

2013年 3月 1日 第3回MSBS研究会

アーチェリー矢の空力特性 -MSBS風洞実験と飛翔実験-

電気通信大学大学院

宮寄 武

JAXA

杉浦 裕樹

円柱境界層

理論解(境界層近似):円柱側面の境界層(べき級数解)

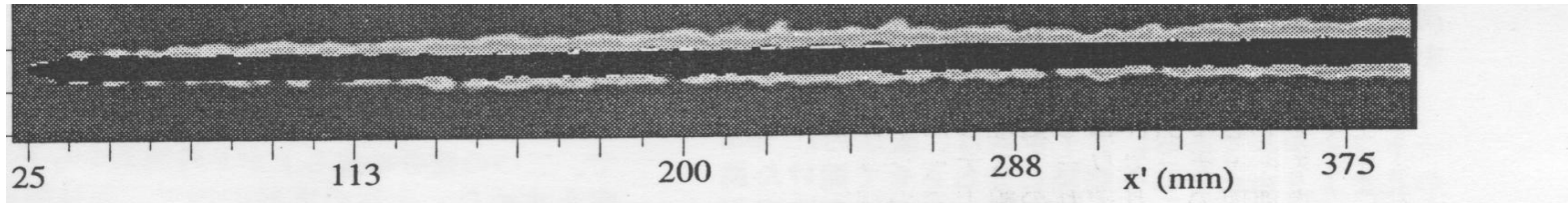
- Seban & Bond (1951) J. Aero. Sci. 18 先端部べき級数解
- Kelly (1954) J. Aero. Sci. 21 修正版べき級数解
- Stewartson (1955) Q. Appl. Math. 13 Far downstream のべき級数解
- Glavert & Lighthill (1955) Proc. R. Soc. London ser.A 全領域のべき級数解

線形安定性

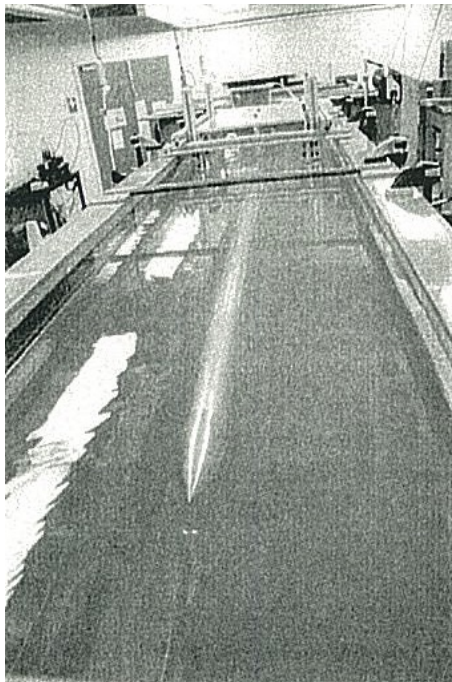
- Morris & Byon (1982) AIAA Pap. Non rotating
- Kao & Chow (1990) J. Spacecr. Rockets 28 Rotating
- Tutty et al. (2002) Phys. Fluids 14(2) Non rotating, 平行流近似
非軸対称モードが臨界 Re 数を決定
- Herrade et al. (2008) Phys. Fluids 20 Rotating, 非平行流, PSE

流体力学的な関連研究

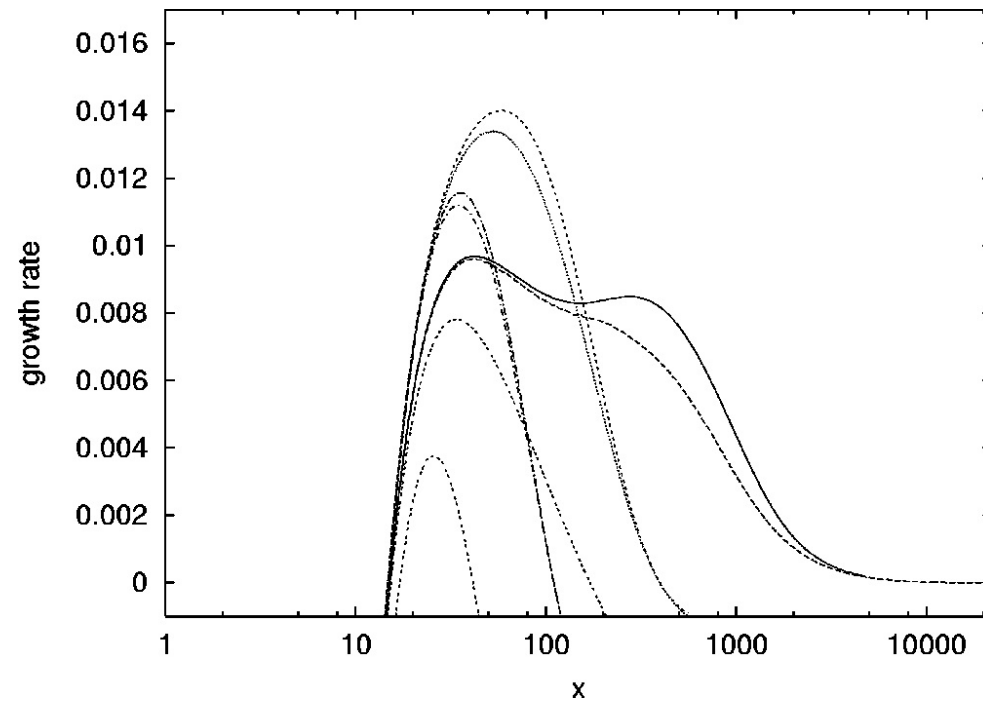
佐藤 明 & 高山 和喜 (1999) 計測と制御 38(4) 『二重露光オーログラフィー干渉写真法』
和弓矢の側面⇒乱流境界層



J. L. Park (2011) 水槽実験
 $Re = 4.5 \times 10^4$ では先端から乱流



Tutty et al. (2002) 不安定モードの成長率



$(Re = 3.0 \times 10^4)$

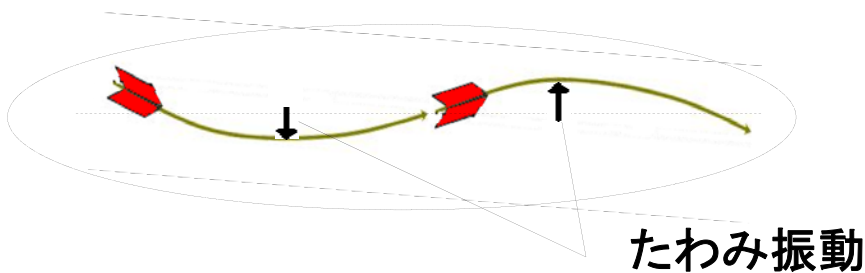
矢の飛翔の複雑さ

実際の飛翔を再現した研究は行われていない。

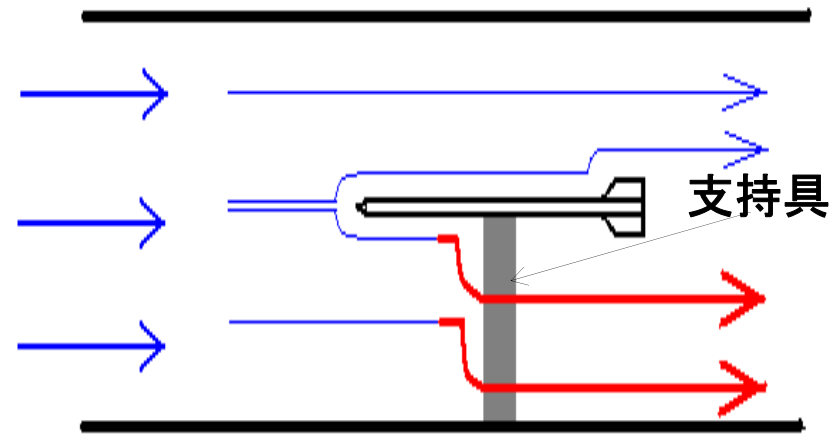
- ・軸回りに回転



- ・軸方向に沿ったたわみ振動

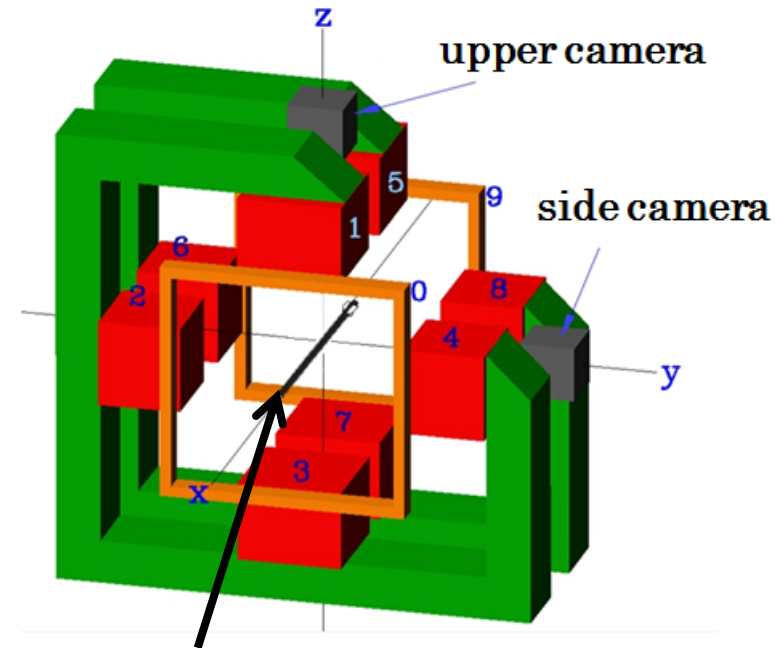
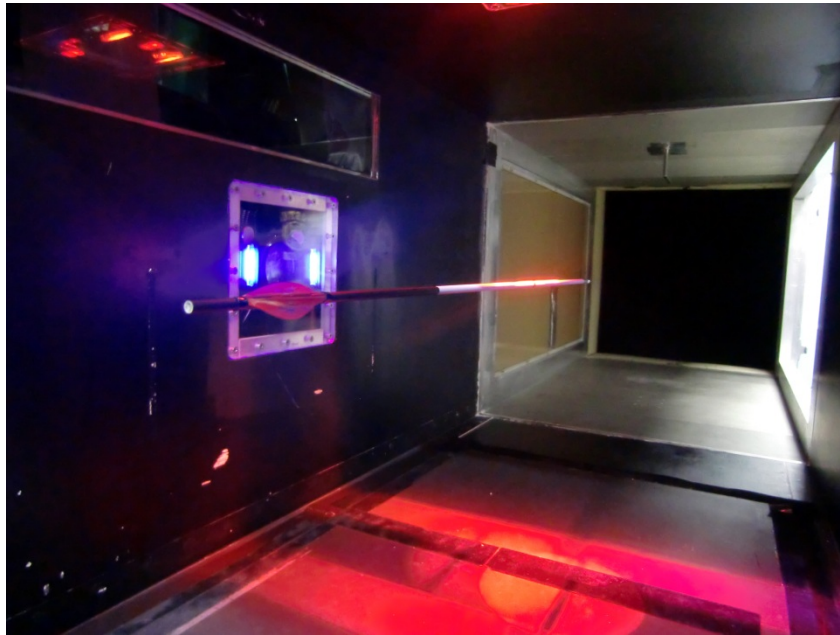


- ・支持具の存在が測定精度を劣化させる



支持具のない2種類の実験方法で矢の飛翔を再現

磁力支持天秤装置(MSBS)を用いた風洞実験



矢軸内部にNd磁石挿入

電磁石の磁力で矢を浮遊 + 姿勢制御

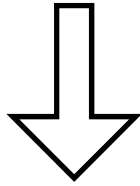


支持干渉のないデータ

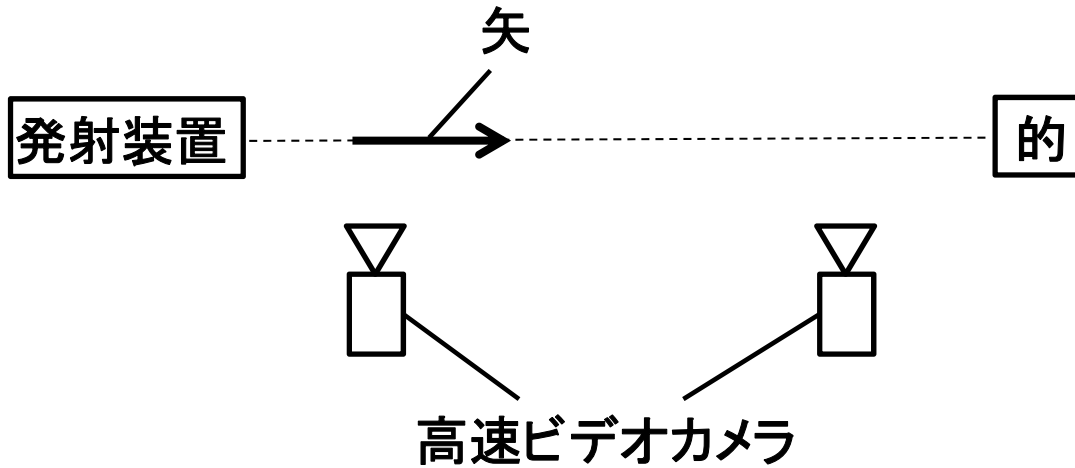
通風時のバランス電流 - 無風時のバランス電流 ➡ 矢に作用する力

圧縮空気による発射

発射圧力自在に変更



幅広いRe数領域での測定可能



映像から速度減衰率を求め、 C_D 算出

算出方法の詳細 鈴木ら (2010) 参照



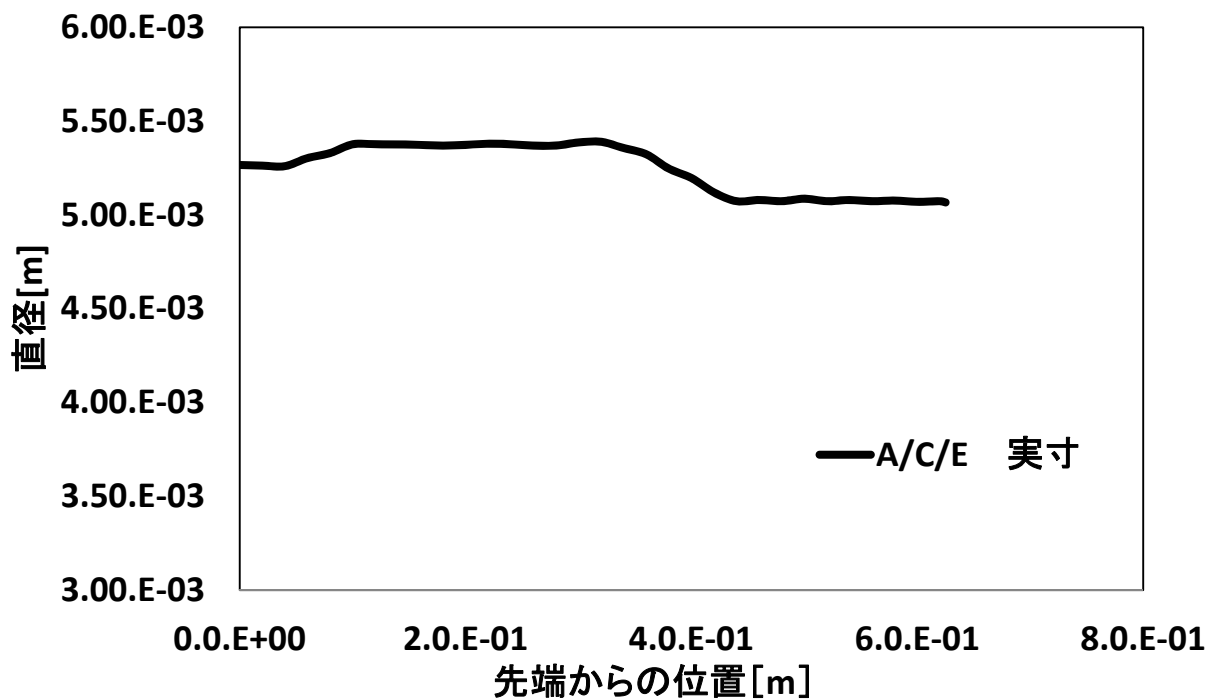
国立スポーツ科学センター(JISS)

シャフト

矢 ⇒ 鏃 + シャフト + 矢羽



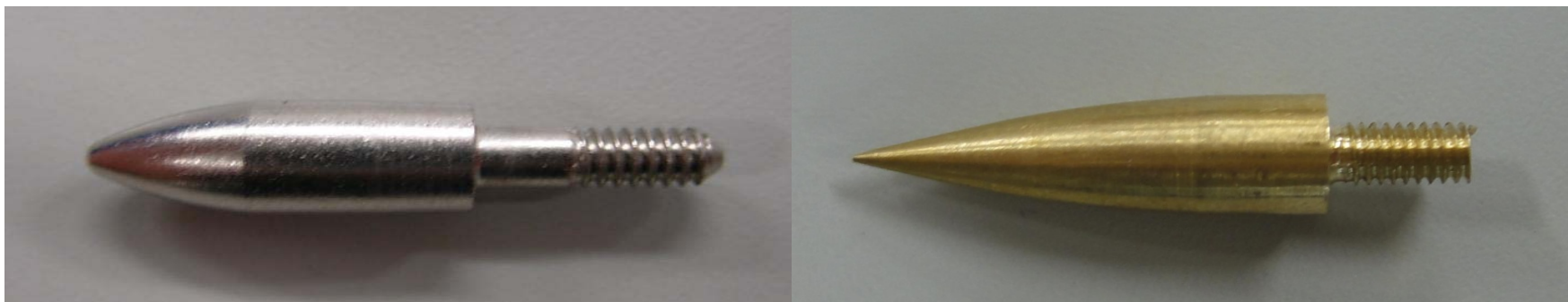
A/C/E (Easton社) ⇒ 樽型形状



全長[m]	6.26×10^{-2}
直径(平均)[m]	5.24×10^{-3}
アスペクト比	1.16×10^2

鏃と矢羽

鏃



椎型

流線形

矢羽



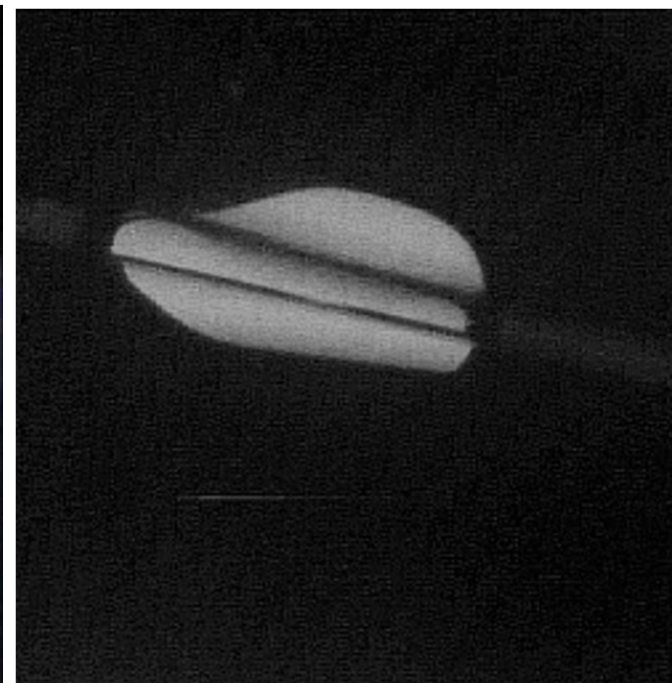
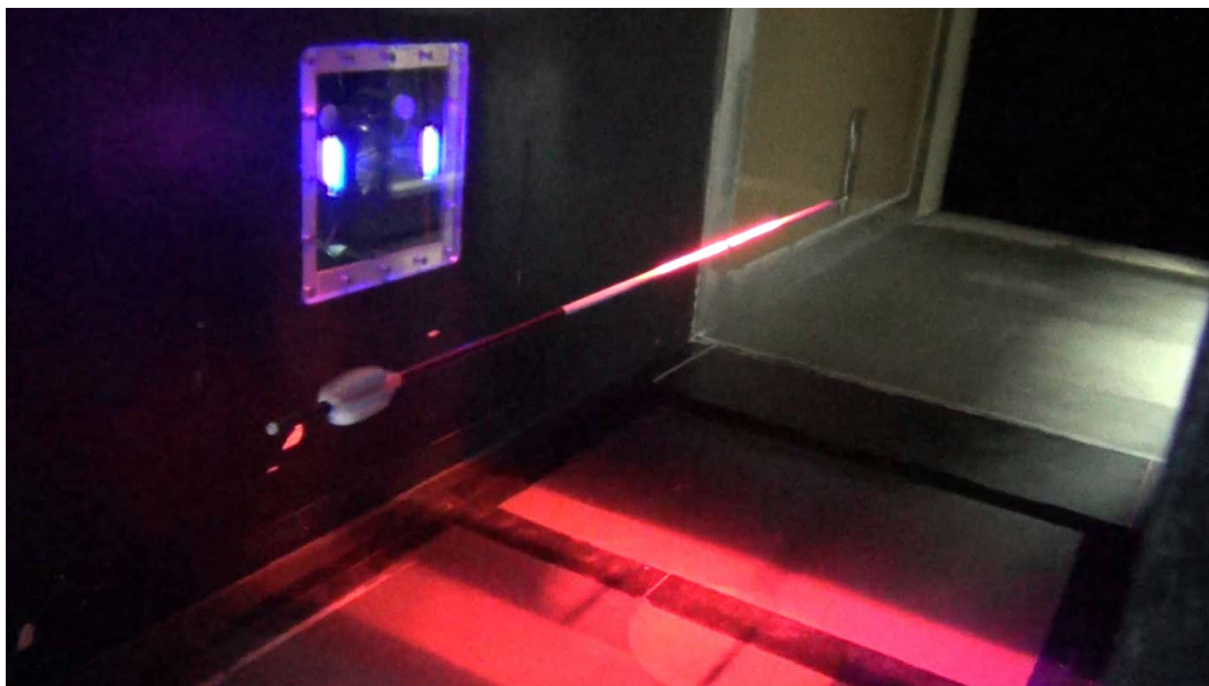
	面積[m ²]
SPIN	3.96×10^{-4}
GAS	3.61×10^{-4}

上 : Spin-Wing-Vane 下 : GASPRO

風洞実験における矢羽の回転

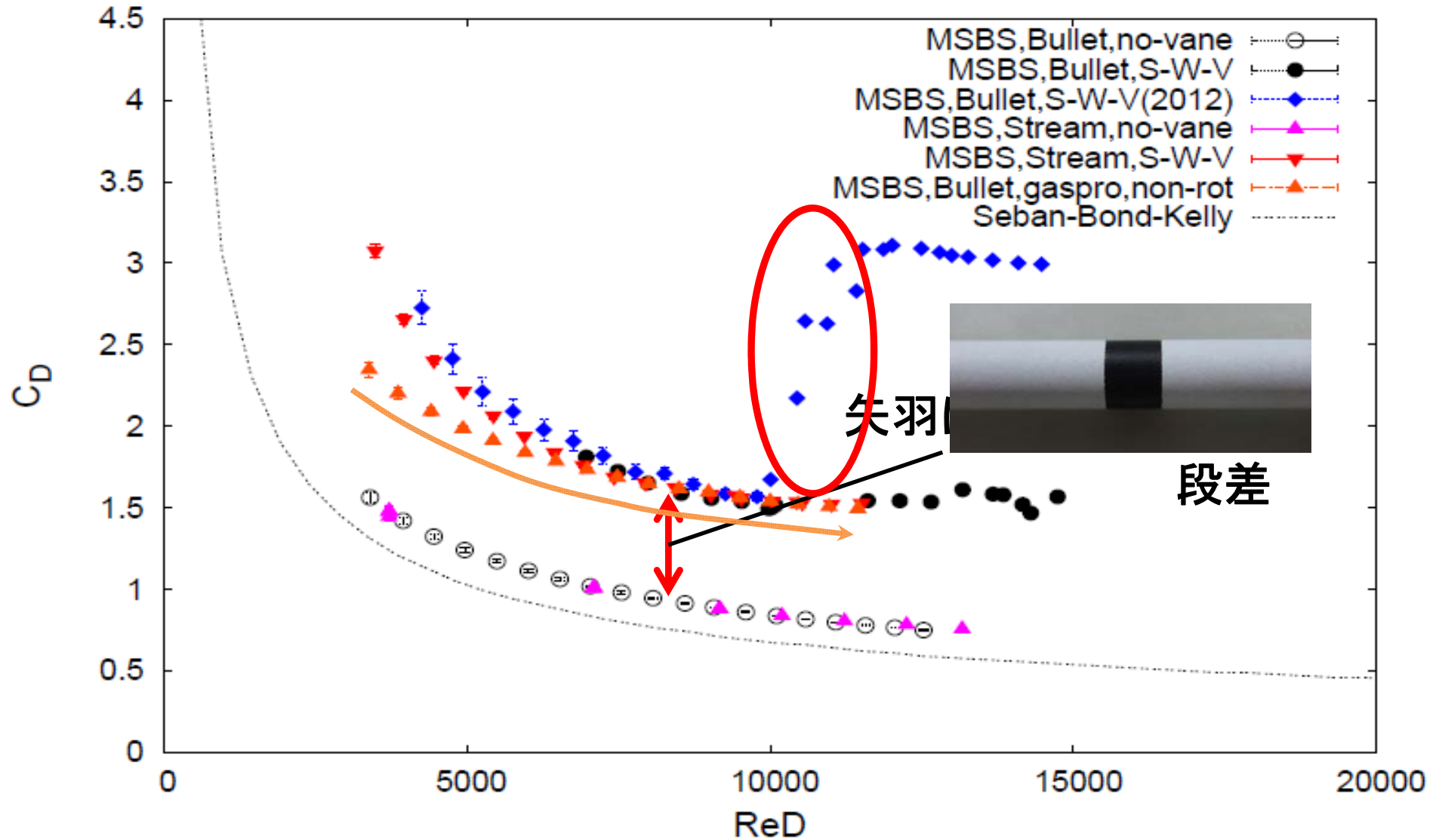


SPIN-WING-VANE

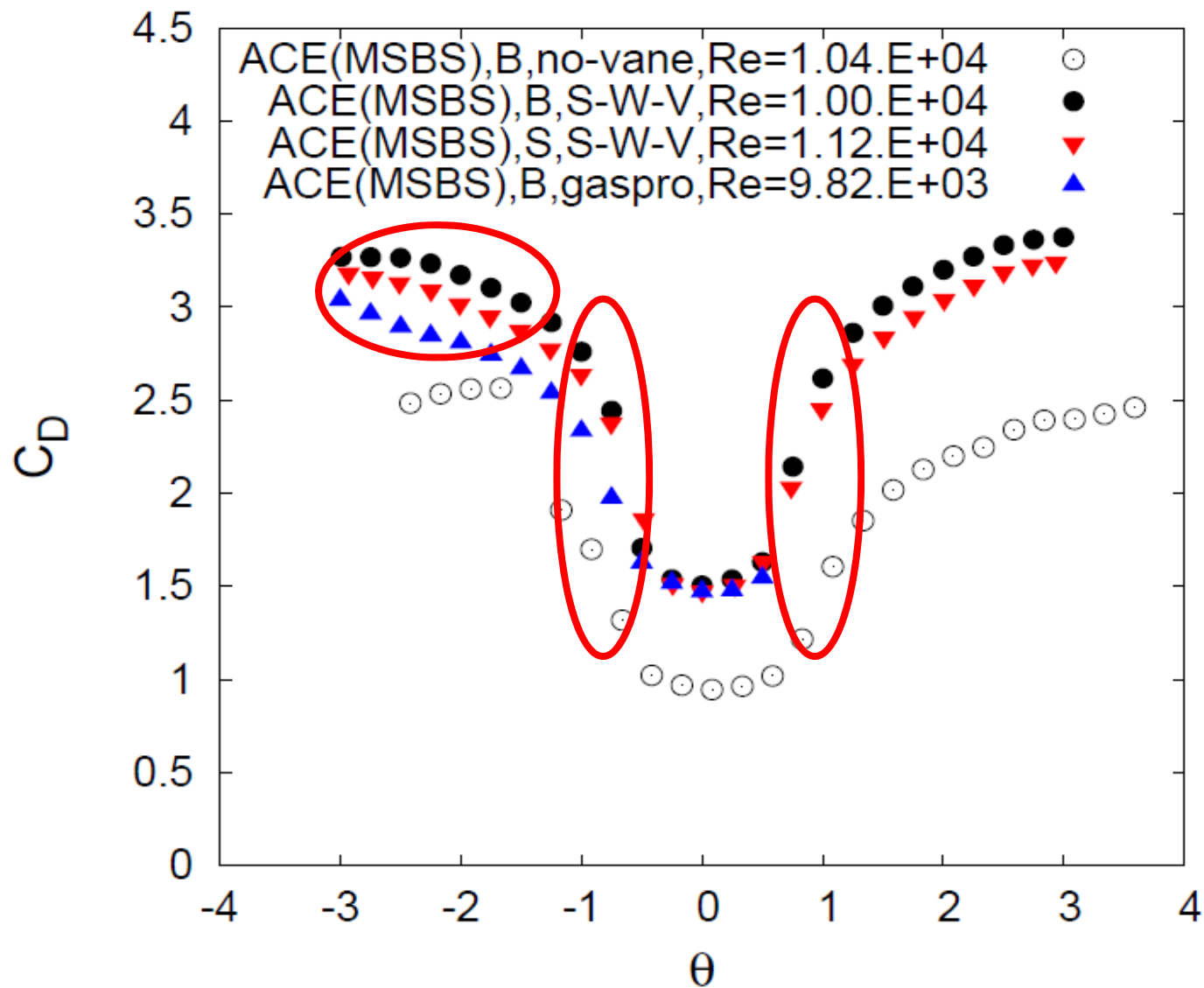


GAS PROは回転しなかった

風洞実験結果 C_D - Re 数 (代表長さ: 直径)

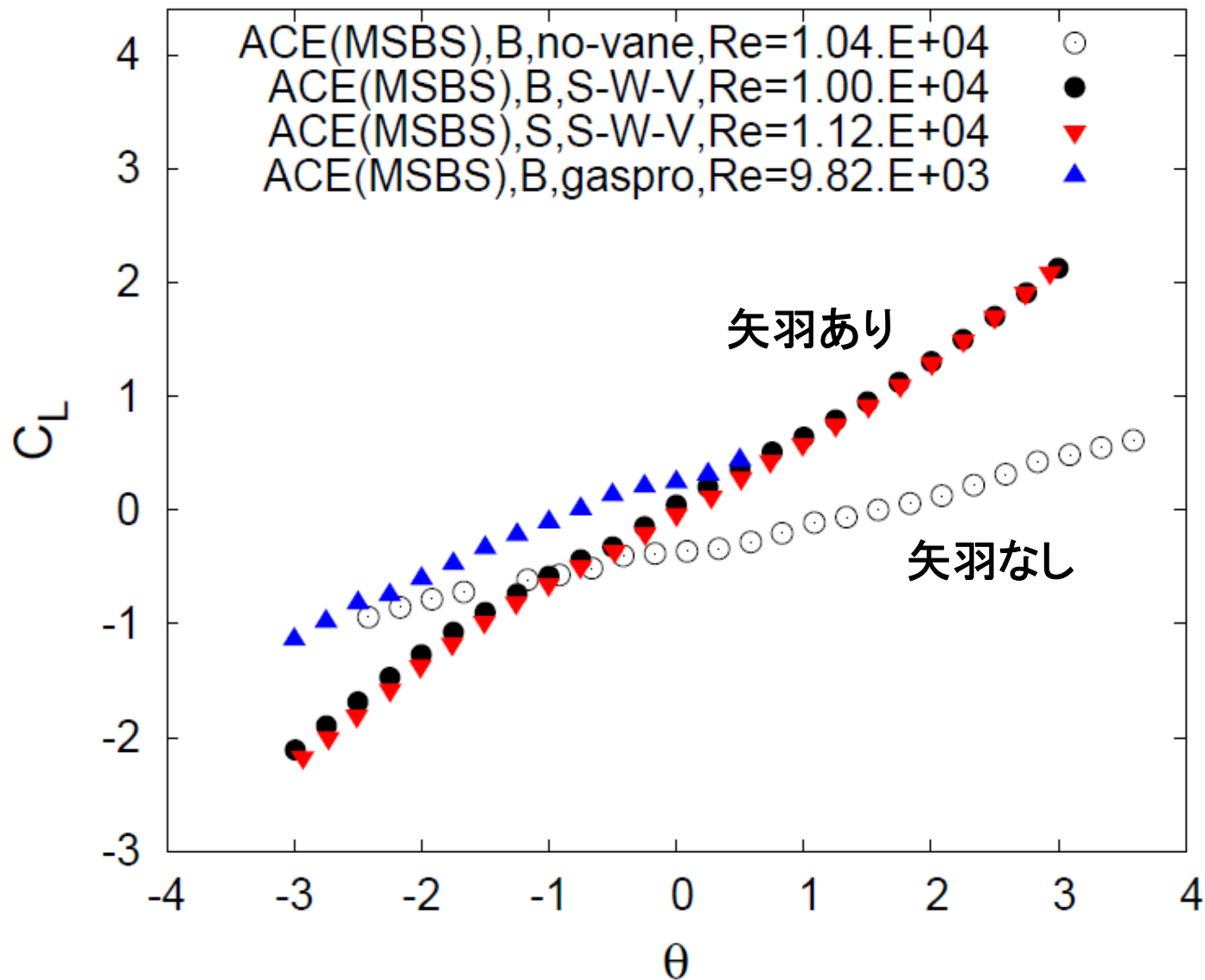


風洞実験結果 迎角-抗力係数 C_D



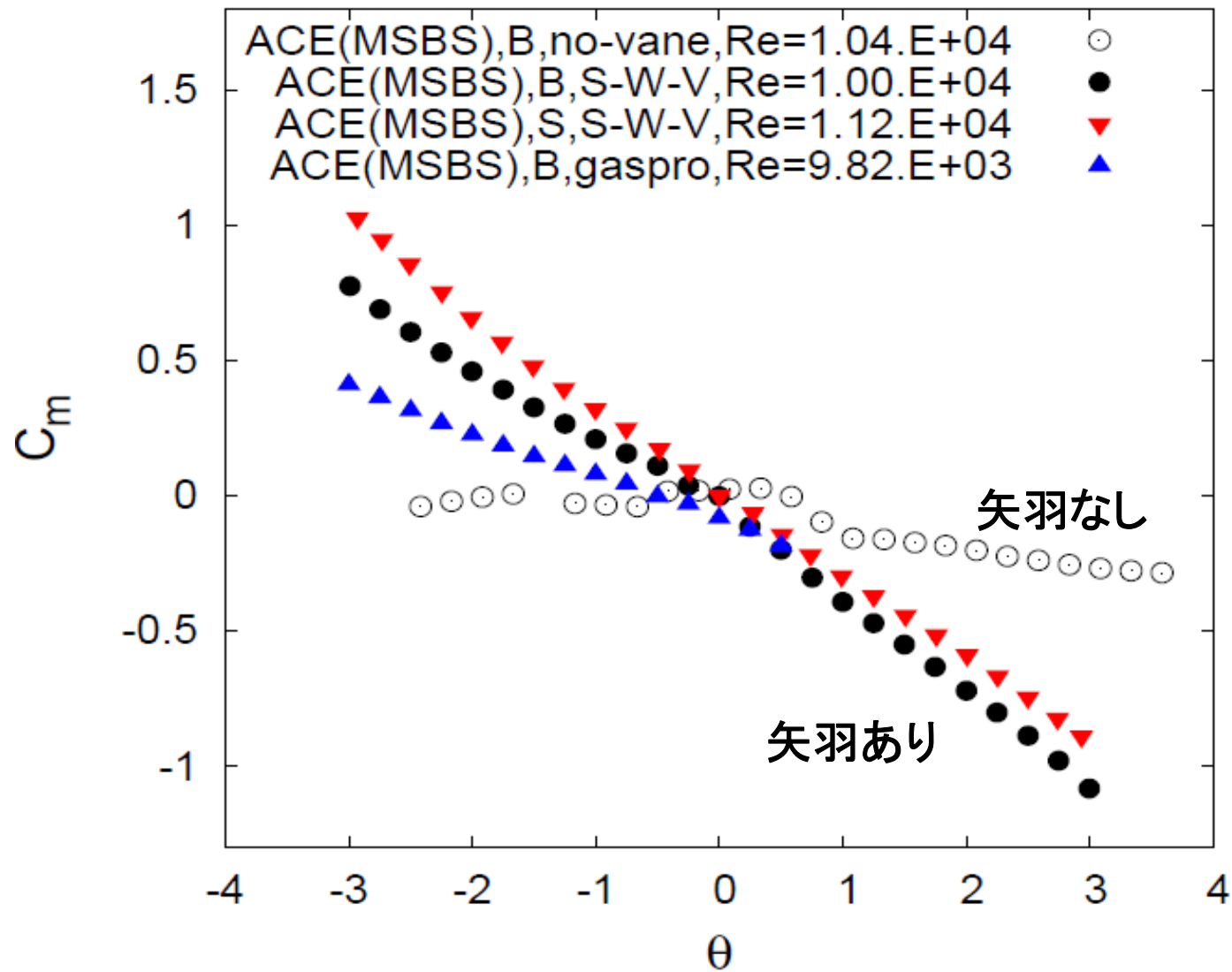
矢羽の有無に関わらず 迎角= $\pm 0.5^\circ$ で境界層は乱流遷移？

風洞実験結果 迎角-揚力係数 C_L



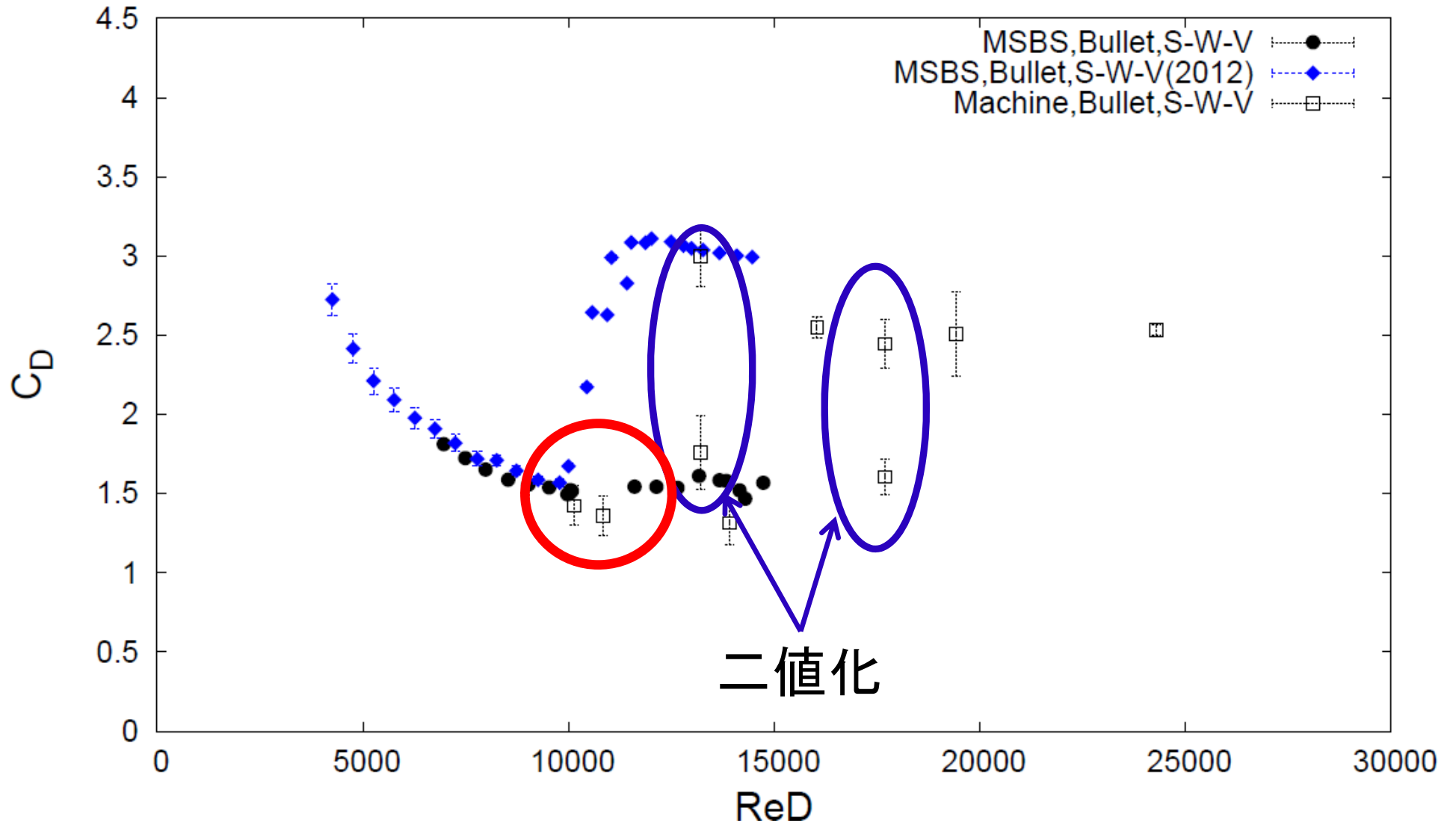
揚力は矢羽の影響大

風洞実験結果 迎角-縦揺れモーメント係数 C_m

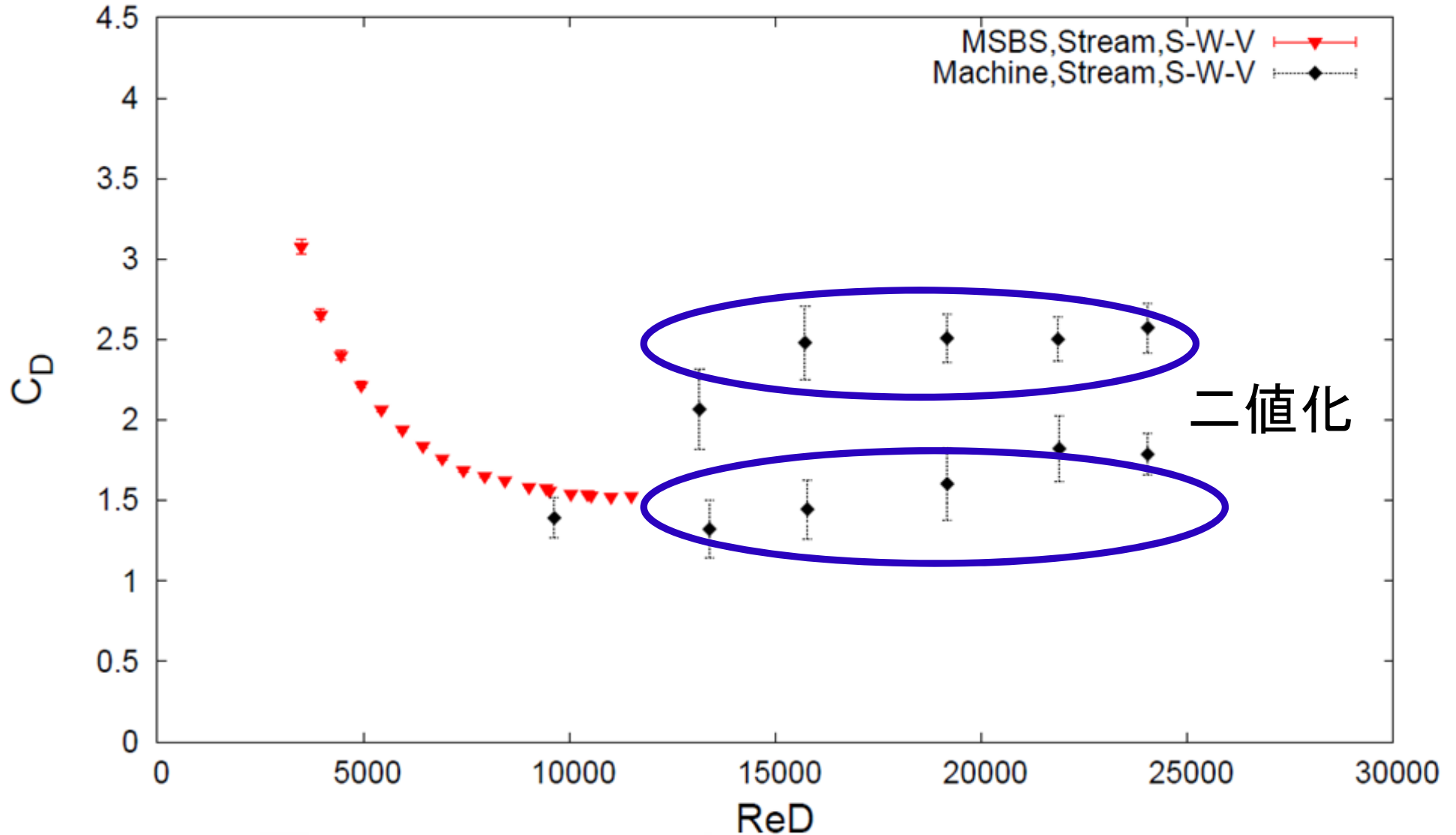


矢羽による姿勢安定性の向上

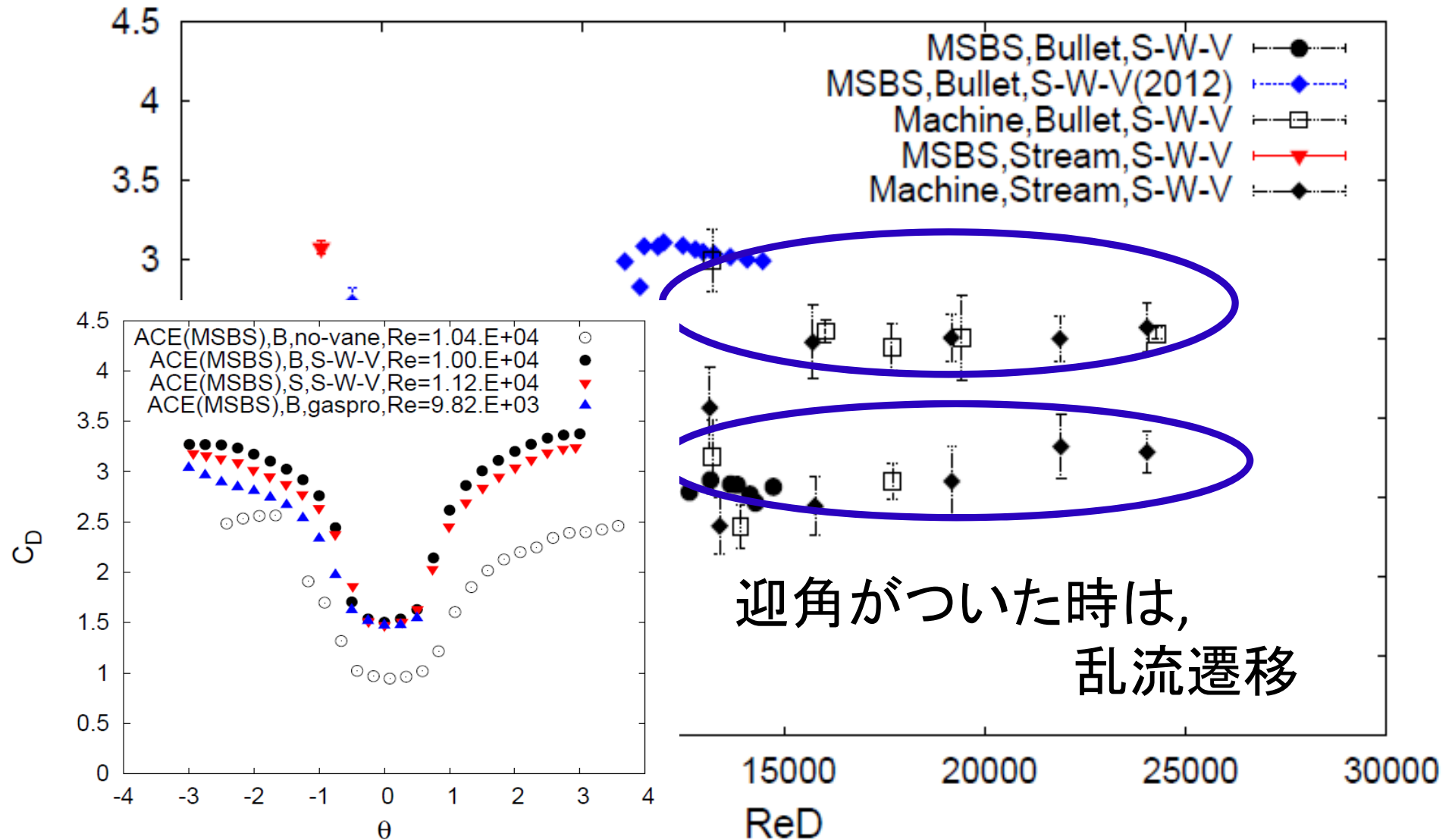
飛翔実験との比較 CD-Re数 (鏃: 椎型)



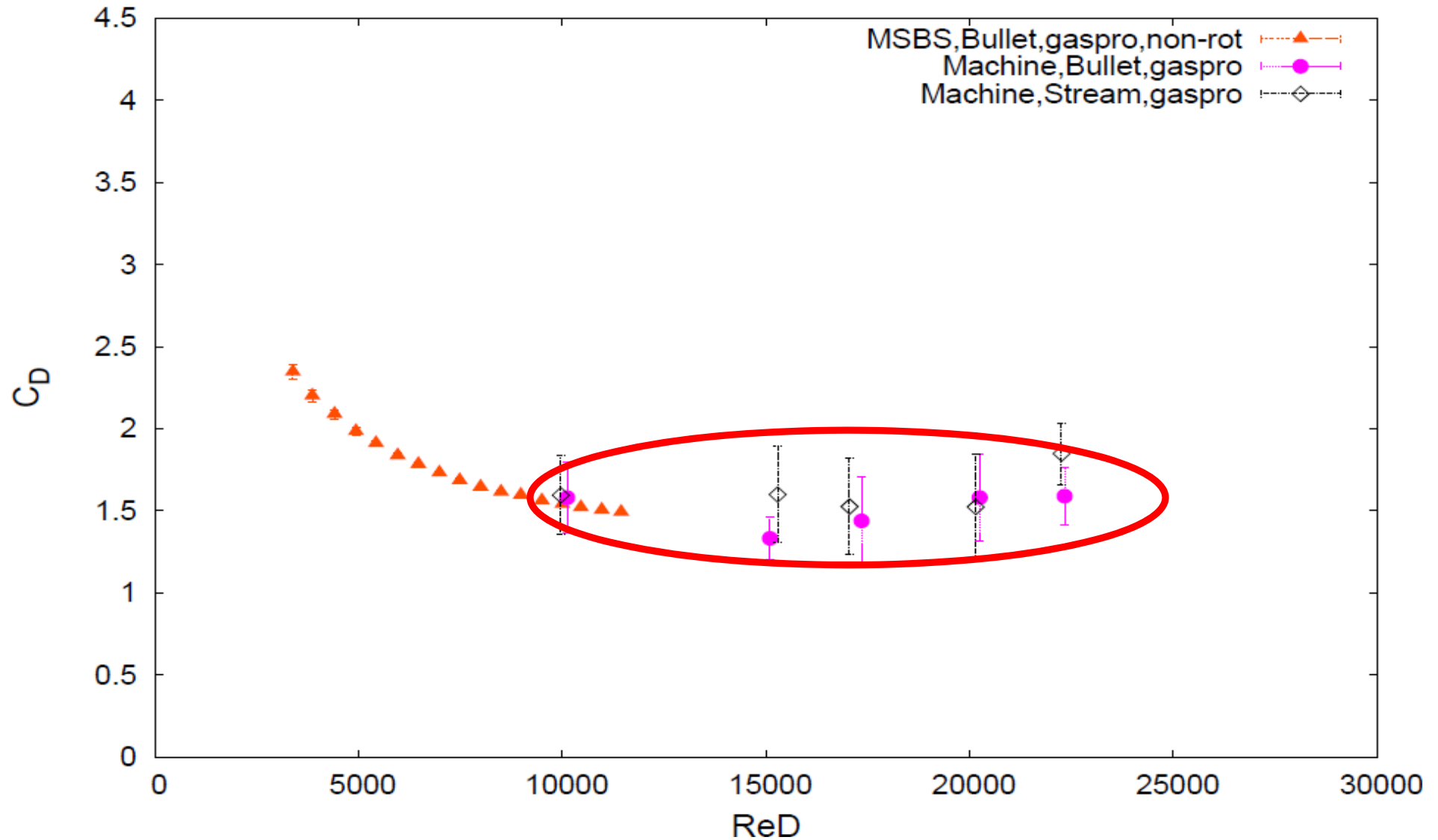
飛翔実験との比較 C_D - Re_D 数 (鏟: 流線形)



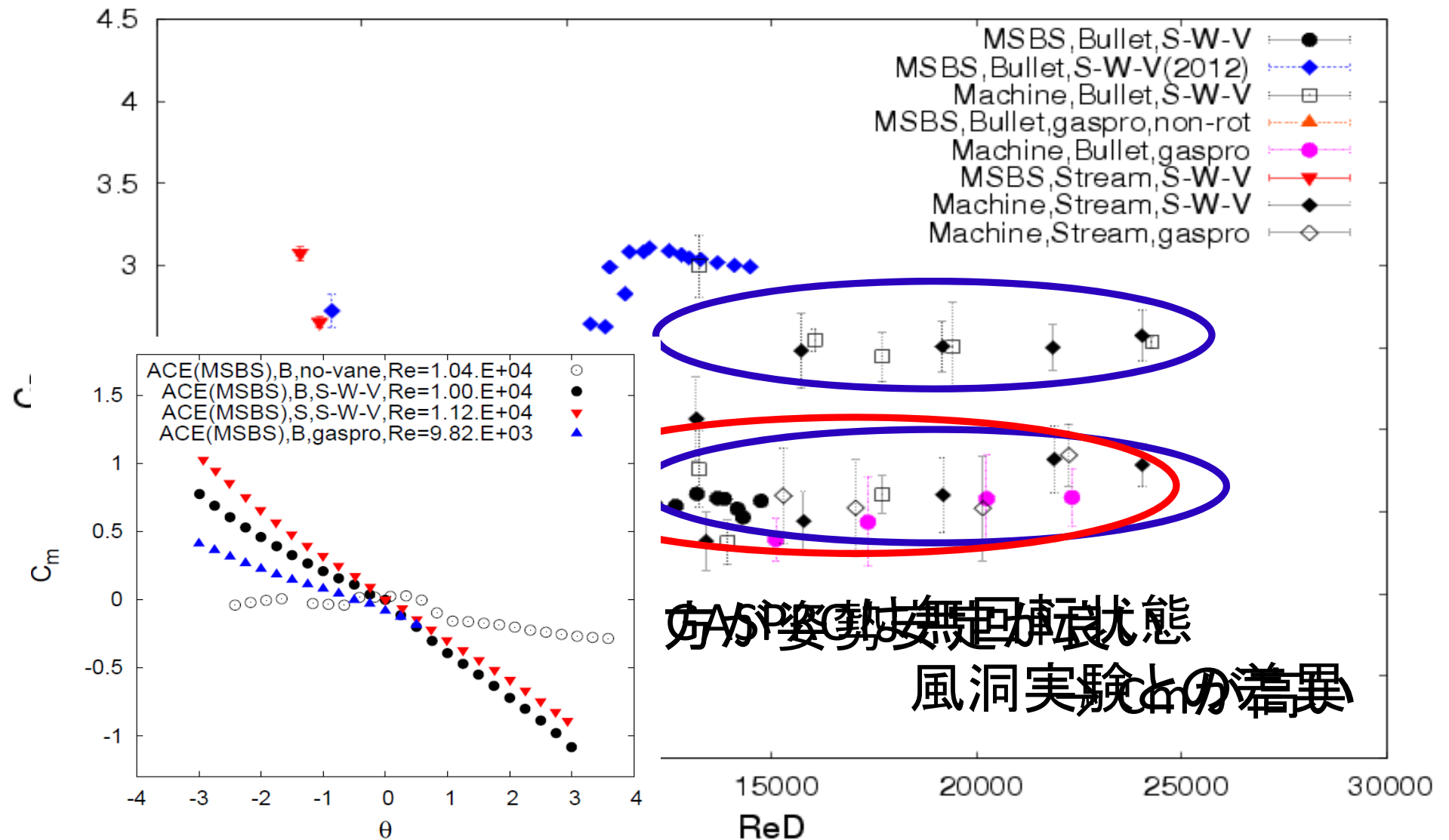
飛行実験との比較 CD-Re数



飛翔実験との比較 CD-Re数



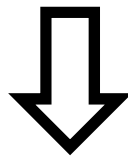
飛行実験との比較 CD-Re数



たわみ振動を伴う飛行実験

ロボットを製作

競技者が行う一連の動作を
再現



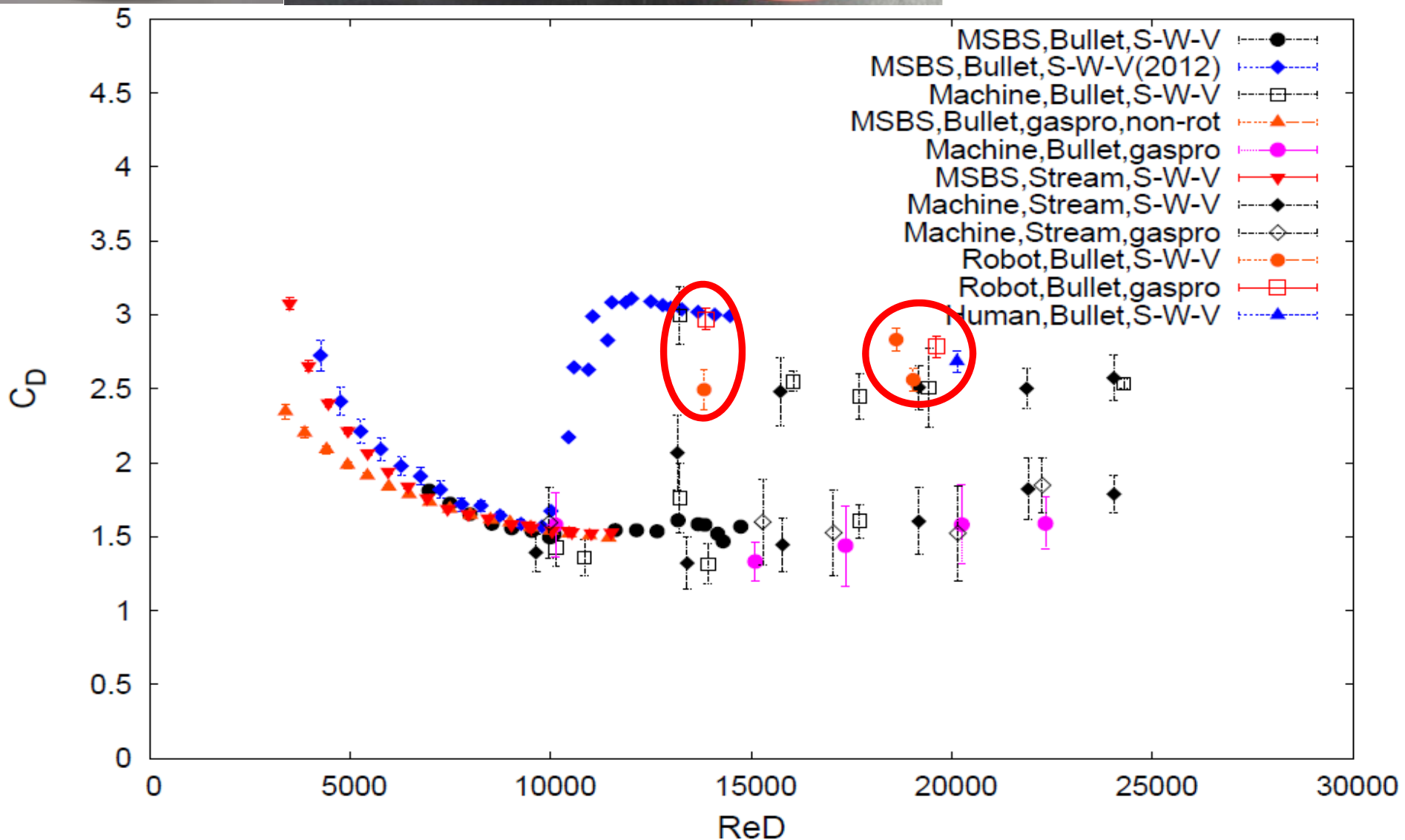
たわみ振動する
矢の発射



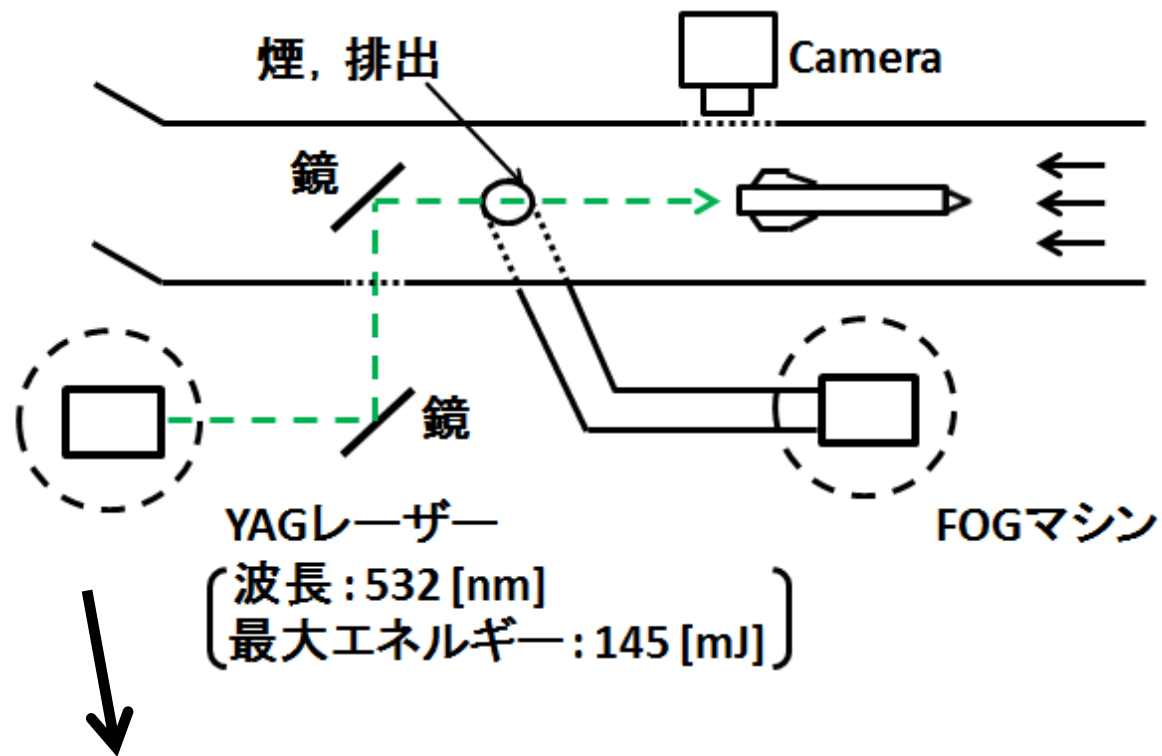
実際の競技者



たわみ振動を伴う飛翔実験



可視化実験



- ・固定支持
 - ・矢の回転
- 後流への影響

可視化実験 (支持具の影響)

支持具有り ($Re = 0.722 \times 10^3$, $v = 2.13$ [m/s])



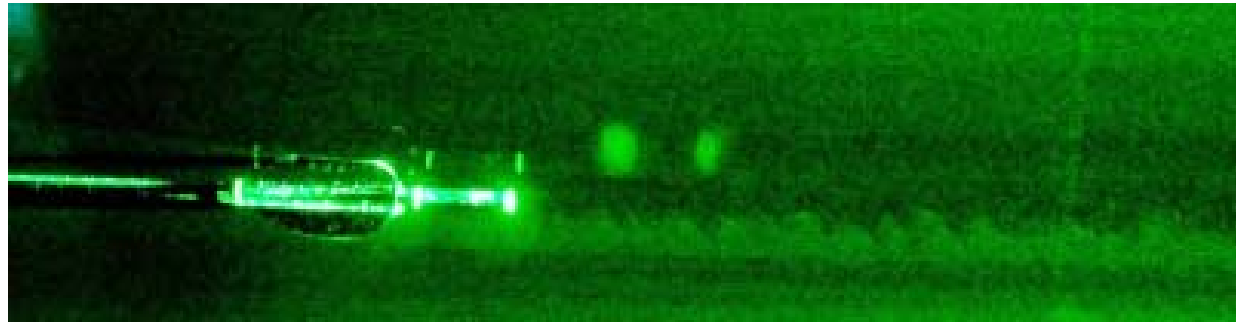
支持具無し ($Re = 0.716 \times 10^3$, $v = 2.14$ [m/s])



支持具の存在で, 後流の乱れ

可視化実験 (回転の影響)

回転無し ($Re = 4.58 \times 10^3$, $v = 13.6$ [m/s])



渦間隔

13.23 mm

C_D 値 : 2.52

回転有り ($Re = 4.57 \times 10^3$, $v = 13.6$ [m/s])



渦間隔

11.10 mm

C_D 値 : 3.14

矢の回転



渦間隔の減少
抗力係数の増加

結言

風洞実験と飛行実験には整合性がある

$Re < 1.0 \times 10^4$: 境界層は層流

$Re > 1.0 \times 10^4$: 遷移領域

- ・粗度(マーカ一段差)による乱流化
- ・鋸形状による乱流化
- ・姿勢乱れによる乱流化
 - GAS PROの方が姿勢安定効果が高い

MSBS風洞への期待

■非定常空力特性の測定

- 位置・姿勢の計測と制御
- 6軸加速度センサーの併用

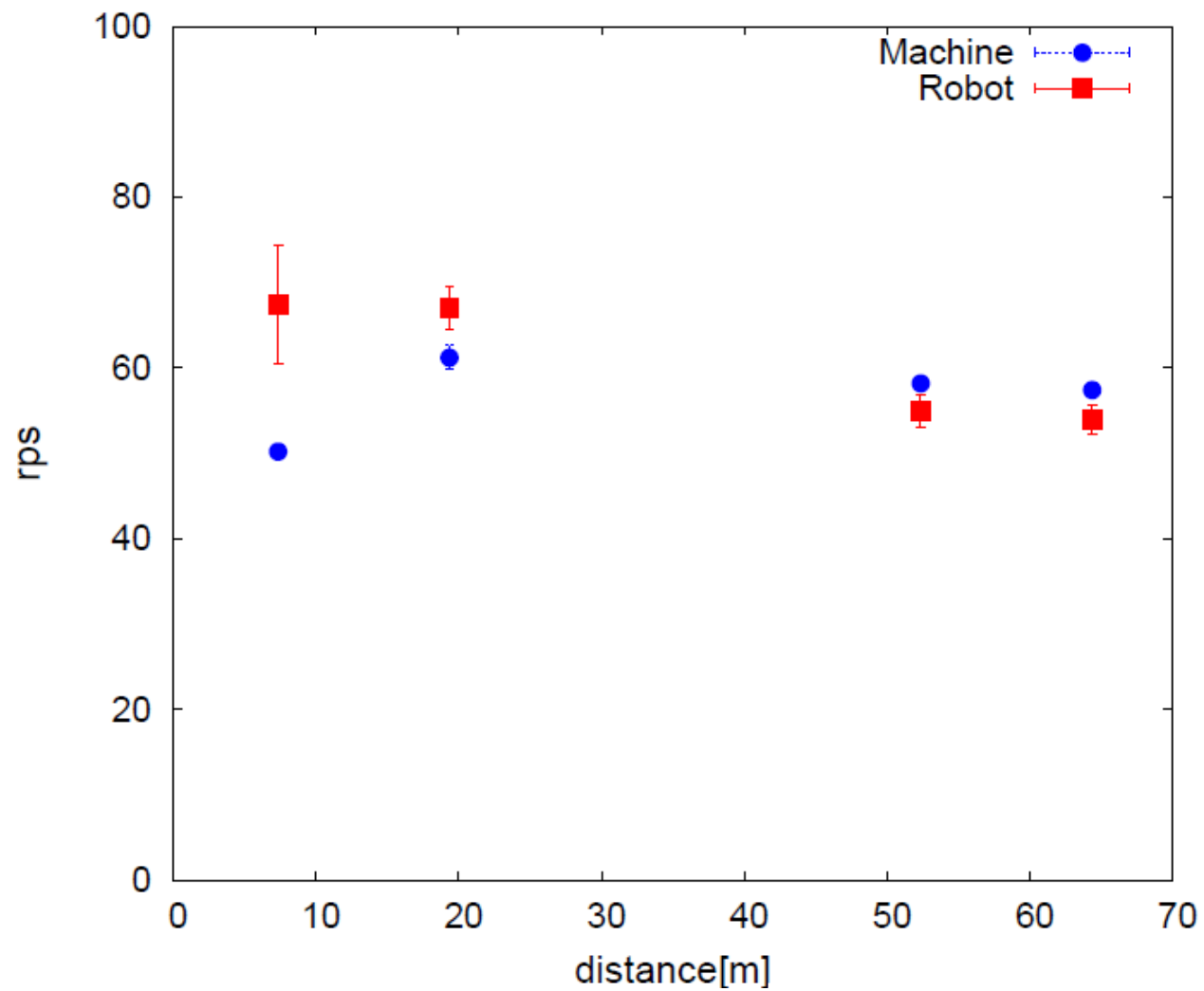
■流れ場PIV計測

ご清聴頂き有難うございました

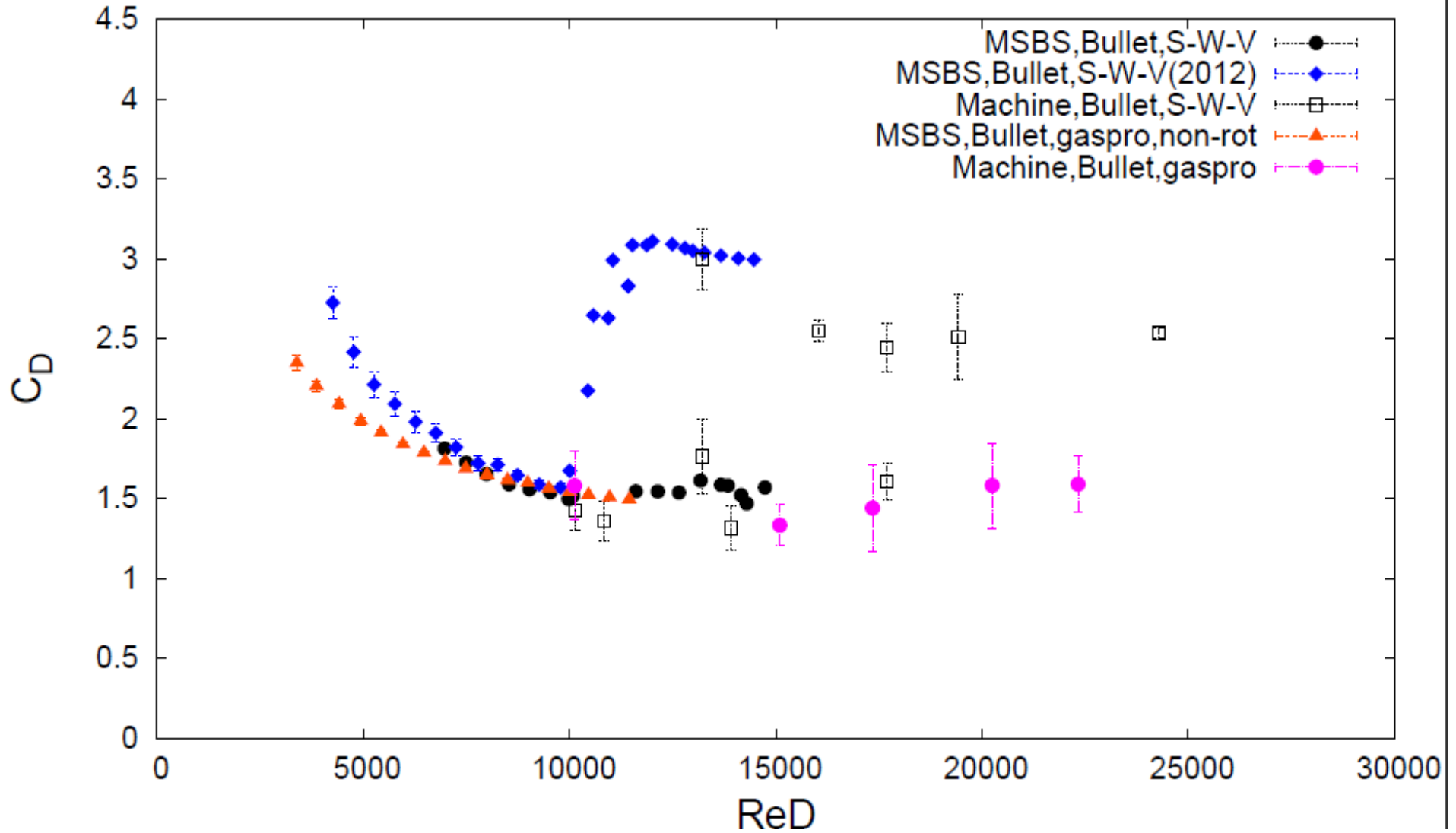
謝辞:

実験施設、道具をご提供して頂いた
宇宙航空研究開発機構(JAXA),
国立スポーツ科学センター(JISS)
に深く感謝いたします

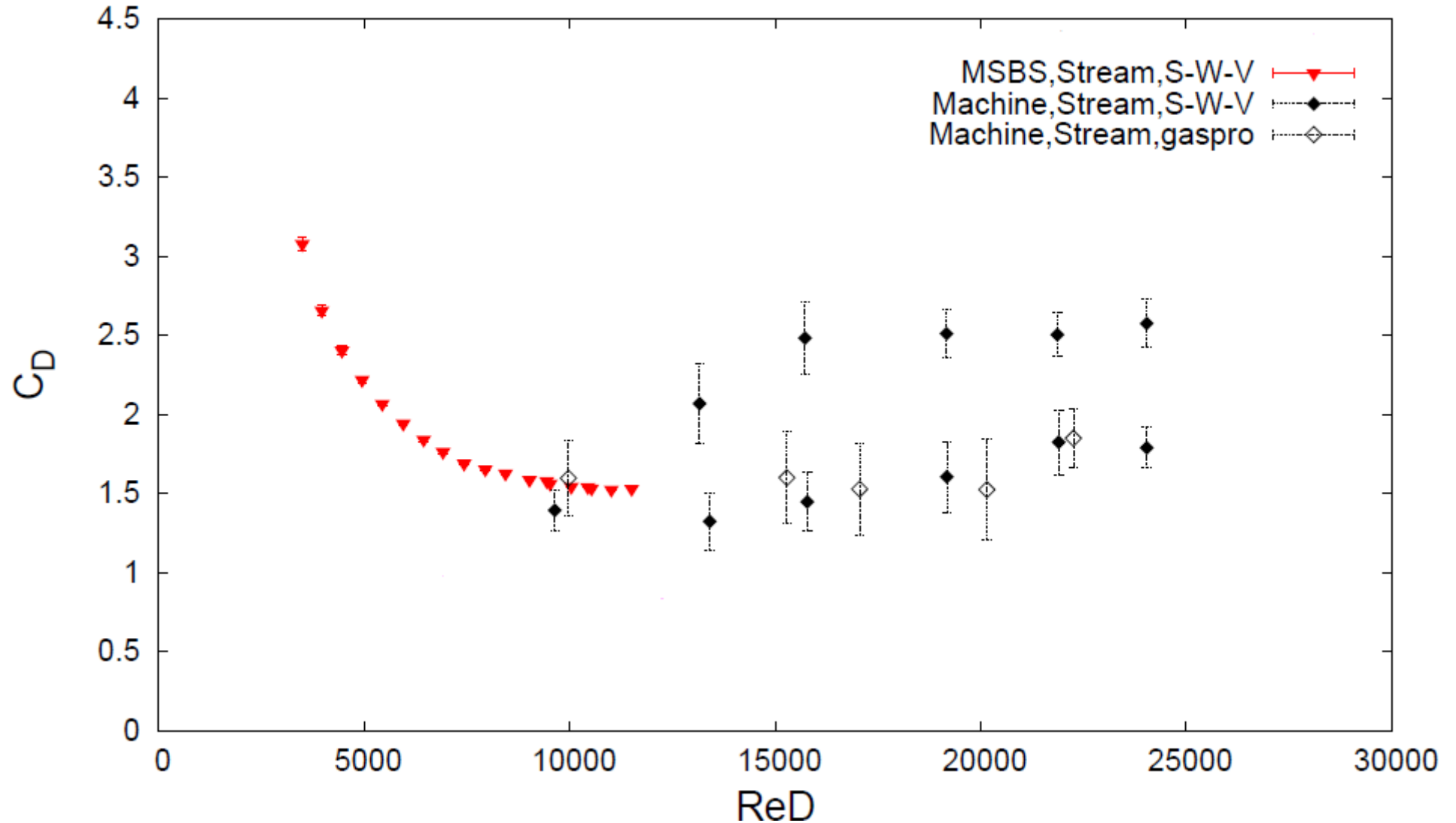
回転数と距離

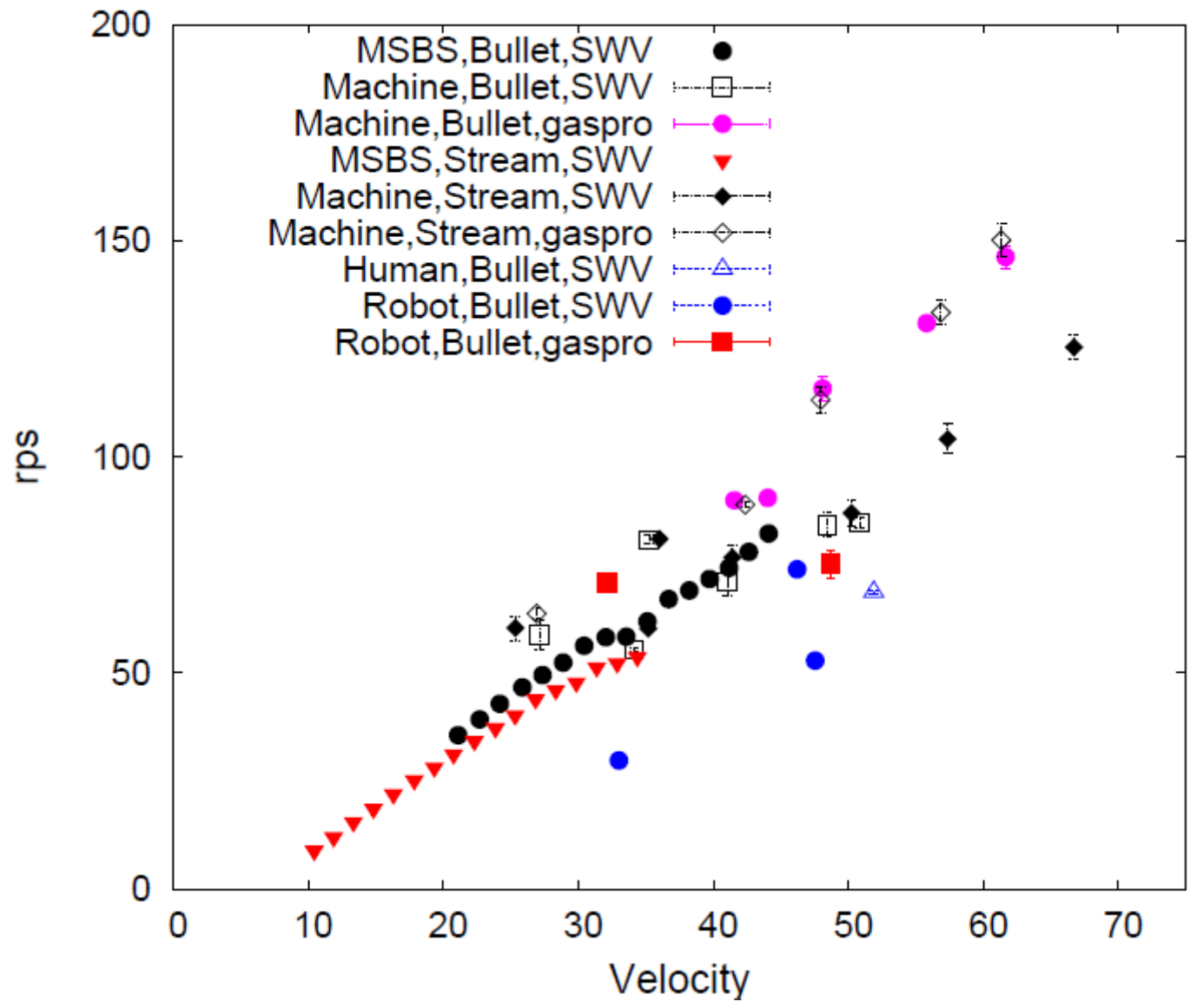


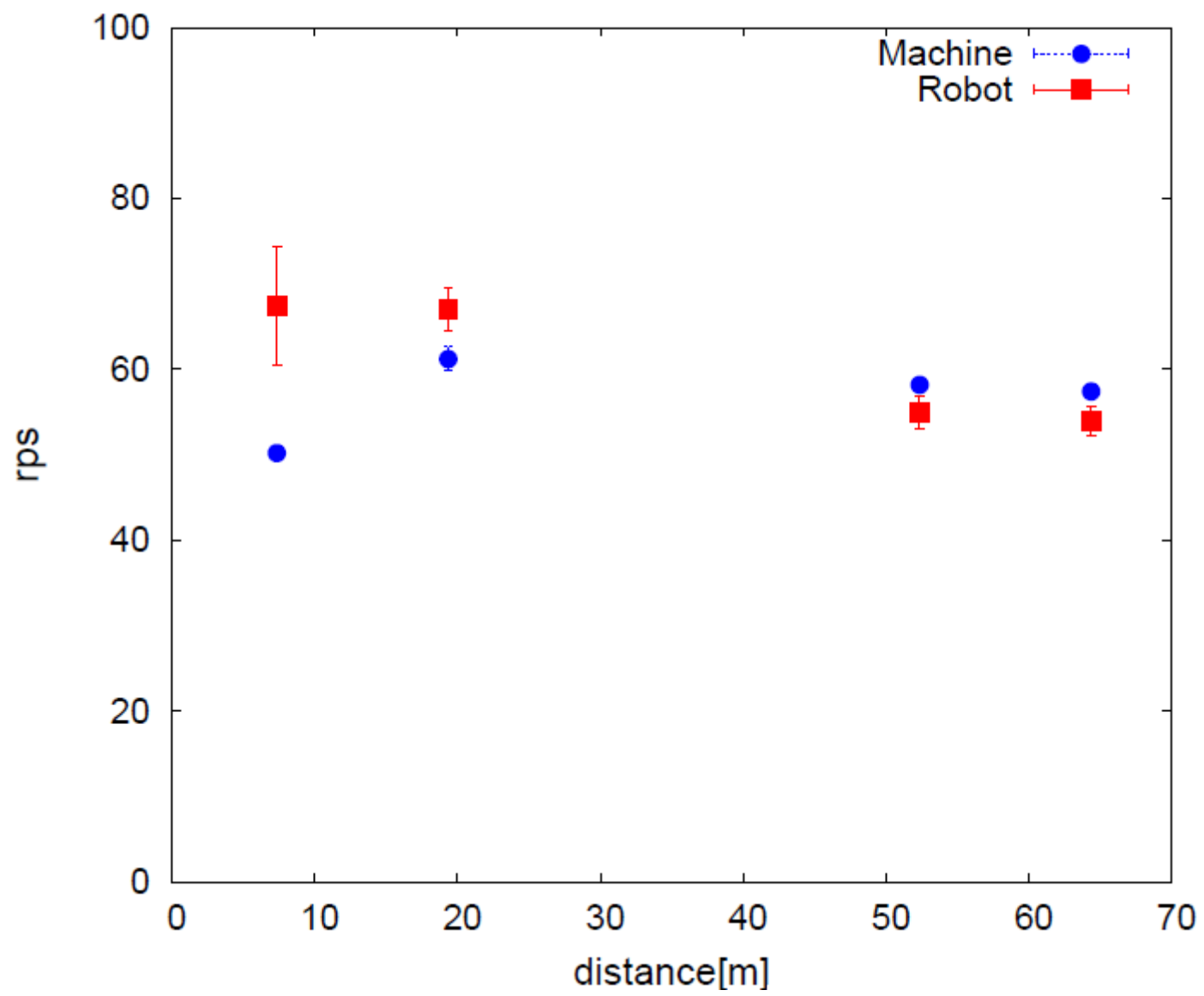
飛翔実験との比較 C_D - Re_D 数 (鏃: 椎型)

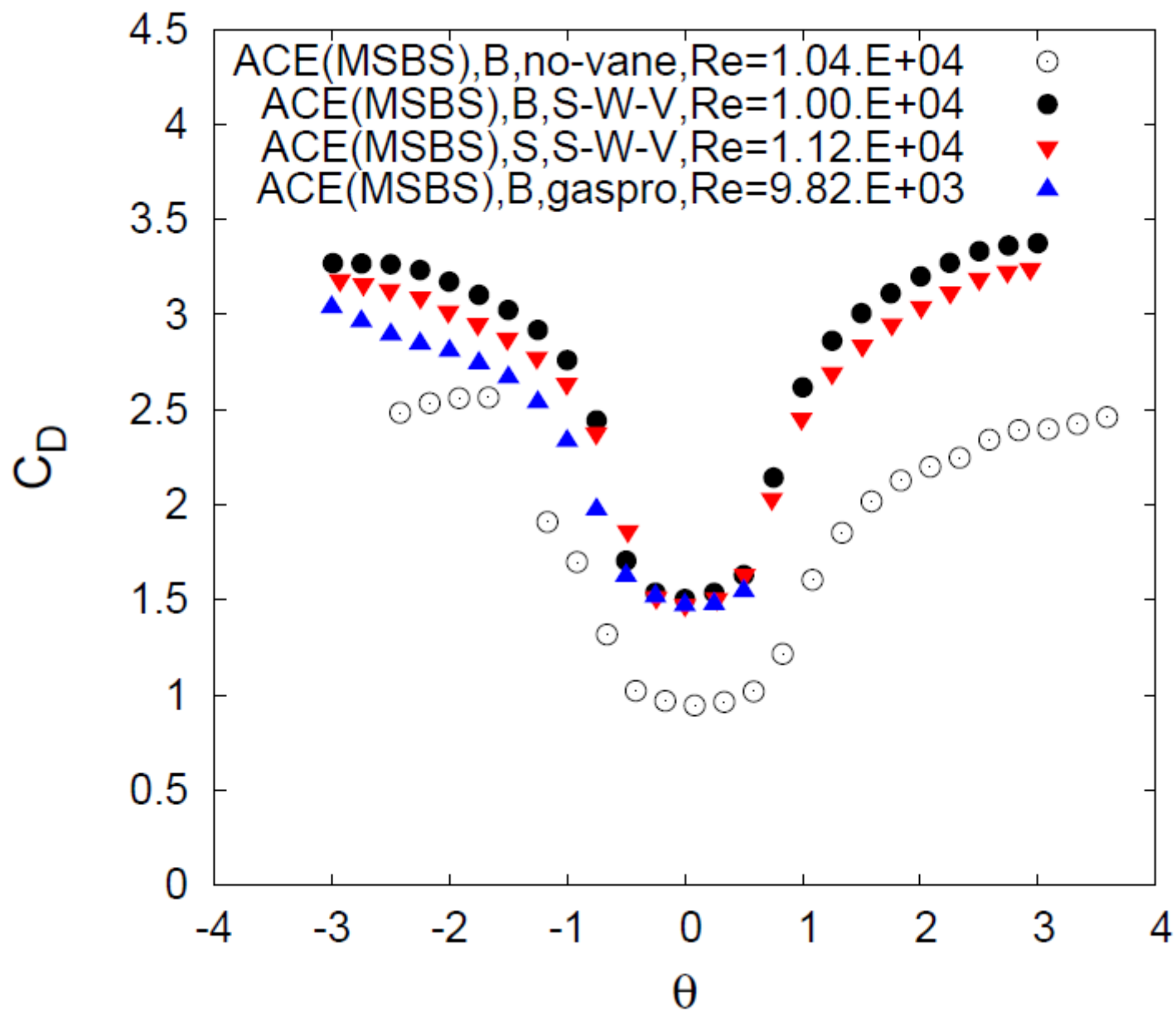


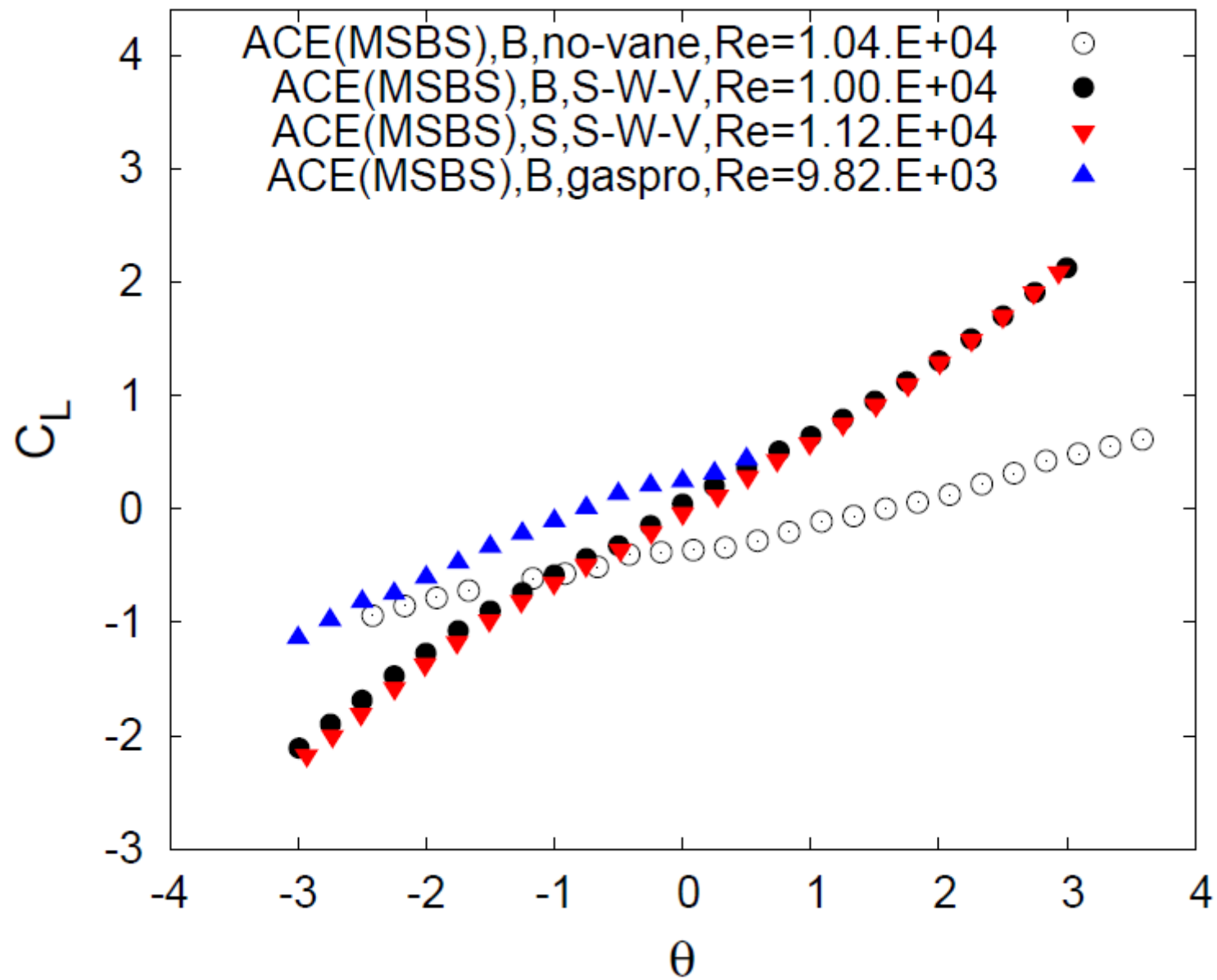
飛翔実験との比較 C_D - Re 数 (鏃: 流線形)

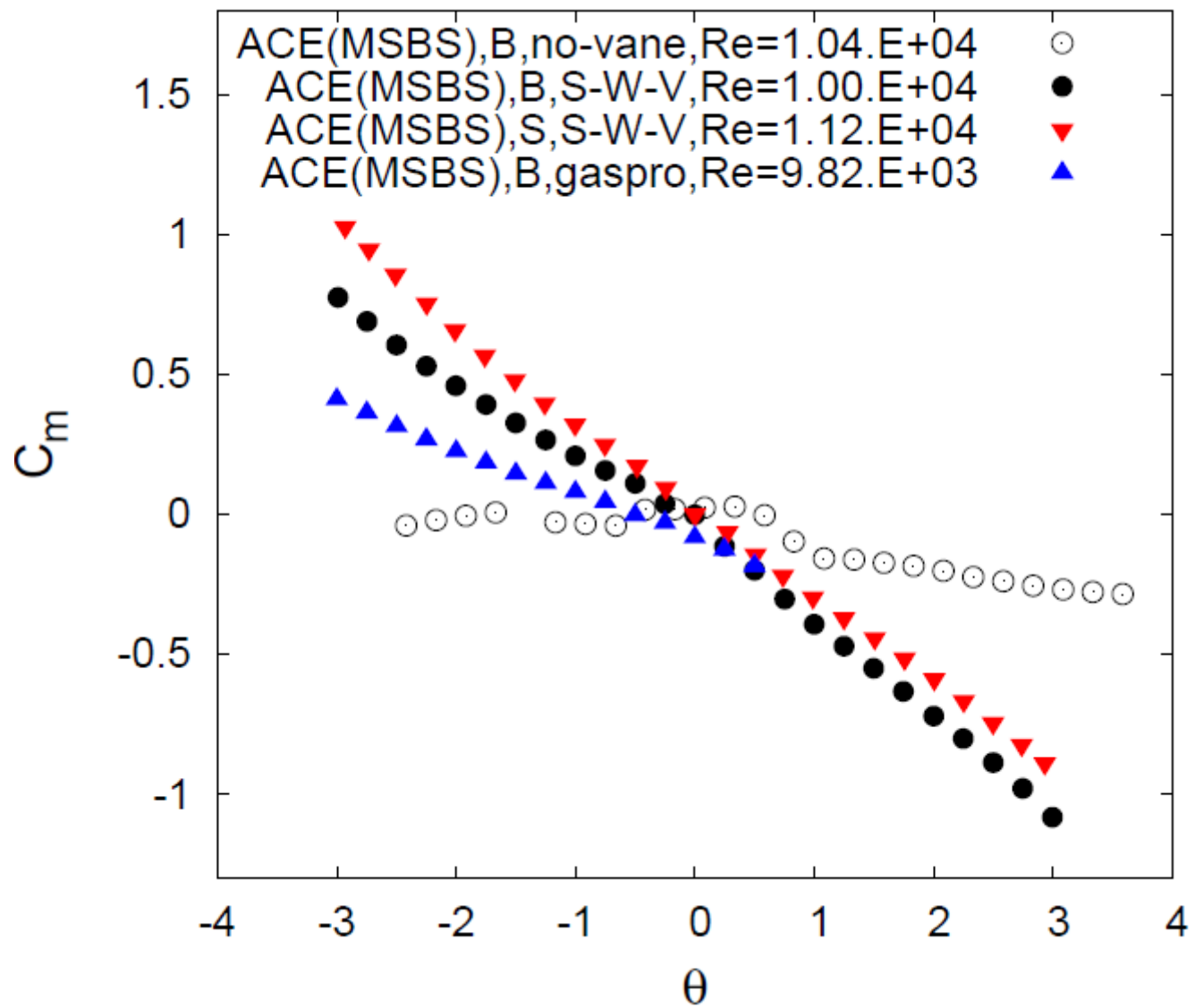












緒言

矢の最適な空力形状 → アーチェリー競技における
競技力の向上

科学技術の発展で発射性能は向上 → 得点UP

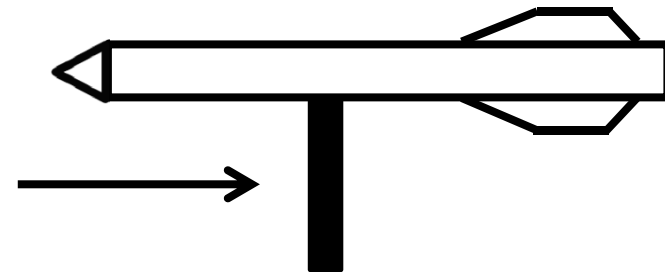
飛翔中の矢 → 回転運動, たわみ振動

たわみ振動がないとして……

風洞実験



固定支持部の影響が大きい



矢に対しては, 固定支持がない実験で測定

結言

A/C/E矢の風洞実験 (SPIN-WING-VANE の場合)

{ 鏃形状に関わらず境界層は層流
矢羽・・・揚力 + 姿勢安定効果

A/C/E矢の飛翔実験 (SPIN-WING-VANE の場合)

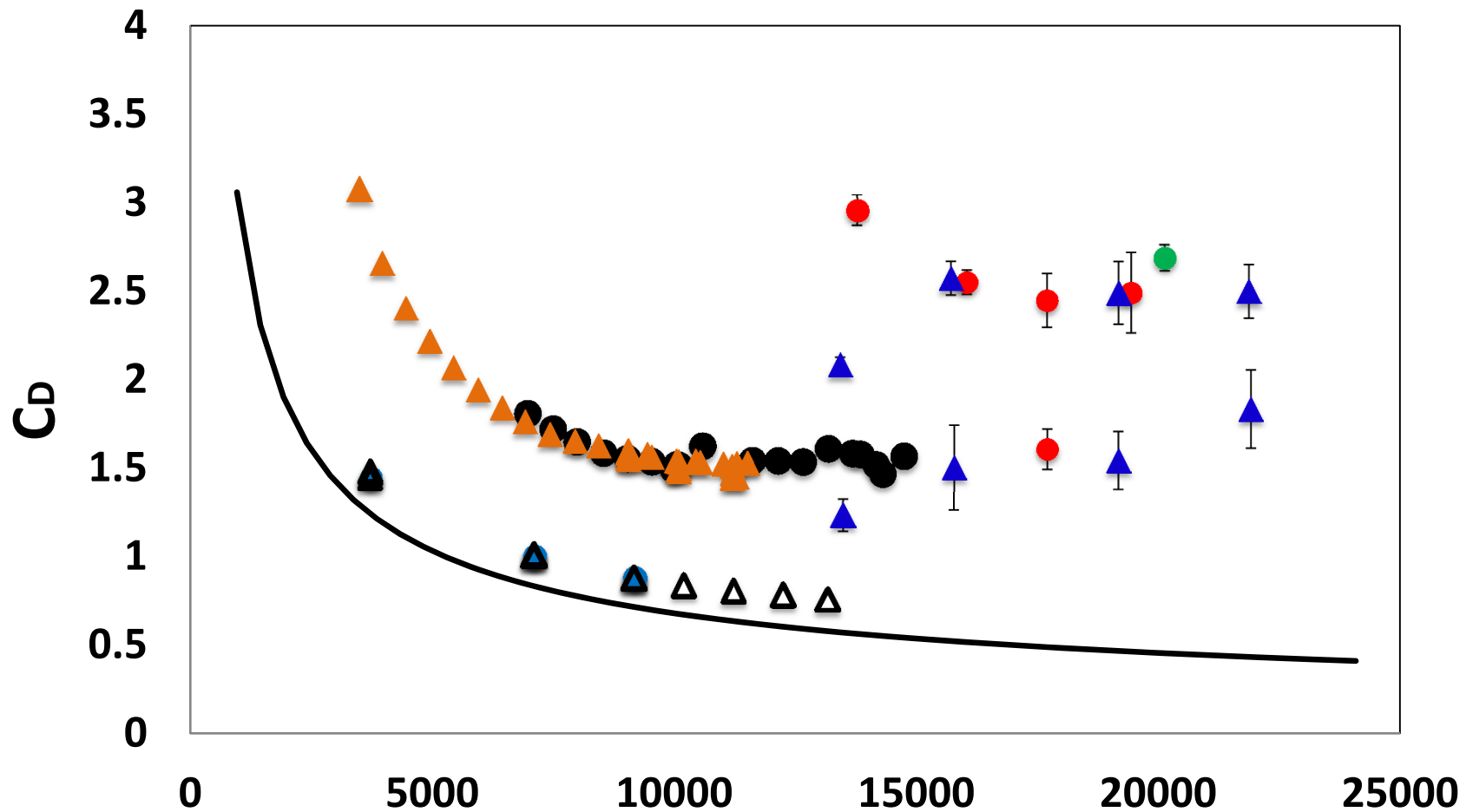
{ 椎型・・・境界層は**ほぼ乱流** (ふた山分布も)
流線形・・・姿勢 $\left\{ \begin{array}{l} \text{安定} \cdots \text{境界層は層流} \\ \text{不安定} \cdots \text{境界層は乱流} \end{array} \right.$
たわみ振動・・・境界層を**乱流化**する

A/C/E矢の飛翔実験 (GASPRO の場合)

鏃形状に関わらず境界層は層流

→ SPIN-WING-VANEよりも姿勢安定効果が高い

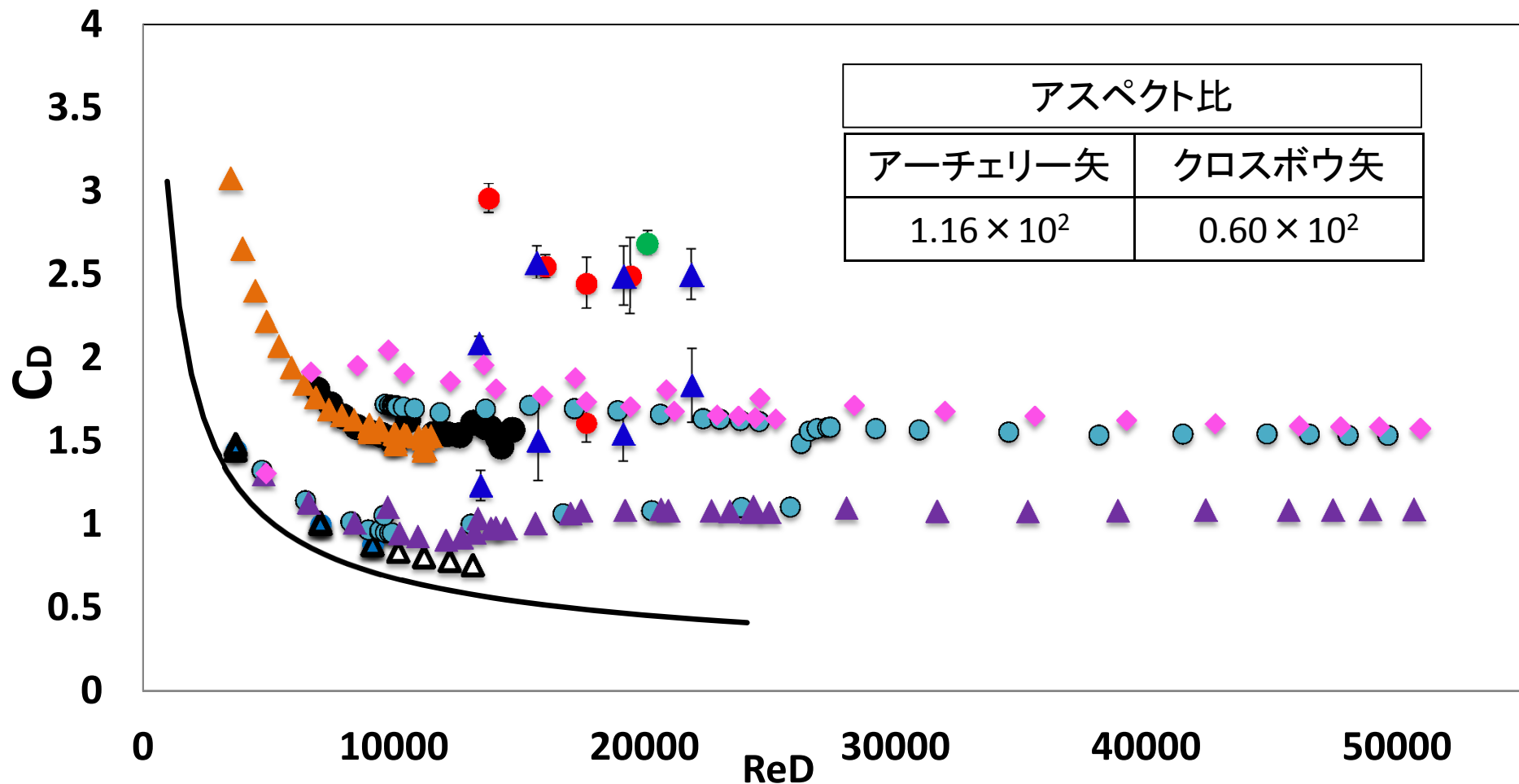
CD-Re数



- A/C/E(MSBS),no-vane,Bullet
- A/C/E(Machine),Bullet
- △ A/C/E(MSBS),no-vane,Stream
- ▲ A/C/E(Machine),Stream

- A/C/E(MSBS),Bullet
- A/C/E(Human),Bullet
- △ A/C/E(MSBS),Stream
- Seban-Bond-Kelly(A/C/E)

CD-Re数(アーチェリー矢-クロスボウ矢)



- A/C/E(MSBS),no-vane,Bullet ● A/C/E(MSBS),Bullet ● A/C/E(Machine),Bullet
- A/C/E(Human),Bullet △ A/C/E(MSBS),no-vane,Stream ▲ A/C/E(MSBS),Stream
- ▲ A/C/E(Machine),Stream —Seban-Bond-Kelly(A/C/E) ● crossbow(MSBS),Bullet
- ▲ crossbow(MSBS),Stream ◆ crossbow(MSBS),Bluff

流体力学的な関連研究

- べき級数解を用いた理論解(境界層近似)
: 円柱側面の境界層

Seban & Bond (1951) (先端部) J. Aero. Sci. 18, 671

Kelly (1954) (修正版) J. Aero. Sci. 21, 634

Stewartson (1955) (Far downstream) Q. Appl. Math. 13, 113

Glavert & Lighthill (1955) (全領域) Proc. R. Soc. London ser.A230,188

- 線形安定性

Tutty et al. (2002) Phys. Fluids 14(2), 628-637

(Non rotating, 平行流近似)

Herrade et al. (2008) Phys. Fluids 20, 034105(1-11)

(Rotating, 非平行流, PSE)

- 実験

佐藤明 & 高山和喜 (1999) 計測と制御 38(4), 255-261

『二重露光オーログラフィー干渉写真法』 和弓の矢の側面⇒乱流境界層

鈴木一史等 (2010) ながれ 29(4), 287-296

クロスボウ矢の抗力係数 C_D に対する先端形状の影響

クロスボウ矢の抗力係数 C_D に対する 先端形状の影響

鈴木ら：ながれ29(2010)

