

＜シンポジウム (3)—10—2＞宇宙医学と神経内科

微小重力環境下における空間識の形成

—スペースシャトル・コロンビア上での実験結果をもとに—

肥塚 泉

(臨床神経 2012;52:1318-1320)

Key words : 空間識, 耳石器, 微小重力, 宇宙酔い, 耳石器における傾斜—移動再解釈説

空間識の形成

前庭系は平衡感覚を司る重要な感覚器である。回転角加速度の感覚受容器である三半規管(外側半規管, 前半規管, 後半規管)と直線加速度の感覚受容器である耳石器(卵形囊, 球形囊)で構成される。外側半規管は、頭部水平面(yaw平面)の回転角加速度を感受している。前半規管と後半規管はこれと垂直方向(rollならびにpitch平面)の回転角加速度を感受している。卵形囊は主に頭部の左右方向, 球形囊は上下および前後方向の直線加速度を感受している。これら5種類, 計10個の感覚受容器が頭部の動き, 地面に対する頭部の傾きを感受しこれを脳内に存在する前庭神経核, 舌下神経前位核などで構成される, 一種の神経積分器であるneural storeと呼ばれる部分に送っている(Fig.1)。前庭系からの情報以外, 視覚情報や体性感覚(深部知覚)情報もneural storeに入力している。これらすべての情報が統合処理されて, 適切な出力が算出される。neural storeからの出力は, 外眼筋群や, 頸部, 上・下肢の筋群などに送られ, 前庭動眼反射による代償性眼球運動や前庭脊髄反射による立ち直り反射などで, 身体の平衡が保たれている。またこれらの情報をもとに空間識が形成される。過去に経験された運動においては一定の感覚情報パターンの入力確立されており, ある運動とそれにもなう感覚情報パターンはneural storeに記憶されている。能動運動は予測制御されており, 脳が運動指令を発すると, 同時に遠心コピーと呼ばれる指令がneural storeよりその運動にもなうと予測される感覚情報パターンを選択する。実際にその運動にもなった感覚情報パターンと予測される感覚情報パターンを比較し, これらが一致すればその運動は正しく遂行されてバランスが保たれ, 空間識は維持される。ところが, 異常な運動環境にさらされたばあい, 能動運動にもなうと実際に入力される感覚情報パターンと予測される感覚情報パターンとの間に乖離が生じ, 空間識が障害される。またその結果として, 空間認知障害をコードするミスマッチ信号が生じる。脳内でミスマッチ信号が生じると, われわれは“めまい”という感覚を覚える。

宇宙酔いとその発症機序

1961年4月12日, ユーリ・ガガーリン少佐を乗せたヴォストーク1号が108分かけて地球を1周後, 地球に無事帰還した。彼が地球を見下ろしながら発した「地球は青かった」という言葉はあまりにも有名である。ユーリ・ガガーリン少佐の初飛行の約4カ月後の1961年8月6日, ヴォストーク2号に搭乗して, 旧ソ連で2人目の宇宙飛行士となったゲルマン・チトフ少佐は地球周回軌道に乗った後, 約1日間(17周)回り続けて翌日帰還した。彼は飛行の後半, 激しい吐気に悩まされ, これを地上に伝えてきた。これが世界で最初の宇宙酔いの報告とされ, “チトフエピソード”と呼ばれるようになった。現在でも初回飛行の宇宙飛行士の73%が飛行初期の2日から3日の間宇宙酔いに悩まされている¹⁾。これをいかに克服するかが, ミッションを成功させる上での重要なキーポイントの1つになっている。宇宙酔いの発症機序については, ①体液移動説, ②耳石器機能非対称説, ③神経ミスマッチ説(感覚混乱説)④Otolith Tilt-Translation Reinterpretation説の4つの説が有力視されている。しかしいずれも現時点では, 仮説の域を脱していない。以下にそれぞれの説について簡単に紹介する。

1) 体液移動説²⁾

宇宙では重力を欠くために, 体液が頭部に移動してしまい, 脳や顔面の浮腫がおこる。このため頭蓋内圧が上昇したり, 脳脊髄液と交通する外リンパでかこまれた内耳の機能が障害される可能性があり, さらに, 内リンパ圧が上昇し, 内リンパ水腫を生じた結果宇宙酔いが生じるとする説。

2) 耳石器機能非対称説³⁾

耳石器機能には生来左右差がありこれは地上においては中枢により代償されているために明らかな平衡障害はみとめられない。ところが無重力空間では耳石器よりの情報に変化が生じるためその結果, 宇宙酔いが生じるとする説。

3) 神経ミスマッチ説⁴⁾⁵⁾

われわれは自分の置かれた位置を視覚, 平衡覚(三半規管, 耳石器), 深部知覚により感受している。これらの情報の間に

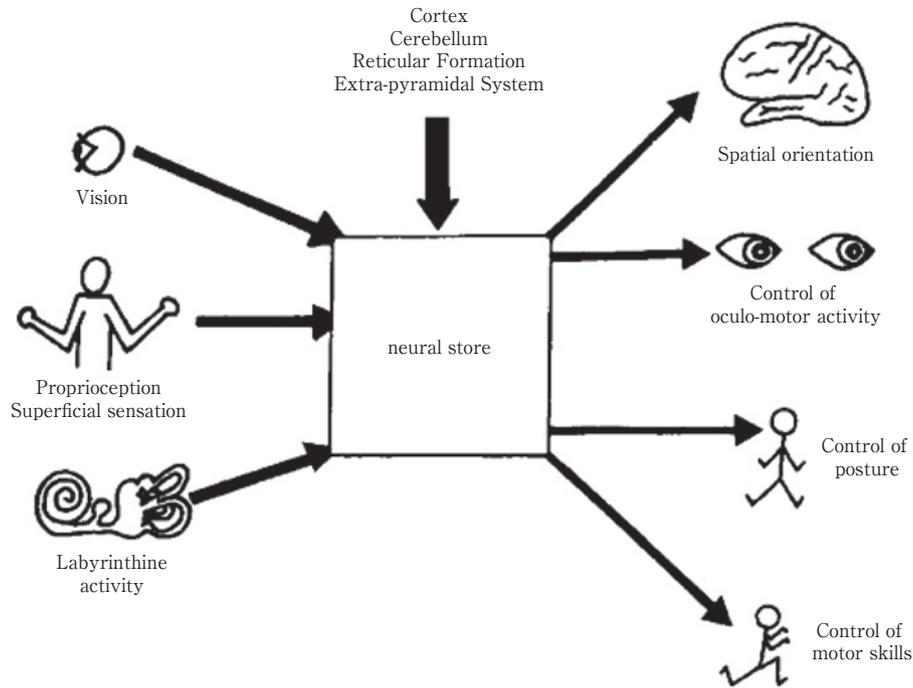


Fig. 1 Neural store.

(Cited and modified from Luxon LM, et al: Neurological examination of the hearing impaired and dizzy patients, House JW, O'Connor (eds), Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1987, p.15)

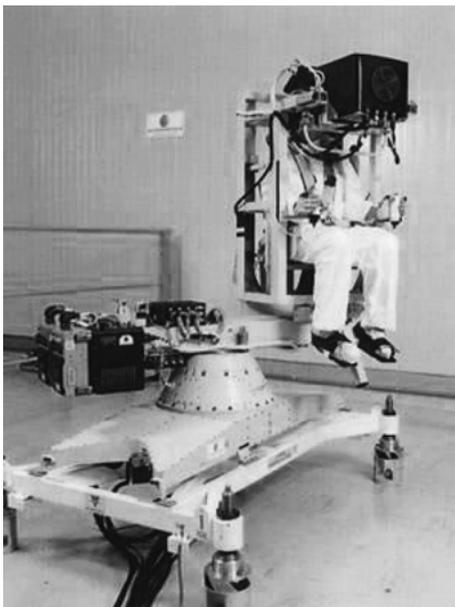


Fig. 2 Body Rotation Device (BRD) loaded in Space Shuttle Columbia (STS-90) in the NeuroLab mission (1998).

不一致が生じたばあいに動揺病が発症するという説。宇宙空間では重力が欠如するために耳石器に対する情報が不充分となる。また足底部よりの情報も減少するためその結果、宇宙酔いの症状が発症するとする説。

4) Otolith Tilt-Translation Reinterpretation 説⁶⁾

耳石器は直線加速度の受容器である。つまり身体の移動にともなって生じる移動感覚および重力方向の変化を感じ取るにより身体の傾斜感覚を司っている。無重力空間では、耳石器に対する刺激は移動感覚のみとなるため、耳石器よりの情報を中枢で再解釈する必要が生じる。この再解釈の過程で宇宙酔いが発症するという説。

スペースシャトル・コロンビア上での実験

平成10年4月17日より16日間にわたっておこなわれたニューロラブ計画(筆者が参加)では、スペースシャトル・コロンビア号に搭載された偏中心性回転装置 (Fig.2) をもちいて本説の検証がおこなわれた⁷⁾⁸⁾。被験者は搭乗員7名中、スペースシャトルの運用に直接かかわる3名を除いた4名である。両耳方向・体幹長軸方向に、1.0g・0.5gの遠心力による直線加速度を付加して、回転刺激中の感覚(移動感覚なのか傾斜感覚なのか)について質問法により検討を加えた。その結果、すべての被験者は偏中心性回転刺激中、移動感覚ではなく傾斜感覚を訴え、本説とは矛盾する結果となった。偏中心回転刺激をおこなうと、回転中は遠心力により臀部や背面などと椅子との接触面にずれの感覚が生じる。また被験者の肘や体の側面など回転中心と反対方向で椅子と接している部位では圧刺激が加わる。これら体幹各部よりの体性感覚入力が neural store で統合処理され、地上でこれをおこなった際と同様の空間識形成がおこなわれた結果と考察した。

※本論文に関連し、開示すべきCOI状態にある企業、組織、団体はいずれもありません。

文 献

- 1) Jennings R. Managing space motion sickness. *J Vestib Res* 1997;7:67-70.
- 2) Parker DE, Tjernstrom O, Ivarsson A, et al. Physiological and behavioral effects of tilt-induced body fluid shifts. *Aviat Space Environ Med* 1983;54:402-409.
- 3) Von Baumgarten RJ, Wetzig J, Vogel H, et al. Static and dynamic mechanisms of space vestibular malaise. *Physiologist* 1982;25:533-536.
- 4) Clark B, Graybiel A. Perception of the visual horizontal in normal and labyrinthine defective observers during prolonged rotation. *Am J Psychol* 1966;79:608-612.
- 5) Parker DE, Reschke MF, Arrott AP, et al. Otolith tilt-translation reinterpretation following prolonged weightlessness implications for preflight training. *Aviat Space Environ Med* 1985;56:601-606.
- 6) Harm DL, Parker DE. Preflight adaptation training for spatial orientation and space motion sickness. *J Clin Pharmacol* 1994;34:618-627.
- 7) Clément G, Moore ST, Raphan T, et al. Perception of tilt (somatogravic illusion) in response to sustained linear acceleration during space flight. *Exp Brain Res* 2001;138:410-418.
- 8) Moore ST, Clément G, Raphan T, et al. Ocular counter-rolling induced by centrifugation during orbital space flight. *Exp Brain Res* 2001;137:323-335.

Abstract

Spatial orientation under microgravity

Izumi Koizuka

Department of Otolaryngology, St. Marianna University School of Medicine

On Earth, humans are constantly exposed to the gravity. During head and body tilts, the otolith organs sense changes in head orientation with respect to the gravitational vertical. These graviceptors also transduce transient linear acceleration generated by translational head motion and centripetal acceleration during rotation about a distant axis. When individuals are rotated at a constant velocity in a centrifuge, they sense the direction of the summed gravitational and centripetal acceleration as the vertical in the steady state. Consequently they experience a roll-tilt of the body when upright and oriented either left-ear-out or right-ear-out. This perception of tilt has been called the somatogravic illusion. Under the microgravity, the graviceptors no longer respond during static tilt of the head or head and body, but they are still activated by linear acceleration. Adaptation to weightlessness early in space flight has been proposed to entail a reinterpretation of the signals from the graviceptors (primarily the otolith organs), so that on return to Earth pitch or roll of the head with respect to the vertical is sensed as fore-aft or left-right translation. In this article, formulation of the spatial orientation on the earth and under microgravity was described.

(*Clin Neurol* 2012;52:1318-1320)

Key words: spatial orientation, otolith organs, microgravity, space motion sickness, otolith tilt-translation reinterpretation theory