原 著

ラバー負荷重心動揺検査による末梢前庭障害の予備的診断

藤本 千里¹⁾²⁾・岩崎 真一¹⁾・山嵜 達也¹⁾

Preliminary assessment of peripheral vestibulopathy using
foam posturography

Chisato Fujimoto¹⁾²⁾, Shinichi Iwasaki¹⁾, Yamasoba Tatsuya¹⁾

¹⁾Department of Otolaryngology, Faculty of Medicine, The University of Tokyo

²⁾Department of Neuro-otology, Tokyo Metropolitan Neurological Hospital

Objectives: The purpose of this study was to assess the diagnostic accuracy of foam posturography for peripheral vestibulopathy.

Methods: Two-legged stance tasks were conducted in patients with peripheral (n=94) vestibulopathy and healthy controls (n=193), under four conditions; eyes open with and without the foam rubber, and eyes closed with and without the foam rubber. We examined 6 parameters: the velocity of movement of the center of pressure, the envelopment area determined by tracing the movement in the eyes closed/foam rubber condition, Romberg's ratio of velocity and area with foam rubber, and the foam ratios (ratios of a measured parameter with and without the foam rubber) of velocity and area with eyes closed.

Results: All the 6 parameters were significantly higher in peripheral vestibulopathy patients compared with the controls ($p<0.0001$). The area under the receiver operating characteristic curve for the Romberg's ratio of velocity with the foam rubber was 0.888, which was the largest, and was not influenced by age in healthy controls.

Conclusions: Foam posturography is useful for preliminary assessment of peripheral vestibulopathy. From a practical standpoint, the Romberg's ratio of velocity with the foam rubber seems the most suitable parameter for assessment of patients with peripheral vestibulopathy.

Key words: posture, vestibulum, vestibular diseases

緒 言

体平衡機能は感覚器系（視覚，前庭覚，体性感覚），中枢神経系（脊髄，小脳，脳幹，大脳），運

動器系（骨・関節，筋・腱）などにより調整・統合されている¹⁾。体平衡機能の定量評価としては，重心動揺計を用いた平衡機能検査が広く普及している。重心動揺検査は，静的体平衡機能検査の一つで，直立姿勢における身体の動揺を足圧中心（地面と接触している床反力の平均作用点）の動揺と

¹⁾ 東京大学医学部耳鼻咽喉科

²⁾ 東京都立神経病院神経耳科

してとらえ、それを記録・分析することによって、静的体平衡機能を定量的に評価するとともに、めまい・平衡障害の診断や治療効果の判定を行うものである。

一般的な重心動揺検査では、重心動揺計の検査台上に足をそろえた状態で直立し、開眼と閉眼の状態で各60秒間身体動揺の記録を行う。開眼時に比べ閉眼時に身体動揺が著しく悪化する場合がロンベルグ陽性であり、下肢体性感覚障害や末梢前庭障害の存在が疑われる。これは、閉眼時には体平衡の3つの入力系の1つである視覚からの入力が遮断されることにより、残された2つの入力である前庭あるいは体性感覚に障害がある場合、結果として、体平衡の著しい障害が出現するものと理解される。一方、フォームラバーなどの素材を重心動揺計の検査台上に敷きその上に起立するという条件により、下肢体性感覚入力を攪乱し、身体動揺を測定するという試みもなされている^{2)~5)}。このような、検査台の上に下肢体性感覚入力を攪乱させる素材を置いた状態で行う重心動揺検査の、末梢前庭障害に対する診断的価値に関しては、これまで共通の見解を得られていないが^{3)~5)}、我々の先行研究では、ラバー負荷重心動揺検査が末梢前庭障害の診断に有用であることを Standards for Reporting of Diagnostic Accuracy (STARD) initiative の示したガイドラインに基づいて示した^{5)~7)}。閉眼・ラバー使用時には視覚・体性感覚からの入力が低下することにより、間接的にはあるが前庭系の機能が評価されると考えられる。

これらの過去の研究を踏まえ、本研究では、アニマ株式会社と我々が共同開発したラバー負荷重心動揺検査による末梢前庭障害の予備的診断能について、より多くの健常者と末梢前庭障害患者を対象として検討した。

対象と方法

対象は、めまい・平衡障害の既往のない健常成人193名（男性94名、女性99名、年齢15-89歳、平均年齢 50.9 ± 22.9 歳）と、末梢前庭障害患者94名（男性43名、女性51名、年齢12-80歳、平均年齢 54.5 ± 15.5 歳）とした。末梢前庭障害患者の内訳は、一側末梢前庭障害患者が87名（メニエール病13名、聴神経腫瘍10名、前庭神経炎8名、ラムゼイハント症候群3名、その他53名）、両側末梢前庭

図1 使用したフォームラバー（A）とラバー使用時の直立姿勢（B）

障害が7名であった。末梢前庭障害の有無は、氷水刺激による温度刺激検査（20秒間）を用い、一側障害は canal paresis $> 20\%$ 、両側障害は両側の最大緩徐相速度が $10^\circ/\text{s}$ 以下とした⁵⁾⁸⁾。

ラバー重心動揺検査は、アニマ株式会社の重心動揺計検査装置グラビコーダー GP5500と付属の天然ゴム性のフォームラバー（引張強度 $2.1 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ 、密度 $0.06 \text{ g}/\text{cm}^2$ 、伸びパーセント110%、厚さ 3.5 cm ）を使用した（図1 A）。サンプリング周波数は 20 Hz とした。測定条件は、まず、ラバー無し状態で、つま先を閉じた状態で直立させ、開・閉眼でそれぞれ1分間の重心動揺の記録を行った。次にラバーを検査台の上に置いた状態で、両踵内側を密着させ足尖方向を 45° に広げた状態で直立させ、重心動揺の記録を各1分間行った（図1 B）。計測時は、被験者が転倒しないよう十分に注意を払った。被験者が直立姿勢を維持できない場合は、その時点で検査を中断し“fall”と判定した。

本研究では、指標として動揺速度（単位時間軌跡長）と外周面積を指標として用いた。閉眼・ラ

図2 6 評価項目の ROC 曲線

バー使用時には視覚・体性感覚からの入力低下することにより、間接的に前庭系の機能評価が可能になると考えられる。よって、身体動揺所見を評価するための項目として、動揺速度（単位時間軌跡長）と外周面積の閉眼・ラバー使用時の数値を使用した。一方で、末梢前庭障害症例は体平衡の維持のため、視覚や下肢体性感覚入力への依存度が相対的に高いと考えられる。ラバー使用時の開閉眼の動揺の比率（以下、ラバーロンベルグ率）、閉眼でのラバー使用時と非使用時の動揺の比率（以下、閉眼ラバー比）は、それぞれ視覚への依存度や体性感覚への依存度を反映する。よって本研究では、上記評価項目に加え、両指標におけるラバーロンベルグ率、閉眼ラバー比も用いることにした。検査を中断し、fallと判定した症例

における評価項目の数値は、60秒の検査が施行可能であった症例において記録された最大値よりもさらに大きな値を設定し、統計処理を行った。例えば、ラバーロンベルグ率・動揺速度において、60秒の検査が施行可能であった症例において記録された最大値が6.87であった場合、fallと判定された症例の数値を7.00と設定した。

上記6評価項目に対し、Wilcoxon rank sum testを用い健常対照群と末梢前庭障害群との比較を行った。さらに各評価項目の診断の有用性を検討すべく、各評価項目における受信者動作特性曲線（以下、Receiver Operating Characteristic curve：ROC 曲線）を作成した。ROC 曲線は、各評価項目のカットオフ値に応じた感度・特異度を求め、縦軸に感度、横軸に1-特異度を取りグラフ表示

表1 各評価項目における健常対照と末梢前庭障害症例との比較と AUC

	中央値（4分位点）		p 値	AUC(95%信頼区間)
	健常対照（n=193）	末梢前庭障害（n=94）		
閉眼・ラバー使用時・動揺速度(cm/s)	3.47(2.79－4.23)	5.57(4.18－7.83)	<0.0001	0.823(0.759－0.867)
閉眼・ラバー使用時・外周面積(cm ²)	12.06(8.44－16.72)	23.46(16.49－47.37)	<0.0001	0.845(0.791－0.889)
ラバーロンベルグ率・動揺速度	1.66(1.53－1.99)	2.74(2.21－3.92)	<0.0001	0.888(0.837－0.925)
ラバーロンベルグ率・外周面積	1.99(1.56－2.56)	4.60(3.04－8.08)	<0.0001	0.874(0.810－0.911)
閉眼ラバー比・動揺速度	2.09(1.82－2.64)	2.68(2.14－3.61)	<0.0001	0.703(0.638－0.768)
閉眼ラバー比・外周面積	3.26(2.53－5.09)	4.84(3.09－7.25)	<0.0001	0.657(0.586－0.721)

AUC = area under the receiver operatorating characteristic curve（ROC 曲線下面積）

表2 健常対照における、各評価項目の数値（y）と年齢（x）との相関

	回帰方程式	決定係数
閉眼・ラバー使用時・動揺速度(cm/s)	y = 0.0277 x + 2.25	0.219
閉眼・ラバー使用時・外周面積(cm ²)	y = 0.131 x + 6.80	0.185
ラバーロンベルグ率・動揺速度	y = - 0.0034 x + 1.92	0.0331
ラバーロンベルグ率・外周面積	y = - 0.0057 x + 2.47	0.0196
閉眼ラバー比・動揺速度	y = 0.0001 x + 2.28	1 × 10 ⁻⁵
閉眼ラバー比・外周面積	y = 0.0155 x + 3.31	0.0215

した。各カットオフ値において、感度は(真陽性)／(真陽性+偽陰性)、特異度は(真陰性)／(真陰性+疑陽性)で計算した。さらに、ROC 曲線の曲線下面積（area under the ROC curve：AUC）を求めた。AUC は分類器の性能の良さを表し、0 から 1 までの値をとり、完全な分類が可能となきの面積は 1 で、ランダムな分類の場合は 0.5 となる。本研究では、AUC が 1 に近づくほど診断上優れた評価項目と解釈できる。また、年齢と各評価項目との相関については回帰分析を行い、決定係数を算出した。

結 果

健常者193人は、全員が転倒することなくラバー重心動揺検査を遂行することが可能であった。一方、一側末梢前庭障害患者の13%（87人中11人）、両側末梢前庭障害患者の43%（7人中3人）が、閉眼・ラバー使用時の条件では1分間の起立を続けることが出来ず、fallと判定された。健常者と末梢前庭障害との比較において、上記の6評価項目はすべて有意差（p<0.0001）を認めた（表1）。

次に、上記の6評価項目のROC 曲線を作成し、AUC を算出したところ、閉眼・ラバー使用

時の動揺速度と外周面積、動揺速度と外周面積のラバーロンベルグ率で比較的高値であった（> 0.8）（図2，表1）。ラバーロンベルグ率・動揺速度は0.888と特に高値であり、これら6評価項目の中で最も優れた評価項目であることが判明した。ちなみに、ラバーロンベルグ率・動揺速度のカットオフ値を2.05とした場合、末梢前庭障害に対する感度は81.9%で、特異度は80.3%となり、カットオフ値を3.42に設定すると感度は34.0%と低下するが、特異度は100%となった。

最後に健常者において、これら6つの評価項目の数値と年齢との相関を検討した（表2）。閉眼・ラバー使用時の動揺速度と外周面積は年齢との正の相関を認める傾向にあるが、動揺速度と外周面積のラバーロンベルグ率、動揺速度と外周面積の閉眼ラバー比は年齢との相関が低かった。即ち、ラバーロンベルグ率と閉眼ラバー比は、加齢による影響を受けにくい評価項目であった。

考 察

本研究では、本邦で実用化が進むラバー負荷重心動揺検査による、末梢前庭障害の予備的診断能について検討した。健常者と末梢前庭障害との比較において、閉眼・ラバー使用時・動揺速度、閉

眼・ラバー使用時・外周面積，ラバーロンベルグ率・動揺速度，ラバーロンベルグ率・外周面積，閉眼ラバー比・動揺速度，閉眼ラバー比・外周面積の6評価項目はすべて有意差 ($p < 0.0001$) を認めた。AUC は，閉眼・ラバー使用時の動揺速度と外周面積，動揺速度と外周面積のラバーロンベルグ率で比較的高値であった (> 0.8)。ラバーロンベルグ率・動揺速度のAUCは0.888と特に高値であり，これら6評価項目の中で最も優れた評価項目であることが判明した。また，健常者においては，閉眼・ラバー使用時の動揺速度と外周面積は年齢との正の相関を認める傾向にあるが，動揺速度と外周面積のラバーロンベルグ率，動揺速度と外周面積の閉眼ラバー比は年齢との相関が低く，ラバーロンベルグ率と閉眼ラバー比は，加齢による影響を受けにくい評価項目であった。

検査台の上に下肢体性感覚入力を攪乱させる素材を置いた状態で行う重心動揺検査の，末梢前庭障害診断における有用性については，共通の見解が得られていない^{3)~5)}。ラバーを用いた重心動揺検査に関する過去の報告を見ると，使用する素材の特性が明記されていないものや，記載されているものでもその特性は各施設で様々である^{3)~5)9)10)}。素材の材質は，動揺所見を左右する重要な要素であるという報告も存在する¹¹⁾。よって，使用する素材の特性が各報告によって異なるため，ラバー重心動揺検査の末梢前庭障害診断における有用性について異なった結論が出た可能性がある。

また，立位時の姿勢は，重心動揺検査における身体動揺所見に影響を与えられる。重心動揺検査において，健常者と末梢前庭障害患者の鑑別力を高めるには，健常者の身体動揺が少ないままで患者の身体動揺が高くなるような立位時の姿勢が求められる。本研究では，ラバー無しの状態ではつま先を閉じた状態で直立させ，ラバーを使用した状態では両踵内側を密着させ足尖方向を45°に広げた状態で直立させた。空間における身体重心の管理は，重心の投射軸を支持基底面内に保つ，もしくは，床面に対して作用させる力を調節する，という方法が考えられるが¹²⁾¹³⁾，両足を45°開いて立つ場合，両足の内側を踵～足尖にかけて密着させて立つ場合よりも，支持基底面が広くなるため，安定した動揺が確保されると考えられ

る。また本研究において，健常者では両足を45°開いた姿勢の場合，いわゆる“fall”例は認められなかった。したがって，本研究で採用した両足を45°開いた姿勢は，末梢前庭障害を有する患者の身体動揺を不安定にし，健常者の身体動揺を少ない状態に保つ，適切な姿勢であったものと考えられた。

疾患群における，ラバーロンベルグ率，閉眼ラバー比の有意な増大は，末梢前庭障害症例では，体平衡の維持のため，視覚や下肢体性感覚入力への依存度が相対的に高いことに由来すると考えられる。その中でも，ラバーロンベルグ率・動揺速度はAUCが特に高値であった。足圧中心動揺のいくつかの評価項目が年齢とともに増大することは，過去にも指摘されており^{14)~18)}，本研究においても，閉眼・ラバー使用時の動揺速度と外周面積は年齢と正の相関を認めたが，ラバーロンベルグ率・動揺速度は加齢による影響を受けにくかった。以上より，ラバーロンベルグ率・動揺速度が実用上，末梢前庭障害の予備的診断に最も有用な評価項目であることが示唆された。

本研究により，ラバー負荷重心動揺検査が，末梢前庭障害に対する予備的診断として有用であることが示された。ラバーロンベルグ率・動揺速度はAUCが特に高値であり，加齢による影響を受けず，実用上最も有用な評価項目であることが示唆された。

文 献

- 1) Massion J, Woollacott M: Posture and equilibrium. In ed Bronstein A, Brandt T, Woollacott M, et al.: Clinical disorders of balance, posture and gait 2nd ed. pp 1-19, Arnold, London, 2004
- 2) Pyykko I, Jantti P, Aalto H: Postural control in elderly subjects. Age Ageing 19: 215-221, 1990
- 3) Baloh RW, Jacobson KM, Beykirch K, et al.: Static and dynamic posturography in patients with vestibular and cerebellar lesions. Arch Neurol 55: 649-654, 1998
- 4) Allum JH, Adkin AL, Carpenter MG, et al.: Trunk sway measures of postural stability during clinical balance tests: effects of a unilateral vestibular deficit. Gait Posture 14:

- 227-237, 2001
- 5) Fujimoto C, Murofushi T, Chihara Y, et al.: Assessment of diagnostic accuracy of foam posturography for peripheral vestibular disorders: analysis of parameters related to visual and somatosensory dependence. *Clin Neurophysiol* 120: 1408-1414, 2009
 - 6) Bossuyt PM, Reitsma JB, Bruns DE, et al.: Towards complete and accurate reporting of studies of diagnostic accuracy: the STARD initiative. *Ann Intern Med* 138: 40-44, 2003
 - 7) Bossuyt PM, Reitsma JB, Bruns DE, et al.: The STARD statement for reporting studies of diagnostic accuracy: explanation and elaboration. *Ann Intern Med* 138: W 1-W 12, 2003
 - 8) Iwasaki S, Takai Y, Ozeki H, et al.: Extent of lesions in idiopathic sudden hearing loss with vertigo: study using click and galvanic vestibular evoked myogenic potentials. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 131: 857-862, 2005
 - 9) Brandt T, Krafczyk S, Malsbenden I: Postural imbalance with head extension: improvement by training as a model for ataxia therapy. *Ann NY Acad Sci* 374: 636-649, 1981
 - 10) Norre ME: Sensory interaction testing in platform posturography. *J Laryngol Otol* 107: 496-501, 1993
 - 11) Patel M, Fransson PA, Lush D, et al.: The effect of foam surface properties on postural stability assessment while standing. *Gait Posture* 28: 649-656, 2008
 - 12) Mouchinino L, Cincera M, Fabre JC, et al.: Is the regulation of the center of mass maintained during leg movement under microgravity conditions? *J Neurophysiol* 76: 1212-1223, 1996
 - 13) Mouchinino L, Mille ML, Cincera M, et al.: Postural reorganization of weight-shifting in below-knee amputees during leg raising. *Exp Brain Res* 121: 205-214, 1998
 - 14) Thyssen HH, Brynskov J, Jansen EC, et al.: Normal ranges and reproducibility for the quantitative Romberg's test. *Acta Neurol Scand* 66: 100-104, 1982
 - 15) Era P, Heikkinen E: Postural sway during standing and unexpected disturbance of balance in random samples of men of different ages. *J Gerontol* 40: 287-295, 1985
 - 16) Ring C, Nayak US, Isaacs B: The effect of visual deprivation and proprioceptive change on postural sway in healthy adults. *J Am Geriatr Soc* 37: 745-749, 1989
 - 17) Baloh RW, Jacobson KM, Enrietto JA, et al.: Balance disorders in older persons: quantification with posturography. *Otolaryngol Head Neck Surg* 119: 89-92, 1998
 - 18) Masui T, Hasegawa Y, Matsuyama Y, et al.: Gender differences in platform measures of balance in rural community-dwelling elders. *Arch Gerontol Geriatr* 41: 201-209, 2005

利益相反ないし利益衝突について

本研究は、アニマ株式会社からの機材（重心動揺計，ラバー）の提供を受けている。