

空港舗装の設計・維持管理手法の 高度化に関する研究

坪川 将丈

1

背景・目的

設計

- ・経験的設計法から理論的設計法へ
- ・信頼性の高い設計法へ
- ・要求性能に対する照査手法の整備
- ・合理的な補修設計法の構築

施工

- ・迅速, 安価な施工方法の開発
- ・施工計画立案のためのツール整備

判定

- ・経験的判定から理論的判定へ
- ・要求性能に応じた管理基準の整備

調査

- ・迅速, 安価な調査方法の開発
- ・破損に応じた調査メニューの整理

2

背景・目的

- ・経験的設計法から理論的設計法への移行
→**空港コンクリート舗装に発生する温度応力の定量化(第二章)**
- ・舗装の損傷の迅速且つ定量的な調査手法の開発
→**熱赤外線による空港舗装層間剥離の検出手法(第三章)**
- ・経験的管理基準から「要求性能を考慮した管理基準」への移行
→**走行時の航空機の挙動を考慮した空港舗装平坦性
管理基準(第四章)**

3

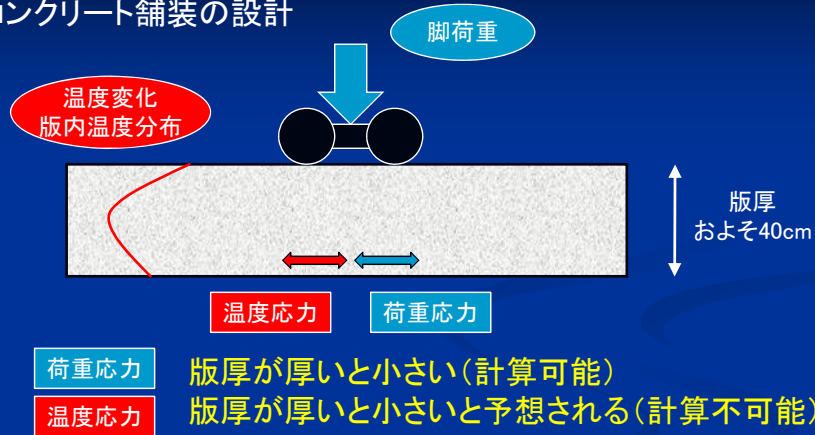
第二章

空港コンクリート舗装に発生する温度応力の 定量化に関する検討

4

背景・目的

空港コンクリート舗装の設計



コンクリート舗装の設計とは、
版下面に発生する応力<曲げ強度であるために
必要な版厚を決めること。

5

背景・目的

経験的設計法

設計思想

$$\text{荷重応力} + \text{温度応力} \leq \text{コンクリートの曲げ強度 (通常 } 5\text{N/mm}^2 \text{)}$$

実態

$$\text{荷重応力} \leq \frac{\text{コンクリートの曲げ強度 (通常 } 5\text{N/mm}^2 \text{)}}{\text{安全率 } 1.7 \sim 2.2}$$

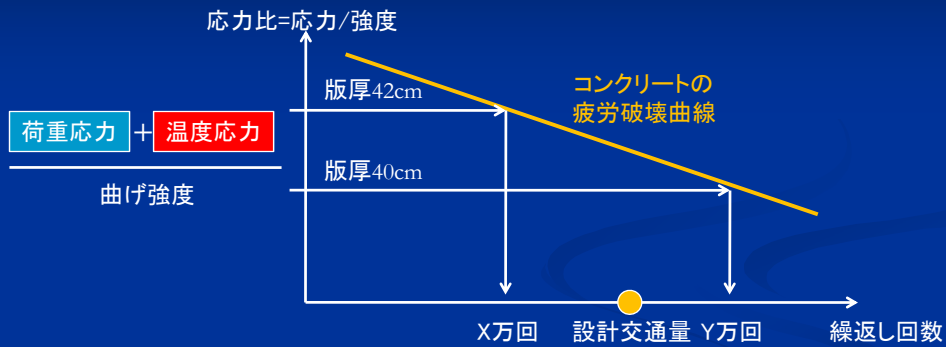
← 経験的(米国PCA)

- ・温度応力の算定ができない。
- ・設計基準曲げ強度を安全率で割った強度に対し荷重応力が上回らないように設計。

6

背景・目的

理論的設計法(平成20年度 空港舗装設計要領から)



- ・荷重応力, 温度応力, 疲労破壊曲線から疲労寿命を算出
- ・疲労寿命と設計交通量の比較から, 版厚を決定.



温度応力の定量的算出が必要

7

温度応力とは

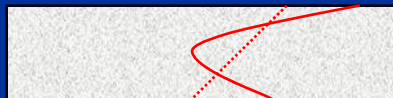
温度変化による膨張・収縮・反り変形が拘束されることにより発生

深さ方向温度分布が線形の場合(曲げ拘束応力のみ)



$$\sigma = 1.0 \times \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)}$$

深さ方向温度分布が非線形の場合(曲げ拘束応力+内部拘束応力)



$$\sigma = 0.7 \times \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)}$$

(岩間, 1964)

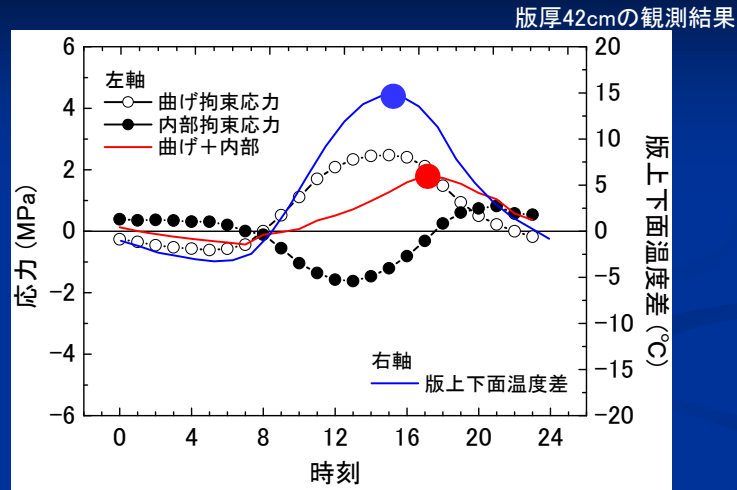
内部拘束応力は曲げ拘束応力の概ね0.3倍



道路コンクリート舗装の温度応力式の係数を0.7(岩間, 1964)

8

温度応力の日変動(長期観測結果)

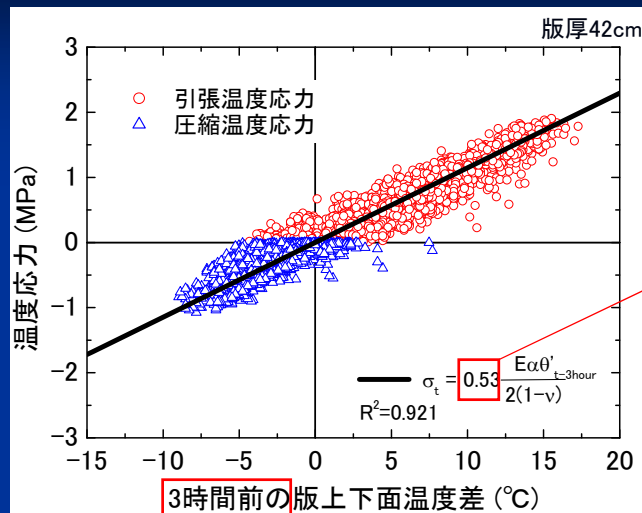


版上下面温度差の最大値
 温度応力の最大値



概ね3時間の時間遅れ

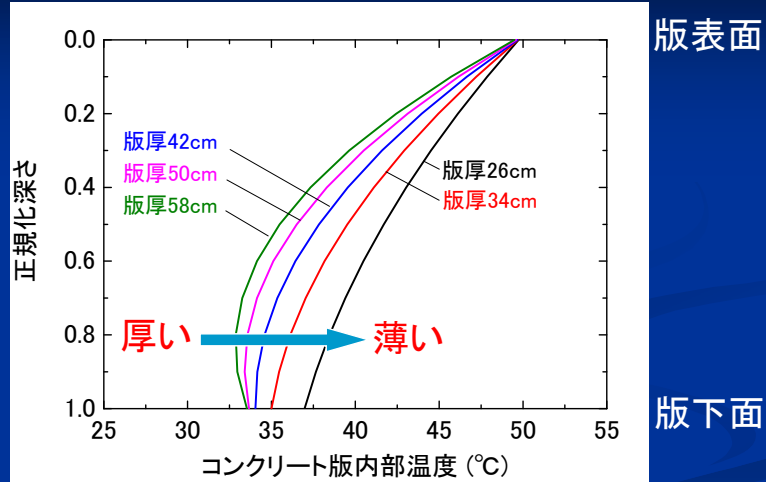
毎時刻の温度応力と版温度差の相関



岩間の研究
 20~25cmでは
 「0.7」

ある時刻の温度応力は「3時間前の版上下面温度差」と
 「提案式」を用いることで推定することが可能。

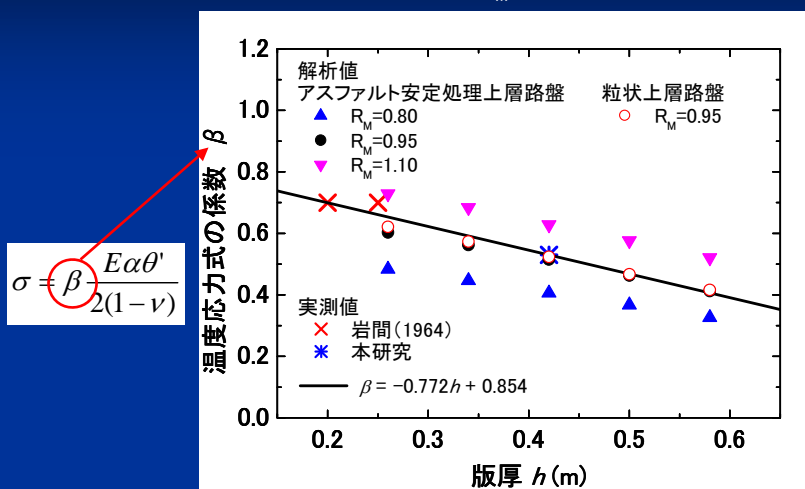
版内部の温度分布(有限要素解析)



版が厚くなるほど、深さ方向の温度分布は非線形
 →版が厚くなると、温度応力式の係数は減少? 11

温度応力と版厚の関係

※長期観測結果を基に、曲げ拘束度 R_M を3種類仮定して温度応力を算出



- ・版が厚くなるほど、温度応力式の係数は小さい
- ・路盤材料種別の影響は小さい

版厚試算結果

以下の対象機種と交通量等を仮定し、版厚を試算
(交通量は10年間の離陸及び着陸それぞれの回数)

B747-400(国際線仕様)	10,000回
B747-400(国内線仕様)	80,000回
DC-10	23,000回
A300-B4	50,000回
A320	35,000回
DC-9	60,000回

・経験的設計法 42cm
(荷重応力と安全率から算出)

・理論的設計法 37cm
(荷重応力, 温度応力, 疲労破壊曲線(破壊確率1%)から算出)

13

第二章まとめ

空港コンクリート版の温度応力の傾向

- ・版が厚いほど、温度分布の非線形性に起因する内部拘束応力は曲げ拘束応力に対して大きくなる。
- ・「3時間前の版上下面温度差」と「提案式」を用いることで、温度応力を精度良く推定できる。
- ・空港コンクリート舗装の上下面温度差の実測頻度分布を提示

空港コンクリート舗装の温度応力算出方法

- ・版厚を考慮可能な次式を開発

$$\sigma = \beta \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)}$$

$$\beta: -0.772h+0.854$$

14

第三章

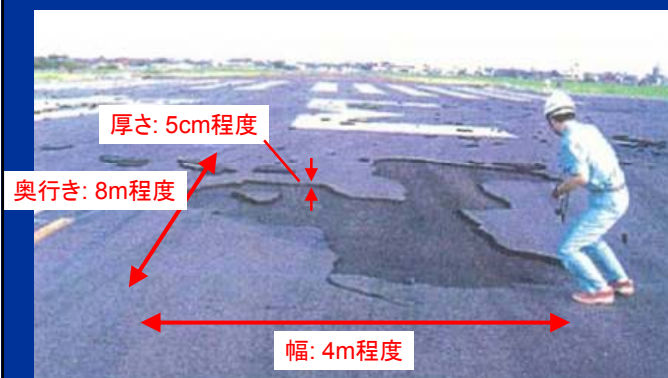
熱赤外線画像による空港舗装層間剥離の 検出手法に関する検討

15

背景・目的

空港アスファルト舗装に発生する層間剥離

- ・2000年7月, 名古屋空港滑走路で層間剥離→ブリストリングに起因する破損発生.
- ・表基層の界面に発生するため, 航空機荷重による水平荷重で
大規模な破損が生じる危険がある.
- ・他空港のアスファルト舗装でも存在が確認されている.



2000年7月
名古屋空港での破損

16

背景・目的

現行の調査方法

- ・打音調査 — 舗装表面をハンマーで叩き、異音箇所を特定
- ・「点」での調査であり、面的に網羅することが困難。
- ・異音を定量的に処理するのが困難(技術者による)。



滑走路における打音調査の様子

面的・定量的に剥離箇所を検出する調査方法が必要

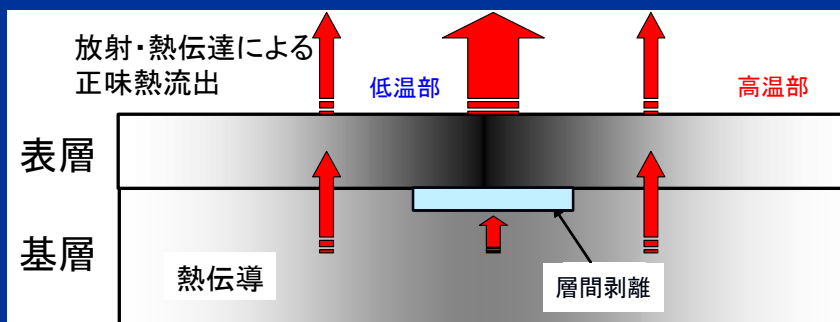
17

熱赤外線法による検出原理

剥離部の空気層により断熱されるため、
剥離直上部は「熱しやすく冷めやすい」状態

- ・昼間(温度上昇期)
- ・夜間(温度下降期)

剥離部温度 > 健全部温度
剥離部温度 < 健全部温度



夜間の舗装内温度分布のイメージ(黒色:低温部, 白色:高温部)

18

適用性試験

- ・那覇空港(2005年10月)及び新潟空港(2006年9月)で実施
- ・10m×10mの範囲の打音調査を実施
- ・高所作業車からの静止画撮影, 走行作業車からの動画撮影を実施
- ・コア採取による剥離の有無, 剥離深さを確認



静止画撮影状況



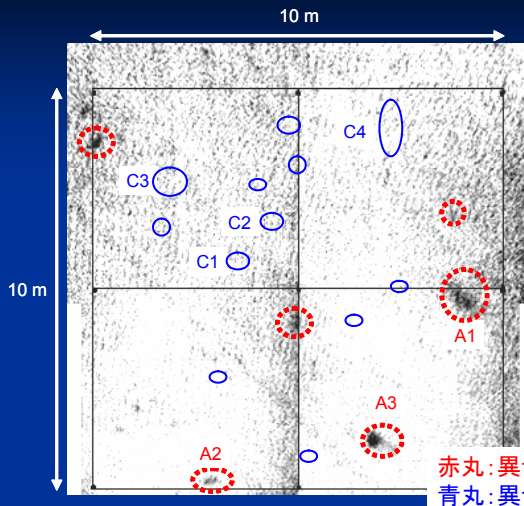
動画撮影状況



赤外線カメラ

19

適用性試験結果(那覇空港滑走路)



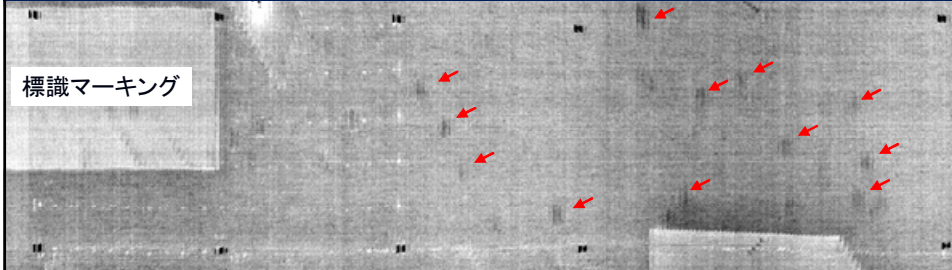
地点名	熱赤外線	打音	コア採取による剥離深さ
A1	低温部	異音	65 mm
A2	低温部	異音	65 mm
A3	低温部	異音	50 mm
C1	異常なし	異音	65 mm
C2	異常なし	異音	68 mm
C3	異常なし	異音	60 mm
C4	異常なし	異音	45 mm

赤丸: 異音 & 低温
 青丸: 異音のみ

全ての層間剥離は検出できないが, 層間剥離の半数程度を判定可能
 →一次調査として赤外線, 二次調査として打音調査

20

動画による撮影結果



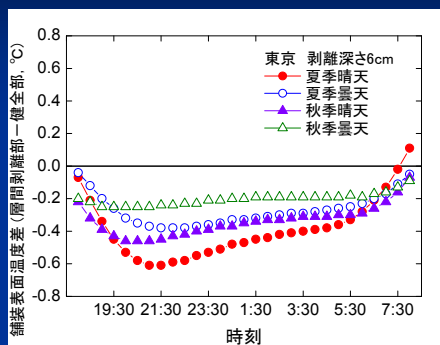
撮影条件

走行速度 時速10km
 撮影高さ 3.1m
 フレーム数 30フレーム/秒

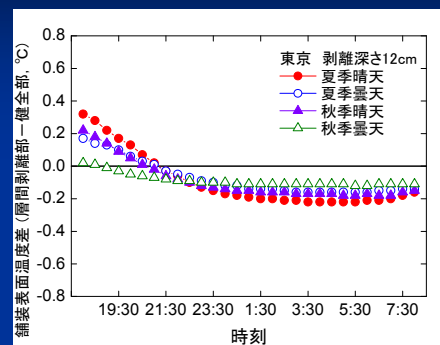
時速10km程度であれば、動画による判定も可能

21

天候・季節・剥離深さの影響(温度解析)



深さ6cm



深さ12cm

層間剥離による発生温度差

- ・天候 晴天 > 曇天
- ・季節 夏季 > 秋季
- ・剥離深さ 6cm > 12cm

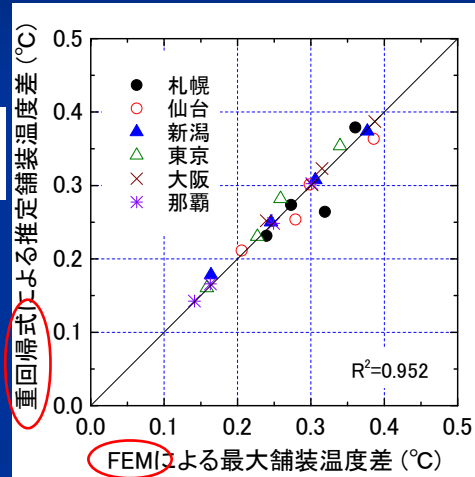
22

重回帰分析結果

各都市の気象条件から解析した
 最大温度差を目的変数として重回帰分析を実施

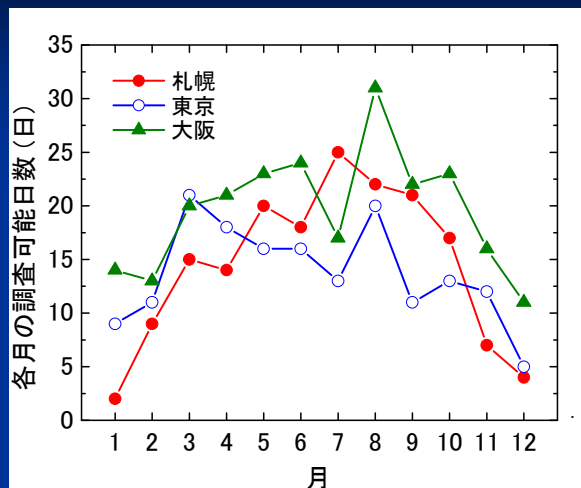
$$\Delta T_{pav} = 0.01335\Delta T_{air} + 0.02944Q - 0.01743v + 0.12282$$

- ΔT_{pav} 最大舗装表面温度差(°C)
- ΔT_{air} 一日の気温差(°C)
- Q 日中の積算日射量(kW・h/m²)
- v 一日の平均風速(m/s)
- (層間剥離深さ8cmの場合)



23

調査可能日数の検討



比較的高緯度の空港においても、春から秋にかけて適用可能

24

第三章まとめ

適用性試験

- ・熱赤外線画像により, 半数程度の剥離検出が可能.
- ・10km/h程度の走行撮影による動画でも検出可能.

適用可能条件の検討

- ・層間剥離の位置が浅い場合や, 昼夜の気温差の大きい晴天時に舗装温度差は大きくなる.
- ・気温差, 積算日射量, 平均風速から, 層間剥離に起因する温度差を推定することが可能.
- ・比較的高緯度の空港においても, 春から秋にかけて適用可能.

25

第四章

走行時の航空機の挙動を考慮した 空港舗装平坦性管理基準に関する検討

26

背景・目的

路面性状調査

舗装補修指数PRI (Pavement Rehabilitation Index)
アスファルト:ひび割れ, わだち掘れ, 平坦性
コンクリート:ひび割れ, 目地部の破損, 段差
3年に一度調査

アスファルト舗装のPRI算定式

$$PRI = 10 - 0.450 CR - 0.0511 RD - 0.655 SV$$

CR : ひび割れ率 (%)
RD : わだち掘れ (mm)
SV : 平坦性 σ (mm)

主観的評価(舗装技術者へのアンケート結果)と
客観的評価(上記三項目の測定)を数量化理論により解析し,
PRI式及び目標数値を決定(福手, 1982)

27

背景・目的

現行の管理基準の問題点

PRIの各指標の限界値は
空港舗装に必要な性能を考慮した限界値となっていない。

研究の目的

操縦安全性・走行快適性を考慮した平坦性管理基準の策定

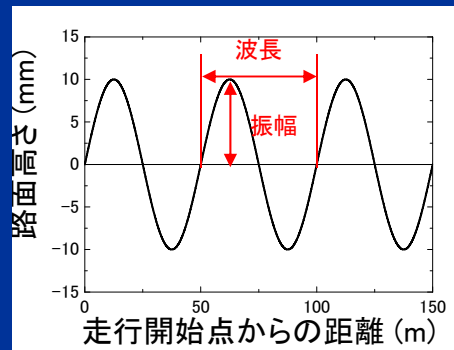
研究の手順

1. 航空機応答シミュレーション(大型機/小型機)
2. 鉛直加速度を元に路面の波長を考慮した凹凸管理基準の策定
(滑走路/誘導路)
3. 実際の路面プロファイルを用いた凹凸管理基準の妥当性の確認

28

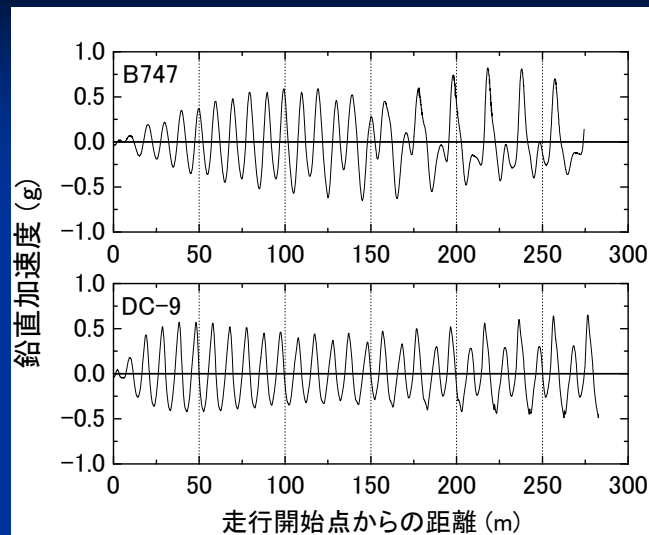
誘導路走行時の航空機の応答

- ・縦断プロファイル
 - ・振幅
 - ・波長
 - ・航空機種
 - ・走行速度
- 連続サイン波形
2~10mm
1~50m
B747-400(大型機), DC-9-40(小型機)
15, 30, 45km/h



29

誘導路走行時の鉛直加速度

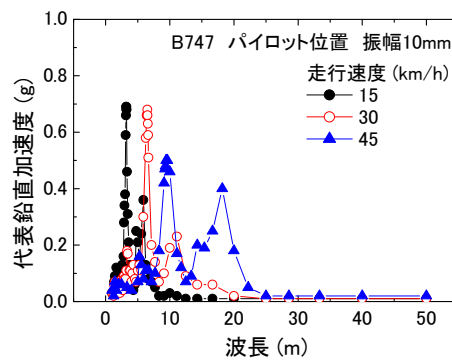
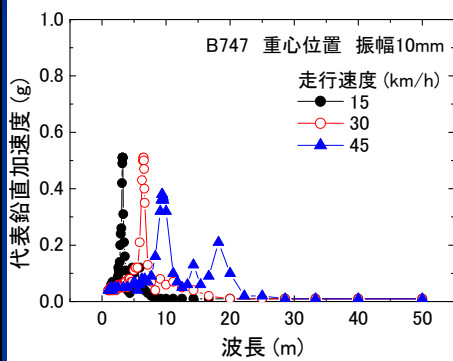


大型機と小型機では、発生する鉛直加速度が異なる

30

路面の波長の影響

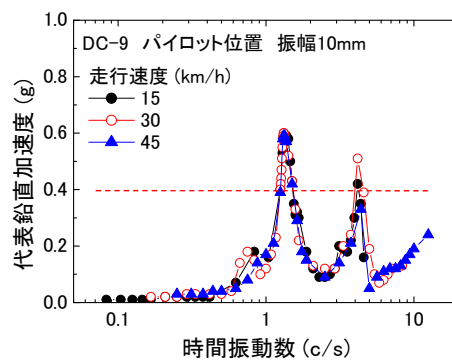
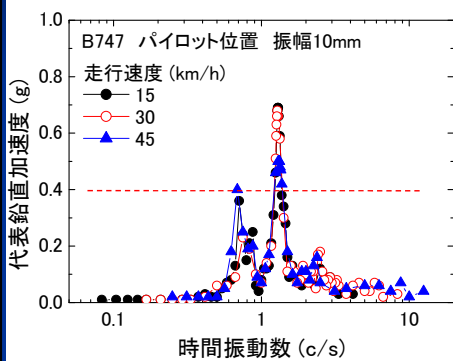
B747, 振幅10mmの場合



- ・代表鉛直加速度
- ・卓越する波長

パイロット位置 > 重心位置
 走行速度により異なるが...

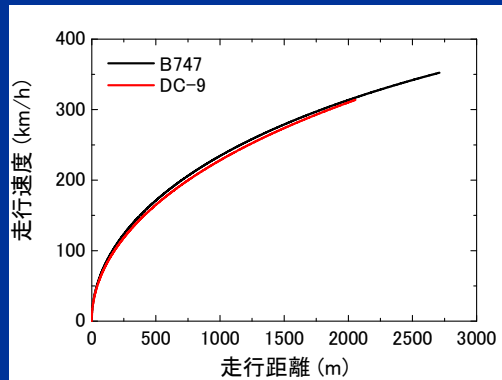
時間振動数の影響



- ・時間振動数 = 走行速度 / 路面波長
- ・速度に関わらず, 特定の時間振動数で加速度が卓越

滑走路走行時の航空機の応答

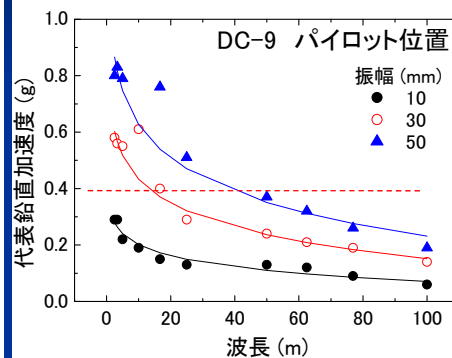
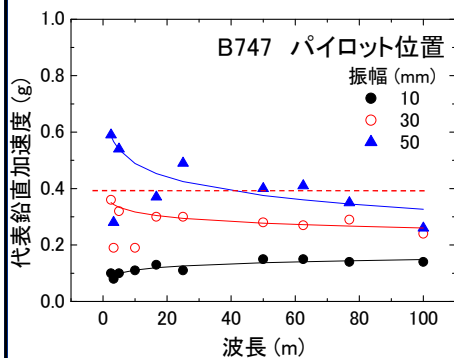
- ・縦断プロファイル 連続サイン波形
- ・振幅 10, 30, 50mm
- ・波長 2.5~100m
- ・航空機種 B747-400(大型機), DC-9-40(小型機)
- ・走行速度



33

路面の波長, 航空機種の影響

パイロット位置の加速度

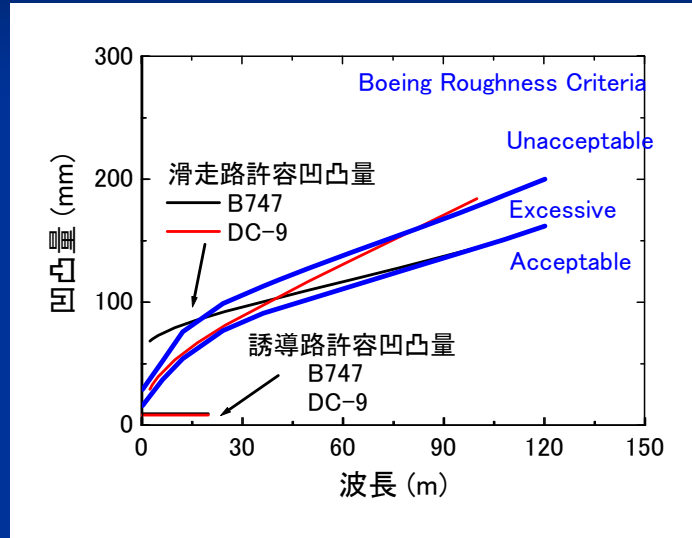


- ・代表鉛直加速度は振幅に比例
- ・短波長路面ほど代表鉛直加速度大
- ・短波長成分—DC-9大, 長波長成分—B747大
 →ホイールベース(前脚と主脚の長さ)が影響か

34

平坦性基準

許容凹凸量 滑走路, 誘導路のシミュレーション結果から,
代表鉛直加速度が $\pm 0.4g$ 以下となる凹凸量を設定



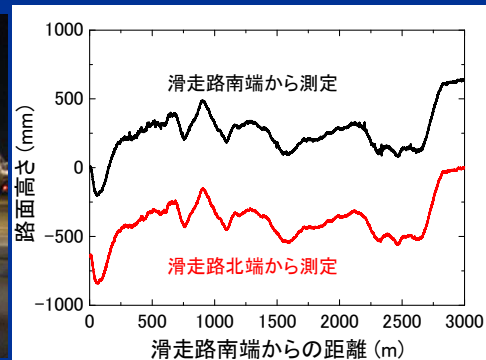
35

平坦性基準の妥当性の検証

- ・東京国際空港のC滑走路において縦断プロファイルを測定
- ・測定月 2001年2月, 2001年12月, 2003年1月

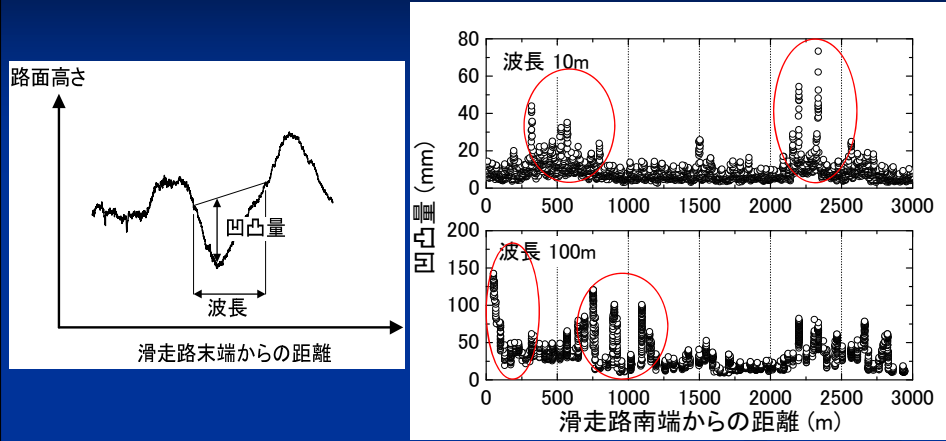


路面性状測定車
(絶対凹凸計測可能タイプ)



36

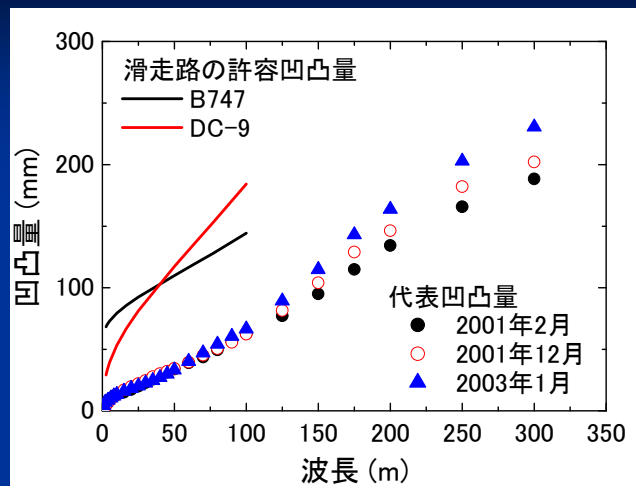
滑走路の凹凸量の算出



路面の波長に応じた凹凸量は、滑走路の位置により異なる

37

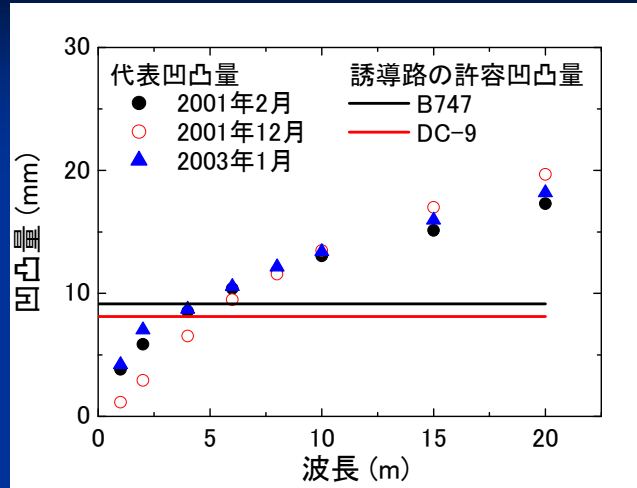
滑走路の代表凹凸量と許容凹凸量



現在の滑走路の路面平坦性は許容範囲内
→既往論文におけるパイロットアンケート結果と一致

38

誘導路の代表凹凸量と許容凹凸量



シミュレーション結果を元にした許容凹凸量は厳しすぎる
→サイン波路面と一定速度走行による共振の可能性

39

第四章まとめ

- ・誘導路走行時の特徴
走行速度によらず, 特定の時間振動数で鉛直加速度最大
- ・滑走路走行時の特徴
B747-長波長, DC-9-短波長で代表鉛直加速度大
- ・許容凹凸量による平坦性評価基準
誘導路走行時 実際の路面凹凸と比べて厳しすぎる
滑走路走行時 実際の路面凹凸を概ね評価可能
ボーイングの基準とほぼ一致

40

結論

- ・版厚を考慮した温度応力式を用いることで、
空港コンクリート舗装の理論的設計法が可能となり、
既存舗装の残存耐力を考慮する等、合理的な設計が可能となる。
- ・熱赤外線画像による探査手法を用いることで、
層間剥離の位置・面積を効率的に把握することが可能となり、
維持管理の省力化が可能となる。
- ・航空機の応答を考慮した凹凸管理基準を用いることで、
空港を利用する航空機に大きく影響を及ぼす箇所を特定し、
各々の空港に応じた維持管理を行うことが可能となる。



**空港舗装の設計・維持管理手法の
高度化を図ることが可能となった**