

本報告は、坪川将丈の学位論文(北海道大学 第6701号, 平成21年12月25日授与)を国土技術政策総合研究所研究報告として発行するものである。

1. 研究の背景及び目的

1.1 研究の背景

わが国の社会・経済活動において、航空輸送は極めて重要な輸送手段である。航空需要は年々増加しており、それに伴い離着陸回数の増加、航空機の大型化が進んでいる。わが国の空港整備は、大都市圏における拠点空港については増加し続ける航空需要に対応した整備が今後も必要であるが、一般空港についてはほぼ概成したといえる。一部の空港は建設から既に数十年が経過しており、施設の老朽化に伴う破損が多く発生する傾向にある。空港の各種施設の中で、空港基本施設といわれる滑走路、誘導路、エプロン等の空港舗装についても例外ではなく、老朽化に対応するための維持・補修作業が非常に重要になっている。しかしながら、空港舗装の設計基準や維持管理基準では、経験を元に決定されている項目も多く、限られた予算の中で効率的な維持・補修を行うためには、設計手法・調査手法・管理基準の高度化が必要である。

本研究では、上記を背景として、空港舗装の設計手法、調査手法、管理基準の高度化を目的とし、

- ・空港コンクリート舗装に発生する温度応力の定量化
- ・熱赤外線画像による空港アスファルト舗装層間剥離の検出手法
- ・走行時の航空機の挙動を考慮した空港舗装路面管理基準

を明らかにすべく、研究を実施した。

1.2 既往の研究及び研究の目的

(1) 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

空港コンクリート舗装の設計で考慮すべき応力としては、航空機荷重により発生する荷重応力と、コンクリート版の温度変化による自由な変形が版の自重や版と路盤との摩擦により拘束されることで発生する温度応力がある。我が国の現行の空港コンクリート舗装の版厚設計法では、荷重応力の算出については Westergaard の中央部載荷公式¹⁾を元にした影響図²⁾を福手が電算化したプログラム³⁾が使用されている。一方、温度応力については、米国のポルトランドセメント協会(PCA)の研究⁴⁾において、コンクリート版厚を最も影響の大きい交通荷重に

よる荷重応力に対して適切な安全率で設計すれば、荷重応力以外の応力に対しても十分安全な範囲であることがいわれており、米国陸軍工兵隊の実験等⁵⁾から、コンクリートの設計基準曲げ強度を、表-1.1に示す設計反復作用回数に応じた安全率で割り、荷重応力がその強度を上回らないような版厚を算出している⁶⁾。

表-1.1 空港コンクリート舗装における安全率

設計反復作用回数	設計反復作用回数区分	安全率
3,000 回	M	1.7
5,000～20,000 回	N	2.0
40,000 回	O	2.2

表-1.1の安全率については、平成2年の空港コンクリート舗装構造設計要領の改訂において、設計反復作用回数の区分として新たにO区分(設計反復作用回数40,000回)を追加した際に、その安全率としては、M区分の1.7、N区分の2.0から外挿により2.2を採用した経緯がある。しかしながら、昨今の技術基準の性能規定化の流れ及び既存の空港コンクリート舗装を有効に活用し効率的な補修を実施する必要性を考えると、脚荷重によりコンクリート版下面に発生する荷重応力と、温度変化によりコンクリート版下面に発生する温度応力をそれぞれ算出し、これら応力の和と設計基準曲げ強度との比の合計から算出される疲労度により、コンクリート版に発生する疲労ひび割れの照査を行い、必要版厚を算定する必要がある。このためには、温度応力についても安全率を用いた方法で考慮するのではなく、定量的な算出手法により考慮する必要がある。

道路コンクリート舗装の設計では、岩間⁷⁾が厚さ20cmと25cmのコンクリート版の長期観測結果を元に提案した温度応力式が広く用いられている。岩間は、コンクリート版の温度とひずみの長期観測結果から、図-1.1、図-1.2に示すように、図解法によりコンペンセーションラインを引き、軸方向拘束応力(端部拘束による応力と版底面摩擦による応力)、曲げ拘束応力、内部拘束応力の各成分を算出し、その傾向を以下のように明らかにしている。

①軸方向拘束応力については、応力が0となる基準時刻を何時にとるかが問題であるが、いずれにせよ、比較的大きい圧縮応力となることが多く、また引張応力となる場合は小さいことから、この応力は設計上無視しても一般的に安全側となる。

②曲げ拘束応力は13時頃に最大の引張応力となり、早朝5時頃に圧縮最大となる。また、曲げ拘束応力はコン

クリート版が厚いほど大きいが、厚さには比例せず、厚いほど単位厚さあたりの応力が小さくなる。

- ③内部拘束応力は、曲げ拘束応力が引張応力となる時点では概ね圧縮応力であり、その大きさは曲げ拘束応力の30%を超える日が少なくない。

以上の結論から、コンクリート版に発生する温度応力の算出には式(1-1)ならびに式(1-2)が用いられている⁷⁾。⁸⁾ また、上記の温度応力式を用いて温度応力を算出するために、表-1.2に示す版上下面の温度差頻度分布⁹⁾が、「版上下面温度差が正となる時間帯に占めるその温度差の発生頻度」、「版上下面温度差が負となる時間帯に占めるその温度差の発生頻度」の別に整理され提案されている。しかしながら、この温度応力算定式がどの程度の厚さのコンクリート版まで適用可能かは検証されていない。

自由縁部における温度応力式

$$\sigma = 0.35C_w\alpha E\theta' \quad \text{式(1-1)}$$

版中央部における温度応力式

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

ここに、

σ : 温度応力 (MPa)

C_w : そり拘束係数

α : コンクリートの熱膨張率 (1/°C)

E : コンクリートの弾性係数 (MPa)

θ' : コンクリート版上下面の温度差 (°C)

ν : コンクリートのポアソン比

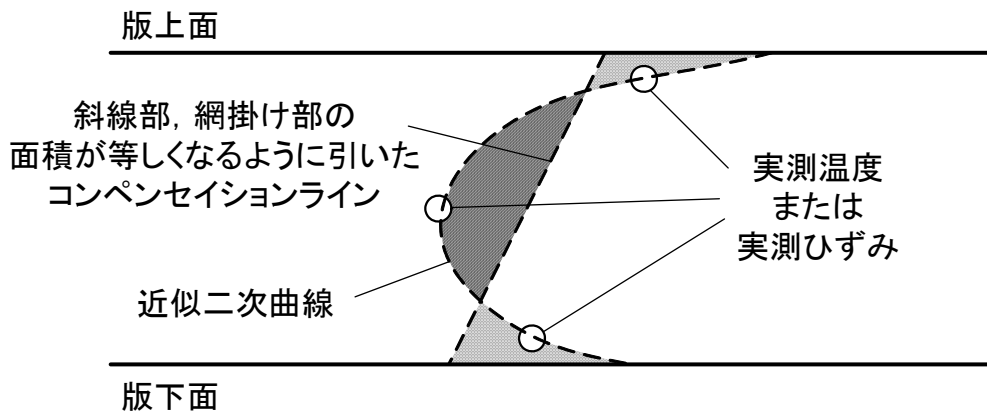


図-1.1 コンペンセーションライン

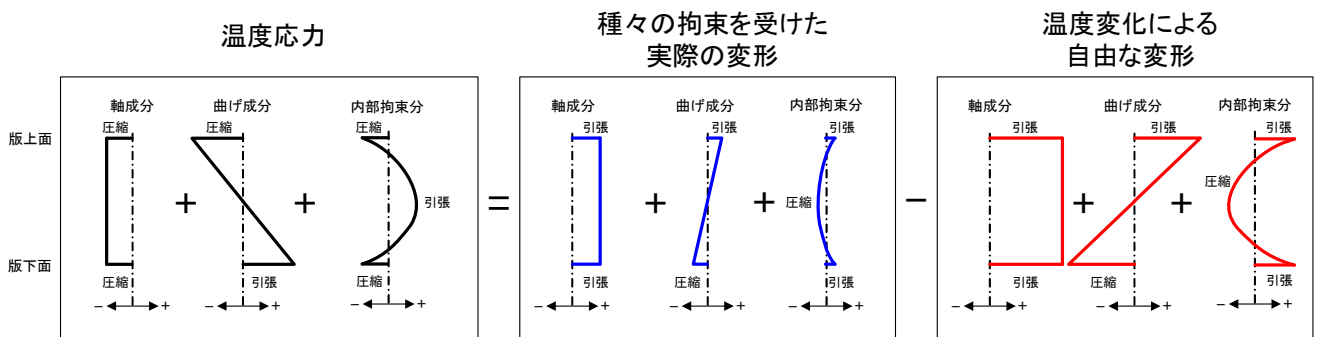


図-1.2 温度応力の各成分の概念図

表-1.2 版上下面の版内温度差とその発生頻度

版厚 cm 温度差℃	温度差の小さいところ						温度差の大きいところ						
	15	20	23	25	28	30	15	20	23	25	28	30	
19(18～19.9)	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.005	0.010	0.012	正対 のす 時 る 間 割 に 合
17(16～17.9)	0	0	0	0	0	0	0	0.005	0.015	0.018	0.018	0.020	
15(14～15.9)	0	0	0.001	0.002	0.004	0.007	0.002	0.020	0.028	0.032	0.037	0.038	
13(12～13.9)	0.004	0.007	0.012	0.016	0.021	0.025	0.015	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	
11(10～11.9)	0.020	0.028	0.032	0.037	0.045	0.053	0.040	0.060	0.050	0.050	0.045	0.045	
9(8～9.9)	0.050	0.060	0.075	0.085	0.080	0.080	0.070	0.070	0.075	0.080	0.080	0.080	
7(6～7.9)	0.100	0.110	0.110	0.110	0.110	0.115	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.105	
5(4～5.9)	0.135	0.140	0.150	0.155	0.150	0.140	0.120	0.120	0.125	0.125	0.125	0.125	
3(2～3.9)	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.210	0.200	0.195	0.190	0.190	0.190	0.185	
1(0～1.9)	0.500	0.460	0.420	0.390	0.380	0.370	0.450	0.390	0.375	0.360	0.355	0.350	
-1(-0.1～-2.0)	0.650	0.615	0.610	0.600	0.530	0.480	0.500	0.450	0.420	0.410	0.400	0.390	負対 のす 時 る 間 割 に 合
-3(-2.1～-4.0)	0.350	0.360	0.345	0.335	0.360	0.380	0.340	0.330	0.330	0.320	0.320	0.320	
-5(-4.1～-6.0)	0	0.025	0.044	0.063	0.100	0.120	0.150	0.200	0.220	0.220	0.225	0.230	
-7(-6.1～-8.0)	0	0	0.001	0.002	0.010	0.020	0	0.020	0.030	0.048	0.052	0.055	
-9(-8.1～-10.0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.003	0.005	

コンクリート舗装に発生する温度応力の算定法について検討した事例としては、西澤らによる研究がある。西澤ら¹⁰⁾は、岩間の温度応力算定式をプレキャストコンクリート版に適用する場合、目地間隔 5m 未満に対するそり拘束係数について、版厚 15cm のプレキャストコンクリート舗装に発生するひずみと温度分布の測定及び有限要素解析により検討している。その結果、版厚 15cm の場合は軸方向拘束応力と内部拘束応力が小さいことを明らかにしているが、版厚と温度応力の関係については触れられていない。また西澤ら¹¹⁾は、岩間の温度応力算定式を連続鉄筋コンクリート舗装へ適用する場合について、版厚 25cm の連続鉄筋コンクリート舗装に発生するひずみと温度分布の測定及び有限要素解析により検討している。その結果、内部拘束応力による温度応力の低減を定量的に明らかにしているが、版厚と温度応力の関係については触れられていない。

コンクリート舗装に発生する温度応力については、温度変化によるひずみは測定されていないものの、実測温

度分布と有限要素解析等を用い、解析的に検討された事例もある。Zhang¹²⁾らは、版厚 23cm のコンクリート版で測定した版厚方向の温度分布の非線形性を考慮し、有限要素解析により温度応力を検討した結果、版厚方向の温度分布を直線と仮定した場合に比べて温度応力が 30%程度低減することを明らかにしており、岩間が実験的に検討した結果とほぼ一致しているものの、版厚と温度応力の関係については検討されていない。

これらのことから、空港コンクリート舗装のように版厚が厚い場合の温度応力の定量化については、主に以下の点が課題である。

- ・版上下面の温度差発生頻度が道路コンクリート舗装と異なると考えられるが、実測例が乏しいこと。
- ・版が厚いことにより、版内温度分布の非線形性が顕著になり、温度応力が正（引張）となる時間帯では温度応力の一成分である負（圧縮）の内部拘束応力が大きくなると考えられるが、実測例がないこと。

- ・設計での実用性を考慮し、有限要素解析によらない温度応力算出法を確立する必要がある。また、版厚と温度応力の関係を考慮できる算出法である必要がある。

以上の背景から、コンクリート試験舗装の製作ならびに版の温度とひずみの長期観測を実施し、空港コンクリート舗装の設計に適用可能な温度応力式の提案を目的として研究を実施した。

(2) 熱赤外線画像による空港アスファルト舗装層間剥離の検出手法に関する検討

空港アスファルト舗装の表基層の層間において、層間剥離が発生した事例が見受けられる¹³⁾。層間剥離が発生している箇所では表基層間が付着していないことから、航空機が走行した際に写真-1.1のようなスリッページが発生する原因となる。このような層間剥離を検出する手法としては、ハンマーで舗装表面を打撃することにより異音部を検出する打音調査が広く用いられている。しかしながら、広大な面積の空港舗装を調査するには、膨大な時間を要すること、異音の検出に個人差があることなど困難な点が多いことから、滑走路や誘導路等の空港アスファルト舗装を面的に且つ定量的に調査する手法が必要である。

近年では、高架橋やトンネルなどのコンクリート構造物の空洞あるいは剥離の探査手法として、熱赤外線画像を用いた探査手法が用いられている。この手法は、図-1.3に示すように、外気温の変化や日射等により構造物表面温度が上昇する過程では、空洞や剥離のある場所では構造物表面から内部への熱の流れが遮断され、空洞や剥離の表面に熱エネルギーが多く蓄積される結果、周囲の健全な箇所に比べて構造物表面が高温となること、逆に構造物表面温度が下降する過程では、空洞や剥離の表面からの熱の流出が大きくなり、周囲の健全な箇所に比べて構造物表面が低温になることを利用した探査手法である。つまり、日中であれば、構造物表面の温度が周囲と比べて高い地点を、夜間であれば、構造物表面の温度が周囲と比べて低い地点を、赤外線サーモグラフィによる画像データから判定することにより、内部に生じた空洞や剥離を探査することができる。

長瀧ら¹⁴⁾は、外殻鋼管コンクリートによる供試体を用い、鋼管とコンクリートとの剥離を熱赤外線画像から推定する手法を室内実験により検討している。その結果、鋼管（厚さ4.5mm）とコンクリートとの間に生じる厚さ

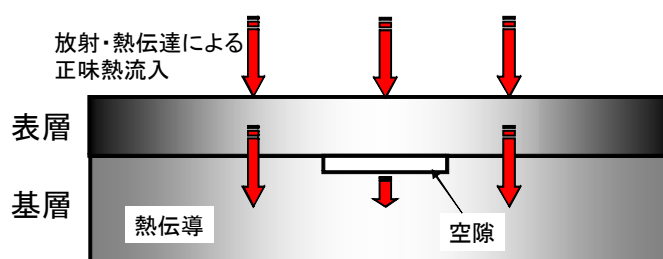
0.1mm程度の剥離を熱赤外線画像から診断できる可能性を示している。また三井ら¹⁵⁾は、コンクリートとFRPシート（厚さ0.1～0.2mm）間に生じる剥離を熱赤外線画像から推定する手法を、室内実験、屋外実験、有限要素解析により検討している。その結果、厚さ1mm程度の剥離を検出できることを明らかにしたほか、FRPシートの層数が多くなると、剥離部と健全部との表面温度差は小さくなる傾向を示している。また、長田ら¹⁶⁾は、厚さ5mm、表面からの深さ20mm程度の剥離を対象とし、剥離を有するコンクリート高架橋を対象にした現地観測データと構造物温度の時系列変化を推定する熱収支モデルを用いた数値解析結果から当該調査手法の適用性を検討している。その結果、日中を対象としたコンクリート構造物の調査可能条件としては、夏季（6～8月）以外、天候は晴れ、時間は10時から14時であることを明らかにしている。夏季を除外しているのは、日中の温度変化が少ないことにより、剥離部と健全部との温度差が明瞭にあらわれないことを理由としている。

しかしながら、この熱赤外線画像による探査手法を空港舗装の層間剥離探査に使用する場合、コンクリート構造物に生じている空洞や剥離と、今回対象とする空港アスファルト舗装の層間剥離では、層間剥離の大きさ、厚さや深さも異なることから、空港アスファルト舗装に対する当該調査手法の適用性を検討する必要がある。また空港の場合、空港の運用が終了する深夜から早朝までの間に調査を完了しなければならないため、熱赤外線画像による探査に最適と考えられる日中に調査を行うのは困難である。よって、夜間の実施を念頭において適用性を検討する必要があると考えられる。この場合、季節や天候によっては、層間剥離に起因して舗装表面に生じる温度差を検知することが困難な場合もあると考えられることから、当日の調査実施の可否を何らかの手法により事前に検討できることが望ましい。

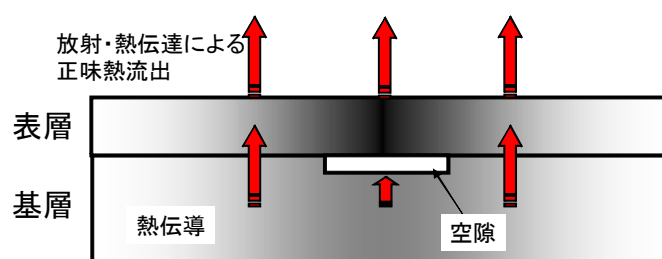
そこで本研究では、熱赤外線画像による空港アスファルト舗装層間剥離の探査手法について、実際の空港における適用性試験ならびに気象データを用いた熱収支解析により、その適用性を検討した。さらに、調査実施の可否の検討に必要な舗装表面温度差推定式および本手法を用いた調査に適した気象条件を検討した。



写真-1.1 2000年7月の名古屋空港滑走路の破損



(a) 剥離を有する舗装付近の昼間の伝熱イメージ



(b) 剥離を有する舗装付近の夜間の伝熱イメージ

図-1.3 熱赤外線法による空洞・剥離探査のイメージ（白色部：高温部，黒色部：低温部）

(3) 走行時の航空機の挙動を考慮した空港舗装路面管理基準に関する検討

空港基本施設である滑走路，誘導路，エプロン等の空港舗装は，日々の航空機の運航を支えるための基幹施設である．これらの空港舗装を適切な状態で維持するために，空港舗装では，空港舗装の供用性を評価するための路面性状調査および空港舗装の支持力性能を評価するための構造調査が定期的に実施されており，これらの調査結果を総合的に考慮して，補修を行う時期や範囲，規模を決定している．空港舗装の供用性を評価するための路面性状調査では，アスファルト舗装の場合，舗装表面のひび割れ，わだち掘れ，平坦性を，コンクリート舗装の場合，ひび割れ，目地の破損，段差を計測している．この路面性状評価に関する調査結果を元に，以下の式を用いて舗装補修指標である PRI (Pavement Rehabilitation Index) を算出している¹⁷⁾．また，PRI のみならず，PRI を構成する三要素それぞれに対する目標値も用意されている．

空港アスファルト舗装の場合

$$PRI = 10 - 0.450CR - 0.0511RD - 0.655SV \quad \text{式(1-3)}$$

ここに，

PRI : 空港アスファルト舗装の舗装補修指数

CR : ひび割れ率 (%)

RD : わだち掘れ (mm)

SV : 平坦性指標 σ (mm)

空港コンクリート舗装の場合

$$PRI = 10 - 0.290CR - 0.296JC - 0.535SV \quad \text{式(1-4)}$$

ここに，

PRI : 空港コンクリート舗装の舗装補修指数

CR : ひび割れ度 (cm/cm²)

JC : 目地部の破損率 (%)

SV : 段差 (mm)

表-1.3 PRI の評価（空港アスファルト舗装）

舗装区域	評価		
	A	B	C
滑走路	8.0 以上	3.8 以上 8.0 未満	3.8 未満
誘導路	6.9 以上	3.0 以上 6.9 未満	3.0 未満
エプロン	5.9 以上	0 以上 5.9 未満	0 未満

A：補修の必要は無し

B：近いうちの補修が望ましい

C：できるだけ早急に補修の必要がある

表-1.4 舗装破損の各項目に対する補修要否の目標値（空港アスファルト舗装）

項目	舗装区域	評価		
		A	B	C
ひび割れ率 (%)	滑走路	0.1 未満	0.1 以上 6.5 未満	6.5 以上
	誘導路	0.9 未満	0.9 以上 12.7 未満	12.7 以上
	エプロン	1.9 未満	1.9 以上 17.0 未満	17.0 以上
わだち掘れ (mm)	滑走路	10 未満	10 以上 38 未満	38 以上
	誘導路	17 未満	17 以上 57 未満	57 以上
	エプロン	22 未満	22 以上 70 未満	70 以上
平坦性 (mm)	滑走路	0.26 未満	0.26 以上 3.64 未満	3.64 以上
	誘導路	0.91 未満	0.91 以上 6.57 未満	6.57 以上
	エプロン	1.50 未満	1.50 以上 8.63 未満	8.63 以上

A：補修の必要は無し

B：近いうちの補修が望ましい

C：できるだけ早急に補修の必要がある

表-1.5 PRI の評価（空港コンクリート舗装）

舗装区域	評価		
	A	B	C
滑走路	7.0 以上	3.7 以上 7.0 未満	3.7 未満
誘導路	6.4 以上	2.3 以上 6.4 未満	2.3 未満
エプロン	5.7 以上	0 以上 5.7 未満	0 未満

A：補修の必要は無し

B：近いうちの補修が望ましい

C：できるだけ早急に補修の必要がある

表-1.6 舗装破損の各項目に対する補修要否の目標値（空港コンクリート舗装）

項目	舗装区域	評価		
		A	B	C
ひび割れ度 (cm/cm ²)	滑走路	0.2 未満	0.2 以上 5.6 未満	5.6 以上
	誘導路	0.6 未満	0.6 以上 7.6 未満	7.6 以上
	エプロン	1.1 未満	1.1 以上 11.1 未満	11.1 以上
目地の破損率 (%)	滑走路	0.1 未満	0.1 以上 1.3 未満	1.3 以上
	誘導路	0.1 未満	0.1 以上 3.2 未満	3.2 以上
	エプロン	0.1 未満	0.1 以上 5.7 未満	5.7 以上
段差 (mm)	滑走路	5 未満	5 以上 10 未満	10 以上
	誘導路	5 未満	5 以上 12 未満	12 以上
	エプロン	5 未満	5 以上 14 未満	14 以上

A：補修の必要は無し

B：近いうちの補修が望ましい

C：できるだけ早急に補修の必要がある

しかしながら、PRIに基づく路面性状評価の基準値は、空港におけるひび割れ、わだち掘れ、平坦性等の測定による客観的評価と、併せて実施した舗装技術者の目視による主観的評価を数量化したものであり、空港舗装上を走行する航空機の操縦安全性や走行快適性は考慮されていない。また、航空機の操縦安全性や走行快適性に特に影響を及ぼすと考えられる舗装縦断方向の平坦性については、図-1.4に示すように、従来から平坦性の計測に用いられてきた3mプロフィロメータの原理を用いて、縦断方向に1.5mごとに測定輪の上下方向変位を計測し、ある区間長（例えば大型ジェット機が就航する空港では30m）における上下方向変位の標準偏差を、その区間の平坦性指標 σ として採用していることから、ある特定の波長成分の凹凸のみを計測しているに過ぎず、路面の波長の影響を考慮することができないため¹⁸⁾、平坦性指標 σ が操縦安全性や走行快適性を的確に評価しているとは言い難い。

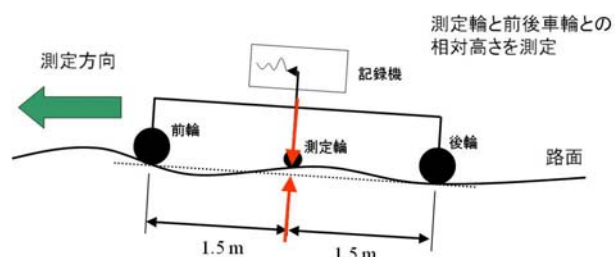


図-1.4 3mプロフィロメータによる
縦断方向平坦性のイメージ

平坦性指標 σ 以外の舗装の平坦性を評価する指標としては、世界銀行が提唱しているIRI（International Roughness Index）がある。これは、測定した路面の縦断プロファイルデータと、クォーターカーモデルと呼ばれる質量一ばね系の1自由度系の車両モデルを用いて、路面を走行した際の累積鉛直変位量を走行距離で除したものである。しかしながら、IRIは波長2.4m及び15mの路面には大きく反応すること、車両と航空機では運動特性や走行速度が異なると考えられること^{18), 19)}から、IRIを用いて航空機走行時の操縦安全性や走行快適性を評価することは難しいと考えられる。

空港舗装の路面平坦性に着目した研究として、井上ら²⁰⁾はパイロットに対するアンケート調査、ならびに滑走路において測定した縦断プロファイルに対してウェーブレット理論による空間周波数分析を行うことで、滑走路においてパイロットが「影響を感じる」と回答している箇所では、0.02cycle/mの周波数帯が影響していることを明らかにしている。また、遠藤ら²¹⁾は、滑走路において測定した縦断プロファイルを用い、大型機から小型機を対象とした離発着時の航空機の応答シミュレーションによる航空機の鉛直加速度から算出した乗り心地指数RQF（Ride Quality Factor）を用いて、乗り心地に影響を及ぼす路面の波長及び航空機材の違いに着目した滑走路の平坦性評価について検討し、離発着時の航空機のRQFに対しては概ね12.8m以上の路面波長の影響が大きいことを明らかにしている。また、八谷ら¹⁸⁾は、サイン波による仮想の路面を用い、大型機を対象とした離発着時及びタキシング時の航空機の応答シミュレーションによる

航空機の鉛直加速度と路面の波長の関係を整理し、航空機に発生する鉛直加速度には、ある特定の波長を有する路面を走行した場合に大きくなることを明らかにし、許容される凹凸の管理基準値を提案している。

これらの研究成果の特徴は、航空機の応答に影響を及ぼす舗装路面の波長（あるいは周波数）について着目している点である。しかしながら、空港舗装の路面平坦性管理基準策定の上では、以下の問題点があると考えられる。

- ・平坦性管理基準としては、航空機応答シミュレーションソフトのような特殊なソフトに基づく RQF のような指標ではなく、縦断プロファイルデータから簡単な計算により算出できる路面の凹凸量で管理するのが望ましいこと。
- ・機材の大きさの違い、走行速度の違いを考慮した路面平坦性管理基準が必要であること。
- ・実際の路面の縦断プロファイルを用いた路面平坦性管理基準値の検証が必要であること。

以上のような背景から、空港舗装上を走行する航空機の操縦安全性と走行快適性を確保するために、離陸時及びタキシング時の航空機の鉛直加速度に着目した平坦性管理基準を作成することを目的として本研究を実施した。また、大規模空港だけではなく、中・小規模空港に対しても適用可能な平坦性管理基準が必要となることから、大型機ならびに小型機の鉛直加速度と路面の平坦性の関係を明らかにした。

具体的な検討手法としては、まず、空港舗装上を走行する種々の航空機の応答が計算可能である航空機応答シミュレーションソフト APRas を使用して解析を行い、空港舗装の平坦性が航空機の鉛直加速度に及ぼす影響を検討した。一連の解析結果から得られた平坦性管理基準の妥当性について、国内の主要空港において三カ年にわたり測定した空港滑走路の縦断プロファイルデータを用い、本研究で得られた航空機の応答を考慮した平坦性管理基準の妥当性を検証した。

第1章の参考文献

- 1) Westergaard, H. M. : New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields, Transactions of ASCE, Vol. 113, pp. 425-444, 1948.
- 2) Picket, G. and G. K. Ray : Influence Charts for Concrete Pavements, Transactions of ASCE, Vol. 116, pp. 49-73, 1951.
- 3) 福手勤：空港コンクリート舗装厚設計への電算プログラムの応用，港湾技研資料，No. 262，1977.
- 4) Portland Cement Association : Design of Concrete Airport Pavements, 1973.
- 5) U.S. Army : Rigid Airfield Pavement, Air Force, TM5-824-3, 1958.
- 6) 国土交通省航空局監修：空港舗装構造設計要領，pp.40 - 41，1999.
- 7) 岩間滋：コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 111，pp. 16-46，1964.
- 8) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書【舗装編】，（社）土木学会，pp. 44-45，2002.
- 9) （社）日本道路協会：舗装設計施工指針，（社）日本道路協会，p. 219，2001.
- 10) 西澤辰男，野田悦郎，福田正：プレキャストコンクリート舗装の温度応力に関する基礎的検討，土木学会論文集，No. 508/V-26，pp. 101-107，1995.
- 11) 西澤辰男，七五三野茂，小松原昭則，子梁川雅：連続鉄筋コンクリート舗装の温度応力に関する検討，土木学会論文集，No. 578/V-37，pp. 123-132，1997.
- 12) J. Zhang, T. F. Fwa, K. H. Tan, and X. P. Shi : Model for Nonlinear Thermal Effect on Pavement Warping Stresses, Journal of Transportation Engineering, Volume 129, Issue 6, pp. 695-702, 2003.
- 13) 久保宏，八谷好高，長田雅人，平尾利文，浜昌志：最近の空港アスファルト舗装の損傷と改良工法について，土木学会舗装工学論文集，第9巻，pp. 35-40，2004.
- 14) 長瀧重義，鎌田敏郎，矢崎剛吉，黒板基，岩波光保：非破壊試験による鋼・コンクリート合成構造の欠陥評価法に関する研究，土木学会論文集，No. 564/V-35，pp. 133-143，1997.
- 15) 三井雅一，福澤公夫，沼尾達弥：赤外線サーモグラフィ法を用いた FRP シート・コンクリート間の欠陥検出，土木学会論文集，No. 655/V-48，pp. 107-117，2000.
- 16) 長田文博，山田裕一，虫明成生，赤松幸生：熱画像による鉄道高架橋コンクリートの剥離診断手法の開発，土木学会論文集，No. 760/V-63 号，pp. 121-133，2004.
- 17) 福手勤，佐藤勝久，八谷好高，山崎英男：路面性状による空港舗装の供用性評価，港湾技研資料 No.414，1982.
- 18) Hachiya, Y., Yin, J., Takahashi, O. and Himeno, K. : Aircraft Response Based Airport Pavement Roughness

Evaluation, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*,
No. 634 / V-45, pp. 403-411, 1999.

- 19) (社) 土木学会舗装工学委員会：路面のプロファイリング入門，舗装工学ライブラリ 1，54p.，2003.
- 20) 井上要人，川村彰，八谷好高，姫野賢治：パイロットの意識調査に基づく空港舗装平坦性の評価－航空機の地上走行挙動に着目して－，土木学会舗装工学論文集第7巻，pp. 12.1-12.10，2002.
- 21) 遠藤桂，姫野賢治，川村彰，八谷好高，松井邦人：滑走路の乗り心地に着目した路面プロファイル解析，土木学会舗装工学論文集第7巻，pp. 13.1-13.8，2002.

2. 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

2.1 研究の手順

第1章で述べたように、空港コンクリート舗装の設計法を高度化するためには、実際のコンクリート版に発生するひずみと温度分布データを長期間採取し、版厚と温度応力の関係を考慮した温度応力算出法を確立する必要がある。

上記の目的を達成するため、既往の研究を参考に、以下の手順で研究を実施した。

- ・試験コンクリート舗装を製作し、ひずみと温度分布の長期観測を実施する。
- ・長期観測結果で得られたひずみと温度分布を元に、コンクリート版に発生している温度応力を算出し、温度応力と曲げ拘束応力、内部拘束応力の関係を定量的に明らかにする。
- ・有限要素法による熱収支解析により、版厚が異なる場合の版内温度分布を計算し、版厚と温度応力の関係を明らかにする。

2.2 試験舗装施工

(1) 設計条件

旧運輸省港湾技術研究所野比実験場において、コンクリート試験舗装を製作した。この試験舗装を製作する目的は、コンクリート版内部の温度とひずみの測定である。試験舗装の平面図と断面図を図-2.1に示す。試験区画はA区画とB区画であり、目地間隔は、A区画では7.5mとし、B区画では、現在の空港コンクリート舗装で最大である8.5mとした。また、コンクリート材料としては、A区画では設計基準曲げ強度6.5MPaの高強度コンクリートを、B区画では、設計基準曲げ強度5.0MPaの普通コンクリートを使用した。構造的には、設計航空機荷重をB-747で代表されるLA-1、設計反復作用回数を20,000回、路盤の設計支持力係数を70MN/m³(平板直径750mm)としたので、コンクリート版厚はA区画で340mm、B区画で420mmとなった。

(2) 路床の施工

路床の材料は現地の既存土(山砂)をそのまま用いた。路床土の性状試験結果を表-2.1に、路床の品質管理試験結果を表-2.2に示す。

路床の施工は、所定深さ近くまでバックホウで掘削を行い、7tタンデムローラで仮転圧を行った後、出来形の計測を行った。出来形に関しては両区画とも共通仕様書

の規定を満足していた。

(3) 下層路盤の施工

下層路盤には粒度調整砕石を用いた。下層路盤材料の性状試験結果を表-2.3に、下層路盤の品質管理試験結果を表-2.4に示す。

下層路盤の施工は、ダンプトラックにより粒度調整砕石を現場に搬入後、ブルドーザ、バックホウにより1層目を敷き均し、7tタンデムローラで仮転圧を行った。その後、出来形の計測を行い、高さの微調整を行った後、7tタンデムローラにて転圧を行った。出来形に関しては、両区画とも共通仕様書の規定を満足していた。

(4) 上層路盤の施工

上層路盤にはアスファルト安定処理材を用いた。アスファルト安定処理材の性状試験結果は表-2.5に、上層路盤の品質管理・出来形管理試験結果は表-2.6に示すとおりである。

上層路盤の施工は、ダンプトラックによりアスファルト安定処理材を現場に搬入後、アスファルトフィニッシャーにより敷き均し、初期転圧を7tタンデムローラ、二次転圧を15tタイヤローラにより行った。アスファルト安定処理材の施工時の温度は、出荷時160℃、現場到着時158℃、敷き均し時148℃であり、規格を満足するものであった。また、抜き取ったコアによる出来形管理試験では、厚さ、締固め度ともに規格を満足するものであった。

(5) コンクリート版の施工

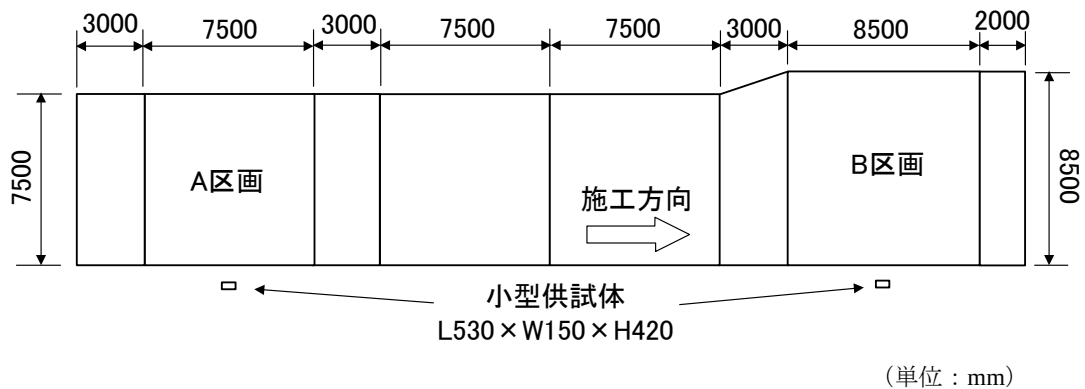
コンクリートに使用した材料は表-2.7に、試験施工に使用したコンクリートの配合は表-2.8に、試験施工前に実施したコンクリートの室内試験結果は表-2.9に示すとおりである。コンクリート版の施工は2000年10月12日(A区画)ならびに13日(B区画)に行った。当日の天候は12日が晴れ、気温は25～31℃、13日が曇り時々小雨、気温は18～20℃であった。

コンクリート版は2層に分けて施工した。下層コンクリートはスプレッダで敷均し、インナーバイブレータを用いて締め固めた後、直径6.35mmの再生異形棒鋼を150mm×150mmの格子状に組み上げて製作した鉄網を敷設した。上層コンクリートは80cm/分の速度でコンクリートフィニッシャーにより締め固めた。そして、コンクリート版表面に簗目を入れ、養生を行った。養生は被膜養生剤を散布した後に、散水マットでコンクリート版表面を覆い、一日一回の散水を7日間継続した。なお、両区画とも、施工翌日にカットにより横方向収縮目地を設

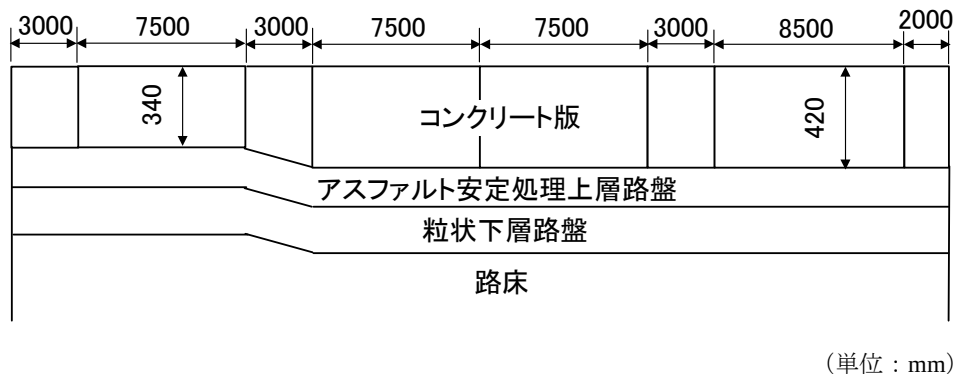
けたが、目地にはスリップバーを設置しなかった。

コンクリート版内部には、測温機能付きモールドゲージを埋設した。図-2.2にコンクリート版内部のモールドゲージ埋設位置を示す。モールドゲージは版施工方向に直角に配置した。また、コンクリート版の自由変形ひずみを計測するために、コンクリート版に埋設したものと同一モールドゲージを埋め込んだ小型供試体を、コンクリート版近傍に作成した。小型供試体の厚さはコンクリ

ート版と同じく 340mm ならびに 420mm とし、長さとは幅は路盤との摩擦による拘束が無視できる寸法を考慮して、それぞれ 530mm, 150mm として作成した。小型供試体の周囲は、断熱のためにアルミテープを貼ってから発泡スチロール板で覆った。養生方法に関してはコンクリート版と同一とした。



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2.1 試験舗装図

表-2.1 路床土の性状試験結果

項目	B 区画	規定値
含水比 (%)	8.1	—
湿潤密度 (g/cm ³)	1.845	—
乾燥密度 (g/cm ³)	1.707	—
仕様密度における 修正 CBR (%)	19.1	10 以上

表-2.2 路床土の品質管理試験結果

項目	A 区画	B 区画	規定値
含水比 (%)	8.6	8.2	—
現場密度 (g/cm ³)	1.816	1.834	—
締固め度 (%)	107.0	108.1	90 以上
K ₃₀ (MN/m ³)	218	263	—
K ₇₅ [※] (MN/m ³)	87	105	—

※K₇₅=K₃₀/2.5

表-2.3 下層路盤材料の性状試験結果

項目		実測値	規定値	試験法
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)			JIS A 1102
	53	100.0	100	
	37.5	98.6	95～100	
	19	67.0	60～90	
	4.75	39.7	30～65	
	2.36	28.0	20～50	
	0.425	15.5	10～30	
	0.075	3.7	2～10	
最適含水比 (%)		15.0	—	JIS A 1210 (E 法)
最大乾燥密度 (g/cm ³)		1.715	—	JIS A 1210 (E 法)
修正 CBR (%)		91	45 以上	舗装試験法便覧
塑性指数		NP	6 以下	JIS A 1205

表-2.4 下層路盤の品質管理試験結果

項目	A 区画	B 区画	規定値
含水比 (%)	15.1	16.4	—
現場密度 (g/cm ³)	1.710	1.717	—
締固め度 (%)	99.7	100.1	90 以上
K ₃₀ (MN/m ³)	362	303	—
K ₇₅ [※] (MN/m ³)	121	101	—

※K₇₅=K₃₀/3.0

表-2.5 上層路盤材料の性状試験結果

項目		実測値	規定値
通過質量百分率 (%)	粒径 (mm)		
	53		100
	37.5	100	95～100
	19	87.3	50～100
	4.75	50.4	—
	2.36	34.4	20～60
	0.075	4.1	0～10
マーシャル安定度 (kN)		11.94	3.45 以上
フロー値 (1/100cm)		32	10～40
空隙率 (%)		6.5	3～12

表-2.6 上層路盤の品質管理・出来形管理試験結果

項目	A 区画	B 区画	規定値
厚さ (cm)	16.9	16.8	14.6 以上
密度 (g/cm ³)	2.355	2.342	—
締固め度※ (%)	99.5	98.9	95 以上

※基準密度 = 2.368 g/cm³

表-2.7 コンクリート材料

使用材料		種類または産地	物性値
セメント		普通ポルトランドセメント	密度 : 3.16 g/cm ³
粗骨材※	40 - 20	茨城県笠間産硬質砂岩	密度 : 2.69g/cm ³
	20 - 05	山口県伊佐産石灰岩	単位容積質量 : 1.68kg/l
細骨材	砂	千葉県君津産山砂	密度 : 2.61g/cm ³
練混ぜ水	上水道水	—	—
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系水溶性ビニル共重合体	—
	凝結遅延材	ポリカルボン酸塩とその塩の誘導体	—
	AE 減水剤	リグニンスルホン酸塩	—
	空気量調整剤	変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤	—

※粗骨材は、40-20 と 20-05 を等量混合して使用した。

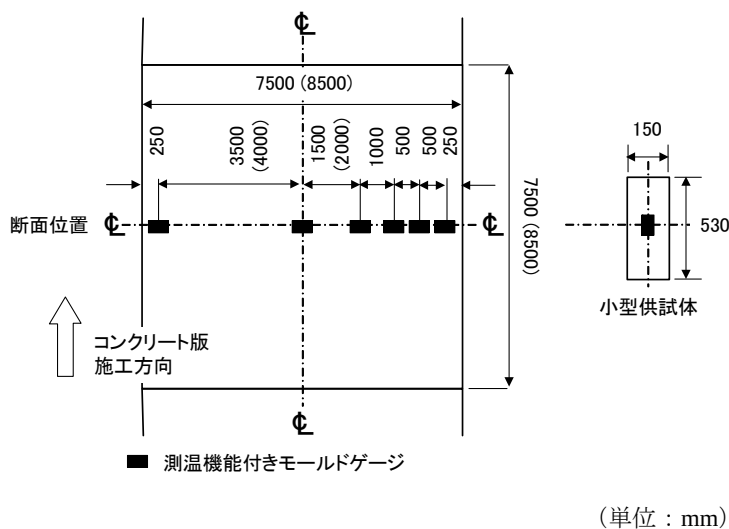
表-2.8 試験施工に使用したコンクリートの配合

区画	W/C (%)	単位粗骨材容積 (m ³ /m ³)	細骨材率 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/cm ³)				混和剤			
						W	C	S	G	高性能 AE 減水剤 (C×%)	凝結遅延剤 (C×%)	AE 減水剤 (C×%)	空気量調整剤*
A	30	0.70	35.5	8	4.5	135	450	627	1,176	1.0	0.3		5A
B	40	0.72	36.6	5	4.0	138	345	676	1,208			1.0	4A

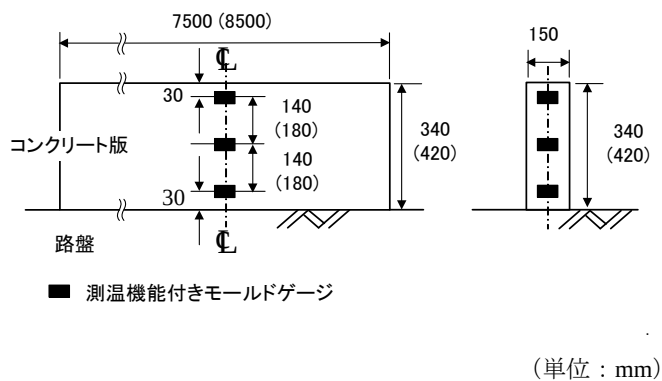
※セメント 1kg に対して空気量調整剤 1%水溶液を 2cc 添加した場合を 1A とした。

表-2.9 コンクリートの室内試験結果（材齢 28 日）

	A 区画	B 区画
曲げ強度 (MPa)	7.71	5.55
圧縮強度 (MPa)	60.6	36.4
静弾性係数 (MPa)	41,800	36,100



(a) 平面図



(b) 断面図

図-2.2 計器埋設位置

表-2.10 小型供試体の熱膨張係数

期間	A 区画熱膨張係数 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			B 区画熱膨張係数 ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	上面	中心部	下面	上面	中心部	下面
10 月 15 日～16 日	11.58	10.24	9.63			
10 月 15 日～16 日	9.39	11.67	15.13	9.39	8.59	11.70
10 月 16 日～17 日	12.35	10.61	13.35	9.94	8.20	11.10
10 月 17 日～18 日				8.60	10.82	12.28
平均値	11.55			10.06		

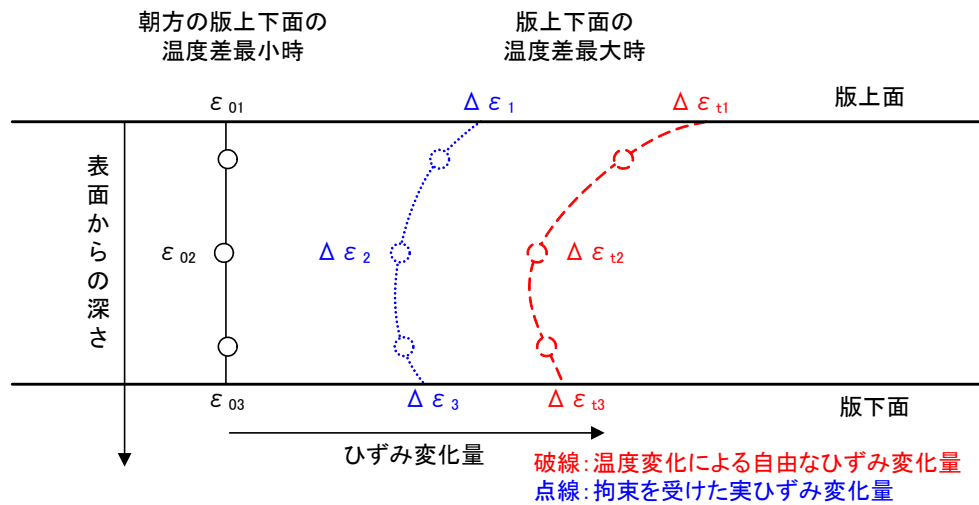


図-2.3 ひずみ変化量

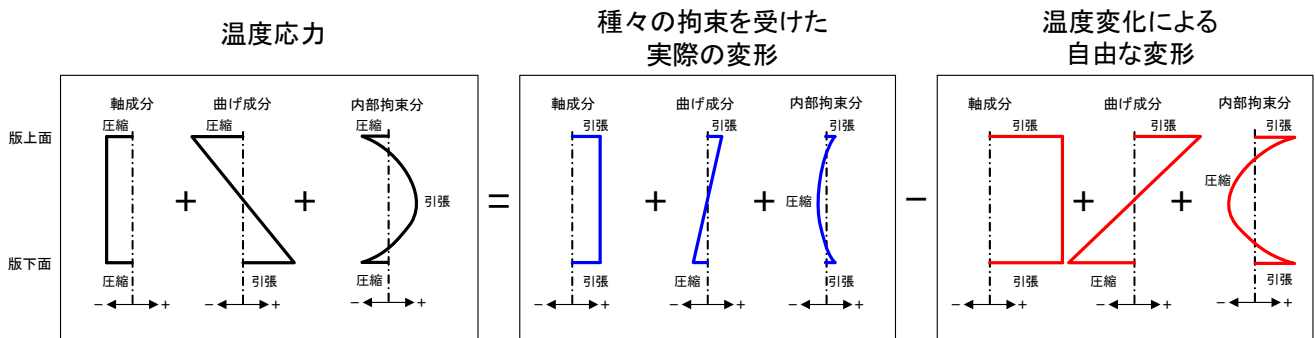


図-2.4 拘束応力の概念図

2.3 試験舗装における温度応力の検討

(1) コンクリートの熱膨張係数

コンクリート舗装の施工中から、コンクリート版内部に埋設したモールドゲージにより、版の温度とひずみを1時間に1回測定した。

版に発生する温度応力を検討する前に、コンクリートの熱膨張係数を決定する必要があることから、コンクリート版の自由変形ひずみを計測するために試験舗装横に製作した小型供試体の、散水養生中の温度とひずみを用いて熱膨張係数を算出した。表-2.10 にその結果を示す。コンクリートの熱膨張係数は概ね $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、一般的な値と考えられる。以降の検討では、表-2.10 の値を用いることとした。

(2) 温度応力の算出

一年間にわたるコンクリート版の温度とひずみの測定値から、1 時間毎の温度応力を算出した。温度とひずみのデータとしては、版中央部のものを使用した。算出

手順を以下に示す¹⁾。

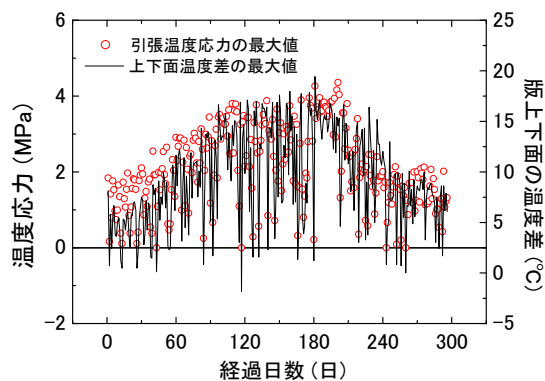
- ① 一日の中で、朝方あるいは夕方頃において版上下面温度差 θ' が最小 (≈ 0) になる時刻をその日の基準時刻として設定し、各位置の基準時刻における温度とひずみを、それぞれ基準温度 t_0 、基準ひずみ ε_0 とする。
- ② 基準温度 t_0 と、ある時刻における実測温度 t から各位置における温度変化量 Δt を算出し、版深さ方向の3点の温度変化量から近似二次曲線を算出する。次に、版上面、版中心、版下面の3点においてこの温度変化量に熱膨張係数 α を乗じて、各位置における拘束を受けない場合の自由ひずみ $\Delta \varepsilon_t$ 算出する。
- ③ 基準ひずみ ε_0 と、ある時刻における実測ひずみ ε からひずみ変化量 $\Delta \varepsilon$ を算出し、版深さ方向の3点のひずみ変化量から近似二次曲線を算出する。次に、②で算出した自由ひずみ $\Delta \varepsilon_t$ の差を、軸方向拘束ひずみ $\Delta \varepsilon_N$ 、曲げ拘束ひずみ $\Delta \varepsilon_M$ 、内部拘束ひずみ $\Delta \varepsilon_I$ に分解し、各々の拘束ひずみ成分に弾性係数を乗じて軸方向拘束応力 σ_N 、曲げ拘束応力 σ_M 、内部拘束応

力 σ_1 を算出する．また，第 1 章で述べた理由から，軸方向拘束応力は考慮せず，曲げ拘束応力 σ_M と内部拘束応力 σ_I の和を温度応力 σ とする．

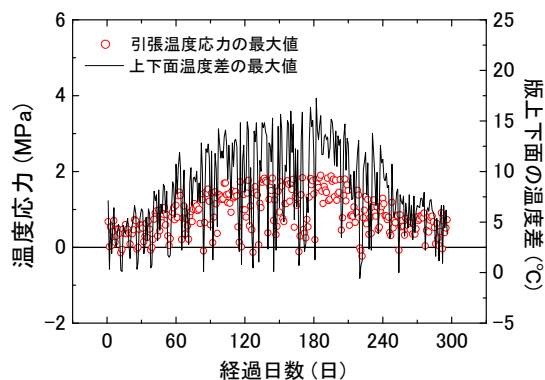
(3) 温度応力の季節的変動

A 区画（高強度コンクリート，版厚 34cm）と B 区画（普通コンクリート使用，版厚 42cm）の中央部における日中の温度応力の最大値（引張応力）と版上下面温度差（版上面温度－版下面温度）の最大値との関係を図-2.5 に示す．温度応力は版上下面温度差が大きくなる春から秋にかけて大きくなっていることから，以降では，版上下面温度差と温度応力との関係を用いて，温度応力を推定することとした．

A 区画と B 区画における版上下面温度差の度数分布を図-2.6 に示す．両区画とも版上下面温度差が $-5^{\circ}\text{C} \sim 0^{\circ}\text{C}$ となる割合が最も高い．また，版厚が 34cm である A 区画のほうが，版厚が 42cm である B 区画よりも，版上下面温度差は大きく，また版上下面温度差が正となる割合が高いことがわかる．

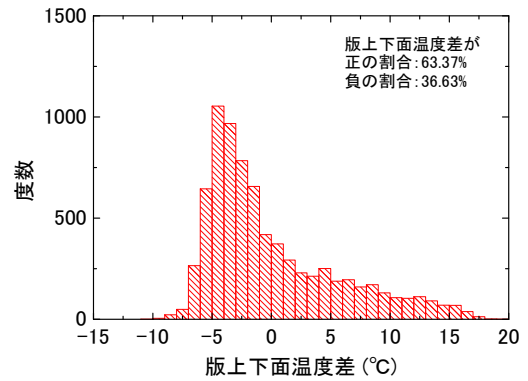


(a) A 区画（版厚 34cm）

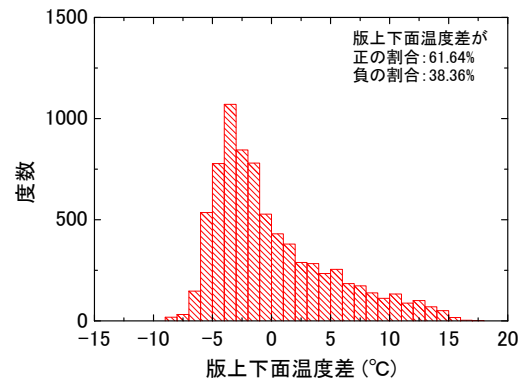


(b) B 区画（版厚 42cm）

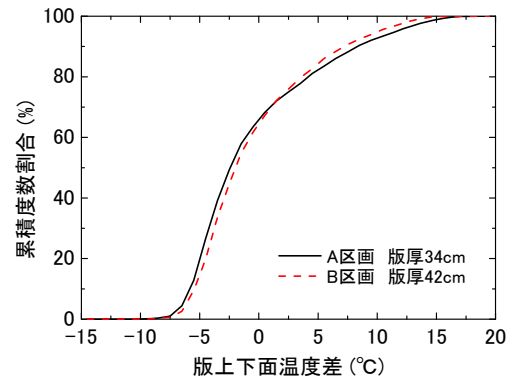
図-2.5 温度応力の季節的変動（12 月 19 日から）



(a) A 区画（版厚 34cm）



(b) B 区画（版厚 42cm）

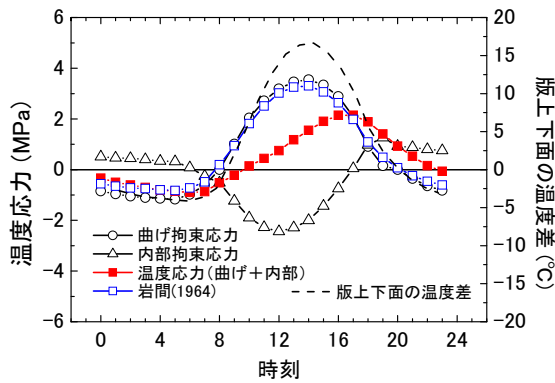


(c) 累積度数

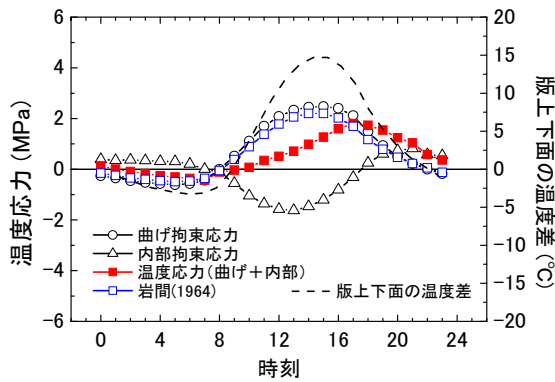
図-2.6 版上下面温度差の発生頻度

(4) 温度応力の日変動

版上下面温度差が観測期間中に最も大きかった 8 月のある一日の温度応力と版上下面温度差の日変動を図-2.7 に示す．版上下面温度差が最大となる 15 時頃に曲げ拘束応力は最大となるが，内部拘束応力はこの時点で圧縮応力であり，両者の和である温度応力としては 17 時頃に最大となっている．岩間はこのような曲げ拘束応力と内部拘束応力の時間差の存在を指摘しているが，内部拘束応力が曲げ拘束応力の -0.3 倍を超える日も少なくないことから，温度応力としては曲げ拘束応力の 0.7 倍

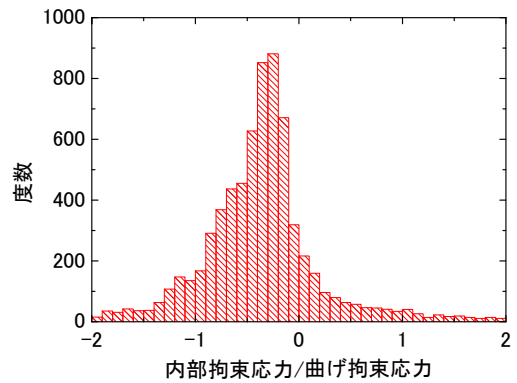


(a) A 区画 (版厚 34cm)

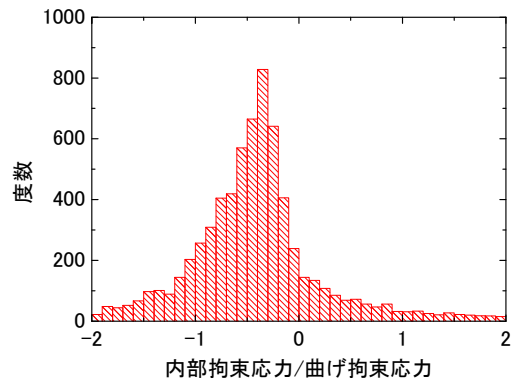


(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-2.7 版上下面温度差と温度応力の日変動



(a) A 区画 (版厚 34cm)



(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-2.8 内部拘束応力と曲げ拘束応力の割合の発生頻度

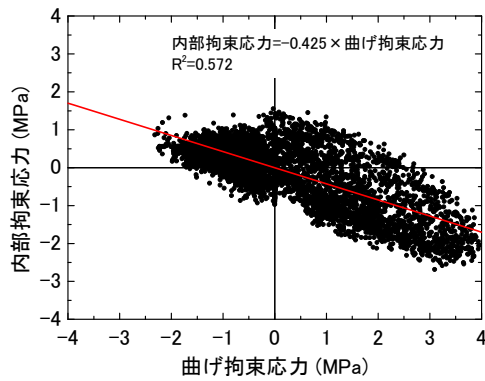
程度としている。

そこで、空港コンクリート舗装における曲げ拘束応力と内部拘束応力の割合について検証した。図-2.8に一年間の曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の比の発生頻度分布を、図-2.9に内部拘束応力と曲げ拘束応力の関係を示す。曲げ拘束応力に対する内部拘束応力の割合は、A 区画では-0.2 から-0.3、B 区画では-0.3 から-0.4 の場合が最も多く、曲げ拘束応力と内部拘束応力の相関を見ると、その割合は A 区画で-0.43、B 区画で-0.46 であり、版厚が厚いB 区画のほうが曲げ拘束応力に対して内部拘束応力が若干大きいことがわかる。

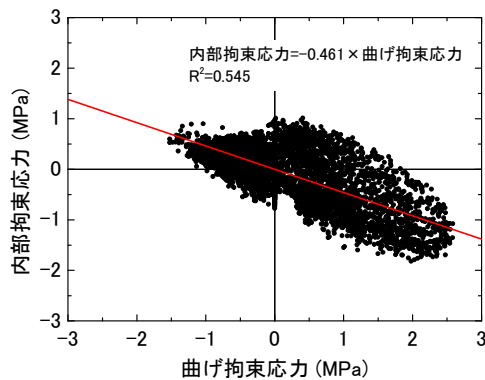
以上のことから、空港コンクリート舗装のようにコンクリート版厚が厚い場合には、曲げ拘束応力に対して内部拘束応力が大きくなると考えられ、曲げ拘束応力と内部拘束応力の和である温度応力としては、岩間が示した温度応力式によるものよりも小さいことが推測される。

なお、図-2.7において、A 区画の温度応力が B 区画に

比べて大きいのは、表-2.9 に示したとおり、A 区画に用いた高強度コンクリートの弾性係数が、B 区画に用いた普通コンクリートの弾性係数よりも大きいためと考えられる。

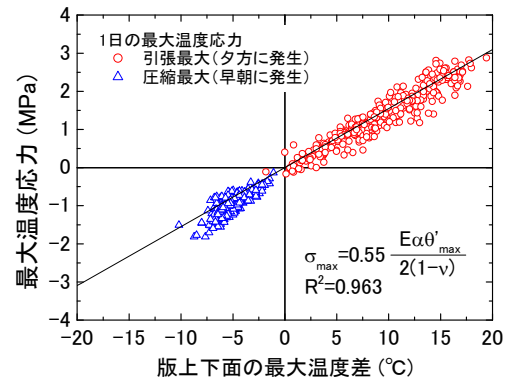


(a) A 区画 (版厚 34cm)

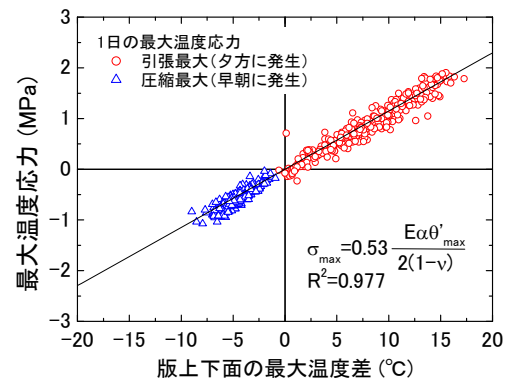


(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-2.9 内部拘束応力と曲げ拘束応力の関係



(a) A 区画 (版厚 34cm)



(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-2.10 最大温度応力と版上下面最大温度差の関係

(5) 温度応力式の検討

A 区画ならびに B 区画の中央部における一年間の温度とひずみの測定結果による，毎日の版上下面の最大温度差（正の最大値と負の最大値）と最大温度応力（引張応力の最大値と圧縮応力の最大値）との関係を図-2.10 に示す．図-2.7 に示したとおり，版上下面の温度差が最大となる時刻には温度応力は最大にはならないが，最大温度応力と版上下面最大温度差との間には非常に強い相関があり，最大温度応力は版上下面最大温度差を説明変数とする一次式で近似できることがわかる．この近似式を，岩間が提案した温度応力式と同様の形に改めたのが，式(2-3)，式(2-4)である．また，比較のために岩間²⁾が示した温度応力算定式（版中央部）を再掲する．

版厚 34cm の場合

$$\sigma = 0.55 \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)} \quad \text{式(2-3)}$$

版厚 42cm の場合

$$\sigma = 0.53 \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)} \quad \text{式(2-4)}$$

岩間による式

$$\sigma = 0.7 \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)} \quad \text{式(2-5)}$$

ここに，

σ : 温度応力 (MPa)

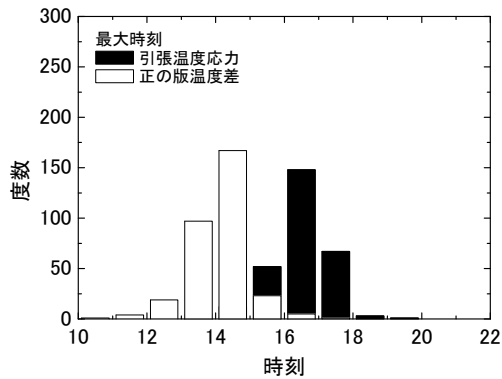
α : コンクリートの熱膨張率 (1/°C)

E : コンクリートの弾性係数 (MPa)

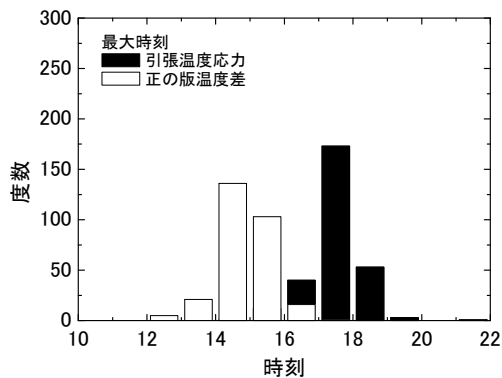
θ' : コンクリート版上下面の温度差 (°C)

ν : コンクリートのポアソン比

式(2-3)，式(2-4)，式(2-5)からわかるとおり，空港コンクリート舗装の版中央部における温度応力は，岩間の温度応力式により算出したものよりも 25% 程度小さいことがわかる．また，版厚の厚い B 区画のデータから算出した式(2-4)のほうが A 区画のデータから算出した式(2-3)よりも温度応力式の係数が小さい．これは，図-2.7



(a) A 区画 (版厚 34cm)



(b) B 区画 (版厚 42cm)

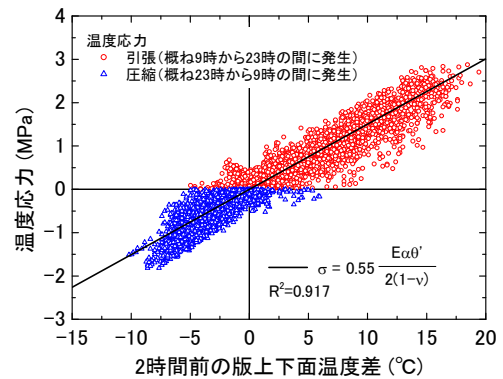
図-2.11 引張温度応力と正の版上下面温度差が最大となる時刻の頻度分布

に示したとおり、版厚が厚い場合、特に曲げ拘束応力が大きくなる午後では、内部拘束応力が圧縮側に大きくなることが原因で、引張曲げ拘束応力が低減されるためと考えられる。

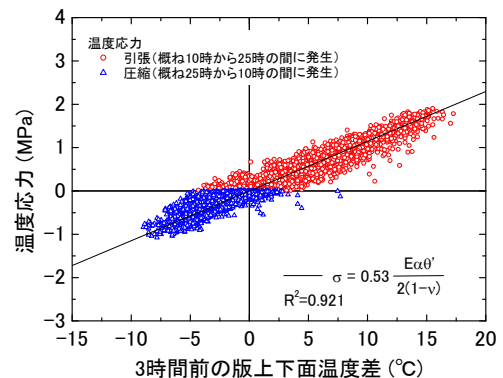
(6) 版上下面温度差と温度応力の時間差

コンクリート舗装の理論的設計を行う場合、昼夜の交通量の違いを考慮して、ある時刻に発生する荷重応力とその頻度、ある時刻に発生する温度応力とその頻度を正確に考慮できることが望ましい。式(2-3)あるいは式(2-4)は、一日の最大温度応力と版上下面の最大温度差との相関から導いた温度応力式であるが、前述したように、温度応力と版上下面温度差がそれぞれ最大となる時刻には時間差がある。従って、ある時刻に版に発生する温度応力を推定する場合、その時刻に発生する版上下面温度差を式(2-3)あるいは式(2-4)に入力することは適切ではない。このことから、温度応力と版上下面温度差が最大となる時間差について検討した。

図-2.11 に引張温度応力と版上下面温度差が最大となる時刻の頻度分布を示す。版厚が 34cm である A 区画で



(a) A 区画 (版厚 34cm)



(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-2.12 温度応力と数時間前の版上下面温度差の関係

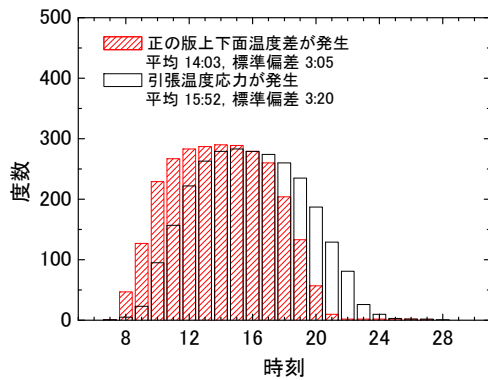
は、14 時頃に版上下面温度差が最大となり、引張温度応力はその 2 時間後の 16 時頃に最大となる傾向があるのがわかる。また、版厚が 42cm である B 区画では、14 時頃に版上下面温度差が最大となり、引張温度応力はその 3 時間後の 17 時頃に最大となる傾向があり、版厚の厚いほうが、版上下面温度差と引張温度応力が最大となる時間差が大きいことがわかる。

以上のことから、ある時刻における温度応力は、その 2 時間前、あるいは 3 時間前の版上下面温度差との相関が高いと推定されることから、両者の関係を示したのが図-2.12 である。A 区画については 2 時間前の版上下面温度差、B 区画については 3 時間前の版上下面温度差を用いた。これによると、ある時刻に版に生じる温度応力は、その 2、3 時間前の版上下面温度差との相関が高く、式(2-3)、式(2-4)により、一日の最大温度応力だけではなく、各時刻の温度応力を精度良く推定できることがわかる。

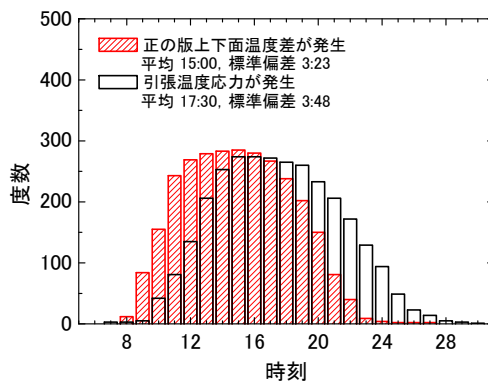
図-2.13 に引張温度応力と正の版上下面温度差が発生する時刻の頻度分布を示す。引張温度応力が発生するのは A 区画で概ね 9 時から 23 時まで、B 区画で概ね 10 時

から 25 時までであることがわかる。このことから、空港コンクリート舗装の理論的設計を行う際は、版厚 42cm 程度の場合は概ね 10 時から 25 時の間に引張温度応力が発生すると仮定し、この間の温度応力の値を式 (2-4) から算出する場合には、その 3 時間前の概ね 7 時から 22 時までの版上下面温度差の頻度分布を使用することで、精度良く温度応力を算出することが可能である。

以上の考え方から、一年間の版上下面温度差の発生頻度をまとめたのが表-2.11、表-2.12 である。これらの表の中で「温度応力が正の時間帯用」の版上下面温度差であっても、負の温度差になる場合があるのは、例えば B 区画の場合は 10 時から 25 時までを「温度応力が正」と仮定しているため、その 3 時間前の 7 時から 22 時の間には温度差が負となる場合もあるからである。



(a) A 区画 (版厚 34cm)



(b) B 区画 (版厚 42cm)

図-2.13 温度応力と版上下面温度差が正になる時刻の頻度分布

表-2.11 A 区画（版厚 34cm）における版上下面温度差の発生頻度

版上下面 温度差（℃）	版上下面温度差の発生割合	
	温度応力が正の時間帯用	温度応力が負の時間帯用
19（18～18.9）	0.0008	-
17（16～17.9）	0.0111	-
15（14～15.9）	0.0336	-
13（12～13.9）	0.0460	-
11（10～11.9）	0.0472	-
9（8～9.9）	0.0655	-
7（6～7.9）	0.0718	-
5（4～5.9）	0.0924	-
3（2～3.9）	0.0902	-
1（0～1.9）	0.1323	0.0040
-1（-2～-0.1）	0.1665	0.0812
-3（-4～-2.1）	0.1566	0.3334
-5（-6～-4.1）	0.0717	0.4700
-7（-8～-6.1）	0.0135	0.0942
-9（-10～-8.1）	0.0009	0.0172
-11（-12～-10.1）	-	0.0011

表-2.12 B 区画（版厚 42cm）における版上下面温度差の発生頻度

版上下面 温度差（℃）	版上下面温度差の発生割合	
	温度応力が正の時間帯用	温度応力が負の時間帯用
17（16～17.9）	0.0011	-
15（14～15.9）	0.0123	-
13（12～13.9）	0.0392	-
11（10～11.9）	0.0467	-
9（8～9.9）	0.0518	-
7（6～7.9）	0.0724	-
5（4～5.9）	0.0948	-
3（2～3.9）	0.1109	-
1（0～1.9）	0.1411	0.0067
-1（-2～-0.1）	0.1879	0.1448
-3（-4～-2.1）	0.1516	0.4345
-5（-6～-4.1）	0.0766	0.3521
-7（-8～-6.1）	0.0133	0.0478
-9（-10～-8.1）	0.0003	0.0140

2.4 コンクリート版厚と温度応力の関係

前節において、空港コンクリート舗装のように版が厚い場合には、内部拘束応力が大きいと考えられることから温度応力が小さくなることを示した。しかしながら、普通コンクリートを用いたコンクリート舗装としては、アスファルト安定処理上層路盤上にある版厚が 42cm のコンクリート版に対してのみの検討であることから、版厚や上層路盤材料が異なる場合の温度応力についても検討する必要がある。そこで、これらの影響については、舗装内部の熱伝導、舗装表面と空気との間の熱伝達、舗装表面での放射をそれぞれ考慮した有限要素法による熱収支解析を実施し、コンクリート版内温度分布およびコンクリート版に発生する温度応力を検討した。

(1) 解析手法

図-2.14 に有限要素解析における解析モデルを示す。モデルは二次元モデルとし、コンクリート版の厚さは 26～58cm とした。ここで、主に粒状材が使用される下層路盤材料と、主に砂が使用される路床材料の熱特性はほぼ同一であること、下層路盤以下の材料特性は、コンクリート版の内部温度分布にほとんど影響しないことから、計算の効率化のため、深さ 250cm までを粒状下層路盤材とした。

有限要素法による熱収支解析では、舗装内部の熱の流れを式 (2-6) による熱伝導方程式で、顕熱輸送量を式 (2-7) によるアスファルト混合物と大気との間の熱伝達で、舗装表面への日射の影響は式 (2-8) によりコンクリートの日射吸収率と熱伝達係数から等価外気温を算出する方法³⁾でそれぞれ考慮した。なお、地表面に水分が無いと仮定し、潜熱は考慮していない。

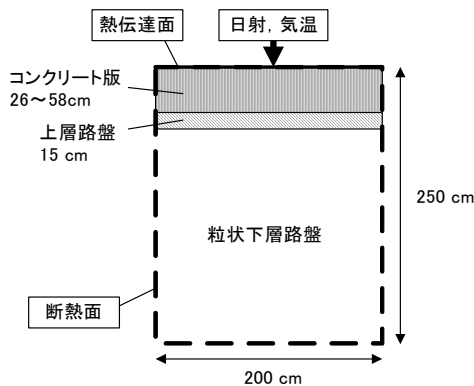


図-2.14 熱収支解析モデル

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{式 (2-6)}$$

$$Q = h(T_s - T_a) \quad \text{式 (2-7)}$$

$$E = S\alpha + \varepsilon\sigma(T_a^4 - T_s^4) \quad \text{式 (2-8)}$$

ここに、

T : 舗装温度 (K),

t : 時間 (s),

λ : 熱伝導率 (W/m/K),

c : 比熱 (kJ/kg/K),

ρ : 密度 (kg/m³),

x, z : 空間座標 (m),

Q : 顕熱輸送量 (W/m²),

h : 熱伝達率 (W/m²/K),

T_s : 舗装表面温度 (K),

T_a : 気温 (K),

E : 舗装面が吸収する正味放射量 (W/m²),

S : 日射量 (W/m²),

α : 日射吸収率,

ε : 輻射率,

σ : ステファン・ボルツマン定数

($= 5.67 \times 10^{-8}$ W/m²/K⁴).

入力する気象条件としては、試験舗装の長期観測を行った際に、温度応力が最も大きくなった夏季の1日の気象条件を用いた。気温については試験舗装近傍で測定した1時間毎の気温を使用し、風速と日射量については、気象庁の AMeDAS データから同日の1時間毎のデータを参照した。

時系列解析を開始する一日の基準時刻としては、試験舗装において測定されたコンクリート版内温度分布の実測値から、版内温度分布が比較的均一で温度勾配が最小（≒0）である朝 8:00 とし、この時刻におけるコンクリート版の初期温度は、実測値を元に、深さによらず一様に 33°C と設定した。

表-2.13 に、解析に使用した各材料の熱特性の諸係数を示す。アスファルト混合物については、室内試験における密粒度アスファルト混合物による実測値を使用し、コンクリートと粒状路盤材料については文献^{4), 5), 6), 7)}を参考にした。

図-2.15 に版厚 42cm のコンクリート版内部温度の実測値と解析値を示す。実測値と解析値は完全には一致しないが、再現精度は非常に高く、温度応力が最大となる夕方において温度分布がほぼ一致している。

表-2.13 解析に用いた熱特性値

項 目		設定値
コンクリート	比熱 (J/(kg・K))	1,050
	熱伝導率 (W/(m・K))	2.7
	熱伝達率 (W/(m ² ・K))	12
	密度 (t/m ³)	2.4
	日射吸収率	0.6
アスファルト混合物	比熱 (J/(kg・K))	890
	熱伝導率 (W/(m・K))	1.1
	密度 (t/m ³)	2.35
粒状路盤材料	比熱 (J/(kg・K))	840
	熱伝導率 (W/(m・K))	2.5
	密度 (t/m ³)	2.0

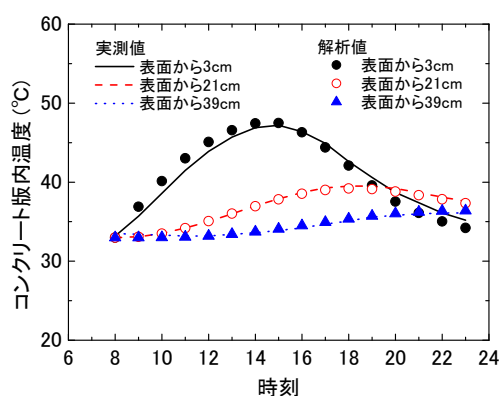


図-2.15 版厚42cmにおけるコンクリート版内部温度の実測値と解析値

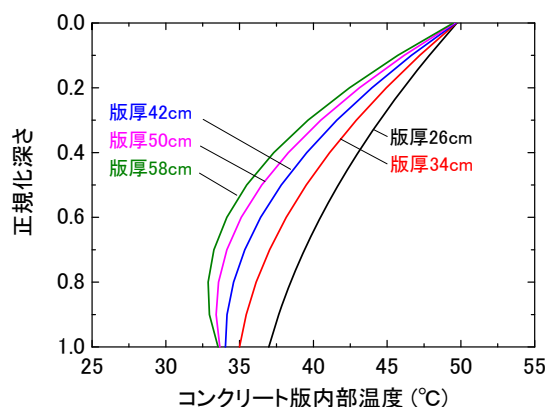


図-2.17 コンクリート版内部温度分布

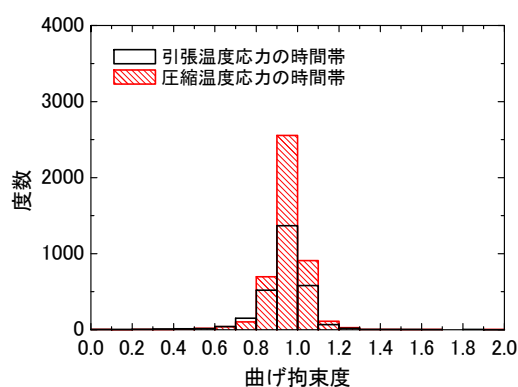


図-2.16 試験舗装 B 区画の曲げ拘束度の度数分布

コンクリート版内温度分布から温度応力を算出するためには、版内温度変化量と線膨張係数から求められる温度ひずみと、拘束を受けた実際の変形を示す実ひずみが必要である。種々の版厚毎の温度ひずみは熱収支解析から算出可能であるが、実ひずみは不明である。そこで、試験舗装における実測の曲げ拘束度を参考とすることとした。図-2.16 に B 区画における曲げ拘束度の頻度分布を示す。実測結果では曲げ拘束度が 0.9～1.0 を中心として分布していることから、曲げ拘束度を 0.95 ± 0.15 (0.80, 0.95, 1.10) と仮定し、熱収支解析結果によるコンクリート版内温度分布から温度応力を算出した。

(2) 温度応力に対する版厚・上層路盤材料の影響

長期観測を行った試験舗装と同様に、上層路盤材料をアスファルト安定処理材としたモデルにおいて、版厚を変えた場合の温度分布を熱収支解析結果から算出した。図-2.17に15時時点のコンクリート版内温度分布を示す。版上下面温度差は、版厚が42cm程度までは版厚につれて大きくなるが、それよりも厚くなるとほとんど変化しないことがわかる。また、コンクリート版が厚くなるほど版内の温度分布は非線形分布となることから、内部拘束応力が大きくなると考えられる。図-2.18に曲げ拘束度を0.95と仮定した場合の、コンクリート版厚と日最大温度応力ならびに各拘束応力成分の関係を示す。版厚が変化した場合でも、曲げ拘束応力はあまり変化していないが、内部拘束応力は版が厚くなるほど大きくなるため、両者の和である温度応力は、版が厚くなるほど小さくなることがわかる。

図-2.19に、コンクリート版厚 h と温度応力式の係数 β との関係を示す。 β は式(2-9)に示すとおり、Westergaard⁸⁾による版中央部の曲げ拘束応力式に対する係数であり、岩間による式(2-5)では0.7、本研究による式(2-4)では0.53である。

$$\sigma = \beta \frac{E\alpha\theta'}{2(1-\nu)} \quad \text{式(2-9)}$$

これによると、曲げ拘束度が0.95の場合、版厚が26cmでは岩間が示した値($\beta=0.7$)に近く、版厚が42cmでは本研究における式(2-4)の値($\beta=0.53$)に近い。また、係数 β は版厚 h に比例して小さくなることから、この解析結果から、係数 β は版厚 h に比例すると仮定し、試験舗装における長期観測結果から岩間が示した式(2-5)と本研究で示した式(2-4)を考慮すると、係数 β と版厚 h の関係は式(2-10)により表すことができると考えられる。また、曲げ拘束度を0.80、1.10とした場合の解析結果による係数 β は、式(2-10)を中心としてそれぞれ下側、上側に分布していることから、式(2-10)により一年間の曲げ拘束度の頻度分布を考慮した平均的な値が得られるものと考えられる。

$$\beta = -0.772h + 0.854 \quad \text{式(2-10)}$$

ここに、

h : コンクリート版厚 (m)

また、上層路盤にアスファルト安定処理材と粒状路盤材を用いた際の温度応力の違いについても検証したが、図-2.19に示すとおり、上層路盤材料の違いはほとんど無いことがわかる。

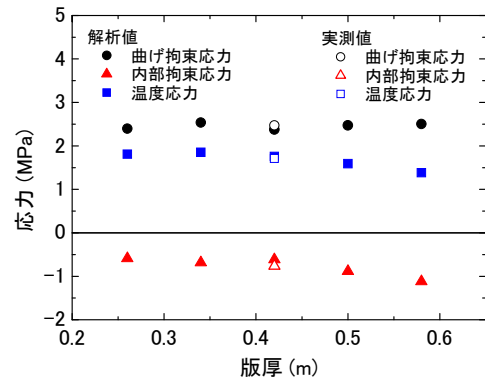


図-2.18 版厚と温度応力の関係（曲げ拘束度＝0.95）

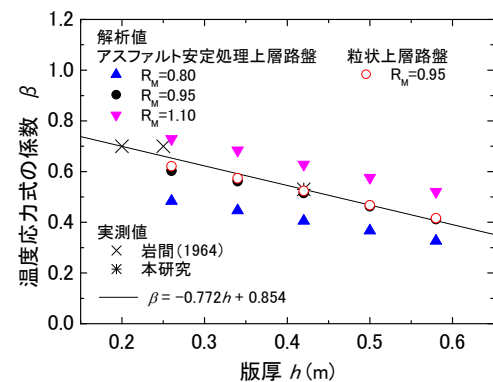


図-2.19 版厚と温度応力式の係数の関係

2.5 結論

空港コンクリート舗装に適用可能な温度応力式について検討した結果、以下のようにまとめられる。

- (1) 空港コンクリート舗装のように版厚が厚い場合は、コンクリート版深さ方向の温度分布が非線形分布となり、曲げ拘束応力に対して内部拘束応力が大きく、それらの和である温度応力は、版厚が厚くなるほど低減する傾向がある。
- (2) 最大温度応力と最大版上下面温度差の関係から、最大温度応力は最大版上下面温度差を説明変数とする一次式により精度良く推定可能である。また、版厚が厚いほうが温度応力は若干小さい傾向がある。
- (3) 温度応力が最大となるのは、版上下面温度差が最大となる時刻の2、3時間後であり、ある時刻に版に発生する温度応力を推定するには、提案した温度応力式に2、3時間前の版上下面温度差を入力することで、精度良く推定できる。
- (4) コンクリート版に生じる温度応力に対して、上層路盤材料の違いによる影響は小さい。一方、版厚の影響は大きく、温度応力式における係数は版厚に比例して小さくなる。

2.6 おわりに

今回提案した温度応力式を用いることにより、より高い精度で空港コンクリート舗装の理論的設計が可能となり、性能規定化の流れに対応した設計が可能になると考えられる。付録では、ある仮定の設計条件のもとで、理論的設計法によるコンクリート版厚の試算を行い、現行設計法による版厚との比較を行っている。この試算では、理論的設計法による版厚は現行設計法による版厚よりも薄くなる結果となった。しかしながら、「設計年数の10年を超過しても疲労による構造的な破損の報告が皆無である現行設計法による版厚」と「ある破壊確率における疲労曲線を用いた照査で、設計年数の10年が経過した時点で疲労度が1.0に達する理論的設計法による版厚」を単純に比較して、理論的設計法による版厚のほうが薄くなると理解してはならない。コンクリート舗装が用いられる誘導路やエプロンでは、これらの施設を閉鎖し補修を行うことが非常に困難であることから、現行設計法で一般的に考えられている10年という設計年数の設定についても議論する必要がある。また、理論的設計法を用いた場合、同じ設計反復作用回数であっても、機材別交通量条件やエプロン舗装等における運行形態等の条件により結果が大きく異なることに注意されたい。

- 9) 八谷好高, 梅野修一: 航空機走行位置分布の実態と舗装構造への影響, 港湾技研資料, No. 757, 9p., 1993.
- 10) 国土交通省航空局監修: 空港舗装構造設計要領, 83p., 1999.
- 11) 福手勤: 空港コンクリート舗装厚設計への電算プログラム応用, 港湾技研資料, No. 262, 1977.

第2章の参考文献

- 1) セメント協会重交通専門委員会: 重交通専門委員会報告書, (社)セメント協会, pp.251-272, 1995.
- 2) 岩間滋: コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 111, pp. 16-46, 1964.
- 3) セメント協会重交通専門委員会: 重交通専門委員会報告書, (社)セメント協会, 221p., 1995.
- 4) 土木学会舗装工学委員会: 舗装標準示方書, (社)土木学会, 35p., 2007.
- 5) 土木学会コンクリート委員会: 2002年制定コンクリート標準示方書(施工編), (社)土木学会, pp. 44-47, 2002.
- 6) セメント協会重交通専門委員会: 重交通専門委員会報告書, (社)セメント協会, pp. 225-227, 1995.
- 7) 椎名貴快, 松井邦人, Smith T.F.: 地上気象観測データを用いたアスファルト舗装の内部温度推定, 土木学会舗装工学論文集, 第2巻, pp. 105-112, 1997.
- 8) Westergaard, H. M. : Analysis of Stresses in Concrete Roads Caused by Variation of Temperature, Proceedings of the annual meeting, Highway Research Board, pp. 201-215, 1926.

付録. 提案した温度応力式による版厚の試算

1. 設計条件

- ・設計対象施設：エプロン誘導路部コンクリート舗装
- ・コンクリート設計基準曲げ強度：5.0MPa
- ・コンクリート弾性係数：34,000MPa
- ・コンクリートポアソン比：0.15
- ・コンクリートの熱膨張係数： $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
- ・路盤支持力係数：70MN/m³
- ・設計年数：10年
- ・設計対象航空機種・交通量：付表-1 のとおり
- ・航空機横断方向走行分布の標準偏差：50cm⁹⁾
- ・昼（10時～25時、主に版上下面温度差は正）と夜（25時～10時、主に版上下面温度差は負）の交通量割合：9：1^{*)}
- ・設計疲労曲線：コンクリート標準示方書【舗装編】24p. 記載の疲労破壊曲線を使用（付図-1 参照）
- ・設定破壊確率：1%^{*)}

*1) 2006年8月の各航空会社の時刻表を基に、東京国際空港から離陸する航空機数を参考とした。

*2) 設定破壊確率は、具体的な調査結果、研究結果に基づくものではなく、あくまで仮定の値である。

2. その他条件

- ・応力照査位置
コンクリート版中央部下面。
- ・設計交通量
現行設計法：設計反復作用回数を使用。
理論的設計法：機材別交通量を使用。
- ・航空機荷重横断方向走行分布条件
現行設計法：

設計反復作用回数を算出するための係数 α により考慮されている¹⁰⁾。

理論的設計法：

全ての機種について、脚を構成するタイヤ1輪の走行位置分布を、版中央部を中心とする標準偏差50cmの正規分布と仮定した（付図-2、付図-3 参照）。

ただし、この条件設定は、機材により主脚の位置が異なることを無視している。すなわち、全ての機材のいずれかのタイヤが必ず版中心を走行するという仮定であるが、実際には、機材の前脚が誘導路中心線上やスポット中心線上を走行する場合、全ての機材の主脚タイヤ走行位置が、版中央部を中心として分布をしているわけではない。

- ・荷重応力の算定方法

福手¹¹⁾による Westergaard 中央部載荷公式電算プログラムを使用。

- ・温度応力の算定方法

現行設計法：温度応力は算定せず、安全率により考慮。

理論的設計法：本文の式(2-9)、式(2-10)を使用。

- ・温度応力式における版上下面温度差発生頻度
本文の表-2.12 を使用。

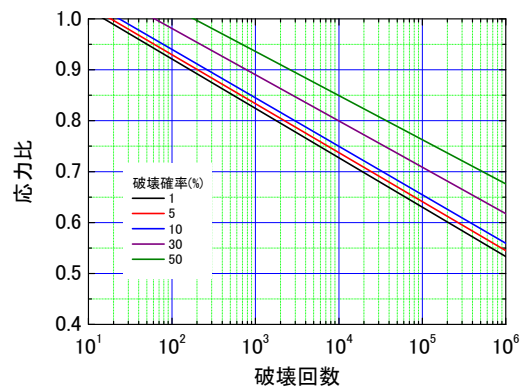
3. 解析結果

- ・現行設計法による版厚

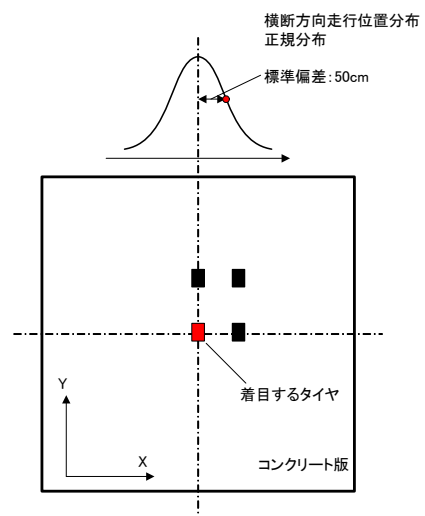
空港舗装構造設計要領より、版厚は42cmとなる。

- ・理論的設計法による版厚

版中心における荷重応力と温度応力を足し合わせた合成応力を算出し、設計疲労曲線により疲労度を計算した結果、付図-4 より、版厚は37cmとなる。



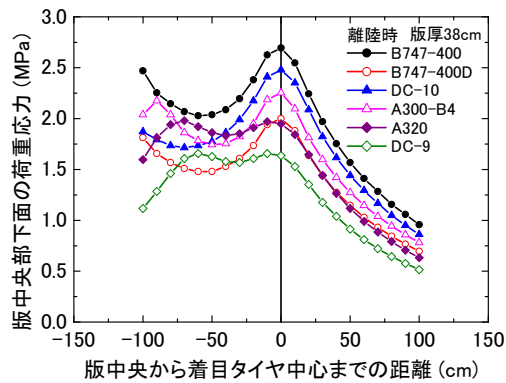
付図-1 疲労破壊曲線



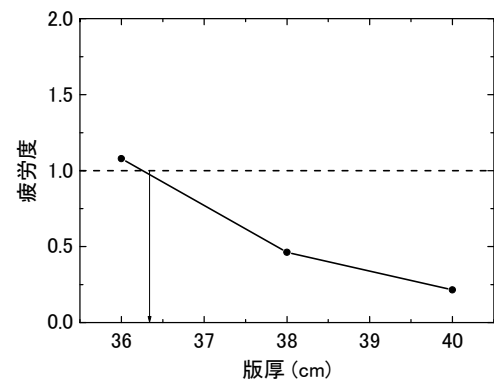
付図-2 荷重応力算出におけるタイヤ走行位置

付表-1 設計航空機荷重と設計航空機交通量¹⁰⁾

機種	国際・国内	離着陸別	n_i	P_i	P_0	$\sqrt{P_i/P_0}$	$\overline{n_i}$	W_i	$W_i \times \overline{n_i}$
B747-400	国際	離陸	10,000	361	361	1.000	10000	8	80,000
		着陸	10,000	253	361	0.837	2232	8	17,853
	国内	離陸	80,000	266	361	0.858	16173	8	129,383
		着陸	80,000	253	361	0.837	12725	8	101,799
DC-10	国内	離陸	23,000	252	361	0.836	4408	4	17,631
		着陸	23,000	240	361	0.815	3601	4	14,403
A300-B4	国内	離陸	50,000	279	361	0.879	13520	4	54,078
		着陸	50,000	246	361	0.825	7568	4	30,271
A320	国内	離陸	35,000	234	361	0.805	4555	4	18,219
		着陸	35,000	223	361	0.786	3728	4	14,911
DC-9	国内	離陸	60,000	190	361	0.725	2927	4	11,708
		着陸	60,000	169	361	0.684	1859	4	7,436
$n_i = \sum W_i \times \overline{n_i}$									498,520
大型ジェット機の就航する滑走路での反復作用回数（ $\alpha = 0.03$ ）							$N = \alpha \overline{n}$	14,960	
大型ジェット機の就航する誘導路での反復作用回数（ $\alpha = 0.04$ ）							$N = \alpha \overline{n}$	19,940	



付図-3 版中央部下面の荷重応力
(離陸機のみ、版厚 38cm)



付図-4 理論的設計法による版厚試算結果

3. 熱赤外線画像による空港アスファルト舗装層間剥離の検出手法に関する検討

3.1 研究の手順

第1章で述べたように、空港アスファルト舗装の層間剥離を定量的に検出手法を確立するため、熱赤外線画像による剥離検出手法の適用性の検討及び適用気象条件の検討を以下の手順で実施した。

- ・実際の空港舗装において、打音調査を実施し、層間剥離の可能性がある位置を検出する。
- ・同一区画において熱赤外線画像による調査を行い、打音調査結果との対比を行う。また、実際の剥離の有無、剥離深さをコアを抜いて確認する。
- ・有限要素法による熱収支解析により、剥離の深さ、気象条件等を変えた場合の舗装表面温度差を検討し、調査に適した気象条件について検討する。

3.2 赤外線サーモグラフィによる調査の原理

表基層間に層間剥離等による空隙が存在する場合、図-3.1に示すように、空隙直上と空隙直下の間の伝熱が遮断される。すなわち、健全部と比較して空隙直上は熱容量が小さくなり、熱しやすく冷めやすい状態になる。これにより、日中には日射や気温の上昇により舗装温度が上昇するため、剥離部の舗装表面温度は健全部のそれよりも高くなる。一方、夜間においては、日射がなくなり気温も低下することで舗装温度が低下するため、剥離部の舗装表面温度は健全部のそれよりも低くなる。

このような原理から、当該手法を用いて空港が閉鎖している夜間に調査を実施する場合は、赤外線サーモグラフィで撮影した舗装表面の熱赤外線画像から舗装表面温度が低下している箇所を検出することとなる。



写真-3.1 2000年7月の名古屋空港滑走路の破損

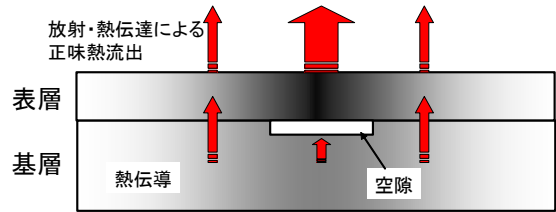


図-3.1 夜間の熱流と舗装内温度分布図
(黒色が低温部、白色が高温部)

3.3 空港における適用性調査

(1) 調査概要

那覇空港の滑走路ならびに新潟空港の誘導路において、熱赤外線画像による層間剥離検出手法の適用性調査を2005年10月（那覇空港）ならびに2006年9月（新潟空港）の深夜に実施した。

舗装表面の熱赤外線画像の撮影には、写真-3.2に示すハンディタイプの赤外線サーモグラフィを使用した。この赤外線サーモグラフィの仕様を表-3.1に示す。適用性調査を実施した際の気温と日射量は、空港近郊において測定した。

調査手順としては、まず、調査区域（10m×10m）において打音調査により異音を検出し、チョークにより異音部のマーキングを行った。次に、高所作業車を用いて、高さ10mの位置から赤外線サーモグラフィにより舗装表面の熱赤外線画像を撮影した（写真-3.3(a)）。その後、打音調査による異音部ならびに熱赤外線画像で周囲よりもおよそ0.2℃以上の温度低下箇所と判別された箇所において直径100mmのコアを採取し、層間剥離の有無とその深さを確認した。また、高所作業車を用いた高所からの静止画の撮影では、全体の調査に長時間を要することから、作業車両に赤外線サーモグラフィを据え付け、走行しながら熱赤外線動画画像撮影を実施した（写真-3.3(b)）。

表-3.1 赤外線サーモグラフィ仕様

項目	仕様
検出素子	非冷却二次元マイクロボロメータ
測定温度範囲	-40 to 500 °C
最小温度分解能	0.06 °C 以上
測定精度	±2 °C
測定視野角	30.6° (H) × 23.1° (V) (22 mm レンズ使用時)
空間分解能	1.68 mrad



写真-3.2 赤外線サーモグラフィ



(a) 作業車からの静止画撮影



(b) 作業車からの動画撮影

写真-3.3 赤外線サーモグラフィによる
熱赤外線画像撮影状況

(2) 調査結果

a) 静止画像による検出精度の検討

図-3.2 に、那覇空港の滑走路において撮影した調査区域の熱赤外線画像を示す。図の中で、赤外線画像による低温部と打音調査による異音部を併せて示している。打音調査により異音を確認されたのは 18 箇所であり、そのうち 6 箇所において熱赤外線画像により低温部が確認された。

熱赤外線画像による低温部のうち A1～A3 の 3 箇所、ならびに低温部ではないものの打音調査により異音を確認された C1～C4 の 4 箇所からコアを抜き、層間剥離の有無を確認したところ、表-3.2 に示すように、熱赤外線画像の低温部（A1～A3）において 50～65mm の深さに層間剥離が発生していることを確認した。しかしながら、熱赤外線画像において低温部ではないものの異音を確認された箇所（C1～C4）においても 45～68mm の深さに層間剥離が確認された。このように、層間剥離が発生しているにも関わらず温度差が検出されなかった原因としては、以下の理由が考えられる。

- ①調査を行った際の一日の気温差が 5℃ 程度と小さく、特に C1～C4 以外の異音部は、直径 20cm 程度以下の面積の小さな異音部のため、層間剥離に起因する舗装温度差が小さい。
- ②付着はしていないものの、両層が互いに密着している場合は、両層間での熱伝導条件は健全部のそれと大きく異なることはなく、層間剥離に起因する舗装温度差が小さい。

図-3.3 に、新潟空港の誘導路において撮影した調査区域の可視画像を示す。図の中で、赤外線画像による低温部と打音調査による異音部を併せて示している。打音調査により異音を確認されたのは 12 箇所であり、そのうち 6 箇所において熱赤外線画像により低温部が確認された。

熱赤外線画像による低温部のうち AA1～AA3 の 3 箇所、ならびに低温部ではないものの打音調査により異音を確認された CC1 と CC2 の 2 箇所からコアを抜き、層間剥離の有無を確認した。結果を表-3.3 に示す。熱赤外線画像の低温部（AA1～AA3）においてのみ 30～35mm の深さに層間剥離が発生しており、打音調査により異音を確認された CC1 と CC2 では層間剥離が確認されなかった。異音部で層間剥離が確認されなかった原因は不明である。

以上のことから、熱赤外線画像によって全ての層間剥離を検出できるわけではないものの、表基層間に存在する層間剥離の多少をある程度判定することは可能であると考えられる。実際の調査では、全ての空港舗装に対して打音調査を行うのではなく、赤外線調査により区画毎

の低温部の位置を調査し，特に低温部が多く検出された区画では打音調査を行うなど，各々の調査手法を組み合わせることで，効率的な調査が可能になると考えられる．

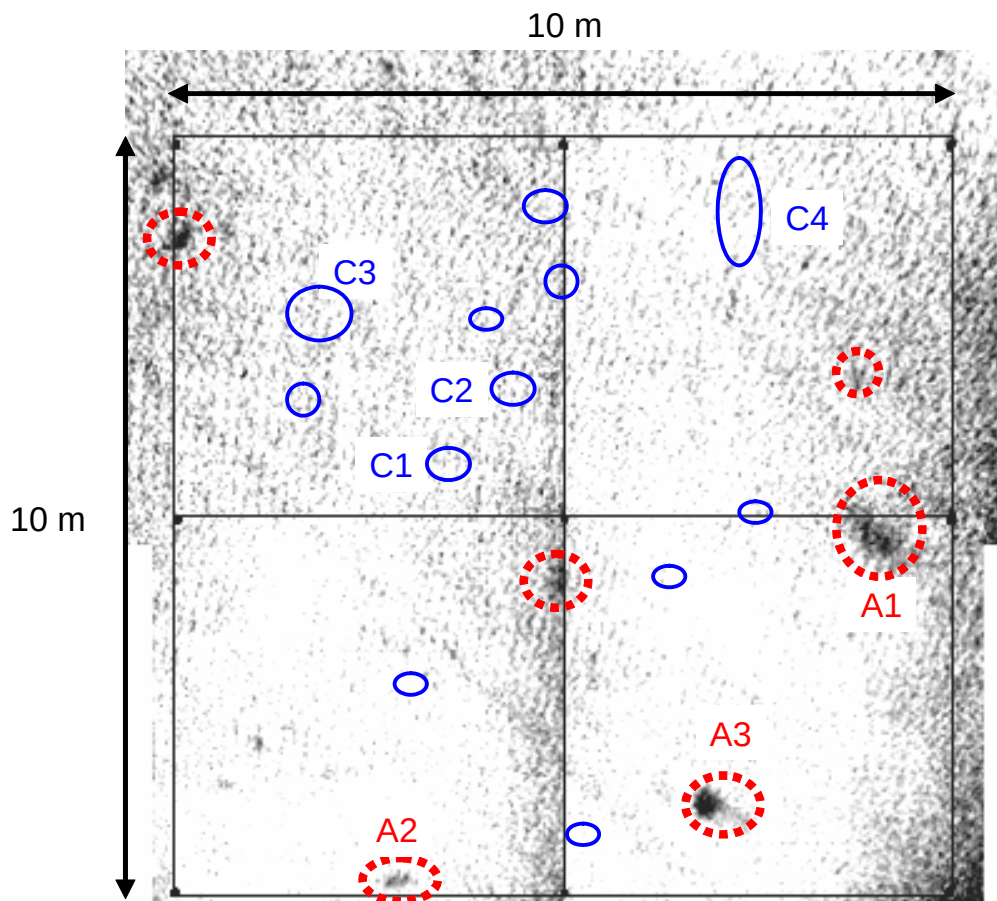


図-3.2 那覇空港の滑走路における熱赤外線画像
(点線：赤外線による低温部，実線：打音による異常部)

表-3.2 那覇空港の滑走路における調査結果

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

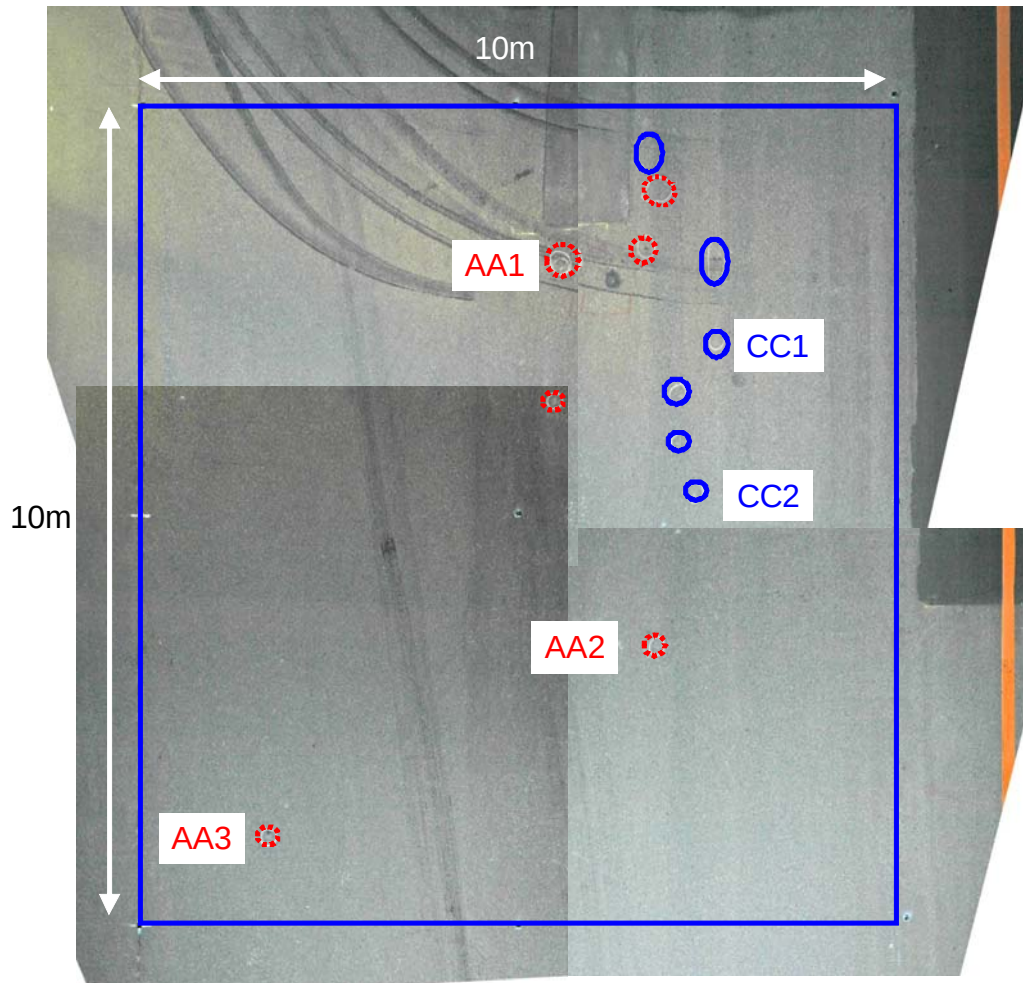


図-3.3 新潟空港の誘導路における可視画像
(点線：低温部且つ打音による異音部，実線：低音部ではないが打音による異音部)

表-3.3 新潟空港の誘導路における調査結果

地点名	熱赤外線	打音	コア採取による 剥離深さ
AA1	低温部	異音	35 mm
AA2	低温部	異音	35 mm
AA3	低温部	異音	30 mm
CC1	異常なし	異音	層間剥離なし
CC2	異常なし	異音	層間剥離なし

b) 動画像による検出精度の検討

高所からの静止画の撮影では、広大な面積を有する空港舗装の調査に膨大な時間を要するため、作業車両に赤外線サーモグラフィを据え付け、走行しながら熱赤外線動画像の撮影も試みた。この際の赤外線サーモグラフィの位置は舗装表面から約 3m の位置であり、走行速度は 10km/h、調査幅は 2.5m、調査延長は 100m とした。

撮影された動画像から自動画像処理を施して得られた温度分布画像を図-3.4 に示す。10km/h 程度の走行速度であれば、静止画像と同等程度で低温部の判別が可能であることから、空港の広範囲を効率的に調査するためには、動画像の撮影を行うのが望ましいと考えられる。

c) グルーピングによる影響の検討

我が国の滑走路表面には、滑走路表面の速やかな雨水排水及び摩擦抵抗の増大を目的として、滑走路横断方向に幅 6mm、深さ 6mm、中心線間隔 32mm のグルーピング（溝）が付されていることから、グルーピングが熱赤外線画像における低温部の検出精度に及ぼす影響を検討した。

滑走路において、高さ 1.5m から撮影した熱赤外線画像を図-3.5 に示す。撮影時の俯角が 20° の場合はグルーピングによる縞模様が明瞭に確認されたが、俯角が 10° の場合には縞模様はほとんど無く、低温部を明瞭に確認することができる。これは、図-3.6 に示すように、同じ高さであれば小さな俯角で撮影するほど撮影範囲は広くなり、熱赤外線画像の解像度は低くなるために、グルーピングによる影響が小さくなるためと考えられる。これは角度のみならず撮影高さも影響することから、グルーピングの寸法と使用する赤外線サーモグラフィの解像度を考慮して撮影高さや俯角を調整することで、グルーピングの影響を無視することが可能になると考えられる。

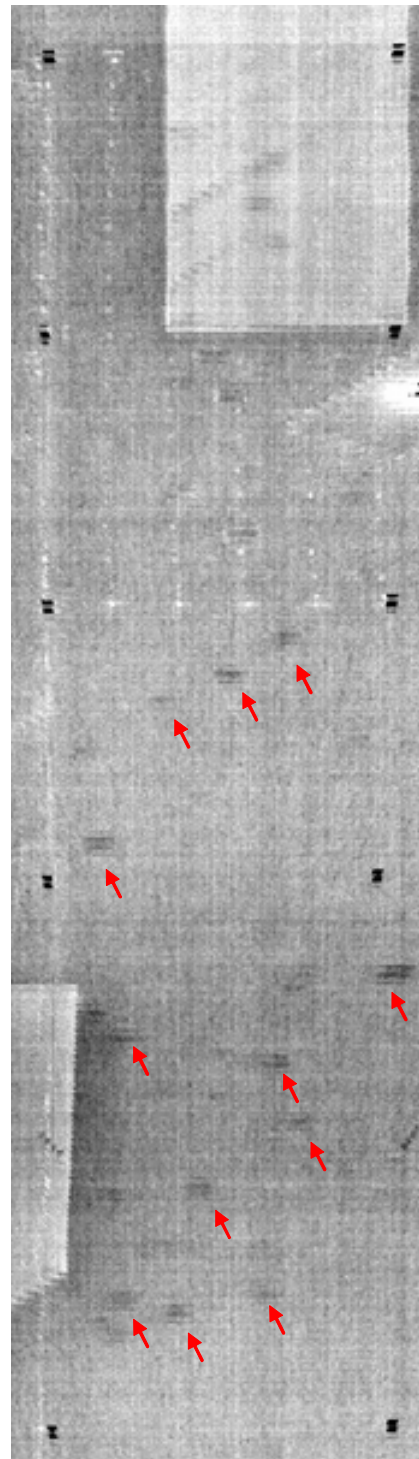
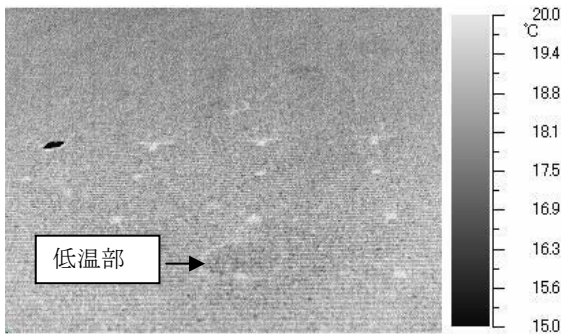
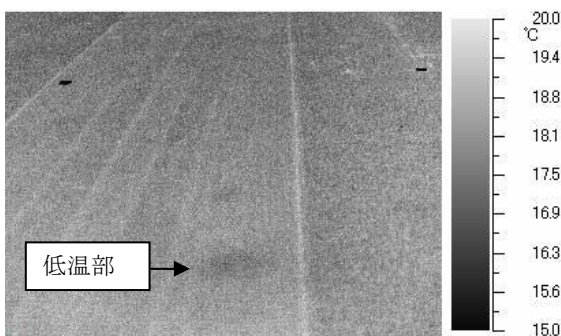


図-3.4 動画像から得られた舗装表面温度分布
(矢印部は低温部)



(a) 俯角 20°



(b) 俯角 10°

図-3.5 グルーピングのある滑走路の熱赤外線画像

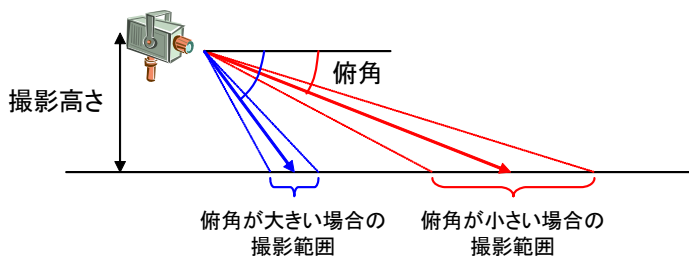


図-3.6 俯角と撮影範囲の関係

3.4 熱収支解析による適用性の検討

前節において、空港アスファルト舗装の層間剥離は、熱赤外線画像による舗装表面温度分布からある程度検出可能であることを明らかにした。しかしながら、層間剥離に起因する舗装表面温度差は、アスファルト混合物内の熱伝導特性の違いによるものであることから、この温度差の大きさには気象条件が大きく影響するものと考えられる。そこで、熱伝導、熱伝達、放射の影響を考慮した有限要素法による熱収支解析を実施し、層間剥離に起因する舗装表面温度差と気象条件との関係を検討した。さらに、那覇空港と新潟空港における経験から、熱赤外

線画像より低温部を容易に判別するためには、目安として少なくとも 0.2°C 以上の温度差が生じていることが望ましいと考えられたことから、この目安値以上の舗装温度差が発生すると考えられる調査可能日数について検討した。

(1) 解析手法

図-3.7 に熱収支解析モデルを示す。舗装内部の熱の流れを式 (3-1) による熱伝導方程式で、顕熱輸送量を式 (3-2) によるアスファルト混合物と大気との間の熱伝達で、舗装表面への日射・舗装表面からの反射日射・大気からの赤外放射・舗装表面からの赤外放射の熱収支による正味放射量を式 (3-3) でそれぞれ考慮した。なお、地表面に水分が無いと仮定し、潜熱は考慮していない。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{式 (3-1)}$$

$$Q = h(T_s - T_a) \quad \text{式 (3-2)}$$

$$E = S\alpha + \varepsilon\sigma(T_a^4 - T_s^4) \quad \text{式 (3-3)}$$

ここに、

T : 舗装温度(K),

t : 時間(s),

λ : 熱伝導率(W/m/K),

c : 比熱(kJ/kg/K),

ρ : 密度(kg/m³),

x, z : 空間座標(m),

Q : 顕熱輸送量 (W/m²),

h : 熱伝達率(W/m²/K),

T_s : 舗装表面温度(K),

T_a : 気温(K),

E : 舗装面が吸収する正味放射量(W/m²),

S : 日射量(W/m²),

α : 日射吸収率,

ε : 輻射率,

σ : ステファン・ボルツマン定数

$$(\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4).$$

解析モデルは2次元モデルとした。各層の厚さならびに剥離の直径は実際の空港舗装におけるものを参考とした。層間剥離の厚さについては不明であることから、採取したコアの層間の状況からここでは1mmと設定した。また、図-3.7に示す舗装構造は、那覇空港における調査区域の舗装構造としたが、上層路盤材料種類や路盤厚の

違いが層間剥離に起因する舗装表面温度差に及ぼす影響が小さいことを確認している。舗装表面温度に大きく影響すると考えられるアスファルト混合物の熱特性値については、表-3.4に示すように、文献調査によるもののほか、試験舗装から切り出した密粒アスファルト混合物(最大骨材粒径 20mm, アスファルト量 5.6%, 空隙率 3.2%)を用いて室内試験により測定した値を使用した。

熱収支解析では、非定常有限要素解析により舗装表面温度の経時的变化を算出するため、以下の理由から前日の午前 8 時を計算開始時刻とし、この時刻における気温ならびにアスファルト混合物平均温度を初期値として設定した。

- ①今回の検討で着目する翌日深夜の時間帯まである程度の計算助走期間が必要である。
- ②昼間の日射により上昇した舗装温度が、日没後に低下する状態を考慮する必要がある。
- ③熱電対を埋設したアスファルト試験舗装の温度測定結果から、アスファルト混合物層内部の深さ別温度が最も均一となる時間帯である。

また、アスファルト試験舗装の温度測定結果から、この時刻における気温とアスファルト混合物平均温度の関係を検証し、初期値として設定するアスファルト混合物平均温度を、この時刻の気温+6°C と設定した。

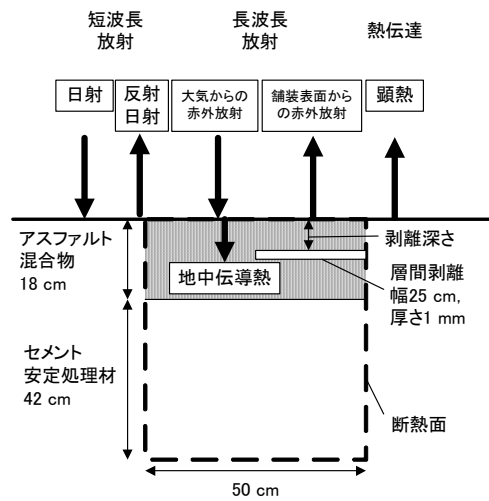


図-3.7 熱収支解析モデル図

表-3.4 熱収支解析に使用したパラメータ

項目			備考
アスファルト 混合物	密度	2,361 (kg/m ³)	室内試験による実測値
	熱伝導率	1.11 (W/m/K)	室内試験による実測値 (JIS A 1412-2, 40°C)
	比熱	0.89 (kJ/kg/K)	室内試験による実測値
	輻射率	0.92	室内試験による実測値 (JIS R 3106, 3107)
	日射吸収率	1.0	文献 ¹⁾
	熱伝達率	7.8+4.5v (W/m ² /K) v: 風速 (m/s)	
セメント 安定処理材	密度	2,400 (kg/m ³)	文献 ²⁾
	熱伝導率	1.20 (W/m/K)	文献 ³⁾
	比熱	0.90 (kJ/kg/K)	

(2) 解析手法の妥当性の検証

前節における那覇空港での適用性調査時に測定した気象条件（気温、日射量、風速）を使用し、調査時に実測した舗装表面温度と熱収支解析により求めた舗装表面温度を図-3.8に示す。表面温度の実測値と解析値との誤差は最大1℃程度であり、剥離部と健全部との温度差については実測値と解析値がほぼ一致している。このことから、当該解析手法により、剥離部と健全部との間の表面温度差を非常に精度良く推定できると考えられる。

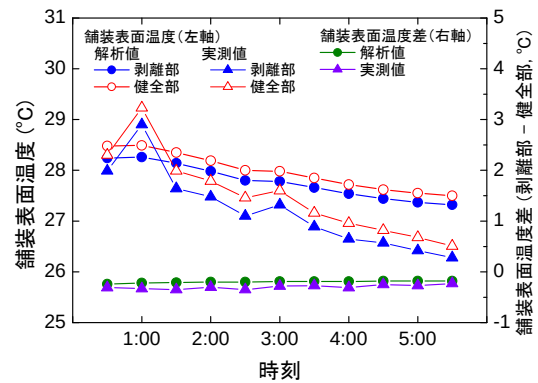


図-3.8 舗装表面温度の実測値と解析値

(3) 剥離深さと気象条件が舗装表面温度差に及ぼす影響

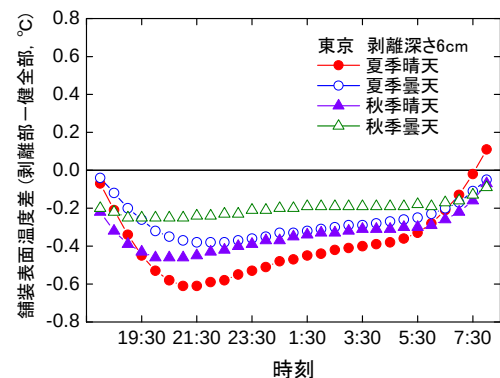
国内6都市（札幌、仙台、新潟、東京、大阪、那覇）の気象条件を使用して、剥離部と健全部との間に生じる表面温度差を熱収支解析により算出した。季節・天候条件としては、表-3.5に示す4ケースについて、AMeDASのデータを使用した。

表-3.5 熱収支解析に使用した気象条件データ

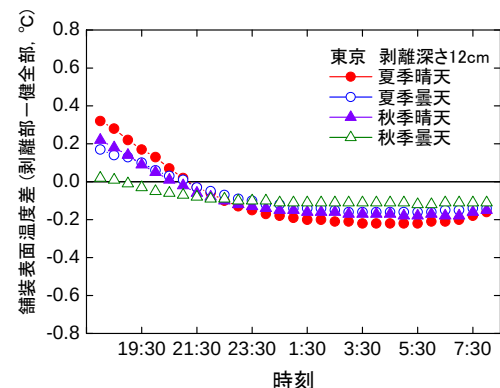
対象都市	札幌、仙台、新潟、東京、大阪、那覇
季節	夏季：6～8月 秋季：9～11月
天候	晴天：昼夜ともに「晴」もしくは「快晴」 曇天：昼夜ともに「曇」「薄曇」「曇時々晴/雨」 「曇一時晴/雨」のいずれかで、日降水量が0mm
データ種類	気温、風速、日射量

まず、層間剥離の深さによる影響を検討した。熱収支解析により求めた東京における剥離部と健全部との表面温度差の経時変化を図-3.9に示す。層間剥離の深さは6cmならびに12cmに設定した。層間剥離の位置が深い場合は、浅い場合に比べて表面温度差は小さくなり、適用性調査の経験による目安値である0.2℃以上の温度差が発生するのは、夏季晴天時の天候においてのみ、非常に短時間に限られることがわかる。

次に、調査に適した気象条件について検討した。図-3.9をみると、剥離部と健全部との間の表面温度差は天候や季節に大きく左右され、比較的大きな温度差が生じるのは晴天時であり、且つ秋季よりも夏季の方が温度差は大きくなる傾向が確認できる。これは、曇天時よりも晴天時、秋季よりも夏季の方が、日中に舗装表面温度が大きく上昇し、日没後に大きく低下することから、熱伝導特性の違いによる剥離部と健全部との温度差が顕著に現れると考えられる。つまり、日射量が少ない曇天時のように昼夜の舗装温度差が小さい場合には、熱赤外線画像による剥離の検出は困難になると考えられる。



(a) 層間剥離深さ 6cm



(b) 層間剥離深さ 12cm

図-3.9 東京における舗装表面温度差の経時変化

(4) 調査可能な気象条件の検討

前項で示したとおり、層間剥離に起因する舗装表面温度差の大きさは気象条件に大きく左右されることから、調査可能な気象条件を事前に推定できることが望ましい。そこで、国内6都市の気象条件を用いた熱収支解析結果（剥離深さ8cmの場合）から、深夜の最大舗装表面温度差 ΔT_{pav} を目的変数、一日の気温差 ΔT_{air} 、日中の積算日射量 Q 、一日の平均風速 v を説明変数として重回帰分析を行った。重回帰分析結果を図-3.10に、重回帰式を式(3-4)に示す。なお、それぞれの説明変数同士の相関は低いことを確認している。

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

式(3-4)

ここに、

ΔT_{pav} : 最大舗装表面温度差（絶対値、℃）

ΔT_{air} : 一日の気温差（最高気温－最低気温、℃）

Q : 日中の積算日射量（kW・h/m²）

v : 一日の平均風速（m/s）

この重回帰式により推定した各都市の最大舗装表面温度差と、熱収支解析により得られた最大舗装表面温度差の相関は非常に高いことから、この重回帰式により、一日の気温差、日射量、風速を入力することにより、深夜に生じる最大舗装表面温度差を精度良く推定することが可能であると考えられる。

さらに、実際に調査可能な日数について検討した。実際の空港での調査では、深夜に制限区域内に入場し、早朝には退場しなければならない。図-3.8に示すように、舗装表面温度差は早朝に近づくにつれて小さくなる傾向があることから、夜間から早朝まで効率的に調査を実施するためには、調査終了時点である早朝でも0.2℃以上の温度差が発生していることが望ましい。図-3.11は熱収支解析により算出した深夜に生じる最大舗装表面温度差と午前6時の舗装表面温度差を比較したものであるが、これによれば、深夜に発生する最大舗装表面温度差が0.25℃以上あれば、早朝6時の時点においても0.2℃以上の温度差が生じていることとなる。

以上の検討を踏まえ、AMeDASの2006年1月から12月までの毎日の気象データ（ただし雨天時のデータを含む）と式(3-4)を用い、札幌、東京、大阪における調査可能日数を検討した結果を図-3.12に示す。これによれば、比較的高緯度の札幌においても、春から秋にかけて、熱赤外線画像を用いた層間剥離の検出が可能であることが

わかる。

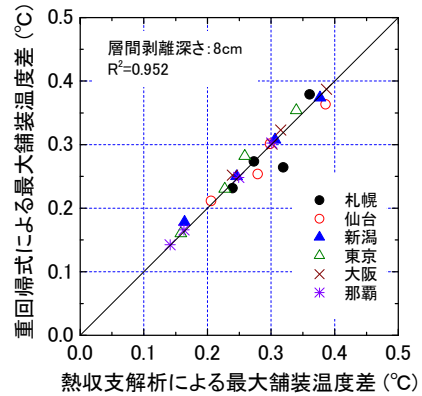


図-3.10 最大舗装温度差の重回帰分析結果

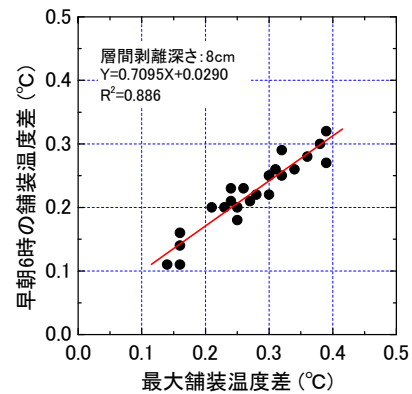


図-3.11 早朝と最大の舗装温度差の関係

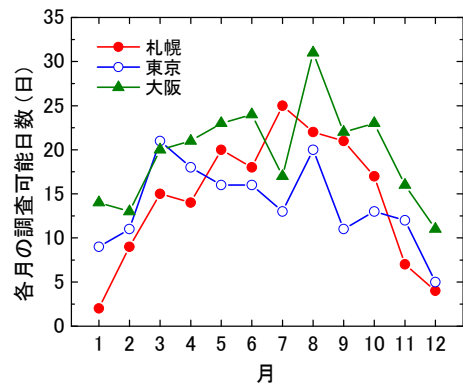


図-3.12 月別の調査可能日数

3.5 結論

熱赤外線画像による層間剥離検出法の適用性について、現地試験ならびに熱収支解析により検討した結果は、以下のようまとめられる。

- (1) 赤外線サーモグラフィを用いた深夜の調査により、熱赤外線画像により層間剥離をある程度検出することが可能である。また、時速 10km/h 程度の走行速度であれば、走行しながら撮影した動画像から層間剥離の検出が可能である。
- (2) 撮影角度や撮影高さを調整することにより、舗装表面のグルーピングの影響を小さくすることが可能である。
- (3) 層間剥離の位置が浅い場合、舗装温度が日中に大きく上昇し日没後に大きく低下する夏季や晴天時に、層間剥離に起因する舗装表面温度差が大きくなる。
- (4) 一日の気温差、日中の積算日射量、一日の平均風速から、層間剥離に起因する舗装表面温度差を推定することが可能である。
- (5) 調査実施可能日を検討した結果、比較的高緯度の空港においても、春から秋にかけて調査が可能である。

3.6 おわりに

熱赤外線画像を用いた空港アスファルト舗装の層間剥離検出の適用性を明らかにしたが、全ての層間剥離をこの手法で検出できるわけではないことに注意しなければならない。ただし、従来の打音調査と比較した場合、作業効率は格段に優れていると考えられることから、当該手法と打音調査を組み合わせる使用することになる。一つの提案としては、定期的な調査として赤外線画像による診断を実施し、その結果層間剥離が多発していると考えられる特定の箇所があれば、その箇所に対して打音調査を集中的に実施する方法があると考えられる。

第3章の参考文献

- 1) 日本建築学会：建築設計資料集成 環境, pp. 97-134, 1987.
- 2) セメント協会重交通専門委員会：重交通専門委員会報告書, (社)セメント協会, 239 p., 1995.
- 3) 日本機械学会：伝熱工学資料改訂第4版, pp. 320-322, 1986.

4. 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

4.1 研究の手順

第1章で述べたように、空港舗装上を走行する航空機の操縦安全性と走行快適性を確保するためには、路面平坦性が航空機の挙動に及ぼす影響を考慮した平坦性管理基準を策定する必要がある。そのために、離陸時及びタキシング時の航空機の鉛直加速度に着目した平坦性管理基準を作成することを目的として、以下の手順で本研究を実施した。

- ・航空機応答シミュレーションによる、路面波長、航空機材、走行速度と航空機に生じる鉛直加速度の関係を明らかにする。
- ・上記関係を用い、路面波長に応じた平坦性管理基準（許容凹凸量基準）を提案する。
- ・実際の滑走路で計測した縦断プロファイルを用い、平坦性管理基準の妥当性を検証する。

4.2 航空機走行時の応答と路面の平坦性の関係

航空機走行時の応答シミュレーションソフト APRas を用い、航空機の種類や走行速度、路面の波長や振幅を変化させて解析を行い、航空機の鉛直加速度と路面の平坦性の関係について考察した。APRas では、以下の条件を入力することにより、航空機の離陸走行時および着陸走行時のパイロット位置および重心位置における鉛直加速度を算出することができる。

- ① 航空機種
- ② 風速
- ③ 標高
- ④ 気温
- ⑤ 走行形態（離陸時、着陸時、タキシング時）
- ⑥ 走行速度（ただし、タキシング時のみ）
- ⑦ 路面縦断プロファイル

(1) 誘導路走行時の航空機の応答

a) 検討手法

航空機が誘導路を一定速度で走行する場合を想定して解析を行い、航空機の鉛直加速度に影響を及ぼす要因について検討した。

解析に用いる縦断プロファイルとしては、図-4.1 に示すように、波長を1～50m、振幅を2～10mmとした連続サイン波形を用いた。縦断プロファイルの入力間隔は0.01mとし、全長は300mとした。縦断プロファイルの入力間隔と全長は、APRas に入力データ数の制限がある

こと、また、後述する滑走路走行時よりも走行速度が遅いことを考慮して設定した。

解析に用いる航空機の種類としては、表-4.1 に示す通り、APRas で選択可能な航空機の中から、大型機としてボーイング 747-400 型機（以下、B747）を、小型機としてマクダネルダグラス DC-9-40 型機（以下、DC-9）を選択した。

航空機が誘導路を走行する際の実速度としては、既往の研究¹⁾を元に、日中に直線誘導路を走行する際の実速度を最大値として、45km/h、30km/h、15km/h の三種類とした。また、路面の標高は海拔 5m とし、気温は 15℃で無風条件とした。

航空機の鉛直加速度としては、航空機の重心位置とパイロット位置において計算されるものに着目した。以下では、航空機に瞬間的に発生する最大鉛直加速度だけではなく、走行中に生じる鉛直加速度全体の大きさを定量的に評価するために、これらの鉛直加速度の代表値として、計算された鉛直加速度の 85 パーセンタイル値²⁾を採用した（以下では、代表鉛直加速度と記す）。この 85 パーセンタイル値は、鉛直加速度が正規分布すると仮定した場合、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。

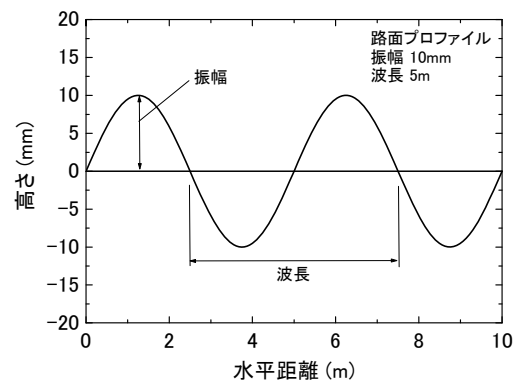


図-4.1 路面の振幅と波長

表-4.1 検討した航空機種

機種名	総質量 (kg)	ホイールベース(m)
B747	362,880	25.60
DC-9	51,710	17.07

b) 各種要因が航空機の代表鉛直加速度に及ぼす影響

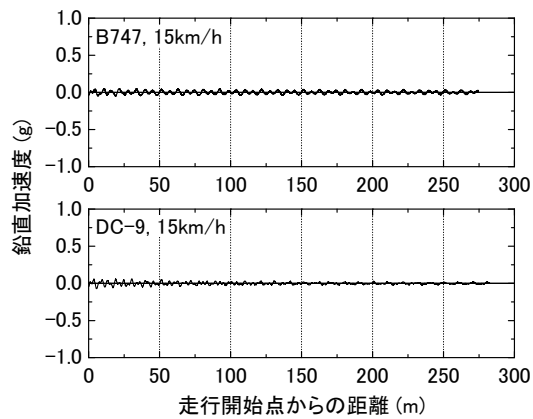
振幅が 10mm、波長が 10m である縦断プロファイルを有する誘導路を走行する際に航空機に生じる重心位置およびパイロット位置の鉛直加速度をそれぞれ図-4.2、図-4.3 に示す。

重心位置とパイロット位置の鉛直加速度を比較すると、B747, DC9 とともに、パイロット位置における鉛直加速度が重心位置のそれよりも大きいことがわかる。

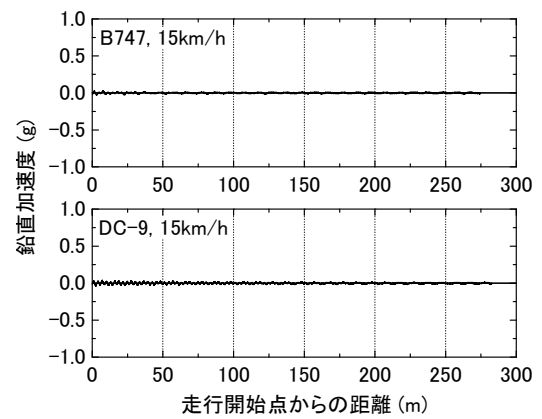
次に、代表鉛直加速度と波長の関係を図-4.4 に示す。代表鉛直加速度は、路面の波長がある長さになる場合に最大となり、それ以外の波長の場合は、非常に小さい。また、代表鉛直加速度が最大となるときの波長は、航空機の走行速度が小さいほど短い。誘導路を航空機が走行する速度が 45km/h 以下であるとすると、航空機の代表鉛直加速度が大きくなるのは、波長が 20m 以下の路面を走行する場合であるといえる。

これらの結果を、航空機の走行速度を路面の波長で除すことにより算出した時間振動数を用いて整理したのが図-4.5 である。航空機に生じる代表鉛直加速度は、走行速度によらず、ある特定の時間振動数の場合に最大となり、その他の時間振動数の場合には非常に小さい。この特定の時間振動数は航空機の種類により異なり、B747 では 1.3c/s 程度、DC-9 では 1.5c/s 程度である。これらの時間振動数は航空機の固有振動数に相当すると考えられるが、これら以外の航空機種（大型機としてマクダネルダグラス MD-11 型機、中型機としてボーイング 737-200 型機）についても解析した結果、走行速度によらず、概ね同程度の時間振動数において代表鉛直加速度が最大となった。これらのことから、誘導路走行時の航空機の応答を考慮した平坦性の基準を考える場合は、航空機の走行速度によらず、特定の時間振動数の場合に発生する代表鉛直加速度に着目すればよいことがわかる。

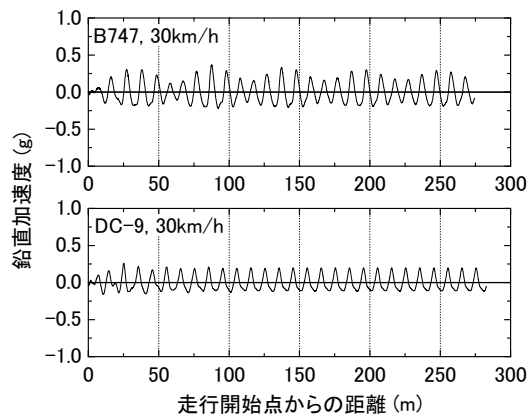
図-4.6 に、一連の計算から明らかになったパイロット位置および重心位置の代表鉛直加速度の最大値と走行速度の関係を示す。B747 では、振幅の大きさにより若干傾向が異なるが、走行速度の大きいほうが代表鉛直加速度は小さくなる傾向がみられる。一方、DC-9 では、走行速度によらず、代表鉛直加速度はほぼ一定であることがわかる。



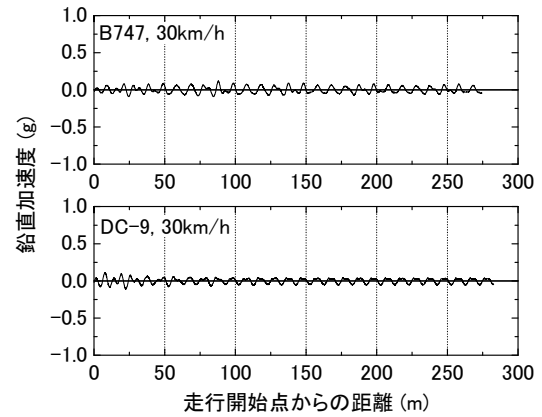
(a) 振幅 10mm, 波長 10m, 走行速度 15km/h



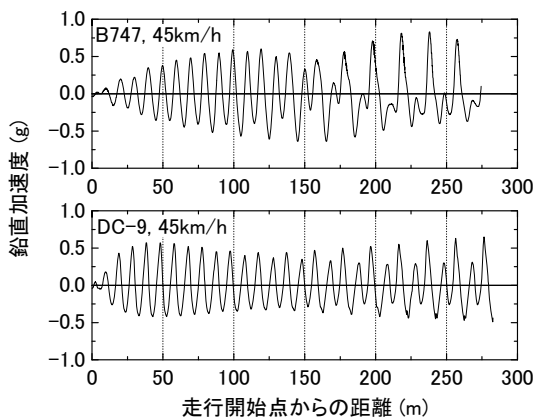
(a) 振幅 10mm, 波長 10m, 走行速度 15km/h



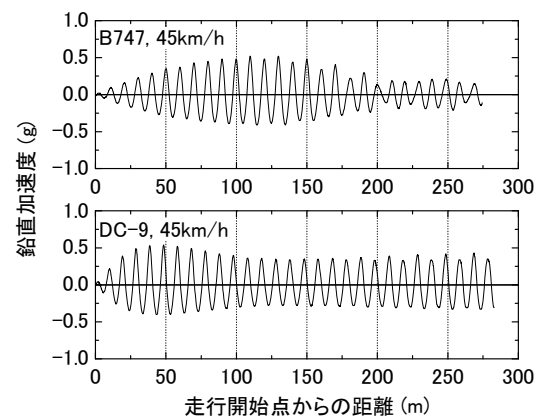
(b) 振幅 10mm, 波長 10m, 走行速度 30km/h



(b) 振幅 10mm, 波長 10m, 走行速度 30km/h



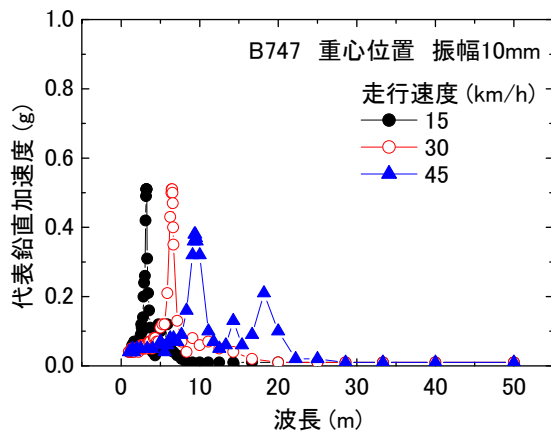
(c) 振幅 10mm, 波長 10m, 走行速度 45km/h



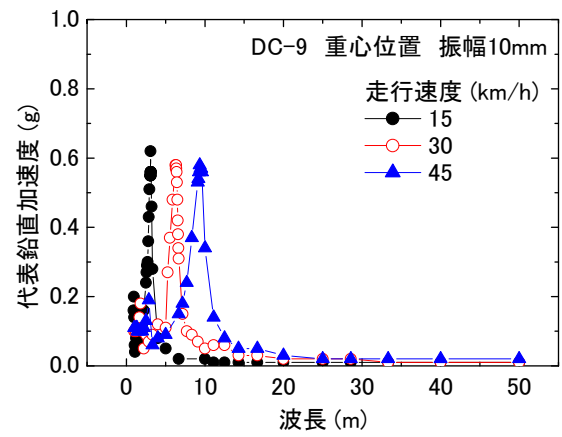
(c) 振幅 10mm, 波長 10m, 走行速度 45km/h

図-4.2 誘導路走行時の鉛直加速度 (パイロット位置)

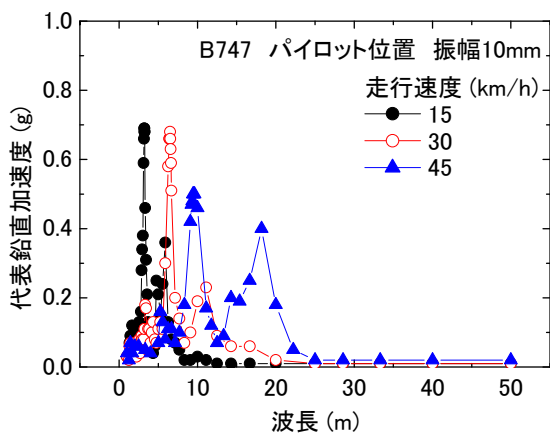
図-4.3 誘導路走行時の鉛直加速度 (重心位置)



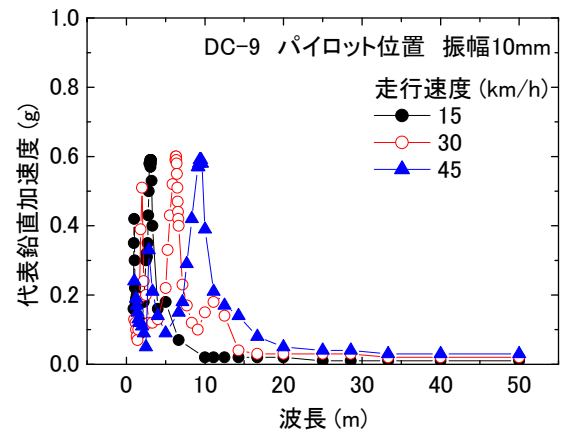
(a) B747 の重心位置



(c) DC-9 の重心位置

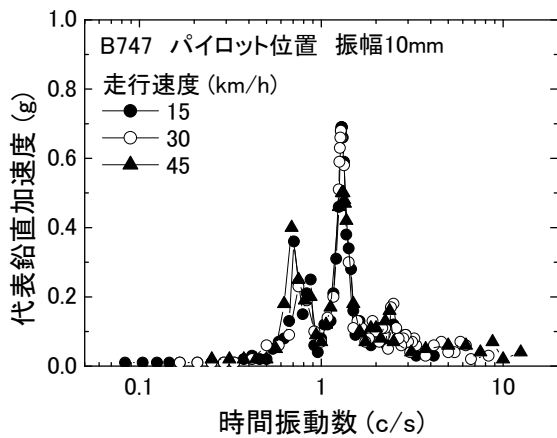


(b) B747 のパイロット位置

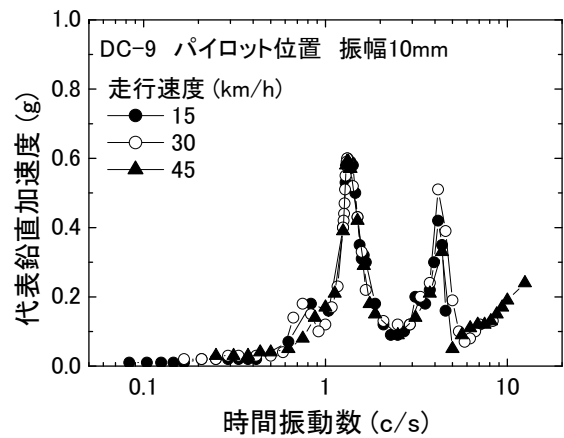


(d) DC-9 のパイロット位置

図-4.4 代表鉛直加速度と波長の関係 (振幅 10mm)

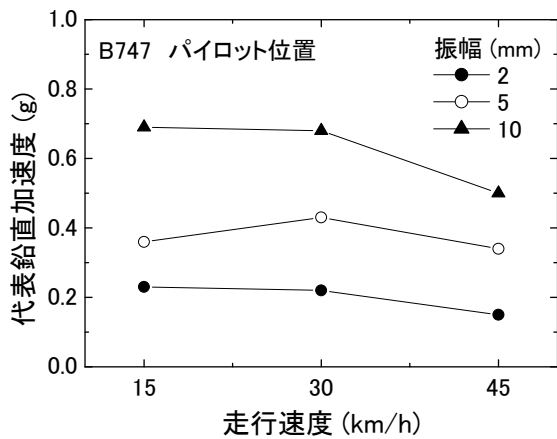


(a) B747 のパイロット位置

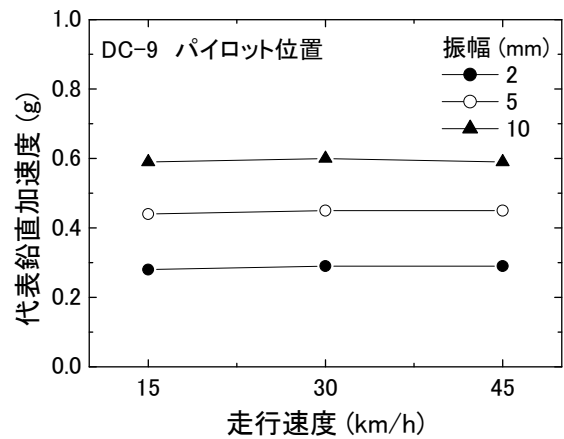


(b) DC-9 のパイロット位置

図-4.5 代表鉛直加速度と時間振動数の関係（振幅 10mm）



(a) B747 のパイロット位置



(b) DC-9 のパイロット位置

図-4.6 代表鉛直加速度と走行速度の関係

(2) 滑走路走行時の航空機の応答

a) 検討手法

航空機が滑走路を加速しながら走行し、離陸に至るまでを想定して解析を行い、航空機の鉛直加速度に影響を及ぼす要因について検討した。

解析に用いる縦断プロファイルとしては、対象とする航空機の離陸に必要な走行距離（APRasでのシミュレーションにおいて離陸に必要な距離で、B747で2,700m程度、DC-9で2,000m程度）を考慮して、全長を3,000mとし、入力データ量の制限からプロファイルの入力間隔を0.1mとした。また、路面の波長を短くした場合、このデータ入力間隔では、一つのサイン波形を構成するデータ点数が少ないために滑らかな連続サイン波形とならないこと、誘導路走行時において検討した振幅の範囲では、滑走路を走行する航空機の代表鉛直加速度が小さいことを考慮し、波長を2.5～100m、振幅を10～50mmとした連続サイン波形を用いた。

解析で対象とした航空機は、前節に示す航空機と同一とし、航空機が滑走路末端から走行を開始して離陸に至るまで解析を行った。また、路面の標高は海拔5mとし、気温は15℃で無風条件としている。

b) 各種要因が航空機の代表鉛直加速度に及ぼす影響

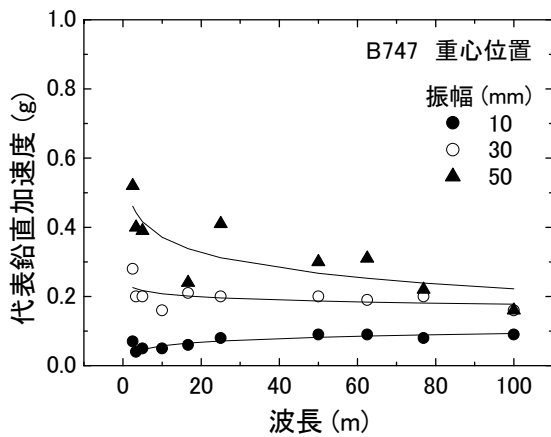
振幅が10～50mmである縦断プロファイルを有する滑走路を走行する際に、航空機に生じる代表鉛直加速度と波長の関係を図-4.7に示す。重心位置とパイロット位置の代表鉛直加速度を比較すると、航空機の種類によらず、パイロット位置の方が重心位置よりも代表鉛直加速度が大きく、また、代表鉛直加速度は概ね振幅に比例して大きくなる。

代表鉛直加速度と波長の関係を見ると、誘導路走行時では、特定の波長以外では代表鉛直加速度が非常に小さいのに対し、滑走路走行時では、短波長領域から長波長領域にかけて、比較的広い範囲で同程度の代表鉛直加速度の値となっており、B747で振幅が小さい場合を除いて、特に短波長の路面を走行する際の代表鉛直加速度が大きいことがわかる。また、短波長領域ではDC-9の方が、長波長領域ではB747の方が代表鉛直加速度は大きいことから、航空機種により路面の波長に対する航空機の応答が異なるものと考えられる。

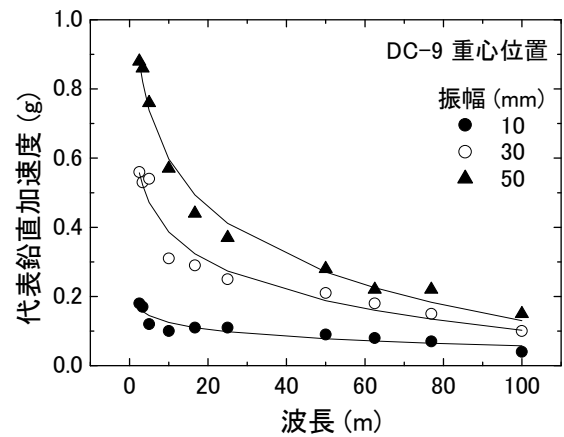
滑走路走行中に航空機のパイロット位置の(85パーセントイル値ではない)鉛直加速度が最大となる時の走行速度と波長の関係を図-4.8に示す。短波長の路面では、低速で走行する場合、すなわち滑走開始直後の比較的早い段階に鉛直加速度が最大となるが、長波長の路面では、

高速で走行する場合、すなわち航空機の離陸に近い段階で鉛直加速度が最大となる。

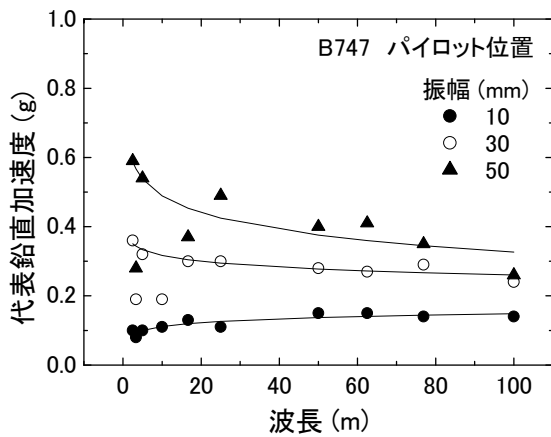
図-4.8に示した結果を、(85パーセントイル値ではない)鉛直加速度が最大となる時の時間振動数と波長により整理したのが図-4.9である。誘導路走行時には、図-4.5に示した時間振動数において、代表鉛直加速度だけではなく、(85パーセントイル値ではない)鉛直加速度も最大となることから、このときの時間振動数を比較のために示した。誘導路走行時には、特定の時間振動数の場合に鉛直加速度が最大となるのに対し、滑走路走行時では、路面の波長により、鉛直加速度が最大となるときの時間振動数は変化しているのがわかる。誘導路走行時の場合と比較すると、短波長路面を走行する場合は、誘導路走行時よりも高い時間振動数のときに、また長波長路面を走行する場合は、誘導路走行時よりも低い時間振動数のときに、鉛直加速度が最大となる傾向がある。これは、誘導路では航空機は一定速度で走行しているのに対し、滑走路では航空機は加速して走行していることから、航空機の応答特性が異なるものと推測される。



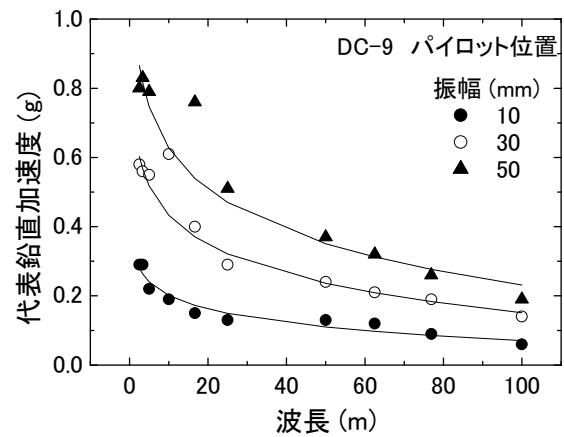
(a) B747 の重心位置



(c) DC-9 の重心位置



(b) B747 のパイロット位置



(d) DC-9 のパイロット位置

図-4.7 代表鉛直加速度と波長の関係

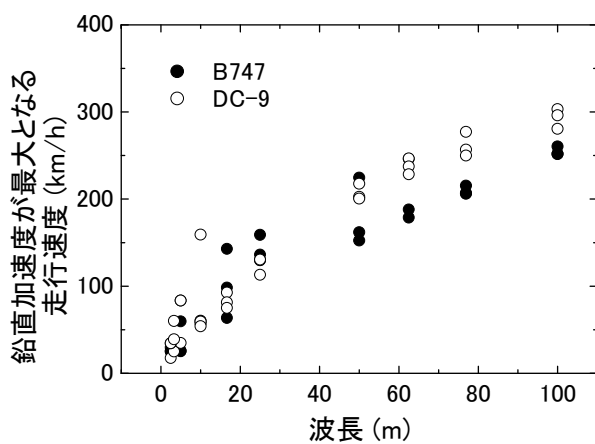


図-4.8 鉛直加速度最大時の走行速度

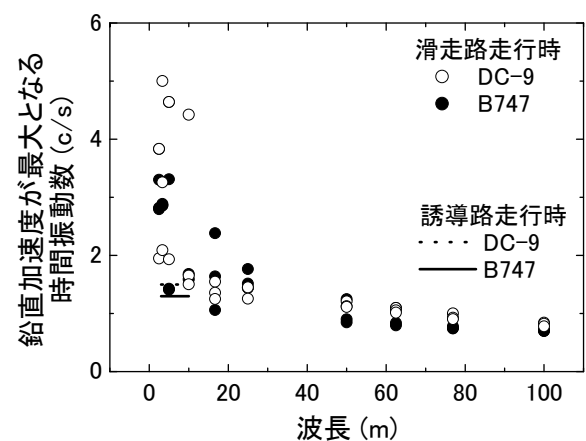


図-4.9 鉛直加速度最大時の時間振動数

(3) 航空機の応答を考慮した平坦性管理基準

航空機を操縦するパイロットが、計器を正確に視認できる鉛直加速度の範囲は $\pm 0.4g$ 以下とされていること³⁾から、航空機の応答を考慮した空港舗装の平坦性管理基準として、走行中の航空機に生じる代表鉛直加速度を $\pm 0.4g$ 以下に抑制するために許容される路面の凹凸量を計算した。航空機の代表鉛直加速度は、パイロット位置のものが重心位置のものと同等か若干大きくなる傾向があることから、ここではパイロット位置の代表鉛直加速度に着目した。

図-4.6、図-4.7に示した代表鉛直加速度と振幅の関係から計算した、誘導路走行時と滑走路走行時の許容凹凸量（サイン波振幅の二倍）を図-4.10に示す。

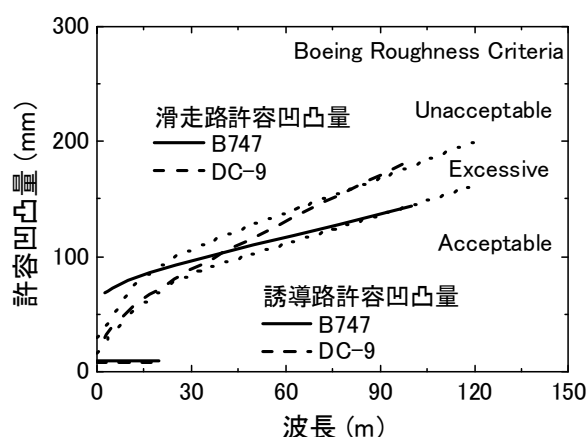


図-4.10 許容凹凸量と波長の関係

誘導路走行時では、20m以下の波長に対して許容凹凸量を示しているが、滑走路走行時のものと比べると許容凹凸量は非常に小さく、B747で9mm、DC-9で8mmであり、航空機種による差は小さいことがわかる。一方、滑走路走行時の場合は、長波長よりも短波長の路面を走行する方が大きな代表鉛直加速度が生じることから、路面の波長が短いほど許容凹凸量が小さくなる。

航空機種の違いをみると、図-4.7で示したように、短波長路面と長波長路面に対する航空機の応答は、B747とDC-9とで異なることから、短波長領域ではDC-9の方が、また長波長領域ではB747の方が許容凹凸量は小さくなる。このことから、空港舗装の平坦性については、対象となる空港に乗入れる航空機種を考慮して総合的に評価する必要があると言えよう。

ボーイング社が定めた滑走路の平坦性基準³⁾を併せて図-4.10に示した。この基準では、波長ごとの凹凸量に対する判定を「Acceptable」、「Excessive」、「Unacceptable」の三段階で定めている（図中の破線はそれぞれの領域の境界線を示している）。今回検討した許容凹凸量とボーイ

ング社の基準を比較すると、B747とDC-9の応答から求めた許容凹凸量曲線の包絡線として、「Acceptable」と「Excessive」の境界を示す曲線が存在することがわかる。しかしながら、ボーイング社の基準で「Unacceptable」と判定される凹凸量であっても、今回検討した許容凹凸量を適用すると、機種と波長の組み合わせによっては許容される場合もある。

既往の研究において、航空機走行時の鉛直加速度から算出された誘導路ならびに滑走路の許容凹凸量と比較した。Hachiyaら²⁾が算出した許容凹凸量と比較すると、短波長領域では同程度であるが、長波長領域に関しては、本研究において算出した許容凹凸量の方が若干大きい。これは、許容される代表鉛直加速度を $0.35g$ としている点で本研究とは異なることが原因と考えられる。また、後藤ら⁴⁾が算出した許容凹凸量と比較すると、誘導路走行時の場合は同程度であるが、滑走路走行時の場合は本研究において算出した許容凹凸量の方が大きい。これは、航空機のパイロット位置に生じる（85パーセンタイル値ではない）鉛直加速度の最大値を用いて許容凹凸量を決定していることが原因と考えられる。このように、航空機に生じる鉛直加速度の代表値や、許容される代表鉛直加速度の設定方法により、許容凹凸量が異なってくると考えられることから、今後、実際に航空機に生じる鉛直加速度とAPRasを用いた解析による鉛直加速度とを比較し、基準値の信頼性を高める必要があるといえる。

4.3 許容凹凸量による空港舗装の平坦性評価

東京国際空港の滑走路において三カ年にわたり測定した縦断プロファイルを用い、前節で示した許容凹凸量を用いた平坦性評価手法の妥当性について検討した。

滑走路の縦断プロファイルは、写真-4.1に示す路面性状測定車により測定した。この路面性状測定車は、逐次二点法⁴⁾でプロファイルを測定する。また、この路面性状測定車はGPSを搭載しており、逐次二点法と組み合わせることにより、短波長から長波長まで正確に計測することを可能としている。

測定位置は、ボーイング747型機と767型機の主脚中心位置を参考に、滑走路中心線ならびに滑走路中心線より左右に1.92m、4.65m、5.50m離れた位置の合計7測線においてレーザプロフィロメータにより測定された。測定時期は2001年2月、2001年12月、2003年1月であり、各回の測定位置は同一である。

7測線において測定された縦断プロファイルを用い、APRasにより航空機の代表鉛直加速度を計算した結果、測線による代表鉛直加速度の差は小さいこと、既往の研

究において同データに対する空間周波数解析を実施した結果でも測線による差は小さいこと⁵⁾から、以降では、ボーイング 747 型機の主脚中心位置にあたる、滑走路中心線から 5.50m 離れた測線において測定された縦断プロファイルについてのみ検討した。滑走路中心線から 5.50m 離れた測線において測定された縦断プロファイルを図-4.11 に示す。図には滑走路南端と滑走路北端から測定を開始したプロファイル（それぞれ測定開始点の路面高さを原点とした）を示しているが、両プロファイルはほぼ完全に一致することから、滑走路の短波長成分および長波長成分を正確に測定することが出来たといえる。

測定により得られた縦断プロファイルを、前節で示した許容凹凸量を用いて評価するためには、特定の波長ごとの凹凸量を定量化する必要がある。ここでは、図-4.12 に示すような定量化方法を用いた。すなわち、縦断プロファイル上で特定の波長の区間を順次移動させて凹凸量を算出した。測定した縦断プロファイルを用いて平坦性を評価する場合、特定の波長成分がどの位置で卓越しているのかを検討する方法としては、ウェーブレット理論を用いた空間周波数分析による方法⁶⁾があるが、ここでは、実用性を考慮し、このような凹凸量の定量化方法を採用した。

滑走路南端からの距離と凹凸量の分布を図-4.13 に示す。波長は 10m、100m としたが、着目する波長が異なると、凹凸量が大きくなる箇所が異なることがわかる。すなわち、波長が 10m の場合は、滑走路南端から 300m ～600m、2,200m～2,400m 付近で、波長が 100m の場合は、滑走路南端付近と 700m～1,200m 付近で凹凸量が大きくなっている。

次に、滑走路の短波長成分と長波長成分が航空機の応答に及ぼす影響を検討するために、図-4.11 に示した縦断プロファイルを用いて、B747 と DC-9 が滑走路南端から離陸走行を開始する場合の鉛直加速度を計算した。

パイロット位置における鉛直加速度を図-4.14 に示す。同一の縦断プロファイルを用いているにもかかわらず、航空機種の違いにより、鉛直加速度が大きくなる位置が異なることがわかる。これは、図-4.13 に示したように、短波長成分と長波長成分の凹凸量の分布が異なることが原因と考えられる。すなわち、連続サイン波形による解析結果から、短波長の路面を走行する際は DC-9 の方が、長波長の路面を走行する際は B747 の方が鉛直加速度は大きくなるため、滑走路の中で短波長成分の凹凸量が大きな箇所を走行する際には DC-9 の、長波長成分の凹凸量が大きな箇所を走行する際には B747 の鉛直加速度が大きくなると考えられる。

以上の結果から、航空機の応答特性と波長ごとの路面の凹凸量を考慮することで、航空機の鉛直加速度が大きくなる箇所を推定することができると考えられる。



写真-4.1 路面性状測定車

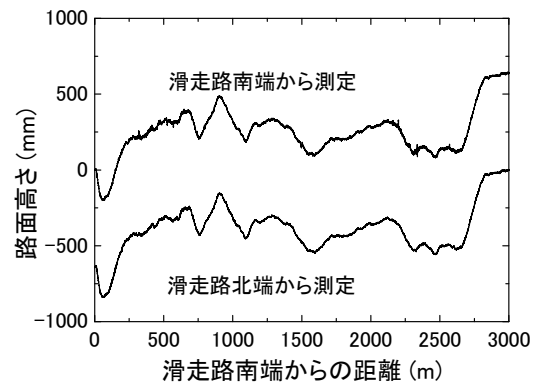


図-4.11 滑走路の縦断プロファイル

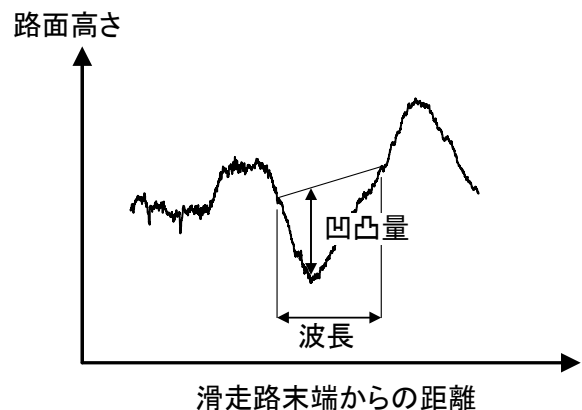


図-4.12 波長と凹凸量の定義

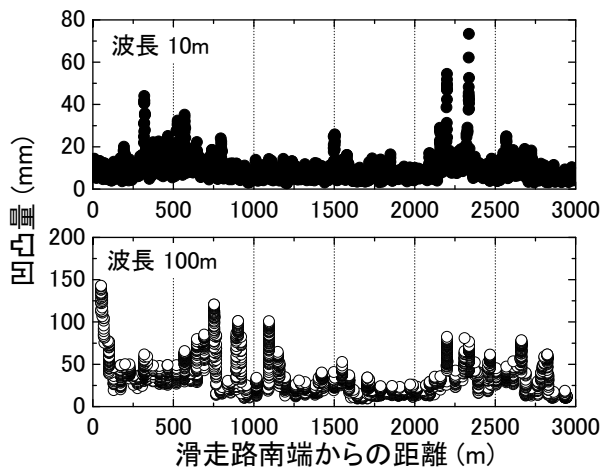


図-4.13 滑走路の凹凸量の分布

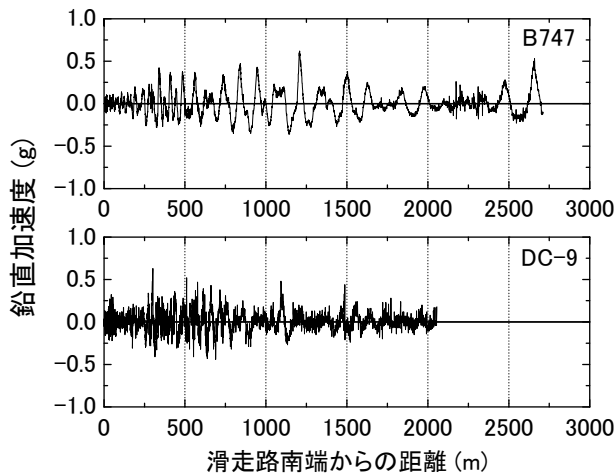


図-4.14 滑走路走行時の鉛直加速度

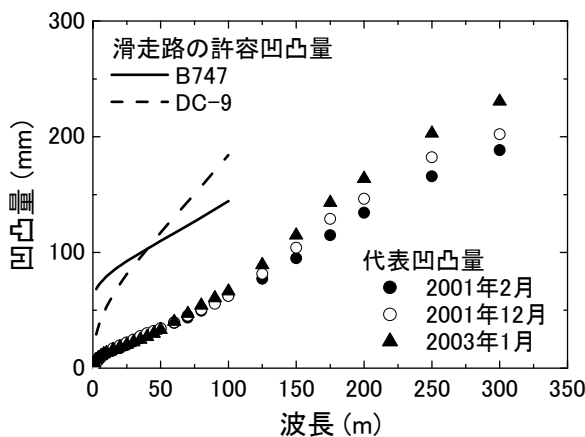


図-4.15 滑走路の代表凹凸量と波長の関係

表-4.2 滑走路走行時の代表鉛直加速度

縦断プロファイル 測定月	パイロット位置の 代表鉛直加速度 (g)	
	B747	DC-9
2001年2月	0.18	0.15
2001年12月	0.14	0.17
2003年1月	0.23	0.21

次に、三カ年にわたり測定した滑走路の縦断プロファイルから、図-4.12 に示す方法により、波長ごとの凹凸量の85パーセンタイル値（以下では代表凹凸量と記す）を整理した結果を図-4.15 に示す。これによると、100m以上の波長に対応した代表凹凸量が二年間で増大していることがわかる。この原因は明確ではないが、この滑走路が埋立地盤上に建設された施設であることから、不同沈下の影響があるのかもしれない。

しかしながら、前節で示した許容凹凸量と滑走路の代表凹凸量を比較すると、この滑走路の代表凹凸量は波長によらず大きくはないと考えられる。また、表-4.2 に、この滑走路を離陸走行した場合のパイロット位置における代表鉛直加速度を示すが、最大でも0.2g程度であることから、今回縦断プロファイルを測定した滑走路は、本研究で提案した許容凹凸量の基準を当てはめると、現時点では良好な路面状態を保っているといえる。これは、この空港を利用するパイロットに対して実施したアンケートにおいて、当該滑走路の舗装状況評価に問題がないとされる結果⁹⁾からも裏付けられる。

次に、今回測定した縦断プロファイルを、誘導路のものと同みなして、誘導路走行時の平坦性について検討した。

誘導路走行時の航空機の応答に影響を及ぼすと考えられる20m以下の波長について、代表凹凸量と波長の関係を整理したのが図-4.16 である。代表凹凸量は5m以下の波長では許容量より小さいが、波長が比較的長い場合には許容量を超過していることがわかる。

この縦断プロファイル上を、航空機が45km/hの一定速度で走行する場合の代表鉛直加速度を表-4.3 に示す。縦断プロファイルの代表凹凸量は許容量を超過しているにもかかわらず、航空機の代表鉛直加速度は最大でも0.2g程度であることがわかる。このことから、連続サイン波形による一連の解析から算出した誘導路の許容凹凸量は過小である可能性がある。これは、航空機の運動特性の時間依存性のために、特定の波長の波が連続した場合について算出した許容凹凸量を様々な波長の波が複合している実際のプロファイルの評価に使用する場合には、

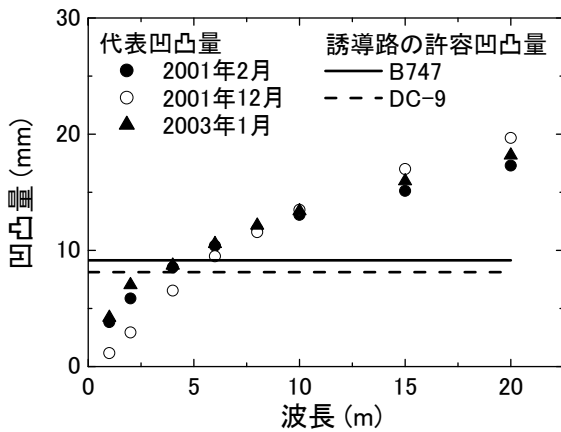


図-4.16 20m以下の波長に対応する代表凹凸量

表-4.3 一定速度走行時の代表鉛直加速度

縦断プロファイル 測定月	パイロット位置の 代表鉛直加速度 (g)	
	B747	DC-9
2001年2月	0.17	0.21
2001年12月	0.20	0.23
2003年1月	0.21	0.23

当てはまらない可能性がある。

4.4 結論

航空機走行時の応答を考慮した平坦性評価方法について、航空機に生じる鉛直加速度に着目して検討した結果は次のとおりまとめられる。

- (1) 航空機種の違いは滑走路走行時の航空機の応答で顕著であり、B747は長波長の路面を、DC-9では短波長の路面を走行する際に代表鉛直加速度が大きくなる傾向にある。
- (2) 誘導路走行時の場合、走行速度によらず、特定の時間振動数のときに鉛直加速度が最大となる。これに対して、滑走路走行時の場合、鉛直加速度が最大となるときの時間振動数は一定ではなく、波長により変化する。
- (3) 一連の解析結果をまとめて、誘導路ならびに滑走路の平坦性管理基準を提案した。
- (4) 滑走路の平坦性管理基準については、縦断プロファイルを元にした波長ごとの凹凸量と平坦性管理基準を比較することで、航空機の応答を考慮した空港舗装の平坦性評価が可能である。
- (5) 誘導路の平坦性管理基準については、実際の航空機

に生じる鉛直加速度と航空機応答シミュレーションによる結果の検証を行う必要がある。

4.5 おわりに

以上で示したように、航空機走行時の応答を考慮した許容凹凸量の基準を提案した。従来の3mプロファイルメータによる平坦性評価は簡易であるが、路面波長の影響や航空機の走行速度を考慮できないという問題があった。最近では、本研究において縦断プロファイル測定に用いた路面性状測定車や、手押し式の小型プロファイラーにより、路面の縦断プロファイルを測定できることから、当該基準を適用することは可能と考えられる。

第4章の参考文献

- 1) 青木義郎，豊福芳典，塚田由紀：航空機の自動地上誘導管制の最適化，(独)交通安全環境研究所 研究発表会概要集，2001。
- 2) Hachiya, Y., Yin, J., Takahashi, O. and Himeno, K. : Aircraft Response Based Airport Pavement Roughness Evaluation, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 634 / V-45, pp. 403-411, 1999.
- 3) K. J. DeBord : Runway Roughness Measurement, Quantification and Application - The Boeing Method, *Boeing Document D6-81746*, Boeing Commercial Airplane Company, 1990.
- 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) 後藤謙太，川村彰，八谷好高，姫野賢治，近藤智史：航空機シミュレーションを用いた滑走路の波状特性評価に関する研究，土木学会第58回年次学術講演会概要集，pp. 1343-1344，2003。
- 6) 井上要人，川村彰，八谷好高，姫野賢治：パイロットの意識調査に基づく空港舗装平坦性の評価－航空機の地上走行挙動に着目して－，土木学会舗装工学論文集第7巻，pp. 12.1-12.10，2002。

5. 結論

本研究により、以下の結論が得られたことにより、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る。

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

- (1) 空港コンクリート舗装のように版厚が厚い場合は、コンクリート版深さ方向の温度分布が非線形分布となり、曲げ拘束応力に対して内部拘束応力が大きく、それらの和である温度応力は、版厚が厚くなるほど低減する傾向がある。
- (2) 最大温度応力と最大版上下面温度差の関係から、最大温度応力は最大版上下面温度差を説明変数とする一次式により精度良く推定可能である。また、版厚が厚いほうが温度応力は若干小さい傾向がある。
- (3) 温度応力が最大となるのは、版上下面温度差が最大となる時刻の2, 3時間後であり、ある時刻に版に発生する温度応力を推定するには、提案した温度応力式に2, 3時間前の版上下面温度差を入力することで、精度良く推定できる。
- (4) コンクリート版に生じる温度応力に対して、上層路盤材料の違いによる影響は小さい。一方、版厚の影響は大きく、温度応力式における係数は版厚に比例して小さくなる。

熱赤外線画像による空港アスファルト舗装層間剥離の検出手法に関する検討

- (1) 赤外線サーモグラフィを用いた深夜の調査により、熱赤外線画像により層間剥離をある程度検出することが可能である。また、時速 10km/h 程度の走行速度であれば、走行しながら撮影した動画像から層間剥離の検出が可能である。
- (2) 撮影角度や撮影高さを調整することにより、舗装表面のグルーピングの影響を小さくすることが可能である。
- (3) 層間剥離の位置が浅い場合、舗装温度が日中に大きく上昇し日没後に大きく低下する夏季や晴天時に、層間剥離に起因する舗装表面温度差が大きくなる。
- (4) 一日の気温差、日中の積算日射量、一日の平均風速から、層間剥離に起因する舗装表面温度差を推定することが可能である。
- (5) 調査実施可能日を検討した結果、比較的高緯度の空港においても、春から秋にかけて調査が可能である。

走行時の航空機の挙動を考慮した空港舗装路面管理基準に関する検討

- (1) 航空機種の違いは滑走路走行時の航空機の応答で顕著であり、B747 は長波長の路面を、DC-9 では短波長の路面を走行する際に代表鉛直加速度が大きくなる傾向にある。
- (2) 誘導路走行時の場合、走行速度によらず、特定の時間振動数のときに鉛直加速度が最大となる。これに対して、滑走路走行時の場合、鉛直加速度が最大となるときの時間振動数は一定ではなく、波長により変化する。
- (3) 一連の解析結果をまとめて、誘導路ならびに滑走路の平坦性管理基準を提案した。
- (4) 滑走路の平坦性管理基準については、縦断プロファイルを元にした波長ごとの凹凸量と平坦性管理基準を比較することで、航空機の応答を考慮した空港舗装の平坦性評価が可能である。
- (5) 誘導路の平坦性管理基準については、実際の航空機に生じる鉛直加速度と航空機応答シミュレーションによる結果の検証を行う必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々に多大なご協力を頂きました。

北海道大学大学院工学研究科教授 三上隆先生、大沼博志先生、名和豊春先生、北海道工業大学社会基盤工学科教授 笠原篤先生には、論文執筆にあたり多くの貴重なご意見を頂きました。

中央大学理工学部教授 姫野賢治先生、北見工業大学土木開発工学科教授 川村 彰先生、東京電機大学理工学部教授 松井邦人先生からは、データ収集及び解析について、多くのご助言を頂きました。

温度応力の研究については、関東地方整備局東京国際空港再拡張プロジェクトに関係する皆様からご相談を頂いたことが、本研究に着手した出発点でありました。また、成田国際空港（株）亀田昭一氏からは、コンクリート舗装の温度応力に関して多くのご指導を頂きました。

熱赤外線画像の研究については、空港内外での現地試験の実施にあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所空港研究センターの皆様、北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所の皆様、内閣府沖縄総合事務局開発建設部那覇港湾・空港整備事務所の皆様に多大なご協力を頂きました。

空港舗装平坦性の研究については、東京国際空港における平坦性データ収集について関東地方整備局東京空港整備事務所及び東京航空局東京空港事務所の皆様に多大なご協力を頂きました。

ご協力頂いた皆様に対し深くお礼申し上げます。