

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

(/)

研究テーマ	泳者の水中聴覚特性を活かした水中音響環境の構築	報告書作成者	仰木裕嗣
研究従事者	仰木裕嗣		
研究目的	水泳中のヒトはおよそ水面表層に位置するが、遊泳中に我々がどのように音を聴き、認識するか？という生理物理現象は未だ明らかにされていない。溺れ防止を含めて泳者への情報伝達やエンターテイメントとしての音響効果を達成するには、この生理物理現象の理解が不可欠である。本研究ではプールを想定しているが、ヒトの水中聴覚生理特性を活かした音響環境の構築と音声による情報伝達手段の適切な手法はどうあるべきか？を追求することを目的とした。泳者は競泳選手を対象として基礎的事実を積みあげることを目指して、従前より取り組んできた水中での水中音聴取、泳ぎながらの水中音聴取における聞こえた際に反応させる実験系で研究を実施した。		

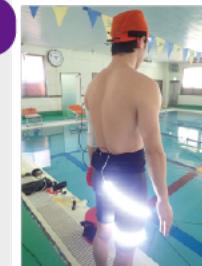
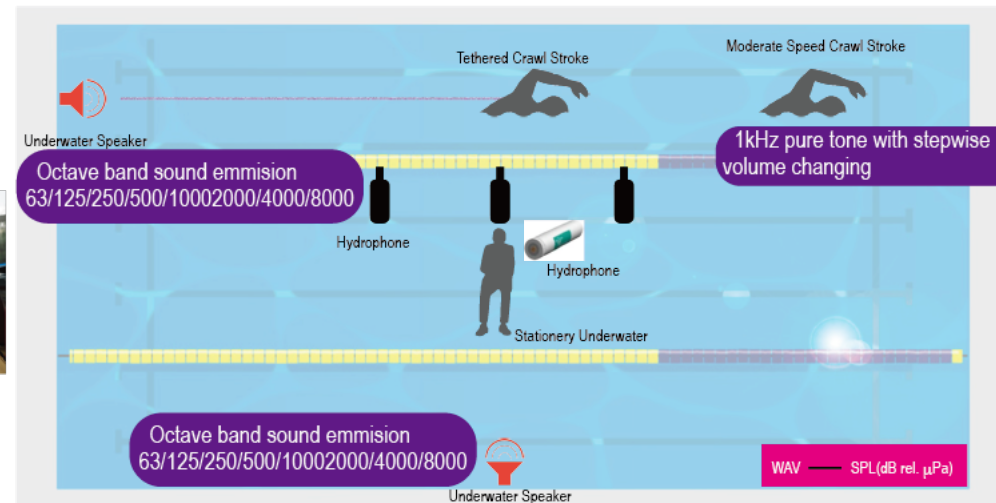
研究内容	本研究助成に申請した研究内容のきっかけは、2016 年リオデジャネイロ、2021 年東京とパラリンピック2大会における視覚障がい水泳選手向けのトレーニング支援用具開発であった。選手団に提供した開発品の中で、泳者が壁に接近したことを検知してアラート音を出す接近検知装置(特許第 6760599)開発の際に、聴覚能に優れていると予想される視覚障がい者に提示した大音量アラートが聴き取れないことがあることに着目し、東京大会後に泳者の水中聴覚に関する研究に着手した(科研費基盤研究(C)課題番号 19K04260/22K04000)。そこで明らかになったことは、ヒトが静止し水面付近に耳を位置する場合でも 500Hz 以下の音の聞き取りが難しく、職業ダイバーに関する研究結果にほぼ一致して 1kHz 近辺で聴取可能最低音圧が小さく、すなわち聞き取りやすいが、泳ぎ始めると 1kHz 以上の高周波音の方が聞き取りやすい。したがって本研究ではこの泳者特有の聴覚能を踏まえた上で、水中で泳者に対してどのように音声を届けることが適切か？という課題に取り組んだ。 課題としては泳者ごとの水中における聴覚能の特性を捉えるために従前より取り組んできたオクターブバンドテストを水中で静止・水表面で泳ぎの状況で行った。実験は 25m 屋内プールを貸切にした状態で、ボイラー・濾過器・空調設備等を切った状態と、全てを稼働させた状態によってまず環境騒音の状態を定量化した。次に従前に我々研究グループが取り組んできた設定同様、ボイラー・濾過器・空調等が稼働した状況下において、(1)スノーケル装着のもとで水中に頭部まで沈み椅子に着座した状態(静止着座)、(2)泳者をゴムチューブでその場に留まらせた状態(テザード泳)、(3)普段の練習と同じように 25m プールを自由に往復する状態(自由泳)の 3 状態での音の聴取実験を実施した。静止着座状態、テザード泳状態では 63Hz から 8kHz までのオクターブバンド音を水中スピーカーによって送出し、泳者はプール中央地点で聴取した。泳者は上肢の強化のために普段トレーニングで使うパドルを手掌に装着し、パドルに防水加工を施した圧力センサタクトイルスイッチを貼付した。泳者が音を認識した時点でこのタクトイルスイッチを押すことで音の聞こえを判断した。静止着座、テザード泳ではタクトイルスイッチ信号は有線で音声信号を収録するレコーダー(RION 社製 SA-A1)に同時記録された。これにより送出音声と同期を行った。自由泳で有線ケーブルによる同期はできないため、水着に装着する防水高輝度 LED テープを用意し、タクトイルスイッチの押下で LED が点灯するようにし、それを水上から視認した際にレコーダーに口頭で音声記録を行い、点灯時刻を送出音声に同期した。 この実験系において泳者が聞こえたことの反応を示した時刻前後の Total SPL(Sound Pressure Level)、オクターブ解析後の周波数別 SPL、時間周波数解析結果(STFT)を検討材料として考察を行った。
------	--

研究のポイント	従前の研究結果から確実に聞こえていると考えられる水中報知音が聞こえなかった、という視覚障がい水泳選手からの訴えには、音が出出されていたことを前提にすれば、「実は音が選手に届いていなかった」、「届いているはずの音を選手が認識しなかった」という 2 つの可能性はある。本研究では泳者の耳元にハイドロフォンを装着し耳元での音も採取し、水中音は届いていたのか？という問題について検証した。届いているはずの音を認識しなかった、という後者の視点については、音のマスキングが存在するのではないかと考えられた。そこで自由泳では水中音に反応した時刻における SPL(Sound Pressure Level)をオクターブ周波数ごとに分解して検討することにした。その結果として泳者が送出音に気づくと考えられる条件が示された。 今回、初めて実現した自由泳条件での実験では、クロール泳で泳ぐ泳者の後方から音が出出された場合には、泳者が聞き取ることはできないことが判明した。この点は大きな発見である。泳者が自分自身の泳ぎで発生させる気泡、多くはバタ足によって生じるとも考えられるが、ストロークの入水時には同様に大きな衝撃音と共に気泡が発生する。これらで発生させた気泡に包まれた状態で泳者は進行していくため、気泡のバリヤーは自身の後方へ位置することになる。したがって、後方からの音が気泡の影響によって大きく減衰することが考えられる。ミネルト共鳴では理論的には 1kHz 帯の音に対して直径約 3.5mm 程度の気泡が最も共鳴しそのエネルギーを減衰させてしまうとされていることから、こうした泡を発生させると音の聞こえが悪くなると考えられる。この気泡の発生は泳ぎのフォームに強く依存することから、実は音の聞こえは泳者のフォームの良し悪しに関係するのではないかと、という示唆が与えられた。今回の研究の大きな発見である。
研究結果	泳者のいない状況での環境騒音レベル(SPL)はプール中央では 89.2dB rel. 1 μ Pa (静寂時 70. 9dB)であった。従前の研究で最小可聴音圧が小さかった 1kHz 純音に対する反応を本報告での事例にすると、環境騒音有りで水中に没し音を聴取した被験者(2 名)は、それぞれ、sub.A=119.2dB, sub.B=126.7dB と環境騒音から 30dB ほどの隔たりで聞こえを報告した。その後のテザード水泳時では(音送出方向：前方から/後方から), sub.A=(132.7/125.2dB), sub.B=(128.0/124.0dB)で反応を示した。極めて遅いリズムでの泳ぎであったことから静止状態とあまり変わらない可聴音圧であったと推察された。自由泳では 25m をインターバルトレーニングで行う程度の努力度で往復したが、往路、すなわち泳者の後方から音が出出される場合は両被験者ともに聞こえることはなかった。これは自身が泳ぎで生み出す気泡によって水中音が減衰するミネルト共鳴が影響していると推察された。その後、ターンのために頭を水没させた瞬間に反応を示し、その後 42m 地点(ターン後 7m)ほどまでの区間で反応を示し続けた。ただし近づけば聞こえるようになる、というわけではないことも興味深い発見であった。この時のオクターブバンド別 SPL を観察するとスピーカーに向かってくる復路においての聞こえが持続するのは、1kHz 帯のパワーが他の周波数帯域よりも優位になりスペクトルで見ても強調される時に限って音に反応していることがわかった。純音に限った実験設定ではあるが、送出された音声周波数パワーが環境騒音と自分自身が泳ぎで生み出す音に比較して、僅かに優位になれば泳者は聞き取りができるということが示唆された。

今後の課題	泳者の聞き取りやすい周波数帯域が、一旦泳ぎ始めると高い周波数帯へ変化することはこれまでも観測されていたが、本研究内の実験を通してこれには個体差が大きいこともわかってきた。こうした個体差をより多くの被験者で確認することは必要である。自由泳中に後方からの音は聞こえず、前方からの音にしか反応できないことは、最も聞き取りやすいとされる 1kHz の純音のみでしか実験を実施できなかったが、1kHz 前後の周波数帯での検証も必要である。温水プールにおいてはボイラー・濾過器・空調設備が常に稼働しているが、構造的にプール壁面から伝わるこれらのパワーは大きく、こうした環境騒音を減らす目的で、エアシャワーを設けたが、予算の都合上保有のエアコンプレッサーを用いた実験では気泡を一気に放出することしかできなかったため、泳者が泳いでいる最中に継続して音のカーテンを実現することが叶わなかった。今後は曝気ブローと散気フィルタ等を用いた手法で実現したいと考えている。また、音響の専門家より、「本来は陸上においてオーディオメータを用いた個人ごとの聴力検査をすべきである」という指摘を受けた。これも今後の課題であると認識している。また、水中では骨導によってのみ音が聴こえるという事実から、果たして耳元だけの観測で良いのか？という疑問はさらに残されている。
--------------	---



耳元ハイドロフォン



反応確認用 LED ライト



静止着座



テザード泳



実験概要図:泳者には、「静止着座」,「テザード泳」,「自由泳」の3条件で音の聴取を行わせた。「静止着座」,「テザード泳」については63Hz-8kHzまでのオクターブバンド周波数の純音を聴かせた。自由泳については1kHz純音の条件のみで聴取実験を実施した