

タイトル	寒冷地空港舗装の温度特性とグルーピング工法に関する研究
著者	堤，洋介；久保，宏
引用	北海学園大学工学部研究報告，32：1-10
発行日	2005-02-21

寒冷地空港舗装の温度特性とグルーピング工法に関する研究

堤 洋 介*・久 保 宏**

Investigations on Temperature Characteristics and Grooving Method of Asphalt Pavements in Cold Regions

Yohsuke TUTUMI* and Hiroshi KUBO**

1. はじめに

近年、空港での冬期における凍上現象や夏期におけるプリスタリング現象が大きな問題となっている。これらの問題の要因として、共に舗装内温度が関係していると考えられる。しかし、現在提案されている舗装温度の推定式は道路舗装をメインとして考えているため、舗装構造が異なる空港滑走路における舗装の温度推定では、実測値と推定値との差が大きくなることが予想される。従って、これまであまり明らかにされていなかった空港滑走路舗装の温度特性および舗装温度の推定手法についての検討が重要であると思われ、本研究に至った。以上に示した内容から本研究では、空港での気象観測データから任意の深さにおける夏期および冬期での日平均・日最高・日最低舗装温度の推定式を導くとともに、舗装温度に影響を与える要因について検討を行った。また、本研究で導いた舗装温度推定式が他の地域でも適用できるかについての検討を行った。さらに、空港における滑走路や誘導路の舗装に施されているグルーピング工法の温度特性についての検討も行った。

2. 研究の背景

ここでは、本研究を進めるに当たって、現在空港舗装で問題となっているプリスタリング現象および凍上現象、これまで行われてきた様々な舗装温度の推定手法に関する既存の研究、現在の舗装温度と自然条件との熱収支のメカニズムの考え方及び舗装内の熱伝達に関し述べる。

* 東亜道路工業(株)盛岡支店 Toa doro Co.(北海学園大学大学院工学研究科修士課程)

Graduate school of Engineering, Hokkai-Gakuen University

** 北海学園大学工学部土木工学科

Department of Civil Engineering, Hokkai-Gakuen University

以上に基づいて本研究において舗装温度の推定を行った。

1) ブリスタリング現象と凍上現象

ブリスタリング現象は、一般に基層アスコンやコンクリート床板等のひび割れに含まれる水分が温度上昇により気化し、その時に発生した蒸気圧が舗装直後あるいは供用時にアスファルト舗装表面を水ぶくれのように膨れ上がらせるものであるとされている。これは橋面舗装においてよく見られる現象である。ブリスタリング現象には円形に一点に集中して一気に大きく膨れ上がる場合と、直線的な分布で小さな膨れ上がりがところどころ発生して繋がって広範囲にわたって連鎖してひび割れが入る場合の2ケースがあるといえる¹⁾。

2) 既存の研究²⁾

舗装温度の推定は、これまでに数多くの推定方法が提案・検討されてきた。初期の研究では、気温と温度の関係や、深さ別の舗装温度と平均舗装温度を示すような、簡易な統計処理に

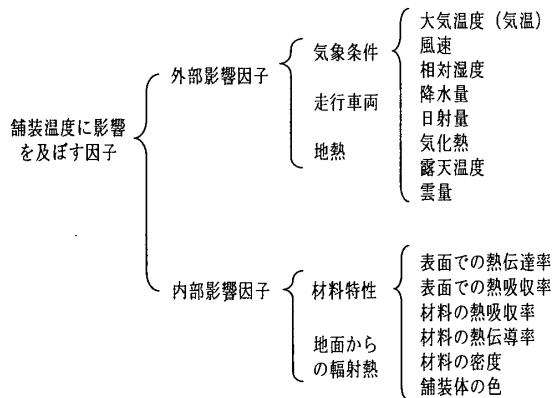


図-1 舗装温度に影響を与える要因²⁾

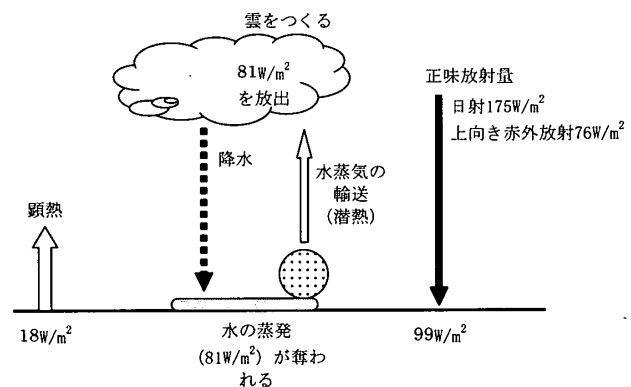


図-3 舗装面と気象の関係

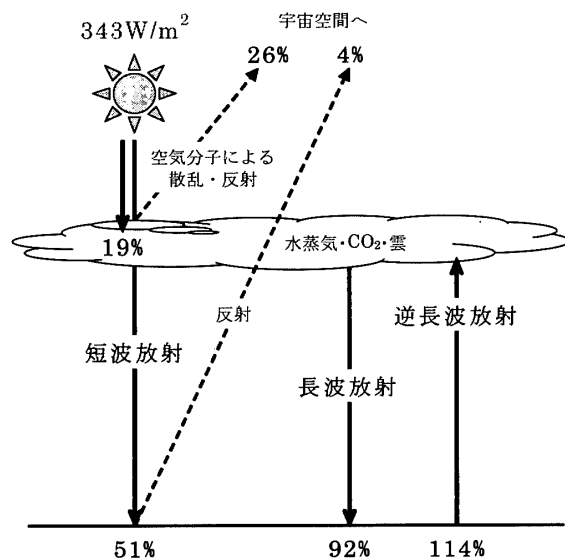


図-2 舗装表面と気象の関係

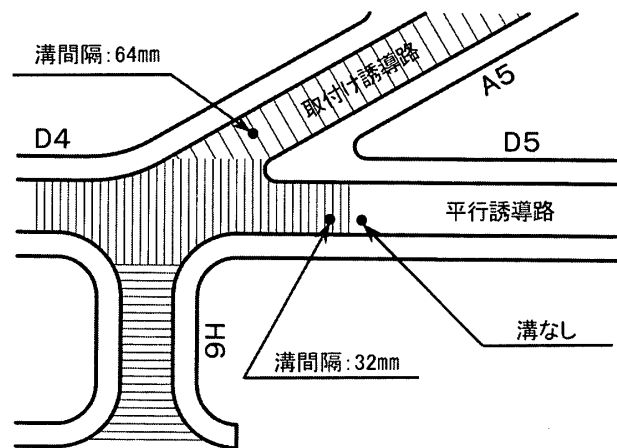


図-4 舗装温度測定箇所の大略図

よるものであった。その後、実測結果に回帰分析を用いるなどの理論的な解析法から、表面温度・大気温度・季節・天候などから舗装温度の空間的・時間的変化を推定する方法などいろいろな試みがなされている。

このように舗装温度を推定するには、日最高・最低気温などによる気温モデルを用いた温度解析や、大気温度・舗装表面温度などから舗装内部における深さ方向の非線形温度分布を関係式から求めて推定する簡易手法などがある。

3) 熱収支のメカニズム

舗装の表面および内部温度の分布に影響を及ぼす要因は、大きく2つに分類することができる。ひとつは外部影響因子であり、大気温度（気温）・風速・日射量、気化熱などの気象条件や、走行車両、地熱などである。もう一つは、内部影響因子として、地面からの輻射熱や舗装材料の伝熱特性などが挙げられる²⁾。図-1に舗装温度に影響を及ぼす要因をまとめて示した。

舗装は、熱が流入することにより暖められる。その要因としては短波放射・長波放射が挙げられる。短波放射は、太陽光のエネルギーから雲・雪氷・空気分子・エアロゾル等に散乱・反射されずに大気中に入ってきた熱放射である日射量で、波長分布が $0.2 \sim 4 \mu\text{m}$ 程度と短いためそう呼ばれている。長波放射（赤外放射）は、波長分布が $4 \sim 100 \mu\text{m}$ と長く、舗装面から出ていく放射が大気中の二酸化炭素、水蒸気、メタンなどの温室効果気体や雲等に吸収され、逆に地球へと再放射されるものである³⁾。図-2および図-3に舗装表面と気象の関係について示した。

4) 空港舗装温度の測定

ここでは、舗装表面や内部温度の推定に必要な実測値の測定に当たる諸条件を示している。新千歳空港では、取付け誘導路および平行誘導路において下記の断面図の各深さで舗装温度の測定を行った。測定には、熱伝対温度計を使用し記録計にはデータロガーFM-30Aを用いた。図-4に舗装温度測定箇所の拡大略図を、図-5に観測位置での詳細断面図を示した。

2. 日平均舗装温度の推定

ここでは、冬期および夏期における舗装温度を気象観測データから推定した。これは、誰も

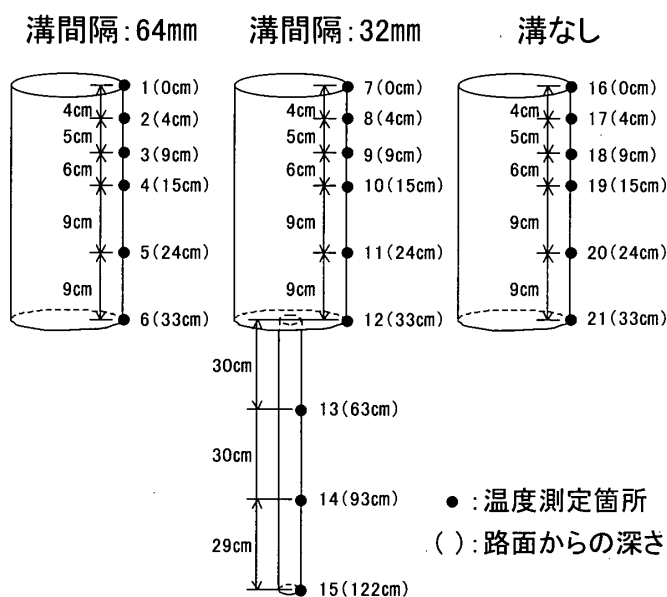


図-5 観測位置の詳細断面図

が容易に得られる数値データであり、舗装温度と気象観測データとの間には密接な相関性が認められるためである。

推定法の手順は目的変数に舗装温度を、説明変数に気象観測データを導入し、重回帰分析を行う。その際、各気象観測データの偏回帰係数を有意水準5%のt分布検定を行い、有意である気象観測データを説明変数として決定し、繰返し重回帰分析を行い各測定深さ（1.5・4・9・15・24・33cm）における重回帰式を導いた。このとき、説明変数の要素の違いによる実測値と推定値の差異の比較検討も行った。次に、推定する舗装温度の各気象要因に対する偏回帰係数と深さの関係から3次の多項式近似曲線を求め、気象観測データと深さを入力条件とし、舗装温度の推定式を導いた。

1) 日平均気温のみの場合

ここでは、気象観測データの中で最も一般的である大気温度（外気温）により舗装温度を推定できるかについて検討した。外気温は1時間ごとに測定した気温の24時間平均（24点法）である日平均気温を、舗装温度は各深さの日平均舗装温度を用い、冬期および夏期における相関関係及び寄与率、標準誤差について検討し、表－1にそれぞれを示した。

表－1 冬期および夏期の気温と舗装温度の相関関係および寄与率と標準誤差

深さ：z (cm)	日平均気温—日平均舗装温度の相関係数：R		日平均気温—日平均舗装温度の寄与率：R ²		日平均気温—日平均舗装温度の標準誤差：SE	
	冬 期	夏 期	冬 期	夏 期	冬 期	夏 期
1.5	0.946	0.667	0.895	0.445	1.780	2.551
4	0.942	0.663	0.888	0.439	1.703	2.379
9	0.934	0.638	0.873	0.408	1.591	2.188
15	0.918	0.594	0.843	0.352	1.459	2.025
24	0.880	0.501	0.775	0.251	1.254	1.815
33	0.840	0.414	0.706	0.171	1.093	1.655

この表－1から、気温と舗装温度の相関関係が認められたため、これらの日平均気温から日平均舗装温度の推定が可能であると考えられる。また、冬期の方が夏期に比べて相関係数が大きくなることがわかった。しかし、寄与率は冬期においては深さ1.5cmで約0.9と高い値となっているが、夏期においては0.45と低い値となった。また、標準誤差も冬期に比べ夏期の方が大きな値となった。これは、夏期において気温以外に他の要因が大きく関わっているためと考えられる。そこで、次に日平均気温に加えて他の気象観測データも導入し日平均舗装温度の推定を行った。

2) 気象観測データによる日平均舗装温度

ここでは、重回帰分析を用いて各気象観測データから日平均舗装温度の推定式を導くととも

に、推定値と実測値との比較検討を行った。

ここで考慮した気象観測データは、最も一般的な日平均気温に加え日照時間、日降水量（夏期）、日降雪量（冬期）、日平均風速、日平均相対湿度、雲量を新たに導入し重回帰分析を行った。式－1に任意の深さにおける舗装温度の重回帰推定式を示した。なお、日射量については新千歳空港測候所において観測されていなかったため、空港から最も近く気象条件が近似である恵庭島松における日照時間を導入した。

$$T_{zave} = \beta_{0zave} + \beta_{1zave} x_1 + \cdots + \beta_{izave} x_i \cdots \text{式－1}$$

$$\beta_i = (\alpha_i z^3 + \beta_i z^2 + \gamma_i z + \delta_i)$$

ここで T_{zave} ：推定舗装温度（℃）、 β_{izave} ：偏回帰係数、 x_i ：各気象観測データ、
 z ：温度測定深さ（cm）、 $\alpha_i \sim \delta_i$ ：係数値

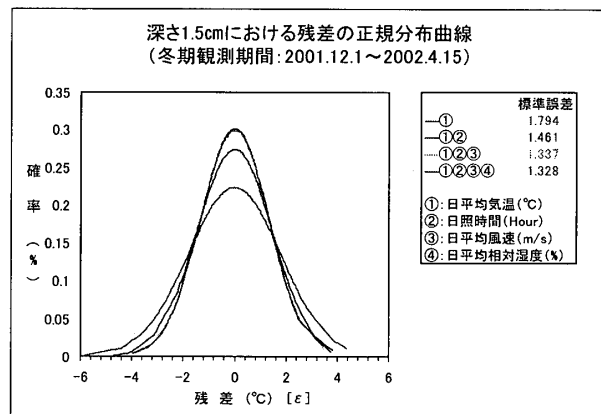
また、冬期および夏期での深さ1.5cmにおける実測値と推定値の舗装温度推移および残差について検討を行った。そして、式－2に示す確率密度関数によって各説明変数の組み合わせでの残差の標準正規分布曲線を導いた。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \cdots \text{式－2}$$

これら夏期および冬期の結果を図－6に示す。

この図から冬期においては日平均気温のみの場合に比べ各々の気象観測データを導入することで、残差の標準偏差（ばらつき）が小さくなり残差の最大値も小さくなるという結果が見られた。しかし、日平均相対湿度を導入してもあまり変化がなかった。これは、深さ1.5cmでの日平均相対湿度が先ほどのt分布検定の結果より有意性が他の気象要素に比べて低かったためであると考えられる。夏期においても、冬期と同様に日平均気温のみの場合に比べ各々の気象要素を導入することで、残差の標準偏差（ばらつき）が小さくなり残差の最大値も小さくなるという結果が見られた。

また、冬期に比べて夏期の方が日照時間を導入することによる残差の標準偏差（ばらつき）が小さくなり最大値も低くなる傾向が見られた。



図－6 深さ1.5cmにおける実測値と推定値の残差の正規分布（冬期）

3) 舗装温度の差異における考察

ここでは、任意の深さにおける舗装温度推定式を適用した場合の各深さでの実測値と推定値の比較検討を行い、その有効性について考察を行った。

ここで、舗装温度の推定値と実測値の残差の絶対値の平均値及び推定値と実測値の標準誤差を表-2に示す。表中の()内は、絶対値の残差の最大値および最小値を示している。また、実測値と推定値を比較した散布図を図-7に示した。

表-2 舗装温度の残差平均値等

	残差の平均値 (μ) および標準誤差 (SE)				残差の許容範囲に収まる確率(%)			
	冬 期		夏 期		冬 期		夏 期	
深さ (cm)	残差の平均値 μ	標準誤差 SE	残差の平均値 μ	標準誤差 SE	$\pm 2^\circ\text{C}$	$\pm 3^\circ\text{C}$	$\pm 2^\circ\text{C}$	$\pm 3^\circ\text{C}$
1.5	1.02(3.9-0.0)	1.290	1.07(3.7-0.0)	1.210	85	97	90	98
4	1.05(4.2-0.0)	1.336	1.00(3.5-0.0)	1.162	86	96	90	98
9	1.11(4.5-0.0)	1.412	1.02(3.7-0.0)	1.160	85	95	86	98
15	1.23(4.5-0.0)	1.513	1.10(3.7-0.0)	1.147	82	93	86	97
24	1.42(5.1-0.0)	1.636	1.17(4.1-0.0)	1.059	76	90	86	96
33	1.54(5.0-0.0)	1.643	1.17(4.0-0.0)	0.889	71	88	85	96

表-2から冬期における深さ1.5cmでの残差の平均値は1.02℃で絶対値残差の最大値が3.9℃、標準誤差が1.29℃となった。夏期における深さ1.5cmでも、残差の平均値は1.07℃で絶対値残差の最大値が3.7℃、標準誤差が1.21℃となり、冬期および夏期においても十分に満足できる値となった。そして、残差の許容範囲に収まる確率も深さ1.5cmで冬期では $\pm 3^\circ\text{C}$ で97%、夏期では98%と実用上十分満足できる値となった。また、深さ33

cmにおいても90%前後の値となり深さが増しても推定の精度が良いと考えられる。そして、表-1の日平均気温のみでの推定値の標準誤差との比較をしても、冬期および夏期ともに精度の向上が見られ、特に夏期における標準誤差の現象が大きなものとなった。また、図-7の比較散布図から誤差範囲 3°C の確率が90%以上あるため実用上満足できる値であると考えられる。

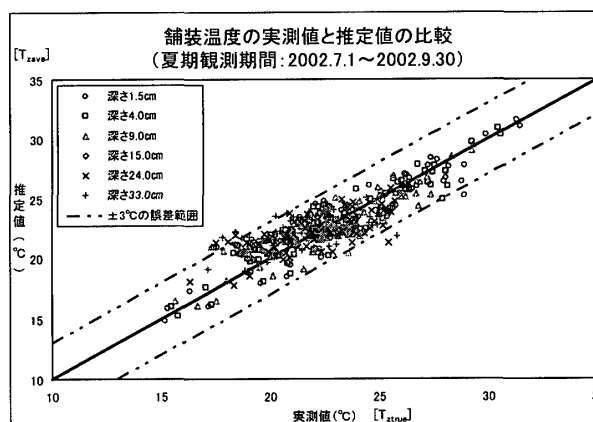


図-7 各深さにおける実測値と推定値の比較散布図(夏期)

3. 日最高・最低舗装温度の推定

ここでは、夏期および冬期における日最高・最低舗装温度の推定についての検討を行った。既存の研究では、日最高・最低気温のみを導入した舗装温度の推定式が一般的となっているが、実測値と推定値の差異が大きくなり実用上満足できる値ではないと思われる。そこで本研究ではその他の気象要因も考慮に入れ日最高・最低舗装温度の推定を行った。推定方法は日平均舗装温度の場合と同様である。

1) 各気象観測データを用いた日最高・最低舗装温度の推定

日最高舗装温度を目的変数に、気象観測データ（冬期：昼最高気温・日照時間・昼平均相対湿度，夏期：日最高気温・日照時間・昼降水量・昼平均相対湿度）を説明変数として重回帰分析を行い、求められた偏回帰係数を有意水準5%のt分布検定によって検定を行った。そして、日平均気温の推定時と同様に残差の確率密度曲線，実測値と推定値の比較散布図を示した。式-3に日最高・最低舗装温度の推定式を示した。

$$T_{zave} = \beta_{0zave} + \beta_{1zave} x_1 + \cdots + \beta_{izave} x_i \cdots \text{式-3}$$

$$\beta_i = (\alpha_i z^3 + \beta_i z^2 + \gamma_i z + \delta_i)$$

ここで T_{zave} ：推定最高・最低舗装温度（℃）

β_{izave} ：偏回帰係数

x_i ：各気象観測データ

z ：温度測定深さ（cm）

$\alpha_i \sim \delta_i$ ：係数値

図-8に、日最低舗装温度における残差の確率密度曲線を示している。この図から、気象要因を導入することで、残差の標準偏差が小さくなり、残差が0℃になる確率も日最高気温のみの場合に比べ高くなった。そして、冬期と夏期を比較すると夏期の方が日照時間を考慮することによって、より推定精度が向上すると考えられる。

2) 既存の推定式との比較⁴⁾

現在、日最高最低舗装温度の推定は、近藤・三浦が提案した推定式がよく用いられている。そこで、ここではこれらの式による推定値と本研究でこれまで導いてきた日最高・最低舗装温度の推定式から求められる推定値及び日最高・最低気温のみでの推定値にどの程度差が生じるか検討を行った。参考までに、式-4に近藤・三浦の提案した日最高舗装温度の推定式を、例

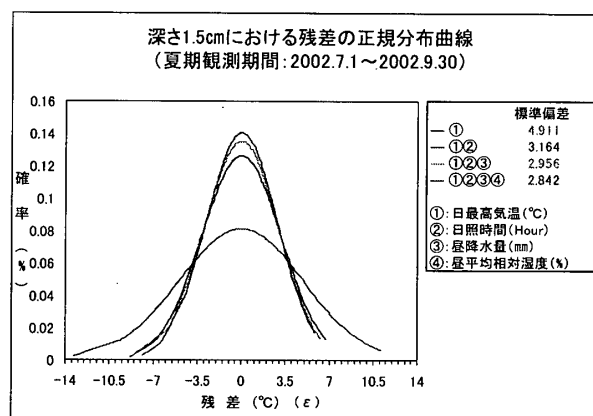


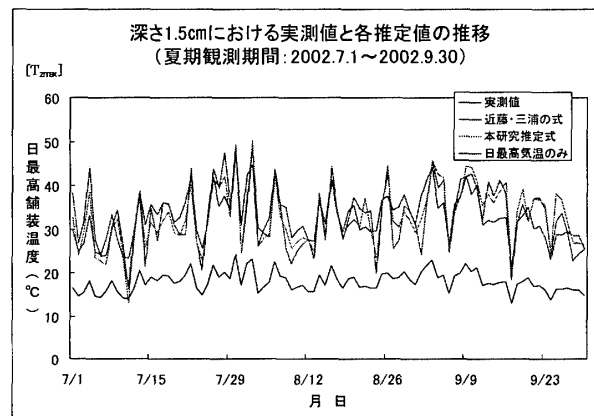
図-8 深さ1.5cmにおける残差の正規分布曲線（夏期）

として図－9に夏期における推定結果の推移を示した。

$$T_{P(Z)max} = 10^{(m \cdot Z + n)} \cdot (T_{Amax}) + c \quad \cdot \cdot \text{式} - 4^{4)}$$

- Z : 任意の深さ (cm)
- $T_{P(Z)max}$: 深さ Z での日最高舗装体内温度 (°C)
- T_{Amax} : 日最高大気温度 (°C)
- m, n, c : 回帰分析より設定した定数

日最高舗装温度の推定においては本研究で導いた推定値や実測値よりも近藤・三浦の推定式の方が全体的に低く求められる傾向が見られた。また、残差の平均値も夏期で15℃と高い値となり、最大値では夏期においては27℃と非常に高くなり、信頼性としては低いと考えられる。日最低舗装温度の推定においては本研究で導いた推定値に比べ精度としてはやや低い値となった。



図－9 深さ1.5cmにおける日最高舗装温度の実測値と各推定値の推移

4. グルーピング工法の温度特性

ここでは、空港滑走路および誘導路舗装に施されているグルーピング工法の温度特性について検討を行った。その検討理由として、グルーピング舗装が航空機のパイロットや空港管理職員などからも、「普通路面よりも融雪が早い」という意見がよく聞かれ、溝の有無での舗装温度に差が生じていると考えられるためである。

グルーピング舗装とは、舗装表面に横断または縦断方向に一定間隔で溝を切削した舗装であり、すべり抵抗性の向上、タイヤの溝部食い込みによる薄氷の破碎、路面排水性の向上等の特徴がある⁵⁾。

図－10・11に冬期・夏期での舗装温度の積算を示した。冬期の新千歳空港におけるグルービ

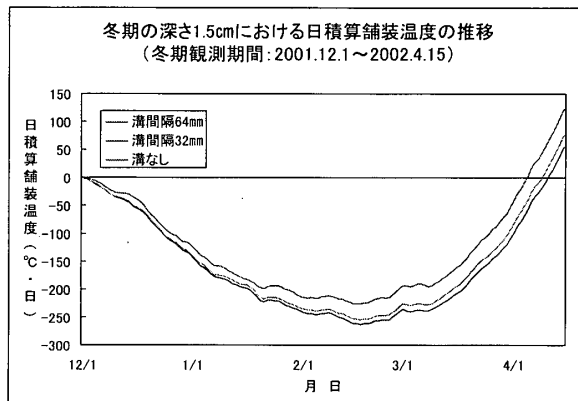


図-10 冬期の深さ1.5cmにおける日積算舗装温度の推移

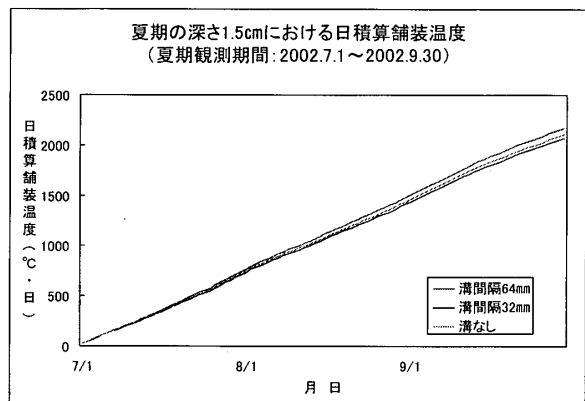


図-11 夏期の深さ1.5cmにおける日積算舗装温度の推移

ング工法は2月・3月において溝間隔64mmと溝間隔32mmおよび溝間隔64mmと溝なしでの温度に差が生じた。これは、場所の違いがあると考えられる。溝間隔32mmおよび溝なしは平行誘導路において測定されたものであり、溝間隔64mmは取付け誘導路において測定されたものである。反復作用回数の違いによるものであると考えられる。

夏期におけるグルーピング工法の温度特性では、溝の種類および有無による舗装温度に差はないということが上記のグラフにおいていえる。従って、グルーピング工法により、舗装の流動・わだち掘れが生じやすくなる確率は低いと考えられる。

5. 結 論

空港舗装の温度特性とグルーピング工法に関する研究において、その結論をおおよそ次のように纏めることができる。

- 1) 夏期・冬期の舗装温度推定は気温のみの場合、残差が大きく推定精度はあまり高くない。
- 2) 気温に加え各気象観測データを導入することで、推定精度の向上が期待できる。
- 3) 日照時間が舗装温度に影響を及ぼし、冬期に比べて夏期の方が舗装温度に与える影響が大きいと考えられる。
- 4) 日最高舗装温度の推定よりも日最低舗装温度の推定の方が精度の良い結果が得られる。
- 5) 初春期において溝間隔64mmのグルーピング工法における舗装温度が高くなる傾向が見られたため、この工法による温度上昇効果が期待できる。
- 6) 夏期では、グルーピング工法を施工しても、舗装の流動やわだち掘れが生じるとは言えない。

参 考 文 献

- 1) 金岡優樹：空港滑走路舗装のブリスタリング現象に関する研究，北海学園大学大学院修士論文 平成13年度
- 2) 姫野賢治・猪股和義：アスファルト舗装の内部温度分布に関する調査研究，土木技術資料28－6，pp.326～331，1986
- 3) 岩井茂：舗装と熱環境，舗装 Vo.36 No.9 pp4～10，2001年9月
- 4) 近藤佳宏・三浦祐二：アスファルト舗装体内温度の推定に関する研究，土木学会論文報告集 No.250号，pp123～132 1976年6月
- 5) 久保宏・島多昭典・小笠原章：アスファルト舗装のグルーピング工法に関する実験的研究
北海学園大学 工学研究報告 第27号，pp215～224，平成12年2月