



FRP 製プール「氷夢 21」での 水中音響解析

Analysis of Underwater Acoustics in the FRP Pool "Swim 21"

山田 潤 Jun Yamada
●研究開発センター コア技術研究室

Abstract

Underwater acoustics is an important element for synchronized swimming. And, since a temporary installation FRP pool was to be used for the first time ever for this competition at the World Swimming Championships in Fukuoka, we were expected to produce a pool with acoustics equal or superior to that of an RC pool. In the World Swimming Championships the effect of the pool walls was eliminated as much as possible by positioning the underwater speakers in the center of the pool. We also developed a new underwater acoustics system that employs an actuator. With this system we achieved results in the maintenance of sound volume, sound quality and evenness of sound distribution that were superior to conventional systems. By using this system in combination with the underwater speakers, we were able to provide high-quality underwater acoustics.

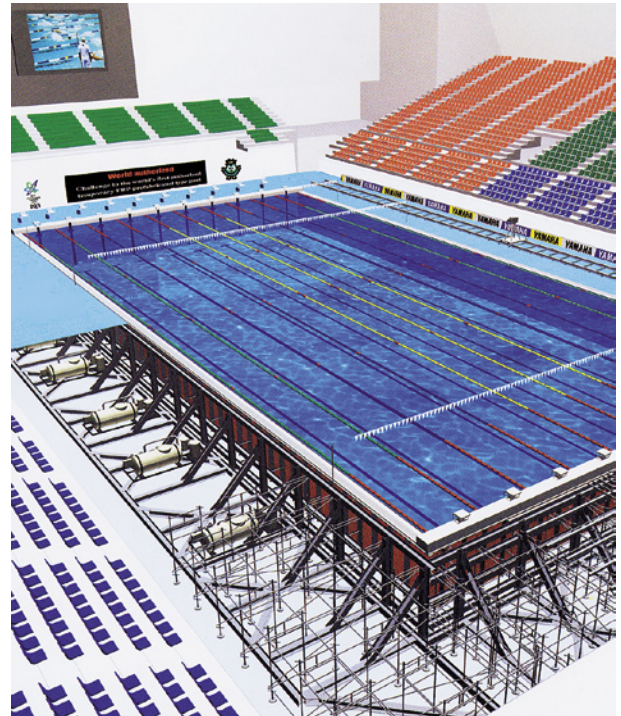
要旨

第9回世界水泳選手権大会（2001年7月福岡、以下世界水泳）前に、FRPプールとコンクリートプール（RCプール）の水中音響の違いが指摘された。シンクロナイズドスイミングは、音楽に合わせて演技し、その美しさを競うスポーツであり、競技中、選手は空中および水中に流れる音楽を聞いてタイミングを計っている。したがって、水中音響は競技に影響を与える重要な要素であり、初めての仮設FRPプールによる開催にあたって、RCプールと同等以上の環境が求められた。そこで、プールの水中音響計測を実施し、現象を把握した。結果、音源自体の問題（水中スピーカーの出力、周波数特性）、プール材質と音源設置場所による影響、遮断周波数の影響があることが分かった。世界水泳では、壁の影響を避けるため、水中スピーカーをプール中央へ配置した。

また、アクチュエータ駆動の新たな水中音響システムを開発した。新音響システムは、音量の確保、音質、音場分布の均一性において既存のシステムをしのぐ性能が得られた。世界水泳では、水中スピーカーと共に使用することにより、高品質の水中音響を提供することができた。

1 はじめに

国際水泳連盟が主催する世界水泳は 2001 年より隔年で開催されるようになった。以前は 4 年に 1 度の開催であった。大会サイクルを短くすることにより、水泳への関心を高め、選手のレベルをあげることが狙いである。しかし、開催のためのプール建設費やその後の維持費などの経費がかかり問題となっている。これを仮設プールで行うことができれば、大幅な経費削減が期待され、発展途上国での開催の可能性も出てくる。2001 年 7 月の福岡の大会では当社の FRP プール(図 1) を用いて行われ、そのモデルケースとして位置付けられていた。当社はメインプール、ウォームアッププール、水球プールを受注し、メインプールでは競泳とシンクロナイズドスイミング(以下シンクロ競技)が行われた。しかし、大会前、シンクロ関係者より「FRP プールは水中音がコンクリートプールと違う」との情報提供があった。世界中が注目する「世界水泳」において、水中音響の悪さから競技不成立は避けなくてはならない状況であり、水中音響特性の改善を行う必要がでてきた。そこで、プールの水中音響特性を計測し、現象を把握し対策を行った。



水中音響計測

第 9 回世界水泳選手権福岡 2001
開催：マリンメッセ福岡、他
主催：国際水泳連盟 (FINA)
期間：2001 年 7 月 16 日～7 月 29 日
FRP 製仮設プール
工期：設置 5 日、撤去 1 日

図 1 仮設 FRP プール(世界水泳メインプール)



一般的な
FRP 製プールでの
音を聞く



一般的な
コンクリート製プールでの
音を聞く

2 FRP プール水中音響特性

水中音の計測には特殊なマイクロホンである水中マイクを使用した。この水中マイクから出力される信号を通常の音と同様に分析した。ただし、音圧レベルの計算に空中音での基準 ($20 \mu \text{Pa}$) を使用しているため、値が大きくなるが聴感上は 120dB でも水中では程よい大きさで聞こえる。(水中音の最小可聴音の計測が望まれる。)

水中音の出力には水中スピーカーを使用した。大きさは直径 200mm、厚さ 60mm、重さ 4.5kg の円盤型のものである。このスピーカーに、プールの周波数特性を計測するために、ピンクノイズの信号を入力した(図 2)。

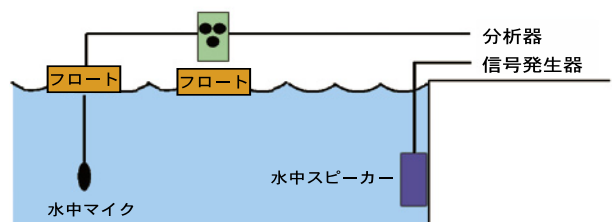


図 2 水中音響計測

FRP プールでの周波数特性の実測結果を図3に示す。水中スピーカーの位置はプール壁面および壁面から1mに設置し、水中マイクはプールサイドから3.5mの位置に設置した。結果、スピーカーをプール壁面に置いた場合は、500Hz以下の周波数の音が減衰していることが分かった。1kHz以上の高周波ではスピーカーの位置によらず、周波数特性の乱れがあり、聴感上でも歪を確認できた。

周波数特性の乱れは、場所によらないため、スピーカー自体の特性と考えられる。以下に中低周波の減衰について検討する。

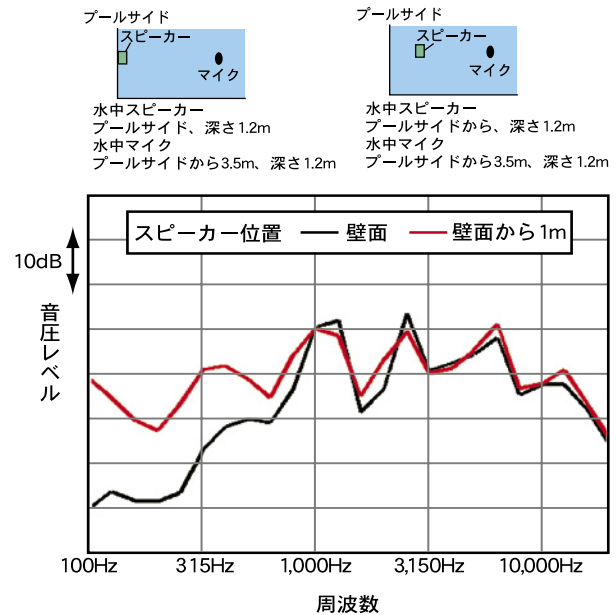


図3 FRP プール水中音響周波数特性

3 500Hz以下の音の減衰

3.1 壁面からのスピーカーの距離

FRPの音響インピーダンスは水と同程度であるため、FRP壁と空気の境で反射している。したがって、軟壁での反射であり、音圧の位相は反転して反射している。図4のようにプール壁面の外側に負の音源を置いて考えると分かり易い（鏡像原理）。

スピーカーがプール壁にある場合 ($l=0$)、位相反転した音源が直ぐ近くにあるため、スピーカーから出た音と反射音が打ち消しあい、音が小さくなってしまふ。特に波長の長い低周波の音が打ち消され易い。スピーカーが壁から離れると、鏡像音源、スピーカー間の距離と半波長が等しくなる周波数 ($\lambda=4l$) で、音が大きくなる。 $l=1.0\text{m}$ の場合では、 $\lambda=4.0\text{m}$ となり、水中の音速を1,500m/sとすると、音が大きくなる周波数は375Hzになる。(その付近の周波数も大きくなる。)

シンクロ競技の練習などでは、水中スピーカーをプールサイドからロープなどで吊り下げて、使用している。RCプールでは硬壁での反射であり、位相が逆転しないため、壁面設置で音が小さくなることはない。

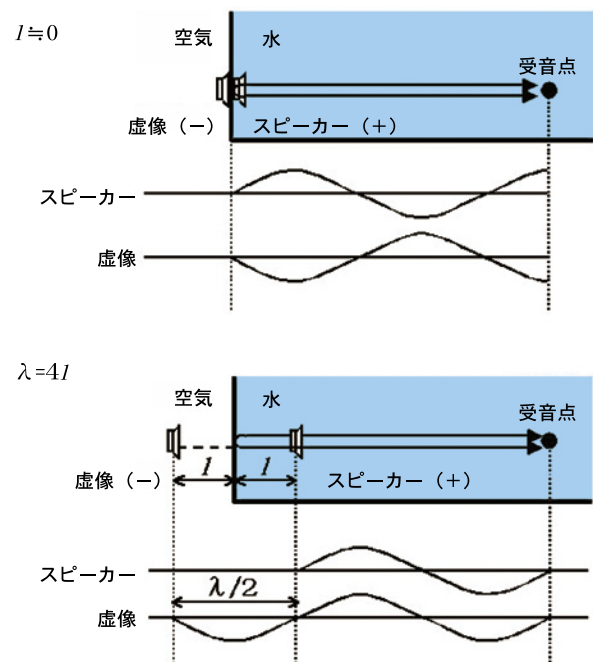


図4 FRP プール壁での反射

3.2 スピーカーの深さ

水面においても負の反射が起こる。スピーカーの深さ d が及ぼす影響は、スピーカーの位置の影響と同様である。 $r \doteq r'$ の時、すなわち、水面近くにスピーカーを置くと音が小さくなり、 r と r' の差が $\lambda/2$ のとき音が大きくなる。

また、受音点が水面付近にある場合も、 $r \doteq r'$ となり、直接波と反射波が打ち消しあって、音が小さくなる。これは、スピーカーの位置に関係なく、水面付近はどこでも音が小さいということである。

さらに、反射は上下で無数に行われ、したがって虚像も上下で無数にあり、これらの総和が受音点の音となる。この音には遮断周波数 (f_0) がある。水深 3m、音速 1,500m/s のときの遮断周波数は 125Hz になる。125Hz 以下の周波数の音には減衰があり、距離が離れるほど減衰が大きくなる (図 5)。

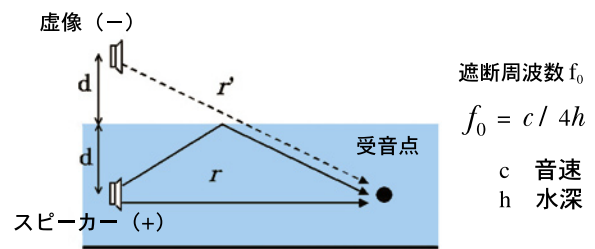


図 5 水面での反射

4 世界水泳での対策

4.1 スピーカー設置位置

鏡像現象の影響を減らすためには、FRP 壁面より離し、ある程度の深さに水中スピーカーを設置する必要がある。ただし、競技に支障が無い位置に設置しなければならない。世界水泳のメインプールの大きさを図 6 に示す。このうち、スタート台から 30m の部分をシンクロ競技の競技エリアとして使用された。実際の水中スピーカーの設置は音響設置業者が担当しており、これらを踏まえて、プール中央である、競技エリアの端の水底に 2 つの水中スピーカーが設置された。

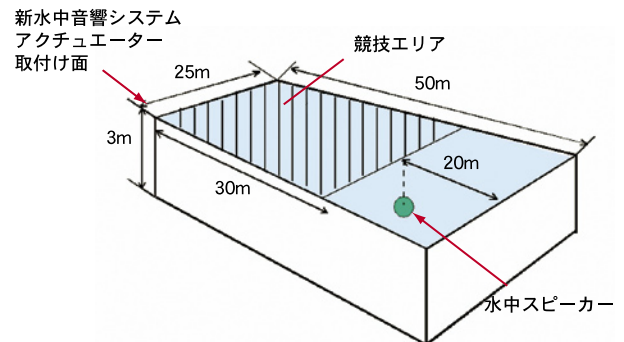


図 6 世界水泳 FRP プール

4.2 新水中音響システム

水中スピーカーでは、周波数特性に歪があり、また、FRP プールでは壁面での反射の影響を受けてしまう。そこで、開発された新しい水中音源は、プール壁面自体を振動させスピーカーとしてしまうシステムである。スタート飛び込み台ユニットの背面に 48 個のアクチュエータを埋め込んだ。アクチュエータの取付け状況を図 7 に示す。アクチュエータの取付けは、放射効率を高めるために、パネルの芯材

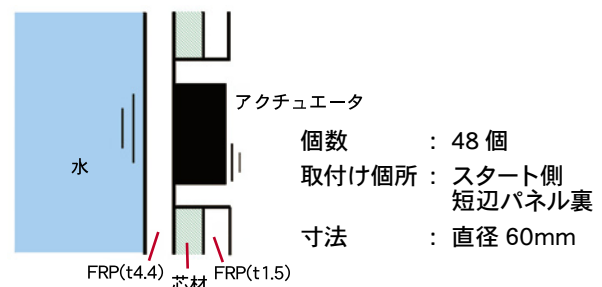


図 7 FRP プールへのアクチュエータ取付け

を除去し、内側の FRP 板に直付けした。

壁面全体から放射されるため、平面波として伝播し、音圧が場所によらない、均一な音場が得られる。また、FRP 壁面での逆位相の反射波の影響を避けることができる。

図 8 に新水中音響システムの周波数特性を示す。水中スピーカーと比較して、1kHz 以上はフラットな特性である。500Hz 以上では距離によらず、レベルは一定である。1kHz 以上は場所、周波数によらず均一な特性を得られた。しかし、300Hz 以下の周波数では音のレベルが低減していた。浅海による影響なのか、要因は明確になっていない。

世界水泳では水中スピーカーと新音響システムの両方を用いて競技が行われた。それにより、高品質な水中音響を提供することができ、選手からのクレームも無く好評で、無事に競技を終えることができた。

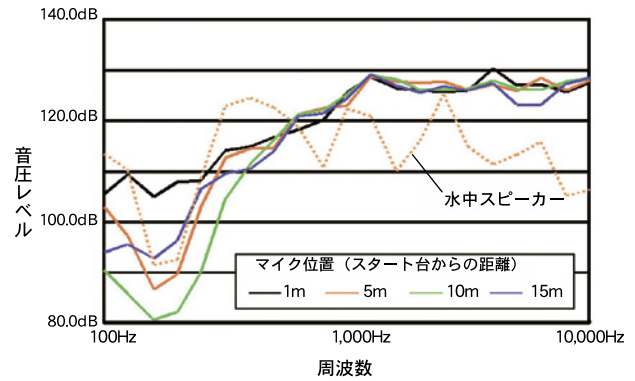


図 8 新水中音響システム周波数特性



FRP 製プール「水夢 21」での
音を聞く

5 おわりに

FRP プールでの水中音響計測を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) FRP プールにおいて、水中スピーカーの位置により、直接波と反射波が干渉して打ち消しあい、音が小さくなることがある。特に低周波では顕著となる。FRP プールではスピーカーの壁面設置を避ける必要がある。
- (2) 水中スピーカー自体の周波数特性がフラットではない。音響システムやスピーカーの改善が必要である。
- (3) プール特有の問題（遮断周波数など）があることが分かった。

また、既存のシステムより周波数や場所による音圧分布などの特性が優れた、新しい水中音響システムを開発した。

■参考文献 / 引用文献

- 1) 渡辺隆行他, シンクロナイズドスイミングを対象とした水中音場特性と評価, 日本音響学会 2002 年 3 月
- 2) 渡辺隆行他, シンクロナイズドスイミングを対象とした新音響システム, 日本音響学会 2002 年 3 月
- 3) (社) 計量管理協会編集 騒音と振動の計測 コロナ社
- 4) 音響工学概論 日刊工業新聞社