

雨天時を模擬した車両運動解析における 車輪／レール接線力モデル

鉄道力学研究部 計算力学研究室

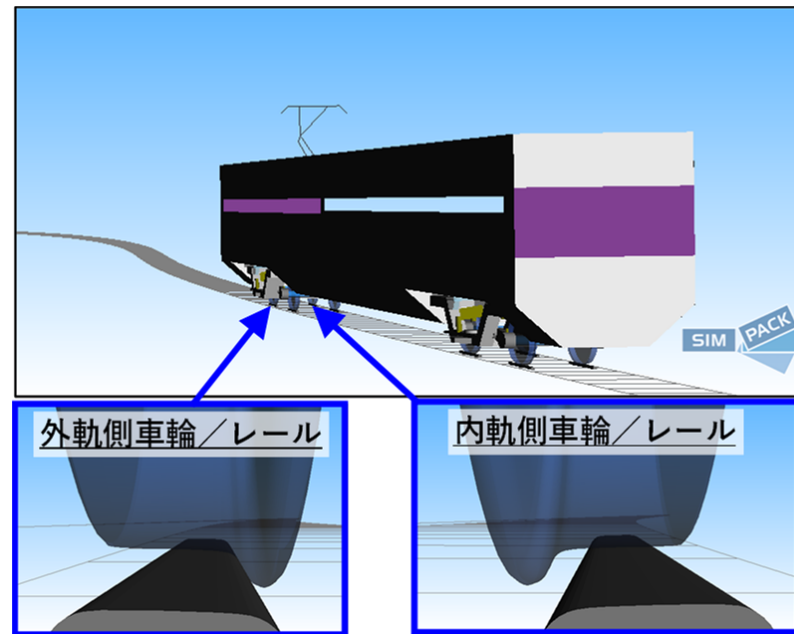
主任研究員 山本 大輔



本日の発表

1. 研究背景・目的
2. 雨天時の車輪／レール間の接線力特性
3. 車輪／レール間の接線力モデルの提案
4. 鉄道総研・室内実験による妥当性検証実験
5. まとめ

研究背景・目的



✓ 雨天時の車両走行に関連する課題:

ex1) 車輪空転・滑走時に生じる車両の前後振動

ex2) 車輪滑走・固着により生じる車輪フラット

✓ 走行試験の実施回数の削減(要望)

実態に即した明確な条件での車両運動解析により実現可能

➡ 解析事例は極めて少ない。

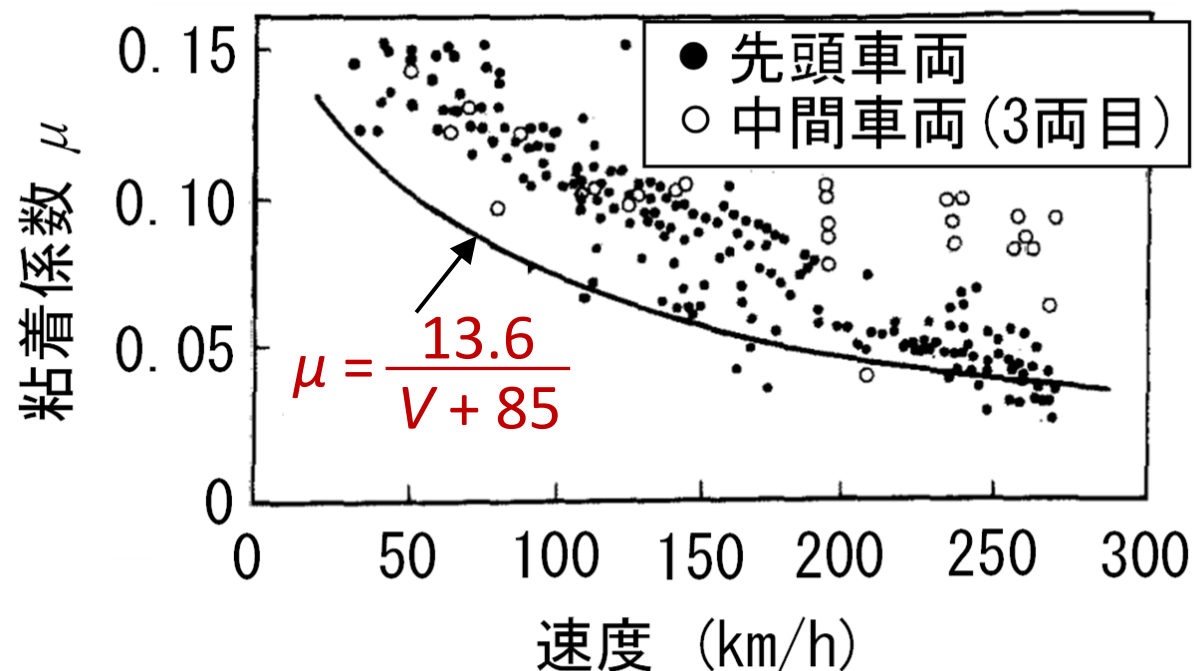
雨天時を模擬した定量的な車輪／レール接線力モデルが存在しないためと推察。

目的:

雨天走行時を模擬した車両運動解析を実行するため、**雨天時の車輪とレール間の接線力特性(摩擦特性)モデル**を理論と実験により構築。

雨天時の車輪／レール間の接線力特性

- ✓ 実態に即した雨天時の車輪／レール接線力特性として、
粘着係数(≒摩擦係数)と速度の関係式※¹に着目。



課題:

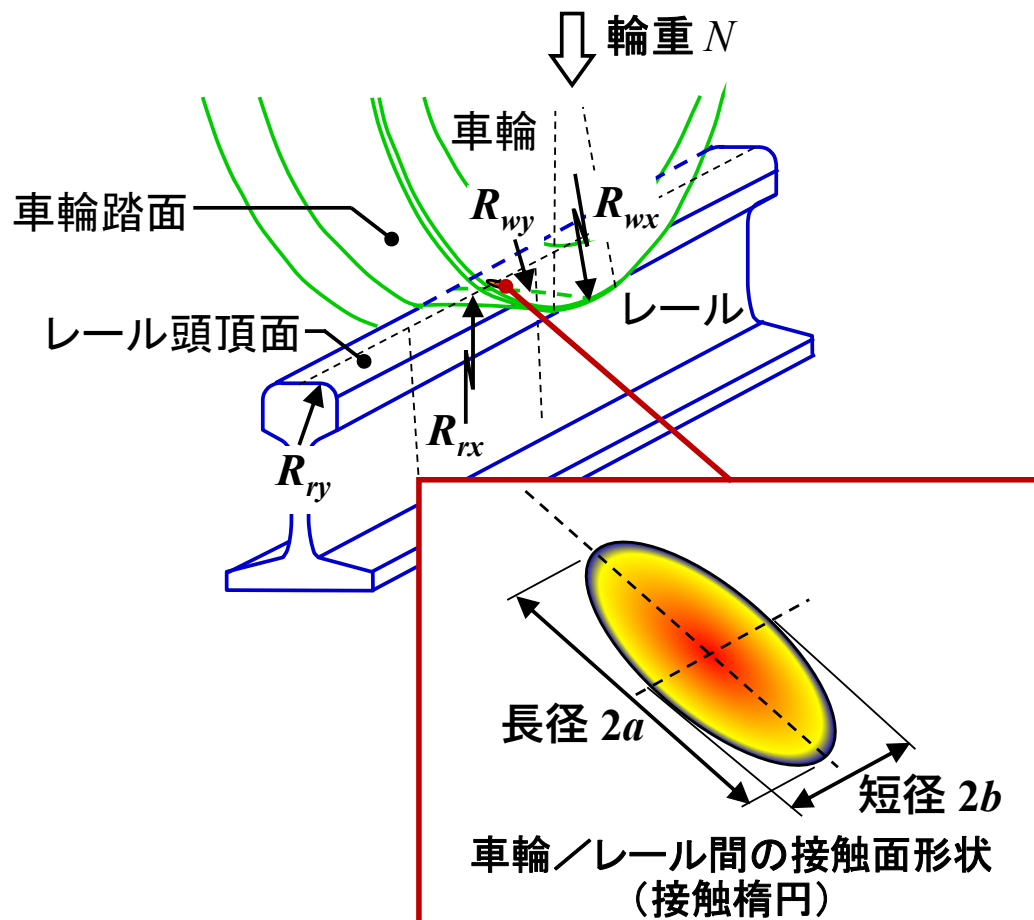
『粘着係数と速度の関係式』にすべり率の情報を組み込むことが必要。

車両運動解析の一般的な流れ

- ① 車輪踏面形状とレール頭頂面形状の決定
- ② 車輪回転半径、接触角を算出
- ③ 車輪／レール間の接触楕円からクリープ係数を算出
- ④ 車輪／レール間の接線力特性(摩擦係数とすべり率の関係)の定義
- ⑤ ②～④を読み込みながら、車両の動的挙動を逐次積分により計算

車輪／レール間の接線力モデルの提案

■ 『カルカーの転がり接触理論』と『粘着係数と速度の関係式』の組合せに着目。



✓ カルカーの線形転がり接触理論(参考文献(1))

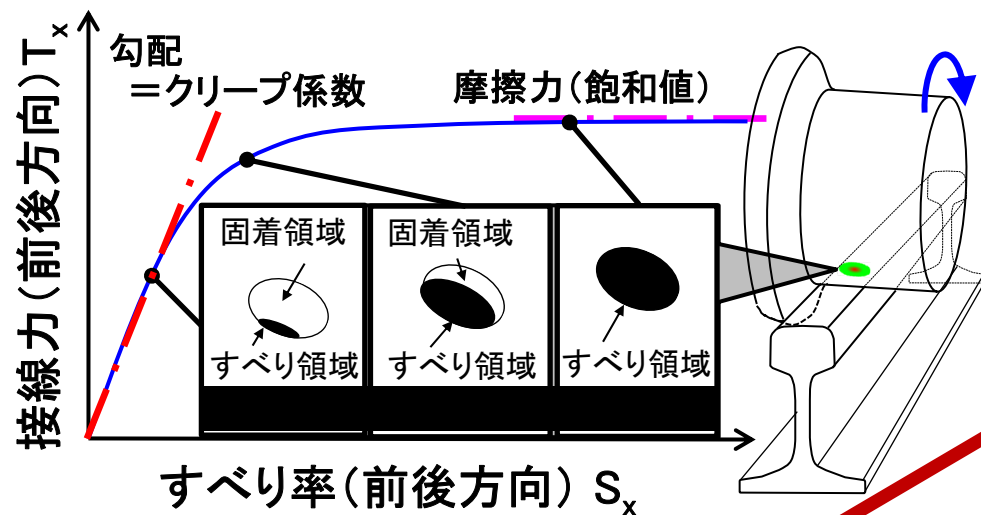
$$A + B = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_{wx}} + \frac{1}{R_{wy}} + \frac{1}{R_{rx}} + \frac{1}{R_{ry}} \right] \quad \dots (1)$$

$$B - A = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_{wx}} - \frac{1}{R_{wy}} + \frac{1}{R_{rx}} - \frac{1}{R_{ry}} \right] \quad \dots (2)$$

$$\cos \eta = \frac{B - A}{B + A} \quad \dots (3)$$

Hertzの接触楕円定数表から、 $\cos \eta$ との関係より m 、 n を算出。接触楕円の長径 a 、短径 b は、

$$\left(\frac{a}{m} \right)^3 = \left(\frac{b}{n} \right)^3 = \frac{3N(1-\nu^2)}{2E(A+B)} \quad \dots (4)$$



摩擦係数に漸近させるための補正式 Levi-Chartetの式から、

$$\varepsilon = \frac{1}{\left\{1 + \left[\sqrt{T_x^2 + T_y^2} / \mu N\right]^\beta\right\}^{1/\beta}} \quad \dots (5)$$

ここで、 β は1.5とすることが一般的。

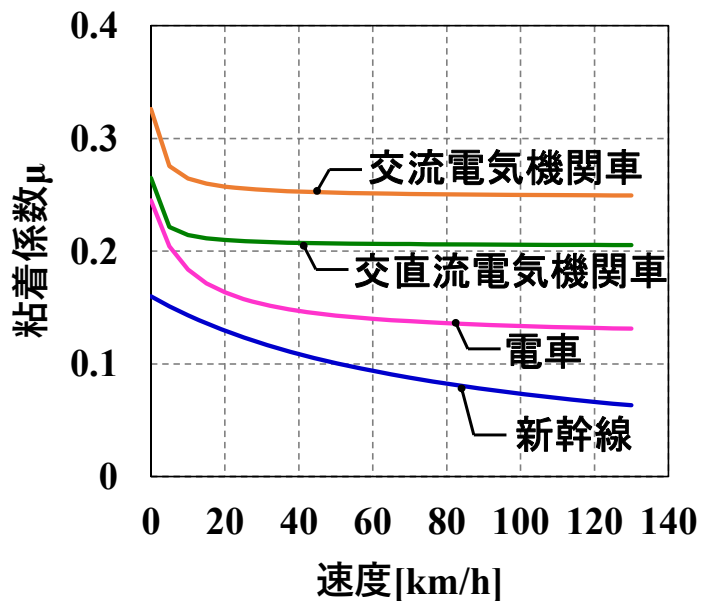
剛性率 G は、

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \dots (6)$$

前後方向の接線力は、

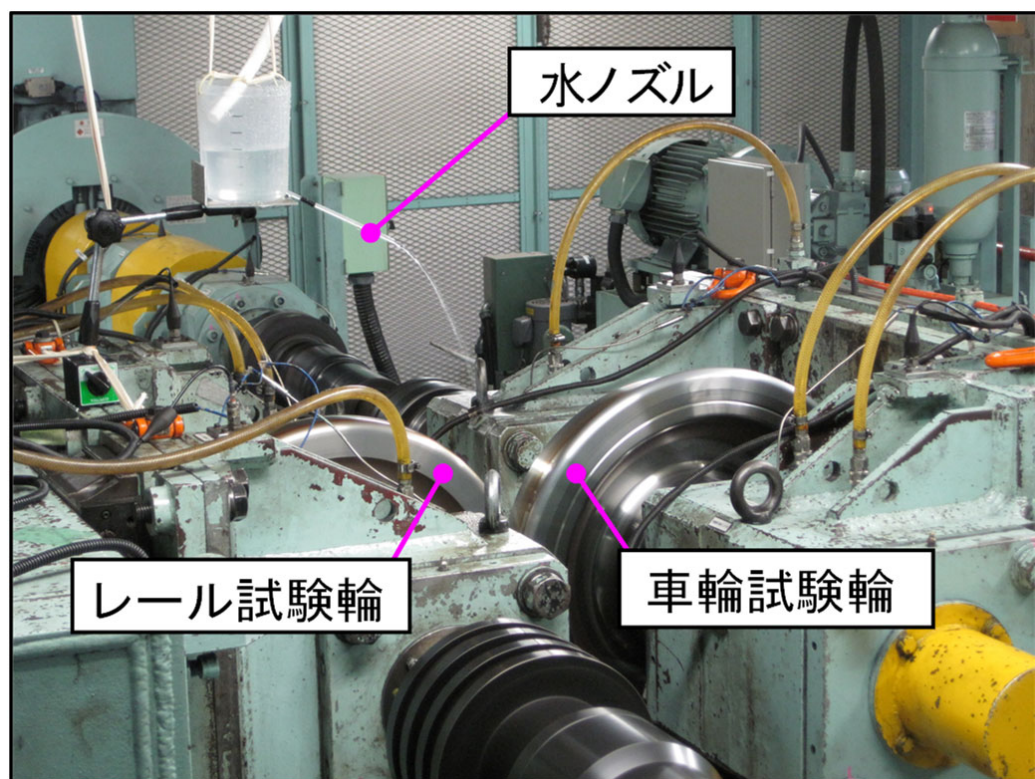
$$T_x = -ab(c11) G \varepsilon s_x \quad \dots (7)$$

✓ 実態に即した雨天時の車輪／レール間の摩擦特性を理論的に表現することが可能。



鉄道総研・室内実験による妥当性検証実験

- 摩擦係数(≒粘着係数)と速度の関係式のみでの把握により、車両運動解析で必須となる接線力係数とすべり率の関係を推定できることを実証。

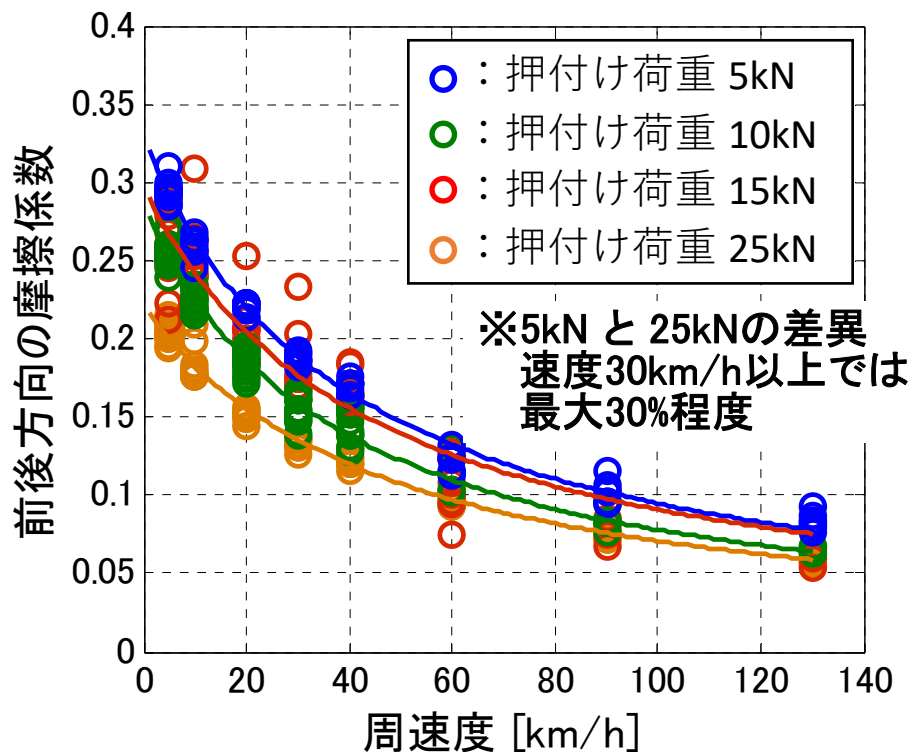


実験装置の構成

主要な実験条件

押付け荷重 [kN]	5	10	15	25
〔実車換算輪重 [kN] ※修正円弧+JIS50kgNの場合〕	【20】	【39】	【58】	【98】
最大接触面圧 [MPa] (理論値)	629.0	792.5	907.2	1075.6
接触楕円の長径／短径 [mm](理論値)	3.00 ／ 1.26	3.78 ／ 1.59	4.22 ／ 1.82	5.13 ／ 2.16
周速度 [km/h]	10, 20, 30, 60, 90, 130			
散水流量 [mL/分]	約600			
水温 [°C]	23～26			

- すべり率0.8%以上の接線力係数が飽和したときの値を摩擦係数と定義し、『摩擦係数と速度の関係式』の係数 P_1 、 P_2 を同定。



実験値と最小二乗法による同定結果

- ✓ 新幹線電車の粘着係数計画式の式に倣い、摩擦係数と速度の関係を同定。

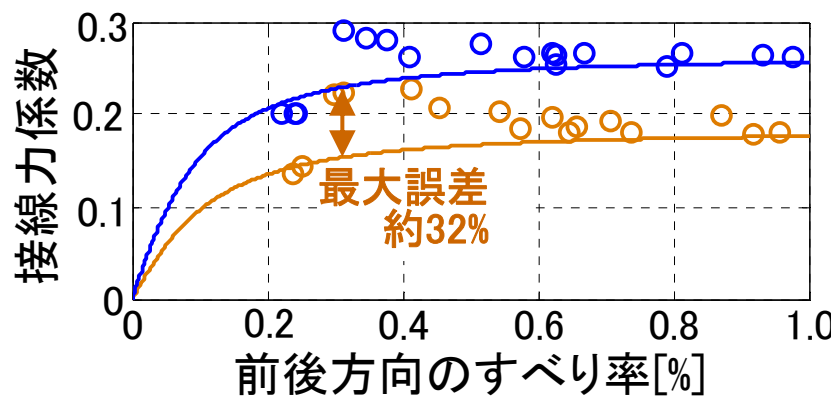
$$\mu = \frac{P_1}{V + P_2}$$

実験結果から同定したパラメータ

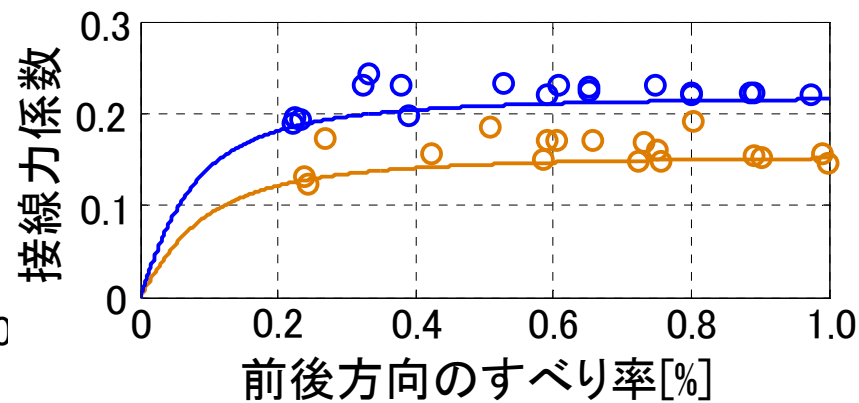
押付け荷重 [kN] (設定値)	実車換算輪重 [kN] ※修正円弧+JIS50kgN	P_1	P_2
5	【20】	13.3	40.5
10	【39】	10.7	37.5
15	【58】	13.1	44.2
25	【98】	10.4	47.0

- ✓ 雨天走行時では、車輪／レール接線力特性に対する輪重変動の影響は僅差。

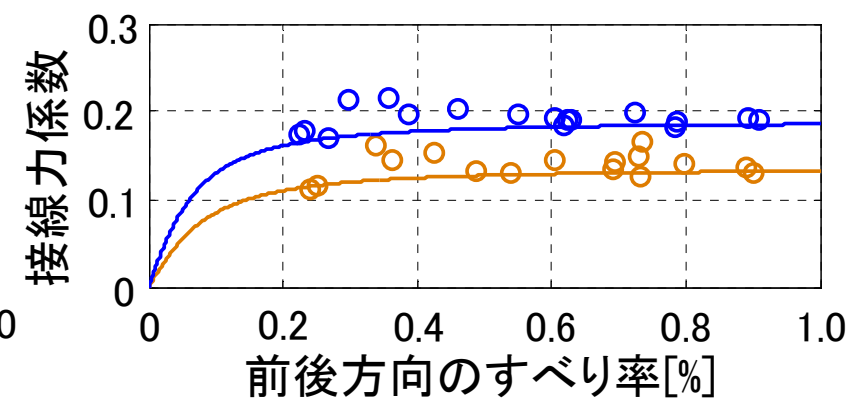
- 『摩擦係数と速度の関係式』を用いた推定値(実線)と、その他の全ての実験値(○印)の比較により、接線力モデルの妥当性を検証。



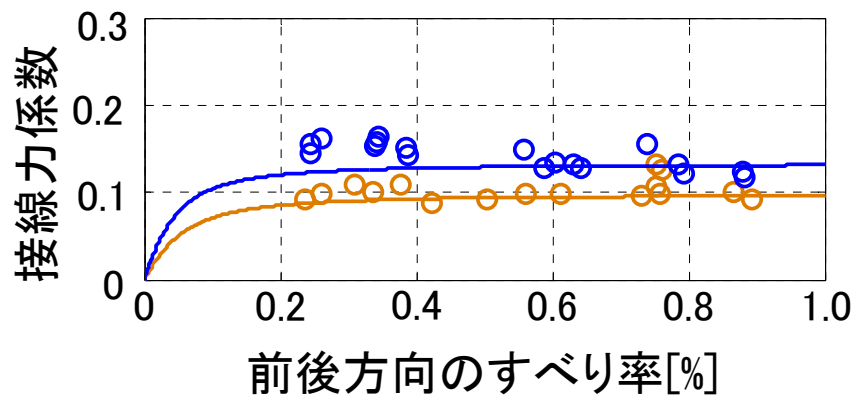
(a) 10km/hの場合



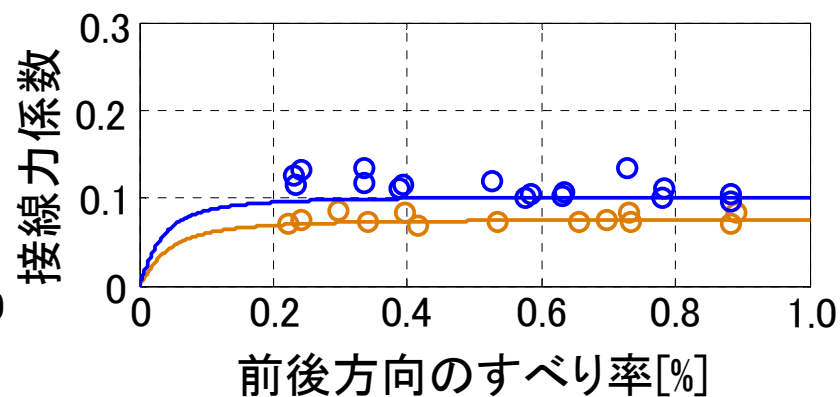
(b) 20km/hの場合



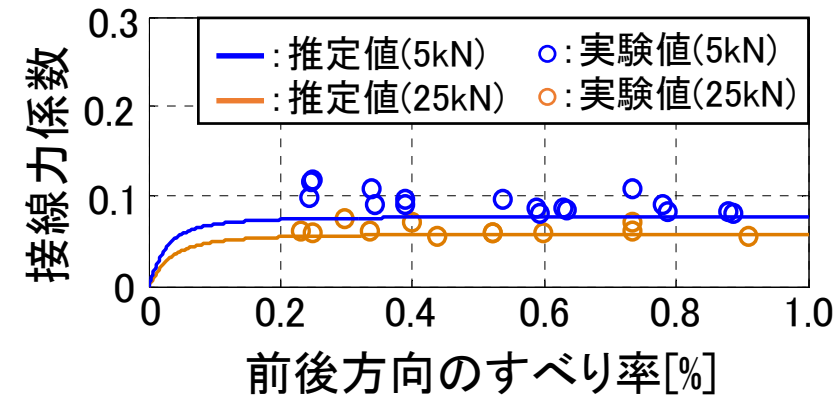
(c) 30km/hの場合



(d) 60km/hの場合

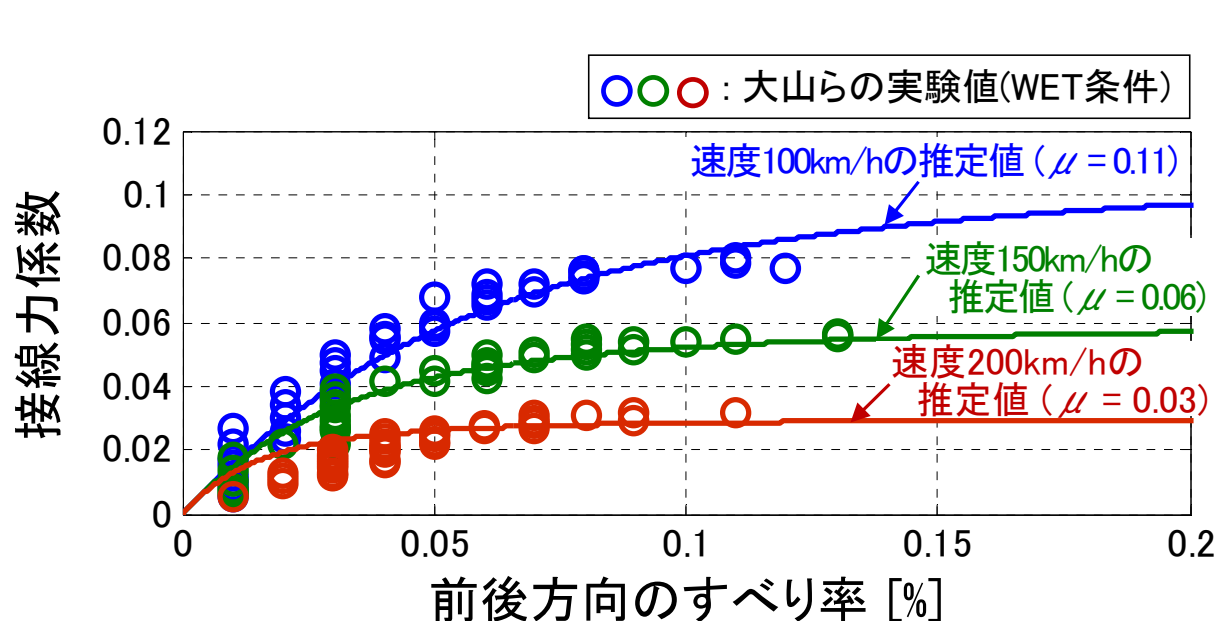


(e) 90km/hの場合



(f) 130km/hの場合

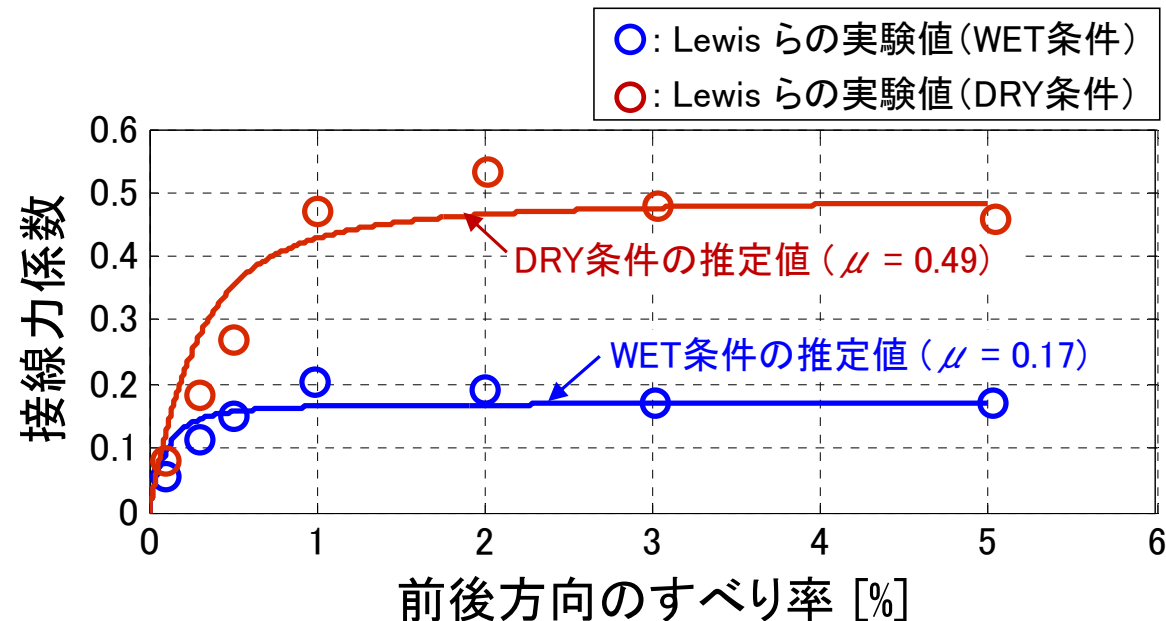
- 接線力モデルの一般性を確認するため、他研究者が行った実験結果に適用。
 - ✓ 著名な学術論文から、試験輪の接触面の形状変化に留意した実験結果を選定。



ケース1: 大山、丸山らの実験結果 ※1)

- 試験輪直径: 660 × 550mm
- 最大接触面圧: 785MPa
- 周速度: 100、150、200km/h

※1) 大山忠夫、丸山弘志、日本機械学会論文集C編、
Vol.48、No.431(1982)、pp.1005-1013



ケース2: Lewisらの実験結果 ※2)

- 試験輪直径: 47 × 47mm
- 最大接触面圧: 1500MPa
- 周速度: 3.54km/h

※2) Lewis, R., Gallardo-Hernandez, E.A., Hilton, T., and Armitage, T., Journal of Rapid Trans. Proc. IMechE, Vol.223 Part F: J. Rail and Rapid Transit(2009), pp.275-283

まとめ

- 営業線での実車走行実験の結果に基づく、『粘着係数と速度の関係式』と『Kalkerの線形転がり接触理論』の組み合わせにより、**実態に即した車輪／レール間の接線力係数とすべり率の関係を理論的に推定するモデルを提案。**
- 実車の輪重変動の範囲においては、粘着係数と速度の関係式には大きな差異がないことを実験的に確認。
※押付け荷重5kNと25kNのときの粘着係数の差異は最大30%程度(30km/h以上の場合)
- 本接線力モデルの妥当性を実験結果との比較により検証した結果、水潤滑条件でも飽和指数 $\beta=1.5$ が適用できることを確認し、推定結果は実験値と良好に一致することを確認。

※実験値に対して推定値は最大30%程度の誤差で良好に一致

成果の活用

- ◆ 鉄道事業者や車両メーカーなど、MBD車両運動解析を実施する不特定多数の技術者が、雨天走行時を模擬した車両運動解析を一定の解析精度の下で実行することが可能。
 - ⇒ 実態に即した明確な条件の下での車両運動解析が実行できるので、走行試験の実施前に、対策デバイスの性能評価を効率的に行うことが可能(走行試験の実施回数削減に貢献)。

参考文献

- (1) Kalker, J.J. : Three-dimensional elastic bodies in rolling contact (1990), KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
- (2) 山本大輔 : Levi-Chartetの式と粘着係数－速度の関係式を組み合わせた車両運動解析のための実用的な車輪／レール接線力モデル、日本機械学会論文集、Vol.89、No.924(2023). DOI: 10.1299/transjsme.23-00003.