解　説

感覚と姿勢制御のフィードバックシステム

板谷　厚[1†]
[1]北海道教育大学旭川校

要旨：ヒトの姿勢制御にかかわる感覚入力は，主に視覚，前庭感覚および体性感覚の 3 つである．これらの感覚入力が中枢神経系で統合され，姿勢制御に利用される．これらの感覚入力は感覚統合において平等ではなく，また，それぞれの感覚入力に対する重みづけには個人差がある．感覚入力の重みづけは環境，疾病や身体活動に応じて変化するとされる．これは sensory reweighting hypothesis（感覚入力の再重みづけ仮説）と呼ばれ，近年，研究が進められている．スポーツ活動の非日常性によって，姿勢制御における感覚入力の再重みづけが促されることが知られている．今後，感覚入力の再重みづけをスポーツトレーニングやリハビリテーションなどの臨床に応用することが期待される．

キーワード：姿勢制御，感覚統合，適応，再重みづけ，トレーニング，リハビリテーション

1. はじめに

ヒトを特徴づける二足立位姿勢は，他の哺乳類の四足姿勢と比べて支持基底面が小さく，身体重心位置が高いために不安定である．したがって，ヒトは四肢動物よりも高度な姿勢制御を常に強いられているはずである．それにもかかわらず，ヒトはあらゆる陸上環境に適応し，生活の場を拡大してきた．さらに，スポーツやレジャーなどの非日常的な活動にも対応できる柔軟性を持っている．これらヒトの活動を下支えする姿勢制御の適応には，多感覚入力によるフィードバックと，それらの感覚入力を統合する中枢神経系（central nervous system: CNS）の機能が大きく関わっている．本稿ではこの CNS における感覚統合機能に焦点を当てる．

本稿では，初めにそれぞれの感覚入力がどのように姿勢制御に貢献しているかを簡潔に述べる．続いて，CNS における感覚統合様相の研究方法と感覚入力に対する重みづけの個人差について概説する．次に，感覚と姿勢制御のフィードバックシステムの適応メカニズムである感覚入力の再重みづけについて述べる．その後，スポーツ活動による感覚入力の再重みづけを解説する．次いで感覚の再重みづけを促す身体活動に着目した研究成果を紹介する．最後に今後の展望として，スポーツのトレーニングやリハビリテーション，教育現場での臨床応用の可能性について述べる．

2015 年 8 月 13 日受付
†〒 070-8621　北海道旭川市北門町 9 丁目
北海道教育大学旭川校
板谷 厚
Tel : 0166-59-1341
E-mail: itaya.atsushi@a.hokkyodai.ac.jp

2. ヒトの姿勢制御にかかわる感覚入力

ヒトの姿勢制御にかかわる感覚入力は，主に視覚入力，前庭感覚入力，体性感覚入力である．これらの感覚入力は CNS において統合され，姿勢制御に利用される．

2.1　3 つの感覚入力の特徴

3 つの感覚入力の姿勢制御に関連する特徴を Shumway-Cook and Woollacott[1] にもとづき簡単に解説する．

視覚入力は，周囲にある物体の相対的な位置関係の情報を提供することから，頭部の位置や移動に関する情報源となる．視野内のドア，窓枠や柱の情報から垂直に関する感覚基準が形成される．視覚入力に基づく感覚基準は姿勢の定位において最も重要であるとされている[2]．しかし，先天盲者も立位姿勢を保持できること[3]，健常者が閉眼状態や暗所で視覚を遮断されても立位姿勢を保持できること等から，視覚入力は立位姿勢保持には必ずしも必要ではないことが確認できる．

体性感覚入力は，身体と支持面との相対的な空間的位置関係についての情報源となり，さらに，身体部分間の位置関係についての情報源にもなる．通常の水平な堅い床面上で立位姿勢を保持する場合，下肢からの体性感覚入力による情報から水平に関する感覚基準が形成される．しかし，波間で動揺するボートの上などの支持面が不安定な場合，体性感覚入力に対する信頼性は低下する．

前庭感覚入力は，頭部に加わる加速度に関する情報源となり，特に重力加速度の情報から鉛直に関する感覚基準が形成される．前庭には，半規管と耳石器の 2 種類の受容器がある．半規管は頭部の回転加速度の受容器で，歩行などの移動時やスリップや躓きでバランスを崩した際の比較的素早い頭部の運動に敏感である．耳石器は，直線加速度に対する受容器で，比較的ゆっくりとした頭部の運動に鋭敏であることから，耳石器からの入力は特に重力に対する頭部の定位に重要であ

る．これらの前庭感覚入力は，頭部の位置と移動について直接的な情報を提供する一方で，単独で空間内の身体運動についての正確な情報を提供することはできない．例えば，頭部のみで頷く場合と腰を折ってお辞儀をする場合では，身体運動は異なるが，頭部の傾斜に関する前庭感覚入力は全く同じなので，前庭感覚入力単独ではこれらの身体運動の違いを区別できない．

2. 2　それぞれの感覚の入力閾値

Fitzpatrick and McCloskey[4] は，これらの感覚の姿勢動揺による入力閾値を調査した．その結果，すべての感覚入力による動揺知覚閾値は動揺速度 0.001 rad/s（0.001rad ≒ 0.057 deg）で 0.003 rad とかなり小さく，より速い動揺速度（0.003 rad/s まで）ではさらに小さな動揺も知覚できた．それぞれの感覚を個別に検討したところ，足関節固有感覚はすべての感覚入力による閾値と等しかった．視覚入力の閾値はゆっくりとした動揺で固有感覚閾値より高い値を示したが，素早い動揺では固有感覚と等しかった．前庭感覚入力はこれら 2 つの感覚よりも高い入力閾値を示した．したがって，通常の立位姿勢における動揺に対しては，足関節固有感覚が最も鋭敏で, 素早い動揺に対しては視覚も固有感覚と同等に鋭敏だが, 前庭は入力を生じないことが示唆されている．

2. 3　感覚入力の統合とその研究方法

それぞれの感覚入力には特性があり，これらの感覚入力は CNS において統合され姿勢制御に利用される．いずれかの感覚を失うと姿勢の定位と安定のために必要な情報が不十分になり，正確な姿勢制御ができなくなる．例えば，前庭機能を喪失した患者は，支持面の傾斜外乱に対応しきれず，健常者よりも転倒しやすい [5]．

感覚統合においてこれらの感覚入力は平等ではない [6, 7]．それぞれの感覚入力がどの程度貢献しているかを調べるには，個々の感覚入力に外乱を加え，その応答を観察する．外乱にはさまざまな方法があり，現在も新しい方法が考案され続けている．いずれの外乱方法も，特定の感覚入力の信頼性を低下させ，その応答として姿勢動揺が増加するなどの影響を姿勢制御に及ぼす．外乱に対する姿勢制御の応答が大きいほど，外乱を受ける感覚入力が姿勢制御にとってより重要，すなわち，姿勢制御における感覚統合の際，その感覚入力に対する重みづけが高いことを示す．

2. 4　感覚入力に対する重みづけの個人差

姿勢制御における感覚入力に対する重みづけには個人差があることが知られている [6, 7]．

Kluzik et al.[6] は，直立するヒトが姿勢定位のために使用する感覚基準における個人差を明らかにしようと試みた．そのために，健常成人 51 名を対象として次のような実験を行った．閉眼で立位を維持している間に，対象者に気づかれないように支持面をつま先上がりに 5 deg 傾斜させ，2.5 分間維持した．その後，対象者に気づかれないように再び水平に戻した．この実験によって，支持面の傾斜外乱の事後効果を検討した．その結果，水平に戻った後も 10 秒間以上にわたって立位が前傾したままの対象者が，全体の 53% 存在することを報告した（図 1A）．これらの対象者は，水平に戻ってからも傾斜時の足関節角度を維持していることになる．このことから，これらの対象者は傾斜時の支持面と足関節角度の関係を感覚基準として立位姿勢を制御していることが示唆されている．それに対して, 前傾姿勢が残存しなかった対象者は, 水平に戻るとただちに立位姿勢を鉛直に定位できることを示した．このことから，これらの対象者は重力方向を感覚基準として立位姿勢を制御していることが指摘されている（図 1B）．つまり，対象者には姿勢制御において，下肢からの体性感覚入力に重みづけが比較的高い者と，重力を参照するために前庭感覚入力の重みづけが比較的高い者がいることが示唆されている．

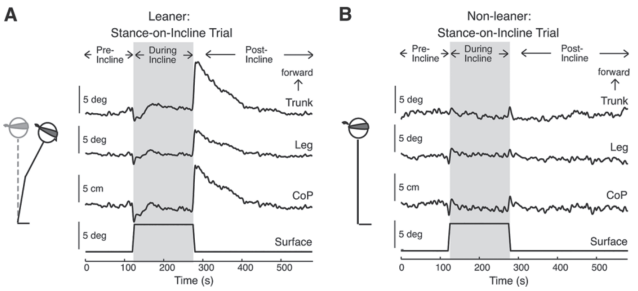


図 1　支持面傾斜の事後効果
支持面が水平に戻ってもしばらく前傾が持続するもの（A）と前傾しない者（B）が存在する．（文献 6 より許可を得て掲載）

3. 感覚入力の再重みづけ

健常なヒトの姿勢制御において，先に述べた 3 つの感覚入力が CNS において統合される際，それぞれの感覚入力に対する重みづけは異なる．さらに，感覚入力に対する重みづけは，感覚に異常をきたす疾病，環境や状況に応じて変化するとされ，これは sensory reweighting hypothesis（感覚入力の再重みづけ仮説）と呼ばれている [8]．近年，実験やモデリングによる研究が進められている [9-13]．

感覚入力の再重みづけは，同一感覚内で重みづけが変化する場合（intra-modal reweighting）と異なる感覚間で重みづけが変化する場合（inter-modal reweighting）が考えられる．さらに，体性感覚では異なる部位からの入力間で再重みづけが生じる．例えば，疼痛 [14] や局所的な筋疲労によりその部位からの入力に対する重みづけが低下する [15]．

3. 1　３つの感覚入力の再重みづけ

Hwang et al.[9] は，視覚，前庭および体性感覚からの感覚フィードバックが立位姿勢を維持するためにどのように統合されるかを，これらの感覚に同時に外乱を加えることで検討

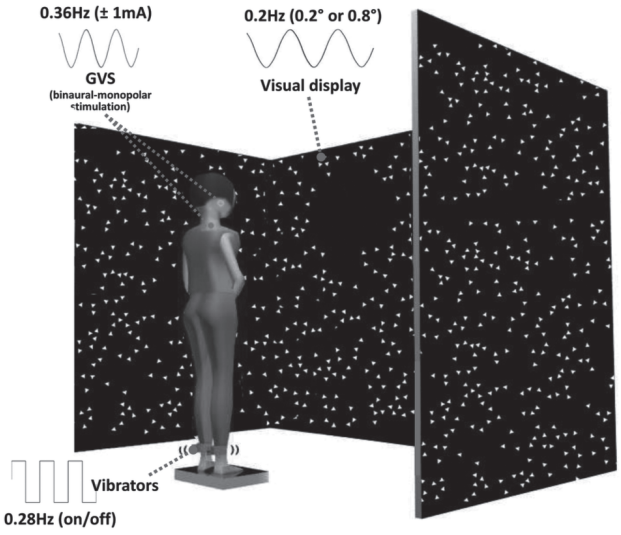


図 2　Hwang et al.[9] の実験設定
doi:10.1371/journal.pone.0088132.g001

した．立位姿勢の対象者に対して 0.36 Hz，振幅 ± 1 mA の前庭電気刺激（galvanic vestibular stimulation: GVS），0.28 Hz で on/off するアキレス腱振動刺激および 0.2 Hz で 0.2 deg または 0.8 deg の振幅で足関節を軸に振動するように見えるランダムドットによって，それぞれ前庭感覚，下腿固有感覚および視覚の入力に外乱を加えた（図 2）．

実験は次の 4 条件で行った；低振幅視覚刺激－振動刺激－ GVS；低振幅視覚刺激－ GVS －振動なし；高振幅視覚刺激－振動刺激－ GVS，高振幅視覚刺激－ GVS －振動なし．入力にあたる外乱刺激と出力にあたる姿勢動揺の周波数応答関数からゲインを求め，それぞれの感覚入力に対する重みづけを見積もった．大小の振幅による視覚ゲインの変化は視覚入力の intra-modal reweighting を示し，振動刺激と GVS のゲインの変化は inter-modal reweighting を示す．その結果，視覚外乱の振幅が大きくなると視覚入力に対する重みづけは低下したが，前庭感覚入力に対する重みづけは増加した．振動刺激が加わることで，視覚および前庭感覚入力に対する重みづけはそれぞれ増加した．これらの結果は，CNS が感覚統合における感覚入力に対する重みづけをそれぞれの感覚入力の信頼性に応じて調節することを示唆している．

3. 2　再重みづけの非対称性

視覚入力の再重みづけには非対称性があることが知られている [11]．視野の移動や回転などの視覚外乱の振幅が増加し，視覚入力の信頼性が低下すると急激に視覚入力に対する重みづけが低下する．一方，視覚外乱が高い振幅から低い振幅に変化した場合は比較的緩やかな適応を示す．

外乱振幅の増加は視覚入力の信頼性を損ない，転倒リスクの増大を招くことから，これに対しては急速な適応が必要である．一方，外乱振幅の減少は危険性が低いため，これに対する適応は緩やかになると考えられている [11]．

3. 3　発達と加齢変化

子どもは 7 歳から 10 歳までに，姿勢制御にかかわる感覚入力を成人と同様に統合し利用できるようになる [16]．基本的な移動運動を獲得する時期（生後 18 ヶ月から 21 ヶ月），幼児は主に視覚入力に頼っているが，4 才から 6 才ではバランス維持に対する視覚，前庭，および体性感覚入力を統合し始める [16]．

次に，感覚入力の再重みづけの発達過程について述べる．4 才児はすでに視覚外乱の振幅の増大に応じて視覚入力に対する重みづけを低下させることができる [17, 18]．視覚外乱の振幅が大きい状態から小さい状態に戻ると，8 才以上の子どもでは，成人と同様に視覚入力に対する重みづけが緩やかに高まるが，4 才児では即座に高まる [17, 18]．さらに，異なる感覚入力間の再重みづけは 10 才以降でのみ認められるとの報告がある [17]．

高齢者は姿勢制御において視覚入力に対する重みづけが高いとされている [19]．しかし，若年成人，一般高齢者および転倒の危険性が高い高齢者の感覚の再重みづけを比較したところ，これらの対象者間に差はないとの報告がある [20]．ただし，高齢者では若年成人よりも感覚の再重みづけに時間がかかることも示唆されている [21]．

4. スポーツ活動による感覚入力の再重みづけ

スポーツでは，日常では経験しない環境や状況の中で特殊な動作目標を達成することが求められる．しかも，スポーツの競技種目には，それぞれ特有の環境や動作目標がある．そのために，競技選手の姿勢制御における感覚入力に対する重みづけは，競技種目の特性に適応していると考えられる．実際，いくつかの研究で，姿勢制御における感覚入力に対する重みづけが競技種目 [22-24] や競技レベル [25, 26] によって異なることが観察されている．

4. 1　競技特性が引き起こす感覚の再重みづけ

Asseman et al.[22] は，体操競技で行う姿勢トレーニングが姿勢制御におよぼす影響を調査した．国際レベルのエリート体操選手 13 名と，地域レベルの体操以外の競技選手 13 名に，開眼条件と閉眼条件で両足立位と片足立位を行うよう求めた．フォースプレートから得られた足圧中心（center of pressure: COP）と COP から見積もられた身体重心の動揺を群間で比較した．その結果，片足・開眼条件での身体重心動揺の水平面動揺と COP 動揺面積でのみ，体操競技選手においてその他の競技選手よりも動揺が小さかった．つまり，体操競技に特異的な姿勢トレーニング（片足立位）と練習の環境（開眼）が合致した条件でのみ，体操競技選手の姿勢制御が優れていた．この結果から，体操の専門的トレーニングは姿勢制御における視覚入力への重みづけを高めたことが示唆されている．

4. 2　種目特性の違いが引き起こす感覚の再重みづけ

Lion et al.[23] は，自転車競技選手の姿勢制御における感覚入力に対する重みづけの競技への適応を調査した．国際レベルを含むマウンテンバイク選手 20 名とロード選手 24 名に，練習量に関する質問紙調査と sensory organization test[27] を行った．その結果，ロード選手は開眼での姿勢制御に優れていた．一方，マウンテンバイク選手には，オフロード走行距離と体性感覚入力に対する重みづけに正の相関が認められた．加えて，マウンテンバイク選手には，ロード走行距離と視覚入力に対する重みづけに正の相関が認められた．これらの結果から，ロード走行は走行コースの先取りのために視覚入力により依存するような適応を引き起こすことが報告されている．一方，オフロード走行は路面の凹凸などの予測不可能な競技環境の変化によるバランスの乱れに対して，素早く適切に反応するために，体性感覚入力により依存するような適応を引き起こすことが指摘されている．これらの結果から，同じ自転車競技であっても走行環境の違いによって引き起こされる感覚入力の再重みづけは異なることが主張されている．

4. 3　競技レベルの違いが引き起こす感覚の再重みづけ

Paillard and Noé[26] は，サッカー選手の競技レベルと姿勢制御における視覚入力に対する重みづけとの関係を調査した．アマチュア選手 15 名とプロ選手 15 名に，フォースプレート上で開眼条件と閉眼条件の 2 つの条件下にて両足静止立位姿勢を保持するよう求めた．静止立位時の COP を記録し，COP 動揺面積，COP 動揺範囲および COP 動揺速度を分析した．その結果，プロ選手がアマチュア選手より COP 動揺が小さく，立位姿勢が安定していたことを示した．さらに，COP 動揺速度は，閉眼条件においてプロ選手がアマチュア選手よりも動揺が小さいことを示した．この結果から，プロ選手はアマチュア選手よりも立位姿勢保持において視覚入力に依存していないことが示されている．さらに，プロ選手が行う高強度・高水準のトレーニングは，試合状況の情報を視覚で捉えられるようにするために，姿勢制御における視覚入力に対する重みづけを低下させることが示唆されている．

5. 感覚の再重みづけを促す身体活動

本章では，ウォーミングアップやコンディショニングとして，スポーツの競技種目に応じた姿勢制御における感覚入力の再重みづけを促すことをねらいとした，不安定面上でのバランスエクササイズの効果について解説する．

板谷と木塚 [28] は，不安定面上でのバランスエクササイズが姿勢制御における感覚入力の再重みづけを促す効果について，下肢からの体性感覚入力に着目して検討した．不安定面上でのバランスエクササイズとしてバランスボード上での立位と G ボール上での座位を採用した（図 3）．21 名の健常男性を，バランスボードエクササイズを行う群 11 名と G ボールエクササイズを行う群 10 名に，ランダムに割り振った．はじめに，対象者は 3 つの感覚条件下で，フォースプレート上にて静止立位を 60 秒間維持した（pre 測定）．感覚条件は，開眼，閉眼およびフォームパッド上で閉眼であった．フォームパッドは下肢体性感覚入力に対する外乱として用いられている [7]．その後，各群の対象者はそれぞれのバランスエクササイズを 2 分間 × 2 回行い，休憩の後再び静止立位課題を行った（post 測定）．

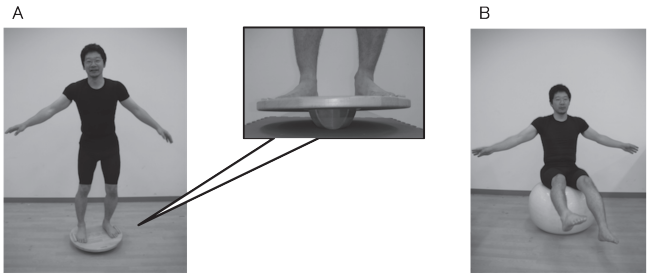


図 3　不安定面上でのバランスエクササイズ
バランスボード（A）と G ボール（B）を用いたバランスエクササイズ．（文献 28 の図 2 を改変して使用）

バランスボードエクササイズでは，可能な限りバランスボードの縁が床に触れないように，立位を 2 分間維持した（図 3A）．この際，腕は自由であった．

G ボールエクササイズでは，対象者は G ボール（ϕ 75 cm）上で，足を床にできるだけ触れずに，座位姿勢を 2 分間維持した（図 3B）．転倒回避のために床に足をついてもよいが，転倒回避後ただちに床から足を浮かせるよう求めた．

静止立位時の姿勢動揺は COP 動揺速度と 90% 信頼楕円面積（動揺面積）によって評価した．姿勢制御における視覚入力への重みづけを評価するために Romberg 率（閉眼時動揺値／開眼時動揺値）を計算した（動揺速度から算出：Romb V，動揺面積から算出：Romb A）．下肢体性感覚入力に対する重みづけは，閉眼時動揺値とフォームパッド上閉眼時動揺値の差を閉眼時動揺値で除した動揺増加量 [7] によって評価した（動揺速度から：ISV，動揺面積から：ISA）．

これらを群別に pre − post 間で比較したところ，バランスボード群では Romberg 率が post で有意に増加した（図 4A）．一方，G ボール群では動揺増加量が post で有意に減少した（図 4B）．これらの結果は，バランスボードエクササイズは，姿勢制御における視覚入力に対する重みづけを高め，G ボールエクササイズは，下肢体性感覚入力に対する重みづけを低下させることを示唆する．

バランスボードエクササイズは，足関節固有感覚を鋭敏にし，ケガにつながる関節の動きを予防する目的で，足関節捻挫の予防やリハビリテーションに用いられている．したがって，バランスボードエクササイズは，下肢体性感覚入力に対する重みづけを高くすると考えられたが，そうならなかった．バランスボードの動きに類似する支持面の傾斜外乱は，下肢体性感覚入力の信頼性を損ない，視覚入力に対する重みづけ

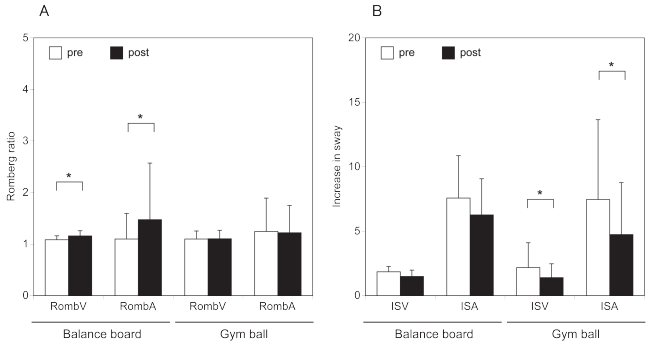


図 4　エクササイズ前後の Romberg 率と動揺増加量の変化
Romberg 率（A）と動揺増加量（B）．文献 28 の図 6 と図 7 より作成．*: $p < 0.05$.

を高める [12]．バランスボード群には，この外乱効果が生じたと考えられる．スポーツのエリート選手やプロ選手は視覚入力に対する重みづけが低い [25, 26]．したがって，バランスボードエクササイズは，高度に専門的なスポーツトレーニングによる適応を打ち消す可能性があるため，行う際には注意を要する．

G ボールエクササイズ後，下肢体性感覚入力に対する重みづけは低下し，一方，視覚入力に対する重みづけは変わらなかった．これらのことから，G ボールエクササイズは，前庭感覚入力の重みづけを高めることが示唆される．したがって，G ボールエクササイズは，競泳や空中での姿勢制御が要求される飛込み競技や体操競技などのウォームアップに適していると推察できる．その一方で，体性感覚入力に依存する柔道 [24] などの競技には適さない可能性がある．

6. 今後の展望

姿勢制御における感覚入力の再重みづけの臨床応用は，前章で触れた，スポーツのトレーニングやコンディショニングのほかに，感覚喪失や感覚障害に悩む患者にとっての福音となる可能性がある．例えば，身体動揺に応じて舌を電気刺激するバイオフィードバック（図 5）は，前庭感覚入力と舌の体性感覚入力間の再重みづけを促し，首の後傾によって損なわれた姿勢制御を改善する [29]．このバイオフィードバックシステムは，前庭機能に障害を持つ患者のバランス改善に効果が期待されている [29]．

発達の観点からは次のような応用が考えられる．幼児期は，視覚入力に対する依存を他の感覚入力にも徐々に広げる重要な発達段階にあたる [16]．従来，変化に富んだ自然環境の中で五感をフルに使ってからだを動かすことで，幼児の感覚統合機能の発達が促されてきたと考えられる．このような機会が急激に減少している昨今，保育施設内で実施できる，視覚以外の感覚入力を積極的に用いる運動遊びが求められる．

われわれの研究室ではこのような活動として組体操に着目している．組体操は，運動会の花形種目として，保育所・幼稚園から高等学校にいたる教育現場で行われている．組体操

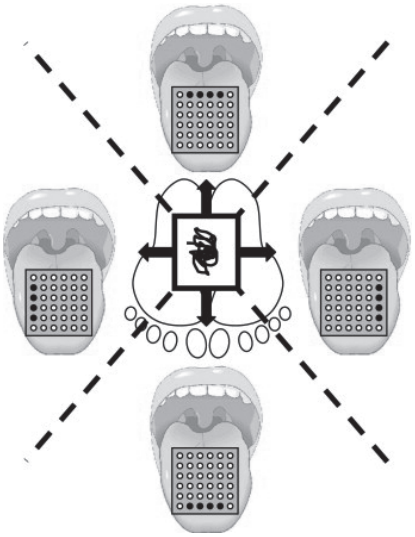


図 5　COP 位置の舌へ電気刺激によるバイオフィードバック
（文献 29 より許可を得て掲載）

では，接している相手の身体の動きを感じながら姿勢を調節しなければならない．つまり，組体操は体性感覚入力に依存した姿勢制御を必要とする活動だと考えられる．われわれは，3 人組の簡単な組体操を行うと，即時的に視覚入力に対する重みづけが低下することを発見した（成人女性対象．未発表データ）．今後，幼児の姿勢制御における感覚統合機能の発達に対する組体操の効果が実証されることを期待している．さらに，これとは別に，組体操による感覚入力の再重みづけの要因が，単に人体の不安定さなのか，他者との接触なのかも，興味深い問題である．

本稿では CNS における感覚統合とその適応メカニズムである感覚入力の再重みづけを中心に解説してきた．感覚入力の再重みづけとして描写される変化の時間的スケールは，実験室内で再現される 1 秒未満の短時間のものから，スポーツ活動への適応として長時間保持されるもの，加齢や感覚喪失による永続的なものまでさまざまである．しかし，本稿ではそれらを区別しなかった．これにより，多少の混乱を生じる可能性はある．しかしながら，むしろ感覚入力の再重みづけは，姿勢制御の適応を幅広く説明しうる仮説であると前向きにとらえて欲しい．

参 考 文 献

1) Shumway-Cook, A. and Woollacott, M. H: Motor Control: Theroy and practical applications, Williams & Wilkins, Baltimore Maryland, (1995).
2) Wilkie, R. and Wann, J.: Controlling steering and judging heading: retinal flow, visual direction, and extraretinal information, The Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29(2), 363-378, (2003).
3) Nakata, H. and Yabe, K.: Automatic postural response

systems in individuals with congenital total blindness, Gait Posture, 14(1), 36-43, (2001).
4) Fitzpatrick, R. and McCloskey, D. I.: Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in human, Journal of Physiology, 478(1), 173-186, (1994).
5) Allum, J. H., Oude Nijhuis, L. B. and Carpenter, M. G: Differences in coding provided by proprioceptive and vestibular sensory signals may contribute to lateral instability in vestibular loss subjects, Experimental Brain Research, 184(3), 391-410, (2008).
6) Kluzik, J., Horak, F. B. and Peterka, R. J: Differences in preferred reference frames for postural orientation shown by after-effects of stance on an inclined surface, Experimental Brain Research, 162(4), 474-489, (2005).
7) Isableu, B. and Vuillerme, N.: Differential integration of kinaesthetic signals to postural control, Experimental Brain Research, 174(4), 763-768, (2006).
8) Peterka, R. J.: Sensorimotor integration in human postural control, Journal of Neurophysiology, 88(3), 1097-1118, (2002).
9) Hwang, S., Agada, P., Kiemel, T. and Jeka, J. J. : Dynamic reweighting of three modalities for sensor fusion, PLoS ONE, 9(1): e88132. doi:10.1371/ journal.pone.0088132, (2014).
10) Assländer, L. and Peterka, R. J.: Sensory reweighting dynamics in human postural control, Journal of Neurophysiology, 111(9), 1852-1864, (2014).
11) Jeka, J. J., Oie, K. S. and Kiemel, T.: Asymmetric adaptation with functional advantage in human sensorimotor control, Experimental Brain Research, 191(4), 453-463, (2008).
12) Logan, D., Kiemel, T. and Jeka, J. J. : Asymmetric sensory reweighting in human upright stance, PLoS. ONE, 9(6): e100418. doi:10.1371/journal.pone. 0100418, (2014).
13) Mahboobin, A., Loughlin, P., Atkeson, C. and Redfern, M.: A mechanism for sensory re-weighting in postural control, Medical and Biological Engineering and Computing, 47, 921-929, (2009).
14) Brumagne, S., Cordo, P. and Verschueren, S.: Proprioceptive weighting changes in persons with low back pain and elderly persons during upright standing, Neuroscience Letters, 366(1), 63-66, (2004).
15) Pinsault, N. and Vuillerme, N. : Vestibular and neck somatosensory weighting changes with trunk extensor muscle fatigue during quiet standing, Experimental Brain Research, 202(1), 253-259, (2010).
16) Woollacott, M. H. and Shumway-Cook, A（編），矢部京之助（監訳）：姿勢と歩行の発達―生涯にわたる変化の過程―，大修館書店，71-88，東京，(1993).
17) Bair, W.-N., Kiemel, T., Jeka, J. J. and Clark, J. E.: Development of multisensory reweighting for posture control in children, Experimental Brain Research, 183(4), 435-446, (2007).
18) Polastri, P. F. and Barela, J. A.: Adaptive visual re-weighting in children's postural control, PLoS. ONE, 8(12): e82215. doi:10.1371/journal.pone. 0082215, (2013).
19) Wade, M. G., Lindquist, R., Taylor, J. R. and Treat-Jacobson, D.: Optical flow, spatial orientation, and the control of posture in the elderly, Journals of Gerontology, Series B, Psychological Sciences and Social Sciences, 50, B51-B58, (1995).
20) Allison, L. K., Kiemel, T. and Jeka, J. J.: Multisensory reweighting of vision and touch is intact in healthy and fall-prone older adults, Experimental Brain Research, 175(2), 342-352, (2006).
21) Teasdale, N. and Simoneau, M.: Attentional demands for postural control: the effects of aging and sensory reintegration, Gait Posture, 14(3), 203-210, (2001).
22) Asseman, F. B., Caron, O. and Crémieux, J.: Are there specific conditions for which expertise in gymnastics could have an effect on postural control and performance? Gait Posture, 27(1), 76-81, (2008).
23) Lion, A., Gauchard, G. C., Deviterne, D. and Perrin, P. P.: Differentiated influence of off-road and on-road cycling practice on balance control and the related-neurosensory organization, Journal of Electromyography and Kinesiology, 19(4), 623-630, (2009).
24) Perrin, P. P., Deviterne, D., Hugel, F. and Perrot, C.: Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control, Gait Posture, 15(2), 187-194, (2002).
25) Paillard, T., Margnes, E., Portet, M. and Breucq, A.: Postural ability reflects the athletic skill level of surfers, European Journal of Applied Physiology, 111(8), 1619-1623, (2011).
26) Paillard, T. and Noé, F.: Effect of expertise and visual contribution on postural control in soccer, Scandinavian Journal of Medicine Science in Sports, 16(5), 345-348, (2006).
27) Nashner, L. M.: Computerized dynamic posturography, In: Jacobson, G. P., Newman, C. W. and Kartush, J. M. (eds): Handbook of balance function testing, Thomson Learning, 280-307, London, (1997).
28) 板谷厚，木塚朝博：不安定面上でのバランスエクササイズが姿勢制御における感覚依存性に及ぼす即時効果，コーチング学研究，25(1)，33-42，(2011).
29) Vuillerme, N., Chenu, O., Pinsault, N., Fleury, A.,

Demongeot, J. and Payan, Y.: Can a plantar pressure-based tongue-placed electrotactile biofeedback improve postural control under altered vestibular and neck proprioceptive conditions? Neuroscience, 155(1), 291-296, (2008).



板谷 厚（いたや あつし）

2011 年筑波大学大学院人間総合科学研究科一貫制博士課程単位取得後退学．博士（体育科学）．2011 年筑波大学たくましい心を育むスポーツ科学イノベーション非常勤研究員．2013 年岐阜聖徳学園大学短期大学部幼児教育学科准教授．現在，北海道教育大学教育学部（旭川校）芸術・保健体育教育専攻保健体育分野准教授．日本体育学会，日本体力医学会，日本発育発達学会，日本体操学会の会員．（バイオメカニズム学会正会員）