

デジタル画像処理による冬期複合路面状態の判別解析

平河内 雄也*・武市 靖**・魚住 純***

平河内 雄也*

武市 靖**

魚住 純***

Discriminant analysis on winter complex pavement conditions
by Digital Image Processing

Yuya HIRAKOUCHI*, Kiyoshi TAKEICHI** and Jun UOZUMI***

1. はじめに

北海道のような寒冷地における冬期間の路面状態は、日中の暖気や日射による湿潤路面やシャーベット路面が夜間に氷板や氷膜路面になるなど天候や、その他の諸条件によって変化しやすい。道路管理において路面状態を正確に判別することは安全な走行を行う上で重要であるが、路面状態を視覚や定点計測センサーによってのみ判断することは、個人差や曖昧さが生じ誤った認識をする恐れが出てくる。特に、これらの路面判別解析は凍結防止剤の散布管理、ロードヒーティングの運転制御、及び路面凍結の警式標示等への応用が考えられる。

現在、路面状態の判別には、路面水分、路面温度および大気温度を路面反射比率計、放射温度計などで測定する方法が採用されている¹⁾。本研究では、デジタル画像処理により路面を面的にとらえ判別解析の過程で、ファジー理論を適用して特に、複合路面状態の判別に関する評価方法について検討した。

2. 単一路面状態のアスファルト供試体路面撮影

デジタルカメラを使いアスファルト供試体の撮影を行った。

供試体は排水性舗装用アスコン (300 mm×300 mm×50 mm) を6枚使用し、路面状態を写

* 北海道大学工学部 大学院工学研究科修士課程
** 北海道大学工学部 土木工学科
*** 北海道大学工学部 電子情報工学科

参考文献

参考文献

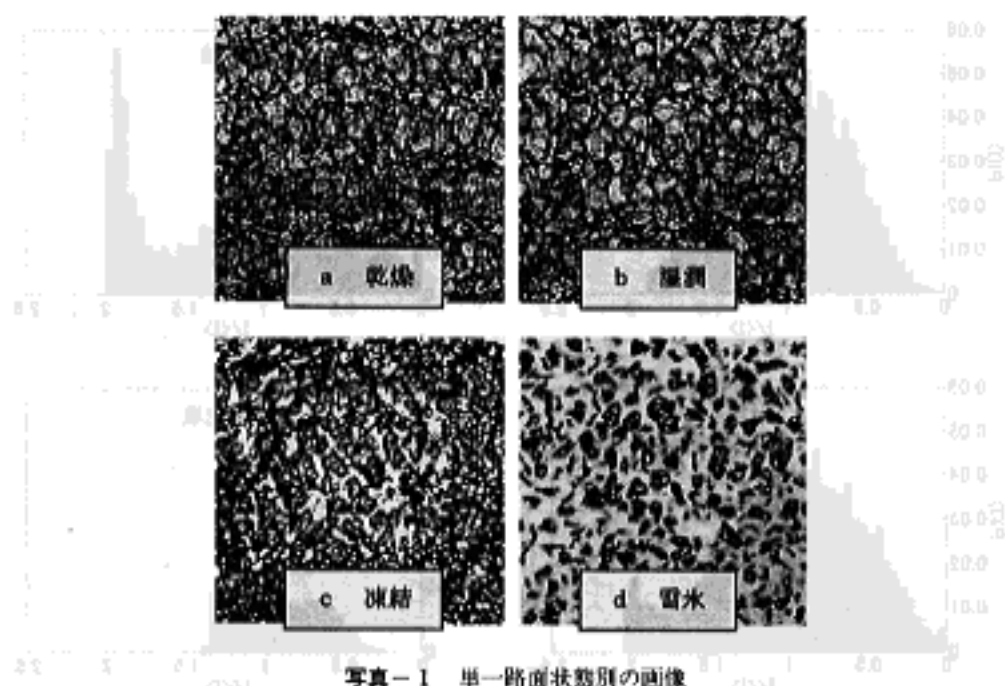


写真-1 単一路面状態別の画像
(高さ100cmから撮影)

真-1のa~dのように、乾燥 (dry)・湿潤 (wet)・凍結 (icefilm)・雪水充填 (snow/ice)の4種類とした。ここで、凍結とは表面を氷膜、空隙を氷で被覆した状態、雪水充填とは空隙率が高く、表面テクスチャーが粗な排水性舗装特有の空隙を雪水で満たした状態である。

撮影場所は室内で一定の光を当てフラッシュを使用し、供試体からの高さを30, 70, 100, 180 cmと変えて行い路面画像は画素数256×256に切り出して解析した。

3. 解析手法

(1) 輝度の定義

輝度 I は、CCD素子で撮像した像の光強度で、使用したカメラではこれを256階調で数値化している。輝度が高いほど記録された画素は白く、低いほど黒いことを表す。

(2) 統計パラメータの出力

路面状態別の輝度分布についての確率密度関数 $P_i(I)$ と平均化した輝度 $I/\langle I \rangle$ との関係を図-1に示した。

平均輝度 $\langle I \rangle$ まわりの中心モーメント M_k は、

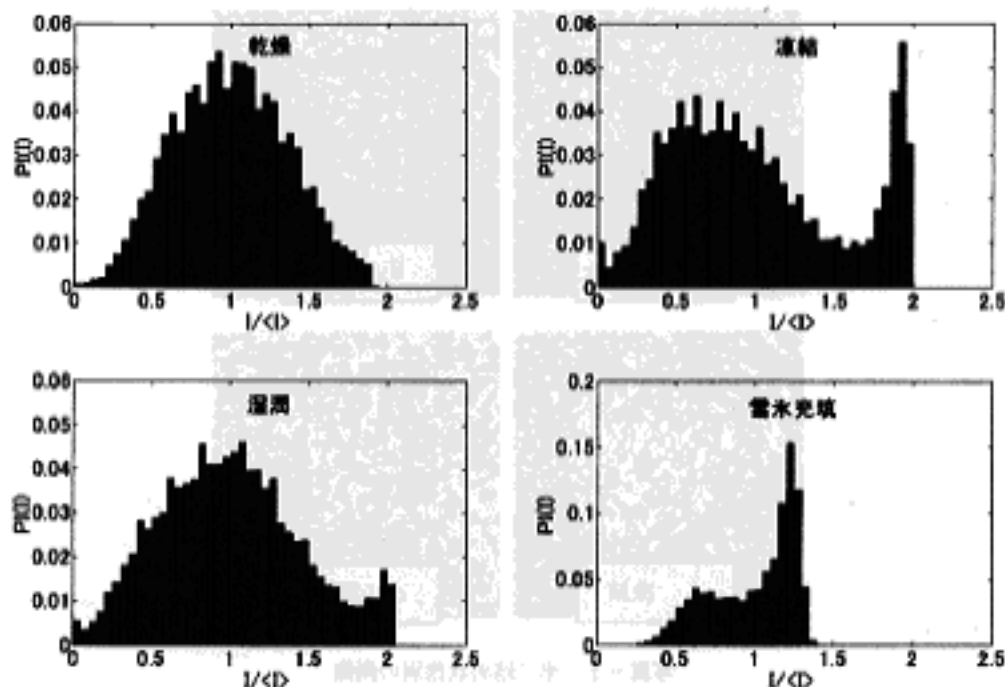


図-1 単一路面状態別の確率密度関数
(高さ100cmからの画像のもの)

ここで、 $M_n = \int_{-\infty}^{\infty} (I - \langle I \rangle)^n P_I(I) dI$

で表される⁹⁾。中心モーメント M_n により、コントラスト (contrast) V 、歪度 (skewness) Sk 、尖度 (kurtosis) Ku は、

$$V = (M_2)^{1/2} / I_m$$

$$Sk = M_3 / (M_2)^{3/2}$$

$$Ku = M_4 / (M_2)^2$$

で表される⁹⁾。ここで、 I_m は輝度の最大値、 M_2 は輝度分布の分散、 M_3 は輝度分布の歪度、 M_4 は輝度分布の尖度を表す。

コントラスト V は輝度分布のバラツキの度合で、大きいほどバラツキが大きいことを表す。

歪度は確率密度関数の平均輝度を中心とした非対称性、つまり、輝度の偏りの度合で、 $Sk = 0$ のとき対称分布を表し、 $Sk < 0$ のとき左側の裾が長く、 $Sk > 0$ のとき右側の裾が長くなる。

尖度は確率密度関数の高低さ、つまり、輝度分布の中心の尖り度合を表し、 $Ku = 3$ のとき正規分布を、 $Ku < 3$ のとき中心は平坦で、 $Ku > 3$ のとき尖っている⁹⁾。中心の尖り度合は

4. 単一路面状態の解析結果

各路面画像から計算した3つの統計パラメータを用いて、2つのパラメータからなる平面上に散布図をプロットした。例として、コントラストと尖度の組み合わせの結果を図-2に示した。

図-2では、30, 70 cmの高さから撮影したものの解析結果は乾燥、湿潤、凍結状態の分布に、重なる部分が生じこれらの状態間の判別はやや困難であると考えられる。一方、100, 180 cmからのものは、各路面状態でそれぞれ群落（クラスター）を形成し、路面状態の判別が可能であると言える。

また、コントラストと歪度、歪度と尖度の組み合わせによる結果は、高さ100 cm以上のものが判別可能であった。

路面状態の判別は供試体からの高さが100 cm以上の場合の画像データについて可能であると考えられる。しかし、判別精度を考慮した供試体面からの撮影距離については、光の環境条件、判別パラメータなどによりさらに検討する必要がある。

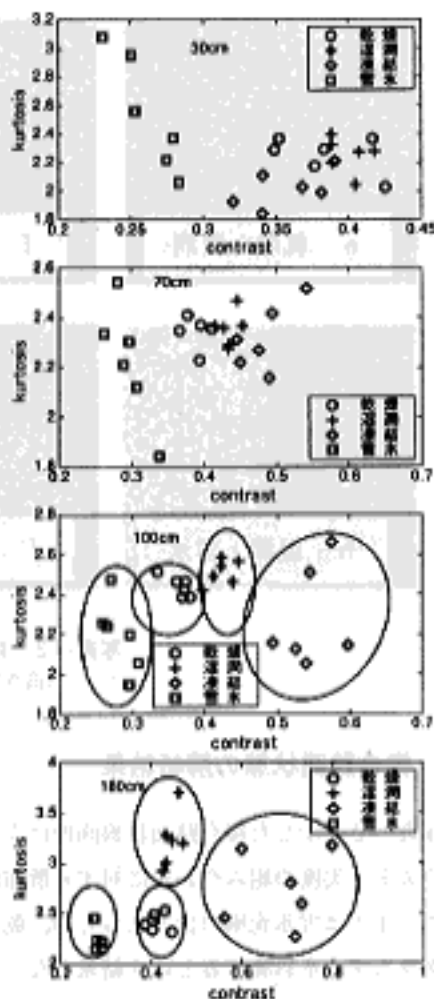


図-2 高さ別のコントラストと尖度の関係

5. 複合路面状態のアスファルト供試体 路面撮影

単一路面状態での判別は、供試体からの高さが100 cm以上の画像については可能であるという結果が得られた。しかし、実際のアスファルト舗装路面は乾燥、湿潤、圧雪、氷膜・氷板、雪氷充填とが入り混じった状態になっている。

そこで、次にアスファルト供試体路面を2種類の状態にした場合の画像について解析を行なった。単一路面状態での解析の結果から、写真-2のe~jに示すように供試体からの高さが180 cmの画像について解析を行なった。

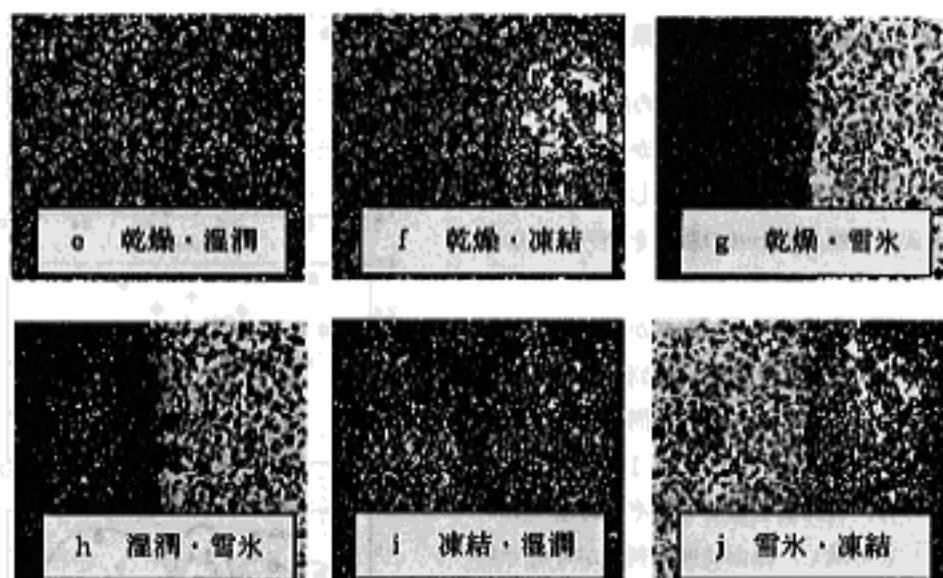


写真-2 複合路面状態別の画像
(高さ180cmから撮影)

6. 複合路面状態の解析結果

写真-2に示した複合路面状態画像による解析結果として、確率密度関数を図-3に、コントラストと尖度の組み合わせに対する散布図を図-4に示した。

図-4では雪氷充填の含まれるもの、乾燥・湿潤と乾燥・凍結の路面状態のもので、それぞれクラスターを形成するという結果となった。このことは、コントラストと重度、重度と尖度の組み合わせにおいても同じような結果になった。単一路面状態では判別可能である条件であっても、複数の路面状態が入り混じったものでは3つの統計パラメータによる判別は困難となった。

7. ファジィ理論による路面状態の判別

複数の状態が入り混じった路面の場合は、供試体からの高さが100cm以上での画像でも判別は困難であったので、曖昧な点を解消するためにファジィ理論により路面状態の判別を行った。

(1) 前件部と後件部の設定

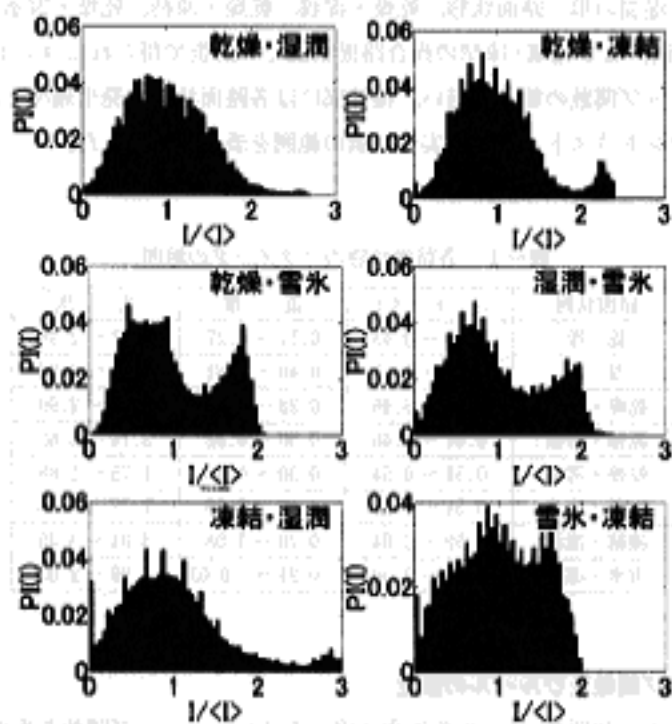


図-3 複合路面状態別の確率密度関数

(高さ180cmからの画像のもの)

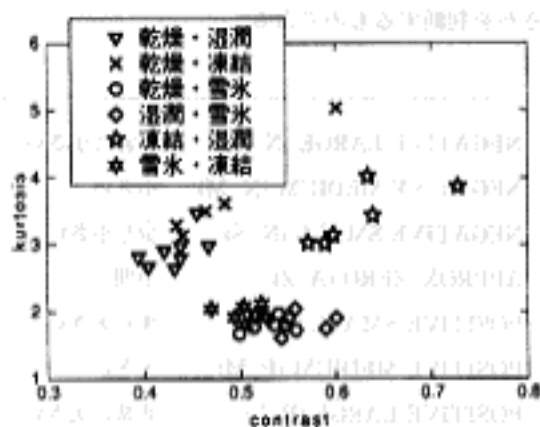


図-4 複合路面状態でのコントラストと尖度の関係

前件部に乾燥、湿潤の単一路面状態、乾燥・湿潤、乾燥・凍結、乾燥・雪氷充填、湿潤・雪氷充填、凍結・湿潤、雪氷充填・凍結の複合路面状態での解析で得られたコントラスト・歪度・尖度のメンバーシップ関数の範囲を用い、後件部には各路面状態の発生確率を用いた。

各路面状態のコントラスト・歪度・尖度の値の範囲を表-1に示した。

表-1 各路面状態のパラメータの範囲

路面状態	コントラスト	歪 度	尖 度
乾 燥	0.40 ~ 0.43	0.17 ~ 0.27	2.32 ~ 2.48
湿 潤	0.43 ~ 0.47	0.49 ~ 0.61	2.99 ~ 3.27
乾燥・湿潤	0.41 ~ 0.46	0.28 ~ 0.45	2.72 ~ 2.99
乾燥・凍結	0.44 ~ 0.46	0.50 ~ 0.82	3.14 ~ 3.62
乾燥・雪氷	0.51 ~ 0.54	0.30 ~ 0.40	1.75 ~ 1.88
湿潤・雪氷	0.54 ~ 0.59	0.20 ~ 0.39	1.77 ~ 1.88
凍結・湿潤	0.59 ~ 0.64	0.70 ~ 1.08	3.04 ~ 3.45
雪氷・凍結	0.49 ~ 0.50	-0.21 ~ -0.05	1.96 ~ 2.02

(2) メンバーシップ関数及びルールの設定

ファジィ理論による判別で、ルールの作成に用いるメンバーシップ関数を次のように設定し、各パラメータの範囲を表-2のようにした。また、ルールを表-3のように設定した。メンバーシップ関数は主観的判断によって路面状態の範囲を定義するものであり⁹⁾、表-2で設定された各パラメータの範囲に基づき、表-3のルールにより実際の路面状態がどの路面状態にどの程度の確率で判別されるかを判断するものである。

NEGATIVE LARGE (N. L)	非常に小さい
NEGATIVE MEDIUM (N. M)	小さい
NEGATIVE SMALL (N. S)	少し小さい
APPROX. ZERO (A. Z)	中間
POSITIVE SMALL (P. S)	少し大きい
POSITIVE MEDIUM (P. M)	大きい
POSITIVE LARGE (P. L)	非常に大きい

表-2 前・後件部のメンバーシップ関数の範囲

	前 件 部			後 件 部
	contrast	skewness	kurtosis	発生確率(%)
N. L	~0.37	~0	~2.10	~17
N. M	0.30~0.50	0.05~0.35	1.80~2.50	0~33
N. S	0.35~0.55	0.10~0.60	2.00~2.70	17~50
A. Z	0.40~0.60	0.20~0.50	2.50~3.50	33~67
P. S	0.40~0.60	0.20~0.90	2.80~3.45	50~83
P. M	0.45~0.65	0.30~1.00	2.90~3.50	67~100
P. L	0.60~	0.70~	3.00~3.70	83~

表-3 ルールの設定

実際の 状 態	前 件 部			後 件 部								
	V	sk	ku	乾燥	湿潤	乾燥 湿潤	乾燥 凍結	乾燥 雪水	湿潤 雪水	凍結 湿潤	雪水 凍結	
乾燥	N.M	N.M	N.S	P.L	A.Z	P.S	A.S	P.S	P.S	N.M	P.S	
湿潤	N.S	P.S	P.M	A.Z	P.L	P.M	P.M	A.Z	N.S	P.S	A.Z	
乾燥 湿潤	N.M	A.Z	P.S	P.S	P.M	P.L	P.S	A.Z	A.Z	N.S	A.Z	
乾燥 凍結	N.S	P.M	P.L	A.S	P.M	P.S	P.L	N.S	N.S	P.S	N.S	
乾燥 雪水	P.S	N.S	N.L	P.S	A.Z	A.Z	N.S	P.L	P.M	N.S	P.M	
湿潤 雪水	P.M	N.S	N.L	P.S	N.S	A.Z	N.S	P.M	P.L	N.S	P.S	
凍結 湿潤	P.L	P.L	P.M	N.M	P.S	N.S	P.S	N.S	N.S	P.L	N.M	
雪水 凍結	A.Z	N.L	N.L	P.S	A.Z	A.Z	N.S	P.M	P.S	N.M	P.L	

(3) ファジィ理論による解析結果

ファジィ理論による路面状態の判別結果を表-4に示した。表の左の列に実際の路面状態を、表の各行にはファジィ理論の判別文責による各路面状態の発生確率の位を示した。判別対象の実際の路面状態と判別分析で発生確率が最も高いと判別した路面が一致した場合、的中(□)で囲んだもの)他の路面状態をそのように判別した場合を非的中(■のもの)とした。また、非的中となった対象路面状態の発生確率の順位を右下すみに例えば②等と記入した。

表-4からファジィ理論による発生確率に基づく路面状態判別の的中率は77% $\left(\frac{\text{的中数}(37)}{\text{判別数}(48)}\right)$ であった。また、非的中の場合でも対象路面状態の発生確率順位が2ないし3であること、第1順位と判別した路面状態が実際の路面状態と比較すると路面管理上危険側になっている場合

表-4 ファジィ理論による路面状態判別の結果

実際の状態	No.	ファジィ理論による各路面状態の発生確率							
		乾燥	湿潤	乾燥 湿潤	乾燥 凍結	乾燥 雪水	湿潤 雪水	凍結 湿潤	雪水 凍結
乾燥	1	0.94	0.50	0.67	0.50	0.67	0.67	0.17	0.67
	2	0.94	0.50	0.67	0.50	0.67	0.67	0.17	0.67
	3	0.92	0.50	0.67	0.50	0.67	0.67	0.17	0.67
	4	0.94	0.50	0.67	0.50	0.67	0.67	0.17	0.67
	5	0.94	0.50	0.67	0.50	0.67	0.67	0.17	0.67
	6	0.93	0.50	0.67	0.50	0.67	0.67	0.17	0.67
湿潤	1	0.50	0.89	0.79	0.84	0.46	0.33	0.67	0.46
	2	0.50	0.87	0.77	0.85	0.44	0.33	0.67	0.44
	3	0.50	0.83 _α	0.67	0.92	0.33	0.33	0.67	0.33
	4	0.50	0.91	0.81	0.84	0.48	0.33	0.67	0.48
	5	0.65	0.83 _α	0.90	0.68	0.50	0.48	0.37	0.50
	6	0.55	0.87	0.84	0.78	0.50	0.38	0.56	0.50
乾燥 湿潤	1	0.63	0.84	0.88	0.71	0.50	0.46	0.43	0.50
	2	0.67	0.83	0.92	0.67	0.50	0.50	0.34	0.50
	3	0.50	0.83	0.69 _α	0.91	0.35	0.33	0.67	0.35
	4	0.87	0.54	0.69 _α	0.52	0.66	0.66	0.18	0.66
	5	0.87	0.54	0.69 _α	0.52	0.66	0.66	0.18	0.66
	6	0.66	0.83	0.92	0.67	0.50	0.49	0.35	0.50
乾燥 凍結	1	0.50	0.83	0.67	0.92	0.33	0.33	0.67	0.33
	2	0.50	0.86	0.75	0.86	0.42	0.33	0.67	0.42
	3	0.46	0.81	0.63	0.86	0.33	0.33	0.69	0.31
	4	0.50	0.83	0.67	0.93	0.34	0.33	0.67	0.34
	5	0.51	0.93	0.83	0.83 _α	0.49	0.34	0.65	0.49
	6	0.65	0.83	0.91	0.68 _α	0.50	0.48	0.37	0.50
乾燥 雪水	1	0.67	0.43	0.50	0.33	0.87	0.85	0.33	0.76
	2	0.67	0.42	0.50	0.33	0.86	0.86	0.33	0.75
	3	0.67	0.42	0.50	0.33	0.86	0.86	0.33	0.75
	4	0.67	0.45	0.50	0.33	0.89	0.84	0.33	0.78
	5	0.67	0.41	0.50	0.33	0.86 _α	0.87	0.33	0.75
	6	0.67	0.50	0.50	0.33	0.83	0.67	0.17	0.92
湿潤 雪水	1	0.67	0.41	0.50	0.33	0.86	0.87	0.33	0.75
	2	0.67	0.35	0.50	0.33	0.83	0.91	0.33	0.69
	3	0.67	0.42	0.50	0.33	0.85	0.85	0.33	0.75
	4	0.67	0.42	0.50	0.33	0.85	0.85	0.33	0.75
	5	0.67	0.36	0.50	0.33	0.84	0.91	0.33	0.70
	6	0.67	0.42	0.50	0.33	0.84	0.84	0.33	0.75
凍結 湿潤	1	0.22	0.69	0.31	0.69	0.35	0.33	0.86	0.22
	2	0.17	0.67	0.08	0.67	0.33	0.33	0.92	0.17
	3	0.17	0.67	0.08	0.67	0.33	0.33	0.92	0.17
	4	0.50	0.84	0.75	0.84	0.42	0.33	0.67 _α	0.42
	5	0.50	0.85	0.76	0.83	0.43	0.33	0.67 _α	0.43
	6	0.17	0.67	0.08	0.67	0.33	0.33	0.92	0.17
雪水 凍結	1	0.67	0.50	0.50	0.33	0.83	0.67	0.17	0.94
	2	0.70	0.42	0.53	0.36	0.80	0.80	0.30	0.75 _α
	3	0.67	0.50	0.50	0.33	0.83	0.67	0.17	0.96
	4	0.67	0.50	0.50	0.33	0.83	0.67	0.17	0.93
	5	0.67	0.50	0.50	0.33	0.83	0.67	0.17	0.96
	6	0.67	0.50	0.50	0.33	0.83	0.67	0.17	0.96

 : 的中した場合, : 非的中の場合, 画面上に「1」～「6」の数字が表示された場合、その数字は「1」～「6」のいずれかである。

 : 非的中の場合の発生確率順位。↑は「1」～「6」の数字が表示された場合、その数字は「1」～「6」のいずれかである。

が少ない等からこの判別方法は、検討の余地はあるが利用可能であると考えられる。
 非的中の路面状態で、乾燥・湿潤を乾燥と誤判断するのは問題はないが、乾燥・凍結・湿潤路面を湿潤と誤判断すると路面管理への警戒を緩めてしまう恐れがある。従って、路面管理においては、送られてきた信号とあるが図-5に示すように凍結過程にあるか融解過程にあるかを留意すれば、発生確率と合わせて効果的な路面管理に対する判断 (decision making) ができると考えられる。

しかし、それらの路面状態は図-5に示すように、互いに凍結あるいは融解過程での関係にあり、道路管理にあたって留意しておく必要があると考え、判別において重大な問題ではないと判断した。

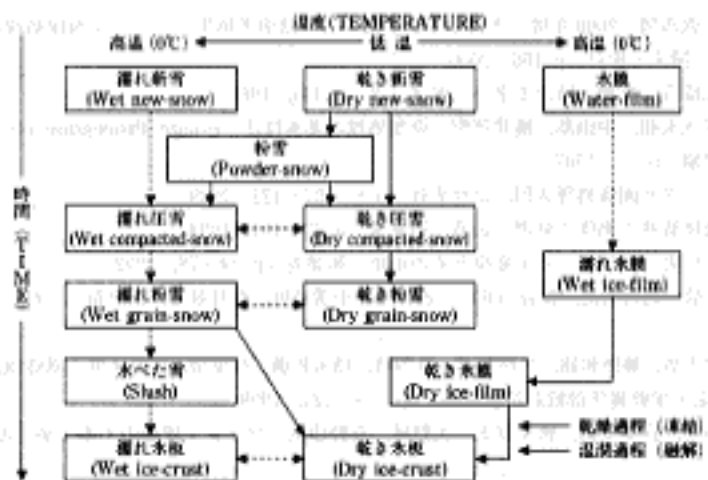


図-5 道路雪氷の変化系統図 (前野, 1987)¹⁰⁾

8. ま と め

- デジタル画像による路面状態の判別は、単一路面状態については 100 cm 以上の高さから撮影した画像について判別は可能であった
- 複合路面状態のものについては高さ 100 cm 以上であっても画像解析のみによる判別は困難であった
- ファジィ理論による複合路面状態の判別を行うと、実際の路面状態と同じ状態の発生確率が高くなり、路面管理に対する判別方法としては検討の余地はあるが有効であると考えられる判別が可能であったと考えられる。

課題 今回の解析を行った単一・複合路面状態についてはパラメータの組み合わせやファジィ理論により判別可能であった。しかし、これまでの解析はアスファルト供試体について行なったものであり、路面状態の種類もまだ少ないと言える。さらに、撮影についても室内で一定の光量の条件下で行なったものである。

今後は、実際に使われているアスファルト舗装路面についての解析を行なってその結果を調べるとともに、問題点を見出し実用化に向け解決していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 平河内 雄也, 武市靖: 2000年度日本雪氷学会全国大会 講演予稿集 デジタル画像処理による冬期路面状態の判別方法に関する検討, p.166, 2000
- 2) 日本建設機械化協会: 新編 防雪工学ハンドブック, p.439, 1988
- 3) 長谷川純一, 興水大和, 中山品, 植井茂樹: 画像処理の基本技法 Image Processing on Personal Computer, 技法入門編, p.12, 1997
- 4) 酒井幸市: デジタル画像処理入門, コロナ社, p.8, 107-121, 1999
- 5) 安田院 猛, 長尾智晴: 画像の処理と認識, 昭見堂, p.87-104, 1994
- 6) 佐川雅彦, 貴家仁志: 高速フーリエ変換とその応用, 昭見堂, p.82-78, 1992
- 7) 得丸英勝, 柴田朝, 興村弘之, 長谷川利治, 沼田産, 中溝高好, 秋月繁雄, 山川新二: 統計工学ハンドブック, p.9, 1987
- 8) 矢島美寛, 廣津千尋, 藤野和建, 竹村彰通, 竹内啓, 織田和清, 松原望, 伏見正則: 基礎統計学III 自然科学の統計学, 東京大学教養学部統計学教室編, pp.223-225, 1999
- 9) 古田均, 小尻利治, 宮本文徳, 秋山孝正, 大野輝, 背野康英: ファジィ理論の土木工学の応用, pp.4-53, 1992
- 10) 前野紀一: 道路雪氷の構造と新分類, 低温科学, 物理篇第46号, pp.131-149, 1987