

リアルタイム位相シフト干渉法による 宇宙での結晶成長の研究

Real-Time Phase-Shift Interferometry for The Study of Crystal Growth in Space

塚本勝男

Katsuo Tsukamoto

ktsuka@mail.cc.tohoku.ac.jp

東北大学 大学院理学研究科

Faculty of Science, Tohoku University

Crystallization in microgravity has been investigated by means of newly designed real-time phase-shift interferometry (RPSI) and by other high-resolution optics, so as to understand the differences of crystallization phenomena in space and on the Earth. The RPSI has successfully been employed to measure the exact growth rate of the crystals ($<0.1\text{nm/s}$) and the surface profile together with the concentration field around the growing crystals. These sensitive optics give us promising tools for the experiments in the international space station which is now being constructed.

1. はじめに

地上からたった 300 キロ上空に達するだけで通常我々の経験しない無重力空間に達する。現在この無重力空間を利用する研究が盛んに行われている。これは21世紀初頭の運用を目指した国際宇宙ステーション計画に向けた研究の準備のためであり、宇宙生物学、宇宙での材料創生や結晶成長の研究、流体现象や燃焼現象の研究などが主な研究分野である。

著者の興味は宇宙での結晶成長メカニズムである。結晶成長を微小重力環境で行うメリットは次のように整理されよう。(1)重力沈降がないために比重差のある合金粒子を均質に混ぜて固化することが出来る。(2)重力に起因する対流を抑制することが出来る。(3)溶液や融液からの成長では、容器を必ずしも必要としない。この中で(2)の効果は結晶成長や核形成のメカニズムの基礎的な解明を行おうとする際には極めて重要である。図1に重力下で普遍的に発生する密度対流を示

した。溶液中で結晶が成長すると、周囲の溶液が薄くなり浮力が発生し対流を誘発する。その際の濃度差は僅かであるが地上では対流の発生を抑制することは不可能である。

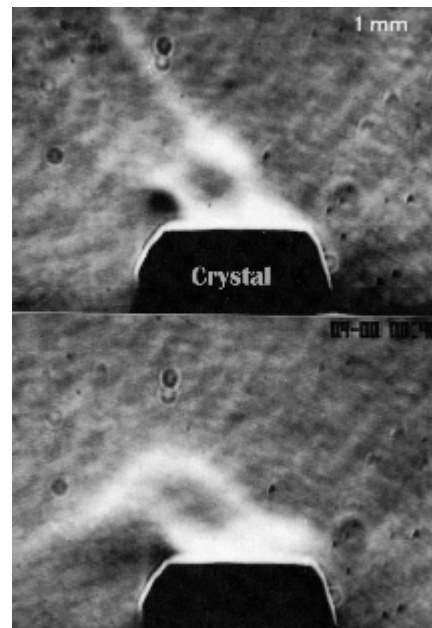


図1 地上で結晶を成長させるときに生じる密度差による対流。

この対流は様々な面で結晶成長に影響を与える。対流が揺らぐために、たとえ溶液全体の濃度を均質にしても結晶近傍の濃度や温度分布は時間とともに変化する。結晶の質や完全性が不均質なのもこのせいである。結晶のメカニズムを知ろうとすると、結晶の成長速度の濃度依存性を調べることは重要であるにもかかわらず、地上ではこの対流のために精密な測定は不可能となってくる。したがって、対流を抑制した微小重力環境を利用したいとするのは当然のなりゆきである。

2. 短時間微小重力実験

では、どのようにして微小重力環境を作り出しているのだろうか。これまで著者が利用してきた方法を年代、目的、利用した光学装置とともに図2に示した。スペースシャトルでの実験に比べて、数秒から6分間という非常に短時間の微小重力環境を利用してきた。数年間以上準備が必要なシャトル実験に比べて、精密で研究者主導の実験ができるのが、これらの短時間微小重力実験の特徴である。

実験室での結晶成長実験では通常、数時間から数日の日時を必要とする。それに対してこの短時間で、どのような有効な実験が出来るのであるか？これに答えるのも一つの挑戦であった。詳細を述べる前に、我々の結晶成長研究のためには何を測定する必要があるのかを整理しておこう。(1)結晶の成長速度:溶液からの成長では結晶面の変位量から 0.1nm/s 以下の成長速度の溶液濃度依存性を測る必要がある。また短時間に濃度を変化させて実験をするために、リアルタイムである必要がある。これまではマイケルソン干渉計を利用したが未だ感度が不十分。(2)結晶近傍の濃度・温度:濃度や温度により溶液の屈折率が変化する。この依存性は僅かであり従来のマツエンダー干渉計でも不十分。

これまで結晶成長の“その場”観察に干渉計を

利用したのは我々が最初であって経験を積んでいたにも関わらず、短時間の微小重力実験の前に問題が山積みされていた。しかも宇宙での研究に使用しようとするとは性能的な問題だけではなく。ロケット実験では微小重力環境に達するまでのロケット内の加速・振動は研究室の防振台環境の比ではない。このような過酷な環境で、かつ、飛躍的な性能の向上を目指して製作したのがリアルタイム位相シフト干渉計であった。干渉計は光の波長を物差しにしているため、僅かな振動が干渉縞の変動となって測定に支障をもたらす。この耐震性向上のために、振動に強いダイソン方式のコモンパス干渉計を設計製作し、さらに耐震性を増すために、レンズの保持方法から改善するために徹底的な振動テストを行った。この一連の作業は、短時間微小重力実験を行う前に計画されたスペースシャトルでの結晶成長その場観察実験に際して、オリンパス光学によってなされた。この設計思想やコモンパス干渉計は現在建設中の国際宇宙ステーションの実験装置にも受け継がれている。

3. リアルタイム位相シフト干渉計

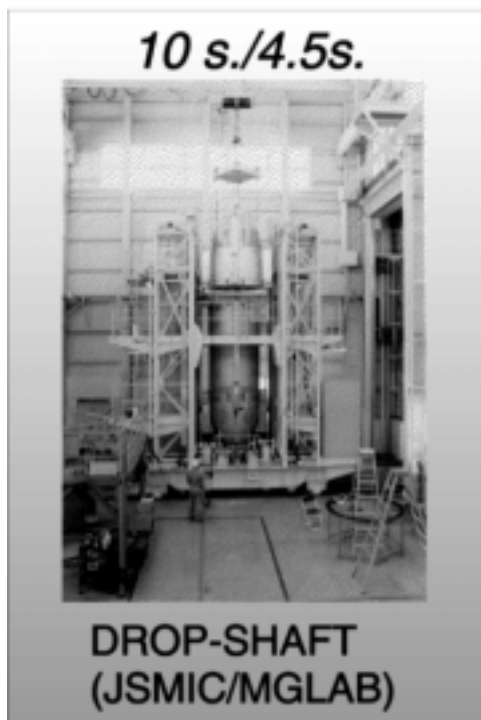
分解能を向上させるために白羽の矢をあてたのが位相シフト干渉計であった。ただ市販の製品ではリアルタイム計測はできない。リアルタイム制を追求した結果、中楯方式で偏光波面を 45 度ごとにずらし、3台の CCD カメラで干渉縞を取得する方法を採用した(図3)¹。ただ、オリジナルと異なって結晶成長の研究には像の拡大と高画質が不可欠であるので、対物レンズを結晶成長セルの前に挿入して結像系の強化をはかり画質の大幅な向上を計った。市販の光学部品だけでブレッドボード上に組み立てた干渉計を最初にテストしたのは、北海道の上砂川にある 700m の落下施設(JAMIC)であった。結果は見事に失敗。原因はメカニカルショックによる光軸の大きなずれであったがこの経験は貴重であった。

問題は3台の CCD カメラである。偏光波面分割系も含めると干渉計程度の大きさとなる。宇宙実

験装置は1グラムが1万円とされているので小型化が不可欠である。悩み抜いた結果 3CCD カ



1990/1995
REAL-TIME PHASE-SHIFT INTERFEROMETRY
(Growth Mechanism)



1993~
**HIGH TEMPERATURE
IN-SITU OBSERVATION**
(Growth Mechanism of Oxide Crystals)
1994~
**DYNAMIC LIGHT SCATTERING/
PHASE-SHIFT INTERFEROMETRY**
(Nucleation)

1993~
**REAL-TIME PHASE-SHIFT
INTERFEROMETRY**
(Measurement of Diffusion Rate etc.)

図2 短時間微小重力実験をするための施設。数秒から6分間で有効な実験データの取得が求められる。

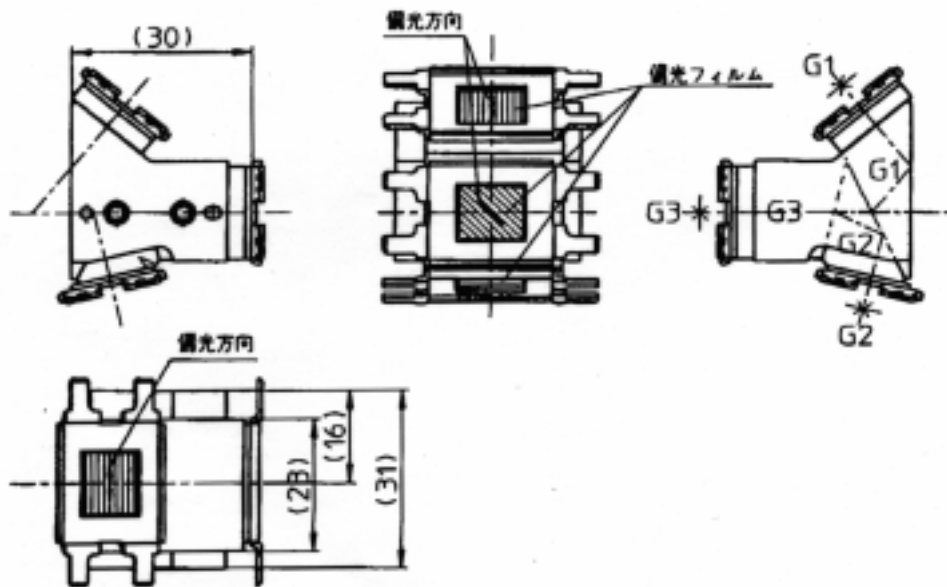


図3 偏光波面分割用のプリズム。3CCD カメラに直接組み込んで使用。

メラを利用できないかと思いついた。早速メーカーに問い合わせると製作には巨額の費用が必要とのこと。そこで、電子回路や本体を変更せずに、色分解プリズムだけを偏光波面分割プリズムに変更出来ないか考えた。そうすると、プリズムだけを入れ替えれば通常のTVカメラと変わりはない。ただ、色分解よりも遙かに精密性を要する偏光波面分割用のプリズムの製作は、どのメーカーも経験がなかったのが問題であった。

この偏光波面分割用のプリズムを設計したのが島津製作所、製作したのが富士写真光機、市販の3CCDカメラ用に組み立てたのがソニーである。偏光用のプリズム製作が大変なハイテクであることはその時に初めて分かった。図3に偏光波面分割プリズムを示す。これで45度ごとの偏光波面を3方向に取り出すことができる。これまで抱えるほどの大きさであったものが、今では手のひらサイズになり、かつ、メンテナンスフリーとなった。その結果、後のロケット実験²や落下、航空機実験に盛んに利用されて来ただけでなく、現在建設中の国際宇宙ステーションにも利用される予定であ

る。

図4には TR-1A4号機ロケットにセットされた光学系を示した。1方向からは透明な結晶裏面より



図4 TR-1A ロケット用のリアルタイム位相シフト干渉計とコモンパス干渉計。直交する2方向で使用する。円盤直径は約100cm。

結晶表面を観察し、成長速度のリアルタイム測定。直交する方向から、結晶周囲の濃度分布の変化を測定、とした。

4. おわりに

リアルタイム位相シフト干渉計の話題を中心にしたが、この他にも動的光散乱装置などの光学系が複雑に組み込まれており、それが日本の宇宙実験装置の特徴である。結晶成長の研究のた

めに、光学系に素人の研究者がどのようにして光学系を技術者と改良していったかが、少しでも理解していただけるならば幸いである。

宇宙での実験は簡単な実験しかできないというのが現在でも世界的な常識である。しかし、短時間微小重力での難問を解決してきた結果、日本が作り上げたユニークな結晶成長研究用の“その場観察”装置は、地上の精度以上での実験が宇宙でも可能になった点で世界に誇れるであろう。

¹ 塚本勝男、応用物理 63 (1994) 713。

² K. Tsukamoto 他7名、J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. Vol.15 (1998) 2。