

# 複合領域最適設計の展望

---

東京大学

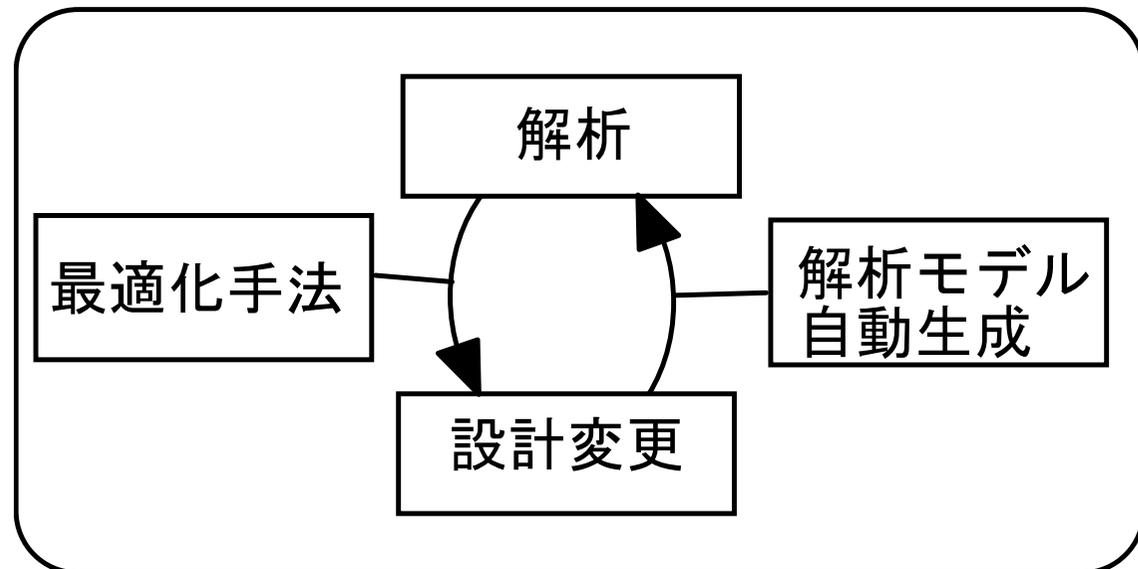
人工物工学研究センター

鈴木克幸

# 最適設計とは

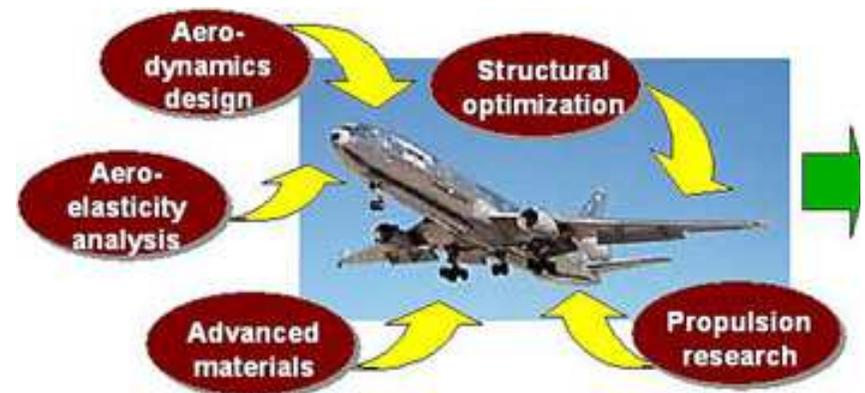
- 解析結果に基づき設計変更を行う
- ある評価関数を最大(最小)にする。

解析＋最適化



# 複合領域システムの最適化

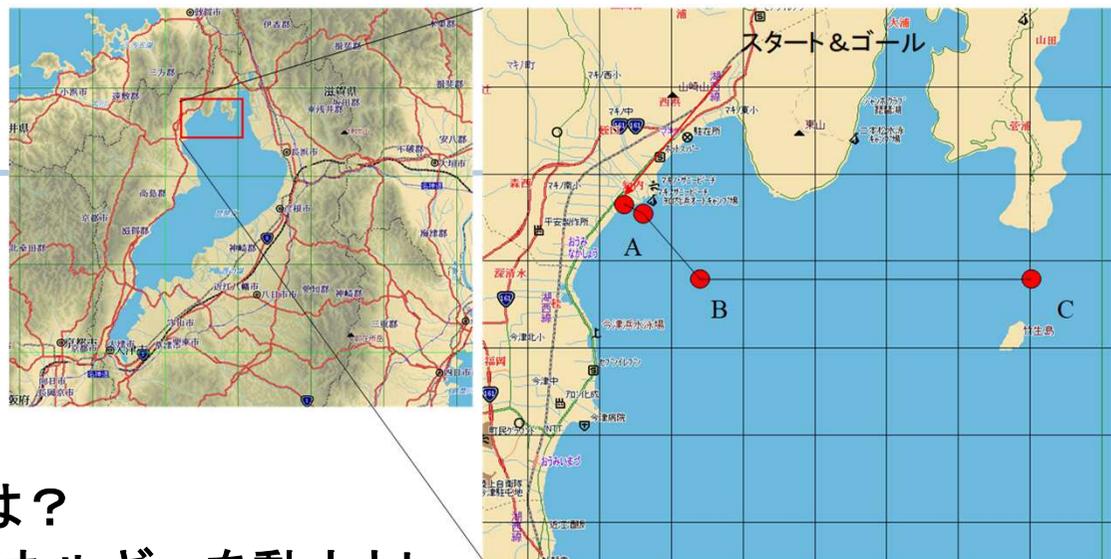
- 1990年代に、航空宇宙分野を中心に複合領域最適設計 (Multidisciplinary Design Optimization, MDO) という考え方が提案された。
- 構造強度、衝突解析、流体抵抗など、設計の際に必要な複数の領域 (Discipline) を、単独領域で最適化を行うのみでなく、全体を考慮しながら設計を行うという考え方。



# びわ湖クルーレスソーラーボート大会

毎年8月に琵琶湖で行われる。

A→B→C→B→Aの周回コースのタイム及び  
ポイント通過の有無で合計得点を競う。



❖クルーレスソーラーボートとは？

ソーラーパネルから得られるエネルギーを動力とし、  
GPSによって自動航行する無人型ボートのこと

## "Evarduino"



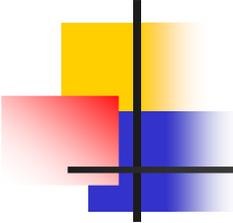
- Hydrofoil
- Improved "EVA"
- Main wing and canard
- Materials: CFRP, PS form

## "Trident"

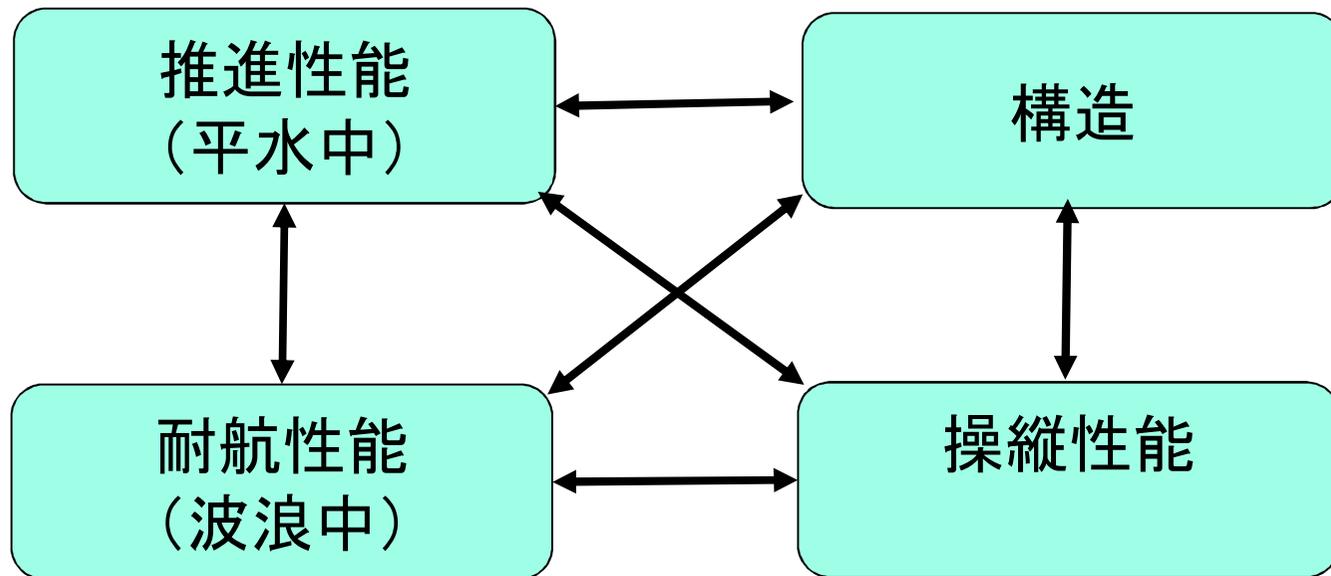


- Planing boat with canard
- Materials; CFRP, PS foam

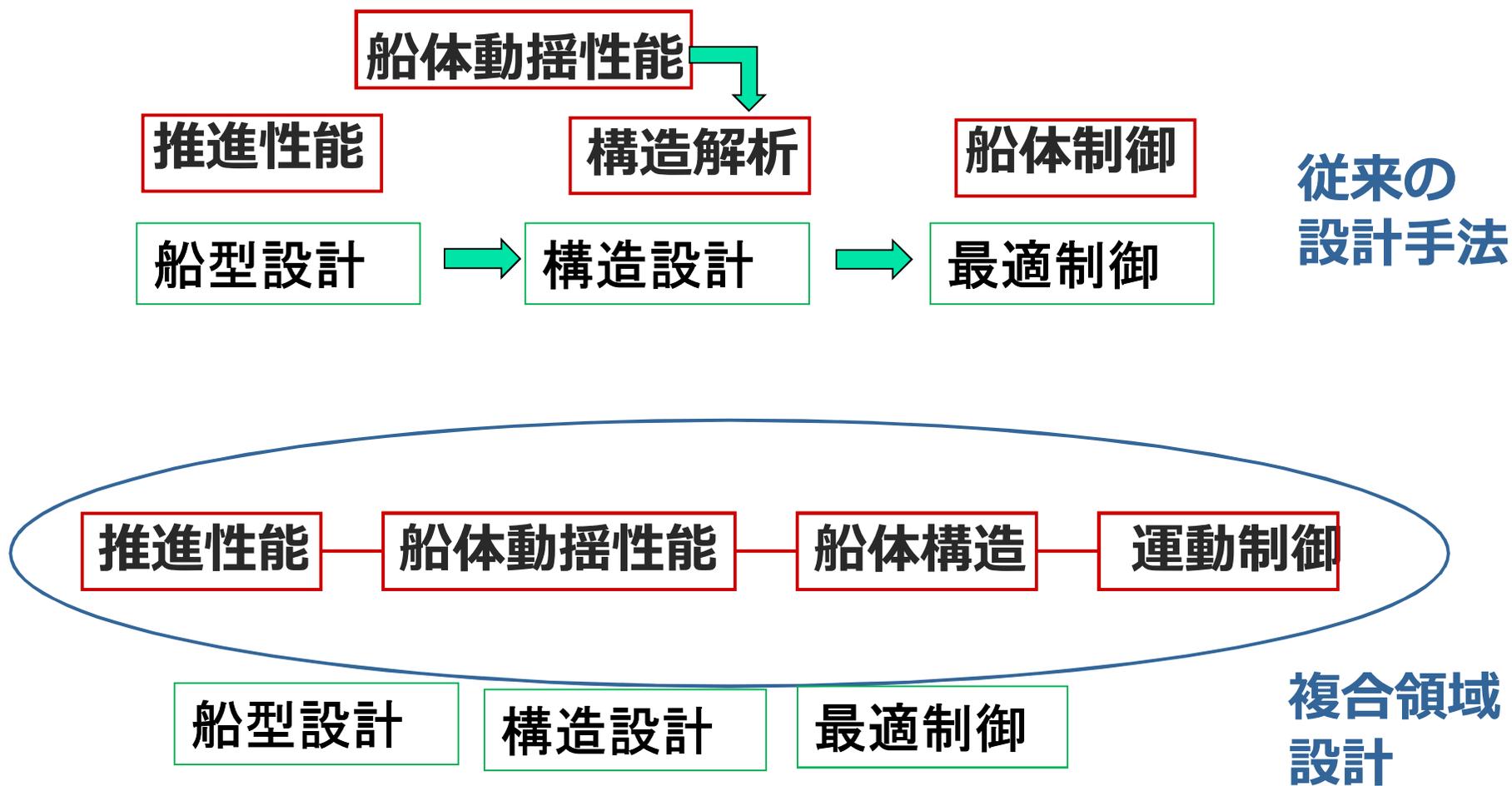




# 船舶設計における複合領域



# 船舶の複合領域最適化



# 複合領域最適設計での評価関数・制約条件

## 制約条件

- ・ 主船体・副船体の縦曲げ強度
- ・ 横梁の衝撃荷重に対する強度

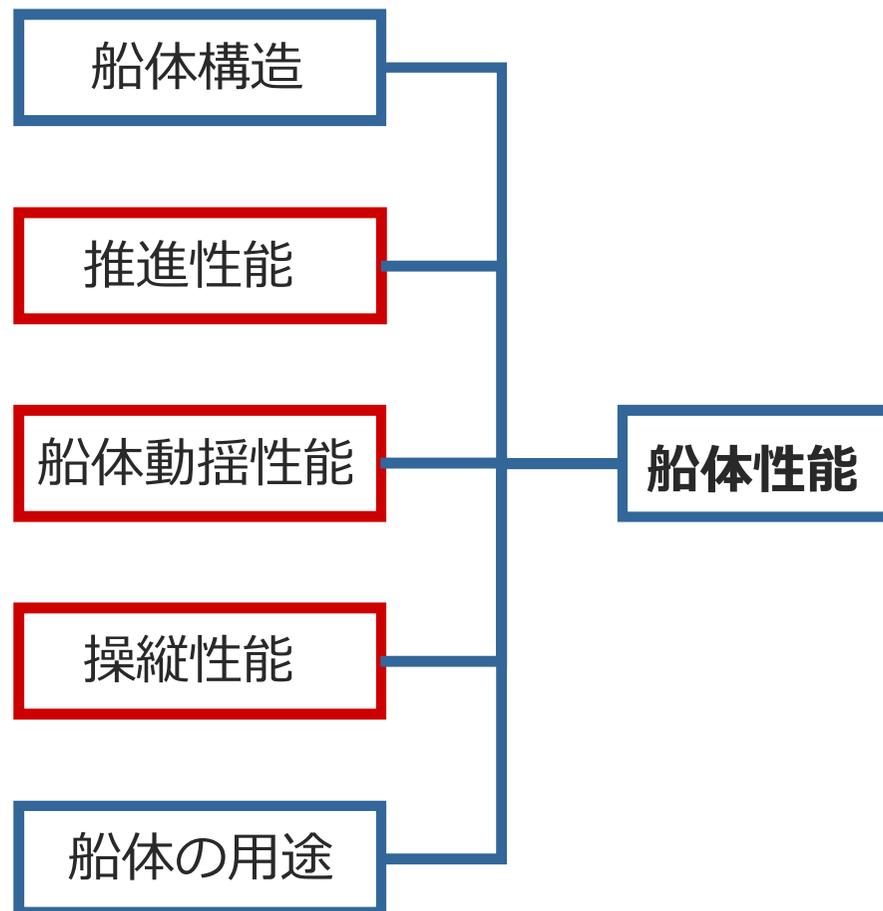
- ・ 推進抵抗とパネルの大きさから導かれる推進速度

## 評価関数

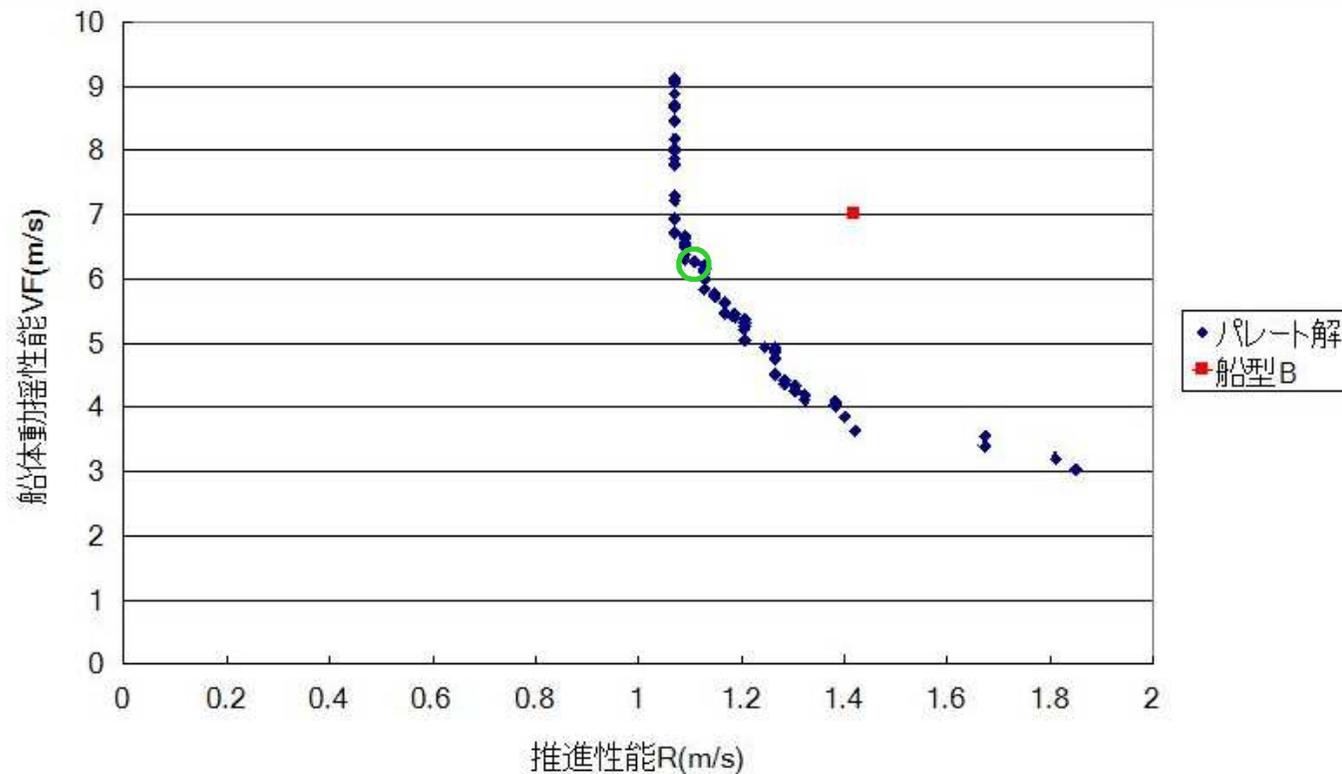
- ・ 船首部の動揺

## 制約条件

- ・ ソーラーボート大会規則

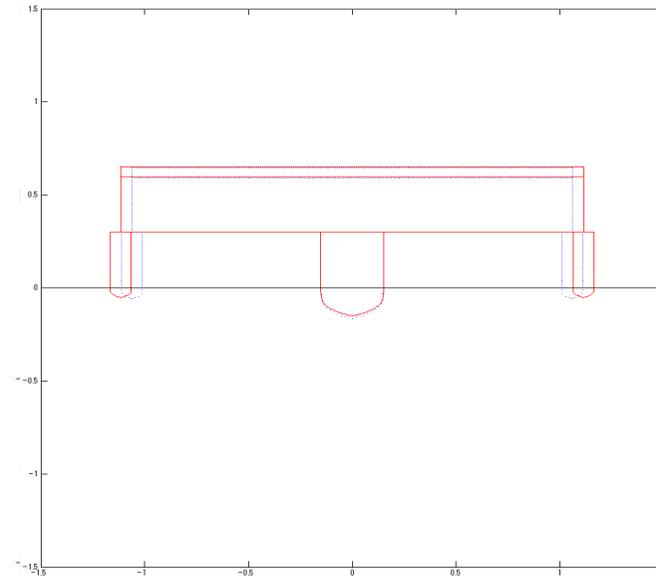
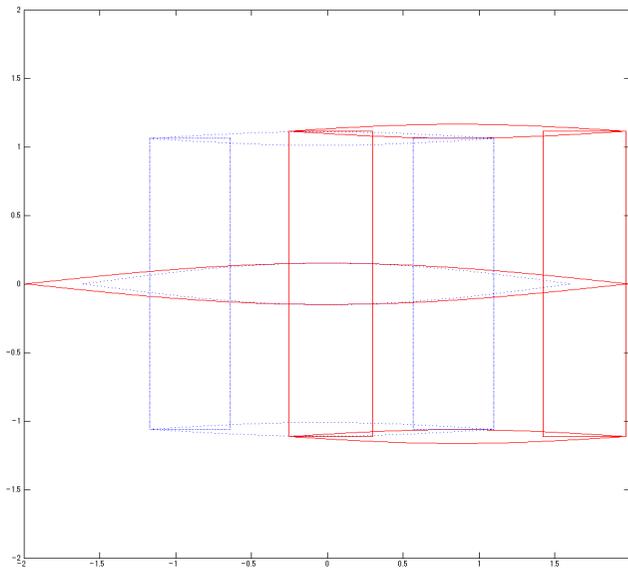


## 制御を考慮した最適設計



- 制御を考慮しない波高0.2(m)時のときと同じような形で比較対象モデルよりも優れたパレート解をとることができた

# 制御を考慮した最適設計



推進速度 | 1.774(m/s)

船体動揺性能 |  $V_F=17.4$

- 副船体を船体前方に取り付けて船体重心を前にする

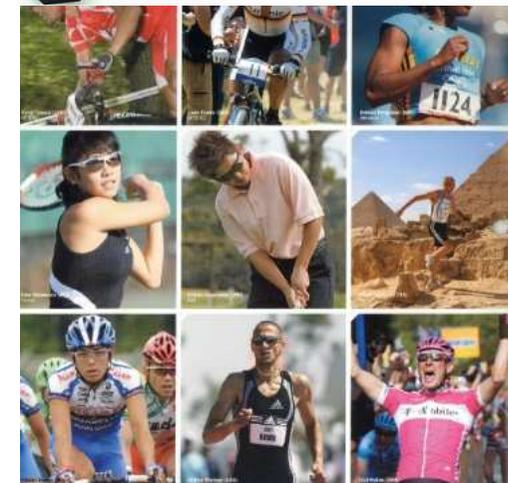
	$F_L$	$F_w$								
(m)	0.219	0.500								
	Lm	Bm	Dm	Ls	Bs	Ds	$x_0$	$y_0$	A	ha
(m)	3.971	0.301	0.151	2.220	0.101	0.052	0.861	1.114	0.549	0.3

# スポーツ用具の最適設計

- ▶ Sporting goods
  - Structure, Dynamics
  - Fluid



- ▶ Human
  - Physical issue
  - Mental issue



パーソナライズド設計

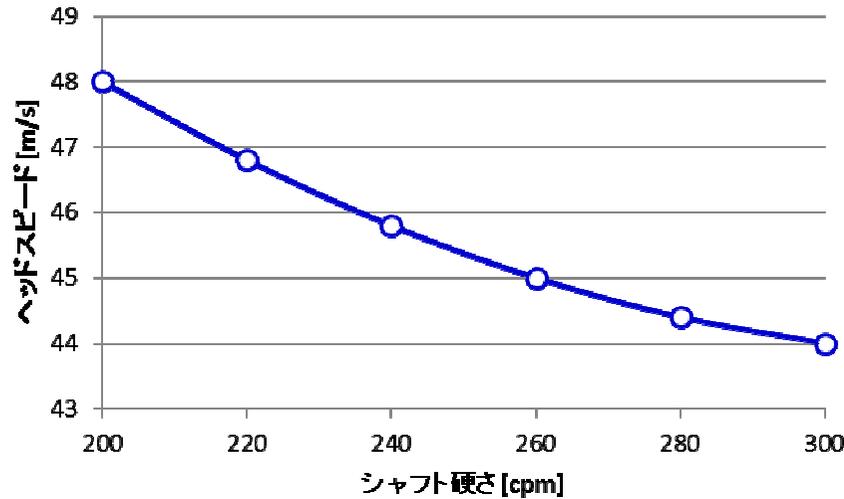
# ゴルフクラブの設計の難しさ

- 決まった動きをする「物」だけの設計であれば、比較的容易
  - 精度の高い解析が可能
- ゴルフクラブは、「物」と「人間」の連成解析
  - 人間の運動は複雑
  - 人間の運動には個人差が大きい
  - 同じ個人でも、毎回ばらつく
- ゴルフクラブは、多目的
  - 遠くに飛ばせばいいという訳でもない
  - ミスのない安定したスウィングはどうすれば実現できるか。

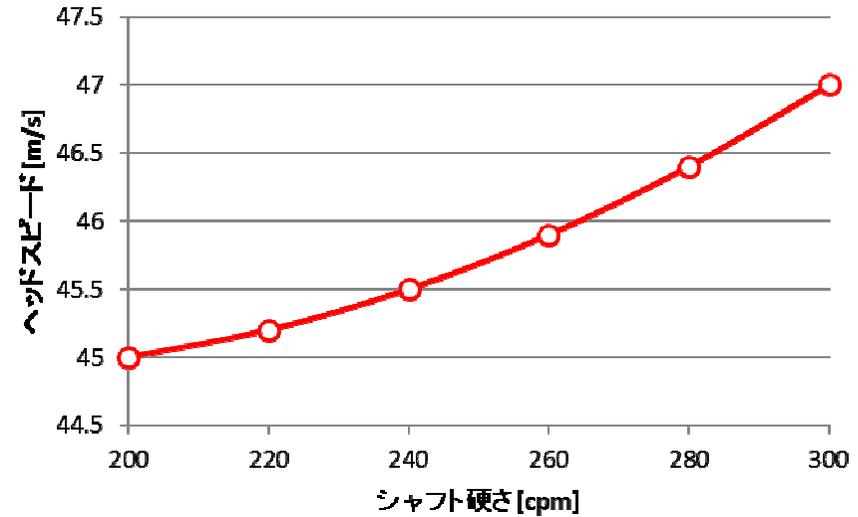


# ゴルフクラブのシミュレーション

## クラブのみのシミュレーション

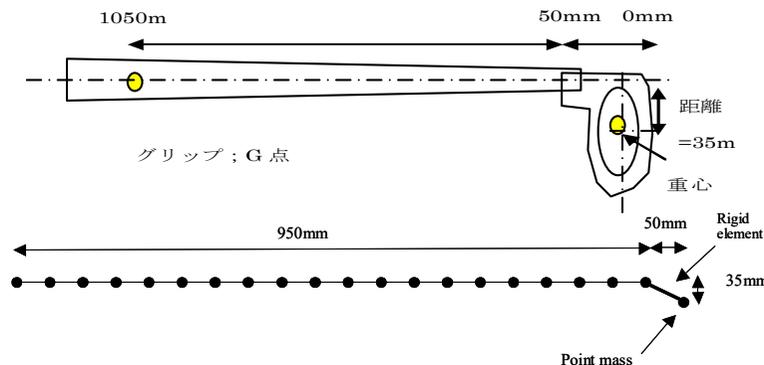


## 実測



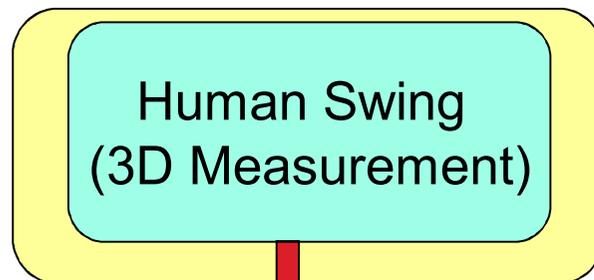
シャフトが柔らかい方がヘッドスピードが大きい

**人間はシャフトが変わるとスイングも変わる**

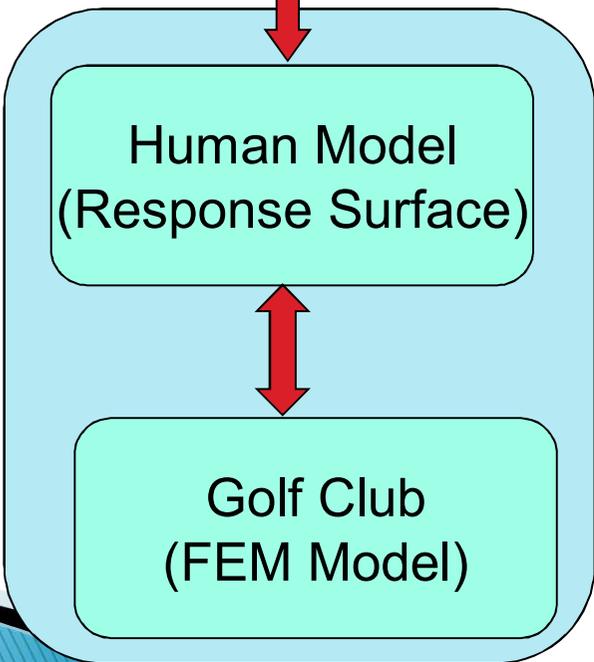


# 応答曲面を用いた人間のスイングモデル

Measurement



Analysis  
Optimization



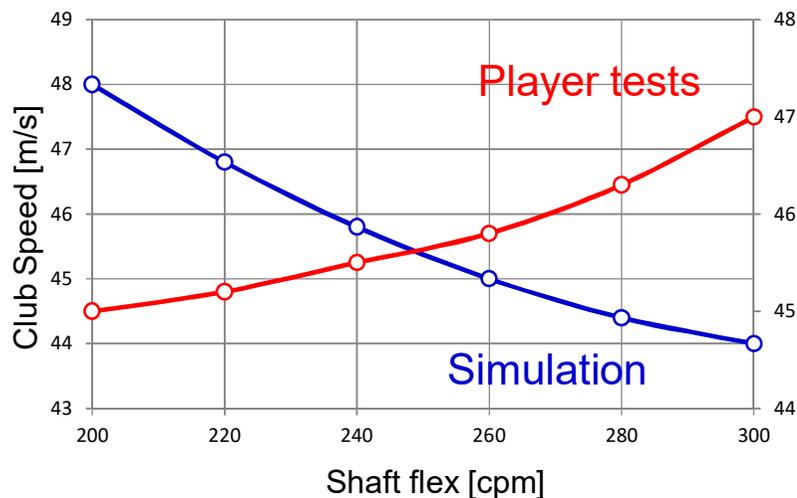
	-	0	+
Bending	soft	ave.	stiff
Torsion	soft	ave.	stiff
tendency	light	ave.	heavy



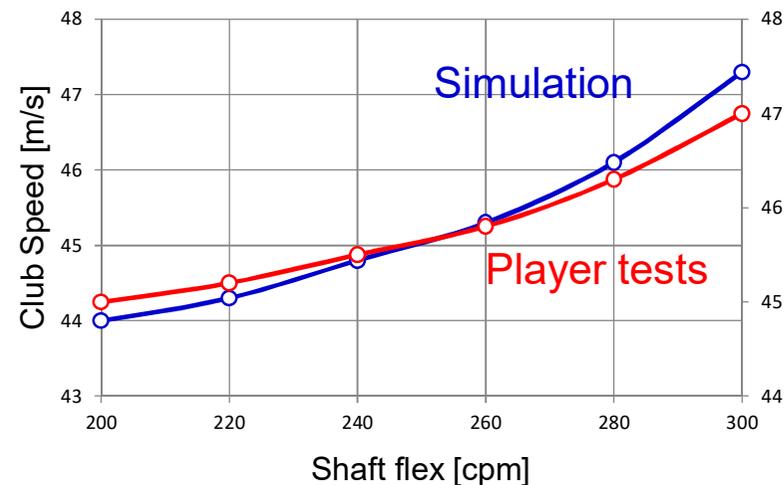
Golf clubs based on design of experiments (DOE)

# クラブ+人間のモデルを用いたシミュレーション

## クラブのみ



## クラブ+人間



- How golfers adjust their motions
- How the shaft bends
- How the club head attacks the ball

# D-fit system

## 【Condition】

- Operated this system at our office
- Conducted fittings to **103 players**



Mitsubishi Chemical Holdings Corporation  
KAITEKI SQUARE (in Tokyo)

## 【Results】

Skill Level	Professional	Advanced	Midrange	Total
Trajectory Scores Ave. (standard shaft)	258	225	187	223
Trajectory Scores Ave. (the best shaft)	263	244	204	237
Improved golfers / Total golfers	2/3	33 / 38	54 / 62	89/103
Improvement Rates [%]	66.7	86.8	87.0	86.4

**Distances and/or directions of  
89 out of 103 players were improved**

⇒ We think our system is ready for launch!

Shaft Fitting System

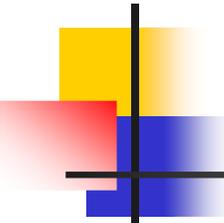
# D-fit

Designed by  MITSUBISHI RAYON



全国5ヶ所のゴルフ場、練習場で稼働中

購入率：50%



## 多目的関数 最適設計

クラブ設計の目的

- ・ 飛距離向上
- ・ クラブを安定して振る

評価

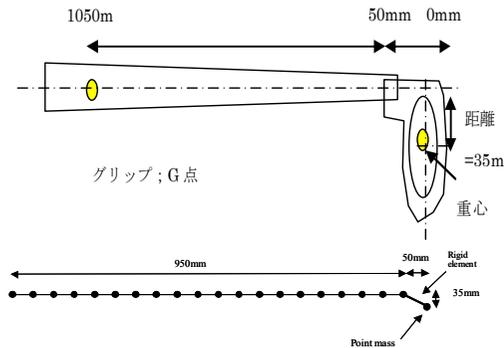
- ヘッド速度
- 身体負荷量

クラブ設計変数の変化に対するスイング動作変化を考慮して

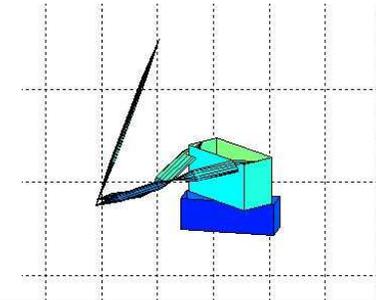
- ・ ヘッド速度向上
- ・ 身体負荷軽減

を最大限に満足する  
クラブを設計する。

# Analysis of golf club and Human dynamics



Measurement of swing and body



FEM analysis of Club

Multibody dynamic analysis of human body

Head Speed

Body Burden

Optimization of multi-objective system

# 身体負荷評価式

身体負荷評価式は、各部位の関節の評価閾値を越えるトルクの積分値を総和し、この総和値を評価値とする

$$T_{all} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \bar{T}_j^i \Delta t$$

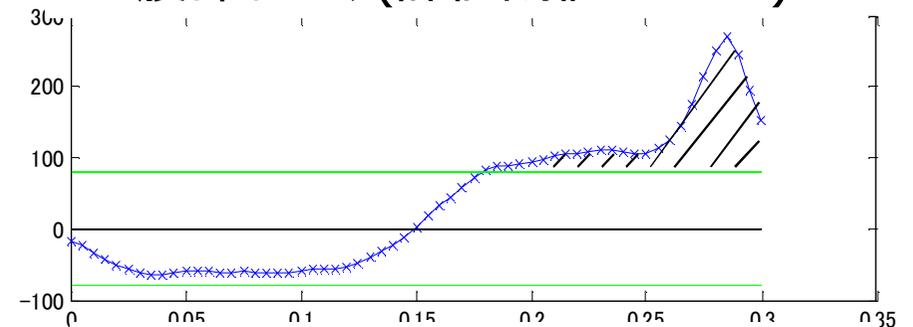
$$\bar{T}_j^i = T_j^i - T_b^i \quad (T_j^i > T_b^i)$$

$$\bar{T}_j^i = 0 \quad (T_j^i \leq T_b^i)$$

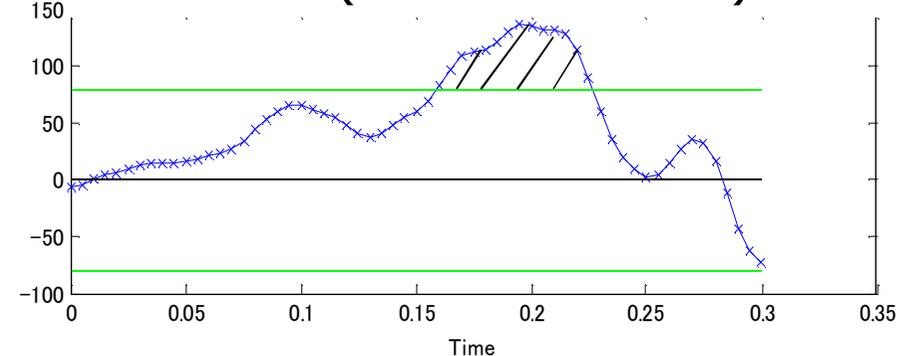
$N_i$  : 総ジョイント数

$N_j$  : 総ステップ数

腹部ねじり(評価閾値: 80Nm)

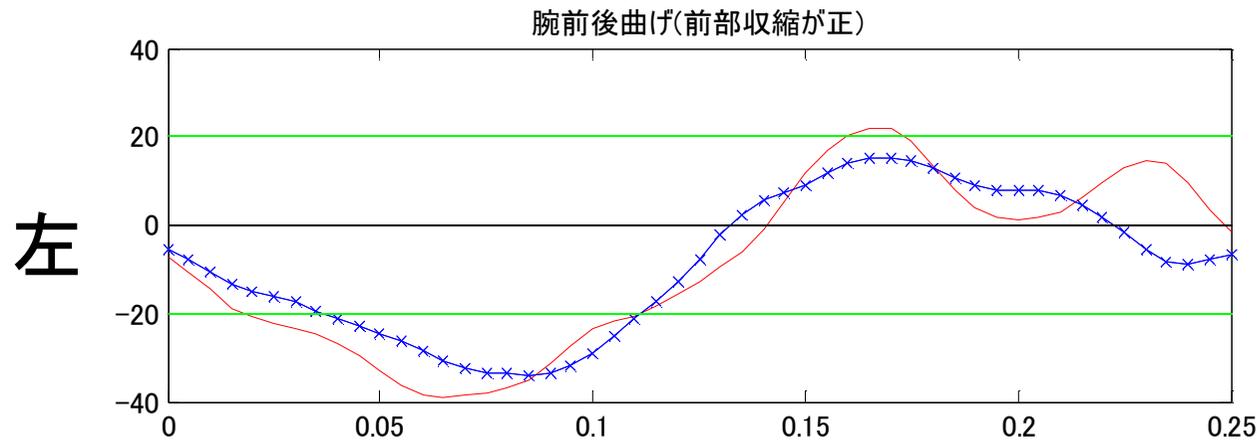
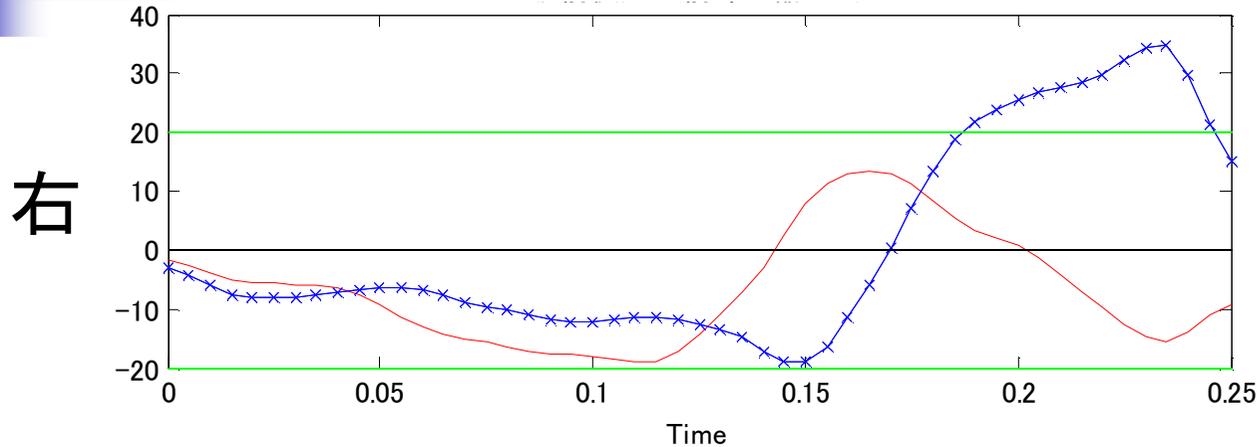


腹部前後(評価閾値: 80Nm)



# 最適解のときの身体負荷量

## 左右肘関節



赤:最適設計 青:標準クラブ 緑:評価閾値(20Nm)

特に右肘で、  
閾値範囲内に  
負荷量改善。

# ゴルフシャフト多目的最適設計

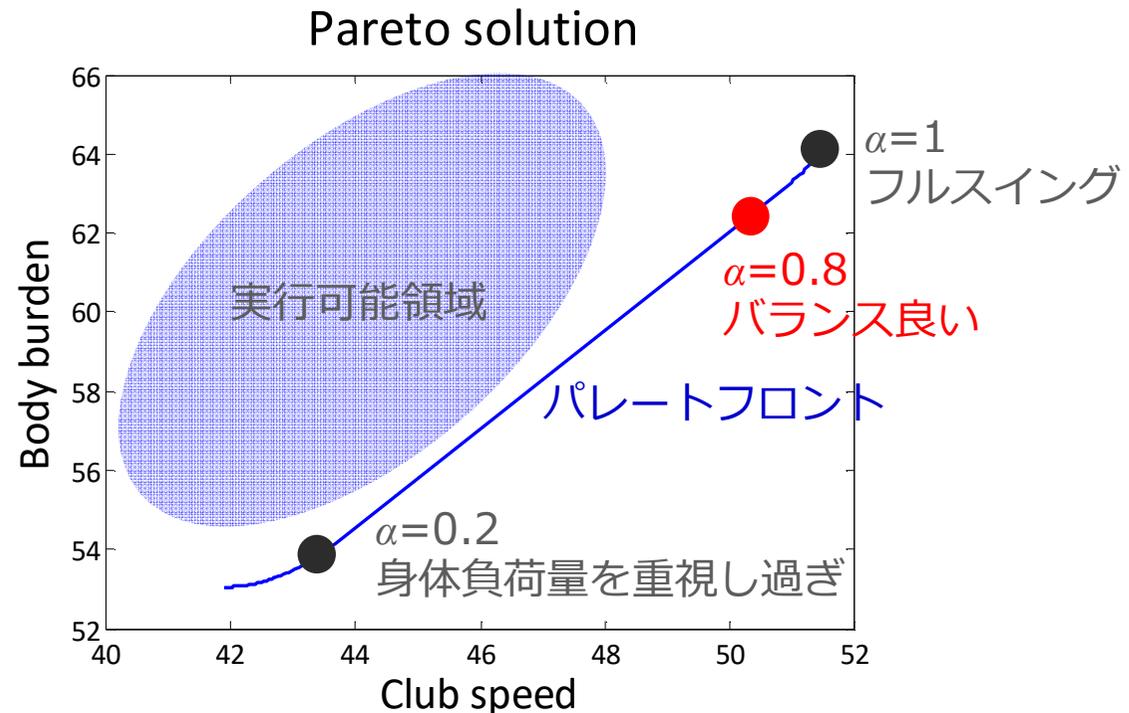
目的関数 $F$

$$F = -\alpha \frac{f_V(x, y, z)}{\max(V) - \min(V)} + (1 - \alpha) \frac{f_B(x, y, z)}{\max(B) - \min(B)} \quad \alpha = 0 \sim 1$$

$F$ の最小化 = ヘッドスピード ↑ + 身体負荷量 ↓

$\alpha$  : ヘッドスピード重視か、身体負荷量重視か

パレート最適解



# 2匹目のドジョウ



MORE SPORTS / TRACK & FIELD

## Japanese athletes earn two silvers, bronze on last day of World Paras

KYODO

**LONDON** - Kaede Maegawa and Anju Furuya each earned silver, while the men's 4x100-meter relay team captured bronze for Japan on the final day of action at the World Para Athletics Championships on Sunday.

In the women's long jump T42 category for single above-knee amputees, Maegawa recorded a jump of 3.79 meters in her sixth and final attempt. Italy's Martina Caironi, who won with a personal best mark of 4.72.

In the women's 800 meters T20 category for runners with intellectual impairment, Furuya crossed the finish line second in 2 minutes, 21.37 seconds. Hungary's Bernadett Biacsi won gold in a championship record 2:20.51.

In the men's T42-47 4x100 relay, the Japanese team of Hajimu Ashida, Keita Sato, Tomoki Tagawa and Mikio Ikeda finished fourth in 44.20 seconds, but the team was bumped up to bronze when the U.S. team was disqualified for a lane infringement.

JUL 24, 2017

ARTICLE HISTORY

PRINT SHARE

PHOTOS

CLICK TO ENLARGE



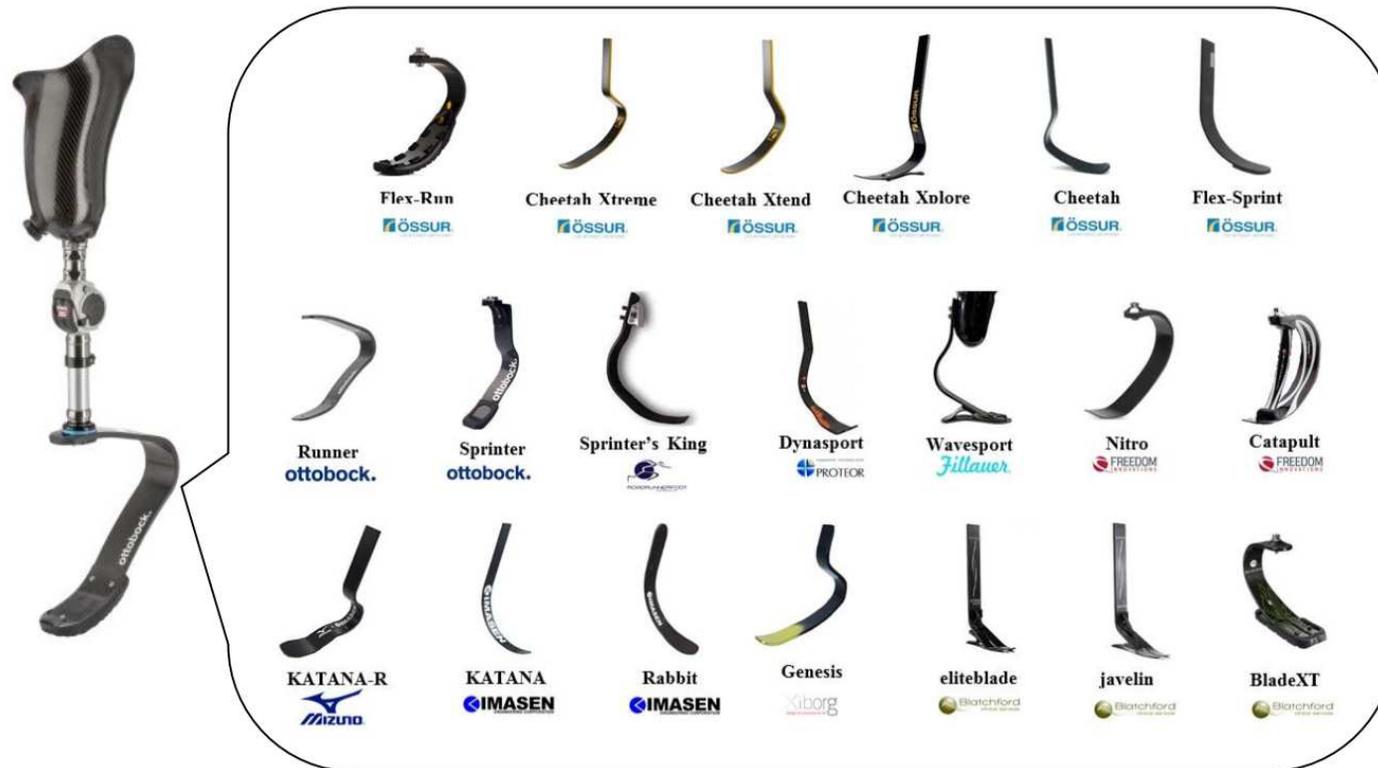
KEYWORDS

WORLD PARA ATHLETICS CHAMPIONSHIPS, KAEDE MAEGAWA, ANJU FURUYA



## Kaede Maegawa

# いろいろな種類がある



競技用義足

ほとんど設計に対する理屈がない

# Measurement

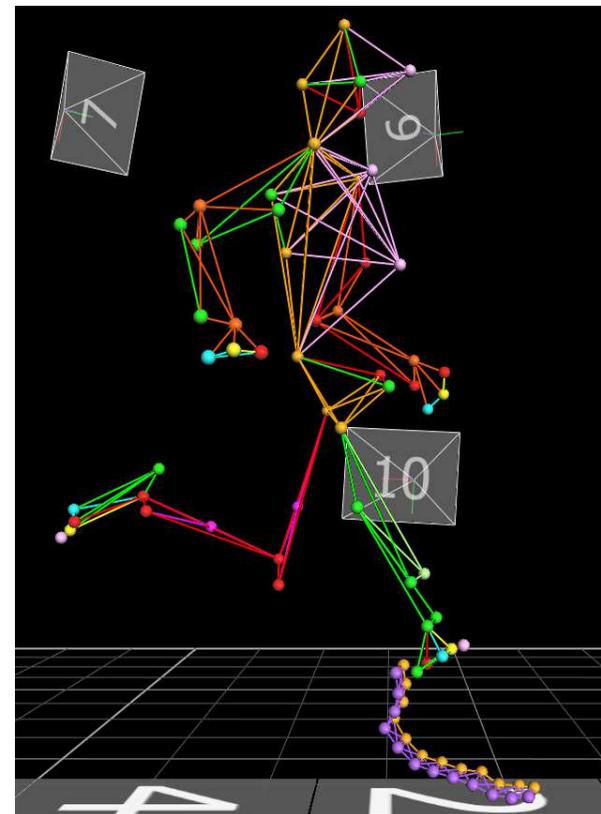
Body Dynamics

Model  
rigid bodies and springs and  
its are determined by

erWorks)  
(HyperWorks)

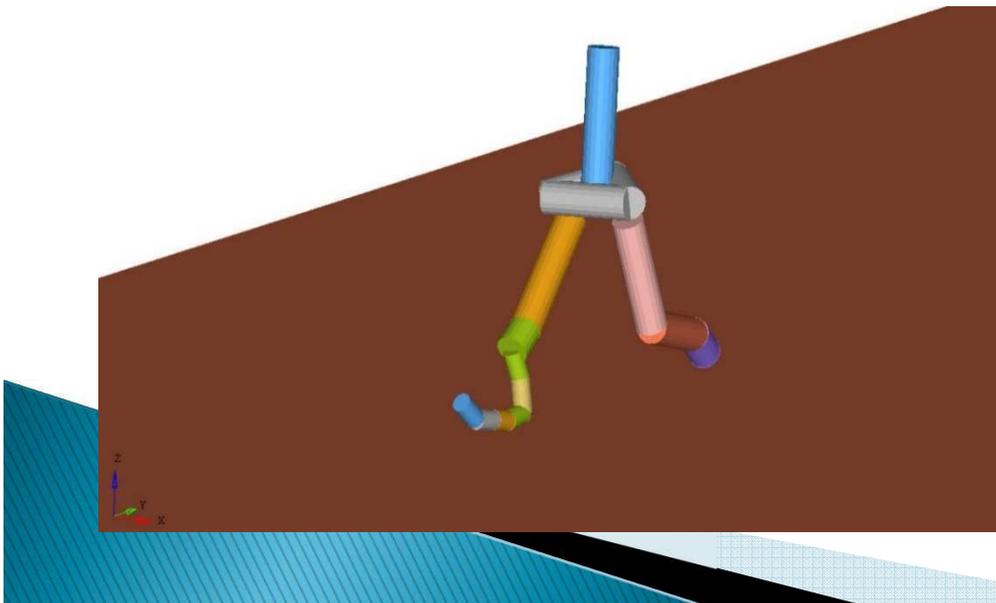


## Motion Capture and Force Plate



# Model in Multi Body Dynamics

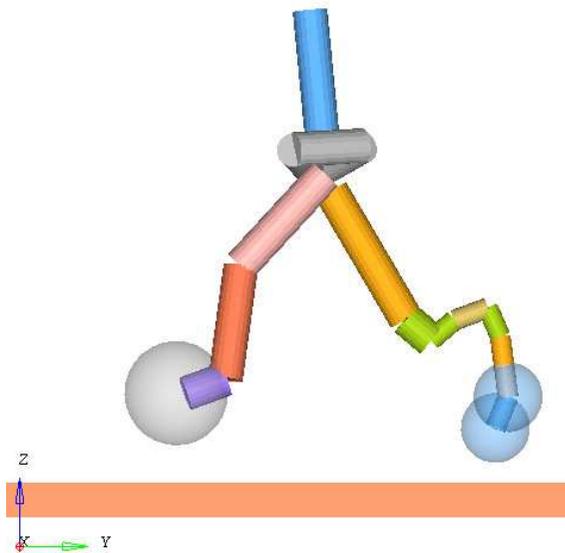
- ▶ HAT (head-arms-trunk) model
- ▶ Prosthesis is modeled by 6 rigid bodies and springs and dampers. Spring coefficients are determined by compression test.
- ▶ Solver: MotionSolve (HyperWorks)
- ▶ Visualization: MotionView (HyperWorks)



# Inverse Dynamic Analysis

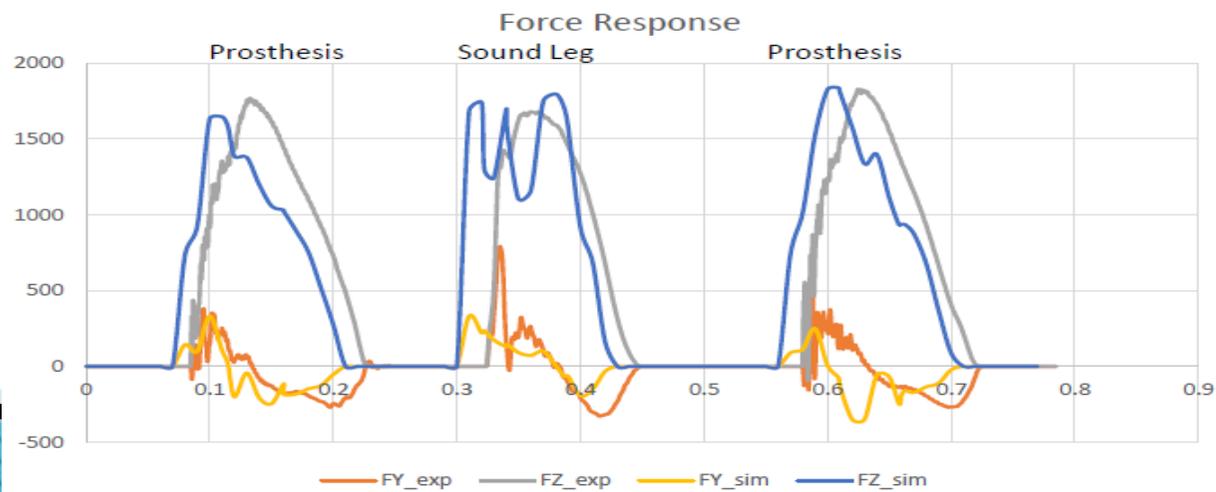
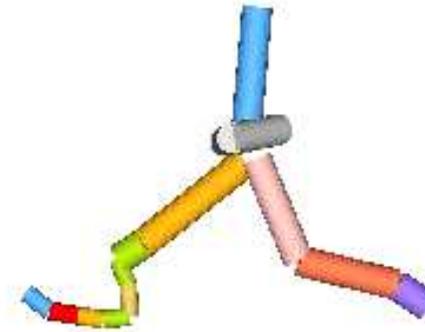
- ▶ Inverse Dynamic Analysis
- ▶ Contact parameters and contacting geometries should be chosen.

Contacting geometries are chosen as spheres to remove sharp corners. Radii of spheres are assigned to fit ground reaction forces and position accuracy. Also ground position is adjusted by radii of spheres.



	Sound Leg	Prosthesis
Stiffness	120000 N/m	140000 N/m
Stiffness Exponent	1.3	1.1
Damping	600 N.s/m	1000 N.s/m
Penetration Depth	0.001 m	0.001 m
Static Friction Coefficient	0.2	0.3
Stiction Transition Velocity	0.01 m/s	0.01 m/s
Dynamic Friction Coefficient	0.2	0.2
Friction Transition Velocity	1 m/s	1 m/s

# Simulation (Inverse Dynamic Analysis)





# おわりに

- ▶ 製品設計の最適化において、複合領域（構造、流体、制御、etc.）を考慮することにより、よりよい設計を行うことができる。
- ▶ 人工物だけでなく、人間も解析領域として考えた設計例を紹介させていただきました。