



# 野球の変化球と投球動作の解析

---

理化学研究所

姫野龍太郎



# 変化球の解析に取り組んだきっかけ

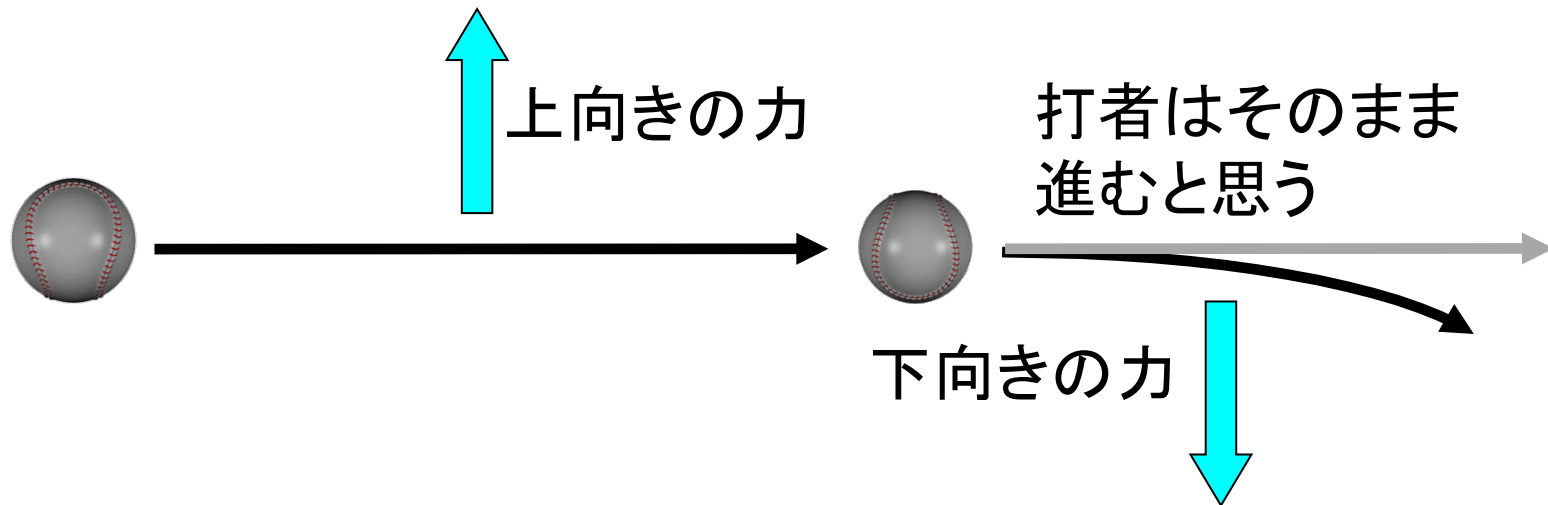




# 別の映像をスローで



# 考えたフォークボールのイメージ

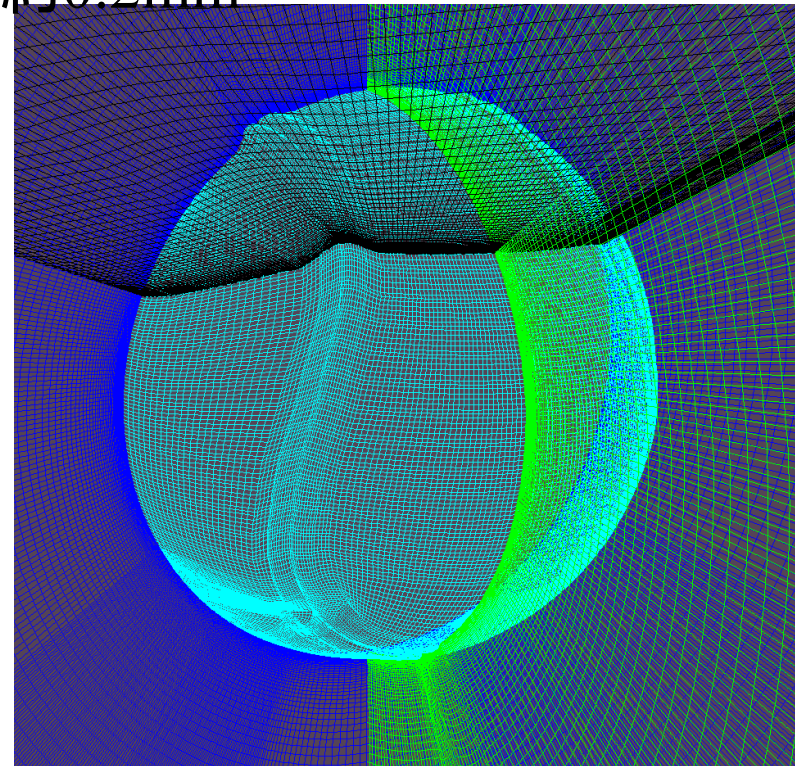
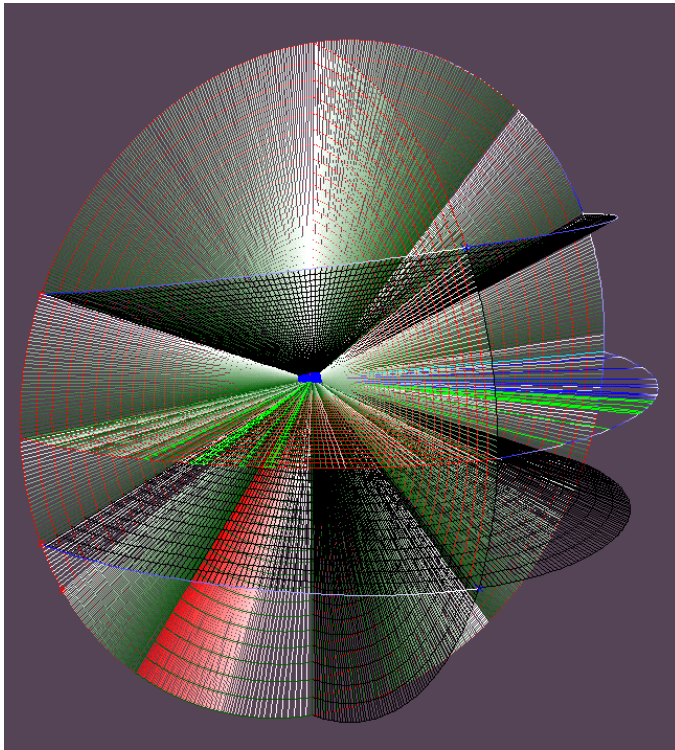


ボールの回転数が極端に小さく、  
途中で1/2回転しかしない

# 野球ボール周りの流れの数値解析

まず、野球ボールの周囲の空間に計算点を作る。

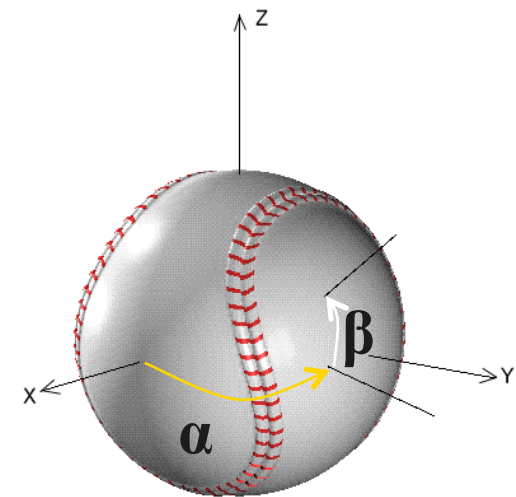
ボール表面近くには境界層。これを解像するため  
一番近い計算点までの距離約0.2mm



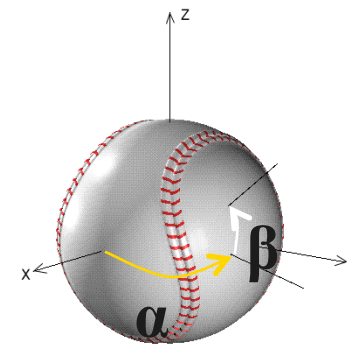
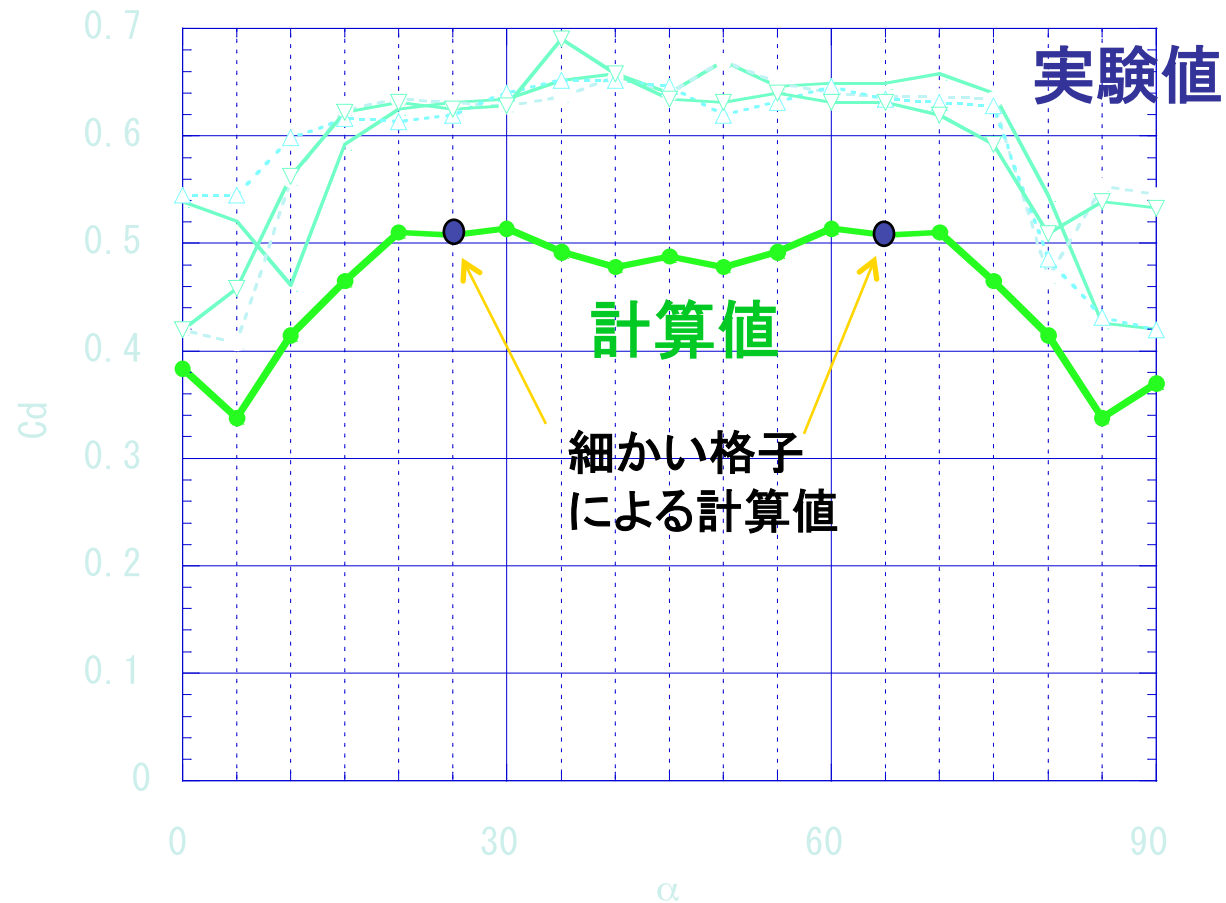
A:173x95x105(173万点), B:345x189x105(685万点)の2種類

# 計算条件

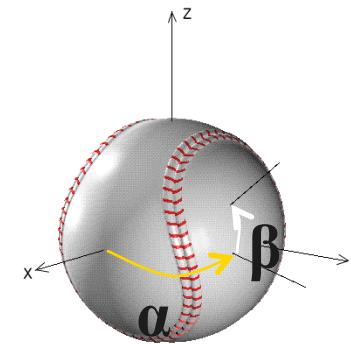
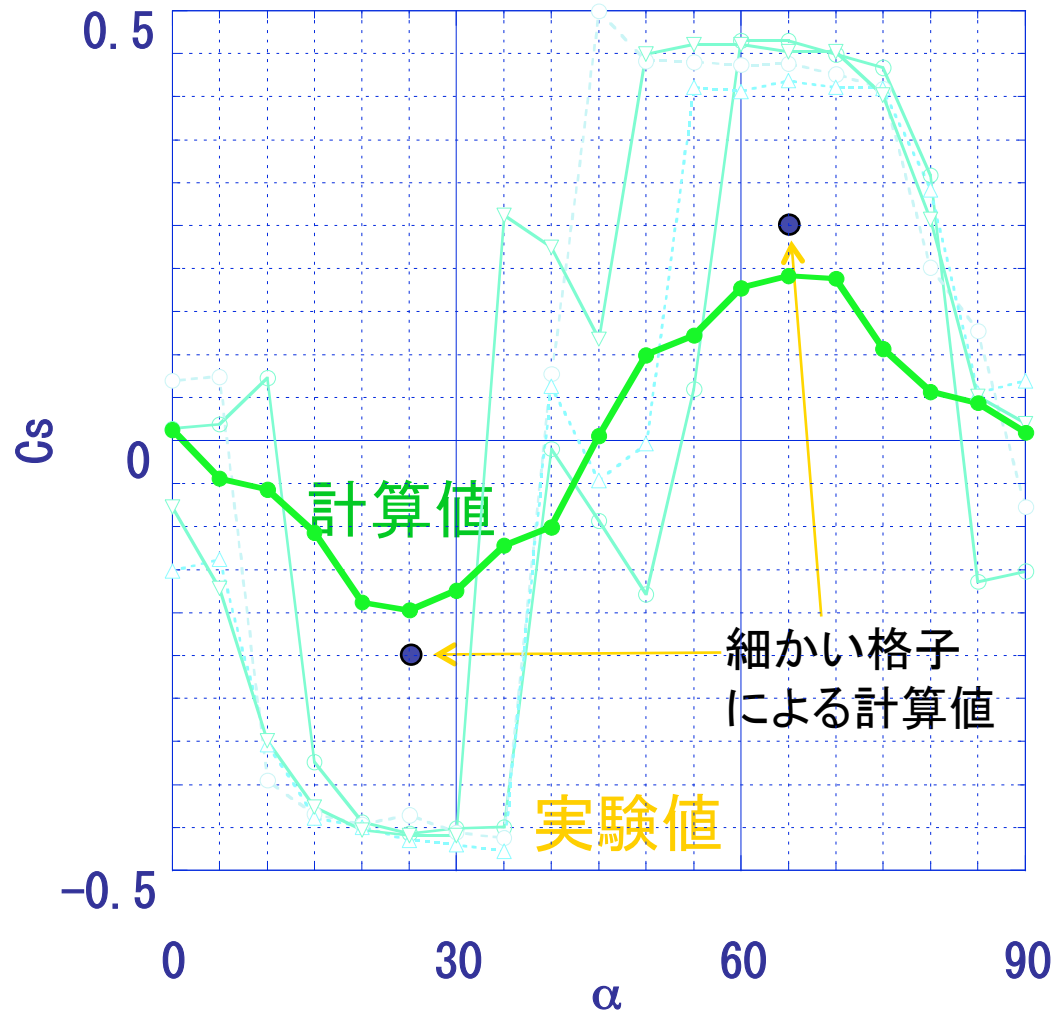
- 時速75km (レイノルズ数100,000)
- ボールは回転しない
- 縫い目と流れの角度をパラメータ
- 溝田先生の風洞実験と比較



# 空気抵抗係数の実験との比較

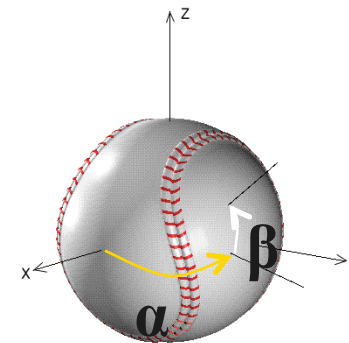
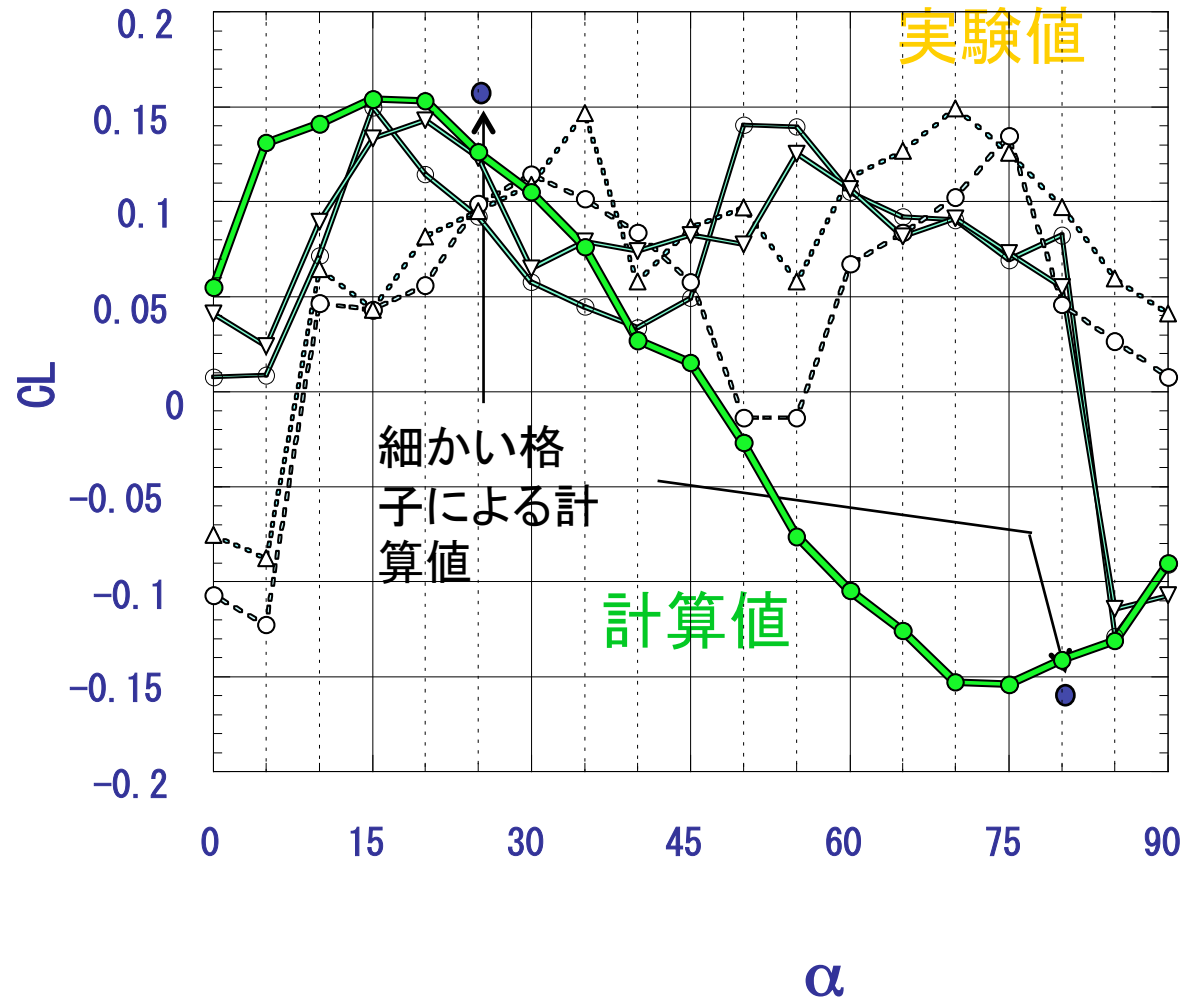


# 横力係数の実験との比較





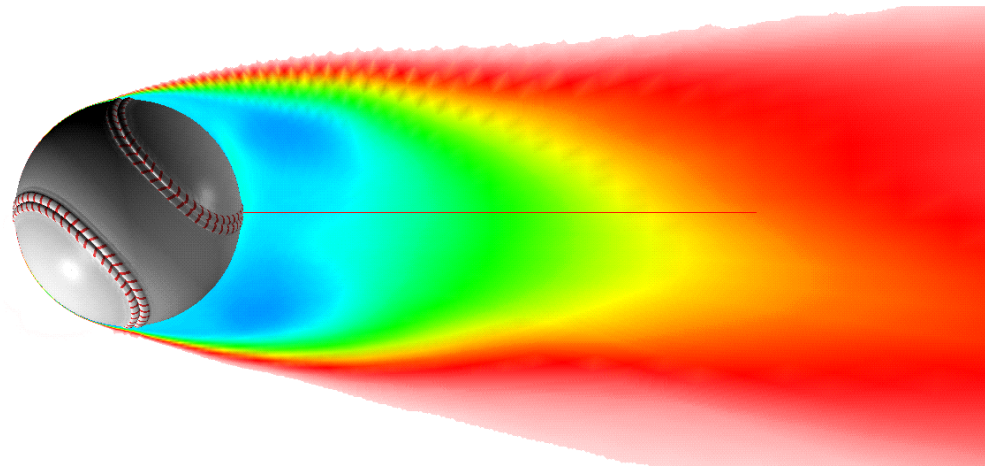
# 揚力係数の実験との比較



# 総圧で見る流れ場の変化： $\alpha$

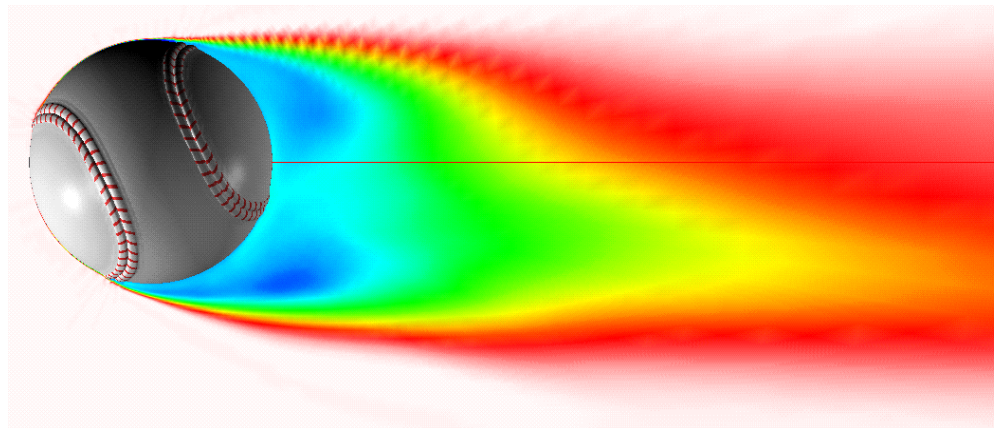
- $\alpha : 45$ 度

Cs:0.006



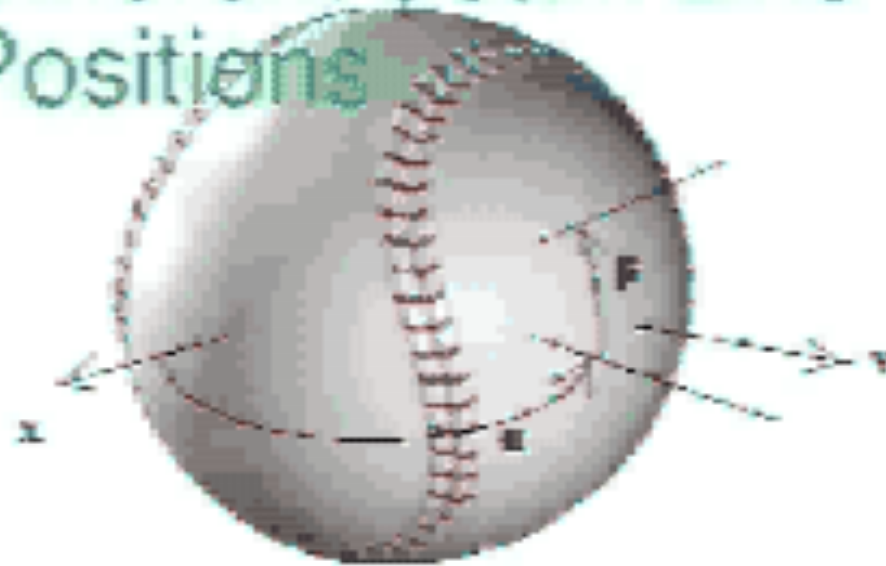
- $\alpha : 65$ 度

Cs:0.192



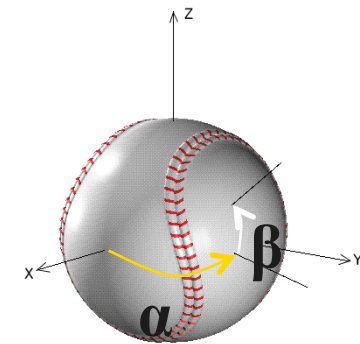
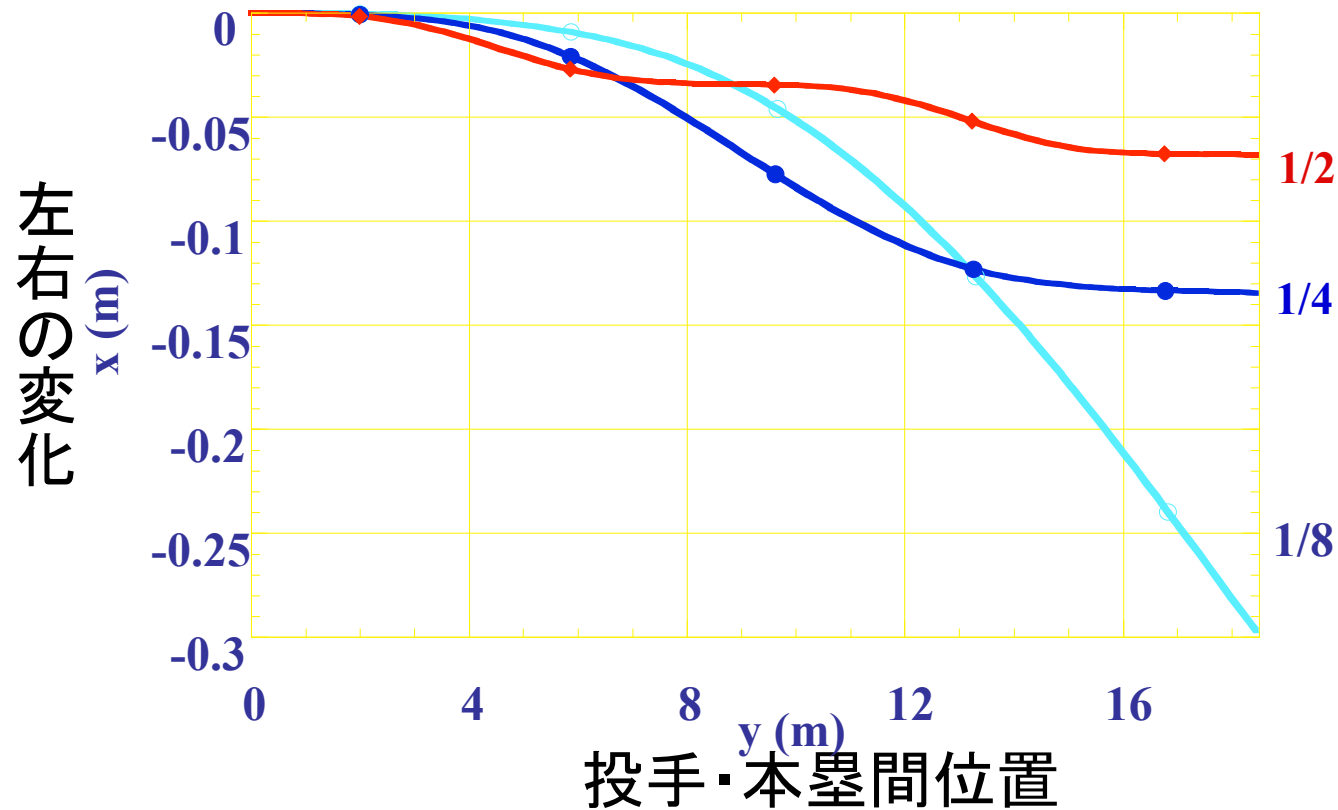
# 動的な流れの変化のようす

Comparison of Flows  
Around a Ball With  
Different Seam Line  
Positions



# 計算結果によるボールの軌跡(1)

- $\alpha$  が変化するようにN回転(投手・本塁間)



# ナックルでは

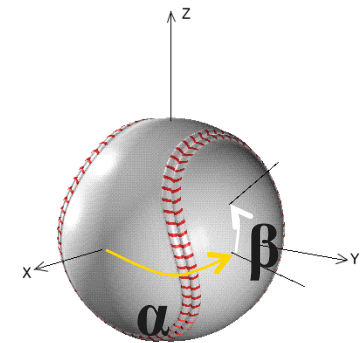
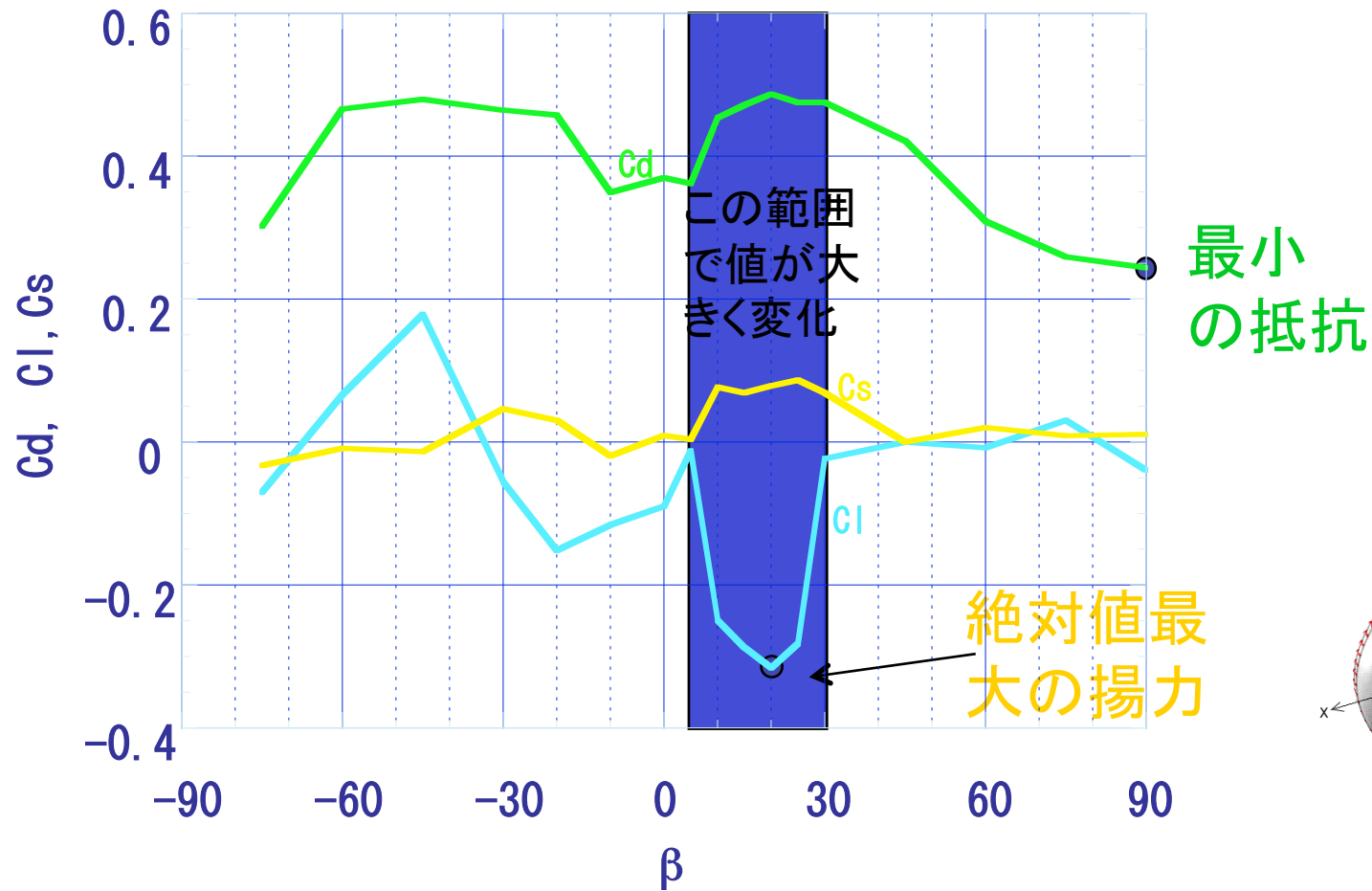
---

わずかな回転の変化、  
わずかな初期縫い目位置の変化が

大きな軌跡の変化をもたらす

ただし、これらは風洞実験でもわかっていた

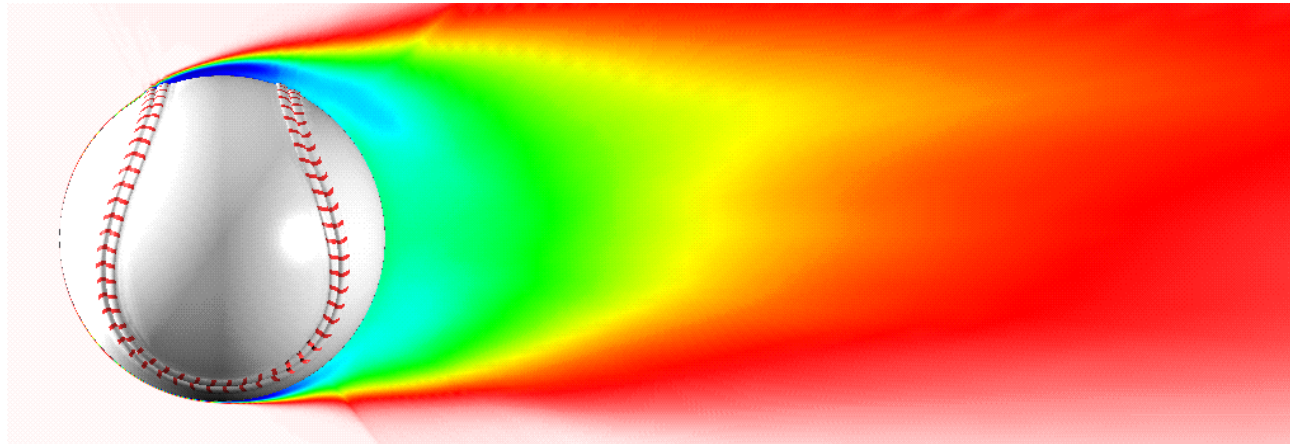
# $\beta$ を変えたときの変化 ( $\alpha : 90$ )



# 総圧で見る流れ場の変化( $\alpha:90$ )

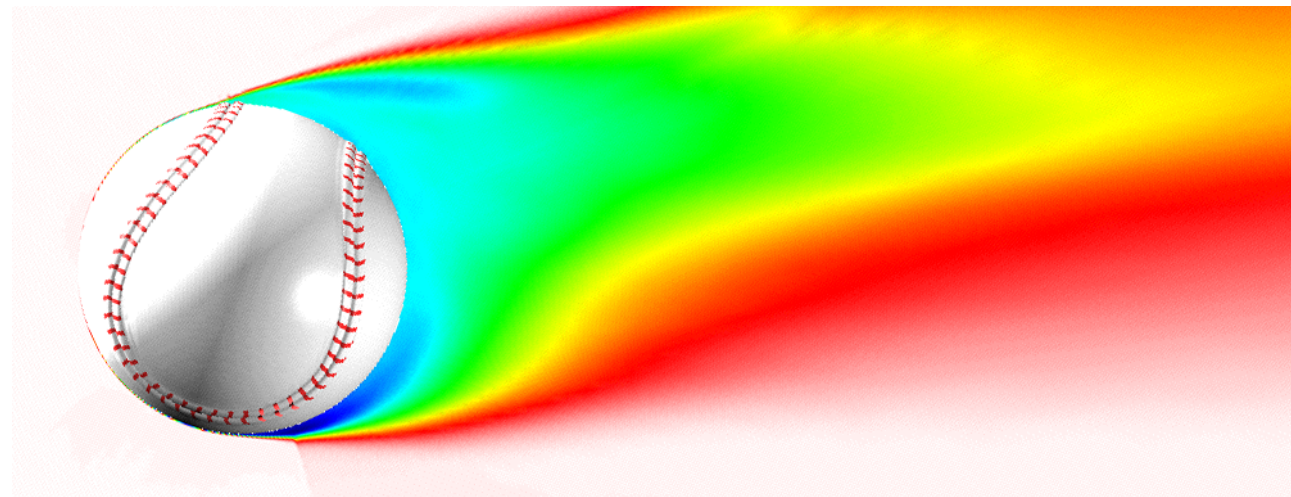
■  $\beta:0$

$C_l:-0.090$



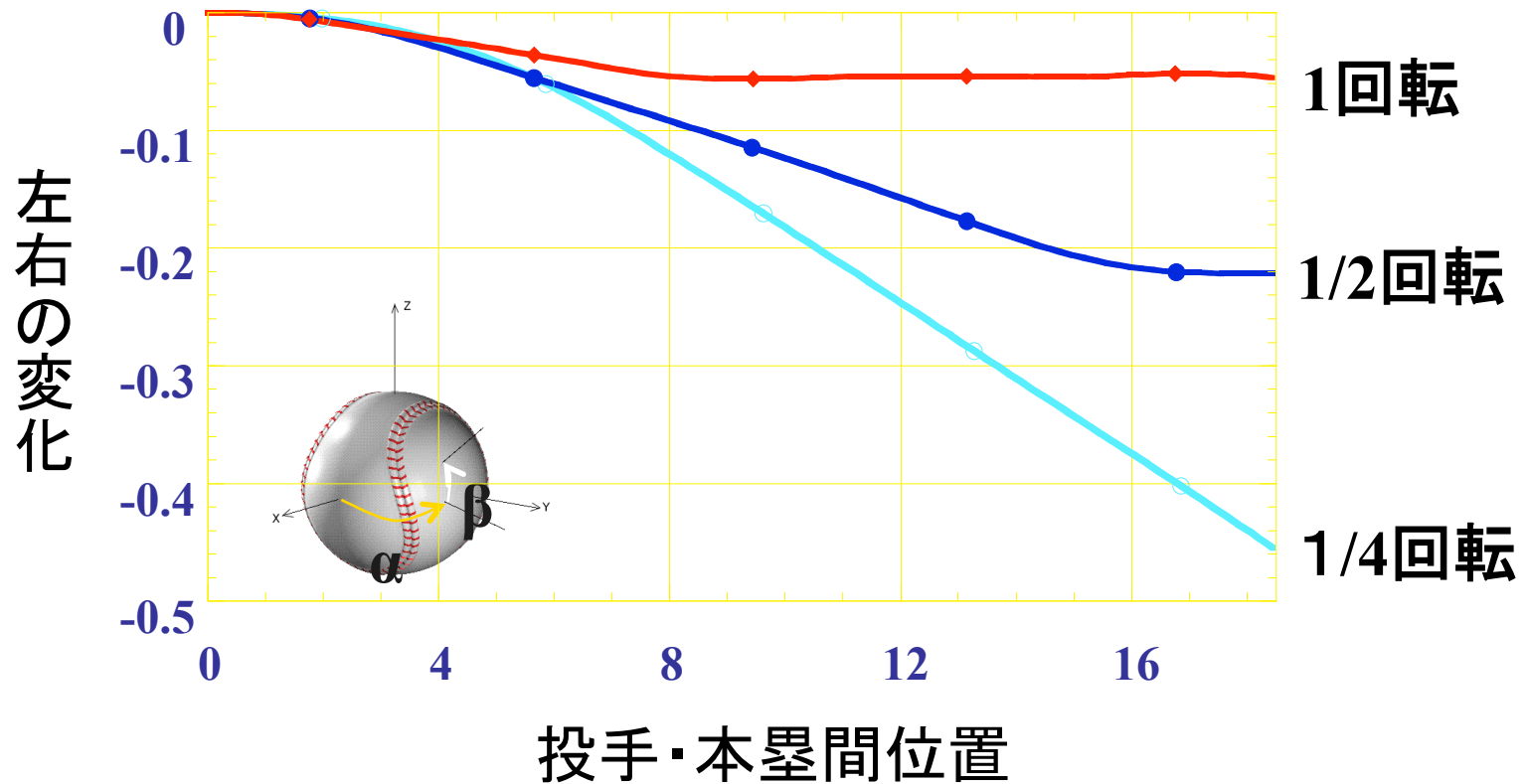
■  $\beta:0$

$C_l:-0.316$



# 計算によるボールの軌跡(2)

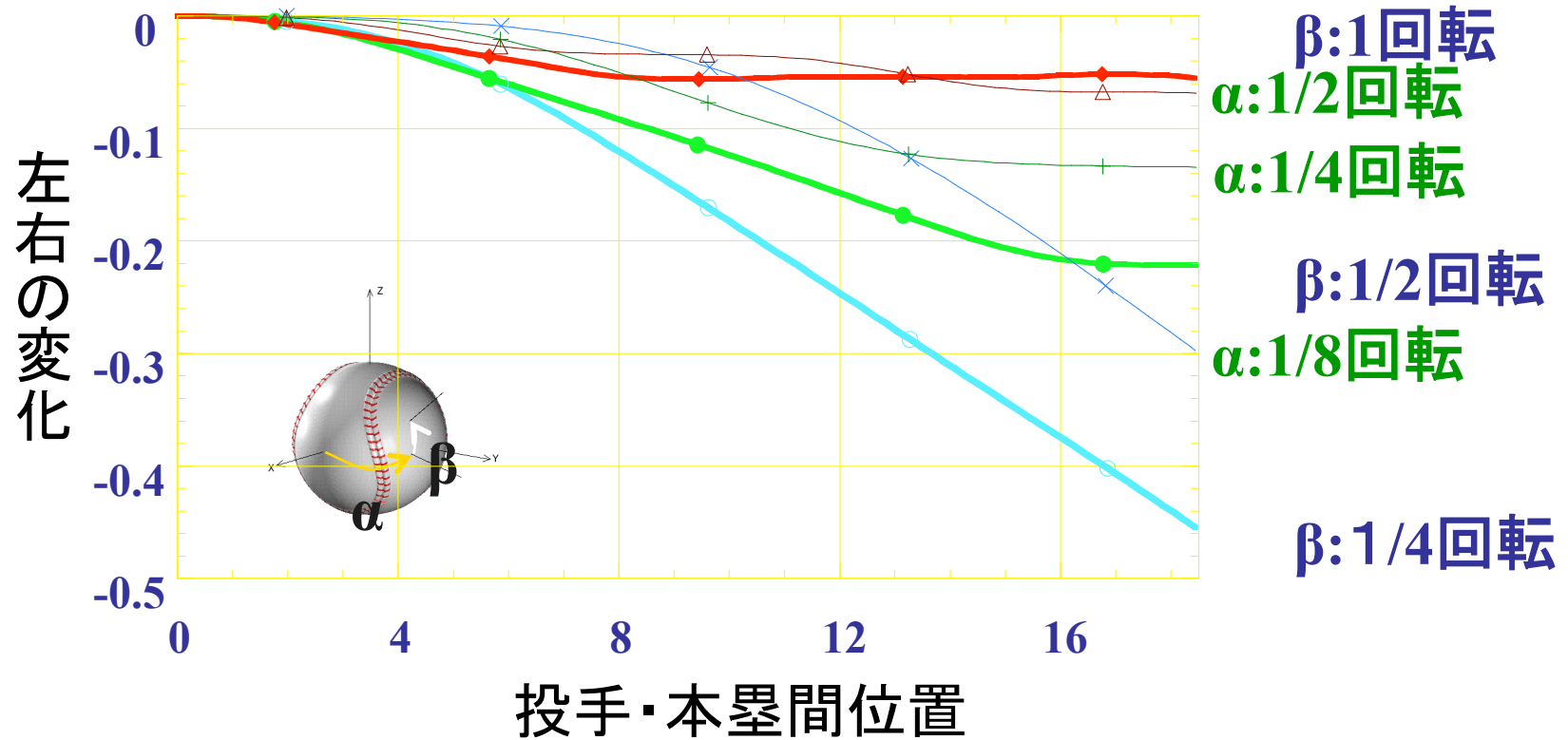
- $\beta$  が変化するようにN回転(投手・本塁間)





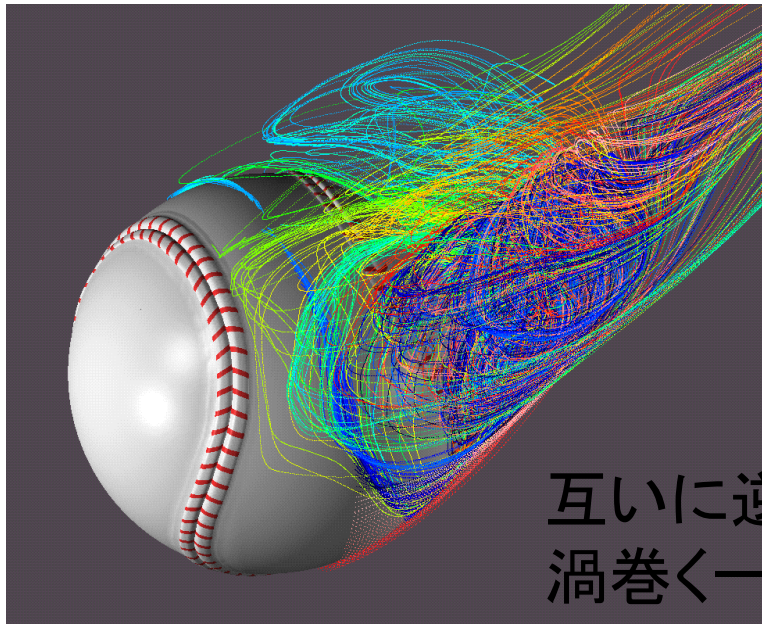
# $\alpha$ 回転と $\beta$ 回転の軌跡の比較

- 細線は  $\alpha$  回転、太線は  $\beta$  回転

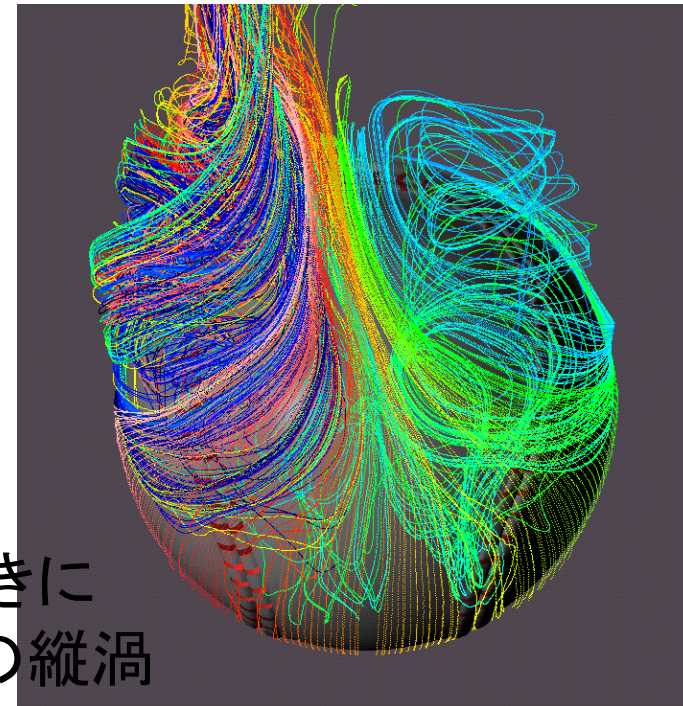


# 後流がなぜ偏るのか？ (1)

- 後流が偏る  $\beta = 20$  の場合



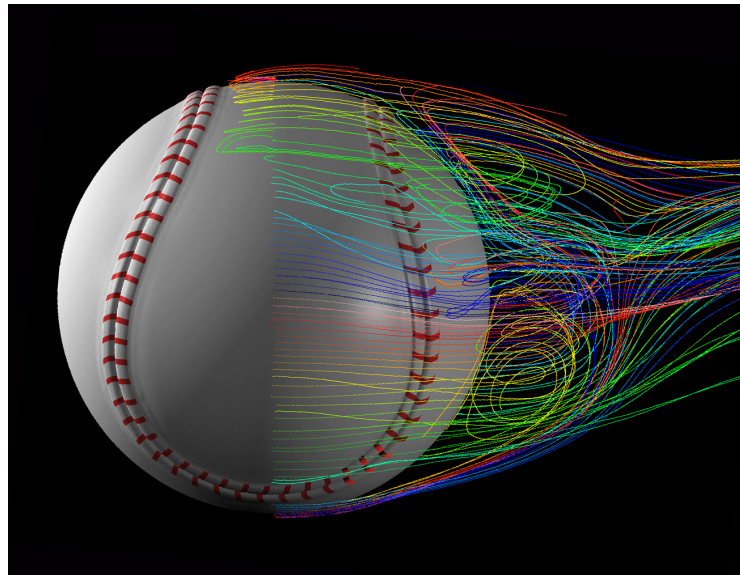
Rear Quarter View



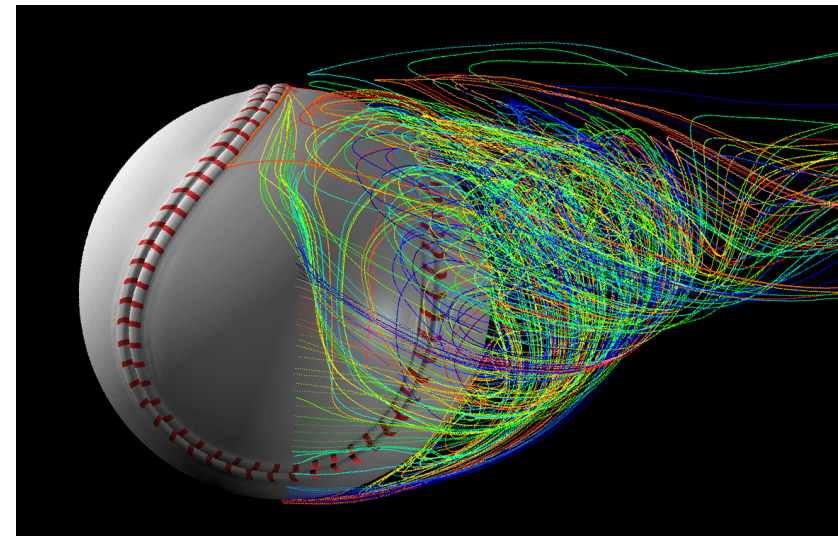
Rear View

互いに逆向きに  
渦巻く一対の縦渦

# 後流がなぜ偏るのか？ (2)



$\beta: 5$ の場合は渦輪



$\beta: 20$ の場合は縦渦

# フォークは本当に落ちるのか？

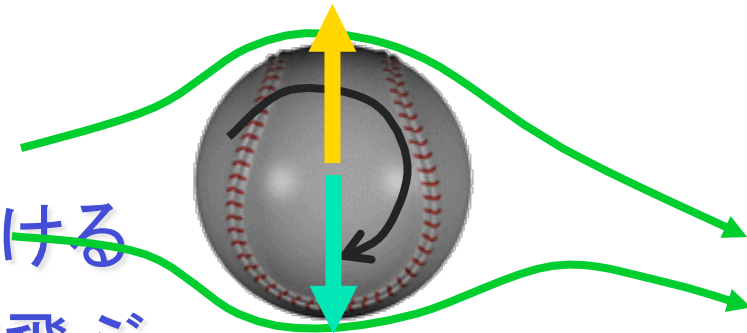
---

- 高速度ビデオの解析（佐々木・野茂他）
  - 重力以外の力は働いていない
  - 空気抵抗が他の球種よりも大きい
- 打者のコメントから
  - 杉下投手のフォークは揺れながら落ちる
  - 縫い目が見えた
  - 蝶のように舞う

# 直球とフォークボール

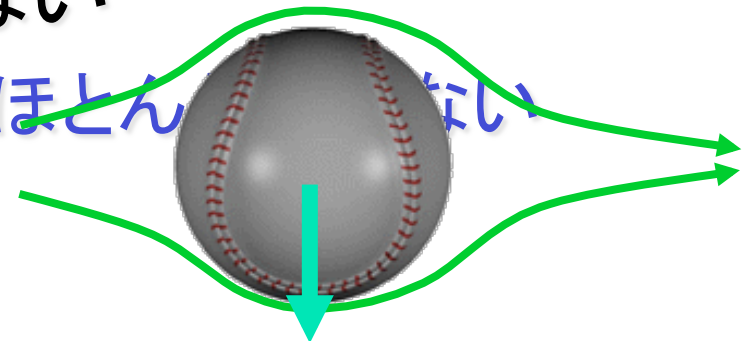
- 直球は変化球

- 上向きの力を流れから受ける
- 重力をうち消してまっすぐ飛ぶ



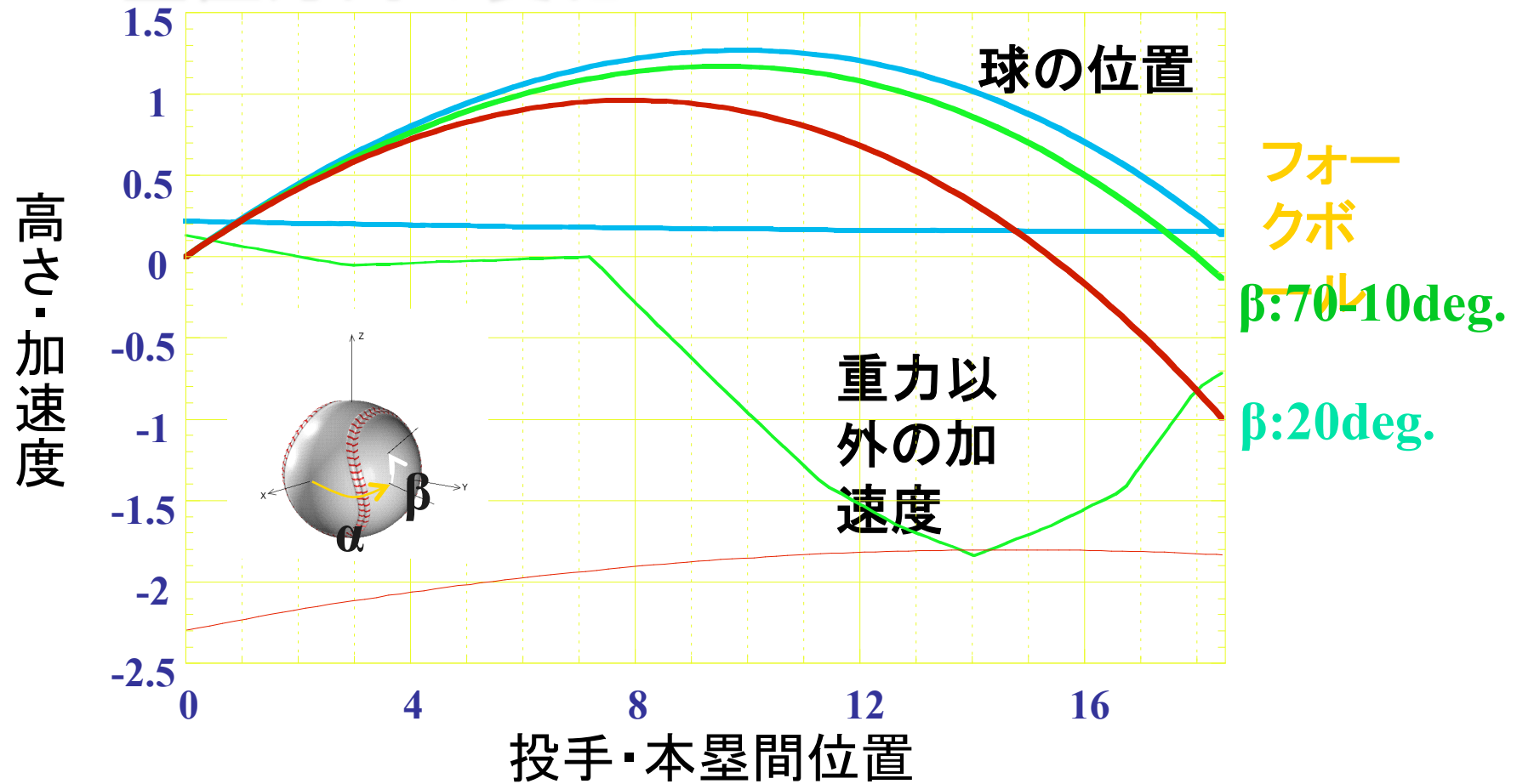
- フォークボールは変化しない

- 重力以外の下向きの力はほとんどない
- サイドスピン



# フォークより落ちる変化球

## ■ 垂直方向の変化



# 実際の映像(ナックル)



4 シーム  
9.8 km/h

$Re \approx 1.22 \times 10^5$



2 シーム  
9.9 km/h

$Re \approx 1.23 \times 10^5$



# ナックル・ボールの映像



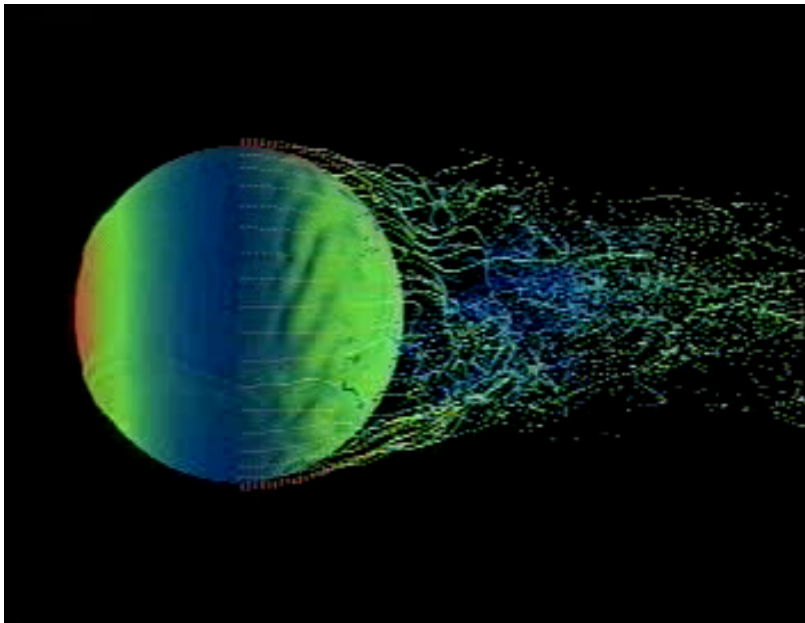


# 回転しているボールの解析

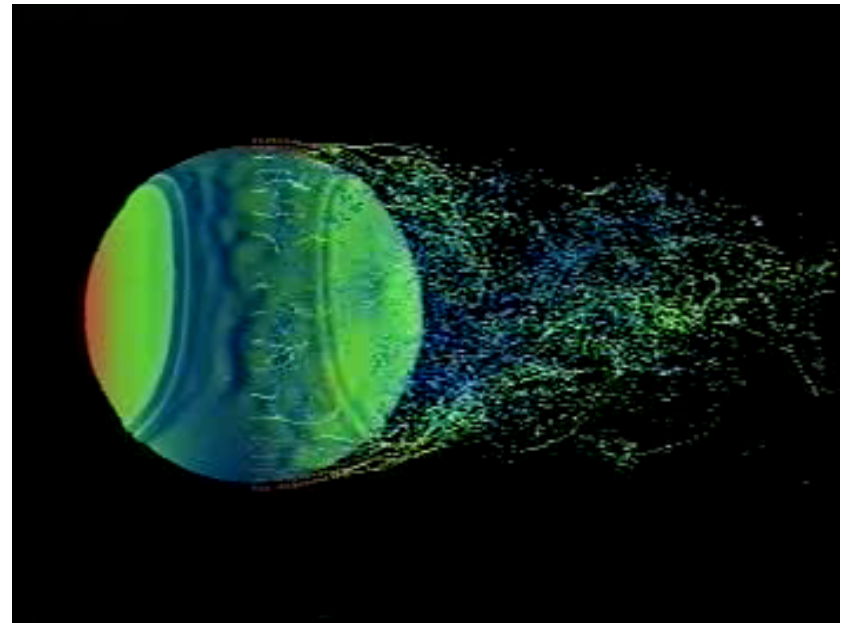
---

- ナックルボールは准定常：毎秒0.5-1回転
- 他の球種では毎秒10-30回転、動的な解析が必要
  
- 解析では静止流体中をボールに固体された座標系で回転移動する場合に変換して計算

# ジャイロボールの解析

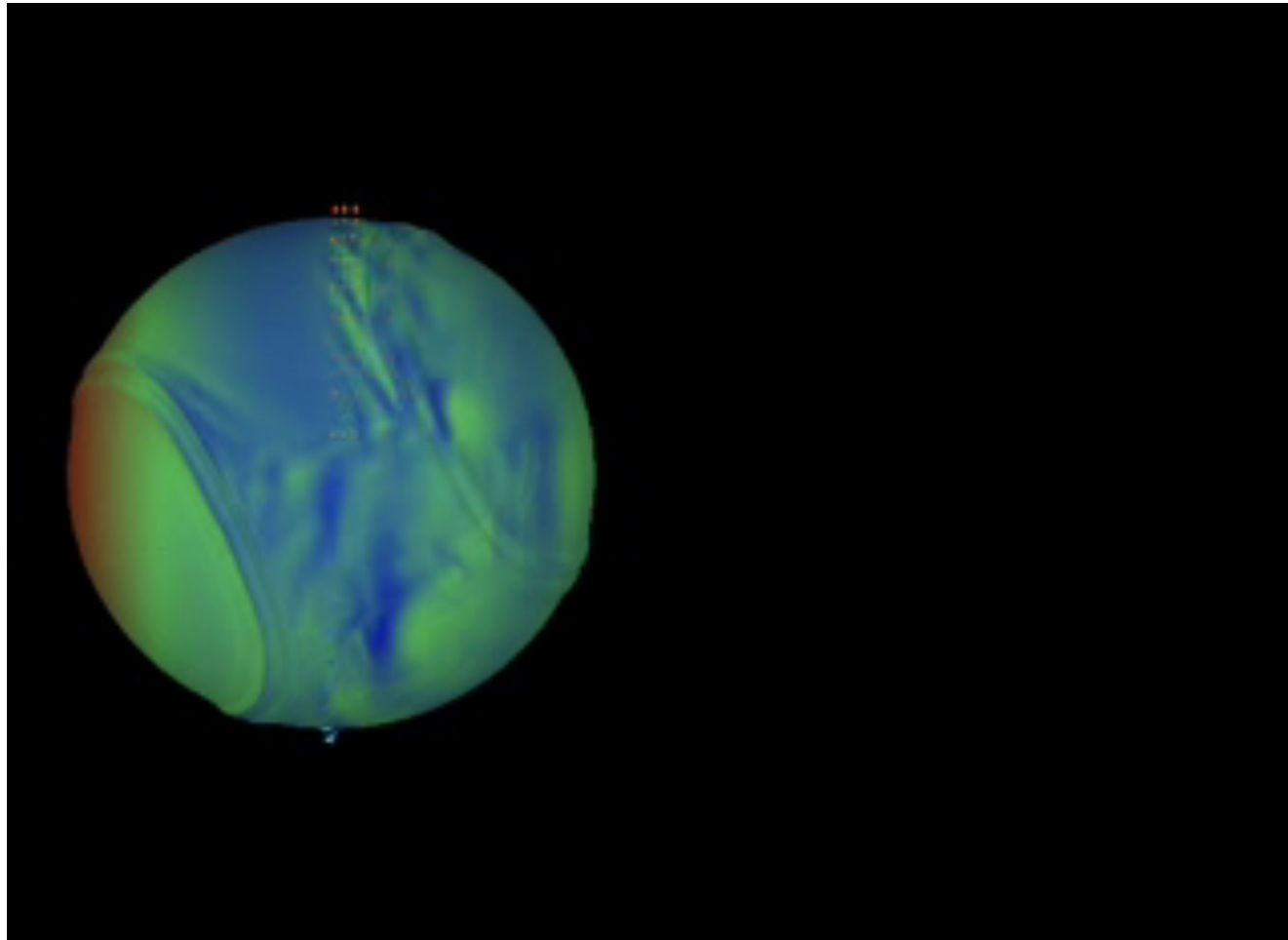


4シーム・ジャイロ



2シーム・ジャイロ

空気抵抗の違いを予測





# ジャイロボールの解析で予測された 空気抵抗の変化は本当か

---

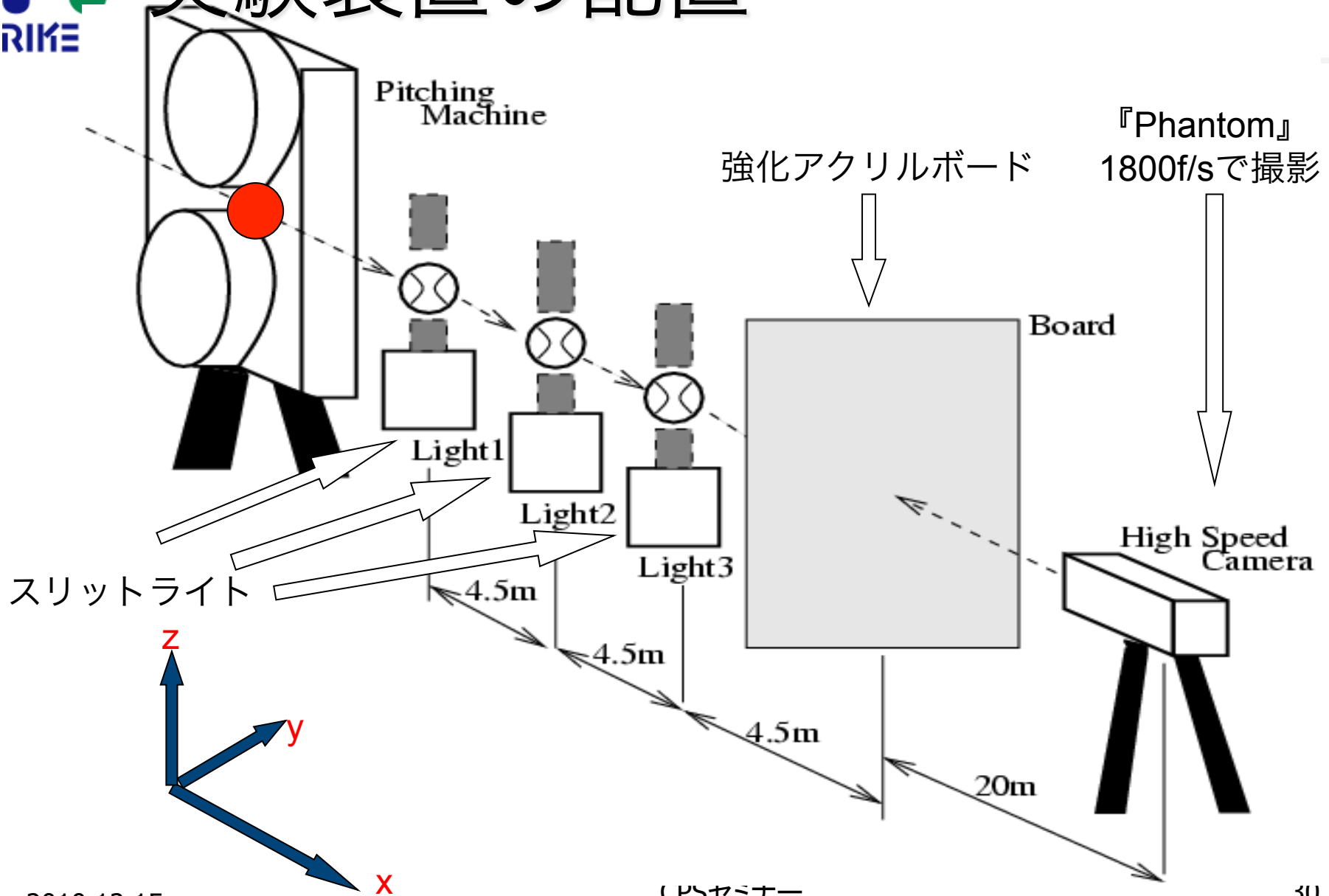
電気通信大学・宮寄研究室との  
共同実験

# 実験に使用したピッチングマシン



電通大及び理化学研究所所有のマシン

# 実験装置の配置



# 実際の映像(ジャイロ)



$SP \approx 0.23$



2 シーム  
129 km/h

$Re \approx 1.80 \times 10^5$

2010.12.15



$SP \approx 0.12$



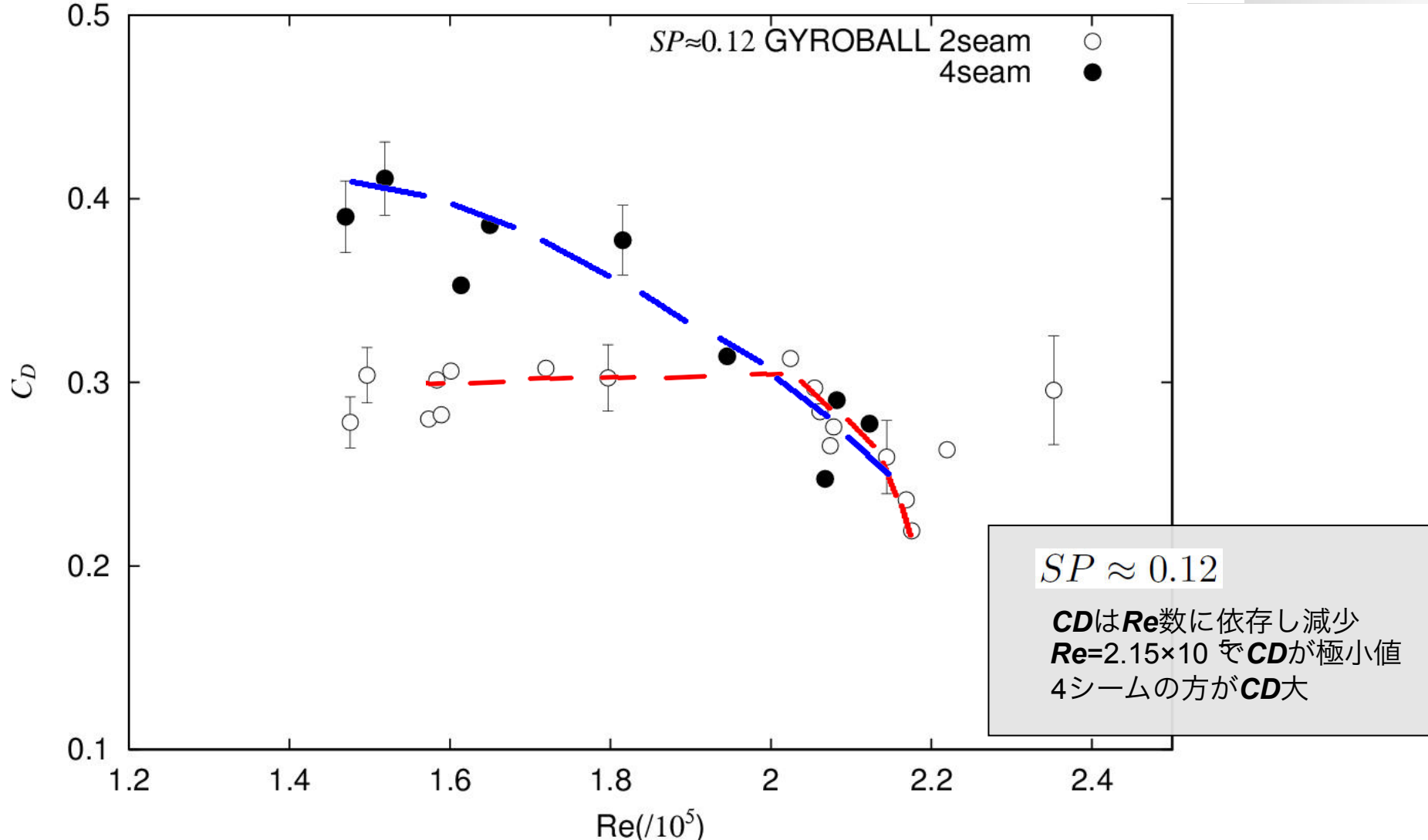
2 シーム  
151 km/h

$Re \approx 2.16 \times 10^5$



# ジャイロボール ( $Re-C_D$ 関係図)

$SP \approx 0.12$



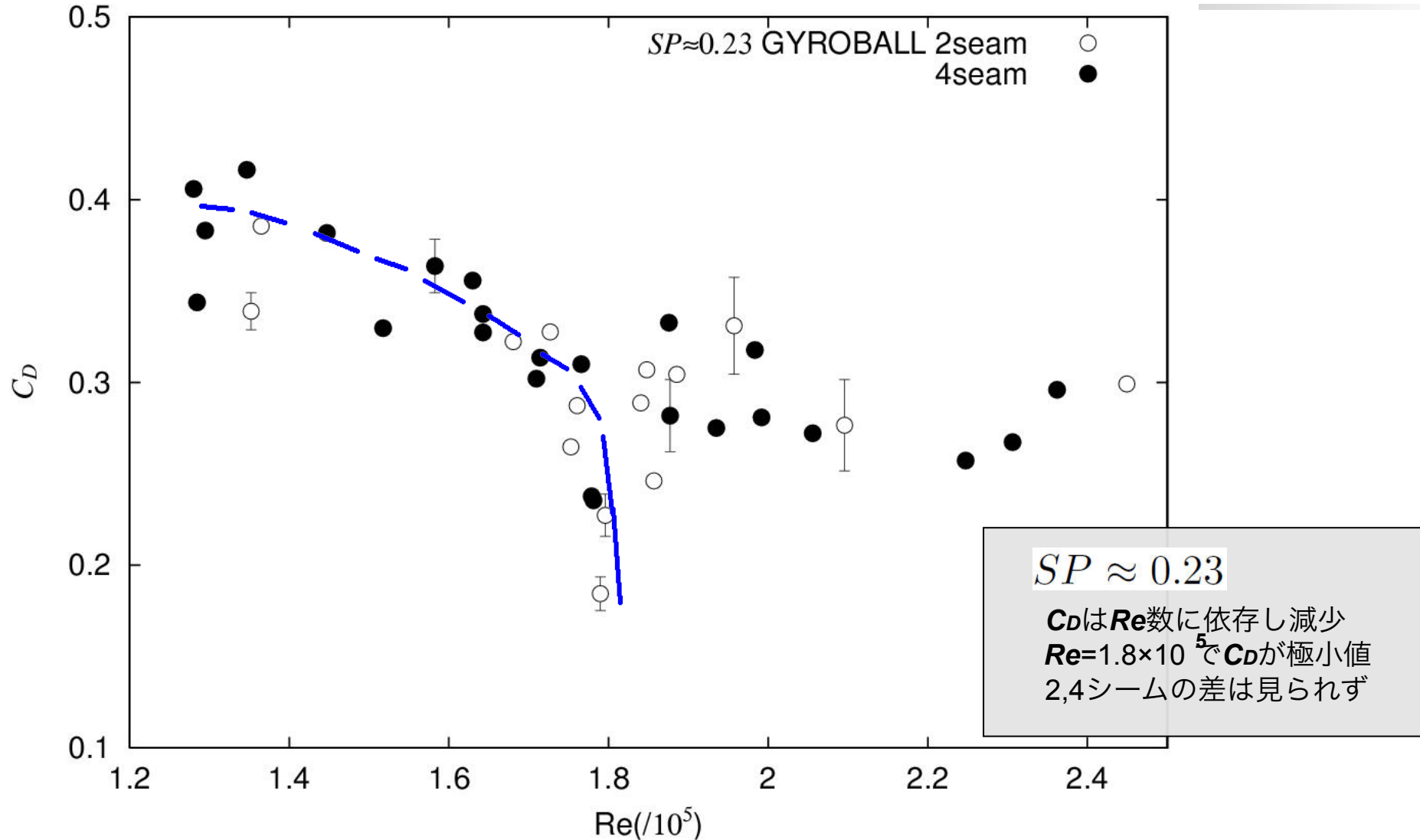
$SP \approx 0.12$   
 $C_D$ は $Re$ 数に依存し減少  
 $Re=2.15 \times 10^5$ で $C_D$ が極小値  
4シームの方が $C_D$ 大





# ジャイロボール ( $Re-C_D$ 関係図)

$SP \approx 0.23$



# 2シームと4シームの差

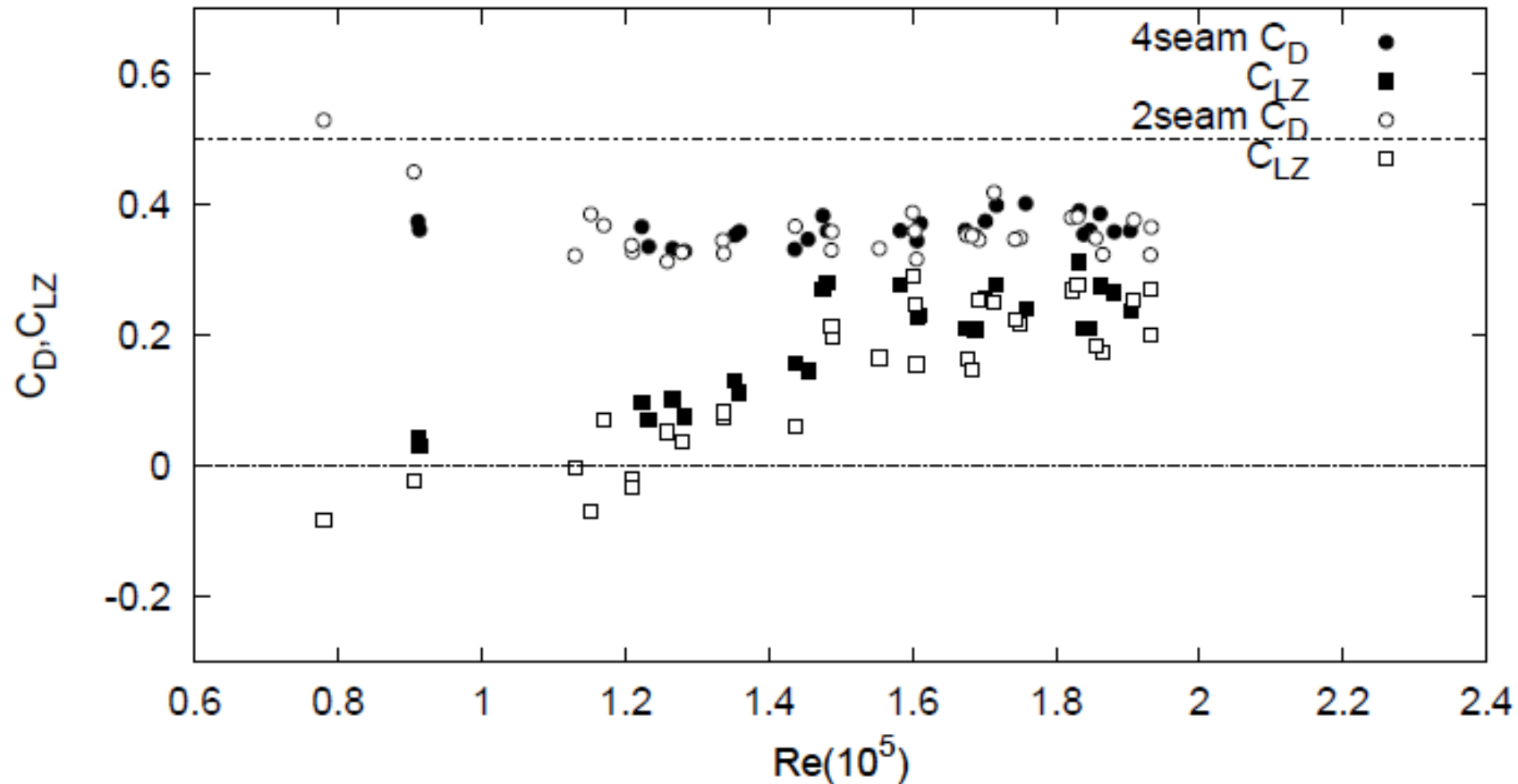
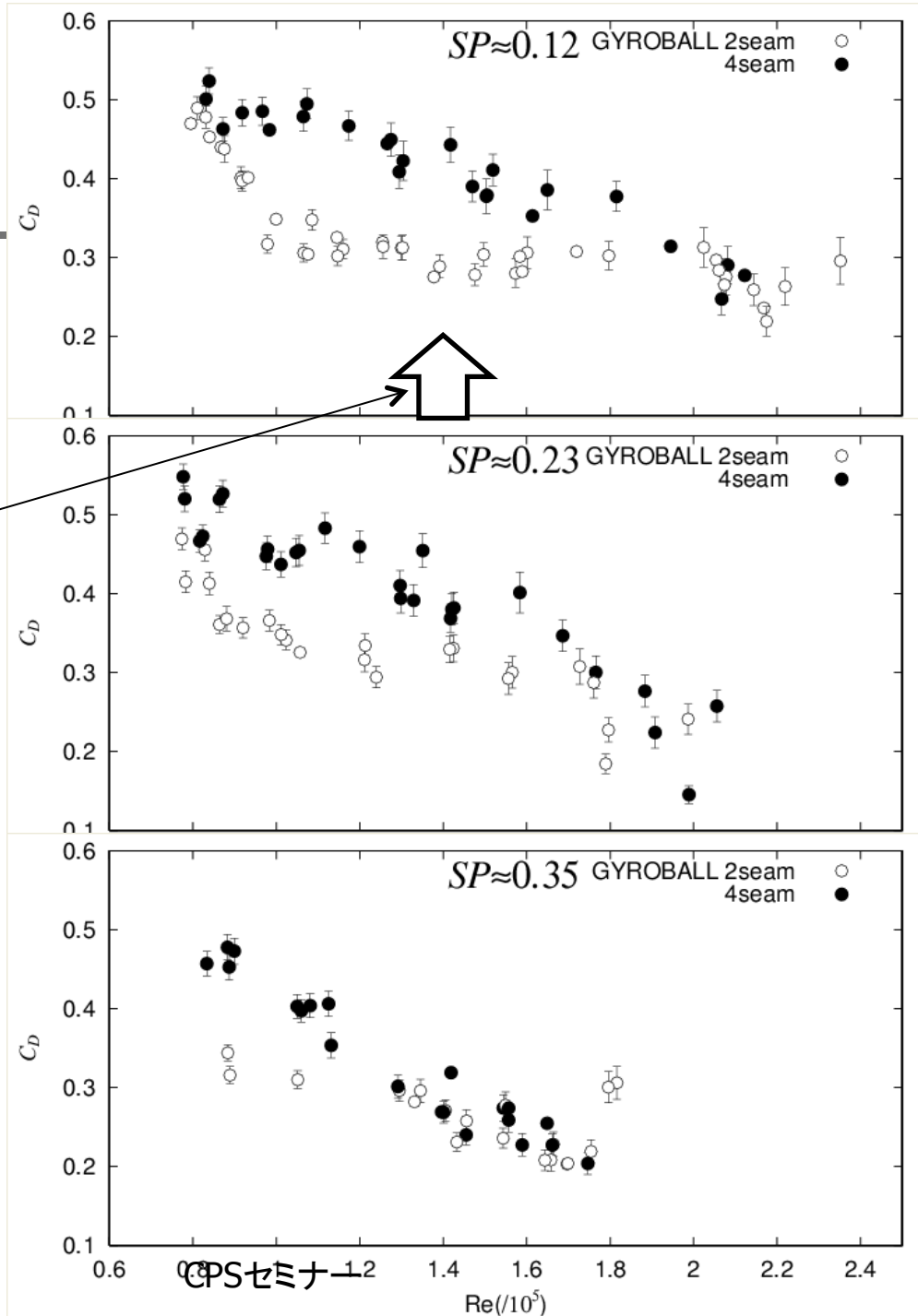


図 15  $C_D, C_{LZ}-Re$  数関係図 (JPN:SP = 0.23)

# Result.1 - GYRO $Re-C_D$



Major League

$Re \doteq 140,000$

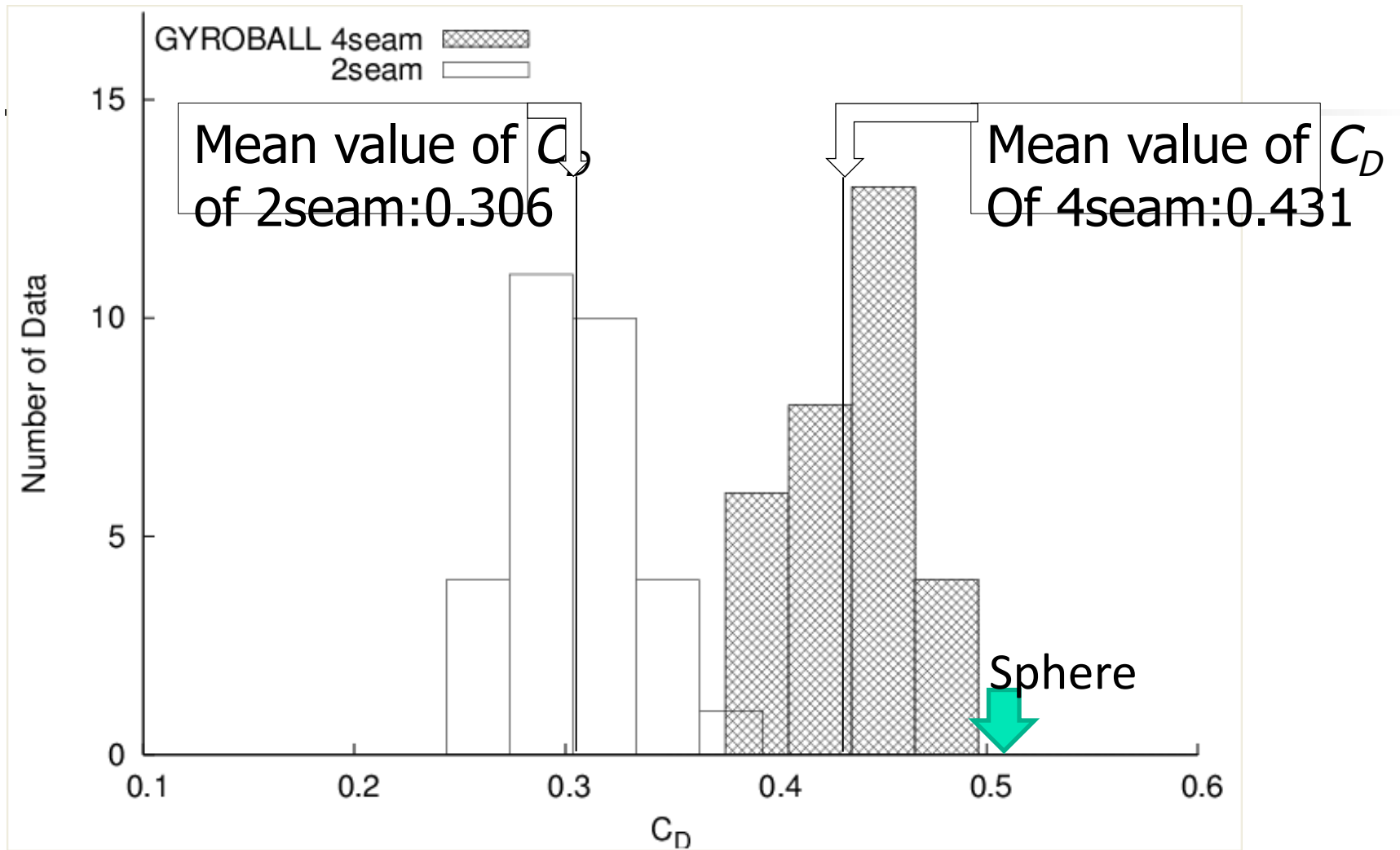
2seam Gyro-ball

$C_D \doteq 0.319$  (n=4)

4seam Gyro-ball

$C_D \doteq 0.339$  (n=4)

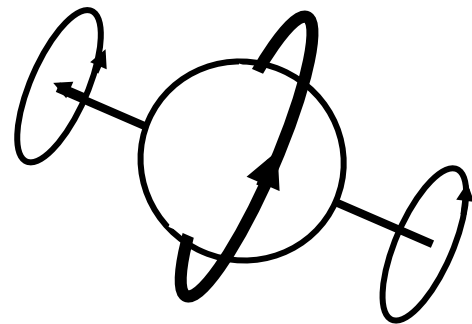
# Result.2 - GYRO $Re=140,000$ $SP=0.12$ Histogram (new)



2seam	4seam
Number of data : 31	Number of data : 32
Standard deviation: 0.030	Standard deviation: 0.033

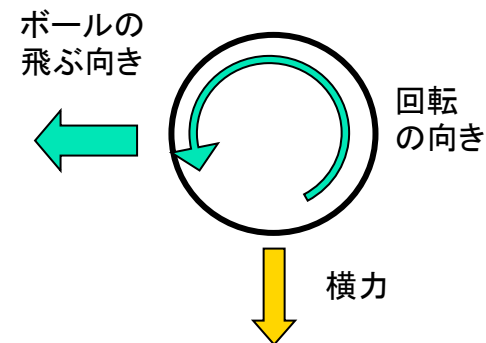
# まとめ(1)

- 魔球と呼ばれるナックルボールの変化の原因をコンピュータによる流れの解析から解明
- ジャイロボールの変化も予測
  - 実験で実証
  - 実はジャイロボールはスライダーの一種
  - スライダーは誤解の多い変化球



一塁側から見た図

CPSセミナー



上から見た図

## まとめ(2)

---

- 落ちる球の作り方
  - 回転数を落とす : SFFB、チェンジアップ
  - 回転軸を前に向ける
    - 斜め前横 : カットボール
    - 斜め上 : スライダー(横にも曲がる)
    - 正面 : 落ちるスライダー(ジャイロボール)
- 科学的な分析によって野球は更に進化する



# なぜ藤川投手は打たれないのか？

---

2007年6-7月

協力:TV朝日

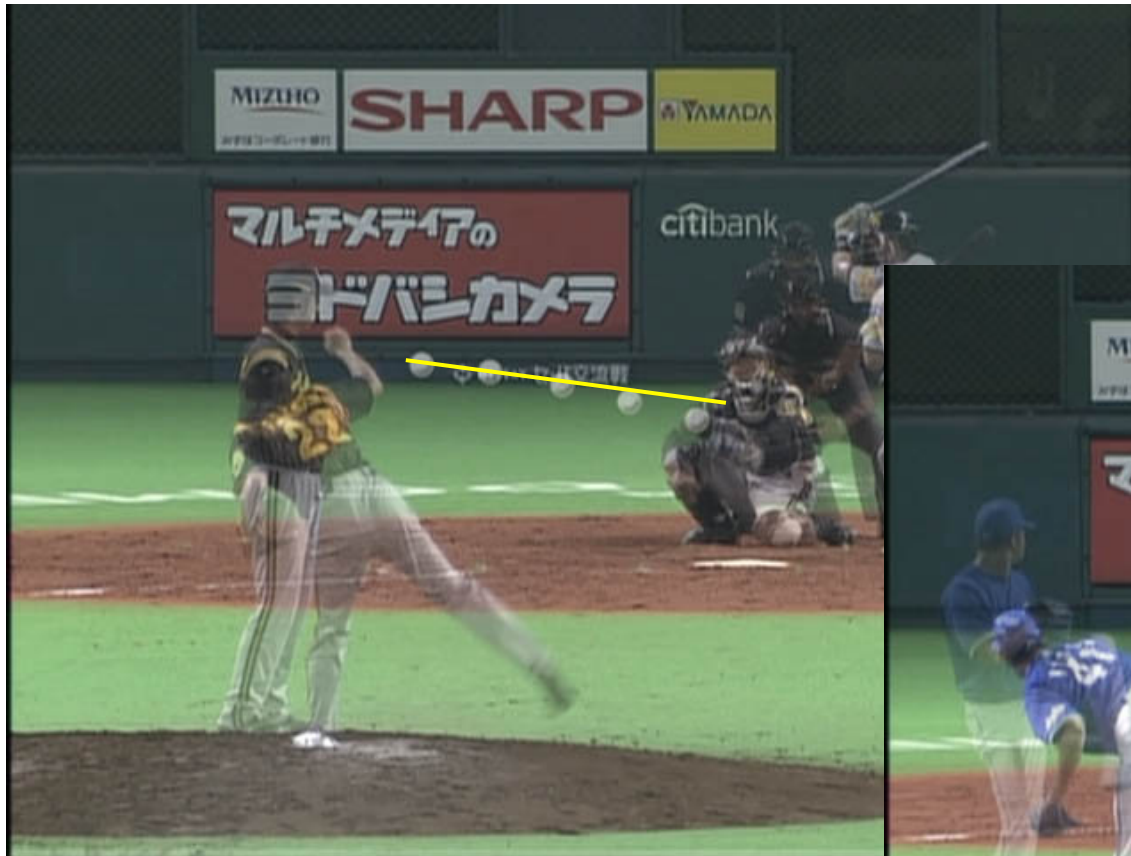
# 2007年17投手高速度ビデオ解析

各投手BE ST(ストレートのみ)	回転数(r ps)	初速(時速)	回転軸傾き(度)
井川(HT) ストレート左	38.47	140	-45
石川(YS) ストレート左	38.47	136	-55
藤川(HT) ストレート右	45.46	149	5
牛田(YB) ストレート右	38.47		5
ゴンザレス(YS) ストレート右	38.47		30
ダーウィン(HT) ストレート右	38.47	148	45
安藤(HT) ストレート右	38.47	144	20
木田(YS) ストレート右	38.47	147	50
江草(HT) ストレート左	38.47		-45
松坂(SL) ストレート右	41.68	149	10
小林(TL) ストレート右	38.47	140	10
藪田(TL) ストレート右	38.47	145	15
クルーン(YB) ストレート左	43.49	157	-10
吉見(YB) ストレート右	33.34	143	10
グローバー(YG) ストレート右	38.47	147	10





# 藤川投手とクルーン投手の投球映像



2010.12.15



2007年松坂投手のスライダーが落ちなくなった？

---

NHKからの依頼



# NHKの依頼：落ちないスライダー？



2010.12.15

CPSセミナー

43

# 松坂の直球(2007.3)



回転軸の傾き

2006:10度

2007:45-60度



# 大村研究グループとの出会い

---

ジャイロボール  
投球動作の最適化

# 一般の投球フォームの改良

---

- 初期動作：実際の投球動作
  - 速度・なめらかさを最適化
    - 上肢の骨格筋肉モデル
    - 肩と腰の動きは計測から
    - 関節の可動範囲を考慮

以下の一連の投球フォーム最適化の研究は  
大村皓一・望月 義幸・横山 太一らによる

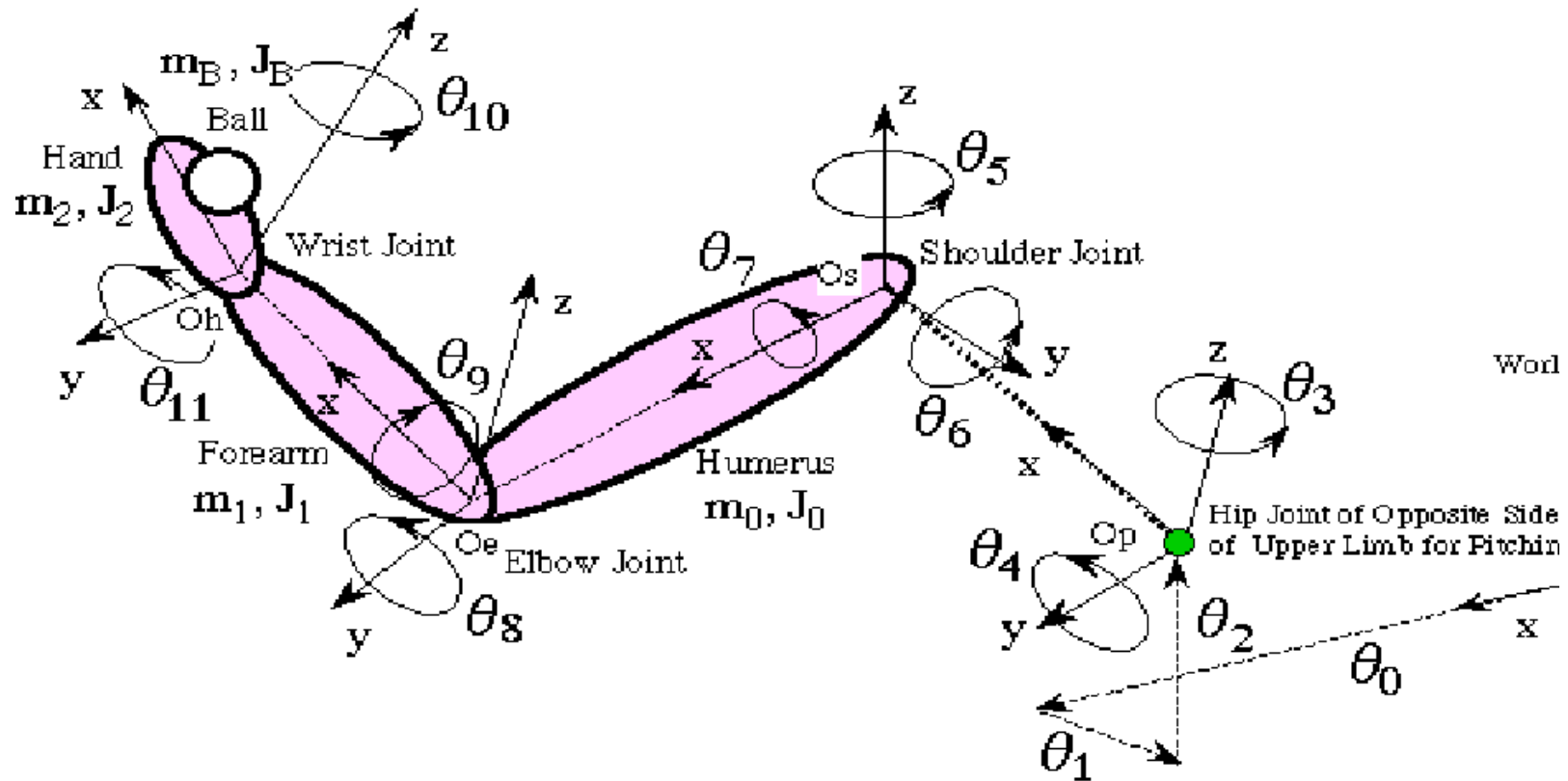
(旧イメージ情報科学研究所)

# 初期動作

- モーション・キャプチャー



# 上肢の筋肉骨格モデル





# 目的関数

$E(\Theta(t)) = W_0$  (Penalty for Joint Movability )

+  $W_1$  (Penalty for Joint Torque)

+  $W_2$  (Penalty for Ball Velocity)

+  $W_3 \int_{t^s}^{t^e} \sum_{i=5}^{11} (\tau_i)^2 dt$  無駄のない動き

+  $W_4 \int_{t^s}^{t^e} \sum_{i=5}^{11} (d\tau_i / dt)^2 dt$  トルク変化最小

+  $W_5 \int_{t^s}^{t^e} \sum_{i=5}^{11} (d^2 \tau_i / dt^2)^2 dt$  トルク変化の滑らかさ

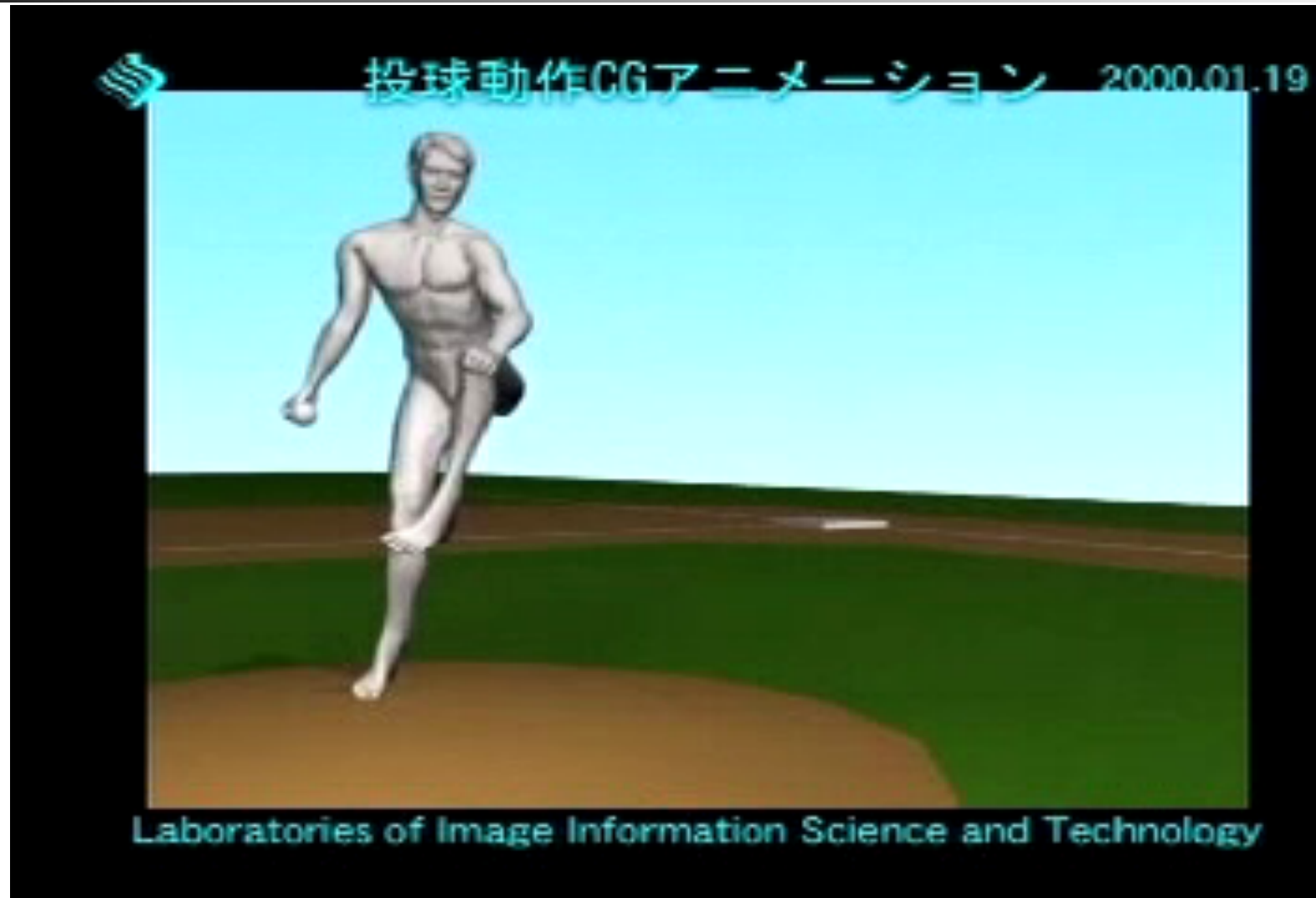
# 最適化前後のフォームの変化



# 最適化フォーム

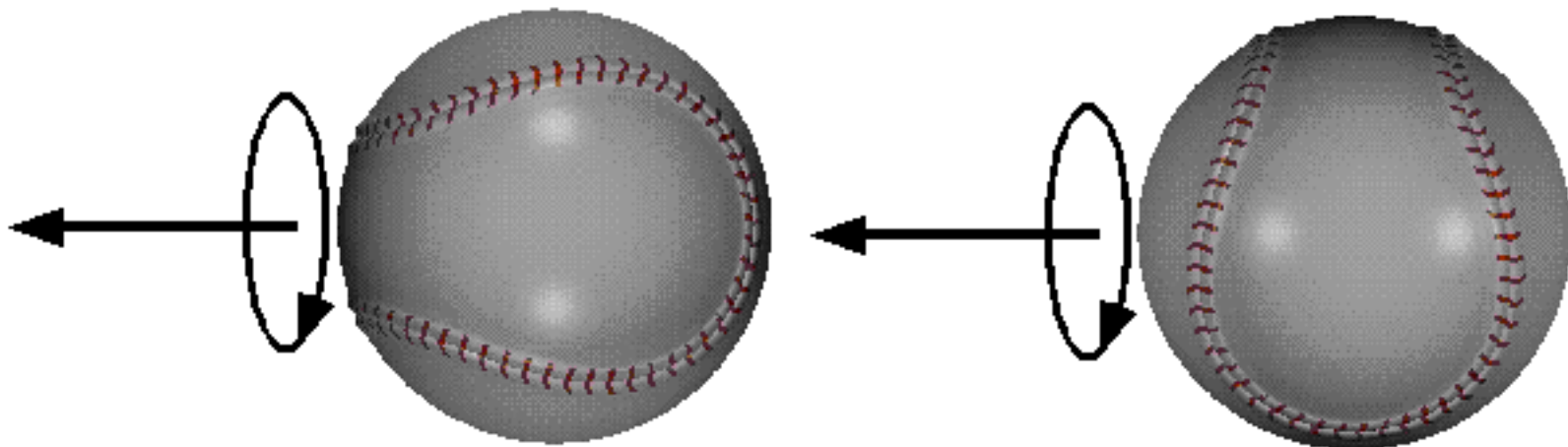


# 最適化フォーム(スロー再生)



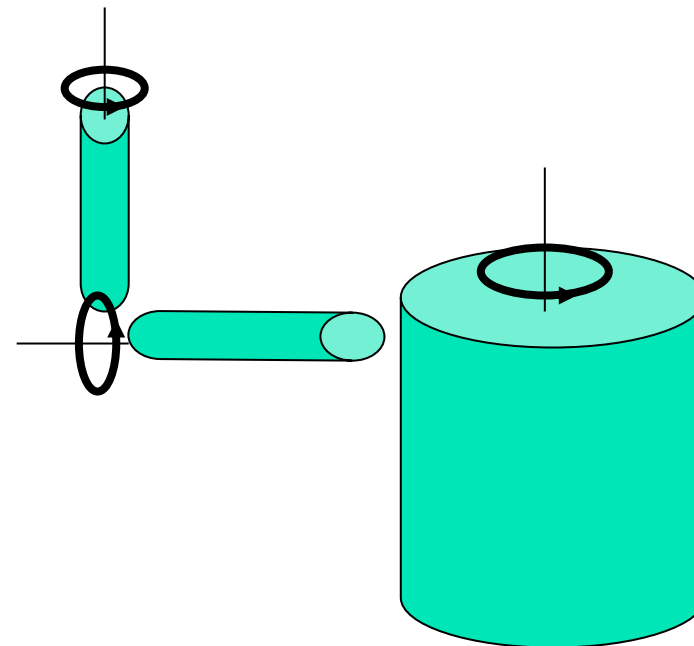
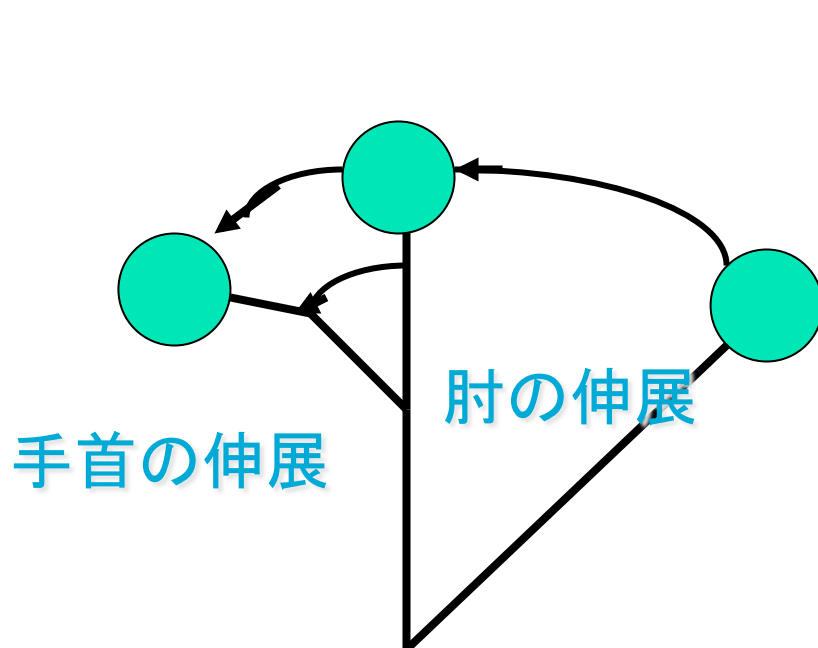
# 投球と球の回転の特徴

- 手のひらが正面でなく体の内側向き
- 回転軸が進行方向と同じ
- 同じ縫い目パターンが正面
- 手塚らがジャイロボールと呼んでいる球



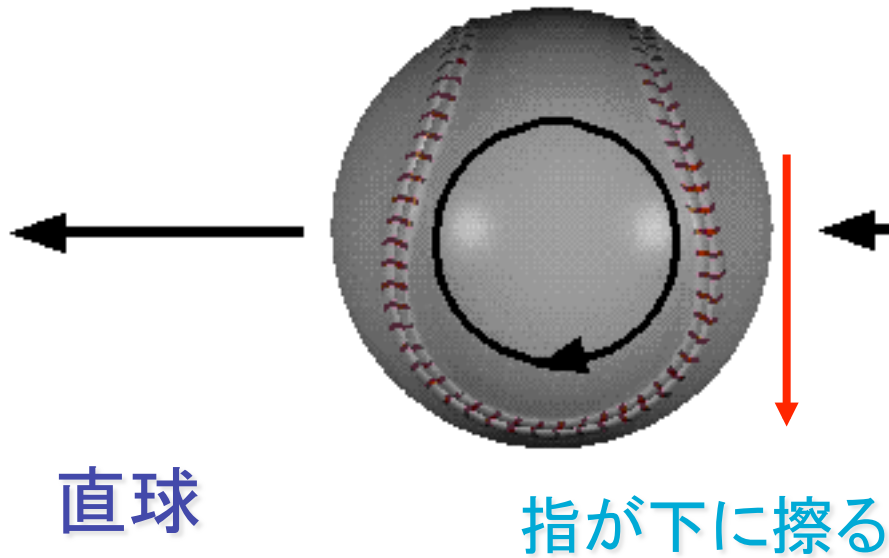
# 投球フォームの違い

- 三重振り子式(直球)と三重回旋式(GB)

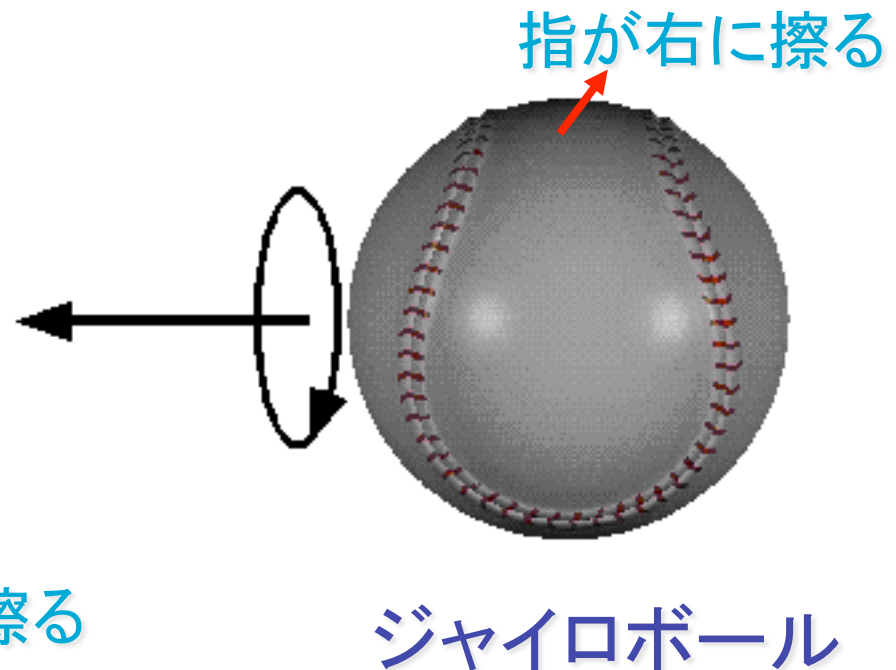


# ボール回転の違い

- 手首のスナップ



- 回旋運動





# プロ野球投手の投球動作の 生体力学的エネルギー解析

---

青木 慶(産総研)

持丸正明(産総研)

姫野龍太郎(理研)



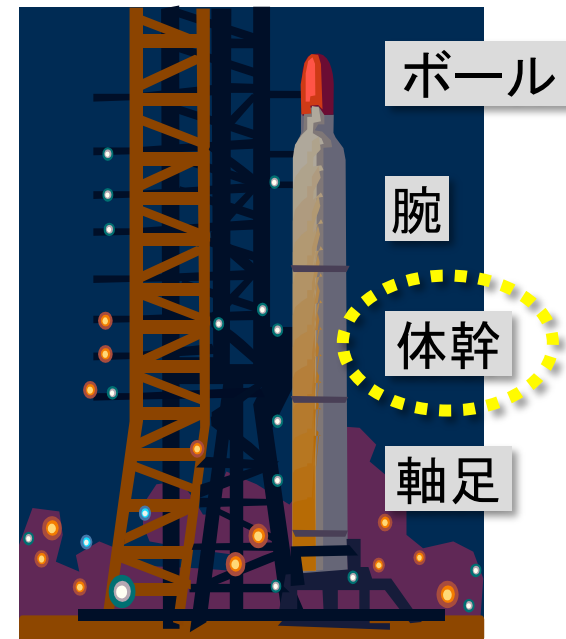
# 「長持ちする投球」とは？

- 本研究における投球の定義
  - ボールを18.44 m先に速く真っ直ぐ投げる

- 投球原理



=

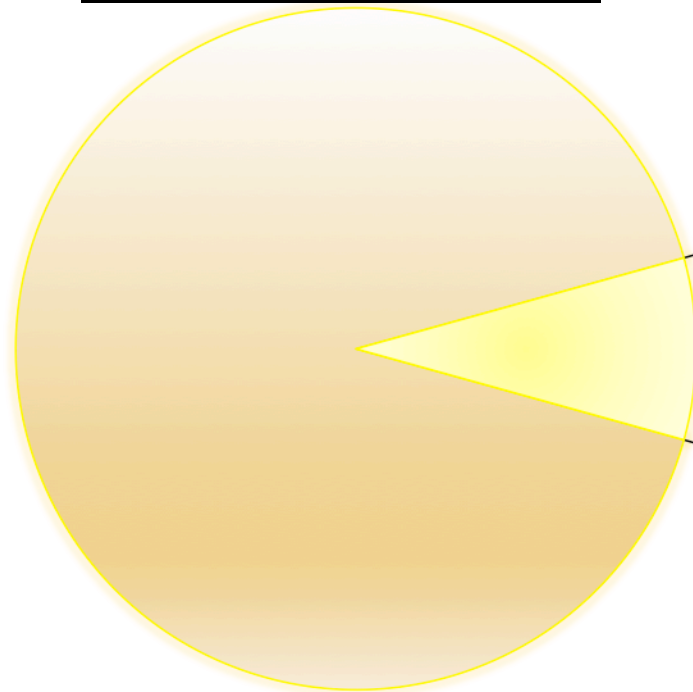


?

# 日本の野球人口

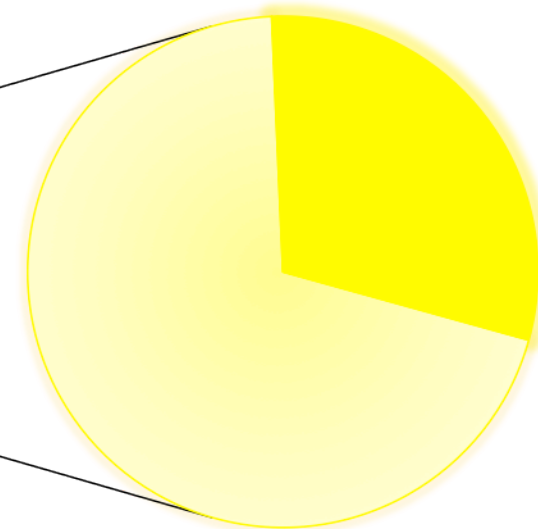
## ■ 総務省統計局平成18年度

10歳以上人口



野球人口: 970万人  
(8.6%)

野球人口



10~19歳: 297万人  
(野球人口の約3割)



# 若年層が野球を続けられると...

---

- 個人
  - 心身の健康増進
- 社会
  - コミュニティの活性化
- メーカー
  - 野球用品の購買力

傷害回避・予防の必然性  
パフォーマンスの維持・向上

# 研究の目的

---

- 長持ちする投手の  
投球動作のメカニズムの解明
  - 高い傷害発生率
  - 野球の道具に非依存
  
- 必要となる対象被験者
  - 長く野球を続けている
  - 高いパフォーマンスを持つ
  - 傷害が少ない

# 被験者

## ■ 現役プロ野球投手2名



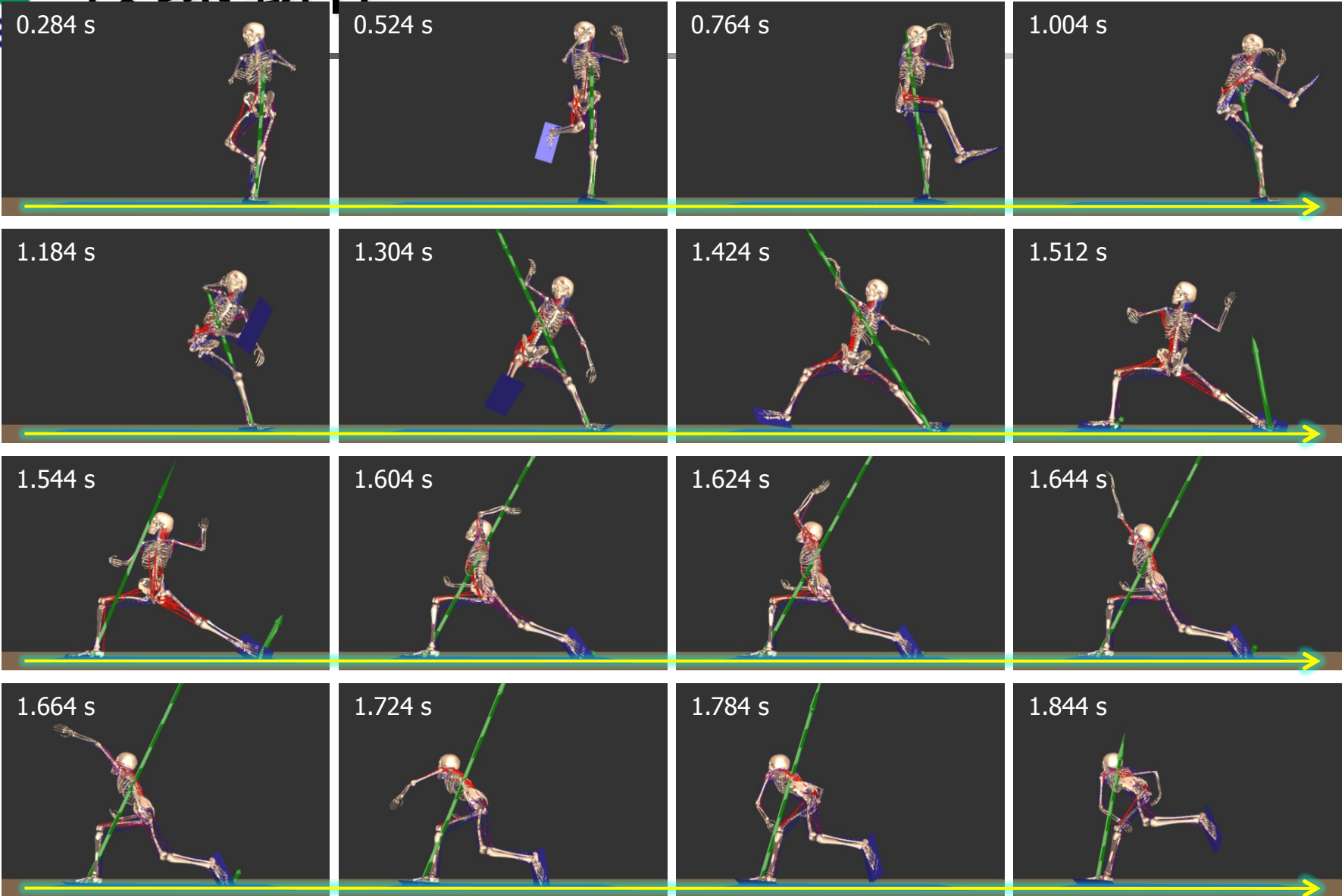
**被験者A(左投)** 現役20年以上  
身長 175.6 cm/体重 84.6 kg  
解析に用いた試技の球速121km/h



**被験者B(右投)** 2年目  
身長 182.1 cm/体重 84.1 kg  
解析に用いた試技の球速133km/h

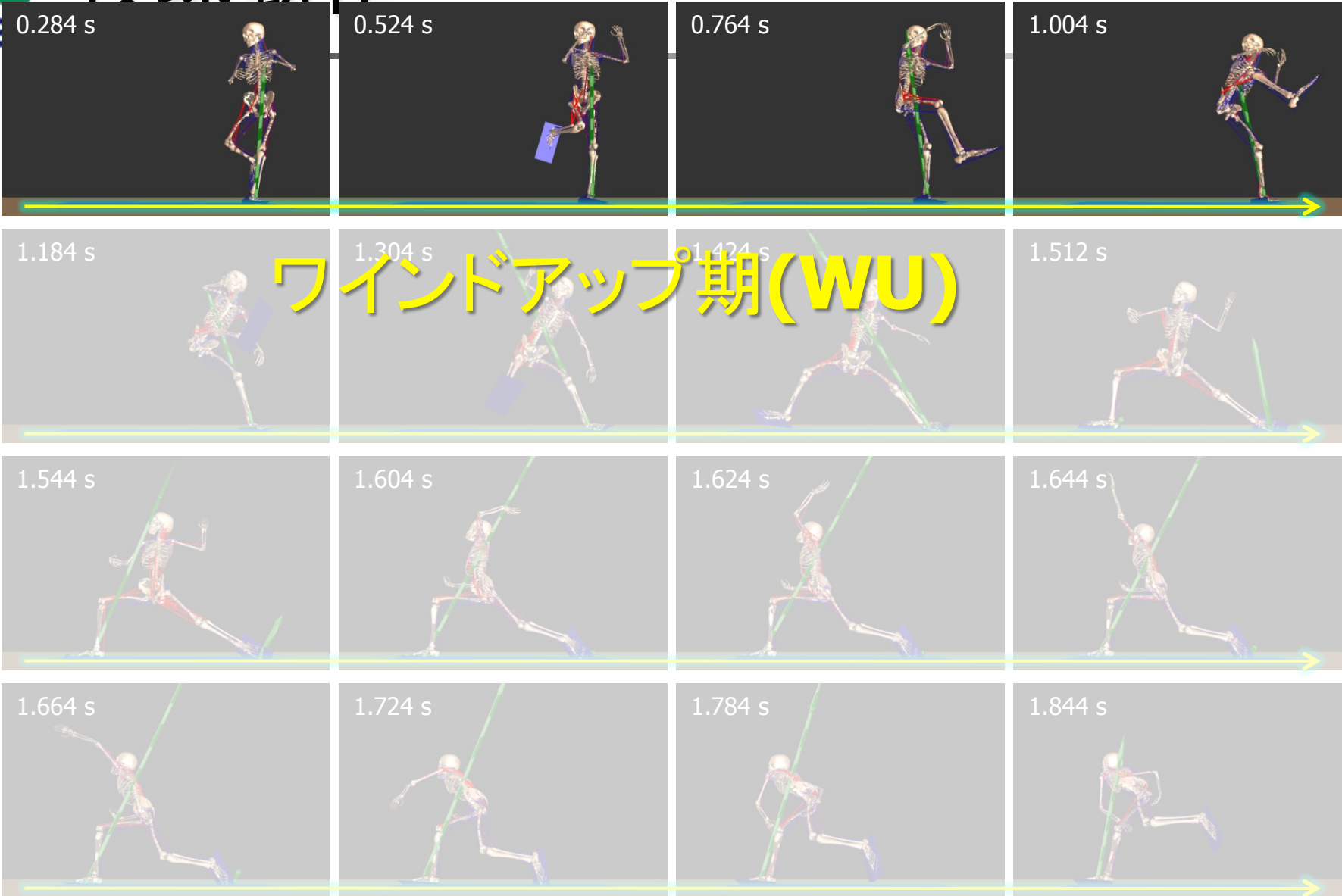


# 投球動作





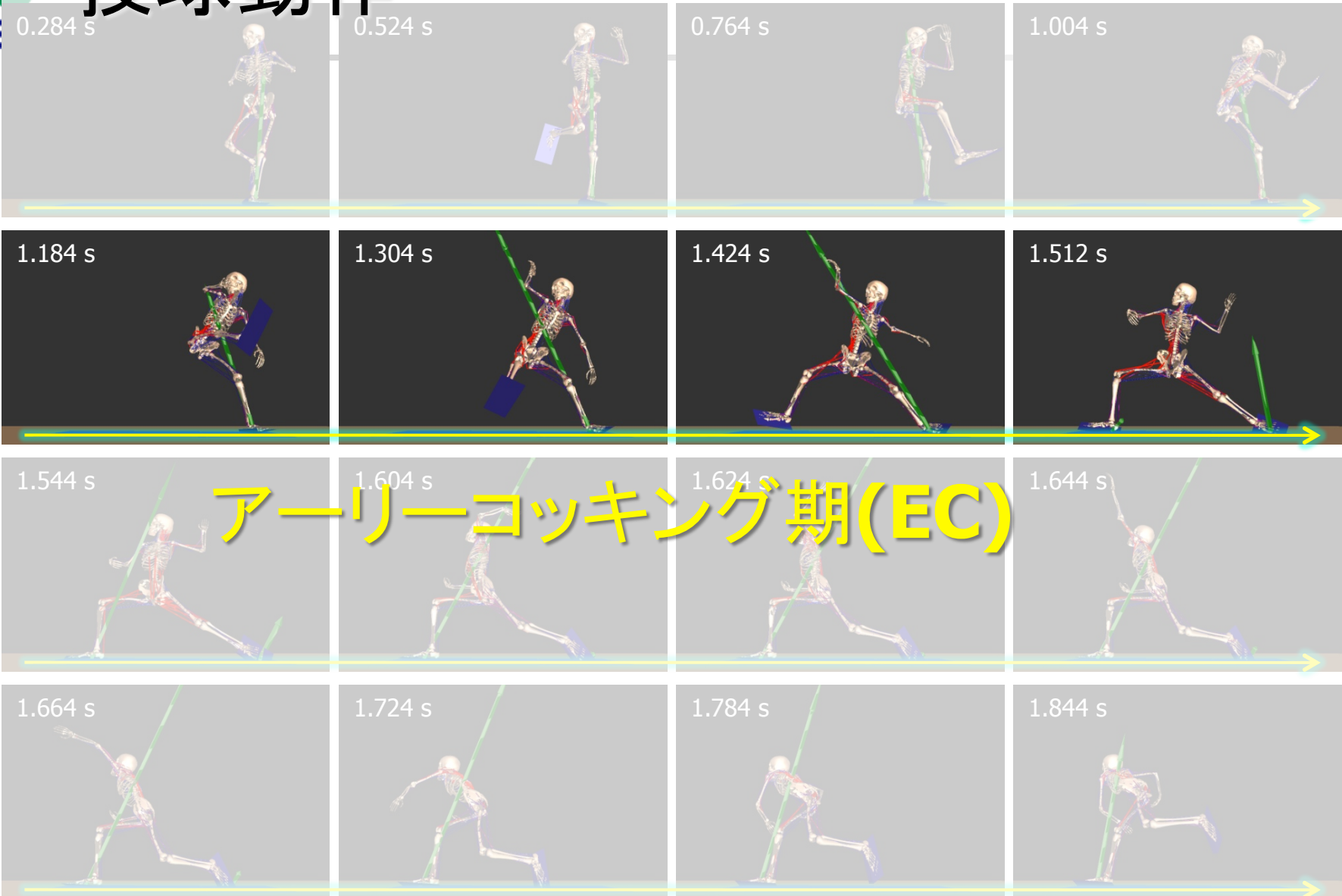
# 投球動作



ワインドアップ期(WU)



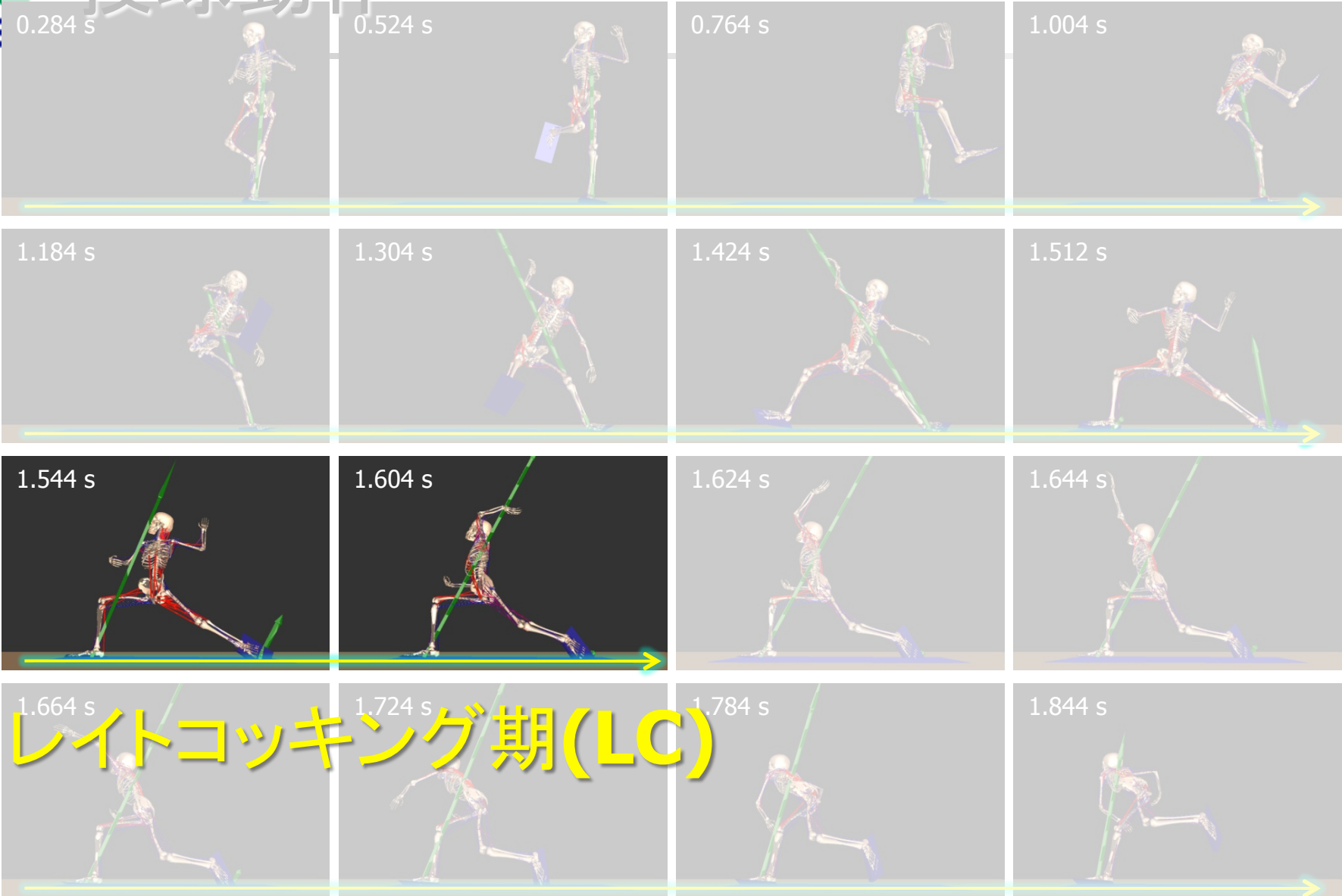
# 投球動作







# 投球動作



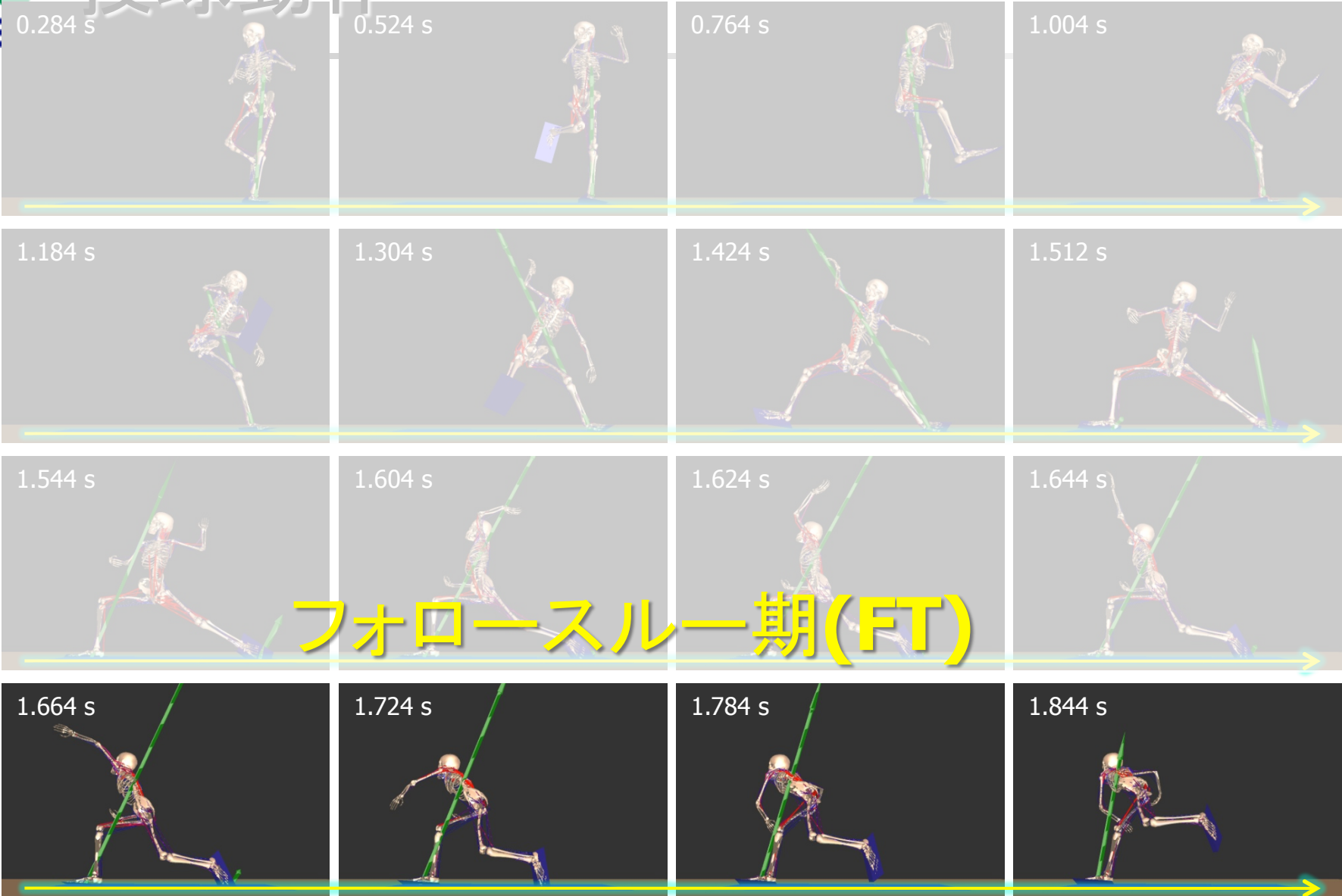


# 投球動作



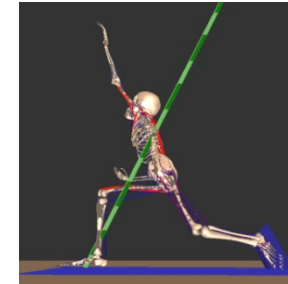
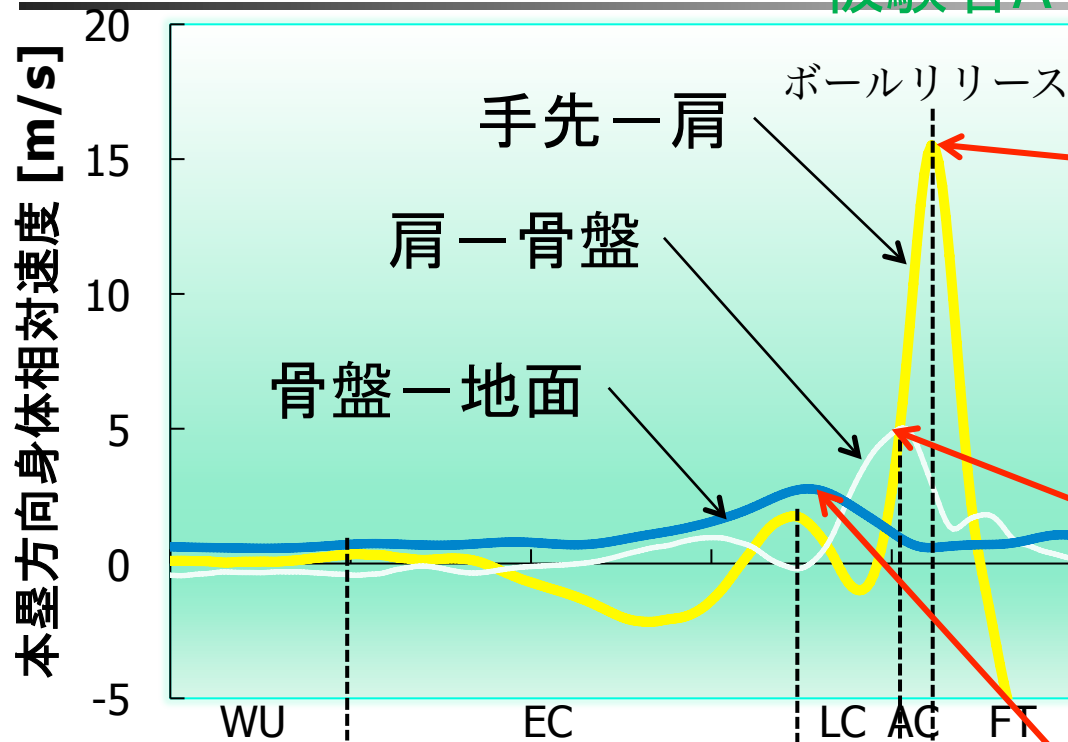


# 投球動作

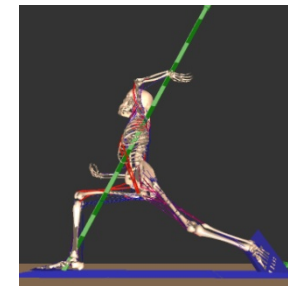


# 投球方向の身体各部位の相対速度

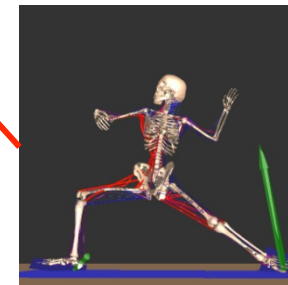
被験者A



ボールリリース



上体の回旋速度大



ピボット脚の蹴り出し

## 3段式ロケットシステム

- ① ピボット脚が骨盤を前方に送り出し、
- ② その勢いで捻れていた上体が戻り、
- ③ さらにその勢いで腕が振られてボールが射出される

# エネルギー解析

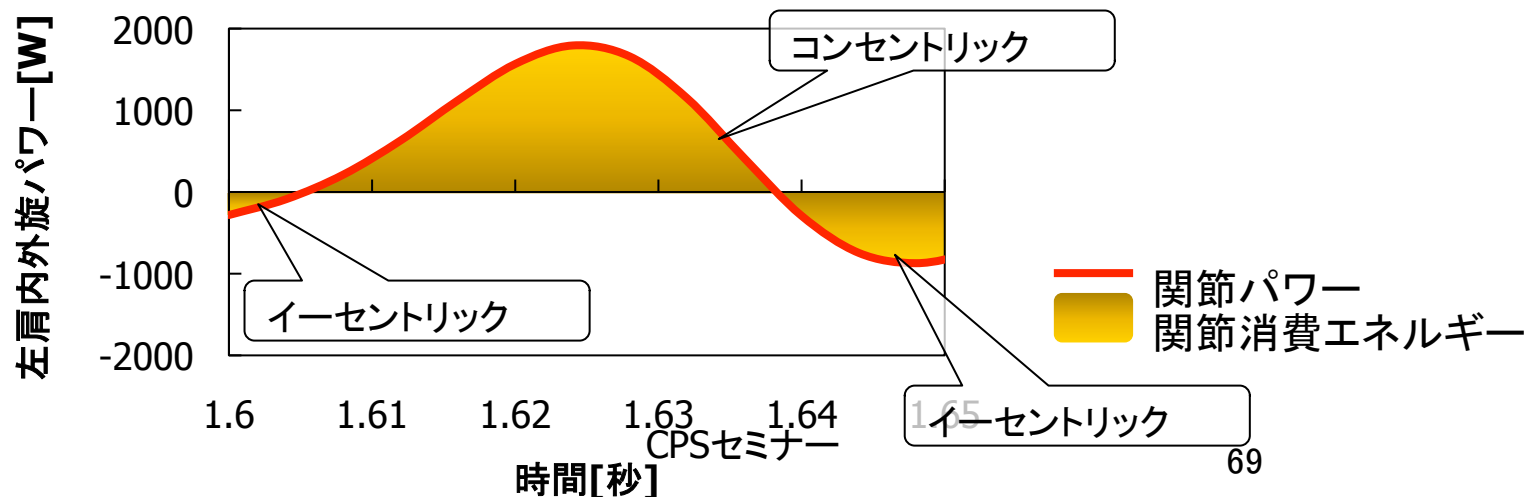
## ■ 関節パワー

= 関節モーメント × 関節角速度

+ : コンセントリック (短縮性収縮)  
 - : イーセントリック (伸張性収縮)

## ■ 関節消費エネルギー

= 関節パワーの運動中の総和 (面積分)



# エネルギー解析が評価できないもの

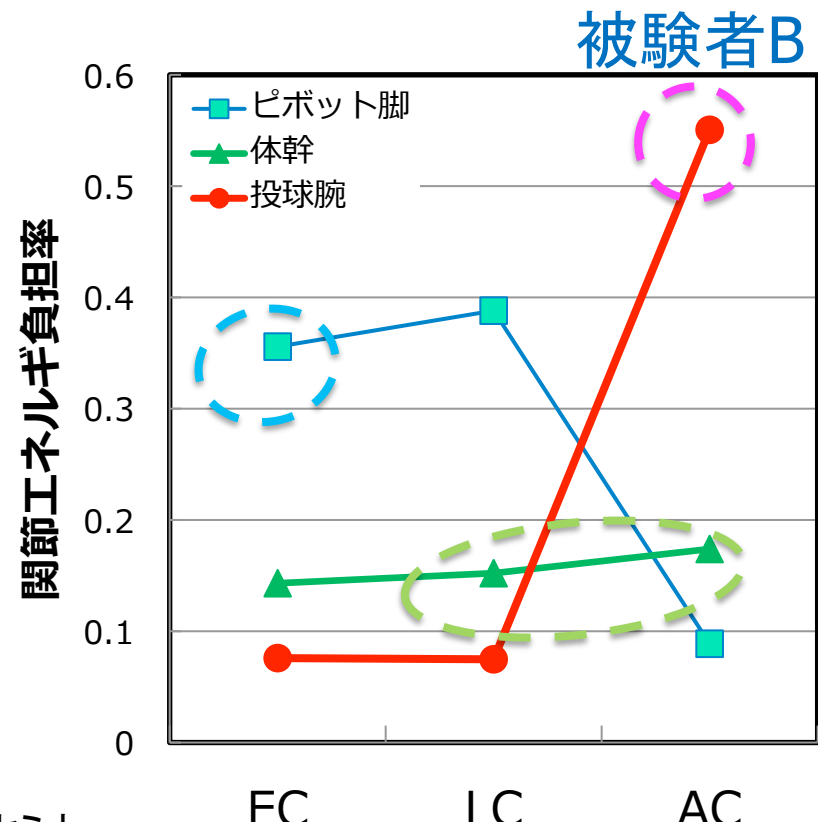
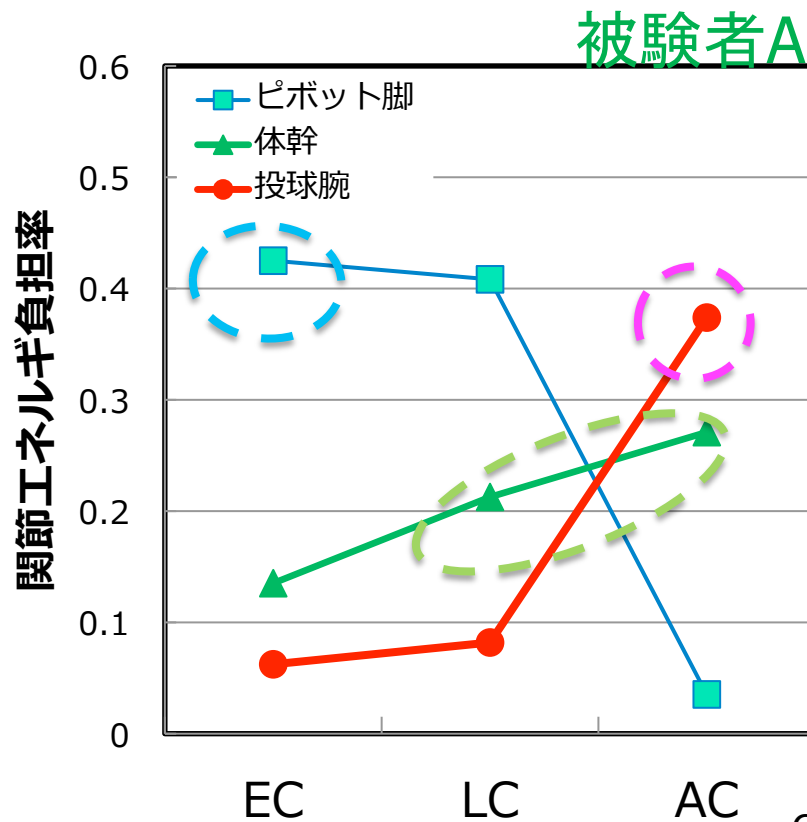
- 筋骨格系
  - 拮抗筋の影響
  - 靭帯・腱・関節包などの粘弾性の影響
- 競技としての投球能力
  - 打者から見た打ちやすさ
  - 走者から見た走りやすさ

エネルギー解析：両者の違いの定量化

# 投球メカニズムの定量化

## ■ 関節エネルギー負担率

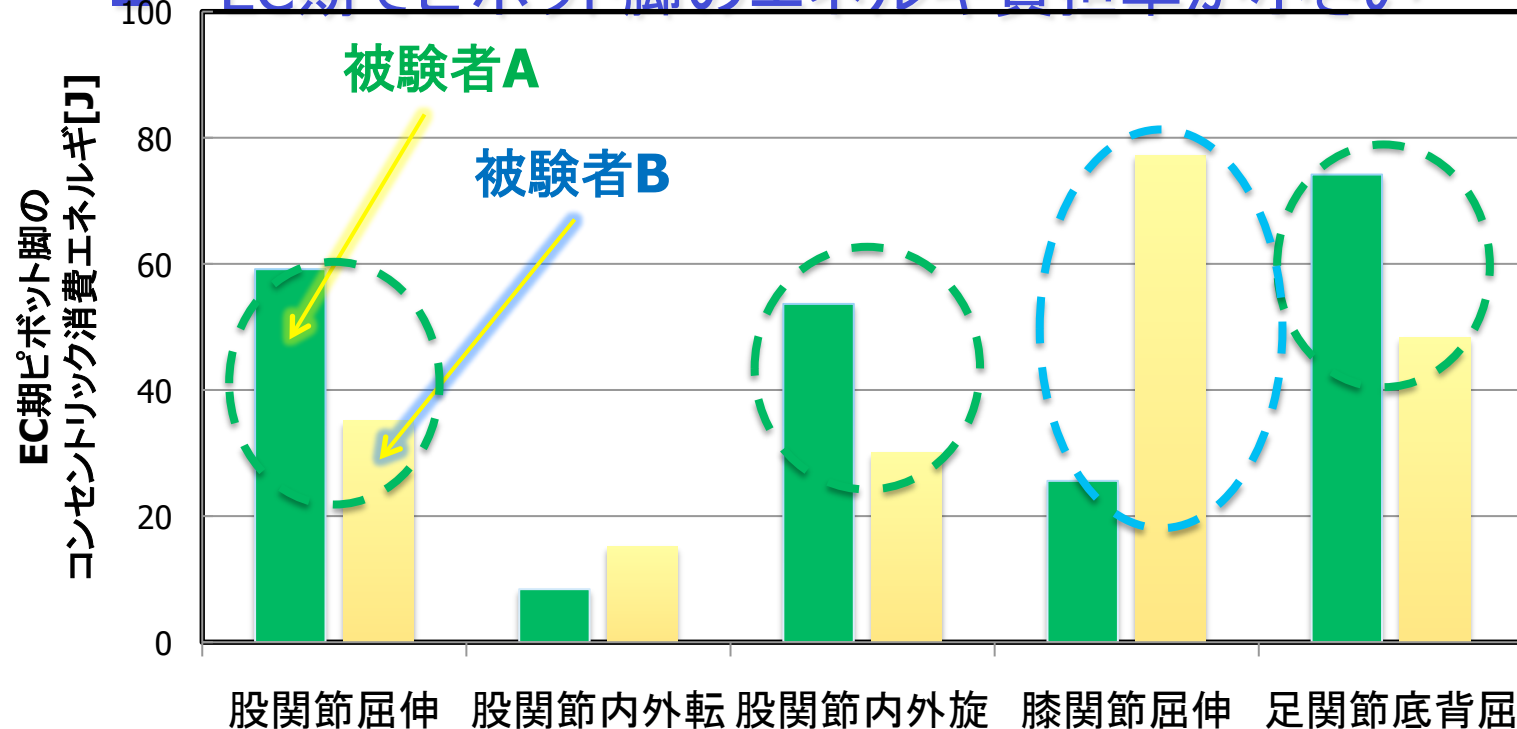
$$= \frac{\text{各部位のコンセントリックエネルギー消費}}{\text{全身のコンセントリックエネルギー消費}}$$



# ピボット脚の使い方の違い

## ■ 被験者Bは被験者Aと比べて...

■ EC期でピボット脚のエネルギー負担率が小さい



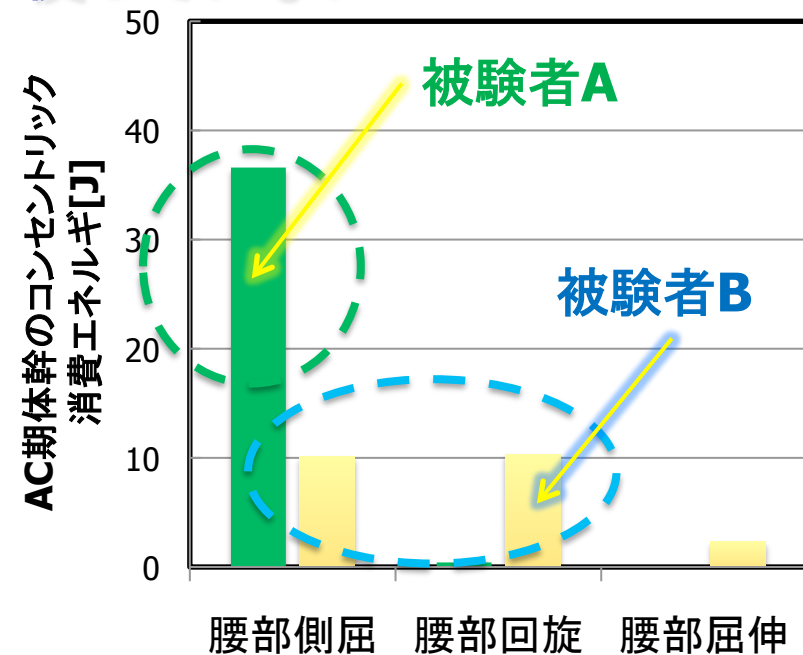
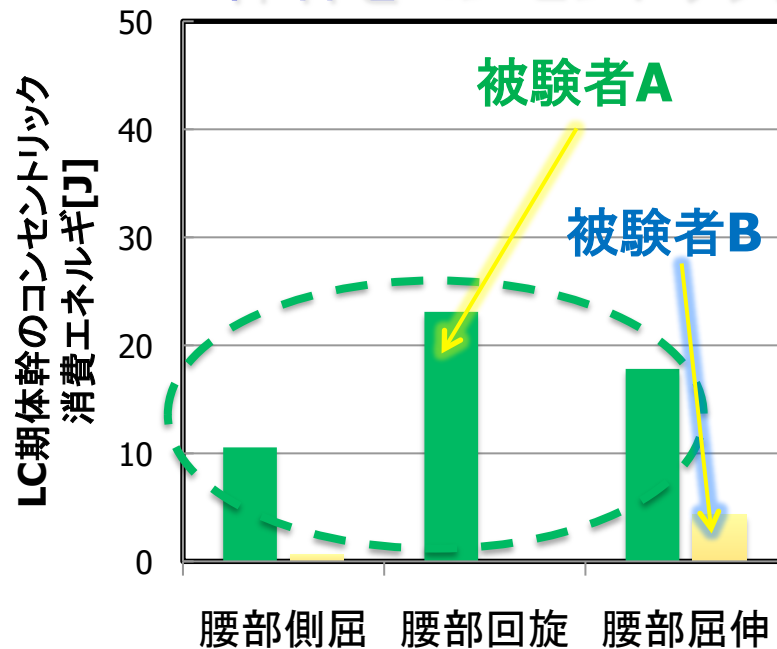
**蹴り出しを膝だけで負担**



# 体幹の使い方の違い

## ■ 被験者Bは被験者Aと比べて...

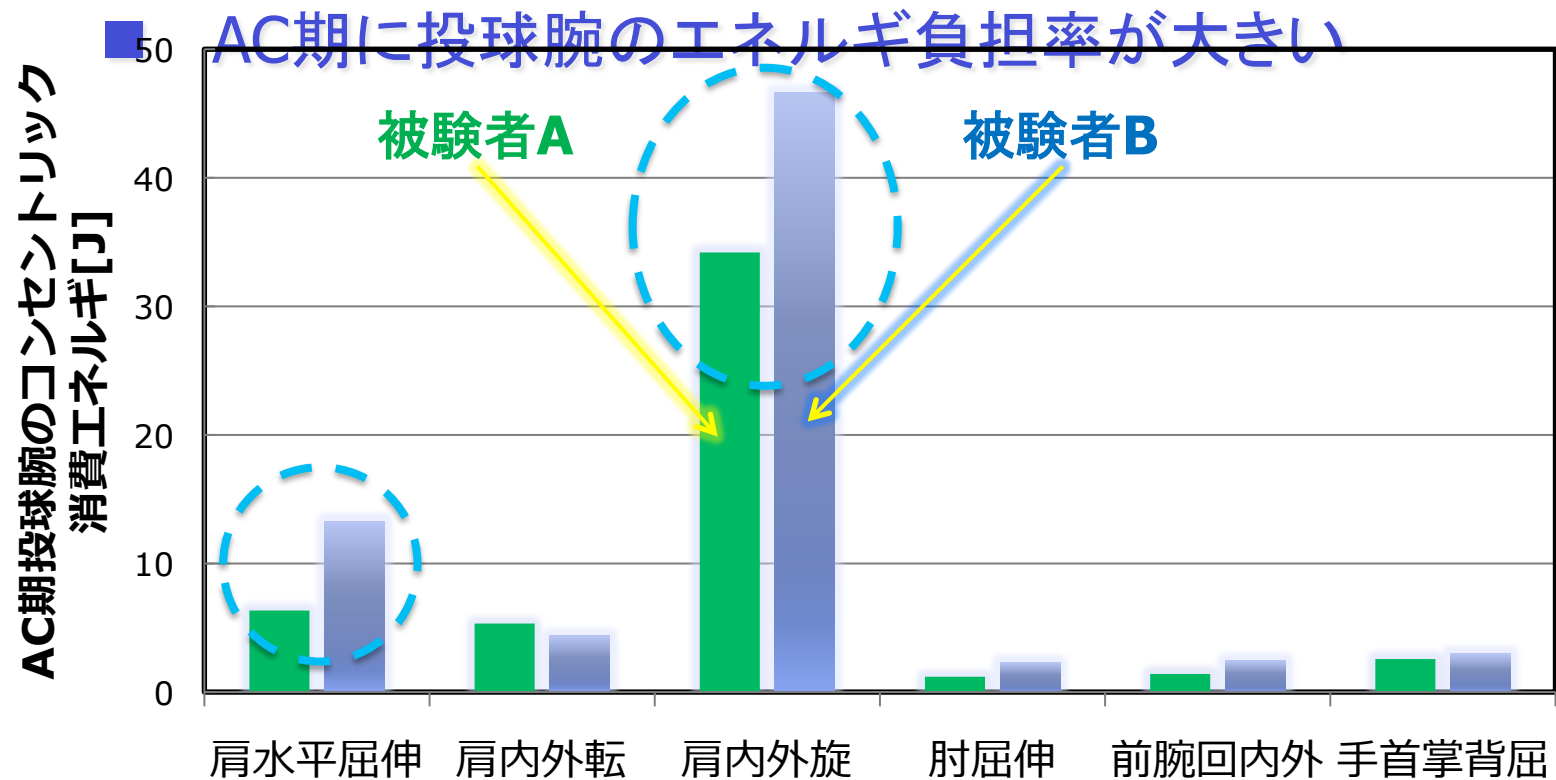
■ 体幹をコンセントリックに使っていない



腰部を使うタイミングが遅い

# 投球腕の使い方の違い

## ■ 被験者Bは被験者Aと比べて...



投球腕の挙動が速い

# 投球効率

- 速さとエネルギー負担の両方を評価
  - ＝ 投球直後のボールの運動エネルギー
  - EC～AC期の全身のエネルギー消費
  - ボール速度大→投球効率○
  - 全身エネルギー消費大→投球効率×

## 投手の投球持久力

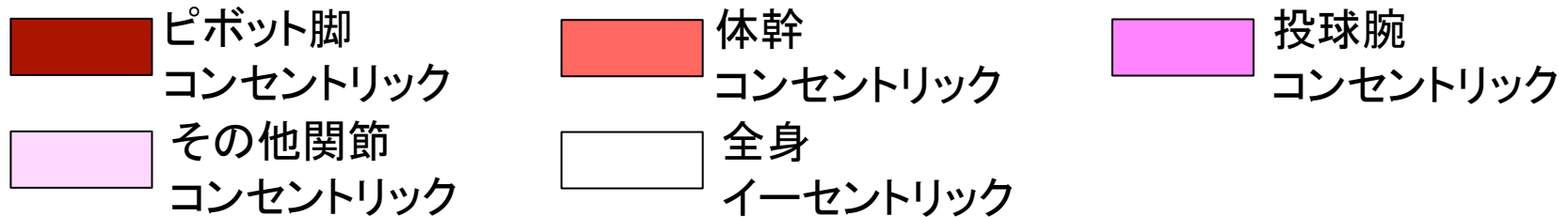
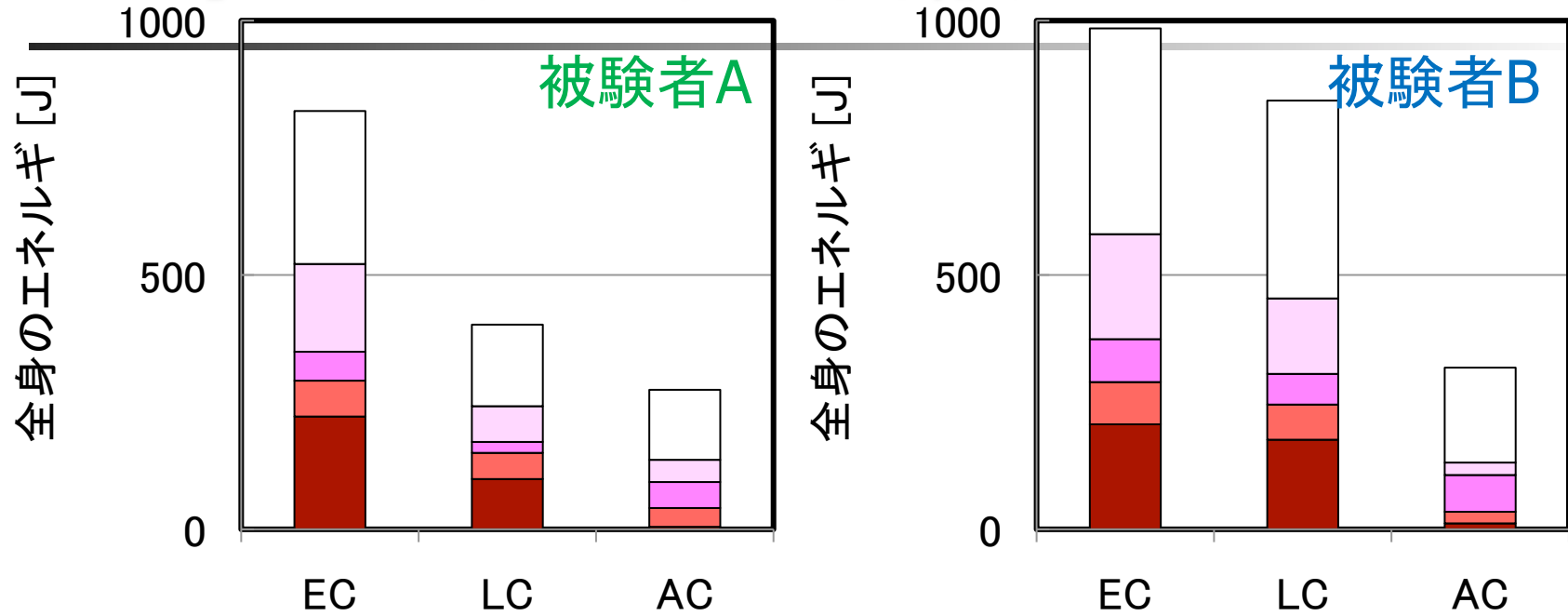


# 投球効率の比較

	被験者A	被験者B
球速 [m/s]	33.6	36.9
ボールの 運動エネルギー [J]	79.1	95.5
全身エネルギー [J]	1498.9	2145.3
投球効率	0.05276	0.04454

被験者A > 被験者B

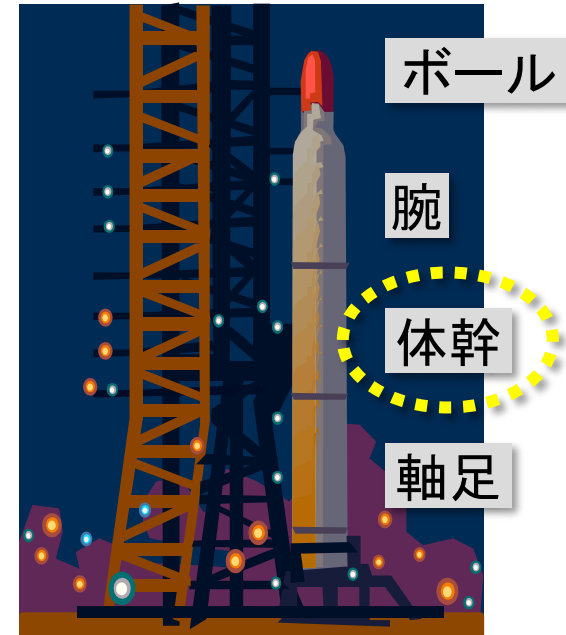
# 全身のエネルギーの内訳



**LC期のイーセントリックな筋活動が投球効率に影響**

# まとめ

## 投げ球百押



- 長持ちする投手は...
- 全身を下肢から順に使用
- 特にLC期に体幹で加速

評価しうる  
定量化指数



# 実験条件

## ■ 計測・解析システム

- モーションキャプチャシステム
  - Vicon NEXUS, Vicon社, 250 Hz
- 床反力計
  - BP400600-1000PT, AMTI社, 1000 Hz
- 高速度カメラ
  - MEMRECAM GX-1, ナック社, 1000 Hz
- 解析システム
  - SIMM, MusculoGraphics社

# 解析方法

- 臨床バイオメカニクスの運動解析
  1. コンセントリック（短縮性収縮）
  2. イーセントリック（伸張性収縮）



関節パワー・消費エネルギーで評価



# 関節パワー

## ■ 定義

■ 関節パワー = 関節モーメント × 関節角速度

＋：コンセントリック  
－：イーセントリック

## ■ イメージ

関節モーメント (筋肉)  
関節角速度 (回転速度)  
関節パワー (出力)

対比

トルク (エンジン)  
エンジンの回転数 (回転速度)  
馬力 (出力)



関節パワー = 関節モーメント × 関節角速度

馬力 = トルク × エンジンの回転数

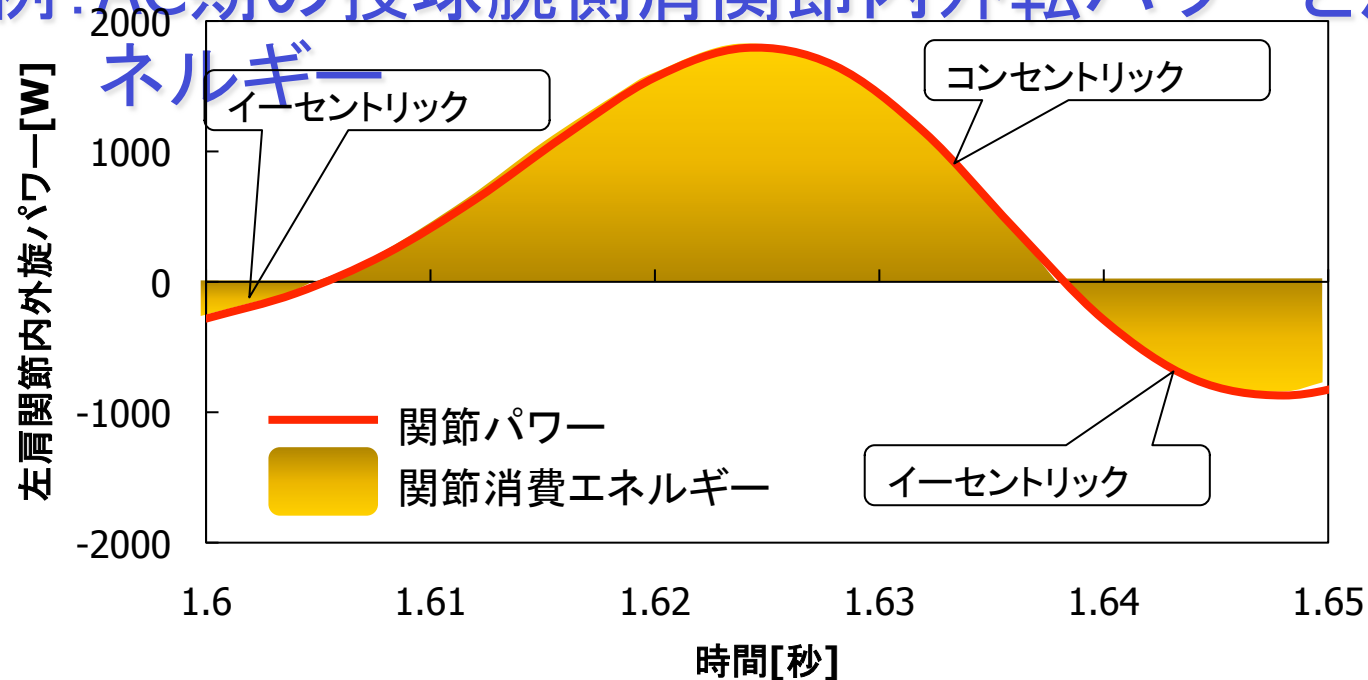
# 関節消費エネルギー

## ■ 定義

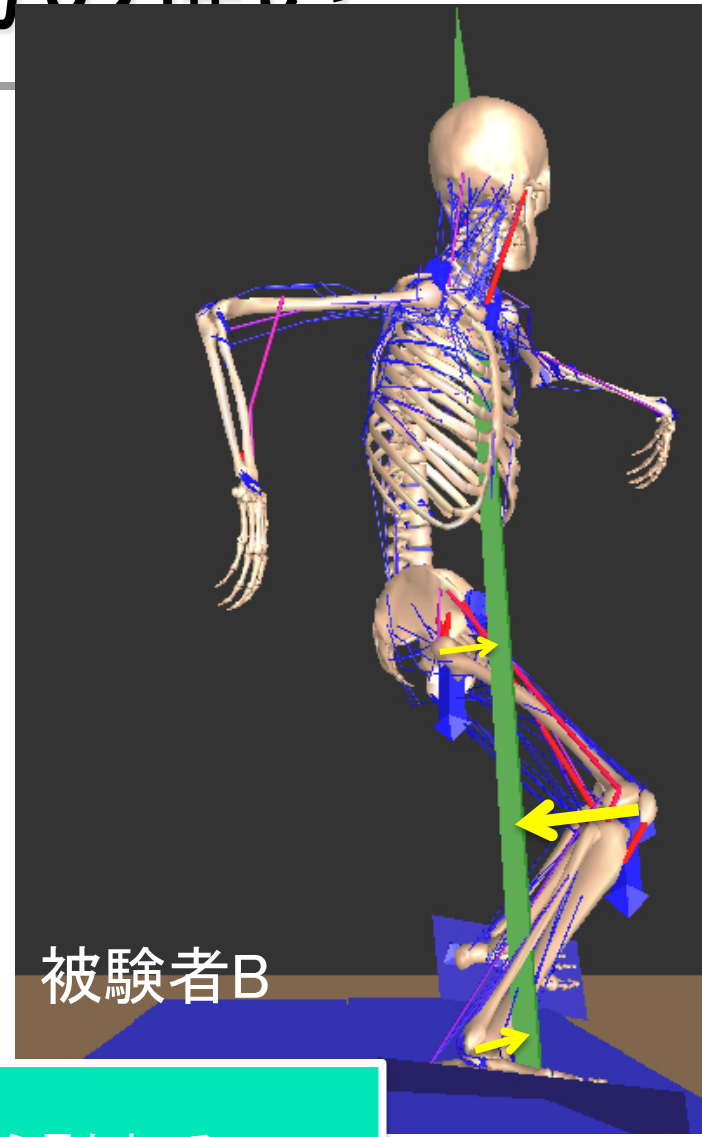
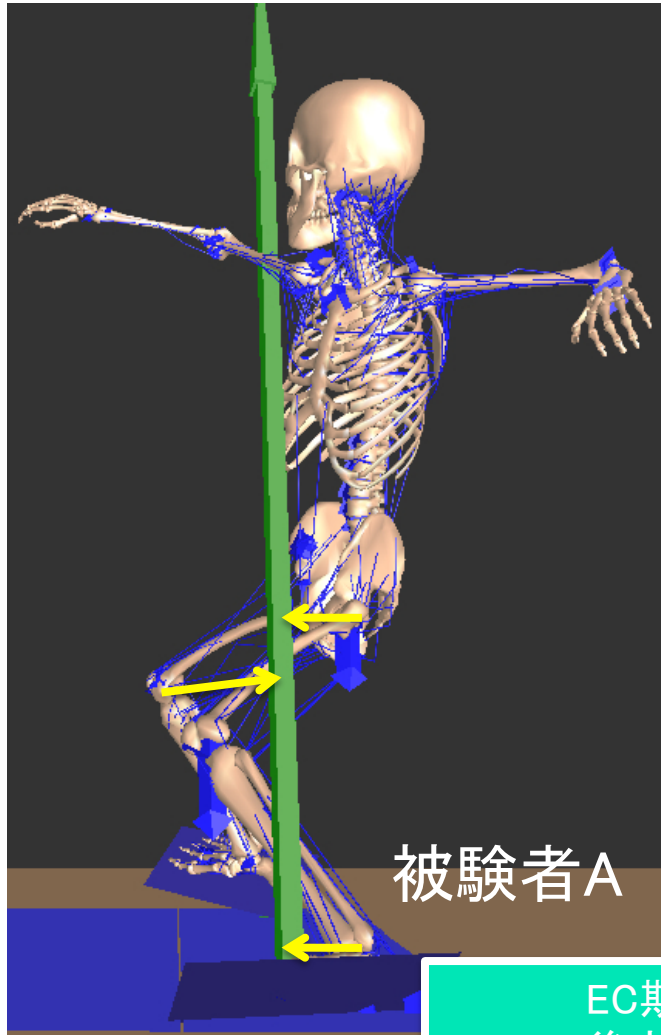
### ■ 関節消費エネルギー

= 関節パワーの運動中の総和 (面積分)

例: AC期の投球腕側肩関節内外転パワーと消費エ



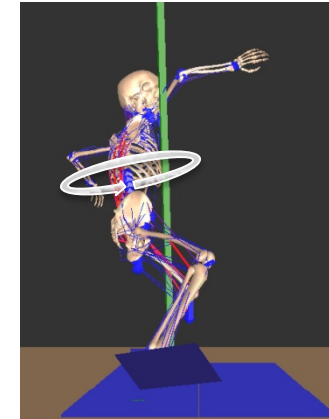
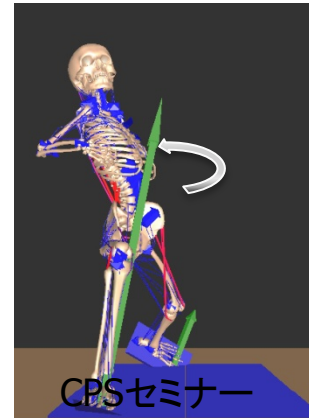
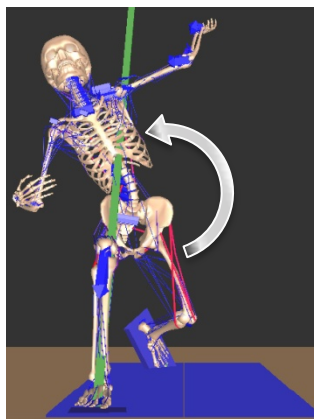
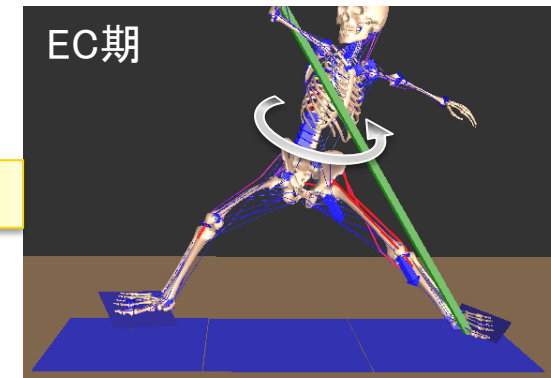
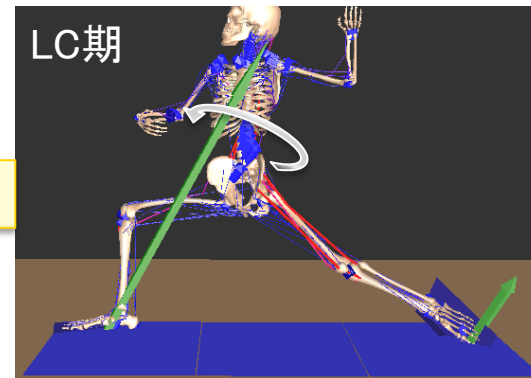
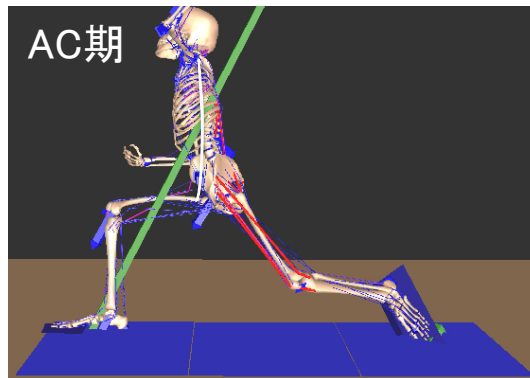
# ピボット脚の使い方の違い



EC期：  
後方から見たところ

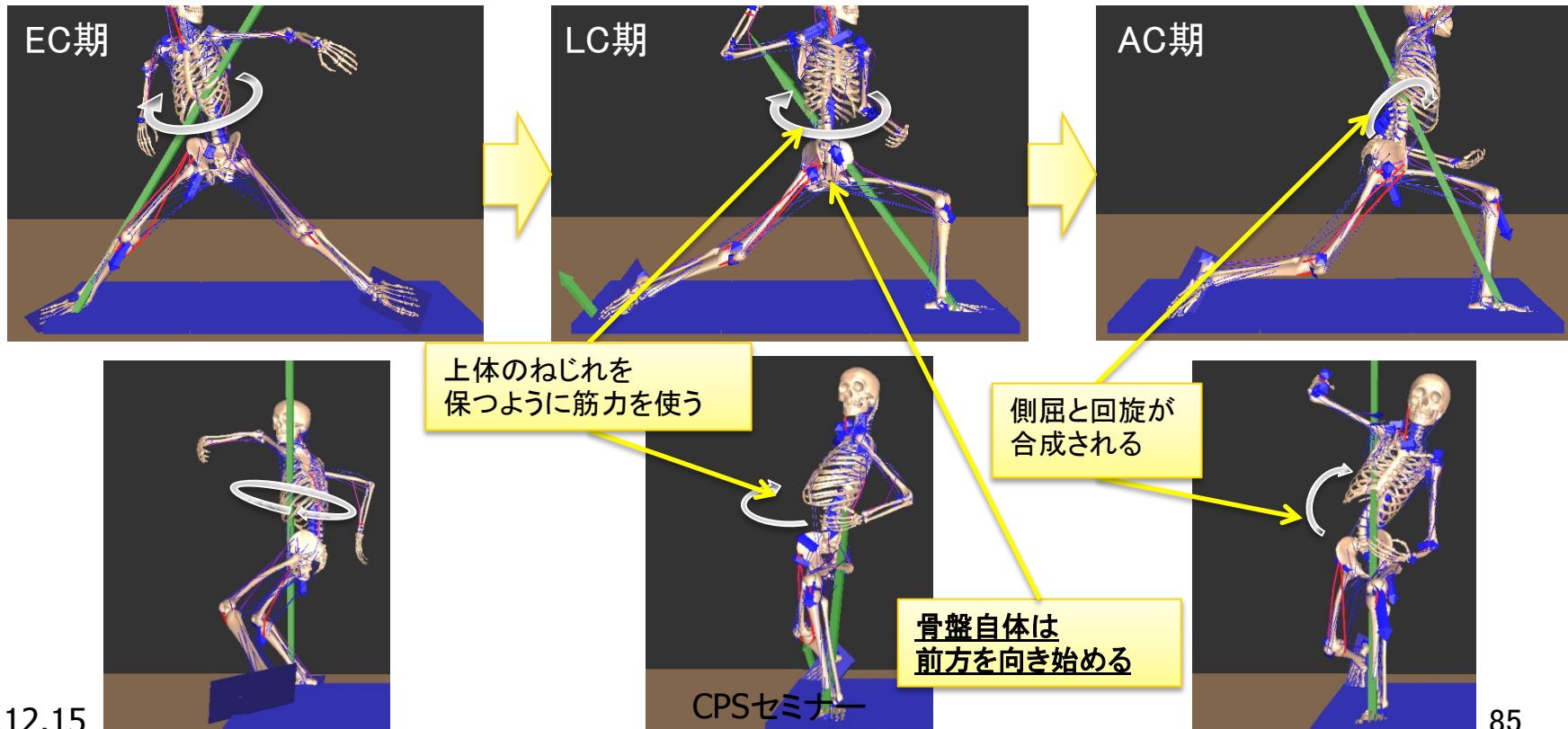
# 被験者Aの体幹の使い方

- EC期: 骨盤に対して上体を投球腕側にねじる
- LC期: ねじった腰部を元に戻すように体幹を動かす
- AC期: 腰部がねじれないようにしつつ  
投球腕を挙げるように側屈



# 被験者Bの体幹の使い方

- EC期: 骨盤に対して上体を投球腕側にねじる
- LC期: ねじった上体を保ち続けている
- AC期: 保ち続けた上体のねじれを元に戻す



# 全体のまとめ

---

- 野球の投球も科学的な分析でパフォーマンスを向上することができる
- その場でフィードバックできることが理想
- 現在は特殊な装置、特殊な環境下で計測
- 分析には人手で長時間の作業が必要
- しかし、それも定型化することができれば、改良の余地がある
- 今よりパフォーマンスを向上させるのに、どこをどう変えれば良いか、どこをどうトレーニングしたら良いか、その答えを示すような分析手法を開発する必要がある