原 著

コリオリ刺激が起立に及ぼす影響

綿貫 浩一¹⁾・高橋 正紘¹⁾・池田 卓生¹⁾
泉 龍太郎²⁾・武岡 元²⁾

The Influence of Coriolis' Stimulation upon Stance Regulation

Koichi Watanuki¹⁾, Masahiro Takahashi¹⁾, Takuo Ikeda¹⁾,
Ryutaro Izumi²⁾, Hajime Takeoka²⁾

¹⁾ *Department of Otolaryngology, Yamaguchi University School of Medicine*

²⁾ *Japan Space Utilization Promotion Center*

To evaluate the influence of spatial orientation upon stance regulation, we gave Coriolis' stimulation to the subject standing on the turntable, and the findings were compared to those of eye movements.

Six healthy adult subjects were asked to wear goggles and stand on a force platform at the center of the turntable with legs together. They performed a forward head tilt (30 deg) while rotating at a constant velocity. Perturbations of body and eye movements were evaluated by shifts in the center of pressure and recordings by a CCD video camera, respectively.

Rotation velocity was increased by 15 deg/sec. None of the subjects touched the hand-rail of the turntable at rotation velocities less than 30 deg/sec. The center of pressure shifted to the left under clockwise rotation, and to the right under counterclockwise rotation. The direction of body perturbation resembled the direction of slow phase in induced nystagmus. The center of pressure shifted in the direction opposite to the physical force given to the head (Coriolis' force), that is, to the direction of transient movement of the spatial framework in the brain.

From the present study, it seems likely that spatial orientation plays an important role in regulating stance, and that posture is subjected to a simple rule, as eye movements are.

Key words: stance, Coriolis' stimulation, spatial orientation, the center of pressure

はじめに

起立など身体骨格系の動作の特徴として、多くの筋群や多様な神経ネットワークにより実現される、という複雑性がある。移動中、絶えず足底支

持面に重心ベクトルを投影する制御原理については、未だ有力な理論はない。

空間識に異常が起こると動揺病が誘発され、自律神経症状と共に著しい平衡失調が観察される^{1)~5)}。日常動作が破綻なく遂行されるためには、空間識（脳内に再現される一種の周囲空間座標）により動作の基本プログラムが瞬時に修正される

¹⁾ 山口大学医学部耳鼻咽喉科学教室

²⁾ (財) 宇宙環境利用推進センター

可能性が考えられる^{6)~8)}。

回転イス上で頭部を傾斜すると、奇妙な感覚と眼球運動が誘発される（コリオリ刺激）。これは被検者の頭の中に周囲の静止空間ではなく、回転するイス上の空間が再現されているため、頭部の傾斜により見かけ上の加速が加わるためである。

今回は、動作に及ぼす空間識の影響を明らかにするため、新たに回転テーブルを作成した。この装置を用いて起立中にコリオリ刺激を与え、重心移動および眼球運動を記録した。コリオリ刺激中の眼球運動はすでに当教室の三浦⁹⁾が詳細に報告しているので、今回は主に重心移動について報告する。

方 法

1) 対象

対象は聴覚、前庭機能に異常を認めず、下肢に外傷の既往のない健康成人6名（男性3名、女性3名）である。年齢は24歳から31歳で、平均26.8歳であった。

2) 装置

本研究のために新たに回転テーブル（ユキエンジニアリング製）を作成した（図1）。本体は直径100 cm、高さ31 cm、重量85 kgで、回転速度を毎秒7度から127度の範囲で無段階に変速することができる。周囲にはドーナツ状の幅50 cmの踊り場を置き、転倒を防止するため四方に手すりを設けた。回転中、任意に加速や減速、回転方向の変更が可能である。

3) 手順

回転テーブルの中心に重心動揺計を置き、その上に被検者を起立させ、赤外線 CCD カメラの組み込まれたゴーグルを装着した。ゴーグルの使用により被検者は完全な遮眼状態となった。両足を接して起立させ、上肢を前胸部で腕組みする姿勢をとらせた。

まず回転テーブルが静止した状態で、頭部の直立と前屈時で、足圧中心と眼球運動を記録し、コントロールとした。次いで回転テーブルを回転させ定速に達した後、最低60秒間の受動的回転負荷を与えた。姿勢が安定し、回転や移動の感覚（以下、移動感覚と略）が消失したことを確認した後、さらに30秒経過した時点で、頭部を前方に約30度傾斜させた。姿勢が安定し、移動感覚が消失したことを確認するまで、前屈姿勢を継続させ

た。頭部の前屈前後で足圧中心と眼球運動を記録した。頭部の前屈動作を実験前に十分練習し、実験中は側方よりビデオカメラで監視した。

回転速度を毎秒15度、30度、45度、60度、75度の5段階に変えて、回転方向を右回転と左回転に変えて記録した。それぞれの実験の間には十分な休息を与え、その間に移動感覚、自律神経症状について問診した。

4) 記録方法と結果の分析

a) 重心の移動

頭部直立中の10秒間と、これに引き続く頭部前屈開始から10秒間の足圧中心を記録した。それぞれの外周面積と動揺中心（X座標、Y座標それぞれにおける全てのデータの算術的平均値、動揺平均中心ともいう）を求め、その座標の移動方向を重心の移動方向とした。

足圧中心の記録には重心動揺計（日本電気三栄

図1 回転テーブル

a: 重心動揺計, b: 回転テーブル, c: ビデオ・カメラ, d: 手すり, e: 踊り場

1G06)を用いた。データの分析は解析プログラム（日本電気三栄 Statokinesigram No. 201）を用い、再生条件を10秒間1024ポイントに設定した。検定は動揺面積と動揺中心（X, Y 座標別）について Wilcoxon の U 検定を用いた。

b) 眼球運動

頭部直立および前屈した時の眼球運動を、赤外線 CCD カメラを用いてビデオテープに記録した。今回は画像から眼球の移動方向を定性的に求めた。

c) 移動感覚および自律神経症状

実験中に口頭で問診し、その内容を詳細に記録した。自律神経症状は Graybiel の分類⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾に準じて、嘔気、唾液分泌亢進、意識レベル、疼痛、中枢神経症状について有無を確認し、顔色、発汗状態を観察した。

結 果

静止および毎秒30度の回転における足圧中心の記録の一例を図2に示す。静止で頭部を前屈すると、外周面積は増大するが動揺中心の移動はみられなかった。他の被検者を含め移動方向に一定傾

向を認めなかった。

テーブルの右回転中に頭部を前屈すると、外周面積は増大し、動揺中心は左方へ移動した。左回転では同様に、外周面積は増大し動揺中心は右方へ移動した。

回転速度を毎秒15度刻みで毎秒15度、30度、45度、60度、75度と段階的に上げていったところ、毎秒15度および30度の回転の前屈では全員が手すりに触れることもなかった。毎秒45度の回転では1名が手すりに触れたため実験を中止した。足圧中心分布はびまん性に広がり、起立を維持するのに必要な許容範囲を越えているのがわかる（図3）。さらに毎秒75度の回転では3名が手すりに触れ、目的とする記録が得られなかった。最後まで実験が可能であった2例も回転速度が上昇するに従って、頭部前屈後の動揺は徐々に増大し、毎秒75度の回転では、起立姿勢を保持するのも困難な状態であった。

全被検者で記録の得られたのは毎秒15度と30度の2つだけであった。今回は動揺のより大きな毎秒30度の結果を分析した。

図2 足圧中心の記録

1) 足圧中心の変化

頭部の前屈により、外周面積は右回転、左回転ともに全例で増大し、有意の変化であった(図4, $p < 0.05$)。頭部を前屈すると、動揺中心は全例

図3 手すりに触れた例の足圧中心の記録

で右回転時には左方へ、左回転時には右方へ移動し、統計学的に有意であった(図5A, $p < 0.05$)。前後方向への移動は一定傾向を示さなかった(図5B, $p > 0.1$)。

2) 眼球運動の変化

CCD ビデオ・カメラで記録した眼球運動の分析では、回転テーブルの右回転時には被検者側よりみて時計方向の回旋性眼振を認めた。回転テーブルの左回転では、被検者側よりみて反時計方向の回旋性眼振を認めた。

3) 移動感覚(表1)

移動感覚は被検者によって表現が異なるが、全例とも回転テーブルが右回転では左方あるいは反時計方向(前額面)へ、回転テーブルが左回転では右方あるいは時計方向(前額面)への受動運動感覚を訴えた。

4) 自律神経症状(表2)

1名が軽度の発汗を、2名が軽度の胃部不快感を訴えたが、他の3名は自律神経症状を示さなかった。

考 察

コリオリ刺激は動揺病を誘発する方法として、しばしば利用されてきている。その多くは回転イスに座った状態の実験であり、動揺病の感受性を調べるためのものである。眼球運動も分析されて

図4 外周面積の変化

A: 右回転の結果, B: 左回転の結果を示す。黒丸は平均値, エラーバーは標準偏差を示す。

図 5 動揺中心の変化
A: 左右方向の変化, B: 前後方向の変化を示す。実線および黒丸は右回転での結果および平均値, 点線および黒三角は左回転での結果および平均値, エラーバーは標準偏差を示す。

表 1 移動感覚

被検者	右回転	左回転
A	左方へ	右方へ
B	左方へ	右方へ
C	左下方へ	右下方へ
D	左方・反時計方向(前額面)へ	右方・時計方向(前額面)へ
E	左方・反時計方向(前額面)へ	右方・時計方向(前額面)へ
F	左方・反時計方向(前額面)へ	右方・時計方向(前額面)へ

表 2 自律神経症状

被検者	右回転	左回転
A	なし	なし
B	なし	なし
C	胃部不快感	胃部不快感
D	胃部不快感	胃部不快感
E	軽度の発汗	軽度の発汗
F	なし	なし

いるが、CCD ビデオ・カメラによる観察はほとんど報告されていない。起立姿勢に及ぼす影響については、Fitger, Brandt¹²⁾ がコリオリ刺激で姿勢が不安定になることを報告している。しかし定量的には分析されていない。

今回は回転テーブルを用いることにより、コリオリ刺激が起立中の重心と眼球運動に与える影響を同時に観察した。本実験は、空間識が身体骨格系と動眼系にどのように関わるか、を調べるのに好都合である。

コリオリ刺激中に頭部に加わる力は、角速度ベクトルを用いることで、理論的に求めることができる (図 6)⁹⁾¹³⁾¹⁴⁾。右方向に一定の速度で回転しているときの頭部運動は、右ネジの約束から、 ω_1 のような重力方向に一致した角速度ベクトルで表すことができる。頭部を直立位から前屈すると、空間的な回転運動は変化しないが、頭部を貫く角速度ベクトルは ω_2 のように変化する。これをベクトルの合成として考えると、コリオリ刺激により $\Delta\omega$ のような角速度ベクトルの変化 (角加速度

図6 頭部前屈による角速度ベクトルの変化
 ω_1 : 頭部前屈前の角速度ベクトル, ω_2 : 頭部前屈後の角速度ベクトル, $\Delta\omega$: コリオリ刺激による角速度ベクトルの変化(角加速度ベクトル)。

ベクトル)が生じたことになる。頭部を前屈する前後の定速回転運動(角速度ベクトル= ω_1, ω_2)は、定速であるため前庭器では知覚されない。この結果、コリオリ刺激によって生じる角速度ベクトルの変化($\Delta\omega$)のみが前庭器に知覚されることになる。

コリオリの力は純粋に物理学的な力(慣性力)なので、頭部に直接作用するならば、その力の方向に頭部が偏倚させられるはずである。つまり右回転の前屈では頭部が右方に曲げられ、重心も右方に偏位するはずである。しかし今回の実験では、全く逆の結果が得られた。

そこで高位中枢を含むニューラル・ネットワークにより再現される自己と周囲空間の関係、つまり空間識の概念を想定することで、これらを単純な現象として理解することが可能である。今回の条件では、コリオリの力は意志的な前屈運動途中で一瞬生じ、受動的な移動は極めて小さかったと考えられる。この結果、コリオリの力は頭部内の前庭器を刺激し、脳内の外界空間座標が影響されることになる。つまり脳内の空間識は頭部に加わる力とは逆の方向の運動を再現することになる。

テーブルが右方向に回転している時に頭部を前屈すると、脳内には被検者からみて反時計方向の回旋運動(ローリング)が再現される。この空間識に従って眼球運動は反時計方向に回旋する(眼振緩徐相)。一方、身体骨格系は、足底とテーブルの摩擦が大きいので、回旋運動とはならず

心が左方へ移動する。同様に、左回転の場合には眼球運動は時計方向回転となり、重心は右方へ偏位する。さらに移動感覚も、重心移動や眼球運動の方向に一致していた。これより、移動感覚は単に空間識が脳皮質に投影された結果とみることでもできる。空間識の概念を用いることにより、重心の移動、眼球運動および移動感覚を同じ仕組みで説明することが可能であった。

姿勢の制御は、多様な知覚および運動システムが複雑に関係しているが、単純な動作として統合されている。ある外力が働いたとしても、それが直接作用し、姿勢変化として観察されるとは限らない。しかし今回の研究では、起立や眼球運動が、角速度ベクトルの変化として理論的に求める空間識を忠実に反映していることが判明した。これより、身体骨格系も動眼系と同様に、現在考えられているよりも、単純な原理で制御されている可能性が示唆された。

今回の実験結果を、従来の前庭眼反射あるいは前庭脊髄反射の概念で説明することも、現象的には可能である。しかし、同じコリオリ刺激においても、遮眼ではなく、裸眼で周囲空間を認知できる条件で行うと、重心移動、眼球運動、移動感覚は全く異なってしまう(未発表データ)。この条件においても前庭器に加わる刺激は等しいのである。従来の考え方では視性反射による修飾で説明するのであろうが、明確な結果を予想することは困難であろう。

今回の実験条件には含まれなかったが、明所のコリオリ刺激においても、空間識の概念は有効である。今後、これらの実験条件を加えてさらに報告する予定である。

まとめ

1. 新たに作成した回転テーブルを用いて、健康成人6名に起立中コリオリ刺激(頭部の前屈)を与え、遮眼下で重心移動と眼球運動を記録した。

2. 回転中の頭部前屈により、足圧中心の外周面積は増大し、動揺中心が右回転では左方へ、左回転では右方へ有意に移動した。

3. 頭部前屈により、右回転では被検者からみて時計方向の回旋性眼振が、左回転では反時計方向の眼振が誘発された。

4. 移動感覚は重心の移動方向や眼振緩徐相と

一致する傾向が見られた。

5. 重心移動, 眼球運動, 移動感覚は全て, 空間識の概念を用いることにより, 同じ仕組みで説明することができた。

これらより, 身体骨格系統, 動眼系を問わず動作は, 感覚と同様に, 脳内に再現された外界空間に忠実に従うと言える。

本論文の要旨は, 第55回日本平衡神経科学会総会(1996年, 京都)において口演した。

本研究は宇宙開発事業団が推進している「宇宙環境利用フロンティア共同研究」プロジェクトの一環として行ったものである。

文 献

- 1) Takahashi M, Saito A, Okada Y, et al: Locomotion and motion sickness during horizontally and vertically reversed vision. *Aviat Space Environ Med* 62: 136-140, 1991
- 2) Takahashi M, Takei Y, Saito A, et al: Motion sickness and equilibrium ataxia. *Aviat Space Environ Med* 63: 486-490, 1992
- 3) Takahashi M, Toriyabe I, Takei Y, et al: Study on experimental motion sickness in children. *Acta Otolaryngol (Stockh)* 114: 231-237, 1994
- 4) Takahashi M, Ogata M, Miura M: Teleology of motion sickness. *Acta Otolaryngol (Stockh)* 115: 130-133, 1995
- 5) Ikeda T, Takahashi M: Active posture control during experimental motion sickness in guinea-pigs. *Acta Otolaryngol (Stockh)* 117: 815-818, 1997
- 6) 高橋正紘, 岡田行弘, 斎藤 晶, 他: 生体内

座標軸理論—空間認知による固視, 歩行の制御. *日耳鼻* 94: 198-202, 1991

- 7) 高橋正紘: 平衡制御における空間認知の意義. *Equilibrium Res* 51: 226-232, 1992
- 8) Takahashi M, Ogata M, Miura M: The significance of motion sickness in the vestibular system. *J Vestib Res* 7: 1-9, 1997
- 9) 三浦正子: コリオリ刺激で誘発される眼球運動と動揺病症状の研究. *Equilibrium Res* 56: 338-346, 1997
- 10) Graybiel A, Wood CD, Miller EF, et al: Diagnostic criteria for grading the severity of acute motion sickness. *Aerosp Med* 39: 453-455, 1968
- 11) 斎藤 晶: 逆転プリズム装着下自由歩行による動揺病の研究. *慶應医* 68: 763-772, 1968
- 12) Fitger C, Brandt Th: Posturography of ataxia induced by Coriolis- and Purkinje-effects. *Aviat Space Environ Med* 53: 153-161, 1982
- 13) Guedry FE Jr, Benson AJ: Coriolis cross-coupling effects: Disorienting and nauseogenic or not? *Aviat Space Environ Med* 49: 29-35, 1978
- 14) Guedry FE Jr: Visual counteraction of nauseogenic and disorienting effects of some whole-body motions: A proposed mechanism. *Aviat Space Environ Med* 49: 36-41, 1978

(原稿到着: 平成9年10月15日
別刷請求先: 綿貫浩一
〒755-8505 山口県宇部市小串1144
山口大学医学部耳鼻咽喉科学教室)