

キャビテーション発生機構に関する研究

高川真一 *1 中西俊之 *1 土屋利雄 *1
網谷泰孝 *1 許 正憲 *1

キャビテーションは、液体が関係するあらゆる分野で様々な影響を及ぼしており、海洋開発においても、船舶のプロペラキャビテーションや、音響機器の音響キャビテーションの発生は非常に重大な問題である。

キャビテーションの諸問題は、キャビテーションの初生が抑えられれば本来は解決するものである。この発生機構については、現在では液体中にもともと微細気泡が存在していてこれが低圧場や高温場で膨張するものといわれているが、気泡の存在が期待できない場合も多く、微細気泡の存在だけでキャビテーションの発生をすべて説明することはできない。

本研究では、種々のキャビテーション現象を考察する中から、流れ自身が微細気泡を生成するという仮説を提示し、それについて議論している。

A Study on Cavitation Inception Mechanics

Shinichi TAKAGAWA*2, Toshiyuki NAKANISHI*2
Toshio TSUCHIYA*2, Yasutaka AMITANI*2, Masanori KYO*2

Cavitation has various effects in every liquid-related field. For ocean research activities, cavitation effects on ship propellers or on acoustic transducers are serious problems.

Problems caused by cavitation can be eliminated principally by suppressing cavitation inception. Until now, the mechanics of cavitation inception have been explained by the existence of many minute bubbles in liquid that increase in low-pressure and/or high temperature fields. However, there are many cases of cavitation in which the existence of minute bubbles cannot be considered a factor. So, cavitation inception cannot be explained by the existence of minute bubbles alone.

In this paper, a new hypothesis that flow itself produces bubbles is presented and discussed. This new hypothesis has been obtained from considerations of various types of cavitation phenomena.

*1 深海開発技術部

*2 Deep Sea Technology Department

1. 序

キャビテーションは、ポンプや船舶の推進器等、液体と関係するあらゆる分野で発生し、様々な影響を及ぼしている。特に、海洋科学技術センターにとっては、海洋での活動が主となるため、船舶のプロペラキャビテーションや、通信手段として重要な音響機器の音響キャビテーションの発生は非常に重大な問題である。

キャビテーションは、気泡の初生、成長、圧力上昇に伴う気泡の崩壊という過程をとり、装置の効率の低下、振動・騒音の発生、装置寿命の低下等種々の問題を引き起こす。しかしこれらの問題は、キャビテーションが初生して初めて生ずるものであり、初生が抑えられればすべての問題が解決するものである。従って、初生を抑えることが非常に重要なテーマとなる。

初生とは、低圧場あるいは高温場の液体中に微細な気泡が生ずる現象であるが、完全に液体で満たされた空間中に忽然と気泡が生ずる過程は一般には非常に考えにくいものである。そのため通常はもともと液体中に微細な気泡が存在し、この微細気泡が核となって低圧場あるいは高温場で成長を開始するのが、初生と考えられている。

しかし、物理化学的な考察から容易にわかることであるが、表面張力が存在するために微細気泡は非常に不安定であり、溶解気体の拡散現象により小さくなって消滅するか、逆に大きくなって浮力がつき上昇して液体中からなくなってしまうか、いずれにせよ、液体中から消滅してしまう性格のものである。

従って、この核気泡が原因でキャビテーションが発生するという立場に立つならば、核気泡の安定性が十分に議論されていなければならない。しかしこれが不十分なまま、核気泡が受け入れられているのが現状である。

そこで本研究では、核気泡に立脚しない全く別の考えからキャビテーション発生機構について検討を行った。

2. 核気泡の問題点

核気泡は不安定ではあるが、直ちに消滅するのではなく、ある程度時間がかかる。そのため波等何らかの原因で気泡が供給されていれば、その気

泡が低圧場に流れ込んでキャビテーション発生に至ると考えること自体は無理がないかもしれない。しかし、気泡の供給が期待できない油圧装置や水中航走体ではこのような核気泡の考え方は困難である。例えば技術面で非常にリアルだといわれている小説 "The Hunt for Red October"¹⁾には、潜航中の潜水艦が探知するシーンがあり、キャビテーション雑音をキャッチする話が出てくる。潜航中の潜水艦が水面から空気を巻き込むことは当然ありえないため、キャビテーションの発生原因を海表面から巻き込まれた気泡以外に求めなければならない。

このような核気泡理論の欠点を補うために核気泡の表面に何らかの物理化学的機構が作用して核気泡が安定化するという理論も提案されている。これは図1に示すように、疎水基と親水基を持つ界面活性分子が気泡表面に疎水基を内側に向けた形で殻を作るというものである²⁾が、まだ難点が多い。

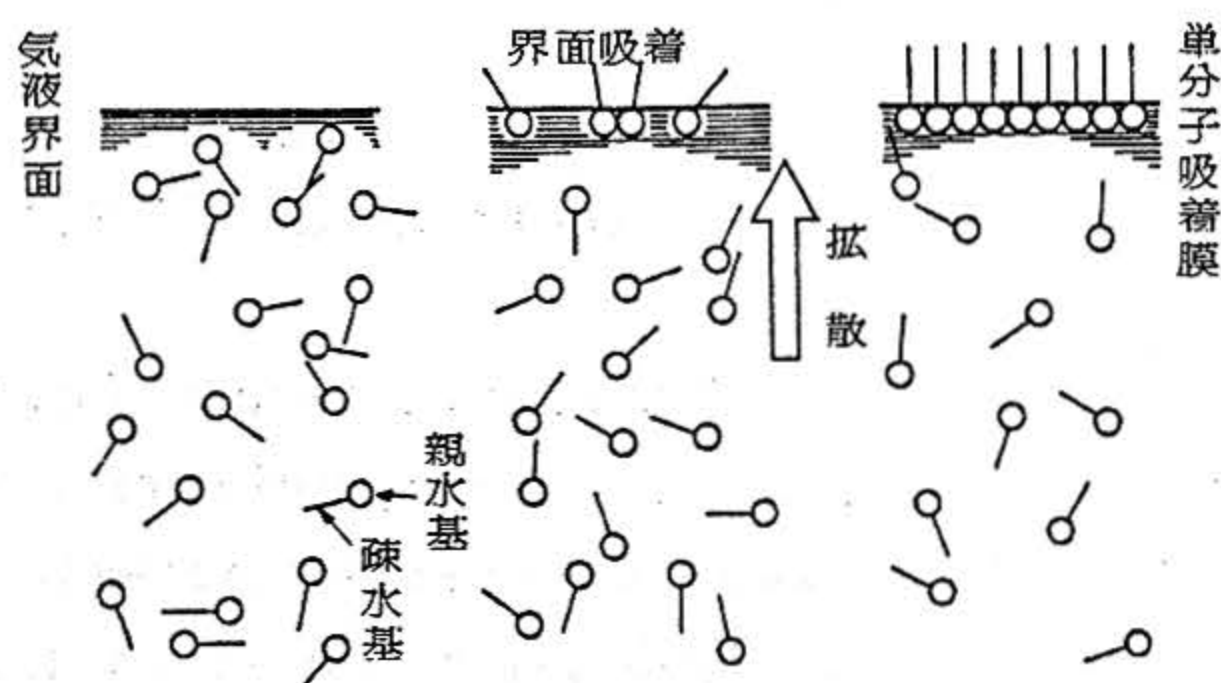


図1-A 拡散による吸着膜の形成

Fig.1-A Formation of Adsorption Layer by Convection

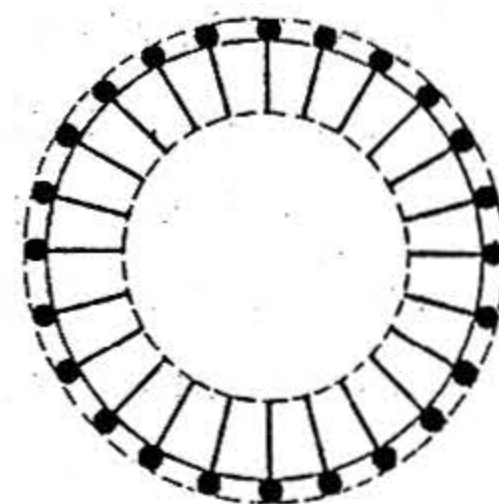


図1-B 単分子吸着膜におおわれた気泡モデル

Fig.1-B Bubble Model Covered by Mono-molecular Adsorbed Layer

3. キャビテーション発生様相

今までの多くの研究者による研究の結果、キャビテーションの発生様相の特徴が次第に明らかになってきている。特に、流体力学的キャビテーションの発生点は、(1)層流剥離流再付着点近傍 (図2参照)、(2)乱流遷移点近傍、又は(3)渦中 (代表例は翼端渦)³⁾であり、音響キャビテーションの分野からは、粘性と周波数が大きな影響を持っている (粘性が大きい程また周波数が高い程発生しにくくなる)⁴⁾ことが明らかにされている。

また、これらのような液体蒸気が気泡内主成分となる蒸気性キャビテーションとは異なり、溶解気体が主成分となる減圧症や炭酸飲料の発泡等に代表される気体性キャビテーションの分野でも、研究が進められている。ここでは、条件をうまく設定すると窒素ガスが溶けた水の場合約200気圧の過飽和にしないと発泡しないことが実験的に明らかにされ、これと合致する理論も提示されている⁵⁾ (図3参照)。そしてまた、ビールでは衝撃によって発泡状態が大きく変わることはしばしば経験するところであるが、容器に適度な衝撃を与える機構を付与し、消費者が好む発泡状態を作れるようにしているビールメーカーもある。

4. キャビテーション発生機構の新仮説

キャビテーションが何故発生するかという理論は古くから研究されている。Fisher は分子の不規則運動によるエネルギーのゆらぎが、分子が比較的密に詰まった系 (即ち液体) の中に空孔を生じさせ、この空孔からキャビテーションが発生するという均一核生成理論を提示している⁶⁾。この理論は、蒸気の凝縮と全く同じ考えであるが、凝縮

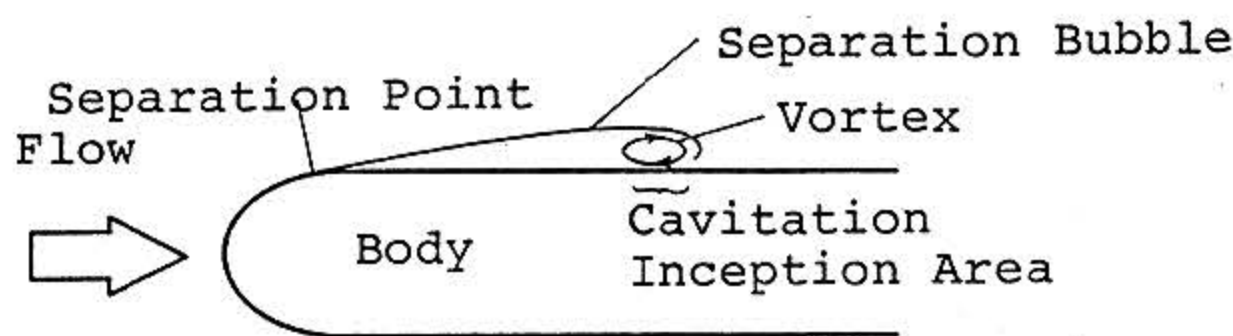


図2 層流剥離とキャビテーション
初生域

Fig. 2 Laminar Boundary Layer
Separation and Cavitation Inception
Area

の場合は理論と実験とが良く一致するのに対し、キャビテーションについては理論値が常温の水で約1300気圧という大きな負圧となり、このような大きな負圧は実験では未だ達成されていない。それに対し通常のキャビテーションは蒸気圧程度の圧力下で発生するため、Fisherの均一核生成理論は現在では殆ど顧みられていない。それに代わって、もともと安定な核があるという考えが主流になっているものである。

しかし前章で示した気体性キャビテーションの超過飽和での発生は、分子運動に起因するゆらぎによる均一核生成理論と関係するものであり、キャビテーションの分野では従来実現不能と言われていた均一核生成が可能であることが実験的に示されたことから、一般のキャビテーションでも十分起こり得ると考えられる (図4参照)。

前章で示した発生様相からは、乱流や渦が大きな影響を持っていることが分る。また粘性については、大きい程乱れや渦が発生しにくくなるわけであるから、肯首できる。周波数については、これは振動速度と関係するものであり、渦発生の際レイノルズ数を考えれば、まさに周波数が高い

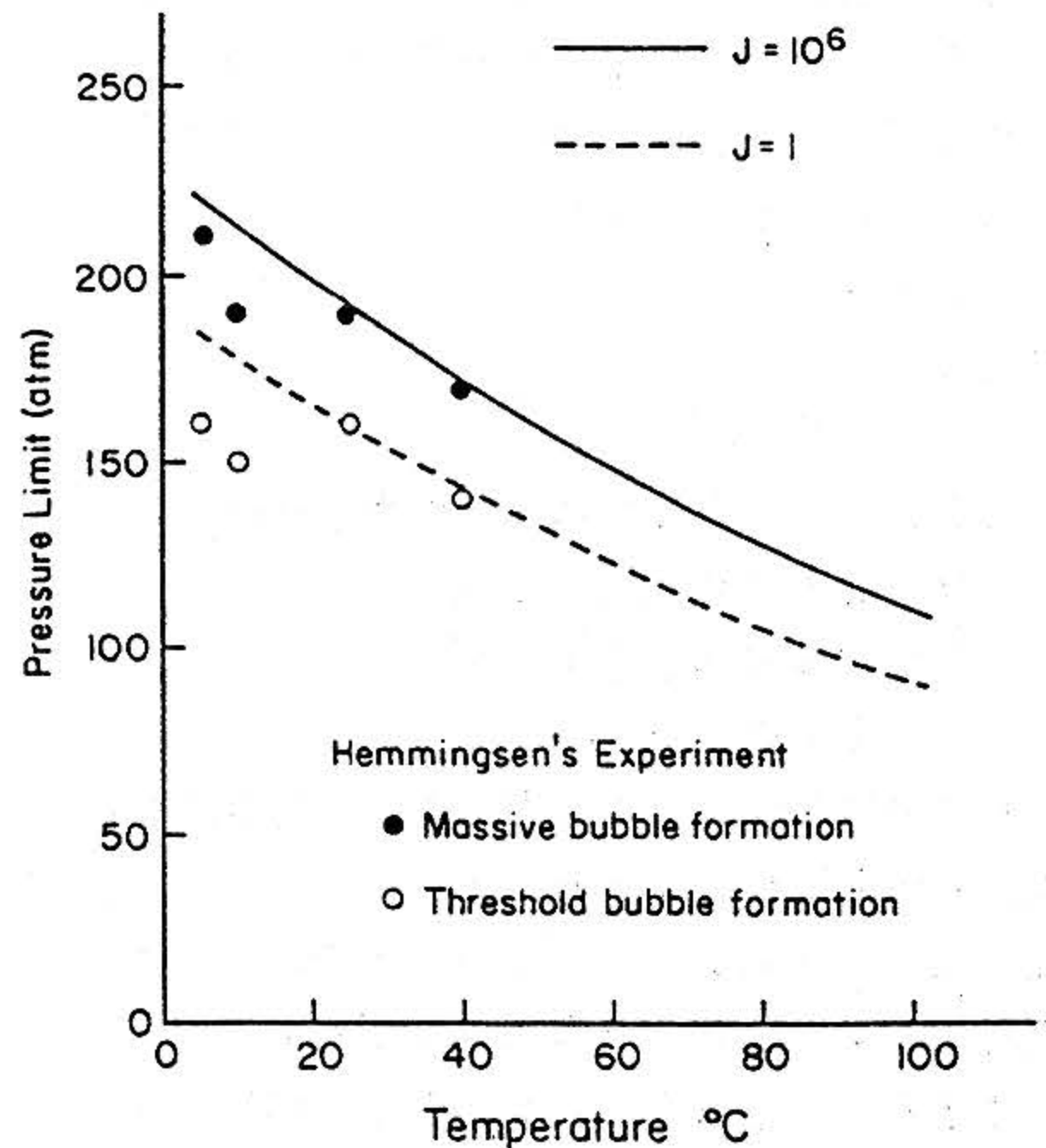


図3 水に溶けた窒素ガスによる発泡限果
Fig. 3 Bubble Formation Limit by
Nitrogen Gas Solved in Water

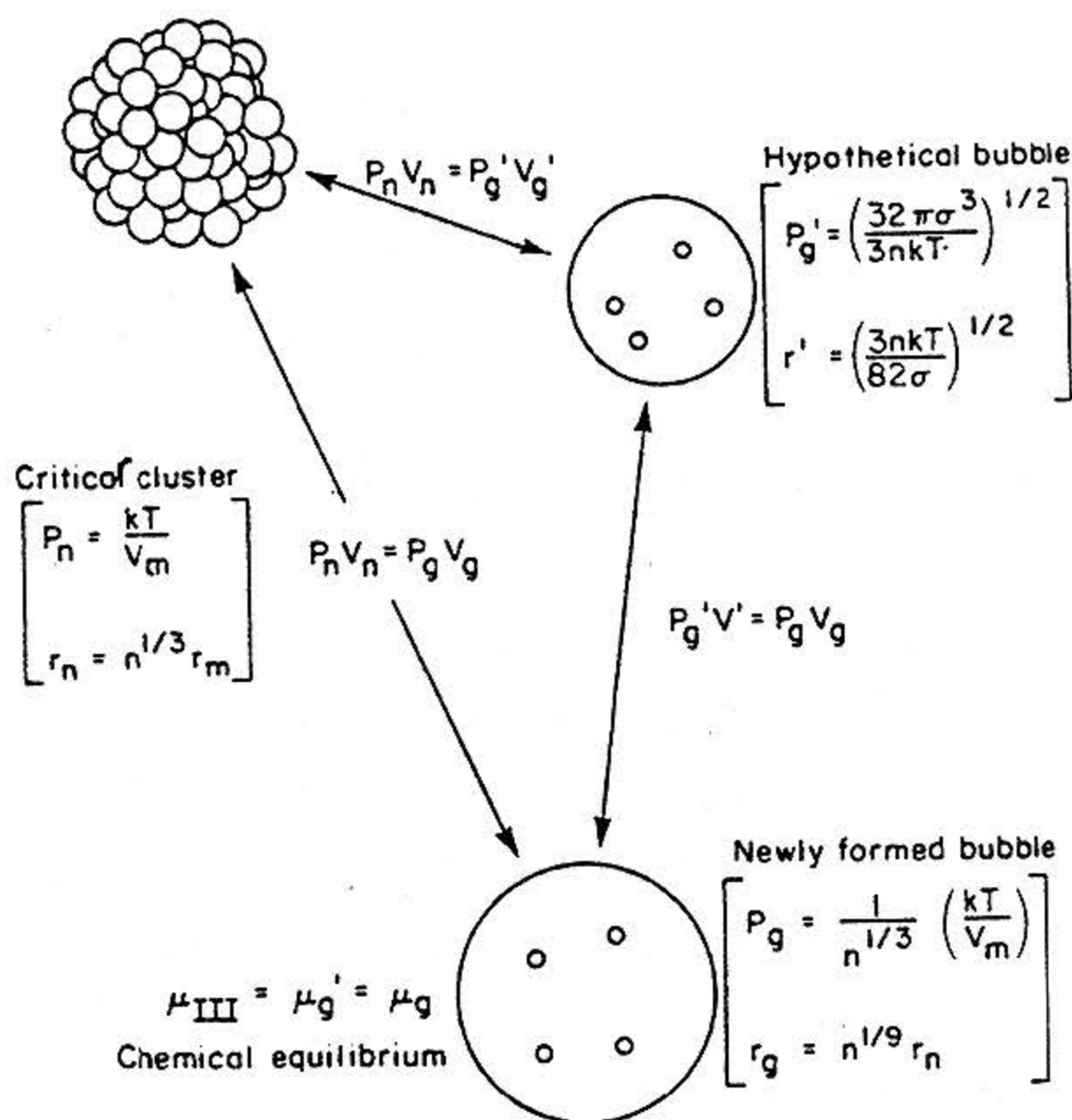


図4 気体分子運動による発泡のメカニズムモデル

Fig. 4 Model of Bubble Formation Mechanics by Motions of Gas Molecules

程渦発生が起こりにくくなることが分る。すなわち、振幅A、角振動数 ω で振動する平板を考え、その縁での渦の発生について考える。この縁が図5のように上下に振動すると液体中に渦が発生し易い状態になる。渦発生の臨界レイノルズ数 Re を、代表長さとして振幅をとって、

$$Re = A \cdot A \omega / \nu$$

とすれば、

$$A = \sqrt{Re \nu / \omega}$$

となるが、このような振動面上の音圧Pは

$$\begin{aligned} P &\sim 2 \rho C V = 2 \rho C A \omega \\ &= 2 \rho C \omega \sqrt{Re \nu / \omega} \\ &= 2 \rho C \sqrt{Re \nu \omega} \end{aligned}$$

となり、渦は粘性が大きい程、そして周波数が高い程、発生しにくくなるといえる。

従って、キャビテーションの発生機構として、乱流や渦が非常に重要な役割を演ずると言える。このことから、本研究では「乱流や渦が均一核生成機構と結びついて液体中に気泡を生成する」という仮説を提案するものである。

乱流や渦がどのような形で均一核生成機構と結びつくかについては未だ明確には示し得ていない。

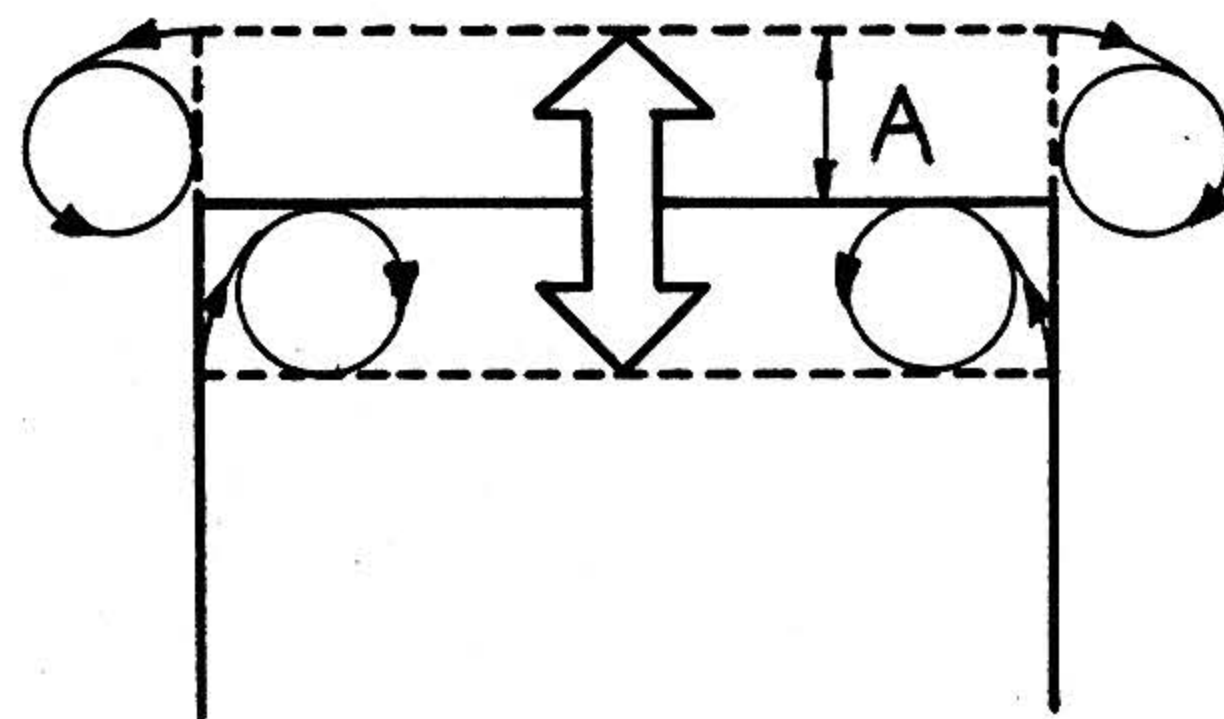


図5 振動による渦の発生

Fig. 5 Vortex Formation by Vibration

しかし、液体に回転を与えて表面張力を計測（回転液滴法、表面張力 σ は回転数 f と密度差 $\Delta\rho$ 、並びに円柱気泡半径 r により $\sigma = \Delta\rho \pi^2 f^2 r^3$ と表される（図6参照）。してみると、図7に示すように表面張力が回転数増加に伴って増加するのが認められる（逆にこのことから、回転液滴法は回転数により異なった表面張力値を与えるため、表面張力計測法としては用いられなくなった）。

表面張力と気体の液体に対する溶解度とは関連があり、表面張力の指数関数で溶解度が減少することが理論的に示されている。これはSPT（Scaled Partical Theory）⁸⁾と呼ばれる、分子を剛体球と見なす理論の1つであるが、このSPTによれば気体の液体に対する溶解度 K は、

$$K \sim \exp \left\{ \left\{ -4\pi a^2 \sigma (1 - 2\delta/a) + 4/3\pi P a^3 \right\} / kT \right\}$$

と表される。

但し、

- a : 2分子間平均距離
- σ : 表面張力
- δ : Tolmanの修正係数
- P : 圧力
- k : Boltzman定数
- T : 温度 (K°)

このことから、乱流や渦と気泡発生とは、乱れや渦が液体の表面張力（あるいは物性そのもの）を変え、溶解度が激減し、相対的に溶解気体が超過飽和状態となって均一核生成機構により気泡が発生すると考えられる。キャビテーション発生に関する従来の考え方とここで提示している新仮説

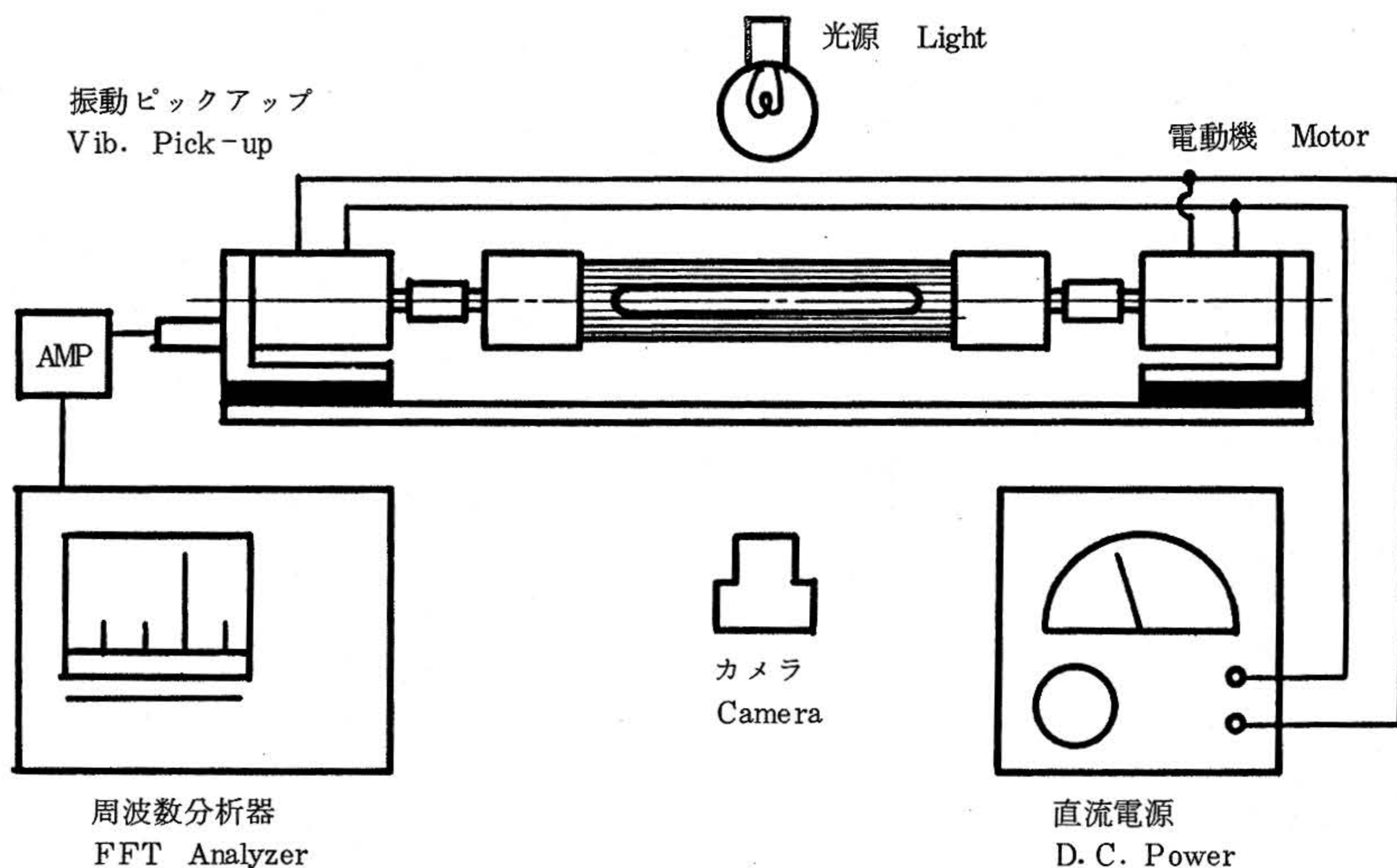


図6 回転液滴法による表面張力計測要領

Fig. 6 Measurement of Surface Tension by Spinning Drop Method

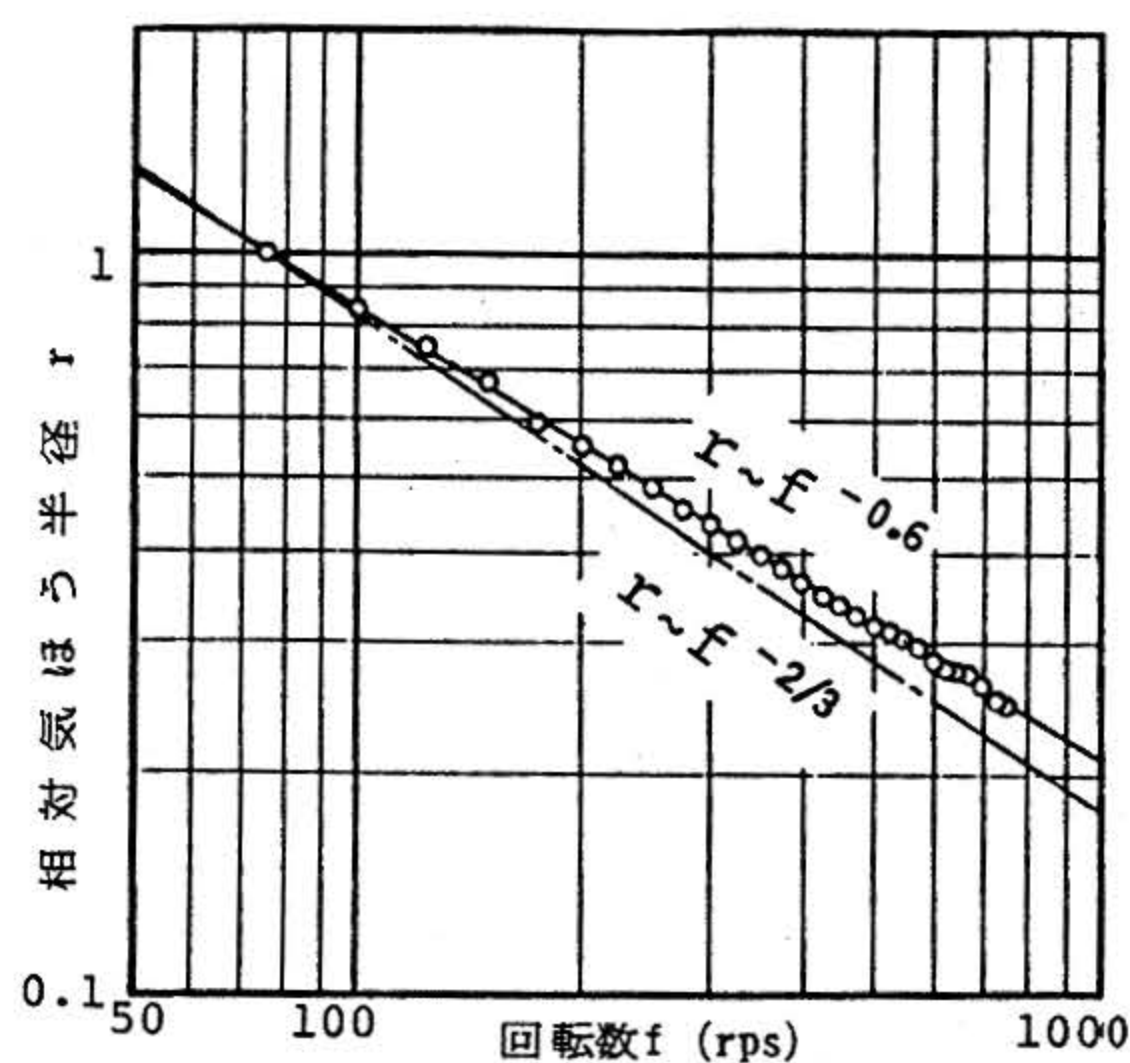


図7 回転液滴法によって得られた気泡半径の変化

Fig. 7 Changes of Cylindrical Bubble Radius Obtained by Spinning Drop Method

を図8に示す。

この新仮説を確認することを目的として2つの実験を行った。1つはキャビテーション水槽に3次元翼型を置いて翼端渦が発生するようにし、この渦を通過するように音響信号を発射して信号の減衰の有無（気泡が存在すれば大きな減衰が得られる）を調べるものである（図9）。その結果図10に示すように、十分に高い圧力下でも翼端渦通過点付近では明瞭な減衰が認められた。また第2の実験として、円筒内の水にマグネットスターラで回転運動を与え、回転中心を通過するように音響信号を発射して減衰率を計測し（図11参照）、図12のように非常に大きな減衰が起こることを見出した。

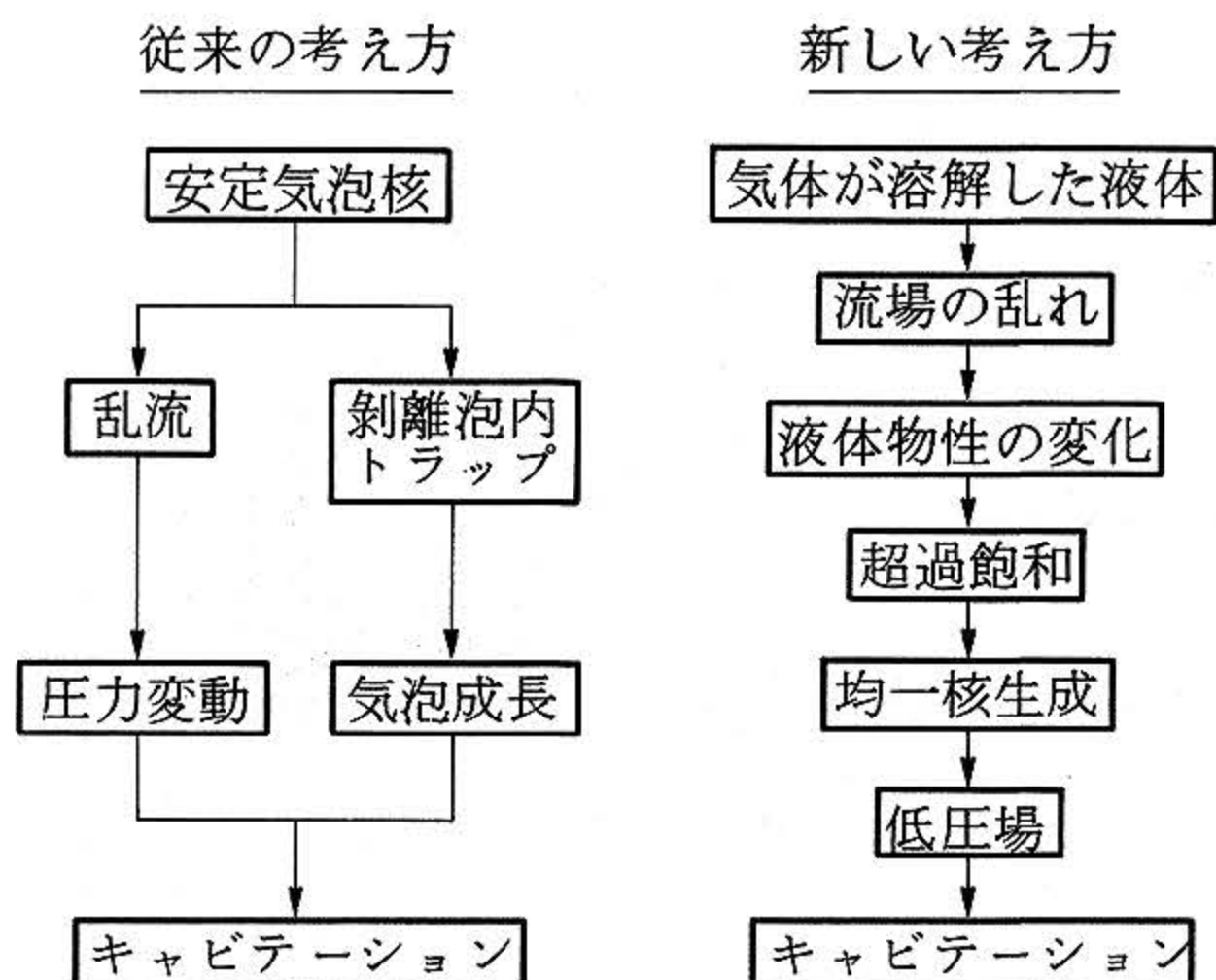


図8 キャビテーション初生に関する新しい仮説

Fig. 8 New Hypothesis on Cavitation Inception

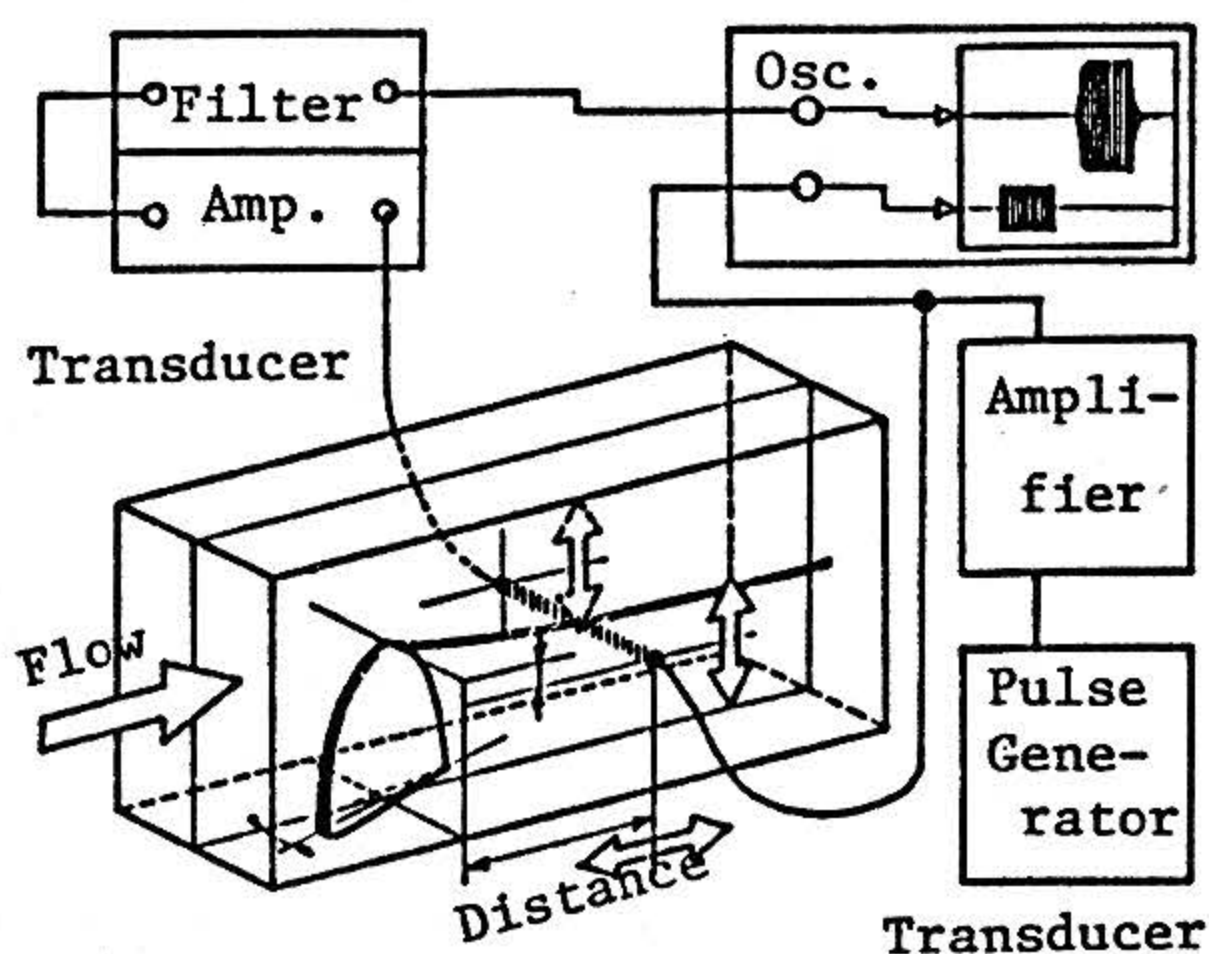


図9 翼端渦による音響信号減衰実験要領

Fig. 9 Measurements of Acoustic Signal Level Attenuation by Tip Vortex

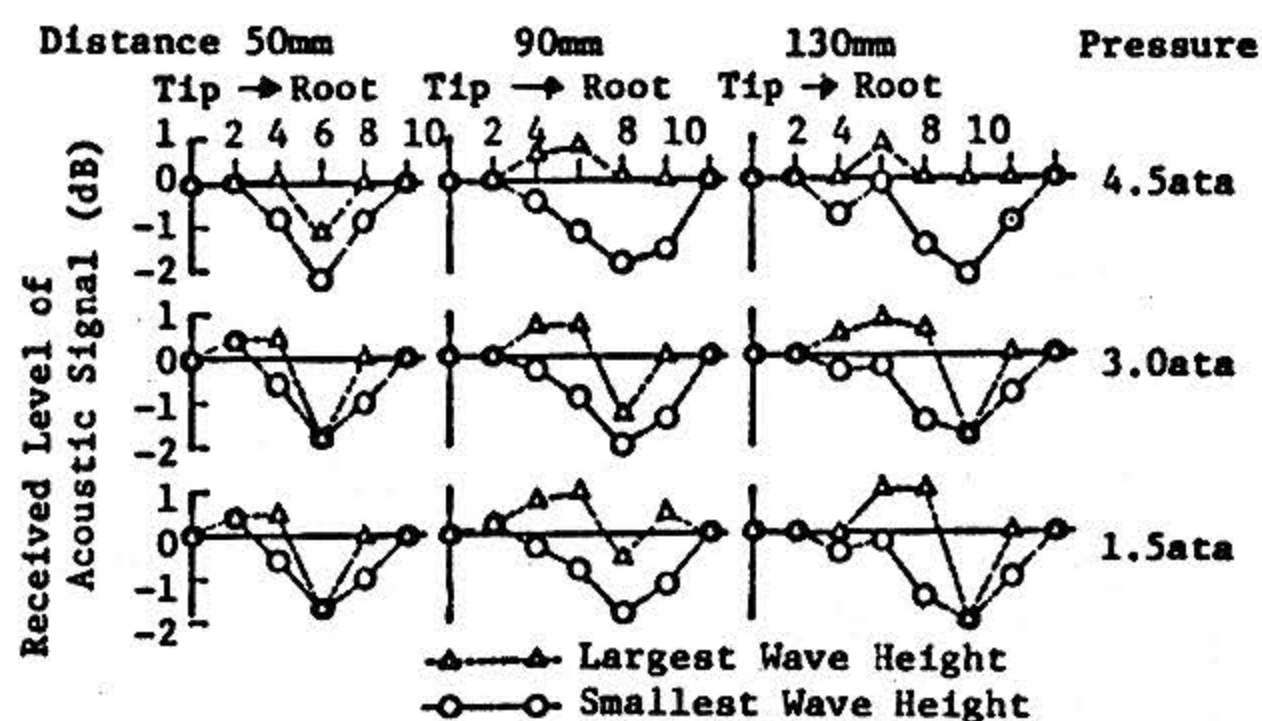


図10 翼端渦による音響信号減衰系課
(信号周波数 5MHz)

Fig. 10 Acoustic Signal Level Attenuation by Tip Vortex for 5 MHz Signal

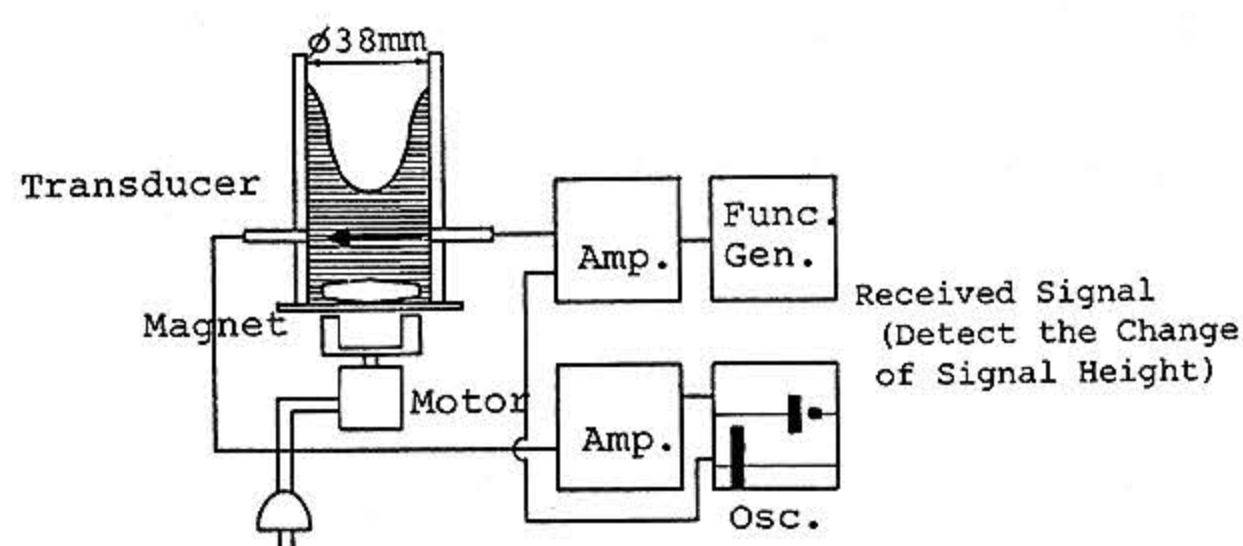


図11 強制渦による音響信号減衰実験要領

Fig. 11 Measurement of Acoustic Signal Level Attenuation by Forced Vortex

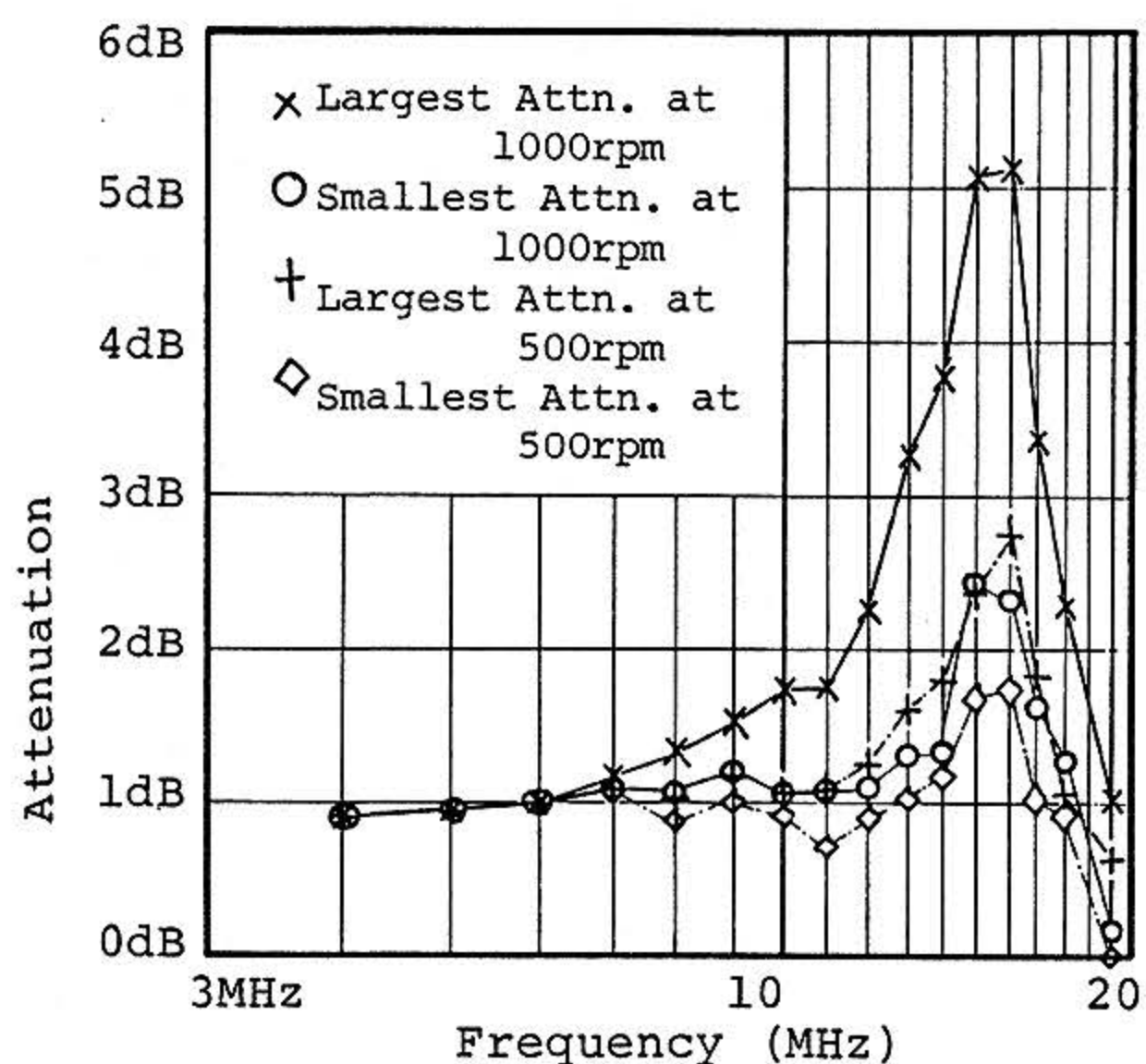


図12. 強制渦による音響信号減衰結果

Fig. 12 Acoustic Signal Level Attenuation by Forced Vortex

このような実験結果に対して、安定核気泡論の立場から、核気泡が渦中心に集まったために音響信号が減衰したものという批判も考えられるが、特に第2の実験では試料水は約1ヶ月放置した水であり、仮に核気泡が採水時にあったとしても、完全に抜けているものである。

これらから、渦に気泡を形成する能力があることが実験的に確められたと考える。

5. 残された問題点

本研究では、渦によって表面張力や溶解度等の液体物性が変化することを指摘して議論を進めているものであるが、渦がどのようにしてこのような変化をもたらすかについては、また不明である。分子動力学(MD法)によって分子の運動を追跡する方法も試みたが、MD法では対象とし得る時間スケール、長さのスケールが実際の系と格段に異なる(MD法では時間は 10^{-10} sec以下のオーダー、長さも数十~数百Åのオーダー)ため、MD法による計算では十分に満足のいく結果は得られていない。しかし、ベナール対流にみられるように、ゆらぎがすべての事象に非常に重要な役割を担っていることが明らかにされて来ており、⁹⁾渦と物性値変化の関係は、この面から研究されるべきものと考えられる。

6. まとめ

キャビテーションの研究は冒頭に述べたように、核気泡の存在を前提にするのが主流であり、核気泡に頼らない考え方は殆ど顧みられていないのが現状である。しかし、核気泡の存在を仮定できない機器は非常に多く、核気泡に頼らない考え方を

確立することが急務である。そのため、本研究を通してこの考え方を確立を図って行かなければならない。

参考文献

- 1) Clancy Tom, 1986, "The Hunt for Red October", 邦訳:「レッドオクトーバーを追え」文春文庫, 井坂清訳,
- 2) Kunkle, T. D., 1979, Bubble Nucleation in Supersaturated Fluids. Sea Grant Technical Report UNIHT-TR-80-01,
- 3) 加藤洋治, 1978, キャビテーション 槇書店,
- 4) 久山多美男, 1987, 気泡と音波. 海洋音響研究会報, 14, (1)
- 5) Kwak, H., Panton, R., 1986 Gas bubble formation in nonequilibrium water-gas solutions. J. Chemical Physics, 78, (9), 5795-5799.
- 6) Fisher, J. C., 1948, The Fracture of Liquids. J. Applied Physics, 19, 1062-1067.
- 7) 高川真一, 1983 血液中のキャビテーション. 第3回キャビテーションに関するシンポジウム.
- 8) Peorette, R. A., 1963. The solubility of Gases in Liquids. J. Physical Chemistry, 67, 1840-1845.
- 9) プリゴジン, I. スタンダール I. 著, 伏見康治他訳. 混沌からの秩序, みすず書房.

(原稿受理 1987年12月7日)