

海域の肥沃化のためのベンチュリー方式による 深層水人工湧昇装置^{*1}

豊田孝義^{*2} 中島敏光^{*2} 中山俊明^{*3}

海潮流のエネルギーを利用して、深層水を有光層に人工的に湧昇することによって、海域を肥沃しようとする、ベンチュリー方式の人工湧昇装置を検討した。さまざまな形状のベンチュリー管を製作し、水槽実験で性能を比較した結果、湧昇可能最大深度と湧昇量の両面で、従来のものよりもすぐれたベンチュリー管が開発された。さらに本研究で開発したベンチュリー管を、実海域での運用を想定した人工湧昇装置に組み込んだ場合の深層水の湧昇量を推定した。

Equipment for Artificially Upwelling Deep Seawater for Fertilization of The Sea., A Study on Venturi-type Upwelling Tubes using Ocean Current-induced Energy

Takayoshi Toyota^{*4}, Toshimitsu Nakashima^{*4},
Toshiaki Nakayama^{*5}

Venturi-type equipment was studied for upwelling nutrient-rich deep seawater into the euphotic layer artificially to fertilize the sea using the energy induced by ocean currents. Several Venturi tube models in different configurations were made for water tank testing. As a result of this study, a Venturi tube developed here was found to perform better in the maximum upwelling depth and in the upwelling water volume than previously reported equipment. In addition, the upwelling water volume expected in the practical application of large-scale artificial upwelling equipment incorporating the Venturi tube developed in this study was estimated.

Takayoshi Toyota^{*4}, Toshimitsu Nakashima^{*4},
Toshiaki Nakayama^{*5}

^{*2} 海洋保全技術部

^{*3} 理化精機工業株式会社

^{*3} Marine Environment
Department

^{*4} Rikaseiki Kogyo, Co., Ltd.

^{*1} 本研究は海洋科学技術センターが昭和55年以来、行なっている経常研究“深層水利用による海域の肥沃化技術に関する研究”の一環として、理化精機工業株式会社との共同で行なった共同研究“流れを利用した深層水吸上げ装置に関する基礎研究”の一部である。

1. 緒 言

近年、200海里漁業管理水域の設定という海洋新秩序が出現し、漁業生産量の1/3を諸外国沿岸水域に依存しているわが国は、自国管理水域内での生産を高める努力を余儀なくされている。このような国内外の情勢にあつて、自国管理水域内の沖合、外洋水域を利用して、漁業生産量を高める技術を開発することは重要である。

ペルー沖、カリフォルニア沖、アフリカ西海岸沖等の湧昇水域では、栄養塩類の豊富な深層水が有光層に湧昇し、植物プランクトンが栄養塩類を利用して活発に増殖し、その結果、高次の動物プランクトンや魚類等の生産が増大し、自然の好漁場を形成している。

Ryther⁷⁾(1969)は、海洋を湧昇水域、外洋水域、および沿岸水域に区分し、魚類生産量を比較した。これによると、湧昇水域の面積は $3.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ で、全海洋面積の0.1%に過ぎないが、魚類生産量は 1.2×10^8 トンで、海洋の全魚類生産量の約50%を占めている。これに比較して、外洋水域は広大な面積($3.26 \times 10^8 \text{ km}^2$ 、全海洋面積の90%)を持つが、魚類生産量(1.6×10^6 トン、海洋の全魚類生産量の1%)は、きわめて少ない。このことは、成層が発達した外洋水域の有光層には、栄養塩類が少ないため、植物プランクトンの増殖が制限されていることが一因としてあげられる。そこで、貧栄養の沖合、外洋水域において、栄養塩類に富む深層水を、有光層内に人工的に湧昇することによって、植物プランクトンの増殖を促進し、自然湧昇水域にみられるような高い生物生産を再現することが可能ではないかと考えられる〔中島、ほか⁶⁾(1979)〕。

深層水の人工湧昇方法には、自然エネルギーを利用する方法がランニングコストが低いという点で優れている。

波力エネルギーの利用による人工湧昇装置の研究は、Isaacs^{1,2)}(1973, 1976)およびWick⁸⁾(1978)によって行なわれている。

Liang³⁾(1978)はベンチュリーベンチュリーの原理によって、海潮流エネルギーを利用して、深層水を汲上げる装置を考案した。さらに、Liang⁴⁾(1979)は改良したベンチュリーベンチュリーを用いて、実海域での実験を試みた。ベンチュリーベンチュリー式人工湧昇装置は、可動部分

がないので耐久性があり、また、装置の主要部分が水中にあるため、波の影響を受けにくいという利点があり、したがって実用化の可能性が高いと思われる。

本研究はLiangが開発したベンチュリーベンチュリーを踏まえて、さらに、より効率的なベンチュリーベンチュリーの形状を求めることを目的とした。

本研究を行なうにあたり、ベンチュリーベンチュリー式人工湧昇装置に関する情報を提供していただいた国立台湾大学海洋研究所 Nai Kuang Liang 教授、および流体力学の分野から適切なご指導を賜った東京大学境界領域研究施設 東昭 教授に対して、深甚の謝意を表す。また、本研究を推進するにあたり、ご助力いただいた長崎大学 水産学部 研究生 松澤誠二氏に対して、感謝の意を表す。

本研究で開発されたニューシングル ベンチュリーベンチュリーについては、現在、特許申請中である。

2. 原 理

ベンチュリーベンチュリー式人工湧昇装置の作動原理を図1に示す。

バルブ(V)が閉じた状態では、ベンチュリーベンチュリー管に沿った流れに対して適用されるベルヌーイの式は、つぎのようになる。

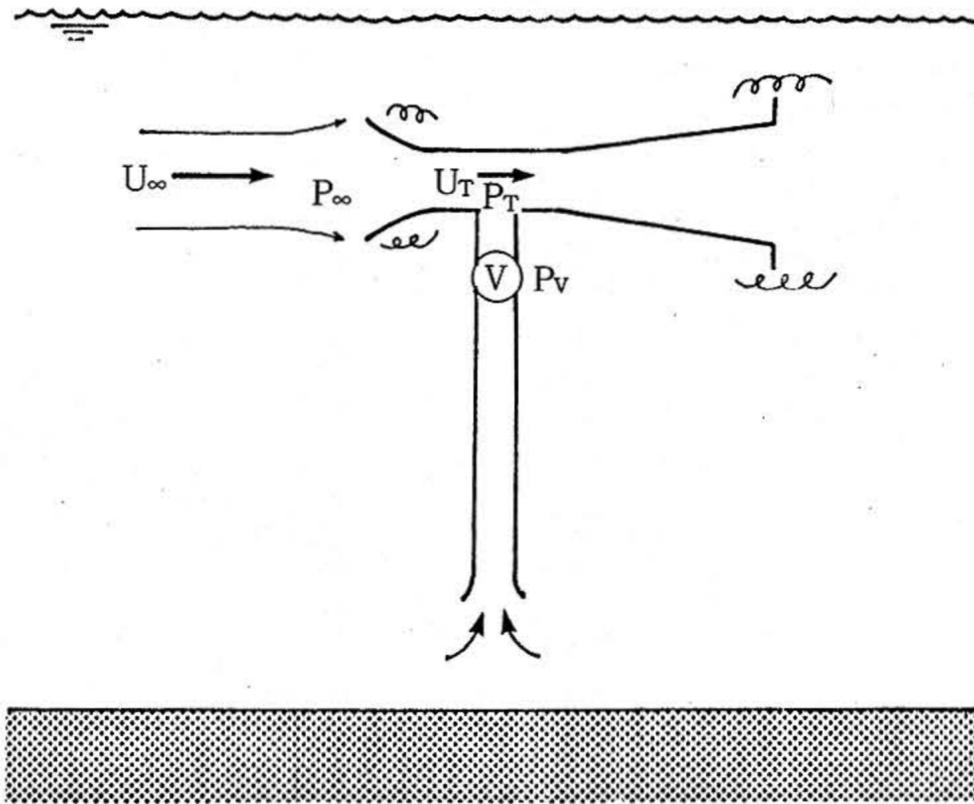
$$\frac{\rho}{2g} \cdot U_{\infty}^2 + P_{\infty} = \frac{\rho}{2g} \cdot U_T^2 + P_T \quad \dots\dots (1)$$

ここで ρ は海水密度(Kg/m^3)、 g は重力加速度(m/sec^2)、 U_{∞} はベンチュリーベンチュリーから十分離れた位置における海潮流の流速(m/sec)、 P_{∞} は同様に、ベンチュリーベンチュリーから十分離れた位置における絶対静圧(mmAq)、 U_T はベンチュリーベンチュリーののど部における海潮流の流速(m/sec)、 P_T は同様にベンチュリーベンチュリーののど部における絶対静圧(mmAq)である。

実験的には、ベンチュリーベンチュリーののど部の静圧(Δh)が測定で求まるので、(1)式を整理すると、次のようになる。

$$\Delta h = P_{\infty} - P_T = \frac{\rho}{2g} (U_T^2 - U_{\infty}^2) \quad \dots\dots (2)$$

さらに Δh を無次元化するために、ベンチュリーベンチュリーから十分離れた位置における海潮流の動圧(P_d)で Δh を割り算すると、差圧拡大率(α)が求まる。



U_{∞} ; ベンチュリー入口の流速, flow rate at the entrance of Venturi tube
 P_{∞} ; ベンチュリー入口の静圧, static pressure at the entrance of Venturi tube
 U_T ; ベンチュリーのど部の流速, flow rate at the throat of Venturi tube
 P_T ; ベンチュリーのど部の静圧, static pressure at the throat of Venturi tube
 P_v ; バルブ入口の静圧, static pressure above the valve

図1 ベンチュリー式人工湧昇装置の原理
 Principle of Venturi-type artificial upwelling equipment

$$\alpha = \frac{\Delta h}{Pd} \quad \dots\dots (3)$$

ただし,

$$Pd = \frac{r}{2g} U_{\infty}^2 \quad \dots\dots (4)$$

流速が一定のとき, (4)式によって, Pd は一定となる。ベンチュリーの性能が良いほど, 得られる Δh は大きいので, (3)式によって α も大きくなる。すなわち, α はベンチュリーの性能を表わしている。

ベンチュリー式人工湧昇装置で, 深層水を汲上げるときには, ベンチュリーののど部の絶対静圧 (P_T) がバルブ入口の絶対静圧 (P_v) よりも低くなければならない。ここで言う, バルブとは, 深層水湧昇時の湧昇管内流体摩擦抵抗による圧力損失や, 海水の成層による鉛直的な密度差によって生じる水頭等を, まとめてモデル化したものである。バルブによる圧力損失を $\Delta h'$ とおけば, つぎのように表わされる。

$$\Delta h' = P_{\infty} - P_v \quad \dots\dots (5)$$

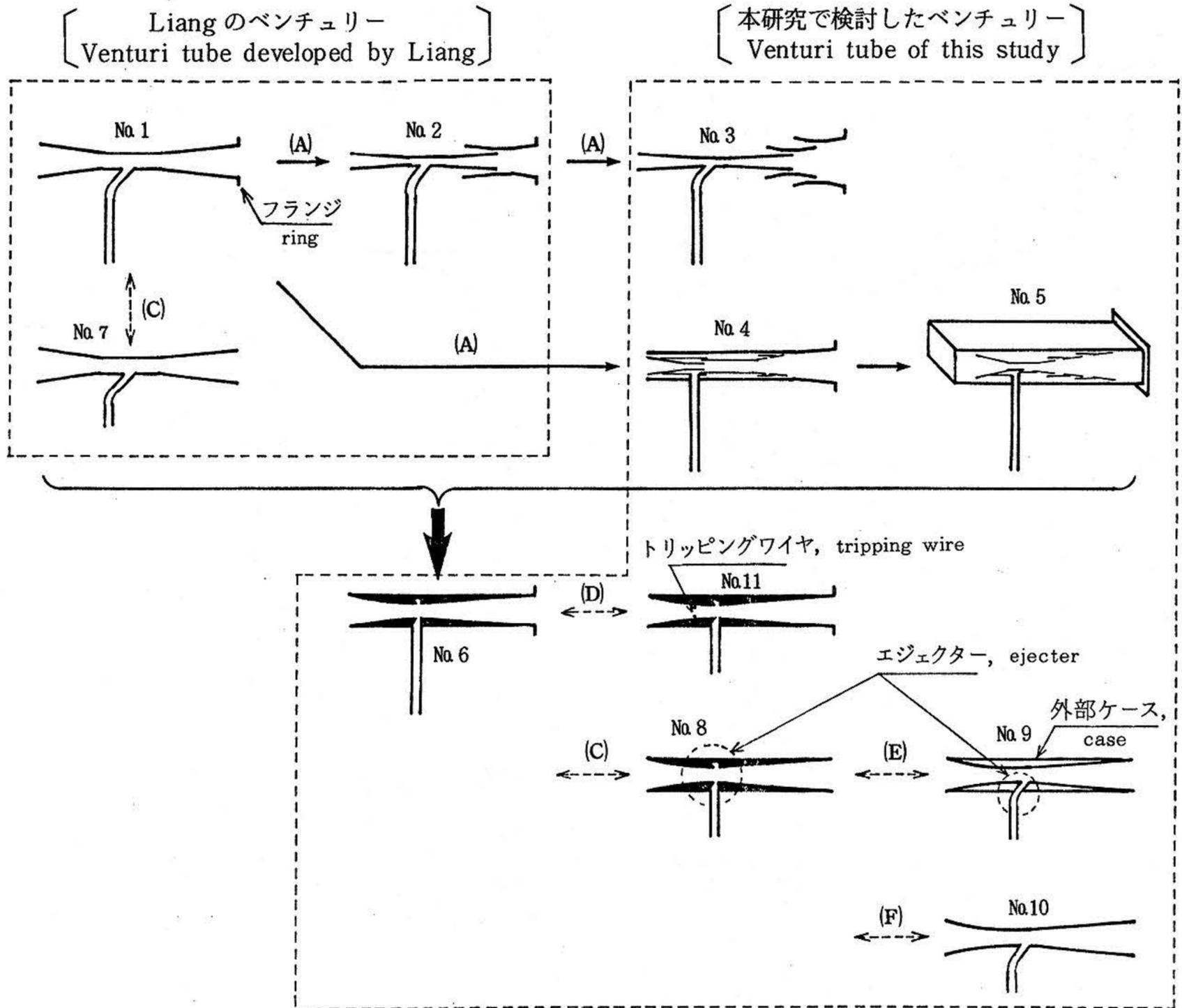
深層水が汲上がるためには,

$$\Delta h > \Delta h' \quad \dots\dots (6)$$

とならねばならない。(6)式に(3)式を代入すると, つぎのようになる。

$$\alpha \cdot Pd > \Delta h' \quad \dots\dots (7)$$

(7)式において, ベンチュリーの性能が良いほど, 海潮流の流速が速いほど (“4.1 各ベンチュリー模型の静圧特性試験結果” 参照), また, ベンチュリーの寸法が大きいほど, α は大きい値となる。一方, 同一条件下で, 湧昇量を多くするほど, α は小さい値となる性質がある。本装置を実海域に設置する場合, 海域の条件として, 海潮流の流速が決まり, ベンチュリーの形と寸法を決めれば α が決まる。そこで, 湧昇する深層水の取水深度とベンチュリーの設置深度を設定すれば, 湧昇流量が決まる。



- | | | |
|--------|----------------------------------|--|
| No. 1 | シングルベンチュリー (フランジ用), | single Venturi with ring |
| No. 2 | ダブルベンチュリー (フランジ用), | double Venturi with ring |
| No. 3 | トリプルベンチュリー (フランジ用), | triple Venturi with ring |
| No. 4 | 境界層制御ベンチュリー (フランジ付), | boundary layer controlled Venturi with ring |
| No. 5 | 二次元ベンチュリー (フランジ付), | two-dimensional Venturi with ring |
| No. 6 | ニューシングルベンチュリー (フランジ付), | new single Venturi with ring |
| No. 7 | シングルベンチュリー (フランジなし), | single Venturi without ring |
| No. 8 | ニューシングルベンチュリー (フランジなし), | new single Venturi without ring |
| No. 9 | ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケース付), | new single Venturi without ring and with case |
| No. 10 | ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケースなし), | new single Venturi without ring and case |
| No. 11 | ニューシングルベンチュリー (フランジ付, トリップワイヤ付), | new single Venturi with ring and tripping wire |

- | | | |
|-----|------------------|--------------------------------|
| (A) | ディフューザーの改良, | improvement of diffuser |
| (B) | 二次元化, | two dimensional |
| (C) | フランジの効果調べる, | effect of ring |
| (D) | トリッピングワイヤの効果調べる, | effect of tripping wire |
| (E) | エジェクターの形状の効果調べる, | effect of the shape of ejector |
| (F) | 外部ケーシングの効果調べる, | effect of casing |

図2 各種ベンチュリー模型の検討, 設計, 製作過程
Several types of Venturi tubes made for water tank test

3. 実験方法

3.1 水槽模型

より湧昇量の多いベンチュリャ形状を求めするために、Liang^{3,4)} (1978, 1979) のベンチュリーも含めて、種々の特徴を有するベンチュリー模型の検討、設計、製作した。各種ベンチュリーの性能を形状面で比較できるようにするため、模型の外形寸法をほぼ同じにした。

各種ベンチュリー模型の検討、設計、製作の過程を図2に示す。

製作した模型の特徴と構造について、順次以下に述べる。

No. 1 ; シングル ベンチュリー (図3参照)

Liang³⁾ (1978) の考案によるもので、形状面では最も基本となるものであるが、湧昇装置として用いるとすれば、差圧拡大率が不足である。

村田ら⁵⁾ (1969) によれば、シングル ベンチュリーでは、一般にベンチュリー管内部の圧損がディフューザー部で大きく、全体の圧損の半分以上を占めると、述べている。したがって、ベンチュリーの性能を向上させるためには、ディフューザーを改良することが効果的と考えられる。それを実現する方法として、ディフューザーの多段化および境界層制御等がある。

No. 2 ; ダブル ベンチュリー (図4参照)

Liang (1979) の考案によるもので、ディフューザーの出口に第2のベンチュリーを設け、ディフューザー出口部での静圧を低くすることによって、ベンチュリーののど部の静圧を、さらに低下させようとするものである。

No. 3 ; トリプル ベンチュリー (図5参照)

ダブル ベンチュリーの考え方を発展させ、第2のベンチュリーの出口に、第3のベンチュリーを設けることによって、差圧拡大率を、さらに向上できる可能性がある。

No. 4 ; 境界層制御ベンチュリー (図6参照)

ディフューザーの内壁に水の吹出し口を設け、ディフューザー内壁の境界層における流速の低下

を回復させることによって、差圧拡大率の低下を防ごうとする考え方に基づく。

No. 5 ; 二次元ベンチュリー (図7参照)

製作の簡便性をねらって、外形を方形にした。内部は境界層制御型にし、絞り比は外形が円形のベンチュリーと同様に $\frac{1}{4}$ とした。

以上のベンチュリーは、内部構造に直線を多く用いており、直線と直線の交点では、流れがはく離しやすく、このことが流体の運動量の損失につながる。また、多段ベンチュリーにおいては、外部に突起物が多いので、それによって、ベンチュリー外側の流体の運動量を損失する。これらの欠点を解決する方向で、次のベンチュリーを設計製作した。

No. 6 ; ニューシングル ベンチュリー (図8参照)

ベンチュリーの外側形状については、流れをさまたげる突起物が少ないことが望ましいので、シングル ベンチュリーを採用することにした。次にベンチュリー管の内部については、村田ら⁵⁾ (1969) を参考にして、絞り比を $\frac{1}{4}$ (他のベンチュリー模型と同様)、ノズル縮流の角度を 10° 、エジェクターの形状を、環状室で流れに沿ってなめらかに入射する構造とし、ディフューザー拡大の角度を 4° とした。さらに直線と直線とが合わさるところを、緩和曲線で結ぶことによって、流れがはく離しにくいようにした。

上記の各種ベンチュリーについて、構成部分の性能を調べるために、フランジ、トリッピングワイヤ等を取りはずせるように製作した。それらについて以下に述べる。

No. 7 ; シングル ベンチュリー (フランジなし)

No. 1の模型について、フランジの効果を調べるために、フランジをはずしたものである。

No. 8 ; ニューシングル ベンチュリー (フランジなし)

No. 6の模型について、フランジの効果を調べるために、フランジをはずしたものである。

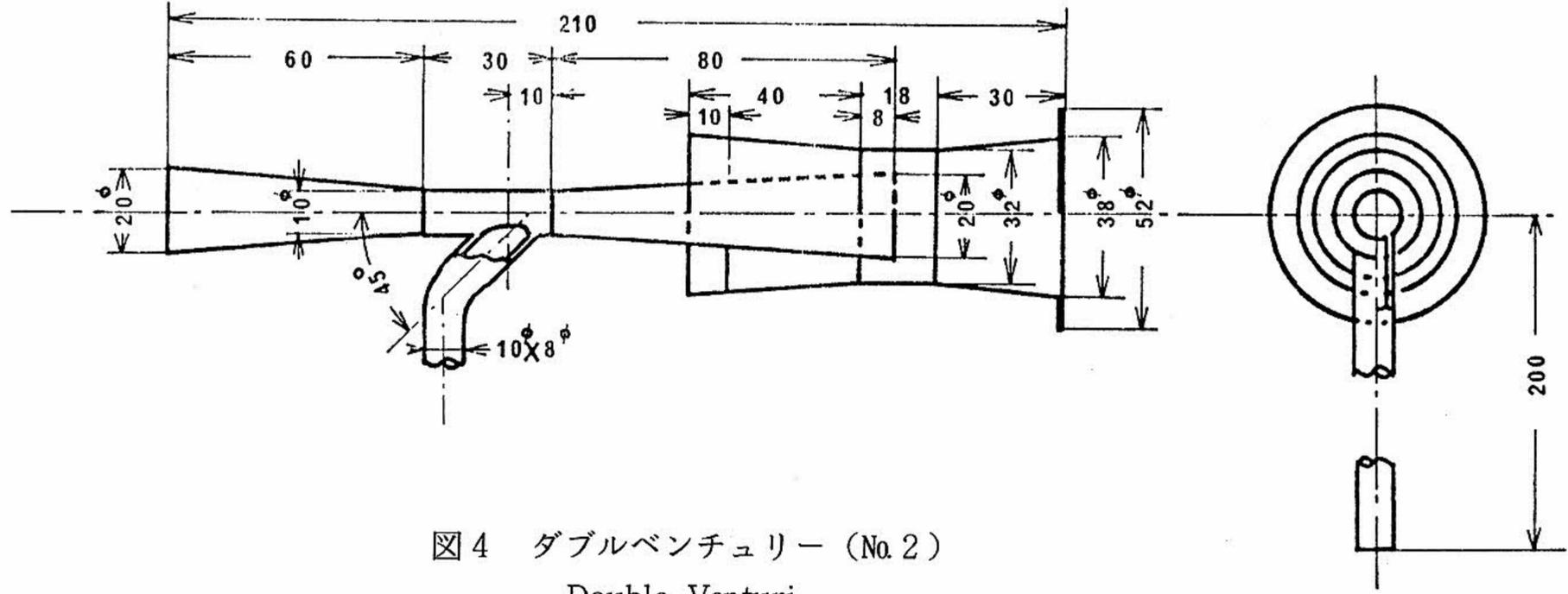


図4 ダブルベンチュリー (No. 2)
Double Venturi

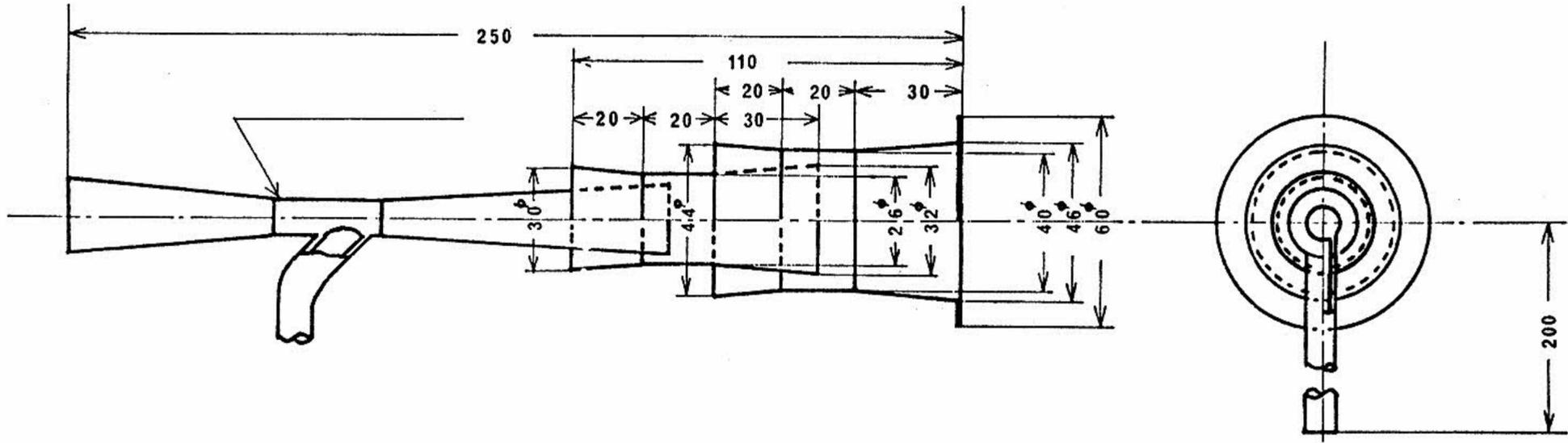


図5 トリプルベンチュリー (No. 3)
Triple Venturi

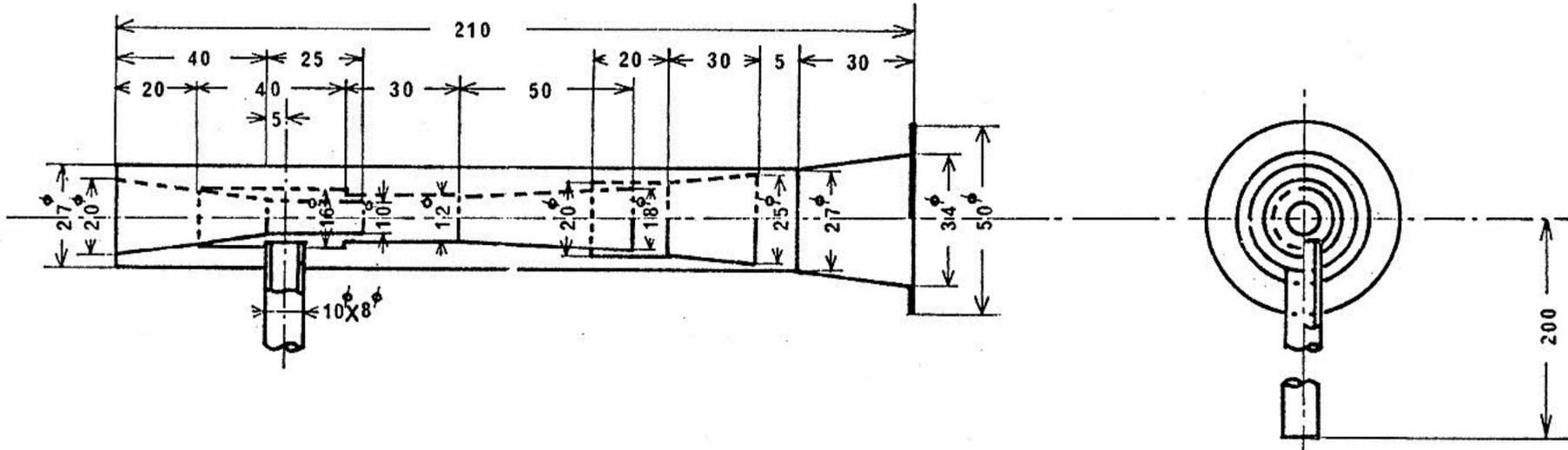


図6 境界層制御ベンチュリー (No. 4)
Boundary layer controlled Venturi

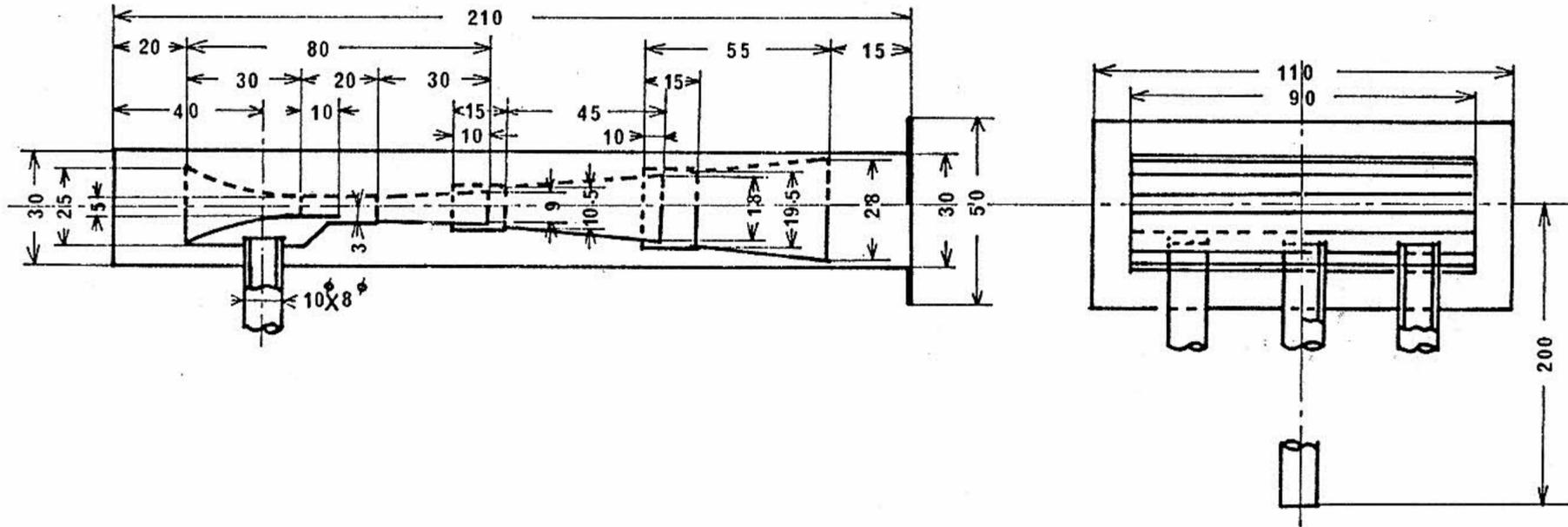


図7 二次元ベンチュリー (No. 5)
Two-dimensional Venturi

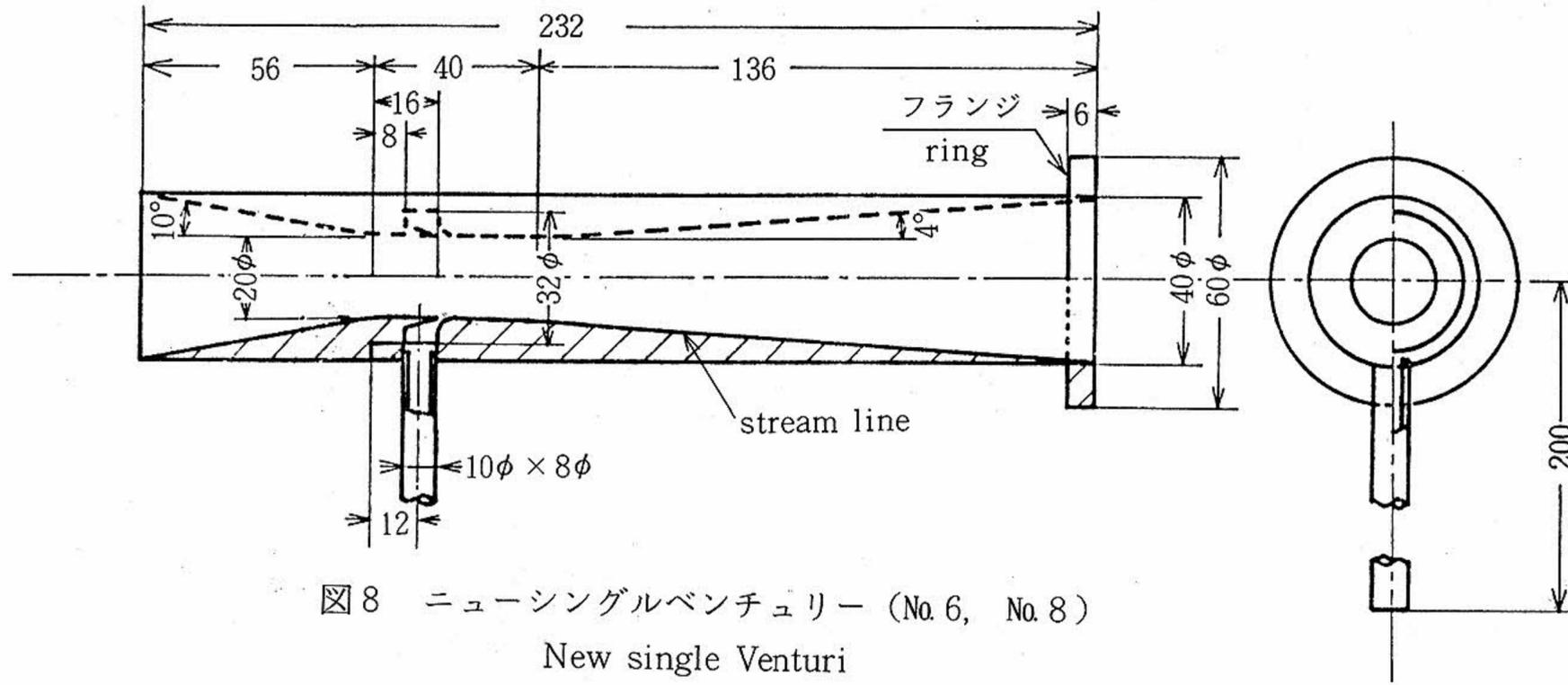


図8 ニューシングルベンチュリー (No. 6, No. 8)
New single Venturi

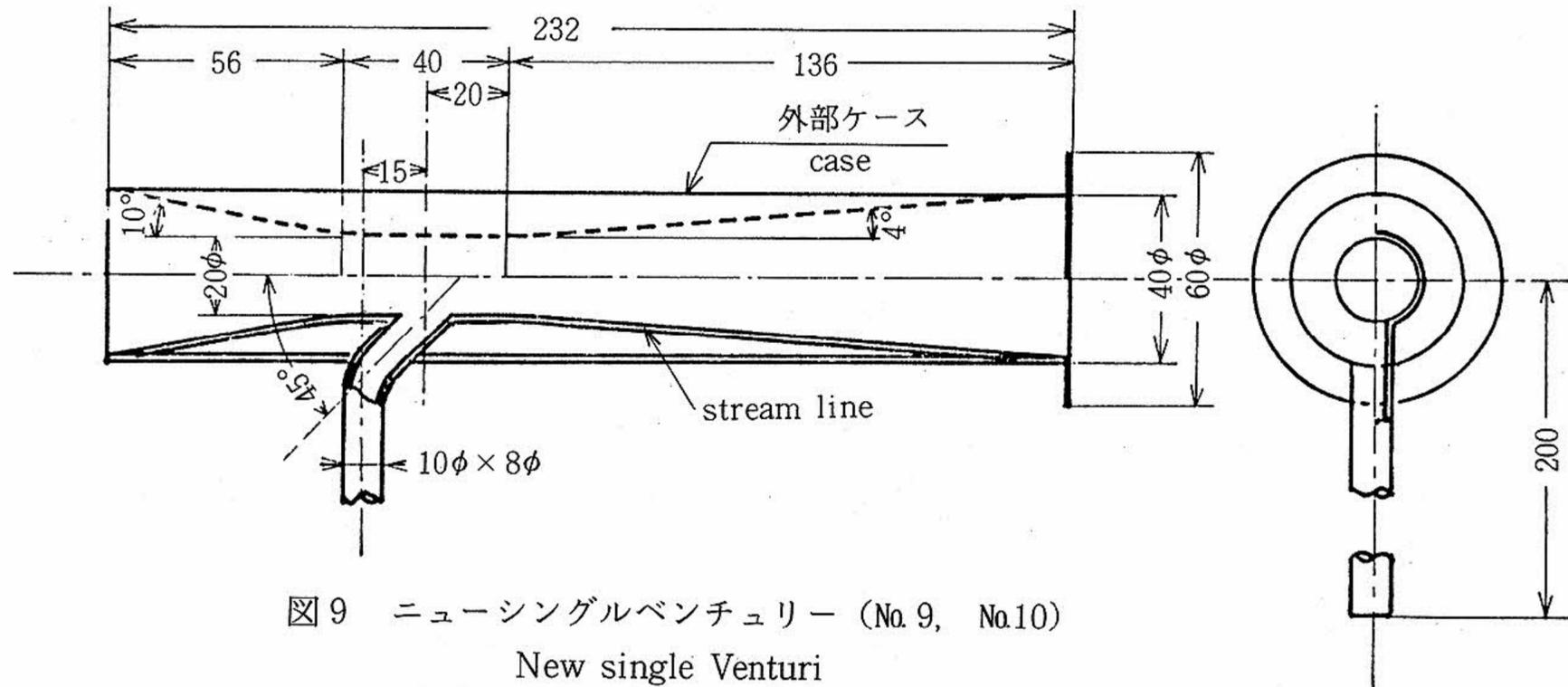


図9 ニューシングルベンチュリー (No. 9, No. 10)
New single Venturi

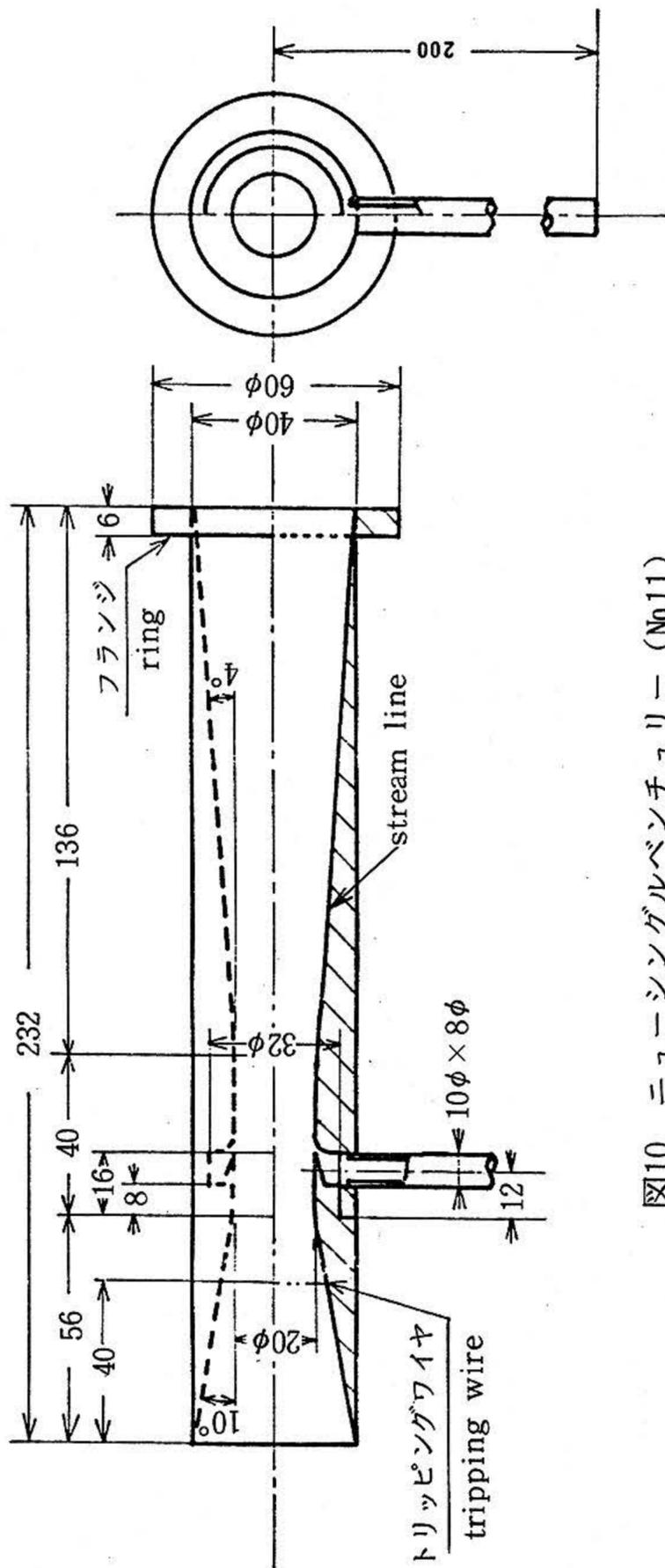


図10 ニューシングルベンチュリー (No.11)
New single Venturi

3.2.2 ベンチュリー模型の湧昇特性試験
用いた装置は、“3.2.1 ベンチュリー模型の静
圧特性試験”に用いたものと同様である。

タンク内の水面と水槽の水面とを等しくして、
タンクの底に栓をしておき、水槽中の流速を一定
に設定したのち、タンクの底の栓を抜き、タンク
内、水面の高さ(Δh)の時間変化をレコーダーに
記録した。記録の一例を図12に示す。 Δh の時間
微分にタンクの断面積を乗じたものを、湧昇速度
(Q_U)とした。本試験は流速 0.40 m/sec および
 0.76 m/sec で行なった。

タンクおよびポテンショメーター機構部を写真
1, また水槽内に設置されたベンチュリー模型お
よびタンクを写真2に示す。

3.2.3 ベンチュリー模型のドラッグ試験
水槽流速を一定に設定し、吸込流量(Q_U)が0
の状態において、図13に示す方法によって、ばね
ばかりで、力(f)を測定した。ベンチュリー模
型のドラッグ(F)は、モーメントの釣合い式に
よって求めた。

$$F = \frac{ld}{Ld} \cdot f \quad \dots\dots (8)$$

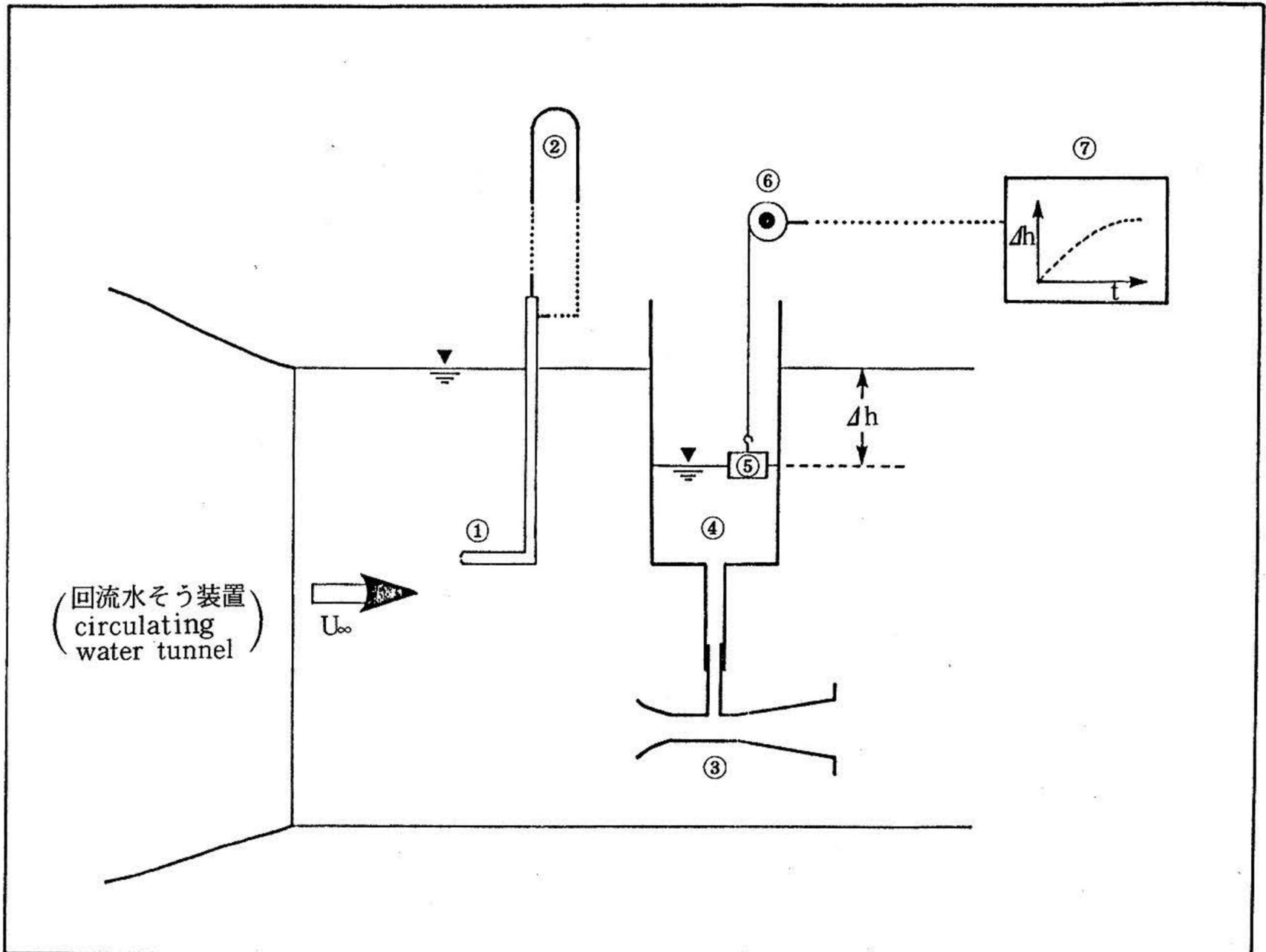
ここで ld は支点からばねばかりまでの距離、
 Ld は支点からベンチュリー模型の中心までの距
離である。支柱のドラッグは、支柱にベンチュリ
ー模型を取付けない状態で測定した。各ベンチュ
リー模型のドラッグは、各測定値から支柱のドラ
ッグを差引いた値を用いた。

4. 結果および考察

4.1 ベンチュリー模型の静圧特性試験結 果

シングル ベンチュリー (No.1), ダブル ベン
チュリー (No.2), トリプル ベンチュリー (No.3),
境界層制御ベンチュリー (No.4), 二次元ベンチュ
リー (No.5), およびニューシングル ベンチュリ
ー (No.6) について、流速に対する差圧拡大率の
特性を図14に示す。

以上のベンチュリー模型について、差圧拡大率
は、低流速領域 ($0 \sim 1.0 \text{ m/sec}$) では流速が速
くなるほど増加するが、高流速領域 ($1.0 \sim 1.7$
 m/sec) では流速が速くなっても増加せず、一定
の値で安定する傾向が見られた。



- | | |
|--------------------|---------------|
| 1. 基準ピート管, | Petot tube |
| 2. 流速測定用逆U字マノメーター, | manometer |
| 3. ベンチュリー模型, | Venturi tube |
| 4. タンク, | cylinder |
| 5. 浮子, | float |
| 6. ポテンシオメーター, | potensiometer |
| 7. レコーダー, | recorder |

図 11 水槽実験概要
Measurement system of static pressure
and upwelling volume of Venturi tube

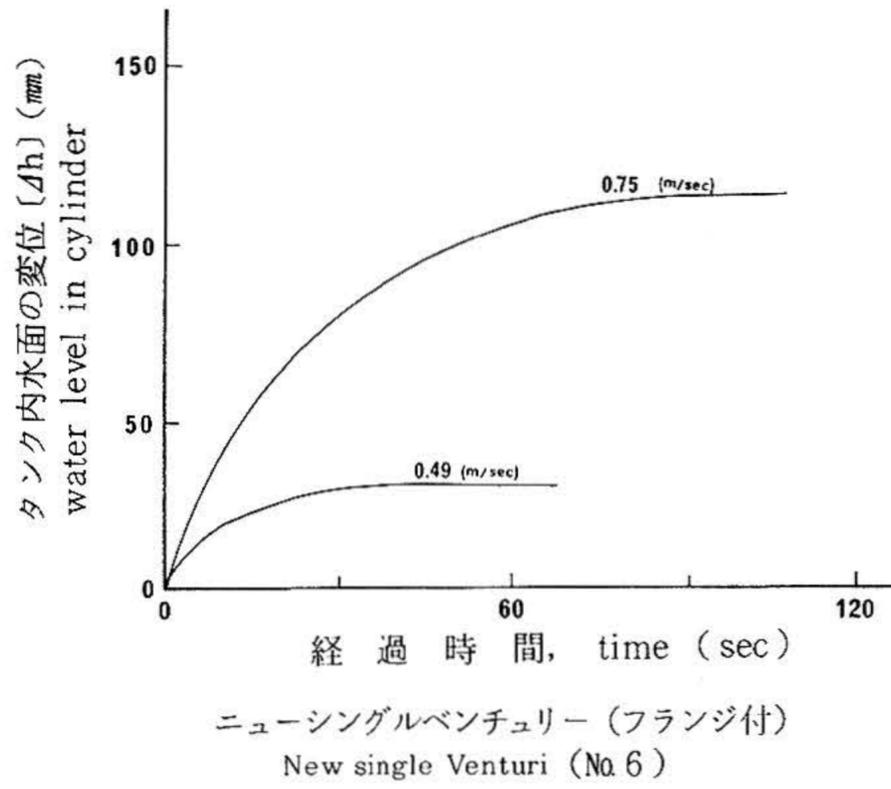


図12 一定流速におけるベンチュリー模型の湧昇性能測定結果
Water level (Δh) in cylinder at constant flow rate

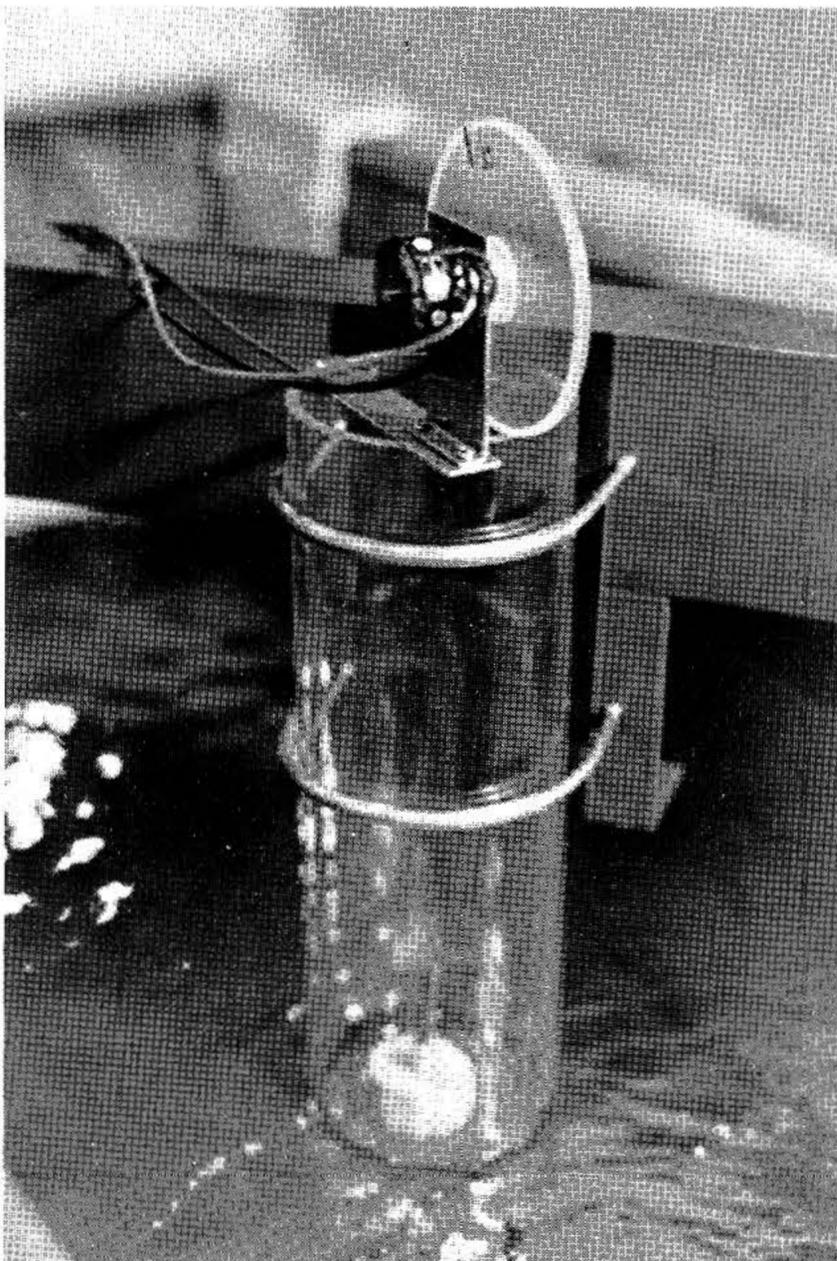


写真1 タンクおよびポテンシオメータ機構部
Cylinder and potentiometer

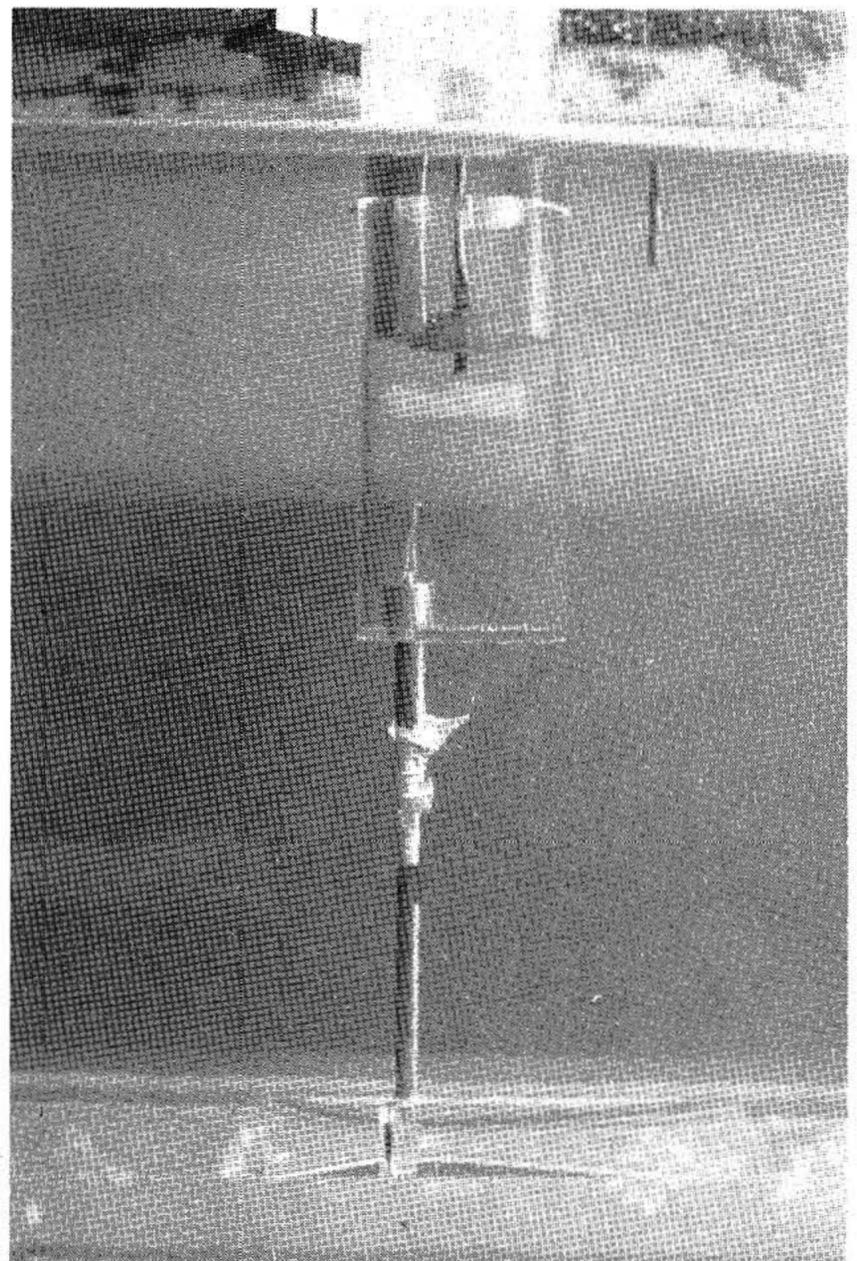
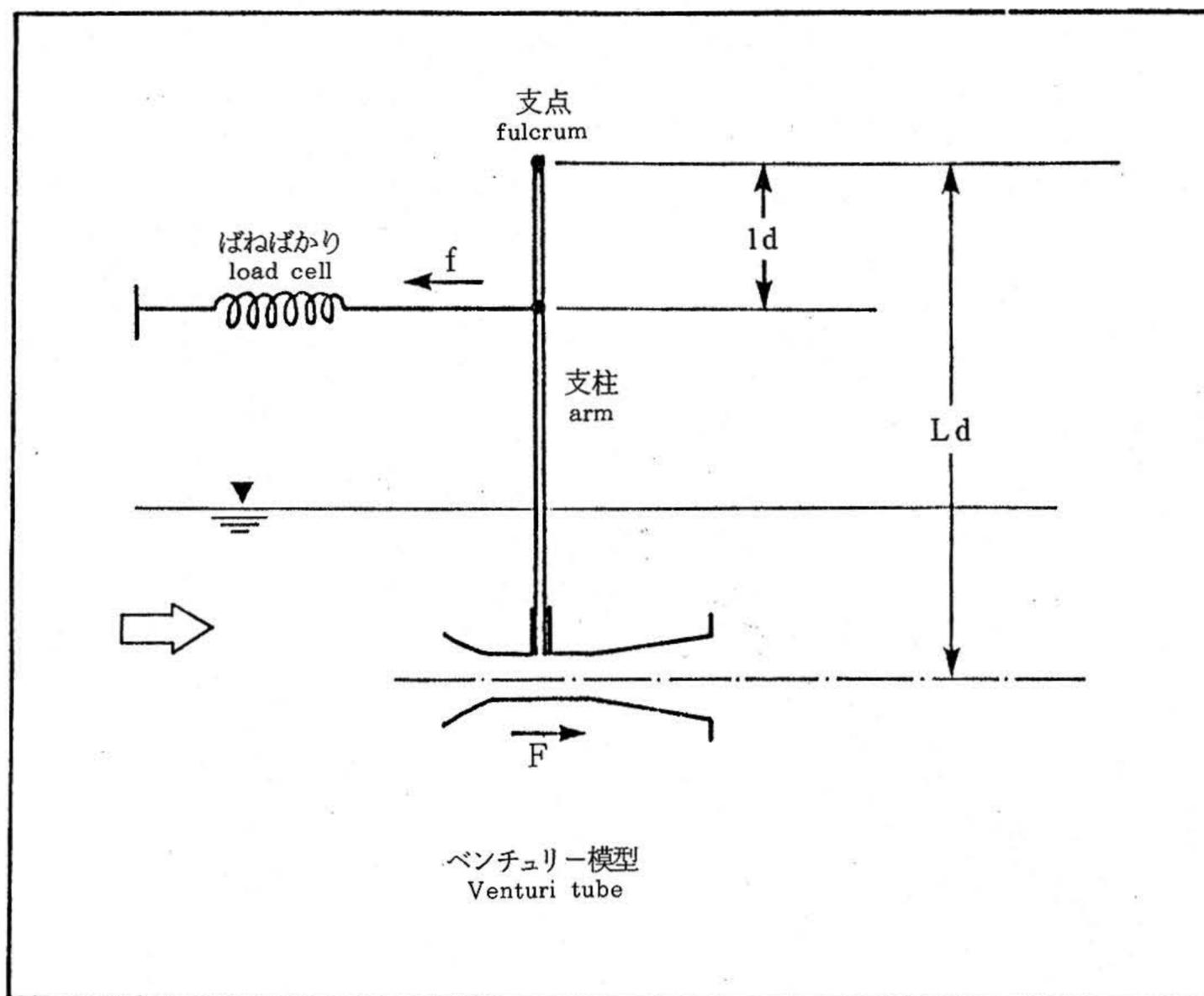


写真2 水槽内に設置されたベンチュリー模型およびタンク
Venturi tube and cylinder setting up in circulating water tunnel



$$F = \frac{ld}{Ld} \cdot f$$

図 13 ドラッグ試験概要
Measurement system of drag force of Venturi tube

実用規模のベンチュリーの装置は、大規模になることが予想されるので、レイノルズ数が大きい領域（高流速領域）での性能が検討の対象となる。高流速領域で一定に安定した差圧拡大率の値は、図14によれば、シングルベンチュリー（No.1）では3.7、ダブルベンチュリー（No.2）では4.8、トリプルベンチュリー（No.3）では4.8、境界層制御ベンチュリー（No.4）では4.3、二次元ベンチュリー（No.5）では4.4、ニューシングルベンチュリー（No.6）では5.2であった。

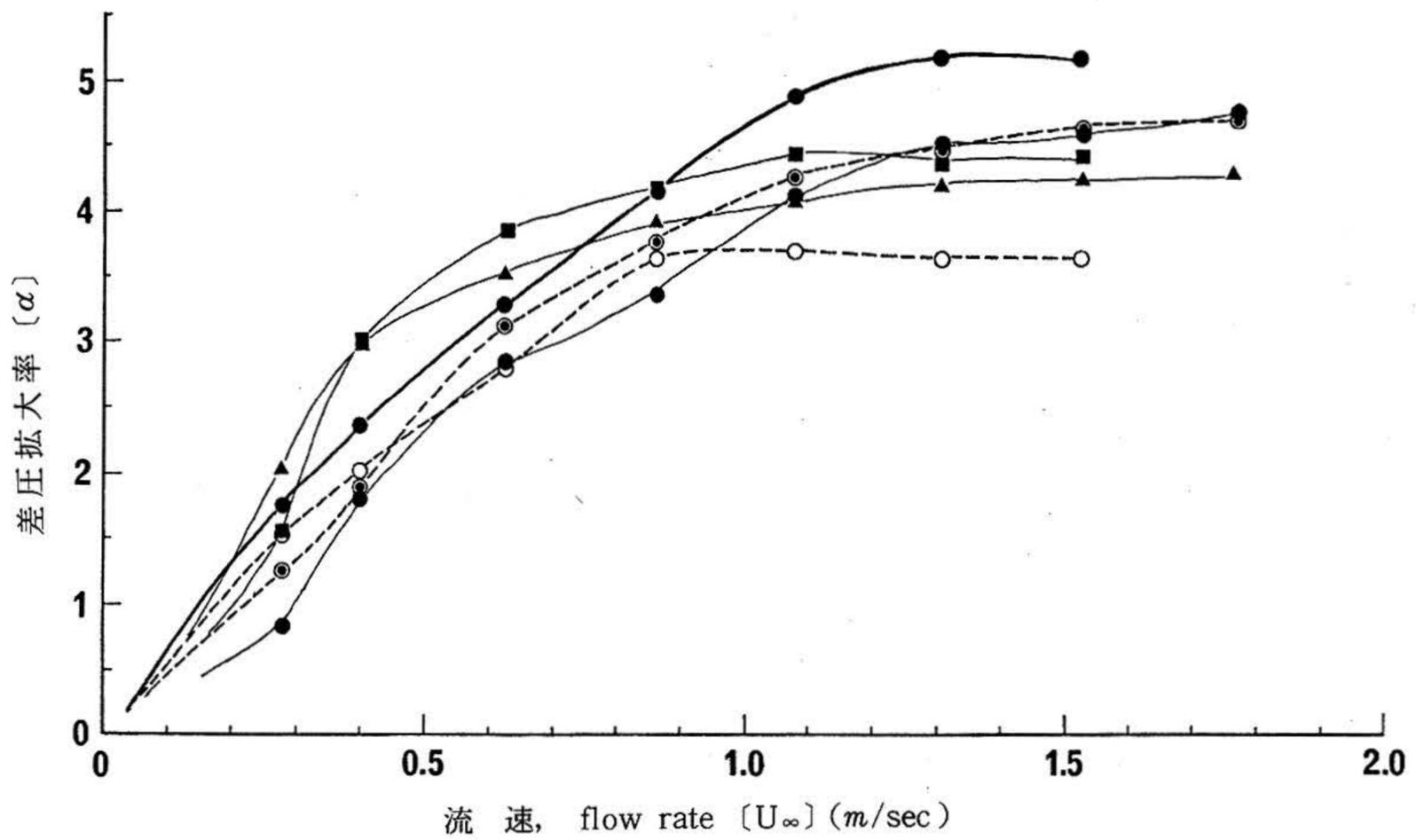
これらの結果から、ベンチュリーの多段化は高流速領域では差圧拡大率を向上させ、またベンチュリーの境界層制御は低流速領域では差圧拡大率

を向上させることがわかった。

さらにニューシングルベンチュリー（No.6）は、差圧拡大率が高流速領域では他のいずれのベンチュリーより最も高くなった。

ニューシングルベンチュリー（No.6）の差圧拡大率が最も高くなった理由として、ベンチュリーの内側に緩和曲線を用いることによって、流れをはく離しにくくしたこと、およびベンチュリーの外側の流れを妨げる突起物を極力減らすことによって、流体の運動量の損失を少なくしたことが考えられる。

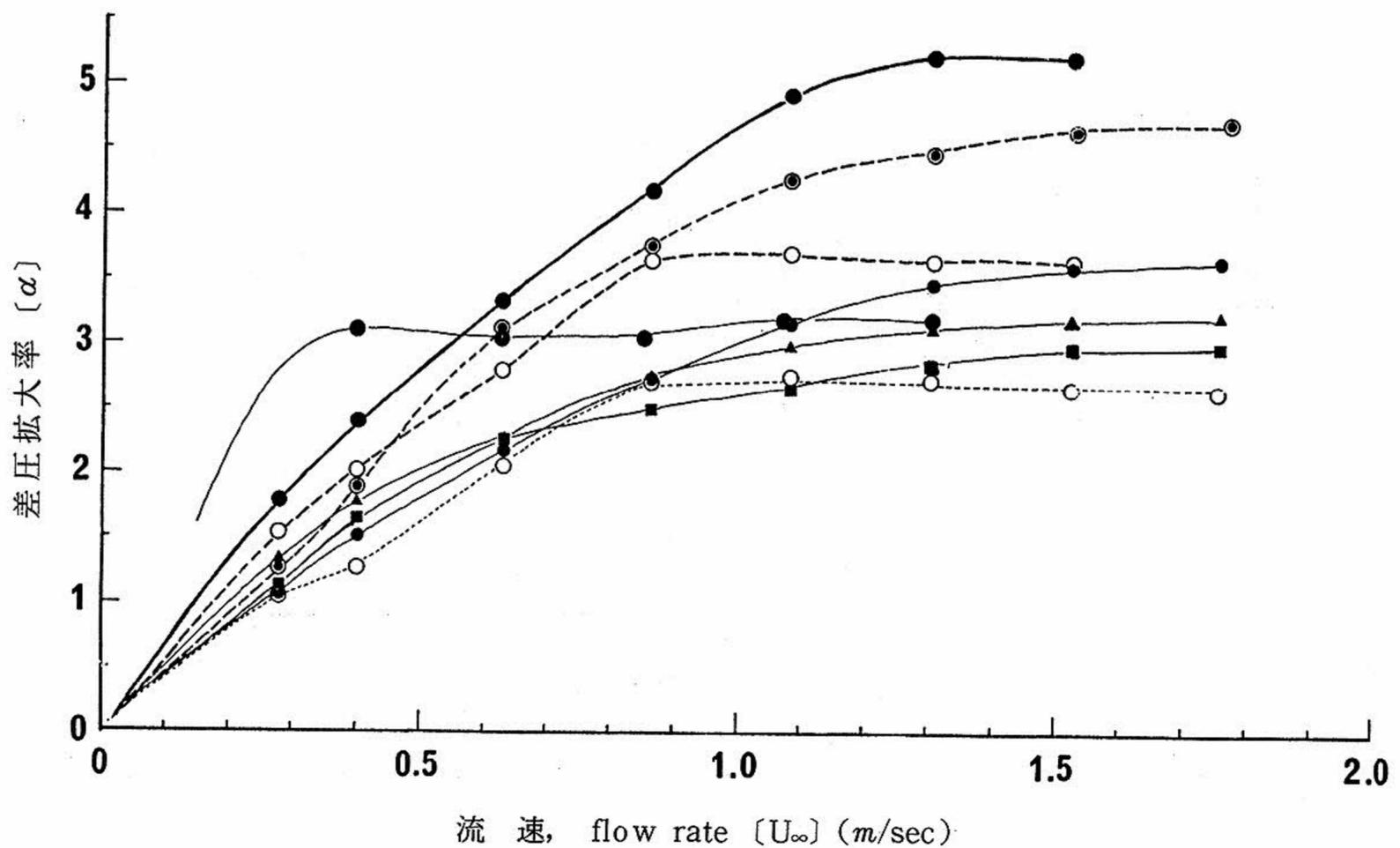
次にシングルベンチュリーおよびニューシングルベンチュリーについて、フランジ、トリッ



α ; 差圧拡大率, the static pressure generated in the Venturi tube non-dimensionalized by divided by the dynamic pressure out of the Venturi tube

- シングルベンチュリー, single Venturi, (No. 1)
- ◎-- ダブルベンチュリー, double Venturi, (No. 2)
- トリプルベンチュリー, tripple Venturi, (No. 3)
- ▲— 境界層制御ベンチュリー, boundary layer controlled Venturi, (No. 4)
- 二次元ベンチュリー, two-dimensional Venturi, (No. 5)
- ニューシングルベンチュリー, new single Venturi, (No. 6)

図14 各ベンチュリー模型の流速に対する差圧拡大率の特性(その1)
Comparison of $U_\infty - \alpha$ property of Venturi tubes (part 1)



- | | |
|--------------------------------------|--|
| --○-- シングルベンチュリー (フランジ付), | single Venturi, with ring, (No. 1) |
| --⊙-- ダブルベンチュリー (フランジ付), | double Venturi with ring, (No. 2) |
| ●— ニューシングルベンチュリー (フランジ付), | new single Venturi with ring, (No. 6) |
| ---○--- シングルベンチュリー (フランジなし) | single Venturi without ring, (No. 7) |
| ●— ニューシングルベンチュリー (フランジなし), | new single Venturi without ring, (No. 8) |
| ■— ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケース付) | new single Venturi without ring and with case, (No. 9) |
| ▲— ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケースなし) | new single Venturi without ring and case, (No. 10) |
| ●— ニューシングルベンチュリー (フランジ付, トリップングワイヤ付) | new single Venturi with ring and tripping wire, (No. 11) |

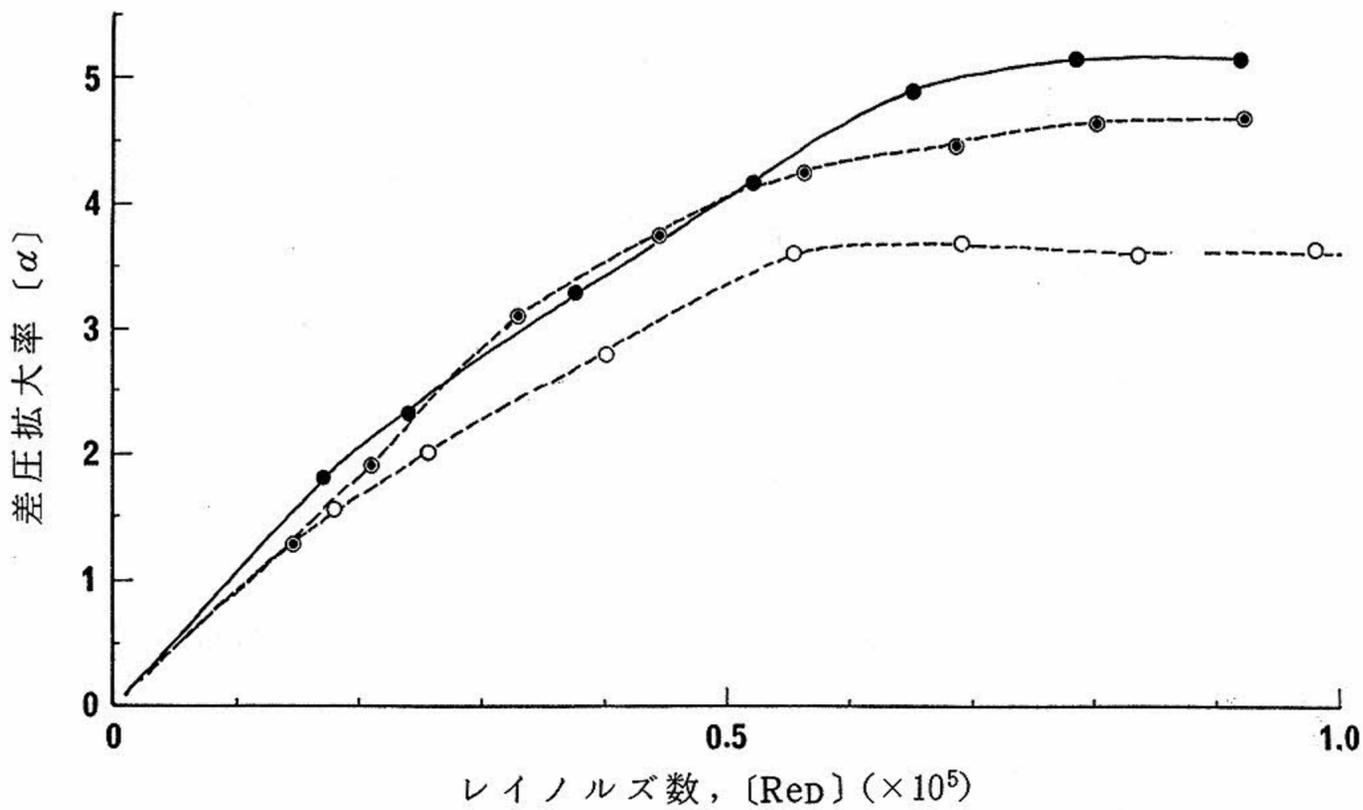
図15 各ベンチュリー模型の流速に対する差圧拡大率の特性 (その2)
Comparison of $U_{\infty}-\alpha$ property of Venturi tubes (part 2)

ピング ワイヤ, エジェクターの形状, および外部ケースの有無が差圧拡大率に及ぼす効果についての静圧特性試験結果を図15に示す。

高流速領域では, 差圧拡大率はニューシングルベンチュリー (フランジ付, No. 6) では5.2, 同ベンチュリー (フランジなし, No. 8) では3.6であり, またシングルベンチュリー (フランジ付, No. 1) では3.7, 同ベンチュリー (フランジなし,

No. 7) では2.7であり, したがって, フランジは差圧拡大率を約1.4倍高める効果を持つことがわかった。

トリッピング ワイヤの効果を知るため, ニューシングルベンチュリー (フランジ付, No. 6) と同ベンチュリー (フランジ付, トリップングワイヤ付, No. 11) の結果とを比較すると, トリップング ワイヤは低流速領域 (約0.4 m/sec) で



- シングルベンチュリー (フランジ付), single Venturi with ring, (No. 1)
- ダブルベンチュリー (フランジ付), double Venturi with ring, (No. 2)
- ニューシングルベンチュリー (フランジ付), new single Venturi, (No. 6)

図16 各ベンチュリー模型のレイノルズ数(代表長さ; 模型外径)に対する差圧拡大率の特性

Comparison of $ReD-\alpha$ property between single Venturi (No.1), double Venturi (No.2), and new single Venturi (No.6). (ReD denotes Reynolds Number non-dimensionalized by the outer diameter of Venturi tube)

差圧拡大率を高める効果があるが、高流速領域 (1.0 ~ 1.7 m/sec) では差圧拡大率を低下させることがわかった。

エジェクターの形の効果を調べるために、ニューシングルベンチュリー (フランジなし, No.8) と同ベンチュリー (フランジなし, 外部ケース付, No.9) の結果を比較すると、ニューシングルベンチュリー (フランジなし, No.8) のエジェクターの方が差圧拡大率を高める効果のあることがわかった。

ベンチュリーの外部形状の効果を調べるために、ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケース付, No.9) と同じベンチュリー (フランジなし, 外部ケースなし, No.10) の結果を比較

すると、差圧拡大率はほぼ同じであり、外部ケースの効果はほとんどないことがわかった。

静圧特性の点で、最も優れているニューシングルベンチュリー (No.6) と、Liang^{3,4)} (1978, 1979) が開発したダブルベンチュリー (No.2) およびシングルベンチュリー (No.1) について、模型の寸法と無関係に性能を比較するため、諸量を無次元化して表わす。代表長さをベンチュリー模型外径にとった場合のレイノルズ数に対する差圧拡大率を図16、また、代表長さをベンチュリー模型の全長にとった場合のレイノルズ数に対する差圧拡大率を図17に示す。

これらの図から、差圧拡大率は、両者の条件下では、ニューシングルベンチュリー (No.6) の

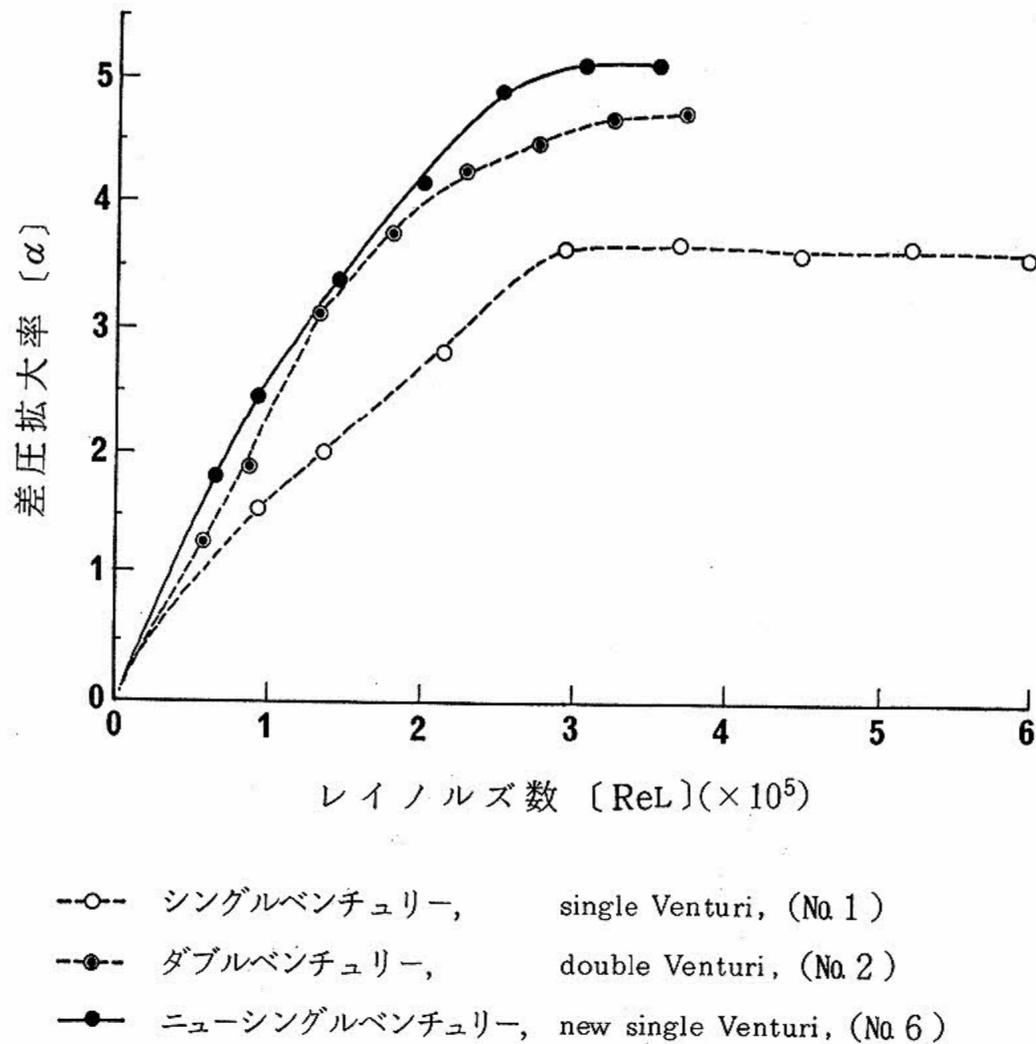


図17 各ベンチュリー模型のレイノルズ数（代表長さ；模型全長）に対する差圧拡大率の特性

Comparison of $ReL-\alpha$ property between single Venturi (No.1), double Venturi (No.2), and single Venturi (No.6). (ReL denotes Reynolds Number non-dimensionalized by the length of Venturi tube)

方が優れていることがわかった。

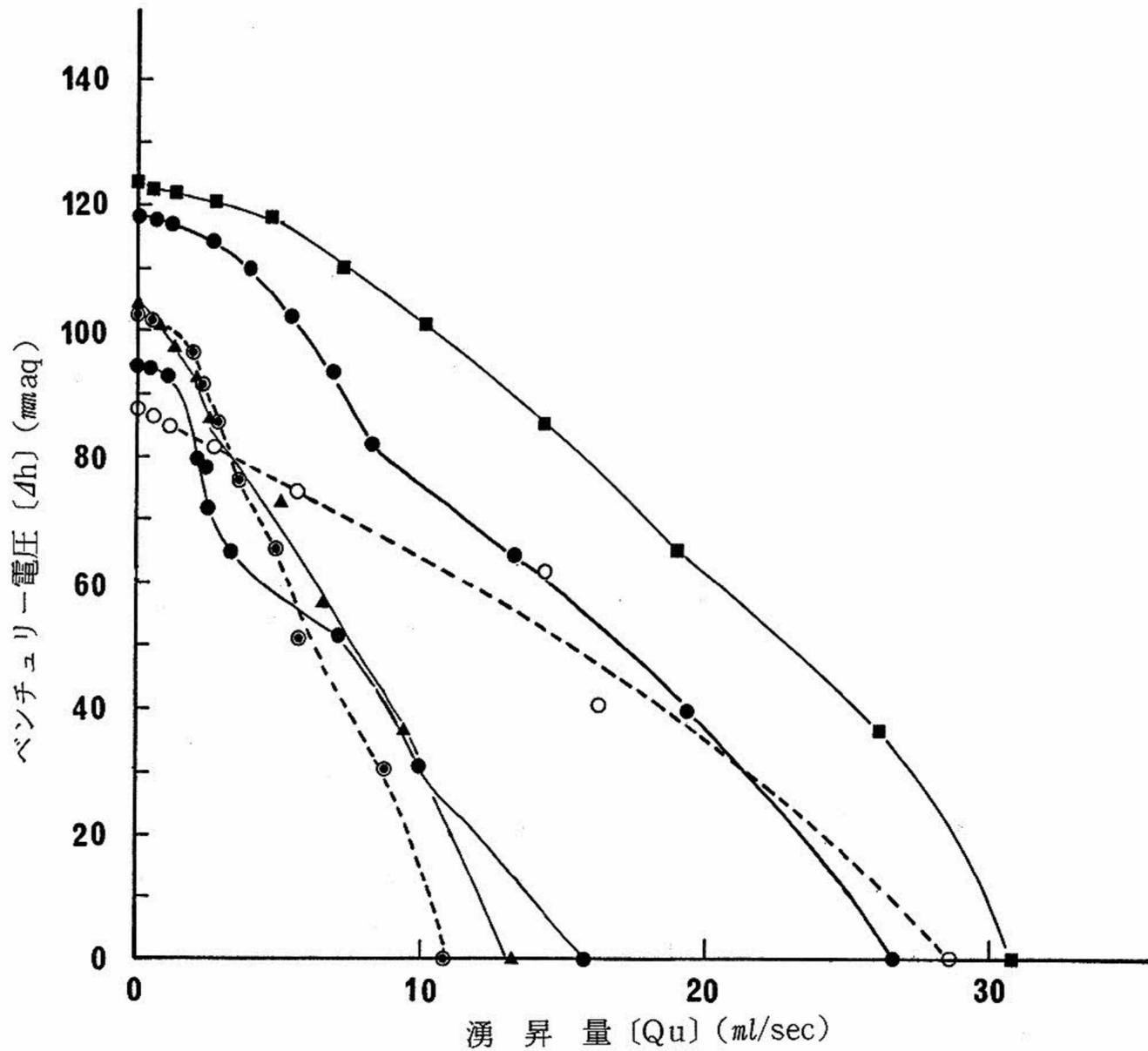
4.2 ベンチュリー模型の湧昇特性試験結果

シングルベンチュリー (No.1), ダブルベンチュリー (No.2), トリプルベンチュリー (No.3), 境界層制御ベンチュリー (No.4), 二次元ベンチュリー (No.5), およびニューシングルベンチュリー (No.6) について、水槽流速 0.76 m/sec におけるベンチュリー静圧に対する湧昇量特性を図18に示す。

実用を想定した大規模ベンチュリーに関しては、レイノルズ数が非常に大きい領域で運用すること

になる。そこで、上記図を以下に述べる方法によって大規模ベンチュリーの場合に換算して、各種ベンチュリーの性能を比較することにする。

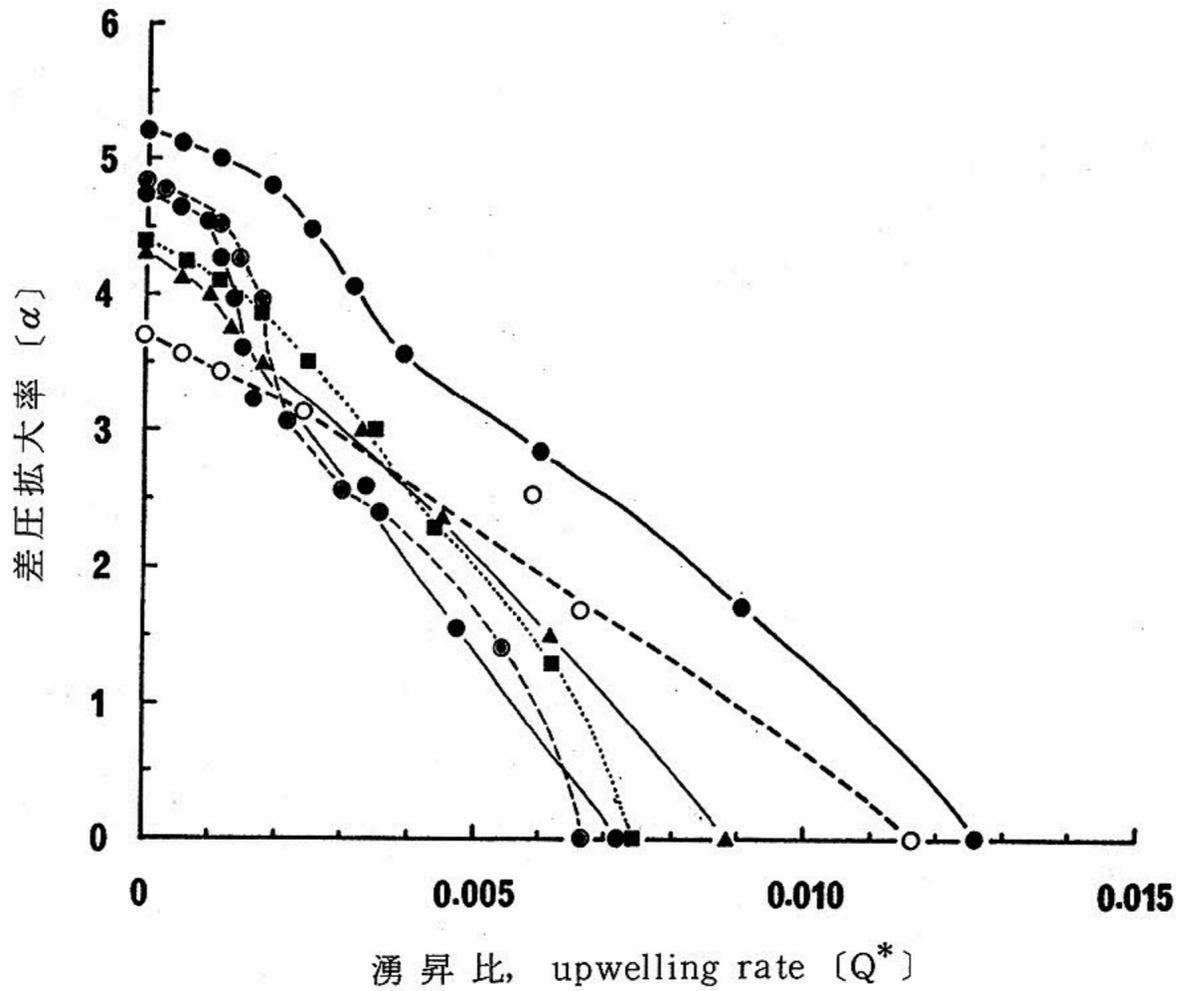
縦軸のベンチュリー静圧を流速 0.76 m/sec における動圧で除して、差圧拡大率として示す。また横軸の湧昇量をベンチュリーのフランジの断面積を通過する流量で除して、湧昇比として示す。ニューシングルベンチュリー (No.6) については、図14において、レイノルズ数が大きい領域（高流速領域）の差圧拡大率は 5.2 であったので、図18の湧昇量が0のときのベンチュリー静圧 118.4 mm Aq に相当する差圧拡大率 4.0 を 5.2 に直し、



〔 Δh ; ベンチュリー静圧, static pressure generated in the Venturi tube 〕

- ニューシングルベンチュリー (フランジ付), new single Venturi with ring, (No. 6)
- シングルベンチュリー (フランジ付), single Venturi with ring, (No. 1)
- ダブルベンチュリー (フランジ付), double Venturi with ring, (No. 2)
- トリプルベンチュリー (フランジ付), tripple Venturi with ring, (No. 3)
- ▲— 境界層制御ベンチュリー (フランジ付), boundary layer controlled Venturi with ring, (No. 4)
- 二次元ベンチュリー (フランジ付), two-dimensional Venturi with ring, (No. 5)

図18 各ベンチュリー模型のベンチュリー静圧-湧昇量特性(その1)
Comparison of upwelling rate (Q_u) - Δh property of Venturi tubes ($U_\infty = 0.76 \text{ m/sec}$)



- ニューシングルベンチュリー, new single Venturi, (No. 6)
- シングルベンチュリー, single Venturi, (No. 1)
- ダブルベンチュリー, double Venturi, (No. 2)
- トリプルベンチュリー, tripple Venturi, (No. 3)
- ▲— 境界層制御ベンチュリー, boundary layer controlled Venturi, (No. 4)
-■..... 二次元ベンチュリー, two-dimensional Venturi, (No. 5)

図19 大規模ベンチュリーの場合に換算した各ベンチュリー模型の差圧拡大率-湧昇比特性

Comparison of calculated $Q^* - \alpha$ property of large scale Venturi tubes. (Q^* is defined to be upwelling rate (Q_u)/ water volume passing through the cross section of Venturi tube in unit time)

同時に湧昇量が0でないときの差圧拡大率に1.3を乗じることによって、レイノルズ数が大きいときの差圧拡大率に換算した。他のベンチュリーについても同様に換算を行ない、その結果を図19に示す。

この図を見ると、ベンチュリー模型の湧昇特性は、2種類のグループに分けられる。すなわち、シングルベンチュリー (No. 1) と、ニューシングルベンチュリー (No. 6) においては、湧昇比を増加させると、差圧拡大率が徐々に減少する傾

向を示すが、これに対して、その他のベンチュリーにおいては、湧昇比を増加させると、差圧拡大率が急速に減少する傾向がみられる。この結果から、湧昇量を多く必要とする場合には、前者を採用すべきであることがわかる。

また、図19において、差圧拡大率が同じであるとき、湧昇比が最も大きいものは、ニューシングルベンチュリー (No.6) である。すなわち、湧昇深度が同じ場合は、ベンチュリー断面積当りの湧昇量が最も多いものは、ニューシングルベンチュリー (No.6) であることがわかった。

次にシングルベンチュリー、およびニューシングルベンチュリーについて、フランジの有無、トリッピングワイヤの有無、エジェクターの形状、および外部ケースの有無がベンチュリー静圧に対する湧昇量特性に及ぼす効果についての試験結果を図20に示す。

この図に示したシングルベンチュリーおよびニューシングルベンチュリーについては、フランジの有無、トリッピングワイヤの有無、エジェクターの形状、および外部ケースの有無にかかわらず、湧昇量を増加させるとベンチュリー静圧は徐々に減少する傾向があることがわかった。したがって、フランジ等については、ベンチュリー静圧を高める手段として、有効なものを利用すればよいということになる。

“4.1 ベンチュリー模型の静圧特性試験結果”で検討した通り、高流速領域におけるベンチュリー静圧を向上させるには、フランジを取付け、エジェクターの形状をNo.6の模型のものとし、トリッピングワイヤを用いないことが効果的である。

以上のことから、高流速領域におけるベンチュリー静圧に対する湧昇量特性は、ニューシングルベンチュリー (No.6) が最も優れていると考えられる。

本研究で開発されたニューシングルベンチュリー (No.6) と、Liang^{3,4)} (1978, 1979) が開発したダブルベンチュリー (No.2) およびシングルベンチュリー (No.1) について、模型の寸法と無関係に性能を比較するため、諸量を無次元化して表わす。

実用化を想定した大規模ベンチュリーでは、レイノルズ数が非常に大きい領域で運用すると考え

られるので、ここでは図16と図17のレイノルズ数が高い領域における湧昇比に対する差圧拡大率の特性を示す。

代表長さをベンチュリー模型外径にとった場合の特性を図21、また代表長さをベンチュリー全長にとった場合の特性を図22に示す。

これらの図から、差圧拡大率が同じ場合の湧昇比については、両者の条件下でニューシングルベンチュリー (No.6) の方が優れていることがわかった。

4.3 ベンチュリー模型のドラッグ特性試験結果

ベンチュリーのドラッグについての検討は、ベンチュリー式人工湧昇装置を実海域に係留する場合に重要となる。

ベンチュリー管のドラッグは、湧昇管のドラッグに比べると、かなり小さいと考えられるが、湧昇装置全体の安定性に影響を与えるので、小さい方が望ましい。

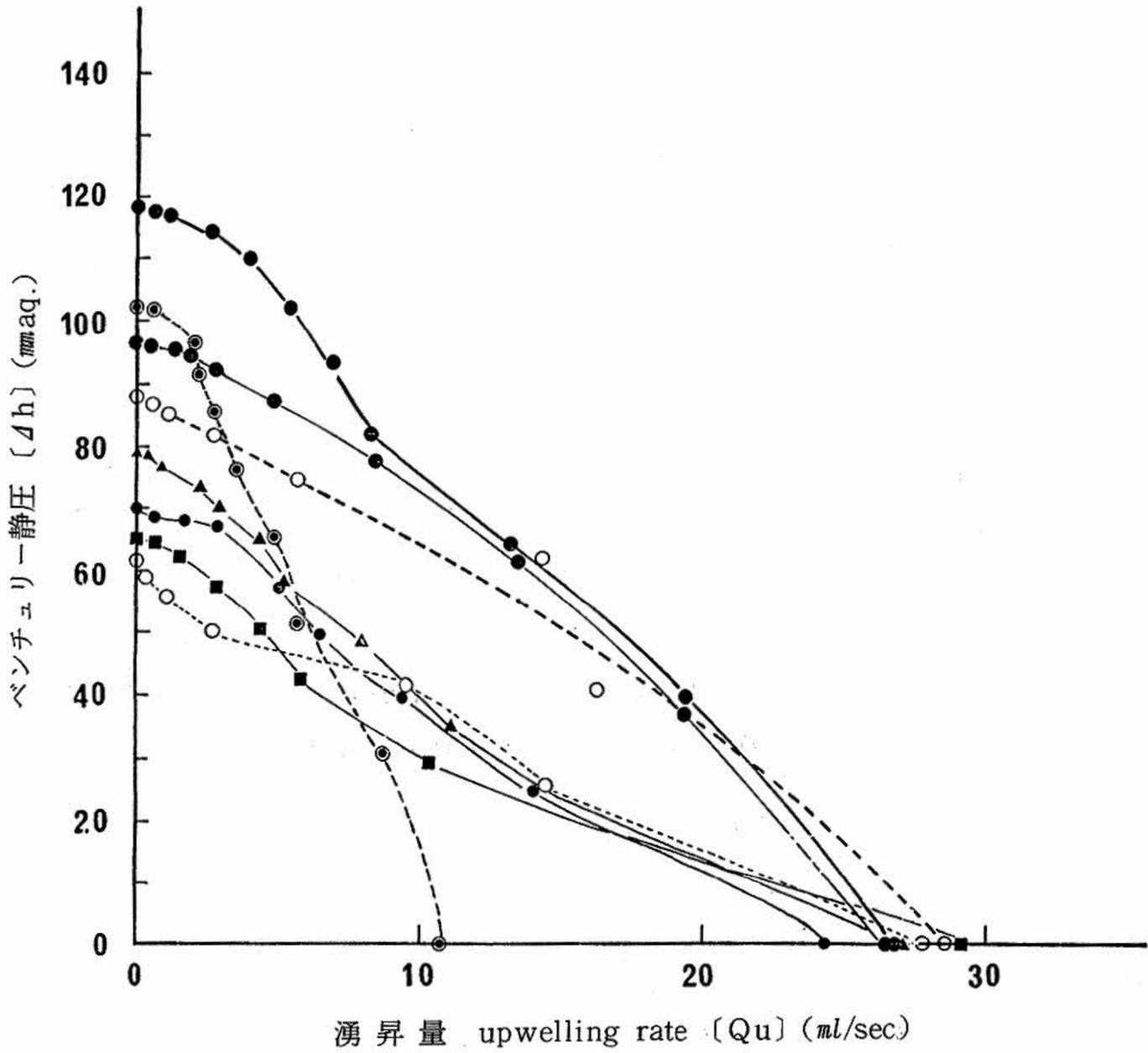
各種ベンチュリー模型について、水槽流速0.78 m/sec において行なった実験結果を表1に示す。

また、模型断面積を同じにした場合のドラッグを計算によって求め、合わせて表1に示した。なお、ドラッグは水槽流速が同じである場合には、模型断面積に比例するとして換算した。

ドラッグに対するフランジの効果を調べるため、表1の測定値を比較すると、シングルベンチュリー (フランジ付, No.1) では150g、同じベンチュリー (フランジなし, No.7) では82gであった。また、ニューシングルベンチュリー (フランジ付, No.6) では119g、同じベンチュリー (フランジなし, No.8) では70gであった。したがって、フランジはドラッグを1.7~1.8倍増加させることがわかった。

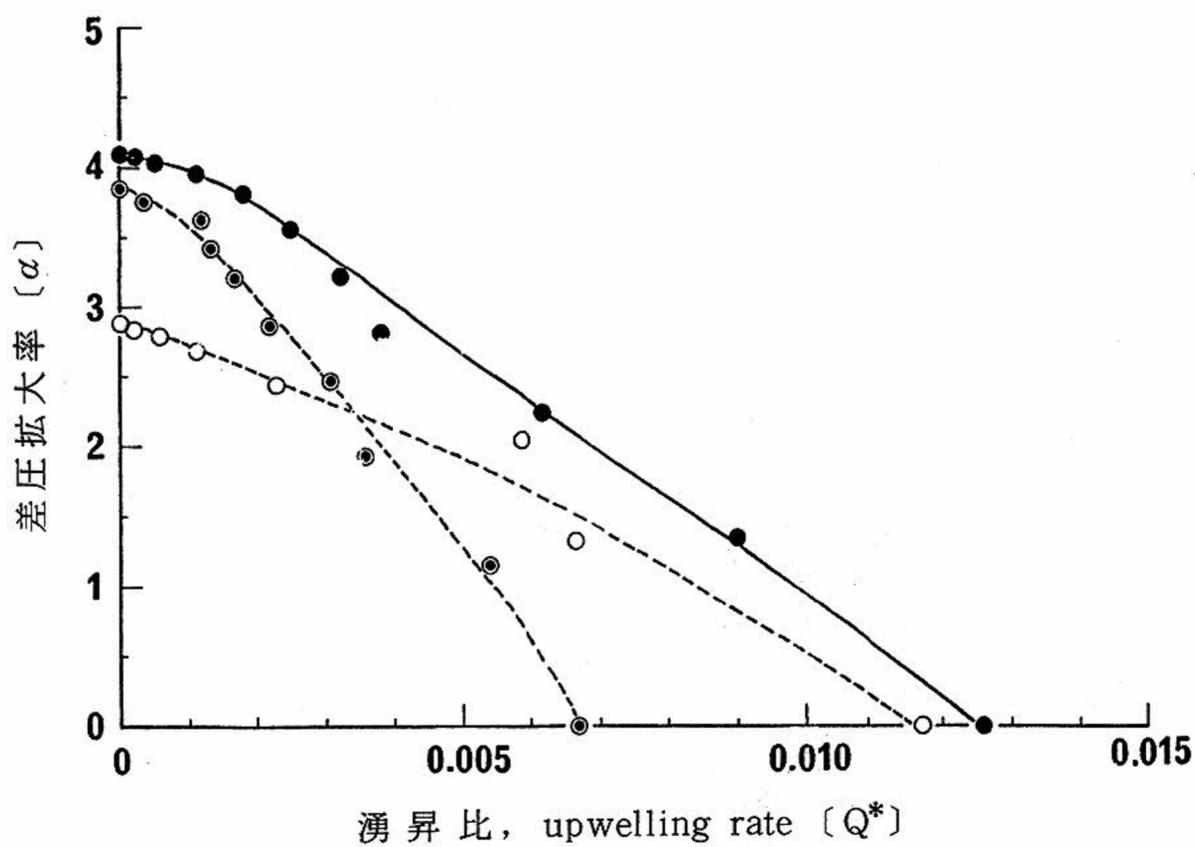
“4.1 ベンチュリー模型の静圧特性試験結果”において、フランジはベンチュリーの差圧拡大率を1.4倍高める効果があることがわかっているので、ドラッグを多少増加させるとしても、取付けるべきであると考えられる。

ドラッグに対する外部ケースの効果を調べるために、表1の測定値を比較すると、ニューシングルベンチュリー (外部ケース付, No.9) では121g、同ベンチュリー (外部ケースなし, No.10) で



- ニューシングルベンチュリー (フランジ付), new single Venturi with ring, (No. 6)
- ダブルベンチュリー (フランジ付), double Venturi with ring, (No. 2)
- シングルベンチュリー (フランジ付), single Venturi with ring, (No. 1)
- ニューシングルベンチュリー (フランジなし), new single Venturi without ring, (No. 8)
- ▲— ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケースなし), new single Venturi without ring and case, (No. 10)
- ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケース付), new single Venturi without ring and with ring, (No. 9)
- シングルベンチュリー (フランジなし), single Venturi without ring, (No. 7)
- ニューシングルベンチュリー (フランジ付, トリップングワイヤ付), new single Venturi with ring and tripping wire, (No. 11)

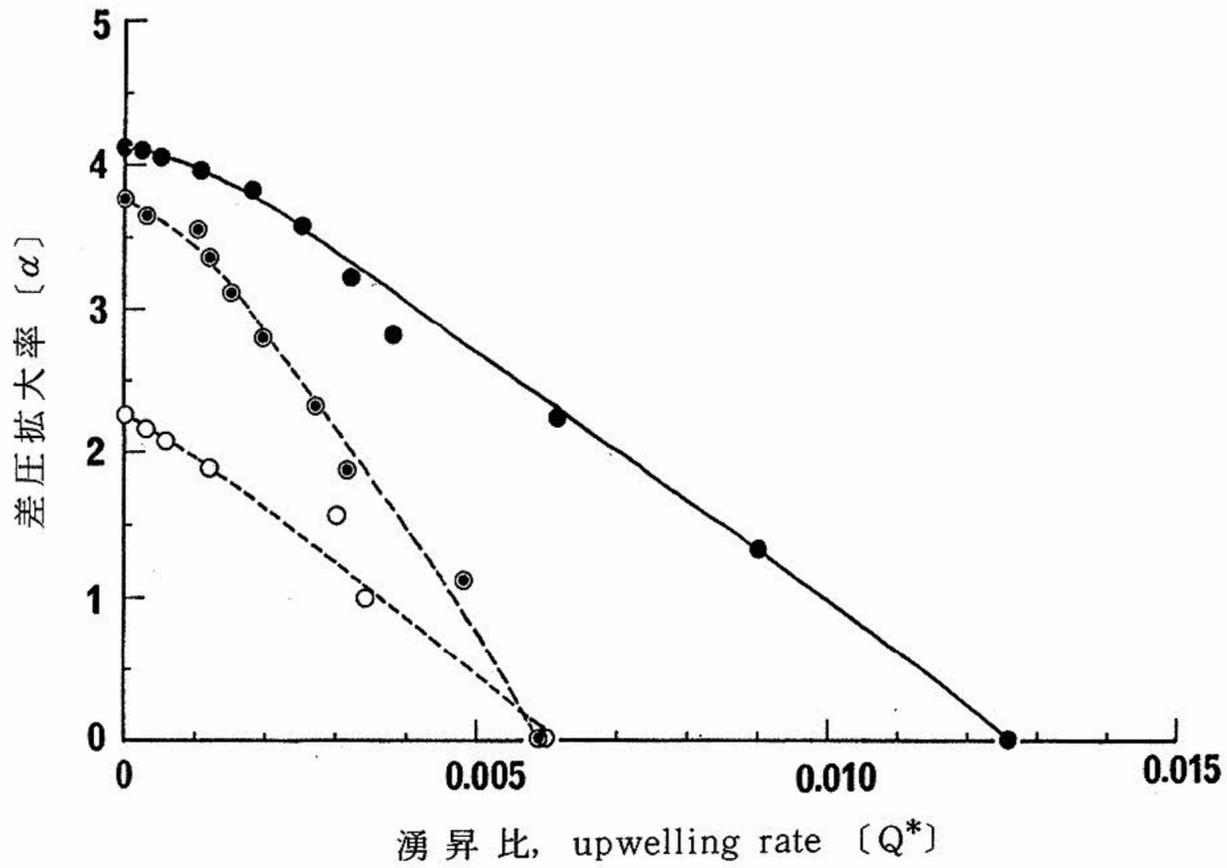
図20 各ベンチュリー模型のベンチュリー静圧-湧昇量特性(その2)
 Comparison of upwelling rate (Qu) - Δh property of Venturi tubes (U_∞ = 0.76 m/sec)



- シングルベンチュリー, single Venturi, (No. 1)
- ダブルベンチュリー, double Venturi, (No. 2)
- ニューシングルベンチュリー, new single Venturi, (No. 6)

図21 一定レイノルス数 (代表長さ; 模型外径) における各ベンチュリーの差圧拡大率-湧昇比特性

Comparison of $Q^*-\alpha$ property between single Venturi (No. 1), double Venturi (No. 2), and new single Venturi (No. 6) at constant Reynolds Number (Re_D) which is no-dimensionalized by the outer diameter of Venturi tube.



$Re_L = 1.74 \times 10^5$

- シングルベンチュリー, single Venturi, (No. 1)
- - ● - - ダブルベンチュリー, double Venturi, (No. 2)
- - ○ - - ニューシングルベンチュリー, new single Venturi, (No. 6)

図22 一定レイノルズ数(代表長さ; 模型全長)における各ベンチュリーの差圧拡大率-湧昇比特性

Comparison of $Q^*-\alpha$ property between single Venturi (No. 1), double Venturi (No. 2), and new single Venturi (No. 6) at constant Reynolds Number (Re_L) which is non-dimensionalized by the length of Venturi tube.

表1 各種ベンチュリーのドラッグ試験結果
Comparison of Venturi tube drag force

* ドラッグの換算は模型断面積に比例すると仮定して行ない、断面積が 28.3 cm^2 のときの値として示した。

Drag force was given as the area of Venturi tube cross section was 28.3 cm^2 . Calculation was carried out as the drag force of Venturi tube was proportioned to the area of Venturi tube cross section.

ベンチュリー模型の種類 type of Venturi tube	模 型 No.	ドラッグの測定値 measured drag force (g)	ベンチュリー模型の断面積 cross section of Venturi tube (cm^2)	換算後のドラッグ calculated drag force (g)*
シングルベンチュリー (フランジ付) single Venturi (with ring)	1	150	32.2	132
シングルベンチュリー (フランジなし) single Venturi (without ring)	7	82	12.6	184
ダブルベンチュリー double Venturi	2	105	21.2	140
トリプルベンチュリー triple Venturi	3	119	28.3	119
境界層制御ベンチュリー boundary layer controlled Venturi	4	97	19.6	140
2次元ベンチュリー two-dimensional Venturi	5	303	55.0	156
ニューシングルベンチュリー (フランジ付) new single Venturi (with ring)	6	119	28.3	119
ニューシングルベンチュリー (フランジなし) new single Venturi (without ring)	8	70	12.6	157
ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケース付) new single Venturi (without ring and with case)	9	121	12.6	271
ニューシングルベンチュリー (フランジなし, 外部ケースなし) new single Venturi (without ring and case)	10	96	12.6	218

表2 ベンチュリー式人工湧昇装置の実海域における設定条件
Setting conditions of Venturi-type artificial upwelling equipment

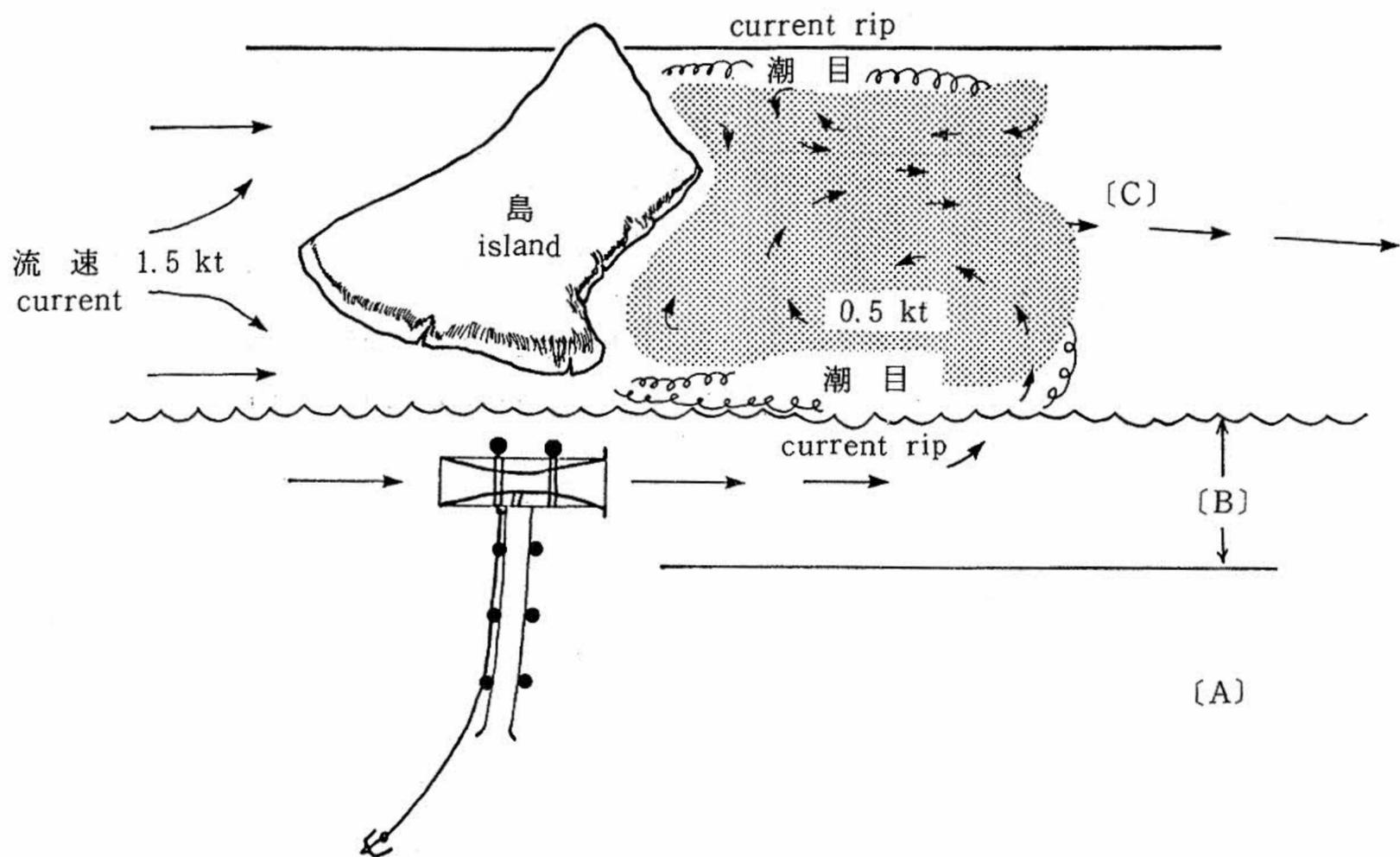
(1) 肥沃化対象想定海域 model waters for fertilization	伊豆大島東側滞留海域 (約 10 km × 10 km) stagnant waters on the east of Oshima Island
(2) 人工湧昇装置設置海域 waters mooring equipment	伊豆大島北端もしくは南端近接域 waters on the north or south of Oshima Island
(3) ベンチュリー管設置深度 the depth of Venturi tube	10 m (海面下, undersea)
(4) 運用時期 operating season	夏季の密度成層期 summer (stratified waters)
(5) 設置海域の流速 flow rate	1.5 kt
(6) 有光層下限深度 lower limit of euphotic layer	40 m (深度, depth)

は96%であった。したがって、外部ケースはドラッグを約1.3倍増加させることがわかった。

実用化を想定した大規模ベンチュリーの場合には、外部ケースが必要になることがあり得るので、そのときにはドラッグの少ない形状の外部ケースを開発する必要がある。

4.4 実海域における大規模ベンチュリーの湧昇量の推定

ベンチュリー式人工湧昇装置の性能に影響を与える海洋諸条件としては、海潮流の流速、および海水密度の鉛直分布に起因する密度差水頭(人工湧昇するのに必要な揚程)が重要である。これら



- (A) 深層水
deep sea water
- (B) 有光層 (貧栄養層) 深度約40 m
euphotic layer (oligotrophic layer) depth approx. 40 m
- (C) 滞留海域 10 km × 10 km
stagnant waters

図23 ベンチュリー式人工湧昇装置の実海域での運用想定概念図
Illustration of Venturi-type artificial upwelling equipment in projected practical use.

の因子は海域や季節によって変化するので、まず対照海域と運用時期を想定して検討を進める。

図23には黒潮流域におけるベンチュリー装置による人工湧昇概念図を示す。

肥沃化対象海域としては、貧栄養で海水の滞留性が強い海域が望ましい。一方、ベンチュリーが深層水を汲上げるためには、海潮流の流速が速いことが必要である。したがって、ベンチュリー式人工湧昇装置を流れに対する島の側面に設置し、人工湧昇した深層水の一部が流れに沿って島の背面の滞留性の強い海域に入込むことによって、海域の肥沃化をはかることを想定した。運用時期は、海水の成層が発達して表層が貧栄養になる夏季に

設定する。

伊豆大島の場合、著者らは島の南北端では平均流速1.5ノットの東寄りの流れが卓越し、島の東側は流れの背面で平均流速が約0.5ノットの複雑な流れを呈する滞留性の海域になっており、また島の南北端接近部を通過する約1.5ノットの流れの一部は、島の東側背面域に流速を低下しながら流入することも観測している。そこで、ベンチュリー式人工湧昇装置の設置場所を伊豆大島北端、もしくは南端近接域に想定し、平均流速を1.5ノットに設定した。さらにベンチュリー式人工湧昇装置によって湧昇した深層水の一部が大島背面滞留域に流入するものと考えた。

この海域では、夏季の有光層下限深度は約40mであると、見積られており（中島ほか、未発表）、したがって深層水の吐出深度（ベンチュリーの設置水深）をその以浅に設定する必要がある。ここでは水深10mに設定することにした。

以上の設定条件をまとめて表2に示す。

深層水を人工湧昇する際の海水の密度差水頭を見積るために、伊豆大島北端隣接海域のSt. A-5（139°29.7'E, 34°55.9'N）における夏季成層期の海水密度（ σ_t ）鉛直分布（図24参照）を用いた。この値に基づき、次の方法によって、密度差水頭を計算した。

水深 z_n (m) から z_0 (m) に汲上げるのに要する水頭差（ ΔH ）は、次式で与えられる。

$$\Delta H = \int_{z_0}^{z_n} (\sigma_t(z_n) - \sigma_t(z_0)) dz \quad \dots\dots (9)$$

ΔH の単位は kg/m^3 または $mm Aq$ となる。 z_0 から z_n の区間を n 個に分割し、 z_i ($i = 0 \sim n$) に対する海水密度 $\sigma_t(z_i)$ を用いて、(9)式を書き改めると、次式のようになる。

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n \left\{ \sigma_t(z_n) - \frac{\sigma_t(z_{i-1}) + \sigma_t(z_i)}{2} \right\} \cdot \frac{z_n - z_0}{n} \quad \dots\dots (10)$$

(10)式から求めた鉛直密度差水頭を図25に示す。

水槽実験で得たレイノルズ数が大きい領域における差圧拡大率は、ニューシングル ベンチュリー (No.6) では5.2, ダブル ベンチュリー (No.2) では4.8であった。この値を用いて、流速1.5ノット (0.75 m/sec) でのベンチュリー静圧 (Δh) を求めると、ニューシングル ベンチュリー (No.6) では146 mm Aq, ダブル ベンチュリー (No.2) では135 mm Aq となった。

これらの値を図25に重ねて描いて両ベンチュリーの最大汲上げ深度を求めた。この図から、最大汲上げ深度は、海域の条件によって著しく変化するが、両ベンチュリー間の汲上げ可能深度の差は少ないことがわかる。例えば、1980年8月9日の条件下では、汲上げ可能深度は、ニューシングル ベンチュリー (No.6) では105 m となり、ダブル ベンチュリー (No.2) では95 m となる。また、1980年6月13日の条件下では、それぞれ225 m および212 m となり、夏季の成層期でも、海水密度の鉛直分布の違いによって、汲上げ可能深度に約2倍の差がみられる。

次に湧昇量について検討する。湧昇量は、湧昇比と差圧拡大率の関係(図26参照)に加えて、湧昇管内の摩擦損失、湧昇管内外の熱交換、および実海域の海水密度鉛直分布によって、主に支配される。これらの因子のうち、湧昇管内外の熱交換は湧昇量を増す方向に働くが、簡単のため、ここでは熱交換を無視して検討を進める。

ベンチュリーのど部における静圧 (Δh) は、密度差水頭 (ΔH) と湧昇管における摩擦損失の和で表わすことができる。その際、湧昇管入口損失は、管損失に比べて小さいので、無視すると、次の式がなり立つ。

$$\Delta h = \Delta H + \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{r}{2g} \cdot v^2 \quad \dots\dots (11)$$

ここで λ は管内摩擦係数、 l は湧昇管の長さ (m)、 d は湧昇管の直径 (m)、 v は湧昇管内の流速 (m/sec) である。(11)式を v について整理すると、次式のようになる。

$$v = \sqrt{\frac{d}{\lambda l} \cdot \frac{2g}{r} (\Delta h - \Delta H)} \quad \dots\dots (12)$$

したがって、湧昇量 (Q_u) は、

$$Q_u = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot v$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{d}{\lambda l} \cdot \frac{2g}{r} (\Delta h - \Delta H)} \quad \dots\dots (13)$$

一方、ベンチュリーがない場合には、ベンチュリー外径 (D) を通過する流量 (Q) は、次式で表わされる。

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot U_\infty \quad \dots\dots (14)$$

その結果、湧昇比 (Q^*) については、次の関係式がなり立つ。

$$Q^* = \frac{Q_u}{Q}$$

$$= \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \frac{1}{U_\infty} \cdot \sqrt{\frac{d}{\lambda l} \cdot \frac{2g}{r} (\Delta h - \Delta H)}$$

$$= \left(\frac{d^2}{D}\right) \cdot \sqrt{\frac{d}{\lambda l} \cdot \alpha - \frac{\Delta H}{Pd}} \quad \dots\dots (15)$$

上式は、湧昇管内の摩擦損失を考慮した上での湧昇比 (Q^*) と、それに必要な差圧拡大率 (α) の関係を表わすものである。この関係をベンチュリーの差圧拡大率 (α) と湧昇比 (Q^*) の関係(図26参照)に重ねて描けば、湧昇管内の摩擦損

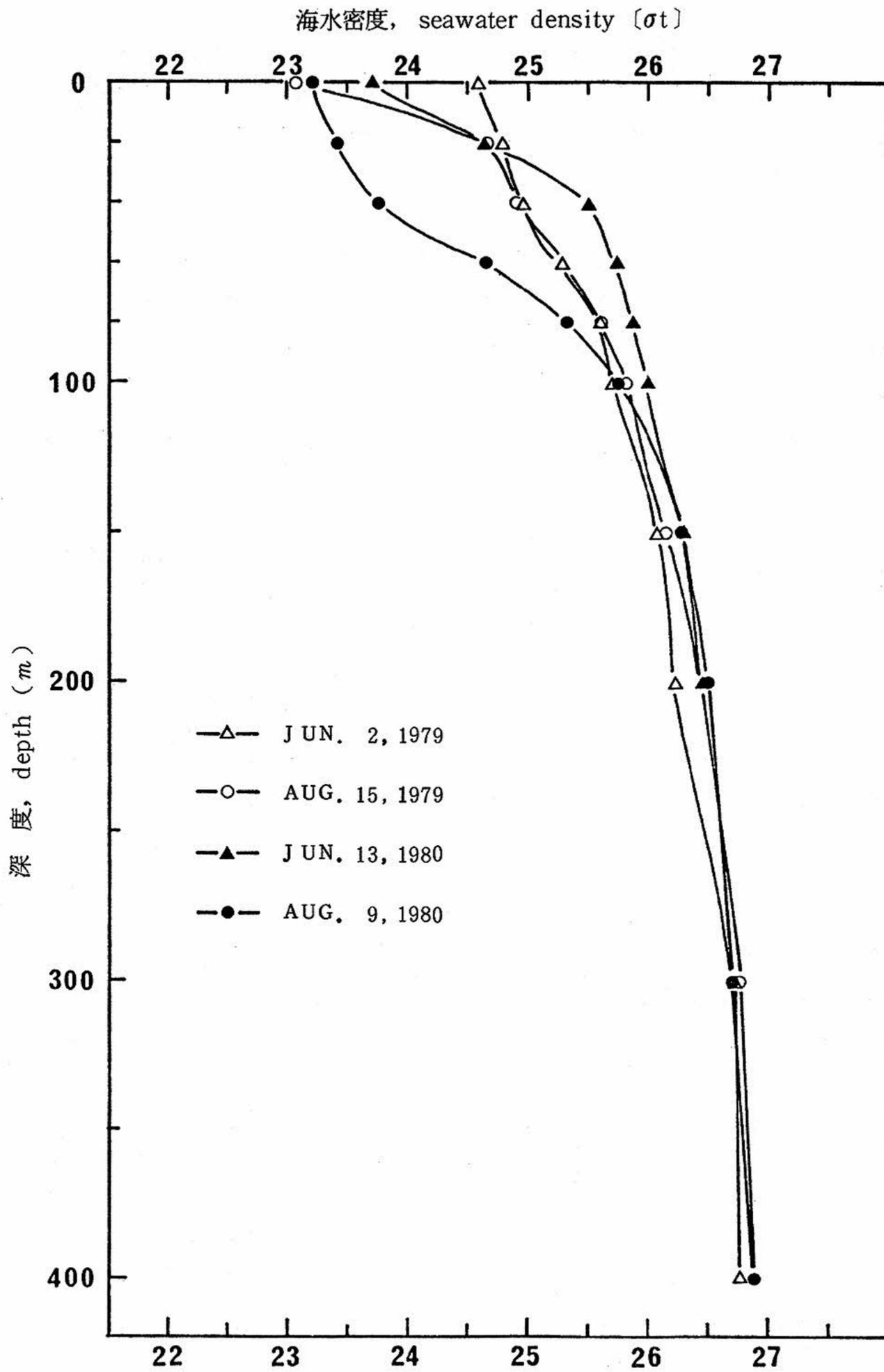
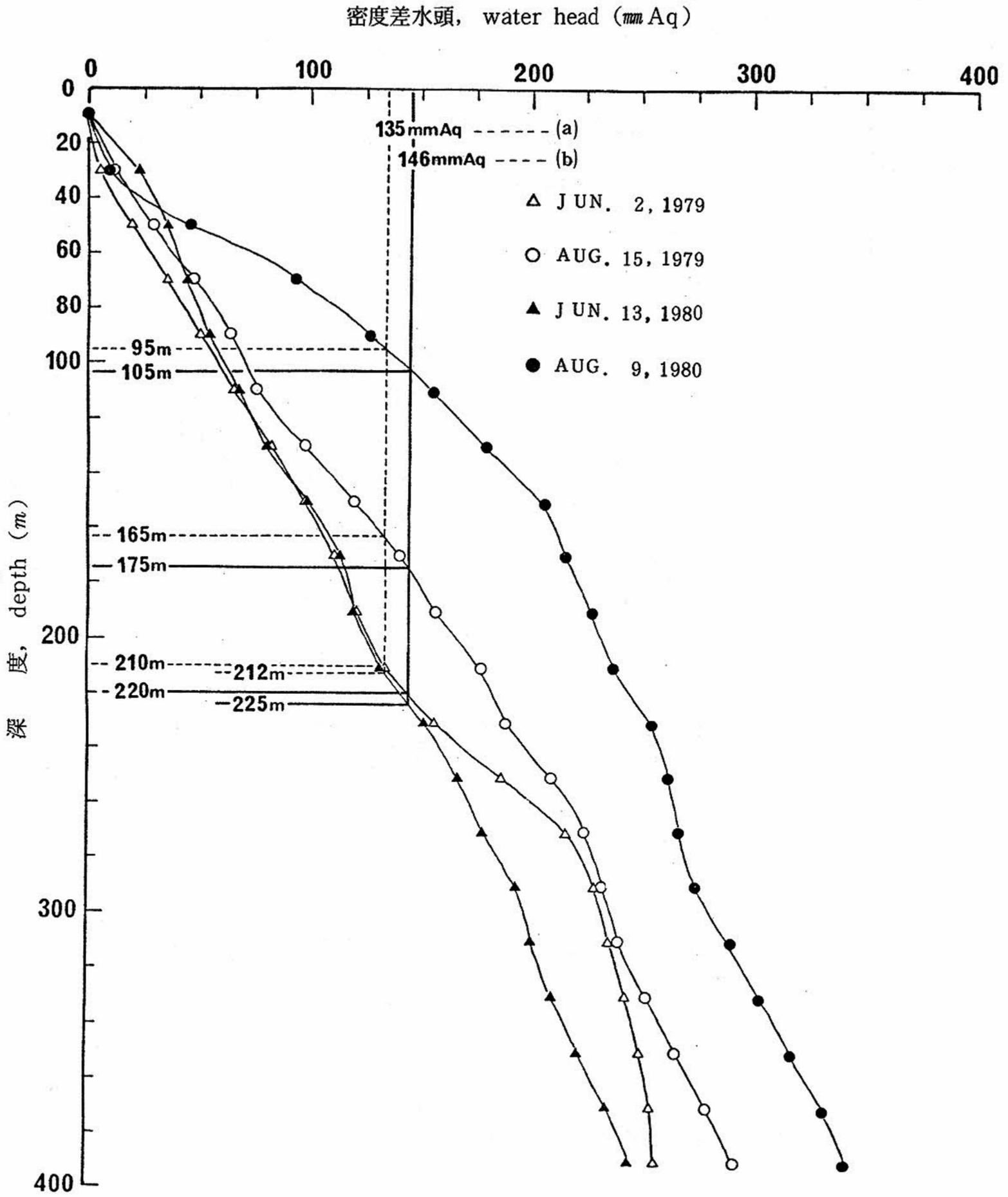


図 24 海水密度の鉛直分布
Vertical profile of seawater density



- (a) ダブルベンチュリー (フランジ付), double Venturi with ring
 (b) ニューシングルベンチュリー (フランジ付), new single Venturi with ring

図 25 鉛直密度差水頭
 Calculated water head as function of
 Vertical profile of seawater density

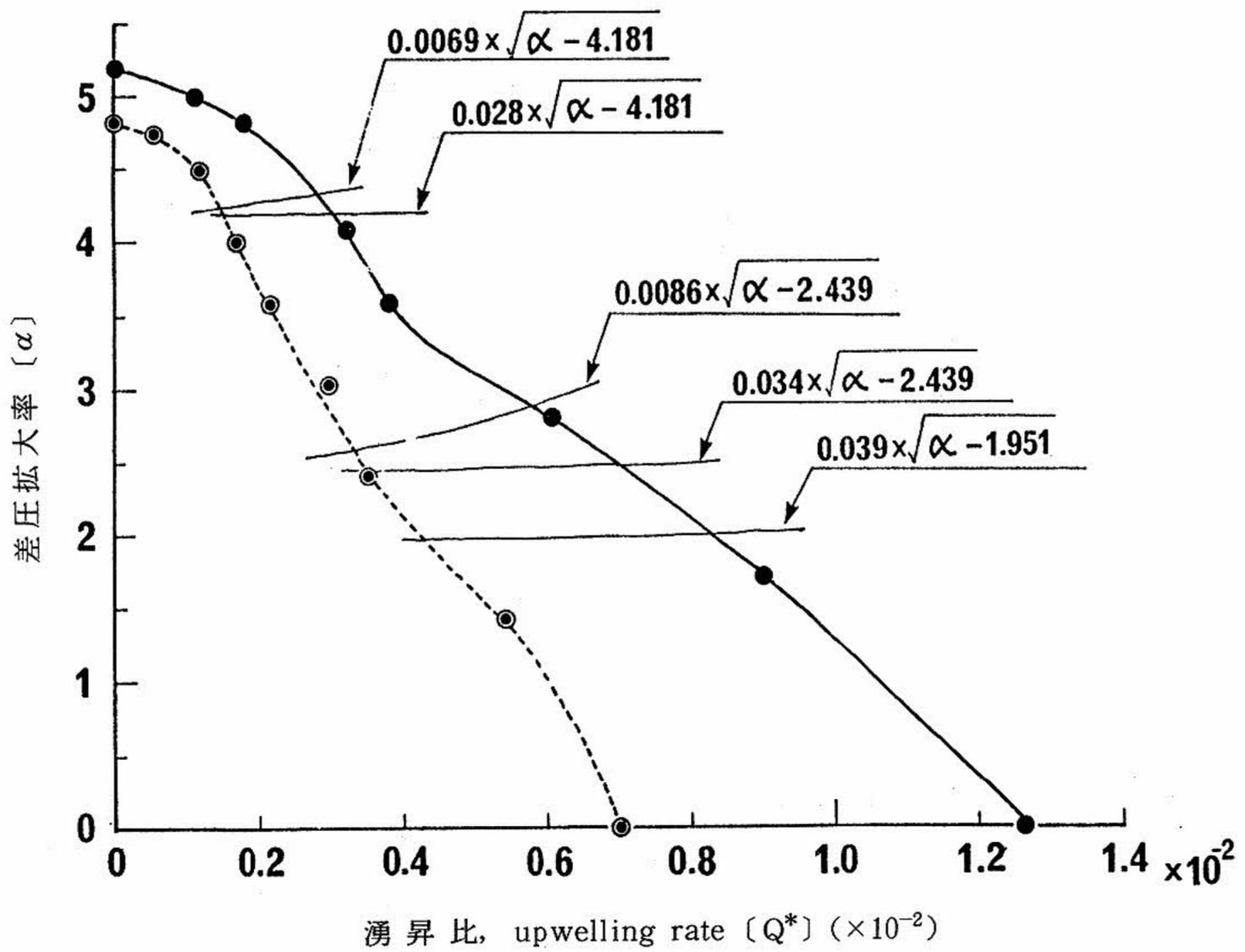


図26 湧昇管内の摩擦損失を考慮した湧昇量
 Calculated upwelling volume of deep seawater influencing the friction loss in an upwelling pipe line of large-scale new single Venturi and double Venturi for projected practical use.

表3 実海域の設定条件下における大規模ニューシングルベンチュリーとダブルベンチュリーの湧昇量の比較 (ベンチュリーの設置水深: 10 m)

Comparison of upwelling water volume expected in practical use between large-scale new single Venturi and double Venturi (the depth of Venturi tube: 10 m)

現場海域条件 conditions (流速, flow rate, $U_{\infty}=0.75\text{m/sec}$)		ベンチュリー式人工湧昇装置の形状 scale of Venturi tube (湧昇管径, diameter of upwelling pipe line, $d=2\text{m}\phi$)			湧昇量 upwelling water volume [Q_{u0}] (m^3/sec)		
汲上げ深度 upwelling depth $X\text{ (m)}$	密度差水頭 water head $\Delta H\text{ (mmAq)}$	ベンチュリー・ フランジ径 diameter of ring $D\text{ (m}\phi\text{)}$	ベンチュリー全長 length of Venturi tube $L\text{ (m)}$		湧昇管長 length of upwell- ing pipe line $[\ell]\text{ (m)}$	ニューシングル ベンチュリー new single Venturi	ダブル ベンチュリー double Venturi
			ニューシングル ベンチュリー new single Venturi	ダブル ベンチュリー double Venturi			
80	56	10	38.7	40.4	70	0.49	0.25
100	70	10	38.7	40.4	90	0.41	0.20
150	120	10	38.7	40.4	140	0.18	0.09
100	70	20	77.3	80.8	90	1.37	0.78
150	120	20	77.3	80.8	140	0.66	0.33

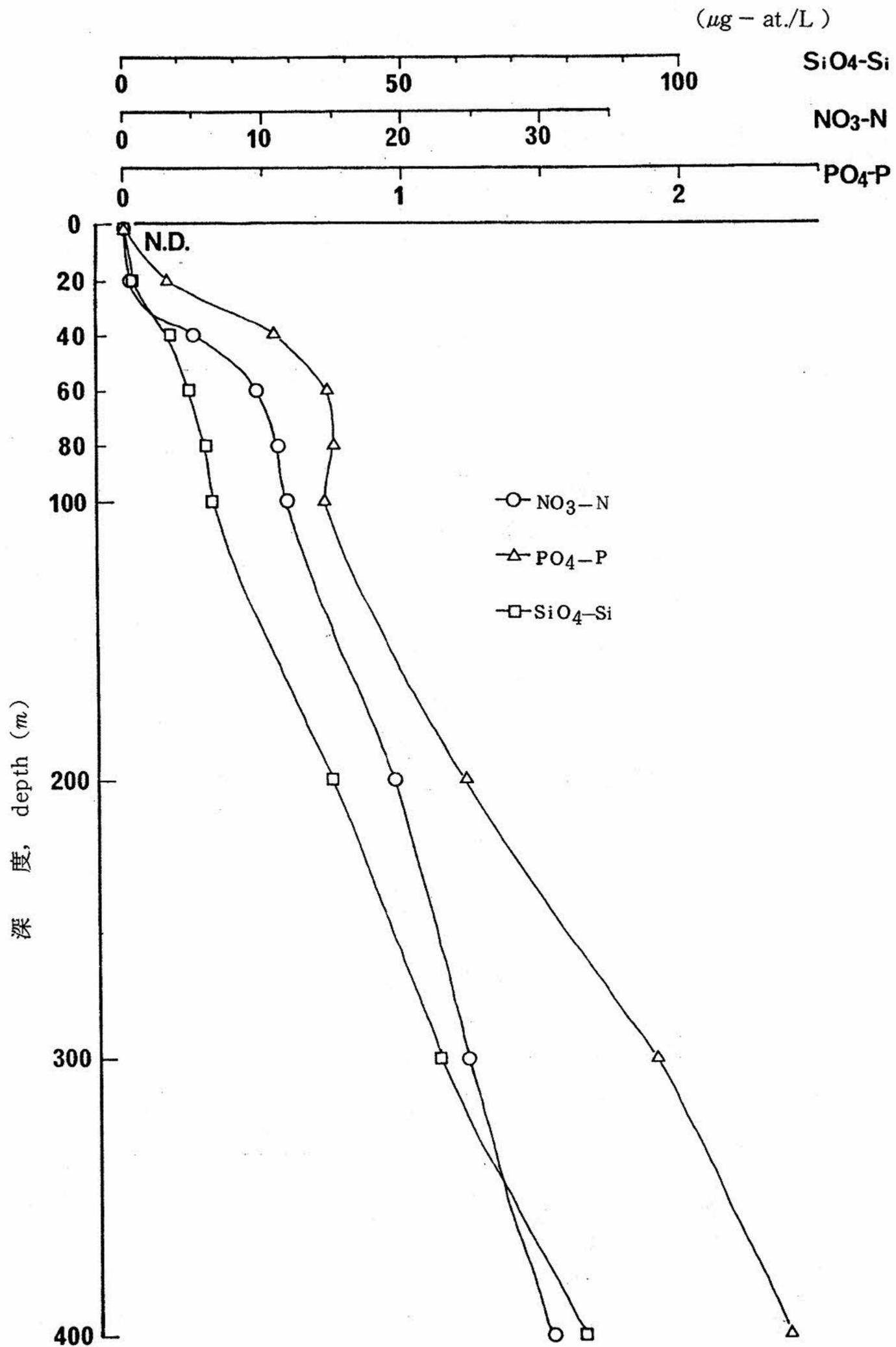


図27 大島東方海域 (st. A-5) における栄養塩の鉛直分布 (昭和54年8月15日)
 Vertical profile of the concentration of nutrients at St. A-5 (Aug.15.1979)

表4 実海域の設定条件下における大規模ニューシングルベンチュリーとダブルベンチュリーによる
 栄養塩($\text{NO}_3\text{-N}$)の供給量の比較(ベンチュリーの設置水深: 10 m)

Comparison of nutrient upwelled into euphotic layer (10 m) between new single Venturi
 and double Venturi

大規模ベンチュリーの寸法 size of Venturi tube	現場海域条件 (流速, $U_\infty = 0.75 \text{ m/sec}$) conditions			湧昇量 Q_{u0} (m^3/sec) upwelling water volume		栄養塩の供給量 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/sec) nutrient upwelled into layer euphotic	
	汲上げ深度 X (m) upwelling depth	密度差水頭 [ΔH] (mm Aq) water head	汲上げ深度の 栄養塩濃度 $\text{NO}_3\text{-N}$ ($\mu\text{g-at./l}$) concentration of nutrient at the upwelling depth	ニューシングル ベンチュリー new single Venturi	ダブル ベンチュリー double Venturi	ニューシングル ベンチュリー new single Venturi	ダブル ベンチュリー double Venturi
A*	80	56	11.65	0.49	0.25	80.0	40.8
	100	70	12.29	0.41	0.20	70.6	34.4
	150	120	15.68	0.18	0.09	39.5	19.8
B**	100	70	12.29	1.37	0.78	235.9	134.3
	150	120	15.68	0.66	0.33	145.0	72.5

* A { ニューシングルベンチュリー, new single Venturi, $D = 10 \text{ m}$, $L = 38.7 \text{ m}$
 { ダブルベンチュリー, double Venturi, $D = 10 \text{ m}$, $L = 40.4 \text{ m}$

**B { ニューシングルベンチュリー, new single Venturi, $D = 20 \text{ m}$, $L = 77.3 \text{ m}$
 { ダブルベンチュリー, double Venturi, $D = 20 \text{ m}$, $L = 88.8 \text{ m}$

D ; フランジ径, diameter of ring, L ; ベンチュリー全長, length of Venturi tube

失を考慮した湧昇量を求めることができる。

実海域で運用を想定する大規模ベンチュリーのフランジ径を10 mφまたは20 mφ、湧昇管の直径を2 mφ、汲上げ深度を80 m, 100 m, または150 m, ベンチュリーの設置深度を10 mとし、図26および(15)式によって、ニューシングルベンチュリー (No.6) とダブルベンチュリー (No.2) の湧昇量を計算し、結果を表3に示す。

表からわかるように、ニューシングルベンチュリーはダブルベンチュリーに比べ、約2倍の湧昇量を示し、実海域の想定条件下においても、湧昇能力が優れていることが推定される。

湧昇量は、ニューシングルベンチュリー (フランジ径10 m, 全長38.7 m) について、汲上げ深度80 m, 100 m, 150 mで、それぞれ0.49 m³/sec, 0.41 m³/sec, 0.18 m³/secとなる。さらにニューシングルベンチュリーの寸法を2倍 (フランジ径20 m, 全長77.3 m) にした場合、汲上げ深度100 mおよび150 mで、それぞれ1.37 m³/sec および0.66 m³/secとなる。すなわち、フランジ径が2倍になると、湧昇量は3.5倍増加する。

次に、これらの大規模ベンチュリーで湧昇する栄養塩類の量を推定する。伊豆大島東方海域 (st. A-5) における硝酸塩、磷酸塩、および珪酸塩の鉛直分布を図27に示す。

このうち、硝酸塩を計算に用いる。湧昇する栄養塩の量は、汲上げ深度の栄養塩濃度に湧昇量を乗じることによって求まる。その結果を表4に示す。

硝酸塩の湧昇による供給量は、ニューシングルベンチュリー (フランジ径10 m, 全長38.7 m) の場合、汲上げ深度80 m, 100 m, 150 mで、それぞれ80.0 mg/sec, 70.6 mg/sec, 39.5 mg/secとなった。

海域を肥沃化しようとする場合、有光層への栄養塩の供給量が問題となる。一般に成層した海洋における栄養塩類の鉛直分布は、表層では低く、

下層に行くほど高くなる。しかし、湧昇量は汲上げ深度が深くなるほど、減少するので、汲上げ深度が浅過ぎても、深過ぎても、湧昇流による栄養塩類の供給量は減少する。

栄養塩類を最大限に供給するための汲上げ深度は、ベンチュリー式人工湧昇装置の性能と本装置を設置する海域の諸条件により決まる。

文 献

- 1) Isaacs, J. D., et al., 1976, "Utilization of the Energy in Ocean Waves", Ocean Engng. 3, 175-187
- 2) Isaacs, J. D., R. J. Seymour, 1973, "The Ocean as a Power Resource", Int. J. Environ. studies 4, 201-205
- 3) Liang, N. K., et al., 1978, "Artificial Upwelling Induced by Ocean Currents — Theory and Experiment", Ocean Engng. 5, 83-94
- 4) Liang, N. K., et al., 1979, "An Artificial Upwelling Experiments — Laboratory and Field Investigation", Acta Oceanog. Taiwanica Sci. Rep. (Nat. Taiwan Univ.) 10, 67-80
- 5) 村田暹等訳, 機械工学における空気力学実験法 (1969), 朝倉書店
- 6) 中島敏光, 豊田孝義, 1979, "深層水利用による海域の肥沃化", JAMSTCTR (3), 117-125
- 7) Ryther, J. H., 1969, "Photosynthesis and Fish Production in the Sea", Science 166, 72-76
- 8) Wick, G. L., D. Castel, 1978, "The Isaacs Wave Energy Pump — Field Tests Off the Coast of KANEHOE Bay, Hawaii (Nov. 1976 - Mar. 1977)", Ocean Engng. 5, 235-242