

論 文

水中での視覚心理実験のための刺激提示装置開発および  
それを用いた水中での自己身体誘導運動知覚実験

中 村 信 次

日本福祉大学 全学教育センター

Development of visual display for underwater psychophysical experiments  
and trials for underwater vection experiment

Shinji NAKAMURA

Inter-departmental Education Center, Nihon Fukushi University

Keywords : 水中での視覚刺激提示, 水中心理実験, 自己空間定位

underwater visual display, underwater psychophysical experiment, spatial orientation of self-body

Abstract

In order to examine a novel approach toward better understanding concerning multimodal sensory integration in human spatial orientation, we tried to develop an underwater visual display which enables us visual psychophysical experiment in a water. We proposed three possible methods, namely 1) a large visual display equipped with water-protection housing, 2) a head-mounted display employing waterproof smartphone and 3) an observing visual display placed outside of water via observational window. Advantages and limitations in each method were discussed. We also executed trial vection experiments employing the underwater visual display and confirmed its feasibility. Furthermore, the results suggested that visual-vestibular interactions were quite different in the underwater condition from the normal observational condition. The current study successfully provided us an invaluable information worth to examine in a future study.

要約

自己空間定位に関わる多感覚統合の様相を新たな角度から検討するために、水中での視覚心理実験を可能とする水中視覚刺激提示装置の検討を行った。1) 大型水中視覚ディスプレイの設置, 2) 防水スマートフォンを用いた頭部搭載ディスプレイ, 3) プールに設置された観察窓を介した刺激提示, の3種の方式を提案し, それぞれの長所, 制約を議論した。水中視覚刺激提示装置を用いた水中での自己身体誘導運動知覚実験を試行し, その実現可能性を確認するとともに, 水中環境での視覚-平衡感覚間相互作用の特異性を示唆する結果を得るなど, 今後の研究推進に有益な知見を得ることができた。

## 1. はじめに

### - 水中視覚刺激提示装置開発の必要性 -

我々人間は、環境への行動的適応のため、自身の活動する空間内における事物と自己との位置関係を正しく把握し、それに対し正しい対処行動をとることを常に求められている。その際、主には視覚や聴覚といったいわゆる遠感覚 (far sense) と呼ばれる感覚モダリティを用いて、外界の事物の空間内での位置 / 運動に関する情報が得られることとなる。一方、外界の事物に対する空間的行動の遂行には、その空間情報の把握のみでは不十分であり、行動の原点となる自己の身体空間内での位置 / 運動をも正しく認識することが必要となる。

自己身体の位置 / 運動の認識、すなわち自己の空間定位 (spatial orientation) においては、単一の感覚モダリティがそのすべての責を果たすことはなく、視覚、聴覚、触覚、平衡感覚、筋運動感覚などの多様な感覚情報を統合することにより、正確で安定した自己身体定位が初めて可能となる<sup>[1]</sup>。したがって、自己空間定位は、その本質として多感覚情報統合 (multimodal information integration) をその成立基盤として持つものであると理解できる。これらの自己空間定位に関わる諸感覚情報の中でも、視覚情報が支配的な役割を果たしていることが知られている<sup>[2]</sup>。自己定位における視覚情報の重要性に関しては、以下に述べる視覚誘導性自己運動知覚 (visually induced self-motion perception, もしくはvection; 以下、ベクション) により、容易に理解することができる<sup>[3]</sup>。視野の大部分を占める広い領域で均一に運動する視覚刺激を観察した場合、実際には静止している観察者が、視覚刺激の運動方向とは反対方向への自己の身体の運動を知覚することになる。自身の乗車している列車が静止しているにもかかわらず、反対側の線路の列車が動き始めると、それとは反対方向へ自身の列車が動き出したように感じることもある (一般に train illusion と呼ばれる)。日常生活において体験可能なベクションの事例である。ベクションは、平衡感覚や筋運動感覚などのその他の自己運動知覚に関わる感覚情報の対応がなくとも、視覚刺激が単独で強力な自己身体運動知覚を引き起こすことが可能であることを明確に示しており、自己空間定位における視覚情報の支配的な役割を証拠づける事例として、多くの研究者に広く認識されている (たとえば [4] の総説を参照)。

これまでの自己空間定位、とくに自己身体運動知覚に

関わる実験心理学的検討においては、主にその効果の大きさ、さらには実験統制の容易さを要因として、視覚刺激のみに焦点を当て、その他の自己空間定位に関わる感覚情報は積極的に操作はしない実験計画が頻繁に用いられてきた。しかしながら、近年の技術的進展を受け、平衡感覚や筋運動感覚を厳密な時間制御のもと、定量的に提示することを可能とする実験系が構築され、それらが自己身体運動知覚に及ぼす影響を分析する研究が見受けられるようになってきた (たとえば、平衡感覚に関しては [5]、筋運動感覚に関しては [6] を参照のこと)。また、聴覚刺激に関しては比較的以前から自己運動知覚に及ぼす影響を分析する研究が存在する<sup>[7]</sup>。

自己空間定位に関わる検討は、一般的には、我々の日常生活環境と等しく、通常重力環境 (1G 環境) 下で実験が行われることとなる。身体に負荷される重力加速度を含む加速度を検出する耳石器および半規管によりもたらされる平衡感覚情報が、自己空間定位に深く関連していることなどを鑑みると、こういった実験実施環境に関しては留意が必要となる。前述の如く、自己空間定位には多様な感覚情報が関与しており、いわば冗長性を有したシステムとなっている。このような状況において、我々の日常生活環境と同様に 1G 重力環境下でのみ感覚統合過程を検討することには一定の制約が存在する。極端な場合、通常の実験環境において操作可能な自己空間定位に関する感覚情報をすべて除去したとしても、日常環境と同様に重力によりもたらされる平衡感覚情報や、抗重力筋群からの筋運動感覚、立位の場合は足底、座位の場合は臀部などの体性感覚からの情報などが存在することとなる。実験参加者は、それらに依存して自己空間定位を行うことが可能であり、研究者の意図した感覚情報操作が困難となる。このような認識に基づき、宇宙空間や放物線飛行 (parabolic flight; 航空機などにおいて落下運動の際に得られる微小重力環境を利用した実験が行われている) などの通常とは異なる重力環境において自己空間定位に関わる感覚情報の関与を検討した研究も存在する<sup>[8][9]</sup>。しかしながら、宇宙空間を利用した実験には、莫大な経費が必要になると同時に、事前に参加者に長時間特殊な訓練を課す必要があり、その実施難易度は相当程度以上に高いものとならざるを得ない。放物線飛行を用いた実験においても、一定程度高額な経費が必要となる。さらに放物線飛行の場合には、微小重力環境が得られる時間間隔が長くとも数十秒程度であるなど、

実施可能な実験計画に大きな制約が存在する（このような状況では、多感覚統合の実験の際によく用いられる感覚順応手続きを利用することは不可能である）。

自己空間定位に関する情報処理過程に関しより良い理解をなすためには、上述の制約を打破し、日常生活場面とは異なる状況下で感覚統合の様相を検討する必要がある。そこで、我々は水中での自己空間定位研究の推進を提起している<sup>[10][11]</sup>。水中においては、浮力により参加者の身体に負荷される重力が相殺されることとなり、自己定位に関する感覚情報の対応は通常の場合と大きく異なるものとなる。適切に浮力調整を行った場合には、参加者はあたかも「無重力」環境を浮遊しているかのような経験することとなる。自己の能動的な移動に関しても、陸上と水中では必要となる身体運動が大きく異なり、筋運動感覚と自己運動感覚との対応も必然的に異なったものとなる。水中環境において自己空間定位の検討を行うことにより、実験実施経費を現実的なものとしつつ、感覚順応過程の検討を可能とする実験時間を確保することができるなど、宇宙空間や放物線飛行を用いた場合の課題を一定程度解消することが可能となる。前述の如く、自己空間定位においては視覚情報が果たす役割は非常に大きく、水中での実験的検討においても視覚刺激の提示とその制御が重要な要素となる。しかしながら、水中においては通常の電子機器の利用は当然不可能であり、水中での実験実施を可能とする視覚刺激提示装置を導入する必要がある。本稿では、水中での視覚刺激提示装置の可能な在り方について論考を進めることとする。

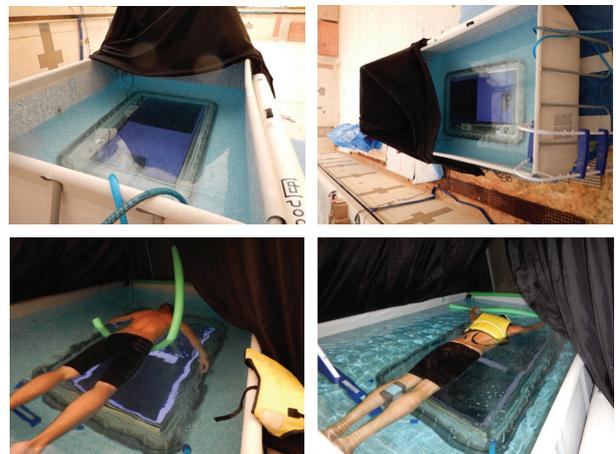
## 2. 水中における視覚刺激提示装置

本章においては、自己空間定位に関する知覚心理学的実験を水中において実施可能とする視覚刺激提示に関し、現状想定することのできる3つの方式について議論を行う。

### 2.1. 大型水中ディスプレイの設置

本方式においては、視覚ディスプレイ（液晶モニターなどのフラットディスプレイ）を封入し水中で利用可能とする防水ハウジングを用いて、水中での視覚刺激提示を可能とする。視覚刺激によって自己空間定位に有意な効果をもたらすためには、視覚刺激の提示領域（面積）が一定程度以上あることが必要条件となる（たとえば [12] [13]）。したがって、本方式において用いる視覚モ

ニタは可能な限り大型のものであることが要求される。様々な水中アトラクションの開発提案を行っている東京 Pool Lab を運営する株式会社 Rockin'Pool が、「アクアサイネージ®」という商品名で、上記要求を満たす大型の水中ディスプレイを開発し、各種イベントでの供用を実施している<sup>[14]</sup>。筆者も、水中での広視野角視覚刺激提示装置の可能性探求のため、同装置の試用、および、それを用いた水中でのベクション実験の試行を行った（試行実験の詳細に関しては次章に詳述する）。図1に、「アクアサイネージ®」を用いた水中視覚刺激提示実験の状況を示す。



上段：「アクアサイネージ®」の水中設置の様子  
下段：大型水中ディスプレイを用いた水中での視覚刺激観察の様子

図1 大型水中ディスプレイを用いた視覚刺激提示

現行、各種利用に供されている「アクアサイネージ®」は、65インチ液晶ディスプレイ（LG社製 65UF8500 画面サイズ：142.8×80.4cm 画像解像度：3840×2160 pixel）を、アクリル製防水ハウジングに封入して使用するものである。プールの側面に設置し、観察者に水中において座位の姿勢を取らせる（または水面に伏臥し、頸部の屈曲により前方を観察させる）ことにより、水平方向での視覚刺激観察が可能となる。また、プール底部に設置し、水面に伏臥した観察者が下方を観察することにより、垂直方向での視覚刺激観察も可能となる。利用されている視覚ディスプレイは十分な表示面積を持つものであり、自己空間定位実験に要求される広視野角刺激提示の要件を十分に満たすことができるものである（水平方向観察時には、観察距離を自由に設定することができ、網膜上での視覚刺激投影面積も任意に設定可能となる。また、水平方向観察時には、視覚刺激の網膜像サイ

ズは水面から水底までの距離（ディスプレイまでの観察距離）に依存することとなるが、プールの水深を操作することにより、一定程度その自由な設定が可能である。視覚ディスプレイは、HDMI を経由して、陸上に設置された制御用 PC と接続される。制御用 PC は（水中ではなく）陸上に設置することが可能であるので、その機種に制限はなく、十分に高性能な PC を利用した場合には、複雑な視覚刺激を動的に生成すること（例えば、観察者の身体運動に同期して視覚刺激を変化させるなど）が可能である。

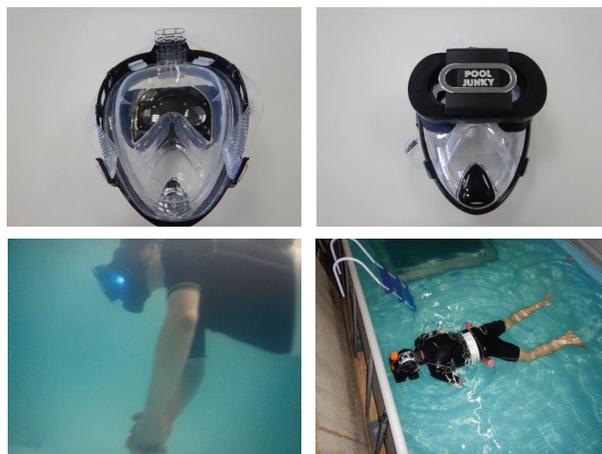
「アクアサイネージ®」を利用した水中視覚刺激提示実験の試行への参加者（筆者を含む）への聞き取りによると、同システムを用いた水中での自己空間定位実験の実施は十分に可能であることを示唆する所感が得られている。同システム利用の課題としては、1) 現状、同機が非常に大型かつ高重量のものであり、その搬送、設置に多くの労力（と費用）が必要となる、2) 実験実施の際には十分な広さのあるプールが必要となる（現実的にはプールを借り切り、排他的な利用をしなければならない）、3) 通常のプール環境においては、視覚ディスプレイに照射される外光の制御が困難であり、視覚刺激提示に予期せず外光が重畳する（特に、水面により複雑に反射した外光が視覚ディスプレイに映り込む場合には大きな問題となる。そのため、今回の試用においては、外光の影響を可能な限り低減するため、小型プール全体を暗幕により覆った）、などが挙げられる。

## 2.2. 防水スマートフォンを用いた頭部搭載ディスプレイ

次に議論する方式においては、スマートフォンなどの小型かつ十分な画像表示機能を有したディスプレイを装備した機器を、観察者の頭部に装着し、近年その利用が爆発的に拡大してきているヴァーチャルリアリティ（Virtual Reality; VR）における視覚刺激提示と同様に頭部搭載ディスプレイ（Head Mounted Display: HMD）として利用する。ディスプレイの防水に関しては、前節で紹介した「アクアサイネージ®」と同様に、専用のハウジングを開発することも可能であるが、近年のスマートフォンには日常生活防水程度の簡易な防水機能を有しているものもあり、そのような機種を利用することにより、スマートフォン単体を簡便に水中視覚刺激提示用のディスプレイとして利用することが可能である。HMD においては、観察距離が極端に短くなることから、

凸レンズを用いた焦点補正が必要となる。水中での利用に際しては、水と空気の屈折率の差に留意した上で、観察者の視力の個人差を補正するために、焦点距離の調整機能を導入することが必要となる。スマートフォンの水中視覚刺激提示デバイスとしての可能性に着目し、浮力や屈折など、空気層を含む装置を水中で利用する際に特有の問題を解決するための設計手法を提案する研究も存在する<sup>[15]</sup>。

上述の議論に鑑み、防水スマートフォンを利用した HMD タイプの水中視覚刺激提示装置の試作を行った（試作にあたっては、「アクアサイネージ®」の開発を行った株式会社 Roking'Pool 社に協力を要請した）。観察者の身体的負担に配慮し、観察者の顔面全体を覆うフルフェイス型の水マスクを採用し、その内部に焦点距離調節用の凸レンズを設置した（レンズの屈曲率は使用者の視力に応じ変更する必要があるが、試用の結果、1ジオプター程度のレンズで多くの場合十分に利用可能であることが分かった）。マスクの外側、観察者の視線方向付近に治具（市販のスマートフォン用 VR ゴーグルを改造）を装着し、スマートフォンを固定した。スマートフォン用 VR ゴーグルが備えている調整機能により、スマートフォンの固定位置を操作することが可能であり、これにより若干の焦点距離調節が可能となる。前節で述べた外部に大型の水中ディスプレイを設置した場合の外光の問題を回避するため、水マスクの観察部位以外の部分に遮光性のシートを塗布することにより、外光の照射を回避した。図2に、試作した HMD タイプの水中刺激



上段：試作した水中視覚刺激観察用 HMD ゴーグル（構造を見やすくするために遮光シートは取り外してある）  
下段：HMD による水中での視覚刺激観察の様子

図2 防水スマートフォンを用いた頭部搭載ディスプレイによる視覚刺激提示

提示装置、および、その試用状況を示す。試用の結果、自己空間定位実験に利用するために十分な視野角、時間的・空間的分解能を有した視覚刺激を提示可能であることが判明した。今回検討は行わなかったが、HMDの特徴を利用して、両眼立体視（ステレオ3D）画像を提示することも容易に実現可能であり、高い発展可能性をも有する。

HMDタイプの水中視覚刺激提示装置の課題として、以下の3点を挙げる。第1に、焦点距離の調整可能範囲が比較的狭く、観察者によっては十分に焦点の調節された視覚刺激を提示することが不可能になる可能性が懸念される。この点については、ディスプレイ固定位置の調整機構のさらなる工夫により回避することが可能であると考えられる。

第2に、ディスプレイが観察者の頭部に固定されることになるので、観察者の身体運動に応じてディスプレイの（外部座標系における）位置も変化してしまうことを考慮しなければならない（観察者の身体座標系におけるディスプレイ位置は常に一定となる）。本方式においては、前節で述べた外部に大型の水中ディスプレイを設置する事例とは異なり、観察者の視野のすべてが視覚刺激で占められることとなり、観察者は外部の不動対象を自己定位の参照枠組みとして用いることはできず、身体定位が相当程度不安定になる。その結果、試用実験においても、視覚刺激観察中の観察者の身体が、水中で大きく動いてしまうような場面も頻繁に生じていた。実験補助者による観察者の身体位置の保持を行うことも考えられるが、不必要な触覚の手がかりを観察者に与えることになり、実験計画の上望ましいものではない。自己空間定位実験においては、外部座標系における視覚刺激の位置の統制を必要とする実験方法が用いられることも多く、そのような場合には、通常のVR刺激と同様、身体運動をフィードバックすることにより、視覚刺激の外部座標系での位置を（画像内で）補正する必要がある。このような課題がある一方、当該機能を実装することができれば、観察者の自発的運動に対応して動的に視覚刺激を変化させるなど、さらに多様な実験の実施が可能ともなる。

第3に、刺激提示に用いるスマートフォンの機能的制約を挙げる。スマートフォンの描画機能は近年急速に高度化しているとはいえ、グラフィクスに特化したPCと比較して、その性能は制限されたものとならざるを得ず、

複雑な視覚刺激の計算と描画を行う際にはフレームレートの低下などに配慮をしなければならない。また、外部に刺激制御用のPCを設置する前節の例とは異なり、刺激提示および実験制御が水中に持ち込まれることとなるスマートフォンにより完結することになるので、実験シーケンス（特に、刺激提示タイミング）の制御には一段の工夫を要することになる。

### 2.3. プールに設置された観察窓を介した刺激提示

最後に、その他の可能な方式として、一部のプールに設置されている「観察窓（競泳選手の泳法の確認等のために、外部から水中を観察可能にする開口部 図3参照）」を通じた視覚刺激提示の可能性について簡単に論じる。観察窓を通じて、水中の観察者は外部に設置された視覚ディスプレイを観察可能となる。観察窓の近傍に、十分な大きさの液晶ディスプレイなどの可搬性の高い視覚ディスプレイを設置することにより、観察窓を通じた視覚刺激の観察は容易に実現可能である（もしくは、観察窓に背面投影用のスクリーンを取り付け、プロジェクタにより視覚刺激を投影してもよいであろう）。この方式の課題としては、観察窓が設置されているプールが限定されること、観察窓の大きさや取り付け位置が利用するプールによって固定されており、刺激提示の自由度が制約されることなどが挙げられる（観察窓の取り付け位置によっては、観察者の刺激観察中の安全な呼吸確保にも課題を有することとなる）。また、実験が行われることとなる水中と、実験制御を行うプール外部とのコミュニケーションにも工夫が必要である。

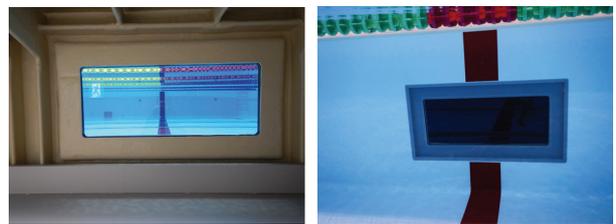


図3 プールに設置された観察窓の事例

### 3. 水中でのベクション実験の試行的実施

本章では、前章において提起した水中刺激提示装置のうち、大型水中視覚ディスプレイの設置を行う方式を利用して試行した水中でのベクション実験について述べる。

### 3.1. 方法

小型プールの底面に設置した「アクアサイネージ<sup>®</sup>」を視覚刺激提示のためのディスプレイとして用い、観察者はプールの水面に伏臥してディスプレイの前面に提示される視覚刺激を観察した。プールの水深は約80cmであり、この場合の視覚刺激の大きさはおよそ視角 $82^{\circ} \times 52^{\circ}$ となり、ベクションの実験を行うのに十分な大きさの視野を確保できた<sup>[12]</sup>。観察者は、水中マスクを装着した状態で、ディスプレイに提示される視覚刺激を30秒間観察し、刺激提示期間中に感じた自己の身体の運動の強さを刺激提示終了後に量推定法を用いて報告した。実験参加者は、成人男性5名（筆者を含む）であった。筆者以外の実験参加者は、いずれも競泳選手もしくは水泳指導者であり、水中での課題遂行に熟練していた（年齢27歳～51歳）。

提示された視覚刺激は以下の7種類であった。視覚刺激はいずれの条件においても、黒背景上に提示された白色ランダムドットパターンであった（ドットサイズ $2.0^{\circ}$ 、ドット密度 $1^{\circ}$ 平方あたり0.2）。以下の視覚刺激条件の記述は、観察者の頭部を上、足部を下とする身体軸に従ってなされている（観察者が伏臥して下方の視覚ディスプレイを観察しているので、運動方向の記述が外部座標系でのそれとは異なる点に注意が必要である。また、視覚刺激運動方向と自己運動知覚方向の対応は、通常環境下でのベクション実験と同様であるものと予想している）。

- 1) 水平運動刺激 (horizontal) : 観察者の身体軸を基準として、左から右へ、 $15.0^{\circ}$ /秒の速度で視覚刺激が運動する条件。観察者は、左方向の自己運動を知覚することが予想される。
- 2) 水平運動 + オシレーション (horizontal+oscillation) : 水平運動刺激に、上下方向の正弦波様速度変調（周波数 $0.5\text{Hz}$ 、振幅 $5.0^{\circ}$ /秒）を付加した条件。
- 3) 垂直運動刺激 (vertical) : 視覚刺激が（観察者の身体軸を基準として）上方から下方へ $15.0^{\circ}$ /秒の速度で視覚刺激が運動する条件。
- 4) 垂直運動 + オシレーション (vertical+oscillation) : 垂直運動刺激に、左右方向の正弦波様速度変調（周波数 $0.5\text{Hz}$ 、振幅 $5.0^{\circ}$ /秒）を付加した条件。
- 5) 回転運動 (rotation) : 視覚刺激がディスプレイ中央を中心として、時計回りに $1/6$ 回転/秒で回転

する条件。観察者が、視線方向を中心とした反時計周りの自己回転（ロール回転）を知覚することが予想される。

- 6) 拡大運動 (expansion) : 視覚刺激がディスプレイ中央を中心として拡大運動する条件。各ドットの平均運動速度が水平/垂直運動条件における運動速度と均一になるように、拡大運動速度が設定された。観察者に、（身体座標系に基づく）前方への自己運動を誘導する（外部座標系においては、観察者が伏臥する水面から、ディスプレイが設置されているプール底面への下方向への自己運動となる）。
- 7) スパイラル運動 (spiral) : 視覚刺激内の各ドットに、5) の回転運動と6) の拡大運動をベクトル加算した運動成分を付与した条件。各ドットがスパイラル様に中心から周辺へ運動することとなる。観察者は、回転しながらの前方への運動を経験することとなる。

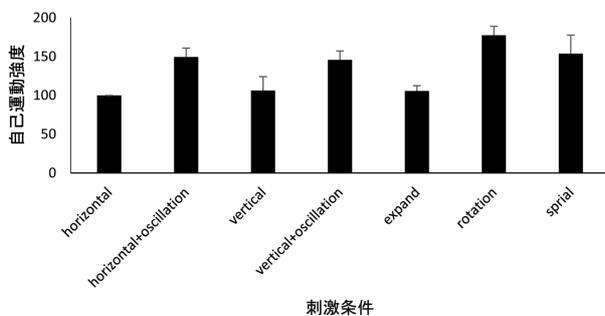
観察者は、適切な休憩をはさみながら、各条件の視覚刺激をランダムな順序で2回観察し、刺激観察終了後にその際に感じられた自己運動知覚の強度を口頭報告した。強度評定の際の基準となる標準刺激として水平運動条件を用いることとし、観察者は、その際に得られた自己運動強度を100として、各実験条件における自己運動知覚強度を評定した（強度評定の基準を獲得するために、実験試行に先立ち、標準刺激を用いた予備施行を2回実施した）。

### 3.2. 結果と考察

観察者の内省報告により、視覚刺激運動とは反対方向への自己身体運動が知覚されており、視覚刺激運動と自己身体運動方向知覚の対応は、通常のベクション実験のそれと同一であったことが確認された。

図4に、各視覚刺激運動条件における強度評定値の平均値を示す。観察者の身体の直線運動を引き起こす水平、垂直、拡大の各条件においてはほぼ同等の強度を持つ自己運動が誘導されていたことが確認できる。前額平行面上の等速直線運動にそれと直交する正弦波様加速度運動成分を重畳した条件（水平運動 + オシレーション条件、垂直運動 + オシレーション条件）では、等速運動のみの条件と比較して、5割程度自己運動強度評定値が上昇し

ていた。主たる自己身体運動方向と直交する方向に加速度運動成分を付加することにより、自己身体誘導運動が有意に強化されることは、これまでも多くの研究において指摘されている（例えば [16] [17] など）。通常の実験環境下（陸上）における加速度運動成分付加による自己運動知覚増強は、通例 2~3 割程度であり<sup>[18]</sup>、水中実験におけるそれは相当程度大きい。視覚刺激に付加された加速度運動が自己身体運動における視覚・平衡感覚統合様式に変化を与えたとする立場をとる研究者が存在することを考え合わせると<sup>[18]</sup>、水中環境での実験において、自己空間定位に関する多感覚統合過程が何らかの形で日常生活場面から変容していた可能性が示唆される。今後、継続的に検討するに値する課題であると考えられる。



エラーバーは標準誤差を示す

図4 各刺激条件における自己運動強度評定値

回転運動を提示した際の自己身体回転運動知覚（視線方向を中心とするロール回転：ロールベクション）は、身体の平行運動に比べ、5割程度強く感じられていた。通常、自己身体のロール回転の知覚には、平行運動の場合と比べ、平衡感覚情報の関与がより大きくなり、ベクション強度は低下することが知られている。ただし、ロールベクション強度は観察者の身体姿勢により大きく変化し、視覚刺激運動が示す自己回転と平衡感覚情報が示す重力方向の変化が矛盾しない伏臥位の場合には、ベクション強度の低下はあまり大きなものではないことが示されている<sup>[19]</sup>。一方、今回の試行においては、平行運動と比べて非常に強い自己回転運動が確認されている。拡大運動に回転運動を重畳させたスパイラル運動においても、単純な拡大運動と比べ強い自己運動知覚が報告されており、前述の加速度負荷の条件と同様、水中実験における視覚・平衡感覚相互作用の特異性が表れたものではないかと推測され、興味深い結果であるといえる。今回の試行実験においては、図4に平均に合わせて示した標準誤

差からもわかるように、条件間の自己運動知覚強度の変動は、個人差による変動よりもかなり大きく、また、結果の傾向はすべての参加者において共通のものであった。このことから、今回試行した実験に用いた装置及び手続きが、水中におけるベクション実験で、十分に刺激条件間の差異を検討するに足るものであることが理解できる（ただし、今回の実験においては、実験参加者が5名とごく限られた人数であり、また、参加者のすべてが[一般的な人に比べて]相当程度水中環境に習熟していたことなどを、結果の検討の際に制約として留意する必要がある）。

本章では、水中に設置された大型視覚ディスプレイを利用したベクション実験の試行結果を報告した。実験実施に際し次章においても論じる種々の課題が存在はするが、今回の試行での水中における自己空間定位実験の実現可能性を十分に確認することができた。

#### 4. まとめと課題

本稿では、水中における自己空間定位に関する心理実験を可能とする視覚刺激提示装置の開発の必要性とその実現方法について論じた。可能な方式として、1) 大型水中視覚ディスプレイの設置、2) 防水スマートフォンを用いた頭部搭載ディスプレイ、3) プールに設置された観察窓を介した刺激提示、の3種を提案し、それぞれの方式の利点と制約とを議論した。現時点で実験実施上の欠点を持たない方式は提案できていないが、本稿で紹介した3つの方式の中では、実験実施の簡便性、拡張可能性の豊富さなどから、防水スマートフォンを用いる方式が最も有望なものであると考える（水中実験の適用範囲の拡大を考える際に、実験実施の簡便性は無視しえない要件となる）。また、大型水中視覚ディスプレイを用いた水中ベクション実験を試行し、今回開発した装置及びそれを用いた実験方法が、水中での自己身体空間定位を分析する心理実験に十分に利用可能であることを確認した。

議論を結ぶにあたり、水中視覚刺激提示装置開発の現状での課題を以下に挙げる。水中での視覚刺激提示に際しては、観察者は水中マスクを装着した状態で刺激を観察することとなる。水、水中マスクのガラス、水中マスク内の空気（さらには刺激提示方式によっては焦点距離調節のためのレンズ）と、屈折率の異なる媒体を刺激光が通過することとなり、視覚刺激が観察者の網膜に到達

するまでに、複雑な光学的過程を経ることとなる。これにより、意図しない視覚刺激の歪みや、大きさの変化、色収差などが起こることが想定される。通常の（陸上での）実験環境下での結果との比較のためにも、水中での視覚刺激提示の際の刺激キャリブレーション手法の開発が強く求められる。本稿では、水中での視覚刺激提示の問題にのみ焦点を当てて議論を進めてきたが、当然のことながら水中における心理実験の遂行には、水中環境で実施可能な反応計測手法の開発も必要となる。防水スイッチなどを用いた反応計測などが好適な方式として想定されるが、（ベクション実験など）厳密な反応時間計測の必要のない実験計画においては、観察者に（ハンドジェスチャーなどの）身体運動により知覚印象を報告させ、それをビデオカメラなどで記録することによって簡便に反応計測を実現することも可能である。前にも述べたが、防水スマートフォンを視覚刺激提示装置として用いた場合には、刺激提示を含めた実験制御がスマートフォンのみで完結することとなる。赤外線通信など、スマートフォンの防水機能を損なわない方式を用いて、実験制御/反応計測用の装置と接続を行う機能を実装することが必要となろう。

#### 引用文献

- [1] Howard, I. P., & Templeton, W. B. (1966). *Human spatial orientation*. Oxford, England: John Wiley & Sons.
- [2] Howard, I. P. (1982). *Human visual orientation*. Chichester; New York: J. Wiley.
- [3] Fischer, M. H., & Kornmüller, A. E. (1930) Optokinetisch ausgelöste Bewegungswahrnehmungen und optokinetischer Nystagmus." *Journal für Psychologie und Neurologie*, 44, 273-308.
- [4] Warren, W. H., (1995) Self-Motion: Visual perception and visual control." in *Perception of Space and Motion* (Eds. W. Epstein & S. Rogers). San Diego, CA: Academic Press, 263-325.
- [5] Weech, S., & Troje, N. F. (2017). Vection latency is reduced by bone-conducted vibration and noisy galvanic vestibular stimulation. *Multisensory Research*, 30, 65-90.
- [6] Riecke, B. E., Feuereissen, D., Rieser, J. J., & McNamara, T. P. (2011). Spatialized sound enhances biomechanically-induced self-motion illusion (vection). In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2799-2802). ACM.
- [7] Riecke, B. E., Väljamäe, A., & Schulte-Pelkum, J. (2009). Moving sounds enhance the visually-induced self-motion illusion (circular vection) in virtual reality. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 6, 7.
- [8] Young, L. R., Oman, C. M., Watt, D. G. D., Money, K. E., Lichtenberg, B. K., Kenyon, R. V., & Arrott, A. P. (1986). MIT/ Canadian vestibular experiments on the Spacelab-1 mission: 1. Sensory adaptation to weightlessness and readaptation to one-g: an overview. *Experimental Brain Research*, 64, 291-298.
- [9] Allison, R. S., Zacher, J. E., Kirolos, R., Guterman, P. S., & Palmisano, S. (2012). Perception of smooth and perturbed vection in short-duration microgravity. *Experimental brain research*, 223, 479-487.
- [10] 中村信次 水中でのナビゲーション感覚. (2013). *心理学ワールド*. 63. 25-26.
- [11] 中村信次 水中ナビゲーション感覚尺度作成の試み. (2018). *日本福祉大学全学教育センター紀要*, 6, 59-67
- [12] Nakamura, S., & Shimojo, S. (1998). Stimulus size and eccentricity in visually induced perception of horizontally translational self-motion. *Perceptual and motor skills*, 87, 659-663.
- [13] Nakamura, S. (2001). The perception of self motion induced by central and peripheral visual stimuli moving in opposite directions. *Japanese Psychological Research*, 43, 113-120.
- [14] Aqua Signage アクアサイネージ  
<http://aquasignage.rockinpool.com/>
- [15] 初鹿デニツク, 長田一馬, 橋本悠希 (2018) 水中で使用可能な有線型 HMD の開発及び基礎的性能の検証. 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 32B-1.
- [16] Palmisano, S., Gillam, B. J., & Blackburn, S. G. (2000). Global-perspective jitter improves vection in central vision. *Perception*, 29, 57-67.
- [17] Nakamura, S. (2010). Additional oscillation can facilitate visually induced self-motion perception: The effects of its coherence and amplitude gradient. *Perception*, 39, 320-329.
- [18] Palmisano, S., Allison, R. S., Kim, J., & Bonato, F. (2011). Simulated viewpoint jitter shakes sensory conflict accounts of vection. *Seeing and perceiving*, 24, 173-200.
- [19] Howard, I. P., Cheung, B. S. K., & Landolt, J. (1987). Influence of vection axis and body posture on visually induced self-rotation and tilt. *Advisory Group for Aerospace Research and Development*, 433, 15-1-15-8.

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP15K13164 の助成により実施した。また、水中視覚刺激装置の試作、試行実験実施に当たっては、株式会社 Rockin'Pool 西川隼矢氏の協力を得た。記して謝意を述べる。