北海道大学工学系シーズ集Vol.12

イノベーションフォーラム2014 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	応用物理学部門	山根 啓作 准教授	トポロジカル光波の発生・計測技術の開発
2	有機プロセス工学部門	仙北 久典 准教授	電気を用いて二酸化炭素から α-アミノ酸誘導体を作る
3	生物機能高分子部門	大利 徹 教授	ペプチドのN-末をキャッピングする新奇酵素の発見と応用
4	物質化学部門	安住 和久 教授	非水溶媒浴からの金属表面への機能性コーティング
5	材料科学部門	橋本 直幸 准教授	カーボンナノファイバーを用いた高熱伝導性を有する鉄系複合材料の創成
6	機械宇宙工学部門	藤井 宏之 助教	バイオメディカル光イメージングのための数理アルゴリズム開発
7	人間機械システムデザ イン部門	黒田 明慈 准教授	流れと伝熱の数値シミュレーション
8	エネルギー環境システ ム部門	千葉 豪 准教授	外惑星探査のための原子力宇宙船の開発
9	量子理工学部門	金子 純一 准教授	Gd ₂ Si ₂ O ₇ 系高性能シンチレータの開発とその応用
10	環境フィールド工学部 門	泉 典洋 教授	氷表面を流れる水によって形成される界面波
11	北方圏環境政策工学部 門	横田 弘 教授	海岸保全施設の防災機能に着目した合理的維持管理手法の構築
12	建築都市空間デザイン 部門	菊地 優 教授	オープンソースOpenSees を用いた免震構造解析システムの構築
13	空間性能システム部門	長野 克則 教授	椎内層珪質頁岩デシカント換気空調・統合型ヒートポンプシステムの研究開発
14	環境創生工学部門	東條 安匡 准教授	焼却主灰中難溶性セシウムの存在形態とその長期安定性
15	環境循環システム部門	胡桃澤 清文 准教授	セメント硬化体の物質移動性能予測
16	附属エネルギー・マテ リアル融合領域研究セ ンター	坪内 直人 准教授	炭素系資源のガス化複合発電用ホットガスクリーンアップ法の開発
17	情報理工学専攻	栗原 正仁 教授	キーワードのあいまい一致と分割を導入したキーワードプログラミングシ囚テム
23	情報エレクトロニクス 専攻	本村 真人 教授	ソフトウェアの価値をハードウェアの世界へ
27	生命人間情報科学専攻	平田 拓 教授	電子の目で分子を見る
31	メディアネットワーク 専攻	日景 隆 助教	大規模電磁界解析による乗り物内無線接続サービスの電波伝搬特性評価手法
37	システム情報科学専攻	五十嵐 一 教授	電波型エネルギーハーベスターの開発

[※]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。

[1]

山根 啓作 大学院工学研究院 応用物理学部門・准教授



発表タイトル	トポロジカル光波の発生・計測技術の開発
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

トポロジカル光波とはビーム断面に位相や偏光などの特異点を持つ光波をさす。例えば、トポロジカル光波の一種である光渦は、それ自身古典的な光波でありながら、らせん状の位相分布を持っており、物質に対して回転力を与えたり空間的に対して回転力を与えたり空間的に対して回転力を与えたりと、特異かつ今までにない新しい機能を持つ光波は配の大容量ではなどへの技術を顕微鏡、光通信の大容量化などへの技術革新をもたらすことが期待され、盛んに応用研究が行われている。

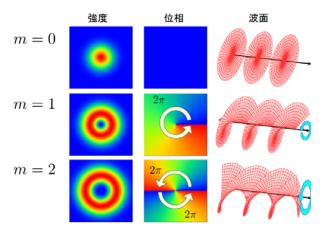


図 1 光渦の強度及び位相分布

こうした空間に特異な性質をもつトポ

ロジカル光波は、これまで主に(疑似)連続光を用いて研究が行われてきたが、我々は超短光パルス技術に代表される時間・周波数領域制御と融合させるという全く新しい光波技術の開発を行っている。我々は本分野において世界的に見て高い独自の技術基盤を有しており、こうした新規光波技術により新規物性制御が可能になると期待される。

(2) 本発表研究の概要

トポロジカル光波発生技術と超短光パルス技術の融合された光波を扱う技術は従来存在していなかったため、新規に基盤技術を確立しなければならない。そもそも超短光パルスを扱うためには広帯域な光を高精度に発生・計測する技術が必要である。我々はトポロジカル光波の一種である光渦を独自の技術によって広帯域に発生させ、光波増幅技術を用いることで数十 GW にも達する高いピークパワーを持つ高強度超短光渦パルスの発生に成功した。合わせて光渦の状態のコンピューター制御をも可能にした。

また、発生した広帯域光渦を定量的に評価することは従来法では困難であったため、干渉法に基づく全く新しいらせん度計測法を考案し、実証した。その結果発生光波の高速かつ高精度な計測が可能となった。

(3) 本研究発表の詳細

高強度超短光渦パルスを発生するために最も重要なキーデバイスは広い帯域をカバーすることのできる光渦変換器である。我々も含め広帯域光渦変換器の提案・実証はいくつか行われているが、どれもスループット、損傷閾値などの点で問題があり高強度な光波に対して使用するのは困難で

あった。そこで我々は比較的強度の弱い広帯域光渦を発生させ、チャープパルス増幅を行うことで高強度超短光光渦パルスを発生させることに成功した。現在パルスエネルギーが mJ 級でかつ

パルス幅が 27 fs と高強度な 超短光渦パルスを発生する ことに成功しており、コーター生成ホログラム 利用によって光渦の状態を 自在に変化させることに変化させることに変化させることに変化させることに変化させることに変化させることに変化されて非常に もる。光波の状態を自在ことには応用研究において非常に 重要である。

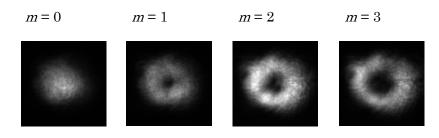


図 2 高強度超短光渦パルスのビーム断面像

光波の発生にはその状態を適切に評価する技術が不可欠であるが、従来技術では広帯域な光渦の定量的評価を行うことは困難であった。従来法では定量的評価を行う場合には回折効果を利用しており、広帯域を扱う場合には結果として検出が困難になるという問題があった。そこで我々

は広帯域な光波にも適用可能な全 考案し、実証した。我々の新たな手 法は干渉法に基づいており、回折数 果を用いないため広帯域な光に悪が しても測定に悪影響は生じない。また、画像を取得し演算を ない。また、画像を取得した ない。またで瞬時に光渦の定量的評価が 可能であるという大きな利えられる。現在独自に開発したソフと というである。現在独自に開発したソフと を担よてのほぼリアルタイムでの評価が可能となっている。

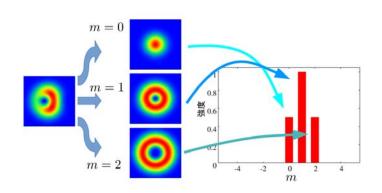


図 2 らせん度計測の概念図

(4) 本発表の注目点

我々が開発した光源は光渦としての特異な性質を持ちつつ、数十GWもの非常に高いピーク強度を有する。これほどパルス幅が短く高いピークパワーをもつ光渦光源は世界にもほぼ例がなく、加えて光渦の状態はパワーやパルス幅をほぼ保ったままでコンピューターによる制御が可能となっている。本光源はこうした高い性能を持ちつつ柔軟な運用が可能であり、レーザー加工や高強度物理への応用研究が期待できる。

また、らせん度計測法については従来法では原理上、分単位の計測時間が必要でかつ計測にも高いノウハウが必要であった。新しく我々が開発した計測法は、干渉像を計測するだけでらせん度が瞬時に計算されるので光波状態のリアルタイムのモニターとしても使用できる。また、干渉計を一度セットアップしてしまえばあとはカメラで画像を取得するだけの手続きしか必要ないのでそれほど高い実験技術を要しないという利点がある。本技術は光渦の応用研究を行う上で、光源の簡易かつ高速なモニタリングを可能にするという点で幅広く利用されることが期待される。

[2]

仙北 久典 大学院工学研究院 有機プロセス工学部門・准教授



発表タイトル	電気を用いて二酸化炭素からα-アミノ酸誘導体を作る
サブタイトル	有機化合物への二酸化炭素の電解固定化によるα-アミノ酸の合成

(1) 研究者のアピールポイント

北海道大学に入学してから32年、北大一筋。北海道では数少ない有機電解合成をテーマとしている研究者の一人です。二酸化炭素の電解固定化を初めて約20年が経ち、たくさんの学生と二酸化炭素から様々なカルボン酸を合成してきました。今回はα-アミノ酸の合成についてです。

(2) 本発表研究の概要

地球温暖化ガスの一つであり化石燃料の燃焼によって年々増加の一途をたどっている二酸化炭素は、シアン化物イオンや一酸化炭素、メタノール・ホルムアルデヒド・ギ酸などの一炭素ユニット(C1)の化合物群の中では最も豊富に存在するとともに安価で無毒性であることから、有機合成化学における炭素資源として非常に大きな可能性を秘めている。そのため、二酸化炭素の削減や貯留のみならず有効利用法の開発も重要な研究課題であり、近年注目を集めている。炭素の代表的な酸化物である二酸化炭素は化学的に非常に安定であり、従来、有機化合物と二酸化炭素との反応には Kolbe-Schmitt 反応のように高温・高圧などの厳しい反応条件や、Grignard 試薬や有機リチウム試薬に代表されるような空気中では取り扱いが困難な高い反応性を有する試薬などの使用が必須であった。合成化学的な見地から考えると、より温和な反応条件下で取り扱いの容易な試薬を用いた効率的な有機化合物への二酸化炭素の固定化反応の開発が望まれていた。

一方、有機合成化学はここ数十年に反応の効率化、不斉合成を含む高選択性の発現、新手法の開発などのあらゆる面でめざましい発展を遂げ、関連する様々な分野の発展に大きく貢献してきた。例えば、二酸化炭素の固定化反応においても、近年、Rh や Ni、Cu などの金属錯体を触媒として用い、アルケンやアルキン、有機ホウ素あるいは亜鉛化合物などへ比較的温和な条件下での二酸化炭素の固定化反応が達成され、多数報告されている。今後も益々その需要は高まり、より精密かつ効率的な有機合成反応が必要になってくることは明らかであるが、近年ではそれらの合成反応を環境に配慮した環境調和型の手段で行うことも同時に要求される。

このような状況の中、電子の移動を反応の駆動力とする電解反応による有機合成(有機電解合成)は、金属酸化物や還元剤を用いることなく、クリーンな試薬である電子の移動によって穏和な条件下に合成反応が達成されるため環境低負荷型・無公害型の反応手段として注目されている。このような環境にやさしい電解反応を用いて反応性の乏しい二酸化炭素を有機化合物と反応させることができれば、通常の試薬を用いる反応や遷移金属触媒を用いる反応の相補的な新しい反応として二酸化炭素の新規有効利用法を達成することが可能となる。我々の研究室では、有機電解合成の開発研究の一環として、電解反応によって有機化合物へ二酸化炭素を効率的に固定化して有用なカルボン酸を合成する電解カルボキシル化反応について研究を行い、これまでに様々なカルボン酸の合成に成功してきた。 1 今回我々は、二酸化炭素と電気を用いて代表的なカルボン酸の一種である α -アミノ酸の合成について研究を行ったので報告する。

(3) 本研究発表の詳細

カルボン酸の一種である α -アミノ酸は、ペプチド、タンパク質および多くの天然物の構成要素として重要であり、医薬品にも含まれる有機化合物である。そのため、実用的合成法は多岐にわたり開発されている。近年では、フェニルスルホニル基を有する α -アミノスルホンに金属試薬および二酸化炭素を塩基性条件下に作用させ、ワンポット 3 段階の反応で α -アミノ酸を合成する方法が報告されているが、塩基性条件下であることや高価な試薬が必要であるなどの問題点を有していた。この有機基質に対して、有機電解合成反応の手法を応用することで、 α -アミノスルホンから一段階かつ高価な金属試薬を使用せず、温和な条件下で α -アミノ酸の合成を達成できるのではないかと考え、研究に着手した。

実験操作は以下の通りである。白金陰極(2×2 cm²)、マグネシウム陽極(3 mm ϕ)を備えた一室型電解セルに 0.1 M Bu $_4$ NBF $_4$ を含む DMF(10 mL)、 α -アミノスルホン **1**(1 mmol)を加え、二酸化炭素をバブリングしながら 0 ∞ にて定電流電解を行った。反応終了後の溶液に 1 M 塩酸を注ぎ、酢酸エチルで抽出した後、飽和炭酸水素ナトリウム水溶液で有機層からカルボン酸を抽出した。この水層に 3 M 塩酸を加えて酸性とした後、酢酸エチルで抽出し、MgSO $_4$ で乾燥後、溶媒を留去すると α -アミノ酸誘導体 **2** が得られた。

これまでの結果の一部を以下に示した。アリール基を有する α -アミノスルホン **1a-1c** を基質に用いて電解カルボキシル化反応を行ったところ、それぞれ良好な収率で α -アミノ酸誘導体 **2a-2c** を得ることに成功した。

NHBoc
$$Pt$$
 Mg , CO_2 $X = 4-Me$ Pt NHBoc Pt NHBo

その他の置換基を有する α-アミノスルホンについても検討を行ったので、併せて報告する。

(4) 本発表の注目点

今回我々は、広く生活環境で使用されている"電気"をクリーンな試薬である電子として用い、電子の移動を駆動力とした有機電解合成反応を利用することで、高価な金属試薬を使用せずに温和な条件下で二酸化炭素から α -アミノ酸誘導体を合成することに成功した。これらの結果は、環境調和的な合成法の開発が求められている昨今において、有益なものであると考えている。さらに本合成反応は、広範な基質に対して適用可能であり、非天然型を含む様々な α -アミノ酸の合成が達成可能であると期待できるため、医農薬分野の発展にも貢献できると考えている。また、本報を用いてこれまでに環境調和的かつ効率的に合成した α -アミノ酸以外のカルボン酸については、下記の文献を参照していただきたい。

【参考文献】

1) H. Senboku, K. Yoneda, S. Hara, *Electrochemistry* **2013**, *81*, 380, and references cited therein.

[3]

大利 徹 大学院工学研究院 生物機能高分子部門・教授



発表タイトル	ペプチドの N-末をキャッピングする新奇酵素の発見と応用
サブタイトル	ペプチドを求核剤とする新奇アミノ酸ライゲースの発見

(1) 研究者のアピールポイント

ペプチドの欠点としてエキソ型(末端から分解)ペプチダーゼによる分解があげられる。しかし天然生理活性ペプチドの中には、ペプチドの末端が修飾されている例が多々見受けられ、さらに、これらの修飾によりペプチダーゼ耐性を獲得した報告もある。そこで我々は、ペプチドの末端を修飾する酵素に着目し検討を重ねた結果、本目的に有用な酵素を見出した。

(2) 本発表研究の概要

見出した酵素は、非タンパク性のアミノ酸である、L-amidino-phenylglycine を ATP を用いてリン酸化し、次いで Asn-Leu-Lys-Asp-Arg、あるいは Asn-Leu-Lys-Asp-Gly-Pro-Thr からなるペプチドを求核剤に用いてペプチド結合を形成する反応を触媒することが解った。通常、酵素は、基質の認識が厳密であり、化学構造の異なる基質には反応しない。しかし本酵素は、上記以外の種々のペプチドを求核剤に用いることが出来た。言い換えると、本酵素は、種々のペプチドの N-末を L-amidino-phenylglycine でキャッピングすることが解った。したがって、有用生理活性ペプチドの N-末を本酵素でキャッピングすることにより、種々のペプチダーゼからの保護が期待できる。

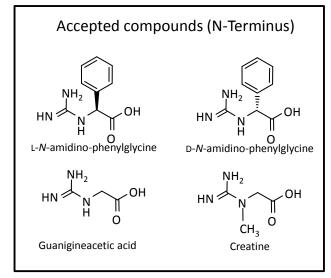
(3) 本研究発表の詳細

ペプチド系抗生物質の生合成では、リボソーム関与の生合成に加え、Non Ribosomal Peptide Synthase (NRPS) に代表されるリボソーム非関与の生合成機構も用いられる。また、近年、ATP 依存のアミノ酸リガーゼ、tRNA 依存のアミノ酸転移酵素によるペプチド結合生成機構も報告

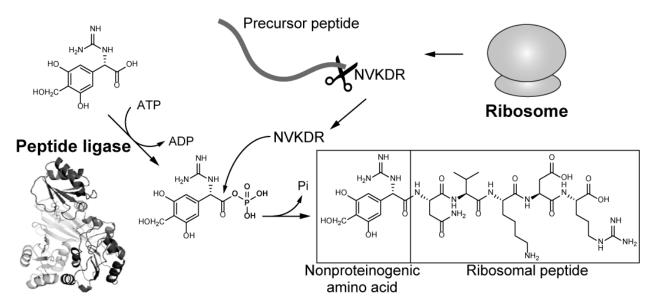
Pheganomycin (R = DR or DGPT)

されている。このようにペプチド系抗生物質の生合成には多様性があるが、ペプチドの基本骨格そのものは上記の何れかの機構で生合成される。

我々は、放線菌が生産するペプチド系抗生物質、pheganomycin(前ページ図)がどのように作られるかを種々検討した結果、ポリケチド合成酵素により合成された非タンパク性のL-amidino-phenylglycine とリボソームで供給されたペプチドのアミド形成を触媒する新奇酵素を見出した。種々検討した結果、本酵素は、本来の基質だけではなく、下図の種々の化合物・ペプチドを基質に出来ることが解った。また、結晶構造も解き、その反応機構も明らかにした。



Accepted compounds (Nucleophile) DVKDR NVK **NVKDR FVKDR NVKD NVKDGPT** (Isolated as AVKDR NV natural products) AAKDR NVKDG **AAADR** NVKDGP **NAKDR** NVKDAGP **NVADR** QVKDR NLKDR **Aspartame** NVRDR **MRFA GNNRPVYIPQPRPPHPRL** RVRRPVYIPQPRPPHPRL



(4) 本発表の注目点

本酵素はペプチドを求核剤に用いる初めての例である。またペプチド基本骨格の生合成の観点からは、リボソームと、それ以外の機構が協同してペプチドを形成する初めての例でもある。さらに、本酵素は、種々のペプチドの N-末キャッピング酵素と言え、LC/MS を用いたプロテオーム解析の内部標準の作成や、生理活性ペプチドのペプチダーゼからの保護等に有用である。

[4]

安住 和久 大学院工学研究院 物質化学部門・教授



発表タイトル	非水溶媒浴からの金属表面への機能性コーティング
サブタイトル	実現可能な界面を設計するか

(1) 研究者のアピールポイント

研究分野としては電気化学、表面物理化学をベースとし、金属の表面処理および腐食防食技術の開発、新しい電気化学系の開拓等を行なっている。最近の具体的な研究課題は、マグネシウム合金へのアルミニウムめっき、各種の新規腐食計測法の開発、屋外や土中などの実環境における腐食モニタリング技術の開発、イオン液体を用いた二酸化炭素電気化学還元や金属空気電池の開発、実環境中での高耐久性センサーの開発、マイクロプラズマや導電性高分子などを用いた新規反応系および機能素子の開発など。

(2) 本発表研究の概要

マグネシウムは軽量で比強度が高く、資源量も豊富で生体親和性も高いため、自動車や航空機等の運輸機関、モバイル機器、生体材料への応用の期待が高い。特に移動機械や駆動系などでその軽量性を生かすことで、大幅な省エネルギーが可能となる。しかしマグネシウム合金の著しく低い耐食性が実用化への障害となっている。当研究室では、耐食性が高くマグネシウムと相性の良いアルミニウムでマグネシウム表面をコーティングすることで、マグネシウム合金の実用化の範囲を拡大することを目指している。

(3) 本研究発表の詳細

マグネシウム合金へのアルミニウムのめっきは極めて困難である。マグネシウムはイオン化傾向の高い金属であるため、めっき浴中では酸化反応すなわち腐食により表面が劣化してしまい、ダメージを受けた表面に対して健全なコーティングを構築することはできない。アルミニウムもまたイオン化傾向の高い金属であり、水溶液系では金属めっき膜として析出することはできない。このため我々は、(1) マグネシウム合金表面の保護およびめっき反応に対する活性化処理前 (2) アルミニウムを析出することのできる非水溶媒(イオン液体および溶融塩めっき浴) を用いたコーティング系をデザインした。

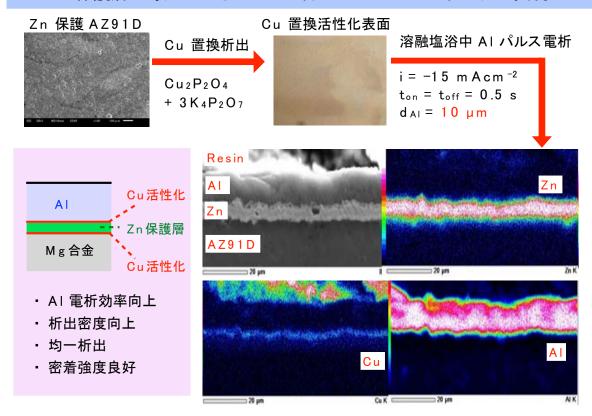
ここで使用した 2 種類の非水溶媒めっき浴は、以下のようなものである。(A)イオン液体浴:イオン液体とは、融点が常温付近の有機化合物塩であり、溶液がイオン(アニオン、カチオン)から構成されているため、イオン電導度が高い、金属イオンの溶解度が高い、蒸気圧が極めて低い、分子設計によりさまざまな物性や機能をもたせることができる、などの特徴を有する。本研究ではアルミニウム電析系で使用実績のある EMIC(1-ethyl-3-methylimidazolium chloride)+AlCl3 を使用した。(B)溶融塩浴:上述のイオン液体は常温で使用できるものの試薬としては高価である。一方無機塩の中温溶融塩浴は浴温度が 150℃前後と高いもののコストが低く電析

速度も高く設定できるため産業化を視野に入れた場合有利である。本研究では AlCl₃、 NaCl、

KClから成る溶融塩浴を用いた。

イオン液体浴中でマグネシウム合金上に直接アルミニウムを電析すると、金属析出反応に対する表面活性が低いために良質なコーティング膜が得られない。このため、合金上の表面に亜鉛層を置換析出することで活性を高め、さらに最適化されたパルス電析法を適用することで良質なコーティングを得ることができた。次にこの手法を、低コストが期待できる溶融塩浴に適用した。溶融塩浴の温度は150℃と高く、マグネシウム合金試料を浸漬するだけで表面が溶解するため、亜鉛層を電析で厚膜化することで充分な保護性を得ることができた。しかしこの亜鉛層には溶融塩浴から良質なアルミニウム膜を電析することができなかった。そこで亜鉛層の最表面に銅を共析させることで電析活性を高め、良質のアルミニウム電析膜を得ることができた(下図)。実用化のためにはプロセスの簡略化や最適化を行なう必要があるが、適切な界面設計により良質のコーティングを実現できることが実証された。

Zn 保護層の導入によるAZ91D合金へのAIコーティングの実現



(4) 本発表の注目点

本研究報告の主眼は、高機能コーティングを実現する際に直面する困難を克服するための界面設計である。本来イオン化傾向の高いマグネシウムの耐食性が低いことは避けられず、また表面の溶解や酸化反応で生成する腐食皮膜の存在により電子授受や電析金属との結合形成が阻害されるために電析反応がスムーズに進行しない。これらの困難を克服するため、本研究では亜鉛保護層の形成、銅ナノ微粒子析出による電極活性の向上と高密度化、電析膜の組織および形状を制御するためのパルス電析などを適時導入し、最終的に要件を満たすアルミニウム/亜鉛保護層/下地マグネシウム合金の界面設計を行なうことで耐食性アルミニウムコーティングを実現できた。すなわち、各プロセス毎でのトラブルの明確化と物理化学的・腐食科学に基づく現象解釈および電気化学・電極反応論的な立場からの方針策定など、学術面からのアプローチが実用性のある高機能コーティング開発のために有効であることが示された。

[5]

橋本 直幸 大学院工学研究院 材料科学部門・准教授



発表タイトルカーボンナノファイバーを用いた高熱伝導性を有する鉄系複合材料の創成

サブタイトル

(1) 研究者のアピールポイント

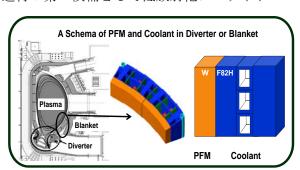
鉄系構造材料接合体の接合界面に高熱伝導性物質を配置して、構造材料全体の熱伝導性を飛躍的に向上させることを目指している。この技術によりエネルギー炉構造体の熱伝導性が改善されれば、エネルギー生産の高効率化だけでなく放射性廃棄物の低減も見込まれ、これまで解がなかった核融合炉ダイバータ用鉄系構造材料に目途がつくだけでなく、高熱伝導性を有する鉄鋼複合材料として工学的にも大きな付加価値を持たせることになる。

(2) 本発表研究の概要

核融合装置において、ブランケットおよびダイバータは表面温度が構成材料の融点あるいは昇華点を超える程の高熱負荷を受けるため、その除熱機能が要求される。国際熱核融合実験炉(ITER)のダイバータにおいては一部に常温で純銅の 1.5 倍を超える熱伝導率を有する高熱伝導性の炭素繊維強化炭素複合材料(CFC)が開発された。一方、ITER と異なり核融合原型炉(DEMO)では中性子を利用して燃料増殖を行うとともに長期的・連続的な発電機能を実証しなければならないため、炉内機器構造材料開発が成功の鍵を握っている。現時点では DEMO 炉用構造材の第一候補として低放射化フェライト・マ

ルテンサイト鋼(RAFM)が提案され、主としてブラン ケット用あるいはダイバータ用構造材として開発が 進められている。ブランケットはコの字型の第一壁, 側壁、後壁と呼ばれる冷却材流路を内蔵する壁を接続 した筐体構造を持ち、RAFM はこの複雑な接合構造体 の主材料であるが、RAFM を DEMO 炉ダイバータお よびブランケット用構造材として採用するに当たり 最も難しい点はその熱伝導率の低さにある。RAFM の 熱伝導率は約 30 W/m/K であり、これはステンレス鋼 の約 1.5~2 倍に相当するものの純銅(無酸素銅)の約 1/10 に過ぎない。核融合実証炉におけるダイバータ用 構造材料の第一候補である低放射化フェライト/マル テンサイト鋼よりも熱伝導性が高い材料を接合面に 適切に配置することにより、第一壁およびプラズマ対 向材料が受ける熱を効率よく逃がすヒートシンクと しての役割を有する複合材料を創製する。

接合界面の高機能化には、銅、CNT 及びより繊維が太い気相成長カーボンファイバー(VGCF)を併用する。CNT は熱伝導率が極めて高く(理論値約 6000 W/mK)、これを接合界面に配向して添加することで熱伝導率を大幅に改善されることを期待する。開発目標として、RAFM の 3 倍以上の熱伝導率を設定している。



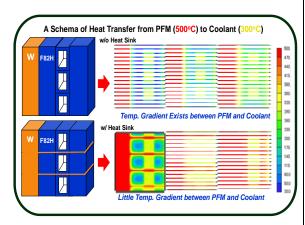


Fig.1 プラズマ対向材料の熱伝導性改善の概念図

(3) 本研究発表の詳細

先ず、純鉄粉または鋼(SCM440)を母材料とし、高熱伝導物質として多層カーボンナノチューブ (MWCNT)または銅を接合面に配置あるいは混合し、放電プラズマ焼結(SPS)とホットプレス(HP)により各種条件で接合した。接合体の一部を直径 10~mm のディスクに加工し、レーザーフラッシュ法により接合体の熱拡散率測定を行った。その後、接合体の断面を切り出し、走査型電子顕微鏡(SEM)及びエネルギー分散 X 線分光法(EDS)により微細組織解析を行った。HP により作製した Sandwich 試料にお

いて熱拡散率の明確な改善は見られないが、相対密度は良好な値を示した。熱拡散率が改善されなかった要因は、①MWCNT の配向性が不十分であること、②MWCNT が母材と反応し、炭化物として接合界面に析出したことが考えられる。MWCNT の配向性を改善すること、また、拡散障壁の導入することで炭素原子の母相への拡散を抑制することで、さらなる性能向上を見込んでいる。一方、SPS により作製した Mixed 試料は熱拡散率と相対密度が著しく減少したことから、緻密化に向けた焼結条件の見直しが必要である。Fig. 2 は鋼と銅板の複合材料の熱拡散率と相対密度の測定結果である。この材料の熱拡散率と相対密度の測定結果である。この材料の熱拡散率と相対密度の測定結果である。この材料の熱拡散率は鋼の1.3 倍であり、かつ良好な相対密度を示している。

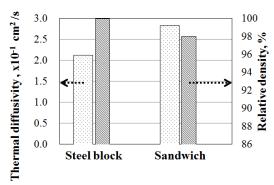


Fig.2 Thermal diffusivity and relative density of the steel/copper composites

次に、Cu-CNT および Fe-CNT の接合試料をホットプレスにより 35 MPa の加圧下で温度、保持時間を変えて作製した。切り出した後、耐水研磨紙#800 まで機械研磨を施し、クロスセクションポリッシャー(CP)を用いて鏡面出しをした。その後フィールドエミッション電子プローブマイクロアナライザー(FE-EPMA)を用いて接合面近傍の炭素原子濃度について定量分析を行った。

Fig. 3(a)は 600 °C で 30 分接合した Fe-CNT 試料における炭素濃度の分析結果を示した。線分析結果から、接合過程で炭素が鉄中に 1 μm 程度拡散していることがわかる。Fig. 3(b)は 600 °C で接合した Fe-Cu 試料における Cu の濃度分析結果である。接合過程における鉄中への銅の拡散は 1 μm 以内であった。また、Fig. 3(c)は 800 °C で 30 分接合を行った Cu-CNT 試料の炭素の濃度分析結果であり、接合過程での銅中の炭素の拡散距離は 3 μm 以内であった。Cu-C 状態図において、800 °C の時の炭素の固溶限が 0.04 at.%であることを考慮し、実際の炭素の銅への拡散距離はナノスケールであると推察される。以上より、CNT と鋼の間に炭素の拡散障壁として 3 μm 程度の銅層を導入することで、鉄中への浸炭を抑制できると結論した。

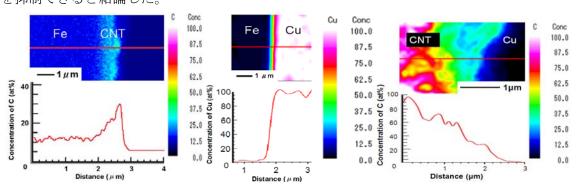


Fig.3 Element mapping of (a) C in Fe-CNT (600°C, 30 min), (b) Cu in Fe-Cu (600°C), and (c) C in Cu-CNT (800°C, 30 min)

(4) 本発表の注目点

上述の成果に加え、純鉄とカーボンフィラーを用いた開発研究において熱伝導率が3倍の鉄系複合材料も作製できたことから、鉄系材料と銅及びカーボン系材料の複合による高熱伝導性を有する鉄系複合材料の創製にある程度の目途がついたと言える。今後は、実用構造材料を用いて高熱伝導率かつ高強度を有する鉄系複合材料の創成を目指すとともに、並行して、当該材料の照射下安定性についても精査していくことになる。

[6]

藤井 宏之 大学院工学研究院 機械宇宙工学部門・助教



発表タイトル	バイオメディカル光イメージングのための数理アルゴリズム開発
サブタイトル	生体における光伝搬数理モデルの構築

(1) 研究者のアピールポイント

研究発表者たちは輻射輸送方程式と光拡散方程式を連結した光伝搬数理モデルを構築し、従来のモデルに比べて高精度でかつ計算負荷を抑えることに成功した(H. Fujii et al.J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 147 (2014) 145-154)。

(2) 本発表研究の概要

バイオメディカル光イメージングの発展のためには高精度かつ計算負荷を抑えた光伝搬数理モデルが求められる。研究発表者たちは輻射輸送方程式と光拡散方程式を連結した数理モデルを提案し、精度を保ちながら計算負荷の削減を実現した。現在は提案モデルを用いて、ラット脳など生体組織の光学特性値推定を試みている.。

(3) 本研究発表の詳細

近赤外光(700-900nm の波長領域)は他の波長領域に比べて生体深部まで到達することが知られている。この特性を利用したバイオメディカル光イメージングが盛んに開発され、悪性腫瘍の非侵襲診断や脳機能マッピングなどに利用されている。このイメージングは光伝搬数理モデルに基づいている。光は生体内部を散乱しながら伝播していくことから、従来では光拡散方程式が用いられてきた。拡散方程式は計算負荷が小さい利点があるが、近似式のために適用範囲に制限があった。また、近年は拡散方程式よりもミクロな時空領域に適用可能な輻射輸送方程式が用いられているが、計算負荷が膨大となり、大きい生体部位に適用することは難しい。研究発表者たちは、輻射輸送方程式と光拡散方程式を連結し、高精度かつ低計算負荷の数理モデルを構築することに成功した。ここで拡散近似が成立する時空領域を解析し、適切に両方程式を連結している点が、本提案モデルの特徴である。

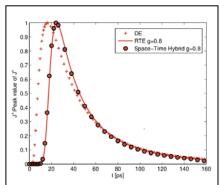


図1:拡散近似が適用できない領域内検出 点における光強度 J+の時間分解波形.十字 は光拡散方程式、実線は輻射輸送方程式、 丸印は提案している連結モデル.

(4) 本発表の注目点

本提案の光伝搬数理モデルは、拡散近似が適用できない mm オーダーの生体組織から輸送方程式の計算が難しい cm オーダーの生体部位まで幅広く適用可能であり、バイオメディカル光イメージングの更なる発展に寄与できると考えられる。

[7]

黒田 明慈 大学院工学研究院 人間機械システムデザイン部門・准教授



発表タイトル	流れと伝熱の数値シミュレーション
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

専門は伝熱工学。特に空気や水、油などの流れとそれによる熱輸送現象を独自に作成したコンピュータプログラムで再現して、輸送メカニズムの解明や応用の研究を行っている。

(2) 本発表研究の概要

1。乱流熱伝達の直接数値シミュレーション

平行平板間を流れる乱流伝熱現象をシミュレーションで再現し、その特性について説明する。 また、平板に溝がある場合、溝が流れや伝熱特性に与える影響について調査、検討した結果について報告する(溝の存在によって流動抵抗や熱伝達率は増加するのか、減少するのかなど)。

2。気液二相流の数値解析

液滴同士の衝突、液滴と固体壁との衝突といった現象を複数の数値解析手法(VOF 法、格子ボルツマン法)で再現した。それぞれの手法の特徴や妥当性、問題点などについて報告する。

(3) 本研究発表の詳細

1。乱流熱伝達の直接数値シミュレーション

図1は本計算によって再現された壁近傍の縦渦構造(流れ方向に回転軸をもつ回転運動)である。壁近傍の運動量や熱の乱流輸送はこの渦構造と強い関連があることが知られている。

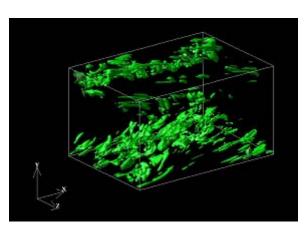


図1 壁近傍の縦薄構造

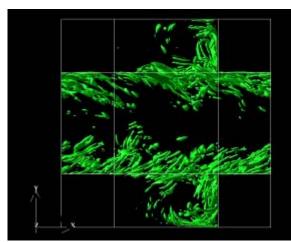
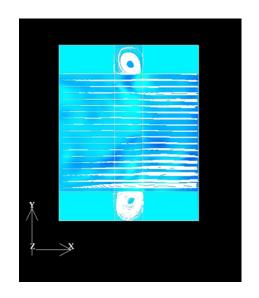


図2 溝付乱流の渦構造

図 2 は溝付流路の場合の縦渦構造を横断方向(z 方向)から観察した様子である。縦渦が溝内に巻き込まれ、循環している様子がうかがえる。

図3は溝内の流動が溝幅によってどのように変化するかを観察したものである。溝幅が小さいときには、溝内には安定した循環流が生じているが、溝幅の増加とともに不安定な流れとなっている様子が見られる。

図 4 は局所スタントン数(熱伝達率を無次元化したもの)の分布例である。溝内上流域で熱伝達が悪く、下流域でよいことが分かる(溝がない場合のスタントン数は概ね 6×10⁻²である)。熱伝達の悪い上流域は、流れの循環が弱い領域であることが流れ場の観察から分かっている。溝形状の工夫などによって、このようなデッドな領域をなくすことで領域全体での熱伝達率が向上することが期待される。



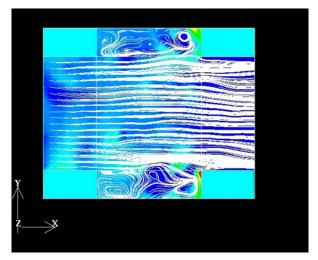


図3 溝内の流動と溝幅の関係

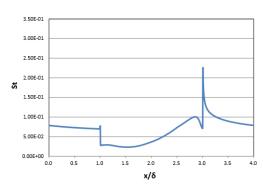
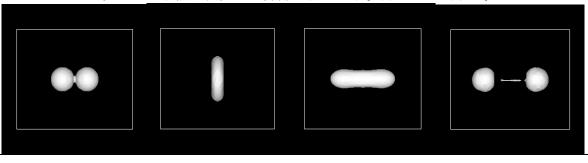


図4 溝付乱流の局所スタントン数

2。気液二相流の数値解析

Vof 法によって再現した 2 液滴の衝突・再分離の様子です。詳しくは会場で。



[8]

千葉 豪 大学院工学研究院 エネルギー環境システム部門・准教授



発表タイトル	外惑星探査のための原子力宇宙船の開発
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

本プロジェクトの研究開発内容は多岐に渡りますが、私は、原子力宇宙船の動力源となる原子 炉システムの設計用数値シミュレーションツールの開発・高度化を行うとともに、それを用いて 宇宙船に搭載する原子炉の設計研究を行っています。

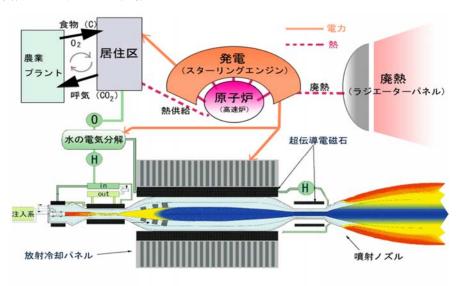
(2) 本発表研究の概要

外惑星探査のための原子力宇宙船を研究室として開発しています。原子炉で生み出した熱エネルギーからスターリングエンジンを用いて電気エネルギーを取り出し、最終的には電磁プラズマロケットにより推力を得るというコンセプトの宇宙船です。数値シミュレーションに基づく原子炉の設計や実機スターリングエンジンを用いた特性評価、軌道設計計算など、宇宙船のトータルシステムについて研究開発を実施しています。

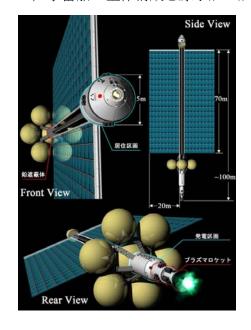


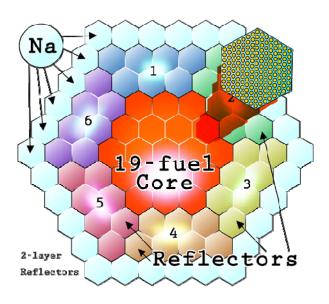
(3) 本研究発表の詳細

(3-1) 宇宙船のエネルギー供給システム

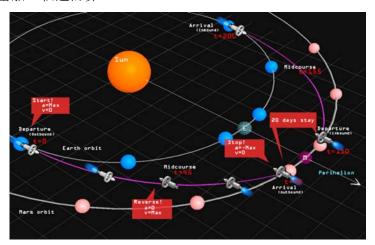


(3-2) 宇宙船の全体構成と原子炉の炉心配置



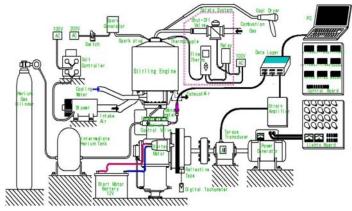


(3-3) 宇宙船の軌道計算



(3-4) 実機スターリングエンジンを用いた特性試験





[9]

金子 純一 大学院工学研究院 量子理工学部門・准教授



発表タイトル	Gd₂Si₂O ₇ 系高性能シンチレータの開発とその応用
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

当研究グループではダイヤモンドや酸化物単結晶などの新規放射線計測用材料開発から計測システム開発まで放射線計測に関連したモノづくりを最上流から垂直統合的に行なっています。「材料を制する者は市場を制する」を基本として、今まで見る事の出来なかった物を見えるようにするのが仕事です。産業界との繋がりの強い領域であり、企業、研究所、他大学等との共同研究も盛んに行なっています。我々のオンリーワン・ナンバーワン技術、さらにマーケティング・マネジメント能力をベースに関係機関と協力し福島第一原子力発電所事故関連の復興事業に全力であたっています。

(2) 本発表研究の概要

シンチレータとは放射線が入射すると発光する物質で、がんの診断などで使われる陽電子消滅断層撮影 (PET)装置や石油探査用の探査プローブ等で使用される。北大オリジナルである $Gd_2Si_2O_7$ (GPS、ガドリニウムパイロシリケート)シンチレータは、高発光量、高エネルギー分解能、非潮解性、自己放射能フリーといった優れた特長を有する。特に発光量に関して単結晶合成可能な非潮解性シンチレータとしては初めて NaI:Tl を実用ベースで凌駕した。さらに GPS は高温での発光量に優れ、 250° Cにおいて室温での GSO 比約 300%の発光量を維持する。現在は単結晶の大型化を進めると共に焼結体ベースのプレート化技術を開発し、福島第一原子力発電所事故で原子力発電所敷地外に放出された Pu 等の α 線放出核種を高感度で検出する装置開発を行っている。

(3) 本研究発表の詳細

Gd₂Si₂O₇(GPS)系シンチレータは北海道大学と日立化成(株)が 共同開発中のシンチレータである。GPS 構成元素に物質中最大の 熱中性子捕獲断面積を持つ Gd を含み、元々中性子ラジオグラフィーや散乱実験用のシンチレータとして開発を開始した。固相反 応法により合成した GPS 粉末は中性子計測が可能であるにとど まらず、GSO 単結晶を超える発光量を示した。Floating Zone 法 により数ミリ角の GPS 単結晶の合成に成功し、BGO 比 3 倍以上 の発光量と $662 \text{keV} \gamma$ 線に対するエネルギー分解能 5.0%を達成し た。

詳細な相図検証の結果、GPSの量論組成と包晶組成の差が小さく、Top Seeded Solution Growth (TSSG)法による大型単結晶合成の可能性が明らかとなった。この結果に基づき、TSSG 法による単結晶合成とその高品質化を現在進めている。合成結晶の例を



図 1 TSSG 法で合成した GPS 単結晶の例。直径約 40 mm 高 さ 50 mm。

図1に示す。現在研究室内の炉を用いることで直径 40mm、高さ 50mm 程度までの大型結晶合成が可能となっている。

石油探査分野では地下 3000m 以上の大深度探査が行われるようになり、175^C以上の高温環境下での γ 線計測が行われる。現在使用されている GSO シンチレータは 175^Cで発光量が室温の半分程度まで減少し、光検出器である光電子増倍管の暗電流との弁別が困難になりつつある。 **図 2** に GPS 系シンチレータの室温から 300^Cまでの γ 線に対する発光量を示す。縦軸は GSO を 100 とした相対値である。GPS は活性化物質である Ce 濃度により複数の結晶構造を示すが、Ce 濃度 2.5%の斜方晶 GPS は 250^Cにおいても室温での GSO の発光量と比較し、300%程度の発光量を維持する。今後光電子増倍管の高温対応の進展とともに石油探査への貢献が期待される。

GPS は γ 線検出用としてのみで無く、 α 線計測用シンチレータとしても期待されている。 α 線 検出用のシンチレータとしては従来より ZnS:Ag が用いられている。 ZnS:Ag は発光量に優れるものの粉体でしか得ることができず、エネルギー分解能に劣る。 我々は α 線に対し ZnS:Ag と同等以上の発光量を有する GPS シンチレータの多結晶体を厚さ $100\mu m$ 程度のプレート状に敷き詰めることにより大面積でエネルギー分解能に優れた α 線検出器開発に成功し、特許申請も行っている。 現在はこの技術をさらに進め、 GPS 焼結体を粒成長させることで、従来法の問題であった検出効率を充填率の向上により改善し、シンチレータプレートの製造コストの大幅な低減を目指している。 さらに凝集性をもつ Pu 等核燃料起因の α 放出核種を均等に広がる天然 α 線放出核種のなかから位置検出型検出器により高い感度での検出を可能にした。 \mathbf{Z} 3 に示すとおり自然放射線核種であるラドン子孫核種約 50Bq 中に約 1Bq の核燃料起因 Pu が存在する場合において Pu を明確に弁別することに成功している。 CPS シンチレータと位置検出器技術の組み合わせにより高い耐久性と信頼性を兼ね備えた従来にない高い性能を誇る可搬型エネルギー弁別・位置検出型 α 線計測装置を実現する。

(4) 本発表の注目点

北海道大学オリジナルの GPS 系シンチレータは酸化物シンチレータとして類を見ない性能を有しており、石油探査や可搬型エネルギー弁別・位置検出型 α 線計測装置への応用が期待される。

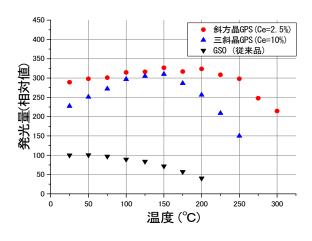


図 2 GPS と NaI:Tl シンチレータの発光量比較。 GPS は市販の NaI:Tl 比 1.4 倍の発光量を有する。

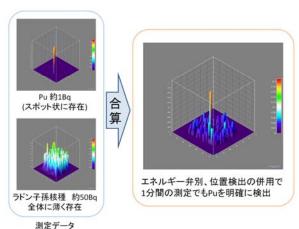


図 3GPS プレートを用いた核燃料起因 α 線検出のイメージ。エネルギー弁別に加え位置検出を行うことで、より迅速確実な Pu の検出が可能。

[10]

泉 典洋 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	氷表面を流れる水によって形成される界面波
サブタイトル	氷の morphodynamics

(1) 研究者のアピールポイント

これまで河川工学の分野で、流れによる砂の移動によって河床に形成される河床波の形成メカニズムに関する理論的な研究を行ってきた。その解析手法を流れと氷の界面に発生する界面波の形成プロセスに適用した。

(2) 本発表研究の概要

外気温が氷点より高い状態で氷の上を水が流れる場合、氷表面は融解と凝固によってその形状を変化させる。その際、平坦な表面は不安定となり界面波が発生する。界面波の発生プロセスを線形安定解析の手法を用いて明らかにした。

(3) 本研究発表の詳細

勾配 S の氷の上の水の流れは乱流変動に対して Reynolds 平均を取った次の Navier-Stokes 方程式で表される。

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) + gS \quad (1)$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) - g \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

ここで $\tau_{ij}(i, j = x, y)$ は応力テンソルであり、次の修正混合距離理論を用いる。

$$\tau_{xx} = -p + 2\rho \left(\nu + \nu_T\right) \frac{\partial u}{\partial x} \tag{4}$$

$$\tau_{xy} = \rho \left(\nu + \nu_T \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$
(5)

$$\tau_{yy} = -p + 2\rho (\nu + \nu_T) \frac{\partial \nu}{\partial \nu}$$
 (6)

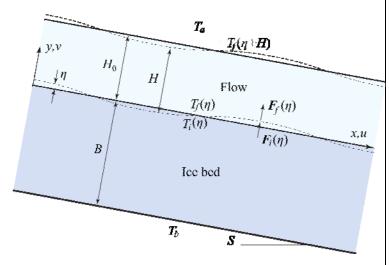
$$v_T = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \tag{7}$$

$$l = \kappa \left(1 - e^{-y/A}\right)(y - \eta) \sqrt{\frac{H + \eta - y}{H}}$$
 (8)

$$A = 25\nu/u^* \tag{9}$$



Fig。 1 川の水面に張った氷の裏側に形成された界面波。(Carey、



Fig。 2 流れの概念図と座標系

流体中の熱輸送は次式で表される。

$$u\frac{\partial T_f}{\partial x} + v\frac{\partial T_f}{\partial y} + \frac{\partial F_{fx}}{\partial x} + \frac{\partial F_{fy}}{\partial y} = 0, \quad F_{fx} = -(\alpha + \alpha_T)\frac{\partial T_f}{\partial x}, \quad F_{fy} = -(\alpha + \alpha_T)\frac{\partial T_f}{\partial y} \quad (10, 11, 12)$$

ここで T_f は流体の温度、 F_{fx} および F_{fy} は流体中の熱フラックスのそれぞれxおよびy方向成分、 α および α_T はそれぞれ分子拡散および乱流拡散による熱拡散率である。

氷内部の熱輸送は次式で表される。

$$k_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} + \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) = 0 \tag{13}$$

ここで k_i は氷の熱伝導率であり、 T_i は氷の温度である。

氷表面高さηの時間変化は次式の氷と流れの界面における熱フラックスの差が凝固や融解を引き起こすという Stefan 条件を用いて表される。

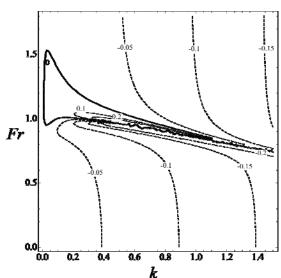
$$-\rho_i h_i \frac{\partial \eta}{\partial t} = \mathbf{F}_i(\eta) \cdot \mathbf{e}_{nb} - \mathbf{F}_f(\eta) \cdot \mathbf{e}_{nb}$$
(14)

ここで ρ_i および h_i はそれぞれ氷の密度および融解熱、 $F_i(\eta)$ および $F_f(\eta)$ はそれぞれ氷・流れ界面における氷および流体中の熱フラックスベクトル、 e_{nb} は氷・流れ界面に対する法線ベクトルである。これらの方程式系に次のような微小擾乱を与える。

 $(u,v,T_f,T_i,\eta,H)=(u_0(y),0,T_{f0}(y),T_{i0}(y),\eta_0,H_0)+A(u_1(y),v_1(y),T_{f1}(y),T_{i1}(y),\eta_1,H_1)e^{i(kx-\omega t)}$ (15) ここでAおよびk、 ω はそれぞれ擾乱の振幅および波数、複素角周波数であり、 ω の虚部が擾乱の成長率を表す。上式を流れおよび熱輸送方程式に代入し、擾乱の振幅Aを微小として線形化した微分方程式系は適当な境界条件の下において複素角周波数 ω を固有値とする固有値問題を構成する。この固有値問題を解けば $Im[\omega]$ が波数kと Froude 数、Reynolds 数、Nusselt 数の関数として得られる。ここでは Chebyshev 多項式を用いた Spectral collocation 法を用いて固有値問題を解いた。

得られた結果の一例を右図に示す。図は $Im[\omega]$ のコンタを波数ーFroude 数平面上に描いたものであり、太い実線が $Im[\omega]$ = 0の中立曲線、細い実線が正のコンタ、破線が負のコンタを表している。解析では氷と水の熱伝導率の比Iが I0、氷底面の温度と外気温の比I1が I1、I1000、I100 I100 I100

って波数の小さい(波長の大きい)界面波が発生する。 F 波長をLとすると無次元波数は $k = 2\pi H_0/L$ と表される E ことから、Froude 数が 1。0 より小さい場合は波長が水 F 深の 6 倍から 20 倍、Froude 数が 1。5 近くなると波長が水深の $600\sim1000$ 倍の界面波が現れることが予想される。



Fig。 3 安定性ダイアグラム。 $\lambda = 4$ 、B = 20、 $T_b = -0.5$ 、Re = 10000、Pt = 7、 $Pt_T = 1$ 、Nu = 1500。

(4) 本発表の注目点

近年、地球以外の惑星の探査が盛んに行われるようになり惑星表面の地形だけでなく内部構造についても詳しい情報が得られるようになっている。地球以外の惑星の地形の多くは氷でできている。この理論を適用することで惑星地形の形成プロセスに関する重要な情報が得られる。

[11]

横田 弘 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	海岸保全施設の防災機能に着目した合理的維持管理手法の構築
サブタイトル	劣化の進行と評価および最適な維持管理体系の構築

(1) 研究者のアピールポイント

海岸線に建設され、海岸地域および背後地域を防護するための海岸保全施設において、施設が長期の供用期間にわたって防護機能および要求性能を満足するように適切な維持管理を推し進めることが改めて求められている。本研究は、コンクリート堤防に代表される海岸保全施設の安全かつ円滑な利用等のために保持すべき性能とともに、利用上の制約や財政上の制約などの要因も加味したLCC(ライフサイクルコスト)の抑制が図られるよう、LCM(ライフサイクルマネジメント)の進展を目指しているもので、上記の社会的要求に対して、コンクリートの材料的、力学的、および経済的見地から包括的に取り組んでいるものである。

(2) 本発表研究の概要

海岸保全施設は長大なコンクリート構造物で構成されるため、点検診断には多大な労力や時間を要する。現状では国内の多数の海岸保全施設に対して現地調査を行い、点検診断データを多く蓄積してきた。これにより、図-1 に示す全体の確率密度関数および相対度数分布として整理することで、コンクリートに発生するひび割れの調査データの統計解析を行うことで効率よく構造物の状態を把握する手法を提案している。

また、上記のような構造物にひび割れが発生する場合、コンクリートのひび割れ面における応力伝達挙動を正確に把握することは、構造物の保有性能を評価する上で大変重要である。そのため、実験室内において、図-2に示すひび割れを生じたコンクリート供試体に対して、せん断変位、ひび割れ幅、せん断応力、拘束応力をパラメータとした実験を行っている。また、このようなひび割れ(変状)が生じている施設の破壊形態を明らかにし、防護機能に与える影響を評価するためのシミュレーション等も実施している。

構造物のライフサイクルマネジメントのためのより高度なシナリオ策定手法の構築を目指して、利用上の制約や財政上の制約などの要因も加味したLCCの抑制を図るとともに、年間予算の制約条件および想定し得る全補修シナリオの下、構造物の各補修シナリオにおける予定供用期間中の各施設の補修優先度決定手法の構築に関する検討を行っている。

(3) 本研究発表の詳細

①現地調査結果の統計解析

国内の複数の無筋コンクリート海岸保全施設である胸壁に対して、詳細な現地調査を実施した。 目視調査により海岸保全施設の施設の健全度を決定し、各スパン中に鉛直方向に発生したひび割れの本数および各ひび割れの幅を複数個所で測定した。さらに、胸壁の寸法(高さ、厚さ、スパン長)および胸壁の正面(海域側)と背面(陸域側)の両側で調査可能な施設においては、ファイバースコープ等を用いた鉛直ひび割れの貫通やひび割れ面の観察を実施している。

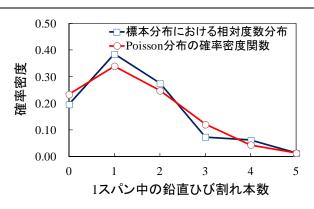


図-1 全体の確率密度関数および相対度数分布

②ひび割れ面における伝達応力

コンクリートにひび割れが発生した場合、せん断変位が増加し、骨材のかみ合わせ効果のためせん断応力と拘束応力が増加するといった複雑な破壊をする。ひび割れ面におけるせん断伝達挙動を精度良く表現するには、変形挙動を詳細に測定をすることが不可欠である。そのため、長大なコンクリート構造物を想定した、変形および力学挙動を定量的に評価している。





図-2 ひび割れを導入した供試体に関する載荷試験の様子

③ライフサイクルコストおよび補修計画の最適化

LCC 算出の際のパラメータは多岐に亘り、その多くは、基礎データの蓄積やその分析が未だ十分進んでいないことから、様々な知見等を総合して得た経験値や仮定条件の下でのパラメータ等を用いて検討が行われているのが現状である。本研究は、施設の効率的・効果的な LCC 検討体系の構築を進めるために、コスト検討の際に考慮すべき主な諸事項が検討結果に及ぼす影響を定量的に把握しようとするものである。

(4) 本発表の注目点

港湾および海岸保全施設を構成するコンクリート構造物のライフサイクルマネジメントにおいては、コンクリートの材料特性、力学性能、および構造物を取り巻く経済的価値を総合的に判断する必要がある。本発表においては、それらを定量的に紐解くと同時に関連付けることで、今後の構造物の社会基盤施設としての性能および機能について最適な LCM を体系的に構築する課題に取り組むことができていることを示している。

現在国土強靭化のための政策が種々の社会基盤施設に対して展開されてきているが、この研究の成果が海岸保全施設の戦略的な維持管理手法の確立に寄与し、経済的にも合理的な維持管理の実践に有用な成果を与えている(成果の一部が農林水産省、国土交通省「海岸保全施設維持管理マニュアル、2014。3」に反映)。

[12]

菊地 優 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	オープンソース OpenSees を用いた免震構造解析システムの構築
サブタイトル	免震構造のさらなる普及に向けて

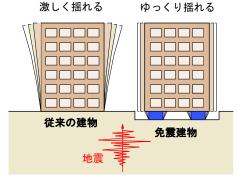
(1) 研究者のアピールポイント

免震構造は、建物の耐震性能を飛躍的に向上させる画期的な構法です。2011 年東日本大震災では、免震構造で建築された病院や消防署などの防災拠点が、震動による被害を免れ建物の機能を維持できたことで、被災者の救護活動に大活躍しました。私は免震構造の普及を目標に研究開発に取り組み、これまでに120 棟を超える数多くの免震建築を世の中に送り出してきました。免震構造の研究開発の過程で構築してきた免震構造の設計ツールを、昨年、オープンソースによるプラットフォーム(OpenSees)を用いて公開しました。これにより、来たる巨大地震に対する備えとして免震構造のさらなる普及の一助となることを願っています。

(2) 本発表研究の概要

免震構造は下図のように建物下部に免震装置を設置して地震の揺れを建物に伝えない(絶縁する)ことで、地震時の建物内の加速度を大きく低減させます。これを免震効果と言います。免震効果は、建物下部に設置される免震装置の力学特性に大きく影響されます。十分な免震効果を得るには、免震装置の性能を十分に引き出してあげることが必要となりますが、それには解析ツールが必要となります。

2011年東日本大震災以降、社会は想定外事象に対する備えを求めるようになりました。免震構造においては、免震装置が今まで以上に大きな変形や荷重を受けるといった非常に過酷な状況を強いられることを想定した設計が求められるようになりました。いかなる場合でも免震構造が安全に建物の機能を維持できるように設計するには、構造解析ツールも過酷事象に対応できるように高度化されなければなりません。本発表では、免震装置の極限挙動を追跡できる解析技術を紹介するとともに、その技術を誰もが自由に使えるように構築された環境についても説明いたします。



免震構造のコンセプト



免震装置 (積層ゴム) の変形

(3) 本研究発表の詳細

南海トラフ地震や首都直下地震などの巨大地震への 有効な備えである免震構造の普及を図るには、免震構造に関わる研究者・技術者が一丸となり、オールジャパン体制で臨む必要があります。免震構造で想定される様々な極限事象はいつの時代にも研究者の研究対象であり、日本国内に蓄積された解析技術は他国に比べて非常に高度化されています。一方で、それらは各研究者・技術者のもとに散在しており、統合する術がありません。そこで、当研究室では、

- ① 免震構造の極限挙動解析技術の高度化
- ② 免震構造の極限挙動解析システムの開発
- ③ 免震構造に関する情報の共有化と教育普及

を目的に掲げ、自ら新たな解析技術を開発するとともに、日本国内に点在する解析技術を集約して1つの解析システムとして統合することを目指しています。この目標を実現するために、米国 UC Berkeley の太平洋地震工学研究センター(PEER)で開発・運用されているOpenSees(The Open System for Earthquake Engineering Simulation)に着目しました。OpenSees はその名の通り構造物の地震応答解析を行えるオープンシステムであり、誰もが無料でダウンロードして利用することができます。世界中の研究者が自らの研究成果を同システムにアップすることで、最新の解析技術をタイムリーに利用できることで、最新の解析技術をタイムリースの精神に則ることで、技術の共有が困難であった地震工学・構造解析分野において、その閉鎖性を打開できるインテリジェンスとして期待されています。

免震構造の分野においては、具体的には右図のような極限事象を想定して、以下のような挙動を追跡できる解析システムを構築しています。

- ① 積層ゴムの大変形、引張破断挙動
- ② 免震部材性能の繰返し変形による疲労劣化・熱劣化
- ③ 免震部材の水平 2 方向、鉛直水平などの多軸連成挙 動
- ④ 免震建物の擁壁衝突挙動
- ⑤ 免震建物全体の非線形挙動

このうち、①と③の解析技術については右図のように KikuchiBearing Element などと開発者の名前が冠され OpenSees に実装されています。現在は、②に関して免震部材内の熱伝導と地震応答をインタラクティブに行える解析システムの開発に取り組んでいます。

(4) 本発表の注目点

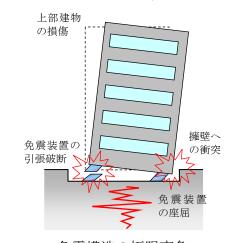
昨年、OpenSees に当研究室で開発されたソースコードをアップしたところ、国内外から問い合わせが届いており、免震構造への関心の高さを実感しています。



OpenSees のホームページ



米国 UC Berkeley PEER



免震構造の極限事象



OpenSees への実装例

[13]

長野 克則 大学院工学研究院 空間性能システム部門・教授



発表タイトル 稚内層珪質頁岩デシカント換気空調・統合型ヒートポンプシステムの研究開発

サブタイトル

(1) 研究者のアピールポイント

本研究は北海道原産のメソポーラス鉱物資源で良好な天然調湿材として利用されている稚内層 珪質頁岩を基材とした長寿命で大幅な低コスト化が可能なデシカントローターを開発し、このローターを搭載したビル用デシカント換気ユニット、世界初の家庭用に冷暖房・給湯除湿換気ヒートポンプユニットを具現化し、従来の空調機に対する省エネルギー性を実証するものである。

(2) 本発表研究の概要

本研究は、①稚内層珪質頁岩(WSS)デシカントローターの性能向上と低コストなデシカントローターの開発、②家庭向け多熱源対応・デシカント換気空調・デスーパー利用冷暖房給湯ヒートポンプ統合システムの開発、③中小ビル向け天井埋設型デシカント換気システムの開発の三ののテーマについて取り組んでいる。さらに統合システムと中小ビル向けデシカント換気システムについて実建築に導入した実証テストを行った。

(3) 本研究発表の詳細

I.稚内層珪質頁岩デシカント材と紙製ローター開発

i)WSS をパルプ紙にすき込んだ基材紙を作成するためには微粉砕が必要である。そこで乾式粉砕技術を導入し、平均粒径 4 ミクロンの粒子を得ることが出来た。この粉体の製造原価は、従来の湿式粉砕の 1/2 である。

ii) 安価な針葉樹パルプをベースとして、珪質頁岩微粉末と PET 繊維を混抄した稚内層珪質頁岩配合抄紙を試作した。さらに吸湿性能を高めるための塩化物担持工程を、抄紙工程中に同時に行うことで、塩化物担持加工に伴うコストを削減することが出来た。

ii)さらに抄紙基材を用いたローター加工製造技術を確立した。ローター幅にカットするためのスリット工程により、±0.2mm の平滑度を有するローターを開発した。

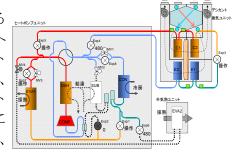
Ⅱ.家庭用デシカントユニット開発

開発した WSS ローターと、高さ 400mm の全熱交換素子を組み合わせた構成のデシカントユニットを計画した. 開発された家庭用デシカントユニットは、 40° C 再生で 8.0g/kg_{DA}の除湿が可能であり、漏気率 4.5%、中間期バイパス回路を有する。



Ⅲ.家庭用冷暖房給湯ヒートポンプシステムの開発

家庭用ヒートポンプシステムは、デスーパーヒーターによる温水取り出しによる冷暖房・給湯運転とデシカントユニットへの熱融通による除加湿換気を可能とする、多熱減対応型ヒートポンプである。その COP は、冷房 9.27、暖房 4.63、給湯 4.23、冷房給湯 6.03、暖房給湯 4.54 の高効率ユニットである。ヒートポンプによる顕熱処理(冷水温度 14° C 以上)とデシカントによる潜熱分離処理(室内環境 $12.6g/kg_{DA}$ を維持)が可能であり、体積は 0.385m^3 、デシカントユニットと合わせ 0.785m^3 である。IV. ビル用デシカント換気システムの開発



家庭用冷暖房ヒートポンプ系統図

事務所やテナントなどの天井スペース (高さ 450mm) に設置可能な薄型デシカント空調機として、高効率な全熱交換素子と水平回転する WSS ローター (直径 880mm、厚み 60mm)、および再生・予冷熱源である小型ヒートポンプを組み込んだユニットを開発した。その大きさは、2140H×1030D×450H で $0.992\,\mathrm{m}^3$ である。 $40\,\mathrm{^{\circ}C}$ の低温再生条件において、除湿量 $7.8\,\mathrm{g/kg_{DA}}$ (外気条件 $30\,\mathrm{^{\circ}C}$ 、 75%、室内空気条件 $26\,\mathrm{^{\circ}C}$ 、 60%) をノンドレン運転で得ることが出来た。

V.実証テスト
i)関東及び東北にある実証実験において、室内ファンコイルユニットへの送水温度を14℃とし、潜顕分離空調を行うことで、RA環境を26°C、60%、12.6 g/kg_{DA}に維持することができ、COP は3.5~6.0 の高い値を維持できた。また寒冷地での試験でも、夏期は15℃送水で、SA 絶対湿度12~14 g/kg_{DA}の空気を供給でき、冬期は室内を18~21℃に維持しながら、SA 絶対湿度6~7 g/kg_{DA}の加湿空気を供給でき、COP は4.7~6.9 と高い効率を確保できた。

ii)関西と関東の2箇所においてビル用システムの実証テストを行った。「従来型ビルマルチエアコンと市販熱交換換気装置」と「全顕熱処理型ビルマルとデシカントユニット」の二つの組合せを比較した結果、夏期における空調消費電力を28%削減できた。また、冬期においては無給水の加湿運転が安定して行えることを確認した。

(4) 本発表の注目点

デシカントシステムが普及しない理由の一つに高価な合成材が指摘されるが、開発品ローターは市販品の半額以下(2万円)で販売の目処が立った。さらに、デシカント換気システムと従来の空調機とを同様の条件で能力、消費電力、室内環境比較した結果、開発機が快適性と高い省エネルギー性の両立を実証出来た。



[14]

東條 安匡 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	焼却主灰中難溶性セシウムの存在形態とその長期安定性
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

管理型処分場に処分される可能性が高い放射性セシウムを含む焼却主灰に関して、その長期的な安全性を確認するために、セシウムの存在形態と長期的な溶出可能性を検討した。主灰中に含有されるセシウムは、燃焼時に形成される結晶粒子表面の非晶質内に物理的に捕捉されており、極めて低い pH にならなければ、溶出することはない。さらに、たとえ易溶性のセシウムが存在したとしても、急速に進行する炭酸化により焼却主灰表面で炭酸カルシウムが形成し、易溶出性セシウムの溶出は抑制される。これらの検討から、焼却主灰中のセシウムは、元々難溶性であり、その溶出は極めて起こり難く、さらに長期的にも溶出は抑制される傾向にあることがわかった。埋立層内の pH は焼却灰埋立の場合、長期的に8以上を示すことが報告されており、そのような環境である限り、埋立地外にセシウムが放出される可能性は極めて低い。

(2) 本発表研究の概要

福島第一原発の事故以来、放射性物質を含む焼却残渣が発生している。焼却残渣は主灰と飛灰に区分される。飛灰の放射能濃度は高いため指定廃棄物となり、中間貯蔵施設の対象となるが、主灰の放射能濃度は環境省が定めた 8000Bq/kg を下回るものが多いため、従来通り、管理型処分場で埋め立てられる。これまでの調査から主灰中のセシウム濃度は低く、またその 9 割以上が難溶性態であることが確認されている。しかしながら、長期的な安全性を保証するためには、何故、難溶性であるのか、また長期的に主灰中に含まれるセシウムが放出される可能性があるかを確認する必要がある。本研究では、人工的にセシウム濃度を高めた焼却主灰を用いて、その存在形態を明らかにし、多くがガラス状非晶質内に物理的に捕捉されていることを確認した。また、多様な溶出試験から、極めて低い pH にならなければ溶出濃度は上昇しないことを明らかにすると共に風化加速試験から、一部存在する易溶性セシウムもエージングによる炭酸カルシウムの表面析出により急激に溶出濃度が低下することも明らかにした。これらのことから、たとえ放射性セシウムを含んだ焼却飛灰が管理型処分場に埋め立てられたとしても、埋立地から環境中へ放出する可能性は、極めて低いと言える。

(3) 本研究発表の詳細

<u>試料</u>: 実際に放射能で汚染された焼却主灰中のセシウム含有量は極めて小さいため、試験には、全て安定 Cs を用いて作成した人工模擬焼却灰 (主灰) を使用した。前処理として、主灰の 10-20kg をジョークラッシャーで 0.5mm 以下となるように破砕した。破砕した主灰は四分法によって 500g 程度まで縮分した。実炉から発生している主灰中の Cs は 9 割が難溶性であるが、本主灰は、添加した Cs の残存により実際の主灰よりも易溶性 Cs の割合が多かったため、主灰を蒸留水と L/S10 で混合して 6 時間連続振とうすることにより残存している易溶性 Cs を取り除いた。水洗前後の主灰試料の Cs 含有量は難溶性態が 4808mg/kg、易溶性態が 53mg/kg、合計で 4861mg/kg である

実験方法: 主灰試料は厚さ 30μm の薄片にした。まず EPMA で主灰粒子の観察および元素マッピングを行った。次に偏光顕微鏡を用いて粒子中の鉱物や非晶質の分布を観察した。 その後、偏光顕微鏡による観察像について輝度をもとに鉱物相や非晶質相の抽出を行い、次に抽出した各相の画像と EPMA による Cs 元素マッピング像を重ね、Cs の各相への分布割合を調べた。風化加速試験における系列は、ブランク、

乾燥・湿潤、凍結・融解、 CO_2 ガス 暴露の4系列とした。風化加速は8週間継続し、各系列で8検体作成し た試料を毎週一つずつ取り出し、溶 出試験に供した。風化加速試料のう ち CO_2 暴露におけるCsの溶出抑制 が著しかったことから、XRD、 EPMA、SEM-EDX、偏光顕微鏡に より、表面に何が形成されているの かを調査した。さらに、 CO_2 暴露系 列においての溶出抑制効果の長期

的安定性について pH 依存試験を実施し、Cs 溶出が抑制される pH 領域について検討した。

結果: EPMA 観察と元素マッピングによって、Alや Si の多く含まれる鉱物相の周囲に高濃度に Csが濃集しているのが確認された(図 1)。これらの鉱物周辺には非晶質相が存在しており、画像解析の結果(図 2)、濃集していた Cs の約 95%はこうした非晶質相に位置していた。すなわち、燃焼時に主

灰中の鉱物表面が融解して、ガラス状の非晶質相が生成 し、そこに Cs が取り込まれて物理的に捕捉され、難溶性 となった可能性が高い。一方、風化加速試験においては、 CO2 暴露系では 1 週で大幅な溶出量の減少が生じ、2 週 でほぼ検出限界に達した。XRD による分析から主灰中で calcite (CaCO₃)が生成していることが確認され、 SEM-EDX の観察像(図3)からも、明らかに焼却灰粒 子表面に Ca を含む鉱物が形成されていることを確認し た。すなわちこの calcite の表面析出が焼却灰粒子を覆う ことで易溶性 Cs の溶出が抑制されることがわかった。図 4には、炭酸化した灰の pH 依存試験結果である。Ca、 Cs 共に pH6.5 以上に於いて炭酸化していない灰に較べ て溶出量が顕著に低下している。pH8 以上では、溶出は 確認されなかった。通常の焼却灰埋立地では長期的に高 い pH が維持されることが知られており、極端に pH が 低下しない限り、焼却主灰からの Cs 溶出は抑制されると言える。

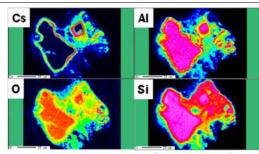


図1 EPMA での元素マッピング

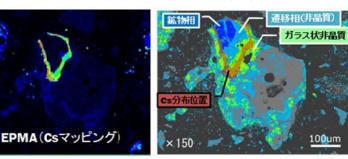


図2 EPMAによる Csの存在位置(左)と偏光顕微鏡観察像の重ね合わせ

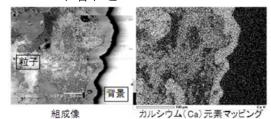


図3 炭酸化灰の表面に生成した Ca 化合物

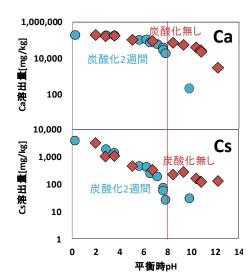


図4 炭酸化灰の pH 依存試験結果

(4) 本発表の注目点

焼却主灰中に含まれる難溶性 Cs は 9 割以上がガラス状非晶質相に存在していた。これらの非晶質相は物理的に Cs を捕捉しており、それが Cs を難溶性としている。炭酸化は、焼却灰粒子表面で形成された Calcite が粒子を覆うことで Cs の溶出を抑制する。Calcite によるセシウム溶出抑制効果は pH8 以上でその効果を保つ。実埋立地でも長期的に pH が 8 以上に維持されれば、Calcite による Cs 溶出抑制効果を持続させることは可能である。

[15]

胡桃澤 清文 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	セメント硬化体の物質移動性能予測
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

研究者の出身は元々建築であるが、サステイナブル社会の構築のために現在では資源循環にかかわる研究を行っている。特に産業界から排出される副産物である資源を有効に活用することを 目的として研究を行っている。

(2) 本発表研究の概要

コンクリートなどのセメント系材料は、広くインフラとして使用されておりその長寿命化はサステイナブル社会構築のために必須である。そのためには適切な性能予測技術が不可欠である。そこで本研究ではコンクリートを構成している硬化セメントペーストの物質移動性能予測を行うことを目的としている。

(3) 本研究発表の詳細

定するものである。

一般にコンクリートなどの多孔体材料の物質移動性能は空隙量に大きく依存しているが、空隙量のみだけでなくその空間に存在している相も影響を及ぼすと考えられる。そこでコンクリートの物質移動性能を予測するために、まずその構成材料である硬化セメントペーストの物質移動性能を予測を行った。特に各相の存在状態を考慮するために本研究では2次元断面測定の結果から得られた情報から3次元イメージモデルを構築しそれにより物質移動性能を予測した。一方、簡易にコンクリートの物質移動性能を評価する手法が求められている。そこで本研究では交流インピーダンス法に着目し、それを用いて拡散性能を評価可能かどうかを検討した。交流インピーダンス法は周波数を変化させその際のインピーダンス測定することにより物質の抵抗値を測

硬化セメントペーストの断面を反射電子像で観察した結果を図1に示す。図中の白は未水和セメント、明灰色が水酸化カルシウム、暗灰色がカルシウムケイ酸水和物、黒が空隙である。この図からそれぞれの各相を抽出し自己相関関数を計算した。その結果を図2に示す。自己相関関数は着目する相がどのくらいの距離にどのくらいの確率で存在しているかを示したものである。した

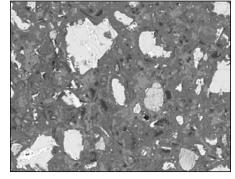
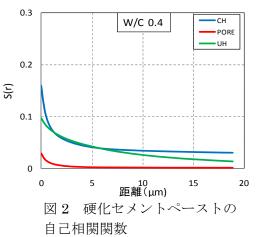


図 1 硬化セメントペーストの 反射電子像



がって距離 0 の点では各相の存在量が示されている。 また、距離が遠くなると存在量の二乗に収束する場合 はランダムに存在していることを示している。したがって硬化セメントペースト中の各相はランダムに存在 していることがわかる。この情報に基づき各相を 3 次 元空間に配置した 3 次元イメージモデルを構築した。 その結果を図 3 に示す。図中の青は未水和セメント、 黄色は水酸化カルシウム、黄緑はカルシウムケイ酸水 和物、赤が空隙を示している。このように反射電子像 から各相を抽出しその自己相関関数から硬化セメント ペーストの 3 次元イメージを構築することを可能とし た。

拡散係数の推定には、定常状態における電気伝導度と拡散係数はネルンスト・アインシュタインの式より同等であることから有限差分法による電気伝導度計算から硬化セメントペーストの拡散係数を推定した。その際には各相の拡散係数を与えそれを有限差分法によって計算することにより硬化セメントペーストクなでは数を試算した。図4に硬化セメントペーストの塩化物イオンの拡散係数の実測値と推定値の比較を示す。推定値と実測値はよく一致していることから、本研究で提案している3次元イメージモデルによる拡散係数推定の手法により塩化物イオンの拡散係数は予測可能であることが示された。

交流インピーダンス法によって得られた電気伝導度と塩化物イオンの拡散係数の関係を図5に示す。交流インピーダンス法においては抵抗と電気容量が並列である等価回路を仮定しそこから抵抗を決定した。その抵抗の逆数から電気伝導度を算出した。測定した材料にかかわらず両者は比例関係にあることから交流インピーダンス法によって得られた電気伝導度から塩化物イオンの拡散係数を推定することが可能であることが示された。

(4) 本発表の注目点

セメント系材料の微細構造から 3 次元イメージモデルを構築することにより、異なる材料を用いた場合においても物質透過性能を予測することが可能である。また、カルシウム溶脱などの劣化が進行した場合においても性能変化を予測可能なモデルである。

セメント系材料の物質移動性能評価の非破壊 手法として交流インピーダンス法を適用することにより、塩化物イオンの拡散係数を精度よく 推定できる可能性を示した。

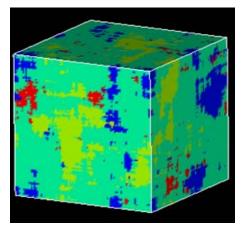


図 3 硬化セメントペーストの 3 次元 イメージモデル

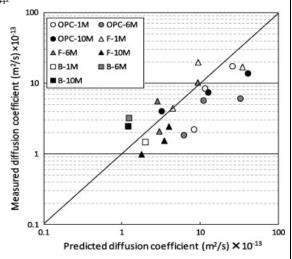


図 4 硬化セメントペーストの拡散係数の実測値と推定値の比較

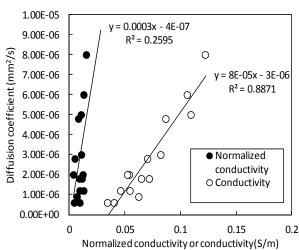


図 5 交流インピーダンス法によって 測定された電気伝導度と塩化物イオン の拡散係数の関係

[16]

坪内 直人 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	炭素系資源のガス化複合発電用ホットガスクリーンアップ法の開発
サブタイトル	安価な低品位鉄鉱石を用いる含窒素化合物の分解除去

(1) 研究者のアピールポイント

Carbon-constrained 社会においては、限りある炭素系資源を如何に効率よく利用するかが非常に大切であり、クリーン・カーボン・テクノロジーの開発研究こそが CO_2 排出量を抑制するための最善の方法と思われる。このような観点から当研究室では、劣質・未利用炭素資源を「クリーンエネルギー」や「高価値化学原料」に効率よく変換できる「高性能触媒の創製」と「プロセスの開発を支える基盤技術の確立」を推し進めている。

(2) 本発表研究の概要

石炭ガス化複合発電は、 CO_2 排出量の削減に貢献できる次世代型発電システムとして期待され、高い発電効率の実現に不可欠な高温ガス精製法の開発が望まれている。本研究では、実ガス中に含まれる微量のタール、HCI、 H_2S 、 NH_3 の高効率除去を目的とし、 α -FeOOH リッチ低品位鉄鉱石(リモナイト)を金属鉄に転化することで、低コスト高性能 NH_3 分解触媒の開発に成功した。また、本触媒は、不活性ガス中ではモデルタール N 化合物のピリジン (C_5H_5N) の完全分解を成し遂げ、 C_5H_5N 中の N の 85% 以上を無害な N_2 に転換できることを見出した (特願 2013-157078)。

(3) 本研究発表の詳細

[背景と目的] 石炭ガス化とガスタービンを組み合わせる複合発電方式 (IGCC) は、現行の微粉炭火力に比べ高い発電効率を実現できることから、 CO_2 排出量を大幅に削減可能なシステムとして開発が進められているが、効率の更なる向上のためには、生成するガス (燃料ガス) 中に含まれる微量のタール、HCI、 H_2S 、 NH_3 を高温で除去する技術の開発が必要である。このような観点から、安価な高温ガス精製法の開発を推し進めたところ、 Fe^{3+} を添加した褐炭より製造した α -Fe 微粒子含有炭素複合体が、 500° C 以上で He 中の NH_3 をほぼ完全に分解できることを見出した。そこで本研究では、Fe 添加工程が不要な鉄鉱石に着目し、その NH_3 分解能を調べるとともに、実際的観点から燃料ガスを模擬したガス雰囲気下での性能評価に取り組むことを主な目的とした。

[実験] 触媒原料には、 α -FeOOH を多量 (88 wt%-dry) に含む豪州産のリモナイト (S_{BET} =20 m^2 /g) を用いた。その Fe 濃度は 56 wt%-dry であった。実験では、固定床反応器に充填した試料を 500°C で H_2 還元したのち所定温度に保持し、次いで、種々のガスと混合した 2000 ppm NH_3 を流通させた。また、100 ppm C_5H_5N を流通させる実験も行った。生成ガスと未反応ガスは高速マイクロ GC と光音響式ガスモニターでオンライン分析した。空間速度は 45000~51000 1/h である。反応前後の触媒のキャラクタリゼーションは主に粉末 X 線回折 (XRD) により行った。

[結果と考察] 図 1 に、He で希釈した NH₃ の分解率に及ぼす温度の影響を示す。石英ウールのみ (図中の Blank) での分解率は 950°C で 1 % 以下であった。これに対し、リモナイトの触媒効果は 350°C ですでに認められ、450°C では時間の経過とともに顕著となり、定常時の分解率は 90 % に

達し、温度を 500~950℃ に上げると NH、はほぼ完全に分解した。また、リモナイトは ≥450℃ で C_3H_5N の分解を著しく促進し、分解率はほぼ 100% となり、 N_2 収率は 85% を上回った。つまり、 リモナイトは 450℃ 以上で、He 中の NH3 と C5H5N の分解に対して高い活性を発揮した。

次ぎに、燃料ガスの主成分である CO/H₂(合成ガス) の影響を検討した。図 2 に、NH3 に対する 結果を表す。 定常時の分解率は、750°C では約 50% と小さかったが、温度の上昇とともに増加し、 950℃ では 90% になった。しかし、これらの値は合成ガスなしの場合 (図 1) に比べると小さく、 その差は低い温度ほど大きかった。このような活性劣化は C₅H₅N 分解時にも起こり、750°C での 2h後の N_2 収率は 20% であった。反応後のリモナイト上には、低温ほど多量の炭素が認められ、 CO₂ 発生量も多かったことから、式 1 による炭素析出が活性低下の主な原因と考えられる。

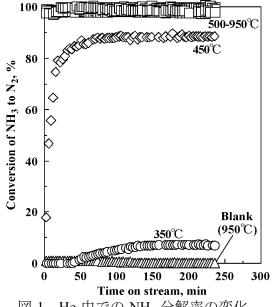
$$2CO \rightarrow C + CO_2 \tag{1}$$

燃料ガス中には数 % 程度の H₂O が含まれるので、その共存効果を調べた。 図 2 に示すように、 750°C での NH, 分解率は CO/H, のみの場合に比べ約 40% 増して 90% に達し、850~950°C では He 中 (図 1) と同様にほぼ全ての NH_3 が N_2 に転換された。このような H_2O の共存効果は C_5H_5N 分解実験でも認められ、750°Cでの定常時の分解率は85%、N₂収率は65%となった。

反応前後のリモナイトの XRD 測定を行なったところ、元々存在した α -FeOOH は H_2 還元時に 金属鉄 (α-Fe) に転換され、その平均結晶子径は 15~25 nm と微細であった。合成ガス単独下での 反応後にはセメンタイト (Fe₁C) に由来するシグナルが現れたが、合成ガスに H₂O を添加すると Fe₃C が完全に消失して α-Fe のみが存在した。これは、水性ガスシフト反応 (式 2) により活性な α-Fe 上に析出する炭素量が減少したためと推測され、その結果、リモナイトの触媒性能は不活性 ガス中とあまり変わらないレベルまで回復した。

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \tag{2}$$

以上より、α-FeOOH を多量に含むリモナイトは 500°C 以上で不活性ガス中の NH₃ と C₃H₃N を ほぼ完全に分解し、一方、合成ガス共存下では、その活性は低下するものの、H₂Oを加えると 750℃ 以上での両化合物の分解率は85%以上に達することが明らかとなった。



He 中での NH3 分解率の変化

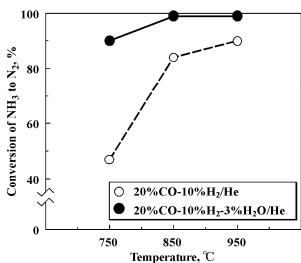


図 2 NH、分解率に及ぼすガス組成の影響

(4) 本発表の注目点

リモナイト由来の α -Fe は、従来の Ru や Ni ベース触媒に比べ低温かつ短い接触時間で NH、と CoHoNを分解除去できることから、ガス精製触媒として非常に有望である。また、リモナイトは 安価で入手が容易なことから経済性に優れ、実用化に向けた強いドライビングフォースになる。 本成果は、発電効率を低下させる湿式処理に依らない低コスト型高温ガス精製原理を与える。

[17]

栗原 正仁 大学院情報科学研究科 情報理工学専攻・教授



発表タイトル	キーワードのあいまい一致と分割を導入したキーワードプログラミングシ ステム
サブタイトル	プログラムコードのあいまいな一部から正しいコードを推測する

(1) 研究者のアピールポイント

私が教授を務めている「知能ソフトウェア研究室」は、ソフトウェア工学(SE)と人工知能(AI) の基礎を担当しています。SE は、複雑・大規模なソフトウェアを、「より簡単・確実」に設計・開発する技術です。AI は、人間の知能を工学的に模倣するなどして、「より高機能」のソフトウェアを創出する技術です。

30年ほど前ですと、SE は産業界で使われている実用技術であるのに対して、AI は役に立つかどうかよくわからない研究分野であったことから、この2つの分野は水と油のような関係で、私のようにこの両分野にまたがる研究をしている研究者はあまり多くありませんでしたが、最近はAI の実用性が産業界でも認知され、この両分野にまたがる研究が理解されてきています。

このような経緯もあり、この2つの技術を両輪として教育・研究を行う研究室は全国的にあまり多くなく、本研究室は「異分野の融合による新研究領域の創出」を目指す大学院情報科学研究科と工学部情報エレクトロニクス学科の特徴の1つと言えるでしょう。

今回ご紹介する研究は、博士後期課程学生の坂本君が自主的にテーマを設定し、意欲的に研究 開発を行っているものです。上記の趣旨から、現時点ではまだ完全には実用的となっていません が、プログラムコードの一部をあいまいに入力すると、正しいと思われる完全なコードをシステ ムが推測して提示するというのは、AI らしい夢があるとご理解いただければ幸いです。

(2) 本発表研究の概要

キーワードプログラミングというプログラミングを支援するツールの研究をご紹介します。これは、ユーザ(プログラマ)が与える少数のキーワードに基づき、現在の文脈に適したコード片を自動生成することによって、プログラミング言語の文法規則や API を正確に覚えていないユーザでも正しいコードを効率よく書けるよう支援するツールです。先行研究では完全一致するキーワードを入力することを前提としていましたが、よりユーザの認知的な負担を軽減するために、あいまいなキーワード入力にも対応できるようツールの拡張を行いました。

(3) 本研究発表の詳細

図1はツールの動作を表した図です。入力クエリーとして add line という2つのキーワードを入力し、「Cntl+Space」を押すと、array.add(src.readLine())という出力を生成します。図2は完全な単語から母音を省略して短縮したあいまいなキーワード encd txt を入力した時のツールの動作を表した図です。図で表されているように出力結果は Google の検索結果のように、ポップアップに複数表示され、その中から最適なものをユーザが選択することができます。本研究で作成したツールは、図のように省略された単語だけでなく、文字が1文字置換および追加された場合であっても完全な単語を入力した場合と比較して精度が極端に悪くなることはありません。

```
public List(String) getLines(BufferedReader src) throws Exception($\delta$ List(String) array = new ArrayList(String)(); $\delta$ while(src.ready())($\delta$ ad Line$ $\delta$ ad Line$ $\delta$ return array; $\delta$ $\delta$ \text{Ctrl} + Space $\delta$ List(String) getLines(BufferedReader src) throws Exception($\delta$ tist(String) array = new ArrayList(String)(); $\delta$ while(src.ready())($\delta$ array.add(src.readLine()); $\delta$ return array; $\delta$ }\delta$ return array; $\delta$ }\delta$
```

図1 ツールの動作

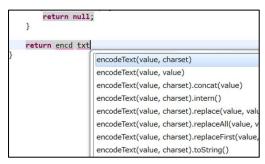


図2 ツールの動作.(あいまいキーワード)

(4) 本発表の注目点

本研究は認知的負担を軽くするという意味で、プログラミング言語初心者ためのツールであり、 プログラミング言語の習得や言語間の移行が容易になります。また短縮されたキーワードを入力 でき物理的負担を軽減することも可能です。

現在開発している実装は、良く利用されている Eclipse というプログラム開発環境の上で、Java 言語によるプログラム開発を行いたい状況に対応しています。たとえば、C、 C++、 C#による 開発経験はあるが、Java での経験に乏しいようなプログラマは、このような条件にあてはまるのではないかと思います。

[23]

本村 真人 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	ソフトウェアの価値をハードウェアの世界へ
サブタイトル	

(1) 研究者のアピールポイント

モバイル機器や環境に埋め込まれたセンサなどの**低電力**/高速な情報処理の実現、およびビッグデータを扱うクラウドコンピューティングにおける高速/**低電力**な情報処理を実現するためには、ソフトウェアのみに頼るのではなく、ソフトウェアの柔軟性をも兼ね備えた新世代のハードウェアによる情報処理の技術が今後ますます重要になります。このような社会的要請に着目して、FPGA(Field Programmable Array)による情報処理(リコンフィギュラブルコンピューティング)や FPGA に変わる新たなリコンフィギュラブル LSI の提案など、ソフトウェア・ハードウェア融合領域の研究に力を入れています。

(2) 本発表研究の概要

具体的には、①サーバーのリアルタイム・ビッグデータ処理を加速する「ストリーム処理アクセラレータ」、②センサでの高度な情報処理を可能とする「低電力・リコンフィギュラブルプロセッサ」などの研究を行っています。

(3) 本研究発表の詳細

①においては、FPGAをサーバーに活用することで、サーバーの情報処理基盤の一部である memcached 処理を加速する技術を研究開発しました(図 1)。 Memcached は、例えば Facebook

や Twitter など既に日常生活の一部となっているビッグ データサービスの根幹をなしており、実用化されれば大き な社会的インパクトがあるものと考えています。

また、②においては、柔軟なハードウェアを実現するためのキー技術である「動的再構成技術」が低電力化面ではマイナスになっていることを詳細に分析し、柔軟性と低電力性のバランスを徹底的に追求した「限定的動的再構成アーキテクチャ」を研究開発しました。同じ処理をソフトウェアで実行した時に比べ、数倍の電力効率を実現することができます。

(4) 本発表の注目点

ハードウェアにのみ頼ることなく、ハードウェアとソフトウェアの適材適所を常に意識している点が、我々の研究活動の特徴です。例えば、①では、ソフトウェアをハードウ

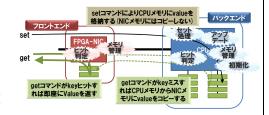


図 1. Memcached 加速技術

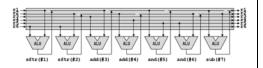


図 2. 限定的動的再構成方式(一部)

ェアに完全に置き換えるのではなく、単純でかつ実効時間の大半を占める処理の部分だけハードウェア化し、複雑な処理の部分はソフトウェア処理に任せることで、全体効率を追求しています。いわば、人間の延髄・小脳の部分をハードウェアで、大脳の部分をソフトウェアに擬えて全体を構成するアプローチであり、このような考え方が今後ますます重要になると確信しています。

[27]

平田 拓 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	電子の目で分子を見る
サブタイトル	磁気共鳴分子イメージング

(1) 研究者のアピールポイント

鏡写しになった構造をもつ分子、鏡像異性体のペアを区別して可視化する磁気共鳴分子イメージング法を開発しました。電子常磁性共鳴(電子スピン共鳴)現象を用いて、標的となる分子に付けられた目印を可視化します。これまでに、鏡像異性体ペアを含む水溶液を可視化する実験と、マウス体内で鏡像異性体を可視化する実験に成功しました。薬物はキラルな分子構造を持つ場合が多く、その鏡像異性体(エナンチオマー)の可視化は、生物医学や創薬に関わる研究テーマです。

(2) 本発表研究の概要

鏡像異性体にニトロキシルラジカル構造を持つラベルを結合することにより、電子常磁性共鳴 イメージング法により可視化する方法を述べます。鏡像異性体のペアを区別する鍵は、窒素 N の 同位体を用いることです。窒素の同位体 14 N と 15 N の核スピンの量子数 I が異なるため (I =1 と I =1/2)、電子常磁性共鳴によるエネルギー吸収のスペクトルを区別することができます。

(3) 本研究発表の詳細

薬物の多くは、キラルな分子構造を持っています。なぜなら、我々の体を作っているタンパク質は、キラルなアミノ酸により構成されているからです。薬物の効果を説明する際に、しばしば鍵穴とカギの説明を使うことがあります。鍵穴の構造が捩じれていると、その捩じれている穴にフィットする分子でなければ鍵穴に作用しないと考えられています。例えば、人工甘味料のアスパルテーム(図 1)は、日本では味の素から「パルスイート」という商品名で販売されています。このアスパルテームはキラルな化合物で、鏡像異性体の他方は甘くないと言われています。

このように、生物の活動に関わりの強いキラルな分子の鏡像異性体を可視化する方法を開発し

ました。可視化するために、不対電子 を有するニトロキシルラジカルを目印 (ラベルと呼びます)として、標的

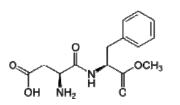


図 1 キラルな分子の例、人工甘味料アスパルテーム

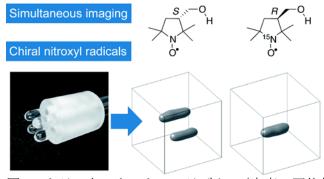
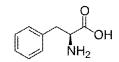


図 2 キラルなニトロキシルラジカル (窒素の同位体に注目) と三次元可視化の例 (Y. Miyake *et al.*, *Anal Chem* 2013)

分子に結合した化合物を合成しました。図 2 にラベルとして使うキラルなニトロキシルラジカルの例を示します。ここでは示しませんが、電子常磁性共鳴による電磁波の吸収スペクトルが異なるため、同時に計測しても ^{14}N を有する分子と、 ^{15}N を有する分子を分けて、可視化することができます。このようなラベルを標的分子となる鏡像異性体に結合することにより、鏡像異性体を同時且つ選択的に可視化することができるようになります。

図 2 は目印になるラベル分子のみを可 視化した実験結果ですが、動物の体の中 で薬となる化合物の行方(薬物動態と言 います)を追うことができれば、薬学研 究にとって役立つことが予想されます。 次の段階として、生体に関わるキラルな 分子であるアミノ酸の一つ、フェニルア ラニンを標的分子としました。アミノ酸 は、天然では L 体しかなく、我々の体の タンパク質は L 体のアミノ酸で作られて

天然に存在 人工的に合成



O NH₂

L-Phenylalanine (L-Phe)

D-Phenylalanine (D-Phe)

図3 フェニルアラニンの鏡像異性体(L体とD体)

います。天然には存在しない D 体のフェニルアラニンを用意し、それぞれ窒素同位体の ^{14}N と ^{15}N を含むニトロキシルラジカルをラベルとして結合しました。この、L 体と D 体のフェニルアラニン誘導体を、マウスに投与し体内で標的分子を可視化することに成功しました(未発表)。図 3 にフェニルアラニンの構造を示します。この図は、ラベルが結合されていない L 体と D 体のフェニルアラニンを表しています(ちなみに、フェニルアラニンは、図 1 のアスパルテームの構造の一部でもあります)。計測には、研究室で開発した 750MHz 電子常磁性共鳴イメージング装置を使用しました(H. Sato-Akaba et al., Anal Chem 2009)。

(4) 本発表の注目点

磁気共鳴分光法の一種である電子常磁性共鳴を用いて、電子をラベルとして鏡像異性体を可視化する方法を実証しました。鏡像異性体をラベル化し、同時にマウスの体の中でイメージングした点が新しい到達点です。水溶液中での同時イメージングの結果は我々のグループから既に報告されています。

市場に出ている薬物の多くはキラルな構造を持つ化合物です。鏡像異性体を含む(ラセミ体と呼ばれます)状態で薬物として使用する場合には、鏡像異性体の他方の毒性や薬理作用も調べる必要があります。そのような場合に、それぞれの化合物を体の中で可視化できる技術が実現しました。実際に応用する場合には、ラベルを結合した化合物の安全性と、ラベルの結合により薬理作用への影響が生じないことを確認する必要があります。

平成23年の国内における医薬品最終製品の生産額は約7兆円、外国からの輸入金額は約2.5兆円です(厚生労働省・薬事工業生産動態統計年報)。この多くがキラル医薬品であることを考えれば、キラル化合物を可視化する計測技術の進展が、研究のためだけではなく医薬品開発や我々の生活に深く関係していると言えます。

謝辞

本研究に用いた鏡像異性体化合物は、東北大学大学院生命科学研究科・有本博一教授から提供頂きました。また、動物実験につきましては、札幌医科大学の藤井博匡教授、北大獣医学研究科・安井博宣助教にご協力頂きました。この研究は、内閣府の最先端次世代研究開発支援プログラムの助成により実施しました(課題番号 LR002)。

[31]

日景 隆 大学院情報科学研究科 メディアネットワーク専攻・助教



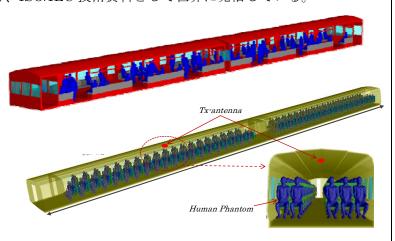
発表タイトル	大規模電磁界解析による乗り物内無線接続サービスの電波伝搬特性評価手法
サブタイトル	ワイヤレス環境の最適設計を目指して

(1) 研究者のアピールポイント

本研究者は電波の人体侵入、さらに体内埋込み型医療機器の電磁干渉評価とメカニズム推定、車輛内やエレベータ内などの複雑で特殊な伝搬環境評価、電気自動車無線給電装置の漏洩電磁界評価など、様々な電波利用分野での研究実績を上げてきている。またシミュレーションの妥当性確認のため、実験研究を並行して進めてきたものであり、その成果は例えば RFID 読み取り装置による植込み型心臓ペースメーカ干渉の技術調査資料として、ISO/IEC 技術資料として世界に発信している。

(2) 本発表研究の概要

乗り物内の無線伝搬環境は、周囲が 金属であることによる多重反射、加え て内部に什器や乗客の存在により、従 来の伝搬モデルとは異なる特殊な環境 になる。そのため、実運用状況の無線 接続品質を見積もるには、乗客人体等 による電波の吸収・散乱の効果を含め た電波伝搬特性の評価が必要となる が、実測や簡便な数値解析(レイトレ ース等)にてこれらを評価することは 困難である。本研究は、従来困難であ



った乗り物内の伝搬環境モデリングに取り組み、超大規模解析空間におけるシミュレーション手法を スーパーコンピュータの利用により実現するものである。

(3) 本研究発表の詳細

多数の乗客を含む旅客鉄道や航空機について、大規模電磁界シミュレーションを実施し、従来にない高精度な伝搬特性評価を実現する。乗車率と電波伝搬における損失量の関係等について定量的評価を初めて実現した。これらにより、例えば、乗客人体吸収による伝搬損失を起因とするサービス品質劣化を定量的に把握することが可能となった。本研究成果は、MIMO、複数帯域使用など今後益々複雑化するワイヤレス通信環境の最適設計(安全性評価などにも)等への寄与が期待される。

(4) 本発表の注目点

計算処理能力向上の進展により、将来は安価な計算機リソースの利用で、市街地などより広い伝搬空間を対象とした大規模シミュレーションが可能となると考えられる。計算機空間における「電波伝搬の可視化」を具現化する極めて有望な手法としても発展し、電波・電磁界利用全般について応用発展することが期待される。オフィス、航空機、車輛内などで電磁界分布の2次元、3次元詳細測定は実際上不可能であり、計算機シミュレーションを将来は使わざるを得ない。本研究は、そのためのパイオニアとなる。

[37]

五十嵐 一 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	電波型エネルギーハーベスターの開発
サブタイトル	パラメータ最適化およびトポロジー最適化によるアンテナ設計

(1) 研究者のアピールポイント

構造物の状態監視や人の健康管理のための無線センシングを研究している。特に無線センサを 駆動するために環境からエネルギーを回収(ハーベスト)する電磁誘導型振動発電機と電波型エネ ルギーハーベスターを開発してきた。本発表では後者について説明する。

(2) 本発表研究の概要

近年、建造物の状態管理や森林等の自然環境の状態モニタリングのための無線センサネットワークが注目を集めている。バッテリー付きの無線センサをセンシング対象領域に広くかつ大量に設置した場合、バッテリーの交換に膨大な労力がかかる。したがってバッテリーのない無線センサの開発が望まれる。無線センサを自立的に動作させるために、環境中の電磁波を電力に変換する電波型エネルギーハーベスターを利用することが考えられる。本研究では、無線センサ用電波型エネルギーハーベスターを開発するために、アンテナの最適設計を行った。最適化ではパラメータ最適化とトポロジー最適化の二通りの手法を用いた。最適化によって得られたアンテナを試作しその特性を実験的に測定し、それら特性の比較検討を行った。

(3) 本研究発表の詳細

周波数 1.0 GGHz \sim 2.0 GGHz の帯域におけるアンテナの平均リターンロスを最小にするようにアンテナの形状を最適化した。まず方形スパイラルアンテナの形状を 8 つの設計パラメータで表し、そのパラメータを変化させた(パラメータ最適化)。本アンテナには C_2 の回転対称性がある。また設計パラメータを必要としないトポロジー最適化法を用い、アンテナの形状最適化を行った。本最適化では正規化ガウス関数ネットワーク (NGNet) を用いてアンテナ形状を表現し、その結合の重みを変化させた。アンテナは C_4 対称性を持つことを課した。結果として得られたアンテナ(図 1.2)は、どちらのアンテナも、周波数 1.0 GGHz \sim 2.0 GGHz においてリターンロスが-10dB を下回る特性を持つことを実験にて確認した。またアンテナゲインを含めた最適設計も実施している。現在、アンテナに接続する蓄電回路を設計しており、実環境でのエネルギー回収実験を行う予定である。またわれわれは RFID センサ

の設計をしてきており、本エネルギーハーベスターと RFID センサを用いたセンシングシステムについて、研究を実施していく予定である。

(4) 本発表の注目点

トポロジー最適化に用いた NGNet 法はアンテナ以外の広い対象にも適用可能である。実際、われわれは本手法を IPM モータおよびリラクタンスモータの回転子形状、磁気シールドなどの形状最適化に適用し、良好な結果を得ている。



図1 パラメータ最適化により得られた方形スパイラルアンテナ

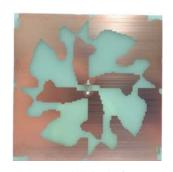


図 2 トポロジー最適化によ り得られた C₄ 対称アンテナ