北海道大学工学系シーズ集Vol.15

イノベーションフォーラム2017　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	笹倉　弘理　准教授	安全な情報通信の実現に向けた半導体量子ドットを用いた量子鍵配送光ファイバーデバイスの開発
2	応用化学部門	青木　芳尚　准教授	酸化物－金属接合に基づく高効率中温作動型燃料電池の創製
3	材料科学部門	菊地　竜也　准教授	ナノ構造を制御した機能性アルミニウム－表面を変えれば全てが変わる－
4	機械宇宙工学部門	藤村　奈央　助教	金属の表面粗さに基づいた疲労損傷評価法の提案と表面改質技術Scanning Cyclic Pressの開発
5	人間機械システムデザイン部門	山田　悟史　助教	海綿骨における骨梁強度とミネラル結晶配向性
6	エネルギー環境システム部門	村井　祐一　教授	流体力学による船舶の省エネルギー技術の開発
7	量子理工学部門	山内　有二　准教授	核融合商用炉の早期実現に向けた炉工学研究～プラズマ・壁相互作用の解明・制御とブランケット工学～
8	環境フィールド工学部門	猿渡　亜由未　助教	海洋エネルギー発電（潮流，海流，波力）
9	北方圏環境政策工学部門	上田　多門　教授	新しいコンクリート内部劣化評価技術を用いたコンクリート構造物の性能評価法
10	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手法の開発
11	建築都市空間デザイン部門	岡崎　太一郎　教授	接着剤による鋼構造の実現に向けた基礎実験
12	空間性能システム部門	森　太郎　准教授	地図情報を利用したパッシブソーラーデザインの分析
13	環境創生工学部門	岡部　聡　教授	次世代創エネ型水処理システムの開発
14	環境循環システム部門	児玉　淳一　准教授	寒冷環境で使用される構造材料の劣化診断・寿命予測システムの開発
15	エネルギー・マテリアル融合領域研究センター	能村　貴宏　准教授	省エネルギーと新エネルギー利用促進のための次世代蓄熱技術
19	情報理工学専攻	喜田　拓也　准教授	グラフに含まれる大きな内周を持つ部分グラフの列挙
24	情報エレクトロニクス専攻	冨岡　克広　准教授	半導体ナノワイヤ材料の開拓と省エネ・高機能素子の創成
26	生命人間情報科学専攻	岡嶋　孝治　教授	イオンコンダクタンス顕微鏡による細胞表面の形状・物性測定
29	メディアネットワーク専攻	小川　貴弘　准教授	画像・映像処理の最先端技術
35	システム情報科学専攻	竹本　真紹　准教授	1個の電磁石で正負両方向のスラスト軸支持力を発生できる5軸能動制御型磁気浮上ポンプに関する研究
36	システム情報科学専攻	金井　理　教授	大規模環境３次元計測データからの物体認識・モデリング技術

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

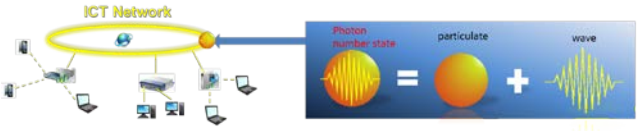
研究発表データシート

【1】	氏名　笹倉　弘理 北海道大学大学院 工学研究院 応用物理学専攻・准教授	

発表タイトル	安全な情報通信の実現に向けた半導体量子ドットを用いた量子鍵配送光ファイバーデバイスの開発
サブタイトル	QDinF デバイスを用いた非古典光供給システムの長時間安定性

（1） 研究者のアピールポイント

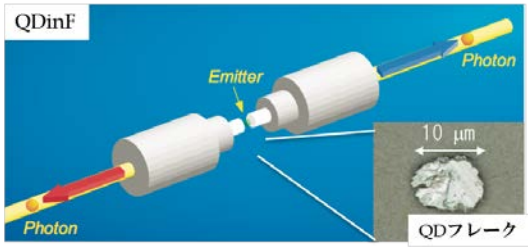
III/V 族半導体量子ドット(QD)を単一モード光ファイバーコアに内蔵し，既存の光情報通信網と親和性の高い“量子”である単一光子等の光子数状態の生成・制御をめざしています．量子ドット内蔵型光ファイバー(QDinF)を用いると異なるQD間を簡便に結合させることができるため，複合システムによる高機能化が期待できます．



（2） 本発表研究の概要

非古典光供給システムは，光子の不可分性・情報の重ね合わせという量子力学の原理に基づく，安全且つ省電力な量子情報通信環境を提供する要素技術である．今後の本格的な運用に向けて，構造的な安定性に優れ，長寿命且つ明るく，更に低コストで製造できる非古典光源の開発が必要不可欠であり，様々な物質材料・構造等で探索研究が行われている．

半導体量子ドット（QD）は空間的な 3 次元閉じ込め効果によって内部エネルギーが離散化しているため，本質的に複数光子（対）の生成が起こらない．このため，従来の非線形光学効果に基づく光子数揺らぎが不可避な光源に比べて格段に高効率な量子シミュレータ，量子通信プロトコル等の実現が期待できる．本発表では単一モード光ファイバー（SMF）コアに QD を直接装着した QDinF(QD in Fiber）を用い QD と 2 本の単一モード光ファイバー（SMF）で構成した非古典光源の開発に関して紹介する．



（3） 本研究発表の詳細

分子線エピタキシー結晶成長装置(MBE)を用いて成長させた InAs/GaAs QDs を電子線リソグラフィーにより直径 300 nm，間隔(B)2.5 μm のピラーアレイ状に加工した．更に HSQ をスピンコートし機械的安定性を高めた後，B とほぼ等しい MFD 径である SMF(Thorlabs: UHNA3: NA=0.35, MFD=2.6 μm)端面に直接固定した[図 1].

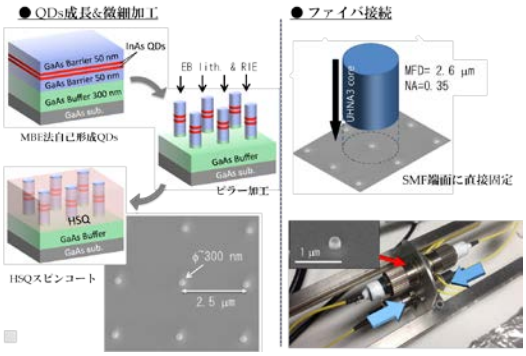


図 1：非古典光源の概略

【1】続き

液体ヘリウム中に設置し，ピグテール付き半導体レーザー(Thorlabs: LP785-SF20)を用いてGaAs バリア層を励起した．図 2(a)に示すように 900 nm-1100 nm の帯域で数本の鋭い発光スペクトルを観測した．次に P1 に着目し，次に P1 に着目し，超伝導単一光子検出器(SNSPD: Single Quantum: custom-made product)と TAC(B&H: TCSPC-130EM)を用いて，2 次の自己相関測定を行い単一光子状態の純度の励起強度依存性を評価した[図 2(c)及び図 3 左上]．P1 の発光が飽和し，state-filling により第一励起状態(P2)の発光が顕著となる励起強度[図 2(b)]においても単一光子状態の純度としての指標である $g^{(2)}(0)$は 0.1 以下であり[図 2(c)]であり純度の高い単一光子状態の生成が可能であることを示している．図 3 下段は単一光子発生源の長時間安定性に関する検証結果である．動的なフィードバック機構を必要とすることなく，数日間にわたる出力光子数の揺らぎが 5 %以下に抑えられていることがわかる．これは開発中の QDinF デバイスの長時間連続運転が容易に実現できることを示唆するものであり，量子 ICT の実用運用に向けたデバイス開発の重要な指針であると言える．

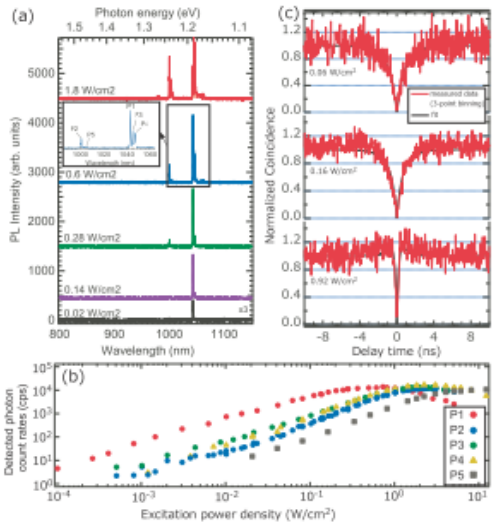


図 2: 励起強度依存性

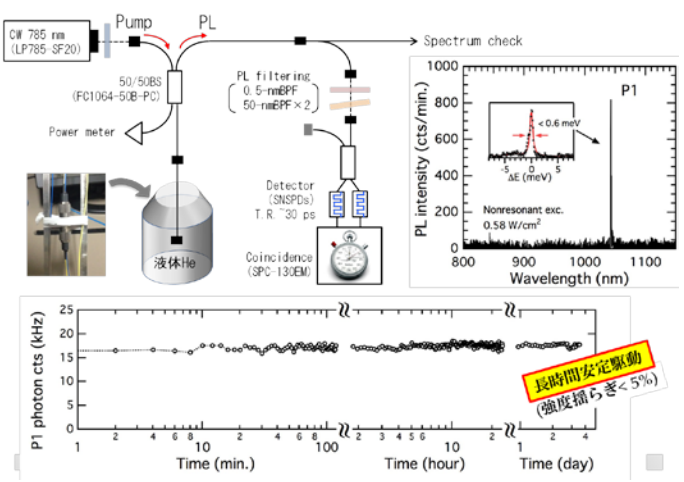


図 3: QDinF の長時間連続運転結果

（4） 本発表の注目点

単一の量子力学的二準位系を情報の基本単位とする量子情報通信技術(QICT)は量子暗号鍵配送(QKD)や超並列計算等，従来デバイスでは実現し得ない機能を備えており，情報流通量の増加やセキュリティの確保，更には多様化した情報を有効利用するため，実用化に向けた研究開発が盛んである．現行の光ファイバーインフラストラクチャーに最適な量子ビットである単一光子や量子もつれ光子対を安定に供給できるデバイス作製技術の確立は必要不可欠である．

QDinF は光ファイバーインフラストラクチャーとの親和性に優れており，QD を光子源として用いることにより，従来の非線形光学効果に基づく光子数揺らぎが不可避な光源に比べて格段に高純度な非古典光の生成が可能である．更にメンテナンスフリーな非古典光供給システムを安価且つ簡便に作製できる可能性が高く QICT の実用運用を拓くだけでなく，新たな量子シミュレータの構築，量子通信プロトコルの探索への展開が期待できる．

研究発表データシート

【2】	氏名　青木　芳尚 北海道大学大学院工学研究院 応用化学部門　物質化学専攻・准教授	

発表タイトル	酸化物－金属接合に基づく高効率中温作動型燃料電池の創製
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

固体電気化学，特に固体酸化物燃料電池，水素分離および水蒸気電解水素製造についてな岩塩研究を行ってきました．近年は固体酸化物燃料電池の中温作動化に関し，JST のさきがけ研究員としても活動していました．

（２） 本発表研究の概要

マルチターゲットスパッタリング法にて，厚さ 1 μm のプロトン伝導性セラミックス $BaCe_{0.8-x}Zr_xY_{0..2}O_3$ 薄膜(x=0, 0.1)を水素透過 Pd 箔上に蒸着し，Pd | $BaCe_{0.8}Y_{0..2}O_3$ | $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0..2}Fe_{0..8}O_3$ 水素膜燃料電池を作製した．水素燃料を用い 600°C にて発電試験を行ったところ， OCV1.08 V と，従来のプロトンセラミックス燃料電池のチャンピオンデータを超えるピーク出力密度 1050 mW cm^{-2} を達成した．電気化学インピーダンス法にて分極特性を調べたところ，カソード分極抵抗が通常のセラミックス燃料電池よりも大きく低減しており，これが高出力の原因であることがわかった．また同様に Pd | $BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0..2}O_3$ | $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0..2}Fe_{0..8}O_3$ 水素膜燃料電池を作製し，アンモニア燃料 600°C にて，OCV1.08 V,およびピーク出力密度 600 mW cm^{-2} を得た．さらに膜厚 450 nm の $BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0..2}O_3$ 電解質膜を用いたセルでは，450℃にて水素燃料時 900 mW cm^{-2}，またアンモニア燃料時 600 mW cm^{-2} という非常に高い出力密度が得られた．以上から水素膜燃料電池は，従来のプロトンセラミックス燃料電池では実現できなかった低い温度領域で，アンモニア燃料発電が可能であることが証明された．

本研究発表の詳細

$BaCe_{0.8}Y_{0..2}O_3$ および CeO_2 または ZrO_2 ターゲットを用いた同時スパッタ法により，$BaCe_{0.8-x}Zr_xY_{0..2}O_3$ 薄膜を作製した．プロセスガスの流入方向，酸素分圧，基板温度などを最適化し，目的組成の高結晶薄膜を作製した(Fig. 1)．Pd | $BaCe_{0.8}Y_{0..2}O_3$(1 μm) | $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0..2}Fe_{0..8}O_3$－水素膜燃料電池(HMFC)を作製し，$H_2$ 燃料を用い 600°C にて発電試験を行ったところ，非常に優れた出力特性を示し，OCV1.08 V およびピーク出力密度 1050 mW cm^{-2} を達成した．このピーク出力密度は，プロトンセラミックス燃料電池(PCFC)のチャンピオンデータよりも高い値である．電気化学インピーダンス解析より HMFC の等価回路モデルを決定した(Fig. 2b)．これにより，HMFC のカソード反応は，同じ $BaCe_{0.8}Y_{0..2}O_3$/$La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0..2}Fe_{0..8}O_3$ 界面からなる PCFC より 10 倍以上速いことが明らかとなった．

電解質を $BaCe_{0.8}Y_{0..2}O_3$ から $BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0..2}O_3$ 薄膜(1 μm)に変えることにより，NH_3 燃料で安定に発電を行えることを見出した．$BaCe_{0.8}Y_{0..2}O_3$ 薄膜では，アノードの H_2 分圧が減少するとマイナーキャリアのホール伝導が増加し，これにより OCV が低下する．一方 $BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0..2}O_3$ 薄膜では比較的低 H_2 分圧下でもホール伝導が抑制されており，このため NH_3 燃料でも安定な出力が得られることが明らかとなった．これにより NH_3 燃料を用い 600°C にて 600 mW cm^{-2} のピーク出力密度を達成した．この値は直接アンモニア形燃料電池のチャンピオンデータである．

【2】続き

$BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0..2}O_3$ 電解質薄膜の作成方法を最適化し，さらに膜厚を 450 nm へ低減することにより 450°C H_2 燃料にてピーク出力密度 900 mW cm^{-2}，また NH_3 燃料にてピーク出力密度 600 mW cm^{-2} を達成した(Fig. 3). 更に膜厚 1 μm のセルに比べ，450 nm のセルでは膜厚の減少により，電解質のオーム抵抗だけでなくカソード･アノードの電荷移動抵抗も低下する現象が見られた．これにより，従来の HMFC は，PCFC では困難である中低温領域(～400°C)での発電が可能であることが明らかになった．

（３） 本発表の注目点

従来固体酸化物燃料電池では，カソード反応が進行しないため発電が困難とされてきた，500℃以下においても優れた発電効率を発揮する新構造燃料電池を考案できた．このことは，本研究で提案する酸化物－金属ヘテロ接合が燃料電池カソード反応を促進すること示唆している．

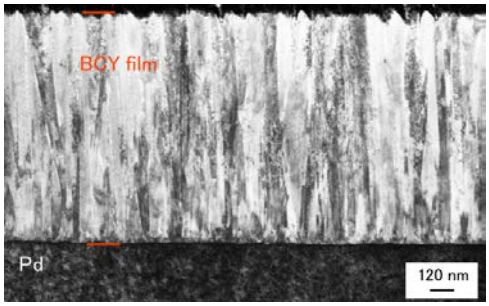


図 1 同時スパッタ法により作成した $BaCe_{0.8}Y_{0..2}O_3$(BCY)薄膜の断面 TEM

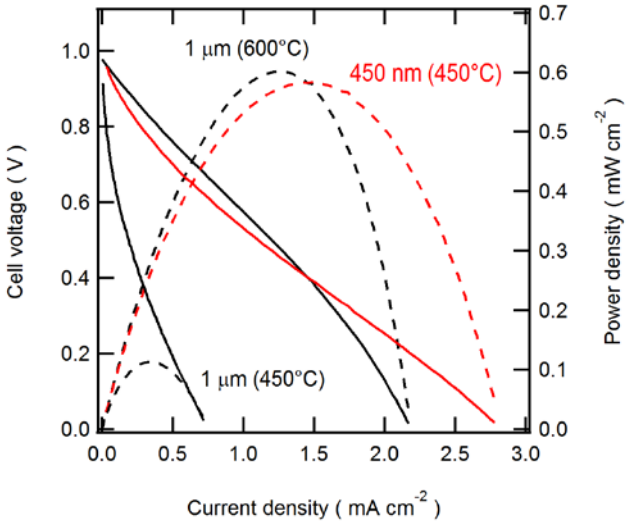


図 3 NH_3, Pd | $BaZr_{0.1}Ce_{0.7}Y_{0..2}O_3$ | $La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0..2}Fe_{0..8}O_3$, air－水素膜燃料電池(HMFC)の電流－電圧および電流－出力曲線．$BaZr_{0.1}Ce_{0.7}Y_{0..2}O_3$ 膜厚を 1 μm および 450 nm とした場合．

研究発表データシート

【3】	菊地　竜也 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	ナノ構造を制御した機能性アルミニウムー表面を変えれば全てが変わるー
サブタイトル	—誰でも簡単に、安価に、新しい特性を—

（1） 研究者のアピールポイント

「企業でできることを行っていては大学人たる意味が無い。企業にはできなくて、大学だからこそできる研究を」　若い学生と一緒に学びながら、ユニークで、面白い、大学だからこそできる研究を遂行し、皆様に発信していければと考えております。

（2） 本発表研究の概要

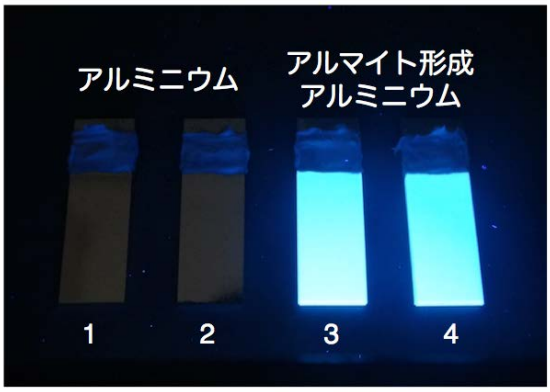
新しいアルミニウムの表面処理技術によって、新しい機能性をもつアルミニウム材料の開発に挑戦しています。

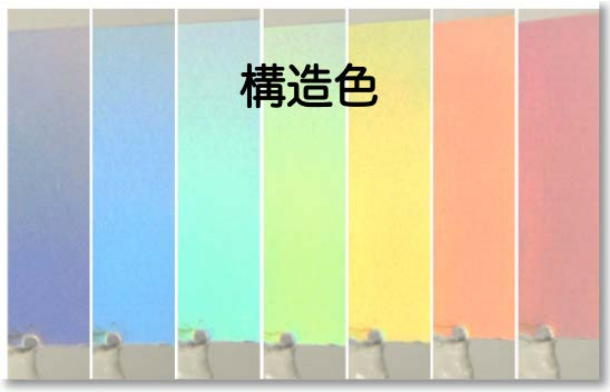
（3） 本研究発表の詳細

アルミニウムは資源量が豊富で軽量な金属材料として幅広く利用されています。アルミニウムは電気化学的に腐食しやすい（反応しやすい）金属であり、最終的に表面処理を施すことによって使用されています。最も代表的な方法は、陽極酸化（アノード酸化）によってアルミニウム上に耐食性の酸化皮膜を形成することです。この皮膜は「アルマイト」の名前で広く知られており、100 年前から日本が世界をリードする数少ない科学技術の 1 つです。

発表者は、新しい電解質化学種を用いたアルミニウムのアノード酸化により、新規な機能性をもつアルミニウム材料の創製に挑戦しています。開発したアノード酸化法によって、「光輝く」、「虹色に反射する」、「よく滑る」、「よく弾く」、「とても硬い」といった機能性の発現を実現するとともに、このアノード酸化の手法を、ナノサイズの細孔や金属の微粒子を自己規則配列させる新規なナノテクノロジーとして応用展開することに挑戦しています。

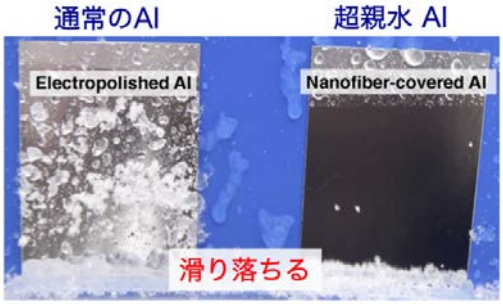
a) 紫外線を照射すると発光したり、光を虹色に反射するアルミニウム材料

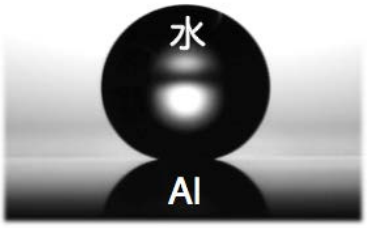


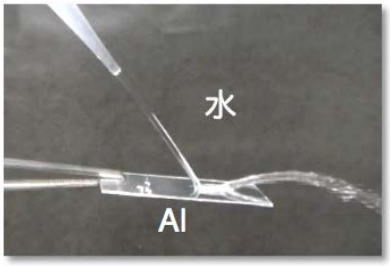


【3】続き

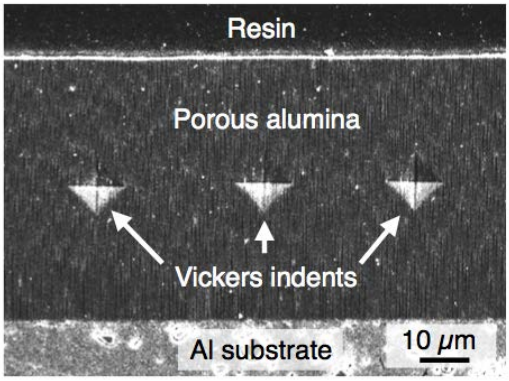
b) 水や雪がよく滑ったり、よく弾いたりするアルミニウム材料

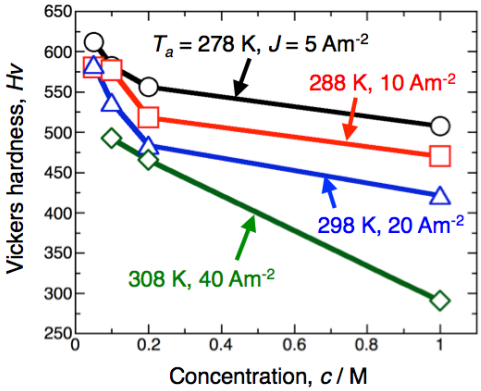




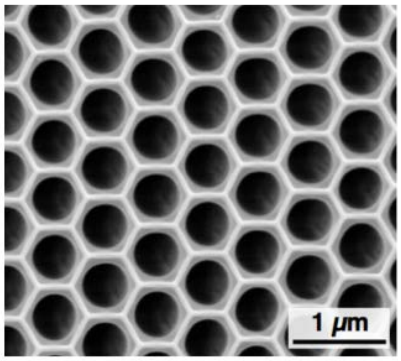


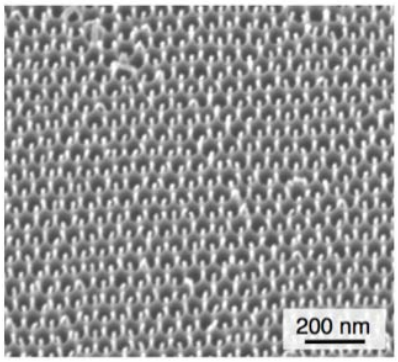
c) とても硬いアルミニウム材料

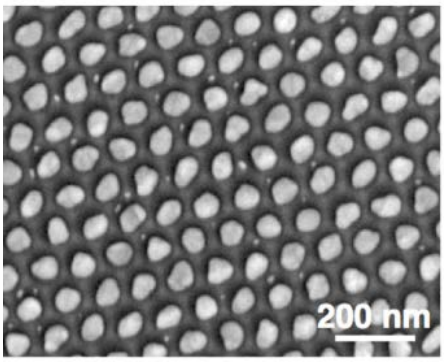




d) 自ら勝手に規則的なナノ構造として成長する、自己規則化ナノ構造構築プロセス







（4）本発表の注目点

「表面が変われば、全てが変わる」

よくあるありふれた材料であっても、表面を変えれば、これまでに無い特性が発現します。これまでに無い特性は、ありふれた材料を新しい材料に革新し、ひいては新しい工業的な応用展開へと導きます。

研究発表データシート

【4】	藤村　奈央 北海道大学大学院工学研究院 機械宇宙工学部門・助教	

発表タイトル	金属の表面粗さに基づいた疲労損傷評価法の提案と表面改質技術 Scanning Cyclic Press の開発
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

材料の強度は機械構造物の性能を左右するため，正確な材料特性・強度特性の把握は機械構造物の高強度化や軽量化，信頼性の向上に貢献する．本研究者たちは，主に構造用材料について，強度や疲労特性など機械的特性を中心とした材料特性の把握ならびに強度や機能の向上方法について研究を進めている．特に，周囲環境，材料に加わる力，材料の微視構造の 3 つの因子が，材料の機械特性に及ぼす相乗効果を実験に基づいて系統的に明らかにし，その結果を基に，強度，耐久性，信頼性を向上させる手法の開発を目指している．

（２） 本発表研究の概要

本発表では 2 つのテーマを紹介する．

１つ目は，**「金属の表面粗さに基づいた疲労損傷評価法の提案」**に関する研究である．発電所やプラントなど重要施設において機器が地震荷重を受けた場合，材料内部に損傷が蓄積されると推測される．設備の健全性を評価するためには損傷量を定量的に見積もることが不可欠だが，地震による繰返し負荷を受けた材料の損傷量を正確に予測する合理的な方法は未だ確立されていない．従来，疲労損傷評価には，材料が受けた損傷を寿命と負荷の繰返し数から寿命消費率を求めて評価する疲労累積係数 *UF* が用いられているが，より精度の高い損傷評価を行うためには疲労のメカニズムも考慮する必要がある．そこで本研究では，材料が受けた疲労損傷過程を評価する有効なパラメータとして繰返し塑性変形を与えると変化する材料の表面粗さに着目し，配管部材として用いられるステンレス鋼を対象に疲労試験を行い，このときの表面性状の変化と負荷の大きさや繰返し数，疲労損傷過程との関係を明らかにすることで，繰返し負荷を受けた材料における損傷の程度を表面粗さ測定に基づいて評価する方法の提案を目指している．

２つ目は，**「表面改質技術 Scanning Cyclic Press の開発」**に関する研究である．金属組織を微細化させる技術として，材料に大きな塑性ひずみを与える強加工が広く知られている．その中でも，材料表面を対象とした Severe surface plastic deformation(S^2PD)はバルクに比べて格段に高い強度や硬度など種々の機能特性を表層に与える技術であり，特に，超音波振動を用いる UIT(Ultrasonic impact treatment)や UNSM(Ultrasonic nanocrystal surface modification)などは表層をナノ微細化層へ改質する有力な手法として注目されている．一方，本研究では，超音波よりも低い周波数を用いて，高精度に制御された低荷重の圧縮振動負荷を金属材料に対して相対的に走査して与える Scanning Cyclic Press(SCP)を開発した．これまでの研究で，SCP を低炭素鋼 S25C やマグネシウム(Mg)合金に適用した結果，これらの表面硬さや疲労特性を大きく向上させることが示された．また，S25C では表層にアモルファス層やナノ結晶を含む微細層の形成が確認された．本発表では Mg 合金に SCP を適用した事例を紹介する．

【4】続き

（3） 本研究発表の詳細

【金属の表面粗さに基づいた疲労損傷評価法の提案】

図 1 に繰返し負荷を受けたステンレス鋼の表面性状の変化を示す．繰返し負荷を与えることで，滑らかな表面から凹凸の激しい表面に変わったことがわかる．この繰返しに伴う表面性状の変化を，様々な負荷の大きさの下で疲労試験を行いながら，レーザー顕微鏡を用いて算術平均粗さ R_a を測定し定量的に調べた．その結果，表面粗さ R_a は繰返し数の増加に伴って増加することがわかった（図 2）．また，繰返しに伴う R_a の増加の割合は負荷の大きさによって異なり，大きな負荷では増加率が大きく，負荷が小さくなると増加率も減少することが明らかになった．この表面粗さと疲労累積係数の関係を用いることで，R_a の測定値から損傷量 UF を推定することができると考えられる．

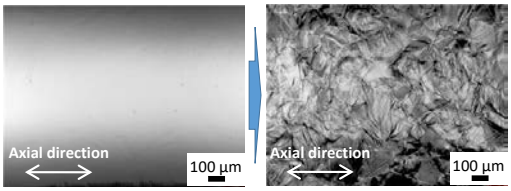


図 1　繰返し負荷付与前後のステンレス鋼の表面

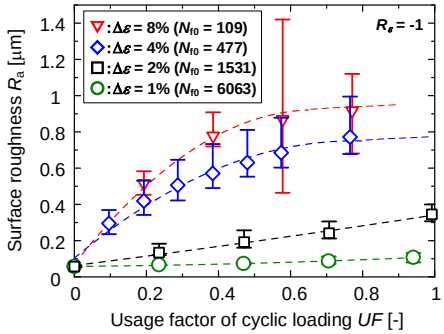


図 2　表面粗さ R_a と疲労累積係数 UF との関係

表面粗さは，図 1 のように表面に凹凸が生じることで変化するが，この凹凸は①結晶粒内のすべり帯形成による細かな凹凸と②結晶粒の変形・回転による大きな凹凸の 2 種類に分類できる．①と②はそれぞれ波長が異なるため，測定した表面の 3 次元形状に周波数解析を行うことで①と②を分離し，各凹凸の形成機構ごとに表面粗さを評価することができる．損傷量 UF の推定にはこの測定結果を用いる．

【表面改質技術 Scanning Cyclic Press の開発】

SCP では，被加工物に回転と送りを与えながら低荷重の圧縮振動負荷を付与することでその表面層全域を改質する．図 3 に SCP を施した Mg 合金(丸棒)の断面組織を示す．表層から深さ約 50μm に渡って細かな網目状の領域が確認される．この微細な組織はこれより内部では認められず，断面中央部では平均粒径 45μm の基地組織が観察された．また，SCP 後の表面硬さは約 2 倍に向上した． SCP 処理材に対して疲労試験を行った結果，図 4 に示すように，その寿命(●印)は未処理材(○印)と比較して 17-100 倍に向上した．以上から，SCP は Mg 合金の表面硬さ向上や疲労特性の改善に大きく寄与することが示された．

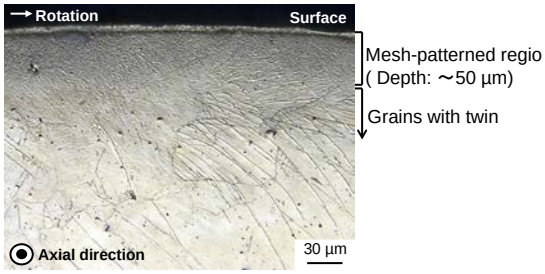


図 3　Scanning Cyclic Press を施した Mg 合金の横断面組織

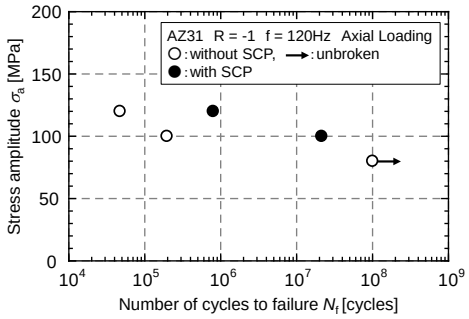


図 4　SCP 処理材の疲労試験結果

（4） 本発表の注目点

・ 重要施設において機器が受けた損傷の具合を従来の目視点検等で把握することは難しい．しかし，本研究で提案する表面粗さ測定を用いて精度よく評価することで設備の安全性を保証できると考えられる．

・ SCP は，材料表層に堅固なアモルファス層やナノ結晶粒を含む微細層を形成する表面改質技術であり，金属材料の疲労特性や耐食性向上技術としての展開が期待される．特に，軽金属への適用は，機器・構造物の軽量化と高い耐久性の両立に貢献できると考えられる．軽金属は鋼に比べ軽量で比強度が高い一方で，耐久性や耐食性に難があるため本来の優れた特性を活かしきれないことがある．しかし，SCP を適用することでこれらの短所を改善できる点に意義がある．

研究発表データシート

【5】	山田　悟史 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・助教	

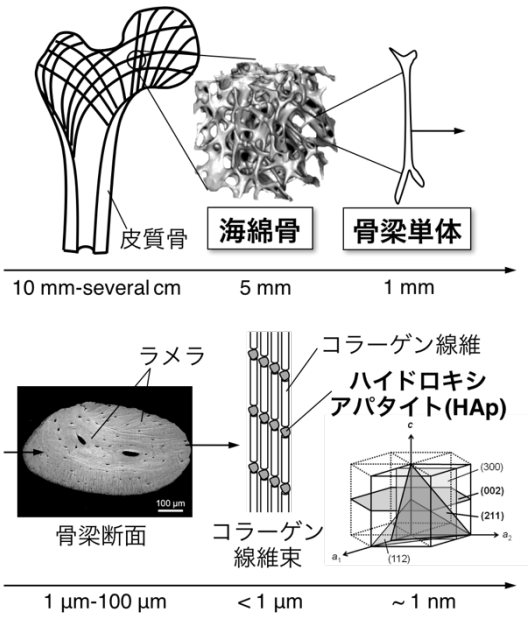
発表タイトル	海綿骨における骨梁強度とミネラル結晶配向性
サブタイトル	

（1） 研究者のアピールポイント

運動機能障害のため移動能力が低下し要介護となるロコモティブシンドロームは、今日の超高齢社会で大きな問題となっています。特に、骨粗しょう症患者は国内だけでも 1300 万人と推測されており、骨粗しょう症や骨折の予防・治療は社会的に重要な課題です。バイオメカニカルデザイン研究室では、骨や軟骨の強度と構造の関係の解明や、将来的に整形外科領域の臨床で役立つような測定・評価技術の開発に取り組んでいます。

（2） 本発表研究の概要

骨粗しょう症は、骨強度が低下し骨折リスクが増大する疾患です。特に、大腿骨近位部や椎体、手首の骨折が多く見られます。これらの部位は、主に海綿骨と呼ばれる骨が多く占める部位です。右図のように、海綿骨は、硬く緻密な皮質骨と呼ばれる骨の内側に存在し、骨梁と呼ばれる小さな梁状の骨が 3 次元編目状に配列した構造を有しています。骨粗しょう症などの骨疾患の診断や治療では、骨強度の低下を正確に評価することが重要となります。現在、骨強度は、骨密度（骨量、骨塩量）を用いて評価されていますが、骨密度だけでは骨強度を予測できない例も多く報告されています。そのため、骨密度の他に海綿骨の強度を決定する因子として、骨梁単体の力学的特性や骨代謝と関わる構造特性を明らかにすることが重要となると考えられます。本研究発表では、骨梁単体の力学的特性を計測する手法、及び骨梁を構成するミネラル（ハイドロキシアパタイト）結晶の構造観察法について紹介します。

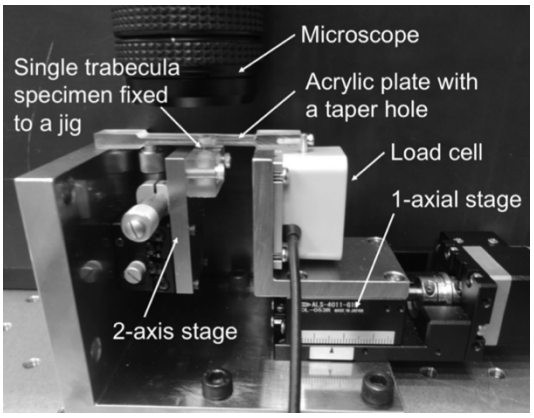


（3） 本研究発表の詳細

海綿骨全体の強度は皮質骨の十分の一以下と低く、骨強度は骨梁構造に依存することが知られている。しかし、一つひとつの骨梁は長さが 1 mm 程度と非常に小さいため、骨梁単体の強度を測定した例は非常に少なく、骨梁単体の力学的特性や骨強度への影響は未だ明らかでない。また、骨梁内部の微視構造は、骨芽細胞・破骨細胞による骨代謝によって形成され、力学的特性に対しても重要な役割を担うと予想されるが、その特性や機序は明らかでない。そこで本研究では、骨梁単体の力学的特性の計測手法を開発し、また、X 線回折法を用いた骨梁内部のミネラル結晶構造観察法を整理することで、海綿骨における骨組織弾性率及び微視構造特性を調査した。

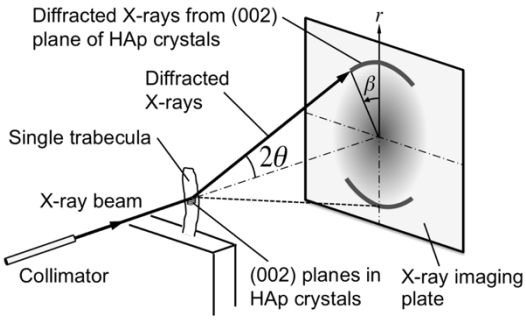
【5】続き

引張試験では、微小な骨梁の採取および試験機治具への固定が難しく、3 点曲げ試験では、試験片の採取及び負荷中の固定や変位の計測が難しい。そこで、試験片の採取、負荷中の固定や変位計測を容易にするため、骨梁の片持梁曲げ試験による力学的特性計測法を提案した。片持梁曲げでは、骨梁を海綿骨から完全に切り離す必要がなく、これにより試験片の固定が容易となる。試験機は、1 軸自動ステージにより負荷治具を介して骨梁試験片先端に負荷し、微小荷重ロードセルにより荷重を計測する機構とした（右図）。光学顕微鏡観察により作用点の確認およびたわみ量を計測した。



2 歳齢ウシの大腿骨近位部海綿骨より、採取した骨梁試験片 10 本を計測した。その結果、骨梁の弾性率は 9.1 ± 5.4 GPa であった。ウシ大腿骨海綿骨から採取した骨梁の弾性率は皮質骨骨軸方向弾性率に比べて有意に低く、皮質骨の 36%であった。海綿骨と皮質骨の弾性率の差は、骨密度や骨梁配向だけでなく、骨梁の弾性率の低さも要因となることがわかった。

骨の主な成分は、コラーゲン線維とそれに沈着したミネラル（ハイドロキシアパタイト）である。ハイドロキシアパタイトは六方晶系の結晶構造を有しており、骨組織内のハイドロキシアパタイト結晶が X 線回折現象を示すことが確認されている。これまでに、皮質骨では、ハイドロキシアパタイト結晶の c 軸が骨長軸方向（骨軸）に配向する傾向を確認し、その配向度と骨組織の弾性率や強度の間に正の相関関係があることを明らかにしてきた。そこで、X 線回折法を用いて骨梁内のハイドロキシアパタイト結晶の構造を観察した。X 線回折装置を用いて、コリメータにより絞った特性 X 線 Mo-Kα を骨梁試験片に照射し、回折 X 線像を X 線 2 次元検出器イメージングプレートにより検出した（右図）。得られた回折 X 線像からハイドロキシアパタイト結晶(002)面の回折パターンを抽出し、結晶 c 軸の配向性を観察した。



その結果、骨梁内のハイドロキシアパタイト結晶は、骨軸とは関係なく骨梁長軸に結晶 c 軸が配向する傾向を示した。骨梁における結晶配向は、骨軸に c 軸が配向する皮質骨とは異なることがわかった。また、骨梁と皮質骨を含む骨組織全体では、弾性率と結晶配向度に有意な正の相関が認められた。骨組織全体では、弾性率が結晶配向度に依存することが考えられる。骨梁と皮質骨のミネラル含有率を比較すると、骨梁は皮質骨に比べてやや低いがその差は小さい。これより、骨梁組織と皮質骨組織の弾性率の違いは、ミネラル含有率の他に結晶の配向性にも起因することが示唆された。

（4） 本発表の注目点

本手法は、骨梁のような小さな骨試験片の力学試験方法として有効であると考えられます。測定された骨梁の組織弾性率は皮質骨よりも低く、海綿骨全体の弾性率が皮質骨に比べて非常に小さい要因の一つであることが明らかになりました。また、X 線回折法を骨梁の微視構造観察に応用することで、ミネラル結晶の配向性が明らかになり、骨強度との関連が示唆されました。本手法を用いて、骨粗しょう症等の骨疾患における海綿骨の弾性率や微視構造の変化が明らかにできれば、今後の骨強度予測や治療薬の開発において重要な知見となり得ます。

研究発表データシート

【6】	村井　祐一 北海道大学大学院　工学研究院 エネルギー環境システム部門・教授 （共同研究者　田坂裕司 准教授，朴炫珍 助教，熊谷一郎 客員教授）	

発表タイトル	**流体力学による船舶の省エネルギー技術の開発**
サブタイトル	Energy-saving technology for marine vehicles based on fluid mechanics

（１） 研究者のアピールポイント

海運における二酸化炭素の排出量が，過去３０年で２倍に増加しました．海運輸送量は世界の GDP の増加とともに増える原理があり，今後も BRICS と呼ばれる大型発展途上国の経済発展によりさらに増加するという予測があります(図１). 時折の世界経済に大きく影響を受けるものの，長期的には海運は疑いの余地無く成長産業と理解されています．このペースが持続すると 2050 年には現在よりも二酸化炭素排出量が３倍に膨れあがる計算です．この問題を私達の世代に解決し，後世の世界経済の持続的発展に貢献しなければなりません．

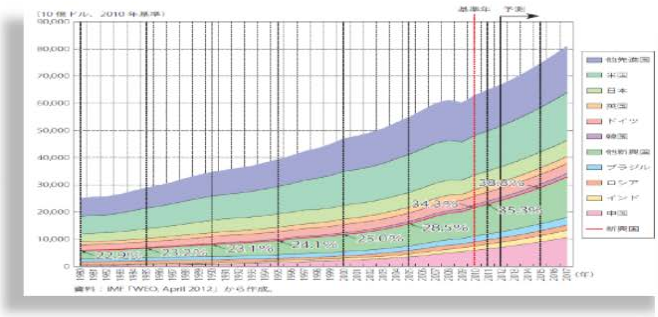


図１　主要国の GDP の増加

図２　船舶の空気潤滑法

エネルギー環境システム部門・流れ制御研究室では，こうした海運における地球温暖化防止を先行的に解決するために，船舶そのものの省エネルギー化技術の開発を推し進めています．その中の一つに，空気潤滑法(air lubrication)の提案があります．図 2 のように，船舶を覆う海水に微細な気泡を含ませ，海水との間で生じる莫大な摩擦抵抗を低減するという新技術です．この技術は 2003 年から 2017 年までの 14 年間に，５隻の船舶で海上試験が実施され，実際に省エネルギー化に成功しました．ある船種では 3 ヶ月の間に 55,000 リットルの燃料節約が実現し，国際的な試験機関(ISO 企画)による検定でも立証されました．空気潤滑法による省エネ率は 10～15%という高い水準を維持しており，今後の海運による二酸化炭素排出量の制限における基幹的な技術になろうとしています．ある専門家は，造船学における第３次革命になるに違いないと，期待を寄せています（第一次は浮体姿勢理論で 19 世紀後半に達成，第二次は造波抵抗の最小化で 20 世紀中盤に達成，第三次は摩擦抵抗の低減で本技術に該当）.

（２） 本発表研究の概要

空気の泡を注入するだけで常に摩擦抵抗が減るという簡単な因果関係は存在しません．もしそのような簡単な原理が存在していれば，今頃，世界中の船舶は気泡を噴き出しながら巡航しているはずです．本技術が２１世紀に入ってから本格的に開発が進展したのは，高度な流体力学，とくに気液二相乱流なる学問領域の発展を待たねばなりませんでした．

【6】続き

図３は世界の多数の研究機関と発表者のグループが共同で調査した，省エネが実現する条件をまとめたものです．個々の丸が，気泡のサイズと船速の範囲を示しています．丸がない条件では気泡を注入しても効果がないか，またはむしろ抵抗が増大する条件です．このような最適条件が存在することは 2010 年頃までは殆ど知られていませんでした．英国，米国，オランダ，フランスの造船・海運会社は，幾度と失敗を繰り返し投資を無駄にする経験ばかりを重ねてきました．そのような中，流体力学による精密な現象解読が，この技術を起死回生へと転化させました．それが図 4 です．私達の研究グループでは成功と失敗の理由を，乱流境界層制御の学問の立場から突き止めようとしています．これにより失敗のない設計パレットの構築が可能となりました．

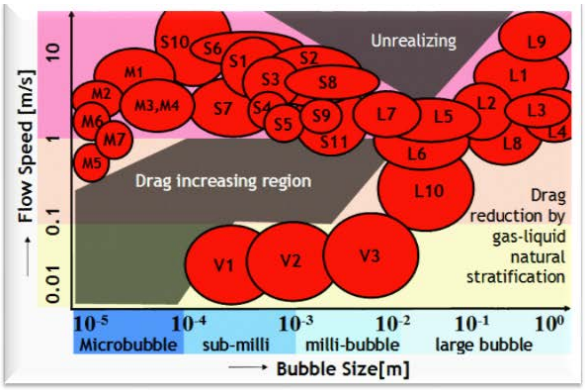


図３　抵抗低減が生じる条件

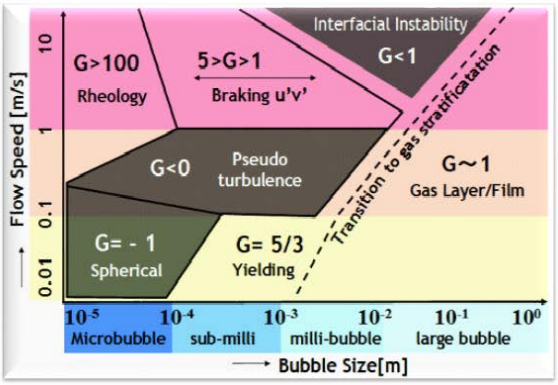


図４　抵抗低減の流体力学的メカニズム

（３） 本研究発表の詳細

図４は発表者が著者となった国際誌のレビュー論文で掲載され，世界的に注目を集めています．また，この成果を基にして設計された水中翼型微細気泡発生装置（日米など特許取得）は，全長 100 メートル，5000 馬力以上の大型船舶でも確実な成果を上げ，2015 年にその詳細が英文誌に掲載されました（図 5 に対応）．この論文は発表後 1 年以上，世界ダウンロード閲覧数 3 位以内を記録し，北海道発の造船イノベーションとして高い評価を受けています．この成果で 2017 年 4 月には日本機械学会技術賞を受賞し，本年 8 月には東京の国立科学博物館にて 3 週間にわたり受賞出展を実施し，ブース来場者は 1000 人以上となる高い人気を記録しました．

図５　実際に試験された船舶から抜粋して掲載

（４） 本発表の注目点

成功の理由は，大学でしか出来ない物理的な探求精神にあります．多数の気泡群を同時に制御するための二相流体力学の構築と，乱流せん断応力の低下を計測するレーザーや超音波による高精度モニタリング技術の開発が，技術開発を加速させました．欧米や中国・韓国の流体力学研究所との教員・学生交流を楽しみつつ，自分達の専門性を活かした仕事を見つけ協力したことが，大きな潤滑剤となりました．何よりも，学生達がラボで疑問の提起を繰り返す姿勢こそが，古典的に成熟した造船学の技術体系の固定観念からの開放を促してくれました．

研究発表データシート

【7】	氏名　山内　有二 北海道大学大学院工学研究院 量子理工学部門・准教授	

発表タイトル	核融合商用炉の早期実現に向けた炉工学研究
サブタイトル	プラズマ・壁相互作用の解明・制御とブランケット工学

（１） 研究者のアピールポイント

将来のエネルギー源として期待されている核融合商用炉の早期実現のための様々な取り組みを長年にわたり実施し、核融合炉工学研究の進展に大きく貢献してきた。

実現に向けた大きな課題として、プラズマ・壁相互作用の解明と制御と、燃料の一つであるトリチウム生成・回収効率の向上がある。前者は、高温・高密度の水素同位体燃料プラズマが炉壁に触れ、炉壁を構成する材料原子などが放出しプラズマに混入することで、燃料プラズマの性能が劣化してしまうものである。一方、燃料の一つであるトリチウムは自然界には存在せず、核融合炉内のブランケットと呼ばれる構造体の内部に配置されるトリチウム増殖材(チタン酸リチウムセラミックなど)で生成する。この増殖材のトリチウム増殖能力やトリチウム回収効率の向上が核融合炉成立のために必要不可欠である。炉運転中、中性子照射や高温水素雰囲気暴露による当該セラミックの組成変化や欠陥生成が予想され、これらが大きく変化する可能性がある。

上記で述べたプラズマ・壁材料相互作用の解明・制御とセラミック特性向上に向けた研究は、プラズマを用いた材料加工プロセス開発、他のセラミック生成プロセス開発に応用できる。

（２） 本発表研究の概要

核融合商用炉実現の課題であるプラズマ・壁相互作用の改善のため、壁近傍にアルゴンガスを流入する方法が提案されている。当該流入は壁への熱負荷の低減につながるが、アルゴンガス流入下でのプラズマ・壁相互作用は十分に理解できていない。アルゴンガス流入下のタングステン(壁候補材料)とプラズマとの相互作用の解明を目指した研究結果について紹介する。

また、トリチウム増殖材の候補として開発された新型チタン酸リチウムセラミックの水素同位体捕捉・脱離挙動と組成・欠陥構造との関係について調べた研究結果についても紹介する。

（３） 本研究発表の詳細

アルゴンガスを流入しながら重水素プラズマに暴露したタングステンの重水素保持・脱離挙動について述べる。

試料近傍からガスを流入できる試料ホルダーを作成し、タングステン試料にアルゴンガス流量を変化させつつ、重水素プラズマを照射した。照射後のタングステン試料の重水素保持・脱離挙動を昇温脱離分析にて評価するとともに、照射後試料の表面組成、表面形態を各種表面分析装置にて調べ、重水素保持・脱離挙動との関係について検討した。

プラズマ照射後タングステン試料の重水素(D_2)の昇温脱離スペクトルを Fig.1 に示す。アルゴンガスパフ無のスペクトルを w/o Ar、ガスパフ有でアルゴン照射量が低いものから順に w/ Ar (No. 1～5)としている。昇温脱離スペクトルには低温側(500 K 程度)と高温側(650 K 程度)の二つのピークが見られた。低温側脱離ピーク温度は少量のアルゴンガス流入で低下し、アルゴン照射量の増加に伴い高温側にシフトした。また、重水素保持量とアルゴンイオン照射量との関係を調べた結果、ピーク温度と同様に少量のアルゴン流量で低下し、アルゴン照射量の増加に伴い増加

【7】続き

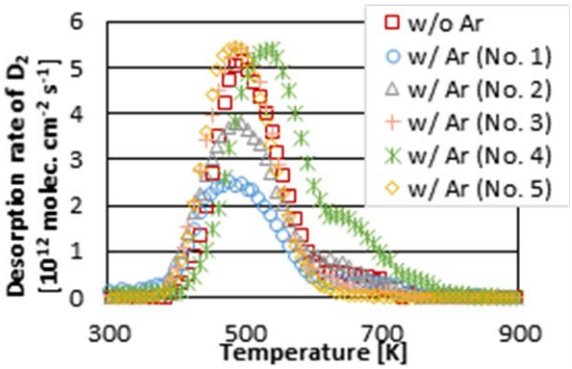


Fig. 1　Thermal desorption spectra of D_2 for plasma-irradiated W with (w/) and without (w/o) Ar gas puffing.

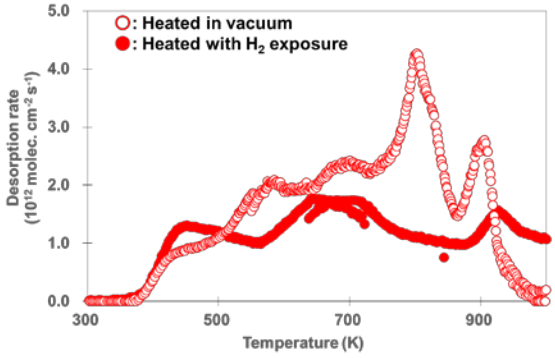


Fig. 2　Thermal desorption spectra of HD_2 for D-irradiated Li_2TiO_3 after heating in vacuum and hydrogen atmosphere.

傾向を示した。プラズマ照射後の表面形態と表面組成分布を調べた結果、アルゴンガスなしの場合、粒界付近の炭素の偏在が見られた一方、アルゴンガスありの場合、当該偏在が見られなかった。また、高アルゴン流量の場合で表面に多くの凸部が確認できた。アルゴンイオン照射による表面不純物の除去と表面の局所的加熱に伴うタングステン内部への重水素拡散の促進、重水素捕獲サイトとしてふるまう表面近傍の欠陥の生成が、重水素保持・脱離挙動を大きく変化させたことが分かった。

次に、新型チタン酸リチウムセラミックの重水素脱離挙動に与える組成変化及び欠陥生成の影響について述べる。

新型チタン酸リチウムセラミックを高温化で水素雰囲気に暴露したのち、重水素イオンを照射した。照射後の重水素脱離挙動を昇温脱離分析にて調べ、表面組成や生成される欠陥との関係について調べた。

高温下で水素雰囲気に暴露した結果、真空中加熱に比べて表面近傍の Li 組成比が減少した。水形成に伴う酸素の化学ポテンシャルの減少に伴い、Li の蒸発が促進されたためである。真空中または水素雰囲気で加熱した後重水素イオンを照射した新型チタン酸リチウムの HD 昇温脱離スペクトルを Fig.2 に示す。5 つ以上の HD 脱離ピークが存在し、真空中加熱に比べて高温水素雰囲気暴露で各ピーク強度が大きく変化した。組成変化や欠陥生成と比較検討した結果、Li 空孔の増加、LiOD として捕捉される重水素の減少、O 空孔の減少などに伴い、脱離ピーク強度が変化したことが分かった。以上、水素曝露などによる組成変化や欠陥生成が当該セラミックの水素同位体脱離挙動を変化させることが分かった。

（4） 本発表の注目点

アルゴンガス流入下のタングステンの重水素保持・脱離挙動を調べ、照射粒子束が非常に大きくなる核融合炉環境下では、アルゴンガス流入が壁コンディショニング条件や運転スケジュール等に大きく影響する可能性があることを指摘した。

また、新型チタン酸リチウムセラミックの水素同位体脱離挙動を調べ、炉の運転に伴う組成変化や欠陥形成により、当該セラミックからのトリチウム回収効率が変化する可能性があることを指摘した。

研究発表データシート

【8】	猿渡　亜由未 北海道大学大学院 環境フィールド工学部門・助教	

発表タイトル	海洋エネルギー発電（潮流，海流，波力）
サブタイトル	流れ，波エネルギーの特徴と装置設置による影響

（１） 研究者のアピールポイント

専門は海岸工学で，波浪推算，高潮評価，海洋エネルギーポテンシャルの評価，波しぶきと海上気象などに関する研究を行っています.

（２） 本発表研究の概要

海上に吹く風のエネルギーを受け発達し海岸に打ち寄せる波，潮の満ち引きと共にもたらされる潮流，これらは海に賦存する新たな再生可能エネルギーとして注目されています．本発表では海洋エネルギー発電のプロジェクト事例を紹介します.

（３） 本研究発表の詳細

北海道と本州の間に位置する津軽海峡は豊饒な漁場として古くから水産業が活発に行われてきましたが，近年では潮流海流発電の適地としても注目されています．最小幅が約 19 km の狭い水路状地形の津軽海峡狭窄部ではピーク流速が約 2 m/s にもなります. 津軽海峡に面する函館市はこの速い流れを利用して海洋エネルギー発電を行う計画を進めています.

津軽海峡内の流れは，日本海から太平洋へと抜ける海流である津軽暖流と，日周期の変動が卓越する潮流との合成流となっています．津軽暖流の流速と潮流のピーク流速は同程度であり，日本海側への潮流は津軽暖流により打ち消されます．そのため海峡内の流れの向きは基本的に東向きに安定しており，発電装置の設計において有利な条件となっています.

ディフューザを発電タービンに装着して流れを増幅させることにより，より有効に流れエネルギーを利用することができます．本プロジェクトで使用を検討しているディフューザの装着により流速は約 1.6 倍，流れエネルギーは約 4 倍に増幅されます．ディフューザの使用によりエネルギーの増幅を図れる一方で，周囲の流速場は乱されるため発電装置背後の流れ場への影響は大きくなります．本発表ではディフューザ周囲の流れ場の変化を詳細に検討するために行った三次元流れ解析の結果もお見せします.

【8】続き

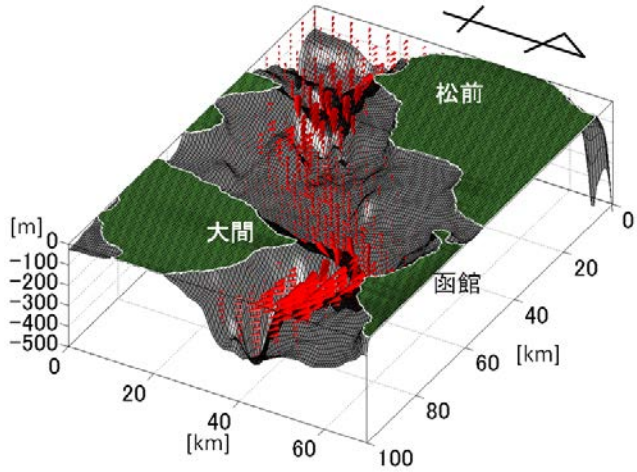
（4） 本発表の注目点

・近年新たな再生可能エネルギー源の一つとして注目される海流，潮流，波浪のエネルギーのポテンシャル分布と，発電の適地選定を行っています.

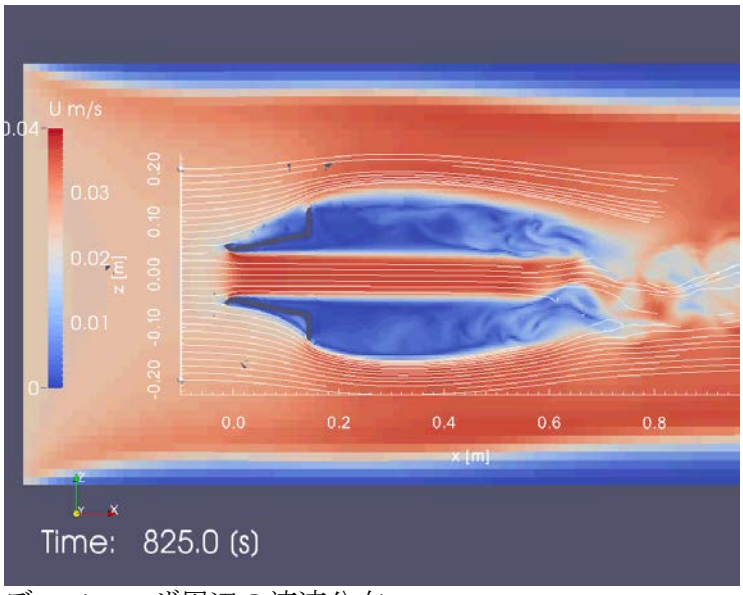
・函館市が現在進めている津軽海峡の海流，潮流エネルギー発電のプロジェクトについて紹介します.

・それぞれ特徴の異なる日本海と太平洋とを繋ぐ津軽海峡内における流れの特徴について紹介します.

・ディフューザによる流れエネルギーの増幅効果と後流への影響について説明します.



三次元流れモデルにより再現した津軽海峡内の流速分布



ディフューザ周辺の流速分布

研究発表データシート

【9】	氏名　上田　多門 北海道大学大学院工学研究院 北方圏環境政策工学部門・教授	

発表タイトル	新しいコンクリート内部劣化評価技術を用いたコンクリート構造物の性能評価法
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

研究者は，内部劣化評価技術の一つの柱であるコンクリートの劣化シミュレーションのための統一モデル構築に関する一連の研究を 10 年以上にわたり実施しており，35 編の研究論文，14 回の国際会議・海外での招待講演，4 回の国内外の論文賞，10 の国内外からの競争的研究資金助成等，その成果は広く国内外で評価されている．中国（浙江大学，深圳大学）と国際共同研究，土木研究所と国内共同研究を実施中でもある．

（２） 本発表研究の概要

本研究は，社会問題となっている各種構造物の劣化への対策技術として必要な，コンクリート部材内部の劣化損傷評価技術である．本研究での技術は，部材劣化シミュレーションの統一モデル構築と，超音波内部損傷探査に基づく CT 技術の２本柱からなる．統一モデルに関しては，荷重（静的と疲労）と凍害（塩害との複合劣化を含む）による損傷シミュレーション法を開発済みで，3 次元部材シミュレーション法を開発中である．超音波内部損傷探査 CT 法は，土木研究所と共同開発中で，小型供試体では実証済みである．

（３） 本研究発表の詳細

コンクリート構造物の劣化・損傷要因は多岐にわたり，その劣化・損傷機構が十分に解明されているとは言えない．特に，直接観察できないコンクリート部材内部の劣化損傷状況の把握は確立した技術はない．

本研究では,劣化損傷したコンクリートのメソスケール統一モデルを適用した数値実験により，劣化損傷したコンクリートのマクロスケール材料モデルを構築し，３次元非線形有限要素解析（構造解析）と水分・温度移動解析とを組み合わせた，コンクリート部材内部の劣化損傷分布のシミュレーションと，この劣化損傷分布を内包するコンクリート部材の性能予測を行う．本発表では，メソスケール統一モデルの解説，それを用いた荷重（疲労）と凍害との複合劣化シミュレーション結果の紹介，このシミュレーションに基づいた数値実験によるマクロな劣化損傷コンクリートモデルの提示，３次元有限要素解析の紹介などを行う．

これと並行して，現場で適用可能なコンクリート部材内部の３次元劣化損傷分布探査法を開発する．これは，超音波伝搬速度に基づく CT（Computerized Tomography）手法である．現時点では，弾性波を適用した類似の手法があるが精度は十分ではない．小型供試体に対しては，十分な精度で精緻な劣化損傷分布の測定が可能なことを確認済みである．寒地土木研究所と実験室で凍害を受けた実大寸法の床版供試体，及び，実際の道路から取り出した劣化損傷した床版を用いて，超音波内部損傷探査 CT 法により３次元の損傷分布測定を行う．本発表では，本研究における CT 手法の説明，CT 手法を用いた小型供試体の２次元損傷分布測定結果の紹介，前述の損傷分布シミュレーション結果との比較の紹介，実験室で凍害を受けた実大床版と実際の道路から取り出した劣化床版の説明，これらの床版に対する 3 次元 CT 手法の紹介などを行う．

【9】続き

（4） 本発表の注目点

数値解析モデルを適用して，コンクリートの凍害による劣化をシミュレーションする技術は本研究者のグループ以外に世界的にも例を見ないものである．また，このモデルは他の劣化損傷シミュレーションにも適用できるものであり，疲労による劣化損傷，さらには，疲労と凍害による複合劣化損傷，低温下の強度増進効果もシミュレーションできるものである．現在，日本の，特に寒冷地で社会的問題となっているコンクリート床版の劣化損傷評価や予測に有用なツールとなる．

本研究で提示する超音波伝搬速度測定と CT を組合せた内部損傷分布測定は，小型供試体の段階ではあるが，他の類似の手法と比較して，損傷測定（損傷水準，分布状況）の精度が高くより有用である（**図1**，**図2**）．前述の内部損傷シミュレーションと組み合わせることにより，お互いの結果の信頼性を高めることも可能となる（**図2**）．

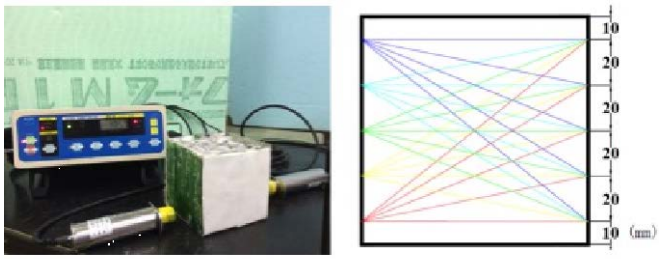


図１ 超音波伝搬速度測定２次元ネットワーク

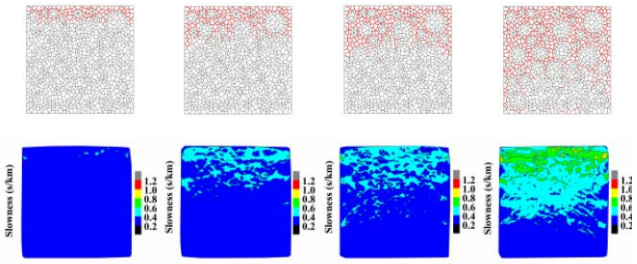


図２ ２次元損傷分布推定

（注：**図2**の上図はシミュレーション結果，下図は CT による測定結果）

研究発表データシート

【10】	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手法の開発
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」－北国の都市デザイン－」
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

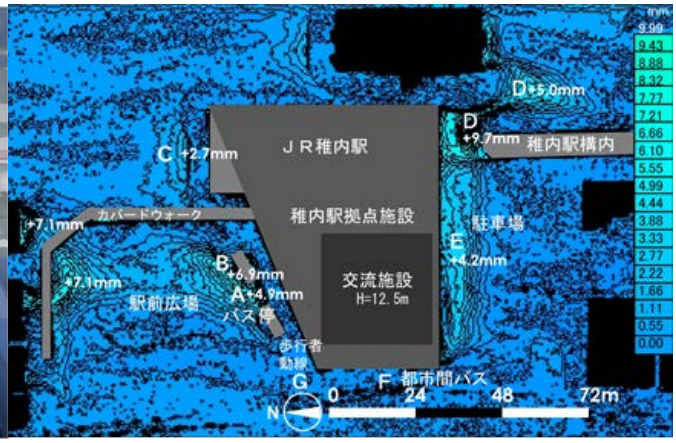


図2　稚内駅再開発計画における風雪シミュレーションの結果

【10】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にくい、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。

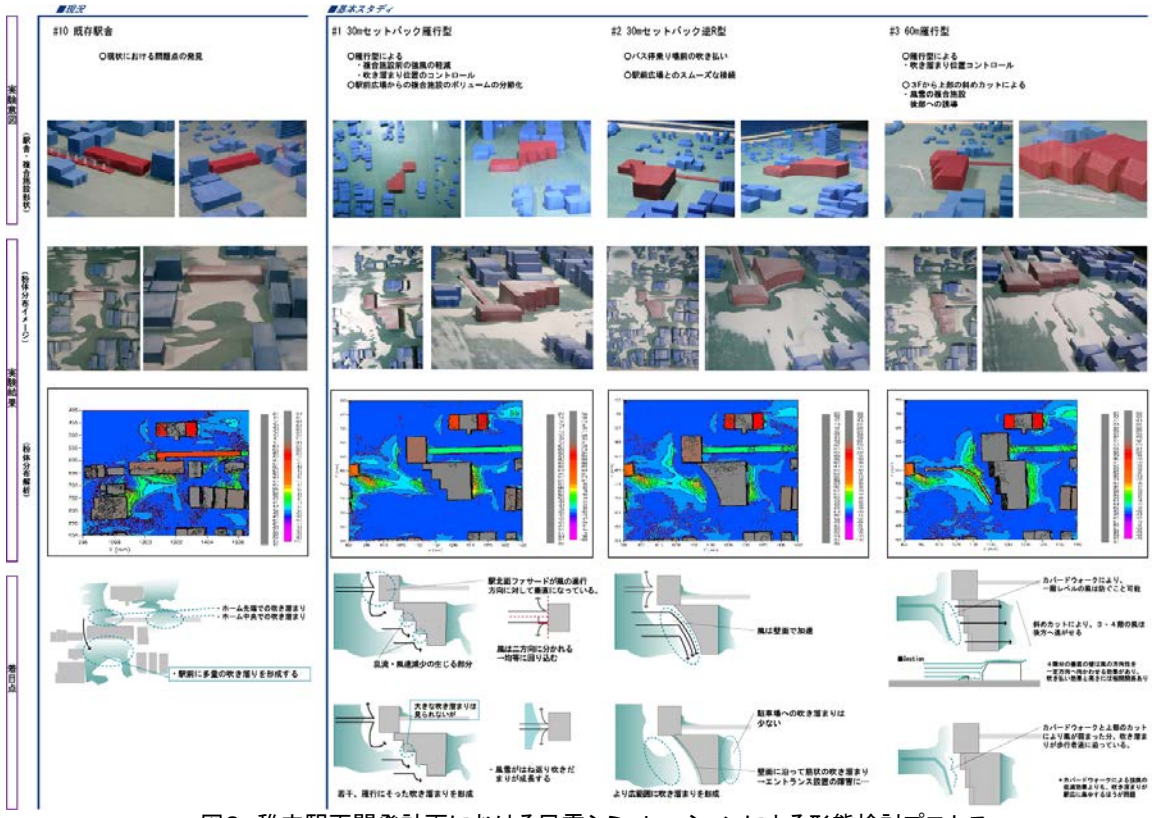


図3 稚内駅再開発計画における風雪シミュレーションによる形態検討プロセス

（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」

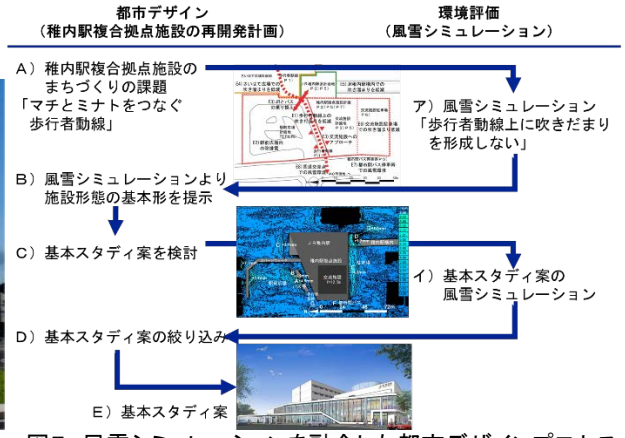


図5 風雪シミュレーションを融合した都市デザインプロセス

研究発表データシート

【11】	氏名　岡崎　太一郎 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	接着剤による鋼構造の実現に向けた基礎実験
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

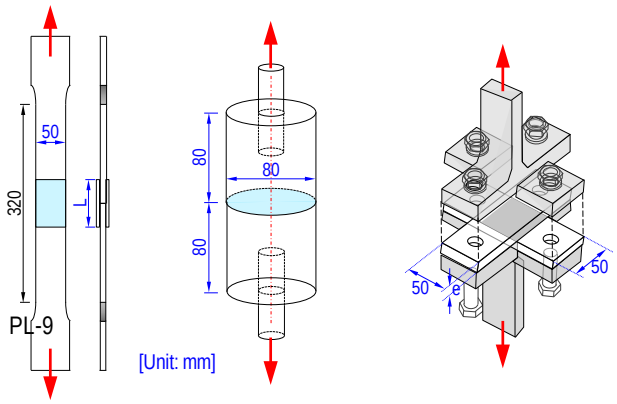
地震に対して安全な建物、地震に強い都市を設計する方法を考える、耐震工学を専門にしています。鉄鋼で構成された建築構造が、地震を受けてどのように挙動するか、どのように損傷し壊れるかを実験的に解明し、その知識をもとに合理的な設計方法を開発する研究を得意にしている。

（２） 本発表研究の概要

鉄鋼材料の接着は、種々の産業分野で普及しており、建築鋼構造に適用可能な強度を有する構造用接着剤もすでに開発されている。しかし、現段階では、建築鋼構造の実寸法と実条件を反映した接着接合の設計・施工方法は確立されていない。そこで、鋼材の接着接合の力学的特性を確認する材料試験を多数実施した。また、実用例として、H 形鋼のフランジとウェブをそれぞれ二面せん断接着する継手接合を考案し、耐力予測式を提案し、その設計式の妥当性を検証するために三点曲げ試験と四点曲げ試験を実施した。

（３） 本研究発表の詳細

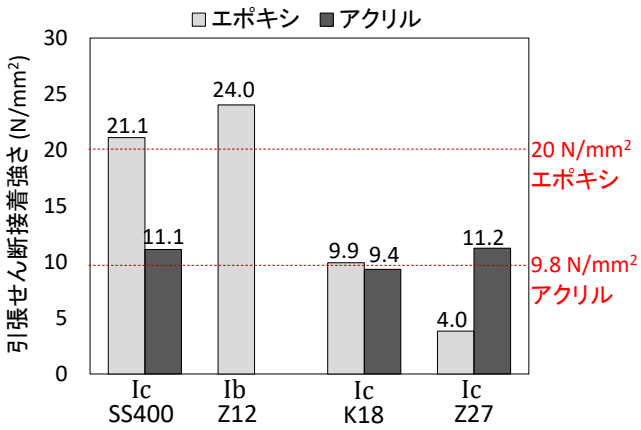
図に示す試験体を用いて、引張せん断接着強さ試験（純せん断に近い条件）、引張接着強さ試験（純引張に近い条件）、剥離接着強さ試験の 3 種の材料試験を行った。各試験について、被着鋼材の表面状態（ショットブラスト処理、メッキ鋼板ではメッキ厚）、接着剤種（エポキシ系、アクリル系）、接着面積、接着厚、鋼材の板厚などを主パラメータに、多数の実験を行った。各実験の結果に基づき、各パラメータが、破壊強度と破壊の種類（界面破壊、凝集破壊）に与える影響を分析し、下記の知見を得た。



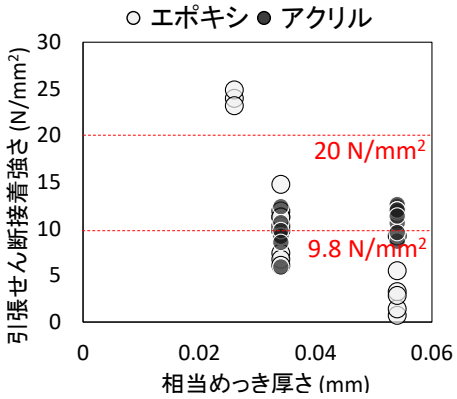
接着試験

1) 引張せん断接着強さ試験では、鋼材種に関わらず、エポキシ系接着剤は脆性的な破壊性状を、アクリル系接着剤は粘りのある破壊性状を示した。
2) エポキシ系接着剤は、被着鋼材のめっきの影響を受けやすく、相当めっき厚が大きいほど界面破壊が卓越し、ショットブラスト処理を施した場合の 1.5 から 4 割程度の強度示した。
3) アクリル系接着剤は、応力状態や被着材の鋼材種によらず凝集破壊が卓越した。めっきや接着長さの影響を受けにくく、メーカーが示す参考値に近い強度を示した。
4) 接着層にせん断応力が働く場合、接着厚さが薄いほど接着強さが大きい傾向があった。

【11】続き



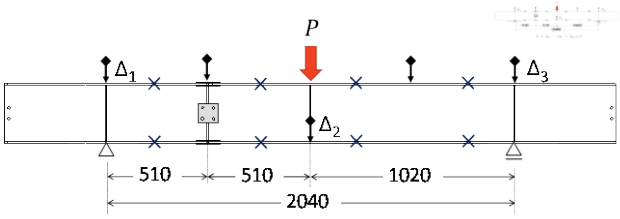
引張せん断接着強さの比較



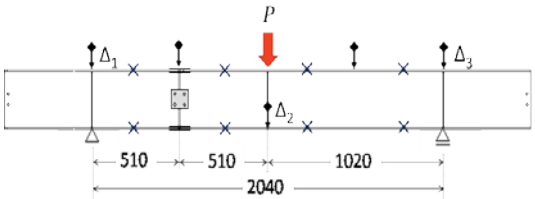
めっき厚さと接着強さの関係

図に示す曲げせん断試験によって、接着梁継手の破壊実験を行った。載荷方法（3 点曲げと 4 点曲げ）、接着剤種接着剤種（エポキシ系、アクリル系）、継手の寸法と形状（4 種）、併用ボルトの有無、フランジ継手が一面せん断か二面せん断かの違いなどをパラメータとして、接着梁継手の耐力を測定し、破壊形態を観察した。これまでに、下記の知見を得ている。

1) エポキシ系では、継手耐力が予測の 59 から 98%にとどまり、継手寸法が大きいほど予測と乖離した。
2) アクリル系では、継手耐力が予測の 110%以上の達した。
3) ボルトを併用した場合も、継手耐力は接着剤だけで決まった。接着接合が破壊したあとではじめて、ボルトの支圧抵抗が発揮された。



$\Delta = \Delta_2 - (\Delta_1 + \Delta_3)/2$



$\Delta = \Delta_2 - (\Delta_1 + \Delta_3)/2$

梁継手試験

（4） 本発表の注目点

- 構造用接着剤を利用した鋼材の接合は、溶接やボルト接合と比較して、工程を簡略化でき、現場で機械器具を要せず、寸法誤差に寛容であるなど幾多の優位性が期待できる。
- 鋼板の表面状態、鋼材の寸法、応力の種類（引張・せん断・剥離）、接着剤の種類（エポキシ系とアクリル系接着剤）、などが接着接合の力学的性能に与える影響を実験的に確認した。
- 構造用接着剤による H 形鋼の継手接合について、耐力予測式の精度と信頼性を検証した。

研究発表データシート

【12】	森　太郎 北海道大学大学院工学研究院 空間性能システム専・准教授	

発表タイトル	地図情報を利用したパッシブソーラーデザインの分析
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

建築物に関係する日射，室内環境，エネルギーのシミュレーションを専門としています．その他，建物の室内環境，エネルギー消費量の実測，中古住宅流通の仕組みの検討等を実施しています．

（２） 本発表研究の概要

世界の温暖化ガス消費量の 1/3 は建設関連と言われています．そのため，建物の省エネルギー化が喫緊の課題となり，国も ZEB（Zero Energy Building）や ZEH（Zero Energy House）を後押ししています．このような建物のデザインの一つにパッシブソーラーデザインがあります．太陽電池等の創エネ機器に頼らずに窓から入射する日射を利用して，省エネルギーを図るデザインですが，そのため，地域の気候だけでなく，建物の建てられている場所の状況にパッシブソーラーデザインの成否が左右されます．本，発表研究では，近年，量と質（精度）が飛躍的に進歩した地図情報を用いてパッシブソーラーデザインの評価を行う手法について説明します．

（３） 本研究発表の詳細

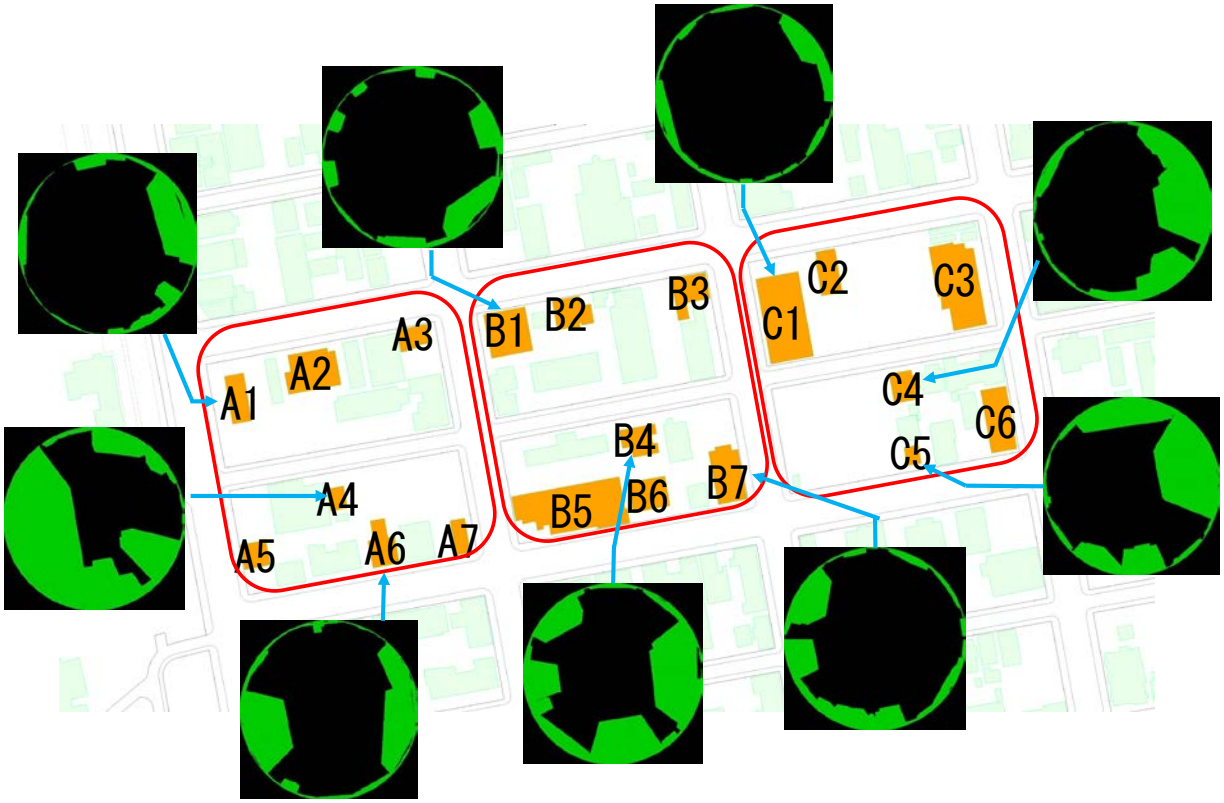
①研究の概要：近年，地球環境問題，また，エネルギーの供給不安定の問題が顕在化し，一次エネルギー消費量の削減は喫緊の課題になっている．そのなかにあって，建設関連分野は一次エネルギー消費量の 1/3 を占め，省エネルギーが求められる分野となっている．北海道の住宅は，産官学の連携による長年の事業推進の結果，新築住宅の断熱・気密性能については世界でもトップクラスの性能を持つようになってきているが，寒冷な気候ゆえ，エネルギー消費量は依然として全国でトップクラスであり，また，断熱性能の向上に関しては，現状の材料ではこれ以上の性能向上は難しくなってきている．そこで，最も身近な再生可能エネルギーである，太陽エネルギーの利用についての検討が必要であるが，太陽エネルギーは，特に都市内において，周囲の建物による影の影響を受け，場所によって大きくばらついてしまうため，どの建物でも同じような利用方法をすれば良いわけではなく，その立地に適した太陽エネルギーの利用方法が必要である．しかし，立地に関する分析は①周囲の建物のモデル化をどのように行うのか，②モデル化した結果をどのように使うべきなのかがいずれも難しく，あまり実施されていない．

本研究では，近年，急激に整備が進んできている GIS データを用いて，札幌市の全ての建物の周辺状況を画像データとしてデータベース化し，web からダウンロードできるようにすること，また，その画像を用いて，札幌市内の建物のエネルギー消費量の分布を把握し，最適な省エネルギー手法，再生可能エネルギーの導入可能量について分析を行った．もちろん，日射の影響を詳細に解析できる熱負荷計算ソフトウェアや手法は存在している．しかし、これらのシミュレーション手法は 3D モデリングを用いて外部環境を再現しシミュレーションを行うため、計算負荷が大きく、多くの時間を必要とする。そこで本研究では計算時間の短縮化を図り、より多くのパラメトリックスタディを行うため、GIS データより抽出した敷地周辺の建物を正射影画像で再現し、

【12】続き

その画像より日射量を算出する手法を提案した。また、算出されたデータを用いて日射量、暖房負荷に対して外部環境が及ぼす影響を検討した。

②手法：GIS データより取得した建物の情報をもとにシミュレーションの対象とする地点の周辺環境を正射影画像で再現し（下図)、その地点に入射する日射量を算出できるようにした。具体的には，下図に太陽位置をプロットし建物に重なっていれば直達日射量は 0，それ以外であれば，気象データの値を利用し，また，拡散日射量に関しては，気象データに図から計算される天空率を乗じて求めた．本手法はあらかじめ GIS データから画像を作成するため画像の作成には時間がかかるが，その後の計算は非常に早く，障害物の計算が可能なソフトで二つの手法を比較した結果，本手法の計算時間は 1/150 となった．



（4） 本研究の注目点

①近年，進化が著しい地図情報を用いている点

②近年，断熱工法や窓性能が飛躍的に進化している中でパッシブソーラーデザインを再考するための技術資料を提供できる点

③今後は地図情報からシミュレーション用の形状モデリングを自動実施することで，地域のエネルギーシミュレーションを実施する予定である．現在，このようなシミュレーションは原単位をもとに実施されていることが多く，より詳細な分析が可能になると考えられる．

研究発表データシート

【13】	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・教授	

発表タイトル	次世代創エネ型水処理システムの開発
サブタイトル	膜分離型 MFC と CANON プロセスを融合した無曝気・高効率・創エネ型水処理システム

（１） 研究者のアピールポイント

膜分離型 MFC プロセスと CANON プロセスを組み合わせた下水処理システムは我々のオリジナルな発想である。ほとんど曝気を必要としない汚泥発生量の極めて少ない下水処理システムであり、学術的および社会的にも意義の高い研究である。

本研究の遂行にあたり、i) アナモックス細菌および電気生産細菌の培養に精通していること、ii) 膜分離技術に精通していること、および iii)MFC のデザイン及び運転に精通していること、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。

（２） 本発表研究の概要

最も深刻な地球環境問題は水資源とエネルギー不足である。この 2 つの問題を同時に解決できる方策として、都市下水を高度に処理しながらエネルギーを回収し、処理水を水資源として再利用できる下水再生技術の開発が強く望まれている。下水処理には、現在、我が国の総電力消費量の約 0.7%(約 72 億 kWh) （内訳：約 30-50%が汚泥処理・処分、40%が活性汚泥法の曝気）が費やされており、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。

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、かつ膜分離技術（MBR）と融合した、膜分離型バイオ燃料電池(MFC)と CANON プロセスを組み合わせることにより、無曝気で高度の有機物、窒素、懸濁物（SS)、病原細菌の除去、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。

（３） 本研究発表の詳細

世界各地で深刻な水不足とエネルギー不足が生じている現在、我が国でも総電力消費量の約 0.7%を下水処理に使用している。低炭素循環型社会構築のためには、水不足を解消すると同時に省エネルギー、可能ならば創エネルギー型高度下水処理システムが求められる。また、水ビジネスの国際競争の激化する今日、革新的な技術開発が求められている。申請者はこれまでに、環境微生物の持つユニークな機能を利用したバイオ燃料電池（MFC)、膜分離活性汚泥法（MBR)、および CANON プロセスの構築、最適化を図り、単独で下水処理システムへの適用を目指して研究を行ってきた。

しかし、それぞれのプロセスには欠点がある。例えば、CANON プロセスは C/N（BOD/NH_4^+）

【13】続き

が高い下水には適しないうえ、処理水中に NO_3^- 残留するため後段処理を必要とする。また、MFCでは十分な窒素および懸濁態有機物(SS)の除去が期待できない。さらに、両プロセスの単独使用では処理水水質の向上（有機物、窒素、懸濁物（SS）の除去）が必要不可欠となる。水質向上のためには酸素供給（曝気）が必要であるが、曝気を行うと消費エネルギーおよび発生する汚泥量が増大する。そこで、MFC、CANON、お膜分離プロセスを融合し、無曝気で高度下水処理と電気エネルギーの同時回収を可能とする新規創エネ型下水処理システムの開発に至った。

（４） 本発表の注目点

本研究で開発する次世代創エネ型下水処理システムは、下水（汚泥）から電力を直接回収可能なため、従来のメタン発酵プロセスと比較して、①システムが簡素である、②エネルギーロスの低減が可能になりエネルギー変換効率が高い、③副産物は水のみである。さらに、発生する余剰汚泥量の大幅な削減が可能であり、汚泥処理（汚泥の濃縮、焼却、埋め立て処分など）に係る消費エネルギー（電力）の大幅削減と、下水汚泥焼却のためのコストと焼却時に発生する CO_2 量を削減することが可能となる。下水汚泥処理水を同時に処理するため、水質汚濁を防止できる。回収した電力は下水処理施設内の補助電力として利用可能なため、自律分散型の下水汚泥処理システムを構築できる。また、本システムは、種々の未利用農業・畜産廃棄物（家畜排泄物など）や食品廃棄物などの処理に応用することで廃棄物処理と同時に付加価値の高いクリーンエネルギーや資源を生産できる大変有望な技術へと発展する。さらに、余剰汚泥の処理費用・エネルギーを大幅に削減し、かつ発電・資源回収までできる本システムは、画期的な環境調和型有機性廃棄物処理技術となると考えられる。

研究発表データシート

【14】	氏名　児玉　淳一 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	寒冷環境で使用される構造材料の劣化診断・寿命予測システムの開発
サブタイトル	

（１） 研究者のアピールポイント

もともとの専門は岩盤力学です。寒冷地特有の岩盤斜面の安定性評価に係る問題に取り組んできました。今後は岩石・岩盤に拘ることなく，広く構造材料を対象に「寒冷地特有の力学体系の構築」を目指して研究開発を進めたいと思っています。

（２） 本発表研究の概要

寒冷地の構造材料が暴露される過酷な環境条件，すなわち，力が加えられた状態で凍結融解作用を受けるときの構造材料中の損傷の発達や劣化を診断できる試験システムと 2,3 の研究事例を報告し，診断結果に基づいた寿命の予測手法の概要について説明します。

（３） 本研究発表の詳細

北海道のような寒冷地で供される構造材料には，自重や外力などの力と凍結融解作用が同時に作用する場合があります。今までは専らそれぞれの影響について検討されており，損傷の発達のプロセスや寿命の予測方法などの研究が行われてきています。しかし，実環境のように両者が同時に作用するときの挙動については，未解明な点が多々あり，例えば力の作用と凍結融解作用による相乗的な損傷の発達の有無などについては全く知られていません。このため，このような環境下における寿命の予測方法は確立されていません。本研究では，まず，下記の性能を有する材料試験装置，温度制御装置，計測装置を組み合わせ，任意の力を負荷しながら同時に凍結融解作用を与えることのできる試験システムを構築しました。

■材料試験機
○最大荷重: 200kN
○実施可能な試験:ひずみ速度を制御した圧縮試験・引張試験，クリープ試験，繰返し載荷試験，応力緩和試験など
■温度制御装置
○温度範囲: -30℃～+80℃
○温度パターン:一定温度，昇・降温速度一定
○これらの任意の組合せと繰返し
■変形の計測
○低温用ひずみゲージ
○軸方向変位計，径方向変位計
■微小破壊音(Acoustic Emission)の計測
○低温用 AE センサー，

図１　試験システム

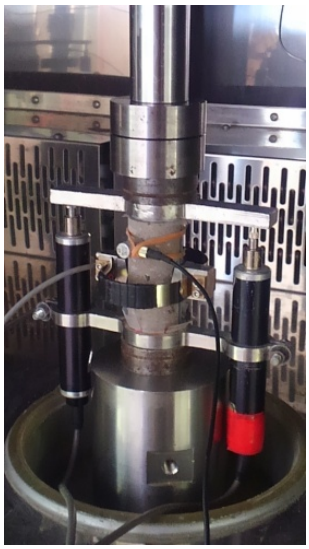


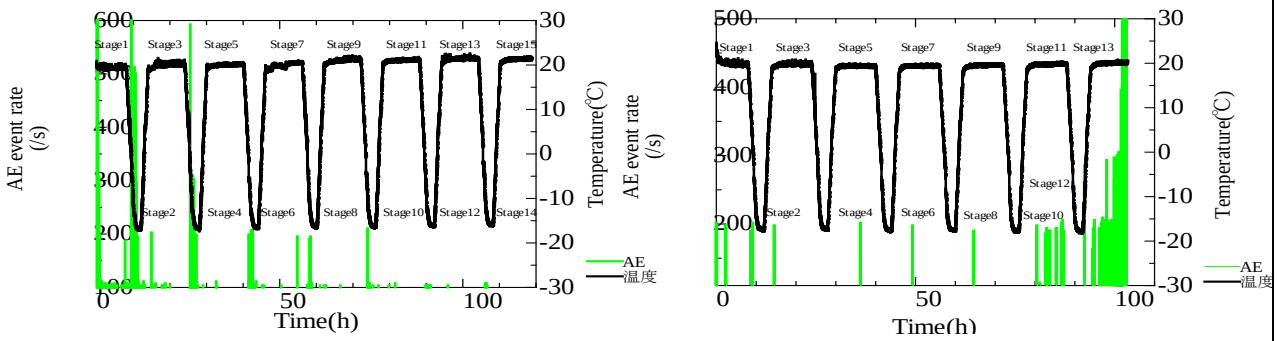
図２ 計測システムの例

【14】続き

そして，変形と微小破壊音（Acoustic Emission）の測定から，力と凍結融解作用を同時に受けるときの構造材料の損傷の発達の特徴について実験的に検討するとともに，損傷力学と粘弾塑性論に基づいた損傷の発展則と構成則を提案し，実用的な寿命の予測方法の開発に取り組んでいます。

■試験結果の一例：

図 3 は，一定の大きさの応力を負荷して，温度を+20℃～-20℃の間で繰返し変化させたときの微小破壊音の発生状況と変形の進行の様子です。微小破壊音（AE）は最初の段階では凍結時に発生していますが，破壊の直前になると融解時に発生していることがわかります。また，このとき変形は時間とともに次第に増加し，破壊の直前で急増しました。このように，AE の発生状況と変形速度から損傷の進行の診断や破壊の予測ができます。



(a)応力レベル 65%　　(b)応力レベル 70%

図 3 微小破壊音（AE）の発生頻度

■開発中の損傷の発展則と構成則

応力や凍結融解作用により，き裂が発生・成長するなど，損傷 D が発達するとします。また，損傷の発達により実質的な応力 $\tilde{\sigma}$（実効応力：実際に）が増加すると考えます。すると外力が変わらなくても材料内部の $\tilde{\sigma}$ や D が変化するため，ひずみが増加することになり，ひずみの増加傾向から寿命が予測できます。損傷の発展則を実験から求めることが本研究のキーポイントです。また，損傷の発展則に非対称性を導入すると損傷の異方性を表現することも可能になります。

○損傷による実際の応力（実効応力）：

$$\tilde{\sigma} = \sigma(I - D) \quad \cdots\cdots(1)$$

○粘塑性ひずみ増分：

$$\frac{d\varepsilon_{vp}}{dt} = \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{dp}{dt}\frac{\left(\dfrac{3\tilde{S}}{2\tilde{\sigma}_{eq}} + \dfrac{\alpha(I-D)^{-1}}{3}\right)}{\left\|\left(\dfrac{3\tilde{S}}{2\tilde{\sigma}_{eq}} + \dfrac{\alpha(I-D)^{-1}}{3}\right)\right\|} \quad \cdots\cdots(2)$$

p: 相当塑性ひずみ，$\tilde{\sigma}_{eq}$:相当実効応力，$\tilde{S}$:偏差実効応力, α:材料定数

（4） 本発表の注目点

・寒冷地の環境を室内で再現
・低温下における計測
・応力の作用と凍結融解作用のハイブリッド効果という新しい概念の提案
・実験（現象の把握）から理論的な展開（損傷則と構成則）までの総合的なアプローチ

研究発表データシート

【15】	氏名　能村　貴宏 北海道大学大学院工学研究院 附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター 准教授	

発表タイトル	省エネルギーと新エネルギー利用促進のための次世代蓄熱技術
サブタイトル	

（１）研究者のアピールポイント

今まで一貫して、蓄熱技術に関する研究に従事してきました。「蓄熱材料の開発（材料科学）から蓄熱熱交換器の設計/開発（伝熱工学）および蓄熱システム全体のエクセルギー解析（プロセス工学）など、工学の学問領域を横断して、研究を推進しています。その結果、本発表で紹介する「高温蓄熱技術」の領域を開拓しつつあります。また、今年度より IEA 蓄熱分科会 Annex30「低コストで効率的なエネルギー管理と CO_2 削減に貢献する蓄熱材料」の専門委員として活動の場を拡大しています。蓄熱技術に関する研究の歴史を概観すると、北海道大学の諸先輩方が重要な研究を担ってきたことがわかります。その志を受け継ぎ、蓄熱分野の“日本代表”として北海道大学を盛り上げていきたいと考えています。

（２）本発表研究の概要

蓄熱技術は、顕熱蓄熱、潜熱蓄熱、および化学蓄熱の３つの種類に分類できます。我々は特に、固液相変化時の潜熱を利用して、融点一定温度で高密度に熱貯蔵、熱供給可能な潜熱蓄熱法（**図1**）に着目しています。潜熱蓄熱材料をマイクロカプセル化できれば、蓄熱のみならず、熱輸送、熱制御用途への展開が可能となります。今まで、500°C 超の高温域で利用可能な蓄熱技術はセラミックスを利用した固体顕熱蓄熱技術に限られており、極めて低蓄熱密度であることが大きな課題でした。我々は 500°C 超の高温域で利用可能かつ、極めて高蓄熱密度（従来比 5 倍以上）の潜熱蓄熱マイクロカプセルを開発することに世界で初めて成功し、高温蓄熱技術の新領域を開拓しつつあります。

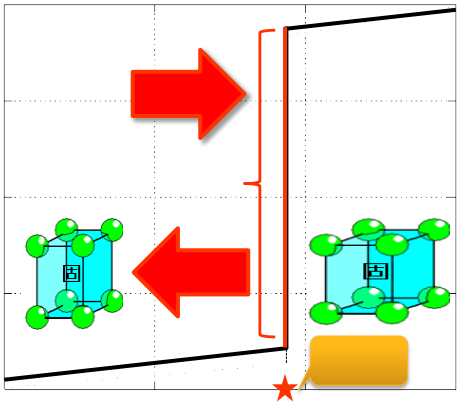


図１ 潜熱蓄熱技術の原理

【15】続き

（３）本発表研究の詳細

500 ˚C 超に融点を持つ Al 基合金を新たに潜熱蓄熱材として見出し、この合金のマイクロ粒子（約 20μm～）へ化成/酸化処理を巧みに施すことで（**図 2** 左上：マイクロカプセル作成方法）、コア（Al 基合金）–シェル（Al_2O_3）型潜熱蓄熱マイクロカプセルの開発に成功しました（**図 2** 右上：作製した潜熱蓄熱マイクロカプセルの SEM 画像）。このマイクロカプセルは固体顕熱蓄熱材と比べて約 5 倍以上の高蓄熱容量（**図 2** 右下および左下：作製した潜熱蓄熱マイクロカプセルの熱分析結果）を持ち、機械的特性に優れます。また、シェルが Al_2O_3 であるため「セラミックス粒子」として扱えます。即ち、現行セラミックス顕熱蓄熱技術の利用形態を継承したまま性能をグレードアップできる画期的な蓄熱材料です。

（４）本発表研究の注目点

潜熱蓄熱マイクロカプセルは他の材料との組み合わせることでその材料（例えば触媒など）に蓄熱/熱制御機能を付与できます。よって、様々な分野とのコラボレーションにより高温領域の蓄熱・熱輸送・熱制御技術の新基盤の確立が期待できます（**図 3**）

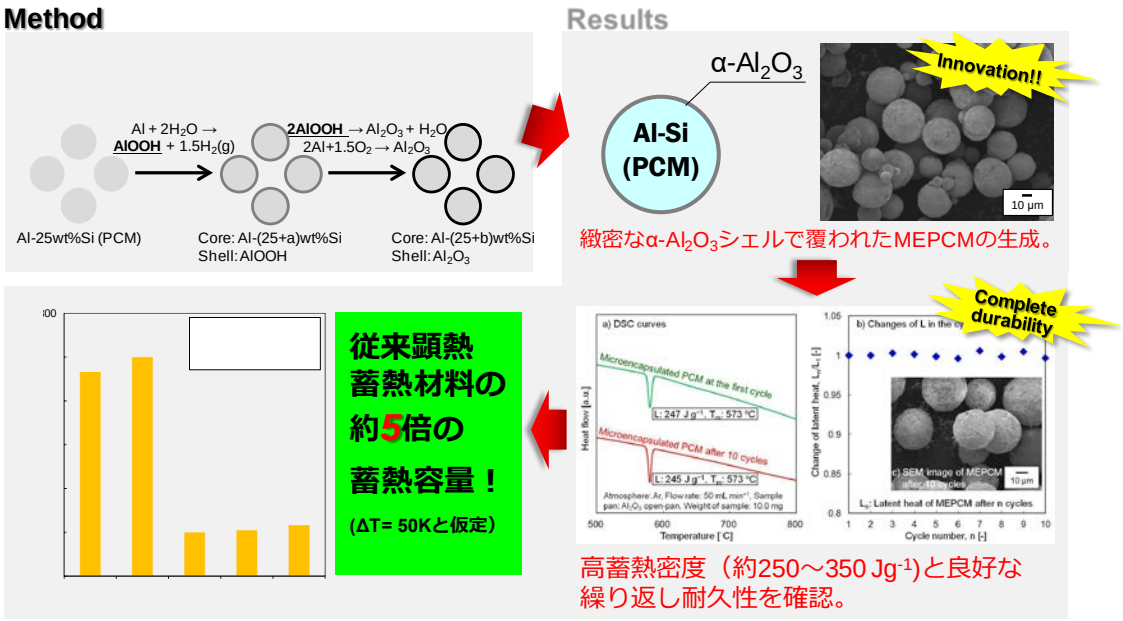


図２　潜熱蓄熱マイクロカプセルの製造法、外観、および性能

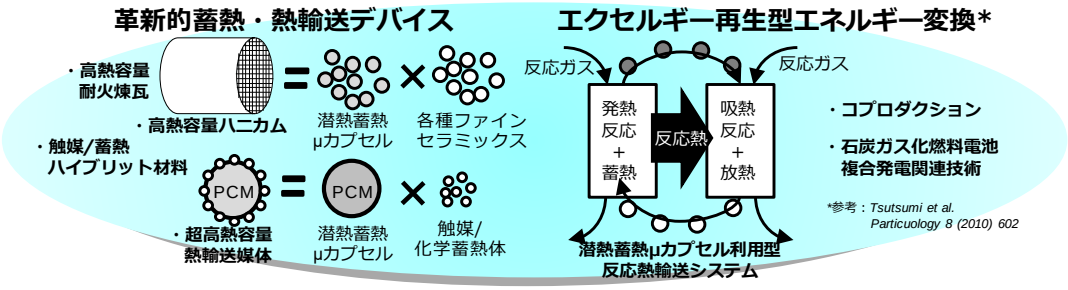


図３　高温領域の蓄熱・熱輸送・熱制御技術の新基盤

研究発表データシート

【19】	氏名　喜田拓也 北海道大学大学院情報科学研究科 情報理工学専攻・准教授	

発表タイトル	グラフに含まれる大きな内周を持つ部分グラフの列挙
サブタイトル	

（1） 研究者のアピールポイント

大量のデータから役に立つ情報や知識を取り出す技術について研究しています。具体的には、検索キーワードと関係のあるデータを抽出するための文字列パターン照合手法や索引データ構造の研究、大量のデータを効率よく扱うためのデータ圧縮技術の開発、膨大な量のデータから役に立つ規則を見つけ出すデータマイニング技術などの研究を行っています。また、これらの基礎理論としてアルゴリズムや計算量理論、機械学習理論に関する研究を行っています。

今回の発表は，同研究室の教授で共同研究者の有村博紀教授が主として指導している博士課程学生である栗田和宏君の研究テーマに関するものです.

（2） 本発表研究の概要

本研究では､データマイニング技術の基礎技術となる列挙アルゴリズムの研究を行っています。列挙アルゴリズムとはデータに含まれる、ある条件を満たすデータをもれなく見つけ出すアルゴリズムです。特に、本研究ではグラフと呼ばれる構造の中から、ある条件を満たすグラフの部分をもれなく、高速に見つけ出す研究を行っています。グラフは実世界のデータを表現するためによく使われる構造です。グラフで表現されるデータの具体例として、道路ネットワーク、タンパク質構造、SNS 等のソーシャルネットワークなどが挙げられます。これらのデータから役に立つ規則を見つけ出す手法の一つとして、ある制約を満たす部分グラフの列挙があります。しかし、グラフの部分構造の列挙はとても時間のかかる計算で、単純な計算方法では大規模なグラフデータから構造を列挙することができません。そこで、本研究では理論的に高速な列挙アルゴリズムの開発を行います。

（3） 本研究発表の詳細

本研究では与えられたグラフから内周というパラメータがある整数 k よりも大きく連結な部分グラフを列挙する効率の良いアルゴリズムの開発を行います。グラフの内周とは、グラフに含まれる最小の閉路の長さを表し、グラフが連結であるとは、どんな 2 頂点間でも繋がりがあるグラフを表します。今回は、内周 k 以上な連結な部分グラフを解 1 つあたり O(n) 時間、O(n^3) 領域使用して解を列挙するアルゴリズムを開発しました。ここで、n はグラフの頂点数を表します。このアルゴリズムは分割法と呼ばれるアルゴリズムの構築法に基づいて構築されています。分割法とは、全ての解を含む集合を、グラフのある頂点を含む解と含まない解からなる 2 つの集合に分割を行い、集合の大きさが 1 になるまで繰り返し分割を行うことで、解を列挙する列挙アルゴリズムの構築法の 1 つです。解を含む集合を 2 つに繰り返し分割する際、アルゴリズムは再帰手続きという処理が作る、同じ処理の繰り返し構造を作ります。この繰り返し構造は木構造と呼ばれる構造を作り、この木構造を列挙木と言います。列挙木はアルゴリズムがどのくらい効率よく動作するかを計算する際に重要な役割を果たします。

【19】続き

既存の手法を用いると、上記の分割法を用いることで、解を1つ見つけるのにO(n^2m)時間のアルゴリズムは容易に構築することができます。ここで、m はグラフの辺数を表します。しかし、本研究では、距離行列と呼ばれる、グラフ中の任意の2 点間の距離を記憶するデータ構造を用いて、何度も繰り返し行われている同じ計算の結果を記憶することで、より効率良い計算方法を開発しました。さらに、このアルゴリズムの計算効率を詳細に解析し、容易に構築できる列挙アルゴリズムと比べて理論的に非常に効率良いアルゴリズムを構築することができました。この改善により、大規模なデータに対してこのアルゴリズムを使用する際の計算時間の増加が抑えられるようになりました。

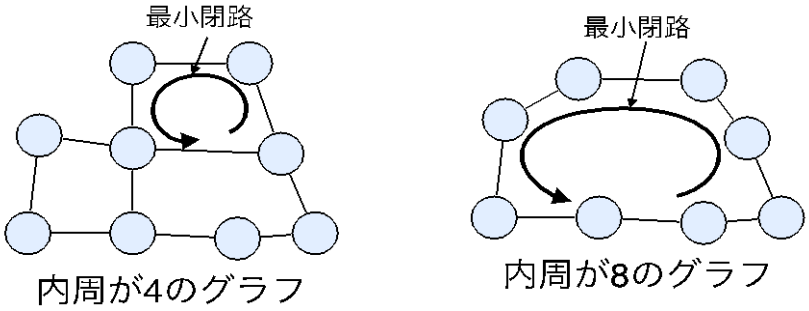


図1: グラフ構造の具体例とその内周

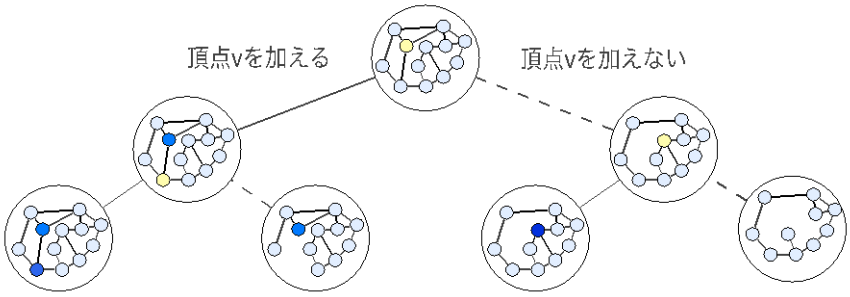


図2: 分割法によってできる列挙木

（4） 本発表の注目点

本研究の注目点は、計算効率に対して理論的保障のあるアルゴリズムの開発を行っていることと、解を１つ見つけるのではなく、全ての解を出力することができるアルゴリズムを研究していることです。計算効率に理論的保障がないアルゴリズムは場合によってはいつまでも計算が終わらない可能性もあります。しかし、本発表のアルゴリズムは理論的な保障があるため、どんなデータに対しても効率よく動作することが保障されています。また、実世界の問題では、アルゴリズムが出力する１つの良い解が見つかっても、それが私たちの欲しい解になっていない場合もあります。出力された解が望んだ解でない場合に、いくつかアルゴリズムに解の候補を見つけるという解決策がありますが、そのような場合には列挙アルゴリズムが有用になります。

研究発表データシート

【24】	冨岡　克広 北海道大学 大学院情報科学研究科 情報エレクトロニクス専攻、集積電子デバイス研究室・准教授	

発表タイトル	半導体ナノワイヤ材料の開拓と省エネ・高機能素子の創成
サブタイトル	新規材料のものつくりから革新的な半導体技術・素子を創り出す

（1） 研究者のアピールポイント

情報科学技術分野、とりわけ半導体エレクトロニクス分野は、スマートフォンに代表されるような携帯電子端末の普及とともに、高性能化と低消費電力化の観点から、革新的な技術・材料・素子の開発が求められます。私たちは、半導体結晶成長技術をもとに、次世代集積システムの実現を目指して新しい集積電子デバイス技術・材料・素子の研究を進めています。研究室では、これらの材料のものつくりから各種デバイスの作製を進めます。研究成果は、国際会議発表や論文報告を通して国内外に発信し、周辺技術の基礎・現状から応用・将来展望まで理解し興味を深めることによって、新たな情報エレクトロニクス技術へと応用すること目的としています。

（2） 本発表研究の概要

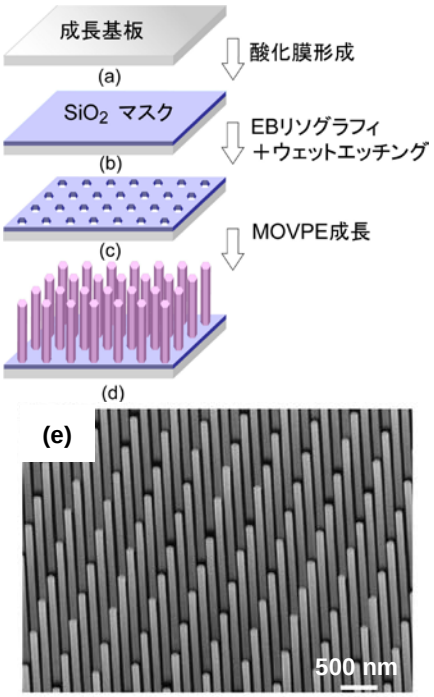
有機金属気相成長(MOVPE)法や分子線エピタキシー(MBE)法などの半導体結晶成長技術を活かして、極微細で高機能な半導体ナノワイヤの作製を行っています。具体的には、自然の摂理を巧みに利用した結晶成長による III-V 族化合物半導体ナノワイヤを作製し、太陽電池や発光ダイオード、トランジスタなどの基本素子から、単一光子源やタンデム太陽電池、トンネルトランジスタなどの、ナノワイヤ材料・構造の物性・幾何的な特徴を活かした新規デバイスの実現と高性能化に取り組んでいます。

（3） 本研究発表の詳細、（4）本発表の注目点

ナノワイヤ結晶成長　半導体ナノワイヤは断面寸法が 20～200 nm 程度、長さ 1 ミクロンから 10 ミクロン程度の 1 次元ナノ細線構造であり、次世代のナノエレクトロニクス・ナノフォトニクス実現のための基本構成要素として注目を集めています。本研究室では、このようなナノワイヤを、選択成長法を応用することで、サイズ・均一性・位置制御性に優れた半導体ナノワイヤ形成技術を確立し、基礎的な電気特性や光学特性の評価を行なっています。

選択成長法では、電子線ビーム露光技術、ドライ・ウェットエッチング技術を応用することで、成長基板に絶縁膜による開口パターンを形成し、成長原料を供給することで、開口部のみにナノワイヤを選択的に形成します。この方法のナノワイヤの形成機構は、結晶の微小面であるファセットの形成機構に従うため、原子層レベルで均一なナノ結晶を形成することができます。

右図(e)は Si 基板上において、垂直配列された GaAs ナノワ

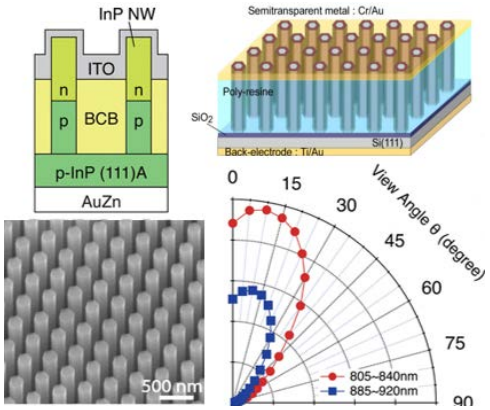


MOVPE 選択成長法【(a) – (d)】と GaAs ナノワイヤアレイの SEM 像(e)

イヤです。このように選択成長法を応用すると、Si の基板などに異種の化合物半導体を集積した構造も実現できるようになります。

ナノワイヤ発光・受光素子応用

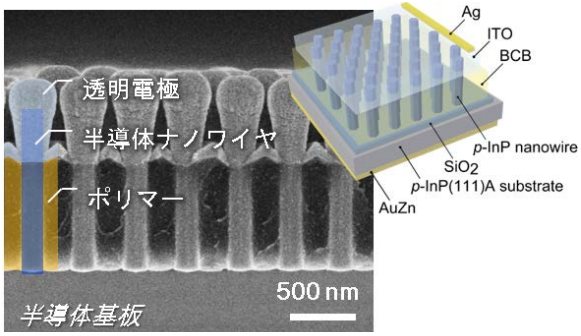
ナノワイヤを用いることによって、微細なナノ構造による微細な発光ダイオード(LED)が作製できます。特に選択成長の利点を活かすと、コア・マルチシェルナノワイヤ構造、つまりナノワイヤを芯（コア）とし、その側壁に半導体多層膜を成膜させたユニークな構造が実現できますので、微細というだけでなく、その幾何的特徴を活かした高輝度の発光素子や、微小領域で動作する高感度の光検出器、世界最小のナノワイヤレーザー、さらにはこれらを融合した量子デバイスの実現・開発を目指しています。



高輝度型ナノワイヤ LED アレイ

次世代ナノワイヤ太陽電池に関する研究

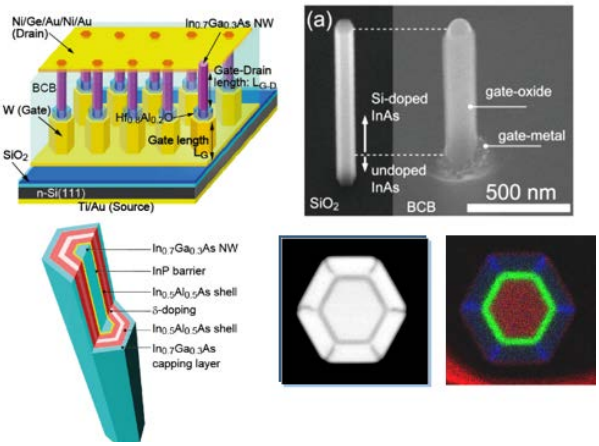
半導体ナノワイヤは次世代の太陽電池開発において、使用原料の削減によるコストの低減化・超軽量化や光トラップ効果の利用など、新しい特徴を有しています。中でも、化合物半導体ナノワイヤアレイは、半導体基板からワイヤ部分を剥離し、基板を再利用するなどにより、使用原料の大幅な削減が期待できます。本研究室では、エネルギー変換効率 40%以上を目指した超高効率太陽電池の創生とナノワイヤ材料を応用した新しい太陽電池構造について研究しています。



超高効率太陽電池の創生を目指した半導体ナノワイヤアレイ太陽電池

次世代トランジスタの開発

次世代電子素子の主要な課題は、高性能化と低消費電力化ですが、従来どおりの電界効果トランジスタ構造を単に微細化するだけでは、これらの課題を解決することは物理的に不可能です。そこで、本研究室では、化合物半導体ナノワイヤを応用した、縦型トランジスタ構造やコア・マルチシェルナノワイヤ構造を応用した高性能トランジスタの開発に世界にさきがけて成功しました。現在では、半導体ナノワイヤで形成される新しい接合界面を応用した超低消費電力駆動型のスイッチ素子を作製しています。これらの研究成果は、将来の電子デバイスの電力消費量を 90%以上削減できる要素技術であり、将来のスマートフォンの電池寿命を 10 - 100 倍まで長くできる可能性があります。さらに本研究室では、これらの半導体ナノワイヤ構造による電子素子応用だけでなく、ナノワイヤ集積回路や、ナノワイヤを基盤とする電子・光融合システムについて検討を進めています。



半導体ナノワイヤ縦型トランジスタ構造作製（上段）と高性能ナノワイヤチャネル材料（下段）

研究発表データシート

【26】	氏名　岡嶋　孝治 北海道大学大学院　情報科学研究科 生命人間情報科学専攻・教授	

発表タイトル	イオンコンダクタンス顕微鏡による細胞表面の形状・物性測定
サブタイトル	イオンコンダクタンス顕微鏡

（１） 研究者のアピールポイント

生細胞の力学物性は、組織の形成や機能発現に重要な役割をしているが、その詳細のメカニズムは不明である。我々は、高時間空間分解能を有する走査型イオンコンダクタンス顕微鏡(SICM) を用いた細胞・組織の物性計測を行っている。従来の SICM の用途は形状イメージとして扱われてきたが、本研究では細胞の物性を精密に計測できる SICM システムを開発し、細胞表面の形状と物性との連関の解明を目指している。

（２） 本発表研究の概要

開発した SICM では、広範囲ピエゾスキャナと光学顕微鏡システムとを一体化した装置システムである。個々のシステムを簡素化し、性能を維持しているため、装置の移動や操作性に優れている。この SICM 装置を用いて、医療課題の一つとして注目されているがん細胞の物性に関する特徴について発表する。

（３） 本研究発表の詳細

＜自作型広範囲 SICM＞

正立型顕微鏡をベースにしてピエゾスキャナ、マイクロピペット、カウンター電極を組み合わせて SICM を構築することで、自由度の高い SICM 設計を行った。高さ方向最大 20 μm、平面方向最大 100μm 四方で動作するスキャナを SICM に組み込み、広範囲の細胞集団測定を可能にした(図 1) 。

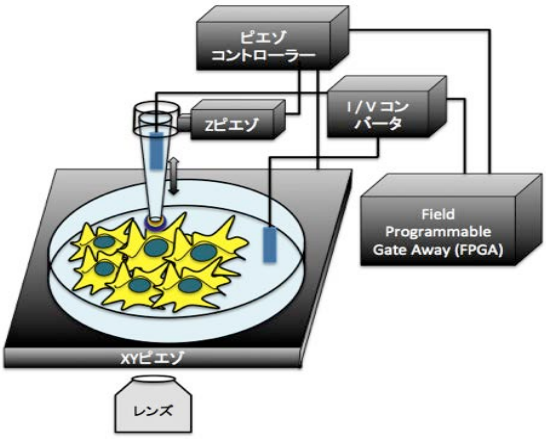


図 1 SICM 測定の模式図

＜*I-D* カーブによる物性解析＞

SICM はマイクロピペット内の電極とディッシュ内のカウンター電極間で電圧を印加することで発生するイオン電流を計測する。イオン電流の大きさはサンプル表面とマイクロピペット間の距離に依存して変化し、サンプル表面との距離が近づくとイオン電流は減少する。縦軸をイオン電流値(*I*)、横軸をサンプル表面との距離(*D*)とした時のプロットを *I-D* カーブと呼び、この *I-D* カーブの形状には細胞表面のかたさと揺らぎの物性情報が含まれている。我々は自作型広範囲 SICM を用いて細胞表面の形状像を取得すると同時に各領域での *I-D* カーブを求めた。その結果、*I-D* カーブの形状は PDMS 基板および、細胞の各部位や細胞ごとによって異なることがわかった。我々は *I-D* カーブの形状を定量的に解析するための一つの指標として、イオン電流が定常状態の 0.2%減少した時から 1%減少した時までの Z ピエゾの移動距離を求め、「相互作用長」とした(図 2)。

【26】続き

*I-D*カーブの形状は先行研究よりなだらかであるほどサンプル表面は柔らかく揺らぎが大きくなると考えられるため、*I-D*カーブの形状依存で変化する相互作用長はサンプル表面のかたさと揺らぎの物性情報を含んでいると考えられる。

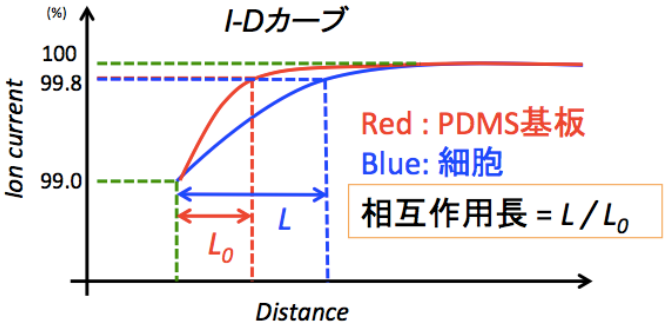
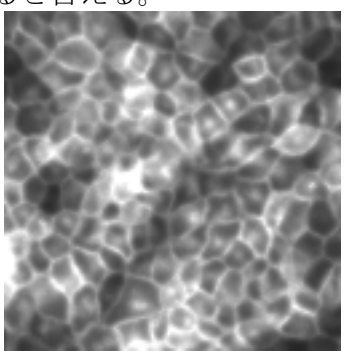
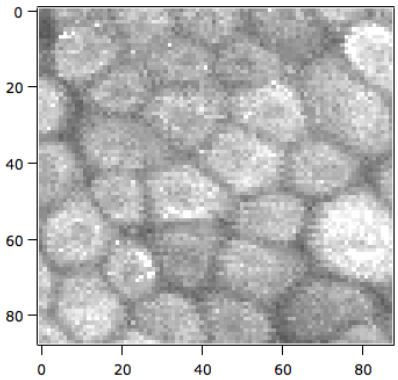


図 2　*I-D*カーブの形状模式図と相互作用長

＜RasV12-MDCK 細胞の SICM 測定＞

がん細胞と正常な細胞を区別する細胞診断の精度をあげることは現在医療課題の一つである。また、がん細胞の物性を知ることは、細胞診断の精度向上につながる可能性があると考えられる。RasV12-MDCK 細胞は、MDCK 細胞に癌遺伝子 RasV12 を導入した癌モデル細胞であり、テトラサイクリンを加えることで、RasV12 たんぱく質を発現し癌化する。癌化した RasV12-MDCK 細胞は蛍光を発するため蛍光顕微鏡を用いて確認可能である(図 3-1)。本研究では RasV12-MDCK 細胞の SICM 測定を行い、トポグラフィーと物性を含む情報である *I-D*カーブを取得し相互作用長を求めた(図 3-2)。その結果、相互作用長は細胞の各部位や細胞間で違いがあることがわかり、また、RasV12 たんぱく質の発現前後でも違いがあることがわかった。このことから、RasV12 たんぱく質の発現による RasV12-MDCK 細胞の癌化のメカニズムには細胞の物性も関わっていると言える。





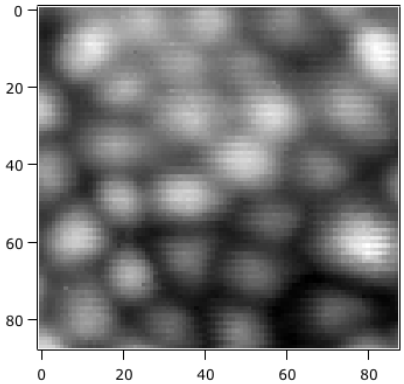


図 3-1　RasV12 たんぱく質発現後の RasV12-MDCK 細胞の蛍光画像(左)
図 3-2　SICM 測定による RasV12-MDCK 細胞の相互作用長マッピング(中央)と形状像(右)

（4） 本発表の注目点

これまでの SICM の測定目的は主に非接触で生体試料との相対的距離を測定することを利点とした柔らかいサンプルの形状イメージング測定であった。しかし、本研究では形状イメージングに加えてさらに生体試料の物性を測定することで、これまでの SICM にはなかった用途の可能性を見出した。また、がん細胞と正常細胞についての物性の違いについて、本研究で開発した SICM を用いて測定することで、SICM が細胞診断装置としてどのように役立つのか議論していく。

謝辞

RasV12-MDCK 細胞は、遺伝子制御研究所・藤田恭之教授より提供された。

研究発表データシート

【29】	氏名　小川 貴弘 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	画像・映像処理の最先端技術
サブタイトル	多様な分野の問題解決を可能にする適応的多変量解析理論構築

（１） 研究者のアピールポイント

適応的多変量解析に基づいた画像復元に関する研究を進めており、超解像や符号化、さらには、異種メディアデータに関する未知データの推定等に関する研究を実施しています。現在までに、大規模かつ多様なデータのクロスメディア解析と可視化に関する研究も行っており、扱うデータは、一般の画像・音楽・映像だけでなく、医用画像、脳活動情報、地球・惑星画像、社会基盤データ、スポーツ映像、SNS・Web 等、多岐に亘っています。

（２） 本発表研究の概要

本研究発表では、「複雑なデータに対して、それらの構成要素毎に最適な近似を与える適応的多変量解析理論」の構築に関して説明を行っています。図１に示すように、本理論の高い汎用性から多様な技術の実現が可能になるだけでなく、異なる研究分野間での融合が可能となっています。

（３） 本研究発表の詳細

本研究発表で紹介する適応的多変量解析理論は、図１に示すように、マルチメディアデータの符号化・復元・認識・意味理解・情報可視化、それぞれの分野で適用することが可能な汎用的理論です。したがって、以下では、それぞれの分野で実現された研究内容について、その詳細を説明します。

マルチメディア符号化・復元

画像や映像の構成要素に注目した適応的多変量解析に基づく画像の近似手法を構築することで、画像の復元・高解像度化・符号化等の高精度化を実現しています。さらに、この手法を応用することで、撮像対象が有する分光反射特性を直接取得可能とする新たな画像センシング技術を構築し、取得されたデータを用いることによって、画像処理の諸分野で汎用的に精度向上が可能になることを明らかにしました。

マルチメディア認識・意味理解

上記で構築した適応的多変量解析の手法を用いることで、複数のマルチメディアデータ間の相関分析に基づいたマルチモーダル解析手法、さらには、解析結果の次元削減に基づく高度な可視化手法を構築してきました。これらの成果については、電子情報通信学会論文賞等を受賞しています。

マルチメディア情報可視化

マルチメディア認識・意味理解において実現された高度可視化手法に基づいて、多様なマルチメディアデータを横断して検索・推薦可能とする可視化インタフェースの構築を進め、成果を挙げてきました。画像・映像・音楽、さらには、Web 情報等のマルチメディアコンテンツを自由に検索可能とするエンジンを構築し、それらの実用化に向けた試みとして、CEATEC JAPAN での出展や札幌市との実証実験等を実施してきました。

【29】続き

図 1 マルチメディアデータの適応的多変量解析理論及びそれにより実現される技術

（4） 本発表の注目点

本研究の注目点は、その高い汎用性です。上記に示すように、マルチメディアデータの符号化・復元・認識・意味理解・情報可視化等の広い分野に応用可能なだけでなく、近年成長の著しい AI・IoT 技術の構築においても活用され、各々の技術で高精度化を実現しています。さらに、医用画像、脳活動情報、地球・惑星画像、社会基盤データ、スポーツ映像、SNS・Web 等、多岐に亙るデータに対して、その適用を可能としています。例えば、AI 技術では、医用画像解析において、胃 X 線画像からの胃がんリスク分類について医療従事者に迫る精度を実現しています。また、地球・惑星画像解析では、火星衛星画像からダストストームを極めて高い精度で検出可能としています。さらに、IoT 技術においては、「EEG (electroencephalogram)、fMRI (functional magnetic resonance imaging)、fNIRS (functional near-infrared spectroscopy)等の脳活動信号や生体信号、活動量等の生体情報」と「マルチメディアデータ」との間に存在する関連性を明らかにすることで、マルチメディアコンテンツの検索・推薦の高精度化を可能にする技術も実現しています。これら、AI・IoT 技術の構築及びそれらの高度化においても、適応的多変量解析理論の導入が行われており、従来研究に存在した精度限界の向上を目指しています。

図 2 実現したシステムの実用化に向けた検討(CEATEC JAPAN での出展及び札幌市との実証実験等)

研究発表データシート

【35】	竹本　真紹 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	1 個の電磁石で正負両方向のスラスト軸支持力を発生できる 5 軸能動制御型磁気浮上ポンプに関する研究
サブタイトル	

（1） 研究者のアピールポイント

パワーエレクトロニクス，特に，「回転機と磁気軸受を一体化したベアリングレスモータ」，「磁気軸受」，「ハイブリッド自動車・電気自動車用などの高出力・高効率な永久磁石同期モータ」などの電磁機械の開発とそのドライブシステムに関する研究に従事。

（2） 本発表研究の概要

磁気浮上ポンプは，回転子主軸を完全非接触で磁気浮上回転できることから，発塵のないクリーンな送液，メンテナンスフリー，長寿命，高い化学耐性といった優れた特性を持つ。そのため，近年，磁気浮上ポンプのさらなるアプリケーション拡大のために，大容量向けの磁気浮上ポンプに加えて，小型・小容量の磁気浮上ポンプの開発も強く求められている。一般に，軸支持のための能動制御の軸数を減らすと，電磁機械のサイズを小さくできるため，小型の磁気浮上ポンプでは，能動制御の軸数を減らした 2 軸能動制御型が多く用いられている。しかし，能動制御の軸数を減らしてしまうと，軸支持制御の安定性が低下し，運転中に回転子が固定子に接触してしまうという懸念がある。特にクリーンな送液が求められる用途では，運転中の回転子と固定子の接触は大きな問題となる。

そこで，本研究は，5 軸能動制御によって安定した軸支持制御性を保持しながら小型化を実現するために，スラスト巻線電流による軸支持磁束は 1 軸上の 1 方向のみに発生するが，その軸支持磁束によって発生するスラスト軸支持力は正負 2 方向に発生できるという特長を持つ，新たな 5 軸能動制御型磁気浮上ポンプを提案する。

（3） 本研究発表の詳細

図 1 に提案する 5 軸能動制御型磁気浮上ポンプの構造を示す。提案構造には，インペラ側から半径方向 2 軸を能動的に磁気支持するラジアル磁気軸受ユニット 1，電動機ユニット，半径方向 2 軸を能動的に磁気支持するラジアル磁気軸受ユニット 2 が配置されている。そして，軸方向 1 軸を能動的に磁気支持するスラスト磁気軸受ユニットとして，1 個の電磁石，すなわち，1 個のスラスト固定子のみが反インペラ側の端部に配置されている。これにより，半径方向 4 軸と軸方向 1 軸の計 5 軸を能動的に制御する構成となっている。この提案構造の特長は，従来構造において必要とされていたスラスト軸支持力を発生するための専用のディスク型部品を回転子に必要としない点である。これにより、従来構造よりもスラスト磁気軸受ユニットに必要なスペースを大幅に削減し，回転子の軸長を短く抑え，小型化を実現している。

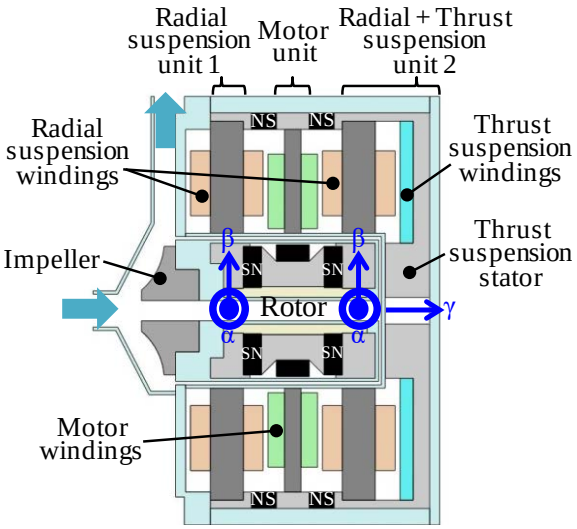


図 1.　提案する小容量モータポンプ構造

【35】続き

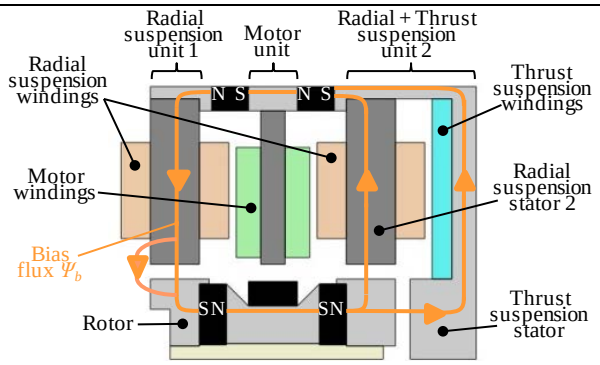


図 2.　スラスト軸支持力発生原理(ポンプ動作時)

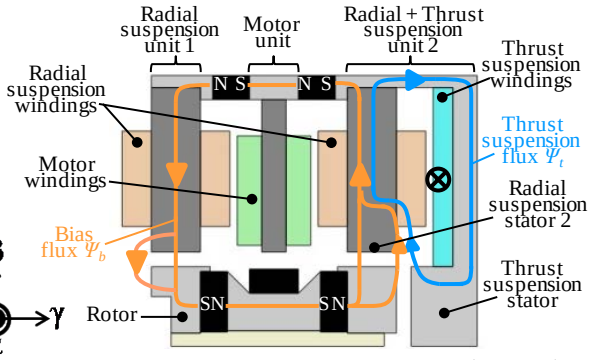


図 3.　スラスト軸支持力発生原理(起動時)

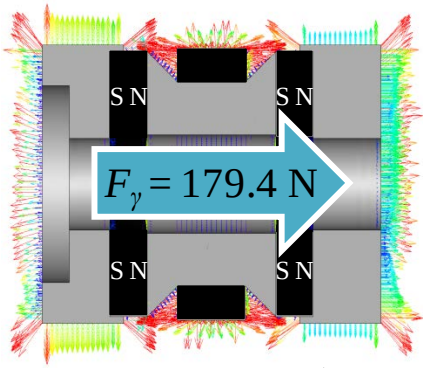


図 4.　回転子表面に働く電磁力(ポンプ動作時)

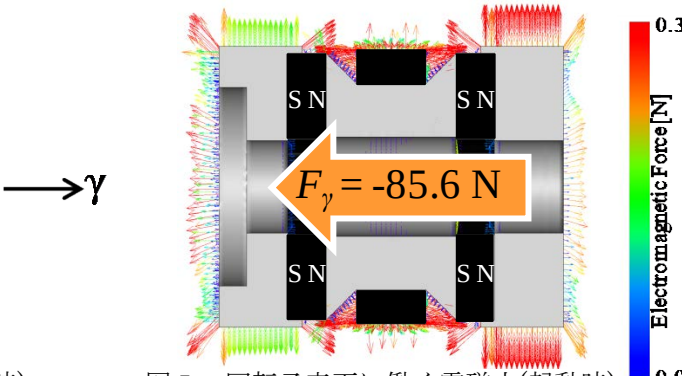


図 5.　回転子表面に働く電磁力(起動時)

図 2 は，ポンプ動作時における磁束の流れを示す概念図である。ポンプ動作時は，ポンプ内に生じる圧力差により，γ 軸正方向のスラスト軸支持力のみが必要となる。そのため，スラスト固定子内に周方向に巻かれたスラスト軸支持巻線の電流 i_t = 0 A とする。これにより，永久磁石によるバイアス磁束 Ψ_b が，ラジアル磁気軸受ユニット 2 の回転子コア部品からスラスト固定子へと流れ込み，γ 軸正方向へのスラスト軸支持力が発生する。

一方，図 3 は，起動時における磁束の流れを示す概念図である。停止時は，回転子が γ 軸正方向の電磁力によって吸い寄せられ，隔壁越しに固定子にタッチダウンしている。したがって，起動するには，γ 軸負方向へスラスト軸支持力を発生させ，回転子を γ 軸負方向に押し出さなければならない。そこで，スラスト軸支持巻線に図 3 に示す向きに直流電流 i_t を通電することで，スラスト軸支持磁束 Ψ_t を発生させ，バイアス磁束 Ψ_b がスラスト軸支持磁束 Ψ_t とぶつかり合うことにより，回転子コアとスラスト固定子間の吸引力を小さくしていく。一方，ラジアル磁気軸受ユニット 1 の固定子から回転子コア部品へバイアス磁束 Ψ_b が流れ込む際，図 2，図 3 に示すように，軸方向にフリンジング磁束が発生し，このフリンジング磁束により，図 4，5 に示すように回転子の左端表面に γ 軸負方向の電磁力が発生する。スラスト固定子との間の電磁力を小さくしていくことで，この回転子の左端表面に発生している γ 軸負方向の電磁力が回転子の右端表面に発生している γ 軸正方向の電磁力に比べて大きくなるため，回転子全体には，γ 軸負方向に軸支持力が発生する。

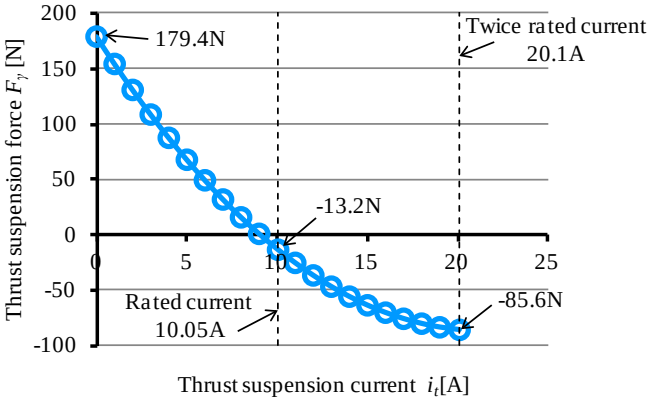


図 6.　スラスト軸支持力特性

3D - FEA によるスラスト軸支持力特性の結果を図 6 に示す。このように，提案構造は 1 個の電磁石によって正負両方向にスラスト軸支持力を発生させることができる。

（4）　本発表の注目点

小型・小容量のための新たな磁気浮上ポンプを設計した。提案構造は，スラスト巻線電流による磁束の向きは 1 軸上の 1 方向のみであるが，それによって発生するスラスト軸支持力は正負 2 方向に発生させることができるという特徴を持ち，5 軸能動制御によって安定した軸支持制御性を保持しながら，小型化を実現している。

研究発表データシート

【36】	氏名　金井　理 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	大規模環境３次元計測データからの物体認識・モデリング技術
サブタイトル	プラント設備やインフラ構造物の３次元「現況反映型」モデルを全自動構築

(1)　研究者のアピールポイント

我が国の橋梁・プラント・発電所などの社会インフラは，高度経済成長期に建設されたものが多く老朽化が加速しています．このような大型設備の維持管理を，信頼性を確保しつつ低コストに実施するため，３次元レーザスキャナやドローンによる３次元画像計測データに基づいて，維持管理情報が属性付加された「３次元現況反映型(as-is)モデル」を構築し，さらにこのモデル情報を長期間，常に最新データに更新してゆくことが必要です．その実現のため，大規模環境の３次元計測最適化，計測点群からの自動物体認識と自動 CAD モデル化のための独自ソフトウエアを，民間企業（測量，土木，プラント，電機メーカ，IT 等）と共同で開発しています．

(2)　本発表研究の概要

レーザスキャナ計測や SfM（画像計測）から得られた大規模な３次元点群・メッシュデータ（数千万点程度）から，CAD グレードの３次元現況反映型(as-is)モデルを高精度かつ効率よく作成し，応用するためのソフトウエア技術，すなわち i）計測位置最適化，ii)プラント設備の自動 CAD モデル化，iii）現況反映型屋内環境モデル内でのアクセシビリティ評価について発表する．

(3)　本研究発表の詳細

i)プラント設備計測のための最適レーザスキャナ配置(Next-Best-View)計画　（図 1）

配管系統をレーザスキャナで計測する際，他物体に遮られ計測できない箇所が多数発生するため，複数個所からの計測が必要となるが，現状では，熟練オペレーターが次のスキャナ設置位置を決定しており，冗長な計測や計測漏れが多い．本システムでは，計測済み点群内から配管部のみを高速認識し，未計測空間内の配管の存在を確率的に推定する独自アルゴリズムにより，未計測部を最も多く計測できる次の最適スキャナ設置位置を導出できる．また改修作業程度に応じた計測重要度を反映した最適スキャナ設置位置の導出も可能で，熟練オペレーターを上回る計測率や精度での計測が行える．

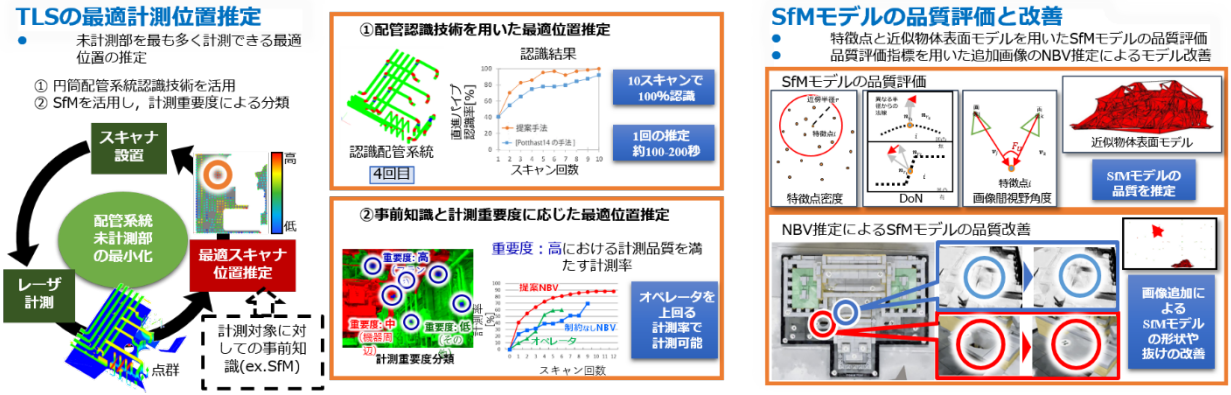


図 1　プラント設備計測のための最適レーザスキャナ配置計画と SfM モデル品質評価

【36】続き

ii)プラント設備自動モデリングのための高精度レジストレーションと配管・ダクト自動認識（図2）

プラント設備の as-is モデル化では，円筒配管が大部分を占める複数計測点群データを 1 つの点群に統合するレジストレーション処理が必要であるが，点群間の重複が少ない場合，従来手法では位置合わせ精度や配管モデル化精度が劣化する問題が起きていた．本システムでは，計測点群内の点群同志が，空間内で同一円筒方程式上に存在する幾何制約式を反復解法で解く独自アルゴリズムにより，数 10m 長の配管の計測データに対してもサブミリメータのモデリング精度を実現している．また統合された点群から，認識率 80～90%程度で直進パイプ，配管接続部，空調ダクトの全自動モデリングが可能である．

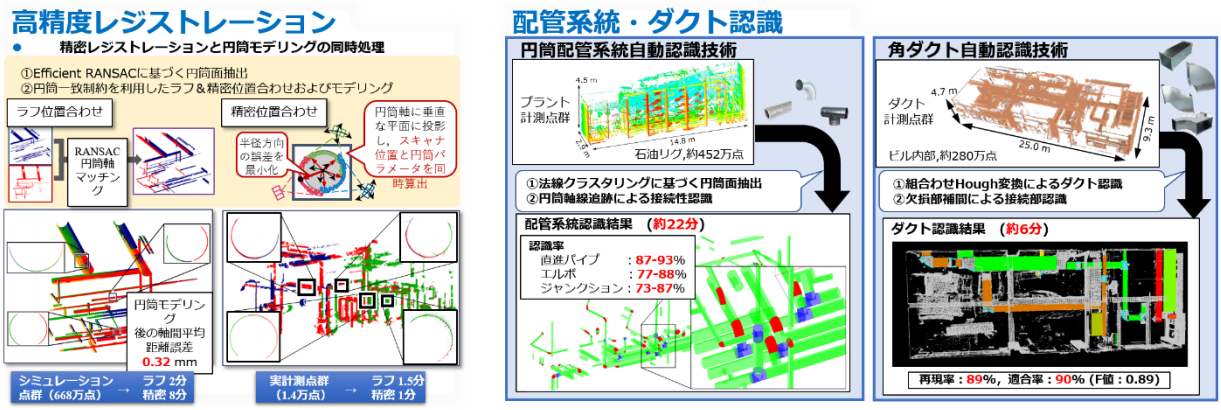


図2　プラント設備自動モデリングのための高精度レジストレーションと配管・ダクト自動認識

iii)現況反映型大規模環境モデル内での人間のアクセシビリティ評価（図 3）

本システムでは，屋内外環境のレーザ計測点群から自動構築された現況反映型屋内環境モデル中で，年齢や性別の異なる人間の歩行動作を模擬できるデジタルヒューマンモデルを仮想的に歩行させ，つまずきリスクや経路案内配置の妥当性などの実環境アクセシビリティを定量的・網羅的に評価できる．すでに数 100m 四方の住宅街を計測した 6 億点程度のレーザ計測点群から，6 分程度の処理により，住宅街内での歩行シミュレーション・つまずきリスク評価が可能なことを確認している．

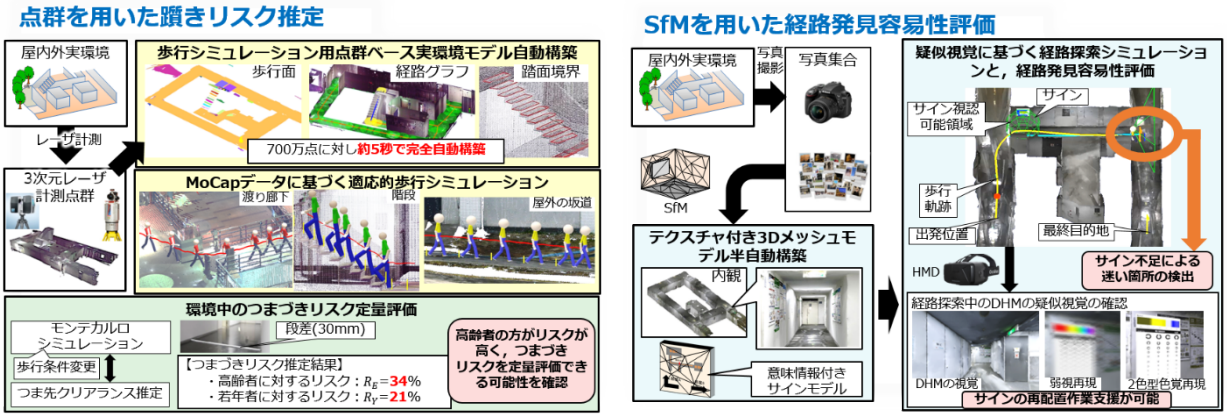


図3　現況反映型大規模環境モデル内での人間のアクセシビリティ評価

（4）　本発表の注目点

大規模環境のレーザ計測点群は，数千万点から数億点という大規模なデータとなることが多いが，本システムでは，様々な独自アルゴリズム導入により，数分～数 10 分程度の実用的な時間内でかつ全自動処理が行える点が特徴である．また，近年増加している画像 3 次元計測（Structure-from-Motion)から得られる 3 次元計測メッシュモデルにも，処理が同様に適用可能である．