

生 存 圈 研 究



No. 14

2018 年



京都大学 生存圏研究所



「生存圏研究」は、京都大学生存圏研究所がその活動と生存圏の研究に関する報告を行うことを目的として年一回発行する紀要です。本第14号は、平成29年度の成果を基に発行します。生存圏の研究に関心を持たれる機関や研究者に広く行き渡るよう無料で配布しています。お問い合わせは当研究所までお寄せ下さい。

〒611-0011 宇治市五ヶ庄、TEL: 0774-38-3346

E-mail: edit-j-journal@rish.kyoto-u.ac.jp

編集委員

篠原 真毅

Chin-Cheng Yang

反町 始

武田 麻友

小嶋 浩嗣

馬場 啓一

日下部利佳

中川 貴文

田鶴寿弥子

岸本 芳昌

目 次

総 説

| | |
|-----------------------------------|---------------------|
| セルロースナノファイバー —木の国ニッポンの資源— | 1 |
| | 矢野 浩之 |
| 基礎科学とセルロースの接点 —科学の発展を支えた物質— | 8 |
| | 今井 友也 |
| レーザーで照らし出す地球の大気環境..... | 16 |
| | 矢吹 正教 |
| 地上再生可能エネルギーから宇宙太陽エネルギーへの拡大..... | 23 |
| | 石川 容平, 松室 堯之, 篠原 真毅 |
| 抗卵菌物質の現状と生合成研究..... | 39 |
| | 川崎 崇 |

解説・資料

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| 木質系材料の塑性加工技術..... | 44 |
| | 金山 公三 |
| 科学衛星における電磁適合性..... | 50 |
| | 小嶋 浩嗣 |
| 根圏を調べる方法..... | 59 |
| | 杉山 暁史 |
| 相対論的プラズマ粒子シミュレーションのための粒子計算アルゴリズム..... | 62 |
| | 銭谷 誠司, 加藤 恒彦 |

| | |
|-----------|----|
| 研究業績..... | 78 |
|-----------|----|

セルロースナノファイバー —木の国ニッポンの資源—

矢野 浩之^{1*}

Cellulose nanofibers

- Future materials based on sustainable resource in Japan -

Hiroyuki Yano^{1*}

概要

植物が細胞の集まりであることは良く知られているが、その細胞が結晶性のナノファイバー（セルロースナノファイバー）から出来ていることはほとんど知られていない。木材はその半分がセルロースナノファイバーである。驚くべきことに、このナノファイバーは細いだけでなく、鋼鉄の 1/5 の軽さで、その 5 倍以上の強度を有している。近年、木材などの植物バイオマスからこのナノファイバーを取り出し、自動車や電子機器、医療、化粧品など幅広い用途に利用する取り組みが世界中で活発化している。先進国の中でも森林資源が豊富な我が国では、特にセルロースナノファイバーに対する関心が高く、産官学の様々な分野から注目が集まっている。

1. はじめに

凄い材料が世の中にある。結晶性のナノ繊維で補強され、3 次元的に構造制御された多孔性の高分子材料。アメリカの化学会でこの材料の化学的構造制御について紹介するといったら、立ち見が出るほど人が集まった。同じ内容を、その前の機会では、“木材の化学修飾”というタイトルで話した時には全く人が集まらなかったのに。アメリカの著名な木材研究者から聞いた笑い話である。

何億年も前から地球上に存在する木材は、古くから人類の生活に溶け込み、あまりに身近すぎて、その高性能素材としてのポテンシャルを考えることが無かった。改めて今風に木材の構造を眺めてみると、鋼鉄の 1/5 の軽さで鋼鉄の 5 倍以上の強度を持つ結晶性ナノファイバーから出来た 3 次元多孔性高分子複合材料という先端素材の匂いの濃い素材となる。製造過程で二酸化炭素を吸収固定し、廃棄にあたっては地球環境下での分解性をコントロールできる。しかも、その生産に要するエネルギーは、金属やプラスチック、セラミックスと比べ圧倒的に少ない。そのため価格も安い。

近年、木材から、その基本構成要素である結晶性ナノファイバーを取り出し、材料として使おうという取り組みが世界中で活発化している。セルロースナノファイバーの製造、機能化、構造・複合化に関する研究開発である。我が国は、製紙、化学、樹脂、自動車、電気・電子機器など世界に誇る高度なものづくり産業が狭い国土に集約的に存在している。一方、一步、街を離れば、そこには国土の 7 割を覆う森林がある。そのような地理的、資源的優位性を活かせば、森林において持続的に生産される高機能低炭素のセルロースナノファイバーから、我が国の得意な分野、技術を活かして高性能の大型部材を製造し、自動車や情報家電にどんどん組み込み世界に向けて売って行くことができる。

2018 年 7 月 9 日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所生物機能材料分野.

* E-mail: yano@rish.kyoto-u.ac.jp

そうならば原料から最終製品までのすべてが **Made in Japan** の未来型産業になる。

本稿では、セルロースナノファイバーの構造や特性、その製造と用途について説明した後、我が国におけるセルロースナノファイバーに関する産官学の動向について紹介する。

2. セルロースナノファイバー

セルロースナノファイバーは、セルロース分子の鎖がピーンと伸びた状態で結晶を形成している幅 4-20nm のナノ繊維である (図1)。学術的にはセルロースマイクロフィブリルあるいはセルロースマイクロフィブリル束と呼ばれ、鋼鉄の1/5の軽さで、その7-8倍の強度を有する。線熱膨張係数はガラスの1/50。これは石英ガラスに匹敵する。こう書くと極めて特殊な繊維の様に思われるが、木材は、その半分がセルロースナノファイバーである。木材や竹の細胞はセルロースナノファイバーが鉄筋となりリグニンがコンクリートの役割を果たしている (図2)。そのコンクリートを取り除いて、細胞一つ一つに解したものが、コピー紙などの原料となるパルプである。我が国では、年間2000万トン近い紙用パルプが流通しているが、それらはすべてセルロースナノファイバーの集合体である。

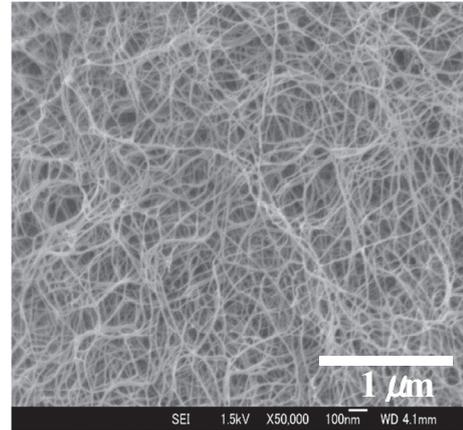


図1: 木材細胞壁中におけるセルロースナノファイバー
スケールバー: 1μm

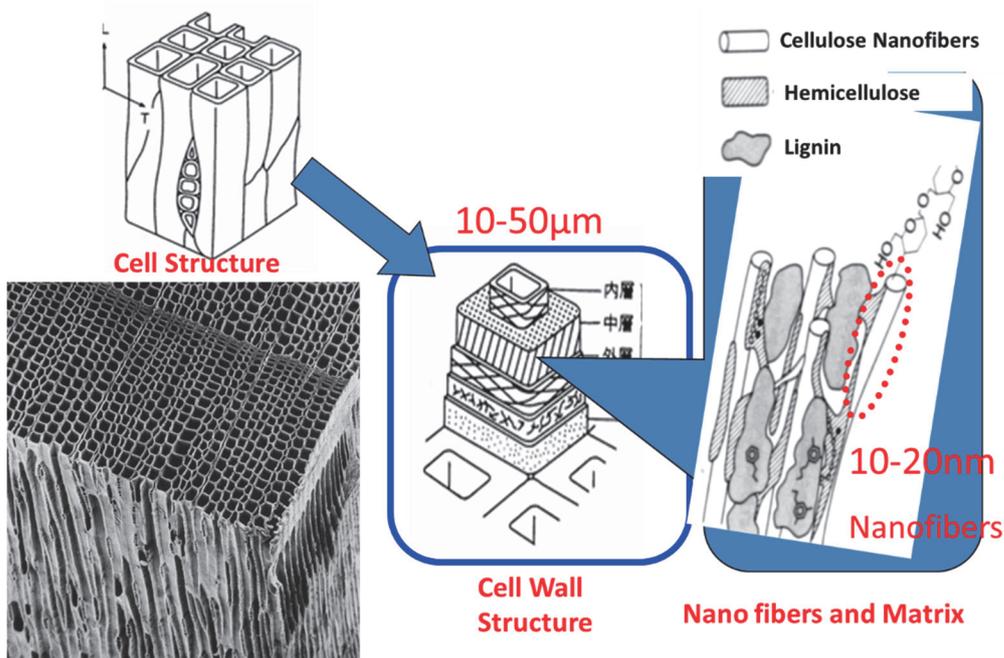


図2: 木材の階層構造

1950年代、電子顕微鏡の開発によってナノの世界を見ることができるようになると、植物細胞壁が均一な結晶性のナノ繊維で出来ていることが知られるようになった。1962年には、そのナノ繊維の結晶弾性率は鋼鉄の2/3の140GPaであることを京大の桜田グループがX線解析から報告している。さらに、1983年にカナダ、紙パルプ研究所のPageはパルプを一本引っ張って1.7GPaの強度(自動車用

鋼板の5倍)があることを明らかにしている。最も高い強度が得られたパルプでは、セルロースナノファイバーの約7割が配向していることから、セルロースナノファイバーの強度は、1.7GPaを0.7で除した値、すなわち2.5GPa以上はあると推測できる。しかし、その強度特性は材料科学の分野においてはあまり意識されてこなかった。

この高強度、高弾性のセルロースナノファイバーを木材などの木質バイオマスから抽出しナノ繊維として利用する研究が盛んになったのはナノテクノロジーが言われた2000年に入ってからである。ナノ素材としての研究の歴史はまだ15年ほどとあってよい。しかし、この15年の動きは目覚ましい。軽量、高強度、低熱膨張といった優れた特性を示すセルロースナノファイバーは、次世代の大型産業資材あるいはグリーンナノ材料として注目され、2004年以降、論文発表や特許出願はうなぎ上りに増えている。中心となっているのは、森林資源が豊かで製紙産業が盛んな北欧、北米、そして日本である。最近では、中国のキャッチアップも無視できない。2011年からは、フィンランド、カナダ、米国の主導で国際標準化の議論も始まり、まさに、国家レベルでの競争の様相を呈している。

3. セルロースナノファイバーの製造¹⁾

図3にパルプのマイクロからナノまでの構造を示す。木材パルプなど植物系繊維材料からのセルロースナノファイバー製造について、様々な方法が開発されている。数%濃度のパルプスラリーについて行う低濃度での解繊技術としては、高圧ホモジナイザー法(図4)。水中カウンターコリジョン法(ACC)法、マイクロフリュイダイザー法、グラインダー磨砕法、凍結粉碎法、超音波解繊法などがある。低濃度での解繊は均一なナノファイバーを得やすいが、解繊効率やその後の脱水プロセスに起因してコスト高である。これに対し固形分が数十%程度のパルプ・水混合物を出発点とした解繊技術として、二軸混練機などを用いた強せん断混練法がある。ポリマー存在下での混練によるナノファイバー化は、ポリマー中への均一フィラー分散を同時に行える可能性があり、複合材料へのナノファイバー利用において有利である。

東京大学、斉藤、磯貝らは、TEMPO(2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinyloxy radical)を触媒に用い、非晶領域にある6位のセルロース水酸基を選択的にカルボキシル化すると、水中で浸透圧によりナノファイバー相互の反発性が高まり、ナノファイバー化が促進されることを明らかにしている。ミキサー等の極めてゆるやかな機械処理によってもマイクロフィブリルのレベルまで均一にナノファイバー化できる。同様に、セルロースナノファイバー表面の水酸基をカルボキシルメチル化やリン酸エステル化してもナノ化は促進される。酵素を用いたナノファイバー化の促進に関する検討もある。

セルロースナノファイバーは全ての植物資源が原料となり得る。これまで木材パルプ以外に、竹、稲ワラ、コットン、バガス(サトウキビの絞りカス)、ジャガイモやキャッサバのデンプン絞りカス、砂糖ダイコン(シュガービート)の絞りカス、あるいはミカンの搾汁カスや焼酎カスといった農産廃棄物や産業廃棄物についても検討がなされ、いずれの原料からもグラインダー処理により幅20-50nm程度の均一ナノファイバーが得られている(図5)。

セルロースナノファイバーには、酢酸菌などのバクテリアが産出するものもある。ナタデココといった方が馴染みがあるかもしれない。身近なデザート食品である。植物原料は細胞壁からマトリック

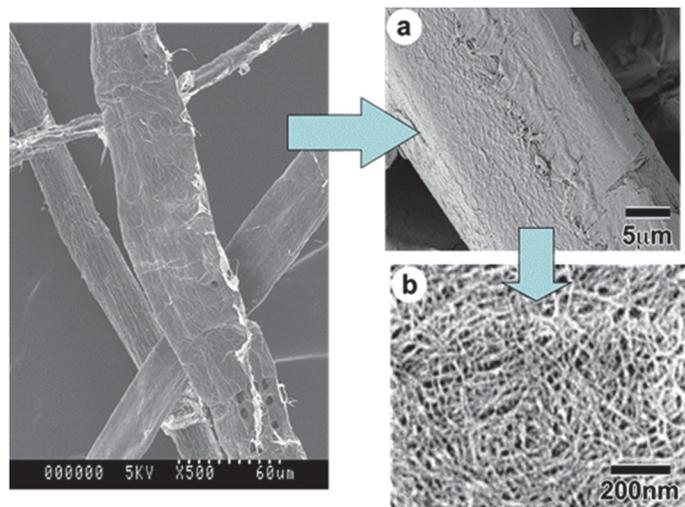


図3：針葉樹パルプの形態から微細構造

ス成分を取り除き、機械的解繊によりナノファイバーを取り出す必要があるが、バクテリアセルロースではバクテリアが培養液中でナノファイバーを紡ぎながら移動し、かつ分裂するため、幅 50-100nm のセルロースナノファイバーが凝集することなく溶液中に均一に分散したネットワーク構造体が容易に得られる。このため、高弾性のゲル状シートとして、人工血管や傷口治療用シートなど医療関係への応用が多く研究されている。乾燥シートがスピーカ振動板として用いられている例もある。

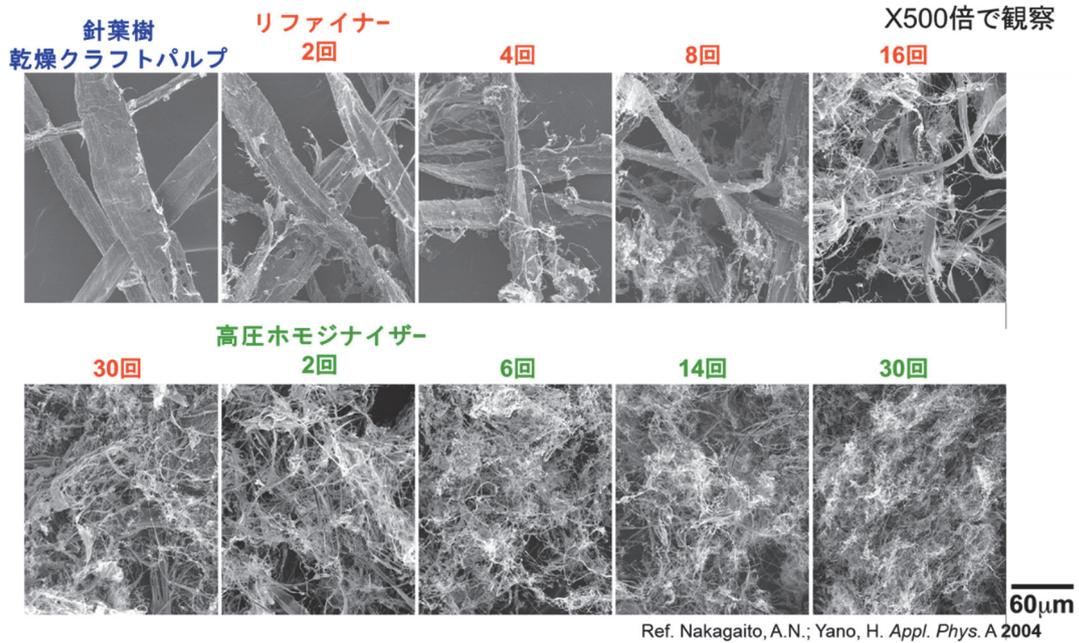


図 4：リファイナー処理と高圧ホモジナイザー処理を組み合わせた製紙用クラフトパルプの解繊

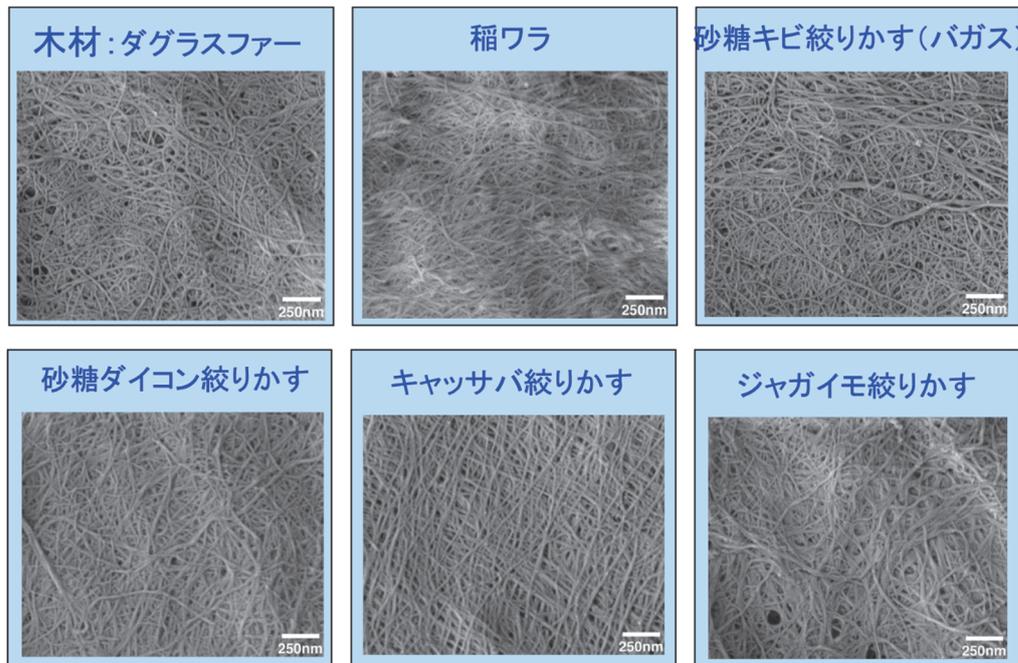


図 5：様々な原料からグラインダーで製造したセルロースナノファイバー。スケールバー：250 nm

4. セルロースナノファイバーの用途²⁾

セルロースナノファイバー、セルロースナノクリスタル（パルプやセルロースナノファイバーを高濃度の硫酸で処理して得るセルロース純度の高い結晶性素材）の高比表面積、可食性、軽量・高強度、低熱膨張性、生分解性、生体適合性などの特徴を活かし様々な用途開発が進められている。

可視光波長（400-800 nm）に比べ十分に細いセルロースナノファイバーは可視光の散乱を生じないため、アクリル樹脂、エポキシ樹脂などの透明樹脂を、その透明性を大きく損なわずに補強できる。得られた複合材料は、高強度で低熱膨張、しかも自由に曲げることができることから（図6）、有機ELディスプレイや有機薄膜太陽電池の透明基板として研究開発が進んでいる。

さらに、ナノファイバー間の空隙をナノレベルにまで小さく制御することで、セルロースナノファイバーだけで透明な低熱膨張材料(CTE:8.5ppm/K)が得られる。この材料は、紙の様に折りたたむこともできるが、その表面はプラスチックのように平滑である。大阪大学の能木らは、これらの特徴を活かして、銀ナノワイヤを塗布した透明導電膜や金属ナノ粒子インクを用いた高導電性配線といった電極材料の開発や、フレキシブルアンテナ、ペーパー太陽電池・トランジスタアレイといった有機半導体デバイスの試作を行っている。また、セルロースの絶縁性を利用した電気抵抗変化記憶メモリ（ReRAM・メモリスタ）やフレキシブル高誘電率材料の開発にも成功している。

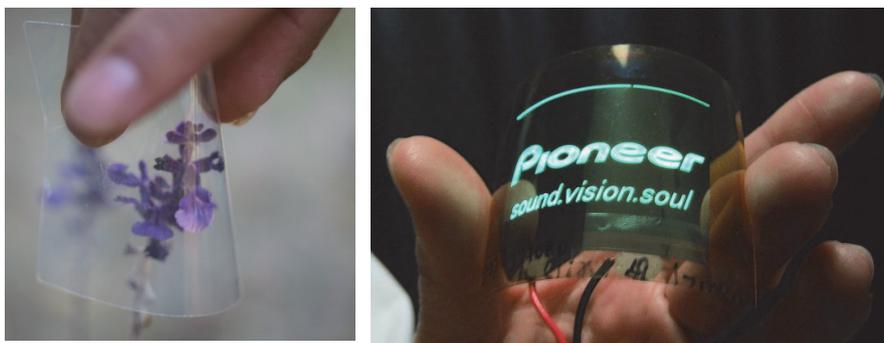


図6：セルロースナノファイバー補強透明材料（左）とそれを基板に用いた有機EL発光素子

TEMPO 触媒を用いた酸化処理により幅 10 nm 以下にまで解繊したセルロースナノファイバーのフィルムはそれだけで高い透明性を示す。適度な透湿性を保ちながら PET や PVC の 1/100 以下の酸素ガス透過性を示すことから、包装容器のコーティング素材として検討されている。

軽量・高強度の特性を活かした構造用途への検討も進められている。ナノファイバーシートにフェノール樹脂を注入後、積層、硬化すると繊維率約 90%で鋼鉄の 1/5 の軽さで鋼鉄なみの強度の成形体が得られる。また、化学変性したセルロースナノファイバーをポリプロピレンやナイロン6といった熱可塑性プラスチックに 10%混ぜると、強度は 2-3 倍も向上する。目指す用途は、軽量、高強度の特性が求められる自動車など輸送機用の構造部材である。

最近、我々は疎水化変性した乾燥パルプを押出機中で樹脂と溶融混練することで、パルプをナノ化し樹脂中に均一分散させる技術（京都プロセス）を世界に先駆けて開発した（図7）。従来は、パルプを水中でナノファイバーまで解繊し、水を除いてから疎水化変性を行い、それを樹脂と複合化していたが、この技術により CNF 強化樹脂材料の製造プロセスが大幅に簡略化された。

現在は、この京都プロセスに基づく、年間 3 トンのリグノ CNF 強化樹脂を原料となる木材や稲わらから始まり樹脂複合品や最終成形品までを連続して製造するテストプラント（将来的には 5 トン/年にまで拡張可能）を京都大学宇治キャンパス内に建設し、複数の企業や公的研究機関にテストプラントを用いて製造したサンプルを提供し、評価を受けている。これにより、植物由来の高性能ナノ繊維で強化した樹脂材料の用途開発が大きく進むことが期待される。

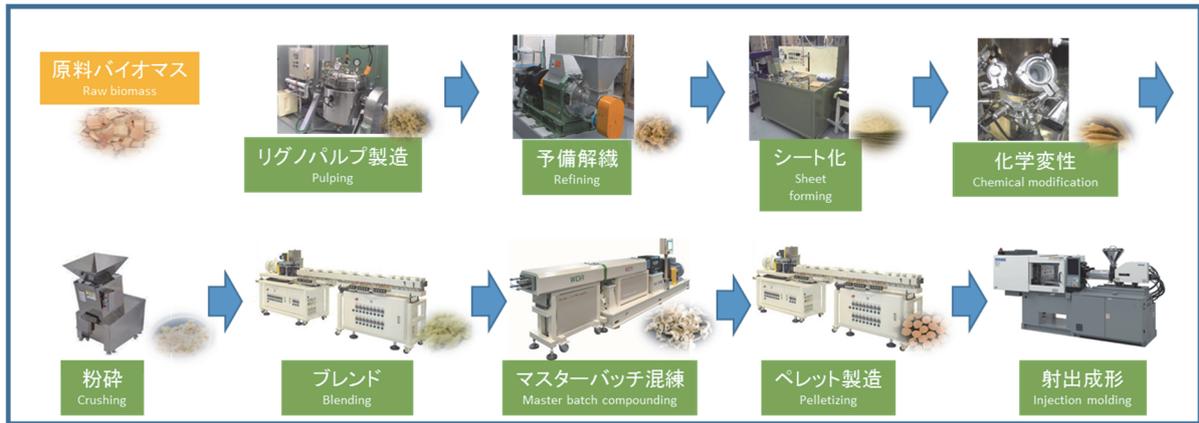


図7: セルロースナノファイバー強化樹脂材料の一貫製造プロセス (京都プロセス)

紙の表面平滑化や強度向上、食品・化粧品用添加剤、人工血管や人工腱といった医療用途、触媒等の担持体、フィルター素材、高断熱エアロゲル、二次電池セパレータ、スーパーキャパシタへの応用についても研究が進んでいる。細胞壁中のリグニンとセルロースナノファイバーの相互作用や細胞構造を上手く利用することで、より高機能で安価な材料の開発も可能であろう。

5. 日本再興戦略とナノセルロースフォーラム

2014年3月に経済産業省、農林水産省並びに産学の学識経験者の共同により、セルロースナノファイバーの将来展開プランについて技術ロードマップが策定された。続いて、6月24日に閣議決定された「日本再興戦略」改訂2014において、木質バイオマスについて“セルロースナノファイバー（超微細植物結晶繊維）の研究開発等によるマテリアル利用の促進に向けた取組を推進”することが明記された（改訂2015、改訂2016、未来投資戦略2017にも記載）。それを踏まえ、8月にはナノセルロースに関係する農林水産省、経済産業省、環境省、文部科学省、国土交通省が連携してナノセルロースに関する政策を推進することとし、政策連携のためのガバニングボードとして「ナノセルロース推進関係省庁連絡会議」が創設された。関係省庁は定期的に連絡会議を持ち、各省の取組について情報共有を図るとともに、各省間で施策の連携について模索している。

これらの動きと並行して、2014年6月にオールジャパン体制でナノセルロース（セルロースナノファイバー、セルロースナノクリスタル、およびそれらを用いた材料の総称）の研究開発、事業化、標準化を加速するためのナノセルロースフォーラムが発足し、木材、製紙、化学・樹脂、自動車、電気・電子製品など幅広い分野から200を越える企業の参画を得ている。また、ナノセルロース研究を進めている個人会員とともに、経済産業省、環境省地球環境局、特許庁、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(株)産業革新機構、岡山県、高知県、愛媛県、京都市などの40を越える公的機関が特別会員として参加している。

ナノセルロースフォーラムの活動は、1) 技術トレンドの調査、共有、情報交換と発信、2) 共同研究開発の提案・事業化推進、3) ナノセルロースの標準化の推進、4) 研究開発設備の利用に関する情報提供、5) 人材育成、6) サンプル提供情報の公開である。毎回、技術セミナーや見学会後には、製造事業者と利用事業者、企業と大学・研究機関と行政との活発な情報交換や交流が行われている。

また、2016年5月にはセルロースナノファイバー活用推進議員連盟が発足し、セルロースナノファイバー材料の社会実装に向けて様々な観点から支援をいただいている。

6. おわりに

植物材料に基づくグリーンイノベーションは時代の要請である。セルロースナノファイバーには、それを可能にするポテンシャルがある。その際、植物が環境に優しいプロセスの中で作ってくれたものを人間が使わせて頂く、という姿勢が大事である。言い換えれば、セルロースナノファイバーを始めとする木質バイオマスの利用研究は、その作り手である樹木の力の借り方と言っても良い。どの様にこの材料を使うのが作り手の思いに沿うのか、樹木はどうありたいと思ってこの構造を創り出したのか、ということを一生涯懸念考え、その機能を借り受ける。その際、生物材料の構造や特性には、生物が長い進化の過程で創り出した必然があることを忘れてはいけない。その必然を損なうことなく材料の形を変えて行くことで、省エネルギー的に高機能材料を製造することができる。この観点から、未来のバイオマス材料の方向を予想すると図8に示す様になる。樹木にとっては、グルコースよりはセルロースナノファイバー。セルロースナノファイバーよりはパルプ。パルプよりは木材の方が、材料としての完成度が高い。すなわち、“結晶性ナノファイバーから出来た3次元多孔性高分子複合材料”である木材を、直接、飛行機や自動車の材料に変換する方が、セルロースナノファイバーを作り再構築するよりも高性能の材料を省エネルギー的に製造できるはずである。それは現在の木材加工技術や遺伝子組み換えとは異なるアプローチによる革新的技術である。それがどのようなものであるか、全く想像できない。ただ地球上に豊富に存在する持続型バイオマス資源を用い、人間の知恵を越えて未来社会を作るには、その様な方法しかないと考えている。21世紀型の発展として、我々は自然と共生し、そこに身を委ねても良いのではないだろうか。

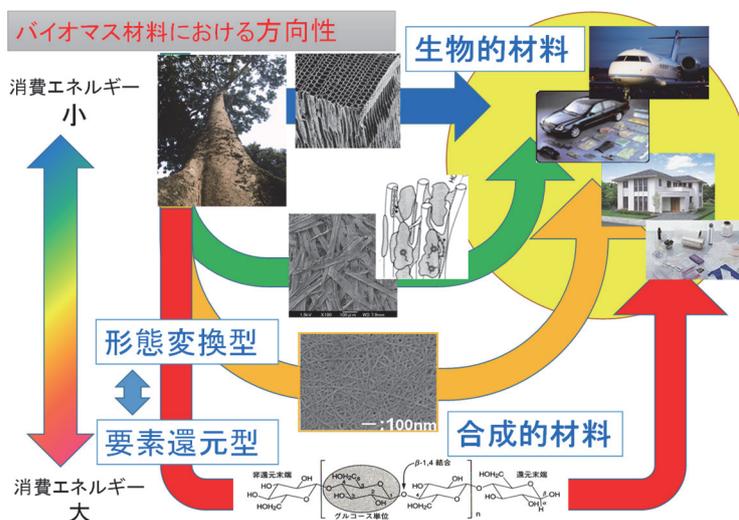


図 8：木材の階層構造と要素還元型から形態変換型への将来的利用について

参考文献

- 1) 矢野浩之, 「セルロースナノファイバーの製造と利用」, 日本エネルギー学会誌, 89, 1134(2010).
- 2) 矢野浩之, 「セルロースナノファイバー研究開発の現況」, 工業材料, 61, 22(2013).

著者プロフィール



矢野 浩之 (Hiroiyuki Yano)

＜略歴＞ 1986 年京都大学農学研究科博士課程中退。同年京都府立大学農学部助手、同講師、京都大学木質科学研究所助教授を経て、2004 年より現職。1988 年京都大学農学博士。

＜研究テーマと抱負＞木質科学、生物機能材料学。

将来、持続型の植物バイオマスから様々な材料が作りだされる時代が来ることを信じています。それは人類の生存にとって不可欠と考えます。古来より木の文化を育ててきた日本がその先頭に立てれば嬉しく思います。

基礎科学とセルロースの接点 —科学の発展を支えた物質—

今井 友也^{1*}

Cellulose as a material that has sustained development of science

Tomoya Imai^{1*}

概要

セルロース利用開発研究は近年ますます活発になっており、2014年から2016年にかけての「日本再興戦略」にも、その国際標準化・製品化にむけた研究開発を進めることで木材需要を創出し、林業の成長産業化を進めるべきとの方向性が明示されている。このように有望視されている材料・セルロースとはどんな物質なのか？ 実はX線回折現象の発見や電子顕微鏡の開発といった近代科学史上の重要なポイントでセルロースは試料として登場しており、科学の発展においても重要な役割を果たしてきた物質である。20世紀の科学史と絡めながら、近年注目が集まってきたセルロースについて概説し、このセルロースを合成する生物能力の凄さについて理解していただけたら幸いである。

1. はじめに

「セルロースは地球上に最も豊富に存在する天然高分子の一つであり・・・」この一文は、セルロースに関する報文の緒言に十中八九見られる表現であり、セルロースの研究をしているものならば一度は使ったことがある表現である。専門家にとっては手垢のついた表現ではあるのみならず、テレビ・新聞等にもセルロースという言葉がしばしば登場する昨今では、一般の皆さんの中にも耳にされた方はいらっしゃると思う。セルロースのお話をするにあたって、まずこの文章を少し掘り下げてみたい。

「地球上に最も豊富に存在する」ということは、普段の生活で普通に目にするということである。我々がもっとも頻繁に目にするセルロースは紙や綿麻製衣料等の植物由来のものであろう。街路樹、庭木、道端の雑草から湖沼・田んぼの水草まで、植物はその細胞の周りに細胞壁をまとっているが、植物組織を化学処理することにより細胞壁から繊維状の物質を取り出し、それをセルロースと名付けたのは19世紀の科学者 Anselm Payen である¹⁾。私の主観による推測だが、このような繊維の外観から、セルロースが植物組織の強さの原因だと当時から考えられていたとしても何ら不思議はないし、実際にセルロースの力学特性は軽量な割には優れている。

ではセルロースが強い材料であるのはなぜだろうか？ ものの特性に関する素朴な疑問を解決する王道は構造解析である。現在も頻繁に使われる分子レベルでの構造解析方法として、X線回折と電子顕微鏡が挙げられるが、その黎明期に試料として頻用されていたのは実はセルロースである。本稿ではまず、X線回折と電子顕微鏡の研究初期で観察された結果を紐解きながら、セルロースの構造というものが現在どう理解されているかについて概説する。その上で、セルロースを合成する生物学的機構がいかに精巧にできているかについて説明する。

2018年7月2日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所バイオマス形態情報分野。

* E-mail: timai@rishi.kyoto-u.ac.jp

2. セルロースの構造研究

本節では、現在の科学における構造解析の王道である X 線回折と電子顕微鏡の黎明期の研究において、セルロースがしばしば試料として登場していたことを紹介する。これらの研究を経て得られた、セルロースの構造に関する現在の理解を簡単に説明する。なお現代の構造解析の主な手法として NMR（核磁気共鳴）という方法もあり、こちらにも優れた構造解析の方法であるが割愛させていただく。

2.1 X 線回折とセルロース

X 線回折とは、ドイツの Laue が 1912 年に発見した現象であり、塩の結晶など規則正しい原子の並びに X 線を当てると、その原子の配列に依存して X 線が特定の方向に飛ばされる現象のことを指す。この現象は 1913 年に Bragg 親子により定式化され、この現象を逆に利用することで X 線を物質に当てたときに得られる回折パターンから、物質の構造解析を原子分解能で行うことができる。古くは低分子の構造解析の主要な手法であったが、現在では高分子、特にタンパク質などの生体高分子の構造解析になくはならないツールの一つである。図 1 にセルロースの X 線回折像の一例を示す。

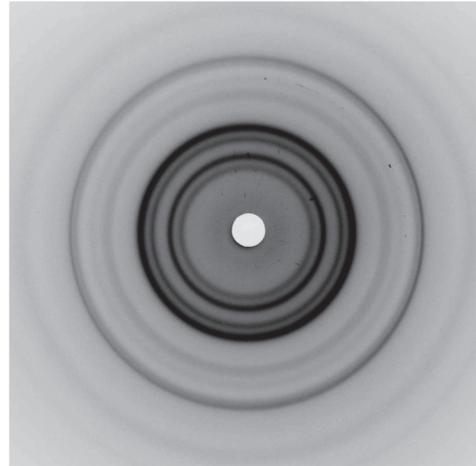


図 1：セルロースの X 線回折パターン
(デバイ・シェラー環)

この X 線回折を使って、Payen の処方で植物組織から取り出された繊維試料に分子がどう充填されているかを解明しようとする考えはごく自然なものだろう。かく

して Laue の発見から時間をおかずして、X 線回折実験によるセルロースの構造解析の試みが始まり（著者の調べた限りで 1920 年にはその報告がある²⁾）、目に見える繊維と平行にナノスケールの大きさのセルロース分子鎖が何本も集まって充填されていることが 1937 年に明らかとなった³⁾。毛利元就の 3 本の矢の逸話よろしく、一本の孤立した分子としてではなく、複数本の分子鎖を束ねることで強度を高めていると理解できる。

なお日本で最初に X 線回折実験を報告したのは東京大学の小野、西川らであり、Laue による X 線回折現象発見のわずか一年後の 1913 年である⁴⁾。この際に使われた試料には竹が含まれていた。すなわちセルロース性の物質である。私の個人的な想像だが、植物組織にセルロースが含まれることは当時すでに認識されており、その中でも竹の割裂しやすい性質に着想を得て規則正しい原子の並びを想像し、X 線回折実験に適切な試料だろうと考えたのではなかろうか。なおこの X 線回折像は、白色 X 線を使ったため構造解析を行うことはできなかったが、セルロースの X 線繊維回折像として世界初のものである⁵⁾。

2.2 電子顕微鏡とセルロース

その名の通り、光の代わりに電子線を使って試料を観察するのが電子顕微鏡である。電子線が光の一種であることが証明され（電子の波動性の証明、1927 年）、電子を使って顕微鏡を作ることが可能であることが示された。それを初めて実現したのがドイツの Ernst Ruska である。1931 年とのことである⁶⁾。Ruska は電子顕微鏡の開発を進める中で生物学者と共同研究を進めた。その一人である von Helmut Ruska は試料の一つとしてセルロースを選んで観察を行っており、1940 年に報告している⁷⁾。ところがこのときの電子顕微鏡写真はかなり質の悪いものであった。電子顕微鏡開発の黎明期の当時ではどうすれば見たいものを見ることができるのか、本当の手探りの状態であったと思われるが、ある程度の方法論や技術が確立された現在も、未知の試料を電子顕微鏡観察の際に一番大事なものは試料の作り方である。そこでよい試料を作るにあたり、電子顕微鏡の特性として一つの点が重要となってくる。

電子顕微鏡でものを見るためには、電子線が観察物により散乱される必要があるが、セルロースのような軽い原子からできている物質は電子線を強く散乱しない。したがって、そのまま観察しても非常にコントラストの薄い写真しか撮れない。この低コントラストの問題を解決するために、試料に金属の薄膜を蒸着して観察する方法が1946年に報告された⁸⁾。この論文において様々な試料が観察されているが、そのうちの 하나가セルロースであった。その後、セルロース試料の選択などでも工夫がなされ、重い元素である金属を試料表面にコートして試料表面の凹凸を強調することで、非常にはっきりとしたセルロース像が1948年に報告された⁹⁾。その写真には、幅10nm程度の微小な繊維が明らかに示されており、ナノメートルスケールにおいてもセルロースが繊維構造を持つことが明確に示された。現在では、生物が作るセルロースは由来を問わずすべてこのような繊維形態を取ることが示されている(図2)。なお図2の写真は金属コートではなく、重金属溶液に試料を浸して試料構造の輪郭を強調する「負染色法」という方法で、軽元素からなるセルロースをより明瞭に可視化する方法で観察した画像である。

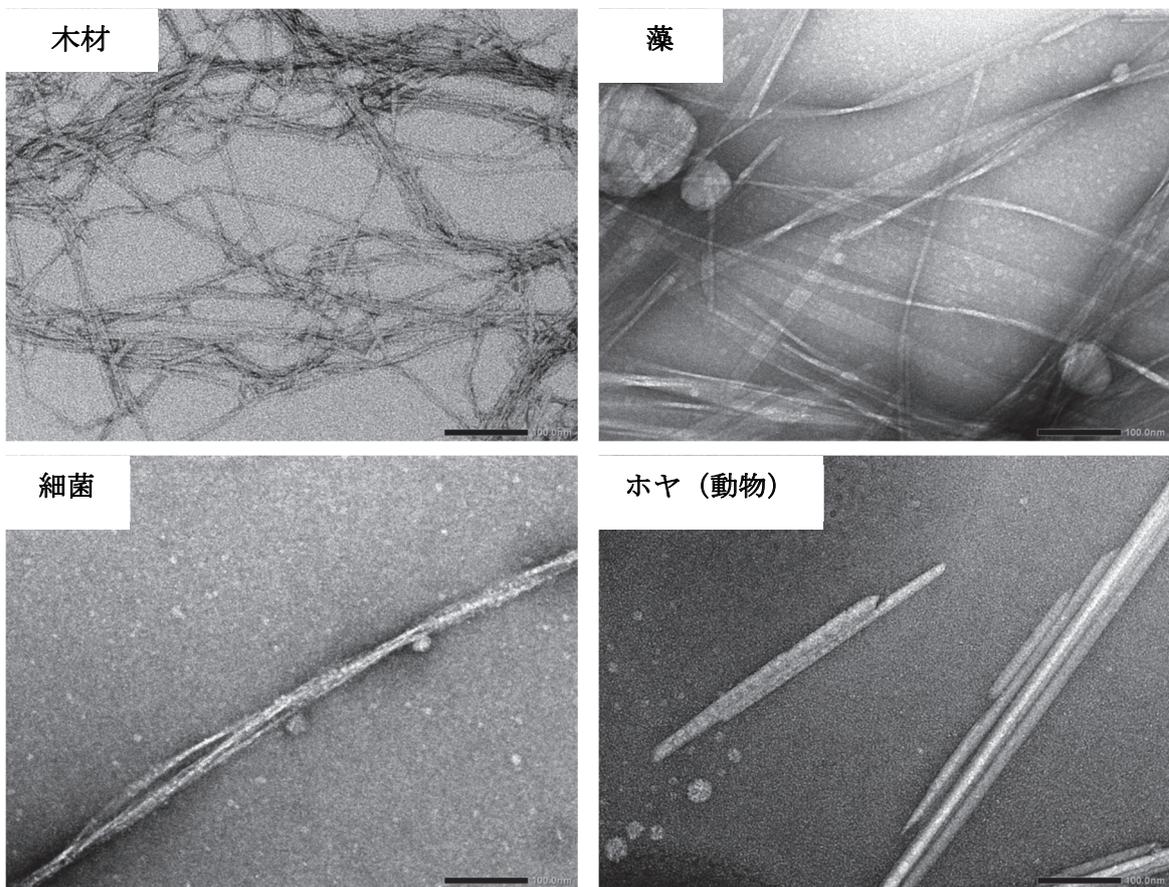


図2: セルロースの電子顕微鏡写真(負染色法による)。異なる4つの生物種から単離したセルロースについて撮影した(いずれも同倍率、スケールバーは100nm)

この微小繊維のことを学術上「マイクロフィブリル」と呼ぶ。X線回折の解析結果と電子顕微鏡のデータを合わせて、現在ではセルロース分子鎖が伸びきった形で何本か束ねられたものがマイクロフィブリルだと理解されている。この分子鎖が規則的に並んでいるためにセルロースは結晶性を示し、X線回折現象を引き起こすのだ。セルロースの優れた強度特性も根本はこの結晶性にある。セルロースのX線回折像の分析から、由来を問わず天然のセルロースは例外なくI型結晶という構造で説明できることが分かっている(正確にはI_α型とI_β型の亜型を含む)。生物種が違ってセルロースは複数本が

束ねられて繊維形態を形成し、しかもその分子鎖配置もいくつか可能性がある中で限られたパターンしかとらないことは驚きであり、研究者の探求心をくすぐる点である。

なお2017年のノーベル化学賞となったクライオ電子顕微鏡（単粒子構造解析）は、重元素による修飾なしの無染色で生体高分子を見ることで原子分解能での構造解析を可能にし、X線結晶構造解析の独壇場であった構造生物学の世界を一変させた。「真空環境に生体高分子を放り込んだらカラカラに乾いて、本来の構造なんか電子顕微鏡で見える訳がない」という常識を壊した Jacques Dubochet と、低コントラストや電子線損傷という問題があろうとも、電子顕微鏡画像には構造情報が含まれていることは間違いないのだから電子顕微鏡でも生体高分子の三次元構造再構築は可能だと、ひるまず研究を進めた Joachim Frank と Richard Henderson に、時代が技術革新を伴って追いついた結果であろう。それまでクライオ電顕データの単粒子構造解析での構造解析はあまり分解能があがらず、時には眉唾ものとして扱われることもあったが、2013年にそれまでのクライオ電顕では考えられないような小さなタンパク質から原子分解能での構造解析が報告されたときは、私も衝撃を受けた。そのわずか4年後にノーベル賞が授与されるわけだから鈍感な私でも衝撃を受けたわけである。同じく軽元素からなるバイオマスの研究にも導入が急がれる。

2.3 構造解析とは試料を小突いて応答を見ること

X線と電子顕微鏡の話が終わったところで、少し横道にそれで構造解析という科学的手法について触れてみたい。X線回折や電子線を使った構造解析法は、詳細を省いてエッセンスだけを言葉にして説明すると、物質に波を当てそこから帰ってくる応答を分析することにより構造を見る方法である。分析する応答の種類により得られる情報も構造情報から化学情報までさまざまである。前節のように構造情報を得るためには散乱波を分析することになる。この点で、本研究所で行われている電磁波を使った気象観測と原理的に似ている。次にもう少し詳しく説明する（難しいと思われる方はスキップしてください）。

波には「波長」という重要な性質がある。ここでいう波は連続的に一定間隔（周期・周波数）で揺れている波を指す（波を人工的におこすプールを想像していただければと思う）。X線も電子線も連続的に一定周期で揺れている波であり、この波の間隔（長さ）のことを波長という。先述したように構造解析では波を観察対象に当てて、返ってくる散乱波を分析することによりその構造を解明しようとするものであるが、観察対象に含まれる構造の大きさと同程度の波長をもつ波を当て、そこから返ってくる散乱波を分析すれば、その構造が見えてくるのである。

例えば、分子は原子と原子が共有結合を結ぶことで出来上がっているが、共有結合を結んでいる原子間の距離はおよそ0.1~0.2 nm である。そこで0.1 nm 程度の波長をもつ波を当て、観察対象から出てきた波を捉えることで、分子の構造（原子の配置）に関する情報を得ることができるのである。この0.1 nm 程度の波長をもつ電磁波がまさにX線である。このことが、X線が分子の構造解析に使用できる理由である。ちなみに電子顕微鏡で使用される電子線の波長は100 kV で加速された電子線で0.0037 nm であり、共有結合距離よりも十分に短く、同様に分子の構造解析に使うことが可能となっている。

現在では常識となっているこのような科学的観点・見識も、100年近く前のX線の発見から継承されてきた地道な努力に基づくものであり、その過程でセルロースはしばしば試料として使用されていたのである。当時のもっとも主要な高分子材料であるセルロースは産業上重要な物質であり、セルロースの構造に大きな興味が寄せられていたからであろう。

3. 生物によるセルロースの合成

3.1 セルロースは高分子一水に溶けない分子集合体！

「高分子」とは、共有結合でつながった大きな分子のことを呼ぶ。共有結合でつながった大きな分

子が存在するというこの学説も、1920年の Staudinger による提案当初は賛同が得られず、15年間の論争を経て認められたものである。実は前節で触れたセルロースの X 線回折実験の結果も、この高分子説をめぐる論争で使用されたそうである。つまり X 線回折現象は分子が規則正しく並んでいることを示しているが、セルロースの回折像から求められる分子間の距離は、大きな分子が規則正しく並んでいると考えるには小さすぎてセルロースが高分子であることに矛盾するという、高分子説に対する反論材料として使われたことがある（現在では、高分子の部分構造が同じ形で規則正しく配置されていれば、その部分構造の繰り返しは X 線回折を起こすと理解されており、上述の反論は退けられる）。

高分子は現代社会でなくてはならない材料である。いわゆる「プラスチック」あるいは「ビニル***（袋、板、管など）」は全て高分子であるし、弊所の主要な研究対象の一つである木材も高分子である。高分子の多くが通常環境下では水に不溶・難溶であり、シンプルだが重要な性質である耐水性をもつ固体であることが、材料としてよく使われる本質的な理由であろう（泥船には誰も乗りたくないでしょう）。

この「溶けない」という見た目の性質を分子レベルで説明すると、高分子同士が集合しておりそれが簡単には離れない性質ということになる。ここに、高分子ならではの「高次構造」という概念が発生する。つまり化学構造が同じ高分子でも、分子の集合の仕方が異なることが十分ありうるのである。そして分子の集合の仕方を制御することで様々な性質が現れるため、形態等を工夫して同じ高分子でも様々な性質を持たせることが可能である。

天然セルロースの場合は、前節で紹介した通り、I型結晶のマイクロフィブリルという構造になる。天然セルロースは例外なくこの構造になることから、生物によるセルロース合成機構には、グルコースを単純につなげるだけではなく、長いセルロース分子を絡み合いなく整然と並べて微小な繊維を形成する機能が備わっていることは明らかである。

3.2 セルロース合成酵素は高分子を合成し、さらに分子集積を行う多機能酵素である

生物活動は種々の化学反応の集積であると捉えることができる。細胞の内外で行われる数々の反応は酵素タンパク質により行われる。一般に酵素は生命活動にとって重要なだけでなく、産業でも広く利用されており、基礎科学と応用科学の両方で古くから盛んに研究が進められてきた。

そしてグルコースを連続的につなげて長いセルロース分子を作り、それを何本も束ねて繊維として仕立てる機能の実体がセルロース合成酵素である。セルロース合成酵素は合成産物が固体構造である点で特異な酵素であり、研究が比較的進んでいない一つの原因であった。2010年代になり、ようやく立体構造の解明¹⁰⁾など研究の進展がみられるが、解明すべき事項はまだ残されている。特に注目すべき点は、繰り返しになるが、セルロース合成酵素は例外なく I 型結晶のマイクロフィブリル構造を合成するという観察事実である。合成酵素を使わない方法でセルロースを人工合成する試みの多くでは、セルロースは正しく集合できず、繊維とはかけ離れた薄板構造となる¹¹⁾ (図 3)。その分子鎖の集合様式は天然構造とは全く異なる「II 型」と呼ばれる結晶構造をとる。

このことは、先述のセルロース合成酵素のもつ「長いセルロース分子を絡み合いなく整然と並べてマイクロフィブリルを合成するメカニズム」が、実は極めて高度な機能であることを意味している。人工高分子で糸を紡ぐときには、高分子を溶媒に溶解したり高温で高分子を溶融したり高電位差下に置いたりと厳しい環境に高分子を置いてようやく紡糸を達成できるが、セルロースの生合成は常温常圧水環境という明らかに穏和な条件での紡糸であり、しかもナノメートルスケールの糸を紡ぐのがセルロース合成酵素である。生物機能の離れ業に感心せずにはいられない。さらに図 2 のように大きさ・形の違う様々な構造のセルロースが存在するということは、セルロースのマイクロフィブリル構造は制御可能であることを示唆している。

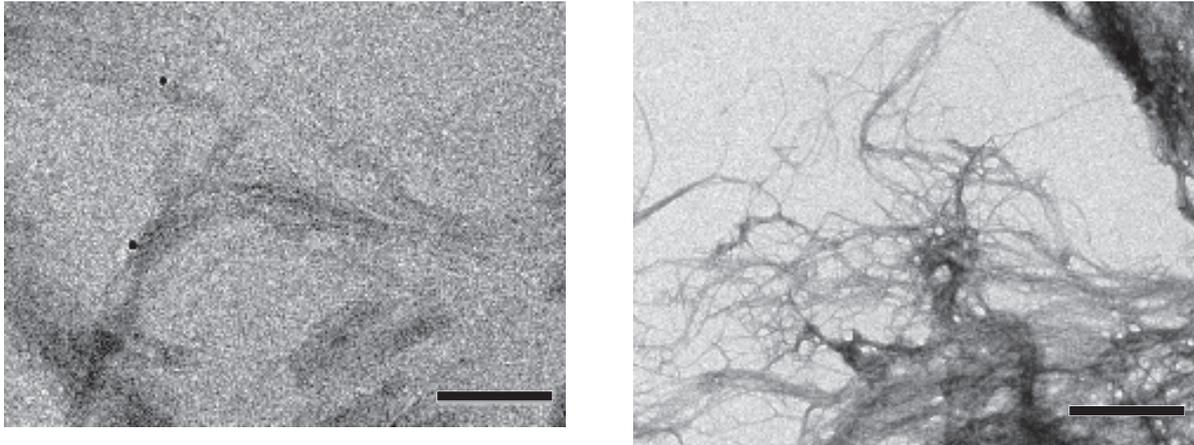


図3：加リン酸分解酵素の逆反応により合成されたセルロース（左）と天然セルロース（右）の電子顕微鏡写真（いずれも同倍率、スケールバーは1 μm）

※写真左は京都大学大学院農学研究科・和田昌久教授のご厚意による

3.3 セルロース合成酵素の機能を人工的に再構成・制御できるか？

上記の驚くべき生物機能を解明するためには、セルロース合成酵素を生物から取り出して、セルロースマイクロフィブリルを合成できる実験系を立てる必要がある。このような直球の試みは当然今までいくつか報告があり、特にここ数年よりレベルの高い実験系が何報か発表されている¹²⁾。しかし、私の分析では、これらの報告はいずれも生化学的にきちんと分析を進めているが、合成産物の解析が不十分であり、酵素活性も十分に高いとはいえず、マイクロフィブリル構造の形成過程の理解やその制御には至っていない。こういった競合グループの論文発表に肝を冷やしつつ、我々の研究グループも研究を進めているが、いまだマイクロフィブリル構造としてセルロースを合成できる実験系の開発には至っていない。しかし失敗から学ぶことは多いはずであり、未成功例からマイクロフィブリル構造形成機構を理解するためのヒントが得られないだろうかという観点で、我々のネガティブデータの例を2つ挙げる。

一つ目は酵素活性の再構成として最も基本的な試験管内系でのセルロース合成について紹介する¹³⁾。このアプローチでは酵素を生物より抽出し、試験管の中で酵素反応を行わせる。セルロース合成酵素は細胞膜に埋まった膜タンパク質であり、その抽出のためには界面活性剤という試薬を使って細胞膜を溶かす必要があるが、この界面活性剤の選択が大変重要であり、適当でないものを選ぶと酵素がたちまち失活してしまう。そこでできる限りマイルドな界面活性剤で酵素を抽出したつもりだったが、合成されたセルロースは高分子量ではあるもののマイクロフィブリルとはならず、塊状の凝集となってしまった。つまりこの実験系では、十分に高い酵素活性でもってグルコースを重合することはできるものの、重合した高分子量のセルロースを繊維として束ねることができなかった。

そこで一つの考察を行った。セルロース合成酵素は本来生きている細胞の細胞膜に存在する酵素である。それを細胞膜から溶かし出して合成反応を行わせること自体に無理があるのではなかろうか。そこでセルロース合成酵素を生きている細胞の中に据え付けて、その上でセルロースを合成させればマイクロフィブリルができるのではなかろうか？ こう考えて、ほとんどセルロースを合成しないとされる大腸菌にセルロース合成酵素を強制的に発現させ、セルロースを合成させることに成功した¹⁴⁾。しかし残念ながら、合成されたセルロースは非天然構造であり、天然活性を持ったセルロース合成酵素の再構成には至らなかった。現在は、酵素が細胞膜上で整然と並ぶことが重要ではないかと考え、酵素を整列させる因子の同定が必要でなかろうかと考えている。

4. おわりに

本稿ではセルロースの構造について、20世紀前半の科学史、特にX線回折および電子顕微鏡と絡めて概説した。そしてセルロースの構造を考えると、セルロース生合成機構は大変精巧な生物機構であることを主張した。この驚くべき生物機構を再現したうえで、セルロースの高次構造を自在に制御できるまでにそのメカニズムを理解したいと考えている。

そして今後、研究を展開していくべきさらに興味深い生物機構は、複数の高分子の混合物である木材細胞壁の生合成である。細胞壁の主成分はセルロース以外に、ヘミセルロース、リグニンという計3種の高分子であり、木材はいわば自然の高分子複合材料である。しかも均一に混じり合った複合材料ではなく、生物が能動的に構造を制御して作りこんだ複合材料である。しかも常温常圧水環境下でのプロセスであり、こんなに素晴らしいメカニズムに学ばない手はない。

この生物機構の解明のためには、構成分子が合成される「生物によるモノ作り」の現場を直接観察する必要があり、酵素反応の分析（生化学）とその産物である高分子固体の構造解析（高分子科学）の両者が必要である。このような複合研究を、木質細胞壁のみならずキチンなども含め広くバイオマスの形成を取り扱う「バイオマス形成学」として進めていく所存である。

最後に、「バイオマス形成学」はまだ研究の小さな種でしかありません。しかしこれが芽吹いて花が咲けば基礎応用の両面で大変面白い展開が待っています。一緒にこの研究を育ててくれる学生・研究者の方をお待ちしています。

謝辞

本稿の3.3で紹介した研究内容は、多くの大学院生（橋本章氏、市川典氏、下農健治氏、孫世静氏）と Paavo A. Penttilä 博士（現・Aalto 大学）の貢献によるものであり、彼らに感謝します。また各種機器分析については、杉山淳司教授、矢野浩之教授、渡辺隆司教授（京都大学生存圏研究所）、辻井敬亘教授（京都大学化学研究所）、和田昌久教授（京都大学大学院農学研究科）、堀川祥生博士（東京農工大学）、榊原圭太博士（京都大学化学研究所）、西村裕志博士（京都大学生存圏研究所）、吉岡康一博士（京都府立大学）にご協力・ご教授いただいて遂行しました。ここに深謝します。透過型電子顕微鏡観察と LCMS 分析に関しては、それぞれ京都大学生存圏研究所全国共同利用システム ADAM と DASH/FBAS により行いました。

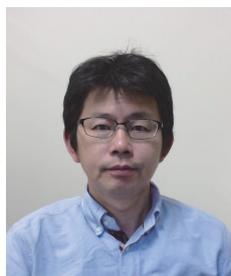
また研究の一部は科研費(19208017, 22658053, 23688021, 25650033) および JST-CREST (JPMJCR13B2) による援助を受けて行いました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) Fisher C.H. Anselm Payen Pioneer in Natural Polymers and Industrial Chemistry. In: *Pioneers in Polymer Science. Chemists and Chemistry*, vol 10. Seymour R.B. (eds), Springer, Dordrecht, 1989, pp47-61
- 2) Herzog R. O. and W. Jancke, *Zeitschrift für Physik*, **3**, 196, 1920
- 3) Meyer K. H. and L. Misch, *Helv. Chim. Acta*, **20**, 232-244, 1937
- 4) Nishikawa S. and S. Ono, *Proc. Tokyo Math. Phys. Soc.*, **7**, 131-138, 1913
- 5) 梶慶輔 *高分子*, **50**, 468-469, 2001
- 6) ノーベル賞公式サイト https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/ruska-bio.html
- 7) Ruska von H. and M. Kretschmer, *Kolloid-Z.*, **93**, 163-166, 1940
- 8) Williams R. C. and R. W. G. Wyckoff, *J. Appl. Physics*, **17**, 23-33, 1946

- 9) Kinsinger W. G. and C. H. Hock, *Indust. Engineer. Chem.*, **40**, 1711-1716, 1948
- 10) Morgan J. L. W. *et al.*, *Nature* **493**, 181-187, 2013
- 11) 例えばHiraishi M. *et al.*, *Carbohydr. Res.* **344**, 2468-2473, 2009
- 12) Cho S. H. *et al.*, *Biochem. J.* **470**, 195-205, 2014; Purushotham P. *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**, 11360-11365, 2016; Cho S. H. *et al.*, *Plant Physiol.* **175**, 146-156, 2017
- 13) Hashimoto A. *et al.*, *Carbohydr. Res.* **346**, 2760-2768, 2011; P. A. Penttilä *et al.*, *Carbohydr. Polym.* **136**, 656-666, 2016
- 14) Imai, T. *et al.*, *Biomacromolecules* **15**, 4206-4213, 2014; S.-j. Sun *et al.*, *Carbohydr. Res.* **434**, 99-106, 2016

著者プロフィール



今井 友也 (Tomoya Imai)

<略歴> 1995 年京都大学農学部林産工学科卒業／2000 年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了(京都大学博士(農学))／2000~2002 年フランス科学研究庁植物高分子研究所ポスドク／2002~2008 年京都大学大学院理学研究科ポスドク／2008 年より京都大学生存圏研究所准教授

<研究テーマと抱負>顕微鏡と膜タンパク質の生化学を武器に「バイオマス形成学」を興し広めたい。<趣味>山歩き、自転車、ウサギ

レーザーで照らし出す地球の大気環境

矢吹 正教^{1*}

Laser remote sensing for environmental monitoring

Masanori Yabuki^{1*}

概要

空を見上げると、青空や真っ赤な夕焼け、雨上がりに現れる虹、太陽の周りに現れる光の輪など、多くの大気光学現象と出会うことができる。これは、太陽光が大気に入射することで引き起こされた現象であり、大気を構成する様々な物質の光学特性を反映している。この特徴を利用し、“レーザー”を大気中に照射して人工的に光散乱を起こすと、直接的な計測が難しい上空などの大気環境をモニタリングすることができる。本稿では、地球大気環境を形成する大気成分の特徴と、それらを遠隔で計測できるライダー（レーザーレーダー）手法について紹介する。

1. はじめに

空に青い「何か」が浮いているわけでないのに、どうして日中の空は青く見えるのだろうか？それには、太陽の光と、地球を取り巻く大気の関係している。プリズムに太陽光を通すと虹色に分光される。光の色は波長で特徴づけられ、虹の7色を波長の短い順に並べると、紫、藍、青、緑、黄、橙、赤となる。これらの波長の光が、同じ割合で目に入った場合は、人は白色や灰色として認識する。一

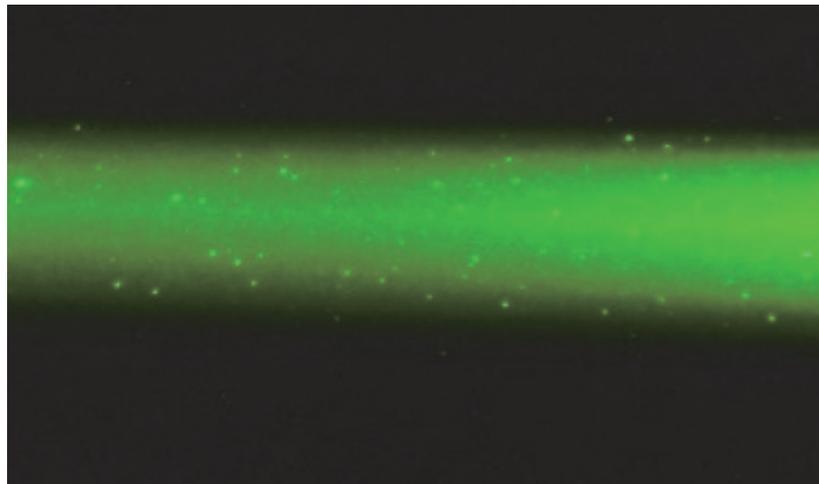


写真 1: レーザーを大気中に照射し、その光線を横から撮影した写真。微粒子の散乱によりビームの進行方向以外でも光の通り道を見ることができる（チンダル現象という）。

2018年5月25日受理。

¹ 〒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: yabuki@rishi.kyoto-u.ac.jp

方、いずれかの波長（色）の光が、強く散乱されたり、もしくは減衰したりすると、特定の色だけが強調して見えるようになる。つまり、青空は波長が短い青色の光が、夕焼けは長波長の赤色の光が、我々の目に多く届くような大気条件になっている。では、何が光散乱を起こしているのだろうか？暗闇でサーチライトやレーザーを使って光を照射すると、光の通り道が見える（写真1）。これは、大気中に浮遊する粒子に光が当たって様々な方向に散乱される様子を捉えたもので、チンダル現象と呼ばれる。可視化された光線を詳しく見ると、散乱の強さが異なる多くの粒子が混在していることに気が付く。このような特性の違いは、粒子の組成、サイズ、形状の違いなどを反映している。

地球の下層大気を構成する主な成分は、空気分子や微量気体などのガス状物質と、エアロゾルや雲粒などの粒子状物質である。これら大気物質による、太陽放射および地球からの赤外放射の散乱・吸収等を通じた地球のエネルギー収支への関与は、地球の気候形成に重要な役割を果たしている。また、大気を介した熱輸送や水循環が、豊かな生命を育む安定した地球環境の維持に寄与している。一方で、地球温暖化や極端気象の発生頻度の増加、大気汚染に伴う健康被害など、人類の持続的な発展や健康的な生活を脅かす大気現象も少なくない。そのような大気環境の変動要因を理解し、将来の変動予測を正確に行うためには、大気物質や気象要素を精密計測する技術の高度化が必須となる。ここでは、下層の地球大気を構成する各成分の役割と光学特性、またその散乱・吸収特性を用いた大気計測法であるライダーについて概説する。

2. 大気の構成物質と光学特性

2.1 ガス状物質

我々は空気の重み（大気圧）の下で過ごしている。標準大気圧に近い標高の低い地表付近において、 1 cm^2 あたり約 1 kg 、 1 m^2 では 10 t に相当する空気の層が上空にはある。空気分子は、高い高度になるほど濃度は低くなるが、3成分で乾燥大気の99.9%以上を占める窒素（78.08%）、酸素（20.95%）、およびアルゴン（0.93%）は、高度80 km付近までほぼ一定の比率で存在している。実大気においては、気象や地球の水循環を考えるうえで欠かせない水蒸気が1~4%程度存在している。空気分子1個の大きさは、 1 nm （ $=10^{-9}\text{ m}$ ）以下であり光の波長（380~780 nm）と比べると非常に小さい。このような粒子の光散乱は、イギリスの科学者 J.W.S.レイリーによって導かれたレイリー散乱理論で説明することができる。レイリー散乱の強さは、波長の4乗に反比例する。赤色と青色の波長の比は2:1であるため、散乱の強さに換算すると1（赤）:16（青）となり、青色のほうが赤色よりも散乱強度は16倍も大きくなる。日中の青空は、このレイリー散乱の特徴を反映している。一方、強く散乱されるということは、それだけ減衰しやすいことを意味する。そのため、太陽光が斜めから入射することで大気を通過する光路が長くなる夕方は、青色の成分が弱くなり、相対的に波長が長い赤色の成分が強くなる。これが夕焼けとなる。

総体積で見ると微量しか存在しないが、地球大気を考えるうえで欠かせない気体成分もある。例えば、成層圏のオゾン層では紫外光を吸収して熱を放出する反応が起こっている。興味深いことに、この波長帯は、遺伝子の構成物質であるDNAを破壊する吸収帯とも良く一致する。つまり、成層圏オゾンは生物にとって有害な紫外線を除去するフィルターの役割を果たしているともいえる。一方で、対流圏のオゾンは、人の健康や植物に悪影響をもたらす大気汚染物質として知られている。また、温室効果ガスで知られる二酸化炭素やメタンは、地表から放射された特定の赤外線を吸収して、地表付近の大気を一定の温度に保つ役割を担っている。この温室効果により、地表付近の大気は約33度も暖められており、地球が氷の惑星となるのを防いでくれている。これらの例からも分かるように、大気と太陽エネルギーに関連した放射により、快適な生存環境が作りだされているのである。但し、それらは、長い年月をかけて地球が獲得してきた、微妙なバランスの上に成り立っている環境であることを忘れてはならない。例えば、中低緯度からのフロン放出が、遠く離れた極域での成層圏オゾン層の破壊を引き起こすなど、予期せぬ形で環境に悪影響を与えてしまうことがある。そのため、継続的に

大気環境をモニタリングし、その環境変動の兆候を素早く察知して対策に活かすことは重要である。

2.2 粒子状物質（エアロゾル・雲）

『エアロゾル(aerosol)』は、「aero（空気の）」と「sol（媒質中に固体または液体が分散しているコロイド系）」を組み合わせた言葉である。すなわち、気体中に浮遊する固体もしくは液体の粒子がエアロゾルの定義となる。必ずしも親しみのある言葉とは言えないが、エアロゾルは私たちの身の回りにたくさん存在している。たとえば、代表格となるタバコの煙をはじめとして、海の波飛沫、土埃、火山の噴煙、車から排出される煤塵、花粉なども、すべてまとめてエアロゾルである¹⁾。大気中に浮遊するエアロゾル濃度は、場所によって大きく異なり、都市域では1 cm³あたり数万個以上になるが、南極のように非常に清浄な地域では100個以下にまで減少する。エアロゾルは、工場や自動車などの人間活動がもとになって排出された『人為起源』のもの、森林や土壌、海水など自然界から放出された『自然起源』のものに大別される（図1参照）。一般的に、燃焼など人工的に排出されたエアロゾルはサイズが小さく、自然起源のエアロゾルのサイズは大きい傾向がある。また、微小粒子ほど体の奥まで入りやすくなるため、健康影響の観点からも重要視されており、2009年にはサイズが2.5 μm（1 μm = 10⁻⁶ m）以下の粒子の重量濃度で定義されるPM_{2.5}について、環境基準が新たに設けられている。

数 nm から約 10 μm にわたる広い粒径範囲を取るエアロゾルの光学特性は、ミー散乱理論²⁾が適用できる。粒径 10~100 nm を最大とする一般的なエアロゾル粒子数濃度の分布（粒径分布）を考えた場合、光の波長領域におけるミー散乱の強度は波長におおよそ反比例する。レイリー散乱の強さが波長の4乗に反比例することを考えると、エアロゾル粒子の波長に対する強度差は、かなり小さい。そのため、太陽光に対するエアロゾルの散乱では、色ごとの明瞭な違いがあらわれにくくなる（白っぽ

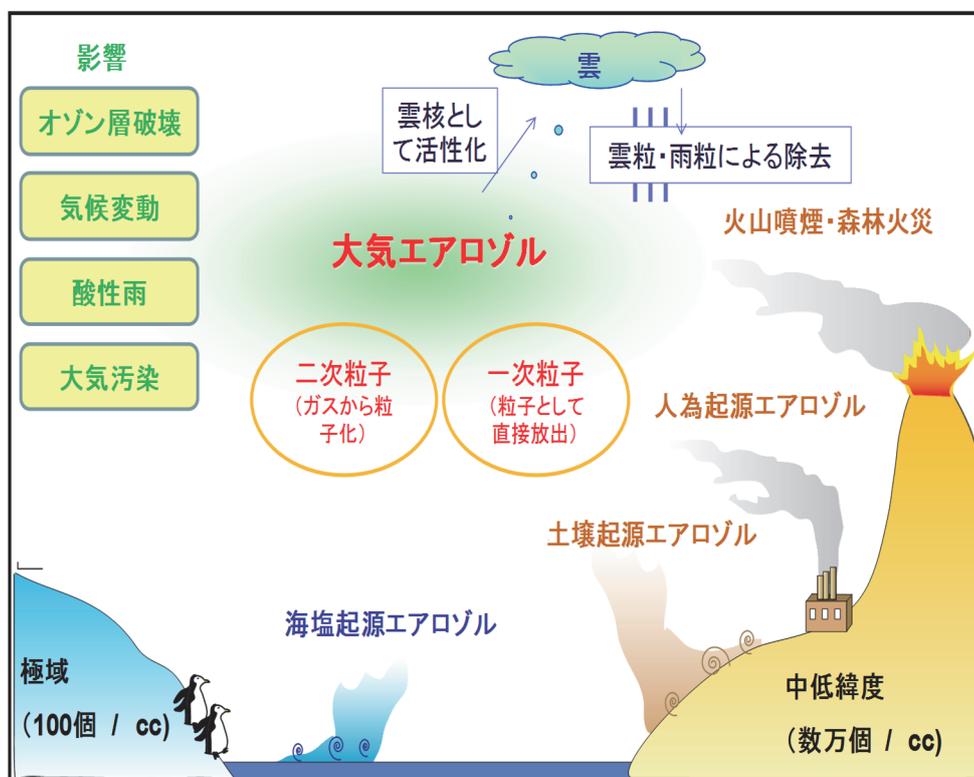


図1: 大気エアロゾルと環境影響

く見える)。この特徴は、2000 m を超えるような標高の高い山で見る青空と、都会で見る青空の色の違いにも反映されている。高山では、透き通った深い青色、空気分子のレイリー散乱による「理想的な青空」となる。一方、大気汚染物質が多く浮遊する都市域で見る空は、空気分子によるレイリー散乱に、エアロゾルによるミー散乱の効果が加わった色となる。つまり、都市域では白みがかかった青色の空となることが多い。さらに、視程に影響を与えるくらいにエアロゾルが多くなると、条件により霧（もや）や霞（かすみ）と呼ばれるようになる。

次に雲を考える。雲は、10～100 μm 以上の水もしくは氷の粒で構成されている。光の波長に比べて、粒子サイズが十分に大きくなると、波長（色）ごとの散乱の強さの差はほとんど見られなくなる。このため、雲の色は白となる。水の粒が集まって数 mm の雨滴の大きさまで成長すると、太陽位置や大気条件によっては水滴の中で光が分光される虹が形成される。また、角柱粒子で構成される氷晶雲は、太陽や月の回りに光の輪を作るハローや、太陽が上下に伸びて柱状に見えるサンピラーなどの特異な大気光学現象を起こす。

ここまで、気体、エアロゾル、雲と別々に扱ってきたが、実大気ではこれらが相互に作用して複雑に繋がっている。例えば、二酸化硫黄、窒素酸化物等のガス状物質として放出された微量気体は、大気中での化学反応により二次的にエアロゾルを生成する。また、それらのエアロゾルは、雲過程を通じて地球の気候変動にも関与している。例えば、水蒸気のみで液滴の雲粒を作ろうとすると、相対湿度で400%もの過飽和状態が必要となる。一方、硫酸塩などのエアロゾルがあると、100%を少し超え

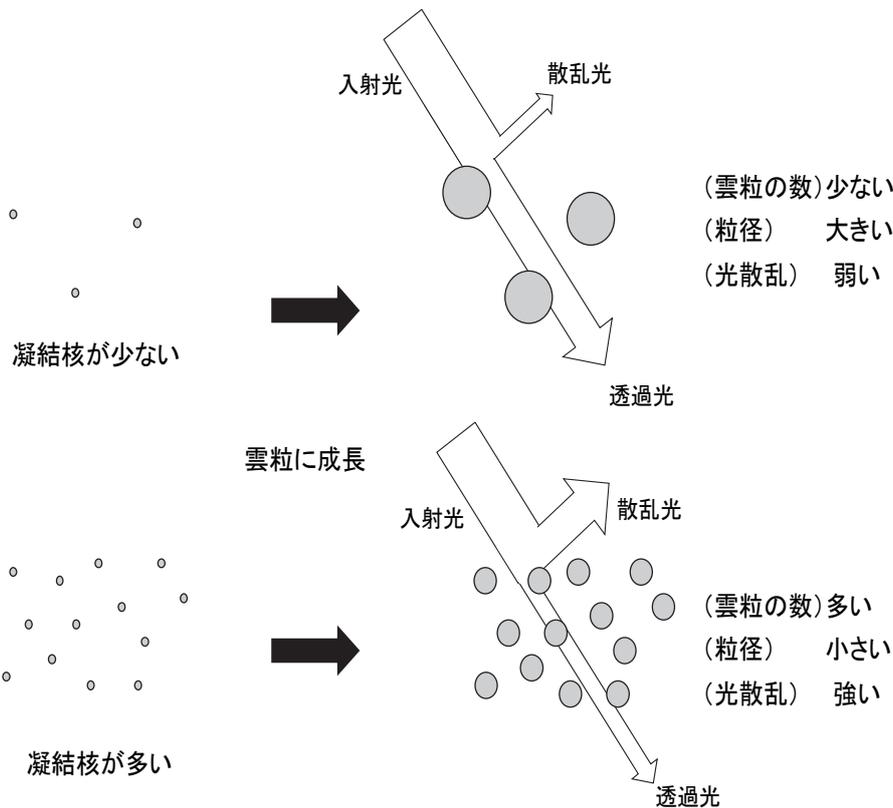


図2：凝結核の数濃度と雲特性の関係³⁴⁾

るくらいの現実的な過飽和状態で液滴が出来始める。これは、エアロゾルが雲凝結核として作用していることに因る。では、図2に示すように、水蒸気が同じ量しかない閉鎖空間に、個数濃度の異なる雲凝結核として働くエアロゾルを入れるとどうなるだろうか？水蒸気量が限られているため、核となるエアロゾル粒子の濃度が高い時ほど、1個あたりに振り分けられる水蒸気量は少なくなり、結果として生成される雲粒のサイズは小さくなることが想像できる。このように、雲粒径が異なると放射特性はどのように変わるのだろうか？雨と霧の条件下を想像してみる。雨が降っているときは、視程は若干悪くなるものの十分に辺りを見渡せるだけの視界は確保できるが、霧の中では、たちまち視界を奪われて身動きが取れなくなってしまう。この違いは、粒子の大きさと数密度が関係している。同じ雲水量を考えた場合、雲粒や雨粒の粒径範囲では、小さい粒子がたくさん存在するほど可視光に対する散乱が強くなる。そのため、雨粒より1~2桁以上、粒径が小さい霧粒のほうが、より多くの光散乱を起こす。地球の放射収支の観点からは、雲凝結核が増えて粒径の小さな雲粒が増加すると、雲の反射率が大きくなり地表に届く太陽放射が減少する（つまり冷却化に寄与する）。

国際的な専門家をつくる気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では、気候に影響を及ぼす因子（温室効果気体やエアロゾルなど）の量が増えた際の、太陽放射および赤外放射の放射収支の変化の推定値を発表している。IPCCの最新の報告書である第5次評価報告書⁴⁾によると、産業革命から現在に至るまでのエアロゾルに起因した冷却効果は、未だ大きな不確実性があるものの、二酸化炭素による加熱効果の数割を相殺すると評価されている。

3. ライダーによる大気計測

ライダーとは、Light Detection And Rangingの略であり、指向性の良いレーザーを光源とするレーザー（Radio Detection and Ranging）手法である。そのため、レーザーレーザーともよばれる。離れたところから対象物の種類や性質を推定するリモートセンシング機器の一種でもある。大気計測を目的とする一般的なライダーは、光源としてのレーザー、散乱された光を集める望遠鏡、および集光された光の強度または光子数を計測する受光・分光装置で構成される。パルスレーザー光を射出して、その後方散乱光が戻ってくるまでの時間から距離を、散乱光強度や周波数変化から測定対象の分布や移動速度を計測する。測定対象は、エアロゾルや雲、オゾンや二酸化窒素などの微量気体成分、気温・水蒸気・風などの気象要素など多岐にわたる（図3）。時空間的な変動が大きい大気環境をモニタリングするうえで、ライダーは有効な計測手法の一つであるといえよう。

滋賀県にある京都大学生存圏研究所・信楽MU観測所には、レイリー・ミー散乱を計測する多波長偏光ライダーが設置されている。このライダーシステムにより、数メートルおきのエアロゾル後方散乱信号を、高度約1km以下では数秒で、10km以下では1分程度で取得することができる。何故、多波長なのかというと、2章で述べたように、粒子特性によって散乱される光の波長（色）ごとの強度が変化する特徴を計測に利用するためである。人工的に光の波長を制御したレーザー光を何種類か使用して、その波長ごとの散乱特性の違いを検出すると、粒子サイズなどの情報を抽出できるようになる。また、レーザーから出た光は電場（および磁場）の振動方向が一定の直線偏光をしている。球形の粒子に光が入射した場合は、その後方散乱光の偏光成分は変わらないが、非球形粒子では入射光と後方散乱光の偏光特性の違いが表れる。そのため、多波長計測と偏光計測を組み合わせたライダーは、エアロゾル成分や雲相（水雲・氷晶雲・混合相雲）の推定に繋がる情報の抽出に広く利用されている。また、レーザーの入射波長と散乱波長が異なる水蒸気分子や窒素分子のラマン散乱を検出すると、水蒸気濃度や気温の空間分布の計測が可能となる。これら物質の空間的な広がりを把握するために、ライダーの観測視野の方向を自動制御できる走査型ライダーも開発されている（図4）。

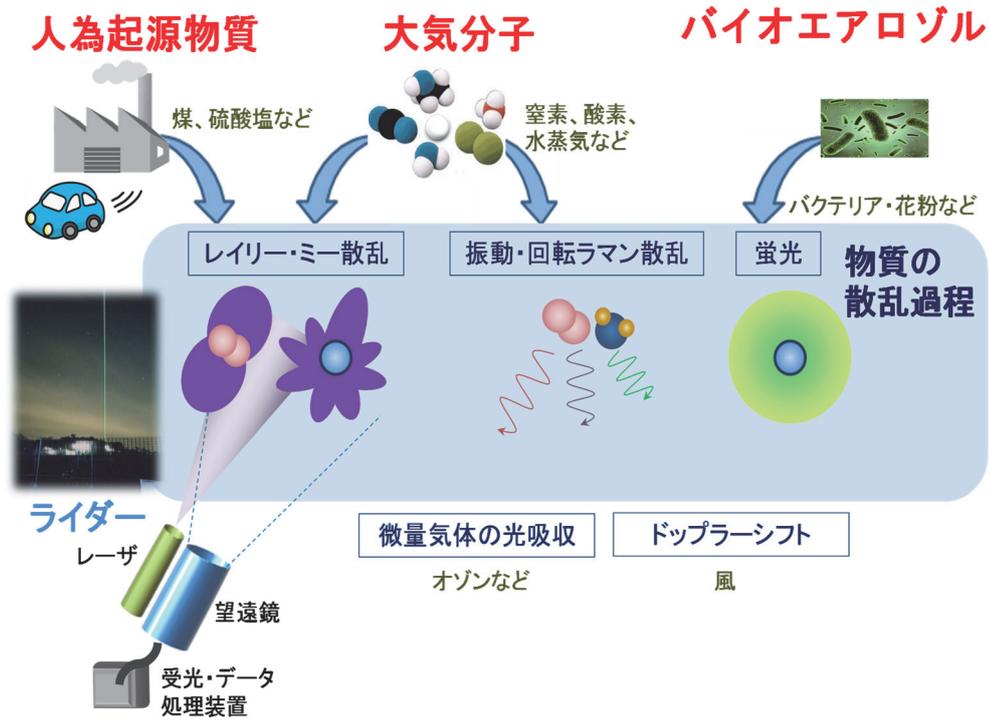


図3：ライダーの計測対象となる大気成分

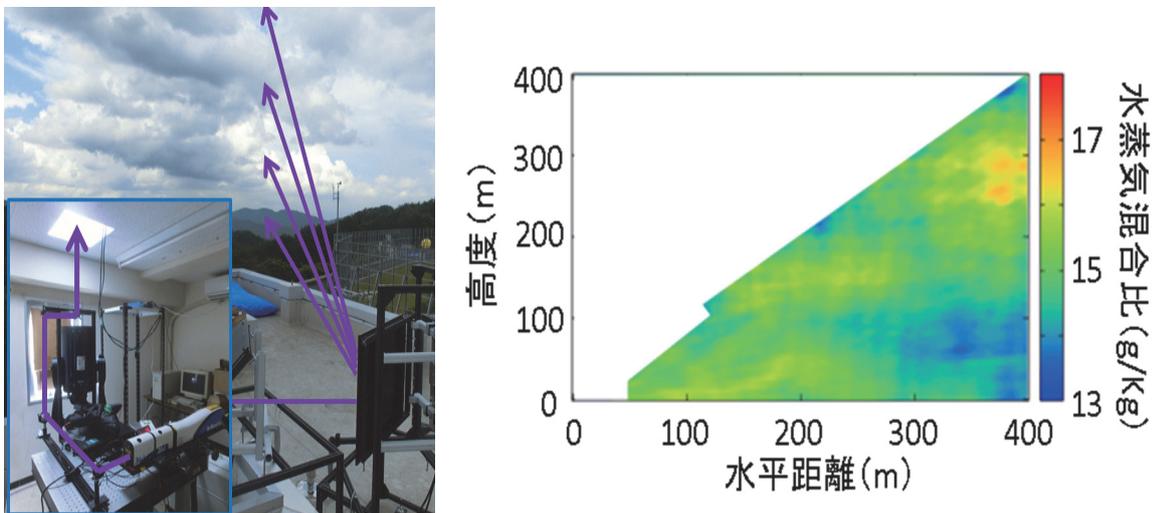


図4：（左）走査型水蒸気ラマンライダーシステムの外観⁵⁾、（右）ライダーで取得された水蒸気混合比の鉛直断面構（信楽MU観測所、2012年8月28日22:17 JST）

一方、オゾンのような微量気体は、窒素分子や酸素分子に比べて非常に少ないため、その散乱の計測のみから濃度を求めることはできない。そこで、特定の光の波長のみを吸収する微量気体の特性を計測に利用する。例えば、オゾンは波長 250 nm を中心とする紫外域で強い吸収を示す。効率良く光を吸収する波長と、吸収しない波長の 2 波長の光源を用いて同時に信号を取得し、その差分を取ると、

オゾンによる光吸収の情報が抽出できる。分子1個あたりの光吸収（吸収断面積）は理論的に求まるため、それらの情報からオゾン濃度の分布を推定できるようになる。

ここまで読むとライダーは万能のように思えるが、実際には原理上の制限がある。まず、光を用いているため、大きく散乱するものがあるとその先が見えない。つまり、光学的に厚い雲があると、その先が計測できなくなる。さらに太陽光がノイズ源となるため、日中の観測精度が落ちるという課題もある。そのため、最近では、太陽光の影響が少ない紫外領域や近赤外域を光源とするライダーも多く開発されている。また、得られた信号からエアロゾルの情報のみを抽出しようとする、空気分子の散乱に埋もれない程度の粒子による散乱強度が必要となる。一般的に、ライダーで検出できる粒子サイズは、有意な光散乱を示すサブミクロン以上（0.1 μm 以上）と言われており、それ以下のナノ粒子サイズの定量的な計測は難しい。そこで、ライダーだけでなく、係留気球、観測タワー、孤立峰をプラットフォームとして利用した直接計測や、雲中まで計測できるレーダー・ソーダーなどの計測手法を組み合わせた複合観測から、大気微量物質の動態や気象要素の空間変動を統合的に把握するための取り組みが進められている。

4. おわりに

地球では、太陽光が大気に入射する際に引き起こされる、様々な大気光学現象が現れる。これらは、大気中に浮遊する微粒子の数・大きさ・形状・物質の種類や空間分布状態を反映している。古くは、身のまわりの空模様や自然の変化を観察して、天気や環境の変動を予想する観測法である観天望気に、この光学現象が用いられてきた。直接の計測が難しい高層の大気環境を間接的に知るその手法は、現在では、自然の光だけでなく人工的な光を用いた光学リモートセンシングへと発展している。これまでに培ってきた知見や新しい計測技術を活用して、地球大気環境の変化を精密かつ多角的・長期的に把握し診断していくことは、持続発展可能な社会の実現において重要である。

参考文献

- 1) 笠原三紀夫, 東野 達 監修, “大気と微粒子の話: エアロゾルと地球環境”, 京都大学学術出版会, 2008.
- 2) van de Hulst, H.C.: *Light scattering by small particles*, pp. 114-171, Dover, New York, 1981.
- 3) 日本エアロゾル学会 (畠山史郎・三浦和彦 編著), “みんなが知りたいPM_{2.5}の疑問25”, 成山堂書店, 2014.
- 4) IPCC: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2013.
- 5) Yabuki, M., M. Matsuda, T. Nakamura, T. Hayashi and T. Tsuda, A scanning Raman lidar for observing the spatio-temporal distribution of water vapor, *J. Atmos. and Solar-Terres. Phys.*, 150, 21-30, 2016.

著者プロフィール



矢吹 正教 (Masanori Yabuki)

<略歴> 2003年 千葉大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了(博士(理))
 / 同年 国立極地研究所研究員 / 2005年 日本学術振興会特別研究員(第47次南極地域観測隊越冬隊) / 2008年 千葉大学環境リモートセンシング研究センター協力研究員 / 2009年 東京大学宇宙線研究所特任研究員 / 2010年 京都大学生存圏研究所特定研究員 / 2011年 京都大学生存圏研究所助教、現在に至る。
 <研究テーマ> 大気観測のための光学計測技術の開発、および大気エアロゾルに関する観測的研究。 <趣味> 七味唐辛子の調査。

地上再生可能エネルギーから宇宙太陽エネルギーへの拡大

石川 容平^{1*}, 松室 堯之², 篠原 真毅³

The Expansion from Terrestrial Renewable Energy to Space Solar Energy

Yohei Ishikawa^{1*}, Takayuki Matsumuro², and Naoki Shinohara³

概要

第5次エネルギー基本計画が審議され、平成30年7月3日閣議決定された。パリ合意の影響を強く反映した方針が示され、世界の潮流を見据え、再生可能エネルギーを主力電源とする明確な方向性が打ち出された。2050年の温室効果ガスの削減目標は80%である。本稿では、その具体的達成手法のひとつとして、洋上再エネの最適組み合わせをエネルギー源とする海洋インバースダムと、水素貯蔵システムが協調した200万kWクラスの洋上エネルギーセンター構想を述べる。バックアップ電源が不要で高速需給調整機能を持つ洋上発電所建設は再エネ拡大を牽引する。このような洋上発電所の世界展開には地政学的制限を伴うが、一方でこのシステムは最小規模(20MW)の宇宙太陽発電衛星の地上局を構成するため、地政学的条件に殆ど影響されない究極の宇宙再エネシステム発展の足掛かりとなる。ここでは小型発電衛星の建設可能性と発展性について論じる。宇宙太陽エネルギーは世界の共有資源であり、その賦存量も地上より遥かに大きい。エネルギー利用の冗長性と国際紛争軽減が期待される。

1. はじめに

我が国のエネルギー基盤は自給率が低く、安全保障上極めて脆弱である。加えて純国産と言われた原子力の再稼働が進まず、火力に頼らざるを得ない現状が継続している。パリ協定により温暖化ガス排出削減の義務を果たすため、早急な対策が求められている。原子力は政治的に軍事的にまた環境保護の立場からも極めて複雑な情勢を示し、海外でも意見が二分され各国の方針策定が揺らいでいるのが現状である。比べて再生可能エネルギー(以下再エネ)は殆ど全世界で受け入れられる方向で進んでいる。我が国では原子力と再生可能エネルギーが屢々結合して論じられ、民間の再エネ研究投資、設備投資がなかなか進まない特殊な状態にあり、世界から取り残されているようにさえ見える。温室効果ガス削減にはどちらも効果的である事が返って議論を複雑にしている。

平成30年7月3日に閣議決定された第5次エネルギー基本計画¹⁾においても、CO₂を可能な限り低減するという以外には現状抱える基本的課題には触れられていない。このことが再エネ政策の中核を不確実なものにしている。再エネについて我が国のような資源のない島嶼国が抱える特殊事情が記述されているが、実際は世界の多くの国が固有のエネルギー問題を抱えている。大陸との連携線を持たない我が国は再エネ利用に当たって平準化が困難であることは確かであるが、一方で太平洋に大きな排他的経済水域(EEZ)を持ち、日本海側に流れ込む対馬海流の恵みをもたらす。さらに大陸からの季節風が日本海の水分を上空で吸って豊かな水資源をもたらしている。水資源は生存基盤を構成する最も重要な要素であることは言うまでもない。我が国の排他的経済水域に存在する豊富で様々な再エネは欧州とは一味違った海洋国家独自の再エネ開発を可能にする。ここではエネルギー基本計画の趣旨に沿ったわが国に有効な再エネの具体的利用方策を提案する。

2018年7月27日受理。

^{1,3}〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大生存圏研究所 生存圏電波応用分野。

²〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷1番5 龍谷大学 電子情報学科。

* E-mail: ishikawa@rish.kyoto-u.ac.jp

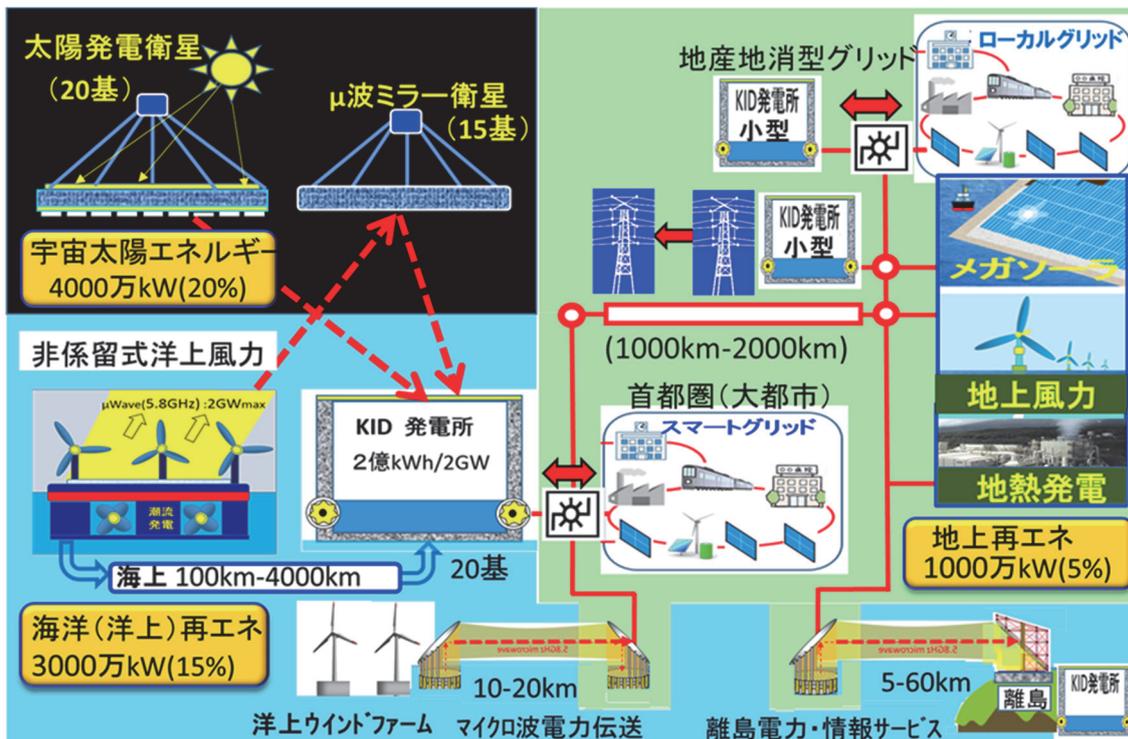


図1 生存圏全域の再エネをグリッドに運ぶ (2050年)

2. 再生可能エネルギーの超長期戦略

エネルギーの問題は安全保障や国家の経済に直接的に大きな影響を及ぼすため、比較的直近の戦略が議論される場合が多い。一方で、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) や我が国の環境省、民間団体の世界自然保護基金である WWF (World Wide Fund for Nature) 等は 2100 年を推定して現在の生活スタイルの改善方向性を打ち出している。国連の人口動態推計によれば 2100 年の世界の人口は約 112 億人で最大値を示し、その後緩やかなカーブを描いて減少する。比較的信頼性の高いマクロパラメタである世界の総人口が推定できれば、関連する水資源、食料資源 (カロリー)、エネルギー需要の把握は比較的容易である。したがって、世界が多くの政治的、社会的問題を解決するという前提をすれば、生活スタイルや科学技術で複数のシナリオを作ることができる。2100 年の地球では人々は豊かで平和に暮らしていないとすれば、戦争や疫病で人類は既に滅び、推定の意味を失う。もちろんそこには途上国はなく、全ての国家が成熟した先進国であり、地球は飽和状態で地球生存圏の全てが有効利用されている。そこでは信頼性の高いインフラが整っている。このように、2100 年のビジョンは部分的に作ることが可能である。いわゆる意志のある未来像である。一方で、中間状態は自由度が多く積み上げ式に世界のビジョンを描くことは極めて難しい。しかし、2100 年を設計基準として複数のシナリオを内挿法的に中間年に適用することは可能である。エネルギーは水や大気と同様に最も重要な資源であるがゆえに、石油発見以来これまで長期にわたって紛争の対象になってきた。21 世紀の再エネを巡る争いはかなり異質なものになるであろう。それは科学技術であり、知的財産 (資源) になる可能性が高い。国際競争の先頭に立つすべての国に覚悟が要るのではないかと思う。また、そのような状況であってもエネルギー安全保障は最も優先されるべき課題である。

我が国の第 5 次エネルギー基本計画では具体的な民間の発想力や科学技術力に強く期待した記述がなされている。そこでは 2030 年と 2050 年に向けた我が国の基本方針が記述されており、2050 年には 80% の CO₂ 削減が数値目標として掲げられている。再エネの社会実装には環境などを配慮した多くの視点が求められる。図 1 に 2050 年の我が国の再エネ導入の一例を示す。我が国は海洋国家であり

広大な EEZ を持つため、海洋エネルギーに着目することは極めて自然なことである。宇宙はフロンティアであり、太陽エネルギーが 24 時間豊富な空間である。両者を地上の再エネに加えてわが国の再エネ電力システムの全体像を示した。合計 8000 万 kW は電力の国内総需要が伸びないと仮定したときの 40% に相当する。これはエネルギー自給率も同率に改善されることを示す。目標の 80% には及ばない数字であるが、原子力を 20%、地産地消型再エネ（小水力、バイオマス火力等）20% を加えて、我が国のエネルギー自給率は 80% を達成できるシナリオである。残りの 20% は高効率ガス火力（LNG、IGCC）で全電力をまかなう一つの計画構想が立案できる。その後は大幅に海洋エネルギー、宇宙エネルギーが発展するであろう。原子力、核融合は第 5 次エネルギー基本計画にもある通り小型炉等特殊な用途を残して終息の方向を示す。筆者は小型原子炉や小型核融合炉が時空間スケールの大きい宇宙や他の惑星で活路を見出すことを期待している。

3. 地球温暖化問題に寄与する再エネベストミックス

図 2 に地球温暖化の主な要因を表した。温室効果ガスだけが気候変動の直接的要因でないことが図から読み取れるが、温室効果がなければ地球表面の平均温度は絶対温度の 4 乗に比例する黒体輻射の法則（Stefan-Boltzmann law）よりマイナス 18 度と計算される。地表の平均気温（約 15 度）との差 33 度が大气による温室効果である。ごく単純に赤外線を吸収する CO₂ ガスのみで温室効果が起きているとすれば、300 PPM の CO₂ で 33 度の効果を持つ。この数字は過去 100 年間で濃度上昇 100 PPM で 3.3 度の気温上昇に対応する事になる。気象庁のホームページによればこの数字は 0.73 度である²⁾。海水の熱容量や水蒸気による赤外吸収、対流の影響など多くの要因が複雑に関係して単純でないことは明らかである。しかし CO₂ 濃度増大が温暖化の負の特性要因になることはない。全世界が CO₂ 排出削減に取り組む合理性は高い。もちろん CO₂ 濃度の上昇防止には海洋植物や陸地の熱帯雨林が、光

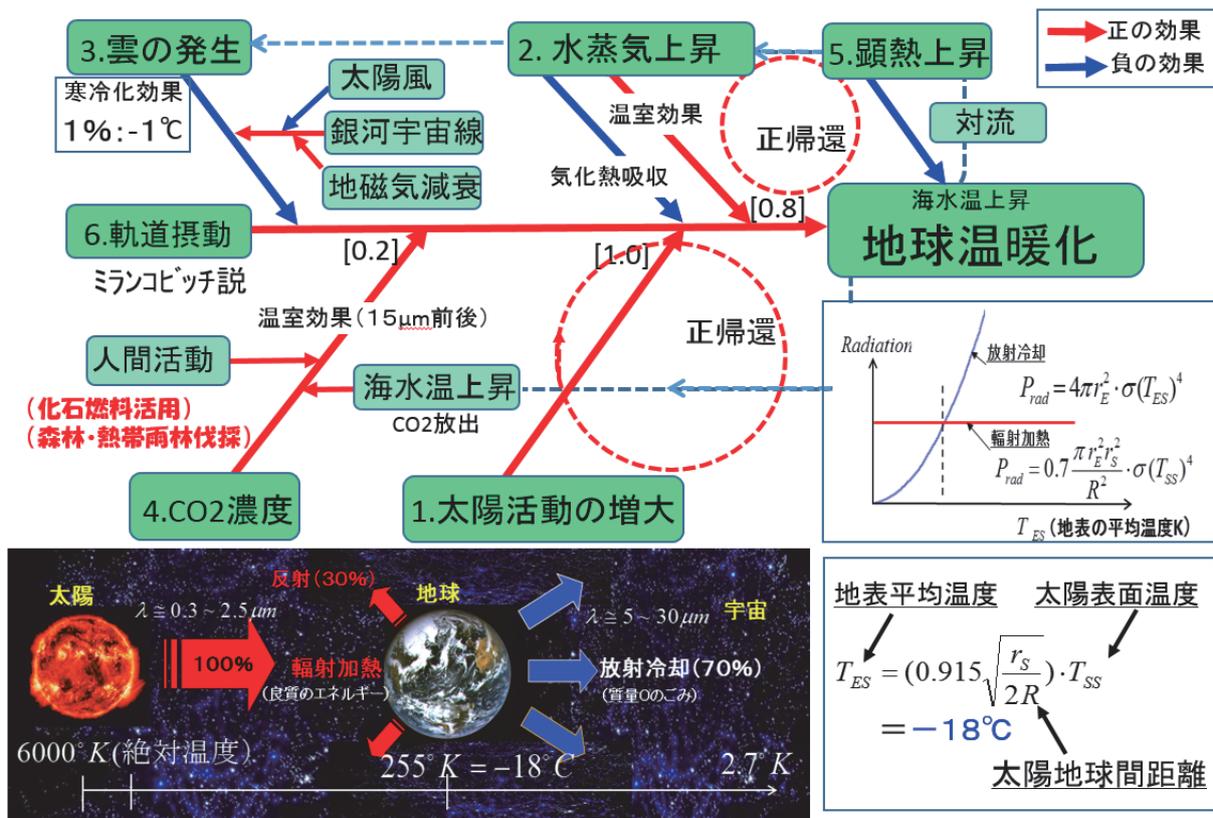


図 2 バランス点から見た地球温暖化の特性要因

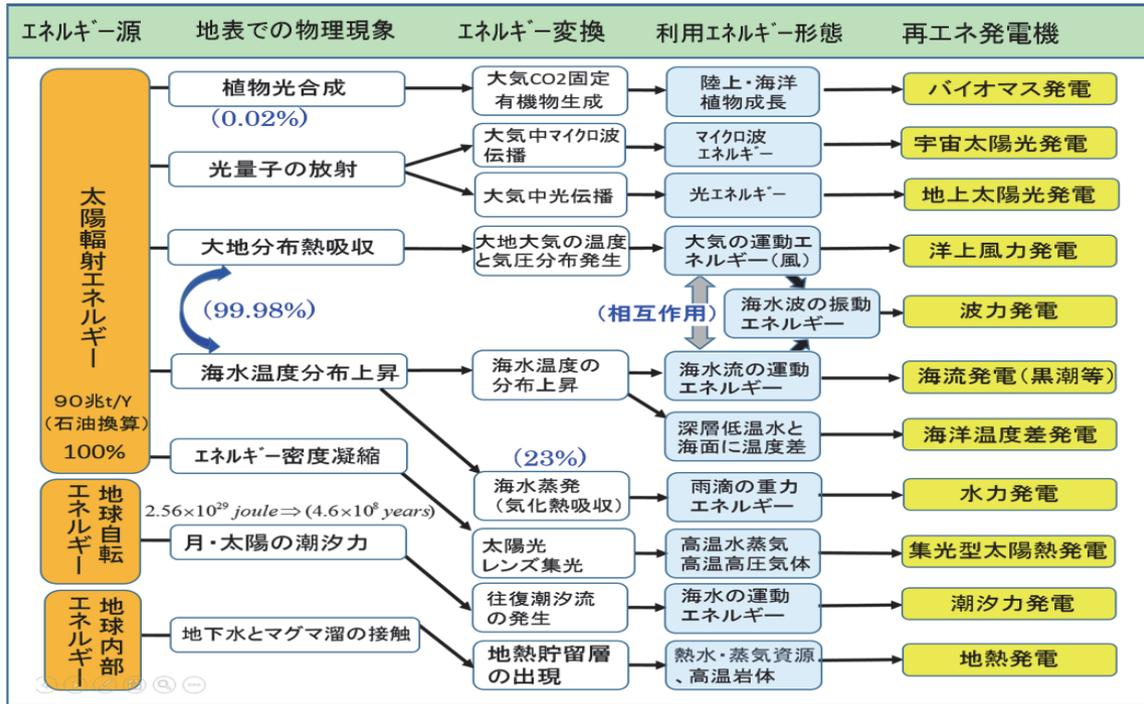


図3 再エネ発電機とエネルギー源との相関及びエネルギー形態の変換プロセス

合成により大きな役割を果たしていることを忘れてはならない。海洋汚染、森林伐採等に対する対策も重要な方策である。従って近年の気候変動による自然災害の激化を減じるためにはCO₂の削減と同時に環境の保全という両方の方策が求められている。

図3に主な再生可能エネルギーのエネルギー起源と利用できる形態への変換プロセスを示した。環境を変化させず、また多様性生物のバランスを崩さない範囲で再エネは利用する事が許される。飽和成熟地球は豊かであるがルールは厳しいはずである。生存圏の持続性を保つために再エネのルーツを辿り、適切な利用方法を開発することが重要である。最終利用形態にある再エネの貯存量はNEDO再生可能エネルギー技術白書³⁾に調査結果が記述されているが全量が利用可能ではない。環境が許す範囲の把握が重要である。逆に数千年から数万年の範囲では実質無限といってもいい再生可能エネルギーも多く存在する。技術開発の可能性を見据え、方向性を決めるときこれらの判断は重要である。さらに重要なことは地球温暖化要因をCO₂濃度だけではなく他の重要な要因の寄与率をより正確に把握することである。有効な技術開発を進めるために効果的に資金が使われるためである。即ち2100年110億人の豊かな飽和地球がゴールでありそのビジョンに整合し実現する技術開発でなくてはならない。我が国は省エネ技術では世界の先端を行き、2100年においても電力使用のお手本になる技術を持つと考える。このことは世界の総電力算出に当たって、わが国の現在の使用量を基準値とする合理性を示している。現在の日本人の平均消費電力は約1kwである。人口を掛け算して我が国の総電力平均は120GW(1億2000万kW)である。この値を基準にすれば、途上国がすでに存在しない2100年の世界の総電力使用量は、省エネ技術が拡散し、かつ季節変動や昼夜の電力需要が地球全体で相互に融通・平均化できる技術が可能であると仮定すれば、一人平均1kWの数字をそのまま用いることが可能である。即ち世界の総電力需要は単純に、1kW/人×110億人=110億kWである。一方、地球が太陽から受けるエネルギーは反射分を差し引いて1.2×10¹⁴ kW(120兆kW)と計算されている。従って太陽エネルギーの恵みは世界の総電力需要の約1万倍であることがわかる。これは、世界の総電力需要を全て再エネで賄った場合、バランスモデルによると地球の平均温度が一時的に0.03度低下する程度に太陽活動が弱まった状態に対応する。尤も利用された後、最終的には熱エネルギーに変換されるため実際には平均気温は変化しない。植物の光合成などがわずかに影響を受けることになるが、マクロに見れば十分許容できる範囲であると考えられる。言い換えれば再生可能エネルギーを地球が平均化

(相互融通)して使うことができれば、環境に殆ど影響なく安全に利用できる範囲であると結論付けることが可能である。

しかし、再エネは空間に不均一に拡散し、その密度は一様では無い。太陽エネルギーは利用形態として風力、太陽光、波力、海流、水力等多様なエネルギーに変換され利用される。図3はエネルギー源と再エネ電源の関係を表したものである。拡散したエネルギーを収集する技術が再エネ利用の本質の一つである。太陽光以外にも、地球の角運動量エネルギーは莫大な量を示し、数万年の単位では実質的に再生可能エネルギーの位置づけが可能である。地球の慣性モーメントは、均一密度を仮定すれば簡単に求められ、その運動エネルギーは慣性モーメントに $1/2 \times (\text{角速度})^2$ を乗じて得られる。その値は、 $2.56 \times 10^{29} \text{ J}$ であり kWh への換算値は $7.1 \times 10^{22} \text{ kWh}$ である。人類が使用する電力の約 4.6 億年分に相当する。このエネルギーは多様性生物がそのバランスに影響を受けない範囲で非常に期待が持てるエネルギー起源である。図3に示すとおりこの種のエネルギーの利用形態の典型例は潮流エネルギーである。NEDOの白書³⁾によれば我が国における潮流エネルギーは瀬戸内海に集中しており、潮流そのもののポテンシャルが小さく有効地域は限定的である。しかし、四季を通じて安定したエネルギーが得られることは優れた性質である。用途により目的により単独または最適な再エネと組み合わせることができる。時空間で短周期的、長周期的な変動を持つものや逆相関を持つエネルギーを持つ組み合わせが再エネ利用には有効である。各再エネの特徴の調査研究が必要であることは言うまでもない。ここでも前提条件として生命としての人類生存の基盤を成す生物多様性に悪影響を与えない再エネ電源の組み合わせであることを忘れてはならない。

4. バックアップ電源の不要な再エネ電源発電所

再エネが CO₂ 削減に良いことは自明であり、各国固有のエネルギー資源であり安全保障上重要な電源であることも理解されている。それでも各国の電力会社はパリ合意までは少なくとも乗り気ではなかった。販売する電力と購入電力との間に事業を進めるには難しすぎる壁があった。価格面、品質面、物流面(納期)は商品の3要素と言われるが、再エネについてはどれも難しく、現状の火力、原子力を置き換え、主力電源にすることには技術的、経済的に無理があった。①価格の面では政府が FIT (feed in tariff: 固定価格買い取り制度) を義務付け、再エネ事業者が利益を出せる構図にした。半面、国民の電力料金は上昇の一途をたどった。②品質面については不安定で不確実な再エネを使いこなすためには再エネの設備容量と同量の調整用の火力が不可欠として二重投資の不合理性を訴え、電力会社は難色を示している。EU 圏は国際連携線が機能するため、再エネは国際間で 2 次元空間的な平均化効果が強く、再エネ導入の許容比率は比較的大きい。半面各国の電力会社の経営が独立できないところに問題を抱える。③さらに物流面では再エネ発電所の分布や立地条件が従来電源と全く異なるため、これまでの物流を担った電力線の電流分布が変わり新たな変電設備や電力線増設工事が求められている。④これらの費用負担面で折り合いが付かず、再エネ導入は思うようにいかないのが現状である。我が国は電力グリッドの規模や形状のため、どの要素においても欧州より不利な立場であり、この分野で世界から遅れつつある。これら4つの問題は再エネ電源の開発とは別の問題であり、新しい事業モデルの創出や中間製品の性格を持つ再エネを従来の系統に導入する技術的課題を解決する必要性がある。再エネ電源の開発は政府が研究開発費を手当てし実証的成果が上がりつつあるが、システム技術については電池の開発を除いて十分とは言えないのが現状である。この問題の本質は電力(商品)を完成品ではなく中間製品で納入するために発生するといっても過言ではない。品質や納期、数量の取り決めがなく発電事業者と電力事業者があたかも事業意志に無関係に取引をしているように見える。即ち再エネ電力は一般商品の物流システムを前提にした事業者間の取引ルールを考えることは不可能と言える。この中間品を完成品にまで高め、取り引きする技術開発やシステム検討が求められている。筆者は英国等でスタートしたコネクト&マネージはあくまで発展段階での苦肉の技術であり、再エネが主電源となった時には事故が多発する電力システムにならざるを得ないことを危惧している。①バックアップ電源が不要で、②需給調整ができる再エネ電源開発が求められている。③しかも取引は基

本的に系統線に接続されている既存発電所サイドである。この3条件が揃えば再エネという電力商品は既存の電力系統線での物流と配信サービスが可能であり、自然な形で化石燃料から再エネへの転換が進む。上記の3条件を満足する再エネ電源の一例を図4に示す。いくつかの再エネが組み合わせられて海洋インバースダム^{4,5,6)}というプラットフォームに固定され、

それぞれ特徴のあるエネルギーを供給している。海洋インバースダムとは揚水発電の原理を利用して海中に大きな空間を作り、海水の重力ポテンシャルとしてエネルギーを蓄える海洋構造物である。図5に構造と機能を示す。海中に空間を作る方策は大きく分けて4種類(ケーソン型、沈埋型、海底トンネル型、築堤型)が存在するがここではケーソン型についてのみ説明する。図5はわが国の領海内の100m前後の水深を持つ海域に最適なケーソン型を示している。容量は数十MWh程度が適当であり、MWクラスの海洋再エネ発電所の出力平準化に最適である。自然災害に強く最悪事故の場合にも海洋汚染や人災に繋がらないことが特徴である。海洋での最適な再エネ電源の組合せは風力と太陽光発電である。前者は沖合にプラットフォームを作れば風況は一般的に良く(NEDO 白書: 設備利用率=31%)、また太陽光パネルは景観を悪化させることなく日陰のない場所で最高の設備利用率が期待できる(15%)。さらに風力に相関の高い波力エネルギーが10kW/mでプラットフォームに周囲全体から波力エネルギーを吸収することが可能である。波力は風力によって引き起こされるが

遠方の風力も波として伝わり時間差を持ってエネルギーを供給する。このことは再エネの平均化に効果的である。装置の固定は海洋インバースダム側壁海水面に潮の干満差の数mの鉛直移動距離を吸収するように固定すれば効果的である。また上述の潮流エネルギー装置を同様に深度10-30m近辺に固定する。これにより大型スクューの抗力を容易に吸収し、年間を通して信頼度の高い往復流体のエネルギーを得ることが可能である。このようにいくつかの洋上再エネ発電機のプラットフォームとして海洋インバースダムが機能することは、空間を多重に使うことになり拡散する再エネを一か所で収

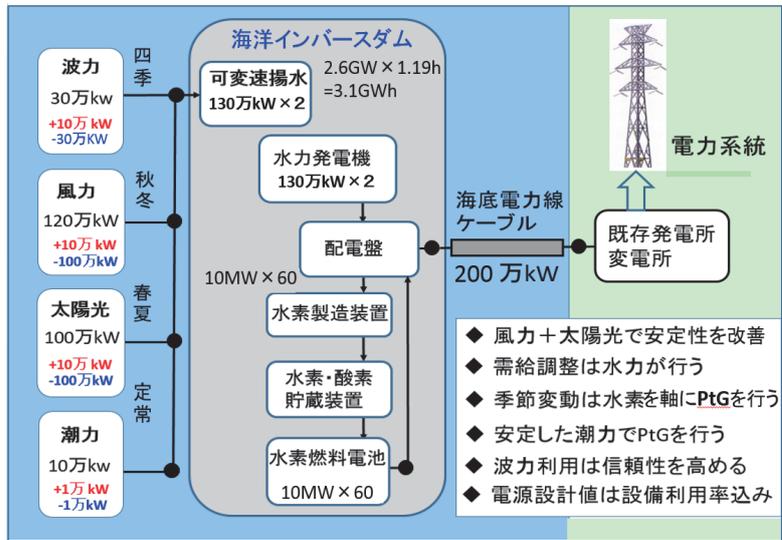


図4 バックアップ電源不要の洋上200万kW再エネファーム

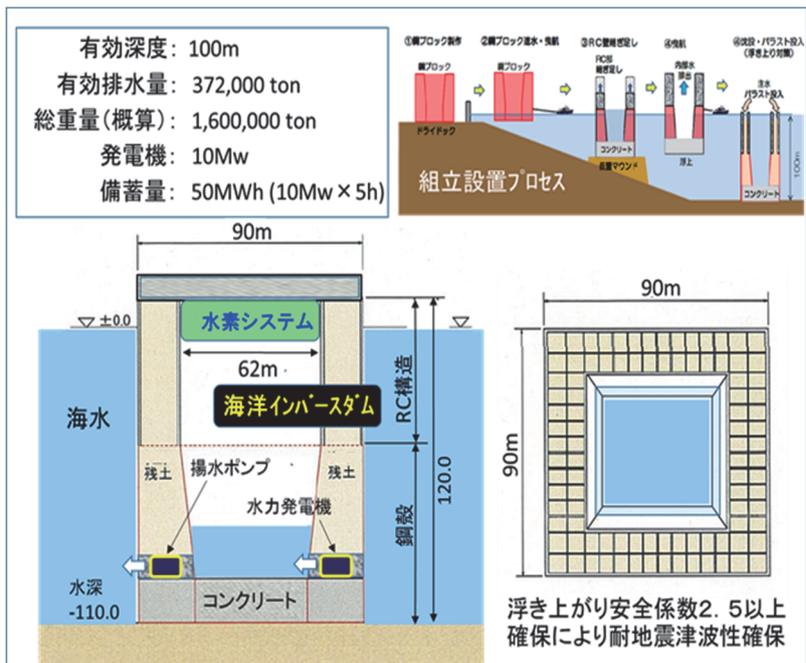


図5 ケーソン型海洋インバースダムの構造例と組立設置プロセス

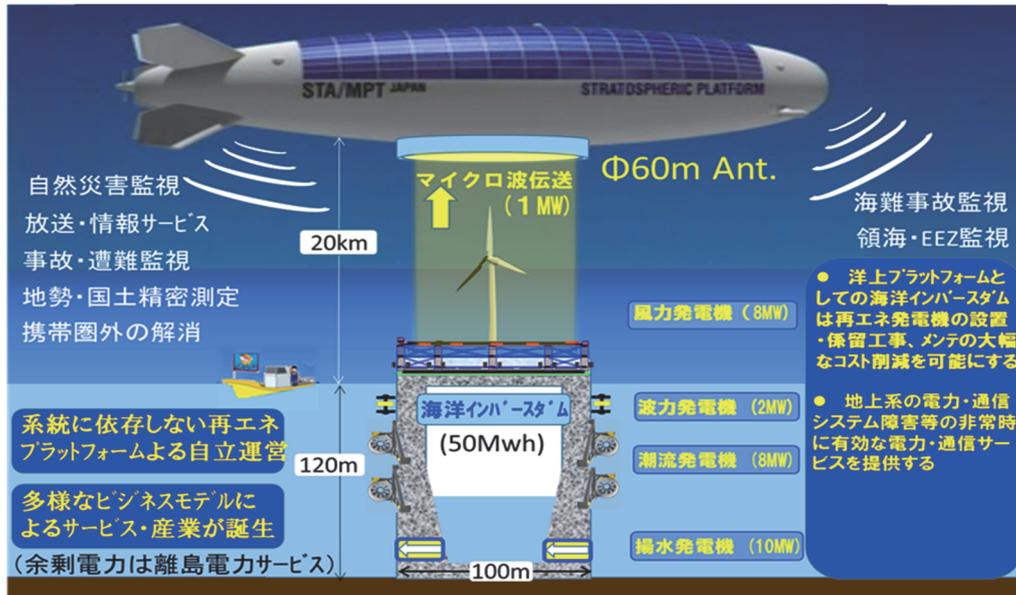


図6 成層圏プラットフォームによる（国境）離島観測システム

集できるというメリットを持ち、再エネの欠点を緩和する。

図6は海洋インバースダムがいくつかの再エネのプラットフォームとして機能する洋上再エネ発電所構想の一例である。ここで作られた安定した電力は、成層圏プラットフォームにマイクロ波を用いて無線でエネルギーを供給する。高度は成層圏下部の20 kmであり伝送電力は約1 MWである⁷⁾。海洋インバースダムの備蓄容量は50 MWhであり約2日間の再エネ投入がなくても成層圏にエネルギーを送ることが出来る。再エネベストミックスとは、時空間的な平均化に近い組み合わせを持つ異なるエネルギー形態の集団であると言える。しかし、海水の重力ポテンシャルはエネルギー密度が低く数時間から数日の時間的平均化効果を持たせること、大電力で速い需給調整機能を持たせることには有効であるが、週単位、月単位、季節単位の変化に対してベストミックスだけで安定電力を供給することは、経済合理性の観点から合理性があるとは言えない。あまりにも大型の備蓄装置（海洋インバースダム）が必要だからである。

長期変動の吸収にはH₂-PtG（パワーツーガス）との組み合わせが効果的である。水素ガスはトヨタのミライで既に燃料電池と組み合わせて商用車として実用化されている⁸⁾。第5次エネルギー基本計画でも「水素社会の実現」として位置付けられ、一層技術開発の進展が期待される。従って水素システムの貯蔵能力と海洋インバースダムの強靱なプラットフォーム性、大電力高速需給調整能力との機能融合は長期変動を吸収する有力な補完技術として期待される。海洋インバースダムの巨大空間の上部は水圧が低くエネルギー備蓄への寄与率は極めて低い（1%未満）。この上部空間（20-30m）に水素エネルギーシステムを収納することは備蓄密度の観点から効果的である（図4）。一方、水素社会の実現には、製造や運搬、安全面に課題を残すが、洋上のプラットフォームの内部空間、即ち頑丈に閉じた系（圧力弁は持つ）で運用する限りこれらの本質的課題は消滅すると考えられる。再エネ電力による水の分解の高効率化は一般的には期待できず、改善には大型化・複雑化によりコスト高になる。しかし、海洋インバースダムの備蓄エネルギーで作った安定電力を使えば電気化学的条件が安定するため水素製造の効率向上が将来にわたって期待できる。大型高压タンク（>70Mpa）により数か月分のエネルギーの備蓄が可能である。この巨大な水素の備蓄エネルギーを水素燃料電池で電気に戻して揚水発電の電力と合成して系統に送り届ける。また、海洋インバースダムの備蓄量が少ない時には水素燃料電池を用いて揚水発電の備蓄量を緩やかに補充することは効果的である。大きな備蓄量に特徴を持つ水素ガスの発電効率は60%が報告されている⁸⁾。あくまで安定供給が目的であるため電力の一部を水素変換して備蓄量の一部を電気に再変換する方式を取る。海洋インバースダムと水素PtGとの融合技術の本質は、以下に述べる。再エネの高効率変換による品質改善と大電力需給調整供給力が海洋

インバースダムの役割であり、水素 PtG 技術は再エネの季節変動という長周期変動を平準化できる大量のエネルギー備蓄と 100 万 kw クラスの水力発電装置のパフォーマンスを常に最高に保つ役割を持つ。図 7 に KID (海洋インバースダム) と H2-PtG の発電システムにおける位置づけを示した。同一空間に両者が存在し、機能融合することによる信頼性のある再エネ発電所実現の可能性を示した。この技術の社会実装により電力事業から再エネバックアップ用の火力発電機は姿を消すことが期待できる。

| | 設置場所 | エネルギー変換 | 備蓄方式 | 発電方式 | 搬送方式 | システム | BU電源 |
|--------------------|---------------------------|---|---|---|--------------------------|-------------------------------------|------|
| KID | 海洋 (海中、海底) (海底トンネル) | 揚水発電 (再エネ+海水) 効率高い(90%) 高揚水速度 | 海水の重力 ポテンシャル (海中ダム) 密度が低い | 水車+ 発電機 高効率 (90%) | 送電線 WPT | 備蓄 装置 再エネ PF 需給調 整機能 | 火力 |
| 再エネ PtG (H2) | 陸地 (地上、地下) | 再エネ+H2O 高温電気分解 効率高い(90%) 低吐出速度 | 化学結合 エネルギー (高圧タンク) 密度が高い | 燃料電池 効率 (60%-65%) | 水素船 トラック 列車 パイプ | 備蓄 装置 備蓄機能 | 火力 |
| 融合型 | 海洋 (海洋構造物) | 揚水発電 +PtG 安定電力+H2O で電気分解 | 高圧H2ガス: 一月分蓄積 KIDは常に満 タンで動作可 最悪事故対応 | 長周期変動 に対応可能 KIDの水力 で需給調整 (信頼性・高効率) (80%-90%) | 送電線 WPT 水素船 | 発電所 需給調 整機能 安定動作 | なし |

BU: back up, PF: Platform, WPT: Wireless Power Transmission, KID: Kaiyo Inverse Dam

図 7 「海洋インバースダム」と「PtG (H2) 装置」の融合がバックアップ電源不要の再エネ発電所を構築

5. 洋上再エネ発電所の具体的構成

バックアップ電源不要の再エネ発電所は洋上のエネルギーセンターと考えられる。しかし、主力電源として位置付けられるためには、その規模は少なくとも 100 万 kW クラスでなければならない。洋上風力だけでエネルギーセンターを実現するときの専有面積とその構成を図 8 に示す。NEDO 白書の 1 平方 km 当り 10 MW の最大設備容量を前提にし、設備利用率を年平均 31% として、100 万 kw 発電所を設計すると直系 22 km の円形の海上面積が必要であることがわかる。この時ウインドファームの面積は 380 平方 km、10 MW の洋上風力発電機は概略 343 機必要である。洋上風力の電力は 49 機ごとに 6 角形のサブファームを作り 50 MWh の蓄積容量を持つ 7 基の海洋インバースダムがエネルギーを蓄える。さらに 7 組のサブファームで一つの巨大なウインドファームを構成する。個別の海洋インバースダムの構造は図 5 と同じである。上部空間には循環型の水素—電力変換システムと貯蔵タンクが収納されている。31 機の海洋インバースダムの強固な建造物に分散して水素を貯蔵することは最悪の事故の場合でも洋上発電所が機能を停止しないという高い信頼性を担保できる。自然災害、人災、点検・故障、事故等あらゆるリスクに強い耐性がありサービスを継続できる事は再エネ発電所の大きなメリットである。再エネベストミックスのメリットを生かすために太陽光パネルが風力発電と洋上で海域を共有している。風力発電機のピッチは大きく太陽光は殆ど影になることなく発電することができる。季節変動にこの種の組み合わせは有効である。現状洋上で動作する太陽電池パネルは既にキャビンクルーザーなどに採用されている。22 km の直径を持つ洋上エネルギーセンターの周囲は約 69 km である。NEDO 技術白書³⁾によれば、波力発電の設備容量は 10 MW/m² として最大で 690 MW まで

可能である。沖合で柔軟な動きをする整合型の波力発電機の研究開発が期待される。潮流発電は上述したように信頼性が高い発電機である。海洋インバースダムへの再エネ発電装置の固定方法は比較的容易である。再エネの複数ハイブリッド型の発電所は平均化操作が期待でき、エネルギーセンターの信頼性が高くなることは言うまでもない。

図9は実施場所の一例として国境離島である対馬周辺の海域に再エネエネルギーセンターを構築した場合のイメージ図である。深度が100-110mぐらいで比較的フラットな海底を持つ海域でかつ風況にも優れている。即ち波力も期待できる海域である。対馬海流のエネルギーも非常時には使うことが出来る優れた場所として候補地例とした。何よりもこの海域は国境離島にエネルギーを届ける重要な意味を持つ。このような海域が日本列島の周辺にどれくらいあるかは未調査である。図10は再エネエネルギーセンターを事業の視点で見たときの機能構成図でありセンターと事業の関係を示した。淡水プラント事業とのシナジー効果が中東や北アフリカ等、降雨量の少ない海外では大いに市場性が期待できる。

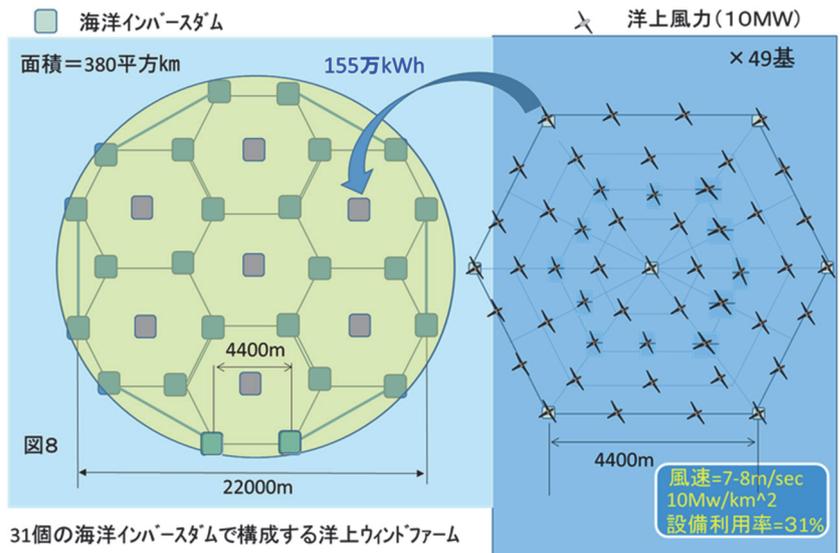


図8 120万 Kw の洋上ウインドファーム例 (342 基×10MW)

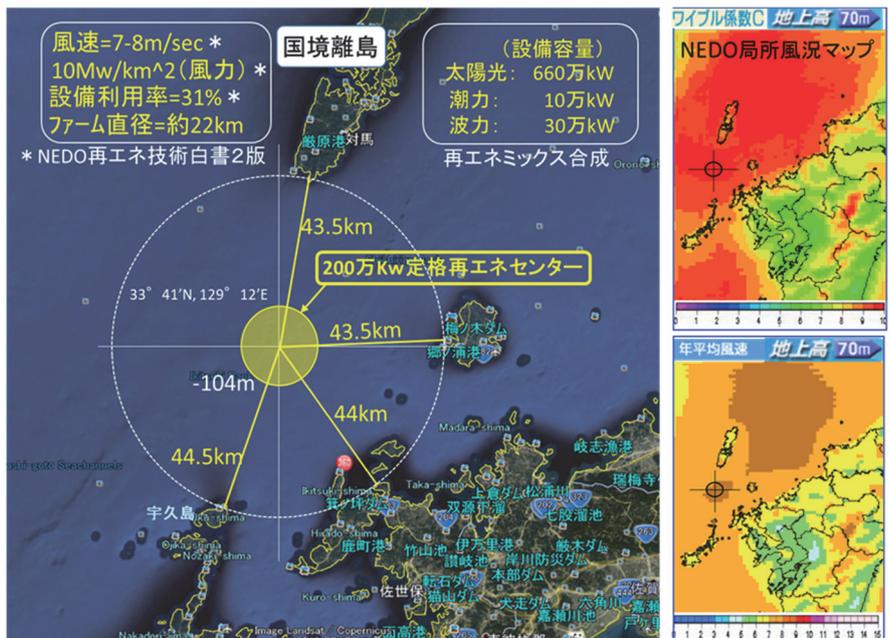


図9 離島サービス面から見た GW 級洋上ウインドファームの適地例

6. 地上再エネの限界と宇宙太陽光発電

これまで地上の再エネの収集ばかりに目を向けてきた。品質の優れた電力供給と需給調整能力、大電力供給能力などについて述べ、バックアップ電源をなくすために水素貯蔵技術との融合が必須であることに触れた。しかし、再エネの収集と平準化技術のみに着目し、再エネの状態が2100年の飽和時代を超えて概略同じという仮定の確からしさの検証は必要である。また、今までの議論においては地球上の地政学的な検討は省略した。さらに気候変動の影響などは全く考慮しなかった。100万kwの洋

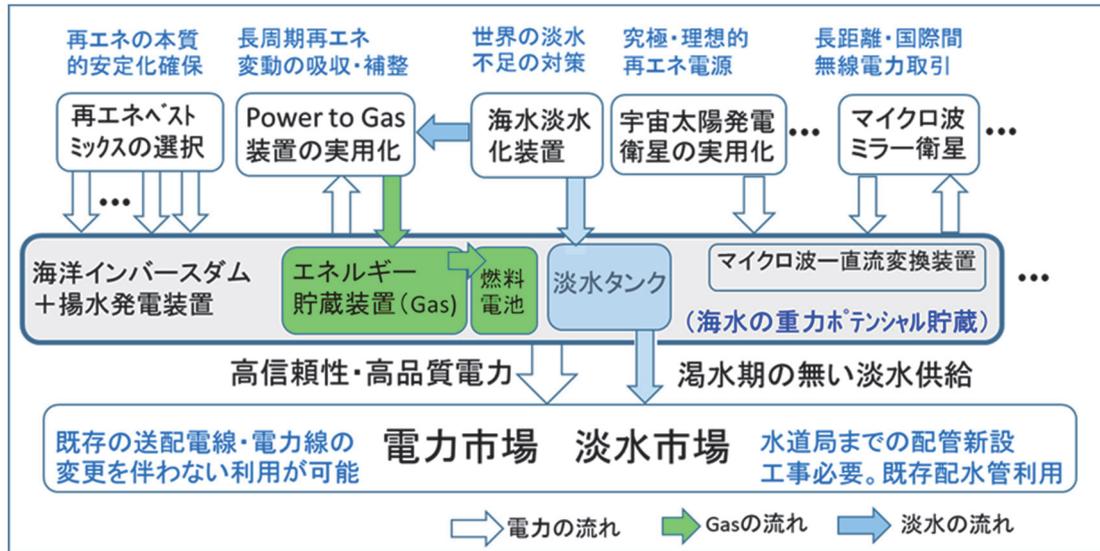


図 10 海洋インバースダムを 21 世紀後半のクリーンエネルギー・淡水センターとして位置づける

上エネルギーセンターを再エネの核とすれば、110 億人の電力である 110 億 kw の発電所は 1 万個の発電所に相当する。面積にすれば 380 平方 km でハイブリッド再エネにより発電能力は 2 倍まで増加するという期待値を入れてみる。この時 5000 個あれば世界の電力は物流問題を除けば解決することになる。総面積は 380×5000=190 万平方kmの土地が必要である。メキシコかインドネシアまたはサウジアラビア一国位の面積である。再エネは性質上 1 箇所に集めて取れるわけではない。地球上に薄く分布して収集できる、またそうでなくてはエネルギー自立の意味を失う。振り返って地政学的な影響を強く受ける。大陸国、島嶼国、半島国、緯度の大きさ、海洋性、草原性、山岳性など気候条件によって、また人口密度、都市型国家等社会形態によっても有効な再エネは互いに異なると言わざるを得ない。当然再エネ収集・利用形態も異なり、利用可能な絶対量とコストに差が出るのはやむを得ない。再エネは拡散しているが、全ての国がひとりあたり換算で公平に利用できるかというやはり地域偏在感は拭えないであろう。これは再エネの一つの限界と言うべきであり、人間も他の生命と同じルールで生きる証でもある。化石燃料の利用は人間が他の生物からエネルギー的に決別して独自の文明を築いたことを示している。そこに持たざる国と持つ国の決定的格差が生まれ紛争原因が生じた。

各国が安全保障のために自立するためには、再エネが更に均一で、その国にとって都合の良い拡散分布をしていることが望ましい。恐らくそれは願望の域を出ない。地上の再エネの限界を乗り越える手段として、究極の再エネと言っても過言ではない宇宙太陽発電か、地球が内部に大量に持つ熱エネルギーの利用がある。エネルギーネットワーク（電力グリッド）の構築と運用の柔軟性、研究実績、技術成熟度を考えれば前者が遥かに有力な候補であることは言うまでもない。宇宙は太陽エネルギーで満たされている。また太陽光発電パネルの実績もある。あとは宇宙と地上の任意な点をワイヤレスに接続できれば人類は大量の再エネを手に入れることができる。無線電力伝送の周波数候補は 2.45 GHz、5.8 GHz、24 GHz 帯等の ISM パンド（産業用周波数）でのビーム型電力伝送技術が盛んに研究されて来た^{9,10}。システムの天才発案者はピーターグレーサー（1968 年）である¹¹。その後、多くの人達によって原理的検証が実験的にまたシミュレーションを使って行われてきた^{12,13,14,15}。36,000km 上空の静止軌道に置かれた太陽発電衛星からおよそ 2-3 km の太さを持つ密度の薄い安全なマイクロ波ビームを作って質の高いエネルギーを昼夜休みなく伝送する。太陽発電パネルで発生した熱エネルギーはそのまま宇宙へ放射するため、エントロピーをほとんど持たない高品質のエネルギーを地上の任意の点に届けることができる。風袋（質量物質）なしで配達時間（遅延時間）は 0.1 秒の高速である。理想的な再エネの物流システムと言えるであろう。石油や天然ガスだと燃料を使う運搬船に積み込み数日から数週間をかけて温室効果ガスの衣を着て配達される。一方、原子力や核融合発電は CO₂ を原理的に発生しない。しかし、利用エネルギー以上の熱発生は避けられず地表の空気や海水を必要

以上に温めることになる。また廃棄物を伴うことは避けられない。

宇宙太陽発電という理想的なエネルギーシステム実現の現状における最大の阻害要因は巨大な発電衛星を宇宙まで運ぶことである。打ち上げの技術は日進月歩であるが現状の我が国の大型衛星打ち上げを担う H2A204 ロケットを例えば、この目的に使用するためには、価格（約 90 億）を 2 桁下げた設計・運営技術が要求されるという試算が出来る。海外ベンチャー企業（スペース X 社等）の再使用技術や、量産化技術、更に再使用準備期間の短縮などで輸送能力を高め輸送コストを大幅に下げようとしている。確かに設備寿命が長く稼働率が高ければ運賃は確実に下げることができる。燃料費は打ち上げ費用の 5%前後と言われているため、ロケットによる輸送費用はひとえに設備寿命と稼働率に依存すると考えて差し支えない。米国の場合、火星探査、火星移住という巨大な国家目標を持っている。これが民間企業の開発投資（1200 億円）を生み出している。わが国の宇宙太陽発電衛星の重量は概算で 2 万 5000 トン/200 万 kw である、単純に打ち上げ能力を 5 トンとすれば 5000 回の打ち上げが必要である。毎日 1 回打ち上げても 13.6 年の仕事である。我が国の総電力を賄うには 120GW の発電衛星が必要である。2100 年には 60 機の太陽発電衛星が運営体制にあるという計画をたてるとする。2040 年から打ち上げを初めて 60 年間かけて毎年 1 機の宇宙発電所が営業運転を始める事になる。5 トンの打ち上げ能力のロケットに頼ると毎日 14 回、年間 5000 回のロケット打ち上げが必要である。ロケットの打ち上げ費用を 1/50 にすると、1 年間の輸送費用は 9000 億円となり発電衛星 1 機分の費用を 1 兆円とすれば総費用で 1 兆 9000 億円/年となる。地上局のアンテナ費用は含まないが、2 GW の原子力発電所の最近の価格と比べて同等である。しかも絶対安全が確保でき、クリーンでかつ稼働率が高い。可動部分を持たず、修復は部分的にできるからである。宇宙発電所内では全てのエネルギーが集まる点がないためメンテナンスは薄い電力密度の空間で AI ロボットが作業可能な範囲であると考えられる。費用をどう見るかは議論が必要であるが燃料棒の交換や高温で動作するタービンの点検等は必要でなく、ユニット化された通常部品の交換で発電所の維持管理は可能であり、非常に高い稼働率が期待できる。これらは全て実質的電力コストの低減につながる。

一方で、打ち上げコストが 2%になるには全く新しい発想が求められる。マイクロ波ロケットの研究もそのひとつである¹⁶⁾。前提にしているのは人を運ばない貨物ロケットである。すなわち急な加速が許されるということである。化学ロケットは打ち上げ時の速度ゼロの時のエネルギー効率は 0%であることはよく知られている。スピードが上がればエネルギー効率は速度に応じて大きくなる。最大効率は燃料噴射速度が上昇速度に等しいときに得られる。従って打ち上げ時に初速度を外部から与えることができれば燃料のエネルギー効率は大きく改善される。筆者は貨物だけを運ぶ場合にはレールガンのような電磁力を打ち上げの際に併用できないかと考えている¹⁷⁾。燃料噴射速度（約 2.5 km/sec）に近くなるまでローレンツ力で加速した直後に化学ロケットのエンジンが動作するのが現実的である。この時燃料噴射の運動エネルギーは全てロケット本体の上昇エネルギー（位置エネルギーの増加）に使われる。もちろん軌道に載せるプロセスではエネルギー整合よりも方向制御、速度制御が重要である。しかし、費用の大部分を占める初段エンジンのエネルギー整合は燃料タンクの大きさや燃費に対して圧倒的に有効であると考えられる。電磁的加速により初段エンジンの負荷はかなり小さくなる。余裕分は「再使用」という新たな機能（垂直着陸等）を付加することに使われる。これによってコストと寿命は大きく改善されるであろう。「再使用」を可能にする技術は 100 万にも及ぶ部品点数の革新的な高速測定・AI 診断技術に加え、我が国の得意分野である高信頼性材料の開発が 100 回を越す再使用機体の実現を可能にすることを期待したい。「再使用」技術と「初速度投入」技術の確立は衛星の高速輸送システムに二けたのコストダウンをもたらすであろうと筆者は確信する。レールガンの技術は軍用としては多くの問題を残すが、民生用途のロケットについては、発射装置は重量制限がなく固定であり、発電所確保もスペース確保も有利である。一つの機能に特化した発射装置が作れるからである。日米の先行研究などにより、有効な要素技術は揃いつつあると考える。21 世紀は宇宙科学、宇

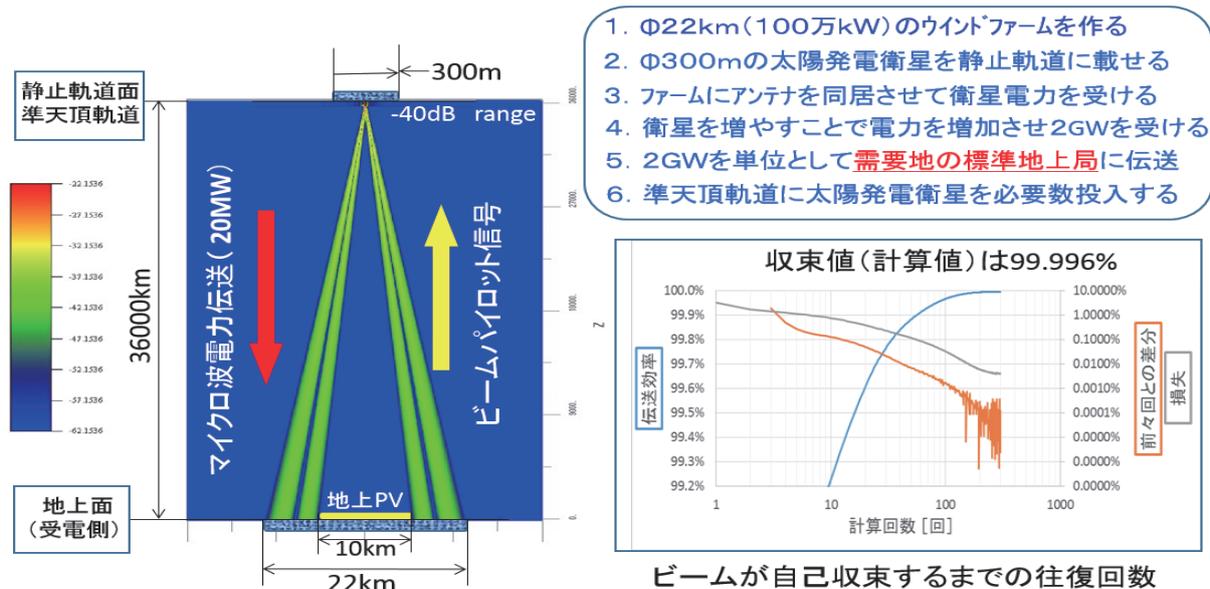


図 11 小型静止衛星から低漏洩ビームで地表へ届ける

宙産業を抜きには考えられない。早い時点からの多くの人のアイデアを集結した低コストロケットの研究開発を始めることが、成功の必須条件であると筆者は考えている。

多くの太陽発電衛星が地上の電力グリッドに電力を供給する地上局の確保が必要である。実証実験も小規模から始めるのが望ましい。第5章で述べた洋上再エネ発電所は太陽光パネルが風力と季節変動を考慮したバランスで面積を専有している。風力と宇宙太陽発電所からのマイクロ波は空間を共有できるが、地上の太陽光パネルは中央に半径10kmの円内に敷き詰め年間での発電量を風力と合わせる。この時外側の面積にはレクテナアレーを配置する。静止軌道に置いた発電衛星からのマイクロ波電力ビームはドーナツ状の領域に送電する。この場合、静止軌道の発電衛星のアレーアンテナのサイズはわずか直径300mで十分な機能を果たす。地上局(洋上エネルギーセンター)のアンテナエリアが大きく(22km)取れるためである。図11は静止軌道上の小型発電衛星から洋上のエネルギーセンターにマイクロ波電力伝送の様子を、電磁界シミュレーターを用いて計算したものである。伝送電力は発電衛星の面積に比例するから10-20MWである。この電力は奇しくも2001年に長友信氏が宇宙科学研究所報告第43号に発表されたSPS2000のシステムコンセプトと一致する¹⁸⁾。最初の最小の実用化発電衛星の規模を合理的に算出されたものである。この衛星の重量は300-400トンで設計可能であり、早い時点でユビキタス衛星として途上国や人口密度の低い地域へのサービスが可能である^{19,20)}。現在運営中の国際宇宙ステーション(ISS)の重量は約420トンである。低軌道衛星ではあるが同じ程度の重さを持つ衛星の打ち上げと組み立て実績があることは非常に有益であると言える。さらに20年に亘る有人による宇宙実験・調査は貴重な見識とデータを発電衛星に提供するものと確信する。

一方、地上における洋上のエネルギーセンターの構築は最小規模の打ち上げ可能な太陽発電衛星の実用化を可能にする。小型の太陽発電衛星は軌道上で組立てることが可能であり、複数の小型衛星を宇宙で一体化して一つの完全な発電衛星(2GW)として機能することもできる。図12は複数の小型発電衛星が同期して地上のエネルギーセンターに送電しているイメージ図である。一つ増やすごとに電力が20MW単位で増大することは興味深い。全体の位相の同期を取る事によって地上で電力が合成できる。この技術は電力伝送の新技术として2017年に開発された両サイドレトロ技術をマルチビーム

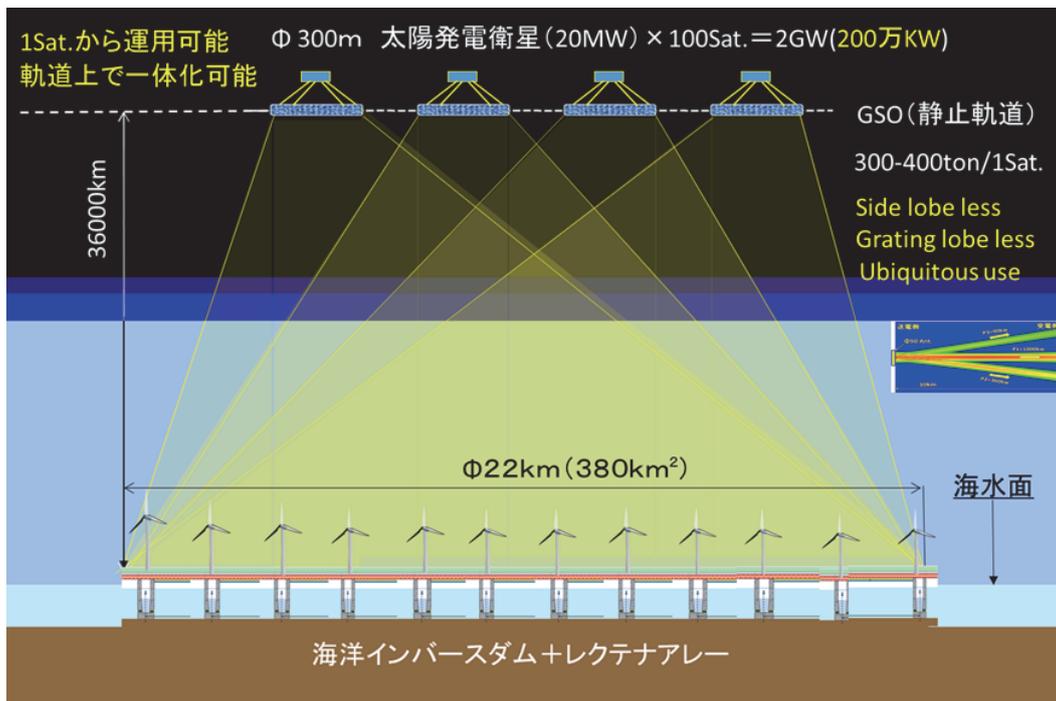


図12 小型宇宙太陽発電衛星と洋上ウインドファーム (1.8 GW) の連携

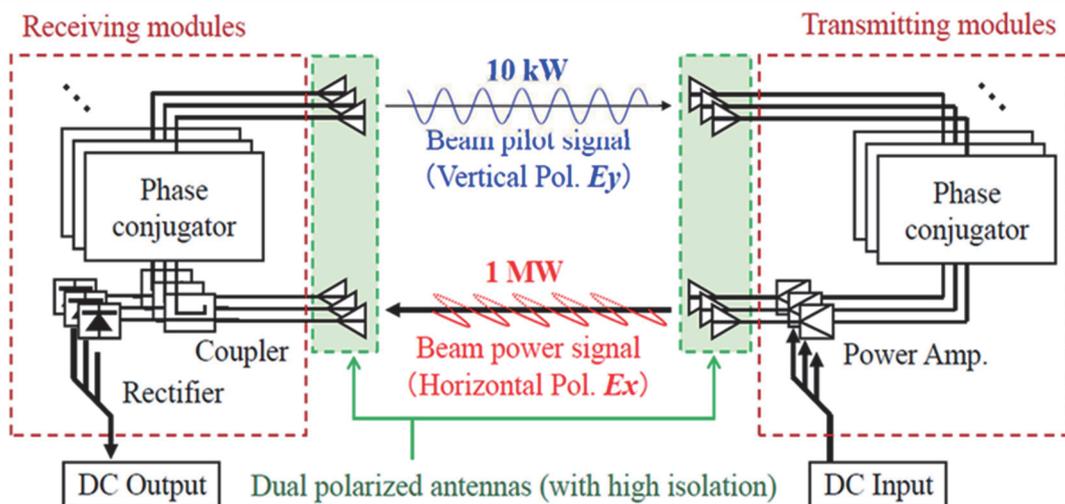


図13 両サイドレトロ技術のブロックダイアグラム

に適用したものである²¹⁾。図13に両サイドレトロ技術のブロックダイアグラムを示す。パイロット信号と電力伝送のマイクロ波ビームは、互いに時間反転された関係にありマルチビームで送り出した信号がそのままの位相で帰ってくるため、電力の完全合成が可能になるという原理を利用したものである。グレーティングローブやサイドローブを殆ど持たない36000kmのマルチビーム伝送が特長である。この技術は漏洩電力が最小になる状態を自ら作り出す自己収束ビーム技術である。漏洩した方向からは電力の戻りがないため、再び時間反転界は作り出さないからである。この技術により従来のフェイズドアレーアンテナではできなかった低漏洩の伝送路を図14のように作り出すことができる。大電力伝送の社会実装には極めて重要な技術ということが出来る。100個の衛星が打ち上がり、相互距離を縮めてマイクロ波の一体型動作を行えばテーパー型のビームが直線的になり、地上局の大きさも直径2-3kmのアレーアンテナで受電することが可能になる。即ち100個を超えて一体化した太陽発電衛星から複数の地上局へ同時に電力伝送が可能になる。もちろん小型衛星100個を一つの単位として軌道上の別の場所に距離を置いて並べることも可能である。このように宇宙と地上がマイクロ波電

力伝送システムを用いて連鎖的にエネルギー接続することができる。軌道も静止軌道だけでなく準天頂衛星に使われている8の字型軌道を使うことも可能であり、電力の国際性、サービス性、効率性を大いに高めることが出来る。特に高緯度の国の人々にとっての恩恵が大きいことは電力のグローバル化や効率化に大いに貢献できる。即ち地球規模の電力グリッドと位置づけることができる。再エネによる強固な洋上エネルギーセンターが宇宙エネルギーをも扱えるセンターとして発展することは喜ばしい。宇宙発電所と地上発電所とでバランスが取れることは人類にとってのリスク軽減に貢献できるであろう。2050年までの再エネの発展ステップを図15にまとめた。2100年飽和人口を持つ地球が持続発展可能であるために早急な判断と行動が必要なことがこの図15より読み取ることができる。

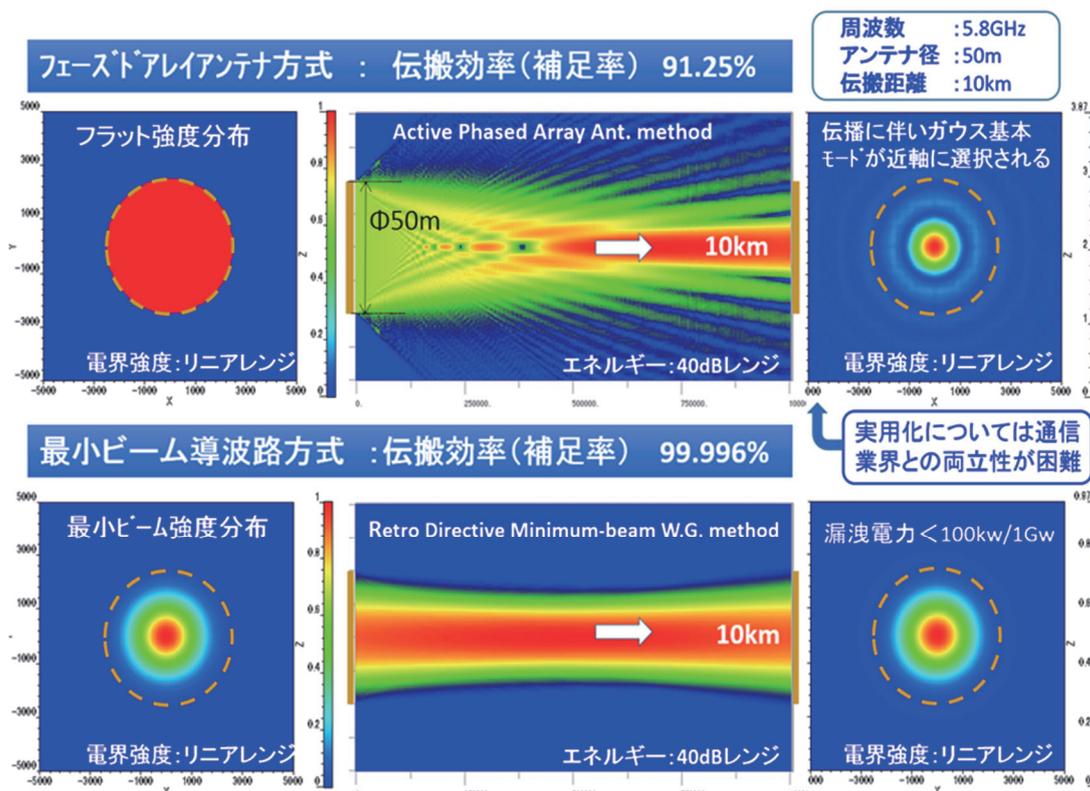


図 14 最小ビーム導波路方式による低漏洩ビームの形成

7. おわりに

第5次エネルギー基本計画が閣議決定された時期でもあり、政府のエネルギー政策とパリ協定を現状の産業界が抱えている問題と照らし合わせて現実的な解決策を探してみた。人口110億の地球はとてつもなく大きな問題を抱えることを改めて認識した。エネルギー問題は人類社会にとっても、多様性生物にとっても水や空気と同様に最も基本的なインフラの代表格である。化石燃料は人類を別物に見える演出をしたが争いを激化させ、さらに気候変動による自然災害という2重の苦しみを反作用として生み出した。この傾向は人口増加とともに増大することは容易に想定できる。110億の静止人口を持つ地球の成熟社会のルールと設計図を作る時期に来ていることは明白である。大気汚染、海洋汚染、土壌汚染対策は待ったなしである。しかし過剰なエネルギーが作り出したものはクリーンなエネルギーがなければ処理できない。再エネは万能ではないことも多くの人々が感じ始めているが、これ以上の汚染を、また温暖化を食い止める大きな手段であることには違いない。これはIPCC第5次報告書に記載された結論である。我々は知恵を結集しなければならない時期に突入している。対症療法で

は間に合わない不都合な自然現象、社会現象が頻繁に発生していることも多くの人達が感じている。110億人への最大の恵みは太陽である。宇宙にはエネルギーが満ち溢れ、この質量を持たない流れのエネルギーの利用が最も自然である。地上に偏在する化石燃料の奪い合いとはわけが違う。太陽からはいくら奪っても紛争の原因にはならず、温暖化の原因にもならず汚染の原因にもならない。これは世界の紛争の半分を消滅させる力があると考えている。宇宙太陽発電システムの構築や地上のエネルギーセンターの構築は社会面、技術面から見て実現には多くの困難が伴う。しかし実現を完全否定する材料はない。我が国の産業という次元の話ではなく、ホモサピエンスが22世紀に幸せな暮らしができてきているか、絶滅種になっているかという判断が今、私たちに求められている。

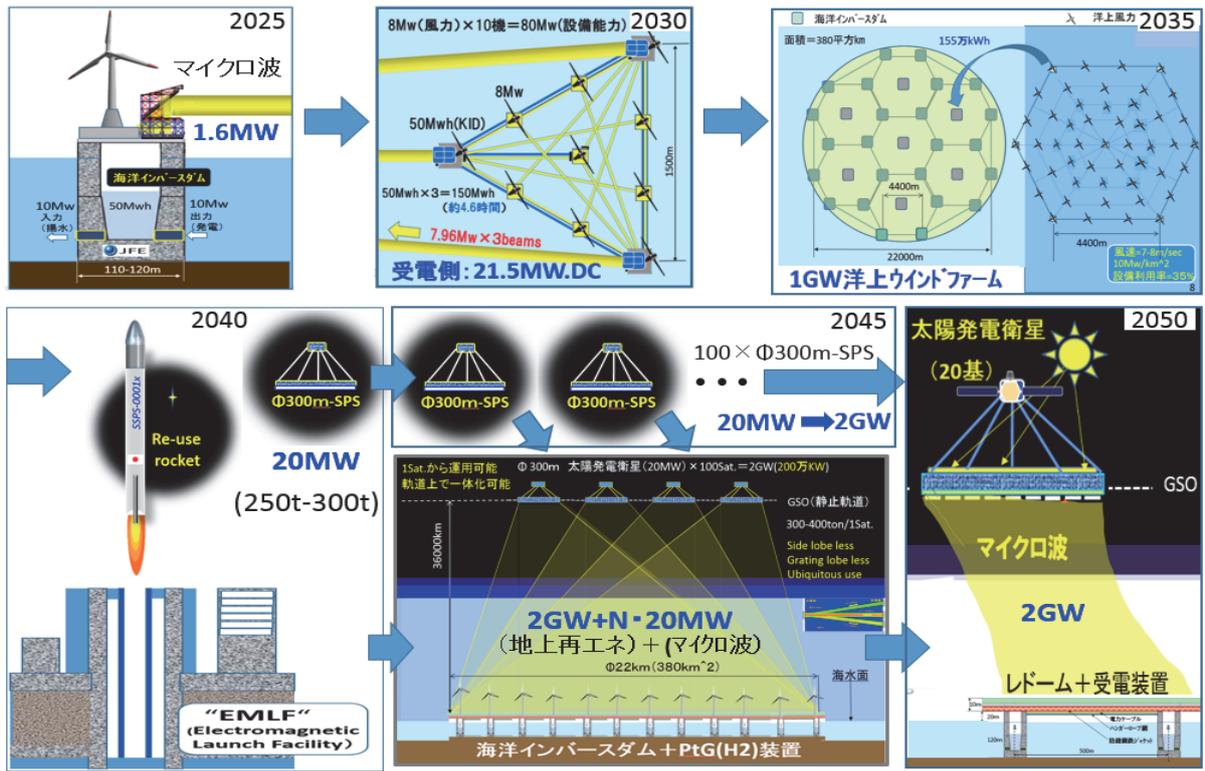


図15 再生可能エネルギーの進化と拡大（海洋から宇宙まで）

謝辞

本稿を纏めるにあたり、宇宙太陽発電学会、JAXA、京都大学生存圏研究所、海洋インバースダム協会、経済産業省、国交省、水産庁、NEDO、IEEJ、OEAJ、AIST、JAMSTEC、RITE、電力中央研究所、中部電力、九州電力、関西電力など各電力会社より多くのご意見をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 第5次エネルギー基本計画, http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf, 2018/07/03.
- 2) 世界の年平均気温 (気象庁), http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html, 2018/06/14 更新.
- 3) NEDO再生可能エネルギー技術白書, http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html, 2013/12/12.
- 4) 石川容平, “マイクロ波ミラー衛星と海洋インバースダムを中核としたグローバルスマートグリッド構想,” マイクロウェーブ展MWE2014 基調講演, 2014/12/10.
- 5) 石川容平, “大規模再エネを導入拡大する巨大エネルギー備蓄装置 (海洋インバースダム) の実用化,” 月刊基

- 礎工, 第498号, pp.88-90, 2015/01.
- 6) 石川容平, “再生可能エネルギーの大規模導入に向けた「次世代電力グリッド網構想」,” エンジニアリングシンポジウム2016, 2016/10/21.
 - 7) 牧野克省, “成層圏滞空型無人機へのマイクロ波無線電力伝送の技術実証に向けた検討,” マイクロウェーブ展MWE2017 ワークショップ, FR4B-4, 2017/12/01.
 - 8) 柴田善朗, “我が国におけるPower-to-Gasの可能性,” エネルギー経済, 第42巻, 第1号, pp.32-49, 2016/03.
 - 9) H. Matsumoto, “Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan,” IEEE Microwave Magazine, vol.3, no.4, pp.36-45, 2002.
 - 10) N. Shinohara, “Power without wires,” IEEE Microwave Magazine, vol.12, no.7, pp.S64-S73, 2011.
 - 11) P.E. Glaser, “Power from the sun: its future.,” Science (New York, N.Y.), vol.162, no.3856, pp.857-861, 1968.
 - 12) W. Brown, “Experiments in the transportation of energy by microwave beam,” IRE International Convention Record, vol.12, pp.8-17, 1964.
 - 13) K. Hashimoto, S. Nijjima, M. Eguchi, and H. Matsumoto, “Optimization of uniformly excited phased array for microwave power transmission,” IEICE Technical Report, SPS2005-09, pp.23-30, 2005.
 - 14) 齊藤孝, 前川和彦, 佐藤正雄, 中村修治, 佐々木謙治, 三原莊一郎, “宇宙太陽光発電システムのためのマイクロ波電力伝送地上試験,” WPT研究会, WPT2014-109, 2015/03/25.
 - 15) T. Matsumuro, Y. Ishikawa, T. Mitani, and N. Shinohara, “An Effective Design Method of Low-leakage Microwave Beam for Long-distance Wireless Power Transmission,” IEICE Transactions on Electronics, vol. J99-C, No.12, pp. 634-645, 2016/12.
 - 16) 小紫公也, 福成雅史, “マイクロ波ロケットの現状と展望,” J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.5, 2016.
 - 17) 矢守章, “電磁飛翔体加速装置開発の歩み”, 宇宙科学研究所報告, 第117号, 2012/02.
 - 18) 長友信人, “SPS2000のシステムコンセプトとあるべき展開,” 宇宙科学研究所報告, 第43号, 2001/03.
 - 19) Y. Ishikawa, “The Pacific Rim Nations Family in Asia and Space Solar Power System,” 2012 IEICE Thailand-Japan Microwave (TJMW2012) Proc., Keynote talk2, Bangkok, 2012/08.
 - 20) T. Matsumuro, “Advanced Beam Forming by Synthesizing Spherical Waves for Progressive Microwave Power Transmission,” Ph. D thesis, Kyoto University, 2017/03/23.
 - 21) 松室堯之, 石川容平, 柳ヶ瀬雅司, 篠原真毅, “両側レトロディレクティブシステムによる自己収束ビーム形成の基礎検討,” WPT研究会, WPT2017-38, 2017/10.

著者 プロフィール



石川 容平 (Yohei Ishikawa)

<略歴>1972年名古屋大学大学院理学研究科修士課程修了/1994年東北大学工学研究科博士終了、博士(工学)/2003(株)村田製作所取締役執行役員・先端技術開発センター長/2005年同社シニアフェロー・次世代技術研究所所長/2009年京大生存圏研究所客員教授/2011年京大生存圏研究所特任教授/2014年(一社)海洋インバースダム協会会長, 現在に至る。

<研究テーマ抱負>2050年マイクロ波電力伝送で宇宙から世界に究極の再エネを届け, 海域には海洋インバースダムを核にしたエネルギー・淡水センターを構築すること。<趣味>大麦パン・洋菓子作り、ピアノ

抗卵菌物質の現状と生合成研究

川崎 崇^{1*}

The current state of anti-oomycete compounds and the biosynthesis study

Takashi Kawasaki^{1*}

概要

卵菌類の仲間には、農作物へ甚大な被害を与えるものやサケやマスの養殖業、動物や人に被害を与えるものがある。本稿では、抗卵菌物質の現状として卵菌に属するミズカビに対しての抗菌剤の現状について述べると共に、放線菌 *Streptomyces* sp. TK08046 株が生産する抗卵菌物質であるサブロールマイシンの特性や生合成遺伝子の取得と解析について紹介する。

1. はじめに

卵菌には、陸上植物へ甚大な被害を与える『根腐れ病』や『立枯れ病』の原因の菌になる *Phytophthora* や *Pythium* 属などが含まれており、ジャガイモやトマトの疫病菌の *Phytophthora infestans*^{1), 2)}がその代表例である。このジャガイモ疫病菌はヨーロッパ全域でジャガイモを壊滅的に枯らし、19世紀中ごろにアイルランドで歴史的な大飢饉を引き起こしたことで知られる植物病原菌である。ジャガイモは、世界中で年間約1億トンも消費される主要作物の一つで、ジャガイモ疫病菌がもたらす年間被害額は50億米ドルに達している。このことは、農業に深刻な打撃を与え続けており、食糧を確保する上で問題点の一つである。

水産業では *Saprolegnia* や *Achlya*、*Aphanomyces* 属などによってミズカビ病が引き起こされる^{2), 3)}。これらの卵菌類によって引き起こされる魚病は2つに大きく分けることができる。一つは主に *Saprolegnia* が感染することによって引き起こされる魚体や魚卵の表面に寄生し繁殖する外部寄生型のミズカビ病であり、もう一つは *Aphanomyces* や *Saprolegnia* などが魚体内の器官で菌糸を伸長させることにより引き起こされる肉腫症や内蔵感染症がある³⁾。特にサケ科魚類の受精卵に発生する *Saprolegnia* が原因のミズカビ病が深刻で、養マス業に大きな被害を及ぼしている。

また、馬や犬などの動物にも感染することが知られており、その感染が人にも及ぶことがある。人への感染例は、*Pythium insidiosum* が報告されており、重篤化する場合もある^{4), 5)}。また、卵菌は真菌とは細胞壁、細胞膜中のステロイドなどが異なるため従来の抗真菌薬剤では治療が困難である。症状が重篤化した場合の治療法は患部の摘出による治療法しかない。

農業、水産業、人の健康に影響を与える卵菌類に対して特異的に抗卵菌作用を示す化合物は、期待が高いのが現状である。

2018年7月11日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 学際萌芽研究センター。

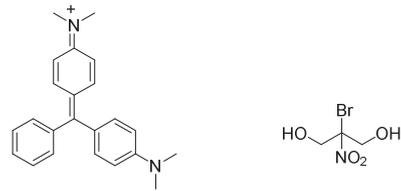
* E-mail: kawasaki.takashi.2x@kyoto-u.ac.jp

2. 抗卵菌物質の現状

2.1 抗ミズカビ剤について

ミズカビ病に対しては、薬剤による予防手段が主な方法であり、現在、この魚病に対する根本的な治療法は未だ見出されていない。薬剤を用いた予防法としては長い間、マラカイトグリーン（図 1）を用いた魚卵などの薬浴が行なわれていたが、げっ歯類を用いた発癌性試験によって発癌性が示唆されたため、現在は養殖場での食用魚に対する使用が法律によって制限されている⁶⁾。マラカイトグリーンの代替薬としてパイセス®が国内で承認されているミズカビ病の予防薬剤であり、欧州などでも使用実績がある⁷⁾。

パイセス®という薬剤はブロナポールという合成抗菌剤を主成分としている（図. 1）。ブロナポールは化粧品や洗顔料などの防腐剤として使用されてきた経緯があり、比較的人体への影響は少ないものである。ブロナポールの作用機構については完全に解明されていないが、細菌のチオール基を含む酵素の活性を阻害し、菌体の細胞膜を変成または破壊させることにより静菌的または殺菌的に作用すると考えられている⁷⁾。ブロナポールは幅広い活性を有し、ミズカビ病の原因微生物のみならず、バクテリアや水生の動植物プランクトンに対しても毒性を示すため、薬浴後の処理水の大量希釈が必要となっている。したがって、代替薬剤の開発が望まれている。



マラカイトグリーン ブロナポール

図 1: マラカイトグリーンおよびブロナポールの構造

2.2 抗ミズカビ作用を示すサブロルマイシンについて

放線菌 *Streptomyces* sp. TK08046 株が生産するサブロルマイシン A および E（図 2）は、アングサイクリン系抗生物質である。サブロルマイシン A および E は、サケやマスの養殖において被害をおよぼすミズカビに対して最少発育阻止濃度（MIC）がサブロルマイシン A は 0.0039 $\mu\text{g/ml}$ 、サブロルマイシン E は 0.0078 $\mu\text{g/ml}$ と非常に低濃度で抗ミズカビ活性を示すものである⁸⁾。市販のパイセスと比べても低濃度で作用することが分かる。また、サブロルマイシン E は、植物プランクトンに発育阻害活性を示さない上、動物プランクトンのミジンコに対しては、パイセスに比べて IC₅₀（半数阻害濃度）が高く、毒性が低い（表 1）。

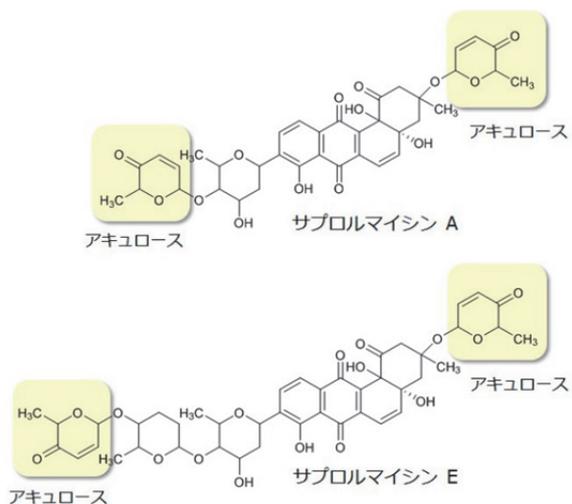


図 2: サブロルマイシン A および E の構造

表 1：サブロルマイシン A および E の生物活性

| 対象生物 | | | MIC (µg/mL) | | |
|----------|----|---|-------------|------------|-------|
| | | | サブロルマイシン A | サブロルマイシン E | パイセス® |
| 真核生物 | 卵菌 | <i>Saprolegnia parasitica</i> (ミズカビ) | 0.0039 | 0.0078 | 5.0 |
| 植物プランクトン | 緑藻 | <i>Chlorella kessleri</i> | >100 | >100 | 62.5 |
| | 藍藻 | <i>Synechocystis sp.</i> | >100 | >100 | 6.3 |
| 動物プランクトン | | <i>Daphnia pulex</i> (ミジンコ) | ND | 4.48※ | 3.69※ |

ND: Not determined

※ IC50 (µg/mL)

3. 放線菌 *Streptomyces sp.* TK08046 由来サブロルマイシン生合成遺伝子について

3.1 サプロルマイシン生合成遺伝子の取得と解析

放線菌 *Streptomyces sp.* TK08046 が生産するサブロルマイシン A~E は、アングサイクリン抗生物質^{9), 10)} に属しており、特にサブロルマイシン A および E は、抗卵菌物質として非常に低濃度で特異的に作用する⁸⁾。この特異的な作用に関しては、サブロルマイシン類の構造と活性の相関から希少糖であるアキュロースが2つ構造に必要なことが示唆されている(図2)。そこで、我々は、サブロルマイシン生合成においてアキュロースの糖転移に関与する遺伝子を解析と利用を目的に、サブロルマイシン生合成遺伝子クラスターの取得と解析を試みた。アングサイクリンの環化酵素と芳香化酵素をコードする遺伝子を含むコスミド DNA について高速シーケンス解析を行い、42 kb の配列を解析した結果、取得したコスミドにポリケチド合成遺伝子やデオキシ糖合成遺伝子などサブロルマイシン生合成遺伝子クラスターと推定される領域を含んでいた(図3)。そこで、取得した生合成遺伝子クラスターがサブロルマイシンの生合成に関与するかどうかを確かめるため、サブロルマイシン生合成遺伝子クラスターの全領域を含むと考えられるコスミドを *Streptomyces lividans* TK23 株(異種放線菌宿主)に導入し、形質転換体の代謝物を HPLC で分析した。その結果、形質転換体の代謝物において、サブロルマイシン A、C、E が検出された(図4)。さらに、LC-MS の分析においても、目的の分子イオンを確認することができた。したがって、形質転換体は、サブロルマイシン類を生産しており、取得した生合成遺伝子クラスターがサブロルマイシンの生合成遺伝子であることを証明した。また、遺伝子の相同性検索結果を基にサブロルマイシン類の生合成経路についても推定した(図5)¹¹⁾。

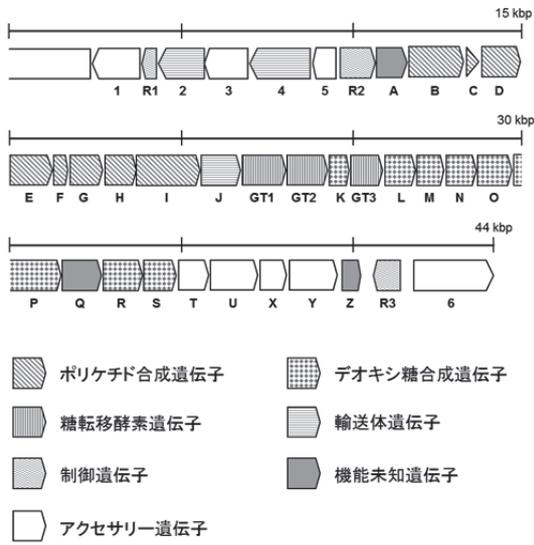
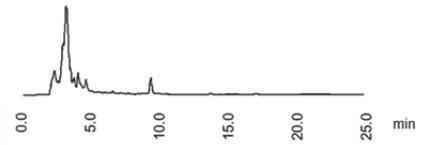


図3：サブロルマイシン生合成遺伝子クラスター

非遺伝子導入株



遺伝子導入株

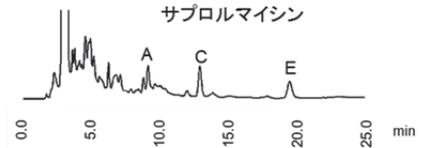


図4：サブロルマイシン生合成遺伝子群を導入した放線菌のHPLC分析. A: サブロルマイシン A. C: サブロルマイシン C. E: サブロルマイシン E.

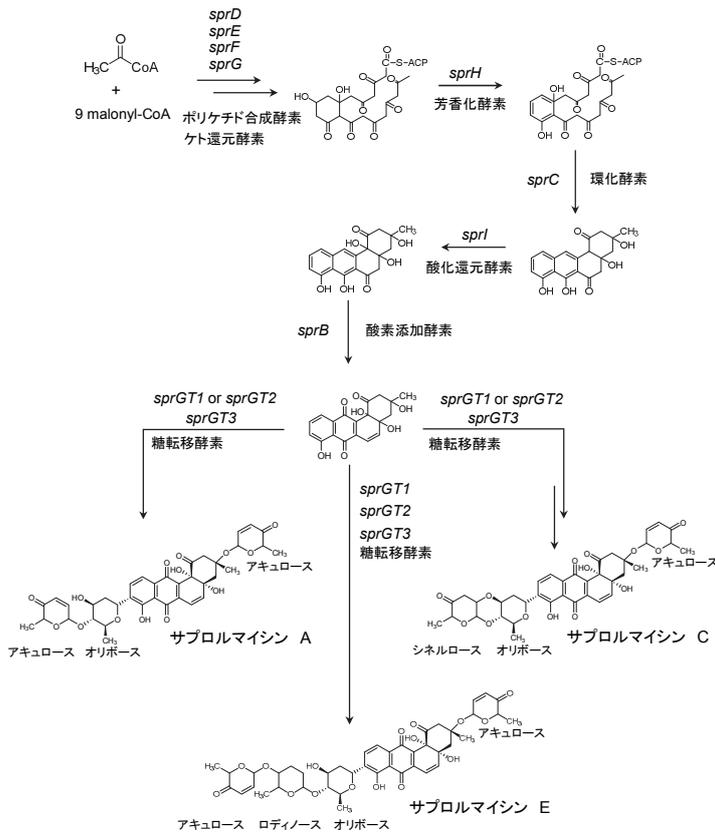


図5：サブロルマイシン推定生合成経路

4. おわりに

卵菌類の間には、陸上植物へ甚大な被害を与えるものや養殖業、動物や人に被害を与えるものがある。これは、水圏、植物圏、人間生活圏での質の向上においての妨げになっている。放線菌 *Streptomyces* sp. TK08046 株が生産するサブロルマイシン類は、卵菌に属するミズカビに対して生物活性を示す抗卵菌物質であるが、特にサブロルマイシン A および E は、ミズカビに対して特異的に作用する。この特異的な作用に関しては、サブロルマイシン類の構造と活性の相関から希少糖であるアキュロースが2つ構造に必要なことが示唆されている⁸⁾。そこで、サブロルマイシン生合成において希少糖のアキュロースの転移に関与する遺伝子を解析し、その遺伝子を利用することでアキュロースを付加した新たな特異的な抗卵菌物質の創製が可能になるかもしれない。

参考文献

- 1) Blum M, Boehler M, Randall E, Young V, Csukai M, Kraus S, Moulin F, Scalliet G, Avrova AO, Whisson SC, Fonne-Pfister R. Mandipropamid targets the cellulose synthase-like PiCesA3 to inhibit cell wall biosynthesis in the oomycete plant pathogen, *Phytophthora infestans*. *Molecular Plant Pathology*, 11(2), 227-243, 2010.
- 2) Sanju S, Thakur A, Siddappa S, Sreevathsa R, Srivastava N, Shukla P, Singh BP. Pathogen virulence of *Phytophthora infestans*: from gene to functional genomics, *Physiol Mol Biol Plants*, 19(2), 165-177, 2013.
- 3) 江草周三, 若林久嗣, 室賀清邦. 魚介類の感染症・寄生虫病, 恒星社厚生閣, 2004.
- 4) Shenep JL, English BK, Kaufman L, Pearson TA, Thompson JW, Kaufman RA, Frisch G, Rinaldi MG., Successful medical therapy for deeply invasive facial infection due to *Pythium insidiosum* in a child. *Clinical Infection Diseases*, 27, 1388-1393, 1998.
- 5) Krajaeun T, Sathapatayavongs B, Prachartam R, Nitiyanant P, Leelachaikul P, Wanachiwanawin W, Chairasert A, Assanasen P, Saipetch M, Mootsikapun P, Chetchotisakd P, Lekhakula A, Mitamun W, Kalnauwakul S, Supparatpinyo K, Chaiwarith R, Chiewchanvit S, Tananuvat N, Srisiri S, Suankratay C, Kulwichit W, Wongsaisuwan M, Somkaew S. Clinical and epidemiological analyses of human pythiosis in thailand. *Clinical Infection Diseases*, 43, 569-576, 2006.
- 6) 食品安全委員会. マラカイトグリーン及びロイコマラカイトグリーンの食品健康評価について. 2005.
- 7) 食品安全委員会. 孵化を目的としたニシン目魚類のプロノポールを有効成分とする魚卵用消毒剤(パイセス). 2013.
- 8) Nakagawa K, Hara C, Tokuyama S, Takada K, Imamura N., Saprolmycins A-E, new angucycline antibiotics active against *Saprolegnia parasitica*. *J. Antibiot.*, 65(2), 599-607, 2012.
- 9) Krohn, K., Rohr, J., Angucyclines: total syntheses, new structures, and biosynthetic studies of an emerging new class of antibiotics. *Top.Curr.Chem.*, 188, 127-195, 1997.
- 10) Rohr, J., Thiericke, R, Angucycline group antibiotics. *Nat. Prod. Rep.*, 9, 103-137, 1992.
- 11) Kawasaki T, Moriyama A, Nakagawa K, Imamura N. Cloning and identification of saprolmycin biosynthetic gene cluster from *Streptomyces* sp. TK08046. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 80(11), 2144-2150, 2016.

著者プロフィール



川崎 崇 (Takashi Kawasaki)

<略歴> 2005年富山県立大学大学院博士後期課程修了 博士(工学) / 同年東京理科大学薬学部製薬学科助教 / 2006年東京理科大学薬学部生命創薬科学科(旧製薬学科)助教 / 2010年京大生存圏研究所 産学官連携研究員 / 2011年神戸大学大学院農学研究科 学術推進研究員 / 2012年立命館大学薬学部薬学科 助教 / 2018年京大生存圏研究所 特任講師(ミッション専攻研究員) 現在に至る。<研究テーマと抱負>生合成遺伝子を用いた特異的な抗卵菌物質の創製を目指した研究。<趣味>バスケットボール。

木質系材料の塑性加工技術

金山 公三^{1*}

Plastic forming technologies for wood-based materials

Kozo Kanayama^{1*}

概要

資源枯渇対策ならびに地球温暖化対策への寄与が期待されている木質系材料の有効利用の促進への寄与が期待されている技術として、圧縮成形と最新の流動成形の概要についてまとめた。

1. はじめに

樹木は、根から吸い上げた水と空気中の二酸化炭素とを光合成により炭水化物に変換する。すなわち、人工的なエネルギーを使用することなく、太陽エネルギーによって二酸化炭素を固定しつつ成長する。従って、適切に「伐採」→「植林」→「育林」を繰り返すことにより、木材は再生産可能な資源・エネルギー源となり得るので、地球温暖化対策への貢献と同時に資源枯渇対策にも有効と考えられている。しかしながら我が国では、現在は木材利用量（需要）が減少し、供給側の管理（手入れ）が不十分となって荒れた山林が増加している。荒廃を防いで森林資源を良好に循環させるためには、木材資源の需要増大に寄与する有効利用技術の開発が急務である。一方、原油や金属などの埋蔵資源は、利用可能な状態にするためにはエネルギーを消費し、その必要エネルギー量が少なくて済む良質な資源量の減少が進んで枯渇も危惧されている。

工業材料として広く用いられている金属では、所要の形状や特性を得る方法として、鋳造、切削、溶接を始めとする接合、塑性加工、粉末冶金(PM)などの多くの加工が行われている。これらの加工では、要求される形状は勿論のこととして、様々な材料特性をも同時に実現することが一般的であり、現状での最適加工方法が選ばれている。すなわち、高寸法精度化、緻密・高強度化、あるいは逆のポーラスな軽量化など、多種多様な要求に応える加工技術の研究や実用化が進められている。一方、木質材料に関しても、古来より加工技術が蓄積されているが、塑性加工についての取り組み¹⁻³⁾は多くない。伝統技術を発展させてきた曲げ加工や、一時ブームともなった圧縮成形があるが形状付与の自由度は低い。

ここでは、木質系材料の代表的な塑性加工技術として、圧縮成形と流動成形について、その変形メカニズムならびに最新の成形技術について紹介する。

2. 塑性加工技術

図1は圧縮成形の一例で、切削加工無しで丸太から角材を作製したものである。木材に水を含ませた状態で加熱して軟化させ、プレスなどの外力で圧縮変形を行い、負荷したまま熟処理を行うと変形

2018年7月18日受理。

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所循環材料創成分野。

* E-mail: kozo-kanayama@rish.kyoto-u.ac.jp

状態で形状が固定される。木材の微細構造は、図2に示すように多くのストロー状細胞の連続体である。この細胞壁に存在しているリグニンは水や各種溶剤が存在していると100℃以下の温度でさえ軟化する。そこで、応力の増大とともに細胞壁が座屈変形して内腔等の空隙部分が押しつぶされる。従って、負荷する外力の大きさと方向との制御によって、押しつぶし量や位置を制御すると、円から正方形にというような二次元成形が可能となる。ここで敢えて二次元成形と限定したのは、次に示す流動成形では三次元成形も可能であり、形状付与の自由度の飛躍的な向上が実現されるためである。

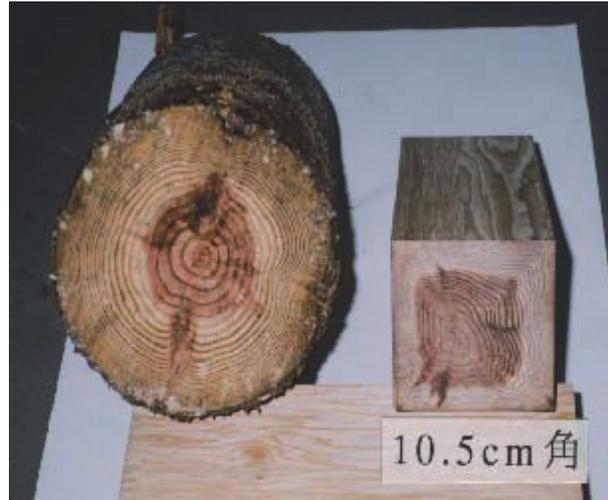


図1：スギの圧縮成形の例

図2の模式図において、細胞と細胞との中間の細胞間層ではリグニンの比率が大きく、上述のようにリグニンが軟化すると、所要の応力が作用すれば細胞間層で「せん断すべり」が生じる。そして細胞相互の位置関係が変化して、その組み合わせによって材料全体としては大変形が生じる。また、接着剤を使用せずとも木材の自己接着能力の発現によって成形体の形状保持が可能となることも、木質粉末成形に関する検討⁴⁾によって示されている。このように細胞がはく離、移動、再接合して大変形する現象は、細胞どうしの位置関係が変わらない圧縮成形³⁾とは全く異なるものである。特筆すべきは、図2ではRあるいはT方向への移動を模式的に示しているが、応力状態によってはL方向（細胞の長手方向）への移動も生じるので、二次元ではなく三次元成形が可能なことである。

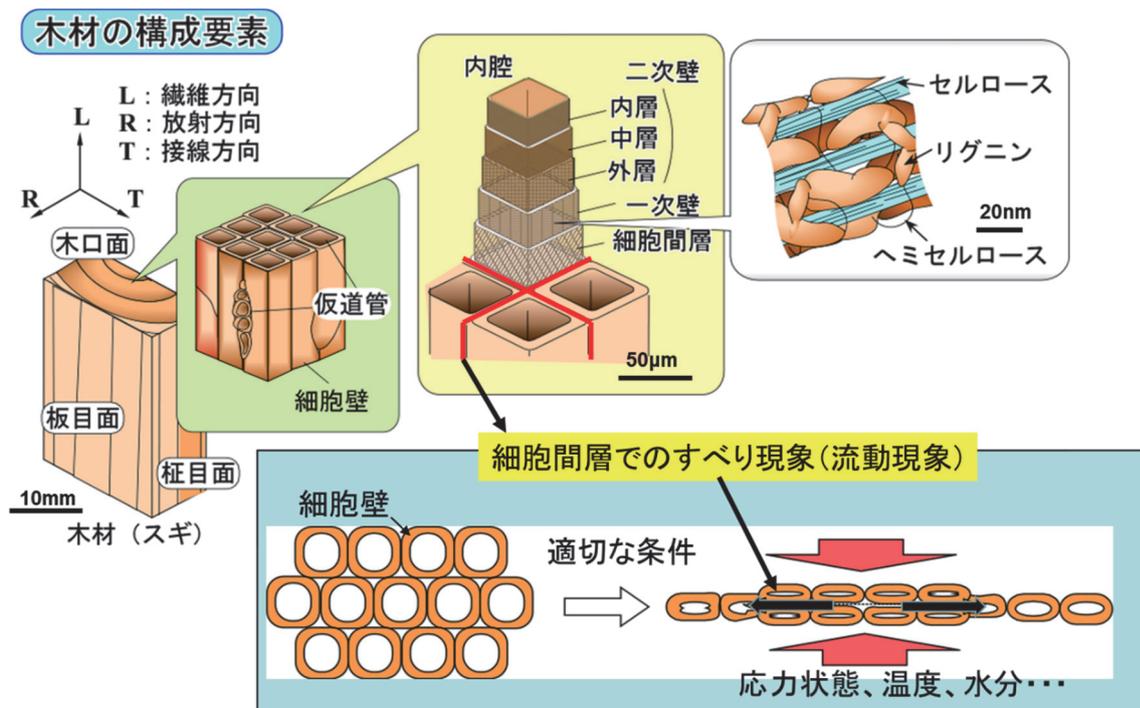


図2：木材の構造と細胞間層におけるせん断すべり現象の模式図

図3に成形例を示す。自由度の高い流動性を発現することを利用したもので、木材の細胞を破壊すること無しに成形できる。これらは、金型を用いて塊状の木材をプレス成形したもので、様々な形状の成形体が短時間で得られる。また、素材の天然由来の木目は成形時の流動によって変化するが、これまでの工業材料にはない独特な意匠性を持つ成形体得られる。

このような流動性は、細胞間層でのく離によって生じていることが図4の拡大画像で確認できる。これは図5に示すように、バルク木材に適切な温度と圧力を作用させて流動現象を生じさせてキャピラリーを通過させる途中で停止し、キャピラリーへの流入部分の断面を走査型電子顕



図3：バルク木材からの流動成形の例



図4：流動部分のSEM写真

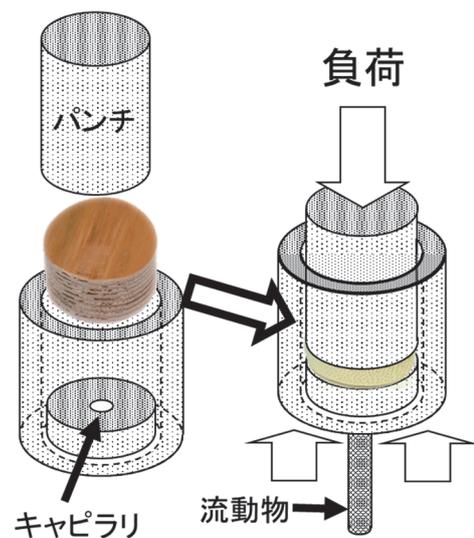


図5：キャピラリーによる流動の概要

微鏡(SEM)観察したものである。ここで細胞どうしが一旦はく離しているが、キャピラリー通過後にキャビティーに充填されて圧縮応力が作用すると図6に示すように接着され、一例として前述の図3のギヤ形状が成形される。この例では添加物は使用していない(木材中に結合水は存在している)。

他の加工例として図7に後方押し出し加工を示す。シリンダ内に円盤状の木材を入れ、適当な温度に保持して段付きパンチで圧縮すると、木材が流動してパンチ(細い径の部分)とシリンダの隙間を上方に向かってせり上がって来る。すなわち、パンチの加圧方向とは逆方向に材料が押し出される「後方押し出し加工」である。パンチのアゴ(段付き部分)にまで材料が到達すると、それよりも上には移動出来ないので、成形体には圧縮応力が作用して細胞どうしの自己接着が促進されて成形が完了する。この現象を利用すると、図8に示すようにスギとタケを同時に加工して、かつ結合することも出来る。また、さらに素材を増やして、松、竹、梅の同時成形も可能である。ここで重要なのは、まず細胞が圧縮されて細胞内腔が押しつぶされ、次に細胞同士がはく離して相互位置を変化させ、最終的に隣接した細胞と再接合することである。この現象は結合水の存在のみでも生じるが、成形中の変形抵抗ならびに成形物の各種特性を積極的に制御するためには、成形前に各種樹脂を木材に含浸することが効果的である。添加する樹脂の種類や、その含浸方法は現在検討を継続している。

さらなる利点として、製材加工などで発生して有効利用が難しい端材、小径木などの小さい素材も成形可能であるため、資源の有効利用にもつながる。すなわち、従来の圧縮成形では製品の大きさは素材以上にならないが、流動成形は細胞間でのすべり現象により細胞が移動するので、大変形による

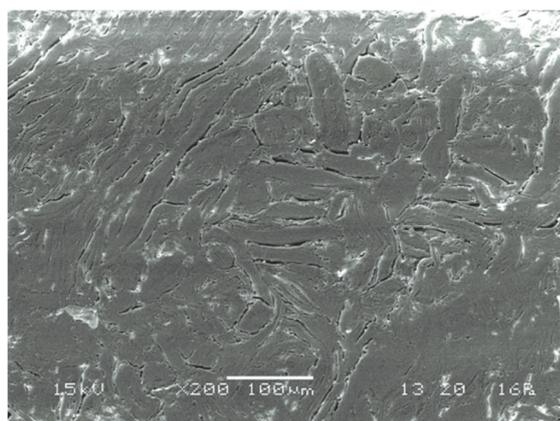


図6：流動成形体表面のSEM写真

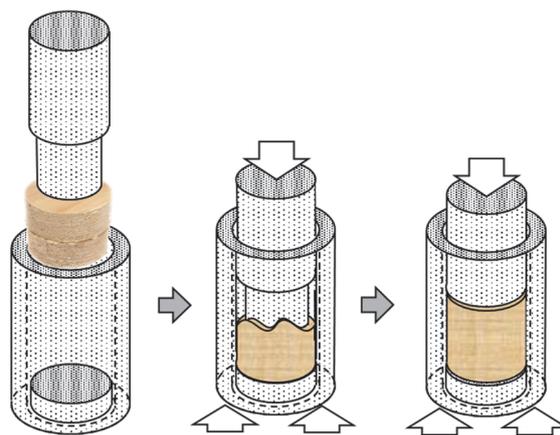


図7：後方押し出し加工の概要

木にタケを接ぐ



松竹梅



図8：成形と接合の同時加工例

断面積の拡大が可能である。その応用例として、図3に示した薄肉コーン形状（スピーカー振動板）がある。表面積の拡大率は400%以上、厚さは約0.2mm以下にまで加工している。ここで、細胞の繊維を残したまま成形できるので、振動板に要求される音響特性（高弾性率等）も優れている⁵⁾。

利用拡大方法として、フェノール樹脂やメラミン樹脂のような熱硬化樹脂を含浸した木材を素材とする代わりに、アクリル樹脂等の熱可塑性樹脂を添加剤として用いると、図9に示すようにリサイクル性の向上や、工程を分割した多段階加工による複雑形状の成形も可能となり^{6,7)}、今後の用途の広がりが期待される。

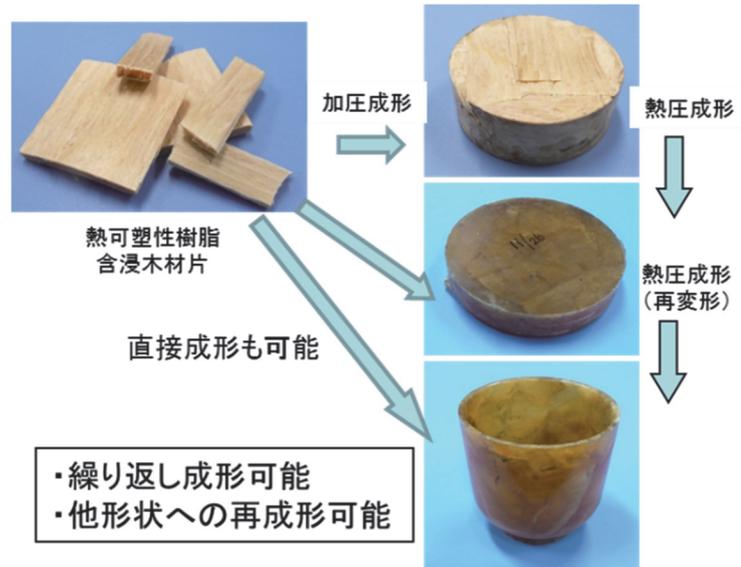


図9：繰返し流動成形の例

3. おわりに

ここでは、資源枯渇対策、地球温暖化対策において、光合成に基づく再生産が可能な木質系材料の有望性について述べ、その有効利用方法として、世界初の流動成形技術の概要を紹介した。これは、木材本来の組織構造を活かした加工技術であり、樹脂材料や金属材料の分野で開発されてきた各種の変形加工技術を応用することで、成形加工の高度化が期待される。しかしながら、研究開発は緒に就いたばかりであり、金属材料の合金設計に相当する「樹脂含浸などによる素材調整」だけでも、解決すべき課題が山積している。そして、この技術を発展させれば、リサイクル性、強度特性、断熱特性、寸法安定性などが優れた成形体の製造が可能となり、木質系材料の利用範囲が拡大する。

また、本稿では触れなかったが、木質系材料の変形固有の問題として金型の表面処理、摩擦制御や金型構造の最適化なども重要である。すなわち、素材制御と加工プロセスとの両輪を組み合わせた研究開発が重要である。

参考文献

- 1) たとえば竹内和敏, 能木雅也, 今西祐志, 古田裕三, 金山公三, 木質薄板を用いたトレイ成形技術, 日本塑性加工学会誌, **44**, 447-451, 2003.
- 2) たとえば井上雅文, 則元京, 大塚康史, 山田正, 軟質針葉樹材の表面層圧密化処理(第1報)木材の表面層を選択的に圧密化するための新しい技術について, 日本木材学会誌, **36**, 969-975, 1990.
- 3) たとえば小林好紀, 木材の熱可塑性を応用した丸太の整形と形状固定-1-, 木材工業, **48**, 261-264, 1993.
- 4) 金山公三, 今西祐志, ファインウッド創成の試み, Cellulose communications, **9**, 81-85, 2002.
- 5) 岩脇一智, 山田満雄, 山田哲也, 関 雅子, 三木恒久, 重松一典, 金山公三, タケ・木材の流動成形によるスピーカー振動板の開発, 日本木材学会中部支部大会講演要旨集, 80-81, 2013.
- 6) 杉元宏行, 三木恒久, 重松一典, 金山公三, 熱可塑性樹脂を含浸した木質材料の流動成形, 第63回木材学会大会講演要旨集, C29-03-0900, 2013.
- 7) 金山公三, 木質系材料の流動現象を用いた成形加工, Cellulose communications, **21**, 172-176, 2014.

著者プロフィール



金山 公三 (Kozo Kanayama)

＜略歴＞ 1980 年京都工芸繊維大学大学院生産機械工学専攻修士課程修了／同年通商産業省工業技術院研究官／1987 年同主任研究官／1991 年大阪大学博士（工学）／2001 年（独）産業技術総合研究所（組織改革）研究グループ長／2015 年京大大学生存圏研究所教授、現在に至る。＜研究テーマと抱負＞木質系材料の流動成形。微細構造設計による材料物性の制御。＜趣味＞温泉巡り。お笑い鑑賞など。

科学衛星における電磁適合性

小嶋 浩嗣^{1*}

Electromagnetic Compatibility in science satellites

Hirotsugu Kojima^{1*}

概要

電磁適合性(EMC: Electromagnetic Compatibility)の考え方は電子機器をある環境下で、その性能を保証し動作させるために必須の考え方である。近年の地上での電気製品ではこの考え方が確立されているが、科学衛星においても同様に EMC 基準の導入が行われている。特に、宇宙プラズマ環境を探索する科学衛星には微弱な電波を観測するプラズマ波動観測器や微弱な磁場の観測器が搭載されており、そこから要求される EMC 基準は非常に厳しいものになる。本稿ではプラズマ波動観測器から要請される EMC 基準とその具体的な内容について述べ、科学衛星における EMC がどのように取り組まれているかを紹介する。

1. はじめに

電磁適合性 (EMC: Electromagnetic Compatibility、以後、EMC と呼ぶ)は、電氣的に動作するすべての機器の性能をその動作環境下で維持させるために重要な考え方である。回路の低電圧化、クロックの高周波化などにより、自分が出した電気ノイズが他の機器の性能に影響を与えてしまう、あるいは、自分の機器が他人からのノイズで誤動作してしまう、など、機器の安定した動作や性能維持のためには、それ単独の機器のことだけを考えればよいという考え方は通用しなくなっている。「それぞれの電子機器が性能を落とすことなく動作できることができる環境」を実現させるための考え方が EMC である。よく似たターミノロジーで、電磁干渉(EMI: Electromagnetic Interference)があるが、こちらは他の機器に対して電磁ノイズを出すなどして干渉を起こす事象のことである。一方、EMC はそれを包含した上で、ノイズを出す側、ノイズを受ける側が、それぞれの性能を維持するためにどのような条件を満たすべきかを規定する。従って、EMC は、放射(emission)と耐性/感受性(immunity/susceptibility)というカテゴリーに大きく分けられる。Emission は相手の機器の性能を劣化させる電磁ノイズや磁場を「出す」ことに対する規定であり、immunity は、どれほどの電磁ノイズを受けても性能が劣化しないようになっているか、というノイズを受ける側の規定である。この両方の観点から EMC は構成されている。

EMC は一般的な電気製品を含め、電子機器動作に重要な考え方であるが、宇宙における人工衛星においてもそれが電子機器の集合体である限り、同様に EMC の考え方が導入されている^{1,2)}。特に宇宙で科学的な観測を行う科学衛星では、地上における通常の電子機器や実用衛星に対する EMC よりもより多くの項目、より厳しい条件が課せられることが多い。本稿では科学衛星、特に厳しい条件が課される宇宙プラズマ環境探査用科学衛星における EMC の現状について、具体例をあげながら解説

2018年7月5日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所宇宙圏航行システム工学分野.

* E-mail: kojima.hirotsugu.6m@kyoto-u.ac.jp



図 1: EMC 規格のイメージ図. ノイズを出す側、受ける側にそれぞれ規格が存在する.

をする。

2. 科学衛星における EMC 構成

2.1 科学衛星と EMC 項目

人工衛星の構成は、大きく分けるとバスシステムとペイロードに分けられる。バスシステムはどの衛星でも必要となる基本コンポーネント、通信、電源、エンジン等のシステム部であり、ペイロードは、その衛星の目的を達成するために必要となる固有の機器の集合である。EMC についても、これらバスシステム観点からの EMC とペイロードの観点による EMC がある。バスシステムの EMC 条件は、衛星毎に大きく変わることがないが、ペイロードからの EMC 要件はその観測器の内容によって大きく変わる。科学衛星における EMC の要件項目を整理すると下記のようなになる。図 1 に各規格とノイズ源、および影響を受ける機器との関係のイメージを示す。

1) Immunity/susceptibility

ノイズを受ける側の規格である。近年は immunity と呼ばれることが多い。

1-1 Conducted immunity(susceptibility) (CI(CS))

計装線(主に電源ライン)を経由してはいつてくるノイズに対して耐える必要のある信号レベル条件。

1-2 Radiated immunity(susceptibility)(electric field) (RI(RS))

電波(電界)として放射されたノイズにさらされても耐える必要のある信号レベル。

1-3 Radiated immunity(susceptibility)(magnetic field) (RI(RS))

電波(磁界)として放射されたノイズにさらされても耐える必要のある信号レベル。

2) Emission

2-1 Conducted emission (CE)

計装線(主に電源ライン)に対して出力されるノイズの許容信号レベル。

2-2 Radiated emission (electric field) (RE)

電波(電界)として放射されるノイズの許容信号レベル。

2-3 Radiated emission (magnetic field) (RE)

電波(磁界)として放射されるノイズの許容信号レベル。

これらは、一般的な電気製品でも求められる EMC 項目であるが、科学衛星ではこれ以外にも例えば、次のような要件も含まれる。

3) DC magnetic field

帯磁状態、あるいは、直流電流による発生磁場に対する要件である。宇宙空間における微弱な直流磁場を観測する科学衛星では、この帯磁および、直流電流ループ形成からの磁場放射について厳しい要件が課される。

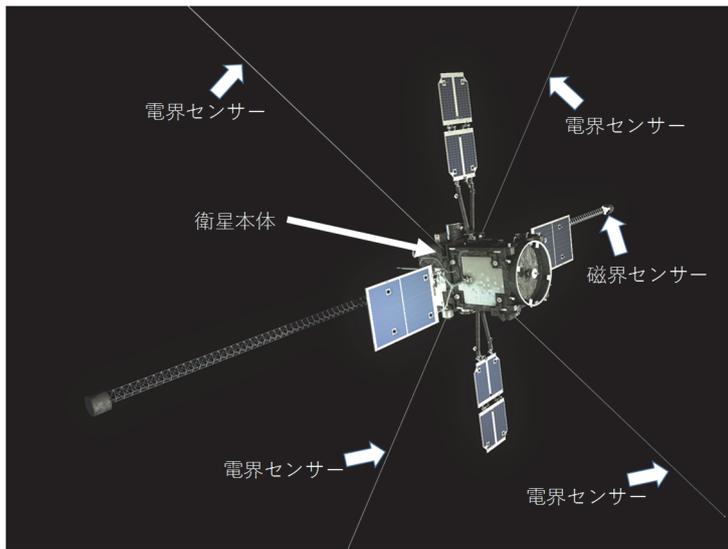


図 2: Arase 衛星とプラズマ波動観測用センサー(JAXA ERG プロジェクトチーム提供).

4) 帯電

人工衛星は宇宙空間において宇宙プラズマの影響で帯電をする。その帯電状況により放電などの危険性につながるだけでなく、科学衛星に搭載した荷電粒子(イオン・電子)の観測装置や電界観測装置に影響がでる。この帯電を制御するための衛星表面や曝露部の表面抵抗などの規定を行う。

2.2 科学衛星 EMC 基準の例

科学衛星に搭載される各機器が満たすべき EMC 基準レベルは、衛星毎に具体的に決定される。特にペイロードからの要請で決められる EMC 基準は衛

星毎に大きく異なる。ここでは、特に厳しい EMC 基準となる宇宙プラズマ環境探査用の科学衛星におけるその EMC 基準について述べる。

2.2.1 科学衛星 Arase とプラズマ波動観測

我が国の科学衛星 Arase(打ち上げ前のコード名は、ERG)は、地球放射線帯を中心とした地球周辺のプラズマ環境を探査する衛星で、これには微弱な磁場を観測する装置やプラズマ波動を観測する装置が搭載されている。ここでは、このプラズマ波動観測装置から要請される Emission としてのノイズレベルについて紹介する。図 2 は、Arase 衛星の外観図である。プラズマ波動を観測する装置 PWE(Plasma Wave Experiment)は二種類のセンサーによってプラズマ波動を観測する³⁾。衛星本体から伸びる計 4 本の電界センサーは、2 本ずつセットで用いるいわゆるダイポールタイプのセンサーである⁴⁾。プラズマ波動の電界変動成分をとらえるこの電界センサーは、2 本ずつの組み合わせで 30m の長さのダイポールセンサーとなる。一方、磁界成分を捉える磁界センサーは、サーチコイルを用いている⁵⁾。特に磁界成分は微弱なため衛星からのノイズを受けにくくするため、衛星本体からマストと呼ばれる 5m の伸展物の先端に搭載されている。いずれもこれらセンサーは衛星本体の外部に設置されており宇宙空間に直接曝露している形式となる。一方、PWE に対してノイズの影響を与える側の機器は、その大部分が、衛星本体の内部におさまられている。しかし、プラズマ粒子を直接捉えることを目的としたセンサーなどは、衛星本体側面からセンサーを露出させて宇宙空間に曝露した形で搭載されている。

2.2.2 プラズマ波動観測器からの EMC 基準の例

図 3 から図 5 は、Arase 衛星プラズマ波動観測器から要請された EMC 基準の例である^{2), 3)}。このようにプラズマ波動や磁場の観測を行う科学衛星では特に厳しい EMC 基準が設けられる。Arase 衛星に搭載される全機器は、この基準値以下のノイズ emission レベルにする必要があった。

図 3 は、CE(Conducted emission)に関する EMC 基準値である。伝導性ノイズであるのでワイヤハーネス経路で伝搬するノイズに対する基準である。Arase 衛星では基本的に電源ライン上での基準とした。カーブが 2 本あるのは、Normal mode noise に対する基準と Common mode noise に対する基準を意味している。Normal mode noise と Common mode noise に対しては後述する。この CE によるノイズは、放射されている計装や本来流れるはずのないノイズ電流が衛星本体パネルに流れてしまってい

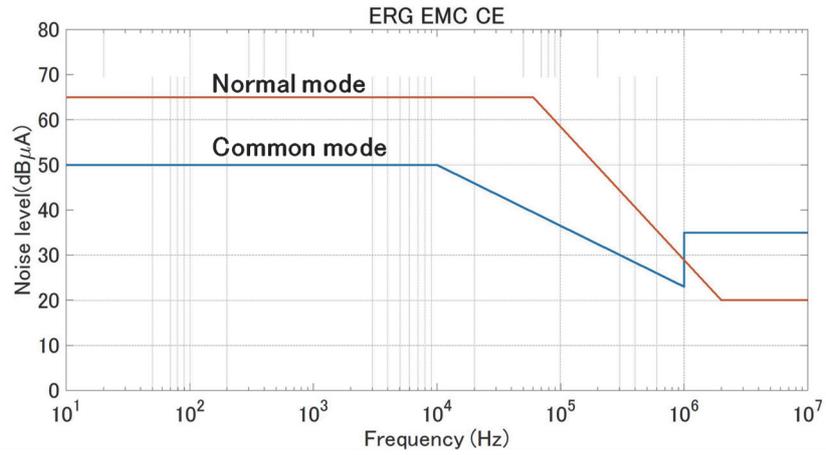


図 3: Arase 衛星における CE 基準値^{2), 3)}.

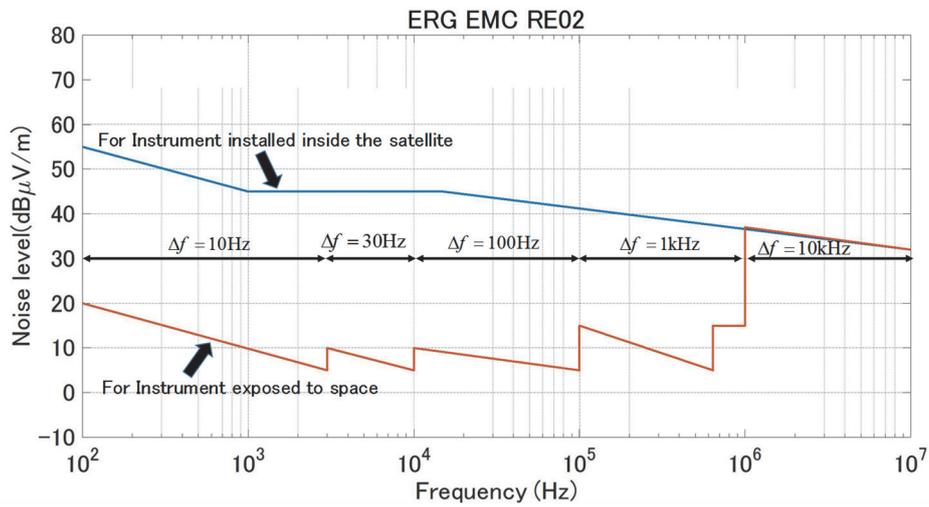


図 4: Arase 衛星における RE02(電界)基準値^{2), 3)}.

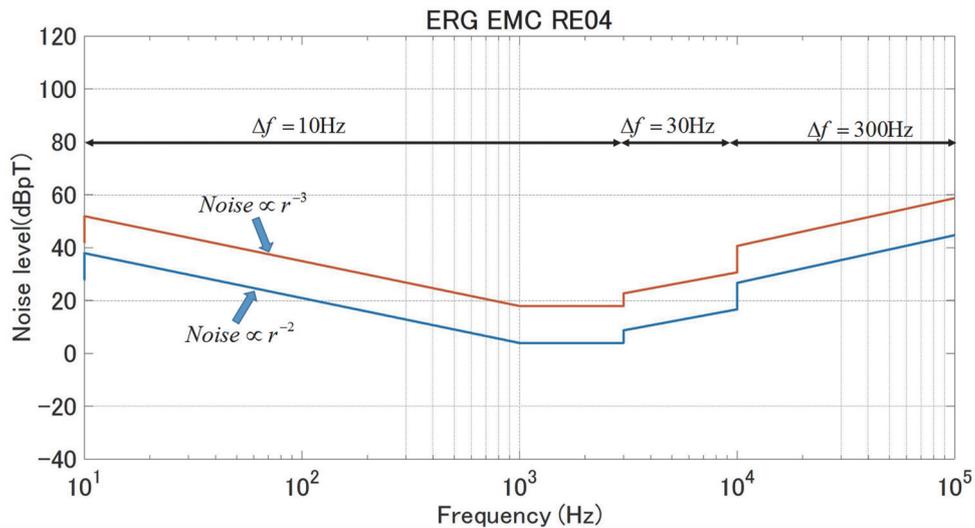


図 5: Arase 衛星における RE04(磁界)基準値^{2), 3)}.

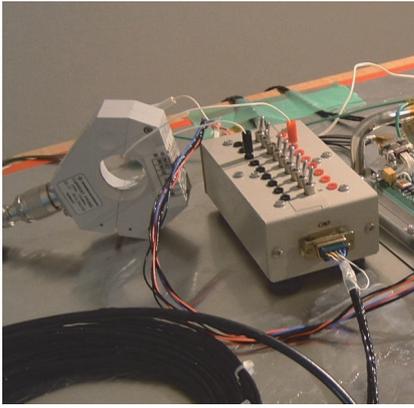


図 6: 電流プローブによる CE 計測.

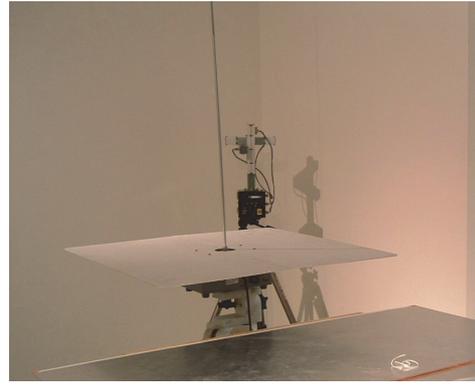


図 7: 電界ノイズ計測用モノポールアンテナ(手前)と磁場ノイズ計測用サーチコイル(奥).

る場合など、その結果が電界や磁界ノイズの放射へと変換されてしまうことが懸念される。特に、衛星本体パネルにノイズ電流が流れると、その衛星本体のインピーダンスによって電界放射へと変換され結果的に電界ノイズとなる。衛星本体のインピーダンスは周波数が高くなると大きくなるため(インダクタンス成分による)、電流ノイズはより効率よく電界ノイズへと変換される。Arase 衛星では模擬構体を使って衛星本体のパネルインピーダンスの計測が繰り返し行われ、その結果を踏まえて図3の基準値が設定された。逆にいうと、図3の電流ノイズ基準値を満たすことができない機器であっても、図4や図5の電界ノイズ、磁界ノイズの基準を満足できていればよいとした。実際の評価にあたって図3のノイズ基準は、他の機器を誤動作させるような巨大なノイズを除けば(実際はそのようなノイズはなかった)、満たされていないとしても電界ノイズ、磁界ノイズとして基準を満足できていればよいという考え方である。

図4は機器から1mの距離で規定した電界ノイズに対する基準である。電界ノイズの基準値は実際にプラズマ波動観測器が観測を行う電界値との関係で決まっていることもあり、プラズマ波動観測器の観測バンド幅に従って周波数バンド毎にバンド幅を指定した形で基準値が決められている。基準値が2本あるのは、その機器が宇宙空間に曝露しているものか、それとも衛星本体に収められているものか、による違いである。衛星本体に収められている機器から出る電界ノイズは衛星本体によるシールド効果が期待できるため電界ノイズの基準値が大きめに設定されている。衛星によるシールド効果は実験的に確認を行い、おおむね30dB程度を期待して基準を決めているが、1MHz以上ではシールド効果があまり期待できなかったため、二つの基準値は同じ値をとっている。

図5は機器から1mの距離で規定した磁界ノイズに対する基準である。磁界ノイズの基準値は磁界センサーであるサーチコイルのノイズレベルから換算されて規定されている。電界のときと同じようにプラズマ波動観測器の仕様に合わせてバンド幅で基準値は周波数バンド毎に決められている。この磁界ノイズ基準値においても二種類が規定されているが、これはノイズからの距離特性によって決定されている。磁場ノイズは基本的に電流ループからのノイズであり、その電流ループの大きさと計測場所との距離によって、ノイズレベルが距離の2乗で変化するか3乗で変化するかで決まることになる。この距離特性を実際のセンサーとの距離である5mのマスト分に反映させたことを想定して2本の基準値が規定された。

2.3 科学衛星 EMC 計測

EMC 計測は外部電磁環境からの影響を極力軽減して行うために電磁シールドルームで行われる(帯磁を含めた計測を行うため実際には「磁気シールドルーム」で行われることが多い)。計測は機器単体で行う単体機器 EMC と、衛星全体を磁気シールドルームに入れて行うシステム EMC の二種類に分け

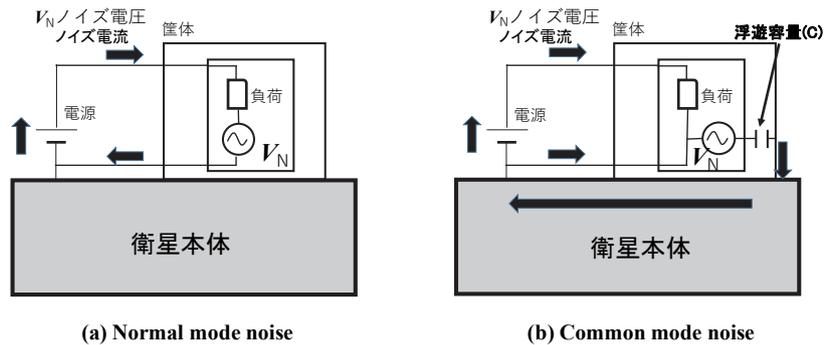


図 8: Normal mode noise と Common mode noise.

られる。単体 EMC は搭載する機器毎に行うため、Arase 衛星では合計数 10 回以上の EMC 計測を行った。実際の計測は電流ノイズに対しては電流プローブ(図 6)で、図 4、図 5 で示した 10MHz 程度以下の電界・磁界低周波数帯では、電界ノイズにはモノポールアンテナ、磁場ノイズにはサーチコイルをセンサーとして計測を行うことが多い(図 7)。

3. Common mode noise

ノイズ源とその発生メカニズムは多岐にわたり、なかには試験をしても発生メカニズムがつかない場合もある。そのようなノイズの中で最もやっかいなのが Common mode noise である。Common mode noise は伝導性のノイズであるが、その結果として電界や磁界のノイズを放射させるため、放射ノイズとしての問題も発生させてしまう。伝導性ノイズは大きく Normal mode noise と Common mode noise に分けられる。図 8 はその仕組みの違いを示している。ここでは、発生するノイズ電圧を V_N として表している。(a)の Normal mode noise では発生したノイズ電圧が電源ラインに直列に入っておりそのノイズ電流は電源ラインの hot と return でバランスがとれており計装がツイストペアシールド線などになっていれば電界や磁界のノイズとして放射するレベルをある程度抑えることができる。一方、(b)の Common mode noise では、ノイズ電流が衛星本体を流れてしまう上に電源ラインでノイズ電流の向きが hot と return で同じ向きであるためアンバランスになっており、電源ラインの計装あるいは衛星本体から電界ノイズや磁界ノイズを放射してしまう。Common mode noise でやっかいなのは、図 8(b)でわかるようにその発生メカニズムが浮遊容量などの回路図に現れない部分に深く関係していることである。例えば、衛星搭載機器でも FPGA や CPU の利用は当たり前になっているが、これらのデジタル回路のクロック周波数は高くなる一方であり、その周波数が高くなるがために浮遊容量の影響を受けやすくなり、Common mode noise 発生のお機会が大変多くなっている。

Common mode noise を発生させる代表的なアナログ回路としては、DC-DC コンバーターがある。非絶縁型の DC-DC コンバーターではノイズが多くなるのは当然のことであるが、絶縁型の DC-DC コンバーターでも、実際にスイッチングを行っている 1 次側と 2 次側のトランス内での浮遊容量によるカップリングによってそのスイッチング周波数が Common mode noise となってしまう、衛星構体のインピーダンスで電界に変換されて放射されてしまうことが多い。

図 9 に実際に計測された Common mode noise の例を示す。BepiColombo という日欧共同の水星探査機に搭載される機器に対する EMC 計測で測定されたものである。図 9(a)に計測時の結線などを示す。被測定機器をシールドルーム内の導電性台座(机)の上に設置し、シールドルーム外に衛星電源を配置してある。そして被測定回路と衛星電源はツイストペアシールドで接続され、このシールドを含めた計装を一括して current probe で計測した。そして、機器を full operation の状態にして計測した電流変動の周波数スペクトルが、図 9(b)である。図 9(b)は current probe の出力を直接スペクトルアナライザ

で解析したものである。この図 9(b)の 100kHz 以上に出現しているスペクトルが common mode noise である(10Hz から 100kHz あたりまで下がってきているスペクトルは計測系のノイズレベルである)。Current probe で計測した電源ラインが、hot 側と return 側で等しいノイズ電流が逆向きに流れていれば、このようなスペクトルは現れない。図 9(a)の矢印で書いてあるように、ノイズ電流は hot 側も return 側も電子回路に流れ込む電流となるために、current probe に信号として現れているのである。これが common mode noise である。ノイズ電流の波形は回路の動作によって複雑に歪むため、周波数解析をすると源振に近い周波数とその高調波成分が現れ、結果的に広帯域にノイズが広がる。

では、どうしてノイズ電流のアンバランスが発生するかというと、この場合も図 8(b)で示したような浮遊容量がデジタル回路とシャーシの間に発生して、ノイズ電流の一部がシャーシから導電性台座に流れ込んでいるからである。図 10(a)では、そのノイズ電流の様子を示している。電子回路とシャーシ間で発生している浮遊容量により、ノイズ電流の一部がシャーシや導電性台座に流れ込んでしまい、その結果、電源の計装の hot 側と return 側に同相のノイズ電流が流れる。

この状態で図 10(b)のように電源ケーブルのシールド線を導電性台座と結線すると、図 9(b)の 100kHz 以上のノイズが著しく改善されることがわかっている。これは、導電性台座とシールドを結線することにより導電性台座を迂回していたノイズ電流が、シールド線に戻って流れるようになり、シールド線を含めて一括して測定している Current probe からは電流のバランスがとれたようにみえるからである。Common mode noise が発生していたことはこの事実からも明らかである。

図 9、10 では浮遊容量は 1 つのコンデンサで代表して示しているだけであるが、実際には何カ所でもカップリングが想定される。ここで紹介している機器の場合は、デジタル部とその基板を支えるフレームの位置が近かったためそこで、浮遊容量が発生して電流が迂回してしまったと考えられた。そしてこの時に見積もられた浮遊容量は、たかだか 2pF 程度であった。

周波数が高いとたかだか数 pF の容量で common mode noise が発生してしまう。すでに述べてきているように、common mode noise は電流として計装や衛星本体を流れる。その際、そのインピーダンスに従って電界に変換され電界ノイズとなって放射してしまう。また、common mode noise 電流が電流ループを形成するとそこから磁場ノイズとなって放射してしまう。特に電界ノイズに対しての影響は大きく、common mode noise 電流が衛星の本体のなかを流れてしまうと、衛星全体からノイズを放射してしまい、プラズマ波動観測器の観測に著しい影響を与えてしまう。

Common mode noise の発生はバラエティに富んでおり、その回路や装置の configuration によって大きく変化するので、common mode noise を抑える決定打というのはなかなかみつからないが、common mode filter の挿入が典型的なものであろう。これもうまく設計しないと軽減には結びつかないことが多い。一旦、出てしまった common mode noise の影響をできるだけ少なくするには、その迂回してし

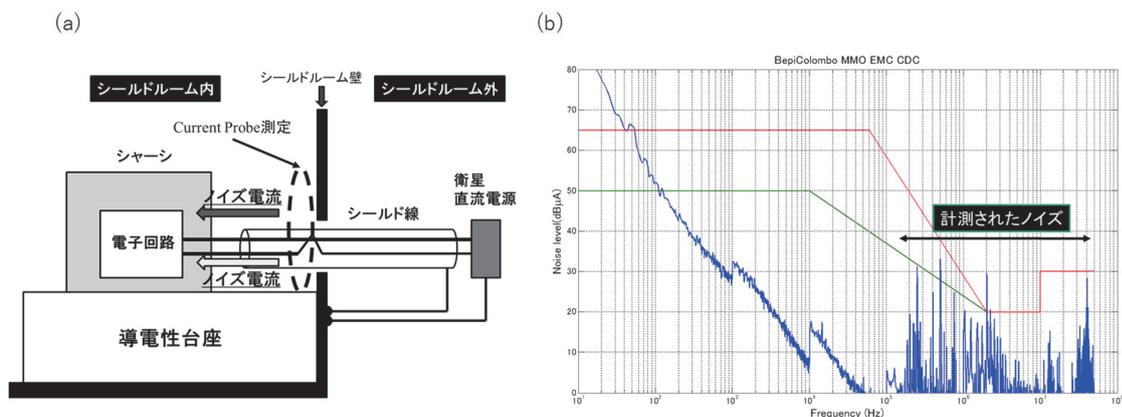


図 9: (a) CE 計測 configuration の例, (b) Common mode noise の例.

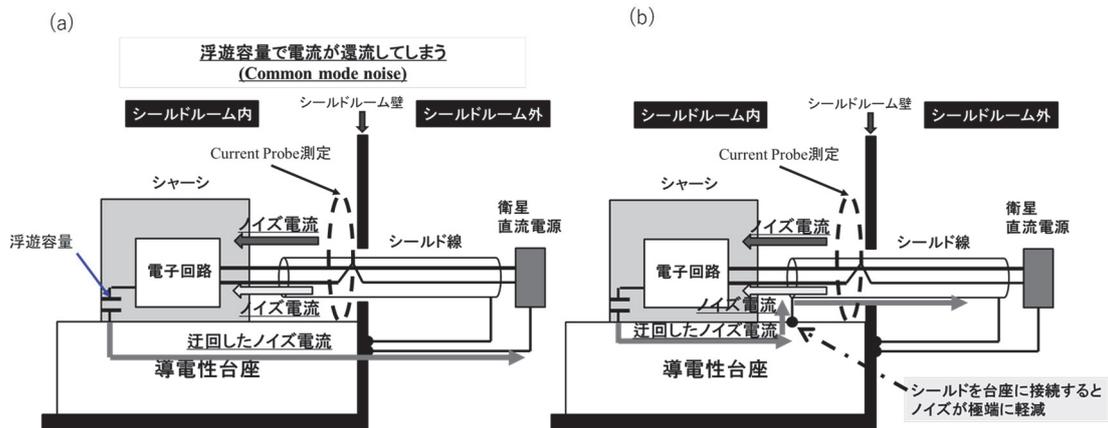


図 10: (a) Common mode noise に対する電流の環流. (b)シールド線を台座と接続するとノイズ軽減.

まっている電流をできるだけ本来のルートに近いところにもどしてやることである。例えば、図 10(b)では、導電性台座をシールドと接続して電源計装に迂回してしまったノイズ電流をもどし、シールド込みでバランスがとれているようにして noise の軽減をはかることができている。

4. 終わりに

科学衛星、特に、本稿で紹介した宇宙電磁環境を探索する科学衛星では EMC 基準とそれを満足する搭載機器を実現することは、衛星そのものの成否に大きく関わってくる。そのため、EMC 専用のボードを設立し、そこに所属するボードメンバーが各機器の EMC 試験を順次行っていき、管理表に基づきその実施状況把握と問題点の解決指針をたてていく。問題点は基本的に各機器単体での EMC 試験の中でみつけ対策していくが、衛星全体として組んだ後に行うシステム EMC 試験においても問題点が明らかになることも多い。EMC 試験は一つの機器に対して 1 日~2 日を要し、全部で数 10 回にもおよぶ回数の試験を実施する。その時間と人的資源の投入量は膨大なものであるが、それほど EMC は重要であるということである。EMC についてまとめると膨大な量のデータとノイズ発生メカニズムの整理が必要となるが、本稿では Common mode noise の例を具体的に示した。通常、表にあまり現れない EMC 対策であるが、科学衛星においてもこのような地道な試験や解析が行われているということを紹介した。

参考文献

- 1) JAXA, BepiColombo Mercury Magnetospheric Orbiter(MMO) Component Electromagnetic Compatibility Design Criteria (JX-MMO-C0005-1), 2010.
- 2) JAXA. ジオスペース探査衛星(ERG) Component Electromagnetic Compatibility Design Criteria(SPB-002), 2013.
- 3) Kasahara, Y., Y. Kasaba, H. Kojima, S. Yagitani, K. Ishisaka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Ozaki, S. Matsuda, T. Imachi, Y. Miyoshi, M. Hikishima, Y. Katoh, M. Ota, M. Shoji, A. Matsuoka, and I. Shinohara (2018), The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) Satellite, Earth, Planets and Space, doi : 10.1186/s40623-018-0842-4.
- 4) Kasaba, Y., K. Ishisaka, Y. Kasahara, T. Imachi, S. Yagitani, H. Kojima, S. Matsuda, M. Shoji, S. Kurita, T. Hori, A. Shinbori, M. Teramoto, Y. Miyoshi, T. Nakagawa, N. Takahashi, Y. Nishimura, A. Matsuoka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, and R. Nomura (2017), Wire Probe Antenna (WPT) and Electric Field Detector (EFD) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard Arase: Specifications and initial evaluation results, Earth, Planets and Space, 69:174, doi: 10.1186/s40623-017-0760-x.

- 5) Ozaki, M., S. Yagitani, Y. Kasahara, H. Kojima, Y. Kasaba, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, A. Matsuoka, T. Sasaki, and T. Yumoto (2018), Magnetic Search Coil (MSC) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard the Arase (ERG) satellite, *Earth, Planets and Space*, 70:76, doi: 10.1186/s40623-018-0837-1.

著者プロフィール

小嶋 浩嗣 (Hirotsugu Kojima)

<略歴> 岐阜県出身。京都大学生存圏研究所 宇宙圏航行システム工学分野准教授。専門は、科学衛星による宇宙空間のプラズマ環境探査。科学衛星によるプラズマ波動の観測を中心に新規装置開発からデータ解析までを手がける。科学衛星による EMC はプラズマ波動観測の観点から中心メンバーとして参画している。近年は特に超小型衛星用にプラズマ波動観測器のワンチップ化に向けて開発を行っている。

根圏を調べる方法

杉山 暁史^{1*}

Methods for the analysis of rhizosphere

Akifumi Sugiyama^{1*}

概要

植物の根の近傍領域である根圏は植物の生育に重要な役割を担う。根圏には土壤中とは異なる微生物のコミュニティが形成され、植物と相互作用する。根粒菌や菌根菌のように直接植物に養分を与える微生物以外にも、根圏には植物の生育と密接に関係する微生物が多く存在し、農業的にも重要な領域である。ここでは植物の根圏を解析する手法について紹介する。

1. はじめに

私たち人類の生存を支える空間である生存圏は人間生活圏から森林圏、大気圏、宇宙圏に広がる巨大な空間である。森林圏の一部として土壌圏があるが、その中で根圏は「植物の根から影響を受ける領域」¹⁾と定義されている極めて微小な領域である。土壌は植物に水や窒素、カリウム、リン等の栄養素を供給することから、植物の生育に重要なことは言うまでもない。植物は土壌圏から養分を吸収するだけでなく、土壌に生息する様々な生物と相互作用をしている。根粒菌や菌根菌のように植物の生育に必要な養分を供給する共生菌の他、植物に感染し被害を与える病原菌、線虫など、その相互作用は複雑である。これらの相互作用は根圏で起こる現象であることから、土壌の中でもとりわけ根圏に生息する生物は、植物の生育と密接に関係している。人類の生存を支える食料生産においても根圏での相互作用は重要であることから、根圏の研究は古くからおこなわれてきたが、近年、微生物を網羅的に解析するシーケンス技術や代謝物を包括的に解析するメタボローム技術が飛躍的に進歩したこともあり、根圏微生物叢研究は世界的に盛んである²⁻⁴⁾。

根圏研究で最も重要なのが、どのようにして根圏を調べるか、ということである。根圏は根の周りの土壌であるが、厳密に根から何mm以内

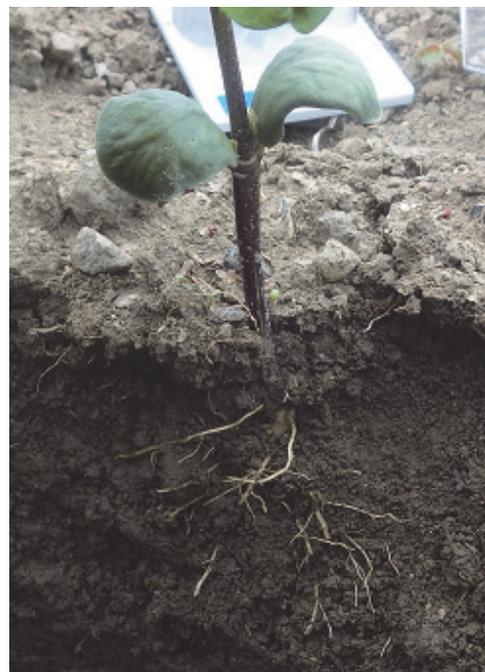


図1：圃場で生育するダイズの根圏

2018年7月9日受理.

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所森林圏遺伝子統御分野.

* E-mail: akifumi_sugiyama@rishi.kyoto-u.ac.jp

と規定されているわけではない。したがって、根圏をどのように調べるかによって、そこから得られる結果は異なってくる点に注意しなければならない。本解説では、根圏を調べる主要な方法についてその利点と欠点を紹介するとともに、今後根圏研究で重要になる解析手法についても紹介する。

2. 空中分画法と水中分画法

根圏研究で古くから用いられてきた手法は、土壌から植物を引き抜き、手でゆすって土を落とした後に、さらに根に付着している土を刷毛を使って優しく落としたりしたもの「根圏」とする空中分画法である。この方法は特別な道具が必要なく簡便であり、筆者らがダイズ圃場において根圏微生物叢の変動を調べた研究においても用いた⁵⁾。手法は簡便であるが、土壌の条件や刷毛で落とす強さの違いによって、安定的にサンプリングできる方法とは言い難く、しばしばバルク土壌（植物から離れたところの土壌）と区別できない結果となる。そのため、空中分画法を用いる際には、サンプリングの条件を十分検討して同じ道具、スピードで行う必要がある。

空中分画法の不安定性を克服すべく、近年は、リン酸バッファーで根を懸濁して根圏を採取する「水中分画法」が主流となってきている。特にシロイヌナズナ等のモデル植物では2012年に発表された論文において動画付きで手法を紹介しており、以降、この方法が基本となっている⁶⁾。シロイヌナズナのような小さな植物の場合は15 ml チューブで根圏を分画できるが、ダイズのような比較的大きな作物の場合にはビーカーを使って分画しなければならない。筆者らは、圃場で栽培したダイズの根圏土壌を500 ml のビーカーを使って分画し、根圏、根面、根内の画分を得た。バッファーによる分画法と空中分画法で得られた各土壌からDNAを抽出し、16S rRNA 配列のアンプリコン解析により微生物叢を比較したところ、バッファーにより分画される最初の画分（根圏画分）と、空中分画法で得られた根圏土壌が同様の群集構造であった。さらにソニケーションにより得られた画分（根面画分）は空中分画法で得られた根圏土壌とは異なる群集構造であった。圃場栽培したダイズにおいても実験室内で栽培したモデル植物と同様のバッファーを用いた根圏分画法が利用できることは、より多くの圃場で統一的に根圏土壌をサンプリングするためには重要である。

3. 根箱を使った根圏の可視化

根圏は土の中にあることから直接観測できず、空中分画法、水中分画法のいずれにおいても、植物が生育している環境を直接解析することはできない。圃場環境を疑似的に再現する方法として、根箱での栽培は古くから用いられている。筆者らも図2のようなアクリル製の根箱を作成し、圃場の土やパーミキュライト、砂等を用いてダイズを栽培し、ダイズの根を経時的に観察する手法を確立した。根箱は非破壊的に根圏解析を行うことができ、放射性核種を活用した分泌物の解析や、センサーを用いた根圏解析に活用されている^{7,8)}。

根圏研究のもう一つの障壁は、根圏に生息する微生物の多く（99%とも言われている）が実験室内で培養できないという問題である。DNA配列の解析ではそこに存在する微生物の種類を調べることができるが、根圏における微生物の機能は配列の解析のみでは明らかにできない。そこで、根圏を「培養できる微生物のみで再現する」Synthetic community 解析という手法が用いられるようになってきた

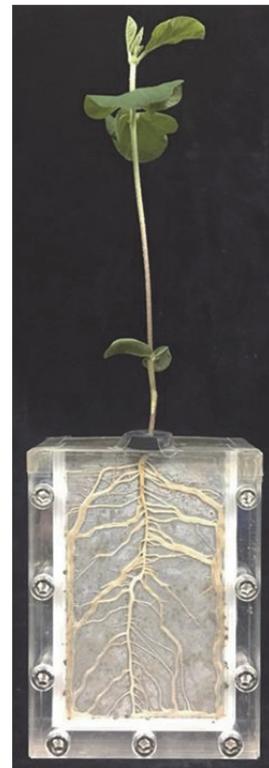


図2：根箱を用いたダイズ栽培

9, 10)。根圏から様々な培地を用いて実験室内で培養できる微生物を単離し、それらを組み合わせることによって根圏の多様性もった人工的な微生物群集を作る手法である。根箱と人工的な微生物群集構造を用いることによって、再現良く解析することができ、根圏相互作用における因果関係の解明に役立つと期待されている。

参考文献

- 1) Hiltner L Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiet der Bodenbakteriologie und unter besonderer Berücksichtigung der Gründüngung und Brache. *Arbeiten der Deutschen Landwirtschaftlichen Gesellschaft* **98**, 59-78. 1904.
- 2) Hassani MA, Durán P, Hacquard S. Microbial interactions within the plant holobiont. *Microbiome*. **6**(1), 58. 2018.
- 3) 杉山 暁史 根圏微生物のダイズ持続的生産への活用 *アグリバイオ* 9月号, 28-31, 2017.
- 4) Tkacz A, Poole P. Role of root microbiota in plant productivity. *J Exp Bot*. **66**(8), 2167-75. 2015
- 5) Sugiyama A, Ueda Y, Zushi T et al. Changes in the bacterial community of soybean rhizospheres during growth in the field. *PLoS ONE* **9**(6), e100709. 2014.
- 6) Bulgarelli D, Rott M, Schlaeppi K, Ver Loren van Themaat E, Ahmadinejad N, Assenza F, Rauf P, Huettel B, Reinhardt R, Schmelzer E, Peplies J, Gloeckner FO, Amann R, Eickhorst T, Schulze-Lefert P. Revealing structure and assembly cues for Arabidopsis root-inhabiting bacterial microbiota. *Nature* **488**(7409), 91-5. 2012.
- 7) Lenzewski N, Mueller P, Meier RJ, Liebsch G, Jensen K, Koop-Jakobsen K. Dynamics of oxygen and carbon dioxide in rhizospheres of *Lobelia dortmanna* - a planar optode study of belowground gas exchange between plants and sediment. *New Phytol*. **218**(1), 131-141. 2018.
- 8) Kreuzeder A, Santner J, Scharsching V, Oburger E, Hofer C, Hann S, Wenzel WW. In situ observation of localized, sub-mm scale changes of phosphorus biogeochemistry in the rhizosphere. *Plant Soil* **424**(1), 573-589. 2018.
- 9) Niu B, Paulson J.N, Zheng X Simplified and representative bacterial community of maize roots. *Proc Natl Acad Sci U S A*. **114**(12): E2450-E2459. 2017.
- 10) Zhalmira K, Louie KB, Hao Z, Mansoori N, da Rocha UN, Shi S, Cho H, Karaoz U, Loqué D, Bowen BP, Firestone MK, Northen TR, Brodie EL. Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly. *Nat Microbiol*. **3**(4), 470-480. 2018.

著者プロフィール



杉山 暁史 (Akifumi Sugiyama)

<略歴> 2008年3月京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了、博士(農学) / 2008年4月京都大学生存圏研究所研究員 / 2009年4月日本学術振興会海外特別研究員(コロラド州立大学) / 2010年10月京都大学生存圏研究所助教 / 2016年2月京都大学生存圏研究所准教授、現在に至る。<研究テーマと抱負>根圏代謝物の機能解析と作物生産への応用 <趣味>旅行(特に鉄道)、ピザ作り、スポーツ観戦

相対論的プラズマ粒子シミュレーションのための 粒子計算アルゴリズム

銭谷 誠司^{1*}, 加藤 恒彦²

Numerical methods for charged particles in relativistic particle-in-cell simulation

Seiji Zenitani^{1*} and Tsunehiko Kato²

概要

宇宙プラズマ研究では、電磁場の中で荷電粒子の運動を解き進めるプラズマ粒子シミュレーション (Particle-in-cell; PIC シミュレーション) が広く活用されている。本稿では、相対論的な粒子運動および全体運動を伴う相対論的プラズマ系をPIC シミュレーションで扱うための数値解法を、大きく2つのカテゴリに分けて解説する。前半は、Sobol 法などの粒子分布を静止系で初期化する数値解法を紹介する。そして、このような粒子分布にローレンツ変換を施す方法を解説する。後半は、粒子運動の時間積分法としてBoris 法とVay 法を紹介し、相対論的プラズマ流に特有の数値問題を議論する。

This tutorial article describes numerical methods to deal with a relativistic plasma in particle-in-cell (PIC) simulation. We first overview numerical methods to initialize particles that follow relativistic velocity distribution functions. Then we describe how to Lorentz-boost the plasma distribution. Next, we introduce two particle integrators, the Boris method and the Vay method. We further present a numerical problem in a magnetized plasma flow at a relativistic speed. It is found that the Boris solver leads to a numerical boost in the momentum space, which depends on the square of the timestep.

1. はじめに

宇宙プラズマの研究では、電磁場の時間発展と、計算空間内に大量に配置した仮想荷電粒子の運動を並行して解き進めるプラズマ粒子シミュレーション (Particle-in-cell; PIC シミュレーション) が広く活用されている。PIC シミュレーションの原理や関連する数値解法は、1970~80 年代に整備が進み、その成果は Birdsall & Langdon¹, Hockney & Eastwood⁶ といった教科書にまとめられている。一方、レーザー物理や高エネルギー天体物理の文脈では、個々の粒子運動と粒子系全体の運動に相対論効果が働く相対論的プラズマ系を議論することが多い。当然ながら、相対論的プラズマ現象を扱う PIC シミュレーション研究も活発に進められている。しかし、PIC シミュレーションで相対論的プラズマを扱うための数値解法は、あまり知られていないのが現状である。本稿では、著者の最近の仕事 (Zenitani¹⁴)

2018 年 7 月 6 日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 学際萌芽研究センター.

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

²〒181-8588 三鷹市大沢 2-2-1 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト

Center for Computational Astrophysics, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

* E-mail: zenitani@rish.kyoto-u.ac.jp

をベースに、相対論的プラズマ PIC シミュレーションに特有の数値解法を紹介する。多くの場合、PIC シミュレーションは、

1. (初期化) 粒子群を初期化する。
2. (計算ループ) 粒子運動を解く。
3. (計算ループ) その結果を受けて電荷と電流を配分する。
4. (計算ループ) 電磁場の時間発展を解く。

のサイクルで計算を進めてゆく。3. については、これまでの研究でよく議論されており、相対論 PIC に特有の問題ではないため、本稿では議論しない。4. に関連して、相対論的プラズマ中では、光速に近い速度で運動する荷電粒子が、数値解法の都合で遅くなった電磁波成分に追いついて非物理的に共鳴する数値チェレンコフ不安定が問題になる。数値チェレンコフ問題は、4. の電磁波の解法を工夫することで、ある程度対処できることが知られており、現在も活発に研究が行われている。

また、相対論的プラズマ現象では、シミュレーションを実行することに加えて、シミュレーション結果を解析すること自体も困難である。例えば、粒子データを集計して流体量を議論するために必要な相対論流体力学の基礎概念と解析手法は、PIC シミュレーション研究者の間ではあまり知られていない。この話題については、著者の最近の仕事 (Zenitani¹⁵) が参考になるだろうが、また機会を改めて解説・紹介できればと思う。

本稿では、上記の 1. 2. の粒子計算部分に関連して、相対論的プラズマを扱うための PIC アルゴリズムのポイントを解説する。具体的には、1. 粒子分布の初期化方法、および、2. 粒子の時間積分方法、を扱い、前者に関連して、分布関数のローレンツ変換、後者に関連して、相対論的プラズマ流特有の数値ドリフト問題を議論する。

2. 準備

本稿では、粒子の3次元速度を \mathbf{v} 、ローレンツ因子を $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2} = [1 + (u/c)^2]^{1/2}$ 、そして両者を掛け合わせた拡張速度を $\mathbf{u} = \gamma\mathbf{v}$ と表記する。そして、粒子の運動量が $m\mathbf{u} = m\gamma\mathbf{v}$ であることから、 \mathbf{u} を運動量、あるいはモーメントと呼ぶことにする。荷電粒子の相対論的運動は、運動方程式

$$m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = q \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{u}}{\gamma} \times \mathbf{B} \right) \quad (1)$$

に従うものとする。記号は、特に指定しない限り、それぞれの標準的な意味を持つ。本稿では、以下の関係を多用する。

$$\gamma^2 = 1 + (u/c)^2. \quad (2)$$

3. 静止系における分布関数

PIC シミュレーションでは、同一セル内に大量の粒子を配置して、それぞれに適切な運動量を割り振る。速度の初期分布としては、Maxwell-Boltzmann 分布 (正規分布) を用いることが多い。

$$f(\mathbf{v})d^3v = N \left(\frac{m}{2\pi T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{mv^2}{2T} \right) d^3v, \quad (3)$$

ここで T は温度 (ボルツマン定数を含む) である。(3) を積分すると数密度 $N \equiv \int f(\mathbf{u})d^3u$ を得る。

Maxwell-Boltzmann 分布を生成する方法としては、Box-Muller 法³ がよく知られている。区間 $(0, 1]$ の2つの一様乱数 X_1, X_2 を使って、以下の手順を踏むと、正規分布に従う2つの乱数 r_1, r_2 を生成するこ

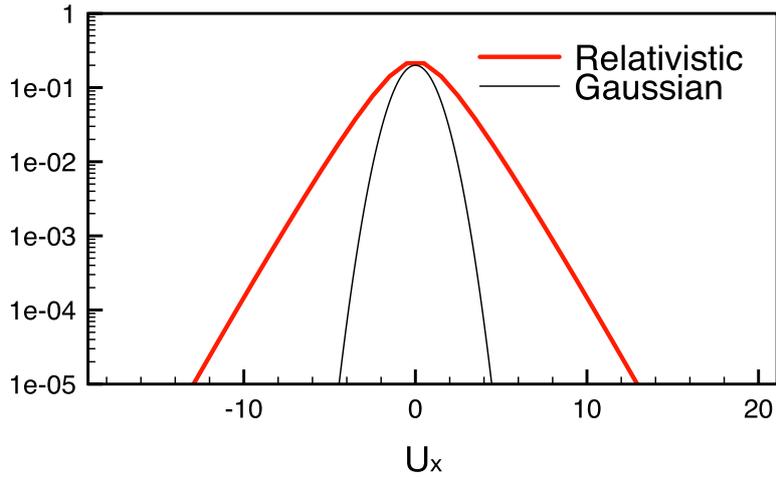


図 1: MAXWELL-JÜTTNER 分布 (RELATIVISTIC) と MAXWELL-BOLTZMANN 分布 (GAUSSIAN)。形状を比較するため、係数を変えて縦軸方向の位置を調整している。

とができる。

$$r_1 = \sqrt{-2 \log X_1} \sin(2\pi X_2), \quad (4)$$

$$r_2 = \sqrt{-2 \log X_1} \cos(2\pi X_2), \quad (5)$$

実際には、一様乱数は区間 $[0, 1)$ の値をとることが多い。PIC シミュレーションで多くの粒子を扱う場合、 $\log 0$ を計算することを避けるため、

$$r_1 = \sqrt{-2 \log(1 - X_1)} \sin(2\pi X_2), \quad (6)$$

$$r_2 = \sqrt{-2 \log(1 - X_1)} \cos(2\pi X_2), \quad (7)$$

としてもよい。正規分布を生成するサブルーチンを数値計算ライブラリが提供することもある。

次に、Maxwell-Boltzmann 分布の相対論的延長である Maxwell-Jüttner 分布 (Jüttner-Synge 分布と呼ぶこともある)^{7,12} を紹介する。その関数形は

$$f(\mathbf{u})d^3u = \frac{N}{4\pi m^2 c T K_2(mc^2/T)} \exp\left(-\frac{\gamma mc^2}{T}\right) d^3u, \quad (8)$$

と表される。 $K_n(x)$ は第 2 種修正 Bessel 関数である。これ以降、特に意図がない限り $m = 1$ 、 $c = 1$ と簡略化して議論する。図 1 の赤線は、温度 $T = mc^2 = 1$ の Maxwell-Jüttner 分布である。参考のため、非相対論の正規分布を黒線で示した。正規分布の裾野部分は、 $\propto \exp[-(v/v_{th})^2]$ であるため、 v の 2 次で急激に減少する。これに対して、Maxwell-Jüttner 分布の裾野は $\propto \exp(-u/T)$ で、 u の 1 次で減少することが特徴である。

次に、PIC シミュレーションで Maxwell-Jüttner 分布の粒子分布を生成することを考える。Maxwell-Jüttner 分布は関数形が複雑であるため、Box-Muller 法のような決定版ともいえる解法は、今のところ見つかっていない。Maxwell-Jüttner 分布が、全方向に一様 (等方) であることを利用して、(8) 式の \mathbf{u} を極座標 (u, θ, φ) で書き直すと

$$f(u)du = \frac{N}{TK_2(1/T)} \exp\left(-\frac{\sqrt{1+u^2}}{T}\right) u^2 du. \quad (9)$$

となる。そこで、(9) 式に従う u を数値的に生成したのち、以下のようにして \mathbf{u} の各成分に展開すると、(8) 式に従う粒子分布を得ることができる。

$$\begin{cases} u_x = u(2X_3 - 1) \\ u_y = 2u\sqrt{X_3(1-X_3)}\cos(2\pi X_4) \\ u_z = 2u\sqrt{X_3(1-X_3)}\sin(2\pi X_4) \end{cases} \quad (10)$$

X_3, X_4 は、区間 $[0,1]$ の一様乱数である。(9) 式の u の分布を生成する計算方法については、逆変換法、Sobol 法、そして、Schnittman 法の3つの方法を紹介する。

A. 逆変換法

逆関数法は、累積分布関数 $F(u)$ に基づいて、 u の値を逆引きする方法である。累積分布関数は

$$F(u) \equiv \left(\int_0^u f(u)du \right) \left(\int_0^\infty f(u)du \right)^{-1} \simeq \left(\int_0^u f(u)du \right) \left(\int_0^{u_{\max}} f(u)du \right)^{-1}. \quad (11)$$

のように近似することができる。ここで、 u_{\max} は実用上の上限速度である。非相対論的温度 $T \ll 1$ の正規分布では、高エネルギー成分が急激に減ることから、熱速度を $v_{\text{th}} = \sqrt{2T}$ として、 $u_{\max} = 5v_{\text{th}}$ 程度の値を採用すればよい。一方、先ほど触れたように、相対論的高温 $T \gtrsim 1$ の Maxwell–Jüttner 分布では、高エネルギー成分が緩やかに減衰するため、余裕をとって、 $u_{\max} = 20T$ とした方がよい。そして、2000 グリッド程度の $F(u)$ の数値テーブルを用意し、一様乱数 X_5 を用いて

$$u = F^{-1}(X_5) \quad (12)$$

として u を算出する。

B. Sobol¹⁰ 法

ロシアの数学者 Sobol が 1976 年に公表した数値解法である。Sobol は、(9) 式が3次のガンマ分布 (Erlang 分布) :

$$P(u; 3, T) = \left(\frac{1}{2T^3} \right) \exp\left(-\frac{u}{T}\right)u^2. \quad (13)$$

に似ていることに注目して、以下のようなアルゴリズムを考案した。導出は、ロシア語の原論文¹⁰あるいは Zenitani¹⁴ 論文に譲ることにして、本稿では具体的手順のみを紹介する。 $X_6 \dots X_8$ の3つの一様乱数を用いて

$$u \equiv -T \ln X_6 X_7 X_8 \quad (14)$$

を生成すると、(13) 式のガンマ分布に従う u を得ることができる。さらに、追加の乱数 X_9 を用いて

$$\eta \equiv -T \ln X_6 X_7 X_8 X_9 \quad (15)$$

$$\eta^2 - u^2 > 1, \quad (16)$$

を満たす時の u を採用すれば、(9) 式に従う u の分布を得ることができる。(14), (15) で用いる一様乱数でも、Box–Muller 法の議論と同様、 $\log 0$ を避ける工夫をすべきであろう。(16) 式の採択率は、温度 T の

関数で

$$\frac{1}{2T^2} K_2(1/T). \quad (17)$$

となる。^{8,14}

C. Schnittman 法

Schnittman & Krolik⁹ の Appendix で議論されている方法で、フランスの研究グループが開発している SMILEI コード⁴ で利用されている。

(9) 式に $u = \gamma\beta$ を代入して

$$f(\gamma)d\gamma \sim \exp\left(-\frac{\gamma}{T}\right)\gamma^2\beta d\gamma \equiv f_2(\gamma)d\gamma \quad (18)$$

とする。簡単のため、規格化定数を取った分布関数を $f_2(\gamma)$ とした。次に、以下の関数形の γ の分布を考える。

$$g(\gamma) = \exp\left(-\frac{\gamma}{T}\right)\gamma^2. \quad (19)$$

(19) 式の累積分布関数は次のようになる。

$$G(\gamma) = \left(\int_1^\gamma g(\gamma)d\gamma\right) \left(\int_1^\infty g(\gamma)d\gamma\right)^{-1} = 1 - \frac{2T^2 + 2\gamma T + \gamma^2}{2T^2 + 2T + 1} \exp\left(-\frac{\gamma-1}{T}\right). \quad (20)$$

そして、一様乱数 X_{10} を用いて、逆関数から γ の分布を得ることができる。逆関数は数値テーブルを参照する。

$$\gamma = G^{-1}(X_{10}) \quad (21)$$

これとは別に、(20) 式の右辺を

$$H(x) \equiv (x^2 + 2x + 2)e^{-x} \quad (22)$$

関数を導入して書き換えると

$$G(\gamma) = 1 - \frac{H(\gamma/T)}{H(1/T)} \quad (23)$$

となり、最終的に

$$\gamma = T H^{-1}\left((1 - X_{10})H(1/T)\right) \quad (24)$$

を得る。(21) あるいは (24) で得た γ は、(19) 式の分布に従う。そこで、乱数 X_{11} が

$$X_{11} < \frac{f_2(\gamma)}{g(\gamma)} = \beta = \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma} \quad (25)$$

の条件を満たす場合の γ を採用すると (棄却法)、 $f_2(\gamma)$ に従う γ の分布を得ることができる。最後に

表 1: アルゴリズムまとめ.

| | Box-Muller 法 | 逆変換法 | Sobol 法 | Schnittman 法 |
|------------------------------------|--------------|------|---------|--------------|
| 実装の容易さ | ◎ | ◎ | ◎ | △ |
| 非相対論的温度 ($T \leq 0.1$) での効率 | ◎ | ◎ | - | - |
| 準相対論的温度 ($T \lesssim mc^2$) での効率 | - | ◎ | △ | ○ |
| 相対論的温度 ($T \gtrsim mc^2$) での効率 | - | ◎ | ◎ | ◎ |
| 数値テーブルを利用 | NO | YES | NO | YES |

$u = \sqrt{\gamma^2 - 1}$ に直して、(10) から \mathbf{u} の 3 成分を得る。(25) 式の採択率は

$$\langle \beta \rangle \equiv \left(\int f(\mathbf{u}) \beta d^3u \right) \left(\int f(\mathbf{u}) d^3u \right)^{-1} \quad (26)$$

であり、Maxwell-Jüttner 分布の温度 T に依存する。

D. 議論

ここで、本稿で紹介した手法の特徴をまとめておく。Box-Muller 法、逆変換法、Sobol 法はロジックが簡素であるため、実装が容易である。しかし、Box-Muller 法は原理的に相対論に対応していない。

Sobol 法と Schnittman 法は、内部で棄却法を利用している。その際の粒子の利用効率 ((17), (26) 式) を図 2 に示す。(26) 式の各点の値は、数値的に求めたものである。 $T \gtrsim mc^2$ の相対論的温度では両者とも良い性能を示している。 $T \lesssim mc^2$ の準相対論的温度では、Sobol 法の効率が下がっているのに対し、Schnittman 法は適度な効率を保っている。そして、 $T \ll mc^2$ の非相対論的極限では、両者とも効率が下がってゆく。

逆変換法および Schnittman 法は、累積分布関数の逆関数 $F^{-1}(x)$, $G^{-1}(x)$, $H^{-1}(x)$ を数値テーブルを参照して求めている。数値テーブルを利用する場合の計算精度は、テーブルの解像度と補間方法に大きく依存する。また、テーブルを参照するなら、複雑な処理を避けて、最初から逆関数法を採用するという考えもあるだろう。また、 $F(x) \cdot G(x)$ は相対論的温度 T に依存する関数であるため、パラメータ毎に数値テーブルを生成する必要がある。これに対して、 $H(x)$ 関数は T に依存しないため、予め固定テーブルを作っておくことができる。SMILEI コード⁴ では、 $H_1(x) \equiv \ln(x^2/2 + x + 1) - x$ という関数形を使って固定の逆関数テーブル $H_1^{-1}(x)$ を参照するようにしたうえで、テーブルの参照方法を工夫している。⁵

これらの手法の特徴を表 1 にまとめた。実用上は、プラズマ温度 T に応じて、それぞれ適したアルゴリズムを使い分ければ良いだろう。

4. 分布関数のローレンツ・ブースト

次に、粒子分布全体が一定速度で動いている場合を考える。例えば、 $+x$ 方向に速度 V_0 で移動する、Shifted Maxwell-Boltzmann 分布

$$f(\mathbf{v})d^3v = N \left(\frac{m}{2\pi T} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(- \frac{m([v_x - V_0]^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2T} \right) d^3v, \quad (27)$$

を考える。この分布を得るためには、Maxwell-Boltzmann 分布を初期化した後、 $v_x \leftarrow v_x + V_0$ と置きかえてガリレイ変換を行えば良い。しかし、バルク速度 V_0 が相対論的になる場合には、さらなる工夫が必要になる。

相対論的速度で $+x$ 方向に動く Maxwell-Jüttner 分布 (Shifted Maxwell-Jüttner 分布) は、観測者系

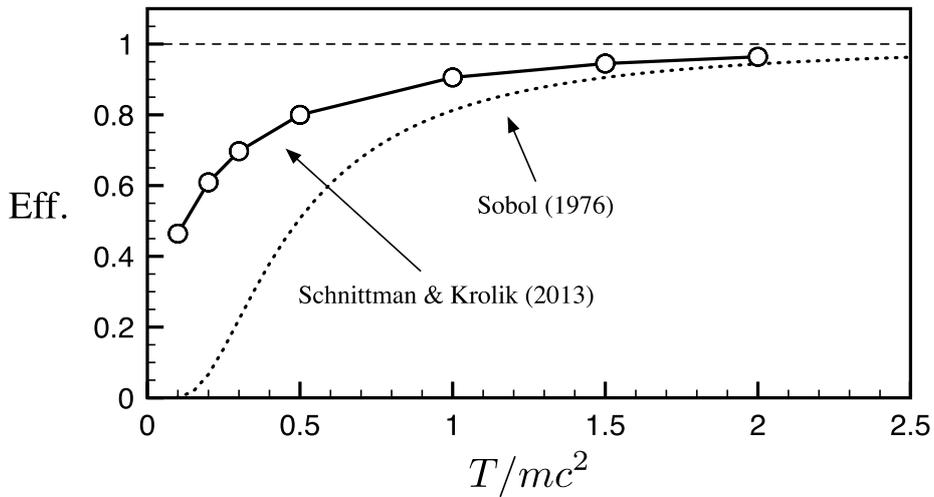


図 2: 棄却法の採択効率。

では

$$f'(\mathbf{u}')d^3u' = \frac{N'}{4\pi m^2 c T K_2(mc^2/T)} \exp\left(-\frac{-\Gamma_0(\varepsilon' - \beta_0 m c u'_x)}{T}\right) d^3u', \quad (28)$$

と表すことができる。ここで Γ_0 および $\beta_0 = V_0/c$ は、バルクのローレンツ因子とバルク速度である。また、 $\varepsilon' = \gamma' m c^2$ は粒子のエネルギーである。後の議論と整合性を持たせるため、観測者系での物理量に ' を追加した。Shifted Maxwell-Jüttner 分布は、 \exp の引数中の関数形が異なるため、Sobol 法などを適用するのは難しい。

図 3 に、バルクのローレンツ因子 $\Gamma_0 = 10$ で $+x$ 方向に流れている相対論的高温 $T = mc^2$ の粒子分布 ((28) 式) を赤線で示した。参考までに、 $T = mc^2$ の静止系の Maxwell-Jüttner 分布 ((8) 式) を赤の点線で示す。静止系では分布が等方であるから、 $u_x = 0$ を軸にして左右対称である。しかし、(28) 式の分布は、左右対称性が崩れて、大きく右に延びていることがわかる。

このような非対称性は、分布関数の $+x$ 方向へのローレンツ変換と対応している。ローレンツ変換には、エネルギー・運動量のローレンツ変換と、時間・空間のローレンツ変換の 2 種類がある。前者は、粒子 (質

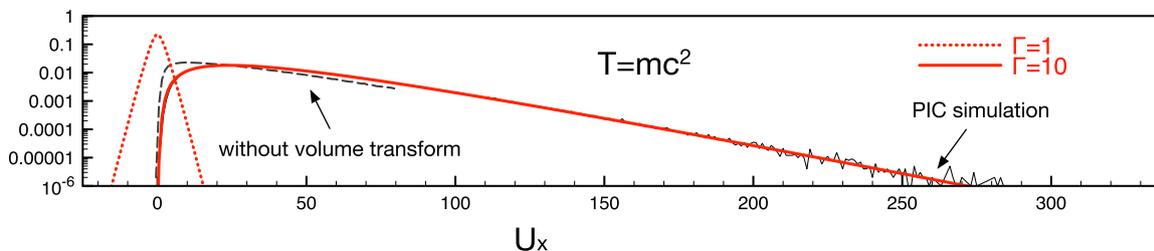


図 3: 相対論的高温分布関数のバルク・ローレンツ因子 Γ_0 に対する依存性。3次元の速度分布関数を、バルク流方向成分 $u_x = (\gamma v)_x$ に対して投影した。

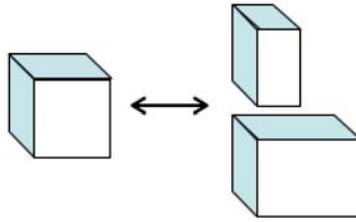


図 4: 空間要素 d^3x のローレンツ収縮

点) のエネルギー・運動量を変換するもので、今回の場合は

$$\begin{cases} \gamma' = \Gamma_0(\gamma + \beta_0 u_x) \\ u'_x = \Gamma_0(u_x + \beta_0 \gamma) \\ u'_y = u_y \\ u'_z = u_z \end{cases} \quad (29)$$

となる。プラズマ分布関数を扱う場合は、これに加えて、時間・空間のローレンツ変換を考慮する必要がある。図 4 でイメージするように、同じ空間ボックス内のプラズマ分布をローレンツ変換する場合でも、対応する空間要素のローレンツ収縮の仕方は一定でない。観測者にとっては、注目している分布関数要素 (d^3u) の運動の仕方 (エネルギー・運動量) に応じて、空間要素 (d^3x) のローレンツ収縮の仕方が変わるため、結果的にプラズマの密度が違って見えることになる。この効果は

$$\gamma d^3x = \gamma' d^3x'. \quad (30)$$

あるいは

$$\frac{d^3u}{\gamma} = \frac{d^3u'}{\gamma'}. \quad (31)$$

と表される。静止系 (S 系) と観測者系 (S' 系) との間で分布関数を変換する際は

$$f'(\mathbf{u}') d^3u' = f(\mathbf{u}) \left(\frac{\gamma'}{\gamma} \right) d^3u. \quad (32)$$

となって、以下の補正項 (空間要素補正ファクター; volume transform factor) が必要になる。

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \Gamma_0(1 + \beta_0 v_x). \quad (33)$$

実用上、規格化定数 Γ_0 は粒子数を割り振る時点で調整することが可能である。一方、(33) には静止系分布関数のブースト方向の速度成分 v_x に依存する項が入っている。ブースト方向の分布関数要素は強い収縮を受けて密度が上がり、遠ざかる方向の分布関数要素は逆に密度が下がって見えるわけである。この補正の影響は、バルク速度 U_0 と静止系での粒子の熱速度の両方が相対論的である場合に顕著である。例えば図 3 では、静止系の Maxwell-Jüttner 分布 (赤の点線) を Shifted Maxwell-Jüttner 分布 (赤の実線) にローレンツ変換する際に密度補正を無視すると、図の左の黒の点線のようになり、エネルギー流などに最大 25% の誤差をもたらす。¹⁴

PIC シミュレーションでこの密度補正効果を取り入れるためには、4つの方法がある。1つめの方法は、ローレンツ変換後の表式 (例えば (28) 式) を使って、粒子を初期化することである。ローレンツ変換 ((29) および密度補正 ((31), (33)) を使えば、任意の分布関数の観測者系での表式を得ることができる。特に、(28) 式の粒子分布を生成する方法については、Swisdak¹¹ が性能の良い手法を提案している。しかし、アルゴリズムが少し複雑であることや、exp 形の分布関数に特化しているため、本稿では議論しないことにす

る。2つめの方法は、ローレンツ変換の際に粒子の「重み」を調整することである。しかし、重みの違う粒子を混在させることは、計算精度や解析の手間を考えると望ましいことではない。そして、バルク流および粒子の熱速度のローレンツ因子 Γ_0, γ が大きい場合には、期待される重みの比も大きくなって、悩みも大きくなる。3つめの方法は、ローレンツ変換の際に棄却法で粒子数を調整することである。一定数の粒子を捨てるため、粒子を追加する処理が必要になるが、この方法を使うのは、シミュレーションの初期化の際であるから大きな問題にならないはずである。4つめの方法は、補正項が影響しないパラメーターを注意深く選び、何も対処しないことである。

最後に、3つめの密度調整処理を効率化する「符号反転法¹⁴」を紹介する。密度補正ファクター ((33)式) を定数倍すると、

$$\frac{1}{\Gamma} \left(\frac{\gamma'}{\gamma} \right) = (1 + \beta_0 v_x). \quad (34)$$

となる。これに従って棄却法を検討する。 $\beta_0 v_x < 0$ の時、係数は $0 < (1 - |\beta_0 v_x|) \leq 1$ となるため、粒子を $|\beta_0 v_x|$ の確率で棄却して良い。一方、 $\beta_0 v_x > 0$ の時、係数は $1 \leq (1 + \beta_0 v_x) < 2$ の値をとる。棄却法の観点からは、全ての粒子を採用したうえで、 $|\beta_0 v_x|$ の確率で別の粒子を追加して良いことになる。分布関数がローレンツ変換の方向に対称である場合、具体的には $f(-u_x) = f(u_x)$ の場合、棄却する粒子数と追加すべき粒子数は一致する。そこで、棄却粒子の u_x 成分の符号を反転させて、 $\beta_0 v_x > 0$ 側に追加してやれば、粒子を棄却する必要がなくなる。一様乱数 X_9 を用いて

$$-\beta_0 v_x > X_9, \quad (35)$$

のとき、 $u_x \rightarrow -u_x$ のように符号を反転した後で、エネルギー・運動量の変換則 ((29) 式) に従って $\mathbf{u} \rightarrow \mathbf{u}'$ を変換すれば良い。この手順を図5に示した。また、Sobol 法を用いて生成し、符号反転法でローレンツ変換したPIC粒子の分布を図3の黒線で示した。この分布は、粒子数が少ない右方の低密度領域 ($u_x > 200$) も含めて、解析解 (赤線) とよく一致していることがわかる。

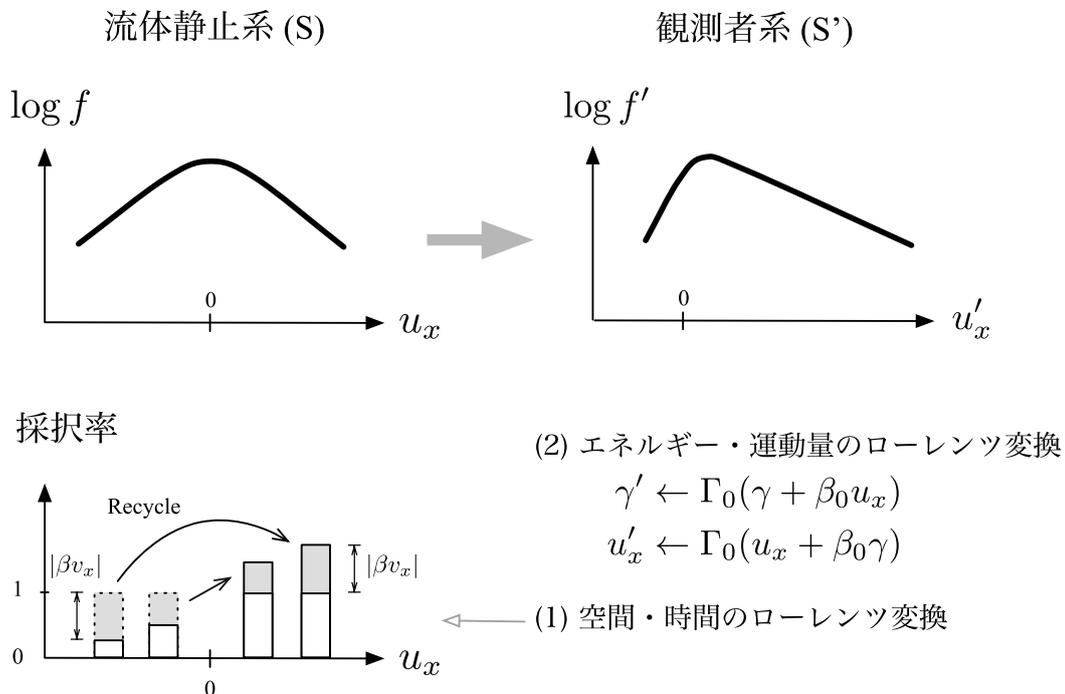


図5: 相対論的高温プラズマ分布のローレンツ変換手順。¹⁴ 下図は、密度を補正する (34) の手法を図解したもの。

5. 粒子計算アルゴリズム

次に、PIC シミュレーションにおける粒子運動の計算方法を考える。多くの場合、以下のように位置と速度を離散化して、leap-frog 方式で粒子運動を解き進めてゆく。

$$\frac{\mathbf{x}^{t+\Delta t} - \mathbf{x}^t}{\Delta t} = \mathbf{v}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} \quad (36)$$

$$m \frac{\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} - \mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t}}{\Delta t} = q \left(\mathbf{E}^t + \mathbf{v}^t \times \mathbf{B}^t \right) \quad (37)$$

ここで、上付き添字 ($t, t+\Delta t, \dots$) は時間ステップを意味している。電磁場は、粒子の位置 \mathbf{x}^t に基づいて、グリッド上の値から補完する。

このうち、粒子の加速に関わる (37) 式を解くためにさまざまな解法が提案されている。本項では、代表的な例として、Boris² 法と Vay¹³ 法を解説する。

A. Boris 法

Boris 法は、PIC シミュレーション研究の草創期に開発された手法である。粒子運動を適度な精度で解くことができ、ロジックが簡素で、安定しているなどの利点がある。そして、Birdsall & Langdon¹, Hockney & Eastwood⁶ などの教科書でも丁寧に解説されていることもあって、広く使われている。本項執筆時点では、PIC シミュレーションの事実上の業界標準解法だと言える。Boris 法では、運動方程式を (1) 電場による加速 1/2 ステップ、(2) 磁場によるジャイロ回転 1 ステップ、(3) 電場加速の残り 1/2 ステップの順に分割して解いている。この手順は、それぞれ (38)–(40) 式のようになる。

$$\mathbf{u}^- = \mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{q}{m} \mathbf{E}^t \frac{\Delta t}{2} \quad (38)$$

$$\frac{\mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^-}{\Delta t} = \frac{q}{m} \left(\mathbf{v}^t \times \mathbf{B}^t \right) \quad (39)$$

$$\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \mathbf{u}^+ + \frac{q}{m} \mathbf{E}^t \frac{\Delta t}{2} \quad (40)$$

\mathbf{u}^- と \mathbf{u}^+ は2つの中間状態である。Boris 法の (2) ステップめでは、ジャイロ回転がエネルギーを保存することを考慮して、 $\mathbf{v}^t = \frac{1}{2}(\mathbf{u}^+ + \mathbf{u}^-)/\gamma^- = \frac{1}{2}(\mathbf{u}^+ + \mathbf{u}^-)/\gamma^+$ とする。そして、ジャイロ回転を以下の手順で近似する。

$$\mathbf{t} \equiv \frac{q\Delta t}{2m\gamma^-} \mathbf{B} \quad (41)$$

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u}^- + \mathbf{u}^- \times \mathbf{t} \quad (42)$$

$$\mathbf{u}^+ = \mathbf{u}^- + \frac{2}{1+t^2} \mathbf{u}' \times \mathbf{t}. \quad (43)$$

このアルゴリズムの概要を図 6 に示す。詳細は Boris² の原論文や Birdsall & Langdon¹, Hockney & Eastwood⁶ を参照していただきたいが、元の状態 \mathbf{u}^- からの差分 $\mathbf{u}^- \times \mathbf{t}$ (緑) を計算して中間状態 \mathbf{u}' を求めたうえで、 \mathbf{u}' に直交する方向に $\mathbf{u}^- \rightarrow \mathbf{u}^+$ の差分 (ピンク) を計算するというものである。

図 6 から伺い知ることができるが、ジャイロ回転の本来の回転角を θ と、この Boris 法の近似回転角 θ' の間には

$$\theta \approx \theta' = 2 \tan^{-1}(|t|) \quad (44)$$

の関係が成立する。 $\omega_c \Delta t \lesssim 0.35$ のとき、 θ と θ' の差は 1% 未満になる。¹

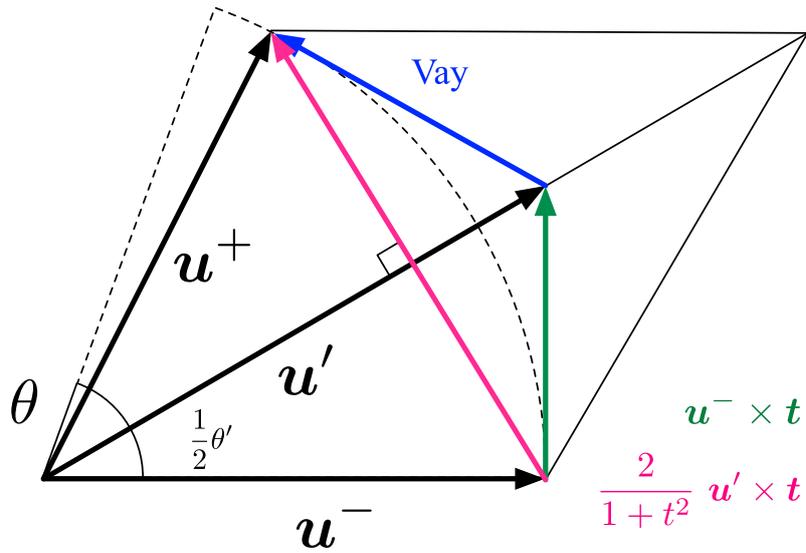


図 6: BORIS 法および VAY 法の原理。

B. Vay 法

Vay¹³ 法は 2008 年に発表された解法で、レーザープラズマや磁化プラズマ中の相対論衝撃波の研究で用いられている。計算手順は次の 2 段階に分けられる。1 段階めは電場による加速と、ジャイロ回転の前半部分である。

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{q\Delta t}{m} \left(\mathbf{E}^t + \frac{\mathbf{v}^{t-\frac{1}{2}\Delta t}}{2} \times \mathbf{B}^t \right) \quad (45)$$

この後、ジャイロ回転の残り半分を解く。

$$\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \mathbf{u}' + \frac{q\Delta t}{m} \left(\frac{\mathbf{v}^{t+\frac{1}{2}\Delta t}}{2} \times \mathbf{B}^t \right) \quad (46)$$

この (46) 式は、 $\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t}$ についての陰解法の式であり、以下の手順で解くことができる。

$$\gamma^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \sqrt{\frac{\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4(\tau^2 + (\mathbf{u}' \cdot \boldsymbol{\tau})^2/c^2)}}{2}} \quad (47)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{q\Delta t}{2m} \mathbf{B}^t, \quad \sigma = 1 + (\mathbf{u}'/c)^2 - \tau^2, \quad \mathbf{t} = \boldsymbol{\tau}/\gamma^{t+\frac{1}{2}\Delta t} \quad (48)$$

$$\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \frac{1}{1+t^2} \left(\mathbf{u}' + (\mathbf{u}' \cdot \mathbf{t})\mathbf{t} + \mathbf{u}' \times \mathbf{t} \right) \quad (49)$$

導出方法は Vay¹³ 論文の Appendix A. を参照されたい。

電場がない場合 ($\mathbf{E} = 0$)、Vay 法は Boris 法と一致する。両者とも、定義に従って次のステップの状態を計算すると、

$$\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \frac{1}{1+t^2} \left((1-t^2)\mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} + 2(\mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} \times \mathbf{t}) + 2(\mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} \cdot \mathbf{t})\mathbf{t} \right) \quad (50)$$

と表すことができる。Vay 法の 1 段階目 ((45) 式) は Boris 法の回転部 1 ステップ目 ((42) 式) と同様、図 6

の緑線部に相当する。Vay 法の2段階目 ((46) 式) の陰解法で次ステップの \mathbf{u}^+ を求める操作は、図 6 の青線部に相当する。(46) 式からは、次ステップ \mathbf{u}^+ と青線部が直交することが読み取れて、図 6 の解釈と一致する。

有限の電場がある場合 ($\mathbf{E} \neq 0$)、(45) 式を

$$\mathbf{u}'' = \mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} + \frac{q\Delta t}{m} \left(\frac{\mathbf{v}^{t-\frac{1}{2}\Delta t}}{2} \times \mathbf{B}^t \right) \quad (51)$$

$$\mathbf{u}' = \mathbf{u}'' + \frac{q\Delta t}{m} \mathbf{E}^t \quad (52)$$

と分割して、(46) 式と合わせて考えると、Vay 法は (1) 磁場 $\frac{1}{2}\Delta t$ ステップ、(2) 電場 Δt 、(3) 磁場の残り $\frac{1}{2}\Delta t$ 、という順の計算法であることがわかる。Boris 法と比べて、電場と磁場の計算順序 (演算子の分割順) を入れ替えているわけである。図 6 では、Vay 法は緑線と青線の間で電場による加速を考慮する、と考えれば良い。(1) が陽解法、(2) が時間対称、(3) が陰解法であるから、(1~3) 全体の手順は時間反転可能である。

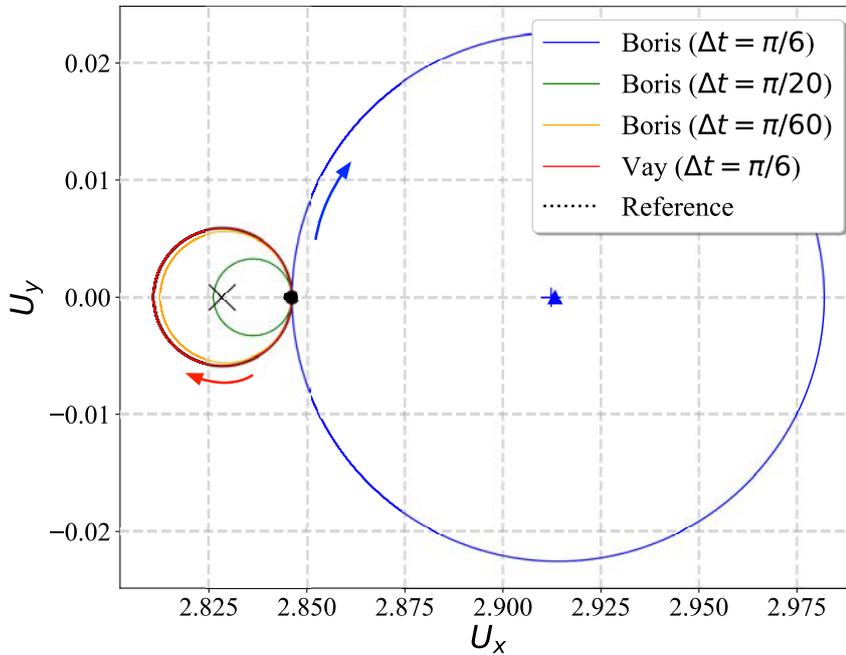


図 7: モーメント空間におけるテスト粒子の軌跡。× がフロー速度で、● が数値計算の起点。BORIS 法 ($\Delta t = \pi/6$) の軌道の旋回中心を + で、数値的な静止点を ▲ で示す。

C. 相対論的プラズマ流における数値誤差問題

Boris 法および Vay 法の特徴を理解するため、磁化された相対論的プラズマ流を想定して、テスト計算を行った。磁場 $\mathbf{B} = (0, 0, 1)$ 、電場 $\mathbf{E} = (0, V_0/c, 0)$ の固定電磁場の中では、荷電粒子群は、+x 方向にバルク速度 V_0 でドリフトすることが期待される。特に、ドリフト系で静止している粒子は、観測系でも一定速度 $\mathbf{u} = (U_0, 0, 0)$ で動くことが期待される。ここで $U_0 = \Gamma_0 V_0$ 、 $\Gamma_0 = [1 - (V_0/c)^2]^{-1/2}$ である。この電磁場の中で、 $m = 1$ 、 $c = 1$ 、 $q = 1$ 、バルクローレンツ因子 $\Gamma_0 = 3$ 、初速度 $\mathbf{u}_{t=0} = (\sqrt{8.1}, 0, 0)$ として、Boris

法と Vay 法を用いてテスト粒子シミュレーションを行った。時間ステップは $\Delta t = \pi/6$ である。Boris 法では $\Delta t = \pi/6, \pi/20, \pi/60$ の 3 ケースを計算した。

粒子のモーメント空間での軌跡を図 7 に示す。初速度の位置は●で、粒子は×で示すフロー速度 ($U_0 = (\sqrt{8}, 0, 0)$) の周りを時計回りに運動することが期待される。解析解 (黒・点線) は、Vay 法の結果 (赤線) とよく一致している。一方、Boris 法では、特に Δt が大きな場合に、回転中心が $+U_x$ 方向にスライドしている。我々は、この現象が Boris 型解法に特有の数値的問題であると考えている。

本稿では、この数値ドリフト問題を理解するための糸口として、モーメント空間内で粒子がジャイロ回転せず、数値的に静止する点の位置を、Boris 法の計算手順に立ち戻って評価してみる。言うまでもないことであるが、物理的な静止点の位置は、フロー速度 U_0 と一致するはずである。

モーメント空間で

$$\mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} = (U_X, 0, 0) \quad (53)$$

のテスト粒子の運動を考える。このとき、 $\delta u = U_X - U_0$ は小さいものとする。この粒子は、(38)–(40) の各ステップで以下のように進む。

$$\mathbf{u}^- = (U_X, \frac{1}{2}U_0\theta_0, 0) \quad (54)$$

$$\mathbf{u}^+ = \left(U_X \cos \theta' + \frac{1}{2}U_0\theta_0 \sin \theta', -U_X \sin \theta' + \frac{1}{2}U_0\theta_0 \cos \theta', 0 \right) \quad (55)$$

$$\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \left(U_X \cos \theta' + \frac{1}{2}U_0\theta_0 \sin \theta', -U_X \sin \theta' + \frac{1}{2}U_0\theta_0(1 + \cos \theta'), 0 \right) \quad (56)$$

ここで $\theta_0 = \frac{qB}{m\Gamma_0}\Delta t$ 、 θ' は前々節で議論した Boris 法の近似回転角である。粒子のモーメントが (数値的な) 静止点に位置している場合、(53) と (56) は一致するはずである。このとき u_y 成分に注目すると

$$U_X \sin \theta' = \frac{1}{2}U_0\theta_0(1 + \cos \theta') \quad (57)$$

が成立する。これを三角関数の公式を使って整理すると、以下の関係を得る。

$$U_X \tan \frac{\theta'}{2} = U_0 \frac{\theta_0}{2} \quad (58)$$

前々節の (44) で触れたように、Boris 法の近似角 θ' は以下の関係を満たしている。

$$\tan \frac{\theta'}{2} = t \quad (59)$$

ここで、 t は (41) の定義を借りたもので

$$2t = \frac{qB}{m\gamma^-}\Delta t \quad (60)$$

であり、 γ^- は (54) から直ちに求まる。

$$(\gamma^-)^2 = 1 + U_X^2 + \frac{1}{4}U_0^2\theta_0^2 \quad (61)$$

(59)~(61) を用いて (58) を整理すると

$$U_X = U_0 \sqrt{1 + \frac{1}{4}U_0^2\theta_0^2} \quad (62)$$

を得る。さらに、 $\delta u = U_X - U_0$ が小さい場合は、以下の関係を得ることができる。

$$\frac{\delta u}{U_0} \approx \frac{1}{8} U_0^2 \theta_0^2 = \frac{1}{8} V_0^2 \left(\frac{qB}{m} \right)^2 \Delta t^2 \quad (63)$$

従って、Boris 法では、モーメント空間での静止点の位置が、時間ステップの 2 乗に比例して数値的にずれることがわかる。非相対論の場合は、ローレンツ因子 $\gamma^- = \Gamma_0 = 1$ を考慮して (58) 式以降を展開すると $U_X = U_0$ が求まるから、静止点のずれは相対論的運動に特有の数値効果だと言える。

テスト粒子シミュレーションによる静止点のずれ δu の推定値と、 Δt との関係を図 8 に示す。ここで議論している静止点の位置は、図 7 の回転中心とは厳密には一致しない。Boris 法 ($\Delta t = \pi/6$) の軌道の場合、回転中心 (\times) と静止点 (\blacktriangle) の位置は 10^{-3} 程度ずれている。そこで、テスト粒子シミュレーションで求めた軌跡中心を起点に、何度も繰り返しテスト粒子シミュレーションを実行することで、十分な精度で δu を推測した。結果は、(63) の見積りとよく一致している。

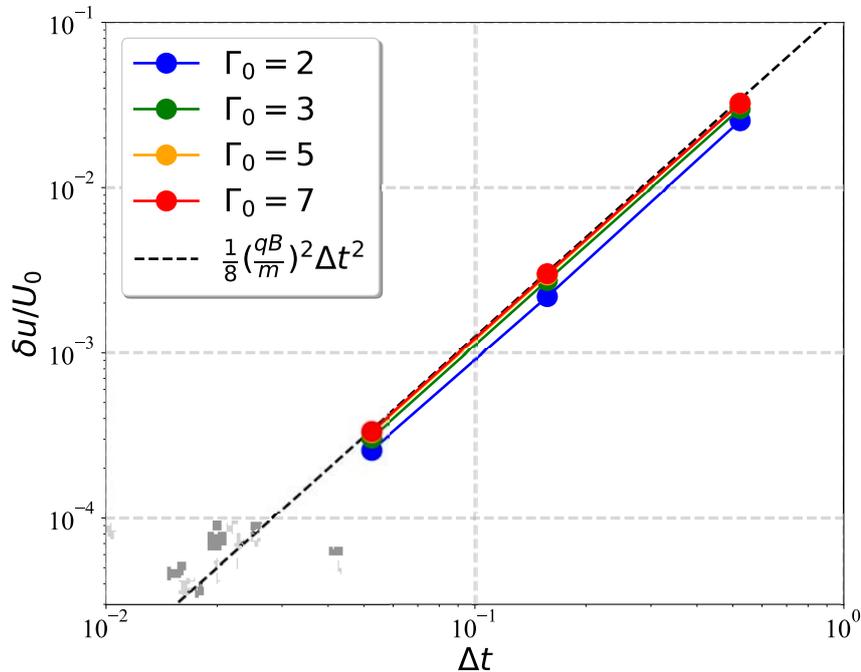


図 8: Boris 法の静止点のずれ δu と Δt との関係。

最後に、Vay 法に対して同様の検討を行う。数値的な静止点に位置するテスト粒子の時間発展を (45), (46) に従って展開すると、

$$\mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} = (U_X, 0, 0) \quad (64)$$

$$\mathbf{u}' = (U_X, -U_X t + U_0 \theta_0, 0) \quad (65)$$

$$\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = (U_X, 0, 0) \quad (66)$$

となる。 t の定義は (41) の通りであるが、ローレンツ因子 γ^- は U_X に対応するものを利用する。(46) 式を考慮して、(66) から \mathbf{u}' を逆算すると

$$\mathbf{u}' = (U_X, +U_X t, 0) \quad (67)$$

となる。(65) と (67) が一致する条件は

$$\frac{U_X}{\gamma^-} = \frac{U_0}{\Gamma_0} = V_0, \quad (68)$$

であり、これを満たす U_X は $U_X = U_0$ に限られる。従って、Vay 法は静止点の位置を厳密に解くことがわかる。

Vay¹³ 論文では、この性質を次のように説明している。計算手順 ((45), (46)) を

$$\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} - \mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} = \frac{q\Delta t}{2m} \left(\mathbf{E}^t + \mathbf{v}^{t-\frac{1}{2}\Delta t} \times \mathbf{B}^t \right) + \frac{q\Delta t}{2m} \left(\mathbf{E}^t + \mathbf{v}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} \times \mathbf{B}^t \right) \quad (69)$$

と置き換えると、物理的な静止点にいる粒子にとっては、そもそも右辺の第1項はゼロであった。そして、右辺第2項もゼロになる場合に、粒子のモーメントは静止点から変化しない。Vay 法は、これらの条件を満たす $\mathbf{u}^{t+\frac{1}{2}\Delta t} = \mathbf{u}^{t-\frac{1}{2}\Delta t}$ をうまく選んでいるのである。

6. まとめ

本稿では、プラズマ粒子 (PIC) シミュレーションにおいて、相対論的速度で運動する粒子を扱うために必要な数値解法を大きく2つに分けて解説した。

前半では、粒子の相対論的な初期分布関数を生成する方法として、Sobol 法などの手法を解説して、それらの性質・得失を議論した。次に、静止系の分布関数を相対論的 shifted 分布にローレンツ変換する数値解法を紹介した。このとき、エネルギー・運動量のローレンツ変換に加えて、時間・空間のローレンツ変換を考慮した密度補正を行う必要があり、その解決策として符号反転法を紹介した。プラズマの密度補正問題は、粒子群のエネルギー・運動量のみならず、電荷密度・電流密度を通じて、電磁場にも影響を及ぼすため、適切に対策を行うことが必須である。

後半では、個々の粒子運動を解く手段として、Boris 法と Vay 法の2つの数値解法を紹介した。そして、相対論的ドリフト運動のテスト粒子シミュレーションで、Boris 法では、時間ステップの2乗 (Δt^2) に比例して、静止点が数値的にずれることを明らかにした。このずれは、予期せぬジャイロ回転と、その周期平均の結果として、数値的なドリフト運動を引き起こすことが予想される。また、プラズマ系全体として見た場合に、予期せぬバルク加速・プラズマ熱化を引き起こす可能性がある。Vay 法はこの数値問題を起こさないため、少なくとも静止点付近では Boris 法より高精度である。しかし、著者らの経験では、Vay 法よりも Boris 法の方が精度が高いパラメーター領域もあり、一概に Vay 法が良いとは言いきれない。両数値解法の性質は、今後の研究でさらに明らかになってゆくであろう。

本稿が相対論的 PIC シミュレーションの基礎知識を得るきっかけとなり、多くの研究者の方々がパラメーター・文脈に応じた適切な数値解法を選択して、より良いシミュレーション研究を進めてくだされば幸いである。

7. 謝辞

本研究は、科学研究費助成事業若手研究 (B) 25871054 および基盤研究 (C) 17K05673 の支援を受けて行われたものである。

参考文献

¹Birdsall, C. K. and Langdon, A. B., *Plasma Physics via Computer Simulation*, McGraw-Hill, New York (1985).

- ²Boris, J. P., *Relativistic Plasma Simulation—Optimization of a Hybrid Code*, in Proceedings of 4th Conference on Numerical Simulation of Plasmas, Naval Research Laboratory, Washington D. C., pp. 3–67 (1970).
- ³Box, G. E. P. and Muller, M. E., *A note on the generation of random normal deviates*, Annals of Mathematical Statistics **29**, 610 (1958).
- ⁴Derouillat J., et al., *SMILEI: a collaborative, open-source, multi-purpose particle-in-cell code for plasma simulation*, Comput. Phys. Commun. **222**, 351–373 (2018).
- ⁵<http://www.maisondelasimulation.fr/smilei/maxwell-juttner.html>, 2018年7月16日閲覧
- ⁶Hockney, R. W. and Eastwood, J. W., *Computer simulation using particles*, McGraw-Hill, New York (1981).
- ⁷Jüttner, F., *Das Maxwell'sche Gesetz der Geschwindigkeitsverteilung in der Relativtheorie*, Ann. Phys. **339**, 856 (1911).
- ⁸Pozdnyakov, L. A., Sobol, I. M., and Sunyaev, R. A., *Comptonization and the shaping of X-ray source spectra - Monte Carlo calculations*, Astrophys. Space Phys. Rev. **2**, 189 (Translation) (1983).
- ⁹Schnittman J. D. and Krolik J. H., *A Monte Carlo Code for Relativistic Radiation Transport around Kerr Black Holes*, Astrophys. J. **777**, 11 (2013).
- ¹⁰Sobol, I. M., *On Modeling Certain Distributions Similar to Gamma Distribution*, in Monte Carlo Methods in Computational Mathematics and Mathematical Physics (Novosibirsk, 1976), pp. 24–29 [in Russian] (1976).
- ¹¹Swisdak, M., *The generation of random variates from a relativistic Maxwellian distribution*, Phys. Plasmas **20**, 062110 (2013).
- ¹²Synge, J. L., *The Relativistic Gas*, New York: Interscience (1957).
- ¹³Vay, J. L., *Simulation of beams or plasmas crossing at relativistic velocity*, Phys. Plasmas **15**, 056701 (2008).
- ¹⁴Zenitani, S., *Loading relativistic Maxwell distributions in particle simulations*, Phys. Plasmas **22**, 042116 (2015).
- ¹⁵Zenitani, S., *Dissipation in relativistic pair-plasma reconnection: revisited*, Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 014028 (2018).

研究業績

当研究所の研究業績は、京都大学教育研究活動データベースにまとめられており、平成 29 年度の研究業績についても本データベース <https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/view/> を参照されたい。

生存圏研究 第14号

| | |
|--------|---------------------------------|
| 発行日 | 平成30年11月5日 |
| 編集兼発行者 | 京都大学 生存圏研究所 京都府宇治市五ヶ庄 |
| 印刷所 | 株式会社 北斗プリント社 京都市左京区下鴨高木町38-2 |