

氏 名	ムラタ カヨコ 村田 佳代子
学 位 の 種 類	博士（心理学）
学 位 記 番 号	人博 第 124 号
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 25 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	皮膚感覚ベクションについての研究 —多感覚統合による自己運動知覚—
論文審査委員	主査 准教授 石原 正規 委員 教 授 山下 利之 委員 教 授 沼崎 誠 委員 教 授 市原 茂

【論文の内容の要旨】

環境における知覚において、運動・移動にともなう情報は極めて重要である。我々は自ら動く際、環境情報の変化と自身の移動による変化を区別する。自身の移動にもかかわらず、変化しない特徴は環境の情報を特定し、移動に伴う変化は自分の移動を特定する。例えば視覚における変化は光学的流動として知られている (Gibson, 1979) が、そうした変化は視覚に限ったことではない。身体の運動を伴う空間移動には前庭感覚からの入力や、皮膚感覚からの入力も重要な情報となる。前庭感覚系には加速度を検知する機能があり、動き始めの情報を提供する。更に移動に伴い空気の流動が生じ、皮膚感覚系はそれを検知する。これら前庭・皮膚感覚系からの情報は視覚障害者にとって重要なリソースとなっている。

視覚においては、観察者に放射状に拡大する光学的流動パターンを提示すると、自身が静止しているにもかかわらず、前方への移動感覚が生じ、縮小する光学的流動パターンを提示すると前方を向いたまま後方へ下がっていくような移動感覚が生じることが知られている。例えば、停車している電車に座っている時、となりのホームに止まっている電車が動き出したところを見ると、あたかも自分の乗っている電車が反対方向に動いているように感じる現象である。また、3D シアターで専用のメガネをかけると 3 次元的な臨場感の中、自身がスクリーンの中を歩く、走るような移動感が生じる。これらの錯覚現象は視覚誘導性自己移動感覚(ベクション)と呼ばれている。自己の移動を特定する情報と同一の（あるいは類似した）情報が与えられると、あたかも実際に移動しているかのような感覚が生じるのである。ベクション研究の歴史は Brandt et al. (1973)から始まり、視覚を中心として多くの研究がなされてきた。また、多感覚統合の重要性も指摘されており (Gibson, 1979)、様々な感覚器官

の組み合わせによる検討がなされてきた (e.g., Lishman & Lee, 1973)。近年、前庭感覚や聴覚といった視覚以外の感覚によるベクシオンについての研究が増えており、皮膚感覚による自己移動感覚 (Murata., 2014) を Palmisano et al (2015) はレビュー論文の中で “Cutaneous Vection” と称している。

本論文の目的は、そのメカニズムがまだ十分に明らかにされていない皮膚感覚由来のベクシオンについて、それが他の感覚入力情報とどの様に作用し、知覚されるのか、以下の3つの観点から明らかにし、整理することである。

1. 皮膚感覚特性 (第3章)
2. 前庭系との関係 (第4章),
3. 視覚系との関係 (第5章)

まず初めに、視覚ベクシオン研究で検討されてきた視覚刺激の呈示領域、呈示面積、呈示速度の影響について、皮膚への刺激 (風の呈示) でも同様に呈示領域、呈示面積、呈示速度の違いによる影響がみられるかについて検討した。次に移動感覚に重要な役割を果たしている前庭系 (例えば, Howard, 1982, Sakurai, 2010 など) の影響について、皮膚感覚系との統合の点から、両者の刺激量、方向、更に刺激の変化を実験的に操作することで、その機能的特徴を検討した。そして最後に、ベクシオンに関わる視覚系と皮膚感覚系との情報統合について、皮膚感覚への刺激が視覚ベクシオンの促進的に作用するのか、あるいは抑制的に作用するのかについて検討した。

第6章ではこれらの実験結果をもとに、皮膚感覚からの情報と他の感覚器官からの情報とがどのように統合されるかについて、その機能的特徴を整理した。

第2章 装置の解説

本研究では、皮膚感覚系への刺激呈示のため、2種類の扇風機 (各2台) を用いた。前庭系への刺激呈示には、2種類のエクササイズマシン (各1台) を用いた。また、(参加者に気付かれることのない) より弱い前庭系刺激のために、オリジナルの移動装置を用いた。視覚刺激呈示にはコンピューターモニターを用いた。本研究では、実験装置および刺激呈示方法が複雑であるため、その詳細説明のために本章を設けた。

3章 皮膚感覚ベクシオンの特徴を皮膚感覚特性から検討

我々が移動を知覚する時に、皮膚から入力される情報の違いがどのように影響するのかを検討するため、以下の四つの点から実験を行った。

1. 皮膚感覚から生起するベクシオン特性として、単一感覚生起するか否か検討（実験 1）
2. 皮膚感覚ベクシオンにおける時間分解能・空間分解能の検討（実験 2, , 実験 3, 実験 4）
3. 皮膚感覚ベクシオンにおける刺激領域の検討（実験 5）
4. 皮膚感覚ベクシオンにおける刺激強度の影響を検討（実験 6）

これら全ての実験において、皮膚感覚特性への影響を純粹に検討するため、視覚情報と聴覚情報は遮断した。以下、各実験の概要を説明する。

<実験 1> Murata et al. (2014)で確認された皮膚感覚のみの条件で 3 名にベクシオンが生起した結果の再検討として、刺激残効の可能性があった。残効への影響を排除した検討を行った。その結果は、皮膚感覚は前庭感覚が統合しない条件ではベクシオンが生起しないことが確認された。

<実験 2>皮膚には、触れた物を敏感に検出するために感度の高い受容器と、変化の検出に感度の高い受容器が全身に分布している。広範囲にわたる皮膚には身体部位の違いにより時間分解能や空間分解能（どれだけ細かく感じるか）が異なる。例えば、空間分解能について、指先と唇の感度はほぼ同等で、また手の甲と額もほぼ同等である（e. g., Lederman, 1991）。また、自転車に乗っているときなどのように、環境内を移動するとき、最も外気に晒される身体部位として考えられる「顔」や「指先」には、対象物を鋭敏に弁別する領域がある。本実験では、「顔の眉の上」や「手の甲」の空間分解能を検討するため、実験で用いている着席姿勢のもと、触 2 点弁別検査を行った。その結果、顔の眉上が手の甲よりも閾値が低いことが確認された。

<実験 3>実験 2 で調べた「顔の眉の上」や「手の甲」の部位に、実験条件と同様の姿勢制御のもと、風速を 4 段階（0.6m /s, 1.5m/s, 3.0m/s, 5.5m/s）に操作した風をランダムに呈示した。どちらの部位も風速が弁別できることを確認した。

<実験 4>実験 2, 3 で確認した部位に前庭刺激と同時に風刺激を与え、ベクシオン生起の違いを検討した。その結果、顔の方にベクシオンが強く生じることを確認した。実験 2, 3, 4 の結果から、皮膚感覚と前庭感覚統合によるベクシオンには、閾値の低い領域の重要性が示唆された。

＜実験 5＞従来の視覚ベクシオン研究では、視細胞の特徴から、周辺視領域への刺激呈示の方が、中心視領域への刺激呈示よりも強いベクシオンを起こすことが示されてきた（例えば、Brandt, Dichgans & Koenig, 1973）。しかしながら、その後の研究により、刺激呈示面積が等しい場合には、中心／周辺の違いにかかわらず、同等の効果を持つことが示され、周辺刺激優位性に否定的な結果も示されてきた（例えば、Post, 1968 ; Palmisano & Gillman, 1998）。本実験では、皮膚感覚ベクシオンにおける刺激呈示面積の問題を取り上げ、皮膚感覚特性にもとづき、皮膚領域（顔と手）のの違いによる影響を検討したところ、顔に刺激を呈示する方が、手に刺激を呈示するよりもより強いベクシオンが生起することを明らかにした。この結果を受け、常に外気に晒されている顔の領域についてさらなる検討を行ったところ、額側と顎側とではベクシオンへの影響が異なり、額側への刺激の方が強いベクシオンを生起させることが明らかとなった。

＜実験 6＞ 視覚ベクシオンでは視覚刺激の運動速度がある速度を超えると、自己移動感覚が変化しなくなる、即ち飽和速度が存在することが報告されている（e. g. Berthoz et al., 1975; Brandt et al., 1973）。本実験では、皮膚感覚ベクシオンにおいても同様に、皮膚刺激速度への飽和が認められるのかについて検討した。前庭刺激の呈示には一定速度で前後に動くエクササイズマシンを利用し、皮膚刺激には風速を 4 段階（0.6m/s, 1.5m/s, 3.0m/s, 5.5m/s）に操作した風を呈示した。実験の結果、視覚ベクシオンでみられた飽和と同様、皮膚感覚ベクシオンにおいても飽和がみられ、そのピーク速度は 3.0m/s であった。

第 4 章 皮膚感覚と前庭感覚統合から生じるベクシオンメカニズム

Gibson (1979) によれば、そもそも自己移動感覚とは多感覚が統合して生じる現象である。皮膚感覚から生じるベクシオンも前庭刺激との同時呈示が必要条件である（Murata et al., 2014）。また、視覚から生じるベクシオンについても、視覚刺激と同時に皮膚刺激（風）を呈示すると、ベクシオンが促進することを報告している（Seno et al., 2011）。しかし、皮膚感覚ベクシオンを中心とし、それが他の感覚とどのように統合されるかについてはまだ詳細に検討されていない。

本章では、皮膚感覚系への刺激と前庭系への刺激が統合されて生じるベクシオンの機能的特徴を検討するための実験について報告する。実験では、移動に伴う前庭系への刺激を呈示するためにオリジナルの装置を用いた。また、実験 1、2、3 と同様、本章における実験においても、皮膚感覚ベクシオンについて検討するため、視覚情報と聴覚情報は遮断した。実験は以下の通りである。

1. 皮膚刺激と前庭刺激における方向（一致／不一致）の検討（実験 7）、および速度（一致／不一致）の検討（実験 8）、及び、移動（受動／能動）の検討（実験 9）
2. 加速度の働く条件と働かない条件の比較（実験 10-13）

3. 皮膚刺激の変化有無の比較（実験 14）

第4章では、皮膚感覚と前庭感覚の統合のメカニズムを明らかにするため、傾きセンサーの働く条件と働かない条件で比較した。加速度が働く条件とは、耳石の傾きやリンパ液の流れにより方向情報を受け取る条件である。そこでは前庭系の加速度が働くゆっくりとした移動（0.95cm/s）を伴う加速度の働く条件と働かない条件を用いて検討した。それと同等の振動刺激のみを皮膚刺激と組み合わせ呈示した。その結果、「移動していた」と感じた方向に指さしをさせると、皮膚刺激のない場合、実際に移動しても自分の進んでいる方向が定まらないが、風刺激を同時に呈示すると移動・振動条件共に進行方向を持つ移動感覚が生じることを確認した。

＜実験 7＞多感覚からの情報は一般的に調和的に統合されていると考えられる (Rieser et al., 1995)。皮膚感覚からのベクションにおいても他の感覚器官と統合することによって生起するのであれば、一致する条件ではベクションが生起または促進すると考えられる。一方で、不一致条件では抑制の方向に働くだろう。そこで、皮膚感覚ベクションにおいても前庭系の情報の統合は密接に関与していることが示唆された。

＜実験 8＞皮膚感覚からのベクションにおいても他の感覚器官と統合することによって生起するのであれば、一致する条件ではベクションが生起または促進すると考えられる。一方で、不一致条件では抑制の方向に働くだろう。そこで、皮膚刺激の風速（0.5m/s , 5.5m/s）と前庭刺激の速度（0.8mm/s, 4.0mm/s）を設け、一致条件（速い条件同士、遅い条件同士）、不一致条件（風速が速く、移動速度が遅い条件、風速が遅く、移動速度の速い条件）での比較検討の結果、全て一致条件でベクションが促進された。

＜実験 9＞能動条件ではベクションが抑制されることも確認した（実験 6）。Ash et al. (2013) は視覚と不一致な能動運動（トレッドミル上の歩行）を加えることでベクションを抑制することがあると報告している。皮膚感覚においても感覚間の不一致がある場合、能動運動ではベクションが抑制されることが確認された。

＜実験 10-13＞ベクションの特徴のに、多くの研究で加速度の影響が示されている（刺激の変化はベクションをより強く引き起こすことが報告されている (Palmisano & Chan, 2004)）。皮膚感覚系への刺激の変化もベクション生起に影響するのかを検討するために、皮膚刺激が変化する（段々近づく）条件と前庭系の加速度が働く条件設け比較し、更に皮膚刺激と参加者の距離が一定（加速度が働かない）条件との組み合わせを用いて比較を行った。

＜実験 14＞皮膚刺激と参加者の距離が一定より変化（近く・遠ざかる）があるとベクションはより長い時間生じていることを確認した。更に皮膚刺激が参加者に近づいてくるよりも遠ざかる方が速く移動したと感ずることも明らかにした。この結果は Bubuka et al. (2008) による報告と同様の傾向を示した。以上の結果から皮膚上の刺激の加速度は前庭系

の加速度と同等の情報を入力することが示唆された。

第5章 皮膚感覚と視覚の統合による検討

ここまでの章では皮膚感覚と前庭感覚の統合によるベクシオンを中心にその機能的特徴について検討してきた。しかし多くの研究報告のある視覚ベクシオンとの検討を行っていない。本章では、次の2点について検討を行った。

1. 皮膚感覚と視覚により生起するベクシオンの特徴の違いについて<実験1>
2. 皮膚感覚特性の1つである温度変化の影響について<実験2>

第5章では、皮膚感覚と視覚を用いて検討することで、皮膚感覚ベクシオンの特徴を検討する。

<実験1>

視覚と皮膚感覚の統合により報告されている Seno et al., (2011)による研究を取るあげる。具体的には、拡大するランダムドットパターンの刺激を呈示すると同時に風による刺激を参加者の顔に当てた。その結果、視覚刺激だけの時に比べて有意に促進した(Seno et al., 2011)。皮膚感覚特性として、温度受容器は 8℃～52℃までの範囲で温度をとらえることが可能である。哺乳類において温度受容器は6種に分類され各温度帯を担当する。本章における実験では、視覚刺激を呈示しながら顔に当てる温度を常温風(22～24℃)、温風(27℃)そして風を当てない条件をランダムに呈示し、視覚・皮膚感覚ベクシオンにおける温風の影響について検討した。実験の結果、風の当たらない条件に比べて常温風ではベクシオンを促進していたが、温風になるとベクシオンはむしろ風の当たらない条件よりも抑制されることが示された。

第6章 総合考察

我々が環境の中を移動するとき、視覚、聴覚、前庭感覚、体性感覚といった多感覚器官からの情報の統合によって、移動方向や移動速度などの情報を受け取ることができる(引用)。本研究では実験研究を行い、これまで体性感覚の1つとして扱われて来た皮膚感覚の特性に焦点を当て、皮膚感覚系からの自己移動感覚のメカニズムの一部を明らかにした。3章における実験により、皮膚感覚ベクシオンには、呈示する刺激強度(速度)にもとづく飽和現象の存在が明らかになった。視覚ベクシオンにおいても同様の飽和現象が報告されており、視覚と皮膚感覚とではモダリティーが異なるものの、両ベクシオンが共通のメカニズムをシェアしている可能性が示唆された。また、皮膚感覚ベクシオンについて、顔領域の違いによる

影響を検討したところ、顔上部により強いベクションを生じさせる領域があることが明らかになった。4 章における実験により、皮膚刺激と前庭刺激の呈示に関する一致がベクションを促進し、不一致は抑制方向に働くことが明らかになった。これらの実験により、皮膚感覚ベクションもまた、多感覚統合のメカニズムにより生じていることが示唆された。更に、わずかな前庭刺激（振動）であっても皮膚刺激の変化の検出によると思われるより強いベクションが確認された。また 5 章における実験により、視覚と皮膚感覚のベクション生起の相違が、皮膚感覚は単一感覚では生じにくい特徴であることが示唆された。しかしながら、視覚と皮膚感覚の統合研究については、まだ始まったばかりである。皮膚感覚から生じるベクションのメカニズムについても今後の研究に期待する。

これまでのベクション研究は、我々が意識せずに環境を移動している際の情報（方向、速度）の入力から出力までのメカニズムを明らかにしてきた。こうした成果は、VR の技術発展や酔いの研究に貢献するものである。本研究は、更に新たに皮膚感覚による影響を検討したことで、知覚心理学の基礎的研究を利用した、技術応用へ貢献する可能性について言及した。