

空港滑走路面のプロファイル特性に関する研究

姫野賢治¹・秋本 隆²・川村 彰³・福原敏彦⁴

¹フェロー会員 工博 中央大学教授 理工学部 土木工学科(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 工博 ニチレキ株式会社(〒102-8222 東京都千代田区九段北4-3-29)

³正会員 工博 北見工業大学助教授 工学部 土木開発工学科(〒090-8507 北海道北見市公園町165)

⁴コマツエンジニアリング株式会社(〒254-0014 神奈川県平塚市四之宮1144-1)

航空機と空港滑走路面特性との間の力学的な相互作用問題は、滑走路面の維持修繕問題のみならず、経済・環境問題にも関連するため、そのプロファイル特性についての定期的かつ合理的な調査が必要であることは言うまでもない。本研究では、関西地方の実主要空港において、GPSと組み合わせた非接触プロフィロメータによる滑走路面の現場プロファイルの正確な測定を行い、スペクトル解析、IRI、RNなどの評価手法によってその路面特性を評価した。また、その実測データに基づき、離陸滑走中の航空機の重心位置における上下方向加速度について力学的シミュレーションを行い、滑走路プロファイルの特性が機体の振動に及ぼす影響について検討を行った。

KeyWords: absolute profile of pavement surface, IRI, ride number, PSD, roughness evaluation, takeoff of airplane

1. はじめに

滑走路のラフネスが、航空機の安全性や乗心地に影響を及ぼし、機体にダメージを生じさせることは周知の事実である。路面の平坦性の、それを利用する交通具に対する標準的な評価規準については、道路と空港滑走路との間には、大きな違いが存在する。航空機の乗心地に影響を及ぼす滑走路面状況を検討する際、そのラフネスとそれによって生じる航空機の乗心地への影響を分析する手法の確立のためには、滑走路面のプロファイルの正確かつ迅速な測定処理が必要不可欠となる。

非接触型プロフィロメータを用いた路面の縦断プロファイルの測定は、かねてより主に道路舗装を対象として実施され、その特性は乗心地の評価を含めて相当の解析がなされてきた¹⁾。しかしながら、交通施設として道路と同程度重要な空港滑走路のプロファイルについては、交通の遮断が許されないこと、数kmに及ぶ延長を高速かつ正確に測定する道具が乏しかったことなどの理由により、注意深く測定された例がほとんど皆無であった。また、道路とは異なり空港の滑走路では、平坦性の基準や対象交通具に特徴があるため、そのプロファイルの特徴は道路舗装とはかなり異なるであろうことが十分想像される。プロファイルが正確に測定されれば、滑走路のラフネスの評価が可能になるだけでなく、加速度とプロファイルとの相関関係を考察することにより、航空機の乗心地、乗員に及ぼす身体的な影響、機体に及ぼす力学的影響、あるいは機体が舗

装に及ぼす力学的影響などの評価が可能になる。

本研究では、非接触プロフィロメータを用い、関西地方の主要空港においてボーイング747の機体における車輪配置を考慮して、滑走路に沿って5測線を選んでプロファイルの測定を行った。このプロフィロメータは、通常車両走行速度で測定が可能で、これにGlobal Positioning System(以下略してGPSとする)を組み合わせることにより、1 [cm] 間隔で±1.2 [mm]の精度により滑走路表面の絶対標高の測定が可能となった。

この実測データに基づき、着陸帯、中央帯、離陸帯などの幾つかの特徴を有する滑走路部分における滑走路面のプロファイル特性を示し、スペクトル解析やIRI (International Roughness Index), RN (Ride Number) などの指数により路面の平坦性を評価した。

測定路面に対応して、大型航空機のコンピュータシミュレーションを行い、離陸中の航空機の運動や乗客の乗心地の観点から航空機の振動の評価を行った。これは、離陸滑走中の航空機の重心位置における上下方向加速度についてシミュレーションを行い、滑走路プロファイルの違いが機体の振動に及ぼす影響について、スペクトル解析等により比較検討を行ったものである。

2. 測定方法

(1) 測定装置

ここで用いたプロフィロメータは逐次2点真直度測定法の原理²⁾を用いた非接触型である。この測定装置は短波長成分をとらえることは可能であったが、単独

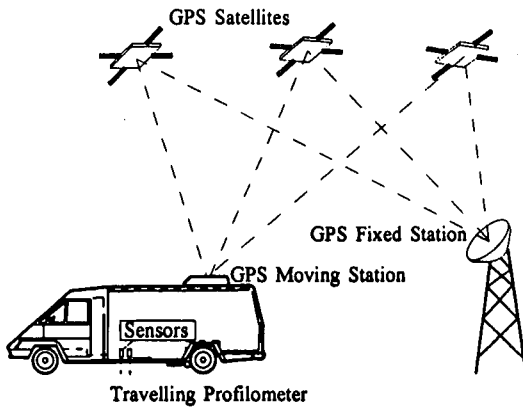


Fig.1 Schematic Diagram of Measuring System for Absolute Elevation

では長波長成分をとらえることは不可能であった。この理由は、測定機のもつ誤差が累積するために長波長では全体的に大きなゆがみが生じることによるものである。

今回の測定では、長波長成分の解析をも正確に行うために、このプロフィロメータ車にGPSを組み込み、これら2つのデータを合成することによって、短波長成分と長波成分を含めて絶対的なプロファイルデータを得ることができた。この測定の概要をFig.1に示す。

(2) 絶対縦断プロフィロ測定

1993年11月30日から12月1日にかけて関西地方のある主要空港においてプロファイル測定を行った。測線は、Fig.2に示すように滑走路の中心灯線、これから左右にそれぞれ190 [cm]、550 [cm] 離れた位置の5本であり、延長は3,000 [m]である。この測線の位置は、Fig.3に示すようにボーイング747型航空機の車輪の配置から決定したものである。なお、測定は1つの測線を往復したことより、測定回数は合計10回となった。また、この時の測定速度は、全測線約10 [m/s]であった。なお、例えば14側とは、方位角を北から時計回りに36分割で表したときの数値で表されており、ほぼ南東に向かっていくことを示している。

3. 絶対縦断プロファイルの測定結果

Fig.4のように、路面縦断プロファイルを波形として捉え、このうち長波長成分をGPSで(図の上部)、また短波長成分を非接触型プロフィロメータで測定し(図の中間部)、これら2つのデータを合成することにより長距離にわたり正確な絶対縦断プロファイルが得られた(図の下部)。過去においては、測定機のもつ累積誤差の

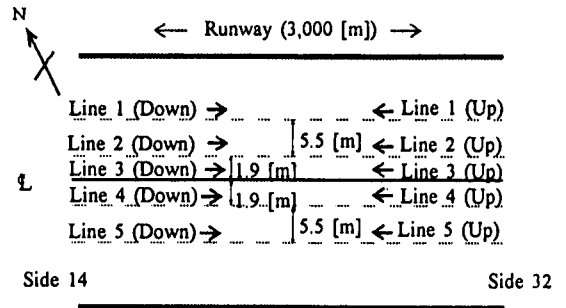


Fig.2 Configuration of Measurement Lines Along the Runway

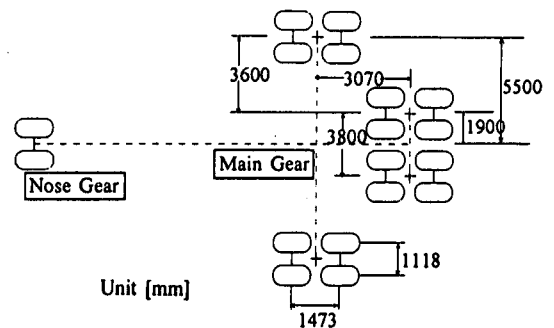


Fig.3 Tire Configuration Pattern of Boeing 747 Aircraft

ため長波長成分が正確に測定できなかったため、測定始点と終点の間を直線と仮定してこの誤差を取り除く方法しかなかったが、今回の測定では、Fig.5に示すようにプロファイルデータにGPSを結合させることによりこの問題を解決した。

Fig.6に、今回測定したそれぞれのデータを合成して得た絶対縦断プロファイルの例を示す。

この図から、往復の両プロファイルは完全に一致しており、その誤差は、ほとんどないことがわかる。このように、従来単独で用いていたプロフィロメータによるプロファイルにGPSを併用することで長波成分を含んだ絶対縦断プロファイルデータを得ることができた。

4. パワースペクトル密度による解析

本研究では、滑走路の平坦性を評価するのに、まずパワースペクトル密度(PSD: Power Spectrum Density)を用いた^{3),4)}。PSDの計算には、最大エントロピー法(MEM)を用いた。今回の測定では、延長3 [km]にわたって、1 [cm]ピッチで正確なプロファイルが得られており、非常に広い範囲の波長の成分が含まれているた

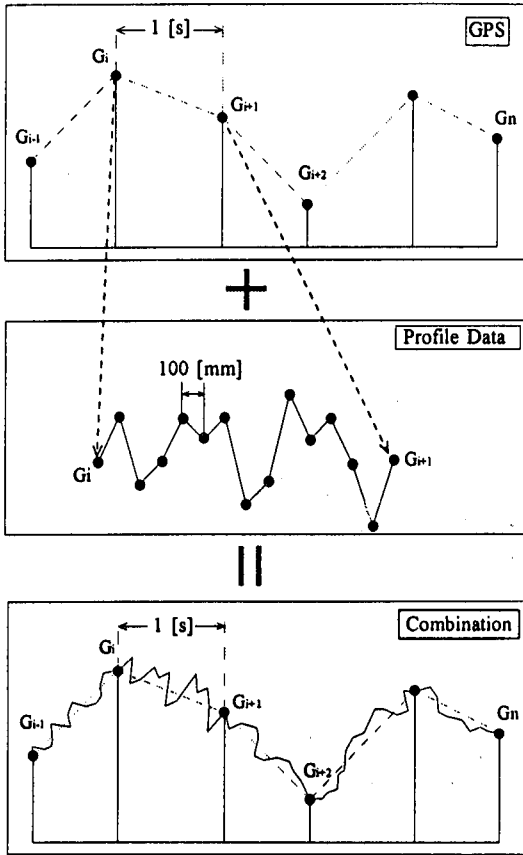


Fig.4 Obtaining Absolute Elevation Combining GPS and Profile Data

め、これを一度にすべて用いた解析を行うと、結果の解釈が困難になるため、波長の長い成分と、波長の短い成分とを別々に解析を行った。なお、結果の解釈をするための一つの指標として、道路評価のために作成されたVDI (Verien Deutscher Ingenieure)の基準を用いた。これは、空港用に作成された適当な評価基準がなかったために参考までに用いたものである。この式および式に含まれる係数をそれぞれ、Eq.(1), Table1に示す。

$$S(\Omega) = S(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-\omega} \quad (1)$$

ここで、

- $S(\Omega)$: 滑走路プロファイルのパワースペクトルの密度関数
- Ω : 空間的な角周波数 [c/m]
- Ω_0 : 関連する空間的な角周波数 (=1 [c/m])

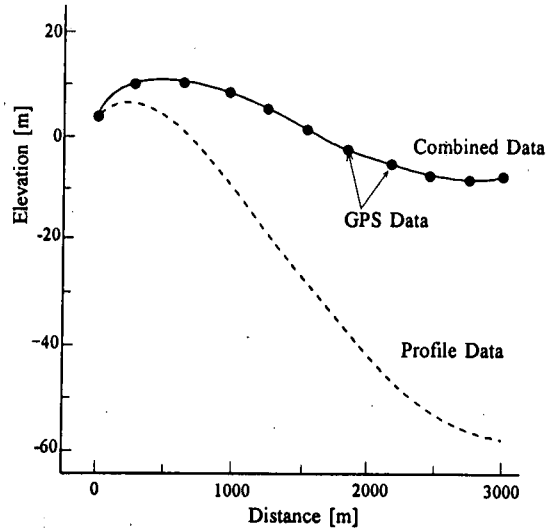


Fig.5 Combination of Profile Data and GPS Data

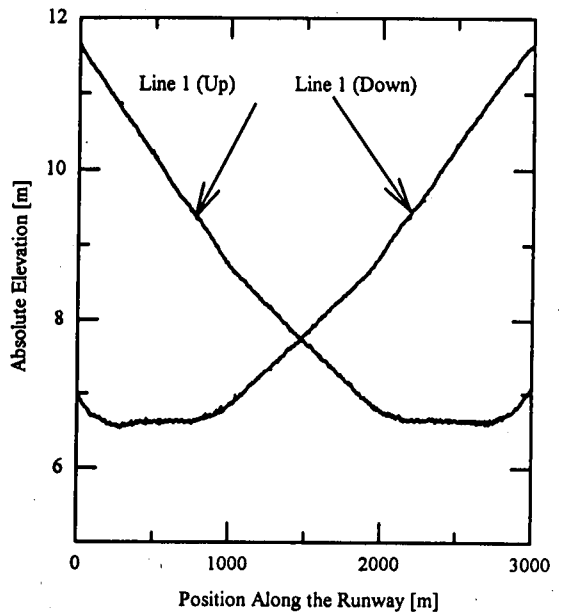


Fig.6 Measured Absolute Elevation

(1) 長波長成分のパワースペクトル密度

Fig.7は、滑走路全長3 [km]にわたって3 [m]間隔でデータを抽出してPSDを求めたものである。全10測線において、PSDには際だった差は見られなかった。

Table1 Evaluation Standard of VDI for Pavement Surface

Evaluation	$S(\Omega_0) [\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{c}/\text{m}]$	ω
Very Good	1.3	2.20
Good	6.0	2.18
Poor	22.0	2.18

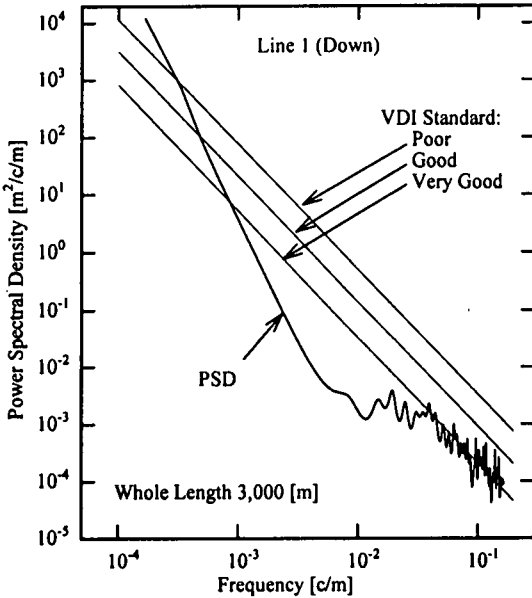


Fig.7 PSD for the Whole Length of Runway

(2) 短波長成分のパワースペクトル密度

次に、各測線の縦断方向の平坦度の傾向をみるために全長3 [km]を100 [m]ずつの区間に分けて10 [cm]間隔のデータでパワースペクトル密度を求め、代表的な区間を示したのが Fig.8(14側, 300-400 [m]), Fig.9(中央, 1500-1600 [m]), Fig.10(32側, 2600-2700 [m])である。

これらを見ると、まず離着陸時に静止または衝撃荷重の作用する滑走路端部の Fig.8と Fig.10を比較すると、32側より14側の方が路面の平坦性が悪いことがわかる。この空港では周辺住民に対する特殊な騒音問題より、離着陸の95%が32側から14側に向かって行われ、事実上のタッチダウンポイントは32側のみとあってよい。つまり、タッチダウン時に衝撃荷重の加わる32側よりも、ほぼ減速を終了して誘導路に抜けようとしている14側の方が平坦性が悪い訳で、アスファルト舗装にとっては、衝撃荷重よりも静止荷重のほうが路面に与える影響が大きいといえる。

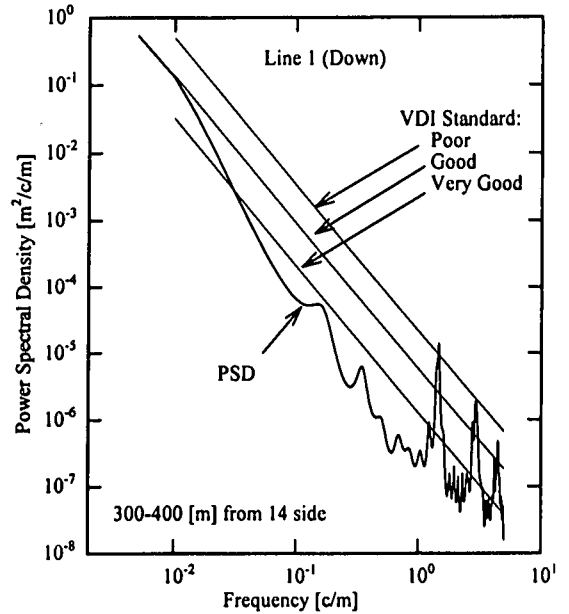


Fig.8 PSD for a Hundred Meter Section of the Runway (At 300-400 [m] from #14 side)

この結果にVDIの評価基準を用いて評価してみると、周波数がほぼ 10^{-1} [c/m]以下の長波領域では悪い状態と評価されるが、さらに長波になると一部にやや悪いと評価される箇所がある。これは、滑走路全体の大きな縦断形状がややゆがんでいることを意味する。また、周波数がほぼ 10^{-1} [c/m]以上の短波領域では、周波数が約1.4 [c/m]、波長で約0.7 [m]程度の領域に卓越した周波数が存在しているが、これは航空機のタイヤの接地長さとはほぼ一致するため、離陸待機時や着陸後の低速タクシー時に、タイヤの静止または低速荷重によってできたものであろうと推察される。

なお、このVDIの基準は道路用であり、測線間、区間間の比較の際の目安として用いたことを述べておく。ちなみに、川合らによれば、高速道路のPSDはVery Goodに位置するとされている⁵⁾。

(3) IRIによる評価

次に、路面性状を評価する尺度として世界銀行が提唱しているIRI (International Roughness Index)によってプロファイルの評価を行った。これは各国や機関によって異なるラフネスを共通化する目的で、1986年に提案された評価基準で、クォーターカーを一定の速度で路面上を走行させたときに車が受ける上下方向の運動変位の累積値と走行距離との比で定義したもので、路面の平坦性をその上を走行する車両の上下加速度の大きさと評価しようとするものである。数字が大きければ

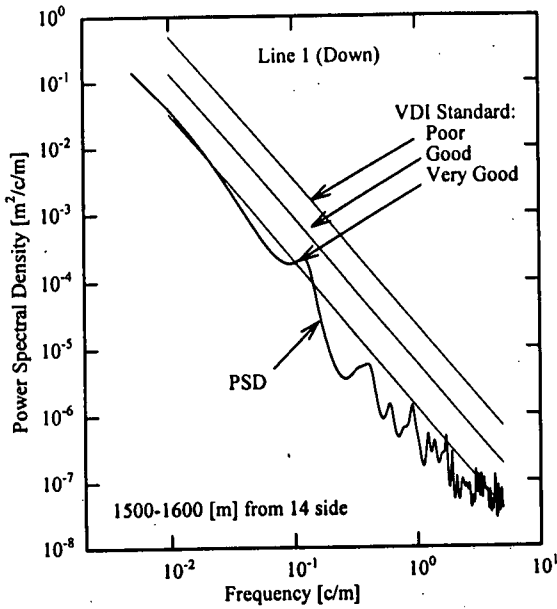


Fig.9 PSD for a Hundred Meter Section of the Runway (At 1500-1600 [m] from #14 side)

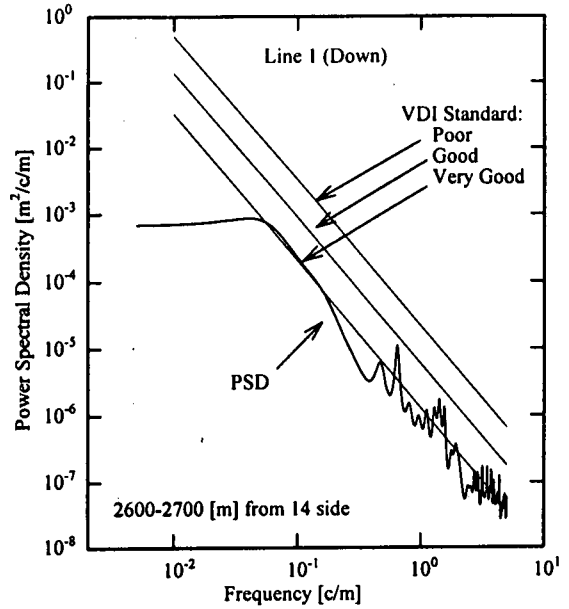


Fig.10 PSD for a Hundred Meter Section of the Runway (At 2600-2700 [m] from #14 side)

ど路面の凹凸が大きく、悪い状態であるといえる。

Fig.11に、Fig.8~Fig.10で示したのと同じ区間についてデータの収集間隔を10 [cm]として算出したIRIを示す。

このIRIの数値を現実路面との対応について示した尺度の例をFig.12に示す。これには、空港の滑走路・高速道路から荒れた未舗装道路までの範囲が示されている。

滑走路端部ではIRIが2程度であることから、「新しい舗装」の区分に、また中央部では、IRIが3程度であり、「新設舗装」の区分に相当する状況が示された。

(4) RNによる舗装表面のラフネスの評価

近年、舗装表面のラフネスの評価に、Ride Number (RN) という指標が広く用いられるようになってきている^{6),7)}。この指標は、路面のラフネスを物理的に表現したProfile Index (PI) から、Eq(2)によって導かれるもので、利用者の快適さを表したものである。

$$RN = 5e^{18.65PI^{0.94}} \quad (2)$$

この式にしたがって、5つの測線の往復のデータについて、RNを計算したものがTable2である。RNは、利用者の立場から作成された指標であり、IRIと似ているが、これとは異なり、その値が大きいきほど路面性状がよいことを表している。これは、RNがパネラーによる5段階評価値に基づき作成された指標であることに

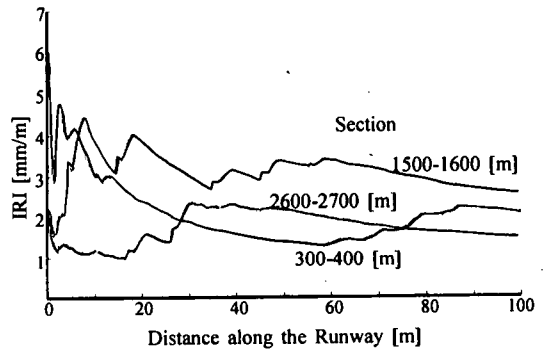


Fig.11 IRI for 100 [m] section

よる。Table2に関する限り、この滑走路を道路用の舗装として評価した結果は必ずしも良いものとは言えないであろう。

5. 航空機モデルによる振動加速度のシミュレーション

滑走路のプロファイルは、離着陸時やタクシー操作時における航空機の安全性・快適性を保持する上で極めて重要であり、機体の耐久性やオペレーション費用

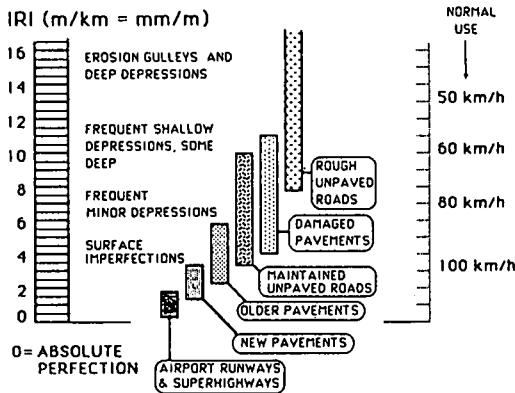


Fig.12 IRI Roughness Scale and Actual Surfaces

Table2 Calculated Ride Number (RN) of Each Measured Line

Section No.	RN	Section No.	RN
1 (Down)	1.042	1 (Up)	1.019
2 (Down)	0.440	2 (Up)	0.910
3 (Down)	0.977	3 (Up)	1.026
4 (Down)	0.892	4 (Up)	1.062
5 (Down)	0.998	5 (Up)	0.966

にも関連していることから空港施設管理者は、これらの影響を考慮に入れた滑走路の維持管理計画を構築する必要がある。また滑走路は、一般道路と異なり、航空機の離着陸のために航空機を高速で走行させる必要があり、そのためには路面の波状特性のうち長波性状をも定期的にモニターしておく必要がある。

一般道路の維持管理計画では、近年、舗装のサービス性能評価に関する調査・研究が進行し、乗心地に影響を及ぼす凹凸程度については車の運動モデルによる理論的裏付けのなされた指標が鋭意開発されている。これに対し、航空機の地上操作に関する航空機モデルの作成例は、従来からいくつか存在するものの、滑走路の維持管理計画と直接結び付く指標の開発までには至っていない。

このことから、空港舗装の維持管理計画に関連した舗装の平坦性評価に結び付く指標の開発を最終目標として、離着陸時の滑走路における航空機の運動シミュレーションを行った。本研究においては、滑走路面の凹凸が航空機の動的挙動に及ぼす影響評価の検討に有効と思われる低自由度の航空機の振動シミュレーション

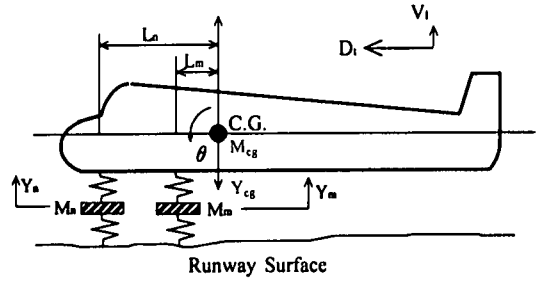


Fig.13 Aircraft Mathematical Model

モデルを作成し、測定により得られた滑走路面のプロファイルデータを用いて、離着陸時に滑走路面凹凸により航空機の各部位に発生する振動加速度の算定を行った。

(1) 航空機モデル

航空機と滑走路面の動的相互作用を扱った運動モデルは、これまで関係機関で数多く発表されている⁸⁾が、

- 大型旅客航空機の機種に大きく依存するのではなく、一般的特性を表現できること。
- 計算プログラムが簡便であること。
- 運動モデルの応答システムにおいて、入出力の応答特性が明確であること。

などの条件を満足するできるだけ低自由度のモデルを作成した。ここで用いたモデルは、これまでによく利用されてきた『ばね-質量-ダッシュポット』で構成される線形モデルであり⁹⁾、左右の主脚の走行軌跡上で、路面の平坦性に大きな違いが無いと仮定した。考慮した自由度は、バネ上質量の上下振動、ピッチング、前輪バネ下質量の上下振動、後輪バネ下質量の上下振動の4つである。Fig.13にこのモデルの概要を示す。

$$M_{cg} \frac{d^2 Y_{cg}}{dt^2} + F_{sn} + F_{sm} + M_{cg}g - V_l = 0 \quad (3a)$$

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} - F_{sn} L_n + F_{sm} L_m - D_t (L_m + X_m) = 0 \quad (3b)$$

$$M_m \frac{d^2 Y_m}{dt^2} - F_{sm} + F_{tm} + M_m g = 0 \quad (3c)$$

$$M_n \frac{d^2 Y_n}{dt^2} - F_{sn} + F_{tn} + M_n g = 0 \quad (3d)$$

ここに、

Table3 Input Data for Aircraft Motion Simulation

Gross Mass	124 [Mg]
Distance Main Gear to CG	1.2 [m]
Distance Nose Gear to CG	13 [m]
Mass Moment of Inertia	670 [Mg·m·s ²]
Unsprung Mass of Each Main Gear	1.2 [Mg]
Unsprung Mass of Nose Gear	160 [kg]
Lift Coefficient	0.6
Drag Coefficient	0.06
Main Tire Spring Constant per Strut	63 [kN/m]
Nose Tire Spring Constant per Strut	180 [kN/m]

- F_{sn} = 前脚支柱による力
- F_{sm} = 主脚支柱による力
- F_{tn} = 前脚タイヤによる力
- F_{tm} = 主脚タイヤによる力
- I = 機体の慣性モーメント
- D_t = タイヤの引張り力
- L_m = 主脚と重心の水平距離
- X_m = 主脚のストローク長
- V_l = 翼の揚力

Table3にシミュレーションに用いたモデルの諸元を示す。

モデルは、一般的大型航空機のものを用いた。また、用いたプロファイルデータは、60 [cm] 間隔で読み込むようになっている。シミュレーションに際しては、前車輪及び主車輪の非線形特性を考慮した非線形2階連立常微分方程式に対して、改良 Euler 法による数値積分法を適用し、コンピュータシミュレーションを行った。なお、改良 Euler 法とは、前進積分法で最も簡便な Euler 法がもつ欠点である誤差の累積の問題を数学的に改良したものである。

(2) シミュレーション結果

Fig.14は、各測線ごとに航空機の重心に作用する振動加速度をモデルによって算出したものである。シミュレーションは、機体が滑走路端で静止していた状況から、徐々に加速を行い、離陸するまでを行ったものである。

この図から、滑走を始めてから離陸するまでに徐々に上下振動の振幅が増幅していく様子が伺える。また、上

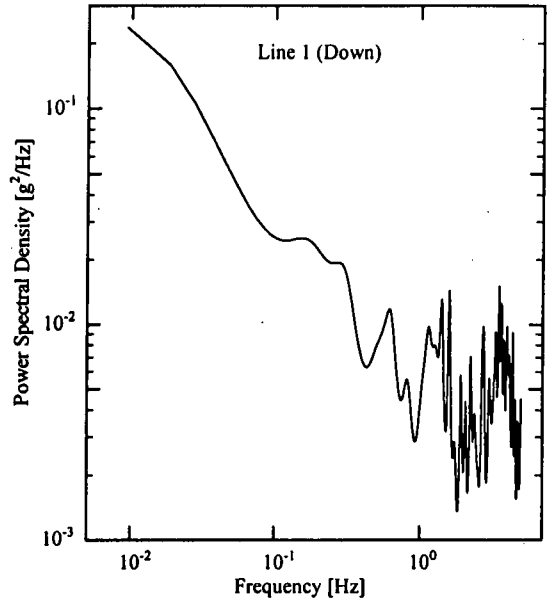


Fig.14 Change in Vertical Acceleration at C.G.

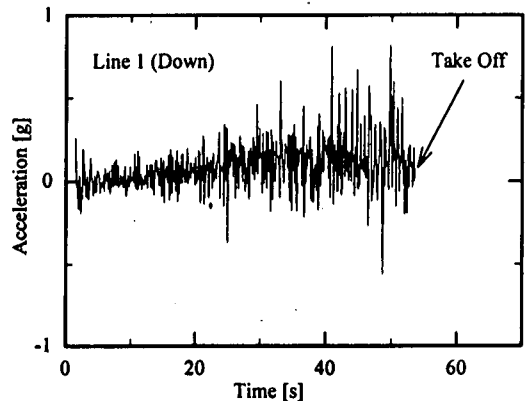


Fig.15 Power Spectra of Vibration of Aircraft

下振動加速度のパワースペクトルを示したのが Fig.15 である。

測線によっては、0.1 [Hz] 以下の低周波数帯と 1 [Hz] 付近の周波数応答が顕著であることから、滑走路の縦断プロファイルにおいて長波成分の把握が乗心地面からも極めて重要と思われる。

今後の課題として、測線の位置の影響が無視できないことから、より現実的な航空機の運動を再現するには横断方向のプロファイル変化を考慮したモデルによるシミュレーションを行う必要がある。また、その結果に基づいて、機体のダメージ予測および滑走路の

維持管理計画に活用できる指標の開発を行うことが望まれる。

6. 結論

以下に、本研究で得られた成果を要約して示す。

1. 逐次2点真直度測定法の原理を用いたプロフィロメータにGPSを組み合わせることににより、短波長成分と長波長成分を含めた広範囲な波長に対して絶対的なプロフィロメータを得ることができるようになった。
2. 主要空港滑走路の縦断プロファイルの特性を分析したところ、短波長領域の分析によれば、ほぼタイヤのフットプリントにより生じたと思われる周波数の凹凸の卓越していることが確認された。これは、低速で走行中または離陸待機中の静止荷重による路面の沈下が原因と考えられる。また、滑走路端部とタッチダウンポイントのプロファイルの比較により、着陸時の衝撃荷重よりも離陸時の低速移動時の荷重の方が、路面に与える影響が大きいと考えられる。
3. 航空機の運動モデルによるシミュレーションによって、離陸時の航空機の機体(重心位置)に作用する振動加速度の再現が可能となった。また、シミュレーション結果のスペクトル特性から、滑走路面の長波成分が乗心地に影響を及ぼす状況も検討できた。
4. 今後の課題として、現実の滑走路面では測線によって凹凸状況に違いを生じていることから横断プロファイルの影響を考慮できる運動モデルの作成とシミュレーションにより得られる結果に基づく、舗装の維持管理計画に結び付く平坦性の評価指標の作成などが望まれる。

7. おわりに

従来の、通常走行で測定が可能なプロフィロメータは、装置がもつ累積誤差のために長波長成分を得るこ

とができなかった。本研究で紹介した、プロフィロメータとGPSの組み合わせにより、短波長に長波長成分も含め絶対的なプロフィロメータを得ることができるようになった。縦断プロファイルによる振動加速度のみならず、これに横断プロファイルを組み合わせ、機体全体の振動加速度のシミュレーションにより、維持管理指標作成への取り組みが、今後期待される。

謝辞： 本研究では、実滑走路の路面性状を測定するにあたって、運輸省港湾技術研究所の八谷好高滑走路研究室長には、並々ならぬご尽力を頂いた。ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Ichihashi, S., Fukuhara, T., Himeno, K., Kawamura, A. and Kasahara, A.: Development of a New Data Acquisition System for Measuring Pavement Surface Profile, Proceedings of Second International Conference on Road Surface Characteristics, 1992.
- 2) Tozawa, K., Sato, H. and O-hori, M.: A New Method for the Measurement of the Straightness of Machine Tools and Machined Work, 1981.
- 3) ISO/TC108/SC2/WG4 N57, Reporting Vehicle Road Surface Irregularities, 1982.
- 4) Xu, D. M., Mohamed, M. O., Yong, R. N. and Caporuscio, F.: Development of a Criterion for Road Surface Roughness Based on Power Spectral Density Function, Journal of Terramechanics, Vol.29, No. 4/5, pp.477-486, 1992.
- 5) 川合平夫, 森崎健二: 自動車走行路面の性質と振動乗り心地への関連性, 三菱重工技報, Vol.2, No.2, pp.20-27, 1965.
- 6) Janoff, M. S.: Methodology for Computing Pavement Ride Quality from Pavement Roughness Measurements, Journal of TRB Research Record, No.1084, 1986.
- 7) Spangler, E. B., Gerardi, A. G. and Yager, D. R.: Smoothness Criteria for Runway Rehabilitation and Overlays, DOT Report DOT/FAA/RD-90/23, 1990.
- 8) Gerardi, T. G. and Lohwasser, A. K.: Computer Program for the Prediction of Aircraft Response to Runway Roughness, AWFL-TR-73-109, Volume I and II, Airforce Weapons Laboratory, Kirtland AFB, 1973.
- 9) Butterworth, C. K. and Boozer Jr., D. E.: A Computer Code for Runway Roughness Studies, C-141 AWFL-TR-70-71, 1970.

(1997. 8. 8 受付)

CHARACTERISTICS OF SURFACE PROFILES OF AN AIRPORT RUNWAY PAVEMENT

Kenji HIMENO, Takashi AKIMOTO, Akira KAWAMURA and Toshihiko FUKUHARA

Longitudinal profile measurements are carried out on an actual runway of a principal airport near Osaka in Japan, using a newly developed non-contact type profilometer, being combined with Global Positioning System (GPS). It is capable of acquiring a profile of the pavement surface at intervals of 10 [mm] with accuracy of ± 1.2 [mm] at normal vehicle speed.

Characteristics of the runway profiles are presented, and a computer simulation of a large sized aircraft has been employed to simulate a taking off motion of an aircraft to evaluate the aircraft's comfort, influence on the crew, on the body of the aircraft, on the pavement, etc.