

超音速磁力支持天秤装置の研究開発

東北大学 流体科学研究所
大林研究室 修士1年 高木 良規

発表内容

前半：小型超音速MSBSの課題

- 超音速MSBS実現への試み
- 過去の超音速MSBSとボトルネック
- $\Phi 85\text{mm}$ 超音速風洞の衝撃荷重

後半：本装置の衝撃荷重対策

- コイル設計
 - コイル配置
 - コイル駆動用アンプ
- センサー系設計

まとめ

Organization	Degrees of freedom	Size (cm)	Mach number	Use	Approximate dates of operation
ONERA	5	8.5×8.5	1 to 3	Drag, base pressure	1957-58
ONERA	5	6	7	Drag, base pressure	1958-62
MIT	5	10.2×10.2	4.8	static, dynamic	1962-71
ONERA	6	30	7	heat transfer, base pressure	1962-71
University of Southampton	5 or 6	15.2×20.3	0 to 0.9	static, dynamic	1962-present
NASA Langley	1	12.1	---	Research, Development	1964-65
Princeton University	3	15.2	16	wake studies	1964-70
University of Virginia	5	10.2	7.6	cone, sphere drag	1964-77
AEDC/NASA Langley	5	27.2×31.9	8/0 to 0.5	wake studies	1965-70/ 1979-present
RAE	5	17.8×17.8	8.6	sting effect , magnus	1966-77
University of Michigan	1	5.1	Subsonic	sphere drag	1966-71
MIT/NASA Langley	5 or 6	15.2octag	0 to 0.5	Aero testing	1969-82/ 1984-present
Oxford University	3	14	5 and 9	low density sphere ,cone drag	1971-75
University of Virginia	3	15.2	3 / Subsonic	Dynamic stability	1973-82
Oxford University	3	12×12	Supersonic	low density sphere ,cone drag	1975-present
MAI/TsAGI(U.S.S.R)	5	40×60	Subsonic	Aerodynamic research	1983-present
JAXA	5 or 6	10×10	Transonic	Research, Development	1987-2010
MAI (U.S.S.R)	6	30×40	Subsonic	Research, Development	1989-present
JAXA	6	60×60	Subsonic	Research, Development	1999-present

超音速風洞への適応例は複数存在する



TOHOKU
UNIVERSITY



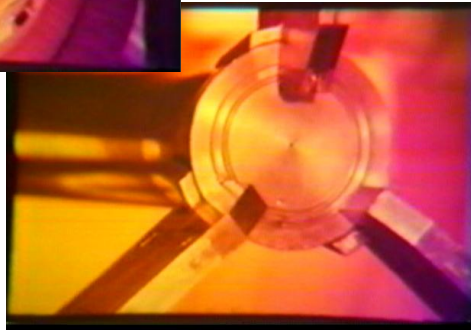
過去の超音速MSBSとボトルネック

1. 起動・停止荷重

これまでの適応例における対策

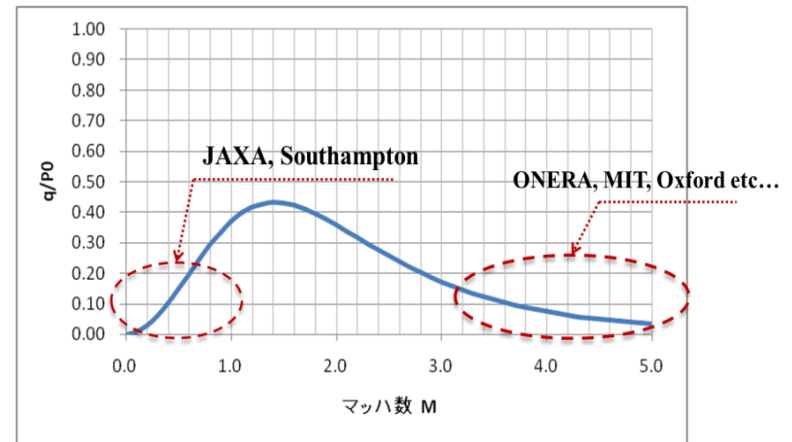
- 起動・停止時に模型を支える支持機構の導入

- ✓ 模型形状の制限
- ✓ 小型測定部への適応は困難



2. 定常時の高動圧

マッハ数1.4付近で極大



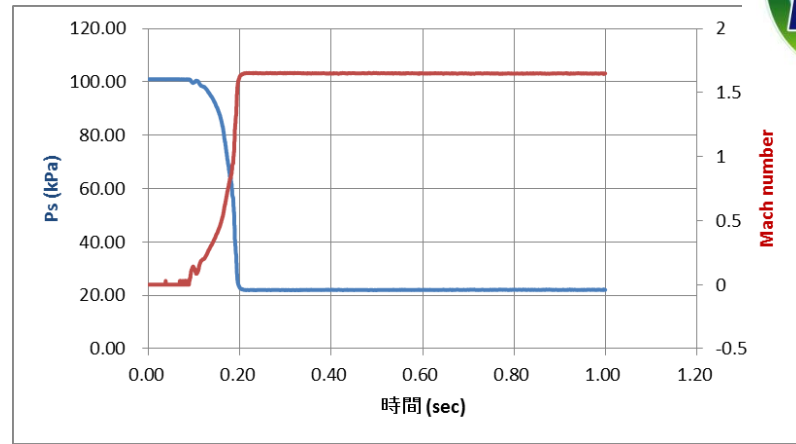
小型超音速MSBSの場合、風洞始動時に機械的支持機構なしで支持しなければならない

最大のボトルネックは起動時の衝撃荷重である



Φ85mm超音速風洞の仕様

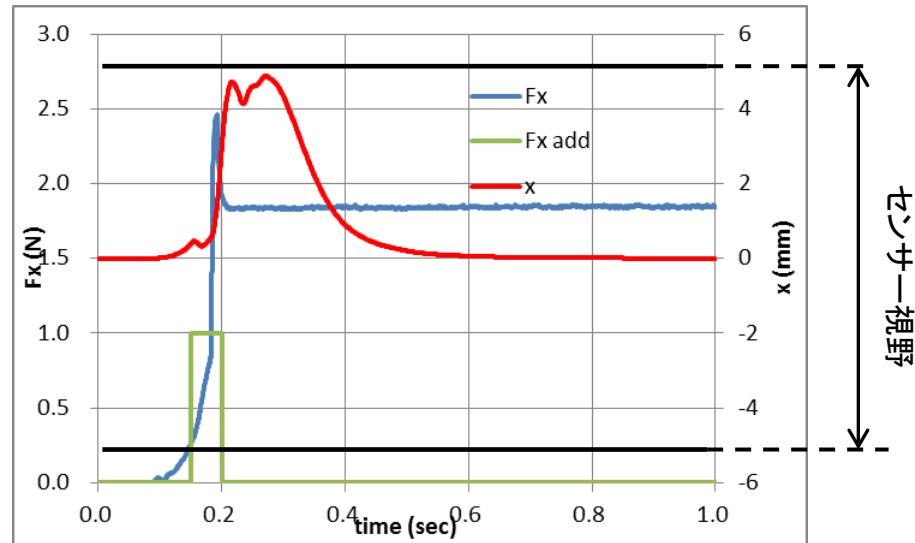
- 大気吸い込み式
- 起動圧力 : 1.0 bar
- 気流静定時間 : 0.1 秒
- マッハ数 : 1.65
- 模型の最大加速度 8G程度



起動停止荷重に耐えるためには
模型をセンサーの視野内に収めなくてはならない

本装置の設計指針

- ✓ 強力な抗力方向の磁気力
 - コイル配置
 - 高出力アンプ
- ✓ 高いコントローラゲイン
 - 高速・高分解能センサー





コイル配置 ～模型に作用する磁気力～

磁気力

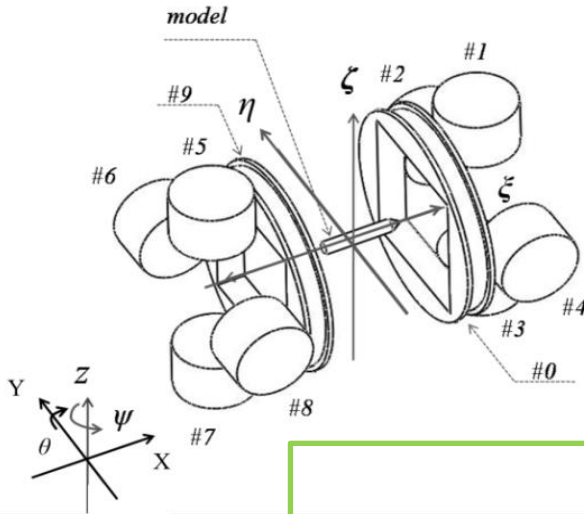
$$F_{mag} = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H}$$

$$\mathbf{N}_{mag} = \mathbf{M} \times \mathbf{H}$$

浮揚させる磁石はx座標軸上にあり

$$\mathbf{M} = (M_0, 0, 0)$$

とする



$$F_{mag,x} = M_0 \frac{\partial H_x}{\partial x}$$

$$F_{mag,y} = M_0 \frac{\partial H_y}{\partial x}$$

$$F_{mag,z} = M_0 \frac{\partial H_z}{\partial x}$$

$$N_{mag,y} = M_0 H_z$$

$$N_{mag,z} = M_0 H_y$$

並進力 → 磁場勾配

モーメント → 磁場強さ



コイル配置

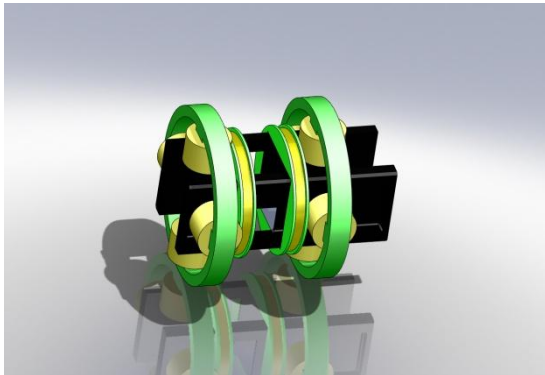


TOHOKU UNIVERSITY

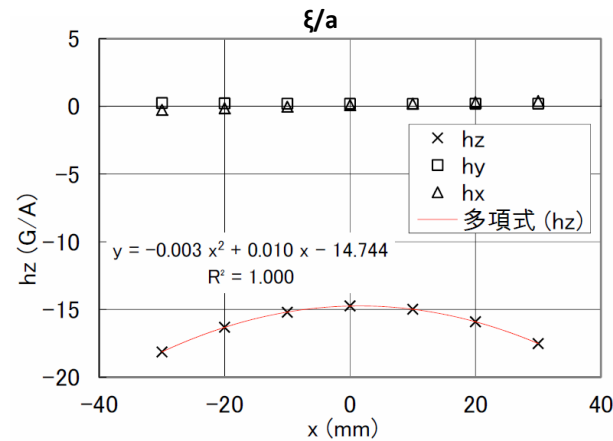
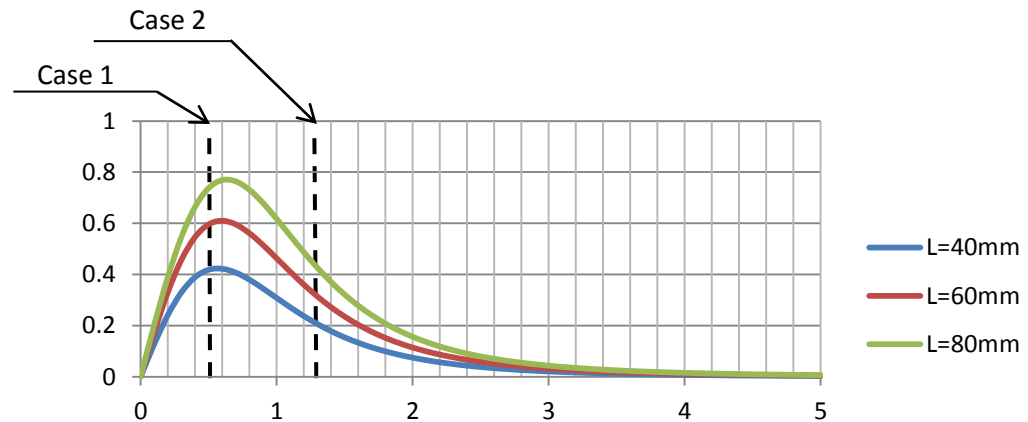
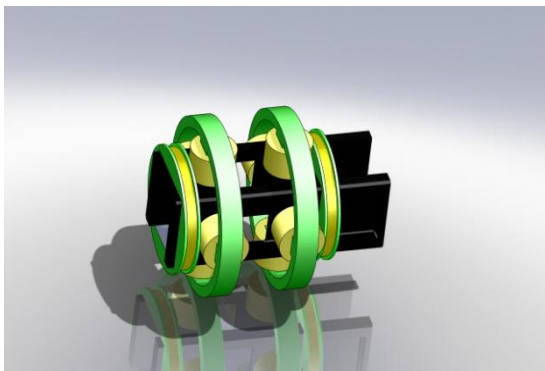
2a : 抗力コイル一辺(正方形)
2ξ : コイル間隔
2l : 磁石長さ

$$F_{mag,x} \propto \left\{ \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{l}{a} - \frac{\xi}{a}\right)^2\right) \sqrt{2 + \left(\frac{l}{a} - \frac{\xi}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{l}{a} + \frac{\xi}{a}\right)^2\right) \sqrt{2 + \left(\frac{l}{a} + \frac{\xi}{a}\right)^2}} \right\}$$

Case 1



Case 2



ピッチ電流制御時

衝撃荷重を支えるため抗力コイル間隔を小さく取った



コイル駆動用アンプ

抗力コイル駆動用アンプ

- Copley 241
 - 最大瞬間電流 120A (50 msec)
 - 連続出力電流 60A
 - 印加電圧 150V

※ 60cm – MSBSで使用



コイル駆動用アンプ (抗力以外)

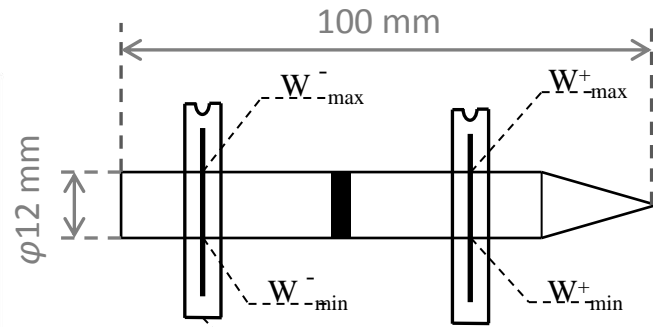
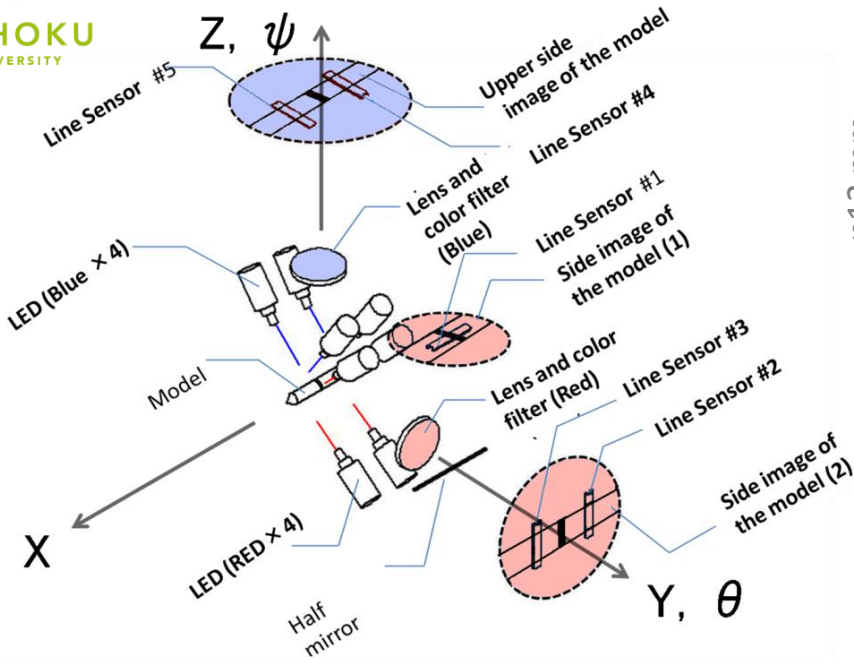
- Copley 423
 - 最大瞬間電流 30A (1 sec)
 - 連続出力電流 15A
 - 印加電圧 150V



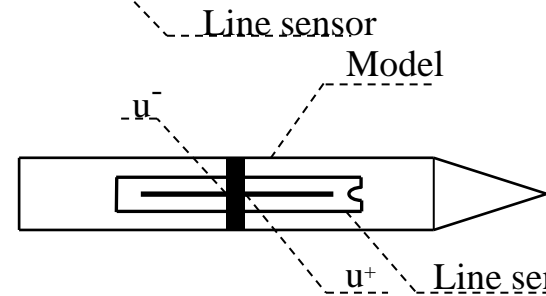
衝撃荷重を支えるため、抗力コイル駆動用アンプを大型化



センサー系



(A)



(B)

$$x_{count} = \frac{u^+ + u^-}{2} + r\psi$$

$$y_{count} = z_{count} = \frac{w_{max}^+ + w_{min}^+ + w_{max}^- + w_{min}^-}{4}$$

$$\theta_{count} = \psi_{count} = \frac{w_{max}^+ + w_{min}^+ - w_{max}^- - w_{min}^-}{4u_0}$$



TOHOKU
UNIVERSITY

センサー系 ～ラインセンサーカメラ～



竹中システム
ラインセンサーカメラ
TL-7450S



Specifications of the CCD line sensor camera

サイズ	64(W) × 64(H) × 88.8(D) mm
素子数	7450
素子サイズ	4.7 × 4.7 μ m
素子長	35 mm
計測周波数	1.25～5kHz
感度	50 V/lx·sec

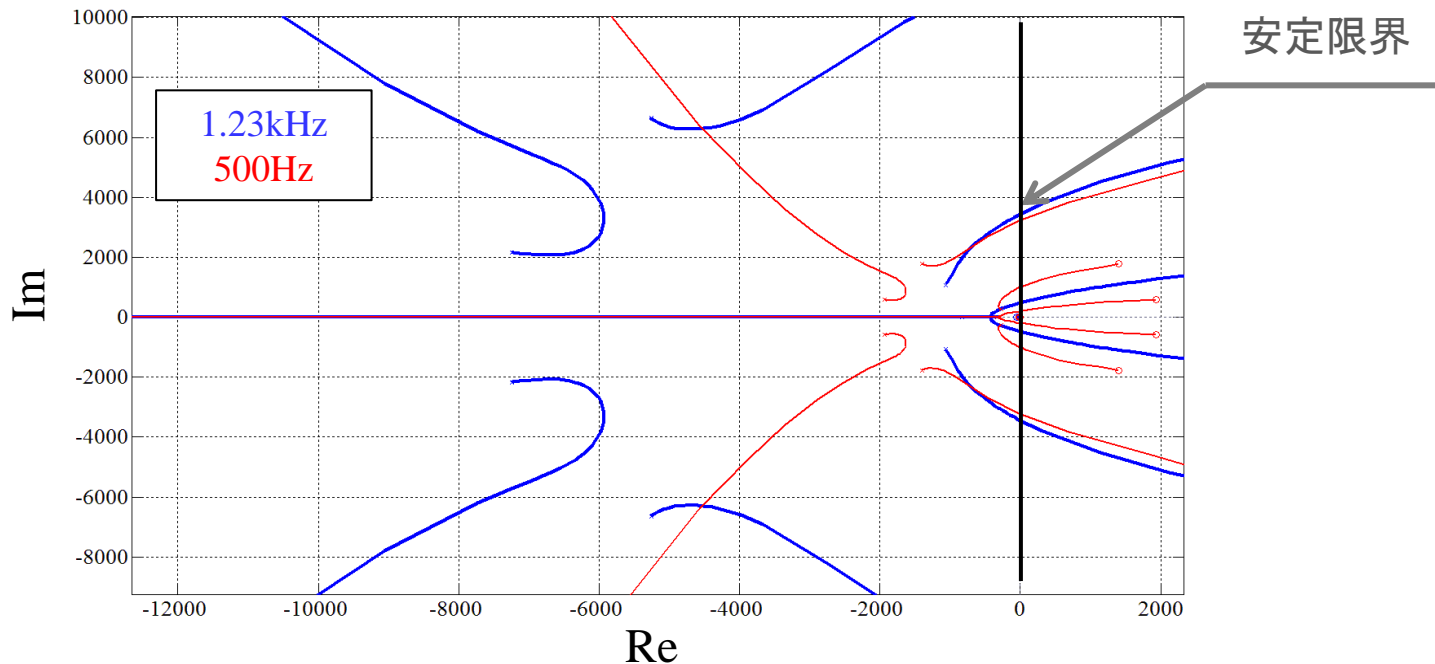


センサー系 ～分解能・計測周波数～

	Φ85mm - MSBS	10cm - MSBS	60cm - MSBS
x (μm)	2.6	7.2	51
y (μm)	3.3	7.8	50
z (μm)	3.3	6.9	53
θ (deg)	0.0080	0.033	0.043
ψ (deg)	0.0082	0.050	0.041
Measurement frequency	1.23kHz	500Hz	240Hz



センサー系 ～根軌跡～



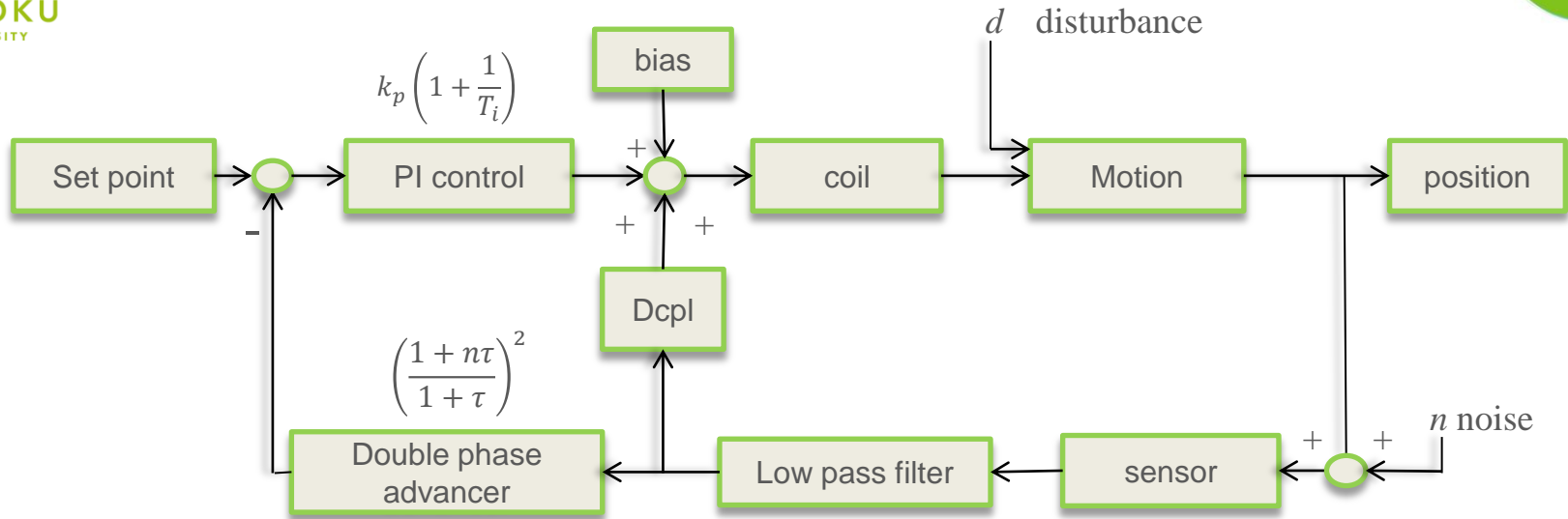
計測周波数向上により、センサーのむだ時間が減りゲイン上限値が上昇



制御の速応性が向上



始動時の模型変位(推算)



仮定

- 模型のCD値は定常
- 衝撃力は気流方向のみ考慮

$K_p : 4.0$

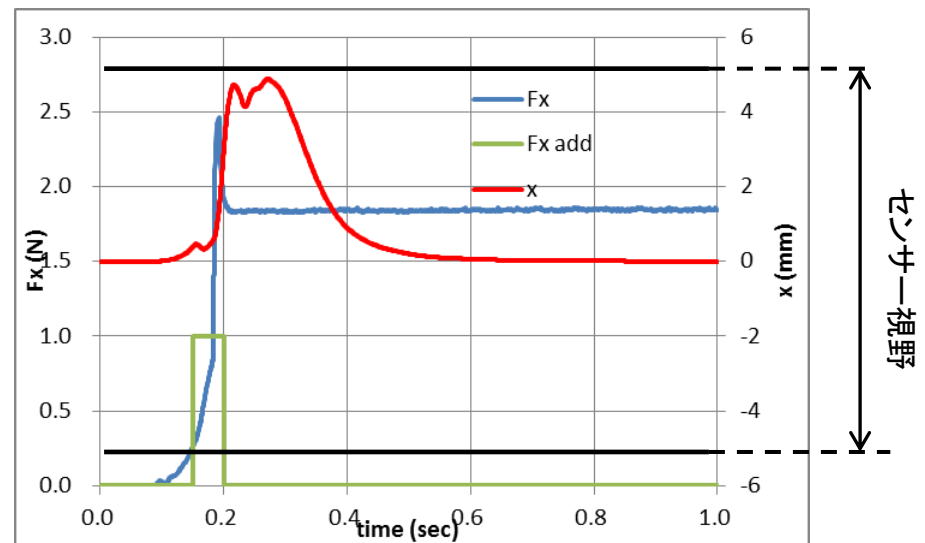
$T_i : 0.01$

$n : 20$

$\tau : 0.0008$

$I_{bias} : 30A \quad (0.15 < t < 0.24)$

2nd Low Pass Filter $f_c : 50Hz$



センサー視野

まとめ

- 超音速MSBSのボトルネックは風洞始動時の衝撃荷重である

特に測定部が小型の場合、機械的支持機構なしで支持しなければならない

本装置の設計指針

- 抗力方向の強力な磁気力
- 高いコントローラゲイン
 - ✓ 抗力コイルの配置を調整
 - ✓ 抗力コイル駆動用アンプを大型化
 - ✓ センサーの計測速度を高速化

制御定数の調整と風洞起動時の抗力特性を把握することで
支持できる可能性がある

A close-up, top-down view of a washing machine drum. The drum is made of a reflective, metallic material, likely stainless steel, and is illuminated with a vibrant, multi-colored light that transitions from purple on the left to blue and green on the right. The light creates a shimmering, iridescent effect on the curved surface of the drum. In the center of the drum, there is a small, cylindrical object, possibly a detergent dispenser or a small container. The overall scene is abstract and visually striking due to the intense, saturated colors and the reflective texture of the metal.

ご清聴ありがとうございました