

第1章 gジッターと流体现象

東北大学流体科学研究所 円山 重直

1. はじめに

国際宇宙ステーションの建設が進み、微小重力実験の運用が目前に迫っている現在、宇宙実験におけるgジッターが問題になっている。予想される宇宙ステーション中のgジッター特性は意外と劣悪であること[1]がわかっており、これが微小重力実験に及ぼす影響が検討され[2][3]、gジッターに関する研究会も設置されている[4]。

一方、航空機による微小重力実験では、定常の残留加速度の問題だけでなく、振動数が高く加速度が大きいため、干渉計を使った実験[5]の障害となっている。一般に微小重力環境が良好であると考えられている落下塔の実験でも、落下カプセル本体の弾性運動や補器類の機械振動のために、意外と大きいgジッターが存在しており、微小重力環境で生成する液柱の界面安定性の影響が考察されている[6]。

国際宇宙ステーション(ISS)などによって得ることの出来る環境で重力が残留してしまう理由には様々な原因が考えられ、潮汐力やわずかな空気との摩擦によって生じる定常的な加速度(残留加速度)と、実験装置の振動や乗組員の活動により生じる周期的な加速度(gジッター)に大別される。

これまでに微小重力下での流体をモデルとした様々なシミュレーションが行われ[7]流体に及ぼす重力の影響の中で最も大きいのは残留加速度であることが知られている。しかしながら、航空機による微小重力実験では残留加速度だけではなく、高周波gジッターの影響が大きく、干渉計を用いた実験の障害となっている[8]。

微小重力環境下におけるマランゴニ対流[9]や半導体製造時における対流現象[10]などの流体现象は、既に発行されている「JSUP 宇宙環境利用の展望」で述べられているほか、多くの解説がある。また、微小重力下における拡散現象も述べられている[11]

本稿では、gジッターが微小重力下の流体现象に及ぼす影響について種々な観点から解説することを試みる。

2. 微小重力場における液柱の挙動とgジッター

2.1 微小重力下における大直径液柱の挙動

水道の蛇口から下方にゆっくり流れ出た水は次第に細くなり、やがて乱れた状態になってばらばらになる。これは、噴流が地上の重力によって加速されて流れが不安定になるからである。太いパイプから流れ出る噴流は、もっと早く乱れた状態になってやがて液滴の噴流となる。

この様な、噴流の乱れと分裂は、液体の表面張力、周囲空気との摩擦、噴流の乱れ等が複雑に影響し合う現象である。この現象は、エンジンの燃料の微粒化や、海面が波によって大気と混合し二酸化炭素を吸収するメカニズムの解明にも多大な影響を与えている。流体の乱れは、流速と代表長さに比例する無次元量であるレイノルズ数によって評価される。管内流れのレイノルズ数が2300以下では乱れが発

生しない(層流)が 10000 以上では乱れた状態(乱流)となる。

地上では、重力の影響があるため、安定で低速な大直径液体噴流を作ることは不可能である。そこで、短時間微小重力環境を利用して低速で直径の大きい液体噴流を作り、液柱表面の安定現象を観察した。液柱は、短時間微小重力が達成された後、下方のノズルから噴出される。バルブを通して水を流出させると、流入液体の乱れのために安定な液柱を作ることができない。そこで、まず、空気を水タンクに流入させ、その水の圧力によってノズル下方の貯水槽の水を押し出す形式とした。この機構によって、極めて初期乱れの小さいノズル噴流を作ることになった。

図 1 は、落下塔を用いて行った液柱の噴出実験結果である。ノズル直径は 50mm であり、流速は 0.3m/s である。この様な低速・大直径の噴流は地上の重力場では作ることが不可能である。この時のレイノルズ数は 15000 であり、管内流では乱流域に達しているが、液柱界面は安定であり、層流状態に近いと考えられている。この状態は、レイノルズ数が 40000 近くになっても同様であった。

液柱表面に僅かな乱れがあるが、この振動数は、落下塔カプセルの微小重力下における g ジッター(微小加速度変動)の振動数とも関係が深いことが明らかとなっている[12]。この様な精密な流体実験には、g ジッターを極力低減する必要がある。

同様な実験が航空機を用いて行われている[13]。このとき、貯水槽に金魚を入れて実験した結果が図 2 である。金魚を容器に入れて微小重力実験を行うと、金魚は色々な方向を向くが、噴流の中では必ずノズルの出口の方向を向いている。図 1 の結果からも、微小重力空間で作った噴流内は安定な液柱と考えられるから、金魚がこの噴流中で流れを感じることは難しい。従って、金魚が一定方向を向くのは、何らかの視覚と脳の作用が関係しているとも考えられる。より精密な実験を行うことによって、動物の視覚と無重力の関係が明らかになるかもしれない。

2.2 液柱のスケール効果

液体をノズルから噴出して液柱を作ると、やがて液柱は分裂して液滴になる。この現象は、インクジェットプリンターに応用されている。デジタルカメラやコンピュータグラフィックのきれいな絵で年賀状を出している方も多いだろう。また、液体が微細化する現象は、ガソリンエンジンなどの熱機関に応用され、高燃費・低公害車の開発には無くてはならないものとなっている。

図 3 は、直径 250 μm のノズルから水を 2m/s の速度で噴出した液柱の分裂過程を示している[14]。ノズルから噴出した水の界面は、徐々にくびれてゆき、ついには液滴に分裂する。この分裂過程は、主に表面張力の不安定性に起因するもので液柱の分裂間隔には一定の法則性がある。レイリー(Lord Rayleigh)は、円筒液柱界面の微小擾乱の安定性理論から、液滴間隔と噴流直径 d との比が、 $\lambda/d=4.51$ のとき、界面が最も不安定になることを示した[15]。実際の液体噴流では表面張力と慣性力の関係、周囲気体との摩擦、重力などの影響によって、上記の比と若干異なる液滴間隔となることが知られている。

液柱の直径を限りなく小さくしてもこの現象が現れるのだろうか。図 4 は、分子 1 個 1 個の動きを逐一計算してシミュレーションした極細液柱の分裂状況を示している[16]。シミュレーションした分子はアルゴンガス中に置かれた液体アルゴンの様子を示しており、直径 14 オングストローム(1 オングス

トローム = 千万分の 1mm) の液柱が分裂している。この時の液滴間隔と直径の比は 6.3-7.5 で巨視的な液柱の間隔と大きく異なっていないことが興味深い。

それでは、液柱の直径を図 3 に比べて大きくしたらどうなるだろうか。水道の蛇口から下方にゆっくり流れ出た水は次第に細くなり、やがて乱れた状態になってばらばらになる。これは、噴流が地上の重力によって加速されて流れが不安定になるからである。太いパイプから流れ出る噴流は、もっと早く乱れた状態になってやがて液滴の噴流となる。地上では、重力の影響があるため、安定な大直径液体噴流を作ることは不可能である。

そこで、短時間微小重力環境を利用して低速で直径の大きい液体噴流を作り、液柱表面の安定現象を観察した。航空機で微小重力環境を実現するには、速度を上げた航空機を急上昇させ、次いで放物曲線を描くように飛行すると約 20 秒間の微小重力環境が得られる。通常 1 時間に 10 回程度の実験が出来るが、微小重力環境前後では地上重力の二倍程度の加速度が実験者と実験装置にかかる。

図 5 は、航空機を用いた微小重力環境中で行った液柱の噴出実験結果である。液柱は、微小重力が達成された後、下方の直径 50mm のノズルから噴出される。水を噴出させるために、水の圧力によってノズル下方の貯水槽の水をピストンで押し出す図 6 の形式とした。この機構によって、極めて初期乱れの小さいノズル噴流を作ることに成功した。この様な低速・大直径の噴流は地上の重力場では作ることが不可能である。

水の表面張力のために、噴流先端は楕円形状になっている。液柱表面に波状の乱れが発生している事がわかる。この不安定性現象は、大直径の液柱の分裂現象に影響を与えると考えられる。この界面擾乱は、微小重力下における g ジッター (微小加速度変動) の振動数とも関係が深いことが明らかとなっている [13]。

噴流の乱れと液柱の分裂は、液体の表面張力、周囲空気との摩擦、噴流の乱れ等が複雑に影響し合う現象である。この現象は、エンジンの燃料の微粒化や、海面が波によって大気と混合し二酸化炭素を吸収するメカニズムの解明にも多大な影響を与えている。

図 1 は、落下塔を用いて行った液柱の噴出実験結果である。ノズル直径は 50mm であり、流速は 0.3m/s である。この時のレイノルズ数は 15000 であり、管内流では乱流域に達しているが、液柱界面は安定であり、層流状態に近いと考えられる。この状態は、レイノルズ数が 40000 近くになっても同様であった。落下塔の微小加速度変動 (g ジッター) は航空機に比べて小さいので、図 6 に比べて液柱界面の擾乱が小さく、滑らかな液柱が発生していることが分かる。

3 . 非線形受動制振装置による g ジッターの低減

3 . 1 非線形受動制振装置

前述したように、予想される宇宙ステーション中の g ジッター特性は意外と劣悪であること [1] がわかっている。 g ジッターの周波数に対する流体现象への影響は木下によって解説されている [18]。この g ジッターを解消するための制振装置も種々開発されているが、装置自体が複雑で高価であること、ステーション中の電力を必要とするなどの問題がある。

航空機による微小重力実験では、定常の残留加速度の問題だけでなく、振動数が高く加速度が大きい
ため、干渉計を使った実験[5]の障害となっている。一般に微小重力環境が良好であると考えられてい
る落下塔の実験でも、落下カプセル本体の弾性運動や補器類の機械振動のために、意外と大きいgジッ
ターが存在しており、微小重力環境で生成する液柱の界面安定性の影響が考察されている[6]。

これらの、gジッターを軽減するために、能動制振装置や受動制振装置が考えられているが、前者は
システムが大型で重くなる傾向にあり、後者は、制振性能を満足する設計を行うと、大きな稼働空間が
必要となる傾向がある。微小重力実験は、実験スペースや時間に制約があり軽く小さいシステムが望ま
れる。特に光干渉計などの実験では、低周波加速度の低減より高周波数の加速度減衰が重要である。

著者らは、膜を用いた弾性翼理論の研究[19]で、初期張力の小さい膜は変位に応じた非線形弾性挙動
を示すことを明らかにしている。微小重力実験では、制振性能が要求されるのは微小重力時のみであり、
大きな加速度がかかっている時の制振は要求されず、むしろばね剛性が高く実験装置の衝撃を緩和する
システムが望ましい。そこで、円山は、膜の弾性の非線形性を利用して、微小重力環境下のみで制振性
能を発揮し、大きな加速度下では残留加速度に応じた制振性能を発揮する安価で小型の非線形受動制振
装置を考案した[20]。

3.2 原理

弾性膜は、初期張力が大きいときには、微小な変位に対して復元力が線形である。しかし、初期張力
が小さいと、平面状態からの変位が小さい場合は変形に対する復元力は極めて小さく、変位が大きくな
ると弾性膜の張力が増大することから大きな復元力を有することになる。つまり、初期張力の小さい膜
は、有限変位に対して非線形のパネとして作用することになる。この非線形性は、膜に掛かる初期張力
が小さいほど、膜の曲げ合成が小さいほど、また膜の接線方向の伸びに対する剛性が高いほど著しく現
れる。

ゴムの変形量が小さい場合、図7の勾配に相当する弾性膜の等価バネ定数は極めて小さいが、変形
が大きくなるにつれてバネ定数が増大する。つまり、このバネに支えられた質量は変形が小さいときに
固有振動数が小さく、変形が大きくなるにつれて固有振動数が増大することになる。つまり、微小重力
のときは固有振動数が著しく小さい振動系を構成し、地上や大きい加速度が掛かるときは、変形に応じ
て硬いバネで支えられた振動系となる。

この原理を使って、試作した非線形受動制振装置の断面図を図8に示す。この制振装置は、一辺90mm
の立方体に収まる大きさで、1個の質量は920gである。

3.3 制振装置の構造

試作制振装置の開発と実験結果を基にして、より小型の非線形制振装置の開発を行った。基本的な原
理と構造はプロトタイプと同一であるが、より効率的な構造にして制振性能を損なわずに小型化するこ
とが出来た。

図9に改良型制新装置の構造と概観を示す。全体の大きさは直径46mm高さ48mmで、プロトタイプに

比べて体積が 1/8 になり、全質量も 100 グラムにすることが出来た。基本的な制振構造と非線形バネ構造はプロトタイプと同一である。

航空機実験を行い改良型非線形受動制振装置の性能を検証した。搭載質量の四隅に制振装置を装着し、離着陸時に装置を固定するロック機構も取りつけた。今回は、制振装置の性能試験を主目的としているために、微小重力実験の計測装置は搭載せず、ダミーウエイトと加速度計測システムのみで実験を行った。

航空機実験で得られたデータの一部を図 10 に示す。実験データはバネ上搭載質量 66.9kg で膜厚 1mm のゴム膜のデータのみを示している。図から本制振装置は、良好な減衰特性を有していることが分かる。本報では省略したが、y 方向の減衰も x 方向と同様な値が得られている。

搭載質量の加速度を航空機の振動で除した伝達率のスペクトル分布を図 11 に示す。この実験データを基にして、単純な 1 次元振動モデルを構築し、共振周波数 $f_0 = \rho / 2 \dots$ と減衰率, ζ を実験値から推定した値も示している。 f_0 の推定値は、非線形バネが 0.02 ~ 0.03G の残留加速度によって、式 (6) の関係で振動するモデルとほぼ等しくなった。

本制振装置は、3 軸方向の制振性能が類似である。しかし、航空機の残留加速度が大きいため、プロトタイプ及び改良型の制振装置いずれも約 2Hz の共振周波数をもつ。しかし、図 7 の非線形バネが中立状態にあるときの固有振動は著しく低くすることが出来る。たとえば、図 10, 11 の制振装置が中立状態にあるとき、式 (2) から推定した f_0 は 0.33Hz である。航空機などの残留加速度が大きい実験環境では、受動制振装置と簡易な能動制振装置を組合せた複合制振装置も有効であると考えられる。

3.4 宇宙ステーションにおける制振性能予測

非線形受動制振装置は、構造が簡単で軽量小型であり、制御電力も必要としないことから、スペースシャトルや宇宙ステーションでの利用が考えられる。特に、これらの環境では残留加速度が小さいので非線形受動制振装置の性能向上が予想される。

図 12 は、宇宙ステーションにおける g ジッター環境[21]と非線形受動制振装置を使用したときの g ジッター環境を比較したものである。航空機実験用の制振装置を使用した場合でも、要求 g 環境をほぼ満足していることがわかる。また、図中にはゴムの膜厚を十分薄くして非線形バネ効果を十分発揮させ、共振周波数をさらに小さくした場合の予測も示しているが、この場合は、さらに g 環境が向上することが明らかとなった。

受動制振装置の場合は、実験装置自身が振動源となる場合の制振性能は、著しく悪化する。また、外部からのケーブルなどの振動伝達部を極力低弾性化することも重要である。制振性能を極限まで高めるためには実験装置自身の固有振動の減衰も重要であることが明らかとなった。一方、本装置は、単純なので、実験装置の制振だけでなく、ステーション内の振動源に装着することによって、ステーションの g 環境向上を達成することも可能である。

3.5 定常加速度も減衰する受動制振装置

航空機による微小重力実験では、高周波の g ジッターだけでなく、航空機の推力や横滑りに起因する定常加速度が流体実験の可否に大きく影響を与える場合が多い。特に、前述の液中の実験やマランゴニ対流の液中実験では、定常加速度を、例えば、鉛直方向のみにすることによって実験精度や実験範囲が大きくなる。そこで、 g ジッターだけでなく定常加速度を一定方向にする制振装置が必要になってくる。

図 1 3 に改良を加えた制振装置の概観図[22]を示す。本装置は実験装置を収納するためのインナーラック、高周波振動に対して減衰効果を得るためのNLPDを4基、低周波振動及び μG エントリー時に瞬間的に生じるマイナス z 方向（航空機機体垂直方向）への加速度に対応するためのショックアブソーバから成る。また、航空機の離発着時における衝撃から実験装置を保護するため、インナーラック底面にはロック機構を取り付け、航空機実験用共通ラックに固定した。本装置は重力レベルが $0.5G$ 以下になるとバネの復元力によってインナーラックが浮上し、 μG 環境中は宙に浮いた状態で制振する。その後、ラックは μG 終了と共に所定の位置へと戻る。この際、インナーラックの浮上と降下に関しては、ショックアブソーバの効果に緩やかに行われ、実験装置に過度な衝撃を与えることはなかった。

装置は実験者らが独自に開発した非線形受動制振装置（NLPDs）、ショックアブソーバおよびユニバーサルジョイントで構成されている。ペイロード部は航空機用ラックとユニバーサルジョイントのみで接続されているので、この点を軸としてペイロード部は回転運動することができ、航空機からの角速度成分を減衰させることが可能となる。またこのユニバーサルジョイントはショックアブソーバの先端に設置されており、ペイロード部全体は z 方向（機体鉛直方向）に振幅 100mm 程度のストロークを持つ。通常重力場では、ペイロードの自重によりショックアブソーバのバネが伸びた状態で底面が航空機ラックに接しているが、 g -レベルが $0.5G$ 付近になると、バネの復元力により、ペイロード部は航空機ラック内の中央付近まで持ち上がり、航空機の共通ラックと一点でしか接していない状態になるよう設計されている。また、航空機のパラボリックフライト突入時に生じる急激なマイナス G への変化も、本ショックアブソーバにより減衰される。さらに g ジッターの低周波域（ 1Hz 前後）の減衰効果も得られる。 g ジッターの高周波域の減衰については、従来のNLPDsを用いた。

本実験では、インナーラックに水溶液からの結晶成長を観測するための実験装置（ 54.5kg ）を搭載し、 g ジッターが流体に及ぼす影響について微視的観測を行った。制振装置の制振性能を評価するため、制振部（インナーラック内）に搭載した実験装置と、別途計測機器を搭載した航空機実験用共通ラックにそれぞれ3軸 G センサを取り付けて、加速度計測を行った。

航空機実験で得られたデータの一部を図 1 4 に示す。(a)に航空機機体上、(b)にはロック状態の制振装置内部、(c)にはロックを解除し、制振装置を稼働させた状態でのインナーラック内部における z 方向の加速度データの時間変化を示す。ロックをかけた状態においても、加速度の振幅が低減されていることが確認されているが、制振装置を稼働させることで更なる減衰効果が表れていることがわかる。

4 . 無外力環境下における溶液の拡散異常現象と g ジッター

4 . 1 無外力拡散場計測の概要

拡散場の観察において、微小重力環境では、対流は抑制されるが、g ジッターのために微小対流が存在する可能性がある。制振装置を微小重力下で使用し、水中に懸濁させた粒子のブラウン運動から導出された拡散係数が、通常値に比べて異常に小さくなるのが、CSAによるミールを用いた宇宙実験で報告されている[22]。そこで、著者らは、変動加速度や重力が働かない条件下では、分子のクラスタリングが発生し、見かけ上の分子量が増大することによって拡散係数が減少するという仮説を考えた。

一方、水溶液の拡散現象は非常に遅い現象なので、今まで航空機実験や落下塔で得られる微小重力環境で実験することは困難を伴っていた。そのため、前記実験は、微小重力下においてg ジッターを軽減し、ブラウン運動の解析から拡散係数を導出している[23]。しかし、我々は、短時間微小重力環境下における拡散場計測技術を確立しており[24]、制振装置の開発やg ジッター計測も平行して進めてきた[22]。

そこで、短時間微小重力環境下で拡散係数を高精度で計測する技術と、非線形微小重力受動制振装置を組み合わせることによって、g ジッターと定常加速度が小さい環境を作り、流体に働く外力が著しく小さい環境下における水の拡散異常現象を、位相シフト干渉計を用いたその場観察技術で計測した。無外力場における水溶液の拡散異常現象を解明することによって純粋な濃度拡散場を観察できれば、非定常拡散現象の機構が明らかとなり、今まで発見できなかった新たな現象を発見できる可能性もある。

4 . 2 計測方法

重力や振動加速度の影響のない環境下で微小な濃度拡散場を形成し、光学系を駆使してその微小非定常濃度拡散場を高精度に観察した。これにより拡散係数を導出し、同時に拡散現象を観察した。光学系には図15に示すようなマツハツェンダー型干渉計を導入し、位相シフト技術を組み込むことによって、より高精度な計測を行っている。

また濃度拡散場において1[mm]四方という微小な非定常濃度拡散場を作成するには、図16に示す特別に設計した拡散セル部を用いる。本拡散セルの最大の特徴は初期状態の濃度分布をステップ状に与えることが可能なことで、拡散開始時から純粋な非定常濃度拡散場を得ることができる。実験には航空機および落下塔施設を用いるが、その際に必要となってくるのが短時間計測技術である。従来濃度拡散場は、長時間観察されることにより、その現象の解明が試みられてきた。しかし地上で得られる微小重力環境はせいぜい20秒程度である。この環境を最大限に利用するためには、拡散開始直後から数十秒間を高精度に測定できる技術が望まれている。

航空機を利用した微小重力実験では、機体の振動が濃度拡散場に重大な影響を及ぼし、同時に光学系にも支障を来すので、前節で述べた制振装置を干渉計に装着して実験を行っている。試料には塩類、および糖類等の有機物の水溶液を用い、希釈溶液から飽和点近傍までの溶液を用いる。同様の実験を、地上や制振装置を固定した状態で行い、異常拡散現象の比較を行ってきた。

また、次年度に行う航空機実験に備えて上記受動制振装置に加えて、3 . 4節で述べた、より大きな

ストロークの制振システムを付加することによって、良好な微小 g ジッター環境を作り出すための簡易制振装置の開発も同時に行った。

物質拡散係数の導出における解析は、著者らがすでに提示している独自の解析法[25]で行った。通常の方法では、得られた干渉縞から濃度場を求める際、予備実験の段階で縞と濃度の関係を求める必要があるが、本解析法ではその必要がなく、解析誤差も少ないという利点がある。

4.3 拡散係数の異常現象と分子クラスター仮説

上述した微小非定常拡散場の短時間測定技術を用い、地上で得られる微小重力環境を利用して非定常拡散現象を観察してきた。現在までに使用した試料は種々の濃度の塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液、および L-Alanine 水溶液である。実験に先立ち、各試料の縞と濃度差の関係を導いておき、実験には解析が容易に行えるような濃度差を用いた。非定常拡散場は、位相シフトデータの時間的・空間的变化で表される。

実験当初は通常重力場と異なって、拡散場が一次元性を保ちながら進行していく現象が見られなかった。これには本拡散セルの構造に原因があると考えられる。本拡散セルは実験準備段階で上下方向から溶液を注入しつづけるため、拡散開始時直前までに混合した溶液がセル中央部から両側に排出される。しかし微小重力環境下では、実験開始後これらの溶液は界面張力支配下におかれ、一度排出された混合溶液はセルの微振動により拡散場内に逆流するため、このような現象が起こったと考えられる。

そこで、排出した溶液を強制的に吸収する機構を組み合わせて実験を行うようにした。その結果、通常重力場と同様な一次元拡散場を得ることができた。通常重力場、微小重力場とも、位相シフトデータが時間とともに広がってゆき、拡散が進行していく様子が観察されたが、微小重力場では拡散の進行速度が小さいことが全ての実験において観察され、拡散現象が異なることが定性的に確認できた。得られた位相シフトデータの時間的・空間的变化を図 17 に示す。拡散開始後、位相シフトデータは一次元性を保ったまま、徐々に広がっていくのが観察できる。

各実験において、得られた位相シフトデータの変化から物質拡散係数を導出した結果を図 18 に示す。通常重力場と微小重力場のデータを比較するために、図中の直線の傾きが物質拡散係数を示すようにプロットした。通常重力場で得たデータには誤差の範囲を付したが、図より明らかのように、微小重力場で得たデータは通常重力場で得たデータと直線の傾きが異なり、拡散異常現象が確認できた。直線の傾きから得られた物質拡散係数は試料によらず約 15% 小さい値を示すことが分かった。

この時点で、微小重力場では通常重力場での拡散現象とは異なる現象が起こり得ることが定性的に評価できた。しかし、本研究の最終目的は、無重力無振動環境下における拡散異常現象を解明し、近年 CSA がシャトル実験で発見した g ジッターとブラウン運動との関係を検証していくことにあるので、微小重力環境において拡散異常現象が起こり得ることが定性的に評価できた現段階において、次なるステップとしては更なる低 g ジッター環境が必要である。

3.3 節で述べた新型制振装置の開発を行い、その性能評価を行うとともにより低 g ジッター環境での拡散実験を実施した。しかしながら、現存の航空機用制振装置では、g ジッターの高周波成分を減衰させることはできるが、低周波 (1Hz 前後) を取り除くことは不可能であった。さらに、無振動無外力

場の構築には、航空機実験に特有である角速度成分も除去しなければならない。そこで、現存の制振装置の性能を活かしたまま低周波成分および角速度成分を除去できる、3.5節で示した新たな制振装置を開発した。

実験では実際に航空機に本装置を搭載し、拡散実験を行うと同時に新型制振装置の性能評価も行った。図19に新型制振装置の減衰性能を示す。図19(a)は G_x (機体進行方向) の制振結果を、図19(b)は G_z (機体鉛直方向) の結果を示している。ともに高周波は著しく減衰されていることが確認できた。また図19(a)において、 G_x は inner 側では outer 側にみられる低周波振動が除去され、0G 付近で微振動していることから、微小重力環境下ではインナーラックが振り子のように運動し、角速度成分を除去していることが確認できた。図19(b)においては、低周波成分の減衰をみるために周波数解析を行った。従来の制振装置では、低周波域では g ジッターの減衰はできず、逆に振幅が増大するという欠点が生じていたが、本制振装置では 1Hz 前後で振幅が僅かではあるが減衰されている傾向が見られた。これは、ショックアブソーバーの効果である。本実験では制振評価の初年度ということもあって、比較的安全面を考慮してバネ定数、ダンパ係数を設定し実験を行ったが、本装置で低周波成分の減衰が可能であることが確認でき、今後はペイロードの質量に応じたバネ定数、ダンパ係数を設定することで、更なる減衰が可能であることを示唆した。しかし、高周波領域では $10^{-4}g$ レベルまでしか減衰されておらず、本装置で NLPDs 従来の性能を活かすことは出来なかった。結果として本制振装置を使用することにより、 $10^{-4}g$ レベルの微小外力環境を構築することができた。

本制振装置を使用した拡散実験では、前年度の結果からさらに g ジッターの流体现象に及ぼす影響を考慮した実験を行った。制振装置を稼動 / 非稼動することで、 g ジッターの影響を観察した。その結果、 g ジッターの影響がある場合とない場合では、得られた拡散係数の値に大きな違いが現れた。図から明らかなように、本制振装置を用いた実験では、 g ジッターの流体现象に及ぼす影響が顕著に現れることが確認でき、拡散係数の違いを求めることができた。図18に示すような解析を各実験ごとに行い、最終的に得られた拡散係数を濃度別にまとめた図を図20に示す。

試料は塩化ナトリウムを用い、実験は全て 25 で行った。通常重力場 (図中)、 g ジッターの影響がある場 (図中)、そして g ジッターの影響のない場 (図中) では、どの濃度においても拡散係数に大きな違いがあることが明らかとなり、これは CSA がシャトル実験結果から示唆した g ジッターとブラウン運動の関係と一致している。これにより、現時点までに、本実験装置を用いることで微小外力場における拡散異常現象を定性的に評価することが可能であることが明らかとなった。

5. 微小重力下の結晶成長と g ジッター

5.1 計測システム

航空機や落下塔を使用して得られる短時間微小重力環境は、溶液からの結晶成長実験のような、物質拡散が遅い研究には不利であると言われてきた。本節では、新しい技術を開発し、短時間微小重力環境で溶液からの物質拡散場と結晶成長のその場観察を行った研究について述べる。

物質の拡散は、温度や運動量の拡散と同様に、拡散係数と物体の代表長さに支配される [17]。拡散係

数が大きい場合は、ごく短時間に現象を見ることは比較的容易である。しかし、溶質の物質拡散係数は熱や運動量の拡散係数に比べて著しく小さいので、短時間で現象を観察するためには測定領域を小さくする必要がある。

落下塔で行う結晶成長実験で、図 2 1 に示すような、上下にペルチェ素子を用いた急速温度制御システム[26]を備えた溶液の厚さが 1mm の小さなテストセルを開発した。これによって短時間微小重力環境において、溶液の拡散場と結晶成長の定量的測定が初めて可能となった。

このような小さな観察空間では、温度計を挿入して環境を乱さず温度計測することは不可能である。従って、光の干渉を用いた温度と濃度の測定が必要になる。しかし、測定部が小さく、溶液内での光路長を長くできないために、通常の光干渉計では十分な精度が得られない。そこで、光の偏光と偏光面の回転を利用した位相シフト干渉計を開発した[27]。このシステムでは偏光面の異なる 3 つのカメラが必要であるが、3CCD カメラを特殊改造した波面分割カメラの開発によって非常にコンパクトな測定システムの構築に成功している。

図 2 1 に示すテストセル内に塩素酸ナトリウムとその飽和水溶液を封入し、その時の干渉縞画像を記録したものが図 2 2 である[28]。この干渉計ではレーザー光を使用しているため、本来色は無いが、波面分割した 3CCD カメラの画像を直接ビデオに録画すると、カラーの干渉縞が得られる。

まず、テストセルを飽和温度で一様に保ち、対流が起きない状態にしておく。落下 5 秒前から急速冷却を始め、落下中は温度制御面を一様温度に保った。微小重力実験中は、結晶近傍の物質拡散場が対流の影響を受けずに広がっていくのが見える。実験終了直後は、制動時の加速度で自然対流ブルームが発生している。図 2 2 では、結晶周りの二重拡散場について、落下実験結果と同一条件における地上実験を行ったものとを比較している。微小重力開始後 4 秒の結果を比較すると、落下実験ではテストセル内には自然対流がほとんど発生していないが、地上では対流が発生し、異なる様相を示している。

本実験は、厚さ 1mm の溶液層に高さ 0.5mm の結晶を入れて実験したにもかかわらず、地上実験で自然対流が発生した。自然対流は代表長さの 3 乗に比例するパラメータで記述されるため[17]、小さな物体周りでは対流が抑制される。しかし、このような小さな空間でも微小重力による対流抑制が有効なことは短時間微小重力実験の有効性を示すものと言えよう。

5.2 結晶成長実験

流体実験は、微小セル内に種結晶(NaClO_3)を置き、周囲を同溶質の飽和水溶液で満たし、その飽和水溶液を急速冷却することで種結晶周りから結晶を成長させるものである。この微小セル内における温度・濃度場の様子を、特別に開発したマツハツェンダー型干渉[29]で捕えた。図 2 3 に、結晶成長実験で取得した結果を示す。これは冷却開始から 20 秒までの微小セル内における種結晶周りの温度・濃度場を表した干渉縞画像である。通常重力場で見られるブルーム対流は μG 下では観察されなかった。また、制振装置を稼働させることで、航空機から伝わる振動による画像の乱れはなく、結晶成長場の観察が可能であった。

図 2 4 は、今回得られた実験結果から求めた NaClO_3 の結晶成長速度である。この図より、制振装置稼働下における μG 中の結晶成長速度は、地上実験と比較して、過飽和度、成長速度共にやや低い値とな

った。

前節でも示したように、 g ジッター制振下では拡散係数が地上実験と異なる傾向を示すことが報告されており、 g ジッターが結晶成長に及ぼすメカニズムの検討は、更なる実験を行なうことによって原因を探っていく必要があると考えられる。

参考文献

1. H. Hamacher, *Microgravity Science and Technology*, 9-3, (1996), p.152.
2. 松本聡：日本マイクログラビティ応用学会誌, 14-3 (1997), p.282.
3. 石井孝治、東久雄、前川透：日本マイクログラビティ応用学会誌, 15-Suppl. (1998), p.19.
4. 大西充：日本マイクログラビティ応用学会誌, 16-2 (1999), p.157.
5. 円山重直、柴田敏行、塚本勝男：日本機械学会論文集, 64-617B(1998), p.174.
6. T. Inamura, Y. Takagi, T. Arai and S. Maruyama, Proc. 3rd Conference of ILASS-Asia, (1998), p.61.
7. H. Hamacher, *Microgravity Science and Technology*, 9-3, (1996), p.152.
8. 松本聡：日本マイクログラビティ応用学会誌, 14-3 (1997), p.282.
9. 今石宣之：平成7年度 JSUP 宇宙環境利用の展望, (1996), p.23.
10. 日比谷孟俊：平成7年度 JSUP 宇宙環境利用の展望, (1996), p.55.
11. 伊丹俊夫：平成12年度 JSUP 宇宙環境利用の展望, (2001), p.31.
12. Inamura, T., Takagi, T., Arai, T. and Maruyama, S., Proc. 3rd Conference of ILASS-Asia and 7th Symposium on Atomization, p. 67, (1998).
13. 高木・新井・稲村・円山・川野, 日本航空宇宙学会北部支部 1999年講演会論文集, (1999-2) p.69.
14. Tuma, N., Sudo, S. and Ikohagi, T., Breakup and Bifurcation Behavior of Water Jets by Oscillation a Nozzle, Proc. 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, S-282, (1999-7)
15. Chandrasecar, S., *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford University Press, London, pp. 515-576, 1961.
16. Kawano, S., Molecular Dynamics of Rupture Phenomena in a Liquid hread, *Physical Review*, E, Vol. 58, No. 4, pp.4468-4472, 1998.
17. 円山, 微小重力場における対流現象、*ダーボ機械*, Vol. 21, No. 2., pp. 99-105, 1993.
18. 木下恭一：平成10年度 JSUP 宇宙環境利用の展望, (1999), p.33.
19. 村井等、円山重直：日本機械学会論文集, 49-443B(1983), p.1389.
20. 円山重直、渡辺和樹、須藤和一、米令二：日本マイクログラビティ応用学会、16-4, (1999), p.272.
21. N. J. Penley, C.P. Shafer and J-D.F. Brtoe, Proc. 48th Int. Astronautic Congress, IAF-97-T.5.01, (1997), p.1.

22. 円山重直 ,大野健太郎 ,小宮敦樹 ,酒井清吾:日本機械学会 2001 年度熱工学講演会, (2001), p.199.
23. R.A. Herring, et al., Japan Society of Microgravity Application Vol. 16, (1999), p.234.
24. 小宮敦樹 ,円山重直 ,大野健太郎:第 38 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 ,Vol.1,(2001), p.273.
25. Z. Guo, S. Maruyama and A. Komiya, Journal of Physics D., Vol. 32, (1999), p.995.
26. 円山重直 , 第 33 回日本伝熱シンポジウム後援論文集 , Vol. 1, (1996), pp.127-128.
27. 塚本勝男 , 応用物理 , Vol. 63, (1994), pp.713-716.
28. 円山・柴田・塚本・河野・清水・森田:日本マイクログラビティ応用学会誌,Vol.13, (1996), p.320.
29. S. Maruyama, T. Shibata, K. Tsukamoto, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 19, (1999), p.34.