

定常突入水膜流による気泡の間欠的取り込みと音の発生

学位論文内容の要旨

静止した水面に水流が突入する流れは、浄水場のエアレーションプールや配水管内部の環状流に見られ、そこから発生する騒音が問題となっている。配水管全体を吸音材で覆うといった配慮がなされている場合もあるが、この騒音の周波数は広範囲に分布しているため、全ての周波数帯で十分に吸音することは難しく、特に低い周波数の音を減衰させることは困難である。そのため、発生した音を吸音するといった従来の技術から、音が発生しないように流れを制御する技術へと発想を転換していくことが重要である。

この音は、水中に取り込まれた気泡が振動することによって発生している。しかし、音源である気泡がどのようにして水中に取り込まれるのか、取り込まれた気泡の振動が騒音の発生とどのように関係しているのかは明らかにされておらず、静穏化を達成するために必要な情報は十分に得られていない。

本研究の目的は、水中に取り込まれる気泡群と発生する音との関係、気泡の取り込み機構を明らかにすることである。これらの結果に基づき、流体力学的な立場から、気泡の取り込みによって発生する騒音の減音対策を提案する。

気泡の取り込みにかかわる要素を取り出した流れとして、垂直壁に沿う水膜流が静止水面に突入する流れを取り上げた。所期の目的を達成するため、気泡の取り込み過程と連行気泡群の観察、発生音の測定および周波数解析、突入水膜流の速度測定を行った。その結果、気泡が取り込まれる際に音圧変動の振幅が最大になること、静止水面の近傍に位置する気泡が主な音源になっていることを明らかにした。また、突入水膜流の速度変動が気泡の取り込みを支配していること、水膜流が層流状態の場合には気泡が取り込まれないことを示した。以上の結果に基づき、気泡の取り込みによって発生する騒音を低減するためには、水面に突入する水流の乱れを抑制することが重要であることを提言した。

本論文は全6章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論であり、気泡から発生する音および気泡の取り込みに関する従来の研究を総括し、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では実験装置と実験方法について記述した。実験装置は水膜流を噴出するためのノズルと静止水面の水位を一定に保つためのオーバーフロー型タンクから構成されており、タンク内には水中マイクロフォンが設置されている。気泡の取り込み過程および水中に取り込まれた気泡群の観察には高速度ビデオカメラを用いた。また、突入水膜流内部の速度変動はレーザ流速計を用いて測定した。

第3章では突入水膜流の乱流遷移や流れの相似性といった基本特性について記述した。水膜流内部の速度変動を測定することで平均速度分布および乱れ強さの分布を求めた。その結果、水膜流水面近傍の流速は下流へ移動するほど増加し、その厚さは薄くなること、この特徴が開水路の流れに見られる特徴と一致していることを示した。また、ノズル出口からの距離 x を代表長さとするレイノルズ数 Re_x を用いると、本実験条件における乱流遷移レイノルズ数は $0.5 \times 10^4 \leq Re_x \leq 2.0 \times 10^4$ となることを明らかにした。さらに水膜流の水面形状を可視化撮影し、水面波の発生条件と波の位相速度を示した。

第4章では気泡の取り込み過程および取り込みにかかわる突入水膜流の乱れの特徴について記述した。高速度ビデオカメラを用いた気泡の取り込み過程の観察から、静止水面の一部が変形することで気柱が形成され、その先端が気柱から離脱することによって気泡として取り込まれること、水膜流の突入は連続的であるにもかかわらず、気泡は間欠的に取り込まれることを明らかにした。また、突入水膜流内部の速度変動を測定し、平均流速よりも1割程度増速した流れが突入する場合に気泡の取り込みが起こることを示した。

第5章では気泡から発生する音の特徴について記述した。気泡取り込み過程の観察と気泡音の測定を同時に行い、音圧変動の振幅は気泡が取り込まれた直後に最大になること、水面近傍における気泡が主な音源であることを示した。ひとつの気泡が取り込まれる際に発生する音の振動数と音圧の減衰率を測定し、これらの値が気泡の膨張・収縮の変形モードにおける固有振動数および振幅の減衰率と一致することを示した。また、いくつもの気泡が群の状態で水中に取り込まれる場合に発生する音の周波数は、ひとつの気泡から発生する音の周波数の1/2程度になること、このような低周波シフトが気泡の直径および気泡間距離によって支配されていることを明らかにした。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 川 重 雄
副 査 教 授 井 上 良 紀
副 査 教 授 武 田 靖
副 査 助 教 授 矢 野 猛

学 位 論 文 題 名

定常突入水膜流による気泡の間欠的取り込みと音の発生

静止した水面に水流が突入する流れは、浄水場のエアレーションプールや配水管内部の環状流に見られ、水流の突入によって水中に取り込まれた気泡から発生する騒音が問題となっている。配水管全体を吸音材で覆うといった従来の減音対策では、幅広い周波数からなる気泡音を十分に吸音することは困難であり、この騒音の静穏化は達成できていない。

このような背景の下に、本論文は、気泡の取り込みによる騒音の発生機構の解明を目的としてなされたものである。気泡の取り込みにかかわる本質的な要素を含む流れとして、垂直壁に沿う水膜流が静止水面に突入する流れを取り上げ、高速度ビデオカメラを用いた観察により気泡が水中に取り込まれる機構を明らかにするとともに、取り込まれた気泡から発生する音の特性をマイクロフォンによる音圧測定により詳細に調べている。さらに、これらの結果に基づき、気泡の取り込みによって発生する騒音の減音対策を流体力学的な立場から提案している。本論文で得られた成果を要約すると次のようになる。

- (1) 水膜流の突入によって、静止した水面の一部が変形することで気柱が形成され、その先端が離脱することによって気泡として取り込まれる。水流の突入は連続的であるにもかかわらず、気泡の取り込みは間欠的である。このような気泡の取り込みは、静止水面に突入する水流内部の乱れの状態に支配され、平均流速よりも1割ほど増速された流れが静止水面に突入することで気泡が取り込まれる。そのため、水流の突入速度に大きな変動がない層流状態では気泡は取り込まれない。
- (2) 水中に気泡が取り込まれた直後に音圧変動の振幅が最大になる。この音圧変動の振幅はわずか数ミリ秒で暗騒音の程度まで減衰するため、静止水面の近傍に位置する気泡が主たる音源である。水中に取り込まれた気泡の変形は複雑であるにもかかわらず、

半径方向に膨張・収縮する変形の成分が音の発生に強く寄与しており、この振動成分の振幅は気泡半径の 1/4000 程度と極めて小さい。

- (3) いくつもの気泡が密集した群の状態水中に取り込まれる際に発生する音の周波数は、単独で取り込まれる気泡から発生する音の周波数の 1/2 程度になる。この結果は既存の振動解析の結果と一致し、密集した気泡群から発生する音の周波数が、気泡の直径および隣り合う気泡間の距離によって支配されることを実験により検証したものである。

以上の結果に基づき、気泡の取り込みによって発生する音を低減するためには、水面に突入する水流の乱れを抑制することが重要であることを指摘している。

これを要するに、著者は、水流の突入によって水中に取り込まれた気泡から発生する騒音に関して、音源である気泡の取り込み機構と気泡から発生する音の特性を明らかにするとともに、騒音の減音対策を提案している。このことは、気泡の取り込みによる騒音問題の解決、さらには流体力学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。