

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

航空機の雪氷滑走路摩擦係数研究の方向性について

井川寛隆、神田 淳

2006年9月

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency



# 航空機の雪氷滑走路摩擦係数研究の方向性について\*1

井川 寛隆、神田 淳\*2

Research Outlines for Aircraft Friction Coefficient on Winter Contaminated Runway \*1

Hiroataka IGAWA and Atsushi KANDA \*2

## ABSTRACT

On winter contaminated runways, aircraft operation may be inefficient. The rules of operation for airlines provide excessive safety margins because the relationship of the friction coefficient of actual aircraft and the friction coefficient determined by a ground friction measurement device, which is used for drawing up the rules, is not based on actual conditions. This report investigates the difficulties that airlines face, the relevant guidelines, and the present status of researches. Research outlines are presented in order to improve the accuracy of relationships of friction coefficients. The research includes the development of a new ground friction measurement device, analysis of flight data, and estimation of a maximum friction coefficient.

*Keywords: Contaminated Runway, Friction Coefficient, Winter Operation*

## 概 要

冬期に滑走路が雪氷で覆われると航空機の運航に大きく影響して運航効率が下がる。一方で、エアラインの運航規定策定に用いられている航空機と地上計測装置の摩擦係数の相関データが実情に合っておらず、運航規定には過剰な安全性があると考えられる。本報告では、日本のエアラインが直面している問題、諸規定、関連する研究の状況について調査した結果を示す。さらに、冬期における運航効率の向上を目指して、摩擦係数の相関データの精度を高めるために、JAXA が進めていく研究（新しい地上計測装置の開発・飛行データの解析・最大摩擦係数の推定）の方向性を示す。

### 1. はじめに

航空機の就航率（就航予定便数のうち実際に運航した割合）および定時運航率（出発予定時刻の15分以内にゲートを出発する割合）を高めることは、エアラインにとって非常に重要な課題である。わが国も加盟している International Civil Aviation Organization（ICAO：国際民間航空機関）の勧告でも95%以上の就航率が求められている。しかしながら北海道・東北・北陸地方等の寒冷地における空港では、冬期の就航率・定時運航率は低下する

傾向にある<sup>1)</sup>。これは冬期に滑走路が雪氷で覆われることで滑りやすくなることによる離着陸の制限や、除雪作業による離着陸の遅延が主たる原因である。特に離着陸の制限に伴う欠航・目的地変更は利用者への影響が大きだけでなく、多大なコスト増となるため、エアラインにとっては大きな問題となっている。

冬期の就航率や定時運航率を上げるために、空港を管轄する国土交通省は、高性能の除雪車両を導入することで滑走路の除雪時間の短縮を図っている。また離着陸性

\*1 H18年9月1日受付 (received 1 September 2006)

\*2 航空プログラムグループ 運航・安全技術チーム (Operation and Safety Technology Team, Aviation Program Group)

を高めるために、航空機メーカーは Antiskid Braking System (ABS) の性能を向上させるなどの改善を長年に渡り行ってきている。一方で、滑走路雪氷時の離着陸に関する運航規定の策定にあたって、一部に実情に合わない古いデータが使われているという現状がある。これは滑走路雪氷時の航空機の摩擦に関するデータであるが、理論解析が困難であることに加え大規模な実験がなかなか実施できないために更新されていない。実情に合っていないにも関わらず使われ続けているのは安全側のデータになっているためであるが、結果として過剰に安全な離着陸規定となっている可能性が高い。各エアラインが運航規定を緩和して、これまで不可と判断されてきた状況でも離着陸を可能とすれば、一層の就航率の向上につながる。勿論、運航の安全性確保は最重要であるため、やみくもに規定を緩和することはできない。そこで安全性を確保しつつ冬期の運航効率を向上させることを目標として、JAXA ではエアラインと協力して雪氷滑走路の摩擦係数に関する研究を現在進めている。本資料では、日本のエアラインが直面している問題、諸規定、関連する研究の状況について示し、最後に JAXA が進めていく研究の方向性について述べる。

## 2. 背景と課題

雪氷で覆われた滑走路（雪氷滑走路）でどのような問題が起こるのか、そして日本のエアラインは航空機の運航に際してどのような問題に直面しているのか、雪氷滑走路における離着陸の問題について、背景と課題について述べる。

### 2.1. 滑走路面状態と運航への影響

滑りやすさの観点から滑走路表面の状態を大きく分類すると、乾燥 (Dry)、湿潤 (Wet/Water/ Damp)、および雪氷 (Compacted Snow/Dry Snow/Wet Snow/Slush/Ice) となる (Table 2-1)。乾燥状態においては、タイヤと滑走路面間の凝着剪断抵抗がすべり摩擦として大きく作用する

ためにもっとも滑りにくくなり、航空機の離着陸性能を最大限発揮できる路面状態である。湿潤状態では、タイヤと滑走路面間の水分により凝着剪断抵抗が減るため乾燥状態に比べると滑りやすくなる<sup>2)</sup>。また、高速度になると水面上にタイヤが浮き上がり極端に摩擦が減るハイドロプレーニング現象が湿潤滑走路では発生する<sup>3)</sup>。ただし現在、国内各地の空港の滑走路面にはグルーピング加工が施されているため、十分な排水性能を保持していればハイドロプレーニング現象を起きにくくなっている。このハイドロプレーニング現象を除けば、乾燥および湿潤状態では、基本的にタイヤと路面間のすべりの問題である。これに対して雪氷状態の場合には、タイヤと雪氷面間のすべりの問題となり、航空機と滑走路の間の摩擦係数が極端に小さくなる。

滑走路表面の滑りやすさは航空機の離着陸に大きく影響する。滑走路が滑りやすくなれば、着陸時には停止距離が長くなるのはもちろんのこと、離陸滑走中にエンジンの故障で離陸を中止した場合の停止性能にも影響を与える。つまり必要離陸/着陸滑走路長が長くなるため、雪氷滑走路は運航上の大きな問題となる。

### 2.2. 日本の航空環境

雪氷滑走路に関する問題は日本に限ったことではなく世界的に見られるものである。しかし日本の航空環境は世界的にみても厳しいと考えられる。

一つ目の理由として日本の空港における滑走路が短いことが挙げられる。東京航空局の管内空港を Fig.2-1 に示す。さらに北海道・東北・北陸地方で定期便が就航している各空港の滑走路長を他のデータと共に Table 2-2 に示す。新千歳・函館・青森・三沢・仙台の各空港（表中グレーで表示）は 3000m 級の滑走路であるが、これら以外の空港の滑走路は 2000m 級およびそれ以下の長さであることがわかる。もちろん北海道・東北・北陸以外の降雪がある地方空港（松本、鳥取、米子、石見、出雲など）にも 2000m 級滑走路は存在する。なお国土交通省では既

Table 2-1 滑走路面状態

分類	状態	
乾燥	Dry	乾燥した状態
	Damp	湿っているが水膜は存在しない状態
	Wet	十分濡れているが、水膜の厚さは薄い状態
湿潤	Water	十分な水膜がある状態
	Dry Snow	乾燥した雪および水分をあまり含まない普通の雪
雪氷	Compacted Snow	除雪機材等で押しかためられた状態の雪
	Wet Snow	雪が水分をかなり含んでおり、手袋をした手で握ると水がにじんだりしみ出る状態
	Slush	雪が水分を十分に含んでおり、かかと又はつま先で踏みつけたり蹴ったりするとスプラッシュが上がる状態
	Ice	氷結した状態



存の大都市拠点空港整備の重点化の方針を打ち出しており、第7次空港整備7ヵ年計画（1996～2002年）で未着手だった4地方空港の新設および7地方空港の滑走路延長計画を、第8次空港整備5ヵ年計画（2003年～）で凍結している<sup>4)</sup>。特に滑走路延長計画が凍結された空港は、いずれも北海道・東北・北陸地方の空港（新千歳・秋田・山形・福島・新潟・佐渡・福井）であった。延長計画が凍結されたことで、2000m級以下の滑走路が大半を占める状況に当面変化は無い。参考として、東京航空局管内における最近の滑走路の新設・延長整備状況を Table 2-3 に示す。

二つ目の理由は、日本では運航している全航空機に占める大型機の割合が圧倒的に多いことである。世界の各地域での機材区別の運航機数を Table 2-4a に示す<sup>5)</sup>。なお機材区分については絶対的な指標は無いが、一般的に通用している概念に基づいて、大型機（250席以上）、

中型機（100席以上）、小型機（100席未満）、プロペラ機に分類している（Table 2-4b）。日本のエアラインが運航している航空機のうち、大型機の割合が1/3以上と世界の他の地域に比べて高い。特に積雪のある西欧・東欧・ロシア他・北米と比較すると、圧倒的に割合が高いことが分かる。なお参考として、国土交通省航空局（JCAB: Japan Civil Aviation Bureau）が定めている空港土木施設設計基準を Table 2-5 に示す。この基準によれば大型機が離発着する場合の滑走路長は原則として2500m以上とされている。当然のことながら大型機はより長い滑走路長を必要とする。

滑走路雪氷時でも、滑走路長が十分にあれば問題にならない。しかし日本の航空環境は、もともと滑走路が短い上に大型機の運航割合が高いことから、世界的にみても厳しいと言える。

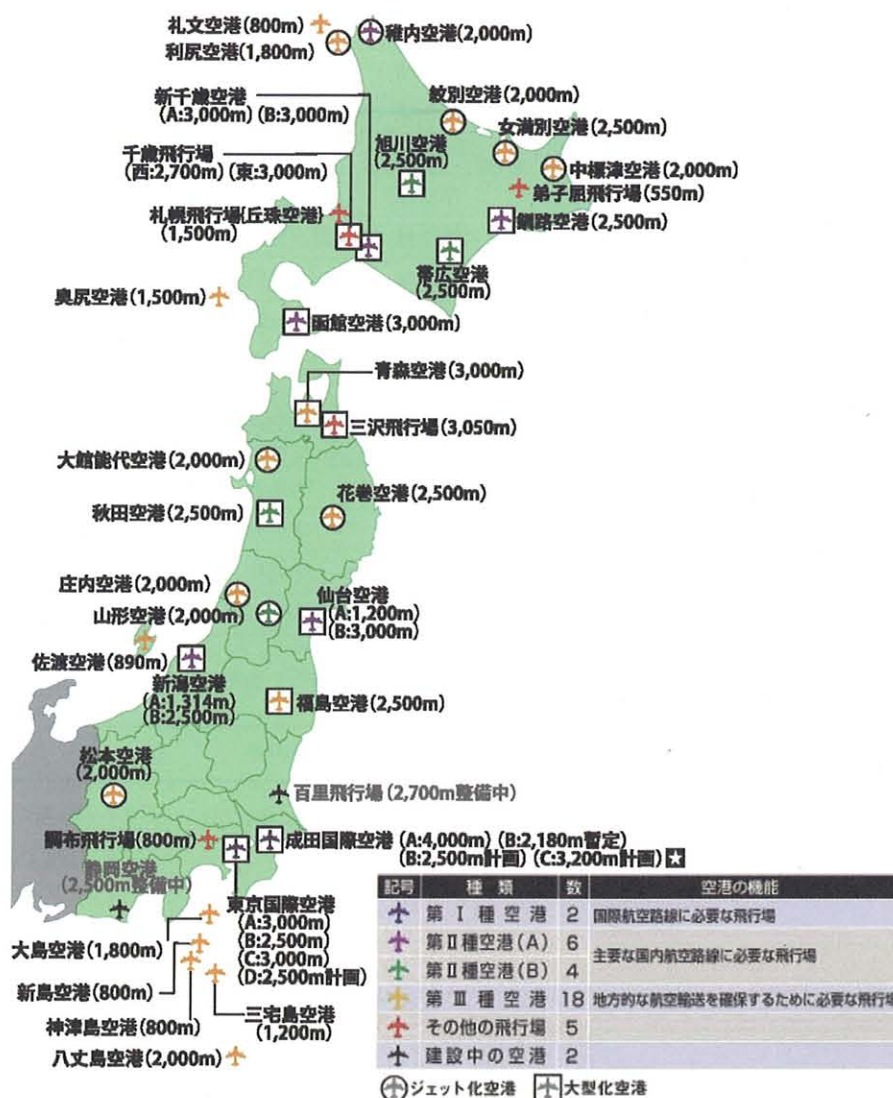


Fig.2-1 東京航空局の管内空港（出典：国土交通省東京航空局管内空港の現況）

Table.2-2 北海道・東北・北陸地方の空港

地方	空港	滑走路長 [m]	滑走路幅 [m]	種別	管理者	路線数		便数	
						国内	国際	国内	国際
北海道	新千歳	3000	60	第2種	国土交通省	31	7	280	40
		3000	60						
	稚内	2000	45	第2種	国土交通省	6		20	
	旭川	2500	60	第2種	国土交通省	6		32	
	紋別	2000	45	第3種	北海道	2		4	
	釧路	2500	45	第2種	国土交通省	7		36	
	女満別	2500	45	第3種	北海道	6		32	
	中標津	2000	45	第3種	北海道	3		10	
	帯広	2500	45	第2種	国土交通省	3		12	
	函館	3000	45	第2種	国土交通省	13	1	64	4
	丘珠	1500	30	自衛隊共用	防衛庁	5		24	
	礼文	800	45	第3種	北海道	1		4	
	利尻	800	45	第3種	北海道	2		6	
	奥尻	1500	45	第3種	北海道	1		8	
東北	青森	3000	60	第3種	青森県	6	2	40	10
	三沢	3050	45	米軍共用	米軍	3		12	
	大館能代	2000	45	第3種	秋田県	2		6	
	秋田	2500	60	第2種	国土交通省	5	1	24	6
	花巻	2500	45	第3種	岩手県	4		16	
	庄内	2000	45	第3種	山形県	3		10	
	山形	2000	45	第2種	国土交通省	4		10	
	仙台	3000	45	第2種	国土交通省	10	7	74	52
		1200	45						
	福島	2000	45	第3種	福島県	5	2	18	12
富山	2000	45	第3種	富山県	3	4	16	32	
北陸	小松	2700	45	自衛隊共用	防衛庁	6	2	36	14
	能登	2000	45	第3種	石川県	1		4	
	新潟	2500	45	第2種	国土交通省	8	7	44	38
		1314	45						
	佐渡	890	25	第3種	新潟県	1		10	

※平成17年3月現在。ただし、国内線については、曜日運航のものは、8月中で最大となる日で計上

Table 2-3. 最近の滑走路の新設・延長整備状況

空港	年月日	整備後の滑走路長	備考
新潟	H8.3.28	2,500m	(←2,000m)B滑走路供用開始
新千歳	H8.4.26	3,000m	B滑走路新設供用開始
旭川	H9.2.1	2,500m	(←2,000m)滑走路供用開始
中標津	H9.3.2	2,000m	(←1,800m)滑走路供用開始
東京国際(羽田)	H9.3.27	3,000m	新C滑走路供用開始
仙台	H10.3.26	3,000m	(←2,500m)B滑走路供用開始
大館能代	H10.7.18	2,000m	新空港開港
福島	H10.12.3	2,500m	(←2,000m)滑走路供用開始
函館	H11.3.25	3,000m	(←2,500m)滑走路供用開始
利尻	H11.6.1	1,800m	(←800m)滑走路供用開始
(新)紋別	H11.11.11	2,000m	新空港開港
女満別	H12.2.24	2,500m	(←2,000m)滑走路供用開始
東京国際(羽田)	H12.3.23	2,500m	新B滑走路供用開始
釧路	H12.11.30	2,500m	(←2,300m)滑走路供用開始
調布	H13.3.31	800m	(場外離着陸場→) コミュニター空港化
成田国際	H14.4.18	2,180m	暫定B滑走路供用開始
大島	H14.10.31	1,800m	(←1,200m)滑走路供用開始
丘珠	H16.3.18	1,500m	(←1,400m)滑走路供用開始
奥尻	H16.3.18	800m	新滑走路供用開始
八丈島	H16.9.30	2,000m	(←1,800m)滑走路供用開始
花巻	H17.3.18	2,500m	(←2,000m)滑走路供用開始
青森	H17.4.1	3,000m	(←2,500m)滑走路供用開始
奥尻	H18.3.25	1,500m	(←800m)滑走路供用開始

Table 2-4a 世界で運用されている旅客航空機の数

中南米	西欧	東欧	ロシア他	アフリカ	中東	豪州	中国	日本	他アジア	世界計
116	584	4	8	98	207	62	164	174	501	2545
(7.3%)	(12.8%)	(0.8%)	(0.4%)	(8.4%)	(35.5%)	(9.2%)	(17.8%)	(34.5%)	(29.3%)	(11.1%)
715	2434	208	749	481	246	222	652	265	757	11391
(45.2%)	(53.3%)	(42.1%)	(33.5%)	(41.1%)	(42.2%)	(33.0%)	(70.9%)	(52.6%)	(44.3%)	(49.7%)
58	648	100	780	85	39	36	68	10	65	3527
(3.7%)	(14.2%)	(20.2%)	(34.9%)	(7.3%)	(6.7%)	(5.3%)	(7.4%)	(2.0%)	(3.8%)	(15.4%)
693	899	182	698	506	91	353	35	55	387	5468
(43.8%)	(19.7%)	(36.8%)	(31.2%)	(43.2%)	(15.6%)	(52.5%)	(3.8%)	(10.9%)	(22.6%)	(23.8%)
1582	4565	494	2235	1170	583	673	919	504	1710	22931
(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)

Table 2-4b 機材区分

機材区分	機種
大型機	B747/777, A330/340, DC-10, MD-11, L-1011
中型機	B737/767, A300/320/321, DC-8, MD-80/90 他
小型機	CRJ-100/200/440 他
プロペラ機	Dash-8, Do228, YS-11, SAAB340 他

Table 2-5 空港土木施設設計基準による滑走路の標準長さ

設計対象航空機	滑走路
大型ジェット機 (B-747、B-777、MD-11 など)	原則として 2,500m
中小型ジェット機 (A-300、B-767、B-727 など)	原則として 2,000m
プロペラ機 (YS-11 など)	原則として 1,500m
小型機 (ドルニエ 228-200、DHC-6-300 など)	原則として 800m～1,000m

### 2.3. 冬期の運航方法

エアラインは雪氷情報に基づいて運航方針を決定する。雪氷情報の概略、雪氷情報に含まれるブレーキングアクションの測定、エアラインの雪氷情報の利用方法について概略を示す。

#### 2.3.1 雪氷情報の提供

雪氷情報は雪氷調査を行うことによって得られる。雪氷調査は空港管理者（例えば国が管理している第1種空港では空港事務所）が行う。調査を行うタイミングは、積雪時や除雪後、滑走路面監視装置（埋めこみセンサー）でモニタリングして状況が変わったとき、パイロットレポート等による。雪氷調査には、滑走路積雪等の状態（積雪量、積雪等の種類、ブレーキングアクション、積雪又は凍結の割合）、滑走路面の状況、滑走路のスノーバンクの状態、エプロンのブレーキングアクション、除雪の状況、総合的な予想、各誘導路のブレーキングアクションが含まれる。雪氷状況調査票を Fig.2-2 に示す。なお雪氷情報の提供方法は世界各国で異なるが、我が国では NOTAM (Notice to Airmen) で配信される<sup>6)</sup>

#### 2.3.2 ブレーキングアクションの測定

雪氷情報の中でもっとも重要なのがブレーキングアクションである。ブレーキングアクションは、滑りやすさを摩擦係数によって分類したもので、JCAB による分類を Table 2-6 に示す<sup>7)</sup>。航空保安業務処理規程では、ブレ

ーキングアクションの測定（実際には摩擦係数の測定）に Tapley Meter または SAAB Friction Tester (SFT)<sup>8)</sup>を用いることになっている。Tapley Meter は減速度計の一種であり、車両に搭載し、フルブレーキング時の減速度を計測する装置である。減速度は重力加速度の単位で表示され、そのまま摩擦係数値となる。SFT は連続式摩擦係数測定計の一種であり、測定輪にかかる荷重から摩擦係数を計測する専用の車両装置である。SFT は非常に高価であるものの、計測員の技量によるばらつきが小さく信頼性の高い摩擦係数が得られる。SFT は主だった空港に配備されており、Tapley Meter は SFT の補助用として用いられている。

ブレーキングアクションは、空港事務所の運航情報官が計測する。60～95km/h で滑走路の中心線から 2～8m の範囲を往復する。左右交互 3 回ずつ、滑走全長の 1/3 ずつ、6 回計測する。

#### 2.3.3. エアライン

雪氷情報はエアラインにとって運航を左右する重要なデータである。各エアラインのディスパッチャーおよびパイロットは、NOTAM により配信された雪氷情報により運航が可能かを判断する。例えば、目的地空港におけるブレーキングアクションの区分により、最大着陸可能重量を超過することが予想されれば欠航となる。また運航しても、途中で現地の状況が変化すると、目的地が変更される。

Table 2-6 JCAB のブレーキング・アクションの区分

ブレーキング・アクション	摩擦係数( $\mu$ )
GOOD (良好)	0.40 以上
MEDIUM TO GOOD (概ね良好)	0.36～0.39
MEDIUM (普通)	0.30～0.35
MEDIUM TO POOR (不良)	0.26～0.29
POOR (極めて不良)	0.20～0.25
VERY POOR (極めて不良で危険)	0.20 未満



様式2

平成 年 月 日		測定者		測定者	
自 時 分 至 時 分					
滑走路積雪等の状況(A地区:滑走路08頭1/3部分)					
積雪量		凍結等の種類		測定計によるB/A	
A1	積雪なし	B1	DRY SNOW	C1	GOOD $\mu=0.40$ 以上
A2	積雪平均 80mm未満	B2	WET SNOW	C2	MED TO GOOD $\mu=0.36$ "
A3	" 100mm "	B3	SLUSH	C3	MED $\mu=0.30$ "
A4	" 150mm "	B4	COMPACTED SNOW	C4	MED TO POOR $\mu=0.28$ "
A5	" 200mm "	B5	ICE	C5	POOR $\mu=0.20$ "
A6	" 200mm以上	B6		C6	VERY POOR $\mu=0.20$ 未満
滑走路積雪等の状況(B地区:滑走路中央1/3部分)					
積雪量		凍結等の種類		測定計によるB/A	
E1	積雪なし	F1	DRY SNOW	G1	GOOD $\mu=0.40$ 以上
E2	積雪平均 80mm未満	F2	WET SNOW	G2	MED TO GOOD $\mu=0.36$ "
E3	" 100mm "	F3	SLUSH	G3	MED $\mu=0.30$ "
E4	" 150mm "	F4	COMPACTED SNOW	G4	MED TO POOR $\mu=0.28$ "
E5	" 200mm "	F5	ICE	G5	POOR $\mu=0.20$ "
E6	" 200mm以上	F6		G6	VERY POOR $\mu=0.20$ 未満
滑走路積雪等の状況(C地区:滑走路2.6頭1/3部分)					
積雪量		凍結等の種類		測定計によるB/A	
I1	積雪なし	J1	DRY SNOW	K1	GOOD $\mu=0.40$ 以上
I2	積雪平均 80mm未満	J2	WET SNOW	K2	MED TO GOOD $\mu=0.36$ "
I3	" 100mm "	J3	SLUSH	K3	MED $\mu=0.30$ "
I4	" 150mm "	J4	COMPACTED SNOW	K4	MED TO POOR $\mu=0.28$ "
I5	" 200mm "	J5	ICE	K5	POOR $\mu=0.20$ "
I6	" 200mm以上	J6		K6	VERY POOR $\mu=0.20$ 未満
滑走路積雪等の状況(A地区)					
M1	吹きだまりあり	N1	吹きだまりあり	O1	吹きだまりあり
M2	表面は平ら	N2	表面は平ら	O2	表面は平ら
M3	凹凸又は高低あり	N3	凹凸又は高低あり	O3	凹凸又は高低あり
M4	雪が凍固した部分あり	N4	雪が凍固した部分あり	O4	雪が凍固した部分あり
M5	氷面に雪が積ってある部分あり	N5	氷面に雪が積ってある部分あり	O5	氷面に雪が積ってある部分あり
M6	氷面がとけて水あり	N6	氷面がとけて水あり	O6	氷面がとけて水あり
滑走路のスノーバンクの状況					
高さ		間隔		測定計によるブレーキング・アクション	
P1	スノーバンクなし	Q1	最小85mm以上	R1	GOOD $\mu=0.40$ 以上
P2	最高0.5m未満	Q2	70m "	R2	MED TO GOOD $\mu=0.36$ "
P3	" 1.0m "	Q3	55m "	R3	MED $\mu=0.30$ "
P4	" 2.0m "	Q4	40m "	R4	MED TO POOR $\mu=0.28$ "
P5	" 4.0m "	Q5	30m "	R5	POOR $\mu=0.20$ "
P6	" 4.0m以上	Q6	30m未満	R6	VERY POOR $\mu=0.20$ 未満

Fig.2-2 雪上状況調査

除雪の状況		オーバーラン/シヨルダ		滑走路灯		誘導路灯	
S1	除雪路は終了	T1	オーバーランは終了	U1	埋れた灯無なし	V1	埋れた灯無なし
S2	" に未了部分	T2	" に未了部分	U2	" 50%未満	V2	" 50%未満
S3	エプロンは終了	T3	シヨルダは終了	U3	" 50%以上	V3	" 50%以上
S4	" に未了部分	T4	" に未了部分	U4	全部埋れている	V4	全部埋れている

総合的な予想(3時間後)

W1	全体的に良くなる可能性が大きい
W2	大きな変化はないと思われ
W3	気温の上昇により凍結が守られる
W4	気温の低下により凍結が守られる
W5	若干悪くなるが使用に支障はないと思われ
W6	全体的に悪くなる可能性が大きい
W7	不明である

備考

1) 積雪量 (滑走路の平均積雪量が8.0mm未満の場合): A地区... mm, B地区... mm, C地区... mm
2) 各積雪路のブレーキング・アクション:
3) その他

注1 積雪の種類は、次の区分により分類している。

- (1) DRY SNOW : 乾燥した雪及び水分をあまり含まない普通の雪 ((2)~(4)以外の雪)
  - (2) WET SNOW : 水分をかなり含んでおり、手袋をした手で握ると水がにじんだりしみみ出る状態の雪
  - (3) SLUSH : 水分を十分に含んでおり、かかと又はつま先で踏みつけたらけたりつたりするとスプラッシュがもがる状態の雪
  - (4) COMPACTED SNOW : 除雪機で押しつぶされた状態の雪
- 2 誘導路のブレーキング・アクションは、各積雪路について、滑走路の表示に適用する区分(1~6)を採用し、該当数字を表示する。
- 3 滑走路の各地区毎の $\mu$ の平均値は、滑走路少数番号の地区から順に小数点以下2数字を表示する。ただし、ブレーキング・アクションがGOODの場合、"05"と表記する。例 30/28/95
- 4 測定計によるブレーキング・アクションは、標準型測定機器の表示がない限りブレーキメーターにより測定したものである。ブレーキメーター以外の機器により測定した場合は、その使用機器名を表示する。  
例 サーフエス・フリクション・メーターを使用した場合: SURFACE FRICTION TESTER
- 5 積雪の種類がSLUSHの場合、ブレーキング・アクションは測定しない。
- 6 積雪量が70mm以上ある場合は、サーフェス・フリクション・メーターを使用してのブレーキング・アクションは測定しない。

## 2.4. 問題点

エアラインの運航規定は、運航の効率性という観点で問題を抱えている。航空機が離着陸可能かどうかの判断は運航規定に基づいて行われる。運航規定では、SFT等の地上摩擦計測装置で計測したブレーキングアクションから、最大着陸可能重量を算出する。このため運航規定は、予め地上計測装置と航空機の摩擦係数の相関データを組み入れて策定されている。この相関データは、1974～1976年にかけての3冬期に千歳空港においてJCABおよびエアライン3社が共同で行った実験データに基づいている。実験で用いられた地上計測装置は、JCAB Type II MeterとML-Mu-Meterである。このうちJCAB Type II Meterは当時の日本で公式に用いられていた計測装置である（後にTapley Meterに取って代わられる）。航空機はDC-8-55, DC-8-61, DC-9-41, B727-200, B737-200が用いられている。本来であれば運航規定には当該航空機とSFTの間の摩擦係数の相関データが組み入れられているべきであるが、理論解析が非常に困難であることとこれ以降大規模な実験ができないことから、古い相関データが使われ続けている。安全性にはかなりの余裕があると考えられるため運航の安全性という観点での問題は無いが、効率性という観点で考えると大きな問題となる。冬期における日本の航空環境は厳しいことは前述のとおりであるが、運航規定の過度の安全性がさらに環境を厳しくしていると考えられる。

## 3. 諸規定

世界の代表的機関としてICAO: International Civil Aviation Organization, FAA: Federal Aviation Administration及びJAA: Joint Airworthiness Authority (現EASA: European Aviation Safety Authority)をとりあげ、それぞれが発行するICAO付属書、FAR及びJARにおいて、湿潤及び雪氷滑走路における性能基準をまとめた。性能基準の内容を(1)一般的事項、(2)Take-off、(3)Landingの3つに大別して整理し、比較を行ったものをTable 3-1に示す。

### 3.1 ICAO

ICAOが発行する付属書にはWet及びContaminated Runwayに関するRequirementはなく、Guidance MaterialとしてATM: Airworthiness Technical Manualに性能基準の記述がある。ATMの離陸性能基準はJARのそれに近い内容も部分的に見受けられる。着陸性能基準に関しては、Method A、B及びCという3つの基準を設定しており、その内Method BはFAR、Method CはJARの内容に近いものとなっている。これはICAOという機関の性格上、他のRequirementを平等に取り入れたためであると考え

られる。

### 3.2 FAA

FAAはLandingのRequired Distance以外には何もRequirementを課していないが、1978年Advisory Circular (91-6A)においてContaminated Runwayの性能に関するGuidance/ Recommendationを示している。その後、このAdvisory Circularに関する改訂が議論され、1986年にDraftとしてAdvisory Circular (91-6B)が公開されたが、現在も正式な改訂はなされていない。近年、FAAとJAAのHarmonizationが盛んに言われており、JARのNPA: Notice of Proposed Amendmentと同様の内容のNPRMを反映したAdvisory Circularとするためと見られている。

### 3.3 JAA

JAAにも、Wet及びContaminatedに関するRequirementは存在せず、Advisory Materialという位置づけでAMJ 25X1591に性能基準を設定している。ただし、1991年5月にJAR25を改訂するNPAが出され、それにはWet Runwayにおける離陸性能に関するRequirementが含まれている。また、FAR Part 121に相当するJAR(OPS)がJAA及び欧州のエアラインを中心に作成されており、その内容はWet及びSlippery Runwayにおける離着陸性能についてのRequirementを含んだものとなっている。

Table 3-1a 各機関の Requirement の比較 (一般的事項)

項目	ICAO	FAA	JAA
Runway Condition の定義	<p>@ANNEX-14</p> <p>Slush: 水分を十分に含んだ状態の雪。</p> <p>Dry Snow: Loose で吹き飛ばされやすく、手で握って放すと粉々になる雪。</p> <p>Wet Snow: 手で握ると固まって団子状態になる雪。</p> <p>Compacted Snow: 押し固められ、それ以上圧縮されることなく、拾い上げると固まったままかバラバラに崩れる雪。</p>	記載なし	<p>Dry: “Wet” でも “Contaminated” でもない滑走路。Grooves or Porous Pavement が施された滑走路。(Braking Action が実質的に Dry の場合)</p> <p>Wet: 滑走路面は十分に濡れ、光っているが Standing Water の部分はない。</p> <p>Standing Water, Slush or Loose Snow: Required Length and Width の滑走路面の 25 % 以上が 3mm(0.125inch)以上の Standing Water で覆われている状態。もしくは、3mm 以上の Standing Water と等価な Slush または Loose Snow で覆われている状態。</p> <p>Compacted Snow: 雪が押し固められた状態</p> <p>Wet Ice: Wet Ice のために、Braking Action が非常に低い状態。</p>
Limitation	記載なし	<p>記載なし</p> <p>@A/C 91-6A</p> <p>0.5inch を超える Standing Water、Slush or Wet Snow で覆われた滑走路では離陸禁止。</p>	記載なし
Runway Condition 管理基準	<p>滑走路の表面摩擦は定期的に測定すべきであり、滑走路全般またはその一部の摩擦特性が当該国家によって定められたレベル以下の場合、その改善対策を講ずるべきである。</p> <p>滑走路の表面は良好な Braking <math>\mu</math> を得るため、または抵抗を小さくするために雪、氷、水たまり等はできるだけ迅速に完全に除くべきである。</p>	<p>記載なし</p> <p>@A/C 150/5320-12A</p> <p>Runway Condition の管理基準を設定</p> <p>@NPRM(1991 Summer)</p> <p>Wet 時の Braking Action を測定</p>	記載なし

Table 3-1b 各機関の Requirement の比較 (Take-Off その1)

項目	ICAO	FAA	JAA
Distance Requirement	@ATM Part III One Engine Out Distance も考慮。	記載なし @ Amendment 25-42 NPRM(1991 Summer) Wet において、One Engine Out Distance も考慮。	One Engine Out Distance も考慮。
Braking $\mu$	@ATM Part III Wet: Varying with speed Dry Snow: $\mu = 0.25$ Ice or Compacted Snow: $\mu = 0.18$	記載なし	Wet: $\mu = 0.5 * \text{Dry } \mu$ Standing Water, Slush or Loose Snow: $\mu = 0.25 * \text{Dry } \mu$ ( $V \leq 0.9 * V_p$ ) $\mu = 0.05$ ( $V > 0.9 * V_p$ ) Compacted Snow: $\mu = 0.2$ Wet Ice: $\mu = 0.05$
Reverse Thrust Accountability	@ATM Part III 考慮可能。	記載なし @ Amendment 25-42 NPRM(1991 Summer) Wet において、考慮する。	Wet: 信頼性が実証できれば考慮可能。 Contaminated: 考慮可能。
Aquaplaning Speed の計算法	@Circular 60 $V_p = 3.4 (P/\sigma_s)^{1/2}$ P = Tyre Pressure (kPa) $\sigma_s$ = Relative density	記載なし	$V_p = 9 (P/\sigma)^{1/2}$ P = Tyre Pressure (lb/psi) $= 34(P/\sigma)^{1/2}$ P = Tyre Pressure (kg/cm <sup>2</sup> ) $\sigma$ = Specific density

Table 3-1c 各機関の Requirement の比較 (Take-Off その2)

項目	ICAO	FAA	JAA
Precipitation Drag の計算	<p>@Circular 60</p> <p>Drag due to slush:</p> $D = C_{DS} \frac{1}{2} \rho_w \sigma_s V_g^2 d_s b$ <p><math>\rho_w</math>: Density of water  <math>\sigma_s</math>: Relative density of slush  <math>V_g</math>: Aeroplane ground Speed  <math>d_s</math>: Slush depth  <math>b</math>: Chord length of tyre cross section at slush surface</p> $= 2w \frac{(\delta+d)}{w - ((\delta+d)/w)^2}^{1/2}$ <p><math>w</math> = Maximum width  <math>\delta</math> = Tyre deflection  <math>C_{DS}</math>: Slush drag coefficient</p>	記載なし	<p>Precipitation drag</p> <p>=Displacement Drag                      + Spray Impingement Drag</p> <p>Displacement Drag (Tyre Drag):</p> $D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 S$ <p><math>\rho</math>: Density of precipitation  <math>S</math>: Frontal area of tyre = <math>b*d</math>  <math>d</math> = Depth of precipitation  <math>b</math> = Tyre width</p> $= 2w \frac{(\delta+d)}{w - ((\delta+d)/w)^2}^{1/2}$ <p><math>w</math> = Maximum width  <math>\delta</math> = Tyre deflection</p> <p><math>C_D = 0.75</math> (Isolated Tyre)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>= 0.75 * 1.6</math> (Dual wheels trailing arm)</li> <li><math>= 0.75 * 2.0</math> (Dual wheels in front of the main led)</li> <li><math>= 0.75 * 3.35</math> (Four wheels bogie layout)</li> </ul> <p>Spray Impingement Drag:</p> <p>Nose Wheel</p> $D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 S * (\text{Number of wheels})$ <p>Main Wheel</p> $D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 * S/2 * (\text{Number of wheels})$ $C_D = 8 * L * 0.0025$ <p><math>L</math> = Length in feet of fuselage behind the point at which the top of the plume reaches the height of the bottom of the fuselage.</p>
Screen Height	<p>@ATM Part III</p> <p>35 ft (All Engine Operative)</p> <p>15 ft (One Engine Inoperative)</p>	<p>記載なし</p> <p>@Amendment 25-42</p> <p>NPRM(1991 Summer)</p> <p>Wet の場合 15 ft</p>	15 ft



Table 3-1d 各機関の Requirement の比較 (Landing)

項目	ICAO	FAA	JAA
Threshold Speed	Method A: 1.0V <sub>s</sub> +5kt と 1.2V <sub>s</sub> の大きい方を V <sub>MIN</sub> とし、V <sub>MIN</sub> + (0.2V <sub>s</sub> と 20kt の小さい方) Method B: 1.25 V <sub>s</sub> 以上 Method C: 1.25VSIG+10kt (All Engine Operative) 1.25VSIG+5kt (One Eng. Inoperative)	V <sub>REF</sub>	V <sub>REF</sub> ~V <sub>REF</sub> + 10kt
Angle of Descent	Method A: 3 deg. B: 記載なし C: 2.5 deg.	記載なし	記載なし
Airborne Time	Method A: 24 - 0.0454V <sub>TH</sub> (sec) V <sub>TH</sub> in kt B&C: 記載なし	記載なし	7 秒
Descent Rate	Method A&B: 記載なし C: 5 ft/sec 以下	記載なし	記載なし
Touchdown Speed	記載なし	記載なし	実証値がない場合、Threshold Speed の 93%
Touchdown Point	Method A&B: 記載なし C: Threshold Speed の関数として定まる	記載なし	記載なし
Distance Factor	Method A: 1.15(All Eng.)と 1.10(One Eng. Inop.)の大きい方 Method B: Wet L/D Field Length = 1.15 * Dry Landing Field Length = 1.15/0.6 * Dry Distance Method C: 1.0	Wet or Slippery Landing Field Length = 1.15 * Dry Landing Field Length = 1.15/0.6 * Dry Distance	1.15
Braking μ	Method A&B: 記載なし Method C: Wet = 0.5 * Dry μ 低摩擦 Wet = 0.25 * Dry μ	記載なし	Take-Off に同じ

## 4. 関連研究

### 4.1. 国際プロジェクト JWRFMP<sup>9)</sup>

#### 4.1.1. JWRFMP の背景

1989年に降雪時のカナダドライデン空港で発生したFokker-28の事故に対し、事故調査委員会は「滑走路面状態を技術的かつ正確に定義する方法とそれらが航空機性能へ及ぼす影響について調査を行うこと」という勧告を出した。

現在、雪氷滑走路での航空機性能については、国によってガイドラインが示されている場合もあるが、国際的に統一された基準がないというのが現状である。これは摩擦係数測定機器により測定した摩擦係数と航空機性能の相関確立に多くの技術的な問題があるためである。

こうした背景の中、1995年12月にカナダ航空局及びNASAは「雪氷滑走路における摩擦係数測定」に関し共同で調査・研究を行うことに合意し、翌年1月に「雪氷滑走路等摩擦係数測定機器に関する国際的な共同調査研究プロジェクト」(JWRFMP: Joint Winter Runway Friction Measurement Program)が発足した。さらに、1996年には、JWRFMPの進捗状況報告会議であるIMAPCR'96: International Meeting of Aircraft Performance on Contaminated Runwayが開催され、その後1999年、2004年にも開催された。

#### 4.1.2. JWRFMP の目的

JWRFMPの目的は以下の通りである。

- (1) 雪氷滑走路における航空機及び摩擦係数測定機器の摩擦係数測定試験実施及び試験結果のデータベース化
- (2) 航空機と摩擦係数測定機器間の相関の確立 (Landing Distance Tableの作成)
- (3) 摩擦係数測定機器間の相関の確立 (IRFI: International Runway Friction Index、詳細後述) 及び摩擦係数通報のIRFIへの国際的統一
- (4) Contaminant Dragに関する調査研究
- (5) 防除氷液がタイヤ摩擦性能に及ぼす影響の調査
- (6) 雪、氷および防除氷液の基礎的研究
- (7) 雪氷滑走路での横風が航空機のHandlingへ及ぼす影響の調査

#### 4.1.3. JWRFMP の構成

JWRFMPの構成メンバーは以下の通りである。

##### (1) 運営委員会メンバー

Transport Canada (カナダ航空局)、NRC (National Research Council Canada)、FAA、NASA、NCAA (ノルウェー航空局)、DGAC (フランス航空局)

##### (2) その他の協力メンバー

ICAO、JAA、ASTM (American Society for Testing Materials)、研究機関、軍、航空会社、メーカー等

#### 4.1.4. JWRFMP の活動

1996年1月から実地試験を含む調査・研究が実施されている。ノースベイ空港、NASA Wallops Flight Facility等で、様々な滑走路面状態において航空機 (Falcon 20、Dash 8、B737、B727等) 及び摩擦係数測定機器 (10種以上) の実地試験が行われた。日本においても2003年に新千歳空港で実施試験が行われた<sup>10)</sup>。また、定期的に国際会議やWorkshop等が開催され、データの解析結果、プロジェクトの進捗状況に関して議論が行われた。

#### 4.1.5. IRFI について

IRFI: International Runway Friction Index<sup>11)</sup>とは、摩擦係数測定機器の違いによる通報値のばらつきを極力小さくするために、機器間の相関関数を求め、いずれの機器による測定結果も共通の尺度に換算し通報するというものである。

JWRFMPで行われた各種摩擦係数測定機器(15種類)による3,000以上の摩擦係数測定試験結果から、IRFIを一次式で表されるようデータ解析をする。IRFIを一次式で表すためには、全ての測定機器と良好な相関が得られるリファレンスデータが必要である。リファレンスデータとしては、以下の4種類が考えられる。

- (1) リファレンスデバイスを開発しその測定値をリファレンスデータとする。
- (2) 全ての測定機器における測定データの平均値
- (3) 2種類の測定機器における測定データの平均値
- (4) 任意の1つの測定機器における測定データ

これまで(3)の方法が検討され、様々な2種類の組み合わせ平均値と全ての測定機器によるデータを一次回帰させ、最も相関の良い組み合わせをリファレンスデータとするような統計学的な解析が行われた。その結果SFT79 (Surface Friction Tester: SAAB) とIMAG(フランスで使用されている連続式摩擦係数計測装置)の測定データの平均値が、全ての測定機器と最も相関が良くリファレンスデータとして適していると考えられている。このデータを基にしたIRFIのプロトタイプデータの設定がなされた。

しかし、IRFIのプロトタイプデータについては、いくつかの問題が指摘されている。また、IRFIと航空機ブレーキ性能との相関の確立についても、課題として残されている。

## 4.2. JAXA の従来研究

旧 NAL (National Aerospace Laboratory) の時代を含めると、JAXA では雪氷滑走路面に対する摩擦係数測定装置の開発を行った事例がある。ここでは、過去に行われた研究の概要を示す。

### 4.2.1. 滑走路面の滑り評価法に関する研究<sup>12)13)</sup>

#### 研究期間

昭和 52 年度～昭和 54 年度

#### 研究担当者

山根皓三郎、上田哲彦、外崎得雄、小野幸一、竹内和之（機体第一部）

#### 研究の概要

滑走路面のすべり計測法の一つとして、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 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、摩擦係数  $\mu$  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  $\mu_D$  との比の逆数 ( $\mu_D/\mu$ ) に一致する。

DBV による計測法は、タイヤの摩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。

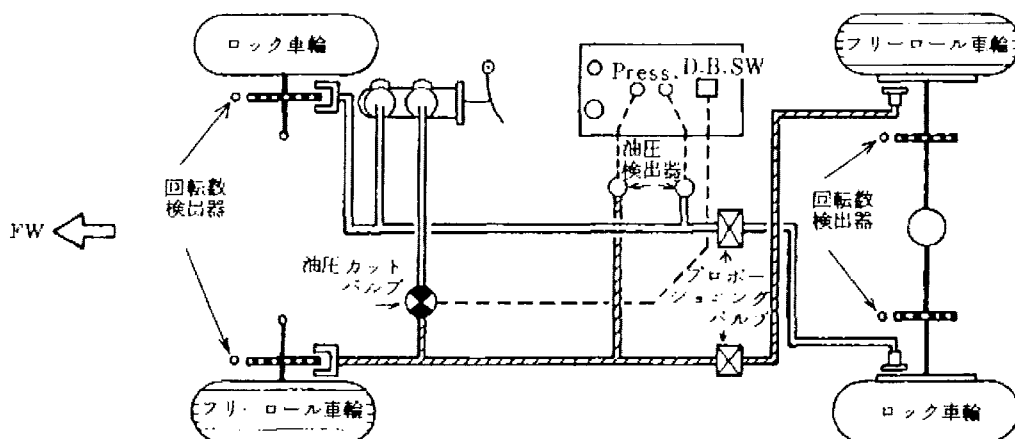
このような背景のもと、主に雪氷滑走路面のすべり計測法の問題点を解明するために、DBV を製作し基礎実験を行った。

#### 製作した DBV の概要

トヨタ社製クラウン 2600 (C-MS101-TKG) を改造し、DBV を製作した。当該車両に、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替機構および安全対策のための機構の付加を行った。

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、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 (Fig.4-1)。油圧カット・バルブはソレノイドに通電することによってバルブが閉じて油圧が遮断されるが、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油圧配分を適正化して普通乗用車として用いるときの後輪の早期ロックを防止するためのプロポーショニング・バルブと、対角 2 系統の油圧作動状況をモニタするために油圧検出器を取り付けた。

Fig. 4-1 DBV の油圧配管系統図



計測装置および計測項目を Table 4-1 に示す。速度および距離計測のために、計測用の第 5 輪を車両後部にバンパーをはずして取り付けられた。

#### 計測実験

最初に、DBV の加速性能、走行安定性を把握するために、日本自動車研究所の総合試験路にて実験を行った。その後、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、各空港での計測実験を行った。また、Tapley Meter および ML-MU-Meter での計測も同時に行い、計測結果の比較を行った。実験の日程、路面状態などをまとめたものを Table 4-2 および Table 4-3 に示す。

Tapley Meter とは、自動車にとりつける簡易加速度計で、20km/h から制動をかけて生じた最大減速度を計測し、摩擦係数を求めるものである。ML-MU-Meter は、開き角 15° を持って取り付けられた 2 輪車を、60km/h の一定速

度で牽引し車両に働く横方向の抗力を計測し、摩擦係数を求めるものである。

#### 実験結果まとめ

- 1) 積雪路面では、DBV のすべり摩擦係数は速度の減少とともにやや減少する。
- 2) ML-MU-Meter は積雪路面で極端に低い値を示し、牽引速度を低くすると計測値は高くなる傾向があった。
- 3) Tapley Meter は、DBV のスノー・タイヤを用いた 10～20km/h のすべり摩擦係数を良く表す。
- 4) Tapley Meter は DBV の  $\mu_1$  の 1.8 倍程度を示した。(  $\mu_1$  とは、DBV で計測された制動距離  $S$  と初期速度  $V_0$  を用いて、ロックしたタイヤと地面とのあいだに速度等によらず一定の摩擦力が作用するとして求めた摩擦係数  $\mu_1 = V_0^2/gS$  である。)

Table 4-1 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 1s/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)
記録モニター用 電磁オシログラフ (共和電業製 RMS-11TPPT 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ー)

Table 4-2 実験日程その1

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)	Tapley Meter ML-Mu-Meter
N	昭和52年12月5,6日	新東京国際空港	A滑走路 エプロン 25mmおよび 100mmピッチ の溝切路面	乾燥および湿潤 (散水車)	
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	

\*エプ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

Table 4-3 実験日程その2

実験名	年月日	場所	路面状態	比較計測器
E	53.6.23	調布空港	湿潤	
F	53.7.12	"	半乾燥	
G	53.7.13	"	乾燥	
K1	54.2.7	東千歳場外着陸場	積雪	Tapley Meter ML-Mu-Meter
K2	54.2.8	"	"	" "
K3	"	"	"	" "
K4	54.2.9	"	"	" "
K5	"	"	"	" "



#### 4.2.2. 雪氷滑走路面摩擦係数測定装置の開発<sup>14)</sup>

##### 開発期間

平成11年度～平成12年度

##### 開発担当者

外崎得雄、甲斐高志、上田哲彦（構造材料研究センター）

##### 装置開発の背景

我が国では雪氷滑走路面摩擦係数測定に SAAB 社製の SFT (Surface Friction Tester) と Tapley Meters 社の Tapley Meter が公式な装置として用いられている。SFT は、離着陸回数が多く降雪頻度の高い空港に配備されており、測定は迅速な装置であるが高価である。一方 Tapley Meter は、簡便で安価な装置であるが、測定路面および測定車両のタイヤに制限を受ける、測定に多くの時間を要する等の問題がある。

空港およびエアラインの運航管理者の間では、これら2つの装置の利点をあわせ持つような、迅速に精度良く測定できる簡便な装置の開発が望まれてきた。そこで、航空宇宙技術研究所ではこの要望に沿うべく新たな装置の開発を行った。前輪駆動式一般車両の後輪に専用のホイールを取り付け、それに本装置を取り付け連続して迅速に摩擦係数の測定を行うものである。車両に対して構造的な改造を加えないため、ホイールを元に戻すことにより容易に車両の原状復帰ができる簡便な装置である。

##### 装置の概要

装置の概略を Fig.4-2 に示す。構造の構成は、計測補助輪、走行輪、計測輪、及び計測輪への垂直荷重負荷機構と滑り率を持たせるための機構から成っている。計測輪への垂直荷重負荷機構は、走行輪と計測補助輪間のロード部分中間に取り付けたコイルバネを用い、フレーム上端部に力を加える事により走行輪軸を回転中心としフレームを回転させて計測輪に下向き荷重を負荷するシンプルなものである。荷重負荷量はコイルバネ受けナットの回転でバネを伸縮させ調節し、その時の値はバネと直列に組み込んだロードセルで測定する。計測輪への荷重負荷のためにデッドウエイトを使用する他の装置に比べて機構重量の軽減となる。レバー操作によりワンタッチで垂直荷重の負荷と解除が可能な機構を組み込んだ。これにより、計測輪への所定量の荷重負荷と解除が容易となるだけでなく、非測定時のタイヤ摩耗を防ぐことも可能となる。

計測輪に滑り率を与える機構を Fig.4-3 に示す。走行輪と計測輪の間に取り付けたフレーム内の二組の傘歯車と

シャフトを用いて走行輪の回転を計測輪に伝達する。このとき計測輪に与える滑り率は走行輪と計測輪の径、傘歯車の歯数の選択により決まる。計測輪に滑り率を持たせることによりタイヤと路面の間に発生する摩擦力を、フレーム内のシャフトの振りとして、シャフトに組み込んだトルクセンサで計測する。以上により、荷重と滑り率の値が変更可能な摩擦係数測定装置の機構を構成した。

##### 測定試験

1) 平成11年、日本航空学園の乾燥路面にて、走行時の安定性、操縦性の確認を目的に試験実施。最高速度70km/hまで走行安定性を確認。

2) 平成12年12月25日、日本自動車研究所において、3種類の摩擦係数の異なる湿潤路面について、摩擦係数測定試験を実施。

3) 平成13年1月22日～25日、新千歳空港エプロン・誘導路において、アイスバーン、グルーピング路面上新雪、圧雪、新雪の路面状態について測定試験を実施。SFT、ASFT 及び Grip Tester と測定結果比較を行った。

##### 測定試験結果まとめ

雪氷滑走路面の摩擦係数を精度良く連続して測定できる簡便な測定計を目指して開発を行い、この装置に対して乾燥路面における走行時の安定性、操縦性の確認試験と雪氷路面における摩擦係数測定試験を実施した。その結果、装置の走行安定性と操縦性に問題のないことを確認し、また、雪氷路面において現用の装置と同時に測定試験を行い、良好な相関が得られる事を確認した。但し、当該装置の測定結果は全体に低めに出る傾向を示した。この原因としては、装置の内部摩擦は計測輪に地面反力が掛からない状態で測定されているのに対し、実際の走行時には地面反力により軸受けや歯車を受ける力が増加し、内部摩擦も大きくなっているためと考えられる。

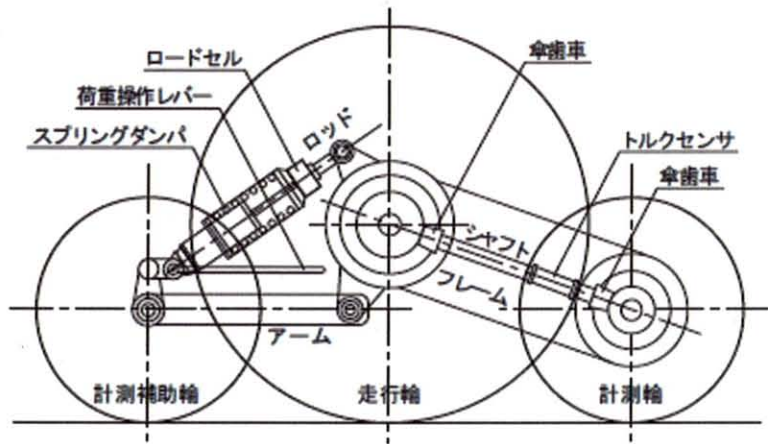


Fig. 4-2 摩擦係数計測装置の概略

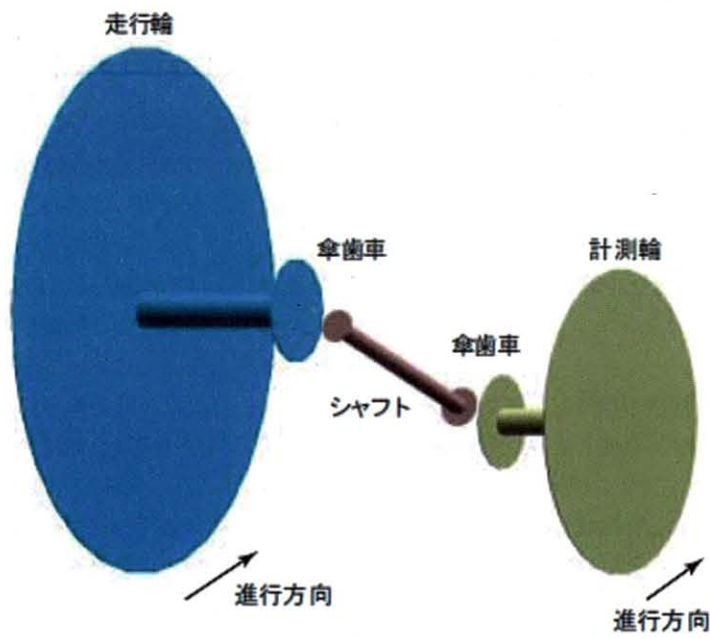


Fig. 4-3 滑り率発生機構

### 4.3. 自動車分野における研究

冬期雪氷路面の摩擦係数計測に関しては、航空機同様に自動車に対しても、その安全確保のための重要な課題として、国内外で多くの研究がなされている。国内の主な研究機関について、情報収集・調査を行った。いくつかの機関では独自の雪氷路面の摩擦係数計測装置を有し、冬期路面の維持管理のための基本データ取得を行っている。また、冬期凍結路面における自動車の挙動解析、加速度・減速度等の運動計測データから凍結路面の摩擦係数推定を行う研究なども行われている。これらの研究は、我々の行う航空機の雪氷滑走路摩擦係数研究の参考になるものである。以下、調査を行った機関の研究内容・研究設備等の概要を示す。

#### 4.3.1. 北海道大学大学院工学研究科 北方圏環境政策工学専攻 交通インテリジェンス研究室

##### ・車両運動データを利用した冬期路面状態の推定<sup>15)16)</sup>

車両にGPSと車両運動センサーを取り付け、得られた車両位置・運動データから、車両と路面の間に作用する力を考えることで走行地点の路面のすべり摩擦係数・スリップレシオ等を逆推定している。さらに、逆推定した現時点のすべり摩擦係数と気象データから短時間先のすべり摩擦係数の予測するモデルを提案した。路面は時間とともに大きく変化していくため、従来のオフラインのモデルを発展させ、カルマンフィルタを用いたオンラインの予測モデルを構築した。

##### ・バス型摩擦係数計測試験車

当該研究室では、独自に製作したバス型の摩擦係数計測試験車を有している。この試験車は、一般的な路線バスを改造したものである。計測方法としては、試験タイヤにかかる抵抗力をトルク計で直接計測し、タイヤにかかる荷重との関係からすべり摩擦係数を測定

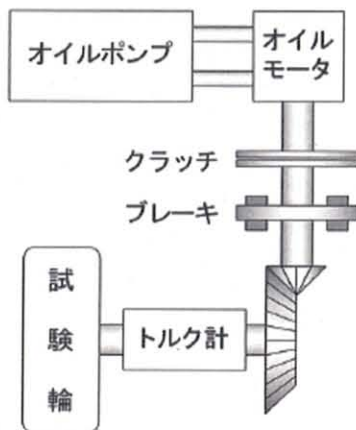


Fig. 4-4 摩擦係数計測機構 (北海道大学)

するシステムとなっている。摩擦係数計測機構の模式図を Fig.4-4 に、計測車両の外観写真を Fig.4-5 に示す。本計測試験車では、スリップレシオを変化させた摩擦係数計測も可能である（ただし、スリップレシオの値を一定値にコントロールするのは困難である）。



Fig. 4-5 バス型摩擦係数計測試験車 (北海道大学)

#### 4.3.2. 北見工業大学 工学部 土木開発工学科 寒冷地工学講座

##### ・路面評価型ドライビングシミュレータ

当該研究室では、路面性状評価の機能を有するドライビングシミュレータを有する (Fig.4-6)。路面性状 (わだち掘れ, 凹凸, 段差など) は車の運動の起因となるものであり、その性状の良否は、道路利用者の安全性や乗心地に大きな影響を及ぼすため、その評価方法の確立を目指している。現在、「路面評価型ドライビングシミュレータ」を用いて道路の路面状況、車両運動及び視界映像を再現する事により、

(1) 高齢者や身体障害者に優しい道路の設計・評価法

(2) 寒冷地における道路の維持管理システム

などの開発を実施している。

本ドライビングシミュレータの特徴として、実際の交通環境において測定した前方映像及び車両挙動データを



入力することによって、実走行の再現ができるということが挙げられる。シミュレータ本体は6軸の電動サーボシリンダに支えられており、このシリンダが伸縮/回転することによって車の挙動をシミュレートする。さらに、ミラースクリーン、振動機能付シート及び路上走行音(ロードノイズ)などを採用し、現実感の向上を行っている。



Fig. 4-6 路面評価型ドライビングシミュレータ (北見工業大学)

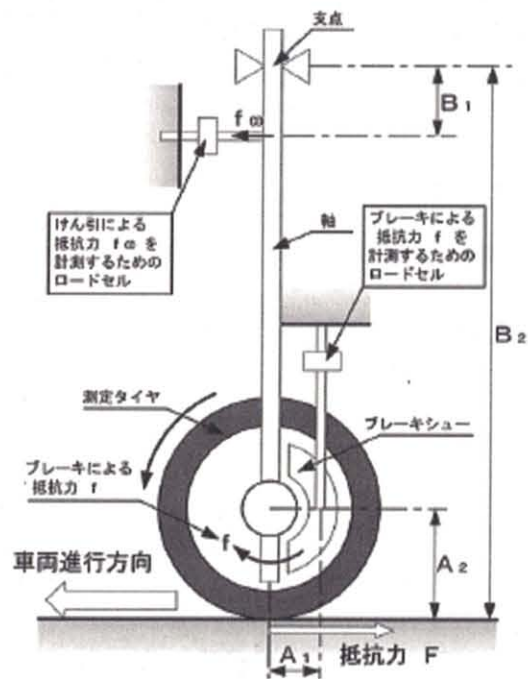


Fig.4-7 摩擦係数計測機構 (開発土木研究所)

#### 4.3.3. 北海道開発土木研究所 道路部 交通研究室

##### ・バス型摩擦係数計測車両

この車両には、走行用の車輪とは別に、中型バス車両の中央線から左にオフセットした位置に測定用の車輪(試験輪)が取り付けられている。このすべり試験車は、試験輪を垂直に上下させタイヤにかけた荷重とブレーキによる抵抗力からすべり摩擦係数を測定する機構となっている。測定は、一定速度で走行しながら試験輪だけ制動をかけ(試験輪は完全ロック状態)、試験輪にかかる抵抗力を測定する。また、車両の進行方向に対して試験輪にのみ横滑り角(ステア角)をつけた時に生じる横滑り摩擦係数を計測することも可能である。操作は車両に搭載したパソコンによって行うことが可能であり、計測データはオンラインで摩擦係数に変換され、記録される。計測機構の模式図を Fig.4-7 に、試験車両の外観を Fig.4-8 に示す。

全長：8990mm 全幅：2300mm 車体重量：9.5t

製造：八千代製作所



Fig.4-8 バス型摩擦係数計測試験車 (開発土木研究所)

・ 苫小牧寒地試験道路

開発土木研究所では、苫小牧東部地域に周回可能なテストコース「苫小牧寒地試験道路」を所有している (Fig.4-9、 Fig.4-10)。コースの形状は周回延長 2,700m で 1,200m の直線部 2 本と 160m の 2 つのカーブからなっている。直線部は高規格幹線道路対応 4 車線区間と一般道路対応 2 車線区間があり、 高速での実験が行える。また、設備として人工降雪機があり、冬期凍結路面を模擬することが可能である。以下の課題について、研究を行っている。

- 1) 冬期における交通事故の減少と交通の円滑化
- 2) 郊外部で多発する重大事故の減少ならびに被害軽減
- 3) 積雪寒冷地により適合した低騒音舗装の開発
- 4) 寒冷地走行支援システムによる冬期走行負担軽減と冬期交通事故の防止
- 5) 新たな道路情報提供システム開発、冬期多重衝突事故の防止対策手法の確立

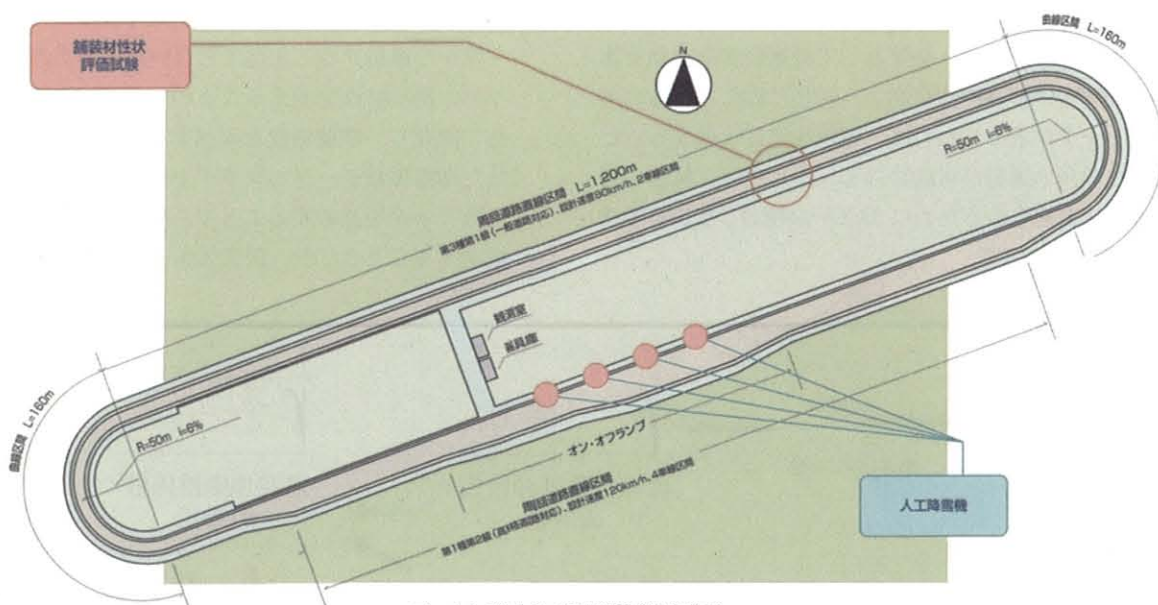


Fig.4-9 苫小牧寒地試験道路概要



Fig.4-10 苫小牧寒地試験道路全景



## 5. JAXA 研究の方向性

冬期の運航効率を向上させるために実行できる方法は少ない。たとえば滑走路長を伸ばすことや、航空機の制動性能を大幅に向上させることは、実現が非常に困難か不可能に近い。もっとも現実的かつ効果的な方法は、運航規定における過度の安全性を排除することである。過度の安全性は、航空機と地上計測装置の摩擦係数の相関データにあると考えられる。これは滑走路雪氷時の離着陸に関する運航規定の策定時に用いられるデータであるが、理論解析が困難であることに加え大規模な実験がなかなか実施できないために更新されていないため、実情に合っていないデータとなっている。実情に合っていないにも関わらず使われ続けているのは安全側のデータになっているためであるが、結果として過剰に安全な離着陸規定となっている可能性が高い。現状に即した精度の高い相関データが求められれば、運航規定に反映することで効率性の高い運航が可能になる。本章では、精度の高い相関データを求めるために JAXA が検討している手法について述べる。

### 5.1. 概要

航空機と地上計測装置の摩擦係数の相関を決定するためには、同じ雪氷滑走路でそれぞれの最大摩擦係数を求める必要がある。このとき地上計測装置は、JCAB で標準的に使用されている SFT を用いるのが妥当である。SFT による最大摩擦係数は、実測することによって簡単に得られる。一方、航空機の最大摩擦係数を計測するためには、大規模な実験が必要であり実施が困難である。そこで航空機の最大摩擦係数を日常の運航データ（フライトデータ）から求める手法を考える。

フライトデータから航空機の最大摩擦係数を求めるためには工夫が必要である。日常の運航でブレーキを一杯使うことは無く、最大摩擦係数を直接的にフライトデータから解析することはできないためである。そこでタイヤの滑り特性を変えることのできる地上計測装置を新たに開発し、摩擦係数を実測する。地上計測装置で得られた摩擦係数データとフライトデータから得られた摩擦係数データを比較することで、航空機の最大摩擦係数を推定することとした。研究スキームを Fig.5-1 に示す。

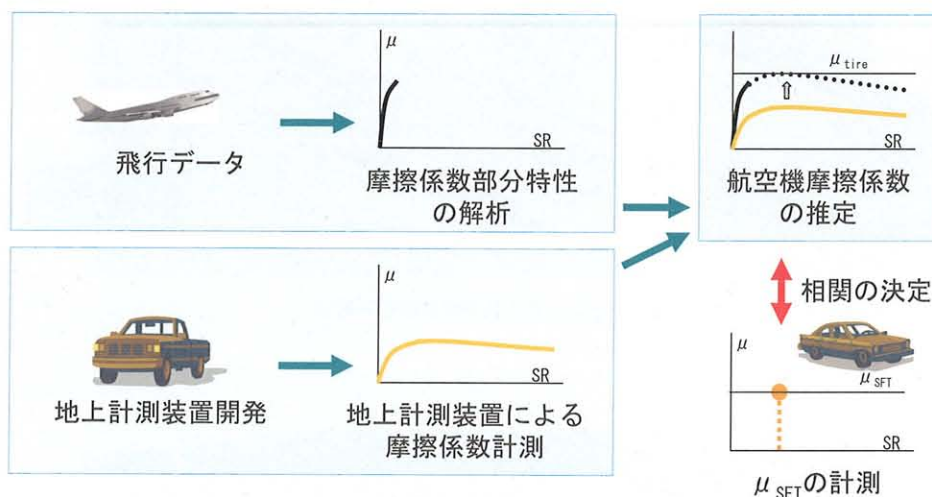


Fig.5-1 JAXA の研究スキーム

### 5.2. フライトデータの解析

フライトレコーダは航空機に搭載され、運航中のさまざまなフライトデータが記録されている。また記録されているデータの種別はエアラインや機種毎に異なるが、航空機の摩擦係数を解析するために重要な減速度のデータは必ず記録されている。航空機の着陸時における摩擦係数の解析方法を示す。

#### 5.2.1 摩擦係数の解析

摩擦係数は次式で定義される。

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1)$$

ここで、 $F$  は摩擦による制動力、 $W$  は重量を表す。この摩擦係数の定義式は金属面等のクーロン摩擦が成立する場合に意味をなすものである。ゴムと雪氷面の間の摩擦はクーロン摩擦ではないため定義式としての意味は薄れるが、一般に広く用いられているため、JAXA 研究でもこれを用いることとする。航空機の摩擦係数を  $\mu_{aircraft}$  とすれば、航空機の着陸時の運動方程式は次式で表される。

$$\frac{W}{g} \ddot{x} = T - (W \cos \phi - L) \mu_{aircraft} - W \sin \phi - D - D_{contam} \quad (2)$$

ここで、 $\ddot{x}$  は減速度（ただし航空機の進行方向が正）、 $T$  は推力、 $L$  は揚力、 $D$  は空力抵抗、 $D_{contam}$  は雪氷抵抗、 $\phi$  は滑走路面の勾配を表す。

(2)式より、摩擦係数は次式で求められる。

$$\mu_{aircraft} = \frac{-W\ddot{x}/g + T - W \sin \phi - D - D_{contam}}{W \cos \phi - L} \quad (2)$$

この式は、フルブレーキングの実験結果から摩擦係数を求めるために広く一般的に用いられている。フライトデータの解析例を Fig.5-2 に示す。この解析例では横軸をブレーキ圧、縦軸を摩擦係数としている。摩擦係数のデータが一部マイナス値になっているのは、あくまでサンプルデータであり、逆推力に関するデータが不足しており推定値を使用したためである。

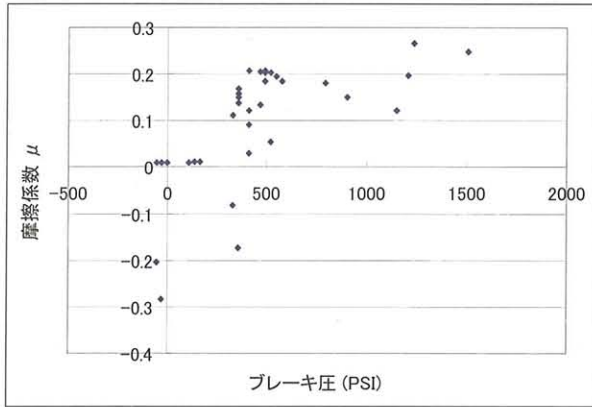


Fig.5-2 フライトデータ解析例

ここで摩擦係数  $\mu_{aircraft}$  について考える。航空機のブレーキは主輪についているため、ブレーキングによる制動力は主輪にのみ働く。一方で地面反力は前脚と主脚に分散されるため、すべての航空機重量が主脚にかかるわけではない。この点で摩擦係数  $\mu_{aircraft}$  はあくまで航空機の平均的な摩擦係数であり、タイヤの純粋な摩擦係数を表現していない。次節で述べる地上計測装置では、あくまでタイヤの摩擦係数を測定するための装置である。航空機と地上計測装置との間で摩擦係数の相関を調べる場合は、 $\mu_{aircraft}$  を使うよりも、タイヤの摩擦係数  $\mu_{tire}$  を使う方が適していると考えられる。 $\mu_{tire}$  を考慮するための航空機モデルを Fig.5-3 に示す。簡単化のために  $\phi = 0$  とすれば、運動方程式は次式で表される。

$$\frac{W}{g} \ddot{x} = T - D - (D_{Ncontam} + D_{Mcontam}) - \mu_{rotation} P_N - \mu_{tire} P_M \quad (4)$$

ここで、 $D_{Ncontam}$  と  $D_{Mcontam}$  はそれぞれ前脚と主脚の雪氷抵抗、 $P_N$  と  $P_M$  はそれぞれ前脚と主脚に作用する地面反力を表す。 $\mu_{rotation}$  はころがり摩擦を表す。このとき垂直方向の力の釣り合いと、前脚まわりのモーメントの釣り合い式は次式で表される。

$$\begin{aligned} W - L - P_N - P_M &= 0 \\ P_M b + (T - D)h - (W - L)(b - a) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

これを(4)式に代入すると

$$\frac{W}{g} \ddot{x} = T - D - (D_{Ncontam} + D_{Mcontam}) - \mu_{rotation}(W - L) \left( 1 - \frac{b-a}{(T-D)h} \right) - \mu_{tire} \frac{(W-L)(b-a)}{(T-D)h} P_M \quad (6)$$

さらに  $\mu_{rotation} \ll \mu_{tire}$  とすれば、タイヤの摩擦係数  $\mu_{tire}$  は次式となる。

$$\mu_{tire} = \frac{-W\ddot{x}/g + T - D - D_{contam}}{W - L} \times \frac{(T - D)h}{b - a} \quad (7)$$

ただし、

$$D_{contam} = D_{Ncontam} + D_{Mcontam} \quad (8)$$

なお、 $\mu_{aircraft}$  と  $\mu_{tire}$  の関係は、(3)式と(7)式から次式で表される。

$$\mu_{aircraft} = \mu_{tire} \frac{b - a}{(T - D)h} \quad (9)$$

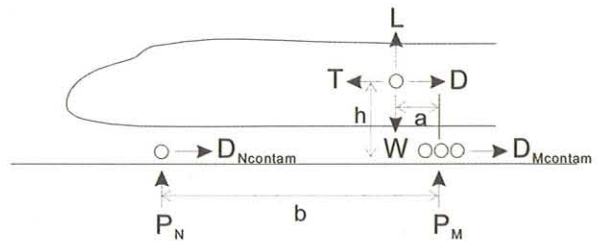


Fig.5-3 航空機モデル

### 5.2.2. 摩擦係数と Slip Ratio

一般に、摩擦係数は速度やタイヤと路面間のすべりの状態によって変化する。すべりの状態は Slip Ratio と呼ばれ、次式で定義される<sup>8)</sup>。

$$s = \frac{V - r\omega}{V} \quad (0 \leq s \leq 1) \quad (10)$$

ここで  $V$  は前進速度、 $r$  はタイヤの半径、 $\omega$  はタイヤの回転速度を表す。 $s = 0$  の場合は、滑りなく回転していることを、 $s = 1$  の場合はタイヤがロックしていることを示す。乾燥路面などでは Fig.5-4 のような関係がみられる<sup>18)</sup>。

通常の航空機の運航では、フルブレーキングの状態になることは滅多になく、ブレーキによる制動力は最大になっていない。このため、フライトデータで解析できるのは摩擦係数の部分特性 (Slip Ratio でかなり低いところの摩擦係数) であり、最大摩擦係数を直接解析することはできない。

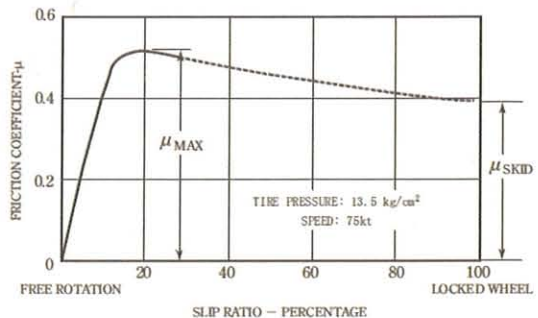


Fig.5-4 Slip Ratio と摩擦係数

### 5.3. 地上計測装置の開発

Slip Ratio と摩擦係数の関係を得るために、地上計測装置を新たに開発する。開発する地上計測装置の最大の特徴は Slip Ratio が可変となる機構（可変 SR 機構）である。JAXA 研究では、Slip Ratio と摩擦係数の関数を求めなければならないため、地上計測装置には Slip Ratio が可変となる機構が必要である。世界各国で地上計測装置が開発されているが、Slip Ratio が固定である場合がほとんどであり、可変機構を採用している装置はごくわずかである。SFT も地上計測装置の一種であるが、Slip Ratio は固定である。SFT では、自由回転する後軸輪からチェーン・トランスミッションを介して計測輪がリンクしており、Slip Ratio が 13% で固定されている。

可変 SR 機構を用いるメリットは大きい。まず正確な最大摩擦係数の計測が可能となることが挙げられる。最大摩擦係数を発生する Slip Ratio は路面状況によって異なるため、Slip Ratio と摩擦係数の関数が求められれば、最大摩擦係数が正確に求められる。さらに雪氷抵抗を計測することが可能になる。これは Slip Ratio を 0 に設定することで摩擦抵抗が無くなり、計測輪にかかる抵抗が雪氷抵抗のみとなるからである。

### 5.4. 摩擦係数の推定と相関の決定

フライトデータから航空機の摩擦係数を解析する。次に同様の路面状態において、開発した地上計測装置を用いて摩擦係数を実測することで、Slip Ratio と摩擦係数の関数を得る。摩擦係数は路面状態に大きく依存するので、さまざまな路面状態において計測を実施する必要がある。地上計測装置によって得られた関数を基に、航空機の最大摩擦係数を推定する。推定された最大摩擦係数と SFT によって得られた摩擦係数を比較することで、航空機と SFT の間の摩擦係数の相関を決定する。

### 6. おわりに

冬期の航空機の運航効率の向上は、運航側および利用者側ともに大きなメリットがあり、社会的な研究ニーズが高い。ただし効率性を向上させるための方法は非常に限られており、航空機と地上計測装置 SAAB Friction Tester の摩擦係数の相関を高精度に求めることがもっとも効果的と考えられる。相関を高精度に求めるために、フライトデータの解析／地上計測装置の開発／摩擦係数の推定と相関の決定という研究項目を設定した。今後、それぞれの研究項目について研究を進めていく。

### 7. 参考文献

- 1) 国土交通省; 空港の利用状況
- 2) 市原薫, 小野田光之; 路面のすべりとその対策, 技術書院
- 3) Norman S. Currey; Aircraft Landing Gear Design: Principles and Practices, AIAA Education Series
- 4) 竹林幹雄, 黒田勝彦; 世界の航空市場の動向とわが国の空港政策, 会計検査研究, Vo.28, pp. 113-126
- 5) 日本航空機開発協会, 民間航空機および関連産業に関する調査研究, 2004
- 6) 国土交通省航空局; 雪氷状況調書および雪氷に係る航空情報の提供方法等に関する調査報告書, 航空輸送技術研究センター, 2002
- 7) AIM-JAPAN 編纂協会; AIM-j, 日本航空機操縦士協会
- 8) 運輸省航空局; 連続式摩擦係数測定計評価実験報告書
- 9) Thomas J. Yager; Joint Winter Runway Friction Program Accomplishments, The Virginia Department of Transportation and Virginia Tech Pavement Evaluation 2002 Conference, Virginia, 2002
- 10) 国土交通省航空局; 摩擦係数に係る測定機器間等の相関性に関する調査報告書, 航空輸送技術研究センター, 2003
- 11) James C. Wambold, J.J. Henry and Arild Andresen; International Runway Friction Index (IRFI): Development Technique and Methodology, Transport Canada, TP14061E, 2001
- 12) 山根皓三郎, 上田哲彦, 外崎得雄, 小野幸一, 竹内和之; 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 —, NAL-TR 576, 1979
- 13) 山根皓三郎, 上田哲彦, 外崎得雄, 小野幸一, 竹内和之; 滑走路面のすべり評価法に関する研究 (第 2 報) — 調布空港と東千歳場外着陸場での実験 —, NAL-TM 399, 1979
- 14) 外崎得雄, 甲斐高志, 上田哲彦; 雪氷滑走路面摩擦係数測定装置の開発, NAL-TR 1443, 2002
- 15) Takashi NAKATSUJI; Inverse Estimation of Friction Coefficients of Winter Road Surfaces: New Consideration of Lateral Movements and Angular Movements, Transportation Research Record No.1911, 2005
- 16) 林 郁子; 車両運動データに基づいたすべり摩擦係数のオンライン予測に関する研究, 北海道大学大学院光学系研究科平成 17 年度修士論文
- 17) 酒井秀男; タイヤ工学, グランプリ出版
- 18) ICAO; ICAO Airport Service Manual (Doc9137-AN/898), Part 2 Pavement Surface Conditions



宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-001

---

発行日 2006年9月29日  
編集・発行 宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>  
印刷・製本 ケーティエス情報株式会社

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター


〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

---

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

 この用紙は地球環境・森林資源のため再生紙を使用しています。

