

超小型全軸制御式磁気浮上モータを用いた 次世代型小児用補助人工心臓の研究開発

茨城大学工学部 機械システム工学科

長 真啓

目次

1. 心臓移植と人工心臓
2. 人工心臓開発のコア技術
3. 小児用人工心臓の研究背景
4. 全軸制御型磁気浮上モータの提案と研究成果
5. 今後の展望とまとめ

心臓移植と人工心臓

■ 心臓移植

1997年からの心臓移植登録者総数は2,016名，うち512名が移植手術を受けている

移植待機患者数は891名，平均待機時間は約1,300日（3.5年）



ドナーが不足！
（臓器提供者）

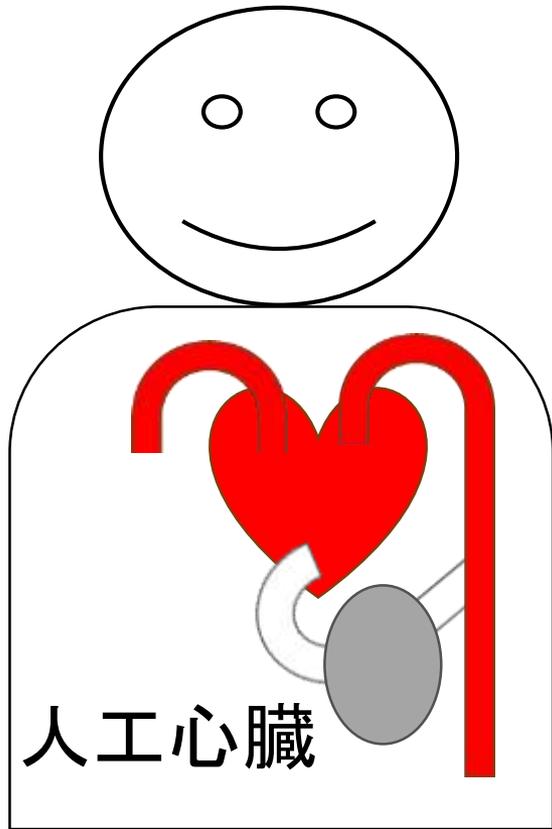


<http://www.jsht.jp/registry/japan/>

人工心臓

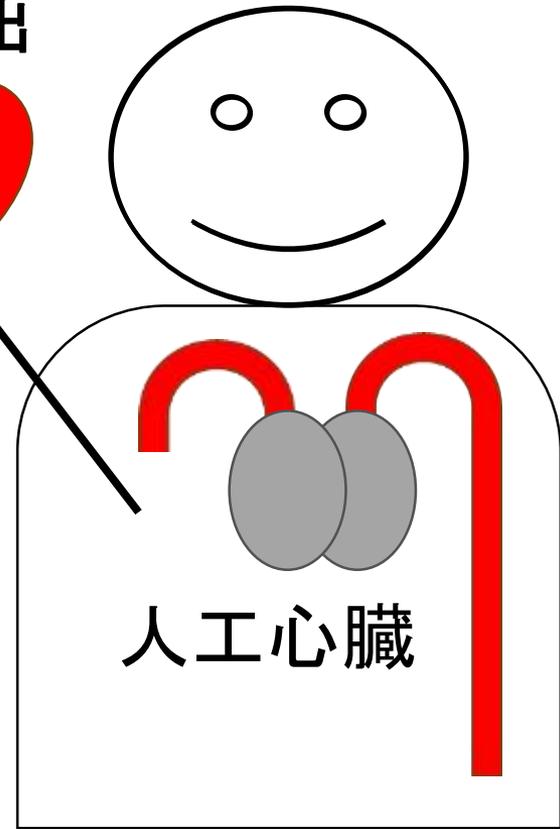
- 心臓移植までの繋ぎ（ブリッジ）
- 永久使用を目的とした自己心の代替

補助人工心臓と全人工心臓



補助人工心臓
Ventricular Assist Device
(VAD)

心臓摘出



全人工心臓
Total Artificial Heart
(TAH)

人工心臓の研究開発

➤ 鳥



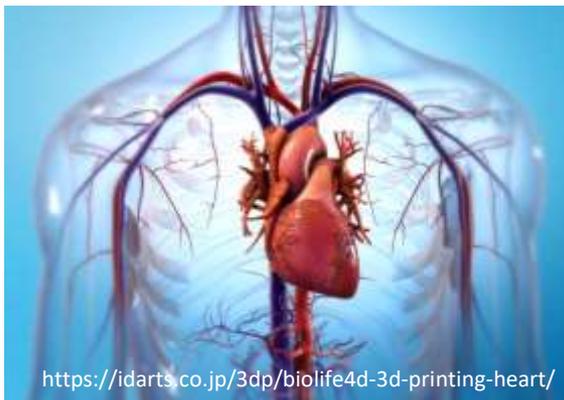
➤ 羽ばたき機



➤ ジェット機, ドローン



➤ 心臓



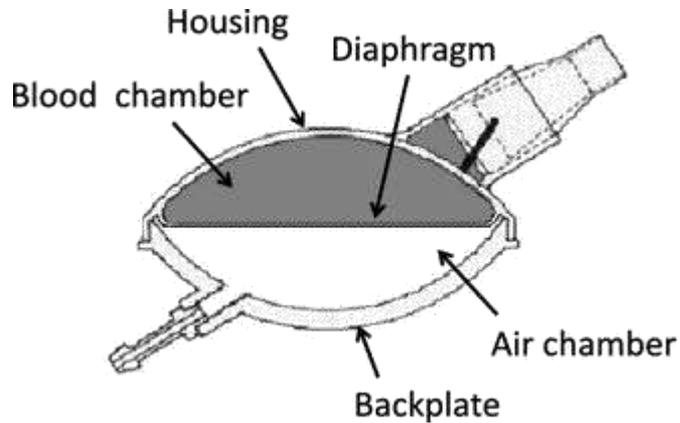
➤ 拍動流ポンプ



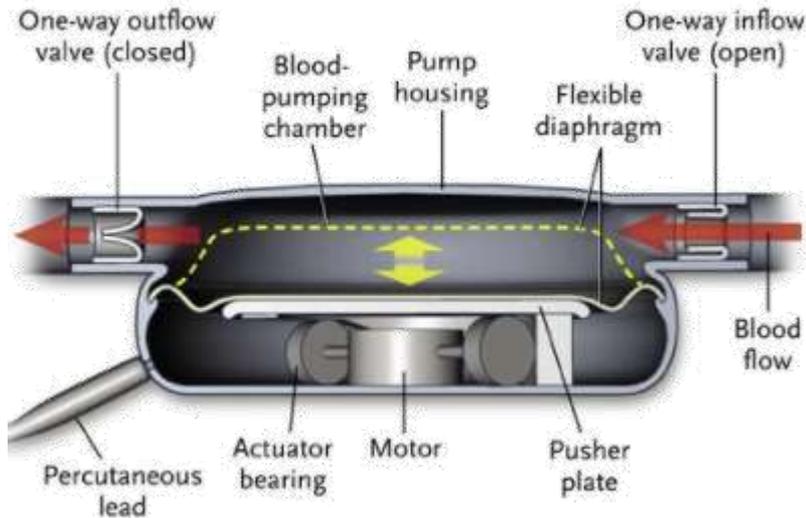
➤ 連続流ポンプ



拍動流ポンプと連続流ポンプ

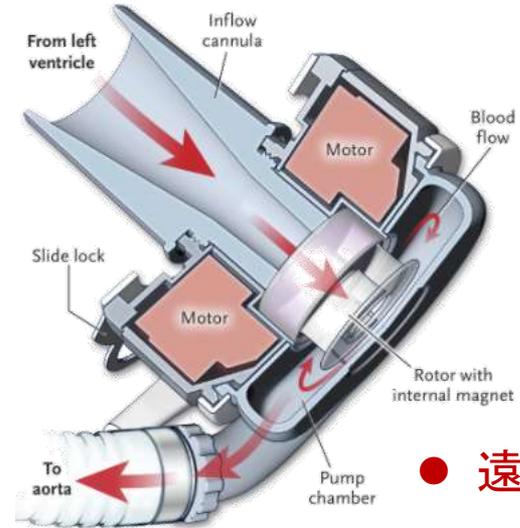


Survey of blood pump diaphragm damage in the NIPRO-ventricular assist device

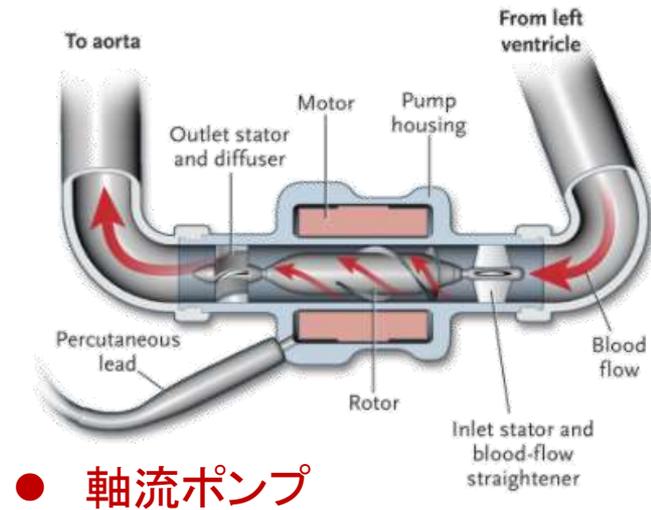


Advanced Heart Failure Treated with Continuous-Flow Left Ventricular Assist Device

拍動流方式



● 遠心ポンプ



● 軸流ポンプ

A Fully Magnetically Levitated Circulatory Pump for Advanced Heart Failure

連続流方式

拍動流ポンプと連続流ポンプ

HeartMate XVE



- 人工弁
- ダイヤフラム

HeartMate II



- 羽根車
(インペラ)

Physiologic and hematologic concerns of rotary blood pumps: What needs to be improved?

連続流ポンプの利点: 小型, 高耐久

世界で臨床応用されている体内埋込型 補助人工心臓

- Jarvik 2000



- HeartMate II



- HVAD



- EVAHEART

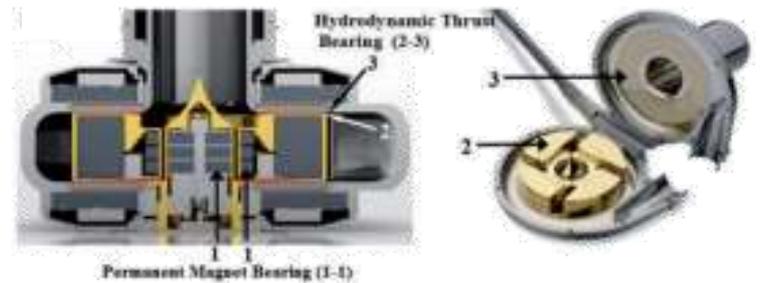
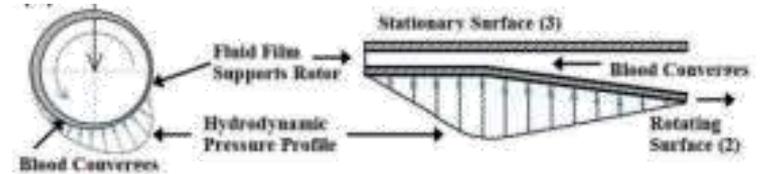


- DuraHeart

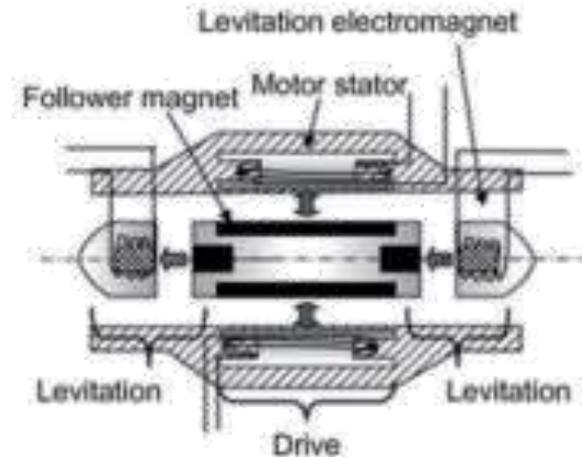


連続流式補助人工心臓の軸受機構

Rotary mechanical circulatory support systems



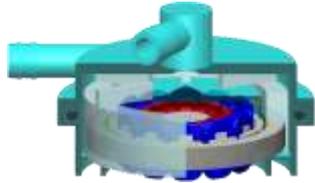
動圧軸受方式: Hydrodynamic Bearing



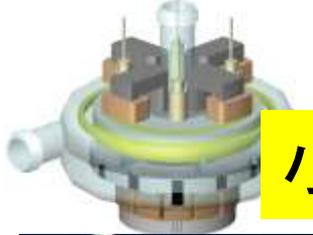
磁気軸受方式: Magnetic Bearing

茨城大学で開発中の磁気浮上人工心臓

ラジアル型
遠心ポンプ



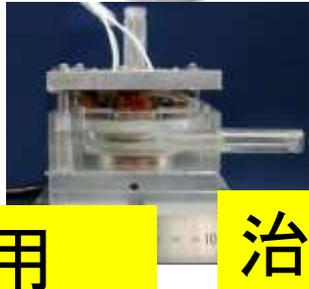
アキシヤル型
遠心ポンプ



小児用

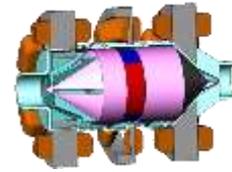


両心用

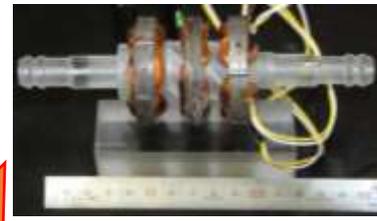


治療用

全軸制御型
斜流ポンプ



ダブルステータ
小型遠心ポンプ



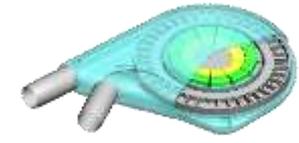
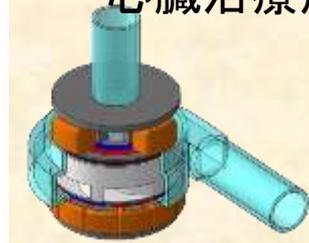
国立循環器病センター

米国
BIVACOR

両心用遠心ポンプ



心臓治療用遠心ポンプ



小児用人工心臓開発の背景

- 世界の小児人工心臓 (Ventricular Assist Device: VAD) 開発動向 -

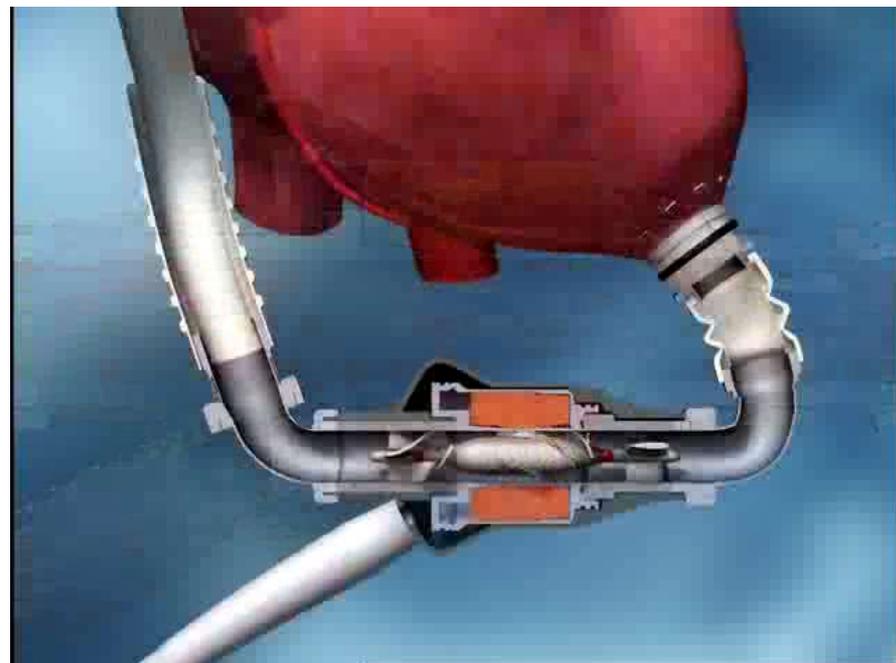
小児用補助人工心臓：心臓移植/成人用デバイス適用への橋渡し

- ・体外設置
- ・拍動流式



<https://www.berlinheart.com/>

■ EXCOR Pediatric : ~3.0 L/min



■ Jarvik 2015 : 0.5-3.0 L/min
※接触式軸受によるインペラ支持

体内植え込み型小児用人工心臓を実現するには**革新的なインペラの非接触支持機構**の開発が必要

小児用人工心臓開発の要求性能

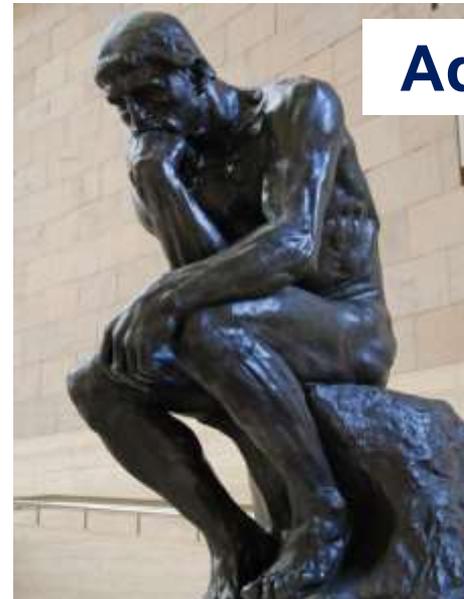
- なぜ小児人工心臓開発が遅れているのか？ -

■ 小児用VAD特有の要求性能

- 解剖学的制限からデバイスの**小型化**が必須
- **低流量補助**だが、成人患者と同等の**揚程 (80-120 mmHg)**が必要
- **成長に応じて循環流量が増加** (0-5歳児で0.5-2.0 L/min)
- ポンプ内で回転するインペラの**非接触支持**



Small children



Adults

磁気浮上型人工心臓の有効性

- 競合デバイスに対する優位性 -



<http://www.berlinheart.de>



<http://www.jarvikheart.com>



■ EXCOR Pediatric

■ Jarvik 2015

■ 本申請で開発する磁気浮上型小児用人工心臓

	EXCOR Pediatric	Jarvik 2015	Next generation pediatric VAD
機器サイズ	10, 15, 25, 30 mL 体外設置型拍動流	10 mL 体内埋込型連続流	18 mL 体内埋込型連続流
流量範囲	~3.0 L/min (ポンプ交換で実現)	0.5-3.0 L/min (10,000-30,000 rpm)	0.5-2.0 L/min (4,000-6,000 rpm)
機械的耐久性	可動部の低耐久性 (ダイヤフラム, 弁)	摺動部の低耐久性 (接触支持型軸受)	摺動部がなく高耐久 (完全磁気浮上型)
血液適合性	血液滞留による 血栓形成	摺動部での 溶血, 血栓形成	非接触支持による 低溶血, 抗血栓

研究開発目標

- 研究開発する医療機器の目標性能と研究指針 -

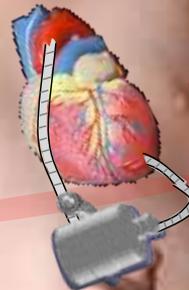
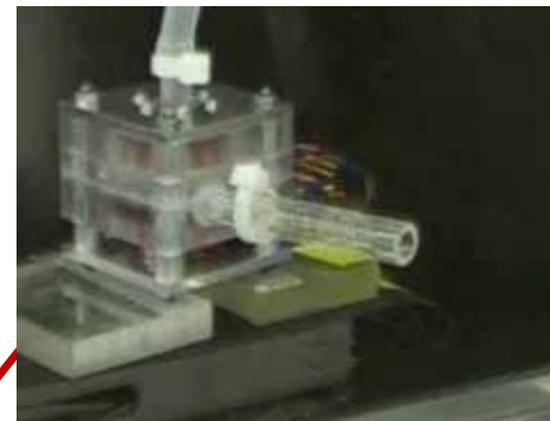
優れた耐久性と血液適合性を有する 磁気浮上型小児用人工心臓を実現する

対象小児

- 年齢: 新生児-5歳程度
- 体重: 3-15 kg

目標ポンプ性能

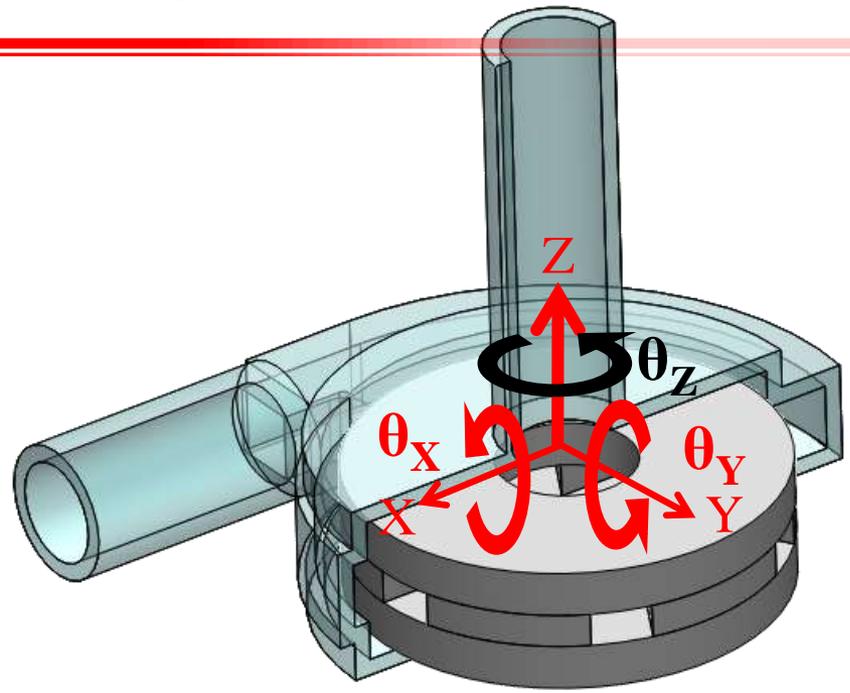
- 揚程(発生圧): 80-120 mmHg
- 補助流量: 0.5-2.0 L/min
- 駆動回転数: 4000-6000 rpm



研究の技術的課題

磁気浮上モータの小型化

磁気浮上を実現するには、少なくとも1自由度の能動制御が必要



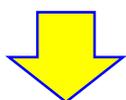
Number of actively controlled axes	1	2	3	4	5
Active control	z	x, y	z θ_x, θ_y	x, y θ_x, θ_y	x, y, z θ_x, θ_y
Passive stabilization	x, y θ_x, θ_y	z θ_x, θ_y	x, y	z	-



研究の技術的課題

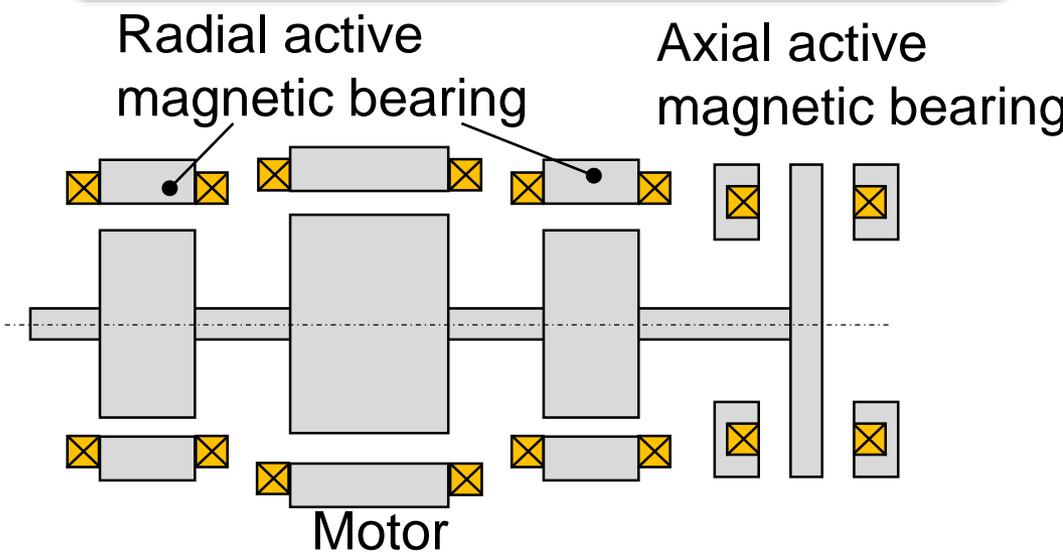
磁気浮上モータの小型化

安定した磁気浮上の実現



ロータの多自由度を能動的に磁気支持

従来の5軸制御磁気浮上モータ

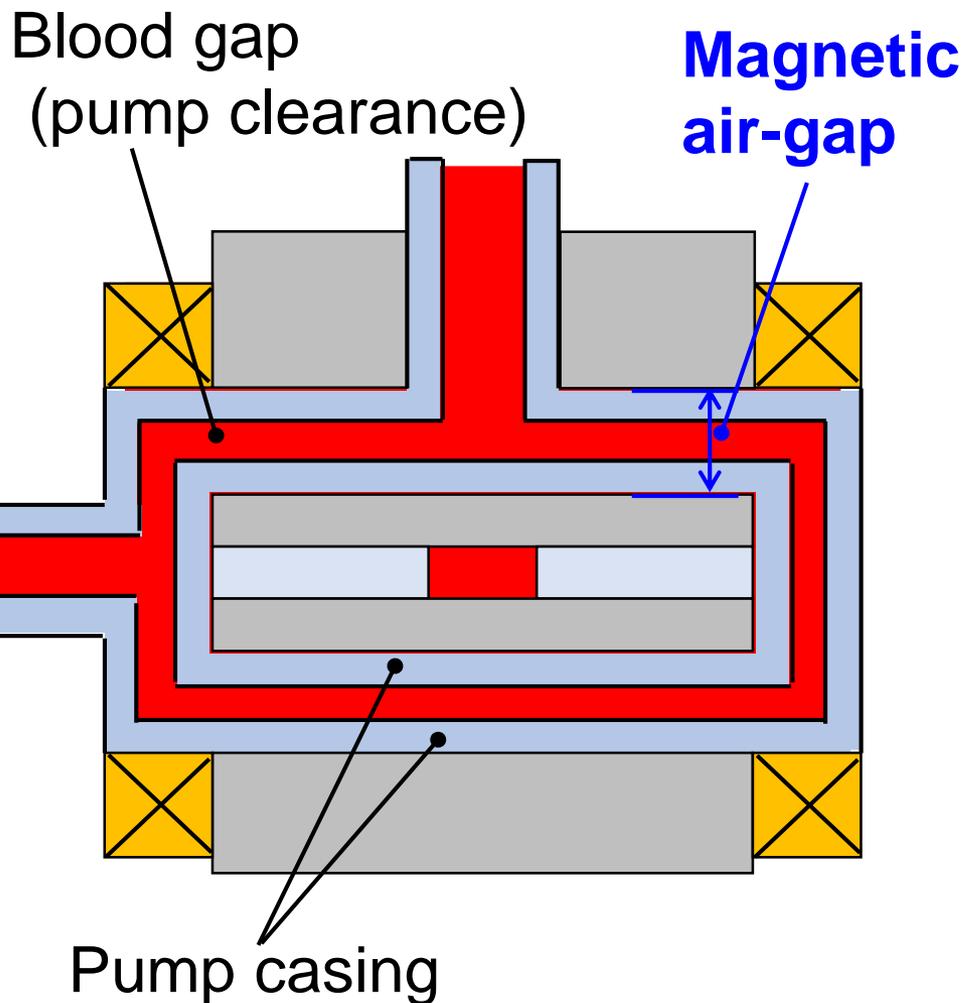


Number of actively controlled axes	1	2	3	4	5
Active control	z	x, y	z θ_x, θ_y	x, y θ_x, θ_y	x, y, z θ_x, θ_y
Passive stabilization	x, y θ_x, θ_y	z θ_x, θ_y	x, y	z	-

Device size : **Small** ←————→ **Large**
 Stability : **Low** —————→ **High**

研究の技術的課題

磁気浮上モータの高性能化



磁気吸引力

$$F = \frac{AB^2}{2\mu_0} = \frac{A\mu_0(Ni)^2}{2l_g^2}$$

μ_0 : 真空の透磁率

B : エアギャップ中の磁束密度

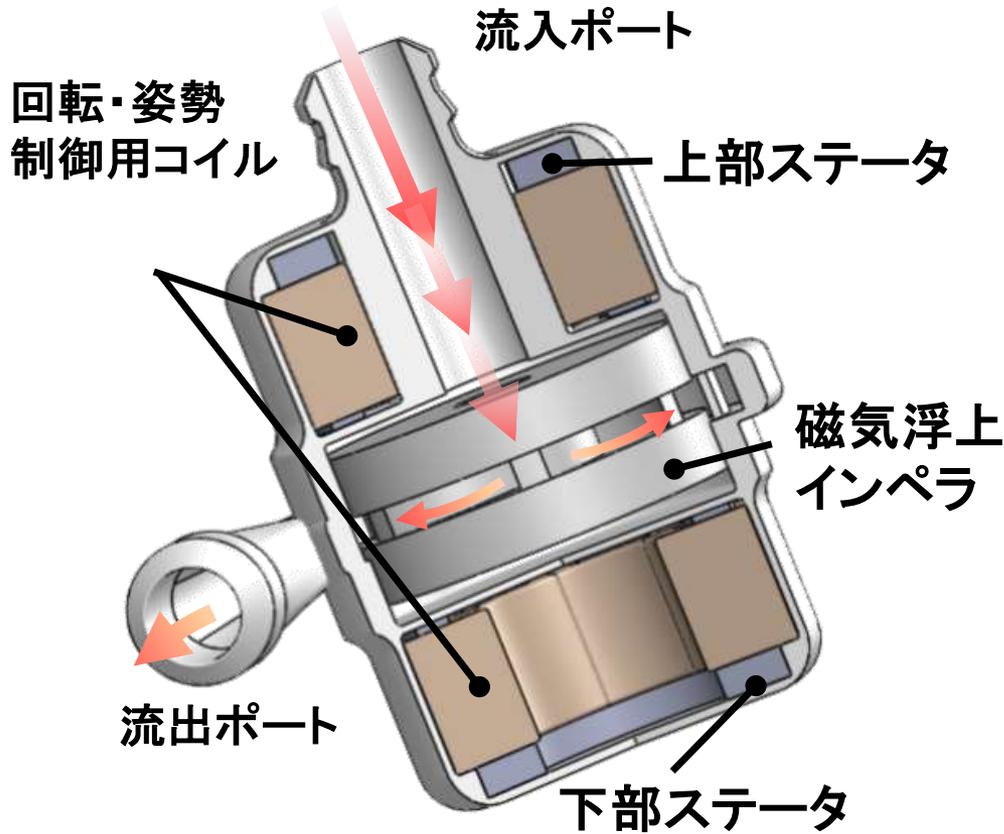
l_g : エアギャップ長

A : 磁路有効断面積

小型・ワイドギャップ化による磁気支持力・トルク低下

開発する磁気浮上式小児用人工心臓

- 革新的要素技術の概要 -



■ 開発磁気浮上型小児用人工心臓の概要 ■ 開発磁気浮上小児用人工心臓

➤ 二つのモータのみで浮上インペラの **姿勢5軸を能動制御可能な方式の考案(特許取得済)**によりモータの超小型化・高性能化

アキシヤル型磁気浮上モータ, 登録番号: 特許第5963134号, 2016

5軸制御磁気浮上モータの超小型化

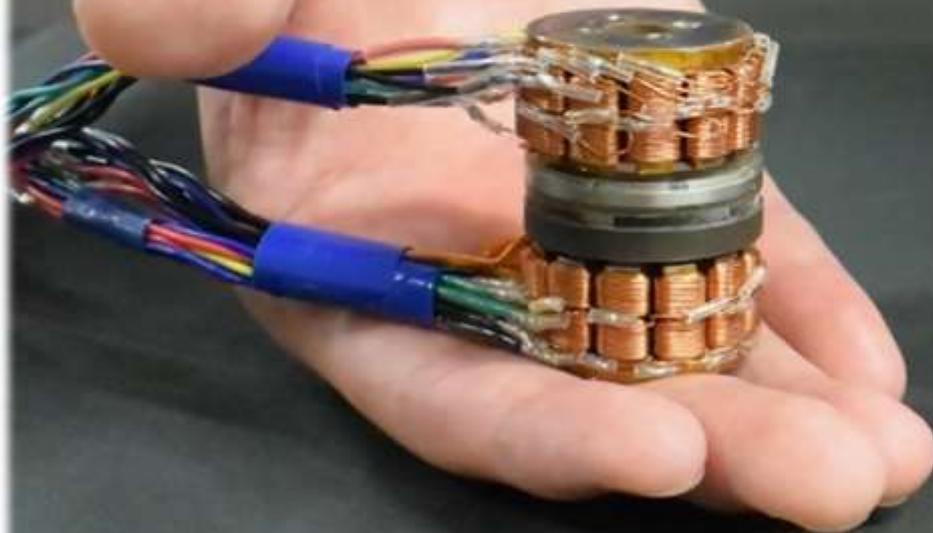
2012-2015

- ・磁気浮上制御原理の提案
- ・実機による原理検証
- ・基礎特性評価
- ・磁気浮上動特性評価

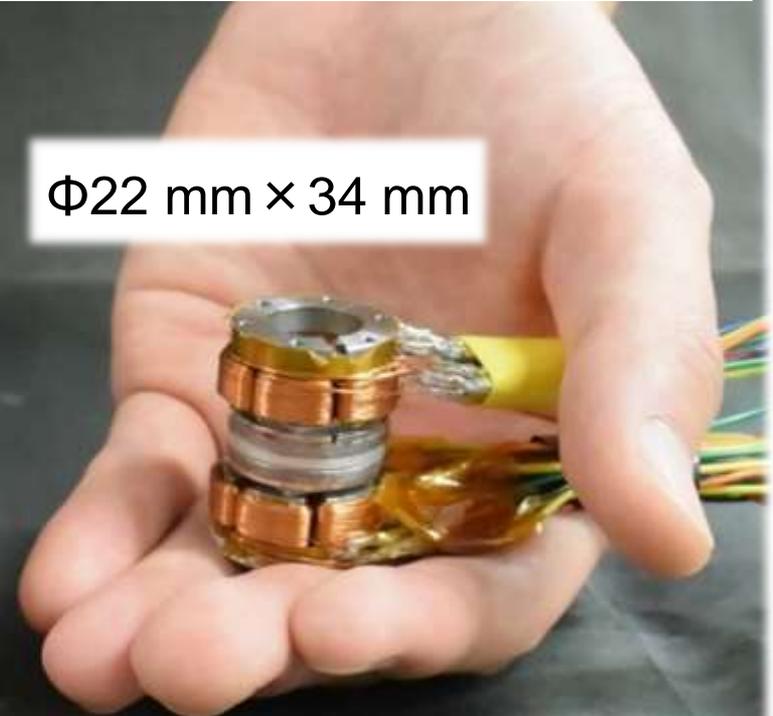
2016-現在(2020)

- ・モータ小型化
- ・高性能化
- ・医療機器応用の検討...

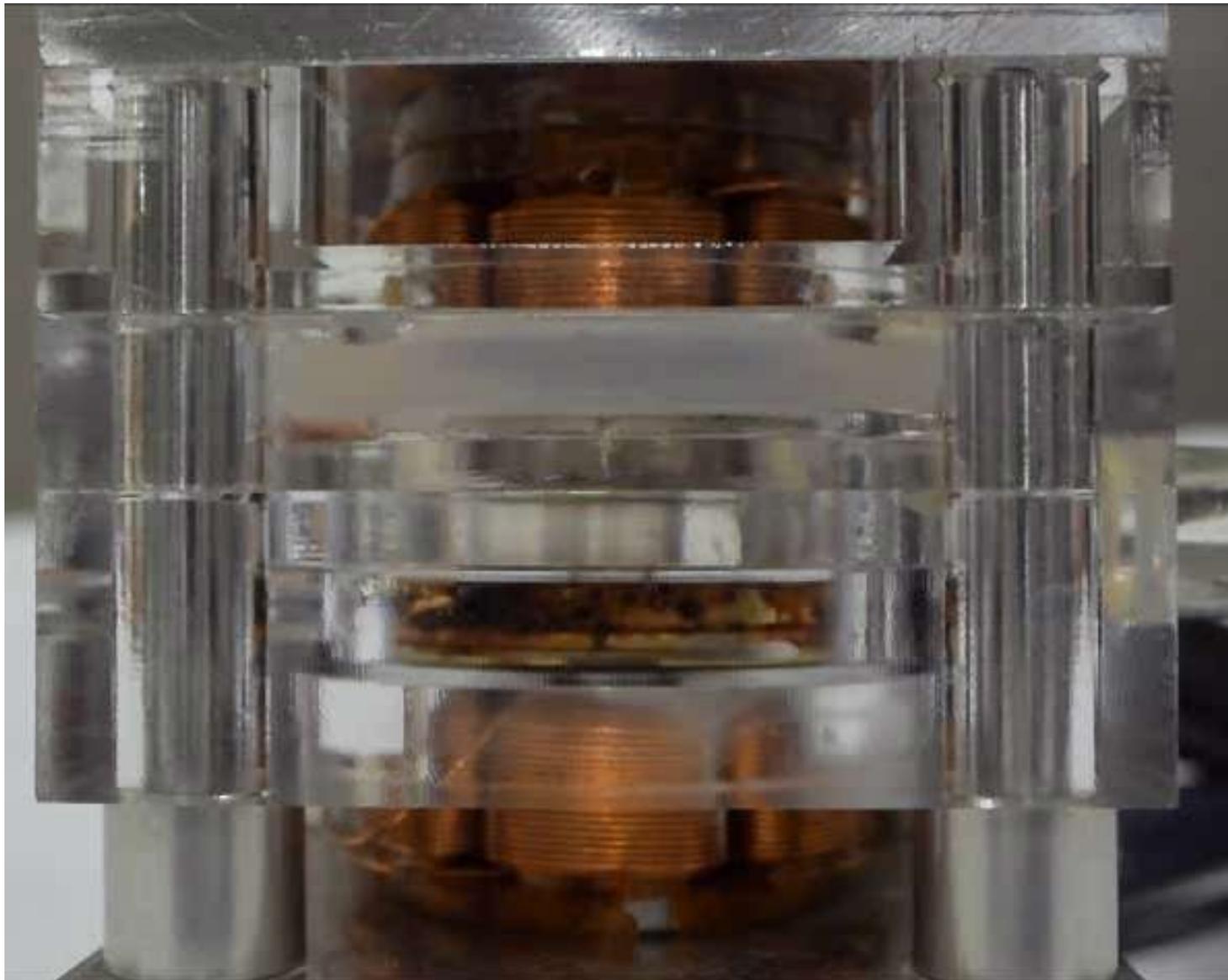
Φ28 mm × 42 mm



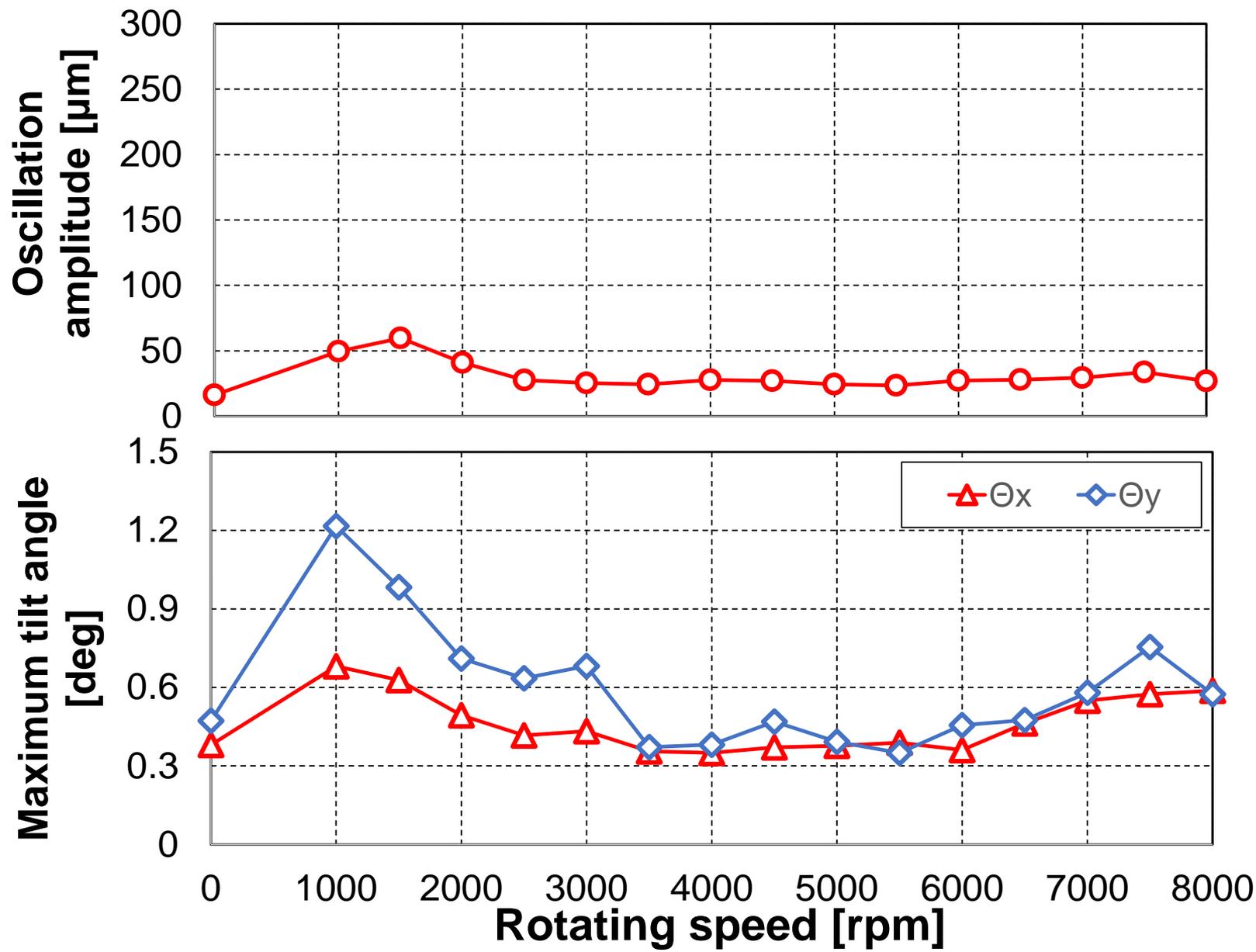
Φ22 mm × 34 mm



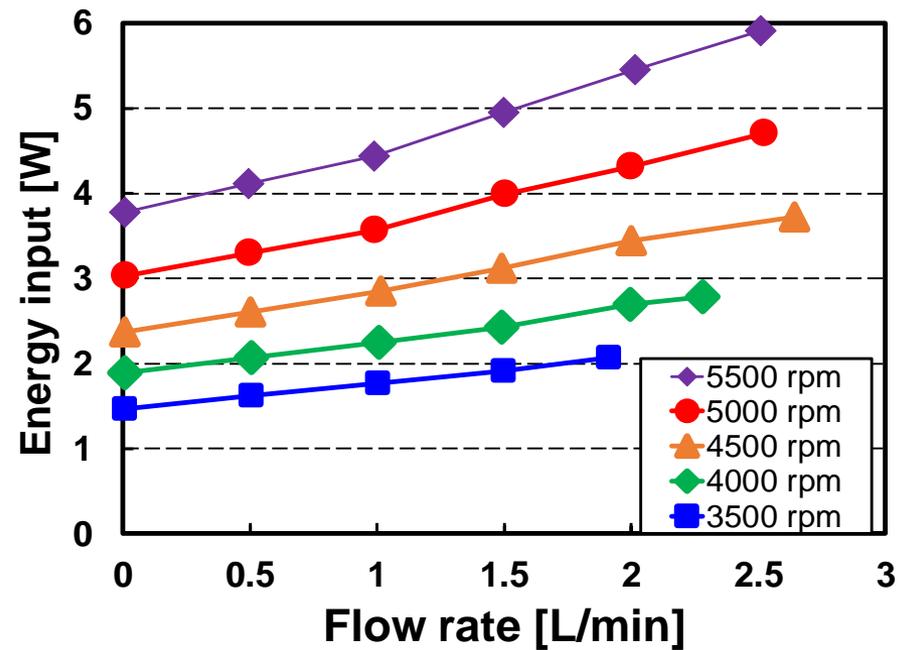
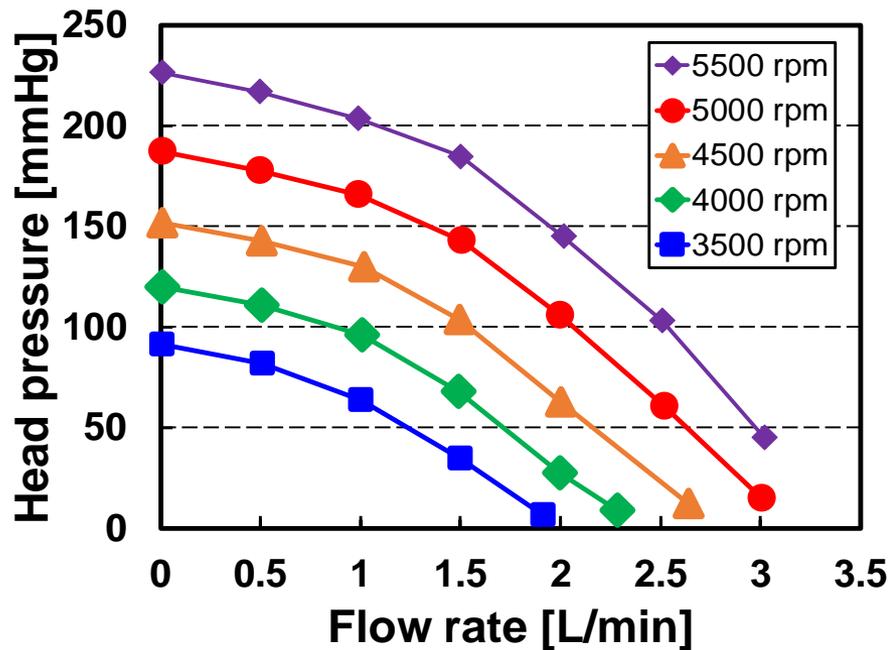
非接触インペラ指示の実現



ポンプ駆動時の磁気支持性能



小児用人工心臓のポンプ特性



おわりに

大学発の工学要素技術（磁気浮上モータ）をもとに、医療機関、企業と協力して次世代型の小児用補助人工心臓の研究開発を行っている。開発する非接触支持方式は、人工心臓の高耐久化、良好な血液適合性を実現するのに貢献するキーテクノロジーとなりえることを示してきた。今後は、開発機器の精度を高めつつ、医学的評価を繰り返し返して実用化を目指す。