



液中渦によるキャビテーションに関する基礎的検討

Basic Study on Vortex Cavitation Inception

江連 俊樹 佐藤 博之 木村 暢之 上出 英樹

Toshiki EZURE, Hiroyuki SATO, Nobuyuki KIMURA and Hideki KAMIDE

次世代原子力システム研究開発部門

機器開発グループ

Component and Fluid Engineering Group

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

December 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

液中渦によるキャビテーションに関する基礎的検討

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門

FBR システムユニット

江連 俊樹、佐藤 博之、木村 暢之、上出 英樹

(2008 年 10 月 7 日受理)

FBR サイクル実用化研究開発において、ナトリウム冷却ループ型高速炉の経済性向上の観点から炉容器のコンパクト化および2ループ化が検討されている。この研究の一環として、1/10 縮尺モデルによる原子炉容器上部プレナム内の水流動試験を実施している。試験では、炉内ホットレグ (HL) 配管入口近傍においてひも状キャビテーションの発生が観察された。ひも状キャビテーションに対する実機評価にあたっては、キャビテーション係数を無次元パラメータとして考慮することにより初生条件を判断する方法をとることが検討されている。しかしながら、縮尺試験に比べ、実機では運転時の系統圧力が高い(0.30MPa)ため、キャビテーション初生時の流速が増加すると考えられる。それに伴ってフローパターンが変化する可能性があり、キャビテーション係数一致だけでは評価できない可能性がある。また、常温の水と 550°C のナトリウムとでは粘性係数が3倍程度異なっており、粘性の相違が渦の生成に影響を及ぼすことが考えられる。よって、水試験の結果からナトリウム中の実機評価を行う妥当性についても検討を行う必要がある。そこで、加圧条件および昇温により粘性を変化させた条件下で液中渦によるキャビテーションを発生させることができる水試験装置を製作し、試験を実施した。

本報告書では、キャビテーションを伴う液中渦の発生条件への系統圧力および粘性の影響を把握し、基礎的な検討を行った。その結果、系統圧が高い条件ほど初生キャビテーション係数が高くなる結果が得られた。また、粘性が低い方が初生キャビテーション係数は大きくなる傾向が見られたが、系統圧力が高くなると粘性による差異は小さくなり、実機圧力条件では差は見られなくなることを確認した。

Basic Study on Vortex Cavitation Inception

Toshiki EZURE, Hiroyuki SATO, Nobuyuki KIMURA and Hideki KAMIDE

FBR System Engineering Unit

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 7,2008)

In the FaCT Project for Commercialized Fast Reactor Cycle Systems, a compact reactor vessel and 2 loops system are investigated in terms of economical improvement of a sodium cooled fast reactor. In order to certificate the issues in thermal hydraulics, 1/10th scaled model water tests have been performed. In the flow visualization of the 1/10th scaled model tests, vortex cavitations were observed at the inlet of Hot Leg pipes.

In order to estimate the occurrence of this type of cavitation in the reactor, cavitation number will be used. In the reactor design, cover gas in a reactor vessel is pressurized up to 0.25MPa. This results in higher velocity at the onset condition of the cavitation as compared to the open-air water experiment. In addition, viscosity of the sodium at 550 °C is nearly 1/3rd of that of water at room temperature. These differences may affect the flow pattern and the inception of vortex cavitation. These factors will bring some difficulties in the estimation using the cavitation number. Thus, the effects of pressure and viscosity on the inception of vortex cavitations were examined in basic water experiments. As the results, it was found that the onset value of cavitation coefficient became higher with the increase of the pressure. In addition, it also appeared that the onset value of cavitation coefficient became higher under lower viscosity. However, this difference of onset value due to the viscosity became smaller with the increase of pressure, and was negligible under the same pressure in the real reactor.

Keywords: Vortex Cavitation, Pressure, Viscosity, Cavitation Number, Cavitaion Inception

目次

1.はじめに	1
2.液中渦によるキャビテーション	2
2.1 液中渦による渦中心での圧力降下量	2
2.2 キャビテーション係数による初生条件評価	2
3.液中渦によるキャビテーション実験	4
3.1 液中渦試験装置	4
3.2 試験条件および試験方法	6
4.実験結果および考察	9
4.1 キャビテーションの発生形態および流況	9
4.2 初生条件把握試験結果	10
5.おわりに	13
謝辞	14
参考文献	14
付録 A. 溶存酸素濃度の初生条件への影響	24
付録 B. 渦中心での流速分布の PIV 計測	26

Contents

1. Introduction	1
2. Influencing Factor for Vortex Cavitation	2
2.1. Pressure Drop at the Center of Submerged Vortex	2
2.2. Evaluation of Cavitation Inception by Cavitation Coefficient.....	2
3. Experiment for vortex Cavitation	4
3.1 Experimental Apparatus.....	4
3.2 Experimental Condition and Experimental Procedure.....	6
4. Experimental Results and Discussions	9
4.1 Configuration of Vortex Cavitation and Flow Pattern	9
4.2 Onset Condition of Vortex Cavitation.....	10
5. Conclusions	13
Acknowledgements	14
References	14
Appendix A. Effects of Dissolved Oxygen for Cavitation Inception.....	24
Appendix B. Experimental Results of Velocity Distribution Measurements by PIV at Vortex Center.....	26

表リスト

表 3.1	キャビテーション初生確認試験条件	15
表 3.2	水とナトリウムの物性値比較	15

図リスト

図 3.1	革新型炉の炉内構造および炉上部プレナム部の概略.....	16
図 3.2	1/10 縮尺試験で確認されたキャビテーションを伴う水中渦.....	16
図 3.3	試験装置および試験装置フロー図	17
図 3.4	試験体	17
図 3.5	可視化試験(全体光およびスリット光観察位置).....	18
図 3.6	キャビテーション音の初生条件確認試験.....	18
図 4.1	可視化試験結果(全体照明).....	19
図 4.2	可視化試験結果(水平方向スリット照明).....	19
図 4.3	可視化試験結果(軸方向スリット照明).....	20
図 4.4	キャビテーション初生条件への圧力の影響.....	20
図 4.5	キャビテーション初生条件への粘性の影響.....	21
図 4.6	キャビテーション発生前のバックグラウンドノイズ分析.....	21
図 4.7	キャビテーション発生前後での音響比較.....	22
図 4.8	キャビテーション音判定による初生条件.....	22
図 4.9	キャビテーション音での判定時と気泡発生による判定時の音響比較(0.29MPa).....	23

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、高速増殖炉による核燃料サイクルの実用化を目指して、コンパクト化により経済性を高めたナトリウム冷却型高速炉の設計研究を実施している[1]。設計に当たっては、原子炉容器の直径を原電実証炉設計時の高速炉[2]と同程度の 10m としながらも電気出力を 2.5 倍程度に上昇させることや、主冷却系ループ数を従来の 3 ループから 2 ループに削減し建設コストを下げることが検討されている。しかしながら、これらの革新的な構造を導入するにあたり、ガス巻き込み現象や温度成層化現象による構造材への熱荷重等、熱流動上の諸課題が発生する可能性があり、炉内流動場を適正化する必要性がある。そこで、原子力機構では、炉内流動場の適正化を図る目的で、1/10 縮尺炉上部プレナム試験[3](以下、炉上部プレナム試験)と 1/1.8 縮尺液面部分モデル試験[4]を実施している。その結果、炉上部プレナム試験において、ホットレグ配管入口部にて液中渦によるキャビテーションの発生が懸念されることが明らかとなった。キャビテーションが発生した場合、構造材料のエロージョンを引き起こすなど構造健全性に深刻な影響をもたらす可能性がある。そのため、キャビテーションの防止が設計上の重要課題となっている。

キャビテーションに関しては、発生評価を模型試験で行う場合の指針として、ターボ機械協会より模型試験方法に関する指針[5](以下、模型試験指針)が示されている。模型試験指針では、液中渦の評価を実機と相似形状の模型、10cm 以上の吸込み配管径、実機との流速一致の試験条件を満たした上でキャビテーションの発生確認を行うこと等を要求している。模型試験指針は主として模型スケールの影響についての指針であるため、実機と同一流体、同一の環境条件で模型試験を行うことを前提としているといえる。一方、炉上部プレナム試験は、模型試験指針を満たした試験体形状となっているものの、実機と比較して、作動流体がナトリウムと水で物性が異なるだけでなく、運転時の圧力条件も 0.3MPa と大気圧で異なるため、キャビテーションが初生する流速が異なる。そこで、物性および圧力の違いについては、もんじゅのエントランスノズルを対象としたキャビテーション試験[6][7]でとられた手法を参考として、キャビテーション係数を相似パラメータとして導入し、キャビテーションの発生条件評価が行われた。その結果、液中渦によるキャビテーションについて、キャビテーション係数による外挿評価では、実機でのキャビテーション発生が懸念されることが指摘された。そこで、炉容器壁に渦の生成を阻害するスプリッタを敷設し、循環の生成を阻害する等の流動適正化を施すことで、実機運転時と同一のキャビテーション係数では、キャビテーションが抑制できる見通しであることが報告された[3]。

しかしながら、ナトリウム中でのキャビテーション係数による評価は先述のもんじゅのエントランスノズルを対象とした試験結果に基づいている。この試験はエントランスノズルのオリフィス部に発生するキャビテーションについての試験であり、オリフィス部からの剥離によるキャビテーションを主対象としている。これに対し、炉上部プレナム試験ではホットホットレグ配管入口部に生じた液中渦によるキャビテーションであり、発生のメカニズムが異なる可能性があり、キャビテーション係数による評価を行うにあたり、物性や圧力の違いを確認しておく可能性がある。

そこで、本研究では、液中渦により発生するキャビテーションに関して、系統圧力(初生時流速に影響)および物性(主として粘性係数)がキャビテーションの初生に与える影響を把握する試験を実施した。

2. 液中渦によるキャビテーション

液中渦によるキャビテーションは、渦中心での圧力降下により発生すると考えられる。そこで、渦中心での圧力降下量を定量化し、系統圧力、粘性係数が違う体系でのキャビテーション評価に対してキャビテーション係数を相似パラメータとして導入する場合の課題について検討を行った。

2.1 液中渦による渦中心での圧力降下量

液中渦による圧力降下量を求めるため、鉛直上向きに発達する定常伸長渦を仮定する。伸長渦にたいする代表的な定常渦のモデルである Burgers モデル[8]によれば速度分布は次式で表される[9]。

$$u(r) = -\frac{1}{2}\alpha r \quad (2.1)$$

$$v(r) = \frac{\Gamma_{\infty}}{r} \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{r}{r_1}\right)^2\right\}\right] \quad (2.2)$$

$$w(z) = \alpha z \quad (2.3)$$

ただし、 u, v, w はそれぞれ円筒座標系における径方向流速、周方向流速、軸方向流速を意味している。 α は下降流速の勾配であり、特性半径 r_1 , 無限遠での循環 Γ_{∞} は以下の式で与えられる。

$$r_1 = 2\sqrt{\nu/\alpha} \quad (2.4)$$

$$\Gamma_{\infty} = \frac{1}{2}r_1^2\omega_0 \quad (2.5)$$

ただし、 ω_0 は渦中心での角運動量(Burgers モデルの仮定による)である。式(2.2)により得られた周方向流速 v を用いれば、渦中心での圧力降下量は、圧力変化と回転による遠心力の釣り合いの関係から計算することができ、最終的には以下の式で表される[9][10]。

$$\Delta P_k = \ln 2 \cdot \rho \left(\frac{\Gamma_{\infty}}{2\pi r_1} \right)^2 \quad (2.6)$$

ここでは、渦による圧力降下は流体の回転運動による圧力降下量が支配的であると仮定し、式(2.6)で表される圧力降下量を渦中心での圧力降下量と見て以下議論する。

2.2 キャビテーション係数による初生条件評価

実機と模型試験では系統圧力が異なることにより、キャビテーション初生時の流速が異なると考えられる。そこで、炉上部プレナム試験では、相似パラメータとしてキャビテーション係数を導入することでキャビテーション評価を行っている。キャビテーション係数 K は、以下で定義さ

れる。

$$K = \frac{P_0 - P_s}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.7)$$

ここで、 P_0 は流体中の静圧、 P_s は飽和蒸気圧、 V は代表流速である。キャビテーション係数は動圧と静圧の比であり、発生しきい値となるキャビテーション係数(以下、初生キャビテーション係数)以下のキャビテーション係数が小さい条件ではキャビテーションが発生すると判断される。すなわち、初生キャビテーション係数の増加は非安全側となる。一方、キャビテーション初生時の流速が変化するとフローパターンが非相似に変化する可能性がある。そのため、代表流速の取り方によっては、代表流速の増加が渦中心での局所流速の増加と非線形な関係となり、系統圧力の変化と共に初生キャビテーション係数が変化する流速依存性を持つ可能性がある。液中渦をキャビテーション係数で評価する場合、代表流速の取り方に依存性しないキャビテーション係数による評価を行うには、式(2.7)の分母の動圧部分を局所的な圧力降下量を直接用いてキャビテーション係数を定義すればよいと考えられる。すなわち、式(2.6)を

$$\Delta P_k = \frac{1}{2}\rho \left(\sqrt{\frac{\ln 2}{2}} \frac{\Gamma_\infty}{\pi r_1} \right)^2 \quad (2.8)$$

とみて、代表流速は括弧内の値(V)で定義すればよいと考えられる。しかしながら、一般には r_1 、 Γ_∞ を用いて実機設計を行うことは困難であるため、代表流速として配管入口部での平均流速(= V_d)を用いて評価を行うことになると考えられる。この場合、 V_d に対してフローパターン相似が成り立つ場合は、 $V_d \propto V$ となるため流速依存性を持たないが、一般には代表流速に対してフローパターン相似が成立しない可能性が高い。よって、代表流速として配管入口部での平均流速をとった場合、キャビテーション係数(初生時のキャビテーション係数)が流速依存性を持つ可能性がある。以上より、炉上部プレナム試験結果等から実機評価を行う場合、ホットレグ配管での平均流入流速を採用し評価をおこなうことになるため、液中渦によるキャビテーションについて初生キャビテーション係数の流速依存性を把握する必要がある。

一方、粘性係数に関しては式(2.4),(2.5)を式(2.6)に代入することにより $\Delta P_k \propto \nu$ の関係が得られる。すなわち、低粘性のナトリウムである実機では安全側となる可能性がある。ただし、Burgersモデルが必ずしも実現象を表していない上、代表流速として配管入口部での平均流速等取る場合粘性係数は考慮されないことから、粘性係数がキャビテーションの初生に与える影響について把握する必要がある。

3. 液中渦によるキャビテーション実験

3.1 液中渦試験装置

図 3.1 は平成 13 年度設計での、革新型炉の炉内構造および炉上部プレナム部の概略を示している。設計上の特徴として、冷却系が 2 ループ化され、炉心部から 1 次系への流出配管(ホットレグ)が 2 本となっていることが挙げられる。同時に、従来設計[2]と比較して炉心部での熱出力を増大させることが検討されている。その結果、ホットレグ入口での流速が増大することとなる。図 3.2 は炉上部プレナム試験にて観察された液中渦によるキャビテーション発生の様子を示している。右上の写真に示すように、ホットレグ配管入口部にて、液中渦によるキャビテーション発生に伴う白い渦糸が確認できる。また、右下のベクトル図はホットレグ入口部での時間平均流速分布を示しており、R/V からの液中渦による強い渦が確認できる。すなわち、このような液中渦によりキャビテーションが発生することがわかる。本研究は、以上に述べた液中渦によるキャビテーションを対象としており、2.章の観点を踏まえ、

- ①液中渦によるキャビテーションの可視化
- ②初生キャビテーション係数の流速(圧力)依存性の把握
- ③粘性係数の相違によるキャビテーション発生への影響の把握

を目的とし、水を作動流体として内部流況を観察でき、系統の加圧条件を変更しつつ試験を行うことが出来る試験装置を製作した。試験装置は現象を単純化し大スケールの渦が単一に形成される実験体系とするため円筒体系とし、液中渦の可視化が行える試験体とした。また、②の流速依存性に関しては、系統圧力を上昇させた場合のキャビテーション初生時の流速を把握することにより系統圧-初生流速の非線形性の把握に置き換えて試験を行った。

3.1.1 液中渦試験装置の概要

試験装置の概観およびフロー図を図 3.3 に示す。試験装置は液中渦を発生させる試験体、ポンプ、フィルタ、アキュムレータから構成され、計測系として流量計、熱電対、圧力計を設置している。装置の主な設計条件は以下の通りである。

作動流体：	水
設計温度：	50°C
設計圧力：	0.2MPa (ゲージ圧)
最大流量：	70m ³ /h
出口配管最大平均流速：	9.9m/s

ポンプより吐出された作動流体(水)は不純物除去のためのフィルタへのバイパスラインを経て試験体手前で2系統に分岐され、流量計、流量調整弁を経て試験部へと流入する。流量計測用の電磁流量計は分岐された2系統それぞれに設置されており、流量計の指示値を基に2系統の流入配管の流量配分の調整が可能となっている。試験部については3.1.2節で詳細を述べる。試験部に2系統から流入した流体は、試験体容器下部中央に設置した内径53.5mmの出口配管1系統に集約され試験部から流出する。その後、アキュムレータによる加圧部、熱電対の測温部、ストレーナを経てポンプ吸込口へと戻るループ構造となっている。また、ループ内はアキュムレータ内の液面を窒素ガスで加圧することにより、系統圧力を制御し試験体底面の圧力で最大0.3MPaまで加圧できる構造となっている。これによりキャビテーションの初生時流速が変化するため、流速依存性を見ることが可能となる。なお、本試験での系統圧力は試験体底面に設けた静圧タップにダイヤフラム式の圧力伝送器を取り付け、その指示値により定義した。

主要な機器の仕様を以下に示す。

- | | |
|----------|--|
| 1) 循環ポンプ | 形式：横型渦巻きポンプ
最大流量：約70m ³ /h
全揚程：約12m |
| 2) 電磁流量計 | 流量範囲：0～35m ³ /h |
| 3) 圧力伝送器 | 計測範囲：0.1～0.3MPa
精度：±1% |
| 4) 温度計 | 型式：K型 クラス1 φ3.2
構造：シース熱電対 非接地型 |

3.1.2 液中渦試験体

試験体概略を図3.4に示す。本試験装置は、上部プレナム試験装置のHL入口近傍で見られた、液中渦によるキャビテーションを模擬することを目的としている。そこで、試験体容器を円筒状とし、左右接線方向から作動流体を流入させ循環を形成する体系とした。

試験体中央はφ300×345mmの円筒状容器であり、試験体容器上部の左右接線方向に取り付けられた200mm×52mmのスリット状の入口から流体が流入する。試験体流入部には開口率30%の整流板が3枚千鳥配置されており、作動流体はこの整流板を経て試験部に流入する。円筒容器の接線方向に流れ込んだ流体は円筒部を周方向に回転しながら循環を形成し、試験体中央下部にある内径53.5mmの出口配管から流れ出る構造となっている。よって、容器の接線方向流れにより形成される循環と、出口配管により形成される循環に垂直な方向の吸込み流れにより液中渦が形成される。また、図3.4右上および左下の図に示す通り、試験体上部にφ150mm、試験体正面に150mm×280mmの亚克力窓をそれぞれ設置し、通常光による可視化観察およびレーザを用いた流速分布の計測が可能な構造となっている。

3.2 試験条件および試験方法

3.2.1 キャビテーションおよび流況の可視化

液中渦によるキャビテーション発生時の様子を可視化により観察した。可視化試験の概略を図 3.5 に示す。試験体内部に蛍光灯を用いた全体光を照射し、渦によるキャビテーションの生成・消滅過程を観察した。さらに、図に示す通り、試験体内部の全般的な流況を把握する目的でスリット光源を用いた流況の可視化を行った。スリット光源としてハロゲンライトを使用し、鉛直方向および水平方向に射出し可視化を行った。加えて、トレーサー粒子（エクспанセル）を流体中に混入しておき、その軌跡をデジタルビデオカメラにて撮影した。観察断面は、図 3.5 に示すとおり渦の水平方向 3 断面および鉛直方向 2 断面について観察を行った。

3.2.2 キャビテーション初生条件の計測

1) 試験条件および試験項目

キャビテーション初生条件に対する流速依存性(代表流速と局所流速の非線形性)および粘性係数依存性把握を目的として、可視化観察によるキャビテーション初生条件の計測を行った。試験条件を表 3.1 に示す。なお、試験時の加圧方法は 2)、温度調節方法は 3)、溶存酸素量の調節方法は 4)で述べる。

流速依存性に関しては、試験条件設定時に流速を変化させると配管の圧力損失により系統圧力も合わせて変化することから、流速を固定した後、アキュムレータによる加圧量を調整することにより、系統圧を変化させてキャビテーション発生条件を計測した。3.1.1 節で述べたように試験時圧力の定義点は試験部底面とし、ダイアフラム式の圧力センサにより圧力計測を行った。実験時の水温は $24.0^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ とし、流速条件は吸い込み配管の平均流速で $3.5\text{m/s} \sim 5.4\text{m/s}$ の範囲で変化させて実施した。系統圧力については 5.0kPa 間隔で変化させ、データを収録した。圧力の設定方法についてはキャビテーションの発生確認は目視によって行った。多くの場合、キャビテーションの初生点付近では、キャビテーションは間欠的に発生・消滅する。そこで、1 分間の可視化試験を行い、30 秒に 1 回以上の頻度で目視可能なキャビテーション気泡(1mm 以上)が確認された場合を発生条件として定義し、キャビテーション初生条件を計測した。一方、粘性係数依存性に関しては水温を変化させ $33.0^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ での試験を行い、流速依存性計測時の 24°C 条件でのデータと比較した。初生条件の判定方法は 24°C 条件での試験と同様の方法とした。

また、従来のエントランスノズル試験[6][7]にて確認されたキャビテーションとの比較および音響計測によるキャビテーション初生の把握の可否を確認するため、図 3.6 に示す通り周波数帯域 $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ のマイクを上部観察窓上に設置し、キャビテーション発生時のノイズと可視化画像を、デジタルビデオカメラを用いてサンプリング周波数 48kHz で収録し、ノイズ分析を行った。さらに、キャビテーション発生時のノイズによってキャビテーション初生判定を行った場合のキャビテーション発生条件の把握を表 3.1 の 24°C 条件の場合について実施し、上述の目視確認から計測した結果との比較を行った。

2) 試験時の系統圧力制御方法

キャビテーション係数の流速依存性の計測時の系統圧力条件として、無加圧条件（アキュムレータ部の絶対圧で 0.1MPa）から実機カバーガス圧条件である圧力条件（同 0.3MPa 程度）を模擬することとした。試験圧力は、3.1.1 で述べたように試験部底面に設けた静圧タップにダイアフラム式圧力伝送器を取り付け、絶対圧 0.12MPa～0.29MPa の範囲で試験を行った。試験時には 5kPa 間隔で圧力条件を設定してデータを収録した。

加圧方法は、窒素ガスポンペの圧力をアキュムレータにおいて供給、液面を加圧することにより系統加圧を行った。なお、窒素ガス加圧により窒素ガスが水に溶解しやすくなり、アキュムレータ内の水中の窒素の溶存度が上昇すると、窒素と酸素の溶存比率が変わることとなる。その場合、4)で述べる溶存酸素の計測のみでは溶存空気の制御は困難となる。そこで、アキュムレータと系統を仕切るバルブ開度を極力小さく調整し、系統内への圧力の伝達はできるが水の循環は抑えることとした。このアキュムレータを仕切るバルブと主配管まで 1m 程度の長さがあることから、窒素ガス加圧による溶存窒素の拡散がキャビテーション初生条件へ与える影響は小さいものと考え、試験を行った。

3) 試験時の温度制御方法

水の温度が変わると、粘性係数だけでなくキャビテーション係数の影響因子である飽和蒸気圧、密度が変化する。これらは初生条件に影響するため、試験時は温度制御を行なう必要がある。ナトリウムの物性は表 3.2 に示すとおり、550°C の条件で動粘性係数 $2.74 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、密度 820 kg/m^3 であり、ナトリウムと水の密度の差については、キャビテーション係数の中に含まれているが、ナトリウムの粘性は水に対し、動粘性係数による比較で 1/3 程度と大きな差があるが、2章で述べたようにキャビテーション係数の構成パラメータとして陽に考慮されていない。そこで、粘性係数の影響を把握するために水の温度を上げて粘性を小さくすることにより、その影響を調査した。

また、試験時にはポンプの入熱や外気への放熱により水温が変化するが、これらについては $\pm 1.0^\circ\text{C}$ の範囲に抑えつつ試験を行った。

4) 溶存酸素量制御方法

水中の溶存空気や気泡の存在はキャビテーション初生条件に影響することがわかっている[6]。本試験では溶存酸素量を指標として溶存空気の制御を行った。試験に使用する水は真空脱気装置を通過させ、水中に溶存する空気を脱気処理することにより溶存空気量及び気泡の抑制を図った。

水に溶解している空気の成分としては、主に窒素 N_2 、酸素 O_2 、二酸化炭素 CO_2 が考えられる。二酸化炭素は通常、大気中に占める分圧が 0.037% と小さく、1l の水に対する溶解 $1.71 \times 10^3 \text{ cm}^3$ (0°C、0.10MPa) を考慮しても溶存量は 1 cm^3 以下と考えられ無視できる。よって、 N_2 と O_2 の溶存割合を考えれば空気の溶存量が推定できる。水に対する N_2 と O_2 の 1l の水に対する

溶解度は、0°C、0.10MPaにおいて24cm³、49cm³溶解し、大気圧下におけるそれぞれの分圧を、4/5と1/5と考えれば、それぞれの溶解量は以下ようになる。

$$\text{N}_2 : 24 \times 4/5 = 19.2 \text{ cm}^3$$

$$\text{O}_2 : 49 \times 1/5 = 9.8 \text{ cm}^3$$

これから、溶存酸素 O₂ が溶存空気量の約 1/3 を占めることがわかり、溶存酸素量を把握すれば逆算により全体の溶存空気量が推定できる[11]。キャビテーション初生条件の把握試験時には、脱気装置の性能等を考慮し、溶存酸素量は最大値で 0.20mg/l (0.15 cm³/l (酸素 23.7°C、0.10MPa の時の密度 1.30kg/m³ として計算) [12]) 以下の範囲において試験を行った。なお、溶存酸素の計測は透過膜型の溶存酸素計 (精度±0.06mg/l 以内) を用いて行った。

4. 実験結果および考察

4.1 キャビテーションの発生形態および流況

キャビテーション初生条件における可視化観察の一例を図 4.1 に示す。①, ②はそれぞれ、試験体の上面および側面から斜め上方向に向かって可視化した結果であり、液中渦によって発生したキャビテーション気泡を示している。液中渦によるキャビテーションの気泡は、試験体上面の観察窓直下から、下向きに発生していることが確認できる。③は発生したキャビテーション気泡の様子を側面より拡大して撮影したものである。キャビテーション気泡は上部観察窓下面から出口配管方向に向かって発生し、ある長さで消滅することが確認できる。詳細は流況の可視化の部分で述べるが、キャビテーション気泡は出口配管からの吸込み流れと試験体に発生させた循環により形成された渦の渦糸に沿って発達しているものと推察される。気泡の消滅に関しては、キャビテーション初生条件において、壁面からの水頭圧差による圧力上昇や、渦中心での流速の減少により圧力降下量が減少するため、気泡が消滅するものと考えられる。その他図中のポンチ絵で示すように、上部観察窓下面付近では、渦中心で鉛直方向に発達するキャビテーション気泡とは別に、周囲に拡散するような形で気泡が発生することが観察された。今回の試験では、系統圧が低い条件ほどキャビテーションにより生成された気泡は上部観察窓の壁面から長く発達する傾向がみられた。また、系統圧が低い条件ほどキャビテーションにより発生した気泡群の存在時間も長くなる傾向が見られ、大気圧条件では数秒以上継続して発生したのに対し、高圧条件ではコマ数秒程度で気泡は消滅する傾向が確認された。

図 4.2 に水平方向にスリット光を照射して、①側面観察窓上端、②中間、③出口配管上端を試験体上部から観察した結果を示す。これらより、側面観察窓上端部①の流況は渦中心を軸として、ほぼ同心円上に流れており中間部②の流況もほぼ同様の傾向を示している。出口配管上端③の高さでは、出口配管周囲 2cm 程度から徐々に出口配管中心方向に流れの方向が変わり始め、中心方向に向かいながら出口配管に吸い込まれる流れが形成されることを確認した。

図 4.3 の写真およびポンチ絵は鉛直方向にスリット光を照射し、①出口配管中心断面、②出口配管の外側の断面を試験体側面より観察された流況を示したものである。①の出口配管中心断面の流況写真から、上部観察窓壁面から出口配管の間に渦糸が白線状に繋がっているのが確認できる。これは、可視化用トレーサーとして混入したポリマー粒子(エクспанセル)が渦中心に集中したものである。これからも、出口配管からの吸込み流れと試験体に発生させた循環により、強い渦が形成されキャビテーションを発生させたと考えられる。すなわち、炉上部プレナム試験での液中渦発生時の流動場を単純化し大スケールの渦が単一に形成される流動場でのキャビテーションが実現された。②の断面では、配管上部は右から左にほぼ水平な流れが観察され、出口配管近傍の高さになると流れは徐々に下方向に向かいながら出口配管に吸い込まれている様子が確認された。①、②の出口配管上端より下の領域では、配管周囲から出口配管に向かう流れが確認された。特に、容器下面に沿って配管中心方向に向かう流れが配管側面に沿って旋回しながら上昇し、配管出口に向かう流れとなっていることが観察された。この流れは、①の図から試験体

部の底面に沿って流れており、その流れ方向から、円筒の壁面近傍を下降してくる流れとなると推察される。この試験体部底面に沿った流れは、装置のスケールや形状に影響されると考えられるが、この影響については課題として残った。

4.2 初生条件把握試験結果

(1)キャビテーション初生条件の流速依存性

3.1 節で述べたとおり、流速依存性(フローパターンの非相似性)に関して、系統圧力を上昇させた場合のキャビテーション初生流速を把握することにより、系統圧-初生流速の非線形性の把握に置き換えて試験を行った。そこで、絶対圧で 0.10MPa から 0.29MPa までの系統圧力に対するキャビテーション初生流速を計測した。なお、キャビテーションの気泡を目視で確認した条件を初生点として定義した。試験結果を図 4.4(1)に示す。系統圧力を横軸として、キャビテーション初生における出口配管での断面平均流速をプロットした。高圧力の条件では、キャビテーションの初生となる流速はより大きくなり、キャビテーションは起こりにくくなっていることが確認できる。図 4.4(2)に系統圧力とキャビテーション係数で整理した結果を示す。系統圧力を横軸として、初生時のキャビテーション係数をプロットした。キャビテーション係数は、流体の圧力 P は試験体部の底面で計測した圧力、流速 V_d は出口配管での平均流速を代表値として用いて算出した。また、飽和蒸気圧力 P_s および流体密度 ρ は、熱電対にて計測された温度と理科年表の物性表[15]から線形内挿により求めた値を使用した。図 4.4(2)より、高圧条件にて初生キャビテーション係数がより大きくなる傾向がみられた。すなわち、今回の体系ではフローパターン相似は成り立っておらず、代表流速(吸込み流速)に対する、式(2.8)で示すような渦中心での圧力降下量に寄与する局所流速(=V')の増加率は高圧条件(高流速条件)程大きくなることが確認された。よって、キャビテーション係数相似により系統圧の違う条件を評価する場合、式(2.7)のキャビテーション係数の定義から高圧条件では代表流速による圧力降下量の評価が過小となり、非安全側の評価となる可能性がある。ただし、その変化量は 0.1-0.3MPa の範囲でキャビテーション係数が 10%程度増加する程度であった。よって、実機よりも低い圧力条件での炉上部プレナム試験結果から実機の評価を行う場合は適切な裕度を見込む必要があると考えられる。

(2)キャビテーション初生条件の粘性係数依存性

ナトリウムと水のように、流体の粘性が異なる場合、渦内の速度分布が異なり、キャビテーション初生条件が異なることが考えられる。そこで、粘性係数の変化がキャビテーションの初生に与える影響を調査した。表 3.1 に示すように、水温 24°C、33°C の 2 条件でキャビテーションの初生条件を計測し、両者の比較を行った。それぞれの条件での動粘性係数は、 9.06×10^{-7} 、 7.78×10^{-7} m²/s である。キャビテーション係数の算出は流速依存性の把握時と同様の方法で行った。

高粘性の 24°C 条件と低粘性の 33°C 条件におけるキャビテーション初生条件を比較した結果を図 4.5(1),(2)に示す。図 4.4 と同様に、(1)は圧力-初生流速の関係、(2)は圧力-初生キャビテーション係数の関係を示している。(1)の初生流速と圧力の関係については、24°C 条件、33°C 条件共に

差は見られなかった。初生キャビテーション係数については 33°C 条件で低圧力条件においてわずかに大きくなる様子が見られた。すなわち同一の圧力条件であれば、低粘性条件の方がより危険側となる傾向が見られた。しかし、系統圧力が高くなるとこの傾向は小さくなり、0.29MPa では、粘性の相違による差は見られなくなることがわかった。これは、高圧条件下では流速が大きくなることにより、乱流粘性の影響が分子粘性と比較して相対的に大きくなるためであると考えられる。ただし、今回の試験では装置の制約上、温度変化量が小さく、粘性の変化量が十分でなかったこともあり、粘性の違いによるキャビテーション係数には定量的な評価には至らなかった、今後更に広いレンジでの粘性の影響を確認する必要がある。

(3)キャビテーションノイズによる初生条件確認

従来のエントランスノズル試験[6]にて確認されたオリフィスキャビテーションとの音響比較および音響計測によるキャビテーション初生の把握方法を検討する目的で、キャビテーションノイズの確認試験を実施した。

まず、従来のキャビテーションとの比較について述べる。図 4.6 に気泡を伴うキャビテーション渦発生前のノイズの周波数分析の結果を示す。横軸を周波数とし、バックグラウンド(装置停止時)ノイズ、ポンプノイズ(試験体には流動なし)、キャビテーション発生前のノイズの PSD を比較した。バックグラウンドノイズに加えて、12kHz 付近にポンプ動作によるノイズが重畳しているのが確認できる。これを元にキャビテーション発生時と発生前のノイズを比較したものが図 4.7 である。計測時の圧力は 0.10MPa(大気圧)条件である。キャビテーション発生時には、図中の破線で囲まれた 15kHz~20kHz の高周波数領域にて PSD が上昇していることが確認できる。これは 10kHz 以上の領域でノイズが増加する報告されているエントランスノズル試験結果と矛盾しない結果であり、キャビテーションノイズであると考えられる。なお、本試験の結果では、使用した集音マイクの周波数帯域は上限が 20kHz であるため、エントランスノズル試験で確認されたような、10kHz~100kHz の範囲で広範囲でのノイズについては確認できなかった。

また、キャビテーションノイズによる判定の可否を探るため、ノイズによって判定した初生条件と気泡の発生により判定した初生条件との比較を行った。結果を図 4.8 に示す。横軸は圧力、縦軸は初生キャビテーション係数を示している。大気圧条件ではノイズ判定条件、気泡判定条件共にほとんど差が見られないが、加圧条件 (0.29MPa) では初生キャビテーション係数が 30%程度増加することが確認された。すなわち、高圧条件になる程ノイズ発生による初生条件(以下、ノイズ判定条件)とキャビテーション気泡の視認による初生条件(以下、気泡判定条件)に差が生じる傾向が確認された。これは、ノイズで判定した条件では、キャビテーションの気泡の視認はできない程度の非常に小規模なキャビテーションが発生しているためであると考えられる。図 4.9 に 0.29MPa の高圧条件下において、キャビテーションノイズによって初生判定を行った場合と気泡により初生判定を行った場合のキャビテーション発生時の音響比較を示す。PSD の比較から、ノイズ判定条件時は図中の破線で囲まれた限られた帯域でノイズが発生しているのに対し、気泡判定条件ではより広帯域でのノイズが確認された。これは、気泡判定条件では、ノイズ判定条件と

比較して多数かつスケールの異なる気泡の生成、消滅が起きたことによると推察され、ノイズ判定時にも非常に小規模なキャビテーションが発生しているとの考えと一致している。しかしながら、キャビテーションの気泡が発生していたとしても、発生直後に消滅している、あるいは非常に小さいことから、この条件における構造材への影響や振動の発生等は殆どないと考えられる。

なお、今回の試験では、ひも状キャビテーション判定の容易さを考えて気泡による初生条件の判定を行った。一方、液中渦によるひも状キャビテーションに関しても音響計測によるキャビテーションの初生の把握は十分可能であり、気泡による初生条件判定より微小なキャビテーションの検出が可能であることを確認した。よって、ナトリウム試験にてキャビテーションの初生確認試験を行う場合には、有効な判定手法の一つとして利用できるといえる。

5. おわりに

液中渦によるキャビテーションに関する水流動実験として、炉上部プレナムの縮尺モデル試験で見られた、液中渦によるキャビテーション発生時の流動場を単純化した、大スケールの渦が単一で形成される試験体系にて実験を行い以下の結論を得た。

1)本試験装置でのキャビテーションの定性的特徴

- ・ 流況の観察の結果、渦糸が可視化窓下面から出口配管まで繋がっており、この渦により試験体上部可視化窓の下面を発生点としてキャビテーションが発生した。
- ・ キャビテーション気泡は主として渦糸に沿って発達するが、発生点の付近では発生点から拡散するように発達するものもみられる。
- ・ 高圧条件では、キャビテーションにより生成された気泡の維持される時間が短くなる傾向が見られた。

2)キャビテーションの初生条件

- ・ 本試験体系では、流速依存性として系統圧が高い条件ほど初生キャビテーション係数が高くなる結果が得られており、炉上部プレナム試験結果から外挿にて実機評価を行う場合は、キャビテーション係数一致では非安全側の評価となる可能性がある。
- ・ キャビテーション係数の変化量は 0.1-0.3MPa の範囲で 10%程度増加する程度であった
- ・ 大気圧条件では、粘性が低い方が初生キャビテーション係数は大きくなる傾向が見られたが、系統圧力が高くなると粘性による差異は小さくなり、実機圧力条件では差は見られなくなることがわかった。

3)キャビテーションノイズ

- ・ 本試験装置でのキャビテーションノイズの周波数帯域は 15kHz~20kHz(高周波数側は計測器具の計測限界による)であり、これは従来のエントランスノズル試験での結果に矛盾しないことを確認した。
- ・ ノイズによるキャビテーション初生判定は可能であり、ノイズによる初生判定の方が気泡の可視化による判定に比べ、より低い流速条件で微小なキャビテーションを検出できる事を確認した。

また、今後の課題として以下が挙げられる。

- ・ キャビテーション初生への粘性係数の影響確認をより広いレンジにて実施する必要がある。
- ・ 粘性の影響による渦中心での速度分布の変化を捉えるため、PIV 等による流速分布計測を行い、流速分布の変化が圧力降下に及ぼす影響を明らかにすることが望まれる。[付録 B に現状での流速分布測定の結果を示す。渦中心での圧力降下量の評価を行うためには、分解能や回転場における計測手法の改善が必要であると考えられる。]

謝辞

試験結果の考察にあたり、三菱重工業の白石直氏に多大なご助言を頂きました。また、実験の遂行にあたり、常陽産業（株） 伊藤真美氏、吉川泰弘氏、関根正氏に、データ処理にあたり NESI（株）中根茂氏に多大なご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Niwa, H., Roadmap toward the commercialization of FR Cycle System in Japan, Proc. 5th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, Jeju, pp.29-31, 2006
- [2] M.Ueta, et al., The development of demonstration fast breeder reactor (DFBR), ICONE-3, Vol.2, p771 (1995)
- [3] 木村暢之、林謙二、他 炉容器コンパクト化に関する流動特性試験 (炉内流況の把握と流動適正化方策の考案)、サイクル機構報告書 JNC TN9400 2003-032(2003)
- [4] 木村暢之、飛田昭、他 1/1.8 縮尺部分モデルによる原子炉容器内ガス巻き込み特性の評価-ガス巻き込み現象の把握-、サイクル機構報告書 JNC TN9400 2004-067
- [5] ターボ機械協会 ポンプ吸い込み水槽の模型試験方法 ターボ機械基準 TSJ S 002:2005 (2005)
- [6] 佐野保、浜田勝憲、他「私信」(1980)
- [7] 佐野保、高橋伸友、他「私信」(1980)
- [8] J.M.Burgers, A mathematical model illustrating the theory of turbulence, Advances in applied mechanics edited by R.Mises, T.Karman, Academic Press INC., New York,(1948)
- [9] 守屋祥一 伸長渦理論と詳細可視化・計測に基づく自由表面渦の流動特性評価、電力中央研究所報告 U97072 (1998)
- [10] 堺公明、伊藤啓、他 数値解析による自由液面からのガス巻込み評価手法に関する研究-評価指針(第一次案)の提案- JAEA-Research 2006-066 (2006)
- [11] 山崎卓爾：キャビテーション工学、日刊工業新聞社、(1978)
- [12] 伝熱工学資料 改訂第4版、日本機会学会、(1986)
- [13] Adrian, R., J., Particle-Imaging techniques for experimental fluid mechanics, Ann Rev. Fluid Mech., Vol.23,261, 1991.
- [14] Sakakibara, J., Hishida, K., and Maeda, M., Measurements of Thermally Stratified Pipe Flow Using Image Processing Techniques, Experiments in Fluids, Vol.16, pp 82-96, (1993).
- [15] 理科年表 (平成 12 年度版)、丸善、(1999)

表 3.1 キャビテーション初生確認試験条件

圧力 MPa	温度 °C	流量 m ³ /h	溶存酸素量
0.12~0.29	24, 33	3.5~5.4	0.15mg/l 以下

表 3.2 水とナトリウムの物性値比較

	水		Na
	20°C	30°C	550°C
動粘性係数(m ² /s)	1.0X10 ⁻⁶	0.80X10 ⁻⁶	0.27 X10 ⁻⁶
密度(kg/m ³)	1.0 x10 ³	1.0 x10 ³	0.82 x10 ³
飽和蒸気圧(kPa)	1.3	2.2	1.3

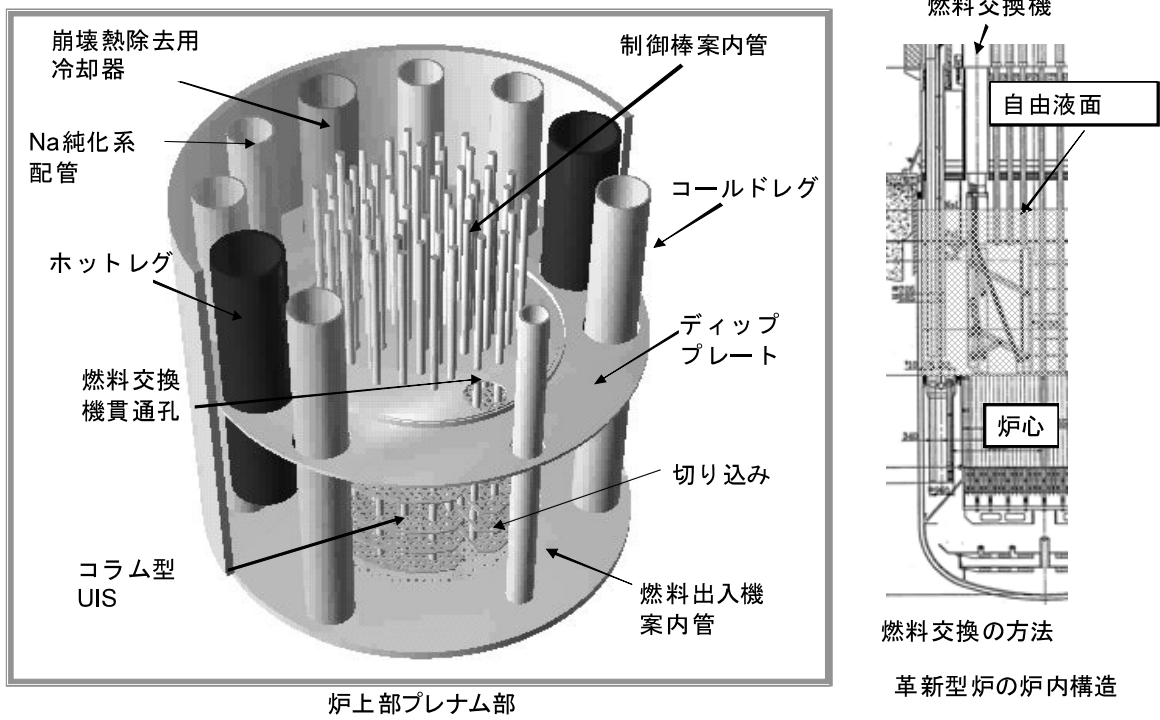


図3.1 革新型炉の炉内構造および炉上部プレナム部の概略

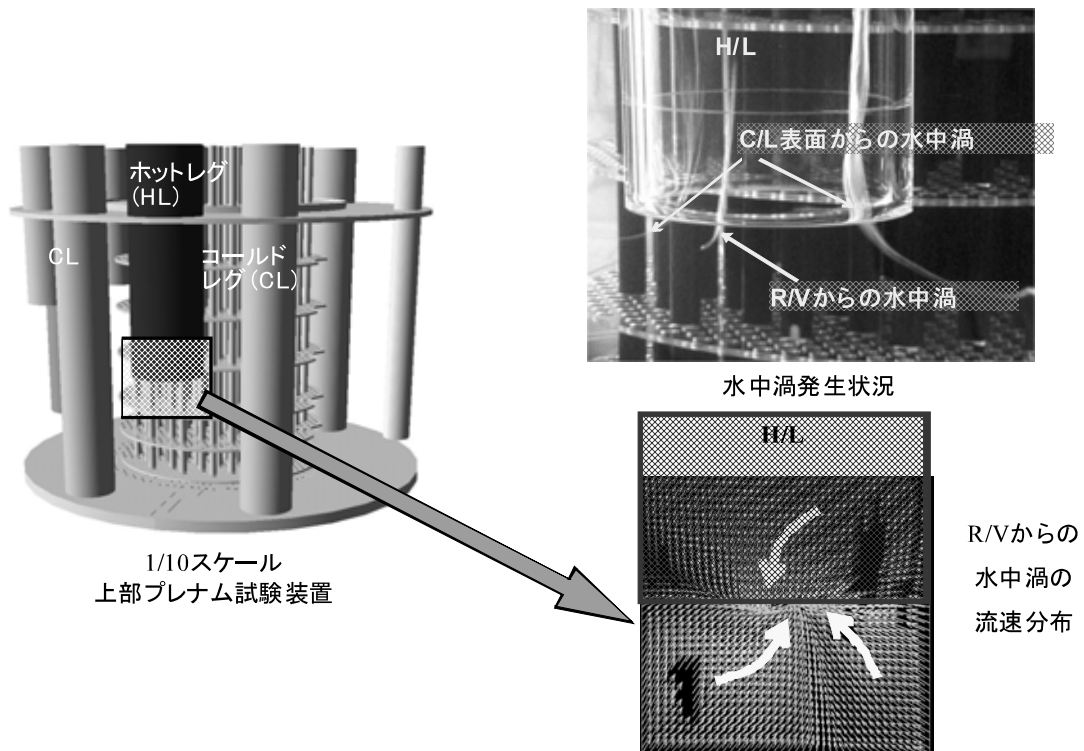
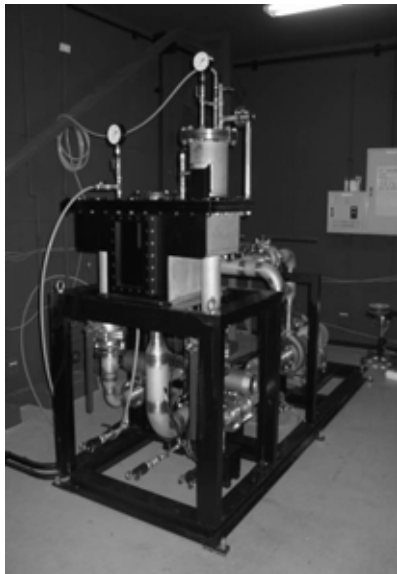
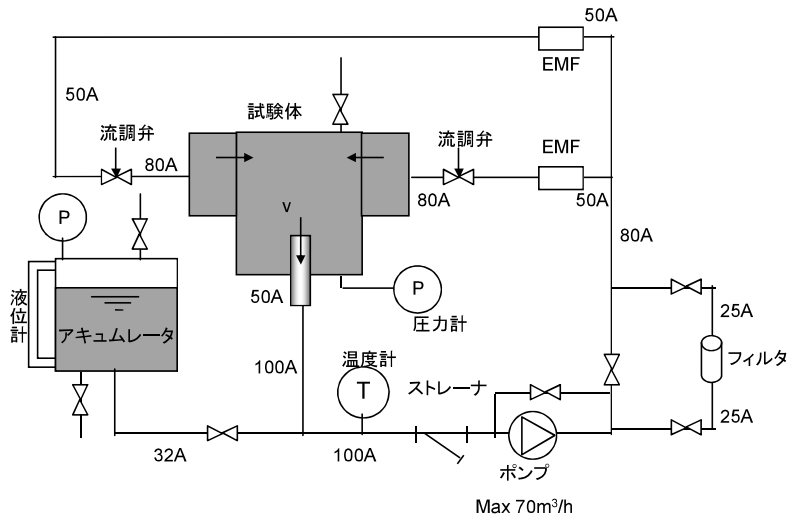


図3.2 1/10縮尺試験で確認されたキャビテーションを伴う水中渦



試験装置



試験装置フロー図

図3.3 試験装置および試験装置フロー図

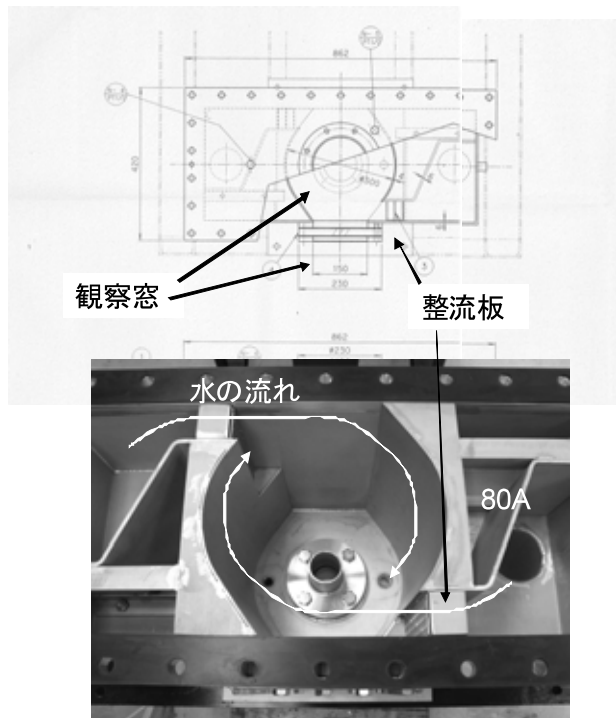
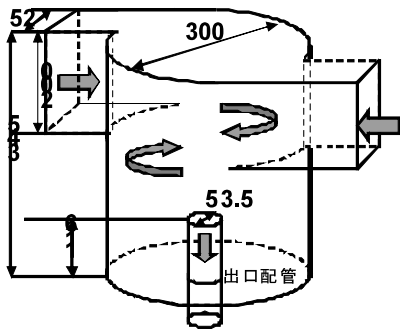


図3.4 試験体

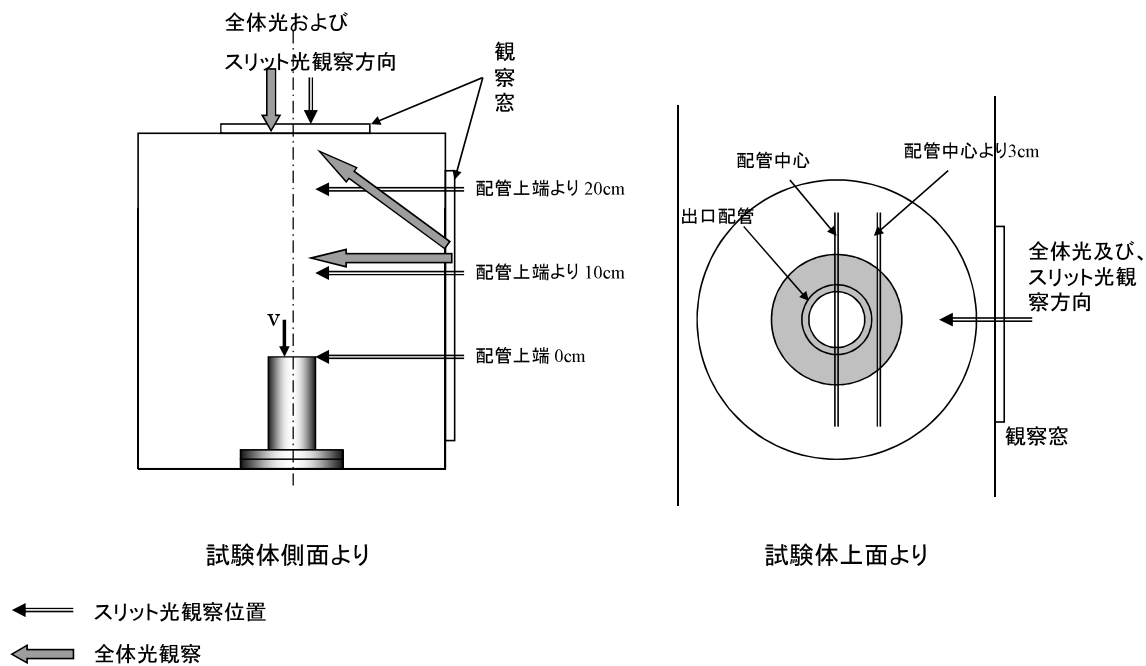


図3.5 可視化試験（全体光およびスリット光観察位置）

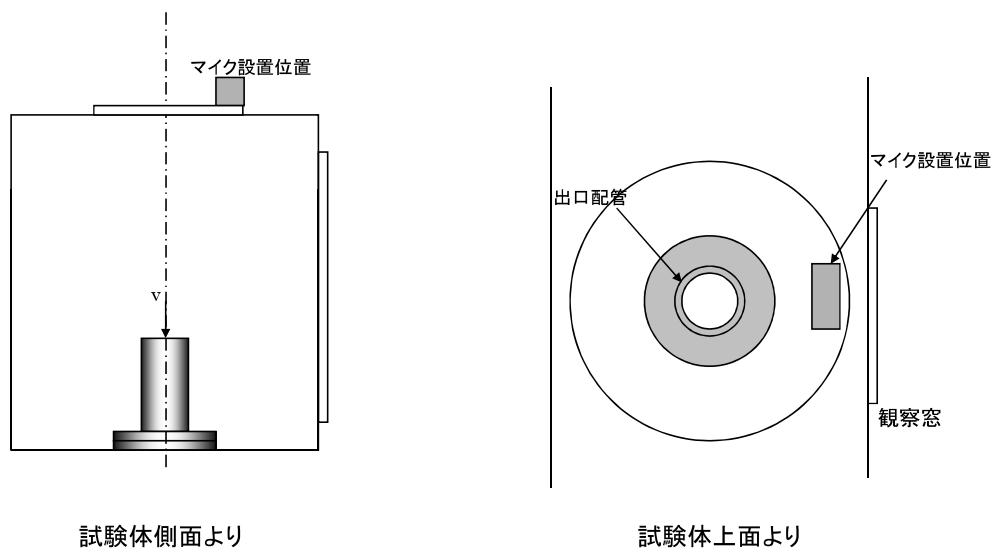


図3.6 キャビテーション音の初生条件確認試験

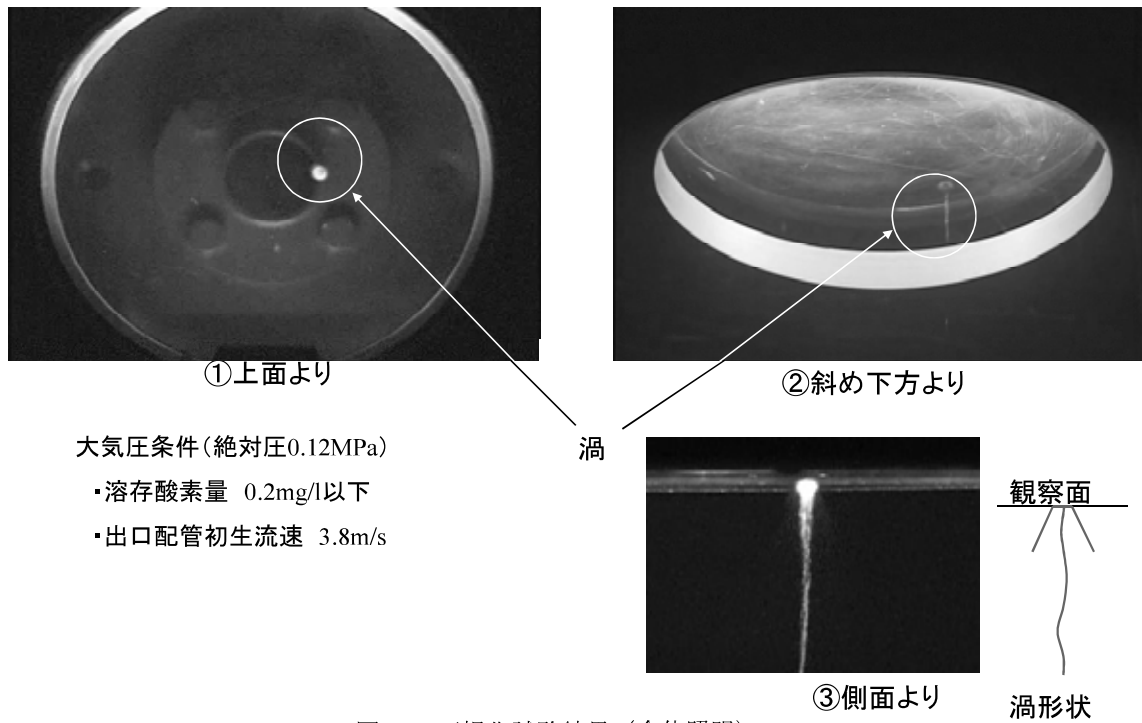


図4.1 可視化試験結果 (全体照明)

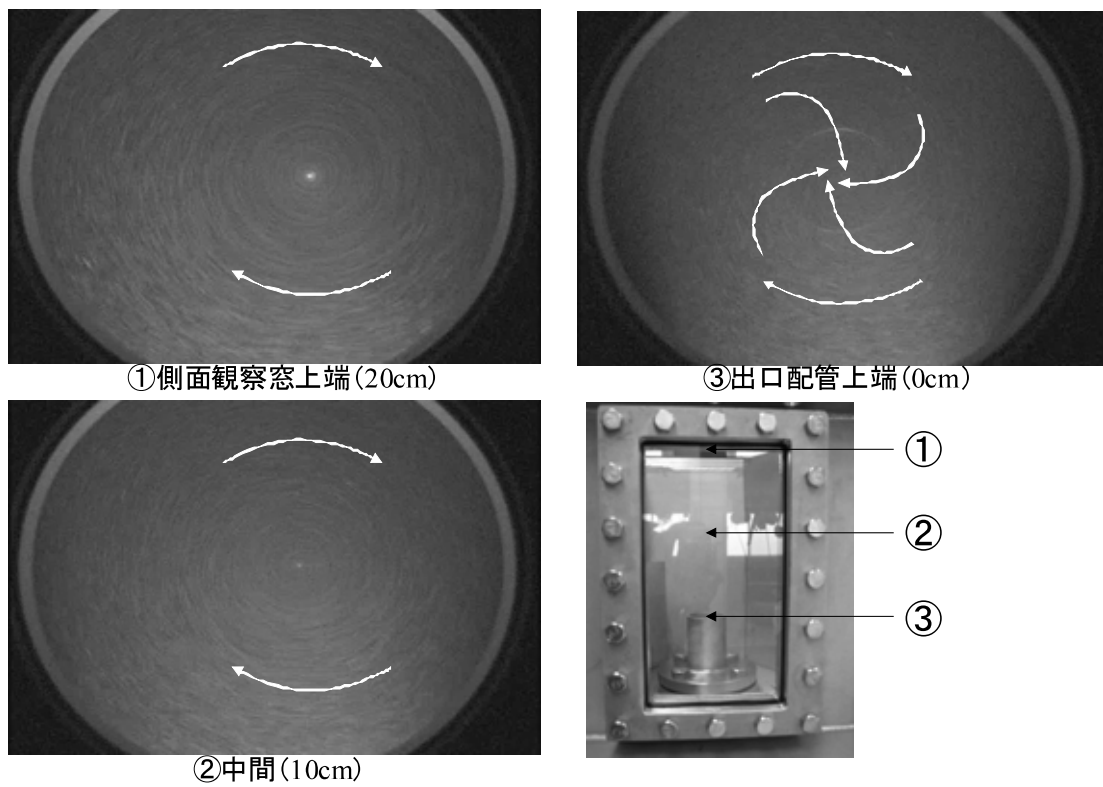


図4.2 可視化試験結果 (水平方向スリット照明)

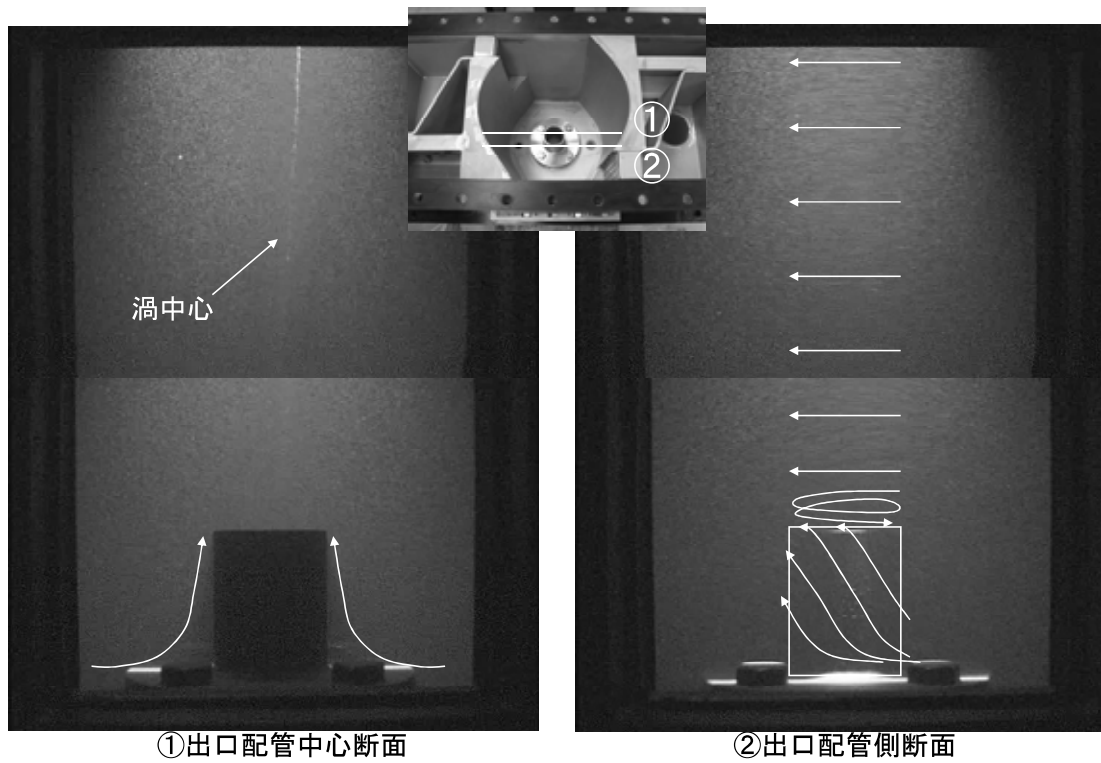


図4.3 可視化試験結果（軸方向スリット照明）

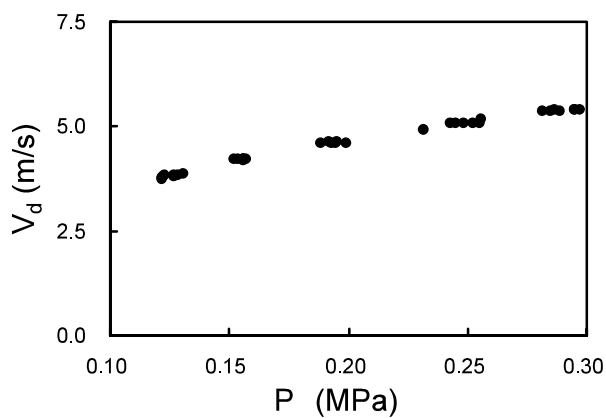
キャビテーション係数: $k = \frac{P - P_s}{\frac{1}{2} \rho V_d^2}$

P : 流体の圧力

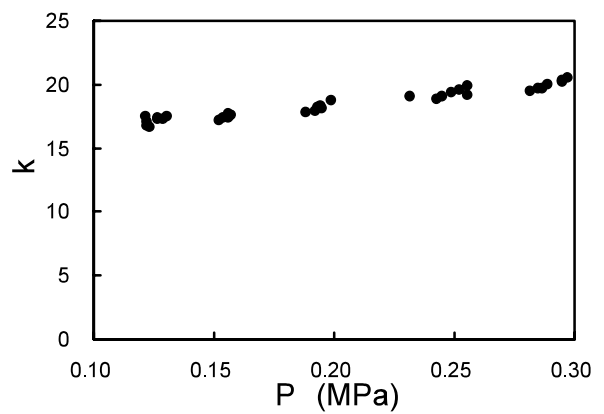
P_s : 飽和蒸気圧力

ρ : 流体密度

V_d : 流速（配管出口の平均流速）

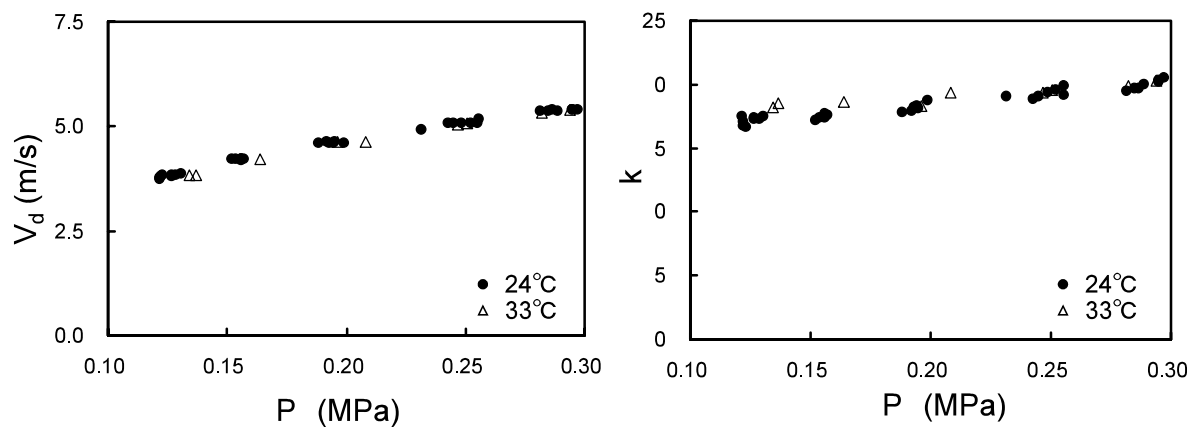


(1) 気泡の初生条件(配管流速)



(2) 気泡の初生条件(キャビテーション係数)

図4.4 キャビテーション初生条件への圧力の影響



(1) 気泡の初生条件(配管流速)

(2) 気泡の初生条件(キャビテーション係数)

図4.5 キャビテーション初生条件への粘性の影響

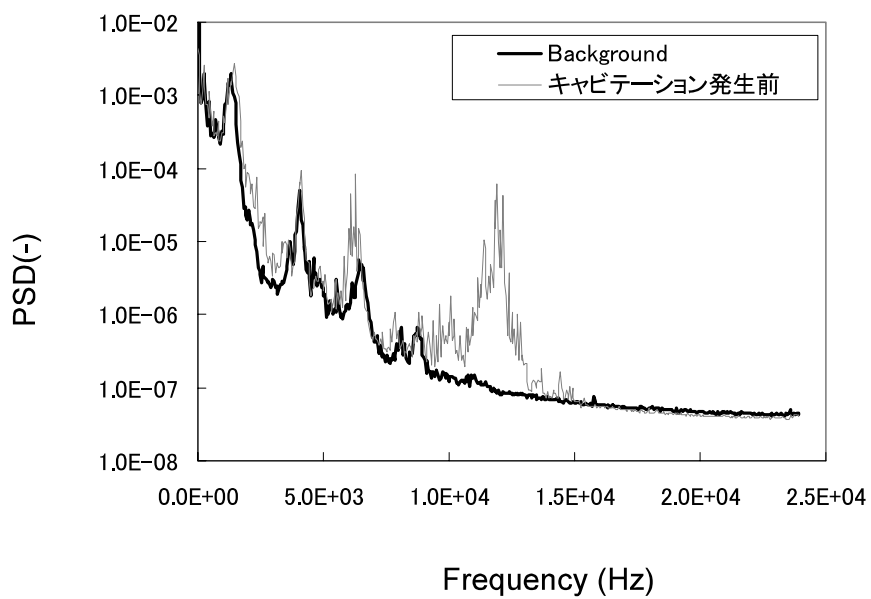


図4.6 キャビテーション発生前のバックグラウンドノイズ分析

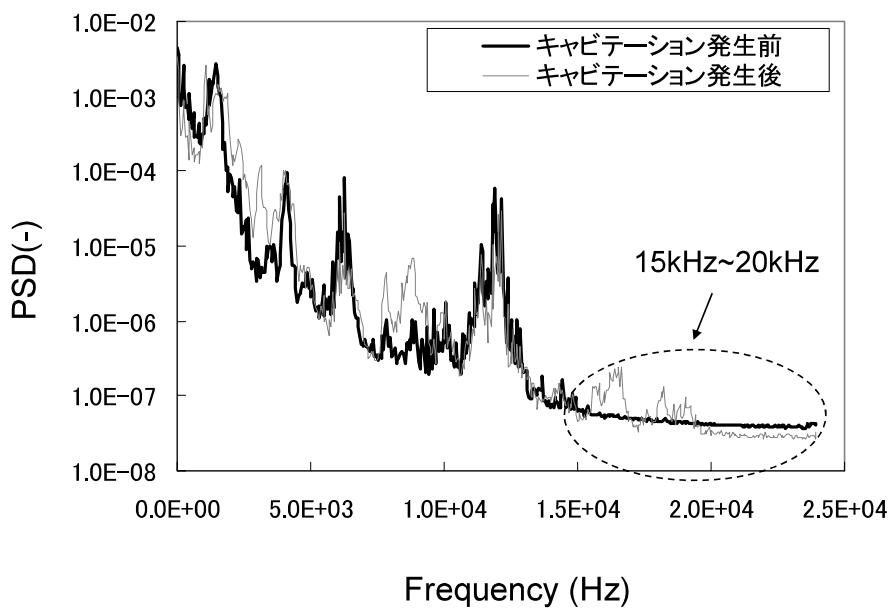


図4.7 キャビテーションの発生前後での音響比較(0.10MPa)

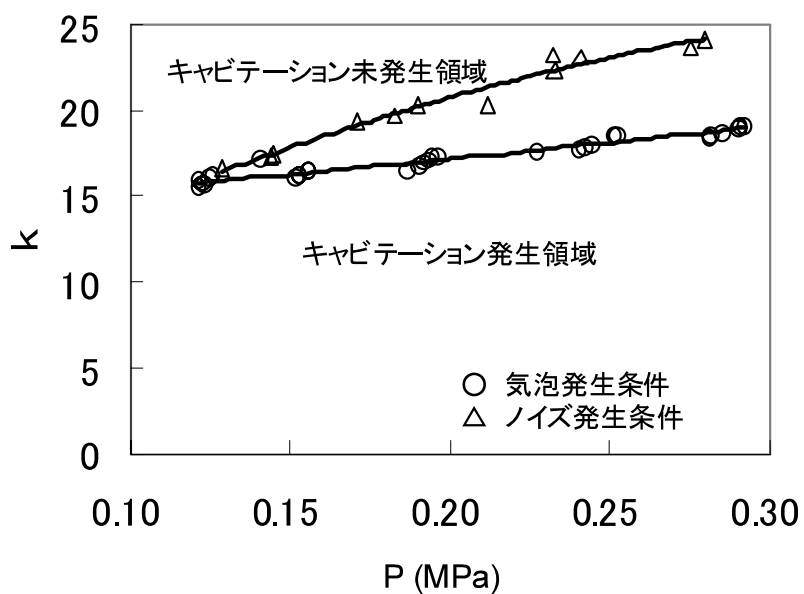


図4.8 キャビテーション音判定による初生条件

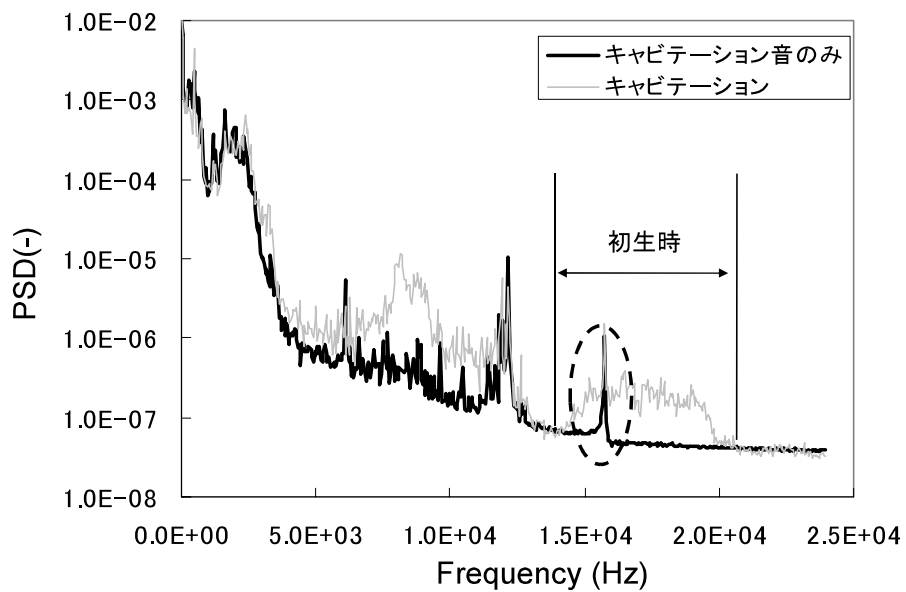


図4.9 キャビテーション音での判定時と気泡発生による判定時の音響比較(0.29MPa)

付録 A. 溶存酸素濃度の初生条件への影響

溶存空気はキャビテーションの初生に影響を与える可能性があるため、初生条件の把握を行うに当たっては、溶存酸素量を指標として溶存空気量のコントロールを行うこととなる。そこで、今回の試験方法の下での溶存酸素濃度のキャビテーション係数への影響を把握するため、0.25MPa 条件(今回の流速依存性確認試験時の圧力条件は 0.2MPa~0.3MPa であり、その中間値)において、溶存酸素量を変化させ、初生キャビテーション係数の変化を調べた。結果を、図 A.1 に示す。図より、溶存酸素量が大きくなると、初生キャビテーション係数が大きくなる傾向があり、本試験における最大値 (0.20mg/l) の約 10 倍となる 2mg/l での初生キャビテーション係数は、0.10mg/l での初生キャビテーション係数と比較すると 6%程度増加している。ただし、本試験での試験範囲である 0.20mg/l 以下では、影響は十分に小さいと考えられる。

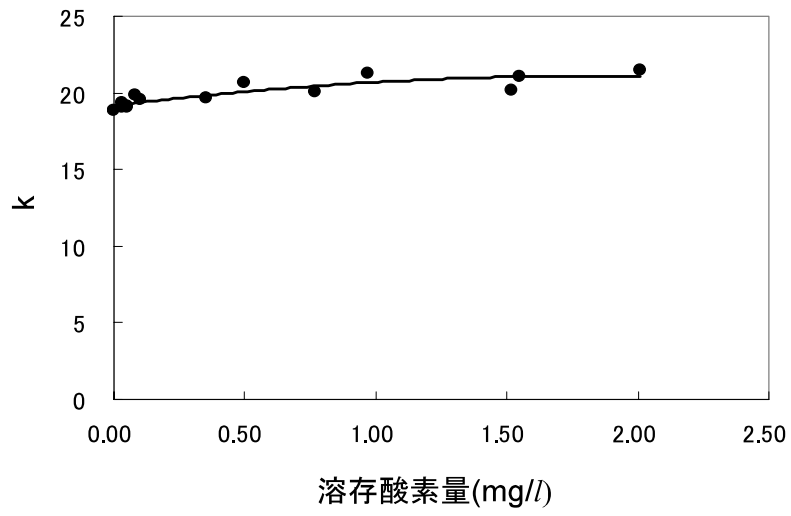


図 A.1 キャビテーション初生条件への溶存酸素量の影響

付録 B.渦中心での流速分布の PIV 計測

B.1 粒子画像流速測定法 (PIV) による流速測定試験方法

液中渦によるキャビテーションは、渦中心で低下した圧力が飽和蒸気圧力以下になるために発生すると考えられる。また、式 2.6 から渦中心での圧力降下量には特性半径が影響することがわかる。特性半径と渦中心での最大流速を取る半径(粘性コア半径: r_c)との関係は、式(2.2)より、 $r_c=1.121r_1$ となる。そこで、代表流速と局所的流速の非線形性と粘性の変化に伴う渦中心での流速分布の変化を把握することを試みた。渦の流速分布を直接的に定量化するために、粒子画像流速測定法 (PIV) [13]を用いて水平方向流速分布の計測を行った。まず、試験体流体内に混入したトレーサー粒子を試験体正面方向から水平のスリット状に入れた YAG レーザにて極短時間露光し、粒子分布画像を試験体上方に設置した CCD カメラにて撮影する。トレーサーとしては比重がおよそ 1.0、粒子径 $4\mu\text{m}$ の粒子 (ナイロンパウダー) を使用した。その後、数十～数百 μs 後に同様に画像を撮影し、この 2 枚に写ったトレーサー粒子群の画像上の移動量を相互相関処理[14]にて求めた。渦中心が、画像の中心に撮影されるようにカメラ位置を調整し、流速分布の測定を行った。計測の位置および画角を図 B.1、計測条件を表 B.1 に示す。また、PIV システムの概略を図 B.2 に示す。CCD カメラの画素数 1008×1018 ピクセルに対し、代表的な画角を $36\text{mm}\times 36\text{mm}$ として計測を実施した。PIV の参照領域は 22×22 ピクセルとし、画像探索を行った。今回の代表的な空間解像度は 0.79mm である。試験流速(吸い込み管平均流速)は、 3.96m/s 、 4.95m/s とした。一方、水温は、 24°C 、 40°C とした。なお、計測時にキャビテーション気泡が発生する場合、画像の撮影が困難となるため、系統圧力を上げることにより、キャビテーションが発生しない条件として計測を行うこととした。このため、試験時の系統圧力は $0.19\sim 0.20\text{MPa}$ の範囲で試験を実施した。

なお、この PIV 試験実施時では、試験体のノズルから観察窓までの距離は 275mm として計測を行った、また、試験体の底から 5cm の位置に水平なアクリル板を挿入した状況で試験を実施した。

B.2 流速試験結果

(1) 全般的な流況

図 B.3 に水温 24°C 条件での各計測断面における、周方向流速の平均値分布(6.7 秒:15Hz,100 点サンプリング)の比較を示す。横軸を渦中心からの距離 $r(\text{m})$ 、縦軸を規格化周方向流速 $V_\theta/V_d(\text{m/s})$ を示している。規格化周方向流速は、周方向流速 V_θ を出口配管平均流速 V_d で規格化し、定義した。なお、液中渦は常に移動しているのに対し PIV の画角は固定されている。その為、得られた速度分布の平滑化を防ぐ為、各時刻で渦中心を一致させてから平均化を行った。液中渦の渦中心近傍での流速分布を見ると、渦の外側から渦中心に向かって自由渦的に徐々に周方向流速が増大し中心から 4mm の位置で最大値をとる。その後、粘性の影響で強制渦的に周方向流速が減少し、内側は剛体回転的な挙動となっていることがわかる。これらは、2.章で述べた Burgers モデルと定

性的に一致している。また、各断面における流速分布を比較すると、試験部鉛直方向の中央(断面3)で最も周方向流速が発達し、試験部上部壁面近傍および出口配管近傍では、周方向流速が低くなる傾向が見られた。すなわち、試験部上部壁面近傍では壁面の影響により、周方向流速が抑えられており、一方、出口配管近傍では、周方向流速が十分に発達せず、下降流速が支配的になっていると考えられる。

(2)吸込み流速と速度分布との関係

系統圧力が増加すると、キャビテーション発生に必要な、渦中心での圧力低下量が増加することになり、結果として吸込み流速が増加することとなる。一方、2.2 節で述べたとおり、フローパターンの相似が成立するかどうかは不明確であるため、吸込み流速に対する依存性を調べる必要がある。図 B.3 より、24°C 条件の断面 1,3 において、高流速条件では、最大流速が増加し、流速分布が渦中心付近に集中する傾向が見られた。一部の断面では逆の傾向が見られたが、これは、PIV 計測時に対となる画像間の撮影時間間隔が適切でなかったことや、PIV システムの計測誤差が原因であると考えられる。一方、図 B.4 より、40°C 条件では、流速による影響は見られなかった。これは、(4)で述べる。なお、本試験では、粘性コア半径に関しては、計測断面による有意な違いは見ることは出来なかった。

(3)粘性依存性

図 B.5 に流速 3.96m/s 条件での周方向流速分布の比較を示す。高温条件(低粘性条件)で渦中心での最大流速が大きくなる傾向が見られた。この傾向は、流速依存性同様に断面 1、3 で顕著に見られ、断面 2、4、5 では有意な差は見られなかった。断面 4、5 に関しては、出口配管の影響により差が見られなかったと考えられる。図 B.6 に流速 4.95m/s 条件での周方向流速分布の比較を示す。図 B.5 と異なり、粘性による有意な違いは見られなかった。

(4)粘性コア半径および渦中心での圧力低下量

本実験では、図 B.3-B.6 より、粘性コアそのものの大きさに対する流速依存性および粘性依存性を見ることは出来なかった。その原因として、PIV の空間解像度と平均化処理が考えられる。本試験での流速ベクトルの空間分解能は 0.79mm 程度である。一方、粘性コアの大きさは 4mm 程度であるが、本試験での粘性係数の変化量は最大で約 50%であり、それによって得られる粘性コア半径の変化量は 20%程度と予測され、1mm 未満となるので、解像度が十分でなかった可能性がある。さらに、速度分布の平均化処理は渦中心を一致させ算出しているが、空間解像度が充分でない場合、渦中心の位置の解像度に影響し、平均化処理時に速度分布が過度に平滑化されることが考えられる。

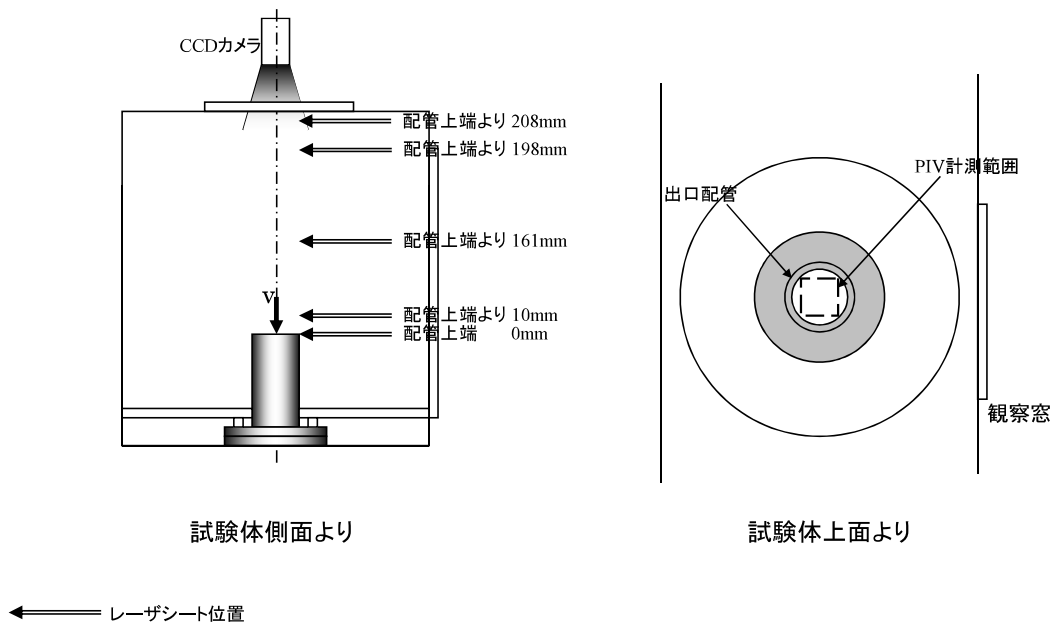
断面 1,3 では、粘性を減少または、流速を上昇させると渦中心の粘性コア付近での最大周方向流速が大きくなる傾向が確認された。この傾向は低流速条件または高粘性条件で顕著にみられた。

高流速条件で影響が小さくなる傾向に関しては、高流速条件、乱流による散逸が大きくなる為、分子粘性がキャビテーション渦中心の流速分布に与える影響が相対的に小さくなるためであると考えられる。一方、低粘性条件で流速依存性が明確に見られなかった理由は、先に述べた空間解像度の問題があると考えられる。以上より、一般的な傾向として、低粘性条件かつ高流速条件となることにより、最大周方向流速が局所的に増大し、渦中心での圧力降下が大きくなっているものと考えられる。

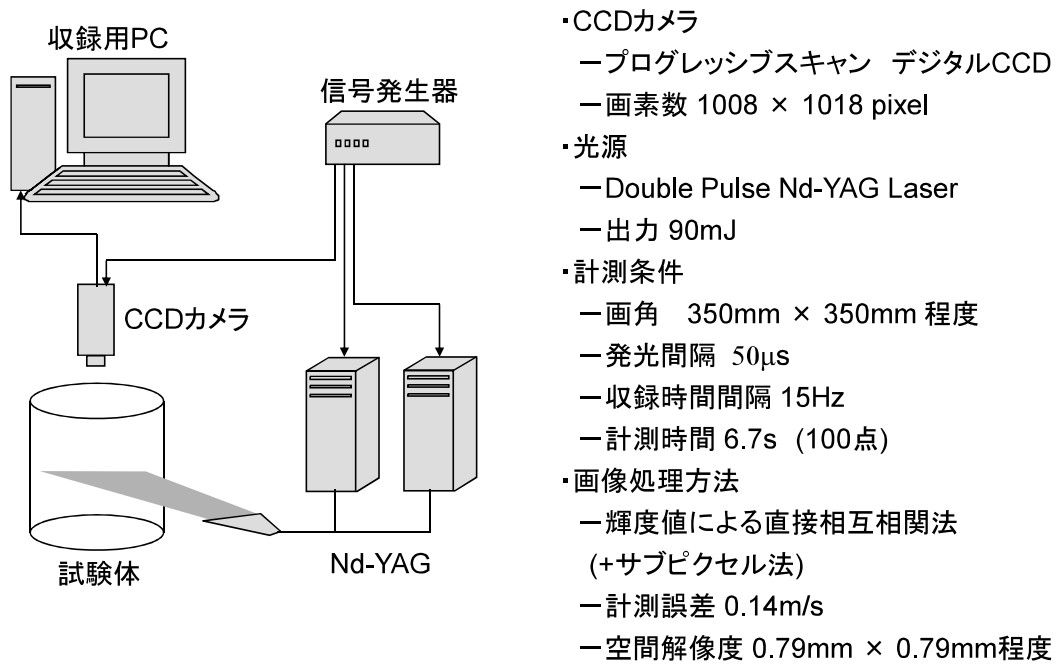
今回の試験では、水とナトリウムとの粘性の違いによって流速分布形状が変化した場合の渦中心での圧力降下量の差、及び流速分布形状の変化を定量評価するには至らなかった。一方、粘性の違いによる圧力降下に関してはキャビテーション係数で評価することは出来ないと考えられるため、PIVの空間解像度を上げる、温度パラメータのレンジを広げて粘性の変化を大きくする等により、粘性コアに対する速度分解能を上げた試験を行い、より詳細な評価を行う必要がある。

表 B.1 PIV 初生条件確認試験条件

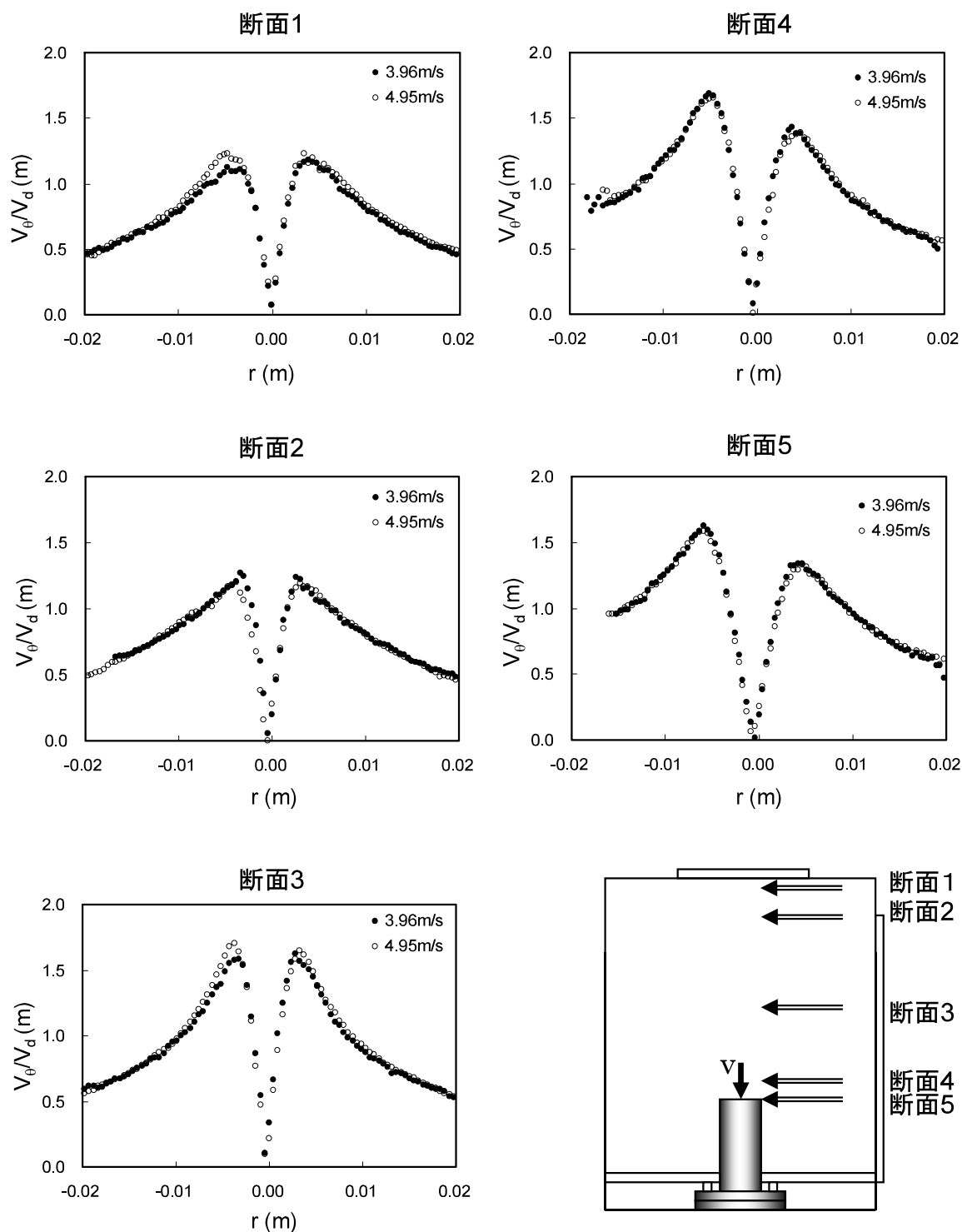
断面	吸込み管からの距離	画角(mm)	空間解像度(mm/vector)
1	208	36.0×36.3	0.79
2	198	36.0×36.3	0.79
3	161	39.5×39.9	0.87
4	10.0	35.4×35.7	0.77
5	0	35.4×35.7	0.77



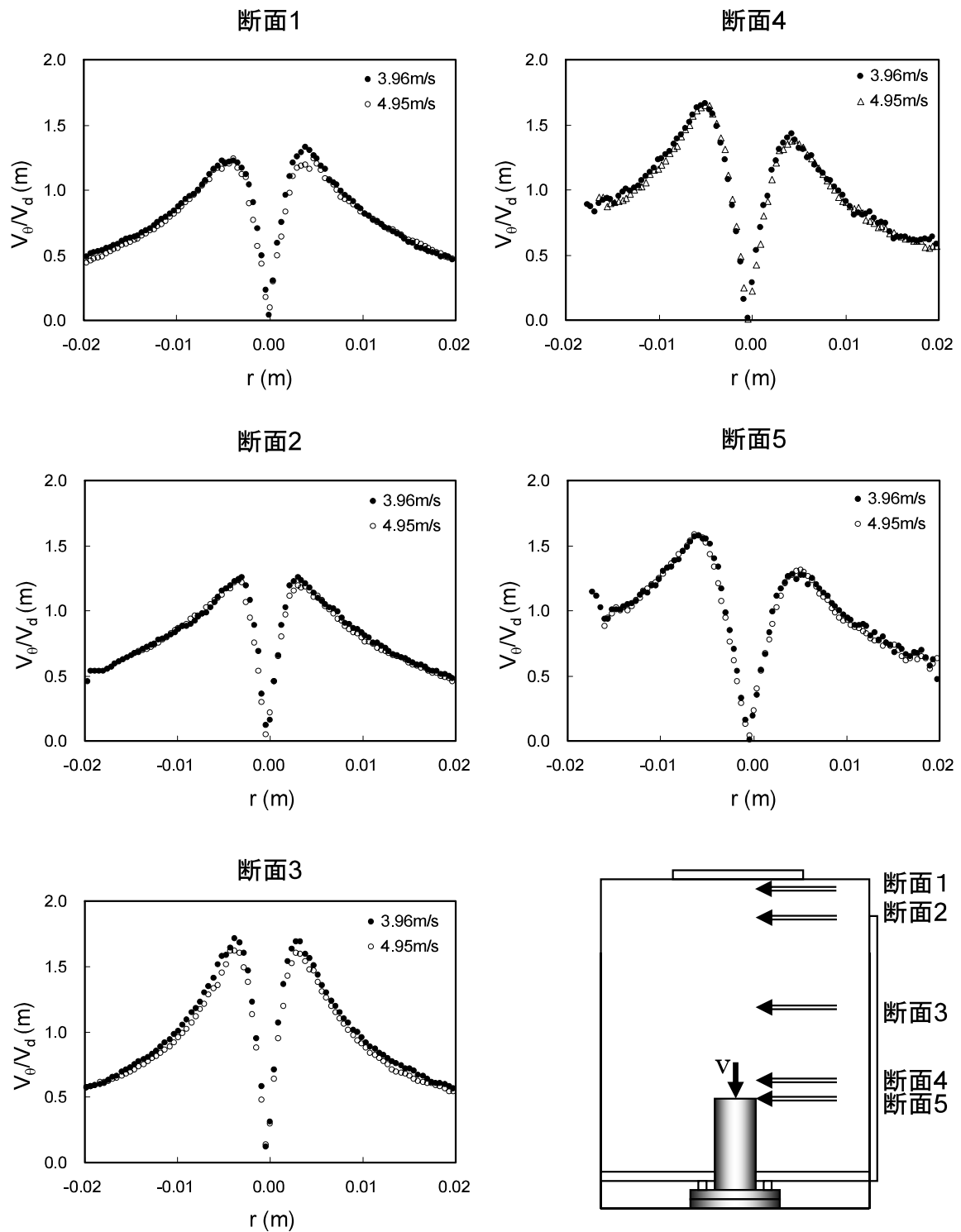
図B.1 PIVによる流速測定試験



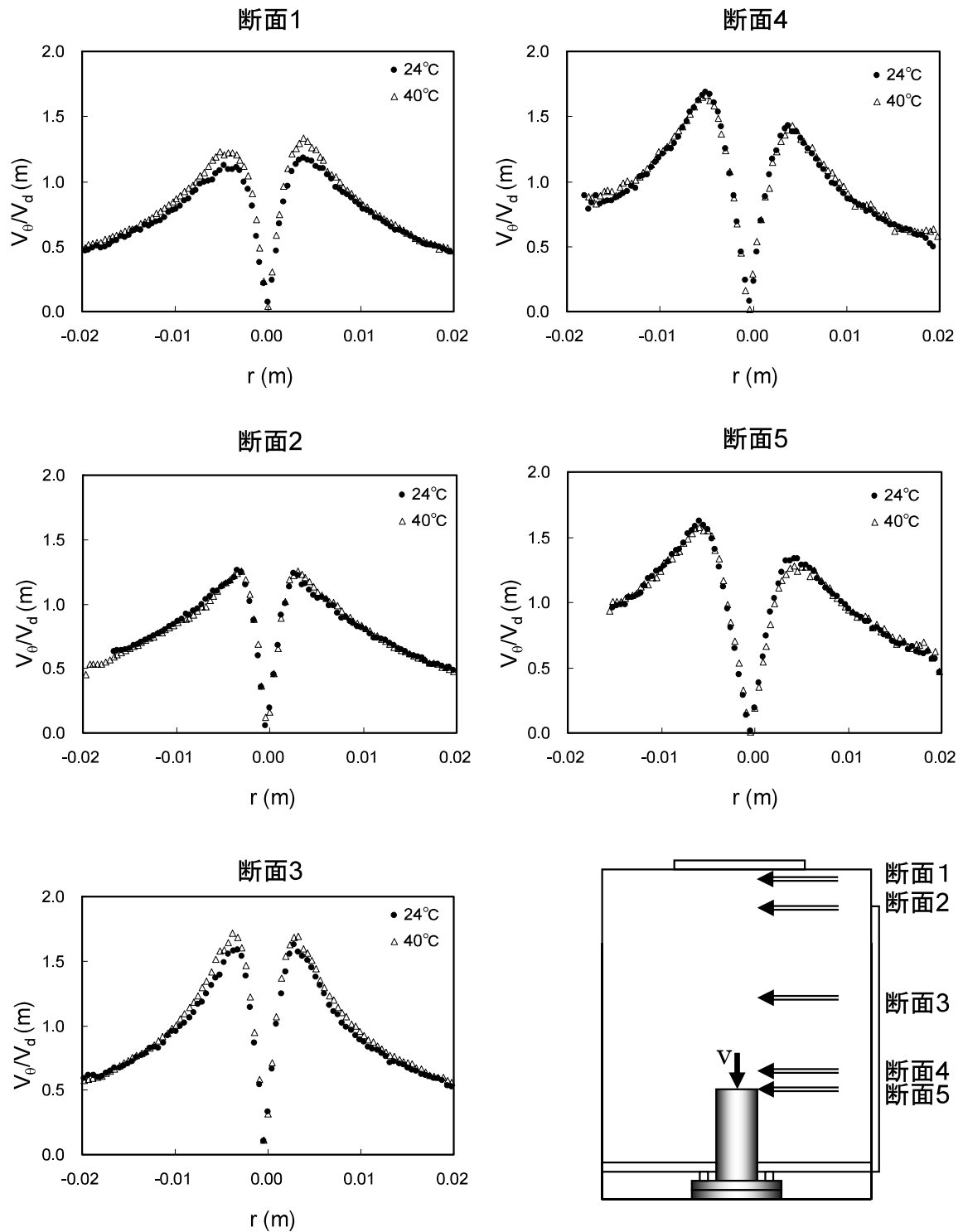
図B.2 PIVシステムの概略



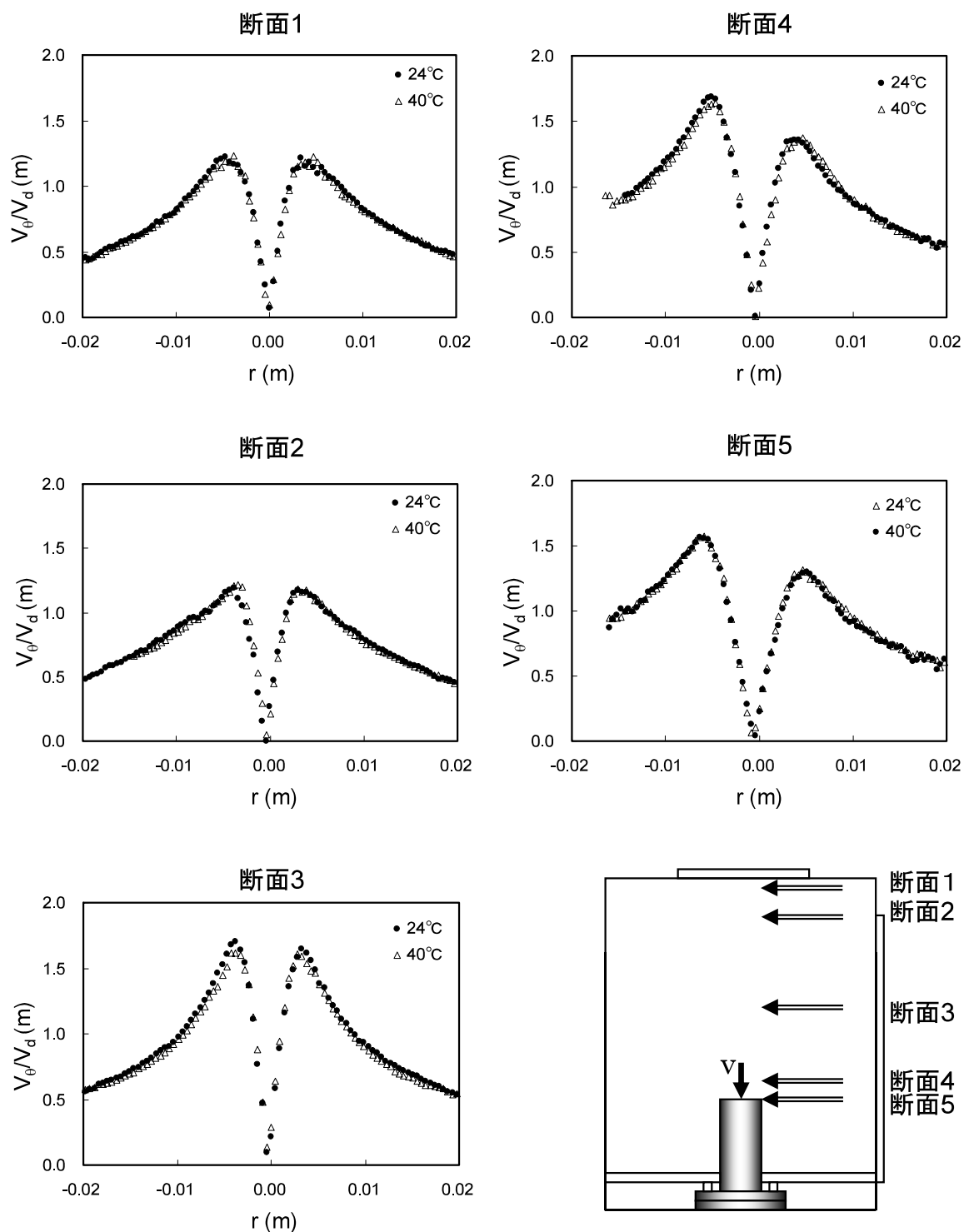
図B.3 周方向流速分布の代表流速依存性 ($t = 24^\circ\text{C}$)



図B.4 周方向流速分布の代表流速依存性 ($t = 40^\circ\text{C}$)



図B.5 周方向流速分布の粘性依存性 ($V_0 = 3.69$ m/s)



図B.6 周方向流速分布の粘性依存性 ($V_0 = 4.95$ m/s)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位		記号
	名称	記号	
面積	平方メートル	m ²	m ²
体積	立方メートル	m ³	m ³
速度	メートル毎秒	m/s	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	A/m
(物質質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テトラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)			K
光照射 (放射性核種の)放射能	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
吸収線量, 質量エネルギー当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
	シーベルト	Sv	J/kg	s ⁻¹
			J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度mのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及び線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =m ² ・kg・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg・s ⁻³ =kg・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1 °=(/180) rad
分	'	1'=(1/60) °=(/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム		1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002 × 10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.184 J
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

