

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 954 Mar.2000

航空機の応答に基づく空港舗装平坦性の評価

八	谷	好	高
股		建	軍
高	橋		修
坪	川	将	丈
室	園	正	徳
阿	部		寛

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 空港舗装に対するパイロットの主観的評価	4
2.1 アンケート調査	4
2.2 空港舗装に関する総合評価	5
2.3 舗装の表面性状と総合評価	7
3. 舗装の表面性状に関する現行規定	11
3.1 縦断方向平坦性に関する基準	11
3.2 新たな規準の必要性	13
4. TAXIによる航空機運動特性の検討	15
4.1 航空機-舗装モデル	15
4.2 シミュレーションの方法	16
5. 航空機加速度に注目した平坦性の検討	18
5.1 走行時の航空機鉛直加速度	18
5.2 航空機の応答からみた舗装平坦性の評価規準	19
6. 結論	19
7. おわりに	20
参考文献	20

# Aircraft Response Based Airport Pavement Roughness Evaluation

Yoshitaka HACHIYA<sup>\*</sup>  
Jianjun YIN<sup>\*\*</sup>  
Osamu TAKAHASHI<sup>\*\*\*</sup>  
Yukitomo TSUBOKAWA<sup>\*\*\*\*</sup>  
Masanori MUROZONO<sup>\*\*\*\*</sup>  
Hiroshi ABE<sup>\*\*\*\*</sup>

## Synopsis

Airport pavement roughness is studied based on both the subjective evaluation and digital simulation. Pilots' subjective evaluation on surface characteristics is clarified by questionnaires, which indicate that the roughness is one of the most highly influential factors on riding quality and safety in aircraft operation. The response of aircraft motion to the longitudinal profiles of airport pavements when departing on runways and taxiing on taxiways was simulated using the program TAXI. The results indicate that the aircraft response varies not only with the surface characteristics (i.e., the amplitudes and wavelengths of profile), but also with aircraft speed. Finally, roughness criteria for runways and taxiways are proposed. Main conclusions are as follows;

- (1) A large number of pilots are satisfied with the surface characteristics of airport pavements from a view point of both riding quality and safety in aircraft operations.
- (2) The influence of surface characteristics on both riding quality and safety is greatly dependent of aircraft speed; i.e., the influence is greater on runways than on taxiways and aprons.
- (3) Both snow and ice, and scattered debris on pavements have greater influence on the safety evaluation. On the contrary, longitudinal roughness due to embedded lights on pavements and faults influence the riding quality evaluation.
- (4) The aircraft vertical acceleration increases with both aircraft speed and amplitude of pavement roughness. Peak accelerations appear at different wavelengths for runways and taxiways. For taxiways, a peak appears only at wavelength of about 10m, while, for runways, peaks appear at some wavelengths besides 10m.
- (5) The vertical acceleration varies with positions in aircraft. The peak acceleration at the pilot station location is greater than that at the gravity center location.
- (6) The roughness evaluation criteria is expressed as bump height to limit the vertical acceleration to 0.35g. The tolerable bump height is 50mm for wider range of wavelength in runways. On the contrary, evenness of wavelength between 5 and 15m is critical in taxiways; that is, only 10mm is tolerable.

**Key Words:** pavement roughness, evaluation, aircraft response, vertical acceleration, simulation, criteria

---

<sup>\*</sup> Chief, Runways Laboratory, Geotechnical Engineering Division

(1-1, Nagase 3, Yokosuka 239-0826, Japan, Phone: +81 468 44 5026, Fax: +81 468 44 4471, E-mail: hachiya@cc.phri.go.jp)

<sup>\*\*</sup> Former STA Fellow (Xian Highway University, China)

<sup>\*\*\*</sup> Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

<sup>\*\*\*\*</sup> Member, Runways Laboratory, Geotechnical Engineering Division

# 航空機の応答に基づく空港舗装平坦性の評価

八 谷 好 高<sup>\*</sup>  
殷 建 軍<sup>\*\*</sup>  
高 橋 修<sup>\*\*\*</sup>  
坪 川 将 丈<sup>\*\*\*\*</sup>  
室 園 正 徳<sup>\*\*\*\*</sup>  
阿 部 寛<sup>\*\*\*\*</sup>

## 要 旨

本資料では空港舗装の平坦性についてとりまとめた。まず、空港舗装の表面性状に関する航空機パイロットの主観的評価について研究し、平坦性が乗り心地に及ぼす影響が最も大きい項目の一つであることを明らかにした。次に、航空機が滑走路と誘導路上を走行するときの舗装縦断形状に対する応答に関する数値シミュレーションをプログラムTAXIを用いて実施した。その結果として、航空機の応答が振幅、波長といった舗装の表面性状だけではなく、航空機走行速度によって変化することを示し、空港滑走路と誘導路の平坦性に関する評価値をまとめた。主要な結論を以下に示す。

- (1) 空港舗装に対する乗り心地・走行安全性についてはパイロット全体の6～7割が肯定的な評価をしている。
- (2) 表面性状が乗り心地・安全性に及ぼす影響の大きさは航空機の走行速度によって異なり、滑走路で最大となっている。
- (3) 走行安全性には舗装表面への雪氷付着、破片散乱による航空機破損の危険性が大きく影響するのに対して、乗り心地に大きく影響を及ぼす表面性状項目は航空灯火・段差といった縦断方向平坦性である。
- (4) 地上走行時の航空機の鉛直加速度は舗装の平坦性の悪化につれて増加することがシミュレーションの結果明らかになった。この加速度が最大となる波長は誘導路走行時と滑走路走行時で異なり、前者では10m付近であるのに対し、後者では10m付近以外にもいくつか認められる。
- (5) 航空機の鉛直加速度は走行速度ならびに航空機内の位置によって異なるが、パイロット位置におけるものが重心位置におけるものよりも厳しくなっている。
- (6) 空港舗装の平坦性に関する評価値について、鉛直加速度を0.35g以下に制限することによって航空機の乗り心地の観点から凹凸の高さとして示した。具体的には、滑走路では広範囲の波長域にわたって50mm程度であるのに対して、誘導路では5～15mの波長域でのみ10mm程度となっている。

キーワード：舗装平坦性，評価，航空機応答，鉛直加速度，シミュレーション

<sup>\*</sup> 土質部滑走路研究室長

(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1, 電話：0468-44-5026, Fax：0468-44-4471, E-mail：hachiya@cc.phri.go.jp)

<sup>\*\*</sup> 前STAフェロー（中国西安交通大学）

<sup>\*\*\*</sup> 土質部主任研究官

<sup>\*\*\*\*</sup> 土質部滑走路研究室

## 1. はじめに

空港を取り巻く環境は、空港の建設地点が海上埋立地や山間部の高盛土といった人工的に造成された比較的軟弱な地盤上へ移行して来たり、主脚が6個の車輪から成る航空機が導入されたりと、近年徐々に変化してきている。このような環境の変化は空港舗装に対しても大きな影響を及ぼす。前者の要因によるものとしては空港舗装建設後にも地盤沈下が継続するため、補修頻度が高くなること、後者の要因によるものとしては車輪軌跡の変化に伴う舗装区域の拡大に加え、新機種導入によって舗装に対する要求性能が変化することが挙げられる。

他方、現行の空港舗装の設計方法は自然地盤上における舗装を対象にしたものである。また、試験舗装に対して当時の代表的航空機荷重を繰返し載荷することにより舗装に生ずる変状に注目して開発されたものでもある。そのため、現行方法に従って新たな要求性能に対応可能な舗装を設計することは難しく、革新的な空港舗装の建設・管理システムの開発が望まれている。

このようなシステム開発の方向性については、1996年に土木学会により発行されたコンクリート標準示方書「舗装編」により示されている<sup>1)</sup>。この中では、利用者・管理者の舗装に対する要求性能がサービス性能として定義されており、舗装構造は所定の期間このサービス性能を確保できるように設計されなければならないとされている。サービス性能の具体的な項目としては、路床・路盤の変形、コンクリート版の曲げひび割れ、乗り心地、走行安全性が取り上げられている。このコンクリート標準示方書「舗装編」では、曲げ疲労ひび割れの発生防止を設計の原則とする現行の構造設計法が再検討され、舗装に対するこれらの要求性能を満たすことを設計の原則とする新しい設計方法が提案されている。これは、曲げひび割れが発生しても車両・航空機の走行には必ずしも支障があるわけではないこと、曲げひび割れが発生する以前に目地に損傷が生ずる場合があること等、現行の設計法で想定している状態が実態と合致しない状況となっていることが判明したからである。

本資料では、上記の4項目のうち、空港舗装上を走行する航空機の乗り心地に注目してその評価方法を検討し、乗り心地の観点からの空港舗装の平坦性に関する規準の提案を行っている。これは、航空機の安全運行を確保する上で最も重要な役割を有するパイロットに対して行った空港舗装に対する主観的評価に関する調査の結果、平坦性が航空機の乗り心地に最も影響を及ぼす要因であることがわかったからである。

この航空機の乗り心地に関して現時点における技術的蓄積はほとんどなく、空港舗装の平坦性について従来道路舗装を対象として実施された研究成果を準用することによって検討されていた<sup>2)・3)・4)</sup>。しかし、最近ではいくつかの研究が空港舗装を対象にして実施されている。たとえば米国においては、Gervaisが滑走路の平坦性の測定・定量化方法ならびにその適用方法を示している<sup>5)</sup>ほか、Gerardiも滑走路の平坦性が航空機の応答に及ぼす影響について検討している<sup>6)</sup>。また、わが国においても姫野らが空港舗装の平坦性について研究している<sup>7)・8)</sup>。しかしながら、空港舗装の表面性状と航空機の応答の関連性について明確にするに至っていないがたい。

空港舗装上を走行する航空機の運動モデルは、米国空軍航空力学研究所（U.S. Air Force Flight Dynamics Laboratory）により1970年代にコンピュータプログラム化され、TAXIと名付けられて発表されている<sup>9)</sup>。この解析プログラムの有効性については、ベトナム戦争時にタイ国のU-Tapao基地におけるB-52のほか、種々の軍用航空機を用いた検証もなされており、航空機の動的応答を予測する上ではこの方法の信頼性が十分であることが確認されている<sup>10)</sup>。このことから、本研究においても、舗装の平坦性が航空機の応答に及ぼす影響を定量化するためにTAXIを使用することにした。

以下では、まず、パイロットの空港舗装に対する主観的評価について、アンケート調査を実施した結果を集計することによってまとめた。次に、このアンケート結果から主観的評価において重要と考えられた舗装の平坦性の評価方法を議論するために、空港舗装の平坦性に関する現行の基準について総括した。そして、舗装走行時の航空機の動的応答に関するコンピュータシミュレーションの方法を記してから、種々の表面形状に対する航空機の動的応答を検討し、最後に空港舗装の平坦性に関する評価方法を示した。

## 2. 空港舗装に対するパイロットの主観的評価

### 2.1 アンケート調査

新しい空港舗装の建設・管理システムを構築するためには、空港舗装の利用者側からの空港舗装に対する要求性能をまず調査する必要があると考えて、航空機パイロットに対してアンケート調査を行った。このアンケートの設問は数人のパイロットに対する事前ヒアリングに基づいて作成した。なお、調査対象は国内主要航空会社3社（全日本空輸、日本エアシステム、日本航空）のパイロットである。

表-1 5段階評価の内容

ランク	表面性状の影響	舗装施設	積載量の影響	走行速度の影響
1	ない	悪い	重いほうが大きい	遅いほうが大きい
2	ほとんどない	やや悪い		
3	普通	普通	どちらともいえない	どちらともいえない
4	ややある	多少よい		
5	ある	よい	軽いほうが大きい	速いほうが大きい

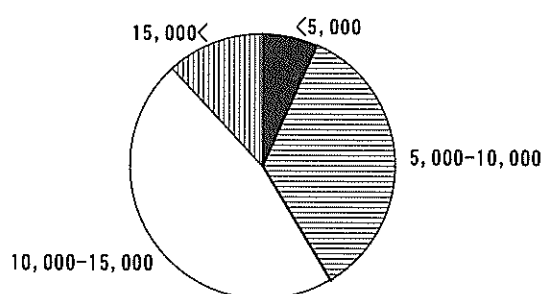


図-1 回答者の飛行経験時間

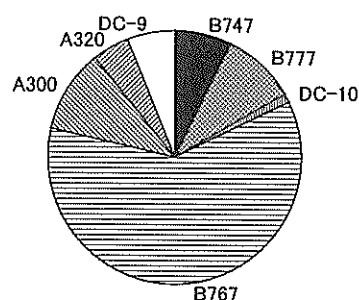


図-2 回答者の乗務している航空機

アンケートにおいては、飛行経験時間、乗務航空機に引き続いて、舗装の表面性状に関わる項目について評価を求めた。表面性状に関しては、航空機が舗装上を走行する際にそれによって受ける影響に注目して質問した。具体的には、まず、乗り心地（パイロットの操縦性と乗客の乗り心地）と走行安全性を取り上げ、表面性状として挙げた以下の9項目がそれらに及ぼす影響度合について評価を求めた。次に、わが国の舗装の一般的な状況についても滑走路、誘導路、エプロンの施設別に評価を求めた。これに加えて、舗装表面性状が乗り心地、走行安全性に及ぼす影響度合について、航空機の積載量ならびに走行速度による違いを質問している。ここでは、いずれも5段階での評価を求めている（表-1）。

- i) 段差
- ii) わだちぼれ
- iii) ひび割れ
- iv) 破片散乱（ひび割れによる）
- v) 縦断勾配
- vi) 横断勾配
- vii) 水たまり

- viii) 雪氷
- ix) 航空灯火

アンケート結果の回収数は84である。回答者の飛行経験時間は、図-1に示すように10,000～15,000時間が約半分を占めて最も多く、次に5,000～10,000時間、そして15,000時間以上、5,000時間未満の順となっている。

乗務している航空機は、図-2に示すとおり、航空機荷重区分でいえばLA-12(B-767, A300)が7割を占めており、LA-1(B-747, B-777, DC-10)が2割、そして残りがLA-2(A320), LA-3(DC-9)となっている。

## 2.2 空港舗装に関する総合評価

まず、パイロット全体からみた現状の空港舗装に対する航空機の乗り心地と走行安全性に関する評価について、滑走路、誘導路、エプロンの施設別にまとめたものを図-3、図-4に示した。いずれも「普通」との評価が半数程度を占めること、これに「よい」、「多少よい」を加えるとパイロット全体の6～7割が空港舗装に対して肯定的な評価をしていることがわかる。

次に、航空機の乗り心地と走行安全性に関する評価に、パイロットの飛行経験時間ならびに乗務航空機の違いが

及ぼす影響を検討した。滑走路を対象とした評価として、図-5、図-6には乗り心地を、図-7、図-8には走行安全性を示した。いずれの場合も、飛行時間や乗務航空機の違いによる影響はあまり認められない。表-2には、これらのクロス集計結果としてカイ二乗 ( $\chi^2$ ) 検定結果を示した。エプロンにおける走行安全性と飛行経験時間との間に関連性が若干認められるものの、全体的には関連性はないとみなせよう。

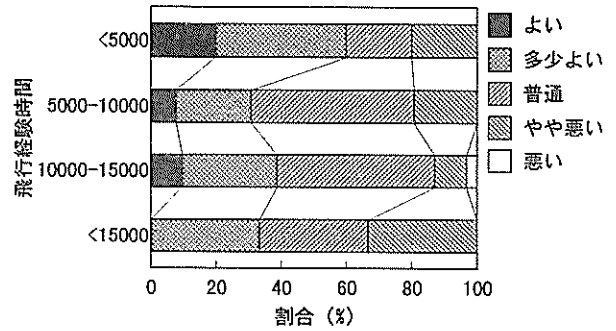


図-5 飛行経験時間別の滑走路における乗り心地評価

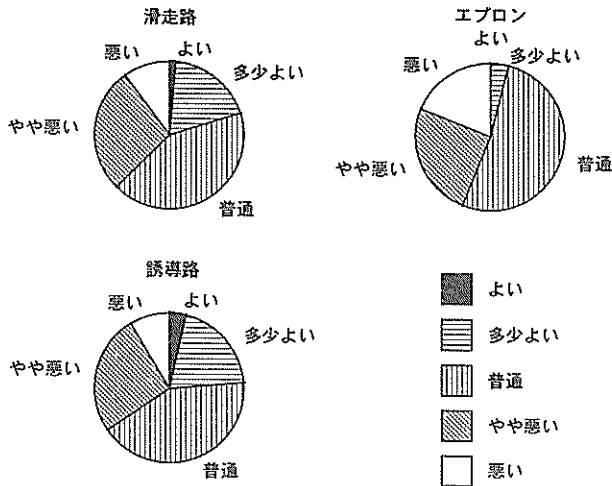


図-3 航空機の乗り心地に関する評価

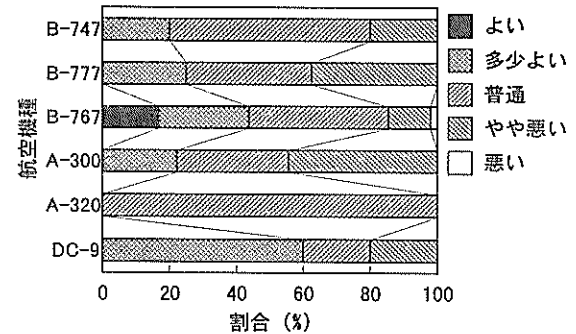


図-6 航空機種別の滑走路における乗り心地評価

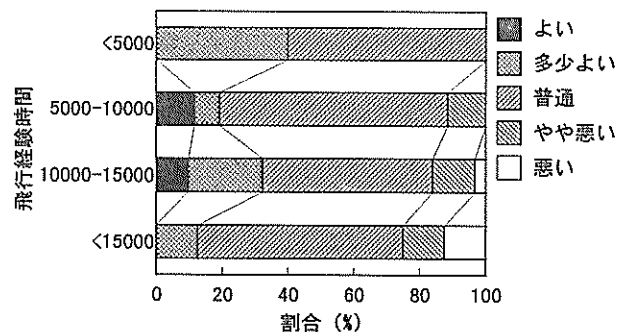


図-7 飛行経験時間別の滑走路における走行安全性評価

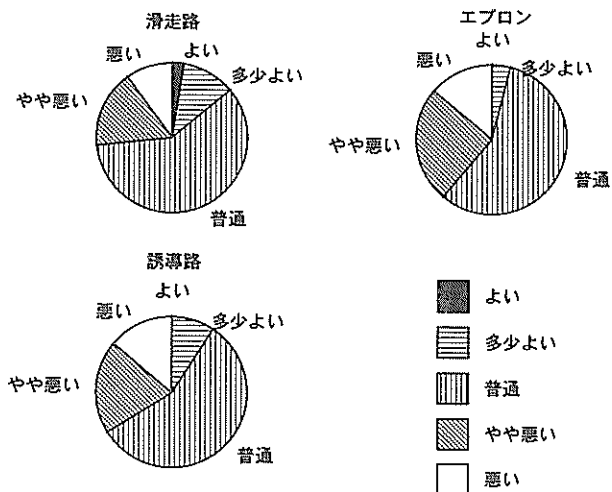


図-4 航空機の走行安全性に関する評価

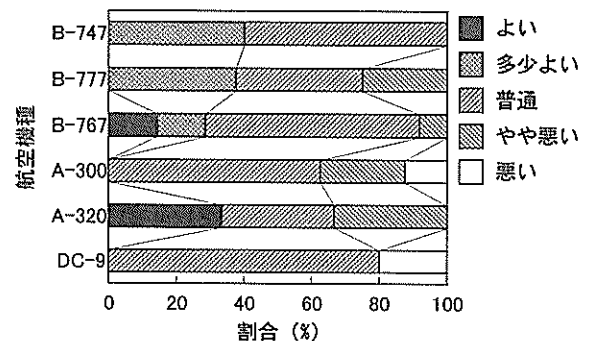


図-8 航空機種別の滑走路における走行安全性評価

表-2 乗り心地と走行安全性に関するカイ二乗検定結果 (p)

項目	乗り心地			走行安全性		
	滑走路	誘導路	エプロン	滑走路	誘導路	エプロン
飛行時間	0.84	0.89	0.85	0.63	0.25	0.04
航空機種	0.48	0.84	0.46	0.08	0.42	0.24

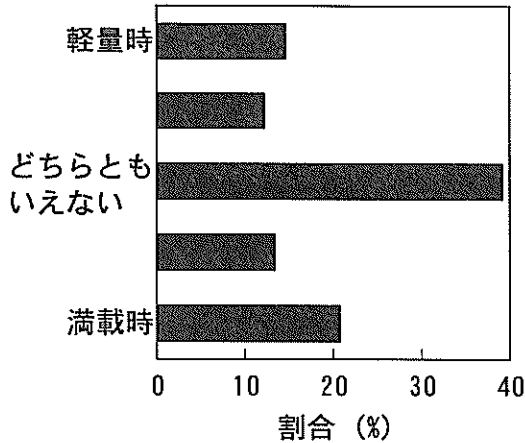


図-9 航空機の積載量と表面性状の影響度合

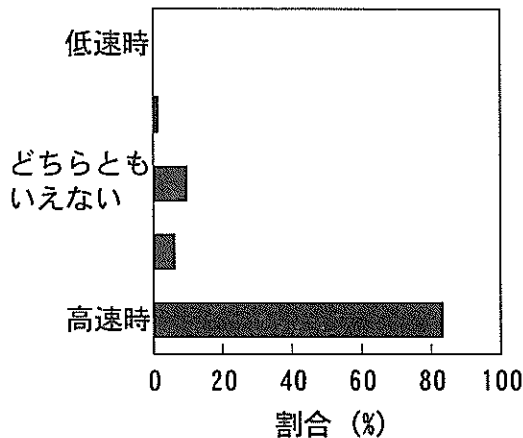


図-10 航空機の走行速度と表面性状の影響度合

舗装表面性状の乗り心地・走行安全性に対する影響度合が、航空機の積載量、走行速度によって変化する状況について図-9、図-10にまとめた。両図から航空機の積載量による差はほとんどないのに対して、走行速度による差は顕著であることがわかる。この速度については、パイロットは高速時のほうが表面性状の影響度合が著しいと考えているものと推定される。表面性状の影響度合についてカイ二乗検定を適用すれば、飛行時間、航空機種との関連性はほとんど認められないことがわかった。

### 2.3 舗装の表面性状と総合評価

上記のように、現状の空港舗装に対してパイロット全体の6~7割が肯定的な評価を下していることが明らかになった。この評価をさらに高いものとするためには、パイロットが舗装を評価する場合に注目する表面性状の種類を特定して、それを改善することが必要となろう。今回実施したアンケート調査においては舗装表面性状として9項目を取り上げているので、まず、これらの表面性状が舗装施設の総合評価、すなわち、乗り心地と走行安全性に及ぼす影響度合について検討し、次に評価を高める上で改善を図るべき表面性状の項目について考察する。

舗装の表面性状が乗り心地ならびに安全性に及ぼす影響度を滑走路、誘導路、エプロンについてみたものが図-11である。これは上記の9項目の影響度についての平均値である。この図から、乗り心地については施設による違いがほとんどないものの、滑走路上の走行安全性において影響度が若干大きくなっていることから、パイロットはこの場合について舗装表面性状の影響が大きいと感じていることがわかる。

次に、9つの表面性状に関する項目のうちで、舗装に関する総合評価に特に影響を及ぼすものについて検討した。

図-12、図-13、図-14は、航空機の乗り心地に関して、滑走路、誘導路、エプロンについてまとめたものである。全体として、段差ならびに航空灯火による凹凸の影響度が高いものと思われる。これを明確にするために、航空機の乗り心地とそれに対する表面性状の項目別影響度との間の関連性について、カイ二乗検定により検討した。表-3には、各舗装施設について、 $p(\chi^2)$ がこの調査により得られた $\chi^2(\chi_0^2)$ より大きくなる確率と棄却判定結果 (\*\*, \*: 両者に関連性がないという仮説が有為水準1%, 5%で棄却)を示してある。これから、単純集計結果とは若干異なり、各施設とも航空機の乗り心地とひび割れならびに航空灯火による凹凸の影響度の大きさとの間に関連性があることがわかった。また、エプロンにおいては段差、わだちぼれといったものの影響も大きいことが認められる。



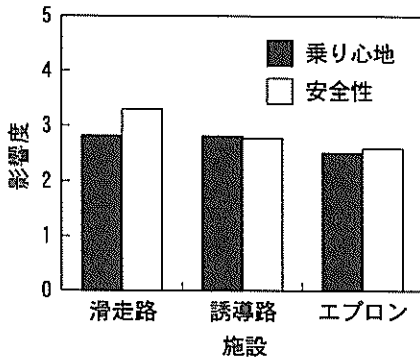


図-11 表面性状が舗装評価に及ぼす影響

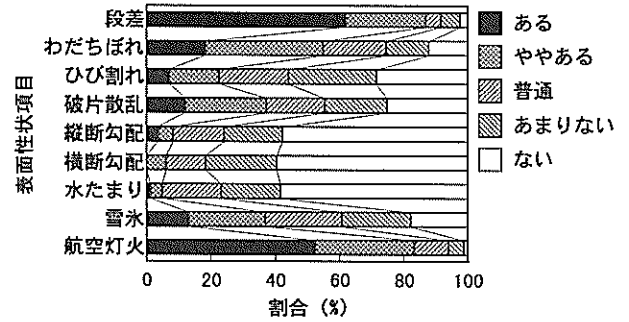


図-13 誘導路の乗り心地に対する表面性状の影響

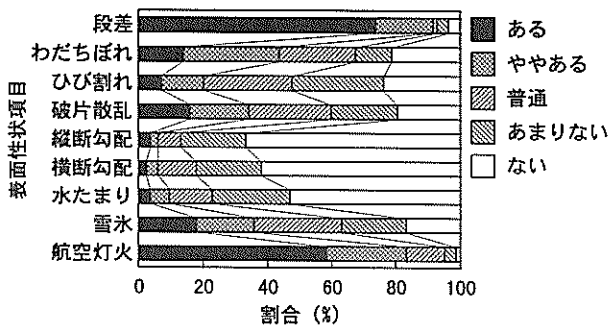


図-12 滑走路の乗り心地に対する表面性状の影響

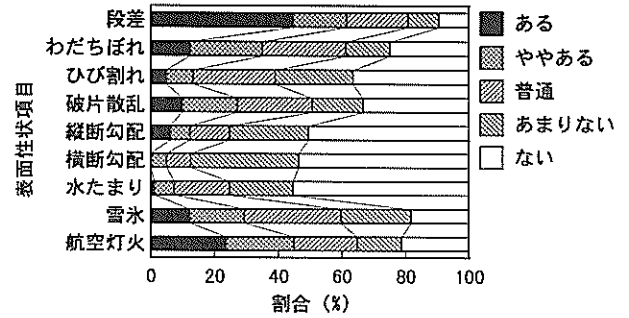


図-14 エプロンの乗り心地に対する表面性状の影響

表-3 乗り心地と表面性状の関連性

表面性状	滑走路		誘導路		エプロン	
	p	棄却判定	p	棄却判定	p	棄却判定
段差	0.073		0.856		0.002	**
わだちぼれ	0.233		0.309		0.005	**
ひび割れ	0.024	*	0.023	*	0.010	*
破片散乱	0.086		0.189		0.068	
縦断勾配	0.223		0.108		0.719	
横断勾配	0.863		0.091		0.038	*
水たまり	0.496		0.501		0.250	
雪氷	0.627		0.019	*	0.584	
航空灯火	0.046	*	0.029	*	0.000	**

同様に、航空機の走行安全性についても、表面性状の影響度に関して項目別の単純集計結果(図-15、図-16、図-17)ならびに表面性状の影響度との関連性(表-4)を示した。この場合は、乗り心地とは異なり、雪氷やひび割れに伴う破片散乱といった項目が大きな影響を有するとの結果が得られる。走行安全性に対する表面性状の影響度については、滑走路において雪氷ならびに段差が大きいとみなされるものの、誘導路、エプロンにおいては影響度の大きな表面性状は特にないようである。

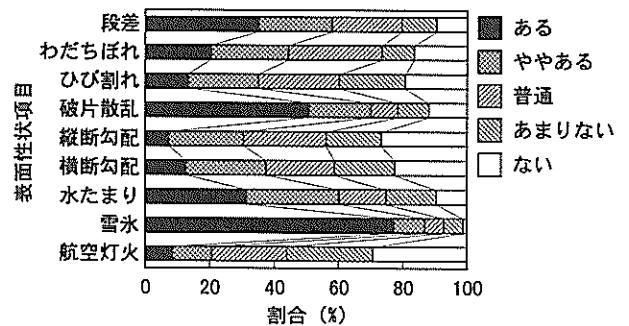


図-15 滑走路の走行安全性に対する表面性状の影響

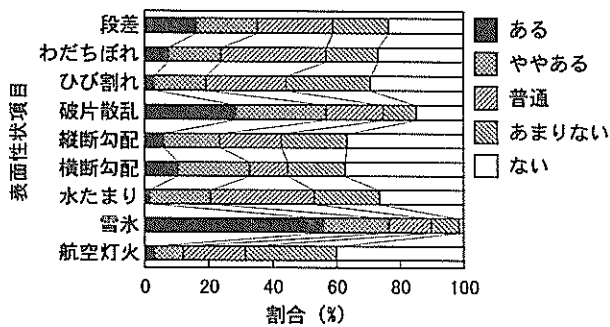


図-16 誘導路の走行安全性に対する表面性状の影響

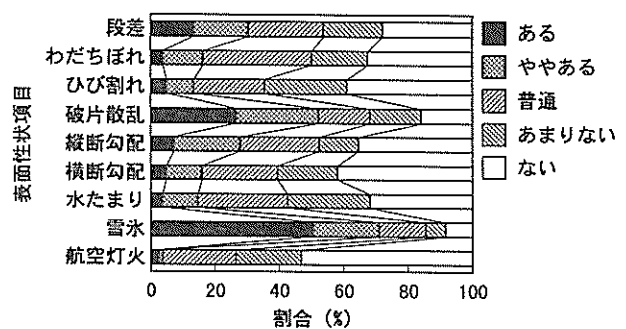


図-17 エプロンの走行安全性に対する表面性状の影響

表-4 走行安全性と表面性状の関連性

表面性状	滑走路		誘導路		エプロン	
	p	棄却判定	p	棄却判定	p	棄却判定
段差	0.000	**	0.731		0.393	
わだちぼれ	0.071		0.804		0.408	
ひび割れ	0.105		0.099		0.636	
破片散乱	0.255		0.149		0.787	
縦断勾配	0.038	*	0.119		0.386	
横断勾配	0.300		0.153		0.064	
水たまり	0.819		0.110		0.429	
雪氷	0.000	**	0.398		0.909	
航空灯火	0.080		0.027	*	0.386	

次に、パイロットの空港舗装に対する総合評価、すなわち、乗り心地と走行安全性を高めるために改善することが必要となる舗装表面性状の種類について検討する。ここでは、舗装表面性状の各項目の独立係数と舗装の総合評価における満足率から、改善すべき項目の優先順位を定量化できるcsグラフの手法<sup>1)</sup>を採用した。この場合の各表面性状の項目における独立係数 $r_c$ は(1)式で定義され、満足率は舗装表面性状が舗装に対する総合評価に及ぼす影響において「ない」と解答した割合である。

$$r_c = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(k-1)}} \quad (1)$$

ここに、

$n$  : データ数,

$k$  : 自由度.

乗り心地に関する評価を、滑走路、誘導路、エプロンに分けて、図-18、図-19、図-20にまとめた。同様に、走行安全性に関して、図-21、図-22、図-23にまとめた。これらの図においては独立係数の値が大きくて満足率が低くなっている表面性状項目について改善する必要性が高いこととなり、それを改善度と定量化して表-5にまとめた(図中の番号は2.1に示したパイロットに対するアンケート項目である)。改善すべき項目の優先度は改善度の大きいほうが高いものとなるので、乗り心地を向上させるためには、各施設に共通して、航空灯火と段差を改善する必要があること、走行安全性については、特に滑走路における雪氷と段差を改善する必要があることがわかる。

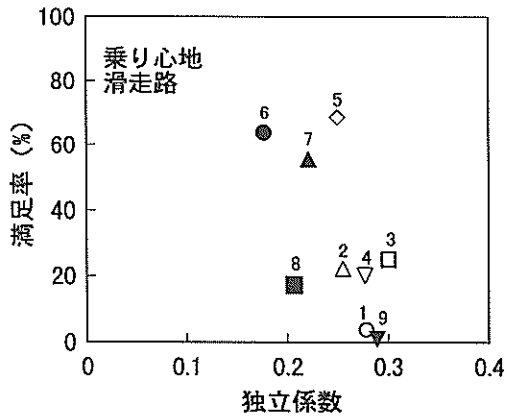


図-18 滑走路上の乗り心地に関する改善方策

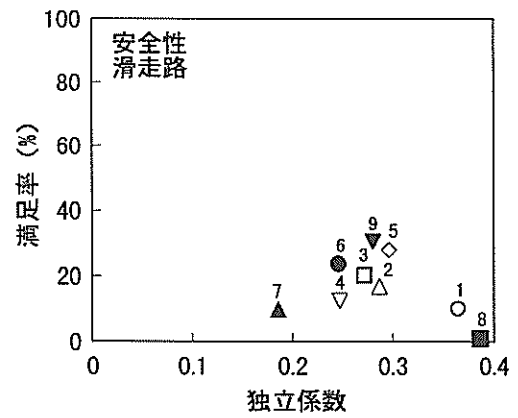


図-21 滑走路上の走行安全性に関する改善方策

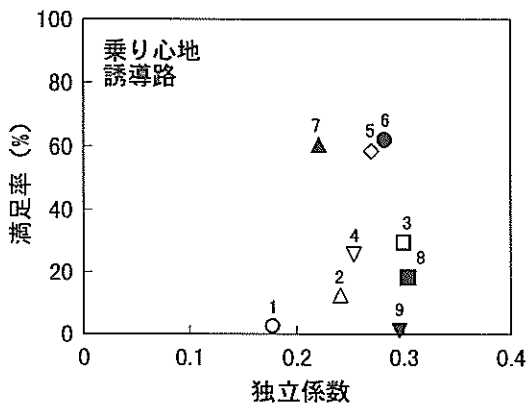


図-19 誘導路上の乗り心地に関する改善方策

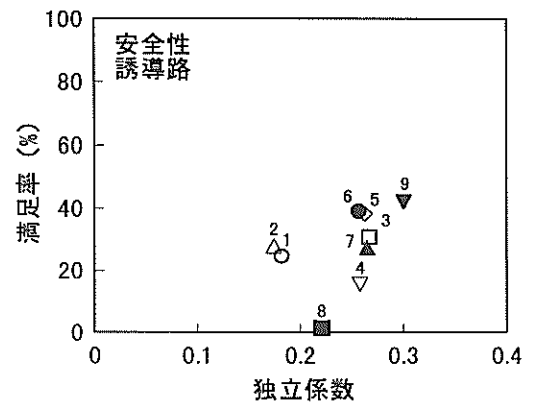


図-22 誘導路上の走行安全性に関する改善方策

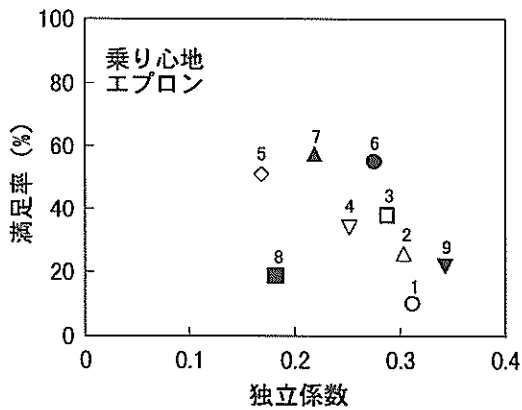


図-20 エプロン上の乗り心地に関する改善方策

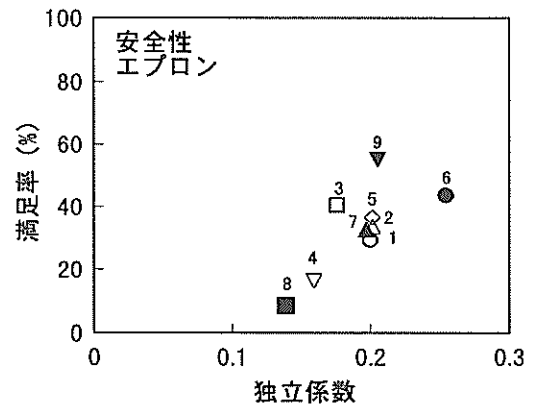


図-23 エプロン上の走行安全性に関する改善方策

以上の結果を総合すると、空港舗装に関するパイロットの主観的評価においては、縦断方向平坦性とすべり抵抗性が支配的なものであることがわかる。前者については、空港土木施設設計基準に勾配に関する規定があるだけで凹凸に関するものはないため、舗装が施設関連基準

を満足していてもパイロットからみると改善すべき点があるとされる場合もあると考えられる。後者において問題となる滑走路面のすべり摩擦係数については、国際基準ならびにわが国の暫定案により規定が設けられている<sup>12)</sup>。

表-5 表面性状の改善度

表面性状	乗り心地			走行安全性		
	滑走路	誘導路	エプロン	滑走路	誘導路	エプロン
段差	10.9	-2.9	14.0	19.7	-6.7	-5.6
わだちぼれ	2.5	2.2	7.7	8.8	-8.6	-6.7
ひび割れ	7.7	6.3	2.9	6.2	2.1	-11.6
破片散乱	6.7	1.5	-0.5	3.1	4.3	-7.8
縦断勾配	-7.6	-2.9	-27.0	6.2	0.0	-7.5
横断勾配	-19.8	-2.1	-1.6	0.9	-0.7	-1.9
水たまり	-10.9	-11.8	-11.9	-3.5	2.7	-7.0
雪氷	-2.5	10.1	-5.7	25.1	2.0	-8.6
航空灯火	13.8	15.7	13.5	3.6	3.5	-14.0

### 3. 舗装の表面性状に関する現行規定

2. で示した航空機パイロットに対するアンケート調査の結果から、縦断方向平坦性が航空機の乗り心地評価において支配的な要因であることがわかったので、本章ではこの縦断方向平坦性について各種現行基準をまとめることにする。

航空機運行の安全性を確保するために、空港舗装の表面性状に関する基準が国際民間航空機構（ICAO）ならびに各国の行政機関により制定されている。表面性状のうち縦断方向平坦性については、施工時における基準のほか、航空機の運行上ならびに構造上の基準がある。しかし、こういった基準に従って建設されたとしても、舗装の表面性状は交通荷重の繰返し載荷、地盤沈下といったことが原因で徐々に悪化してくる。そのため、供用開始後にも舗装の表面性状を確認・保持することが必要となり、補修必要性に関する基準も設けられている。

#### 3.1 縦断方向平坦性に関する基準

##### (1) 設計の見地からの基準

舗装の表面形状について、わが国では空港土木施設設計基準が定められている<sup>2), 3)</sup>。表-6~8は、滑走路、誘導路の縦断方向平坦性に関する基準について示したものである。まず、表-6は滑走路の縦断線形に関する基準について示している。縦断勾配については、これに加えて、1,500m以上の滑走路の場合には末端から滑走路長の1/4以下の範囲は0.8%以下にしなければならないとも規定されている。

勾配変化は、図-24に示すように、勾配変化点における2つの勾配 $x$ 、 $y$ の差の絶対値と定義されており、表中

の曲率半径とは勾配変化点で設けなければならない縦断曲線の半径のことである。この勾配変化点の最小間隔についても基準が設けられており、(2)式により算定される最小間隔（ $D$ ）が、45m以上なければならない。式中の $\alpha$ は表-7に示すものである。

$$D = \alpha \cdot (|X - Y| + |Y - Z|) \quad (2)$$

ここに、 $|X - Y|$ 、 $|Y - Z|$ は縦断勾配変化点における勾配変化量である。

表-6 滑走路縦断線形の基準

滑走路長 (m)	縦断勾配 (%)	勾配変化 (%)	曲率半径 (m)
1,500 <	< 1.0	< 1.5	30,000 <
900 - 1,500	< 1.0	< 1.5	15,000 <
< 900	< 1.5	< 2.0	7,500 <

表-7  $\alpha$ の定義

滑走路長 (m)	$\alpha$ (m)
1,500 <	300
900 - 1,500	150
< 900	50

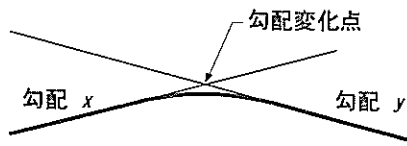


図-24 勾配変化の定義

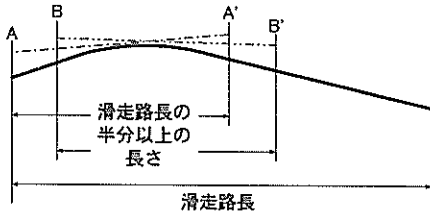


図-25 視距離の定義

表-8 誘導路縦断線形の基準

滑走路長 (m)	縦断勾配 (%)	曲率半径 (m)
1,500 <	< 1.5	3,000 <
< 1,500	< 3.0	2,500 <

このほか、視距離について基準が設けられている。具体的には、図-25に示すとおり、任意地点の視距離測定高さから滑走路長の半分以上の長さにわたって同じ高さの地点が見えること、すなわち、A地点とA'地点、B地点とB'地点の距離が滑走路長の半分以上であること、そしてそれが滑走路全長にわたって可能となることが必要であるとされている。この場合の視距離測定高さは、滑走路の長さで異なり、900m以上の滑走路においては3m、それ以下では2mとなっている。

表-8は誘導路の縦断線形に関する基準であるが、表-6に示した滑走路の場合よりも緩くなっている。滑走路の場合と異なり、勾配変化に関する基準はなく、最小視距離については3mの高さから少なくとも300m離れた地点の舗装表面が見えなければならないとされるに止まっている。

エプロンの基準勾配は最大で1%であり、エプロン誘導路については誘導路の基準に準拠することとなっている。

## (2) 施工の見地からの基準

施工時の縦断方向平坦性に関する基準として具体的なものは、アスファルト舗装の場合で、3mプロフィロメータによる測定値から算出される標準偏差を2.4mm以下

としなければならないというものである<sup>13)</sup>。このプロフィロメータはストレートエッジの両端に間隔が3mとなるように2つの車輪が設置されたもので、両車輪の中間位置に上下方向に動く測定輪が取り付けられている。測定結果は、測定車輪の位置において、両車輪の高さを直線で結んで得られる高さ（平均高さ）と測定輪により得られる高さの差が連続的に記録されたものであり、通常1.5m間隔の測定値を用いた標準偏差が平坦性と定量化されている。

## (3) 補修の見地からの基準

舗装の補修必要性を判定する際にも舗装表面の平坦性が注目される。

道路アスファルト舗装の場合は、従来より設計基準として舗装表面性状を用いている。たとえば、CBR設計法では、車両走行にともなう舗装表面性状の変化に注目して、特定の走行回数に対する舗装厚が決定され<sup>14)</sup>、また、AASHOの舗装構造設計法では、乗客の乗り心地に関する主観的評価が舗装の破損と結びつけられることによってPSI (Present Serviceability Index) として定量化され、PSIの基準値を下回らないように舗装厚が決定される<sup>15)</sup>。このようなことから、舗装は設計対象期間中はその表面性状が基準を下回らないことは本来ないと考えられるものの、設計期間中でも補修が必要とされる事態になってしまったり、設計期間を超えても補修が不要となっていたりするため、補修必要時の表面性状に関して基準が設けられている。

わが国の空港舗装の構造設計法では航空機の乗り心地は直接的には考慮されておらず<sup>16)</sup>、舗装評価法においても考えられていない。補修の必要性については技術者の主観的評価に基づいて判断するための指標であるPRI (Pavement Rehabilitation Index) が開発されている。この方法は、技術者の目視調査に基づく主観的評価と表面性状の定量的測定値とを結びつけたものである。舗装の必要性は、PRIの値に応じて、表-9、表-10に示すように3段階に判定される。

### i) アスファルト舗装

$$PRI = 10 - 0.450CR - 0.0511RD - 0.655SV \quad (3)$$

ここに、

CR：ひび割れ率 (%、=ひび割れ面積/区画面積)、

RD：わだちぼれ (mm、最大値)、

SV：平坦性 (mm)。

ii) コンクリート舗装

$$PRI = 10 - 0.290CR - 0.296JC - 0.535SV \quad (4)$$

ここに、

CR：ひび割れ度 (cm/1,000m<sup>2</sup>, =ひび割れ長/区画面積),

JC：目地部の破損率 (% , =破損目地の長さ/目地長),

SV：段差 (mm, 最大値) .

表-9 PRIによるアスファルト舗装の評価基準

舗装区域	評 価		
	A	B	C
滑走路	8.0<	3.8-8.0	<3.8
誘導路	6.9<	3.0-6.9	<3.0
エプロン	5.9<	0-5.9	<0

A: 補修の必要なし

B: 近いうちの修繕が望ましい

C: できるだけ早急に補修の必要がある

表-10 PRIによるコンクリート舗装の評価基準

舗装区域	評 価		
	A	B	C
滑走路	7.0<	3.7-7.0	<3.7
誘導路	6.4<	2.3-6.4	<2.3
エプロン	5.7<	0-5.7	<0

A: 補修の必要なし

B: 近いうちの修繕が望ましい

C: できるだけ早急に補修の必要がある

表-11 平坦性による評価

舗装区域	評 価		
	A	B	C
滑走路	<0.26	0.26 - 3.64	3.64 <
誘導路	<0.91	0.91 - 6.57	6.57 <
エプロン	<1.50	1.50 - 8.63	8.63 <

(単位: mm)

表-12 目地部段差による評価

舗装区域	評 価		
	A	B	C
滑走路	<5	5 - 10	10 <
誘導路	<5	5 - 12	12 <
エプロン	<6	6 - 14	14 <

(単位: mm)

これに加えて、PRIの計算に用いられている個々の項目に注目した補修の必要性に関する評価法も整備されている。これは、PRIと同様に、補修の必要性を3段階で評価するものである。平坦性による評価基準を表-11、表-12に示した（それぞれ、アスファルト舗装の平坦性、コンクリート舗装の目地部段差）。

### 3.2 新たな規準の必要性

2.で示したように、パイロットの主観的評価からみて表面性状を改善する必要性は、航空灯火や段差等縦断方向平坦性に関して高いことがわかった。舗装が3.1で示した設計、施工ならびに補修基準に従って建設・管理されていることから、航空機の乗り心地にはこれらに規定された以外の波長成分、すなわち、空港土木施設設計基準にある長波長成分や施工基準にある短波長成分ではなく、両者の中間に位置する波長成分も影響するものと考えられる。

この乗り心地を測定するために従来より用いられている装置は2種類に大別される。一つはプロフィロメータ等により舗装の縦断形状を相対的高低差として計測する方法であり、もう一つは車両に測定装置を搭載すること等によって舗装の縦断形状に対する車両の応答を直接測定する方法である。

わが国ではこのうち前者を用いることが一般的となっている。しかし、この方法による測定結果はプロフィロメータ自身の長さ、すなわち車輪間隔によって非常に影響されることがわかっている<sup>17)</sup>。たとえば図-26は、舗装の表面性状が種々の波長と振幅を有する正弦波で表されたとした場合における3mプロフィロメータによる測定結果である。この図から、航空灯火が設置されていることにより生ずるような短波長成分が卓越した表面形状の場合、たとえば滑走路に直径400mm、高さ30mmといった航空灯火が中心線上に30m間隔で埋設されている<sup>18)</sup>場合には、3mプロフィロメータによりある程度対応可能であることがわかる。しかしながら、これを超える波長成分を有する舗装表面形状の場合には3mプロフィロメータを用いて評価することは不可能であり、プロフィロメータの適用限界が明らかになっている。

これに代わるものとして、舗装の縦断形状をレベル測量や非接触式測定法<sup>19)</sup>により直接測定する方法がある。これを定量化する方法としては従来よりパワースペクトル密度を用いるものが多用されており、道路舗装を対象にした規準としてVDI (Verien Deutscher Ingenieure) によるものが提案されている。パワースペクトル密度に注目した評価の例として、サイン波形が連続する舗装表面の

縦断形状の場合を検討した。図-27は波長が30mで振幅を4~10mmとした場合のパワースペクトル密度である<sup>20)</sup>。波形の振幅が増加するにつれてパワースペクトル密度が増加し、VDI規準（図中でVDIと記載）から逸脱するようになることがわかる。

この方法は米国の軍用飛行場舗装を対象にしても用いられており、具体的な規準値<sup>21)</sup>が設けられている。上図でも示したように、振幅の増加につれてやはり規準値（USAと記載）を超えるようになる場合もみられる。両規準（VDI規準ではPoorのみ）から逸脱する場合の振幅、すなわち限界振幅を計算した結果が図-28である。限界振幅は規準によって異なっているものの、波長につれて増加する点は同一である。

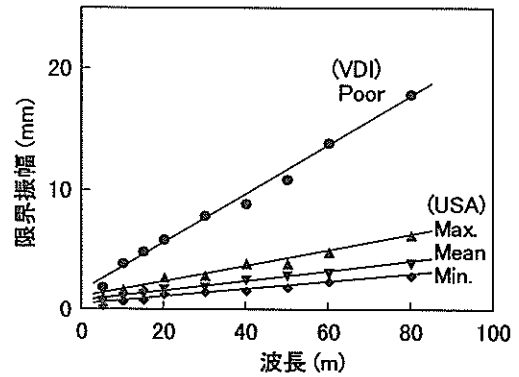


図-28 限界振幅と波長

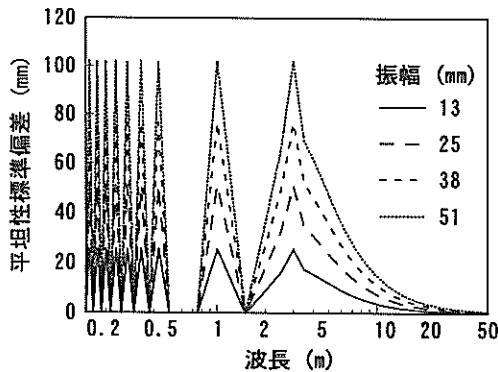


図-26 縦断形状に対する平坦性標準偏差

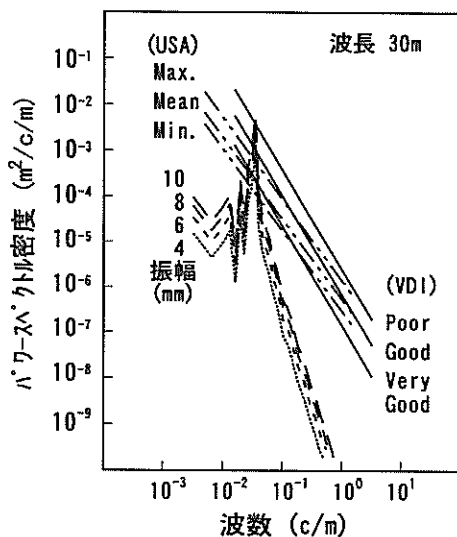


図-27 舗装縦断方向のパワースペクトル密度

このほか、車両の応答を直接測定する方法も、ASTMにも規定がみられるように、道路を対象として米国で用いられている。また、同様の方法は、わが国の鉄道線路の管理基準としても用いられており、具体的には鉄道車両の床面に据え付けられた動揺加速度計により走行中に計測される値に基準を設けている<sup>22)</sup>。しかし、このような方法は車両・航空機の種類・走行速度が多様である道路・空港舗装用の基準として実用化することは現実的には難しいものと考えられる。

そのため、最近では舗装表面の縦断形状を一定の間隔で直接測定し、それに対する車両応答を計算した結果に基づいて舗装平坦性を評価することも行われている。その代表的なものとして世界銀行が提唱しているIRI (International Roughness Index)がある<sup>23)</sup>。これは、車両の1/4モデル (クォーターカーモデル) を一定の速度で舗装上を走行させたときに車両に生ずる上下方向の運動変位量の累積値と走行距離との比で定義されるもので、標準的なラフネス指数として考案されたものである。IRIの具体的な値については、図-29に示すように、舗装・施設に応じてその範囲がまとめられている。

パワースペクトル密度による評価事例と同様に、表面形状として正弦波形が連続するものを考えてIRIを計算してみた。その結果を示した図-30からわかるように、IRIはここで計算対象とした表面形状に対しては波長3m付近で上記の値をはるかに超えるピークに達する特性を有するようだ。これに加えて、航空機と車両の運動特性は異なったものであることから、空港舗装の縦断方向平坦性を評価するためにIRIを使用することは難しいものと考えられる。

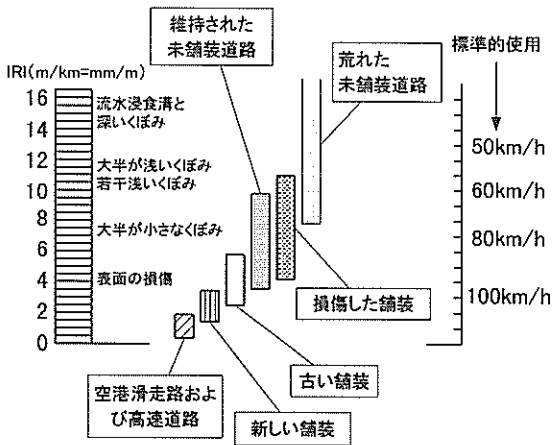


図-29 IRIの範囲

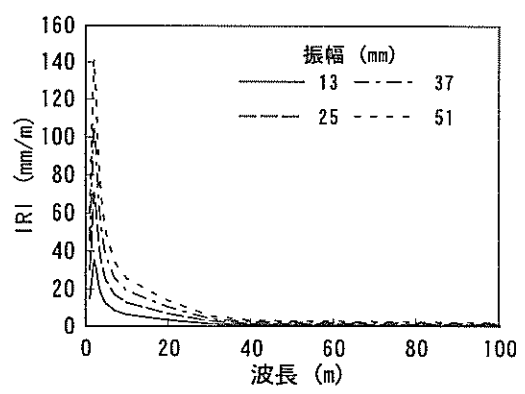


図-30 縦断形状に対するIRIの変化

以上のことを総合すると、パイロットに対するアンケート調査で明らかにされた乗り心地は、単に平坦性を測定したり、車両を対象にした評価法を準用することによって把握することは不可能であると結論づけられる。したがって、その定量化には、航空機が舗装上を走行するときの乗り心地を直接測定する、もしくは数値解析モデルを使用することによって舗装表面形状と航空機の動的応答の関係を見出すことが必要となろう。前者については実験の困難さもあって現時点では実際的ではないと考えられることから、ここでは後者の手法を用いることとした。縦断形状に対する車両の応答をIRIとして定量化する手法と同様の方法を空港舗装の評価に適用したのものとしては、航空機地上走行時の上下方向加速度を計算するためのコンピュータプログラムTAXIが提案されているので、4.でその点について検討する。

#### 4. TAXIによる航空機運動特性の検討

航空機の運動状態は、縦断形状が同一であったとしても航空機の機種や走行状態によって異なったものとなる。この点について定量的な評価をするために、地上走行時における航空機の動的応答のシミュレーションを行った。ここでは、前述のコンピュータプログラムTAXIを用いて縦断形状の評価方法を検討した。

##### 4.1 航空機-舗装モデル

TAXIで考えられている地上走行時の航空機の運動モデルは図-31に示すとおりである。ここでは航空機は軸対称の機体を有し、前脚ならびに左右1つずつの主脚により舗装面と接触しているものとしてモデル化されている。主脚のエネルギー吸収装置はバネ・ダッシュポットによりモデル化されているのに対して、車輪は舗装面と点接触する線形バネとしてモデル化されている。

この航空機-舗装モデルによるシミュレーションは2段階に分けて行われるようになっている。すなわち、第一段階では航空機が剛体であるとして、また、第二段階では機体と翼の曲げを考慮できるように航空機が弾性体であるとして解析され、両者を合成することによって最終的な解が得られる。

航空機を剛体とみなす場合の運動方程式は(5)式で表される。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial KE}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial KE}{\partial q_i} + \frac{\partial PE}{\partial q_i} + \frac{\partial DE}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (5)$$

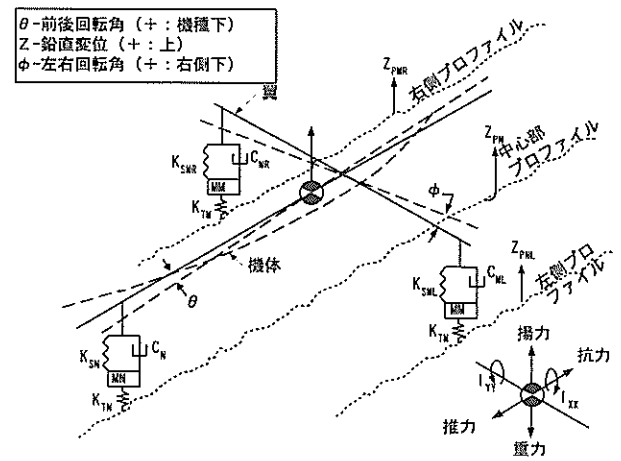


図-31 航空機の運動モデル<sup>10)</sup>



ここに、

$KE$  : 運動エネルギー,  
 $PE$  : 位置エネルギー,  
 $DE$  : 消散エネルギー,  
 $q_i, \dot{q}_i$  : 変位, 速度.

これから次のような解が得られる.

i) 重心位置における鉛直加速度

$$\ddot{Z}_{CG} = (F_{SML} + F_{SMR} + F_{SN} + L - Mg) / M \quad (6)$$

ここに、

$F_{SML}, F_{SMR}, F_{SN}$  : 脚に作用する力 (それぞれ, 左主脚, 右主脚, 前脚),  
 $L$  : 揚力,  
 $M$  : 航空機的全質量,  
 $g$  : 重力加速度.

ii) 主脚における鉛直加速度

$$\ddot{Z}_M = (F_{TM} - F_{SM} - M_M g) / M_M \quad (7)$$

ここに、

$F_{TM}$  : 主脚車輪に作用する鉛直力,  
 $F_{SM}$  : 主脚に作用する鉛直力,  
 $M_M$  : 主脚の質量.

iii) 前脚における鉛直加速度

$$\ddot{Z}_N = (F_{TN} - F_{SN} - M_N g) / M_N \quad (8)$$

ここに、

$F_{TN}$  : 前脚車輪に作用する鉛直力,  
 $F_{SN}$  : 前脚に作用する鉛直力,  
 $M_N$  : 前脚の質量.

iv) ピッチング加速度

$$\ddot{\theta} = (F_{SML} A_{ML} + F_{SMR} A_{MR} - F_{SN} B_N - F_{TD} \epsilon_1) / I_{YY} \quad (9)$$

ここに、

$F_{TD}, \epsilon_1$  : タイヤの摩擦力とモーメントアーム長,  
 $A_{ML}, A_{MR}, B_N$  : 左右の主脚, 前脚のモーメントアーム長,  
 $I_{YY}$  : ピッチング慣性力.

v) 水平加速度

$$\ddot{x} = (F_T - F_{TD} - F_{AD}) / M \quad (10)$$

ここに、

$F_T$  : 推力,

$F_{AD}$  : 抗力.

航空機-舗装モデルの第二段階, すなわち, 航空機の機体を弾性体と考えるシミュレーションの過程では, 機体の弾性特性が運動に及ぼす影響が(11)式で求められる.

$$M_i \ddot{q}_i = \xi_{mli} F_{ML} + \xi_{mri} F_{MR} + \xi_{ni} F_{SN} - 2\zeta_i \omega_i M_i \dot{q}_i - \omega_i^2 M_i q_i \quad (11)$$

ここに、

$M_i$  : 質量,

$\xi_{mli}, \xi_{mri}, \xi_{ni}$  : 主脚 (左右), 前脚の変位,

$\omega_i$  : 振動数,

$\zeta_i$  : ダンピング係数,

$q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$  : 座標軸ならびに1, 2階の時間微分.

#### 4.2 シミュレーションの方法

図-32にはプログラムTAXIを用いたシミュレーションのフローを示してある. ここでは一定時間間隔 (たとえば0.001秒) で第3項まで考えたティラー級数を用いている. 得られる結果のうち, 乗客の乗り心地とパイロットの操縦性を考慮して, それぞれ, 航空機重心位置, パイロット位置における鉛直加速度に注目した.

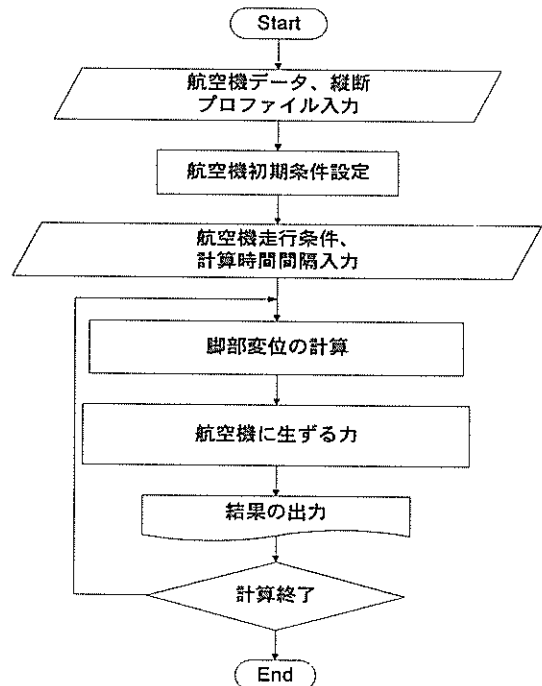


図-32 シミュレーションのフロー

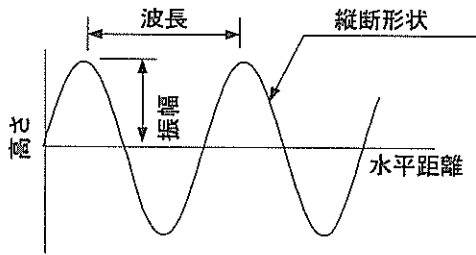


図-33 計算に用いた舗装表面形状

(1) 舗装縦断形状

舗装の縦断形状は、図-33に示すように、種々の波長と振幅を有する連続サイン波形を仮定している。用いた波長ならびに振幅は以下のとおりである。

- ① 波長：1.5, 3.1, 4.6, 6.1, 7.6, 9.1, 12.2, 15.2, 18.3, 24.4, 30.5, 45.7, 61.0, 76.2, 91.4m
- ② 振幅：13, 25, 38, 51mm

計算においては、いずれも計算結果から誤差を除去するために、入力として用いる舗装縦断形状の前に30mの平坦な縦断形状を付加している。

(2) 走行状態

航空機の走行状態として、次の2種類を考えた。

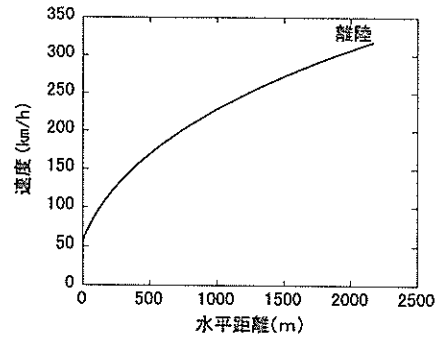
- ① 離陸時：55km/hの初期速度から加速して離陸に至るまで
- ② 低速走行時：33km/hの一定速度で走行<sup>24)</sup>

(3) 加速度の代表値

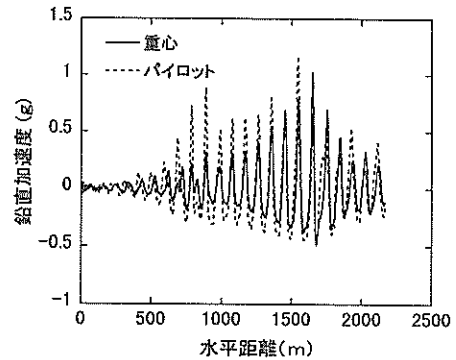
計算結果として得られるものは縦断方向に連続した鉛直加速度である。この場合、計算結果の代表値としては、鉛直加速度の85パーセンタイル値を使用することとした。これは、鉛直加速度が正規分布すると仮定して、その平均値に標準偏差を加えたものにほぼ相当する値である。

(4) 計算例

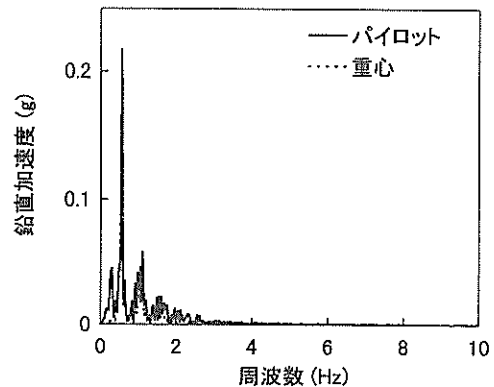
計算例として波長91.4m、振幅51mmの連続サイン波形からなる縦断形状を有する滑走路舗装上をCクラス航空機<sup>25), 26)</sup>が走行して離陸する場合を図-34に示した。図-34(b)には航空機鉛直加速度を、図-34(c)にはその周波数分析結果を示す。これから、最大加速度が1gを超えることがわかる。図-34(d)からは、航空機重心位置ならびにパイロット位置での代表鉛直加速度は、それぞれ、0.28g、0.38gとなることがわかる。



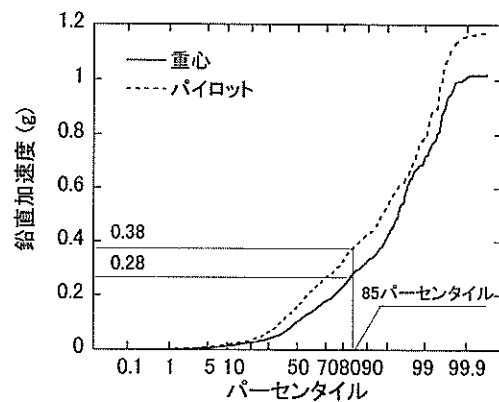
(a) 航空機走行速度



(b) 航空機鉛直加速度



(c) 鉛直加速度の周波数分析



(d) 鉛直加速度の分布

図-34 シミュレーション結果の例

## 5. 航空機加速度に注目した 平坦性の検討

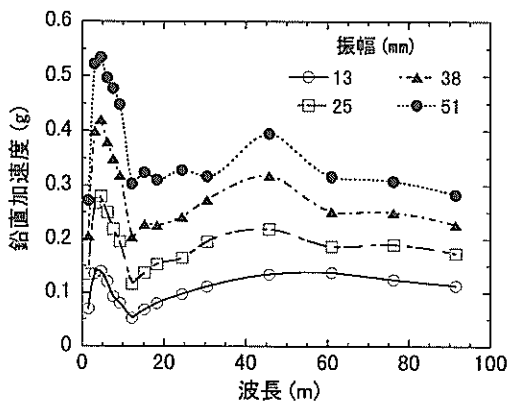
プログラムTAXIを用いた航空機走行時の運動特性の解析結果として、航空機重心位置ならびにパイロット位置における鉛直加速度についてとりまとめ、その結果に基づいて航空機の運動特性から見た空港舗装の平坦性に関する評価値を示す。

### 5.1 走行時の航空機鉛直加速度

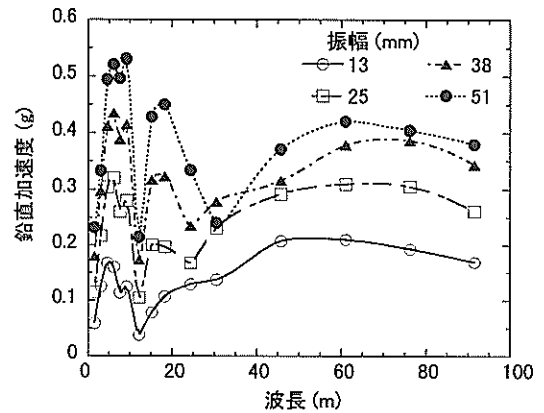
図-35には種々の縦断形状を有する滑走路を航空機が走行して離陸するに至るときの航空機重心位置ならびにパイロット位置における鉛直加速度の代表値をまとめてある。この図から鉛直加速度は舗装の表面形状の振幅ならびに波長によって変化しているものの、それらの影

響は同じではないことがわかる。すなわち、振幅が大きくなると鉛直加速度はいずれの位置においても大きくなるが、波長の違いによる影響は両者で異なっている。具体的には、重心位置では約5、50mの波長において鉛直加速度が大きくなるのに対して、パイロット位置では5、10、20、60mの波長時に大きくなっている。

航空機が一定速度で誘導路を走行する場合については図-36にまとめてある。航空機の鉛直加速度に舗装表面形状の振幅が及ぼす影響は滑走路走行時と同様であり、振幅が大きくなると重心位置ならびにパイロット位置の鉛直加速度はともに増加していく。波長の影響としては約10mのときに鉛直加速度のピークがみられ、それより長い波長では鉛直加速度は非常に小さいものとなっている。

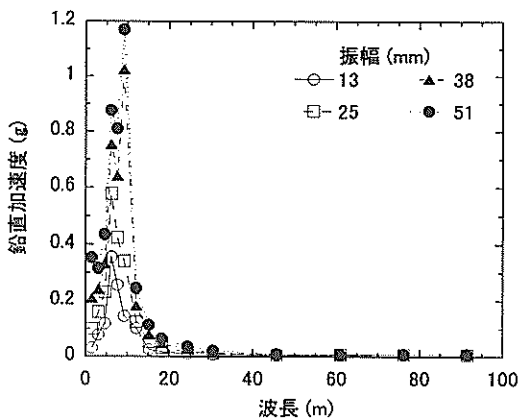


(a) 航空機重心位置

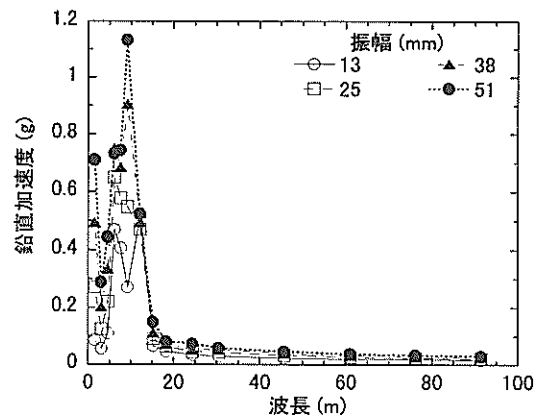


(b) パイロット位置

図-35 滑走路走行時の航空機代表鉛直加速度



(a) 航空機重心位置



(b) パイロット位置

図-36 誘導路走行時の航空機代表鉛直加速度

## 5.2 航空機の応答からみた舗装平坦性の評価規準

5.1で得られた舗装縦断形状の振幅、波長と航空機の鉛直加速度の関係から、航空機走行時の限界鉛直加速度として適切な値を設定することによって、航空機の応答特性からみた舗装平坦性の評価規準が明らかにできる。この限界加速度は現時点では定められていないが、0.35gという値が用いられることが多い<sup>5)・9)・10)</sup>ので、ここでもそれを使用して平坦性の新しい評価規準を検討することにする。

この観点から図-35、36をみると次のことが明らかになる。

- i) 滑走路においては、波長によらず振幅が25mm以下の表面形状は許容されるものの、38mm以上となるものは許容されない場合もある。
- ii) 誘導路走行時には、振幅が13mmであっても波長10m付近の表面形状で鉛直加速度が限界値を超えている。このときの鉛直加速度は滑走路走行時のものより大きくなっている。

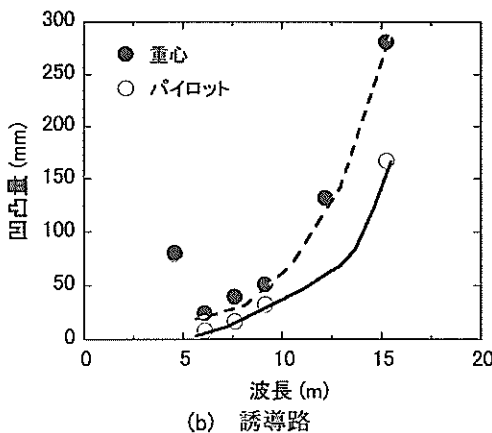
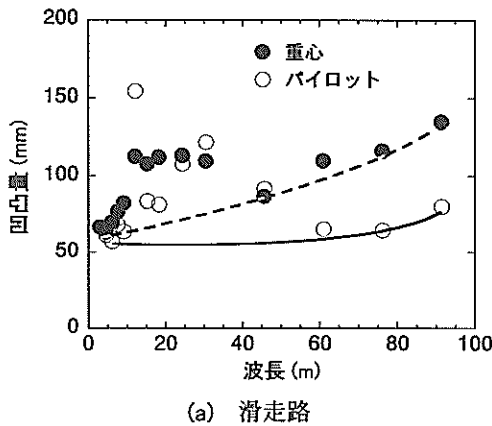


図-37 航空機応答からみた舗装平坦性評価規準

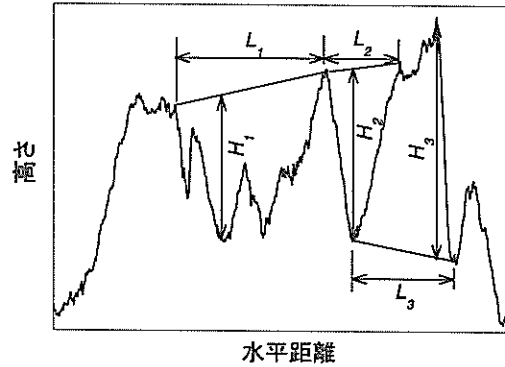


図-38 結果の実際問題への適用 (波長L, 高さH)

以上に示した計算結果から、波長ごとに得られた加速度が限界値に一致するときの振幅を見出せば、それが航空機地上走行時の鉛直加速度に基づく平坦性評価規準となろう。これを図-37に示した。この図の縦軸には実際への適用を考えて、振幅の2倍にあたる凹凸量を用いている。この図から2つの計算位置のうちではパイロット位置におけるものが厳しくなっていることがわかる。したがって、このパイロット位置における凹凸量が平坦性評価規準たる限界凹凸量となろう。限界凹凸量は、滑走路においては広範囲の波長域にわたって50mm程度であること、誘導路においては5~15mmの波長域で10mm程度であることがわかる。

図-37に示した評価規準はサイン波形が連続するとの表面形状を有する舗装を対象にしたものであるが、実際の舗装表面形状に対しても適用可能である。それは、ここで考えた連続サイン波からなる舗装表面形状のほうが単一もしくは複数の凹凸を有する場合よりも航空機の応答に及ぼす影響が著しいからである。実際の表面形状における凹凸の波長、高さについては図-38に示すようにとればよいと考えられる。

## 6. 結論

本研究では、パイロットの空港舗装に対する要求事項をアンケート調査により明らかにし、その結果最重要項目と判明した縦断方向平坦性に関する要求性能を定量化した。主要な結論を以下に示す。

- (1) 空港舗装に対する乗り心地・走行安全性についてはパイロット全体の6~7割が肯定的な評価をしている。
- (2) 舗装表面性状が乗り心地・安全性に及ぼす影響の大きさは航空機の走行速度によって異なり、滑走路で最大となっている。
- (3) 乗り心地に大きく影響を及ぼす表面性状項目は、航

空灯火・段差といった縦断方向平坦性であるのに対して、走行安全性には舗装表面への雪氷付着、破片散乱による航空機破損の危険性が大きく影響する。

(4) 走行時の航空機の鉛直加速度は舗装の平坦性の悪化につれて増加することがシミュレーションの結果明らかとなった。この加速度が最大となる波長は、走行状態によって異なり、誘導路では10m付近であるのに対し、滑走路では10m付近以外にもいくつか認められる。

(5) 航空機の鉛直加速度は走行速度ならびに航空機内の位置によって異なるが、パイロット位置におけるものが重心位置におけるものよりも厳しくなっている。

(6) 空港舗装の平坦性に関する評価規準について、鉛直加速度を0.35g以下に制限することによって航空機の乗り心地の観点から限界凹凸量として示した。その値は滑走路では広範囲の波長域にわたって50mm程度であるが、誘導路の場合は5~15mの波長域で10mm程度である。

## 7. おわりに

本資料では、地上走行時における航空機の運動特性の観点からの空港舗装の平坦性評価方法についてとりまとめた。道路舗装では利用者たる運転者・乗客の主観的判断が舗装の設計・補修基準に反映されているのに対して、空港舗装ではそれが十分にはなされておらず、本研究はそれを実現するための最初のステップになると考えている。

本研究では航空機の地上走行時における乗り心地を定量化するために、舗装縦断形状に対する航空機の動的応答を数値シミュレーションにより解析し、その結果として得られる鉛直加速度に注目した。今後は、設計の対象とする航空機を適切にモデル化した上でシミュレーションを行うとともに、限界鉛直加速度を合理的に定めることによって、縦断形状に関する基準として提案できるようにしたいと考えている。

最後に、本研究の遂行にあたり、中央大学理工学部土木工学科姫野賢治教授ならびに北見工業大学工学部土木開発工学科川村 彰助教授に多大なご協力を頂きました。深甚な謝意を表します。

(平成11年11月30日受付)

## 参考文献

- 1) (社) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：土木学会コンクリート標準示方書 [舗装編]，168p., 1996.
- 2) International Civil Aviation Organization: *International Standards and Recommended Practices on Aerodromes*,

*Annex 14*, 159 p., 1990.

- 3) 運輸省航空局：空港土木施設設計基準，(財) 港湾空港建設技術サービスセンタ，1999.
- 4) 運輸省航空局：空港舗装補修要領 (案)，60p., 1999.
- 5) Gervais, E. L.: *Runway Roughness Measurement, Quantification and Application; The Boeing Approach, Aircraft/Pavement Interaction; An Integrated System*, ASCE, pp. 121-131, 1991.
- 6) Gerardi, T.: *The Effect of Runway Roughness on Aircraft Operations, Aircraft/Pavement Technology: in the Midst of Change*, ASCE, pp.335-347, 1997.
- 7) 姫野賢治, 秋本 隆, 川村 彰, 福原敏彦：空港滑走路面のプロファイル特性に関する研究，土木学会論文集, No. 606/V-41, pp.43-51, 1998.
- 8) Akimoto, T., Kawamura, A., Kasahara, A., Himeno, K. and Hachiya, Y.: *Characteristics of Pavement Surface Profile on Airport Runways, Proceedings of the third International Symposium on Pavement Surface Characteristics*, New Zealand, pp.171-187, 1996.
- 9) Gerardi, A. G.: *Digital Simulation of Flexible Aircraft Response to Symmetrical and Asymmetrical Runway Roughness, Technical report AFFDL-TR-77-37*, August 1977.
- 10) Gerardi, A. and Krueger, D.: *The Effects of Runway Roughness on Aircraft Fatigue Life, Aircraft/Pavement Interaction; An Integrated System*, ASCE, pp.77-95, 1991.
- 11) 菅 民郎：アンケートデータの分析，(株) 現代数学社，374p., 1998.
- 12) 梅野修一, 八谷好高, 藤倉豊吉, 横田 弘：空港滑走路のすべり抵抗性，港湾技研資料, No. 846, 20p., 1996.
- 13) 運輸省航空局：空港土木工事共通仕様書，(財) 港湾空港建設技術サービスセンタ，1999.
- 14) Horonjeff, R.: *Planning and Design of Airports*, Second Edition, 460p., 1975.
- 15) AASHTO: *Design of Pavement Structures*, 1993.
- 16) 運輸省航空局：空港舗装構造設計要領，(財) 港湾空港建設技術サービスセンタ，147p., 1999.
- 17) Hudson, W. R. : *Road Roughness : Its Elements and Measurement*, Transportation Research Record, No.836, pp.1-7, 1981.
- 18) 佐藤勝久, 八谷好高：埋設・配管方式による航空灯火の野外実用実験，港湾技研資料, No.395, 46p., 1981.
- 19) 秋本 隆, 姫野賢治, 川村 彰, 福原敏彦：舗装路面の絶対プロファイルデータ収集システムの開発，土木学会論文集, No. 606/V-41, pp.13-19, 1998.
- 20) UMTRI (The University of Michigan Transportation Research Institute) *Road Roughness Home Page* (<http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/index.html>)

- 21) 土木学会・空港舗装研究委員会：新東京国際空港の舗装に関する研究報告書，258p., 1985.
- 22) 軌道管理研究グループ：鉄道線路の保守管理，日本鉄道施設協会，174p., 1982.
- 23) Sayers, M. W., et al. : Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements, World Bank Technical Paper, No.46, The World Bank, 87p., 1986.
- 24) International Civil Aviation Organization: *Aerodrome Design Manual, Part 2*, 1970.
- 25) Sonnenburg, P. N.: Analysis of Airfield Runway Roughness Criteria, *Final Report of FAA-RD-75-110*, 1976.
- 26) Spanger, E. B., Gerardi, A. G. and Tomita, H.: Roughness Measurements of Airfield Pavements, *Road and Airport Pavement Response Monitoring Systems*, ASCE, pp.352-366, 1991.

港湾技研資料 No. 954

2000. 3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright ©(2000) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。