

自然対流と拡散に対する重力加速度揺らぎ(g ジッタ)の影響 (CONVECTION)

代表研究者： 東 久雄^{*1}

共同研究者： 大西 充^{*1}、吉原正一^{*1}、土井隆雄^{*2}、
大井田俊彦^{*2}、石川正道^{*3}、亀井信一^{*3}

^{*1} 航空宇宙技術研究所、^{*2} 宇宙開発事業団、^{*3} 三菱総合研究所

The experiments of CDU of VIBES were conducted as scheduled. The first one was executed while running the VIBES system and the second without running the system. G -jitter acceleration was measured by two sets of tri-axial accelerometers on board the VIBES and the CDU.

Diffusion of OH^- was measured by color of phenolphthalein by using the fact that phenolphthalein turns color between pH 8 and pH 10. Measured diffusion showed a more than 20 % faster rate compared to theoretically calculated one. This means that the apparent diffusion coefficient of OH^- was $D^* \sim 2D$ in the first experiment and $D^* \sim 3D$ in the second, where D is diffusion coefficient of OH^- .

Measured g -jitter by the accelerometer on-board the CDU showed a stronger g -jitter level in the second experiment than that in the first. This corresponds that the diffusion in the second was larger than that in the first. This suggests that there exist some convection in the liquid due to g -jitter.

With regards to measuring natural convection due to residual gravity, this failed because we could not obtained clear distribution of color. The measured flow from the distribution of color, however, was opposite to that predicted.

実験の目的、意義

スペースシャトルや宇宙ステーション内は、完全な無重力状態ではなく、空気抵抗や重心位置からのずれによりわずかではあるが定常的な重力が残っている(残留重力)。また、船内での人間の活動や種類の機械の作動などによる振動があることが知られている(重力ゆらぎ)。これらの微小重力は、それがいかに微小であろうとも、流れを新たに発生させたり、拡散に影響をおよぼすのではないかと考えられる。そのため、それらの影響を知ることは、材料プロセッシングなどの流体を扱う分野では極めて大切なことである。

残留重力は $10^{-8} g_0$ のレベルと考えられ、流れに温度勾配があると一方向への流れをわずかに起こす。重力ゆらぎは $10^{-2} \sim 10^{-4} g_0$ のレベルで広い範囲の周波数で振動しているもので、その影響は明らかではない。

本実験の目的は

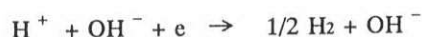
- 1) 重力揺らぎおよび残留重力が拡散に及ぼす影響の測定
- 2) 拡散の観測を通して重力揺らぎおよび残留重力による対流を知ることである。

実験の方法と試料

実験方法

実験では微小重力の影響を実際に観察し、定量的に測定するために、図 1 のような実験容器を用いる。内寸が約縦 7 cm、横 8 cm、幅 2 cm の直方体の容器に水、NaCl (0.02 mol/l)、EtOH (7.0 %) 及び Phenolphthalein 0.0035 % (1.1×10^{-4} mol/l) を入れ、容器上面を加熱 (70 °C) し、液体に温度勾配をつける。この温度勾配により、重力加速度があると流れが起きる。容器内に陽極(プラス極)の銀板と陰極(マイナス極)のバリウム線 (0.3 mmφ, 15 cm) その半分は 2 mm 毎に絶縁皮膜でシールドされている) を設け、通電することにより、陰極バリウム線に近くの水素イオン濃度 (pH) を変化させて染料を発色させるのである。この発色部分の移動の様子により拡散、流れの様子を知ることができる。

陰極近傍のイオンの反応を以下に示す。



従って OH^- の存在が pH を変え染料を発色さ

せるので、色の移動、拡散は OH^- の移動、拡散を表している。陽極には塩素ガス、陰極には水素ガスが発生するが、この実験装置ではそれらはそれぞれ銀とバリウムにより吸収され、実験を妨げる気泡の発生を防いでいる。

上記実験容器は図 2 に示される制振装置 (VIBES) の制振機構 (VIB) の中にセットされる。VIBES は図 3a, b のような振動伝達特性を持っている。防振機構が働いている場合は、外から与えられた振動は低周波では振幅は増大し、高周波では減衰して実験容器に伝わる (図 3a)。防振機構を機械的にロックし、働かせない場合は、60 数 Hz に増幅のピークがあ

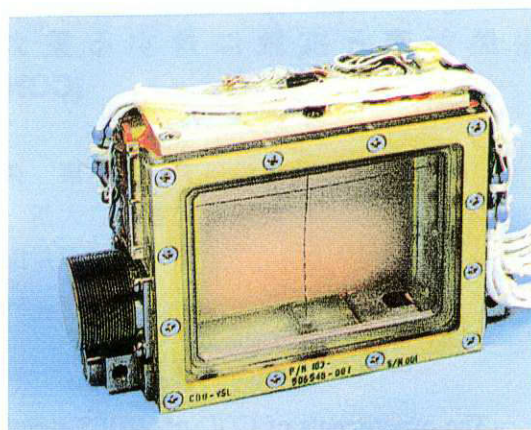


図 1 実験セル (CDU)

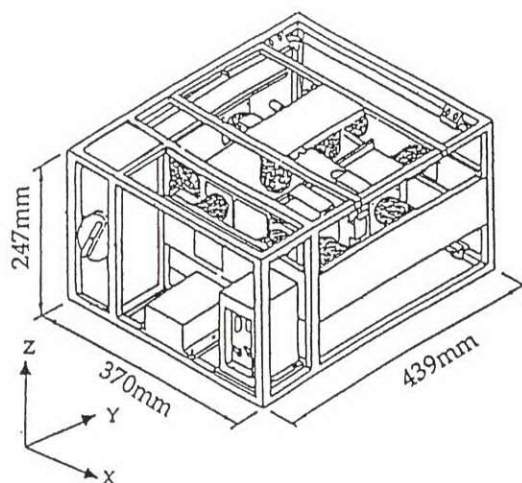


図 2 制振実験装置 (VIBES)

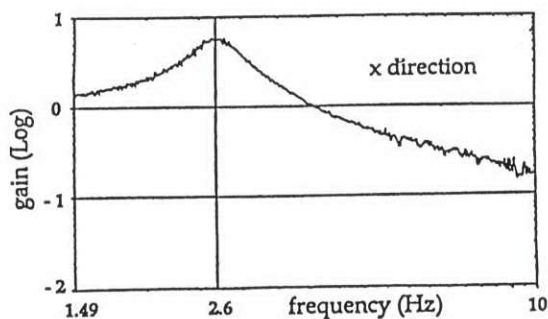


図 3a VIBES の振動伝達特性
(作動させたとき)

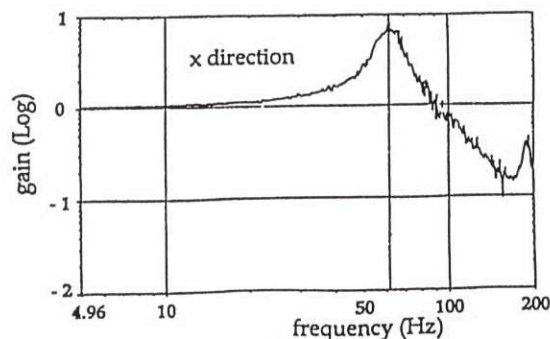


図 3b VIBES の振動伝達特性
(固定させたとき)

る(図 3b)。実験は制振装置を作動させた場合と作動させない場合の 2 回行われた。振動周波数の拡散への影響の違いを知るためである。制振装置の外部と内部には三軸の加速度計がセットされ、実験中の重力加速度が計測された。

次に重力揺らぎがないとして、色の拡散を予測する。ある物質の濃度を c として通常拡散は以下の拡散方程式で表される。

$$\partial c / \partial t = D \Delta c$$

この拡散方程式の三次元の解は

$$c(r,t) = \frac{M}{8(\pi Dt)^{3/2}} \exp(-r^2 / 4Dt)$$

で与えられる。

フェノールフタレインは pH 8.0 ~ 10.0 で発色することが知られている。通電した電気量と OH^- 濃度、pH の関係は以下のである。

陰極近傍の OH^- の総量は

$$\begin{aligned} 5 \text{ mA} \times 5 \text{ sec} &= 0.025 \text{ C} \\ &= 2.6 \times 10^{-7} \text{ F} \cdot \text{mol} \\ &\quad (F = 9.64846 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}) \end{aligned}$$

陰極の長さを考慮して

$$\begin{aligned} M &= 2.6 \times 10^{-7} \times \frac{0.2 \text{ cm}}{7.5 \text{ cm}} \text{ F} \cdot \text{mol} \\ [\text{OH}^-] &= c \times 10^3 + 10^{-7} \text{ l}^{-1}, \quad [\text{H}^+] = \frac{10^{-14}}{[\text{OH}^-]} \\ \text{pH} &= -\log[\text{H}^+] \end{aligned}$$

OH^- の拡散係数を $D = 5.23 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ として¹⁾、これらの式から、重力揺らぎがないとした実験条件の場合に予測される OH^- の密度分布変化及び pH の分布変化は図 4a, 4b (0 ~ 60 秒)、図 4c, 4d (100 ~ 1500 秒)のようになる。

フェノールフタレイン発色、沈降試験

実験容器でフェノールフタレインを発色させ試験条件を詰めた。その際、その色の沈降速度を測定した(図 11a)。発色したフェノールフタレインの沈降速度は 0.5 cm/min. ($8 \cdot 10^{-3} \text{ cm/sec}$)であることが分かった(図 11b)。このことは、フェノールフタレインの発色領域は密度が水よりも大きいことを示唆している。その発色領域を半径 R の球として、沈降力 = Stokes の抵抗力 から密度と半径の関係を求める。図 11c に密度差と半径との関係を示すが、密度差は $1/1000 \sim 1/10000$ のオーダーと推測される。

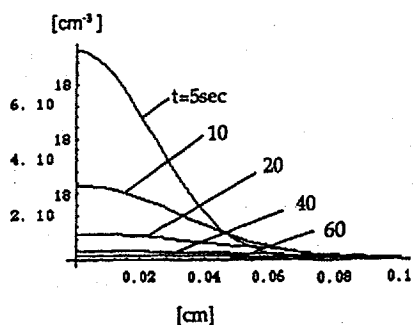


図 4a 予想される OH⁻ の密度分布変化

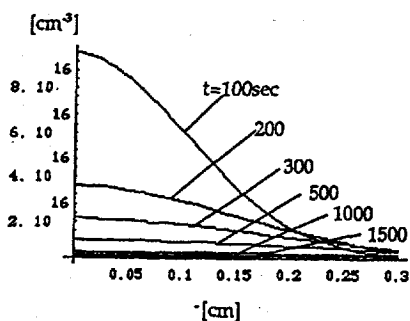


図 4c 予想される OH⁻ の密度分布変化

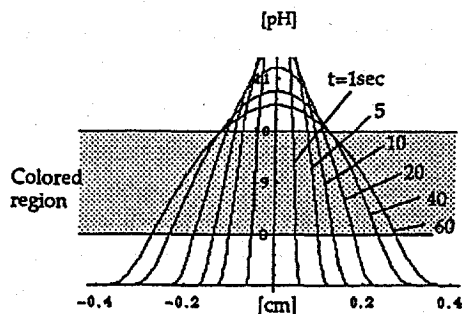


図 4b 予想される pH の分布変化と発色領域

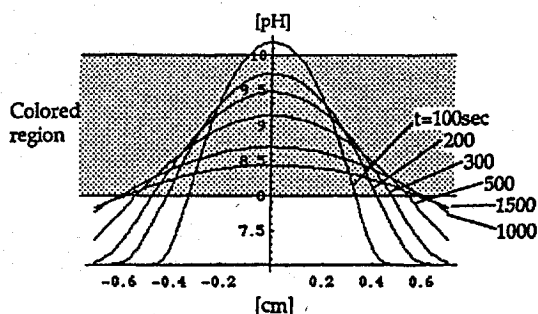


図 4d 予想される pH の分布変化と発色領域

染料長期安定試験

試料を実験容器に充填後、スペースシャトルでの実験まで3カ月以上の保存期間があり、フェノールフタレインの発色能力の劣化が予想されたため、長期安定性試験を行った。試料液の組成は水にフェノールフタレイン、塩、アルコールを加えるが、最も発色能力の低下が少ない割合を長期試験で決定した。即ち NaCl 0.02 mol/l, フェノールフタレイン 1.1×10^{-4} mol/l, Ethanol 7 %である。しかし発色性能の劣化は避け難く、透過率で3倍になるほど、発色は薄くなった。

飛行実験の結果

宇宙実験は以下のように行われた。

第一回(1994年7月11日) VIBES 作動(ケース1)

実験容器の壁を加熱し、徐々に温度勾配をつけ、5分おきに電流をカソード、アノード間に5秒間通電し、発色させ、その動きを観察した。
実験時間約25分。

第二回(1994年7月12日) VIBES 作動させず(ケース2)

実験手順は同様

特記すべきことは、ビデオカメラ映像で左上隅(加熱部壁と反対側)に(半径14 mmの)気

泡の 1/8 程度 (1437 mm³, 全容量の 1.3 %) が存在した。また第二回の実験時、微細な気泡が多数発生し、(おそらく)壁に付着しているのが発見された。

加速度揺らぎの計測結果

搭載された加速度計の計測結果をケース 1 およびケース 2 について図 5a、図 5b の上図に示す。参考に NASA の SAMS のケース 1、ケース 2 と同時刻のデータを図 7a に示す。どれも途中で 10 分位振動レベルが大きくなるのが観られる。ケース 2 において、振動のレベルが大きくなっているのが、目立つ。

拡散測定結果

ビデオカメラで撮影された結果の一例を図 8 に示す。カメラは CDU の一部分のみを写している。カソード線の周りに白く(実際は赤紫色)見えているのが、拡散しているフェノールフタレインの色である。左上に気泡が混入している。

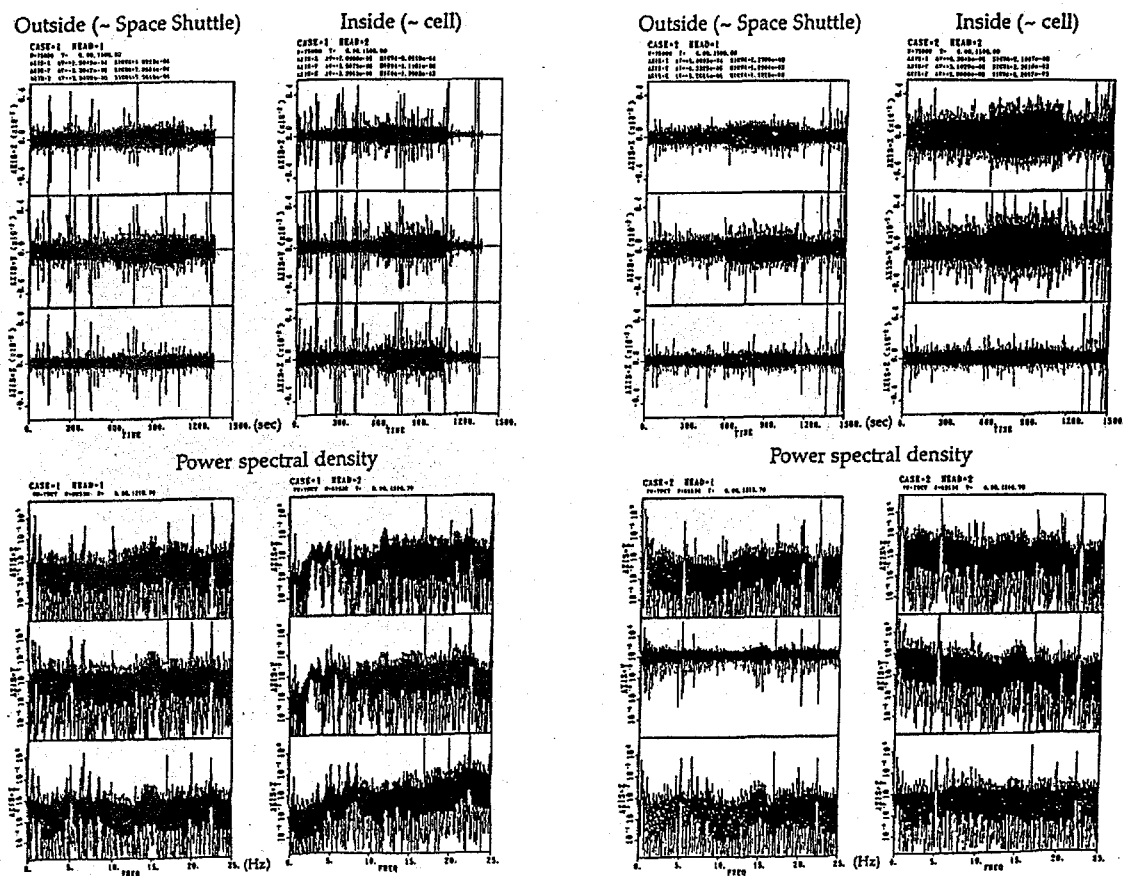


図 5a 計測された重力加速度(50 Sample/sec)とそのパワースペクトル(ケース 1)

図 5b 計測された重力加速度(50 Sample/sec)とそのパワースペクトル(ケース 2)

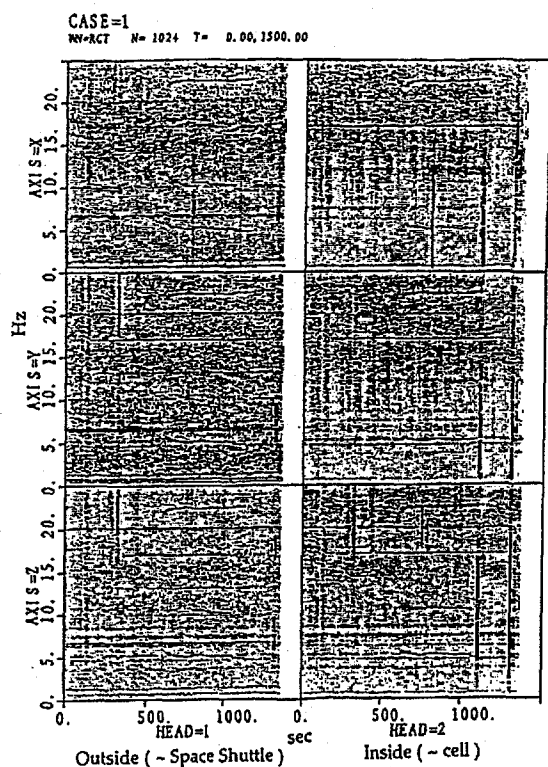


図 6a 計測された重力加速度の時間一周波数とそのパワースペクトル(ケース 1)

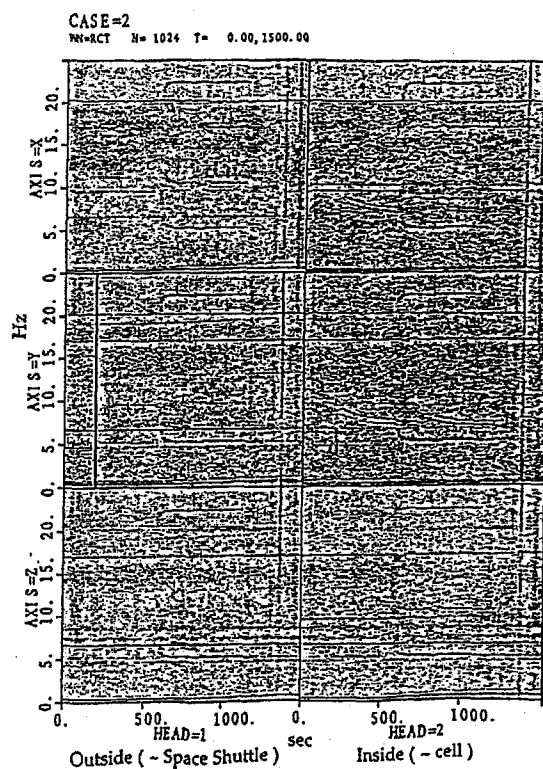


図 6b 計測された重力加速度の時間一周波数とそのパワースペクトル(ケース 2)

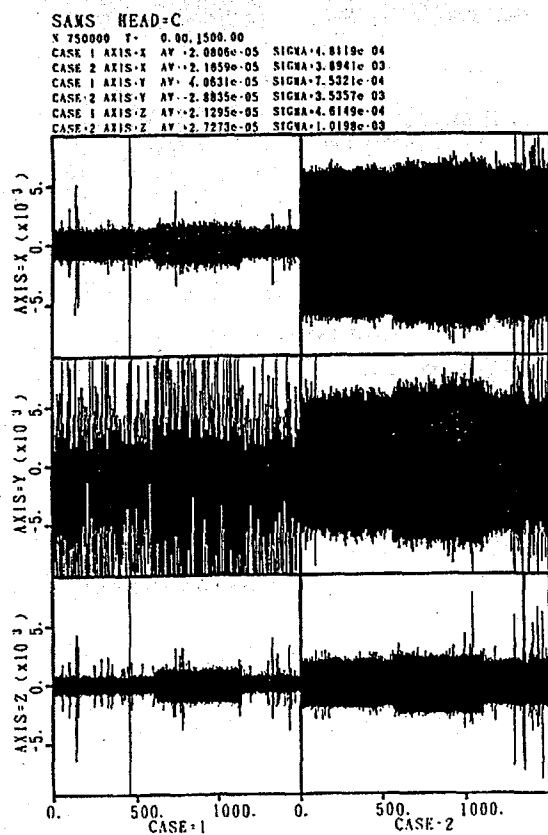


図 7a NASA SAMS の重力加速度データ (500 Samples/sec)

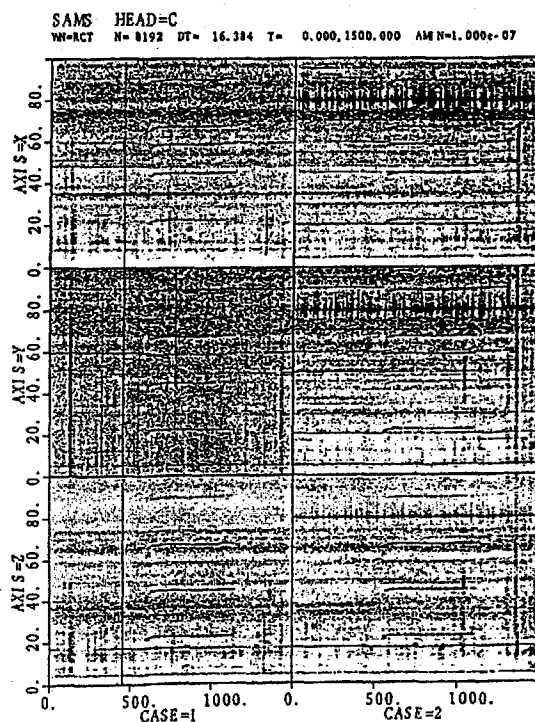


図 7b NASA SAMS の時間一周波数—パワースペクトルの関係

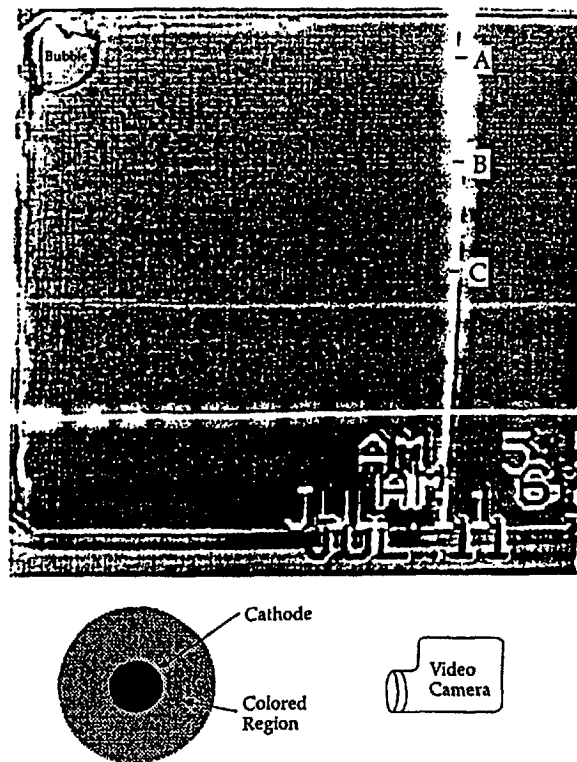


図 8 実験セルのビデオ画像

解析と考察

加速度揺らぎ解析

図 5a、図 5b 下図に全実験時間の加速度揺らぎを周波数解析した結果を示す。制振装置が作動しているケース 1 で低周波数のパワースペクトルムが減少し(増大するはず)、高周波数で僅かだが増大している(減少するはず)のは奇妙である。図 6a、図 6b にパワースペクトルを色の濃さで表した、時間一周波数ースペクトルム ダイアグラムを示す。図 7b に図 7a (NASA, SAMS データ)の時間一周波数ースペクトルム ダイアグラムを示す。80 Hz に強い振動があることが分かる。この振動が図 3b に示される振動伝達特性により、制振機構を機械的にロックした場合(ケース 2)に内側が大きく振動する原因である。

拡散結果解析

ケース 1 およびケース 2 についての染料の拡散の実験結果を時間経過に従って(0～60 秒)図 9a, b に示す。染料の色は極めて薄かったので、画像処理を行い、色を強調した。0 秒での色をベースにして、色の変化を表してある。図 9 の縦軸は色の濃さを表しているが、中心部はカソード線があるので意味は無く、また色の濃さは積分されたものである(図 8 参照)。従って分布の端が最も重要で意味を持っている。

染料は時間の経過とともに拡散していくのが観察されるが、その程度は場所によって異なっているのが分かる。A, B 点では色の拡散はほぼ同じであるが、C 点については、色の拡散が極めて大きいように見える。しかしやや明快さを欠いているので断定できない。

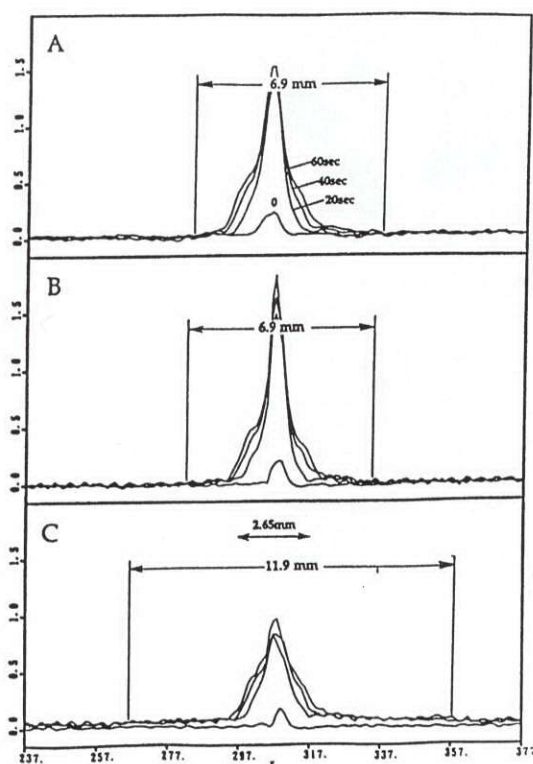


図 9a 測定された色の分布変化(ケース 1)、
0 ～ 60 秒

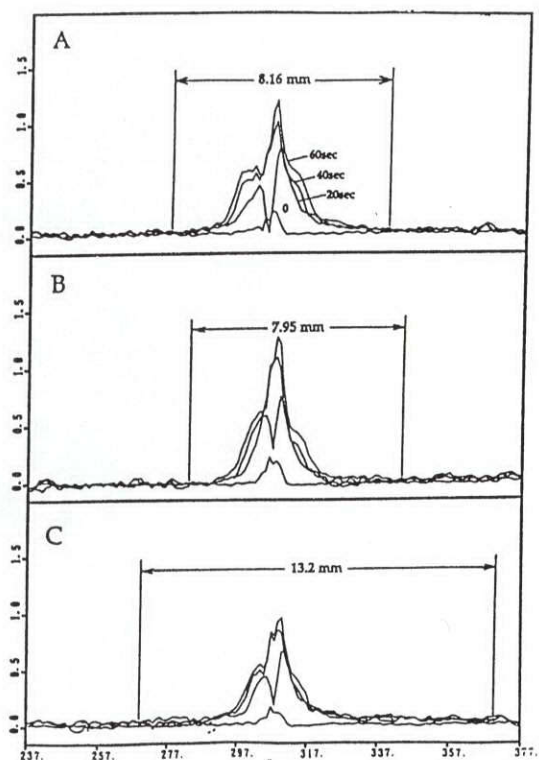


図 9b 測定された色の分布変化(ケース 2)、
0 ～ 60 秒

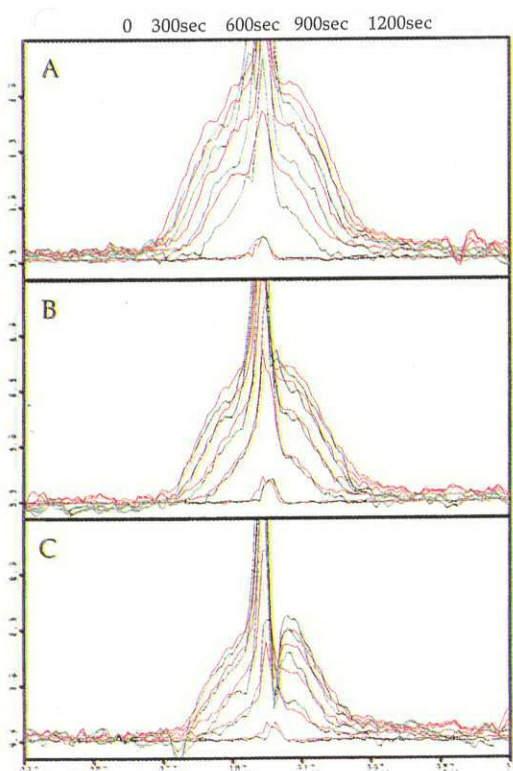


図 9c 測定された色の分布変化(ケース 1 :
緑、ケース 2 : 赤)、0 ～ 1200 秒

図 4b に示された重力揺らぎの無い場合に
予想される色の拡散の幅は 60 秒間で 5.53 mm
であるから、A、B 地点ではケース 1 の場合
が 1.25 倍、ケース 2 の場合が 1.45 倍である。
このことは、ケース 1 では、見かけの拡散係
数 $D^* \doteq 2D$ 、ケース 2 では $D^* \doteq 3D$ という
ことを意味する(計算はここには示さない)。
C 点では $D^* \doteq 18 \sim 20D$ ということになるが、
発色領域の境界が不明確なので、断定するこ
とはできず、参考に留める。これらの事実は、
液体内部に対流が起こっていることを示唆し
ている。また g ジッタの大きかったケース 2
の方が見かけの拡散が大きいことを示してい
る。0 秒から 60 秒迄なので、以下に述べる
温度勾配による流れの影響は殆どないと考え
られる。

図 9c にケース 1、ケース 2 について、0
秒、300 秒、600 秒、900 秒、1200 秒の色
の濃さの変化の様子を示す。この場合は A 地
点においてケース 1 とケース 2 の差が最も大
きく、ケース 2 の方が拡散が速いことが分か
る。

対流検討

容器の液体内に対流があると考えられるが、温度勾配がある時と無い時に分けて考える。

温度勾配が無いときの対流の要因は 1) 水の圧縮性による流れ、2) 容器の回転による流れ、3) 水と密度の異なる流体の振動 が考えられる。

- 1) 水の圧縮率は $4 \cdot 10^{-5}$ と極めて小さいが、念のため g ジッタによる圧縮による流れを計算した。 $g \sim 10^{-2} g_0$, 周波数 200 Hz として空気で計算した速度分布と渦度を図 10a, b に示す。水の圧縮性、密度を考慮し、流体の速度は最大 $3 \cdot 10^{-4}$ cm/sec 程度と考えられる。無視できない速度である。

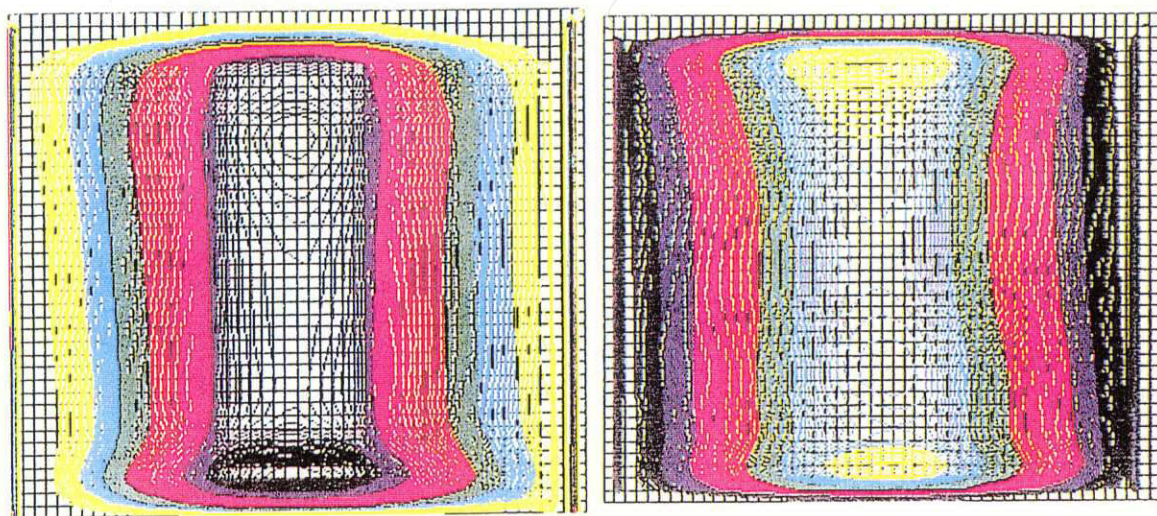


図 10a 水の圧縮性を考慮した速度分布 (Max 3×10^{-4} cm/s)
($g \sim 10^{-2} g_0$, $f = 200$ Hz で空気で計算)

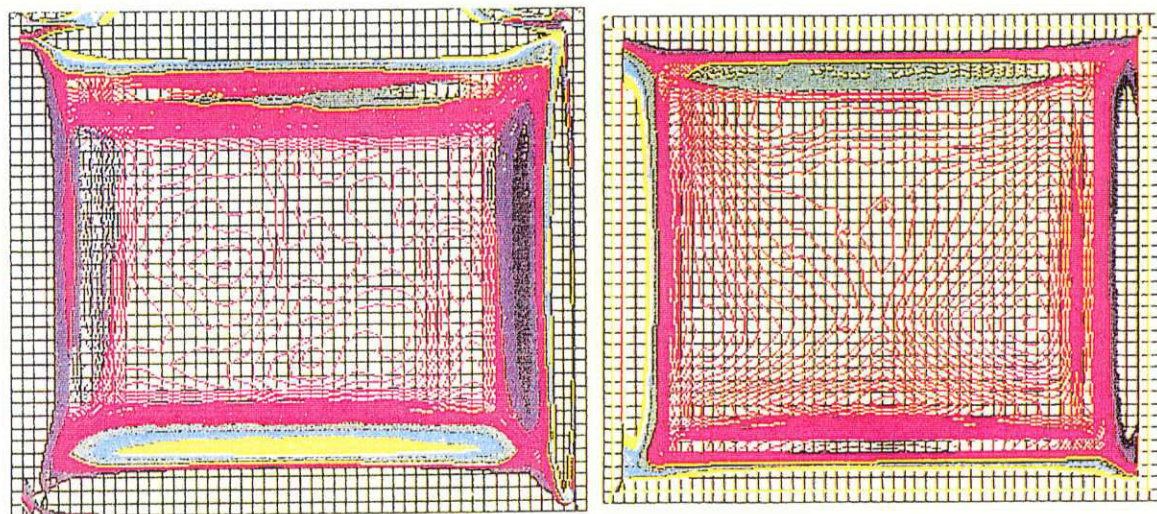


図 10b 渦度分布

- 2) 容器が振動により僅かでも回転し、振動すると容器壁周辺に流れが生ずる。壁 ($y = 0$) の速度を $u = U \cos \omega t$ とすると、液体内の流れ速度は $u = U e^{-ky} \cos(\omega t - ky)$ となる。ここで $k = (\omega/2\nu)^{1/2}$ である。いま $\delta = 1/k = (2\nu/\omega)^{1/2}$ とおくと、 δ は振幅が $1/e$ 倍に減衰する距離を表す。因みに、 $\nu = 0.01$ cst であり、 $f = 1$ Hz であれば $\delta = 0.056$ cm, $f = 0.1$ Hz

であれば $\delta = 0.18.. \text{ cm}$, $f = 0.01 \text{ Hz}$ であれば $\delta = 0.56.. \text{ cm}$ である。 δ で $1/e = 0.367$, 2δ で 0.135 , 5δ で 0.0067 , 10δ で $4.5 \cdot 10^{-5}$, 20δ で $2 \cdot 10^{-9}$ 程度の減衰となる。一方、加速度を $10^{-2} g_0$ とすると、容器壁の最高速度 U は $f = 10 \text{ Hz}$ で 0.318 cm/sec , $f = 1 \text{ Hz}$ でおよそ 3.18 cm/sec , $f = 0.1 \text{ Hz}$ で 31.8 cm/sec , $f = 0.01 \text{ Hz}$ で 318 cm/sec となる。 $f = 0.1 \text{ Hz}$, $f = 0.01 \text{ Hz}$ についてはジェルの支え等があり非現実的なので、 $f = 1 \text{ Hz}$ を例に取ると、壁より 0.056 cm で 1.16 cm/sec , 0.28 cm で 0.02 cm/sec , 0.56 cm で $1.2 \cdot 10^{-4} \text{ cm/sec}$, 1.12 cm で $6.5 \cdot 10^{-9} \text{ cm/sec}$ 程度の速度を持つ。

- 3) フェノールフタレインを地上で発色させた際、 0.5 cm/min. の速度で落下することから、フェノールフタレインの発色領域は水より僅かであろうが重いと考えられる。地上実験(図 11a)でのフェノールフタレインの落下速度(図 11b)から、フェノールフタレイン発色域の膜の厚みを $0.3 \sim 1 \text{ mm}$ と考えて、密度差は $0.002 \sim 0.0002 \text{ g/cm}^3$ 程度と推測される。この発色域を球形として、この液体が g ジッタ ($10^{-2} g_0 \sim 10 \text{ cm/sec}^2$) によって振動する速度を、半径、振動数をパラメータとして図 11d に示す。およそ 10^{-4} cm/sec の速度を持つことが分かる。この発色領域の振動が拡散に大きな影響を与えると思われる。発色領域の周りの流れは図 11e のように推測されるが、流れの詳細は現在不明である。

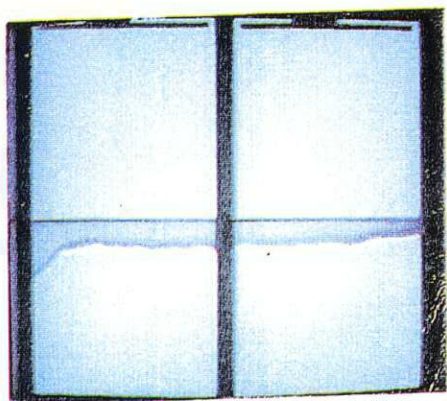


図 11a 発色フェノールフタレインの落下の様子

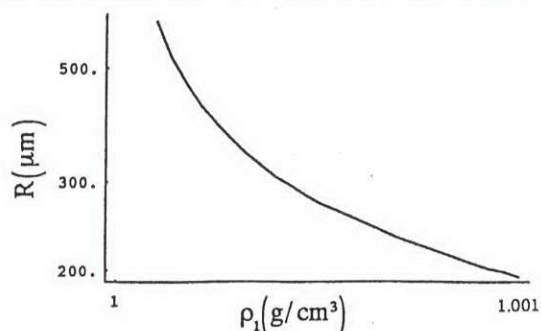


図 11c 密度塊の直径、密度の関係

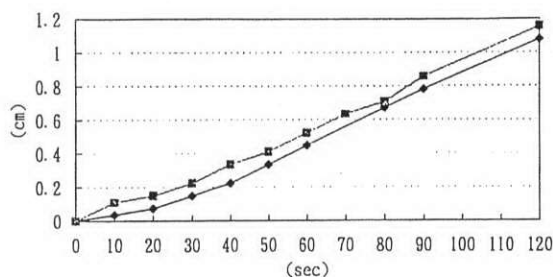


図 11b 発色フェノールフタレインの落下速度

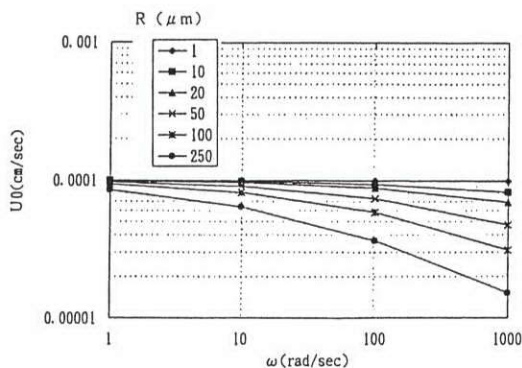


図 11d g ジッタ ($10^{-2} g_0$) による粒子の速度

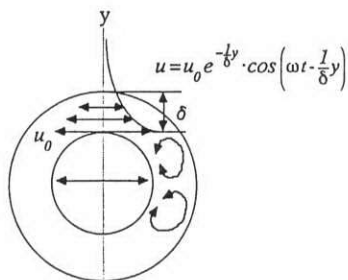


図 11e 発色領域周りの流れ

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \text{ cm} \quad \eta = 0.010 \text{ g/cm sec}$$

$$\omega = 2\pi \quad \delta = 0.56 \text{ mm}$$

$$20\pi \quad 0.17 \text{ mm}$$

$$100\pi \quad 0.08 \text{ mm}$$

$$200\pi \quad 0.05 \text{ mm}$$

温度分布および流れのコンピュータ・シミュレーション

実験が始まると同時に一つの側壁を加熱した。容器の側壁に設置した熱電対により、測定した液体内の温度分布の時間変化を図 12a に示す。A, B 地点は温度勾配の付いてない方に位置する。この温度勾配により大きな対流が起こる。それは以下にコンピュータ・シミュレーションで示す。酸解離定数 K_w の温度による変化は水の場合、 25°C で $1.008 \cdot 10^{-14}$ 、 30°C で $1.469 \cdot 10^{-14}$ それぞれ $\text{pH} = -\log 1.004 \cdot 10^{-7} = 7$, $\text{pH} = -\log 1.469 \cdot 10^{-7} = 6.83$ であり、温度の変化による pH の変化は小さい。

容器の一方の壁を加熱して、その壁と平行な方向に重力加速度揺らぎ $10^{-3} g_0$ が働いている場合について、重力加速度揺らぎの振動数が異なる場合についてシミュレーションを行った。 0.5 Hz と 2 Hz および 10 Hz の場合について 150 秒、450 秒、1500 秒後についてその速度分布を求めた。その結果を図 12b に示す。加熱面と反対側で加速度を $10^{-3} g_0$ として振動流の最大速度は 0.2 Hz で $5 \cdot 10^{-4} \text{ cm/sec}$, 2 Hz で $1 \cdot 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 程度である。

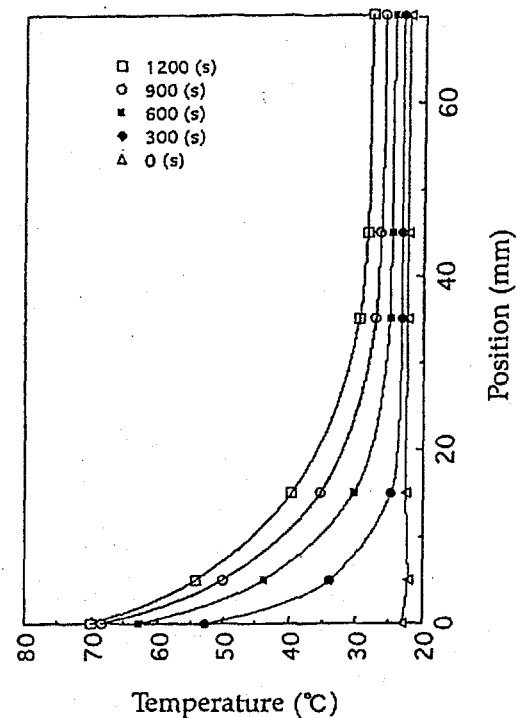


図 12a 実験セル内の温度分布変化

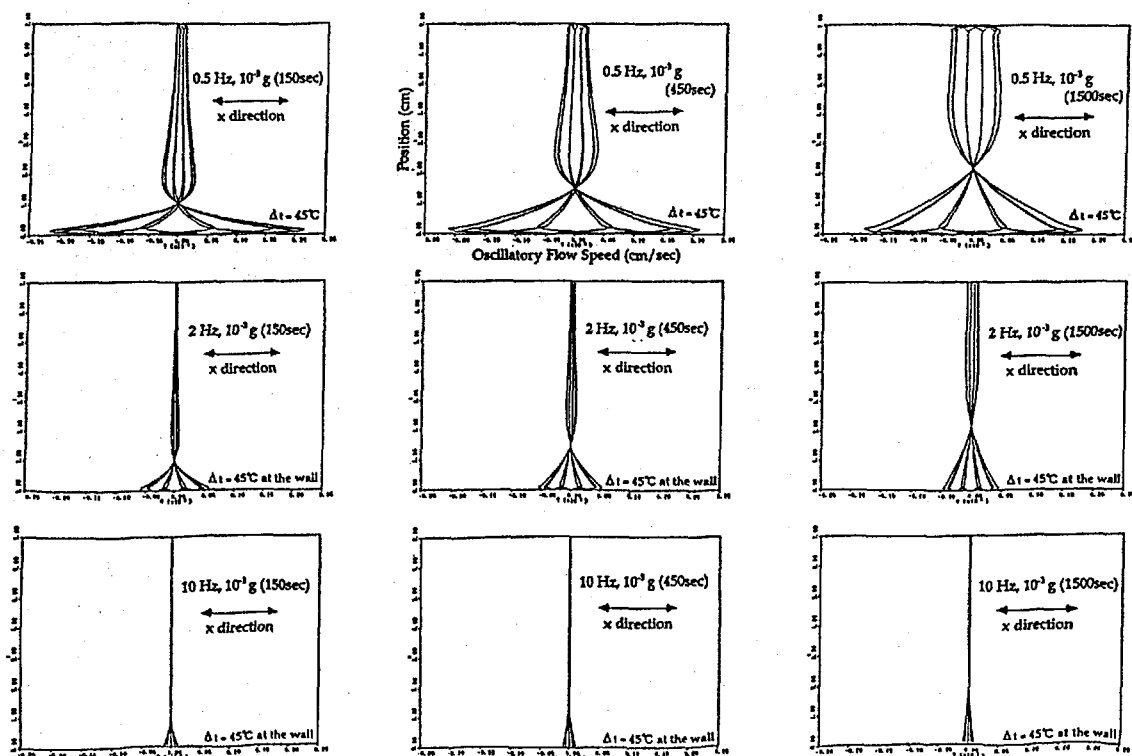


図 12b 温度分布がある場合の重力揺らぎによる振動流
(コンピュータ・シミュレーション)

結論

- 1) 拡散の増大が観測された。防振装置を用いたケース1では見かけの拡散係数 D^* は $D^* \approx 2D$, 防振装置を作動させないケース2では $D^* \approx 3D$ であった。ケース2の方が測定された重力揺らぎは大きく、見かけの拡散 D^* の増大と対応している。
- 2) 液体内に僅かではあるが、なんらかの対流が発生していると考えられる。その原因は幾つか考えられるが、現時点で断定的なことは言えない。
- 3) 長時間(300 ~ 1200 秒間、温度勾配による流体の振動が起こっている)でもケース2の方が拡散が速いことが観察された。

参考文献

- 1) アトキンス. 物理化学(第2版), 上下, 東京化学同人.
- 2) Walter, H. W. (Editor). *Fluid Sciences and Material Sciences in Space*, Springer-Verlag.
- 3) Otto, G. H. and Frohberg, G. *Droplet Dissolution Kinetics in the Miscibility Gap of Ga-Hg: Comparison of Microgravity Results with a Computer Simulation*, ESA SP-256 (Feb. 1987).
- 4) 福中康博氏(京都大学)の助言および諸文献

外部発表

- 1) 東 久雄, 吉原正一, 大西 充. 重力揺らぎの対流、拡散への影響. 第9回宇宙ステーション講演会 (Apr. 1993).
- 2) 吉原正一, 大西 充, 東 久雄, 川原弘靖, 土井隆雄. 重力変動下での流体の挙動—IML-2 予備実験—. 日本マイクログラビティ応用学会誌. 11, 212 (1994). (JASMAG-10 Abstract)
- 3) Doi, T., Prakash, A., Azuma, H., Yoshihara, S. and Kawahara, H. Oscillatory Convection Induced by G-jitter in a Horizontal Liquid Layer. 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV (Jan. 1995).
- 4) 東 久雄, 大西 充, 吉原正一, 土井隆雄, 大井田俊彦, 石川正道, 亀井信一. IML-2 実験の予備検討結果. 第10回宇宙ステーション講演会 (Apr. 1995).
- 5) Azuma, H., Ohnishi, M., Yoshihara, S., Doi, T., Ooida, T., Ishikawa, M. and Kamei, S. Preliminary Result from IML-2 Experiment on Influence of G-jitter on Diffusion. Ninth European Symposium, Gravity Dependent Phenomena in Physical Sciences, Berlin (May 1995).
- 6) 東 久雄, 大西 充, 吉原正一, 土井隆雄, 大井田俊彦, 石川正道, 亀井信一, 小俣美歌, 白石篤史. IML-2 実験から観た宇宙実験環境. 第12回宇宙利用シンポジウム プロシーディング (1995). 223-226.
- 7) 東 久雄, 大西 充, 吉原正一, 土井隆雄, 大井田俊彦, 石川正道, 亀井信一. 重力揺らぎの拡散への影響. 日本マイクログラビティ応用学会第11回学術講演会 (Nov. 1995).
- 8) Azuma, H., Ohnishi, M., Yoshihara, S., Doi, T., Ooida, T., Ishikawa, M. and Kamei, S. Influence of g-jitter on Diffusion-Experimental Result from IML-2. 20th ISTS, Gifu (May 1996). (予定)