

# 不整地走行力学解析を基盤とした フィールドロボットの研究開発



石上 玄也

慶應義塾大学 工学部 機械工学科

# Self-Introduction

## 専門分野

### ロボティクス

テラメカニクス, 宇宙探査工学,  
機械力学, 自律移動システム

## 応用分野

### フィールドロボティクス

月惑星探査, 火山探査, 建設・  
無人化施工, 災害対応など



# 実社会でのロボット

- メディアサービスロボット
- 警備ロボット
- 生活支援ロボット

サービス  
ロボット

産業  
ロボット

フィールド  
ロボット

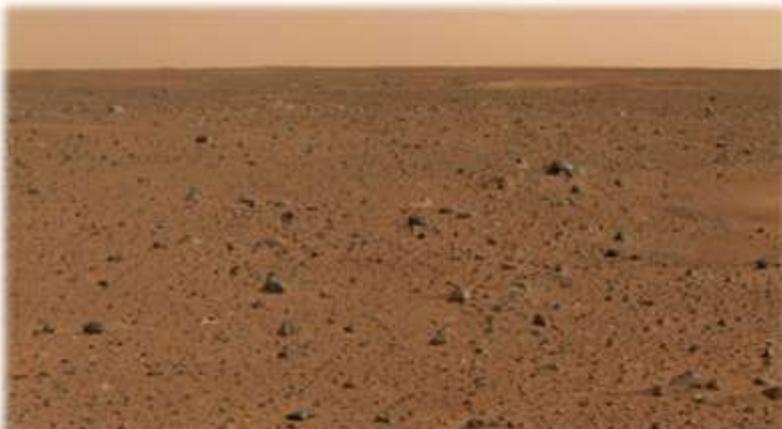
- 搬送ロボット
- 組立ロボット

- 災害ロボット
- 建設ロボット
- 保全ロボット

# フィールドロボット

- 人間に代わって極限環境で活動するロボット

対象フィールド：月惑星, 火山, 建設現場, 災害地, etc...



岩, 砂地などのオフロード

地図の無い未知の環境

限られた電力, CPU能力

厳しい熱環境, 耐候性, 放射線



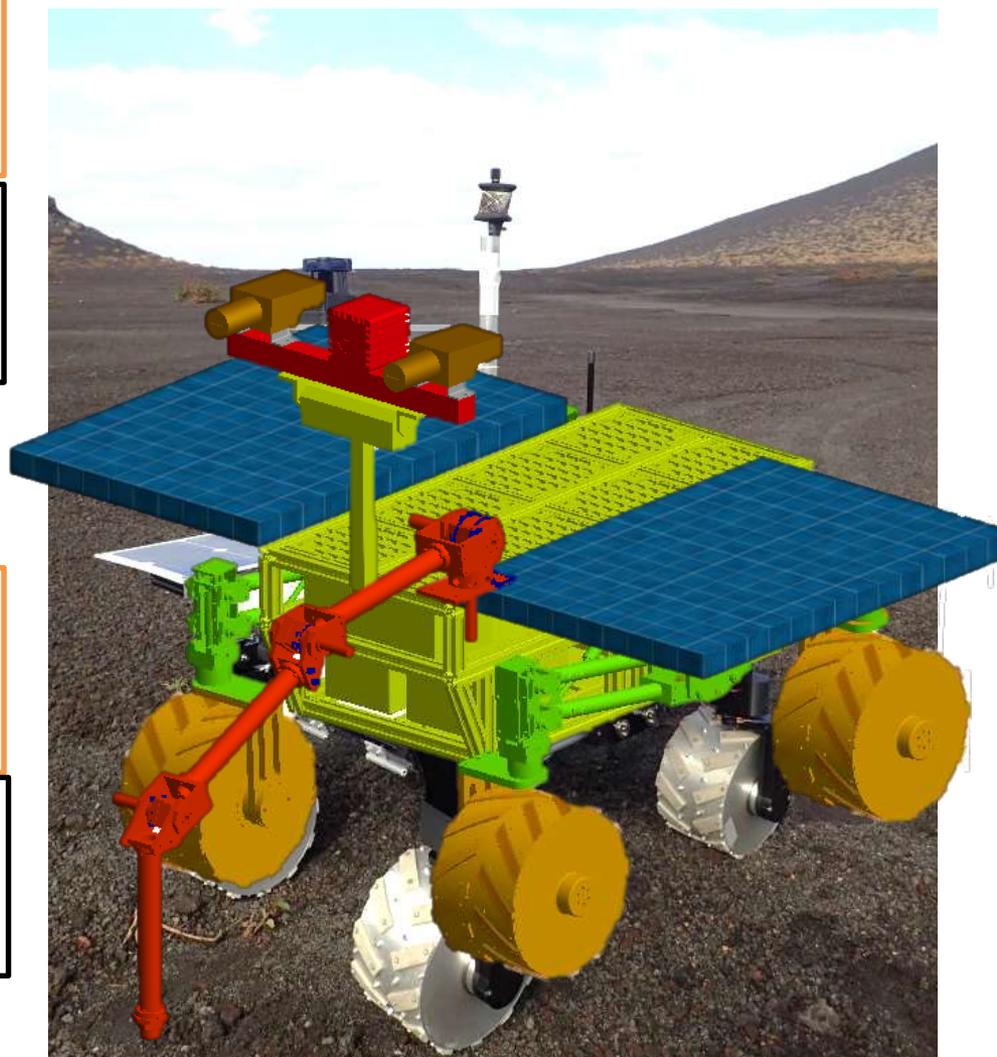
# フィールドロボティクスの技術的チャレンジ

## 走行システム

岩, 砂地などのオフロード

## 自律システム

地図の無い未知の環境



## ミッションシステム

タスク達成のツール

## 自立システム

限られた電力  
CPU能力

# Space Robotics Group, Keio Univ.



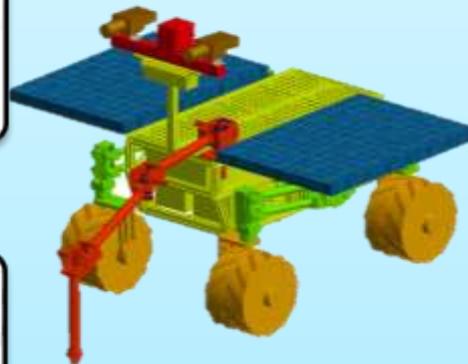
**Terramechanics**



**Multibody  
Dynamics**



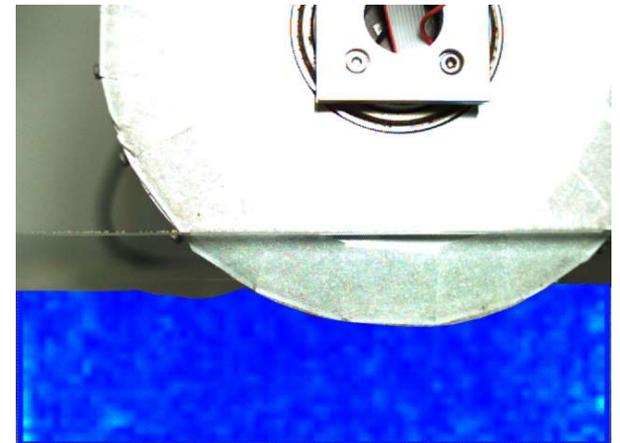
**Autonomous  
Mobility**



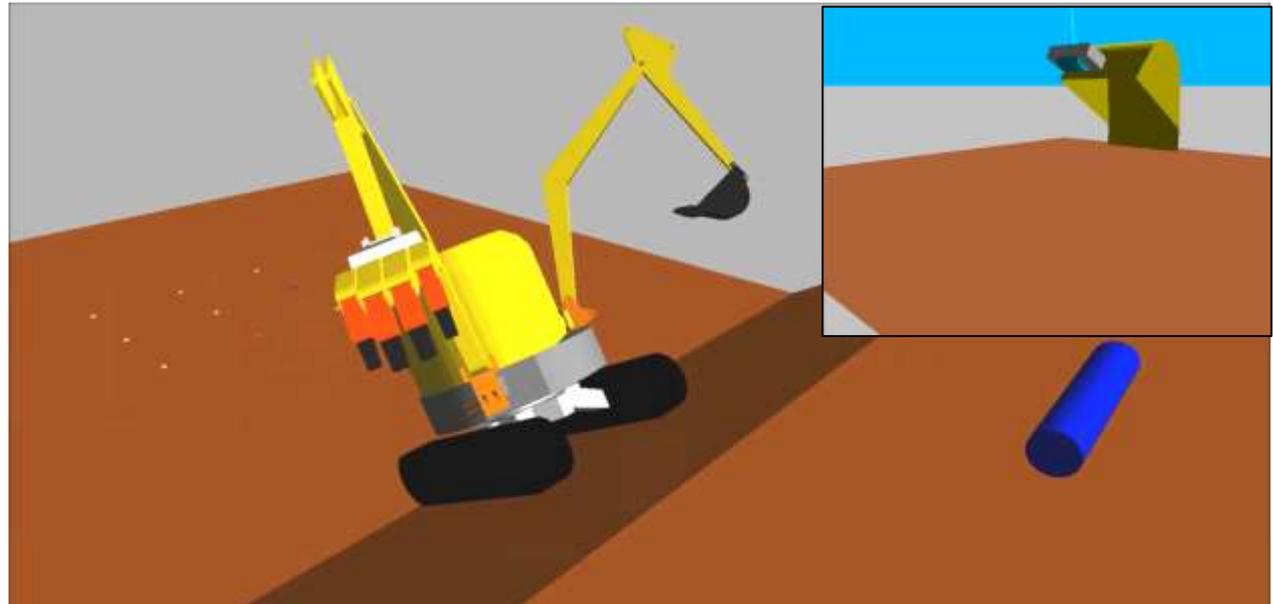
**Energy  
Management**



**Terramechanics**



**Multibody  
Dynamics**



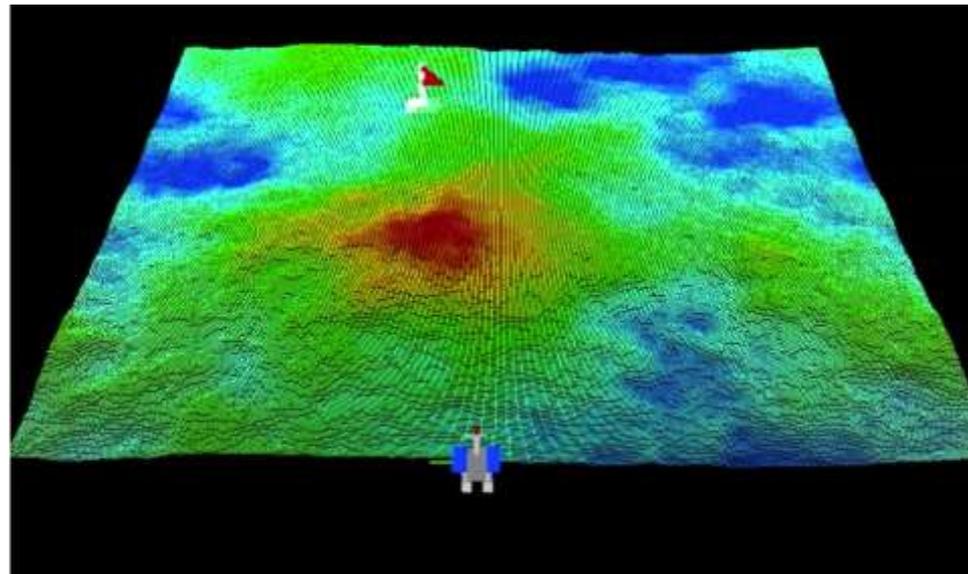
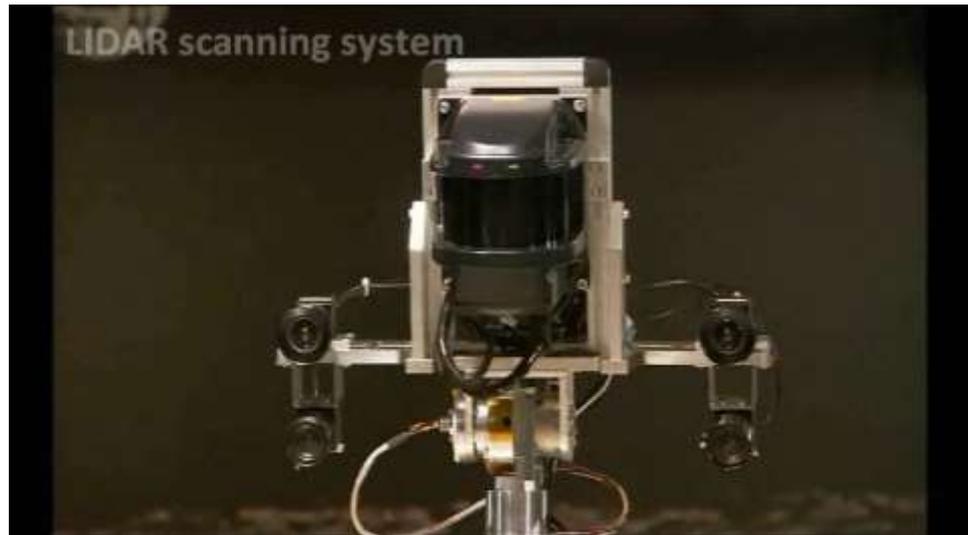
# 慶應大・石上研の研究分野



**Autonomous  
Mobility**



**Energy  
Management**



# フィールドロボット

- 人間に代わって極限環境で活動するロボット

対象フィールド：月惑星, 火山, 建設現場, 災害地, etc...

岩, 砂地などのオフロード

## 【オフロードにおけるロボットの走行力学解析】





## 機械と砂の力学

### 「テラメカニクス (Terramechanics)」

機械力学

材料力学

土質力学

計算力学

計測工学

## Terramechanics

### Interaction Mechanics

Macroscopic approach

In-wheel sensor

Soil flow analysis

### Numerical Analysis

Dynamic simulator

Uncertainty problem

Mobility prediction

### Application

Steering maneuvers

Tire/wheel design

Terrain/slip classification

MATLAB®

Curve Fitting Toolbox™

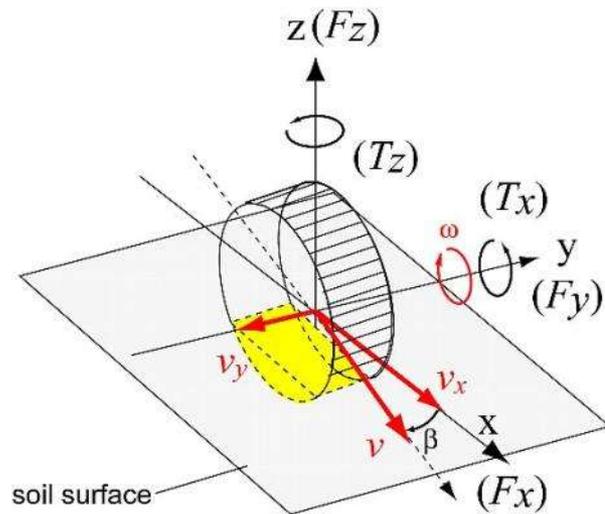
PIVlab

Symbolic Math Toolbox™

Statistics and Machine Learning Toolbox™

Statistics and Machine Learning Toolbox™

- テラメカニクスのマクロアプローチに基づいた定式化
  - 駆動力, サイドフォース, 鉛直抗力
  - 回転抵抗, セルフアライニングトルク
- ➔ 車輪・土壌間の**応力**(Stress)から計算される (c.f. DEM/FEM)
  - ✓ 車輪・土壌間の応力分布
  - ✓ 土壌の動き, 流れ解析



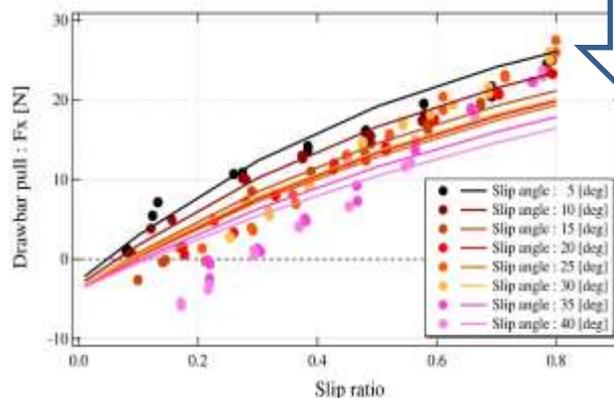
# テラメカニクス | 接触力学モデル (従来)



単輪試験装置により，走行力学データを取得する。

$$DP = rb \int_{\theta_r}^{\theta_f} \{ \tau(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta \} d\theta$$

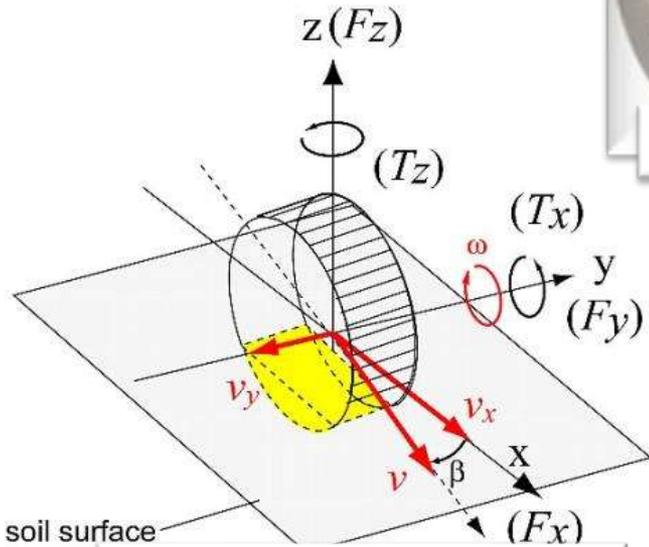
モデルの妥当性検証



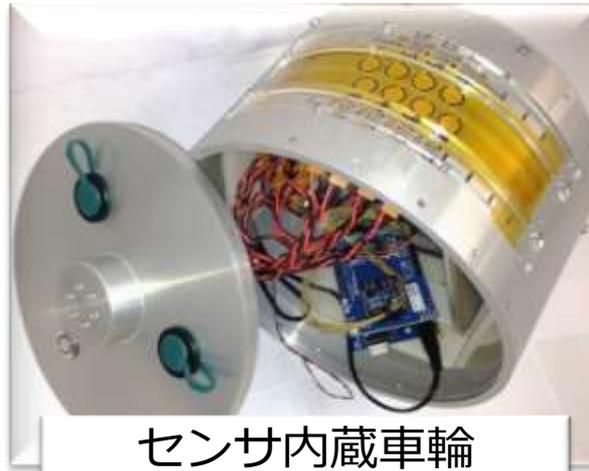
## Open Issues

- 不確定パラメータの調整
- 従来モデルの忠実度

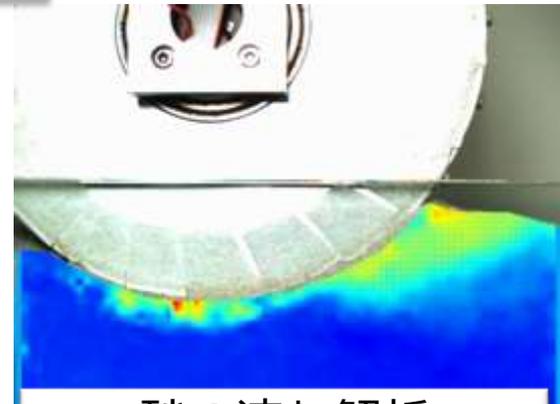
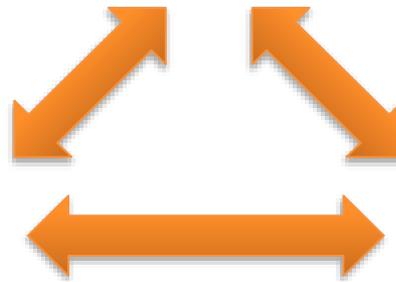
[1] G. Ishigami et al, J. of Field Robotics, Vol. 24 (3), pp. 233-250,2007.



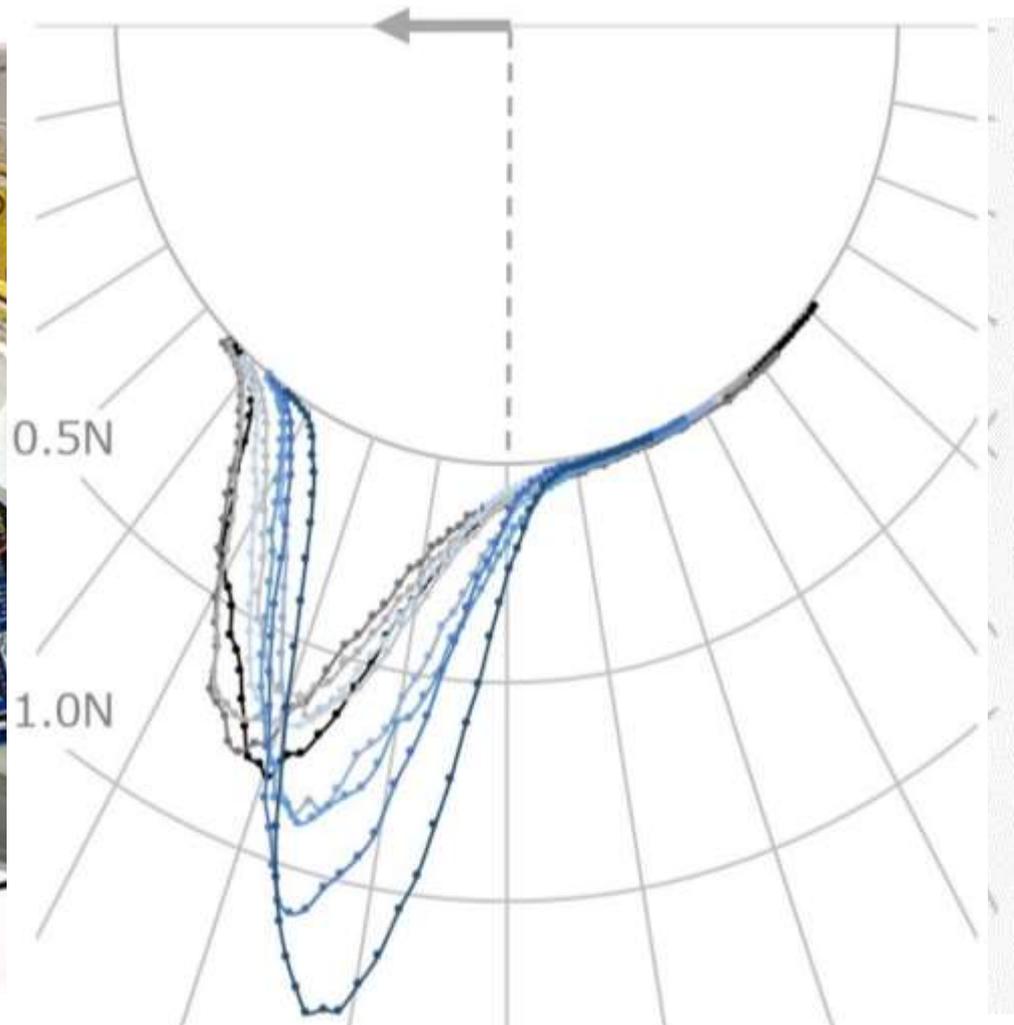
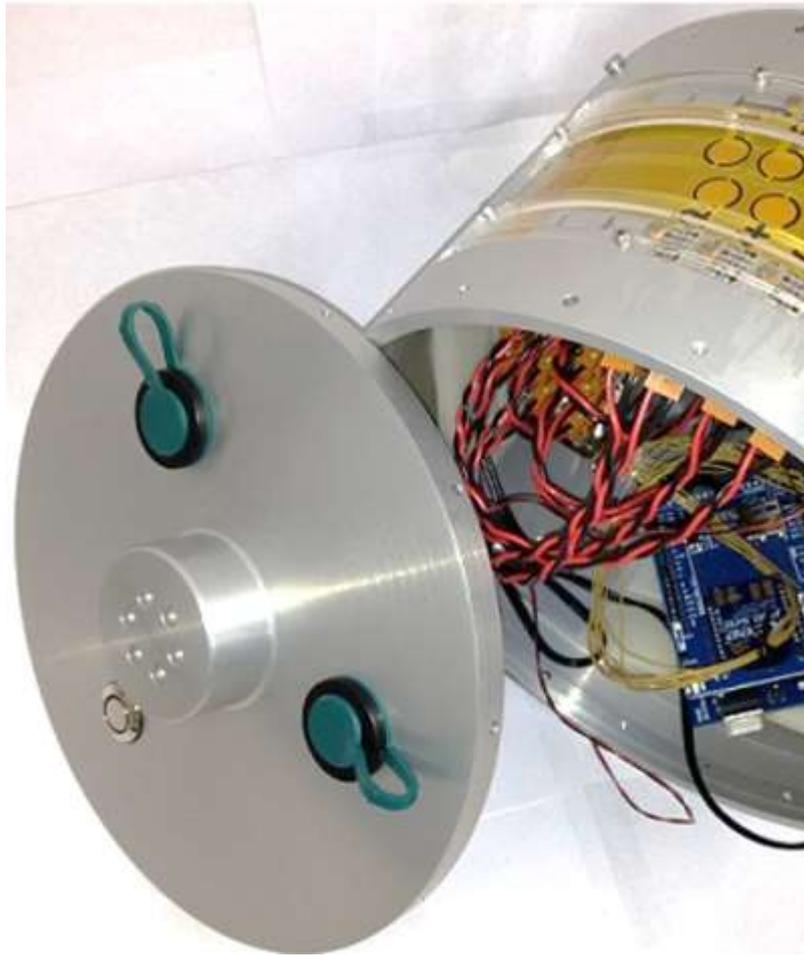
物理モデル



センサ内蔵車輪



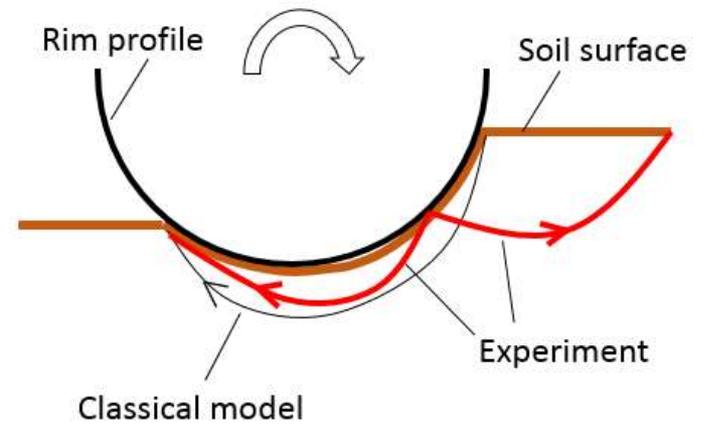
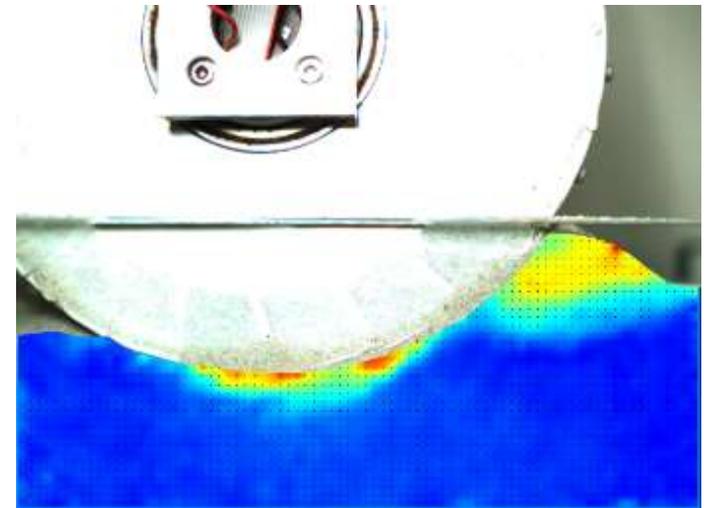
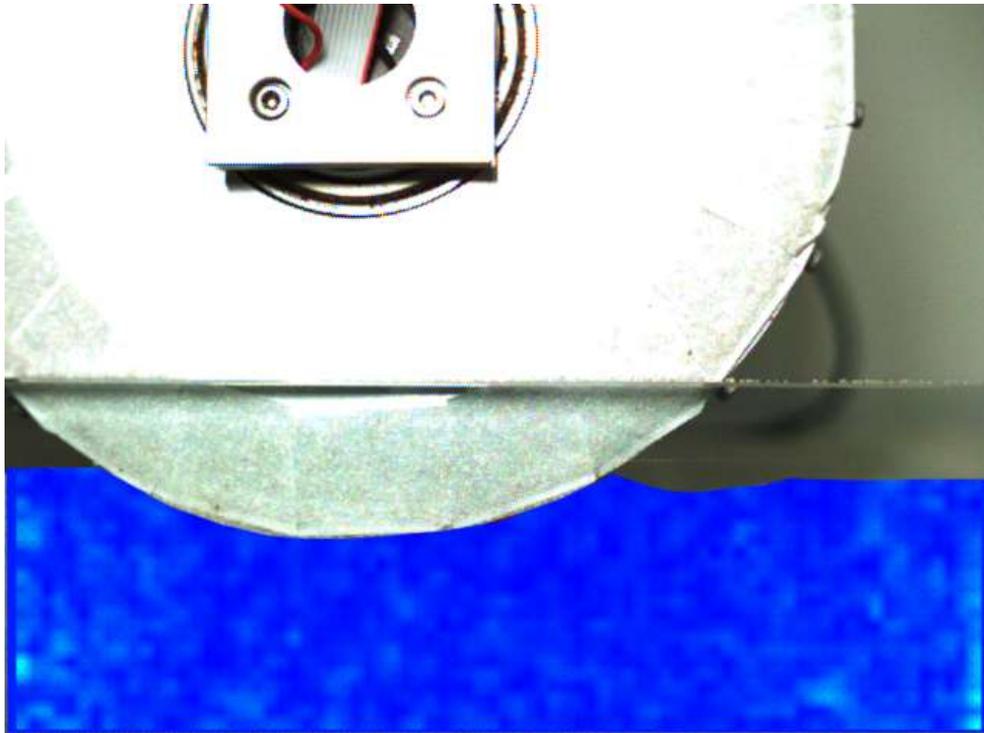
砂の流れ解析



[2] T. Shirai, G. Ishigami, J. of Terramechanics, Vol. 62, pp. 51-61, 2015.

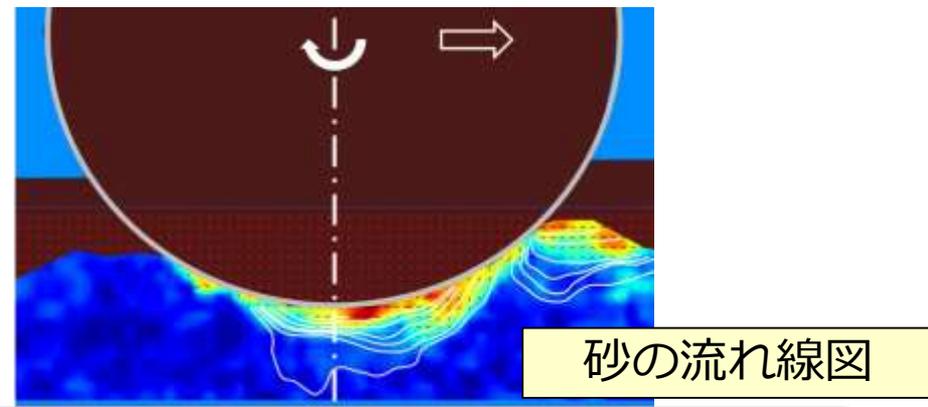
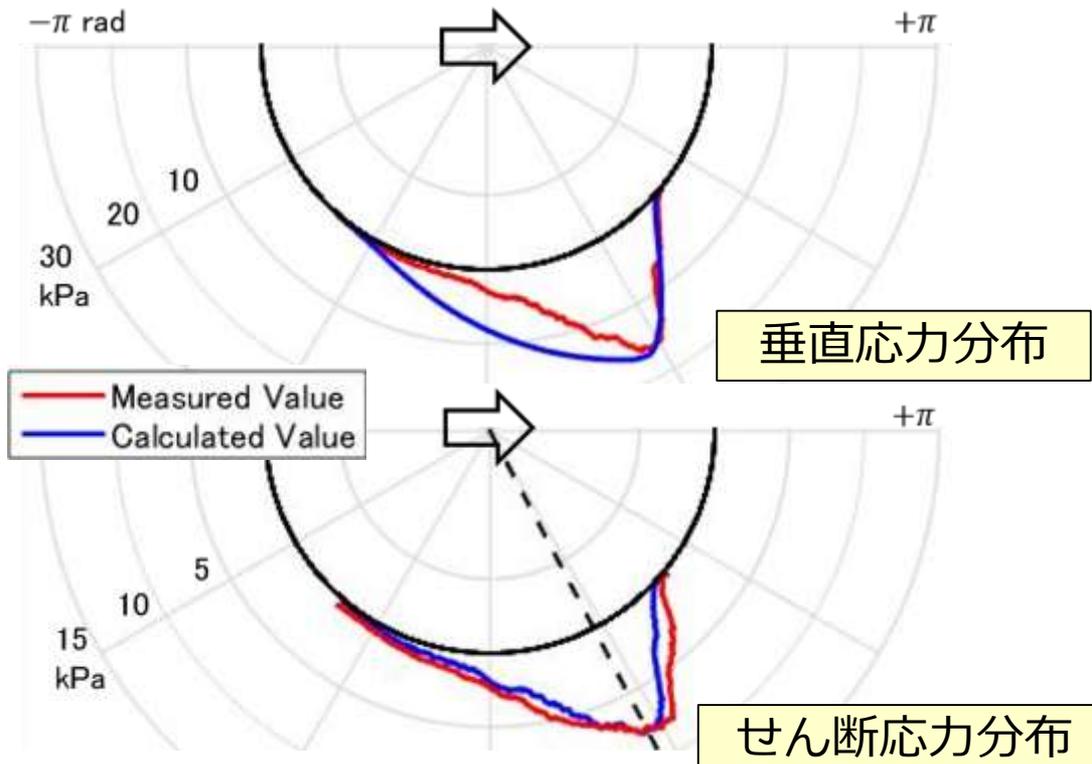
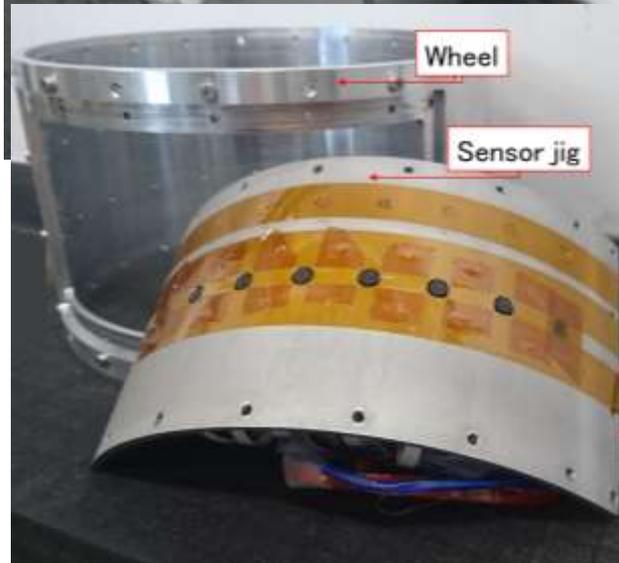
## ■ Particle Image Velocimetry

- PIVLab toolboxを利用している.

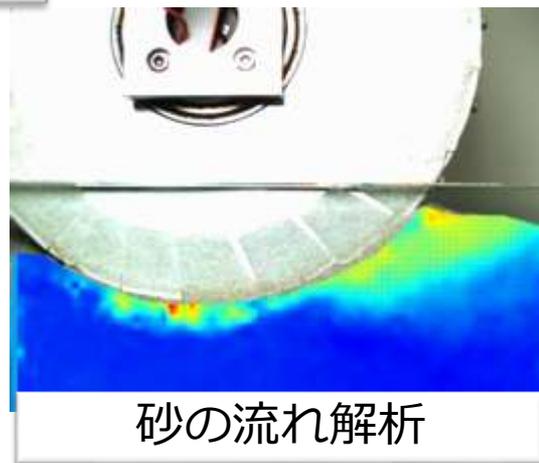
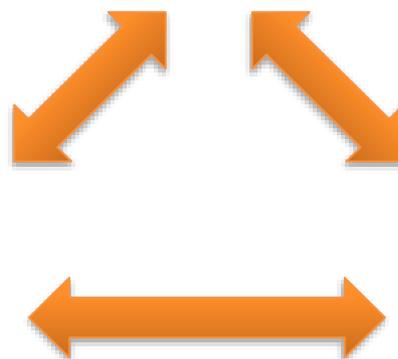
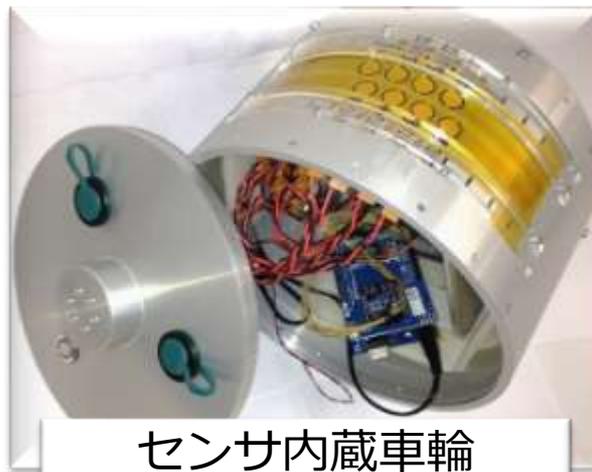
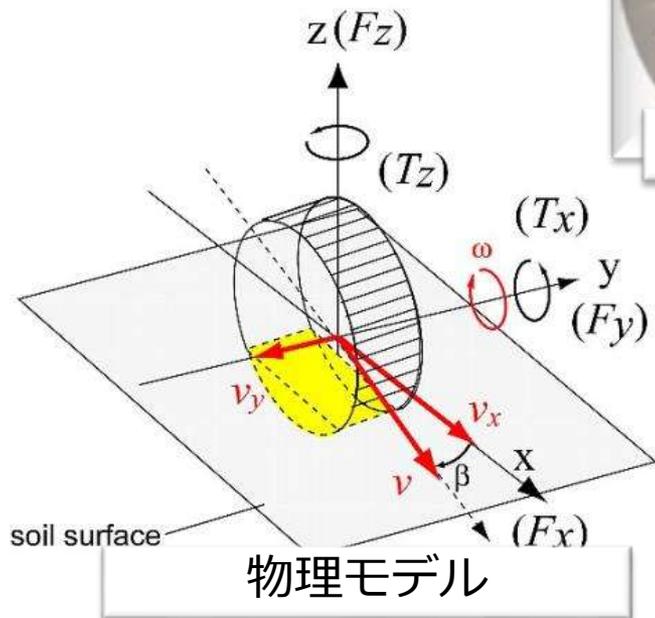


[3] H. Tsubaki, G. Ishigami, Proc. of the 8th Americas Regional Conference of the ISTVS, #39, 2016

# テラメカニクス | センサ内蔵車輪 Ver.2



[4] 堀古翔太, 石上玄也, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-B08, 2017



実現象に忠実な接触力学モデルを構築できる

## Terramechanics

### Interaction Mechanics

Macroscopic approach

In-wheel sensor

Soil flow analysis

### Numerical Analysis

Dynamic simulator

Uncertainty problem

Mobility prediction

### Application

Steering maneuvers

Tire/wheel design

Terrain/slip classification

MATLAB®

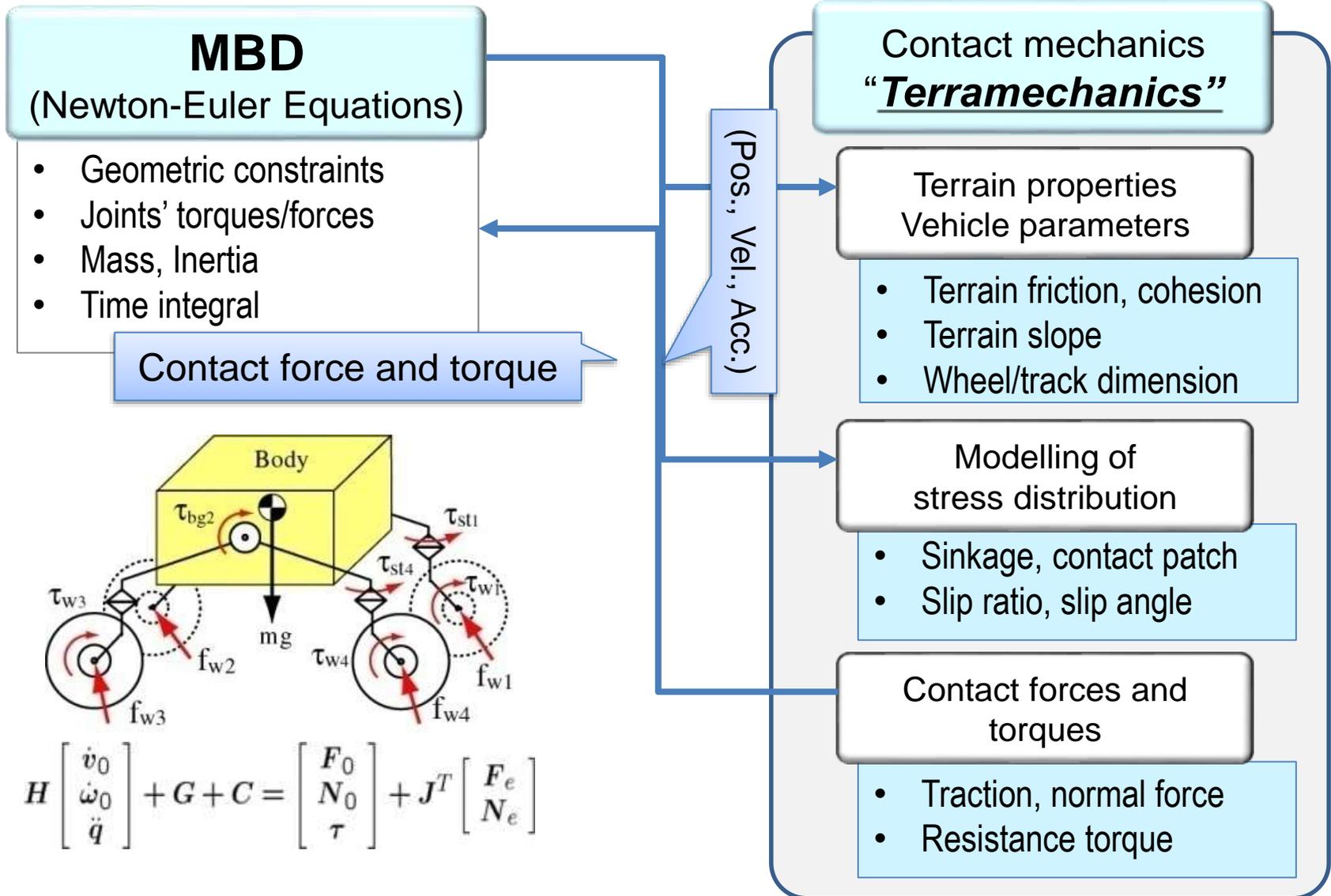
Curve Fitting Toolbox™

PIVlab

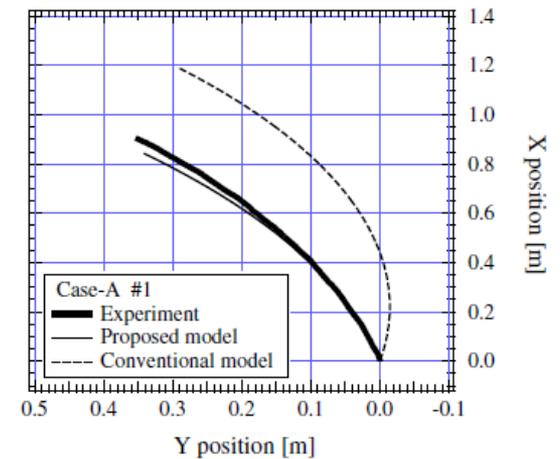
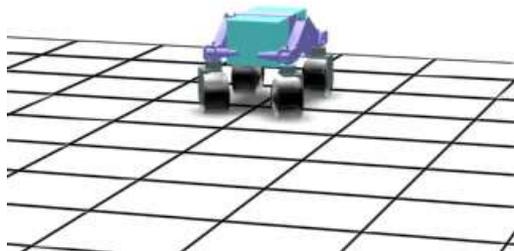
Symbolic Math Toolbox™

Statistics and Machine Learning Toolbox™

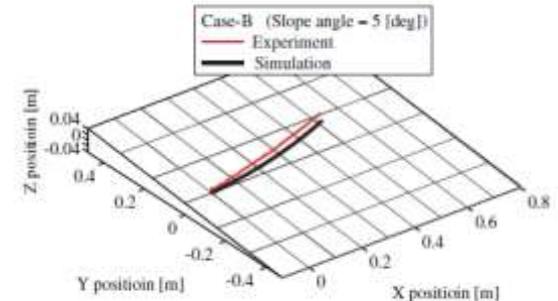
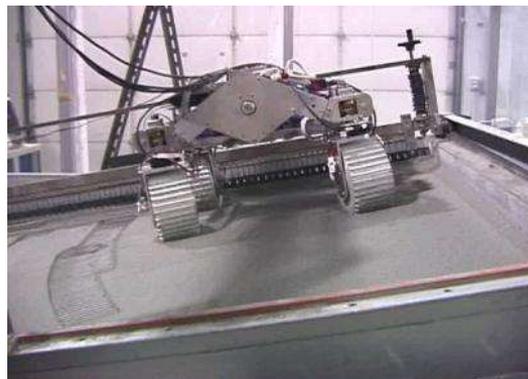
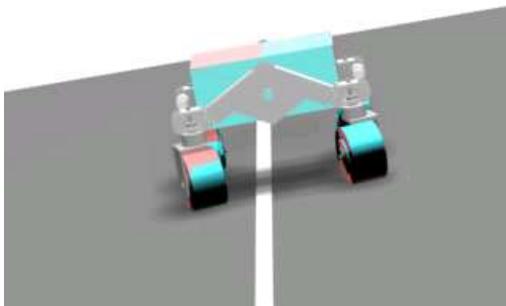
Statistics and Machine Learning Toolbox™



## ■ ステアリング走行



## ■ 斜面横断走行

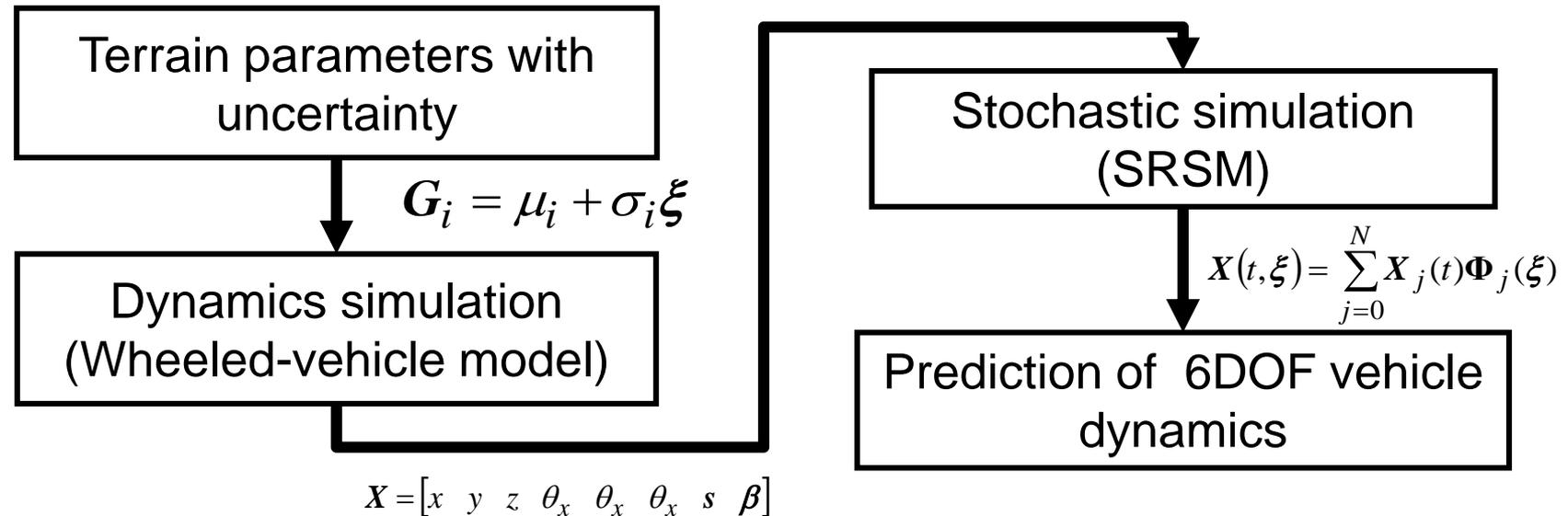


[5] Ishigami. G., Terramechanics-based Analysis and Control for Lunar/Planetary Exploration Robots, Doctoral Thesis of Tohoku University, 2008.

## ■ シミュレーションパラメータの不確定性

- 砂の摩擦, 粘着力など, 一意に定まらない場合が多い.
- モンテカルロ的アプローチ→シミュレーションコストの増大

### 統計学的アプローチ



- 確率論に基づいたシステム出力に対する多項式近似モデルの生成が可能となる.

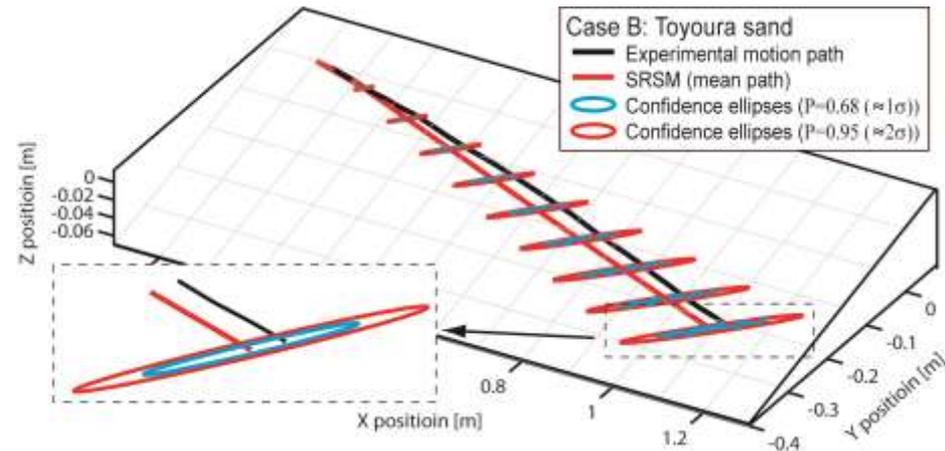
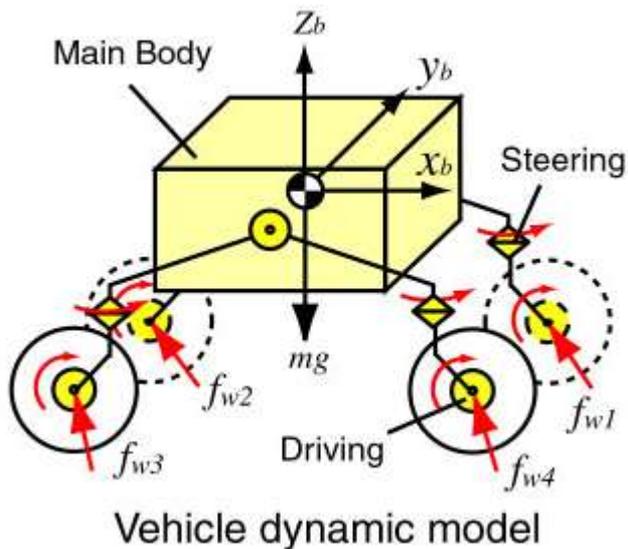
[6] Ishigami, G., Kewlani, G., and Iagnemma, K., IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 16, No. 4, 2009, pp. 61-70.

# 数値解析 | 不確定性解析の高速化

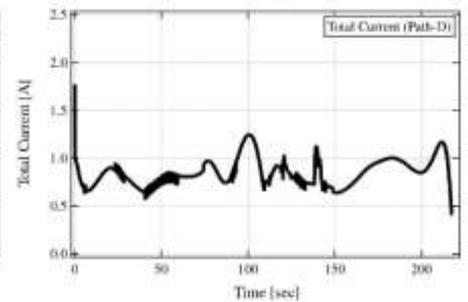
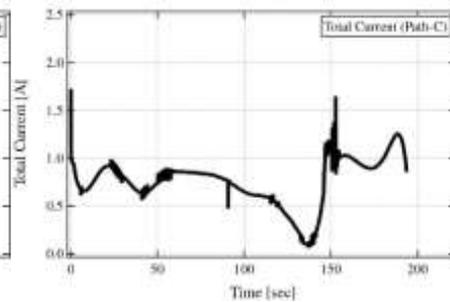
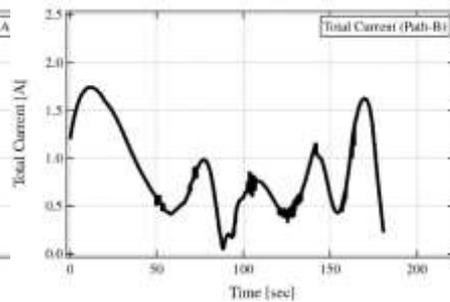
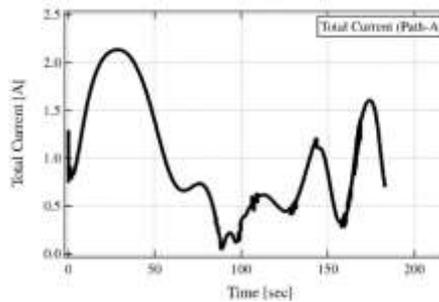
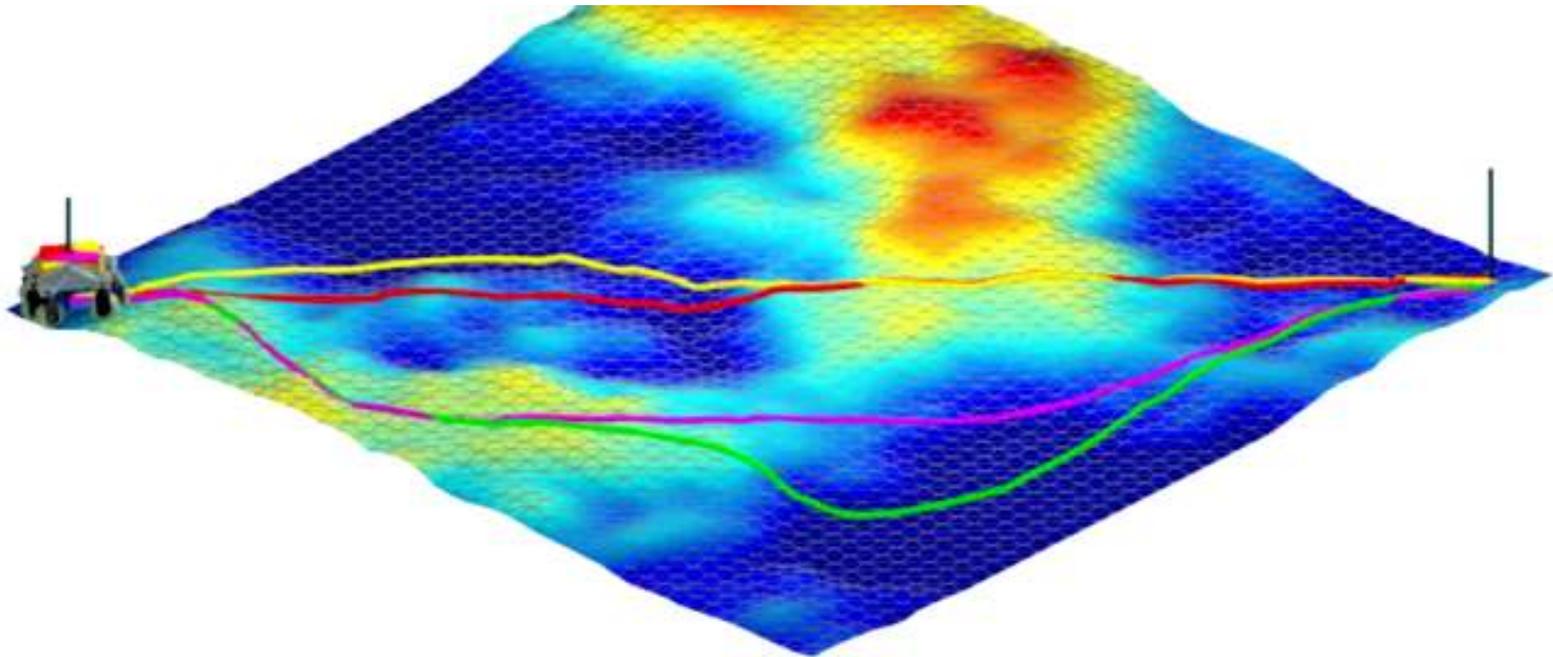
## ■ シミュレーションパラメータの不確定性

- 砂の摩擦, 粘着力など, 一意に定まらない場合が多い.
- モンテカルロ的アプローチ → シミュレーションコストの増大

$$H \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 \\ \ddot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} + \mathbf{C} + \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_0 \\ \mathbf{N}_0 \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \mathbf{J}^T \begin{bmatrix} \mathbf{F}_e \\ \mathbf{N}_e \end{bmatrix}$$

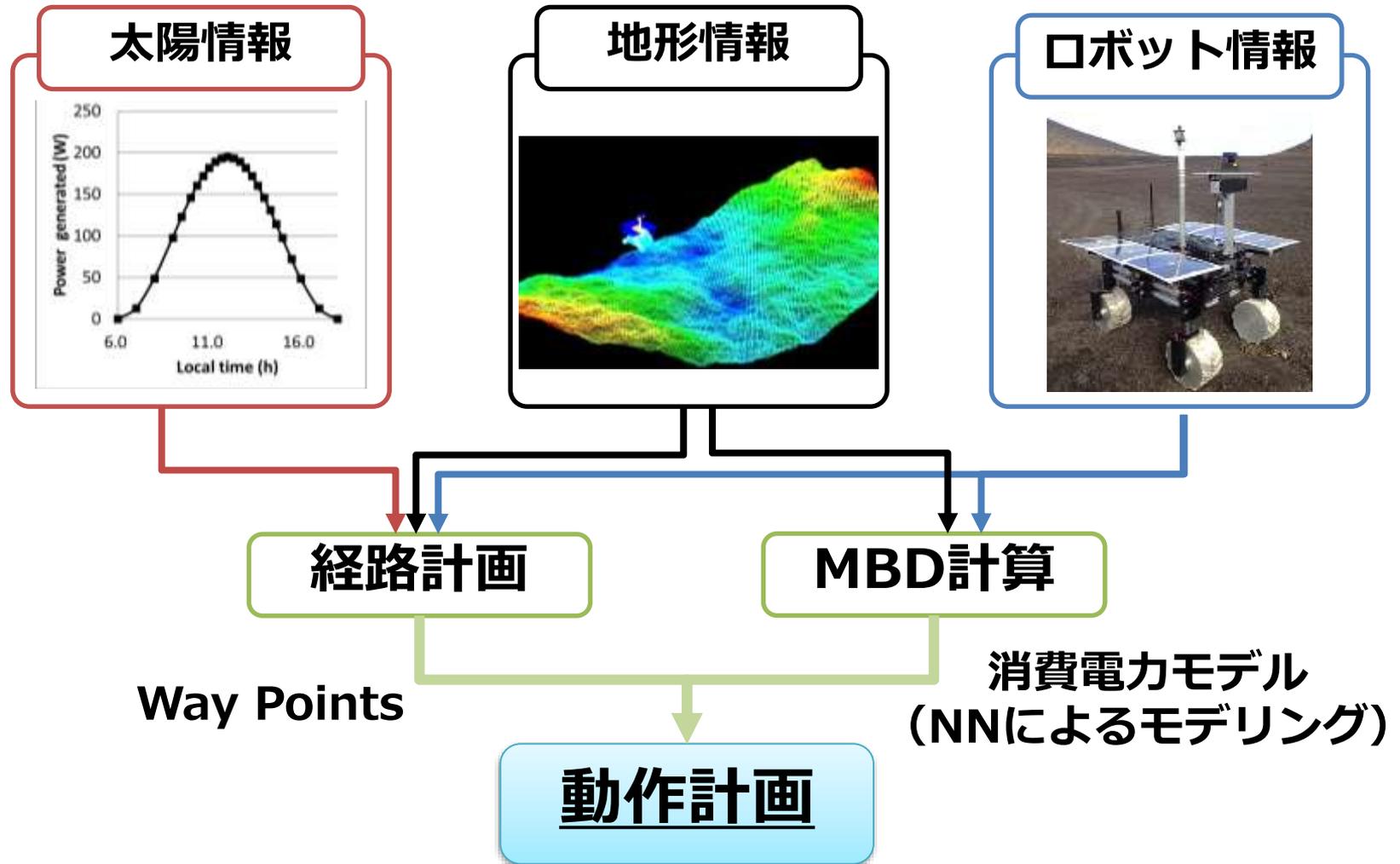


Method	Case A: Lunar simulant	Case B: Toyouira sand
SMC (500 runs)	17526.1 sec	79994.1 sec <b>(one day)</b>
LHSMC (100 runs)	3507.2 sec	16232.5 sec
Proposed approach (500 runs)	<b>245.8 sec</b>	<b>1125.9 sec</b>

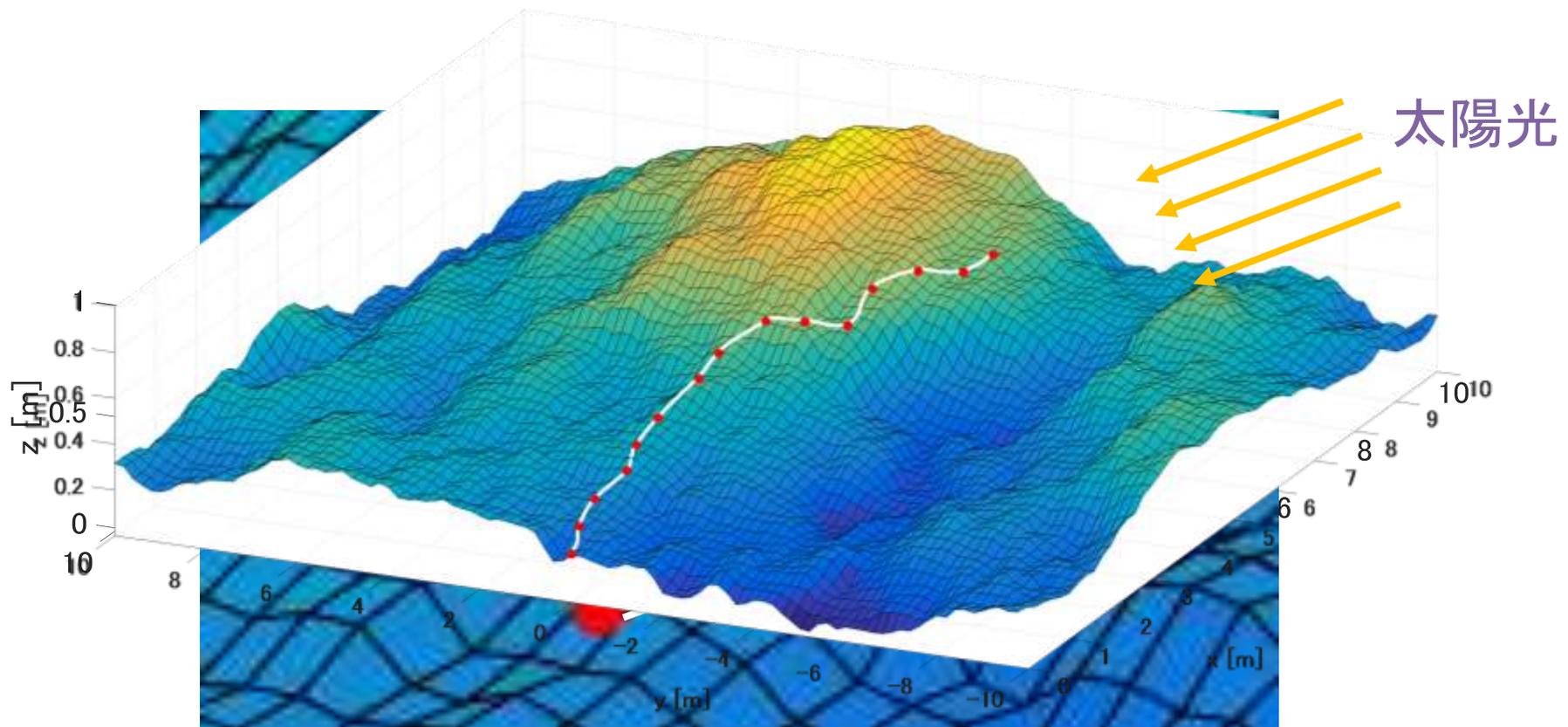


[7] Ishigami, G., Nagatani, K., and Yoshida, K., Proc. of the ICRA2011, pp. 601–606.

## ■ ロボットの電力・エネルギー収支を考慮した動作計画



[8] G. Sakayori, G. Ishigami, Proc. of the IEEE-ICM2017, pp. 99-104.



[8] G. Sakayori, G. Ishigami, Proc. of the IEEE-ICM2017, pp. 99-104.

## Terramechanics

### Interaction Mechanics

Macroscopic approach

In-wheel sensor

Soil flow analysis

### Numerical Analysis

Dynamic simulator

Uncertainty problem

Mobility prediction

### Application

Steering maneuvers

Tire/wheel design

Terrain/slip classification

MATLAB®

Curve Fitting Toolbox™

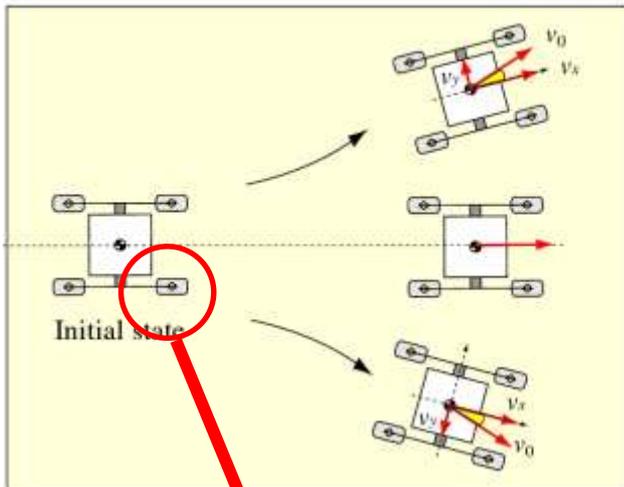
PIVlab

Symbolic Math Toolbox™

Statistics and Machine Learning Toolbox™

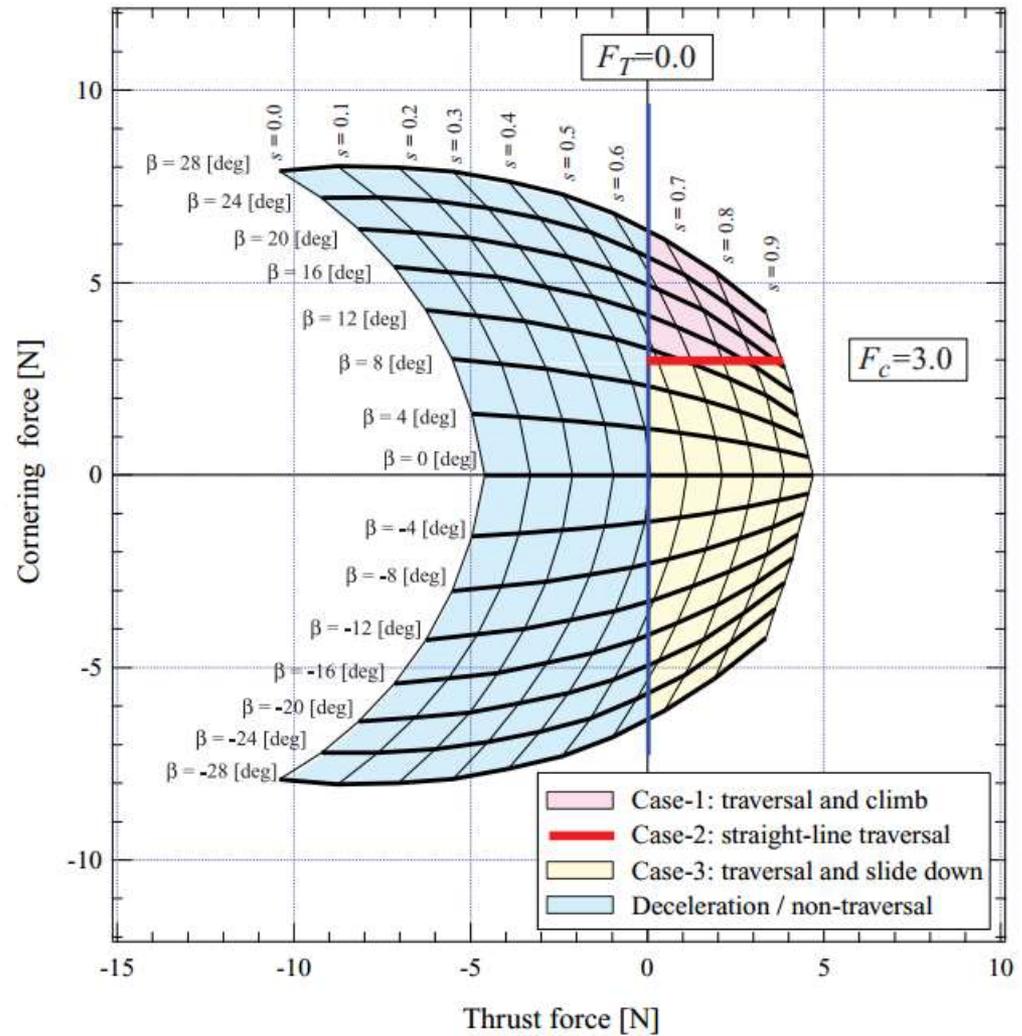
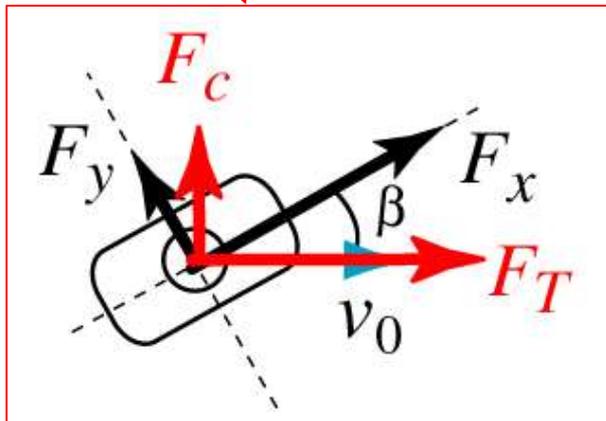
Statistics and Machine Learning Toolbox™

# テラメカニクス応用 | ステアリング制御



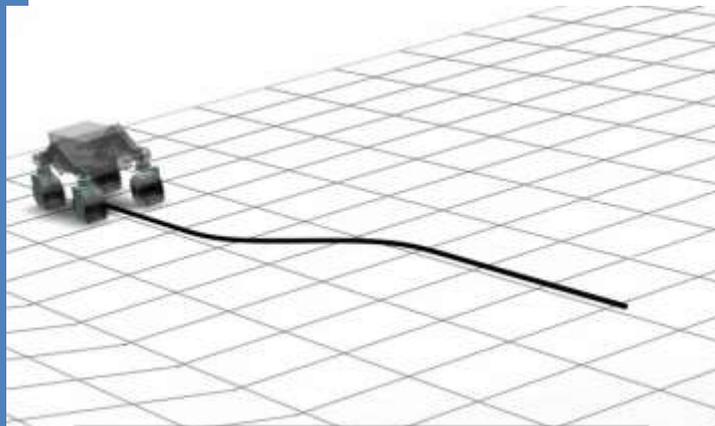
Tr

l

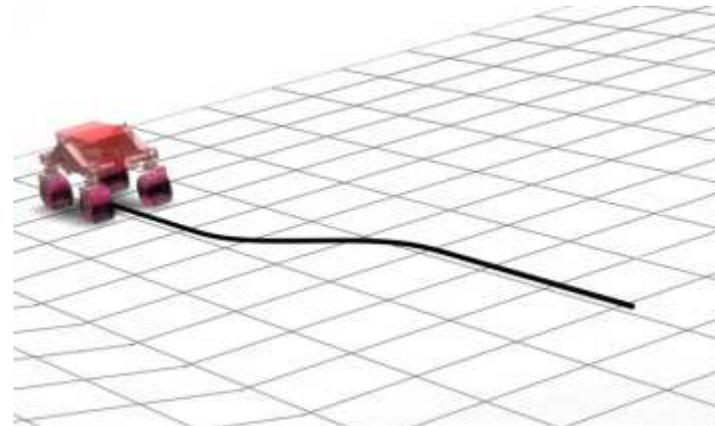


[9] Ishigami, G., Nagatani, K., and Yoshida, K., J. of Field Robotics, Vol. 26, Issue 3, 2009, pp. 264-286.

Slope traversability diagram

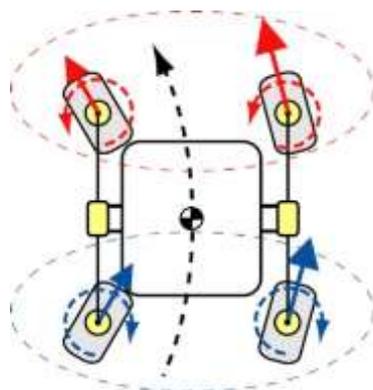


w/o compensation



w/ compensation

前輪：経路追従

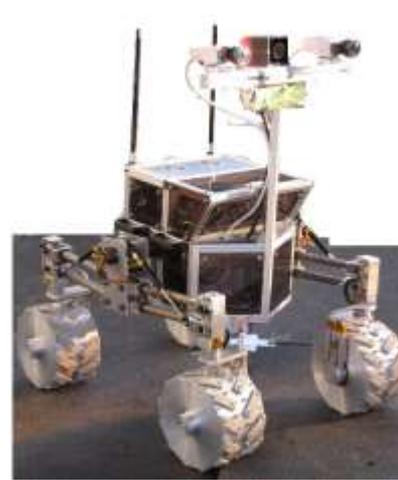


後輪：滑り補償



[9] Ishigami, G., Nagatani, K., and Yoshida, K., J. of Field Robotics, Vol. 26, Issue 3, 2009, pp. 264-286.

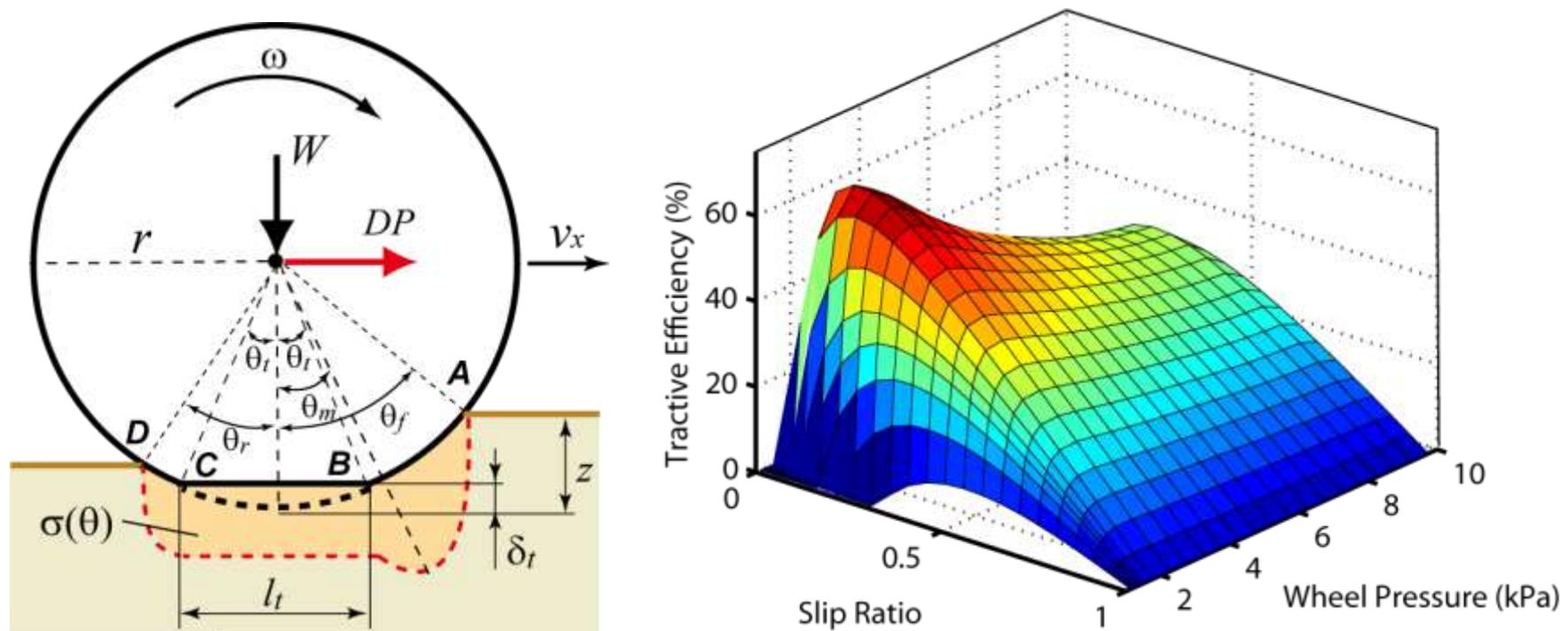
# テラメカニクスの応用 | タイヤ設計



## ■ ロボットの車輪サイズはどのように決めるべきか？

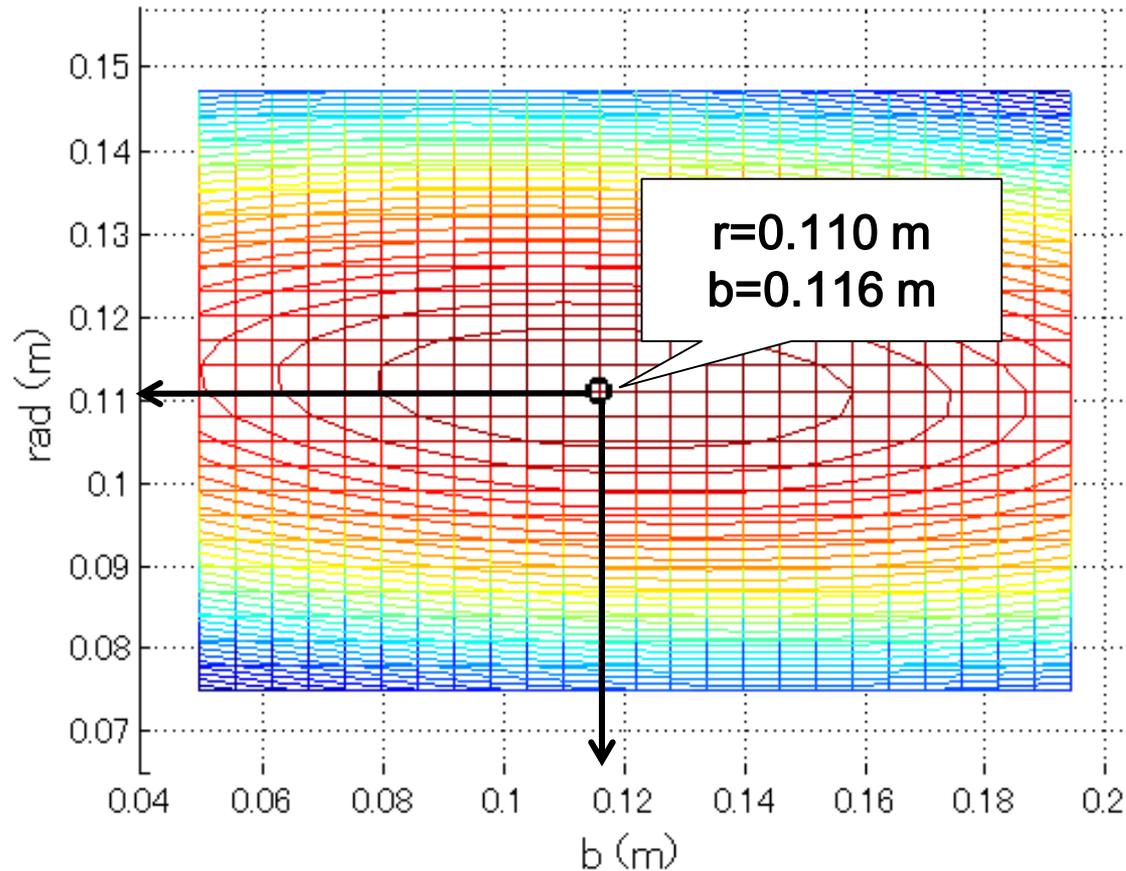
- 車輪直径大 → ○走行性能, ×重量, ×負荷トルク
- 車輪幅大 → ○走行性能, ×重量, ×ステアトルク
- 車輪剛性低 → ○走行性能, ×負荷トルク

- 統計学に基づいたアプローチを用いて、走行効率の近似モデルを構築し、接地圧の最適化を図る。



[10] 石上玄也ほか, 日本機械学会 第12回運動と振動の制御シンポジウム, OS13-B105, 2011

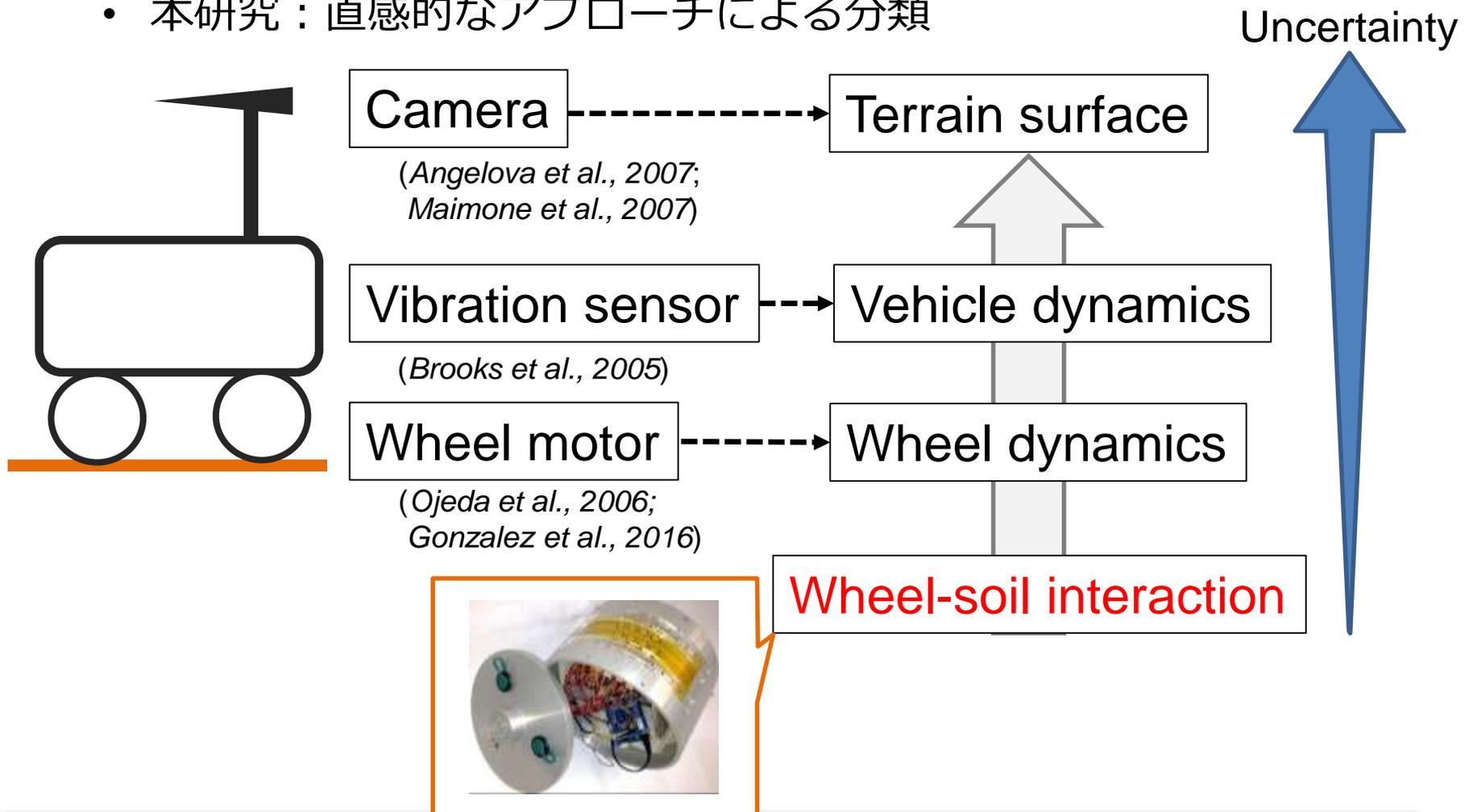
- 走行効率を統計学に基づいたアプローチから近似モデルを構築し，車輪幅や車輪径の最適化を図る。



[11] 石上玄也, 日本機械学会 第13回運動と振動の制御シンポジウム, A28, 2013

## ■ どのような地面を走行しているか？

- 従来：カメラや振動センサ
- 本研究：直感的なアプローチによる分類



## ■ どのような地面を走行しているか？

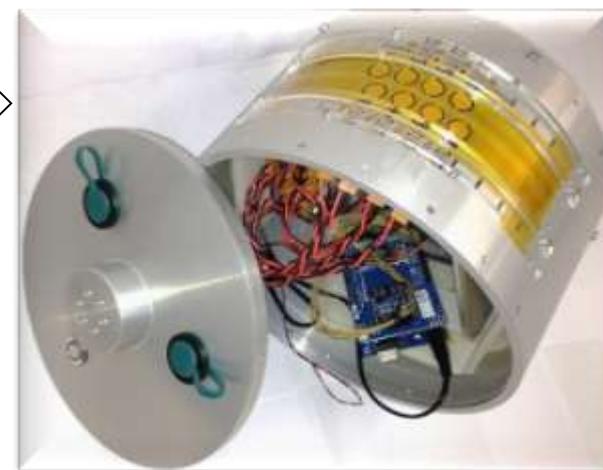
- 従来：カメラや振動センサ
- 本研究：直感的なアプローチによる分類



ゴツゴツする。  
痛い。硬い。

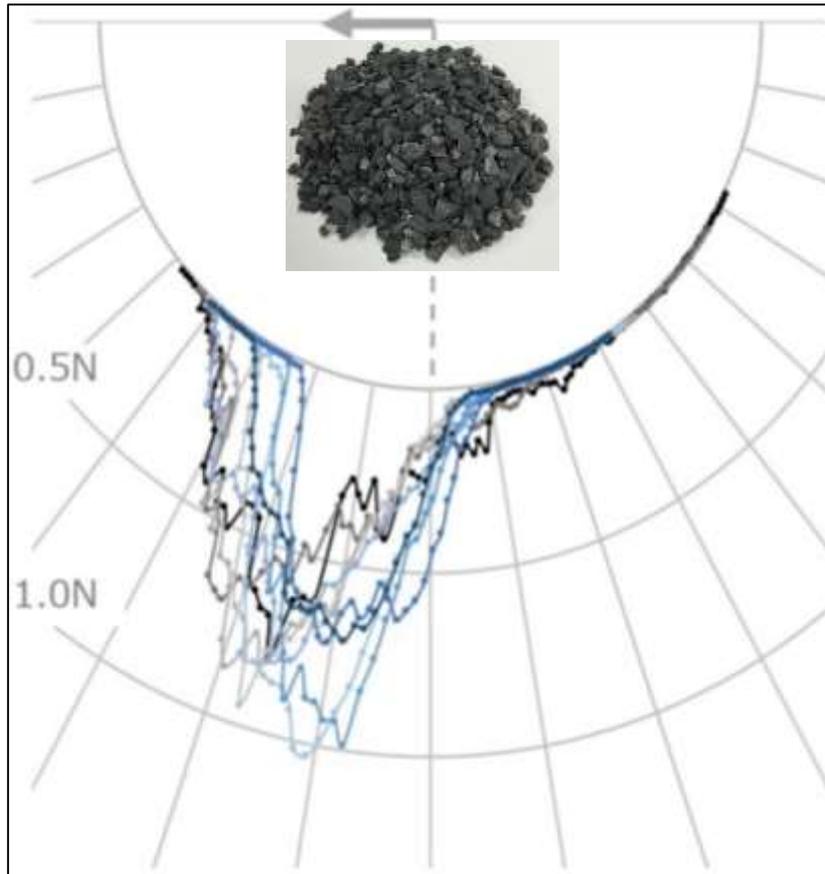


サラサラする。  
沈む。なじむ。

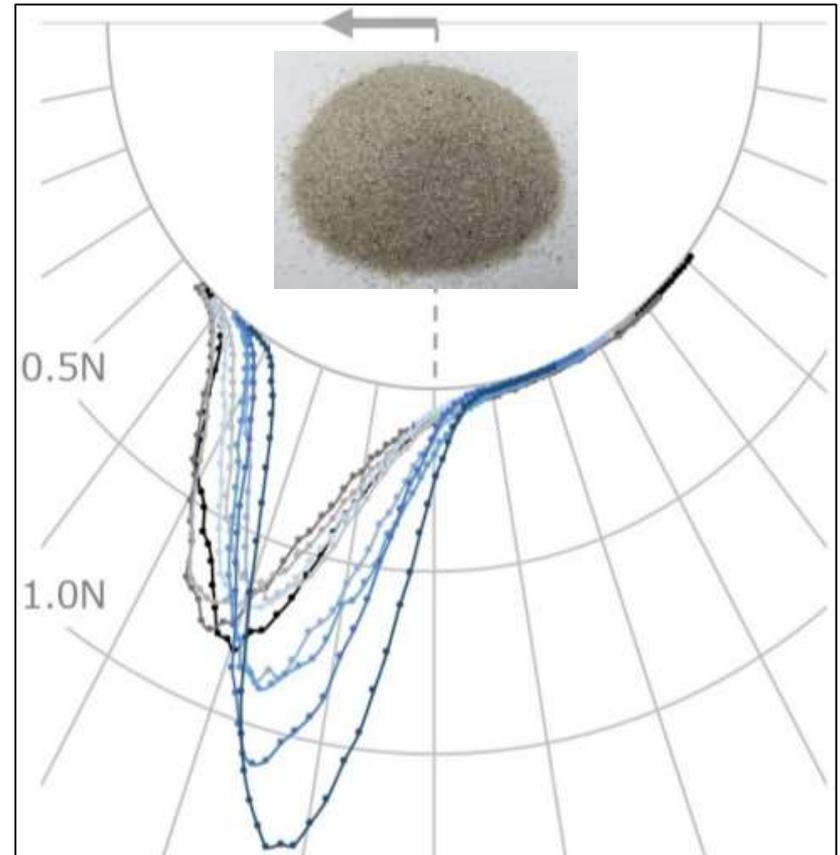


センサ内蔵車輪

## ■ センサ内蔵車輪による分類



黒碎石



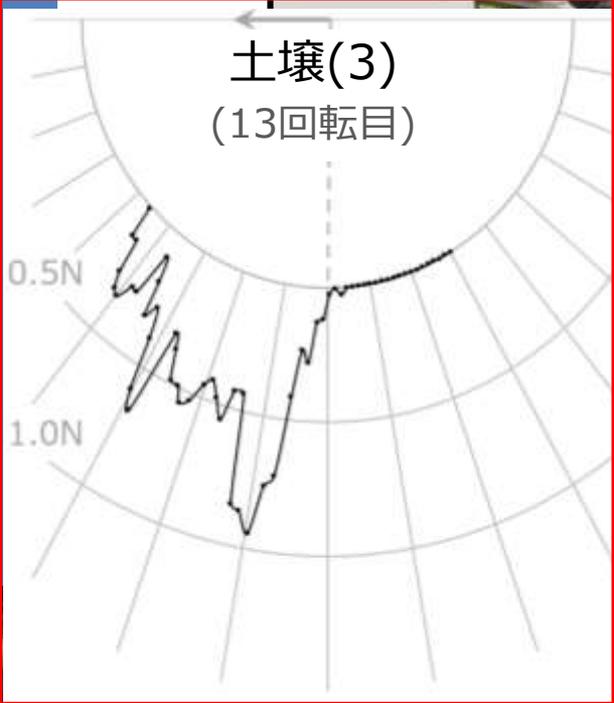
珪砂5号

[12] T. Shirai, H. Tsubaki, G. Ishigami, Proc. of the 13th European Conference of the ISTVS, pp. 282-289, 2015.

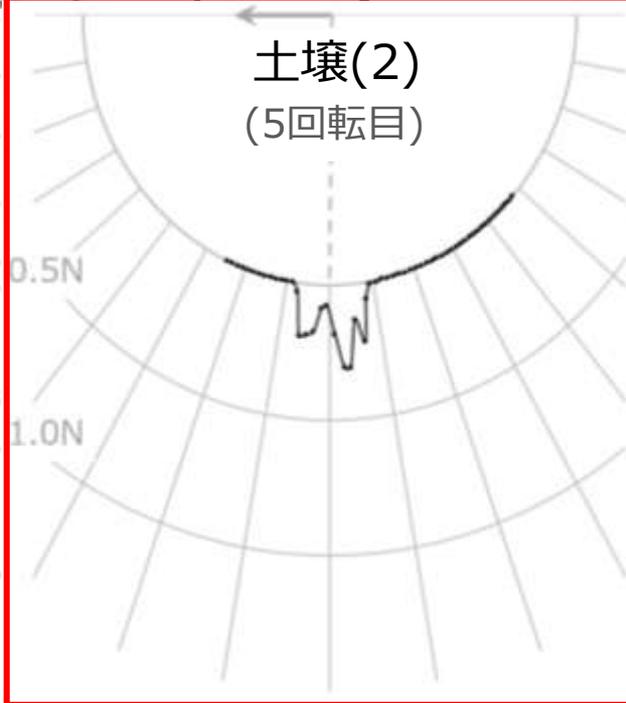
# テラメカニクス応用 | 地質分類



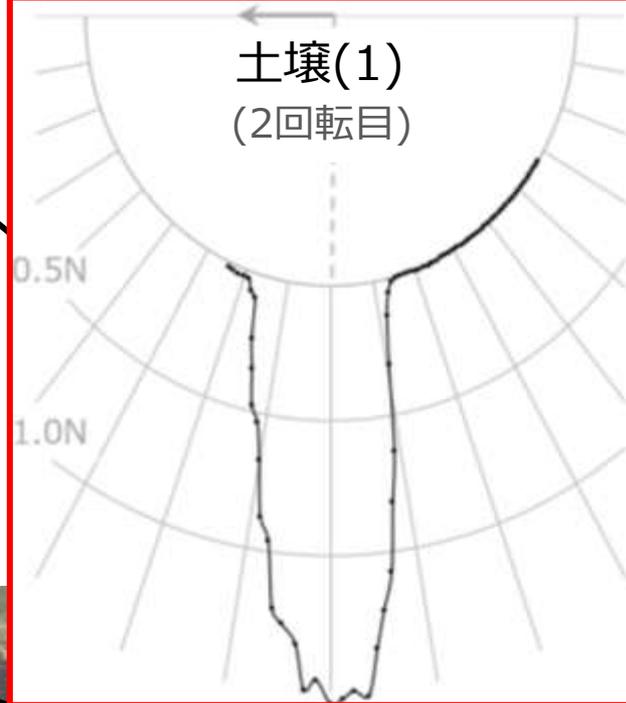
土壌(3)  
(13回転目)



土壌(2)  
(5回転目)



土壌(1)  
(2回転目)



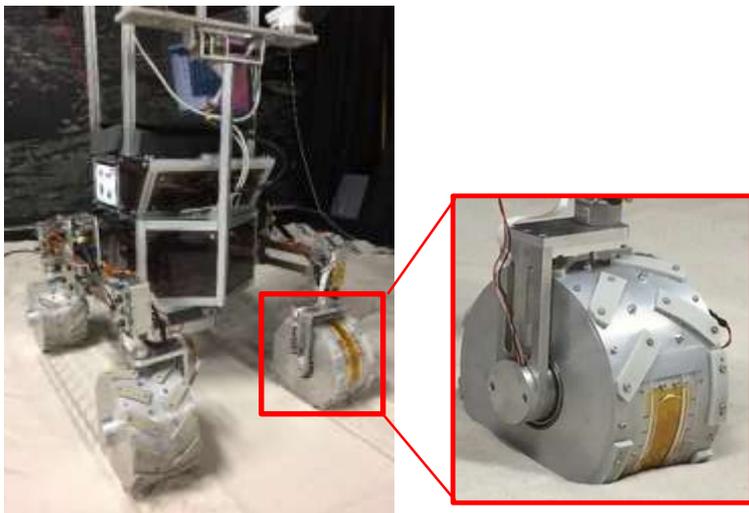
礫環境

踏み固め環境

砂環境



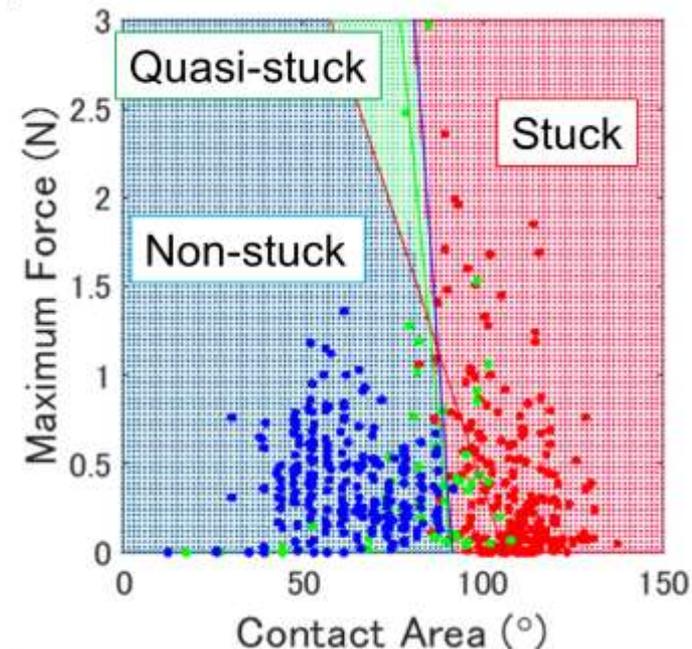
## センサ内蔵車輪搭載ロボット



## スリップ・接触力学データ

Support Vector Machineによる分類  
(incl. Statistics and Machine Learning Toolbox)

## カ学データに基づいた スリップ分類器



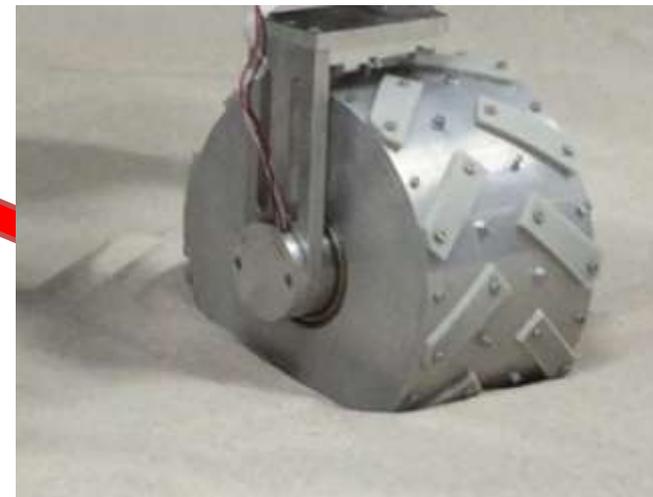
[13] T. Omura, G. Ishigami, Proc. of the ISTVS 19th International & 14th European-African Regional Conference, 2017.

## Confusion matrix

True class	Non-stuck	0.87	0.14	0
	Quasi-stuck	0.12	0.57	0.09
	Stuck	0.01	0.29	0.91
		Non-stuck	Quasi-stuck	Stuck

Classified class

Accuracy (%)	92.1
Precision (%)	88.5



[13] T. Omura, G. Ishigami, Proc. of the ISTVS 19th International & 14th European-African Regional Conference, 2017.

## Terramechanics

### Interaction Mechanics

Macroscopic approach

In-wheel sensor

Soil flow analysis

### Numerical Analysis

Dynamic simulator

Uncertainty problem

Mobility prediction

### Application

Steering maneuvers

Tire/wheel design

Terrain/slip classification

MATLAB®

Curve Fitting Toolbox™

PIVlab

Symbolic Math Toolbox™

Statistics and Machine Learning Toolbox™

Statistics and Machine Learning Toolbox™

# 不整地走行力学解析を基盤とした フィールドロボットの研究開発



慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 石上研究室

Web: <http://www.srg.mech.keio.ac.jp>

Email: [ishigami@mech.keio.ac.jp](mailto:ishigami@mech.keio.ac.jp)

1. G. Ishigami et al, J. of Field Robotics, Vol. 24 (3), pp. 233-250, 2007.
2. T. Shirai, G. Ishigami, J. of Terramechanics, Vol. 62, pp. 51-61, 2015.
3. H. Tsubaki, G. Ishigami, Proc. of the 8th Americas Regional Conference of the ISTVS, pp.97-109, 2016
4. 堀古翔太, 石上玄也, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-B08, 2017
5. Ishigami. G., Terramechanics-based Analysis and Control for Lunar/Planetary Exploration Robots, Doctoral Thesis of Tohoku University, 2008.
6. Ishigami, G., Kewlani, G., and Iagnemma, K., IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 16, No. 4, pp. 61-70, 2009.
7. Ishigami, G., Nagatani, K., and Yoshida, K., Proc. of the ICRA, pp. 601–606, 2011.
8. G. Sakayori, G. Ishigami, Proc. of the IEEE-ICM, pp. 99-104, 2017.
9. Ishigami, G., Nagatani, K., and Yoshida, K., J. of Field Robotics, Vol. 26, Issue 3, pp. 264-286, 2009.
10. 石上玄也ほか, 日本機械学会 第12回運動と振動の制御シンポジウム, OS13-B105, 2011
11. 石上玄也, 日本機械学会 第13回運動と振動の制御シンポジウム, A28, 2013
12. T. Shirai, H. Tsubaki, G. Ishigami, Proc. of the 13th European Conference of the ISTVS, pp. 282-289, 2015.
13. T. Omura, G. Ishigami, Proc. of the ISTVS 19th International & 14th European-African Regional Conference, 2017.