

路上吹溜り数値シミュレーション

佐藤篤司*・植松孝彦**

Numerical simulation of snowdrift on a road

By

Atsushi Sato

*Shinjo Branch of Snow and Ice,
National Research Institute for Earth Science
and Disaster Prevention*

and

Takahiko Uematsu

Hokkaido Bureau of Japan Weather Association

Abstract

Computer simulation of snowdrift was conducted for 16 weather conditions of combination of wind and precipitation rate by Japan Weather Association model. At the first, the model, which was based on the Reynolds equations and equation of continuity, calculates wind profile around the vertical section of a real road in Shounai District of Yamagata prefecture. Snow transport rate was then calculated for saltation layer and suspension layer, with using an empirical law and a diffusion equation of snow particle.

Results show that for the low wind speed, snow deposition occurred evenly on the road. On the other hand, with increasing wind speed, more localization of snowdrift occurred on the both sides of windward and leeward of concrete blocks dividing cars and pedestrians. That is, only a part of the road surface close to the concrete block is covered with snow, and other part of the road is blown away by the wind. Precipitation rates affect rationally deposition amount for all cases of wind speed. These results are coincident well with field observations.

This simulation work suggests that possibility of effective uses of this type computer simulation in a forecasting of disaster due to the blowing snow deposition on a road.

* 新庄雪氷防災研究支所・** 日本気象協会北海道本部

Key words : snowdrift, snowdrift on a road, numerical simulation,
concrete blocks dividing car and pedestrian

キーワード:吹溜り, 路上吹溜り, 数値シミュレーション, 歩車道境界ブロック

1. ま え が き

現在, 我国の積雪地帯では幹線道路を中心に除雪体制の整備が進み, 長期にわたる交通停止という事態は少なくなった. しかし, 吹雪によって急速に発生する“路上吹溜り”が交通障害として顕著になってきた. これは雪の堆積場所が強風によって路上の片側や一部分に片寄って生じるものであり, 自動車の運転を著しく困難にするものである.

本研究は, 路上吹溜り発生の危険度予測手法の研究の一環として実施した, 気象条件を変えた路上吹溜り発生の数値シミュレーションの結果を報告するものである.

2. 路上吹溜りの発生

1988年より3ヵ年, 路上吹溜り発生の野外観測を試みた. 場所は山形県庄内平野の国道および県道である. しかし, 観測した3冬期間は全国的に暖冬少雪の期間と重なり, 例年発生すると言われる路上吹溜りはほとんど起こらず, 観測による吹溜り発生条件の調査は進展しなかった.

第1年度(1988年-89年)は観測地域に路上吹溜りは発生しなかった. 第2年度(1989年

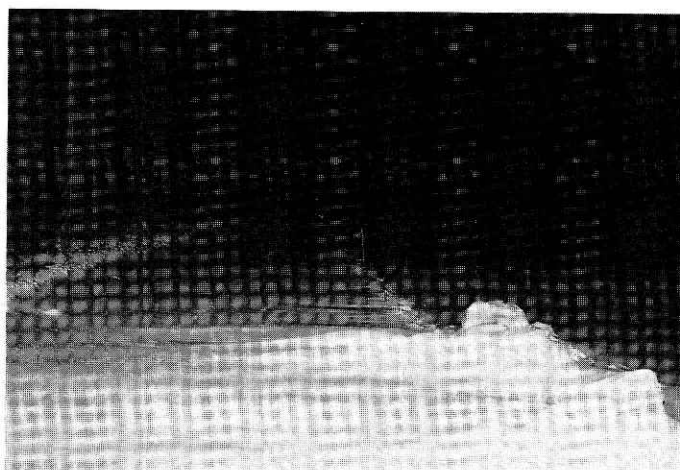


図1 1990年1月26日に発生した路上吹溜り. 阿部建設(株)提供.

Fig.1 Photograph of snowdrift on a road, occurred on January 26, 1990, by the courtesy of Abe Construction Co., Inc.

—90年)では90年1月下旬に1回の路上吹溜りが見られた。この時の早朝除雪前に撮った路上の写真を図1に示す。第3年度(1990年—91年)は2月5日に路上吹溜りがあった。

3. 数値シミュレーションの概要

野外観測ではとらえることの難しい路上吹溜り発生を予測するため、最近シミュレーション手法として注目されている数値シミュレーションにより、気象要素を変えた吹溜り発生予測を行った。

吹雪の数値シミュレーションの試みは少なく、Decker and Brown (1983, 1985) および植松等(植松1987, Uematsu et al. 1989, 1991)が報告されているに過ぎない。本研究では植松等が開発した気象協会モデルを使用した。

シミュレーション手法は大きく分けて次のようになる。

(a) 気流の場の計算—雪面上各点の摩擦速度の計算

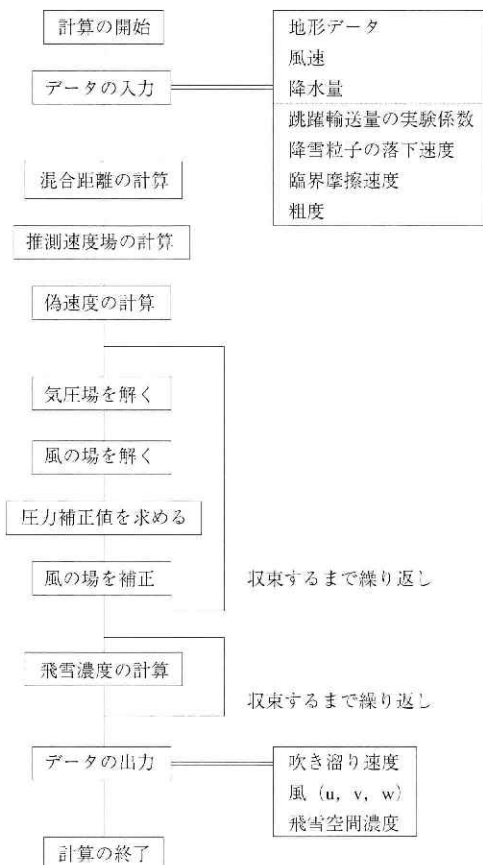


図2 数値シミュレーション手法の流れ図.
Fig.2 Flow diagram of the numerical simulation of snowdrift on a road.

(b) 飛雪の輸送量の分布の計算—摩擦速度から計算

(c) エロージョンあるいはデポジションの計算—飛雪の輸送量の収支

また、入力データ等も入れた数値シミュレーションの流れ図を図2に示す。

4. 数値シミュレーションの基礎方程式

4.1 気流の計算

シミュレーションにはまず気流の場と摩擦速度を求めることが必要である。3次元の気流場を計算するためにレイノルズの方程式と連続の式を用いた。また、摩擦速度は風速の対数法則において粗度を $1 \times 10^{-4} \text{m}$ として用いた。

4.2 雪の輸送計算のための基礎方程式

吹雪による雪の輸送形態は跳躍、浮遊、転動の三つに分けられるが、ここでは輸送の大部分を占める跳躍と浮遊を考慮する。

a) 跳躍

吹雪輸送量の実験式の多くは提案があるが、その1つとして Iversen (1980) のものがある。これは吹雪輸送量 q を摩擦速度の関数として表している。

$$q = c \left(\frac{\rho}{g} \right) \frac{|w_f|}{u_{*t}} u_*^2 (u_* - u_{*t}) \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度、 g は重力加速度、 w_f は雪粒子の落下速度、 u_{*t} は臨界摩擦速度である。吹雪輸送量の分布 $q(x)$ は、 $u_*(x)$ の分布が求められれば、(1) 式を用いて計算することができる。ところで、上式では実験常数 u_{*t} と c が必要であるが、 u_{*t} は White (1946) より 0.2m/s 、 c は Schmidt (1982) と同じ値 1.0 を用いた。

b) 浮遊

浮遊は次の重力を考慮した拡散方程式によって計算する。

$$\frac{\partial (\phi)}{\partial t} + \text{div} (u_s \cdot \phi) = \text{div} (K_s \text{grad} \phi) - \frac{\partial (w_f \phi)}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 ϕ 、 u_s 、 K_s はそれぞれ飛雪空間濃度 (g/m^3)、雪粒子の速度、雪粒子の渦拡散係数である。また、 w_f は雪粒子の落下速度である。拡散係数については議論の多いところであるが、ここでは運動量の拡散係数と等しいものとして、 $K_s = K_m$ とした。

c) 境界条件

下部の境界条件

浮遊層の下部は跳躍層と接しているものとし、跳躍層の平均の飛雪空間濃度を境界条件として与えた。なお、跳躍層は吹雪の発達程度によって変化するものであろうが、ここでは一定値として与えた。

上部の境界条件

上部の境界は吹雪による飛雪空間濃度がほぼ0として扱える高さとする。この時飛雪空間濃度は降雪による雪の空間濃度となる。 P_{re} を降水強度、あるいは降雪強度とすると、境界条件として与える空間濃度は次式で表される。

$$\phi_H = \frac{P_{re}}{w_f} \quad (3)$$

d) 吹溜りの計算

吹溜りは落下する雪粒子として計算される沈着と、気流によって運ばれる雪粒子として計算される剥離の差として求める。

沈着速度は跳躍層の飛雪空間濃度 ϕ_h を用いて次のように求められる。

$$d = w_f \phi_h \quad (4)$$

一方、定常状態を仮定すると、剥離速度 e は気流による吹雪輸送量に等しいと考えられるので、

$$e = \frac{qw_f}{u_h h} \quad (5)$$

ここで u_h は跳躍層の風速、 $q / (u_h h)$ は風が運びうる最大飛雪空間濃度に対応する。その結果、吹溜り速度 s は沈着速度と剥離速度から次式で求められる。

$$s = d - |e|$$

本モデルでの結果として得られるのは吹溜り速度である。つまり単位時間における吹溜りの量である。従って、これを吹溜り量（あるいは積雪深）に変換するためには時間積分の必要がある。

5. 数値シミュレーション

5.1 地形と気象条件

地形としては山形県庄内の県道、藤塚―八幡線大豊田地点の断面を参考に、図3の様な地形を計算条件として与えることとする。なお、斜面が階段上になっているのは採用モデルの直交3次元座標のメッシュの大きさに対応している。

野外調査地点においては最近、暖冬小雪のため、吹溜りの発生はほとんどないが、さきに述べたように1990年1月25日にはその発生が観測された。そのときの気象データは次のようであった。

日平均風速 10.4m/s
 最大1時間降水量 1.0mm/hr (=0.1g/hr)
 日平均気温 -4.1℃

図3 モデル計算に用いた道路断面図。

Fig.3 Cross section of the road used for the simulation.

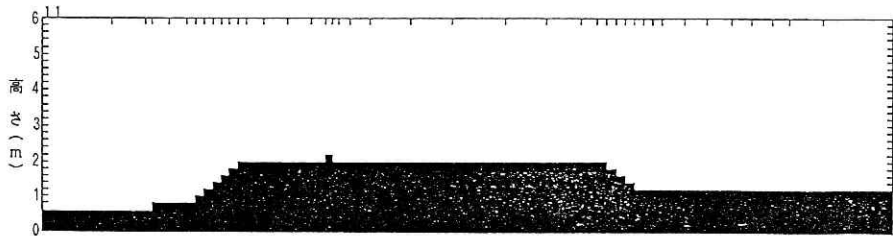


表1 計算を行った気象条件。

風速4種類、降水量4種類の組み合わせで、計16種類の場合について吹溜り計算を行った。

Table 1 Weather conditions used for the simulation. Calculation was done for 16 cases with the combination of four each case of wind speed and solid precipitation.

パターン	風速 (m/s)	降水量 (降水量強度) (mm/hr)
1	5	0.5
2	5	1.0
3	5	2.0
4	5	3.0
5	10.4	0.5
6	10.4	1.0
7	10.4	2.0
8	10.4	3.0
9	15	0.5
10	15	1.0
11	15	2.0
12	15	3.0
13	20	0.5
14	20	1.0
15	20	2.0
16	20	3.0

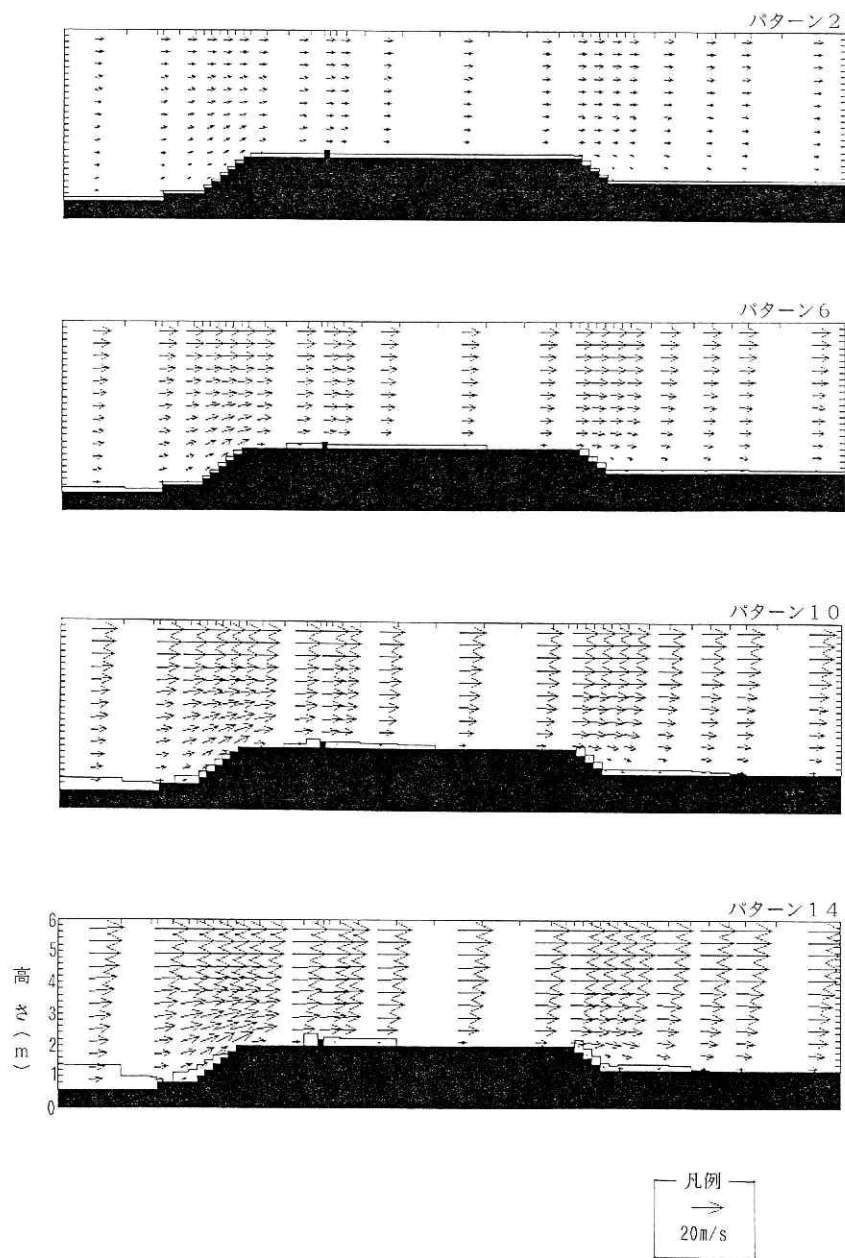


図 4 計算によって得られた風速パターン。降水量は1.0mm/hrとし、風速は図中に示した。
Fig.4 Calculated wind-velocity field. Solid precipitation was set as 1.0 mm / hr.

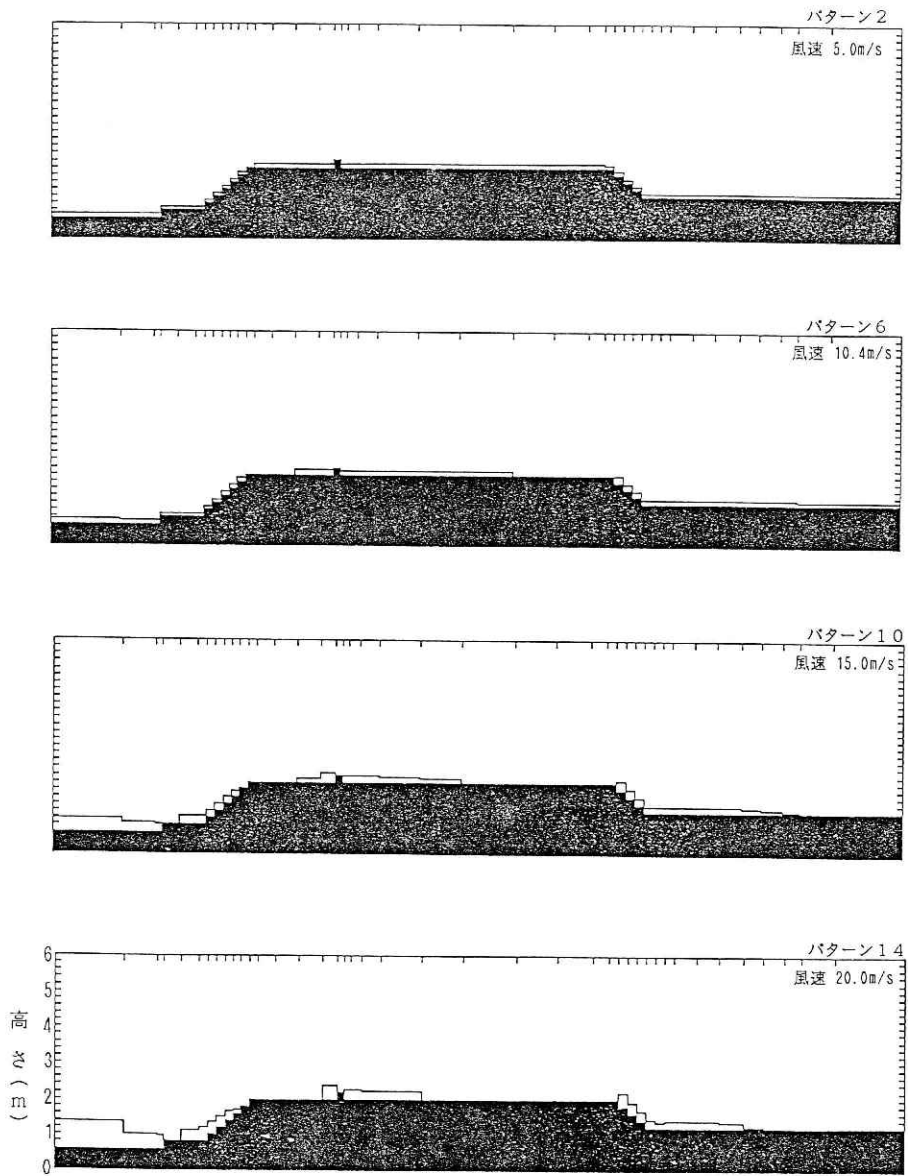


図5 計算によって得られた吹溜り。地形上の白い部分が積雪であり、積雪の高さを3倍の縮尺にしてある。

Fig.5 Calculated snowdrift on the road, shown as white part on the road. Height of snow is extended three times as large as the cross section of the road.

本モデルにおいては、気象条件として日平均風速、降水量を与えることが必要である。そこで、発生しうるであろう気象条件を上記の値を中心としてパターン分けして計算を行うこととした。計算を行ったパターンは表1のとおり、風速4パターン、降水量4パターンの計16パターンである。

5.2 数値シミュレーション結果

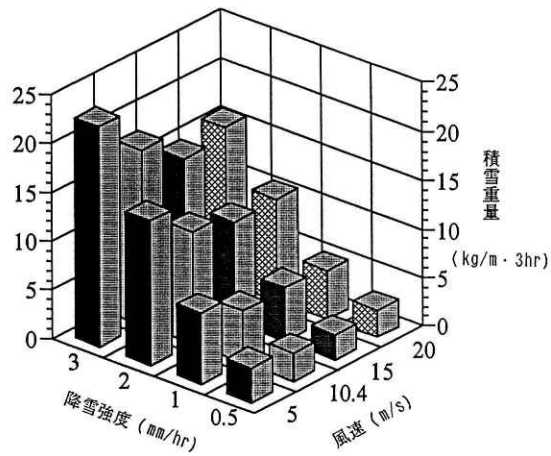
図4に気流と吹溜りの計算結果の例を示す。パターン6が実際に吹溜りの観測された条件に相当する。吹溜りの結果は、吹溜り速度（単位時間に吹溜る積雪深）を3倍して、3時間あたりの積雪深として示した。

これらの図から、まず気流を見ると、盛土の直前、直後、縁石の風下の弱風域が顕著な傾

表2 路上吹溜りの計算結果（藤塚八幡線）。
与えられた気象条件について縁石の風上風下に対して道路の単位長さ当たり、3時間後の積雪重量を示す。

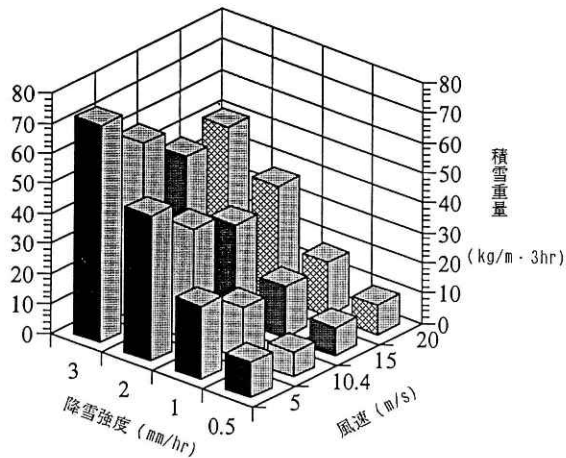
Table 2 Calculated snow weight for 16 weather conditions for unit length of the road per 3 hours. Results are shown separately windward part and leeward part of concrete blocks dividing car and pedestrian.

降雪強度0.5mm/hr				
風速	5m/s	10.4m/s	15m/s	20m/s
縁石の前	3.61	2.84	2.62	2.85
縁石の後	12.04	8.72	9.57	9.75
降雪強度1.0mm/hr				
風速	5m/s	10.4m/s	15m/s	20m/s
縁石の前	7.34	5.37	5.67	5.14
縁石の後	24.36	17.72	16.76	18.46
降雪強度0.5mm/hr				
風速	5m/s	10.4m/s	15m/s	20m/s
縁石の前	14.9	11.7	10.4	10.9
縁石の後	48.3	38.0	31.9	37.7
降雪強度0.5mm/hr				
風速	5m/s	10.4m/s	15m/s	20m/s
縁石の前	22.60	18.19	15.08	16.39
縁石の後	72.28	60.72	48.66	51.47
風速5m/s				
降雪強度	0.5mm/hr	1.0mm/hr	2.0mm/hr	3.0mm/hr
縁石の前	3.61	7.33	14.95	22.60
縁石の後	12.04	24.36	48.26	72.28
風速10.4m/s				
降雪強度	0.5mm/hr	1.0mm/hr	2.0mm/hr	3.0mm/hr
縁石の前	2.84	5.37	11.66	18.19
縁石の後	8.72	17.72	37.98	60.72
風速15m/s				
降雪強度	0.5mm/hr	1.0mm/hr	2.0mm/hr	3.0mm/hr
縁石の前	2.62	5.67	10.41	15.08
縁石の後	9.57	16.76	31.91	48.66
風速20m/s				
降雪強度	0.5mm/hr	1.0mm/hr	2.0mm/hr	3.0mm/hr
縁石の前	2.85	5.14	10.94	16.39
縁石の後	9.75	18.46	37.67	51.47



積雪重量の合計

藤塚八幡線吹き溜まり状況（縁石の前）

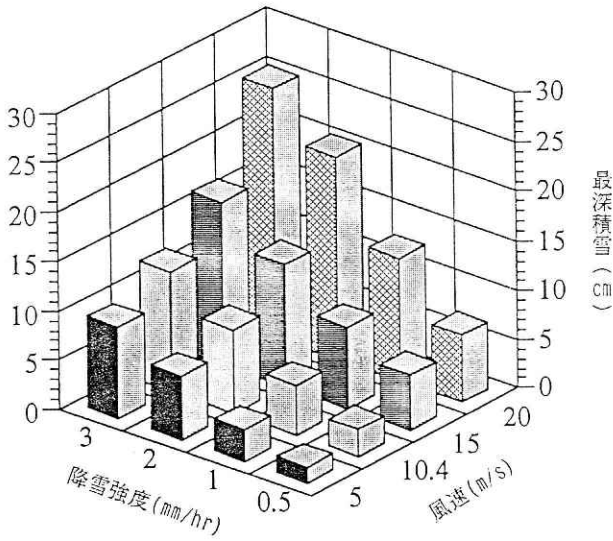


積雪重量の合計

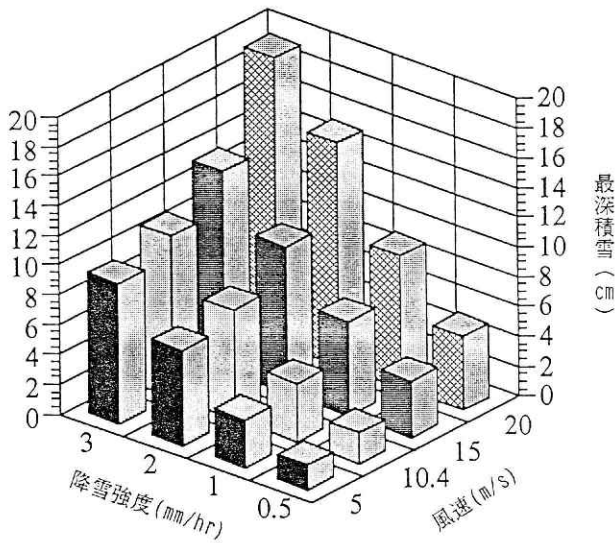
藤塚八幡線吹き溜まり状況（縁石の後）

図6 計算によって得られた路上吹溜りの積雪重量。縁石の風上（上図）と風下（下図）に分けて示す。

Fig.6 Calculated total snow weight of drifted snow on the road. Upper figure shows a part of windward of concrete blocks dividing car and pedestrian, and lower figure shows a part of leeward of the concrete blocks.



藤塚八幡線吹き溜まり状況（縁石の前）



藤塚八幡線吹き溜まり状況（縁石の後）

図7 計算によって得られた路上吹溜りの最深積雪。降雪強度と風速への依存性を縁石の風上風下に分けて示す。

Fig.7 Calculated value of the maximum depth of drifted snow on the road. Upper figure shows a part of windward of concrete blocks dividing car and pedestrian, and lower figure shows a part of leeward of the concrete blocks.

向として現れている。これらの弱風域に対応して吹溜りが計算されていることも同時に表現されている。

3時間積算の吹溜りだけを示したのが図5である。図中、積雪深を地形の縮尺に対して3倍にしてある。吹溜り領域（吹溜りの発生する範囲）が風速によって大きく変化する様子が顕著である。風速5 m/s では路上全体にわたって積雪が生じ、いわゆる吹溜りは見られない。風速が大きくなるにつれて吹溜り領域が局在化し、積雪深も増加してくる。一方、吹払いにより路面の露出面積も多くなる。こういう状況が起こると、実際の自動車の運転に障害となってくる。

全気象パターンについての計算結果を表2に示す。また、路上吹溜り量（積雪重量）を縁石の風上と風下に分けて総量を調べると図6となる。降雪強度が大きくなると吹溜り総量が増えること、また風速が大きくなると総量が減少することが明確に現れている。風速増加によって吹溜りと吹払いの二つの効果が現れて、路上吹溜り総量が減少することを示している。

交通障害には路面吹溜り総量よりむしろ、部分的に発生する吹溜りすなわち積雪の塊であることから、計算結果に現れた縁石前後の最深積雪を示す図7となる。これを見ると、縁石の風上風下とも降雪強度の増大および風速の増大に伴い、最深積雪が増加することが明瞭である。この定性的傾向は雪国住民の感覚に一致しており、本数値シミュレーションは基本的に妥当であると言える。

4. あとがき

吹溜り発生の予測に関する研究の一貫として、数値シミュレーション手法を用いて路上吹溜りの実験を実施した。使用したのは気象協会モデルで、これはPatanker(1980)のアルゴリズムに基づいて気流計算を行い、これを用いて雪の浮遊、跳躍の両現象を計算するものである。

このモデルを用いて実際の道路断面について現地で想定される16ケースの気象条件（風速および降雪速度の組み合わせ）で吹溜りの計算を行った。吹溜りの発生が多いと言われる山形県庄内地区の県道、藤塚八幡線の大豊田地点を代表に選んだ。

その結果、路上の突起となっている縁石（歩車道境界ブロック）の風上、風下で吹溜りの多いこと、盛土の風上、風下で吹溜ること、さらに風速が大きくなると路上の吹溜り面積が小さくなって雪の深さが増えること等が明らかになった。これらの結果はこれまでの現地での観測結果と良く一致する事がわかった。

路上吹溜り発生の危険度予測手法に本シミュレーション手法を組み込むことは基本的に可能であると言えよう。

5. 謝 辞

山形県道路維持課の山内主査からは道路断面図，八幡町の阿部建設からは路上吹溜りの写真や重要な情報の提供を頂いた。当支所の木村忠志支所長からは貴重なコメントを頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表明するものである。

参 考 文 献

- 1) Decker, R. and R.L.Brown(1983) : A Turbulent Mixture Theory for the Atmospheric Mixture of Snow and Air. *Annals of Glaciology* 4, 37-41.
- 2) Decker, R. and R.L.Brown(1985) : Two Dimensional Solutions for a Turbulent Continuum Theory for the Atmospheric Mixture of Snow and Air. *Annals of Glaciology* 6, 53-58.
- 3) Patanker, S.V.(1981) : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Pub., 193pp.
- 4) Schmidt, R.A.(1982) : Properties of Blowing snow. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20-1, 39-44.
- 5) 植松孝彦 (1987) : 吹雪・吹溜りの数値シミュレーション 1. 寒地技術シンポジウム '87講演論文集, 411-416.
- 6) Uematsu, T., Y.Kaneda, K.Takeuchi, T.Nakata and M.Yukumi (1989) : Numerical Simulation of Snowdrift Development. *Annals of Glaciology* 13, 265-267.
- 7) Uematsu, T., T.Nakata, K.Takeuchi, Y.Arisawa and Y.Kaneda (1991) : Three-dimensional numerical simulation of snowdrift. *Cold Regions Science and Technology*, 20, 65-73.
- 8) White, C.M.(1940) : The equilibrium of grains on the bed of a stream. *Proc. Royal Soc. of London, Ser. A*, No.958, Vol.174, 322-338.

(1992年 7 月13日 原稿受理)