

# ブレーキによる滑りを伴う回転車輪の 接触摩擦（粘着特性）

野村 義夫・榊原 鑛藏

## Adhesion between Two Wheels in Contact with Large Brake Slip

Yoshio NOMURA and Khozo SAKAKIBARA

### Abstract

Both traction and braking forces of rolling stock depend on the friction between wheels and rail. The friction, so called adhesion at railway engineering, has been studied when slip of wheel is very small, but not yet explored with larger slip.

In order to investigate the fundamental adhesion phenomenon between wheel and rail with larger slip, authors designed and constructed an adhesion testing machine, and then carried out some experiments under several conditions of speed (80~160 km/h), load (106.3 kgf, 212.7 kgf) and contact surface (dry, wet and muddy).

As a result, under dry condition the maximum adhesion coefficient is about 0.55 at 2~3% of slip ratio, and is not so much influenced by both speeds and loads. Under wet condition, the adhesion coefficient is small when the slip ratio is small, but as increasing the slip ratio, the adhesion coefficient becomes larger. Under the dirty conditions such as existence of some amount of sand, the coefficient is similar to the dry condition, and such as existence of some mud, the coefficient is similar to the wet condition.

### 目 次

- |               |                |
|---------------|----------------|
| 1. ま え が き    | 3.4 データ整理      |
| 2. 実験装置       | 4. 実験結果と考察     |
| 2.1 粘着試験機     | 4.1 乾燥状態の粘着特性  |
| 2.2 測定装置      | 4.2 水ぬれ状態の粘着特性 |
| 3. 実験計画とデータ整理 | 4.3 異物介在時の粘着特性 |
| 3.1 実験条件の設定   | 5. 結 論         |
| 3.2 実験準備      | 6. あとがき        |
| 3.3 実験方法      | 「文献」           |

### 1. ま え が き

鉄道車両の駆動力あるいはブレーキ力は、車輪とレール間の接触部における摩擦力に依存している。この摩擦力は通常「粘着力」といわれ、過去において多くの研究がなされてきた。特に、弾性接触と考えられ

る範囲内については、「クリープ力」といわれ、Carter<sup>1)</sup>、Poritzky<sup>2)</sup>や穂坂<sup>3)</sup>などの理論があり、実験的にも大山ら<sup>4),5)</sup>によってその特性が確かめられている。

しかし、駆動トルクあるいはブレーキ力が大きく、いわゆる「車輪空転」あるいは「車輪滑走」を起す場合は、滑りを伴う回転車輪の接触摩擦現象であり、従来殆んど検討されたことはなかった。これは、滑りによる摩擦熱や摩擦の発生が接触部に極めて複雑な摩擦

現象を起して解析を困難にしているからである。

他方、車両の加速あるいは減速を出来るだけ大きくする為に、駆動力あるいはブレーキ力を増大すると、接触部に大きな滑りを起す危険がある。これは現実には鉄道車両で起っており、車輪およびレールの損傷の原因になっている。このため、車輪に滑りが起れば、駆動力あるいはブレーキ力を減少させる工夫、すなわち、車輪滑走防止機構が開発されてきた。しかしながら、この機構設計の理論的根拠はあまり明確ではない現状である。

本研究は、室内実験によって、レールに対応する軌条輪とブレーキをかける車輪（制動輪）との間の接触摩擦力（すなわち粘着力）を、比較的大きな滑りに対して、いろいろの条件の下で求め、粘着現象を解明し、滑走防止機構設計の基礎を得ようとしたものである。

このため、まず、粘着力を求めるのに便利な試験機

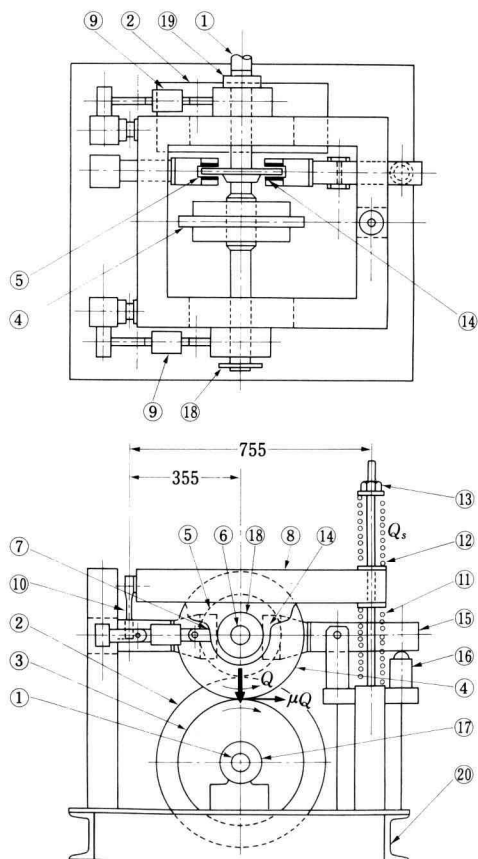


Fig. 1. Construction of adhesion testing machine.

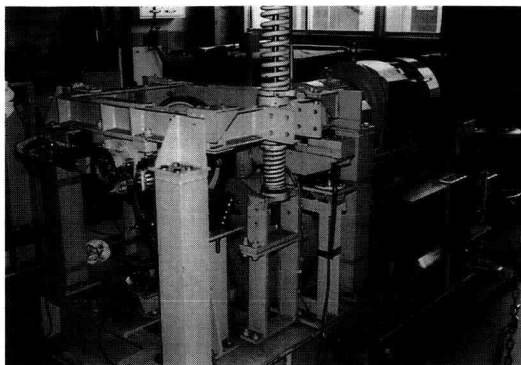


Fig. 2. General view of adhesion testing machine.

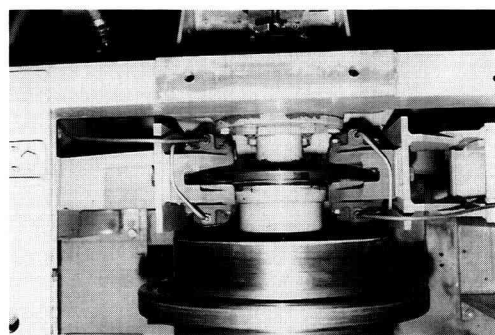


Fig. 3. Brake disc and calipers.

を計画し製作の上、実車を考慮して接触荷重を選定し、また接触部速度を変え、ブレーキ作用時の粘着特性および再粘着時の特性を求めた。この場合、接触部が乾燥状態ばかりでなく、水ぬれ状態および塵埃や泥あるいは油の介在する状態についても検討し、実車の粘着係数のバラツキを評価する資料を求めることとした。

## 2. 実験装置

### 2.1 粘着試験機

粘着試験機の構成は Fig. 1 のとおりで、その主要構成部品の名称と仕様の概要とを Table 1 に示す。

この試験機のモータ軸にはクラッチを介してフライホイールと軌条輪とが設けられ、この軌条輪に接触するように制動輪が配置されている。制動輪と同じ軸上にはブレーキディスクが設けられ、これらは軸受を介して一つの枠に取りつけられている。この枠の一端は薄い接合ばねで支えられ、他端には枠の重量を相殺す

Table 1. Nomenclature of adhesion testing machine

No. in Fig. 1	Nomenclature and Specification
①	Motor Shaft (Variable Speed, 200 V, 7.5 kW Motor)
②	Flywheel ( $2.04 \text{ kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ )
③	Rail-wheel (S55C, 400 mm Dia., 25.2 mm width)
④	Brake-wheel (S55C, 400 mm Dia., 21.3 mm width)
⑤	Brake Disc (FC25, $\phi$ 260, 10.4 mm thickness)
⑥	Brake-wheel Shaft
⑦	Bearing
⑧	Brake-wheel Frame
⑨	Load-cell for measuring Tangential Force (a pair)
⑩	Connecting Plate
⑪	Adjusting Spring (for weight balance of ⑧)
⑫	Loading Coil-Spring (spring constant $10.0 \text{ kg f/mm}$ )
⑬	Load Adjusting Nut
⑭	Brake Calipers (a pair, resin mold asbestos)
⑮	Supporting Frame of ⑭
⑯	Load-cell for measuring Braking Force
⑰	Revolution Detector of ③ (photo-electric type)
⑱	Revolution Detector of ④ (photo-electric type)
⑲	Speed Meter of ④ (electro-magnetic type)
⑳	Basic Frame

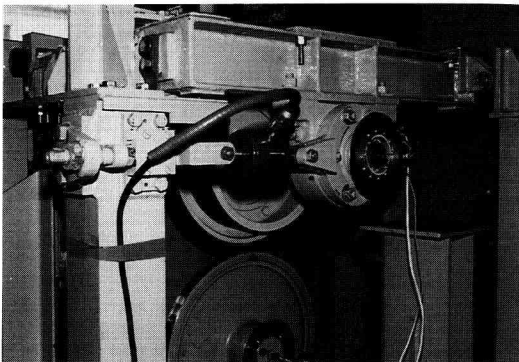


Fig. 4. Load-cell to measure tangential force and revolution detector of brake wheel.

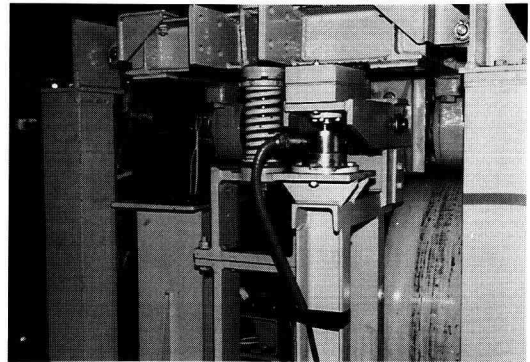


Fig. 5. Load-cell to measure braking force.

るための調整ばねと、制動輪を軌条輪に押しつけるための荷重用コイルばねとが設けられている。Fig. 2は、この試験機の外観図であり、Fig. 3は、制動輪とブレーキディスクおよびキャリパーを上面から見た図である。なお、ブレーキは別に設けた油圧源からの圧力によって働かされる構造となっている。

## 2.2 測定装置

電磁オシログラフに記録される各部の測定はつぎのとおりである。

### (1) 制動輪と軌条輪間の接線力の測定

制動輪枠と基礎台枠との間に設けた2個のロードセルAおよびBによって検出測定する。(Fig. 1および

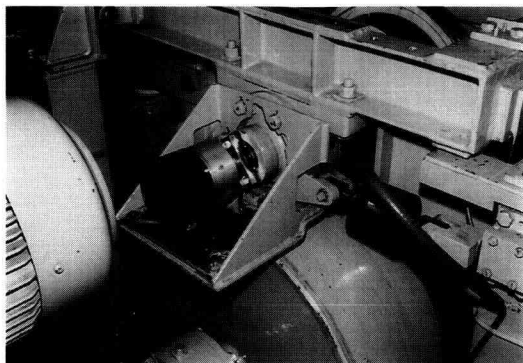


Fig. 6. Electro-magnetic type speed meter of brake wheel.

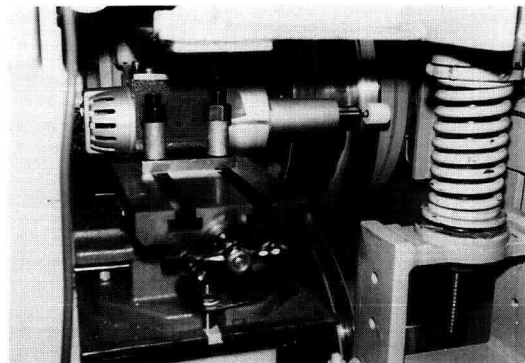


Fig. 7. Grinding work at brake wheel.

Fig. 4 参照)

## (2) ブレーキ力の測定

制動輪のブレーキ力は、軸に対称的に配置した左右一対のキャリパーを用いて与えられるが、その反力をキャリパー棒を介しロードセルCによって検出測定する。(Fig. 1 および Fig. 5 参照)

## (3) ブレーキ油圧の測定

油圧源よりキャリパーにつながる導管の途中に設けた油圧ピックアップにより検出測定する。

## (4) 速度の測定

制動輪の軸端に設けた電磁式速度計により測定する。(Fig. 6 参照)

## (5) 車輪回転数の測定

軌条輪、制動輪共に、それぞれの軸端に設けた光電式測定器により測定する。(Fig. 1 および Fig. 4 参照)

# 3. 実験計画とデータ整理

## 3.1 実験条件の設定

本研究の目的を達成するため、鉄道車両の実態を考慮しつつ粘着試験機で実現出来る実験条件を、次のように設定した。

(1) ブレーキ開始時の車輪周速度は、最高 160 km/h とし、主として 120, 100 および 80 km/h とする。

(2) 車輪接触部の荷重は、ヘルツ応力が新幹線車両の場合の半分程度とすることとして、200 kgf とし、さらにその半分の 100 kgf の場合も考慮する。

(3) 車輪接触部表面の粗さは、両輪とも実験開始時に触針式アラサメータの指示値で、2~3  $\mu\text{m}$  に仕上げる。

(4) 車輪接触部は乾燥状態を基準とし、水ぬれ状態および塵埃や泥あるいは油などの異物の介在する場合、とについて実験する。ここで、水量および汚れの程度については、実状に近くなるよう配慮する。

## 3.2 実験の準備

実験開始に先立ち、試験機各部の調整と管理とが必要であるが、その主なものは次のとおりである。

### (1) 車輪接触表面粗さの管理

実験中何らかの原因によって生ずる車輪接触表面の疵や不正を修正し、粗さを設定値に保つため、実験毎に研削を行う。Fig. 7 は、制動輪の研削状況を示す。研削結果は触針式アラサメータにより計測し、設定値を保つよう管理するが、軌条輪は試験機の構造上直接測定が出来ないので、スンプによる比較測定とした。

### (2) 車輪直径の計測と接触状態の管理

制動輪および軌条輪のそれぞれについて、実験毎に車輪接触表面の幅方向 3 個所の直径を計測し、その平均値をもって各車輪の直径とする。また、接触状態は車輪間にカーボン紙を重ねた薄紙を通して調べ、接触が一様になるよう管理する。

### (3) 滑り速度の管理

ブレーキ操作によって制動輪が軌条輪に対し滑る場合、滑り率があまり大きくなると、車輪接触表面の荒れがひどくなり遂には疵となる。

これを防ぐため、特殊の滑走制御器を考案し、ブレーキ開始速度より制動輪が約 40 km/h 低下した時、自動的にブレーキを開放するようにした。これによって最大滑り率は約 50% に押えられた。

### 3.3 実験方法

実験は、軌条輪と制動輪とが共に設定速度に達し、クラッチによりモータ側を切り離した後、制動輪側にブレーキをかける瞬間から始め、滑走制御器によるブレーキの解放で終る。この間、測定値は電磁オシログラフに連続記録する。

また、設定された実験条件のすべての組み合わせについて3回宛実験を繰り返すこととする。

なお、接触部に異物介在の条件を実施するのに、水ぬれ状態は、ヘッド1700 mm、流量2.1 cm<sup>3</sup>/secの散水器を用い、車輪接触部に注水し、雨天時を模擬した。砂の介在状態は、#200の砂を横幅20 mmの樋を通し振動により接触部に送り込んだ。泥の介在状態は、塵埃を含む黒土に若干の水分を与え、ペイント用ローラーを用いて回転中の軌条輪に付着させた。また別に、実車より採取した泥についても同様な方法によった。さらに、油の介在状態は、#40のマシン油をペイント用ローラーにより付着させた。

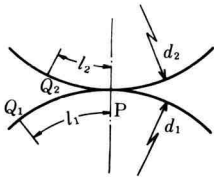


Fig. 8. Slip model of wheels in contact

### 3.4 データ整理

#### (1) 滑り率の算出

P点で接触する二つの車輪、すなわち軌条輪と制動輪とにおいて、微少時間の後にQ<sub>1</sub>点とQ<sub>2</sub>点とが接する場合、軌条輪に対する制動輪の「滑り率」(ε)は、P点とQ<sub>1</sub>点との距離をl<sub>1</sub>、P点とQ<sub>2</sub>点との距離をl<sub>2</sub>として、

$$\epsilon = (l_1 - l_2) / l_1 \dots\dots\dots(1)$$

で定義される。(Fig. 8 参照)

軌条輪直径をd<sub>1</sub> mm、制動輪直径をd<sub>2</sub> mm、オシログラフの紙送り速度をk mm/sとした時、オシログラフ記録用紙上での車輪n回転あたりの長さを、軌条輪でR mm、滑りのない制動輪でW mm、滑りのある制動輪でW<sub>1</sub> mmとすると、Rは車輪周上でnπd<sub>1</sub>の長さに対応し、その移動時間はR/k秒であり、WおよびW<sub>1</sub>は、いずれもnπd<sub>2</sub>の長さに対応し、時間はそれぞれW/k秒およびW<sub>1</sub>/k秒である。

単位時間の接触部移動量は、滑りのない場合、軌条輪でnkπd<sub>1</sub>/R、制動輪でnkπd<sub>2</sub>/Wであり、これらはそれぞれ等しいから、

$$l_1 = nk\pi d_1 / R = nk\pi d_2 / W \dots\dots\dots(2)$$

である。

滑りのある場合には、制動輪の単位時間の接触部移動量は、

$$l_2 = nk\pi d_2 / W_1 \dots\dots\dots(3)$$

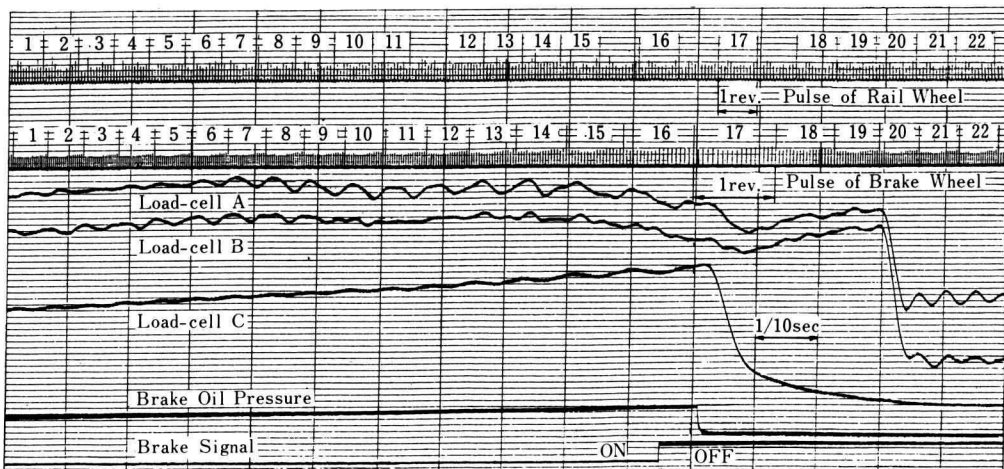


Fig. 9. An example of recording data.

である。

滑り率は、(2)、(3)式を(1)式へ代入して、

$$\varepsilon = 1 - \frac{W}{W_1} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、(2)式より

$$W = \frac{d_2}{d_1} R \dots\dots\dots(5)$$

である。

ブレーキ開始速度が低い場合、 $n=1$ とし、高い場合には $n=2$ または $n=3$ とする。

#### (2) 粘着係数の算出

制動輪を軌条輪に押しつける力  $Q$  kgf は、制動輪枠の端の荷重用コイルばね力  $Q_s$  kgf に「てこ比」を乗じた値である。すなわち、

$$Q = Q_s \times 755 / 355 = 2.127 Q_s \text{ kgf}$$

である。

実験にあたって、 $Q_s$  は 100 kgf および 50 kgf と設定したので、 $Q$  の値は、212.7 kgf および 106.3 kgf の二水準となる。

両車輪間の接線力すなわち粘着力  $F_{AB}$  は、ロードセル A と B とが受ける力  $F_A$  と  $F_B$  との和であり、これと  $Q$  との比が粘着係数  $\mu$  である。すなわち、

$$\begin{aligned} F_{AB} &= F_A + F_B \\ \mu &= F_{AB} / Q \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

である。

#### (3) データの読み取り

実験で得られるデータの一例を Fig. 9 に示す。この図において、車輪一回転毎に大きなパルスが現われるが、その間の小パルスは、軌条輪で 12 個、制動輪では 18 個である。制動輪の大パルス間隔毎に番号を付し、それぞれの番号の所の  $W_1$  を読み取り、それに対応する軌条輪パルスから  $R$  を読み取り、滑り率  $\varepsilon$  を算出する。

また、 $W_1$  を読み取った範囲にある平均の  $F_A$  と  $F_B$  との値から  $F_{AB}$  を求め、粘着係数  $\mu$  を算出する。

ロードセル C は、ブレーキ作用中および解放指令後のブレーキ力  $F_c$  を示すので、再粘着状況の検討資料となる。

## 4. 実験結果と考察

実験結果を整理し、滑り率と粘着係数との関係を示すと、乾燥状態については、Fig. 10, Fig. 11 であり、水ぬれ状態については、Fig. 12, Fig. 13、砂の介在状態については、Fig. 14、塵埃と泥の介在状態については、Fig. 15、実車の泥の介在状態については、Fig. 16、油の介在状態については、Fig. 17 である。

これらの結果から、粘着特性を考察すると、つぎのとおりである。

### 4.1 乾燥状態の粘着特性

接触部が乾燥状態にある時の粘着係数は、滑り率が 2~3% 程度までは比例的に増大し、ほぼ 0.55 の値に達

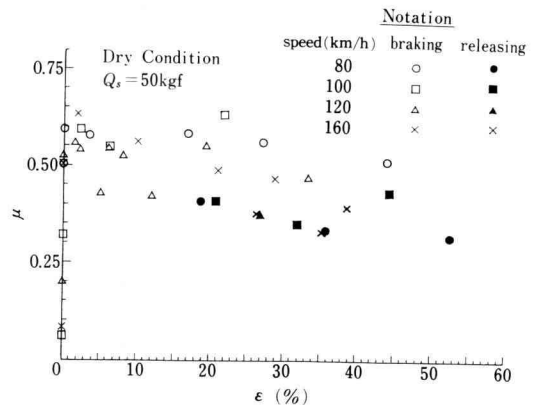


Fig. 10. Relations between adhesion coefficient ( $\mu$ ) and slip ratio ( $\varepsilon$ ).

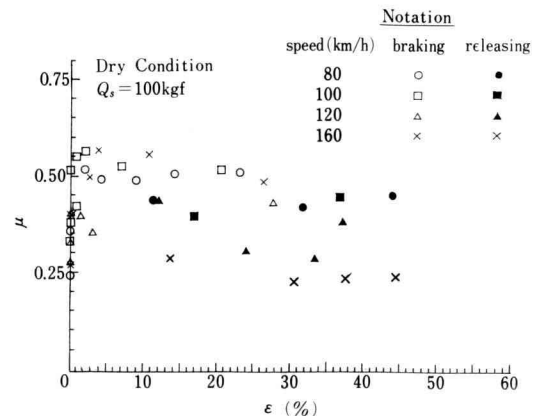
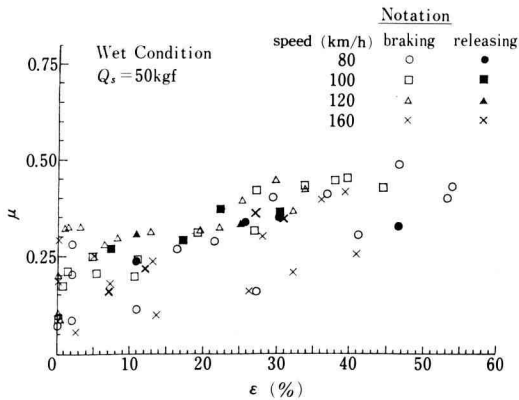
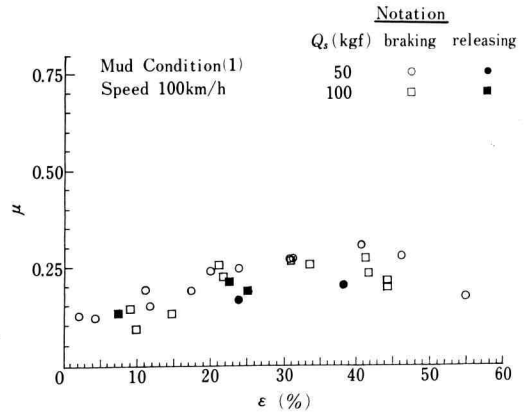
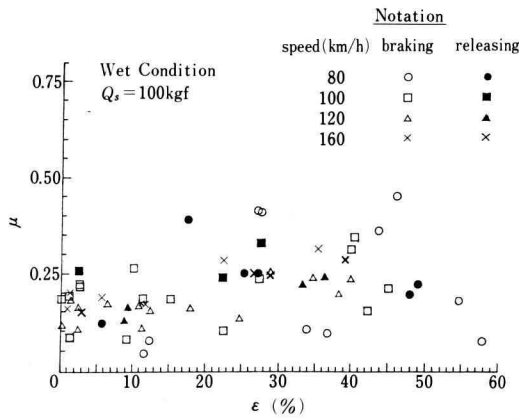
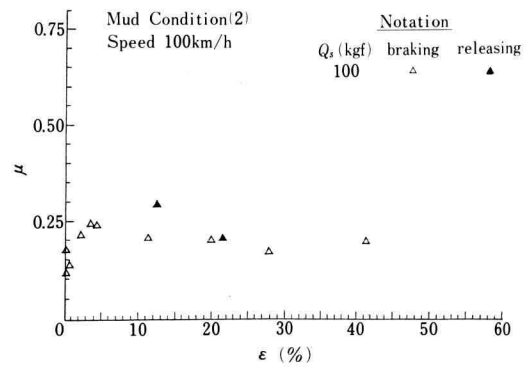
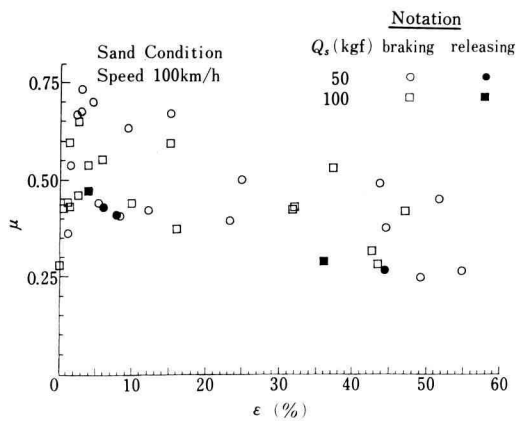
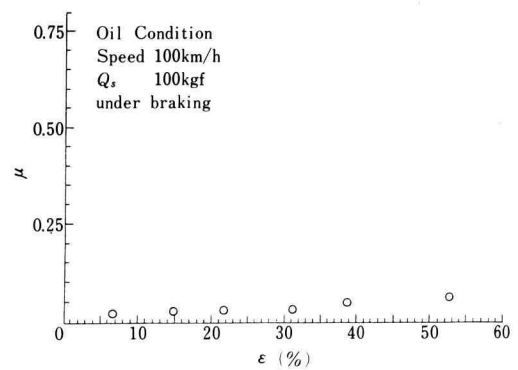


Fig. 11. Relations between adhesion coefficient ( $\mu$ ) and slip ratio ( $\varepsilon$ ).


Fig. 12. Relations between adhesion coefficient ( $\mu$ ) and slip ratio ( $\epsilon$ ).

Fig. 15. Relations between adhesion coefficient ( $\mu$ ) and slip ratio ( $\epsilon$ ).

Fig. 13. Relations between adhesion coefficient ( $\mu$ ) and slip ratio ( $\epsilon$ ).

Fig. 16. Relations between adhesion coefficient ( $\mu$ ) and slip ratio ( $\epsilon$ ).

Fig. 14. Relations between adhesion coefficient ( $\mu$ ) and slip ratio ( $\epsilon$ ).

Fig. 17. Relations between adhesion coefficient ( $\mu$ ) and slip ratio ( $\epsilon$ ).



し、その後滑り率の増大に対しあまり変化がみられない状態から、ゆるやかに低下する傾向がみられる。また、再粘着時の粘着係数も同様な傾向がみられるが、その値はブレーキ作用時の値より低いことが認められた。

荷重と初速度との影響は、あまり明確ではないが、強いていえばそれらの増大と共に粘着係数は若干低くなるようにみえる。

本実験ではブレーキのかけ方が手動であったこと、接触部が毎回全く同じ状態にあったとは考えにくいこと、などがデータのばらつきの原因と考えられる。

#### 4.2 水ぬれ状態の粘着特性

接触部が水でぬれた状態での粘着係数は、滑り率のごく小さい所は別として、滑り率の増大と共に徐々に増加する傾向がみられる。この傾向は、ばね荷重( $Q_s$ ) 50 kgf の時に明確に現われているが、ばね荷重( $Q_s$ ) 100 kgf の時には、ばらつきが大きくあまり明確ではない。数値でみると、ばね荷重( $Q_s$ ) が 50 kgf の時の粘着係数は、滑り率が 2~3% で約 0.25 に達し、その後やや低下傾向があるが、滑り率 20% 前後から徐々に増大し滑り率が約 30% 付近で約 0.40 の値になる。これに対し、ばね荷重( $Q_s$ ) 100 kgf の時の粘着係数は、ばらつきがありあまり明確ではないが、滑り率 20% 以下では約 0.20、滑り率 20% 以上では平均的に約 0.25 とみなされる。

ブレーキ初速度の相違が、粘着係数に及ぼす影響は明確ではない。また、再粘着時の特性はブレーキ作用時とあまり変わらないように見受けられる。

この水ぬれ状態の実験では、接触部への水の入り方が問題となろう。水膜の生成の程度が粘着特性に大きく影響するものと推測される。

#### 4.3 異物介在時の粘着特性

(1) 接触部に砂を散布した実験では、滑り率が数% の付近に粘着係数の最大値があり、その値は乾燥状態に近いが、滑り率が増大すると急激にその値は低下することが認められる。値のばらつきは極めて大きい、これは接触部に喰い込む砂の量と質の影響と考えられる。

なお、ばね荷重の相違による影響は殆んど認められないが、再粘着時の値はブレーキ作用時の値より低いことが認められた。

(2) 接触部に泥が付着した状態の粘着係数は、水に

ぬれた状態と同様で、滑り率の増大と共に増大する傾向がみられるが、その値はやや低く最大 0.25 である。また、ばね荷重の相違および再粘着時との差は殆んど認められない。

これらの特性は、泥の性質の他に付着に便利なものに含ませた水の影響も加わっているものと考えられる。

更に、実車より採取した泥を付着した場合の粘着係数は、最大でも約 0.25 で比較的小さく、上記の通常の泥の場合とはほぼ似た値であったが、通常の泥の場合よりやや滑り率の小さい所に最大値が観察された。この実験では泥に水分を加えなかったため、砂の特性に近いと予想されたが、むしろ、水分を含む通常の泥の特性に近かった。これは、実車の泥には微細な鉄粉が比較的多く含まれていたことから、予想とは異なる効果があったものと考えられた。

(3) 接触部が油でぬれた場合の粘着係数は、極めて小さく 0.05 以下であり、滑り率に殆んど無関係のようである。

試験機の軌条輪に付着した油は 1 回転後再び接触部に影響を与えるので、実際の車輪とレールとの関係とは著しく異なることを留意しなければならない。

## 5. 結 論

この実験的研究について得られた結果をまとめると、つぎのとおりである。

(1) 乾燥状態での粘着係数は、滑り率が増大するに従って急激に増大し、最大値に達した後、ゆるやかに減少する。

この粘着係数の最大値は、滑り率 2~3% 付近で観察され、約 0.55 である。また、ブレーキ解除後の粘着係数は、ブレーキ作用中の値より低い値をとる。

粘着係数のバラツキは比較的大きく、この実験の範囲では粘着係数に及ぼす速度および荷重の影響は明確ではない。

(2) 水ぬれ状態での粘着係数は、乾燥状態の場合よりバラツキが大きい。

荷重の小さい場合の粘着係数は、滑り率 2~3% で約 0.25 に達し、その後やや低下する傾向があるが、滑り率 20% 前後から再び増大する傾向がみられる。一方荷重の大きい場合の粘着係数は、平均的にみてこれよりやや低い値と見做されるが、バラツキは一段と大きい。

粘着係数に及ぼす速度の影響は、荷重の小さい場合



で初速度 160 km/h の時やや低い値を示すが、他の条件では明確な傾向を認められなかった。

(3) 砂を散布した状態の粘着係数は、乾燥状態に似た傾向で、滑り率が 3~10% の間で最大値が現われ、0.6~0.7 の範囲にばらついている。

(4) 水分を含む通常の泥を付着させた状態での粘着係数は、水ぬれ状態に似た傾向を示すが、全体的にやや小さく、0.25 以下の値である。

実車より採取した泥を付着させた状態での粘着係数は、通常の泥の場合よりやや滑り率の小さい所に最大値（約 0.25）が観察された。この実車の泥には微細な鉄粉が比較的多く含まれていたことが可成り影響していたようである。

(5) 油の介在する状態での粘着係数は、極めて小さく、滑り率に関係せず 0.05 以下であった。

## 6. あ と が き

本研究は、鉄道車両の加速や減速の制約となる車輪とレール間の摩擦すなわち粘着の特性を、滑り率の大きい場合について、粘着試験機を用いて実験的に求めたものである。その成果は、従来未知であった特性について新しい知見を得たものと考ええる。また接触部の

汚れに関しては、実用上多くの示唆を与えるものと考ええる。しかしながら、滑りを伴う回転車輪の接触問題には、極めて多くの影響因子たとえば、ブレーキ力のあたえ方や接触面の粗さと発熱、摩耗などがあり、これらの検討は今後の重要な課題である。

この実験的研究を進めるにあたり、内外の多くの文献および過去の経験を参照させていただいたが、実験の実施にあたっては、昭和 59 年度~昭和 61 年度の卒業研究生たちの多大の協力を得た。また、実車の泥の採集にあたっては、小田急電鉄海老名検車区の方々の協力を得た。さらに、研究費の一部は、(株)曙ブレーキ中央技術研究所の援助を受けた。ここに深く感謝の意を表わすものである。

## 文 献

- 1) Carter, F.W., Proc. Roy. Soc., London, A, 112 (1926), 151.
- 2) Poritzky, H. Trans. ASME, J. of Appl. Mech., 17, 2 (1950) 191.
- 3) 穂坂, 機論, 17-61, (昭 26), 161.
- 4) 大山, 丸山, 機論, 48-431, C (昭 57), 1005.
- 5) 大山, 他 3 名, 機論, 52-475, C (昭 61), 941.