

有限波列ぜん動流路内流れの数値解析*
(第2報, 実測値との比較検討)川橋正昭**, 田中 暁***, 鈴木 允**
Masaaki KAWAHASHI, Satoru TANAKA, Makoto SUZUKI**Key Words** : Fluid Transportation Systems, Numerical Analysis, Biological Engineering, Peristaltic Pumping, Roller Pump, MAC Method, Moving Boundary

1. ま え が き

生体内の尿道や腸でみられる流路壁のぜん動運動による物質の輸送現象は、食品関係や医療用機器など機械部との直接接触をきらう場合の流体輸送に応用されている。このようなぜん動流路内の流れについては、前述の流体輸送用機器としてのポンプ特性、および流路内での逆流やトラッピング現象などのフローパターンを明らかにすることが、主な研究対象となっている。ぜん動流路内流れの解析は今日まで数多くなされてきているが、その多くは比較的限られたレイノルズ数範囲における、無限波列流路についての波系(ぜん動波とともに移動する座標系)での解析である。最近では、直交曲線座標系での差分法⁽¹⁾や、斜方格子を導入した差分法⁽²⁾による、レイノルズ数やぜん動波形状に対する広い適用範囲をもつ解析手法が示され、ぜん動流路内の流動状態が詳細に調べられている。一方、著者等は、本研究の第1報⁽³⁾において、有限波列ぜん動流路内流れについて、種々のぜん動波形に対して広いレイノルズ数適用範囲をもつ実験室系(固定座標系)での解析方法を検討した。その解析方法の基礎は、MAC法に基づく数値解析法⁽⁴⁾であるが、固定座標系の解析ではぜん動壁を移動境界として扱わなければならないため、その扱い方を新たに検討し加えた。計算例としては、解析方法の基本的な妥当性を確認することを目的として、従来より多く扱われてきている正弦波状長波長の場合を取り上げ、3波列流路内の、おもに平均圧力こう配によるフローパターンの変化を示した。その結果、比較的少ないセル分割数で、レイノルズ数2000までは一応安定した解が得られ、流路中央部で

のフローパターン計算結果は、従来より得られている無限波列仮定の解析結果とよく一致している。一方、ぜん動流路内流れの特性についての実測値は少なく、従来の解析結果も限られた条件のもとでしか比較検討がなされていない。したがって本報告では、従来あまり調べられていない範囲でのぜん動流路内流れの特性について調べ、前報で示した解析方法による計算結果と比較検討する。なお、実験では正弦波状長波長3波列片壁ぜん動の、半円弧状近似二次元流路内流れのポンプ特性、およびフローパターンを調べ、解析では二次元流路を仮定して同様の特性を調べる。

記 号

a : ぜん動流路平均流路幅
 b : ぜん動波の振幅
 c : ぜん動波の進行速度
 p : 圧力
 P : 無次元圧力 $= p/\rho c^2$
 ρ : 無次元圧力 $= a^2 p/\mu c \lambda$
 \bar{q} : 平均流量
 \bar{Q} : 無次元平均流量
 $= \bar{q}/ach$ (h : ぜん動流路高さ)
 Re : レイノルズ数 $= ac/v$
 Re' : レイノルズ数 $= (ac/v)a$
 t : 時間
 T : 無次元時間 $= ct/a$
 u : 流路軸方向(周方向)流速成分
 U : 無次元流速成分 $= u/c$
 v : 流路幅方向(半径方向)流速成分
 V : 無次元流速成分 $= v/c$
 x : 流路軸方向(周方向)座標
 X : 無次元座標 $= x/a$
 y : 流路幅方向(半径方向)座標

* 昭和57年9月2日 第917回講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和57年3月8日。

** 正員, 埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保255)。

*** 准員, 海上保安庁 (〒100 東京都千代田区霞が関2-1-3)。

- Y: 無次元座標 = y/a
- α : 波数 = a/λ
- ϵ : 振幅比 = b/a
- λ : ぜん動波の波長
- μ : 作動流体粘性係数
- ν : 作動流体動粘性係数
- ρ : 作動流体密度
- τ : ぜん動波の無次元周期 = ct/λ

2. 実験装置および方法

ぜん動流路内流れの解析は、主にレイノルズ数が低く、比較的振幅比の小さい領域についてはじめられたが、次第に慣性の影響が無視できない領域に適用される解析手法が検討されるようになってきている。したがって本研究では、慣性項も粘性項もともに無視できない領域でのぜん動流路内流れを、ナビエストックスの式を基礎式として解析を行っており、その方法による計算例は他の解析結果とよく対応しているが、慣性の影響が現れはじめる領域でのぜん動流路内流れの特性を調べた実測値がほとんどないため、解析結果の実測値による検証はなされていない。したがって本報告では、慣性の影響を無視できないと考えられる、レイノルズ数 $Re = 0(10^2) \sim 0(10^3)$ [$Re_s = 0(1) \sim 0(10^2)$] の範囲についての実験を行い、その結果と解析結果との比較検討より、解析方法の妥当性を調べる。

本研究で用いられる実験装置の概略図が、図1に示されている。図に示されるように、ぜん動流路は上流側および下流側リザーバ間に半円弧上に形成され、外

周側が固定壁、内周側がぜん動壁の長方形断面をもつ近似二次元流路である。同様の形状の流路を用いた場合の、低レイノルズ数範囲の実験については、いくつかの報告がある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。ぜん動壁のぜん動運動は、周囲に正弦波状に配されたローラ群を有するロータの回転により誘起される。本実験では、3波列ぜん動流路とするため、ロータ外周は1波長当たり10本のローラで6波列形成されている。各ローラは、個別に半径方向に移動が可能であり、その移動により種々の振幅比や波数の設定、および種々のぜん動波形の形成が可能である。ぜん動壁は、内側が厚さ0.5mmのゴム膜で、ローラと接触する外側が、厚さ0.2mmのばね鋼の二

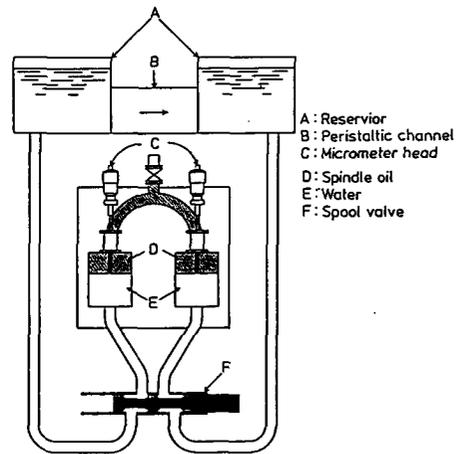


図2 マノメータ概略図

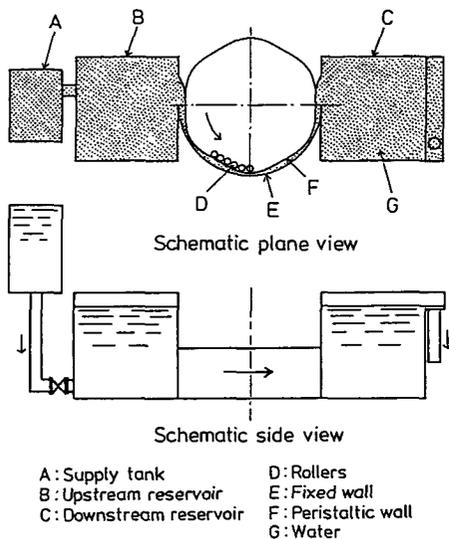


図1 実験装置概略図

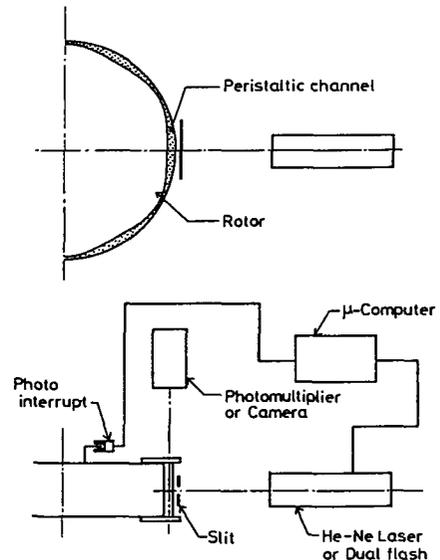


図3 光学系概略図

重壁である。また、固定壁および流路上下壁は、流れの可視化を考慮して透明塩化ビニル樹脂およびアクリル樹脂である。流路の形状は、曲率半径 400 mm、流路高さ 200 mm、流路長さ 1200 mm であり、上・下流側リザーバの断面は 600 mm×600 mm で、上流側リザーバ内にヘッド変動抑制のために、ダンパがそう入されている。

本実験では、作動流体を水として、以下のようにぜん動流路のポンプ特性の実測、およびフローパターンの観察がなされる。上・下流側リザーバ間のヘッド差は、図 2 にその概略が示されている自作の油封入式逆 U 字微差圧マノメータにより測定される。本実験での設定条件範囲では、上・下流側リザーバ間ヘッド差は最大でも約 30~40 Pa (約 3~4 mmAq) であり、さらに最大流量状態 (上・下流側リザーバ間ヘッド差 0) を特定するためには、非常に高い精度が要求される。製作されたマノメータの封入液は、水との比重差が少ない白スピンドル油であり、両リザーバ間ヘッド差による水とスピンドル油との接触面の移動を、両面とも探針に直結されたマイクロメータで読みとり圧力差に換算する。測定範囲が超微差圧になるため、マノメータの読取り精度および再現性は周囲の温度変動の影響を著しく受けるが、最適条件下での実験では、読取り精度約 0.02 Pa (約 0.002 mmAq) が得られ、すぐれた再現性も得られる。このマノメータを用いて、ぜん動流路内の時間平均流量が 0、すなわち上・下流側リザーバ間ヘッド差が最大 (Δp_{max}) の状態から、最大流量状態 (\bar{q}_{max}) すなわち両リザーバ間ヘッド差 0 にいたるまで測定がなされる。ぜん動流路内の時間平均流量の測定は、上・下流側リザーバ間に定常な設定ヘッド差が保たれている状態での、下流側リザーバオーバ

ローより流出する流量の測定による。下流側リザーバからの流出分は、オーバフロー付きサブタンクより流量調整弁を経て、上流側リザーバへ供給され、定常ヘッド差状態が保たれる。

つぎに、流路内フローパターンの可視化およびレーザ・ドップラー流速計 (L.D.V.) による流速測定について述べる。図 3 に、可視化の光学系、発光制御系および L.D.V. による流速測定系の概略図が示されている。流れの可視化はトレーサ法によるものとし、作動流体中に混入されたトレーサの動きを、流路側面より入射するスリット光の散乱光により写真撮影する。本実験の流路形状は、平均流路幅に比べて波長が約 20 倍であるため、1 波長分を全視野に収めて観察すると十分な解像度は得られない。そこで、波長の 1/20 の領域に分割して部分的に可視化し、長焦点レンズを用いた等倍撮影で得られる写真をつなぎ合わせて、全波長にわたってのフローパターンを調べる。また、可視化は固定座標系で行うため、長時間露光による流跡線の撮影では、ぜん動壁の移動により局所的な流動状態の観察はできない。そこで本実験では、局所速度ベクトル分布の可視化に相当する、ストロボ二重露光法によって撮影する。なおストロボの発光間隔は、ぜん動壁の移動が十分無視できる時間間隔とする。以上のような可視化写真の撮影では、観察領域を正確に 1/20 ずつずらしていく必要があること、ストロボの発光間隔をレイノルズ数や、上・下流側リザーバ間設定ヘッド差などによって調節する必要があることなどから、撮影のタイミングおよび発光時間間隔制御のために、マイクロコンピュータを使用する。なお、可視化に使用したトレーサは、ポスターカラー用として市販されている界面活性処理のされたアルミニウム粉である。L.D.V. による流路内周方向流速の測定は、レーザ光を流路側面より入射し、ビーム交差点を固定壁よりぜん動壁まで徐々に移動しながら、各位置での変動速度値に対応する信号処理器出力をペンレコーダ上に記録することにより行う。なお、この場合の散乱粒子はシッカロールをアルコールでいたものを用いる。

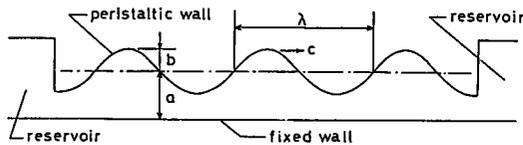


図 4 二次元近似流路形状

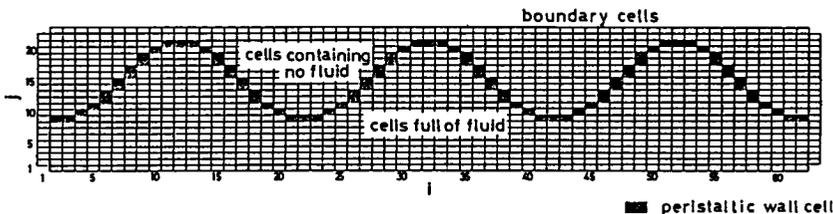


図 5 セル分割図

3. 解析方法

実験で用いられるぜん動流路は、半円弧状流路であるが、平均流路幅が曲率半径に比べて十分小さい(約1/20)ため、解析では図4に示すような二次元流路を仮定する。解析方法は、基本的にはMAC法に基づく数値解法⁽⁴⁾であるが、固定座標系での解析であるため、移動境界を含む非定常流となり、解の収れん性・安定性など種々の問題を含む。そのため移動境界の取扱いにおいて、境界位置の移動と移動速度に対して異なった時間きざみを用いる方法を導入し、ぜん動壁の y 方向変位速度変化の時間きざみを壁変位時間きざみに対して十分小さくすることにより、高いレイノルズ数範囲まで安定な解が得られている。そのアルゴリズムの詳細は前報に示されている。なお、解析領域は図5に示すようにセル分割され、ぜん動壁セルが x 方向に移動し、そのセルの上端に変位速度が与えられる。

4. 実測値と計算結果との比較検討

実験は波長をほぼ400mm一定として、比較的振幅比の大きい場合の、慣性の影響が無視できないレイノルズ数範囲で行う。はじめに、振幅比およびレイノルズ数 (R_e) によるぜん動流路内流動状態の変化を可視化して調べる。図6は、 $\epsilon=0.43$ および0.6についての最大流量状態および最大圧力上昇(流量0)状態での、レイノルズ数によるフローパターンの変化の例を示している。各可視化写真は、数値解析において流路長さ方向に1波長を20分割していることと対応させるため、波長の1/20の領域をずらしながらストロボ二重露光法で撮影した写真を、つなぎ合わせたものである。これらの結果は、流れが安定な場合には各部分がなめらかに接続されているが、乱れが生じている場合には接続されなくなることを示している。可視化されたぜん動流路内の流動状態より以下のことが明らかに

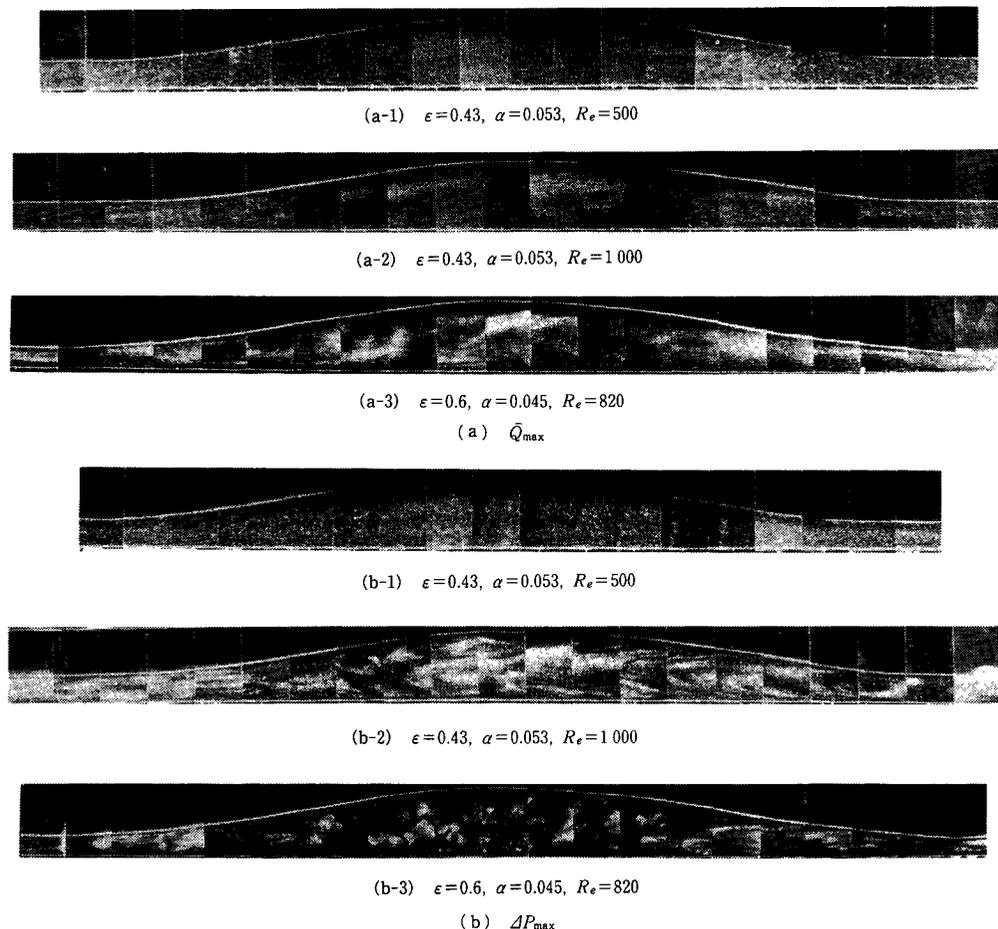


図6 ぜん動流路内流れの可視化

された。最大流量状態でのぜん動流路内流れは、 $\epsilon = 0.43$ ($\alpha = 0.053$) および $\epsilon = 0.6$ ($\alpha = 0.045$) の場合ともに、 $Re \approx 1000$ 付近まで安定である。最大圧力上昇状態では、 $\epsilon = 0.43$ の場合 $Re = 1000$ では比較的安定な流動状態を示しているが、 $Re = 2000$ になると流路の山部全域で乱れている。一方、 $\epsilon = 0.6$ では $Re = 820$ の場

合にすでに $\epsilon = 0.43$, $Re = 2000$ の場合と同様に山部全域にわたって流れは乱れている。これらの乱れのスケールは、ぜん動波の波長の $1/20$ より小さく、この領域での解析では、本研究での1波長当たり20分割による計算は不適當であることがわかる。なお、 $\epsilon = 0.43$ の場合の $Re = 1000$ は、 $Re' = 53$ に、 $\epsilon = 0.6$ の場合の $Re = 1000$ は、 $Re' = 45$ に相当する。

図7に、 $\epsilon = 0.429$ ($\alpha = 0.053$) および $\epsilon = 0.6$ ($\alpha = 0.037$) についての、最大流量状態および最大圧力上昇状態でのレイノルズ数による流路内ベクトル線図計算値の変化が示されている。本計算では流路を図5に示すようにセル分割するため、振幅比の増加とともに谷部での y 方向セル数は5である。図7の最大流量状態についての結果では、 $\epsilon = 0.429$, $Re = 300$ ($Re' = 15.9$) でのベクトル線図が、前報で示した $Re = 100$ ($Re' = 5.3$) での二次元ポアズイユ流れに近い流速分布の形状よりも、 $Re = 1000$ ($Re' = 53$) の場合に近づき、慣性の影響が現れていることを示している。 $\epsilon = 0.6$, $Re = 214$ ($Re' = 7.9$) でのベクトル線図では、ポアズイユ流れに近い流速分布を示しているが、 $\epsilon = 0.429$, $Re = 100$ の場合に比べて、流路中心部(ぜん動壁と固定壁の間中部)での流速が大きくなっている。また、 $\epsilon = 0.6$, $Re = 714$ ($Re' = 26.4$) では、 $\epsilon = 0.429$, $Re = 1000$ の場合に近い分布形状を示している。最大圧力上昇状態についての結果では、 $\epsilon = 0.429$ の $Re = 300$ および 1000 でのベクトル線図が、図6(b-1), (b-2)の可視化の結果から予測される流動状態とよく対応している。一方、図7(b-3)の $\epsilon = 0.6$, $Re = 714$ のベクトル線図は $\bar{Q}/\bar{Q}_{max} \approx 0.6$ の場合であり、ほぼ周期的な解が得られているが、最大圧力状態 $\bar{Q} = 0$ では解の取れん性が悪くなり、安定な周期解は得られていない。このことは、可視化による予測とよく一致している。これらのベクトル線図計算結果は、他の解析によって得られている流路内流速分布の結果と比較して、レイノルズ数が低い範囲ではよく一致しているが、慣性の影響が増してくるレイノルズ数範囲では、流路の山部および上流側のぜん動壁付近の速度分布の傾向がやや異なっている。その傾向は、振幅比が大きいほど著しい。そこで、 $\epsilon = 0.6$, $Re = 714$ の場合の、最大流量状態における流速の周方向 (x 方

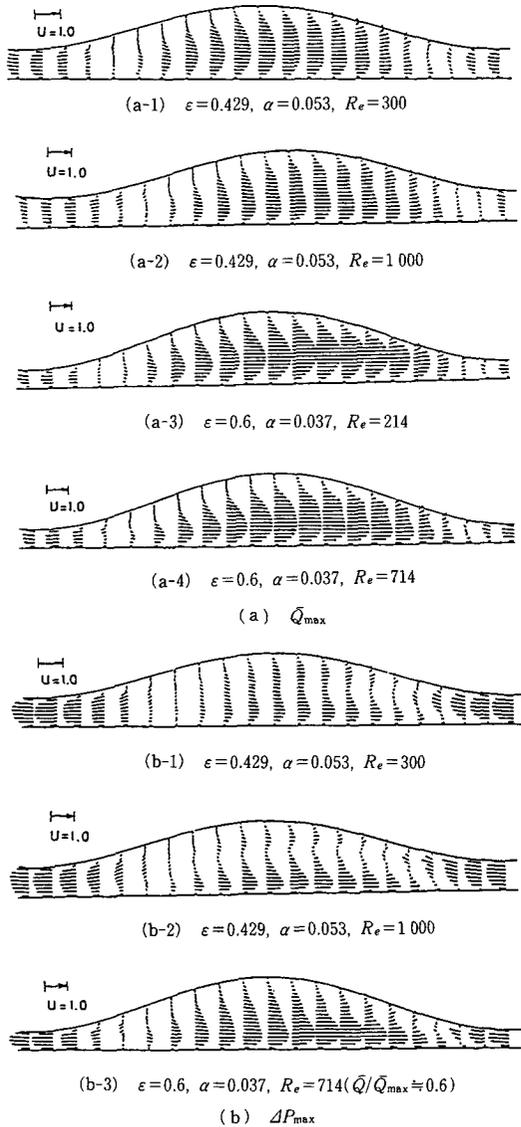


図7 速度ベクトル線図計算結果

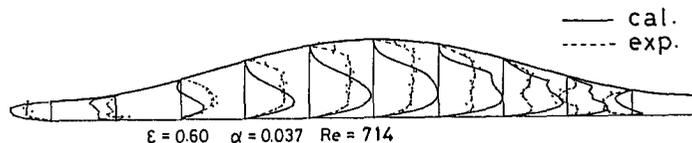


図8 周方向 (x 方向) 速度成分分布

向) 成分の分布を, L.D.V.により実測した結果と計算値とを比較して図8に示す。この結果実測値と計算値では, 流路の山部での速度と速度分布形状, および流路下流側谷部からの逆流の影響が現れる部分で差を生

じることが示され, このことから本解析方法では, 慣性の影響が支配的になるレイノルズ数領域で, 移動境界の取扱い方に問題が生じてくること, 振幅比が大きい場合に谷部の y 方向セル数が十分でないことなどが考えられる。

つぎに, ぜん動流路のポンプ特性について, 実測お

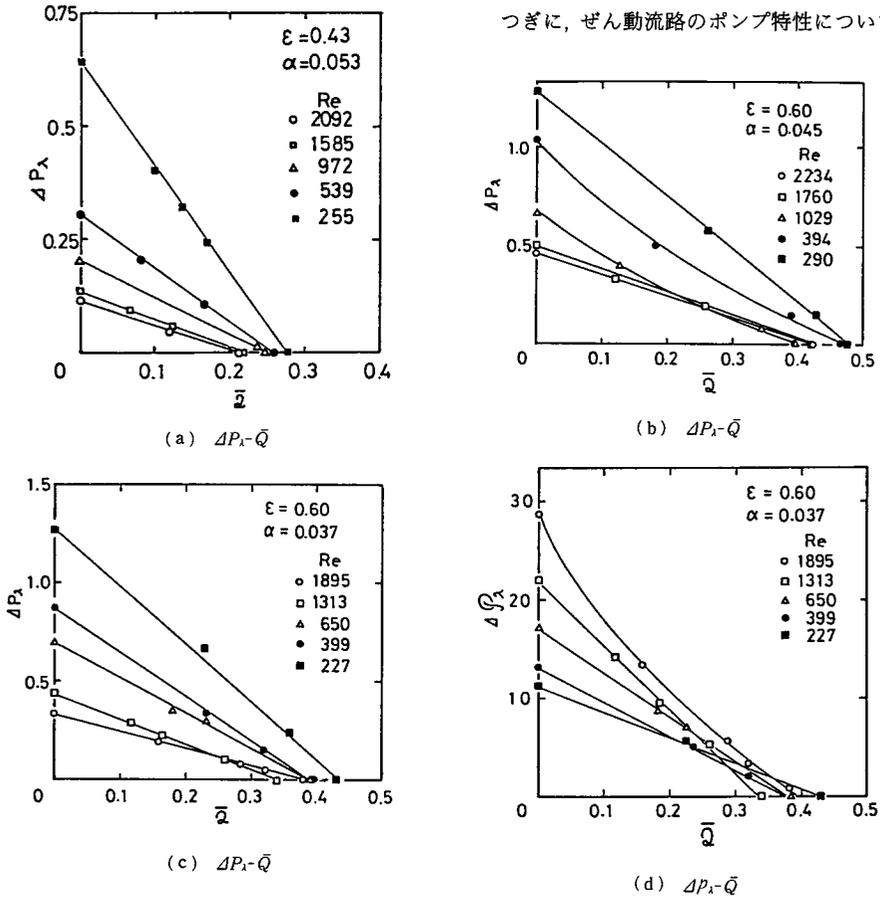


図9 ポンプ特性実測値

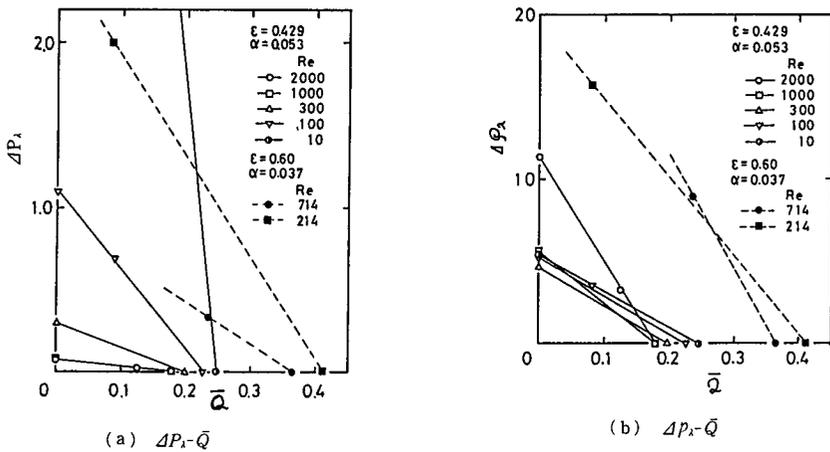
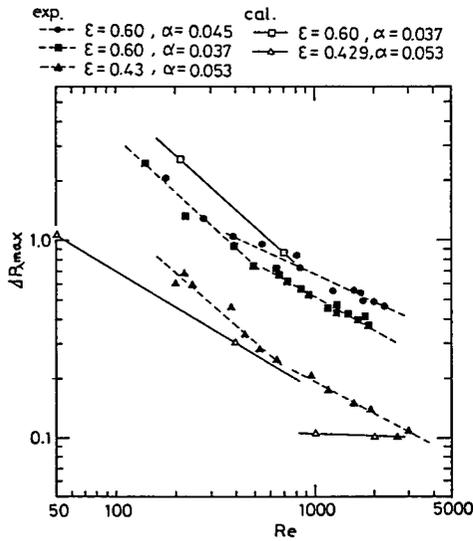


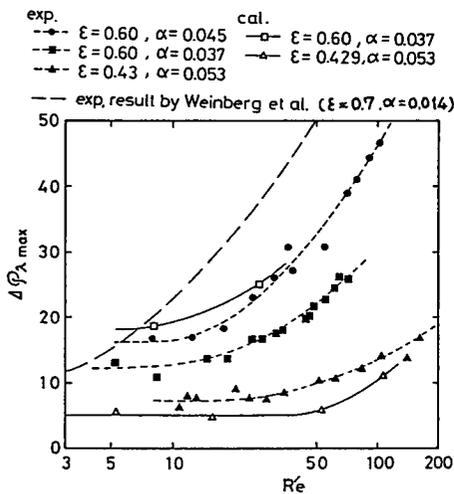
図10 ポンプ特性計算値

よび計算により調べ、流路内流れの粘性および慣性の影響を明らかにするとともに、計算結果の妥当性を検証する。図9に、レイノルズ数によるぜん動流路内圧力・流量特性の変化の実測値を、 $\epsilon=0.43$ ($\alpha=0.053$) および $\epsilon=0.6$ ($\alpha=0.045, 0.037$) の場合について示す。図9(a)~(c)の縦軸は、解析の場合と同様に、圧力を ρc^2 で無次元化して得られる1波長当たりの平均圧力上昇である。これらの結果は、レイノルズ数の増加とともに、 $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性のこう配が一定値に近づいていくことを示している。一方、図9(d)は、圧力を $a^2/\mu c \lambda$ で無次元した場合の $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性を示している。この場合、高レイノルズ数の範囲では $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性

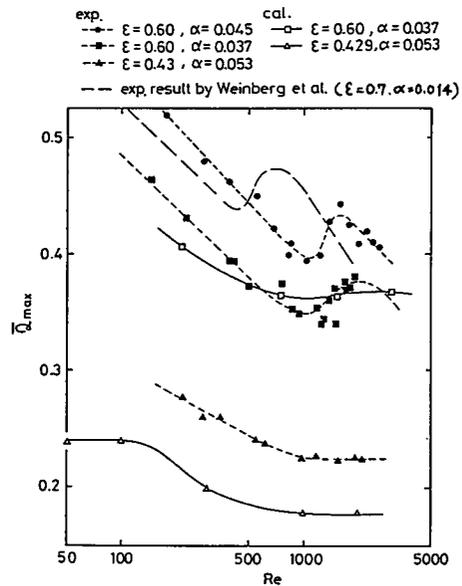
が非線形になるが、レイノルズ数の低下とともに線形になり、一定こう配の特性に近づく。この傾向は $\epsilon=0.43$ ($\alpha=0.053$)、 $\epsilon=0.6$ ($\alpha=0.045$) の場合も同じである。図9の結果から、 $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性でこう配が一定になるレイノルズ数よりも高いレイノルズ数範囲では、ぜん動流路内流れは慣性が支配的となり、ポテンシャル流れ近似の解析が可能であり、一方、 $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性でこう配が一定に近づくレイノルズ数よりも低いレイノルズ数範囲は、ストークス近似による解析が可能な領域であると考えられる。しかし、両者の中間のレイノルズ数範囲では、粘性および慣性のいずれの影響も無視できない領域であり、ナビエ・ストークスの式を基礎式とする解析が必要である。図10に $\epsilon=0.429$ ($\alpha=0.053$)、 $\epsilon=0.6$ ($\alpha=0.037$) でのレイノルズ数による $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性および $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性の変化の計算結果が示されている。図9の実測値と、図10の計算値とを比較検討すると、以下のことがわかる。 $\Delta P_x=0$ および $\Delta P_x=0$ での \bar{Q} の最大値は実測値と計算値がよく一致しているが、 $\bar{Q}=0$ での ΔP_x および ΔP_x の最大値は、 $\epsilon=0.43$ では実験値より計算値のほうが小さく、 $\epsilon=0.6$ の場合はその逆である。また、 $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性でレイノルズ数の増加とともにこう配が減少して一定値に近づく傾向と、 $\Delta P_x - \bar{Q}$ 特性でレイノルズ数の低下とともにこう配が減少して一定値に近づく傾向は、実測値と計算値で一致している。しかし、この傾向は振幅比が比較的小さい範囲でなされている解析結果⁽⁷⁾とは



(a) $R\epsilon - \Delta P_{\lambda \max}$



(b) $R\epsilon - \Delta P_{\lambda \max}$



(c) $R\epsilon - \bar{Q}_{\max}$

図11 最大圧力上昇および最大流量

逆の傾向である。つぎに、図9および10の結果からレイノルズ数に対する $\Delta P_{\lambda \max}$, $\Delta P_{\lambda \max}$ および \bar{Q}_{\max} の関係を表し、図11に示す。なお、図11(b), (c)には、文献(6)の実験結果を合わせて示す。図11(a)の結果は、 $\Delta P_{\lambda \max}$ がレイノルズ数の増加とともに減少する傾向を示しているが、いずれの場合も $Re=400\sim 1000$ の範囲でこう配が変化している。これは最大圧力上昇すなわち流路内の時間平均流量が0の場合の流動状態が不安定になりはじめるためと考えられる。なお、こう配が変化するレイノルズ数の値は、振幅比と波数の積 ($\equiv b/\lambda$) の値が大きいかほど低くなる傾向がみられる。このこう配の変化は、 $\varepsilon=0.429$ についての計算結果でもみられる。なお、 $\varepsilon=0.6$ ($\alpha=0.037$) では、高レイノルズ数での $\Delta P_{\lambda \max}$ は計算されていないが、図10(a)の $\Delta P_{\lambda}-\bar{Q}$ 特性を外そうして、得られた点をプロットしたものである。図11(b)に示す $\Delta P_{\lambda \max}$ は、レイノルズ数 Re の増加とともに、実測値および計算値ともに増加していくが、低レイノルズ数範囲では一定値に近づく傾向にある。また、振幅比の減少とともに、レイノルズ数による $\Delta P_{\lambda \max}$ の増加の割合は減少するが、同じ振幅比でも波数によって異なり、波数の大きいほうが増加割合は大きい。Weinbergら⁽⁶⁾によって示された実測値も、 Re とともに増加し、振幅比が大きいため増加割合も大きい。なお、計算値は振幅比が小さいほど実測値に近い。流路内に平均圧力こう配がない場合の最大流量 \bar{Q}_{\max} は、図11(c)に示されているようにレイノルズ数 Re の増加とともに減少するが、そのこう配も減少する傾向にある。 $\varepsilon=0.6$ では、 $Re\approx 1000$ 付近で \bar{Q}_{\max} がいったん増加して再び減少する特徴的な傾向を示しているが、この変化は最大流量状態でのぜん動流路内流れがこの付近で不安定になり、乱流状態に遷移することを表していると考えられる。なお、図中に Weinberg らの実測値を、レイノルズ数 Re を Re に変換して示してあるが、同様の現象と思われる傾向を示している。 $\varepsilon=0.43$ では、このような特徴的な変化はみられないが、 $Re=1000\sim 2000$ 付近でこう配が0になる範囲で遷移していると考えられる。このことは、 $\varepsilon=0.429$, $\varepsilon=0.6$ についてのベクトル線図計算結果で、 $Re=2000$ ではいずれも乱れが多くなり、解の取れん性が悪くなることから予測される。なお、 \bar{Q}_{\max} についての計算値では、 $\varepsilon=0.6$ の場合に実測値とよく一致している。以上のように、計算結果をぜん

動流路のポンプ特性として整理すると、実測値と比較的よく一致していることがわかる。

5. あとがき

正弦波状長波長の半円弧状3波列片壁ぜん動流路を用いて実測された、流路内のフローパターンおよびポンプ特性と、前報で示した数値解析方法によって計算された結果とを比較検討した結果、以下のような点が明らかになった。

(1) 粘性および慣性の影響がともに無視できないレイノルズ数範囲で計算されたぜん動流路内のベクトル線図は、最大流量状態および最大圧力上昇状態ともに、流れの可視化で得られたフローパターンの傾向と、よく一致している。

(2) ぜん動流路のポンプ特性、すなわち圧力-流量特性は、圧力の無次元化の方法により異なり、圧力上昇分を ΔP で表して得られる特性と、 ΔP で表して得られる特性の両者より、粘性あるいは慣性が支配的となるレイノルズ数範囲が明らかになる。

(3) $\Delta P_{\lambda \max}-Re$, $\bar{Q}_{\max}-Re$ の関係より、最大圧力上昇状態および最大流量状態において、ぜん動流路内流れが不安定になるレイノルズ数の限界が推測された。

(4) 慣性が支配的な領域で、振幅比が大きい場合の流路内速度分布計算値は、実測値と一致していないが、これはぜん動波のステップ状近似による波形のひずみや、セル分割数の不足などの影響が現れたものと考えられる。

なお、本報告での計算は、東京大学大型計算機センターおよび埼玉大学データステーションを利用して行った。おわりに、本研究での実験に協力された本学学生の高橋誠一郎君、広瀬順一君に謝意を表す。

文 献

- (1) Brown, T. D. and Hung, T-K., *J. Fluid Mech.*, 83-2 (1977), 249.
- (2) 鮎川・高島, 機論, 47-423, B (昭56), 2120.
- (3) 川橋・ほか3名, 機論, 48-427, B (昭57), 473.
- (4) Hirt, C.W. and Cook, J.L., *J. Comput. Phys.*, 10-2(1972), 324.
- (5) Shapiro, A. H., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, 37-4 (1969), 799.
- (6) Weinberg, E. C., ほか2名, *J. Fluid Mech.*, 49-3 (1971), 461.
- (7) 高島・鮎川, 機論, No. 810-8 (昭56-8), 19.

討 論

〔質問〕 鮎川 恭三・高 昌 伸

(愛媛大学工学部)

やっかいな実験にもかかわらず、多くの結果を得られていることに敬意を表す。以下の点につき、ご教示いただきたい。

(1) 例えば、 $\varepsilon=0.43$, $Re=2000$ のとき山部全域にわたって乱れていると述べておられるが、流路上下壁の影響で流れが三次元的になっている可能性はないか。

(2) 圧力の計算はセル分割数にかなり大きな影響を受けると考えられるが、この点についてのご見解をお示しいただきたい。

(3) 図9(d)において高レイノルズ数になれば ΔP_x-Q の関係が非線形になることを述べておられるが、考えられる原因をお教え願いたい。流動状態にも何か特徴的な変化があるのか。あるいは、この程度の高いレイノルズ数のとき、測定する水頭差は微小であろうと思われるが、精度上の問題で測定値が直線からずれてくるとは考えられないのか。

(4) 速度分布の実測値と計算値は、レイノルズ数の低い範囲ではよく一致するのか。

〔回答〕 (1) 本実験で用いたぜん動流路の高さと平均流路幅との比は約10~13であり、Weinbergらの報告⁽⁴⁾で述べられている二次元性が十分維持される値20よりも小さいため、三次元性の影響が現れている可能性はあるが、本実験ではその点について検討は行っていない。

(2) 本計算では、上・下リザーバ間の圧力差を直接境界条件とするため、圧力の値には問題はないが、振幅比の大きい場合に、流動状態の計算値と実測値とはあまりよい一致を示していないため、時間平均流量計算値にやや問題があると思われる。したがって、圧力-流量特性の計算値は、流路の形状によってはセル分割数の影響を受けると考えられる。

(3) 長波長ぜん動流路 ($\alpha \approx 0$) 内流れでは、慣性の影響が十分無視できるレイノルズ数範囲で、圧力上昇-流量特性が直線関係になることは理論的に明らかであり、実測値もそのことを実証している。しかし、

レイノルズ数が高くなると慣性の影響が現れはじめて、圧力上昇-流量特性は線形関係よりはずれてくる。慣性の影響が現れるのは、図11(b)に示すように、 $\Delta P_{x,max}$ がレイノルズ数、すなわち、ぜん動波進行速度の2~3乗に比例して上昇しはじめるレイノルズ数範囲であり、振幅と波長の比 (b/λ) が大きいほど慣性の影響は低いレイノルズ数で現れはじめる。

なお、本実験では、 $Re=1000 \sim 2000$ の範囲で最も測定精度が高いため、図9(d)での ΔP_x-Q 特性の非線形性が、精度上の問題で現れることはないと思われる。

(4) 振幅比が小さい場合には、実測値と計算値はよく一致する傾向にあるが、振幅比が大きい場合について、同一セル寸法で計算すると、低レイノルズ数範囲でも、計算値と実測値とのよい一致はみられない(付図1参照)。これは、谷部でのセル数が十分でないため、流動状態に大きく影響する逆流部での計算値が実際の流れと異なっているためと思われる。

〔質問〕 長谷川 英治 (慶応義塾大学理工学部)

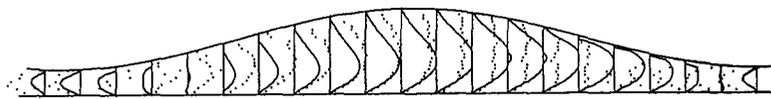
(1) 図9の ΔP_x-Q と $\Delta P_x-\bar{Q}$ の曲線は本来直線関係にあってもよいように思うが、ご指摘のとおり、図9(d)のように Re が大きい場合に曲線となる理由をお教え頂きたい。

(2) 図9の(b)では $Re=394, 1029$ を曲線で結び(c)では $Re=227, 399, 650$ を直線で結んであるが、特別の理由があるのなら、お教え頂きたい。

(3) 図9(d)および図10(b)の $\Delta P_x-\bar{Q}$ 曲線で、 ΔP_x が小さい場合に、曲線が Re に対して単調に変化しない結果となっているが、何か物理的理由がおりでしたらお教え頂きたい。

〔回答〕 (1) 鮎川氏らの質問(3)に対する回答を参照されたい。

(2) ご指摘の図9(b)の場合は、 $Re \approx 300$ 付近より慣性の影響が現れはじめるため、それ以上のレイノルズ数範囲では、圧力差-流量特性は線形関係よりはずれ、 $\Delta P_x-\bar{Q}$ 特性ではすべて非線形となる。しかし、圧力を ρc^2 で無次元化した場合には、レイノルズ数が高くなるほど曲線の曲率は大きくなり、ほとんど直線



$\varepsilon=0.6, \alpha=0.037, Re \approx 210$, — 計算値 実験値

付図 1

状になる。

(3) ご指摘の部分における圧力上昇-流量特性の傾向は、図 11(c)に示すように、比較的振幅比の大きい場合に得られる最大流量 ($\Delta P = 0$) のレイノルズ数に対する変化に、単調でなくなる部分が現れるために

生じる。これは、レイノルズ数の増加とともに、最大流量状態の流れが不安定になりはじめることによるものと思われる。一方、計算値では最大流量はレイノルズ数に対して単調であるが、上述の部分で計算は不安定になる傾向がある。
