

NAL TR-1037

ISSN 0389-4010
UDC 629.7.08
629.7.015.4
656.71

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1037

滑走路面凹凸のパワースペクトルの推定

山根 皓三郎 ・ 外崎 得雄

1989年10月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. はじめに	1
2. 滑走路面の凹凸とパワースペクトル表示	2
2.1 対象とする凹凸	2
2.2 凹凸のモデル	2
2.3 パワースペクトル表示	3
2.3.1 パワースペクトル	3
2.3.2 クロススペクトル	3
2.3.3 2トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトル	4
3. 滑走路面凹凸のパワースペクトル計算	4
3.1 プロフィール・データ	4
3.2 計算方法	5
3.3 計算結果	7
4. 検 討	14
4.1 プリホワイトニング	14
4.2 パワースペクトルの強さおよび傾斜	16
4.3 新旧舗装面の比較	18
4.4 2トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトル	18
5. おわりに	20
参考文献	21
付録1 滑走路プロフィール	22
付録2 滑走路面凹凸のパワースペクトル推定結果	23

滑走路面凹凸のパワースペクトルの推定*

山根 皓三郎** 外崎 得雄**

Estimation of Power Spectral Density of Runway Roughness

Kosaburo YAMANE, Tokuo SOTOZAKI

ABSTRACT

In this paper, attention is focused on a PSD method in order to evaluate runway roughness from the standpoint of airplane loads, and a procedure for estimating runway spectra is examined. It is shown that the low order trend (long wavelength component) included in a runway profile can seriously impair the estimated spectra, and therefore, a simple method to remove this trend is obtained.

Next, power spectra of sixteen commercial runways are estimated, including the spectra of symmetric and anti-symmetric components between two tracks, to provide airplane design data on ground loads. Comparing the runway spectra obtained before and after overlay repair of runway surface, it is shown that the power spectral presentation is an effective method to evaluate runway roughness.

1. はじめに

滑走路面の凹凸によって生じる地上走行荷重は、輸送機にとって代表的な荷重の一つであり、耐空性審査要領¹⁾では、降着装置および機体構造が通常の運用で予想される最も粗い滑走路面を滑走した場合に受ける荷重に耐えることを要求しているが、滑走路面の凹凸に関する具体的な規定はない。

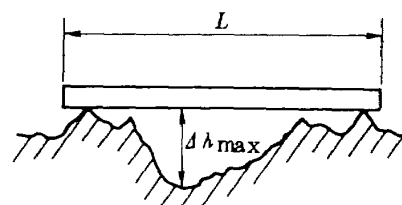
また、米国軍用規格²⁾では、孤立凹凸モデルおよび連続凹凸モデルを用いて、滑走路面の凹凸の程度を定めているが、その背景は必ずしも明らかでない。

一方、滑走路の施工および維持・管理においては、滑走路面の凹凸を評価する合理的な方法は確立されておらず、例えば、ICAO ANNEX 14³⁾に定められている直線定規方式^{注)}では、使用する定規の長さ(ICAOの場合3m)以上の波長の凹凸を評価することはできない。

飛行機が大型化・高速化し、さらに空港の過密化が進む今日、滑走路面の凹凸の評価方法および評価基準の確立は飛行機の強度設計および滑走路面の維持・管理の両面において重要な問題である。

本報告では、滑走路面の凹凸を合理的に評価する

注) 滑走路面に長さ L の直線定規を当てたとき、両者の間に生じる最大隙間 Δh_{\max} をもって凹凸の程度を規定する方法であり、 Δh_{\max} は L に依存する。



方法の一つとしてパワースペクトルによる方法を取り上げ、滑走路のプロフィールからパワースペクトルを推定する方法に関する検討を行うとともに、16の滑走路と1本の誘導路についてパワースペクトルを推定して、すでに発表されているデータとの比較を行った。

2. 滑走路面の凹凸とパワースペクトル表示

2.1 対象とする凹凸

滑走路面の凹凸を広義に捉えると、滑走路長に近い長波長の起伏から、舗装骨材の表面の粗さのように非常に短い波長のものまで、多様な凹凸が存在する。

これらのうち、数百メートル以上の波長の凹凸あるいは滑走路全長にわたる傾斜は、飛行機の離着陸時の性能および操縦性に影響を及ぼし、逆に数センチ・メートル以下の波長の凹凸は、湿潤滑走路での飛行機の制動距離に重大な影響を及ぼすが、飛行機の地上走行中の上下運動および地上走行荷重に関係するのは数十センチメートルから数百メートルの波長の凹凸であり、本報告ではこのような中間の波長の凹凸を議論の対象とする。

2.2 凹凸のモデル

滑走路面の凹凸、あるいはその凹凸が飛行機に及ぼす影響を定量的に評価する場合、大別して孤立凹凸モデルと連続凹凸モデルが用いられる^{4),5)}。

孤立凹凸モデルは、平坦な滑走路面上に特定の形状の凹凸が1個あるいは複数個存在するとするもので、凹凸の形状はステップ、ランプ、 $1-\cos$ 形等が用いられる(図1)。

このモデルが現実の凹凸を非常に単純化したもの

であるのに対して、後者の連続凹凸モデルは実際の滑走路面を模して、不規則な形状の凹凸が連続に分布するとするものである。

連続凹凸モデルの適用例として、特定の滑走路のプロフィールをそのままシミュレーションの入力に用いて飛行機の地上走行荷重を算定する方法がある。しかし、この方法にはシミュレーションの結果が入力として用いる滑走路プロフィールの選定に大きく依存するという欠点がある。

連続凹凸モデルのもう一つの適用例としては、特定の滑走路プロフィールではなく、滑走路面凹凸のパワースペクトルを用いる方法がある。

パワースペクトルは、元来、定常確率過程に対して適用する手法であるが、滑走路プロフィールは短時間のうちに確率的に変化する性質のものではない。また、飛行機が運用中に遭遇する滑走路面の凹凸の内には、老朽化した滑走路のオーバーレイ工事のすりつけ部分のように、孤立凹凸モデルとして取り扱う方がより適した場合もある。

しかし、滑走路面の凹凸の多くは連続的かつ複雑な形状を有し、さらに飛行機は異なるプロフィールを持つ多数の滑走路に離着陸するため、飛行機の側から見た場合、何らかの統計的な取扱いが有効である。

滑走路面凹凸のパワースペクトルは、連続・不規則に分布する凹凸の程度を、波長成分ごとに分解して統計的に表現したものである。パワースペクトルが与えられれば、その様な統計的性質を持つ滑走路プロフィールを作り出して^{5),6)}シミュレーションの入力に用いることもできるし、また、滑走路面凹凸のパワースペクトルと飛行機の伝達関数から地上走行荷重およびその頻度を直接算定することも可能である。

以上のことから、パワースペクトルは滑走路面の

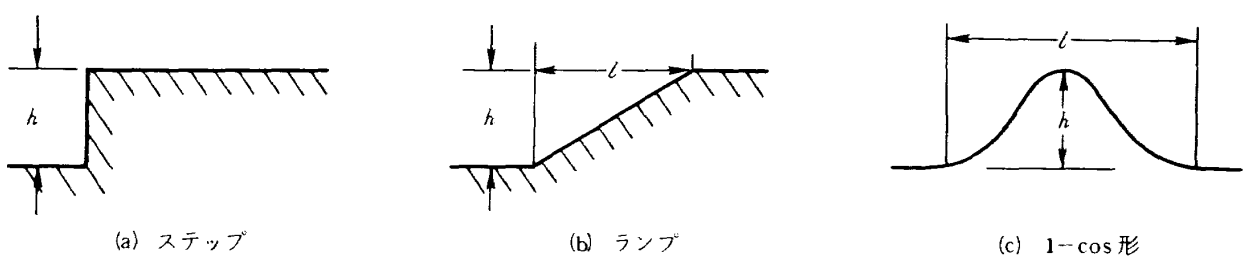


図1 孤立凹凸のモデル

凹凸を定量的に評価する際の非常に有効な手段の一つと考えられる。

2.3 パワースペクトル表示^{4),7)}

2.3.1 パワースペクトル

滑走路中心線に沿った任意のトラックのプロファイル $y(s)$ の自己共分散関数 $C_{yy}(s)$ を次式で定義する。

$$C_{yy}(s) = E\{y(s+s_1) \cdot y(s_1)\} \quad (2.1)$$

ただし、 s および s_1 はトラック上の距離であり、 $y(s)$ の平均値は零とする。すなわち、

$$E\{y(s)\} = 0 \quad (2.2)$$

$C_{yy}(s)$ には次の性質がある。

$$\left. \begin{aligned} C_{yy}(s) &= C_{yy}(-s) \\ C_{yy}(0) &= E\{y(s)^2\} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$y(s)$ の両側パワースペクトル $P'_{yy}(k)$ を (2.4) 式のように $C_{yy}(s)$ のフーリエ変換で定義すると、 $C_{yy}(s)$ は (2.5) 式のように $P'_{yy}(k)$ のフーリエ逆変換で与えられる。

$$P'_{yy}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{yy}(s) \cdot e^{-i2\pi ks} ds \quad (2.4)$$

$$C_{yy}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} P'_{yy}(k) \cdot e^{i2\pi ks} dQ \quad (2.5)$$

ただし、 k は波数 (波長 λ の逆数) である。いま、 k の代わりに reduced frequency Q を導入する。

$$Q = 2\pi k = 2\pi / \lambda \quad (2.6)$$

Q を用いると、(2.4) および (2.5) 式は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} P_{yy}(Q) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C_{yy}(s) \cdot e^{-iQs} ds \\ C_{yy}(s) &= \int_{-\infty}^{\infty} P_{yy}(Q) \cdot e^{iQs} dQ \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ただし、 $-\infty < Q < \infty$

(2.7) 式において $P_{yy}(Q)$ は偶関数であり、また Q の負の領域は現実の物理現象で意味を持たない。そこで、 Q の正の領域のみで表わした片側パワースペクトル $\Phi_{yy}(Q)$ を次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{yy}(Q) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} C_{yy}(s) \cdot \cos Qs \cdot ds \\ C_{yy}(s) &= \int_0^{\infty} \Phi_{yy}(Q) \cdot \cos Qs \cdot dQ \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

ただし、 $Q \geq 0$

なお、(2.7) および (2.8) 式より、次式の関係が明らかである。

$$\left. \begin{aligned} E\{y(s)^2\} &= \int_{-\infty}^{\infty} P_{yy}(Q) dQ \\ &= \int_0^{\infty} \Phi_{yy}(Q) dQ \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

2.3.2 クロススペクトル

滑走路中心線に沿った2本のトラックのプロファイルを $y(s)$ および $x(s)$ とするとき、両者の間の相互共分散関数 $C_{yx}(s)$ を次式で定義する。

$$C_{yx}(s) = E\{y(s+s_1) \cdot x(s_1)\} \quad (2.10)$$

ただし、 $y(s)$ および $x(s)$ の平均値はいずれも零とする。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} E\{y(s)\} &= 0 \\ E\{x(s)\} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

$y(s)$ と $x(s)$ が異なるとき、 $C_{yx}(s)$ には次の性質がある。

$$\left. \begin{aligned} C_{yx}(0) &= E\{y(s) \cdot x(s)\} \\ C_{yx}(s) &= C_{yx}(-s) \\ C_{yx}(s) &= C_{xy}(-s) \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

$y(s)$ と $x(s)$ のクロススペクトルを $P_{yx}(Q)$ とすると、 $P_{yx}(Q)$ と $C_{yx}(s)$ の間の関係は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P_{yx}(Q) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C_{yx}(s) \cdot e^{-iQs} ds \\ C_{yx}(s) &= \int_{-\infty}^{\infty} P_{yx}(Q) \cdot e^{iQs} dQ \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

ただし、 $-\infty < Q < \infty$

いま、(2.13) 式のように $C_{yx}(s)$ の \cos 変換を $P_{L,yx}(Q)$ 、 \sin 変換を $P_{Q,yx}(Q)$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} P_{L,yx}(Q) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C_{yx}(s) \cdot \cos Qs \cdot ds \\ P_{Q,yx}(Q) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C_{yx}(s) \cdot \sin Qs \cdot ds \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

ただし、 $-\infty < Q < \infty$

$P_{yx}(Q)$ は (2.13) 式で表わされる。

$$P_{yx}(Q) = P_{L,yx}(Q) - i P_{Q,yx}(Q) \quad (2.15)$$

次節に述べる2トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトルを求めるための準備として、(2.14) 式の $P_{L,yx}(Q)$ は (2.16) 式のように書き表わすことができ、そのフーリエ逆変換として (2.17) 式の

関係が得られる。

$$P_{L,yx}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_{yx}(s) + C_{yx}(-s)}{2} \cos \Omega s \cdot ds \quad (2.16)$$

$$\frac{C_{yx}(s) + C_{yx}(-s)}{2} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{L,yx}(\Omega) \cdot \cos \Omega s \cdot d\Omega \quad (2.17)$$

2.3.3 2トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトル⁵⁾

滑走路中心線に沿った2本のトラックのプロファイル $y(s)$ と $x(s)$ の間の対称成分 $(y(s) + x(s))/2$ のパワースペクトルおよび非対称成分 $(y(s) - x(s))/2$ のパワースペクトルを求める。

まず、対称成分および非対称成分の自己共分散関数をそれぞれ $C_{(y+x)/2}(s)$ および $C_{(y-x)/2}(s)$ とすると、両者は次式のように表わされる。

$$C_{(y\pm x)/2}(s) = E \left\{ \frac{y(s+s_1) \pm x(s+s_1)}{2} \cdot \frac{y(s_1) \pm x(s_1)}{2} \right\} \\ = \frac{1}{4} \{ C_{yy}(s) + C_{xx}(s) \pm \{ C_{yx}(s) + C_{yx}(-s) \} \} \quad (2.18)$$

前述の(2.16)式の関係を用いて(2.18)式の両辺をフーリエ変換すると、対称成分および非対称成分の両側パワースペクトルが次式のように求められる。

$$P_{(y\pm x)/2}(\Omega) = \frac{1}{4} \{ P_{yy}(\Omega) + P_{xx}(\Omega) \pm 2P_{L,yx}(\Omega) \} \\ \text{ただし, } -\infty < \Omega < \infty \quad (2.19)$$

(2.19)式において、 $P_{yy}(\Omega)$ 、 $P_{xx}(\Omega)$ 、 $P_{L,yx}(\Omega)$ はいずれも偶関数であり、したがって $P_{(y\pm x)/2}(\Omega)$ も偶関数である。そこで Ω を正の領域のみに限定すると、対称成分および非対称成分の片側パワースペクトル $\Phi_{(y\pm x)/2}(\Omega)$ は次式で表わされる。

$$\Phi_{(y\pm x)/2}(\Omega) = \frac{1}{4} \{ \Phi_{yy}(\Omega) + \Phi_{xx}(\Omega) \pm 2\Phi_{L,yx}(\Omega) \} \\ \text{ただし, } \Omega \geq 0 \quad (2.20)$$

上式中の $\Phi_{yy}(\Omega)$ および $\Phi_{xx}(\Omega)$ はそれぞれ $y(s)$ および $x(s)$ の片側パワースペクトル((2.8)式参照)であり、 $\Phi_{L,yx}(\Omega)$ は次式で定義される。

$$\Phi_{L,yx}(\Omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{C_{yx}(s) + C_{yx}(-s)}{2} \cos \Omega s \cdot ds \\ \text{ただし, } \Omega \geq 0 \quad (2.21)$$

2トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトルは以上のようにして求められる。逆に、対称成分および非対称成分のパワースペクトルが与えられておれば、まず各々から対称成分および非対称成分のプロファイルを作成し、次に両プロファイルの和および差をとることによって、所期の統計的性質をもつ2本のトラックのプロファイルが得られる。したがって、これを入力として用いれば、飛行機の前輪と主車輪、あるいは左右の主車輪が滑走路横方向に所定の距離だけ離れた別々のトラックを走行するときのシミュレーションを行うことも可能である。

3. 滑走路面凹凸のパワースペクトル計算

3.1 プロファイル・データ

表1に示すAからOまでの滑走路および誘導路Pのプロファイル・データを用いて、滑走路面凹凸のパワースペクトルの推定を行った。

AからLまでは米国の国際空港の滑走路で、滑走路中心線上および中心線から左右に4.6m(15ft)離れた(KおよびLは3m(10ft)離れた)合計3本のトラックのプロファイルの測定結果が文献8)~13)に発表されている。プロファイルの測定ピッチはいずれも0.61m(2ft)である。

Mは我が国を代表する第一種空港の滑走路で、土木学会・空港舗装委員会が比較のために同一滑走路のオーバーレイ工事前(M1)とオーバーレイ工事直後(M2)のプロファイルを測定した¹⁴⁾。滑走路中心線上および中心線から左右に5m離れた合計3本のトラックについて、10mの測定ピッチで滑走路全長のプロファイルが得られており、さらに、滑走路全長の内から凹凸の多い区間と少ない区間をそれぞれ200mずつ選び、0.5mの測定ピッチで両区間のプロファイルが得られている。

NおよびOはそれぞれ我が国の第一種および第二種空港の滑走路、Pは我が国の第二種空港の誘導路で、滑走路あるいは誘導路中心線上のトラックのプ

表1 滑走路

滑走路	測定区間長 (m)	測定ピッチ (m)	トラックの 本数(本), 間隔(m)	備考	
A	2,870	0.61	3, 4.6 (滑走路中心線上および その左右のトラック)	米国の国際 空港 ^{8)~13)}	
B	2,990				
C	3,050				
D	3,050				
E	2,900				
F	3,050				
G	3,350				
H	3,050				
I	2,440				
J	2,800				
K	3,050	0.61	3, 3.0 (滑走路中心線上および その左右のトラック)		
L	2,440				
M	M1	3,260	10(全長) および 0.5(200m長, 2区間)	3, 5.0 (滑走路中心線上および その左右のトラック)	我が国の第1種 空港 ¹⁴⁾
	M2				
N	2,650	10	1 (滑走路中心線上の トラック)	我が国の第1種 および第2種空港	
O	2,020	20			
P ^{注)}	2,140				

注) Pは誘導路。

ロフィルがオーバーレイ工事の前に測定されている。
測定ピッチはNおよびOが10mで、Pは20mである。

3.2 計算方法

3本のトラックのプロフィル $x(s)$, $y(s)$, および $z(s)$ から、電子計算機を用いてそれぞれの片側パワースペクトル、ならびにトラック相互間の対称成分および非対称成分の片側パワースペクトルを推定した。以下にその計算方法を示す。

なお、これ以後は片側パワースペクトルを単にパワースペクトルと記す。

(1) プリホワイトニングを行う。

緩やかな低域遮断特性を持つ〔フィルタ1〕とより強い低域遮断特性を持つ〔フィルタ2〕を、プロフィールのデータ間隔 Δs により次のように

組み合わせて用いる。

イ) $\Delta s \leq 1\text{m}$ の場合は〔フィルタ2〕と〔フィルタ1〕をそれぞれ1度ずつ直列に適用する。

ロ) $\Delta s \geq 10\text{m}$ の場合は〔フィルタ2〕を2度直列に適用する。

ここで、フィルタへの入力を $y(n \cdot \Delta s)$, 出力を $\tilde{y}(n \cdot \Delta s)$ とすると、

〔フィルタ1〕:

$$\tilde{y}(n \cdot \Delta s) = \frac{1}{1 + \pi k_c \cdot \Delta s} \left\{ y(n \cdot \Delta s) - y((n-1) \Delta s) \right\} + \frac{1 - \pi k_c \cdot \Delta s}{1 + \pi k_c \cdot \Delta s} \tilde{y}((n-1) \Delta s)$$

$$n = 2, 3, \dots, M$$

$$k_c = \frac{4}{M \cdot \Delta s}$$
(3.1)

[フィルタ 2] :

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}(n \cdot \Delta s) &= y(n \cdot \Delta s) - y((n-1) \Delta s) \\ n &= 2, 3, \dots, M \end{aligned} \right\} (3.2)$$

なお, [フィルタ 1] ではフィルタ出力の最初の部分に含まれる過渡的影響をできるだけ短い範囲にとどめるために, 入力最初の点の値 $x(1 \cdot \Delta s)$ が零となるように直流成分を差し引いた後に [フィルタ 1] を適用し, さらに, フィルタ出力の最初から 20 点目までは捨てて以後のパワースペクトル計算に使用しなかった。

(2) 自己共分散および相互共分散を推定する。

$$\left. \begin{aligned} C_{yy}(l \cdot \Delta s) &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M-l} \tilde{y}((l+n) \Delta s) \cdot \tilde{y}(n \cdot \Delta s) \\ l &= 0, 1, 2, \dots, h \end{aligned} \right\} (3.3)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{yx}(l \cdot \Delta s) &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M-l} \tilde{y}((l+n) \Delta s) \cdot \tilde{x}(n \cdot \Delta s) \\ &\quad \text{for } l \geq 0 \\ &= \frac{1}{M} \sum_{n=l+1}^M \tilde{y}((l+n) \Delta s) \cdot \tilde{x}(n \cdot \Delta s) \\ &\quad \text{for } l < 0 \\ l &= -h, -h+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, h-1, h \end{aligned} \right\} (3.4)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \tilde{y}(n \cdot \Delta s) &= 0 \\ \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \tilde{x}(n \cdot \Delta s) &= 0 \end{aligned} \right\} (3.5)$$

とする。

(3) フーリエ変換を行う。

$$\bar{\Phi}_{yy}(\Omega_r) = \frac{\Delta s}{\pi} \left\{ C_{yy}(0) + 2 \sum_{l=1}^{h-1} C_{yy}(l \cdot \Delta s) \cos\left(2\pi \frac{r}{2h} l\right) + (-1)^r \cdot C_{yy}(h \cdot \Delta s) \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Phi}_{L,yx}(\Omega_r) &= \frac{\Delta s}{\pi} \left\{ C_{yx}^+(0) + 2 \sum_{l=1}^{h-1} C_{yx}^+(l \cdot \Delta s) \cos\left(2\pi \frac{r}{2h} l\right) + (-1)^r \cdot C_{yx}^+(h \cdot \Delta s) \right\} \\ r &= 0, 1, 2, \dots, h \end{aligned} \right\} (3.6)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} \Omega_r &= \frac{2\pi}{2 \cdot \Delta s} \cdot \frac{r}{h} \\ C_{yx}^+(l \cdot \Delta s) &= \frac{1}{2} \{ C_{yx}(l \cdot \Delta s) + C_{yx}(-l \cdot \Delta s) \} \end{aligned} \right\} (3.7)$$

(4) Hanning Window により平滑化する。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\Phi}_{yy}(\Omega_r) &= 0.5 \bar{\Phi}_{yy}(\Omega_r) \\ &\quad + 0.25 \{ \bar{\Phi}_{yy}(\Omega_{r-1}) + \bar{\Phi}_{yy}(\Omega_{r+1}) \} \\ \tilde{\Phi}_{L,yx}(\Omega_r) &= 0.5 \bar{\Phi}_{L,yx}(\Omega_r) \\ &\quad + 0.25 \{ \bar{\Phi}_{L,yx}(\Omega_{r-1}) + \bar{\Phi}_{L,yx}(\Omega_{r+1}) \} \\ r &= 0, 1, 2, \dots, h \end{aligned} \right\} (3.8)$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Phi}_{yy}(\Omega_{-r}) &= \bar{\Phi}_{yy}(\Omega_r) \\ \bar{\Phi}_{yy}(\Omega_{h-r}) &= \bar{\Phi}_{yy}(\Omega_{h+r}) \\ \bar{\Phi}_{L,yx}(\Omega_{-r}) &= \bar{\Phi}_{L,yx}(\Omega_r) \\ \bar{\Phi}_{L,yx}(\Omega_{h-r}) &= \bar{\Phi}_{L,yx}(\Omega_{h+r}) \end{aligned} \right\} (3.9)$$

(5) 対称成分および非対称成分のパワースペクトルを求める。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\Phi}_{(y \pm x)/2}(\Omega_r) &= \frac{1}{4} \{ \tilde{\Phi}_{yy}(\Omega_r) + \tilde{\Phi}_{xx}(\Omega_r) \\ &\quad \pm 2 \tilde{\Phi}_{L,yx}(\Omega_r) \} \\ r &= 0, 1, 2, \dots, h \end{aligned} \right\} (3.10)$$

ただし, $\tilde{\Phi}_{xx}(\Omega_r)$ は $x(s)$ から $\tilde{\Phi}_{yy}(\Omega_r)$ と同様の方法で求める。

(6) プリホワイトニングの影響を取り除く。

イ) $\Delta s \leq 1m$ の場合

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{yy}(\Omega_r) &= \frac{1}{2\{1 - \cos(\Omega_r \Delta s)\}} \frac{\Omega_r^2 + (2\pi k_c)^2}{\Omega_r^2} \tilde{\Phi}_{yy}(\Omega_r) \\ \Phi_{(y \pm x)/2}(\Omega_r) &= \frac{1}{2\{1 - \cos(\Omega_r \Delta s)\}} \frac{\Omega_r^2 + (2\pi k_c)^2}{\Omega_r^2} \tilde{\Phi}_{(y \pm x)/2}(\Omega_r) \\ r &= 0, 1, 2, \dots, h \end{aligned} \right\} (3.11)$$

ロ) $\Delta s > 1m$ の場合

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{yy}(\Omega_r) &= \frac{1}{4\{1 - \cos(\Omega_r \Delta s)\}^2} \tilde{\Phi}_{yy}(\Omega_r) \\ \Phi_{(y \pm x)/2}(\Omega_r) &= \frac{1}{4\{1 - \cos(\Omega_r \Delta s)\}^2} \tilde{\Phi}_{(y \pm x)/2}(\Omega_r) \\ r &= 0, 1, 2, \dots, h \end{aligned} \right\} (3.12)$$

表2 PSDの推定に用いたパラメータ

滑走路	長波長成分の推定			短波長成分の推定		
	ピッチ Δs (m)	データ点数 M	共分散関数の 点数, h	ピッチ Δs (m)	データ点数 $M \times$ 区間	共分散関数の 点数, h
A	12.2	236	25	0.61	401×3 区間	40
B	12.2	246	25	0.61	401×3	40
C	12.2	251	25	0.61	401×3	40
D	12.2	251	25	0.61	401×3	40
E	12.2	236	25	0.61	401×3	40
F	12.2	251	25	0.61	401×3	40
G	12.2	276	25	0.61	401×3	40
H	12.2	251	25	0.61	401×3	40
I	12.2	199	25	0.61	401×3	40
J	12.2	231	25	0.61	401×3	40
K	12.2	251	25	0.61	401×3	40
L	12.2	201	25	0.61	401×3	40
M	M1	10.0	327	0.50	401×2	40
	M2	10.0	303	0.50	401×2	40
N	10.0	251	25	/		
O	20.0	99	15			
P	20.0	105	15			

計算に用いたパラメータの値を表2に示す。プロフィール・データの電子計算機への入力は、キーボードから一点ずつ手作業で行ったため膨大な作業量となった。そこで、滑走路AからM2については表2に示したように、長波長成分側と短波長成分側とに分けてパワースペクトルの推定を行うことによりデータ入力作業の軽減化を計った。

すなわち、先ず12.2m(40ft)のピッチで(滑走路M1およびM2については10mのピッチで)サンプルした滑走路全長のプロフィール・データから長波長成分側のパワースペクトルを推定した。

次に短波長成分側のパワースペクトルについては、滑走路全長のうちから、244m(800ft)の長さの区間を3ヶ所選び、各区間について0.61m(2ft)ピッチのプロフィール・データからパワースペクトルを計算したのち、3区間のパワースペクトルの平均を求めて、その滑走路の短波長成分側に対する推定値と

した。ただし、滑走路M1およびM2の場合は、区間長が200m、ピッチが0.5mの2つの区間のプロフィール・データからパワースペクトルを求めて平均化した。

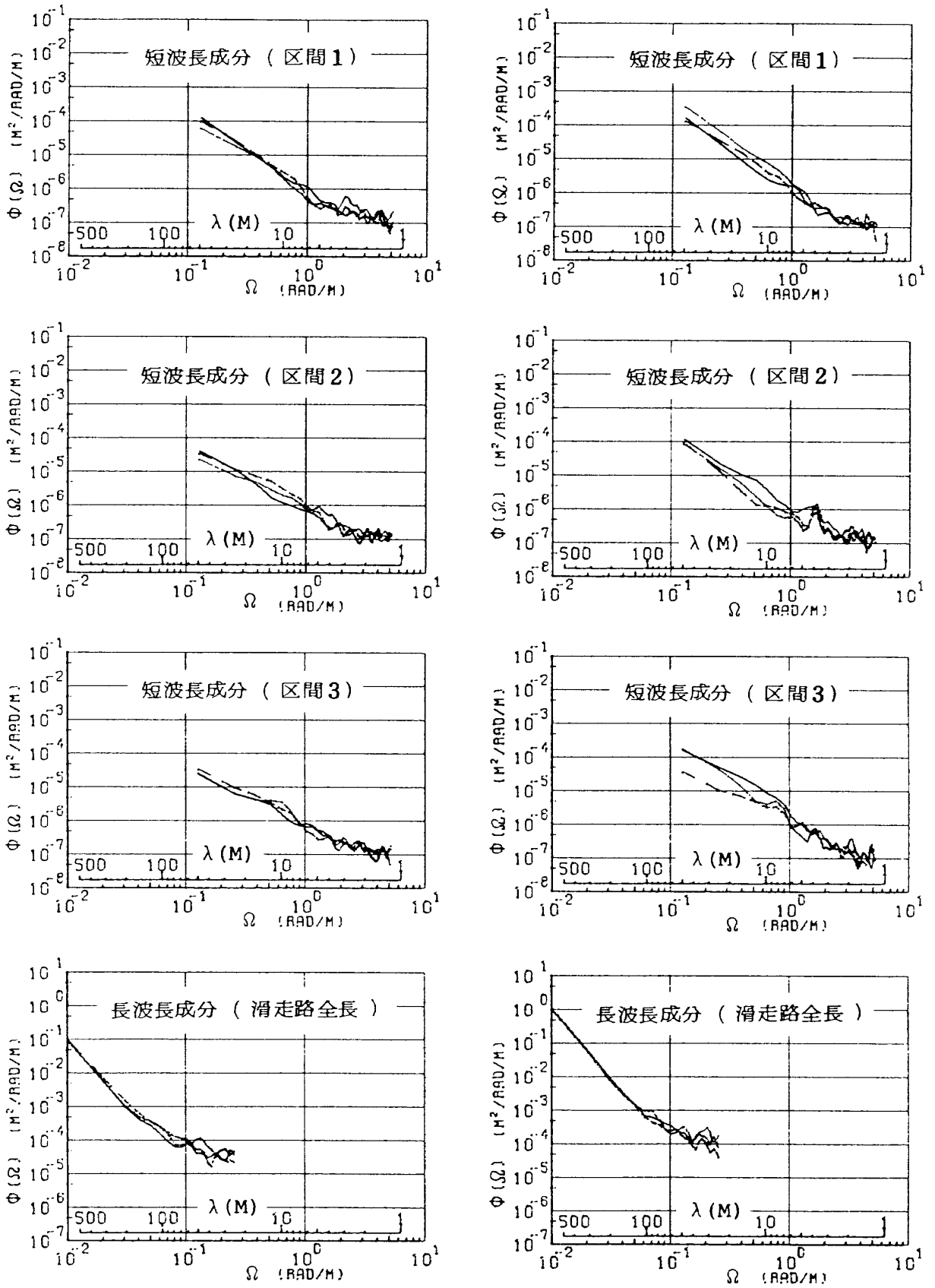
各滑走路のプロフィールを付録1に示す。

3.3 計算結果

滑走路面凹凸のパワースペクトル推定計算の結果を以下に示す。

図2は、滑走路中心線沿い($y(s)$)と、中心線から左側($x(s)$)および右側($z(s)$)に所定の距離はなれた合計3本のトラックについて、短波長成分側と長波長成分側とに分けて行ったパワースペクトルの計算結果例であり、短波長成分側についてはパワースペクトルを区間ごとに個別に示した。

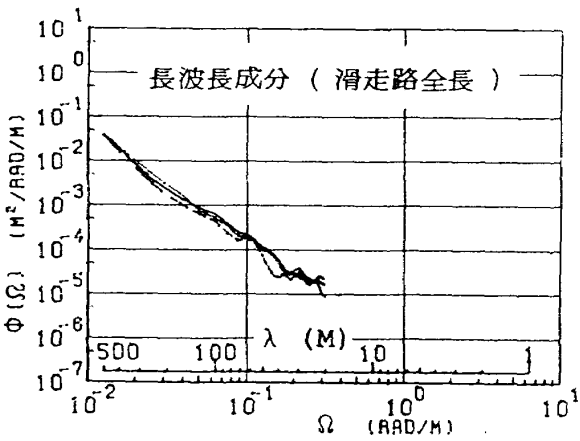
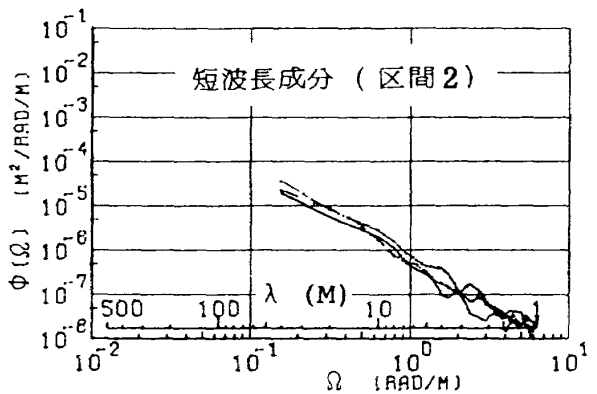
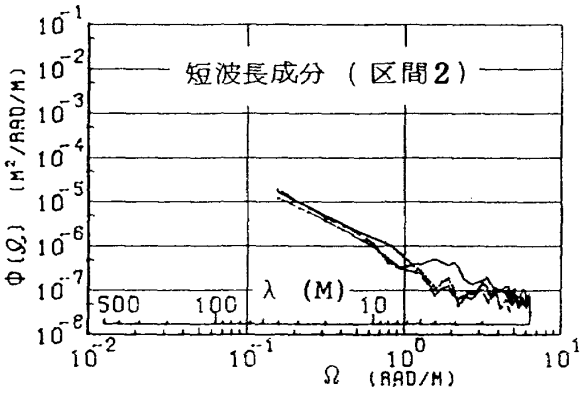
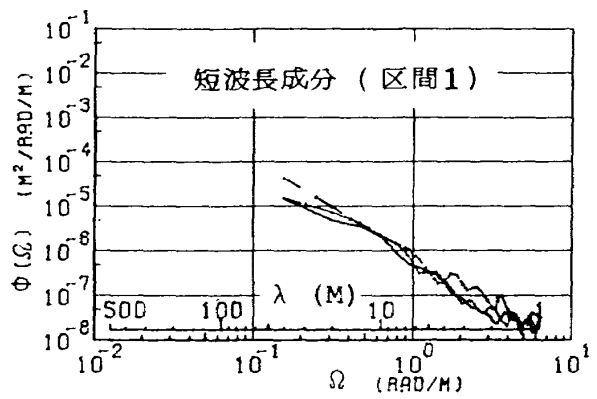
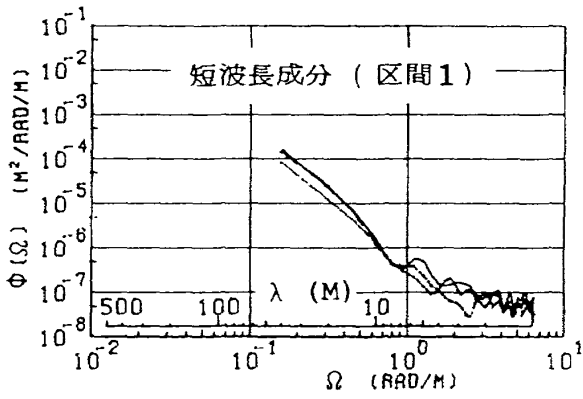
同図のうち(1)は短波長成分側に関して、3トラックの間のパワースペクトルの差が平均的な例で、(2)



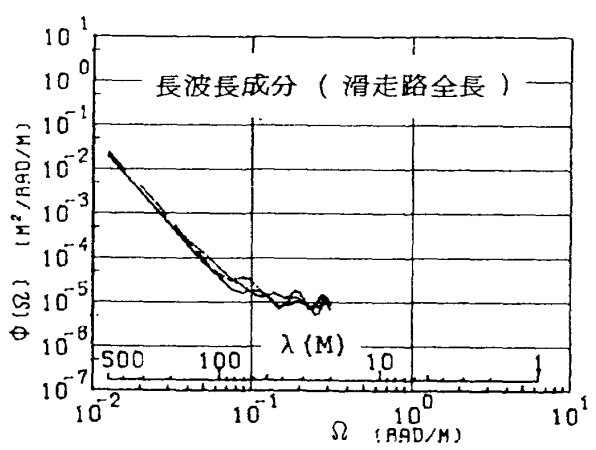
(1) 滑走路 B

(2) 滑走路 D

図2 パワースペクトル計算の中間結果例 — その1

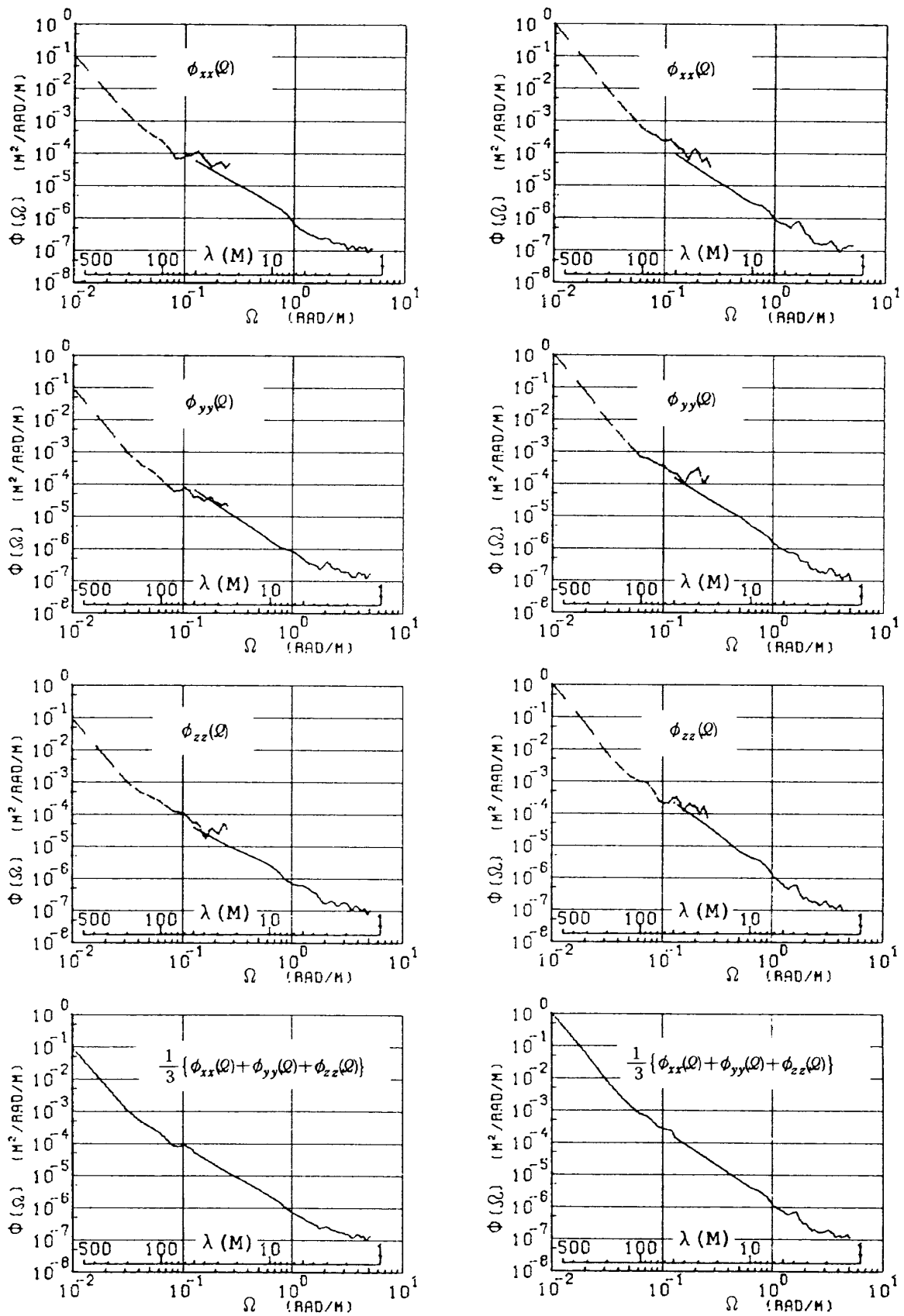


(3) 滑走路 M1



(4) 滑走路 M2

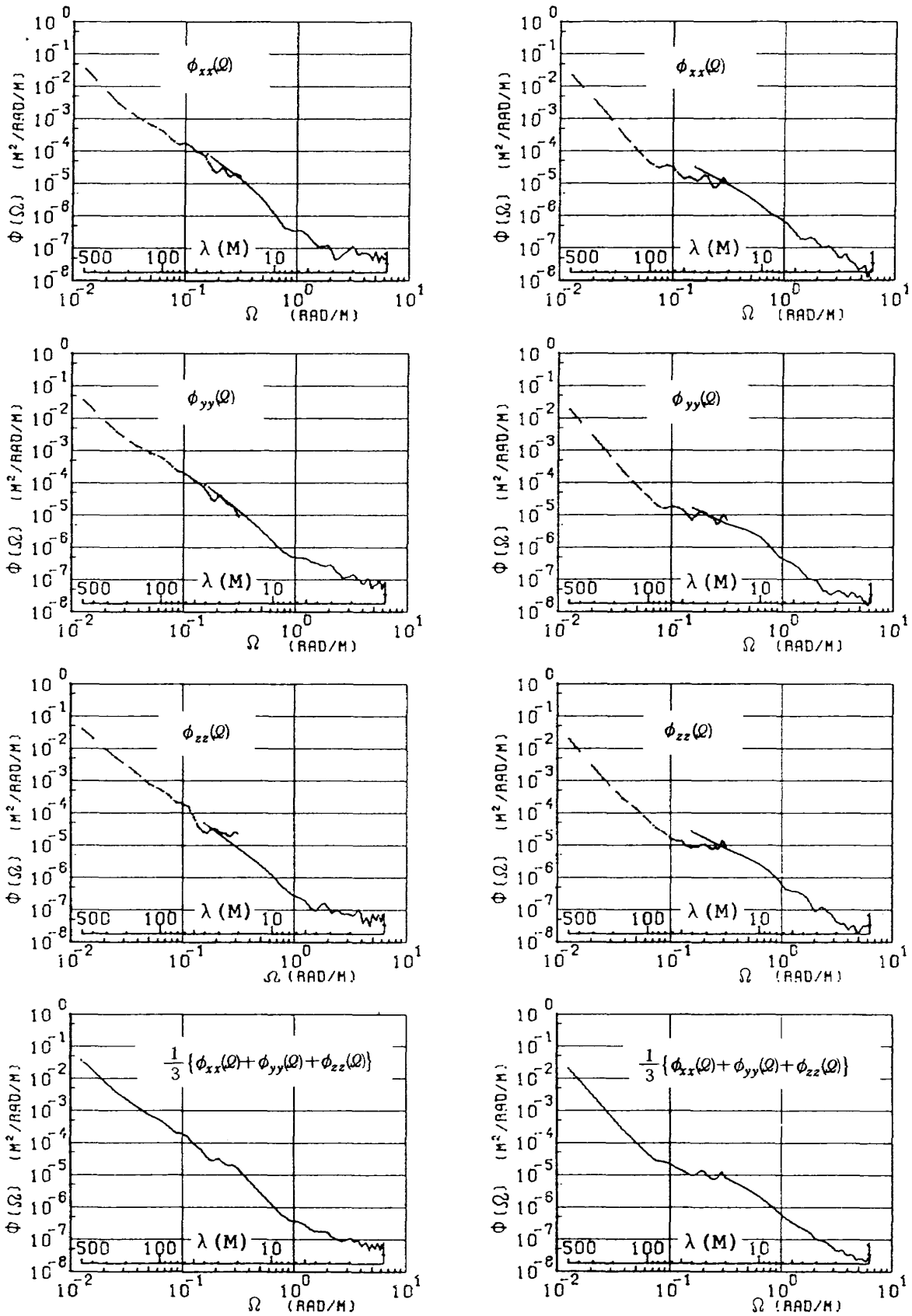
図2 パワースペクトル計算の中間結果例 — その1(続き)



(1) 滑走路 B

(2) 滑走路 D

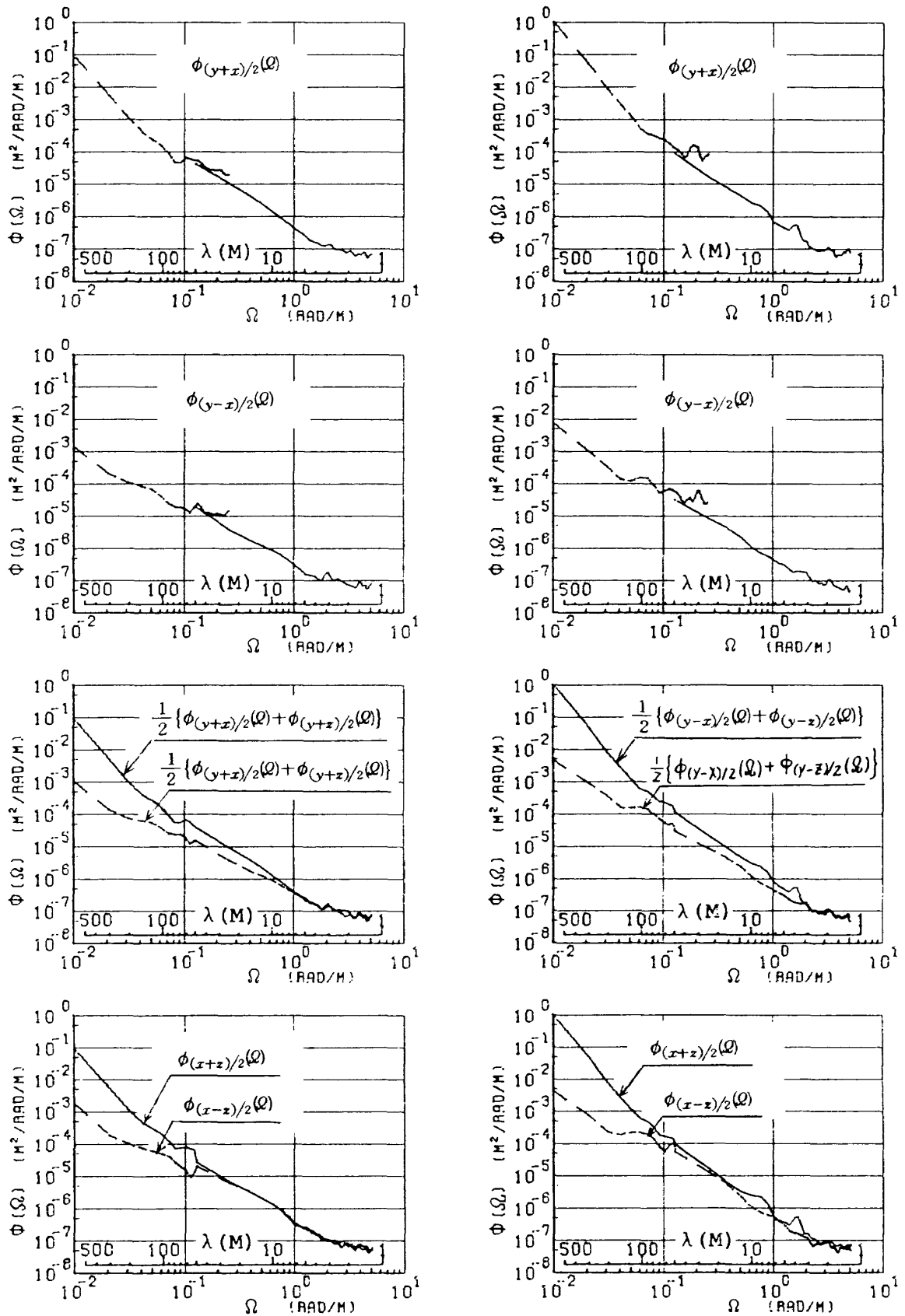
図3 パワースペクトル計算の中間結果例 — その2



(3) 滑走路 M1

(4) 滑走路 M2

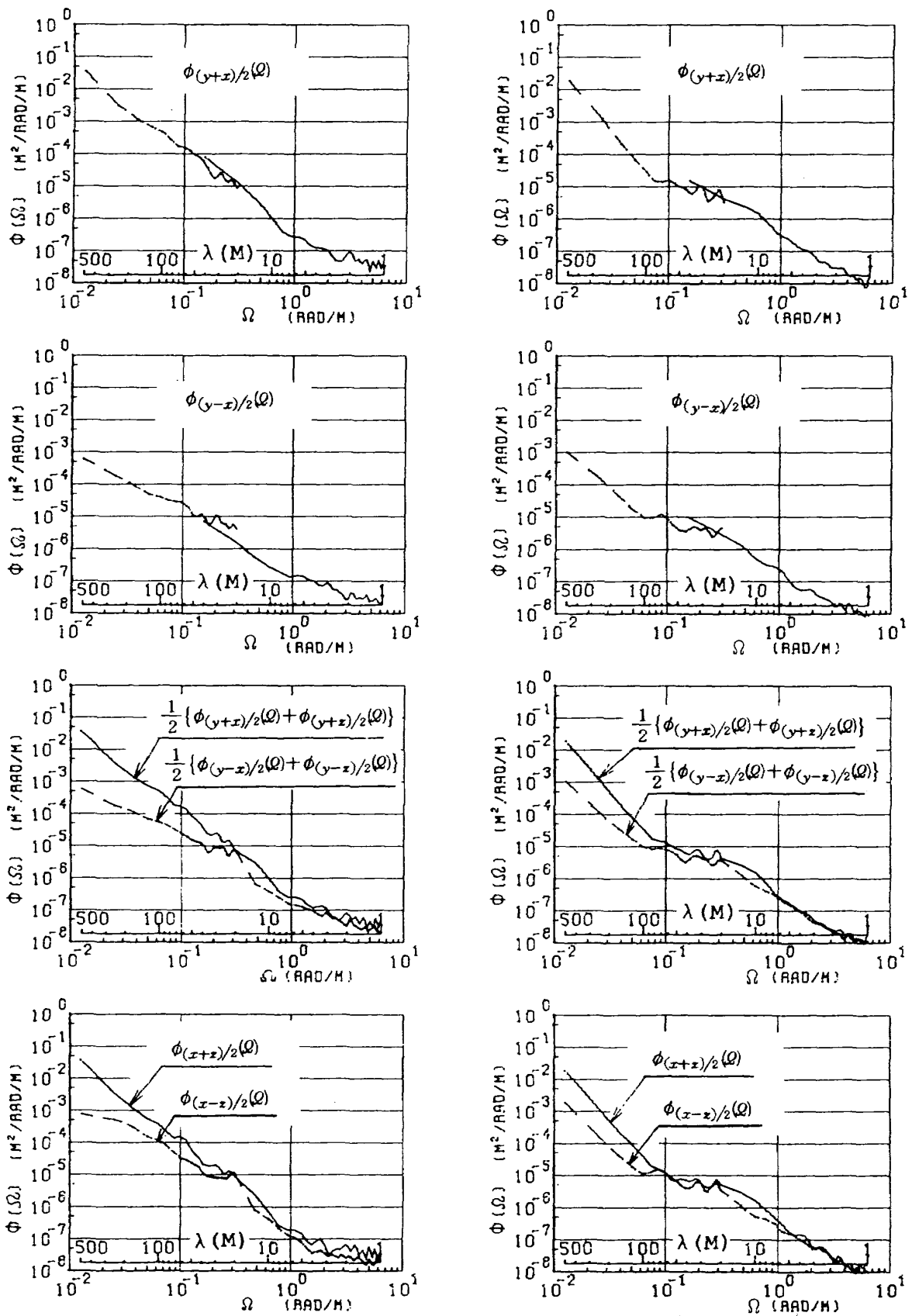
図3 パワースペクトル計算の中間結果例 — その2(続き)



(1) 滑走路 B

(2) 滑走路 D

図 4 パワースペクトル計算の中間結果例 — その 3



(3) 滑走路 M1

(4) 滑走路 M2

図4 パワースペクトル計算の中間結果例 — その3(続き)

はその差が最も大きかった例である。一方、100ないし200 m以上の波長では、3トラック間のパワースペクトルの差は非常に小さい。

図3の最上段から3段目までは、図2の結果をトラック別にして、長波長成分側と短波長成分側のパワースペクトルを同じ図の中に示したものである。ただし、短波長成分側については3区間（滑走路M1およびM2については2区間）の平均を用いた。

図中の、パワースペクトルがオーバーラップしている波長領域に関しては、長波長成分側の計算結果（図中の破線）にエーリアシングが生じている可能性が考えられる（長波長成分側の計算結果が短波長成分側のそれよりも高い値となっている）。そこで、この波長領域に関しては短波長成分側の計算結果（図中の実線）を採用して、全波長成分のパワースペクトルを一本の連続した曲線で表わしたのち、3トラック間で平均化した最終推定結果が図3の最下段である。

ただし、滑走路M1とM2に限っては、図3の(3)および(4)の最上段から3段目までに見られるように、パワースペクトルがオーバーラップしている波長領域において、短波長成分側の計算結果が長波長成分側の結果より高いかほぼ等しくなっている。この原因は、短波長成分側のパワースペクトル推定に使用した滑走路区間の選び方に起因したものではないかと考えられる。そこで、滑走路M1とM2については、長波長成分側の計算結果を採用した。

図4の最上段および2段目は、トラックy（滑走路中心線上）とトラックx（同中心線の左側）との間の対称成分および非対称成分のそれぞれについて、短波長成分側と長波長成分側のパワースペクトル計算結果を同じ図の中に示したものである。ただし、短波長成分側については、3区間（滑走路M1およびM2については2区間）の平均を用いた。

同図の3段目には、トラックxとトラックyとの間の対称成分および非対称成分のそれぞれについて、長波長成分側と短波長成分側のパワースペクトルを、図3と同じ方法を用いて一本の連続した曲線で表わし、さらに、トラックy（滑走路中心線沿い）とト

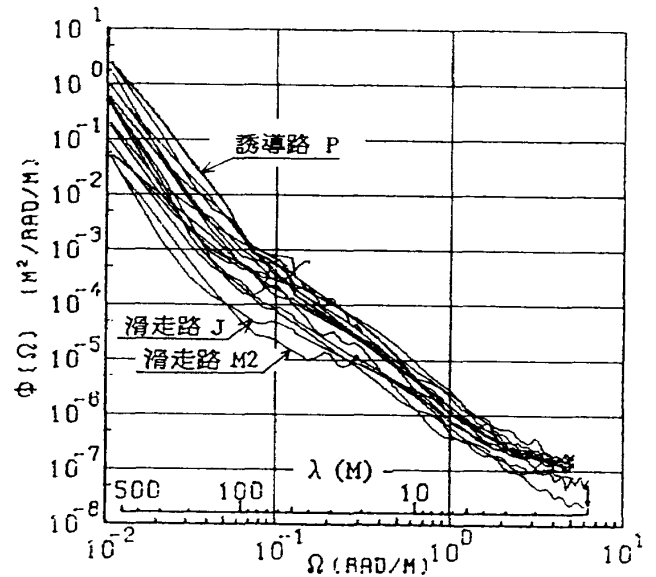


図5 PSDの推定結果

ラックz（同中心線の右側）との間の対称成分および非対称成分のパワースペクトルを上記と同じ方法で求めて、トラックx・y間とトラックy・z間との平均値を示した。^{注)}

同図の最下段には、トラックxとトラックzとの間の対称成分および非対称成分のパワースペクトルを上記と同様の方法で求めて示した。^{注)}

図2～図4に示した手順で得られた全滑走路のパワースペクトルの推定結果を図5にまとめて示した。

また、図6にはトラックx・y間およびトラックz・y間の平均の対称成分および非対称成分のパワースペクトル推定結果を、さらに図7にはトラックx・z間の対称成分および非対称成分のパワースペクトル推定結果を、全滑走路についてまとめて示した。

なお、個々の滑走路のパワースペクトル推定結果は付録2に示した。

4. 検 討

4.1 プリホワイトニング

滑走路は必ずしも平坦な地形に建設されたものばかりではなく、付録1の滑走路A, B, C, D等に見られるように、線形トレンドあるいは2次、3次のトレンドを強く含む場合が多い。このような低次のトレンドは、飛行機の地上走行荷重に直接関係ない

注) xとyのトラック間隔はyとzのトラック間隔と等しいが、xとzのトラック間隔は前2者の2倍となっている。

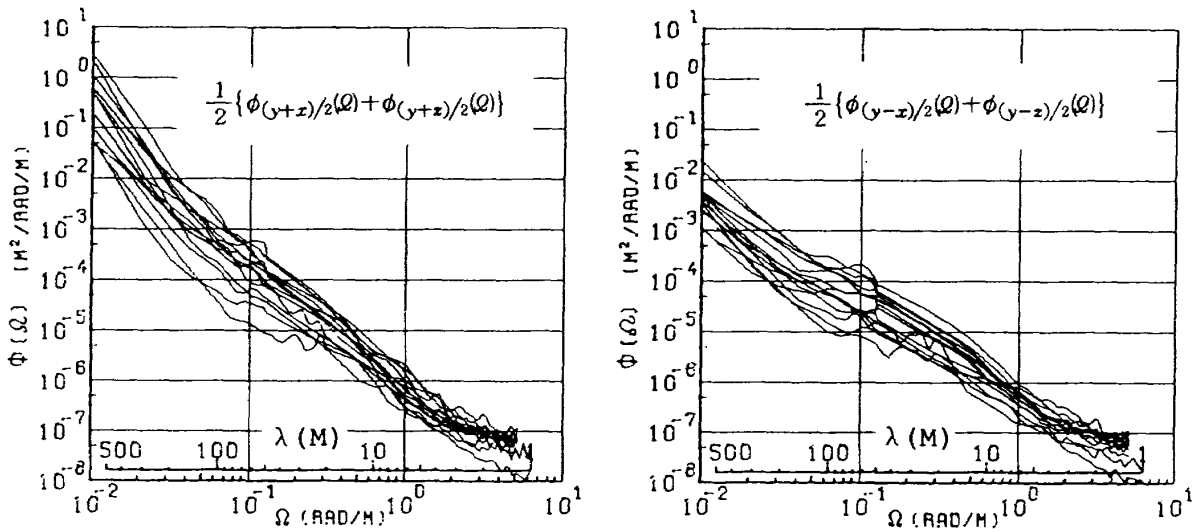


図6 2トラック間の対称および非対称成分のPSD推定結果(その1)

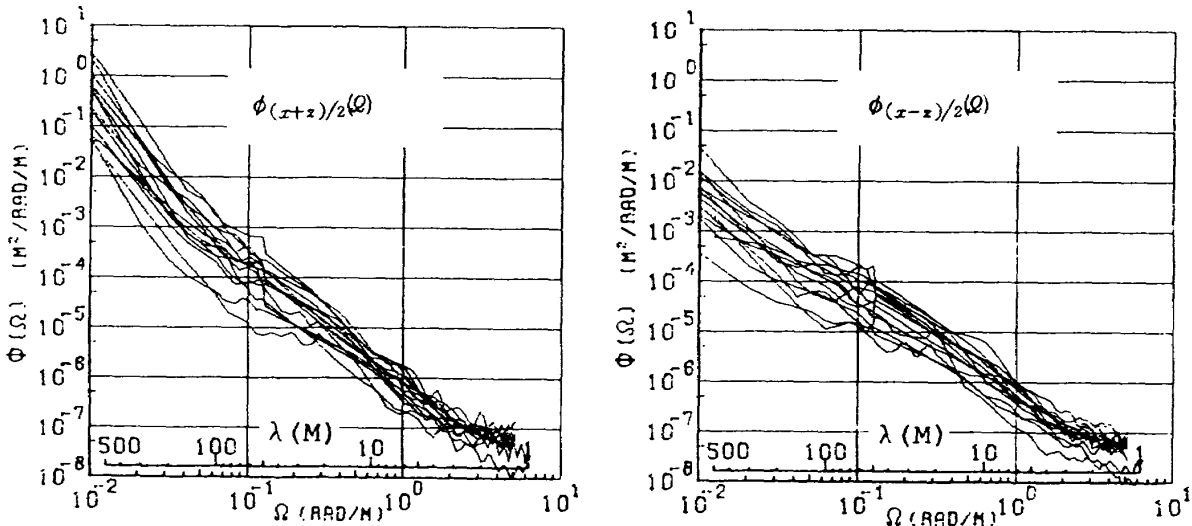


図7 2トラック間の対称および非対称成分のPSD推定結果(その2)

ばかりか、滑走路面凹凸のパワースペクトル推定に重大な障害となる。

すなわち、低次のトレンドを強く含む場合は、実際に解析したい波長領域のデータの有効桁数が減少してパワースペクトルの推定精度が低下する。さらに、滑走路BおよびCの長波長成分側のパワースペクトル推定を例にとって示すと、図8(1)に見られるように、3.2節の(1)に示したプリホワイトニングを省略した場合(図中の一点鎖線)は、プリホワイトニングを行った場合(図中の実線および破線)に比べて異常に高いパワースペクトルを推定することとなる。この原因は図8(2)から明らかのように、強い低次のトレンドのために自己共分散関数の収斂が非常に悪くなるためである。しかし、データ点数(滑

走路長)が限られているため、自己共分散関数の点数をむやみに増やすことは許されない¹⁵⁾。

このような場合の解決策としては、パワースペクトルの推定に先立って、有害な長波長成分を低減あるいは除去してパワースペクトルを平坦化しておく、いわゆるプリホワイトニングの操作が有効である。従来は3.2節の〔フィルタ2〕を一度だけ適用する方法がよく用いられているが¹⁶⁾、図8に一点鎖線で示したように、この方法では自己共分散関数の収斂が未だ十分ではない。

そこで、今回使用した種々の滑走路プロフィールに対してプリホワイトニングの方法を検討した結果、3.2節の(1)に示した方法が簡便で、かつ、良好な自己共分散関数の収斂が得られることがわかった。

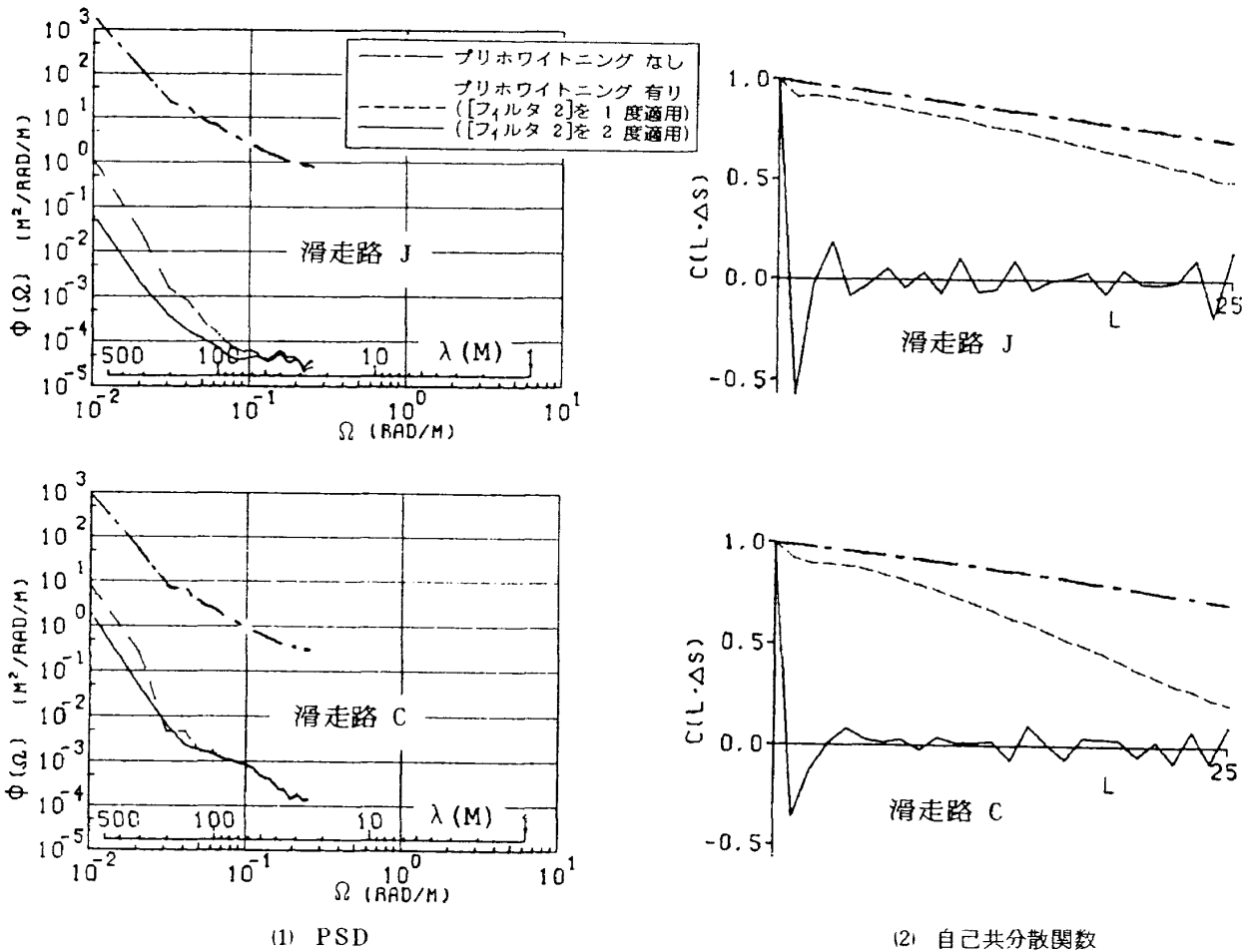


図8 低次トレンドがPSD推定に及ぼす影響

4.2 パワースペクトルの強さおよび傾斜

図5のパワースペクトル最終推定結果を見ると、誘導路Pのパワースペクトルは他の滑走路に比べて高い値を示している。また、オーバーレイ工事直後の滑走路M2と、運用履歴は不明であるが滑走路Jの2本の滑走路のパワースペクトルは、約40m以上の波長において顕著に低い値を示している。

その他の滑走路についても、個々にはパワースペクトルの強さもその傾斜も異なる。しかし、上記の3本を除いた残りの滑走路のパワースペクトルは、図9に破線で示す比較的狭い上下限幅の中に入っている。

この上下限値を、米国軍用規格²⁾で採用されている滑走路面凹凸のパワースペクトルと比較すると図10のとおりである。米国軍用規格のパワースペクトルは $\Omega^{-1.77}$ に比例し、全波長にわたってパワースペクトルの傾斜を一定としている。今回得られたパワースペクトルも約1mから5mまでの短い波長では

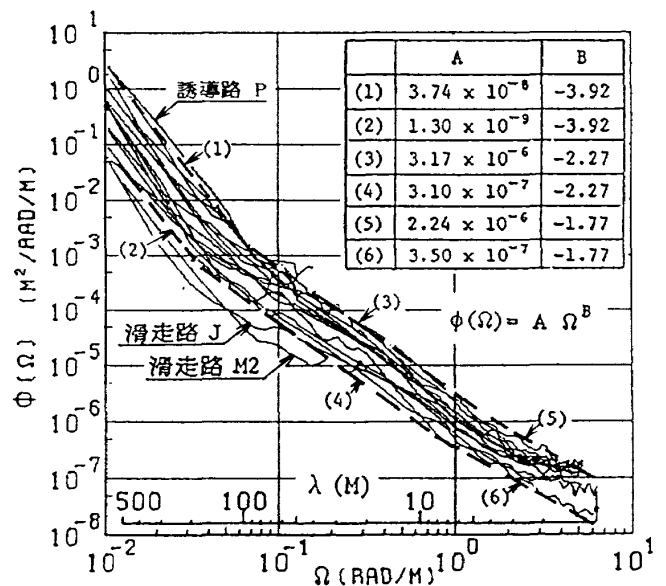


図9 PSDの推定結果とその上下限幅

同じく $\Omega^{-1.77}$ に比例しているが、約5mから150mの波長では $\Omega^{-2.27}$ に比例し、約150m以上の波長では $\Omega^{-3.92}$ に比例している。

また今回得られたパワースペクトルの強さは、波

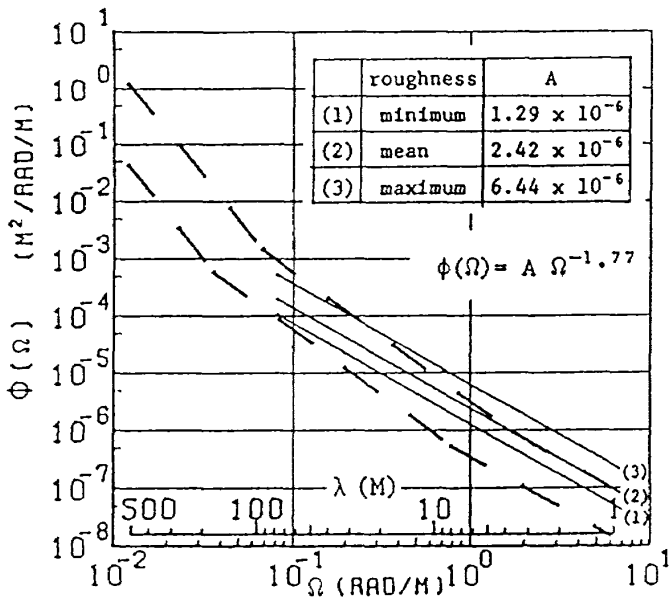


図10 米国軍用規格²⁾との比較

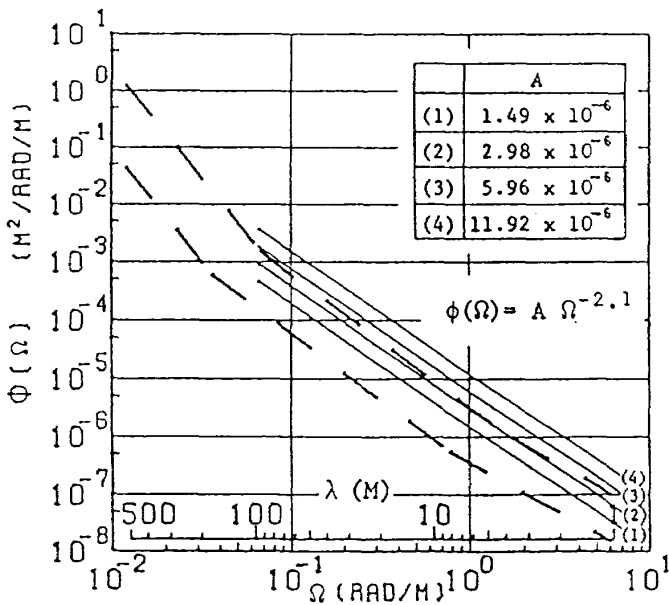


図11 文献5)の解析結果との比較

長60m付近では米国軍用規格のそれとほぼ等しいが、波長約5m以下では米国軍用規格のパワースペクトルの中程度の強さ以下となっている。

図11は今回得られた結果を、米国内の85の軍用滑走路および誘導路ならびに文献16)の滑走路に関する解析結果⁵⁾と比較したもので、図中の(1)~(4)の実線は、滑走路面凹凸のパワースペクトルのレベルを4段階に分類した場合、(1),(2),(3)および(4)のレベル以下に属する確率がそれぞれ50, 82, 97 および100

%であることを示している。

図10および図11から、今回得られたパワースペクトルは、100 m以下の波長に関しては、その強さと傾斜のいずれにおいても、米国軍用規格に採用されているものよりも図11に実線で示した文献5)の解析結果と良く一致している。

一般に、滑走路面凹凸のパワースペクトルはほぼ Ω^{-2} に比例すると云われている¹⁷⁾。今回の推定においても、飛行機の地上走行荷重に主として関与する約150 m以下の波長ではこれに近い結果が得られたが、約150 m以上の波長では $\Omega^{-3.92}$ に比例し、2次以上の低次トレンド^{注)}を強く含む滑走路ほど長い波長のパワースペクトルの傾斜が強くなる傾向がみられた。この原因は次のように考えられる。

すなわち、滑走路は大小の起伏を持つ広大な土地に建設されるため、地形および建設費の制約から、滑走路の設計プロフィール自身が強い低次のトレンドを含む場合が多い。その結果、実際の滑走路のパワースペクトルは、低次トレンドを主たる凹凸とする設計プロフィールのパワースペクトルと、舗装工事の良否およびその後の運用によって生じる凹凸のパワースペクトルとが重畳したものとなる。今回の結果から類推すると、設計プロフィールのパワースペクトルは、個々の滑走路ごとにかかなりの範囲で異なるが、平均的にはほぼ Ω^{-4} に比例し、波長の減少とともにパワースペクトルが急速に低下して、約100 m以下の波長ではその影響がほとんど見られなくなるものと考えられる。

因に、文献18)では一般の舗装路面に関して、

- イ) 路面のプロファイルを折線で近似する。
- ロ) 路面傾斜角 θ の平均値は零で、分布は正規分布とする。
- ハ) 傾斜角の変化は不規則に生じる。路面の単位長さ当たり平均 k 回生じる。
- ニ) 傾斜角が一様な区間の長さ l と各区間の傾斜角 θ との間に相関はない。

との仮定を用いて路面凹凸のパワースペクトルを次式のように導いた。(図12参照)

注) 線形トレンドはブリホワイトニングによって完全に除去されており、今回のパワースペクトル推定結果には影響がない。

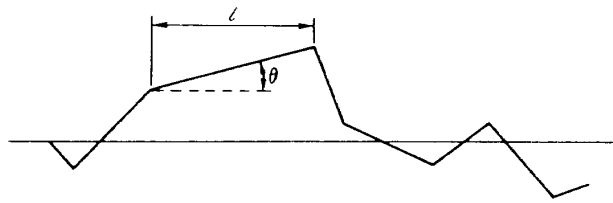


図 12 文献 17) の路面凹凸モデル

$$\Phi(\Omega) = \frac{2}{\pi} \sigma_0^2 \frac{k}{\Omega^2 (k^2 + \Omega^2)} \quad (4.1)$$

ただし、 σ_0^2 は θ の 2 乗平均値である。

k は路面の単位長さ当たりの傾斜角変化の平均回数で、舗装面の施工および保守が良好な滑走路では k は大きな値をとる。その場合、パワースペクトルは Ω^{-2} に比例することを (4.1) 式は示している。

また、低次トレンドを有する滑走路の設計プロフィールのように、大きく緩やかなうねりを主たる凹凸とする路面では k が非常に小さい。そのような場合にはパワースペクトルが Ω^{-4} に比例することを (4.1) 式は示しており、上述の今回得られた結果はこれとよく一致する。

4.3 新旧舗装面の比較

図 13 には、完成後放置期間 6 年と供用期間 6.5 年の合計 12.5 年が経過した滑走路 M について、オーバ

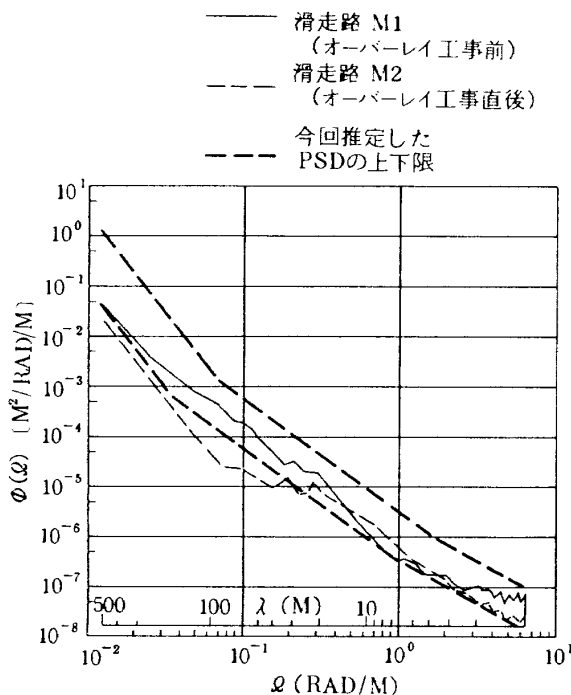


図 13 新旧舗装面の比較

ーレイ改修工事の前 (M1) と直後 (M2) の凹凸のパワースペクトルを示した。

両者を比較すると、約 100 m の波長を中心に、約 30 m から 200 m までの波長範囲で両パワースペクトルの間に顕著な差が認められる。これは主として地盤沈下によって生じた比較的長い波長の凹凸がオーバーレイ改修工事によって是正された結果と考えられる。

これに対して、約 20 m 以下および約 200 m 以上の波長では M1 と M2 のパワースペクトルにこのような顕著な差が見られない。前者に関しては、当空港が我が国を代表する第一種国際空港であり、滑走路面の局部的な劣化に対して適切な補修がなされていたことを示すものと考えられる。

また、後者の約 200 m 以上の波長領域に関しては、4.2 節で述べたように、設計プロフィールに含まれる低次トレンドがこの波長領域での主たる凹凸であり、かつ、オーバーレイ改修工事を行う場合も滑走路の設計プロフィールは通常変更されないためと考えられる。

以上のことから、滑走路面凹凸のパワースペクトルは、オーバーレイ工事による滑走路面の補修効果を良く表わしていると考えられる。

4.4 2トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトル

2トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトルに関する理解を助けるために、2本のトラックのプロフィール $y(s)$ および $x(s)$ が、次式の関係を満足する定常確率過程である場合を考える。

(図 14 参照)

$$\left. \begin{aligned} y(s) &= v(s) + n(s) \\ v(s) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(s-s_1) \cdot h(s_1) ds_1 \\ C_{nx}(s) &= E[n(s+s_1) \cdot x(s_1)] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

すなわち、 $y(s)$ は $v(s)$ と $n(s)$ の和であるが、そのうち $v(s)$

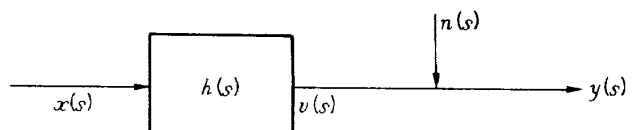


図 14 $x(s)$ と $y(s)$ の間の関係

は $x(s)$ と線形関係にあり、 $n(s)$ は $x(s)$ と無相関なノイズである。

(4.2) 式中の $h(s)$ は線形系のインパルス応答関数であり、周波数応答関数 $H(\Omega)$ と次式で結ばれる。

$$H(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(s) \cdot e^{-i\Omega s} ds \quad (4.3)$$

さらに、線形系への入力 $x(s)$ と出力 $z(s)$ との間の振幅ゲインを $|A(\Omega)|$ 、位相遅れを $\theta(\Omega)$ とすると、 $H(\Omega)$ は次式のように書き表わすこともできる。

$$H(\Omega) = |A(\Omega)| e^{i\theta(\Omega)}$$

$$= \sqrt{\frac{\Phi_{vv}(\Omega)}{\Phi_{xx}(\Omega)}} \{ \cos \theta(\Omega) + i \sin \theta(\Omega) \} \quad (4.4)$$

一方、

$$C_{yx}(s) = E \{ \{ v(s+s_1) + n(s+s_1) \} \cdot x(s_1) \}$$

$$= C_{vx}(s) \quad (4.5)$$

であるから、(4.5) および (4.4) 式の関係から次式が得られる。

$$\Phi_{yx}(\Omega) = \Phi_{vx}(\Omega)$$

$$= H(\Omega) \cdot \Phi_{xx}(\Omega)$$

$$= \sqrt{\Phi_{xx}(\Omega) \cdot \Phi_{vv}(\Omega)} \{ \cos \theta(\Omega) + i \sin \theta(\Omega) \} \quad (4.6)$$

したがって、 $\Phi_{yx}(\Omega)$ の実数部 $\Phi_{L,yx}(\Omega)$ は、

$$\Phi_{L,yx}(\Omega) = \sqrt{\Phi_{xx}(\Omega) \cdot \Phi_{vv}(\Omega)} \cdot \cos \theta(\Omega) \quad (4.7)$$

となり、(2.20) 式で定義した 2 トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトル $\Phi_{(y\pm x)/2}(\Omega)$ は次式のように書き表わされる。

$$\Phi_{(y\pm x)/2}(\Omega) = \frac{\Phi_{yy}(\Omega) + \Phi_{xx}(\Omega)}{4} \pm \frac{\sqrt{\Phi_{xx}(\Omega) \cdot \Phi_{vv}(\Omega)}}{2} \cos \theta(\Omega) \quad (4.8)$$

いま、 $y(s)$ と $x(s)$ の対称成分および非対称成分のパワースペクトルを $\sqrt{\Phi_{yy}(\Omega) \cdot \Phi_{xx}(\Omega)}$ で正規化して表わすこととし、さらに簡単化のために、 $\Phi_{yy}(\Omega)$ と $\Phi_{xx}(\Omega)$ が等しい場合を考えると次式が得られる。

$$R_{(y\pm x)/2}(\Omega) = \frac{\Phi_{(y\pm x)/2}(\Omega)}{\sqrt{\Phi_{yy}(\Omega) \cdot \Phi_{xx}(\Omega)}}$$

$$= \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{\Phi_{vv}(\Omega)}{\sqrt{\Phi_{yy}(\Omega)}} \cdot \cos \theta(\Omega)$$

$$R_{(y\pm x)/2}(\Omega) + R_{(y-x)/2}(\Omega) = 1$$

ただし、

$$\Phi_{yy}(\Omega) = \Phi_{xx}(\Omega) \text{ の場合。}$$

(4.9)

すなわち、 $\Phi_{yy}(\Omega)$ と $\Phi_{xx}(\Omega)$ が等しい場合には、 $y(s)$ と $x(s)$ との間の対称成分および非対称成分の正規化したパワースペクトル $R_{(y+x)/2}(\Omega)$ および $R_{(y-x)/2}(\Omega)$ は 0.5 を中心にして対称な値をとり、両者の和は常に 1 である。また、 $y(s)$ と $x(s)$ とが完全に線形関係

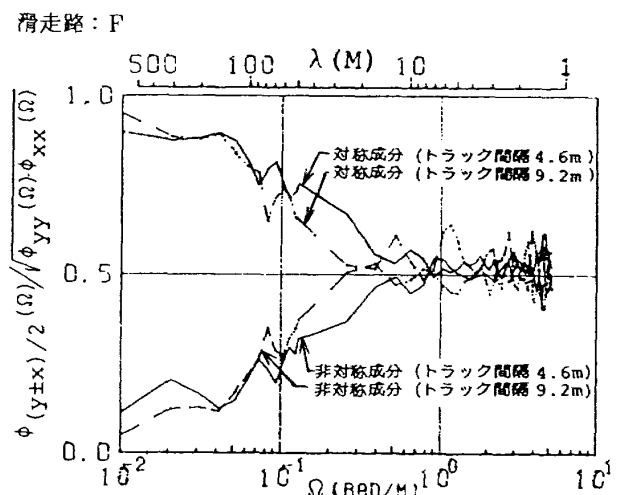
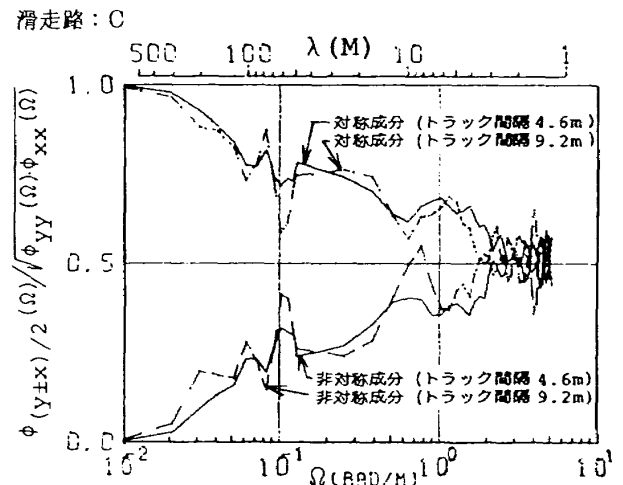
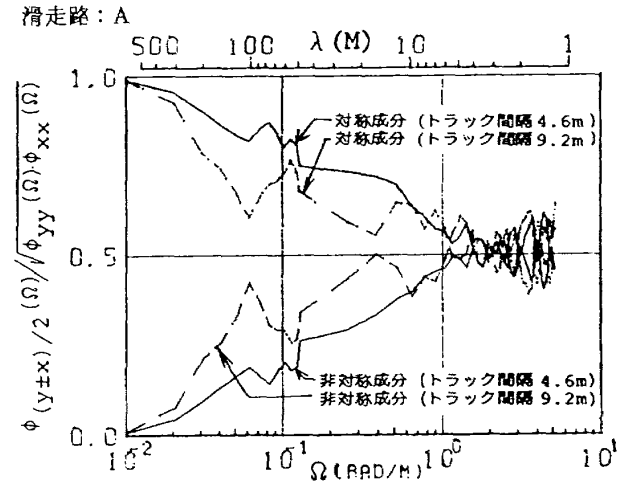


図 15 2 トラック間の対称および非対称成分の PSD 推定結果例

にあり、位相遅れが無いときは、対称成分 $R_{(y+x)/2}(\Omega)$ は 1 となるが、位相遅れが大きくなり、また線形関係が崩れて両者の相関が低下するに従って、 $R_{(y+x)/2}(\Omega)$ は減少して 0.5 に近づいて行く性質を持つ。

今回得られた 2トラック間の対称成分および非対称成分のパワースペクトルを上記の方法で正規化して図15～図18に示す。

図15は、例として滑走路 A, C および F についての結果であるが、個々の滑走路について見ると $R_{(y+x)/2}(\Omega)$ と Ω の関係は複雑で、しかも、滑走路ごとにその様相がかなり異なる。

図16はトラック間隔が 4.6m の A から J までの滑走路について平均化した結果である。滑走路中心線上のトラックと左右のトラックとの間（トラック間隔 4.6m）および左と右のトラックの間（トラック間隔 9.2m）のいずれの場合についても対称成分と非対

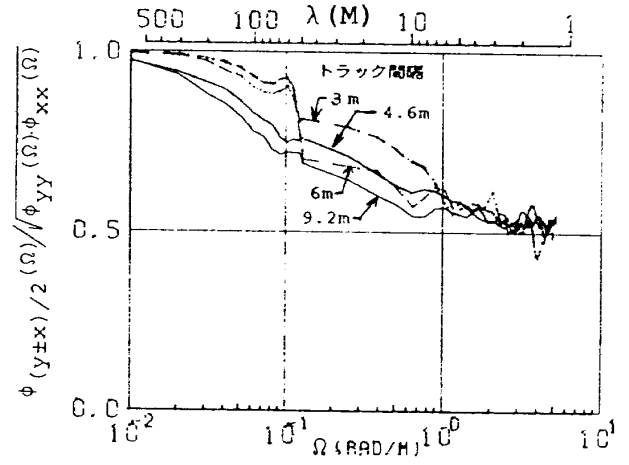


図 18 対称成分の PSD とトラック間隔の関係

称成分は 0.5 を中心にしてほぼ対称な値を示している。また、対称成分の正規化したパワースペクトルは、波長 500 m 付近では 1 に近い値であるが、波長が短くなるに従って減少し、トラック間隔 4.6 m の場合は波長が約 3 m のあたりで 0.5 となっている。

図17はトラック間隔が 3m の滑走路 K と滑走路 L について平均化した結果である。

さらに、図18にはトラック間隔の影響を見るために、対称成分に関して図16と図17の結果を重ね合わせて示した。トラック間隔が 3m の滑走路は K と L の 2本しかなく、今回得られた結果が十分収斂しているかどうかは疑問であるが、総じてトラック間隔の増加とともに対称成分の減少する傾向が窺える。

5. おわりに

滑走路面の凹凸を合理的に評価する方法の一つとしてパワースペクトルによる方法を取り上げ、滑走路面凹凸のパワースペクトルを推定する方法に関する検討を行った。その結果、滑走路プロフィールに含まれる低次トレンドがパワースペクトルの推定に大きな障害となることを明らかにするとともに、その対策としてのプリホワイトニングの方法を示した。

さらに、16の滑走路について路面凹凸のパワースペクトルを推定して、2トラック間の対称および非対称成分のパワースペクトルも含めて地上走行荷重に対する飛行機の強度設計のための資料を提供するとともに、滑走路のオーバーレイ補修工事の前後における路面凹凸を比較して、パワースペクトルが滑走路面凹凸の評価に有効であることを実例で示した。

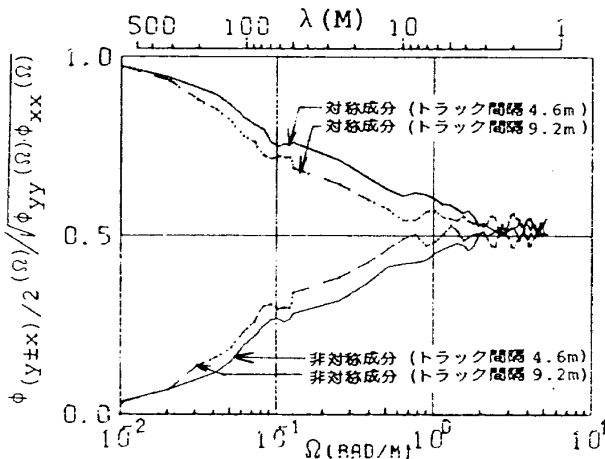


図 16 2トラック間の対称および非対称成分の PSD (滑走路 A～J の平均)

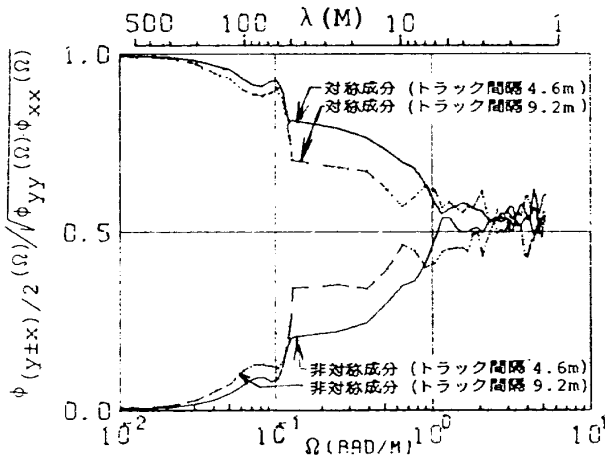


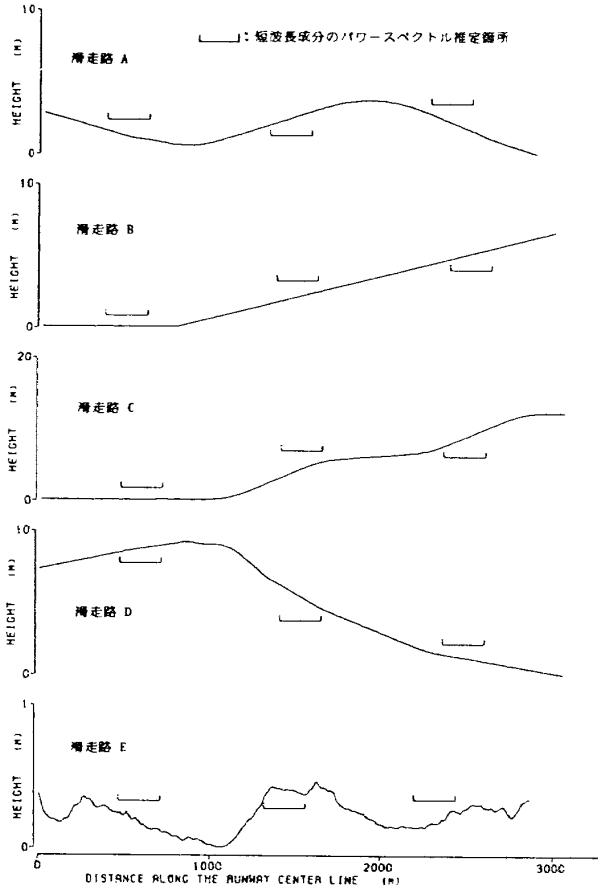
図 17 2トラック間の対称および非対称成分の PSD (滑走路 K および L の平均)

また、滑走路面凹凸のパワースペクトルは、飛行機の地上走行荷重に主として関与する約150 m以下の波長では大略 λ^{-2} に比例し、それ以上の波長では大略 λ^{-4} に比例する結果を得た。

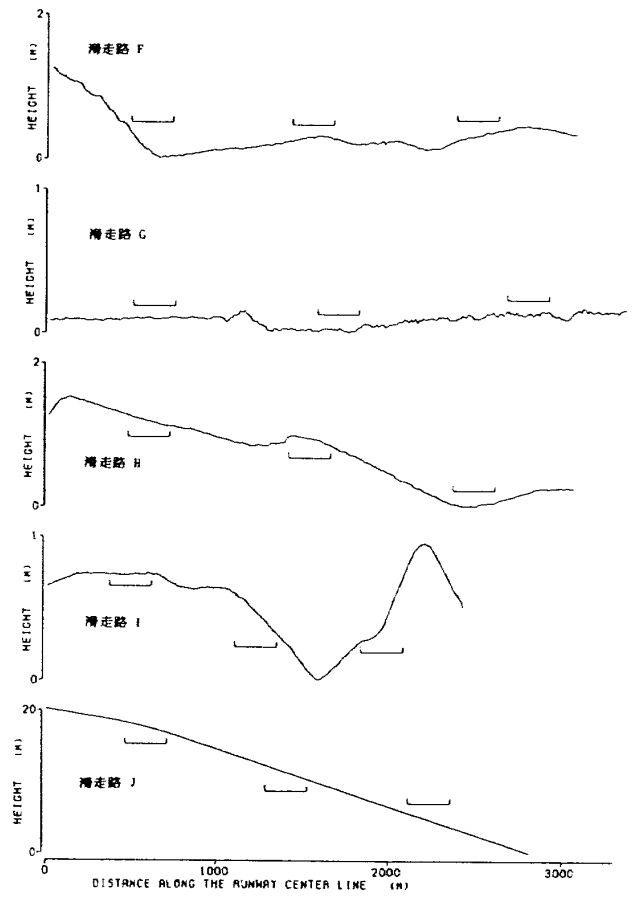
最後に、本研究に際して新東京国際空港公団の上村正路氏、阿部洋一氏および辻信雄氏には滑走路プロフィール・データの収集に大変ご尽力いただいた。土木学会・空港舗装研究委員会の委員各位には滑走路面凹凸の評価方法に関して有益なご意見をいただきました。また、当研究所機体部の上田哲彦主任研究官にはプリホワイトニングのためのフィルタに関してご教示いただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

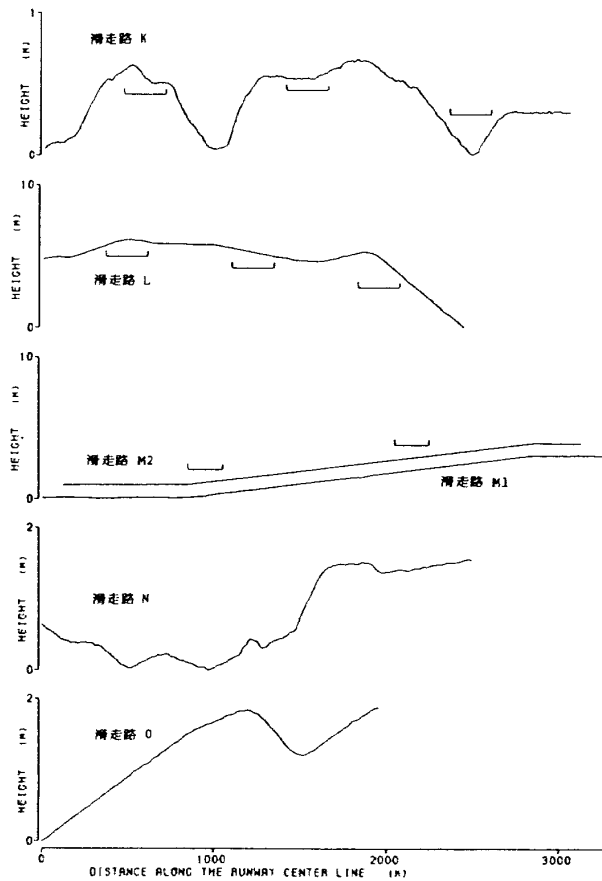
- 1) 耐空性審査要領, 運輸省航空局.
- 2) Military Specification, Aircraft Structures, General Specification for, MIL-A-87221 (USAF), 28 Feb. 1985.
- 3) ICAO Annex 14, Aerodromes, 8th Edition, Mar. 1983.
- 4) Hahn, E. E. ; Design Criteria for Ground-Induced Dynamic Loads, RTD-TDR-63-4139-Vol. I and vol. II, Nov. 1963.
- 5) Wignot, J. E. and others : The Development of Dynamic Taxi Design Procedures, FAA-ADS-68-11, 1968.
- 6) Sinozuka, M : Stochastic Mechanics, Vol. II, Columbia University, 1987.
- 7) Jenkins, G. M. and Watts, D. G. : Spectral Analysis and Its Applications, Holden-Day, 1969.
- 8) Hall, A. W. : Three-Track Runway and Taxiway Profiles Measured at International Airports A and B, NASA TN D-5444, 1969.
- 9) Hall, A. W. : Three-Track Runway and Taxiway Profiles Measured at International Airports C and D, NASA TN D-5703, 1970.
- 10) Hall, A. W. : Three-Track Runway and Taxiway Profiles Measured at International Airports E and F, NASA TN D-6567, 1971.
- 11) Hall, A. W. : Three-Track Runway and Taxiway Profiles Measured at International Airports G and H, NASA TN D-6680, 1972.
- 12) Hall, A. W. : Three-Track Runway and Taxiway Profiles Measured at International Airports I and J, NASA TN D-6932, 1972.
- 13) Morris, G. J. : Three-Track Runway Elevation Profiles Measured at Two United States Government Installations, NASA TN D-5545, 1969.
- 14) 新東京国際空港の舗装に関する研究報告書, 土木学会・空港舗装研究委員会, 昭和60年.
- 15) 赤池弘次, 中川東一郎: ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 1972年.
- 16) Thompson, W. E. : Measurements and Power Spectra of Runway Roughness at Airports in countries of The North Atlantic Treaty Organization, NACA TN 4303, 1958.
- 17) 武田峻: 航空機の走行荷重の解析, 運輸技術研究所報告第10巻, 第5号, 1960年.
- 18) 武田峻: 路面凹凸のモデルによる検討, 運輸技術研究所報告第11巻, 第4号, 1961年.



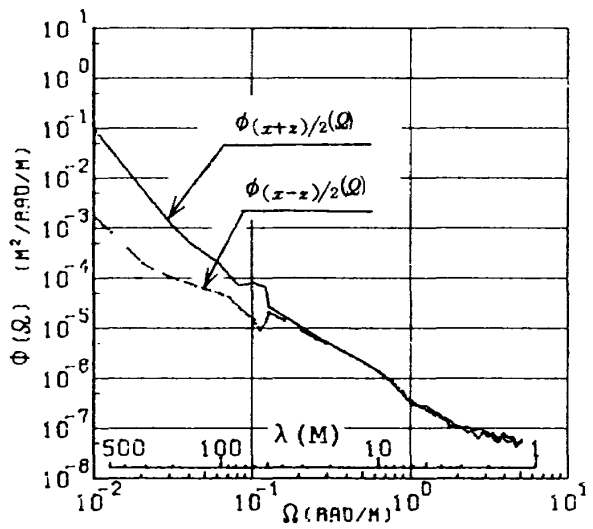
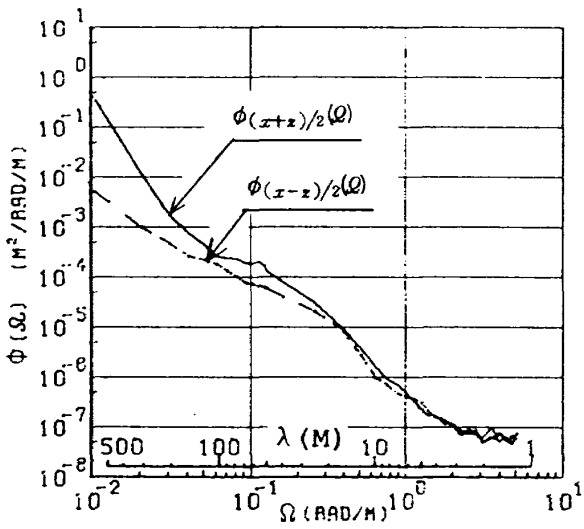
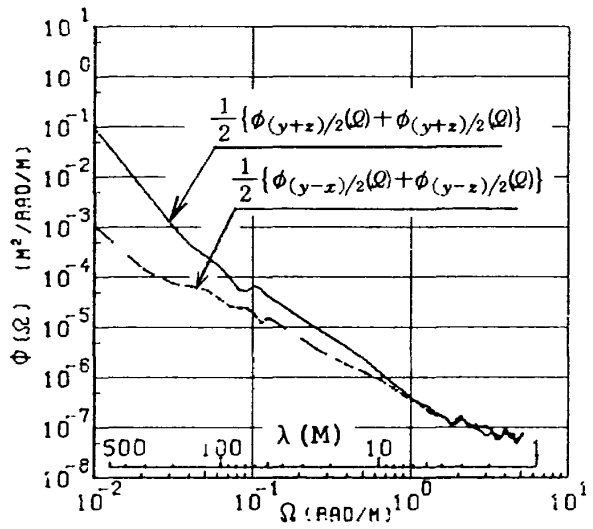
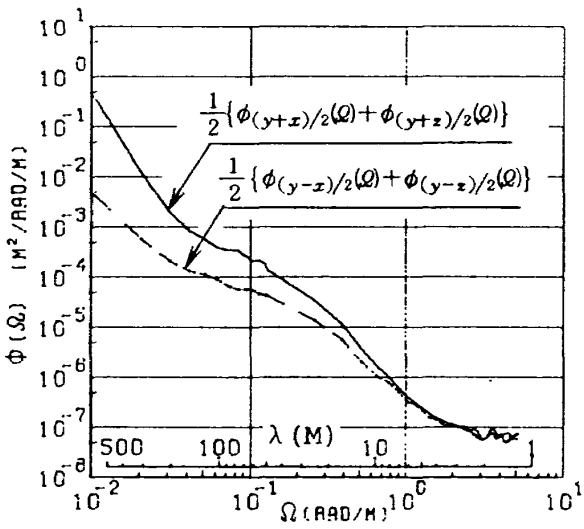
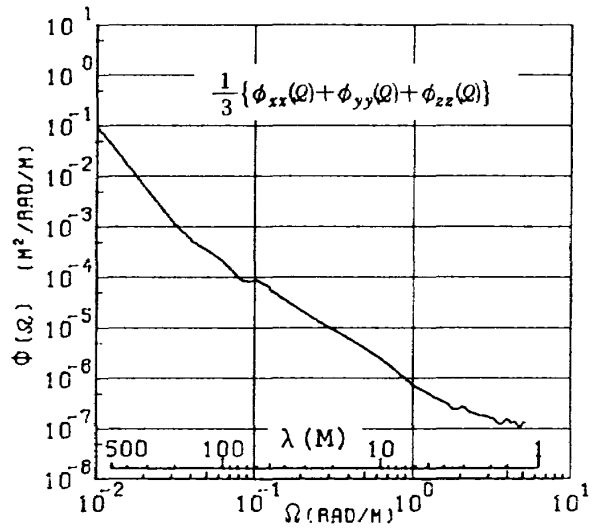
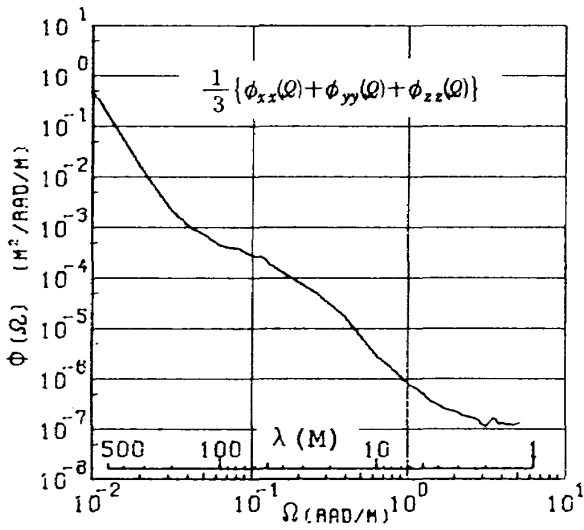
付録1 滑走路プロフィール



付録1 滑走路プロフィール(続き)



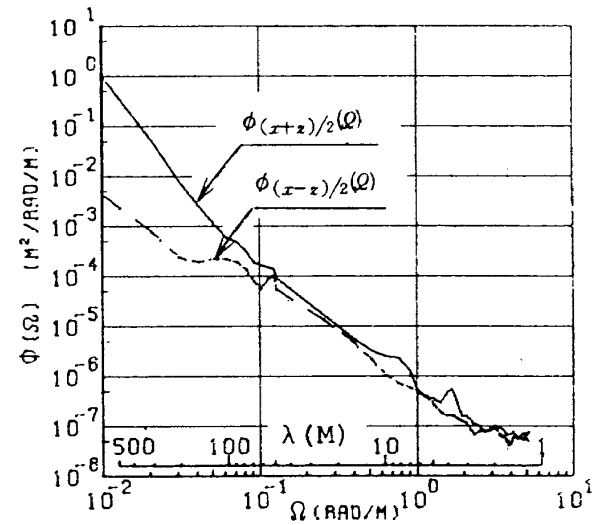
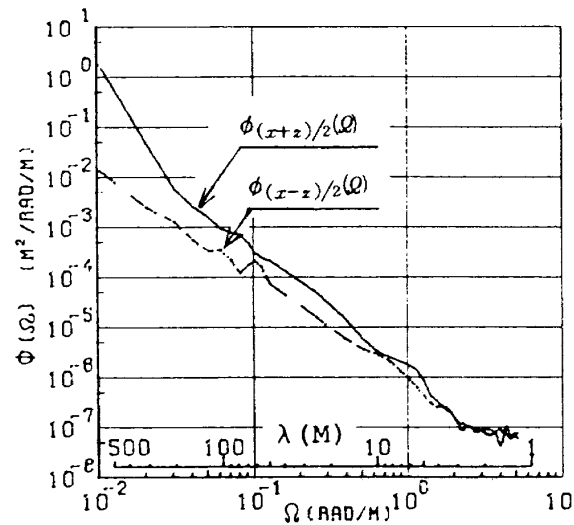
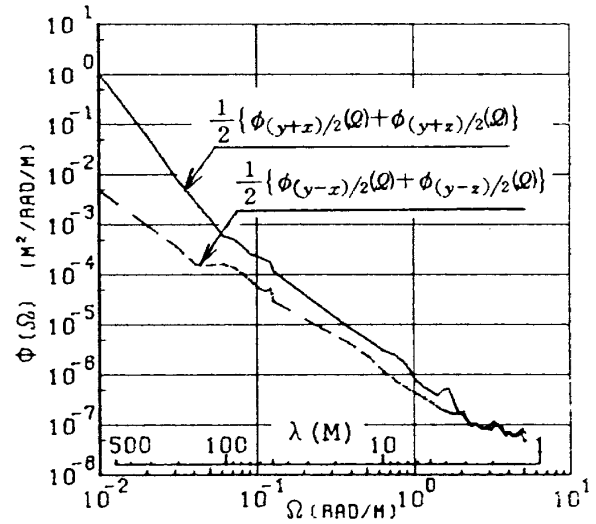
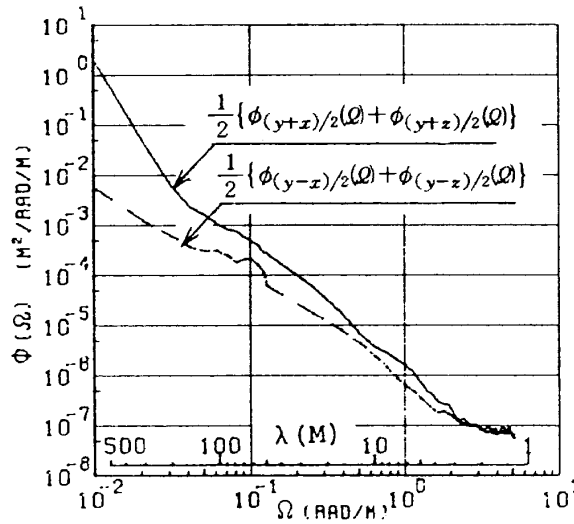
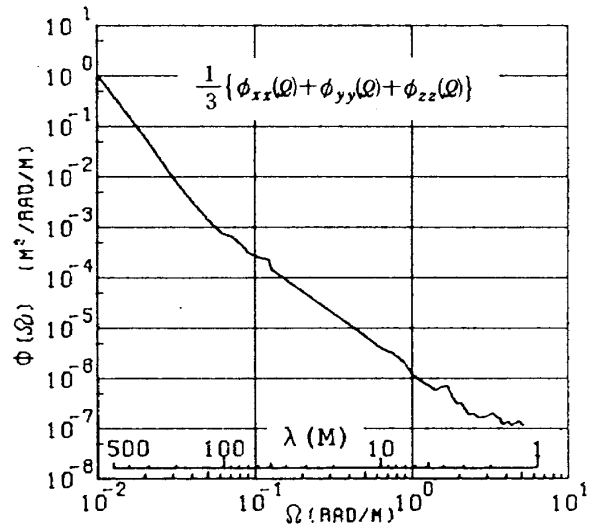
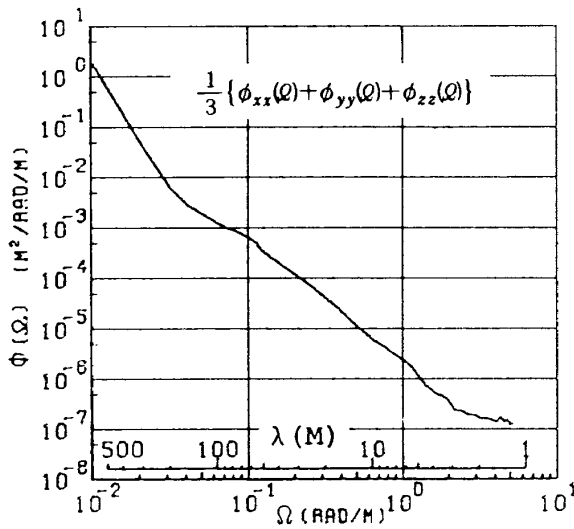
付録1 滑走路プロフィール(続き)



(1) 滑走路 A

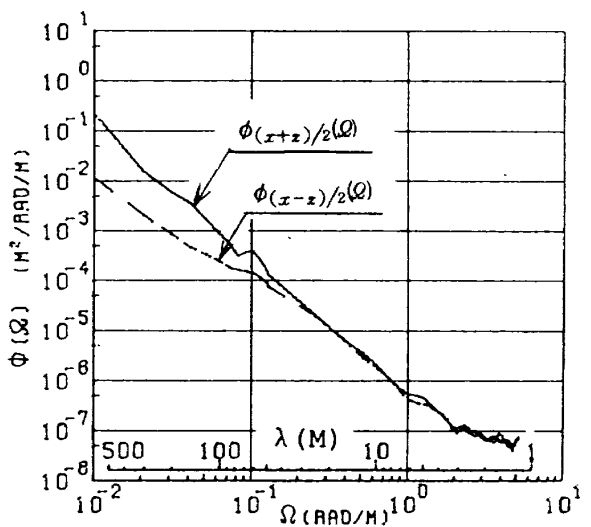
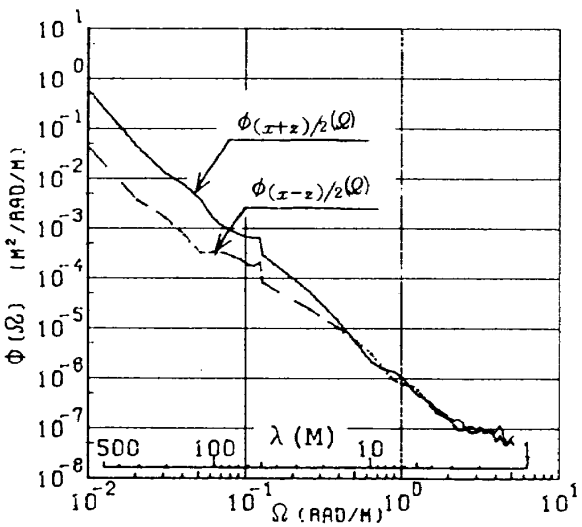
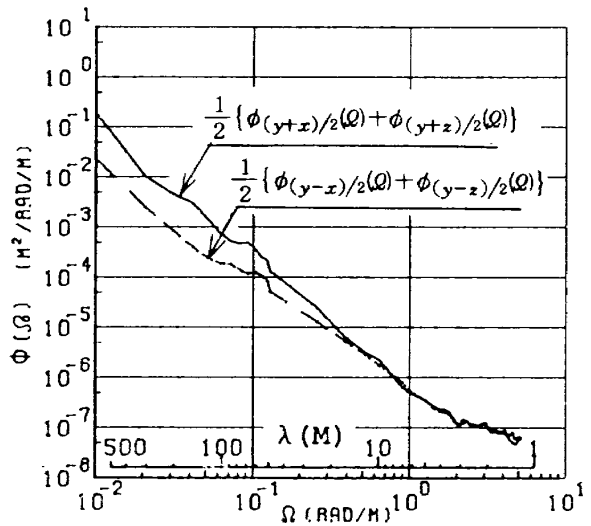
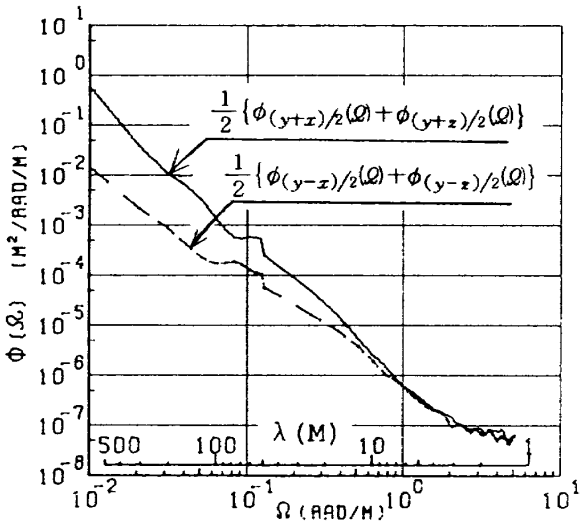
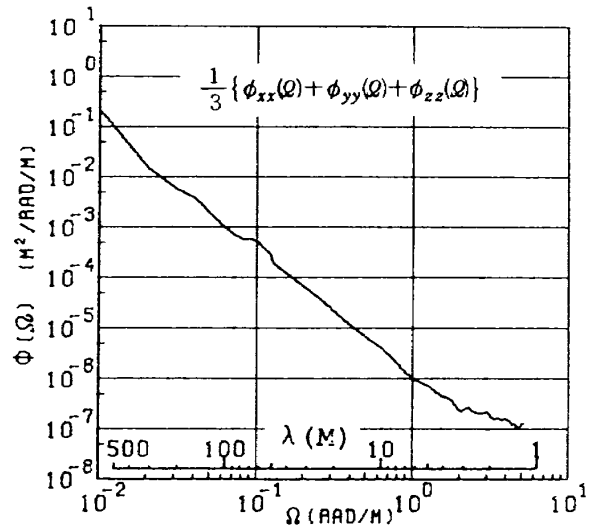
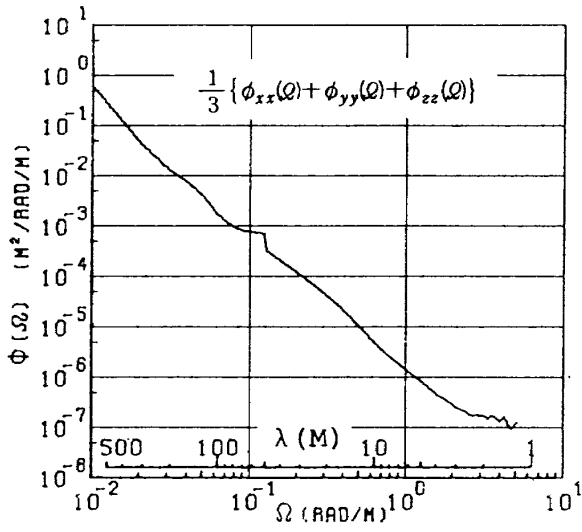
(2) 滑走路 B

付録2 PSDの推定結果



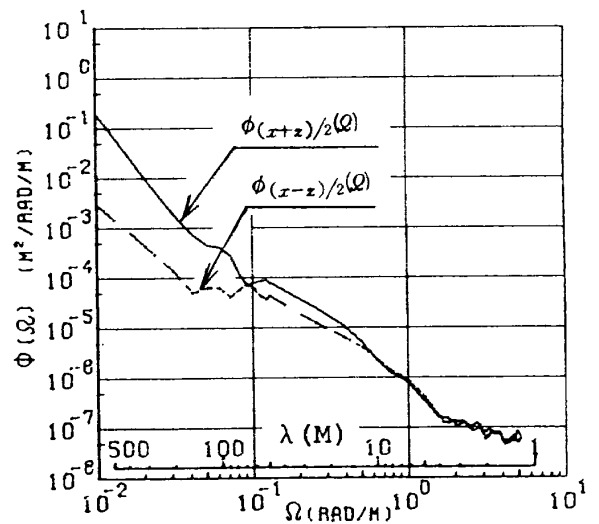
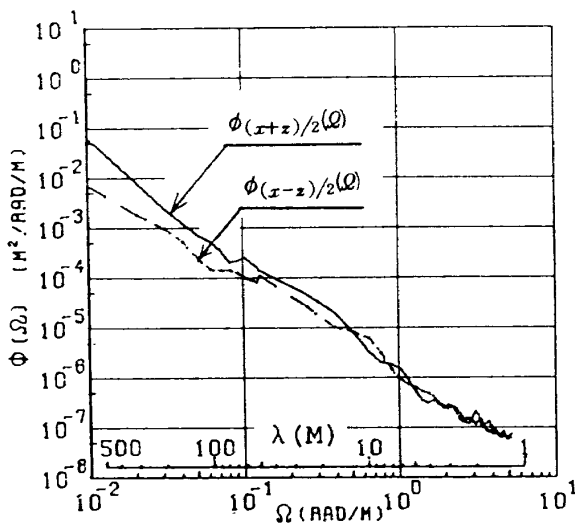
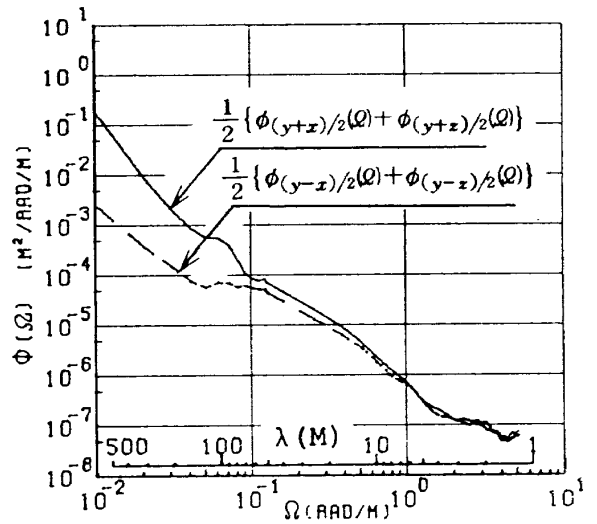
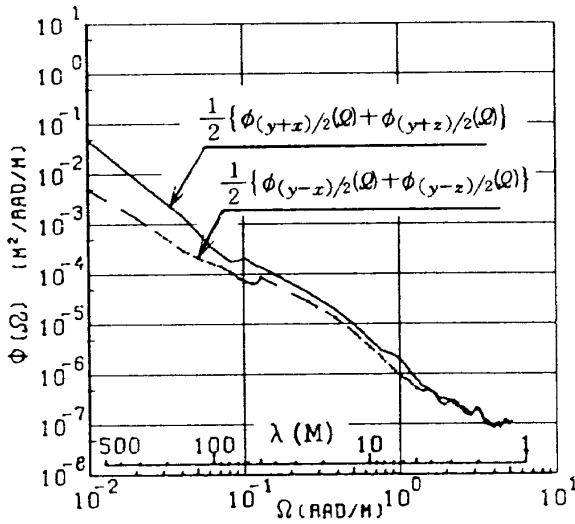
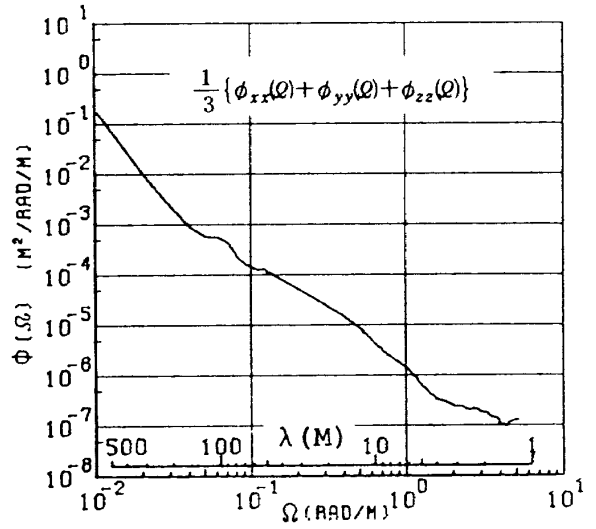
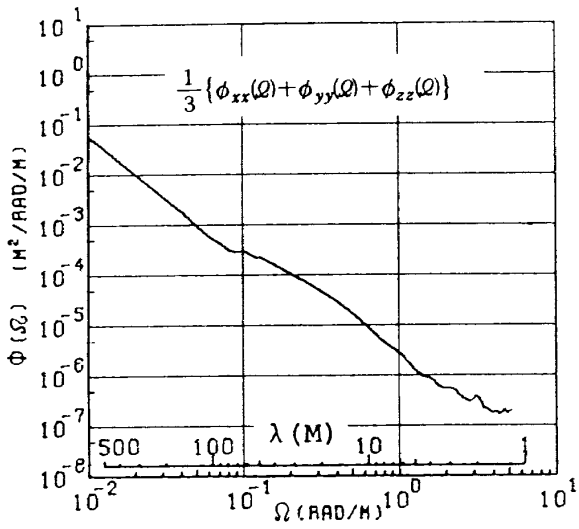
(3) 滑走路 C

(4) 滑走路 D



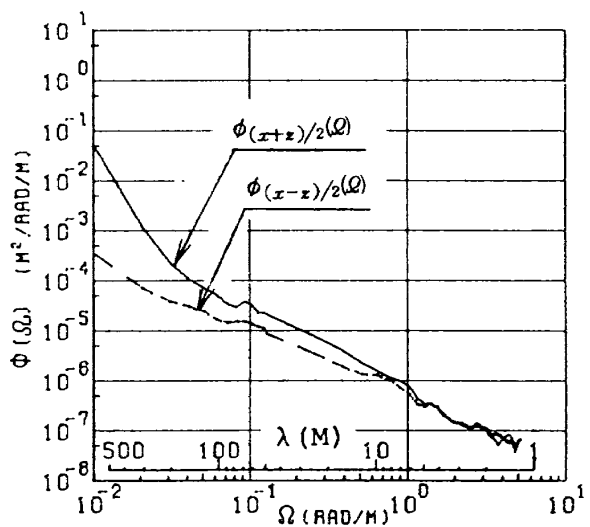
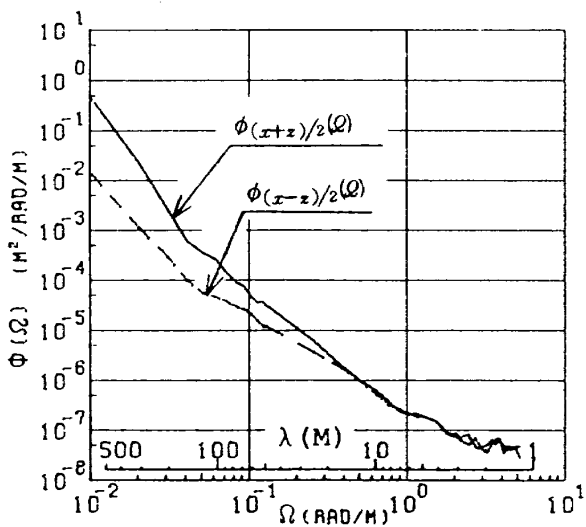
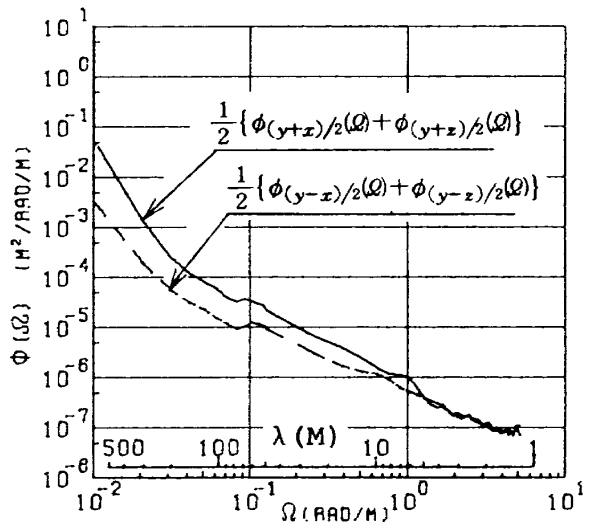
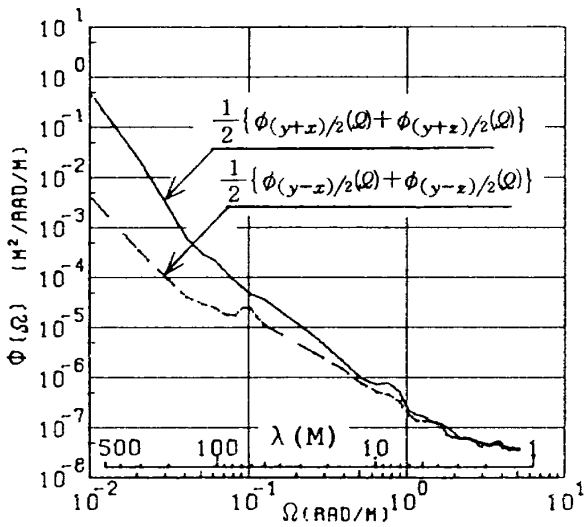
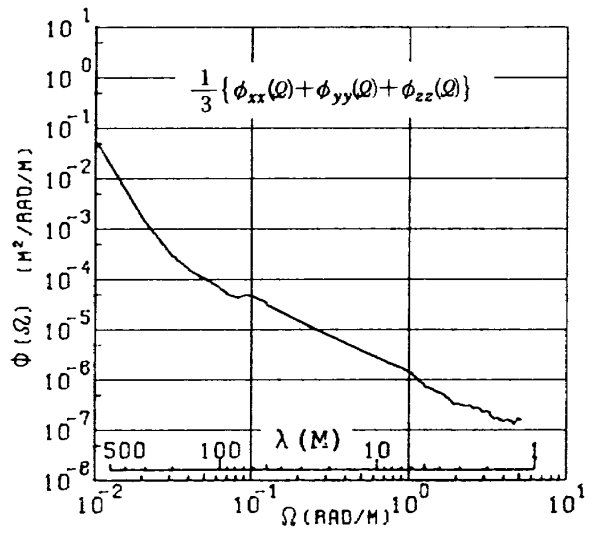
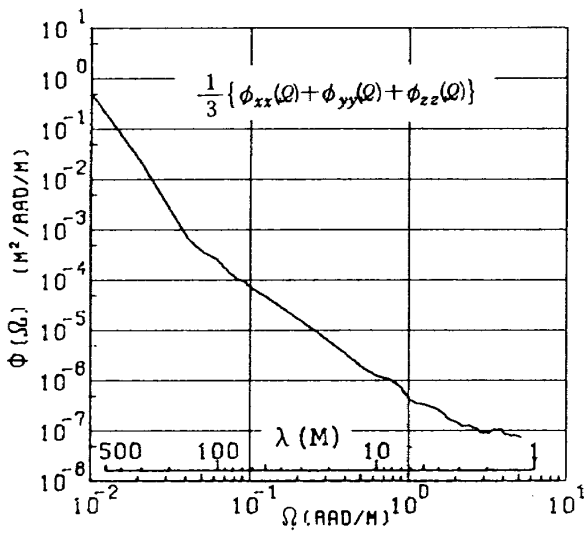
(5) 滑走路 E

(6) 滑走路 F



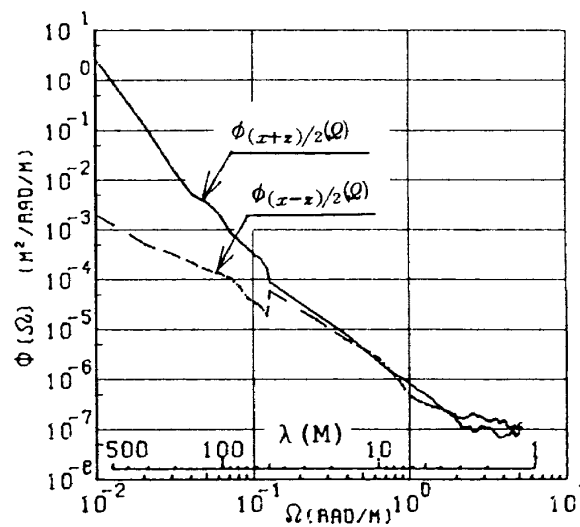
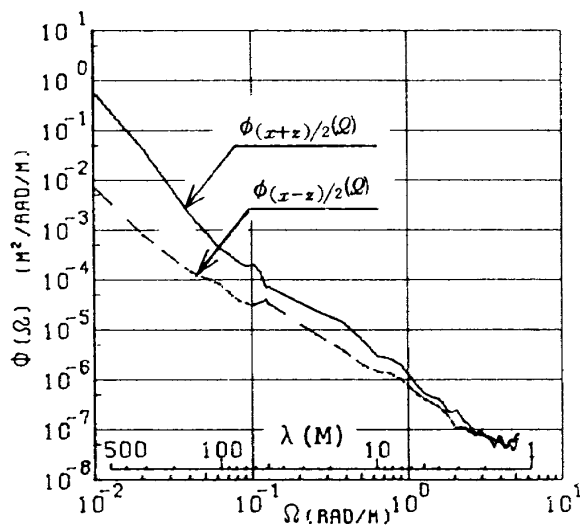
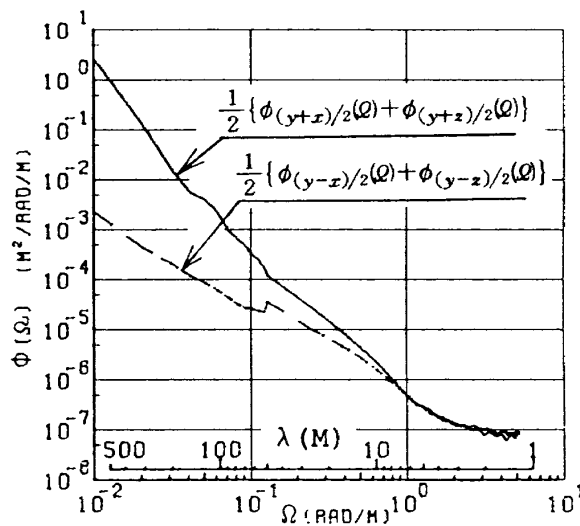
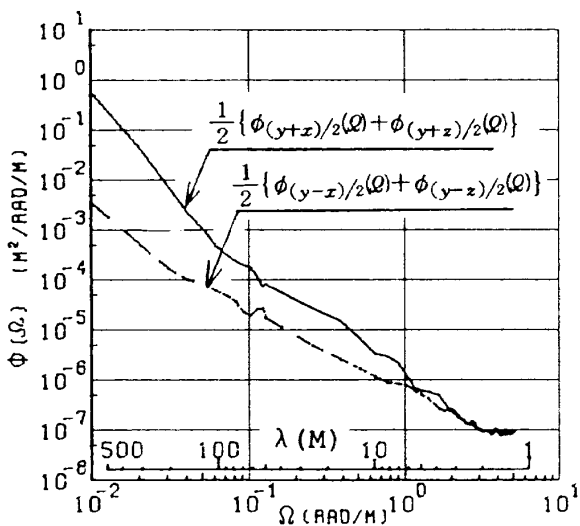
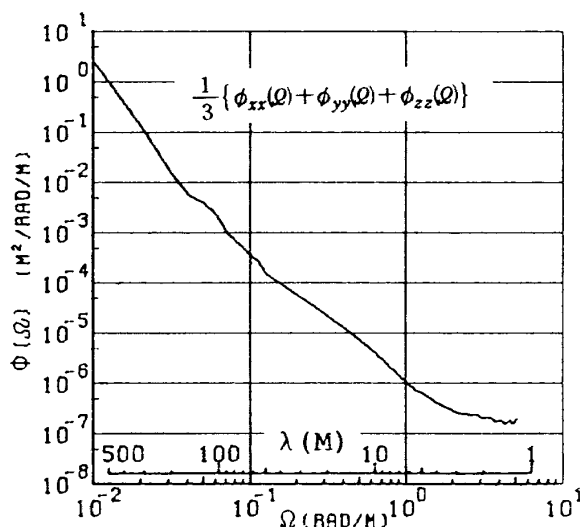
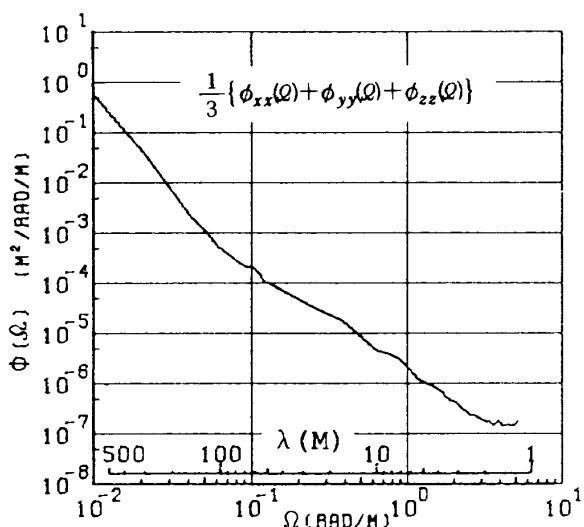
(7) 滑走路 G

(8) 滑走路 H



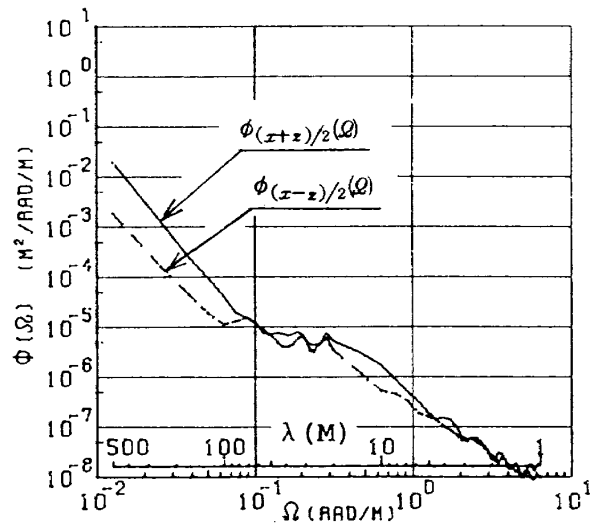
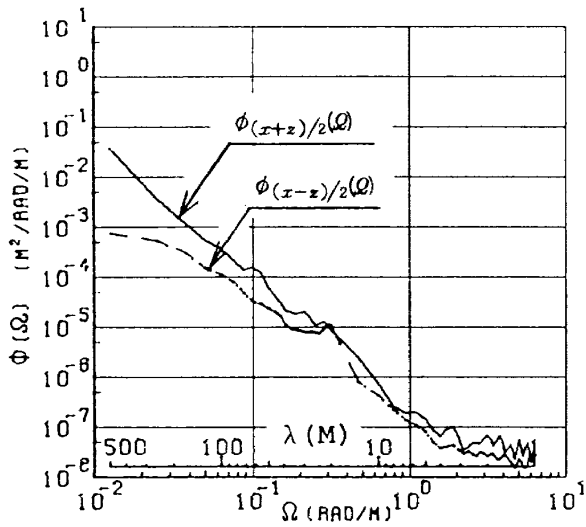
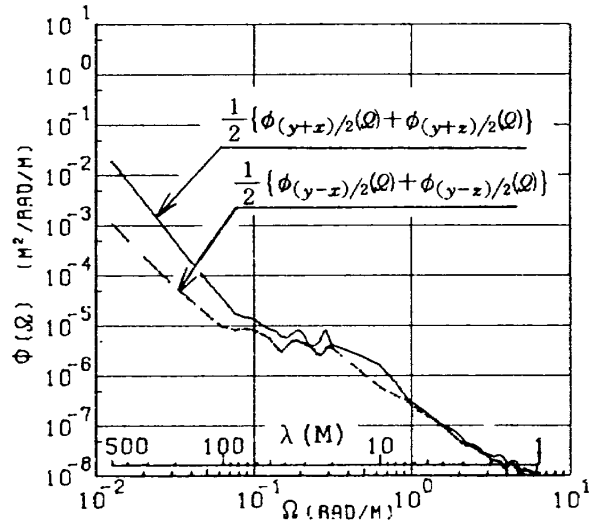
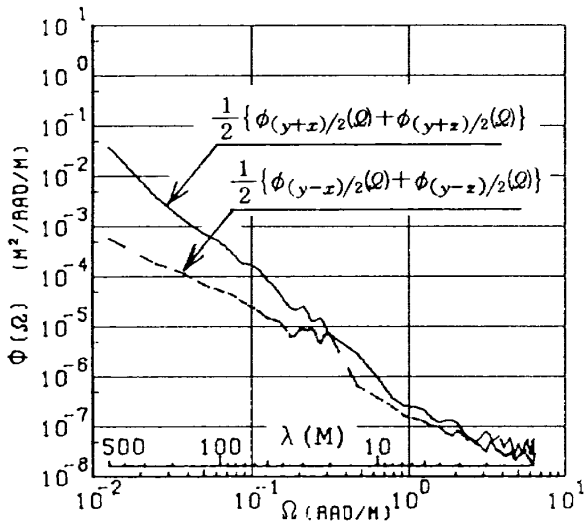
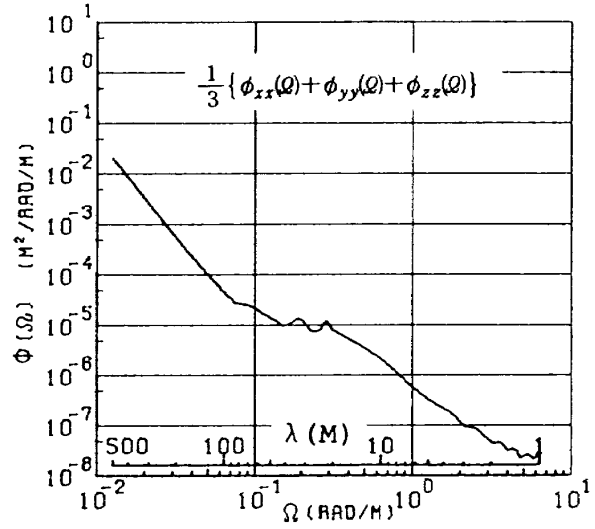
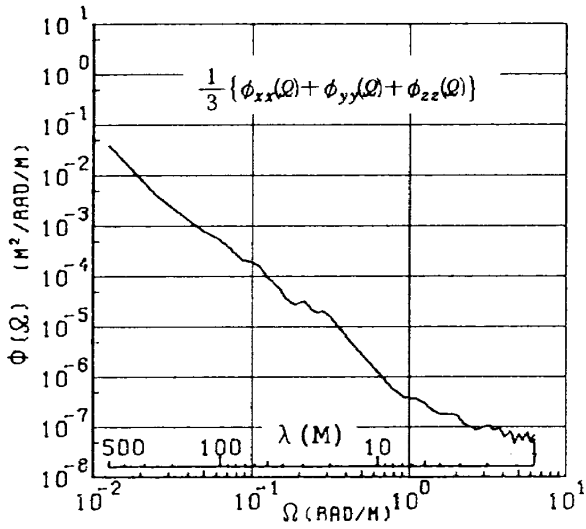
(9) 滑走路 I

(10) 滑走路 J



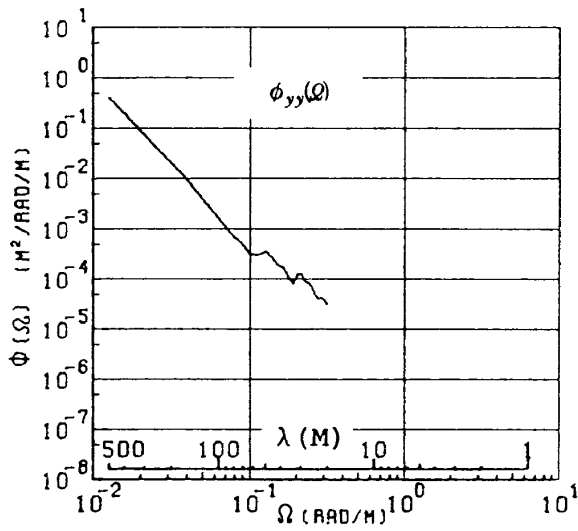
(11) 滑走路 K

(12) 滑走路 L

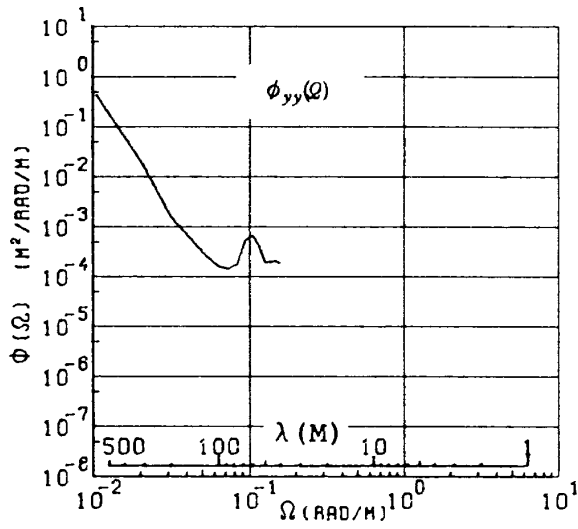


(13) 滑走路 M1

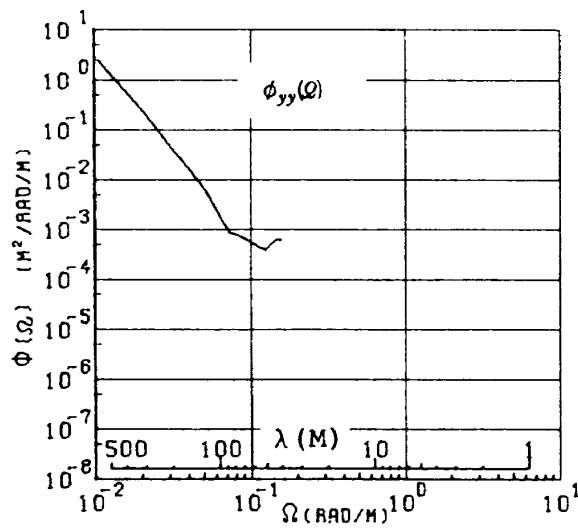
(14) 滑走路 M2



(15) 滑走路 N



(16) 滑走路 0



(17) 誘導路 P

航空宇宙技術研究所報告1037号

平成元年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊦182

印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17

Printed in Japan