


# 北海道大学工学系シーズ集Vol.14

## イノベーションフォーラム2016 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	江上 喜幸 助教	MOS界面中の欠陥によるリーク電流に関する数値シミュレーション
2	応用化学部門	岩佐 信弘 助教	燃料電池用水素ガスからの一酸化炭素の選択的除去触媒の開発
3	応用化学部門	真栄城 正寿 助教	マイクロデバイスを用いたタンパク質の結晶化
4	応用化学部門	長浜 太郎 准教授	スピネル酸化物を用いた新規スピントロニクスデバイスの開発
5	材料科学部門	大参 達也 准教授	材料プロセスを利用したマイクロチャンネルデバイスの製造とマイクロチャンネル内壁の機能化
6	機械宇宙工学部門	寺島 洋史 准教授	燃焼反応流体シミュレーションの新たな展開：詳細反応機構の適用を可能とする高効率反応性流体解析手法の提案
7	人間機械システムデザイン部門	大橋 俊朗 教授	ハイスループット細胞培養実験のためのバイオMEMSデバイス
8	エネルギー環境システム部門	三輪 修一郎 助教	超音速蒸気インジェクタを用いた静的炉心注水システムの開発
9	量子理工学部門	加美山 隆 准教授	加速器中性子を用いた微細な材料組織情報の広視野非破壊イメージング
10	環境フィールド工学部門	田中 岳 助教	降雨流出変換系の不確実性とそれを考慮した流出解析
11	北方圏環境政策工学部門	内田 賢悦 准教授	不確実性下における交通ネットワーク解析手法の開発—時間信頼性解析法—
12	建築都市空間デザイン部門	瀬戸口 剛 教授	風雪の影響を低減する都市設計シミュレーションの開発
13	空間性能システム部門	飯場 正紀 教授	地震観測記録に基づく地盤液状化時の建築物の振動性状
14	環境創生工学部門	岡部 聡 教授	新規微生物機能を統合した超省エネ型水処理システム
15	環境循環システム部門	中島 一紀 准教授	タンパク質を利用したシリカ材料の作製
16	エネルギー・マテリアル融合領域研究センター	柴山 環樹 教授	複合量子ビーム超高圧電子顕微鏡を用いたその場観察とナノ材料開発への応用
18	情報理工学専攻	川村 秀憲 教授	エンターテインメントのための屋内バルーンロボットの開発
26	情報エレクトロニクス専攻	岡本 淳 准教授	光による未来の創造
28	生命人間情報科学専攻	工藤 信樹 准教授	フォーカストシャドウグラフ法による透明減衰媒体中の超音波音場可視化
30	メディアネットワーク専攻	藤澤 剛 准教授	光通信容量の飛躍的高度化に向けたモード分割多重通信技術の研究
35	システム情報科学専攻	田中 孝之 准教授	ウェアラブルセンサによる腰部負担の見える化
37	システム情報科学専攻	五十嵐 一 教授	非接触給電系の電磁界解析

※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】	江上 喜幸 北海道大学大学院工学研究院 応用物理学部門・助教	
-----	--------------------------------------	---

発表タイトル	MOS 界面中の欠陥によるリーク電流に関する数値シミュレーション
サブタイトル	

### (1) 研究者のアピールポイント

できるだけ物理的、化学的な近似を取り入れない第一原理計算手法を用いて、導電性分子やカーボンナノチューブ、グラフェンなどのナノスケール構造体における電子輸送特性の解析を行ない、次世代電子デバイス材料として有用な物質の探索やデザインを行なっている。スーパーコンピュータでの大規模計算にも適した独自のプログラムコードの開発も行なっている。

### (2) 本発表研究の概要

電界効果型トランジスタに見られる MOS (金属/酸化膜/半導体) 構造について、界面中に生じた酸素欠陥がリーク電流に与える影響について、第一原理電子輸送シミュレーションを用いて解析を行なった。ここでは、Si/SiO<sub>2</sub> 界面モデルと Ge/GeO<sub>2</sub> 界面モデルを用い、欠陥が及ぼす影響の違いや、その起源について比較を行なった。その結果、Si と Ge でダングリッドボンド由来の状態が持つ性質や基板中のエネルギー準位との相互作用が異なっており、Si/SiO<sub>2</sub> 界面モデルに比べ、Ge/GeO<sub>2</sub> 界面モデルでは欠陥によるリーク電流の増加比が 10 分の 1 以下に抑えられることが分かった。

### (3) 本研究発表の詳細

現在、電子デバイスのほとんどは Si ベースの素子によって構成されている。これらのデバイスでは、トランジスタなどの素子の小型化、高集積化によって高性能化が進められてきた。トランジスタの中でも最もポピュラーな構造として MOSFET があるが、小型化に伴いゲート絶縁層である半導体酸化膜の薄膜化が進んでいる。このため、わずかな格子欠陥であっても酸化膜の絶縁性を低下させ、絶縁層を透過するゲートリーク電流が増大するといった問題が生じている。そこで、より絶縁性の高い high-k 材料や欠陥の影響を受けにくい材料など、ポスト Si 材料の探索に多くの関心が寄せられている。本研究では、半導体/酸化膜界面近傍に酸素欠陥が生じた場合に、ダングリッドボンド(DB)の存在がリーク電流に与える影響について数値シミュレーションを行った。ここでは、ポスト Si 材料のひとつとして注目されている Ge について、Si の場合と比較をしながら解析を行なった。

計算モデルとして、半導体基板上に $\alpha$ -クォーツ型の半導体酸化物が積層した構造を考え、図 1 のような酸素欠陥を導入したモデルについて、半導体基板側から入射してくる電子の輸送特性を計算した。SiO<sub>2</sub>(GeO<sub>2</sub>)層と Si(Ge)基板層の厚さはそれぞれ 7.34 (7.25) Å と 7.18 (7.37) Å とした。計算は密度汎関数理論に基づく第一原理計算手法を用い、原子核-電子間のクーロン相互作用はノルム保存型擬ポテンシャルを、電子間相関交換相互作用は局所密度近似を用いて表した。また、Kohn-Sham 方程式における 2 階微分項の計算は差分近似を用いて行った。電子輸送特性は Grid Lippmann-Schwinger 法を用いて計算した。

図 2(a)は Si/SiO<sub>2</sub> モデル、図 2(b)は Ge/GeO<sub>2</sub> モデルについて、酸素欠陥による DB がない場合とある場合のコンダクタンススペクトルの計算結果をそれぞれ描いている。Ge/GeO<sub>2</sub> モデルの方には目立ったピークは見られないが、Si/SiO<sub>2</sub> モデルについては VBM+0.41 eV 近辺で非常に高いピークが見られる。この違いの要因について、原子構造と電子状態の関係から考察する。

【1】 続き

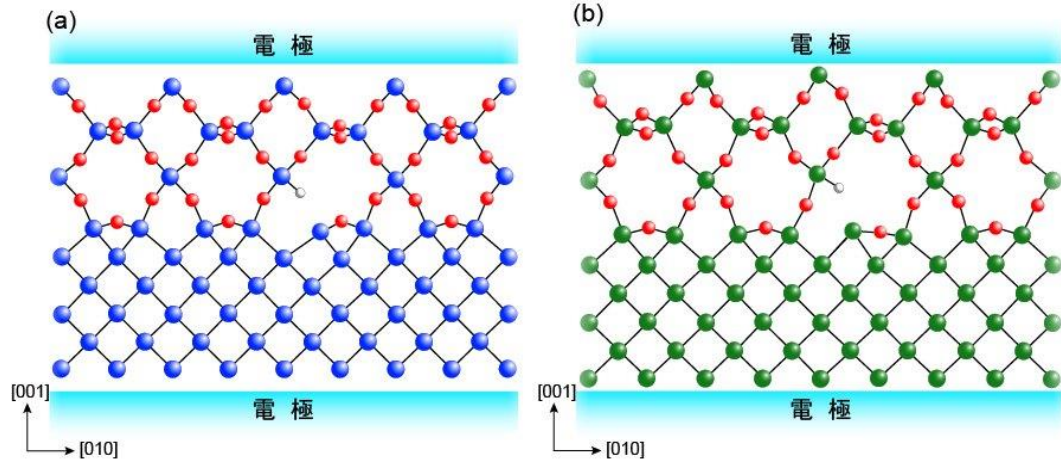


図 1：構造最適化を行った半導体/酸化物構造のモデル図。青、緑、赤、白の球はそれぞれ Si 原子、Ge 原子、O 原子、H 原子を表わす。

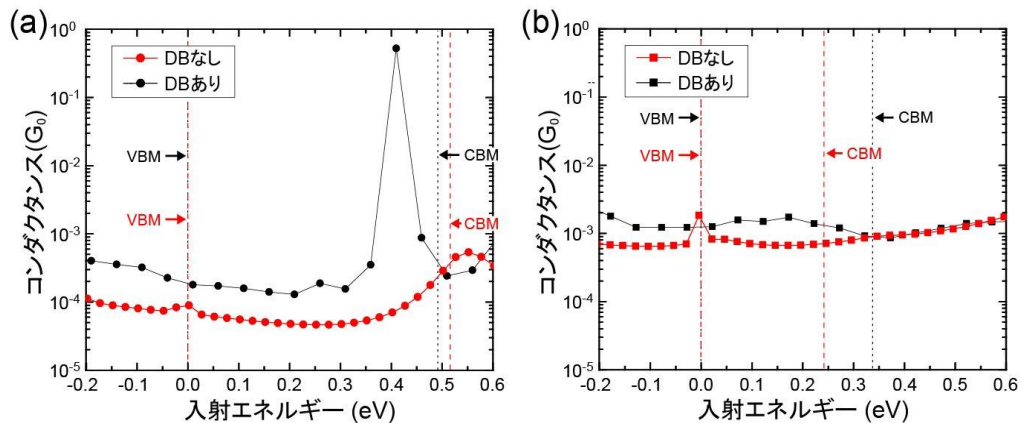


図 2: (a)Si/SiO<sub>2</sub> モデルと(b)Ge/GeO<sub>2</sub> モデルにおけるコンダクタンススペクトルの計算結果。VBM は半導体基板における価電子帯の上端、CBM は伝導帯の下端を表わす。

ダイヤモンド構造の半導体では DB が生成されたとき、DB 状態が持つ性質が s 軌道型になるか p 軌道型になるかの 2 通りの可能性が考えられる。p 軌道型の場合、残りの 3 つの結合手は sp<sup>2</sup> 混成軌道型の状態を形成しようとし、ストレスがないようにフラットな構造を取ろうとする。図 1(a)を見ると、DB を持つ Si 原子が Si 基板側に引き下げられて、結合している 3 つの原子と平面構造を取ろうとしていることから、この Si 原子は p 軌道型の DB を持っていることが分かる。このとき DB は [001] 方向に広がっており、その準位は基板のエネルギーギャップ中に現れる。これが絶縁性の低下を招く原因となっている。


一方で、DB 状態が s 軌道型の場合、残りの 3 つの結合手は p 軌道型になろうとするため、最も安定な四面体構造を取ろうとし、s 軌道型 DB は結合している 3 つから離れようとする。図 1(b)で DB を持つ Ge は酸化膜側に引き上げられ、結合している 3 つの原子と四面体構造を取ろうとしている。すなわち、この Ge 原子の DB は s 軌道型であり、Si の DB に比べて界面に平行な方向に広がる性質を持ち、Ge 基板の界面準位と結びついている。このため、[001] 方向の電子輸送にはあまり寄与しない。

結果として、酸素欠陥が生じることによって、リーク電流は Si/SiO<sub>2</sub> モデルでは 163 倍になるのに対し、Ge/GeO<sub>2</sub> モデルでは 12 倍程度に抑えられている。

(4) 本発表の注目点

実験的に観察することが難しいナノスケールの原子構造や電子状態を計算機シミュレーションによって再現し、欠陥によって生じるダングリングボンド状態が持つ性質を解析することで、ゲートリーク電流に与える影響の違いを明らかにし、Ge ベース MOS 構造の有用性を示した。

# 研究発表データシート

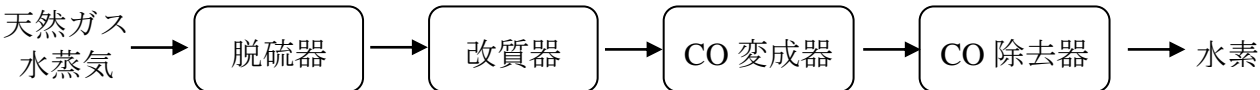
【2】	岩佐 信弘 北海道大学大学院工学研究院 応用化学部門・助教	
-----	-------------------------------------	---

発表タイトル	燃料電池用水素ガスからの一酸化炭素の選択的除去触媒の開発
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント  
 研究者は一貫して固体触媒を用いて水素の関与する研究に従事してきた。これまで、メタノールやエタノールなどのアルコールやメタン、ジメチルエーテルからの水素製造に関する研究を行い、それぞれの反応における有効な触媒およびその作用機構について明らかにしてきた。近年は、燃料電池を構成しているプロセスの一つである水素ガスからの一酸化炭素の選択的除去にも取り組んでいる。

(2) 本発表研究の概要  
 燃料電池の燃料である水素は、炭化水素、アルコールやエーテルなどの水蒸気改質反応により製造されるが、改質ガス中に含まれる微量の一酸化炭素による電池の白金電極の被毒が問題となる。本研究では改質ガス中の一酸化炭素の濃度を低減する技術として、水性ガス転換反応、選択的酸化、選択的水素化について検討を行い、それぞれのプロセスにおける最適な触媒および操作条件を明らかにした。また燃料電池では日々の起動・停止による DSS(Daily Start and Stop operation)運転が必要となるため、その影響についても明らかにした。

(3) 本研究発表の詳細  
 燃料電池システムでは、図 1 に示すように改質ガス中に含まれる一酸化炭素を CO 変成器および CO 除去器により 50 ppm 以下まで低減した後に燃料電池に供給している。



```

            graph LR
            A[天然ガス  
水蒸気] --> B[脱硫器]
            B --> C[改質器]
            C --> D[CO 変成器]
            D --> E[CO 除去器]
            E --> F[水素]
            
```

図 1 燃料電池用水素製造プロセスのフローチャート

CO 変成器では水性ガス転換反応 ( $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ ) により、改質ガス中に数%程度含まれる一酸化炭素を 0.5~1%の濃度まで低減している。この反応には Cu/ZnO 系触媒が高い活性を示すことが知られているが、燃料電池への利用では DSS 運転による触媒活性の劣化が問題となる。そのため、CO 変成触媒には高い活性と DSS 運転に対する優れた耐久性を併せ持つことが求められる。そこで、Cu/ZnO 触媒に第 3 金属(Fe, Cr, Zr, Ga, Ce, La)を添加して、活性と DSS 条件下における耐久性に及ぼす影響について検討した。

その結果、第 3 金属を添加していないオリジナルの Cu/ZnO 触媒の CO 転化率は 62%であったのに対して、Zr や Ga, Fe を添加した触媒では CO 転化率が 70~80%に向上し、特に Fe の添加が最も効果的であることが分かった(図 2)。CO 転化率が向上した要因の一つとして、第 3 金属の添加により触媒表面の Cu 種の分散度が増加するためであると考えている。

また、DSS 運転を 4 回行った触媒の CO 転化率と DSS 運転 1 回目の初期 CO 転化率より活性の低下率を求めて触媒の耐久性を評価すると、第 3 金属を添加していない Cu/ZnO 触媒の場合、活性低下率は 65%

## 【2】 続き

であったのに対して、Fe や Zr を添加した触媒の場合、活性低下率が 12~15%に抑えられること、特に Zr を添加した触媒が優れた耐久性を有することを見出した。これは市販の工業用触媒である MDC-02(Cu-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)の活性低下率 26%よりも優れた結果となった。反応前後の触媒の物性測定より、Zr などの第 3 金属の添加により触媒の耐久性が向上した要因として、DSS 運転下においても Cu 種のシンタリング(金属凝集)が抑制されるためであることを明らかにした。

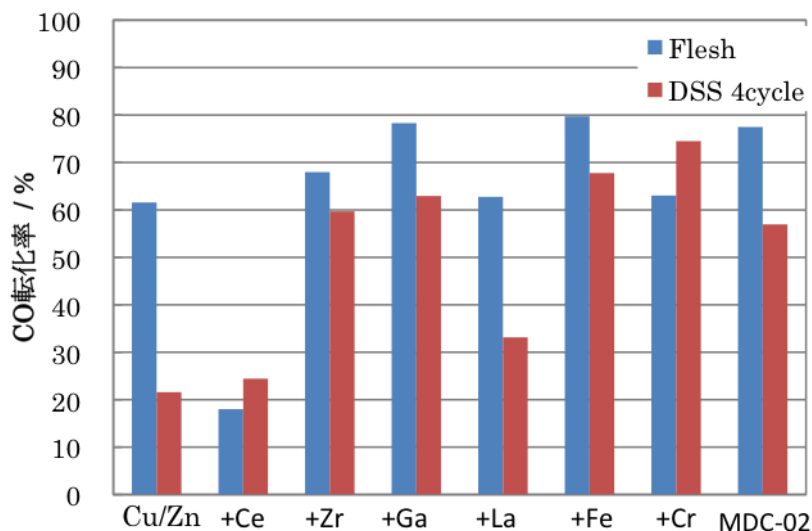



図 2 DSS 運転による第 3 金属を含む Cu/ZnO 触媒の CO 転化率の変化

一方、CO 除去器では選択酸化 ( $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ ) あるいは選択水素化 ( $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ) により一酸化炭素の濃度を低減している。これらの反応に用いられる触媒には、高い活性を有するばかりでなく、一酸化炭素のみを選択的に除去する高い選択性も求められる。すなわち、選択酸化においては共存する水素を酸化せずに一酸化炭素のみを優先的に酸化除去すること、選択的水素化においては、共存する二酸化炭素の水素化を抑制して、一酸化炭素のみを選択的にメタンに変換することが重要である。発明者らは、これらの反応に対して有効な触媒の開発を行い、選択的酸化には Pd を Zn と合金化した触媒に Cs などの微量のアルカリ金属を添加した触媒が、選択的水素化にはメソ多孔体の一種であるスメクタイトに Ni を取り込んだ触媒が極めて高い活性および選択性を有することを見出した。

### (4) 本発表の注目点

水性ガス転換反応は古くから炭化水素などの水蒸気改質による水素製造プロセスで用いられている反応であるが、最近の燃料電池の普及にともない再び精力的に研究が行われている。工業的に化学品を製造するプラントとは異なり、日々の起動停止による DSS 運転条件での活性劣化が問題となるが、既存の Cu/ZnO 系触媒に適切な金属種を添加することにより、活性の向上ばかりでなく活性劣化の抑制が可能となる。

## 研究発表データシート

【3】	真栄城 正寿 北海道大学大学院 工学研究院 応用化学部門、生物計測化学研究室・助教	
-----	---	---

発表タイトル	マイクロデバイスを用いたタンパク質の結晶化
サブタイトル	
<p>(1) 研究者のアピールポイント タンパク質などの生体分子を微量試料で簡便に測定（構造決定・定量）できる分析法や分析システムの開発は、生命現象の解明や医薬品開発、遺伝子解析など学術・産業分野を含めた生命科学分野に多大な貢献をもたらす。我々は、分析装置の小型化や高感度化、操作の簡便化が可能なマイクロデバイスの開発に取り組んでいる。本発表では、タンパク質の立体構造解析のためのマイクロデバイスについて紹介する。</p> <p>(2) 本発表研究の概要 タンパク質の立体構造は、創薬や生命現象の解明において重要な情報を与える。その主な解析法は、タンパク質の単結晶を用いた X 線結晶構造解析である。しかし、高分解能な X 線回折データを与えるタンパク質の単結晶作製と結晶成長は、実験従事者の経験と運に依存している。本研究発表では、マイクロデバイスを用いたタンパク質結晶化と立体構造解析への応用に関する研究について報告する。</p> <p>(3) 本研究発表の詳細 タンパク質の結晶構造解析は、生命現象の解明や創薬などにおいて重要である立体構造情報を得るための強力な手法である。しかし、良質なタンパク質の単結晶作製と X 線結晶構造解析は未だに熟練者の勘や経験に大きく依存しており、簡便な測定手法や技術開発が望まれている。マイクロデバイスを用いたタンパク質の結晶化は、省サンプル化やハイスループット・スクリーニングなどの多くの利点があるため、アメリカを中心に研究開発競争が行われている。しかし、これまでの研究は、従来の結晶化方法を単純に小型化に関する研究であった。一方で我々は、マイクロ空間でのタンパク質の結晶化挙動に関する研究を行い、結晶化空間を精密に設計することで、タンパク質の結晶成長を制御し、高品質な単結晶を作製できることを明らかにした<sup>[1,2]</sup>。また、マイクロデバイスを用いて、on-chip での X 線結晶構造解析を行い、高分解能での立体構造決定を実現した<sup>[3]</sup>。本研究発表では、マイクロデバイスを用いた 2 種類のタンパク質の結晶化方法と機能集積化立体構造解析デバイスの開発について報告する。</p> <p>マイクロ流体デバイスは、半導体微細加工技術を用いてガラスなどの基板に数百 <math>\mu\text{m}</math> の幅の流路を作製して、その流路中で化学反応や分析を行うことができる化学システムである。小型、省サンプル量などの特徴があり、バルブなどを集積化することによって、結晶化→前処理→構造解析までの一連のプロセスが 1 個のデバイスだけで実現可能となると考えた。そこで、我々は結晶化空間サイズと機能集積化という 2 つのアプローチによって、課題解決に取り組んできた。まず、マイクロデバイスで高品質なタンパク質の単結晶を作製するために、微小液滴やマイクロチャンバーのような微小空間におけるタンパク質の結晶化挙動を行った。図 1 に微小液滴によるタンパク</p>	

### 【3】 続き

質の結晶化法を示す。分子量が大きく異なる4種類のタンパク質をマイクロデバイスで生成した微小液滴中で結晶化させた。その結果、タンパク質分子の拡散と結晶化空間サイズが結晶化制御において重要な要素であることを明らかにした。また、結晶化挙動解析によって得られた知見をもとに、従来法では結晶同士が集積して解析が困難であったタンパク質の場合でも、マイクロデバイスによって測定に適した結晶を作製することに成功し、タンパク質の立体構造の高解像度決定を達成した(図2-①)。

さらに、結晶化、前処理、X線結晶構造解析を1つのデバイスで実現可能な機能集積化マイクロデバイスを開発し、タンパク質の立体構造解析のためのトータルシステムを創成した。我々が開発した微小空間による結晶化制御とマイクロ流体技術を用いたトータルシステムの組み合わせは、これまで立体構造を決定できなかったタンパク質の立体構造を解析できる手法となり、生命科学分野に大きく寄与するとともに、創薬産業の発展にも貢献できると期待される。

#### (4) 本発表の注目点

本研究は、北海道大学が中心となって、九州大学(理学部)、佐賀大学(農学部)、久留米大学(医学部)、九州シンクロトロン光研究センター、産業技術総合研究所、およびイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校(アメリカ)との国内外の研究機関による共同研究によって推進している。北海道大学、産総研、イリノイ大学がマイクロ

デバイスの設計・作製を担当している。また、理・農・医学部の共同研究者からは、末端利用者の立場からデバイス設計に関する助言をもらい、従来法では構造解析が困難なタンパク質の立体構造解析に取り組んでいる。今後も、工学、理学、農学、医学などの分野横断的な研究体制によって研究を推進し、本技術をタンパク質構造解析のトータルシステムとして確立したい。

#### 参考文献

- [1] M. Maeki, H. Yamaguchi, K. Yamashita, H. Nakamura, M. Miyazaki, H. Maeda, *Chem. Commun.*, **48**, 5037-5039, (2012).
- [2] M. Maeki, Y. Teshima, S. Yoshizuka, H. Yamaguchi, K. Yamashita, M. Miyazaki, *Chem. Eur. J.*, **20**, 1049-1056, (2014).
- [3] M. Maeki, A. S. Pawate, K. Yamashita, M. Kawamoto, M. Tokeshi, P. J. A. Kenis, M. Miyazaki, *Anal. Chem.*, **87**, 4194-4200, (2015)

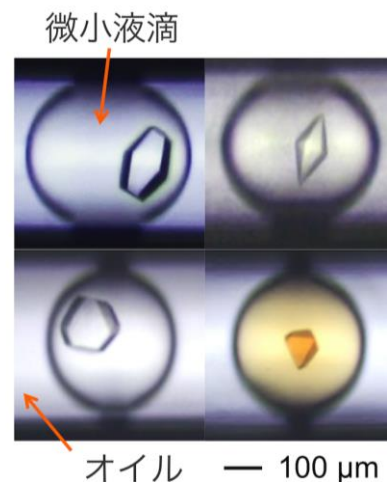


図1 微小液滴による結晶化制御

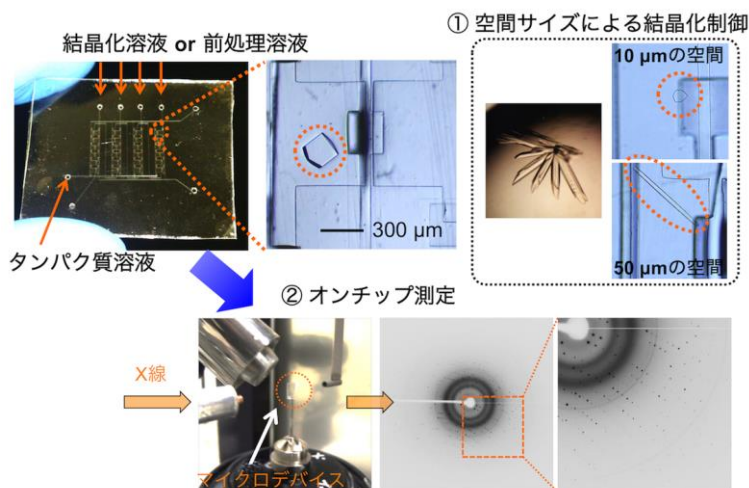



図2 機能集積化マイクロデバイスによる①結晶化制御と②オンチップ測定

## 研究発表データシート

【4】	長浜太郎 北海道大学大学院（工学研究院） 応用化学部門無機材料化学分野・准教授	
-----	---	---

発表タイトル	スピネル酸化物を用いた新規スピントロニクスデバイスの開発
サブタイトル	酸化物・金属ハイブリッド多層膜による高機能素子を目指して

### （1）研究者のアピールポイント

我々は電子のスピン自由度と電荷の自由度を融合した新しいエレクトロニクス技術であるスピントロニクスに関する研究を行っています。スピン機能を取り入れることにより、不揮発性や省エネルギー特性を実現することが可能となります。とくに当研究室ではスピントロニクス分野では未知の領域の多い酸化物材料を活用した新機能素子の開発に力を入れています。酸化物磁性体は高スピン偏極率であり、キュリー点も高く、化学的に安定であるなど、多くの利点を有していますが、一方で高品質薄膜の作製は容易ではなく材料学的なブレークスルーが期待されています。我々は反応性 MBE 法による高品質多層膜作成から素子特性評価まで一貫した研究開発に取り組んでいます。

### （2）本発表研究の概要

酸化物磁性体の中でもスピネル型フェライトは高いキュリー点を持ち、室温動作スピントロニクス材料として大きな期待を集めています。とくに典型的な鉄酸化物であるマグネタイト ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) は、電子状態計算から 100% スピン分極電流が得られるハーフメタル材料であると予測されています。本発表では  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の高品質エピタキシャル膜の作製とその磁気特性から、それを電極に用いたトンネル磁気抵抗素子 (MTJ) の開発について紹介します。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MTJ は大きな負の磁気抵抗効果 (MR 効果) が期待されていますが、これまで実現された例は多くありません。我々は酸化物のエピタキシャル成長技術と金属薄膜作製技術を組み合わせて、高品質な  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -MTJ の作成に成功し、-15% の抵抗変化を得ることができました。また、同類の材料である  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  などを用いた新規スピントロニクス素子の開発も行っています。

### （3）本研究発表の詳細

スピネル型酸化物は図1に示すような比較的複雑な構造をしています。単結晶的なエピタキシャル成長を促すため、格子定数の近い酸化マグネシウム ( $\text{MgO}$ ) あるいはサファイア ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) を基板として用います。 $10^{-8}\text{Pa}$  台の超高真空環境下で  $\text{O}_2$  ガスあるいは原子状酸素を導入し、酸化物層の成長を行なうことにより、高品質なスピネル型酸化物薄膜の作成が可能となりました。図2は  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CoCr}_2\text{O}_4/\text{Fe}$  多層膜の断面電子顕微鏡写真です。それぞれの層がきれいにエピタキシャル成長していることがわかります。このような手法を用いて、幾つかの結晶方位で  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  膜の作製し磁気特性の評価を行いました (図3)。結晶方位によって磁気特性が大きく異なること、また、(110)方位では特性が磁場の方向に依存する磁気異方性を有することがわかりました。これは基板として用いた

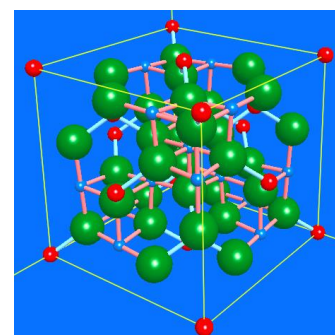


図1：スピネル型酸化物の結晶構造。緑色が酸素、赤と青は鉄などの陽イオン。



#### 【4】 続き

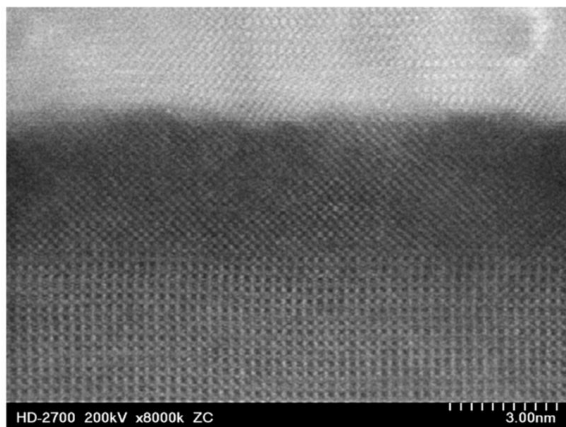


図2：Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CoCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Fe 多層膜断面の高分解能電子顕微鏡写真

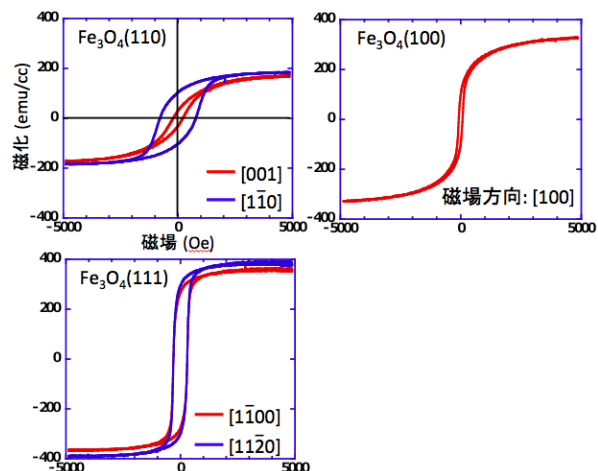


図3：Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の各結晶方位による磁気特性

MgO(110)の構造異方性が反映したものと考えられます。MTJ として利用するには、磁気特性としては(111)成長したものが最適であることがわかりますが、さらに表面構造の評価などを加味すると、MTJ の電極層としてはFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(110)が適していることがわかりました。図4にFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe トンネル接合の磁気抵抗曲線を示します。トンネル磁気抵抗効果は2つの強磁性電極を持っており、その磁化が同じ方向を向いている状態(平行状態)と逆向きを向いている状態(反平行状態)で大きく電気抵抗が変化する現象です。外部磁場によって磁気状態を変えることによって15%の抵抗変化を観測することができました。また、通常のMTJとことなり、反平行状態のほうが抵抗が低い事がわかります。これは、電子状態計算の結果と一致するものです。理論的には抵抗変化はさらに増大することが予想されており、界面状態の制御などによって巨大な磁気抵抗変化を実現したいと考えています。

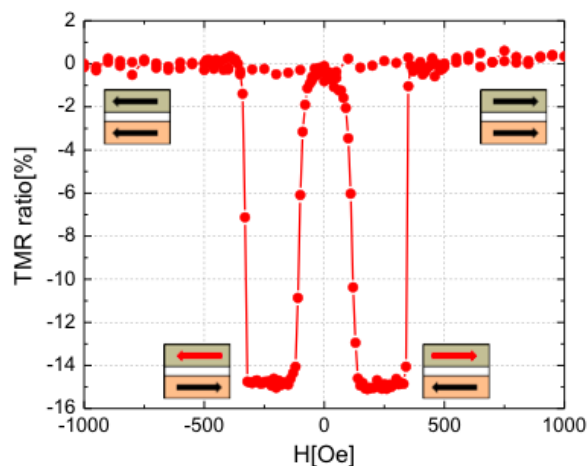



図4：Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(110)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe トンネル接合のトンネル磁気抵抗曲線。図中の矢印は各磁性層の磁化の方向を示している、

#### (4) 本発表の注目点

これまで磁気材料は記録媒体として、電気材料はエレクトロニクスとしてそれぞれ発展を遂げてきました。両者のいいとこどりで、新機能の発現を目指すのがスピントロニクスです。その研究成果の一部はすでにハードディスクの超高密度化や次世代メモリであるMRAM (Magnetoresistive Random Access memory) の実現に貢献しました。本研究ではさらなる高性能化を目指して材料開発の観点から、酸化物磁性体の活用を進めています。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>だけではなく、CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> やγ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などスピネル型酸化物はスピントロニクス材料としての基礎的な特性を有しており、これらを組み合わせることで新機能スピントロニクスデバイスの実現が可能になると期待されます。

## 研究発表データシート

【5】	大参達也 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	材料プロセスを利用したマイクロチャンネルデバイスの製造とマイクロチャンネル内壁の機能化
サブタイトル	金属粉末から環境技術用マイクロリアクターを創る

(1) 研究者のアピールポイント

未利用の工業廃熱を効率良く回収し化学エネルギーに転換する新システムの創成を目指して、粉末冶金、合金化／脱合金化、高温酸化、陽極酸化等、様々な材料プロセスを取り入れたマイクロリアクター製造プロセスを研究している。

(2) 本発表研究の概要

マイクロリアクターとは、直径 1mm 未満の微細な流路（マイクロチャンネル）を化学反応や熱交換の場とする小型反応器である。本研究では、優れた伝熱性能を有する金属製マイクロリアクターユニットの製造法と、マイクロチャンネル内壁に触媒を担持するためのポストプロセスを検討した。

(3) 本研究発表の詳細

① 犠牲コア法による金属製マイクロリアクターユニットの製造

金属製のマイクロリアクターは、比表面積の高いマイクロチャンネル構造に由来する優れた伝熱性能と、金属の持つ高い熱伝導率と耐熱性を兼ね備えていることから、精密な温度制御を要する触媒反応に適している。犠牲コア法は、粉末冶金技術を基盤とするマイクロチャンネル形成法であり、金属部材内部にマイクロチャンネルを「その場」形成すると同時にマイクロチャンネル内壁を局所的に合金化することができる。

図 1 に犠牲コア法の概要を、図 2 にマイクロチャンネル形成機構をそれぞれ示す。

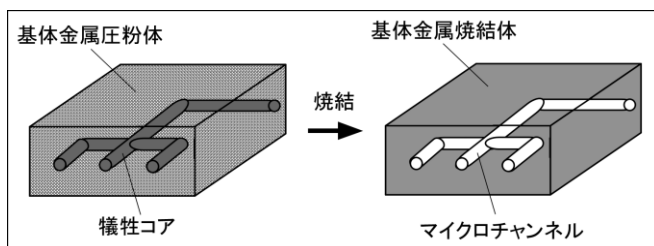


図 1 犠牲コア法

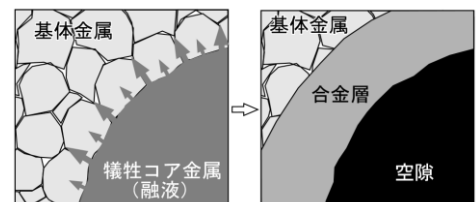


図 2 マイクロチャンネル形成機構

犠牲コア法では、デバイス本体を構成する基体金属（高融点）とマイクロチャンネルの形状を与える犠牲コア金属（低融点）との二種類の金属種を用いる。犠牲コア（成形された犠牲コア金属）を内包する基体金属圧粉体を犠牲コア金属の融点以上で焼結すると、熔融した犠牲コア金属が基体金属側に浸透・拡散して空隙を形成するとともにその周囲に合金層を形成する。この合金

## 【5】 続き

層をライニング層と呼んでいる。ライニング層の組成と組織は、二種類の金属種の組み合わせと、焼結条件によって多様に変化する。図3にニッケル（基体金属）とアルミニウム（犠牲コア金属）の組み合わせを用いて作製したマイクロチャンネルの横断面組織を示す。マイクロチャンネルの内壁に多孔質のNiAl金属間化合物層が形成している。金属間化合物NiAlは耐熱性、耐食性、耐酸化性に優れる。また、ライニング層内では、直径1~10 $\mu\text{m}$ 程度の細孔が膜厚方向に整列しながら長く成長している。このようなマイクロチャンネル内壁組織は沸騰熱伝達の安定化を促進し、伝熱性能を向上させることが期待される。

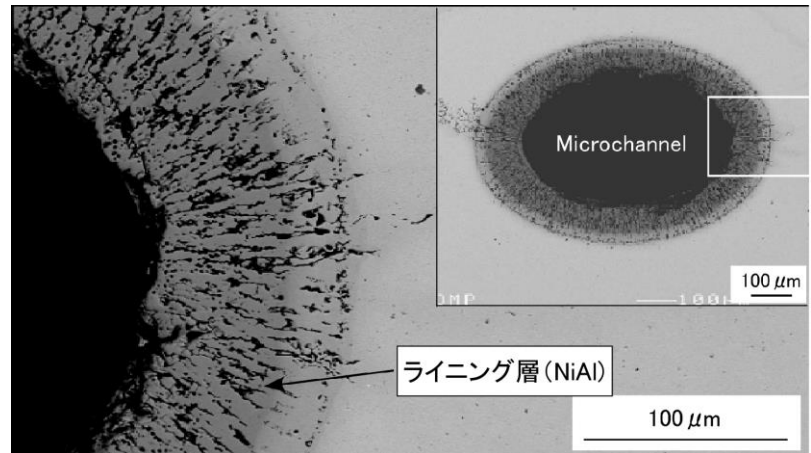


図3 Ni-Al系犠牲コア法により形成したライニング層の組織

### ② ポストプロセスによるマイクロチャンネル内壁の高機能化

マイクロチャンネル内壁に形成したライニング層に簡便なポストプロセスを施し、その組成や組織を制御して触媒や触媒担体を形成することを試みた。図4~6にこれまで検討した例を示す。

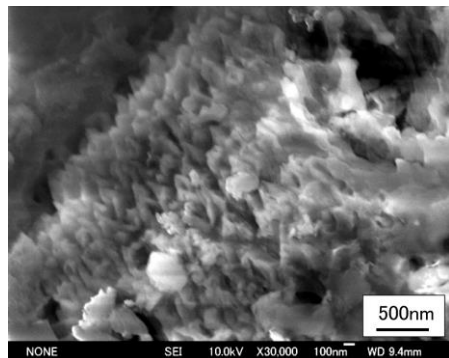


図4  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ ライニング層のアルカリリーチングによる脱合金化（ラネー型Ni触媒）

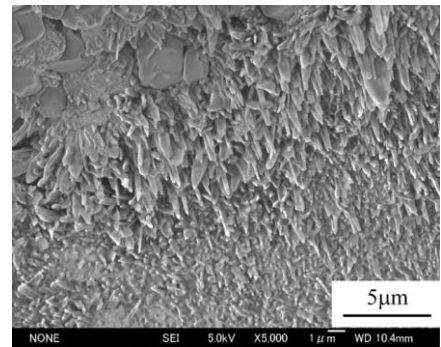


図5 NiAlライニング層の高温酸化によるアルミナ皮膜の形成（触媒担体）

### （4） 本発表の注目点

工業廃熱の有効利用は環境技術における重要な課題である。本研究で明らかにしたように、粉末冶金、合金化／脱合金化、高温酸化、陽極酸化等の様々な材料プロセスを駆使することによって、いわゆる微細加工技術では容易に作製することのできない、機能性を有したマイクロチャンネル内壁を形成することができる。本手法を発展させて、例えば炭化水素の改質反応によって水素を製造するマイクロリアクターシステムを構築することができれば、工業廃熱を効率良く化学エネルギーに転換し、輸送・貯蔵を容易にすることが可能になると期待される。

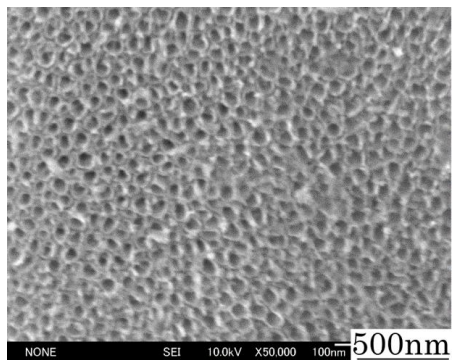



図6 Ti-Al合金ライニング層の陽極酸化によるナノポーラスチタニア皮膜の形成（触媒担体）

# 研究発表データシート

【6】	寺島 洋史 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	燃焼反応流体シミュレーションの新たな展開
サブタイトル	詳細反応機構の適用を可能とする高効率反応性流体解析手法の提案

## (1) 研究者のアピールポイント

スパコンなど高性能並列計算機を援用した熱流体シミュレーション技術の研究開発と適用を行っています。特に、近年は、化学反応を伴う燃焼流の研究に注力しており、これまで困難であった詳細化学反応と流体の一体的な解析を可能とする独自の解析手法を提案しています。本手法は、液体ロケット、宇宙衛星推進器（下図）、自動車内燃機関などで見られる非定常燃焼流現象の解明に適用されており、現在実施中の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的燃焼技術」における研究開発（ノッキング抑制技術の開発）にも活用されています。

## (2) 本発表研究の概要

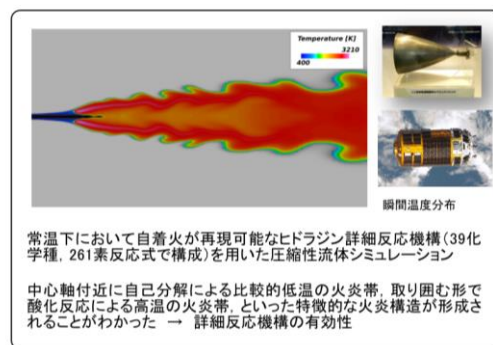
数百化学種、数千化学反応オーダーから成る炭化水素系燃料のような大規模詳細反応機構を効率的に熱流体シミュレーションに組み込む数値解析技術を紹介します。

## (3) 本研究発表の詳細

これまでの熱流体シミュレーションにおける化学反応現象は、主に計算負荷や解析技術の欠如から、数個の反応式で系を表現する総括反応モデルや無限に早い化学反応を仮定するなど、簡素にモデル化されてきた。一方で、化学反応と流体现象の相互作用が重要となる場合、例えば、着火や消炎タイミングをはじめとした非定常現象の予測や極限的な超希薄燃焼条件では、それら簡素モデルの適用は困難である。そのため、幅広い条件で化学反応現象を予測できる詳細反応機構の適用が望まれてきたが、その適用は非常に限定的であった。これは、詳細反応機構が、結果として数百数千の化学種と数千数万の素反応から構成されることに起因し、具体的には以下二つの大きな問題が発生するためである。

- ① 詳細反応機構に基づく化学反応方程式は、幅広い時間スケールを持つため、極めて硬直性が強く、使用できる時間刻み幅が極めて小さくなる。これは、数値安定性にも影響し、効率的かつ堅牢な解析を困難にする
- ② 考慮する化学種が増加するため、化学種同士の相互作用から計算される輸送係数評価の計算負荷が増加する

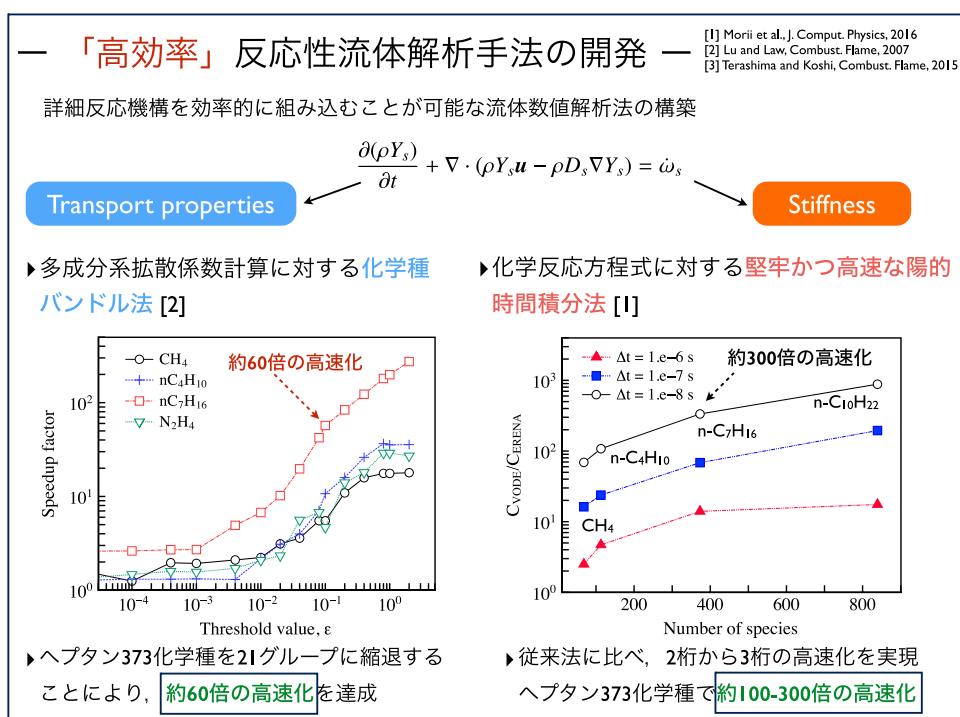
以上の問題を解決するために、それぞれの問題に対して様々な方法が提案され、現在においても世界中で活発に研究が進められている。



詳細反応機構/流体解析によるヒドランジ同軸噴流火炎解析例

## 【6】 続き

我々の研究グループでは、**詳細反応機構を組込むことが可能な高効率流体シミュレーション技術の研究開発**に取り組んで来た。問題(1)に対しては、これまで標準的に使用されてきた手法の場合、**全体計算時間の約95%が、化学反応方程式の計算時間に占有**されていたことが大きな問題であった。この計算時間を低減すべく、従来法に対して**劇的な高速性を有する数値積分法, Extended Robust-Enhanced Numerical Algorithm (ERENA)を新しく開発**することに成功している。ERENAは、保存則を有する常微分方程式に対して、保存則という束縛条件の下、変数残差の最小化という最適化問題を、ラグランジェ未定乗数法により一般的に定式化したアルゴリズムである。準定常仮定による時間積分式を用いることもポイントである。下図右に、従来法とERENAとの計算時間比較を示す。使用する時間刻み幅にも依存するが、 $1.e-8$  sの結果(黒線)を見ると、**373化学種を用いたn-C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>では、約300倍強の高速化を実現し、839化学種のn-C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>では約900倍と3桁に近い高速化が可能**な場合もある。大きな時間刻み幅や小さな反応機構でも高速性は保たれており、ERENAの高効率性を示すものである。




問題(2)に対しては、化学種バンドル法を導入することで、特に拡散係数計算の効率化を図り、更なる高速化を実現している。化学種バンドル法は、相互拡散係数評価において、類似した相互拡散係数を一つのグループにまとめ、少ない代表化学種で拡散係数計算を行う方法である。上図左に示すように、誤差10%を許す場合、**373化学種を用いたn-C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>では、21グループにバンドル化され、約60倍強の高速化を実現**することが可能である。

高速積分法ERENAと化学種バンドル法から構成された手法を、n-C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>(373化学種)を用いた予混合ノッキング現象の燃焼流解析に適用した場合、従来法に比べ、ほぼ精度を損なうことなく、**約75倍の高速化が可能**であることを実証している。これは、**約2ヶ月半かかっていた計算が、本手法を用いることにより、僅か1日で計算可能**になったことを意味している。

### (4) 本発表の注目点

これまで困難であった実用炭化水素系燃料の詳細反応機構を用いた熱流体シミュレーションを劇的に高速化できる手法を提案した。これら**解析技術**の一部は、**プログラムサブルーチンとして提供されており、誰でも使うことが可能**である。本手法の適用問題の拡大を目指し、新たな数値解析手法の研究を進めている。

## 研究発表データシート

【7】	大橋 俊朗 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	ハイスループット細胞培養実験のためのバイオ MEMS デバイス
サブタイトル	

### (1) 研究者のアピールポイント

私たちの体の基本構成要素である細胞の構造や機能を機械工学の知識・技術を駆使して記述し、生命現象のより深い理解とともに病気の治療法の開発など医療分野への貢献を目指しています。例えば、運動をすれば静止している状態より大きな力が加わります。また、血流や組織液の流れなどからだの中には様々な流れが生じていて、この周辺部位は流れによる力を受けています。つまり、私たちの体は多かれ少なかれ常に力学刺激を受けています。これらの力の理解には機械工学の基礎である材料力学や流体力学の知識が役に立ちます。したがって、細胞が力学刺激に対して構造や機能をどのように調節しているのかを調べることは生命現象のより深い理解につながります。私達は、最先端のバイオメカニクス技術を駆使して生体組織・細胞の力学特性や力学応答を評価し、また得られた知見をもとに各種疾患の予防医学、治療医学への応用研究を精力的に進めています。

### (2) 本発表研究の概要

近年、国内外でバイオ MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 研究が盛んに行われています。バイオ MEMS とは MEMS 技術をバイオへ応用する学問分野です。本発表では、バイオ MEMS 研究の一例として、細胞の力学環境を計測するデバイスや物理刺激に対する細胞の応答性を評価する MEMS デバイスの開発について紹介します。

### (3) 本研究発表の詳細

#### (3. 1) 細胞の力学環境計測に関する MEMS デバイス

細胞には細胞骨格の収縮能に起因する細胞内張力が生じており、牽引力として接着基質に発揮されます。細胞内張力(牽引力)を計測する方法の一つが直径数  $\mu\text{m}$  の弾性マイクロピラーです(図 1)。このマイクロピラーを用いた研究として、細胞遊走の力学メカニズムの解明に取り組んでいます(図 2)。細胞は周囲の力学刺激、化学刺激などに反応し遊走します。この細胞遊走は癌の発生や転移、損傷治癒過程における血管新生などに深く関わっていますが、細胞遊走メカニズムの詳細は十分にわかっていません。そこで本研究ではマイクロピラーを組み込んだ微小実験デバイスを開発し、細胞が遊走時に発生する力学場を計測することで、そのメカニズムの解明や遊走能の制御を目指しています。特に、遊走時の細胞が発揮する牽引力を計測し、細胞骨格の再構築や細胞間結合力との関連に着目して細胞遊走の評価を行っています。

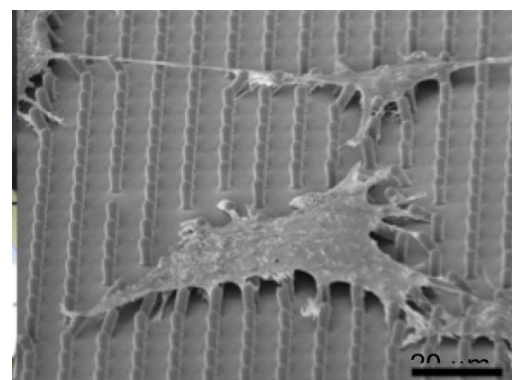


図 1 細胞牽引力計測用弾性マイクロピラー

【7】 続き

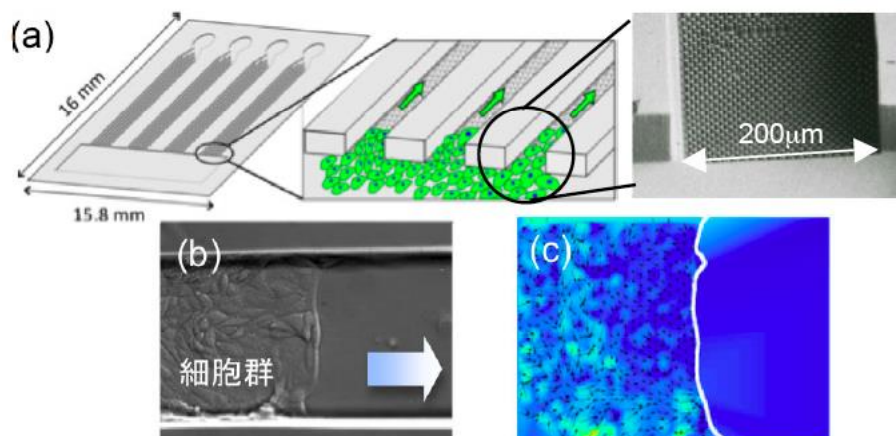


図 2 (a)微小流路をもつ MEMS デバイスと幅 200  $\mu\text{m}$  の流路の SEM 画像. (b)微小流路を遊走する細胞と(c)細胞牽引力分布を示したコンター図.

(3. 2) 化学刺激に対する細胞応答性評価 MEMS デバイス

細胞は同一種においても、個々について形状や増殖動態、遺伝子・たんぱく質の発現に個体差が存在しています。したがって最先端医療技術として、細胞群を対象とした従来のマクロな解析に替わり、細胞一つ一つの評価を行う単一細胞解析が注目されています。本研究では単一細胞解析のための新規バイオアッセイシステムの開発を目指しています。本システムは個々の細胞の反応室の役割を果たすマイクロウェルを規則的に配置したシリコン製マイクロウェルプレート (26 x 76 mm, 762 holes) と、試薬を送液するシリコン製マイクロチャンネル層で構成されます (図 3)。マイクロチャンネルの設計は数値流体解析を用いています。

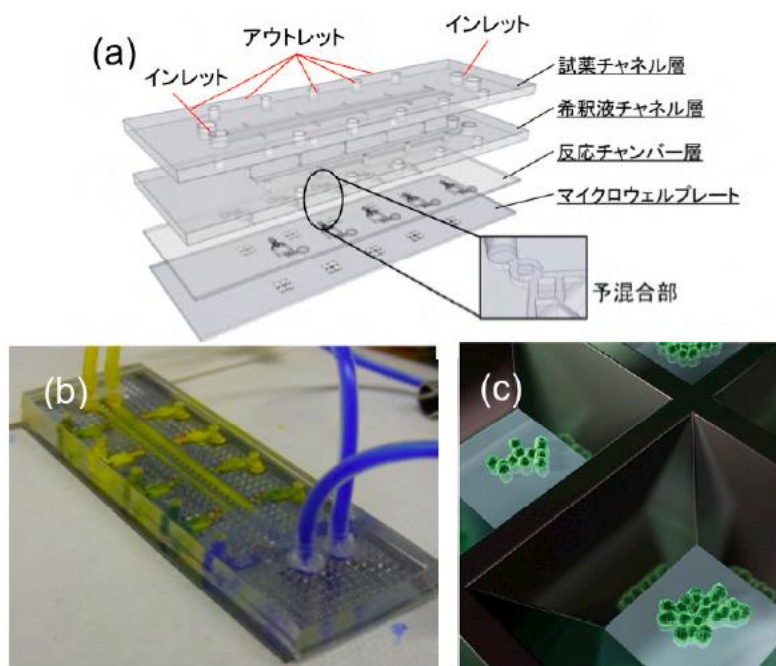



図 3 (a)マイクロウェルプレートに搭載した 2 液混合バイオアッセイシステム概念図と (b)全体写真. (c)マイクロウェル内で培養される細胞の様子.

(4) 本発表の注目点

私達は、主として力学の視点から生命現象を解明するバイオメカニクス研究を推進しています。材料力学、流体力学を中心として、生化学的・細胞生物学的手法を駆使して、生体組織や細胞の力学特性や物理刺激に対する応答を調べています。疾患の形成や発達に関連する現象の力学的側面に着目し、力学負荷による細胞機能の制御とその応答機序についての研究のほか、組織再生医療の実用化に向けた基礎研究にも取り組んでいます。特に本発表では、近年注目を集めるバイオ MEMS 研究として、細胞力学応答計測・力学環境操作が可能な MEMS デバイスの開発に関する紹介を行います。機械工学技術がバイオに応用可能な研究として鋭意取り組んでいます。

# 研究発表データシート

【 8 】	氏名 三輪修一郎 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 助教	
-------	---	---

発表タイトル	超音速蒸気インジェクタを用いた静的炉心注水システムの開発
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

発表者は、混相流体・熱流体工学を主な専門分野としており、海外研究グループや企業との共同研究を通して気液二相流実験と機構論的モデル構築の研究を展開している。

(2) 本発表研究の概要

外部からの電源を必要とせず、静的注水系・熱交換器機として原子炉安全系への適用が期待される蒸気インジェクター (Steam Injector, 以下 SI) は回転機器を不要とするシンプルな構造であるため、起動における信頼性が高い。また、蒸気圧力を利用した水-蒸気の直接接触凝縮による高い熱伝達率を駆動源として利用するため、従来のシェルアンドチューブ型熱交換器を遥かに上回る伝熱性能を保持するとともに、供給流体圧力よりも高い圧力での注水が可能である。本発表では、SI の作動特性、吐出圧ならびに伝熱性能評価、応用の可能性について取り上げる。

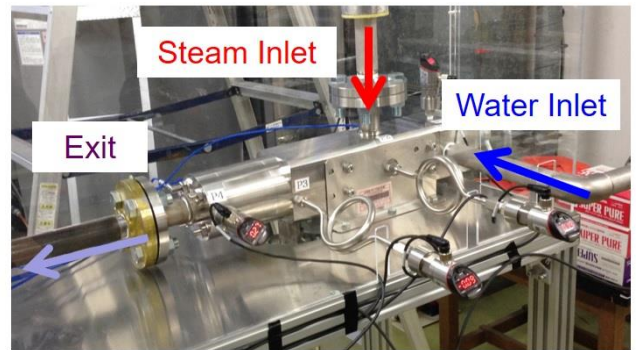
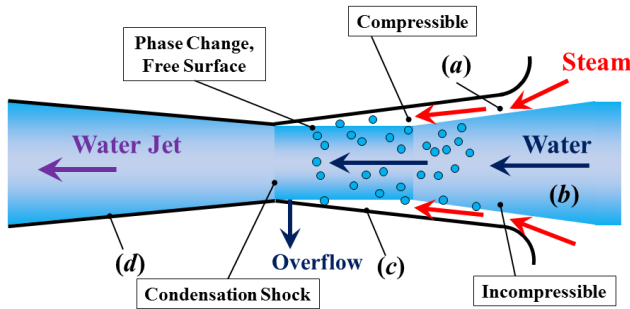


図 1 : SI 作動概念図 (左) と本研究にて使用した装置 (右)

(3) 本研究発表の詳細

本研究では、全電源喪失時における静的注水設備として SI の適用を検討するため、中心水噴流型 SI の差動特性に関する熱流動特性を検証した。SI は、蒸気を供給するための水ノズル、蒸気を供給するための蒸気ノズル、混合ノズル、ディフューザーの部位により構成される装置である (図 1)。図中に示した水ノズルから常温水が供給され、水ノズル外面と混合ノズル内面の環状領域から高速蒸気が供給される。混合ノズル内において、水噴流と蒸気が直接接触し、臨界流速に達した蒸気が水噴流を加速させ、且つ界面熱輸送に伴う蒸気凝縮が生じることにより、混合ノズル部下流において完全に水単相の高速噴流となる。混合ノズル内にて加速した凝縮混合水は、ベルヌーイの定理に従い、ディフューザー部において減速・昇圧し、出口部において高圧の水噴流となる。従って、SI は静的ジェットポンプと同等の特性を持つとともに、蒸気と水による直接



【8】 続き

接触凝縮が生じることにより、高い熱伝達性能を有する。

今回は、北海道大学大学院工学研究院原子カシステム安全工学研究室が保有する多管式貫流ボイラーを使用し、最大蒸気圧力 0.2 – 0.6MPa の入口圧力にて SI の最大吐出圧と温度計測ならびに起動検証を行った (図 2)。

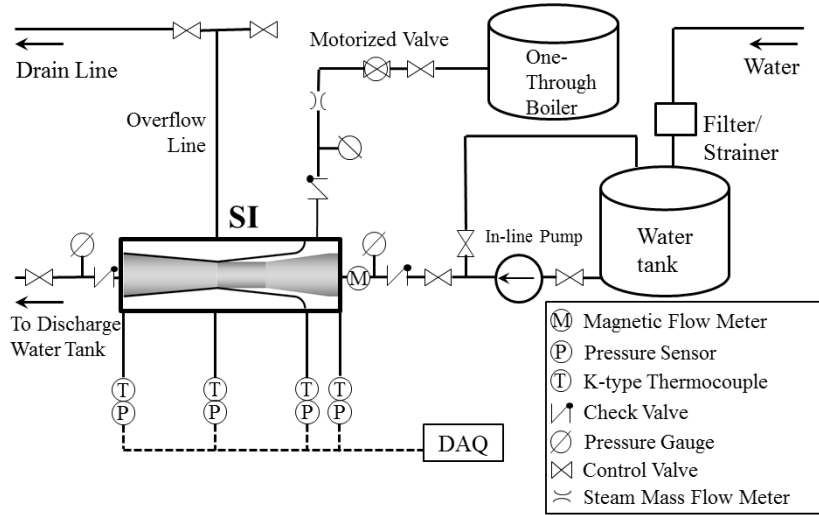


図 2 : SI 作動検証実験装置概念図

(4) 本発表の注目点

SI の起動時の圧力変動を図 3 に示す. SI 内部に水噴流 (青) が形成された後, 入口蒸気 (赤) の注入を開始すると, オーバーフローからの流出 (緑) が止まり, 安定した分離二相流が SI 混合ノズル内部にて形成される. ここで, 背圧弁を徐々に締め, SI 出口に負荷をかけることにより, 吐出圧力 (紫) が徐々に上昇し, 最大吐出圧に達する. 本実験においては, 広範囲の流入条件において, 最大吐出圧を記録し, 一次元二相流モデルをベースとした吐出

圧予測モデルとの比較検証を行った (図 4). SI の吐出圧力は供給蒸気の圧力に依存性を示しており, 全ての入口条件において吐出圧力は供給蒸気圧力を上回っていることから, 本 SI の静的注水系としての機能が確立されていることが分かる. また, 本研究にて使用した一次元モデルにより, SI の吐出圧力性能が ± 20% の精度で予測可能であることが示された.

本技術は, 原子炉安全系設備や給水加熱器のみならず, 排熱利用システムや冷媒サイクル等への適用も期待される.

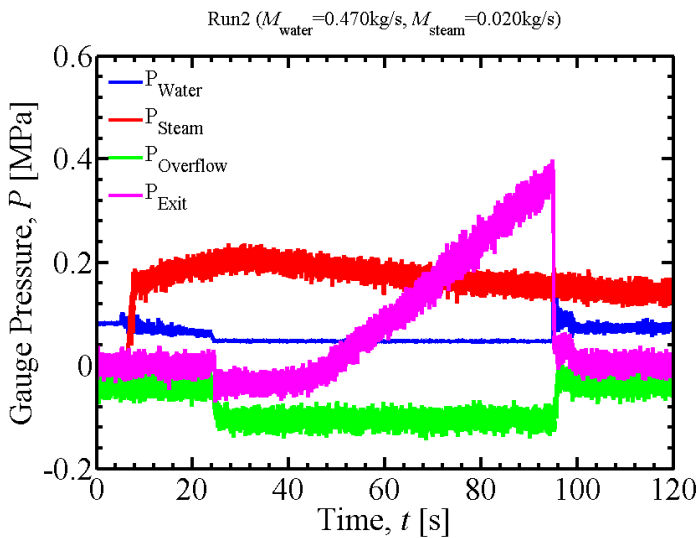


図 3 : SI 起動時における吐出圧力変化

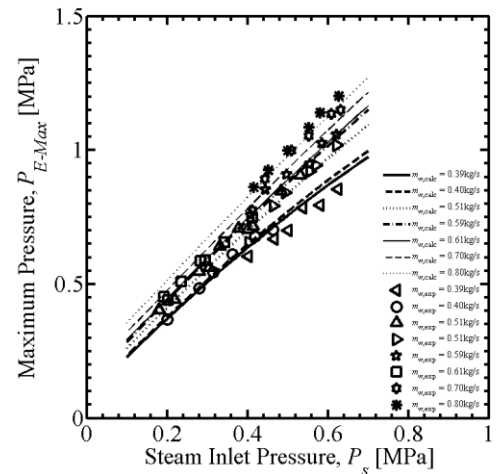



図 4 : 蒸気供給圧力 v s SI 吐出圧力

# 研究発表データシート

【9】	加美山 隆 北海道大学大学院（工学研究院） 量子理工学部門、量子理工学専攻・准教授	
-----	---	---

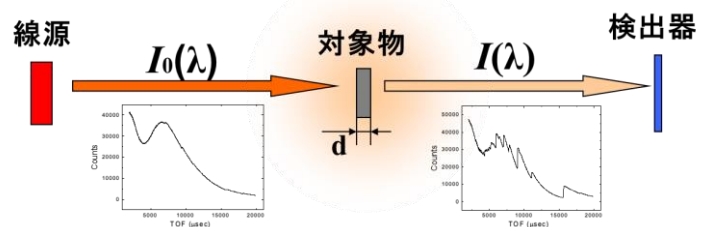
発表タイトル	加速器中性子を用いた微細な材料組織情報の広視野非破壊イメージング
サブタイトル	

## （1）研究者のアピールポイント

加速器中性子源を利用した新しい非破壊計測手法の開発およびその応用研究を進めています。北海道大学に設置されているような小型加速器中性子源は、各種研究機関や企業毎にも設置・利用が可能な量子ビーム源として注目され、現在世界的に推進されつつあります。北大工学部では40年にわたり中性子の発生法や利用法に関して研究が蓄積されており、黎明期から継続して成果を挙げている施設として先導的なモデルとされています。北大発の技術は国内外の大規模施設から小型施設に至るまで幅広く導入され、現在の加速器利用中性子施設の重要な基盤を形成する礎となりました。このような他施設への線源設置や利用、さらには大型中性子源施設プロジェクトへの積極的な参画も通して、中性子をはじめとする量子ビームの生成から応用まで一貫した研究を行うとともに専門性の高い人材の育成を図る教育を行っています。

## （2）本発表研究の概要

中性子を利用するイメージングは、いわゆる X 線レントゲン写真と同様に、量子ビームと種々の物質の相互作用の違いから生ずるビーム透過量の違いを撮影するものです。しかしながら中性子は物質との相互作用が一般的な X 線とは異なることから、より深い物体内部の情報を X 線とは異なるイメージで現すことができます。北海道大学ではさらに進んだイメージングを行うために、加速器中性子源の特長を活かし、物体を透過する中性子のエネルギー分析を行う手法を提案してきました。中性子と物質の相互作用の仕方は、中性子がどれだけのエネルギーを持っているかにより、様相が異なります。中性子のエネルギーが高い(中性子を物質波と捉えると、その波長 $\lambda$ が短いことに相当します)と、原子核との相互作用のエネルギー準位に対応するエネルギーを持つ中性子は共鳴的に吸収され鋭いピークを示します。これを中性子共鳴吸収ピークと呼びます。このピークは核種毎に出現するエネルギーが異なり、また原子核の運動状態によりドップラー効果を受けますので、これを解析するイメージングを行うと核種分布や原子核の運動状態(温度)分布等を非破壊的に可視化することが可能になります。



対象物で散乱や吸収を受けて透過強度が決まる。

図 1. エネルギーに依存する中性子透過測定。

一方、中性子のエネルギーが低い(波長 $\lambda$ が長い)と、物質の結晶構造により回折が起こり、回折波長に一致するエネルギーの中性子の透過量が減ってしまいますから、透過イメージの濃淡をエネルギー毎に並べて解析することで、結晶構造の分布やそれらが形成する組織の分布に関する可視化を行うことができます。このような解析のことをブラッグエッジ解析と呼びます。

本発表では、上記した低いエネルギーの中性子を利用するブラッグエッジイメージングと高い

## 【9】 続き

エネルギー中性子を利用する共鳴吸収イメージングについて最近の成果を紹介いたします。バルク物体内部に関して、前者はひずみや結晶配向、結晶子サイズなどの非破壊的な可視化に、後者は核種分布や温度分布の非破壊的な可視化に利用でき、北大を中心に開発されてきた手法です。

### (3) 本研究発表の詳細

低エネルギー中性子を利用するブラッグエッジイメージングでは、ブラッグの式( $2d\sin\theta = \lambda$ )から、中性子の波長 $\lambda$ が結晶面間隔の2倍である $2d$ に等しくなった時に急激に回折による影響がなくなります。したがって、この急激な変化を起こす $\lambda$ から面間隔 $d$ を決めることが可能です。さらにこの $d$ の微小変化を追うことによってマクロ歪を求めることができます。一方、微視的には各結晶粒に様々な力の歪が加わることから急激な変化を起こす $\lambda$ の位置が少しずつ変わる、すなわち $\lambda$ の変化位置に幅が生じるようになります。

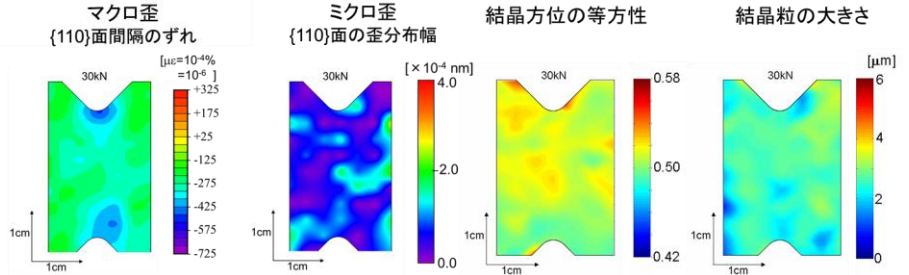
ここからマイクロ歪も求めることが可能になります。発表では、 $\alpha$ 鉄の引っ張り試験片にその場で荷重をかけていきながら、これら歪がどのように変わっていくのかを解析した結果を示します。引っ張り試験中に弾性域内の荷重をかけているときにはマクロ歪の分布が引っ張り試験片の切り欠き部から変化していくもののマイクロ歪の分布は変化せず、塑性域に入ると今度はマイクロ歪が急激に増大する様子を可視化することができました。マクロ歪はいわゆる弾性歪に、マイクロ歪が塑性歪によるものということがよくわかります。また、これらと併せてブラッグエッジ解析から組織構造分布と結晶粒サイズ分布の変化も得られますが、いずれもマイクロ歪の変化と一致しており、塑性変形の進展に伴う結晶の回転や転位の増大がこのような変化の原因であることを示しています。加速器中性子源を用いる中性子イメージングでは、このような結晶組織の微細変化を透過試料全体のバルク平均としてとらえて広視野に分布をマッピングできることが特徴となります。また非破壊測定となるため、ここで紹介するようなその場測定にも対応できる測定法です。

高エネルギー中性子を利用する共鳴吸収イメージングでは、共鳴吸収ピーク形状を解析することにより、物体内部の特定核種のダイナミクス情報が得られることが大きな特徴です。この情報は、特に“温度”として捉えることができるので、非破壊的に物体内部の温度情報を得られることが特徴になります。本発表ではその最近の結果を示します。

### (4) 本発表の注目点

今回紹介する手法は、一般的な顕微法では不可視な情報を非破壊で可視化できるものとして、国内外の多くの分野から注目を受けています。そのため、現在、各国で稼働中または計画中の大小中性子源施設で本手法を用いるあるいは準じるような中性子イメージング装置のプロジェクトが動いています。その中で日本では世界に先駆けて本格的なエネルギー分解型中性子イメージング装置 BL-22 螺鈿が J-PARC で動き出しました。この建設には北大も大きな貢献をしています。本手法は、大型施設のみならず小型施設でも適用可能な測定手法として産学両面からさらなる発展が期待されており、北大ではその進展に今後も力を入れていきたいと考えています。

#### 引張応力30kN



#### 引張試験後

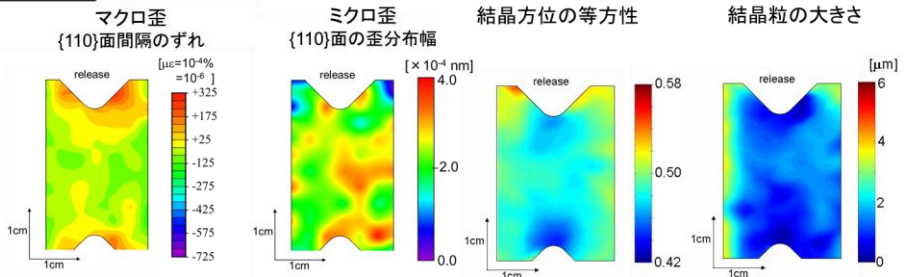



図 2. 引張試験による試験片の結晶組織変化の解析結果イメージ。

# 研究発表データシート

【10】	田中 岳 北海道大学大学院（工学研究院） 環境フィールド工学部門・助教	
------	---	---

発表タイトル	降雨流出変換系の不確実性とそれを考慮した流出解析
サブタイトル	

## （1）研究者のアピールポイント

自然現象を定量的に理解するうえで、これを微分方程式で記述することがある。この現象の予測問題においては、この微分方程式は確率微分方程式と解釈される。これまでに発表者は、大小様々な空間スケールで生じる降雨流出過程（流域のなかで降雨が集積される現象）を記述した確率微分方程式の解法に関する研究に従事してきた。これは、降雨量、地形、地質など、流出特性を規定する様々な要素の不確実性を確率論的に数量化したうえで、それらが流出量の不確実性にどのような影響を与えるのかを検討するものである。なお、ここでは、推定された流出量の時間変化する確率密度関数に基づき評価される。この研究からは、①流出予測の精度を理論的に評価、②流出予測の不確実性を低減させる方法の提案、③降雨流出モデルの集中化の妥当性の評価などが期待される。

## （2）本発表研究の概要

降雨量が流域場を介して流出量に変換される系（降雨流出系）は、集中定数系、分布定数系、あるいは集中定数系の分布モデルなど、様々な形式の微分方程式で記述される。この降雨流出系の強制項、モデルパラメータ、初期条件が確率過程に属するとした立場では、降雨流出現象を記述する微分方程式が確率微分方程式と解釈される。例えば、これまでに降雨量の時系列データの従う確率過程の特性（確率分布や自己相関性）が、河川計画において極めて重要な最大流出量とその確率分布に影響を与えることが明らかとなってきた。このような観点から、確率論的に降雨流出現象を理解することは、河川工学の諸問題を扱う上で重要であると考えられる。

本発表では、降雨流出過程に最も単純な形の貯留型流出モデルを用いて、これを確率微分方程式と捉え、降雨強度（強制項）、貯留係数（モデルパラメータ）、初期流出高（初期条件）の全てが既知の確率過程に属するとした条件の下で、流出高の確率特性を理論的に推定する手法を提案する。なお、本発表が、既発表論文（2016）にその後の成果を合わせたものであることを付記しておく。

## （3）本研究発表の詳細

### 3.1 降雨流出系～貯留型流出モデル

ここで用いる流出モデルは、以下に示す最も単純な形の貯留型流出モデルである。

$$\frac{ds}{dt} + q = r, \quad s = kq^p.$$

なお、 $s$ : 貯留高;  $q$ : 流出高;  $r$ : 降雨強度;  $k$ : 貯留係数;  $p$ : 貯留指数である。ここでは、降雨強度  $r$ 、貯留係数  $k$  および流出高  $q$  の初期値（初期流出高） $q_0$  の確率的な変動特性が既知の条件の下、流出高  $q$  の確率特性を理論的に推定する。なお、貯留指数  $p$  については、理論解析の都合から定数として扱う。

#### (a) 降雨強度 $r(t)$ と観測降雨強度 $r_d(t)$ の関係とその特性

$r(t)$  と  $r_d(t)$  は、以下の関係を満足する。

$$r_d(t) = \sum_i r_{d,i} (u(t - (i-1)\Delta t) - u(t - i\Delta t)), \quad r_{d,i} = \frac{1}{\Delta t} \int_{(i-1)\Delta t}^{i\Delta t} r(\tau) d\tau. \quad \text{なお, } u(t): \text{ステップ関数; } \Delta t: \text{観測間隔.}$$

観測降雨時系列の統計解析に基づき、 $r_{d,i}$  の平均値  $\bar{r}_{d,i}$  からの偏差  $\tilde{r}_{d,i}$  が以下の指数分布に従うものとする。

【10】 続き

$$f(\tilde{r}_{d,i}) = \lambda e^{-\lambda(\tilde{r}_{d,i}+1/\lambda)}, \quad \tilde{r}_{d,i} \geq -1/\lambda, \quad \lambda: \text{定数.}$$

(b) 貯留係数  $k$  の特性

$k$  が土壌物性（地質）や流域の面積（地形）と関係付けられることを踏まえて、その確率分布は以下のガンマ分布に従うものとする。

$$g(k) = \zeta^\eta k^{\eta-1} e^{-\zeta k} / \Gamma(\eta), \quad k \geq 0, \quad \zeta, \eta: \text{定数.}$$

(c) 初期流出高  $q_0$  の特性

ここでは、 $q_0$  の確率分布に次の一様分布を仮定する。

$$h(\tilde{q}_0) = 1/(\gamma_1 - \gamma_0), \quad \gamma_0 \leq \tilde{q}_0 \leq \gamma_1, \quad \gamma_0, \gamma_1: \text{定数.}$$

3.2 検証結果

流出高の確率特性（例えば、平均値  $\bar{q}$  と分散  $\mu_{q_2}$ ）を与える微分方程式の誘導過程の詳細は、紙面の都合から省略するが、貯留係数  $k$ 、流出高  $q$  ならびに降雨強度  $r$  のそれぞれを平均値 (bar 記号) とそれからの偏差 (tilde 記号) とで分離した後、偏差に関する微分方程式の二乗したものに期待値を取ることで、例えば分散  $\mu_{q_2}$  に関する微分方程式が得られる。なお、確率変数  $X$  の分散を、本発表では  $\mu_{X_2}$  と表すことにする。

この誘導に際しては、指数型の確率変数  $q^p$  の取り扱いが課題となる。ここでは、Bras and Georgakakos (1980) の近似式、

$$q^p \approx \alpha \bar{q} + \beta \tilde{q}, \quad \alpha, \beta: \text{パラメータ,}$$

を用いた。また、降雨強度  $r$  については互いに独立な確率変数と仮定し、その二次のキュムラント関数を次式で表した。

$$\langle \tilde{r}(\tau_1) \tilde{r}(\tau_2) \rangle = \mu_{r_2} \delta(\tau_1 - \tau_2),$$

なお、記号  $\langle \rangle$  は期待値演算子、 $\mu_{r_2}$ : 降雨強度  $r$  の分散;  $\delta$ : Dirac のデルタ関数。

図-1 は、貯留指数  $p$  を 0.4 から 1.0 の範囲を 0.2 刻みで変化させ、ここで導出された流出高  $q$  の平均値  $\bar{q}$ 、分散  $\mu_{q_2}$  (破線) と、シミュレーション法により求められた結果 (実線) を比較したものである。なお、計算に用いた条件を表-1 にまとめる。表に示す  $t_r$  は降雨継続時間を指す。平均値  $\bar{q}$  (図-1 上段) の結果は、貯留指数  $p$  の変化に関わらずシミュレーション結果と極めて良く一致している。分散  $\mu_{q_2}$  (同下段) については、観測間隔  $\Delta t$  の値に対応したシミュレーション結果の振動する波形を、ここで導出された結果が包含する形となっており、両者の適合度は良好といえる。

(4) 本発表の注目点

本発表では、降雨流出系を最も単純な形の貯留型流出モデルで置換し、これが確率微分方程式で表されるとして、強制項、モデルパラメータおよび初期条件の全てが既知の確率過程である場合の流出量の確率特性を検討する基礎的な手法を示した。当然のことながら、流出解析にこの様な集中定数系モデルを用いると、実現象を詳細に捉える分布定数系モデルと比べて、ある程度の精度劣化は避けられない。しかしその一方で、流出モデルそのものの理解が極めて容易であるため、降雨流出系に存在する上記の不確実性の振る舞いの理解も容易となる。ここでは、降雨流出系の出力（流出高）の平均値と分散についてのみを議論の対象としているが、流出高の高次モーメントの導出が可能となれば、時間変化する確率密度関数の推定は容易である。その結果として、例えば降雨強度、貯留係数や初期貯留高、これら個々の確率特性（推定精度）が河川計画において極めて重要な最大の流出高とその確率分布に与える影響を定量的に評価できるようになる。今後、実際の降雨流出現象における不確実性のより深い理解が期待される。

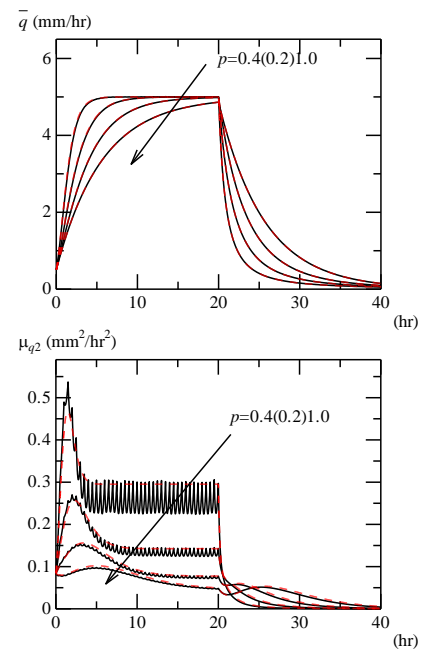



図-1 検証結果（矩形降雨波形）  
（上段：平均値；下段：分散）

表-1 計算条件（図-1 に対応）

$\bar{r}_d$ (mm/hr)	$\mu_{r_2}$ (mm <sup>2</sup> /hr <sup>2</sup> )	$\Delta t$ (hr)	$t_r$ (hr)
5.0	1.0	0.5	20
$\bar{k}$ (mm <sup>1-p</sup> /hr <sup>p</sup> )		$\mu_{k_2}$ (mm <sup>2(1-p)</sup> /hr <sup>2p</sup> )	
5.66		0.56	
$\bar{q}_0$ (mm/hr)		$\mu_{q_0_2}$ (mm <sup>2</sup> /hr <sup>2</sup> )	

# 研究発表データシート

【 1 1 】	氏名 内田 賢悦 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	不確実性下における交通ネットワーク解析手法の開発
サブタイトル	時間信頼性解析法

<p>(1) 研究者のアピールポイント</p> <p>解析学や確率論といった基礎数学だけではなく，経済理論，交通行動モデル，金融工学など，さまざまな分野の手法を統合化して，従来は表現することができなかった交通現象を解析可能な交通ネットワークモデルを開発します．開発するモデルでは，これまで確定的に扱われていた交通量，移動時間等の変数が確率変数として表現されるため，私たちが日常的に経験している不確実性下の交通行動を解析することが可能となります．</p> <p>(2) 本発表研究の概要</p> <p>本研究で開発するモデルは，道路ネットワーク上の交通量と移動時間を推計します．入力データとなるネットワーク上の交通需要と道路区間（リンク）が単位時間にさばきうる交通量（リンク交通容量）は確率変数として表現されます．その結果，ネットワーク上の経路移動時間も確率変数として表現されます．ネットワーク上のドライバーは，経路移動時間の平均が小さく，その変動も小さい経路を選好するリスク回避的な経路選択を行います．さらに，移動時間を完全に予見することは不可能であるため，ドライバーの移動時間に関する認知誤差を導入した経路選択行動を考えます．このようなドライバーの経路選択行動から交通量とそれに対応した移動時間が決定されます．</p> <p>(3) 本研究発表の詳細</p> <p>道路交通量は日々変動していることがわかっています．また，天候や駐停車車両等によって，リンク交通容量も日々あるいは時々刻々と変動していることもわかっています．その結果，移動時間が変動します．こうした不確実な交通状況下では，遅刻を避けるため，多くのドライバーは，余裕をもって出発時刻を決定すると推察されます．</p> <p>本研究では，こうした交通状況を再現するため，道路ネットワーク上の交通需要とリンク交通容量がともに負の値をとらない対数正規分布によって表現される交通ネットワークモデルを開発します．リンクの移動時間は，以下に示す移動時間関数によって表現します．</p> $t_a(v_a, c_a) = t_a^0 \cdot \left( 1 + \beta_a \cdot \left( \frac{V_a}{C_a} \right)^{n_a} \right)$ <p>ここで <math>t_a^0</math> はリンク <math>a</math> における自由移動時間，<math>\beta_a</math> と <math>n_a</math> はリンク <math>a</math> におけるパラメータを表します．また <math>V_a, C_a</math> は，それぞれ対数正規分布に従うリンク交通量，リンク交通容量です．リンク移動時間，経路移動時間 (<math>T_{w,k}</math>) は，シフト対数正規分布に従うことになります．リスク回避的なドライバーは，経路移動コスト (<math>\eta_{w,k} = E[T_{w,k}] + \gamma \cdot \text{var}[T_{w,k}]</math>) に基づいて経路選択を行います．ここで <math>\gamma</math> は，リスク回避度を表す定数であり，<math>E[T]</math> と <math>\text{var}[T]</math> は，それぞれ確率変数 <math>T</math> の平均値と分散（ばらつきの程度）を表します．経路移動時間を完全に予見することはできないため，ドライバーの移動</p>	
---	--

【11】 続き

コストに関する認知誤差を導入したロジット型の確率的利用者均衡配分問題として、ドライバーの経路選択問題を定式化します。

(4) 本発表の注目点

ここでは、図1に示す道路ネットワークを対象に解析を行った結果を示すとともに、開発した交通ネットワークモデルの有効性を示します。図2、図3は、それぞれリンク1, 2, 3の交通量と移動時間を示しています。従来の解析法では、交通量や移動時間は、100台や10分など確定的な値として推計されてきましたが、これらが確率変数として表現されていることがわかります。

確率変数として交通量や移動時間を表現することは、交通状況の将来予測を行う際に重要となります。なぜなら、たとえば30年後といった遠い将来の交通状況は誰も完璧に予測することができないからです。「交通量が少なく野生動物(たとえば熊)しか利用しない」と言われるような道路がしばしば取り上げられます。そうした道路は、あま交通需要予測値に基づいて建設されたと解釈され、大きな批判を浴びます。実際は、「あま交通需要予測値」というよりは「*将来の不確実性を考慮しない交通需要予測値*」と表現する方が正確でしょう。先述の通り、将来の交通状況を完璧に予測することは不可能ですので、少なくとも不確実性の存在を前提として予測することが肝要となります。開発した交通ネットワークモデルを適用すると、将来交通状況の不確実性を考慮して交通計画を立てることができます。

図4は、自然災害によりリンク2が途絶した場合のリンク移動時間の分布を示しています。図3と比較すると、リンクの2の途絶により、リンク1とリンク5の移動時間は、平均だけではなくそのバラツキ(不確実性)も増大していることがわかります。この結果から、開発した交通ネットワークモデルでは、不確実性の高い自然災害が交通ネットワークに与える影響も解析できることがわかります。

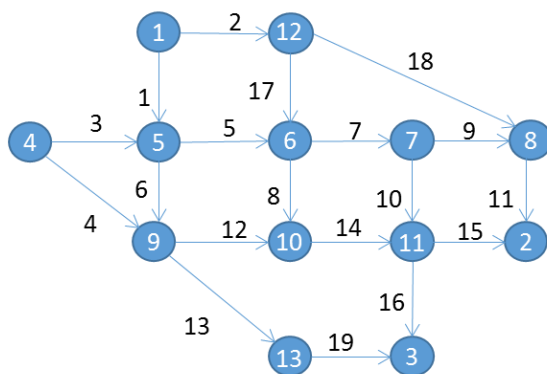


図1. 道路ネットワーク

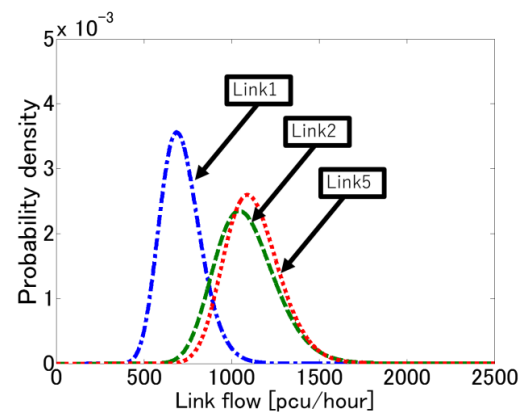


図2. リンク交通量

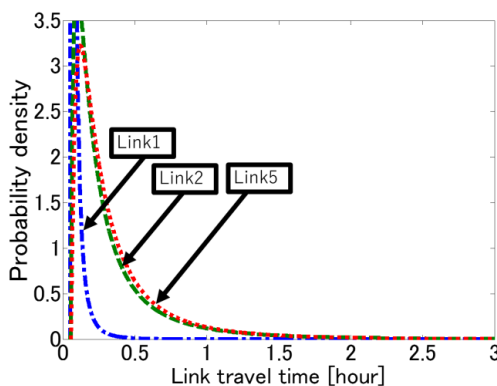


図3. リンク移動時間

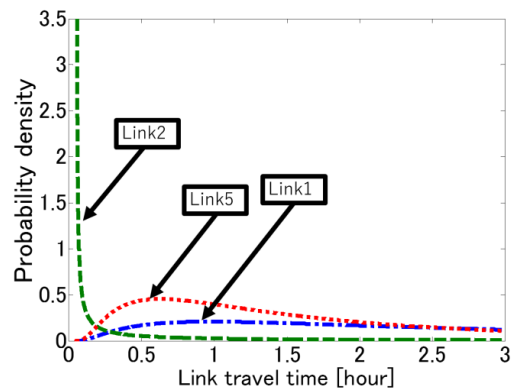



図4. リンク2途絶時の移動時間

## 研究発表データシート

【12】	瀬戸口 剛 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	風雪の影響を低減する都市設計シミュレーションの開発
サブタイトル	北国の都市デザイン

### (1) 研究者のアピールポイント

本研究成果による主な受賞

- 国土交通大臣表彰国土技術開発賞 (2016年度)  
「風雪の影響を低減する都市設計シミュレーションの開発」  
瀬戸口剛 (北海道大学)
- 文部科学大臣表彰科学技術賞 (2015年度)  
「積雪寒冷都市において風雪の影響を低減する都市デザインシミュレーション手法の研究」  
瀬戸口剛 (北海道大学)
- 日本建築学会賞(論文) (2014年度)  
「積雪寒冷都市において風雪の影響を低減する都市デザインシミュレーション手法の研究」  
瀬戸口剛 (北海道大学)
- 日本都市計画学会 計画設計賞 (2014年度)  
「稚内駅前地区再開発事業「キタカラ」ー北国の都市デザイナーー」  
瀬戸口剛 (北海道大学) 共同受賞者：相澤誠吾 (稚内駅前地区市街地再開発組合理事長) / 工藤 広 (北海道稚内市長) / 島田 修 (北海道旅客鉄道株式会社代表取締役社長) / 菅野彰一 (株式会社北海道日建設計代表取締役会長) / 加納美佐恵 (株式会社北海道日建設計設計室主管)

### (2) 本発表研究の概要

本研究では、北海道をはじめとする積雪寒冷都市において、屋外公共空間での風雪の影響を低減するために、都市空間形態の評価手法を開発した、従来全く見られない先進的な研究である。粉体風洞実験設備を用いた風雪シミュレーションにより、計画対象地区において雪の吹きだまりや強風域を予測し、開発される都市施設周辺の屋外公共空間において、雪の吹きだまりや強風域を発生させない、風雪に強い都市空間を導き出すものである。積雪寒冷都市という地域性を十分に考慮した都市デザインの手法で、都市計画における新しい学問分野を開拓している。



図1 雪の吹きだまりを把握する風洞実験

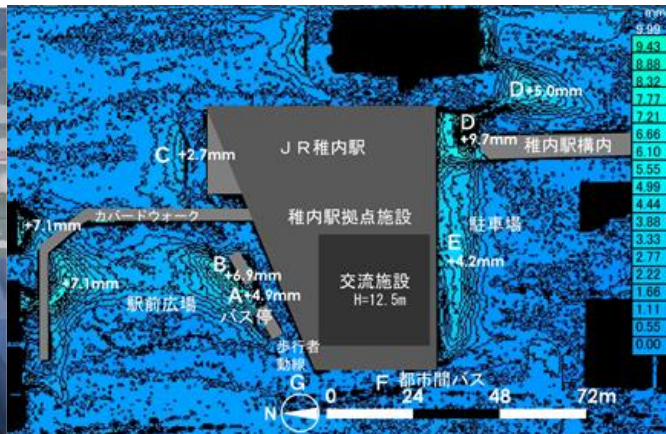


図2 稚内駅再開発計画における風雪シミュレーションの結果



【12】 続き

(3) 本研究発表の詳細

稚内駅再開発ビル「キタカラ」において、風雪の影響を低減する都市デザイン手法を開発し、稚内駅および再開発ビルの形態を決定した。稚内市では冬季の吹雪が多く気候が厳しいことから、再開発計画の模型を用いて風雪の風洞実験を何回も行い、望ましい「キタカラ」の形態を導き出した。再開発事業で最も重要となる歩行者動線上に雪の吹きだまりができてく、再開発ビル「キタカラ」のデザインを導き出した。稚内駅舎と再開発ビルの基本計画段階から、風洞実験を用いて雪の吹きだまりが懸念される場所を特定し、基本計画に反映している。積雪を考慮して風雪の風洞実験を行い、都市デザインの形態を導き出す計画設計は、世界的にも例が無い。

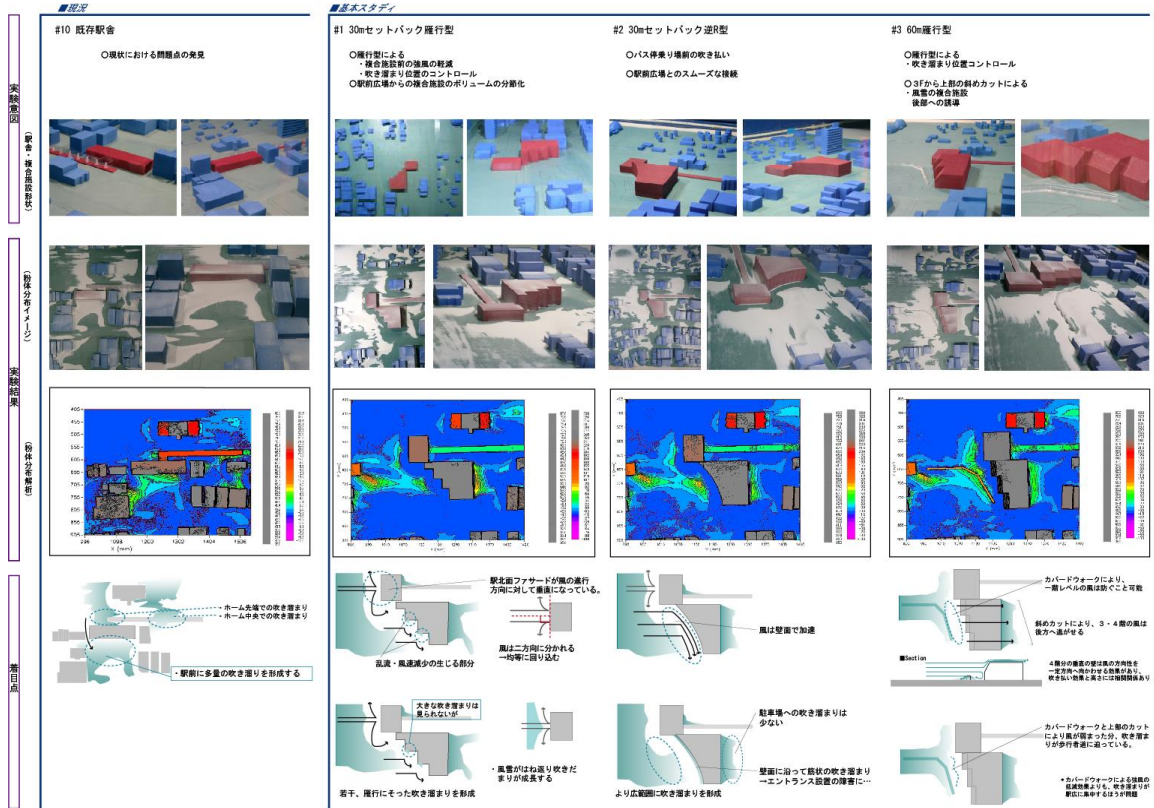


図3 稚内駅再開発計画における風雪シミュレーションによる形態検討プロセス

(4) 本発表の注目点

稚内駅の再開発に合わせて取り組まれた本研究は、従来は分離されていた都市デザインと環境評価を融合するもので、相互の応答により稚内駅の再開発事業に実際に反映させていることが大きな特徴である。そのため、実際の設計活動と並行して風雪シミュレーションを行うことで結果を設計に反映することができ、世界で初めての取り組みである。



図4 完成した稚内駅再開発ビル「キタカラ」

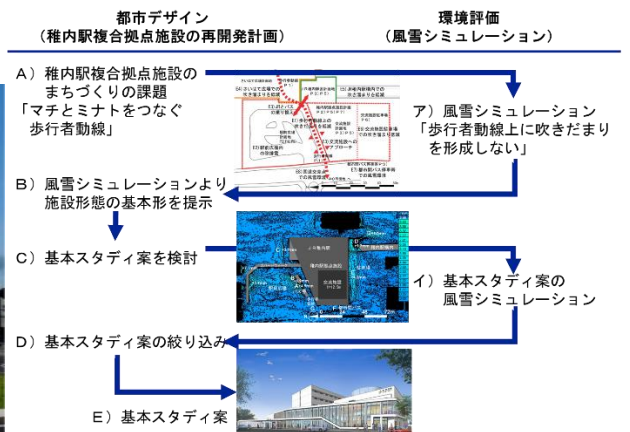



図5 風雪シミュレーションを融合した都市デザインプロセス

## 研究発表データシート

【 1 3 】	氏名 飯場 正紀 北海道大学大学院工学研究院 空間性能システム部門、建築システム専攻・教授	
---------	---	---

発表タイトル	地震観測記録に基づく地盤液状化時の建築物の振動性状
サブタイトル	
<p>(1) 研究者のアピールポイント</p> <p>地震時に地盤の液状化が発生すると、地盤の支持力が低下し、杭などの鉛直支持部材を持たない戸建て住宅の低層建築物には、不同沈下が発生する。一方、杭基礎を有する中高層建築物は、地盤が液状化することにより、地盤から杭に作用する地盤反力が低減することが確認されており、低減した地盤反力状態における建築物の地震時挙動は、液状化が発生しない状況とは大きく異なることが予想される。地盤条件により、建築物に作用する地震動の大きさや周期特性が変化する。</p> <p>建築物の耐震設計を行う場合、建築物の耐震性が注目されることが多いが、建築物に作用する地震動の違いにより、建築物の損傷程度が異なってくる。建築物に作用する地震動は、地表面近くの表層地盤の振動特性・増幅特性の影響を大きく受ける場合があり、表層地盤の特性を含めた耐震設計が必要となる。</p> <p>(2) 本発表研究の概要</p> <p>2011年東北地方太平洋沖地震の本震・余震での建築物及び地中を含む表層地盤の地震動の記録を収集し、その観測記録に基づいた、建築物—地盤連成系の地震挙動の分析を行った。</p> <p>はじめに、千葉市内での地盤観測点（地中を含む）における地震記録により、表層地盤の地震時性状を整理した。地盤の地震観測記録の分析から、深さ2～9mの地盤では、液状化の発生に伴い、地盤の増幅特性が急激に変化し、固有振動数が不明確になる現象が確認された。</p> <p>さらに、千葉市内で実施されている建築物—地盤連成系の地震観測結果を分析した。液状化時の表層地盤の増幅特性の変化と地盤連成系建築物の振動特性の変化が同様な特性を示した。地盤の液状化が連成系建築物の固有振動数に大きく影響しており、地盤反力がかなり低減した建築物の地震挙動が明確になった。</p> <p>(3) 本研究発表の詳細</p> <p>3-1) 地盤の地震観測記録の分析</p> <p>建築物観測点近傍で、地中を含めた表層地盤(観測深さ：2、9、19、45m)での地震観測が千葉市内で実施されており、2011年東北地方太平洋沖地震で地震記録が収集された<sup>1)</sup>。地盤観測点では、同地震で液状化が発生したことが確認されており、埋立地盤の液状化の発生深度等の評価などが行われている<sup>2)</sup>。この地震観測記録を入手し、分析を行った。2011年東北地方太平洋沖地震の本震の地表面付近での、最大水平加速度は200gal程度、計測震度は5.3であった。</p> <p>図1に、深さ9mに対する深さ2mのフーリエスペクトル比の経時変化(2011年東北地方太平洋沖地震の本震)を示す。現地での地盤情報から、地震動の初動部分では、深さ9mに対する深さ2mの固有振動数は、5Hz強であり、地震動が大きくなるにつれて、5Hz強にあった固有振動数が徐々に低下し、80s程度経過すると、固有振動数が確認できなくなる。この結果から、地盤が液状化し、地盤増幅が非常に小さくなり、地盤の固有振動数が不明確になったと考えられる。</p>	

【13】 続き

3-2) 建築物の地震観測記録の分析<sup>3)</sup>

図2に、建築物の地震観測地点の地盤条件を示す。3m以深は砂層(8~10.5mの区分は沖積砂層(As)であるが細粒分含有率が50%以上となっている)が続き、23m付近の2m程度がシルトがあり、地下水位は2.2mである。工学的基盤となりうるDs4( $V_s=540$  m/s)より上層地盤の1次固有振動数は2.2Hzである。液状化に対する安全率(F1)が1以下となる点は、10.3mの1か所であるが、3.3mの表層付近も安全率1.02と液状化の可能性は無視できない値となっている。

図3に、本震における地表面に対する建築物5階(5F/GL)のスペクトル比を示す。本震時は、主要動以降に急激な固有振動数の低下がみられる。液状化により地盤反力が低下した結果と考えられ、連成系の建築物の固有振動数は低くなる。

(4) 本発表の注目点

地震時に液状化する地盤上に建設された建築物において、液状化時の建築物の揺れ特性が確認できる貴重なデータである。建築物の観測点には、地中部の観測点がないことから、近傍の地盤観測記録と連携させることにより、液状化時の建築物の揺れを解明することができる。

参考文献

- 1)金子正洋他：平成23年東北地方太平洋沖地震による強震記録、国総研資料、No.726、2013.2 2)谷本俊輔他：鉛直アレー記録に基づく埋立地盤の液状化発生深度の評価、JAEE論文集、第15巻、第7号(特集号)、pp.157-172、2015 3)井上波彦他：2011年東北地方太平洋沖地震において液状化した区域における板状建築物の地震観測結果(その1~2)、AIJ大会梗概集、pp.321-324、2011.8  
謝辞 地盤系の地震観測記録については、国土交通省国土技術政策総合研究所から、観測データ提供を受けました。感謝申し上げます。

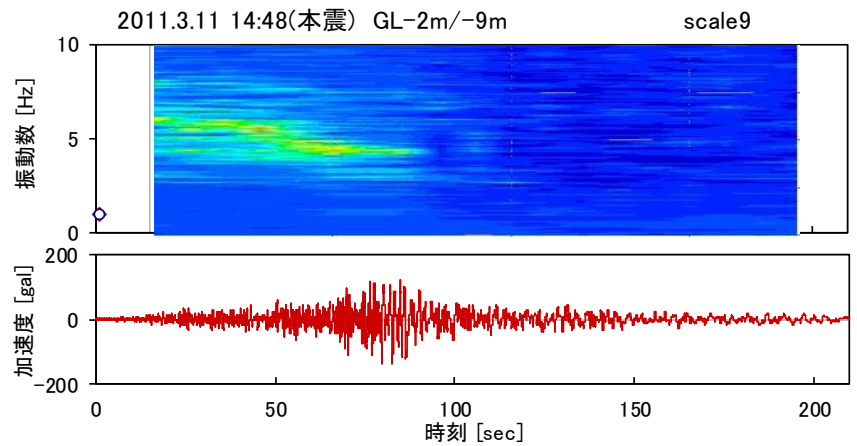


図1 本震におけるGL-2m/-9mのフーリエスペクトル比の経時変化

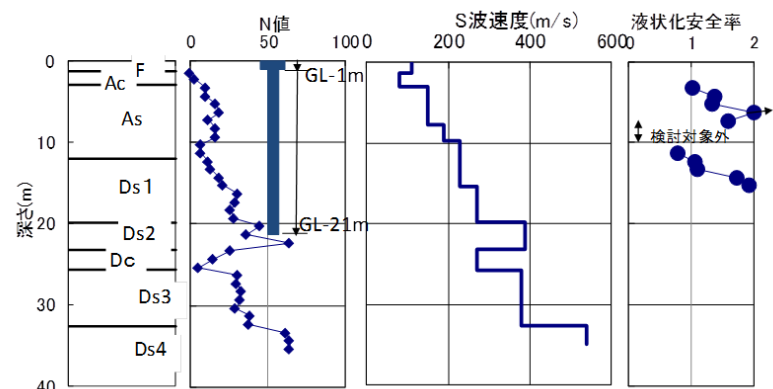


図2 建築物の地震観測点の地盤概要

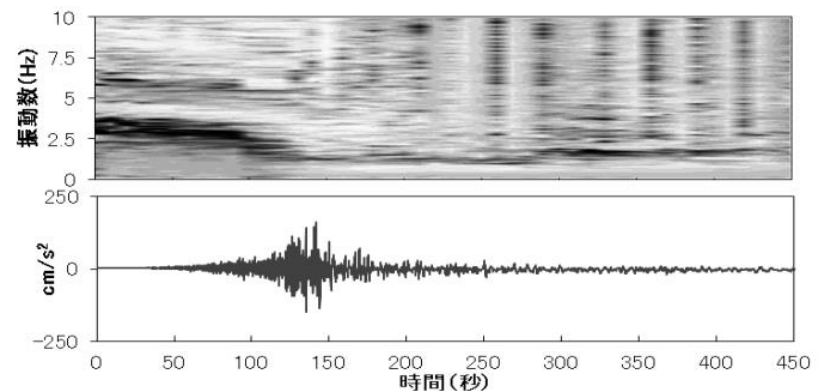



図3 本震における5F/GLのフーリエスペクトル比の経時変化

## 研究発表データシート

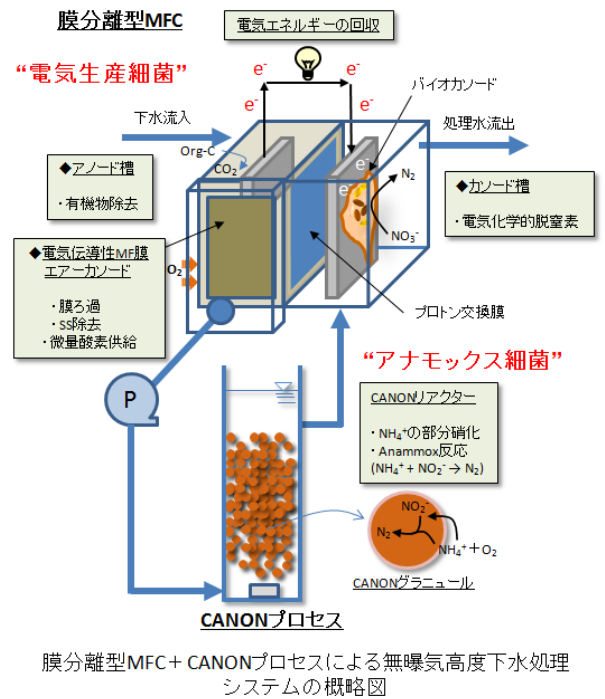
【14】	氏名 岡部 聡 北海道大学大学院工学研究院環境創生工学部門 水代謝システム分野・教授	
------	--	---

発表タイトル	新規微生物機能を統合した超省エネ型水処理システム
サブタイトル	アナモックスプロセスを核とした新規窒素除去システム
<p>(1) 研究者のアピールポイント</p> <p>これまでに電気伝導性 MF 膜を用いた膜分離型 MFC は開発されていない。さらに膜分離型 MFC プロセスとアナモックスプロセスを組み合わせた水処理システムは我々のオリジナルの発想である。全く曝気を必要としない汚泥発生量の極めて少ない水処理システムであり、学術的および社会的意義の高い研究である。</p> <p>本研究の遂行にあたり、i) 高純度のアナモックス細菌を十分に確保できること、ii) アナモックス細菌の培養に十分な経験があること、iii) 膜分離技術に精通していること、iv) 電気生産細菌の培養に精通していること、および v) MFC の原理を理解し経験を有していること、が最低必要条件であるが、それらを全て兼ね備えた研究グループは世界的にも申請者の研究グループのみである。</p> <p>(2) 本発表研究の概要</p> <p>現在、我が国の総電力消費量の約 0.7%(約 72 億 kWh)が下水処理に消費されている（その内訳は約 30-50%が汚泥処理・処分、40%が活性汚泥法の曝気である）。したがって、下水処理にかかる消費エネルギーを削減するためには、曝気量と汚泥発生量を削減しなければならない。</p> <p>そこで本研究では、新しいユニークな機能を持った微生物（電気生産菌と嫌気性アンモニア酸化（アナモックス）細菌）を活用し、膜分離技術を融合した膜分離型バイオ燃料電池(MFC)と CANON プロセス (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の部分硝化+アナモックス反応を 1 つのリアクターで同時に行う) を組み合わせることにより (図参照)、無曝気で有機物酸化、窒素除去、病原細菌除去、余剰汚泥発生量の削減、電気エネルギー回収を同時に可能とする高効率・創エネ型水再生システムを開発する。</p> <p>(3) 本研究発表の詳細</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>新しいユニークな機能を持った微生物（電気生産菌とアナモックス細菌）を培養し、これら細菌のゲノム情報を活用し、未解明である電気生産、嫌気性窒素代謝の生化学を解明し、水処理への実用化を加速させる。具体的には、申請者が培養に成功したアナモックス細菌(4 種)、電気生産細菌(3 種)の増殖速度をはじめとする生理生態学的特性を明らかにする。</li> <li>膜分離型 MFC を構築するために、電気伝導性 MF (限外ろ過) 膜を、ポリエステル製不織布にカーボンナノチューブを多層状に塗布し作成し(成功すれば世界初となる)、膜分離型 MFC の作成および性能評価を行う (図参照)。</li> <li>膜分離型 MFC と CANON プロセスを統合したシステムを開発し、処理性能を評価する。これまで単独に研究開発されてきた MFC, MBR, CANON プロセスを統合することによって、それぞれの欠点を克服し、無曝気で高度下水処理（有機物、窒素、SS、病原細菌の除去）が達成でき、処理水は都市の安定した水資源として再利用できるようになる。同時に電気エネルギーが回収でき、処理施設のエネルギー消費の一部を補填することも可能となる。</li> </ol>	


【14】 続き

(4) 本発表の注目点

本研究では、新しいユニークな機能を持った微生物（電気生産菌と嫌気性アンモニア酸化（アナモックス）細菌）を活用し、かつ膜分離技術と融合した、膜分離型バイオ燃料電池(MFC)と CANON プロセス ( $\text{NH}_4^+$ の部分硝化+嫌気性アンモニア酸化を1つのリアクターで同時に行う) と組み合わせることにより、無曝気で有機物酸化、窒素除去、病原細菌除去、余剰汚泥発生量の削減、電気エネルギー回収を同時に可能とする高効率・創エネ型下水再生システムを開発する。



# 研究発表データシート

【15】	中島 一紀 北海道大学大学院工学研究院 環境循環システム部門・准教授	
------	--	---

発表タイトル	タンパク質を利用したシリカ材料の作製
サブタイトル	

### (1) 研究者のアピールポイント

生体内では温和な条件下で極めて複雑で多岐にわたる反応が行われています。その反応とメカニズムを、化学的な観点から理解し、生物工学と化学工学をツールとして用いることで、循環型の機能性物質・エネルギー生産へ応用することを目指しています。研究のキーワードは、バイオミネラリゼーション、生物模倣、バイオ燃料、タンパク質工学、です。

### (2) 本発表研究の概要

シリカチンは海綿動物中に存在し、常温・常圧・中性 pH という極めて温和な条件下においてシリカの重合を触媒する酵素タンパク質です。本研究では大腸菌を用いた活性シリカチンの作製方法とそれを用いたシリカ作製技術を紹介します。

### (3) 本研究発表の詳細

シリカは、化学的安定性が高い、物理的に強固である、多孔質性のため物質の拡散に優れる、といった性質を示すことから、バイオ分野において、細胞固定化、バイオセンサー、バイオデバイス、バイオ医薬品（ドラッグデリバリー）等への応用が期待されています。しかし、通常のシリカ合成においては、テトラエトキシシラン

(TEOS) などのシリカ前駆体を原料として、酸あるいはアルカリ条件下で加水分解と重縮合を行うゾル-ゲル反応 (図 1) が一般に用いられており、その過酷な条件により、シリカに固定化する生体物質が失活するという問題がありました。

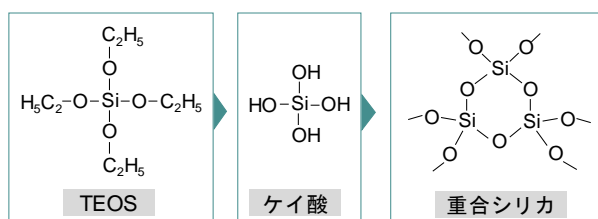


図 1 TEOS の加水分解とシリカの重合

シリカチン (図 2) は海綿動物 (*Suberites domuncula* 等) のガラス骨格中に含まれ、シリカの重合を触媒する酵素タンパク質です。シリカチンを用いることにより、TEOS などのシリカ前駆体を基質として常温・常圧・中性 pH という温和な条件下でシリカの合成を行うことが可能であるため、新たな無機材料の作製ツールとして期待されています。しかし、シリカチンは本来海綿動物中に存在する酵素であり、その中から微量の酵素を抽出・分離して用いることは工学的に困難であると考えられます。

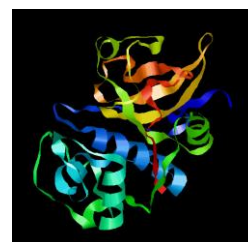


図 2 シリカチンの推定構造 (SWISS モデル)

本研究では、遺伝子工学的手法を用い、大腸菌 *Escherichia coli* にシリカチンを作らせ (異種発現) (図 3a)、それを回収してシリカ重合の触媒として利用するプロセスについて研究しています。

【15】 続き

また、シリカテインはタンパク質分子内に疎水性ドメインを持つため、水溶液中で多量体を形成し、不溶化・凝集するという性質があります。そこで、シリカテインのリフォールディング（タンパク質の巻き戻し操作）（図 3b）および凝集性について調査しています。

大腸菌の発現系において最も用いられている pET 発現系ではシリカテインの効率的な発現はできませんでしたが、低温で発現誘導を行うコールドショック発現系を用いることでシリカテインの過剰発現に成功しました（図 4a）。得られたシリカテインは不溶性ですが、適切な条件でリフォールディングを行うことにより、可用性のシリカテインを得ることができました。大腸菌で作製したシリカテインを用いて、TEOS を基質としてシリカの重合実験を行ったところ、コントロールの酵素非添加系ではシリカの生成は見られなかったのに対し、シリカテイン添加系では顕著なシリカの生成が確認されました（図 4b）。これは常温（20°C）、常圧、中性 pH という極めて温和な条件下でも、シリカテインのシリカ重合機能を用いることで無機材料の合成が可能であることを示しています。また、生成したシリカの形態をデジタルマイクロスコップで観察したところ、多孔質性のシリカであることが分かりました（図 4c）。

シリカテインはリフォールディング操作により可溶性となりますが、室温でしばらく放置しておくともたまたま再凝集します。再凝集を抑制し、可溶化した状態で安定に存在させる技術や、凝集したシリカテインのシリカ重合活性についても検討を行っています。

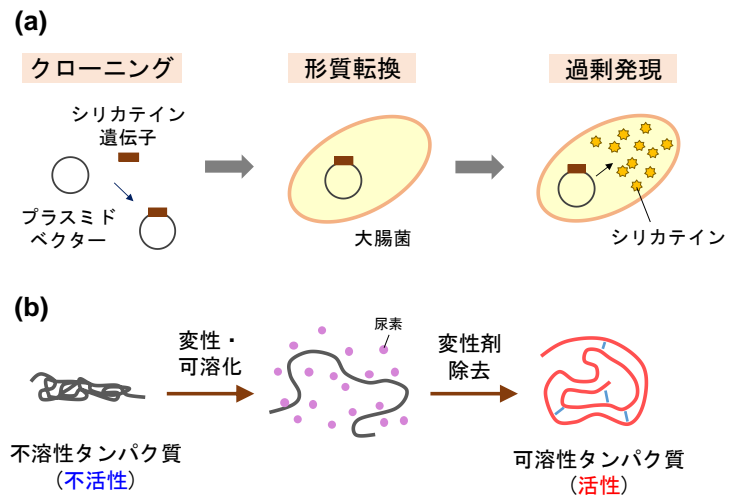


図 3 (a) 大腸菌を用いたシリカテインの過剰発現 (b) リフォールディングによる活性化

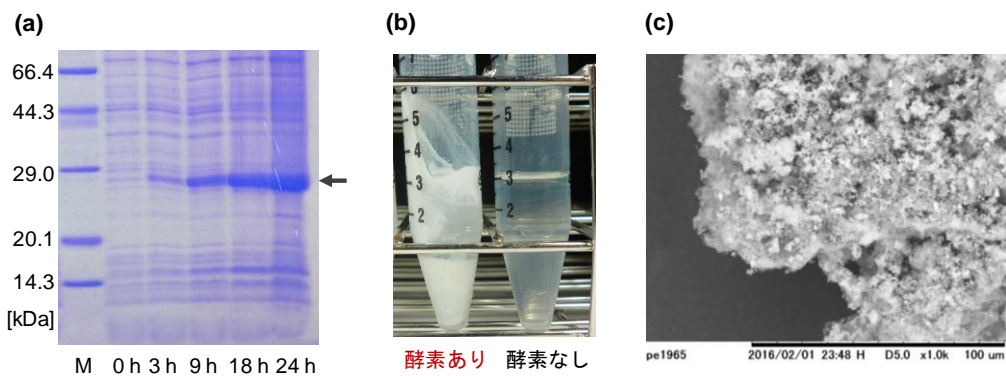



図 4 (a) 大腸菌によるシリカテインの発現 (b) シリカテインによるシリカ重合 (c) 生成シリカのデジタルマイクロスコップ像

(4) 本発表の注目点

本来、海綿動物の中に存在し、自身のガラス骨格を形成するために機能しているシリカテインの遺伝子を大腸菌に導入し、異種発現により大量にシリカテインを作製する技術を開発しました。シリカテインは、シリカのみならず他の金属酸化物や金属微粒子を生成することが報告されており、そのような機能を用いることで様々な無機材料を温和な条件下で作製するツールとして利用できると期待されます。

# 研究発表データシート

【16】	氏名 柴山 環樹 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・教授	
------	---	---

発表タイトル	複合量子ビーム超高压電子顕微鏡を用いたその場観察とナノ材料開発への応用
サブタイトル	グリーンナノマテリアルの開発に向けて
<p>(1) 研究者のアピールポイント</p> <p>高エネルギー電子あるいはレーザーやイオンビームと物質や材料の動的な挙動をその場観察出来る世界で唯一の複合量子ビーム超高压電子顕微鏡を用いて、社会生活を豊かに安全で安心なグリーンなナノ材料の開発に取り組んでいます。</p> <p>(2) 本発表研究の概要</p> <p>北海道大学で開発した複合量子ビーム超高压電子顕微鏡の仕組みと特長について紹介します。誘電体基板状の貴金属薄膜にレーザーやイオンビームを単独あるいは同時に照射することによって貴金属薄膜の <b>Dewetting</b> 現象を利用して均一に分散したナノ粒子化あるいは周期的にナノ粒子を配列した量子ドット構造として、近年光学フィルターやバイオセンサー等への応用へ展開できると注目されている表面プラズモン共鳴を応用したグリーンナノ材料開発について紹介します。</p> <p>(3) 本研究発表の詳細</p> <p>超高压電子顕微鏡は、一般的な汎用の 200kV の透過電子顕微鏡に対して 5 倍以上の高い加速電圧を有するため、原子番号の大きい元素で構成している厚い試料の観察も可能です。また、高い加速電圧に起因する高エネルギー電子による試料の損傷が問題になることもありますが、北海道大学ではこの性質を積極的に利用して、放射線照射環境下で使用される原子力材料や宇宙空間で使用される材料の研究に取り組んできました。また、イオン加速器を連結することにより、放射線照射環境下における核変換効果を模擬することや、半導体への異種元素ドーピングや機能材料の表面改質について物質・材料とイオンビームの相互作用により変化する微細組織を直接観察することが出来るので大学に限らず企業も含めて国内外の研究者が利用しています。そこで、レーザーと物質・材料の相互作用を直接観察出来る用にするために、先ずナノ秒パルスレーザーを敷設したレーザー超高压電子顕微鏡を開発し、レーザーを照射することによってステンレス鋼試料内の空孔型転位ループの挙動についてその場観察が初めて可能となり、照射欠陥の研究に新しいインパクトを与えました。これらの成果を基に、イオン加速器を連結したマルチビーム超高压電子顕微鏡の 300kV イオンビームラインを利用してレーザーを導入するシステムを設計・開発しました。イオンビームとレーザーの相乗照射効果により、金ナノ粒子が周期的に配列する量子ドット構造になる照射条件を見出しその特異的な光学的特性の発現機構について発表する。</p>	



## 【16】 続き

図 1 (a) に、イオンビームとレーザーを同時に照射することが出来る複合量子ビーム超高压電子顕微鏡の断面模式図を示す。試料位置には、高压タンクの設置してある 2F 部分から水平面に対して 44 度の角度で電子顕微鏡の中へ導かれる。電子顕微鏡のポールピース上部にはコリメーターに相当する細い管が設けられており、レーザーは試料にイオンビームと共に照射される。試料は、液体窒素で冷却することやヒータで加熱することも可能である。

### (a) Drawing of newly installed Laser irradiation equipment

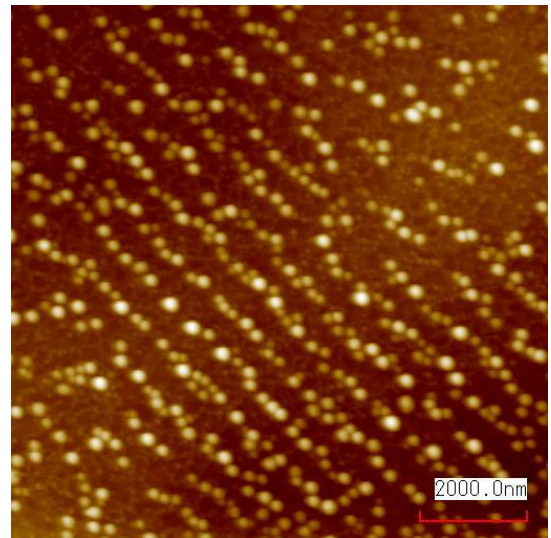
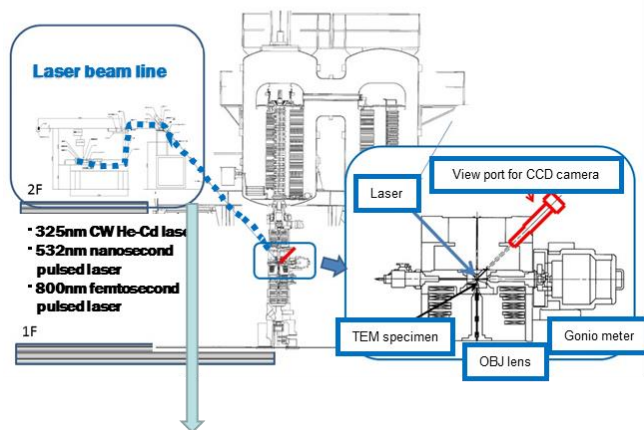



図 1 (a) 複合量子ビーム超高压電子顕微鏡のビームライン断面図、(b) ナノ秒パルスレーザーとイオンビームの同時照射による石英ガラス基板上に形成した金ナノ粒子(白い丸いコントラスト)

ナノ秒パルスレーザーが照射されると金薄膜は、加熱され溶融と凝固を繰り返す、金薄膜の結晶粒界や三重粒界点などの欠陥が多い場所や、粒内などの膜厚の不均一な領域から、金薄膜の破れが生じ、照射パルス数が増加するにしたがってホールが複数形成して大きく成長して行く様子を初めてその場観察することに成功した。これは、金薄膜の石英ガラス基板上での濡れ性が非濡れ性になったため生じたためで、ガラスの水滴を思い浮かべると理解しやすいと思われる。ナノ秒パルスレーザーに加えて 100kV の  $\text{Ar}^+$ イオンを同時に照射すると図 1 (b) に示すように、金ナノ粒子が周期的に配列した量子ドット構造になる条件を見出した。これまで、ナノ秒パルスレーザーの照射パルス数を増加するとこの様なレーザー照射誘起表面周期構造 (LIPSS) が形成することが分かっていたが、イオンビームとの同時照射による相乗効果によって、少ない照射パルス数で形成することが明らかになった。これは、イオンビームによる **Dewetting** 現象の重畳効果であると考えている。表面プラズモン共鳴による可視光の吸収ピーク波長は、ナノ粒子の平均サイズに依存し、粒径が減少するに従い吸収ピーク波長は短波長になるブルーシフトを示すが、それによらない特異な応答を示すことがある。現在、非常に高いエネルギー分解能を有する収差補正型の走査透過型電子顕微鏡の電子エネルギー損失分光 (Cs-STEM/EELS) を用いてその機構について検討している結果を報告する。更に、集束イオンビーム加工装置で作製したマイクロメートルサイズのミニチュア試験片を使用した複合材料の超高压電子顕微鏡内での界面破壊挙動のその場観察 (ナノメカニクス) や、物質・材料を対象とする研究だけでなく、最近推進している新しい研究分野への複合量子ビーム超高压電子顕微鏡の展開についても紹介する。本研究は、エネルギー・マテリアル融合領域研究センターの教職員や学生、大学院生、博士研究員との共同研究の一部であり多大な協力に感謝すると共に科学研究費補助金をはじめとする競争的資金によって行われました。

### (4) 本発表の注目点

表面プラズモン共鳴を利用した光エネルギー変換デバイス、バイオセンサーなどの開発。

## 研究発表データシート

【18】	川村 秀憲 北海道大学大学院情報科学研究科 情報理工学専攻・教授	
------	--	---

発表タイトル	エンターテインメントのための屋内バルーンロボットの開発
サブタイトル	バルーンロボットによるエンターテインメント飛行の実現

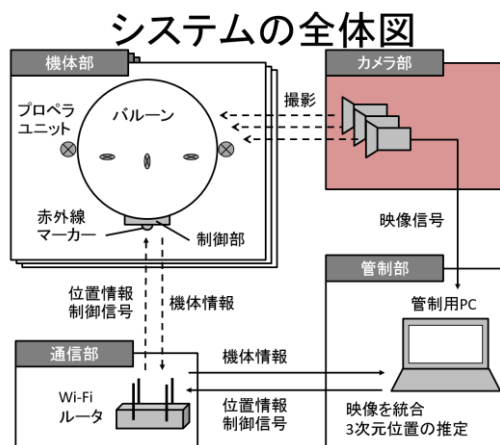
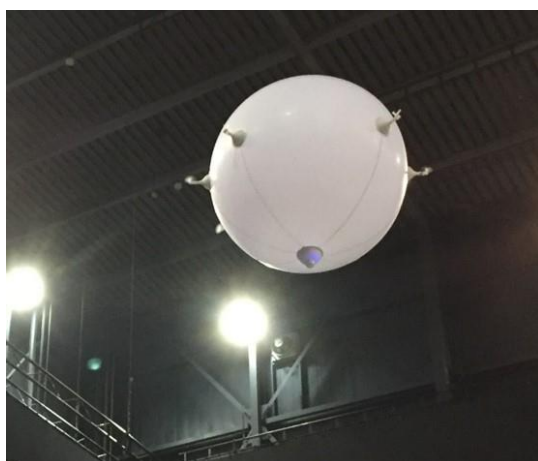
### (1) 研究者のアピールポイント

ディープラーニングや機械学習などによる人工知能技術の応用研究を行っています。バルーンやラジコン車両などのロボットの制御や、画像、売り上げデータ、時系列データの学習、分類、予測などを研究対象としています。

### (2) 本発表研究の概要

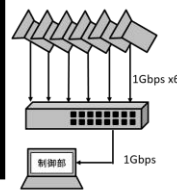
ライブやコンサートなどのイベントにおいて、観客の上空を効果的に利用し新しいイベント演出を行うための屋内用バルーン型の飛行ロボットの開発を行っています。複数設置されたカメラからバルーン下部の赤外線マーカーを撮影することで位置を測位し、無線を経由してその位置をバルーンに搭載されたマイコンに送信します。マイコンでは、カメラからの測位位置とバルーンに搭載した加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサの情報を統合し、位置、速度、向きなどの状態量を推定します。その状態量と目標となる軌跡との誤差が小さくなるようにバルーンのプロペラをPID制御し、目標軌跡を実現します。PID制御する際、浮力やプロペラ出力の偏りなどによってバルーンの特性が変化するため、ニューラルネットワークによってその特性を学習し、PIDゲインを最適に調整する機構の導入に取り組んでいます。気流がある広い屋内空間において、10cm程度の誤差で時刻、および軌道を制御可能なシステムの実現を目指しています。

### (3) 本研究発表の詳細



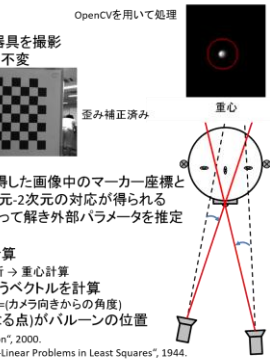
### カメラによる位置推定(1/2)

- ・ イベント会場：激しいライティングの変化  
→赤外線による撮影
- ・ 赤外線マーカー  
- 半値角60度を45度ごとに配置
- ・ 赤外線カメラ  
CMOSセンサ+可視光カットフィルタ( $\lambda_c \approx 950\text{nm}$ )  
40ms露光 + (6台×(1920×1200px×8bit)÷1Gbps) → 6.6fps



### カメラによる位置推定(2/2)

- 事前準備
  - 内部パラメータ(歪み、画角等)推定  
Zhangの手法<sup>[1]</sup>：キャリブレーション器具を撮影  
ズームやフォーカスを変えないかぎり不変
  - 外部パラメータ(位置、姿勢)推定  
既知位置にマーカーを置き撮影、取得した画像中のマーカー座標とマーカーの座標を入力することで3次元-2次元の対応が得られる  
4組以上からPnP問題をLM法<sup>[2][3]</sup>によって解き外部パラメータを推定
- 飛行中
  - カメラ画像の明るい領域の重心を計算  
2値化 → 膨張×5回 → 領域解析 → 重心計算
  - 画角とカメラ姿勢でバルーンへ向かうベクトルを計算  
(画像中心からの距離) × (画角) = カメラ向きからの角(度)
  - ベクトルの交点(2重距離が最小)になる点がバルーン的位置

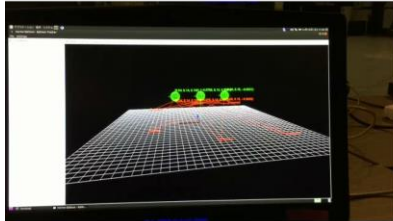


[1] Z. Zhang : "A flexible new technique for camera calibration", 2000.  
[2] K. Levenberg : "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares", 1944.  
[3] D. Marquardt : "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters", 1963.

### 管制部

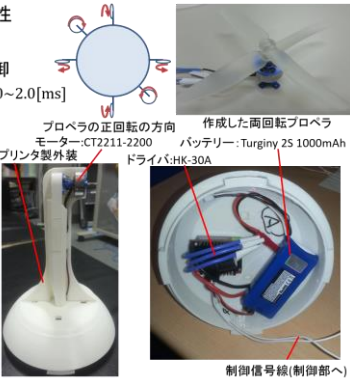
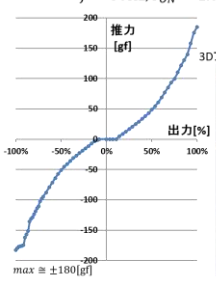
- ・ 各バルーンに司令を送る  
- 飛行準備、編隊飛行開始、緊急停止等
- ・ カメラの画像を取得し座標を推定
- ・ 推定した座標をバルーンに送信
- ・ バルーンの位置、状態等を表示

PC : DELL Alienware15
OS : Ubuntu Linux
開発言語 : C++
使用ライブラリ : OpenCV OpenGL(gtkglxextmm) GTK+gtkmm



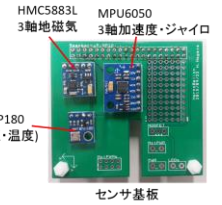
### プロペラユニット

- ・ 正転/逆転で同じ特性
- ・ 反トルク相殺
- ・ PWMによる出力制御  
-  $f = 50\text{Hz}, T_{ON} = 1.0 \sim 2.0[\text{ms}]$



### 制御部

- ・ Raspberry Pi 2 Model B
- ・ 管制PCとの通信(USB-WiFiドングル)
- ・ プロペラモジュール、IRマーカー、カラーLED制御
- ・ センサフュージョン  
- カメラの位置推定約6Hz+センサ10Hz



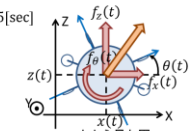
サンプリング間隔 $\Delta t = 0.1[\text{sec}]$   
バルーン座標 $P(t)$ 、速度 $v(t)$ 、ヨー角 $\theta(t)$   
センサによる推定座標 $P_C(t)$ 、速度 $v_C(t)$ 、ヨー角 $\theta_C(t)$ 、ヨー角速度 $\Delta\theta_{CY}$   
 $\theta_C(t) = \alpha_{Mag} \theta_{Mag}(t) + (1 - \alpha_{Mag})(\theta_C(t - \Delta t) + \Delta\theta_{CY})$   $\alpha_{Mag}$ : 地磁気センサの重み(0.95)  
加速度センサ値 $S_{AccB}$ (バルーン座標系)、 $S_{AccW}$ (実世界座標系)  
 $S_{AccW}(t) = \int \begin{bmatrix} \cos \theta_C(k) & 0 & \sin \theta_C(k) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_C(k) & 0 & \cos \theta_C(k) \end{bmatrix} S_{AccB}(k)$   
 $P_C(t) = \int \int S_{AccW}(t) \Delta t$   
カメラでの推定座標 $P_C(t) = (x_C(t), y_C(t), z_C(t))$ を受信している場合:  
 $P(t) = \alpha_{Comp} P_C(t) + (1 - \alpha_{Comp}) P_G^s(t)$   $\alpha_{Comp}$ : カメラの推定の重み(0.95)  
 $P_G^s(t) = P(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2}(v_C(t - \Delta t) + v_C(t))$   
 $P_G^s(t)$ から $v_C(t)$ 、 $a_C(t)$ を再計算  
 $P_C(t)$ を受信していない場合:  
 $P(t) = P_G^s(t)$

マイコン: Raspberry Pi 2 Model B
OS: Raspbian "Wheezy" Linux
WiFi: PLANEX GW-450D KATANA
開発言語: C++



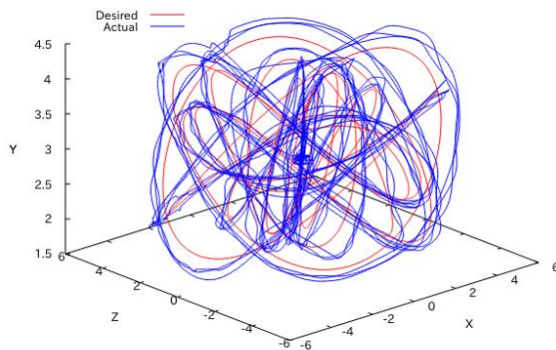
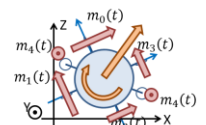
### バルーンの位置制御

サンプリング間隔 $\Delta t = 0.1[\text{sec}]$ 、軌跡先読み時間 $\Delta t_v = 0.5[\text{sec}]$   
バルーンの座標 $p(t) = (x(t), y(t), z(t))$ 、ヨー角 $\theta(t)$   
バルーンの数 $v(t)$ 、目標座標 $p^*(t)$   
目標速度 $v^*(t) = \frac{p^*(t + \Delta t) - p(t)}{\Delta t}$ 、目標ヨー角 $\theta^*(t)$   
目標との差 $E(t) = v^*(t) - v(t)$ 、 $E_\theta(t) = \theta^*(t) - \theta(t)$   
バルーン出力(実世界座標系) $f_x(t), f_y(t), f_z(t), f_\theta(t)$



$$f(t) = \begin{cases} K_p (E_y(t) + T_I \int E_y(t) \Delta t + T_D \frac{E_y(t) - E_y(t - \Delta t)}{\Delta t}) & (\text{垂直方向}) \\ K_p (E(t) + T_D \frac{E(t) - E(t - \Delta t)}{\Delta t}) & (\text{水平方向、ヨー回転}) \end{cases}$$

バルーンの水平方向出力(バルーン座標系) $f_{Bx}(t), f_{By}(t)$   
 $\begin{pmatrix} f_{Bx}(t) \\ f_{By}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta(t) & -\sin \theta(t) \\ \sin \theta(t) & \cos \theta(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x(t) \\ f_y(t) \end{pmatrix}$   
 モーター出力 $m_0(t), m_1(t), m_2(t), m_3(t), m_4(t)$   
 $\begin{cases} m_0(t) = -f_{Bx}(t) + f_\theta(t) \\ m_1(t) = f_{Bx}(t) - f_\theta(t) \\ m_2(t) = -f_{By}(t) - f_\theta(t) \\ m_3(t) = f_{By}(t) + f_\theta(t) \\ m_4(t) = f_y(t) \end{cases}$



(4) 本発表の注目点  
屋内空間における誤差の少ないバルーンロボットの制御、複数バルーンロボットが同期して飛行する様子などが注目点です。



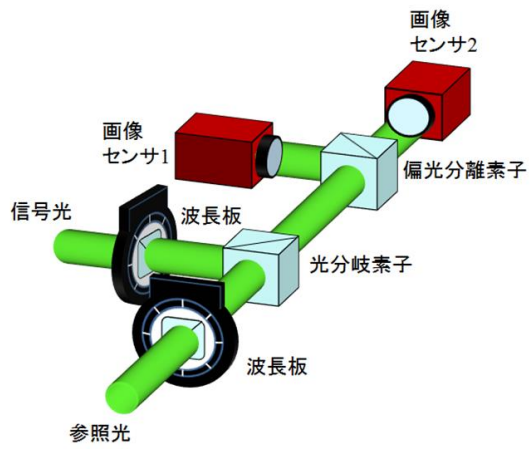
QRコードを読み取ると実験飛行の様子をyoutubeで見ることができます。

## 研究発表データシート

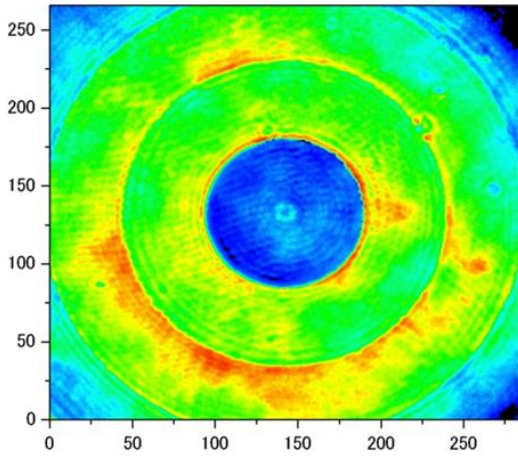
【26】	氏名 岡本 淳 北海道大学大学院情報科学研究科 部門、専攻名・職種 情報エレクトロニクス専攻・光エレクトロニクス研究室・准教授	
------	--	--

発表タイトル	光による未来の創造
サブタイトル	ー光の空間位相情報を検出可能にする「見えないものを見るための技術」ー
<p>(1) 研究者のアピールポイント</p> <p>光複素振幅の計測・制御は、光情報処理とデジタル信号処理の融合を加速し、IT システムの高速化や低消費電力化に貢献するだけでなく、医療計測や製品設計など幅広い分野にわたり新規技術を創出します。</p> <p>(2) 本発表研究の概要</p> <p>本技術は、2 台のセンサと偏光光学素子によって、空間補完誤差を生ずることなく 1 回の計測で光位相分布の精確な検出を可能にします。3D 画像計測、3D 断層計測、デジタル位相共役、3D 光メモリ、空間モード光通信など多岐にわたる応用が期待されます。</p> <p>(3) 本研究発表の詳細</p> <p>ホログラフィックダイバーシティ干渉法では、複数のイメージセンサを偏光光学素子と組み合わせることで、空間補完誤差を生ずることなく 1 回の計測で精確な光位相分布の検出を可能にします。これまでに、2 台のイメージセンサによる干渉光学系の開発と計測アルゴリズムの大幅な改良を行い、高精度な位相計測を実現すると共に、計測された位相分布データを用いた 3D 情報処理を可能にしました。この技術は、3D 光情報の取得やデジタル位相共役による光断層撮影、ならびに、3D 光メモリに直接応用することができます。また、本研究では、信号光に空間フィルタリングを施した光を信号光と再干渉させる参照光不要型位相検出装置の開発にも成功しました。これにより、空間モードを用いた次世代超高速光通信システムやリモートセンシング分野への応用が期待されます。</p> <p>(4) 本発表の注目点</p> <p>応用例</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・3D 画像計測</li><li>・3D 断層計測</li><li>・デジタル位相共役</li><li>・3D 光メモリ・ホログラム</li><li>・空間モード光通信</li></ul>	

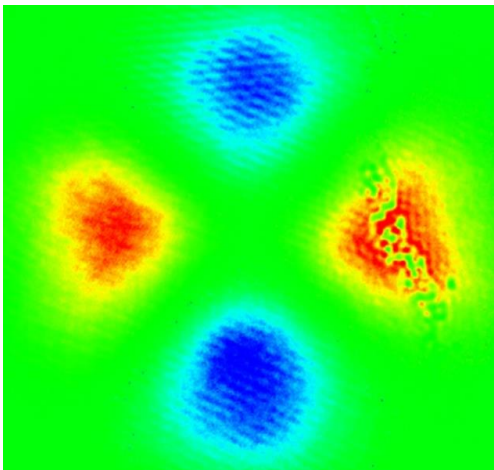
【26】 続き



◆ホログラフィックダイバーシティ干渉計の構成




◆位相計測例(リング状の構造を有する光学素子)



◆複素振幅虚部の計測例(ファイバから出射した空間モード)

# 研究発表データシート

【28】	氏名 工藤信樹 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部門・准教授	
------	---	---

発表タイトル	フォーカストシャドウグラフ法による透明減衰媒体中の超音波音場可視化
サブタイトル	

### (1) 研究者のアピールポイント

従来手法では計測が困難であった減衰媒体中の超音波音場を、光学的手法により簡易に可視化する手法を開発した。従来から利用されているシュリーレン法に比べ、光学系が簡易であり圧力波形を簡易的に評価できる点で優れている。

### (2) 本発表研究の概要

医療用超音波機器の出力評価には、ハイドロホンと呼ばれる圧力測定センサが用いられている。しかし、ハイドロホンを用いた音場分布測定には、大がかりで高価な装置と熟練の技術がなければ正確な測定が実現できない。また、ハイドロホンは一点の音圧を計測する素子であり、音場空間的な広がり測定するには、数時間から数十時間を要する。

超音波診断の安全性を評価するには、生体組織が受ける超音波の圧力波形を正しく把握する必要がある。しかしハイドロホンは水中専用であり、生体内の圧力を直接計測できない。それゆえ生体内の音圧は、ハイドロホンで測定した水中音圧波形に生体の減衰係数を乗じることで計算によって推定されている。しかし、実際とどの程度一致するかは検証されていない。

これらの問題点を解決するため、本研究では、透明な減衰媒体を伝搬する超音波の音場をフォーカストシャドウグラフ法により可視化する試みを行った。

### (3) 本研究発表の詳細

フォーカストシャドウグラフ法は超音波音場中で光が曲げられることにより局所的な輝度変化、すなわち影を生じる現象を利用して音場を可視化する。光学系は基本的に照明光源とカメラのみであり、超音波の有無の条件で2枚の写真を撮影し、差分をとることにより超音波音場像を簡易にかつ高感度に可視化できる。

透明な減衰媒体であるひまし油を用い、フォーカストシャドウグラフ法を用いて減衰媒体の超音波音場を可視化した。図2(a), (b)に水中もしくはひまし油中を伝搬する平面波超音波の音場像を示す。水中では伝搬距離が変わっても音場像の輝度に変化がないのに対し、ひまし油中では減衰を反映した輝度低下が確認できる。

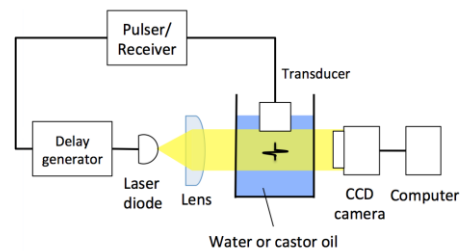


図1 フォーカストシャドウグラフ法の実験システム

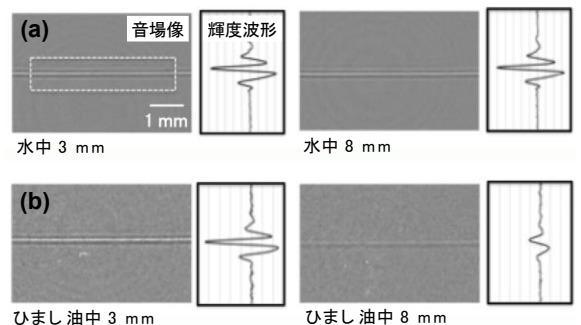


図2 音場可視化像と輝度波形

【28】 続き

図 2(a)に示した白枠内の輝度画像から輝度の分布（以下輝度波形と呼ぶ）を求め、ハイドロホンにより測定した音圧波形と比較した。輝度波形とその1階積分波形をハイドロホンにより測定した音圧波形と比較した結果を図 3(a), (b)に示す。輝度波形の1階空間積分波形が音圧波形と良く一致したことから、音場可視化像から音圧の定量評価を実現する可能性が示された。

ひまし油中の伝搬距離を3 mmと8 mmの2条件に設定して取得した輝度の1階積分波形の周波数スペクトルを図 4(a)に示す。また同条件でハイドロホンを用いて測定した圧力波形の周波数スペクトルを図 4(b)に示す。伝搬距離の増加に伴い、高い高周波域でより大きな減衰が生じていることが両方の計測結果で確認できる。

伝搬距離3 mmの周波数スペクトルを8 mmの周波数スペクトルで除算して求めたひまし油の減衰特性を同図に示す。図のように両者とも減衰量は周波数の増加とともに線形に増加した。輝度画像から求めた減衰係数は4.94 dB/(MHz·cm)となり、ハイドロホンの圧力波形から求めた減衰係数5.02 dB/(MHz·cm)と良く一致した。以上の検討より、我々の開発したフォーカストシャドウグラフィ法は音場分布の計測だけでなく音圧波形再現や減衰特性の簡易評価にも有用であることが示された。

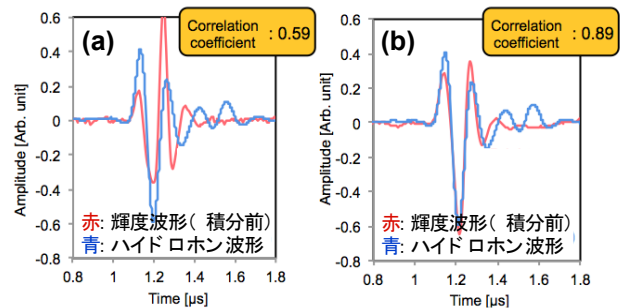
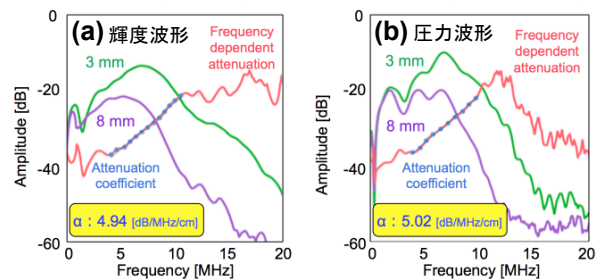


図3 ひまし油の輝度波形と音圧波形の比較




緑・紫：輝度波形の周波数スペクトル，赤：減衰特性

図4 輝度波形と圧力波形の周波数スペクトルと減衰特性

(4) 本発表の注目点

- ・ 【減衰媒体中の音場可視化】従来手法では直接計測が不可能だった減衰媒体中の音場が、我々の開発したフォーカストシャドウグラフィ法により直接可視化できることを示した。
- ・ 【圧力波形推定の可能性】可視化像から作成した輝度波形と、ハイドロホンで測定した音圧波形の関連を検討し、輝度波形の1階積分波形が音圧波形と良く一致することを示した。
- ・ 【減衰係数評価の可能性】ひまし油中の輝度波形から減衰係数を求め、ハイドロホンで測定した音圧波形から求めた減衰係数と良く一致することを示した。

## 研究発表データシート

【30】	藤澤 剛 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	
------	---	---

発表タイトル	光通信容量の飛躍的高度化に向けたモード分割多重通信技術の研究
サブタイトル	
<p>(1) 研究者のアピールポイント</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 光通信伝送容量飛躍的拡大のためのモード分割多重技術</li> <li>● デバイスからシステムまで、幅広く光通信技術を研究</li> <li>● 光ファイバ、デバイス設計のための独自の設計技術を保有                     <ul style="list-style-type: none"> <li>ー 有限要素法、ビーム伝搬法、最適化アルゴリズム</li> </ul> </li> <li>● 光通信に限らず、あらゆる導波系光学応用が可能                     <ul style="list-style-type: none"> <li>ー センシング応用など</li> </ul> </li> </ul> <p>(2) 本発表研究の概要</p> <p>光通信伝送容量の飛躍的増加を可能とする、モード分割多重技術を研究している。具体的に、(1) 複数の導波モードを有する数モードファイバ上での光パルス伝送特性解析法の開発、及び、(2) 高性能モード制御光波回路設の創出を目的とした。</p> <p>前項目的(1)については、研究代表者が独自開発してきた、ベクトル有限要素法を用いた高精度ファイバ設計技術と光パルス伝搬シミュレーション技術を融合し、伝送路中でのモード結合が存在する中での、伝送特性解析技術を確立した。前項目的(2)については、光波回路最適設計技術の一つである波面整合法を用いた、モード制御光波回路最適設計技術を新規開発し、広帯域モード合分波器の設計が可能であることを見出し、実験によりその効果を実証した。</p> <p>(3) 本研究発表の詳細</p> <p>研究背景</p> <p>近年のクラウドサービスの普及などに伴い、従来の長距離幹線系のみならず、データセンタ内、センタ間などの LAN 系通信の光化が急速に進んでおり、あらゆる場面での光通信の伝送容量拡大が強く求められている。これまでの幹線系光通信システムは主に、光の波長軸で信号を多重化する波長分割多重技術を用いて、その伝送容量拡大を達成してきた。LAN 系通信においては、10 ギガイーサネットまでは、単一波長で、その伝送容量を賄ってきたが、2010 年に標準化が完了した 100 ギガビットイーサネットでは、もはや 1 波で必要な伝送容量を賄うことができず、25G×4 波の波長分割多重システムを採用した。今後、400G、1T のシステムへと拡大していくためには、波長軸だけではなく、別の軸での多重化が必要となっている。</p> <p>モード分割多重技術は、伝送路に、従来のシングルモードファイバではなく、複数の導波モードを有する数モードファイバを用い、伝送路の各モードに情報を載せる技術であり、主に長距離通信への適用を念頭に研究が進められている。モード分割多重技術を用いることで、波長数を増やすことなく、伝送容量を拡大することが可能であり、幹線系のみならず、LAN 系光通信への適用も期待される。しかし、数モードファイバ上で、複数の導波モードの信号を伝送する場合、ファイバ中の各種の摂動（曲げやねじれなど）により、信号間でクロストークが生じ、伝送特性に悪影響を与える。また、送受信器では、各モードを多重・分離するモード合分波器が必要となるが、集積型の導波路デバイスを用いた合分波器では波長依存性が大きいことが問題になっていた。</p>	



### 【30】 続き

そこで本研究では、(1) 複数の導波モードを有する数モードファイバ上での光パルス伝送特性解析法、及び、(2) 高性能モード制御光波回路の創出を目的とした。前项目的(1)については、研究代表者が独自開発してきた、ベクトル有限要素法を用いた高精度ファイバ設計技術と光パルス伝搬シミュレーション技術を融合し、伝送路中でのモード結合が存在する中で、伝送特性解析技術を確立した。前项目的(2)については、光波回路最適設計技術の一つである波面整合法を用いた、モード制御光波回路最適設計技術を新規開発し、実験によりその効果を実証した。

#### (1) 数モードファイバ上での光パルス伝送特性解析法

数モードファイバ上での、モード間結合が存在する場合の光信号伝搬解析技術の開発を行った。

数モードファイバ上の伝送特性解析に関しては、モード間結合を生じさせるファイバ中の摂動としてマイクロベンドを想定したファイバモデルを構築し、その中でモード間群遅延差による群遅延広がり算出技術、及び、信号伝搬解析技術を開発した。図1上段に、数モードファイバの一つである、結合型3コアファイバの構造図を示す。3コアファイバは3つのコアから形成される3つのスーパーモードを有するが、ファイバ中でのモード結合が無ければ、それぞれ別々の群速度で伝搬する。しかし、ファイバ中での各種摂動によるモード結合が生じると、摂動が大きい場合には強く結合し、出力では同時に一つのガウス型パルスとして出力される。図1下段に60キロ伝搬後の3つのモードのインパルス応答、及び、文献(R. Ryf et al., in Proc. of OFC, PDP5C2, 2011)の実測結果を示す。図に示すように、本研究で開発した伝送特性解析結果と、文献における実験結果とは良く一致しており、開発した手法の妥当性が確認できる。

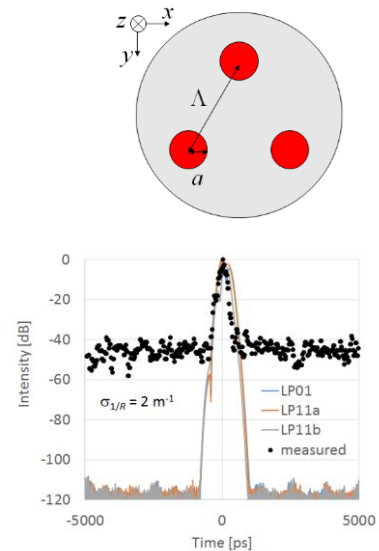


図1 結合型3コアファイバの断面図と60キロ伝搬後のインパルス応答

#### (2) 高性能モード制御光波回路設計技術の開発

実用に耐えるより高性能なモード合分波器などのモード制御光波回路の実現を目指し、光波回路最適設計技術の一つである波面整合法を用いた、モード制御光波回路最適設計技術を開発し、低損失・広帯域モード合分波器が構成可能であることを見出した。

図2上段に、波面整合法によって設計された、非対称型方向性結合器を用いた、LP01/LP11モード合分波器の上面図を示す。非対称方向性結合型モード合分波器では、下側の細い導波路(Waveguide2)のLP01モードと上側の太い導波路(Waveguide1)のLP11モードが位相整合しており、Waveguide2に入社された光は、結合部でWaveguide1のLP11モードへと結合し、2モード合分波器として動作する。通常の構造では、2つの導波路ともに、一定の導波路幅を有しているが、波面整合法による最適設計を行うことで、図のように、導波路幅が伝搬方向に変化した構造が得られる。図2下段に、通常構造、及び、波面整合法によって最適化された構造の、Waveguide2からWaveguide1への透過スペクトルを示す。図中、赤線は通常構造、緑線が波面整合法によって設計されたものの透過スペクトルである。図から明らかなように、本研究で考案したモード合分波器の透過スペクトルは、通常構造に比べ、広い帯域で低損失であることがわかる。

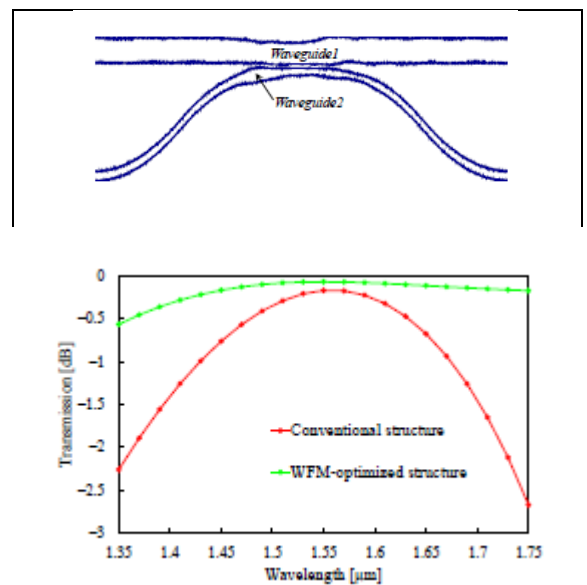



図2 波面整合法によって設計された2モード合分波器の構造図と透過スペクトル

#### (4) 本発表の注目点

- 独自の光学シミュレーション技術
- 実験結果をよく説明する高信頼理論解析技術
- 人間の偏見にとらわれない、最適化アルゴリズムによる新規デバイスの創出

## 研究発表データシート

【35】	氏名 田中 孝之 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	ウェアラブルセンサによる腰部負担の見える化
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

ロボット工学，人間工学を基盤として，人間中心のものづくりができる技術開発・人材育成を目指しています。人の手による作業の負担軽減を目的とした「軽労化®技術」の研究開発では，軽労化スーツ「スマートスーツ®」を開発し，実際に農業や介護の現場で使っていただける技術を，メーカー，ユーザと一緒に創り上げています。

(2) 本発表研究の概要

作業者の腰部負担を定量的に求めることで，腰痛リスクの高い姿勢を未然に防ぐシステムの開発を行っている。腰仙椎アライメントを考慮した腰部負担計測を目的とし，表皮形状から体内の情報である腰仙椎アライメントを推定することで腰部負担を計測するためのウェアラブルセンサシステムの研究を進めてきた。脊柱の形状が変化すると各椎体にかかる圧迫力は変化するため，腰部表皮形状と上体姿勢角度や仙骨角度を計測し，腰椎の形状及び各椎体の座標系を推定する手法を開発する。また，各椎体と表皮の関係は性別，体型，姿勢によって変化することが考えられる。そのためセンサが人体のどの位置を計測しているかを知ることにより，体格差に対してロバストである腰仙椎アライメント推定を実現する。

(3) 本研究発表の詳細

前屈動作姿勢における X 線画像の解析から構築した，腰椎形状と姿勢推定を行う計測システムを図 1 に示す。ウェアラブルセンサシステムのセンサ配置を決定するために，前屈動作姿勢における X 線画像の解析を行った。そのため，ウェアラブルセンサシステムで使用するセンサは，曲率センサを 4 組，加速度センサを 2 個となった。

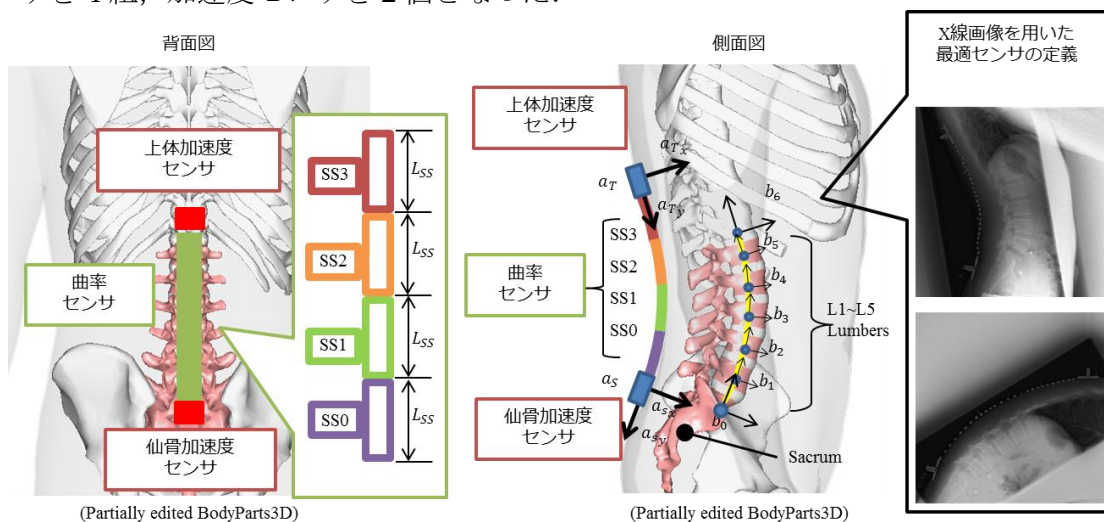


図 1 ウェアラブルセンサシステムの構成

【35】 続き

ウェアラブルセンサシステムとして実装するために、計算コストの低い推定法を構築する必要がある。このため、座標変換行列を用いた順運動学的アプローチにより腰仙椎アライメントを求める。Skin line と Spine line が部分的に同一の曲率中心を持つものとする。このことに着目し、腰部曲率を用いて図2に示すような腰仙椎アライメント推定法を構築した。仙骨加速度センサの位置座標系 $s_5$ に基準座標系 $\Sigma_0$ を設ける。 $\Sigma_0$ から下の $s_0, b_0$ から上の $s_6, b_6$ と順々に求めていく。

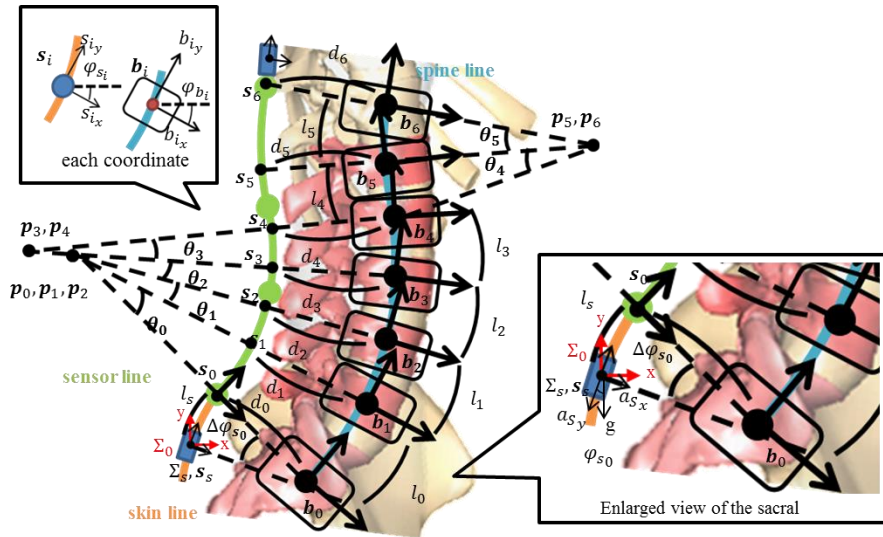


図2 腰仙椎アライメント推定法

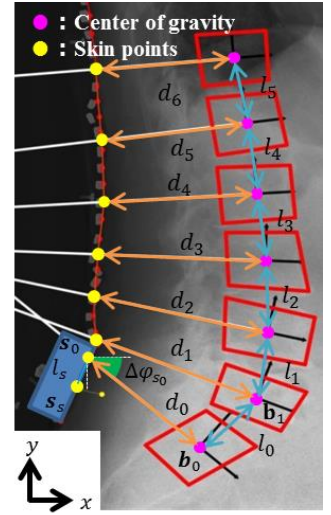


図3 腰仙部寸法

ユーザの体格や性別によらず使用できるウェアラブルセンサシステムの開発を目指さすため、体格差を考慮した腰仙椎アライメント推定法を構築するために、図3に示すようなX線画像を、本研究グループで健常者54名に対して3姿勢、撮影した。それらのX線画像から腰仙部における各体内寸法の補正式を求める。腰仙部におけるパラメータと、性別、体表面積、上体姿勢角との関係を用いて補正式を構築した。

推定した腰仙椎アライメント情報から、筋骨格静力学モデルを用いて、腰部負担を計算する。計算した腰部負担値を元に、着用者の姿勢から警告をしたり、負担を管理したりすることができる。

図4に示すように、構築した腰仙椎アライメント推定法と腰仙部寸法の個体補正をウェアラブルセンサシステムに適応することで、リアルタイムに腰仙椎アライメントを推定することができる。その結果を用いて前屈姿勢等の腰部負担を計算することができる。

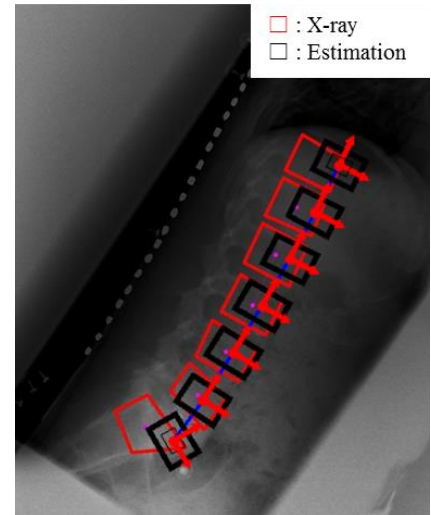



図4 腰仙椎アライメント推定結果

(4) 本発表の注目点

着るだけで作業中の腰の負担を可視化することができる複数のセンサを内蔵したウェアラブルセンサシステムを開発した。加速度センサ、曲率センサの情報から、腰仙椎のアライメントや腰椎負担を推定する手法を新たに開発した。

# 研究発表データシート

【37】	五十嵐 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・教授	
------	--	---

発表タイトル	非接触給電系の電磁界解析
サブタイトル	均質化有限要素法とモデル縮約法による等価回路自動合成

(1) 研究者のアピールポイント

磁界共鳴を利用した非接触給電は、電気自動車の充電や、各種電子機器のケーブルを介さない充電、ペースメーカーなどの体埋め込み機器の体外からの充電等に応用が可能であり、近年注目を集めています。このような非接触給電装置を開発する際には、コイルの損失を考慮した最適設計が必要になります。しかしコイル内の渦電流を考慮できる効率的な数値解析法がありませんでした。われわれは、非接触給電系のコイルを効率的かつ高精度に解析できる方法(均質化有限要素法)を開発しました。

(2) 本発表研究の概要

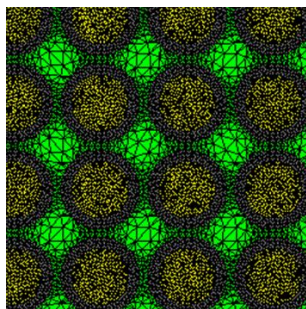
図1(a)に従来の有限要素法で離散化したコイル断面を示します。このままでは、多数の要素が必要であるため、解析に膨大な時間を要します。図1(b)にわれわれが開発した均質化法で用いる要素分割を示します。本法では、コイルの渦電流損を考慮した複素透磁率を導入することにより、コイル断面を一様な媒質として扱うことが可能となります。

(3) 本研究発表の詳細

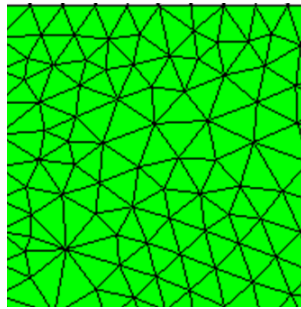
われわれは、コイルの均質化有限要素モデルから、コイルを表す等価回路を直接導く方法も開発しました。本法により生成した非接触給電系の等価回路を図2に示します。これまでは、コイルの渦電流損、渦電流によるインピーダンスの変化を考慮した等価回路は存在しませんでした。われわれは、渦電流の効果を **Cauer** 回路で表現しています。等価回路で非接触給電系を表現できるため、電源回路等の検討を **Spice** などの回路シミュレータで行うことができます。

(4) 本発表の注目点

発表では、提案手法による解析結果と実験結果がよく一致することを示します。提案手法を用いることにより、非接触給電系の開発を効率化することができると考えます。



(a) 従来法



(b)均質化法(複素透磁率)

図1 非接触給電コイルの有限要素モデル

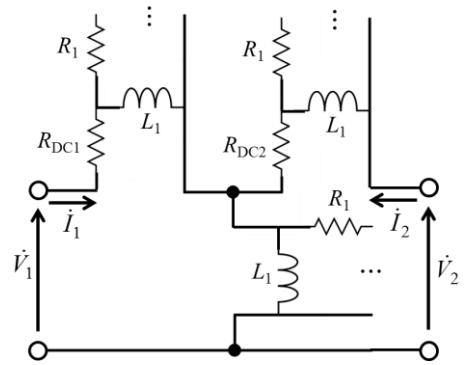


図2 モデル縮約法により生成した非接触給電コイルの等価回路