

3次元フォトリック結晶生成宇宙実験

(独)宇宙航空研究開発機構 宇宙環境利用センター 池田俊民

1. はじめに ~ 応用利用プログラム 産学官の連携 ~

1.1. 国際宇宙ステーション(ISS)は産業への応用利用に果たして使えるのか？

日本の実験棟「きぼう」の利用開始時期が遅れている現状においては、ISSが産業応用利用に使えるか否かという問いは、まだ何とも答えようがないように思われるかもしれない。しかしながら、「きぼう」に先立つ宇宙実験機会として、組立中のISSを利用することにより、その目処を立てることは可能である。実際、宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、科学分野や広報分野において、すでにいくつかの宇宙実験を建設中のISSにおいて実施しており、一定の成果を挙げている。応用利用プログラムにおいても、蛋白質構造・機能解析のための高品質蛋白質結晶生成プロジェクトは平成15年から継続的に宇宙実験を行っており、平成16年末までの4回の宇宙実験で、150種類あまりの蛋白質が宇宙実験に供されている。従来、地上では単結晶が得られなかったものや、構造解析に耐えられる高品質な結晶生成が困難であったものも含め、宇宙実験では70種類以上の高品質な単結晶が得られており、産業界への寄与が期待されている。

科学技術基本計画における重点4分野の一つであるナノテクノロジー・材料分野では、現在産学官のさまざまな研究機関において活発な研究開発活動がなされているが、我々は宇宙環境利用が、この分野においても有効な手段の一つになりうると考えている。本稿で紹介する、3次元フォトリック結晶生成宇宙実験プロジェクト(3DPCプロジェクト)は、ナノ・材料分野の主要テーマの一つである自己組織化による新材料開発を、建設中のISSを利用して行うものである。図1は、本プロジェクトの推進体制を示しているが、これをご覧いただくと、素材となる微粒子の作製(富士化学(株))から、コロイド結晶生成条件の研究(富山大学、名古屋市立大学大学院、名古屋工業大学)、宇宙実験の実施(JAXA)、結晶の機能・構造評価(物質・材料研究機構)、光学素子としての性能評価、製品化検討(浜松ホトニクス(株))まで、一貫して実施可能な体制が整っていることがお分かりいただける。本プロジェクトにおける研究テーマは、民間企業における高出力パルスレーザー加工装置開発の一環として実施されるものであり、研究成果が直接製品化につながることを期待され、事業化の成功例を早期創出することで、「きぼう」利用フェーズに向けた産業界の潜在的なニーズを誘引することができるかと期待される。現行のISSの利用可能な範囲内で、「きぼう」利用を含む宇宙環境の産業応用利用の有効性を早期に実証し、まさに表題の問いにYesと答えることを目指しているのである。

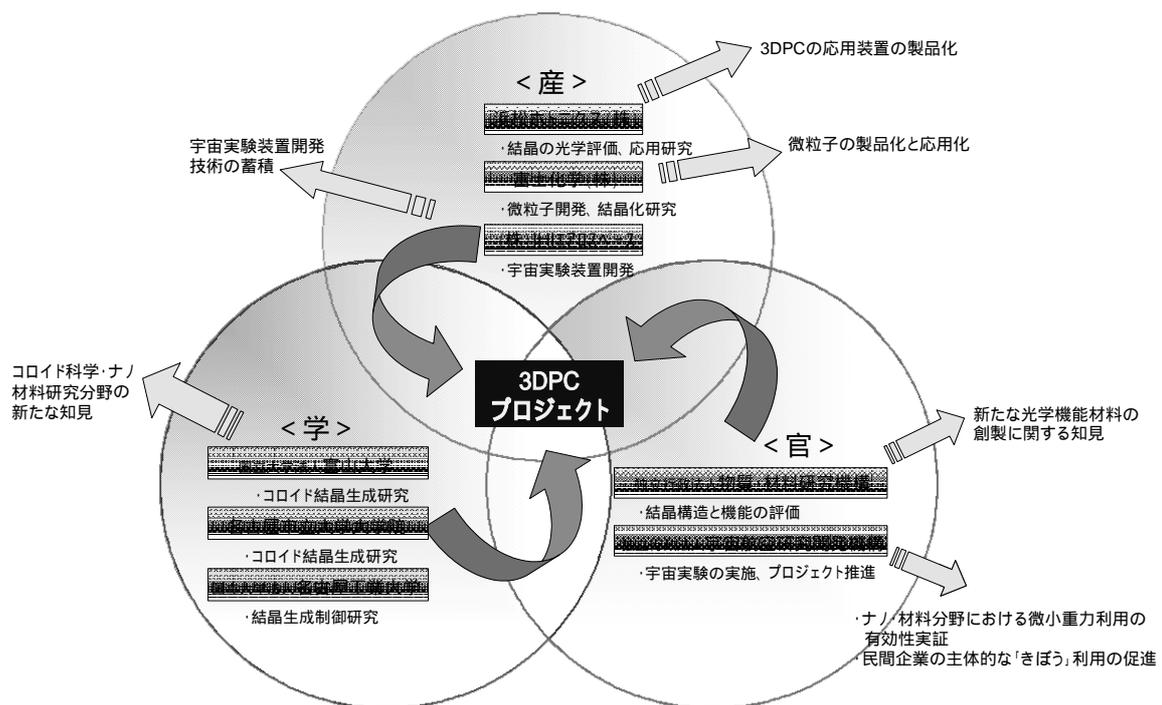


図1 3DPC プロジェクトの推進体制

1.2. 宇宙環境利用分野におけるJAXAの応用利用プログラム

前述の通り、本プロジェクトは地上から軌道上実験を経て取得成果の応用に至るまでの一貫した研究体制をとっている。それは本プロジェクトが先導的応用化研究制度から生まれた実験テーマであるからに他ならない。

先導的応用化研究制度とは、宇宙実験で得られる成果を地上の製品開発等へ応用することが明確であり、宇宙環境利用の有効性を早期に実証し得ると判断されたテーマを選定し、テーマ提案者とJAXAの間で共同研究を実施するものである。実は従来の宇宙環境利用実験では、ISSでの実験テーマを含めて、実用化まで見据えた実施体制が組まれることはほとんどなかった。一方欧米ではISSの産業界の利用推進が積極的に進められるようになり、我が国においても学問的成果のみならず産業利用に直結する成果の創出を目指すべく1999年から先導的応用化研究制度をスタートさせた。この制度の下で、民間企業の参加による宇宙環境利用を促進し、宇宙実験の成果を産業に应用することを目指すこととなったが、2004年、公募による個別課題の研究に対応する本制度については発展的に解消し、より戦略的に応用展開に資する成果を継続的に創出するために、新たな産学官連携体制の構築に向けた制度を新設するという見直しが行われるに至った。本プロジェクトは先導的応用化研究制度からプロジェクト化された最後の実験テーマということになる。

応用利用分野の新しい制度について若干付け加えると、今回の見直しにあたっては、「きぼう」の利用開始が遅れ、企業利用の拡大と促進に直接結びついていない現状を鑑み、現行のリソースの限られたISS利用の範囲内で、民間企業が注目する成果を出し続けること

により、「きぼう」運用初期の民間企業利用を円滑に推進する準備が必要とされた。そのため、まず現状の「限られたリソース」を最大限に活用し微小重力の有効性を実証しうる有望な研究領域を設定することから始まり、その中で優れた研究構想を持つ者を研究リーダーとして選定し、研究リーダーを中心とする研究拠点を設置することとした。これが、ISS 応用利用研究拠点推進制度の概要である。制度の詳細については割愛させていただくが、飛行機会としては平成 19 年ごろからを想定している。

2. フォトニック結晶のもたらすもの

2.1. フォトニック結晶

我々は、ISS の微小重力環境を利用して、3 次元フォトニック結晶 (3DPC) を生成しようとしているが、この「フォトニック結晶」とはどのようなものであるか、ということを紹介しておきたい。

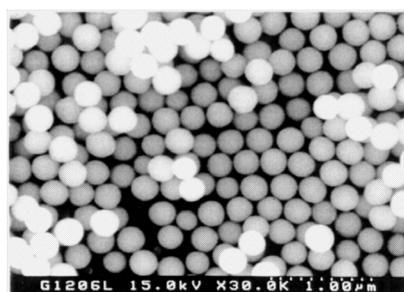
いわゆる「結晶」とは、原子の配列が空間的に繰り返しパターンを持つような物質のことを指す。結晶の中には、この空間的な周期構造に起因する周期的な電磁場が形成される。金属や半導体結晶に入射した X 線や電子線は、この周期的な電磁場と相互作用し結晶内で多数の散乱波を生じる。入射波の波長、周期構造の間隔 (結晶面間隔)、入射の角度が、ブラッグの回折条件を満たす場合に限り散乱波の位相がそろい、ブラッグ反射として観測されることはよく知られている。ブラッグ反射は、結晶面間隔と入射波の波長が同程度の場合に顕著に現れる。通常の金属、半導体結晶の格子間隔は 0.1 nm オーダであり、対応する電磁波は X 線領域であるが、周期構造の間隔を可視光領域 (数百 nm) にまで拡大すると、可視光のブラッグ反射が観測されることになる。実は可視光領域のブラッグ反射を起こす構造体は自然界には多数存在している。オパールの遊色効果、真珠の表面、モルフォ蝶の羽、玉虫の甲殻などの美しい色彩は、可視光の波長程度の周期を持つ微細な構造によって現れており、見る角度によりブラッグ条件を満たす波長が変化するために虹色の煌めきとなって人を魅了してきた。

さて金属、半導体などの結晶に話を戻すと、結晶に入射する電子波は、ブラッグの条件が満たされる場合には、強度の大きい反射波が観測される。逆に言えば、電子は真空中ではあらゆるエネルギー状態 (波長) を取りうるが、金属、半導体などの固体結晶中では、ブラッグの条件を満たす波長の電子波は、結晶の周期的な電磁場により多重散乱を受けるため、伝搬することができない。別の言い方をすれば、このようなエネルギーを持つ電子は、結晶中には存在できないということになる。このエネルギー領域を禁制帯 (バンドギャップ) と呼ぶが、このギャップを利用して電子の流れを制御することが可能となり、今日のエレクトロニクス技術の発展に繋がっている。

再び視点を可視光の波長領域に広げると、光の波長程度の周期性を持った構造体は、固体結晶中の電子のエネルギー分布に見られたようなバンドギャップを、可視光領域の光に

対して持つようになる。これをフォトニックバンドギャップと呼び、このような周期構造体をフォトニック結晶と呼ぶ。電子に対するバンドギャップを利用してエレクトロニクス技術が発展してきたのと同様、フォトニック結晶は光の伝搬特性を制御することが可能であり、昨今の情報化技術の急速な発展により要求される、より膨大な情報伝達能力、情報処理能力を小型、低エネルギーで実現するために不可欠なフォトニクス技術の中心的役割を果たすと期待されている。

フォトニック結晶は、その周期構造の次元により、1次元(1D)、2次元(2D)、3次元(3D)フォトニック結晶と呼ばれる。我々のプロジェクトが作製しようとしている3次元フォトニック結晶(3DPC)は、100 nm オーダの微粒子を微小重力下で静置することにより均一に配列させたコロイド結晶である。軌道上で生成させたコロイド結晶をそのまま弾性ゲルで固定して回収することで、圧縮により格子間距離(構造の周期)を自由に変えることができる(図2)。すなわち、1つの素子でさまざまな波長に対応可能な素子の開発を目指している。



100 nm(ナノメートル)サイズの粒揃い微粒子
(富士化学(株)製)

微粒子同士の電气的反発力を利用した自己組織化による規則配列(結晶)が、微小重力下で静置することにより高品質、大型化。結晶が熟成した後、紫外線LEDの照射によりゲル化剤を反応させゲル固定。

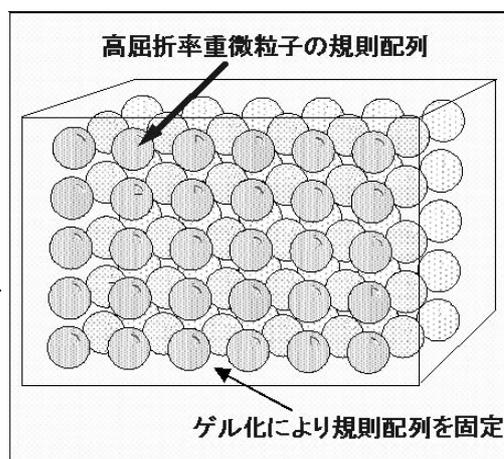


図2 微粒子の自己組織化による3次元フォトニック結晶化とゲル固定

2.2. フォトニック結晶の応用利用

フォトニック結晶は、当初はそのバンドギャップが注目され、透明な誘電体が研究対象とされていたが、近年、研究対象が半導体や金属にまで拡張されている。また、バンドギャップそのもの以外にも、例えばフォトニックバンドの分散性(波長によって光の速度が少しずつ異なる(図3))に着目した研究も行われている。フォトニック結晶が示す様々な特性は、次世代デバイスとしての可能性を広げ、光パルス遅延回路、分岐回路、波長フィルター、分散補償素子、光パルス圧縮器、ゼロ閾値レーザーなど、その応用の幅は広い。

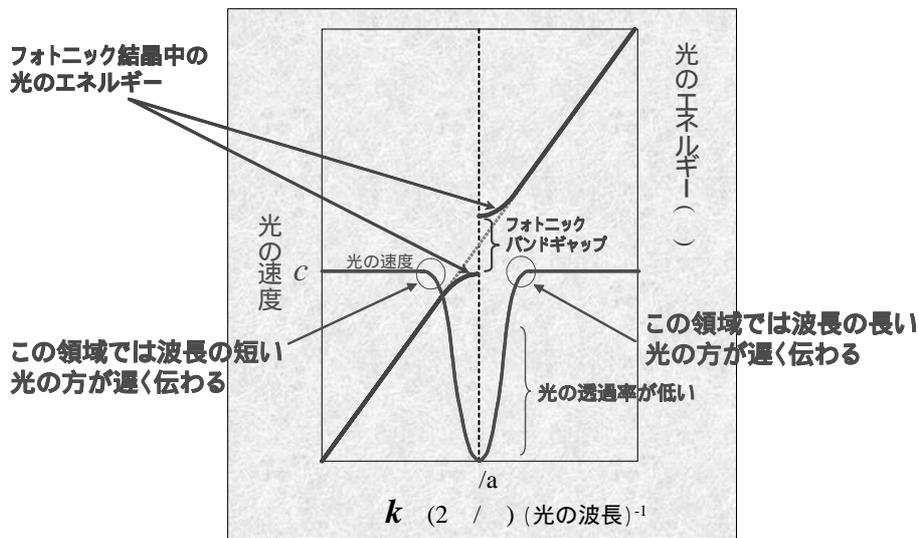


図3 フォトニック結晶中の光の波長分散特性

我々のプロジェクトが目指しているのは、先程述べたフォトニック結晶の波長分散性を利用して、図4に示すような高出力のパルスレーザ加工装置に利用されるパルス遅延・圧縮素子を開発することであるが、ゲルで固定化されたコロイド結晶を使用すると、その他にも、さまざまな利用形態がありうると考えている(図5)。

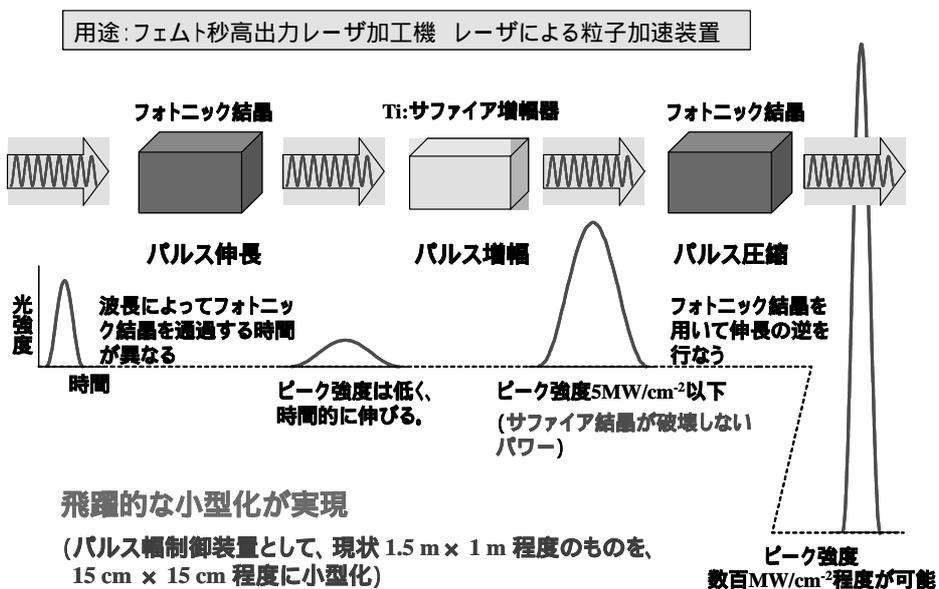


図4 フォトニック結晶の応用利用の例
(フォトニック結晶とTi サファイア増幅器を用いたパルス増幅)

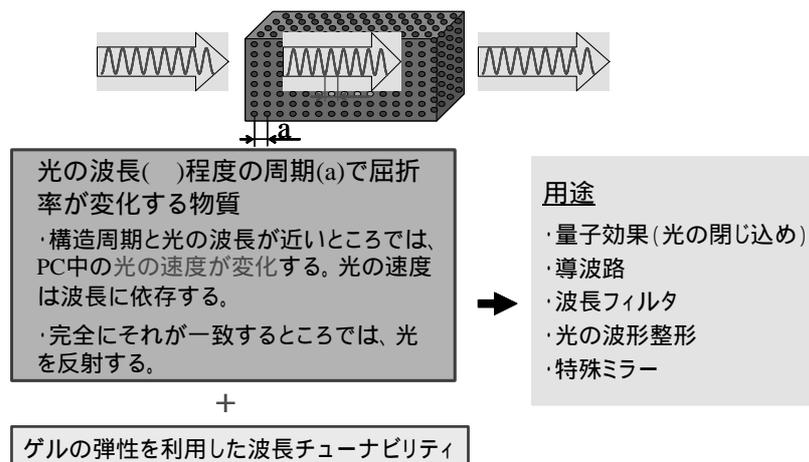


図5 ゲル化したフォトニック結晶の概要と用途

3. 3次元フォトニック結晶生成宇宙実験

3.1. プロジェクト概要

JAXA では、ISS の日本の実験棟「きぼう」による本格的な宇宙環境利用に先立ち、ISS のロシアサービスモジュール等を利用し、3次元フォトニック結晶生成宇宙実験を行う計画である。まずこの実験の内容や条件から、小規模な実験装置で実験を行うことが可能である。また、できるだけ自律的な装置とすることで、外部インタフェースを最小とすることができ、運用上の制約を少なくしている。これにより早期の宇宙実験の実施が可能となっている。実験の実施、すなわち装置の打上、軌道上運用、回収については、ロシア連邦宇宙局 (FSA/Roskosmos) や RSC エネルギア社等の支援のもとで行う計画である。

3DPC に関わる研究は、先導的应用化研究テーマとして平成 12 年に提案があり、以後調査研究及びフィジビリティスタディを通じて、宇宙実験に向けた検討を行ってきた。これらの研究成果をもとに、平成 15 年 9 月に新たに宇宙実験提案がなされ、平成 15 年 11 月に開催された应用化研究テーマ選考評価委員会における審査を経て、宇宙実験プロジェクトとして設定された。

プロジェクトの推進体制については 1 項でも触れたが、研究体制としては、国立大学法人富山大学、名古屋市立大学大学院、浜松ホトニクス(株)(独)物質・材料研究機構、国立大学法人名古屋工業大学と JAXA とが共同研究という形で宇宙実験計画の具体化を図っている。富山大学、名古屋市立大学などは、コロイド結晶科学の分野では世界をリードする研究機関であり、名古屋工業大学は高分子、ゲル、コロイドなどのソフトマテリアルの代表的研究機関である。物質・材料研究機構と浜松ホトニクスは本研究体制の中では主に結晶の評価を担当しており、3DPC の結晶構造の評価から、機能性の評価、光学特性の評価を行うとともに、製品化を目指した研究も進めている。

また、我々の目指す 3DPC の重要な要素となる微粒子の開発は富士化学(株)が、宇宙

用実験装置の開発については、実験装置の低コスト化の検討を JAXA とともに進めてきた（株）IHI エアロスペースが、それぞれその役割を担っている。その他にも、ロシアとの宇宙実験の実績のある日揮（株）や、射場での実験試料の充填手順作成の支援として、地上実験と宇宙実験の双方を熟知している（株）エイ・イー・エスなどが参加し、プロジェクトの成功に向けて日々準備を進めている。

3DPC プロジェクトは、今まで述べてきたとおり、ナノテクノロジー・材料分野の主要テーマの一つである自己組織化による新材料開発を目指すものであり、特に、本プロジェクトがターゲットとしているのは、荷電コロイド微粒子の結晶形成現象を利用し、微小重力下でセンチメートルサイズの 3DPC 単結晶を生成することである。粒径がナノメートルからマイクロメートルのオーダのコロイド微粒子が液体（媒体）中に分散したコロイド分散液では、微粒子濃度、分散液の塩濃度、微粒子の電荷数などのパラメータを適切に選ぶと、固体結晶中の原子配列のように、コロイド微粒子が規則的に配列する。この周期構造をコロイド結晶と呼ぶが、コロイド結晶は微粒子が液体中にある程度の隙間をもって配列する構造であるため固体結晶のような堅牢性はなく、小さな衝撃を与えるだけで容易に破壊されてしまう。そこで、媒体中に光に反応して重合するゲルの材料を入れておき、結晶ができたところで光を当てて全体をゲル固定する手法により結晶を保持することとしている。また、結晶化条件は上記のようなパラメータの他、イオン性の不純物の濃度などにも非常に敏感に反応し、取り扱いが容易ではない。したがって、目標とする構造を持ったコロイド結晶をねらい通りに作製するため、本プロジェクトでは 2 回の宇宙実験機会を確保し、パラメータの最適化と結晶の均一化、大型化を図る計画である。

完成した 3DPC は、高出力のパルスレーザー加工装置などの光学機器に必要な小型・高性能光学素子として応用することを目指しているため、光との相互作用の強い高屈折率の微粒子を素材として使用する必要がある。一般に高屈折率の物質は比重が大きく、このような物質からなる微粒子は地上では沈降して格子が歪んでしまうため、微小重力環境における結晶生成が不可欠である

（図 6）。なお、地上研究においては、例えば 2 次元のフォトニック結晶薄膜を積層させるなど、別の手法による 3DPC 生成の研究も行われているが、本プロジェクトで採用している方法が確立できれば、一度に大量の 3DPC を作製できる可能性があるという点で、より実用化に向いていると考えている。

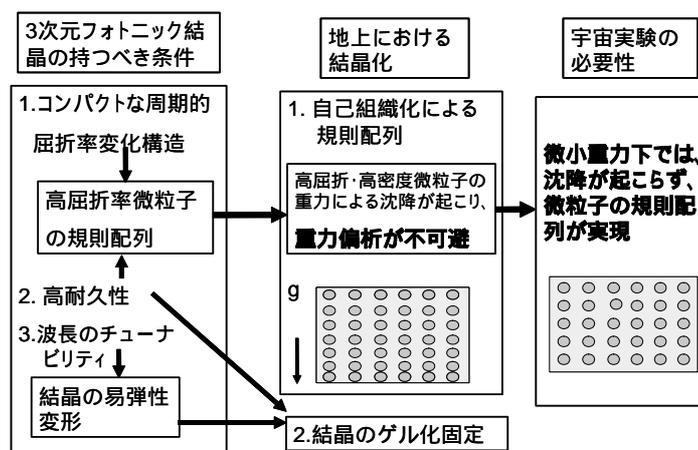


図 6 宇宙実験の必要性

3.2. 宇宙実験計画

3DPC を生成するための実験装置については次項で詳しく述べるが、我々はこの装置を 3 次元フォトニック結晶生成実験装置と呼んでいる。この実験装置は、カザフスタンのバイコヌール宇宙基地からプログレス補給船により打上げられるが、打上げの直前にコロイド分散液を長さ 10 cm ほどのセルの中に充填し、実験装置に設置する。装置の中はアルゴンガスを封入した状態として、不純物が入り込む危険性を少しでも排除しておく。打上がった実験装置は ISS のロシアサービスモジュール内に設置される。装置の中には、コロイド分散液を封入したセルを 8 本搭載し、うち 1 本については、デジタルカメラにより結晶成長の様子を定期的に撮影する。残りの 7 本については、軌道上で紫外線を照射することによりゲル固定した後、ソユーズ宇宙船を利用してカザフスタン地域内で回収する(図 7)。

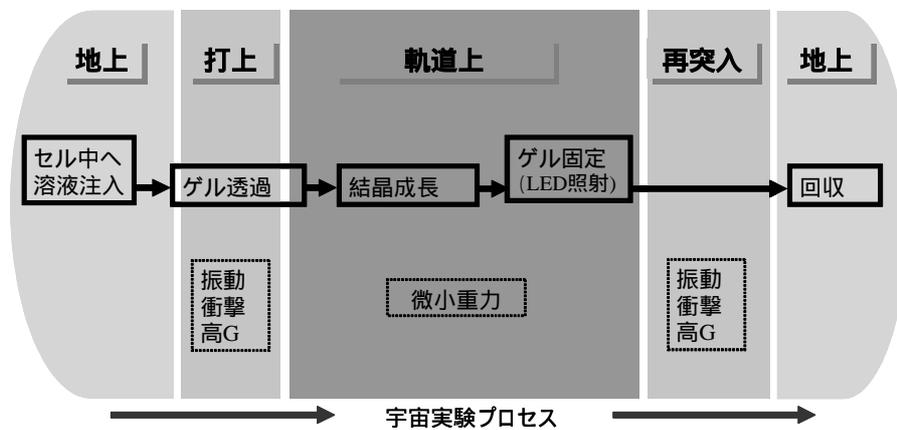


図 7 宇宙実験の流れ

3DPC プロジェクト実施のための飛行機会は 2 回を想定している。1 回目の実験は 2005 年 12 月頃に打上げが予定されており、2006 年 4 月頃回収する計画である。1 回目の実験では、主に結晶生成過程の観察や比重の異なる微粒子を用いてコロイド結晶生成に与える重力の影響の評価と、地上で想定した各種パラメータの妥当性の評価を行うのが目的である。2 回目の実験は、2006 年 12 月頃に打上げ、2007 年 4 月頃に回収する予定である。2 回目の実験では、1 回目に搭載したデジタルカメラの代わりに実験セルを載せ、全部で 12 本のセルを用いて最終目的である高屈折率のシリカコート酸化ガドリニウム微粒子によるセンチメートルサイズのコロイド結晶の生成を目指す。

3.3. 実験装置概要

3DPC を微小重力環境で生成するための実験装置として、我々は 3 次元フォトニック結晶生成実験装置 (3D-PCGF) を開発している。3D-PCGF は、その主要コンポーネントで

ある 3DPCU メインユニットと、メインユニットを操作するためのスイッチボックス、打上・帰還時の振動衝撃を緩衝するためのフォーム（発泡剤）や不燃性の布で作られたバッグなどから構成される。3DPCU メインユニットのイメージを図 8 に示す。この装置は実験試料（コロイド分散液）を含む実験セルを気密封入するコンテナのようなものである。装置内にはデジタルカメラが設置されており、指定した時間間隔で特定の実験セルの結晶生成の様子を撮影する。撮影された画像はメモリに記録され、装置を地上で回収した後にパソコンに取り込んで解析を行う。また、その他の実験セルについては、紫外線 LED (Light Emitting Diode) を埋め込んだ基板が各セルの側面に配置されており、結晶生成に必要な時間が経過した後、セルごとに順番に紫外線を照射し、ゲル化反応を起こさせてコロイド分散液全体をゲル固定する。なお、デジタルカメラ撮影、紫外線 LED の照射に必要な電力はロシアサービスモジュールから供給する。図 8 の 3DPCU メインユニットの大きさは、縦横約 22 cm 四方で、高さは約 15 cm 程度、質量は約 5 kg 強である。3D-PCGF の開発は、2005 年 3 月までに技術認定モデルの開発試験を完了し、2005 年度当初からフライト品の製作に入る計画である。

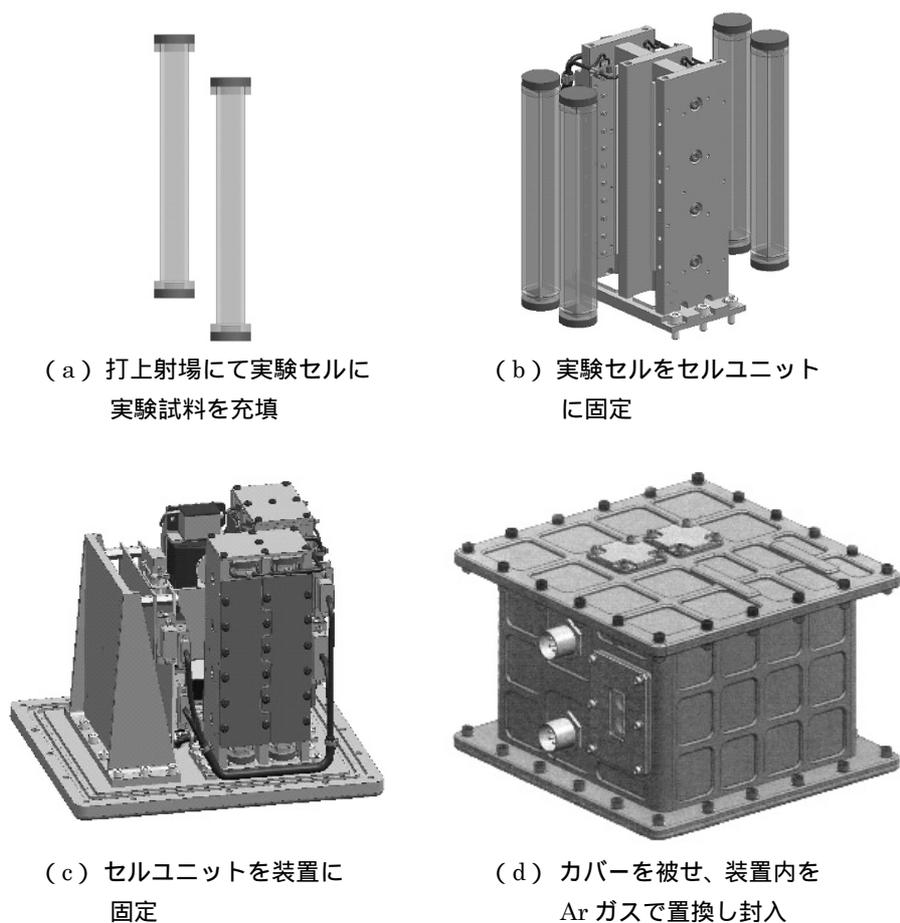
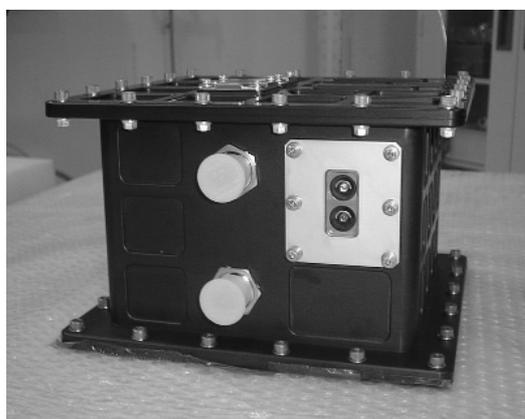
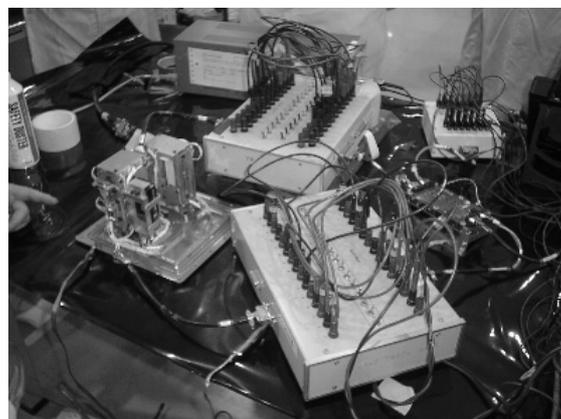


図 8 3次元フォトニック結晶生成実験装置のイメージ

図9は、3DPCU メインユニットの技術認定モデルと開発試験の様子である。宇宙用実験装置、特に有人環境で使用する装置は、十分な安全性を要求される。機械的強度、電磁適合性、過電流保護回路等の要求のみならず、ISS 船内のような密閉空間に設置される装置については、使用する材料（特に非金属材料）から放出されるガスの成分に対する規制や、火災の原因となる可燃性材料の制御に関する厳しい要求がある。また宇宙飛行士が直接ハンドリングするということを考慮し、シャープエッジ（鋭利な突起）についても地上で使用される一般的な装置以上の基準で除去しなければならない。これらの種々の安全要求に適合していることを示す安全解析は宇宙実験のコスト増のひとつの要因ではある。しかしながら、実験の規模やISS 本体とのインターフェースの取り方などに応じて、高信頼性部品を民生部品に置き換える、すなわち信頼性要求を緩和することはできても、安全要求を緩和する訳にはいかない。これは、有人宇宙環境を利用する以上避けては通れない道なのである。図9の装置外観は、一見すると過剰に頑丈そうに見えるかもしれないが、これにはいくつか理由がある。装置上下のフランジ部分大きいのは、ある基準を満たすリークレート以下で装置内を2重に封入するためのものである。この措置をとることにより、そのままでは材料要求を満足できない可能性のある非金属材料、民生部品や民生コンポーネントなどの使用が可能になっている。また、打上振動や衝撃などの環境条件に対する十分な機械的設計マージンを確保し、開発試験で問題が発生するリスクを低減している。したがって、非常にコンサーバティブな設計とはなっているが、逆に開発期間を短縮し、短期間で安全審査をクリアし、最終的には短期間で装置開発を完了させることが可能である。



(a) 技術認定モデルの写真



(b) 開発試験の様子

図9 3DPCU メインユニット

3.4. プロジェクトを支える民生技術

3D-PCGF の開発にあたっては、将来的に宇宙実験をより身近で利用しやすいものとするという観点に立ち、装置開発コストを下げるために多くの優秀な民生技術を採用している。本項目では、その一部を簡単に紹介する。

すでに述べたとおり、軌道上でコロイド結晶を生成した後は、紫外線を照射してコロイド分散液全体をゲルで固定する計画である。そのための光源としては、ゲル化反応(重合)の開始剤が反応する波長帯に十分な強度を持っている必要がある。また、コンパクトな実験装置に搭載するため、光源に紫外線 LED を採用している。紫外線 LED は現時点ではまだ市場には出回っていない最先端の民生技術であり、いくつかの企業において開発が行われている段階である。我々の使用する材料との波長適合性を考慮し、今回は豊田合成(株)製のものを採用する予定である。ただし、製品として市場に出ているわけではないため、豊田合成(株)の協力を得ながら JAXA においても寿命の評価などを行い、搭載化を進めている。

結晶生成の様子を撮影するデジタルカメラそのものも民生品を一部改修して搭載しているが、その撮影シーケンスをコントロールしたり、また、結晶生成が完了した後の紫外線 LED の照射をコントロールしたりするためのシーケンサを装置に搭載している。このシーケンサは 3D-PCGF の最も重要な機器のひとつとなるが、シーケンサを構成する部品は、従来の宇宙用実験装置に採用されている宇宙用高信頼性部品ではない。プロジェクトのスタートから宇宙実験までの期間が短く、また低コストの宇宙実験装置を製作するという観点から、高価、長納期な宇宙用高信頼性部品は最初から検討の対象から外しており、シーケンサを構成するのは地上で自動車用として開発されている部品である。周知の通り、自動車用部品は振動や温度などの過酷な環境下での使用が想定されており、また、相当数の市場データがあるため、高い信頼性を有している。この自動車用部品を宇宙に転用できれば、宇宙開発のコストが劇的に下がることも考えられる。唯一、宇宙独特の放射線環境という条件のみが評価されていないことになるが、本プロジェクトではミッション期間を限定して使用し、また放射線の影響により誤って停止してしまった場合でも、故障モードによっては再起動ができるようにするなどのシステム設計に配慮し、搭載化を行っている。

また、3.1 項でも述べたとおり、ゲル固定する前のコロイド結晶は衝撃に非常に弱いいため、ISS 内での 3D-PCGF の設置場所についてはロシア側と協議しながら、極力振動、衝撃を受けるリスクの少ない場所を選定している。それでも 100%振動、衝撃を避けられるわけではないため、実験中の環境を記録する装置を搭載しようとしている。宇宙で微小重力の擾乱などを計測するような高性能センサを搭載したシステムは、計測精度やサンプリング周波数は高いが、高価で大型となってしまう。したがって、精度は低くともスタンドアロンで動作し、小規模な実験装置に見合うような、小型、軽量なものに絞って選定を行った。候補となった振動衝撃計測装置は、物品輸送時に発生する振動・衝撃のピーク値を記録していく機器であり、輸送車や船舶などに搭載して使用されている。最終的には最も軽量(バッテリー込みで約 115 g)、かつコンパクト(75×60×32 mm)な(株)スリックの G-MEN を採用することとした(図 10)。G-MEN はリリース当初から、少しずつモデルチェンジしながら性能向上を果たしてきている。JAXA では、ミッションに最適なモデルや測定モードを決定するため、取付けインタフェースの評価を行うための航空機実験や、

計測モードごとのバッテリーの寿命評価などを行うこととしている。



図 10 G-MEN の外観
(ケースの一部を取り外した状態)

4. 今後の展望

4.1. 宇宙実験の低コスト化、短期化

宇宙環境利用を産業応用の手段とするには、宇宙実験に掛かるコスト・スケジュールの大幅な圧縮が必要である。仮に宇宙の微小重力環境を利用して精度の高い製品開発が可能であろうとも、地上で開発される精度の多少劣る製品の方が圧倒的に低コスト、短期間で実現できるのであれば、民間企業はなかなか宇宙を利用しようという気にはならないだろう。我々のプロジェクトは将来の産業応用を目指して進めていることもあり、宇宙実験装置開発の低コスト化、短期化という観点でもパイロットプロジェクト的な役割を担っている。もちろん、装置に要求される機能や信頼性は、個々の目的によって異なり、また宇宙への輸送コストは装置の重量にほぼ比例するため、それらを見捨てて全て同様のアプローチを取るわけにはいかない。しかし、最小限の機能要求、最小限の重量の実験装置を開発する際に、高いコストをかけて高信頼性を確保するのは、コストパフォーマンスの点で最適化されているとは言い難い。

このような視点から、JAXA では数年前から有人宇宙用実験装置開発の低コスト化を目指した検討を、開発部門のみならず安全信頼性管理を担当する部門とともに進めてきたが、本プロジェクトはその成果を活用して進めてきている。それは例えば、単に民生部品や民生コンポーネントを沢山載せるということではなく、実際に搭載化するための設計プロセスや審査プロセスをどれだけ効率的に実施できるか、という点にある。そのためには、リスクを如何に回避するかではなく、如何にリスクテイクできるか、という観点が必要となる。また別の例では、従来装置開発メーカーが実施していたフライト品に対する振動試験などの環境試験を実施せずに、装置製作後に最低限の機能確認を行った状態で受け取り、JAXA において環境試験を実施するというプロセスである。これは開発段階で十分な設計

マージンを確保し、フライト品製作段階ではJAXAがリスクテイクするという発想である。

今回我々が開発している装置は、将来、同様の小規模な実験装置を低コストで開発する際のひとつの先例となる。ただし、更なる宇宙実験の低コスト化、短期化に向けては、まだまだできることは沢山あると思っている。

4.2. 自己組織化による新材料の創製

ナノテクノロジーは紛れもなく今世紀の科学技術の重要なキーワードであるが、ナノデバイスを大量生産するとなると、リソグラフィに代表される微細加工技術の著しい進歩をもってしても、まだまだ技術的にも生産コストという点においても課題が多い。そこで注目されているのが、自己組織化による新材料の創製である。リソグラフィなどで多段の工程を経て作成されるパターンが、自己組織化を利用することで半自動的に大量形成できる可能性がある。

「自己組織化」という言葉を使う際には必ずと言っていいほど、その定義から話が始まるのが世の常となっている。それは「自己組織化」という用語が、科学的な共通認識を得られないまま、様々な分野で様々な意味で使われており、明確な定義が存在していないためである。本稿では特に断りなく使ってきたが、材料を創製する際に、その構成要素が自ら進んでパターン形成すること、といった広い意味合いでとらえていただきたい。そういう意味で、本稿ではコロイド微粒子がある条件下で自律的に結晶構造をとる現象も、いわゆる自己組織化として記載している。

本プロジェクトでは特定の目的を持ったデバイスを開発するという観点から、素材となる微粒子や目標とするコロイド結晶の格子間隔を決め、結晶生成に必要な条件を検討している。しかしながら、このコロイド微粒子の素材を変えたり、格子間隔を変えたりするだけで、様々な特性を持つフォトリソ結晶を大量に生成することが可能になるかもしれない。あるいは、この方法を応用して別の機能性を有するフォトリソ結晶を生成することも可能になるかもしれない。

3DPC プロジェクトは自己組織化を利用した宇宙におけるフォトリソ結晶生成の第一歩に過ぎず、このコンセプトは今後さらに発展する可能性を秘めている。今まで、宇宙を材料生産の工場とすることを本気で考えた宇宙実験はなかったが、このプロジェクトが完了した後、ISS にコロイド微粒子を使用したフォトリソ結晶の大量生産工場が実現できる可能性はある。そうなれば、将来宇宙で生産した光デバイスが地上の機器に使われるという夢のような話が、現実の話となる。まさに、希望の光が宇宙からやってくることになるのである。

5. 参考文献等

- K. Inoue and K. Ohtaka(Eds.): Photonic Crystals (Springer, Berlin, 2004)
- J. Yamanaka, H. Yoshida, T. Koga, N. Ise and T. Hashimoto: Phys. Rev. Lett.80, 5806 (1998)
- Y. Iwayama, J. Yamanaka, Y. Takiguchi, M. Takasaka, K. Ito, T. Shinohara, T. Sawada and M. Yonese: Langmuir, vol.19, 977 (2003).
- T. Sawada, Y. Suzuki, A. Toyotama and N. Iyi: Jpn. J. Appl. Phys.40, L1226 (2001)
- 伊藤研策：「光を操る三次元フォトニック結晶の開発」(最前線の研究現場から) 実業之富山 2004年3月号、実業之富山社(2004)
- 瀧口義浩：解説「人工オパール「フォトニック結晶」と光制御」、未来材料 2004年12月号、(株)エヌ・ティー・エス(2004)
- 伊勢典夫、曾我見郁夫著：「高分子物理学」、朝倉書店(2004)
- 日本化学会編：「コロイド科学」、東京化学同人(1995)
- 千葉大学工学部 大高一雄研究室ホームページ
<http://comp.te.chiba-u.jp/photonic/photonic.html>
- 京都大学大学院工学研究科 野田進研究室ホームページ
<http://www.kuee.kyoto-u.ac.jp/~lab05/index.html>
- 「ナノエレクトロニクス.jp」ホームページ
<http://www.nanoelectronics.jp/index.htm>
- JAXA プレスリリース「国際宇宙ステーション利用計画における応用利用分野の新しい施策について-国際宇宙ステーション応用利用研究拠点推進制度-」(2004年11月)
http://www.jaxa.jp/press/2004/11/20041117_sac_iss_use_j.html