シンポジウム「難治性めまい平衡障害に対するアプローチ」

めまいリハビリテーションの段階的治療戦略.

—代償不全の前庭障害—

山中 敏彰

Graded treatment strategy of vestibular balance rehabilitation for patients with intractable dizziness due to vestibular decompensation

Toshiaki Yamanaka

*Department of Otolaryngology-Head and Neck Surgery Nara Medical University,
School of Medicine*

Some patients with uncompensated vestibular hypofunction present with a long history of persistent severe problems in posture and mobility that are intractable to any treatment.

We examined whether graded vestibular balance rehabilitation would alleviate the dizziness and balance problems, and increase the safety and independence of patients with chronic balance disorders following unilateral vestibular loss. The stepwise treatment program for vestibular balance rehabilitation developed at our clinic consists of vestibular adaptation training (Step 1), sensory reweighing training (Step 2), and vestibular substitution training (Step 3). This rehabilitation program is intended at promoting the central vestibular adaptation process, altering the vestibular, visual and somatosensory inputs, and encouraging the use of the sensory substitution system with a human (brain)-machine interface as a substitute for the diminished vestibular input, for transmitting information about the patient's head position to the tongue. Clinical trials were performed to investigate the degree to which the stepwise multimodal approach might be effective for chronic balance disorder in subjects with unilateral decompensated vestibular loss. Some interventions for rehabilitation were selected and customized for each patient in accordance with the level of their compensation for postural control and sensory dependence.

Improvements in the balance performance were noted in 64.4% of all the subjects after the Step 1 training. Of the 31 subjects (35.6%) who failed to improve with the step 1 program, 14 (45.2%) showed improvements after the Step 2 training. All of the subjects who failed to show improvement after the Step 1 and 2 training programs showed pronounced improvements after the Step 3 training.

These results suggest that programmatic stepwise multimodal approach to vestibular rehabilitation yields beneficial effect in patients with balance disorder secondary to vestibular decompensation.

Key words: vestibular rehabilitation, sensory substitution, vestibular decompensation, balance, vestibular dysfunction

はじめに

不可逆な前庭障害で急性発症するめまい・平衡障害は、前庭代償機構が稼働することにより自発的に改善していく経過をたどる。しかし、代償が停止すると回復機転は働かず、めまい・ふらつきなどがいつまでも存続することになる¹⁾。このような病態は代償不全と呼ばれ、薬物治療による治癒に期待できないことから、通常、平衡リハビリテーションが適用される^{2)~6)}。本稿では代償不全の病態重症度に合わせてトレーニングメニューを段階的に選択する平衡リハビリテーションの治療戦略について述べる。

前庭代償の進行メカニズム

前庭代償は末梢前庭からの神経伝達が消失することにより中枢前庭に生じる平衡系の可塑現象である⁷⁾。この前庭代償の機転により、一側前庭障害で発症するめまいは自発的に寛解していく経過を辿る。その過程は進行度によって急性期と慢性期に分けられる。

1) 急性期

激しい症状が出現して徐々に消失していく病期である。前庭障害が起こると、末梢前庭からの情報入力が欠落するため、障害側前庭核ニューロンの活動は低下・消失する。それにより健側前庭核への交連抑制がとれ、健側ニューロン活動は亢進する。この結果、両側前庭核の活動性の著しい不均衡が生じ、激しいめまい・平衡障害症状が出現する。この不均衡が可塑を導いて代償を始動させる起点となり、障害側と健側前庭核におけるニューロン機能の特性変化が誘導されて代償が進行していく。このことにより両側前庭核ニューロンの活動性（自発的な神経活動）と感受性（神経入力に対する感受性）の不均衡が是正されるが、活動性の不均衡が先行して減弱していくため、自発的なめまい症状が急速に軽減する⁸⁾⁹⁾。

2) 慢性期

すでに前庭核ニューロン両側間の活動性は均衡化され、自発性めまい（静的症状）は消失している。しかし、その後もニューロンにおける感受性の不均衡が残存しているので、頭部回転など前庭刺激が加わった時に、神経活動に不均衡が生まれめまい症状が誘発されることになる。これは動的な症状と呼ばれ、両側前庭核間の感受性の左右差の減少とともに徐々に改善していく。この感受性が均衡化すると、回転などの刺激が加わっても症状が出現なくなり、代償が完成される¹⁰⁾。

前庭代償と代償不全

前庭代償は前述の進行メカニズムによって、めまいや平衡障害は図1の破線のようなカーブを描きながら時間経過とともに軽減し消失する。前庭核ニューロンにおける活動性の左右差が先行して是正された後、代償が停止すると感受性の不均衡が残存して症状は長引くことになる(図1実線)。この病態は代償不全と呼ばれ、身体（頭部）が動くなど前庭に刺激が加わった時に誘発されるめまい、ふらつきが長期間にわたって存続する。疾患や病態としては、前庭神経炎やめまいを伴う突発性難聴、ハンツ症候群、内耳炎、特発性前庭障害、聴神経腫瘍術後、迷路破壊術後などが該当し、代償不全をきたすめまいは長期化して難治性となる¹⁾¹¹⁾。

代償不全によるめまい・平衡障害の診断

代償不全患者の多くは長引いているめまいふらつきを主症状として来院する。病歴が長いことが多いので、過去に生じためまい発症イベントやその後の経過を詳細に聴取して、前庭代償の臨床過程に合致するかどうか確かめることが重要である。前庭代償不全によるめまいの時間経過は、図1実線のようなカーブで表され、代償不全によるめまいの診断は比較的容易である。すなわち、①大きなめまい発作が過去にあること。（前庭障害による急性めまい、数時間～数日）②最初は急激に寛解する時期（代償急性期、数日～数週）があること、③続いて、徐々に軽減する時期（代償慢

図1 前庭代償の臨床経過と代償不全の診断

性期、数週～数カ月)があること、④その後、変化しない時期(数カ月～数年)(代償停滞期)があり現在に至ること、⑤現症状として前庭が刺激を受ける動作でめまいやよろめきが誘発されること(動的症状、代償不全に特徴的)、という問診レベルで、前庭障害後の代償遅延状態にあることが示唆される。さらに、⑥前庭障害が機能検査で確かめられ、⑦患側を想定できるVOR方向優位性や体平衡偏倚が認められれば、同病態と確診できる。

代償不全における平衡リハビリテーションの治療理論とトレーニング選択

平衡リハビリテーションは、失った平衡機能の再獲得を治療概念とし、代償不全に対しては平衡覚の1) 適応促進、2) 置換・代用の理論に基づいて行われる¹²⁾¹³⁾。

1) 平衡覚の適応促進

代償不全によって生じた前庭神経核ニューロンの活動性や感受性の不均衡を是正して平衡代償を促す理論に基づく。正常に働く健側前庭覚の入力を増強させることにより、前庭眼反射(Vestibular Ocular Reflex: VOR)や前庭脊髄反射(Vestibular Spinal Reflex: VSR)の左右差を均衡化させることを目的とする。このトレーニングで使用するモダリティの主体は前庭覚である。前庭性—視性眼運動機能(図2-A, B, C, D)と姿勢・歩行制御機能を向上させるトレーニングメニュー(図2-E, F, G, I, J, K)を選択する。

2) 平衡覚の置換・代用

前庭覚以外の平衡覚(視覚と体性感覚)を用い

て身体の平衡制御機構を正常化させる理論に基づく。健側前庭機能の入力により前庭代償が進まなくなった状態や両側とも前庭機能が障害された場合に有効となる。代償過程において、視覚や体性感覚の情報が誤使用されるとそれらの依存性の偏在が起り、かえって代償が進まないことがある^{14)~16)}。この場合、どの感覚に依存して平衡調節されているのかを評価して、視覚と体性感覚の利用ウェートを再調節するプログラムを設定する(図2-H, L)¹⁶⁾。このプログラムで使用するモダリティは視覚と体性感覚であるが、器質的な視覚障害や筋・関節障害などを伴えば、それらに対する治療も当然必要となる。

3) 平衡覚における感覚代行方式の応用(図3)

感覚代行方式とは、本来伝達すべき感覚情報を別の感覚系に置き換えて中枢へ代行伝達することをいう¹⁷⁾¹⁸⁾。この技術を応用して、損失した前庭機能を補完する新しい感覚伝達系を設計することにより平衡情報を中枢へ入力することができる。代行入力された平衡情報により脳の可塑性を導入し中枢前庭系の特性を新しく変えることを目的としている。使用するモダリティは平衡覚とは全く異種の感覚器となる。触覚や聴覚などに連結するヒューマン(ブレイン)-マシンインターフェースを用いて前庭覚の代替を行う。生体内の平衡制御システムが完全に働かなくなった状態、いわば“平衡(機能)不全”と呼称できる病態に適応となる¹⁹⁾。

A. 頭位変換運動

B. 眼球を速く動かす運動

C. 眼球をゆっくり動かす運動

D. 頭と眼球を動かす運動

E. 姿勢を保持する運動

F. 頭回転で姿勢を保持する運動

G. 立ち直り姿勢を保持する運動

H. 姿勢を保持する運動(閉眼・ソフトフロア)

I. 基本歩行

J. 条件歩行①

K. 条件歩行①

L. 条件歩行③

図2 平衡リハビリテーションのトレーニングメニュー
(奈良医大方式)(文献3を改変)

図3 舌の触覚を用いる感覚代行トレーニング（文献21を改変）
A：舌表面に装着された触覚ディスプレイ
B：本システムによる平衡トレーニングの外観

代償不全に対する段階的リハビリテーション（治療ピラミッド方式）

代償不全によるめまい・平衡障害が起こっている病態生理に応じてトレーニングを選択し、特有のプログラムを作成する。動機付け、コンディショニングを事前に行い、平衡覚の適応促進と代用・置換、さらに感覚代行を行う治療理論（前述）に立脚したインターベンションを3段階（ステップ1，2，3）に分けて治療プログラムを組んでいる。図4に筆者が提唱する平衡リハビリテーションの治療ピラミッドを示す。代償不全の重症度や難治度に適合させてトレーニングレベルを低位から高位へステップアップさせる段階的治療プログラムを計画する。

1. 動機付けとコンディショニング

平衡リハビリテーションではホームトレーニングが主体となるので、患者のアドヒアランスがプログラム成功の重要な鍵を握る。患者にはその意義や理論、方法、効果、リスク、さらには具体的な実践法を冊子やVTR、実演でもってわかりやすく説明し、トレーニングの適正な理解を求める。通院のたびに、どれだけの効果がでたのか、評価結果を提示し、今後どれだけ効果が期待できるのかを逐次説明してモチベーションの維持に努める。また、平衡リハビリテーションを実際行うためにはコンディショニングも重要である。上半身の体幹のストレッチや筋トレ、立位姿勢の矯正²⁰⁾、関節の可動性を高めるエクササイズを事

図4 平衡リハビリテーションの治療ピラミッドと段階的治療方式

前に行うよう指導する。

2. 前庭系の適応（左右差是正）トレーニング（STEP 1）

1) 基本トレーニング：（図2）

最初に導入される基本的なトレーニング法である。前庭性—視性眼運動機能と姿勢・歩行制御機能の向上を目的に2つのカテゴリーに大きく分類される。

(1) 前庭性—視性眼運動機能トレーニングでは、前庭眼運動と視性眼運動それぞれの固有の機能を向上させることを目的とする。前庭に障害が生じると前庭動眼反射の利得が低下するため、視性眼球運動の補正が及ばないと、頭部を動かすときにふらつき感や動揺視などの症状が生じる。この現象を改善するために、前庭刺激や視運動刺激を与えて眼運動の固視や追跡機能を向上させるトレーニング（図2-A，B，C）を行う。

(2) 姿勢・歩行制御機能トレーニング（図2-E，F）では、身体のバランス中心点である身体中心（Center of mass：COM）²⁰⁾の位置を認識することによる姿勢・歩行の安定化を目的にする。前庭が障害された場合、身体にはCOMの変位や動揺が生じているので、COMを元の位置に戻す意識によって立ち直り反射機能を向上させる。

2) 応用トレーニング：（図2）

前述の基本バージョンを応用したトレーニング法で、代償不全での訴えとなる、体動（頭部運動）時のめまい感や起立・歩行時のフラツキに対して

図5 前庭代償不全に対する段階的リハビリテーション治療の効果

実効のあるトレーニング法である。

(1) 前庭性一視性眼運動機能トレーニングでは、前庭性と視性の眼運動がお互いに協調する機能を亢進させる。基本トレのAとBやAとCを同時に連動させながら行う(図2-D)。振り返りや上下方視のめまい感やふらつき感に有効である。

(2) 姿勢・歩行制御機能トレーニングでは、起立や歩行などさまざまな動作でCOMを安定化させる。代償不全が慢性化すると、COMの移動制限が生じるとされることから⁴⁾、COMの可動性を高めることも重要と考えられる。能動的に身体を動揺させCOMがどのように身体の中を移動するのか、意識を集中させる(図2-G, K)。

(3) (1)と(2)を併せるトレーニングを行う。歩行しながら頭部を回転させ視標を捉える。起立時や歩行時のフラツキ、よろめきに効果的である(図2-J)。

3. 平衡覚統合(依存度較正)トレーニング(STEP 2)

STEP 1の効果が乏しい代償不全症例においては、3つの平衡覚(前庭覚系と視覚系、体性感覚系)の情報入力が中枢で統合異常を起こしていることが想定される。長期化すると視覚や体性感覚に対する依存度の偏在化がみられるので¹⁴⁾¹⁵⁾、平衡覚を利用するウェイトを変えて、それらの依存性を再較正する必要がある。視覚あるいは体性感覚、あるいは両感覚の入力を促進したり、逆に抑制したりするトレーニングプログラムが効果的である。例えば、サングラス装着や閉眼下で視覚入

力を減弱し、メモリーフォーム(座布団、クッションなど)上で体性感覚の減弱(攪乱)を試みる(図2-H, L)。また、外出時には砂利道、凸凹道、水中で歩行を試みて、体性感覚の耐容性強化を試みる³⁾。

4. 感覚代行トレーニング(STEP 3)

STEP 1および2でも軽快しない場合には、平衡制御システムそのものが稼働不能となる“平衡不全”といえる病態にあると考えられる。もはや既存の平衡覚では対応不能となっているので、当科では、別の感覚器から前庭情報を入力する感覚代行方式を用いるトレーニングを行っている¹⁸⁾。損失した前庭覚機能を補完する新しい感覚伝達系を中枢へ入力することにより、破綻した平衡制御システムを新しくリニューアルすることを目的にしている。ヒューマン(ブレイン)-マシーン・インターフェイス(Human(Brain)-Machine Interface: H(B)MI)と呼ばれる機器を使って、バランス情報を舌の触覚に置き換えて生体(脳)内へ提示するシステムを用いている¹⁹⁾。同機器を舌に設置して姿勢を維持するようトレーニングする(図3)²¹⁾。

前庭代償不全に対する段階的リハビリテーション治療の効果(図5)

前庭代償不全症例85例(男性32例、女性53例、平均61.8歳)に対して、段階的リハビリテーション治療(STEP 1, 2, 3トレーニング)を行った。治療評価には日常のバランス支障度を表すDizziness Handicap Inventory (DHI)²²⁾と歩行能

力の指標となる Functional Gait Assessment (FGA)²³⁾を用いた。DHI (当施設和訳バージョン参照²¹⁾)では、日常生活を行うのにどれだけふらつきによる支障があるのか、25項目に対して3段階 (ある：4点、時々ある：2点、なし：0点) で総合点を算出した。30点以下を生活に支障ないとされていることから²⁴⁾、今回は、30点以内を改善とした。一方、FGAでは、10項目の歩行条件での障害程度を各々4段階 (正常：3点、軽度：2点、中等度：1点、高度：0点) で点数化を行い、総合点が23点以上なら転倒リスクの少ない安全な歩行が可能とされることから²⁵⁾、今回は23点以上を改善とした。DHIとFGAがともに改善を示したものを改善症例として検討した。第1段階として施行された前庭系の適応 (左右差是正) トレーニング (STEP 1) (図2) では、全症例85例のうち治療1カ月後で34%、3カ月後で57%、6カ月後で66%の症例に改善がみられた。改善率は、治療期間に依存して上昇する傾向にあったが、6カ月後で改善しない44%の31例は、第2段階の平衡覚統合 (依存度較正) トレーニング (STEP 2) に移行した (図2)。6カ月間の同トレーニングで、改善率は1カ月後19%、3カ月後45%、6カ月後に45%であった。しかし、ステップ2トレーニングを行っても改善しない症例は17例にみられた。この“平衡不全”といえる最重度平衡障害症例に対しては、第3 (最終) 段階にあたる感覚代行トレーニング (STEP 3) (図3) を行った。2カ月間のプログラムで全く改善不能であった平衡機能障害が劇的に軽減し、日常のQOLも著しく向上した²¹⁾²⁶⁾。

おわりに

前庭代償不全によるめまい・平衡障害には中枢前庭系のニューラルネットワークの再編成を目的に平衡リハビリテーションが適用される。代償不全の病期や病態を正確に評価して、トレーニング法を選別すると効率のよい効果が得られたことから、段階的に治療レベルをステップアップする治療戦略の有益性が示唆される。このことから、筆者は動機付け、コンディショニングを最下段、感覚代行トレーニングを最上段とする平衡リハビリピラミッド方式を提唱している。今後、代償不全による難治性めまいに対する新規治療法が開発され、さらに頂の高いピラミッドが築かれることが

望まれる。

謝 辞

本研究の一部は日本医療研究開発機構 (AMED) 研究費「難治性めまい疾患の診療の質を高める研究班」により行われた。本論文の要旨は第64回日本めまい平衡医学会シンポジウム<難治性めまい平衡障害に対するアプローチ>において発表した。本シンポジウムを企画いただきました本学会長の岐阜大学伊藤八次教授、ならびに司会の労をお執りいただきました徳島大学武田憲昭教授に深甚なる感謝を申し上げます。また、協力いただいた教室員各位に感謝いたします。

文 献

- 1) 武田憲昭：難治性めまいへの対応. 日耳鼻 116：1185-1191, 2013
- 2) 伊藤八次：平衡訓練. 耳鼻臨床 94：101-109, 2001
- 3) 山中敏彰：平衡のニューロリハビリテーション—慢性平衡障害への対応—. Equilibrium Res 71: 120-135, 2012
- 4) Shepard NT, Telian SA: Programmatic vestibular rehabilitation. Otolaryngol Head Neck Surg 112: 173-182, 1995
- 5) 新井基洋：【身につけたいリハビリテーションの最新のスキル】めまいのリハビリテーション. 耳喉頭頸 85：300-305, 2013
- 6) 長沼英明：平衡覚障害のリハビリテーション. 総合リハビリテーション 30：707-712, 2002
- 7) 山中敏彰：前庭代償の薬理. Equilibrium Res 59: 543-555, 2000
- 8) Kitahara T, Takeda N, Uno A, et al.: Unilateral labyrinthectomy downregulates glutamate receptor $\delta 2$ expression in the rat vestibulocerebellum. Brain Res Mol Brain Res 61: 170-178, 1998
- 9) Yamanaka T, Sasa M, Matsunaga T, et al.: Glutamate as a primary afferent neurotransmitter in the medial vestibular nucleus as detected by in vivo microdialysis. Brain Res 762: 243-246, 1997
- 10) Yamanaka T, Cameron SA, Dutia MB, et al.: Rapid compensatory changes in GABA recep-

- tor efficacy in rat vestibular neurones after unilateral labyrinthectomy. *J Physiol (Lond)* 523: 413-424, 2000
- 11) 山中敏彰：前庭神経炎. 大西弘高編. 各科専門医が教える診断の鍵～臨床推論で常に意識すべきポイント～. レジデントノート. 175-177頁, 羊土社, 東京, 2014
 - 12) 山中敏彰：慢性めまい 平衡訓練のエビデンス, EBM 耳鼻咽喉科・頭頸部外科の治療 2015-2016. 武田憲昭他編. 133-138頁, 中外医学社, 東京, 2015
 - 13) McDonnell M, Hillier SL: Vestibular rehabilitation for unilateral peripheral vestibular dysfunction (Review). *Cochrane Database Syst Rev*. 2015 Jan 13; 1: CD 005397
 - 14) Black FO, Shupert CL, Peterka RJ, et al.: Effects of unilateral loss of vestibular function on the vestibulo-ocular reflex and postural control. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 98: 884-889, 1989
 - 15) Norre ME, Ferrez G, Beckers A: Vestibulospinal findings in two syndromes with spontaneous vertigo attacks. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 98: 191-195, 1989
 - 16) Shepard NT, Telian SA: Vestibular and balance rehabilitation therapy. *Ann Otol Laryngol* 102: 198-205, 1993
 - 17) 山中敏彰：感覚代行システムとバランス機能. *Equilibrium Res* 66: 37-39, 2007
 - 18) Bach-y-Rita P, Kercel SW: Sensory substitution and the human-machine interface. *Trends Cog Sci* 7: 541-546, 2003
 - 19) 山中敏彰：めまいの新しい治療・将来展望. 一感覚代行トレーニング. *Brain-Machine Interface* を用いる治療-. *JOHNS* 32: 97-102, 2016
 - 20) 長谷公隆：立位姿勢の制御. *リハビリテーション医学* 43: 542-553, 2006
 - 21) 山中敏彰, 細井裕司, Paul Bach-y-Rita, 他：感覚代行技術による最重度平衡障害の新治療. *耳鼻臨床* 102: 527-538, 2009
 - 22) Jacobson GP, Newman CW: The development of the dizziness handicap inventory. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 116: 424-427, 1990
 - 23) Wrisley DM, Marchetti GF, Kuharsky DK, et al.: Reliability, Internal Consistency, and Validity of Data Obtained With the Functional Gait Assessment. *Phy Ther* 84: 906-918, 2004
 - 24) Whitney SL, Wrisley DM, Brown KE, et al.: Is perception of handicap related to functional performance in persons with vestibular dysfunction? *Otol Laryngol* 25: 139-143, 2004
 - 25) Wrisley DM, Kumar NA: Functional Gait Assessment: Concurrent, Discriminative, and Predictive Validity in Community-Dwelling Older Adults. *Phys Ther* 90: 761-773, 2010
 - 26) Yamanaka T, Sawai Y, Murai T, et al.: Long-term effects of electrotactile sensory substitution therapy on balance disorders. *Neuroreport* 27: 744-748, 2016

利益相反に該当する事項はない。

別刷請求先：山中敏彰