



## 圧力波による流れ診断

板 東 潔\*

液体を作動流体とする流体機械たとえばポンプや水車を運転した場合、流体機械の入口と出口における特性値たとえば全圧、静圧を測定することにより、その流体機械に対する性能が求められる。この性能が正常で現実の要求を満足するものであれば申し分ないが、そうでない場合には流体機械内部の流れに特異な現象が起きている場合が多い。特異な現象にはキャビテーション、旋回失速、流れの剝離や逆流などが挙げられる。流体機械の性能を正常なものとし、さらに性能を向上させるためにはこれらの特異現象を制御することが重要である。そのためには特異現象を含む流れの状態を正確に把握することが必要である。流れの状態を知るためには、ケーシングの数箇所に穴を空けて、ピトー管や圧力変換器などを用いて計測を行う。しかし流れのエネルギーと機械的エネルギーを変換する作動部すなわち羽根車は回転運動しているため、この方法ではケーシング付近のデータしか得られないという欠点がある。これを回避するために、ケーシングの一部をアクリルなど透明な材質のものとし観察するか、またはレーザー流速計を用いる方法がある。しかし流れの可視化による観察では精密な計測は不可能である。またレーザー流速計により得られるデータは基本的に点情報であり、特異現象が非常定であれば、現象全体の瞬時値を得ることは困難である。

そこでこのような非定常な特異現象全体の瞬時値を得る方法として、音波または超音波を用いることが考えられる。すなわち音は伝播する媒質の音響インピーダンスが著しく異なると、その境界面でほとんど反射する。さて上述の特異現象のうち音響インピーダンスが著しく異なる

現象にはキャビテーションがあり、また流体中に異物が混入した場合もそうである。したがって流体機械内部にキャビティあるいは異物が存在すると、音はキャビティ等の表面で反射を起こし、それらのものが存在しなかった時と比べて異なった応答を示す。そこで流体機械の流路壁表面または内部で羽根車から離れた位置の数点より音を発し、その受信音を壁表面または内部の数点で圧力変動波形として計測し、キャビティ等が存在しない時の圧力変動波形との差異より、キャビティ等の位置や形状を決定する。このような手法は一般に逆解析と呼ばれるが、音を用いると次のような特長がある。音速は水中で約1400m/sであり非常に高速であるので、送信から受信までの時間差が極めて短かく、非定常現象に対する時間分解能が高い。さらに機械内の流動速度を零とする近似を用いることができる。無指向性の音波や指向性の低い超音波を用いることによって、広い空間に対する同定が可能となる。

以上に述べた方法を用いて流体機械内のキャビテーションや異物の同定を行うための基礎研究として、以下に示すような数値シミュレーションを行った。伝播する圧力波を音波とすると基礎式は非同次項をもつ波動方程式となるが、音源を面または点状にするとグリーンの定理よりこの方程式を体積積分項のない境界面積分方程式に変換することができる。この式はキルヒホッフの方程式として知られているが、このような境界要素法を用いると、数値計算の時に境界面だけを要素(パネル)分割すればよく、キャビテーション等の表面形状を未知量とする逆解析に対しては非常に有効な方法であることがわかる。

図1は計算例として用いた直方体領域とその内部の球形キャビティおよび三つの点音源を示

\*板東 潔 (Kiyoshi BANDO), 大阪大学工学部機械工学科, 講師, 工学博士, 流体工学

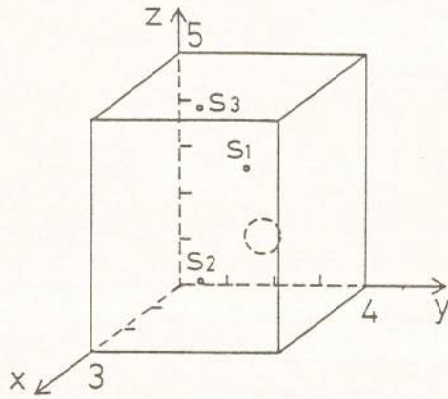


図1 計算領域内のキャビティと音源

す。直方体表面は94枚、球面は24枚のパネルに分割している。まずキャビティを固定して音源からパルス状の音波を発生し、直方体表面パネル上での圧力変動波形を求める。以上は正解の順解析に相当する。次にキャビティは球形であることを指定し、その中心位置  $(x, y, z)$  と半径  $r$  を未知数として、逆解析を以下のように行う。 $x, y, z$  と  $r$  を仮定して順解析を行い、直方体表面パネル上での圧力変動波形を求める。ただしここではキャビティが正しく置かれていないので、求まる圧力変動波形は正解の圧力変動波形とは異なったものとなる。そこで新たに  $x, y, z$  と  $r$  を仮定して順解析を行って圧力変動波形を求め、正解のそれとの差の二乗平均が十分小さくなるまで計算を反復する。図2はキャビティ

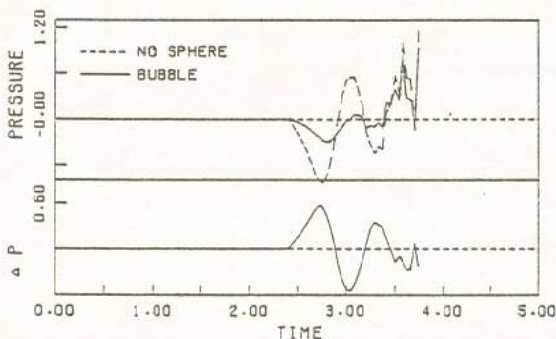


図2 観測パネル上での圧力変動波形

がある場合（実線）とない場合（破線）の圧力変動波形を示す。下段は両者の差のみを示す。ただしこの図は音源が  $S_1$  であり、観測パネルはキャビティの影響を最も強く受けるパネル、すなわち音源  $S_1$  とキャビティ中心を結ぶ直線が境界面と交わる点に最も近いパネルに対する結果である。図3は逆解析によるキャビティの同定結果であり、実線は実際のキャビティ、破線は計算によって求めたキャビティである。

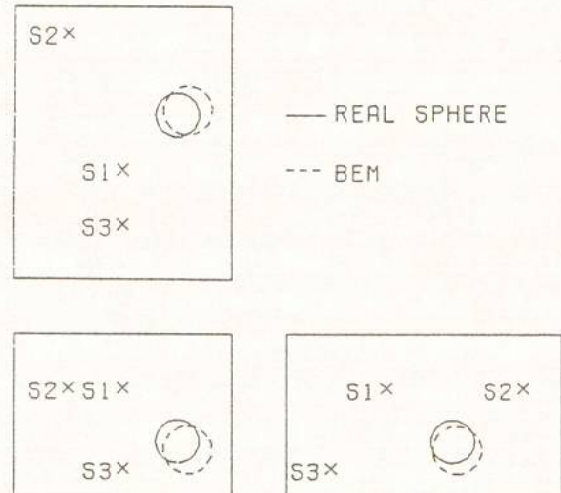


図3 逆解析による同定結果

図3よりこの解法の逆解析はかなり正確な結果を与えることはわかるが、順解析が信頼性のある解であるかどうかはまだ確認できない。そこでキャビティを金属球に置き換えた計算と同一の条件で実験を行ったが、順解析の計算結果と実験結果の一致は良好でないことが明らかになった。実験ではパルス波を水中放電によって起こしているが、この圧力波は計算で仮定した粘性のない音波ではなく、減衰と拡散を考慮した超音波と考えなければならないようである。

現在はそのような超音波を仮定した研究を進めているが、人体の超音波診断や金属の非破壊検査とは異なり、検査領域すなわち羽根間流路が高速運動するところに大きな障害がある。しかし超音波を用いた流れ診断技術は、高速大容量の電子計測システムの進歩とともに、近い将来実用化されるであろうと考えている。

終わりに、本稿執筆をお勧め下さいました大阪大学工学部三宅裕教授に感謝します。