

平成21年 5月27日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19700387

研究課題名(和文) 血液ポンプ羽根車のための先駆的な翼の開発

研究課題名(英文) A Pioneer Wing Study for Blood Pump Impeller

研究代表者

鈴木 康方 (SUZUKI YASUMASA)

日本大学・理工学部・講師

研究者番号：20424749

研究成果の概要：低レイノルズ数かつ拍動流の特殊な条件下で使用される補助循環用定常流血液ポンプの羽根車に適した翼形状の開発を目指し、定常流および拍動流の流入条件下での翼周り流れと翼性能について研究を行った。その結果、他に例を見ない、定常流のみならず拍動流も生成可能な回流水槽試験装置が開発された。翼周り非定常流れの数値解析により拍動流条件下では定常流条件下に比べ著しい流れのはく離が翼性能低下に大きく寄与する可能性と流れの局所的受動制御により解決できる見通しが得られた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	0	2,500,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	240,000	3,540,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：人間医工学，医用生体工学・生体材料学

キーワード：低レイノルズ数流れ，血液ポンプ，羽根車翼素，翼周り流れ，拍動流，回流水槽

1. 研究開始当初の背景

航空機エンジンやウインドタービンなどレイノルズ数が $10^5 \sim 10^6$ オーダーの流れとなる流体機械においてはNACA(米国)や産業総合技術研究所などが開発した、基本特性が提供されている翼型と翼理論を用いて設計を行うことが可能であるが、血液ポンプや小型飛行機に代表されるレイノルズ数が 10^4 以下となるような低レイノルズ数の流れにおいては従来の翼理論や翼型の基本特性がそのまま適用できないため、有効な設計指針が確立されていない。著者らはNEDO産業技術助成事業^{*1}において、実際に羽根車直径 3～4mm程

度の軸流式マイクロ血液ポンプの試作を行っているが、従来のポンプ設計法による試作の結果、ポンプの必要揚程が目標値の1/3程度にも満たないことを確認している。このようななかで現行の血液ポンプは定常流特性をもとに設計されているものの、血流は拍動流であるため、羽根車が流体力変動を受け、吐き出し流が必ずしも定常流とはなっていない。また、実際に心室の拡張・収縮とともに血液ポンプの性能が大きく変化することが報告されており^{*2}、設計で期待されたポンプ性能が実際には得られないことが懸念される。そこで、拍動流中での使用を前提とし

た血液ポンプに最適な羽根車の開発が必要であると考えられる。

*1 NEDO 平成 18 年度第 1 回産業技術研究助成事業，カテーテル式マイクロ能動循環補助デバイスの研究開発（研究代表者：東京医科歯科大学・星 英男）

*2 D. Timms, et al., *Artif. Organs*, 29(7), 573-580 (2005)

2. 研究の目的

拍動流下の特異な条件で使用される，補助循環用定常流血液ポンプの羽根車に適した先駆的な翼形状の開発を，従来の一様流中での評価ではなく，拍動流中での評価をもとに開発を行う。

(1) 拍動流・定常流の翼の流体力の平均特性を計測し，血液ポンプ設計を念頭においたレイノルズ数が $10^3 \sim 10^4$ 程度における翼の流体力定常特性を把握する。

(2) 変動値，位相遅れ等の変動情報を計測し，拍動流中の翼の流体力基本特性を解明する。

(3) 翼周り流れの数値流体解析を実施し，翼性能に寄与の大きい流れ構造を抽出し，局所的な境界条件の変更等により性能の改善を試みる。

3. 研究の方法

(1) 翼に作用する流体力基本特性の解明

血液ポンプ羽根車要素の基礎形状である翼弦長 20mm の二次元翼模型とこれに直結させた多分力計測器およびターンテーブルを用いて，レイノルズ数が $10^3 \sim 10^4$ 程度の定常流・拍動流での翼に作用する流体力変動が計測可能な回流水槽試験装置を製作し，翼に作用する流体力特性の解明を目指す。定常流，拍動流はそれぞれ船舶用スクリューおよび一般直流モータ，専用の容積型ポンプにより発生させ，一部モジュールを交換することで定常流，拍動流のいずれかの試験が可能となるようにする。

(2) 翼周り非定常流れの数値解析による翼性能改善のための検討

実験計測では翼周り流れの瞬時の空間情報を取得するのが困難であるため，数値流体解析ソフトとワークステーションを用いて翼周り非定常流れの可視化および流れ場の定量データの取得を行い，翼性能に影響をおよぼす流れの解明とその知見に基づく根本的な改善策の検討・改善効果の確認のための解析を実施する。前述の翼に作用する流体力の計測結果と検証しながら，特に定常流と拍動流の流入条件による翼周り流れの違いの根本を明確にする。

4. 研究成果

(1) 定常流・拍動流回流水槽試験装置

回流水槽試験装置の予想外の漏水対策への多大な時間の消費により残念ながら研究期間内に翼に作用する流体力基本特性の解明には至らなかったものの，他に例を見ない拍動流条件下での翼周り流れの詳細な現象解明のための試験装置の開発と強固な基盤が構築できた。図 1 および 2 に定常流試験時の本装置の概観を示す。

①定常流発生部

船舶模型用スクリューと船舶実験用回流水槽試験装置の例をもとに縮流比 4 : 1 で設計したノズルを装備し，翼弦長と主流速度に基づくレイノルズ数が $4 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4$ の範囲の定常流試験が可能である。

②拍動流発生部

拍動流発生装置は 2 個のチャンバとダイアフラム（株高石工業製），ピストン，逆止弁により構成され，外部空気駆動装置によりチャンバの拡張および伸縮を行い，拍出量は 5L/min となっている（図 3）。実際の拍動型ポンプと類似の構造であるが，流路断面積は実際の大人の大動脈血管の 10 倍以上も大きいため，全て専用設計である。拍動流試験時の測定部壁面静圧変動の波形より各位置（4 箇所）での位相差がほとんどなく，実際の血管内の血流を模擬できていることが確認できた（図 4）。

このような定常流・拍動流の要素試験が可能な試験装置は世界に例をみないため，ISRBP（米国・Houston）での発表時には本装置そのものと今後の試験内容に注目され，同一セッションの拍動流に関する議論に拍車をかけることとなった。今後は本装置を活用することで翼のみならず拍動流条件下の流れの試験が可能となる。まずは拍動流中の翼に作用する流体力基本特性の解明が実施されることにより血液ポンプの拍動流研究への新たなブレークスルーが期待できるものと考えられる。

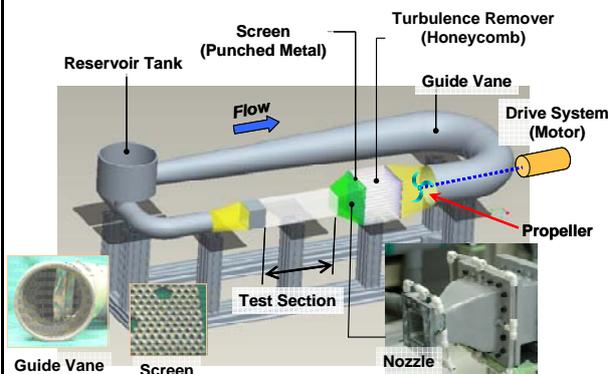


図 1 回流水槽試験装置概観（定常流試験用）

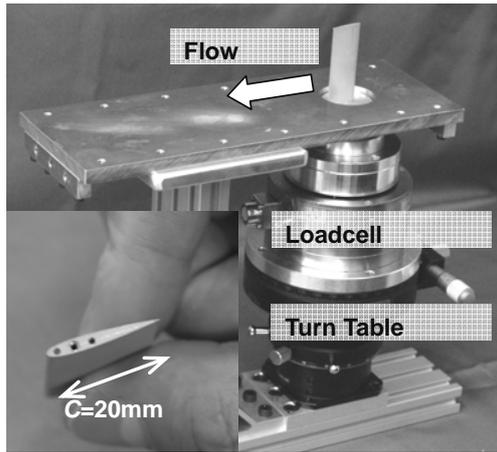


図2 測定部概観

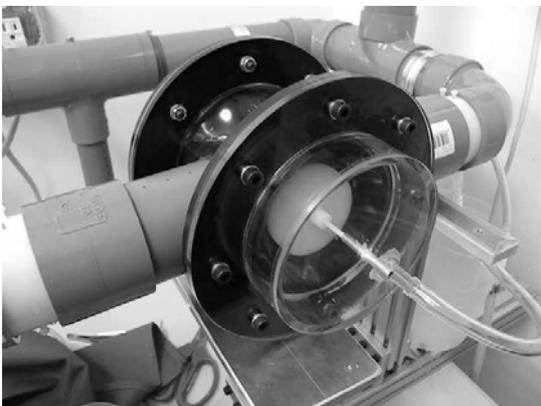
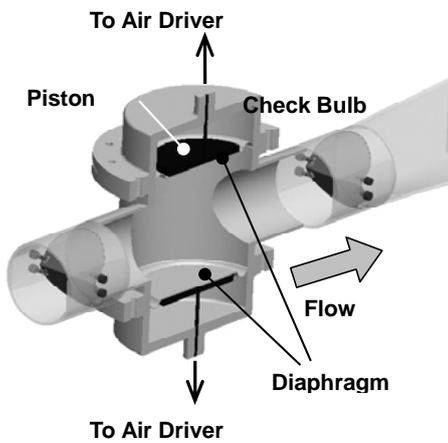


図3 拍動流発生装置概観

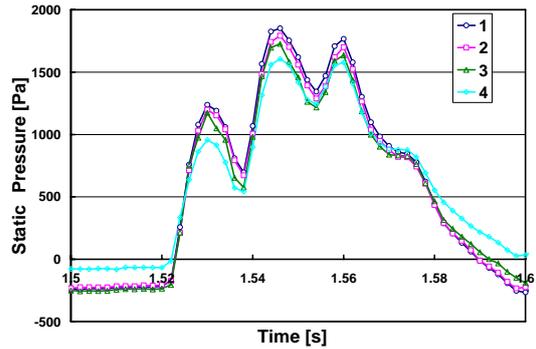
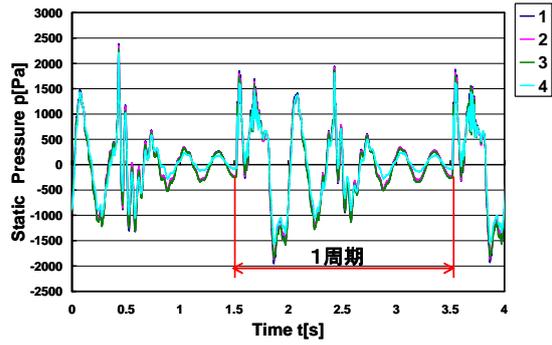


図4 測定部壁面静圧 (拍動流)

(2) 翼周り非定常流れの数値解析

① 定常流と拍動流の翼周り流れの比較

定常流流入条件下と拍動流流入条件下の翼周りの非定常流れ解析を行い、拍動流1周期分の間の翼周り流れの変化の違いの比較を行った。拍動流の条件は単純化をはかり、時間とともに正弦波で変化する流入条件を与えた。図5に瞬時の流れ場の比較を、図6に翼面平均静圧の比較をそれぞれ示す。定常流では $X/C=0.02$ 付近から後縁まで静圧回復がみられるため、負圧面の境界層は再付着していると予想される。しかし、拍動流では $X/C=0.4$ 付近から後縁まで静圧回復がほとんどみられないため、拍動流1周期の間平均的にこの位置から後縁まで境界層がはく離し翼性能が低下しているものと考えられる。

② 流れの受動制御による翼性能の改善

負圧面の前縁から $X/C=0.3$ 付近までの壁面にSlip条件を用いて壁面流速低下の抑制によるはく離の防止を試みたところ、負圧面の静圧回復特性が改善され、翼性能低下の防止の見通しが得られた(図7)。この結果は、拍動流中での翼性能の改善策の一つとして、航空機分野で実用化されている前縁Slatの応用が拍動流に対しても有効であることを示唆していると考えられる。

上述の回流水槽試験装置とあわせて数値解析結果は、日本機械学会関東支部総会講演会での発表で、日本国内ではまだ血液ポンプにおける拍動流現象の研究例が少ないなか、

参加者が近年拍動流研究の必要さを感じ始めていた状況とも重なり、会場では医学系研究者から拍動流現象の解明への期待と必要性が認識され、発表後も議論が活発に行われ、本研究の意義がより一層強まる結果となった。

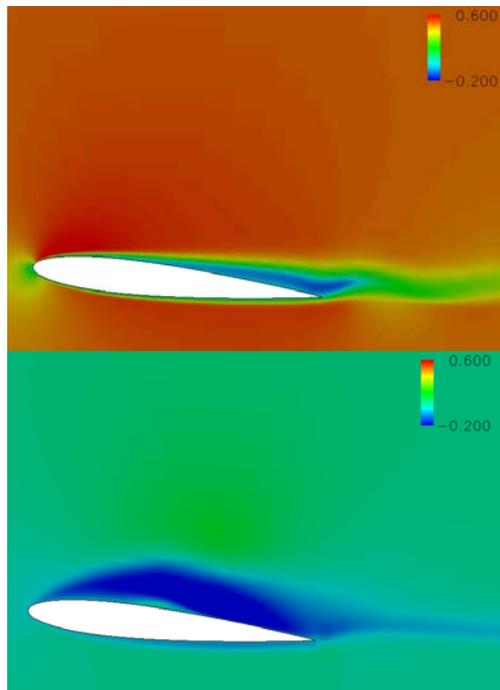


図5 流れ場の比較
(一様流方向成分速度, 上: 定常流, 下: 拍動流)

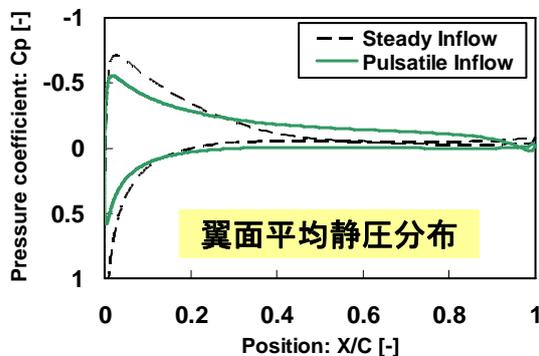


図6 定常流・拍動流の翼面平均静圧の比較

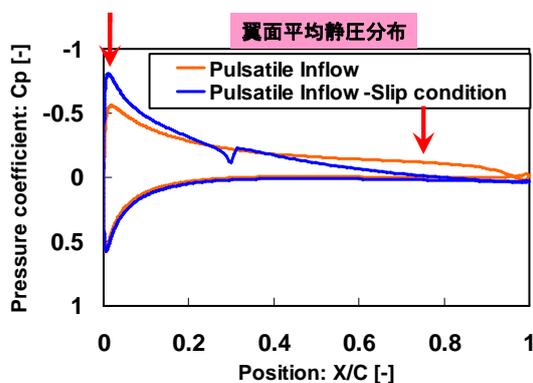


図7 翼面近傍流れの受動制御の効果

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2件)

① 鈴木康方, 血液ポンプ羽根車のための翼特性および翼周り流れの基礎的研究, 日本機械学会関東支部総会第 15 期総会講演会, 2009 年 3 月 7 日, 茨城県水戸市

② Yasumasa Suzuki, Impeller Design Based Hydraulic Characteristics for Low Reynolds Number and Pulsatile Wing Flow, 16th Congress of the International Society for Rotary Blood Pumps, 2008 年 10 月 4 日, Houston, Texas, USA

[その他]

高石工業株式会社事例一覧, 拍動装置用ダイヤフラム

<http://www.takaishi-ind.co.jp/making/results.php>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 康方 (SUZUKI YASUMASA)

日本大学・理工学部・講師

研究者番号: 20424749

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者