

宇宙ライフサイエンス研究向け微小重力環境シミュレータ

3 Dimensional Clinostat "Micro-Gravity Simulator for Life-Science Research"

技術本部 小松直隆^{*1} 佐々木 拓^{*1}
 広江隆治^{*2} 木下 毅^{*3}
 神戸造船所 高沖宗夫^{*4}

宇宙ライフサイエンス研究向け微小重力環境シミュレータは、一般には3Dクリノスタット（クライノスタット）⁽¹⁾と呼ばれている。本シミュレータは、互いに直交する2軸回りに回転可能な回転体の中央に試料（主に植物細胞）を載せ、地上で微小重力環境を疑似的に提供する装置である。回転速度を回転角に因らず一定としていた従来法に替え、回転角に応じて回転速度を変えることで当社従来機に比べ駆動時の振動発生が小さく、試料設置位置における重力の時間平均が特定の向きに対して偏りが少なく、微小な重力場を実現する制御手法を開発した。実験の結果、特定の方向に偏ることなく $1 \times 10^{-3}G$ の微小重力場が実現でき、本制御手法の有効性が確認できた。

Micro gravity simulators are widely known as 3D clinostats. The deviations of time-averaged gravity vectors are required to be equal in the x , y and z directions, at the center of the simulator and the time-averaged gravity vector is also required to be zero. To achieve these micro gravity conditions, a new control method of altering the rotational velocity according to the rotational angle, has been developed. In experiments with a prototype of the simulator using the new method, the time-averaged gravity vector of $1 \times 10^{-3}G$ has been achieved, which has little deviation in a particular direction. The validity of the new control method has been verified by the results of the experiments.

1. 緒言

宇宙ライフサイエンス研究向け微小重力環境シミュレータは、試料を載せた回転体を2軸回りに回転させることで試料に作用する重力ベクトルの方向を変化させ、これにより時間平均として重力の影響を相殺する装置である。

当社では平成6年度に図1に示す3Dクリノスタットを試作し、これを用いて植物細胞の微小重力環境での実験を行っている⁽²⁾。

このとき試作した従来機では、回転体を駆動する2つのモータに対してランダムな速度指令を与えることで、時間平均として重力の影響を相殺する制御法（以下、ランダム制御法と称す）を用いた。この制御法では、(1)装置自体の振動を引起すような速度の

急激な変化を伴う場合がある、(2)軌道の与え方がランダムであるため試料に作用する重力の一意性に一定の限界があるという、より精度の高い微小重力場を模擬するために改善すべき点があった。このため、振動を抑えかつ一様な重力が試料に作用するようオフラインであらかじめ軌道を算出し、この軌道に基づいて装置を駆動する新しい制御法を開発した。

2. 新制御手法の開発

2.1 基礎式

以下に、今回開発した制御方法の基礎式についてその概要を述べる。

シミュレータでは水平軸回りに回転する外側回転体の内部に、更に内側回転体が取付けられており、試料はこの内側回転体のほぼ中央に設置される。シミュレータの運動に伴い、試料に固定したO-XYZ座標系に対して重力ベクトル g が変化する。クリノスタットの目的は、試料に作用する重力の方向を統計的に均一化し、微小重力環境を疑似的に実現することにあるが、どのように試料を回転させるべきかという問題はまだ解決されていない。微小重力環境を作るためには、少なくとも試料に作用する重力の時間平均が向きによらず0であることが必要である。クリノスタットでは、従来重力の時間平均を0にすることに着目した運転がされてきた⁽¹⁾。重力の時間平均を0にするだけであれば、試料の天地が替わるように縦方向に回転させるだけで十分であり、回転軸は1個でよい。しかし、このときには試料の横方向には重力が作用せず、各方向に作用する重力の分散は均一でない。2個の回転軸を使う3Dクリノスタットは、試料を縦方向のみならず横方向にも回転させることができるので、試料に作用する重力の分散を方向によらず均一にできることになる。

3Dクリノスタットにおいて、試料に作用する重力の統計的な性質を以下で検討する。

初期状態では試料には式(1)の重力ベクトル $g(0)$ が作用するもの

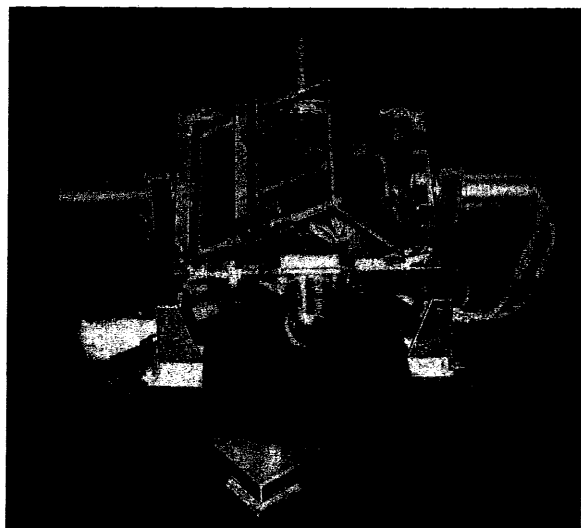


図1 平成6年度に試作したシミュレータ インキュベータや人工気象機の内部に入れて使用するため一辺が500 mm程度の立方体に収まるようコンパクトにまとめられている。
 Prototype simulator made in 1994

*1 高砂研究所機器・自動化装置研究室

*2 高砂研究所制御システム研究室

*3 エレクトロニクス技術部システム技術開発センター

*4 電子・宇宙技術部主査 理博

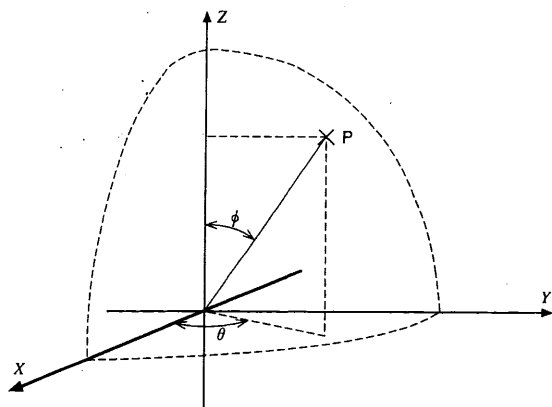


図2 シミュレータの回転角 ϕ , θ で定義される単位球面
シミュレータの2軸回転軸回りの回転角 ϕ , θ で決まる試料の姿勢を単位球面上の点 P の座標 (ϕ, θ) に置換える。
Surface of sphere defined by rotational angles ϕ and θ about 2 axes of simulator

とする。

$$\mathbf{g}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

時刻 t において、図2に示すように、内側と外側の回転体が初期角度に対しそれぞれ $\phi(t)$, $\theta(t)$ 回転しているとすると、このときの重力ベクトルは式(2)で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(t) &= \begin{bmatrix} \cos\theta(t) & \sin\theta(t) & 0 \\ -\sin\theta(t) & \cos\theta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi(t) & \sin\phi(t) \\ 0 & -\sin\phi(t) & \cos\phi(t) \end{bmatrix} \mathbf{g}(0) \\ &= \mathbf{g}_0 \begin{bmatrix} \sin\theta(t)\sin\phi(t) \\ \cos\theta(t)\sin\phi(t) \\ \cos\phi(t) \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

従来、内側と外側の回転角速度を互いにランダムな値に選定することにより、重力の均一化を図っていた。式(2)より、重力の期待値(平均値) $\mathbf{E}(\mathbf{g})$ を求めると式(3)のように、意図どおりに0になる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{g}) &= \mathbf{g}_0 \begin{bmatrix} E(\sin\theta)E(\sin\phi) \\ E(\cos\theta)E(\sin\phi) \\ E(\cos\phi) \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{g}_0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

一方、重力の X , Y , Z 方向ごとの成分を g_x , g_y , g_z とすると重力の分散は次式(4)となり、 Z 方向の分散のみが他と比べ大きい。

$$\begin{aligned} \mathbf{E} \left(\begin{bmatrix} [g_x - E(g_x)]^2 \\ [g_y - E(g_y)]^2 \\ [g_z - E(g_z)]^2 \end{bmatrix} \right) &= \mathbf{g}_0 \begin{bmatrix} E(\sin^2\theta) \cdot E(\sin^2\phi) \\ E(\cos^2\theta) \cdot E(\sin^2\phi) \\ E(\cos^2\phi) \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{g}_0 \begin{bmatrix} (1/2)^2 \\ (1/2)^2 \\ 1/2 \end{bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

このように、従来のランダム法では全方位に対する重力の均一性を得る上で限界があることが分かる。

従来、回転の角速度は角度によらず一様としていたが、 ϕ の角速度を、正の定数 k を用いて式(5)のように、 ϕ に依存して変えることにする。

$$\dot{\phi} = \frac{k}{|\sin\phi|} \quad (5)$$

式(5)の微分方程式を解くと、式(6)を得る。

$$\phi(t) = \cos^{-1} kt \quad t \in [-1/k, 1/k] \quad (6)$$

内側回転体が一回転するのに要する時間を T_ϕ 、外側回転体のそれを T_θ とする。 T_θ を T_ϕ に比べ十分に小さくすると、式(5)を用いたときにも従来のランダム法のように、 θ と ϕ は統計的に独立とみなすことができ、重力の期待値は式(3)と同様に0になる。

次に分散を求めると式(7)を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{E} \left(\begin{bmatrix} [g_x - E(g_x)]^2 \\ [g_y - E(g_y)]^2 \\ [g_z - E(g_z)]^2 \end{bmatrix} \right) &= \mathbf{g}_0 \begin{bmatrix} E(\sin^2\theta) \cdot E[\sin^2(\cos^{-1} kt)] \\ E(\cos^2\theta) \cdot E[\sin^2(\cos^{-1} kt)] \\ E[(kt)^2] \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{g}_0 \begin{bmatrix} 1/2 \cdot 2/3 \\ 1/2 \cdot 2/3 \\ 1/3 \end{bmatrix} = \mathbf{g}_0 \begin{bmatrix} 1/3 \\ 1/3 \\ 1/3 \end{bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

このように、 ϕ の角速度を式(5)に従って定めることにより、試料に作用する重力の各方向の成分は分散が均一でしかも平均値が0となり、3D クリノスタットへの要求を満たし得ることが分かった。

2.2 実験

(1)シミュレータ動作時の振動加速度の低減、(2)試料近傍における重力の微小性、(3)試料近傍における重力の一様性、の3点に着目し新制御の有効性を確認するため、今回新たに試作機を製作し、これを使い従来制御法であるランダム制御法と、今回開発した新制御法との実験による比較を行った。

2.2.1 シミュレータ試作機

シミュレータ試作機の外観を図3に、主な仕様を表1に示す。

外側フレームには外側回転体が、外側回転体にはその内部に内側回転体が取付けられている。

外側回転体及び内側回転体は軽量化を図るため、アルミニウム

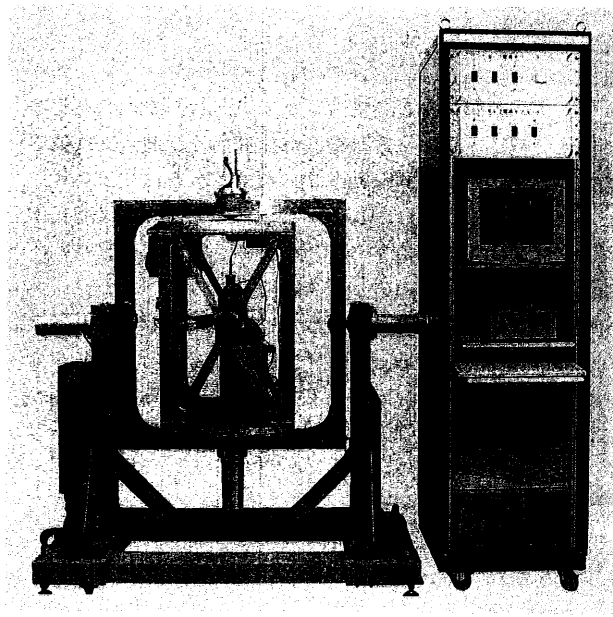


図3 シミュレータ試作機 シミュレータ試作機本体及び電装盤の外観を示す。
Prototype simulator and its controller

表1 シミュレータ試作機の主仕様
Specification of prototype simulator

項目	仕様
回転速度	2 軸共 25 rpm
最大寸法	W 1 535×D 1 410×H 1 729 mm (運転時) W 1 535×D 720×H 1 675 mm (運搬時)
外側フレーム寸法	W 1 535×D 720×H 1 075.5 mm
外側回転体最大寸法	W 900×D 130×H 1 016 mm
内側回転体最大寸法	W 500×D 560×H 824 mm
外側モータ	ハーモニックドライブシステムズ社製 RH-14-3002 E036AL
内側モータ	ハーモニックドライブシステムズ社製 RH-8C-3006 E036AL
制御用計算機	COMPAQ 製デスクプロ 2 000 5133 (Pentium 133MHz) US DOS モードで使用
重量	本体: 約 200 kgf 電装盤: 約 70 kgf

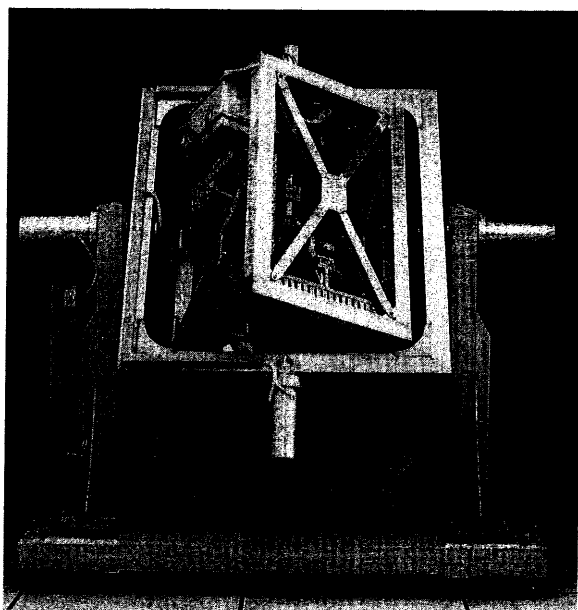


図4 回転中のシミュレータの状況 2 軸回りに回転体が回転している状況を示す。
Prototype simulator in operation

合金のフレームを溶接した構造になっている。また、ねじりや曲げに対して剛性を確保するため回転体底面及び側面には補強材が溶接されているほか、回転軸回りのバランスを取るためカウンタバランスが回転体底面にボルト付けされている。外側回転体及び内側回転体は、各1個のサーボモータにより回転軸回りに各々独立に回転可能となっている(図4参照)。

回転角の原点は回転する側に取付けた永久磁石の位置で定義される。この原点位置をホール素子で検出し、サーボモータのエンコーダパルスを制御コンピュータでカウントすることで回転角の絶対位置検出を行う。回転角の原点を設けることにより、エンコーダパルスカウント時に誤差が積算されることを排し、これにより回転角の検出誤差を抑える。

内側回転体内部には図5に示すように試料を搭載するための試料ケースと、試料を観察するための位相差式顕微鏡が取付けられている。顕微鏡により得られる試料の画像は、CCDカメラに取込まれて内側回転体/外側回転体間及び外側回転体/外側フレーム間に設置された2つのスリップリングを介してシミュレータ外部

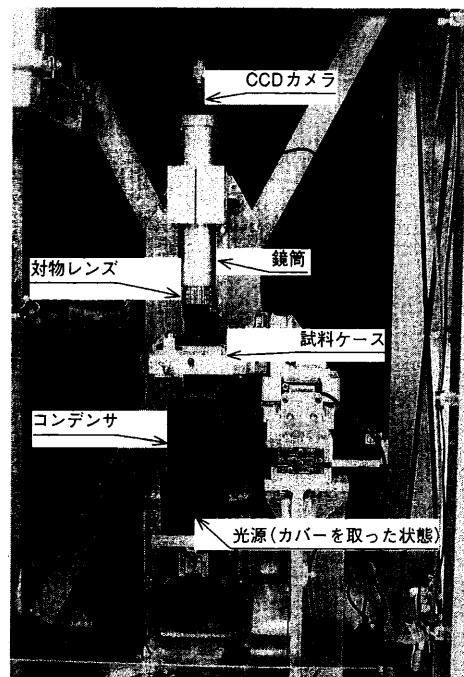


図5 顕微鏡回りの構成 内側回転体に設置された顕微鏡回りの構成を示す。
Microscope installed on inner rotor of prototype simulator

に取出され、ビデオモニタに出力される。また、必要に応じて顕微鏡画像はビデオカセットデッキに記録される。なお、機内との制御信号(CCDカメラのビデオ信号、サーボモータのエンコーダ帰還信号等)や動力信号(サーボモータの電源ライン、顕微鏡光源の電源ライン、CCDカメラユニットの電源ライン等)のやり取りは、これら2個のスリップリングを介して行われる。シミュレータの試作に当り、スリップリング接点における画質低下、スリップリング接点における電磁ノイズの影響、サーボモータの駆動に伴う電磁ノイズの影響による画質の劣化が懸念された。このため、(1)CCDカメラユニットとビデオカセットデッキをを直結した場合、(2)CCDカメラユニットとビデオカセットデッキ間にスリップリングを介した場合、(3)CCDカメラユニットとビデオカセットデッキ間にスリップリングを介かつサーボモータを駆動した場合、の3条件に対しテストパターン(テストチャート名:USAF 1951を使用)画像を比較した結果、ビデオ画像を見る限りではこれら3条件で著しい画質の差は認められなかった(図6参照)。

2.2.2 実験結果

3軸加速度計を内側回転体の試料取付け位置の近傍に取付け、表2に示す条件で運転したときの振動加速度データを図7に示す。

同様に表2に示す条件で、シミュレータ運転中の回転角の時刻歴を0.05s周期で800s間記録した。この回転角の時刻歴データから求めた試料位置の時刻歴 $[X(t), Y(t), Z(t)]$ に対する重力ベクトルの時間平均と分散を表3に示す。

2.2.3 考察

図7から従来制御法であるランダム制御法に比べ、シミュレータ制御中の振動加速度が新制御では大幅に低減していることが分かる。なお、同図の新制御のデータにおいて、約40s周期で若干の振動の発生が認められる。この事象は内側回転体の回転軸が垂直になる位置で発生している。軌道生成上の要求からこの位置で角速度の時間変化を大きくする必要があり、その結果この位置で振動加速度が発生する。角速度の上限を小さくすれば振動加速度

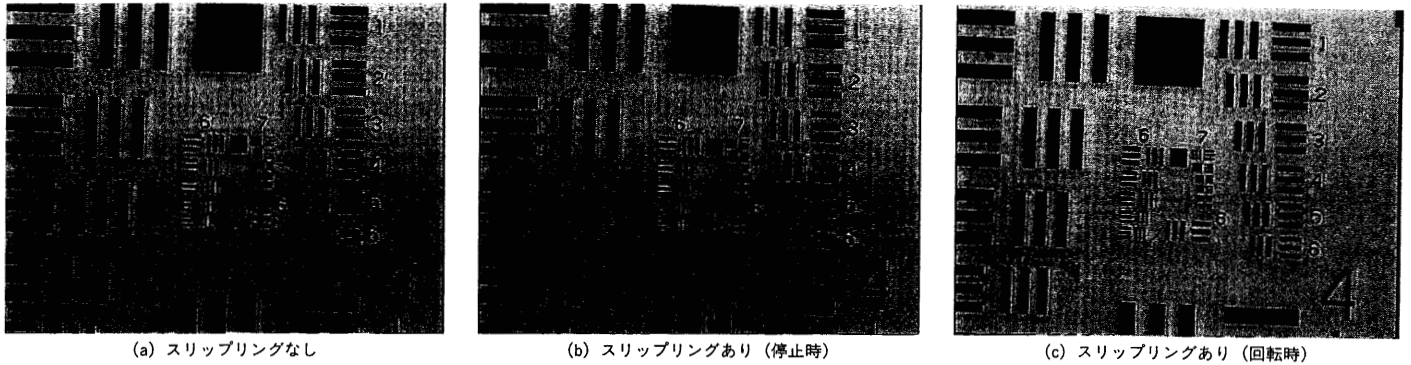


図6 顕微鏡画像の状況 3つの条件の顕微鏡画像に画質の差は認められない。
Test patterns through microscope

表2 試験条件
Test conditions

条 件	詳 細 条 件					
	外側モータ回転数 (rpm)			内側モータ回転数 (rpm)		
	最 小	最 大	平 均	最 小	最 大	平 均
ランダム制御 (当社従来の制御手法)	0	10	5	0	10	5
新制御	0.48	7.63	0.75	1.77	28, 27	2.78

表3 試験結果
Test result

条 件	実験結果	
	平 均	分 散
ランダム制御 (スムージングあり)	X軸: -12.0×10^{-3} Y軸: 38.0×10^{-3} Z軸: 3.5×10^{-3}	X軸: 0.254 Y軸: 0.244 Z軸: 0.500
新制御方式	X軸: 1.1×10^{-3} Y軸: -1.4×10^{-3} Z軸: 0.4×10^{-3}	X軸: 0.321 Y軸: 0.321 Z軸: 0.358

(注) 起動から800s経過した時点における、各軸当りデータ数16000に対する平均と分散を示す。

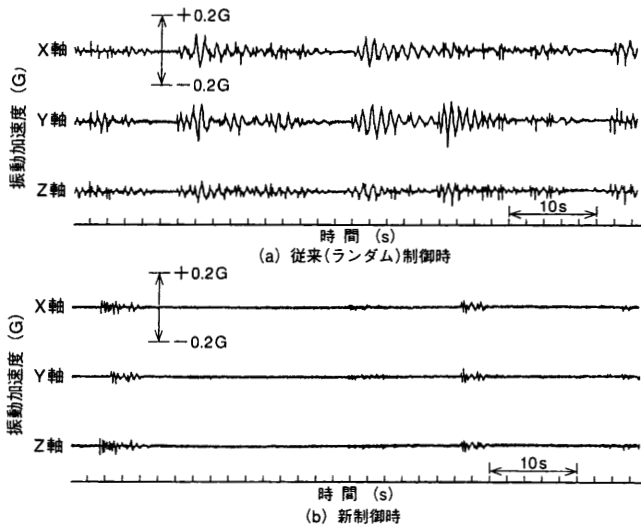


図7 シミュレータ駆動時の振動加速度の比較 (a)従来制御及び(b)新制御の駆動時の振動加速度を示す。
Comparison of vibration data

の発生を抑えることができる。

表3に示す時間平均は、その値が0に近いほど微小重力環境が模擬できていることを表している。新制御では、回転軸の交点である回転軸において $1 \times 10^{-3}G$ (ランダム制御法に比べ約1/10以下)の微小重力が得られている。なお、回転中心を離れた点では遠心力が作用する。試料ケースの観察窓の大きさと回転数の最大値から求める加速度は $10^{-2}G$ 程度となるが、実際には表2に示す範囲で回転数が増減するため、回転に伴い発生する遠心力は更に小さくなり、試料ケースの観察窓の領域ではほとんど無視できる値となる。一方、表3に示す分散は、X、Y、Zの3軸同時にその値が1/3に近づくほど特定の向きに偏ることなく重力が作用していることを表す。ランダム制御ではZ軸方向の分散が0.5であ

り、残りの2軸と比べてZ軸方向に偏って重力が作用していることが分かる。これに対して新制御では、Z軸の分散が残りの軸と比べてやや大きいものの、いずれも0.3であり、ほぼ一様に重力が作用していると考えられる。

以上の実験結果から、新制御では $1 \times 10^{-3}G$ の微小重力場がほぼ一様に発生していると考察される。

3. 結 論

試料に作用する重力ベクトルの時間平均がそれぞれ0になり、かつその分散がそれぞれ等しいときを微小重力が模擬された必要条件として、軌道生成ソフトウェアを開発した。そして、(1)シミュレータ動作時の振動加速度の低減、(2)試料近傍における重力の微小性、(3)試料近傍における重力の一様性、という3つの観点に着目し、従来の制御法との比較実験を行った結果、新制御では、振動加速度の発生も少なく、 $1 \times 10^{-3}G$ の微小重力場がほぼ一様に発生していることを確認し、新制御法の有効性が確認できた。

今後、今回開発した新制御法を従来機にも適用して、微小重力の精度を上げることでシミュレータの性能向上を図る。また、駆動中の振動が小さいという新制御法の利点を生かして、シミュレータ内部に顕微鏡を搭載して駆動中でも試料の状況が観察できる、といったシミュレータの機能向上を図っていく予定である。

参 考 文 献

- (1) 山下雅道ほか, 3Dクライノスタットとその動作特性, 宇宙生物科学 Vol.11 No.2 (1997) p.112
- (2) Osuga, K. et al., Somatic embryogenesis processes in carrot suspension cultures under microgravity condition simulated by a three-dimensional clinostat, Journal of Plant Resesarch (in prep) (1998)