シンポジウム「めまいと前庭脊髄路系異常—病巣局在診断への貢献—」

めまいと前庭脊髄路系異常—タクトイル・センサーによる歩行分析—
(末梢前庭障害を中心に)

ウォンウエンホウ・石川 和夫

Gait Analysis using a Tactile Sensor in Vertigo and
Vestibulospinal Tract Disorders

Weng Hoe Wong, Kazuo Ishikawa

*Akita University School of Medicine, Department of Sensory Medicine,
Division of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery*

Integration of the normal equilibrium function, space orientation and cognitive functions is needed to complete straight-line walking. Also, visual and vestibular inputs play important roles in a constantly varying 3-dimensional environment to ensure smooth locomotion. However, in vestibular disorders, patients suffer problems of gait instability. The characteristics of the instability might reflect the site and severity of the lesion. How can these abnormalities be delineated objectively? To gain an understanding from the physiological viewpoint, gait analysis under eyes-opened and blindfolded conditions was conducted using tactile sensors (F-scan system) in patients with various types of vestibular lesions. All of the data were reviewed and summarized to evaluate the usefulness and limitations of this analysis method.

The coefficients of variation of gait phase-related parameters were evaluated, such as stance, swing and double support, integrated foot pressure, stability, movement and average length of the trajectories of the center of force (TCOF), and the pattern of foot pressure progression during stance which can be divided into three phases: body weight acceptance, body weight translation, and body weight thrust. Comparison of the mean values was conducted using the two-tailed t-test, with $p < 0.05$ set as the criterion for statistical significance.

The patients enrolled were those with vestibular neuritis (VN; 14 cases), acoustic tumors (AT; 61 cases: 27 cases of small AT and 34 cases of large AT), and spinocerebellar degeneration (SCD; 12 cases). Healthy adults (23 subjects) served as controls.

Gait instability is depicted by increment of the coefficient of variation of each gait phase. Visual cue plays an important role in providing feed-forward information for steady locomotion. Unilateral vestibular lesions could shift the body center of gravity towards the lesion side, which leads to greater foot pressure on the lesion-side foot with greater horizontal sway of the TCOF during gait, especially during gait with eyes closed. An irregular

pattern of foot pressure progression could also reflect gait instability, and was most prominently found in the patients with SCD. As for the average length of TCOF, significantly longer trajectories were found in SCD patients, especially as compared with the findings in vestibular neuritis.

In conclusion, gait analysis with the use of a foot pressure sensor can provide useful information for understanding gait abnormalities caused by vestibular disorders. It would be clinically useful to perform gait testing for the evaluation of gait abnormalities in vertigo patients.

Key words: Gait analysis, Vestibular disorder, Vestibulospinal tract

はじめに

人が、生来獲得して来た最も重要な移動手段は歩行運動である。無意識的になされる円滑な歩行運動は、視覚入力、体感覚入力および前庭入力の統合とともに歩行運動制御系によって制御されている¹⁾。

合目的歩行運動を完成するには、正常な平衡機能及び空間認知の統合も必要である。特に歩行姿勢制御において、前庭機能は頭部の安定による注視およびレフレンス・フレームの制御に関与していることが知られている²⁾。また、視覚入力が遮断されている状態でも、歩行運動ができるように、ナビゲーション・タスク・コントロールに関わっているともいわれている³⁾。再求心性知覚入力 (Sensory re-afferent)、いわば、歩行運動などに際して、深部知覚入力との統合による姿勢反応を誘発させる役割も担っている⁴⁾。そして近年、歩行運動の位相変調制御への関与も報告されている⁵⁾。

一方、歩行運動制御機構について、歩行運動の生起に関わる中脳歩行野からの指令が歩行リズム制御機構と筋トーンス制御機構と位相制御機構という3つの制御系により統制されていることが知られている⁶⁾。位相制御系に関しては、特に下行路の前庭脊髓路に関わっている前庭障害が生じると、歩行運動の位相に異常が検出される。それに対して、小脳や脳幹の筋トーンス制御機構に影響を及ぼす障害は、位相制御だけでなく歩行運動の

筋トーンス制御の異常を反映した異常が得られると考えられる⁷⁾。

以上の背景から、我々は、めまい患者における歩行異常の発現の仕方について、特に歩行偏倚以外の、歩行運動に見られる異常を検出するために、タクトイル・センサーを用いて前庭神経炎 (VN) 及び聴神経腫瘍 (AT) をはじめとした一側前庭機能障害患者と脊髄小脳変性症 (SCD) 患者の歩行検査を施行し、歩行位相、足圧中心移動軌跡 (Trajectories of Center of Force, TCOF)、立脚期の足圧分布曲線などの解析を行ってきているが、末梢前庭系障害を中心に報告する。

方 法

1. 対 象

前庭神経炎 (VN) 患者14例 (平均年齢: 56.6 ± 11.7歳)、聴神経腫瘍 (AT) 患者61例 (平均年齢: 57.8 ± 21.4歳)。AT 群について、27例が小聴神経腫瘍群 (腫瘍径 < 2 cm)、34例が大聴神経腫瘍群 (腫瘍径 > 2 cm) に分けられている。そして、脊髄小脳変性症 (SCD) 患者12例 (平均年齢: 52.6 ± 15.5歳) とコントロール群23例 (平均年齢: 34.1 ± 13.8歳) であった。全被験者には、関節炎、心疾患、脳循環疾患、糖尿病などの基礎疾患のないことを確認している。

2. 歩行解析システム

分解能が 5 mm で、0.5 kg 以上の圧力が感知可能な 0.15 mm の厚さの F-scan (Nitta Ltd, 日本) センサーシートを用いて、各々の足のサイズに合わせてトリミングし、足底に両面テープで取り付ける。8秒間の歩行運動に際して701フレーム撮影される (サンプリング時間は約 11 ms)。歩行

図1 タクティルセンサー (F-scan system) による歩行運動の記録
L : 左足, R : 右足 ; : 矢印は歩行の方向を示す。

図2 立脚期の足圧分布曲線
L : 左足, R : 右足 ; a : 体重受容期,
b : 体重移行期, c : 体重突上期

時の足圧の信号はA-Dデジタル変換機を通して、F-scan 解析ソフトで分析する⁸⁾。なお、被験者はバリアーフリーの広い室内を約8m開・閉眼下で直進自由歩行するように指示される。

3. 歩行運動の主な解析内容

I) 歩行位相の安定性：立脚期，遊脚期，両脚支持期の変動係数 (CV 値) (図1)。

II) 立脚期の足圧分布曲線の定常性 (a : 体重受容期, b : 体重移行期, c : 体重突上期) (図2)。

III) 立脚期における足圧中心移動軌跡 (TCOF, Trajectories of Center of Force) の定常性 (図3)。

IV) 患側肢と健側肢の立脚期の足圧積分値の差異 (図4)。

健常群と前庭障害群のデータ解析を Student の t 検定で検定する。なお、統計学的有意差を $p < 0.05$ で表す。

健常者

AR:0.20 AR:0.20

図3 立脚期における足圧中心移動軌跡 (TCOF, Trajectories of Center of Force) の重ね合わせ図

L : 左足, R : 右足 ; AR : 動揺面積比

結 果

歩行位相に関わる変動係数は、立脚期と遊脚期のどちらとも、視覚入力を除くことで上昇する。一方、前庭系疾患群では健常群よりも上昇し、SCD 群のように広範な前庭系の異常を有するもののほど、この CV 値は大きくなるのが分かる (図5)。これらは、重心動揺検査の動揺距離の上昇と似ている。

立脚期の全般的な足圧分布曲線の流れについて、開眼下では、健常群と比べて VN 群と AT 群

図4 患側肢と健側肢の立脚期の足圧積分値

図5 立脚期・遊脚期の変動係数 (CV 値) の変化

Control: コントロール群, VN: 前庭神経炎, Small AT: 小聴神経腫瘍, large AT: 大聴神経腫瘍, SCD: 脊髄小脳変性症; 立脚期と遊脚期のどちらも、視覚入力を除くことで上昇する。

では大きな差異が見られないが、閉眼下では、分布曲線に乱れが観察される。しかしながら、SCD群では視覚入力の有無に関わらず、足圧曲線に大きな乱れが見られる (図6)。立脚期の安定性について、それぞれ体重受容期と体重移行期と体重突上期に細分化して足圧曲線の乱れについて検討すると、開眼下において、慢性前庭障害例 (小ATと大AT) では、大きな乱れは認められなかった。しかし、VNの急性期では、軽度の乱れが見られ、SCD例では、さらに大きな乱れを示した (図7)。

そして、その乱れの程度は、突上期・移行期・体重受容期の順に大きくなる傾向があった。閉眼下の歩行でも同様な傾向が得られた。つまり、体重心が一側肢から他側肢へ移行する際の乱れが大きくなる傾向を有すると判断される。

足圧中心移動軌跡 (TCOF) の定常性については、SCD群はともかく、AT群の腫瘍サイズの大きさを反映して動揺面積比が大きくなる傾向を有した (図8)。しかし、TCOFは歩行位相に関わる変動係数の傾向と大きな違いは認めがたいよう

図6 立脚期の足圧分布曲線
開眼下では、健常群と比べてVN群とAT群では大きな差異がないが、閉眼下では、分布曲線に乱れが出現する。一方、SCD群では視覚入力に関係なく、歩行位相に大きく乱れている⁸⁾。

図7 閉眼下歩行時の足圧位相分布
➡：安定性の良さを表す。1：不良，2：中等度，3：良好。慢性前庭障害例(小ATと大AT)では、大きな乱れはなかったが、VNの急性期では、軽度の乱れが見られ、SCD例では、さらに大きな乱れを有する。閉眼下の歩行でも同様な傾向であった。

に思えた。

患側肢と健側肢の立脚期の足圧積分値については、開・閉眼下で、VN群(閉眼下、約6割)と比較して、小ATと大AT群に約半数の症例で、患側肢の足圧積分値が大きく観察された。腫瘍が緩徐に増大するため、中枢機能代償が働いたと考えられる。一方、閉眼下では、約4分の3のVN例(急性前庭障害例)に患側肢の足圧積分値が大きくなる傾向が認められた(表1)。

考察

末梢前庭機能障害に伴うめまいは前庭脊髓路に影響を与え、姿勢歩行制御系に乱れを及ぼす。歩行運動の制御系のモデルに基づけば、前庭入力

図8 立脚期における足圧中心移動軌跡、TCOF
SCD群はともかく、AT群の腫瘍サイズの大きさに動揺面積比が有意に大きくなる。TCOFは歩行位相に関わる変動係数の傾向と大きな違いは認めがたい⁸⁾。

表1 一側性前庭障害における立脚期の足圧積分値の変化
I：健側肢，L：患側肢，閉眼下では，約3／4のVN例に患側肢の足圧積分値が大きくなる傾向が認められた。

	開 眼			閉 眼		
	I>L	I=L	I<L	I>L	I=L	I<L
VN	11.1%	27.8%	61.1%	11.8%	11.8%	76.5%
小 AT	7.1%	50.0%	42.9%	28.6%	14.3%	57.1%
大 AT	10.5%	31.6%	57.9%	15.8%	31.6%	52.6%

は，歩行運動の位相制御に関わることが知られており，末梢前庭機能の異常はこの事実を反映して変動係数の増大をみたと思われる。しかし，これらの異常所見は，主に視覚入力を遮断した状態で大きくなり，視覚入力下では，異常出現しにくくなる傾向を有した。従って，視覚入力は，歩行異常を効率よく代償させうることがわかった⁹⁾。

これまで姿勢・歩行運動の病態生理学的解明に向けて歩行解析の実験的研究が行われてきた。しかし，総合的に臨床的に実用できる歩行検査はいまだに確立されていない。臨床への応用の簡易化とともに検査に際しての適正なパラメーターの選択が不可欠条件である。今回提示したタクトイル・センサーによる歩行分析では，歩行位相関連パラメーターにおける歩行位相の変動係数からみた安定性，立脚期の足圧分布曲線の定常性，立脚期における足圧中心移動軌跡の定常性，患側肢と健側肢の立脚期の足圧積分値の差異が比較的簡単に測定できて，歩行異常の病態把握に一定の有用な情報を提供していると考えられる¹⁰⁾。

立脚期の足圧分布曲線の定常性については，SCDのように，小脳の制御系異常のほかに，脳幹の筋トヌス制御系に影響を与えるような状態にならない限り¹¹⁾，その定常性に大きな乱れは生じ難いことも分かった。足圧分布曲線の乱れは，立脚期終盤の体重突上期に出やすい傾向があるが，全体としての曲線の乱れは前庭系の広範な障害を有するSCDのような病態や，急性前庭障害の初期に特に強く認められるようである。特に暗所下では，歩行時体重心が患側肢側により偏倚し易くなることを反映して，足圧積分値が患側肢に大きくなったと考えられる。

TCOF（足圧中心移動軌跡）の動揺および患側

肢と健側肢の立脚期の足圧積分値の差異の診断学的意義は，CV値のそれにほぼ等しいと思われる。但し，横揺れ成分は，脳幹を圧排する程大きな聴神経腫瘍例では暗所下，患側肢に大きく出る傾向があることが示されている¹²⁾。

ま と め

我々は，めまい患者における歩行異常（前庭脊髄路系異常）の発現の仕方について，タクトイル・センサーを用いて歩行検査を施行し，歩行位相，足圧中心移動軌跡，立脚期の足圧分布曲線などの解析を施行し，その異常所見の出方と疾患・病態による違いをみた。今後，足圧分布曲線の解析法を工夫することで更に詳細に病態を反映した情報が得られると考える。

文 献

- 1) Massion J, Alexandrov A, Frolov A: Why and how are posture and movement coordinated? Prog Brain Res 143: 13-27, 2004
- 2) Pozzo T, Berthoz A, Lefort L: Head stabilization during various locomotor tasks in humans: normal subjects. Exp Brain Res 82: 97-106, 1990
- 3) Jahn K, Strupp MS, Schneider E, et al.: Differential effects of vestibular stimulation on walking and running. Neuroreport 11: 1745-1748, 2000
- 4) Inglis JT, MacPherson JM: Bilateral labyrinthectomy in the cat: Effect on the postural response to translation. J Neurophysiol 73: 1181-1191, 1995
- 5) Bent LR, Inglis JT, McFadyen BJ: When is vestibular information important during walking? J Neurophysiol 92: 1269-1275, 2004

- 6) Mori S, Matsuyama K, Takakusaki K, et al.: The behavior of lateral vestibular neurons during walk, trot and gallop in acute precollicular decerebrate cats. *Prog Brain Res* 76: 211–220, 1988
- 7) Mori S: Integration of posture and locomotion in acute decerebrate cats and in awake, freely moving cats. *Prog Neurobiol* 28: 161–195, 1987
- 8) Ishikawa K, Zao CW, Wang Y, et al.: Dynamic locomotor function in normal and patients with vertigo. *Acta Otolaryngol* 121: 241–244, 2001
- 9) Reynolds RF, Day BL: Visual guidance of the human foot during a step. *J Physiol* 569. 2: 677–684, 2005
- 10) Jordan K, Challis JH, Newell KM: Walking speed influences on gait cycle variability. *Gait Posture* 26: 128–134, 2007
- 11) Mori S: Contribution of postural muscle tone to full expression of posture and locomotor movements: multi-faceted analyses of its setting brainstem-spinal cord mechanisms in the cat. *Jpn J Physiol* 39: 785–809, 1989
- 12) Ishikawa K, Wang Y, Wong WH, et al.: Gait instability in patients with acoustic neuroma. *Acta Otolaryngol* 124: 486–489, 2004