剛球または水滴の水面への落下および水流により発生する音の研究* (第2報, 水流の場合)

森 康夫**, 水上 雅人***, 武士俣 健†

Study of Sound Generation by Rigid Spheres and Droplets falling on a Water Surface and by Water Flow in Tubes (2nd Report, Sound Generation by Water Flow in Tubes)

Yasuo MORI, Masato MIZUKAMI, and Takeshi BUSIMATA

The aim of this paper is to report experimental results of sound generated by water flow such as in a washbasin, curved tube or vertical tube. First, it is made clear that the main sound generated at the outlet of the washbasin provided with the vertical outflow pipe at the bottom is caused by an acoustically resonating cavity formed in the outflow pipe by surface tension and that the tisy sound in a bend tube connected with the outflow pipe of washbasin is caused when the bubble flow strikes the tube inside wall and results in sound generation. In case of the vertical elastic tube, sound is generated by the elastically bending motion of the tube caused by the unsteady change of the momentum of water film along the inside of the tube. Lastly, based on the results obtained above, a method to control sound generated in the vertical tube is proposed.

Key Words: Sound Generated By Water Flow, Washbasin Outflow, Curved Tube Flow, Vertical Tube Flow

1. 緒 言

剛球, 水滴および水の流れが原因となって発生する音のうち, 第1報においては, 周囲の空間が広く開放されている場合にはナイロン球が水面に落下するとき, および水滴が水平な剛体面および水面に衝突するときに発する音の実験的研究結果につき報告した。すなわち第1報においては主として開放系の場合における剛球, 水滴の衝突音を中心として議論した⁽¹⁾。

本第2報においては主に閉じた系である管内を流れる水が発する音についての研究結果について報告する。管内の水流の発する音といっても当然なことながら, 水そのものの中を伝わる波により発する音波は対象とならない。水の流れと空気との相関により生ずる空気の粗密波の生成とこれがもととなり周囲に伝はん音波, および水流を保持する管の弾性振動に起因する音を対象とする。したがって水の流れる管の入口, 出口における水流と空気との相互干渉と, これに関係を与える流体力学的状態, 管の材料, 管が直管か曲り

管か, 垂直管か, あるいは水中に気泡が存在するか, など多くの種類の条件により, 音の発生原因も違っており, また閉じた系であるので, 気泡と管の共鳴状態も考慮する。また本報では実際の問題として部屋の手洗槽や, ホテルの他の部屋で水を使用するときに聞こえてくる音の発生原因, できればそれらを一種の騒音として, 水流により発せられる種々の音の発生原因の研究を目的とし, その研究結果について報告する。これらの結果をもとに将来はそれらの音を騒音として制御する方法にも発展しうる資料を提供する。

上述したように管内の水流に伴い発生する音の原因を考え, 次の順序で報告する。まず垂直管に流入する部分での発生音, ついで垂直管の底部に曲り管がつながれている場合につき述べる。最後に垂直管の内面に沿い流れる水により発生する音と管内の空気柱との共鳴による音などについての実験結果とその検討結果について報告する。

2. 記 号

D : 円管またはノズルの直径

f : 周波数

l : 円管の長さ

Q : 流量

* 昭和61年10月25日 山梨地方講演会において講演, 原稿受付 昭和61年3月27日。

** 正員, 電気通信大学 (〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。

*** 電気通信大学。

† 電気通信大学。

3. 管流入部の発生音の特性

図1(a)に鉛直円管入口部に流入する場合の実験装置を、(b)には垂直円管の共鳴振動の測定に用いた装置の概略図を示してある。(a)図の破線の部分はグラスウールを内面に約30 mmの厚さに吸音材として取付けた吸音室であり、循環ポンプ等はこの外に設置してある。上部正方形タンクの水面を一定に保つためにオーバーフロー管が取付けてあり、またこの入口でタンク槽上部の空間が空気共鳴室にならないように側壁はほとんど水面と同じ高さにしてある。(b)図はこのタンクとこの水溜(リザーバ)の間にアクリル製の直径50 mm、厚さ3 mmの円管を取付け、その円管に加速度計(acc. meter)を取付けて、水流による円管の弾性振動が測定できるようにしてあり、その詳細は5章で論ずる。

まず(a)図の装置を用いて図2に示すような各種の水流の形について実験を、それぞれの場合の音圧の測定と流れの観測により行った。

図1の(a)に示した装置のタンクの底の中央に設けた流出口の径と形、流量を変えて実験をし、音波を発生する条件を求めた。実験した流れの模様の代表的なものを図2に示してある。(a)は流量が非常にわずかで、孔径も小さく、表面張力で孔をおおう液膜が生じ、次第に中央の液膜が厚くなり最後に膜は破れ、水滴が落下する。このときに非常に小さな液膜の破壊音を発する。(b)は流量が(a)のよりやや大きい場合で流れ模様は(a)と異なり定常的に見え、中央に空洞がみられる。この場合が図2の四つのうちで最も大きな音を発する。

(c)はさらに流量が大きい場合で、中央に小さな凹部が生ずる場合もあるが音の原因にはほとんどならない。

(d)は上記三つの場合と異なり中央の孔にふれないように小さなノズルから水流を落下させるようにしたものであり、水流による空気の付随流も考えられるがほとんど音は観測されなかった。したがって最も強い音を発生する(b)の場合について詳しく研究し、その結果について述べる。

(b)図の状態をさらに詳細に述べると、水が孔より環状になって流下するが、少し下部で表面張力のためくびれた状態に移行し、中央に円すい状の空洞ができる。第1報では乾いた剛球が水中を降下するときその後発生する柱状の空気の部分を気柱と呼んだ。表面張力が現象に大きく関係することは気柱と同様であるが、ここで論ずる場合は、水流があると同時に、そ

の形状が時間平均的には同じであるが、後述するように水流量のわずかな変化で、瞬間的な形状が変化しているのを、本報では空洞と呼ぶことにした。空洞のくびれた部分がかなり早く上下、左右に移動していることが観測され、このためにこの空洞の共鳴音が発生すると考えられる。

図2について説明したようにタンクの底の孔径が与えられたとき、(b)のくびれが生ずる界面流量は流量を増して行った場合と減少して行った場合で異なり、その実験結果を図3にそれぞれ(i)、(ii)の曲線で示してある。(i)の限界は管の周りの水膜が一樣な厚さでなくこのため環状流の下端がくびれてこないことによる。(ii)の限界はくびれの下端がほとんど水平膜になるまで表面張力の効果で切れず、空洞が保たれることによる。(i)と(ii)の限界の原因が異なるために、両線間に幅がある。

次に(b)図の空洞による発生音の性能、現象を解明するため次に述べるいくつかの実験を行った。図1(a)のタンクにおける空気の容積は音響共鳴特性を持つため、タンクの側壁の高さを水深と同じにし、空気容積がないようにした。また空洞の体積を変えるために孔の下部に孔と同じ内径を持つ長さ l の管を取付けた実験を行った。その結果の一例として $D=22$ mmの孔に $l=65$ mmと138 mmの管を取付け、流量4 L/

図1 管入口水流による発生音実験装置

図2 水槽などからの水流と音の生成

minの結果を図4に示す。 $l=110$ mmのものも実験したが、ピークの周波数は0.8 kHzであった。最大のピーク値の周波数は空洞の共鳴周波数であり、それより高い周波数の小さなピークは後で述べるようにくびれの下端が振動するための高周波数成分に対応している。この結果から、孔の下部に取付けた管が長くなると、管にそい水はしばらく下降し、やがて表面張力のため環状流がくびれ、長い空洞を形成し、管長と共に空洞の長さが長くなり共鳴周波数が低下すると思われる。この円すい形空洞部の共鳴周波数を理論的に計算することは形状が複雑で容易でないので実験的に求めた。すなわち図5に示すような空洞の形状を図2(b)のタンクおよびその下の管を透明なアクリルで作し、空洞の寸法をビデオレコーダの観測結果より求めた。次いで無音室でマイクロフォンとスピーカを対向させた状態で較正し、図5の空洞の周波数特性を求めたものが図6である。空洞の共鳴周波数は1 kHzで図4(a)の結果とよく一致していることがわかった。この結果図2(b)のような水流の発する音は空洞による共鳴音であることが明らかとなった。

また図2(b)で図4(a)の1 kHzより高い周波数の山が、くびれた位置の上下、左右変動によることを証明するため、図7に示すように、くびれの位置に20 mmの球を置いてくさびの位置が動かないようにしたところ、図6とほとんど同じ周波数特性が得られ

た。したがって1 kHz以上のピーク等はくびれの位置によるものである。この周波数の特性はタンクの孔の下に取付けた管の弾性あるいは管内空気柱との共鳴、またはタンクの側壁を高くし、タンクに空気共鳴室を持たせるようにすると強い音の源となる可能性がある。

図2(b)の場合のタンクの側壁の高さを250 mmにして、上方よりスピーカで可変周波数の音を送り周波数特性を求めた。流量は図4(a)と同じく4 L/minで、タンクの下に取付けた管の長さも同じである。この場合には、0.3 kHzのところに新しいピークが観測された。そこで水を流さない状態で上記と同じ方法でタンクの空気室の周波数特性を求めたところ0.29 kHzにのみピークを持つ特性が得られた。これらより図8の0.3 kHzのピークは、タンクの底の水の層の厚さの影響を考えると水のない場合の0.29 kHzとよく一致しているといつてよく、タンクの上部に空気槽があるときは、その共鳴音が、タンクの下に取付けた管中の空洞より発した音により励起されたものと考えてよい。このような音は洗面所などの手洗槽に水を流すときの音としてよく観測されるものであることが明らかとなった。

4. 下部曲り管において発生する音の特性

部屋などに取付けてある水道の配水管の下部には、

図3 孔径と限界流量

図5 実験用空洞

図6 空洞の周波数特性

図4 タンク出口管長と空洞周波数特性

図7 水流膜くびれの位置固定実験装置

大きな固形物が、長い配管をふさぐのを防止したり、修理を行うときの便利さのために図9に示すような曲り管が取り付けられていることが多い。この曲り管が後述するように特殊な音の発生の原因となっていることがあるので、その代表的寸法に従い、図のような装置を用いて実験を行った。曲り部は内径 25 mm、外径 30 mm で、管軸の曲率半径は 150 mm であり、また後述のように管内の二相流を観測できるようにアクリル製とした。上部タンクの水面は一定に保てるようにしてある。

図9の装置を用いて実験を行ったところ、流量により現象が著しく異なることが明らかとなった。流量の大きい場合には第1報および本報で上述した現象と似ているところもあるが、流量の小さい場合はかなり特有な現象が見い出されたので、それぞれの現象の差異を明らかにするために流量による三つの場合に分けて説明する。

4.1 流量の比較的大きな場合 内径 25 mm の管に図9のように水を流す場合、流量が非常に大きいと図2(c)のような水面であるが、流量をこれよりやや小さくすると図10に示すようになる。実際には流量が 10.0 L/min 前後では、タンク内の水面に管軸に中心を持つくぼみを生ずる。これは垂直管部の下に曲りがあり、曲りからタンクまでほぼ全体に水が充満している場合である。この場合には水流によりくぼみ先端

は下方へ長くのび、表面張力による不安定現象により、次々と気泡が水流中に形成・伴送される。このような流れの状態のときに発生する音の周波数特性は 0.8 kHz にピークを持ち、これ以上の高周波側の強さは周波数とともに急速に減衰する。水中の気泡の直径をビデオレコーダの観測により求め、前報で述べた Minnaert⁽²⁾の理論よりその共鳴周波数を求めたところ 0.8 kHz の値が得られ、流量が比較的大きく図10に示したような流れの場合は気泡により発生する音が卓越していることが明らかとなった。

4.2 比較的小さい流量の場合 4.1節で述べた場合よりも流量が小さく 3.0~4.0 L/min の付近では、水は管の内壁に沿って流れ、曲りのために図9に示したように曲りにたまっている水と合流する。この場合に測定された音の周波数特性は 0.3 kHz にピークを持っていた。この周波数特性が得られた場合の図9に示すタンク下部に連結した垂直円管の空気柱の長さを計測し、気柱の共鳴周波数を求めたところ 0.3 kHz の値が得られた。これにより図9に示すように水が管の内面に沿って流れるような流量範囲では、環状水流が曲り部にたまった水の上面に流入するとき表面に変動を生じさせること等により気柱を音響的に励起することがわかった。

上述の音以外に、図9のような曲り管が途中にある

図8 タンクに高い側壁を設けた場合の周波数特性

図10 大きな流量の流れ模様

図9 水流により発する音の実験装置

図11 間歇的に発生する音の周波数特性

管中に水を流すと聞けつ点に“ゴボゴボ”という音が聞かれることがある。本実験装置でこのような音が発生する場合の周波数特性の一例を図11に示す。0.2 kHzにピークが現れている。またこのときの流れの観測から曲り部に比較的大きな気泡の生成と下流への移動がみられた。

この気泡の共鳴周波数の予測値は0.2 kHzで、また曲り管の水面から上部タンクまでの空気柱も0.2 kHzの共振周波数を持つことがわかった。この現象をさらに詳細に研究するため流れ系全体の挙動をとともに観測した結果、曲り部の存在による次のような現象があることがわかった。図9のような装置で水管の出口が大気に開放されていなくて、リザーバの水面下にあるときには、水流がリザーバの中に入るときに多くの小さな気泡を発生させて空気を巻き込み、図9の左側の下降管の中の空気の量は減少する。したがって曲り管の右側の液面は次第に下降し、図12の(2)の状態を経て(3)の状態になり、曲り部の内側に空気が侵入する。さらに(4)の状態となると図9の右側の下降管中の空気柱の下部の水面が振動するため、まずこの空気柱の共鳴周波数の圧力変動が卓越するようになる。これにつれて図12の状態(4)の曲り部の近くの空気層がこの周波数で波立ち、表面張力の不安定現象を引き起こし、空気層は空気柱の周波数と同じ周波数を持って形が変動する気泡群に分かれることが観測され、この分かれるときにゴボゴボという音を出す。この気泡の大きさを可視化測定により求め、得られた径より計算した周波数は空気柱の周波数と一致していた。またこのような気泡の形で空気が下流に送られると、曲り部の液面は図12の(1)にある状態にもどりしばらくはゴボゴボという音の発生はない。図12の(3)、(4)、(5)に示したような流動の際には、液面は不安定であると同時に、(5)のような気泡が発生するとき、気泡は必ずしも液面に沿って流れず、液面の不安

図12 曲り管流れの特徴的な現象

定あるいは気泡が壁にぶつかる衝撃のために曲り管の弾性振動が励起がされるように思われる。このときは気泡音とともに管の弾性振動音が聞かれるはずである。気泡音はマイクロホンでの測定により確認されたが、弾性振動音を確認するため次のような実験を行った。すなわち曲り部の底の外側に加速度計を設置して上記気泡発生時の加速度計の出力を求め、その記録を図13(a)に示してある。また図9で水を流さず、曲り部の左右の液面が同水位にあるようにし、このとき曲り部の中に細い管を入れ、図12(A)に示したように曲り部の中央の底近くにその出口を設置し、その先端から空気を放出させて気泡を形成した。このときの加速度計の出力を図13(b)に示してある。図13の(a)、(b)に示されている周波数特性はほぼ同様な特性を持つ。すなわち曲り部を通過するとき気泡が管軸に垂直方向に揺動しながら流れることにより誘起される水の非定常運動により、管の弾性振動が励起されたものと考えられる。図12に示してあるように加速度計は曲り部の底に付けてあり、図13に示され周波数特性の三つのピークは曲り部の曲げ振動と、曲げ部上流の管と下流の直管の振動特性が現れているものと思われる。しかしその詳細はこれらの振動の制御とともに今後の研究を待つ必要がある。

5. 垂直円管内を流下する 水流による管の発する音

5.1 基礎実験 第1報および本報で述べてきた水流などによる音の発生は、前項で報告した場合を除いて多くは水流が空気柱などの音響的励起によるものであった。ところで第1報の緒論で述べたように、建物などでは他の部屋で水を流す音がかなり強く聞かれることがあるのは、各部屋の水の配管が上水あるいは排水の配管系統の一部として連結されているために、管を伝わる弾性音が原因となっている場合が多いと考えられる。そこで次に管の弾性音の原因を確かめるために、内径50 mm、肉厚3 mm、長さ1000 mmのア

図13 曲り管の弾性振動の周波数特性

クリル製の垂直円管を図1(b)のように設置した。アクリル製にしたのは円管の壁に沿う流れの模様を観測するためである。しかし図1(b)と異なるのは流量を(b)の場合より多くし、水が入口部でくびれを生ぜず、円管の内面に沿って流れるようにしたことである。また管長の中央の部分に加速度計を設置した。流量が4.0 L/minの場合には円管内面に約3 mmの水膜が壁に沿って下降するのが観測された。この流量より小さい流量ではそれほど大きくないが、この流量のときには振動が加速度計に感じられ、音も聞かれた。このときの加速度計で得られた信号の周波数特性を図14(a)に示してある。この振動の原因を解明するために、管に水を流さずに管の下部近くを金属棒で打撃してそのときの加速度計の周波数特性を図14(b)に示してある。図(a)と(b)はほぼ同様な特性を持っている。そこで図(a)がなぜ(b)とほぼ同様な管の曲げ振動特性を示すかを明らかにするため、管の内壁に沿う水流の模様の詳細な可視化観測を行ったところ、水流はその厚さが円周方向に一様ではなく、かつ流下するときに時間的にも一定ではないことがわかった。すなわち管の軸方向に断面内の水の運動量が時間的に変化

し、これは水により管に加わる力が変わることを意味しており、水の流下における円周方向の運動量の変化により管が加振されていることを意味する。水が垂直管内を流下するときに、水膜が薄いときには、水の運動量も小さく、管の振幅も小さいが、流量が大きくなると水膜は一様でなくなり、表面は波立つようになり、水流による曲げ振動が発生する。

5.2 振動の抑制実験 上述の実験結果から垂直円管内を流れる水流により発生する円管の曲げ振動は水流の厚さの円周方向の時間的变化によるものであることが明らかとなった。本報の目的は上述のように各種の水滴または水流による音の発生の原因を解明することである。しかし今までにはあまり問題になっていないが、今後は本報で述べた水流の発する音を、騒音防止あるいは環境上から制御または音の強さを減少させる方法を検討する必要があると考えられる。水流による音の発生の現象の本質が解明されれば、音の制御などに役立つと考えられる。そこでその一例として本章で取り上げている垂直円管内の水流による管の弾性振動による音を、上述の実験結果をもとに流体力学的に制御する方法を検討した。

垂直円管内を流下する水流による管の弾性振動とそれによる音の発生原因は上述のように流下する水流が波打ち、円周方向に変動するためであるから、この音の発生を抑えるために、水流の厚さの変動がないようにすることを考えた。

具体的な方法として、図15に示すように、まず管軸を鉛直より6度傾けた。その結果、音の強度はわずかに減少したが、この程度の傾斜では水流は円周の一方には集まるが、やはり水流の最も深いところの周りにゆれながら流下していることが観測された。

そこでさらに水流の厚さを一定にするため管壁の内側に図15(b)に示すように軸方向に、高さ4 mm、厚さ4 mm、長さ1 000 mmのフィンを3枚取付けた。こ

図14 水が鉛直円管内を流下するときの周波数特性

図15 水流による管の振動の抑制実験装置

図 16 微小傾斜とフィンによる水流音の制御特性

のフィンを取付けたところを水が流れるようにして実験を行った。そのときの加速度計による測定結果を図 16 に示してある。図(a)には円管を鉛直にした場合について左側には振動の周波数特性を右側には振幅の時間的変化を示してある。図(b)に図 15 の装置による結果を示してある。図(a)と(b)の周波数特性からわかるように、ピークの周波数は同じであるがピーク値はフィンを取付けた場合のほうが dB で約 30 % 減少している。また図の右側に示すように(b)のほうが(a)の場合より時間による振幅の変化が少なく、管の振動の振幅の制御が有効に行われたことがわかる。

また図 16 に示した実験結果は、前報での結果を参照し、図 15 に示したよう管出口で水が下部水槽に流入するときに水流が水滴群になってこれが気泡を生成し、音の発生の原因にならないよう、出入口に導流板と、出口にグラスウールをつめた箱を設置した。

6. 結 論

前報において開いた系というべき水面に剛体および水滴が落下するとき発する音について報告した。前報に続いて本報では、管に流入、流下、流出する水流などの、閉じた系の水流による各種の音の性能およびその発生の原因について主として実験により研究し、次の結論が得られた。

(1) 水が水槽から垂直円管に流出するときに、水槽出口において発生する音の主な原因は、出口の環状流が出口から少し下で表面張力のためにくびれ、出口に気柱を作り、その音響共鳴音である。

(2) 垂直円管上部入口の環状流がくびれたために生ずる気柱による音は、管の上部の水槽の上に空気層が形成されるように側壁が高いときは、くびれ気柱による空気層の共鳴音が励起される。

(3) 垂直円管の下部に曲り部が設けられているときは、間接的に気泡が曲り部を通り、そのため気泡による音と、気泡がゆれながら流れる運動による曲り部の管の弾性振動が励起され、それらによる音が発生する。

(4) 垂直管の中を水流が落下する場合、管壁に沿って流下する水の厚さが時間的に変化し、そのための運動量の変化により管の曲げ振動が励起され、音の発生の原因となる。

(5) 垂直管を流下する水流による管の弾性振動による音を抑制するには、その管に沿う水の厚さが変化しないようにわずかに管軸を垂直から傾斜させるか、軸方向のフィンを付けばよい。

文 献

- (1) 森・ほか 2 名, 機論, 53-487, B (昭 62), 894.
- (2) Minneart M., *Phill. Mag*16 (1933), 235.

討 論

〔質問〕 丸 田 芳 幸〔榊原総合研究所〕

(1) くびれ部の空洞の共鳴周波数は、単純な平面波の定在波共鳴の計算で概略推定が可能か。図 4～6 の結果よりどんな共鳴モードを推測できるか。

(2) 図 2 (b) の流れにおいて、図 10 のような気泡の流入とその発生音を観察できないのか。

(3) 曲がり管や垂直管の弾性振動としての曲げ振動は、軸方向断面内の曲げのようだが、周方向での管

壁の曲げ振動は励起されないのか。

〔回答〕 (1) くびれ部を持ち一端開放の空洞の共鳴周波数の理論計算に空洞を回転円体で近似して行うことも考えたが、実際の空洞との形状の差による信頼性を考慮し、空洞の形状を正確にビデオで測定し、図 5 に示したように実験により求めた。

(2) 図 10 は図 2 の(b)と(c)の中間の水量の場合で、小さな空洞が生じたり、それが気泡になったり

するので、気泡音が観察される。

(3) 軸方向の曲げ振動に比べ、周方向の曲げ振動の剛性は大きく、固有振動数は高いので、音としては前者の振動による音のほうが発生しやすく強い。

〔質問〕 小竹 進〔東京大学工学部〕

(1) 図2(b)の音の発生を、気柱の共鳴と水流のくびれの振動とに分けて考えられているが、どちらもくびれの振動と解釈できないだろうか。くびれが振動しているときに気柱の共鳴は考えにくいと思うが、いかがか。

(2) 図10での気泡の発生周波数はどのくらいになるか。できたら、4・1、4・2節の場合の代表的な周波数特性をお示しいただけないか。

(3) 5・2節の振動の抑制実験で管出口にガラスウールをつめておられるが、管内の流れよりも管出口の流れの状態が最も影響が大きいのではないか。

〔回答〕 (1) 気柱があっても、全く周囲に空気の圧力変動を起こす原因がなければ音は観測されない。本研究では水流によるくびれ部の非定常振動が非常にブロードなスペクトルをもつ圧力変動を引き起こし、そのスペクトルの内の気柱の共鳴周波数と一致するものが気柱の共鳴音を励起すると考えており、これを証明するために図7の実験を行った。

(2) 図10の気泡が単位時間に発生する個数を質問されていると思うが、水の流速により異なる。 $Q=4.0\text{ L/min}$ のときだいたい毎秒3~4個くらいである。また4・1、4・2の場合の代表的な周波数は、大きい流量では906ページ右欄に記述してあるように0.8 kHz、小さい流量では図11、12に示してあるが水の流量、曲がり管の上流・下流の構造、空気の流入可能性

などで異なる。

(3) 管の出口の構造・状態は上流の管内の音場に影響をもつ。本研究ではその検討を重要な課題としていないので、出口の影響を押さえるような構造とした。

〔質問〕 坂尾 富士彦〔広島大学工学部〕

(1) 図13の(a)、(b)はよく似ているが、それは当然と考えられなくもない。類似の状況だからである。振動があることは確かであるがそれが音の発生にどの程度寄与しているかは、ここに示されている資料からは判断できないのではなかろうか。図14~16に示されているような実験がここでも必要ではないだろうか。

(2) 経験によると水流によるゴボゴボといい音は管の途中に異物がひっかかって断面積が小さくなっている場合に特に大きいような気がしないでもない。管の曲がり部だけでなく水流の速度が大きい場所や急変する場所(局部的にでも)を泡を含む水流が通る際大きい音が発生する可能性があると考え。そのような場合を調べてみるご計画はおありか。

〔回答〕 (1) 図13(a)の実験結果のみでは気泡が壁にぶつかるのが主原因か、推定の域を出ないので、図14の管を金属棒で打撃することに対応し、外部より気泡を強制的に導入することにより証明した。図12(a)の実験で現象を明確にした価値は十分あると思う。

(2) ご説の管の途中に異物があるとき、気泡を含む水流では4・2節で述べた理由により大きい音を発する可能性はあると思うが、現在その現象を研究する計画はない。