

景観シミュレーションに用いる消散係数の推定法に関する一考察

Estimation of Extinction Coefficient

青 島 正 和*・村 井 俊 治*
Masakazu AOSHIMA and Shunji MURAI

近年発達した美しい景観シミュレーションであるが、今までは主に晴天時を対象としてきた。しかしながら実際の景観は雨や雪などの気象条件により種々変化し、また気象条件を考慮した景観が必要なケースも多い。本解説は各種の気象条件を考慮した景観シミュレーションをするにあたって、景観の再現に必要な各種天候時の消散係数を、物理現象に忠実にかつ一般的な気象要素を用いて容易に求められるよう考察してまとめたものである。

1. はじめに

近年、自然あるいは構造物の景観に対する配慮が重要視されている。この目的を達成するためには、景観を的確に表現できるシミュレーション手法が大切であるが、景観図における空や地物の色は、人間の感覚により決められているのが現状である。ところで自然の色、特に山や構造物の色は気象条件にしたがって種々変化するが、これを数値的に取り扱えると、景観図の作成に便利である。この点に鑑み筆者は、散乱理論を用いて大気の状態により変化する景色の、理論的表現手法を提案した¹⁾。本論文では、これらを実務に供する場合に必要な雨や霧の消散係数の推定法について考察を行った。

雨や霧の景観は古寺とか宮島、城ヶ崎などによく似合い、景観としても一品である。この効果を理論的に説明できれば、逆に景観解析ができる。

2. 遙青効果

遙青とは、景観の状態を表す言葉で、“遠山が雲霞たなびき朦朧と見える状態”²⁾のことをさす。絵画の分野では大気遠近法と呼び、遠くの山が青く見える現象や、雨や霧により山や構造物、標識などが、ぼけて見え難くなる現象を表現することで、遠近感を出すことができる。遙青は一般に人間がその景色を見た時に心を安らげる効果があり、水墨画などで多用される。遙青によりぼける状態は次の数式で表現できる。

$$\begin{aligned} & \text{背景の明るさ } B_b \left\langle \begin{array}{c} \text{視程 } V = 3.91/\sigma \text{ 以上} \\ \text{---} \end{array} \right\rangle \\ & \text{(天空光)} \\ & \text{物体の明るさ } B_o \left\langle \begin{array}{c} \text{物体までの距離 } R \\ \text{---} \end{array} \right\rangle \text{ 視点} \end{aligned}$$

*東京大学生産技術研究所 第5部

σ : 単位体積当り消散係数

$$B = B_o e^{-\sigma R} + B_b (1 - e^{-\sigma R})^3$$

B : 視点で見た物体の見かけ上の明るさ

すなわち、遙青効果は消散係数がわかれば、簡単にシミュレーション可能である。なお背景の明るさについては、既報¹⁾を参考にすれば求められる。

3. 消 散 係 数

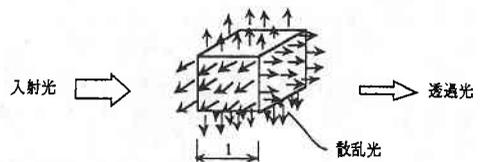
① 消散係数の求めかた

消散係数は、雨や霧などの水滴により、入射光が散乱されてなくなる度合いを示す係数で、水滴による光の吸収がなければ散乱強度と粒子濃度の積で求まる。

$$\text{消散係数 } \sigma = I \times N$$

I : 粒子 1 個の散乱強度

N : 単位体積当り粒子個数



消散係数の求め方には次の2種類がある。

A. 水滴の特性値を用いて、散乱理論式から求める方法
イ. 視程から求める方法

両者は同じ結果を与えるので、逆に視程から散乱理論を使って、水滴の特性値を出すこともできる。

② 散乱係数の理論式

水滴による散乱は Mie 散乱と呼ばれ、高度な電磁気学を使って初めて導出可能な理論であり、ここでは結果のみ示す。なお結果を見ればわかるが、雨や霧などの大型水滴に関する散乱係数は、簡単な数式で表されるので、実用性が高い。

◎散乱光の分布

Mie 散乱基礎式⁴⁾

$$I_{\theta} / I_0 = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 R^2} (i_1 + i_2)$$

$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{a_n \pi_n + b_n \tau_n\} \right|^2$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \{b_n \pi_n + a_n \tau_n\} \right|^2$$

ここで

$$a_n = \frac{S_n'(\beta) S_n(\alpha) - m S_n'(\alpha) S_n(\beta)}{S_n'(\beta) \Phi_n(\alpha) - m \Phi_n'(\alpha) S_n(\beta)}$$

$$b_n = \frac{m S_n'(\beta) S_n(\alpha) - S_n'(\alpha) S_n(\beta)}{m S_n'(\beta) \Phi_n(\alpha) - \Phi_n'(\alpha) S_n(\beta)}$$

$$S_n(\alpha) = \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2}} J_{n+1/2}(\alpha)$$

$$C_n(\alpha) = (-1)^n \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2}} J_{-(n+1/2)}(\alpha)$$

$$\Phi_n(\alpha) = S_n(\alpha) + i C_n(\alpha)$$

$$\pi_n = \frac{1}{\sin \theta} P_n^{(1)}(\cos \theta)$$

$$\tau_n = \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^{(n)}(\cos \theta)$$

I_{θ} : 散乱光強度

I_0 : 入射光強度

J : Bessel 関数

$P_n^{(1)}$: Legendre の陪関数

$\alpha = 2\pi a / \lambda$ a : 粒子半径 λ 波長

$m = \mu_2 / \mu_1$ μ_1, μ_2 媒質および粒子単体の光の屈折率

$\beta = m\alpha$

◎散乱係数 (=消散係数)

$$\text{散乱係数 } I = 2\pi r^2 \alpha^4$$

r : 水粒子半径

なお散乱係数にはこのほかに、大気中の粒子によるレーリー散乱があるが、本論文の目的から外れるので触れない。興味ある方は既報¹⁾を参照されたい。

③視程と消散係数

視程とは大気中の混濁の程度を表す尺度の一つであり、見ている方向の空を背景とした時に、遠くの黒い目標を認めることのできる最大距離を言う。具体的には、物体（黒体）が視点から遠ざかるにつれ、空と物体の明るさが近づいていき、ちょうど空と物体のコントラスト比が 2%（人間がちょうど判別できなくなる比率で、航空視程では 5%）となった距離を言う。数式では以下のような簡単な数式で表せる。

$$\text{視程 } S = 3.91 / \sigma^5$$

σ : 消散係数 = $I \times N$

すなわち、視程がわかれば、消散係数が得られて遙青効果が計算でき、各種の景観シミュレーションが可能となる。これより 4, 5 節においては、各種気象条件下の視程の推定方法について示す。

4. 理論式から得られる視程の推定

ここでは 5 章での実測値の説明に用いる目的で、理論式を用いての視程の推定方法について述べる。

①水滴の諸元

大気中の水滴は、その大きさにより呼び名が変わる

表 1 大気中の水滴の呼び名

直径	呼び名
0.1mm~6mm弱	雨(ただし 3mm 以上の粒子は非常に不安定)
0.05mm~0.1mm	かすみ
~0.05mm	霧(視程 1km 以下), もや(視程 1km 以上)・雲

表 2 雨の諸元

水粒子	直径	体積	落下速度	雨量	単位体積中個数	単位体積中総体積
土砂降り雨	3.0mm	14.1mm ³	806cm/s	60mm/h	147個/m ³	2073mm ³ =2.07cm ³ /m ³
非常に強い雨	2.0	4.19	649	40	409	1.71
強雨	1.4	1.44	517	20	746	1.07
並雨	1.0	0.523	403	10	1317	0.689
小雨	0.4	0.0188	160	3	27704	0.521
細雨	0.2	0.00419	71	1.5	140060	0.587
霧雨	0.1	5.24×10 ⁻⁴	25.6	0.5	1.04×10 ⁶	0.545

表 3 霧と雲の諸元

種類	直径	濃度	水量	厚さ
放射霧	数 μm ~数十 μm (濡れた) 30 μm (乾いた) 10 μm	数ヶ~数百個/ cm^3	0.01~1 g/m^3 (海霧)0.2~2 g/m^3	数十m~200m 50m~100m (移流霧)数百m
積雲 (大陸性)	10 μm	200~300個/ cm^3	1~3 g/m^3	200~700m (時に 2 km)
	14~26 μm	75~180個/ cm^3	0.4~0.5 g/m^3	500~1200m
層雲・高層雲	18 μm	140個/ cm^3	0.05~0.5 g/m^3	300~500m
	9 μm	50個/ cm^3 260個/ cm^3		500m
積乱雲	20 μm	100個/ cm^3	1~3 g/m^3	12~15km
			(時として 5 g/m^3)	3~10km 1~10km

生活の中の気象学 啓文社 気候学気象学辞典 二宮書店
 気になる気象の話 成山堂 気象候学 岩波書店
 気象をはかる 日本規格協会 気象の事典 平凡社

表 4 雨滴の終端速度⁶⁾ (1013hPa, 20°C)

雨滴直径 (mm)	終端速度 (cm/sec)	雨滴直径 (mm)	終端速度 (cm/sec)	雨滴直径 (mm)	終端速度 (cm/sec)
0.01	0.3	0.04	160	3.0	806
0.02	1.2	0.60	246	4.0	883
0.03	2.6	0.80	325	5.0	909
0.05	7.2	1.00	403	5.8	917
0.10	25.6	1.40	517		
0.20	71	2.0	649		

るが、ここでは表 4 の値を採用した。また表中の雨滴の個数は次式から求められる。

$$\text{水滴個数 } N = \frac{q}{Vv} \times \frac{10^6}{3.6} \quad (\text{個}/\text{m}^3)$$

q : 時間雨量 (mm/h)

V : 粒子の体積 (mm^3)

v : 粒子の落下速度 (mm/s)

②視程

①で示した水滴の諸元から視程を求めると表 5 のようになる。

り、おおむね表 1 のようになっている。

これらについては種々の諸元が測定されており、表 2、表 3 のようになっている。両表は各種文献や専門家に対するヒアリングをもとに筆者が推定した値である。なお落下速度に関しては種々の研究が

5. 実測値から得られる視程の推定

筆者が収集した実測値は、以下のとおりである。

もや、雨……東京の1992年の通常値と1968年~1992

表 5 降雨時の視程一覧

水粒子	直径 r	断面積 $A = \pi r^2$	個数 N (m 単位)	落下速度 mm/s	雨量 mm/h	消散係数 $\sigma = 2AN$ (mm 単位)	視程 $V = \frac{3.91}{\sigma}$ (m)	水分量 g/m^3
土砂降り雨	3mm	7.07 mm^2	147/ m^3	8060	60	2.078 $\times 10^{-6}$	1737	2.07
非常に強い雨	2	3.14	409	6490	40	2.569 $\times 10^{-6}$	1522	1.71
強雨	1.4	1.54	746	5170	20	2.302 $\times 10^{-6}$	1698	1.07
並雨	1.0	0.785	1316	4030	10	2.066 $\times 10^{-6}$	1892	0.69
小雨	0.4	0.126	15543	1600	3	3.916 $\times 10^{-6}$	1000	0.52
細雨	0.2	0.0314	140094	710	1.5	8.798 $\times 10^{-6}$	444	0.59
霧雨	0.1	7.85 $\times 10^{-3}$	1.04	256	0.5	1.633 $\times 10^{-6}$	240	0.55
ぬれた霧	0.03	7.07 $\times 10^{-4}$	60	—	—	8.48 $\times 10^{-6}$	46	0.85
乾いた霧	0.01	7.85 $\times 10^{-5}$	250	—	—	3.93 $\times 10^{-6}$	100	0.13

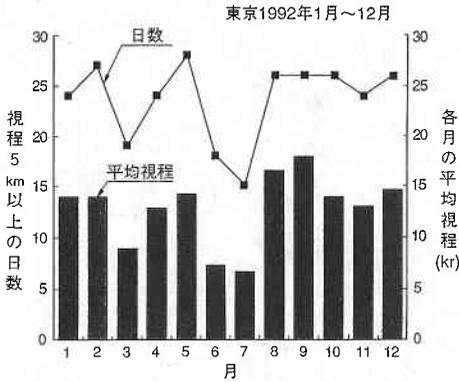


図1 視程の概要

1992年1月～12月(1日or15日)
 ● 非雨
 × 雨

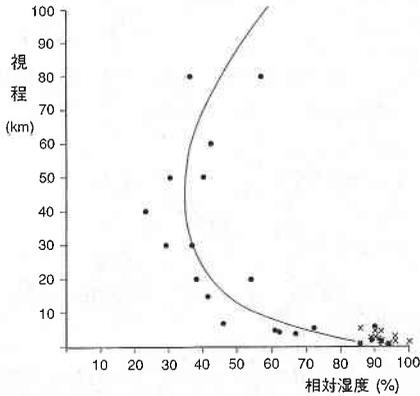


図2 相対湿度と視程

年の極値

霧……………実測値が入手できなかったので、理論値で代替

雪……………高田の1991年～1992年冬季の通常値

③実測視程の概要

視程の観測は、各気象台で3時間ごとに行われている。観測方法は、目視でどこまで遠い景色が見えるかで決めている。ただし360度の視界の中で、一番近い距離の値を採用するので、方位によってはそれ以上に見えることがある。たとえば冬では東京から100km離れた富士山が見えることがままあるが、1992年の視程観測値には100km以上の値はない。

図1に東京における1992年一年間の月別視程概要を示す。平均視程の一番小さいのは7月で大きいのは9月である。視程は空気中の水分と関係があるはずなので、視程と相対湿度の関係を図2に示す。通常スケールでは、両者の間に明確な傾向は見られない。ただ降雨時は相対

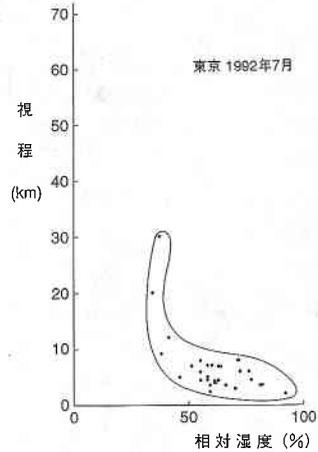


図3 最低平均視程月の分布

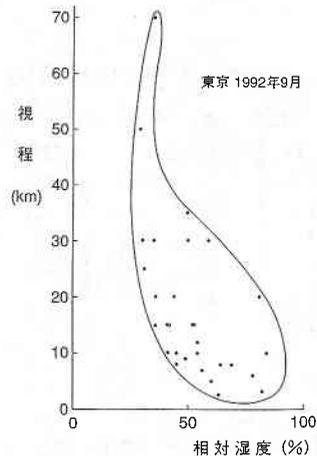


図4 最大平均視程月の分布

湿度が85%以上で視程も非常に小さいことがわかる。両者の関係をもう少し詳しく見ようと、視程の極値である7月と9月のデータを図3、図4に示したが、これからも有用な傾向は得られなかった。

②もやの視程

いわゆるもやの時の、視程と相対湿度の有用な関係は、野本⁷⁾により得られている。野本の論文から引用し、スケールを変えたのが図5である。図中の回帰曲線は次式で示される。

$$\log V = 2.5 - 0.025H$$

H: 相対湿度

図5は1973年と1974年の各々1月と7月のデータを用いて作られている。

この式の妥当性を調べる目的で筆者のデータを使用して同様の図を作った。

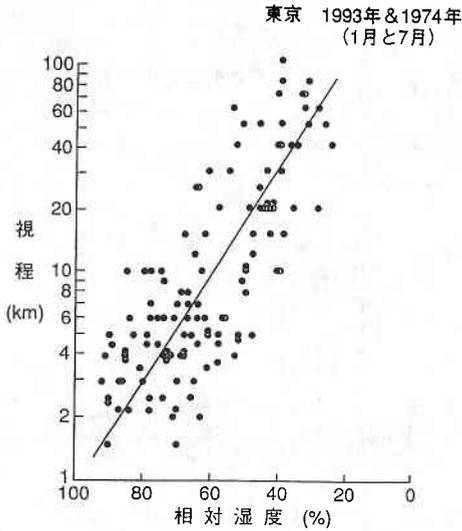


図5 視程観測結果(野本)⁷⁾

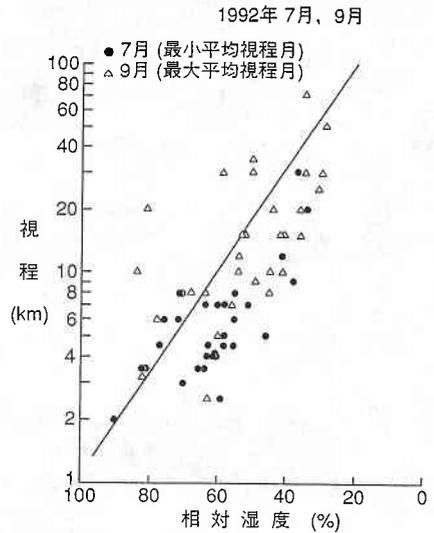


図7 平均視程の最大最小の月の月別視程分布

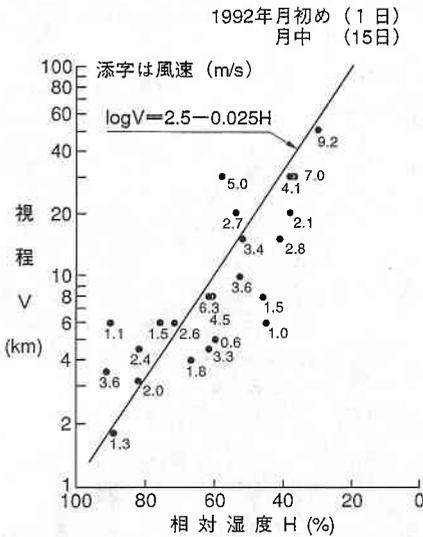


図6 通常値の視程

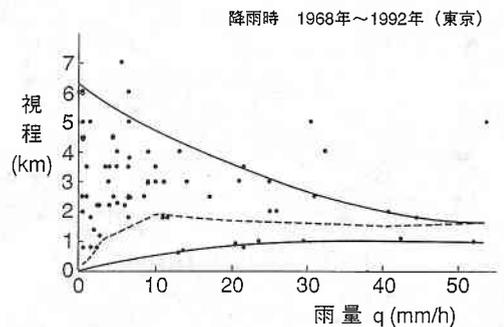


図8 雨量と視程

図6に1992年の各月の1日と15日の通常値のケースを示す。図6では視程の点に添えて風速をプロットしたので、概略の風速の傾向がわかる。

図7に平均視程が最小と最大の7月と9月のケースを示す。両図ともに上式の直線を示したが、よく近似できていると思われる。

図7では7月のデータと9月のデータがきれいに分かれており、なまじ別々に書くより一緒にしたほうが、直線をよく表現していることがわかる。

③雨の視程

降雨時の視程を表すものとして、時間雨量と視程の関係を図8に示す。

図8より降雨時の視程は比較的良好とまとまっていることがわかる。図中の点線は、4節に示した表5の値をプロットしたものである。理論から得られた表の値は、観測視程の一番視程が短い付近の観測結果をよく表していることがわかる。また図の上下の曲線は、視程の最大値と最小値の包絡線を示している。最大値のデータはこの曲線より大きいものもあるが、これは次のように説明できる。すなわち、降雨は定常的なものではなく、強く降ったり弱く降ったりしている。時間雨量は一時間の平均値を示しているため、たまたま視程の観測時に降雨が弱ければ雨量に比較して視程は大きくなる。この2本の曲線を算出できるようにした、雨量と雨粒直径の関係を図9に示す。図9を用いれば、客観的な値である雨量と雨粒の大きさを推定することで、視程を計算できる。

④霧の視程

霧は視程自身が霧の濃度を示すパラメータとなっており、視程以外霧の状態を示す客観的なパラメータはない。ここでは人間の直感的な言葉である、濃い霧とか薄い霧

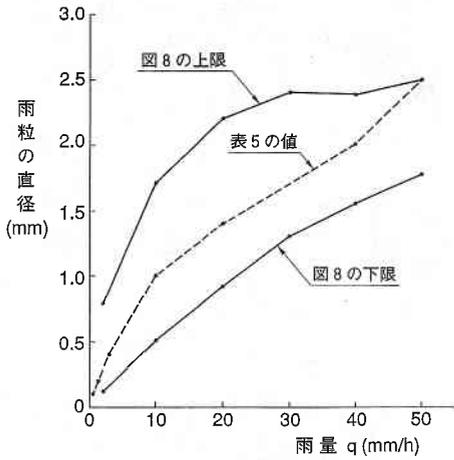


図9 雨量と雨粒直径から消散係数を求める図

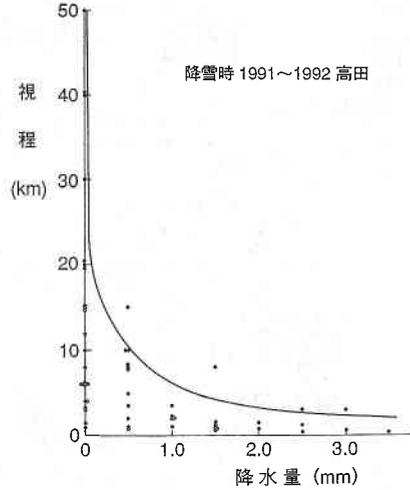


図12 降雪時の視程 (降水量との関係)

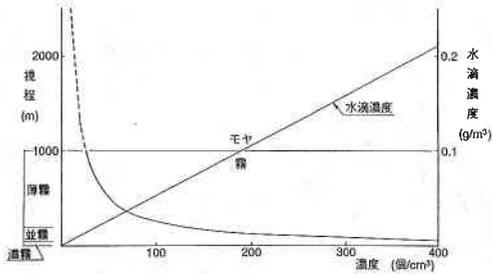


図10 乾いた霧の視程 (直径10μ)

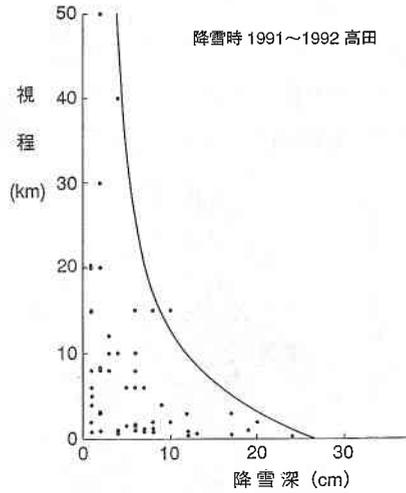


図13 降雪時の視程 (降雪深との関係)

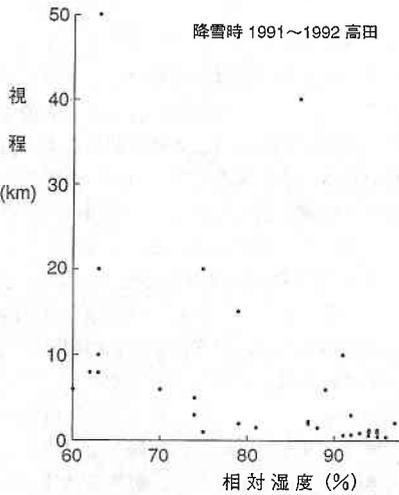


図11 降雪時の視程 (相対湿度との関係)

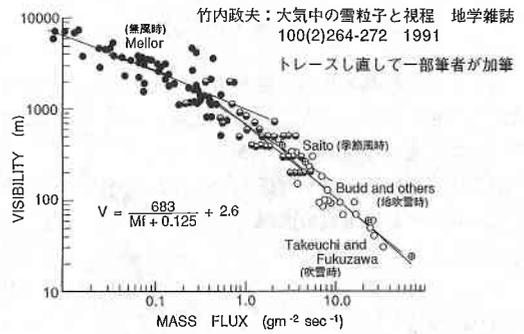


図14 視程と雪の移動量

とかの表現を用いて、霧の視程を理論式から求めるようにする。

図10は霧粒の直径を 10μ (乾いた霧)とした時の霧状の個数濃度から、視程を計算したものである。図の左側の軸に書いたとおり、視程は濃い薄いと言う表現で表せるので、逆にこれから視程を求めることができる。

⑤雪の視程

降雪時における視程を、相対湿度、降水量、降雪深さをパラメータに取ったときのプロット結果を図11, 図12, 図13に示す。図11ではパラメータと視程に明確な関係はない。図12と図13では、パラメータと視程の範囲はわかるが、視程の推定はできない。

竹内⁸⁾によれば、視程と雪の移動量には明確な関係があるとのことである (図14参照)。図14で雪の移動量は、雪の空間濃度 (g/m^3)と風速 (m/s) をかければ求まるので、この図より視程が求まる。

6. おわりに

本考察の結果、従来は人間の感覚で決めていた遙青効

果の表現が、物理常数を用いて表現可能となる。全般に、なお研究の余地は残されているが、当面の使用には十分有効であるものと思われる。(1993年8月9日受理)

参考文献

- 1) 村井俊治, 青島正和: 大気の状態を考慮した景観画像の作成 生産研究 1993年5月
- 2) 中村良夫著: 風景学入門 P. 30 中公新書
- 3) 新井重男: 視程と視距離 P. 40 測候時報 Vol. 32 No. 2
- 4) 久保田広編: 光学技術ハンドブック PP. 1112~1114 朝倉書店
高橋幹二著: 基礎エアロゾル学 PP. 146~148 養賢堂
- 5) 新井重男: 視程と視距離 P. 40 測候時報 Vol. 32 No. 2
- 6) 火災便覧 P. 266 日本火災学会 共立出版(株)
- 7) 野本真一: 視程の変動 天気 Vol. 123 No. 5 P. 235 1976年5月
- 8) 竹内政夫: 大気中の雪粒子と視程 地学雑誌 P. 264 Vol. 100 No. 2