

東北大学流体科学研究所低乱風洞用 大型磁力支持天秤装置の計画

MSBS研究会
JAXA航空宇宙センター
2012/11/20

低乱風洞実験施設共用リエゾン室
澤田秀夫

内容

- **磁力支持天秤装置 (MSBS) とは**
 - 基本的原理、構成、試験法、歴史
- **一般的な利点**
 - 支持干渉が無い、運動が容易、空気力評価が単純
- **大型化に伴う利点**
 - 現状のMSBS寸法、模型を大きく、高機能にできること、流れ場の解像度を上げられること、他の計測と同時利用の機会を増やせられる。
- **大型化に伴う解決すべき技術課題**
 - 測定部内磁場のエネルギーが、浮揚模型の位置が測定センサーから遠い、磁石が大型化。磁場発生用電源の容量が大きい、試験者が磁場に曝される危険、模型が落下した時の測定部の破損、磁石の散乱等が増える。
- **MSBS大型化の試み例**
 - NASA LRC、Princeton Univ. SuperTubeへの導入 (Old Dominion Univ.)、JAXA60cmMSBS、2m風洞への導入計画
- **東北大学流体科学研究所低乱風洞1m級MSBS計画**
 - 目標、緒元、課題
- **東北大学流体科学研究所低乱風洞1m級MSBS利用のイメージ**
 - 自作して持ち込む、利用は有償
- **大型MSBS整備に向けた環境整備**
 - MSBSを利用した研究活動の活性化、MSBS利用技術の普及、MSBS維持体制の強化
- **まとめ**

磁力支持天秤装置 (MSBS) とは

- 定義:

磁気力で風洞模型を気流中に支持して、同時に、気流から受ける流体力を測定する装置。

- 原理:

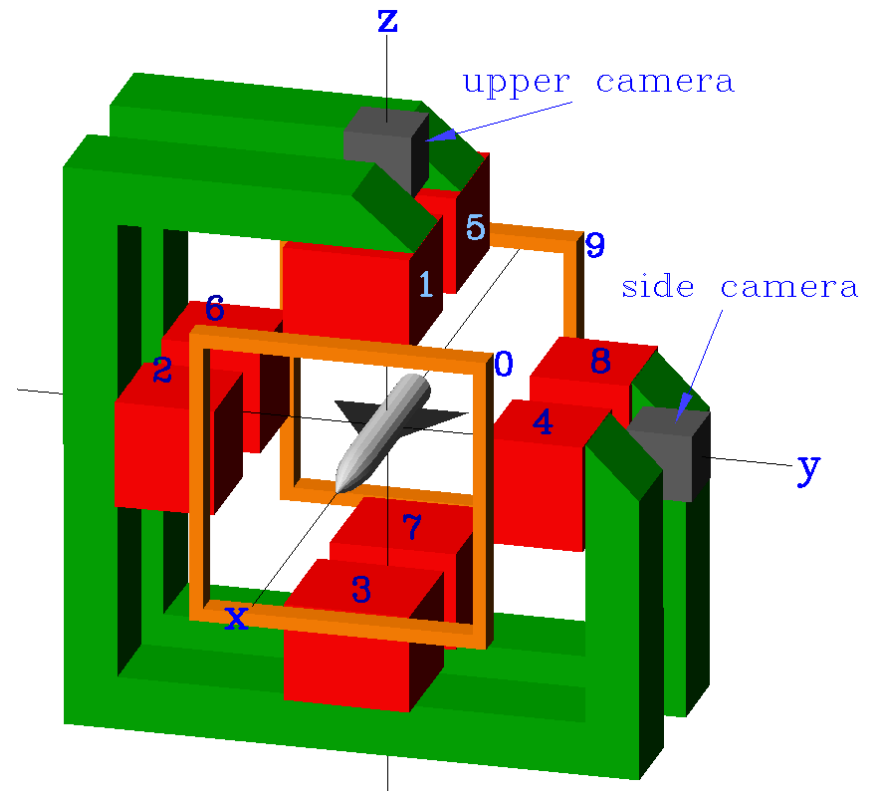
模型周りに磁場を形成し、模型に制御された磁気力を作用させる。模型の運動と推定可能な磁気力から流体力を評価する。

- 構成:

- 模型 (外形 + 磁石)
- センサー系 (光調整)
- コイル系 (コイル + パワーアンプ)
- 制御系 (計算機利用)

- 試験法:

1. センサー較正試験
2. 浮揚調整試験
3. 軸間干渉評価試験
4. Zero迎角評価試験
5. 天秤較正試験
6. 通風試験



$$\frac{d(mv)}{dt} = F_{magnet} + F_{aero} + F_{gravity},$$
$$\frac{d(I \cdot \omega)}{dt} = N_{magnet} + N_{aero} + N_{gravity},$$

センサー系

条件:

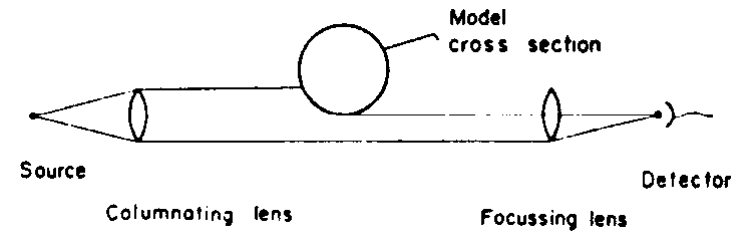
1. 非接触
2. 各軸分解が高精度で可能
3. 分解能、再現性、高速性
4. 様々な形状の模型にも適用可能
5. 磁場の影響を受けない
6. 小型で、コイル配置に影響しない

- Optical:

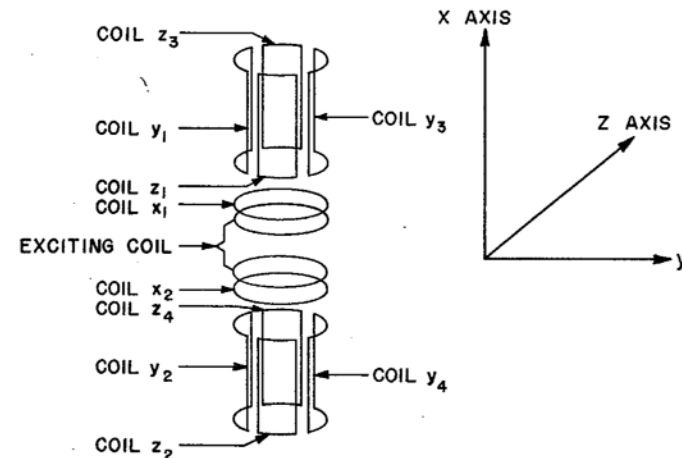
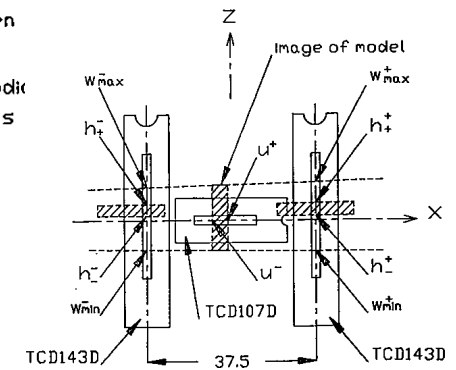
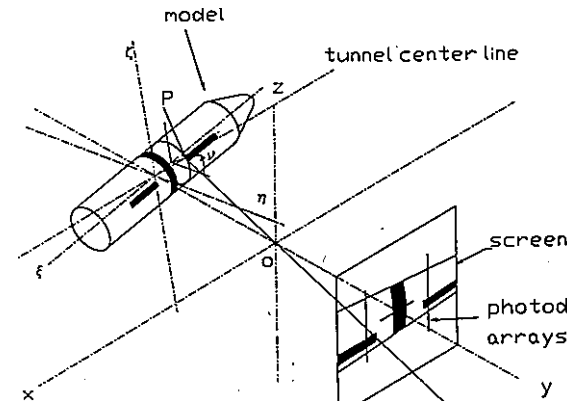
- Light beam position sensor: *low cost but small range*
 - NASA, AEDC, ONERA, Russia (modified)
- PSD : *low cost and wide range*
 - Fukuoka Engineering Institute
 - ONERA and NASA have proposed.
- CCD camera : *high cost*
 - Line sensor camera : JAXA, MHI, IHI
 - Area sensor camera : JAXA(2010~)

- Magnetic field: *high cost but wide range*

- Electromagnetic position sensor: M.I.T., ONERA, U. Virginia

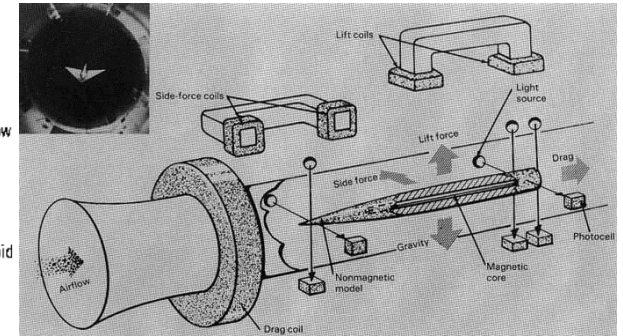
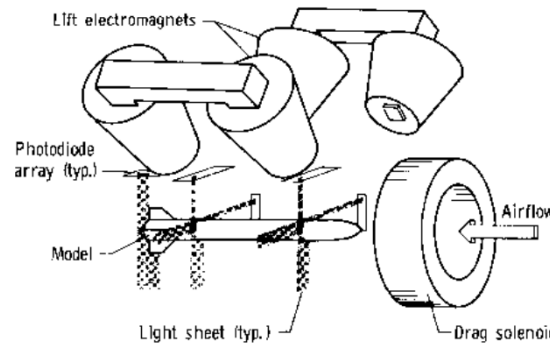


Quoted from IEEE AES magazine, May, 1988 pp. 17-22



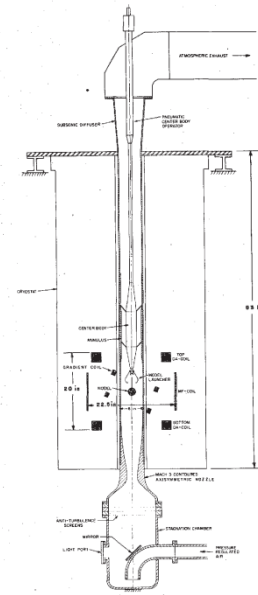
コイル系

- コイル配置
 - V型 : AEDC, NASA, ONERA
 - L型 : MIT



Quoted from <http://history.nasa.gov/SP-440/ch8-4.htm>

- 点对称型 : Virginia Univ.

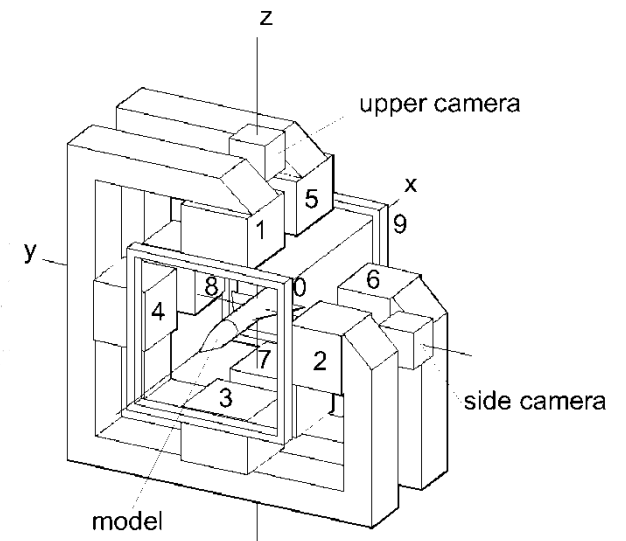


Quoted from NASA-CR-141284

- 点对称型派生形 : MIT

- 軸対称型 : Southampton Univ., JAXA

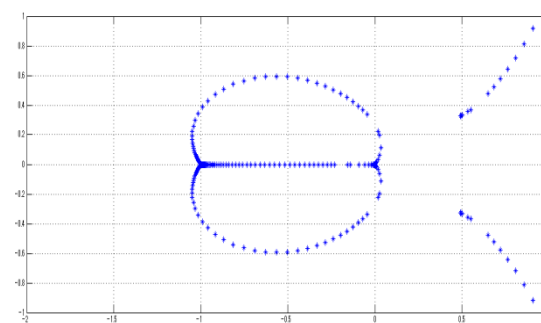
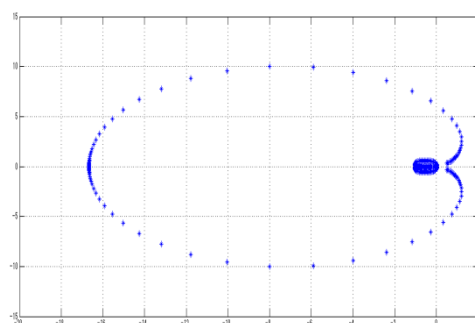
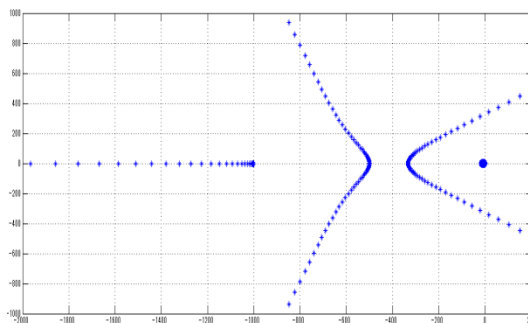
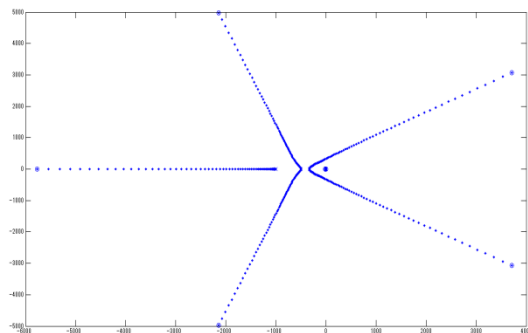
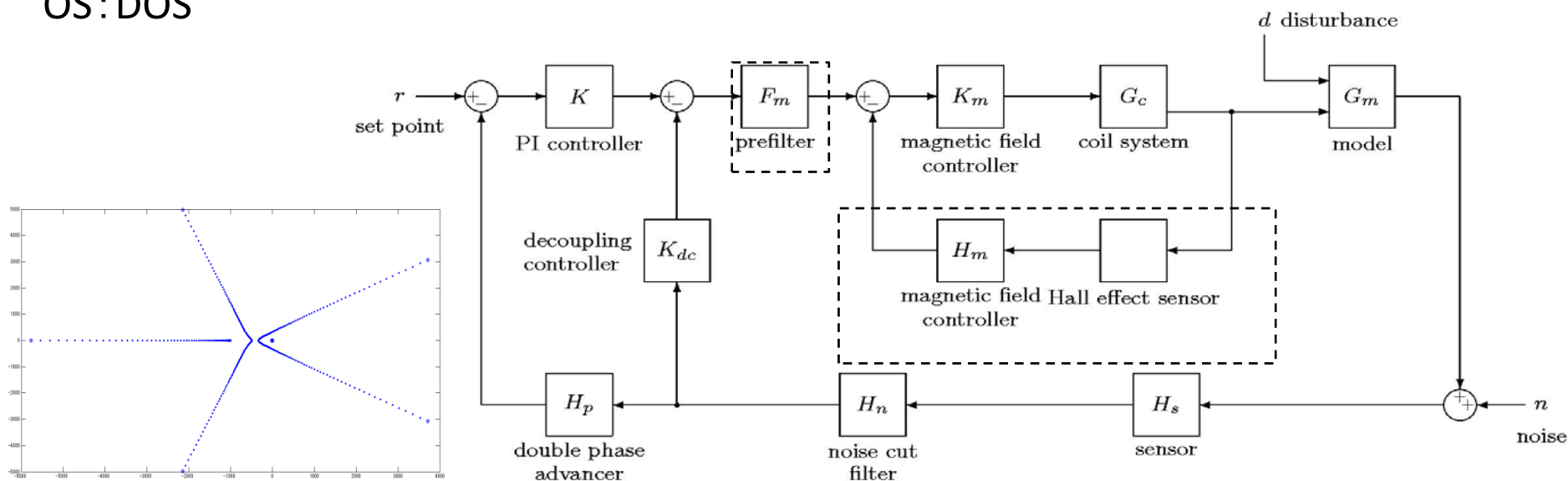
Figure 6 Overall Prototype Facility Sketch.



Quoted from *Exp. Fluids* (2011) 50:271-284

制御系

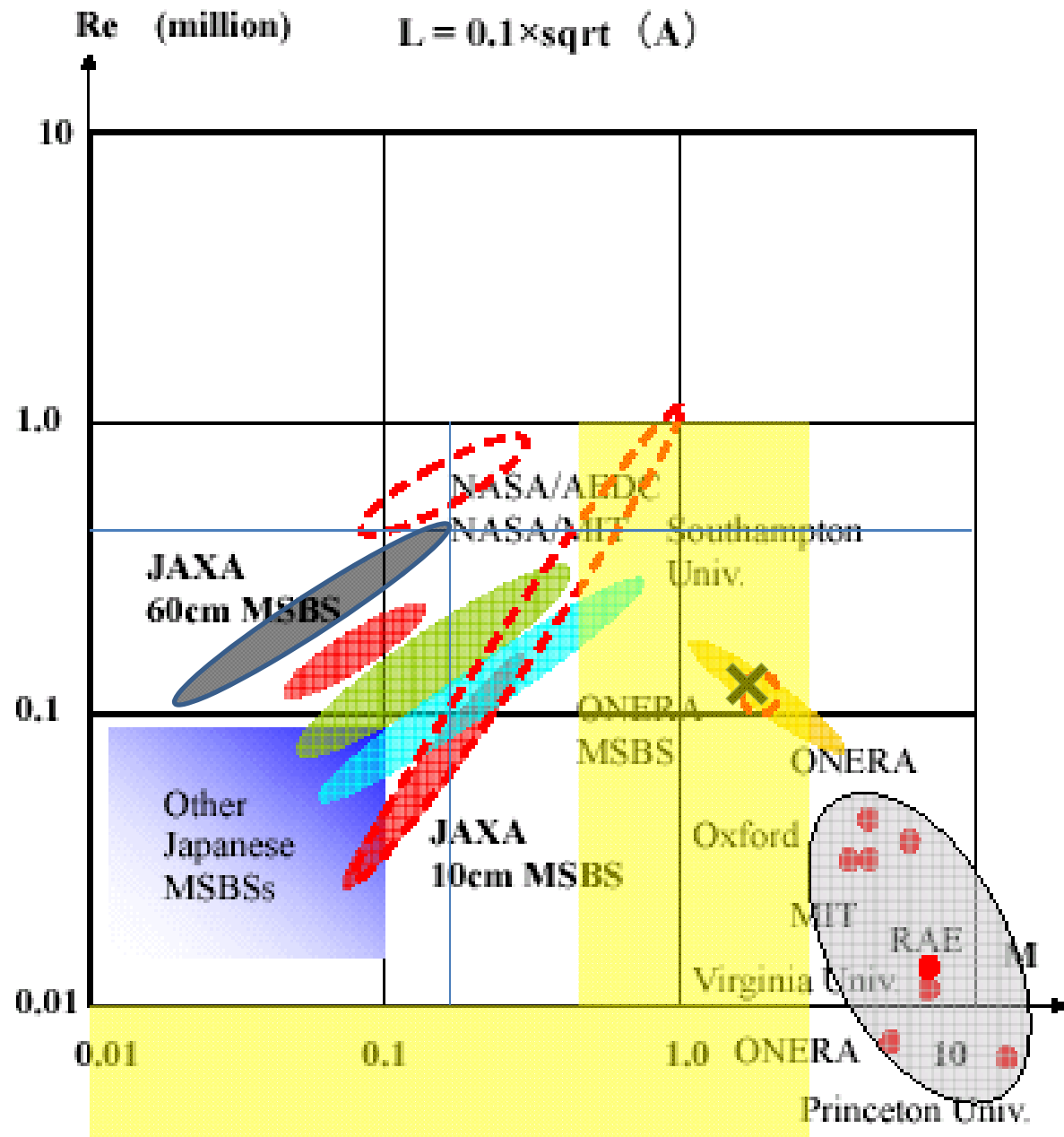
- PI制御＋二重位相進み
- 6軸独立制御＋軸間干渉除去機能
- 制御周期：センサーによる位置姿勢測定毎
OS: DOS



MSBSの歴史(1)

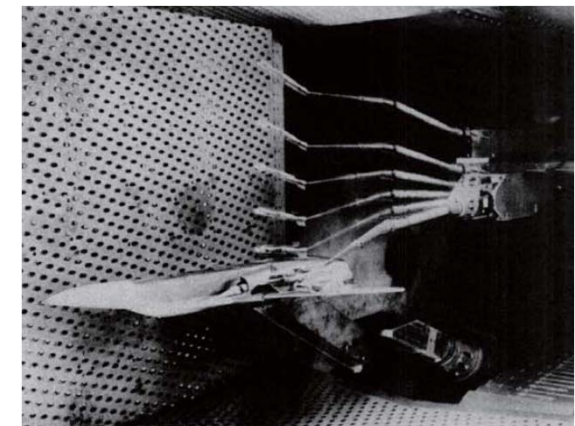
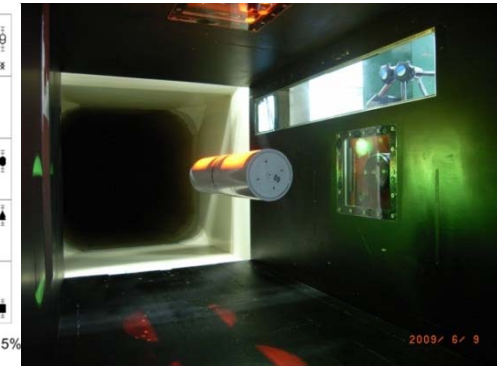
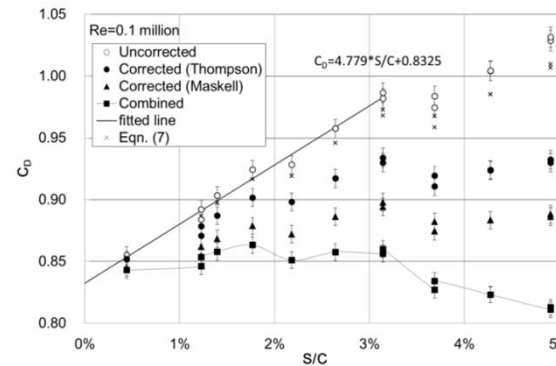
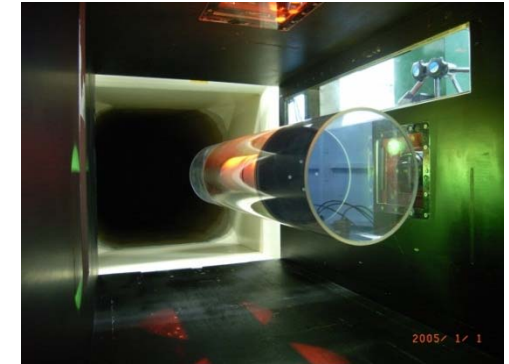
1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	remarks	
	ONERA MSBS's						Supersonic/ Transonic Subsonic	
	MIT MSBS's		NASA LaRC					
	AEDC		NASA LaRC MSBS's				Supersonic/ Subsonic	
	Virginia Univ. MSBS's						Hypersonic/	
	Southampton Univ. MSBS's						Subsonic	
	Oxford Univ. MSBS's							Hypersonic
			TsAGI MSBS's				Subsonic	
			JAXA MSBS's				Subsonic	
			Japanese MSBS's F.I.T. Kyushu Univ. Tohoku Univ.				Subsonic	
						Tohoku Univ.	Supersonic /Subsonic	

MSBSの歴史(2)



一般的な利点

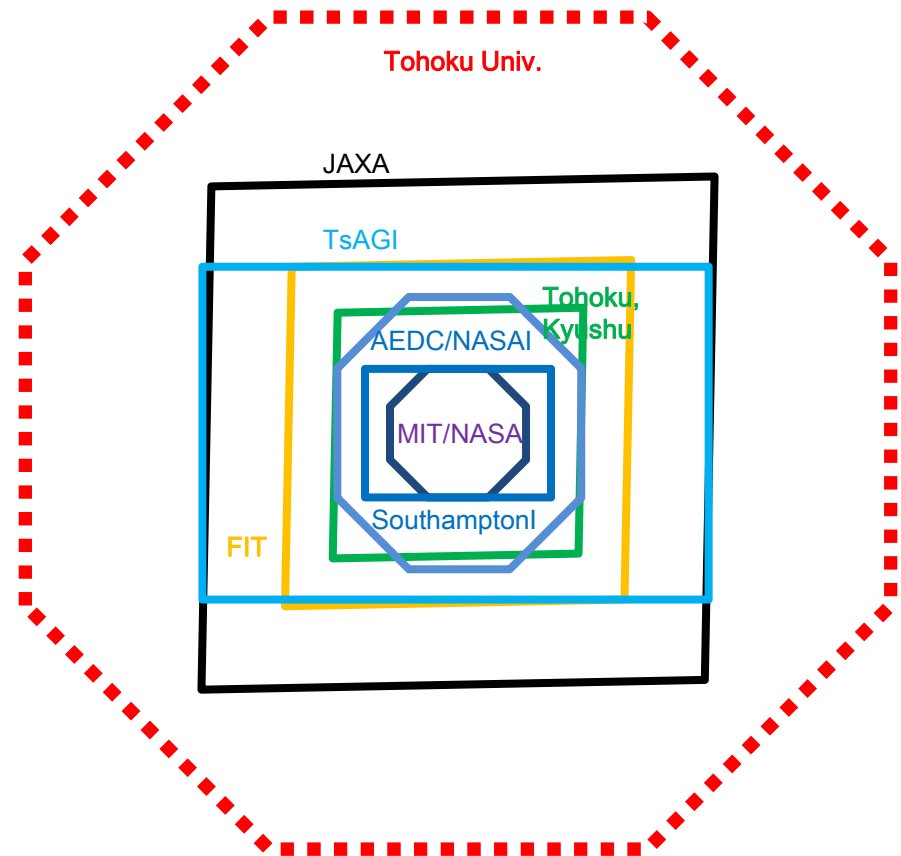
- 支持干渉が無い(現象の分離)
 - 機械的支持装置の影響評価
 - 通常的支持干渉
 - 高迎角支持干渉
 - CTS
 - 地面効果
 - 後流の研究
 - 壁干渉評価
- 運動が容易
 - 動的試験
 - 動安定微係数の測定
 - 非定常現象関連試験
 - ボールの挙動(サッカー、野球、卓球)
 - 回転し、曲振動する矢の挙動(和弓、アーチェリー)
 - 機体の分離(増槽タンクの落下、ロケットの分離)
- 空気力評価が単純
 - 高精度力測定
 - 動的力測定
 - 模型歪影響の低減
 - 分布支持が可能



CTS NASA CR3900、1985から引用

大型化に伴う利点

- 現状のMSBS寸法
 - 磁極間距離<0.64m
- 模型を大きくできる
 - レイノルズ数を通常の風洞試験領域にまで大きくできる。
 - ペイロードが増えて、模型設計が容易になる。
 - 多様な模型の浮揚が可能になる
 - 質量が大きくなり、微小振動が相対的に減る
- 模型を高機能にできる
 - 通信機器等を搭載できる
 - 可動部分を組込める
- 他の計測と同時利用の機会を増やせる。
 - 流れ場の解像度を上げられる
 - PIV、PSPを利用し易くなる
 - CTS



大型化に伴う解決すべき技術課題

- 測定部内磁場のエネルギーが大きくなる
 - 測定部容積に比例して増える
 - 磁場発生用電源の容量が大きくなる
 - 磁場制御が大掛かりになる
 - － 大型のパワーアンプが必要
- 模型位置が測定センサーから遠くなる
 - 光学センサーでは照射光量が距離の二乗に比例して減衰
- 磁石の大型化、強力化
 - 高価(価格は容積に比例する)
 - 取扱が一層危険
 - 超電導コイルの利用を検討すべき。
 - － 磁石よりも安全な取扱いが可能
- 試験者が磁場に曝される危険が増す
 - 磁石が大きくなると、強い磁場の領域も大きくなる。
- 模型落下時の測定部破損、磁石散乱等が増す
 - 模型が重くなり、落下時の破損規模も大きくなる。
 - ヨークに吸引された磁石の除去が一層困難になる。

MODEL	V _{MAX} †	OUTPUT CURRENT		
		A _{DC} /A _{RMS}	TRIANGLE WAVE A _{MAX}	PULSE A _{MAX}
231HC	150	70	120	130
232HC		120	208	260
234P02		225	390	520
234P04		300	520	675
261HC	300	45	78	180
262PN		85	147	190
265P		150	260	324
266	350	250	433	475
271 		400	693	950*
C700	700	212	367	500
282 	675	250	433	500
281 		360	624	850*

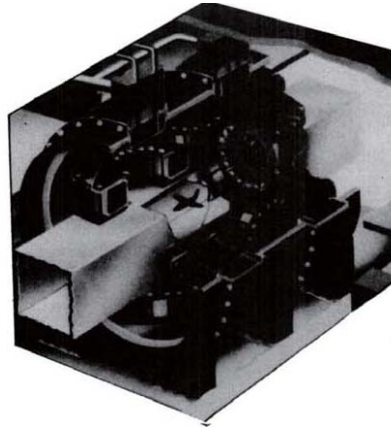
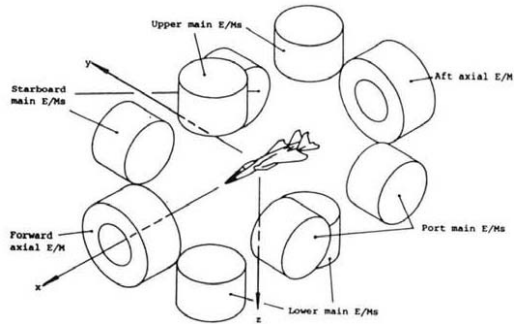
 Liquid Cooled  Special Mode † Load Dependent

Copley Control 社の大型パワーアンプ例

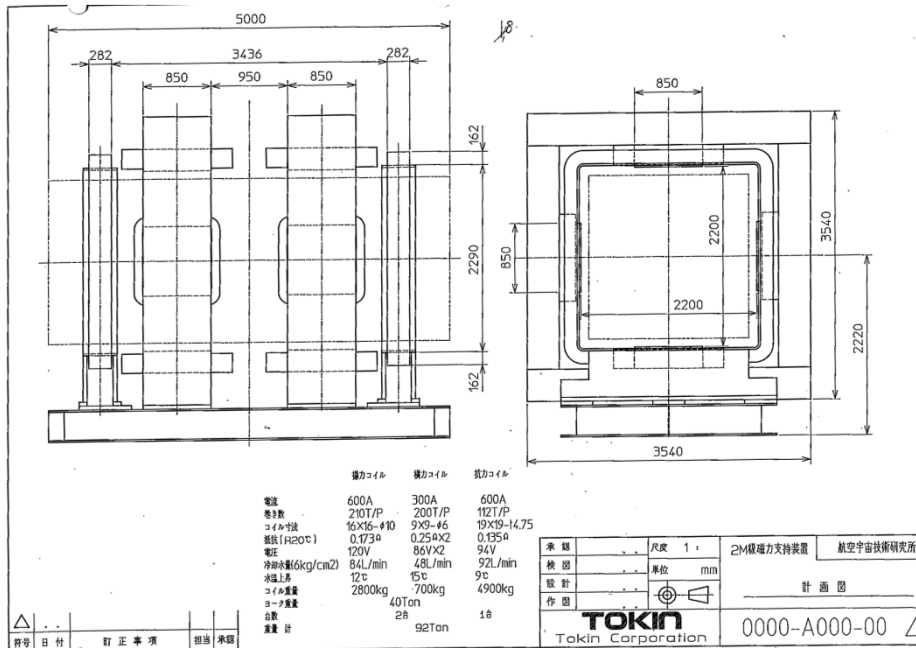


JAXAのMSBS用超電導コイル模型

MSBS大型化の試み例



NASA が検討した遷音速風洞用大型MSBS (NASA CR 3900 から引用)
2.5m x 2.5m test section



JAXA2m突風風洞への導入計画

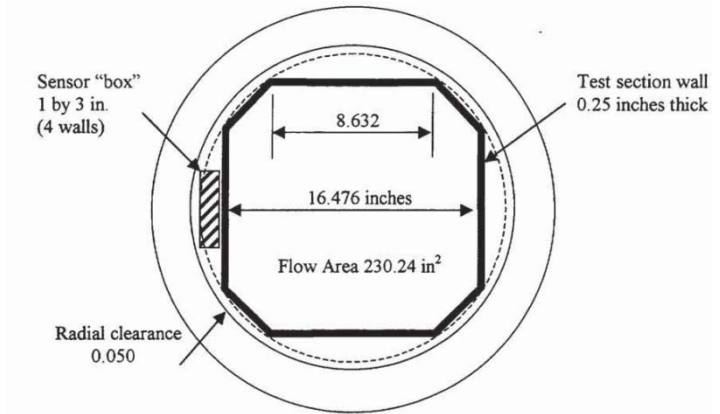


Figure 7 - Candidate Test Section Cross-Section

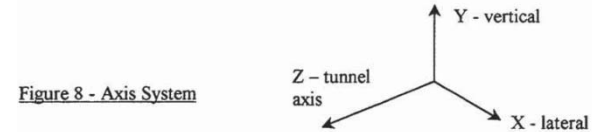


Figure 8 - Axis System

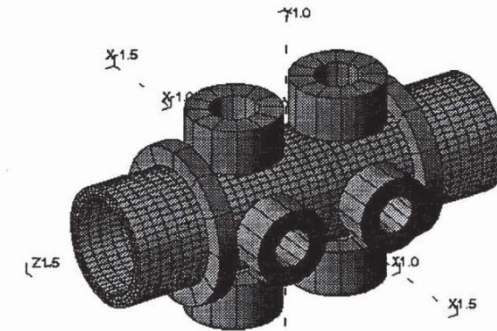


Figure 9 - Baseline Electromagnet Configuration ("+" layout)

Princeton Univ. SuperTubeへの導入
(Old Dominion Univ.)
4th ISMST by C. Britcher 1997

東北大学流体科学研究所低乱風洞1m級MSBS計画(1)

- 構造:カート方式。使用しない時は低乱風洞から外し、移動できる構造。
- 能力:模型によっては最高風速(70m/s)まで磁力支持できる能力を保持。
- コイル系:上下磁極間隔は1.088m、前後ヨーク間隔は646mm。
 - JAXA60cmMSBSの1.7倍スケール
- センサー系:現在開発中の小型超音速風洞用MSBSセンサーを利用する。
- 制御系:6軸制御(航空機模型の磁力支持が可能)
 - JAXA60cmMSBSのC言語制御プログラムを利用。
 - DSPボードを用いた制御装置の導入も検討。
- 模型把持装置:測定部斜め下45度に取り付ける機構。
- 力較正システム:重りによる力較正を基本とする。
- 測定部:
 - 模型の磁石と測定部との強力な吸引を避け、測定部はアルミ合金で製作。
 - 前後に2分割できる構造とする。測定部静圧を大気圧にする機能を持たせる。
- 単年度で整備する:
 - 利用初年度は定常試験を中心に基本的試験経験を積みあげる。
 - 翌年度以降、経験を積みながら、非定常試験、高迎角試験へと発展させていく。
 - MSBS利用試験計画は数年度にわたり、積極的に受入れておく。

設備概要図：フライト計測融合低乱熱伝達風洞設備



磁力支持天秤

(模型を支持することによって生じる流れへの影響を避けるため磁力により模型を支持すると同時に模型へ働く力を計測する。また、フライト状態を再現するため模型を自在に運動させる。)

三次元・時系列流速計測装置

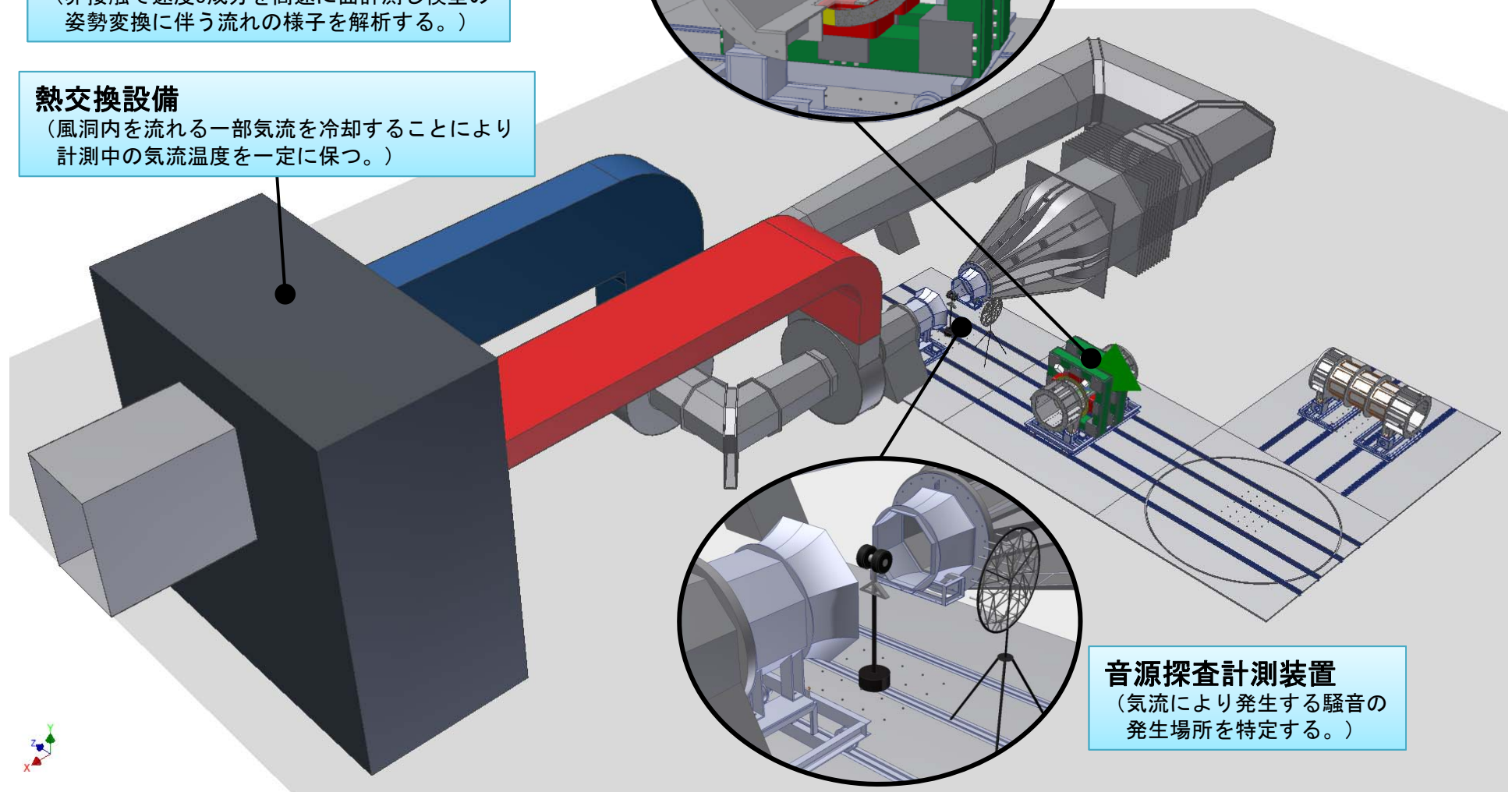
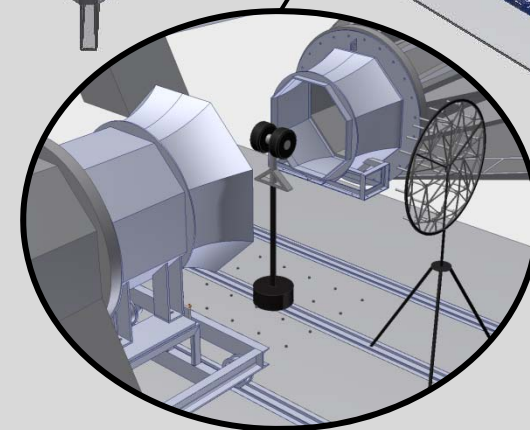
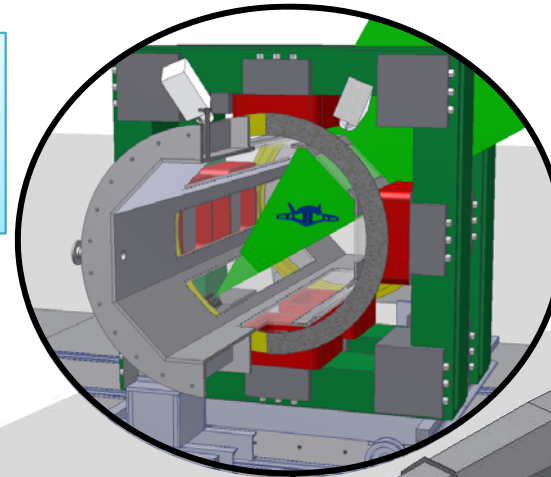
(非接触で速度3成分を高速に面計測し模型の姿勢変換に伴う流れの様子を解析する。)

熱交換設備

(風洞内を流れる一部気流を冷却することにより計測中の気流温度を一定に保つ。)

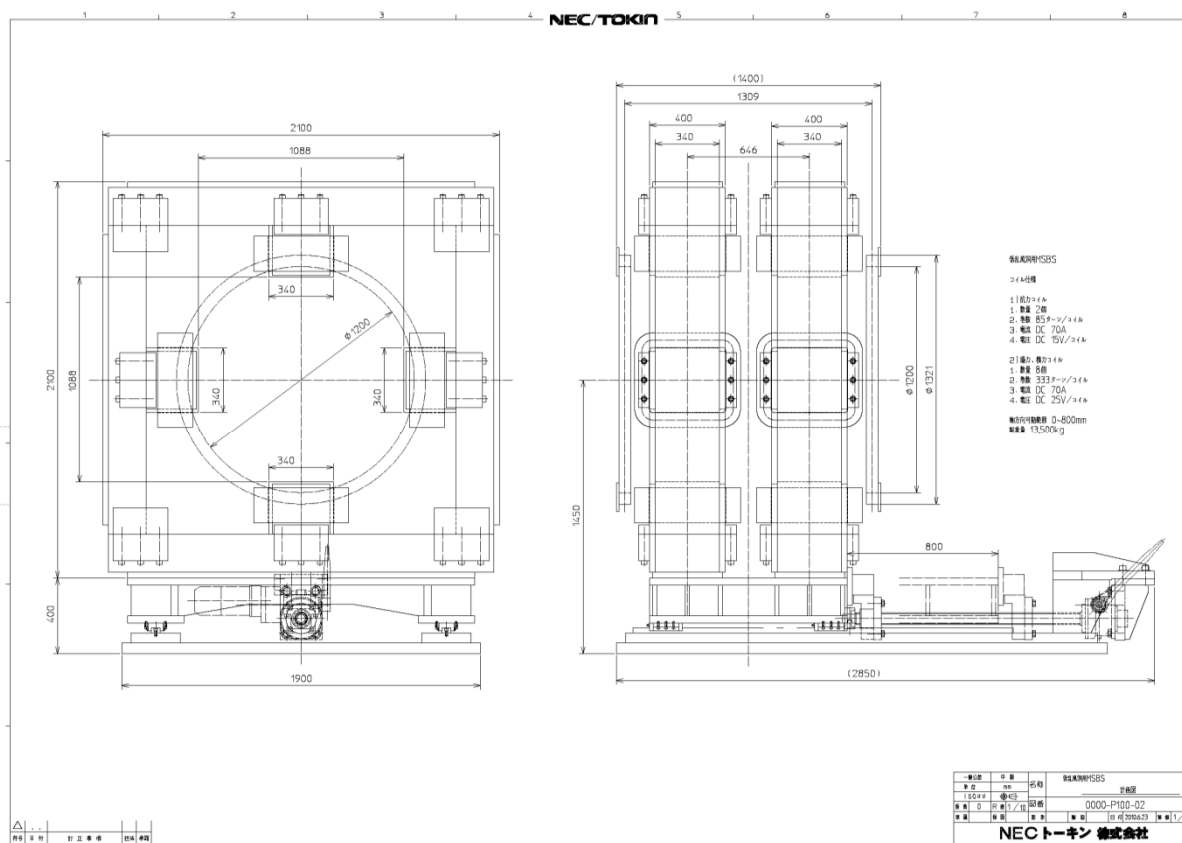
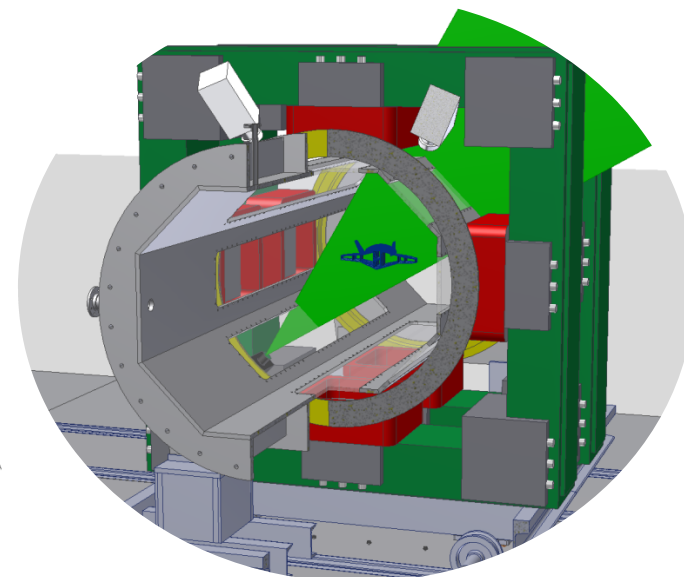
音源探査計測装置

(気流により発生する騒音の発生場所を特定する。)



東北大学流体科学研究所低乱風洞1m級MSBS計画(2)

- コイル系仕様:
 - 空冷(1時間/120A)
 - ヨーク間距離調整可能
 - 総質量: 13,500kg
 - 直流電源: 150V、30kW(検討中)



	揚力コイル	横力コイル	抗力コイル
数量	4	4	2
巻き数	333	170	85
抵抗(Ω)	0.170	0.085	0.153
インダクタンス(H)	0.175	0.046	0.058
磁極断面積(m ²)	0.1156	0.1156	1.184
最大定常電流A	120	120	120
パワーアンプ°	Copley232	Copley232	Copley232
磁場強さG/A	4.24	2.174	
その勾配G/m/A	9.81	4.65	1.47
備考	2コイル 直列制御	各コイル 独立制御	2コイル 直列制御

東北大学流体科学研究所低乱風洞1m級MSBS計画(3)

- 基本性能:
 - 標準磁石: NMX-S54(ネオジ磁石、1.45~1.51T) 60φ240L Br=1.36
 - 単体浮揚電流: 70A
 - 6軸制御(有翼模型対応)
 - 直径60φ,長さ240の磁石単体で1度/10Hzの強制型揺れ振動が可能
- JAXA60cmMSBSに無い新機能
 - PIV計測と磁力支持天秤装置のベストマッチングを追及する。
 - 後流計測機能や流れ場と同期させた非定常空気力測定機能を持たせる。
 - MSBS自体が流れ方向に移動可能。(~400mm)
 - 高迎角模型空気力測定用に機械天秤による力較正を可能にする。
 - 変動空気力を測定できるように、模型位置姿勢測定周波数を高速化(1kHz以上。既に1.25kHzを達成)。
 - MSBSと計算機を連動させ、航空機の運動、物体の落下等のシミュレーター機能を追求する。

東北大学流体科学研究所低乱風洞1m級MSBS利用のイメージ

- 模型は自作して持ち込む
- MSBS制御調整は風洞を専有せずに、MSBS退避場所でゆっくりと行う(数週間単位)。
 1. センサー較正試験
 2. 浮揚調整試験
 3. 軸間干渉評価試験
 4. 天秤較正試験
- 通風試験のみ、低乱風洞を利用(1週間程度有れば可能)
- 利用は有償を想定
 - MSBS維持費用を捻出しなければならない。
 - パワーアンプは数年に一度故障する。修理が必須です。(～50万円×1回/年)
 - 何回かに一回は模型は落下します。模型の床からの取外しは経験者でなくては無理。測定部床や窓の破損はつきものです。(～25万円×2回/年)
 - 運悪く自分の時にパワーアンプが故障したり、模型が落下すると、補償が大変です。
 - 利用する人達全体でカバーする体制が、MSBSの利用促進につながると思います。
 - 想定：
 - 4回/年(風洞占有期間は1週間)⇒利用料金～25万円/回+電気料金+・・・

大型MSBS整備に向けた環境整備

- MSBSを利用した研究活動の活性化
 - MSBS利用可能な風速域の拡大
 - 遷音速、超音速、極超音速風試にも利用可能な環境整備
 - MSBS利用経験者の増加を図る。
 - MSBSを所有している機関が積極的に共同研究を推進
 - MSBSの特徴を活かした試験の開拓。
 - 極限環境下の計測
超高压、
極低レイノルズ数流れ
- MSBS利用技術の普及
 - 停止中のMSBSを再稼働する。(東北大学、九州大学)
 - MSBS関連技術の公開(運転プログラム、模型、センサー系、コイル系設計法)
- MSBS維持体制の強化
 - 風洞試験装置としての商品化を進める。
 - 関連分野が多岐に亘るので、・・・

まとめ

- MSBSは様々な分野で利用可能な技術である。
- MSBSの大型化は流体関連の研究開発にとって有益である。
- MSBSの大型化には課題は残るが、1m級MSBSでは克服可能。
- 東北大学流体科学研究所低乱風洞1m級MSBS計画を紹介。
- 低乱風洞1m級MSBS運用についての検討結果の例を紹介。

- 要望
 - 東北大学流体科学研究所低乱風洞へのMSBS導入計画は始まったばかり
 - 新たなMSBS仕様追加提案を受入れます。
 - 数年分の利用計画を予め受け入れておきたい。
 - ニーズのアンケート調査も必要か。