

技術解説

国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟を利用した 革新的な新材料の開発

Development of Innovative Materials Using Onboard Japanese Experiment Module "Kibo"
in International Space Station

小林 智之 福井 寛
Kobayashi Tomoyuki Fukui Hiroshi

現在、「きぼう」日本実験棟は順調に稼働している。我が国では1999年から産業応用のための宇宙環境を利用した革新的な新材料の開発を目指した施策が開始され、社会情勢や科学技術政策の変遷に応じてその都度見直されて、今日に至っている。ここでは高品質タンパク質結晶生成実験と革新的な光触媒を創製する実験の2つの産業応用に向けた宇宙実験の概要を述べる。

At present, Kibo is operated satisfactory. Japan started to utilize space environment for industrial applications in 1999 to develop innovative materials. The program has been reviewed in every case until now according to science and technology policy and social conditions. In this paper, the outline of the experiments about high quality protein crystallization and innovative photocatalysts for industrial applications are described.

キーワード：「きぼう」日本実験棟、産業応用、国際宇宙ステーション、微小重力環境

1 創薬に向けた「きぼう」日本実験棟の利用

1.1 先導的応用化研究制度

宇宙開発事業団（NASDA：現在の宇宙航空研究開発機構 JAXA^{*1}）は1999年より「先導的応用化研究制度」を開始し、民間企業を主体とする宇宙環境を利用した宇宙実験テーマを募集した。

当初NASDAは宇宙空間での実験が可能な対象施設としてスペースシャトルを想定した。スペースシャトルで使える装置と時間及び資金の制約に加え、産業応用を考慮し、タンパク質結晶生成を宇宙実験対象として設定した。

宇宙で得られた高品質なタンパク質結晶の構造を解明し、創薬や新たな酵素等の開発を目的として、実験装置はコロンビア号（シャトルミッションSTS-107）にて2003年1月16日に打ち上げられた。しかし、帰還時の事故により実験結果は喪失した。

一方、NASDAはスペースシャトルと平行して、

ロシアサービスモジュール（RSM）を利用した宇宙実験を計画していた。RSMではスペインのグラナダ大学のガルシア・ルイツ教授が開発したキャピラリー管を使ったカウンターディフュージョン法^{*2}によるタンパク質結晶生成実験計画を設定した。コロンビア号事故翌日にカザフスタンのバイコヌールの射場から打ち上げが開始された。

1.2 RSMでの宇宙実験

JAXAは、定期的で安定したロシアの宇宙ロケットを利用して2003年2月から2008年2月までに、合計9回の宇宙実験を行った。

JAXAは国際宇宙ステーション（International Space Station：ISS）RSMを利用し、タンパク質結晶生成装置（図1）・技術及びそのための宇宙実験プロセスを確立し、合計で338種類、2529サンプルのタンパク質の宇宙実験を実施した。

民間企業、大学、公的研究機関が参加したこの

*1 2003年に宇宙科学研究所（ISAS）、航空宇宙技術研究所（NAL）、宇宙開発事業団（NASDA）が1つになりJAXAが誕生した。

*2 タンパク質溶液が細管から外側に拡散し、結晶化溶液が細管内に拡散し、細管内の結晶条件の整った所で結晶が生成する方法。

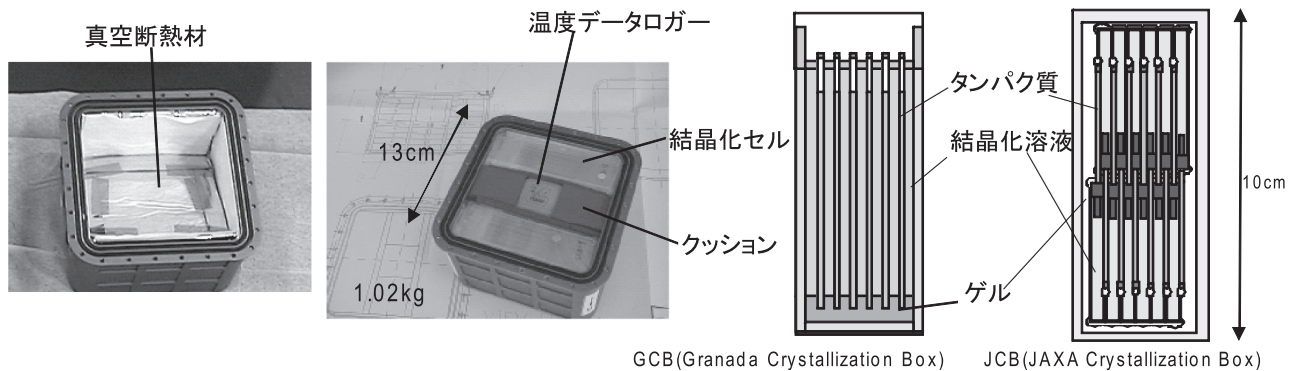


図1 ロシアサービスモジュールで用いたタンパク質結晶生成装置(左2つ)と結晶生成セル(右2つ)

宇宙実験計画から、宇宙で得られた高品質なタンパク質結晶に基づく新しい構造解析結果が生み出され、創薬や国のタンパク質構造解析プロジェクトに貢献した。また日本独自の改良によるタンパク質結晶生成セル(図1)を整備し、少量の試料量で、多数の結晶化条件を一度にできる仕組みを開発し、これからの創薬開発に大きく貢献できる成果を得た。

1.3 ISS 応用利用研究拠点推進制度

JAXAはISS計画が遅延しても、産業界がISS利用から乖離せず研究の持続を図るために、「先導的応用化研究制度」を見直し、「ISS 応用利用研究拠点推進制度」を開始した。新制度のポイントは個別のテーマを選ぶのではなく、JAXAが設定した研究領域を主導するリーダーを選ぶことにある。

リーダーの所属組織を研究拠点として定め、産学連携チームを編成する。5カ年を目安に宇宙実験計画を含む、基礎から応用までの総合的な研究計画を遂行し成果を創出する。

研究拠点として設定されたのは以下の3拠点である(設置順)。

- タンパク質結晶領域：大阪大学
リーダー：中川敦史教授
(2004年設置、4回の宇宙実験を実施)
- 新材料の創製領域：名古屋工業大学
リーダー：木下隆利教授
(2005年設置、2回の宇宙実験を実施中)
- 界面ダイナミクス領域：東京理科大学

リーダー：阿部正彦教授

(2006年設置、2回の宇宙実験を実施)

タンパク質結晶領域は、合理的な薬剤設計やタンパク質の機能改質等に向け、「医薬品や病気の発症に関わるタンパク質」や「廃棄物処理やエネルギー生産に関わるタンパク質」を対象とし、高品質なタンパク質結晶を使用した超精密構造解析・機能解析技術の確立による、応用成果の創出を目指した。

超精密構造解析の例として、 α -アミラーゼ酵素を示す。 α -アミラーゼはそれまでに地上実験により2.1 Å分解能で構造が解析されていた。今回の宇宙実験ではクラスター化が解消された結晶が得られ、兵庫県にある世界最高級の放射光を発生することができる大型放射光施設(SPring-8)で結晶構造を解析した。その結果、0.89 Å分解能(SPring-8BL12 B2)を示す単結晶が得られ、水素原子及びマルチ構造の可視化が可能になった。(図2)

応用成果例として、先天代謝異常症関連タンパク質やナイロン分解関連タンパク質で、0.88 ~ 1.1 Å分解能の構造解析を実施し、精密構造を決定することができた。このデータを利用して、医薬品開発や新規酵素開発が進められている。

1.4 「きぼう」日本実験棟での実験

タンパク質結晶領域(大阪大学)拠点の成果等

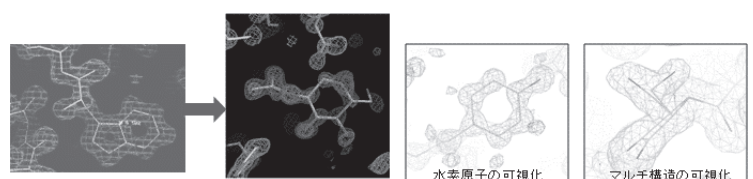


図2 α -アミラーゼの電子密度図

を踏まえて、JAXAはロシア連邦宇宙局協力の下で、2009年度より3年間、半年毎に6回実施する実験計画を設定し、「きぼう」での実験を進めている。

これまで3回の宇宙実験が行われ、1 Å以下の超高分解能を与える結晶化に成功し、創薬につながるタンパク質の結晶化・構造解析が進むなどの成果が得られている。また、技術開発に関しては、拡散係数Dと取り込み係数βからなる係数D/βが小さいほど宇宙での微小重力の特徴を十分に引き出せることが明確になったため、宇宙実験に向けたタンパク質試料の調製や結晶化条件の最適化が行えるようになってきている。

2 「きぼう」日本実験棟での光触媒の創製

2.1 革新的な光触媒の創製(界面ダイナミクス)

今回の実験では、アナターゼ型のチタニア結晶からなる高品質のナノスケルトン（以下チタニアナノスケルトン）の創製を目指した。2010年3月の実験で創製を目指したナノスケルトンとは、細孔構造をもつ金属酸化物などの無機材料のうち、細孔径が7～15 nmで壁膜が結晶性を有するものを指す。これまでに作られてきた細孔材料は細孔径が2～3 nmだが、これでは細孔に大きな分子を入れられない。100 nm程度の細孔構造を作る技術は別にあるが、これでは孔が大きすぎる。

アナターゼ型チタニア結晶はその構造特性から紫外線を吸収し電子を放出できる。

チタニアナノスケルトンは、現在市販されている光触媒よりも10%以上の性能向上が期待される。

また、色素増感型太陽電池への応用や、化粧品やクロマトグラフィー用吸着剤としての利用も考えられている。ナノスケルトンの作り方はきわめてシンプルで、無機材料の前駆物質の水溶液と界面活性剤の水溶液とを混合し、加熱するだけである。界面活性剤が自己組織化してミセルとなり、その表面に無機材料のナノ結晶が集積する。その過程で棒状の集合体へと成長してナノスケルトンとなる。その際に、油を加えておくとミセルが膨潤し、細孔径が広がる。具体的には、前駆物質と

して酸化硫酸チタン (TiOSO₄)、界面活性剤としてセチルトリメチルアンモニウムブロミド (CTAB)、油としてトリメチルベンゼンを用いた。(図3)

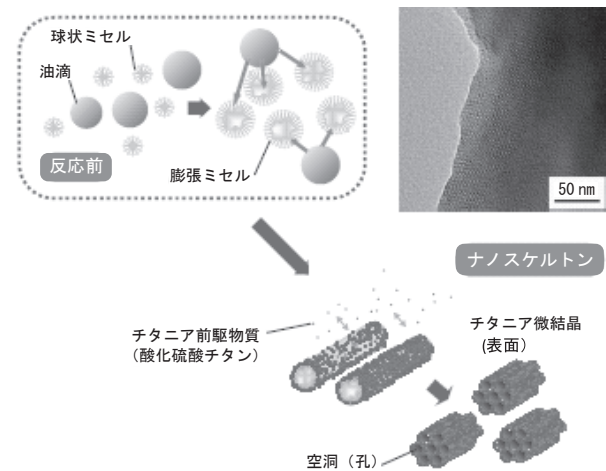


図3 ナノスケルトンの作製方法

地上でも、細孔径が7 nm程度のもので得られているが、微小重力環境には対流の抑制、浮遊・沈降の抑制、静水圧の除去などの特徴があるため、油滴がミセルの近くにとどまってさらに孔を広げる効果を発揮することにより、地上では作れない細孔径が8～15 nmのものや、長さが数μmのもので作れることが期待されている。

2.2 「きぼう」ならではの困難

このような実験を「きぼう」で行うことは簡単ではなかった。従来、ナノスケルトンの壁膜の形成は60℃程度で実施していた。だが、「きぼう」では使用を想定した実験装置の仕様により「最高で60℃、できれば40℃」と実験環境に制限があった。

界面ダイナミック領域のISS応用利用研究拠点である阿部教授グループでは生成条件を詳しく検討した結果、CTABを用い、濃度などの条件を工夫すると、40℃でもアナターゼ型結晶の壁膜をもつチタニアナノスケルトンが作れることを見いだした。

宇宙において『AとBを反応させてCを作る』というような化学実験はほとんど例がない。化学では当たり前の「ビーカーに溶液を入れ、ガラス棒で混ぜる」という作業が、宇宙では難しいことが理由のひとつである。微小重力空間ではビー

カーの溶液は浮遊してしまうし、一度混ぜはじめると攪拌が止まらなくなってしまう。このため、1つの袋を2つに仕切り、それぞれに溶液を入れるようにした。(図4)

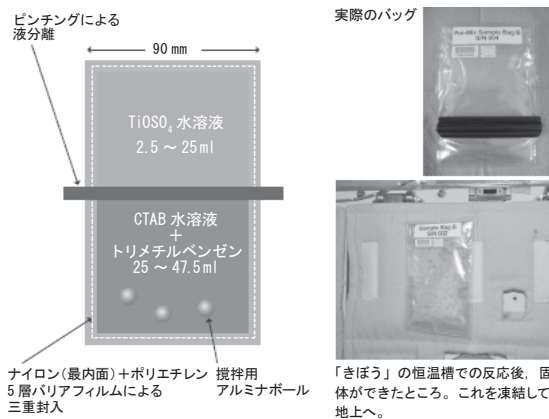


図4 宇宙実験用ミキシングバッグ

混ぜるには、仕切りをはずし、軽く振る。中にはアルミナの球が入れてあって、溶液が混ざるしかけである。誤って溶液が外に出してしまわないように、袋は三重になっている。実験材料は、油の有無や濃度が異なるものなどを各実験2セットずつ、全部で22セット持ち込んだ。実験材料の多くは凍らせて運び、「きぼう」でも実験まで凍らせて保管した。常温だと、混合しなくてもゆっくりとではあるが酸化硫酸チタンが反応してしまうし、油も相分離するので、これらを防ぐためである。「きぼう」では、野口宇宙飛行士が混合操作を行った後、細胞培養実験装置で40℃に保ち、反応させた(図4右下)。反応後、攪拌や結晶化を止めるために、袋は冷凍冷蔵庫に移された。そして第1回実験試料は2010年4月19日に山崎宇宙飛行士と共にスペースシャトルで地上に帰還し、第2回実験も2011年の4月に終了し、地上に帰還後、ナノスケルトンの細孔径や均一性、結晶性、光触媒としての機能を調べている。

今回の研究には、東北大学大学院工学研究科の宮本明教授の計算化学シミュレーションも大きく貢献している。宮本教授は、ミセル形成、チタニア結晶化といった反応過程や、できあがったナノスケルトンの結晶性などの諸物性に、重力がどのような影響を及ぼすかを、分子レベルからマクロレベルまでのマルチスケールシミュレーションで予測した。こうしたシミュレーション結果と実験

結果とを組み合わせることで、重力の作用を詳しく知ることができる。今後は、双方の結果を解析することで地上でのナノスケルトンの最適生産条件を提案し、生産へとつなげることを目指す。

3 今後の展開

今後、JAXAは、これまでに実績のある技術を基に、「きぼう」を最大限活用して、社会生活と密着した食糧問題、高齢者問題、創薬・医療やエネルギー・環境の分野などで地球生活の革新につながる成果創りに向け、産業界と大学との連携による総合的な取り組みを実施していく予定である。

最後に、写真1に「きぼう」日本実験棟が設置される国際宇宙ステーションを示す。

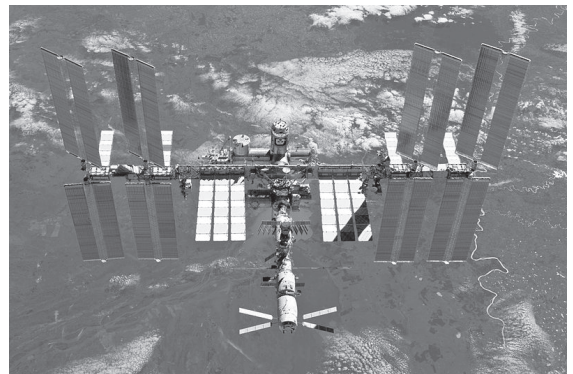


写真1 2011年3月7日の国際宇宙ステーション

<引用文献>

- 1) 小林智之:「きぼう」の科学実験一応用(産業応用), 理大科学フォーラム, 通巻314号, 東京理科大学, 2010
- 2) 科学と工業編集幹事会監修:「きぼう」と「はやぶさ」を舞台として, 化学と工業, VO163-5, pp.393-397, 日本化学会, 2010

小林 智之 (こばやし ともゆき)

宇宙航空研究開発機構
宇宙環境利用センター
主幹開発員
e-mail: kobayashi.tomoyuki@jaxa.jp



福井 寛 (ふくい ひろし)

技術士(化学部門)

福井技術士事務所 代表
客員教授: 東北大学, 東京理科大学, 大同大学
工学博士
日本化学会フェロー
e-mail: fukudont0221@jupiter.ocn.ne.jp

