 原 著

コリオリ刺激実験による 1G と μ G の空間識比較関根 基樹¹⁾・高橋 正紘¹⁾・小林 修²⁾池田 卓生³⁾・綿貫 浩一³⁾・武岡 元⁴⁾Coriolis Stimulation under the μ G conditionMotoki Sekine¹⁾, Masahiro Takahashi¹⁾, Osamu Kobayashi²⁾,
Takuo Ikeda³⁾, Koichi Watanuki³⁾, Hajime Takeoka⁴⁾¹⁾ *Department of Otolaryngology, Tokai University School of Medicine*²⁾ *Department of Astronautics and Aeronautics, Tokai University School of Engineering*³⁾ *Department of Otolaryngology, Yamaguchi University School of Medicine*⁴⁾ *Space Utilization and Research Department, Japan Space Forum*

The purpose of the present study was to verify our hypothesis that perception of the outer world determines sensations, eye movements and bodily movements. We did so by assessing the effects of Coriolis stimulation under a μ G condition during parabolic flight. Using a suspended rotary chair, we subjected five young men to Coriolis forces under μ G and 1-G conditions. Wearing a linear accelerometer on their chest, and goggles with a CCDcamera, which recorded eye movements, each subject was rotated clockwise at speeds of 50, 100, 150 deg/s under 1 G and at 100 deg/s under μ G. Under the 1-G condition, the subject's body was displaced in response to inertial inputs provoked by Coriolis stimulation, i.e., momentarily accelerated leftwards while bending during clockwise rotations. Torsional nystagmus, moving sensation, and motion sickness were produced under 1 G. Under the μ G condition, subjects shifted slightly to the right, but nystagmus was as pronounced as that under 1 G. Moving sensation and motion sickness were far less pronounced under μ G than under 1 G. The results can be explained by our hypothesis. When gravity provides the Z-axis of the three-dimensional outer world, inertial inputs from the labyrinths displace the coordinates in the head, producing body sways, nystagmus and moving sensations. Because the Z-axis of the outer world is not ordained under μ G, inertial inputs do not influence spatial orientation. Thus, neither body movements nor moving sensations are produced. However, because gaze is controlled by both head and eye movements, eye movements in the head are evoked directly by head movements, whether or not orientation in space is based on gravity. Space motion sickness is likely provoked by a failure in posture control depending on the outer world under 1 G.

Key words: Coriolis stimulation, spatial orientation, μ gravity condition, space motion sickness

¹⁾ 東海大学医学部耳鼻咽喉科²⁾ 東海大学工学部航空宇宙学科³⁾ 山口大学医学部耳鼻咽喉科⁴⁾ 日本宇宙フォーラム

はじめに

我々は、起立台回転装置を用いてコリオリ刺激を与える実験を、遮眼と裸眼で行ってきた。遮眼のコリオリ刺激では、三半規管からの慣性入力に一致した揺らぎ、眼球運動、感覚が観察される^{1)~6)}。一方、裸眼で同一刺激を与えても、これらの現象は観察されない²⁾。この違いは、脳内に外界空間をベクトルとして想定すると、視覚入力と前庭入力の単純なベクトル合成で説明できる(図1)^{7)~10)}。これより、姿勢や眼球運動、感覚は、慣性入力で駆動されるのではなく、脳で知覚される外界に画一的に依存すると言える。

この原理を利用して μG 空間における外界知覚を調べるために、コリオリ刺激実験を企画した。 μG 空間の現象はこれまで、詳細に報告されてきた^{11)~15)}。しかし、1G と μG の現象を同じ原理で単純に説明できる理論は報告されていない。地上と異なり、 μG では 3D の座標軸(重力)を欠くため、慣性入力は脳内の外界に 1G と異なった影響を与える可能性がある。1G か μG かを問わず、動作が脳内に再現された外界に従うとすれば、 μG でコリオリ刺激を与え、姿勢変化や眼球運動を分析すれば、脳内の外界すなわち μG の空間識を知ることができる。

この目的のために、1G と放物線飛行中の μG で同一刺激を与えるための装置を作成し、両条件

の空間識の違いを調べた。本稿では、実験方法と身体移動所見を中心に報告した。

対象と方法

あらかじめ学内と NASDA の倫理委員会に実験計画を提出し、承認を得た後にボランティアを募り実験を開始した。

対象：聴覚、前庭機能に異常を認めず、下肢に外傷の既往のない20歳代健康男子5名を対象とした。全員に実験内容および起こりうる不快症状を説明し、インフォームド Consent が得られた。

装置：回転装置は、あらかじめ航空機(ダイヤモンドエアサービス所属のガルフストリームII)に搭載可能のように設計された、小型軽量の懸垂式回転椅子(永島医科器械製)を使用した(図2左)。縦、横、高さは、それぞれ173 cm, 100 cm, 172 cm の装置である。回転装置はダイヤルの調節により、170度/秒以下の任意の速度を出すことができる。航空機実験のときは、回転装置の周囲を、不燃性のクッション材で被覆した。安全を確保するため、被験者の骨盤周囲を固定するシートベルトが付けられている。

コリオリ刺激による身体移動を記録するために、前後・左右・上下方向の加速度を同時に記録する、3D 直線加速度計を用いた記録システムを開発した(図2右)。頭部の傾斜角度を確認するために、側頭部と肩に角度センサーを取り付け、

図1 回転中のコリオリ刺激によるベクトル変化

遮眼 (A)：遮眼で回転中に頭部を傾斜すると、頭部に回転加速 ($\Delta\omega$) が加わり、三半規管から慣性入力 ($\Phi\Delta\omega$) が脳に入力される。脳内の外界座標が移動するため、眼振と身体移動、受動感覚が起こる。

裸眼 (B)：裸眼では外界が知覚され脳内にベクトルとして再現されている ($\Phi\omega_1$)。頭部を傾斜すると、このベクトルに慣性入力 ($\Phi\Delta\omega$) が加算され、脳内の外界座標は影響されない ($\Phi\omega_2$)。

図2 実験装置

機内に搭載された懸垂式回転装置（左）。

身体移動記録のための3D直線加速度センサー（右）。

直線加速度と共にコンピューターに記録した。頭部傾斜角が一定値（実験では40度）を超えると100%，未満では0%の指標を同時に表示した。

眼球運動の記録には、右眼にCCDビデオカメラの装着された（左眼は遮蔽）ゴーグルを用いた。

方法：被験者の前胸部に加速度センサーを貼付し、ゴーグルを装着し、シートベルトで腰部を椅子に固定した。回転いすを加速した後、毎秒100度の等速で右回転させ、回転中に検者の合図により頭部を40度以上に前屈させ、コリオリ刺激を加えた。地上では毎秒100度に加え、静止、毎秒50度、毎秒150度においても実験した。航空機実験では、一部の被験者で左回転の前屈刺激を行った。航空機実験は、パラボラフライト中、微小重力に移行する10秒前に回転を始め、微小重力に移行8秒後に検者の合図により前屈させた。連日に計5回飛行し、各飛行で2名ずつ実験し、1回の飛行で10-16回のパラボラフライト飛行を実施した。再現性を調べるため、同一被験者が日を替えて2回搭乗した。

記録の解析と評価：身体移動の加速度変化から、各方向の最大直線加速度を求めた。位置の移動を、直線加速度より求めた。眼球運動のテープ記録から画像をパソコンに取り込み、公開されているNIH image programを用いて3D解析¹⁶⁾し、水平、垂直、回旋成分を求めた。椅子停止時に、実験による被験者の不快症状（悪心、冷汗、唾液分泌亢進、顔面蒼白）を確認し、Graybiel's Score¹⁷⁾を用いて定量的に評価した。同時に、被験者に移動感覚の内容、強さを聞き記録した。

結 果

1) 地上実験

毎秒100度、右回転で頭部を前屈したときの、左右方向への加速度変化の1例を示す（図3上）。身体は主に一峰性に左方向に加速されている。回転速度が毎秒50、100、150度と増すと共に、加速度の最大値平均も比例的に増加した（図4）。コリオリ刺激後約1秒間の移動距離を、加速度変化から算出したところ、1G空間では身体が主に左方向へ移動していた（図5左）。静止状態で前屈しても加速度変化は記録されないので、身体移動

図3 毎秒100度の右回転中に前屈したとき（↑）の、左右直線加速度記録縦軸の単位は重力加速度。

は前庭入力によると言える。1G 下において、眼球も慣性入力に一致した回旋成分の強い眼振を示した。

2) 航空機実験

毎秒100度、右回転で頭部を前屈すると、1G とは異なった加速度波形が記録された（図3下）。コリオリ刺激により身体は初め右方向に加速し、

その後左方向に加速し二相性の波形を示した。加速度変化から算出した位置の移動では、右方向への小さな揺らぎが再現された（図5右上）。一部の被験者で実施した左回転では、右回転の波形と鏡像を示した（図5右下）。

眼球運動の解析では、μG でも 1G に類似した回旋成分の強い眼振がみられたが、持続は 1G に

図4 1G 環境における右回転コリオリ刺激（前屈）ときの、右方向（上向き）と左方向（下向き）の最大直線加速度の5名の平均値
横軸は回転速度で、0 deg/s は、椅子停止で前屈のみを表す。

図5 毎秒100度の回転でコリオリ刺激（前屈）後、1秒間の左右方向への身体移動
1G：右回転
μG：右・左回転
近似式による換算なので、移動距離の単位を省いてある。

比べ短い傾向があった。

3) 動揺病症状と移動感覚

実験後に、動揺病症状である悪心、冷汗、唾液分泌亢進、顔面蒼白のそれぞれの項目を、Graybiel's Score により評価した。4 症状のトータルスコアの平均は、1G で平均8.5、μG では、2.4 と低い値となった（図6）。被験者全員が、1.8G から μG に移行した途端に、回転感覚の喪失を訴

えた。1G で経験されるコリオリ刺激時の奇妙な感覚は、μG ではほとんど訴えられなかった。移動方向については、一定の傾向はみられなかった。

考 察

今回は、次のような仮説に基づき実験計画を立てた。

1) 1G か μG かを問わず、動作は知覚された外界に従う可能性がある。

図6 動揺病症状の強さの比較（Graybiel's Score）

2) 1) が正しければ、 μG でコリオリ刺激中の姿勢や眼球を分析することにより、 μG の外界知覚を知ることができる。

3) μG では座標軸（重力）を欠くため、慣性入力は外界知覚に影響しない可能性がある。

1G と μG 下の実験結果をまとめると、表1のごとくなる。地上すなわち 1G 下では、身体は明らかに左方向に移動した。右回転中の前屈では、頭部を被験者からみて時計方向に移動させるコリオリの力が働く。しかし、1G では三半規管からの慣性入力の影響はるかに強く、身体はこれに従い、右回転では左方向に移動したと解釈される。毎秒50、100、150度と回転速度を増すと、左方向への加速度の最大値平均は比例的に増加しており、慣性入力による身体移動を表している。一方、前屈直後にみられる右方向への加速度の最大値平均は、速度が増大しても変化せず、頭位変化に伴うノイズである可能性が高い（図4）。

これに対して、 μG では身体はわずかに右方向へ移動した。 μG においても 1G と類似した眼振が誘発されるので、 μG で三半規管が刺激されたことは明らかである。 μG においては、三半規管からの慣性入力外界座標に相当するものを回転移動させるが、座標の基準となる Z 軸が存在しないため、身体移動が出力されなかったと理解される。この結果、頭部に加わるコリオリの力が優位となり、身体が軽度右方向に移動した可能性がある。固視の制御も身体と同様に外界空間に依存するが、空間内の頭部移動と頭部内の眼球移動から成っている。 μG では空間内の頭部移動は脳内の外界知覚には影響しないが、慣性入力頭部内の眼球位置を移動させるため、眼振が起こる、と

推測される。言い換えると、 μG において誘発される眼振は、空間識と無関係な反応と言える。

μG では、コリオリ刺激中に感じる移動感覚（空間内の回転感覚）もきわめて軽微であった。これに対応して μG の Graybiel's Score は、1G の約 1/3 と低い値を示した。 μG で移動感覚が希薄なことは、慣性入力自体が移動感覚を生むのではなく、外界座標が変化して初めて感覚を生むことを証明している。

以上より、今回の結果は実験前の作業仮説が正しいことを裏付けた。1G 環境では、重力軸を Z 軸とする 3D 座標が脳内に再現され、慣性入力がこの座標に作用することにより、感覚や姿勢変化が画一的に起こる。一方 μG 環境では、重力を欠くため空間の Z 軸が定まらず、外界座標が制御の基準として機能しない。この結果、慣性入力は感覚や姿勢制御に影響しない。 μG 環境では、脳内の外界座標が曖昧になり、外界の知覚（空間識）とこれに依存する制御が破綻する。この結果、知覚と現実がかい離し、宇宙酔いが起こると考えられる。この状態が持続すると、自己中心的な空間識とこれに基づく身体制御に適応していくと予想される。

まとめ

1. 航空機搭載可能な回転装置を用いて、1G と μG におけるコリオリ刺激反応を正常者と比較した。

2. 右回転中の前屈刺激で、1G では慣性入力に対する反応である身体の左方移動が、 μG ではわずかな右方移動が記録された。

3. 1G と比べ μG では、コリオリ刺激中に感じる移動感覚がきわめて軽微であり、不快症状の発現も少なかった。

4. μG 環境では、重力を欠くため空間の Z 軸が定まらず、外界座標は制御の基準として機能しない。この結果、慣性入力は感覚や姿勢制御に影響しない。

本研究は、日本宇宙フォーラム、平成12年度公募地上研究フェーズ I (B) で行われたものであり、謝意を表します。また、実験を共に行った元東海大学工学部航空宇宙学科大学院 白田周三氏に深謝致します。

表1 1G と μG の実験結果比較

	1G	μG
身体移動	左方向(++)	右方向(±)
眼球運動	(++)	(++)~(+)
移動感覚	(+)	(±)~(-)
動揺病症状	(++)~(+)	(±)~(-)
主に働く力	慣性入力	コリオリの力

文 献

- 1) Watanuki K, Takahashi M, Ikeda T: Perception of surrounding space controls posture, gaze, and sensation during Coriolis stimulation. *Aviat Space Environ Med* 71: 381-387, 2000
- 2) Hitouji K, Takahashi M, Iida M, et al: Spatial reference and standing posture during high-speed Coriolis stimulation. *Aviat Space Environ Med* 73: 865-871, 2002
- 3) 綿貫浩一, 高橋正紘, 池田卓生, 他: コリオリ刺激が起立に及ぼす影響. *Equilibrium Res* 57: 382-388, 1998
- 4) Woodman PD, Griffin MJ: Effect of direction of head movement on motion sickness caused by Coriolis stimulation. *Aviat Space Environ Med* 68: 93-98, 1997
- 5) Dizio P, Lackner JR: Congenitally blind individuals rapidly adapt to Coriolis force perturbations of their reaching movements. *J Neurophysiol* 84: 2175-2180, 2000
- 6) Bles W: Coriolis effects and motion sickness modeling. *Brain Res Bull* 47: 543-549, 1998
- 7) 池田卓生, 高橋正紘, 綿貫浩一, 他: 空間識再現における耳石入力の役割. *パラボリックフライト* 8: 17-24, 1997
- 8) 高橋正紘: 動揺病と空間識. *耳鼻・頭頸外科* 67: 383-395, 1995
- 9) 高橋正紘: 空間識とめまい平衡障害. *耳鼻臨床* 90: 379-386, 1997
- 10) Takahashi M, Watanuki K, Ikeda T: Sensation and action during active and passive movement. *Acta Otolaryngol* 119: 121-125, 1999
- 11) Gurovskiy NN, Bryanov, Yegorov AD: Changes in the vestibular function during space flight. *Acta Astronaut* 2: 207-216, 1975
- 12) Davis JR, Vanderploeg JM, Santy PA, et al: Space motion sickness during 24 flights of the space shuttle. *Aviat Space Environ Med* 59: 1185-1189, 1988
- 13) Graybiel A, Kennedy RS, Kellogg RS: Motion sickness precipitated in the weightless phase of parabolic flight by Coriolis accelerations. *Aerosp Med* 40: 819-822, 1969
- 14) Hilbig R, Anken RH, Bauerle A, et al: Susceptibility to motion sickness in fish: a parabolic aircraft flight study. *J Gravit Physiol* 9: 29-30, 2002
- 15) Yakovleva IY, Bokhov BB, Kornilova LN: Study of space perception functioning during simulation of certain space flight factors. *Life Sci Space Res* 14: 295-300, 1976
- 16) 池田卓生, 綿貫浩一, 菅原一真, 他: 赤外線 CCD カメラとパソコンを用いた簡易的眼球運動画像解析法. *Equilibrium Res* 59: 298-305, 2000
- 17) Graybiel A, Wood CD, Miller EF, et al: Diagnostic criteria for grading the severity of acute motion sickness. *Aerosp Med* 39: 453-455, 1968

原稿到着: 平成16年2月12日

別刷請求先: 関根基樹

〒259-1193 神奈川県伊勢原市望星台

東海大学医学部耳鼻咽喉科

E-mail: k167813@is.icc.u-tokai.ac.jp