

青葉山に新しい二つの「みどり」 造営進む新キャンパスのご紹介

仙台市都心部にほど近いながらも、ゆたかな自然が残されている青葉山。この青葉山の81ha(東京ドーム17個分)という広大な敷地で、青葉山新キャンパスの造営が進められています。青葉山は、広瀬川や市街地のケヤキ並木と共に、「杜の都仙台」の象徴として親しまれてきました。市民共有の財産である青葉山の自然環境と公共性を維持継承するため、東北大学では「自然共生型キャンパス」をコンセプトに据えて、環境と調和した、開かれたキャンパスづくりを目指しています。環境科学研究科本館が新キャンパスに完成してから2年が経ちました。完成目指して今なお発展中の、環境科学研究科本館周辺の姿をご紹介します。

青葉通のケヤキ、新青葉山へ

仙台市営地下鉄東西線の工事で、仙台市のシンボルともいえる青葉通のケヤキの一部はどうなったかと思われる方もいらっしゃるのではないのでしょうか。地下鉄一番町駅と西公園駅周辺で葉を茂らせていたケヤキは地下鉄工事の影響を受けるため一部は伐採されましたが、樹勢が良好で移植に耐えられると判断された17本は公園等に移されました。実はこのうち9本が、環境科学研究科本館近くの遊歩道に移植され

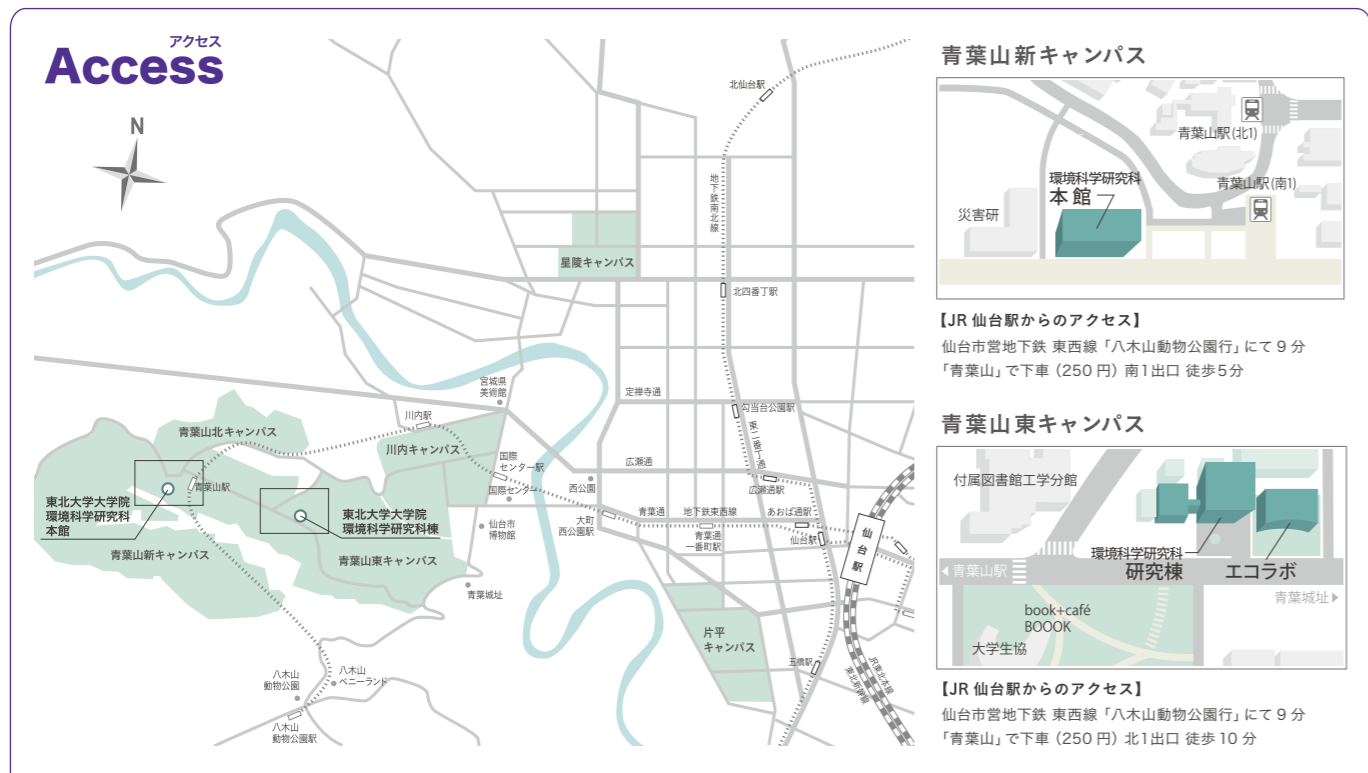


青葉通から移植されたケヤキと研究科本館(右建物)

ています。賑やかな市街地から新キャンパスに移ってきたケヤキ、春が来れば再び、たくさんの若葉を芽吹かせてくれることでしょう。

レストラン、保育園・・・青葉山の新しい景色

環境学研究科の東隣、地下鉄青葉山駅前のバスプールに隣接する形でこの春竣工するのは福利厚生施設です。1F～2Fは店舗でコンビニエンスストアとレストラン、喫茶店、大学生協が入り、新キャンパスはこれまでよりもっと便利になります。3Fには東北大で3件目となる保育園が設置されます。保育園の名は「青葉山みどり保育園」。青葉山の緑と、新芽のような小さな子供「みどり子」の、二つの意味をもつ名称の保育園です。ケヤキの若葉の下で遊ぶ子供たちが、新しいキャンパスの新しい風景になるかもしれません。



特集 大地と大気 大きな環境の動きをつかむ

① 地震の“引きがね”を探る -実測からのアプローチ-

先進社会環境学専攻 資源戦略学講座
地球開発環境学分野 准教授 坂口清敬

② オゾンホールは今? -オゾン層を破壊する 塩素化合物の動向から-

先端環境創成学専攻
太陽地球システム・エネルギー学講座
地球システム計測学分野 准教授 村田功

Research Report

リサーチ・レポート

① 環境リスク評価とは?

先進社会環境学専攻 エネルギー資源学講座 エネルギー資源リスク評価学分野 助教 中村謙吾

② 触媒は見た目が肝心 -水素社会に向けた材料開発-

先端環境創成学専攻 環境創成計画学講座 環境材料表面科学分野 助教 轟直人

トピックス Topics

青葉山に新しい二つの 「みどり」

造営進む新キャンパスのご紹介

特集
1

地震の“引きがね”を探る - 実測からのアプローチ -

東北大学大学院環境科学研究科 准教授 坂口清敏



図1 釜石鉱山の地下約300m地点での地殻応力測定風景

地下深くで発生する地震を掴めるか？

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(東北沖地震)前後(1991年~2016年)に岩手県釜石鉱山の地下約300mで測定された地殻応力の増減と、釜石沖で発生した地震の規模および発生頻度の相関から、「本震の断層すべり破壊が停止した地域では地殻応力が上昇し余震を活発化させ、さらにその余震で、上昇した地殻応力が元の状態に戻る」という、典型的な地震—地殻応力関係を、地殻応力の実測によって初めて確かめました。

地殻応力と地震の関係

地殻応力は地下で発生する方向性を持った力(圧力)で、場所毎に大きさと方向の異なる三次元的な圧力が同時に作用しています。地殻応力は地震発生のトリガーといえます。地殻応力の測定(図1)は、トンネルや地下空洞の設計・施工など工学分野で一般的に行われています。

本研究では円錐孔底ひずみ法(図2)(筆者の博士論文の成果で、現在は International Society for Rock Mechanicsの標準試験法および地盤工学会の基準になっています。)という地殻応力測定法を用いて、1991年~2016年にかけて岩手県釜石鉱山の地下約300m地点において測定された地殻応力の

地震は浅くとも地下数km以深で発生するため、発生メカニズムの理解には同深度程度を対象とした研究が必要とされています。本研究成果は、地震発生のトリガーとなる地殻応力を地下数百mという浅い箇所であっても定期的に定点で測定すれば、甚大災害と成り得る巨大地震のすべり破壊挙動を理解することに資する情報が得られることも示しており、地震研究の新たな手法の確立への貢献が期待されます。なお、本研究成果は、2017年8月31日、英国の科学誌 Scientific Reports(電子版)に掲載されました。

大きさの変化(図3)に着目しました。図3から、東北沖地震1年後の地殻応力の3成分である最大、中間、最小主応力の大きさは、地震前に比べて2倍~4倍大きくなっていますが、徐々に減少して、3年後以降は地震前のレベルに戻っていることがわかります。

図4は東北沖地震における5m以上の地震すべりの分布図に三陸沖低地震活動域(SLSR: Sanriku-oki Low-Seismicity Region)を重ねたものです。SLSRはいわゆる地震の空白域と言える場所です。東北沖地震によるすべりの小さな領域(5m未満のすべり)は釜石沖にコの字型に分布しています。

また、この領域は SLSRに含まれています。釜石地域は東北沖地震のすべり域の西側外縁に位置していますが、本震によるすべりは釜石沖のコの字型の領域で止まったと推察されます。釜石沖で発生した地震の規模と発生頻度(図5)を調べると、東北沖地震前(1955年~2010年)は、約5.5年おきにマグニ

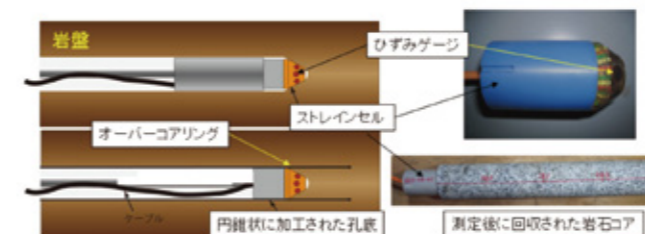


図2 円錐孔底ひずみ法による地殻応力測定

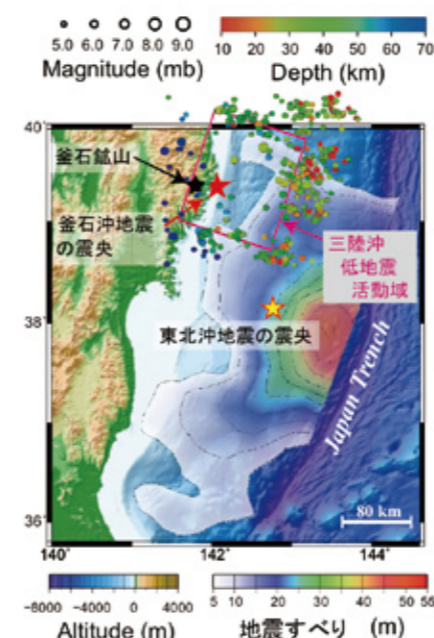


図4 東北地方太平洋沖地震による5m以上の地震すべり分布 (Yagi and Fukuhata, GRL, 2011)と三陸沖低地震活動域(Ye et al., JGR, 2012)

浅いところから深いところを理解する

上述した地殻応力と釜石沖地震の相関から、「東北沖地震発生直後の地殻応力の上昇は、釜石沖でSLSRがバリアとなりすべりが止まったことが原因である。この結果、地殻応力が上昇し釜石沖で地震が増加した。頻発した地震により地殻応力が解放され、釜石鉱山における東北地震後2年目以降の応力値は減少し地震の頻度も減少した。」という地震—地殻応力関係が理解されます。

本研究成果は、地震発生のトリガーとなる地殻応力を浅所(地下数百m)であっても定期的に定点で測定すれば、甚大災害と成り得る巨大地震のすべり破壊挙動を理解することに資する情報が得られることも示しており、地震研究の新たな

チュード4.7~5.1の地震が発生していました。一方、東北沖地震後の1ヶ月間は10日に1回程度の頻度でマグニチュード5.5~5.9の地震が発生しています。また、東北沖地震の1年~2年後の期間では、4か月に1回の発生頻度になり、その規模は東北沖地震前とほぼ同じ規模に戻っています。

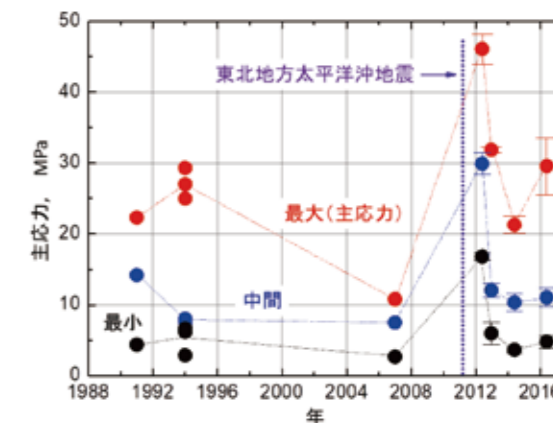


図3 東北地方太平洋沖地震前後の地殻応力の変化

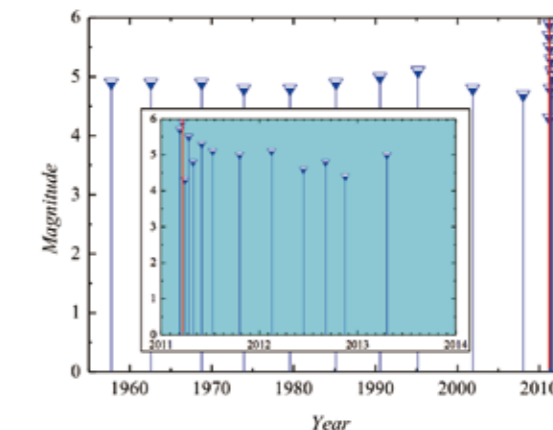


図5 釜石沖で発生した地震の規模と発生頻度(1955年~2013年) (Ariyoshi et al., GRL, 2014)

手法の確立への貢献が期待されます。本研究は、JSPS科学研究費補助金(課題番号: 23360399、26289346、25000009、16H04065)の支援を受けて実施しました。

東北大学大学院環境科学研究科 准教授

坂口 清敏 (さかぐち・きよとし)

専門はジオメカニクス。東北大学工学部資源工学科助手、同大学院工学研究科講師、同大学院環境科学研究科講師を経て、2009年11月より現職

住所: 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20
電話: 022-795-7381
E-mail: kiyotoshi.sakaguchi.c5@tohoku.ac.jp



特集
2

オゾンホールは今？ -オゾン層を破壊する塩素化合物の動向から-

東北大学大学院環境科学研究科 准教授 村田 功

フロン規制が効いてない？

オゾン層破壊とその対策としてのフロン規制については中学や高校でも習うようですので知っている人も多いかと思いますが、フロンが直接オゾン層を破壊するわけではありません。フロンは「安全」な物質としてスプレー噴射剤などに使われていたくらいですから、対流圏ではほとんど化学反応に関わりません。しかし、成層圏に運ばれると紫外線によって分解し塩素を放出します。この塩素は通常は比較的安定なHCl、ClONO₂といった分子として存在しますが、極域で特殊な条件がそろると活性な塩素への変換が起こり大規模にオゾン層を破壊します。そのため、この活性塩素の元となる成層圏のHClやClONO₂の量はオゾン層破壊の重要な指標です。

我々は国立環境研究所との共同研究として、フーリエ変換型分光計(FHIR)を用いた赤外分光観測により1998年からつくばにおいて大気中の様々な微量成分を観測していますが、HClについても継続的に解析してきました。また、同様のFTIR観測は国際的な観測ネットワークNDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change: 大気成分変動観測ネットワーク)に属する20以上の観測サイトで行われています。

大気中のHClは1980年代までは数%/年で増加していましたが、フロン規制によって対流圏の塩素量が1990年代に減少に転じるとHClの増加率も鈍り、2000年代に入って減少傾向が見られるようになりました。つくばの観測でも2000年代前半には2%/年程度の減少が観測されていました。ところが、ユングフラウで観測を行っているベルギーのグループが

2007年頃からHClが再び増加していることを見だし、我々も含めたNDACCの8つの観測点のHCl経年変化を調べたところ、図1に示すように北半球の観測点のみ2007年以降増加に転じていることがわかりました(Mahieu et al., 2014)。なお、観測されているのは高度方向に積算したカラム全量という値ですが、HClの場合は対流圏では少なく成層圏に多く分布する成分ですので、主に成層圏での変動を反映していると考えられます。成層圏の塩素量が再び増えたとするとオゾン層破壊がまた拡大するのではないかと心配になりますが、3次元化学輸送モデルを用いた解析から今回の再増加は短期的な大気循環の変動によることが分かり、フロン規制は問題なく機能していることがわかりました。

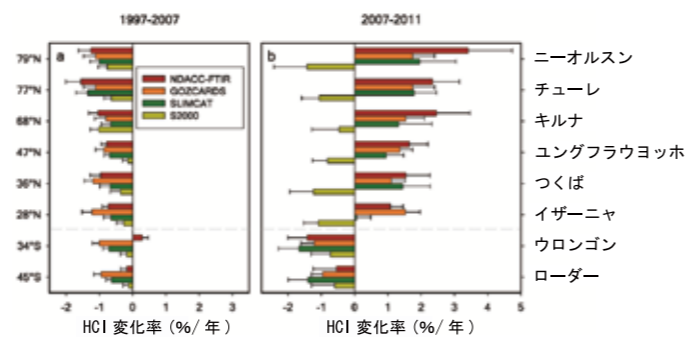


図1 8つのNDACC観測地点におけるHClの変化率。図aは1997-2007年の期間における年変化率(%/年)。図bは2007-2011年の期間における年変化率。年変化率はFTIRおよびGOZCARDS(人工衛星)観測データ、ふたつのSLIMCAT計算結果から導出。エラーバーは標準偏差の2倍で定義した誤差範囲を示す。[Mahieu et al./Nature]

HClの動きを見つめる

HCl再増加の原因が短期的な大気循環の変動なのであれば、その後またHClは減少に転じるはずですが、そう思ってその後のつくばのデータを解析してみたのが図2です。予想通り2012年以降は若干の減少傾向が見られ、少なくとも増加傾向は止まっていることがわかりました。気象データを用いて循環の変化を調べてみると、図3のようになりました。細かい説明は省きますが、これは質量流線関数の変化をみたものです。(a)がHClが減少していた2006年より前の4年分

の平均と再増加した2007-2010年の平均との差、(b)が2007-2010年の平均と増加が止まった2012以降の4年分の平均との差です。赤枠で囲った北半球下部成層圏を比較すると負(青)から正(赤)に変わっており、これは循環が減速から加速に変わったことを示しています。2007年を境に成層圏の循環が減速したことがHClの再増加の原因だったのですが、2012年以降は加速に転じており、これが観測されたHClの減少傾向に対応することが確認できました。

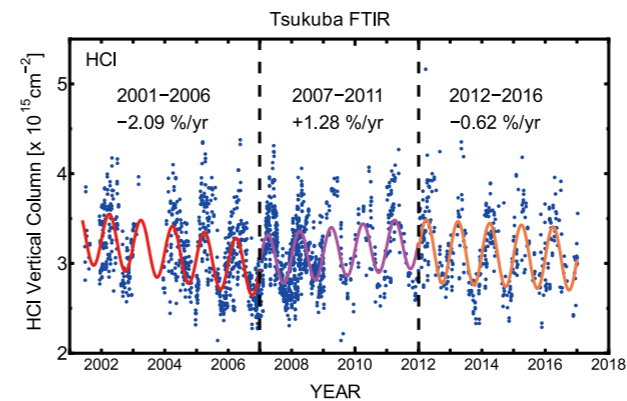


図2 つくばで観測されたHClカラム全量の経年変化。点線で区切った3つの期間についてのフィッティング曲線と年変化率も示してある。

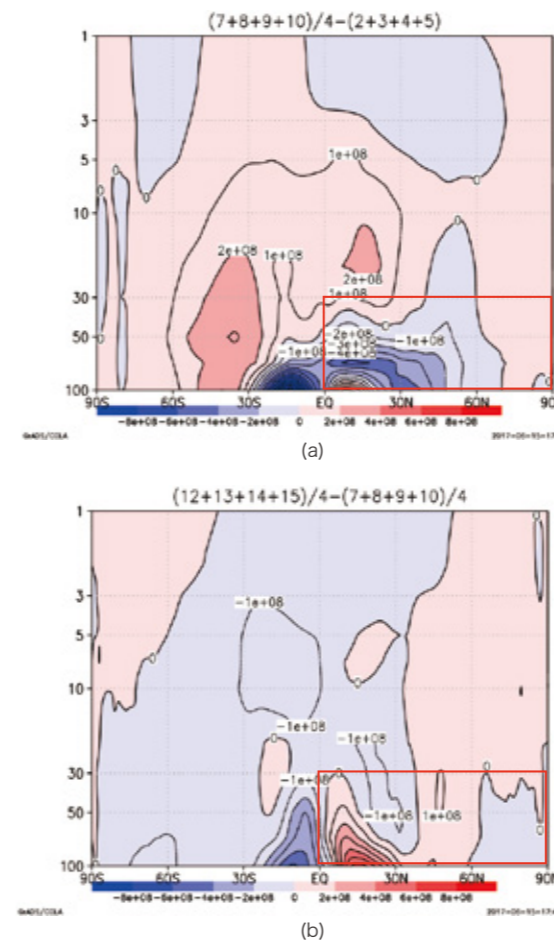


図3 質量流線関数の変化
(a) 2002-2005年の平均と2007-2010年の平均との差
(b) 2007-2010年の平均と2012-2015年の平均との差
(国立極地研究所富川喜准教授提供)

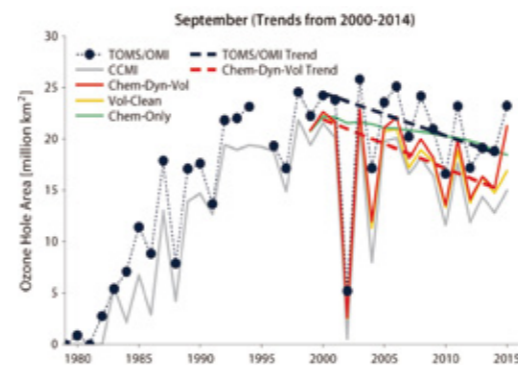


図4 9月のオゾンホール面積の経年変化。黒丸が衛星観測結果、黒点線がその2000年以降のトレンド。[Solomon et al./Science]

オゾンホールの回復が見えた！

オゾン層保護のためにフロンを規制したのですから、その効果が出ているのかが当然気になるところですが、中緯度については「1990年代後半に減少傾向が止まった」という論文が2004年頃から出始めました。また、南極オゾンホールについては「回復の兆しが見えた」という論文が昨年出版されました(Solomon, et al., 2016)。図4がその論文に示された、9月のオゾンホール面積の経年変化です。シミュレーション結果も示されているので少しややこしいですが、黒丸が観測結果、黒点線がその2000年以降のトレンドです。年々変動があるのでこれまであまりはっきりしていませんでしたが、10年以上の期間にわたるトレンド成分を見ることで、2000年頃を境に縮小の傾向が見え始めていることがわかりました。

温暖化抑制にも貢献

最後に「おまけ」の話題をひとつ。実はフロン類はどれも温室効果気体であるため、温暖化係数という指標で見ると何も規制をしていなかったとしたらフロン類全体で二酸化炭素の半分程度の温暖化能力があったはずでした。実際にはフロン規制によってかなり押さえられ、現在は二酸化炭素の1/10程度です。我々はモントリオール議定書に基づくフロン規制によって、オゾン破壊防止のみならず地球温暖化の抑制にも貢献したということになります。これは一種副産物ではありますが、これを踏まえ、モントリオール議定書のキガリ改正(2016年10月)ではオゾン破壊効果のないHFCsにも規制をかけることになりました。HFCsは代替フロンとして近年エアコンなどに多く使われていますが、いずれフロン類以外の物質に切り替えられることになるでしょう。

[参考文献]

- Mahieu et al., Recent Northern Hemisphere stratospheric HCl increase due to atmospheric circulation changes, *Nature*, Vol. 515, 104-107, doi:10.1038/nature13857, 2014.
- Solomon, et al., Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, *Science*, Vol. 353, Iss. 6296, 269-274 doi:10.1126/science.aae0061, 2016.

東北大学大学院環境科学研究科 准教授

村田 功 (むらた・いさお)

大学院生時代に第32次南極観測隊に参加してオゾンホールの観測を行う。1996年東北大学大学院理学研究科助手。2003年より環境科学研究科准教授。専門は大気微量成分の観測的研究。



住所：仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20
電話：022-795-5776
E-mail：murata@pat.gp.tohoku.ac.jp

環境リスク評価とは？

東北大学 大学院 環境科学研究科 助教 中村謙吾

研究の背景と経緯

従来の有害化学物質による環境汚染問題に加えて、大震災に伴う津波堆積物、放射性物質、気候変動、地盤変動などの社会の抱える新たな環境問題が日々深刻さを増す中、環境リスク評価学の展開および合理的なリスク管理は、工学・農学の基礎となる重要な学術分野です。

研究活動では、様々な環境汚染物質のモニタリングや調査・分析を通じて、環境リスクの同定、定量化をはかるとともに、リスク低減のための除染技術の開発、社会的要素を考慮に入れた環境汚染物質のリスク管理技術について研究しております。

私はこれまで、岩手大学農学部で産業廃棄物不法投棄現場のウラン

研究内容と進捗

最近の研究は、データ駆動型解析を用いた本質的な自然プロセス（土壌、津波堆積物）の抽出、地盤環境における重金属類の移送モデルの作成、日本国内の新規物質や新規規制物質のリスク評価、海外における鉱山のリスク評価及び数値解析によるメタンハイドレート生産増進法の検討を行っております。広義に及ぶ研究分野ですが、すべてが「環境」の一部であります。そのため、これまで学んだ環境工学だけでなく、地球化学、岩石力学、資源工学など様々な知見を広げ、垣根を越えた更なる分野を創造していきたいと思っております。

その中でも、土壌中の流れの可視化は、社会的に大きなインパクトの

今後の展開

日本国内において、土壌汚染の対象となるのが重金属類だけでは、ありません。環境省の定める土壌に関する規制には、油や揮発性有機化合物など、産業に関わる様々な物質が対象となります。行政執行型のすべ

中村 謙吾 (なかむら・けんご)

宮城県出身。岩手大学農学部卒業後、京都大学大学院都市環境工学専攻修士前期・後期博士課程修了(工学)。産業技術総合研究所・同専攻本研究科の研究員を経て、現職に至る。専門は、環境リスク、衛生工学。



モニタリング調査を行い、京都大学大学院では、鉄鋼スラグ中のフッ素のリスク評価をおこなってまいりました。現在では、国内外の重金属類に関する休止鉱山のリスク評価や土壌への重金属類の吸着メカニズムの解明の研究に取り組んでおります。

リスクの研究は、必ず対象となる物質があり、その物質がどのようなシナリオ（物質の移動経路、人の摂取経路）により、環境や人に影響を及ぼすのかを評価するものです。その環境や人への影響を研究する学問であることは、社会的・人類学的に責任の伴う研究であり、やりがいのある研究です。

ある研究成果であります。土壌汚染問題は、産業発展と共に顕著化し、イタイイタイ病などの公害病の原因となりました。最近でも、公共工事の掘削に伴う自然由来重金属類を含んだ掘削土壌の処理が問題になっております。土壌汚染問題で最も重要なのは、重金属類の動きを明確にすることで、周辺環境（地域住民、作業員、野生動植物）への影響を知ることです。そうすることで、私の研究している土壌中の流れの可視化は、土壌中の重金属類の分布や濃度からリスクを予測できる技術へと発展することができると考えております。

ての物質をただ規制することは、リスク評価の本質と異なります。適切なリスク評価した上で、工業・農業・経済を含む社会的要素を考慮に入れた環境汚染物質のリスク管理技術を提案していきたいと思っております。

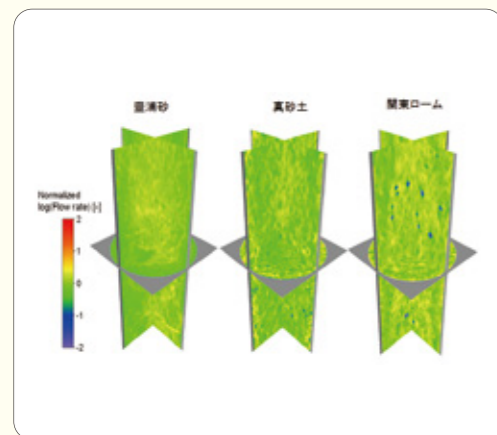


図1 土壌コアの流量分布



図2 ドラム缶土槽実験の様子



図3 気仙沼河川堆積物サンプリングの様子

触媒は見た目が肝心 -水素社会に向けた材料開発-

東北大学 大学院 環境科学研究科 助教 轟直人

研究の背景と経緯

地球表面の約7割を占める水。その構成元素の一つである水素は近年クリーンなエネルギー源として注目されています。特に、水素を燃料として電気エネルギーを生み出す燃料電池(図1)は発電時の生成物が水のみであることから、主に自動車用の動力源として普及が期待されています。日本では2014年より燃料電池自動車の一般販売が開始されており、街中で走っているのを見かけた方もいるのではないのでしょうか。

水を電気分解することで2つの電極から水素と酸素が発生することを多くの方が学校で習ったかと思いますが、その逆反応、つまり水素と酸素

研究内容と進捗

そこで、燃料電池の反応は触媒表面上でのみ起こることから、表面の1原子層分のみを白金にし、その内側を別の原子に置き換えるコアシェル触媒が検討されています(図2上部)。コアシェル構造を取ることで、白金の使用量を極限まで少なくできるだけでなく、コア元素が白金に与える影響により触媒の特性を向上できる可能性があります。

このナノ粒子の表面は図2に示す通り、原子が六角形上に密に並んでいるもの、四角形上のものなどがあり、ナノ粒子表面のそれぞれの箇所

今後の展開

以上のように、コアシェル触媒が高い特性を有するための表面形態が次第に明らかになってきました。しかしながら、現状研究されているコアシェル触媒は実際の燃料電池自動車に搭載するためには特に耐久性の面で不十分であり、白金使用量を削減しつつ高い特性を示す触媒を作るためには更なる技術的進展が必要です。また、燃料電池自動車を走らせ

轟 直人 (とどろき・なおと)

栃木県那須塩原市出身。東北大学大学院工学研究科修士課程修了後、昭栄化学工業株式会社に入社。その後、2011年東北大学大学院工学研究科博士課程に編入学し、2014年同課程を修了。博士(工学)。2014年より現職。



が結合することで電気と水を生み出すのが燃料電池の化学反応です。この反応には多くのエネルギーが必要で、ただ水素と酸素を混ぜ合わせただけでは反応は進行しません。その際に役に立つのが白金触媒です。白金の表面で水素分子と酸素分子がそれぞれ原子上に分裂し、水へと再結合することで化学反応に必要なエネルギーを低下させることができます。しかしながら、白金は高価な金属であり、また地球中の資源量も鉄などと比べて極めて少ないため、燃料電池の広範な普及のためには白金の使用量を大幅に削減する必要があります。

することは現状では困難です。そこで、触媒表面の原子の並びがよく規制された触媒が役に立ちます。私は超高真空という宇宙空間に近い真空環境で白金を様々な金属基板上に堆積した試料を燃料電池触媒のモデルとし、コアシェル触媒がどのような構造であれば高い特性を示すか研究しています。例えば、図3に示すようにイリジウム単結晶の基板上に2原子層分の白金を堆積した試料の触媒特性を比較したところ、表面がやや荒れた欠陥の多い試料に対し、原子レベルで平らな試料は遥かに高い特性を示すことを見出しました。

るための水素は水の電気分解で生成することが理想的ですが、そのコストは現在主流である天然ガス改質法などに比べてかなり高いため、効率的に水素を生成するための新しい触媒材料が必要とされています。私は、水素社会実現に向け、燃料電池・水電解のための新規触媒材料の研究開発に貢献したいと考えています。

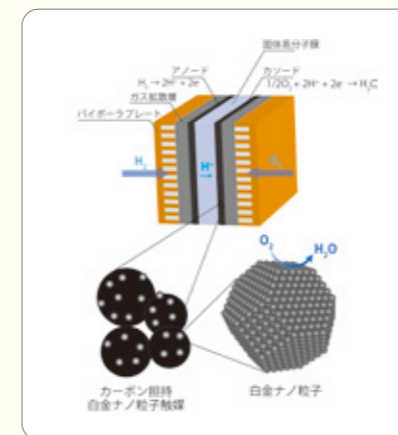


図1 自動車用燃料電池と白金触媒の模式図

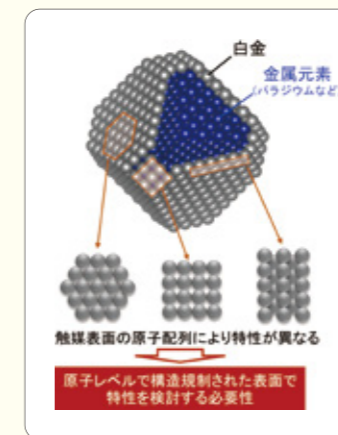


図2 コアシェルナノ粒子触媒

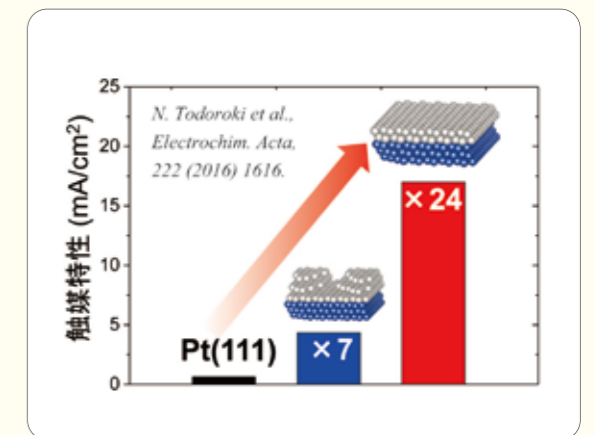


図3 白金/イリジウムモデル触媒の燃料電池触媒特性