

UDC 629.73.018.3

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-576

滑走路面のすべり評価法に関する研究(第1報)

— DBVの製作と基礎実験 —

山根 皓三郎 ・ 上田 哲彦 ・ 外崎 得雄

小野 幸一 ・ 竹内 和之

1979年6月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. はじめに	1
2. DBVの製作	2
2.1 車両の選定	2
2.2 車両の改造	2
2.3 データ計測装置	3
2.4 計測用タイヤ	3
2.5 走行性能	6
3. 実験	6
3.1 実験日程	6
3.2 実験結果	8
4. DBV計測法に関する基礎的考察	16
4.1 制動開始速度と制動距離	16
4.2 制動距離計測開始点および車輪ロック遅れの影響	17
4.3 すべり摩擦係数と摩擦以外の抵抗	18
4.4 乾燥路面の制動距離	22
5. すべり摩擦係数と路面条件および速度の関係	23
6. DBVと他の計測器および実機との相関	27
6.1 DBVによるSDR	27
6.2 Tapley Meter	27
6.3 自記制動計	29
6.4 ML-Mu-Meter	31
6.5 実機との相関	34
7. 結論	39
8. おわりに	39

滑走路面のすべり評価法に関する研究(第1報)*

— DBVの製作と基礎実験 —

山 根 皓三郎** 上 田 哲 彦** 外 崎 得 雄**

小 野 幸 一** 竹 内 和 之**

Studies on the Evaluation of Runway Slipperiness (I)

— Design of DBV and its Preliminary Tests —

Kosaburo YAMANE, Tetsuhiko UEDA, Tokuo SOTOZAKI

Koichi ONO and Kazuyuki TAKEUCHI

ABSTRACT

A Diagonal Braked Vehicle is designed and the preliminary tests are conducted together with a Tapley Meter and an ML-Mu-Meter. It is shown that the DBV maintains good directional control during braking to a complete stop on slippery runways. It is also shown that the friction patterns, with respect to vehicle speed, vary with the runway conditions such as dry, wet, ice-, snow- and slush-covered runways. This implies that the friction values, measured by a Tapley Meter and an ML-Mu-Meter, should be evaluated with consideration to the fact that the former picks up only the maximum value during the braking and the latter measures the friction value of a constant vehicle speed. The correlation of the DBV, the Tapley Meter, the ML-Mu-Meter and an aircraft is also discussed in this paper.

1. はじめに

航空機の地上走行時の制動距離および方向維持性能は滑走路の路面条件によって大きく左右されるため、降雨、^{*}積雪、凍結、ゴムの付着といった状態における路面のすべりを定量的に把握し、航空機の制動性能を事前に推定することが、航空機の離着陸における安全性を確保するために必須である。しかし、航空機タイヤと滑走路面のすべり摩擦の現象は未だ十分な解明がなされておらず、航空機の運航面で問題があり、ICAO(国際民間航空機構)においても、滑走路面のすべり計測法および航空機の制動性能の評価法が、数年来重要な課題の1つになっている。

わが国においても、この問題に対し、関係分野の協力のもとに努力が重ねられ、空港管理、運航、設計の各分野での改善が進められているが、基本的な問題として、滑走路面のすべり計測法の確立が強く要望されている。¹⁾

現在までにわが国で用いられてきた滑走路面のすべり計測法には、開き角 15° を持って取付けられた2車輪を 60 km/h (16.7 m/s)の一定速度で牽引し車輪に働く横方向のすべり抗力を計測する方法(ML-Mu-Meterによるもの)と、自動車に簡易加速度計を搭載して 20 km/h (5.6 m/s)の速度から制動をかけて生じた最大減速度を計測する方法(Type II Meter, Tapley Meterによるもの)とがある。しかし冬期の雪氷滑走路に対するこれらの計測法について、公表されている資料は少なく、

* 昭和54年4月3日受付

** 機体第一部

* 路面の「よごれ」(contaminants)については「路面状態」という言葉を用い、その他の舗装の種類、実験路の違い、溝切等の条件をも含めていうときは「路面条件」という言葉を用いることにする。

実機との相関関係が明らかになってはいない。後者の計測法では、当初国内の空港で使用されていた Type II Meter が減衰特性に問題があったため、昭和52年度より Tapley Meter に置き換えられた。²⁾

一方、わが国では使用経験がないが、NASA で開発された DBV (Diagonal Braked Vehicle) による計測法がある。これは乗用車のブレーキ系に改造を加え、4 輪のうちの対角線上の 2 輪にのみブレーキが作動するようにして、60mph (26.8m/s) の速度で 2 輪をロックさせてから停止するまでの制動距離 S を計測し、乾燥路面での制動距離 S_D との比 SDR (Stopping Distance Ratio) $= S/S_D$ を路面のすべりの指標とする方法である。SDR は、もし摩擦係数 μ が速度、位置に依存しない一定値と仮定すれば乾燥路面の摩擦係数 μ_D との比の逆数 (μ_D/μ) に一致する。

DBV による計測法は、タイヤの消耗や計測の簡便さの点で他の方法に劣るが、湿潤路面では航空機の SDR と良い相関を示し、また実験例は少ないが、積雪路面においても航空機と良い相関を示す。³⁾ さらに DBV は ICAO Airworthiness Technical Manual の Landing Specification - Method C において、実機性能試験のための wet runway の定義法に、英国の Skidding Trailer と並んで採用されている。

なお、滑走路面の維持管理の面では、雨に対しては英国で始められた溝切 (grooving, 滑走路の横幅方向に細い排水溝を切るもの)⁴⁾ による解決策がわが国でも空港整備 5 ヶ年計画で施行されつつあるが、冬期の積雪や凍結に対しては、除雪するか、尿素で溶かす (約 -7°C が限度) か、砂を撒くしか方法がなく、したがって特に積雪時や凍結時の路面のすべりを的確に把握することが重要である。

このような背景のもとに、主に雪氷滑走路面のすべり計測法の問題点を解明するために DBV を製作し、昭和 52 年 11 月より DBV の性能試験を兼ねた基礎実験を行った。本報告では DBV の製作および基礎実験の結果について述べる。

2. DBV の製作

2.1 車両の選定

DBV は 4 輪のうちの対角線上の 2 輪にのみブレーキが作動してこれをすみやかにロックさせる制動機能を持つ車両である。今回 DBV の製作では、技術的および経済的理由から、市販の国産乗用車を改造することとし、下記の条件を考慮して改造用車両の選定を行った。

1) すみやかに 100 km/h (27.8 m/s) の速度まで加

速しうるために、大馬力で加速性の良いこと。

ロ) 路面摩擦計測用規格タイヤを使用するため、15 インチ・タイヤが装着可能であること。

ハ) 制動時に車輪への駆動力をすみやかに断つため、手動変速機構であること。

ニ) 急制動時に車輪を容易にロックし、かつ、ステアリング操作が容易であるために、パワー・ブレーキおよびパワー・ステアリング機構であること。

ホ) 急制動時に車両の安定性があり、かつ、制動時の頭下げモーメントおよびそれに付随する姿勢変化を最小限に止めるため、車両の重心位置が低いこと。

ヘ) 寒冷地での使用に十分耐え、かつ、データ計測用搭載機器への電源供給を考慮して、バッテリー容量に十分余裕のあること。

ト) 対角制動機構への改造、および 4 輪の回転状態をモニターするための 4 輪回転数検出機構の付加が容易であること。

チ) DBV としての苛酷な使用に耐えるための十分な強度を有すること。

以上の条件を検討した結果、改造用車両にトヨタ社製クラウン 2600 (C-MS101-TKG) を採用した。

2.2 車両の改造

この車両を DBV として使用するために、対角制動機能付加のための油圧配管の改造、ならびに、4 輪制動と対角制動の制動モード切換機構および安全対策のための機構の付加を行った。ただし、制動油圧源および制動機構には改造を加えず、一般道路も走行出来るよう普通乗用車としての機能維持に対して十分配慮した。

制動装置の油圧配管に関しては、前 2 輪と後 2 輪がそれぞれ一対となった既設の 2 系統配管を撤去して、右前輪と左後輪および左前輪と右後輪がそれぞれ一対となった対角 2 系統の油圧配管を設け、対角 2 系統のうち左前輪 - 右後輪の油圧配管系統の途中に油圧カット・バルブを挿入して、スイッチ操作により対角制動モードが得られるように改造した (図 1)。油圧カット・バルブはソレノイドに通電すると磁力によってバルブが閉じて油圧が遮断されるが、ソレノイドへの通電を止めるとスプリングの力により強制的にバルブが開き 4 輪制動モードへ復帰する。また、対角 2 系統油圧配管の後輪側には、前輪と後輪の制動装置への油圧配分を適正化して普通乗用車として用いる時の後輪の早期ロックを防止するためにプロポーション・バルブと、対角 2 系統の油圧作動状況を運転席においてモニターするために油圧検出器を取付けた。

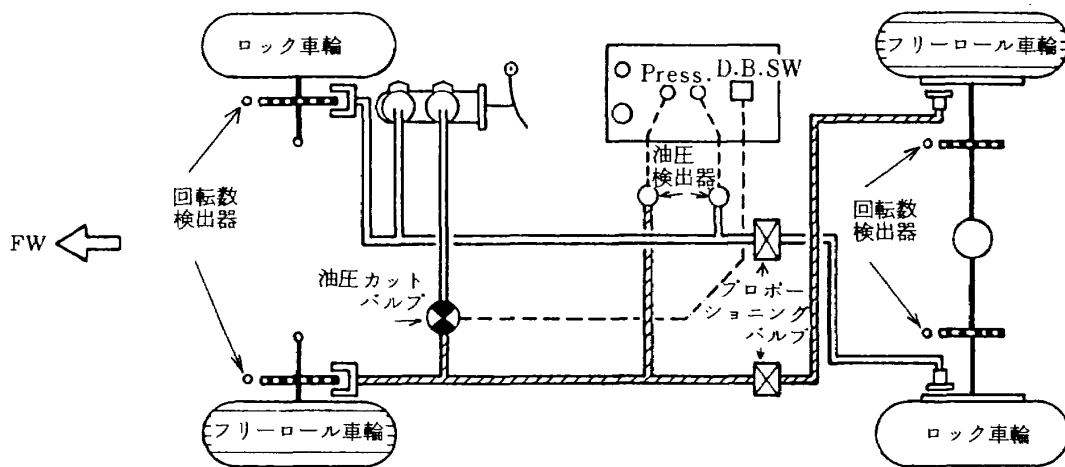


図1 DBVの油圧配管系統

車両をDBVおよび乗用車の両目的に使用するためには、油圧カット・バルブのソレノイドに電流を供給するための電気回路、およびこの電流をON、OFFする制動モード切換スイッチが必要である。この機能に加えて、制動モード表示ランプ、対角2系統制動配管の油圧表示ランプおよび対角制動作動通告ブザー、油圧カット・バルブのソレノイド温度警告ランプ、ならびに主電源スイッチおよび電源表示ランプを1筐体に組込んだDBV操作盤を製作して、ダッシュ・ボード上に取付けた。ただし、DBV制御系の電気回路は既設の電気系とは全く独立したものとし、本装置の付加によって既設の電気回路に対して何ら影響を及ぼさず、また普通乗用車として使用する場合にはDBV操作盤をダッシュ・ボードから取りはずせるように設計した。なお、当該車両は懸架装置や車体に改造を加えることなく15インチ・タイヤの装着が可能であったため、車体に合ったオフセットをもつ15インチ・ホイールを製作して、DBVとして使用する場合のみ15インチの計測用規格タイヤを装備した。

2.3 データ計測装置

使用計測装置および計測項目を表1に、また、計測システム・ブロック図を図2に示した。

速度および距離計測用第5輪は図3に示したように、車両の後部にバンパーをはずして取付けた。第5輪による車速のリモート表示部は、車両に既設の速度計が14インチ・タイヤ用のものであるため、15インチ・タイヤ装着時の走行速度をダッシュ・ボード上に表示（デジタル）するものである。一方、第5輪デジタル表示部には、ブレーキ・ランプ信号と連動して制動開始時の速度が表示され、また、制動距離および制動時間もブレーキ・ランプ信号によって計測を開始し、速度が約0.1m/

sec以下となった時の値が表示される。

4輪各々の回転数は、制動車輪（右前および左後輪）のロック状態、および、他の2輪の回転状態（例えば、雪氷路面でのスリップ）を計測するためのもので、車両改造時に電磁式車輪回転数検出器を、前輪についてはスピンドルとハブの間に、後輪についてはアクスルとハウジングの間にそれぞれ装着した。

前後加速度計は車両の時々刻々の減速度を計測するためのもので、コンソール・ボックスに取付けた。

これらの計測値は、デジタル表示されるものを除いて、カセット式データ・レコーダに記録し、さらに電磁オシログラフにより記録状態をモニターした。計測器の電源はすべて車載のバッテリー（12V, 60AH）を用いた。また、計測用機器は計測用架台に配置して、助手席を取りはずして取り付けた。計測装置の配置およびアナログ・データ計測例をそれぞれ図4および図5に示した。

2.4 計測用タイヤ

ASTM (American Society for Testing and Materials) に舗装路のすべり抵抗試験法が規定されており、米国のDBVは、この試験用に開発された規格タイヤを用いている。タイヤの規格は1973年に改正があり、また1975年に規格が追加されたため、1973年以前に行われたDBV試験では旧規格（E 249）14インチ・タイヤが用いられているが、現在ではこのタイヤは製造されておらず、新規格（E 501, E 524）^{6), 7)} 15インチ・タイヤに統一されている。したがって、このDBVには、新規格の15インチ・タイヤを用い、フリーロール車輪にスムーズ・トレッド・タイヤ（E 501）、ロック車輪にボールド・タイヤ（E 524）を用いた。（図6）

タイヤ圧は、このタイヤの規定値である1.68 kg/cm²

表 1 計測装置および計測項目

計 測 装 置	計 測 項 目	出 力 形 式
第 5 輪計測装置 { 第 5 輪 (小野測器製 SM-171 型) 電磁式第 5 輪回転検出器 (小野測器製 MP-910 型) 第 5 輪計測表示部 (小野測器製 SV-531 型)	車 速	デジタル表示 (運転者用リモート表示部) およびアナログ出力
	制動開始速度	デジタル表示
	制動距離	デジタル表示および 1m/pulse の距離 マーキング
	制動時間	デジタル表示および 1 s/pulse の時間 マーキング
加速度計測装置 { 加速度計 (日本航空電子製 JA-42HT 型) 同上用増幅器および DC-DC コンバータ (豊田中央研究所製)	減速度	アナログ出力
4 輪回転数計測装置 (豊田中央研究所製) { 電磁式回転検出機構 同上用増幅器	右前輪回転数	アナログ出力
	左後輪 "	
	左前輪 "	
	右後輪 "	
カセット式データ・レコーダ (共和電業製 RTP-500A 型)	(6 ch + 音声)	(上記アナログ出力および音声の記録)
記録モニタ用 電磁オシログラフ (共和電業製 RMS-11 TPT 型)	(6 ch)	(ストリップチャートによる データレコーダ記録のモニタ)

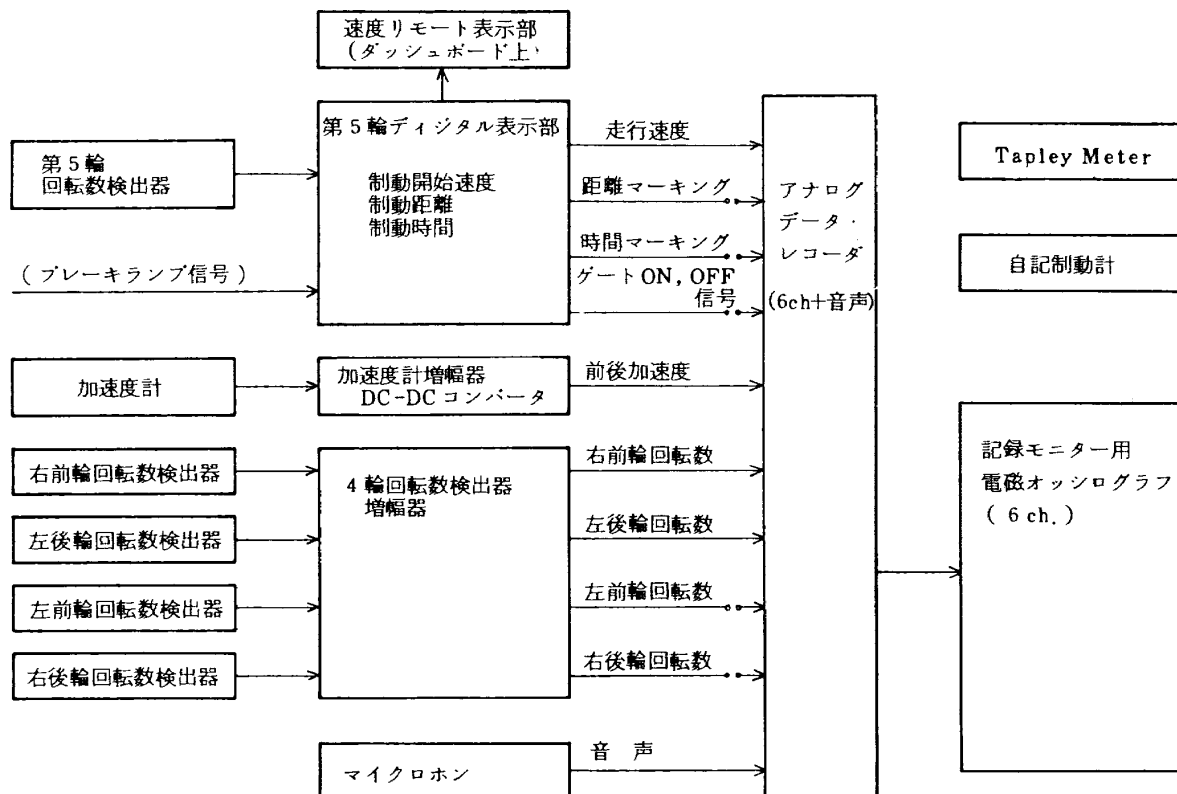


図 2 DBV の計測システム

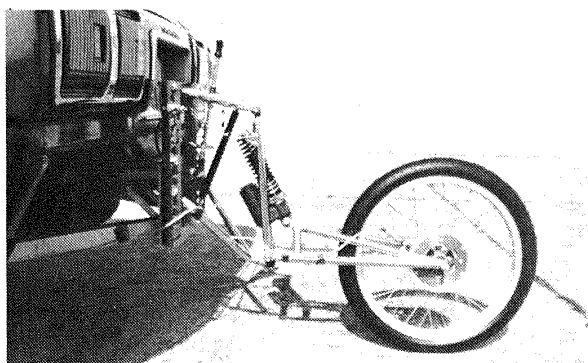


図3 速度および距離計測用第5輪

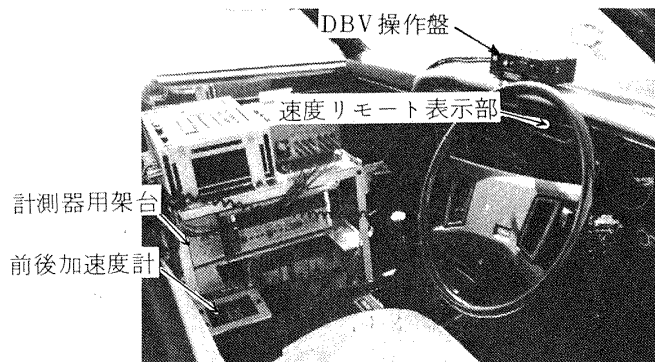


図4 計測装置配置

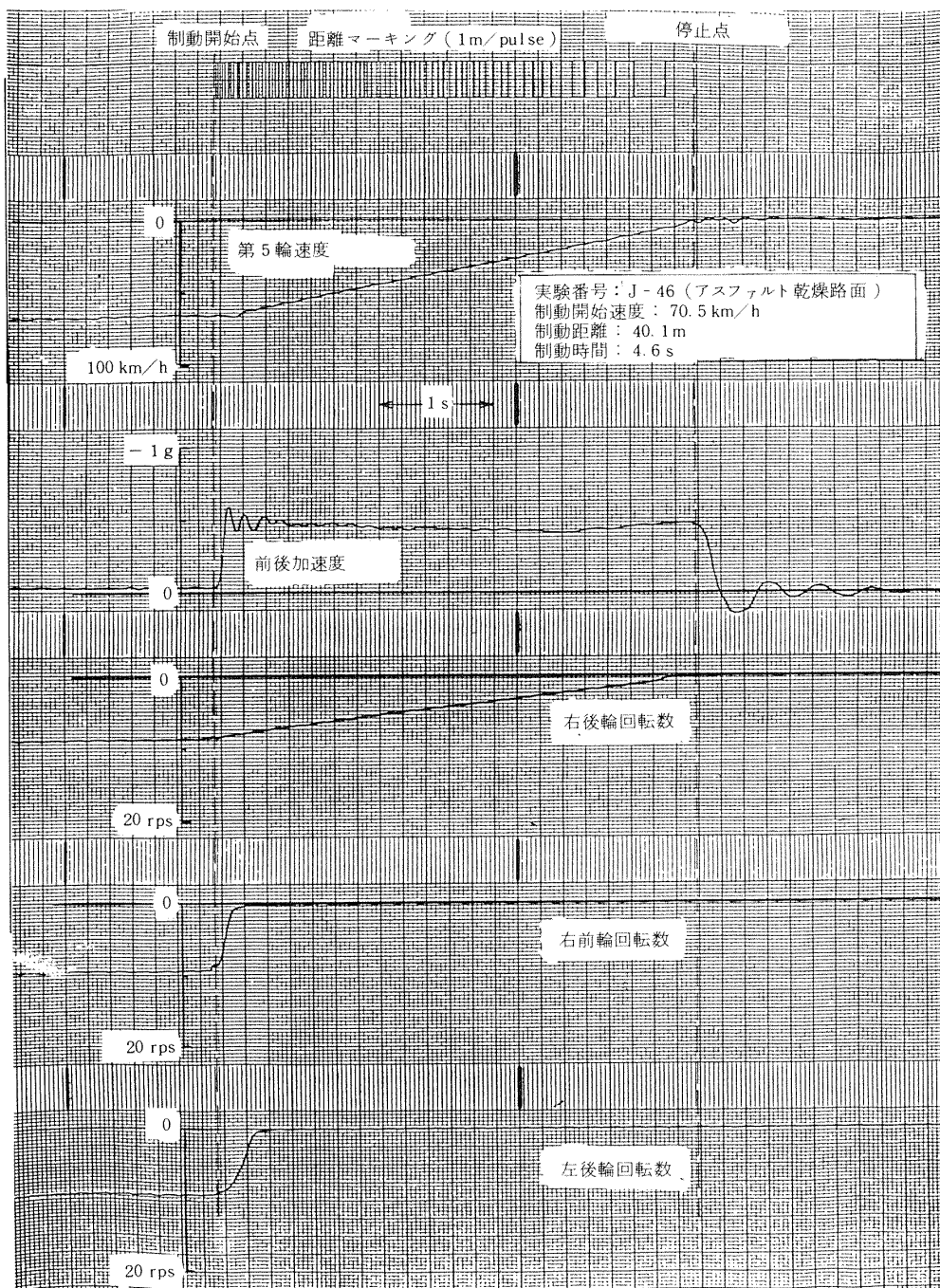
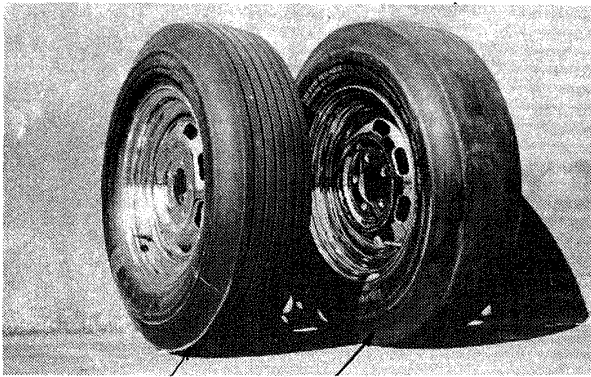


図5 アナログ・データ計測例



ゴード・タイヤ (ASTM E524)
スームズ・トレッド・タイヤ (ASTM E501)

図6 計測用タイヤ

(165 kPa)とした。また、規格ではタイヤにかかる標準負荷は492 kg (4,826 N)となっているが、当該車両は、2名乗車、計測機器装備状態、1/2燃料搭載時で総重量が、1,700 kg (16,670 N)であり、試験タイヤの負荷は右前輪456 kg (4,472 N)、左後輪390 kg (3,825 N)で標準値よりやや軽くなっている。タイヤの負荷に関しては、1968年の実験⁸⁾での363 kg (3,560 N)の負荷をもつ単車輪トレーラ (Pennsylvania State University trailer) との比較や、1973年の2台のDBV (NASAのフォードXLセダン、総重量2,214 kg (21,710 N)とUSAFのブリムス・サテライトステーション・ワゴン、総重量2,504 kg (24,560 N)) を使った重量修正を含む実験⁹⁾の結果によると計測結果に与える影響が少なことから、砂袋搭載などによる負荷の修正は行わなかった。

2.5 走行性能

DBVの加速性能は、乾燥路面および湿潤路面(水深約0.02 mm以下)のいずれにおいても大差なく、時速100 kmまでの加速距離は約300 mであった。ただし、これは無風時の性能であり、例えば新潟空港において降雨時、約20 m/secの強い向い風のもとでは70 km/h (19.4 m/s)までの加速に約400 mの距離を要した。

一方、雪氷路面においては、加速時に駆動輪のスリップにより車体にスピンが生じ、後輪駆動方式であるために、このような外乱に対して急加速時の方向維持機能が著しく損なわれる。このため雪氷路面では駆動輪にスリップを起さぬよう急激な加速を避けた。

対角制動機能に関しては、乾燥路面のような高μ路において左後輪がロックしにくかった。これは2.2節に述べたように、制動油圧配管に後輪の早期ロック防止用プロポーション・バルブを用いたためで、DBVに普通乗用車としての機能を加える場合の1つの問題点であ

る。DBVの車輪ロックが遅れたり、あるいは車輪がロックしていないと、摩擦係数および制動距離に影響をおよぼすため、後輪のロックに遅れを生じないように極力大きな力で急制動をかけるよう留意した。

対角制動時のステアリング機能は、左前、右後の2輪が常に回転状態にあるため、乾燥、湿潤、雪氷のいずれの路面状態においても十分満足し得るものであった。また制動中の走行安定性に関しては、制動時に上からみて時計廻り方向のスピン・モーメントを生じた。これは制動開始時に左後輪のロックが遅れること、および、制動中の摩擦力により車体に頭下げモーメントが働いて、右前車輪の摩擦力が一層増加するためと考えられる。しかし、このようなスピン・モーメントは路面とタイヤの摩擦力に比例するため、すべり易い路面ほど制動時のスピン・モーメントが小さくて安定であった。乾燥路面ではこのスピン・モーメントがかなり大きい、常に同じ特性を示すため、ステアリング操作によって十分修正可能であった。

乾燥路面におけるロック車輪のタイヤの摩耗は、制動開始速度が80 km/h (22 m/s)を越えると急激に増大し、100 km/hでは大きな摩擦音と相当量の煙が観察された。また、右前輪と左後輪ではタイヤの摩耗が大きく異なり、乾燥路面において100 km/hからの制動では右前輪タイヤが約5 mm 摩耗するのに対して、左後輪タイヤは表面が溶けた様子は観察されるものの、右前輪タイヤに比較して摩耗度ははるかに少なかった。

3. 実験

3.1 実験日程

DBVの加速性能、走行安定性などを把握し、かつ、各種路面条件でのすべり特性に関する基礎資料を得るために行った昭和53年3月までの実験を表2に示した。

実験Jは、日本自動車研究所で行ったものである。そのうち、第1回(11月7, 8日)は旋回試験場および総合試験路において、安全最高制動初速を定め、かつ、走行安定性および計測器類の作動状態を確認することを目的として、乾燥状態と散水車を用いてつくった人工湿潤状態のアスファルト路面について計31回の走行を行った。第2回(11月25日)は総合試験路において、4輪制動試験、空力および車輪のころがり抵抗の測定、加速性能試験を含め、第1回と同様にアスファルト路面の乾燥状態および散水車を用いてつくった人工湿潤状態について計24回の計測走行を行った。

実験Nは、開港前の新東京国際空港で行った。この実験ではアスファルト舗装をしたA滑走路、コンクリート

表2 実験日程

実験 シリーズ名	年 月 日	場 所	路 面*	路面状態	比較計測器
J	昭和52年11月8, 25日	日本自動車研究所	総合試験路	乾燥および湿潤 (散水車)	
N	昭和52年12月5, 6日	新東京国際空港	A滑走路 エブロン 25mmおよび 100mmピッチ の溝切路面	乾燥および湿潤 (散水車)	Tapley Meter ML-Mu-Meter
CP	昭和53年1月21日	新潟空港	A滑走路	湿潤(自然降雨)	Tapley Meter
C	昭和53年1月22日	"	A, B滑走路	凍結	自記制動計
CA	昭和53年1月29日	"	A, B滑走路	積雪	ML-Mu-Meter
D	昭和53年3月14日	調布空港	滑走路	乾燥	

* エブロンおよび溝切路面のみコンクリート舗装、
その他はアスファルト舗装

舗装のエブロン、および日航第1ハンガー前のエブロン上にある幅7m、長さ100mの、100mmピッチと25mmピッチの2種類の溝切路面（コンクリート舗装、図7）の合計4種類の路面について、乾燥状態と散水車による人工湿潤状態で計44回の実験走行を行った。また実験Nでは自記制動計とTapley MeterをDBVに搭載するとともに新東京国際空港公団のML-Mu-Meterによる計測も同時に行った。

新潟空港では、CP, C, CAの3回の実験を行った。実験CP(1月21日)は降雨による自然湿潤状態のA滑走路で9回の実験走行を行った。

実験C(1月22日)で早朝に行った9回の走行時の路面は、前夜の霰様の雨が路面上に凍結した状態で、図8に見られるように塊状の氷が表面を覆っていた。この日は実機(YS-11)¹⁰⁾を使った試験も同時に行われた。実機は午前9時から10時40分までに、1回の加速停止試験を含めて計6回の着陸制動試験をB滑走路で行った(図9)。実験中、時間の経過に伴って大きな路面状態の変化があった(後述)。DBVの実験走行は、A, B両滑走路において計21回行った。

実験CA(1月29日)は、図10に示したように、新雪が表面を薄く覆っている路面状態で計11回の走行をB滑走路で行ったが、実験Cでのような時間による状態の変化はなかった。CP, C, CAの実験では、いずれも新潟空港所属のML-Mu-Meterによる計測も同時に行った。また実験CAでは通常のオペレーションで行っている航務車両によるTapley Meterでの計測も行った。

実験D(3月14日)は調布空港において、乾燥路面状態で主に空力および車輪のころがり抵抗の計測を目的

として計14回の試験を行った。

なお、DBVの制動開始速度は100km/h(約60mph)とし、さらに比較のために70km/hおよび40km/h(11.1m/s)からの制動試験も行った。

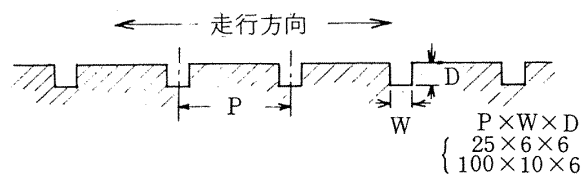


図7 溝切路面(写真は25mmピッチのもの、日本航空提供)

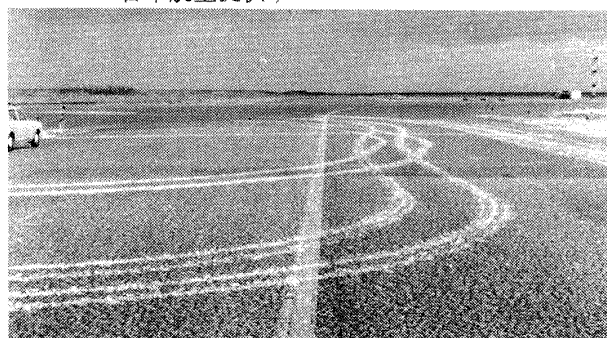


図8 実験Cでの凍結路面
(昭和53年1月22日、新潟空港)



図9 実験機

図10 実験CAでの積雪路面
(昭和53年1月29日, 新潟空港)

3.2 実験結果

表3に実験結果の要約を示した。表中, 第7列および第8列は, 制動車輪のロック状態の目安として, 右前輪および左後輪の, (1)式によるすべり率がそれぞれ80%となった時の速度を示した。

$$\text{すべり率} = \frac{\text{地面とタイヤ接面の相対速度}}{\text{車速}} \quad \dots(1)$$

また, 第3列に示した路面状態は実験時に目視により観察した結果であるが, すべり摩擦係数の履歴による推定結果がこれと異なる場合は備考欄に()で路面状態を記入した。

アナログ記録をA/D変換して電算機により処理(図11)した結果の代表的な出力例を図12に示した。同図において, 最上段は右前輪(実線)および左後輪(破線)のすべり率, 第2段は前後加速度計によるDBVの減速度, 第3段は走行速度(実線)および制動距離(破線)で, 制動距離は停止位置を起点とした。縦の破線は距離マーキング・パルスで判定した制動開始位置を示し, 横軸はその制動開始点を起点とした経過時間を示す。

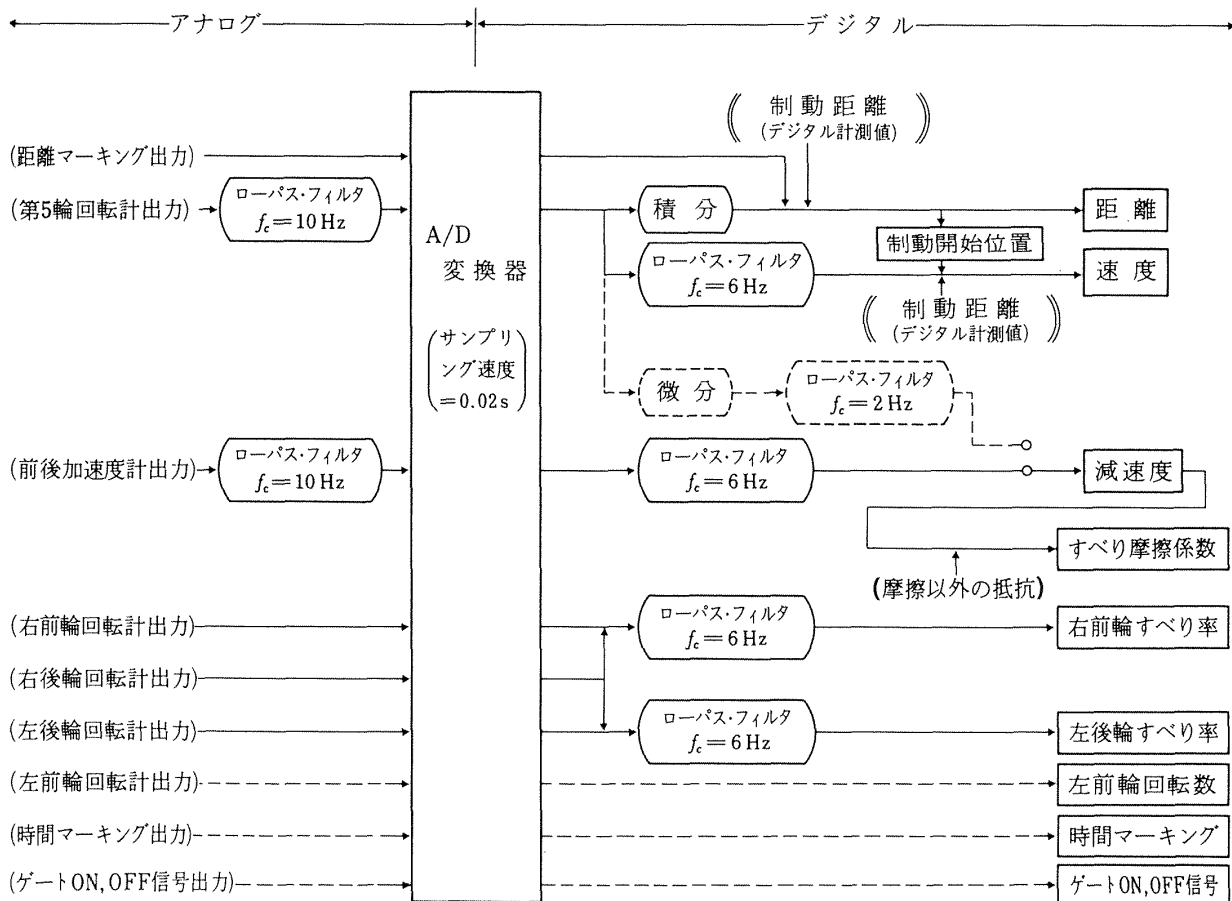


図11 電子計算機によるアナログ・記録データの処理

表 3 実験結果一覧

実験番号	試験の種類 (注1)	路面状態	路面	制動距離 (m) (注3)	制動開始速度 (km/h) (注3)	すべり率が80%に到達した時の速度(km/h)		DBVの最大減速度(a) Tapley Meter (注6)	μ_1 (注7)	すべり摩擦係数		備考
						右前輪 (注4)	左後輪 (注5)			制動開始時の最大値	停止直前の最大値	
J-1	DBV	乾燥	0.1	29.4	60.1				.97			
J-2	"	"	"	40.4	70.4				.97			
J-3	"	"	"	51.6	79.1				.95			
J-4	"	"	"	51.0	79.0				.96			
J-5	"	"	"	61.8	84.8				.92			
J-6	"	"	0	58.5	85.2				.98			
J-7	"	"	"	67.1	90.1				.95			
J-8	"	"	"	77.4	95.3				.92	1.05	1.00	
J-9	"	"	"	85.5	100.9	95.7	90.0*	.56	.94			
J-10	"	"	"	27.9	60.5				1.03			
J-11	"	"	"	40.7	69.7				.94	1.01	1.01	
J-12	"	"	"	54.4	80.2	69.1	6.5*	.52	.93			
J-13	"	"	"	61.1	84.7				.92			
J-14	"	"	"	74.5	90.5				.87			
J-15	"	"	"	75.0	94.9	87.6	76.5*	.54	.95	1.03	.98	
J-16	"	"	"	39.4	60.5	6.6	6.6*	.42	.73	.80		
J-17	"	"	"	29.8	61.0	6.0	6.0*	.59	.98	1.15		
J-18	"	"	"	30.2	60.5				.95			
J-19	"	"	"	26.8	58.4				1.00			
J-20	"	"	"	39.4	68.1	6.7	6.3*	.61	.93		1.19	
J-21	"	"	"	40.8	72.0	64.8	31.8*	.56	1.00	1.08	1.00	最後の部分で制動が磨んだ。トランスミッションがニュートラルでない。
J-22	"	"	"	50.0	78.2	68.3	6.5*	.54	.96	.99	1.06	
J-23	"	"	"	58.9	83.4	78.3	53.2*	.51	.93	.97	.99	
J-24	"	"	"	67.5	89.9	82.2	6.5*	.53	.94	1.01	.98	
J-25	"	湿潤	"	47.9	59.7	57.6	54.8*	.48	.59	.64	.94	
J-26	"	"	"	207.8	95.5	95.2	93.6*	.52	.35	.31	1.02	後半乾燥路面に進入して停止した。
J-27	"	"	"	184.6	95.0	95.2	92.6*	.49	.38	.41	.95	
J-28	"	"	"	76.0	70.5	67.8	63.1*	.53	.51	.78	1.04	
J-29	"	"	"	141.4	90.4	88.2	80.9*	.52	.46	.65	1.02	2.04
J-30	"	"	"	91.0	71.5	71.0	67.0*	.49	.44	.43	.95	
J-31	"	"	"	87.8	70.3	69.1	67.6*	.51	.44	.41	.99	

表 3 (続き)

実験番号	試験の 種 類 (注 1)	路面状態	路 面 (注 2)	制動距離 (m) (注 3)	制動開始 速 (km/h) (注 3)	すべり率が 80 % 以下到達 した時の速度 (km/h)		DBV の最大減速度 (g)		μ_1 (注 7)	すべり摩擦係数		SDR	備 考
						右前輪 (注 4)	左後輪 (注 5)	Tapley Meter	前後加 速度計 (注 6)		制動開始 時の最大 値	停止直前 の最大値		
J-32	DRG	乾燥	0											
J-33	"	"	"											
J-34	4BV	"	"	7.4	42.4	4.7	34.9*		1.12	.96		1.12		
J-35	"	"	"	17.2	63.1	43.4	55.6*		1.08	.91	1.07	.96		
J-36	"	"	"	6.6	40.6	21.2	34.6*		1.05	.98	1.04	.97		
J-37	"	"	"	15.0	60.0	46.3	54.9*		1.10	.94	1.09	.95		
J-38	"	湿潤	"	9.4	40.7	39.8	37.6*		.86	.69	.66	.86		
J-39	"	"	"	27.7	59.9	59.5	56.7*		.85	.51	.48	.85		
J-40	"	"	"	10.7	42.6	39.5	37.6*		.87	.67	.69	.87		
J-41	"	"	"	30.8	61.5	59.7	57.3*		.88	.48	.47	.88		
J-42	DBV	乾燥	"	13.7	41.1	39.4	31.2		.53	.97	1.02	1.04		トランス・ミッションがニュートラルでない。
J-43	"	"	"	39.3	69.2	65.8	60.8		.53	.96	1.02	1.00		アナログ・データの最初の 0.02 秒が欠如している。
J-44	"	"	"	97.1	99.9	96.1	89.9		.54	.81	1.02	.94		後半湿潤路面に進入して停止した。中間部分で制動が緩んだ。
J-45	"	"	"	13.3	40.9	39.6	36.2		.52	.99	1.00	1.02		
J-46	"	"	"	40.1	70.5	69.8	66.0		.53	.98	1.01	1.01		
J-47	"	湿潤	"	18.4	40.0	39.7	38.2		.50	.68	.62	.97		
J-48	"	"	"	84.8	69.7	69.8	69.5		.48	.45	.34	.93		
J-49	"	"	"	260.9	100.4	100.4	99.3		.46	.30	.29	.89	3.05	トランス・ミッションがニュートラルでない。
J-50	"	"	"	15.0	38.1	37.1	30.6		.52	.76	.75	1.01		
J-51	"	"	"	83.9	70.2	69.8	66.7		.48	.46	.47	.93		
J-52	"	"	"	154.6	86.3	86.2	83.5		.46	.38	.42	.90	2.45	
J-53	DRG	"	"											
J-54	"	乾燥	"											
J-55	DBV	"	"	85.5	102.7	97.9	86.1		.57	.97	1.05	1.12		トランス・ミッションがニュートラルでない。
N-1	DBV	湿潤	G 1	15.1	39.4	37.0	30.4		.51	.81	.85	1.00		
N-2	"	"	"	15.6	39.6	37.0	30.3	.50	.51	.79	.84	.99		
N-3	"	"	"	63.3	70.7	67.9	62.0	.46	.47	.62	.81	.92	1.54	
N-4	"	"	"	70.5	68.4	67.8	65.0	.49	.49	.52	.47	.95		溝切路面の手前から制動を開始した。
N-5	"	"	G 2	15.0	40.6	33.6	20.7	.52	.53	.87	.91	1.04		
N-6	"	"	"	15.1	40.0	36.5	30.6	.50	.51	.83	.91	.99		
N-7	"	"	"	51.0	67.9	64.3	58.4	.48	.49	.71	.91	.96	1.34	

表3 (続き)

実験番号	試験の種類 (注1)	路面状態	路面	制動距離 (m) (注3)	制動開始 速度 (km/h) (注3)	すべり率が80%に到達 した時の速度(km/h)		DBVの最大減速度(a)		μ_1 (注7)	すべり摩擦係数		SDR	備考
						右前輪 (注4)	左後輪 (注5)	Tapley Meter	前後加 速度計 (注6)		制動開始 時の最大 値	停止直前 の最大値		
N-8	DBV	湿潤	G2	56.7	69.5	68.5	65.4	.47	.48	.67	.83	.94	1.42	
N-9	"	"	16	20.7	43.4	43.2	42.3	.55	.56	.72	.56	1.10		
N-10	"	"	"	18.8	41.6	40.6	39.1	.55	.56	.72	.60	1.09		
N-11	DRL	"	"		41.8	39.1	37.3		.53		.68	1.04		
N-12	DBV	"	"	87.4	70.0	70.0	68.4	.55	.56	.44	.37	1.10		
N-13	"	"	"	74.3	70.9	70.7	68.4	.55	.57	.53	.42	1.11		
N-14	DRL	"	"		40.4	38.7	34.6	.50	.50		.67	.98		
N-15	DBV	"	"	326.9	98.1	97.8	96.2	.52	.54	.23	.09	1.05	4.00	
N-16	"	"	"	222.7	101.8	102.7*	101.6	.54	.55	.37	.39	1.08	2.53	前半トランス・ミッドジョンがニュートラルでない。
N-17	"	"	CR	14.8	36.2	33.8	31.3	.50	.52	.70	.74	1.01		
N-18	"	"	"	20.6	40.5	40.1	38.1	.52	.53	.63	.63	1.04		
N-19	"	"	"	101.5	68.3	67.9	65.9	.48	.50	.36	.48	.97		
N-20	"	"	"	92.5	70.2	69.7	67.8	.50	.51	.42	.45	.99		
N-21	"	"	"	289.0	100.1	99.3	96.7	.49	.49	.27	.51	.96	3.40	散水車の後部ノズルから散水した。
N-22	"	"	"	238.1	99.4	99.9	98.5	.50	.50	.33	.34	.98	2.84	散水車の後部ノズルから散水した。
N-23	"	乾燥	G1	17.7	46.5	40.6	34.4	.52	.56	.96	1.08	1.00		
N-24	"	"	"	12.9	39.9	38.7	32.1	.51	.52	.97	1.01	1.02		
N-25	"	"	"	49.8	76.0	64.9	62.9	.58	.57	.91	1.09	1.00		
N-26	"	"	"	49.3	75.7	67.1	62.2	.53	.53	.92	1.02	.96		アナログ・データの最初の0.16秒が欠如している。溝切路面の手前から制動を開始した。
N-27	"	"	G2	12.9	40.4	35.6	23.5	.53	.54	1.00	1.04	1.06		
N-28	"	"	"	12.3	40.5	36.8	31.2	.53	.56	1.05	1.09	1.06		
N-29	"	"	"	39.1	69.8	66.1	65.1	.52	.56	.98	1.07	1.03		
N-30	"	"	"	38.8	69.5	66.1	61.3	.50	.54	.98	1.03	1.02		
N-31	"	"	16	13.8	40.9	38.6	35.3	.55	.55	.95	.99	1.07		
N-32	"	"	"	12.6	39.7	38.5	35.3	.52	.53	.98	1.00	1.04		
N-33	DRL	"	"		39.1	37.4	34.0	.47	.49		.95	.89		制動が十分に解除されていない。
N-34	DBV	"	"	41.4	70.5	69.7	66.6	.51	.53	.95	1.02	1.00		
N-35	"	"	"	41.8*	69.9*	67.6	64.6	.53	.54	.92	1.02	1.05		
N-36	DRL	"	"		40.8	7.4	7.4	.47	.47		.92	.92		
N-37	DBV	"	"	81.3	98.6	95.8	92.8	.59	.58	.94	1.11	1.01		
N-38	"	"	"	84.4	99.4	97.5	95.6	.52	.56	.92	1.07	.98		

表 3 (続き)

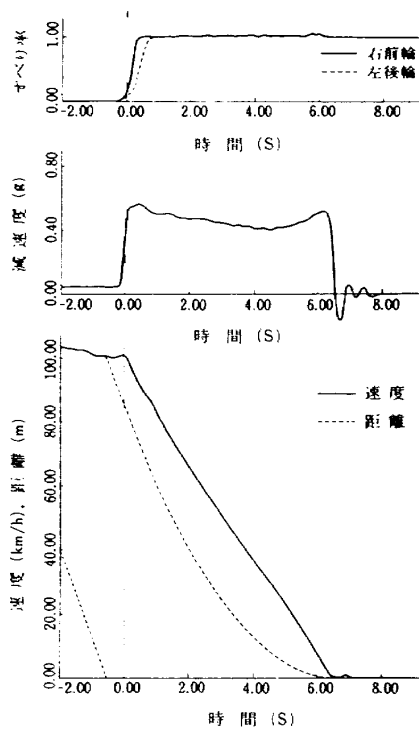
実験番号	試験の 種 類 (注 1)	路面状態	路 面 (注 2)	制動距離 (m) (注 3)	制動開始 速 度 (km/h) (注 3)	すべり率が 80 % に到達 した時の速度 (km/h)		DBV の最大減速度 (g)		μ_1 (注 7)	すべり摩擦係数		SDR	備 考
						右前輪 (注 4)	左後輪 (注 5)	Tapley Meter	前後加 速度計 (注 6)		制動開始 時の最大 値	停止直前 の最大値		
N-39	DBV	乾燥	C R	12.8	40.8	39.3	33.6	.52	.53	1.02	1.03	1.04		
N-40	"	"	"	13.7	40.9	37.1	28.3	.54	.55	.96	1.06	1.08		
N-41	"	"	"	36.2*	66.8*	62.5	46.7	.53	.55	.97	1.06	1.01		
N-42	"	"	"	39.6	69.7	67.7	65.0	.50	.54	.97	1.04	1.02		
N-43	"	"	"	91.6	100.5	98.7	95.5	.47	.51	.87	.95	.91		
N-44	"	"	"	94.0	99.9	95.9	88.1	.50	.50	.84	.91	.98		
CP-1	DRG	湿潤	2 2											
CP-2	"	"	"											
CP-3	DBV	"	"	12.7	39.3	35.2	33.6	.57	.58	.96	.95	1.12		
CP-4	"	"	"	48.5	69.9	69.1	61.4	.56	.57	.79	.79	1.10		
CP-5	"	"	"	113.3	87.8	86.9	6.8	.46	.49	.54	.60	.94		前半トランス・ミッションがエンブローラルでない。
CP-6	"	"	"	15.1	39.6	39.7	36.6	.55	.57	.82	.74	1.09		ベイント・マーキング上で制動を開始した。
CP-7	"	"	"	44.8	69.3	67.2	57.4	.58	.60	.84	.84	1.15		
CP-8	"	"	"	151.4	96.0	95.6	90.6	.55	.56	.48	.49	1.09	1.93	
CP-9	"	"	"	124.6	95.9	92.7	86.4	.57	.60	.58	.83	1.16	1.60	
C-1	DBV	凍結	2 8											
C-2	"	"	"	48.1	40.1	40.4	40.5	.15	.17	.26	.27			
C-3	"	"	"	129.4	67.8	68.6	68.1	.18	.19	.28	.28			
C-4	"	"	"	244.5	99.2	99.2	98.1	.18	.21	.32	.28		2.93	
C-5	"	"	"	123.4	69.3	69.3	68.6	.17	.19	.31	.27			
C-6	"	"	2 2	114.1	70.0	69.6	68.9	.18	.21	.34	.34			
C-7	DRG	"	"											
C-8	4RL	"	"		20.7*	20.5	20.2*	.32	.36		.36			制動が十分に解除されていない。
C-9	"	"	"											
C-10	DBV	"	2 8	223.5	95.6	95.8	95.3	.38	.41	.32	.14	.76	2.88	(スラッシュ)
C-11	"	"	"	118.3	85.0	84.2	82.5	.51	.49D	.48	.41	.93	1.93	(スラッシュへ遷移)
C-12	"	湿潤	"	117.0	98.7	96.5	91.2	.50	.47D	.66	.65	.87	1.41	(スラッシュへ遷移)
C-13	DRG	"	"											
C-14	DBV	ダンブ	1 0	115.7	101.1	99.8	8.4	.45	.46D	.70	.86	.82		
C-15	DRG	"	"											
C-16	DBV	湿潤	2 2	71.5	72.4	72.4	68.0	.55	.55D	.58	.48	1.05		最後に制動が緩んだ。
C-17	"	スラッシュ	"	28.5	41.2	41.3	41.3	.27	.27D	.47	.42	.49		(凍結へスラッシュ)

表3 (続き)

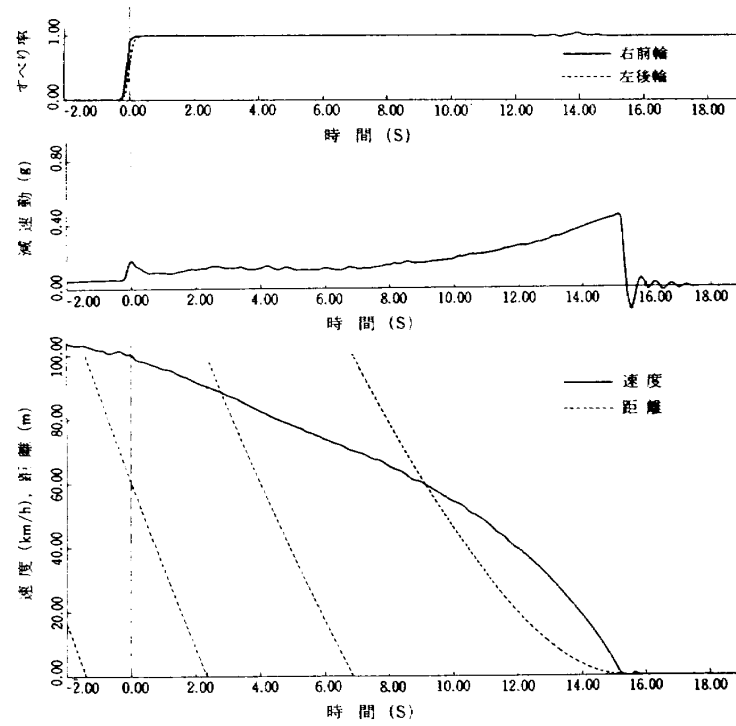
実験番号	試験の種類 (注1)	路面状態	路面 (注2)	制動距離 (m) (注3)	制動開始 速度 (km/h) (注3)	すべり率が80%に到達 した時の速度(km/h)		DBVの最大減速度(a)		μ_1 (注7)	すべり摩擦係数		SDR	備 考
						右前輪 (注4)	左後輪 (注5)	Tapley Meter	前後加 速度計 (注6)		制動開始 時の最大 値	停止直前 の最大値		
C-18	DBV	スラッシュ	2 2	126.9	70.4	70.5	69.9	.19	.21D	.31	.34			(凍結)
C-19	"	"	"	61.1	70.7	70.6	50.0	.47	.45D	.64	.72	.85		最後に制動が緩んだ。
C-20	DRG	"	"											
C-21	"	"	"											
CA-1	DRG	積雪	2 8											
CA-2	"	"	"											
CA-3	"	"	1 0											
CA-4	"	"	"											
CA-5	DBV	"	2 8	30.9	40.6	40.9	40.1		.31	.42	.58			路面露出があった。
CA-6	"	"	"	137.1	69.8	70.1	69.8		.17	.28	.29			
CA-7	"	"	1 0	175.1	98.6	98.2	97.6		.30	.44	.47		2.12	路面露出があった。
CA-8	"	"	"	46.9	40.5	40.5	40.3		.17	.28	.29			
CA-9	"	"	"	140.8	70.3	70.2	69.7		.18	.28	.30			
CA-10	"	"	2 8	262.7	99.1	99.3	98.6		.19	.29	.32		3.15	
CA-11	DRG	"	1 0											
D-3	DRG	乾燥	1 7											1人乗車
D-4	"	"	3 5											"
D-5	"	"	1 7											2人乗車
D-6	"	"	3 5											"
D-7	"	"	1 7											3人乗車
D-8	"	"	3 5											"
D-9	"	"	1 7											4人乗車
D-10	"	"	3 5											"
D-11	DBV	"	1 7	11.8	40.4	36.7*	6.8		.55	1.09	1.04	1.08		
D-12	"	"	"	38.5	69.8	65.0*	4.5		.52	1.00	1.02	1.03		
D-13	"	"	"	88.6	100.6	94.9*	4.5		.53	.90	1.01	.88		
D-14	DBV	"	3 5	9.5	39.5	6.9*	22.0		.66	1.29	1.30	1.24		
D-15	"	"	"	40.7	70.8	64.4*	49.5		.54	.97	1.03	.95		
D-16	"	"	"	75.6*	97.4*	94.3*	82.1		.60	.99	1.11	.95		

表 3 (続き)

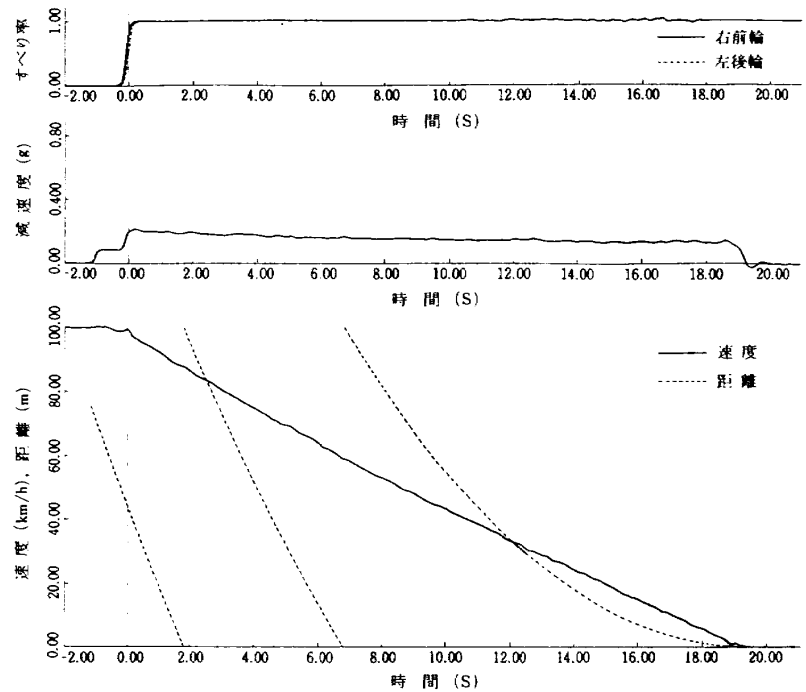
(注 1)	DBV : 対角制動試験 DRL : 対角制動試験 (約 10 km/h 以後制動解除) 4BV : 4 輪制動試験 4RL : 4 輪制動試験 (約 10 km/h 以後制動解除) DRG : 自由走行試験	(注 3)	制動距離および制動開始速度にはデジタル計測値を用いたが, 第 5 輪アナログ速度から求めた場合は * 印を付した。
(注 2)	01 : 日本自動車研究所施回試験場 0 : " " 総合試験路 G1 : 新東京国際空港 100mm ビッチ溝切路面 G2 : " " 25mm ビッチ溝切路面 CR : " " コンクリート路面 16 : " " A 滑走路 22 : 新潟空港 A 滑走路 10/28 : 新潟空港 B 滑走路 17/35 : 調布空港滑走路	(注 4)	速度は, 制動開始速度およびすべり率の計算における車速 (1) 式の分母) を除いて, 第 5 輪アナログ速度を用いたが, 右後輪回転数を用いた場合は * 印を付した。
		(注 5)	すべり率の計算における車速には右後輪回転数を用いたが, 第 5 輪アナログ速度を用いた場合は * 印を付した。
		(注 6)	D 印のあるものは減速度およびすべり摩擦係数を速度微分から求めた。
		(注 7)	制動距離 (第 5 列) および制動開始速度 (第 6 列) を用いて (10) 式から求めた値 (4.1 章参照)



a) 乾燥路面



b) 濡潤路面



c) 凍結路面

図 12 電子計算機による処理結果の出力例

4. DBV 計測法に関する基礎的考察

4.1 制動開始速度と制動距離

滑走路面のすべりを定量的に表わす一つの方法として、摩擦係数 μ が用いられ、現在国内の空港で使用されている ML-Mu-Meter や Tapley Meter は路面とタイヤの間の μ を計測表示するものである。これに対して DBV は時速 100 km からの制動距離比をすべりの指標とする方法であって、直接 μ の値を与えるものではない。しかし、当然のことながら、SDR あるいは S は μ と密接な関係にあり、これらの物理的意味および対応関係を十分把握しておくことは、DBV の計測値からその時の路面状態に対して適切な判断を下すためにも、また、DBV と他の計測器による計測値を比較するためにも重要である。

いま DBV が平坦路を直線走行し、時刻 $t = 0$ において速度 $V = V_0$ で制動を開始して T 秒後に制動距離 S で停止する場合を考える。問題の簡単化のため、DBV に働く前後方向の外力はロックした 2 輪のタイヤと路面の間の摩擦係数 $\mu(t)$ のみとすると、任意の時刻 t における DBV の減速度 $a(t)$ は次式で表わされる。

$$a(t) = \frac{F(t)}{W/g} = \frac{g}{2} \mu(t) \quad (2)$$

ここで、 W は車重で g は重力加速度である。すなわち、重力単位で表わした DBV の減速度は、路面と DBV のロック・タイヤとの摩擦係数 $\mu(t)$ の約 $1/2$ に等しく、前節で述べた加速度計の出力は、DBV に働く摩擦係数以外の影響を無視すると、 μ の時間変化を示していると考えられる。

(2) 式を用いると、制動中の時刻 t における速度 $V(t)$ および制動開始位置からの走行距離 $S(t)$ はそれぞれ (3) および (4) 式で表わされる。

$$V(t) = V_0 - \int_0^t \frac{g}{2} \mu(\tau) d\tau, \quad (3)$$

$$S(t) = V_0 t - \int_0^t \int_0^\tau \frac{1}{2} g \mu(\tau') d\tau' d\tau, \quad (4)$$

さらに、DBV は制動開始から T 秒後に停止して $V(T) = 0$ 、 $S(T) = S$ となることから、 V_0 および S はそれぞれ (5) および (6) 式で与えられる。

$$V_0 = \int_0^T \frac{g}{2} \mu(t) dt \quad (5)$$

$$S = V_0 T - \int_0^T \int_0^t \frac{g}{2} \mu(\tau) d\tau dt \quad (6)$$

いま μ が制動開始から停止まで一定である場合を考え

ると、

$$\mu(t) = \bar{\mu}, \quad (0 \leq t \leq T) \quad (7)$$

となり、(5)、(6) および (7) 式から (8) および (9) 式が得られる。

$$S = \frac{1}{g\bar{\mu}} V_0^2, \quad (8)$$

$$SDR = \frac{S}{S_D} = \frac{\bar{\mu}_D}{\bar{\mu}}, \quad (9)$$

すなわち、制動中の摩擦係数が一定であれば、制動距離は制動開始速度の 2 乗に比例し、制動距離比は $\bar{\mu}$ の比の逆数に等しく、制動開始速度には全く無関係である。

DBV は元来摩擦係数を計測する方法ではなく、また、実際の路面の摩擦係数は一般に一定ではないが、解析の便宜上、DBV で計測された S および V_0 が地面とロックしたタイヤとの間の一定のすべり摩擦係数のみによって生じたと仮定した場合の摩擦係数 μ_1 を定義する。すなわち、

$$\mu_1 = \frac{V_0^2}{gS}, \quad (10)$$

また (2) 式から

$$V_0^2 = g \int_0^S \mu ds, \quad (11)$$

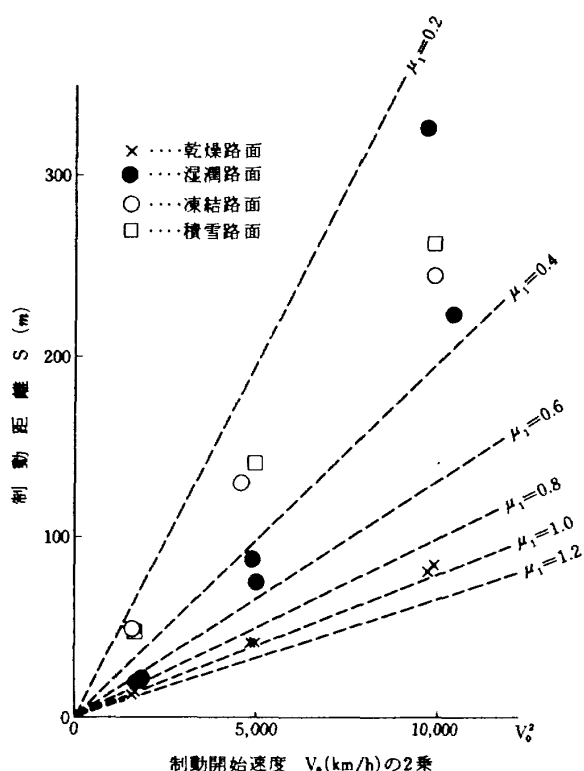
したがって、(10) 式で定義した μ_1 は (11) 式の関係を用いると (12) 式のように表わすことができる。

$$\mu_1 = \frac{V_0^2}{gS} = \frac{1}{S} \int_0^S \mu ds, \quad (12)$$

すなわち、 μ_1 は摩擦係数 μ を走行位置 s の関数として表わした場合の S に関する平均値である。ただし、DBV では計測中に速度が変化するため、もし μ に速度依在性のような位置による変動以外の要素が含まれている場合には、その影響が (12) 式の平均化の中に含まれて、ML-Mu-Meter のように一定速度で計測した摩擦係数と単純に比較することはできない。

図 13 は (10) 式に含まれる S 、 V_0 および μ_1 の関係を代表的な路面状態での実験結果について記したもので、 μ_1 は実験点と原点を結ぶ直線の勾配の逆数に比例する。同図から、乾燥、凍結および積雪路面では S と V_0^2 の比例関係が広範な速度範囲にわたって比較的良く保たれているが、湿潤路面では V_0 の増加とともに S が急激に増加して μ_1 の V_0 への依在性が認められる。

したがって、DBV の SDR をすべりの指標として用いる場合には一定の V_0 に対する SDR の値を用いることが必要で、 V_0 は 100 km/h とした。さらに、実際の制動試験における V_0 のばらつきに対しては、運動エネルギー³⁾の観点から (13) 式により制動距離の修正を行っている。

図 13 制動距離，制動開始速度および μ_1 の関係

$$S_{corr} = \left(\frac{V_{0\ corr}}{V_0} \right)^2 S, \quad (13)$$

V_0 および $V_{0\ corr}$ はそれぞれ制動開始速度の実験値および目標値で， S および S_{corr} はそれぞれ制動距離の実験値および修正値である。湿潤路面のように μ_1 が V_0 に依存する場合には，(13)式による修正誤差を少なくするために制動試験での V_0 のばらつきをおさえることが望ましい。

4.2 制動距離計測開始点および車輪ロック遅れの影響

タイヤと路面の間の摩擦係数は，すべり率に依存するため，DBV の制動輪のロックが遅れると計測値に影響を受ける。また，すみやかにロックした場合でも制動開始直後の摩擦係数は過渡的な状態を示すため，この過渡状態を制動距離の計測にどの程度含めるか，すなわち，(12)式の μ の平均化をどの範囲で行うかによって SDR あるいは μ_1 のばらつき方が変わってくる。

今回製作した DBV では，制動輪のロック状態あるいは走行速度に無関係にブレーキ・ランプ信号によりリレーを作動させて制動距離の計測を開始する方法を採っているが，前後輪ともリレー作動から約 1 秒以内にロックした場合の実験結果について，距離計測開始点を制動開始からロック位置までの範囲で移動させた場合の μ_1 の

変化を図 14 に示した。横軸にはブレーキ・ランプ信号により計測した制動開始速度を約 40，70，および 100 km/h の 3 つのグループに分類し，縦軸には距離計測開始点を前輪のすべり率が 5 % となった位置から後輪のすべり率が 95 % (後輪の方がロックしにくい) となった位置まで移動させた場合の μ_1 の変化量 $\Delta\mu_1$ (最大値と最小値の差) とブレーキ・ランプ信号から求めた μ_1 の比 $\Delta\mu_1/\mu_1$ を制動試験ごとに求めて， $\Delta\mu_1/\mu_1$ の平均値および変動の範囲を乾燥，湿潤，雪氷の各路面状態ごとに示した。ただし，距離計測開始点を移動させた場合の μ_1 は，(10)式の V_0 および S に距離計測開始点での速度および停止点からの距離の値を代入して求めた。同図から，制動開始直後の摩擦係数の過渡状態による影響は，制動開始速度が遅い場合には全制動距離に占める過渡状態の割合が多くなることにより μ_1 の変動量が大きくなり，また湿潤路面では他の路面状態に比較して μ_1 の変動量が大きい。制動距離を標準値の 100 km/h の速度から求めるものとする， μ_1 の変動量は高々 5 % 程度と推定される。

一方，図 15 には制動輪のロックが遅れた場合の実験結果をいくつか示した。図中，実験 D-16 は $\mu_1 = 0.99$ で前後輪とも 1 秒以内にロックした場合であるが，これと同じ路面条件の実験 D-13 では停止するまで後輪のすべり率が 5 % 以下であり (2 m/s 以下では計算処理の都合上，すべり率は常に 1 とした)，実験 D-16 と比較して μ_1 が約 10 % 低下している。実験 D-11 では同じく後輪がロックに至らず，すべり率が約 10 % で μ_1 は逆に約 10 % 上昇している。実験 D-14 では後輪のロック遅れとともに前輪もほとんど最後まで 10 ~ 20 % のすべり率を維持しており， μ_1 は実験 D-16 に比較して約 30 % 増加している。またすべり率が 10 ~ 20 % の区間で μ は速度の減少とともに増加して，正常にロックした場合とは逆の傾向 (第 5 章および図 20 参照) を示している。

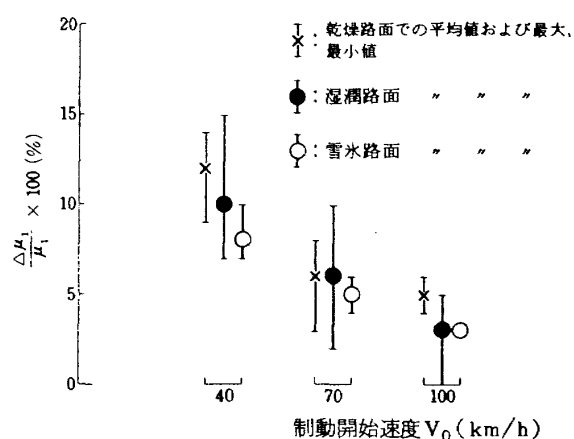


図 14 制動距離計測開始点の影響

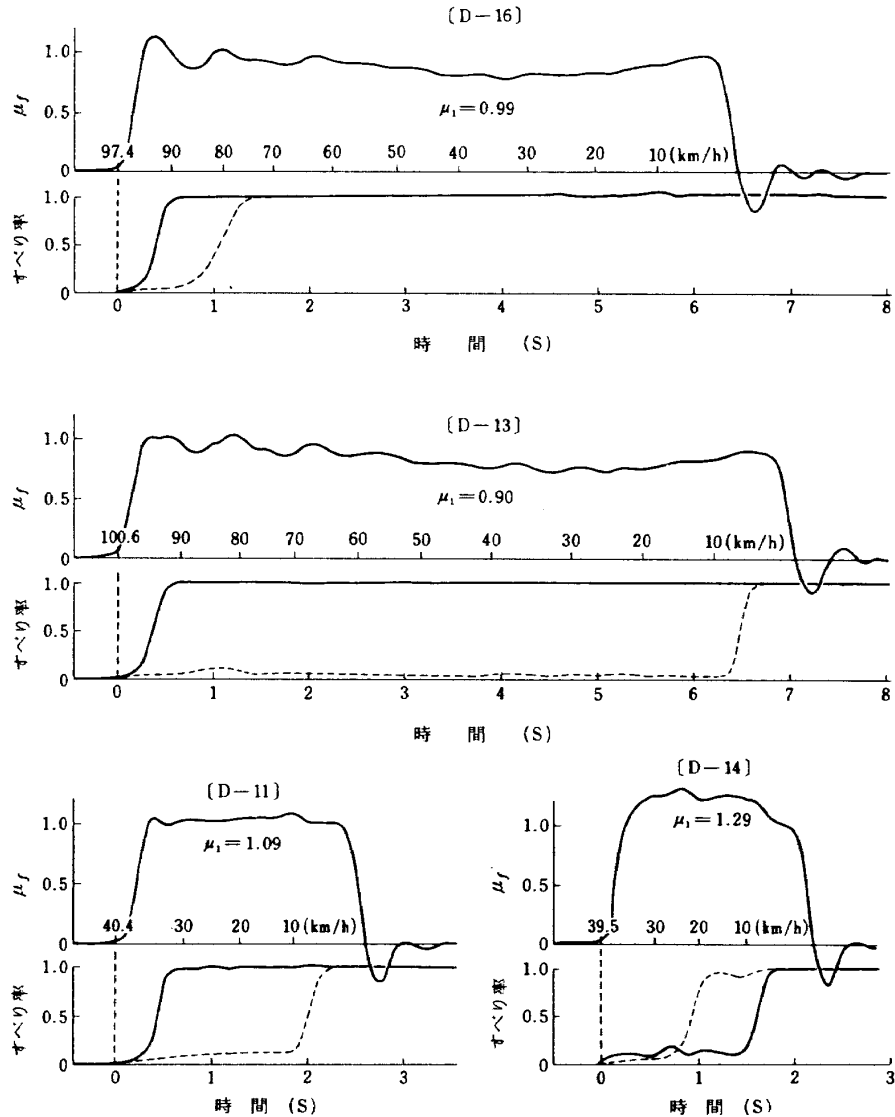


図 15 制動車輪ロック状態と摩擦係数 (すべり率は実線が右前輪で点線が左後輪を示す)

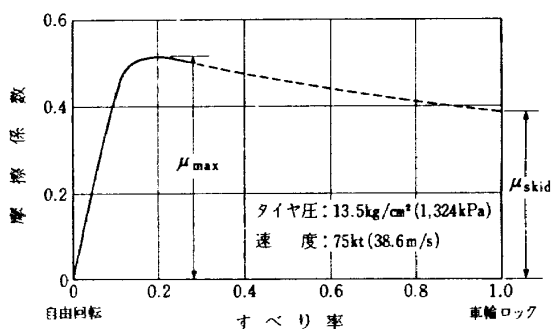


図 16 すべり率と摩擦係数 (文献 18) より引用)

DBV では摩擦係数が前後輪の平均値でしか求められないことや任意のすべり率を定常的に得られないという理由からすべり率と摩擦係数の関係を定量的に評価することはできないが、図 15 の結果は、一般に摩擦係数はすべり率が 20 % 前後で最大となると云われている¹¹⁾ (図 16) ことと良く一致している。

4.3 すべり摩擦係数と摩擦以外の抵抗

前後加速度計により DBV の減速度を計測する場合、その検出値は(14)式で表わされる。

$$\frac{a_M^{(n)}}{g} = \left\{ \frac{nF_f}{W} + \frac{F_A}{W} + \frac{(4-n)F_R}{W} + \frac{F_S}{W} \right\} \cos(\theta_I + \theta_P) - \sin(\theta_S + \theta_I + \theta_P) \quad (14)$$

ここで

$a_M^{(n)}$: n 輪制動による前後加速度計の検出値

n : 制動車輪数

W : 車体重量

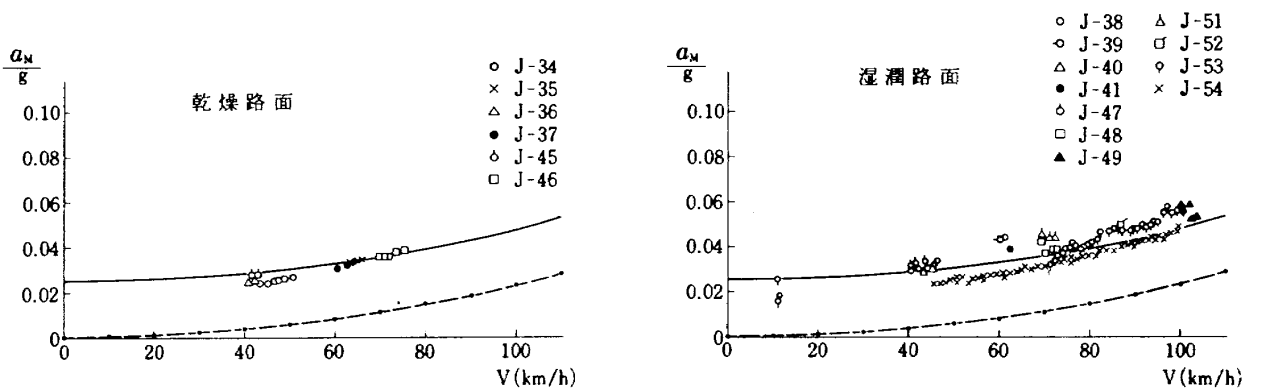
F_f : 1 車輪あたりの路面摩擦力

F_A : 空気抵抗

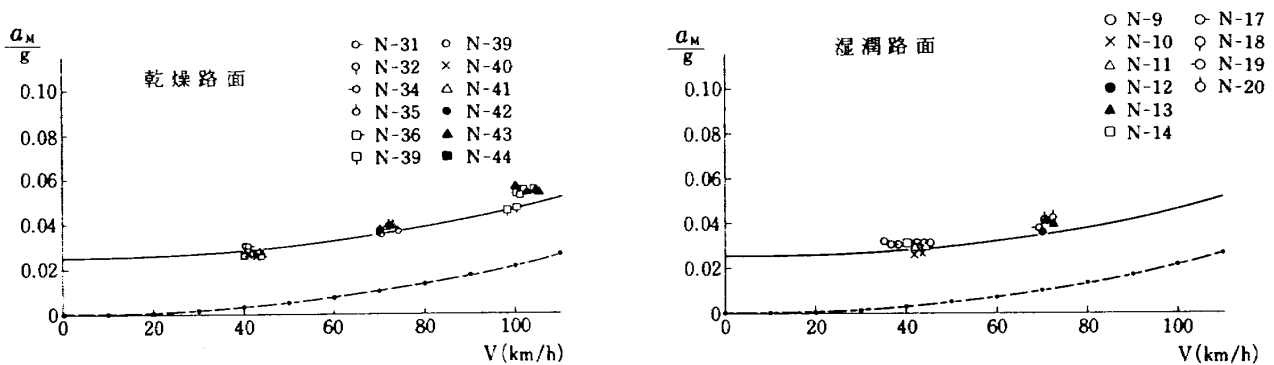
F_R : 1 車輪あたりのころがり抵抗

F_S : 路面傾斜による減速力,

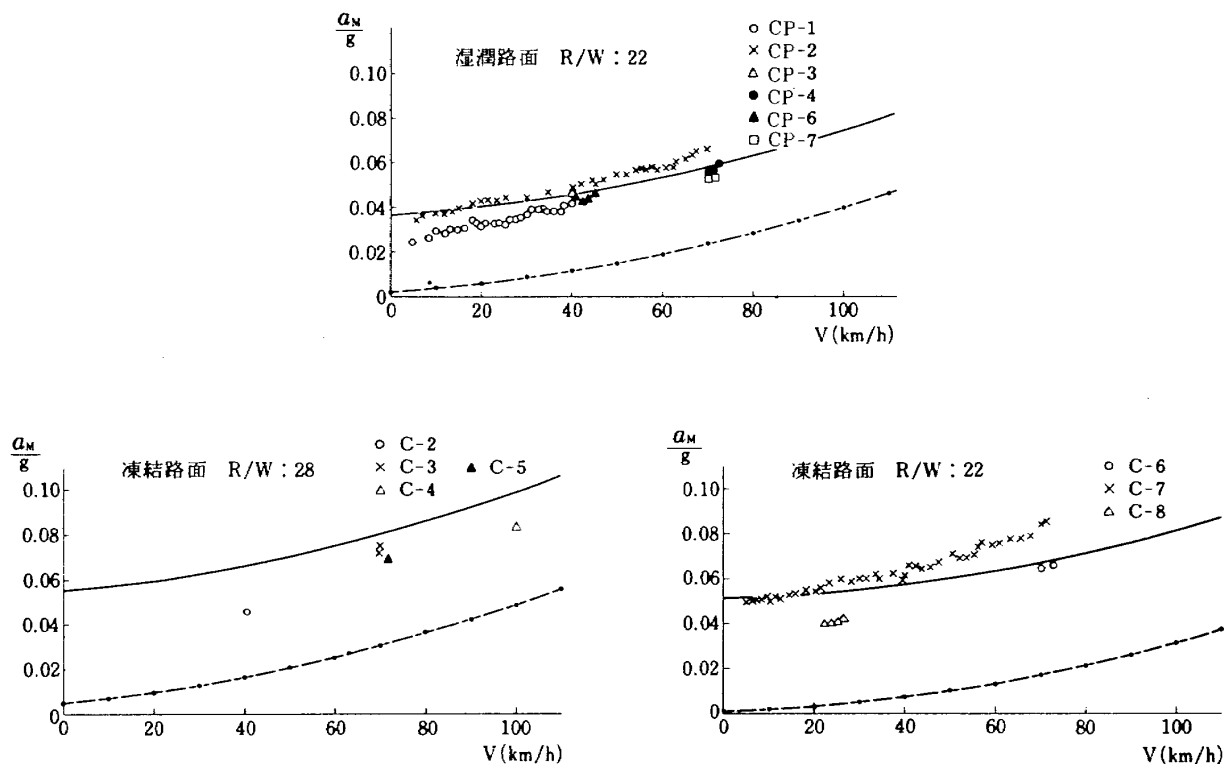
θ_S : 路面傾斜角 (登り坂を正とする)



a) 日本自動車研究所

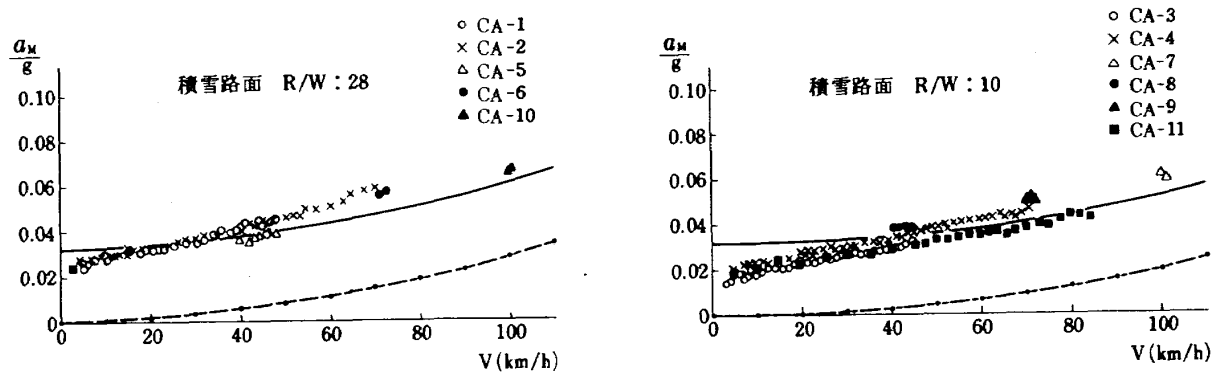


b) 新東京国際空港

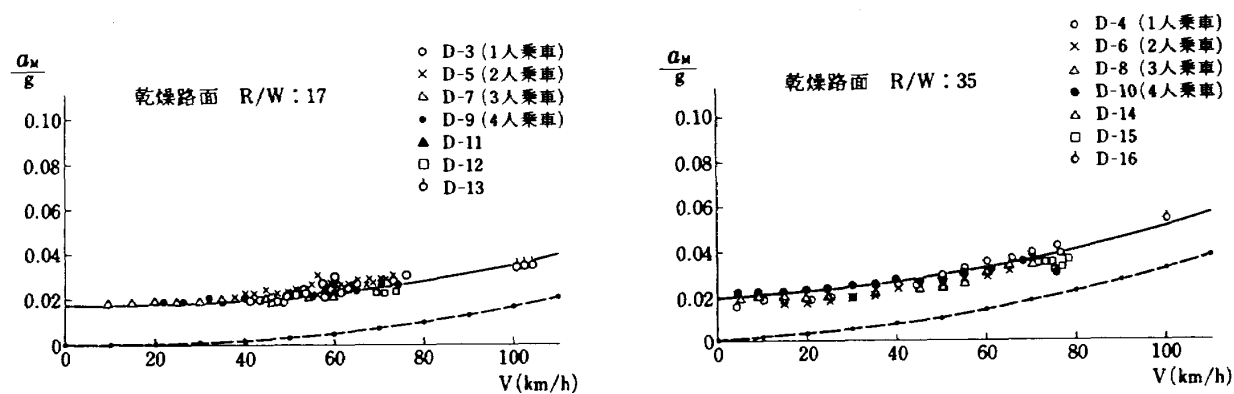


c) 新潟空港

図 17 自由走行時の減速度出力のプロット



c) 新潟空港



d) 調布空港

図 17 (続き)

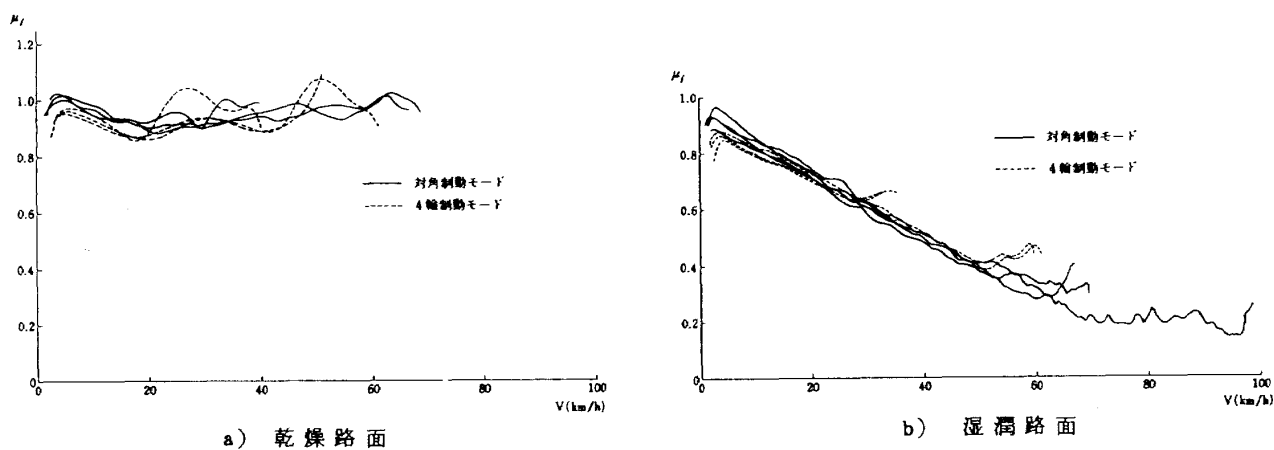


図 18 対角制動と 4 輪制動

表4 摩擦以外の抵抗

実験	日付 年月日	路面	気温 t: °C (K)	気圧 p': atm (kPa)	風向	風速 m/s	露点 °C (K)	飽和水蒸気圧 mb(Pa) 気温露点	湿度 φ	飽和水蒸気圧 e: mm Hg (kPa)	空気密度 ρ: kg·s ² /m ⁴ (kg/m ³)	風速成分 V _w : m/s	車両重量 W: kg (N)	$\mu_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot (V - V_w) \cdot V - V_w \cdot S \cdot C_D}{W}$	μ _R
J	'77 11/25	総合試験路									0.125*	0	1,700 (16,670)	$\mu_A = 3.00 \times 10^{-5} \times V^2$	0.025
N	12/5.6	コンクリート アスファルト 溝切	11 (284)	1.00* (101.3)	360	2				10 (1.33)	0.126 (1.24)	+ 1.9	1,640 (16,080)	$\mu_A = 3.13 \times 10^{-5} \times (V - 1.9) \cdot V - 1.9 $	0.025
CP	'78 1/21	R/W: 28										- 8.7			
		R/W: 10										+ 8.7			
		R/W: 22	4 (277)	0.987 (100.0)	250	10	1 (274)	8.1 (810)		6.1 (0.813)	0.128 (1.25)	- 8.7	1,760 (16,730)	$\mu_A = 2.97 \times 10^{-5} \times (V - 8.7) \cdot V - 8.7 $	0.035
		R/W: 04							0.79			+ 8.7			
C	1/22	R/W: 28										- 12.8		$\mu_A = 2.99 \times 10^{-5} \times (V + 12.8) \cdot V + 12.8 $	0.050
		R/W: 10										+ 12.8			
		R/W: 22	2 (275)	0.989 (100.2)	290	13	- 3 (270)	6.8 (680)		5.1 (0.680)	0.129 (1.26)	- 4.4	1,760 (16,730)	$\mu_A = 2.99 \times 10^{-5} \times (V + 4.4) \cdot V + 4.4 $	0.050
		R/W: 04							0.66			+ 4.4			
CA	1/29	R/W: 28										- 2.6		$\mu_A = 3.06 \times 10^{-5} \times (V + 2.6) \cdot V + 2.6 $	0.032
		R/W: 10										+ 2.6		$\mu_A = 3.06 \times 10^{-5} \times (V - 2.6) \cdot V - 2.6 $	0.032
		R/W: 22										+ 1.4			
		R/W: 04	0 (273)	1.006 (101.9)	330	4	- 6 (267)	6.1 (610)	0.62	4.6 (0.613)	0.132 (1.29)	- 1.4	1,760 (16,730)		
D	3/14	R/W: 35	4 (277)	0.996 (100.9)	350	4.5	- 7 (266)	8 (800)		6 (0.800)	0.129 (1.26)	- 4.5	1,700 (16,670)	$\mu_A = 3.10 \times 10^{-5} \times (V + 4.5) \cdot V + 4.5 $	0.019
		R/W: 17						3.5 (350)	0.44			+ 4.5		$\mu_A = 3.10 \times 10^{-5} \times (V - 4.5) \cdot V - 4.5 $	0.019

*推定値

θ_I : 車体に対する前後加速度計の取付角 (頭上げを正とする)

θ_P : 路面に対する車体の姿勢角 (頭上げを正とする)

F_S の定義より

$$F_S/W \cdot \cos(\theta_I + \theta_P) - \sin(\theta_S + \theta_I + \theta_P) \\ = -\cos\theta_S \cdot \sin(\theta_I + \theta_P) \quad (15)$$

であり、さらに

$$\left. \begin{aligned} \mu_f &= \frac{F_f}{(W/4)}, \\ \mu_A &= \frac{F_A}{W}, \\ \mu_R &= \frac{F_R}{(W/4)}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

と表わして、(15)、(16)式を(14)式に代入すると(17)式を得る。

$$\frac{a_M^{(n)}}{g} \simeq \frac{n}{4} \mu_f + \mu_A + \frac{4-n}{4} \mu_R - \theta_I - \theta_P \quad (17)$$

したがって加速度計の検出値からすべり摩擦係数 μ_f を算定するためには、(17)式に含まれる μ_A 、 μ_R 、 θ_P および θ_I の値を知らなければならない。

θ_I は前後加速度計を取付ける時に調整することにより小さくすることができ、また、水平面上で静止して較正することにより容易に検出することができる。 θ_P は制動過程で変化し正確な値を把握することは困難であるが、対角制動の場合には 4 輪制動に比べて小さく、 μ_f に与える影響は少ないとして実際の処理では無視する。空力抵抗 μ_A は次式により評価する。

$$\mu_A = \frac{1}{2} \rho (V - V_W) |V - V_W| S_A C_D / W \quad (18)$$

ここで V_W は風速の走行方向成分 (追い風を正とする) で、代表面積 S_A 、抗力係数 C_D にはそれぞれ 1.9m^2 と 0.43 の車体公称値を用いた。ところがり抵抗 μ_R は、自由走行時の抵抗のうち空力抵抗 (18 式) 以外の速度に依らない成分とみなして各実験ごとに求めた。これらの結果を図 17 および表 4 に示した。図の値は自由走行中の減速度 (0.5 秒間の平均値)、破線は (18 式) から求めた μ_A の計算値、実線はこの両者による減速度の推定曲線で、実線と破線の差が μ_R を表わしている。表中、実験 N, J および D の乾燥路面での μ_R は文献¹²⁾の値と良く一致している。実験 CP, C, CA ではこれに比べて幾分高い値を示しているが、これは温度の影響による軸受部分の抵抗の増加およびタイヤ変形抵抗の増加が原因と考えられる。

実験 D では乗車人数により重量を $1,640$ ($16,080$) ~ $1,820$ kg ($17,850$ N) まで変化させたが、その影響は少

なく、 μ_A の計算値は $1,700\text{kg}$ ($16,670$ N) で代表させてある。

図 18 は対角制動および 4 輪制動時の前後加速度計の検出値から (17) 式によりすべり摩擦係数を求めて、両制動方式の比較を行った結果である。乾燥路面では 5 章で述べるように、 μ_f の値が制動開始速度の影響を受けるため両者の対応は明らかではないが、湿潤路面では制動開始時の過渡状態を除いては両制動方式から求めた μ_f がよく一致している。

4.4 乾燥路面の制動距離

SDR を求める時、乾燥路面での制動距離が必要である。これは、路面固有の値を用いるべきであるが、天候や季節の都合で求めるのが困難な場合があるため、代表値を定めておくのが便利である。実験 J と N の各乾燥路面についての制動実験結果を図 19 に示した。ただし、車輪のロックが遅れたものは除外した。縦軸は (10 式) で定義した μ_1 で、横軸は制動開始速度 V_0 である。この図には溝切りした路面についての結果も含んでいるが、路面の違いによる μ_1 の差は顕著ではない。これらの結果から、図中に破線で示したように、DBV の乾燥路面の μ_1 について次の実験式を定めた。

$$\mu_1 = -0.967 \times 10^{-3} \cdot V_0 \text{ (km/h)} + 1.024. \quad (19)$$

(19 式) と (10 式) から、代表的な乾燥路面についての制動距離は、 V_0 が $40, 70, 100$ km/h に対してそれぞれ $12.8, 40.4, 84.9$ m となる。なお SDR は特にことわらない限り、 $V_0 = 100$ km/h で $S_D = 84.9$ m に対する値を用いた。

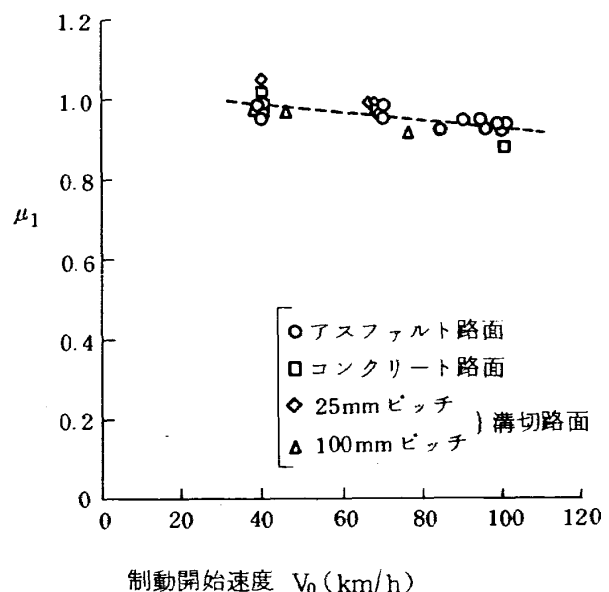


図 19 乾燥路面の μ_1

5. すべり摩擦係数と路面条件および速度の関係

すべり摩擦係数 μ_f には各路面条件ごとに固有の傾向が認められる。

乾燥路面の μ_f は、制動開始後20～30 km/h (5.6～8.3 m/s)まで速度の減少とともに緩やかに減少し、その後再び増加して、停止直前に制動開始直後とほぼ等しい値となる。図20には日本自動車研究所と新東京国際空港のアスファルト路面について、新東京国際空港の3種類のコンクリート路面について、 μ_f と速度の関係を示した。舗装の種類、表面粗さ、溝切の有無など試験路の違いによる μ_f 差は顕著ではなく制動開始速度による相違が認められる。図21は V_0 に対して μ_f の最小値と停止直前の値を示したものである。同図において μ_f の最小値および停止直前の値はいずれも制動開始速度の増加とともにわずかながら減少しており、図20と同様に制動開始速度の影響がみられる。

湿潤路面での μ_f は、制動開始直後のタイヤがロックするまでの遷移状態においてピークを生じるが、その後、急速に減少し定常なすべり状態では速度の減少とともに緩かに増加して停止直前に最大となる。図22は制動開始直後のピークを除く部分について μ_f と速度の関係を示したもので、図中、ICAO耐空性技術マニュアルで規定されているSkidding Trailerを用いた場合の摩擦係数を点線で記入した。Skidding Trailerは英国のRoad Research Laboratoryで開発されたものである（タイヤ負荷144 kg (1,410 N)、内圧1.4 kg/cm² (138 kPa)、外径40.6 cm)。湿潤路面の場合は高速時の μ_f の低下が顕著であり、その低下の度合は湿潤度や表面粗さによって大きく変わるが、図18-bからもみられるように路面条件が一定であれば μ_f は速度によりほぼ一義的に定まることを示している。図22-cは新東京国際空港のエプロン上にある溝切路面と普通路面（いずれもコンクリート舗装）についての比較であり、25mmおよび100mmピッチのいずれの溝切路面も速度

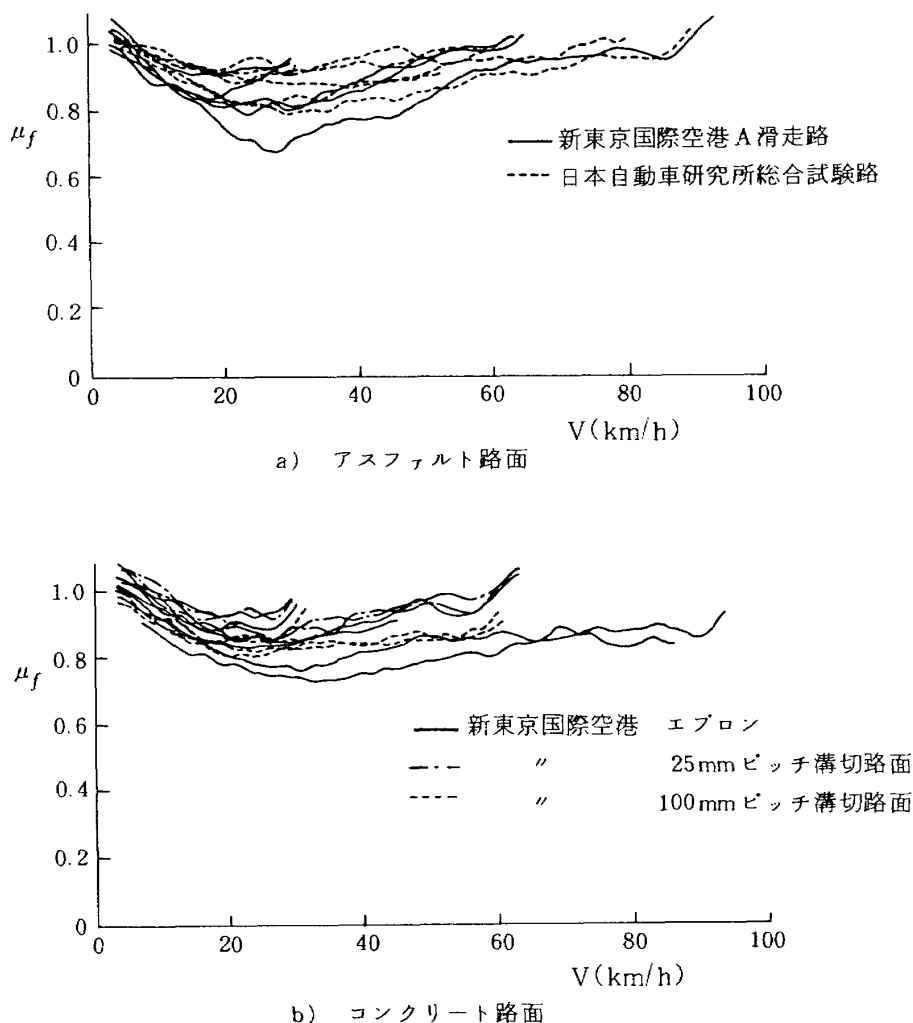


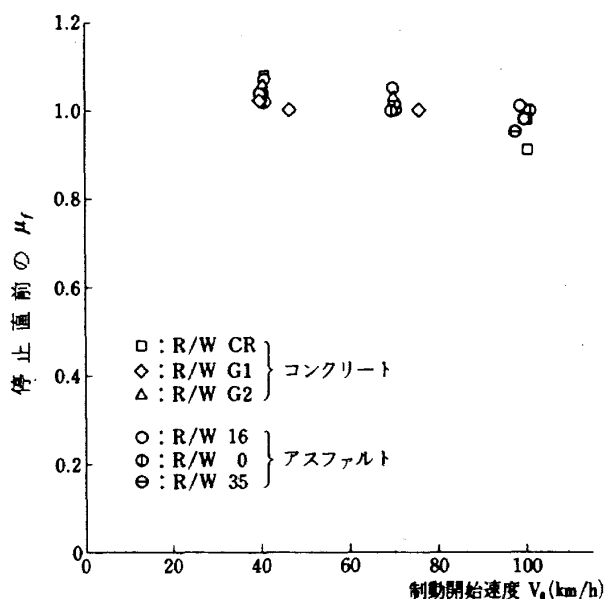
図20 乾燥路面のすべり摩擦係数

による μ_f の低下がおさえられ、溝切の効果を表わしている。湿潤路面で停止直前に生じる μ_f の最大値は乾燥路面での値とほぼ同程度であるが、乾燥路面に比較して路面条件による差が大きい。また、制動開始時に生じる μ_f のピーク値は図 23 に示したように制動開始速度の増加および μ_1 の減少とともに減少する傾向を示している。

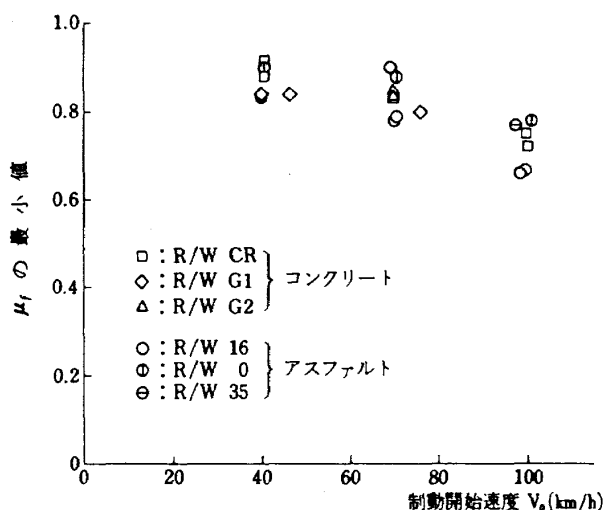
図 24 には新潟空港の雪氷路面での μ_f と速度の関係を示した。実験 C は前夜の霰様の雨が路面上に凍結した状態であり、実験 CA はあられ状の雪が路面を薄く覆った状態であった。これらの雪氷路面では、図中の実線が示すとおり、 μ_f は速度によってあまり変化せず、僅かに速度とともに増加する傾向がみられる。雪氷路面での μ_f と速度の関係について、Yager³⁾ らは DBV および実験機の制動中の減速度について上記と同様の傾向を報告しており、一方 Norrbom¹¹⁾ らは BV^{注)} 11 による測定結果から速度の増加とともに μ_f が減少する傾向を報告しているが、いずれの場合も速度による変化は微少で、このような速度依存性の相違が雪氷条件の違いによるものか、計測法の違いによるものかは明らかでない。

実験 C の後半 (C-10 ~ C-14) は日照によって路面温度が上昇し、時間の経過とともにスラッシュ、湿潤、ダンプといった路面状態の変化を示したが、このような路面状態の変化に伴う μ_f の変化を図中の破線が如実に示している。なお、スラッシュ路面での停止直前の μ_f の値は湿潤路面に比較して低い値を示している。

実験 CA では実験中の時間経過に伴う路面状態の変化はみられなかったが、位置によって舗装面が露出しており、図中の破線は雪の量が少ない位置での結果を示している。



a) 停止直前の μ_f に対する影響



b) μ_f の最小値に対する影響

図 21 乾燥路面のすべり摩擦係数に対する制動開始速度の影響

注) スウェーデンで開発されたすべり計測用トレーラー (タイヤ負荷約 100 kg (981 N), 内圧 1.20 kg/cm² (117 kPa), 外径 40.6 cm)。

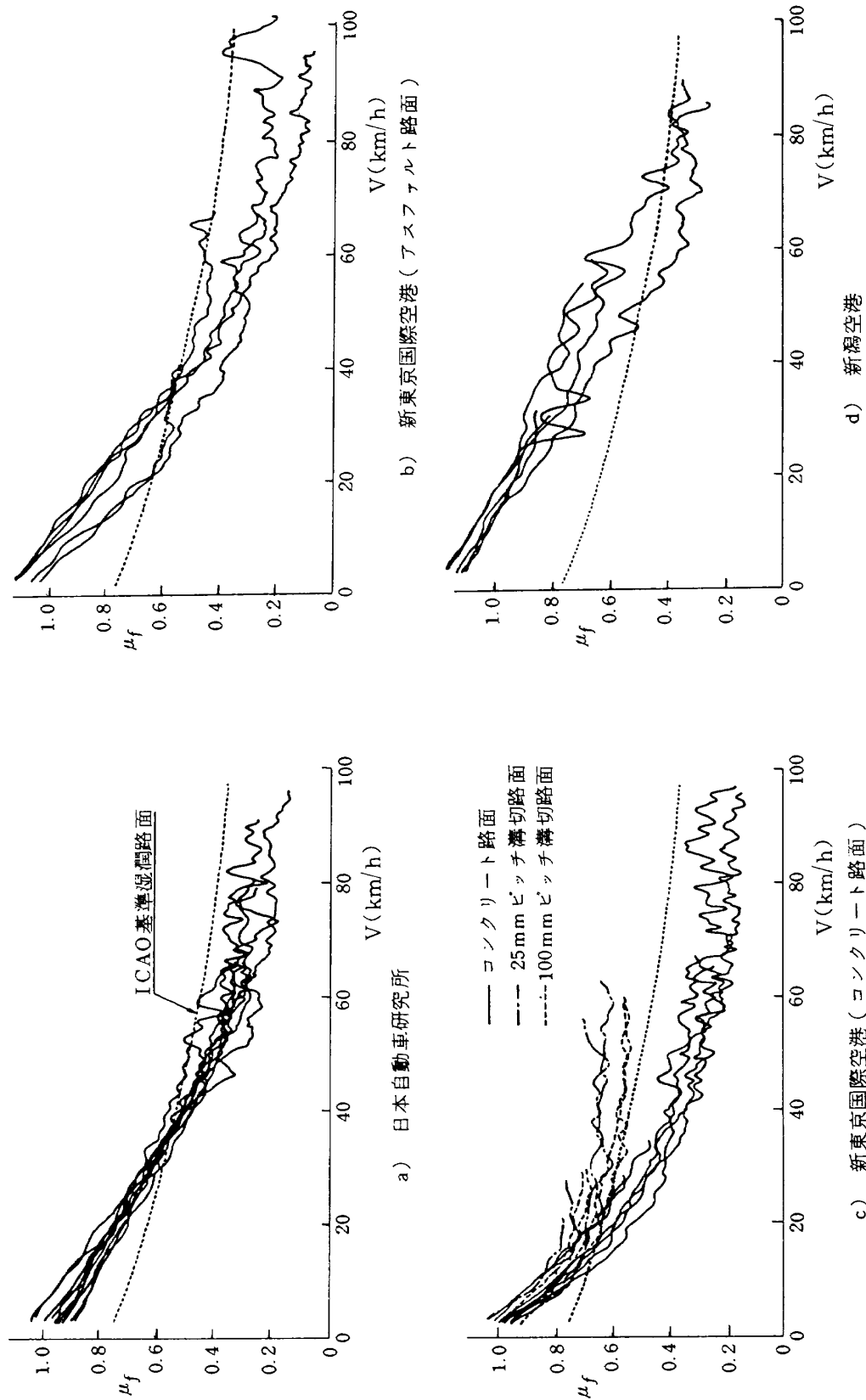


図 22 湿潤路面のすべり摩擦係数

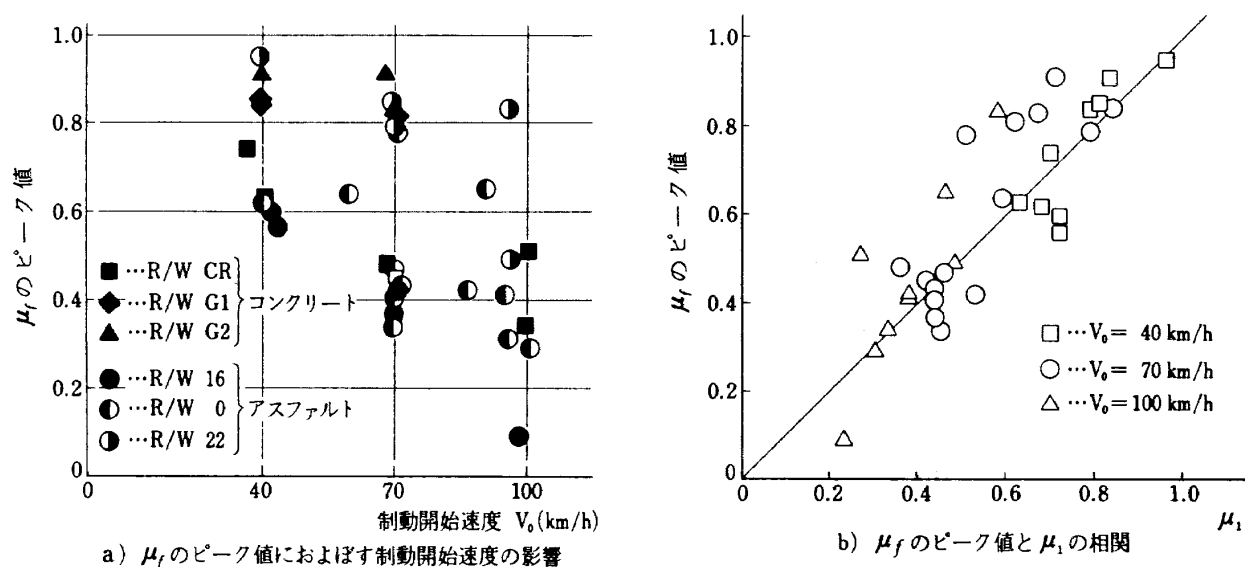
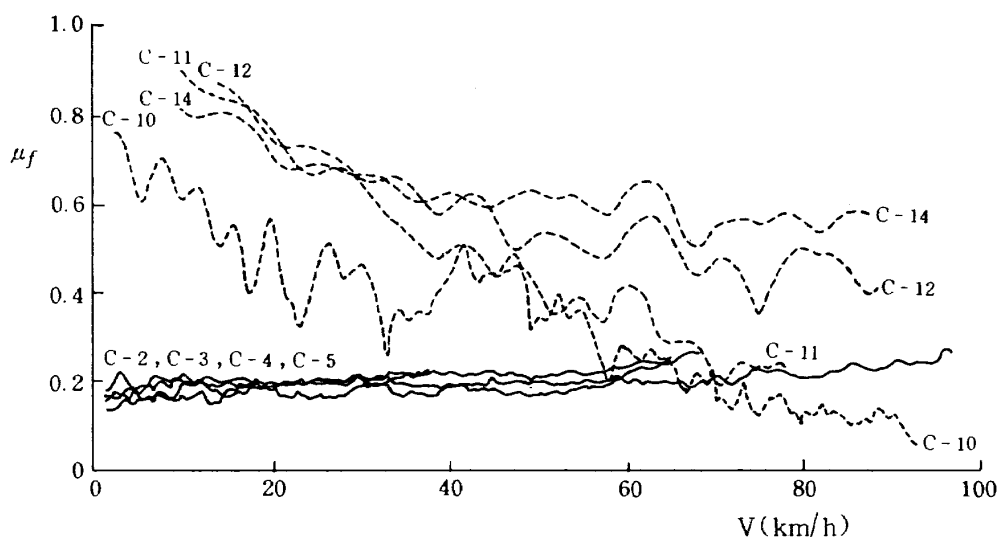
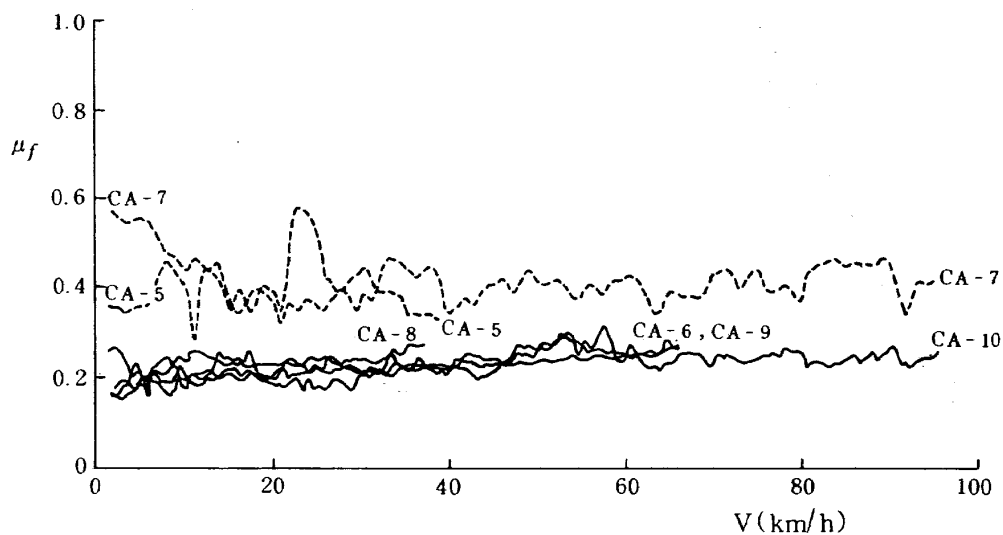


図 23 湿潤路面における制動開始時のすべり摩擦係数のピーク値



a) 新潟空港 (実験C, 点線は後半の路面状態が変化しているものを表わす)



b) 新潟空港 (実験CA, 点線は雪の少ない位置での実験を表わす)

図 24 雪氷路面のすべり摩擦係数 (数字は実験番号)

6. DBV と他の計測器および実機との 相関

6.1 DBVによるSDR

図25に各種路面についてDBVのSDRを示した。実験Nの溝切路面については試験路長の制約より100 km/hからの制動試験ができなかったため70 km/hからの制動試験結果を用いてある。他は100 km/hからの制動試験の値である。前述したように湿潤路面のすべりは路面の舗装状態により大きく異なり、実験Nでは乾燥路面の4倍もの制動距離を記録している。また、この図から

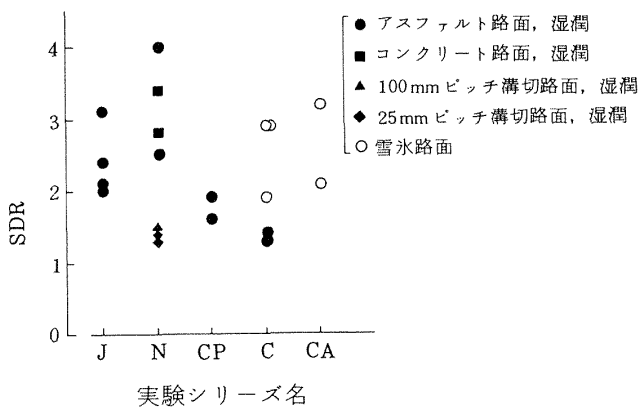


図25 各種路面のSDR

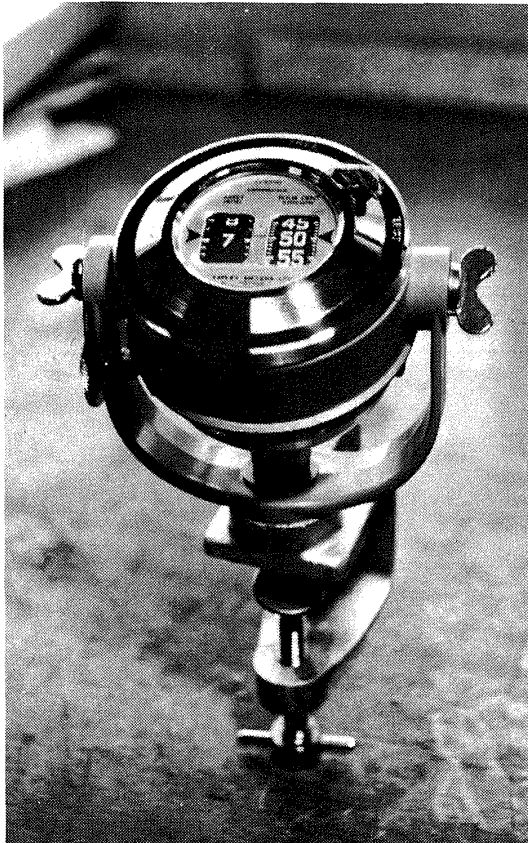


図26 Tapley Meter

も溝切の効果を見ることができる。実験CP, CおよびCAの新潟空港では、降雨によるSDRの増加は大きく表われなかったが、雪あるいは氷が薄く路面を覆うことにより制動距離は通常の乾燥路面での距離の3倍程を必要とした。

6.2 Tapley Meter

Tapley Meter (図26)は元来自動車のブレーキ性能試験用に開発されたもので機械的な減速度検出器である。機構は振子式の単純なもので、感知した最大減速度に目盛がホールドする仕組みをもち、バイメタルによる温度補償装置を備えたオイル・ダンパを用いて時定数が0.7秒に保たれている。

これまで滑走路摩擦係数測定計として国内の各空港で使用されてきたTYPE-II, III Meterが昭和51年の丘陵空港と千歳空港で行われた実験で計器特性に問題のあることが指摘されたためその改良が試みられた。しかしその後、函館空港で行われた評価試験で、Tapley Meterが簡便でかつ安定した値を示すという結果を得たために²⁾昭和52年度から航空局の公式機材としてTapley Meterが採用されるようになった。

Tapley Meterは雪氷路面に対して用いられ、わが国では、スノー・タイヤ付車両(総重量1～2 ton)に装備して、測定点の約20 m手前から発進加速し、測定点の若干手前でクラッチ・ペダルを踏み、速度計が20 km/hを指した時、車輪がロックするような急ブレーキをかけ、完全にロックした後、ブレーキを外す方法で計測されている。¹⁴⁾

Tapley Meterによる計測方法は、搭載車両のブレーキのかけ方や制動開始速度に未解決の問題があるが、先ずTapley Meter自体の特性を検討するために実験N, CPおよびCでDBVに搭載し、Tapley Meterと前後加速度計との比較を行った。DBVの場合には2輪制動車であるために重力単位で示した減速度は摩擦係数の約1/2の値になるが、計測値の比較は検出した減速度で直接行った。図27に前後加速度計によるDBVの制動中の減速度の履歴を示した。横軸は時間、縦軸は重力単位で示した減速度で、その時のTapley Meterの読取値を破線で記入した。

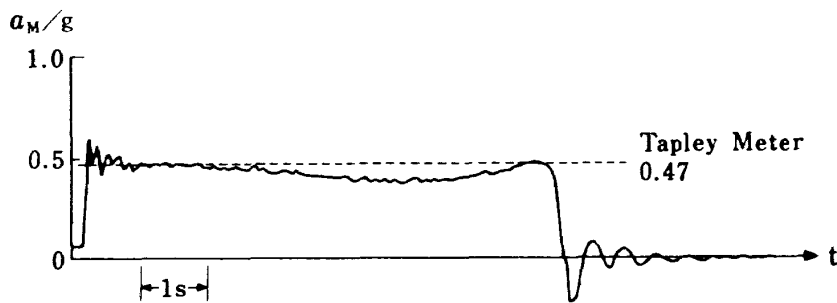
Tapley Meterは最大減速度しか検出できない。湿潤および凍結路面では、前後加速度計の最大値とTapley Meterの読みとの一致は良好である。すなわち図27-b(湿潤路面)のように減速度の最大値が現われるまでの勾配(減速度の時間微分係数)が小さい場合Tapley Meterは十分追従している。また、最大値に至るまで

の勾配が急であってもその最大値がある時間維持される場合には、図 27 - c (凍結路面) のように前後加速度計の最大値と良い一致を示す。しかし、図 27 - a (乾燥路面) のように最大値までの立ち上がりが急で、しかも最大値の持続時間が短い場合には Tapley Meter はその最大値を表わし得ない。これらの特性は Tapley Meter の時定数を考えるなら当然の結果である。ここに示したものは代表例であるが、他の実験についても湿潤および凍結路面での一致は良好で、前後加速度計の最大値と Tapley Meter の読みとを比較した結果を図 28 に示した。ただし、乾燥路面についてのデータは前記理由により比較をしていない。凍結路面の場合は、減速度の履歴が図 27 - c のようであるため、Tapley Meter の時定数を考えて、減速度が制動開始によって急上昇を始めてから 0.7 秒後の減速度値と比較したものも修正値として加えた。以上の結果から、Tapley Meter 自体は指示の

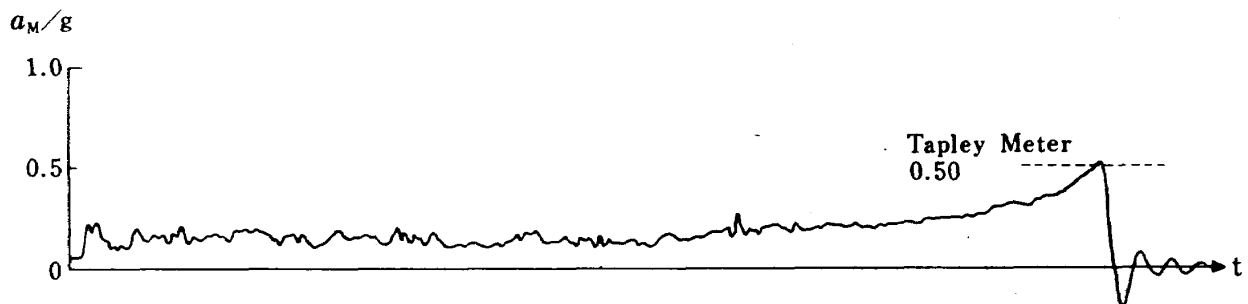
ばらつきが少なく値も信頼しうるものであると云える。

一方、Tapley Meter は 1 回の計測で制動区間中の最大減速度のみしか計測できないという制約から、路面状態が一様でない場合には計測位置による差が結果を大きく左右するという欠点があり、このため ICAO¹⁵⁾ では滑走路の端から端までを連続して一度に計測し得る形式の計測器を推奨している。乾燥路面上に圧雪が点在している場合、その影響を計測することは不可能で、また逆に、雪氷面上に路面が一部分露出している場合も、露出部分での減速度の最大値を検出して誤ったすべりの評価を下すことになる。積雪量の少なかった新潟空港の積雪路面 (実験 CA) では、航務車両 (4 輪制動) に搭載した Tapley Meter は、33 回の計測で 0.28 ~ 0.68 までばらついた。

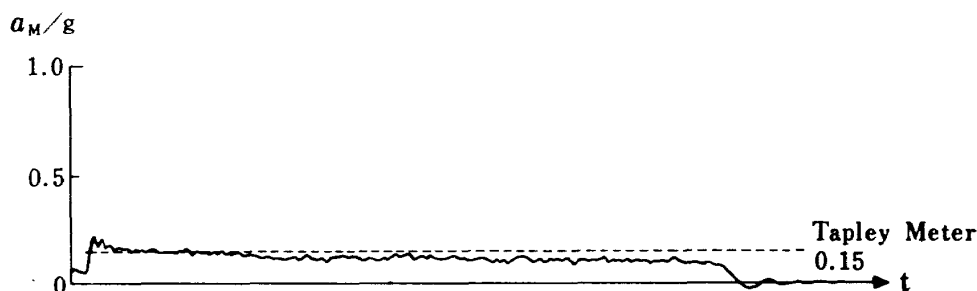
また、スラッシュ状態では図 24 - a にみられるように、高速ではハイドロ・ブレーニングの可能性が生じる



a) 乾燥路面 (N-43)



b) 湿潤路面 (N-22)



c) 凍結路面 (C-2)

図 27 各種路面における制動中の減速度と Tapley Meter の指示

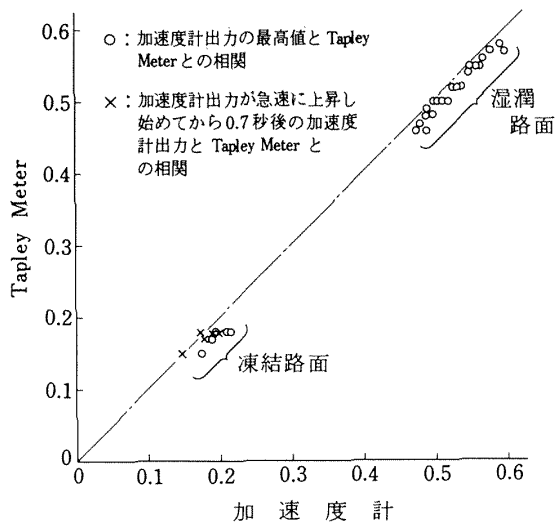


図 28 Tapley Meter の指示と前後加速度計出力の最大値との相関

一方、低速ではすべり摩擦係数が上昇するため、制動中の最大減速度のみでは路面のすべり特性を正しく評価することができない。

さらに、Tapley Meter の計測値はタイヤの種類、ブレーキ操作法、計測速度、積雪深などによっても影響を受けることが考えられるため、その検出値だけを指標、にするのは場合によってすべりの適切な評価とならず、条件を十分把握した上でその値を評価しなければならない。このことは今後の課題である。

6.3 自記制動計

図 29 に示した自記制動計は Tapley Meter と同じく機械的な減速度計である。乾電池でマイクロモータを駆動させる紙送り機構をもち、時間履歴が記録できるようになっている。測定は一方向片振れで、ガイド棒にコイルスプリング（スプリング定数 0.0102 kg/mm (100 N/m)) を介して重錘があり、これが減速度によって移動して重錘に取付けられた記録針で履歴を記録する。オーバー・シュートをおさえるためにエア・ダンパを備えて

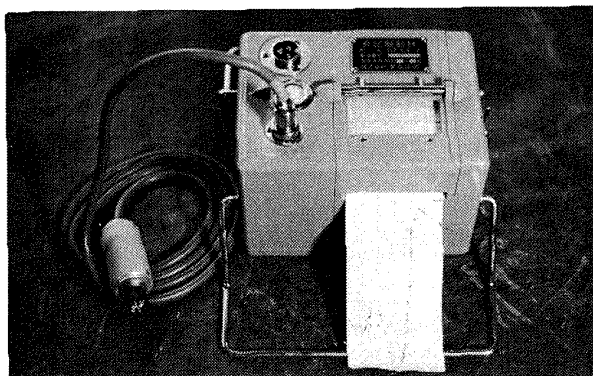


図 29 自記制動計

おり、減衰量は臨界値よりやや低い値におさえてある。ステップ入力に対する応答を図 30 に示した。これは、自記制動計を水平に対してある角度に設置し、重錘のクランプ・レバーを解除することによって記録したものである。減衰特性は入力大きさによって若干異なり、オーバー・シュートの量は 0.7 g 近辺で最大 0.04 g を示している。スプリングにエア・ダンパ使用時の系の固有振動数は 2.5 Hz である。

DBV の制動実験時の自記制動計と前後加速度計の値とを比較したのが図 31 である。自記制動計の紙送り速度は 10 mm/s で、前後加速度計出力もこれに一致させてある。前後加速度計出力にはローパス・フィルタを介してあり、それぞれの波形にその遮断周波数 f_c を記入してある。出力波数を比較すると、自記制動計の機械的なフィルタ作用の等価な遮断周波数は約 7 Hz とみなすことができ、両者の対応は良好である。

なお、紙送り速度が電池の使用度や個体差により異なる場合がある¹⁰⁾ので時間積分などの処理に際してはこのことに注意しなければならない。

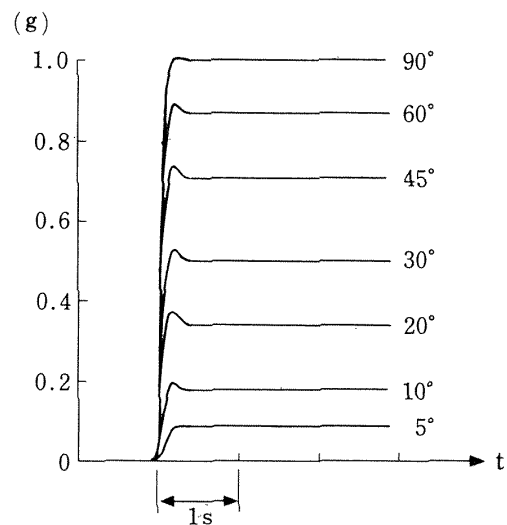


図 30 ステップ入力に対する自記制動計の応答

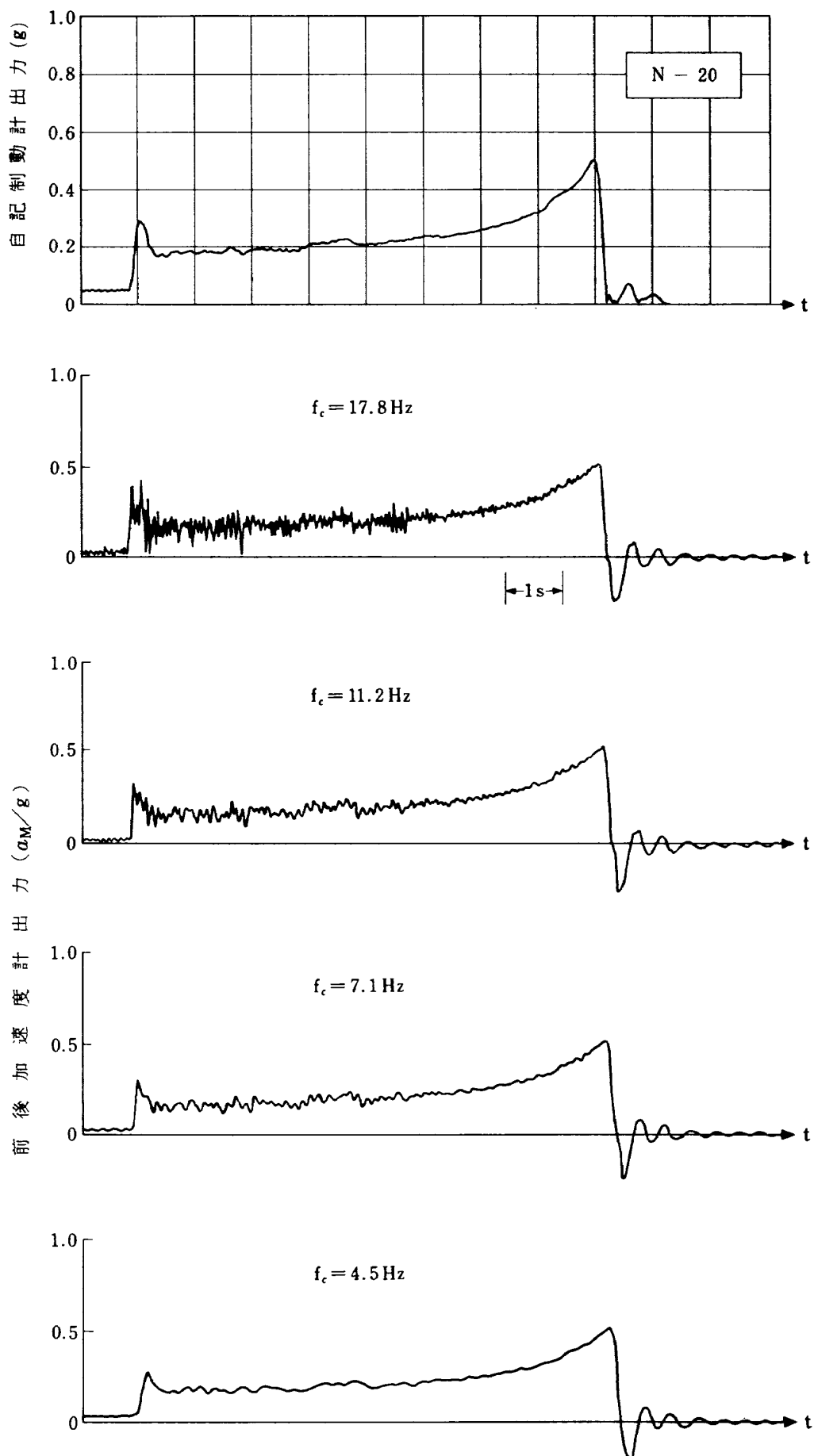


図 31 自記制動計と前後加速度計の出力の比較

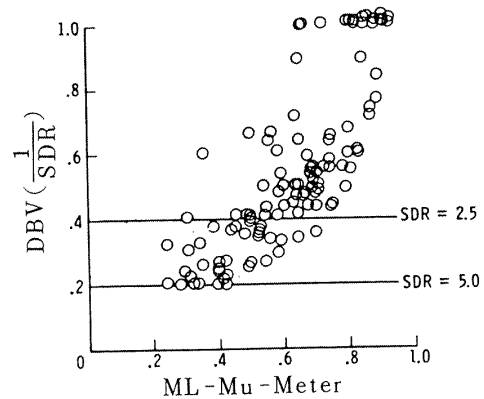
6.4 ML-Mu-Meter

英国で開発されたML-Mu-Meterは図32に示されるもので、国内でも一部の空港に路面管理のため配備されている。これは、開き角 15° を持って取付けられた、外径40.6cm、幅10.2cm、内圧 0.70 kg/cm^2 (69.0 kPa)のタイヤ圧をもつ2個のタイヤの横摩擦力を検出する牽引式の計測器で、第3輪として距離指示用の車輪があり、総重量は 246 kg ($2,410\text{ N}$)である。この計測器は湿潤路面に対しては実績も多く、他の計測器との比較データも多い。DBVと比較したものを文献から引用して図33に示した。これらの図をみると、相関が良いとは云えない。Horne¹⁶⁾も指摘しているが、ML-Mu-Meterはある速度（わが国では 60 km/h ）の摩擦力を計測しているということを念頭におかなければならない。今回の実験では、N, CP, C, CAの実験でML-Mu-MeterとDBVを比較した。

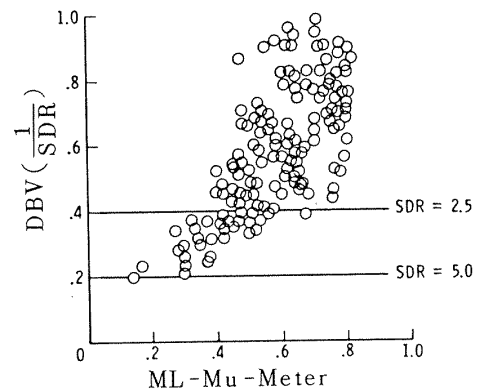
図34-aに実験N、図34-bに実験CP, CAの結果を示した。横軸は速度で、ML-Mu-Meterの μ_{AV} （距離平均値）を 60 km/h の速度にプロットした。DBVは速度が一定ではないが、各実験の μ_1 を制動開始速度 V_0 の位置に示した。実験Nの乾燥路面で、ML-Mu-Meterは0.7程度の低い値を示した。この値は、DBVの μ_1 との差が大きく、通常の乾燥路面としても低すぎる値であるが、この違いの原因は不明である。これを除外して考えると、データ量は少ないが、湿潤路面のように特に速



図32 ML-Mu-Meter

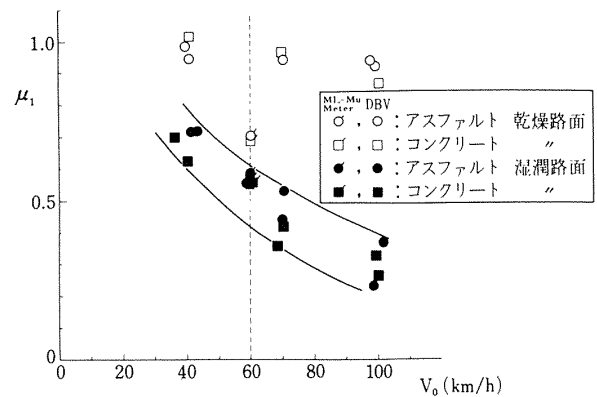


a) USAFによる試験結果

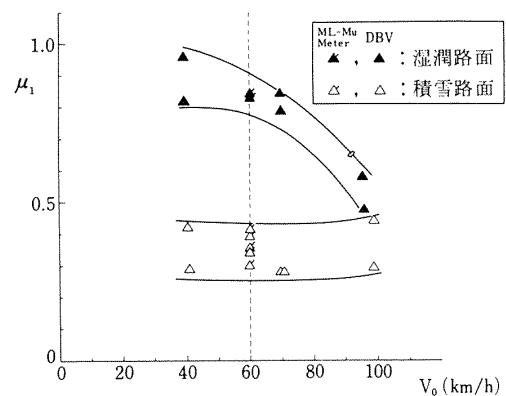


b) FAAによる試験結果

図33 ML-Mu-MeterとDBVの相関試験結果（文献16）より引用）



a) 実験 N



b) 実験 CP, CA

図34 ML-Mu-MeterとDBVの比較

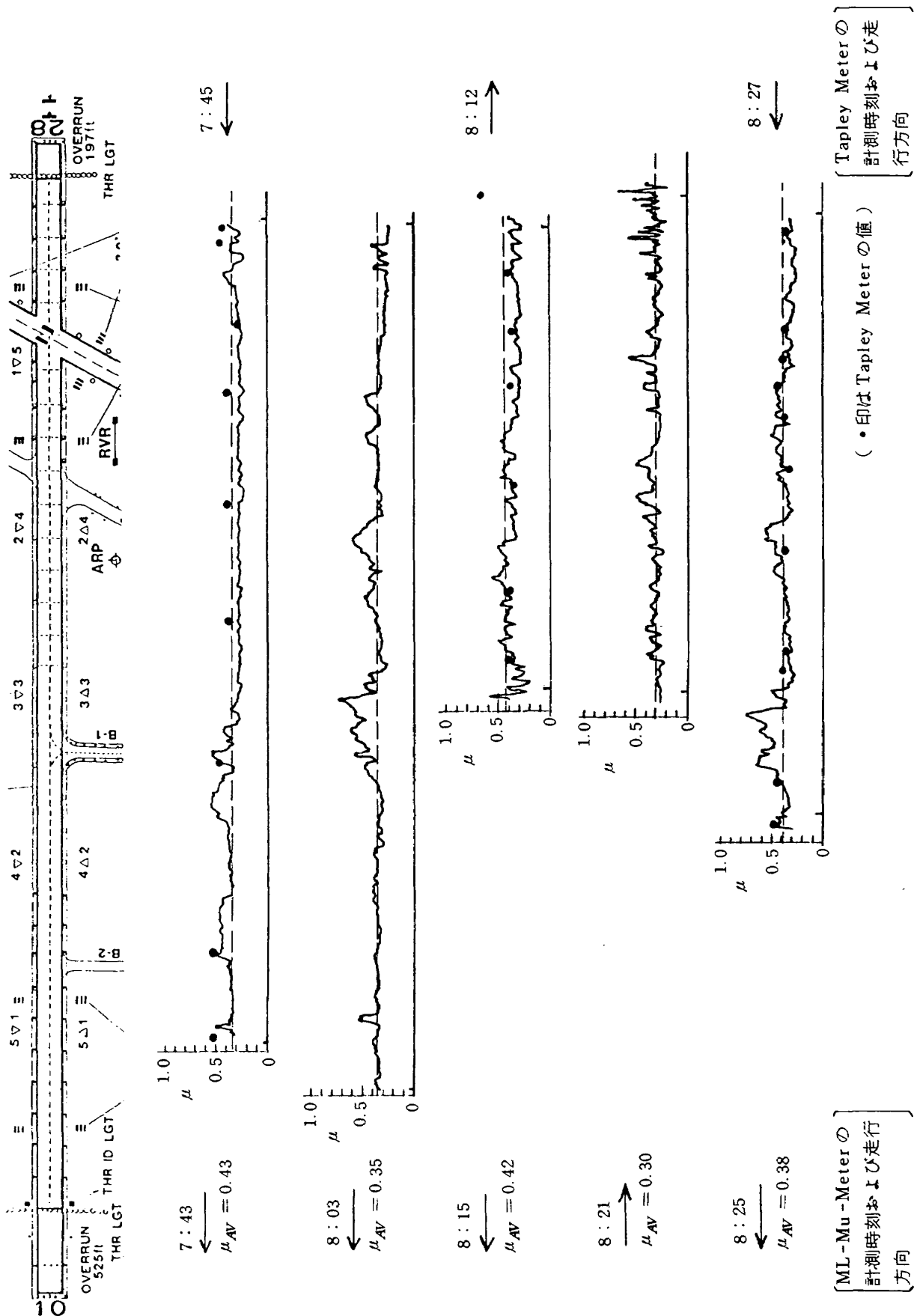


図 36 実験 CA での ML-Mu-Meter および Tapley Meter (航務車両) による計測結果 (昭和 53 年 1 月 29 日新潟空港)

度依存性の大きい場合に、ML-Mu-Meter の値は 60 km/h での計測値であることに注意しなければならないことが判かる。薄い積雪路面（実験 CA）についての両者の一致はおおむね良好である。実験 C の場合は、時間の経過に伴う路面状態の変化が激しく、また位置による違いが大きくて DBV の結果とこの様な比較ができないため図 34 - b に含めていない。

実験 C の路面状態の変化を顕著に表わしているのが図 35 である。この図の横軸は距離であり、滑走路図の位置と対応している。時間の経過とともに R/W 10 端から凍結がなくなっていく様子を見ることができる。

図 36 には実験 CA の結果を示した。航務車両による Tapley Meter の計測値も同時に各位置に記入してある。この時の路面は、図 10 のように雪がまばらに覆っている状態であり、また、ML-Mu-Meter の記録と Tapley Meter の計測位置の対応が完全ではないことを考えると、両者の一致はおおむね良好である。

今回の実験では積雪量の少ない路面状態しか得られなかったため明らかにできなかったが、スラッシュ、あるいは積雪路面の変位抵抗が計測値にどのように影響するかが今後の課題の一つである。

6.5 実機との相関

実験 C と同時に実機の制動試験が YS-11 (JA8668) を使って行われた。¹⁰⁾ YS-11 機の重量配分は前脚に 5% で残り 95% が主脚に作用する。タイヤ圧は前車輪が 3.52 kg/cm^2 (345 kPa)、主車輪が 5.27 kg/cm^2 (517 kPa) である。使用した滑走路は新島空港 R/W 28 で、当日 10 ~ 12 m/s の向い風があり 15 m/s 以上の突風がある気象状況であった。試験内容および結果を表 5 と図 37 に示した。表 5 で平均減速度は DBV の μ_1 に相当し、平均摩擦係数は、制動開始速度、制動距離、機体データおよび気象データを使って求めた値である。図 37 は機上に搭載した 3 軸加速度計による前後加速度、速度および距離を示している。6 回の制動試験のうち、Y 4 はアンチ・スキッド装置（マーク I）を OFF にして操作したため、車輪ロックによるタイヤ破裂を避ける意図でブレーキのかけ方が弱くなり、さらに途中 2 回程ブレーキを緩めて調節している。Y 2 と Y 5 が最大限のブレーキ操作に近いと考えられる。この機体はブレーキ力の方に制約があるため、Y 2、Y 5 および Y 6 では機体の最大減速度が 0.4 ~ 0.5 g に抑えられている。したがって表中の制動距離、平均減速度、平均摩擦係数などは、タイヤと路面のすべりを必ずしも表わすものではないが、平均摩擦係数と ML-Mu-Meter および DBV による計測

値の比較を図 38 に示した。

この実験を行った日は、路面状態が時間とともに大きく変化したことを考慮して、横軸は時刻にとった。ML-Mu-Meter と DBV の値は時間の経過につれて路面がすべり難くなっていることを示している。その値は、摩擦係数が低いところで ML-Mu-Meter が DBV より低い値を示し、摩擦係数の高いところでは逆で、ML-Mu-Meter の方が大きな値の変化を示している。実機の結果については、値そのものは ML-Mu-Meter の μ と DBV の μ_1 とも掛け離れた値を示しているが、時間の経過とともに平均摩擦係数が高くなっている傾向をみることができる。Y 4 の値が低いのは前述の理由による。また、Y 3 は通常用いている程度のブレーキ操作をしたものである。

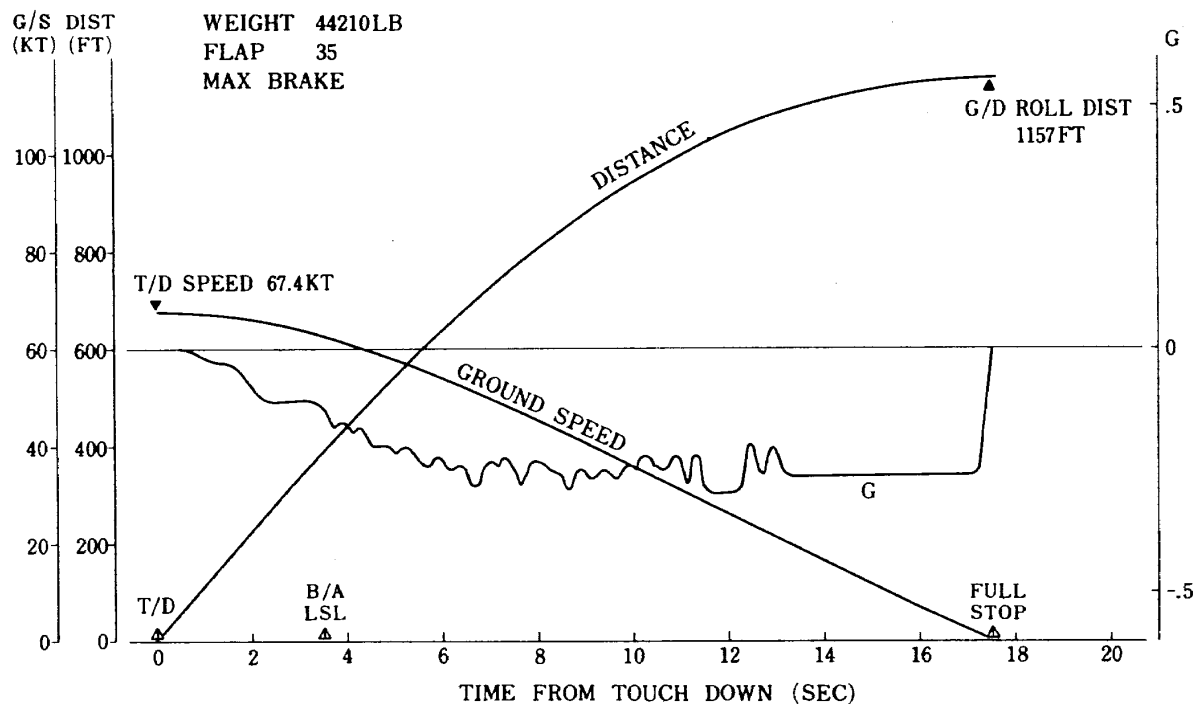
実機のデータを SDR で DBV の計測結果と比較すると図 39 のようになる。この場合、実験機の乾燥路面上での最大制動力による制動距離について、公表値も実験値もないため、ここでは全日空の計算値を乾燥路面での制動距離として用いた。この図で、実験 Y 4 の SDR が 2.2 と比較的大きな値であるのは前と同じ理由による。時間に伴う DBV の SDR の変化に比べて実機の SDR の変化は少ない。この違いの原因として実験機がプロペラ機であり、着陸制動時にプロペラ抵抗を含む空力抵抗の減速力に対する寄与分が大きく、ブレーキによる制動力と同程度となるため、滑走路面のすべりの影響が、SDR には表われ難いと考えられる。

表5 実機制動試験の内容および結果(文献10より引用)

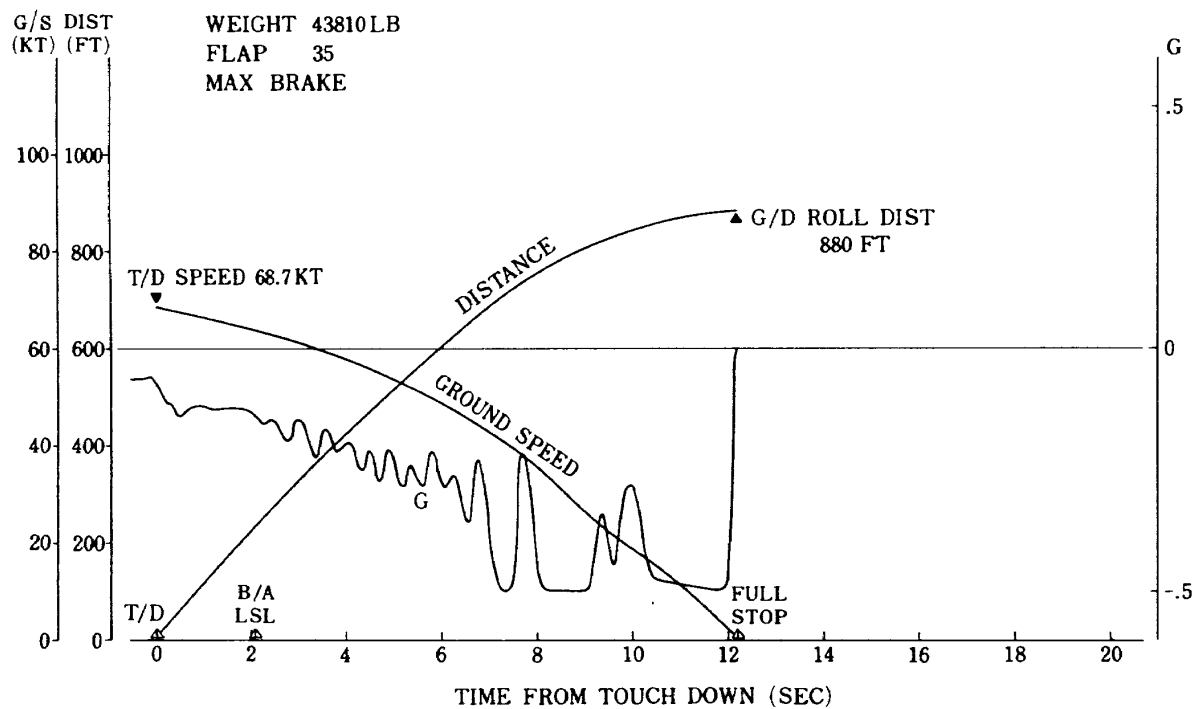
試験番号	Y 1	Y 2	Y 3	Y 4	Y 5	Y 6
試験内容	着 陸	着 陸	着 陸	着 陸	着 陸	加速停止
試験時刻	9 : 00	9 : 30	9 : 56	10 : 02	10 : 11	10 : 37
機 体						
重量 (L.H. [N])	44,210 (196,600)	43,810 (194,900)	43,260 (192,400)	42,910 (190,800)	42,660 (189,700)	42,360 (188,400)
重心位置 (% MAC)	23.2	23.1	23.0	22.9	22.8	22.7
フラップ角 (DEG. (RAD))	35 (0.611)	35 (0.611)	35 (0.611)	35 (0.611)	35 (0.611)	15 (0.262)
気圧 (inHg. (kPa))	29.58 (100.2)	29.58 (100.2)	29.59 (100.2)	29.59 (100.2)	29.58 (100.2)	29.58 (100.2)
気温 (°C. (°F))	2 (275)	1.5 (275)	1 (274)	1.5 (275)	2 (275)	3 (276)
風向	290	290	280	270	280	280
風速(注1) (kt. (m/s))	24 (12.3)	25 (12.9)	23 (11.8)	25 (12.9)	23 (11.8)	26 (13.4)
風速成分 (kt. (m/s))	向い風 20 (10.3)	向い風 21 (10.8)	向い風 20 (10.3)	向い風 22 (11.3)	向い風 20 (10.3)	向い風 23 (11.8)
TTS or V_1 (KIAS. (m/s))	90 (46.3)	90 (46.3)	90 (46.3)	90 (46.3)	90 (46.3)	89 (45.8)
V_{TD} or V_{EF} (KIAS/KGS. (m/s/m/s))	88.6/67.4 (45.6/34.7)	91.0/68.7 (46.8/35.3)	96.9/75.4 (49.9/38.8)	81.0/57.9 (41.7/29.8)	82.5/61.4 (42.4/31.6)	85.5/61.5 (44.0/31.6)
地上滑走距離 (ft. (m))	1157 (353)	880 (268)	1172 (357)	1063 (324)	830 (253)	1894 (577)
TRANS. TIME (s)	3.5	2.1	2.7	3.4	3.9	3.3
制動速度 (KIAS/KGS. (m/s/m/s))	83.8/62.7 (43.1/32.3)	86.0/63.8 (44.2/32.8)	89.3/68.0 (45.9/35.0)	75.7/52.7 (38.9/27.1)	76.6/55.6 (39.4/28.6)	93.0/68.9 (47.8/35.4)
制動距離 (ft. (m))	767 (234)	645 (197)	835 (255)	744 (227)	441 (134)	864 (263)
平均減速度 (ft/s ² . (m/s ²))	7.3 (2.2)	9.0 (2.7)	7.9 (2.4)	5.3 (1.6)	10.0 (3.0)	7.8 (2.4)
平均摩擦係数	0.144	0.247	0.195	0.045	0.268	(0.251)
Tapley Meter 測定値 ML-Mu-Meter 測定値	0.40 ~ 0.45 0.28	0.40	0.46	(0.54)	(0.58)	(0.80)
滑 走 路 状 態	ガラス状氷+水	ガラス状氷+水 (水分多)	Wet	Wet	Wet (Water Depth 0.03" ~ 0.01")	Damp (Water Depth ~ 0.01")
ブ レ ー キ 操 作	Max Brake (Max Brake より少し弱い)	Max Brake	Modulate Brake (通常のFLTのBraking)	Anti-Skid off	Max Brake	Max Brake (方向維持の為 Brake 踏む)
備 考				50m 程 Round		LIVE E/G クローズ多少 変わる。

注1) 風速の変動が激しいため10分間平均のDATAを用いる。

() 内にはSI単位に換算した値を併記した。

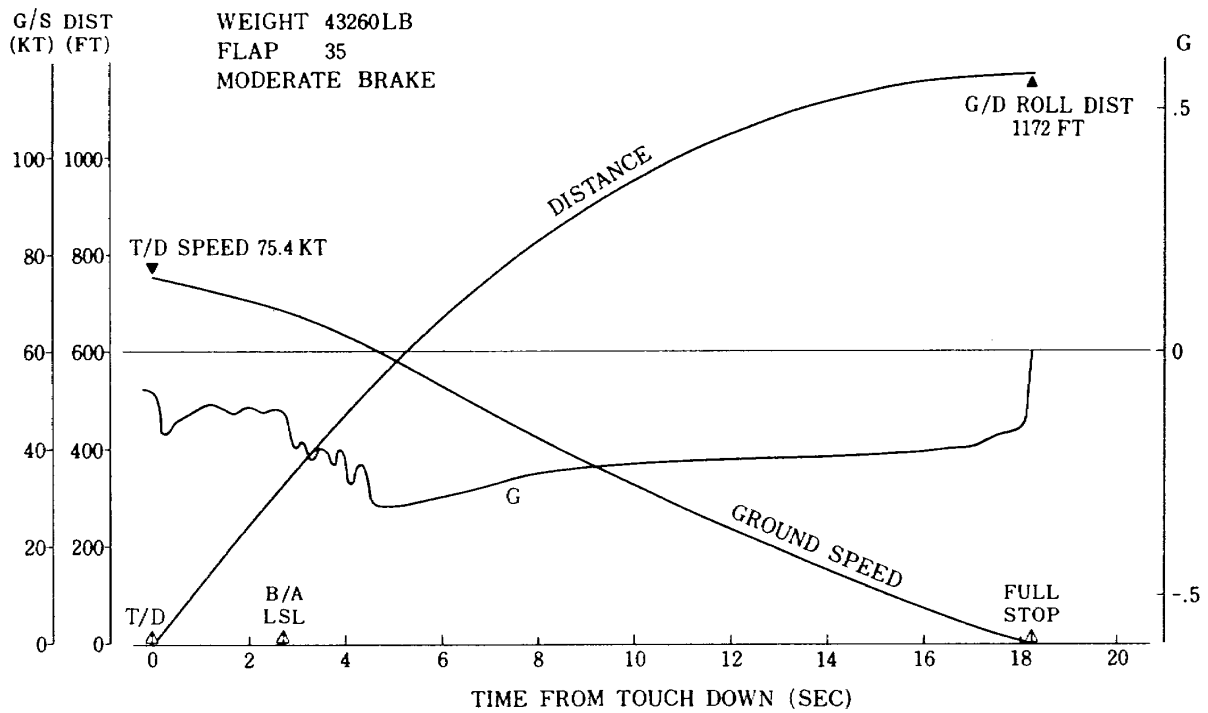


a) 実験 Y 1

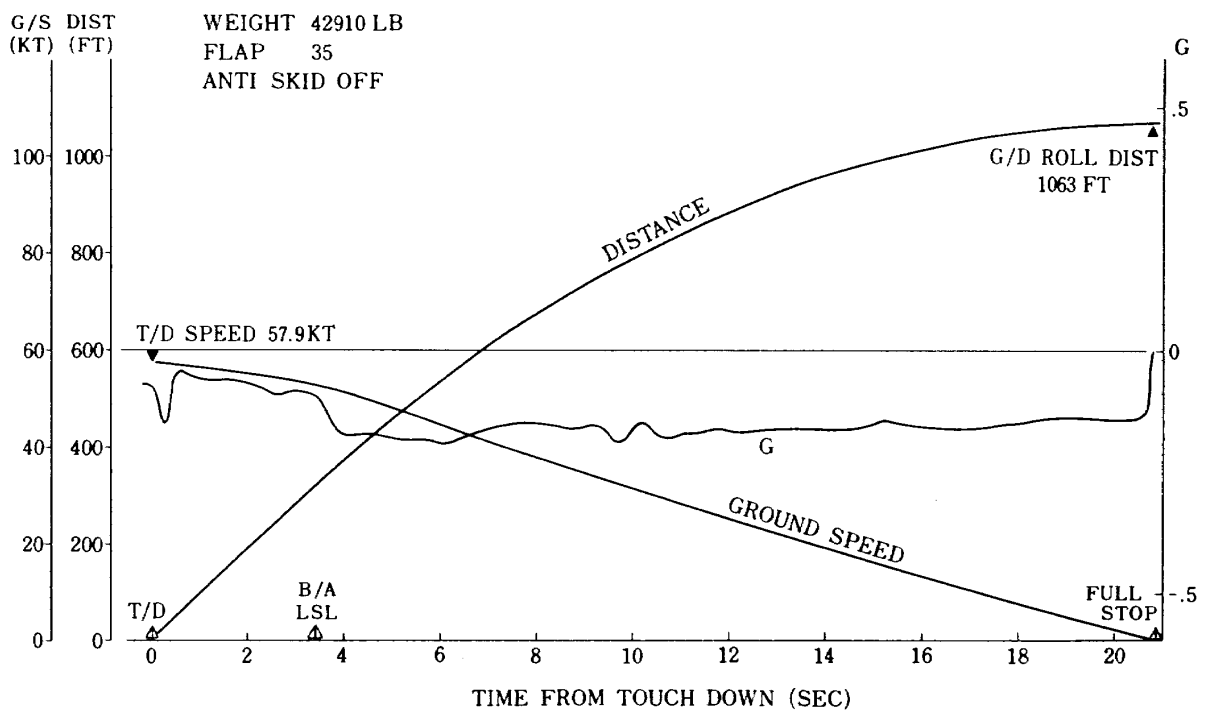


b) 実験 Y 2

図 37 実機の制動試験結果 (文献 10) より引用)

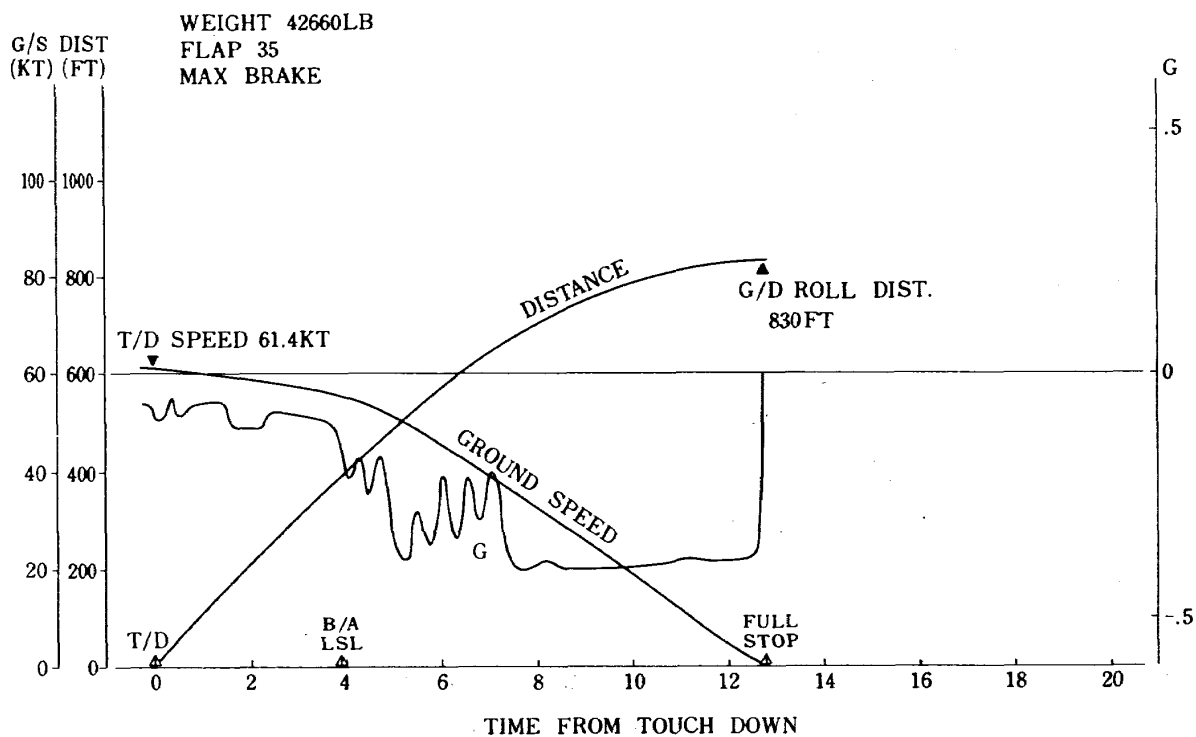


c) 実験 Y 3

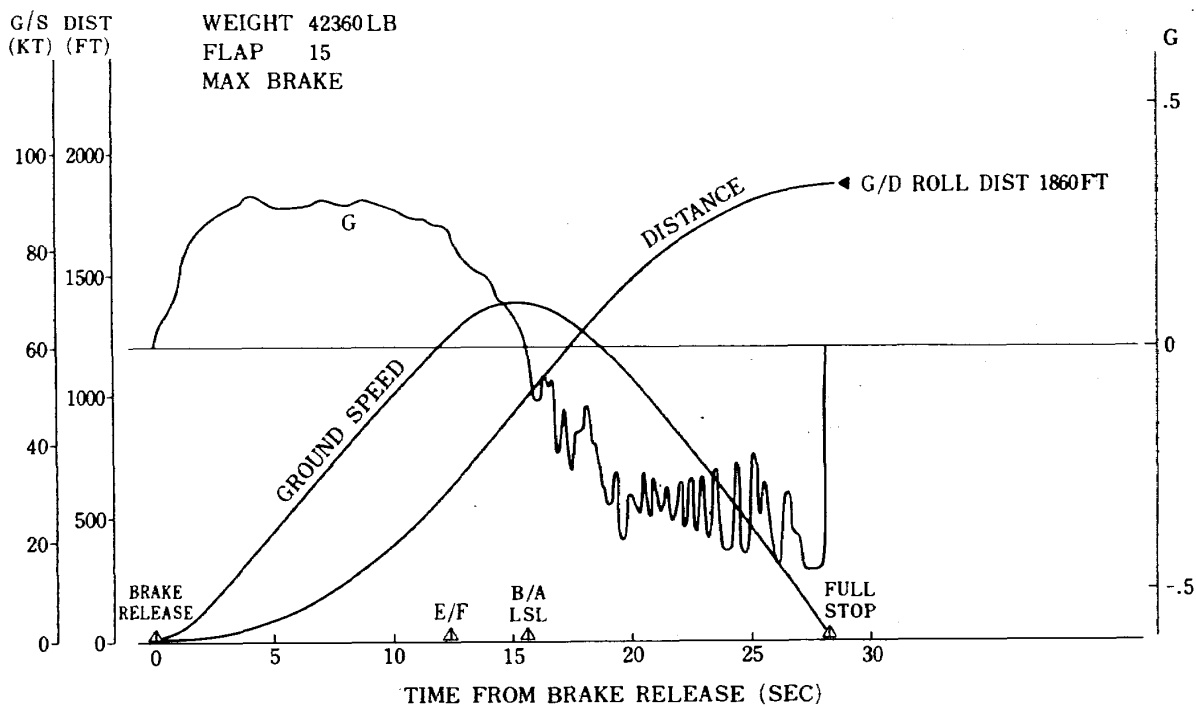


d) 実験 Y 4

図 37 (続き)



e) 実験 Y 5



f) 実験 Y 6

図 37 (続き)

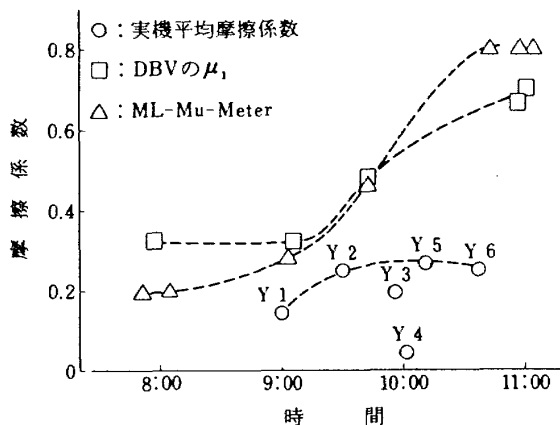


図 38 実機DBVおよびML-Mu-Meterによる摩擦係数の比較

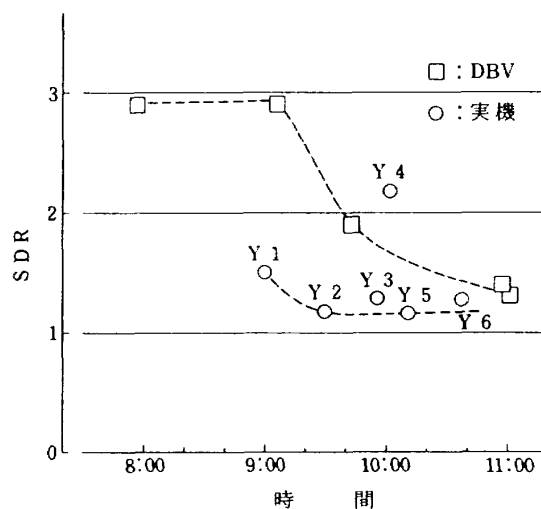


図 39 実機とDBVのSDR

7. 結 論

DBVを製作して基礎実験を行い、次の結果を得た。

(1) DBVの乾燥路面における時速100kmまでの加速距離は約300mで、制動中のステアリング機能および走行安定性はいずれも良好であった。

(2) 乾燥路面での制動中のすべり摩擦係数は、制動開始後20～30km/hまで、速度の減少とともに緩やかに減少するが、舗装の種類、表面粗さおよび溝切の有無による差は顕著ではなく、速度とすべり摩擦係数の関係は制動開始速度に依存する。

(3) 湿潤路面では高速時のすべり摩擦係数の低下が顕著である。その低下の度合は路面条件によるが、路面条件が一定であればすべり摩擦係数は速度によってほぼ一義的に定まる。溝切路面では高速時のすべり摩擦係数の低下がおさえられて排水効果が表われている。

(4) 凍結路面および薄い積雪路面では、制動中のすべ

り摩擦係数がほとんど一定で速度の減少とともに僅かに減少する傾向がみられる。

(5) スラッシュ路面ではすべり摩擦係数に速度依存性が表われ、氷の融解とともに次第に湿潤時の制動中のすべり摩擦係数の履歴に近づいていく。

(6) Tapley Meterは計測器自体の指示のばらつきが少なく値も信頼しうる。しかし制動区間中の最大減速度のみしか検出できないため、路面状態が一様でない場合あるいはすべり摩擦係数が速度に依存する様な路面状態では、Tapley Meterの検出値だけを指標にするのはすべりの適切な評価とならず、路面状態による速度依存性の違いや、ブレーキ操作法、タイヤの種類等の条件を十分把握した上でその値を評価しなければならない。

(7) ML-Mu-Meterは(速度依存性のある路面状態では)ある一定速度での摩擦力を計測していることを念頭においてその値を評価しなければならない。

(8) 薄い積雪路面ではML-Mu-Meter, Tapley Meter, およびDBVの μ_1 の値の一致はおおむね良好である。

(9) ML-Mu-MeterおよびDBVはいずれも凍結路面の融解に伴う路面状態の変化を敏感に示すが、摩擦係数の低いところではML-Mu-MeterがDBVより低い値を示し、摩擦係数の高いところでは逆にML-Mu-MeterがDBVより高い値を示す傾向がみられる。

(10) 凍結路面の融解に伴う路面状態の変化に対して、実験機YS-11のSDRの変化はDBVに比べて少ない。これは実験機のブレーキ力に制約があり0.4～0.5g以上の減速度を生じ得ないこと、全体の減速力に対してプロペラ抵抗を含む空気抵抗の占める割合が大きいことなどによるものと考えられる。

8. おわりに

今回DBVの製作は豊田中央研究所によって行われた。また実験に際しては、航空局運航課、新潟および調布空港事務所、日本航空、全日本空輸、東亜国内航空をはじめ、日本自動車研究所、新東京国際空港公社、所内関係各部の全面的な御協力を戴いた。厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 久保哲也, 近藤貞雄 "湿潤および雪氷滑走路における運航上の諸問題" 日本航空宇宙学会誌, Vol.25, No.282, 1977, PP342-347
- 2) 滑走路摩擦係数測定計評価試験報告, JAL 運航技術調査報告, OER-450 昭和52年3月
- 3) T. J. Yager, W. P. Phillips and W. B. Horne; A

- Comparison of Aircraft and Ground Vehicle stopping Performance on dry, wet, flooded, slush-, snow-, and ice-covered Runways, NASA TN D-6098 (1970).
- 4) F. R. Martin; Pavement Surface Treatments at Airports in Great Britain, NASA SP-5073 (1969).
 - 5) Standard Method of Test for Skid Resistance of Paved Surface using a Full-scale Tire, ASTM E274-70.
 - 6) Spec. for Standard Tire for Pavement Skid-resistance Test, ASTM E501-73.
 - 7) Spec. for Smooth Tread Standard Tire for Special-purpose Pavement Skid Resistance Tests, ASTM E524-75.
 - 8) W. B. Horne and J. A. Tanner; Joint NASA-British Ministry of Technology Skid Correlation Study – Results from American Vehicles, Pavement Grooving and Traction Studies, NASA SP-5073 (1969) pp. 325 ~ 359.
 - 9) R. Merritt; Concorde Landing Requirement Evaluation Tests, FAA Report, No. FAA-FS-160-74-2 (1974).
 - 10) YS-11 新潟空港における試験飛行結果報告, EN-50-11-37, ANA, 昭和 53 年 5 月
 - 11) B. Norrbom and K. Fristedt; Studies concerning Snow, Ice and Slush on Runways, FFA Memo 106 (1975).
 - 12) 市原薫 "路面のすべり抵抗に関する研究(1)" 土木研究所報告, 昭和 44 年 2 月
 - 13) 湿潤滑走路の安全基準に関する調査研究報告書, (そのⅣ), 航空振興財団, 昭和 51 年 3 月
 - 14) 航空保安業務処理規定「雪氷調査」昭和 52 年 12 月 1 日適用, 航空局管制保安部運用課
 - 15) ICAO Airport Service Manual.
 - 16) W. B. Horne; Status of Runway Slipperiness Research, NASA SP-416 (1976).
 - 17) D. W. Lawrence and J. H. Hawthorne; With Respect to Slush Touch Down-2, A Journal of British Corporation Commercial Aircraft Division (1977) pp. 17 ~ 27.
 - 18) Airport Services Manual, part 2 – Pavement Surface Conditions, ICAO (1977).

航空宇宙技術研究所報告 576号

昭和54年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

Printed in Japan