

滑走路の乗り心地に着目した路面プロファイル解析

遠藤 桂¹・姫野賢治²・川村 彰³・八谷好高⁴・松井邦人⁵

¹ 正会員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

² フェロー会員 工博 中央大学理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

³ 正会員 工博 北見工業大学工学部土木工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165)

⁴ 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所空港研究部空港施設研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

⁵ フェロー会員 Ph.D. 東京電機大学理工学部建設環境工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

空港内における航空機の安全な、あるいは乗員乗客にとっての快適な運行を考慮した場合、離着陸の行われる滑走路は、重要な役割を担っている。本研究では、非接触型路面プロファイラを用いて空港滑走路の縦断プロファイルを測定し、得られたプロファイルにウェーブレット解析を適用していくつかの仮想プロファイルを設定することで、航空機の離発着時の鉛直方向加速度をシミュレートした。その結果、鉛直方向加速度、すなわち、航空機の乗り心地に影響を与える波長が存在することがわかった。その航空機の種別による差を検討するとともに、これらをふまえた滑走路の補修方法についての簡単な検討を行った。

Key Words: runway profile, vertical acceleration, wavelet analysis, riding comfort, pavement management

1. はじめに

空港における航空機の安全で乗員乗客にとっての快適な運行を考慮した場合、離着陸の行われる滑走路は、重要な役割を担っている。これまで、道路の縦断路面プロファイルを測定して、乗り心地についての検討を行った報告例はいくつかあるが¹⁾²⁾³⁾、滑走路に関しては、供用中の滑走路という性格上、調査時間が極めて限られていること、数 km にわたって路面プロファイルを正確に評価する手法があまりなかったことなどから、データの収集および解析が十分に行われてきたとは言い難い。

また、滑走路の場合、荷重の大きさ、路面と接触するギアの構成、あるいは滑走速度などの面で、道路とは異なる性格を持っていることから、滑走路に適した解析あるいは評価方法を策定する必要がある。

本研究では、非接触型路面プロファイラを用いて滑走路のプロファイルを測定するとともに、空港滑走路に適した路面評価方法について検討するため、測定した路面プロファイルにウェーブレット解析を適用して複数の仮想的なプロファイルを作成し、その上を航空機が滑走する場合のシミュレーション計算を行って、路面プロファイルと航空機の乗り心地の関係を求めた結果について報告する。

また、滑走路を補修する場合のいくつかの工法について、以上の解析結果を踏まえた簡単な検討を行った。

2. 滑走路面プロファイルの測定

(1) 路面プロファイラ

本研究で用いた路面プロファイラは、逐次二点法⁴⁾でプロファイルを測定する。使用しているレーザ距離計の応答周波数は 4kHz であり、プロファイルの測定間隔を 10mm とした場合、1 時間あたり 144km の計測まで可能である。最小で 1mm という短波長まで計測可能であるが、一般に、この種のプロファイラでは、測定延長が長い場合、誤差が蓄積することで路面の長波長の起伏を正確に捉えることは困難である。そこで、本システムと GPS (Global Positioning System) を組み合わせることによって短波長から長波長まで正確に計測することを可能とした。その GPS についても、リアルタイムキネマティック GPS を採用することで、全線測定時でも鉛直方向で 2~3cm の精度で路面の絶対高さを計測できる。本システムの模式図を図-1 に示す。

(2) 路面プロファイルの測定

路面プロファイルの測定は、2001 年 2 月 5 日から 6 日にかけて東京国際空港にて実施した。縦断プロファイルを測定したのは、図-2 に示したような 7 測線である。これは、航空機の離着陸時の目標となる滑走路中央付近の路面プロファイルと航空機の加速度との関係を検討するために設定した。なお、各測線の横断位置は、ボーイン

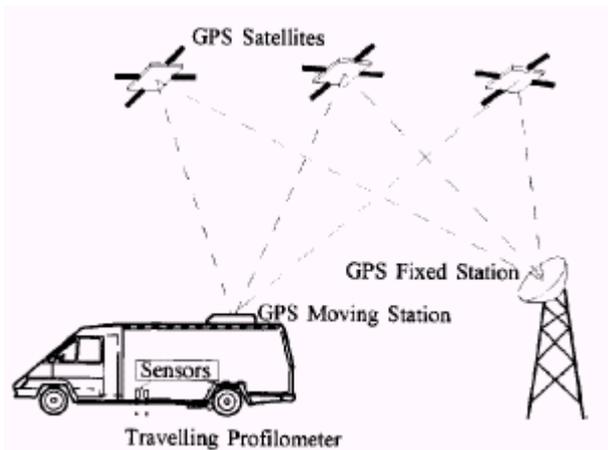


図-1 路面プロファイル測定の様式図

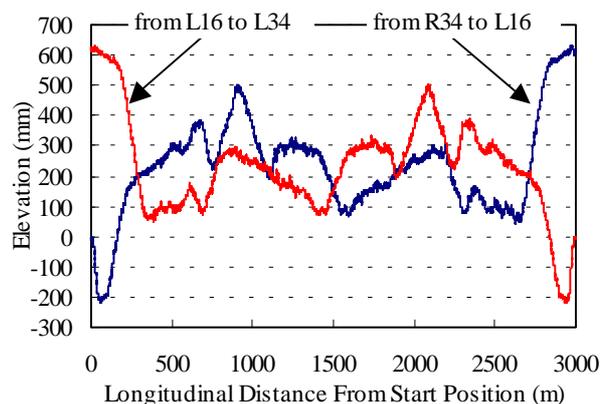


図-3 測定したプロファイルの例 (Line4)

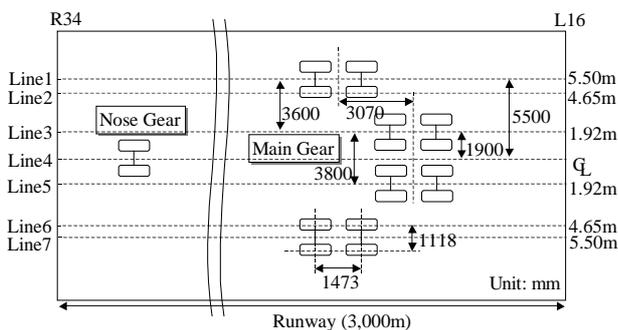


図-2 プロファイルの測線とB747のギア構成

747 と 767 のギア構成から決定した⁵⁾。プロファイル測定は、すべての測線は、プロファイルの走行速度を 50km/h にして行った。

(3) 滑走路プロファイルの測定結果

プロファイルの測定は、滑走路の両方向から実施した。すなわち、1 測線につき 2 つずつ、合計 14 のプロファイルデータを得た。その一例として、センターライン上 (Line4) で測定した縦断プロファイルの結果を図-3 に示した。このプロットは、プロファイルが得た短波長の高さデータと GPS から得た長波長データを組み合わせることによって移動距離と絶対高さの関係を得た結果を示したものである。この方法によって、数 100m 以上にわたるプロファイル測定において通常見られる、長波長の起伏を正確にとらえられないという問題を解消している。図には、R34 側から測定を開始した点の高さを 0 とし、R34 側から測定開始した場合と L16 側から開始した場合の両方について、それぞれの測定開始点を距離 0 とし、測定したプロファイルをプロットしている。L16 から測定したプロファイルの縦断方向距離を R34 から測定した場合に同期させると、両プロファイルがほぼ完全に一致しているのがわかる (図では両プロファイルが左右対称になっている)。このように長波長成分を正確に捉えることができるということが、後の解析によって非常に大きな意味を持っているということが明らかになった。

3. 航空機の鉛直加速度のシミュレーション

航空機の安全な運行、乗客乗員の快適性などを考慮した場合、とりわけ、滑走路の路面プロファイルが重要になる。空港の管理者が滑走路の維持修繕計画を立案する際、滑走路の耐久性や運用コストなどを考慮に入れることが大切であるのはもちろんのこと、滑走路という性格上、航空機が自動車に比べて非常に高速で移動することから、波長の長い路面状態にも常に注意を払う必要がある。

最近、空港舗装の管理においてもマネジメントシステムが導入されており⁶⁾、主に構造的な面から滑走路のマネジメントを行っているが、航空機の乗り心地が評価されるには至っていない。

そこで、本研究では、空港舗装マネジメントシステムに利用可能で、乗り心地に着目した舗装路面評価指数を開発することを念頭に置き、その基礎的研究として、実際の滑走路上で測定した路面プロファイルと、その実測したプロファイルから作る仮想プロファイル上を航空機が滑走するときの挙動をシミュレートすることで、航空機の乗り心地を評価した。

(1) シミュレーション方法

航空機の鉛直加速度のシミュレーションには、APRas という市販のアプリケーションソフトウェアを用いた。APRas は、路面のプロファイルを入力すると、航空機の操縦席の鉛直加速度 (以下、PSA) と重心位置の鉛直加速度 (以下、CGA) を出力する。APRas を用いることで、航空機の種別、滑走路上の滑走開始位置、気温、風などを変数とした、様々な状況下の航空機に生じる加速度のシミュレーションが可能である。

APRas を用いて航空機が離陸する場合のシミュレーション出力例を図-4 に、着陸する場合の例を図-5 に示す。入力プロファイルには、本研究で得た実測データを用いた。なお、本研究では、路面プロファイルのみの影響について検討するため、気温 15℃、無風条件という一定条

Takeoff: Class E4 Aircraft 362880.00 kg GW

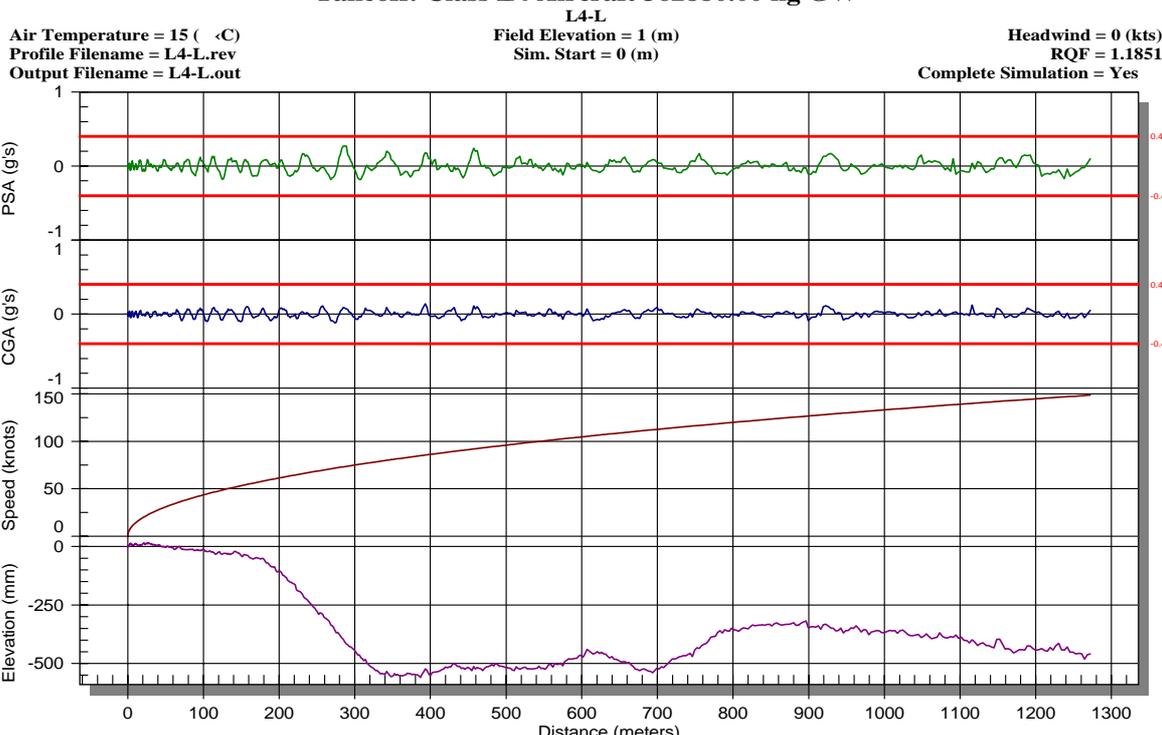


図-4 APRas による航空機の鉛直加速度のシミュレーション結果 (Line4, 離陸の例)

件にて解析を行った。

(2) 滑走路プロファイルのウェーブレット解析

鉛直加速度は乗り心地に関連があるという研究がなされている⁷⁾。そこで、本研究では、滑走路のどの波長が航空機の鉛直加速度に影響しているのか調べるため、実際に得られたプロファイルに対してウェーブレット解析を行った⁸⁾。

ウェーブレット解析とは、フーリエ解析のような信号処理解析方法の一つであるが、問題すべてを周波数領域に変換することから元信号が持つ時間情報が失われてしまうフーリエ解析に対して、ウェーブレット解析では周波数情報と時間情報を同時に得ることができるのが大きな特徴である。

本研究では、まず、db4 (Daubechies 4) というマザーウェーブレットを用いて、式(1)に示したように、計測した滑走路プロファイルを 10 個の detail と 1 個の approximation に分解した。

$$S = \sum_{n=1}^{10} D_n + a_{10} \quad (1)$$

ここで、 S は測定したプロファイル、 D_n はレベル n の detail、そして、 a_{10} はレベル 10 の approximation である。

各レベルの波長は、サンプリングレートなどで決まるが、本研究での条件下では、最も短い波長が 0.4m で、その他の波長が式(2)のように表すことができる。

表-1 各レベルの波長

Level	Wavelength (m)
1	0.4
2	0.8
3	1.6
4	3.2
5	6.4
6	12.8
7	25.6
8	51.2
9	102.4
10	204.8

$$\begin{aligned} D_1 &= 0.4 \\ D_n &= 2D_{n-1} \\ n &= 2, 3, \dots, 10 \end{aligned} \quad (2)$$

表-1 に各レベルの波長を示した。たとえば、レベル 2 の detail は、0.4m を越えて 0.8m 以下の波長を持つ波の合成波、レベル 7 の detail は、12.8m を越えて 25.6m 以下の波長を持つ波の合成波となる。したがって、approximation は、波長が 204.8m を越える波の合成波である。

(3) 仮想プロファイル

前述のように、実測プロファイルを異なる波長を持つ 10 波の detail と 1 波の approximation に分解したが、式(3)

Landing: Class E4 Aircraft 285768.00 kg GW

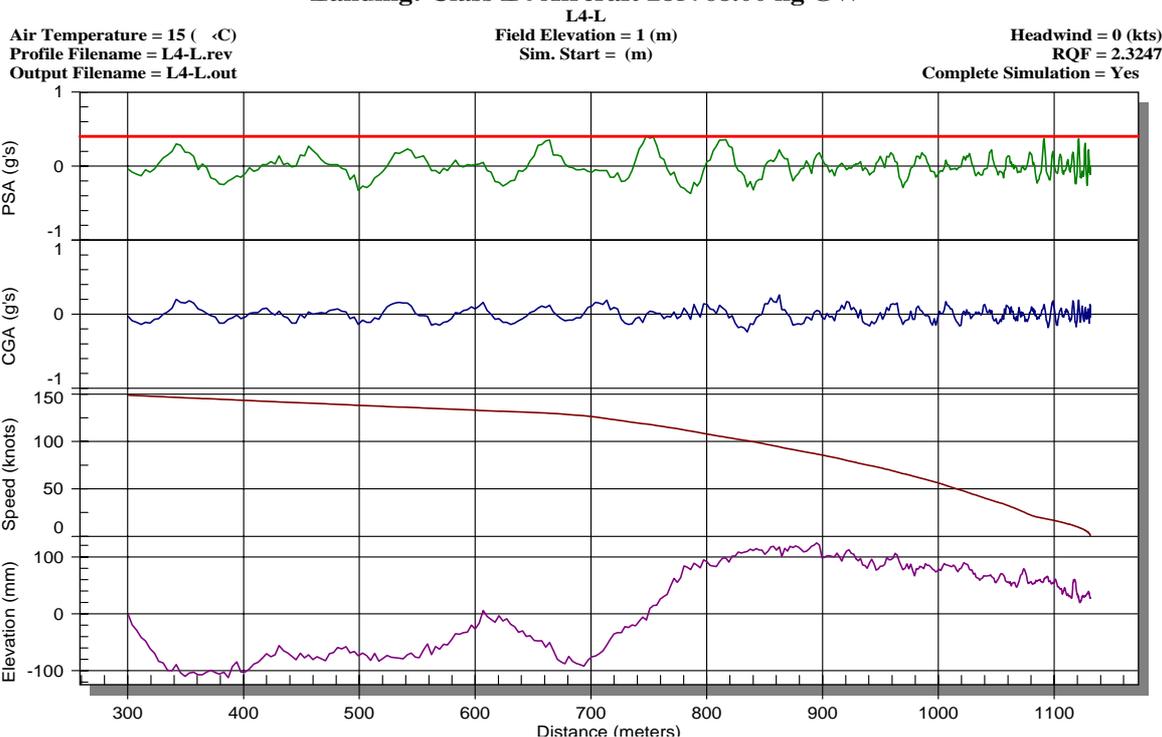


図-5 APRas による航空機の鉛直加速度のシミュレーション結果 (Line4, 着陸の例)

に示したように、実測プロファイル S からあるレベルの detail のみを差し引くことによって、仮想プロファイルを求めた。

$$VS_n = S - D_n \quad (3)$$

ここに、 VS_n はレベル n の仮想プロファイル、 S は測定したプロファイル、 D_n はレベル n の detail である。このようにして、測定した 1 本のプロファイルデータから 10 本の仮想プロファイルを得ることができる。

(4) 仮想プロファイル上を滑走する航空機のシミュレーション

前述のようにして求めた仮想プロファイルを入力値として、APRas を用いて航空機の PSA と CGA を求めた。そして、滑走中に示す PSA と CGA の RMS (平均平方誤差) 値から、乗り心地指数 (RQF) を次式によって算出した。

$$RQF = (PSA_RMS + CGA_RMS) \times 10 \quad (4)$$

ここに PSA_RMS は滑走中の PSA の RMS 値、 CGA_RMS は、同じく CGA の RMS 値である。RQF は、両加速度の RMS から計算される値であり、RQF が大きいほど加速度の変動が大きく、乗り心地が悪いことを示す⁹⁾。

PSA や CGA を用いると、たとえば、PSA や CGA が $0.4g's$ を越える点はどこであるのかといった、瞬間的な加速度の絶対値による評価が可能であるが、RQF の採用により、パイロットと乗員乗客の両者の視点に立った、航空機の滑走中の総合的な乗り心地評価が可能となる。

(5) 航空機の乗り心地に影響を与える路面波長の検討

実際に得たプロファイル上における航空機挙動のシミュレーション結果と、仮想プロファイル上のシミュレーション結果を比較することで、どの波長が航空機の乗り心地に影響を与えるのかを推定することができる。たとえば、レベル n の detail を取り除いて得た仮想プロファイルを用いたときの航空機の RQF が、オリジナルのプロファイル上で得た RQF より大きい結果を示したならば、取り除いた波長の detail が RQF を小さく押さえ込んでいる因子となり、その波長は乗り心地をよくする波長であることがわかる。逆に、仮想プロファイルによる RQF が、オリジナルによる結果より小さくなれば、取り除いた波長が RQF を大きくする原因であることになり、その波長は乗り心地を悪化させる波長であるといえる。

ボーイング 747 で離陸あるいは着陸したときのシミュレーション結果例を図-6 と図-7 に示す。図中の太い線はオリジナルのプロファイルによって解析した RQF を、他の細い線は、仮想プロファイルによる結果を示している (重なっているものを含めて 10 本の線がある)。ここでは、燃料を満タンにして離陸し、着陸時には燃料を消費することにより総重量が約 21% 減少するという条件で解析した。

いずれの図からもいえることは、離陸・着陸を問わず、短い波長の波をオリジナルのプロファイルから取り除いても、RQF にはほとんど影響を与えないということである (図ではオリジナル S にほぼ重なっていて認識できない)。つまり、路面プロファイルの短波長成分は、ボーイ

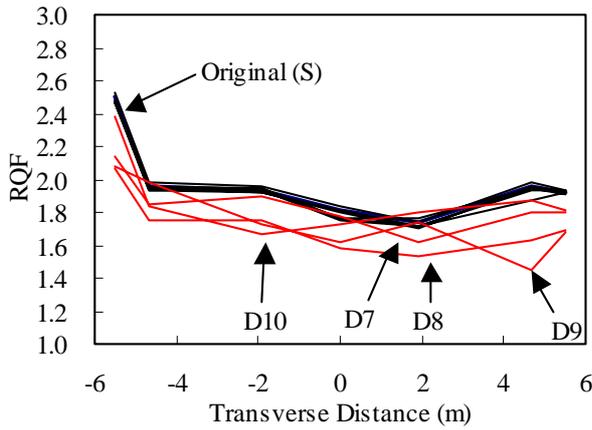


図-6 横断位置とRQFの関係 (B-747, R34, 離陸)

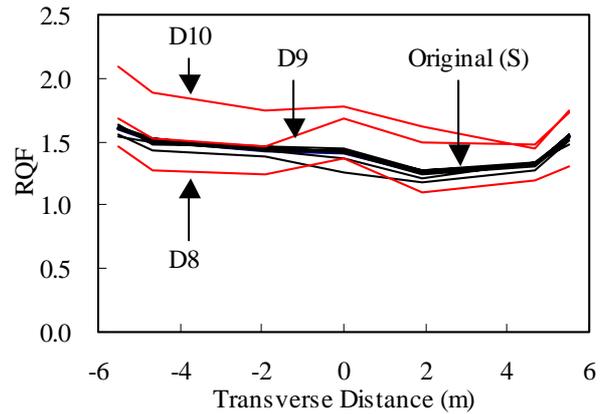


図-7 横断位置とRQFの関係 (B-747, R34, 着陸)

表-2 検討した航空機種

Aircraft Class	Approximation of this Aircraft	Engine Configuration	Gross Weight (kg)		Wheelbase (m)
			Takeoff	Landing	
Class B3	Bowing 737	Two Wing Mounted	53,071	46,721	11.58
Class D	McDonnell Douglas DC-10-10	Wide Body Tri-Jet	195,048	164,884	22.25
Class E4	Bowing 747-400	Four Wing Mounted	362,880	285,768	25.60

ング747 航空機の乗り心地にはほとんど影響しないものといえる。

その一方で、離陸の結果である図-6 では、 $D_7 \sim D_{10}$ を取り除いた RQF がオリジナルに比べて小さいという結果を示している。この場合、12.8m を越える波長が、乗り心地を悪化させている原因となっているといえる。逆に着陸の結果である図-7 では、 D_8 を取り除いたときの RQF がオリジナルに比べて小さくなっているものの、 D_9 と D_{10} を取り除いたときの RQF がオリジナルに比べて大きくなっており、すなわち、51.2m を越える波長が乗り心地をよくしていることがわかる。

この検討から、RQF を大きくするか小さくするかの違いはあるが、およそ 12.8m を超えるような長い波長成分が、ボーイング 747 航空機の乗り心地に影響を与えていることがわかった。

(6) 航空機種による影響

乗り心地に影響を与える波長は、航空機の特徴によっても異なる場合があると考えて、航空機種を変えて以上と同様の検討を行った。検討を行った機種の概要を表-2 に示す。気温、風速は、先の検討と同一条件にした。燃料満タンで離陸し、燃料を消費して着陸するという条件は同一であるが、航空機のタイプにより搭載できる燃料と消費する燃料の量は異なる。なお、表には、先に検討したボーイング 747 の情報も合わせて示している。

図-8 と図-9 に離陸の場合の例、図-10 と図-11 に着陸の例を示したが、長い波長が RQF に影響しているのは同

様であるが、機種が異なると、RQF に影響する波長のうち最も短い波長が若干異なっている。

(7) 航空機のホイールベースによる影響

図-12 に航空機のホイールベースと RQF に影響を与える最短波長との関係を示す。ホイールベースが長いほど、RQF に与える最短波長が長くなることがわかった。

また、着陸するときよりも離陸するときの方が、短い波長が RQF に影響を与えることもわかった。

(8) 航空機の総重量による影響

図-13 に航空機の総重量と RQF に影響を与える最短波長との関係を示す。なお、着陸時の総重量は、離陸時の総重量から燃料を消費したときの重量である。図より、航空機総重量の対数と RQF に影響を与える最短波長の相関が高いことがわかった。

また、離陸時と着陸時で総重量が異なるので単純比較はできないが、着陸するときよりも離陸するときの方が、短い波長が RQF に影響を与えるといえる。

(9) 空港滑走路の補修への応用

以上の検討結果を空港滑走路舗装の補修へ応用することを考えるならば、航空機の乗り心地の観点からは、グレーピング、ポットホールの補修といった短波長の凹凸は乗り心地に影響しないものといえる。よって、乗り心地の観点からは、通常の施工を行う分には、特に意識する必要はない。

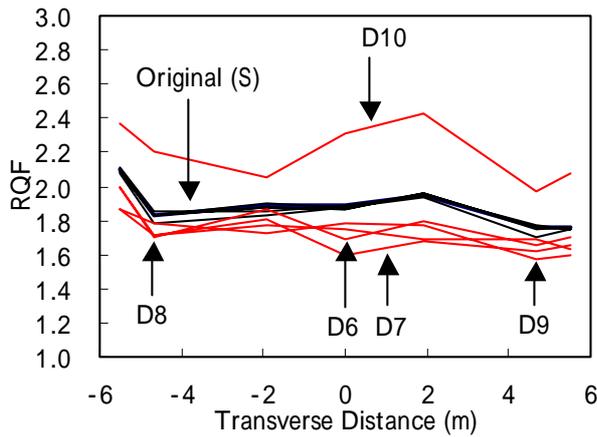


図-8 横断位置とRQFの関係 (DC-10, R34, 離陸)

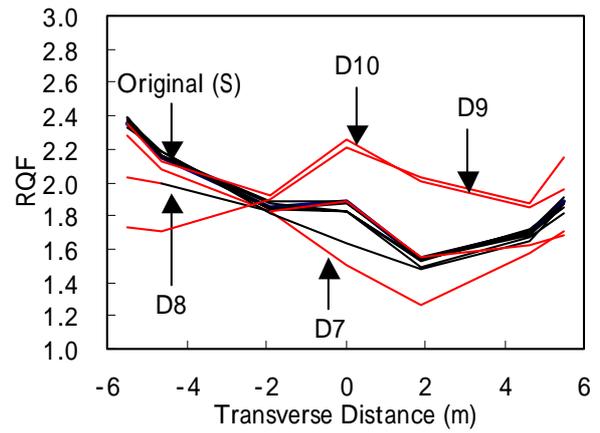


図-10 横断位置とRQFの関係 (DC-10, R34, 着陸)

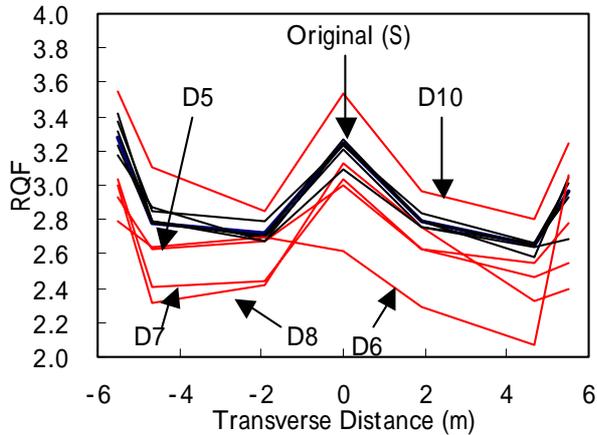


図-9 横断位置とRQFの関係 (B-737, R34, 離陸)

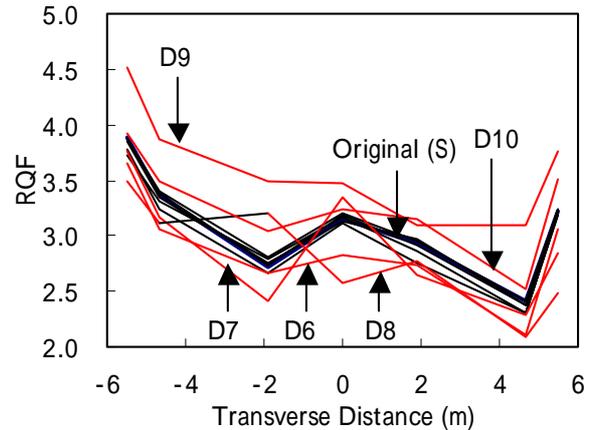


図-11 横断位置とRQFの関係 (B-737, R34, 着陸)

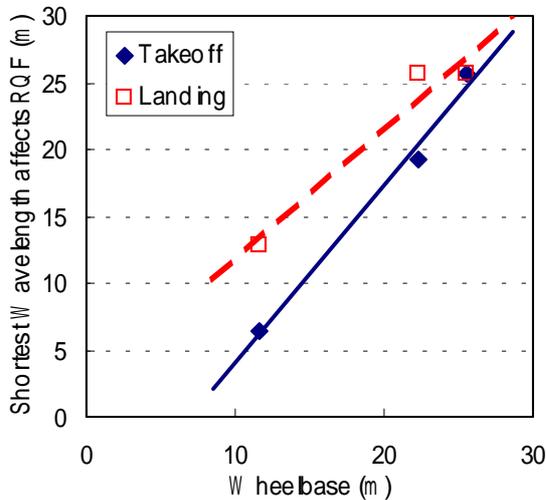


図-12 航空機のホイールベースとRQFに影響する最短波長の関係

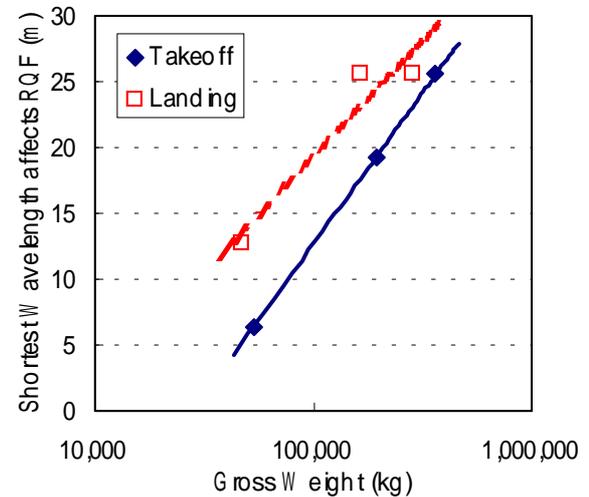


図-13 航空機の総重量とRQFに影響する最短波長の関係

うねりのような波長の長い路面プロファイルの改善が期待できない薄層表面処理は、路面のテクスチャを改善するが、乗り心地を改善しないと考えられる。

一般的に行われるオーバーレイでは、施工後に長い波長の成分が残らないようなオーバーレイ厚の決定と施工が要求される。

機種により若干乗り心地に影響する波長が異なること

から、滑走路の補修に関して乗り心地を考慮するならば、その空港で離発着する最小ホイールベースの機種に対応して行うことが望ましい。

4. まとめ

以上の検討結果をまとめると次のようになる。

- (1) 本研究で用いた方法で空港滑走路の路面プロファイルを正確に測定することができた。
- (2) 測定した路面プロファイルにウェーブレット解析を適用することで、PSA と CGA から求められる乗り心地指数(RQF)に影響を与える波長が存在することがわかった。
- (3) ボーイング 747 クラスを対称とした場合、その波長は、おおむね 12.8m を越える長い波長である。
- (4) RQF に影響を与える波長は、航空機種により若干異なるが、長波長成分が影響するという点は変わらない。
- (5) RQF に影響を与える波長のうち最も短いものは、航空機のホイールベースに比例し、総重量の対数に比例する。
- (6) 以上の解析結果を反映させれば、乗り心地に着目した空港滑走路の補修工法について検討することができる。

5. おわりに

以上、空港滑走路面のプロファイル測定およびプロファイルに起因する航空機の鉛直加速度に関する解析結果について報告を行った。乗り心地の評価は古くから盛んに行われているが、舗装の補修は、わだち掘れやラフネスといった乗り心地にも関係するであろう指標、あるいは乗り心地にはあまり関係しないであろうひび割れといった指標を基準として行われているのが現実である。本研究では、そういった舗装の個々の破損形態ではなく、路面の持つ波長に着目した解析結果と補修工法に対する適用性についての簡単な検討を報告した。

合理的な舗装マネジメントを前提にすると、舗装管理者側の視点に加え、利用者側の視点に立った評価も取り入れることが妥当と考える。利用者側の視点に立った評価の一つである乗り心地は、舗装の様々な破損の複雑な組み合わせにより生じる。乗り心地を舗装管理指標にする場合、個々の破損形態によって管理するには限界があり、たとえ複合指標を作成したとしても、評価に必要な情報量が減るわけではない。そういった意味で、本研究のように、路面の持つ波長に着目することで、舗装上を滑走する航空機の鉛直加速度、すなわち乗り心地を評価することは、合理的で実用性が高いものとする。

謝辞

最後に、本研究が、運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」の支援を得て行っているも

のであり、ここに心より感謝の意を表します。

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. the 2nd International Symposium on Pavement Surface Characteristics of Roads and Airfields, Berlin, pp.309-324, Jun., 1992
- 2) Kawamura, A., Himeno, K., Ogawa, S., Kuriyagawa, Y. and Ichihashi, S.: Some New Approaches to Evaluation of Road Surfaces, Procs. 6th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Cape Town, Vol.2, pp.IV_110 - IV_118, Oct., 1994
- 3) Kawamura, A., Himeno, K., Kasahara, A., Shibasaki, R. and Kameyama, S.: Some Considerations on the Measurement and Evaluation of Road Roughness, International Journal of Vehicle Design, Vol. 3, No.I-4, pp.261-274, 1996
- 4) Tozawa, K., Sato, H. and O-hori, M.: A New Method for the Measurement of the Straightness of Machine Tools and Machined Work, 1981.
- 5) Kawamura, A., Shimeno, S., Himeno, K., Komatsubara, A. and Hagiwara, T.: Study on Application of the Multire solution Analysis to Road Profile Evaluation, Proceedings. 3rd International Symposium on the Environmental Impact of Road Unevenness, Porto, pp.121-132, Mar., 1999
- 6) 八谷好高：空港コンクリート舗装のマネジメントシステム、平成5年度港湾技術研究所講演会講演集、pp.45-66、1993年
- 7) たとえば、M. W. Sayers, S. M. Karamihas: The Little Book of Profiling, pp.30, September, 1998
- 8) Oguri, N. Himeno, K., Kawamura, A. and Nakamura, R.: Application of Wavelet Analysis on Evaluation of Roughness of Pavement Surfaces, Proceedings. 4th International Symposium on Pavement Surface Characteristics of Roads and Airfields, Nantes, pp.57-66, May, 2000
- 9) M. Gerardi and T. Gerardi: Aircraft Ride Quality Assessment Of A New Pavement (Case History), The 1999 Federal Aviation Administration Technology Transfer Conference, April, 1999

ANALYSIS OF RUNWAY PROFILE AND EVALUATION OF THE RIDING COMFORT

Katsura ENDO, Kenji HIMENO, Akira KAWAMURA, Yoshitaka HACHIYA and Kunihito MATSUI

Runway plays pretty important role when taking account safe and comfort operation for passengers and staff at airport. Runway surface profiles have been measured using non-contact type profiler and vertical accelerations at pilot's station and center of gravity of aircraft have been simulated using wavelet analysis of measured runway surface profiles. It has found that longer wavelength of profile is effective to vertical accelerations, that correlate to riding comfort. Its effect of airplane type has been evaluated, and pavement maintenance procedures also have been evaluated under consideration of above results.