

レール摩耗進展に及ぼす車輪のアタック角の影響評価試験

辻江 正裕*

Examination of the Effect of Attack Angle on Rail Wear Development

Masahiro TSUJIE

Rail wear does not develop in a short term, but it closely relates to crack initiation. Therefore, it is very important to predict the wear development of a rail. The wear of a rail occurs more outstandingly at curved sections than straight sections. At a curved section, wheels pass with an attack angle, which gives rise to not only longitudinal slips but also lateral slips at the wheel/rail contact patch. The previous research treated both slips equally as the effect. In this research, we conducted wear experiment by use of wheel/rail rolling contact test equipment to examine the influence of lateral slips on wear development. Furthermore, the wear experiment was conducted under the mixed slip conditions. As a result of the experiments, we reveal that the wear development under the mixed slip conditions can be evaluated by the contribution ratio of longitudinal slip and lateral slip.

キーワード：摩耗進展, Archard, 縦／横すべり, 車輪・レール高速接触疲労試験装置, 車輪／レール

1. はじめに

列車通過に伴う車輪との繰り返しの転がり接触により、車輪／レール間には著大な接触荷重やすべりが作用し、結果としてレールの車輪との接触面（以下、「頭頂面」とする）においては、摩耗やき裂の発生といった事象が確認されている。レールにおける摩耗進展は、摩耗深さが交換基準となっていることからレールの交換頻度に影響するほか、き裂の発生と密接な関係がある。したがって、レールの摩耗進展を予測することは非常に重要である。そこで筆者らは先行研究¹⁾において、マルチボディダイナミクスによる車両運動解析を活用したレール摩耗形状予測モデルを構築している。

これまでのレール摩耗進展予測においては、先行研究で構築したモデルを含め、車輪／レール間における縦すべりと横すべりが摩耗進展におよぼす影響は同等であるものとみなして扱われているが、両者の摩耗進展への影響については明らかになっていない。そこで本研究では、より高精度にレールの摩耗進展を予測するために、縦すべりと横すべりが摩耗進展に及ぼす影響について、大型転動疲労試験装置を活用して評価した。さらに、縦すべりと横すべりが同時に作用する条件（以下、「混合すべり」とする）における摩耗進展状況を評価するため、室内摩耗試験を実施した。そしてそれらの結果を踏まえて、混合すべりによる摩耗進展を評価する予測式を提案した。

2. 摩耗進展予測モデル

車輪／レール接触における摩耗の形態は、主に凝着摩耗である。凝着摩耗に対する予測式として、これまでにいくつかの予測式が提案^{2) 3) 4)}されている。そのうちの1つである Archard 摩耗予測式²⁾は、式(1)で定義されている。

$$D = \frac{kP\delta}{H} \quad (1)$$

ただし D [m] は摩耗深さ、 P [N/m²] は接触面圧、 δ [%] はすべり率、 H [N/m²] は接触する物体のうち柔らかい方の材料硬さ（本研究では普通レール材）である。また k は摩耗進展の程度を評価する摩耗係数であり、これまでに室内摩耗試験や現地測定結果に基づき同定されている。

本研究では、Archard 摩耗予測式に基づき、室内摩耗試験結果から横すべりや混合すべりにおける摩耗進展を評価することとした。

3. 車輪・レール高速接触疲労試験装置

本研究では、車輪／レール間の転がり接触によって生じる摩耗進展を定量的に評価するため、大型転動疲労試験装置を用いて室内摩耗試験を実施した。本章では、試験装置の概要について記述する。

3.1 試験装置の概要

室内摩耗試験は、鉄道総研が所有する車輪・レール高速接触疲労試験装置⁵⁾を用いて実施した。本試験装置

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

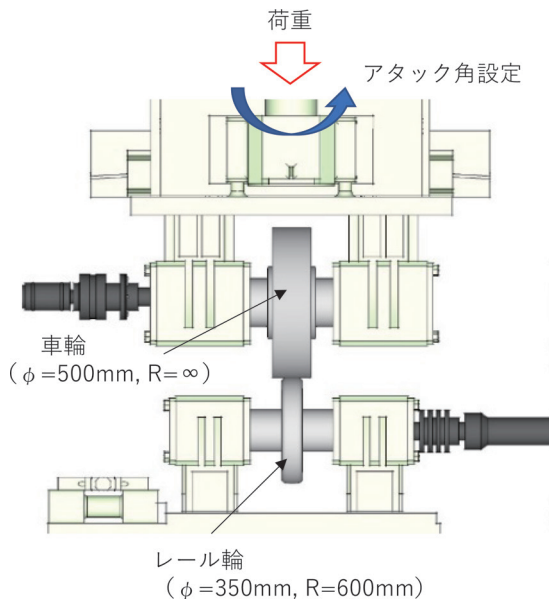


図1 車輪・レール高速接触疲労試験装置

の概略図を図1に示す

本試験装置は、車輪材試験輪（以下、「車輪」とする）ならびにレール材試験輪（以下、「レール輪」とする）を組み合わせ、車輪／レール接触を模擬することができる。車輪はφ500mm、レール輪はφ350mmの円筒試験輪である。試験輪の断面形状については、レール輪が実物大のJIS60kgレール形状となっている。一方、車輪の断面形状については、車輪とレール輪の接触部にスピンを発生させないようにするため、踏面勾配のない平面形状の試験輪を採用した。また車輪／レール輪とも、それぞれ実際の車輪／レール相当の硬さとなっている。試験輪の概要を表1に示す。

表1 試験輪概要

試験輪	直径 (mm)	断面形状	硬さ (Hv)
車輪	φ 500	平面 (R=∞)	330
レール輪	φ 350	JIS60kg レール (R=600)	270

本試験装置は、2つのモータにより2つの試験輪をそれぞれ独立して回転させることができるため、試験輪の接触部において任意のすべりやトルクを発生させることができる。また、車輪側の試験輪回転軸を回転（図1の青矢印方向）させることにより、試験輪にアタック角を設定することも可能である。

3.2 アタック角と横すべり

前節に記載したように、本試験装置では曲線区間の車輪／レール接触を模擬するため、車輪とレール輪の接触

部においてアタック角を設定することができる（図2）。その際に試験輪接触部において発生する縦すべり δ_x ならびに横すべり δ_y は、式(2)および式(3)で与えられる。なお、 θ はアタック角、 V_w は車輪の回転速度、 V_r はレール輪の回転速度である。なおここでは、試験輪の踏面勾配はないものとし、ロール角は 0° とする。

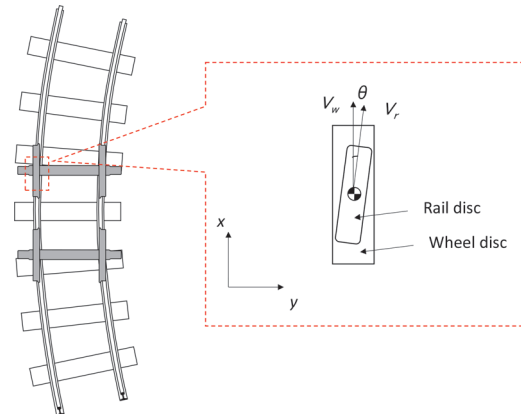


図2 車輪／レール間のアタック角と試験輪の関係

(縦すべり率)

$$\delta_x = \frac{2(V_w - V_r \cos \theta)}{V_w + V_r} \quad (2)$$

(横すべり率)

$$\delta_y = \frac{2V_r \sin \theta}{V_w + V_r} \quad (3)$$

本研究では、上記の回転疲労試験装置により、式(2)および式(3)で与えられる縦すべり δ_x および横すべり δ_y による摩耗進展について検討を行う。

4. 縦／横すべりによる摩耗進展

縦すべりならびに横すべりによるレールの摩耗進展状況を把握するため、前章で記載した大型回転疲労試験装置を用いた室内摩耗試験を実施した。

4.1 室内摩耗試験

室内摩耗試験は、表1に記載した円筒試験輪を組み合わせ実施した。その他の試験条件を表2に示す。

表2に示すように、Case1は縦すべりが発生する条件、Case2はCase1と同じすべり率の横すべりが発生する条件とした。在来線の半径600mの曲線区間における車輪／レール間のアタック角は約 0.2° である⁶⁾ことから、本試験におけるアタック角についても 0.2° とした。この

表2 試験条件（縦／横すべり）

	Case1	Case2
すべり率 [%]	0.35	0.35
すべり方向	縦すべり	横すべり
アタック角 [deg]	0	0.2
車輪速度 [km/h]	60.21	60.00
レール輪速度 [km/h]	60.00	60.00
荷重 [kN]	10 (最大接触面圧：800MPa)	

場合、式(3)より試験輪接触部に発生する横すべり率が0.35%となることから、Case1における縦すべり率についても0.35%となるよう、試験輪の転動速度を設定した。さらに、試験輪接触部における最大接触面圧が800MPaとなるよう、10kNの荷重を載荷した。

各試番とも、接触回数が100万回になるまで試験を実施した。また25万回転動するごとに試験輪の転動を中断し、試験輪の断面形状を測定した。

4.2 室内摩耗試験結果

25万回転動するごとにレール輪の断面形状を測定し、初期形状を重ね合わせた結果を図3に示す。

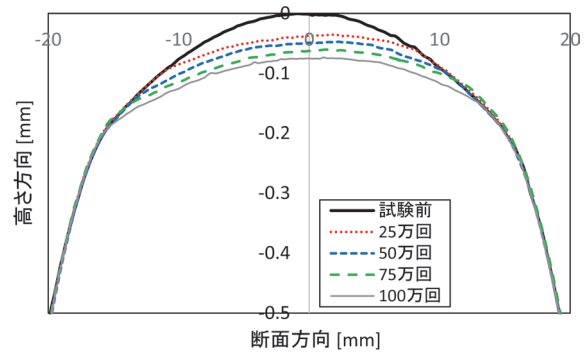
図3に示すように、いずれの条件においても転動回数が増加するにつれて摩耗が進展し、形状が変化していることが確認できる。全体的な傾向として、摩耗が進展するにつれて、試験輪形状が平面に近づいている傾向が確認できる。

つぎに、これらの結果より25万回転動ごとにおけるレール輪の摩耗量を算出した。その結果を転動距離別に図4に示す。

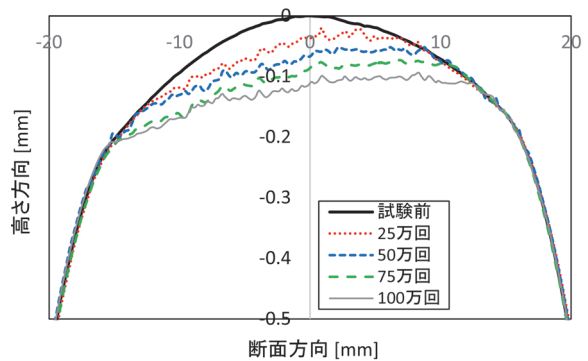
図4に示すように、縦すべりならびに横すべりともに、試験開始から25万回転動までとそれ以降において、摩耗量が異なっていることが確認できる。これは、試験開始から25万回転動までの間においては、初期摩耗の影響があるためと考えられる。25万回以降の摩耗進展については、若干のばらつきは認められるものの、おおむね安定した結果であることが確認できる。また全体的に、横すべりによる摩耗量は縦すべりによる摩耗量よりも多く、その割合は約1.3~2.1倍であった。なお試験終了時においては、その割合は約1.7であった。

4.3 試験輪の分析

前節に記載したように、すべり率0.35%の場合は横すべりによる摩耗進展は縦すべりに比べて、約1.7倍多い結果となった。そこで、縦／横すべりが試験輪の接触面に与える影響を評価するため、レール輪の表層について断面組織観察ならびにピッカース硬さ測定を実施した。



(a) Case1（縦すべり）



(b) Case2（横すべり）

図3 断面形状測定結果

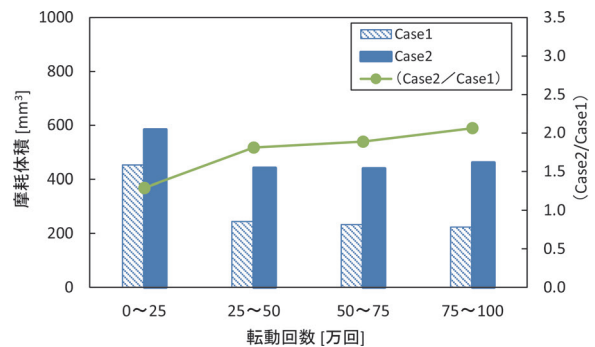
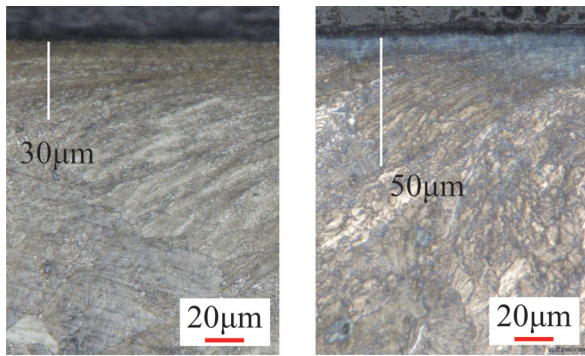


図4 摩耗量算出結果

4.3.1 断面組織観察

断面観察はすべりが作用する面、すなわちCase1の縦すべりについては転動方向、Case2の横すべりについては断面方向に試験輪を切断し、3%ナイトール溶液でエッチングを行い断面組織について観察した。それらの結果を図5に示す。

図5に示すように、いずれの断面においてもすべりが作用したことによる塑性流動が確認できる。縦すべりが作用したCase1における塑性流動深さは約30μmであったのに対し、横すべりが作用したCase2においては約50μmであった。このように、試験輪の接触面に作



(a) Case1 (縦すべり) (b) Case2 (横すべり)

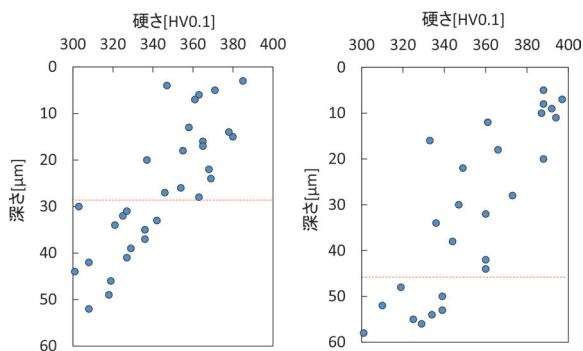
図5 断面観察結果

用したすべりによる塑性流動の深さは、横すべりにおいては縦すべりの約1.7倍であることが確認できた。

4.3.2 ビッカース硬さ測定

塑性流動が確認された図5に示す断面において、すべりによるレール輪表層への影響をより定量的に評価するため、マイクロビッカース硬さ測定を行った。なお、硬さ測定における押し込み荷重は1Nと設定して測定した。各断面における深さ方向の測定結果を図6に示す。

このように、いずれの断面においてもレール輪の表層においては、おおよそ340HV0.1~400HV0.1に達する高い値が測定された。普通レール材の硬さ(約270HV)に対して高い値となったことは、繰り返しの転がり接触ならびにすべりによる塑性流動の影響であると考えられる。一方、表層から深くなるにつれて、測定値は減少傾向にあることが確認できる。特に縦すべり(Case1)においては、深さ28μm付近、横すべり(Case2)においては47μm付近を境に、測定された値はいずれも340HV0.1以下に収まっていることが確認できる。したがって、試験輪表層部において塑性流動が影響したと考えられる領域(硬さ測定結果が340HV0.1~400HV0.1の領域)では、横すべりは縦すべりに比べて約1.7倍大きい結果であった。



(a) Case1 (縦すべり) (b) Case2 (横すべり)

図6 硬さ測定結果

前項の断面観察結果ならびに硬さ測定結果より、本試験で行ったすべり率0.35%の場合、横すべりによる接触面への影響は縦すべりと比較すると、1.7倍程度大きいと考えられる。

4.4 摩耗係数の同定

4.2節で算出した摩耗量をもとに、式(1)に示すArchard摩耗予測式を適用し、レール輪の摩耗係数を同定した。それらの結果を実験条件ならびに転回数別に図7に示す。

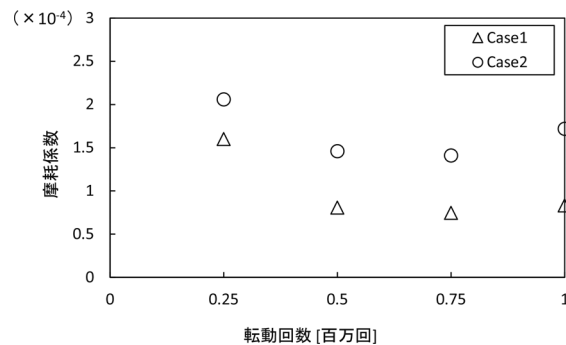


図7 摩耗係数同定結果(縦/横すべり)

図7に示すように、横すべりが作用したCase2における摩耗係数は、縦すべりが作用したCase1での結果に比べて1.3~2.1倍高い値となった。いずれの試番も、試験輪の初期硬さならびにすべり率は同じであることから、摩耗量の差がそのまま摩耗係数の値に反映された結果となっている。したがって縦すべりによる摩耗係数を基準に考えると、横すべりによる摩耗量を算出するためには、縦すべりの摩耗係数を用いた予測式に一定の係数を乗ずることで算出することができると考えられる。つまり式(1)において摩耗量を算出する際、横すべりについては重み付けをすることで、縦すべりによる摩耗係数を横すべりによる摩耗係数に置き換えられるとし、式(4)のように算出(α が重み付けの値)することで、横すべりが摩耗進展に及ぼす影響を評価できると考えられる。

$$D' = \frac{\alpha k P \delta}{H} \quad (4)$$

ここで D' [m]は横すべりによる摩耗深さ、 α は重み付け係数、 k は縦すべりによる摩耗係数である。そのほか、 P [N/m²]、 δ [%]、 H [N/m²]は式(1)と同じである。

4.2節で記述したように、本研究で実施したアタック角0.2°(すべり率が0.35%)の場合においては、横すべりによる摩耗量は縦すべりによる摩耗量に比べて、約1.7倍であった。したがってアタック角0.2°(すべり率が0.35%)の場合、横すべりの摩耗予測式(4)において

縦すべりの摩耗係数に $\alpha=1.7$ の重み付けすることで、横すべりによる摩耗量を算出できると考えられる。

5. 混合すべりによる摩耗進展

前章において、車輪／レール間の縦すべりならびに横すべりによる摩耗進展速度が異なることを明らかにした。本章では、混合すべりによる摩耗進展を明らかにするとともに、その進展を簡易に、かつ精度よく予測する手法を構築するため、室内摩耗試験を実施した。そして試験結果をもとに、混合すべりによる摩耗進展を評価する予測式を構築した。

5.1 室内摩耗試験

室内摩耗試験は、3章に記載した車輪・レール高速接触疲労試験装置を活用して実施した。試験に用いた試験輪は表1に記載した円筒試験輪であり、その他の試験条件を表3に示す。

表3 試験条件（混合すべり）

	Case 3	Case 4
(縦) すべり率 [%]	0.35	0.35
(横) すべり率 [%]	0.35	0.17
アタック角 [deg]	0.2	0.1
車輪速度 [km/h]	60.21	60.21
レール輪速度 [km/h]	60.00	60.00
接触荷重 [kN]	10 (最大接触面圧：800MPa)	

表3に示すように、室内摩耗試験は2ケースの混合すべり条件で実施した。Case3は前章と同じすべり率の縦すべりと横すべりが発生する条件とした。一方、Case4は縦すべりと横すべりのすべり率が異なる条件として、縦すべり率についてはCase3と同じ0.35%とし、横すべりについてはCase3の半分のすべり率が発生す

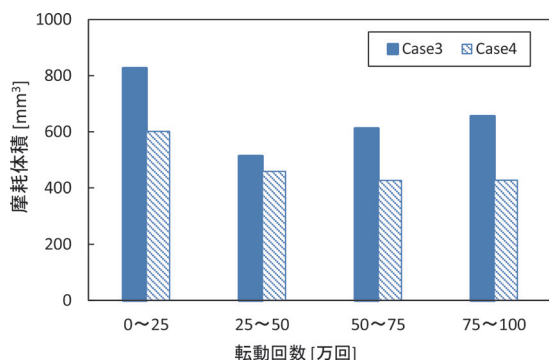


図8 摩耗量算出結果（混合すべり）

る条件とした。また各試番とも前章と同様に、回転回数が100万回になるまで回転させ、また25万回転ごと

に測定を行った。25万回転ごとのレール輪の摩耗量を算出した結果を図8に示す。図8に示すように、いずれの条件ともに試験開始から25万回転までとそれ以降において、摩耗量が異なっていることが確認できる。この傾向は前章の結果と同様、初期摩耗が影響していると考えられる。また全体的に、アタック角の大きいCase3の方がCase4に比べて摩耗量が大きい結果となっている。これは、横すべりにおけるすべり率の差が影響したものであると考えられる。

5.2 摩耗係数の同定

前節で示した摩耗量をもとに、2章に記述した Archard 摩耗予測式を適用し、レール輪の摩耗係数を同定した。その結果を図9に示す。なお前章で示した、Case1（縦すべりのみ）ならびにCase2（横すべりのみ）が作用した条件における摩耗係数についても合わせて示す。

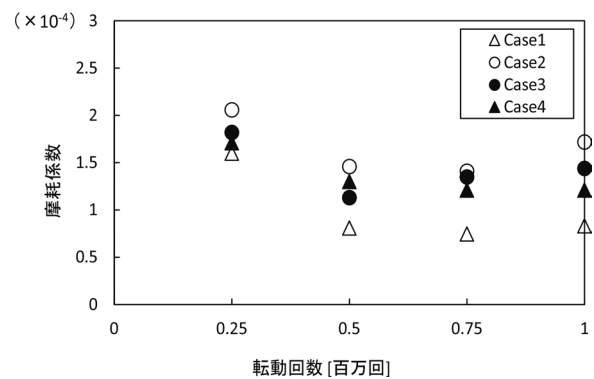


図9 摩耗係数同定結果（混合すべり）

図9に示すように100万回転後においては、アタック角が0.2°の混合すべり条件下におけるCase3での摩耗係数は、アタック角が0.1°のCase4での摩耗係数に比べて、約1.1倍高い値となった。またいずれの条件とも、Case1（縦すべりのみ）およびCase2（横すべりのみ）の摩耗進展から同定した摩耗係数の範囲に収まっていることが確認できる。

5.3 摩耗係数の推定

4.4節に記載したように、すべり率が0.35%の場合、横すべりによる摩耗進展は縦すべりに比べて約1.7倍促進する。そして、この摩耗進展速度の差は、摩耗係数に反映することでその進展状況を予測することができる。一方、本章で実施した混合すべり条件下における摩耗進展は、縦すべりと横すべりが同時に作用しているため、同じすべり率における摩耗進展速度という観点では、横すべりのみによる摩耗進展よりも進展が遅いと考えられ

る。つまり混合すべりは、式(5)に示すように、接触面内における縦すべりと横すべりの寄与率によって、評価できる可能性がある。そこで、Case3ならびにCase4における摩耗係数について、4章で得られた縦すべりならびに横すべりの寄与率で評価できるか検討した。なお式(5)において、 k_m は混合すべり条件における摩耗係数の推定値、 k_x は縦すべりに関する摩耗係数(式(4)における k)、 k_y は横すべりによる摩耗係数(式(4)における ak)、 δ_x は混合すべり条件における縦すべり率、 δ_y は混合すべり条件における横すべり率である。

$$k_m = \frac{\delta_x}{\delta_x + \delta_y} k_x + \frac{\delta_y}{\delta_x + \delta_y} k_y \quad (5)$$

Case3ならびにCase4における摩耗係数について、前節に示すように室内摩耗試験結果から同定した摩耗係数、ならびに式(5)で示す縦すべりと横すべりの寄与率による推定式から算出した摩耗係数を図10に示す。

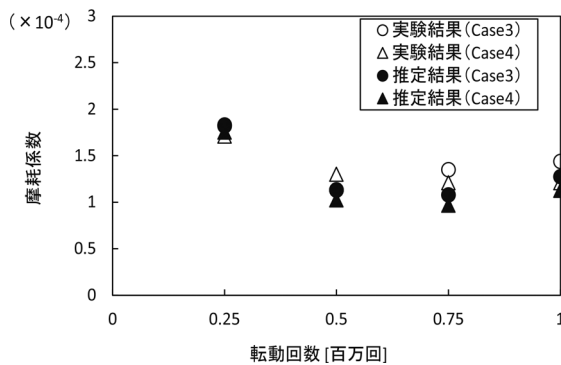


図10 摩耗係数推定結果

図10に示すように、混合すべり条件下で実施したCase3ならびにCase4ともに、実験結果から同定した摩耗係数と寄与率により推定した摩耗係数は、若干のばらつきは認められるものの、概ね一致していることが確認できた。またその誤差は、最大でも2割程度に収まる結

果となった。これらの結果より、単一のすべり条件以外の混合すべりによる摩耗進展に対しても、縦すべりのみ／横すべりのみの室内摩耗試験から同定した摩耗係数により、その進展を評価する摩耗係数を推定できることが見込まれる。

6. まとめ

本研究では、より高精度なレールの摩耗予測モデルを構築するため、車輪／レール間にアタック角を有した条件を模擬した室内摩耗試験を実施した。そして、車輪／レール間における縦すべりと横すべりがレールの摩耗進展に及ぼす影響を明らかにするとともに、混合すべりによるレールの摩耗進展を評価した。最後に、混合すべり条件下における摩耗進展について、車輪／レール接触部における縦すべりと横すべりの寄与率により摩耗係数を推定する手法を提案した。今後、さまざまなアタック角におけるレールの摩耗進展予測に活用する予定である。

文献

- 1) 辻江正裕, 三苦雅史, 曄道佳明: MBDソフトを援用した摩耗形状予測とその考察, 日本機械学会論文集C編, Vol.79, No.806, pp.3376-3388, 2013
- 2) Archard, J.F., "Contact and Rubbing of Flat Surface", Journal of Applied Physics, Vol.24, pp.981-988, 1953.
- 3) Kalousek, J. and Bethunr, A.E., "Rail Wear Under Heavy Traffic Conditions", STP, Vol.644, pp.63-79, 1978.
- 4) Elkins, J.A. and Eickhoff, B.M., "Advances in Nonlinear Wheel/Rail Force Prediction Methods and Their Validation", Proceedings of the ASME winter annual meeting, 1979.
- 5) 名村明, 石田誠: レール損傷の発生メカニズムを探る, RRR, Vol.68, No.9, pp.6-9, 2011
- 6) 石田弘明: 急曲線低速走行試験における安全性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.5-10, 2005