北海道大学工学系シーズ集Vol.11

イノベーションフォーラム2013　研究発表データシート一覧

番号	部門･専攻等	発表者	タイトル
1	環境創生工学部門	木村　克輝　准教授	膜ファウリングを引き起こす多糖・タンパク質の構造解析
2	物質化学部門	忠永　清治　教授	無機固体電解質を用いた全固体リチウム二次電池の創出
3	材料科学部門	鵜飼　重治　教授	次世代Fe基及びNi基ODS合金の開発
4	人間機械システムデザイン部門	梶原　逸朗　教授	非接触レーザー加振による高周波振動計測／異常検知技術
5	量子理工学部門	越崎　直人　教授	結晶性サブミクロン球状粒子
6	生物機能高分子部門	谷　博文　准教授	リポソーマル生物発光イムノアッセイ
7	メディアネットワーク専攻	坂本　雄児　准教授	電子ホログラフィによる次世代３Ｄシステムの開発
8	システム情報科学専攻	近野　敦　教授	脳外科手術シミュレータの研究開発
9	応用物理学部門	戸田　泰則　教授	ラゲールガウス光を用いた情報多重化
10	有機プロセス工学部門	荒井　正彦　教授	窒素ドープ炭素材料の調製とメタルフリー触媒としての応用
11	材料科学部門	Marta Ziemnicka-Sylwester　助教	TiB_2-based ultra-high-temperature ceramic matrix composites fabricated in situ by SHS combining strong and weak exothermic reactions
12	機械宇宙工学部門	大島　伸行　教授	マルチフィジックス次世代流動場シミュレーション
13	エネルギー環境システム部門	奈良林　直　教授	原子力防災ロボットの開発と福島の復興支援
14	環境フィールド工学部門	杉山　隆文　教授	非破壊CT-XRD連成法の開発とその応用
15	北方圏環境政策学部門	佐藤　太裕　准教授	炭素ナノ材料の形状変形性能を利用した新しい構造システムの提案
16	建築都市空間デザイン部門	森　傑　教授	住民主導による防災集団移転の計画技術
17	空間性能システム部門	長谷川　拓哉　准教授	表面性状に基づく鉄筋コンクリート構造物の維持管理技術
18	環境循環システム部門	原田 周作　准教授	液中微粒子の集団性を利用した沈降・拡散挙動の制御
19	エネルギー･マテリアル融合領域研究センター	沖中　憲之　准教授	潜熱蓄熱材(PCM)を用いた未利用熱エネルギーの有効活用
20	複合情報学専攻	鈴木　恵二　教授	SNSにおける炎上抑制に向けた見守りシステム
21	コンピュータサイエンス専攻	田中　章　准教授	再生核ヒルベルト空間論が拓く標本化定理の未来
22	情報エレクトロニクス専攻	富田　章久　教授	量子暗号鍵配付装置の安全性保証技術
23	生命人間情報科学専攻	舘野　高　教授	微細加工技術を用いた次世代人工聴覚器の小型集積化

※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】	木村　克輝 大学大学院工学研究院 環境創生工学部門・准教授	

発表タイトル	膜ファウリングを引き起こす多糖・タンパク質の構造解析
サブタイトル	水処理、膜ろ過、MBR、MALDI-TOF/MS、SDS-PAGE

（１） 研究者のアピールポイント

今後国際市場が急拡大する「水ビジネス」の基盤要素技術となる膜を用いた水処理に関する日本を代表する研究者。膜処理普及の最大阻害要因となる膜ファウリングに関する先駆的な研究を行ってきた。日本水環境学会の「膜を利用した水処理技術研究委員会」の委員長を務める他、世界最大の水関連学会である国際水協会のスペシャリストグループ「Particle Separation」の Chairman、「Membrane Technology」の Committee Member でもある。

（２） 本発表研究の概要

膜ファウリングに関与する多糖類およびタンパク質の構造をおそらく世界で初めて推定した。

（３） 本研究発表の詳細

膜ファウリング（膜透過性能の低下）は、微生物が生産する多糖類やタンパク質によって引き起こされることについては研究者間でコンセンサスが得られている。しかし「どのような」多糖類・タンパク質が重要であるのかという問題についてはほとんどが不明のままであり、真に効率的な膜ファウリング制御手法の開発が遅れている。

本研究では、多糖類についてはレクチンアフィニティクロマトグラフィーを用いて多糖類を集積精製した後に部分加水分解を施すことにより、MALDI-TOF/MS 分析を行った。MALDI-TOF/MS 分析で検出された質量数ピークをデータベースと照合することで、多糖の構造およびその起源（多糖を生産した微生物）を推定することが可能になった。

タンパク質についても、膜ファウリング物質を精製した後に二次元電気泳動を行って分離し、切り出したスポットのアミノ酸配列を読むことが可能になってきた。こちらも、データベースと照合してその構造と起源を推定することが可能となっている。

（４） 本発表の注目点

本学他学部の生体高分子分析を専門とする複数の研究グループとの共同研究である。水処理工学の分野ではほとんど類例のないレベルの分析を行っている。本研究で開発し、確立しつつある分析手法により、膜ファウリングの発生に関与する多糖類・タンパク質に関する情報は飛躍的に充実する。膜ファウリングを発生させる多糖類やタンパク質を生産する微生物の選択的追跡や、同定したファウリング多糖・タンパク質の構造に基づいた新規耐ファウリング膜の設計などが可能になる。

研究発表データシート

【２】	忠永　清治 大学大学院工学研究院 物質化学部門・教授	

発表タイトル	無機固体電解質を用いた全固体リチウム二次電池の創出
サブタイトル	液相からの硫化物固体電解質の作製

（１） 研究者のアピールポイント

発表者は液相からの機能性無機材料の合成を主な専門分野としており、JST の先端的低炭素化技術開発(ALCA)の特別重点技術領域として 2013 年 7 月にスタートした「全固体電池」チームの分担者として、液相法からの硫化物固体電解質の合成による全固体リチウム二次電池の高エネルギー密度化取り組んでいる。

（２） 本発表研究の概要

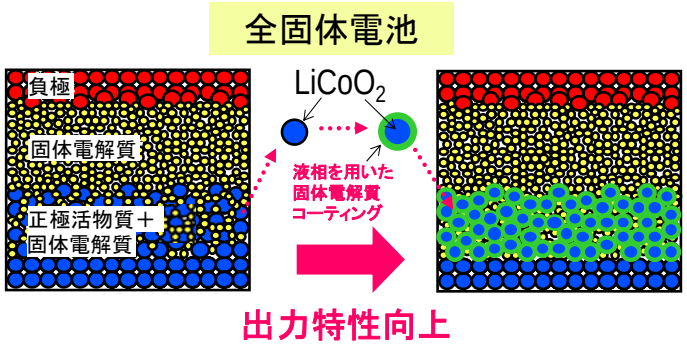
リチウムイオン伝導性固体電解質を電解質として用いる全固体リチウム電池において、良好な電極-電解質間界面の構築が電池の高エネルギー密度化に非常に重要である。本研究では、液相から硫化物系固体電解質を作製することにより、良好な電極-電解質界面の構築を目指した。

（３） 本研究発表の詳細

本研究では、リチウムイオン伝導性硫化物を液相法により合成することによって、塗布法により良好な固体電解質－電極界面の構築を目指した。

Li_2S-P_2S_5 系固体電解質を *N*-メチルホルムアミド(NMF)に溶解させて均質な溶液を作製し、その溶液から NMF を除去することで Li_2S-P_2S_5 系固体電解質を再析出させた。*N*-メチルホルムアミドを溶媒として用いることで、Li_2S-P_2S_5 系固体電解質の均質な溶液を作製することができた。さらにこの溶液から NMF を減圧留去することで淡黄色の粉末が析出した。得られた粉末は、X 線回折測定より、Li_2S および Li_3PS_4 結晶が析出していることが確認され、イオン伝導度は 2.6×10^{-6} S cm^{-1} であった。

上記で得られた Li_2S-P_2S_5 系固体電解質の溶液と正極材料である $LiCoO_2$ を混合し、$LiCoO_2$ 上に固体電解質をコーティングした。そして、この固体電解質がコーティングされた $LiCoO_2$ を用いて電極複合体を作製した。得られた電極複合体、硫化物系固体電解質を用いて全固体リチウム電池を作製したところ、安定に動作することを確認した。また、10 サイクルの間可逆的に動作することも確認した。



（４） 本発表の注目点

・全固体リチウム二次電池の紹介
・硫化物固体電解質について
・良好な電極-電解質界面の構築にむけた取組み

研究発表データシート

【３】	鵜飼　重治 大学大学院工学研究院 材料科学部門・教授	

発表タイトル	次世代 Fe 基及び Ni 基 ODS 合金の開発
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

発表者はこれまで一貫して酸化物分散強化(Oxide Dispersion Strengthened)合金の開発研究に携わってきた。最近は Fe 基のみならず Ni 基や Co 基にまでその範囲を広げている。熱力学、転位論等をベースに基礎原理を追及するとともに、実学重視の基に国研や企業との共同研究を通して、革新的な ODS 合金の開発を行っている。

（２） 本発表研究の概要

金属材料の強化手段は主に析出物に因るが、高温では析出物の粗大化・母相への溶解により、強化作用は急激に低下する。これに対し、高温でも熱的に安定なナノサイズの酸化物粒子を利用して、優れた高温強度を発揮する画期的な ODS 合金を開発した。これは、酸化物粒子のナノサイズ微細分散制御と合金母相の組織制御により達成したもので、開発した ODS 合金は優れた高温エネルギー機器材料として期待される。

（３） 本研究発表の詳細

Fe 基 ODS 合金では、α/γ 相変態を利用することにより優れた加工性を有する 9～12 wt%Cr の ODS 鋼を開発した。JST の研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)において、本鋼は 700℃でフェライト鋼としては最高の高温強度を有し、次世代超々臨界圧（A-USC）火力タービンの動翼・ボルトに適用できることを示した。さらに Al を添加した高 CrODS 鋼は耐水蒸気酸化特性に優れ、軽水炉の 1000℃を超える事故時安全性向上に寄与するとして、その燃料被覆管への適用技術開発が MEXT の国家課題対応型研究開発推進事業（原子力システム研究開発事業）に採択された。本プロジェクトは今年 10 月に開始したところである。

Ni 基 ODS 合金についても Hf 添加により酸化物粒子の超微細化を達成した。また、ゾーンアニーリングによる一方向再結晶を研究し､応力のかかる方向に結晶粒を伸長させる技術を開発した。本合金の適用温度範囲は～1200℃で、比較的小型の無冷却ガスタービンの動静翼材への適用が見込まれる。

（４） 本発表の注目点

福島第一原子力発電所の事故以降、軽水炉の事故時安全性の向上のみならず、その代替としての石炭火力発電の高温化（A-USC)、ガスタービン発電へのニーズが飛躍的に高まっている。その達成は高温に耐える高性能エネルギー材料の実現にかかっている。～1200℃程度まで高温強度を維持可能な ODS 合金は魅力的な高温エネルギー材料として期待される。本発表では、ODS 合金の高温強化の発現機構にまで遡って説明する。

研究発表データシート

【４】	梶原　逸朗 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	非接触レーザー加振による高周波振動計測／異常検知技術
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

高出力パルスレーザーを用いることにより、被照射面で瞬時にレーザーアブレーションを発生させ、理想的なインパルス加振入力を実現させた。本技術により、今まで不可能であった非接触かつ高周波数帯域まで高精度な振動測定を可能にした。さらに、高周波数帯域での微小な振動特性の変化を捉えることにより、システムの故障や異常を高感度で検知できるシステムを開発した。

（２） 本発表研究の概要

本発表では、非接触レーザー加振技術の特徴を最大限に活用し、下記の振動計測およびヘルスモニタリングに適用した事例を紹介する。

２。１　非接触レーザー加振システムによる膜構造の真空環境振動試験

２。２　レーザー加振技術を用いた高周波帯域の特性変動検知に基づくヘルスモニタリング

（３） 本研究発表の詳細

図１にレーザーによる加振力の生成原理を示す。レーザーによる加振力は、レーザーアブレーションによって引き起こされる。レーザーアブレーションにより、物体の表面から原子、分子、イオン等が放出され、これにともない物体上のレーザー照射点にインパルスが発生し、これが加振力となる。

３。１　非接触レーザー加振システムによる膜構造の真空環境振動試験

本計測システムを図２に示すが、YAG パルスレーザー、誘多膜ミラー、集光レンズ、膜構造、LDV および真空チャンバから成る。膜構造が固定されているのは真空チャンバの内部であり、大気環境から真空環境まで真空チャンバ内の空気圧を調整しながら実験を行うことができる。試験対象はカプトン膜であり、-269℃の超低温領域から約 400℃の高温領域まで耐え得る性質を持つため、実際に宇宙でも多く利用されている。本研究では、このカプトンで構成される膜構造を対象とし、YAG レーザーと LDV を用いて、加振力の作用および応答検出ともに非接触で膜構造の振動計測を行う。

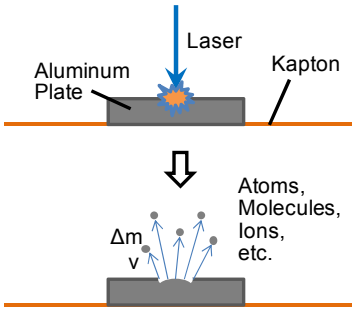


図１　レーザー加振の原理

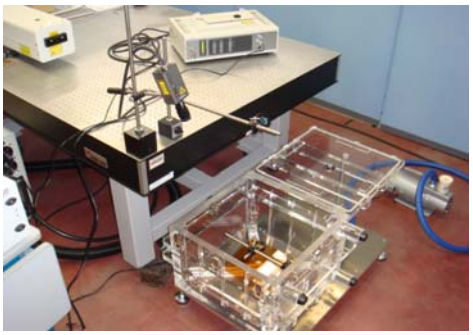


図２　真空環境の振動試験システム

計測された膜の周波数応答を図 3 に示す。真空度を上げることにより、膜の共振周波数が高くなり、同時に共振の応答レベルも向上していることがわかる。このように、膜表面の空気による質量効果および減衰効果の影響を抽出することができ、宇宙環境を想定した真空チャンバ内での実験における本技術の有効性を検証した。

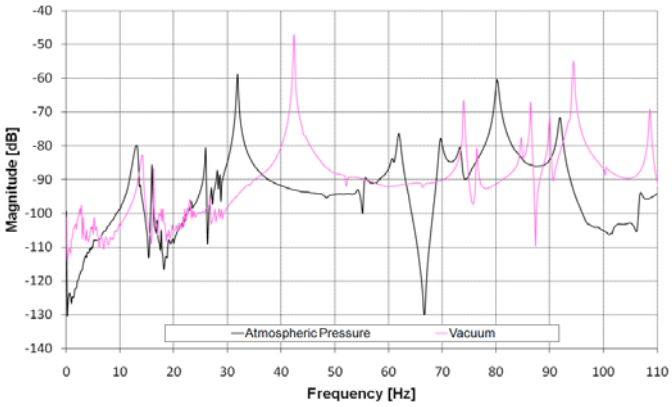


図 3　空気圧の違いによる周波数応答の変化

３。２　レーザー加振技術を用いた高周波帯域の特性変動検知に基づくヘルスモニタリング

図 4 のようにボルト締結された構造体において、非接触レーザー加振技術によりボルト締結緩みを検知する手法を開発した。ボルト締結トルクが正常な場合と緩んだ場合で周波数応答の計測を行った結果を図 5 に示す。同図から、微小な締結トルク低下に対し、周波数応答の特性変動は高周波数帯域において現れることがわかる。また、高周波数帯域の加振に有利なレーザー加振により計測されるパワースペクトルを評価することにより、構造物の微小な異常に対し、高周波帯域で動特性の変化を識別できることを明らかにした。さらに、ボルト締結トルクに関する異常状態に対し、高周波帯域の微小な動特性変化を、RT 法を用いて解析することにより、異常の検知および特定を行う方法を提案し、その有効性を実験的に検証した。

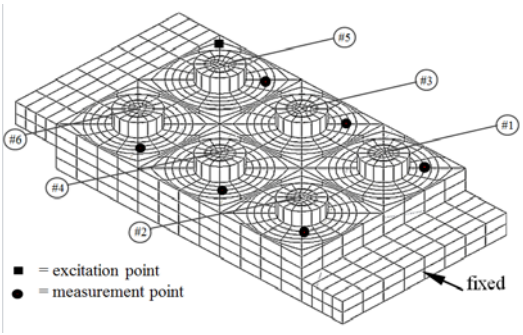


図 4　ボルト締結を有する構造

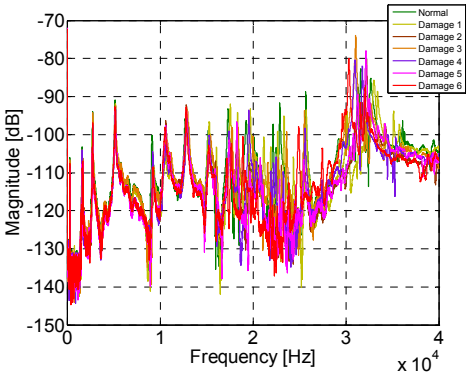


図 5　ボルト締結トルクの低下による特性の変化

（4） 本発表の注目点

本技術は、下記用途への発展的な応用展開が期待できる。

４。１　MEMS や超精密位置決め機器など、高周波数帯域における振動の計測および評価が望まれる対象に適用可能である。

４。２　原子力施設など、安全性の観点から人による作業が困難な領域において、システムの振動計測および健全性評価に極めて有効である。

４。３　自動車・車両などの実稼働時(走行時)における振動特性の計測・モニタリングを実現できる。

研究発表データシート

【５】	越崎　直人 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	結晶性サブミクロン球状粒子
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

レーザーを利用して、従来得ることができなかった結晶性サブミクロン球状粒子の作製を可能とする新たな手法（液中レーザー溶融法）を開発した。球状であるため凝集しにくく、取扱が容易であるという大きな特徴を有した粒子が容易に得られる手法である。

（２） 本発表研究の概要

本発表では、液中レーザー溶融法の開発に至った経緯、その特徴と原理、応用の可能性、大量合成などについて取りあげる。

（３） 本研究発表の詳細

液体中に分散させた原料ナノ粒子（図１左）にパルスレーザー光を照射し粒子だけを 1000 ℃以上の高温に加熱・溶融させる。融解した原料が急冷することでサブマイクロメートル球状粒子（図１右）が得られる手法を開発した。従来の液相レーザーアブレーション法によるナノ粒子合成よりも照射するレーザーエネルギーを大幅に低下させることによって、新たなサブマイクロメートル球状粒子作製法が実現した。この技術により、これまで作製が困難であった機能性を持つ酸化物・金属・炭化物などの結晶性サブミクロン球状粒子の作製が可能となった。

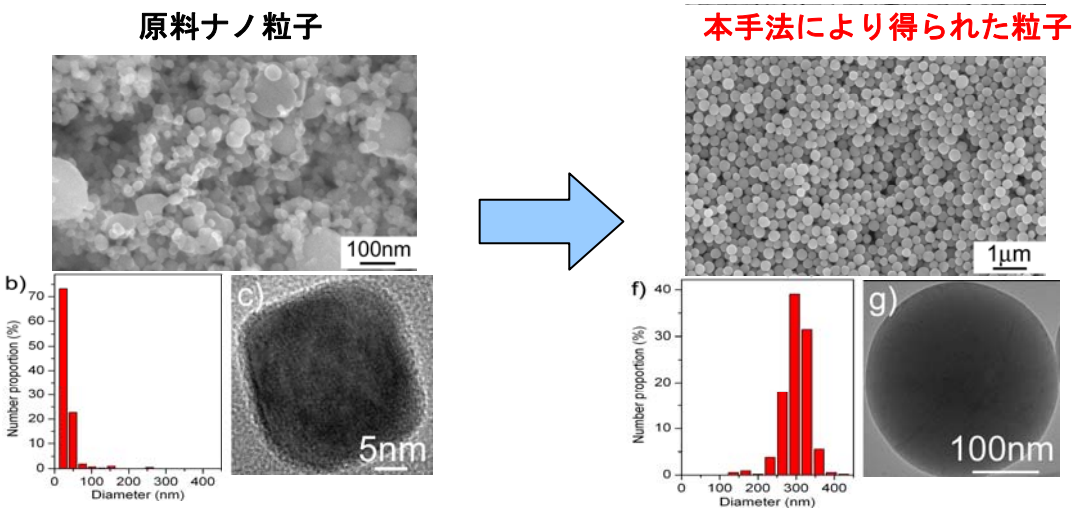


図１　酸化銅の原料ナノ粒子にパルスレーザー光を照射して得られた球状粒子（右）

今回、われわれが開発した方法では、液体中に原料ナノ粒子を分散し、ナノ粒子が吸収できる波長のパルスレーザー光を照射する。ナノ粒子に吸収されたレーザー光のエネルギーが熱に変換することで急速に粒子の温度が上昇し、融点以上に到達して融解する。10 ナノ秒以下の幅のパルスレーザー光を用いたので、エネルギー供給は短時間で停止し、その後、液滴から媒体へ熱が拡散して液滴の温度が低下して急冷が起こり、溶融していた液滴が固化して球状粒子が生成する。

このように、本手法の最大の特徴は、溶融に必要なエネルギーを必要な原料物質だけに必要な時間だけ投入していることである。これを模式的に示したのが図 2 である。また、必要なレーザー光エネルギーが小さいので、非集光レーザー照射を利用でき、作製速度が大幅に向上している。

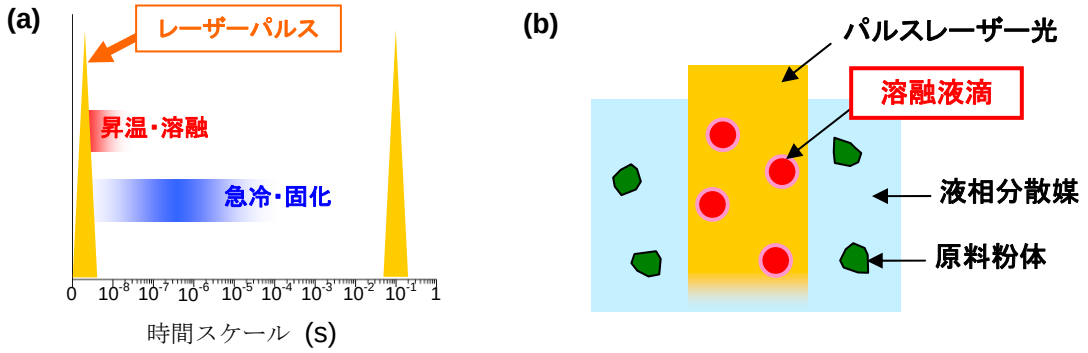


図 2 (a) レーザー光パルスと溶融、固化の時間スケールの関係図
(b) レーザー光吸収により熱容量の小さい原料ナノ粒子粉体が溶融して生成

（4） 本発表の注目点

本手法の汎用性は高く、適当な原料粒子を選択し照射レーザーや液体種などの条件を最適化することで、容易に他の機能性材料の球状粒子の作製に応用できる。図 3 は銅と鉄のサブミクロン球状粒子の作製例である。この場合、酸化物ナノ粒子を原料に作製する。

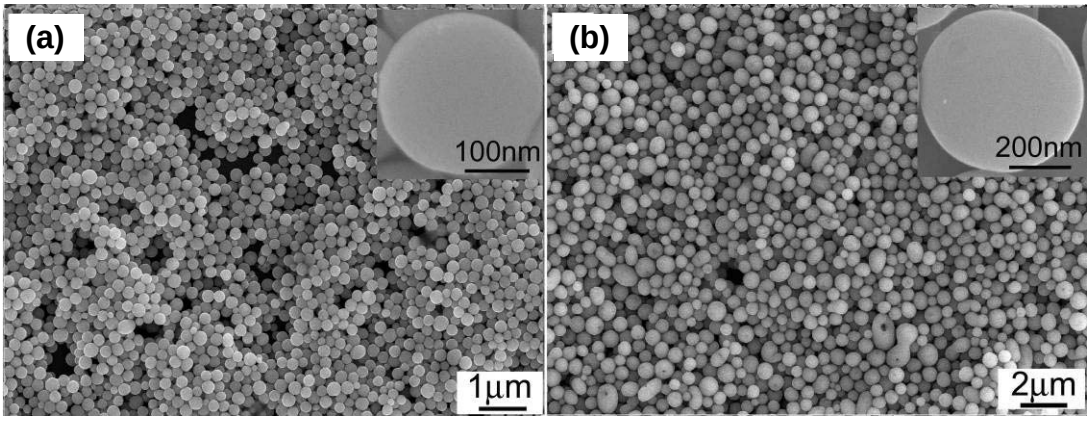


図 3 球状サブマイクロメートル粒子の作成例 a)銅 b)鉄

応用に関しては、光散乱体、ランダムレーザー、DDS キャリア、潤滑剤など広範な分野のさまざまな応用が提案されている。

研究発表データシート

【６】	谷　博文 大学大学院工学研究院 生物機能高分子部門・准教授	

発表タイトル	リポソーマル生物発光イムノアッセイ
サブタイトル	ルシフェラーゼ内封リポソームの調製と超高感度標識体としての応用

（１） 研究者のアピールポイント

臨床検査や環境分析において必須の分析技術であるイムノアッセイでは、分析対象物質の多様化や対象物質濃度の低下により、迅速、簡便、高感度、ハイスループットなどの高性能化が求められている。演者らは、高感度な分析法である生物発光法の触媒酵素であるルシフェラーゼを、リポソームと呼ばれる脂質二分子膜小胞に多数内封させ、これをイムノアッセイの標識体として利用する超高感度な生物発光イムノアッセイ系の構築を目指している。

（２） 本発表研究の概要

リポソーム内部に酵素を内封する方法は既に知られているものの、ルシフェラーゼについてはこれまで検討された例がない。本研究ではまず、熱安定化組換えルシフェラーゼをリポソーム内へ封入し、封入量や安定性を評価し、イムノアッセイの標識体として十分な性能を保持していることを明らかにした。ルシフェラーゼ内封リポソームを標識体として用い、モデル物質として炎症マーカーであるＣ反応性タンパク質のイムノアッセイを行ったところ､その定量が可能あった。

（３） 本研究発表の詳細

ルシフェラーゼ内封リポソームを標識体とするイムノアッセイの概要を Fig.1 に示す。イムノアッセイには様々なフォーマットがあるが、ここでは標準的に用いられているサンドイッチ型のイムノアッセイを行うこととし、ターゲットには炎症マーカーである C 反応性タンパク質を用いた。通常のイムノアッセイでは、一分子の抗体に対して酵素や蛍光色素などの標識物質を数分子程度しか結合（標識）させることができない。また、特に酵素を標識する場合、化学結合に伴い活性が低下する問題もある。Fig.1 に示す通り、ルシフェラーゼをリポソームに多数内封して標識することで、 こうした問題を解決し、極めて高感度なイムノアッセイ系の構築が可能となる。

はじめに､多数のルシフェラーゼを安定な状態でリポソームに内封する方法について検討した。その結果、リポソームに内封されたルシフェラーゼが安定であること、ならびに凍結融解法によりリポソームを作成するとルシフェラーゼがより多く内封されることを明らかにした。この結果より、ルシフェラーゼ内封リポソームをイムノアッセイの標識体として利用可能であることが分かった。次いで、Fig.1 に示す手順で CRP のイムノアッセイを行った。マイクロタイタープレート表面に抗 CRP 抗体を固定化し、ここに、CRP、ビオチン化抗 CRP 抗体、ストレプトアビジン、ルシフェラーゼ内封ビオチン化リポソームを添加し､最後にルシフェラーゼ基質である ATP やルシフェリンを添加して生物発光を測定した。その結果、生物発光強度は CRP 濃度の増加に伴い増加し、標準的なイムノアッセイと同様の検量線を得た。これにより、ルシフェラーゼ内封リポソームを標識体とするイムノアッセイ系を構築することができた。

しかし現時点で定量感度は従来法と同程度であり、多数のルシフェラーゼを内封・標識することにより期待された高感度化は達成していない。これは、ルシフェラーゼ内封リポソームの非特異吸着によるブランク発光の増大が原因となっていることを突き止めた。現在、超高感度化に向

けてイムノアッセイならびに生物発光の反応条件などの最適化を行うとともに、非特異吸着の問題を解決する方法を検討している。

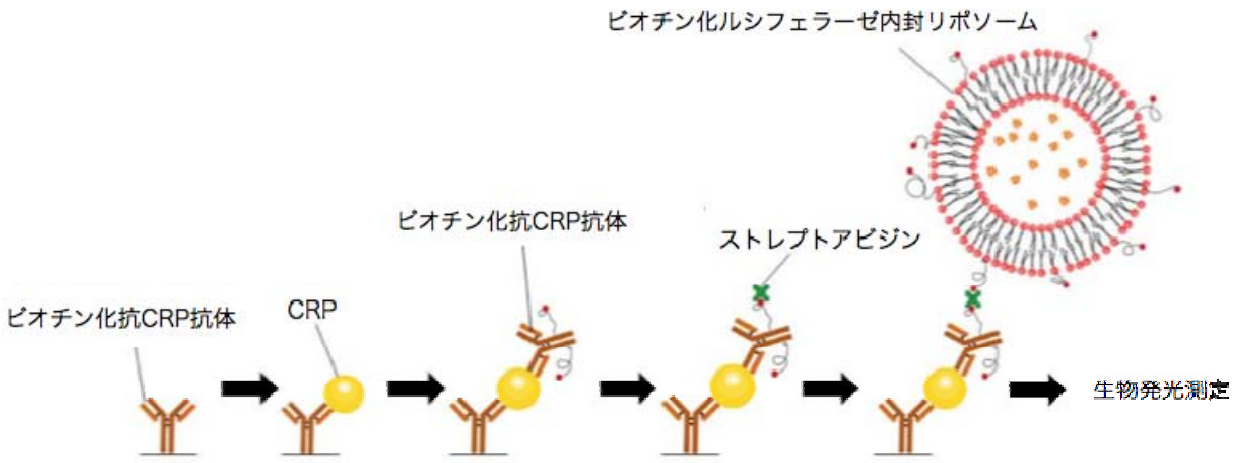


Fig.1　リポソーマル生物発光イムノアッセイの手順

（4） 本発表の注目点

ルシフェラーゼをリポソームに内封することで、酵素活性の低下が懸念されたが、バルク水溶液と変わらない安定性を示すことを見出した。また比較的不安定な野生型のルシフェラーゼではむしろリポソーム内部の方がより安定であった。内封量を増やすために行った凍結融解法においても、熱耐性ルシフェラーゼを用いることで、活性を損なうことなく多くのルシフェラーゼ分子を内封させることができた。イムノアッセイの感度に関しては、上述した通りブランク発光の増大が見られたが、CRP 存在下での発光強度そのものは極めて大きいため、超高感度化を達成できるものと期待している。

研究発表データシート

【７】	坂本　雄児 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	電子ホログラフィによる次世代３Ｄシステムの開発
サブタイトル	理想的な３Ｄ映像の表示

（１） 研究者のアピールポイント

研究者はホログラフィ技術、コンピュータグラフィックス、画像処理、無線通信技術、最適化理論、メディア創生論に渡る広い分野の複合された領域に注目し、新産業分野の創出を目指し研究を行っています。

（２） 本発表研究の概要

本研究室では電子ホログラフィによる３Ｄ映像技術の研究を行っています。本発表では、最近開発した電子ホログラフィを用いたＨＭＤ型３Ｄ表示装置について発表を行います。

（３） 本研究発表の詳細

近年、映画やテレビジョン、ゲーム機などに３Ｄ映像が用いられ、身近なものとなってきています。しかし、現在実用化されている３Ｄ映像技術は、乗り物酔いの様な不快感や長時間の視聴による疲労の発生が問題となっています。３Ｄ映像技術は様々なものが提案されていますが、ホログラフィ技術のみが人間の知覚を全て満足させる唯一の理想的な３Ｄ映像技術であるとされています。このため、次世代の３Ｄ映像技術として、ホログラフィ技術を電子化した電子ホログラフィ装置の３Ｄモニタや３ＤＴＶへの応用が期待されています。しかし、従来、電子ホログラフィは技術的な困難さから、装置が高価で大型、かつ低画質などの問題点がありました。

我々は新たな計算アルゴリズムと光学系の原理を提案し、高画質で、小型で軽量、かつ低価格な電子ホログラフィ装置を開発しました。

提案された電子ホログラフィ装置は、頭部に装着するヘッドマウントディスプレイ(ＨＭＤ)として利用することを目的に開発されました（図１）。従来のＨＭＤでは、液晶パネルに表示された映像をそのまま空間に投影しているため、焦点調節に対する奥行きは固定されます。これに対して、電子ホログラフィでは液晶パネルに表示されるのは光の波面パターンとなり、再生された３Ｄ映像は物体の奥行きに合わせて表示されます。図２はカメラの焦点位置を変えて撮影した例で、図２（A）では、手前の球に焦点が合い下地の模様も綺麗に写り込んでいて、かつ、後ろの金色の球はボケているのが分かります。一方、焦点を後ろの金色の球に合わせた図２（B）では、手前の球がボケています。このことからも分かるように、電子ホログラフィは焦点調節（ピント）も含めた理想的な３Ｄ映像を表示することができます。

この波面パターンはコンピュータによって計算されます。開発された電子ホログラフィ装置では、計算アルゴリズムによるデータ補正によって、従来必要であった複雑な光学系を単純な構成の光学系に置き換えました。これによって、小型、軽量、低価格かつフルカラーの美しい画像を実現しています。

この電子ホログラフィ装置は、ＣＡＤなどにおける機械設計の立体表示、分子設計における立体モデルの表示などの３Ｄ映像の表示システムの応用だけでなく、遠隔医療システム、ＨＭＤによるＡＲシステムや立体顕微鏡、立体内視鏡や、更により進んだダ・ビィンチシステムなどの様々な分野の装置への組み込みが期待されます。

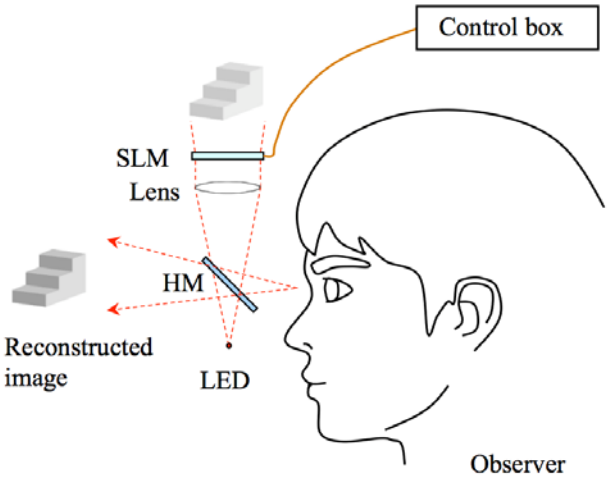
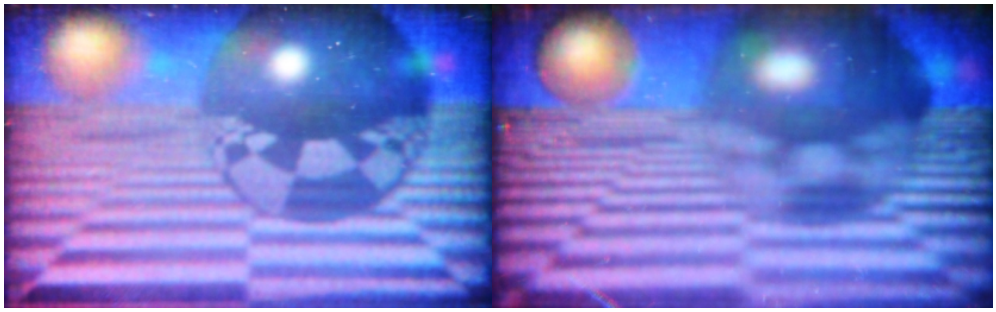


図１　装置概略図



(A)手前の球に焦点　　(B)後方の球に焦点

図２　開発された装置による３Ｄ映像

（４） 本発表の注目点

今回開発された装置は、電子ホログラフィとして、世界で初めてシースルー型でカラーの表示に成功しました。これは、新たに設計された光学系とともに、新提案のホログラムデータ計算アルゴリズムとの組合せにより実現されました。優れた画質、小型、軽量であり、電子ホログラフィの実用に向けての大きな前進と言えます。

研究発表データシート

【８】	近野　敦 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	脳外科手術シミュレータの研究開発
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

現在、手術シミュレータ、無人航空機、ヒューマノイドロボットの研究を行っています。これまで、NEDO 産業技術研究助成事業（平成 17～19 年度）、NEDO 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト（平成 19～22 年度）、最先端・次世代研究開発支援プログラム（平成 22～25 年度）などのプロジェクトを遂行してきました。また、多数の企業と共同研究を行ってきました。

（２） 本発表研究の概要

近年の医療現場では、新たな手術トレーニング手法としてバーチャルリアリティー技術（VR 技術）を利用した手術シミュレータが注目されています。手術シミュレータは、若手医師の基本手術手技トレーニング、外科手術の術前計画による最適な手術手順の確認、まれな症例の手術手技トレーニング、などへの応用が期待されています。

本発表では、ハプティックデバイスを用いて脳組織からの反力や触覚を提示できる、脳外科手術シミュレータについて、その詳細を紹介します。

（３） 本研究発表の詳細

術前計画や手術手順の確認などへの応用を目的として、脳外科手術シミュレータの開発が切望されていますが、組織の複雑さ、モデル化の困難さなどから開発例は多くはありません。数少ない開発例として、カナダ国家研究評議会の NeuroTouch、ImmersiveTouch 社の ImmersiveTouch がありますが、実時間計算のために手術部位の局所的な部分モデルを用いていたり、脳の変形や組織からの反力の計算を省略していたりと、手術中に発生する力を正確に計算できていませんでした。神戸大では、全脳モデルを用いて変形を計算するシミュレータを開発しましたが、0。1 秒間のシミュレーションに 170 時間もの計算時間を要しました。

私たちはこれまで、要素数が 34、401 の有限要素脳モデルを構築し（図 1)、脳の変形と反力を実時間で計算し操作者に反力を提示できる脳外科手術ハプティックシミュレータを開発してきました（図 2)。動力学計算を行うことにより、脳組織の粘性などによる過渡的な応答も表現できます。脳の組織の特性値は、豚の脳を使った引っ張り試験を行い、同定しました（図 3)。

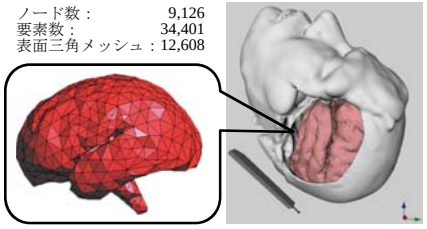


図 1　全脳モデル

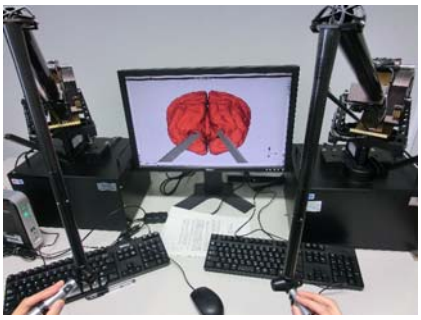


図 2　ハプティックシミュレーションの様子

メスなどで組織を切開することを鋭的剥離といいます（図 4)。これとは逆にある一部の組織に応力を集中させることにより、応力集中部に組織破壊を生じさせて、組織を分離することを鈍的剥離といいます（図 5)。鈍的剥離は、脳の溝（脳裂）を開放していき、その奥にある病変部にアクセスする際などに見られる手術技術（手技）です。脳にできた腫瘍などを切除する場合は、鋭的剥離操作と鈍的剥離操作を組み合わせて行います。この二つの手技をシミュレーションする手法を開発しました。このような破壊や剥離が進んでいくとき、モデルの要素と要素が 1 点接続になったり孤立要素ができたりします。このような状態は特異状態であり、シミュレーションが不安定になることが知られています。そのため、そのような特異状態を回避する手法を提案しています。例えば図 6 のような状態で、要素 A に生じる応力が破壊応力を超えたとします。ここで要素 A が破壊されたと判定し消去すると、要素 B と要素 B'が一つのノードのみで接続される状態になり、特異状態になります。すなわちここでシミュレーションが不安定化します。このような場合は要素 A の破壊を遅延し、要素 B または要素 B'に生じる応力がが破壊応力に達したときに、同時に消去することで、シミュレーションの不安定化を回避できます。

脳の深部に病変部がある場合は、脳裂（大脳縦裂、シルビウス裂など）を開放して、手術時の視野を確保します。この脳裂を開放する術技でシミュレーションの妥当性を検証しています（図 7)。

現在のところ、1 シミュレーションループに要する時間は 356 [ms]となっています。現在は手術器具と脳の接触判定に GPGPU を利用した高速演算を行っていますが、今後は脳の変形・反力計算にも GPGPU を用いた大規模並列演算を導入し、高速化を図っていく予定です。また、脳裂開放では、過大な力により脳や血管に損傷を与る危険性があります。手術シミュレーションで、脳に負荷している力を視覚的、力覚的に操作者に提示し、若い医師などがどれぐらいの力をかければ良いのかを定量的に評価できるような機能を、今後は付け加えていく予定です。

（4） 本発表の注目点

発表では、実際のシミュレーションの様子や、シミュレーションの安定化などについて、動画を用いてわかりやすく説明していきます。

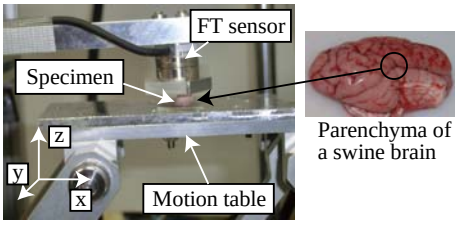


図 3　豚脳を使った組織特性同定

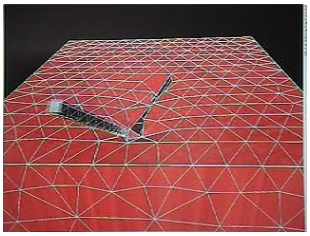


図 4　鋭的剥離シミュレーション

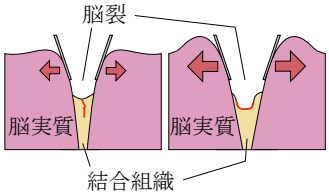


図 5　鈍的剥離による脳裂開放

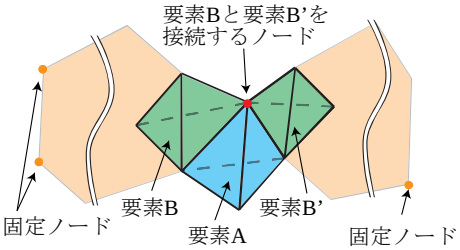


図 6　破壊遅延による不安定化回避

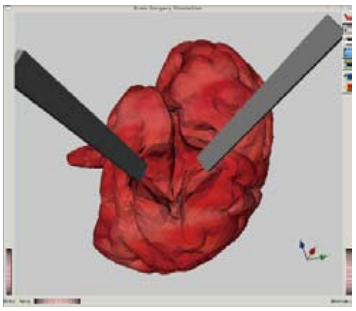


図 7　シルビウス裂開放

研究発表データシート

【９】	戸田　泰則 大学院工学研究院 応用物理学部門・教授	

発表タイトル	ラゲールガウス光を用いた情報多重化
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

時空間制御光波を用いた光誘起相転移や多体相関ダイナミクスなどの物性探索および機能制御を目的とした研究を行っています。ここではラゲールガウス光(※)と呼ばれる特徴的な空間位相を持つレーザー光に着目した取り組みを紹介したいと思います。

※光渦、トポロジカル光波、ツウィスト光などの名称も用いられる。

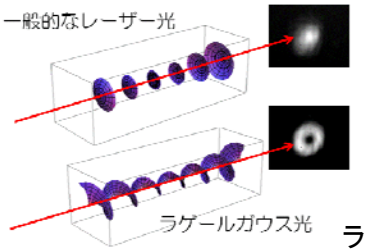
（２） 本発表研究の概要

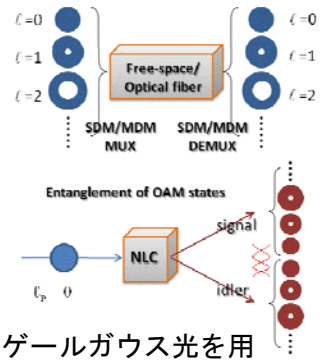
光の電場は位置と時間の関数として記述され、振幅、偏光、位相によって特徴づけられます。光を用いた応用研究の多くは、これら空間に依存しないパラメータが用いられます。近年、特徴的な空間位相を持つラゲールガウス光の利用が広まり、光の空間パラメータを積極的に利用した応用研究が盛んになってきました。本研究発表では、ラゲールガウス光を用いた１）軌道角運動量変換や２）トポロジカル位相特性、および３）半導体レーザーの空間モード制御や４）ファイバ伝送応用について紹介します。

（３） 本研究発表の詳細

レーザー光は直進性に優れた光です。そのためレンズで平行にされたビームは遠方まで真円状の空間パターンを保持しながら伝播していきます。このような空間強度分布は最低次のガウスモードに相当し、伝播方向に垂直な平面内で等しい位相、すなわち等位相面（波面）を形成します。本研究で扱うラゲールガウスモードは、この等位相面がらせん状に変形した光です（以下、ラゲールガウス光と呼ぶ)。このときビーム断面の位相は方位角方向に沿って一定の割合で変化します。そのためビーム中心は位相の定まらない位相特異点となり、空間パターンはドーナッツ状になります（右図参照)。

ラゲールガウス光のように等位相面の回転する光は、軌道角運動量を運ぶことを意味します。通常、光の角運動量として電場ベクトルの回転（円偏光の回転）に応じたスピン角運動量が定義されます。分光などでよく使われる電子スピンの励起は、この偏光が利用されます。他方、軌道角運動量はラゲールガウス光に見られる等位相面の回転で実現されます。ところで光による情報伝送や記録再生はレーザー光の強度や偏光、空間的に均一な位相を用いて行われます。また異なる周波数を用





ラゲールガウス光を用いた多重化概念図

いた多重化により、伝送容量を増大させることができます。これに対して光の空間特性は、これまで積極的に利用されることのなかった未開拓領域です。このような背景のもと、伝送容量限界を打破するステップとして、ラゲールガウス光を使った空間分割多重やモード分割多重と呼ばれる多重伝送が注目されるようになってきました。同時に次世代量子情報伝送においても、ラゲールガウス光は高い関心を集めています。先に述べた通り、ラゲールガウス光は軌道角運動量を運びます。このことは量子情報のビットに対応する光子(フォトン)を考えたときに、その状態を特徴付ける量子数として機能することを意味しています。スピンが±１の二種類のビットしか対応させることができないのに対し、ラゲールガウス光が持つ軌道角運動量は無限の整数値で表わされます。したがって量子情報伝送においても多重化が可能になります。

本研究発表では、物質との相互作用を通したラゲールガウス光の１）軌道角運動量変換、２）トポロジカル位相特性と、多重伝送を目的とした３）半導体レーザーの空間モード制御、４）ファイバ伝送応用について紹介します。１）では半導体の電子系を介して光の軌道角運動量が変換可能であることを示します。超短パルスのラゲールガウス光を使って、電子系に転写された光の軌道角運動量が保持される様子を明らかにします。これらの結果はラゲールガウス光を用いた光記録や全光制御の可能性を意味しています。２）では非線型結晶を使った軌道角運動量変換を示します。結晶の対称性に起因した多モード化が実現されます。同時にラゲールガウス光のらせん状波面に起因するトポロジカルな特徴を反映した位相特性が特異点ダイナミクスとして可視化される様子を示します。３）と４）は応用研究の観点から取り組んでいる研究です。３）で紹介する半導体レーザーの空間モード制御は古くから研究されていますが、従来の研究は高次モードを抑圧して単一モード化することが目的でした。空間モード多重の観点からは、むしろ高次モードを積極的に利用することが望まれます。本発表では高次モードを制御性良く取りだす手法について考察します。４）は情報伝送の鍵となるファイバ伝送に関する研究です。ラゲールガウス光をファイバ中で伝播させるためには、その空間位相を保持する必要があります。空間位相を保持するためにマルチコアファイバやバンドルファイバを用いた伝送結果を紹介します。

（４） 本発表の注目点

ラゲールガウス光に代表される特徴的な空間特性をもつ光は、従来利用されてこなかった光パラメータを使用する点で革新的です。同時に空間特性を保持するための波面制御や伝送技術、光源開発などのイノベーションが求められています。我々の取り組みは光の空間特性を利用した様々な応用研究の一部に過ぎませんが、本発表を通して当該領域に興味を持っていただければ幸いです。研究成果の一部は URL（http://renault-ap.eng.hokudai.ac.jp/Research.html）でもご覧になれます。また本発表の詳細に関しては下記文献をご参照ください。

[1] Y. Toda, K. Shigematsu, K. Yamane, R. Morita, Opt. Commun. 308, 147–151 (2013).
[2] K. Shigematsu, Y. Toda, K. Yamane, R. Morita, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 08JL08 (2013).
[3] K. Yamane, Y. Toda, and R. Morita, Opt. Express 20, 18986-18993 (2012).
[4] Y. Awaji, N, Wada, and Y. Toda, CLEO/QELS 2012, JTu2K.3 (2012)
[5] Y. Awaji, N. Wada, Y. Toda, and T. Hayashi, ECOC2011, We.10.P1.55 (2011).
[6] Y. Awaji, N. Wada, Y. Toda, and T. Hayashi, CLEO/QELS 2011, CThGG2 (2011).
[7] Y. Toda, S. Honda, R. Morita, Opt. Express 18, 17796-17804 (2010).
[8] Y. Ueno, Y. Toda, S. Adachi, R. Morita, T. Tawara, Opt. Express 17 20567–20574(2009).

研究発表データシート

【１０】	荒井 正彦 大学院工学研究院 有機プロセス工学部門・教授	

発表タイトル	窒素ドープ炭素材料の調製とメタルフリー触媒としての応用
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

窒素ドープ炭素触媒材料，環境流体（二酸化炭素と水）を構成要素とする多相系有機反応場，二酸化炭素をプロモーターとする反応制御，二酸化炭素の有用有機物質への化学変換，チタニア複合酸化物光触媒によるグリセロールからの水素製造，スメクタイト系多孔質触媒材料等の研究を進めている。

(http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/catal/ *“New and Future Developments in Catalysis. Activation of Carbon Dioxide”*, S. L. Suib (Ed.), Chapter 5, pp. 149-169; Chapter 12, pp. 357-377, Elsevier, 2013, ISBN 9780444538826; *“Transformation and Utilization of Carbon Dioxide”*, (14 Chapters), M. Arai, B. M. Bhanage (Eds.), Springer, 2013/14, ISBN 9783642449871)

（２） 本発表研究の概要

表面に窒素をドープした炭素材料が，Knoevenagel 縮合反応，エステル交換反応，芳香族化合物の空気酸化等の塩基，金属，金属酸化物が触媒となる反応で触媒機能を示すことを見出した。それぞれの反応で触媒機能に与かる窒素ドープ炭素表面の構造を議論した。

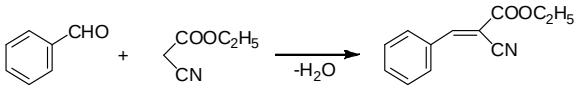
（３） 本研究発表の詳細

目的　　活性炭等の炭素材料は化学的に不活性であると考えられているが，その表面や構造内に存在する含酸素基や含窒素基の量や種類を調整すると触媒機能が発現することが知られている[1]。このような表面を制御した炭素材料を触媒に用いた研究例は限られているが，既存の希少で高価な金属ベース触媒の代替になることが期待されている[2]。本研究では，表面に種々の条件で窒素をドープした炭素材料を作製し，いろいろな有機反応に応用してそれらの触媒機能をスクリーニングするとともに，触媒機能を発現するドープ窒素の種類とその周辺構造を考察する。

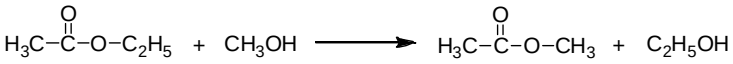
実験方法　　出発炭素原料として活性炭（AC）と焼成したポリアクリロニトリル（PAN）を用いた。炭素原料を NH_3 100％ (A 処理)，NH_3 90％ - 空気 (AO 処理)，あるいは NO 1% - He (NO 処理)気流中に置き，所定温度で 1 時間処理して窒素をドープした。窒素ドープ量と表面窒素種の状態は X 線光電子分光法(XPS)で，総表面積は窒素吸着法で測定した。対象反応は(a)Knoevenagel 縮合，(b)エステル交換反応，(c)芳香族化合物の空気酸化で，SUS 製回分式反応器を用いて行った。反応系は，前二者は固(炭素)－液(基質) 2 相系，後者は固－液－気(空気) 3 相系である。

結果　　表面に窒素をドープした炭素材料は，(a)～(c)の何れでの反応でも触媒活性を示し，活性は窒素ドープ条件と炭素出発原料で大きく異なることが分った。炭素試料の表面積と活性との間に相関は認められず，表面積は活性の支配因子ではなかった。

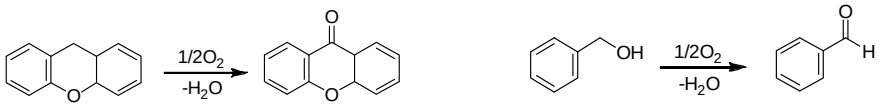
(a)Knoevenagel 縮合反応



(b)エステル交換反応



(c)空気酸化（キサンテン，ベンジルアルコール）



XPS の結果によると炭素表面には異なる状態の窒素種が認められ，XPS スペクトルの波形分離から図１のような窒素種が存在していた。反応(a), (b)では，pyridine 型の窒素が活性発現に重要である。反応(a), (b)は塩基が触媒となることが知られているが，ピリジン等の分子触媒は活性が小さいことから，炭素網面の広がりも必要と考えられる。出発原料として AC よりも PAN の方が窒素ドープ後に活性の高い触媒を与える。(c)のキサンテン酸化反応でも pyridine 型の窒素の関与が推定され，炭素網面の広がりも重要である。(c)のベンジルアルコール酸化では活性と graphite 型窒素量の間に良い相関が認められた。この型の窒素量は原料炭素の表面酸素量が多いほど大きくなる傾向があった。

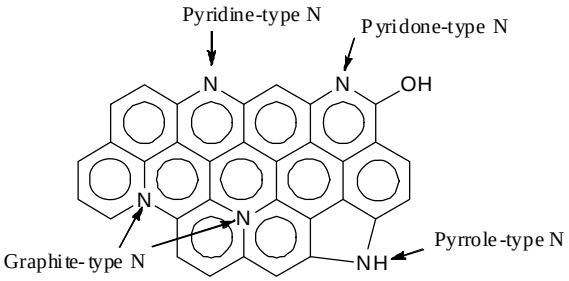


図１　ドープ窒素の状態（XPS）

窒素ドープ炭素材料は，塩基，金属，金属酸化物が触媒となる有機反応に対して，有効な触媒となることが分った。

[1] (a) P. H. Given, L. W. Hill, *Carbon* 6 (1968) 525; (b) N. Kannari, S. Okamura, S. Fujita, J. Ozaki, M. Arai, *Adv. Synth. Catal*. 352 (2010) 1476; (c) Y. Gao, D. Ma, C. Wang, J. Guan, X. Bao, *Chem. Commun*. (2011) 2432; (d) H. Zhou, L. Shi, Q. Sun, Chin. *J. Catal*. 33 (2012) 1463.
[2] 白金代替カーボンアロイ触媒，宮田清蔵（監修），シーエムシー出版，2010.

（４） 本発表の注目点

- アンモニア＋空気による熱処理で炭素材料表面に窒素をドープできる。
- 窒素ドープは，炭素材料に触媒機能を付与することができる。
- 窒素ドープ炭素は，性格の異なる複数の有機反応で触媒活性を示し，メタルフリーな多機能性触媒として期待される。目的反応によって窒素のドープ状態を制御する必要がある。

研究発表データシート

【１１】	Marta Ziemnicka-Sylwester 大学院工学研究院 材料科学部門・助教	

発表タイトル	TiB_2-based ultra-high-temperature ceramic matrix composites fabricated in situ by SHS combining strong and weak exothermic reactions
サブタイトル	Fabrication of molders by using low energy consuming technology

（1） Appeal point of the researcher

In order to enhance the safety in nuclear power plants, materials used especially near the working core have to be designed and fabricated with particular consideration. Several severe accidents recorded in the history have proven that any problem with cooling may affect serious consequences, like melted core, leaks of radioactive nuclear fuel and contamination of the atmosphere. Therefore, author of this poster carried out the research with advanced high temperature ceramics with high TiB_2 content, which are expected to withstand such harsh conditions.

（2） Summary of this announcement study

Ultra-high temperature ceramic materials made of boron compounds are of significant importance, mainly for nuclear industry, i.e. for control rods or core catcher due to the remarkable capability of neutron absorption. Most boron compounds can be fabricated by means of SHS (self-propagating high temperature synthesis), however different exothermic effects can be expected. By using the method proposed in this research relatively big molders can be fabricated from elemental powders such as Ti, B, and C in one stage process. Significantly reduced cost of fabrication was achieved thanks to recuperation of heat originated from highly exothermic reaction.

（3） The detailed results of the study

Due to the combination of strongly exothermic ($Ti+2B=TiB_2$) reaction the heat was recuperated "in situ" in order to activate weakly exothermic ($4B+C=B_4C$) reaction. Therefore, TiB_2-based $B_{13}C_2$ matrix composites were fabricated. The composites possessed homogenous microstructure, high relative density (over 95%) and high hardness of 25GPa when the volume fraction of TiB_2 in those composites was 65-70%. The XRD pattern and whole combination of properties for those same composites indicates that reaction completeness was ensured. Extremely high refractoriness is expected, with eutectic temperature of over 2300°C. The corrosion resistance was improved by increasing volume fraction of TiB_2 of those composites.

（4） Attention point of this announcement

TiB_2 seems to be a compound competitive to commercially used boron carbide at least because of better corrosion resistance and better stability at high temperature. The low energy consuming technology is expected to fulfill the requirements for high temperature shielding, as well as neutron absorbing materials in nuclear reactors. The proposed "in situ" synthesis is economically justified method of rapid fabrication. The materials fabricated in such a way are potentially attractive for private sector (reactor makers) as well as great number of countries which utilize nuclear energy. Since the number of nuclear plants increases, the potential market is large and with perspective of further growth.

研究発表データシート

【１２】	大島　伸行 大学院工学研究院 機械宇宙工学部門・教授	

発表タイトル	マルチフィジックス次世代流動場シミュレーション
サブタイトル	「京」級コンピュータが拓くデジタル・イノベーション

（１） 研究者のアピールポイント
マルチフィジックス流体解析ソフトウェア FrontFlow/red の開発代表者であり、流体数値シミュレーションに関する幅広い工学応用を手掛けている。

（２） 本発表研究の概要
「京」級ハイパーフォンマンス・コンピューティング技術(HPCI)を背景に自動車やエネルギー機器など実際の流動場設計への高精度数値シミュレーション実現によって先進的技術におけるデジタル・イノベーション加速を図るためのマルチフィジックス流体解析ソフトウェア FrontFlow/red の開発と、自動車空力、ガスタービン燃焼器、燃料電池など実際の工学設計応用の各種事例を紹介する。

（３） 本研究発表の詳細
本研究室では**燃焼**、**空力**、**燃料電池**、**高速流**の４つのグループに分かれ、各分野の研究に取り組んでおり、それぞれの代表的成果として以下内容を紹介する。
燃焼グループでは主に乱流燃焼場を対象とし、様々な実用燃焼器内の数値解析を行っている。 また、乱流燃焼場の解析に欠かせない各火炎モデルの構築を進めており、特にガスタービン燃焼器の NO 予測への応用を進めている。
空力グループは対象物の動作を再現する非定常解析などに取り組んでおり、特に自動車空力の非定常解析技術の開発、スキージャンパー周りの数値解析、基礎的な非定常空力現象をなど取り上げる。
燃料電池グループでは近年注目される燃料電池の開発への適用を目指した数値解析技術の研究を行っており、多孔質内の物質移動モデルの構築と高分子形燃料電池の性能予測シミュレーションへの応用を進めている。
高速流グループでは、惑星大気再突入時に飛翔体周りに現れる様々な問題や、耐熱材料に関連する研究に取り組んでおり、特に柔軟構造飛翔体の空力・空力加熱解析、再突入体周りの電磁波解析などの応用研究を進めている。

（４） 本発表の注目点
ソフトウェア FrontFlow/red は「京」コンピュータに公開ソフトウェアとして登録され、同研究室が直接かかわる HPCI 課題４「ものづくり」をはじめ、一般応募の企業、大学による採択課題でも活用されている。非営利目的向けの WEB 公開には延べ 400 以上のダウンロードアクセスあり、また、ソフトウェアベンダーによる商用版へのライセンス供与も行っており、HPCI 流動場シミュレーションの工学応用において我が国で最も活用されているソフトウェアの一つに挙げられている。

研究発表データシート

【１３】	奈良林　直 大学院工学研究院 エネルギー環境システム部門・教授	

発表タイトル	原子力防災ロボットの開発と福島の復興支援
サブタイトル	耐熱セラミックスコイルを用いた耐放射線・耐熱モータ技術の適用

（１） 研究者のアピールポイント

原子炉工学の専門家として、原子力規制委員会の福島第一原子力発電所の事故の分析検討会の委員を務める他、日本原子力学会シニアネットワーク福島復興チームＦ代表として、循環注水システムの提案などを行っている。また、テレビや新聞などでの解説を行ったり、福島の汚染水などについても提言活動を行っている。

（２） 本発表研究の概要

文部科学省の復興人材育成プロジェクトは、現在全国１９大学が参加する大学連合 ATOM プロジェクトとなり、全国の学生の参加を得て、研修を行っている。多くの企業の参加を得て、キャタピラ型の防災ロボットから、「ガンダム」のような、より人間に近く、過酷な環境下でも重作業が行えるロボットを開発したいと考えており、実用化を果たし、将来の巨大な市場ニーズを先取りしたい。

（３） 本研究発表の詳細

【目的】

福島第一原発事故の事故収束やその後の原子炉建屋内の点検、溶融固化した燃料の回収、原子炉の解体など、作業ロボットを必要とする場面がたくさんある。そこで、過酷な環境下で、人に代わって重作業ができるロボットを開発することを目的とする。

【背景・現状】

現在、文部科学省の復興人材育成プロジェクトで、過酷事故や原子力防災に対応できるロボットを教材として使って、人材育成教育を行っている。学生達から、多くの改良提案が出てきており、福島の復興に役立つ人材育成の実践の場となっている。

（４） 本発表の注目点

①高温、高放射線コイル：高温・高湿度の厳しい環境下で、スムーズに移動し、重作業ができるロボットが必要なので、経済産業省のプロジェクトで開発した、「耐熱セラミックスコイル」を用いた高温耐熱モータ技術を用いる（図１・図２）。また、高放射線に耐えるため、タングステンや鉛で遮蔽したり、ケーブルを用いたリモートコントロールシステムを採用した。

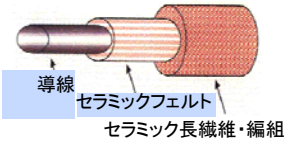


図１耐熱・耐放射線セラミック線

図２　耐高温・耐放射線コイルとモータ（耐熱 300℃）

②磁場解析：耐熱セラミックスコイルを用いた耐熱・耐放射線モータを設計するため、高温下のケイ素鋼板やセラミックス被覆コイルの物性値（鉄損・銅損）を用いた磁場解析を実施した。
③セラミックス被覆耐熱コイルの高温絶縁劣化試験：恒温槽内で高温に保ち 800℃までの範囲で絶縁劣化などが発生しないことを確認した。
④耐放射線試験：コバルト 60 を用いたガンマ線照射試験や中性子線を用いた中性子絶縁劣化試験を実施したが、放射線による劣化は発生しなかった（図５，図６，図７）。
⑤モータ耐久試験：大型恒温槽を用いた高温耐久性試験を実施した。300℃の高温下での耐久性を確認した。(以上、経済産業省：耐熱セラミックスコイルを用いた内蔵 CRD の開発の成果適用)
⑥ロボット階段走行試験：原子力発電所での作業に必要な走行試験を学生研修の場で実施し、問題点の抽出を行った（文部科学省：原子力人材育成・原子力ヤングエリートの育成研修)。

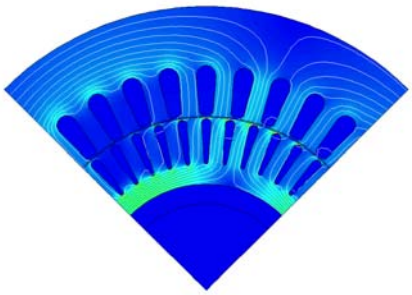
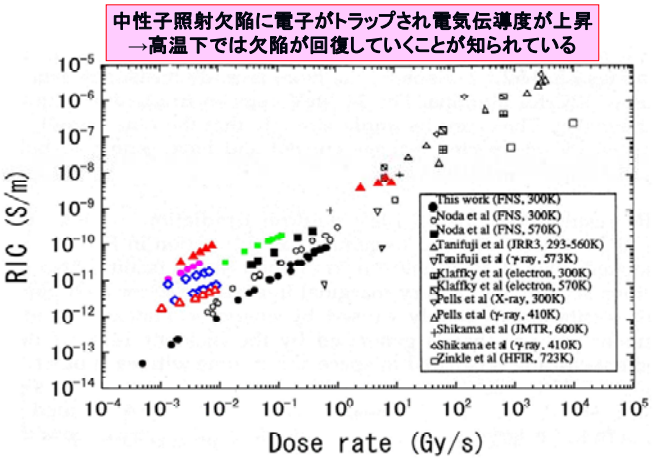


図３　耐熱セラミックコイルモータの磁場解析

図４　高温劣化試験（800℃で劣化なし）

図５　Co60 を使ったガンマ線照射

図６　研究用原子炉を使った中性子照射試験



20

図７　高温下での中性子照射試験結果
（東大　寺井教授による）

図８　高温槽による高温耐久性試験（500℃）

図９　ロボットの階段走行テスト（学生研修）

研究発表データシート

【１４】	杉山　隆文 大学院工学研究院 環境フィールド工学部門・教授	

発表タイトル	非破壊 CT-XRD 連成法の開発とその応用
サブタイトル	セメント硬化体微細組織の可視化

（１） 研究者のアピールポイント

土木工学の主要分野であるコンクリート工学について、構造物挙動推定から微細組織解明まで時空間の幅広い領域をカバーしている。

（２） 本発表研究の概要

建設基幹材料として莫大な容積を占めるコンクリートは、構造材料としての宿命である荷重作用や環境作用によって、ひび割れが発生、進展したり、浸食物質の侵入に伴う化学反応で劣化する場合がある。これらの劣化現象を突き止め、構造物の長期間安全性を確保しながら安心して利用するために、コンクリートの構成物を微細空間で同定して、ひび割れの起点や潜在的な劣化要因を明らかにする新しい評価手法の研究開発に着手した。

セメント硬化体の微細組織構造を対象に、数ミクロンの精度でその幾何学的空間情報を取得できる CT 法、および関心領域での水和物組織の同定を可能にする回折法を連成させる新しい測定手法「**非破壊 CT－XRD 連成法**」（**図１**参照）ついて、革新的構造材料開発の視点から紹介する。

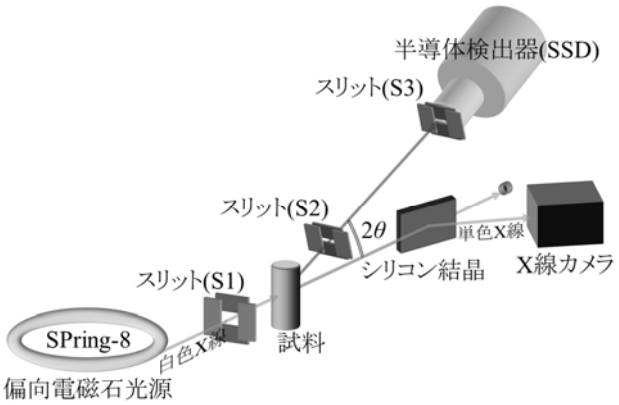


図１「非破壊 CT－XRD 連成法」の概念図

（３） 本研究発表の詳細

コンクリートは、セメントと水との水和反応によって岩（骨材）を結合することで、硬化体へと成長する。したがって、結合体であるセメントペーストの性質がコンクリートの材料特性を支配することとなる。本研究では、先ず出発材料として普通ポルトランドセメントと水を、その混合割合を変化させた試料を用いた。また、硬化体のひび割れから劣化は促進されることから、本研究では割裂による損傷試料を用いた。発展研究では、化学混和剤、骨材種、短繊維、中空材などを内包する革新的材料の開発に向けた評価手法の確立を目指している。試料サイズは、直径が5mm で長さが 10mm である。このサイズは、これまでの X 線 CT の測定実績から、エネルギーが 20~30keV の X 線が硬化体試料を透過できることから決定している。試料は、アルミ製の特製観察治具に固定して、ビームライン内の測定ステージに取り付ける。放射光が提供する高輝度な白色 X 線を用いることで、CT 画像と合わせてエネルギー分散型の回折チャートを取得した。現在、画素寸法 0.0058mm（全体視野が最大 10mm）を達成している。次に、ビーム径が 0.15mm ×0.1mm とし、回折角度を 10 度として回折測定を行った。これにより CT 画像から特定した関心領域の回折スペクトルをピンポイントで測定した（**図 2** 参照）。

セメントと水の水和反応から生じる結晶として、主として portlandite や ettringite、原材料に起因する larnite や silica を同定している。分析技術を深度化することで、各種結晶に加えて結合材の主成分であるケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の解明に挑戦している。これにより、劣化前後や水和進行による微細組織構造の時間変化を非破壊で調べることが可能になる。

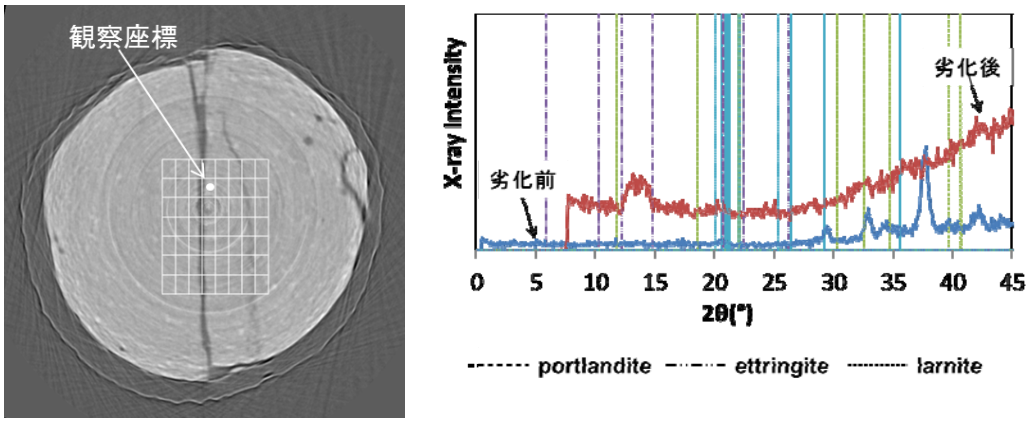


図 2 CT 画像（左）と観察座標における溶脱前後の回折チャートの比較（右）

（４） 本発表の注目点

・透視技術を核とする微細組織構造の新しい評価手法（機器開発分野）

・放射光科学の産業利用（機器開発分野）

・セメント硬化体の劣化、損傷現象の解明（材料開発分野）

・ひび割れない、劣化しない、自己修復する革新的セメント系材料の開発（材料開発分野）

研究発表データシート

【１５】	佐藤　太裕 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	炭素ナノ材料の形状変形性能を利用した新しい構造システムの提案
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

これまで専門研究分野であり、橋梁やトンネルなどの社会基盤構造物の設計に用いられる土木構造力学を、既成概念にとらわれることなく次世代を見据え広い分野に発展させ、新しい構造システムの研究開発へ繋げてきた。代表的な具体例として、以下の３点が挙げられる。

■ 水中浮遊式トンネルの研究開発
■ 粒状体をコア材とする新概念フレキシブルパイプインパイプ構造の研究開発
■ カーボンナノチューブの力学特性解明およびその工学的利用に関する研究開発

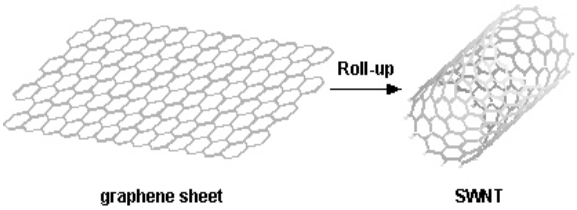
特に本研究発表に関連するカーボンナノチューブの力学特性研究については、本年９月に当該研究分野で世界初の英文単行本である”Elastic and Plastic Deformation of Carbon Nanotubes”を執筆、出版するに至っている。

（２） 本発表研究の概要

本研究は、カーボンナノチューブの優れた力学特性に着目し、荷重印加時の特異な形状変形性能を利用した新しい構造システムの提案を行うことを目的としている。

（３） 本研究発表の詳細

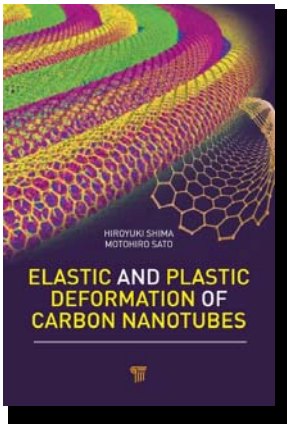
グラフェンシートを円筒状に丸めたカーボンナノチューブ（図－１）は極めて大きい引張強度と曲げや外圧などに対して非常に柔軟かつ弾性的に変形する、次世代の理想的な構造材料の一つとして大きな注目を集めている。力学的な面からみると、カーボンナノチューブは曲げ、ねじり、外圧などが印加されると、座屈による非常に特異な形状変形を引き起こすことが知られている。本研究ではまず、構造力学的手法および分子動力学的手法を用いて荷重を受けたカーボンナノチューブの変形モードを安定問題として解析し、その特性を多角的に検証する。また荷重印加により幾何形状の変化がもたらされたカーボンナノチューブの導電性変化について検討する。これにより、意図的な外圧印加により強度などの優れた力学的特性は損なわれずに、機能を変化させることが可能となる新しい構造システムの可能性を探る。



図－１　カーボンナノチューブ

（4） 本発表の注目点

様々な観点から力学特性の検証と導電性変化との関連を検討しているが、それらを大別すると本発表の注目点は以下の 3 点に要約される。

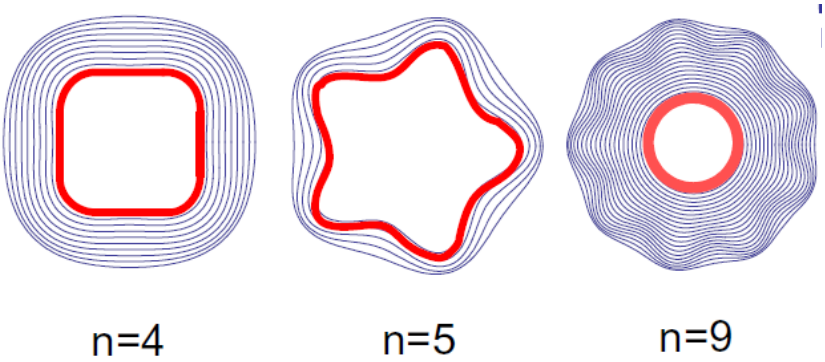


■ 多層カーボンナノチューブにおいて、外圧作用時に層数、断面径の違い、またカーボンナノチューブと接する弾性他媒質の存在の有無などにより、特異な形状を有する様々な花びら上の変形モード（Corrugation mode、図－２）が発生することを、世界で初めて理論的に予測した点。

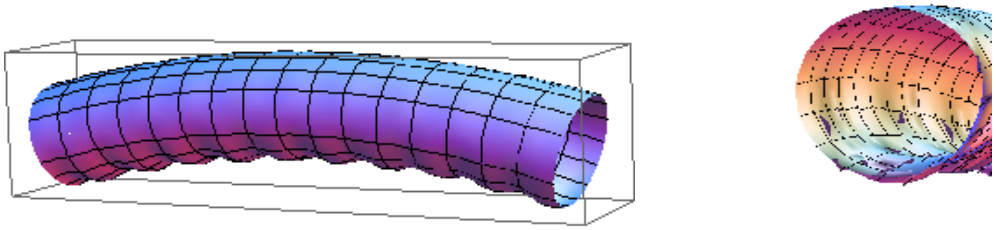
■ 純曲げを受けるチューブに生じる波状変形モード（Rippling mode、図－３）を構造力学的に再現するとともに、後座屈の性状を理論的に説明した点。

■ 起こりうる外圧印加時の変形モードに対するバンドギャップを導出し、変形特性と導電性変化の関係を新たに検証した点。

なおこれらの研究成果は、他の研究者、研究グループの成果も含めて纏められた前述の拙著”Elastic and Plastic Deformation of Carbon Nanotubes”に詳述されているので参照いただきたい。また本研究は科研費若手研究（A）（課題番号：24686096）および寿原記念財団研究助成金により実施されていることを付記する。



図－２　多層カーボンナノチューブに生じうる様々な Corrugation mode の解析例



図－３　多層カーボンナノチューブに生じうる Rippling mode の一例

研究発表データシート

【１６】	森　傑 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	住民主導による防災集団移転の計画技術
サブタイトル	東日本大震災からの再生：気仙沼市小泉地区の挑戦

（１） 研究者のアピールポイント

人口減少時代における居住環境のアフォーダビリティとコミュニティ賦活に資する PPP（Public–Private Partnership）のあり方について、地方都市における公共施設再編を機とした生活環境の再構築と自治体救済のシナリオとして「まちの整体」という計画理論を提唱し、人々が地方で定着して自立的・持続的に生活するための具体的方策を提言・実践している。

（２） 本発表研究の概要

東日本大震災により被災した気仙沼市小泉地区の住民主導による集団移転への活動とその計画は、東北被災地の他の地域における協議会型の集団移転における合意形成や意思決定、国内外における住民参加型の復興まちづくり、南海トラフ等の大規模災害に備えた事前対策・事前復興などにおいて、模範的な事例として大きな注目を集めている。

集団移転の必然性とそれへ向けての現世代の責任を正面から問う小泉地区の挑戦は、劇的な変化が予想される人口減少時代において非常に示唆に富んでおり、歴史的なプロジェクトとその成果といえる。

（３） 本研究発表の詳細

小泉地区は、2011 年 6 月 5 日に「小泉地区集団移転協議会」を設立し、100 世帯を超える地区住民の意向を集約、移転先の土地の候補を決めた。同年 7 月以降、ほぼ隔週で住民ワークショップを実施してきている。

移転する高台は、海抜 40m で水平に切り土した地盤面を敷地としている。できる限り盛り土や擁壁を少なくすることと安定した地盤面の確保を意図した。敷地と斜面との境界線は必然的に湾曲したものとなるが、小泉の人々が「鍵をかけなくてもよい」「塀や障壁がいらない」など、住民が「プライバシーがないところ」がよいところとして積極的に評価している向こう三軒両隣の関係を、地形を活かしたクラスターとして継承するプランとなっている。

小泉の人々がワークショップを通じて頻繁に言及してきたのが、共有空間のあり方である。例えば、「共同利用」「共同作業」「近所付き合い」「家庭的繋がり」が重要なキーワードとして語られた。かつての小泉地区は短冊状の宅地割りで、道路からは短辺方向からアクセスする長細い敷地形状であったのだが、各宅地の敷地境界に沿って川から引き込まれた水路があったのが特徴である。小泉の人々には、その水路で野菜を洗ったり米研ぎや洗濯をしたりといった記憶が強く残っている。そして、道路→住宅→共有空間という配列が、小泉コミュニティを支える基盤として、住民同士の豊かなコミュニケーションと繋がりを育んできたことが、ワークショップを通じて再確認された。

ワークショップは既に 20 回以上を数え、2013 年 6 月に造成工事が着工し、住民主導による集団移転計画がそのまま事業化されることとなった。合い言葉である「集団移転は未来への贈り物」のヴィジョンを一度も見失うことなく、協議会事務局のリーダーシップのもと、小泉コミュニティの再生へ向けて邁進している。

最近の画期的な展開は、被災直後から地域を牽引してきた任意団体の小泉地区の明日を考える会が株式会社化したことである。その中心的な目的は建築協定の運用にあるが、大きな視点では小泉コミュニティのサステナビリティが目標である。被災地の中には、震災前からすでに過疎化が進んでいた地域も少なくない。小泉地区もその一つである。そのような小泉地区が集団移転までして持続するためには、相当の知恵と努力が必要である。

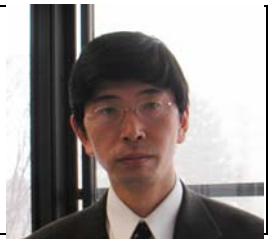
具体的には、集団移転の住宅建設にかかわる資材等の一括発注や商業施設・メガソーラーの誘致などの検討を進めている。今後の様々な公共事業・民間事業に対して「株式会社小泉地区の明日を考える会」が主体的に参与することで、実利的にも復興まちづくりが小泉住民へ還元される仕組みづくりを目指している。なお、株式会社として初の事業として書籍「大好きな小泉を子どもたちへ継ぐために―集団移転は未来への贈り物」を 2013 年 7 月に発行・出版した。

（4） 本発表の注目点

小泉地区の住民主導による集団移転へ向けての活動は、既に多くのメディアで取り上げられている。国内に限らず、2012 年 3 月には NHK WORLD RADIO JAPAN により世界 18 言語で紹介され、2013 年 6 月には NHK BS-1「TOMORROW」にて、ニュージーランド記者による訪問取材として、コミュニティの再生へ向けての先進的事例として大きく取り上げられた。

東日本大震災は、将来大きな地震や津波に見舞われると警戒されている地域に大きなインパクトを与えた。静岡県沼津市の内浦重須地区は、全国ではじめて防災集団移転促進事業の被災前の適用を仮定した予防的集団移転の検討をはじめた。小泉地区の現実と挑戦から多くを学ぶべく、発表者（森傑）を招き、昨年度から勉強会を重ねてきている。

研究発表データシート

【１７】	長谷川　拓哉 大学院工学研究院 空間性能システム部門・准教授	

発表タイトル	表面性状に基づく鉄筋コンクリート構造物の維持管理技術
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

建物や橋といった鉄筋コンクリート構造物をできるだけ長く使うという社会的な背景の中、適切な維持管理技術が求められている。構造物の維持管理には、「壊さず」、「早く」、「正確に」構造物の状態を知る技術が理想的といえる。本研究では、コンクリート分野以外で用いられている手法を取り入れ、できる限り「壊さず」、「早く」、「正確に」情報を得る新しい技術を提案している。

（２） 本発表研究の概要

本発表研究の目的は、既存鉄筋コンクリート構造物の維持管理技術、特に寒冷地に特有な凍害劣化（写真１に事例を示す）に関して、コンクリートの劣化状態を表面性状から非破壊、もしくは最低限の破壊で把握する手法の開発にある。具体的には次の２つの手法について検討を行った。

1)銀紙光沢度法（得られる情報：コンクリートのスケーリング量、特徴：非破壊試験・簡便）

2)染色明度差法（得られる情報：微細なひび割れ本数、特徴：破壊試験（微破壊）・簡便）

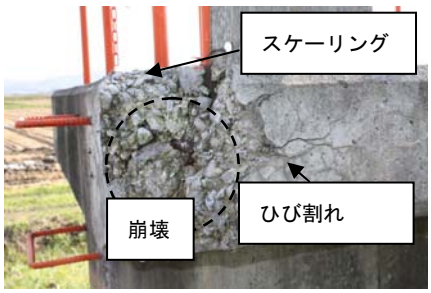


写真１　凍害の事例（北海道Ａ市）

－コンクリートの凍害とは？－

コンクリートに浸透した水分が凍ることが原因で、コンクリートの組織を破壊する現象をいう。劣化現象として、スケーリング（表面がうろこ状に剥がれる現象）、ポップアウト（コンクリート中の砂利等がはく離・はく落する現象）、ひび割れ、崩壊がある。

（３） 本研究発表の詳細

1)銀紙光沢度法

W/C40、50、60%の配（調）合としたコンクリート供試体（10×10×40cm）に対し、JIS A 1148 A 法による凍結融解試験を実施し、一定のサイクル毎に質量減少量（＝スケーリング量）、光沢度の測定を行った。測定の方法は、次の通りである。

①市販のアルミホイル（厚さ 15μm 程度）を試験面の大きさに切ったものを表面に押し付け、上からやわらかい布でアルミニウム表面の見た目の変化がなくなるまでおさえる。

②測定角 60°の光沢度計で、その表面の光沢度を測定する。（今回使用した光沢度計は、読み値で 199～0%まで測定可能。199 を超えたものは「200」とした。）

測定箇所は、打込み面、側面、底面の３面について、３箇所（上から 5、20、35cm の位置）の測定を行った。

実験の結果を図 1 に示す。データから回帰し、式(1)を求めた。

$$\ln(X)=9.6-0.74\ln(Sm) \qquad (1)$$

ここに、X：光沢度（%）、Sm：質量減少量（g/m²）

ややばらつきは見られるものの、スケーリング進行の傾向をつかむことは可能といえる。

ここで、実構造物を対象とし、一般的な目視によるスケーリング評価（ASTM C 672 による）と実測したスケーリング深さ、式(1)で求めたスケーリング量から推定したスケーリング深さを図 2 に示す。スケーリングの実測値と推定値は概ね一致しているとともに、目視の評価結果とも一致しており、本手法はスケーリングを把握する上で有効といえる。

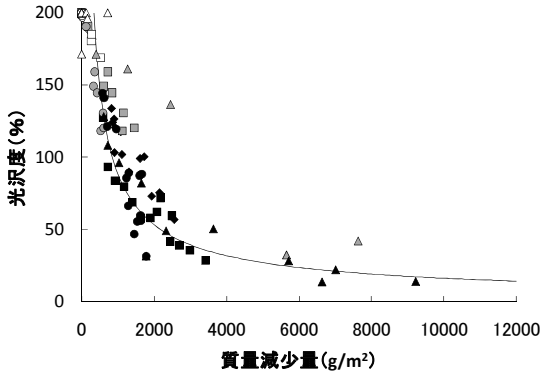


図 1　銀紙光沢度法による質量減少量と光沢度の関係

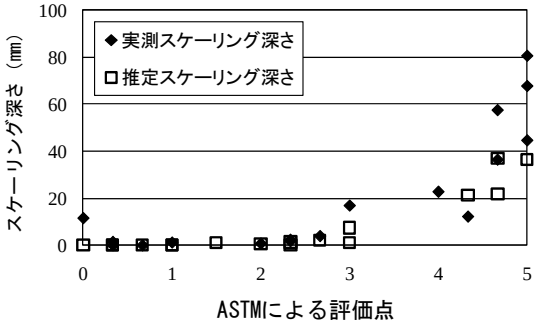


図 2　実構造物の目視、実測および本手法によるスケーリング評価の関係

2)染色明度差法

W/C55%の配（調）合としたコンクリートで試験体を作製し、所定の載荷、乾湿繰返し、凍結融解試験を行った後、厚さ 3cm に切断し、その表面に金属用浸透染色剤を吹きかけ、顕微鏡による微細ひび割れの測定を行うとともに、測色計によって明度を測定した。写真 2 で示す通り、ひび割れが多い場合は明度が低くなる傾向がある。これはひび割れが多いとそこに染色剤が浸透し、色の変化が大きくなるためである。初期からの明度差とひび割れ本数の関係を図 3 に示す。両者は高い相関を示し、明度差によってひび割れ本数の推定が可能といえる。

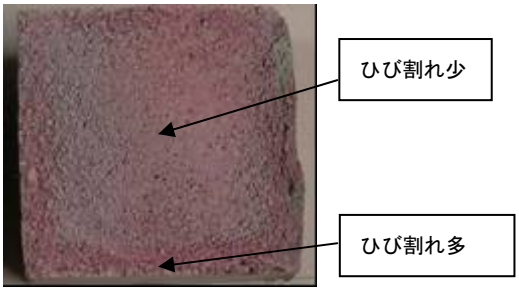


写真 2　染色明度差法による染色の例（凍害劣化）

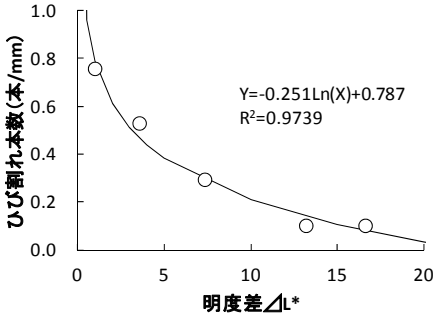


図 3　明度差とひび割れ本数の関係

（4） 本発表の注目点

これまで実構造物のスケーリング評価は、目視による定性的な評価か、基準面を仮定したスケーリング深さの測定からスケーリング量を推定するしかなかった。1)の方法によれば、ごく簡便に定量的なスケーリングの把握が可能となる。また、これまで凍害による微細ひび割れの測定は、蛍光エポキシ樹脂を浸透させ顕微鏡観察を行っており、極めて時間と労力のかかる方法しかなかった。2)の方法によれば、ごく簡便にひび割れ本数の把握が可能となる。これらの方法を組み合わせることで、より早く、より正確な構造物の劣化状況の把握が可能となると考えられる。

研究発表データシート

【１８】	原田 周作 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	液中微粒子の集団性を利用した沈降・拡散挙動の制御
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

移流集積法を利用した微粒子構造化や固－液分離操作など、種々の工学プロセスにおいて重要となる液体中の粒子運動を自在にコントロールできるような技術の確立を目指しています。

（２） 本発表研究の概要

濃度差によって生じる液中微粒子の集団性を上手く利用して、沈降速度や分散挙動を能動的に制御する技術を提案します。図 1 のように、不均一に分散した粒子の沈降形態は、懸濁条件を変えることによって集団的な挙動が見られるようになります。この集団的挙動に密接に関連する濃度界面近傍の粒子の挙動を理解するとともに、それを積極的に利用することによって、各種工学プロセスにおいて重要となる沈降促進、分散制御、輸送効率の向上などを目指しています。

（３） 本研究発表の詳細

これまでの研究から、濃度界面を伴う微粒子の重力沈降過程において、粒子懸濁部が周囲流体と不混和にふるまい、finger状の界面不安定が沈降挙動を支配する「液体的沈降」、および個々の懸濁粒子が干渉沈降を行う「粒子的沈降」が沈降形態の極限として現れ、その沈降形態の推移が濃度界面の明瞭性(解像度)と密接に関係することがわかりました (Harada *et al*。、 2012) 。さらに図1に示すように、粒子の集団的な沈降速度は界面不安定により単一粒子の速度の何百倍にも促進されること、また沈降速度の変化が濃度界面の明瞭性を表す無次元数によって定量的に表し得ることを明らかにしました (Harada *et al*。、 2013) 。したがって、微粒子の懸濁条件を変化させることによって、沈降速度を自在にコントロールすることが本知見から可能となりました。

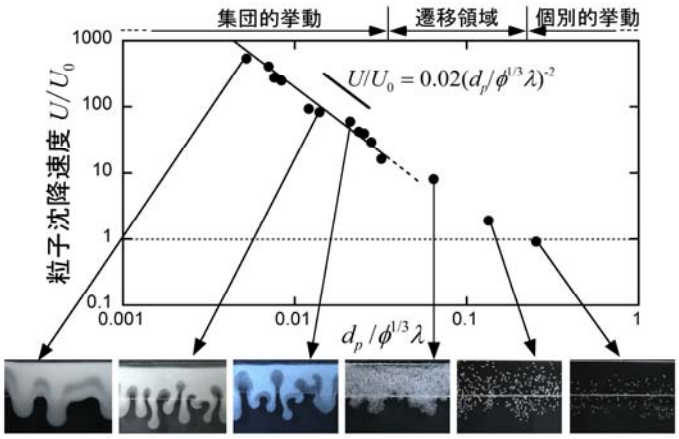


図１　種々の液体–粒子条件における粒子沈降速度。横軸は濃度界面の明瞭性を表す無次元数である。粒子速度は界面の明瞭性によって決まり、集団的な条件では単一粒子の数百倍にもなる(Harada *et al*。、 2013)。

さらに図 2 に示すような複雑流路中では、粒子の集団性によって流路中の拡散挙動が大きく変化することがわかりました。個別的な挙動を示す条件では、粒子が流路全体に拡がりながら垂直に移動するのに対して、集団的な条件では不混和流体のような下部流体との体積置換が生じた結果、分岐部で横方向に移動することが明らかになりました。これらの結果は、多孔質体や岩盤亀裂のような複雑な流路ネットワークを粒子状物質が移動するような系において、懸濁条件を操作するだけで流路中の拡散特性をコントロールすることができることを示唆しています。

(a) 個別的挙動　　(b) 集団的挙動

図 2　複雑流路中における粒子の沈降挙動。集団的な条件では不混和流体のような体積置換挙動により粒子は分岐部で横方向に拡散する。

（４） 本発表の注目点

本技術は、微粒子懸濁液の固体基板上への塗布・乾燥プロセス（機械工学、化学工学)、水処理、固液分離プロセス（環境工学、資源工学）、亀裂や狭小流路中の粒子拡散挙動の予測（土木工学)など広範な工学プロセスへの応用が期待されます。

(参考文献)

1) S。 Harada、 T。 Mitsui and K。 Sato、 Particle-like and Fluid-like Settling of Stratified Suspension、 *European Physical Journal E*、 **35**-1、 (2012)、 pp。1-6。
2) S。 Harada、 M。 Kondo、 K。 Watanabe、 T。 Shiotani and K。 Sato、 Collective Settling of Fine Particles in a Narrow Channel with Arbitrary Cross-section、 *Chemical Engineering Science*、 **93**、 (2013)、 pp。307-312。

研究発表データシート

【１９】	沖中　憲之 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・准教授	

発表タイトル	潜熱蓄熱材(PCM)を用いた未利用熱エネルギーの有効活用
サブタイトル	―新型潜熱蓄熱カプセルの提案―

（１） 研究者のアピールポイント

潜熱蓄熱を利用することによって、

高密度蓄熱が可能

熱交換器のコンパクト化が可能

変動熱源の恒温化が可能

（２） 本発表研究の概要

高温用充填層型熱交換器に使用する、高密度蓄熱が可能な潜熱蓄熱材(PCM)のカプセル化技術(融解時体積膨張率 0%、PCM 充填量 100%)の提案。

（３） 本研究発表の詳細

製造・輸送分野では多量の排熱が存在するが、その有効な利用システムはまだ確立しているとはいえない。その理由として、1)排熱は間欠的に発生するため、安定利用困難。2)排熱源が点在するため、集約利用困難。等がある。これらの解決策として高密度蓄熱システムの導入による排熱の定常熱源化、熱の輸送システムの導入による排熱の集約利用が必要となる。それらに対応する要素技術として物質の固液相変化時の潜熱を利用した蓄熱法である潜熱蓄熱技術がある注目されている。

潜熱蓄熱においてはその蓄熱の性質上、代表的な熱交換方式である充填層において顕熱蓄熱材の代替として使用する場合、潜熱蓄熱材(PCM)のカプセル化が必須となる。しかし、これまでの技術では PCM の融解時体積膨張率が大きい(例 NaCl:20%)ため、熱応力を緩和する構造が必要となり結果として PCM 充填量が減少、潜熱蓄熱の持つ高密度蓄熱の利点が生かせていなかった。本発表ではその問題を解決し得る新型潜熱蓄熱カプセルについて提案する。

（４） 本発表の注目点

従来の潜熱蓄熱材(PCM)のカプセル化における問題点として、PCM の融解時体積膨張率が大きい(例 NaCl:20%)ため、熱応力を緩和する構造(カプセルを肉厚にする、PCM 固体時にカプセルとの間に空隙を設ける、等)が必要となる。また、この問題点の結果として潜熱蓄熱材充填量(カプセル PCM の潜熱量)が減少し、空隙が熱抵抗となるため熱交換速度が低下する。

これらの問題点解決策として「Si, Bi 含有合金系 PCM のカプセル化」を提案する。他の金属とは違って、Si, Bi の融解時体積膨張率は負であり、Si, Bi の添加で体積膨張率を抑制することが可能となる。特に Si は潜熱が 1,650[kJ/kg]と桁違いに大きく、合金化による潜熱量の損失を考慮しても十分に大きな潜熱量を有する PCM となる。

また、上述のように従来技術では、融解時体積膨張による応力緩和のため、PCM をカプセル内に 100%充填することはできない。しかし、提案技術では原理的に融解時体積膨張を「0」に調整することが可能で、カプセル内全てに潜熱蓄熱材を充填可能すなわち蓄熱量増大が実現可能となる。さらに、カプセル膜厚の薄型化が可能となり、原料コストの削減となる。また、PCM とカプセル間に空隙が存在しないため、熱抵抗が抑制可能となる。

本提案技術は、充填層式熱交換器の代替のみならず、太陽熱発電システムや高温排熱利用システムへの適用が期待される。

研究発表データシート

【２０】	鈴木　恵二 大学院情報科学研究科 複合情報学専攻・教授	

発表タイトル	SNS における炎上抑制に向けた見守りシステム
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

情報科学研究の成果を社会サービス実現のための基盤技術に昇華させる方法論について研究を行っております。特に。実験レベルで技術評価するのではなく。最終的なサービス運用までを視野に入れて。社会ニーズに即した研究テーマに取り組むことを強く意識しています。

（２） 本発表研究の概要

近年。ツイッター等の SNS 上での不用意な発言が炎上し。個人情報が掲示板等にさらされたり。過剰な社会的責任を負わせるために匿名での過激な行動が行われたりすることが社会問題化しています。SNS 利用時において設定や発言を監視することで。個人情報を適切に保護し。炎上を抑止するための対策を行うシステムを開発しました。

（３） 本研究発表の詳細

近年。SNS 上での不用意な投稿によりネットユーザに標的にされ。ネット上に分散していた個人情報が次々に関連づけられて掲示板上にさらされたり。過剰な社会的責任を負わせるために匿名での過激な行動が行われたりすることが社会問題化しています。この問題には、① つい内輪感覚で公の場ではふさわしくない発言をしてしまうこと。②SNS の炎上は進展が速く、事態が深刻化する前に適切な対処を行う事が時間的に困難であること。　③利用している SNS アカウントに関連づけられた情報から、個人情報が露呈している事実を把握する事が困難であること。 の三つが要因となって引き起こされます。本研究では、「投稿文の危険性を自動判定する機能」、「ツイッター上の発言とネット掲示板の炎上の予兆。進行を自動検出し。リアルタイムにユーザに警告と対策を促す機能」、「個人情報が推測されてしまう断片的な情報がどれぐらいあるのか、またどのように設定したら良いのかについて判定を行う機能」を備えたシステムを開発しました。 このシステムはテキストマイニングを前提技術として構成されており、このシステムを利用する事で SNS へ投稿する前に内容が安全かどうかを判断したり、炎上に巻き込まれた時に迅速に対応したり、炎上被害に未然に備えたりする事ができます。このような SNS セキュリティは。個人を守るためだけでなく。個人的に SNS を利用している社員の企業モラル違反を適切に管理することも可能となります。

（４） 本発表の注目点

個人を守ることに主眼を置いた SNS セキュリティシステムを実現したところが注目点です。

研究発表データシート

【21】	田中　章 大学院情報科学研究科 コンピュータサイエンス専攻・准教授	

発表タイトル	再生核ヒルベルト空間論が拓く標本化定理の未来
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

劣化した画像の修復や、複数の音が混ざった観測から元の音源を推定する問題、機械学習理論、標本化理論などを主な適用分野とした、線形系の逆問題の理論について幅広く研究しています。

（２） 本発表研究の概要

本発表では標本化理論を扱います。従来の標本化理論では、対象とする信号の族それぞれに対して、個別の方法論で標本化定理(離散点から信号を完全再構成するための条件をあたえる定理)が構築されてきました。それに対し本研究では、再生核ヒルベルト空間論に立脚し、個別の信号族の特徴に左右されない一般的な標本化理論の枠組みを構築することに成功しました。

（３） 本研究発表の詳細

ディジタル信号処理は、現代社会になくてはならない技術の一つであり、その基礎を担うのは、標本化定理です。標本化定理とは、離散化された信号から元のアナログ信号を完全再構成することができる条件を与えるもので、様々なディジタル機器において離散化した信号を扱うことの正当性を保証する重要な定理です。

シャノンの標本化定理に代表されるように、これまでの標本化定理では、個別の信号の族(例えば帯域制限された信号の族)特有の性質に依存した理論構築がなされていたため、異なる性質の信号に対する標本化定理は、一から構築し直す必要がありました。これは効率の面からも望ましいことではありません。それに対し、本研究では、再生核ヒルベルト空間論という数学的道具立てを用いることで、個別の信号の性質によらない一般的な標本化理論を構築することに成功しました。これはいわば「標本化定理の卵」です。この理論を用いれば、扱いたい信号の族に対応する「再生核(カーネル関数)」と呼ばれる単純な 2 変数関数と標本点集合のみの情報から、標本化定理が成立するかどうかを簡便に判別することが可能になります。様々な信号に対する標本化定理の構築を、地球外の様々な天体に向かうことに例えるなら、これまでは一々地球上からロケットを打ち上げていたのに対し、今後は、国際宇宙ステーションから目的地を目指すことができるようになったと考えると分かり易いと思います。

（４） 本発表の注目点

標本化周波数を可能な限り小さくすることは、ディジタル機器を安価に製作する一つの方策と言えます。この理論の整備はまだ完全に終わってはいませんが、この理論が完成した暁には、難解な数学を駆使することなく、自身が開発したディジタル機器で扱う信号に対して最適な標本化ができるようになると期待されます。

研究発表データシート

【22】	富田　章久 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	量子暗号鍵配付装置の安全性保証技術
サブタイトル	究極の暗号の安全性を実験的に保証する

（１） 研究者のアピールポイント

量子情報技術は量子物理・情報理論・電子工学が交差したところにあり、超高速計算や敵の能力に対する仮定が不要な暗号など、従来の情報技術では実現が難しい能力や機能を実現します。

ともすれば頭でっかちになりがちな量子情報技術ですが、光通信の研究で培った工学的なアプローチで本当に使える装置・システムを目指しています。（独）情報通信研究機構の委託研究プロジェクトに参画し、産官学が連携した研究を行っています。

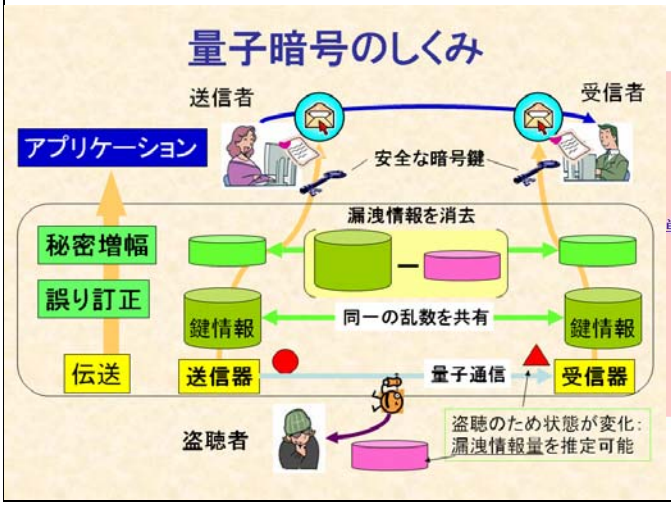
（２） 本発表研究の概要

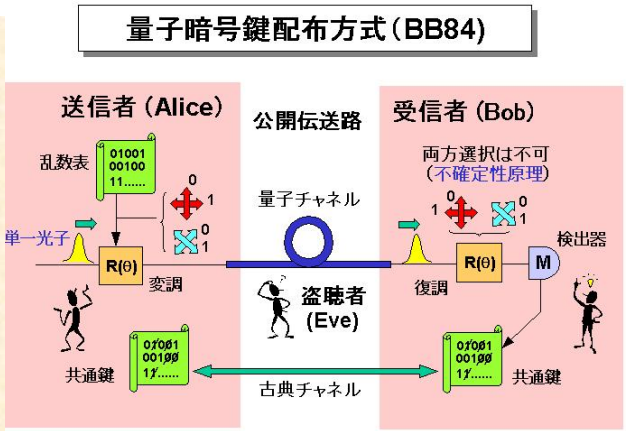
高度な秘匿性を実現する量子暗号鍵配付の安全性を実際の装置について実験的に保証するための技術を紹介します。

（３） 本発表研究の詳細

現在広く利用されている暗号は計算機による解読に非現実的な時間がかかることを安全性の根拠としています（計算量的安全。）このため、計算機の能力向上や計算アルゴリズムの進歩に対応して暗号プログラムのアップデートが必要になります。また、旧世代の暗号が後から解読可能になるという問題もあり、高度な秘匿性が必要される領域ではそのような計算量の仮定に頼らない暗号方式が求められます。

量子暗号鍵配付（QKD）は秘匿通信につかう乱数（鍵）を量子通信によって共有する技術です。QKD の安全性の根拠は量子力学が与える測定の限界に基づいているため、いかに技術が進歩しても破られることはありません。QKD では光ファイバの中を通る光子に暗号鍵情報を乗せて伝送します。送信者と受信者は検出した光子情報を用いて暗号鍵を生成します。





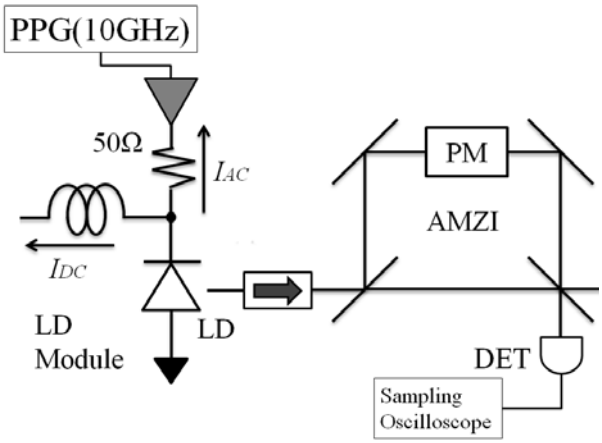
もし、その途中で盗聴者が情報を抜き取ろうとすると、検出した光子情報に盗聴の痕跡（エラー）が残り、受信者は盗聴されたことを検知することができます。さらにエラー率を計算することで盗聴の強さの上限が得られ、盗聴者の持つ情報量を見積もることができます。これにより、盗聴の可能性のある鍵を排除（鍵蒸留）することができ、安全な鍵だけを使用することが可能になります。

QKD の安全性は理論的に証明されていますが、現実の装置では不完全性がつきものであり、安全性理論の仮定が常に満たされているとは限りません。我々は装置構成を詳細に見直し、安全性に影響を与える部分とその評価方法を研究しています。現在、特に送信器について検討しています。送信器は光源と状態生成部からなります。光源はレーザ光を減衰させたものを用いますが、レーザパルスの間で位相相関があると効率的な盗聴が可能になることが知られています。そのため、高速光通信で用いられているような外部変調器を用いることができません。半導体レーザをしきい値以下にバイアスしてパルス電流を印加して発振させる、いわゆる利得スイッチ動作を行う必要があります。この場合でもクロックレートが高くなりパルス間隔が短くなると位相相関を持つ可能性があります。現在開発されている高速 QKD 装置では 1GHz 程度のクロックが用いられていますが、将来の高速化に備えてより速いクロックでも位相相関の有無を確認する必要があります。

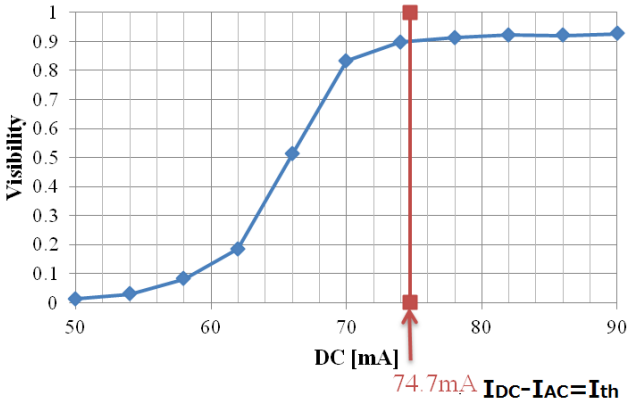
我々は繰り返し周波数 10GHz においてパルス間の可干渉性を測定しました。その結果印加電流がしきい値以下となる時間が 30ps より短くなると隣接パルス間に干渉性、即ち位相相関が現れることを見出しました。これは QKD 装置の高速化にあたり重要な知見です。

（4） 本発表の注目点

装置の性能をきちんと確保し、本当に安全な暗号装置を実現するための研究を進めています。これは新しい技術を実用化するためには不可欠な仕事です。理論と実装の間をつなぐポジションで量子暗号を研究している機関はほとんどなく、本研究は重要です。また、理論と現実のズレを追求していくことが、新しい理論の発展につながることも期待できます。



パルス間位相相関測定系



DC 電流と干渉の明瞭度

研究発表データシート

【23】	舘野 高 大学院情報科学研究科 生命人間情報科学専攻・教授 【発表者】北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科 生体情報コース・4 年生　橘 唯至	

発表タイトル	微細加工技術を用いた次世代人工聴覚器の小型集積化
サブタイトル	大脳皮質における聴覚情報処理原理の解明に向けた基礎及び応用研究

（1） 研究者のアピールポイント

発表者の所属する生体計測工学（来年度は「神経制御工学」に変更）研究室では，所謂「ものづくり」のドライな工学と「いきもの」の仕組みを理解するウエットな生物学の 2 つを同時に学生に修学して貰いながら，生体情報をセンシングするデバイスを開発する基礎研究によって，次世代のヘルスケア・イノベーションにおける技術開発の中核的役割を果たす学生を育成しています．本発表ではその一部を紹介しています．

図 1　微細加工技術を用いた人工聴覚器開発の基盤形成

（2） 本発表研究の概要

本研究では，特に，現在の人工内耳の利用が困難な難聴者が聴知覚を得られるような，完全埋め込み型の次世代聴覚インプラントの小型集積化技術を開発しています（図 1）．また，齧歯類を用いた動物実験を通して，開発した新規デバイスの有効性を検証しています．そして，脳における聴覚情報処理原理を理解するために，従来の神経活動計測技術や新しい脳活動イメージング手法を利用して，脳の活動を様々な階層性で計測を行い，記録したデータの解析を行っています．

（3） 本研究発表の詳細

先天的な高度難聴児は，国内で毎年 1,200 人程度産まれると推定され，3 歳頃までに人工内耳などの埋め込み型聴覚機器（聴覚インプラント）を装用すれば，話したり聞いたりすることが通常の人と同様にできると言われています．しかし，現在の聴覚インプラントは海外製品が多く，音質が劣る場合もあると言われており，さらに高機能小型の国産製品が望まれています．本研究では，完全埋め込み型の次世代聴覚インプラントの小型集積化技術を開発しています（図 1）．マウスやラットなどの齧歯類を用いた小動物実験により，開発したデバイスの有効性を検証するとともに，大脳皮質聴覚野における音の情報処理原理を解明しようとしています．

具体的には，微細加工技術を用いて，音を電気信号に変換する蝸牛の仕組みを実装した音響センサや，その電気信号を処理するための電子回路（CMOS LSI チップ）を開発しています．また，現在，

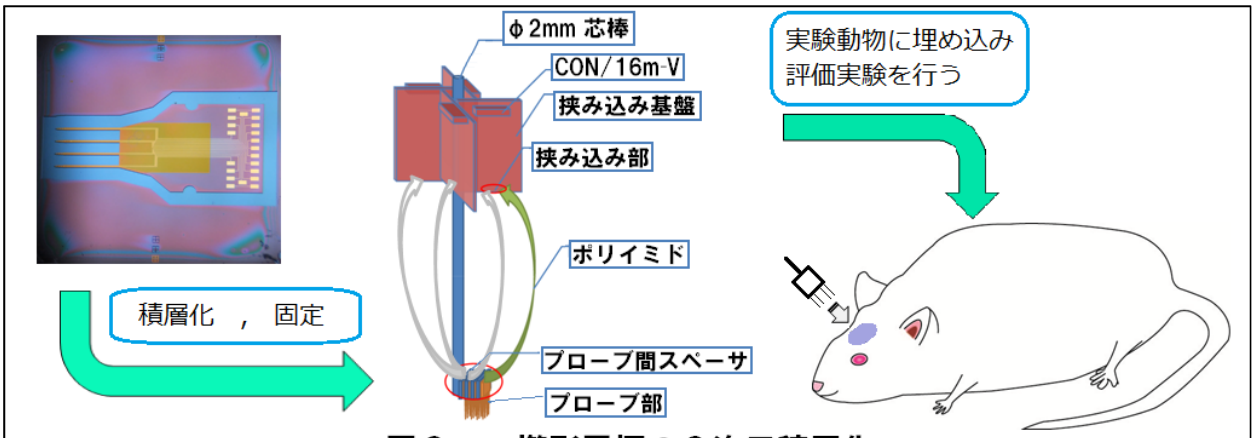


図２　櫛形電極の３次元積層化

実際に生物に埋め込む櫛形電極基板を開発しています．現在開発中の櫛形電極は，一層で 16 チャネルのプローブを持ち，着脱可能な形式で 3 次元的に 4 層積み重ねることで立体的に 64 チャネルの刺激・記録が可能なものを想定しています．この積層化された櫛形電極が完成した後に，実際に齧歯類に埋め込み，in vivo 実験による評価実験を行うことを予定しています（図 2）．

また，大脳皮質聴覚野における音の情報処理原理を解明するためには，まず個々の単一神経細胞ごとの電気的活動を直接計測する必要があります．次に，神経細胞ネットワークレベルの解析が必要なために，多数の神経細胞の活動を同時計測する実験手法を用いた動物実験を行なっています．具体的には，光計測を用いて，麻酔下動物の生きた状態での神経活動を観測する in vivo 実験とシャーレ内で培養細胞活動を観測し，組織を取り出して細胞の反応を観測する in vitro 実験の 2 つを研究室内で行っています．2 つの実験手法は，各々に長所と短所があり，互いに相補的な関係になっています．さらに，聴覚系の計算理論を新たに展開するために，音声知覚の運動理論に基づいて，マウスの声道の MRI 切片画像を撮影し，その画像から声道のモデルを構築しようとしています（図 3）．研究の目的を端的に述べれば，声道の物理的パラメータが脳の中に神経符号として表現されているかを実験的な手法で解明する研究課題に取り組んでいます．今回は特に，人工聴覚器の小型集積化技術の開発において現在進めている上記の研究について述べると共に，声道モデルを画像から再構成する詳細についても発表する予定です（図 3）．

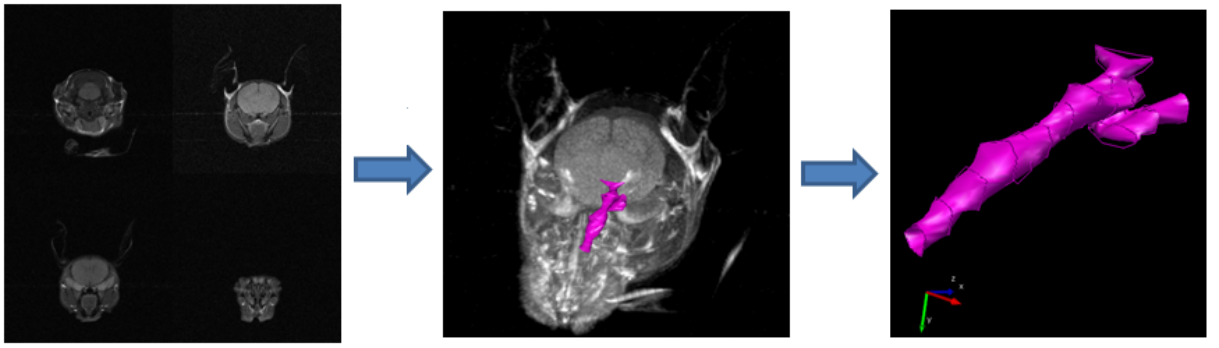


図3　MRI切片画像からの声道の抽出

（4） <u>本発表の注目点</u>

本発表では，現在，私達の研究室が試作している多電極配列基板，CMOS LSI チップ，圧電素子を利用した音響センサ等のマイクロスケールの構造物を実際にご覧頂く予定です．そして，こうした技術の基礎的背景を述べると同時に，今後，医療や福祉の向上に私達が開発している技術がどの様に役立つかについてもご説明致します．発表用ポスターの前に，是非お立ち寄り下さることをお願い致します．