する研究をコアとして，当研究室ではマルチメディア無線情報通信の融合に関する研究開発を推進している．加えて，集積回路設計を含むシステムレベル設計をアルゴリズム開発と相補的に推進し，ハードウェア・ソフトウェアを含んだ各種アプリケーションのシステム実装について，より実践的に研究開発している．ここでは雑音に強いフレーズ音声認識システムに関する研究内容を取り上げる．

（２） 本発表研究の概要

各種サービスの高齢者対応への関心が，社会の高齢化に伴い高まってきている．音声コマンドによる機器操作を可能とする孤立音声認識(IWR, isolated word recognition)技術は，現在広く着目されており，スマートホームや車載システムなどへの応用が期待され，特に高齢者や視覚等障害のある方にとって有益な技術となる．本発表では我々が提案している孤立音声認識システムについて，単語棄却基準[1, 2]に関する内容を中心に発表を行う．

（３） 本研究発表の詳細

<u>孤立音声認識システム</u>

我々が開発している孤立音声認識システムは，音声区間検出(VAD, voice activity detection)，雑音ロバスト特徴抽出(RFE, robust feature extraction)，自動音声認識(ASR, automatic speech recognition)，および単語棄却基準(WDC, word discrimination criterion)から構成される．RFE においてノイズ除去を適用することにより，ノイズ環境下でも発話音声を認識できる．ASR では隠れマルコフモデル(HMM, hidden Markov model)に基づく音声認識を用いる．未登録語や通常の発話音声以外の入力による誤認識を避けるため，WDC により入力がシステムに登録されている単語であるかをチェックし，そうでない場合は棄却を行う．

<u>雑音ロバスト特徴抽出</u>

RFE では，変調スペクトル分析(RSA, running spectrum analysis)に基づくノイズ除去[3]を利用する．特徴量としてはメル周波数ケプストラム係数(MFCC, mel-frequency cepstrum coefficients)を用いる．図 1 に RSA を含む RFE のブロック図を示す．各フレームのパワースペクトルのフーリエ変換は変調スペクトルと呼ばれ，音声認識に必要な情報はこの変調スペクトルの 0–15Hz に集中していることが知られている．そこで，以下の帯域通過フィルタを変調スペクトルに適用することによりノイズの影響を低減する．ここでf_a, f_b, f_c, f_dは帯域通過フィルタの形状を決めるパラメタである．

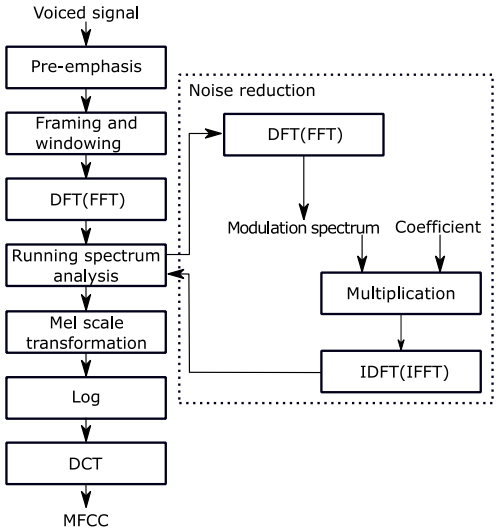


図 1: 雑音ロバスト特徴抽出(RFE, robust feature extraction)のブロック図

$$F(f) = \begin{cases} 0.1, & f < f_a \\ 0.9(f - f_a)/(f_b - f_a) + 0.1, & f_a \le f < f_b \\ 1, & f_b \le f < f_c \\ 0.9(f_c - f)/(f_d - f_c) + 1, & f_c \le f < f_d \\ 0.1, & f_d \le f \end{cases}$$

単語棄却基準

単語棄却基準を用いて(1)登録語の入力と(2)未登録語や通常の発話音声以外の入力を識別する．この目的のため，ASR の結果得られる登録語毎の尤度から$\mathrm{A} = [\frac{L_1 - L_2}{N} \quad \frac{L_1 - L_3}{N}]^{\mathrm{T}}$を求める．ここで$N$は各登録語のフレーム数，$L_i$は尤度であり，$i$は尤度の高い順に並べられているものとする($L_1 \ge L_2 \ge \cdots$)．(1)(2)の学習データに対して ASR を適用し，得られた A の集合は，(1)(2)毎に K-means クラスタリングによりクラスタ化される．棄却判定する際は同様に入力に対して ASR を行い，Aを求め，学習時に算出した各クラスタ重心とAの距離により，棄却か否か判定する．

単語認識評価

学習過程では 30 人の男性発話者の日本語 13 単語各 3 発話を利用する．ノイズのない状態で特徴抽出を行い，HMM を作成する．テスト過程では，10 人の高齢発話者の 13 単語各 1 発話を用い(単語は学習と同じ)，15 種類のノイズを付与して認識評価を行う．また，学習とテストの両方で RSA に基づくノイズ除去を適用する．比較のため変調スペクトルフィルタリング(RSF, running spectrum filtering)も適用する．表 1 に結果を示す．最も左カラムの数値の並びは，$(f_a\ f_b\ f_c\ f_d)$となっている．(0 1 30 40)の場合に良好な結果が得られていることが判る．

単語棄却評価

白色雑音 20dB の条件下で，10 人の男性発話者が 90 個の登録語と 90 個の非登録語を発声する．また別途 900 語に相当する無関係の音声もテストに利用する．クラスタ数 Kを(1)(2)で同じとし，$K = 1, 9, 18$で評価を行った．なお高齢者発話音声データベースが現状では限られているため，この評価では男性の発話データベースを利用した．結果を表 2 に示す．$K = 1$では登録語の 33.56%が登録語として認識され，$K = 9, 18$と比較して良好であった．一方非登録語および無関係音声に関しては$K = 18$がそれぞれ 87%, 88%であり良好な結果を示した．現状では棄却精度は高いが，登録語も誤って棄却される．この結果についてさらなる考察を進める予定である．

表 1: 単語認識制度(高齢者) (%)

Noise reduction method	Clean Speech	15 noises (NOISEX-92)			
		0 dB	5 dB	10 dB	20 dB
RSF	75	19	34	59	73
(1 1 15 15)	74	23	39	67	85
(0 1 15 15)	92	23	40	67	85
(0 1 15 18)	92	23	39	67	85
(0 1 30 40)	94	24	40	67	86

表 2: 単語棄却の判定精度(%)

K	登録語	非登録語	無関係音声
1	34	70	74
9	15	86	88
18	14	87	88

（４） 本発表の注目点

我々は雑音ロバスト孤立音声認識システムの研究開発を推進している．本発表では非登録語の棄却について検討を行った．

参考文献

[1] X. Jiang, T. Nakagoshi, J. Tang, R. Takanashi, Y. Tian, H. Tsutsui, Y. Miyanaga, "Rejection criterion for keyword recognition system," IEICE Technical Report, Vol. 118, No. 149, pp. 53-58, EA2018-10, Jul. 2018.

[2] X. Jiang, T. Nakagoshi, N. Hayasaka, H. Tsutsui, Y. Miyanaga, "An Evaluation of Phrase Rejection Using K-means Clustering for Robust Speech Recognition," Proc. SISA, pp. 154-157, Sep. 2017.

[3] X. Jiang, T. Nakagoshi, G. Mufungulwa, H. Tsutsui, Y. Miyanaga, S. Abe, "Robust Isolated Phrase Recognition System Using Running Spectrum Analysis," Proc. ITS, pp. 1-7, AP-TP1039, Oct. 2017.

研究発表データシート

【２６】	植村　哲也 北海道大学大学院情報科学研究科 情報エレクトロニクス専攻・教授	

発表タイトル	次世代高感度磁気センサー応用に向けたナノスケール巨大磁気抵抗素子の開発
サブタイトル	ハーフメタル強磁性体が切り拓く新しいエレクトロニクス

（１） 研究者のアピールポイント

電子のスピン状態を積極的に活用した新しいデバイス体系を構築するスピントロニクスと呼ばれる分野が着目されている．スピントロニクスデバイスでは，強磁性体の中のスピンの向きが揃っている程，デバイス特性が優れたものとなるが，我々は，スピンの向きが 100%揃ったハーフメタルと呼ばれる新しい強磁性体（図１）を用いたスピントロニクスデバイスの研究を行っており，これまで，ハーフメタル強磁性体の一種である Co 基ホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合デバイス(MTJ)において，世界最高の ON/OFF 比動作を達成した．また，ホイスラー合金から半導体へスピンの揃った電子を注入することに成功し，スピン状態を利用したトランジスタの実現に大きく前進した．これらは，超大容量・超低消費電力メモリ／論理回路や高感度磁気センサーの実現につながる重要な技術であり，次世代エレクトロニクスの中核技術となる．

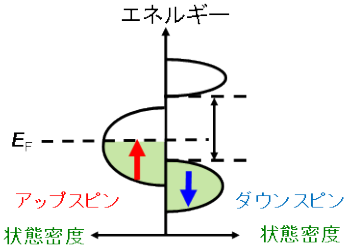


図 1. ハーフメタル強磁性体の電子構造．電気伝導に寄与する電子のエネルギーレベル（E_F）において、一方のスピンの方向に対して、エネルギーギャップが存在するため，スピンの向きが 100%揃う．

（２） 本発表研究の概要

超小型・高速・高感度磁気センサー実現に向けて，Co 基ホイスラー合金を用いた膜面垂直通電型巨大磁気抵抗(CPP-GMR)素子の開発を行った．具体的には，強磁性層にハーフメタル性に優れた Co 基ホイスラー合金の Co_2MnSi (CMS)層を，非磁性金属層に Ag 層を用いた CPP-GMR 素子を作製し，磁気抵抗(MR)効果や自励発振などの GMR 素子としての基本動作を実証した．さらに，Co 基ホイスラー合金のハーフメタルとしての潜在性を十分に活用するため，Mn 組成を化学量論比よりも大きくした Mn-rich CMS の GMR 素子における有用性を明らかにした．

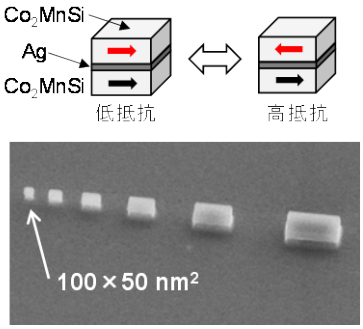


図 2. CPP-GMR 素子の構造と電子顕微鏡写真．MgO 基板上に，Co_2MnSi と Ag 中間層からなる 3 層構造を含む GMR 多層膜をスパッタ法により形成後，電子線描画装置を用いた微細加工により接合面積が 100×50 nm² 程度の GMR 素子に加工した．

（３） 本研究発表の詳細

次世代超高密度ハードディスクドライブの読み取りヘッドをはじめとする超小型・高速・高感度磁気センサー実現に向け，低い素子抵抗と高い磁気抵抗(MR)比を有する GMR 素子の開発が盛んに行われており，中でも強磁性層にスピン偏極率が 100%となる Co 基ホイスラー合金を用いた GMR 素子の研究が注目されている．しかしながら，多元化合物である同物質群は，組成

の揺らぎや原子配置の乱れによりその物性が大きく変化することが知られており，Co 基ホイスラー合金のハーフメタル特性を十分に活用するためには，化学組成や構造欠陥の適切な制御が必要となる．我々は，これまで，CMS や $Co_2MnFeSi$ を電極とした MTJ において，Mn 組成が化学量論的組成より過剰な領域で MR 比が増大することを実験的に見出し，これが，Co 原子が Mn サイトを置換する構造欠陥（Co_{Mn}アンチサイト）を抑制することで生じることを明らかにした[1]．この結果，CMS-MTJ において室温で 354%，4.2 K で 1995%の高い TMR 比を実証した[2]．本研究の目的は，Mn リッチの CMS 薄膜を CPP-GMR 素子に応用することの有効性を明らかにすることである．そのため，Mn 組成αを系統的に変化させた，$Co_2Mn_\alpha Si_{0.82}$/CoFe/Ag/CoFe/$Co_2Mn_\alpha Si_{0.82}$構造を有する CPP-GMR 素子を作製し，その MR 比の Mn 組成依存性を評価した．これまでに得られた主要な結果を以下にまとめる．

(1) CPP-GMR 素子作製基盤技術の確立

Ag 中間層を介した上下の CMS 層の磁化配置が平行から反平行にスイッチすることによる明瞭な MR 特性が室温にて得られた(図 3 挿入図)．また，同素子においてスピン移行トルクによる磁化反転や自励発振も観測され，GMR 素子としての基本動作を実証した．作製した GMR 素子における，CMS の Mn 組成 α と得られた MR 比の関係を図 3 に示す．図に示すように Mn 組成が化学量論的組成よりも過剰な領域にて MR 比の増大が観測された．このことは，Mn リッチの組成にすることによりハーフメタル性を阻害する Co_{Mn}アンチサイトの発生が抑制されたことを示しており，本手法が GMR 構造においても有効であることが分かった[3]．得られた最大の MR 比はおよそ 20%であり，同一条件で作製した CoFe-GMR の値よりも約 3 倍大きな値となった．これはホイスラー合金の高いスピン偏極率を反映した結果である．以上のことより，Co 基ホイスラー合金の CPP-GMR 素子における有用性を実証した．

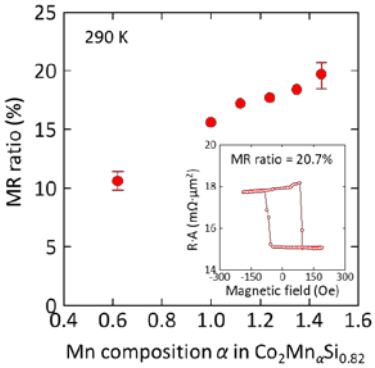


図 3. MR 比に対する Mn 組成依存性[3]．Mn-rich な組成で最も高い MR 比を示している．(挿入図．CMS/Ag/CMS GMR 構造の典型的な MR 特性．磁化平行状態と反平行状態の 2 値状態が表れている．)

(2) MR 比のさらなる増大を制限している起源を特定

Mn 組成を増加することにより MR 比の向上が得られたが，同時に Ag 層の両側の CMS 層間で，その磁化方向を相対的に 90º にするような磁気的結合が強くなり，これがさらなる MR 比の向上を妨げていることを見出した．同様の磁気的結合はこれまでの先行研究でも報告されていたが，その起源については明らかではなかった．本研究ではこの磁気的結合の起源が CMS 層から Ag 層に拡散した Mn 原子によるものであることをはじめて実験的に明らかにし，さらなる MR 比向上に向けての重要な知見を得た．

（4） 本発表の注目点

Co 基ホイスラー合金は MTJ や GMR，さらにはスピントランジスタの電極材料として盛んに研究がなされているが，本研究では欠陥を制御した独自の手法，具体的には，Co_2YZ の Y 組成を化学量論比よりも大きくすることで，Co 基ホイスラー合金のスピン偏極率の低下をもたらす代表的な構造欠陥を防ぐことができることを MTJ のみならず GMR 素子でも実証した．本研究の進展により，超高感度ナノ磁気センサーが実現されれば，HDD の読み取りヘッドをはじめ，車載センサー，生体計測，医療，化学分析など広範囲の分野の発展が期待される．

参考文献

[1] M. Yamamoto *et al.*, JPCM **22**, 164212 (2010).
[2] H.-x. Liu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 132418 (2012).
[3] M. Inoue *et al.*, Appl. Phys. Lett. **111**, 082403 (2017).

研究発表データシート

【２７】	小林　孝一 北海道大学大学院情報科学研究科 システム情報科学専攻・准教授	

発表タイトル	デマンドレスポンスのための電力消費ダイナミクスの確率モデル
サブタイトル	太陽光発電を活用したエネルギー管理システムの理論構築を目指して

（１） 研究者のアピールポイント

数学的なモデルや手法に基づくシステム制御理論は，四輪ロボットなどの機械システムからエネルギー管理システムなどの社会システムまで幅広い分野に適用できます．最近では，複数のエージェントが協調して動作するマルチエージェントシステムの制御も重要な課題となっています．我々の研究グループでは，複雑かつ大規模化しているダイナミカルシステムを制御するための新しい手法の開発を行っています．ここでは最近の研究の一つとして，エネルギー管理システムにおけるデマンドレスポンス（DR）の研究成果を紹介します．

（２） 本発表研究の概要

環境にやさしい社会を実現するためには，太陽光発電の大量導入が必要不可欠である．太陽光発電を大量導入するためには，太陽光発電予測や需要予測などの技術に加えて，需要家の協力も重要である．DR は，電力需給バランスを調整するために需要家に対して需要の抑制を促す方法である（図１参考）．太陽光発電を活用したエネルギー管理システムの実現に向けて，DR は重要な基盤技術の一つである．DR が高度化することで，太陽光発電の変動を系統側だけでなく，需要家側でも吸収できる．したがって，太陽光発電が現状以上に導入できることが期待される．

我々の研究グループでは，フィードバック制御の考え方を利用した DR の新しい設計手法の確立を目指している．DR が確実に実施できると，アグリゲータの機能が明確になり，ビジネスモデルの構築にもつながる．また，本研究を通して，電力会社，アグリゲータ，需要家の新しい役割分担が明確になることも期待される．本発表研究では，その基礎として開発した電力消費ダイナミクスのモデル化手法について紹介する．

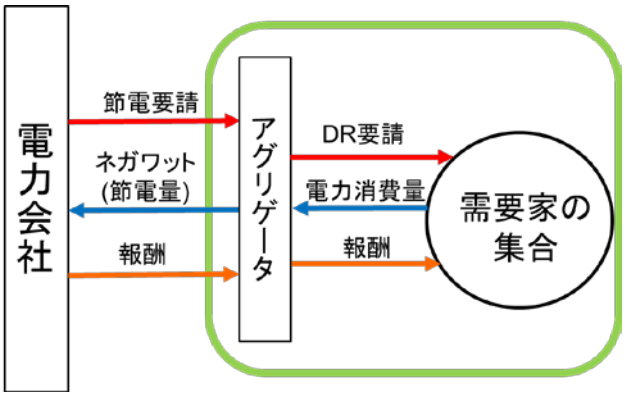


図 1：デマンドレスポンスの概念図

【２７】続き

（３） 本研究発表の詳細

一般家庭のエアコンの電力消費量をモデル化することを考える．一般家庭の電力消費量においてエアコンが占める割合は非常に高く，研究の第一段階として重要であると考えられる．ここでは，設定温度を変化させると，電力消費量がどのように変化するかをモデル化する．複雑な振る舞いを表現するためのモデルとして，切換型確率モデルを提案した．切換型確率モデルとは，確率モデル（例えば，マルコフ連鎖）を各時刻で切り替えるモデルである．天候や外気温などさまざまな要因で電力消費量が変化することから，確率モデルを用いることが適切である．本研究では，切換型確率モデルの導出手順の開発，およびエアコンの実データによる検証を行った．ここでは，使用したデータと得られたモデルの結果を簡単に説明する．

エアコンの実データは 2014 年 6 月に京都府宇治市で計測したデータを用いた（図２参照）．1 回の実験時間は 2 時間であり，最初の 1 時間は設定温度 24℃，後半の 1 時間は設定温度 20℃とした．実験は 58 回行い，図２を得た．エアコンの場合，DR で調整できるのは設定温度である．したがって，本実験により，設定温度に対する電力消費量の変化を評価することができる．図２から，設定温度を変更することで，電力消費量が変化することがわかる．また，設定温度を一定にしていても外気温などの影響により，電力消費量が変化することがわかる．

図２の実験データを用いて切換型確率モデルを導出した結果を図３に示す．ここでは，21.0℃から 24.9℃までのデータのみを用いた．図３において，青線 $p(k)$は実験データの平均値である．赤線 $E[p(k)]$は提案した切換型確率モデルにより得られた電力消費量の期待値である． 相対誤差は 4.5%であり，実際のデータを表現できていると考えられる．

今後は提案したモデルを用いた制御問題を検討していく．将来をモデルで予測して現在の最適な制御入力（例えば，エアコンの設定温度）を求める制御手法は，モデル予測制御と呼ばれている．提案したモデルを単に利用するだけでなく，数百程度の需要家を対象とする必要があるため，大規模な計算が必要となる．したがって，高速化を検討していく必要がある．また，需要家間の公平性も考慮する必要がある．引き続き，制御手法の開発を進めていきたい．

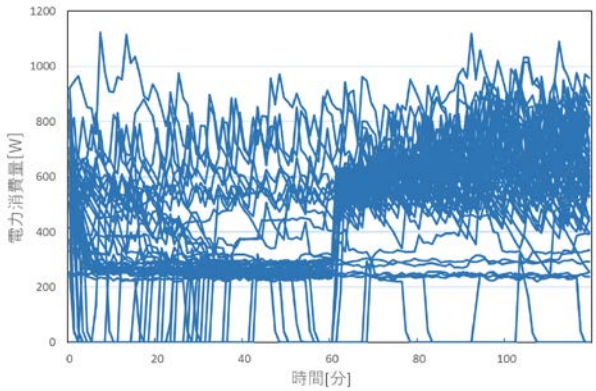


図２：電力消費量の実験データ

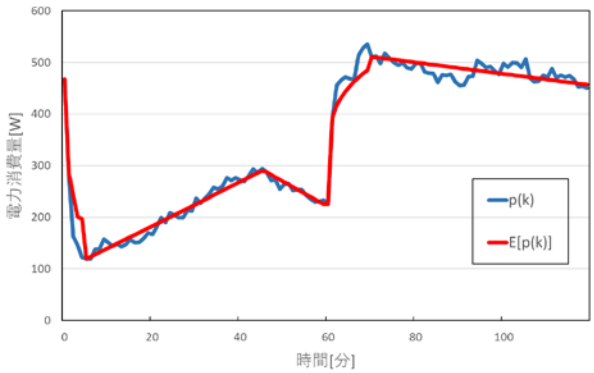


図３：データと提案モデルの比較

（４） 本発表の注目点

DR のための数理モデルは研究が少なく，実験データからのモデル化は今後ますます重要になってくると考えられる．また，本研究の成果はシステム制御理論だけでなく，データサイエンスなどの新しい分野とも関連している．