

電波は生存圏を救う

篠原 真毅**

1. はじめに

「生存圏研究所」とは「人類の生存に必要な領域と空間を「生存圏」としてグローバルにとらえ、その状態を正確に「診断」するとともに、それに基づいて現状と将来を学術的に正しく評価・理解し、さらにその生存圏の「治療・修復」を積極的に行なうことを目指した研究を遂行する」研究所です¹⁾。研究所内には様々な研究を遂行する先生方が居られますが、私は電波を用いた研究をしています。電波は生存圏に何の関係があるのでしょうか？電波だけではありませんが、私たち人間にとって電波技術を含む科学技術は生存のために不可欠な要素だと思います。

私たち人間は「裸のサル」とも呼ばれ、生物としてはサルの幼生がそのまま大きくなってしまった不思議な生物で、体毛もなく、生まれて立ち上がるまでに約1年もかかる(普通の哺乳類は生まれて数分で立つ)、体一つでは生きていけない不思議な生物という説があります。しかし、それでも人間は地球上にすべての生物を搾取して君臨しています。これは知能が異常に発達し、生物として駄目な部分を知能と、その発現である科学技術で補完しているからと思っています。体毛がなければ服を發明し作り、子供が生まれて1年も全く無防備であれば家族や社会システムを作って子供を守り、生き延びるために食物を採取するのみならず農業を始め、そして様々な科学技術が私たちの生存を支えています。科学技術がなければ(つまり知能がなければ)人間は生存できないと思います。近年「行き過ぎた科学技術は人間を滅ぼす」という論調が目立ちますが、どこまで行きすぎたとするのかははっきりしませんし、イメージだけの問題でしょう。すぐに我々の役には立たないように見え、人間を滅ぼすかに見える最先端科学は、我々の生存を支える基盤技術や社会システムを支えるために必須であり、イメージで研究を減速させることは人間という不思議な生物自体の否定に見えます。

このような思いで、電波を応用した様々なエネルギーシステムの研究を私は行っています。大きく分けると 1) 宇宙で発電した電力を電波で地上に送る「宇宙太陽発電所」の研究、2) 電池を電波で充電したり電池レスで電波だけで電気製品を動かすような「無線電力伝送」の研究、3) 電波で新材料を作る研究、の3つを宇治キャンパスで行っています。今回はこれらの内容について説明します。

2. 宇宙太陽発電所 SPS²⁾

宇宙開発には重大な意味があると思います。近視的には多大なコストのわりにリターンが少なく見える宇宙開発や宇宙科学は意味がないように思えるかもしれません。しかし、今地球は真綿で首を絞められるがごとく少しずつおかしくなっています。最近すっかり忘れられ、下手をするとその問題すら否定するような論調に変わってしまった地球温暖化問題は何も解決していません。豪雨や竜巻等が起こると「温暖化問題のために」と少し他人ごとのように天気予報で触れるだけで、5年ほど前の「地球温暖化問題を解決しない限り地球に未来はない」的な論調はすっかり影をひそめました。人間は信じたいものしか信じないという特性があるので仕方がないのですが、我々の首を絞めているのは私達人間以外の何者でもないのです。地球上に人類が今の勢いで増え続ける限り、地球は破滅へ向かい続けるでしょう。宇宙空間を利用することは人類を地球の重力から解放し、生存のためにその活動を広げることを意味すると思っています。私達はこれを「生存圏の持続的発展」として捉えています。図

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生存圏電波応用分野。
E-mail: shino@rish.kyoto-u.ac.jp

1はそのイメージ図ですが、地球上のみならず宇宙圏からもエネルギーをはじめ様々な循環系を構築し、持続的に発展していける地球や生活のイメージと考えています。すぐにリターンが返らない宇宙開発は、近未来の人類や地球のために重要な意味を持っているのです。



図1 「生存圏の持続的発展」のイメージ

このような思いの下、生存圏研究所では宇宙圏の研究を行っています。その中でも特に「宇宙太陽発電所SPS (Solar Power Satellite/Station)」の実現のために日々研究を行っています。SPSとは宇宙空間で超大型の太陽電池パネルを広げ、太陽光発電によって得られる直流電力をマイクロ波という電波に変換して、送電アンテナから地球や宇宙都市の受電所に設置されるレクテナと呼ばれる受電アンテナへ伝送し、再び直流電力に戻す方式の発電所構想です(図2)。SPSは、地球上のエネルギー不足を補い、様々な問題を抱える原子力発電所の不足を補い、環境破壊や地球温暖化をもたらす火力発電所に代わる大型基幹電力供給源となり得るものとして1968年に米国のピーター・グレーザーによって提案されました。以降40年以上絶え間なく研究が行われています。

SPSは宇宙空間に浮かぶ発電所から地上に電力を送らなければならないため、無線による電力伝送技術が重要となります。SPSは上空36,000kmの静止衛星軌道にあり、常に地上から止まっているかのように見えています。受電側ではマイクロ波をレクテナと呼ばれる整流アンテナで再び電気エネルギーに再変換して利用します。マイクロ波はISMバンド(産業・科学・医療用周波数帯)である2.45GHzや5.8GHzの周波数を用いることが検討されています。SPSは宇宙空間で太陽光発電を行い、地上へマイクロ波送電するシステムであるため、他の新技術のように越えなければいけない技術ハードルはほとんどありません。唯一発電所としてのビジネスモデルを考えた際に必要な技術の研磨及び量産性が求められているだけなのです。SPSは2040年頃の実現を目指して検討が進められています。

我が国は2009年6月に制定された宇宙基本計画³⁾、及び2013年1月に改定された宇宙基本計画⁴⁾で共にSPS研究開発の推進をうたっています。国の宇宙開発計画にSPSが明記されているのは現在世界中でも日本だけです。しかし残念ながら、SPSは国の本格プロジェクトとしてはまだ始動していないのが現

実です。SPSプロジェクトとしては2013年現在経済産業省が推進する太陽光発電無線送電技術委員会が無線電力伝送システム開発は行っており、近々マイクロ波無線電力伝送の地上実証実験を予定しています。日本の宇宙開発の中心であるJAXAも一部ではSPS研究を推進し、経産省プロジェクトと現在も連携してはいます、他の宇宙プロジェクトと比べるべくもないほど小さなものです。京都大学では30年以上前からマイクロ波無線電力伝送の研究を中心としたSPS研究を進めています。現在は宇治キャンパス内にある実験設備の中で正確なマイクロ波ビームの制御方法の研究や、小型試験衛星の設計研究等を行っています。経済産業省プロジェクトの委員長も著者です。

このような状況ですが、我が国及び世界が推進してきたSPS及び無線電力伝送技術研究が技術の民生展開を推進し、逆に民生研究が宇宙応用へと逆輸入され始めたという嬉しいニュースがありました。2013年6月には世界最大の米国電気学会IEEEが「民生用無線電力伝送技術の発展が宇宙開発及びSPSを牽引する」と発表したのです⁵⁾。無線電力伝送は10年前まではSPSのみが魅力的な応用でした。しかし今IEEEが発表したように、SPS以外でも様々な応用が進んでいるのです。

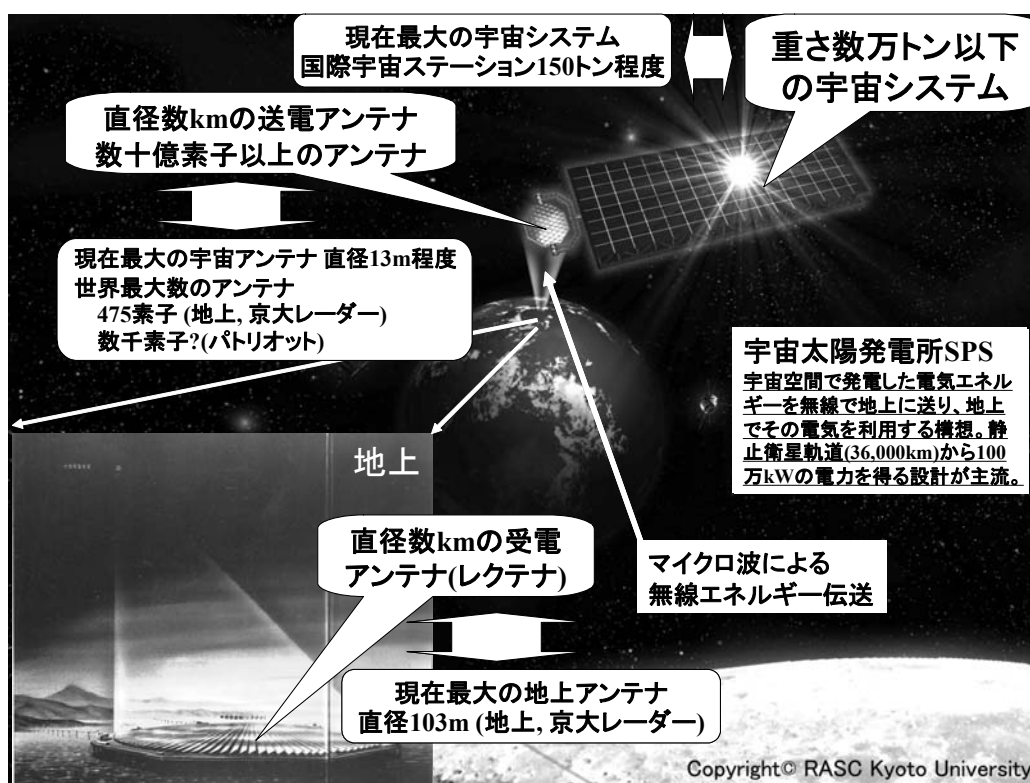


図2：宇宙太陽発電所 SPS の概念図と特徴

3. 無線電力伝送⁶⁾

一番古い無線電力伝送実験は100年以上前に行われました。しかしこの頃は電波エネルギーを伝えるほどに1か所に集中させる技術がなく、失敗に終わりました。第2次世界大戦以後にマイクロ波という携帯電話でも今使われている電波を発生させることができる技術が生まれ、その後1960年代にはマイクロ波を使って電波エネルギーを1か所に集中させることができるようになり、マイクロ波無線電力伝送の技術が始まりました。しかし、電波エネルギーを1か所に集中させることができたといってもまだ私たちが日常使うには大きすぎるシステムと高すぎるコストであったため、マイクロ波無線電力伝送は商売としてはうまく発展できませんでした。ちょうどマイクロ波無線電力伝送の実験が行われていた頃に先述の Glaser が SPS を提唱したため、以後マイクロ波無線電力伝送は SPS 研究と寄り添うように発展してきたのです。

しかし、無線で電力を送る方法は電波を使う以外にもう一つあり、コイルを介して磁場で行う方法がこれも 100 年以上前から研究されており、こちらは電気ポットやシェーバー、IC カード等に実用化されてきました。しかしコイルで磁場を介する方法は電波と違い cm 以下に近づけないと理論的に無線で電気が送れません。電波を用いると SPS のように何万 km でも非常に高い効率で電気エネルギーを送ることができます。ですのでコイルを用いる方式は個別には商品化されていても爆発的な普及はしなかったのですが、2006 年に MIT がコイル方式でも距離を数 m 程度まで伸ばせる方式「共鳴送電」を提唱し、無線電力伝送に「革命」を起こしました。MIT の革命以降、世界中で「無線電力伝送は使える」という雰囲気となり、研究が爆発的に広がり始めたのです。現在は「Qi 規格」と呼ばれる携帯電話の置くだけ充電器が電気屋で手に入るまでに普及してきました。

これまで SPS 以外ではなかなか応用が難しかったマイクロ波無線電力伝送も MIT の革命のおかげで再注目されるようになりました。京都大学ではマイクロ波無線電力伝送を含む無線電力伝送一般の実用化を図るために企業を集めて「ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム WiPoT」を 2013 年 4 月に立ち上げ、無線電力伝送の実用化を目指す 28 社とそれをサポートする学識会員 30 大学等で活発な議論を行っています⁷⁾。

京都大学ではマイクロ波無線電力伝送のアプリケーションとして今電気自動車とワイヤレスセンサ、固定通信機器等を想定し、企業との共同研究等を進めています。図 3 は 2012 年度に開発した固定通信機器への情報と電力の同時送信⁸⁾を想定して開発した受電整流用の 1mm×3mm 角のチップです。周波数は SPS で研究されていたマイクロ波よりも 1 ケタ高い 24GHz を用いており、世界最高効率の 47.9%を実現しました⁹⁾。

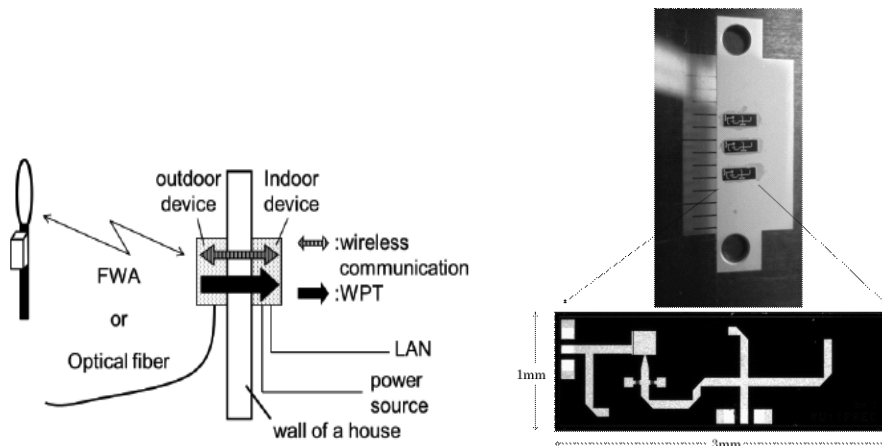


図 3：想定する応用 - 固定通信機器(FWA : Fixed Wireless Access)⁸⁾と開発したレクテナチップ (24GHz)⁹⁾

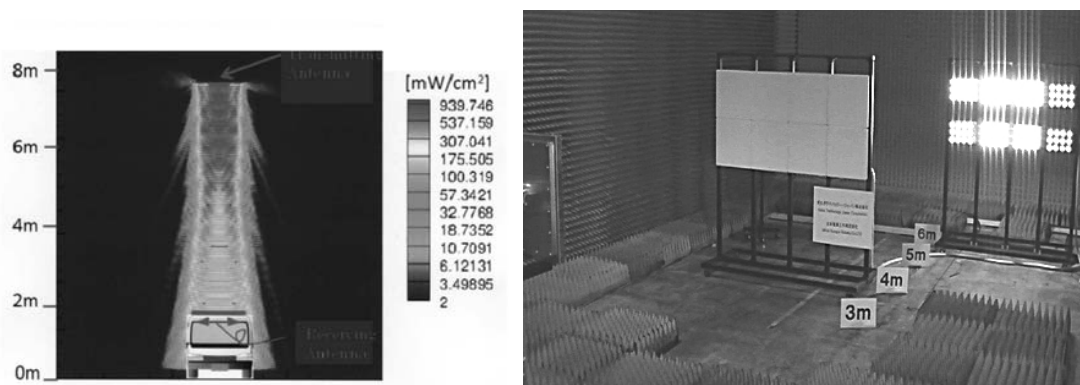


図 4：高さ 8m 程度の上空送電アンテナからの電気自動車無線充電システムのシミュレーション結果

(10kW)¹⁰⁾と、開発された 10kW を受電整流可能なレクテナ¹¹⁾

図4左は電気自動車への無線充電に関するシミュレーション結果です¹⁰⁾。2.45GHzの電波強度を示しており、受電エリアだけに放射された10kWのマイクロ波電力がほぼ集中し、不要な個所へはほとんどマイクロ波の漏れがないことがわかります。図4右はこの提案システムのために開発された10kWを受電整流可能なレクテナ(受電整流アンテナ)です¹¹⁾。レクテナ素子は2.45GHz帯で世界最高効率となる91.6%を用い、128素子のアレーを用いて実際に10kWを受電し、4.1kWの出力を得ました。

このような世界的な無線電力でのすを取り巻く状況と、マイクロ波無線電力伝送のこれまでの研究の蓄積からすぐにでもマイクロ波無線電力伝送の実用化を進めたいのですが、残念ながら電波を管理する電波法にマイクロ波無線電力伝送が未規定なことから、「マイクロ波は危ない」という意見、そしてアプリがあまりないために未成熟で高コストな大電力マイクロ波機器の問題等、様々な障壁があり、現在はまだマイクロ波無線電力伝送装置は本格的な普及段階には至っていません。

4. マイクロ波化学¹²⁾

SPSを実現する前段階として無線電力伝送の商用化を進めているのですが、電力を送るようなマイクロ波機器は他に用途があまりないこともあり、コストも高く、商用化の足かせになっています。そこでさらに遡り、無線電力伝送というこれまでにない技術を普及させるために、大電力のマイクロ波を用いた今ある何か技術をさらに発展させることで無線電力伝送の普及を加速させることはできないか、と考えました。私たちの身の回りを見渡せば一つだけそのような家電製品があることに気づきます。電子レンジです。電子レンジは2.45GHz・約1kWのマイクロ波を用いて食品を温めています。このマイクロ波加熱という技術は電子レンジのみならず、木材乾燥機やハイパーサーミアというガン治療装置等、世界中で普及しています。このマイクロ波による加熱技術をさらに高度に利用することで新しい材料を作ることができる、というマイクロ波化学という学問領域が21世紀に入り進展してきました。京都大学ではこのマイクロ波化学による様々な研究プロジェクトを実施しています。

最新のマイクロ波化学を応用したプロジェクトとして、環境省予算により「マイクロ波による瓦礫中の有害物質迅速処理 —アスベスト飛散とダイオキシン発生防止—」を2012-13年度に実施しています(図5左)。これは他の加熱方式では十分に無害化できないアスベストをマイクロ波を用いることで短時間・大量に処理するもので、東日本大震災により大量に発生した瓦礫に含まれる非飛散性のアスベストを対象としています。実験は順調に進み、アスベスト含有スレート瓦と木材を合わせて1日に約5トン処理することに成功しました。また別プロジェクトとして木質バイオマスからエタノールを生成する研究も実施しており、図5右のようなマイクロ波プロセスを用いた前処理装置の開発にも成功しました。



図5：宮城県名取市に設置されたマイクロ波による非飛散性アスベスト無害化処理装置と、実験室に設置されたバイオエタノール生成用マイクロ波前処理装置

5. まとめ

人類の生存圏のために宇宙圏を利用し、宇宙発電所を早期に実現したい。これが私たちの目標です。しかし、その道のりは遠く、これまで30年以上研究や普及活動をしてきても未だ本格的なプロジェクト化には至っていません。そこで無線電力伝送の民生応用の推進と共に、同じ大電力マイクロ波発振器を用いるマイクロ波化学を推進することで、遠回りかもしれませんが生存圏のために研究をしていきたいと思っています。一見我々の生存とは無関係に見える電波の技術も、このようにして見ると「電波は生存圏を救う」ように見えることがお分かりいただけましたでしょうか？電子レンジの発展形の研究が、これからの実用化を目指す無線電力伝送研究を支え、その無線電力伝送の商品が広く普及することで宇宙太陽発電所 SPS がいつか実現するのです(するはずです)。生存圏研究所ではこのような様々な科学技術の研究を通じ、生存圏のための研究を今後も行っていききたいと思います。

図6はそれぞれの研究に関する理系の大学生向けの教科書です²⁾⁶⁾¹²⁾。理系の大学生向けなので少し難しいかもしれませんが、講演で説明しきれなかった技術の背景や詳細等をまとめてありますので、興味がある方はご参照ください。また、「はじめに」で述べたような人間と宇宙圏のかかわりに関する考察は参考文献13)で社会学の研究者とまとめたことがありますのでこちらもご参考に。

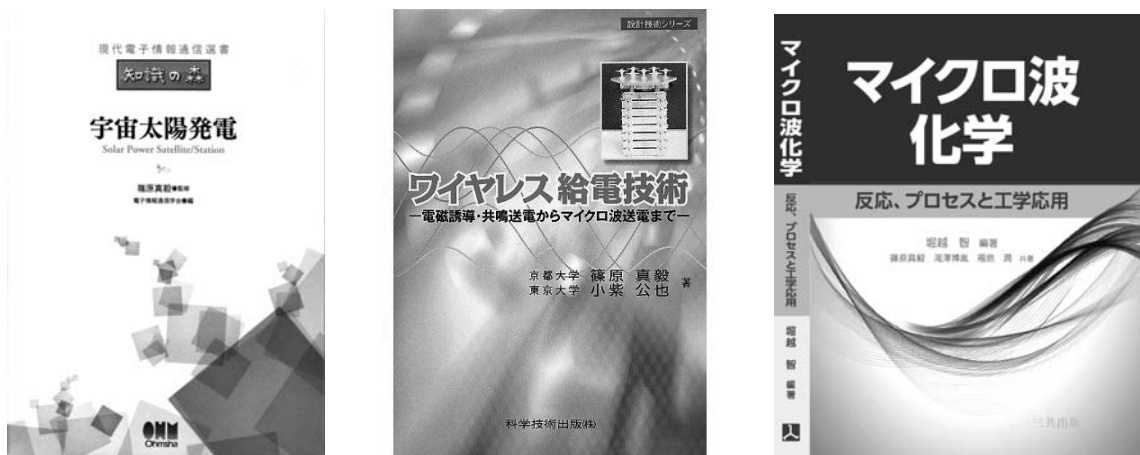


図6：宇宙太陽発電所 SPS²⁾、無線電力伝送⁶⁾、マイクロ波化学¹²⁾に関する教科書(理系大学生向け)

参考文献

- 1) 生存圏研究所Homepage <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/>
- 2) 篠原真毅(監修, 著), “宇宙太陽発電 (知識の森シリーズ)”, ISBN978-4-274-21233-8, オーム社, 2012.7
- 3) 宇宙基本計画(2009)本文 http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/keikaku/keikaku_honbun.pdf
- 4) 宇宙基本計画(2013)本文 <http://www8.cao.go.jp/space/plan/plan.pdf>
- 5) IEEE Experts Comment on Space Technology Advancements' Impact on the Future of Consumer Electronics (2013) http://www.ieee.org/about/news/2013/3june_2013.html
- 6) 篠原真毅, 小紫公也, “ワイヤレス給電技術—電磁誘導・共鳴送電からマイクロ波送電まで (設計技術シリーズ)”, ISBN978-4-904-77402-1, 科学技術出版, 2013.2
- 7) ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアムHomepage <http://www.wipot.jp/>
- 8) Hatano, K., N. Shinohara, T. Mitani, T. Seki, and M. Kawashima, “Development of Improved 24GHz-Band Class-F Load Rectennas”, Proc. of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT2012), pp.163-166, 2012

- 9) Hatano, K., N. Shinohara, T. Seki, and M. Kawashima, "Development of MMIC Rectenna at 24GHz", Proc. of 2013 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS), pp.199-201, 2013
- 10) Shinohara, N., Y. Kubo, and H. Tonomura, "Mid-Distance Wireless Power Transmission for Electric Truck via Microwaves", Proc. of 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory (EMT-S2013), pp.841-843, 2013
- 11) 古川実, 峰岸隆偉, 小川智也, 佐藤幸次, 王鵬, 外村博史, 寺本正彦, 篠原真毅, "電動トラック用2.4GHz帯 10kW出力レクテナへの送電実験", 信学技報WPT2012-47 (2013-03), pp.36-39, 2013
- 12) 堀越智(監修, 著), 篠原真毅, 滝澤博胤, 福島潤(共著), "マイクロ波化学 -反応、プロセスと工学応用-", 三共出版, 2013.10予定
- 13) 速水洋子, 西真如, 木村周平編, 「人間圏の再構築 - 熱帯社会の潜在力 - 講座生存基盤論第3巻」, 京都大学学術出版会, 2012
のうち、第3編 人間圏をとりまく技術・制度・倫理の再構築 第9章 "クリーン・エネルギーをめぐる科学技術と社会 - 宇宙太陽発電を事例に - (篠原真毅, 木村周平)", pp.275-298

末端リグニン分解菌と位置づけられる微生物*

渡邊 崇人**

1. はじめに

水、空気、土壌等の自然環境とそこに住む様々な生物は、太陽エネルギーを命の源として互いに密接に関わり合っている。生物やそれを取り巻く環境を生態系と呼んでいる。植物（生産者）は太陽エネルギーを取り込んで成長し、それを動物（消費者）が利用し、その死骸や排泄物を微生物（分解者）が分解するという「食物連鎖」については学校の理科の時間で学ばれたかと思う。その際、生産者が取り込んだエネルギーは消費され、そして、生物を構成していた物質は無機化（水と二酸化炭素に変換）されるが、それらは再び植物等へと取り込まれる。このような流れを物質循環と呼んでいる。物質循環がうまく回っている場合は、以前と変わらない豊かな自然が保たれるが、これまで生物が会うことのなかった物質（異物：xenobiotics）については物質循環に入ることができずに環境中に残留することになる。

本稿では、食物連鎖の分解者である微生物、特に、20世紀後半に入り環境中に放出され、残留する深刻な環境汚染物質の分解菌に注目する。主に、その分解菌が持つ環境汚染物質分解系について、また、その起源や利用について紹介する。

2. 夢の化学物質から深刻な環境汚染物質に

当時、合成化合物の中で20世紀最大の発明品とも言われたものの、その毒性が社会問題化し、一転して深刻な環境汚染物質として烙印を押された化合物にポリ塩化ビフェニル（PCB）がある。

2.1 ポリ塩化ビフェニル（polychlorinated biphenyl: PCB）

PCBの構造を図1に示す。理論的には、塩素が1から最高10まで置換した209種類の化合物が合成可能である。1929年に製造が開始され、1970年代半ばに製造が中止となった。なお、Aroclor（アメリカ）、Clophen（ヨーロッパ）、カネクロール（日本）等の商品名で販売されていた。

PCBの総生産量は世界中で120万トンと見積もられ、日本でも5万トン以上製造された。塩素置換の違いで物理的・化学的性質が異なり、その化学的安定性（酸、アルカリ、熱により分解されない、金属を腐食させない）、不燃性、絶縁性、高脂溶性（水に溶けにくい）、低揮発性（高沸点）などの優れた性質により工業的に広く使用された¹⁾。日本においては、PCBの製造・使用・輸入については、1972年にこれらを中止とする行政指導、その翌年に法的に禁止となった。ただし、具体的な対策ができるまで廃棄物も含め保管となった。しかしながら、2001年に「ポリ塩化ビフェニル廃棄物の適正な処理の推進に関する特別措置法」が公布・施行、2012年に改正され、処理期間が2027年3月末日までとされたものの、可能な限り当初予定された2016年7月までに行う

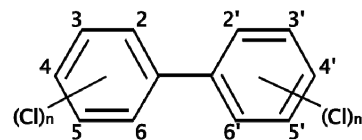


図1: PCBの一般構造式。ベンゼン環が2個結合したビフェニルに塩素が置換した化合物。

* 2014年7月20日作成 本稿は第10回生存圏研究所公開講演会（2013年10月26日開催）講演要旨「生存圏を守る小さな生き物たち」の表題の変更及び内容の加筆・修正を行ったものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス変換分野

E-mail: takahito@rish.kyoto-u.ac.jp

こととされている。国際的には、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（POPs 条約）が 2004 年 5 月発効され、（日本は 2002 年に本条約を締結）、PCB に関し、2025 年までの使用の全廃、2028 年までの適正な処分を求めている²⁾。

2.2 カネミ油症事件

1968 年に福岡を中心に西日本一帯で被害者約 1 万数千人、死亡者 50 人を出した健康被害事件である。カネミ倉庫株式会社における米油の製造過程で PCB が漏れて混入し、その油を摂取した人々に吹き出物、手足のしびれ、肝機能障害等を引き起こした（PCB は、高い脂溶性から生物の脂肪組織に蓄積する性質がある）。当時、被害女性から生まれた赤ちゃんの皮膚に色素沈着があり、「黒い赤ちゃん」と報道されて大きな社会問題になった。

2.3 コプラナー PCB とダイオキシン

PCB は、置換する塩素の位置によっては共平面構造（コプラナリティ：coplanarity）を取るものがあり（コプラナー PCB と呼ぶ）、その毒性のうち発癌性、催奇性がダイオキシン類（ポリ塩化ジベンゾパラジオキシン、ポリ塩化ジベンゾフラン）に似ているとされている。そのため、ダイオキシン様 PCB (dioxin-like PCB) と呼ばれ、ダイオキシン類に加えることがある。なお、カネミ油症事件の原因物質は、21 世紀に入り、PCB の加熱によって生じたダイオキシン類の一種であるポリ塩化ジベンゾフラン (PCDF) とコプラナー PCB であると確定した（図 2）。

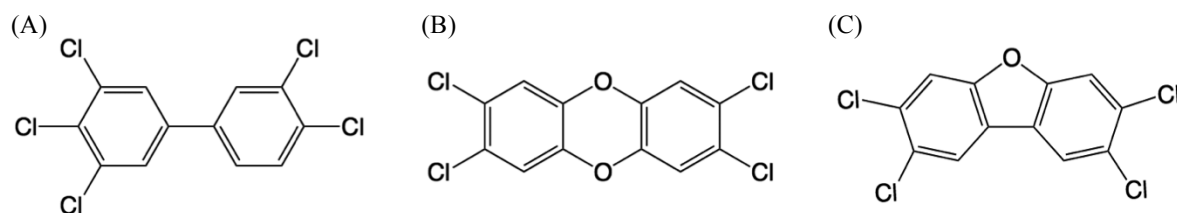


図 2：ダイオキシン類の構造式。(A) 3,3',4,4',5-ペンタクロロビフェニル（コプラナー PCB の一種）；(B) 2,3,7,8-テトラクロロジベンゾ-1,4-ジオキシン（代表的なポリ塩化ジベンゾパラジオキシン: PCDD）；(C) 2,3,7,8-テトラクロロジベンゾフラン（代表的なポリ塩化ジベンゾフラン: PCDF）

3. 環境汚染物質分解菌から微生物の適応・進化を見る

環境中に放出された PCB は食物連鎖を通じて最終的には海洋のイルカやアザラシなどの大型哺乳動物の脂肪組織に高濃度で蓄積する。もちろん、我々人間においても同様に体内で分解されず、蓄積し、重大な健康被害が出る。従って、物理的・化学的に安定な PCB を分解する生物はこの世に存在しないと思われたが、1973 年に低塩素 PCB（置換している塩素の数が少ない PCB）を分解する微生物（分解菌）の報告が初めてされた³⁾。それ以降、1980 年代から PCB だけでなく難分解性芳香族化合物分解菌が次々と発見され、その諸性質が報告されるようになってきた¹⁾。

3.1 ビフェニル/PCB 分解菌の単離、分解特性、分解遺伝子のクローニング

現在、著者が研究に用いている、そして、世界的にも有名なビフェニル/PCB 分解菌を紹介したい。その分解菌は、シュードモナスというグラム陰性細菌の一種で⁴⁾、正式名は、*Pseudomonas pseudoalcaligenes* KF707 株である。本菌は、北九州市のビフェニル工場付近の土壌から単離され、ビフェニルを資化できる（ビフェニルを分解し、唯一の炭素源として生育できる）。PCB に対しては、ビフェニル/PCB 分解酵素の構造や機能、特に、基質特異性に大きく依存し、置換する塩素の数や位置によって「良く分解できる」「ある程度分解できる」「ほとんど分解できない」「全く分解できない」等その分解特性が大きく異なっていた⁵⁻⁶⁾。

一方, KF707 株の単離後, ビフェニル/PCB 分解遺伝子の取得も試みられ, 1986 年に KF707 株より世界で初めてビフェニル/PCB 分解遺伝子がクローニングされ, *bph* (ビフと呼ぶ) と命名された⁷⁾. その後, *bph* 遺伝子の構造, 機能, そして, 転写制御について詳細に解析されている (図3)⁸⁻¹⁰⁾.

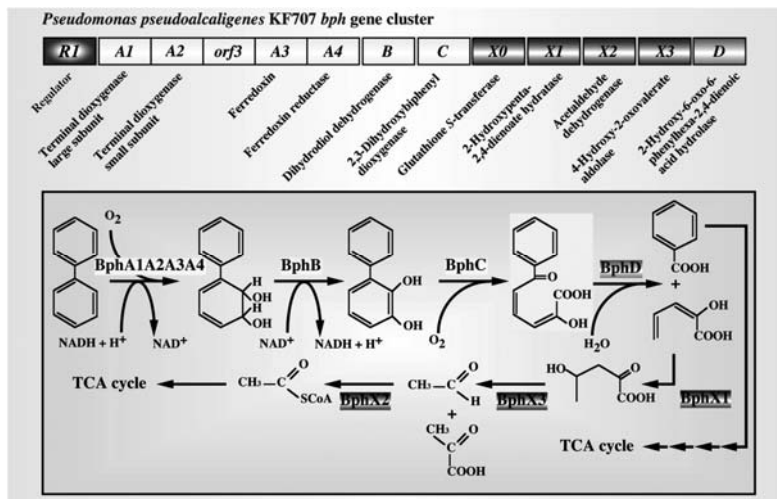


図3: KF707 株のビフェニル/PCB 分解遺伝子クラスターの構造と分解経路.

図には, ビフェニルの分解経路を示しているが, PCB についてもこれら分解酵素の共代謝 (co-metabolism) を受ける. ただし, 置換する塩素の位置によっては分解経路の途中までで分解が停止してしまう場合もある. 各遺伝子の下の斜めの英数字は酵素名.

3.2 菌から菌へ接合伝達因子としての *bph* 遺伝子群

KF707 株を単離した際, 同じ場所 (土壌) から, 同じ細菌でも属, 種が異なるビフェニル/PCB 分解菌が数多く単離された^{5, 11)}. ところが, これらのビフェニル/PCB 分解菌の染色体 DNA に対し, KF707 株の *bph* 遺伝子を用いて Southern 解析をした結果, これらの分解菌の多くは KF707 株が持つ *bph* 遺伝子と非常に良く似た構造の遺伝子群を自身の染色体 DNA 上に保有していた¹¹⁾. この事実は, 染色体上の *bph* 遺伝子群が他の菌へ転移する機能を備えているか, 以前にその機能を保有していたことを意味し, 微生物の生態や環境適応を探る上でも非常に興味深い.

あるビフェニル/PCB 分解菌においては, *bph* 遺伝子群及びサリチル酸分解 (*sal*) 遺伝子群が接合型トランスポゾンと呼ばれる巨大な動く遺伝子 (*bph-sal* エレメント) 上に存在していることが分かっている¹²⁾. この *bph-sal* エレメントは, 通常, 染色体 DNA に組込まれているが, 切り出されて環状となり, 他の菌に伝達され, 受容菌の染色体 DNA に挿入されると予想されている (図4). 実験室レベルでは, *bph-sal* エレメントを有するビフェニル/PCB 分解菌 (供与菌) と *bph-sal* エレメントを有さずビフェニル/PCB を分解しない菌 (受容菌) とが接合という現象を介して受容菌の染色体 DNA へ *bph-sal* エレメントを容易に転移 (接合伝達) させることが再現できている¹²⁾.

ビフェニル/PCB を始め難分解性芳香族化合物分解系遺伝子群は染色体 DNA, 伝達性のプラスミド (環状の DNA) やトランスポゾンと呼ばれる「動く遺伝子」上に存在していることが多い. 微生物同士の相互作用が密な (土壌) 環境中では, 接合伝達により菌から菌へとこれらプラスミドやトランスポゾンが伝達され, 伝達された方の菌 (受容菌) に分解系遺伝子が一時的に保持されたり, 染色体 DNA に組込まれたりすることが頻繁に起きているものと考えられる. このような現象を水平伝播 (horizontal gene transfer) と呼んでいる¹³⁻¹⁴⁾.

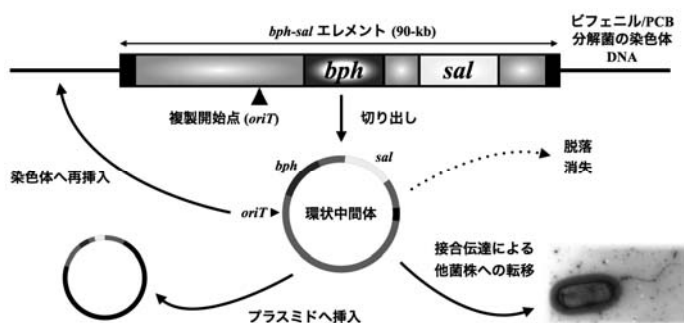


図4: 分解系遺伝子の水平伝播 (*bph-sal* エレメントの転移機構モデル). 様々な種類のビフェニル/PCB 分解菌が自然界に広く分布すること, しかも, 非常に良く似た *bph* 遺伝子群を保持していることが説明できる.

一方、難分解性芳香族化合物分解系遺伝子群が菌（供与菌）から菌（受容菌）へ転移されても、その受容菌が供与菌と同じような振る舞いをするとは限らない。すなわち、転移した遺伝子群（外来性の遺伝子）は転移先（新しい宿主）の異なる転写制御系で制御を受ける可能性がある^{1,9-10}。

3.3 PCB 分解菌の由来は？

PCB を含め人為的に合成された化合物が大量に環境中へ放出され、深刻な環境問題として騒がれ始めたのはここ 50~60 年くらいの間と考えられる¹⁵。従って、それ以前は、生物が PCB 等に出会うことはなく、図 3 に示したような *bph* 遺伝子群や PCB 分解経路が存在したとは考えにくい。それでは、環境汚染物質である PCB を始めとする難分解性芳香族化合物を分解する微生物は一体どこから来たのか？

そもそも自然界の芳香族化合物がどこから供給されるのかを考えると、その答えは、植物（樹木）から、特に、リグニンという高等植物の木化に關与する高分子のフェノール性化合物からとなる。リグニンは樹木の構成成分の 20~30% を占め、ベンゼン環の豊富な非常に複雑な構造をしている。リグニンは天然物であるものの難分解性高分子で容易には分解できないが、唯一リグニン分解性担子菌（白色腐朽菌）と呼ばれるキノコの仲間によって分解され、多くの芳香族化合物（低分子化されたリグニン）が土壤中に供給される（図 5）。そのリグニン由来の芳香族化合物（ベンゼン環を 1~2 個含む）をさらに分解・利用する細菌は既に知られている¹⁶⁻¹⁷。従って、ビフェニル/PCB 分解菌として今回紹介している KF707 株もこのようなリグニン由来の芳香族化合物の末端分解に關与する菌「末端リグニン分解菌」の一種、さらには、末端リグニン分解菌から由来し、自らが置かれている環境（汚染場所）で生存できるように適応・進化した種とも考えられる。

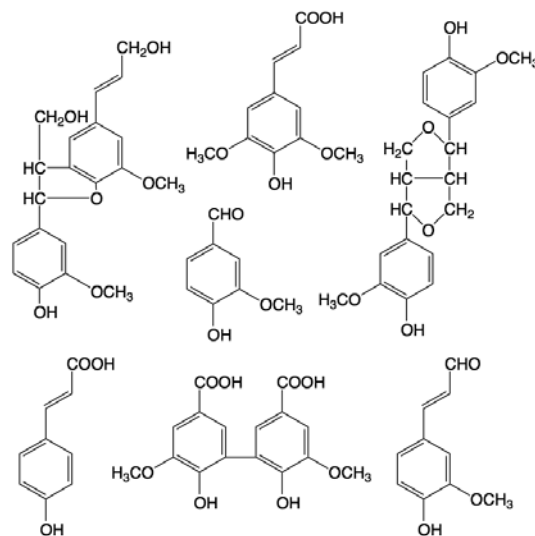


図 5. リグニン由来の芳香族化合物の構造の一部。自然界から供給される芳香族化合物の多くは植物リグニン由来でその構造には、ベンゼン環があり、PCB の基本骨格となるビフェニル環を持つものもある。

3.4 環境汚染物質分解系遺伝子の進化

末端リグニン分解菌の適応・進化によって PCB 等の環境汚染物質の分解ができるようになるためには、結局、菌（宿主）が分解系遺伝子を獲得し、何とか使いこなす（制御する）ことができなければならない。しかしながら、分解系遺伝子がある日突然獲得するわけではない。そこで次に、環境汚染物質（難分解性芳香族化合物）分解系遺伝子の起源について考えてみたい。

まず、次の 2 点を整理しておく必要がある。1 点目は、「芳香族化合物を供給する植物、そして、植物リグニン由来の芳香族化合物を分解する末端リグニン分解菌は、PCB 等の環境汚染物質が合成される以前から既に地球上に存在していた」ということ、もう 1 点目は、「そもそも生物の進化では、新しい機能はすでに存在していた材料（遺伝子）を改変し、必要な成分をつきはぎして作られ、無から生み出されることはあり得ない」ということである。これらを踏まえると、まず末端リグニン分解菌が元々持っていた様々な分解経路（例えば、植物リグニンから供給される芳香族化合物の分解経路）を担う遺伝子（群）が組み合わせたり、新規な芳香族化合物分解系遺伝子群の原型（先祖遺伝子群）が形成されると考えられる。そして、これらが雛形となり、改変（突然変異、重複、融合等）、或いは、トランスポゾンや伝達性のプラスミドを介して様々な菌に転移しては、転移先でさらに遺伝子の改変や再編成が起り、進化を加速させる¹⁵。その最終的な結果として環境汚染物質（難分解性芳香族化合物）分解系遺伝子群として環境中から単離されるのではないだろうか。

さて、現在までに分かっている微生物の主な芳香族化合物の分解経路を図6に示した。ぼんやりとだが、一定の法則が見え隠れする。すなわち、これらの環境汚染物質の分解は初期の段階でカテコールやプロトカテク酸（最初の化合物に塩素が置換しているのならば、これらの塩化物）のようにベンゼン環がジヒドロキシル化された少数の中間体化合物に収束する。その後、ベンゼン環がメタ開裂、或は、オルト開裂し、TCA回路に入る。従って、分解経路を①ジヒドロキシル化中間体への変換過程（上流代謝経路）と②ベンゼン環開裂反応以降の過程（下流代謝経路）の2段階に分けると、様々な環境汚染物質を分解できるようになったのは①の過程が多様化した結果と考えられている¹⁵⁾。

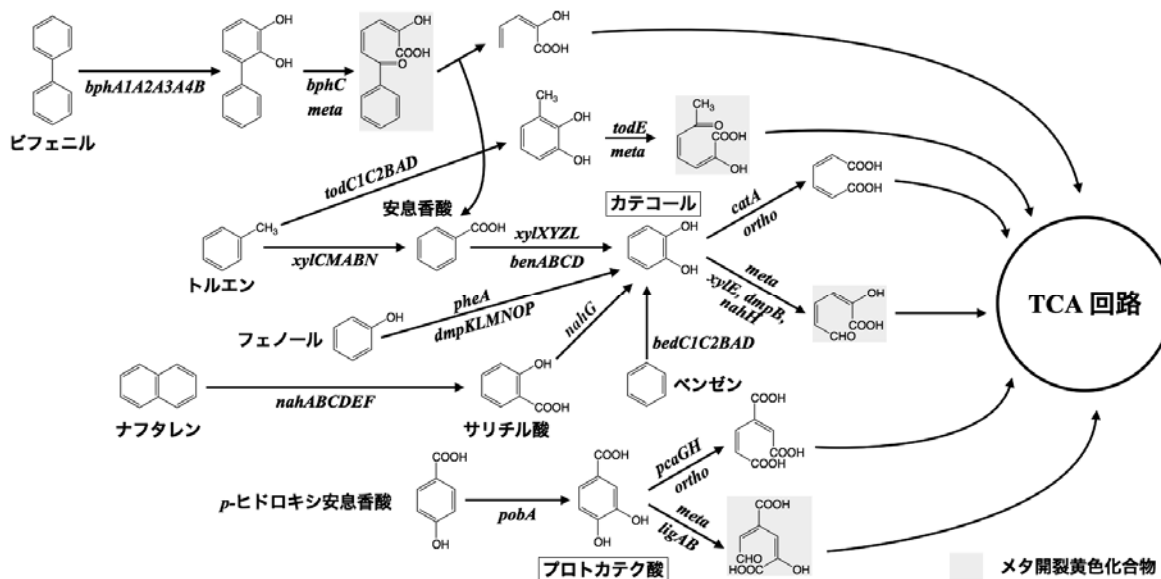
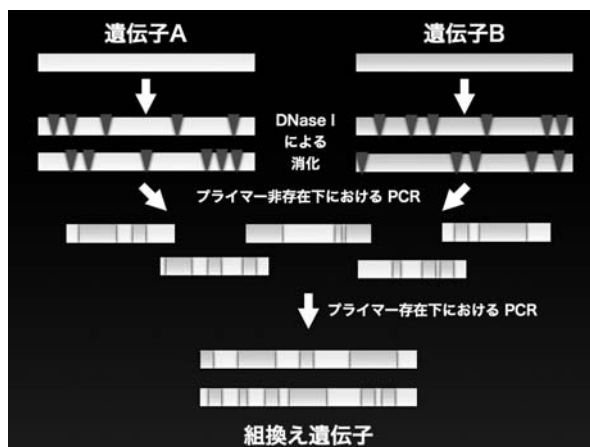


図6. 主な難分解性芳香族化合物の分解経路（文献15を改変）。環境汚染物質分解系遺伝子は末端リグニン分解菌が元々持っていた遺伝子が改変や再編成した結果ではないだろうか？

4. 進化分子工学を用いて強力な分解菌を育種する

生物の進化は遺伝子の変異や組換えなどから生じる。また、生物における様々な反応の多くは、酵素が担っている。酵素は、20種類のアミノ酸が一つにつながって、正しい折り畳まれ方をしてできた特有の構造を有するタンパク質である。その構成するアミノ酸配列の違いによって多様な機能が生み出される。生物の進化には非常に長い年月がかかる印象があるが、実験室内で短時間に進化を起こすことにより、優れた機能を持つ酵素を人工的に構築する手法「進化分子工学」が発表され、現在までに様々な進化分子工学の手法が開発されてきた。



4.1 DNA シャフリング (DNA shuffling)

図7に進化分子工学の手法の先駆けとなったDNAシャフリング法を示した¹⁸⁾。まず、進

図7: DNA シャフリングで新規な機能を持った酵素を作る。

化させたい遺伝子を2種類用意する(図7では、遺伝子A及び遺伝子Bと表記)。この時、ある程度DNAの相同性が高い者同士の方が望ましい。次に、それぞれの遺伝子をDeoxyribonuclease I(DNase I)で短時間処理し、細くなったDNA断片を回収後、両者を混合する。次に、PCR(polymerase chain reaction:極めて微量なDNAからでも選択的に目的のDNAを増幅する技術)を用いると相同性の高い配列がある領域で組換えが起こり、PCRを行っている過程で様々な変異(正確には点突然変異)が導入された多数の変異DNAを調製できる。その調製できたDNAと遺伝子A、或いは、遺伝子Bの両端の配列と相同な短い一本鎖のDNA(プライマー)を加えて、再度PCRを行うと、図7の遺伝子Aと遺伝子B由来の多種多様な組換え遺伝子が調製できる。

4.2 ビフェニルジオキシゲナーゼの進化分子工学

このDNAシャフリング法をビフェニル/PCB分解遺伝子に適用する、すなわち、分解遺伝子を進化させることで新規な機能を持ったビフェニル/PCB分解酵素を作ることを試みた。PCBの分解を効率良く行うためには、分解酵素の基質であるPCBの認識及び基質特異性に関与する酵素が重要であることから、それらに関与するKF707株のビフェニルジオキシゲナーゼ大サブユニットの遺伝子(*bphA1*)に注目した(図3)。それとDNAシャフリングをする相手としては、アメリカのハドソン川のPCB汚染底土より単離されたPCB分解菌*Burkholderia xenovorans* LB400株(以後、LB400株)の*bphA1*遺伝子を選んだ。驚くべきことにLB400株のビフェニル/PCB分解遺伝子群は、図3に示したKF707株のものと同数の***bph***遺伝子の数や並び方が全く同じである。また、個々の*bph*遺伝子の相同性も非常に高く、両菌株の*bphA1*酵素(BphA1)のアミノ酸配列の相同性は95.6%である。しかしながら、もっと驚くべきこととしては、アミノ酸レベルで両菌株のBphA1がわずか4.4%(BphA1の460個のアミノ酸の内、わずか20個程度)しか変わらないのにもかかわらず、PCBの分解能が異なっているということである⁶⁾。

実際、KF707株及びLB400株の*bphA1*遺伝子を用いてDNAシャフリング法を行い、得られた組換え*bphA1*遺伝子を多数得ることができた。その後、大腸菌を用いて得られた組換えBphA1の発現を行い、PCB及び関連化合物に対する分解特性を調べた(図8)。その結果、それぞれの親酵素の分解特性を合わせ持つ、或いは、それを凌駕する様々な機能を持つビフェニルジオキシゲナーゼの構築に成功した¹⁹⁾。また、組換えBphA1の中には、親酵素が分解できないベンゼン、トルエン、ダイオキシン(塩素置換無)に対して新たな分解能を獲得した組換えBphA1、同じく親酵素がほとんど分解できない2,2'-ジクロロビフェニルに対してのみ高い分解能を示す組換えBphA1等が得られた。その後、以上によって得られた「進化*bphA1*遺伝子」をKF707株の染色体上に存在する*bphA1*遺伝

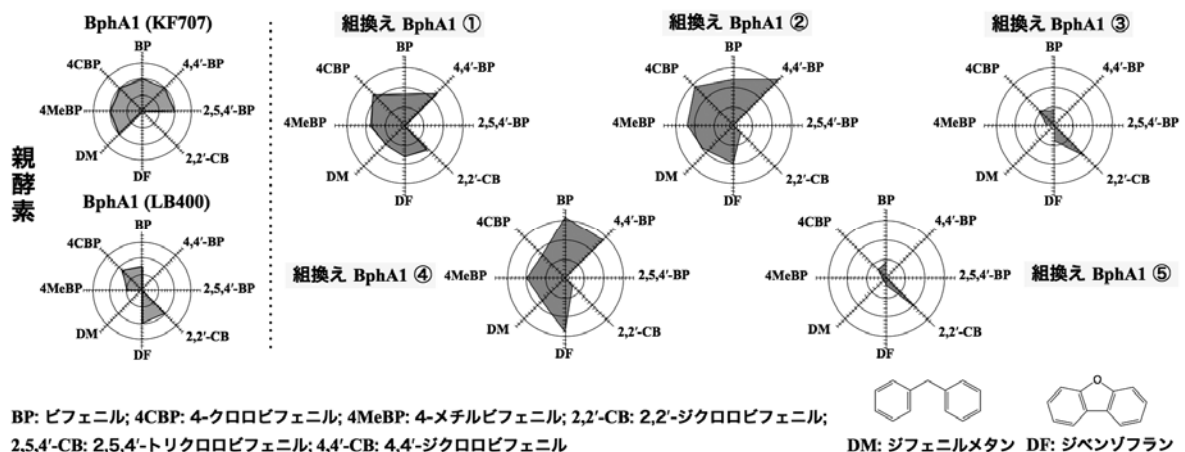


図8: 組換え BphA1 の PCB 及び関連化合物に対する分解特性. DNA シャフリング法で得られた組換え *bphA1* を大腸菌で発現させ、その分解特性を調べた。

子と入れ換えることに成功している。その進化 *bphA1* 遺伝子が組み込まれた KF707 株は様々な芳香族化合物に対しても資化・分解でき、幅広い PCB 分解能を示すことが明らかになっている²⁰⁻²¹⁾。

5. バイオレメディエーション

有用な環境汚染物質分解菌を発見した、或は、強力な分解菌を構築した際に、実際の汚染場所に分解菌を撒いて汚染を浄化したいという気持ちが強くなる。微生物等の働きを利用して土壌や地下水等を浄化する技術であるバイオレメディエーションについて簡単ではあるが最後に紹介したい。

5.1 バイオレメディエーションの種類・利点・欠点

バイオレメディエーションには、外部で培養した微生物を導入することにより浄化を行う「バイオオーグメンテーション」と窒素やリン等の栄養分や酸素、そして、炭素源にメタン等を加えて汚染場所に生息している微生物を活性化することにより浄化を行う「バイオスティミュレーション」がある。さらに、植物を利用して土壌の浄化などを行う技術「ファイトレメディレーション」も含まれる。これらのバイオレメディエーションが汚染浄化法として選択・利用されるのは、自然環境における広範囲かつ低濃度での汚染では、処理施設を建設し、汚染地域の土壌や地下水をすべて汲み上げて物理的・化学的な方法で浄化するのが極めて困難なためである。従って、バイオレメディエーションの利点としては、物理化学的処理法と比較して費用・エネルギーの消費が少ないことがまず挙げられる。また、多様な汚染物質に対して適用できる可能性を有することや生物を利用するということから手法が穏和であるため環境に負荷を与えないことも挙げられる。一方で、浄化に時間がかかる、高濃度の汚染物質浄化に向いていない、さらには、分解除去能には限界があるという欠点もある。特に、実験室では強力な分解活性を示す分解菌であることが分かっているにもかかわらず実際の汚染現場では、その分解菌の菌体濃度や生育条件等が実験室のように再現できないため、実験室で得られる同様な汚染除去効果を発揮させることが難しいとされている。

5.2 有望な技術の課題と期待

我が国日本においては、バイオオーグメンテーションを対象に 2005 年に「微生物によるバイオレメディエーションの利用指針」が設けられた。本指針では、浄化事業計画が指針に適合しているか経済産業大臣や環境大臣に確認できるようになっているが、その事業計画や生態系等への影響評価書の作成、そして、緊急時の対応及び事故対策、安全管理体制の整備、記録等の保管、周辺住民等への情報提供等、実施の際の準備や評価等のやるべきことが多い。これらが事業者等の相当な負担にもなり、本指針の課題となっている。一方で、2010 年 4 月 1 日に「土壌汚染対策法の一部を改正する法律」が施行されて以来、土壌汚染の除去、特に掘削除去は可能な限り抑制的に取り扱うこととされ、低コストで on-site で浄化の可能性があるバイオレメディエーションの期待が高まっている²²⁻²³⁾。その期待に答えるために、また、我が国のバイオレメディエーション促進のためにも、例えば、浄化事業者の負担軽減を含めた利用指針の運用の見直し等が必要と思われる。

6. おわりに

現在、KF707 株を始めとするビフェニル/PCB 分解菌においては、次世代シーケンサーによるゲノム解析が進行している。得られたゲノム情報は、環境汚染物質分解菌の環境適応・進化のメカニズムを解明する上で非常に有用である。一方、著者は、「環境汚染物質分解菌は、末端リグニン分解菌を祖先として進化してきた種」と考えており、天然の芳香族化合物分解代謝系とは異なる新規な環境汚染物質分解代謝系を木質バイオマスの生物変換に適用し、主にリグニン由来の芳香族化合物から付加価値の高い化合物を作ることを目標にゲノム情報を利用して研究を試みている。

参考文献

- 1) 末永光, 渡邊崇人, 藤原秀彦, 西哲人, 古川謙介. 微生物によるポリ塩化ビフェニル (PCB) の分解: 最近の遺伝生化学的研究. 「環境バイオでなにができるのか -環境調和型社会形成のためのバイオテクノロジー-」 環境バイオテクノロジー学会編, pp. 19-30, 2006.
- 2) 環境省パンフレット「ポリ塩化ビフェニル (PCB) 廃棄物の適正な処理に向けて」 [2012年12月版]
- 3) Ahmed, M., and Focht, D. D. Degradation of polychlorinated biphenyls by two species of *Achromobacter*. *Can. J. Microbiol.* **19**, 47-52, 1973.
- 4) 古川謙介. *Pseudomonas* 物語. 生物工学 **89**, 549-552, 2011.
- 5) Furukawa, K. Molecular genetics and evolutionary relationship of PCB-degrading bacteria. *Biodegradation* **5**, 289-300, 1994.
- 6) Mondello, F. J., Turcich, M. P., Lobos, J. H., and Erickson, B.D. Identification and modification of biphenyl dioxygenase sequences that determine the specificity of polychlorinated biphenyl degradation. *Appl. Environ. Microbiol.* **63**, 3096-3103, 1997.
- 7) Furukawa, K., and Miyazaki, T. Cloning of a gene cluster encoding biphenyl and chlorobiphenyl degradation in *Pseudomonas pseudoalcaligenes*. *J. Bacteriol.* **166**, 392-398, 1986.
- 8) Taira, K., Hirose, J., Hayashida, S., and Furukawa, K. Analysis of *bph* operon from the polychlorinated biphenyl-degrading strain of *Pseudomonas pseudoalcaligenes* KF707. *J. Biol. Chem.* **267**, 4844-4853, 1992.
- 9) Watanabe, T., Inoue, R., Kimura, N., and Furukawa, K. Versatile transcription of biphenyl catabolic *bph* operon in *Pseudomonas pseudoalcaligenes* KF707. *J. Biol. Chem.* **275**, 31016-31023, 2000.
- 10) Watanabe, T., Fujihara, H., and Furukawa, K. Characterization of the second LysR-type regulator in the biphenyl-catabolic gene cluster of *Pseudomonas pseudoalcaligenes* KF707. *J. Bacteriol.* **185**, 3575-3582, 2003.
- 11) Furukawa, K., Hayase, N., Taira, K., and Tomizuka, N. Molecular relationship of chromosomal genes encoding biphenyl/polychlorinated biphenyl catabolism: some soil bacteria possess a highly conserved *bph* operon. *J. Bacteriol.* **171**, 5467-5472, 1989.
- 12) Nishi, A., Tominaga, K., and Furukawa, K. A 90-kilobase conjugative chromosomal element coding for biphenyl and salicylate catabolism in *Pseudomonas putida* KF715. *J. Bacteriol.* **182**, 1949-1955, 2000.
- 13) Top, E. M., and Springael, D. The role of mobile genetic elements in bacterial adaptation to xenobiotic organic compounds. *Curr. Opin. Biotechnol.* **14**, 262-269, 2003.
- 14) Springael, D., and Top, E. M. Horizontal gene transfer and microbial adaptation to xenobiotics: new types of mobile genetic elements and lessons from ecological studies. *Trends Microbiol.* **12**, 53-58, 2004.
- 15) 新井博之, 工藤俊章. 進化的観点から見た環境汚染物質分解微生物について. バイオサイエンスとインダストリー **55**, 87-91, 1997.
- 16) Masai, E., Katayama, Y., and Fukuda, M. Genetic and biochemical investigations on bacterial catabolic pathways for lignin-derived aromatic compounds. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* **71**, 1-15, 2007.
- 17) 大坪嘉行, 永田裕二, 津田雅孝. 環境細菌ゲノムの構造と可塑性 難分解性化合物の総合職と専門職の場合. 化学と生物 **47**, 35-42, 2009.
- 18) Stemmer, W. P. C. Rapid evolution of a protein *in vitro* by DNA shuffling. *Nature* **370**, 389-391, 1994
- 19) Kumamaru, T., Suenaga, H., Mitsuoka, M., Watanabe, T., and Furukawa, K. Enhanced degradation of polychlorinated biphenyls by direct evolution of biphenyl dioxygenase, *Nat. Biotechnol.* **16**, 663-666, 1998.
- 20) Suenaga, H., Nonaka, K., Fujihara, H., Goto, M., and Furukawa, K. Hybrid pseudomonads engineered by two-step homologous recombination acquire novel degradation abilities toward aromatics and polychlorinated biphenyls. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **88**, 915-923, 2010.
- 21) 古川謙介. 環境バイオ 分解菌の新機能を探る. 化学と生物 **51**, 46-51, 2013.
- 22) 須藤学. バイオレメディエーション指針の概要. 化学と生物 **49**, 121-124, 2011.
- 23) 福田雅夫. 微生物によるバイオレメディエーション利用指針における微生物の生態系への影響評価. 化学と生物 **49**, 199-203, 2011.

木材から燃料電池用材料をつくる

畑 俊充*

1. はじめに

「木材から燃料電池用材料をつくる」

このように書くと何か突拍子もないことをするのような感じを受けるかもしれないが、炭化すれば木材は電気を通すようになるということを先に説明するとわかりやすいかもしれない。木材の炭化とは、空気のない状態で蒸し焼きにすることによって、木材中に純度の高い炭素を作り出すことだ。図1に示すように、もともとの木材は電気を流さない絶縁体だが、約600°C以上に炭化すると導体となる¹⁾。一つの材料で物性値が一兆倍近く変化するのだ。燃料電池用材料をつくるのは、炭化により木材に電気を流す性質を付与することが出発となっている。

木炭も炭素も、有機物を蒸し焼きにすることによりできあがる。木材の主要成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニンであり、これらの成分は炭素骨格でできている。炭化によって有機物である木材から炭素からなる無機材料に変化する。炭化とは炭素の純度上げる過程をいい、黒鉛化は炭素原子が規則正しく並びやすいように整える過程といっても良い。木炭に電気が流れるので、航空宇宙、セラミックス、エレクトロニクス、電気化学といった分野の新しい用途に適合する先端材料となる可能性がある。

本稿では、燃料電池に使用されている白金の代替として、セルロースから燃料電池用触媒材料をつくる試みを紹介する。窒素を含んだ特殊な炭には酸素を還元する力がある。還元された酸素イオンと水素イオンが反応して水となり電気が発生する。金属や窒素など他の元素の力をかりながら炭本来の性質を利用した、環境にやさしく高効率なエネルギー開発を紹介する。

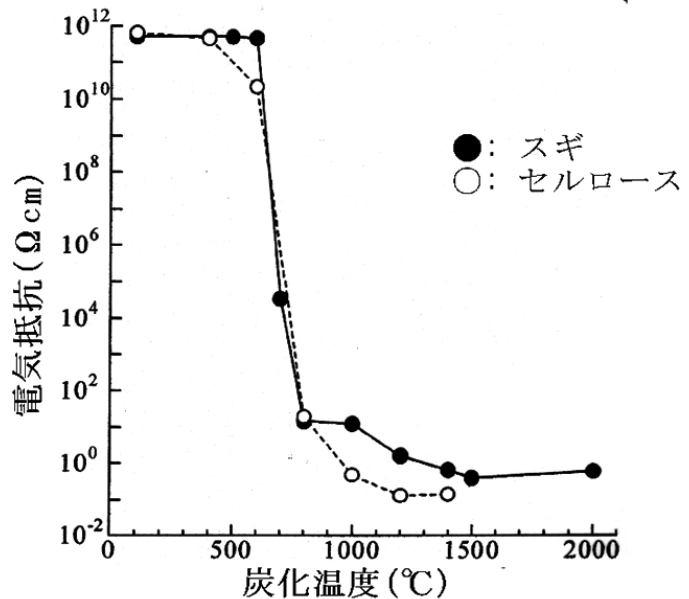


図1：木材の表面電気抵抗と炭化温度の関係¹⁾

2. 燃料電池とは

燃料電池は、水素と酸素を反応させることで継続的に電力を取り出すことのできる発電装置である。乾電池のような一次電池やリチウムイオン二次電池などと比較すると、電気容量の制限がなく放電を続けられるところに特徴がある。通常の発電システムと異なり、燃焼過程を含まないことから発電効率が高く、騒音、振動および排気ガスを発生しない。そのためノートパソコンなどの携帯機器から自動車、鉄道、発電所などのエネルギー源用に期待されている。

燃料電池では、酸素と水素が反応して水ができるときに電気が発生する。これとは逆の反応が水の

* 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所居住圏環境共生分野 E-mail: hata@rish.kyoto-u.ac.jp

電気分解で、液体中に二本の電極を浸し二つの電極の間に電圧をかけると、それぞれの電極から水素と酸素が発生する。反応時に熱を伴うが、その排熱は、動力や温熱に利用することができる。このようにエネルギー効率を総合的に高めるシステムをコジェネレーションという。発電効率が高いこと、静かでクリーンな環境、コジェネレーションおよび複数の発電方式から選択可能であることが燃料電池の特徴である。

アポロ計画やスペースシャトルで利用され実用化されたのがアルカリ電解質形燃料電池(AFC)で、従来法の燃料電池といっても良い。この AFC 以外に現在研究開発が進んでいる、電解質の異なる 4 種類の方式の燃料電池がある。(1) 固体高分子形燃料電池(PEFC)は、ナフィオンのようなプロトン交換膜をはさんで正極に酸素を、負極に水素を供給し発電する。起動が早く小型で、運転温度は 80-100°C と低温で、発電効率は 30-40% である。図 2 に PEFC の模式図を示す。(2) リン酸形燃料電池(PAFC)はリン酸水溶液を電解質に用いている。運転温度は 200°C 程度で、工場・ビル内にコジェネレーションシステムが設置され運転している。(3) 熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)は熔融した炭酸塩を用い、動作温度は 600-700°C である。火力発電所の代替などに期待されている。(4) 固体酸化物形燃料電池(SOFC)はイオン伝導性セラミックスを用いており、空気極で生成した酸化物イオンが電解質を透過し、燃料極で水素あるいは一酸化炭素と反応することにより電気エネルギーを発生させる。火力発電所の代替などに期待されている。

環境に優しい木材を利用し、高効率で無公害な燃料電池の実用化を進めることは、地球温暖化や環境汚染問題を解決する上で有効な対処法である。特に、電気自動車や定置用電熱併供システムに用いられる PEFC は低コスト化の可能性が高く、研究開発への期待が高まっている。従来の PEFC では、比表面積が大きくかつ導電性を有するカーボンブラックを多孔質構造体兼触媒単体としたものがその電極に使用されている。触媒には白金あるいは白金合金系触媒が使用され、これらの触媒が担体中で分散している。しかし、白金は埋蔵量の少ないレアメタルで高価な金属であり、それが燃料電池を高コストにする最大の原因になっている。白金を用いた燃料電池が大量に使用されるようになると、需給がひっ迫し価格が高騰する恐れが非常に大きい。

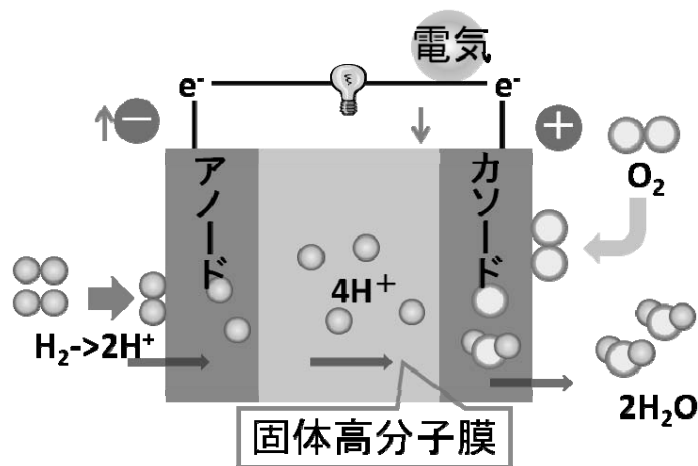


図 2：固体高分子形燃料電池(PEFC)の模式図。

3. 木炭と炭素

原始時代から木炭は主として燃料用に使われてきたが、近代に入ってからはその物理的性質にも人々の関心が向くようになった。古くからの使い方の中には、顔料および防腐剤への木炭の利用があげられる。画き眉としての顔料や防腐剤の他には、図案や文字を書くためにも木炭が用いられてきた。古墳時代の木炭槨、奈良時代以降に埋経に木炭をつめ防腐と防湿を兼ねた使い方も木炭の物理的応用の一種といえる。近世以降は研磨材や光沢剤、浄化剤にも使われている。

空気中で木材を燃やすと灰になるが、酸素のない雰囲気蒸し焼きにすると表1の過程を経て木炭ができる。木炭にはたくさんの小さな空隙が存在し、表面積は木炭 1g 当たり約 100m² で、炭化前の木材の表面積が約 1-2m²/g であるのとは対照的である。微細な空隙に水分やガスを吸着することによ

り環境浄化に役立つさまざまな機能を発現する。空隙を構成する、炭化した細胞壁に着目すると炭化温度によって様々な炭素構造が形成される。材料としての木炭に着目すると木材にはない特徴が見えてくる。有機物の特徴である燃える・狂う・腐るといった欠点は木炭には見られない。炭化温度が高くなるほど炭素含有率が上昇し、600℃で約90%、1000℃における木炭の元素組成は炭素 96%、酸素 3%、水素 1%である。炭素が主体なのでシロアリに食べられたり腐朽菌に普及させられたりすることもなく、長期にわたり安定して二酸化炭素を貯蔵することができる。

炭化方法や分析技術の進歩により、炭素化過程における加熱条件を変化させることで、木炭の吸着性能や電気伝導度などを制御できることがわかってきた。木炭には木材本来の細胞壁構造の異方性や60%もの空隙率を有するにもかかわらず適度な強度をもつという他材料にはない興味深い特徴がある。さらに他元素との複合化により、500℃以上での木炭表面における強度低下や酸化を防ぐことができる。このように加熱処理方法を選択することでスギを原料にした燃料電池用電極の作製も夢ではない。

炭素は元素名で"C"という記号で表すが、炭素材料の意味で使われる場合もある。一方、炭素材料学において"炭素"と"黒鉛"は厳密に定義されている。図3のように結晶の発達していないものを炭素と呼ぶのに対し、結晶化が進み三次元周期構造をもつものを黒鉛と呼ぶ。つまり、炭素六角網面が積層構造を持ち二次元の周期構造をもっている、図4に示すような隣あった炭素六角網面が半周期ずれた三次元的周期構造がなければ黒鉛とはいわない。そのため、高温炭や触媒炭素化により木炭中に観察される微小な黒鉛層を"マイクロ黒鉛構造"と呼ぶ。そして、このマイクロ黒鉛層がどれだけ発達しているかで、木炭の電気伝導性が決まる。

表1：木材の炭化現象²⁾。

熱変換過程	温度範囲	状態変化(無酸素下)
熱減成	60℃ ~200℃	高分子から低分子へ
熱分解	160℃ ~500℃	セルロース・ヘミセルロース・リグニンが分解する
炭素化	500℃ ~1800℃	新たな芳香環が生成する
黒鉛化	1600℃ ~3000℃	芳香環が一定方向に並ぶ

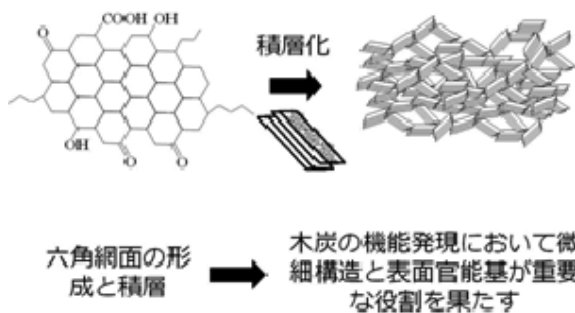


図3: 炭素六角網面の積層による乱層構造炭素形成⁹⁾。

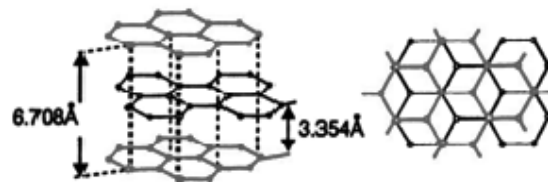


図4: 黒鉛の結晶構造⁹⁾。

4. 白金フリーの窒素ドーブ炭素触媒

白金に代わる触媒開発には多くの注目が集まっており、そのなかでも窒素と炭素の結合による酸素還元活性への関心が高まっている³⁻¹⁰⁾。窒素と炭素が結合してつくられる窒素ドーブ炭素触媒では、

白金並の酸素還元活性が得られることが知られている¹¹⁾。現在は、CoやFeなどの金属錯体を含むポリイミド等の窒素含有樹脂を電気炉で焼成し製造されている。セルロースを出発物質として燃料電池が作られれば、バイオマス由来の燃料電池開発の端緒となるだろう¹²⁾。例えばセルロースを約50%含むスギ炭の燃料電池への応用で、これまでとは全く異なるバイオマスの革新的なエネルギー利用形態となる。建築廃材、間伐材、製材残材などの木質系廃棄物にも対象を広げることができ、森林保護や木材の有効利用に社会の目が向けられることになる。

白金フリーの窒素ドーピング炭素触媒を合成するために、直流の大電流を発生する特別なインバーター電源をもつ直パルス通電加熱装置により窒素含有木質粉を加熱した。大きな表面積と活性をもつ窒素ドーピング炭素触媒の合成をおこなうことにより、従来は難しいとされていた熱分解時の炭素と窒素の反応をこのシステムは可能としている。電流を投入によりパルスが発生する瞬間に極めて大きな収斂エネルギーが物質にナノレベルで作用する。物質間にプラズマ現象を微小時間、断続的に発生させることによる熱のフローにより微小金属が材料全体に拡散すると同時に、窒素ドーピング炭素触媒の導電性向上に必要な微小黒鉛積層構造の発達、黒鉛層エッジ部における炭素の触媒黒鉛化および炭素-窒素結合の同時生成が起こる。こうして窒素のドーピングと黒鉛結晶の発達という一見矛盾する二つのことを同時に実現することができるのである。

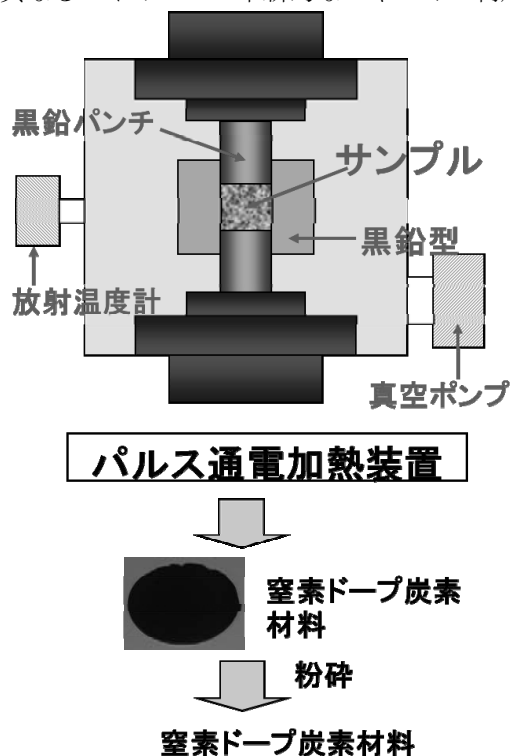


図5：白金フリーの窒素ドーピング炭素触媒の合成方法。

5. 窒素ドーピング炭素触媒の課題

炭素化前駆体には Fe または Co を担持した CAA(アセトアセチル化セルロース)にメラミンを75wt%(重量パーセント)混合した混合物を用いた。炭素化条件は窒素雰囲気下で、温度：600~900℃、昇温速度：20℃/分、保持時間 15 分の条件で通電加熱を行った。Py-GC-MS(ガスクロマトグラフ質量分析装置)分析で調べたところ、セルロースからはレボグルコサンが生成したが、CAA またはメラミン混入により不安定なレボグルコサンの生成が抑制され、体に有害なガスも検知されなかった¹³⁾。800℃で炭素化した FeCAA800 では黒鉛微結晶が観察されたが、700℃で炭素化した FeCAA700 では黒鉛微結晶は観察されなかった。800℃から Fe による炭素の触媒黒鉛化が起こったことがわかった点が意義深い。Py-GC-MS と TEM(透過電子顕微鏡) による分析手法により、木質を前駆体に用いた窒素含有炭素の反応機構の理解から本合成方法の安全性と合理性の検証をすることができた。今後、従来法の白金触媒で得られる性能に近づけるため、さらなる努力を必要とする。

6. おわりに

花粉アレルギーなどで悪名高いスギの炭素化物から、生命圏や人間圏に役立つ新たな材料の開発することができれば、木質資源の有効利用の鍵となる。将来、炭化によりスギから高機能炭素素材が開

発されれば、スギの役割は重要なものとなるのではないだろうか。近い将来、石油・石炭や希少金属からではなくスギ炭素化物から高性能電極触媒が製造され、燃料電池の一翼を担うだろう。

参考文献

- 1) 石原茂久, 木質系炭素材料素材開発の新しい展開, 木材学会誌, 42(8), 717-723, 1996.
- 2) 畑 俊充, 「炭化と生成物の利用」木平勇吉編 『森林と木材を活かす事典』, 産調出版, 2007.
- 3) Fu, R., T. F. Baumann, et al, Formation of graphitic structures in cobalt- and nickel-doped carbon aerogels. *Langmuir*, 21(7), 2647-2651, 2005.
- 4) Matter, P. H., L. Zhang, et al, The role of nanostructure in nitrogen-containing carbon catalysts for the oxygen reduction reaction. *Journal of Catalysis*, 239(1), 83-96, 2006.
- 5) Nagaiah, T. C., S. Kundu, et al, Nitrogen-doped carbon nanotubes as a cathode catalyst for the oxygen reduction reaction in alkaline medium, *Electrochemistry Communications* 12(3), 338-341, 2010.
- 6) Lee, K. R., K. U. Lee, et al, Electrochemical oxygen reduction on nitrogen doped graphene sheets in acid media, *Electrochemistry Communications* 12(8), 1052-1055, 2010.
- 7) Chen, Z., D. Higgins, et al, A review on non-precious metal electrocatalysts for PEM fuel cells, *Energy and Environmental Science*, 4(9), 3167-3192, 2011.
- 8) Ferrandon, M., A. J. Kropf, et al, Multitechnique characterization of a polyaniline-iron-carbon oxygen reduction catalyst, *Journal of Physical Chemistry C* 116(30), 16001-16013, 2012.
- 9) Ozaki, J., S. Tanifuji, A. Furuichi, K. Yabutsuka, Enhancement of Oxygen Reduction Activity of Nanoshell Carbons by Introducing Nitrogen Atoms from Metal Phthalocyanines. *Electrochimica Acta*, 55, 1864-1871, 2010.
- 10) Edgar, K.J., K.M. Arnold, W.W. Blount, J.E. Lawniczak, and D.W. Lowman. Synthesis and Properties of Cellulose Acetoacetates. *Macromolecules*, 28, 4122-4128, 1995.
- 11) 畑 俊充, ウッドバイオリファイナリー 2. スギ炭素化物からの機能性材料の開発, 材料, 61(8), 742-747, 2012.
- 12) Tsuge, S., Ohtani, H., Watanabe, C., Pyrolysis - GC/MS Data Book of Synthetic Polymers: Pyrograms, Thermograms and MS of Pyrolyzates, ELSEVIER, 2011.

災害に立ち向かう先端大気観測とその社会還元*

古本淳一**, 東邦昭**

1. はじめに

近年、災害を引き起こす「極端気象」の発生頻度が増加している。最新の将来予測でも温暖化の進行に進むにつれて我が国ではこのような極端気象現象の発生がさらに増えることが予想されている。2012年8月14日には、京都府宇治市を中心とした北摂・山城地域に局地的豪雨が発生した。宇治市では積算雨量が311ミリという大量の雨が短時間に観測され中小河川が氾濫し大きな水害となった。崖や盛土の崩落により道路や鉄道など公共交通機関が麻痺し、復旧活動の中8月18日には再度雨で河川が決壊する二次災害も発生した。また、2013年の台風18号の通過では史上初の「特別警報」が発令され、淀川水系の大河川が氾濫寸前まで増水し多くの地域で避難指示が出た。

図1に気象災害による気象災害による行方不明者、死亡者の年々推移を示す。1970年以前は図示されていないが、社会インフラの荒廃した戦後間もなくは気象災害による死者数は千人オーダーで推移していたが、堤防やダムなど社会基盤の整備に伴って被害者は急速に減少を続けてきた。

1990年代中頃には100名を切るまで減少したが、2000年以後は下げ止まっており近年は1980年代水準に近づく年もある。これは従来型の災害対策では抑えきれない「都市型災害」の増加によると考えられる。

都市型災害が大きな注目をあつめる鎗矢となった事故として神戸市灘区を流れる都賀川の鉄砲水を取り上げる。都賀川は神戸市の住宅街を流れる中小河川である。高度成長期には汚染が激しかったものの、周囲の住民の努力による河川浄化が積極的に進められ魚が遡上するまで復活した経緯がある。現在では図2のようにスロープ、遊歩道、飛び石が整備された遊水公園となっており、子供からお年寄りまで水に触れあう場となっている。2008年7月28日に六甲山系の南側にゲリラ

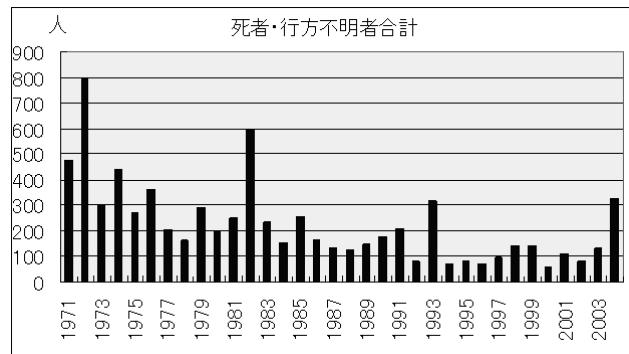


図1: 日本の気象災害による死者・行方不明者の年変化 (気象庁・異常気象レポート)



図2: 都賀川の堤防内部の写真

* 2014年7月26日作成

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所大気圏精測診断分野.
E-mail: furumoto@rish.kyoto-u.ac.jp

豪雨が発生した。10分間で1メートル以上という急激な水位上昇により河川敷内で遊んでいた子供たちを中心に40名以上の方が流され5名の方が犠牲になった。神戸市の河川モニタリングカメラの映像によると、急激な増水は数分間で発生している。

よくみるとこの事故は堤防内部の遊水公園で発生したものであり、越堤を防げているため大規模洪水を防ぐことができたともいえるが、都市住民の自然に触れあいきれいな川を望む要請の高まりにより親水公園が建設され遊びの場が知らない間に新たな災害を生み出す要素になっていたといえる。他にも、上流の降水により下水管の水量が急激に増加し作業員が被害にあう、急に地下街に下水が流入するなど事前に予測が難しい「都市型災害」が増加している。

近年、極端気象現象の極端度が増し、今後の温暖化の進行により極端気象頻度が増加することが危惧されている。「都市型災害」の新たな減災対策はまさに喫緊の課題となっている。本稿では、極端気象の中でも観測や予測研究が多く行われていない突風災害に着目し著者らの取り組みを紹介する。

2. 比良おろしによる突風動態の観測と予測

「比良おろし」は比良山地の麓に発生する局地風である。図3に湖西地方の地図を示す。比良山地から吹き下ろす突風は、湖西地域の幅約10kmの限られた地域にのみ毎年冬期に現れる。突風により家屋損壊、学校休校などの被害が毎年出る一方で、トラックの転覆など重大な事故も発生している。突風域内には幹線鉄道が走り頻繁に突風による鉄道運行の遅れや休止が発生している。鉄道網は広域相互乗り入れが行われていることから、姫路から神戸、大阪、京都、米原から敦賀に至る広い領域の鉄道網に大きな影響を与えている。

従来の比良おろしの予測法である天気図解析から突風を予測する場合のスレド・スコアは30%程度にすぎず、良い予測が得られない。比良おろしは他のおろし風とは異なる特徴がありこの特性が予測を難しくしていると考えられる。一般的なおろし風は山脈の中で一段低くなった鞍部から風が吹き出すことで強いおろし風が発生すると説明される(Saito 1992, 1994)。この場合おろし風は常に鞍部の下流側領域に現れる。一方で、比良山地には大きな鞍部が見られないにも関わらず強風域が発生しその場所が時間によって移動する特異な特徴を持つ。これらは従来研究されてきたおろし風とは違うメカニズムの存在を示唆する。

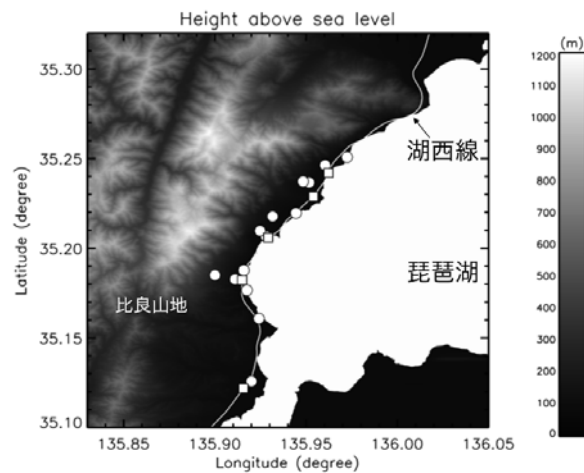


図3：比良おろし域周辺の地形。色合いは標高を表します。比良山地の最大標高は約1200m。白丸・四角は本研究で設置をしている風速計の位置。白線は沿線の鉄道路線。

2.1 比良おろしの稠密観測ネットワーク

比良おろしの動態を観測的に明らかにするため、携帯電話会社や鉄道会社と連携して、比良おろし域に19台からなる地上観測ネットワークを構築した。2012年10月から観測を開始し現在まで定常的な観測を続けている。2012～2013年、2013～2014年の秋～春季には最大瞬間風速が25m/sを超える突風イベントをそれぞれ20期間以上捉えた。図4にそのうちの一例を示す。図中の黒矢印は最大瞬間風速

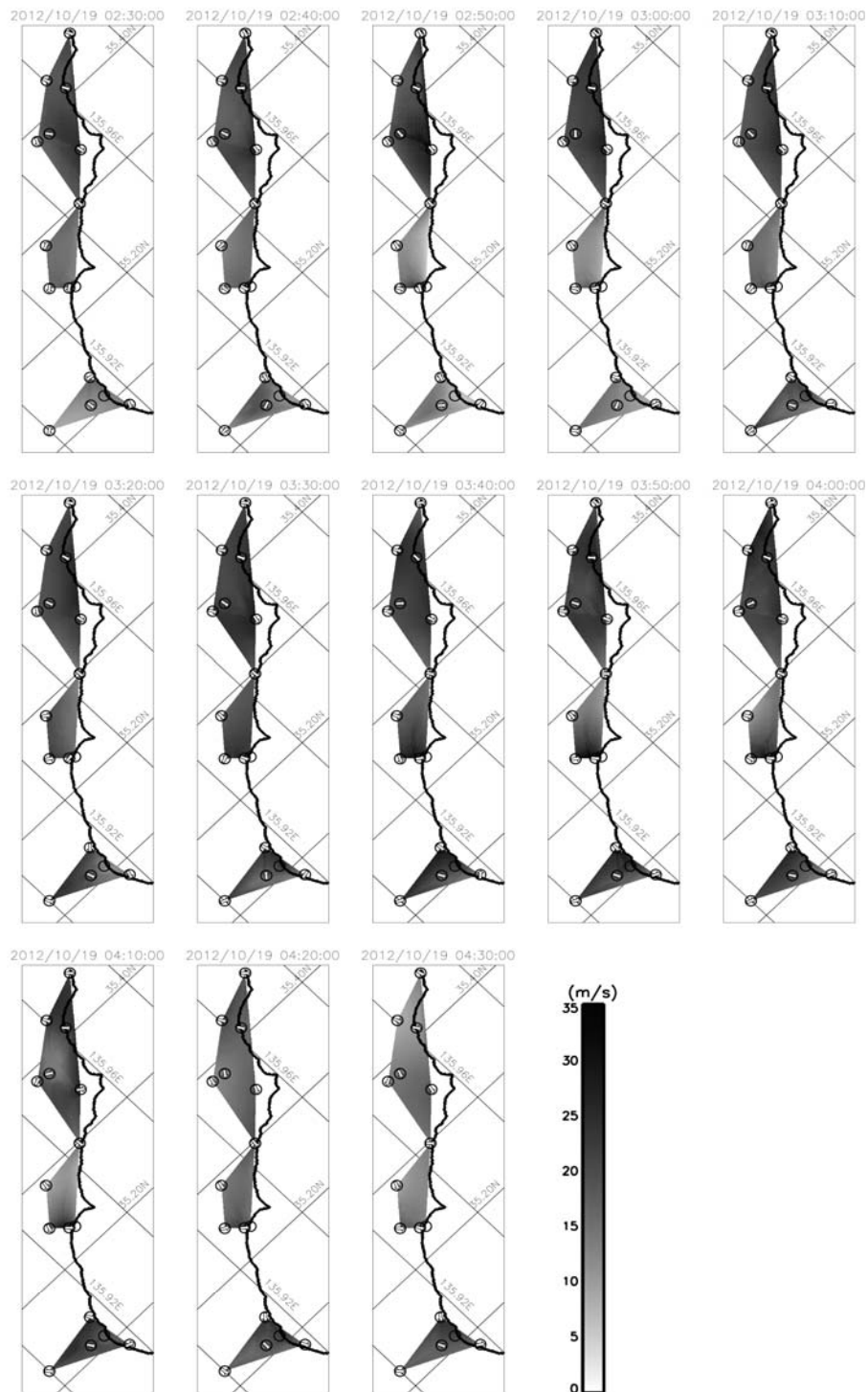


図 4: 比良おろしが発生した 2012 年 10 月 19 日の比良おろし域の風速の水平分布。それぞれの図は 10 分間の最大風速を色で表す。丸印が観測位置を示し、中の白抜き矢印は最大風速の時の風向を示す。黒実線より右側が琵琶湖の湖水面。

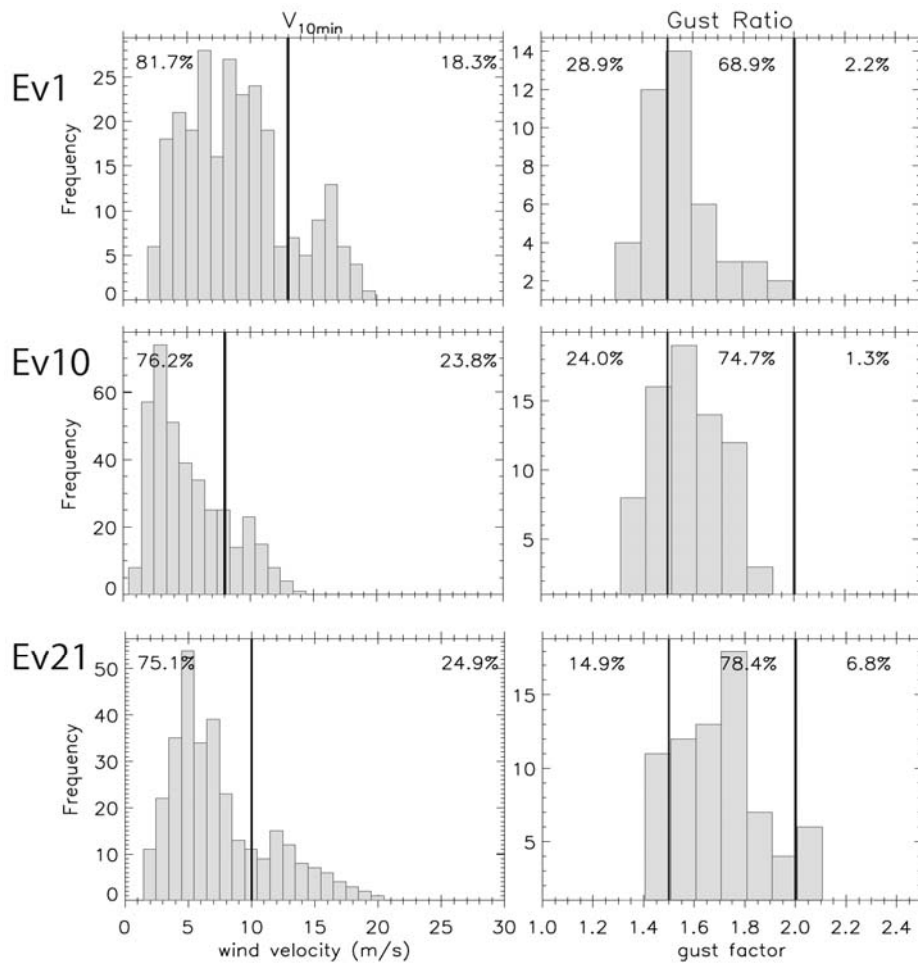


図5：比良おろしが発生した期間中の10分間平均風速（右図）。頻度分布で2ピークが見られ右側のピークが突風に対応する。縦実線を境として右側のデータのみを用いて計算した突風率の頻度分布を左図に示す。縦線は、突風率1.5と2.0の値を示す。

35m/s以上の強い突風を示す。期間前半は図面上側の北東側で風速が強く2時50分に強い突風が現れている。一方期間後半には画面中から下側にかけて強い突風が現れ突風域は時間とともに画面下方に移動して行き、突風の微細な構造が観測により明らかになった。

突風災害を考える上では、最大瞬間風速と平均風速値の比である突風率の特性を調べるのが重要である。突風率は1.5程度の値を取るとされているが、周囲の地表面状態の影響を受け変化するため、その詳細特性は調べられていないのが現状である。図5に2012年10月7日(Ev.1)、2012年12月30日(Ev.10)、2013年3月13日(Ev.21)の平均風速のヒストグラム(右図)と突風が吹いているときの突風率(左図)に示す。すべてのケースにおいて7割程度は突風率が1.5~2.0の間に収まっているが、下にゆくほど、突風率が2.0を超える割合が増えており、イベント毎に突風率特性が大きく異なる。

さらに精密な構造を調べるために天気予報に用いる数値予報モデルを用いて、50mという極めて細かい風速構造をスーパーコンピュータで計算した結果を図6に示す。強風と弱風領域が時間とともに変化しながら動いてゆく様子が見て取れ、この結果は図4の結果とも良く一致する事がわかった。

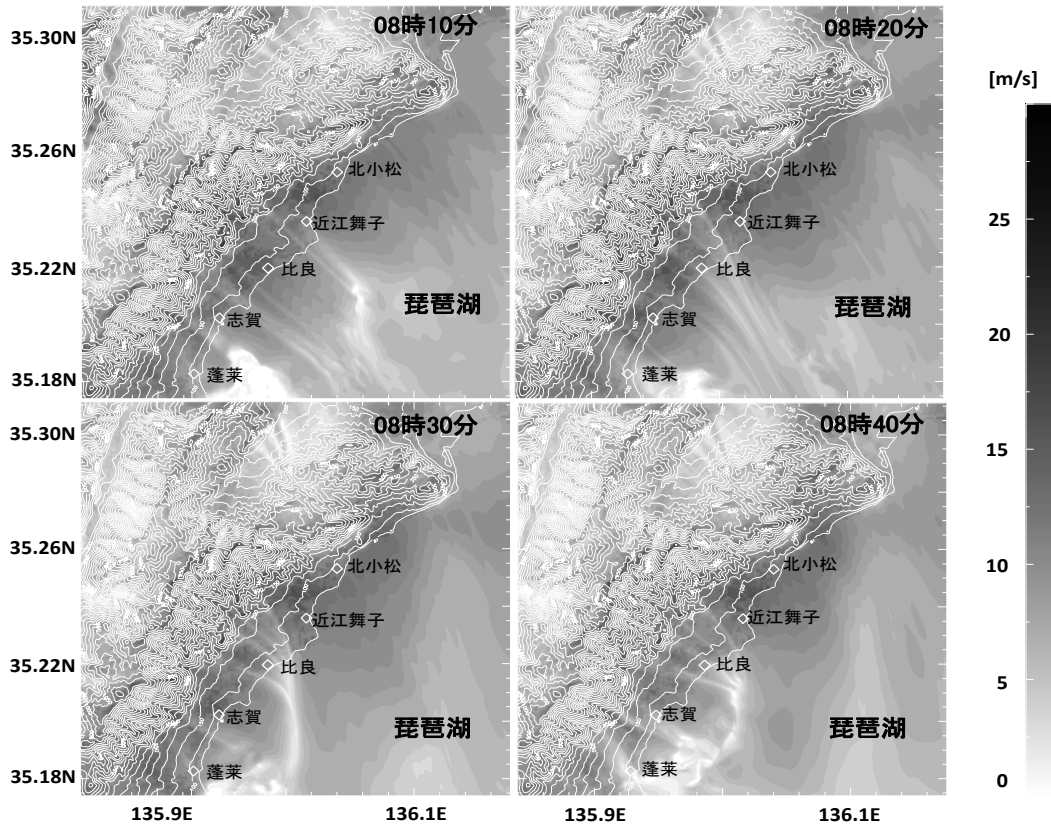


図 6：数値予報モデルで計算した水平 50 メートルごとの風速の水平分布。等高線は標高を示す。

3. おわりに

日本は世界有数の複雑な地形と植生・地表面状態を持った国土を持ち、比良おろしのような地域特有の災害事象が数多く見られる特徴がある。温暖化が進むにつれて我が国ではこのような現象の発生頻度がさらに増えることが予想される。我が国では人類活動の多様化により複雑系の中での生活をしているため、一事象が思わぬところに影響を与え災害が発生することがある。こうした災害に立ち向かうには今まで以上に個人やコミュニティーの働きが重要になってくることはいうまでもなく、それにはより高度かつ正確な情報をより迅速かつ分かりやすく提供することが重要になる。

本稿ではおろし風という風害をもたらす現象についての研究を紹介した。これをケーススタディーとして得られた知見をもとに様々な地域特有での精密観測、災害予測、情報伝達手段について検討して一般化することで、災害にしなやかに立ち向かえる社会のための情報発信力を高める研究を進める。

参考文献

- 1) 気象庁, 異常気象レポート 2005 概要版, pp.1-57, 2005.
- 2) Saito, K., Shallow water flow having a lee hydraulic jump over a mountain range in a chanel of variable width, *J. Met. Soc. Japan*, **70**, 775–782, 1992.
- 3) Saito, K., A numerical study of the local downslope wind “Yamaji-kaze” in Japan. Part3: Numerical simulation of the 27 September 1991 windstorm with a non-hydrostatic multi-nested model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 301–329, 1994.