

路面摩擦係数を検知可能な インテリジェントタイヤの研究

機械機能設計研究室

D2	伊勢	大成
M1	藤城	慶治
B4	久保	貴大

指導教員

立矢	宏	教授
樋口	理宏	准教授
小塚	裕明	助教

研究背景

自動車の安全技術

衝突安全ボディ



衝突回避



路面摩擦係数の検知



低 μ 路での危険告知



路面情報の車両間共有



ABS制御への応用



路面摩擦係数の測定可能なインテリジェントタイヤ

研究目的

他で提案された摩擦係数検知システム

- ・ ひずみ無線パッシブモニタリング法

(松崎 日本機械学会論文集71巻 2005年)

➡ ベルト部のワイヤの電気容量変化を利用

- ・ デジタル画像相関法

(平岡 日本機械学会論文集74巻 2008年)

➡ タイヤ内部表面のひずみ分布を利用

- ・ 平行ステレオ法

(岩井 日本トライボロジー学会予稿集9巻 2010年)

➡ タイヤ内部表面のひずみ分布を利用

・ 間接的測定 $\mu = \frac{f}{w}$

- ・ 複雑
- ・ 高価

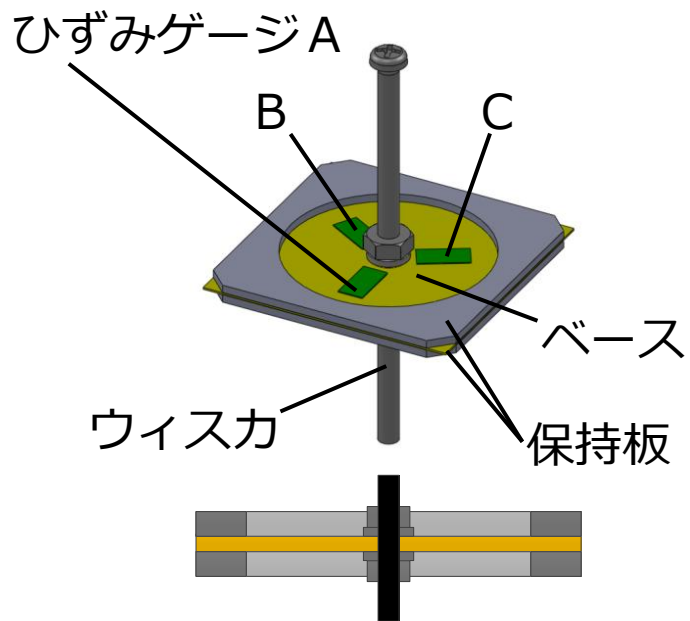
実用化には至っていない

インテリジェントタイヤ用センサとして

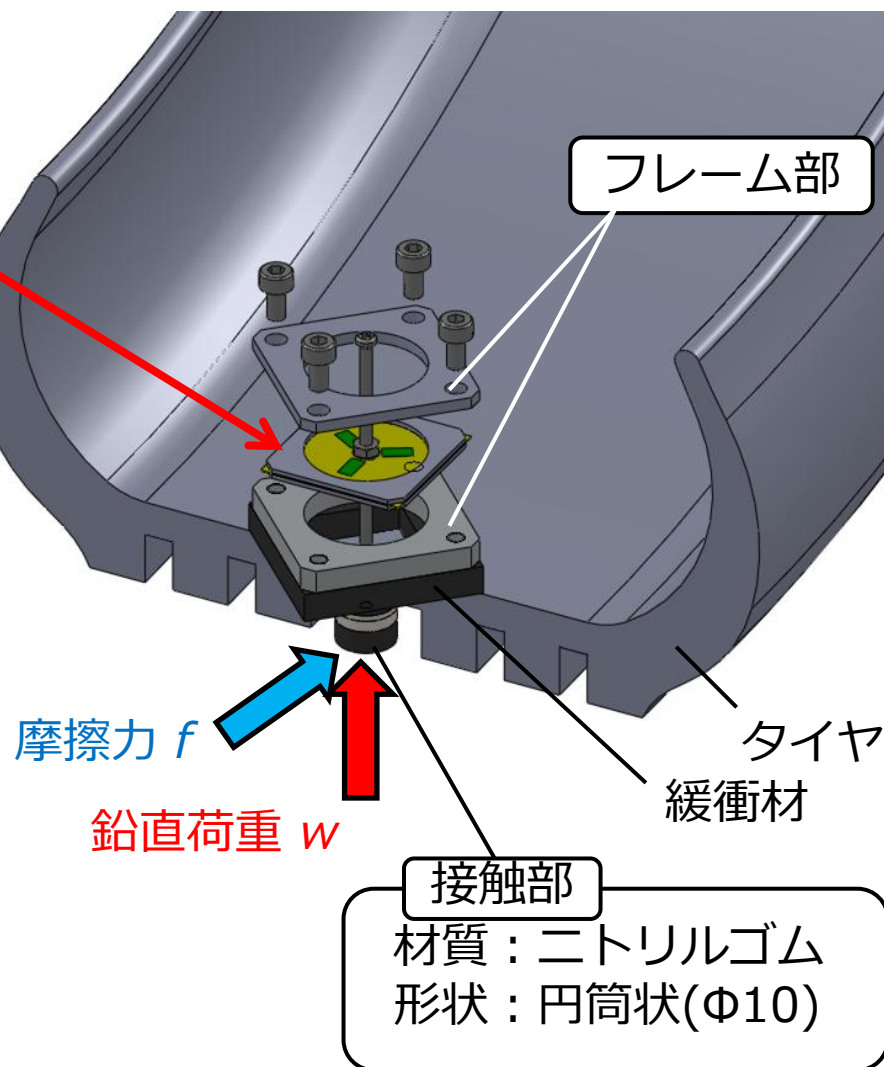
直接的・簡便に摩擦係数が測定可能な
ウィスカ型触覚センサを提案

センサの概要

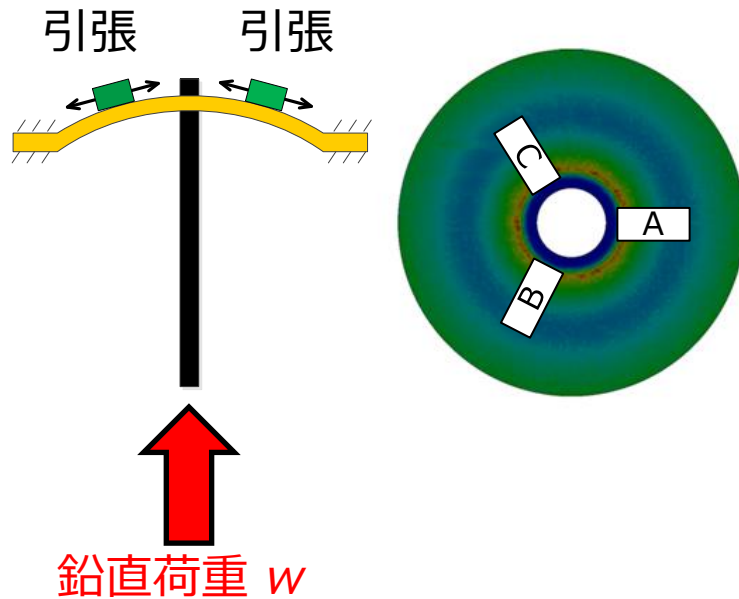
検知部



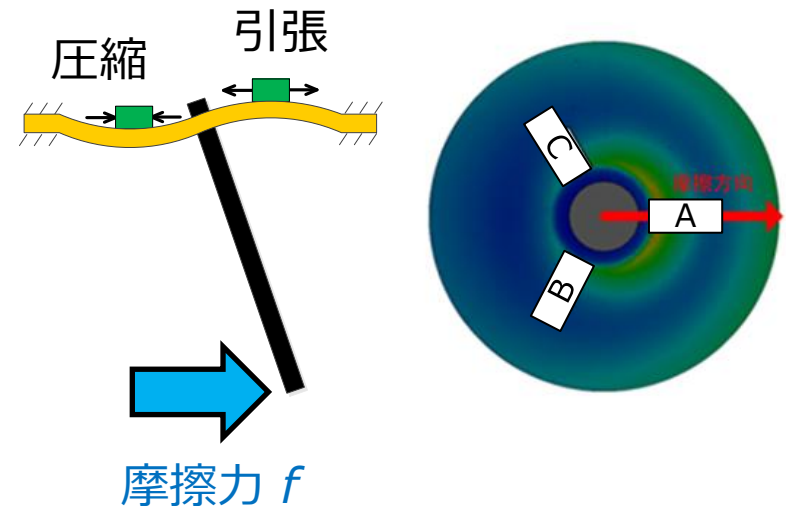
部品名	材質・寸法など
ベース	A5052 t0.2
保持板	SUS 内径φ20
ウィスカ	SUS M2×40



センサの検知原理



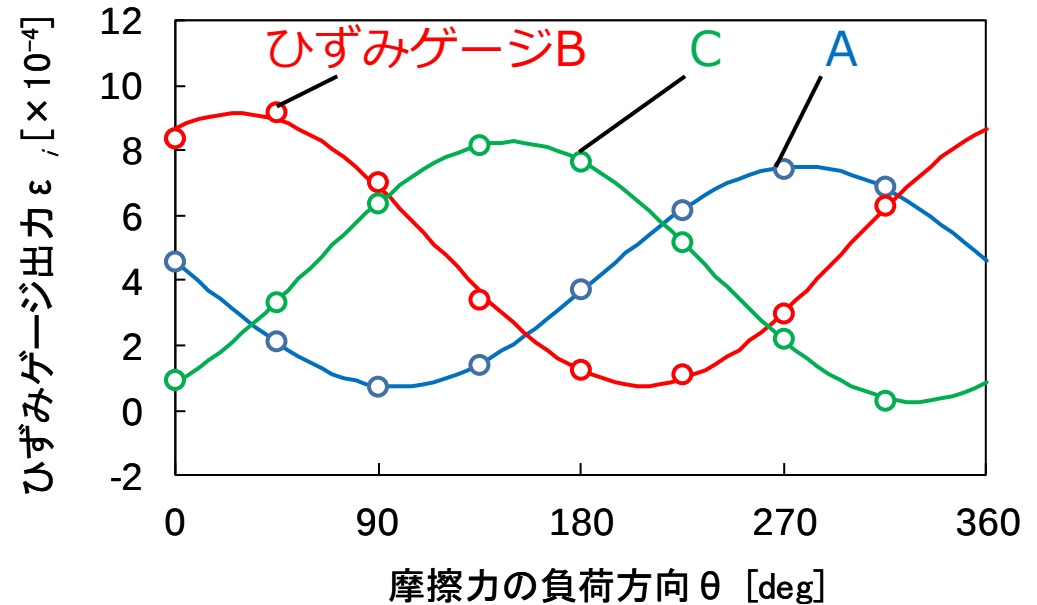
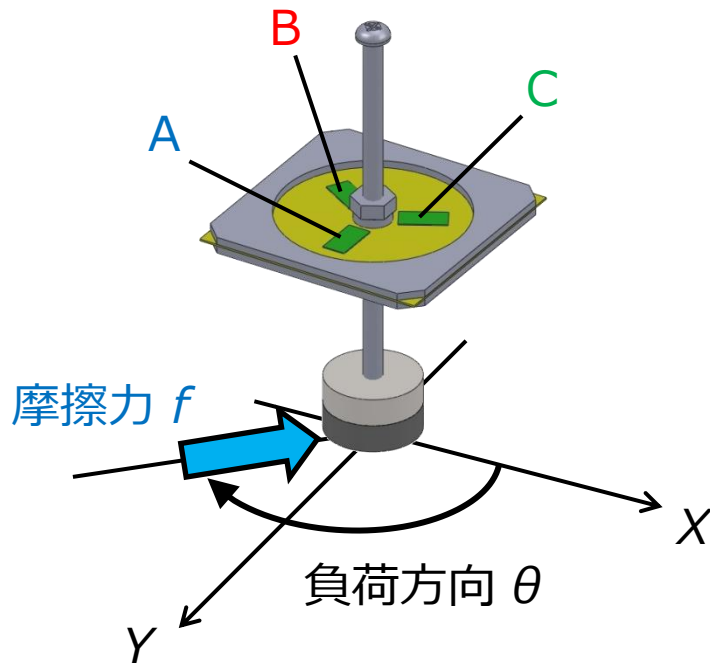
- ひずみの分布は軸芯対称
- 全てのひずみゲージに引張ひずみ



- ひずみの分布は非軸芯対称
- ひずみゲージ毎に引張or圧縮ひずみ

鉛直荷重と摩擦力が同時に作用する場合のひずみは
両ひずみの重ね合わせとして得られる

荷重の推定式

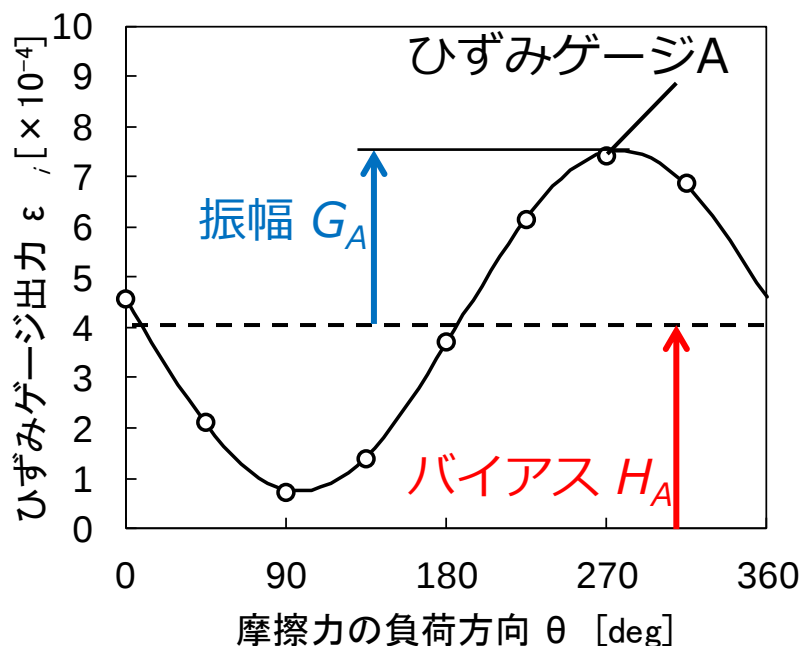


摩擦力の負荷方向と各ひずみゲージ出力の関係
(鉛直荷重, 摩擦力は一定)

— θ と ε_i の関係式 —

$$\varepsilon_i = G_i \sin(\theta + \varphi_i) + H_i \quad (i = A, B, C)$$

荷重の推定式



$$\varepsilon_i = G_i \sin(\theta + \varphi_i) + H_i \quad (i = A, B, C)$$

振幅
摩擦力 f の関数

$$G_i = k_i \cdot f + a_i$$

バイアス
鉛直荷重 w の関数

$$H_i = l_i \cdot w + b_i$$

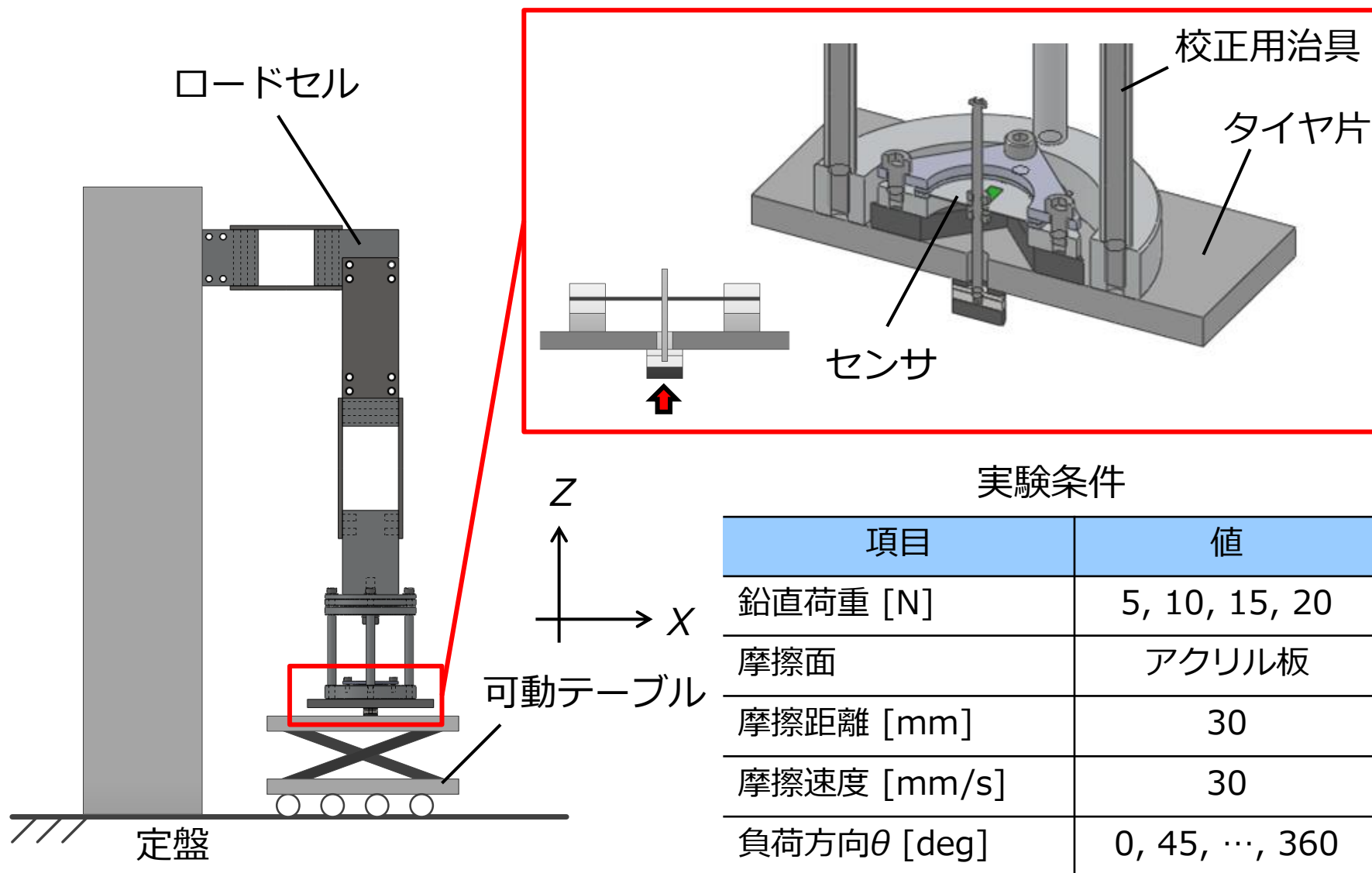
ε : ひずみ w : 鉛直荷重, f : 摩擦力
 θ : f の負荷方向 k, l, a, b, φ : 実験定数

推定式

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= G_i \sin(\theta + \varphi_i) + H_i \\ &= \underline{(k_i \cdot f + a_i)} \sin(\theta + \varphi_i) + \underline{(l_i \cdot w + b_i)} \quad (i = A, B, C) \end{aligned}$$

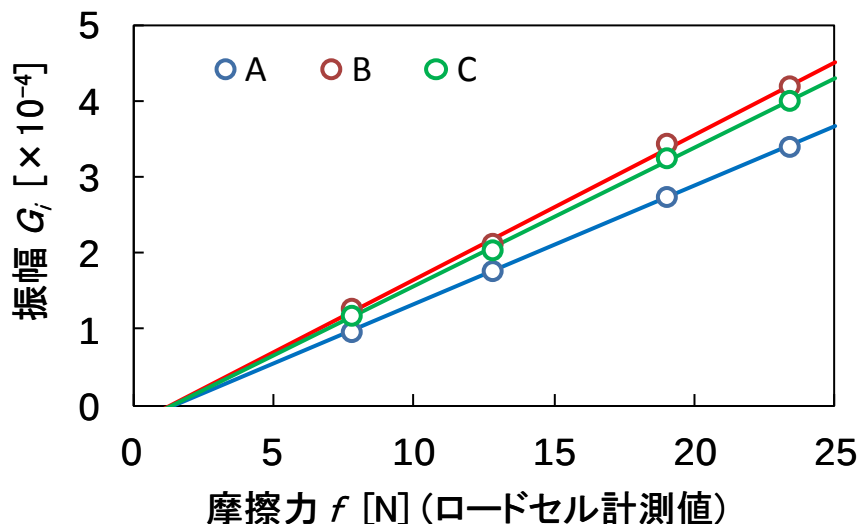
センサ出力 ε_i を f, w, θ の関数として表現

センサの校正

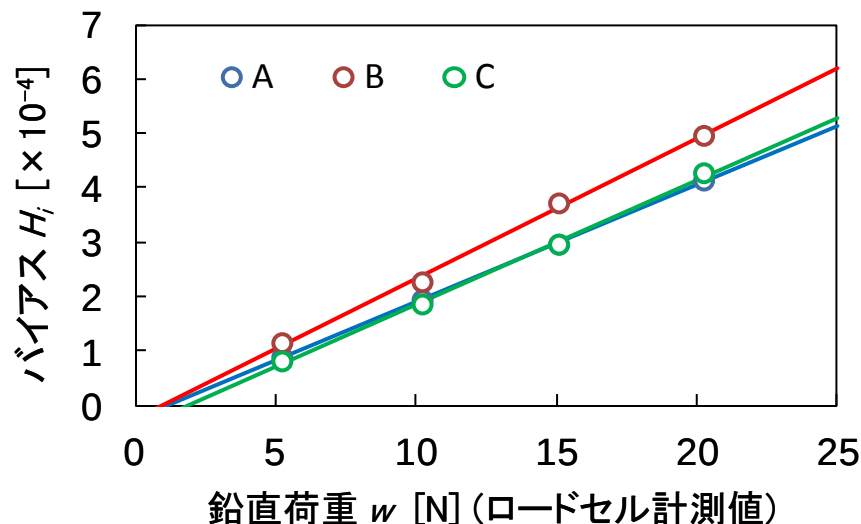


センサの校正結果

振幅の変化



バイアスの変化



$$G_i = k_i \cdot f + a_i$$

$$H_i = l_i \cdot w + b_i$$

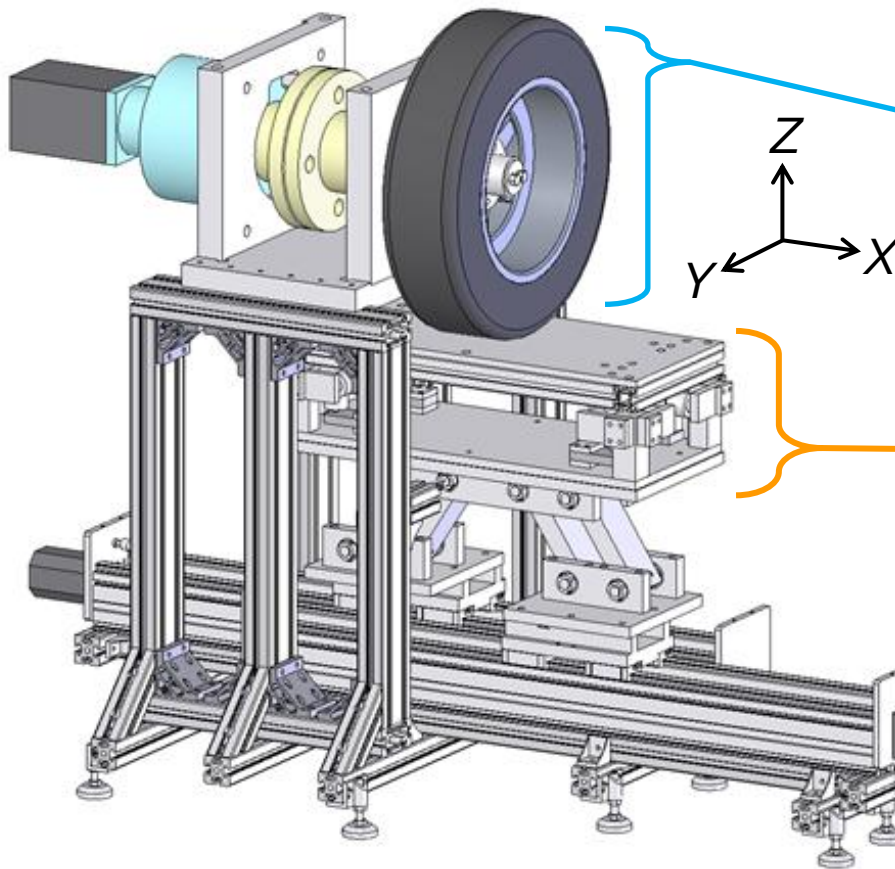
実験定数が決定

i	k_i [$\times 10^{-4}/\text{N}$]	a_i [$\times 10^{-4}$]	φ_i [deg]	l_i [$\times 10^{-4}/\text{N}$]	b_i [$\times 10^{-4}$]
A	0.156	-0.245	171.9	0.216	-0.266
B	0.191	-0.247	63.2	0.258	-0.259
C	0.183	-0.265	302.6	0.230	-0.452

摩擦係数推定実験

実験装置

センサをタイヤに装着し、実用時を模擬した実験が可能



タイヤ駆動部

- ・タイヤの回転
- ・Y方向の摩擦力を負荷

フォースプレート

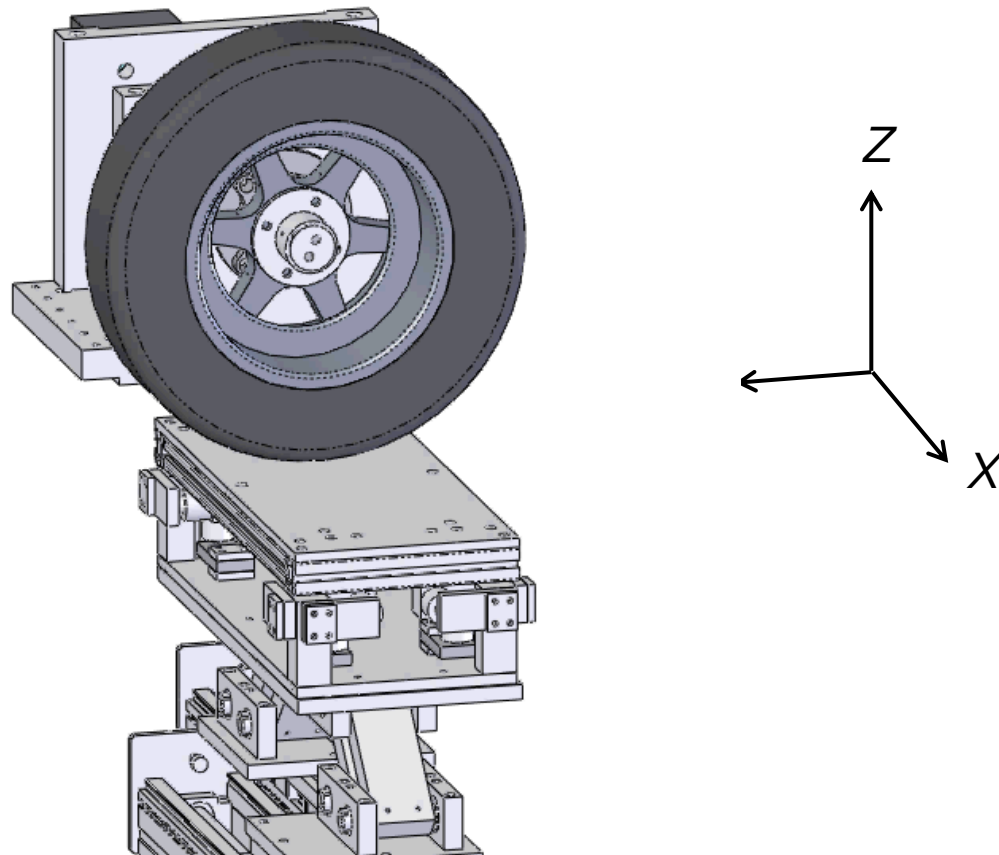
- ・タイヤ接地面における3軸方向の負荷を測定
- ・天板の付け替えにより、摩擦面を変更可能

パラレル式負荷装置

- ・X, Z方向に可動
- ・鉛直荷重（Z方向荷重）とX方向の摩擦力を負荷

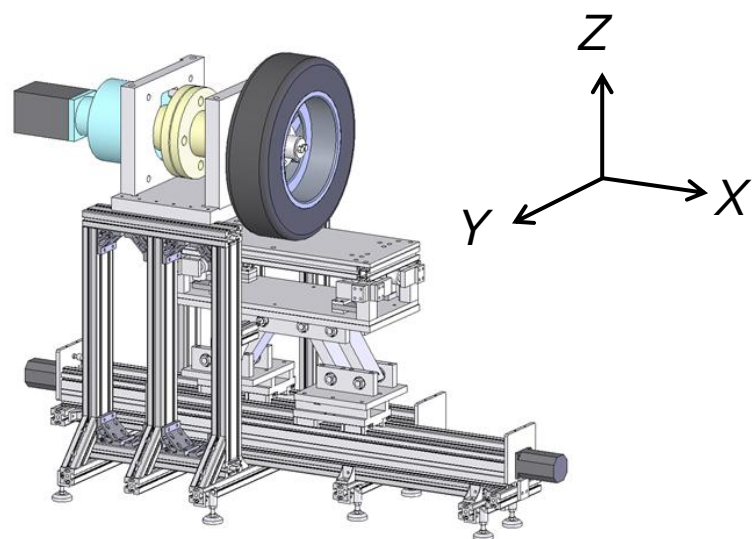
タイヤ接地面上の任意方向に摩擦力を負荷可能

摩擦係数推定実験



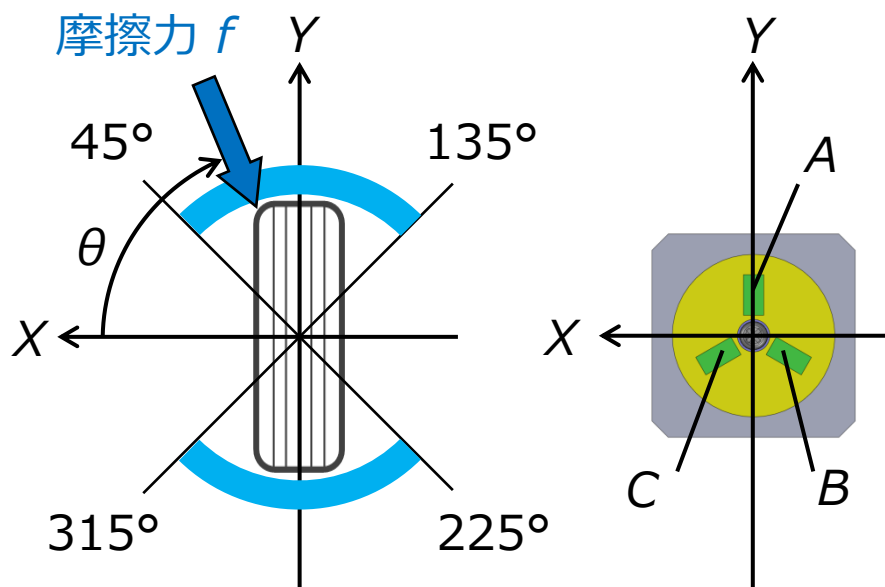
摩擦力負荷時の動作イメージ

実験条件



実験条件

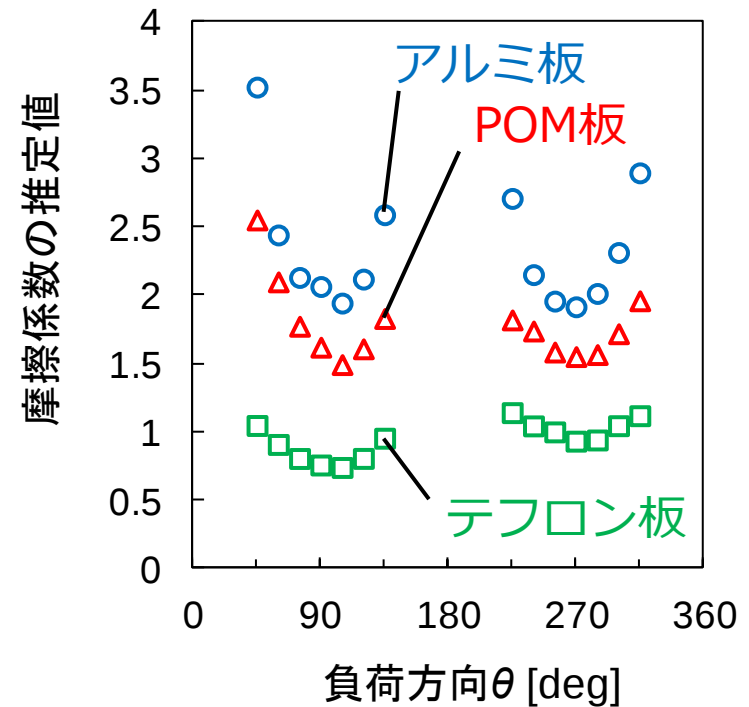
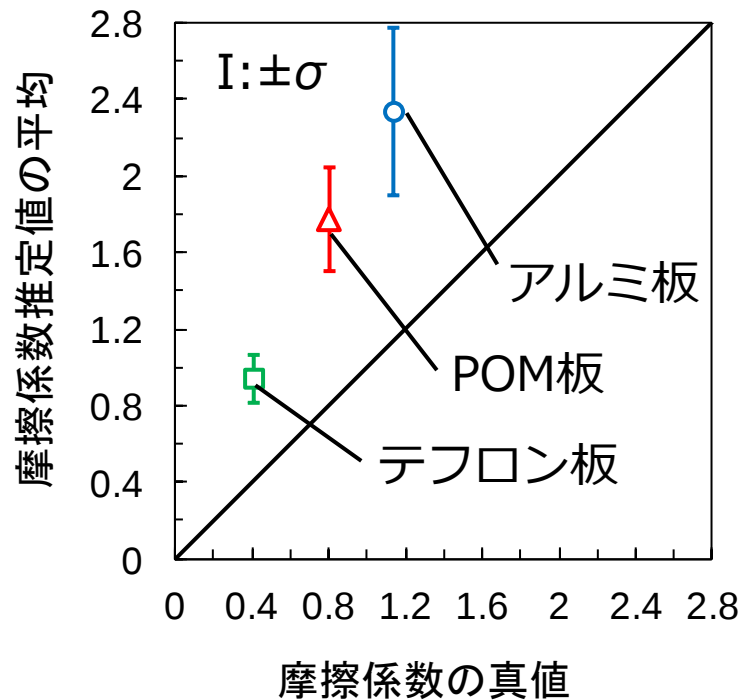
項目	値
鉛直荷重 [N]	2500
摩擦距離 [mm]	300
摩擦速度 [mm/s]	30
負荷方向 θ [deg]	45~135, 225~315 (15刻み)



摩擦対象面と摩擦係数真値

摩擦面	真値
アルミ板	1.14
POM板 (ポリアセタール)	0.80
テフロン板	0.41

実験結果



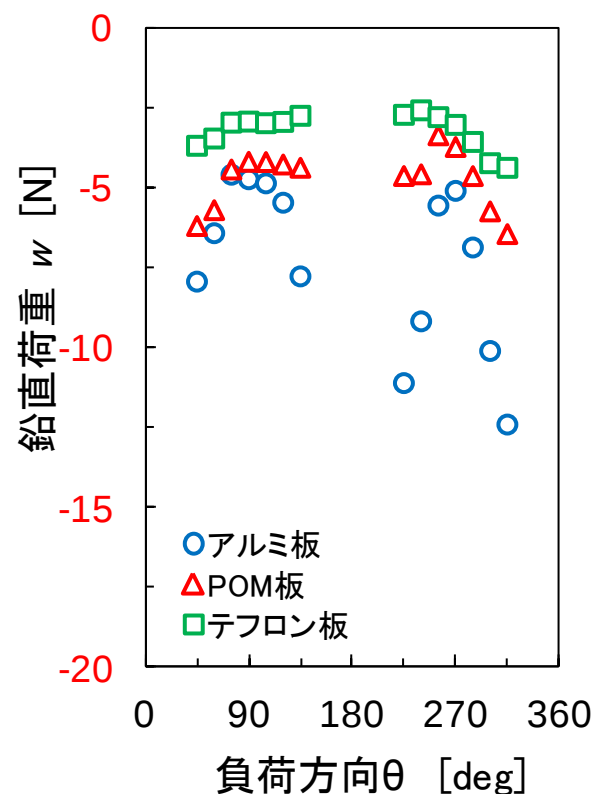
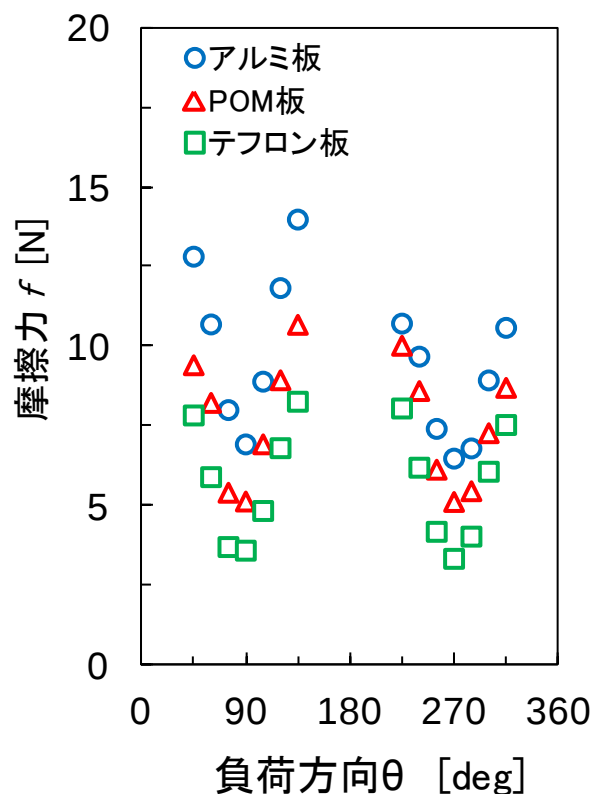
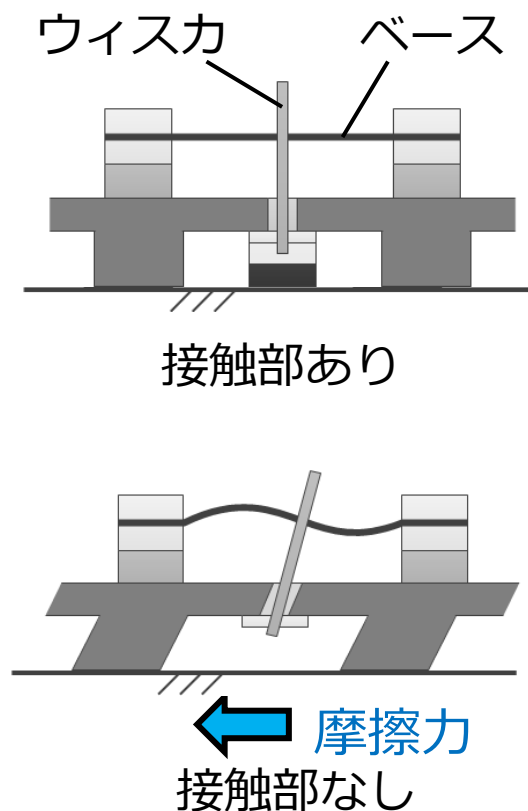
- ・ 全摩擦面で推定値は真値を上回る
→ f が大きい, w が小さい可能性

- ・ 推定値は, 負荷方向 θ により変化
→ f , w が, θ により変化

f , w に, 負荷方向 θ により変化する外乱 (荷重) が含まれている可能性

タイヤ自体の変形の影響が考えられる

考察

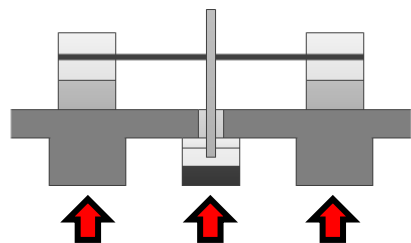


接触部がない場合において、タイヤの変形によりセンサは
正の値の f 、負の値の w を検知

タイヤの変形による影響により、ベースにひずみが発生
→ 摩擦係数の推定値に影響

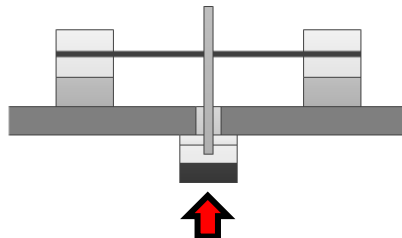
補正方法の検討①

センサ検知荷重 f, w



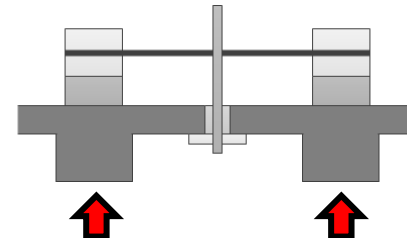
=

接触部への負荷
荷重成分



+

タイヤ変形による
荷重成分

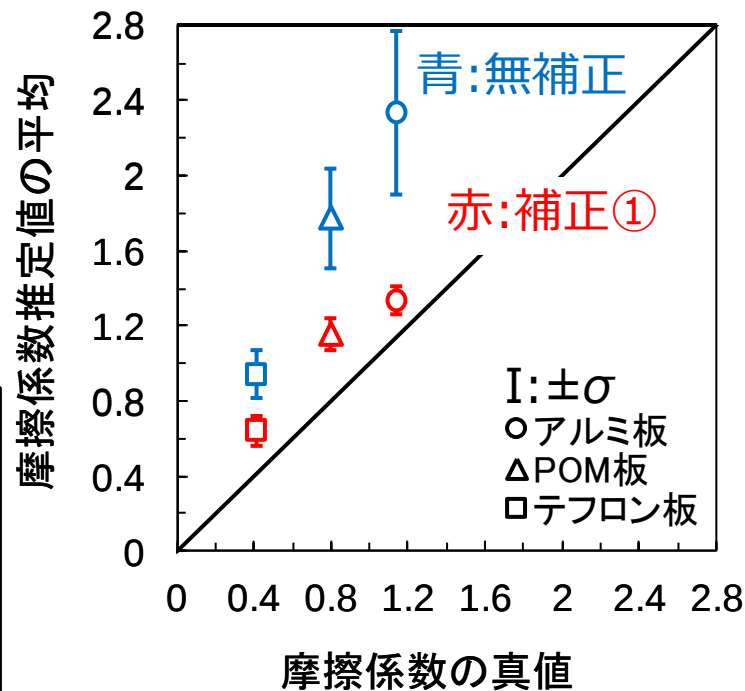
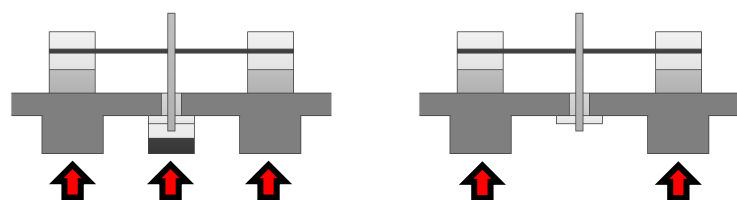


タイヤの変形成分の除去により

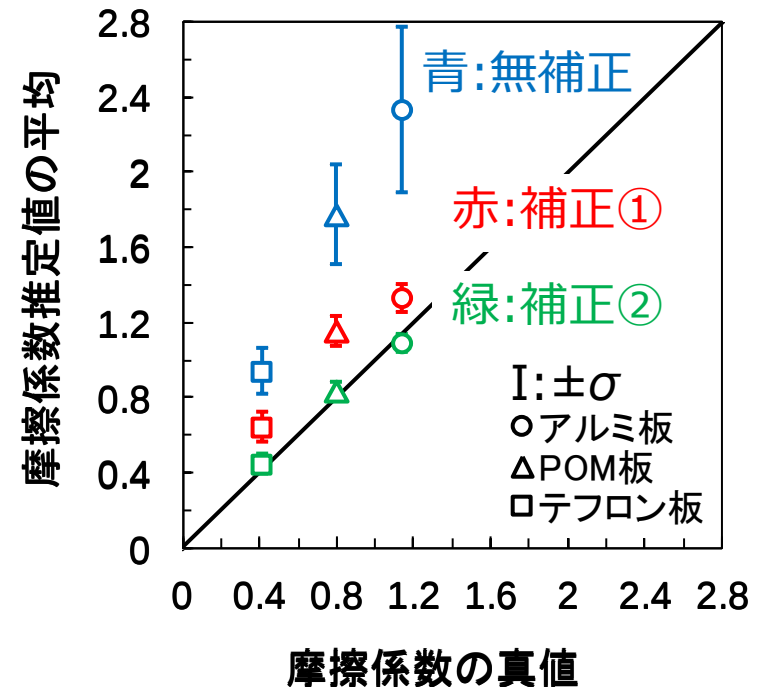
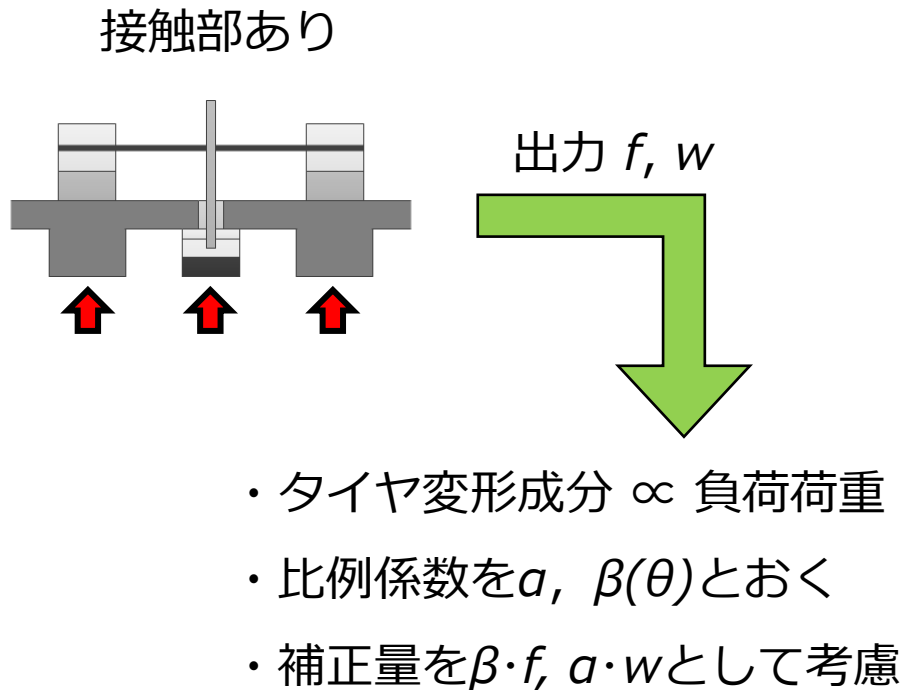
- ・ 真値との差が減少
- ・ 標準偏差 σ も大幅に減少

難点

センサが2つ必要であり, 煩雑



補正方法の検討②

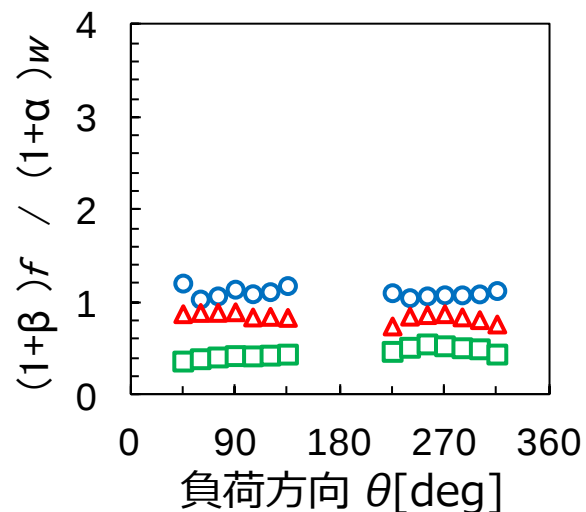
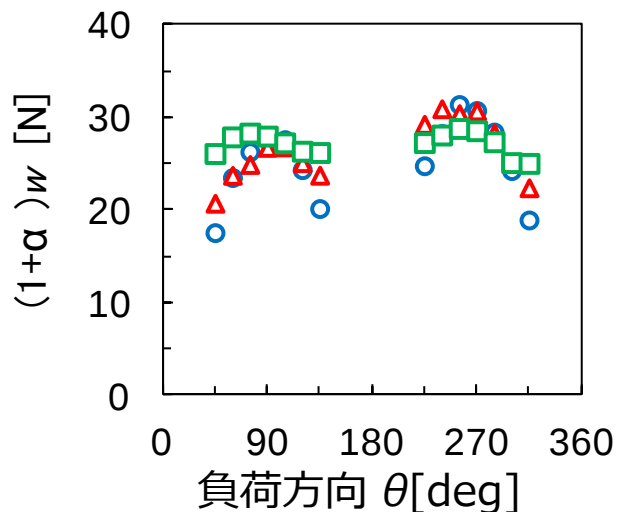
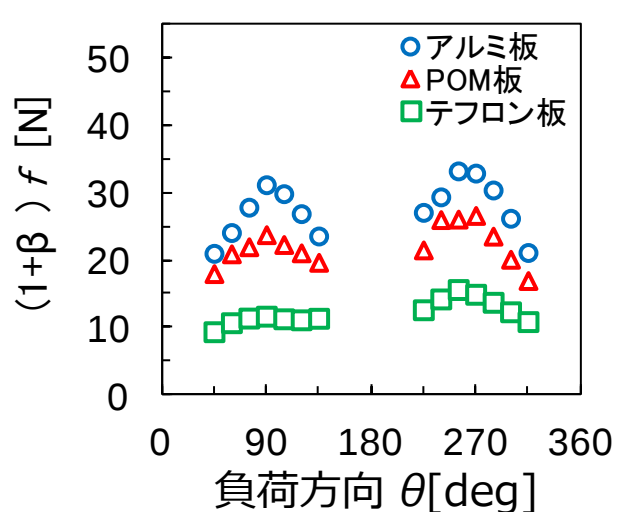
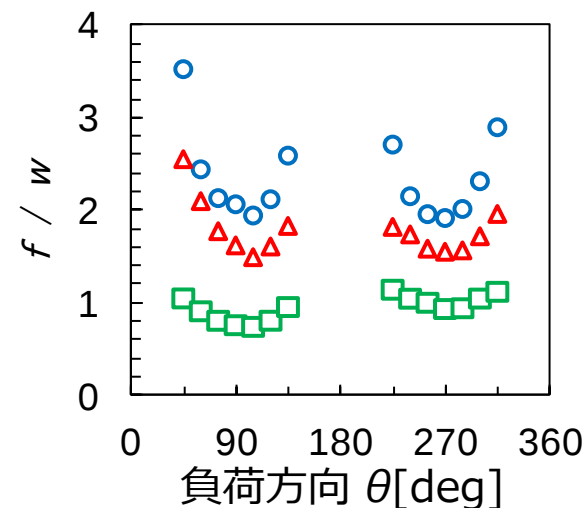
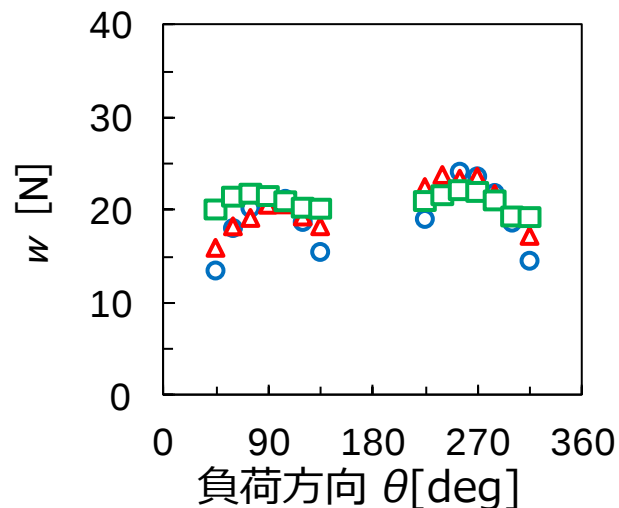
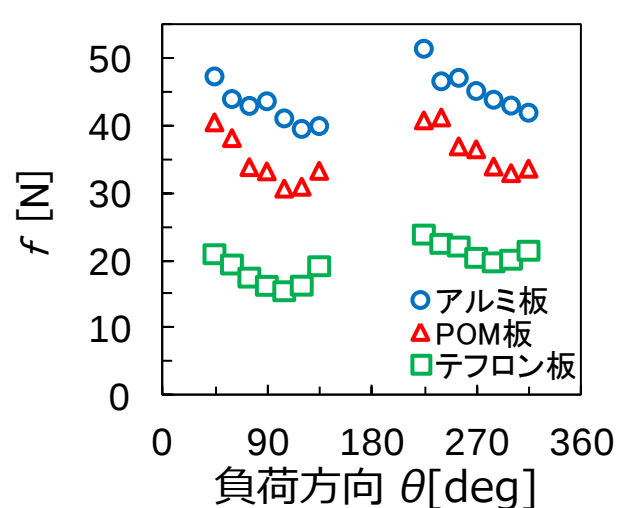


補正式

$$\mu = \frac{f + \beta \cdot f}{w + a \cdot w} = \frac{(1 + \beta)f}{(1 + a)w} = \frac{\{1 + 0.19\sin(2.14\theta + 125.4) - 0.47\} f}{(1 + 0.30)w}$$

3つの摩擦面での実験結果に対して最小二乗法を適用

補正方法の検討②



各種表面での推定実験

センサおよび測定値処理方法の確認実験

- ・センサを装着したタイヤで、材質の異なる9種類の表面の摩擦係数を推定
- ・その推定精度を確認

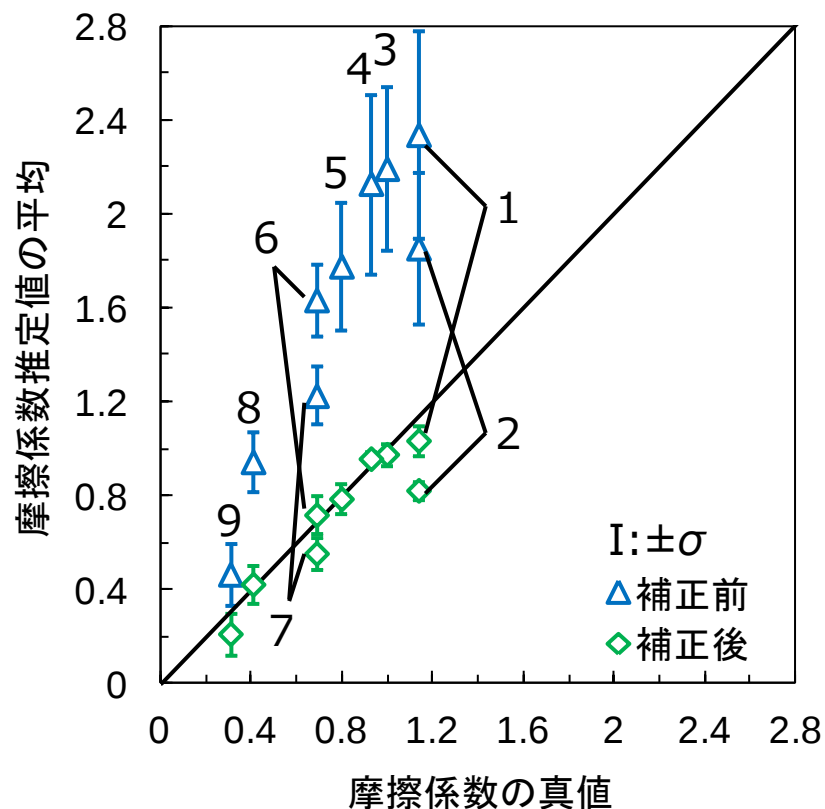
摩擦係数の測定対象面と摩擦係数真値

摩擦面	真値	相当路面
1.アルミ板	1.14	乾燥路
2.アクリル板	1.14	
3.PVC板（ポリ塩化ビニル）	1.00	
4.ABS板	0.93	
5.POM板（ポリアセタール）	0.80	
6.UHPE板（超高分子量ポリエチレン）	0.69	湿潤路
7.紙テープ	0.69	
8.テフロン板	0.41	
9.油塗布アルミ板	0.31	雪上路

実験条件

項目	値
鉛直荷重 [N]	2500
摩擦距離 [mm]	300
摩擦速度 [mm/s]	30
負荷方向 θ [deg]	45~135, 225~315 (15刻み)

実験結果



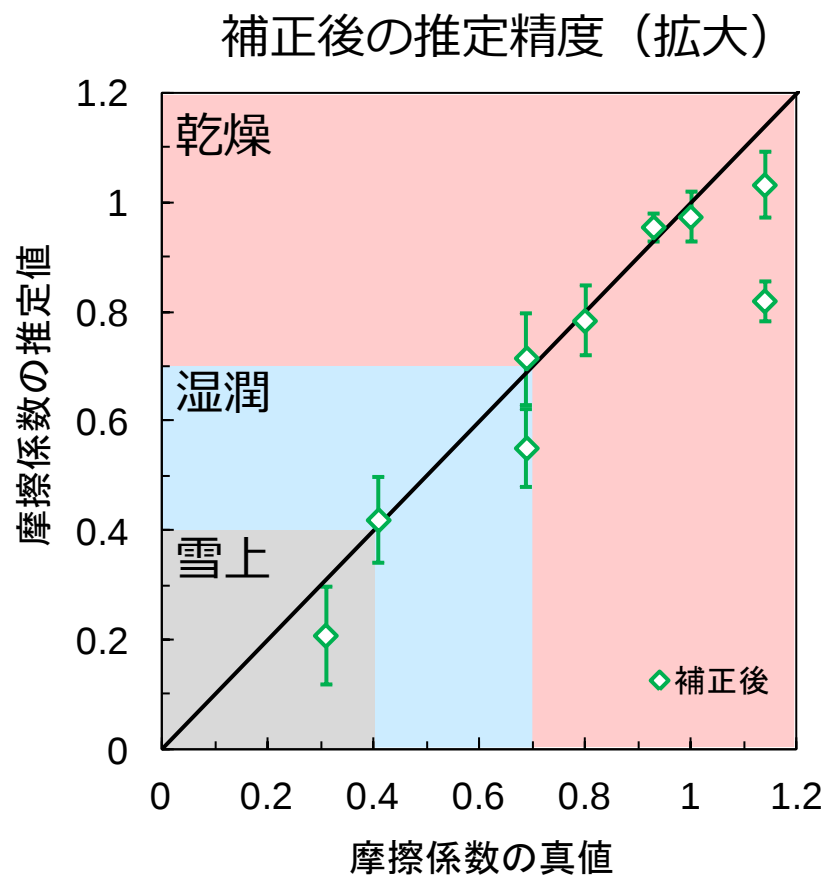
補正後の摩擦係数推定値

摩擦面	真値	平均	標準偏差
1.アルミ板	1.14	1.03	0.06
2.アクリル板	1.14	0.82	0.04
3.PVC板	1.00	0.97	0.05
4.ABS板	0.93	0.95	0.03
5.POM板	0.80	0.78	0.06
6.UHPE板	0.69	0.71	0.08
7.紙テープ	0.69	0.55	0.07
8.テフロン板	0.41	0.42	0.08
9.油アルミ板	0.31	0.21	0.09

- ・タイヤの変形成分の補正により，全摩擦面で推定精度が向上
- ・ばらつきを表す標準偏差 σ も減少

提案する補正式は，摩擦面が変化しても汎用的に使用可能

実験結果



- ・ 摩擦係数推定値は、雪上から乾燥までの路面状態に分布

→ 本センサは、乾燥、湿潤、雪上の判別が可能

→ 滑りやすい路面での警告装置として有用

実用化に向けての検討課題

- ・ 速度依存性の調査
- ・ スリップ率依存性の調査

結言

1. 鉛直荷重と任意方向の摩擦力を測定可能なインテリジェントタイヤ用センサを提案した
2. センサ出力から、鉛直荷重および摩擦力とその方向を求める実験式を確立した
3. タイヤの変形がセンサの推定精度に影響を及ぼすことを明らかにし、その補正方法を提案した
4. 提案するセンサは、実用時と同等の高荷重下においても精度よく摩擦係数が測定可能であることを確認した

ご清聴ありがとうございました