

計算科学が拓く世界 No. 11

オフロード車両の 走行力学について

要約版

農学研究科地域環境科学専攻
農業システム工学研究室
中嶋 洋

オフロード

オンロード (on-road)

= 道路上 (アスファルト舗装等)

オフロード (off-road)

= 道路外 (土, 岩, 雪氷, 水, 他)

★ 農業機械

★ 建設機械

★ 自動車 (四輪駆動, SUV)

★ 特殊車両など

オフロード車両(1)



駆動型耕うん作業
(from ヤンマーWEBカタログ)



切削作業 by ブルドーザ (from Wikipedia)



けん引型耕うん作業 by Challenger (from Wikipedia)



ゲレンデ作業 (<http://www.pistenbully.com/>)

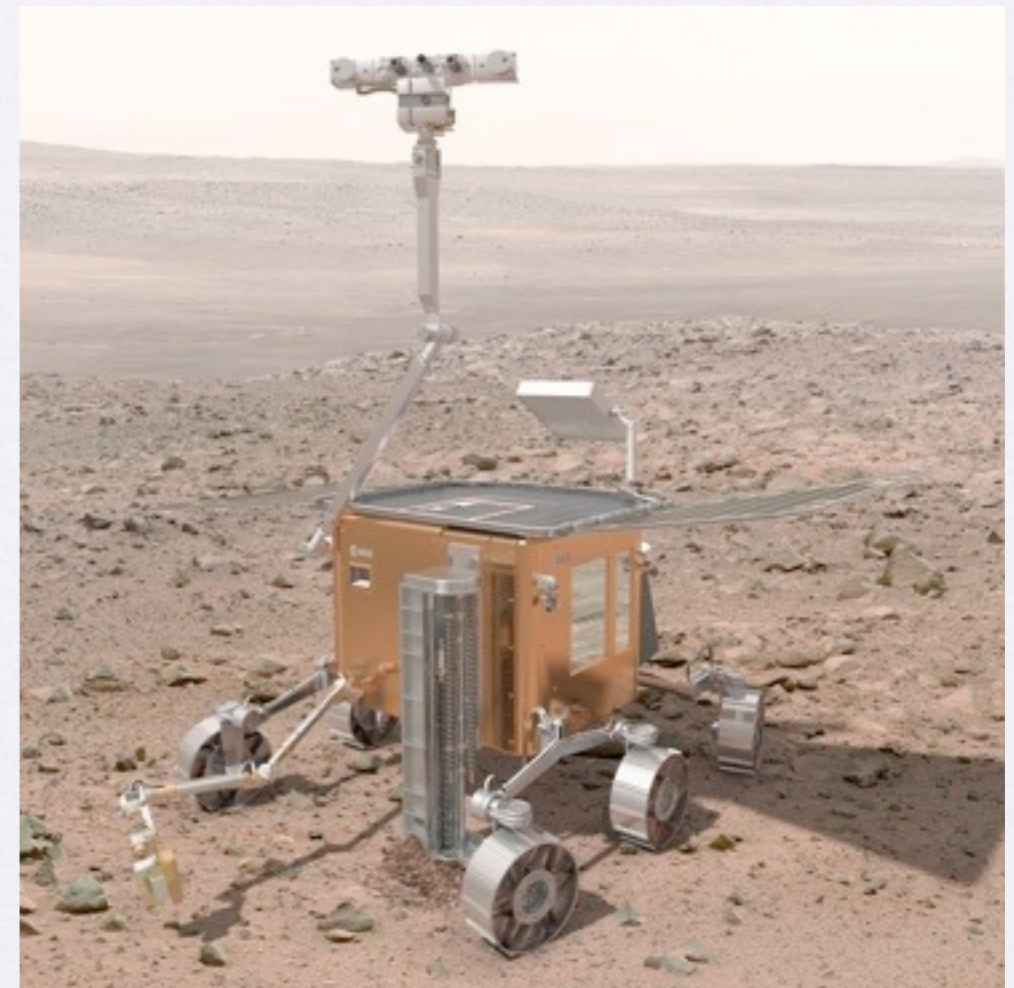
オフロード車両(2)

LRV, Apollo 17, 1972 (NASA)



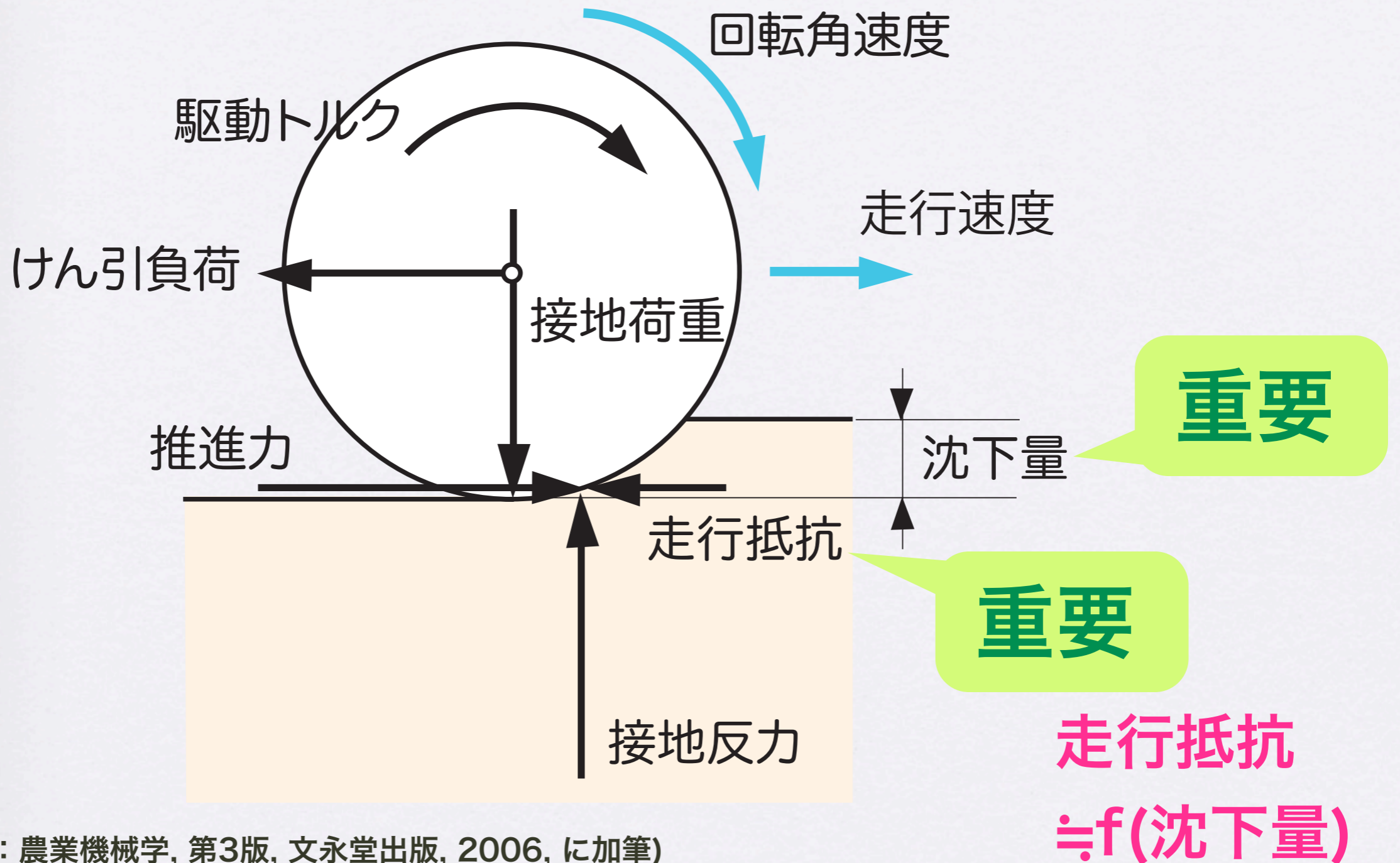
[http://grin.hq.nasa.gov/
IMAGES/SMALL/
GPN-2000-001139.jpg](http://grin.hq.nasa.gov/IMAGES/SMALL/GPN-2000-001139.jpg)

ExoMars Rover, 2018 (ESA)



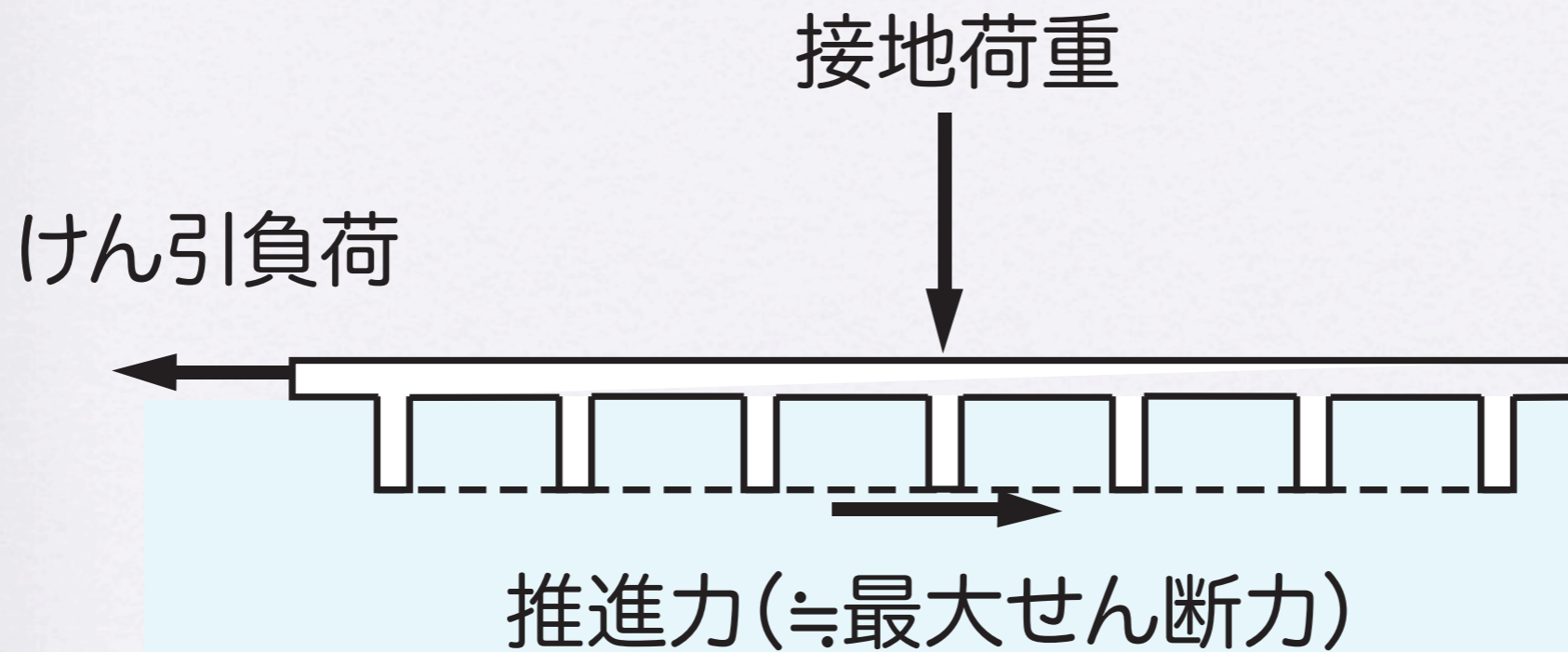
[http://www.dlr.de/irs/en/
desktopdefault.aspx/
tabid-5960/10970_read-25034/
gallery-1/216_read-2/](http://www.dlr.de/irs/en/desktopdefault.aspx/tabid-5960/10970_read-25034/gallery-1/216_read-2/)

走行の特徴(1)



走行の特徴(2)

接地面拡大模式図



(池田他：農業機械学, 第3版, 文永堂出版, 2006, に加筆)

最大負荷をけん引できる

☞ 凹凸部が左に移動するとき = 完全に「滑る」とき

接触問題

- 接触後に接触面形状が決まる
- 接触後に接触力（表面力）が決まる

理論解析が困難

👉 実験

👉 接触面形状と接触力作用の分離を仮定した解法（Bekker法＝半経験的手法）

👉 数値解析による近似解法【今回の話題】

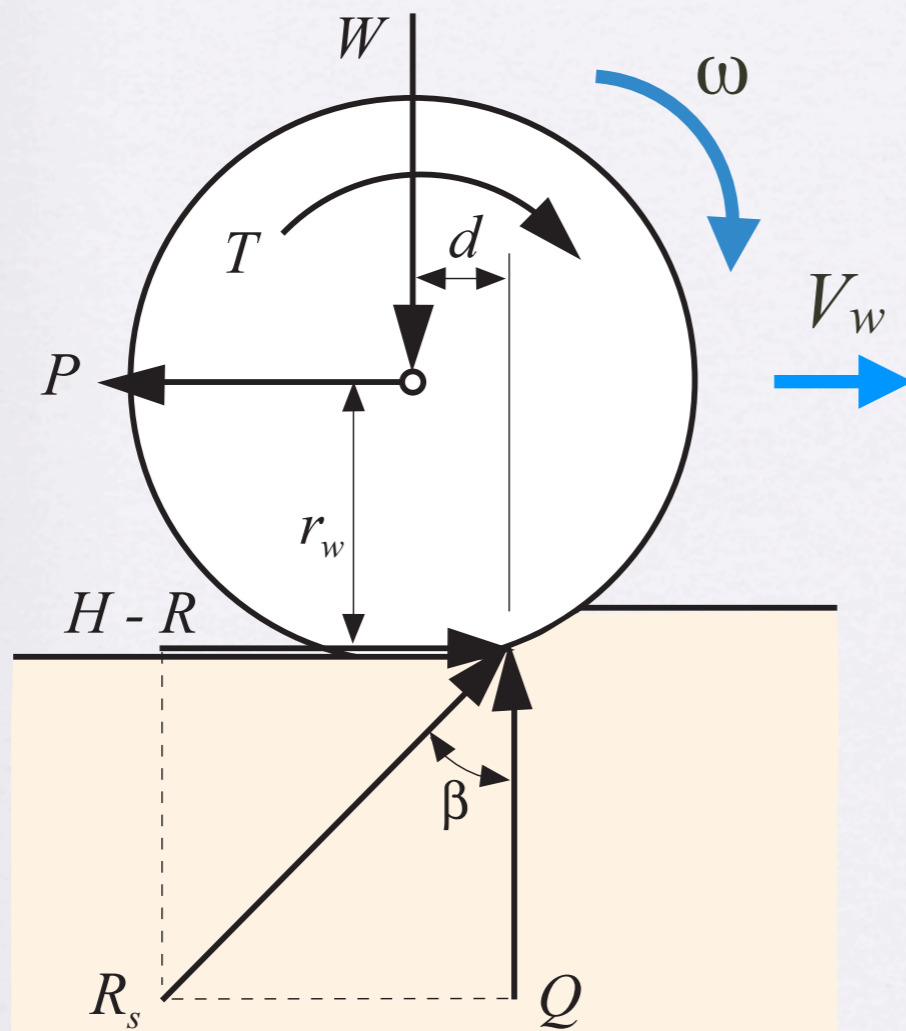
車輪の走行力学

けん引力：

$$P_d = H - R$$

滑り率：

$$i = \left(1 - \frac{V_w}{r_w \omega} \right) \times 100[\%]$$



推進力 H
走行抵抗 R
駆動トルク T
接地荷重 W
けん引負荷 P
転がり半径 r_w
接地反力 Q
接触反力 R_s
転がり摩擦係数 d
走行速度 V_w
回転速度 ω

研究の背景

- オフロード車両の走行性能を計算機により予測したい【目標】
- 走行装置と路面との接触問題👉走行装置と地表面との接触解析手法の開発～特にラグを有する場合
- パソコンで実行可能な2次元解析が理想

剛性車輪の事例

- 対象：月探査用小型無人ローバ
- 動機：月面傾斜地での剛性車輪の走行可能性を知りたい（車輪パラメータと走行性能の関係を解明する）【NASDA(JAXA)との共同研究】
- 内容：数値解析と検証実験による解析精度の確認、パラメータの走行性能への影響を解析により予測

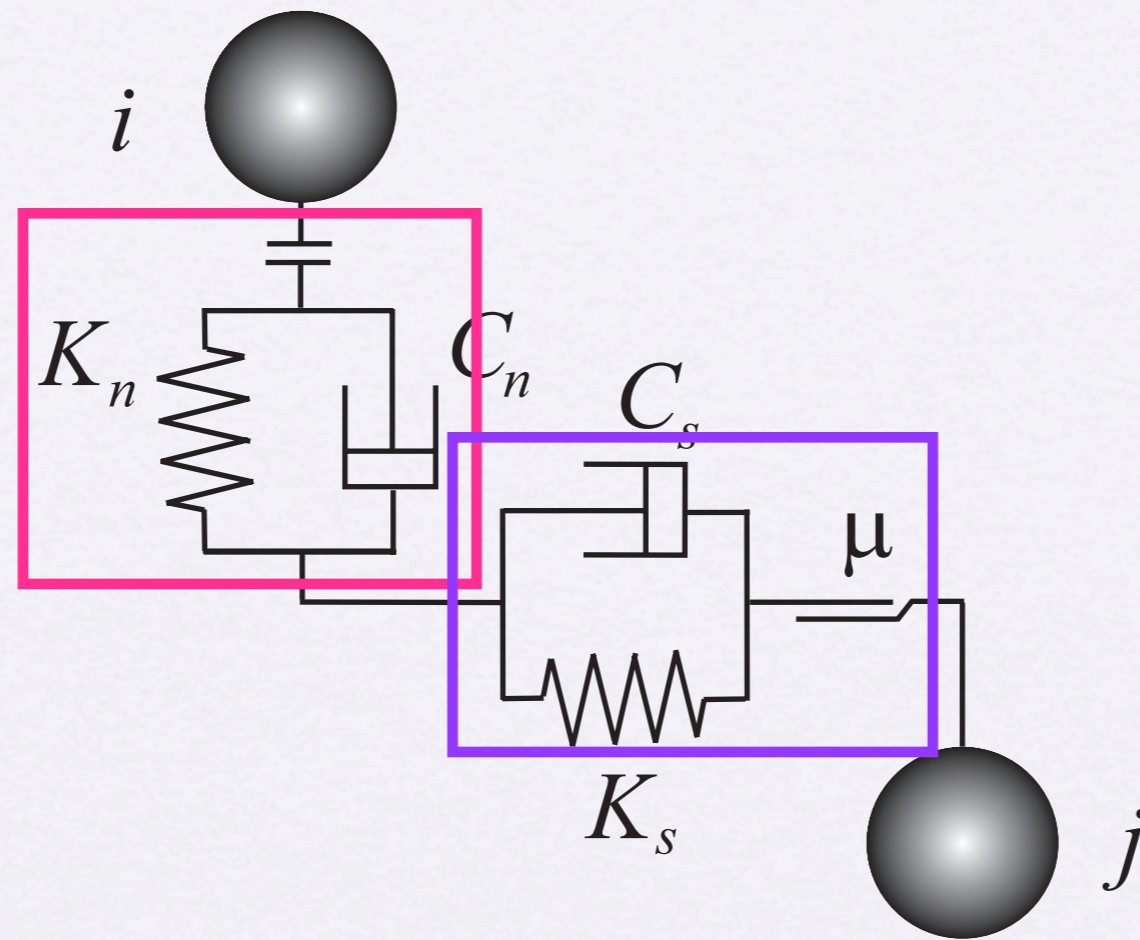
解析手法

- ☑ 離散要素法(Discrete Element Method; DEM)
- ☑ P. A. Cundallにより提案(1970年代)
- ☑ 粒子モデル
- ☑ 接触 2 要素間に力学モデルを適用
- ☑ 運動方程式を数値積分により解く(積分する)
- ☑ 接触判断と接触力計算に時間がかかる

接触力学モデル

法線方向接触力

バネ
+
ダンパー
+
ジョイント

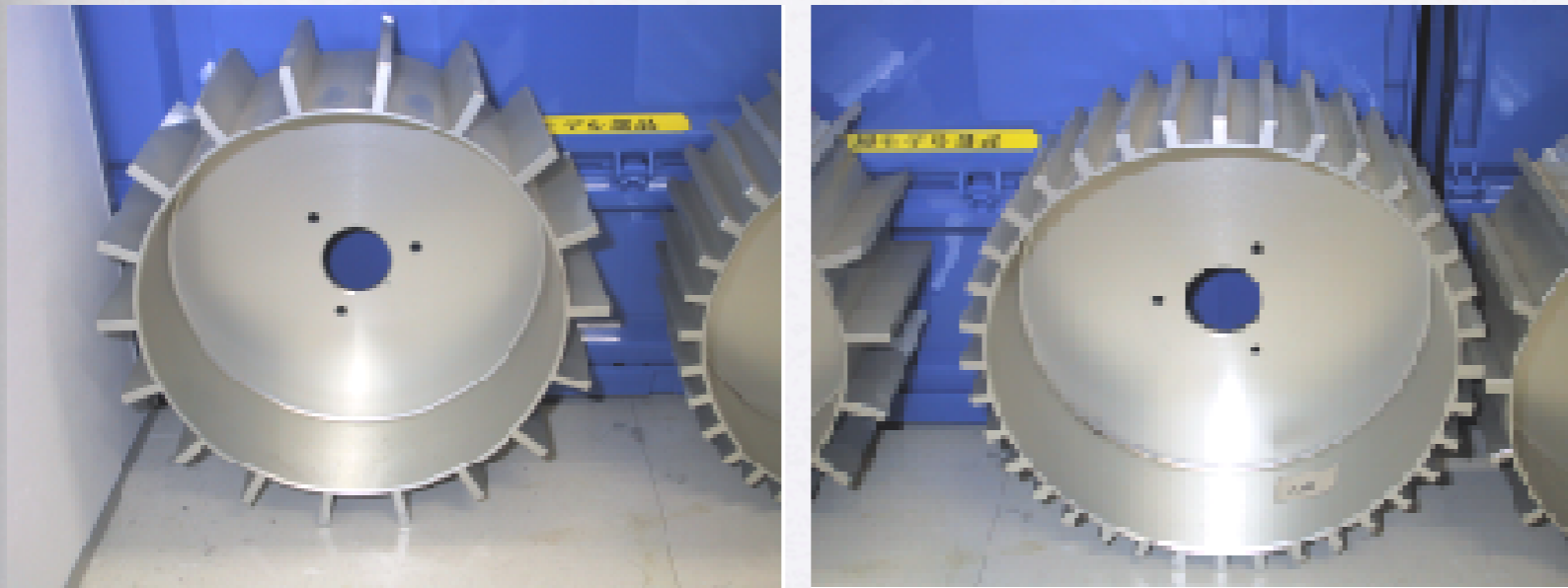


接線方向接触力

バネ
+
ダンパー
+
摩擦力

要素は大きさを持つ \Rightarrow 並進と回転の運動方程式

剛性車輪の実験



Data from:
H. Nakashima et al.
J. Terramechanics
44(2007), 153-162

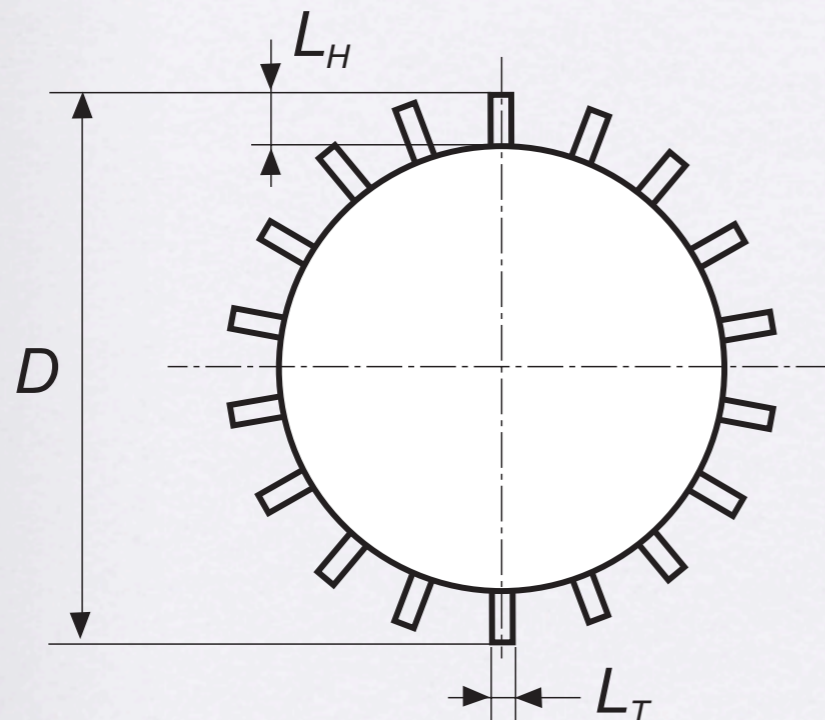


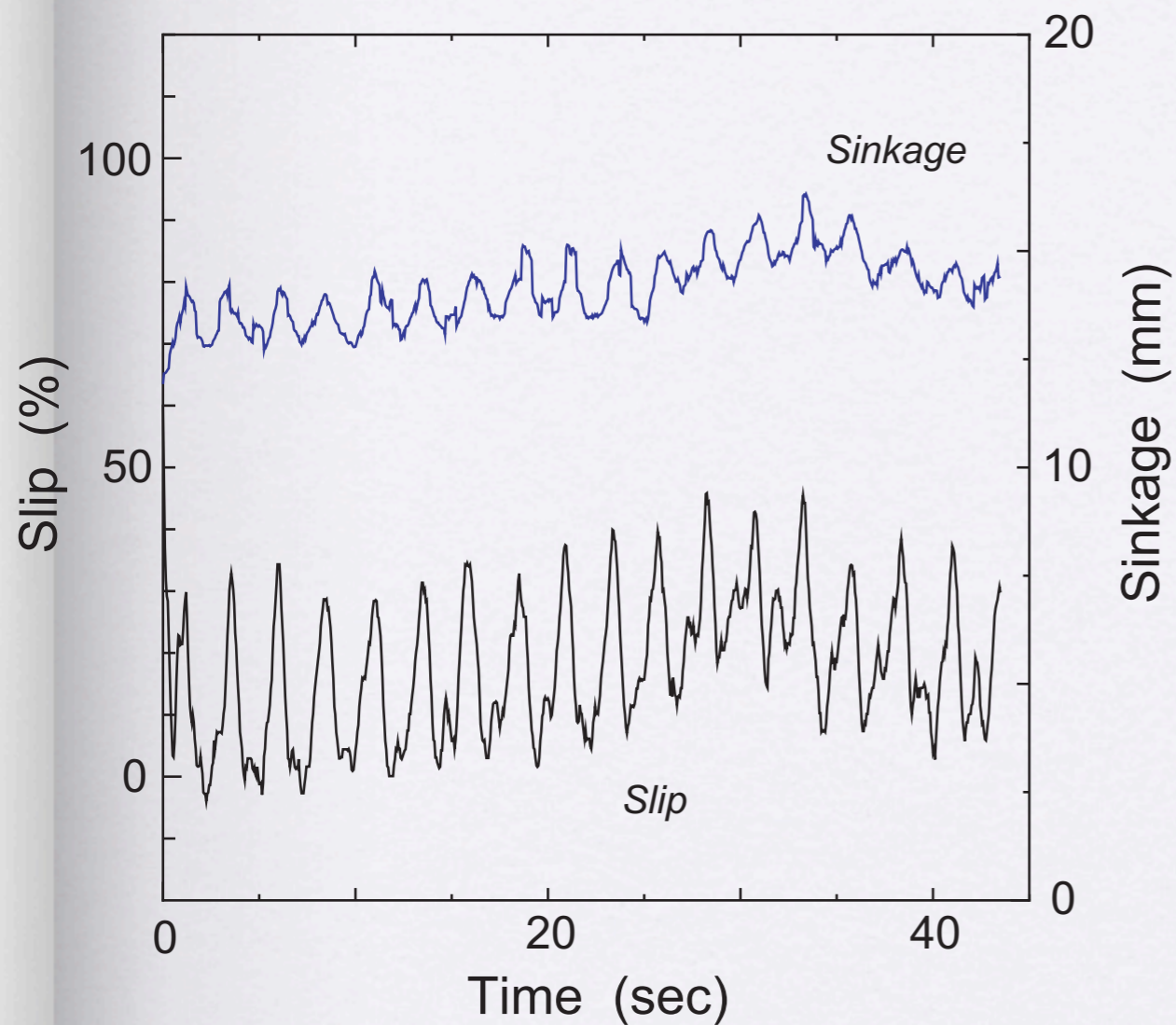
Table 1: Experimental wheel specifications

Wheel No.	D (mm)	B (mm)	L_H (mm)	L_T (mm)	L_n
1	200	50			
2		100			
3		150			
4	150	100			
5	250				
6	220	50			
7		100			
8		150			
9	170	100			
10	270				
11	210				
12	220		5	36	
13	240		10		
14	220		20	18	
		10	10		

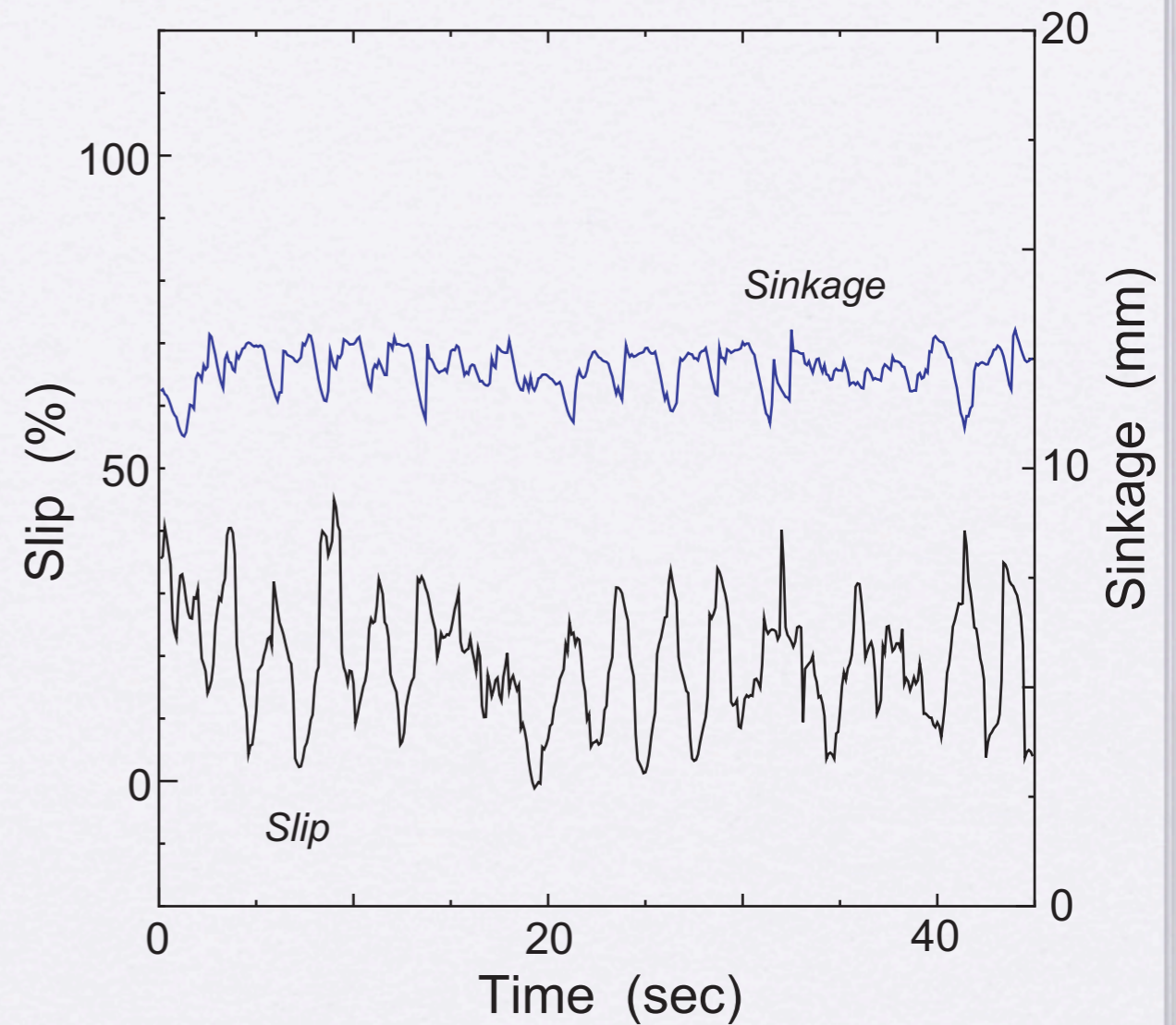
結果例(1)

Data from:
H. Nakashima et al.
J. Terramechanics
44(2007), 153-162

実験



DEM

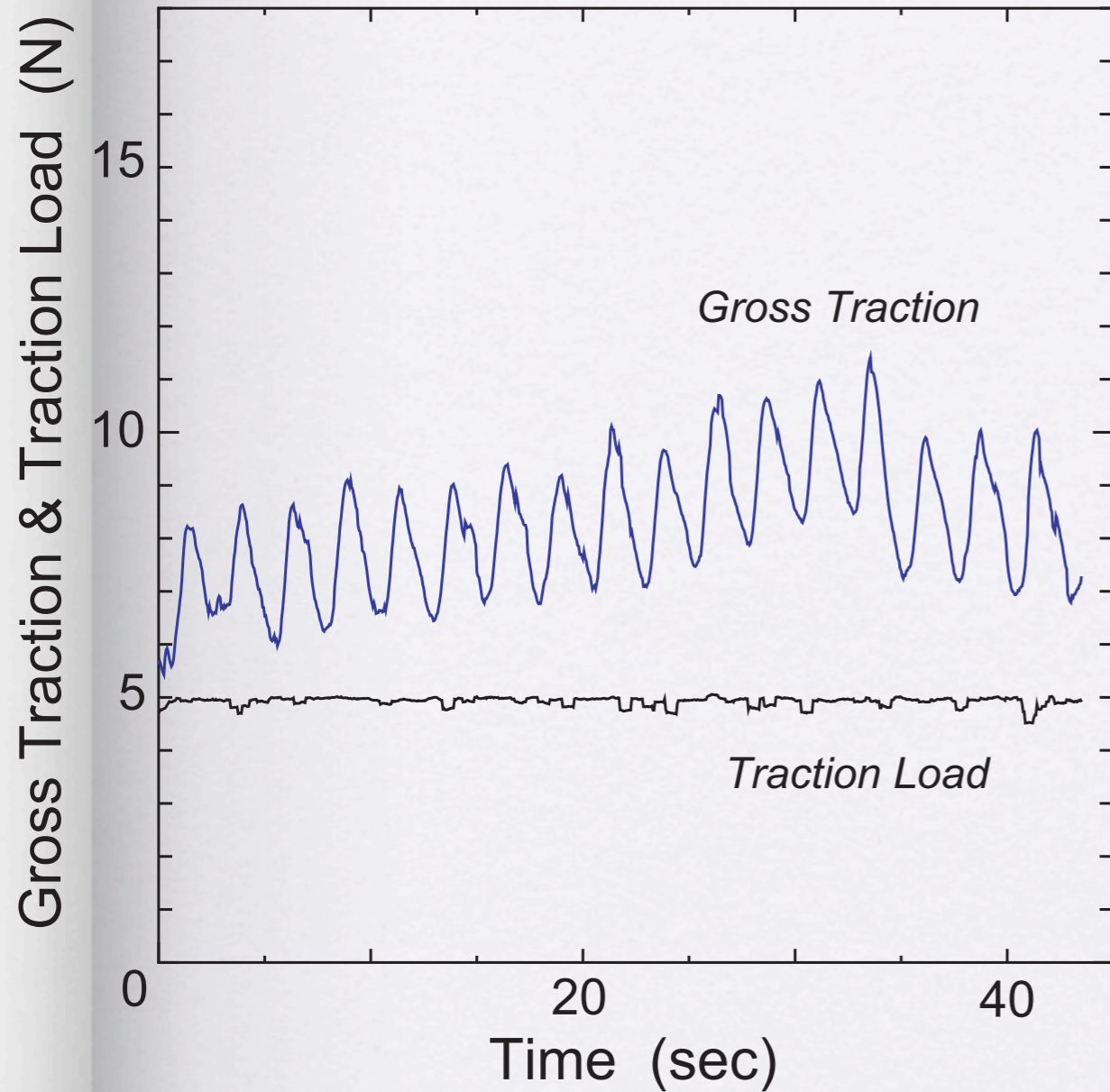


車輪No. 7; 接地荷重: 19.6 N; けん引負荷: 4.9 N

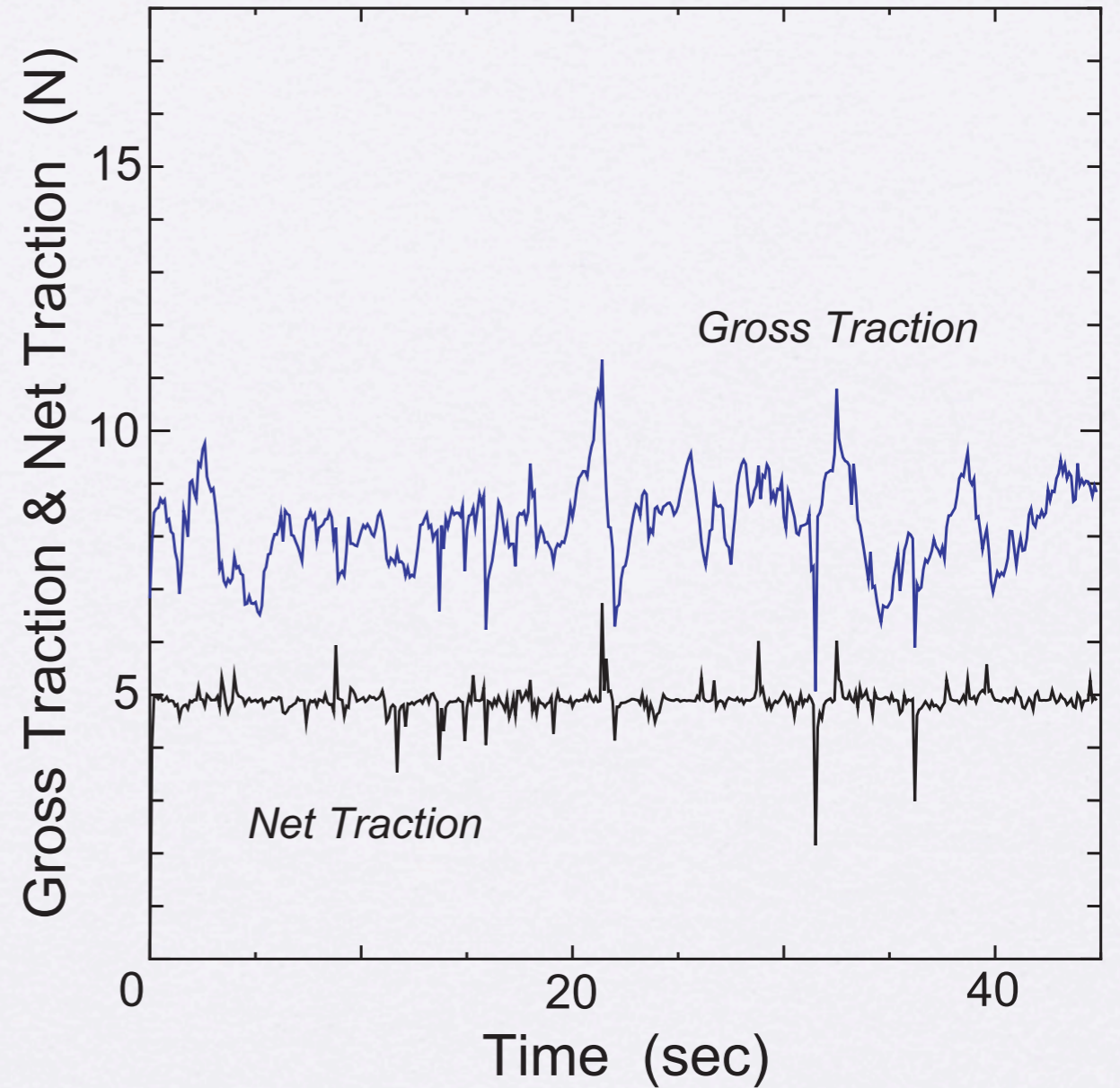
結果例(2)

Data from:
H. Nakashima et al.
J. Terramechanics
44(2007), 153-162

実験



DEM

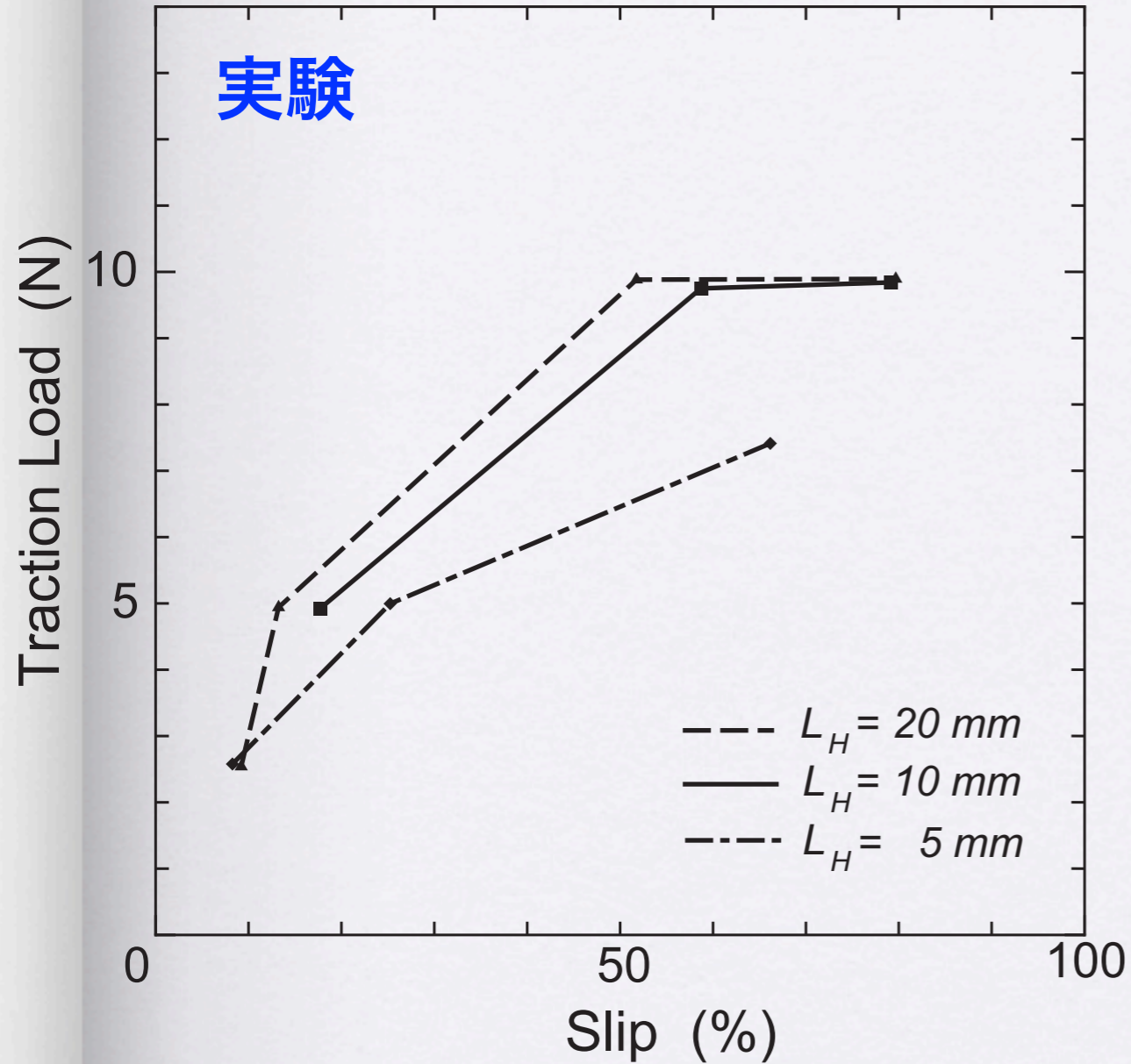


車輪No. 7; 接地荷重: 19.6 N; けん引負荷: 4.9 N

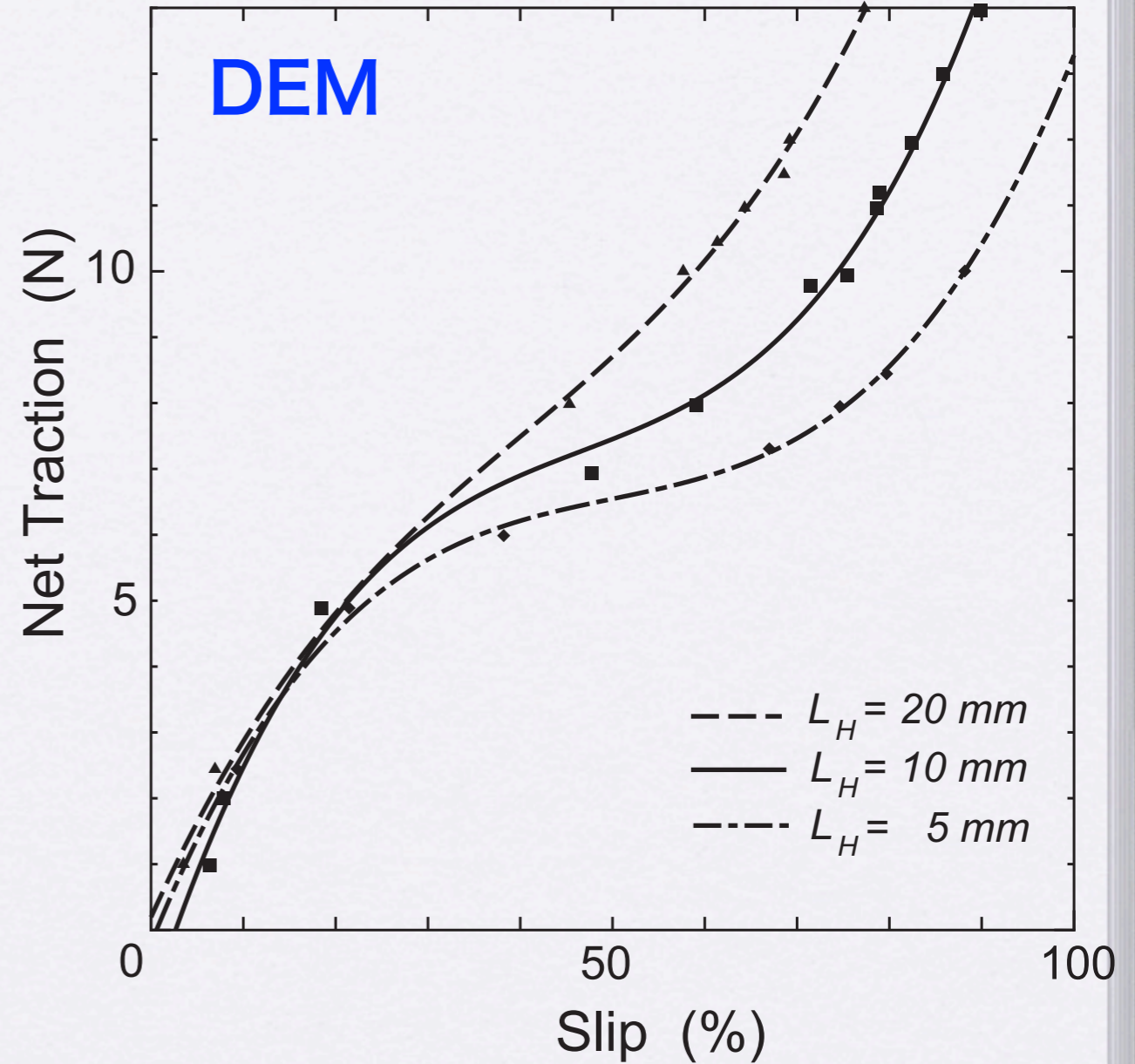
結果例(3)

Data from:
H. Nakashima et al.
J. Terramechanics
44(2007), 153-162

実験

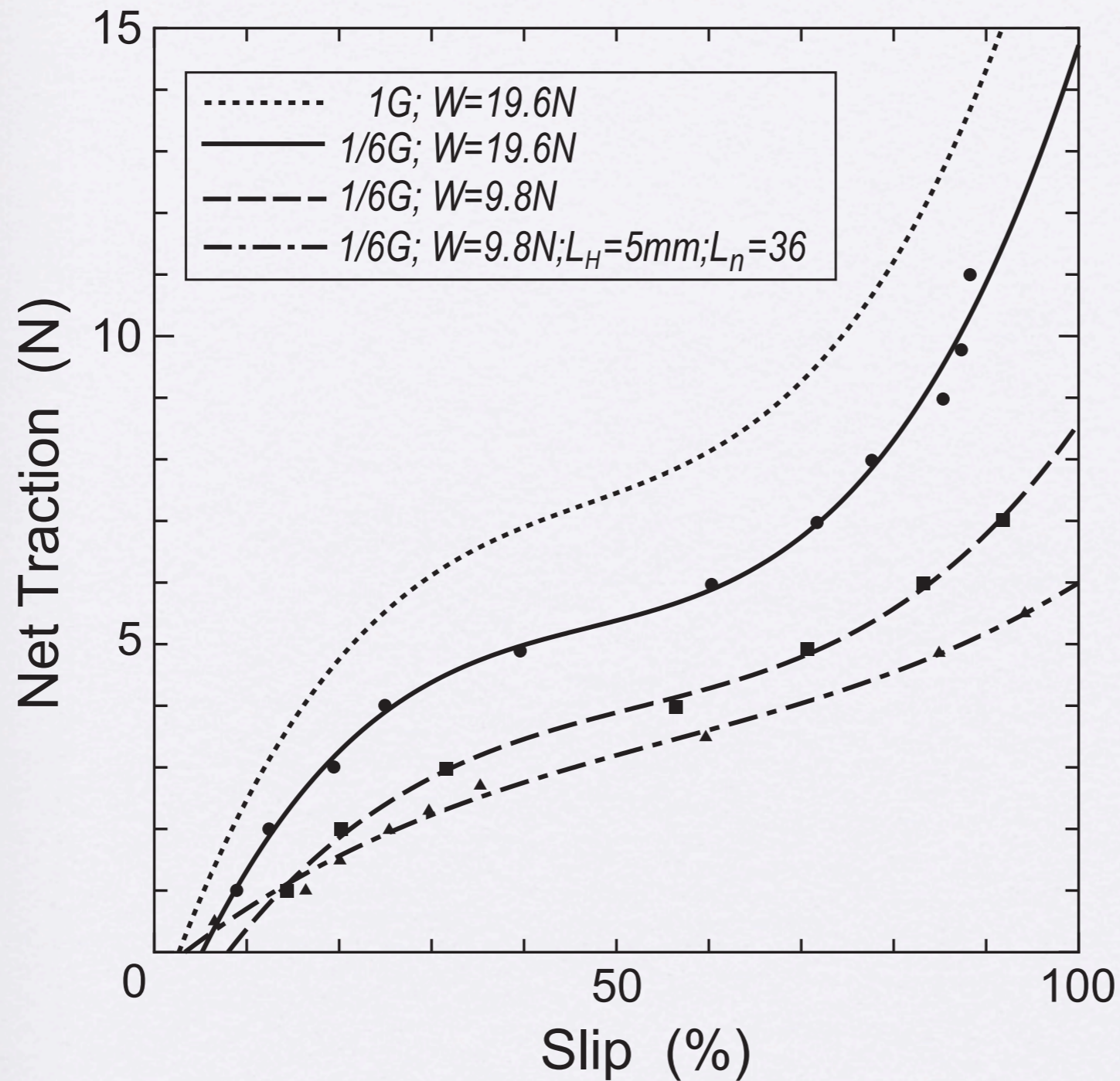


DEM



$$W = 19.6 \text{ N}$$

月面走行性能予測



傾斜角：0度

重力加速度：1/6G

$L_H = 10$ mm

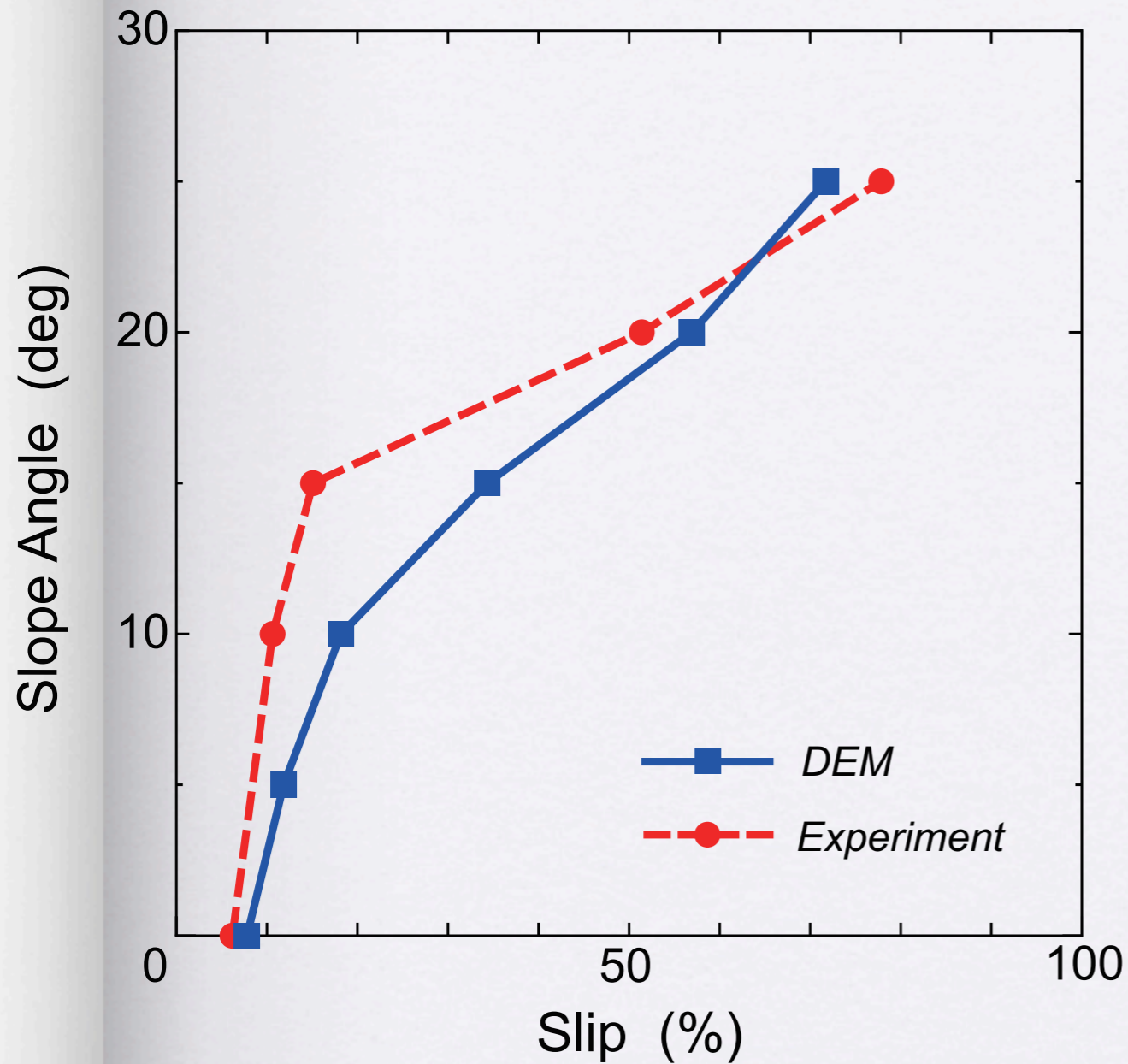
$L_n = 18$

□ けん引力の低下

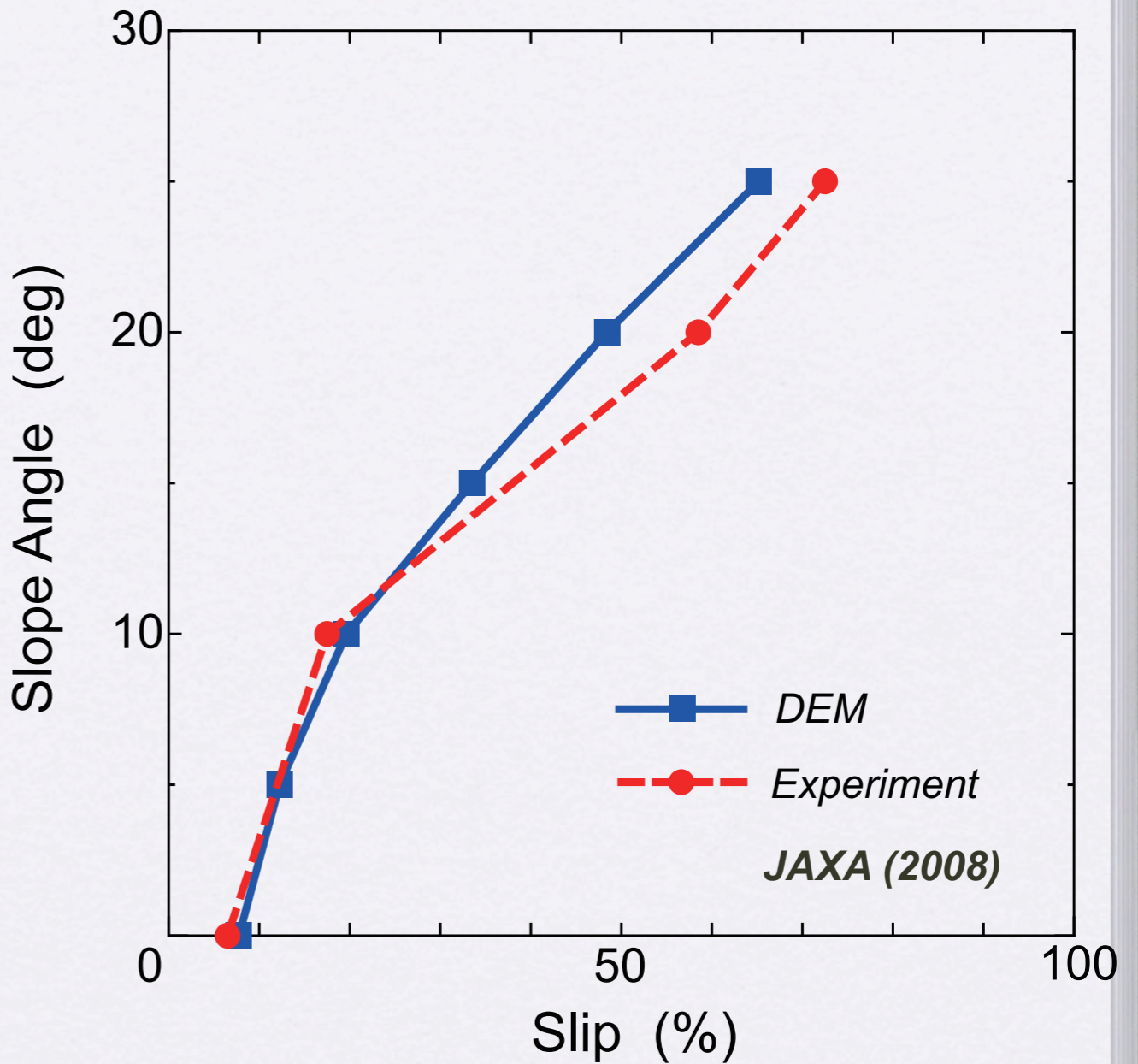
□ 車輪沈下量の増加

Data from:
H. Nakashima et al.
J. Terramechanics
44(2007), 153-162

斜面走行解析結果例



$L_n=18$; $L_H=10\text{mm}$; $W=14.7\text{ N}$

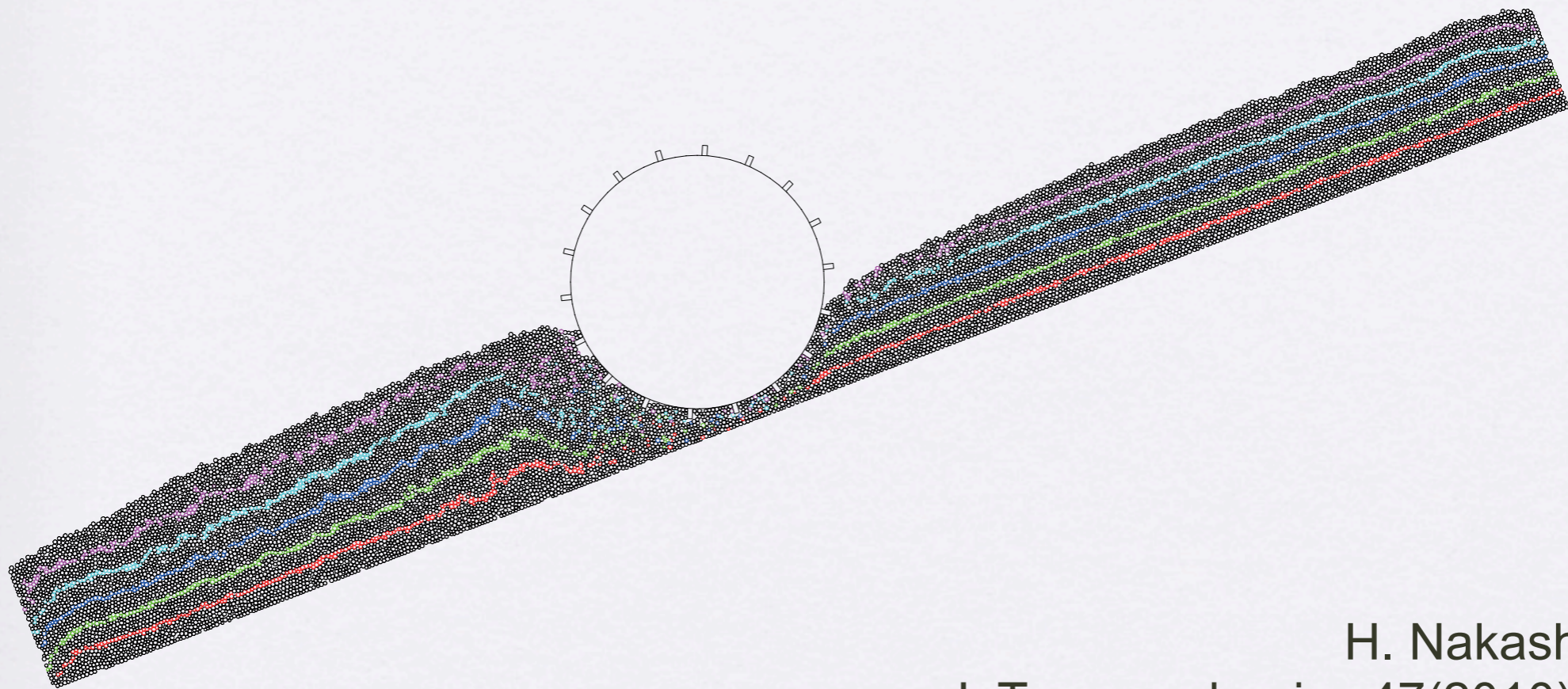


$L_n=18$; $L_H=20\text{mm}$; $W=19.6\text{ N}$

月面斜面走行予測

傾斜角度: 21度 ; 重力加速度 : 1/6G

$W=14.7\text{ N}$; $D=270\text{mm}$; $L_H=10\text{mm}$



H. Nakashima et al.
J. Terramechanics 47(2010), 307-321

最適と思われた剛性車輪でも走行できない傾斜角がある

タイヤの事例

- 対象：自動車用タイヤ，トレッドパターンの有無
- 動機：トレッドパターンの違いによる砂路面でのタイヤの走行性能の差を明らかにしたい【B社との共同研究】
- 内容：数値解析と検証実験による比較

解析手法

- ☑ 有限要素—離散要素法(Finite Element-Discrete Element Method; FE-DEM)
- ☑ 考え方：両手法の特徴を取り入れた数値解析
 - 連続体的挙動を有限要素法(FEM)で、粒子的挙動を離散要素法(DEM)でモデル化
- ☑ 運動方程式を数値積分により解く(積分する)
- ☑ DEM領域を小さくすることで計算負荷を減らせる可能性

タイヤの実験



(a)



(b)

B社製供試タイヤ例: (a) スムース
(b) ラグパターン[ラグ溝: 56個]

H. Nakashima et al.: J. Mech Sys. Transport.
and Logist., 2(1), 55-65, 2009

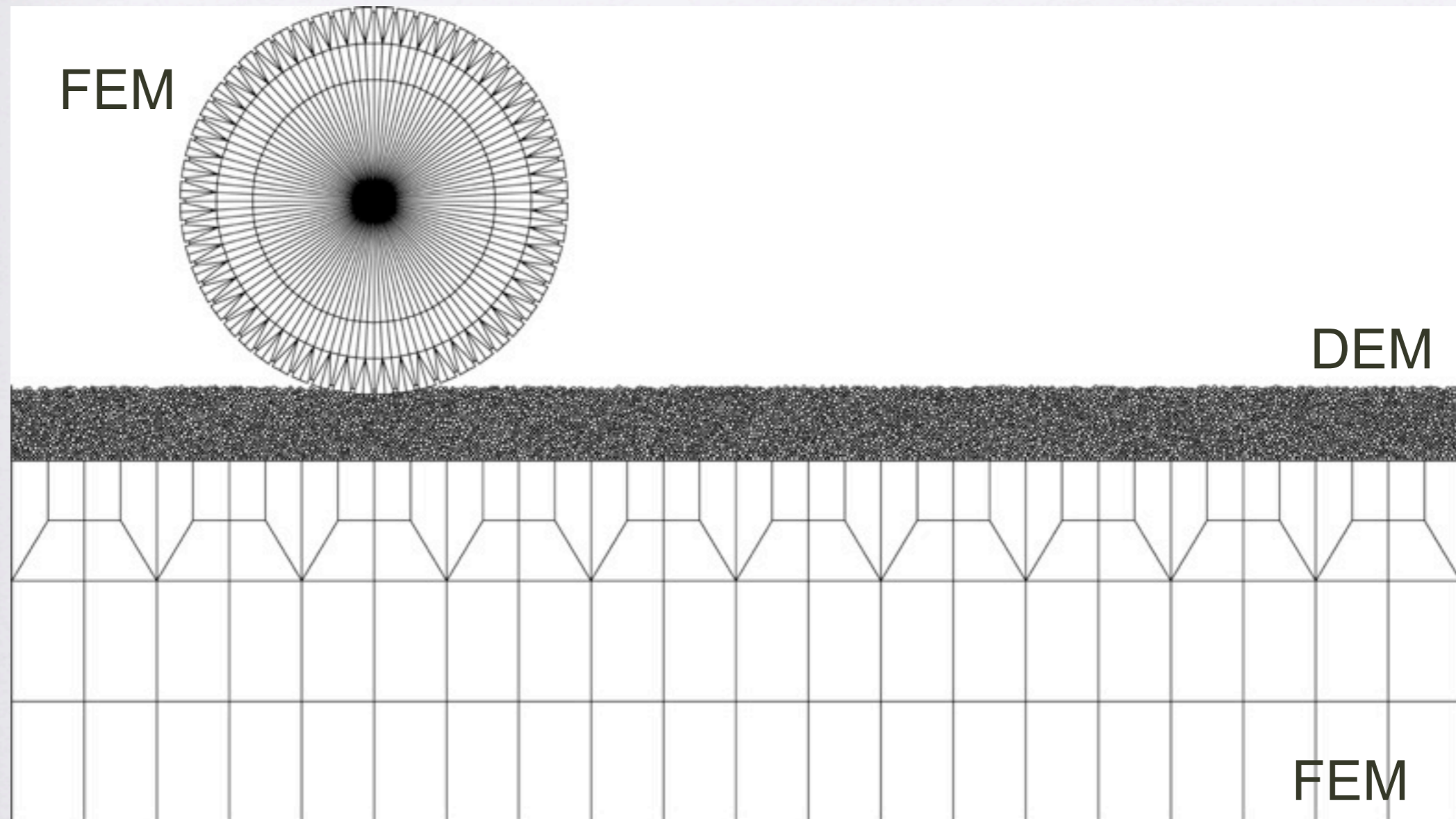
タイヤ直径: 535 mm; 接地荷重: 980 N;
空気圧: 140 kPa

👉 剛体モードの接触

京都大学農業システム工学研究室
室内タイヤ性能計測装置

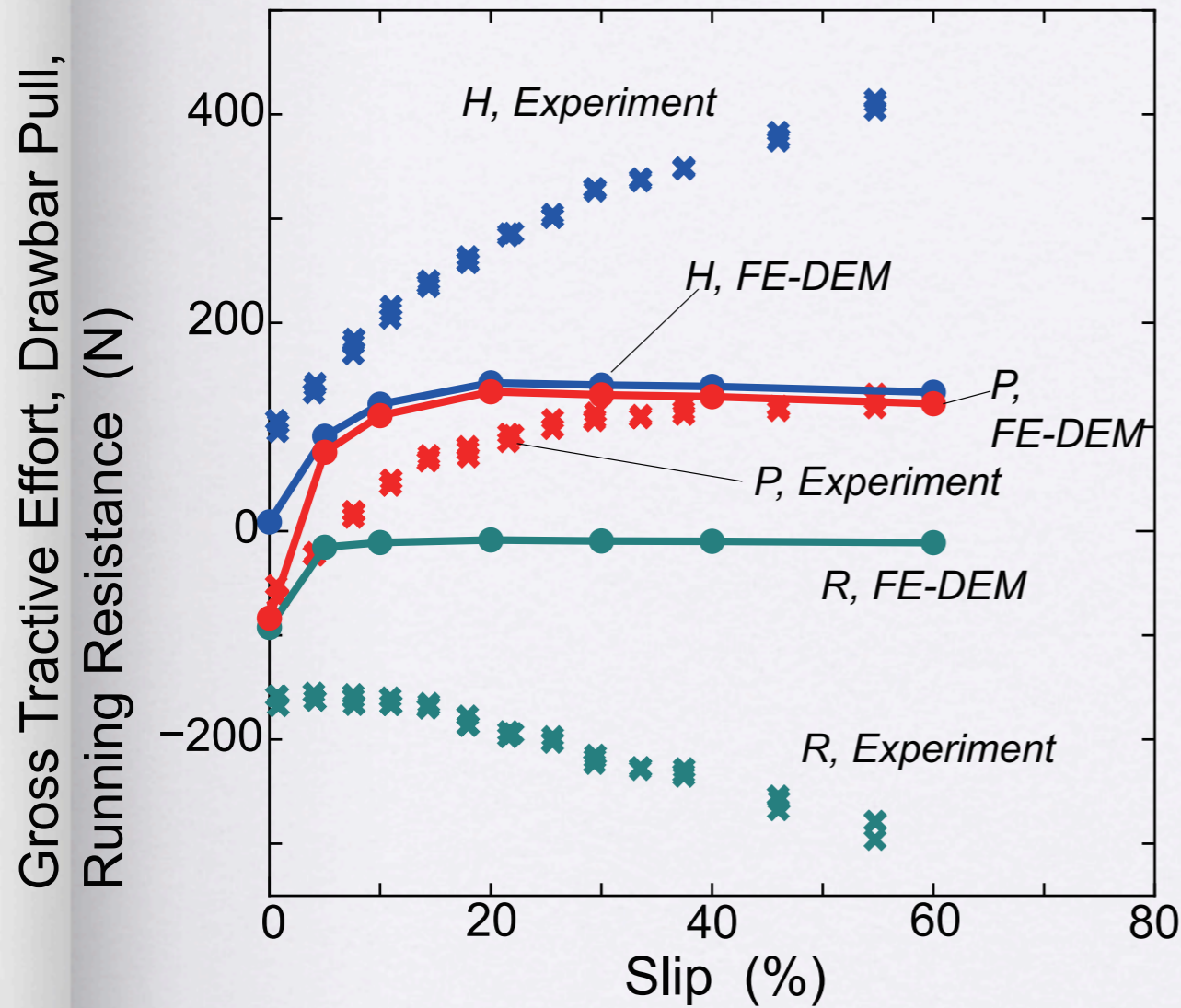


計算モデル



ラグパターンタイヤの場合

結果の比較(1)

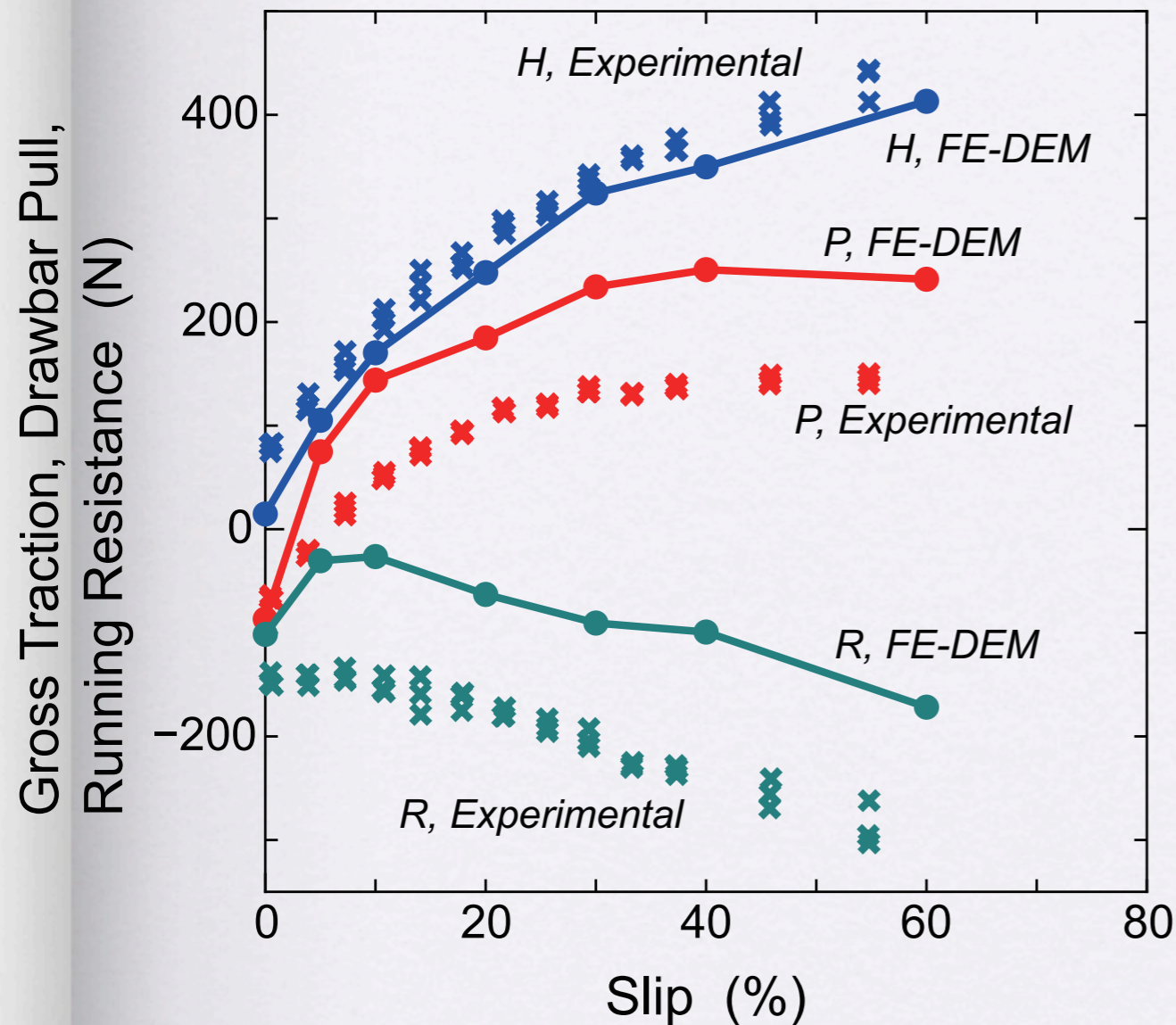


- 推進力：実験と解析で異なる
- 走行抵抗：実験と解析で異なる
- 走行抵抗がほぼゼロとなる高滑り域では推進力と走行抵抗の差であるけん引力が実験結果と同様な値に漸近する

スモースタイヤの場合

H. Nakashima et al.:
J. Mech Sys.
Transport. and
Logist., 2(1), 55-65,
2009

結果の比較(2)



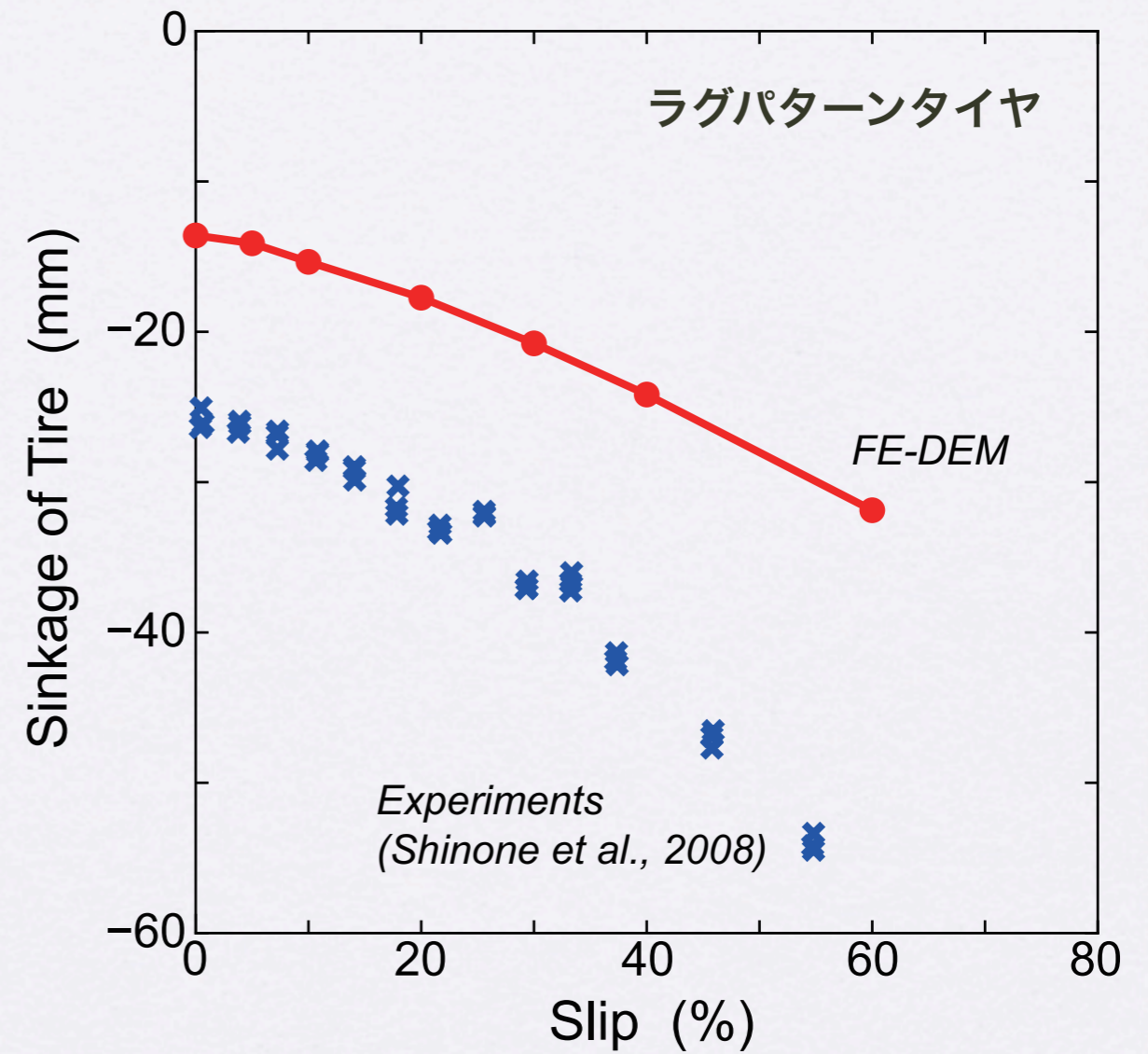
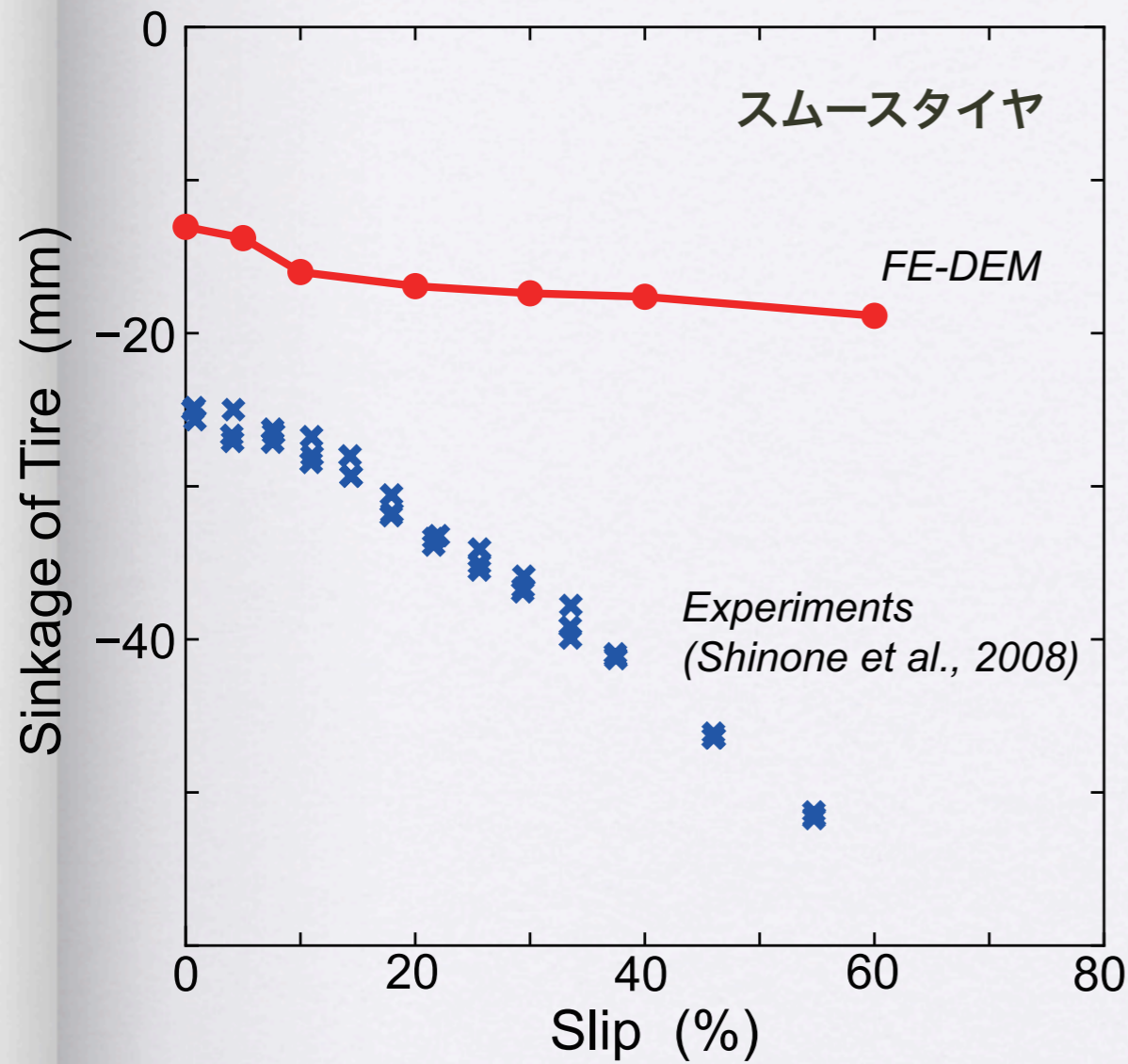
- 推進力：実験と解析では同様な結果
- 走行抵抗：実験と解析で異なり、解析結果は絶対値が小さめであるが滑りに対する挙動はよく似ている
- 推進力と走行抵抗の差であるけん引力は実験よりも小さめであるが挙動は類似している

ラグパターンの場合

H. Nakashima et al.: J. Mech Sys. Transport. and Logist., 2(1), 55-65, 2009

考察(1)

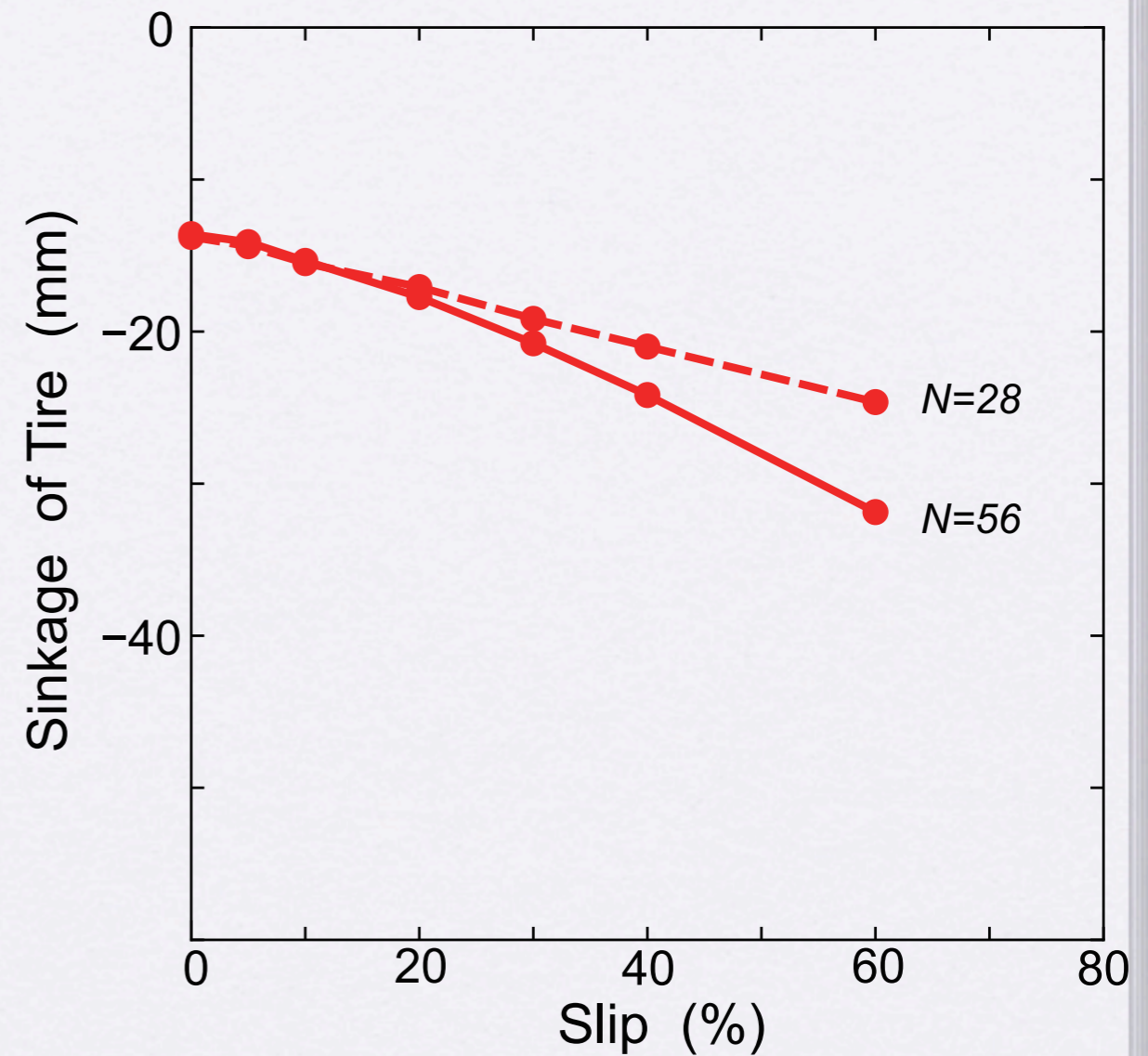
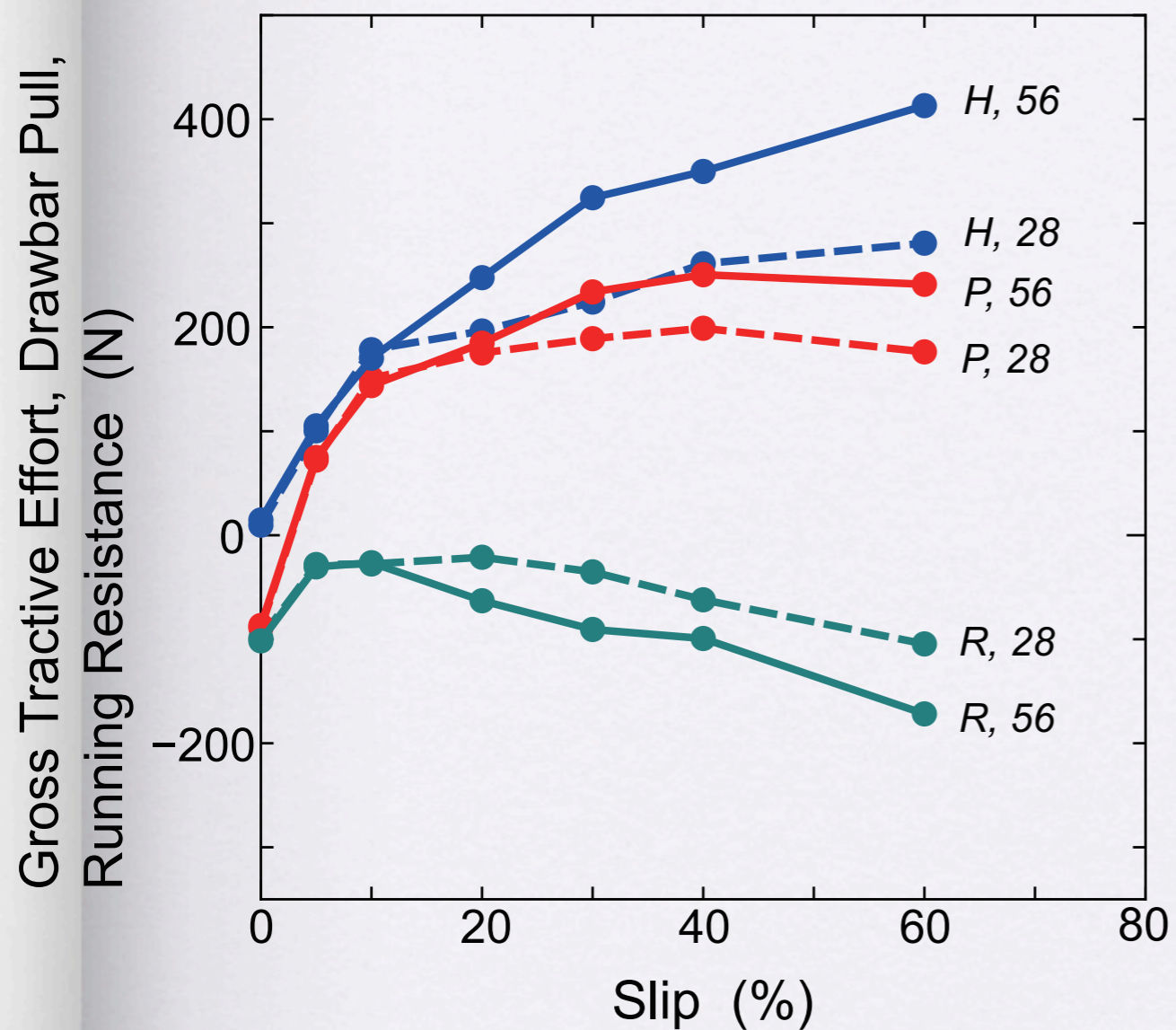
H. Nakashima et al.: J. Mech Sys. Transport. and Logist., 2(1), 55-65, 2009



ラグパターンタイヤの方が沈下量が大きい

考察(2)

H. Nakashima et al.: J. Mech Sys. Transport. and Logist., 2(1), 55-65, 2009



ラグ溝数を減らすとスムーズタイヤの性能に近づく

今後の方向

- 解析の一層の高精度化
- 解析の汎用化（各種土壌条件）
- 解析の3次元化・高速化
- 実際のオフロード用タイヤや履帯の
走行性能の数値予測への適用