

気流性状を用いた
積雪荷重分布の予測法に関する研究

2001年 9月

土谷 学

学位論文内容の要旨

氏名 土谷 学

気流性状を用いた積雪荷重分布の予測法に関する研究

北海道や本州の日本海沿岸は、世界でも有数の多雪地帯として知られており、その積雪が3mを超える地域も少なくない。また、近年の地球環境の変化や都市気候による温暖化で、日本の平均積雪量は減少の傾向にあるとされているが、その反面、異常気象による一時的な豪雪の確度が増えているとも言われている。実際、平成8年や平成12年には、各地で近年稀に見る積雪深を記録しており、札幌における年最大積雪深では、平年値87cmに対して、平成8年に145cm、平成12年に148cmを記録している。

建築物の設計時において積雪荷重を算定する場合、積雪量そのものに加え、風による吹きだまりや吹き払いによって生じる偏分布荷重を評価することが必要である。建物形状によっては、この吹きだまりにより、通常の積雪荷重を遙かに超える荷重が局所的に加わる可能性がある。特に、近年に見られる競技場や運動施設におけるドーム建築物、吊屋根構造建築物、あるいは、大規模小売店舗や工場、倉庫、体育館などの大スパン建築物においては、偏分布荷重の予測と評価は、不可欠であると言える。しかしながら、吹きだまりの位置や形状は、気温、降雪量、雪質、風向、風速などの種々の気象条件に加えて、建築物自身の形状や、近隣建物の状況などの条件により大きく左右されるため、一概には定まらず、容易に予測することはできない。建築基準法においては、令86条第5項において、「屋根面における積雪量が不均等となる恐れがある場合においては、その影響を考慮して積雪荷重を計算しなければならない。」と明記されているが、その具体的な分布形状については規定されていない。また、日本建築学会の建築物荷重指針・同解説では、基本的なM型屋根、連続山形屋根、のこぎり屋根、セットバックのある屋根における偏分布係数が規定されているが、大規模または特殊な形状の建築物等については、調査、実験等に基づいて定める必要があるとしている。これは、建物屋根上における積雪分布の調査研究の絶対数が少なく、様々な屋根形状に対して、系統的に把握するには至っていないことによる。

現在、建物屋根上や周囲の吹きだまりを予測する最も有効な手法としては、自然雪や模型

雪を用いた吹雪風洞実験が行われており、多くの検討実績がある。しかし、建物屋根面や建物近傍における吹きだまり性状については、実現象自体が十分に解明されていないことなどにより、相似則が細部までは確立されていないという面が残り、個々の研究者の知識と経験に頼る部分がある。従って、吹雪風洞実験においては、研究者の技術ポテンシャルの高さが要求される。また近年では、吹雪風洞実験による吹きだまり予測の他に、混相流を対象とした数値流体解析による吹きだまり予測も試みられているが、前述のように実現象の解明が不十分なことに加え、計算技術自体が確立されていないことなどにより、正確な予測結果が得られるには至っていない。風により形成される積雪分布形状予測における相似則の確立には、自然界における吹きだまり現象の把握と、その形成要因の解明が重要であると言える。

吹きだまりが形成されるという物理現象の過程を考えると、様々な要因が雪粒子の一つ一つに作用した現象の累積結果であるといえるが、吹きだまり性状を予測する上では、吹きだまりの形成に対して特に支配的に作用する要因を明らかにすることが重要である。吹きだまりの形成に関わる多くの要因の中で、雪面近傍の気流性状が密接に関係することは、既往の研究において明らかである。特に建物の風上側にできる吹きだまりの形成には、雪面近傍のせん断応力の変化が大きく寄与していることが明らかにされている。一方、建物の風下側における吹きだまりの形成に対しては、雪面近傍のせん断応力の変化との間に、必ずしも相関関係が成り立つわけではない。建物からの剥離流の影響により、建物の風上側と風下側における流れ性状の違いは、雪面近傍のみではなく、建物高さと同程度以上にまで及ぶことから、吹きだまり形成に与える建物前後の気流性状の違いの影響は大きい。しかしながら、建物の風上側や風下側を問わず、風の作用によって吹きだまりが形成されていることは事実であり、その形成に影響を及ぼす別の物理的要因があるのではないかと推測した。

本研究では、吹きだまりと気流性状との関連性の検討を行い、吹きだまり形成の主要因となる気流特性を明らかにすることで、吹雪風洞実験や混相流を対象とした数値流体解析による吹きだまり現象の予測手法における相似則の確立に寄与し、さらに、一般的な気流風洞実験や数値流体計算で得られる建物周りの気流性状分布を用いて吹きだまり性状を予測する手法を提案しようとするものである。

本論文は、次に示す1章から6章で構成する。

1章 序 論

1章では、本研究の背景と目的、吹きだまりおよび積雪荷重分布等に関連する既往の研究の概要と本研究の位置付けについて述べている。

2章 試験体を用いた屋外観測による積雪分布の調査

2章では、積雪分布の形成に影響を与える気流性状の特性について検討を行う上で必要となる積雪分布の性状について述べる。積雪分布の性状は、吹きだめ型の防雪フェンスと、階段状屋根建物を対象とした試験体を北海道工業大学のグラウンドに設置して、長期間にわたり

観測したものである。吹きだめ型の防雪フェンスを対象とした観測では、冬期の気象条件の違いによる積雪性状の推移の違いを明らかにし、階段状屋根建物を対象とした観測では、風速と風向をパラメータとして、吹きだまりが問題となる下段屋根上にできる吹きだまり形状の違いを明らかにしている。

3章 風洞実験による気流性状の測定

3章では、積雪分布の形成に影響を与える気流特性について検討を行う上で必要となる気流性状について述べる。気流性状は、2章で対象とした吹きだめ型の防雪フェンスと階段状屋根建物周りののについて、それぞれの試験体の縮尺モデルを用いた風洞実験により測定した。実験では、全体的な流れの性状を測定するとともに、積雪性状に影響を及ぼすと考えられる地表面や屋根面に近接した位置における流れについて、スプリットファイバークローブを使用して、風向、風速の平均成分、変動成分を高い精度で測定し、その分布性状を明らかにしている。

4章 積雪分布の形成に影響を及ぼす気流性状の検討

4章では、2章で示した吹きだまり性状と3章で示した気流性状を用いて、雪面に近接した位置における水平方向の平均風速の分布および水平方向の流れの平均加速度と吹きだまり性状の相関関係を検討する。その結果、平均風速では、対象物の風上側などにおいて良い相関を示す部分も見られるが、対象物の風下側や屋根面のように障害物からの剥離流れによって複雑な流れ場となる領域においては、必ずしも相関性が良くないことを示した。一方、水平方向の流れの平均加速度は、対象物の風上側において積雪性状に対して負の相関関係を示すとともに、平均風速では、相関性が良くなかった対象物の風下側や屋根面のにおいても、同様の関係を示すことを明らかにし、水平方向の流れの平均加速度を使うことで、積雪分布を予測できる可能性を示している。

5章 気流性状を用いた吹きだまり予測への適用

5章では、4章で得た屋根面や地表面に近接した位置における水平方向の流れの平均加速度を用いて、種々の建物や地形に対して積雪分布の予測を試み、実現象との比較検討を行うことで、本研究で提案する積雪分布の予測手法の有効性を検証している。

6章 結論

6章では、2章から5章までの調査、実験、検討で得られた結論および今後の課題をまとめて示す。

目 次

1 章 序 論

1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	既往の研究の概要と本研究の位置付け	4
1.2.1	吹雪現象に関する既往の研究	4
1.2.2	吹きだまり性状と気流性状の関係に関する既往の研究	7
1.2.3	建築物に対する積雪荷重算定の現状	10
1.2.4	本研究の位置づけ	13
1.3	本論文の構成	14

2 章 試験体を用いた屋外観測による積雪分布の調査

2.1	はじめに	1
2.2	積雪分布の観測地	2
2.2.1	観測地の位置および周辺の状況	2
2.2.2	観測地周辺の気象性状	2
2.3	フェンス周辺の地上積雪深分布の推移に関する観測	5
2.3.1	試験体形状と観測フィールド	5
2.3.2	観測方法および観測期間	6
2.3.3	気象条件の観測結果	7
2.3.4	積雪分布の観測結果	12
2.3.5	断面観測	15
2.3.6	観測結果に対するフェンス端部の影響	16
2.4	階段状屋根建物モデルを用いた屋根上積雪分布の観測	17
2.4.1	試験体および観測方法	17
2.4.2	観測結果	18
2.4.3	風向角と風速による分類	27
2.5	まとめ	29

3章 風洞実験による気流性状の測定

3.1	はじめに	1
3.2	使用風洞および測定装置	2
3.2.1	境界層風洞装置	2
3.2.2	吹雪風洞装置	3
3.2.3	風向風速計	4
3.3	二次元吹きだめフェンス周りの積雪量による気流性状の変化	5
3.3.1	吹雪風洞実験による吹きだまり性状の測定方法	5
3.3.2	吹雪風洞実験による吹きだまり性状の測定結果	6
3.3.3	吹きだまり形成に伴う気流性状変化の測定方法	7
3.3.4	吹きだまり形成に伴う気流性状変化の測定結果	8
3.4	階段状屋根建物モデル周りの風向別の気流性状	13
3.4.1	風洞実験による気流性状の測定方法	13
3.4.2	風洞実験による気流性状の測定結果	15
3.5	まとめ	22

4章 積雪分布の形成に影響を及ぼす気流性状の検討

4.1	はじめに	1
4.2	雪面近傍の風速と積雪分布との関係	2
4.2.1	雪面近傍における平均風速について	2
4.2.2	二次元フェンスを対象とした検討	2
4.2.3	階段状建物の屋根上を対象とした検討	6
4.3	雪面近傍の風の加速度と積雪分布との関係	9
4.3.1	雪面近傍における風の平均加速度について	9
4.2.2	二次元フェンスを対象とした検討	11
4.2.3	階段状建物の屋根上を対象とした検討	14
4.4	まとめ	16

5章 気流性状を用いた吹きだまり予測への適用

5.1	はじめに	1
5.2	流れの加速度分布の算定	2
5.2.1	加速度算定の概要	2
5.2.2	二次元流れにおける加速度の算定	3
5.2.3	三次元流れにおける加速度の算定	4
5.3	種々の形状に対する気流性状分布を用いた積雪分布予測	6
5.3.1	直方体周りにおける地表面の積雪分布	6
5.3.2	アーチ型屋根建物における屋根上の積雪分布	8
5.3.3	丘状地形周りにおける地表面の積雪分布	9
5.3.4	階段状屋根建物における下段屋根上の積雪分布	10
5.3.5	階段状屋根建物周りの地表面における積雪分布	12
5.4	積雪分布予測への気流数値計算結果の適用	17
5.5	まとめ	22

6章 結 論

謝 辞

参考文献

関連発表論文

図表一覧

- 表1.1 吹雪の分類
- 表1.2 M型屋根・連続山形屋根およびのこぎり屋根における谷底辺の屋根形状係数 μ_d
- 表1.3 セットバックのある屋根の屋根形状係数 μ_d
- 表2.1 アメダス観測点の概要
- 表2.2 観測期間と気象条件
- 表2.3 積雪深比 s/S_d の最大値分布のピーク値
- 表2.4 観測データ別の気象条件（風向，風速，気温，積雪記録）
- 表3.1 風洞装置の仕様
- 表3.2 自然雪と活性白土の物性の比較
- 表5.1 改良型Launder & Katoモデルの基礎方程式
- 表5.2 境界条件
- 図1.1 吹雪の運動形態の模式図
- 図1.2 吹雪の発生臨界風速
- 図1.3 地表面と建築物屋根面における雪の移動現象の違い
- 図1.4 画像より実験によるよどみ領域と野外実験による積雪分布の比較
- 図1.5 地表面の積雪パターン
- 図1.6 日平均風速が4m/sec以上における積雪深比の垂直断面
- 図1.7 セットバックのある屋根の屋根形状係数 μ_d
- 図1.8 建築物の設計用積雪荷重評価のフローにおける本研究の位置づけ
- 図2.1 観測地の広域図
- 図2.2 試験体設置場所の周辺図
- 図2.3 日別積雪深推移（石狩）
- 図2.4 風速発生頻度（山口）
- 図2.5 風速別の風向発生頻度（山口）
- 図2.6 降水量1mm/h以上かつ風速3m/sec以上における風向頻度分布（山口）
- 図2.7 試験体の大きさと観測フィールドの概要

- 図2.8 気温の頻度分布
- 図2.9 風速の頻度分布
- 図2.10 風速別の風向頻度分布
- 図2.11 観測年別の日別積雪分布の推移
- 図2.12 観測年別の積雪深比 s/S_d の最大値分布
- 図2.13 平均風速ベクトルの分布
- 図2.14 試験体の概要
- 図2.15 試験体に対する風向角の定義
- 図2.16 観測場における試験体の配置
- 図2.17 最頻度風向角 0° の場合における下段屋根上の積雪深分布
- 図2.18 最頻度風向角 22.5° の場合における下段屋根上の積雪深分布
- 図2.19 最頻度風向角 45° の場合における下段屋根上の積雪深分布
- 図2.20 風速と風向角による下段屋根上の積雪分布性状の分類

- 図3.1 気流風洞装置の概観および内部の断面図
- 図3.2 粉体専用大型風洞装置の概観図
- 図3.3 トリプルスプリット型プローブの概要
- 図3.4 トリプルスプリット型プローブの出力特性
- 図3.5 実験気流の高さ方向分布
- 図3.6 吹雪風洞実験による積雪分布と実測結果
- 図3.7 吹き止めフェンス周辺の平均風速ベクトル分布および平均流線
- 図3.8 吹きだめフェンス周辺における模型雪の堆積時間別
- 図3.9 堆積時間240分時の気流性状
- 図3.10 模型に対する風向と風速成分の定義
- 図3.11 気流の高さ方向分布
- 図3.12 下段屋根が風上側の場合，風向角： 0°
- 図3.13 下段屋根が風上側の場合，風向角： 10°
- 図3.14 下段屋根が風上側の場合，風向角： 20°
- 図3.15 下段屋根が風下側の場合，風向角： 0°
- 図3.16 下段屋根が風下側の場合，風向角： 10°
- 図3.17 下段屋根が風下側の場合，風向角： 20°

- 図3.18 下段屋根が風上側の場合における流れの性状
- 図3.19 下段屋根が風下側の場合における流れの性状
- 図4.1 雪面近傍における水平方向の平均風速の絶対値 $|\bar{u}/U_0|$ と積雪深 $(s - Sd)/Sd$ の比較
- 図4.2 フェンス下部間隙付近の流れと風速測定位置の模式図
- 図4.3 雪面近傍における水平方向の平均風速の絶対値 $|\bar{u}/U_0|$ と積雪深 $(s - Sd)/Sd$ の関係
- 図4.4 隅角部における風速測定点と剥離流れとの位置関係
- 図4.6 屋根面に近接した位置における水平方向の平均風速 $|\bar{u}/U_0|$ と吹きだまり係数 C_s の関係
- 図4.8 風速が変化する領域における雪粒子に加わる風力の概念図
- 図4.9 雪面近傍における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と積雪深 $(s - Sd)/Sd$ の比較
- 図4.10 雪面近傍における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と積雪深 $(s - Sd)/Sd$ の関係
- 図4.11 屋根面に近接した位置における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と吹きだまり係数 C_s の分布
- 図4.12 屋根面に近接した位置における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と吹きだまり係数 C_s の関係
- 図5.1 加速度の算定過程における各成分の分布
- 図5.2 風洞実験による直方体中心断面位置における平均風速ベクトルの分布
- 図5.3 建物風上側の中心断面位置における積雪分布の比較
- 図5.4 建物風下側の中心断面位置における積雪分布の比較
- 図5.5 アーチ型屋根建物モデル周辺における平均風速ベクトル分布
- 図5.6 アーチ型屋根建物モデル上における水平方向の流れの平均加速度分布
- 図5.7 加速度分布を基にしたアーチ型屋根建物モデル上の積雪分布の予測結果
- 図5.8 丘状地形モデル周辺における平均風速ベクトル分布
- 図5.9 丘状地形モデル上における水平方向の流れの平均加速度分布
- 図5.10 加速度分布を基にした丘状地形モデル上の積雪分布の予測結果
- 図5.11 下段屋根が風上側の場合の下段屋根上における積雪分布の予測結果
- 図5.12 下段屋根が風上側の場合の下段屋根上における積雪分布の予測結果
- 図5.13 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角： 0° ）

- 図5.14 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：10°）
- 図5.15 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：20°）
- 図5.16 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：0°）
- 図5.17 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：10°）
- 図5.18 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：20°）
- 図5.19 計算グリッド
- 図5.20 気流数値計算による平均加速度分布
- 図5.21 風洞実験による平均加速度分布
- 図5.22 吹雪風洞実験による積雪深分布

- 写真1.1 雪粒子が屋根から飛散する様子

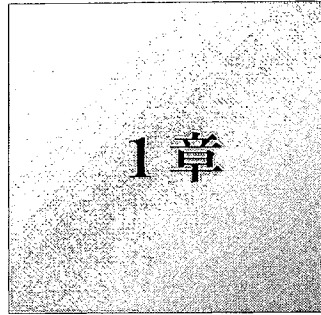
- 写真2.1 観測に用いた吹きだめフェンス
- 写真2.2 雪尺の設置状況
- 写真2.3 超音波積雪深計と風向風速計
- 写真2.4 断面観測によるピーク位置の推移
- 写真2.5 低積雪時の試験体
- 写真2.6 高積雪時の試験体
- 写真2.7 測定の様子
- 写真2.8 下段屋根上の積雪断面

- 写真3.1 気流実験における模型の設置状況
- 写真3.2 風洞内に設置した模型および風速計

- 写真5.1 下段屋根が風上側の場合の下段屋根上における積雪状況
- 写真5.2 下段屋根が風下側の場合の下段屋根上における積雪状況
- 写真5.3 2段屋根建物周りの積雪の状況

記号

τ	: せん断応力	a_u	: u 方向の流れの加速度
ρ	: 空気密度	a_v	: v 方向の流れの加速度
u_*	: 摩擦速度	\bar{a}_u	: u 方向の流れの加速度の平均値
λ	: 混合距離	\bar{a}_v	: v 方向の流れの加速度の平均値
x	: 流れ方向の水平距離	ϕ	: 流れ関数
y	: 流れ直角方向の水平距離	k	: 乱流エネルギー
z	: 鉛直方向の高さ	ε	: 乱流散逸率
θ	: 風向角		
H	: 基準高さ		
L	: 基準長さ		
s	: 積雪深		
S_d	: 基準点における積雪深 (増分)		
C_s	: 吹きだまり係数		
u	: x 方向の風速		
\bar{u}	: x 方向の風速の平均値		
u'	: x 方向の風速の標準偏差		
v	: y 方向の風速		
\bar{v}	: y 方向の風速の平均値		
v'	: y 方向の風速の標準偏差		
w	: z 方向の風速		
\bar{w}	: z 方向の風速の平均値		
w'	: z 方向の風速の標準偏差		
U_0	: 基準点における平均風速		



序 論

1. 1	本研究の背景と目的	1
1. 2	既往の研究の概要と本研究の位置付け	4
1. 2. 1	吹雪現象に関する既往の研究	4
1. 2. 2	吹きだまり性状と気流性状の関係に関する既往の研究	7
1. 2. 3	建築物に対する積雪荷重算定の現状	10
1. 2. 4	本研究の位置づけ	13
1. 3	本論文の構成	14

1.1 本研究の背景と目的

南北に長い日本においては、亜熱帯気候に属して珊瑚礁を有する沖縄県から、冷涼寒冷で、冬には流氷も見られる北海道まで、様々な気候、自然条件が見られる。その中で、北海道や本州の日本海沿岸は、世界でも有数の多雪地帯として知られており、その最大積雪深が3mを超える地域も少なくない。また、近年の地球環境の変化や都市気候による温暖化で、日本の平均積雪量は減少の傾向にあるとされているが、その反面、異常気象による一時的な豪雪の確度が増えているとも言われている。平成8年や平成12年には、各地で近年稀に見る積雪深を記録しており、札幌管区気象台における年最大積雪深では、平年値87cmに対して、平成8年に145cm、平成12年に148cmを記録している。

建築物に加わる積雪荷重を見た場合、建築基準法¹⁾においては、沖縄県を除くすべての都道府県に設計用積雪荷重が規定されており、この中で、一般的に積雪荷重が大きく問題となるのは、北海道、東北地方、北陸地方が主であると言える。この様な地域において、建築物の積雪荷重を評価する場合、その積雪量に加え、風による吹きだまりや吹き払いによって生じる偏分布荷重を評価することが望ましい。建物形状によっては、この吹きだまりにより、通常の積雪荷重を遙かに超える荷重が局所的に加わる可能性があり、特に、近年に見られる競技場や運動施設におけるドーム建築物、あるいは、大規模小売店舗や工場、倉庫、体育館などの大スパン建築物においては、偏分布荷重の予測と評価は、不可欠であると言える。しかしながら、吹きだまりの位置や形状は、気温、降雪量、雪質、風向、風速などの様々な気象条件に加えて、建物自身の形状や、近隣建物の状況などの条件により大きく左右されるとされており、一概には定まらず、容易に予測することはできない。

建築物の設計用積雪荷重の算定における偏分布荷重の取り扱いの現状をみると、建築基準法¹⁾において、令86条第5項において、「屋根面における積雪量が不均等となる恐れがある場合においては、その影響を考慮して積雪荷重を計算しなければならない。」と規程されている。しかし、その具体的な分布形状については明記されていない。また、日本建築学会の建築物荷重指針・同解説²⁾では、基本的なM型屋根、連続山形屋根、のこぎり屋根、セットバックのある屋根における偏分布係数が規定されているが、大規模または特殊な形状の建築物等については、調査、実験等に基づいて定める必要があるとしている。これらは、建物屋根上における積雪分布の調査研究の絶対数が少なく、様々な屋根形状に対して、系統的に把握するには至っていないことによる。

現在、建物屋根上や周囲の吹きだまりを予測する最も有効な手法としては、自然雪や模

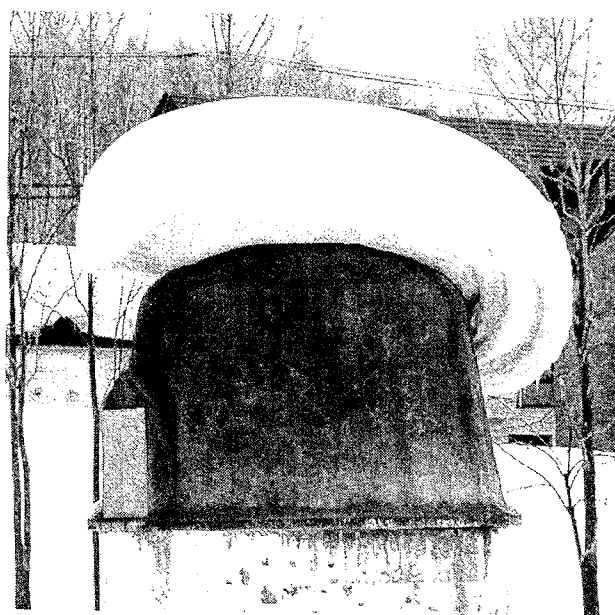
型雪を用いた吹雪風洞実験が行われており、多くの検討実績^{3)~7)}がある。国内における吹雪風洞施設は、小型のものを含めても10カ所に満たなく、通常の気流測定を目的とした風洞施設では、建築、土木分野における主なものに限っても数十カ所以上^{8), 9)}あることと比較すれば、全体規模は大きくないと言える。これは、検討対象が積雪地域に限定されることから、調査の絶対的な需要が小さいということが考えられるが、施設によっては、非常に高い稼働率で実験が行われているところもあり、一概に、それだけではないとも言える。1つの要因として、気流風洞実験においては、相似則を含めた実験手法^{10)~13)}が確立されて来ている。これに対して、建物屋根面や建物近傍における吹きだまり性状については、実現象自体が十分に解明されていないことなどにより、相似則が細部までは確立されていないという面が残り、個々の研究者の知識と経験に頼る部分がある。従って、吹雪風洞実験においては、研究者の技術ポテンシャルの高さが要求されるということが上げられる。単純な風を対象とした建物周りの流れに関しても、その物理的現象や相似則は、非常に複雑であるのに加えて、風に雪粒子が加わった吹雪現象については、更に複雑であると言える。

また近年では、吹雪風洞実験による吹きだまり予測の他に、混相流を対象とした数値流体解析による吹きだまり予測も試みられている^{10), 11)}が、前述のように実現象の解明が不十分なことに加え、計算技術自体が確立されていないことなどにより、正確な予測結果が得られるには至っていない。風により形成される積雪分布形状予測における相似則の確立には、自然界における吹きだまり現象の把握と、その形成要因の解明が重要であると言える。

吹きだまりが形成されるという物理現象の過程を考えると、様々な要因が雪粒子の一つ一つに作用した現象の累積結果であるといえるが、吹きだまり性状を予測する上では、吹きだまりの形成に対して特に支配的に作用する要因を明らかにすることが重要である。吹きだまりの形成に関わる多くの要因の中で、雪面近傍の気流性状が密接に関係することは、既往の研究^{14)~18)}において明らかである。特に建物の風上側にできる吹きだまりの形成には、雪面近傍のせん断応力の変化が大きく寄与していることが明らかにされている^{19), 20)}。一方、建物の風下側における吹きだまりの形成に対しては、雪面近傍のせん断応力の変化との間に、必ずしも相関関係が成り立つわけではない¹⁹⁾。建物からの剥離流の影響により、建物の風上側と風下側における流れ性状の違いは、雪面近傍のみではなく、建物高さと同程度以上にまで及ぶことから、吹きだまり形成に与える建物前後の気流性状の違いの影響は大きい。建物の風上側と風下側を問わず、風による作用によって吹きだまりが形成され

ていることは事実であり，その形成に影響を及ぼす別の物理的要因があるのではないかと推測した。

本研究は，吹きだまりと気流性状との関連性の検討を行い，吹きだまり形成の主要因となる気流特性を明らかにすることで，吹雪風洞実験や混相流を対象とした数値流体解析による吹きだまり現象の予測手法における相似則の確立に寄与し，さらに，一般的な気流風洞実験や数値流体計算で得られる建物周りの気流性状分布を用いて吹きだまり性状を予測する手法を提案しようとするものである。



1.2 既往の研究の概要と本研究の位置付け

1.2.1 吹雪現象に関する既往の研究

雪および吹雪現象に関する研究は、理学分野において古くから行われており、その物性や力学的性状に関する研究が多く蓄積されている。ここでは、吹雪現象に関する既往の研究についてその概要を示す。

吹雪とは、風によって雪粒子が空中を舞う現象を示し^{21), 22)}、その状況に応じて細分されている。竹内^{23), 24)}が日本雪氷学会²¹⁾およびAmerican Meteorological Society²⁵⁾を基に、吹雪の分類についてまとめたものを、表1.1に示す。この中で、吹雪は、降雪を伴う吹雪と降雪を伴わない地吹雪に分類される。更に地吹雪は、低い地吹雪と高い地吹雪に分類される。

飛雪の種類は、その運動の形から、転動・滑動 (creep)、跳躍 (saltation)、浮遊 (suspension) の3つに分けられる。低い地吹雪は、転動・滑動と跳躍粒子からなり、高い地吹雪は、跳躍粒子から転化した浮遊粒子も混じったものである。この3つの運動形態の模式図²³⁾を図1.1に示す。風により雪面にある雪粒子に働くせん断応力や揚力が、雪粒子に働く重力、雪粒子間の付着力や結合力を超えると雪粒子が動き始める。転動・滑動とは、雪粒子が雪面に接したまま転がりや滑りながらの運動をしているものであり、跳躍とは、放物線を描いて10cm程度の高さまでの範囲を飛び跳ねる運動を繰り返すものである。更に風が強い状態においては、跳躍粒子の中から、乱流渦に巻き込まれ (乱流拡散)、空中高く飛びだしそのまま着地しないで煙のように漂う粒子が発生する。これを浮遊としている。

雪面の雪粒子は、乾いた砂や土粒子と異なり、互いに付着や結合している。その付着力は、温度が 0°C より高く雪が濡れている場合は、水の表面張力による。 0°C 以下でもその表面には非常に薄い液体状の膜 (疑似液体層) があり、温度が高いほど厚く付着力が大きい。また、結合力は、 0°C で接触点が固結される焼結や、融解凍結によって発生する。従って、降雪後に時間が経った積雪からは、吹雪現象は発生し難い。ただし、風のみだけでは、結合力が外れなくても、別の雪粒子が衝突することで結合力が外れ、その雪粒子が他の雪粒子に衝突し、徐々に吹雪が発達することがある。従って、跳躍粒子の発生が吹雪の発生とすると、吹雪を発生させる最小の風速 (臨界風速) は、運動している雪粒子の有無によって大きな違いがあることがわかり、静止時の雪粒子が動き出す時の風速を静止臨界風速 (static threshold velocity)、飛雪粒子のある場合は、動的臨界風速 (dynamic threshold velocity) として分類されている。静止臨界風速は、雪質に伴う付着力や結合力に大きく関係するの

で、一概に表すことはできない。逆に、降雪を伴う場合は、動的臨界風速であるので、雪質による違いは小さい。この動的臨界風速の条件を、風速と温度で表したもの²⁶⁾を図1.2に示す。

表 1.1 吹雪の分類²³⁾

	分類および定義	降雪有無	飛雪の種類	
地吹雪 drifting / blow snow	地表に積もった雪が、風によって飛び跳ねながら移動する現象。	低い地吹雪 飛雪が10cm程度に、drifting snow 低く跳ぶ現象。	無	転動・滑動、跳躍
		高い地吹雪 飛雪が目の高さより blow snow 高く飛ぶ現象。	無	転動・滑動、跳躍、浮遊
吹雪 blow snow	高い地吹雪と同時に降雪が降り、視程が悪くなる現象。舞い上がる雪で降雪の有無がはっきりしない場合もいう。	有	転動・滑動、跳躍、浮遊	
風雪	飛雪の有無に関係なく、強い風によって横なぐりに雪が降る現象。	有		
Snow Storm	風の強弱に関係なく、降雪強度の強い降雪。豪雪、大雪。	有		

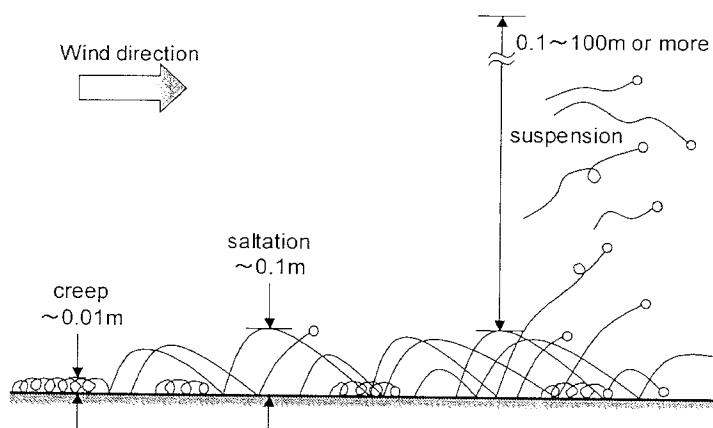
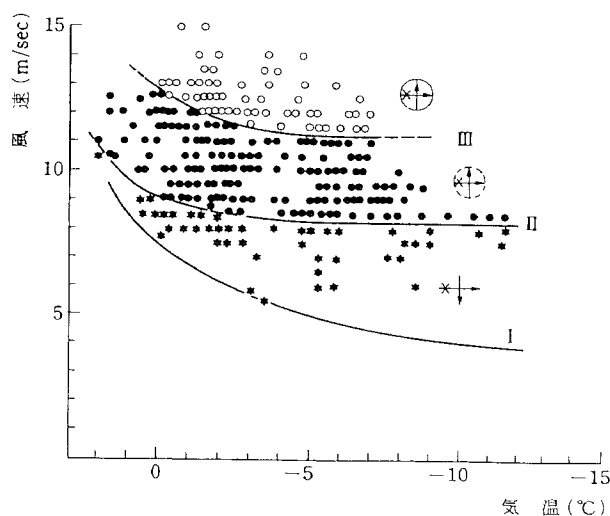
図 1.1 吹雪の運動形態の模式図²³⁾図 1.2 吹雪の発生臨界風速²⁶⁾

図1.2における曲線Ⅰは、跳躍粒子、曲線Ⅱは、断続的な浮遊粒子、曲線Ⅲは、連続的な浮遊粒子の発生臨界風速を示しており、曲線Ⅰでは、温度による影響が大きく、曲線Ⅱおよび曲線Ⅲでは、 -2°C 以下では、温度の影響が小さいことがわかる。また、図1.2における風速は、地上10mの風速であるが、 -5°C においては、吹雪の発生する臨界風速が、 $3.5\sim 4.0\text{m/s}$ であることがわかる。

一方、苫米地²⁷⁾は、地表面と建築物の屋根面における雪の移動現象の違いについて、図1.3を示している。地表面では、ある地点から雪粒子が移動しても、その地点には、次の雪粒子が運ばれてくる。これに対して、屋根面では、ある地点から雪粒子が移動し始め、何回かの跳躍運動を繰り返し、最終的には、屋根面外に流出する。この点が、地表面と屋根面での地吹雪現象の大きな違いであるとしている。雪粒子が屋根面から飛散する様子を写真1.1に示す。また、地表面に対して、屋根面高さにおける風速が高いことから、地吹雪現象は、地表面よりも屋根面上において発生しやすいとしている。

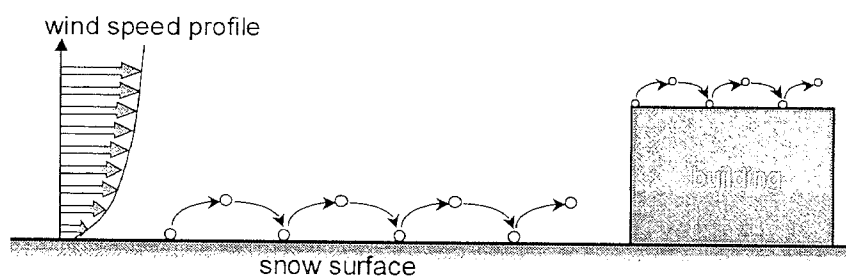


図 1.3 地表面と建築物屋根面における雪の移動現象の違い²⁷⁾

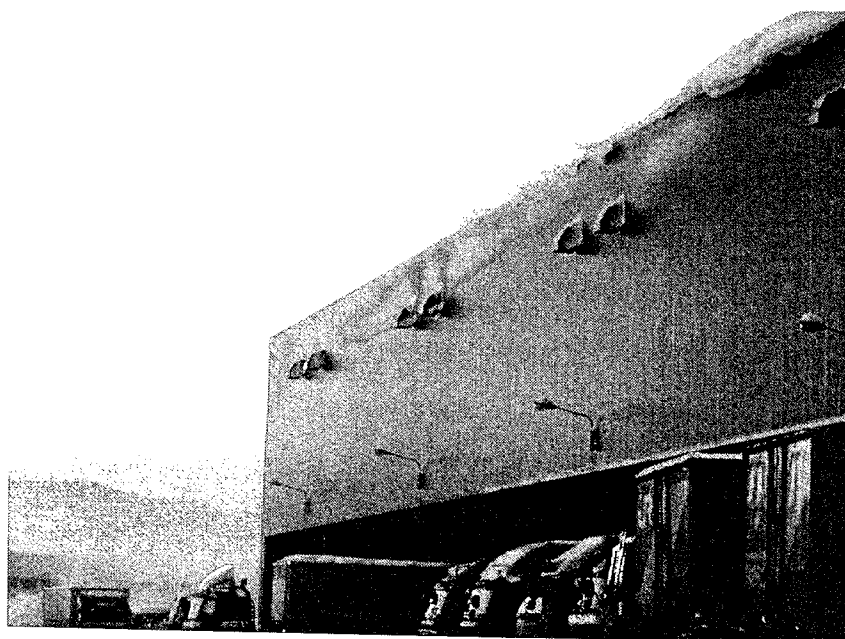


写真 1.1 雪粒子が屋根から飛散する様子

1. 2. 2 吹きだまり性状と気流性状の関係に関する既往の研究

吹きだまりが形成される要因について、吹雪の全体的な流れから見た場合、風で運ばれる雪の量（吹雪量）は、風速の n 乗（ $n=2\sim 7$ ）に比例するので、地形や構造物などにより風の流れが変わり、風速が V_A から V_B に小さくなると、 $V_A^n - V_B^n$ に比例した雪の量が堆積する²²⁾とされている。

また、雪粒子に注目すると、吹きだまりは、風によって発生した跳躍粒子や浮遊粒子が、運動を停止し堆積したものであり、堆積するものが主として跳躍粒子か浮遊粒子かによって、吹きだまりのでき方、形状や内部構造が異なるとされている^{19), 28)}。障害物の風上側に発生するのは、跳躍粒子による吹きだまりで、障害物に近づくにつれて風速が減少し、それと共に吹雪量が減少し、その減少分が吹きだまりとして堆積する。跳躍粒子を発生させ、その運動を継続させる力は、地表面に働く風のせん断応力で、次式により表される。

$$\tau = \rho u_*^2 \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

$$u_* = \left(\frac{du}{dz} \right) \lambda \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

τ : せん断応力, ρ : 空気密度, u_* : 摩擦速度, λ : 混合距離

物体の風上側では、風速減少に伴い、(1.1)式で示されたせん断応力が減少し、吹きだまりが形成される。地表面における風速は、0であるので、地表面付近の風速とせん断応力とは、比例関係にある。

これに対して、障害物の風下側にできる吹きだまりは、主として浮遊粒子によるものであることが明らかにされている。しかしながら、吹きだまりの形成位置と、気流性状との関連性は、明確にされていないのが現状である。

吹きだまり性状とその形成要因としての気流性状の関係について述べた既往の研究は、極めて少ない。この中から、具体的な検討対象を用いて、吹きだまり性状と気流性状の関連性について検討されている既往の研究を次に示す。

佐藤等²⁸⁾は、昭和基地建物を対象として、その周りの気流性状をシャボン玉を用いた可視化実験により明らかにし、吹きだまり性状との関連性を述べている。また、坂本等³⁰⁾は、アルミ粉末をトレーサーとして使用した流れの可視化実験を行い、風のよどみ領域と吹きだまり位置が図 1.4 の様に一致することを示し、流れの可視化実験を行うことで吹きだま

りの大まかな予測が可能であるとしている。

老川等³¹⁾は、1辺が1mの立方体モデル周りの積雪性状について屋外観測を行い、吹きだまりと風の関係について詳細な検討を行っている。10m×10m四方の仮床上に設置した立方体モデル周りについて、1回の降雪を伴う吹雪に対して700点の積雪深分布を測定し、日平均風速との対応を得ている。つまり、1回の降雪現象において積もった積雪を対象とすることで、風向、風速の特性を限定しようとしたものである。雪面上1m高さでの日平均風速が、4m/sec未満では、顕著な吹き払いが生じなく、逆に、日平均風速が4m/sec以上では、強い吹き払い域が形成され、Wind Scoopの積雪パターンが顕著に現れることを明らかにしている。日平均風速が4m/sec以上における立方体周囲の積雪分布として図1.5を、中央断面位置での積雪分布形状として図1.6を示している。

上田、苔米地²⁰⁾は、熱膜式せん断応力計を用いた風洞実験により、防雪フェンス後方の地表面のせん断応力分布を調査し、吹きだまり性状とせん断応力が概ね対応することを示している。

また、橋本等³²⁾は、2次元陸屋根上の積雪分布と表面風速、風圧との関係を表す式として、次式を提案している。

$$R=a \times C_p + b \times U_s + 1 \quad \dots \dots \dots (1.3)$$

R : つもり係数, C_p : 風圧係数, U_s : 雪面上の風速

以上、積雪性状と気流性状の関係を検討した既往の研究を示したが、いずれも、ある特定対象物それぞれに関しての両者の関係を示し、その関係について他の対象物に対する適用性を示すには至っていないものが多い。また、この様に、構造物周りの吹きだまり性状と気流性状を同時に調査し、その関連性を明らかにしようとした研究は、極めて数が少ない。

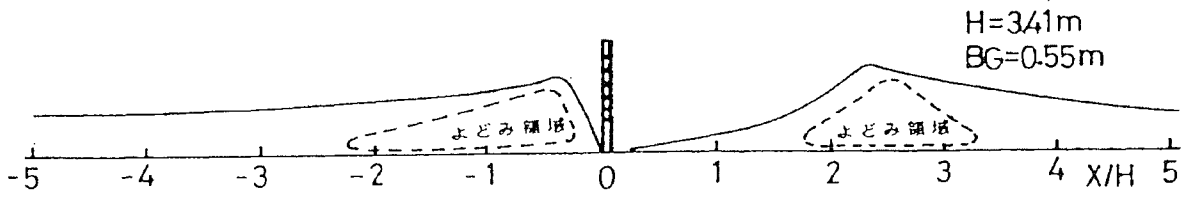


図 1.4 画像より実験によるよどみ領域と野外実験による積雪分布の比較³⁰⁾

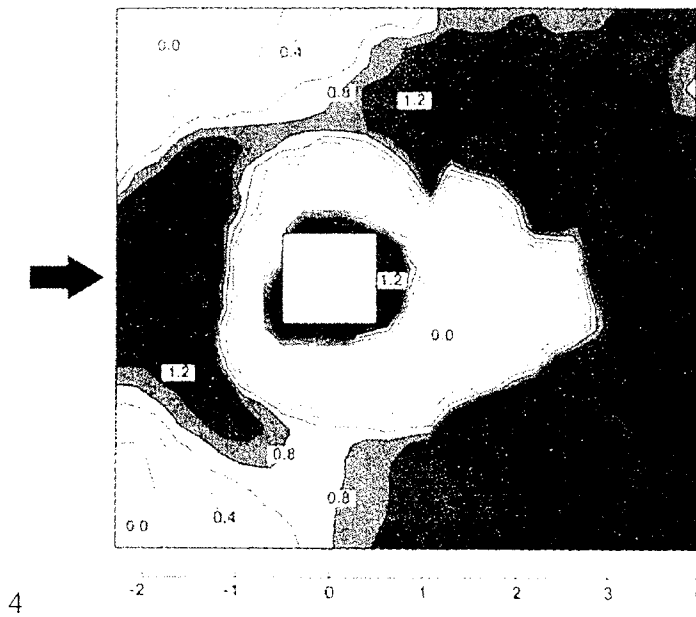


図1.5 地表面の積雪パターン (U=5.2m/sec) ³¹⁾

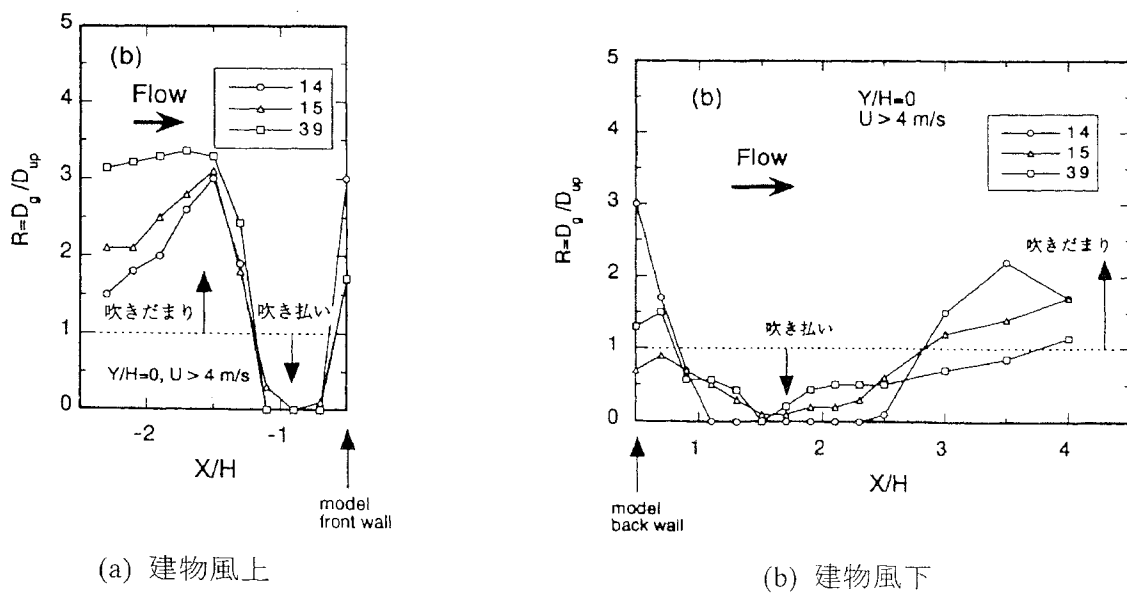


図1.6 日平均風速が4m/sec以上における積雪深比の垂直断面³¹⁾

1. 2. 3 建築物に対する積雪荷重算定の現状

我が国における建築物の設計用積雪荷重の算定について、以下にその概要をまとめる。

(1) 建築基準法¹⁾

建築基準法における積雪荷重の算定は、2000年の6月にその一部が改訂された。

建築基準法施行令第86条で積雪荷重を次のように規定している。

$$\text{積雪荷重} = \text{積雪の単位荷重} \times \text{屋根の水平投影面積} \times \text{垂直積雪量} \times \text{屋根形状係数} \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

積雪の単位荷重：20N/cm以上

垂直積雪量：建設省告示第1455号に定める市町村の区域により次式を用いて算定される値に、局所的地形要因による影響等を考慮した値。ただし、観測資料に基づき50年再現期待値を求めることができる場合には、その値を用いることができる。

$$d = \alpha \times ls + \beta \times rs + \gamma$$

d ：垂直積雪量 (m)， α ， β ， γ ：区域に応じて定められた値

ls ：区域の標準的な標高 (m)， rs ：区域の標準的な海率

屋根形状係数：屋根勾配が 60° 以下の場合には、次式による値とし、屋根勾配が 60° を超える場合には、0とすることができる。

$$\mu_b = \sqrt{\cos(1.5\beta)}$$

μ_b ：屋根形状係数， β ：屋根勾配

本研究で対象とする偏分布荷重に対しては、第5項において、「屋根面における積雪量が不均等となる恐れがある場合においては、その影響を考慮して積雪荷重を計算しなければならない。」と規程されている。しかし、その具体的な分布形状については、明記されるに至っていない。また垂直積雪量に関して示されている「局所的地形要因による影響等を考慮した値」について、その具体的な割り増し係数は示されていない。

(2) 日本建築学会／建築物荷重指針・同解説²⁾

建築物荷重指針・同解説では、設計用積雪荷重 S は、地上積雪荷重 S_0 と屋根形状係数 μ の積としている。地上積雪荷重 S_0 は、年最大積雪深の再現期間100年値を基本とし、再現期間換算係数 μ と周囲の地形・地物等の状況に応じた環境係数 C_e を掛け合わせることで求める。

環境係数 C_e は、通常の場合は、1.0とし、周囲の地形・地物等の影響で基本地上積雪深が局部的に特に大きくなると思われる場合には、建築物の周囲の状況に応じて C_e を1.0よりも大きな値としなければならないとされている。しかしながら、具体的な数値は、規定されていない。

屋根形状係数 μ は、次式により求める。

$$\mu = \mu_b + \mu_d + \mu_s \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

μ_b ：基本となる屋根形状係数で、屋根勾配および1月と2月の2ヶ月間の平均風速とで定められる値。

μ_d ：風による偏分布に関する屋根形状係数。

μ_s ：屋根上滑動による偏分布に関する屋根形状係数。

風による偏分布に関する屋根形状係数は、M型屋根、連続山形屋根、こぎり屋根については、風速と屋根勾配による値が表1.2の様に規定されている。また、セットバックのある屋根については、風速による値が表1.3および図1.7に規定されている。また、パラペットの内側についても規程がある。

表 1.2 M型屋根・連続山形屋根およびのこぎり屋根における谷底辺の屋根形状係数 μ_d ²⁾

屋根勾配	M型屋根および連続山形屋根				のこぎり屋根			
	1月、2月の平均風速				1月、2月の平均風速			
	2m/s以下	3m/s	4m/s	4.5m/s以上	2m/s以下	3m/s	4m/s	4.5m/s以上
10°以下	0	0	0	0.02	0	0	0	0.02
25°	0	0.02	0.14	0.20	0.10	0.22	0.34	0.57
40°	0	0.19	0.37	0.47	0.10	0.29	0.47	0.57
50°以上	0	0.28	0.56	0.70	0.10	0.38	0.66	0.80

表1.3 セットバックのある屋根の屋根形状係数 μ_d ²⁾

1月、2月の平均風速	2m/s以下	3m/s	4m/s	4.5m/s以上
μ_d	0.10	0.30	0.50	0.60

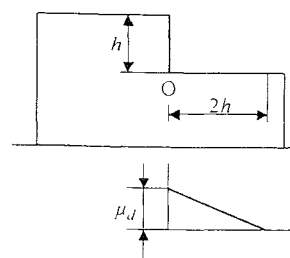


図1.7 セットバックのある屋根の屋根形状係数 μ_d ²⁾

建築物荷重指針・同解説においては、建築基準法とは異なり、基本的な屋根形状に対しては、風による偏分布の値が示されている。しかし、偏分布荷重の検討が最も必要であるとされる屋根形式の1つである二次元および三次元のドーム屋根形状、あるいは、吊屋根形状の値については、触れられておらず、「大規模または特殊な形状の建築物等については、調査、実験等に基づいて定める必要がある。」としている。

以上、我が国における建築物の設計用積雪荷重の算定の現状について示したが、屋根上における風による偏分布に関しては、建築基準法においては、考慮しなければならないとしているが、具体的性状については、全く示されておらず、また、建築物荷重指針においては、基本的な屋根形状に対する係数を示すに留まっている。

また、建築基準法、建築物荷重指針・同解説とも、局所的な地形などによる地上積雪量の割り増しについては、考慮しなければならないと明記されているが、具体的数値は、規定されていない。

1. 2. 4 本研究の位置づけ

本研究は、吹きだまりと気流性状との関連性の検討を行い、吹きだまり形成の主要因となる気流特性を明らかにすることで、吹雪風洞実験や混相流を対象とした数値流体解析による吹きだまり現象の予測手法における相似則の確立に寄与し、さらに、一般的な気流風洞実験や数値流体計算で得られる建物周りの気流性状分布を用いて吹きだまり性状を予測する手法を提案しようとするものである。

建築物の設計用積雪荷重評価のフローにおける本研究の位置づけを図1.8示す。本研究で提案する吹きだまり性状の予測手法は、垂直積雪量を求める際に考慮しなければならない局所的地形による割増の検討と、屋根形状係数を求める際に考慮しなければならない風によって生じる偏分布の形状の検討において、その検討方法を提供するものである。

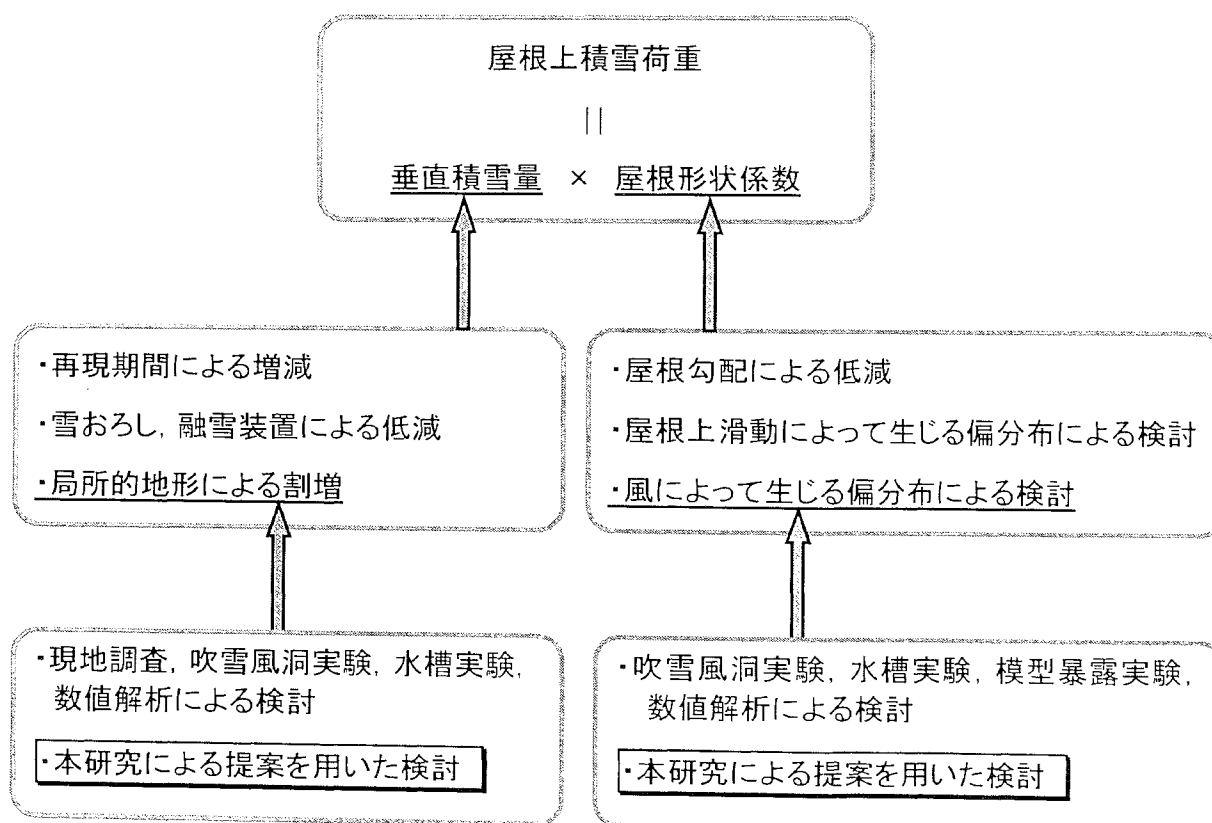


図 1.8 建築物の設計用積雪荷重評価のフローにおける本研究の位置づけ

1.3 本論文の構成

本論文は、次に示す1章から6章で構成する。

- 1章 序 論
- 2章 試験体を用いた屋外観測による積雪分布の調査
- 3章 風洞実験による気流性状の測定
- 4章 積雪分布の形成に影響を及ぼす気流性状の検討
- 5章 気流性状を用いた吹きだまり予測への適用
- 6章 結 論

1章では、本研究の背景と目的、吹きだまりおよび積雪荷重分布等に関連する既往の研究の概要と本研究の位置付けについて述べる。

2章では、積雪分布の形成に影響を与える気流性状の特性について検討を行う上で必要となる積雪分布の性状について述べる。積雪分布性状は、吹きだめ型の防雪フェンスと、階段状屋根建物を対象とした試験体を屋外に設置して、長期間にわたり観測したものである。吹きだめ型の防雪フェンスを対象とした観測では、冬期の気象条件の違いによる積雪性状の推移の違いを明らかにし、階段状屋根建物を対象とした観測では、風速と風向をパラメータとして下段屋根上にできる吹きだまり形状の違いを明らかにした。

3章では、積雪分布の形成に影響を与える気流性状の特性について検討を行う上で必要となる気流性状について述べる。気流性状は、2章で対象とした吹きだめ型の防雪フェンスと階段状屋根建物周りののについて、それぞれの試験体の縮尺モデルを用いた風洞実験により測定した。実験では、全体的な流れの性状を測定するとともに、積雪性状に影響を及ぼすと考えられる地表面や屋根面の近傍における流れについて、スプリットファイバースローブを使用して、風向、風速の平均成分、変動成分を高い精度で測定し、その分布性状を明らかにしている。

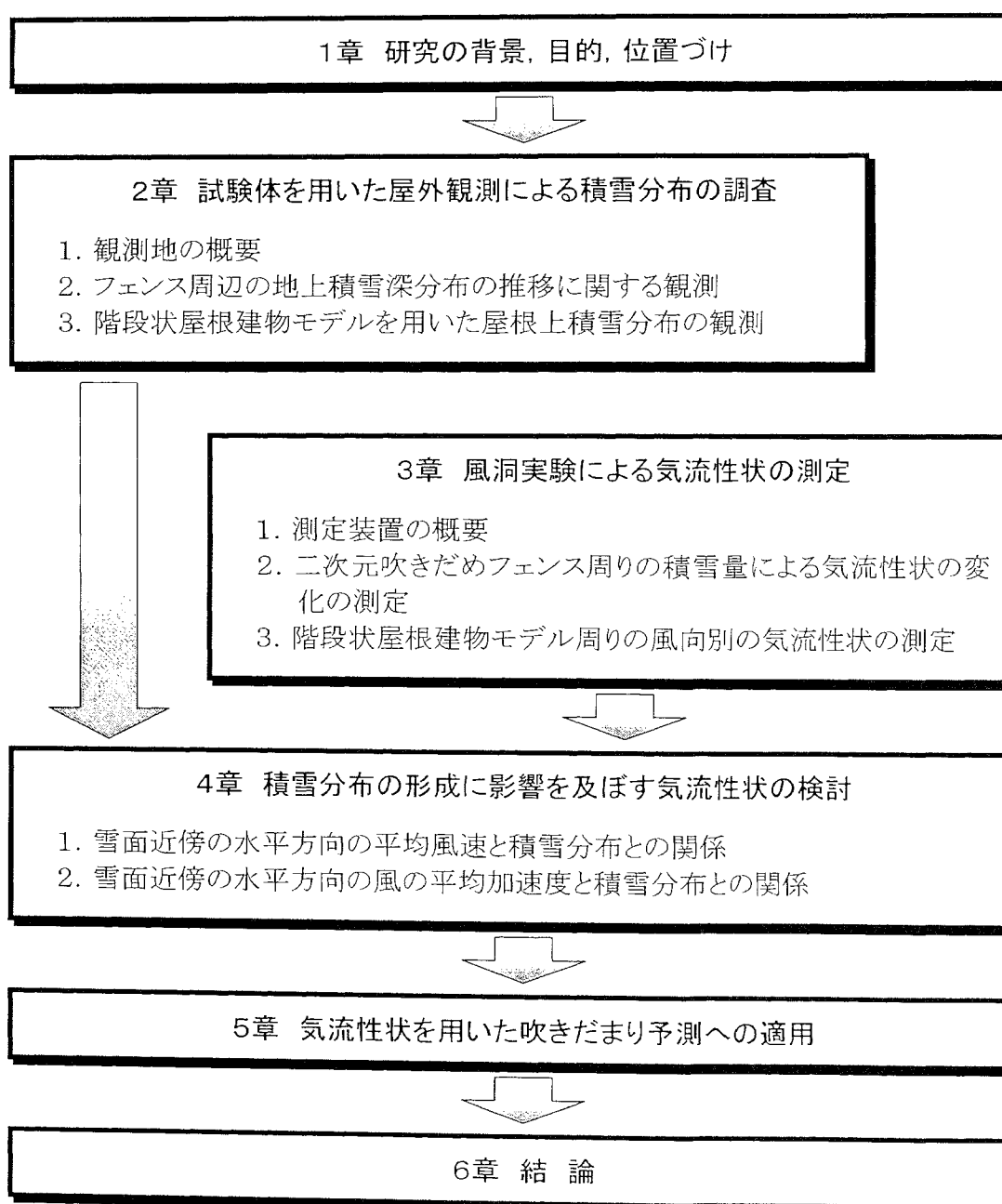
4章では、2章で示した吹きだまり性状と3章で示した気流性状を用いて、両者の相関関係を検討する。検討を行う気流性状は、雪面に近接した位置における平均風速の分布および水平方向の流れの平均加速度である。その結果、平均風速では、対象物の風上側などにおいて良い相関を示す部分も見られるが、対象物の風下側や屋根面のように障害物からの剥離流れによって複雑な流れ場となる領域においては、必ずしも相関性が良くないことを示した。一方、水平方向の流れの平均加速度は、対象物の風上側において積雪性状に対

して負の相関関係を示すとともに、平均風速では、相関性が良くなかった対象物の風下側や屋根面においても、同様の関係を示すことを明らかにし、水平方向の流れの平均加速度を使うことで、積雪分布を予測できる可能性を示した。

5章では、4章で得た屋根面や地表面に近接した位置における水平方向の流れの平均加速度を用いて、種々の建物や地形に対して積雪分布の予測を試み、実現象との比較検討を行うことで、本研究で提案する積雪分布の予測手法の有効性を検証した。

6章では、2章から5章までの調査、実験、検討で得られた結論および今後の課題をまとめて示す。

以下に、本論文の構成フローを示す。



2章

試験体を用いた屋外観測による積雪分布の調査

2.1	はじめに	1
2.2	積雪分布の観測地	2
2.2.1	観測地の位置および周辺の状況	2
2.2.2	観測地周辺の気象性状	2
2.3	フェンス周辺の地上積雪深分布の推移に関する観測	5
2.3.1	試験体形状と観測フィールド	5
2.3.2	観測方法および観測期間	6
2.3.3	気象条件の観測結果	7
2.3.4	積雪分布の観測結果	12
2.3.5	断面観測	15
2.3.6	観測結果に対するフェンス端部の影響	16
2.4	階段状屋根建物モデルを用いた屋根上積雪分布の観測	17
2.4.1	試験体および観測方法	17
2.4.2	観測結果	18
2.4.3	風向角と風速による分類	27
2.5	まとめ	29

2.1 はじめに

積雪分布の形成に影響を与える気流性状の特性について検討を行う上では、同一対象物に対する両者それぞれの性状を明らかにすることが必要となる。本章では、このうちの積雪分布の性状について調査した結果を示す。

積雪分布の調査の手法として、一般的には吹雪風洞実験を行うことが有効であり、多くの検討が行われている。しかし、相似則の確立が不十分であることから、本研究では、吹雪風洞実験を用いず、屋外に試験体を設置して、積雪分布性状を観測した。

積雪性状に関する調査は、既往の研究^{27), 31), 33)~47)}においても行われており、防雪フェンス前後の吹きだまり、階段状屋根やドーム屋根を初めとする建物屋根上や建物周囲の吹きだまり、あるいは、盛土や切土といった地形による吹きだまりの観測結果が報告されている。しかし、本研究で必要とする吹きだまり形成時における風の流れの性状との関係を詳細に観測した研究は少ない。この中で老川³¹⁾らは、1辺が1mの立方体周りの吹きだまりと風の性状を観測し、風向、風速による吹きだまり変化について述べている。

本章では、基本的な吹きだまり性状を把握することを目的として、下部間隙をもつ吹きだめ型フェンスと階段状屋根建物モデルを対象とした屋外観測の結果を述べる。

屋外観測は、長期間に渡り、かつ気象条件に大きく左右されることから、観測場所は、観測が容易に実施でき、かつ、寒候期の風向特性が安定した性状を示す場所であることを考慮して、北海道工業大学を選定した。北海道工業大学は、石狩平野の北西端に位置し、寒候期においては、石狩湾からの降雪を伴う海風の頻度が卓越する。2.2節では、この観測場所の地理的位置および気象特性について述べる。

試験体として選定した下部に間隙を持つ吹きだめ型フェンスは、風上側、風下側に顕著な吹きだまりが形成され、かつ、直下に吹き払いができることが知られている。本観測では、1寒候期の間、積雪性状には手を触れない状態の積雪分布の推移を毎日観測し、5寒候期に渡る観測結果を得た。この結果を用いて、風向風速などの気象条件の違いによる吹きだまり形成の違いを寒候期別に明らかにした。2.3節において、この結果を述べる。

屋根上の積雪分布に着目すると、単純な陸屋根の場合では、屋根面内における積雪量の偏りは大きくはなく、問題とはなり難い。これに対して、セットバックし階段状となった屋根形状では、その下段の屋根において、大きな偏分布荷重となることが知られている。このことから、階段状建物を対象とした試験体を選定し屋根上の積雪を観測した。その結果から、風向、風速の違いによる積雪分布の変化について、2.4節において報告する。

2.2 積雪分布の観測地

2.2.1 観測地の位置および周辺の状況

本章に示す吹きだまり性状の観測は、札幌市手稲区前田七条16に位置する北海道工業大学のグラウンドにおいて実施した。観測地の広域図を図2.1に示す。この地は、石狩平野の西端に位置し、北西約4kmの位置に、南西－北東方向に走る石狩湾の海岸線がある。

試験体設置場所の周辺図を図2.2に示す。試験体は、大学本館から北西側の道路を隔てた、北東-南西方向約600m、北西-南東方向約170mの敷地のほぼ中央に設置した。敷地内には、ラグビー場、テニスコート、駐車場などがあるが、構造物はほとんど無く、地形も平坦である。観測地の北西側および南東側には、二階建ての戸建て住宅地が広がる。従って、試験体設置場所付近の風や降雪の性状に対して、大きく影響するような大型の構造物は、存在しないと言える。

2.2.2 観測地周辺の気象性状

観測地周辺の気象性状を把握するために、観測地の北西約2kmおよび北東約12kmにある2カ所の気象庁アメダス観測点の記録を解析した。解析に用いたアメダス観測点の概要を表2.1に示し、その位置を図2.1に示す。降水量、風向、風速のデータは、山口のものを用い、山口では観測されていない積雪深のデータは、石狩のものを用いた。また、解析期間は、1992年から2001年の10年間における1月、2月である。

図2.3に、石狩の10年間における日別積雪深の推移を示す。積雪のピークは、2月20日前後であり、その値は、解析した10年間の平均値で約100cmである。また、この10年間における最大積雪深は、1996年2月20日に記録した164cmであった。

図2.4に、1m/sec毎の風速頻度分布を示す。ここでの風速とは、10分間の平均風速である。最も頻度が高い風速は、2m/secであり、10m/sec以上の風速頻度の合計は0.1%である。

図2.5に、風速別の風向頻度分布を示す。1m/sec以上の風向頻度分布は、西-西北西-北西の風向と、東南東-南東の風向の頻度が高い。しかし、3m/sec以上の頻度では、東南東-南東に比べて西-西北西-北西の風向の頻度がより多くなる。

図2.6に、1時間当たりの降水量が1mm以上で、かつ、風速が3m/sec以上の場合の風向頻度分布を示す。西-西北西-北西の3風向の合計が70%程度を占めることから、降雪を伴う比較的強い風は、概ねこの風向に限定されていると言える。

2. 試験体を用いた屋外観測による積雪分布調査

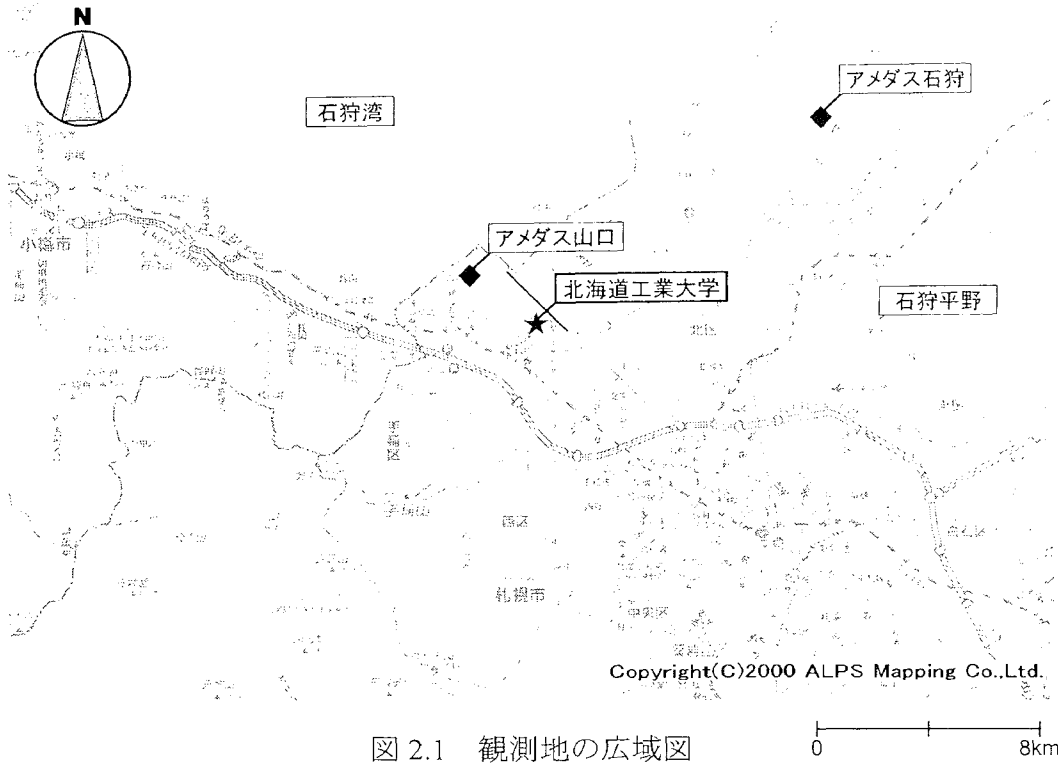


図 2.1 観測地の広域図

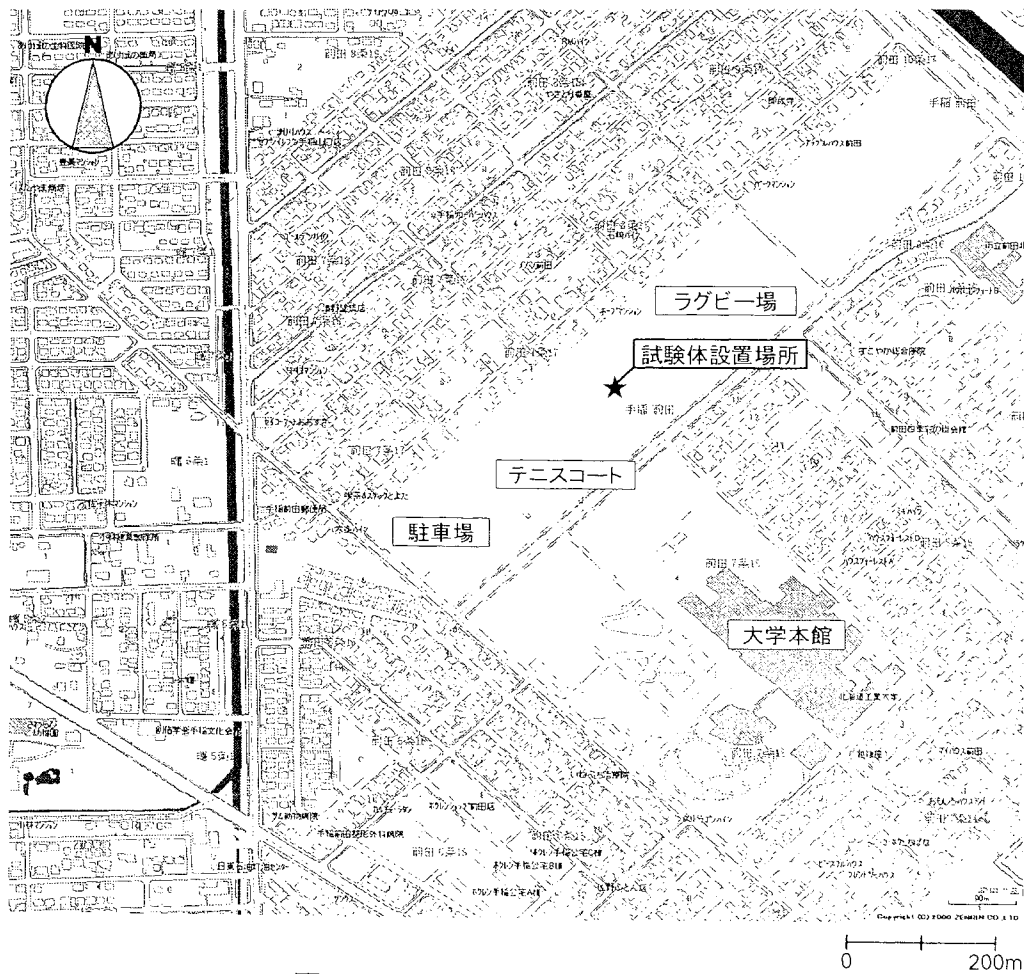


図 2.2 試験体設置場所の周辺図

表2.1 アメダス観測点の概要

名称	山口	石狩
地点番号	14116	14121
所在地	札幌市手稲区山口 292	石狩市生振 671-1
標高	5m	5m
風向風速計の地上高さ	6.5m	8.0m
観測項目	降水量	○
	風向	○
	風速	○
	日照時間	○
	気温	○
	積雪深	×

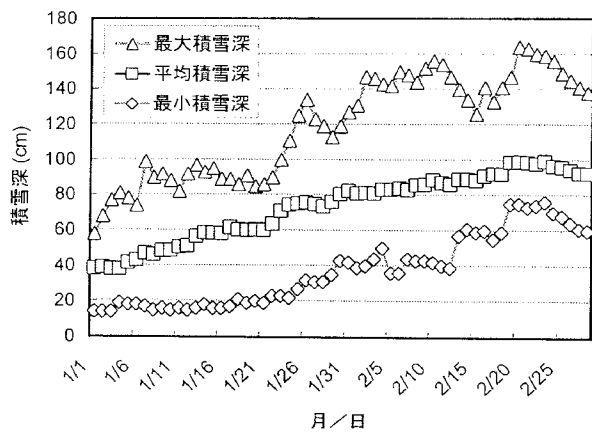


図 2.3 日別積雪深推移 (石狩)

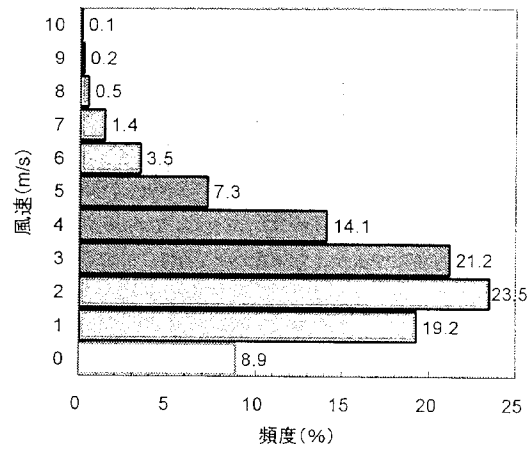


図 2.4 風速発生頻度 (山口)

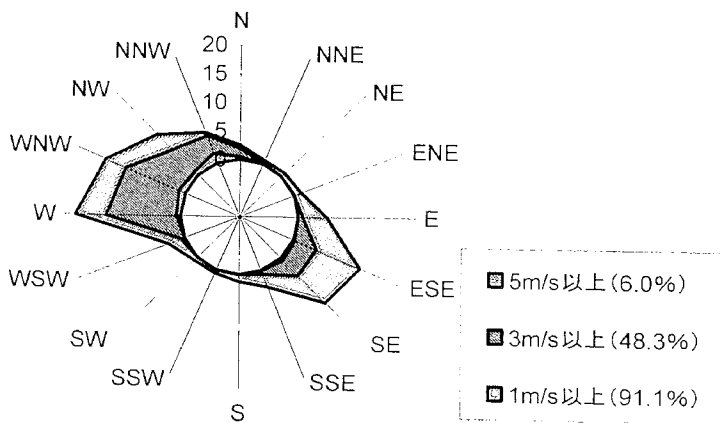


図2.5 風速別の風向発生頻度 (%) (山口)

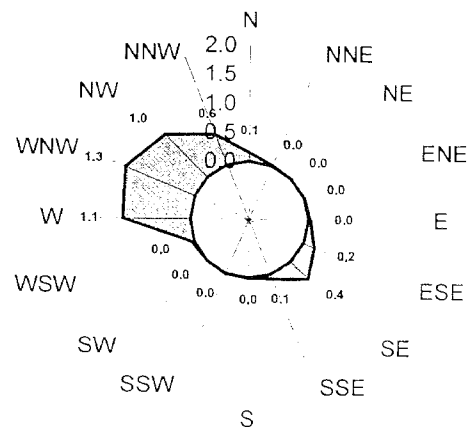


図2.6 降水量1mm/h以上かつ風速3m/sec以上における風向頻度分布 (%) (山口)

2.3 フェンス周辺の地上積雪深分布の推移に関する観測

2.3.1 試験体形状と観測フィールド

防雪フェンスには、その用途や設置する場所の状況に応じて、吹き止めフェンス、吹き払いフェンス、吹きだめフェンスなどの様々な形式^{48), 49)}が利用されている。本研究では、形状が単純で、かつ、吹きだまりおよび吹き払い現象が顕著に現れる下部間隙を持つ吹きだめフェンスを対象とした。前節に示した試験体設置場所における吹きだめフェンスを写真2.1に、フェンスの試験体の大きさおよび観測フィールドの概要を図2.7に示す。試験体は、高さ $H=3.0\text{m}$ 、長さ $L=18.0\text{m}$ ($6H$)、下部間隙 0.5m ($H/6$)の形状で、 $H/6\sim H$ までは、柵密度100%の波形パネルを用いた。設置方向は、前節に示した当地における寒候期の主風向に概ね正対する北西向きとした。

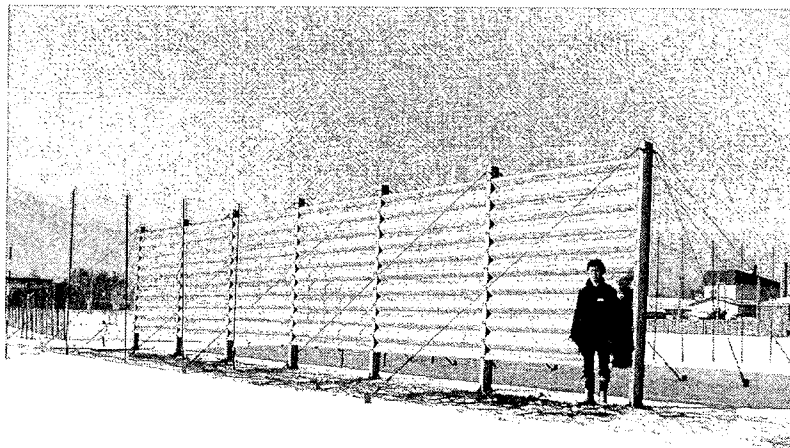


写真2.1 観測に用いた吹きだめフェンス

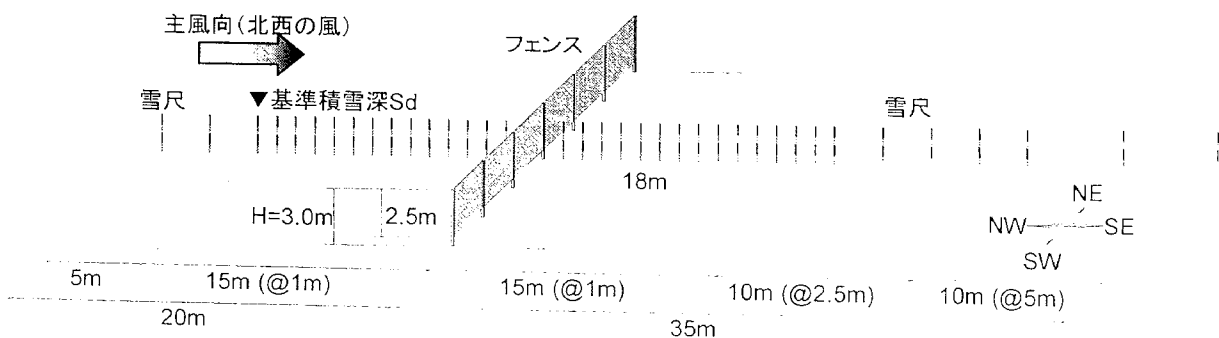


図2.7 試験体の大きさと観測フィールドの概要

2.3.2 観測方法および観測期間

積雪分布の測定は、フェンス中央断面線上で行い、主風向に対して風上側はフェンスから20mの範囲に、風下側はフェンスから35mの範囲に、それぞれ図2.7に示す間隔で雪尺を配置し、フェンス風上15m (5H) における積雪深を基準積雪深 S_d とした。雪尺の設置状況を写真2.2に示す。観測期間中は、観測場内の積雪には手を触れず自然の状態とし、測定は、原則として毎日1回実施した。

風向および風速の測定は、フェンスの影響を受けない位置に三杯型風速計と矢羽根式風向計(写真2.3)を設置した。設置高さは地上約1.8m(フェンスのほぼ中央高さ)とし、10分ごとに10分間の最頻度風向、平均風速および瞬間最大風速などが自動計測されるものである。気温および降水量は、アメダス観測点(山口)における毎正時の観測値を用いた。

観測期間は、1997年から2001年の寒候期であるが、以下では、データの欠測が比較的少ない1997年、1999年、2000年、2001年の4寒候期について、その結果を解析する。

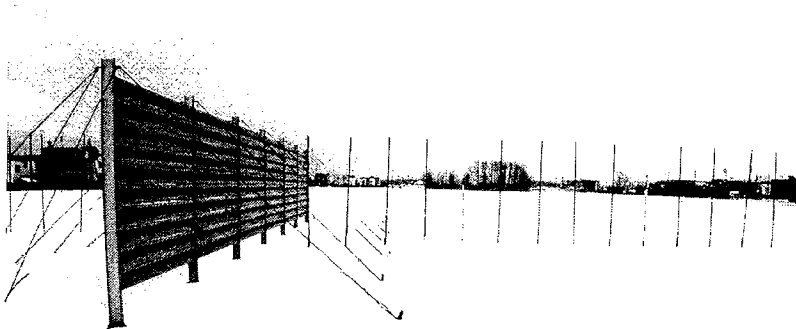


写真2.2 雪尺の設置状況

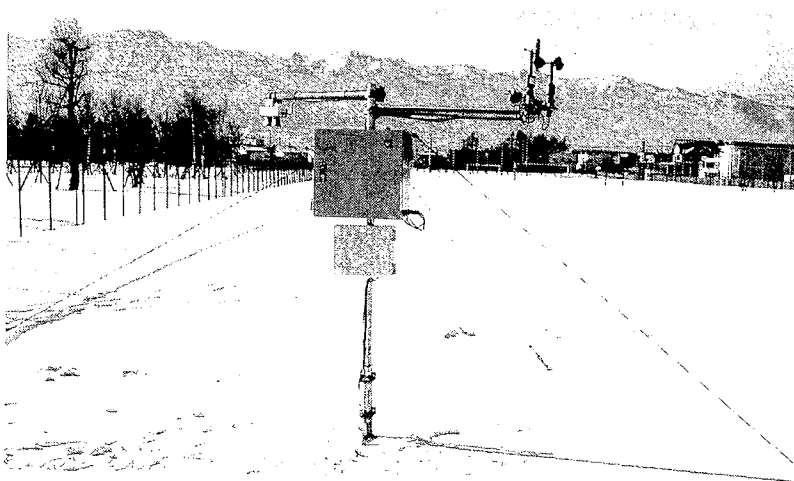


写真2.3 超音波積雪深計(左)と風向風速計(右)

2.3.3 気象条件の観測結果

それぞれの観測年における観測月日および気温、風速、降水量の統計値の一覧を表2.2に示す。各観測年の観測期間にはばらつきがあり、それぞれ全ての観測結果を用いると気象条件の比較が困難であるため、以下の気象条件の解析には、全ての観測年において共通する12月28日正午から2月23日正午までの57日間の観測結果を用いた。

表2.2 観測期間と気象条件

(*気温、風速、降水量は、各寒候期の12月28日～2月23日の統計値)

	1997年	1999年	2000年	2001年
観測開始日	1996年12月8日	1998年12月20日	1999年12月28日	2000年12月13日
観測終了日	1997年3月6日	1999年2月23日	2000年2月29日	2001年2月26日
観測期間	88日間	65日間	63日間	75日間
最高気温*	+6.0℃	+8.9℃	+5.3℃	+8.2℃
平均気温*	-2.8℃	-3.9℃	-3.6℃	-6.1℃
最低気温*	-13.5℃	-19.7℃	-17.7℃	-19.5℃
平均風速*	2.1m/sec	2.5m/sec	2.3m/sec	2.6m/sec
最大の10分間平均風速*	7.9m/sec	8.5m/sec	10.7m/sec	8.6m/sec
瞬間最大風速*	17.5m/sec	15.8m/sec	18.8m/sec	17.4m/sec
降水量*	131mm	176mm	193mm	73mm
基準積雪深Sdの 最大値	86cm (2月21日)	100cm (2月19日)	139cm (2月25日)	90cm (2月9日)

(1) 降水量

降水量は、2000年が193mmを示し、観測年の中で最も降雪が多く、2001年は73mmで、最も降雪が少なかったことがわかる。基準積雪深Sdの最大値においても、2000年は139cmであり、他の観測年と比較して特に大きい値を示す。

(2) 気温の頻度分布

気温は、吹雪の発生に大きく関係する。一般に 0°C より高温で、雪粒子の表面が濡れている場合には、表面張力により大きな付着力が発生し、吹雪は発生し難い。 0° より低温の場合でも、雪粒子の表面には薄い液膜(疑似液体層)があることから、 -10°C 程度までは、温度が高いほど吹雪の発生に必要な臨界風速は高くなる。各観測年別における 2°C 毎の気温の発生頻度分布を表2.7に示す。各寒候期の最頻度温度は、1997年および2000年が $-4\sim-2^{\circ}\text{C}$ 、1999年が $-6\sim-4^{\circ}\text{C}$ 、2001年が $-10\sim-8^{\circ}\text{C}$ である。吹雪が起り難い 0°C 以上の温度の頻度が最も多いのは1997年で16.0%を示し、最も少ないのは2001年で8.1%である。一方、 -10°C 以下の割合が最も多いのは2001年で16.4%を示し、最も少ないのは1997年で1.2%であった。これらの結果および観測期間中の平均気温(表2.2)から、2001年が他の観測年と比較して突出した低い気温であったことがわかる。すなわち、気温の条件のみから判断すると、2001年が最も吹雪が発生しやすく、逆に1997年は、比較的発生し難いと言える。

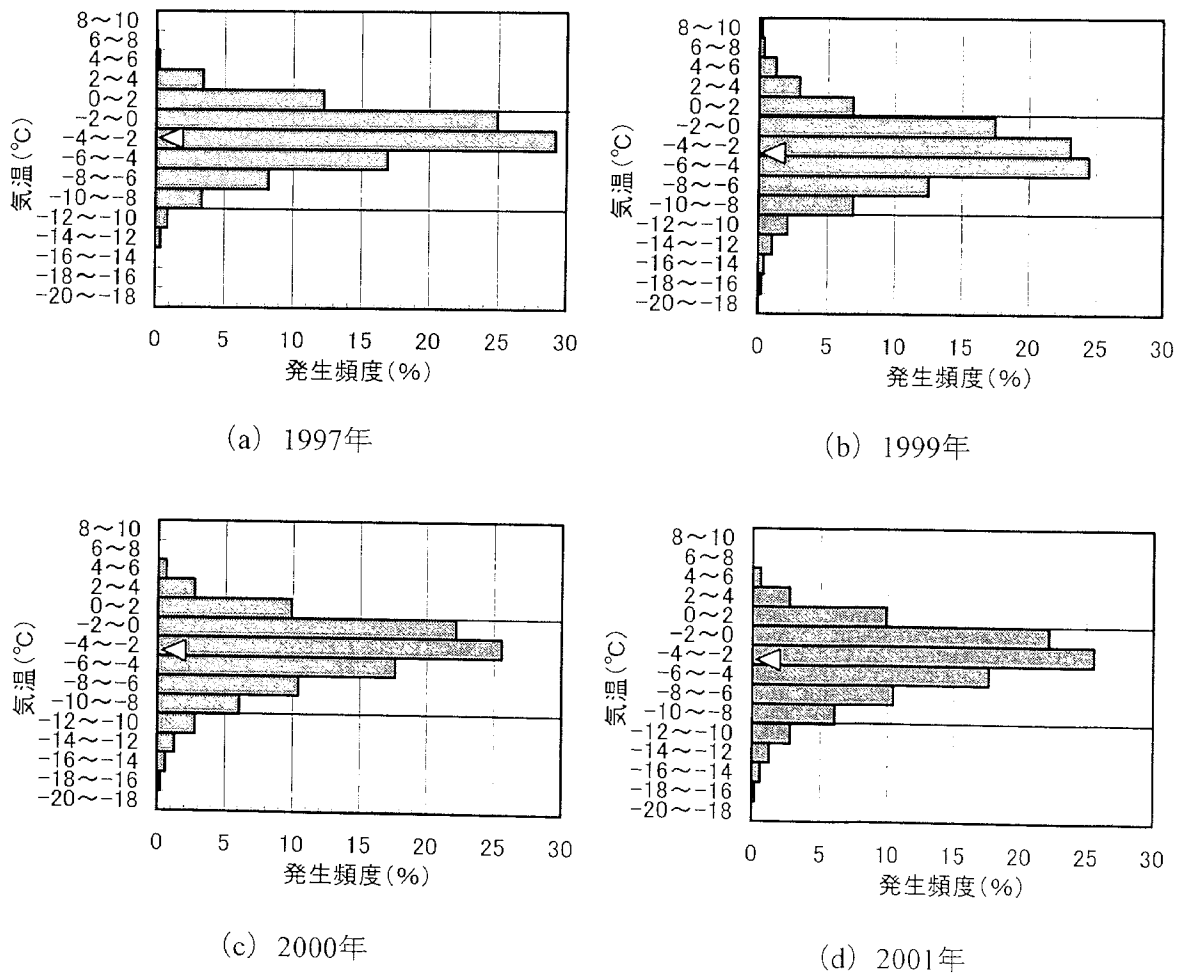
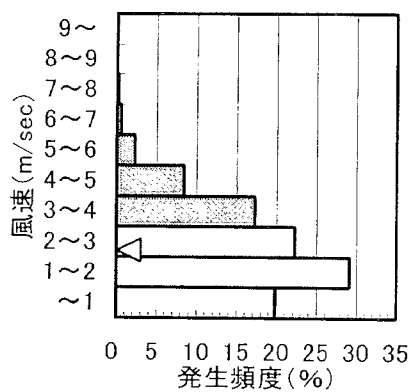


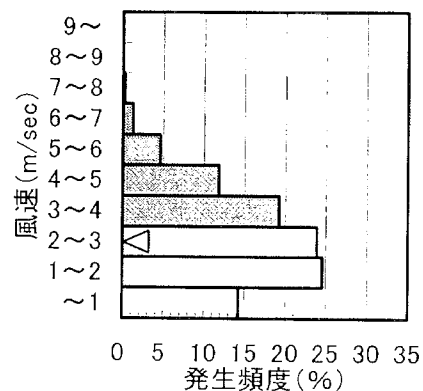
図2.8 気温の頻度分布 (△: 平均値)

(3) 風速の頻度分布

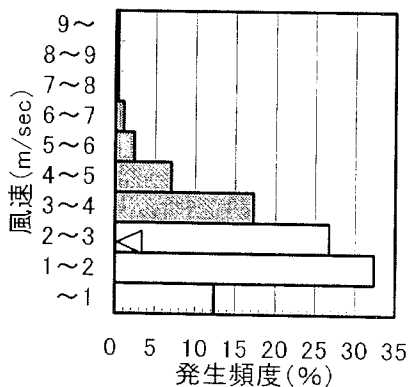
観測年別の10分間平均風速の発生頻度分布を図2.9に示す。平均風速（表2.2）は、各年とも2.1m/secから2.6m/secの類似した値を示すが、10分間平均風速の頻度分布では、1997年、1999年および2000年が1~2m/secの頻度が最も多いのに対して、2001年では2~3m/secの発生頻度が最も高く、更に3~4m/secの頻度も比較的高いことから、全般的には、2001年は他の観測年と比較して風が強いことがわかる。10分間平均風速の最大値および瞬間最大風速（表1）は、2000年が最も高く、それぞれ10.7m/secおよび18.8m/secの値を示している。測定高さが低い（地上1.8m）にもかかわらず、いずれの観測年も1m/sec未満の風速の頻度は12.4（2000年）~19.8%（1997年）程度であり、その割合は小さいと言える。なお、目視による観測では、風速4m/sec以上で弱い吹雪が発生し、風速6m/sec以上で強い吹雪が発生していた。



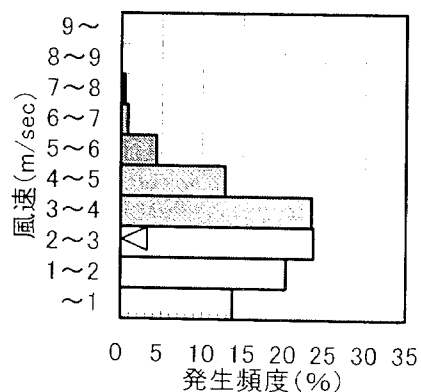
(a) 1997年



(b) 1999年



(c) 2000年



(d) 2001年

図2.9 風速の頻度分布 (◁: 平均値)

(4) 風向の頻度分布

観測年別の10分間平均風速別の10分間最頻度風向の発生頻度分布を図2.10に示す。風向発生頻度分布図の中央に示した数値は、それぞれの分布における全風向の合計頻度(%)である。0.3m/sec以上の風向発生頻度分布を見ると、2001年を除きフェンスに正対した北西から1風向ずれた西北西(1997年:24.4%, 1999年:29.7%, 2000年:17.2%)が最も頻度が高い。2001年ではフェンスに正対する北西の頻度(21.6%)が最も高いが、西北西の頻度(21.3%)もほぼ同様の値を示す。1997年および2000年では、西北西と正対する東南東の頻度(18.1%および13.2%)も大きい値を示す。積雪分布への影響が大きいと考えられる3.0m/sec以上の風向発生頻度分布では、西北西、北西または西の風の頻度が他の風向と比較して大きくなり、0.3m/sec以上の頻度に見られた東南東の風の割合は小さくなる。6.0m/sec以上の風向頻度でも、3.0m/sec以上の場合とほぼ同様の最頻度風向を示しているが、2000年では、南東の頻度が最も高い値を示す。

今回の観測において、フェンスの配置に対して、2001年は正対した北西の風が最も多く、他の観測年は1風向ずれた西北西の風が多い。また、フェンスの横方向(北東および南西寄り)からの風はほとんど見られず、全般的には、安定した風向特性を示していると言える。

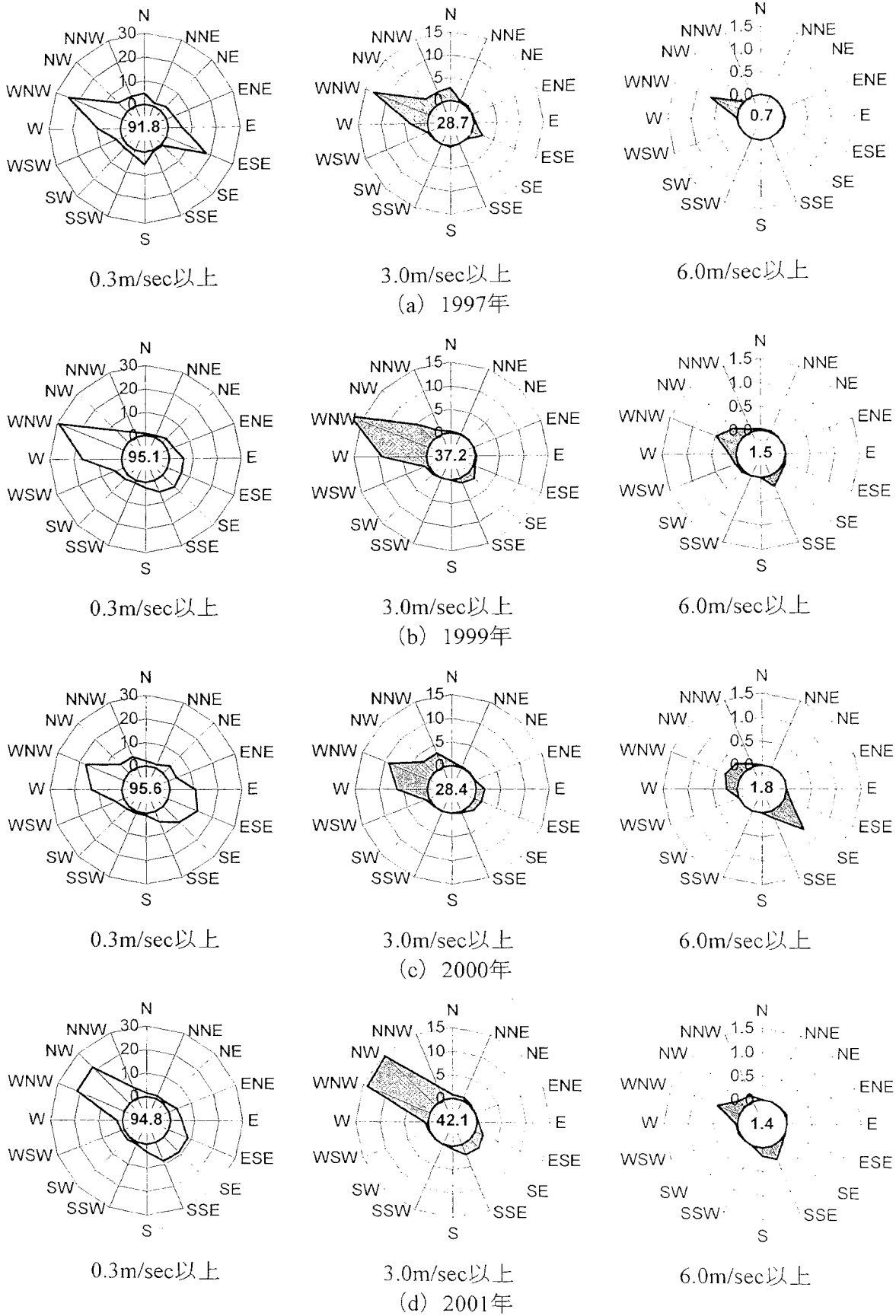


図2.10 風速別の風向頻度分布

2.3.4 積雪分布の観測結果

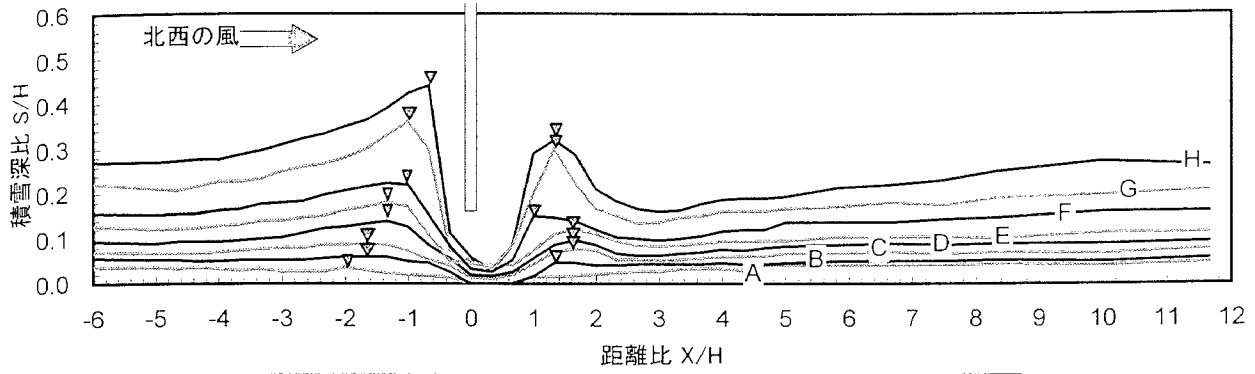
各観測年における測定結果の中から代表的な積雪分布（降雪があった翌日のものを基本に、分布が概ね等間隔になるものを抽出）を図2.11に示す。フェンスからの距離 x および積雪深 s は、共にフェンス高さ H で無次元化しているが、積雪深の変化を明瞭にするため、縦軸と横軸の表示スケールは異にした。

各観測年の積雪分布性状の概要を見ると、1997年、1999年および2001年では、フェンス下部が吹き払われた分布性状を示しているのに対して、2000年の観測では豪雪と比較的弱い風速のためにフェンスの下部間隙が雪に埋没してしまい、最終的な吹きだまり性状は、他の観測年の吹きだまり性状とは、大きく異なる性状を示している。

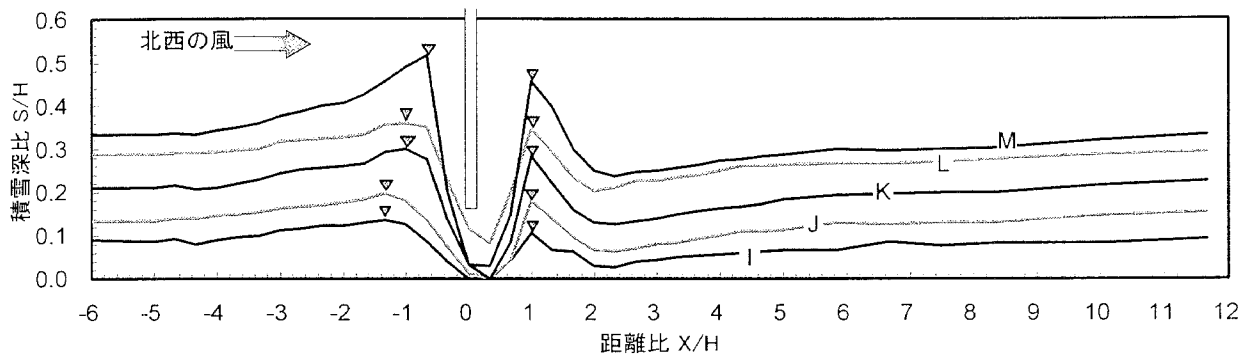
フェンスの影響による積雪分布の変化が顕著に現れる水平位置は、フェンス近傍の $-4 < x/H < 3$ 程度の範囲である。また更に、その後方の $3 < x/H < 10$ 程度の範囲に於いては、周囲の標準的な積雪深と比較して、やや小さい値を示す。吹きだまりは、フェンスの前後において1箇所ずつ見られ、そのピーク位置は、風上側では $x/H = -2.0 \sim -0.67$ の範囲に分布し、風下側では $x/H = 1.0 \sim 1.67$ 程度の範囲に分布する。その大きさは、全般的に風上側が大きい傾向を示す。風上側のピーク位置の日変化について、最も観測期間が長い1997年の分布をみると、積雪深が小さい12月10日の記録では、極僅かなピークが $x/H = -2.0$ に見られるが、積雪深の増加に伴いそのピーク位置は、徐々にフェンス寄りに推移し、2月23日には、 $x/H = -0.67$ まで移動している。1999年、2001年および2000年の初期の観測結果においても、このピーク位置がフェンス寄りに移動する現象がみられ、1999年および2001年における2月末のピーク位置は、1997年と同様に $x/H = -0.67$ にある。この吹きだまりのピーク位置の移動現象は、吹きだまりの形成に従い、風の流れの性状が変化することが原因の1つとして考えられる。この流れの性状の変化については、3章に示す。

フェンス直下では、風速の増加が起こることから顕著な吹き払いが見られが、1999年のように豪雪でかつ強風が少ない場合には、フェンス下部間隙が埋まることが確認された。

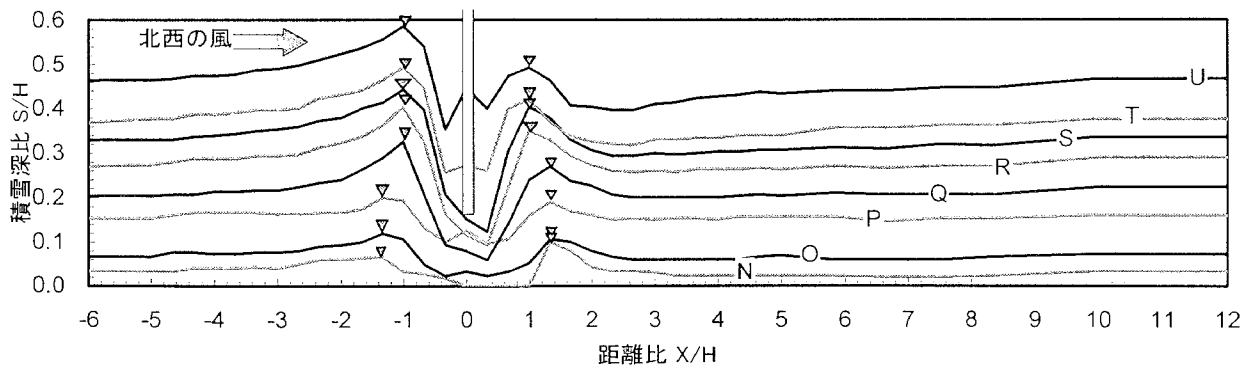
風下側の吹きだまりは、観測年によりその性状に違いが見られる。1999年の場合、風下側の吹きだまりは、そのピーク位置が $x/H = 1.0$ の位置で一定であり、かつ他の観測年と比較して鋭角のピーク形状をしている。これは、他の観測年と比較して風速 3.0m/sec 以上の風の風向特性が安定していることによる。これに対して1997年および2001年では、ピーク位置にばらつきが見られ、かつ分布形状は緩やかである。この原因として、1997年では吹雪が発生し難い 2m/sec 以下の風速発生頻度が高いこと、2001年では風速は比較的速いが、風速 6m/sec 以上の風向特性では、西北西と同程度に南南東の風の頻度が高いことが考えられる。



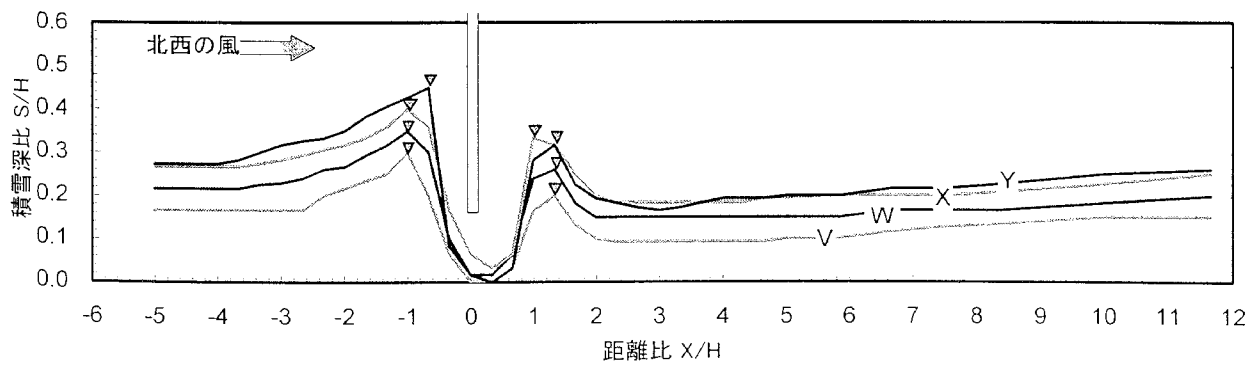
(a) 1997年



(b) 1999年



(c) 2000年



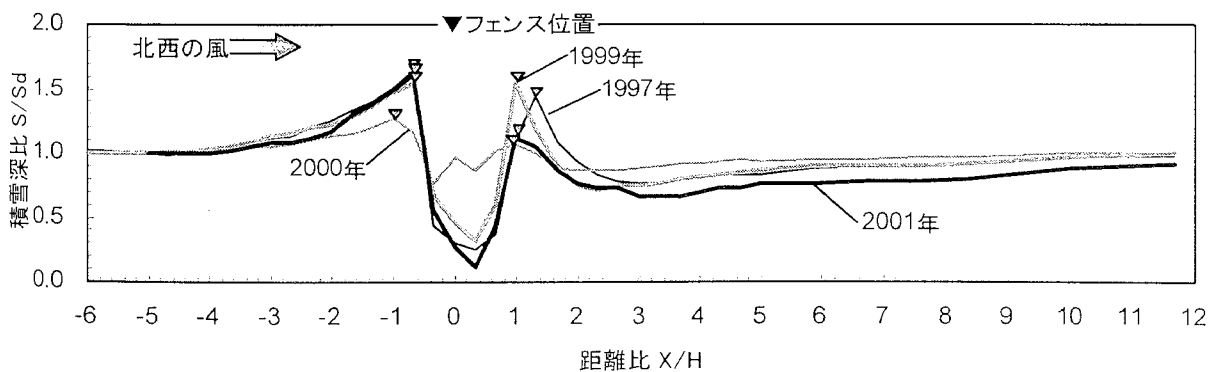
(d) 2001年

図2.11 観測年別の日別積雪分布の推移 (▽ : 吹きだまりのピーク位置)

各観測年の最大積雪深比 s/S_d の分布を図4に、積雪深比 s/S_d の最大値を表2.3に示す。風上側の積雪深分布は、2000年を除き類似した性状を示し、ピーク位置 ($x/H=-0.67$) およびピーク高さは概ね等しい値 ($s/S_d=1.55\sim 1.65$) を示す。これに対して風下側の吹きだまり性状では、そのピーク位置は、ほぼ同じ値 ($x/H=1.0\sim 1.33$) を示すのに対して、ピーク高さ ($s/S_d=1.11\sim 1.55$) は、観測年により異なる値を示す。特に強風の頻度が大きい2001年では、風下側の積雪深比 s/S_d は、全般的に小さい値を示している。このことから、風上側の積雪分布に比べて、風下側の積雪分布が気象条件の違いに大きく影響を受けることがわかる。

表2.3 積雪深比 s/S_d の最大値分布のピーク値

観測年	風上側におけるピーク値 $Ps_1 (s/S_d)$	風下側におけるピーク値 $Ps_2 (s/S_d)$
1997年	1.65	1.44
1999年	1.55	1.55
2000年	1.27	1.06
2001年	1.61	1.11



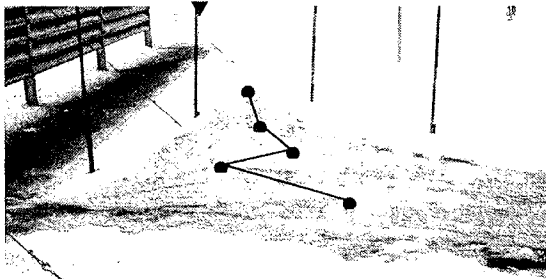
(▽ : 吹きだまりのピーク位置, S_d : $x/H=-5$ における積雪深)

図 2.12 観測年別の積雪深比 s/S_d の最大値分布

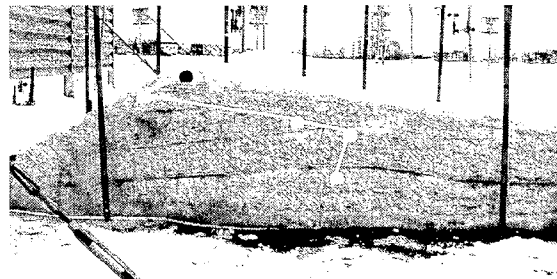
2.3.5 断面観測

各観測年の3月初旬に、フェンス近傍のピーク位置付近に関して、積雪断面を切り出し積雪の推移を観測した。観測では、吹きだまりの中央位置付近を垂直に切断し、水性インクを吹き付けた後、ガスバーナーを用いて積雪層をあぶりだした。1997年、2000年、2001年のフェンス風下側の観測結果を写真2.4に示す。なお、風向風速などの記録は示していないが、1998年の観測結果を合わせて示す。図中には、各積雪層のピーク位置を、●印で示し、1997年、2000年、2001年については、フェンスからH (3m) の雪尺に▼印を示す。これらの雪尺の設置間隔は、H/3 (1m) である。

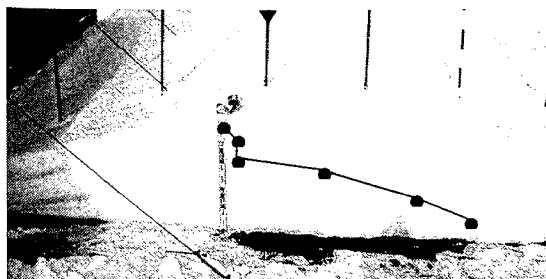
断面観測結果からは、雪尺の測定では得られなかった細かな積雪深分布の変化を読みとることができる。ピーク位置の推移は、観測年毎にばらつきがあるものの、いずれの観測年の結果においても積雪深の増加に伴い、そのピーク位置はフェンスに近づく方向に移動している。そのピーク位置の移動範囲は、概ね $x/H=1.0\sim 1.67$ ($x=3\sim 5$ m) であることがわかる。また、ピーク位置がフェンスから離れる方向に移動している部分が見られるのは、風向が逆方向などの原因が考えられる。



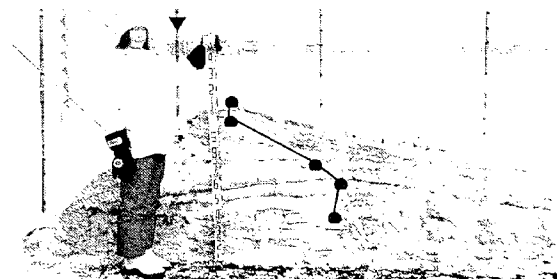
(a) 1997年



(b) 1998年



(c) 2000年



(d) 2001年

写真2.4 断面観測によるピーク位置の推移

2.3.6 観測結果に対するフェンスの3次元性の影響

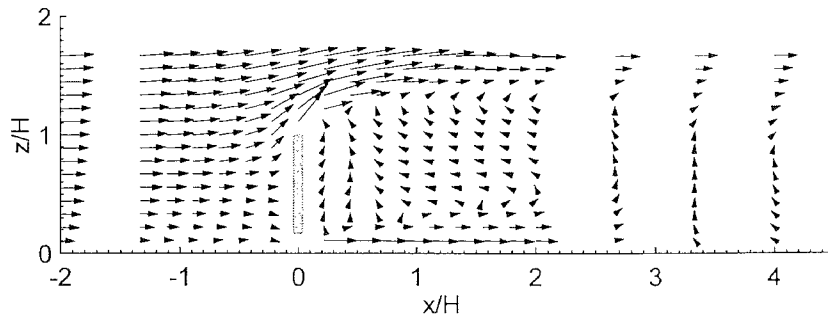
本観測に用いた試験体は、高さHに対して長さが6Hであり、一般的な防雪フェンスと比較すると短いと言える。従って、ここで示したフェンス中央断面の観測結果を、本試験体より長いフェンスに適用しようとした場合、フェンス端部の3次元性の影響が懸念される。

4章に示す風洞実験によって得られた中央断面位置における平均風速ベクトル分布の比較を図2.13(a)及び(b)に示す。全体的な流れの構造は、類似しているが、吹きだまりの形成に影響が大きい地表面付近の流れを見ると、フェンス下部間隙からの流れと、その風下側の逆流との合流点が、二次元実験の場合は、 $x/H=3$ 付近であるのに対して、屋外試験体を模擬した3次元実験の場合は、 $x/H=2.5$ 付近となっている。

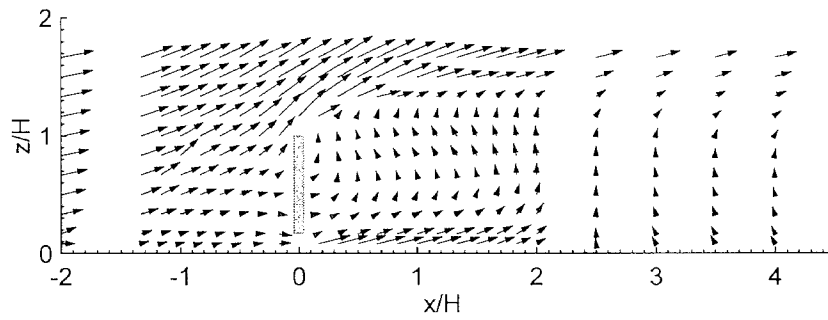
1997年、1999年、2000年の観測における最頻度風向は、フェンスに正対する北西の風から1風向(22.5°)ずれた西北西の風である。このことから、風向角 0° の場合と 22.5° の場合における地表面付近($H/12$)の流れの違いを、屋外観測と相似形の3次元模型を用いて風洞実験を行い観察した(測定方法は3章を参照)。流れの測定結果を図2.13(c)及び(d)に示す。

屋外観測で対象としたフェンス中央断面位置を見ると、フェンス後方 $0 < x/H < 2 \sim 2.5$ の領域では、両風向角の場合とも、概ねフェンスに正対する流れが観察される。さらにその後方の $x/H > 2 \sim 2.5$ の領域では、風向角 0° の場合、 $0 < x/H < 2$ の領域における流れとは、逆向きの流れが観察されるのに対して、風向角 22.5° の場合、 $0 < x/H < 2.5$ の領域における流れと概ね直交する流れが観察される。

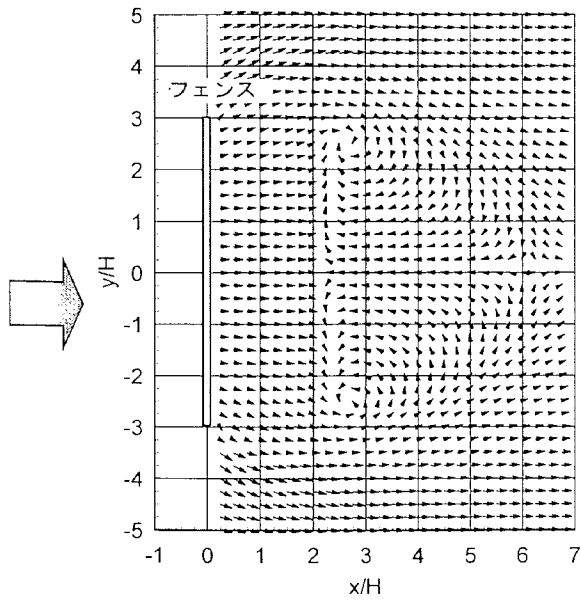
従って、本章で示した積雪分布性状を、本試験体より長いフェンスにおける積雪分布性状と比較した場合、フェンス風下側の吹きだまり位置よりさらに風下側の範囲($x/H > 2 \sim 2.5$)においては、その流れ性状の違いから、積雪性状が異なる可能性があると考えられる。これに対して、フェンス風下側の吹きだまりの形成位置付近($0 < x/H < 2 \sim 2.5$)においては、何れもフェンスに直交する類似した流れが観察されることから、フェンス形状の3次元性及び主風向のずれによる吹きだまり性状への影響は少ない。



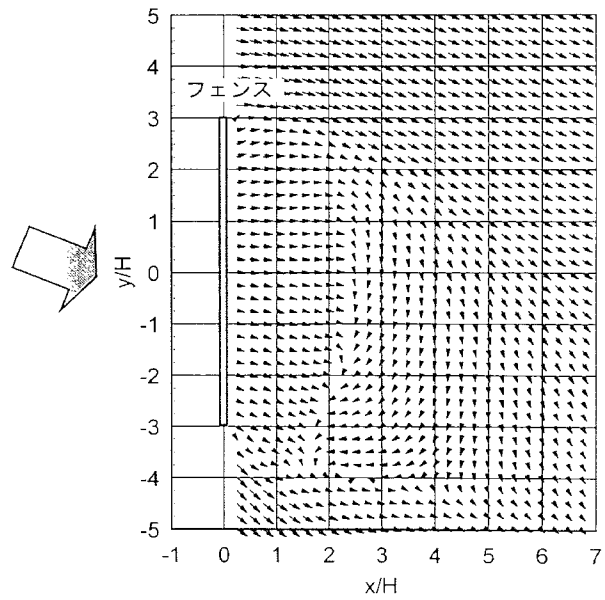
(a) 二次元実験による鉛直断面の流れ



(b) 三次元実験による中央鉛直断面位置の流れ



(c) 風向角 0° の地表面付近の流れ



(d) 風向角 22.5° の地表面付近の流れ

図2.13 平均風速ベクトルの分布の比較

2.4 階段状屋根建物モデルを用いた屋根上積雪分布の観測

2.4.1 試験体および観測方法

屋根面の吹きだまり性状の屋外調査は、2.2節に示した試験体設置場所において実施した。試験体を設置した状況を写真2.5および2.6に、試験体の概要を図2.14に、試験体に対する風向角の定義を図2.15に、観測場における試験体の配置を図2.16に示す。試験体は、2種類の高さの屋根面を持つ階段状屋根建物（以下、2段屋根建物）を想定し、その大きさは、下段部分が高さ0.9m(H)、幅4.5m(5H)、奥行き5.4m(6H)、上段部分が高さ0.9m(H)、幅1.8m(2H)、奥行き5.4m(6H)で、下段屋根面と上段屋根面の長さ比は3:2とした。また、降雪が多い1月から2月にかけての地上積雪が0.5m程度の状況において、雪面上に試験体形状を維持できるように、試験体を地上から0.5m高さに設置した。試験体表面は、屋根面、壁面とも木製合板の塗装仕上げである。試験体は2体製作し、寒候期の主風向に対して、下段屋根が風上側になる方向と、上段屋根が風上側になる方向に設置した。2000年寒候期の設置方向は、当地の気象観測記録を基に北西-南東軸とした。2001年は、2000年の観測結果において頻度が最も高い値を示した西北西-東南東軸とした。

屋根上の積雪分布の測定は、下段屋根上の中央断面位置を雪尺を用いて0.1m間隔（2000年）または0.05m間隔（2001年）で測定した。測定は、主として降雪後の毎正午前後に行った。積雪断面の測定状況を写真2.7に、積雪断面の一例を写真2.8に示す。これらの写真は、手前側の屋根面上の雪を除雪し、中央断面を切り出した状態である。観測にあたっては、一定風向下の積雪分布を得るために、屋根上に堆積した雪は毎測定後にすべて除雪した。また、試験体の周囲の吹きだまりや吹き払いは、定期的に平滑化した。

基準となる風向、風速と積雪深を測定するために、試験体の影響を受けない風上位置に、矢羽根型風向計、三杯型風速計（地上高さ：1.8m）と超音波型積雪深計（広洋エレクトロニクス製：SSL-100）を設置し、10分毎に10分間の平均風速、最大の瞬間風速、最頻度風向などの常時観測を行った。使用した風向計の分解能は、方位軸を基準とした16風向である。また、試験体に対する風向角は、下段屋根が風上の場合および風下の場合のそれぞれについて、図2.15に示すように、試験体に正対する場合を 0° として定義する。また、風速計の地上高さ1.8mは、下段屋根面の地上高さ1.4m（0.5m+0.9m）と上段屋根面の地上高さ2.3m（0.5m+1.8m）のほぼ中間的な高さに相当する。

以下に示す結果の観測期間は、2000年（1999年12月7日～2000年3月10日）および2001年（2000年12月22日～2001年2月26日）の2寒候期である。

2. 試験体を用いた屋外観測による積雪分布調査



写真2.5 低積雪時の試験体
(1999年12月15日)

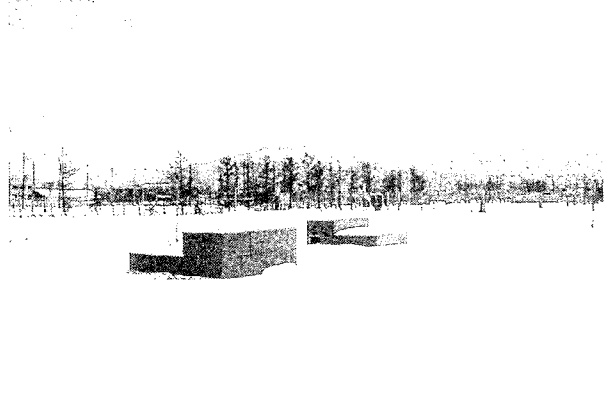


写真2.6 高積雪時の試験体
(2000年1月12日)



写真2.7 測定状況
(2000年2月10日)



写真2.8 下段屋根上の積雪断面
(2000年1月12日)

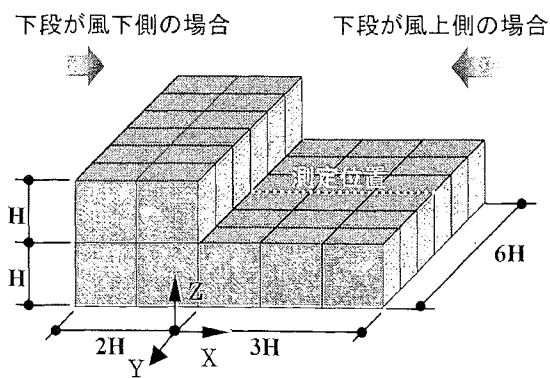


図2.14 試験体の概要 (H=0.9m)

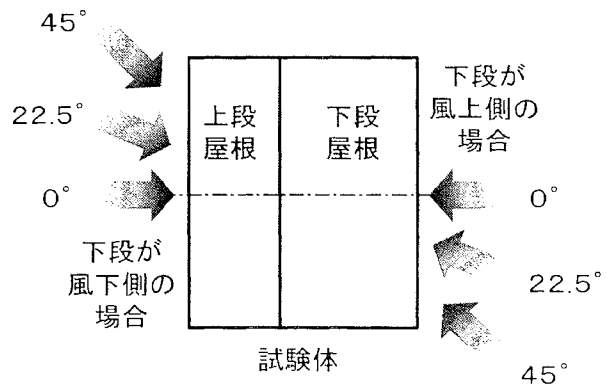
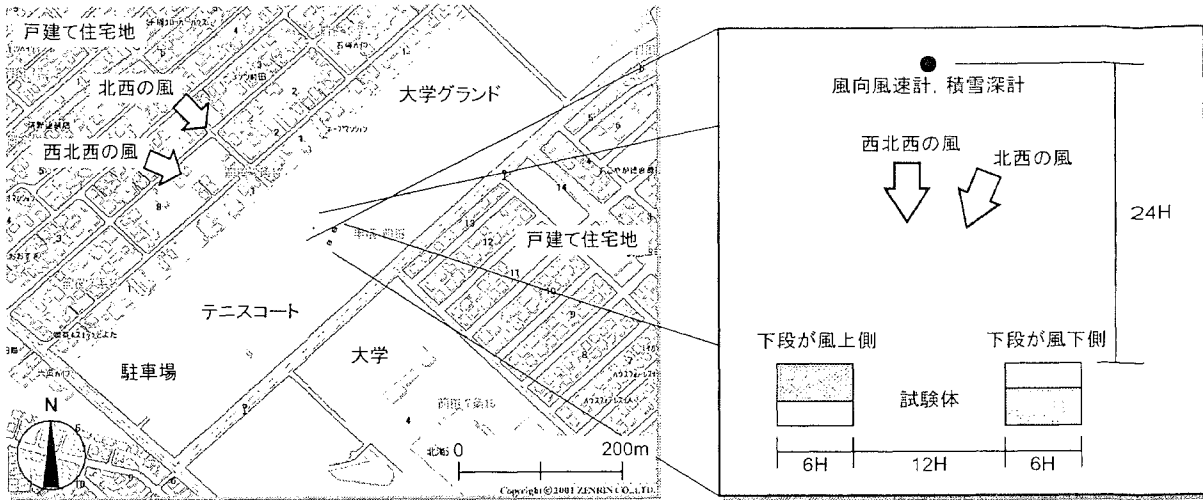


図2.15 試験体に対する風向角の定義



(a) 観測場の周辺図（札幌市手稲区前田）

(b) 試験体配置図（ $H=0.9\text{m}$ ）

図2.16 観測場における試験体の配置

2. 4. 2 積雪分布形成時の気象状況

降雪期間中における最頻度風向角と平均風速の違いによって分類した9通りの積雪深分布の観測結果を図2.17から図2.19に示し、それぞれの積雪が発生した期間の気象条件を表2.4に示す。

観測期間中の気温は、2.2節に示した観測地点より約2km北西のアメダス観測点（山口）における毎正時の観測値を用いた。

表2.4の「降雪期間」とは、試験体上を除雪した時以降に発生した降雪の始まり年月日時およびその降雪がやんだ年月日時を示し、()内にはその継続時間を示す。降雪の開始および終了の時間は、超音波積雪深計の観測記録から判断した。「基準積雪深増分 S_d 」は、超音波積雪深計の観測記録から判断した降雪の開始および終了時間における積雪深の差から求めた。なお、降雪の継続時間が概ね1日以内であること、気温がすべて氷点下であることから、その間の積雪の沈降は、無視できると判断した。風向、風速、気温は、降雪期間中におけるそれぞれの観測記録から求めた。最大の瞬間風速値の左には、その発生風向を示し、最大の10分間平均風速値の左には、その10分間における最頻度風向を示す。風向頻度分布のグラフの中央に示した長方形は、試験体の設置向きを示す。「最頻度風向角」は、最も頻度が高い風向と試験体との相対的な角度（図2.15）を示す。

図2.17から図2.19に示した下段屋根上の積雪深分布では、それぞれの左図が、最頻度風向に対して下段が風上側となる場合、右図が、最頻度風向に対して下段が風下側となる場合

である。図の縦軸は、測定した積雪深 $s(\text{cm})$ を基準積雪深増分 $S_d(\text{cm})$ で除した積雪深比 s/S_d であり、図の横軸は、下段屋根上において上段壁面からの距離 x を上段壁面高さ H で除した値である。

(1) 最頻度風向角が 0° の場合

図2.17に、最頻度風向角が 0° の場合における下段屋根上の積雪深分布を示す。

気象条件Aにおける下段が風上側となる積雪深分布（図2.17(a)の左図）を見ると、上段壁面位置($x/H=0$)では、 $s/S_d=2.0$ 付近まで積雪があるものの、その風下側 ($x/H=0.1\sim 0.5$)には局所的な吹き払いが見られ、積雪深が $s/S_d=0.25$ まで急激に減少している。 $x/H=0.6\sim 0.7$ において積雪深のピークが見られ、 $s/S_d=1.3$ 程度を示す。その風下側では、積雪深がなだらかに減少し、 $x/H>1.5$ では $s/S_d<1$ となり、端部 ($x/H=3$)において、 $s/S_d=0$ となる分布を示す。

一方、下段が風下側となる積雪深分布（図2.17(a)の右図）では、 $x/H=0.5$ に $s/S_d=1.2$ 程度のピークを持つ分布を示す。 $x/H>0.9$ では $s/S_d<1$ となり、 $x/H>1.3$ では $s/S_d<0.5$ の小さい値を示し、屋根面上の全積雪量は、下段が風上側の場合と比較してやや少ない。

ただし、図2.17(a)の測定値は、降雪期間中の最頻度風向は 0° であるものの、 22.5° の頻度もほぼ同様に高く、本来の主風向は正確には 0° ではなく、また、基準積雪深増分が 7cm と小さいことから、相対的な誤差が大きい測定結果になりかねないが、主風向が 0° に近似した分布は他に得られなかったため、ここでは、本結果を示した。

気象条件Bにおける下段が風上側となる積雪深分布（図2.17(b)の左図）を見ると、屋根全面に渡って、ほぼ均一な分布になっており、気象条件A（図2.17(a)の左図）と比較して大きく異なる。積雪深比は、ほとんどの領域において $s/S_d>1$ を示す。気象条件Aの場合と同様に $x/H=0.1\sim 0.5$ の局所的な吹き払いは見られるが、吹き払い量は小さい。

下段が風下側の分布（図2.17(b)の右図）は、上段壁面位置($x/H=0$)の $s/S_d=2$ から $x/H=1$ 付近の $s/S_d=1$ まで徐々に減少、 $x/H=2.5$ までほぼ均一に堆積し、 $x/H<2.5$ の位置で、やや減少を示す。

下段が風上側および風下側の両方において、気象条件AとBの積雪深分布の形状が異なる要因として、風向分布およびその風向における発生風速の違いが挙げられる。気象条件Aでは風向変化の幅が狭いものに対して、気象条件Bでは風向分布が比較的分散し、最頻度風向は、風向角が 0° となる南東であるものの、風向角 22.5° （南南東）や風向角 135° （西）の風の頻度も比較的多く含まれる。更に、10分間平均風速の最大値である 6.0m/sec を示し

た風は、風向角 135° （西）であることから、この点のみに着目すると、図2.17(b)の左図は、後述する風向角 45° における下段が風下側の場合であり、図2.17(b)の右図は、風向角 45° における下段が風上の場合に相当し、図2.17(b)の右図の上段壁面付近の分布形状が、図2.19(b)左図の下段が風上側の分布に類似していることが説明できる。

気象条件Cにおける下段が風上側となる積雪深分布（図2.17(C)の左図）は、上段壁面への付着を除いては、小さな凹凸があるものの、全体的には、 $s/S_d=1$ 程度の均一な分布形状を示す。これは一時的に強い風が吹いたものの、降雪期間中の平均風速は、 1.2m/sec と弱いことによる。同様に、下段が風下側となる積雪深分布（図2.17(C)の右図）においても、 $s/S_d=1$ 程度の均一な分布形状を示す。

(2) 最頻度風向角が 22.5° の場合

図2.18に、最頻度風向角が 22.5° の場合における下段屋根上の積雪深分布を示す。

気象条件D（図2.18(a)）と気象条件E（図2.18(b)）の場合は、類似した積雪深分布の形状を示し、下段が風上側となる積雪深分布(左図)は、両者とも $x/H=0\sim 0.5$ の位置に吹き払いが見られ、 $x/H=0.6\sim 0.8$ の位置に積雪のピークがある。ピーク位置から軒位置($x/H=3$)までは、ほぼ直線的に減少する。下段が風下側となる積雪深分布（図2.18(a),(b)の右図）では、 $x/H=0.3\sim 0.4$ の位置にピークがあり、その位置より上段壁面側の吹き払いは、下段が風上側となる場合と比較して小さい。屋根中央 $x/H=1.5$ においては、 $s/S_d<0.5$ となり、屋根面上の全積雪量は、下段が風上側の場合と比べて小さい。以上のように、気象条件DとEにおける積雪深分布の性状は、気象条件Aにおける場合に類似している。

気象条件Fにおける下段が風上側となる積雪深分布（図2.18(c)の左図）は、気象条件D（図2.18(a)左図）およびE（図2.18(b)左図）の場合の積雪深分布に見られた上段壁面近傍の窪みが小さくなり、全体的に $s/S_d=1$ 程度であるほぼ均一な積雪深分布を示している。これは、上段壁面近傍の窪みを形成するための渦の強さが、接近流の風速に伴って、小さくなったことによると考えられる。下段が風下側の積雪深分布（図2.18(c)の右図）において、上段壁面近傍の窪みが形成されていないのも、同様の現象によると考えられる。

(3) 最頻度風向角が 45° の場合

図2.19に、最頻度風向角が 45° の場合における下段屋根上の積雪深分布を示す。

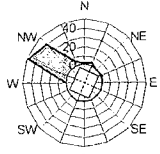
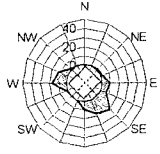
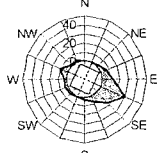
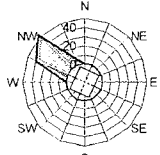
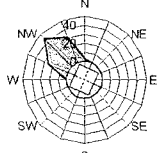
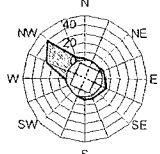
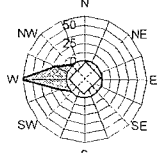
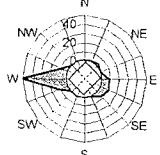
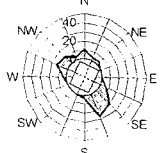
気象条件Gにおける下段が風上側となる積雪深分布（図2.19(a)の左図）では、 $x/H=0$ において $s/S_d=1.3$ 程度の積雪深を示し、 $x/H=0\sim 1$ の範囲においてほぼ直線的に積雪深が減少し、 $x/H=1$ 付近において積雪深が0となる。 $x/H=1\sim 3$ では、 $s/S_d<0.25$ 以下の小さな丘状の堆積を

示す。下段が風下側となる積雪深分布（図2.19(a)の右図）においては、気象条件DおよびEの下段が風下側となる積雪深分布と類似した形状を示している。

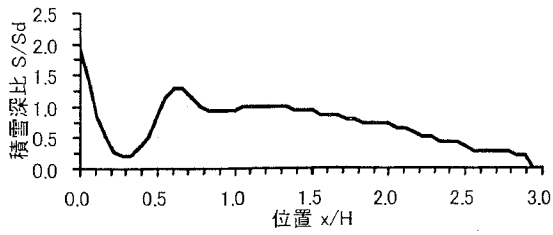
気象条件Hにおける下段が風上側となる積雪深分布（図2.19(b)の左図）では、 $x/H=0$ において $s/S_d=2.25$ 程度の積雪深を示し、 $x/H=0\sim 1$ の範囲において積雪深が減少し、 $x/H=1$ 付近において $s/S_d=0.75$ 程度となる。 $x/H=1\sim 3$ では、やや丘状の堆積を示す。つまり、気象条件Gにおける場合の積雪深分布に一定値を加えた分布形状をしていると言える。下段が風下側となる積雪深分布（図2.19(b)の右図）においては、上段壁面近傍に極小さな窪みが見られるものの、気象条件Fの場合に近い形状であると言える。

気象条件Iにおいては、下段が風上側および風下側となる両者（図2.19(c)）において、屋根全面に渡りほぼ一定の積雪深分布を示している。

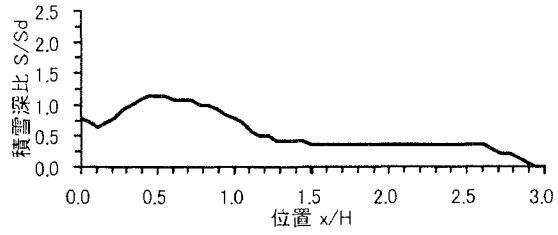
表2.4 観測データ別の気象条件（風向，風速，気温，積雪記録）

気象条件	最頻度風向角	風向頻度分布 (%)	瞬間風速の最大値 10分間平均風速の最大値 降雪期間中の平均風速 10分間平均風速の最小値	最高気温 平均気温 最低気温	基準積雪深の増分Sd	降雪期間
A	0°		9.9 m/sec (WNW) 4.8 m/sec (NW) 2.9 m/sec 1.0 m/sec	-2.4°C -4.6°C -5.7°C	7cm	2001年1月30日18時 ↓ 2001年1月31日11時 (17時間)
B			11.7 m/sec (W) 6.0 m/sec (W) 2.3 m/sec 0.9 m/sec	-5.1°C -7.2°C -8.7°C	30cm	2000年2月24日23時 ↓ 2000年2月25日06時 (7時間)
C			6.1 m/sec (WNW) 3.5 m/sec (SSE) 1.2 m/sec 0.0 m/sec	-3.9°C -8.1°C -13.2°C	11cm	2001年1月22日08時 ↓ 2001年1月23日10時 (26時間)
D	22.5°		10.7 m/sec (WNW) 5.0 m/sec (NW) 3.5 m/sec 1.7 m/sec	-3.3°C -5.5°C -6.7°C	15cm	2001年2月19日22時 ↓ 2001年2月20日12時 (14時間)
E			9.1 m/sec (W,WNW) 5.0 m/sec (WNW) 3.3 m/sec 2.1 m/sec	-4.9°C -5.9°C -6.9°C	20cm	2001年2月25日01時 ↓ 2001年2月25日20時 (19時間)
F			8.9 m/sec (W) 4.9 m/sec (NW) 2.4 m/sec 0.4 m/sec	-6.7°C -8.2°C -10.8°C	15cm	2001年1月16日00時 ↓ 2001年1月17日00月 (12時間)
G	45°		13.0 m/sec (WNW) 6.5 m/sec (WNW) 3.9 m/sec 1.0 m/sec	-4.8°C -6.2°C -7.3°C	22cm	2000年1月11日12時 ↓ 2000年1月12日08時 (20時間)
H			8.9 m/sec (WSW) 5.1 m/sec (W) 3.1 m/sec 1.0 m/sec	-8.0°C -10.6°C -12.7°C	19cm	2000年1月25日15時 ↓ 2000年1月26日12時 (21時間)
I			5.2 m/sec (NW) 3.0 m/sec (WNW) 1.8 m/sec 0.0 m/sec	-7.1°C -7.7°C -8.7°C	15cm	2001年2月08日17時 ↓ 2001年2月08日22時 (5時間)

2. 試験体を用いた屋外観測による積雪分布調査



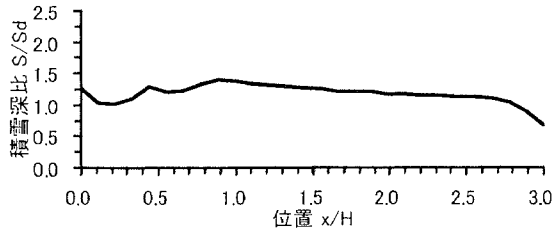
下段が風上の場合



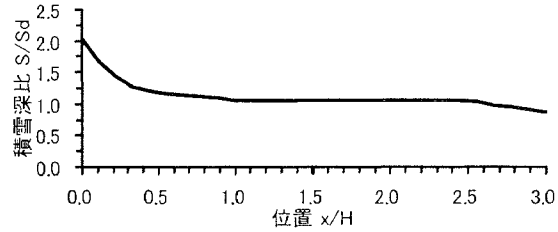
下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:2.9m/sec, 基準積雪深増分Sd:7cm)

(a) 気象条件Aにおける積雪深分布



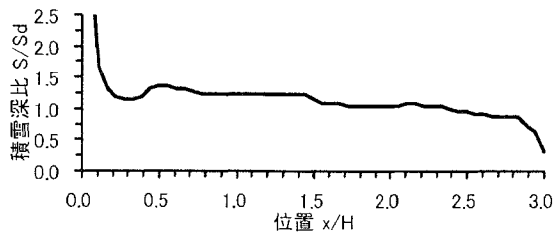
下段が風上の場合



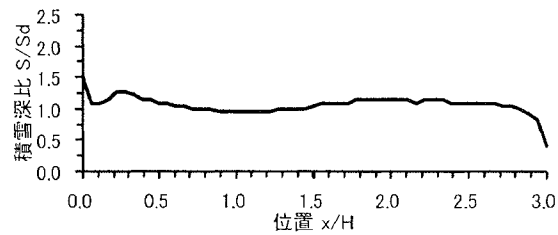
下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:2.3m/sec, 基準積雪深増分Sd:30cm)

(b) 気象条件Bにおける積雪深分布



下段が風上の場合



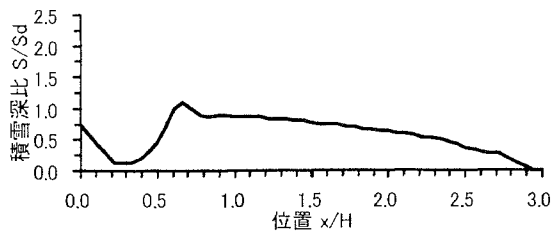
下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:1.2m/sec, 基準積雪深増分Sd:11cm)

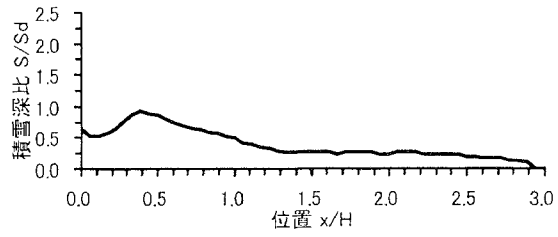
(c) 気象条件Cにおける積雪深分布



図2.17 最頻度風向角 0° の場合における下段屋根上の積雪深分布



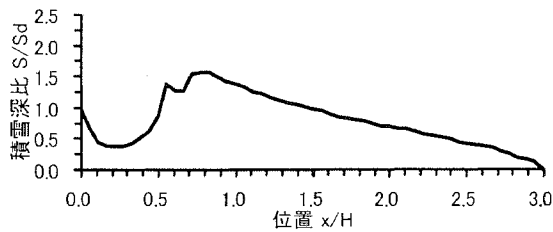
下段が風上の場合



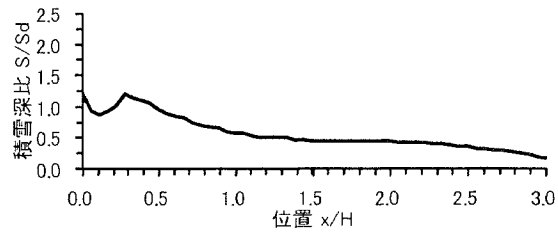
下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:3.5m/sec, 基準積雪深増分Sd:15cm)

(a) 気象条件Dにおける積雪深分布



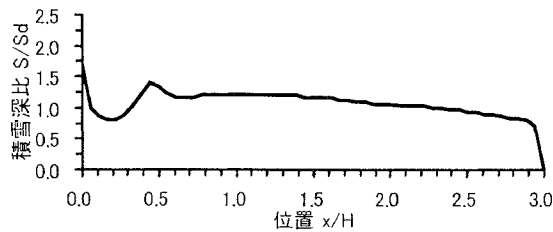
下段が風上の場合



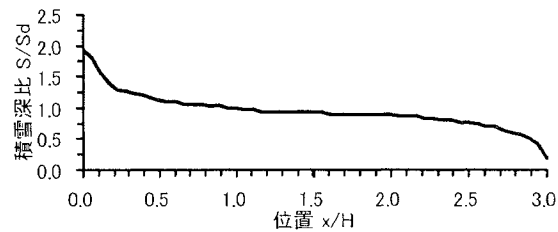
下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:3.3m/sec, 基準積雪深増分Sd:20cm)

(b) 気象条件Eにおける積雪深分布



下段が風上の場合



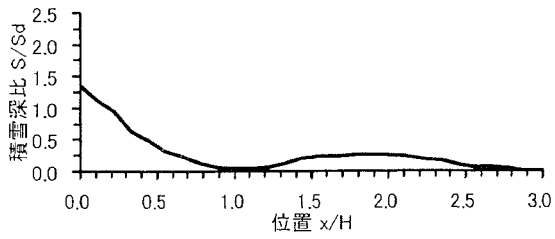
下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:2.4m/sec, 基準積雪深増分Sd:15cm)

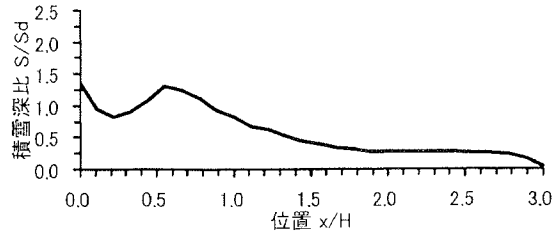
(c) 気象条件Fにおける積雪深分布



図2.18 最頻度風向角 22.5° の場合における下段屋根上の積雪深分布



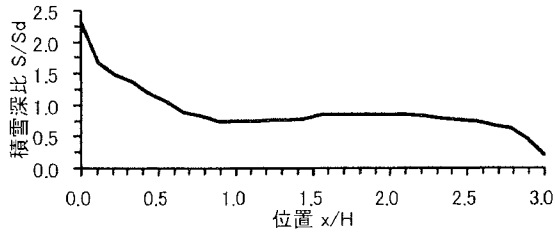
下段が風上の場合



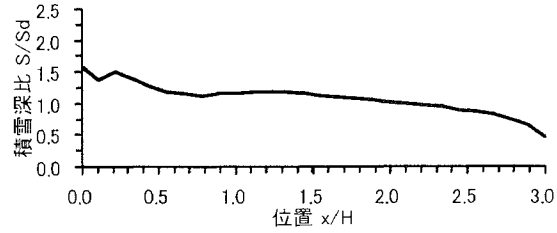
下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:3.9m/sec, 基準積雪深増分Sd:22cm)

(a) 気象条件Gにおける積雪深分布



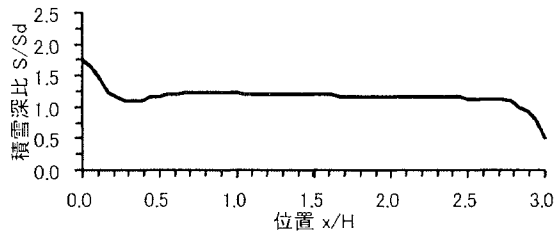
下段が風上の場合



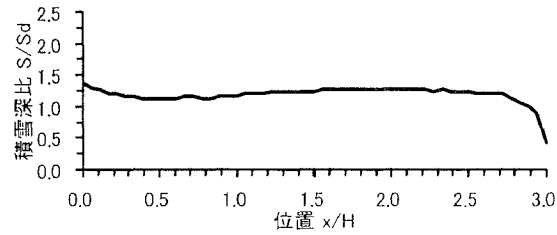
下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:3.1m/sec, 基準積雪深増分Sd:19cm)

(b) 気象条件Hにおける積雪深分布



下段が風上の場合



下段が風下の場合

(降雪期間中の平均風速:1.8m/sec, 基準積雪深増分Sd:15cm)

(c) 気象条件Iにおける積雪深分布



図2.19 最頻度風向角45°の場合における下段屋根上の積雪深分布

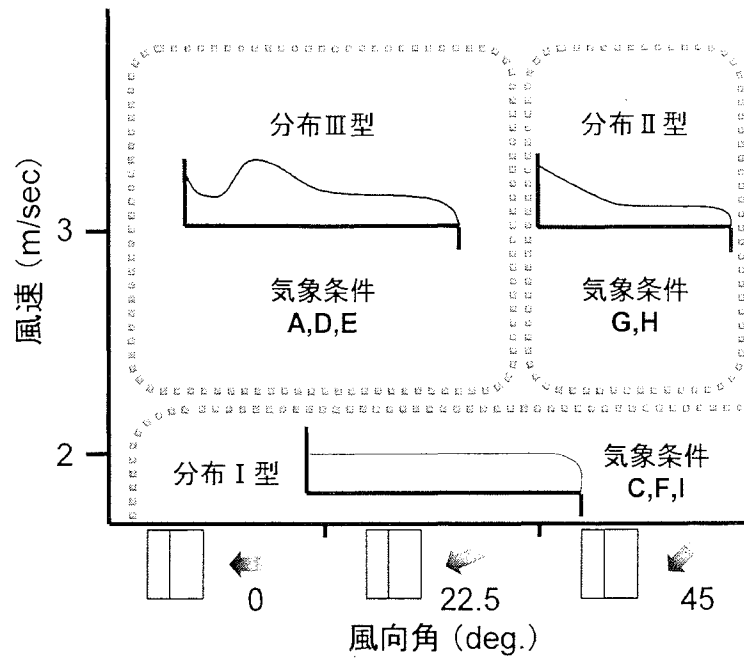
2.4.3 風向角と風速による分類

ここでは、前項の図2.17～図2.19に示した積雪深分布を、Ⅰ型～Ⅲ型の3つに分類し、それぞれが発生した風向、風速との関係を図2.20に示す。積雪深が一定となる分布形状をⅠ型とし、上段壁面側に偏り、下段屋根の軒方向に向かって概ね単調に減少する分布形状をⅡ型とし、下段屋根面中央より上段壁面寄りに積雪深のピークを持つ分布形状をⅢ型とした。なお、O'Rourke等³³⁾は、今回の試験体とはやや異なる形状ではあるが、階段状屋根建物における積雪深分布について、「Triangular Drift」と「Quadrilateral Drift」に分類しており、ここで示すⅡ型が前者に、Ⅲ型が後者に相当する。

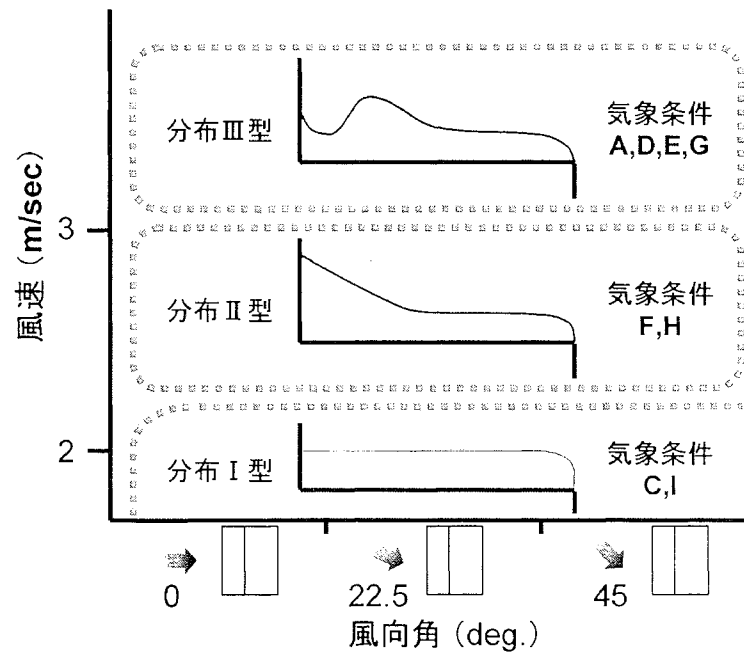
気象条件Bは、最頻度風向と強風が発生した風向が大きく異なることから、この図では省略した。

下段が風上側の場合（図2.20(a)）、降雪時の平均風速が2.3～2.4m/sec程度以下では、下段屋根上の積雪は概ね一定（Ⅰ型）となり、それ以上の風速では、分布に偏りが生じる。その時、風向角が0°および22.5°の場合は、上段壁面付近が吹き払われる分布形状（Ⅲ型）となり、風向角が45°の場合では、上段壁面側に偏る分布形状（Ⅱ型）となる。

下段が風下側の場合（図2.20(b)）は、風向角が0°～45°の範囲では、風向角による分布形状の差は小さく、風速による差が大きい。積雪がほぼ一定（Ⅰ型）となるのは、平均風速が約2m/sec以下の場合であり、下段が風上側の場合と比べて、その風速値はやや低い。次に、平均風速が3m/sec程度以下の場合には、上段壁面側に偏る分布形状（Ⅱ型）を示し、3m/sec程度以上の平均風速では、 $x/H=0.5$ 付近に吹きだまりのピークを持つ分布（Ⅲ型）を示す。これは、風速の増加により、上段壁面付近の渦が強くなり、上段壁面側が吹き払われることによると考えられる。



(a) 下段が風上側の場合



(b) 下段が風下側の場合

図2.20 風速と風向角による下段屋根上の積雪分布性状の分類

2.5 まとめ

下部間隙を持つ吹きだめフェンスおよび2段屋根建物を対象とした屋外観測を行い、その周囲や屋根上における積雪分布性状と風向、風速との関係を明らかにした。

下部間隙を持つ吹きだめフェンスでは、吹きだまりがピークを形成する範囲は、フェンスの風上側では $X/H=-2.0\sim-0.67$ 、風下側では $X/H=1.0\sim1.67$ であること、フェンスの風上側ピーク位置は、積雪深の増加に伴い $X/H=-2.0$ から $X/H=-0.67$ に推移すること、風上側の積雪分布に比べて、風下側の積雪分布は、気象条件の違いに影響を受け易く、強風の頻度が高い場合、風下側の積雪深は全般的に小さくなることを示した。さらに、試験体の3次元性の影響を風洞実験により検討し、本章で示した積雪分布性状を、本試験体より長いフェンスにおける積雪分布性状と比較した場合、フェンス風下側の吹きだまり位置よりさらに風下側の範囲($x/H>2\sim2.5$)においては、その流れ性状の違いから、積雪性状が異なる可能性があり、これに対して、フェンス風下側の吹きだまりの形成位置付近($0<X/H<2\sim2.5$)においては、何れもフェンスに直交する類似した流れが観察されることから、フェンス形状の3次元性及び主風向のずれによる吹きだまり性状への影響は少ないことを確認した。

2段屋根建物では、下段屋根上における積雪深分布の形状をI型～III型の3つに分類し、それぞれが発生した風向、風速との関係を明らかにした。分類は、積雪深が一定となる分布形状をI型とし、上段壁面側に偏り、下段屋根の軒方向に向かって概ね単調に減少する分布形状をII型とし、下段屋根面中央より上段壁面寄りに積雪深のピークを持つ分布形状をIII型とした。下段が風上側の場合、降雪時の平均風速が $2.3\sim2.4\text{m/sec}$ 程度以下では、下段屋根上の積雪は概ね一定(I型)となり、それ以上の風速では、分布に偏りが生じる。その時、風向角が 0° および 22.5° の場合は、上段壁面付近が吹き払われる分布形状(III型)となり、風向角が 45° の場合では、上段壁面側に偏る分布形状(II型)となる。これに対して、下段が風下側の場合は、風向角が $0^\circ\sim45^\circ$ の範囲では、風向角による分布形状の差は小さく、風速による差が大きい。積雪がほぼ一定(I型)となるのは、平均風速が約 2m/sec 以下の場合であり、下段が風上側の場合と比べて、その風速値はやや低い。平均風速が 3m/sec 程度以下の場合には、上段壁面側に偏る分布形状(II型)を示し、 3m/sec 程度以上の平均風速では、 $x/H=0.5$ 付近に吹きだまりのピークを持つ分布(III型)を示す。つまり、下段屋根が風上側となる場合では、風向角による依存が大きく、下段屋根が風下側となる場合では、風速による依存が大きいことを示した。また、吹きだまりが形成される風速は、屋根面高さにおいて、平均風速が約 2m/sec 以上であることを明らかにした。

3章

風洞実験による気流性状の測定

3. 1	はじめに	1
3. 2	使用風洞および測定装置	2
3. 2. 1	境界層風洞装置	2
3. 2. 2	吹雪風洞装置	3
3. 2. 3	風向風速計	4
3. 3	二次元吹きだめフェンス周りの積雪量による気流性状の変化	5
3. 3. 1	吹雪風洞実験による吹きだまり性状の測定方法	5
3. 3. 2	吹雪風洞実験による吹きだまり性状の測定結果	6
3. 3. 3	吹きだまり形成に伴う気流性状変化の測定方法	7
3. 3. 4	吹きだまり形成に伴う気流性状変化の測定結果	8
3. 4	階段状屋根建物モデル周りの風向別の気流性状	13
3. 4. 1	風洞実験による気流性状の測定方法	13
3. 4. 2	風洞実験による気流性状の測定結果	15
3. 5	まとめ	22

3.1 はじめに

前章においては、吹きだめ型防雪フェンス周囲の地表面および2段屋根建物の下段屋根面上を対象として、その積雪分布性状を屋外観測により明らかにした。本章においては、屋外観測を行ったものと同形状の試験体を対象として、その周囲の気流性状を明らかにする。

積雪性状と気流性状との関連性を検討することを目的とする本研究においては、本来ならば、積雪性状を観測した屋外試験体周りの気流性状を直接測定することができれば、理想的である。しかしながら、時々刻々と性状が変化する自然風を対象とした場合、ある一定条件下における風向および風速の分布を測定することは、現状においてはほぼ不可能に近い。更に、構造物周囲における風は、その風上側からの剥離やそれに伴う渦など、非常に複雑な非定常流れであり、その性状を把握するためには、空間的に高い密度での測定を実施する必要がある。従って、本研究においては、屋外試験体の縮尺模型を用いた風洞実験を行い、その気流性状を測定する。3.2節に実験を実施した風洞装置および風速測定装置について示す。

雪面上の流れの性状は、吹きだまりの成長に伴い、次第に変化すると考えられる。気流性状を用いた積雪性状予測を目的とする本研究においては、積雪前の気流性状が吹きだまり形成に与える影響と、積雪後の気流性状がその後の吹きだまり形成に与える影響とが、大きく異なることを確認する必要がある。このために、二次元フェンスを対象として、周囲に吹きだまりの成長過程を模型化した実験を行い、吹きだまり形成に伴う気流性状の変化を把握した。この結果を3.3節に示す。

階段状屋根建物モデルを用いた風洞実験では、屋外試験体と同じ三次元模型を用い、屋根上とその周囲の気流性状分布を測定した。その結果を3.4節に示す。

3.2 使用風洞および測定装置

3.2.1 境界層風洞装置

気流測定実験に用いた風洞装置は、鹿島技術研究所の西調布研究所にある「可視化風洞」^{8), 9)}である。風洞装置の概観および内部の断面図を図3.1に、その仕様を表3.1に示す。この風洞装置は、通常境界層気流実験に加えて、流れの可視化実験が行えるように配慮された装置であるが、ここでは、通常境界層風洞として使用する。また、装置自体は、エッフェル型（吹出し型）風洞装置であるが、本実験においては、気流の安定性を高めるために、風洞装置上部に設けられたリターンダクトを使用して回流型風洞として使用した。

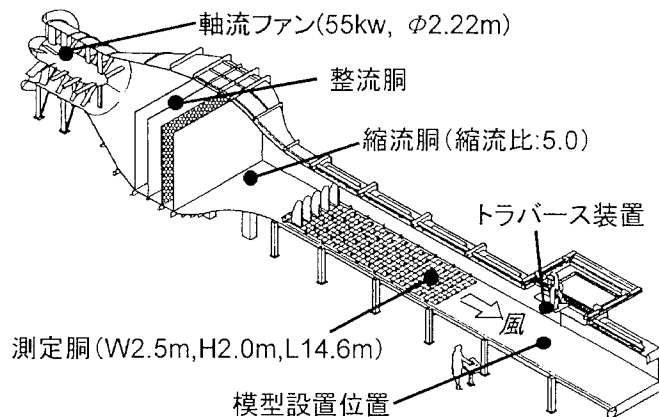


図3.1 気流風洞装置の概観および内部の断面図

表3.1 風洞装置の仕様

形式	垂直密閉回流型, 開放型(ダンパー使用時)
全長	26.5m
測定胴	幅:2.0m, 高さ:1.2m, 長さ:14.6m
縮流比	5.0
風速範囲	0.5 ~ 20m/sec
風速分布	± 2.0%以内
乱れ強さ	0.6%
送風機	軸流送風機
直径	2.22m
最大風量	2,880m ³ /min, 590Pa (60mmAq)
電動機	直流電動機 55kW, 647rpm
付属装置	ターンテーブル(境界層流実験用, 直径 1.6m, 密閉装置付) 外装型トラバース(4軸制御), CW YAG レーザー, ダブルパルス YAG レーザー, トレーサー発生器

3.2.2 吹雪風洞装置

3.3節において、フェンス周囲の吹きだまり形成時の気流性状を測定するために、吹きだまりをモデル化する必要がある。この吹きだまりの推移は、一定の気流条件下における基礎的性状を再現するために吹雪風洞実験により調査し、その再現性を屋外観測結果により確認した。用いた吹雪風洞装置は、北海道工業大学所属の粉体専用大型風洞装置である。この測定装置の概観を図3.2に示す。

本風洞を用いた実験におけるモデル雪には、安息角、限界摩擦速度、粘着性などの諸性状が自然雪（北海道における新雪）に近似した特性を示す含水率8.5%の活性白土を使用する。自然雪と活性白土の物性の比較を表3.2に示す。活性白土は、表面に微細な孔を有した粒径 $10\mu\text{m}$ 程度の粉体で、その安息角は、自然雪が $45^\circ\sim 50^\circ$ 程度に対して、 $48^\circ\sim 53^\circ$ の値を示す。活性白土は、エアーコンプレッサーからの圧縮空気により、測定部上流のノズルから風洞内に噴出され、降雪および吹雪現象を再現する。

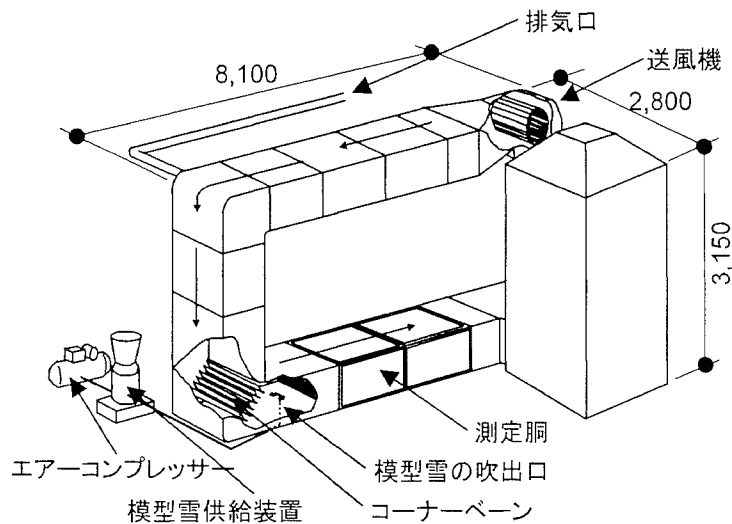


図3.2 粉体専用大型風洞装置の概観図

表3.2 自然雪と活性白土の物性の比較

	粘着性	粘着力 ($\text{g}/\text{cm}\cdot\text{sec}^2$)	かさ密度 (g/cm^3)	真密度 (g/cm^3)	平均粒子径 (mm)	安息角
自然雪 (北海道に おける新雪)	—	1.0	0.03 - 0.15	—	0.1 - 1.5	$45^\circ - 50^\circ$
活性白土	小	—	0.4 - 0.5	2.3 - 2.4	0.002 - 0.02	$48^\circ - 53^\circ$

3. 2. 3 風向風速計

本研究における気流測定においては、風速だけでなく、風向の測定が必要不可欠である。従って、一般的に用いられているI型やX型の熱線風速計あるいはサーミスタ型風速計では、正確な測定ができない。ここでは、トリプルスプリット型ファイバープローブ⁵⁰⁾を使用し、風速と同時に風向を測定する。この風速計の概要を図3.3に示す。この風速計は、直径0.4mmの円筒形のクォーツファイバーに120°毎に平行に並べられた3つのニッケルフィルムセンサーにより、2次元流れの風向風速の時間変動を測定することが可能である。出力電圧の風速特性と風向特性を図3.4に示す。

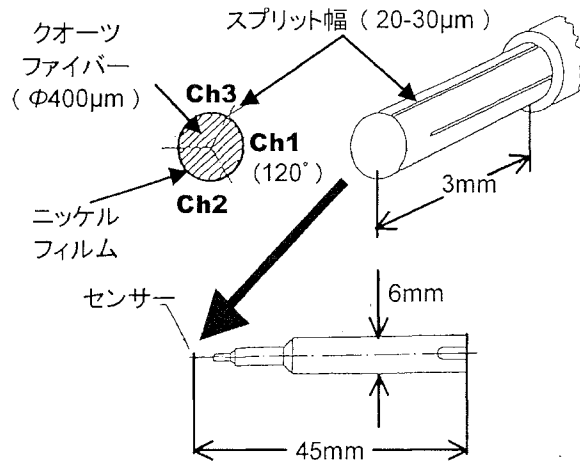


図3.3 トリプルスプリット型プローブの概要³⁷⁾

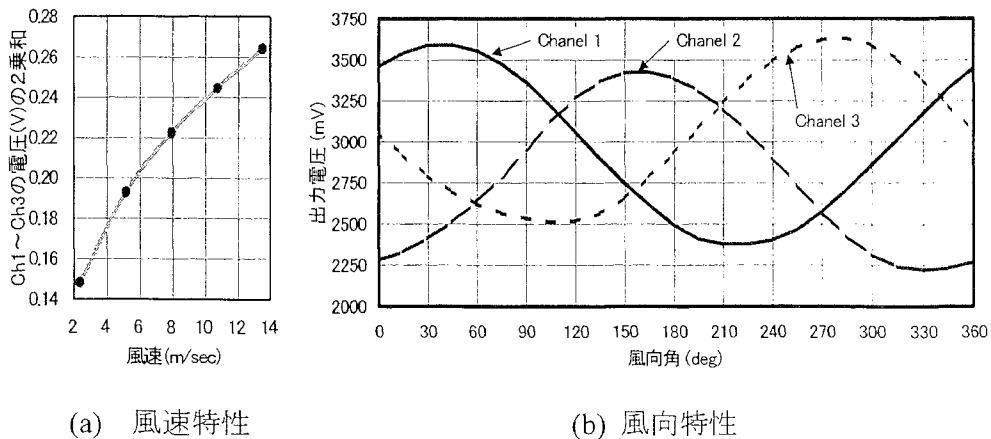


図 3.4 トリプルスプリット型ファイバープローブの出力特性

3.3 二次元吹きだめフェンス周りの積雪量による気流性状の変化

吹きだまりの成長に伴い、雪面上の流れの性状は、次第に変化すると考えられる。本節では、積雪の推移に伴う流れの変化を把握するために、二次元フェンスを対象として、周囲に吹きだまりの成長過程をモデル化した実験を行った。

実験では、まず、模型雪を用いた吹雪風洞実験により積雪分布を調査し、次に、その積雪分布を再現した気流風洞実験により、風向風速の分布を測定した。

3.3.1 吹雪風洞実験による吹きだまり性状の測定方法

吹雪風洞実験には、3.2.2項に示した北海道工業大学所有の粉体専用大型風洞装置を用いた。実験では、測定部の風上に10mm格子のスクリーンを3枚設置し、境界層乱流を作成した。作成した境界層乱流の平均風速および乱れの強さの高さ方向分布を図3.5に示す。風速の測定は、ピトー管と微差圧計を用いて速度圧波形を測定（間隔：1/250秒，データ数：16,384）し、導圧管の伝達特性を用いて圧力変動の伝達歪みを補正した後、風速波形に変換した⁵¹⁾。

吹きだめフェンスの模型は、高さ30mm(H)、下部開口5mm(H/6)である。またフェンス長さは、中央位置において積雪分布の2次元性が確保されると判断できる400mm(約13H)とした。高さ5～30mmの部分のフェンス充実率は100%である。

実験風速は約5m/秒とし、模型雪の堆積時間は、時間経過による吹きだまりの形成過程を把握するため、30～240分の範囲で8通りの測定を行った。積雪分布は、トラバース装置に取り付けたレーザー変位計を用い、模型中央断面位置を流れ方向に10mm(H/3)間隔で測定した。

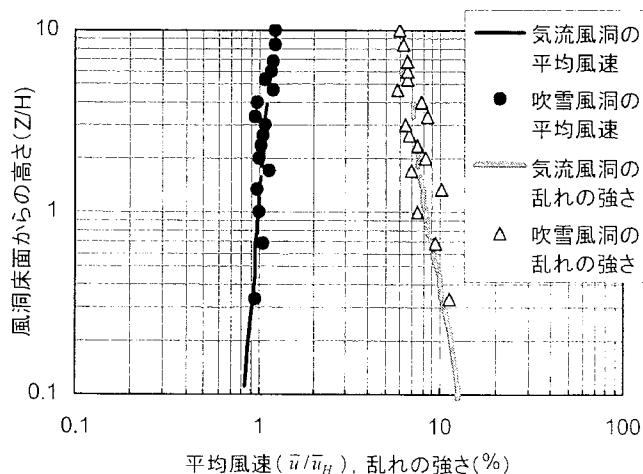


図3.5 実験気流の高さ方向分布

3.3.2 吹雪風洞実験による吹きだまり性状の測定結果

吹雪風洞実験によって得られた堆積時間別の積雪分布を図3.6に示す。ここで、距離 x および積雪深 s は、いずれもフェンス高さ H で無次元化した。また、積雪のピーク位置を \downarrow 印で示す。

各堆積時間の分布において、フェンスの風上側および風下側に、それぞれ積雪のピークが生じている。風上側では、フェンスに近づくにつれて徐々に積雪深が大きくなり、 $x/H=-1.0\sim-0.67$ の位置でそのピークが生じる。本実験の測定間隔では、詳細には捉えられていないが、風上側のピーク位置は、積雪が進むにつれてややフェンス側に近づく傾向を示す。その直後は急激に吹き払いが生じ、フェンス位置 $x/H=0$ で積雪深 s/H はほぼ0となる。フェンスの風下側の積雪のピークは、全ての堆積時間で $x/H=1.67$ に生じる。そのピークから $x/H=5$ 程度の位置まで積雪深 s/H は減少し、それより風下側の $x/H>5$ では、概ね一定の積雪深を示す。

本実験結果の妥当性の確認として、2章において示した同形状のフェンスの実測結果を図3.6に合わせて示す。この結果は、1997年3月5日に観測したものである。

フェンス風上側の吹きだまり形状およびフェンス直下の吹き払い形状を比較すると、両者の対応は良い。実測の場合、フェンス風下側の積雪のピーク位置は $x/H=1.33$ であり、実験結果とは僅かな差が見られるものの、概ね良い対応であると言える。実測と吹雪風洞実験の相違の一因として、実験では一定の風向風速における結果であるのに対して、実測値は12月初旬からの約3ヶ月間の累積した積雪の結果であり、その間の風速や風向が様々に変化した結果であることが考えられる。

この比較結果から、両者の間に僅かな違いが見られるものの、吹きだまり性状を検討する上での本吹雪風洞実験結果の有効性を確認した。

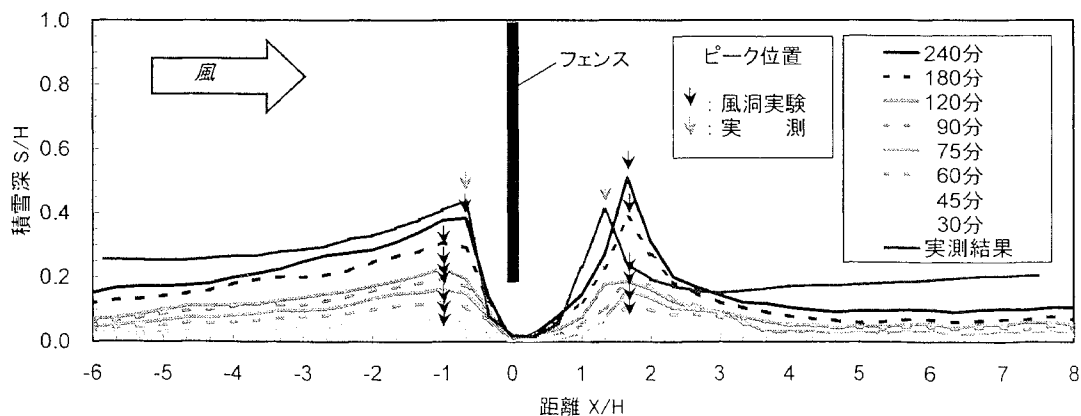


図3.6 吹雪風洞実験による積雪分布と実測結果

3.3.3 吹きだまり形成に伴う気流性状変化の測定方法

気流測定に使用したのは、3.2.1項に示した鹿島技術研究所所有の境界層風洞装置である。本実験の場合、吹雪風洞実験における流入部の気流性状と、気流風洞実験における流入部の気流性状を相似させることは、非常に重要である。気流風洞実験におけるフェンス模型位置の平均風速および乱れの強さの高さ方向分布を図3.5に合わせて示す。図中の高さ z は、フェンス高さ H で無次元化している。吹雪風洞実験においては、 $H=30\text{mm}$ としたのに対して、気流の高さ方向分布を一致させるために、気流風洞実験では、吹雪風洞実験の3倍の大きさである $H=90\text{mm}$ とした。気流風洞実験における境界層流の作成には、スパイヤーおよびソーを用い、気流の高さ方向分布は、I型熱線風速計(KANOMAX 4186)を用いて測定した。

模型の設置状況および座標系を写真3.1に示す。模型は、フェンス模型（高さ $90\text{mm}(H)$ 、下部間隙 $15\text{mm}(H/6)$ ）に加えて、3.3.2項の吹雪風洞実験で得られた積雪分布を、堆積時間毎に再現した。この時、フェンス風下側のほぼ一定の積雪深と見なせる範囲を風洞床面とし、フェンス風上側は、 $x/H=-8.3$ 位置まで積雪分布を再現し、その風上側は、気流に影響を及ぼさない程度の緩やかな勾配を設けた。本実験では、フェンスおよび積雪形状模型の幅を 500mm とし、その両端には、気流の二次元性を確保するための端板（高さ $1.2\text{m}\times$ 長さ $3.25\text{m}\times$ 厚さ 10mm ）を設置した。写真3.1においては、手前側の端板は、透明アクリル製である。

本測定のように、乱れの大きい流れや、逆流などを詳細に測定しようとする場合、従来の気流測定で用いるI型やX型熱線風速計では、風向角が測定できないか、あるいは、測定できる風向角が限定され、正確な測定が困難である。しかし、本研究においては、乱流、逆流中における風向風速分布などの正確な測定が必要不可欠であることから、3.2.3項に示したトリプルスプリットファイバー風速計を使用した。

実験風速は、風洞および風速計の性能を考慮して、フェンス風上 $480\text{mm}(x/H=-5.3)$ 、高さ $90\text{mm}(H)$ において、約 10m/秒 とした。データの測定間隔は $1/500$ 秒、データ数は $15,000$ である。水平方向の測定点間隔は、フェンス近傍($-1.33\leq x/H\leq 2.0$, $0\leq z/H\leq 1.67$)では $10\text{mm}(H/9)$ 間隔とし、その他の領域では、 $60\text{mm}(H\times 2/3)$ 間隔とした。高さ方向の測定点の最下点は雪面上 $10\text{mm}(H/9)$ 高さであり、地上付近($z/H\leq 1.67$)では $10\text{mm}(H/9)$ 間隔、その上部($1.67\leq z/H\leq 3.0$)では $30\text{mm}(H/3)$ 間隔とした。測定点数は、 765 点である。

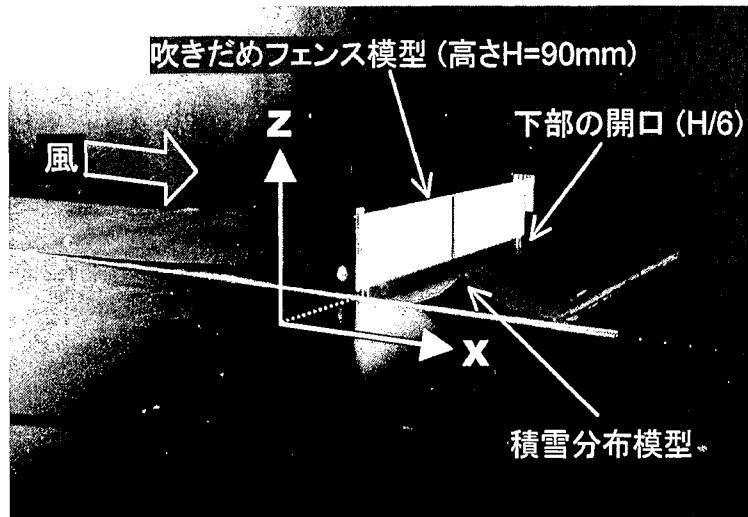


写真3.1 気流実験における模型の設置状況

3.3.4 吹きだまり形成に伴う気流性状変化の測定結果

基本的なフェンス周りの気流性状として、下部間隙を持たない吹き止めフェンス周辺の平均風速ベクトル分布および平均流線を図3.7に示し、吹きだめフェンス周辺の平均風速ベクトル分布および平均流線を図3.7に示す。図3.8は、堆積時間0分時を図3.8(a)に、堆積時間120分時を図3.8(b)に、堆積時間240分時を図3.8(c)に示す。ここで平均風速ベクトルとは、水平方向の平均風速 \bar{u} と鉛直方向の平均風速 \bar{w} のベクトル合成値であり、平均流線は、各測定点における水平方向の平均風速 \bar{u} を基に、式(1)により流れ関数 ψ を算出し、その等値線を示したものである。

$$\psi = \int_0^z \bar{u} dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで z は、風洞床面からの高さを表す(写真3.1)。また図中には、概略の流れを太線矢印で示す。

吹き止めフェンスの場合(図3.7)、フェンス風上側下部に渦が確認でき、地上付近では $x/H=-1\sim 0$ の範囲でこの渦による逆流が確認できる。フェンス上端からの剥離流れは、測定範囲である $x/H=8$ 以遠まで伸びており、再付着位置は確認できない。フェンス風下側の地上付近では、 $x/H>1$ の範囲で、逆流が観察される。なお本結果は、同様のフェンスを対象とした勝田、村上⁵²⁾や、W. D. Baines⁵³⁾らの調査結果と良く対応しており、本実験の妥当性が確認できる。

これに対し吹きだめフェンスにおける模型雪の堆積時間0分(積雪なし)の場合(図3.8(a))、

下部開口から風が風下に流れ込むため、フェンス前面の渦と逆流域は観察されない。フェンス風下側には、S字の流れと更にその後方に大きな渦領域が見られ、その渦内の風速は比較的低い。フェンス上部から剥離した流れは、 $x/H=8$ より後方で再付着しており、その影響で $x/H=3\sim 7$ 程度の地上付近では逆流がみられる。この逆流とフェンス下部からの流れが $x/H=3$ 付近の地上付近で合流する。

堆積時間120分における気流分布（図3.8(b)）をみると、積雪なしの場合と比較して、大きな変化は見られないが、フェンス下部間隙からの流れと、その風下側の逆流との合流点は、積雪がない場合と比較して風上側に若干移動し、 $x/H=2.67$ 程度となっている。この流れの合流点と、積雪のピーク位置（ $x/H=1.67$ ）は、一致せず、風は積雪のピークを乗り越える流れとなっている。なお、流れの合流位置は、実験風速（ $U_0=5\sim 12\text{m/秒}$ ）に依存しないことを、可視化実験により確認した。

堆積時間240分における気流分布（図3.8(c)）では、積雪がない場合および堆積時間120分の場合と比較して、流れの性状に変化がみられる。フェンス風上側では、吹きだまりのピークからの剥離により吹きだまりのピークの風下側に渦が発生している。この渦により、 $x/H=-0.67\sim 0$ の範囲では吹きだまりのピークに向かう流れが形成され、吹きだまりを成長させる方向であることがわかる。また、フェンス下部間隙からの流れとその風下側の逆流は、吹きだまりによって、流れが拘束され、その合流点は、吹きだまりのピーク位置である $x/H=1.67$ と一致している。この流れにより、吹きだまりは、更に成長するものと考えられる。

堆積時間240分における流れについて、水平方向および鉛直方向の平均風速、変動風速の分布を図3.9に示す。図3.9(a), (b)に示す平均風速は、それぞれの風速成分の平均値 \bar{u} , \bar{w} を、フェンス風上側の基準点（ $x/H=-5.33$, $z/H=1.0$ ）における水平方向の平均風速 U_0 で無次元化した値であり、図3.9(c), (d)に示す変動風速とは、それぞれの風速成分の標準偏差 u' , w' を、基準点における水平方向の平均風速 U_0 で無次元化した値である。

水平方向の平均風速分布（図3.9(a)）をみると、フェンス風上側の $x/H<-0.67$ の範囲では、フェンスに近づくにつれて平均風速は徐々に弱まる。この平均風速の弱まりにつれて、積雪深が徐々に大きくなる。フェンス風下側では、フェンス下部間隙からの流れと上部からの剥離の流れは、局所的に速い値を示し、フェンス風下の吹きだまりのピーク位置より風下側の逆流領域では、その風速値は小さい値を示す。

鉛直方向の平均風速分布（図3.9(b)）では、フェンス下部間隙の風上側の部分、フェンス上部からの剥離領域およびフェンス下部開口からの流れが風下の吹きだまりに沿って流

れる領域においてのみ、比較的大きな値が観察されるが、その他の領域においては、鉛直方向の流れは小さく、水平方向の流れが支配的であることがわかる。

水平方向および鉛直方向方向の変動風速分布（図3.9(c), (d)）をみると、フェンス風上の吹きだまりピーク位置より風上側の領域には、変動風速が大きな領域はみられない。変動風速が最も大きい領域は、フェンス上部からの剥離領域である。積雪面上においては、吹き払いが顕著にみられるフェンス下部開口近傍で大きい値を示す。フェンス風下側では、広範囲に渡って変動風速が大きい。雪面に働く風の力は、風速の垂直勾配に比例するが、風速の垂直勾配の大きい領域では、乱れが生成される。つまり、変動風速が吹きだまりに与える影響は小さくない。

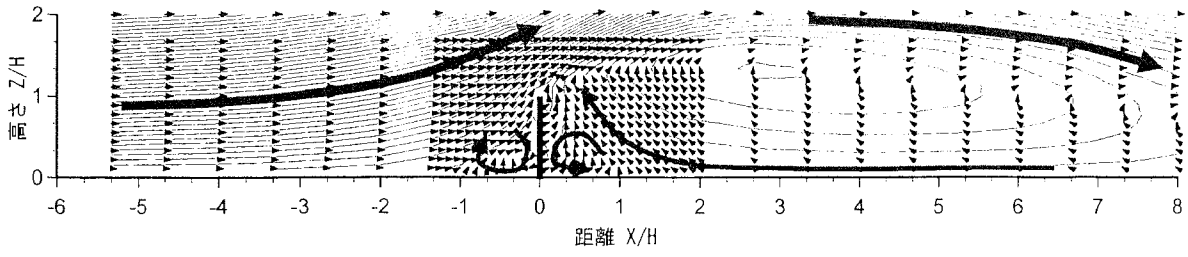
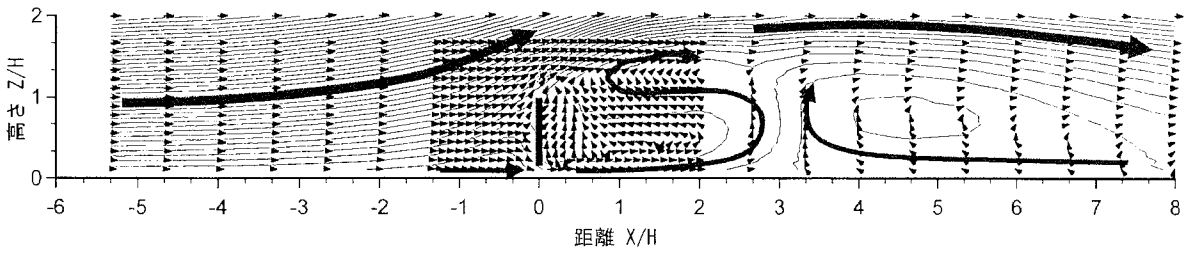
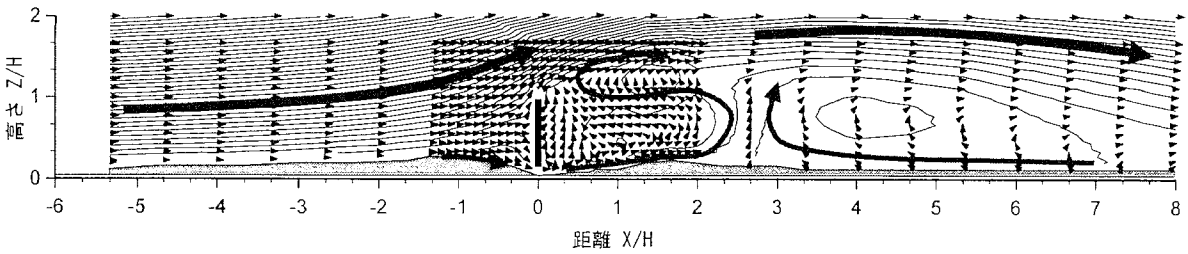


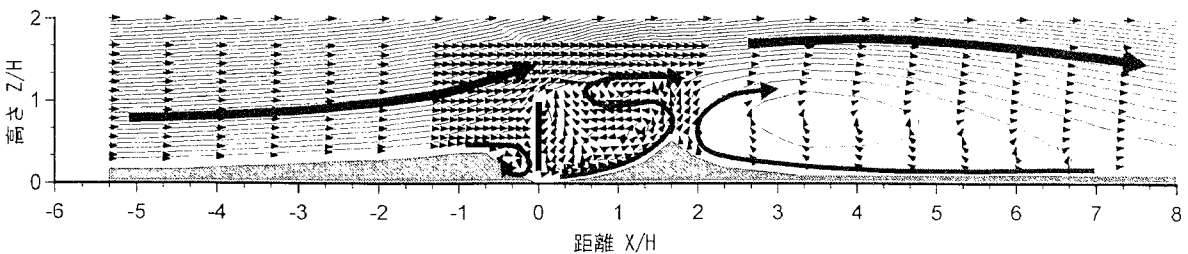
図3.7 吹き止めフェンス周辺の平均風速ベクトル分布および平均流線



(a) 積雪なし

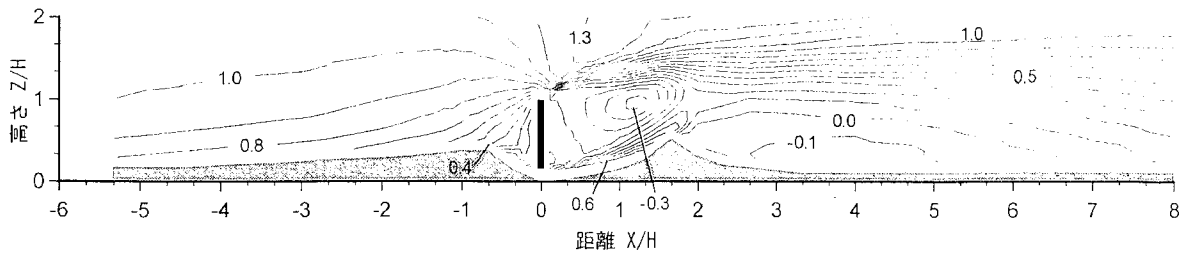


(b) 堆積時間120分

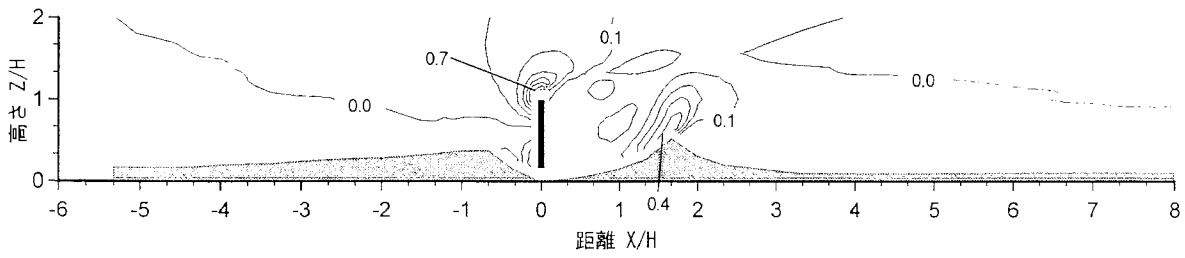


(c) 堆積時間240分

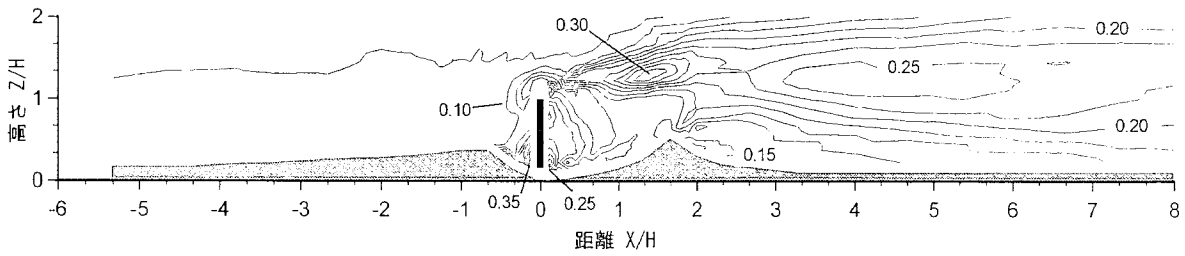
図3.8 吹きだめフェンス周辺における模型雪の堆積時間別
平均風速ベクトル分布および平均流線



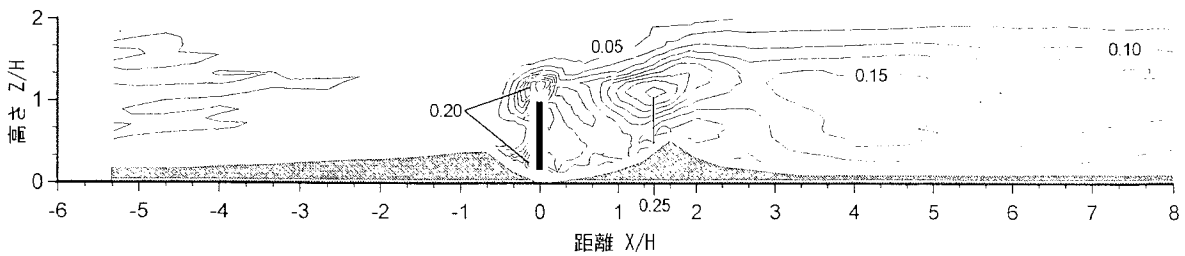
(a) 水平方向の平均風速 \bar{u}/U_0 の分布



(b) 鉛直方向の平均風速 \bar{w}/U_0 の分布



(c) 水平方向の変動風速 u'/U_0 の分布



(d) 鉛直方向の変動風速 w'/U_0 の分布

図3.9 堆積時間240分時の気流性状

3.4 階段状屋根建物モデル周りの風向別の気流性状

本節では、2章で示した屋外観測を行った2段屋根建物モデル周りの流れ性状を把握するために気流風洞実験の方法および結果について示す。

3.4.1 風洞実験による気流性状の測定方法

実験に使用した風洞装置は、3.2.1項に示した可視化風洞である。模型は、野外試験体の1/20の縮尺とし、下段屋根が風上側の場合と、風下側の場合について、風向角が 0° 、 10° 、 20° の計6通りについて測定した。模型の概要と風向および風速成分の定義を図3.10に、風洞内への模型の設置状況を写真3.2に示す。

風速の測定は、3.2.3項に示した二次元の風速と風向を測定できるトリプルスプリット型ファイバースプロブ (DANTEC 55R92)⁵⁰⁾をトラバース装置に取り付け、模型の中央断面位置 ($x/H=-4\sim 5$, $y/H=0$, $z/H=0\sim 4$)の1263点において、 $u-w$ 成分 (図3.10)の風向、風速を測定し、また、模型周囲の地表面および屋根面において、 $u-v$ 成分 (図3.10)の風向、風速を測定した。本研究では、屋根面および地表面に近接した位置における気流性状の把握が重要であると考えられるが、屋根面および地表面と測定センサーとの最小距離は、センサーサポートの半径が3mmであることから、2mmの余裕を考慮して5mm ($H/9$)とした。水平方向の測定間隔は、屋根面上においては、5mmとし、地表面においては、模型風上側と側面の模型近く (模型壁面から90mm($2H$))においては、10mm間隔、その他の領域においては、20mm間隔とした。ADサンプリングは、1測定点当たり500Hz、30秒間行った。

模型が無い状態における模型位置での平均風速と乱れ強さの高さ方向分布を図3.11に示す。境界層流の作成には、ソー (高さ0.2m)とスパイヤー (高さ1.0m、幅0.09m、5本)を用いた。下段屋根高さ H (45mm)における平均風速 U_0 は約7.4m/sec、乱れの強さは、 u 成分 (水平主流方向)が7.5%、 w 成分 (鉛直方向)が4.0%である。平均風速の高さ方向の分布は、 $\alpha=0.1$ のべき指数分布に近似できる。

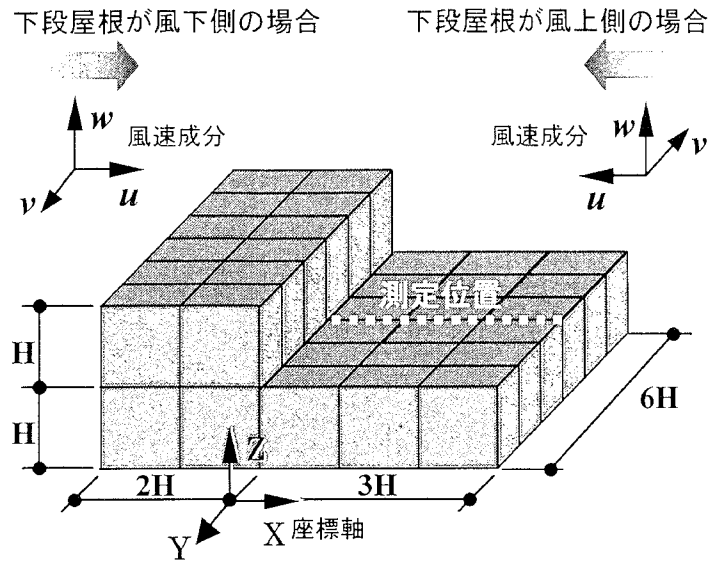


図3.10 模型に対する風向と風速成分の定義

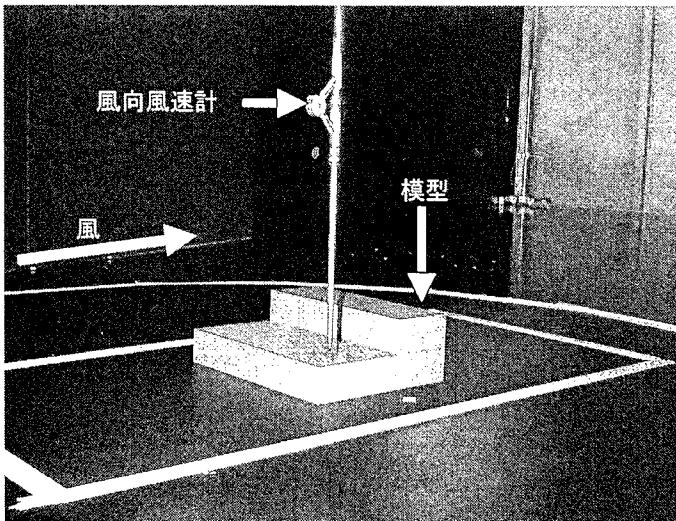


写真3.2 風洞内に設置した模型および風速計

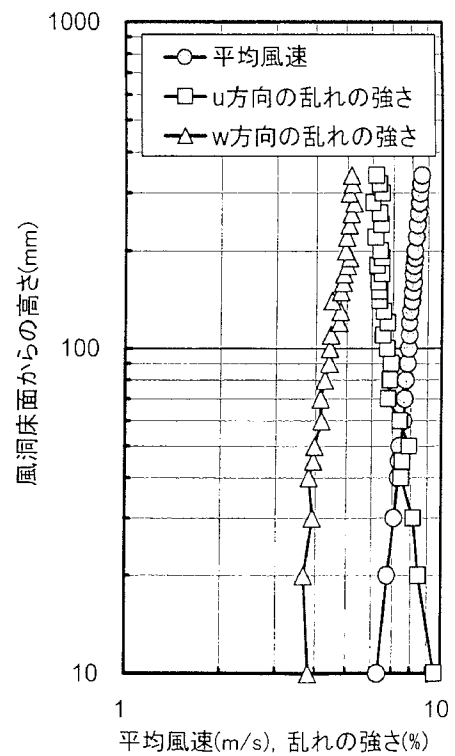


図3.11 気流の高さ方向分布

3. 4. 2 風洞実験による気流性状の測定結果

下段屋根が風上側で、風向が建物に正対する場合 (0°) の地表面および屋根面近傍の気流性状を図3.12に示し、風向が建物に対して 10° 傾いた場合を図3.13に、風向が建物に対して 20° 傾いた場合を図3.14に示す。また、下段屋根が風下側で、風向が建物に正対する場合 (0°) の地表面および屋根面近傍の気流性状を図3.15に示し、風向が建物に対して 10° 傾いた場合を図3.16に、風向が建物に対して 20° 傾いた場合を図3.17に示す。このうち、下段屋根上中心断面位置における下段が風上側の場合の気流性状を図3.18に、風下側の場合を図3.19に示す。

(a) に示す平均風速ベクトル (細線矢印) は、水平主流方向の平均風速 \bar{u} と鉛直方向の平均風速 \bar{w} を用いて算定した。また、概略の流れの様子を太線矢印で示す。(b), (c) に示す水平方向の平均風速および変動風速 (風速の標準偏差) の分布は、下段屋根高さ H における平均風速 U_0 で無次元化した値 (\bar{u}/U_0 , u'/U_0) で示す。

下段屋根が風上側の場合 (図3.12), 下段屋根の端部から強い剥離流れが生じ、下段屋根上に渦を形成している。この渦により、屋根面近傍においては、全面に渡って主流方向とは逆の流れを示す。この逆流の最大値は、 $x/H=0.5$ の位置において、 $\bar{u}/U_0=-0.4$ である。また、下段屋根面上では、 $u'/U_0=0.3$ 程度の比較的大きな値を示しており、剥離域内の風速変動が大きいことがわかる。

下段屋根が風下側の場合 (図3.13), 下段屋根上やその風下側の領域は、上段屋根の風上側端部からの強い剥離流れによる逆流域に覆われている。下段屋根の端部では、逆流による弱い剥離が確認でき、下段屋根面上は、全面に渡り主流方向とは逆の流れであり、屋根面近傍における逆流の最大値は、 $x/H=1$ 程度において、 $\bar{u}/U_0=-0.3$ 程度を示すが、 $u'/U_0=0.1$ 程度であり、下段屋根が風上側の場合と比較して、風速の乱れが小さいことがわかる。

3. 風洞実験による気流性状の測定

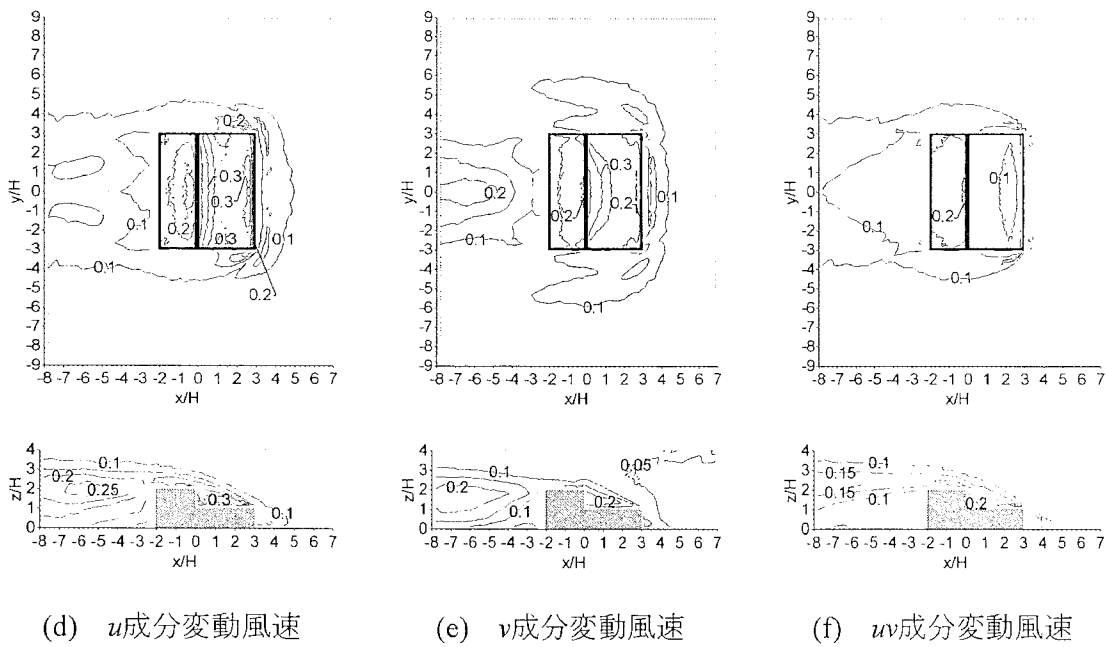
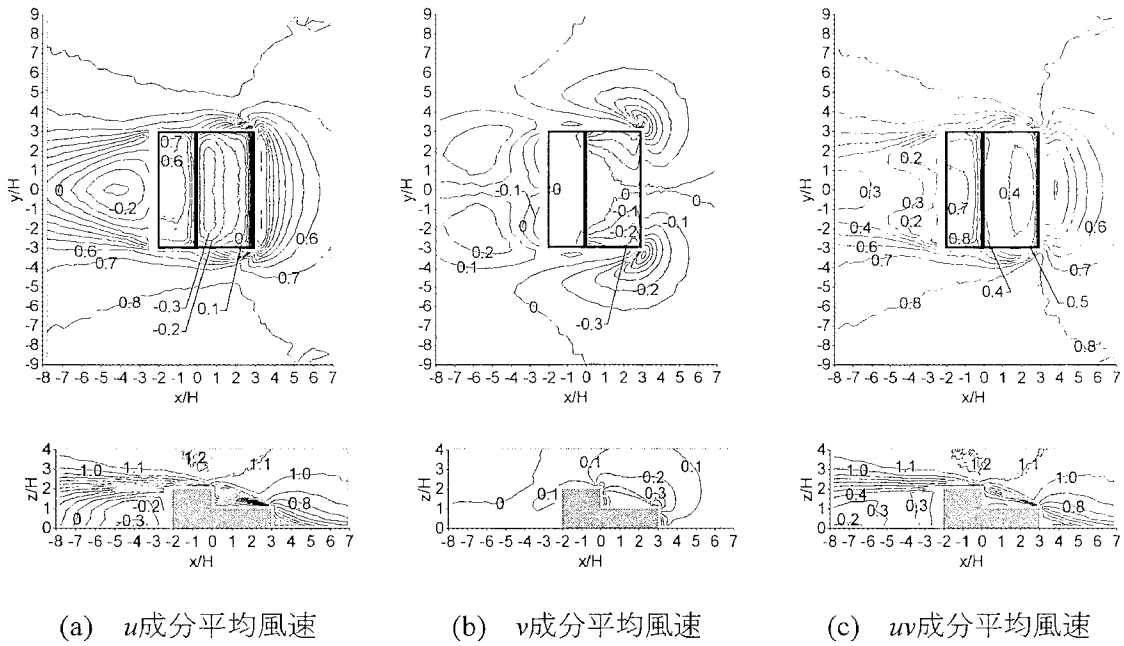


図3.12 下段屋根が風上側の場合，風向角： 0°

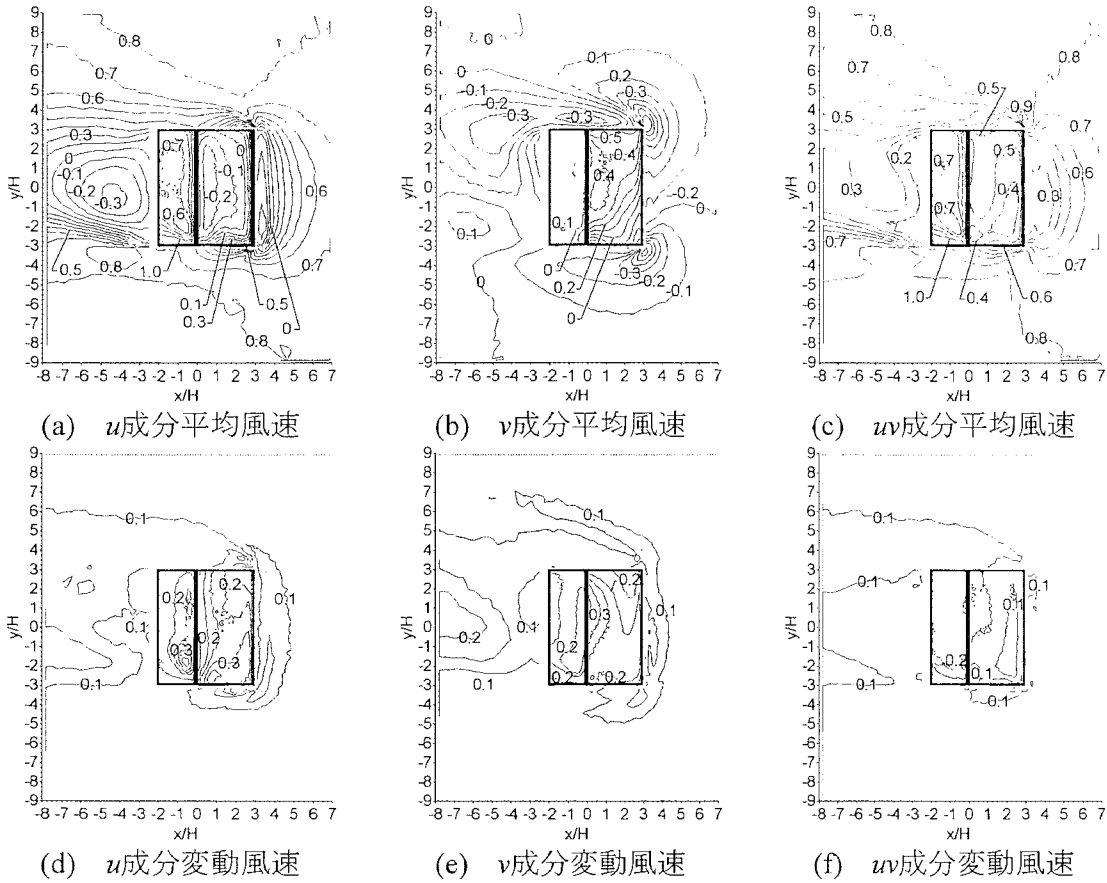


図3.13 下段屋根が風上側の場合、風向角： 10°

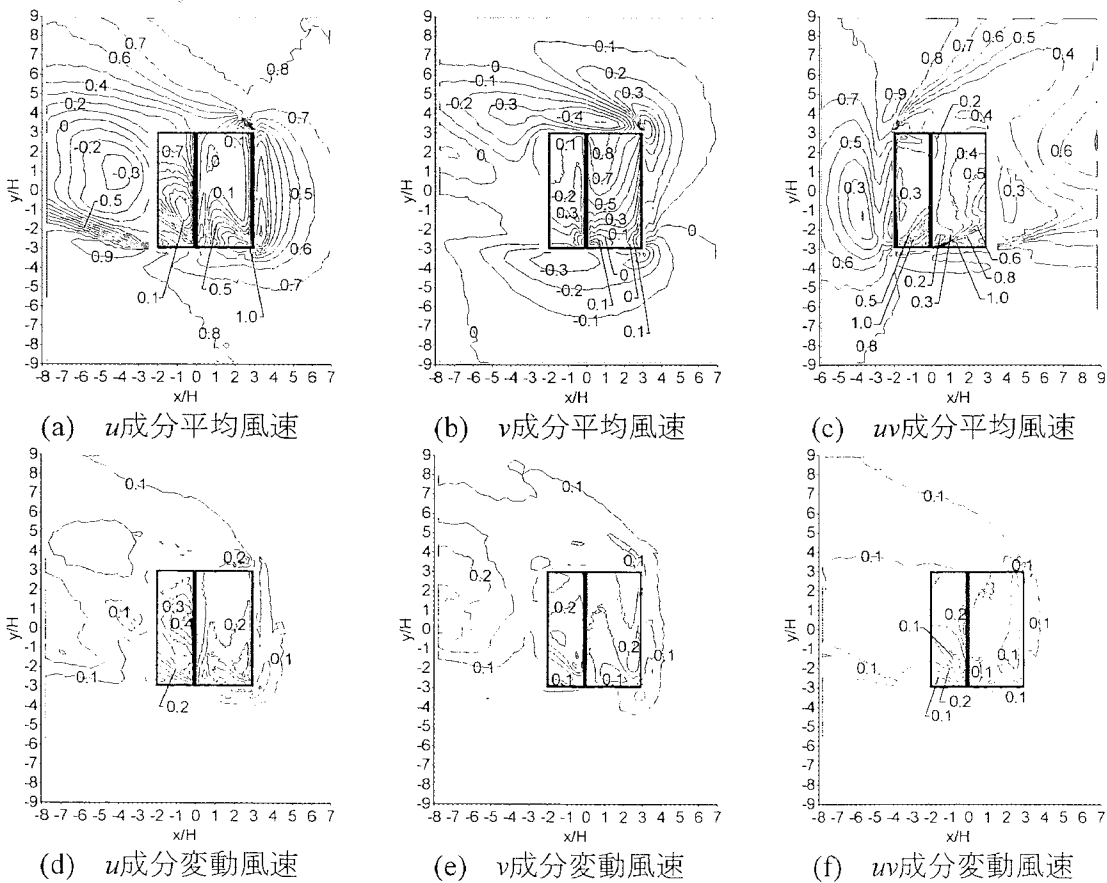


図 3.14 下段屋根が風上側の場合、風向角： 20°

3. 風洞実験による気流性状の測定

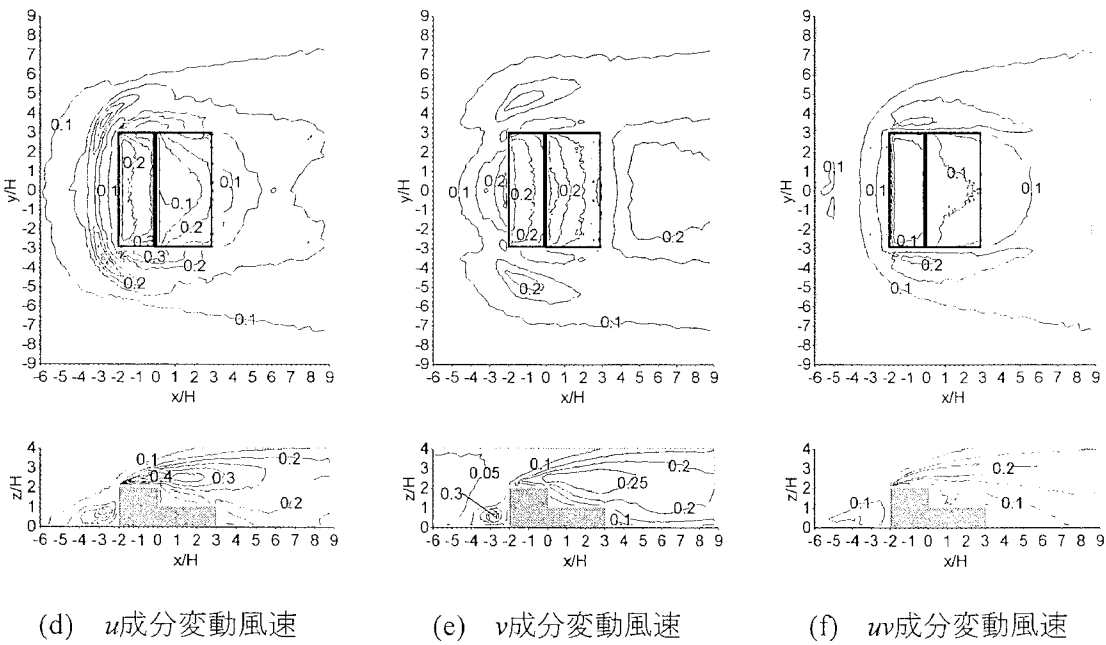
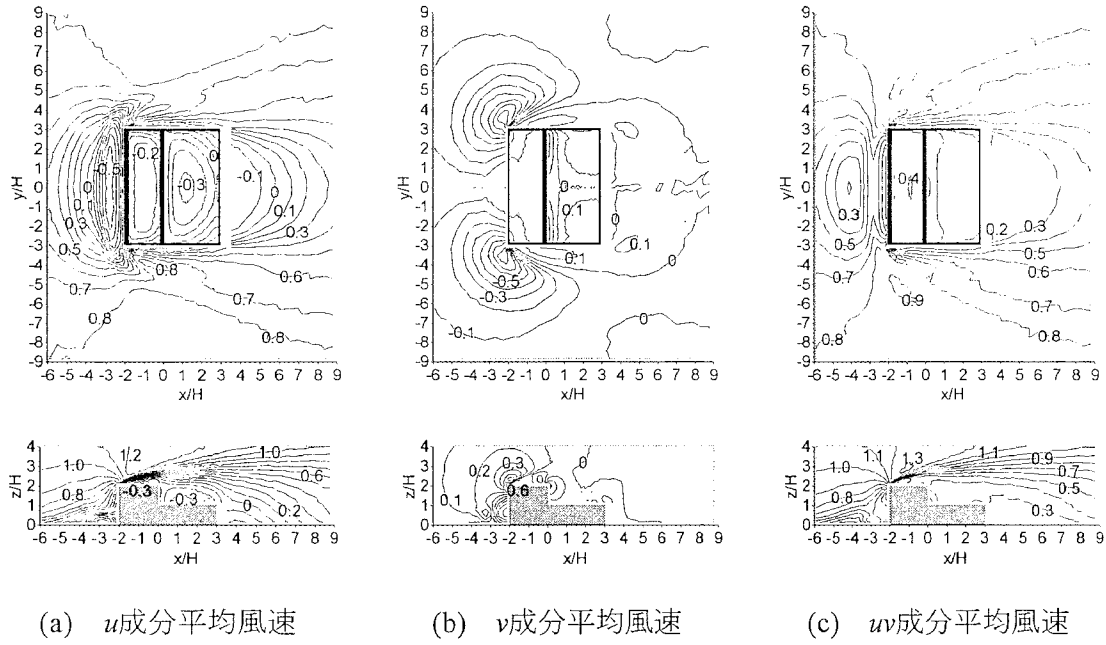


図3.15 下段屋根が風下側の場合，風向角： 0°

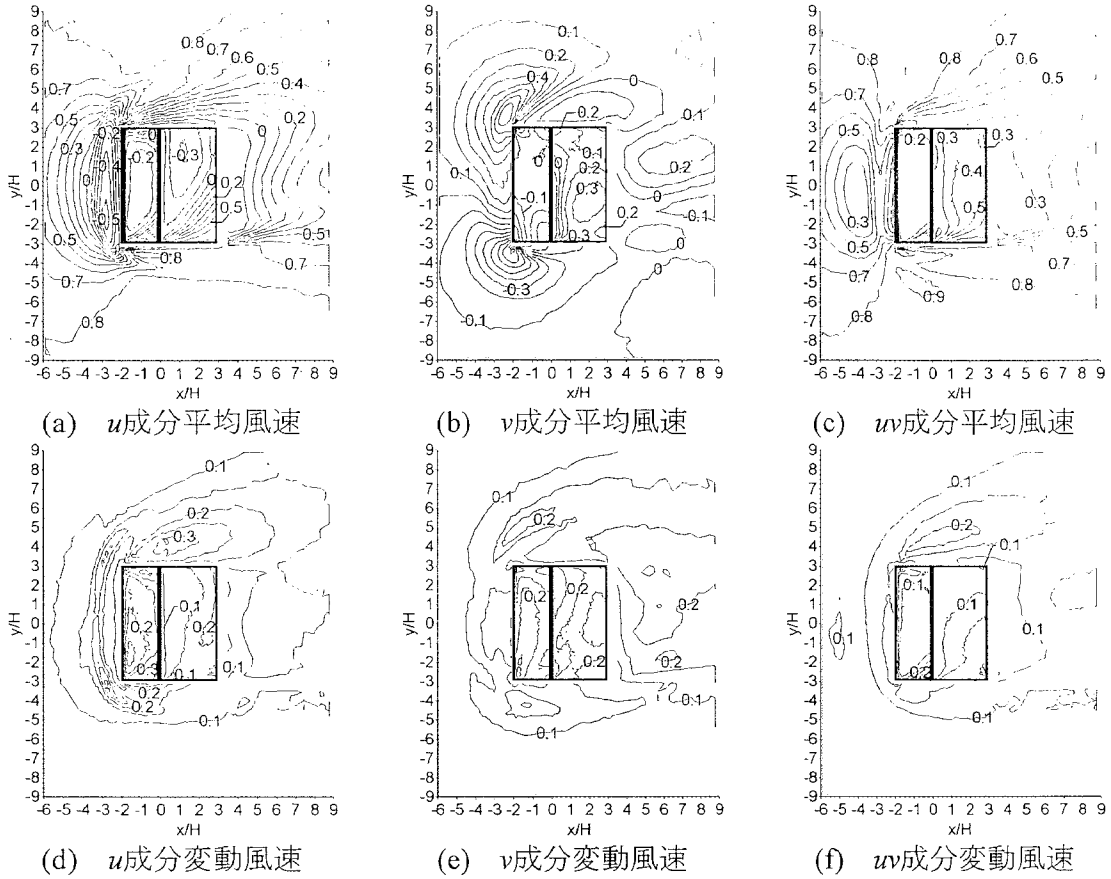


図3.16 下段屋根が風下側の場合，風向角： 10°

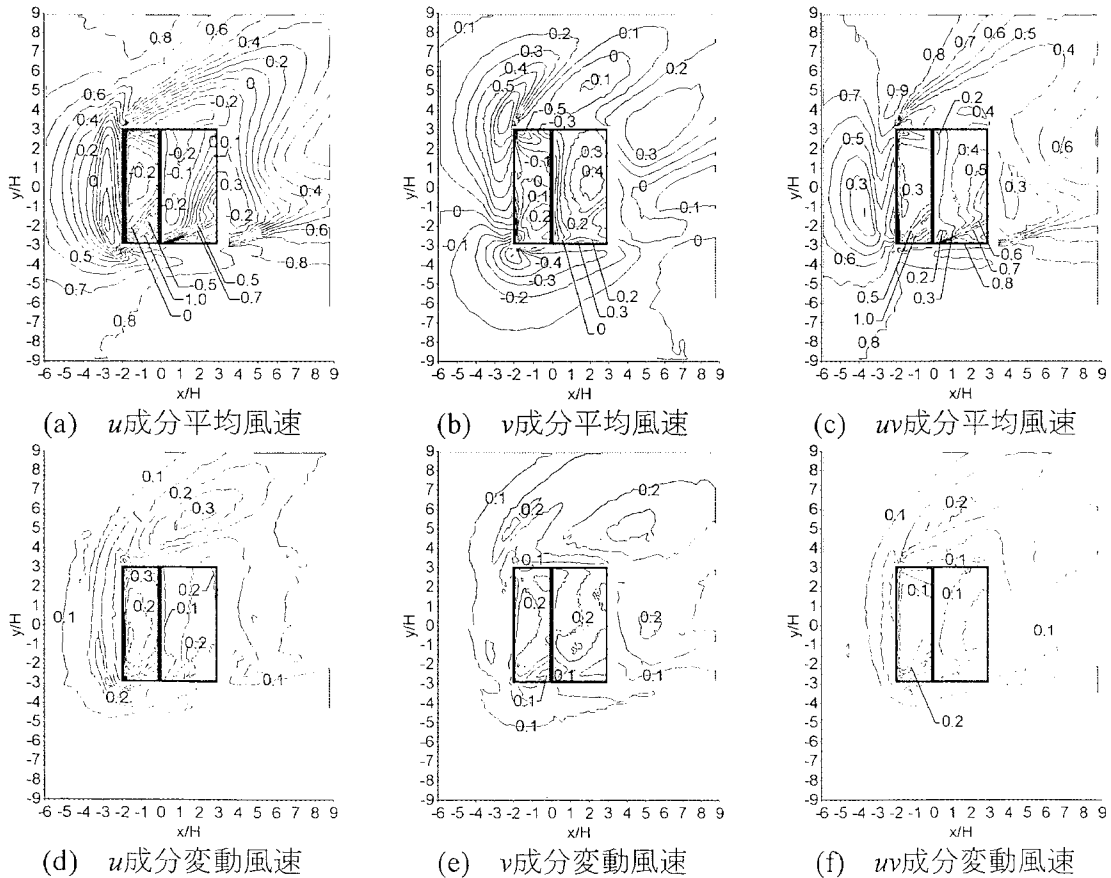
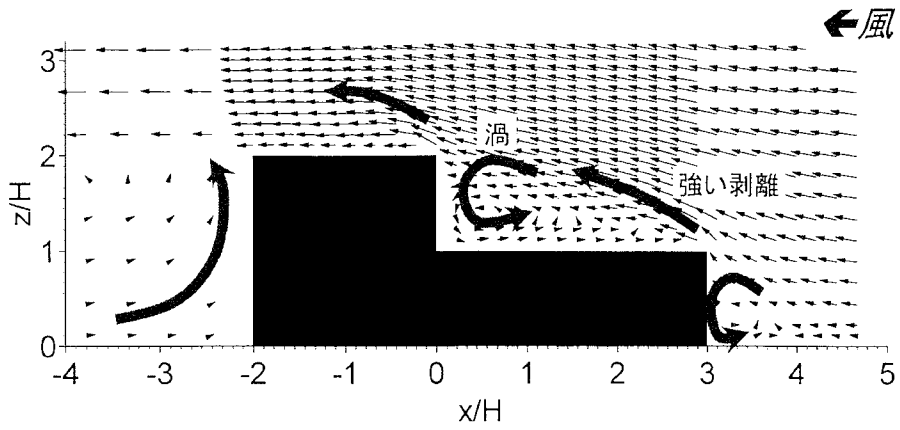
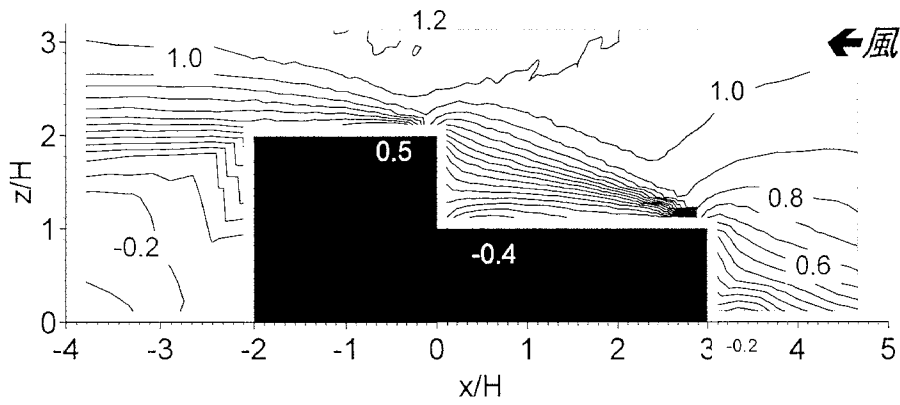


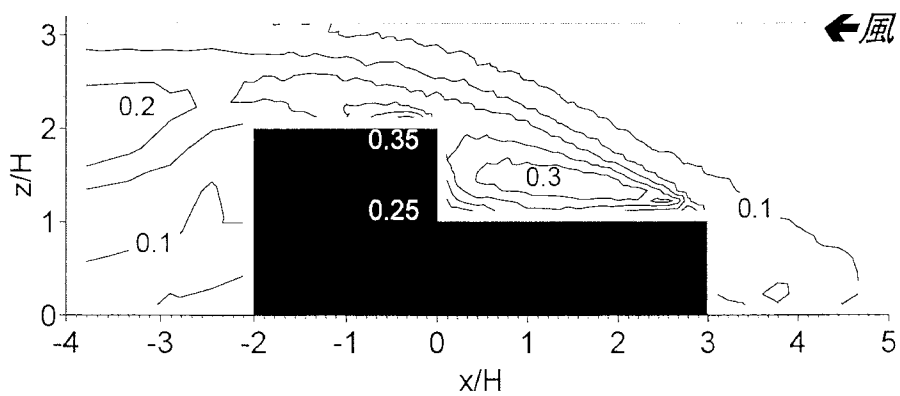
図3.17 下段屋根が風下側の場合，風向角： 20°



(a) 平均風速ベクトルの分布

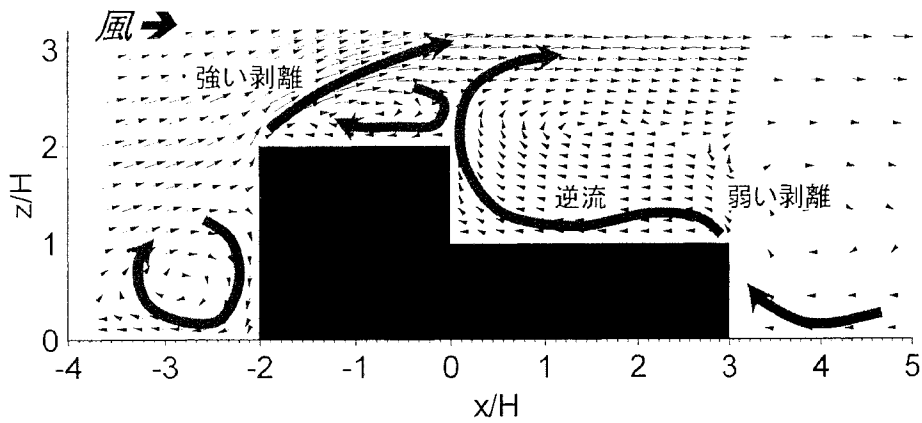


(b) 水平方向の平均風速 \bar{u}/U_0 の分布

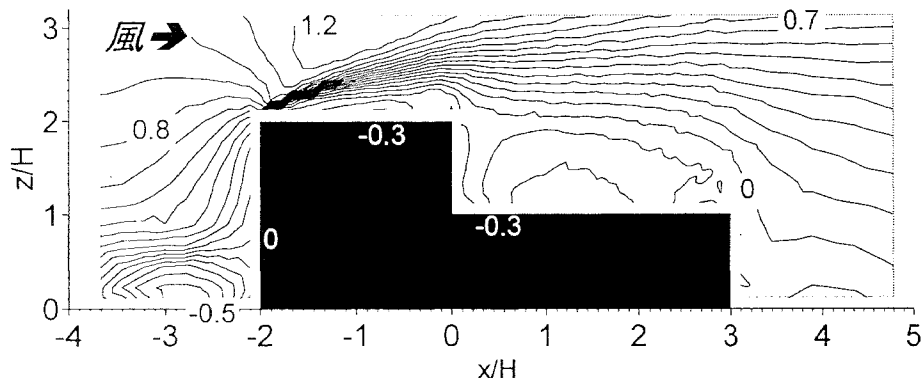


(c) 水平方向の変動風速 u'/U_0 の分布

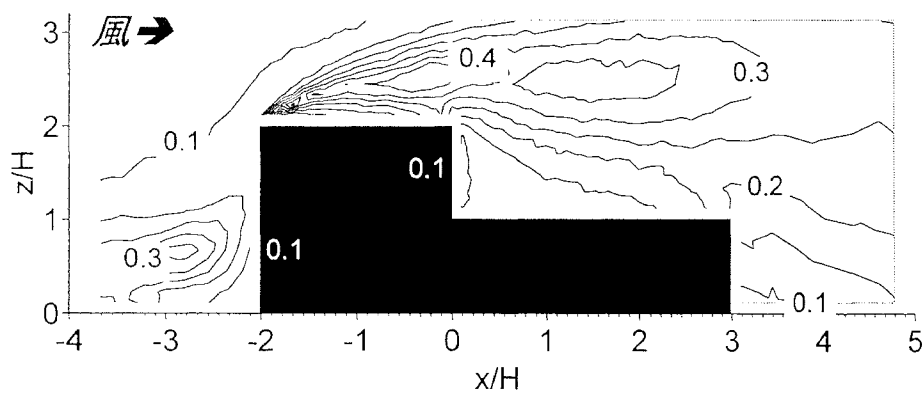
図3.18 下段屋根が風上側の場合における流れの性状



(a) 平均風速ベクトルの分布



(b) 水平方向の平均風速 \bar{u}/U_0 の分布



(c) 水平方向の変動風速 u'/U_0 の分布

図 3.19 下段屋根が風下側の場合における流れの性状

3.5 まとめ

二次元の吹き止めフェンス及び下部に開口を持つ吹きだめフェンス、階段状屋根建物を対象として、その周囲の気流性状および吹きだまりの形成に伴う気流の変化を調査し、以下のことを明らかにした。

吹き止めフェンスの場合は、フェンス風上側下部に渦が確認でき、地上付近では $x/H=-1\sim 0$ の範囲でこの渦による逆流が発生する。フェンス風下側の地上付近では、 $x/H>1$ の範囲で逆流を観察した。

吹きだめフェンスの場合は、下部開口から風が風下に流れ込むため、フェンス前面の渦と逆流域は観察されない。フェンス風下側には、S字の流れと更にその後方に大きな渦領域が見られ、その渦内の風速は比較的低い。フェンス上部から剥離した流れは、 $x/H=8$ より後方で再付着し、その影響で $x/H=3\sim 7$ 程度の地上付近では逆流がみられる。この逆流とフェンス下部からの流れが $x/H=3$ 付近の地上付近で合流する。積雪が進むと、積雪がない場合と比較して、流れの性状に変化がみられる。フェンス風上側では、吹きだまりのピークからの剥離により吹きだまりのピークの風下側に渦が発生する、この渦により、 $x/H=-0.67\sim 0$ の範囲では吹きだまりのピークに向かう流れが形成される。これは、吹きだまりを成長させる方向であることがわかる。また、フェンス下部間隙からの流れとその風下側の逆流は、吹きだまりによって、流れが拘束され、その合流点は、吹きだまりのピーク位置である $x/H=1.67$ と一致している。この流れにより、吹きだまりは、更に成長するものと考えられる。

階段状屋根建物を対象とした実験では、下段屋根が風上側の場合、下段屋根の端部から強い剥離流れが生じ、下段屋根上に渦を形成する。この渦により、屋根面近傍においては、全面に渡って主流方向とは逆の流れを示す。この逆流の最大値は、 $x/H=0.5$ の位置において、 $\bar{u}/U_0=-0.4$ であった。また、下段屋根面上では、 $u'/U_0=0.3$ 程度の比較的大きな値を示しており、剥離域内の風速変動は大きい。下段屋根が風下側の場合では、下段屋根上やその風下側の領域は、上段屋根の風上側端部からの強い剥離流れによる逆流域に覆われている。下段屋根の端部では、逆流による弱い剥離が確認でき、下段屋根面上は、全面に渡り主流方向とは逆の流れであり、屋根面近傍における逆流の最大値は、 $x/H=1$ 程度において、 $\bar{u}/U_0=-0.3$ 程度を示すが、 $u'/U_0=0.1$ 程度であり、下段屋根が風上側の場合と比較して、風速の乱れが小さいことを明らかにした。

4章

積雪分布の形成に影響を及ぼす気流性状の検討

4.1	はじめに	1
4.2	雪面近傍の風速と積雪分布との関係	2
4.2.1	雪面近傍における平均風速について	2
4.2.2	二次元フェンスを対象とした検討	2
4.2.3	階段状建物の屋根上を対象とした検討	6
4.3	雪面近傍の風の加速度と積雪分布との関係	9
4.3.1	雪面近傍における風の平均加速度について	9
4.2.2	二次元フェンスを対象とした検討	11
4.2.3	階段状建物の屋根上を対象とした検討	14
4.4	まとめ	16

4.1 はじめに

吹きだまりの位置や形状は、風向、風速、雪質、気温、建物形状、周囲の状況などの様々な要因により左右される。これら多くの要因の中で、雪面近傍の気流性状が密接に関係することは、既往の研究^{14)~18)}において明らかであり、両者の関連性について検討を行った研究が報告されている。既往の研究^{19), 20)}では、障害物の風上側では、風速の減少に伴って、跳躍粒子を発生させ運動を継続させる地表面に働くせん断応力が減少することで、吹きだまりが形成され、障害物の風下側の吹きだまりは、浮遊粒子の落下によって形成されることが示されている。このことから、4.2節では、2章で示した吹きだまり性状と3章で示した気流性状を用いて、雪面付近のせん断応力に概ね対応する平均風速の大きさと積雪分布との関係について、その対応を確認した結果を示す。

一方、既往の研究¹⁹⁾においても、障害物の風下側については、せん断応力と吹きだまりに対応関係が認められない場合があることがわかっている。しかしながら、障害物の風上側や風下側を問わず、風の力によって吹きだまりが形成されることは事実であり、本研究では、風の性状の観点からの見た場合に、その形成に影響を及ぼす物理的な主要因は、その形成される場所を問わず同一ではないかと推測し、4.2節で示した平均風速(せん断応力)以外の種々の気流性状について検討を行った。その結果、雪面近傍における風の加速度と積雪分布に関連性があることを見いだした。4.3節では、その検討結果について示す。

4.2 雪面近傍の風速と積雪分布との関係

4.2.1 雪面近傍における平均風速について

雪面上の風と積雪の関係を考えた場合、表面の雪粒子に加わる風の力が、雪粒子に働く重力と雪粒子間の結合力を上回る時、雪面から雪粒子が飛び出す。雪面に働く風の力（せん断応力）は、雪面付近の風速の垂直勾配（ du/dz ）に比例する。上田ら²⁰⁾は、この点に注目して雪面上のせん断応力を測定し、摩擦速度と吹きだまりとの関係を検討している。しかし、風洞実験においてせん断応力を測定することは困難である。ここで、地表面や屋根面位置の風速を0とすれば、屋根面に近接した位置における風速が大きいほど、垂直勾配（ du/dz ）が大きくなる。従って、地表面や屋根面に近接した位置においては、せん断応力と平均風速は概ね対応することから、ここでは、せん断応力に代わって、平均風速の分布を用いて検討を行う。

4.2.2 二次元フェンスを対象とした検討

3.3節に示した吹きだめフェンス周囲の雪面近傍（模型雪面より $z/H=0.11$ 上方）における水平方向の平均風速の分布を図4.1に示す。ここでは、風速の水平成分の平均値 \bar{u} をフェンス風上側の基準点（ $x/H=-5.33$ ， $z/H=1.0$ ）における平均風速 U_0 で無次元化し、その絶対値 $|\bar{u}/U_0|$ で示す。また、図中には、2.3節に示した屋外観測で得られた積雪分布 $(s-S_d)/S_d$ を合わせて示す。また、積雪分布との比較を容易にするため、平均風速の絶対値 $|\bar{u}/U_0|$ の軸は上下を反転した。

ここで、フェンス下部開口付近の流れと風速測定位置の模式図を図4.2に示す。風洞実験における風速測定位置の最低高さは、センサーサポートの大きさを考慮し10mmであるのに対して、フェンス模型の下部間隙の高さは15mmである。この部分では、局所的な流れが発生していると推察されるが、風速測定高さが、フェンス開口高さの中心より上方であるため、必要とする雪面付近の気流性状とは、異なる性状の流れが測定されていると考えられる。従って、フェンス直下における測定結果は、検討対象から除外する。

積雪がない場合の平均風速の絶対値（図4.1(a)）では、フェンス風上側において、平均風速の絶対値と積雪の分布は良い対応を示し、風速の減少に伴い積雪深が大きくなり、風速の急激な増加に伴い、積雪深は急激に減少する。しかしながら、フェンス風下側においては、両者の変化は一致しない。平均風速の絶対値が最小値となる位置と吹きだまりのピー

ク位置が大きく異なり、平均風速の絶対値が比較的小さい $x/H>3$ の範囲において、積雪深は小さい値を示し、風上側に見られる傾向とは異なる傾向を示す。

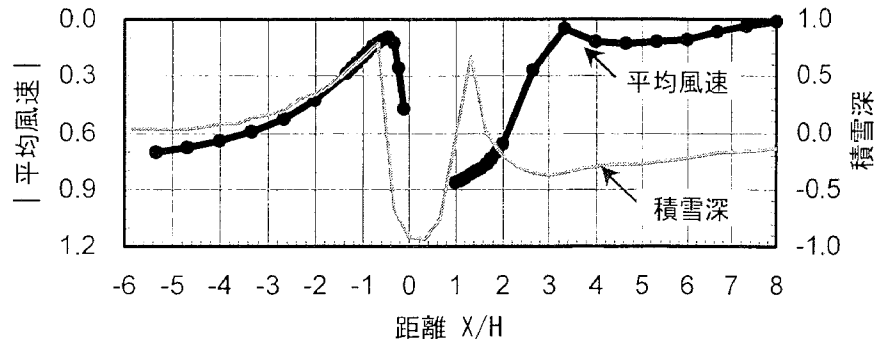
吹きだまりが大きい場合の平均風速の絶対値（図4.1(c)）では、フェンス風上において吹きだまりのピーク位置からの剥離が現れることから、吹きだまりのピーク位置と平均風速の絶対値の減少位置とにややずれが生じている。一方、フェンス風下側では、吹きだまりによって流れが拘束されることにより、吹きだまりのピーク位置と平均風速の絶対値が最小となる位置は一致する。しかし、その風下側の傾向は、積雪がない場合と同様に、風上側とは逆の傾向を示す。

吹きだまりが小さい場合の平均風速の絶対値（図4.1(b)）は、積雪がない場合と吹きだまりが大きい場合のほぼ中間的な性状を示している。

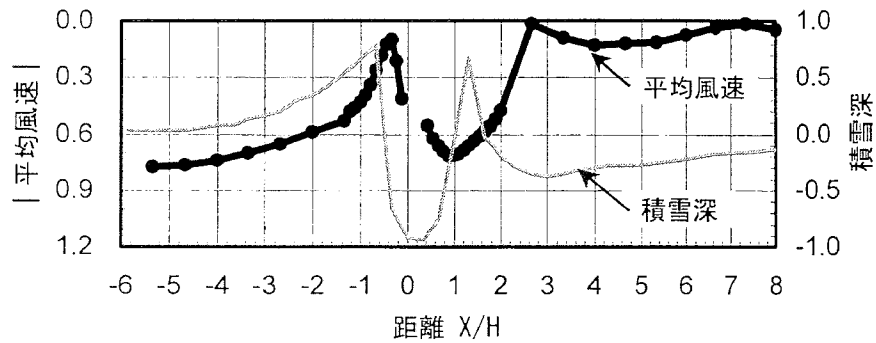
図4.3にそれぞれの吹きだまり状態における平均風速の絶対値と屋外観測による積雪深との関係を示す。ここで、フェンス風上側の積雪深が増加する部分を「●領域A」、風上側ピークからフェンス位置までを「▲領域B」、フェンス位置から風下側ピークまでの積雪深が増加する部分を「△領域C」、風下側ピークの後方を「○領域D」として、領域分けした。

積雪がない場合の平均風速の絶対値と積雪深の関係（図4.3(a)）をみると、領域A、領域Bおよび領域Cでは、平均風速の絶対値の増加に伴い、積雪深が減少する。ただし、その割合は、それぞれの領域で異なる。逆に、領域Dでは、平均風速の絶対値が速いほど積雪深が大きくなる傾向を示す。

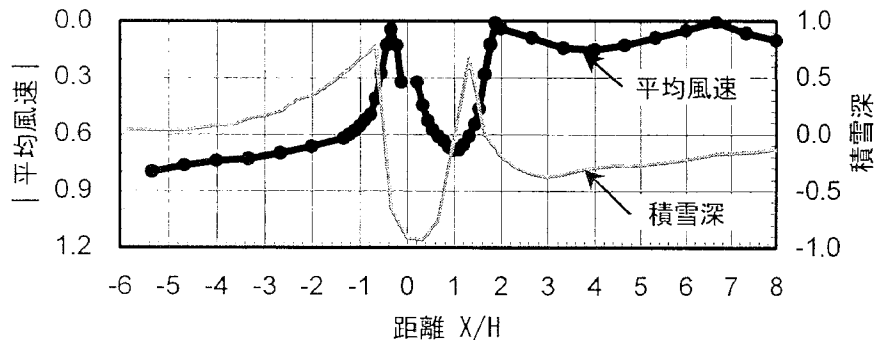
吹きだまりが小さい場合の平均風速の絶対値と積雪深の関係（図4.3(b)）および吹きだまりが大きい場合の平均風速の絶対値と積雪深の関係（図4.3(c)）においても、領域Aでは、積雪がない場合と同様の傾向を示す。既往の研究においても、障害物の風上側の吹きだまりは、せん断応力の変化に密接に関係することが示されており、この結果からも確認できる。その他の領域においても、両者の間に何らかの関係が認められるものの、領域間の傾向は大きく異なる。つまり、全ての領域を合わせて見た場合には、両者の相関性は低いと言え、同じ風速値であっても、積雪深は一概には定まらないことがわかる。



(a) 積雪がない場合の平均風速



(b) 吹きだまりが小さい場合の平均風速



(c) 吹きだまりが大きい場合の平均風速

図4.1 雪面近傍における水平方向の平均風速の絶対値 $|\bar{u}/U_0|$ と積雪深 $(s - S_d)/S_d$ の比較

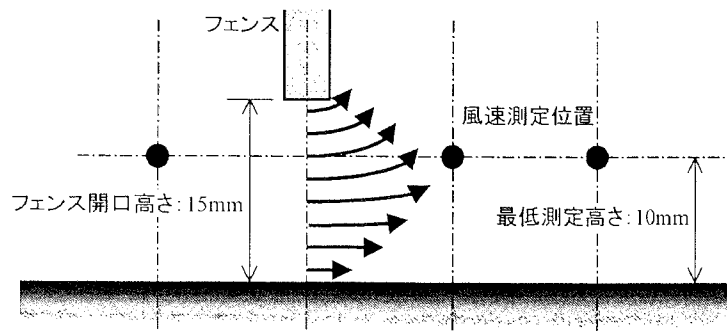
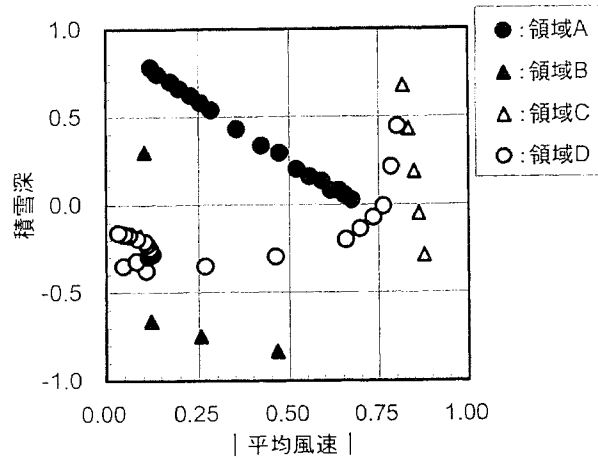
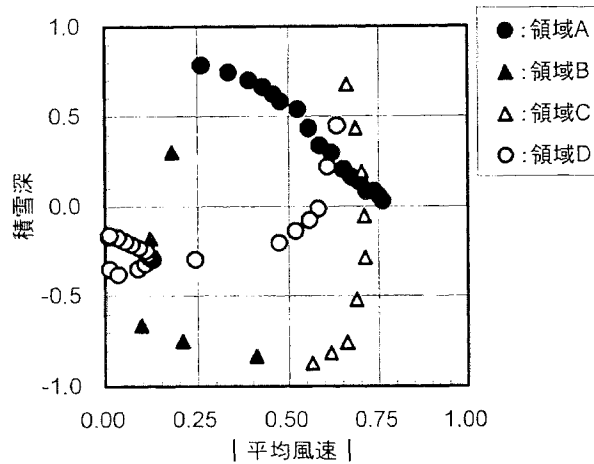


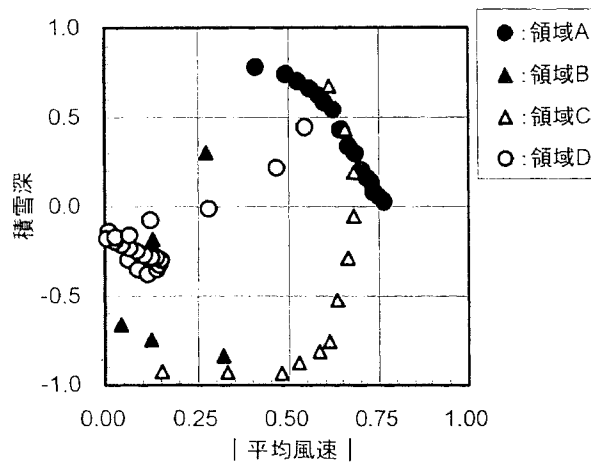
図4.2 フェンス下部間隙付近の流れと風速測定位置の模式図



(a) 積雪がない場合の平均風速



(b) 吹きだまりが小さい場合の平均風速



(c) 吹きだまりが大きい場合の平均風速

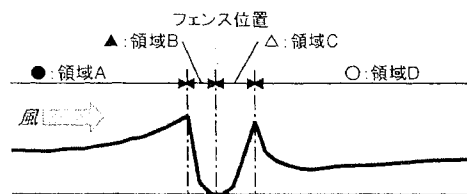


図4.3 雪面近傍における水平方向の平均風速の絶対値 $|\bar{u}|/U_0$ と積雪深 $(s - S_d)/S_d$ の関係

4. 2. 3 階段状建物の屋根上を対象とした検討

本項においては、2.4節に示した2段屋根建物における下段屋根上の吹きだまりと、3.4節に示したその屋根面近傍における平均風速との関係を検討する。

図4.4に下段屋根端部における風速測定点と剥離流れの位置関係を示す。前述のようにセンサーサポートの大きさの制約により、この実験においては、屋根面から高さ5mm (H/9)における風速を測定した。また、3.4節では、下段屋根が風上側となる場合および風下側となる場合の両風向において、下段屋根端部から剥離流れが生じていることを示した。従って、屋根端部の風速測定点では、ここで必要とする屋根面に近接した流れの性状とは異なり、剥離流れの外側、あるいは、剥離流れの影響を大きく受けた風速を測定していると考えられる。従って以下の検討では、この影響を考慮し、 $x/H > 2.5$ の測定結果を除外する。

下段屋根面に近接した位置（屋根面よりH/9上方）における水平方向の平均風速と積雪深の分布を図4.5に、その両者の関係を図4.6に示す。ここでの平均風速は、図3.12(b)および図3.13(b)で示した値の絶対値 $|\bar{u}/U_0|$ とし、図4.5では、比較を容易にするため、平均風速の軸を上下に反転した。積雪深は、2.4節において、分布Ⅲ型を示した気象条件A、D、Eの3つの観測結果（図2.17(a)、図2.18(a)、図2.18(b)）の平均分布を s とし、 s の平均値 \bar{s} を用いて、次式(4.1)による吹きだまり係数 C_s として表した。

$$C_s = (s - \bar{s}) / \bar{s} \quad \cdots \cdots \cdots (4.1)$$

従って吹きだまり係数 $C_s > 0$ の時、下段屋根面上の平均積雪深よりも積雪が多いこと（吹きだまり）を示し、 $C_s < 0$ の時は、下段屋根面上の平均積雪深よりも積雪が少ないこと（吹き払い）を示す。

下段屋根が風上側の場合（図4.5(a)、図4.6(a)）、 $x/H < 0.3$ 程度の上段壁面付近では、平均風速（せん断応力）、吹きだまり係数とも、右下がりの変化を示すが、その他の範囲においては、両者は異なる変化を示し、 $x/H > 0.7$ の範囲では、平均風速は右上がりの変化に対して、吹きだまり係数は、逆に右下がりの変化を示している。図4.6(a)を見ても、両者に顕著な相関性は認められない。

下段屋根が風下側の場合（図4.5(b)、図4.6(b)）、 $0.4 < x/H < 1.2$ の範囲では、両者の変化は対応するが、その他の範囲では一致せず、 $x/H = 0.4$ には、吹きだまりのピークがあるが、平均風速には、その付近にピーク値が存在しないなど、両者の間に相関性は認められない。

吹きだまりと風速（せん断応力）の関係は、既往の研究でも述べられているとおり、物

体の風上側において認められているが、本節において対象としている物体の風下側や屋根面上における剥離流れの中では、両者の相関性は乏しいことがわかる。従って、風速値が定まっても、積雪深を一概に定めることはできないと言える。

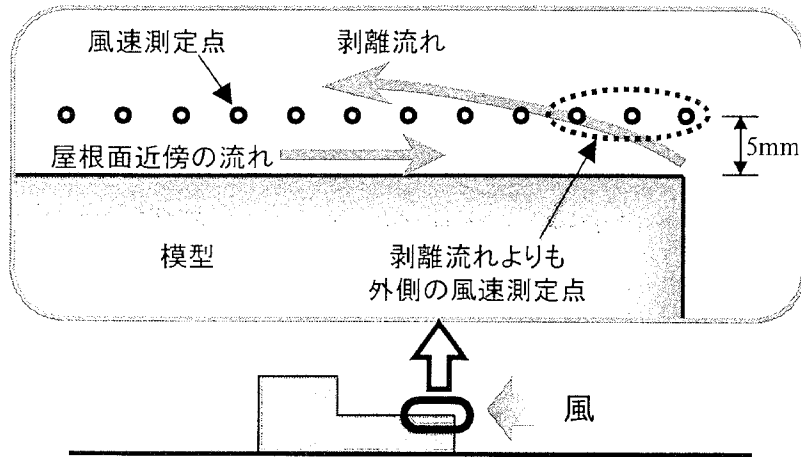
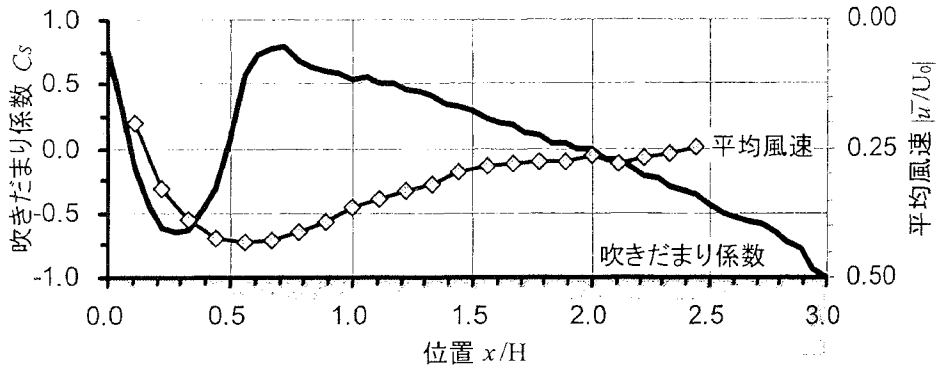
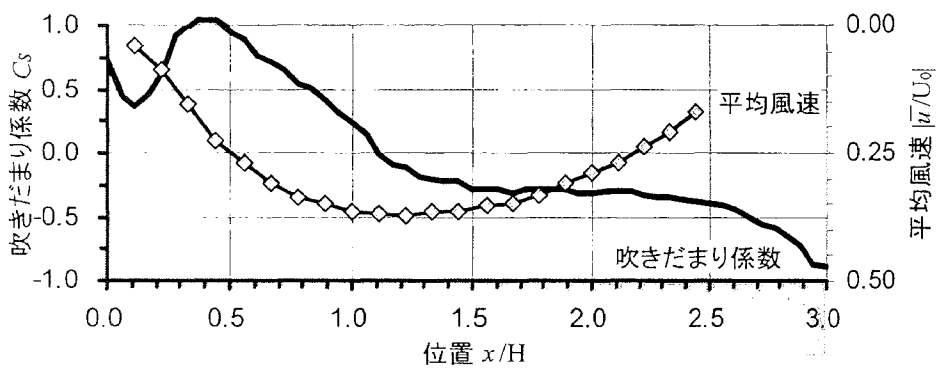


図4.4 隅角部における風速測定点と剥離流れとの位置関係

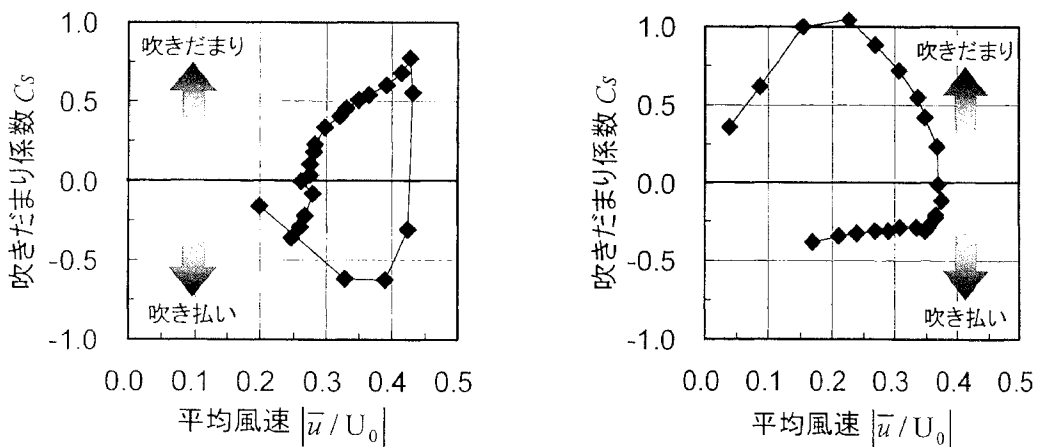


(a) 下段屋根が風上側の場合 (風←)



(b) 下段屋根が風下側の場合 (風→)

図4.5 屋根面に近接した位置における水平方向の平均風速 $|\bar{u}/U_0|$ と吹きだまり係数 C_s の分布



(a) 下段屋根が風上側の場合

(b) 下段屋根が風下側の場合

図4.6 屋根面に近接した位置における水平方向の平均風速 $|\bar{u}/U_0|$ と吹きだまり係数 C_s の関係

4.3 雪面近傍の風の加速度と積雪分布との関係

4.3.1 雪面近傍における風の平均加速度について

4.3節では、雪面からの雪粒子の飛散現象に着目して、水平方向の平均風速の絶対値と吹きだまりの関係を検討した。しかし、雪面から雪粒子を飛散させるエネルギーと、浮遊する雪粒子を落下させるエネルギーを比較した場合、前者と比較して後者のエネルギーが遙かに小さいと考えられる。従って、吹きだまりの形成には、雪粒子の落下現象が大きく関連していることが推察される。ここでは、気流中の雪粒子が雪面に落下する現象を考え、以下に示す力の作用状態を仮定した。

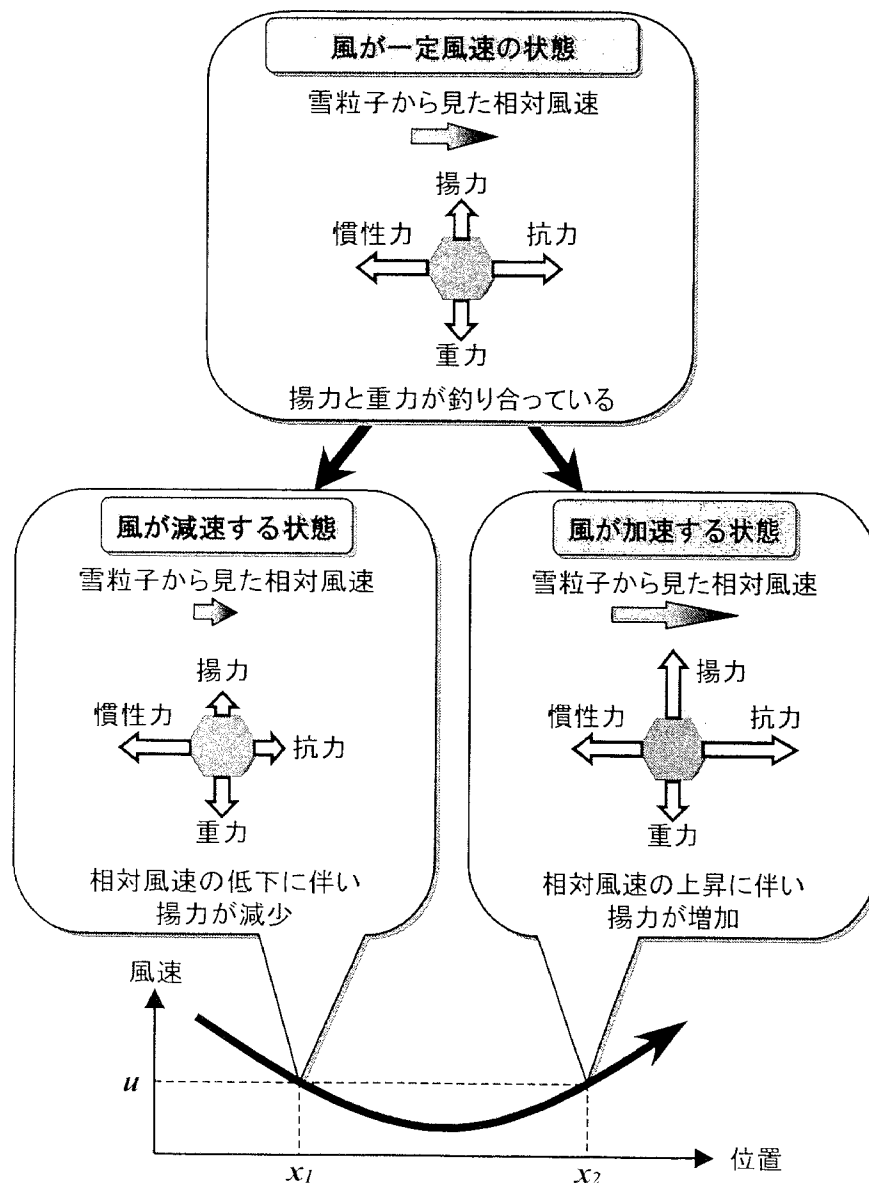


図4.8 風速が変化する領域における雪粒子に加わる力の概念図

雪粒子に加わる重力、慣性力、抗力及び揚力の概念図を図4.8に示す。今、雪粒子が水平に飛行していると仮定する。この時、空気よりも密度が高い雪粒子の速度は、風速と比較して遅く、雪粒子には抗力と揚力が働き、雪粒子に加わる重力と揚力が釣り合っている。この状態から、風速が減少すると、空気に対して密度の大きい雪粒子は、慣性力によって風速の減少に即座に追随せず、雪粒子に対する相対風速が減少する。それに伴って、抗力、揚力が減少し、雪粒子は下降する。風速が強くなる場合は、これとは逆の力が作用する。従って、図4.8に示す位置 $x1$ と $x2$ では、風速は同じ値 u であるが、その前後の風速の違いから、雪粒子に加わる力が異なり、雪面に落下する雪粒子の量に影響を与えると考えることができる。この点に注目して、風の水平方向の平均加速度と吹きだまりの関係を検討する。

水平方向の風速の変化は、位置の移動および時間の経過の両者によって生ずることから、3章で示した風速の空間分布から、風の水平方向の加速度（風速の水平成分の時間変化率） a_u の算定には、次式(4.2)を用いる。

$$a_u = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、 u , v , w は、それぞれ、 x , y , z 軸方向の風速を表す（図3.10）。本節における検討では加速度の時間平均値を対象とすることから(4.2)式の右辺第1項を0とし、二次元流れ、あるいは、物体の中央断面位置を対象としていることから、(4.2)式の右辺第3項の水平直交成分 v の平均値を0とし、更に雪面、あるいは、屋根面近傍を対象とすることから(4.2)式の右辺第4項の鉛直成分 w の平均値を0と仮定することができる。従って、ここでは、水平方向の風の平均加速度 \bar{a}_u を、水平方向の平均風速 \bar{u}/U_0 および水平距離 x/H を用いて、次式(4.3)により算出する。

$$\bar{a}_u = (\bar{u}/U_0) \times \frac{\partial(\bar{u}/U_0)}{\partial(x/H)} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

4.3.2 二次元フェンスを対象とした検討

3.3節に示した吹きだめフェンス周囲の雪面近傍（模型雪面より $z/H=0.11$ 上方）における水平方向の風の平均加速度 a_u の分布を図4.9に示す。図中には、図4.1と同様に屋外観測で得られた積雪深($s-Sd$)/ Sd の分布を合わせて示し、積雪分布との比較を容易にするため、平均加速度 a_u の軸を上下に反転して示す。

積雪がない場合の平均加速度（図4.9(a)）では、フェンス風上側においてピーク位置が風上側にずれるものの積雪深の分布との正負の対応は良い。フェンス風下側では、吹きだまり形状と同様に、平均加速度もピークを持つ分布形状となるが、そのピーク位置は、 $x/H=2$ にあり、吹きだまりのピーク位置 $x/H=1.33$ とは一致しない。ただし、平均風速のピーク位置 $x/H=3.33$ と比較すると値が近づき、更にその風下側の両者の一致は比較的良い。

吹きだまりが小さい場合の平均加速度（図4.9(b)）では、フェンス風上側においては両者の変化の傾向は概ね一致する。フェンス風下側においても、積雪がない場合と同様にピーク位置のずれがあるものの、大まかな変化の傾向は類似している。

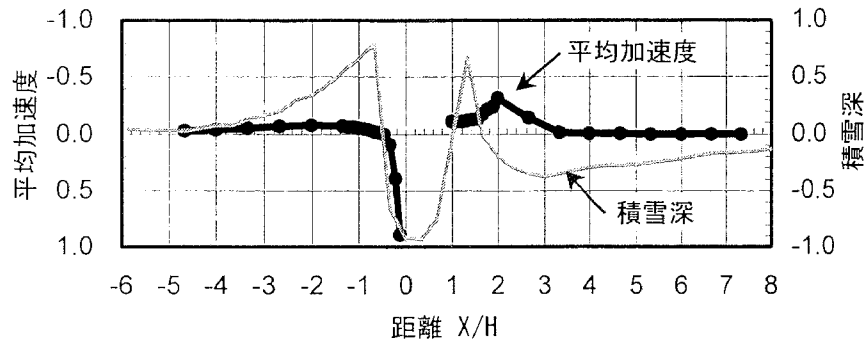
吹きだまりが大きい場合の平均加速度（図4.9(c)）では、フェンス風上側および風下側の吹きだまりのピーク位置と平均加速度のピーク位置および符号の変化は類似している。

図4.9で示した雪面付近における風の平均加速度と積雪深の関係を図4.10に示す。ここでも、図4.3の場合と同様の領域Aから領域Dの4つの領域に分類した。

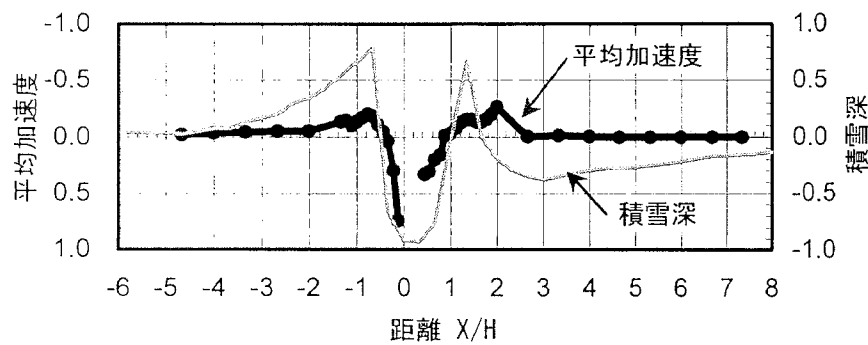
積雪がない場合の平均加速度と積雪深の関係（図4.10(a)）と、吹きだまりが小さい場合の平均加速度と積雪深の関係（図4.10(b)）はほぼ同様の傾向を示し、積雪深が正の値（吹きだまり）のとき、平均加速度は負の値を示し、一方、平均加速度が正の場合、積雪深は負の値を示す。ただし領域Dは、この関係から外れた性状を示している。

吹きだまりが大きい場合の平均加速度と積雪深の関係（図4.10(c)）では、積雪深が $-0.4 \sim 0.0$ 程度の範囲では、風速の平均加速度が僅かではあるが正負両方の値を示しているものの、全体的には、平均加速度が負の時、積雪深は正の値を示し、逆に、平均加速度が正の時、積雪深は負の値を示す。

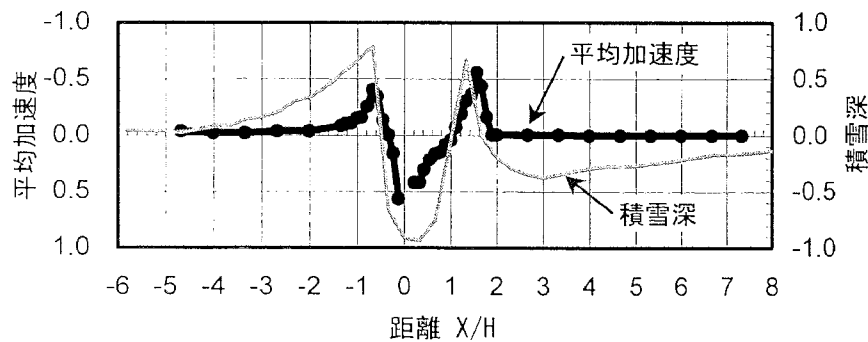
積雪深が $-0.4 \sim 0.0$ 程度の範囲において、平均加速度が曖昧な値を示すのは、ここで用いた積雪深が屋外観測値であり、その生成過程においては、主風向以外の風も含まれているなど、風洞実験と異なる条件であることによると考えられる。



(a) 積雪がない場合の平均加速度

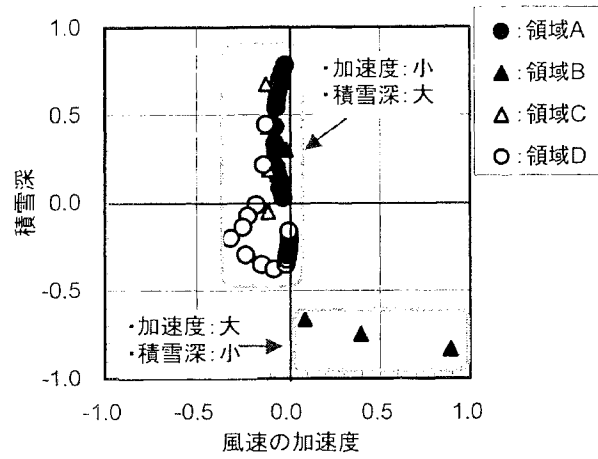


(b) 吹きだまりが小さい場合の平均加速度

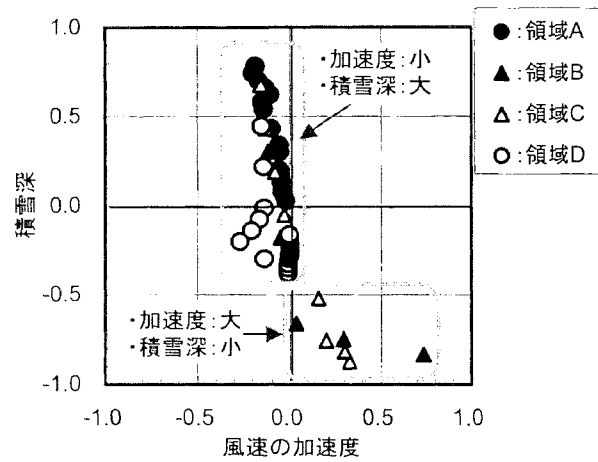


(c) 吹きだまりが大きい場合の平均加速度

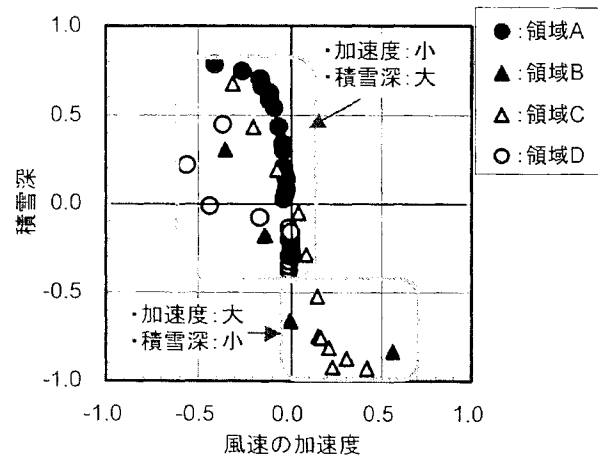
図4.9 雪面近傍における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と積雪深 $(S - S_d)/S_d$ の比較



(a) 積雪がない場合の平均加速度



(b) 吹きだまりが小さい場合の平均加速度



(c) 吹きだまりが大きい場合の平均加速度

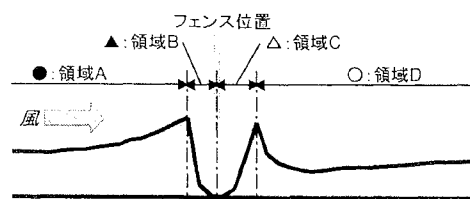


図4.10 雪面近傍における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と積雪深 $(S - S_d)/S_d$ の関係

4. 3. 3 階段状建物の屋根上を対象とした検討

本項においては、2.4節に示した2段屋根建物における下段屋根上の吹きだまりと、3.4節に示したその屋根面近傍における平均風速から求めた風の水平方向の平均加速度との関係を検討する。

(4.1)式により算定した吹きだまり係数 C_s と、風の水平方向の平均加速度 \bar{a}_u の分布を図4.11に示す。ここでは、吹きだまり係数との比較を容易にするため、平均加速度の軸は上下を逆に表示した。

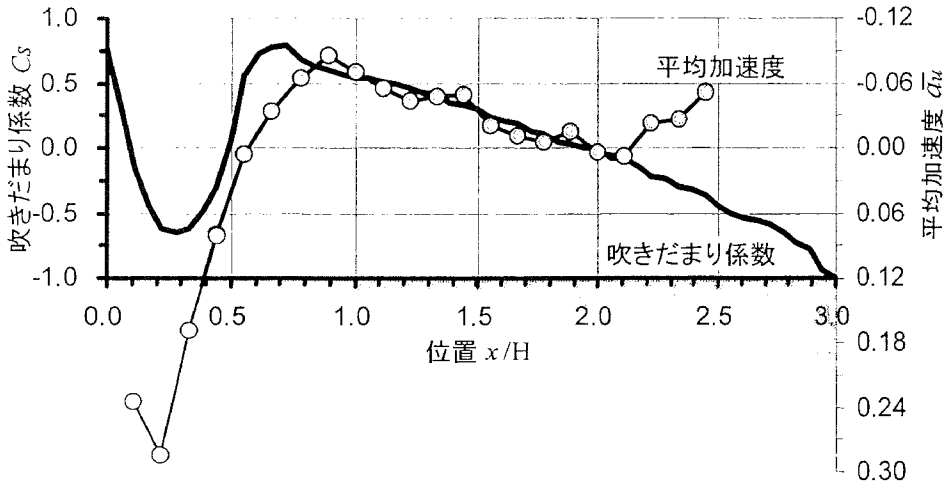
下段屋根が風上側の場合(図4.11(a))を見ると、 $x/H < 2.2$ の範囲においては、両者の変化の傾向が概ね一致する。すなわち、 $x/H = 0.3$ 付近に極値が見られること、 $x/H = 0.5$ 付近で正負が反転すること、 $x/H = 0.7 \sim 0.9$ 付近に極値が見られること、 $x/H = 2.0$ において正負が反転することなどが一致している。次に、下段屋根が風下側の場合(図4.11(b))を見ると、 $x/H = 0.4$ 付近に極値があること、 $x/H = 1.2$ 付近において正負が反転すること、更に全体的な変化の割合が一致する。これらのことから、ほぼ両者の関係は、対応していると言える。

図4.11(a)および図4.11(b)の中で、下段屋根が風上側の $x/H > 2.2$ の範囲においてのみ両者の対応が一致しないが、これは、屋根端部からの強い剥離による影響であると考えられる。3章で示したとおり、下段屋根が風下側の場合と比較して、下段屋根が風上側の場合、屋根端部からの剥離が強いことから、下段屋根が風上の場合のみ、4.2.3項で示した剥離の影響範囲が大きいことから、この部分に剥離の影響が現れ、測定した値が本研究で必要とする屋根面に近接した流れの性状を表していないことによると考えられる。

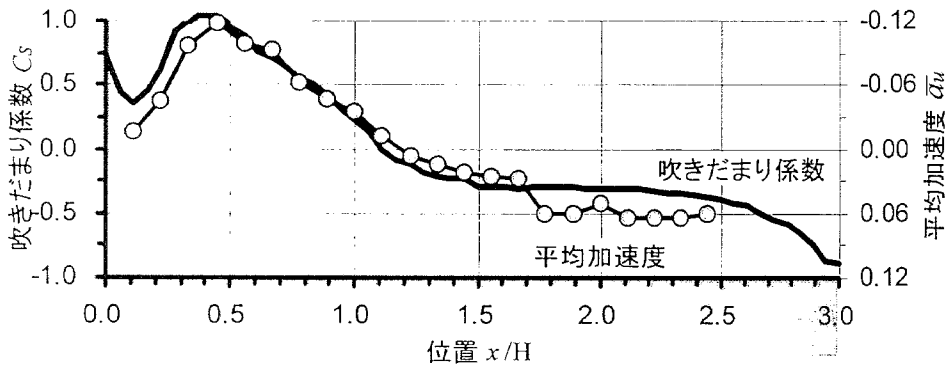
図4.12に両者の関係を示す。下段屋根が風上側の場合の $x/H > 2.2$ の範囲(図4.12(a)の○印)を除き、平均加速度が負の範囲において吹きだまり係数は正の値を示し、平均加速度が正の範囲において吹きだまり係数は負の値を示す。このことから、吹きだまり係数と屋根面に近接した位置における水平方向の平均加速度には、負の相関関係があると言える。

$$C_s = A \times \bar{a}_u \quad \dots \dots \dots (4.4)$$

図4.12に、式(4.4)における比例定数 $A = -8$ とした場合の線を記入した。下段屋根が風上側の場合(図4.12(a))の吹きだまり係数が負の領域においてはやや異なる傾向を示すが、吹きだまり係数が正の領域および、下段屋根が風下側(図4.12(b))の全領域においては、式(4.4)を用いて実験結果を近似することが可能である。すなわち、屋根面に近接した位置における水平方向の平均加速度分布から、吹きだまりの範囲やピーク位置の特定が可能であると言える。

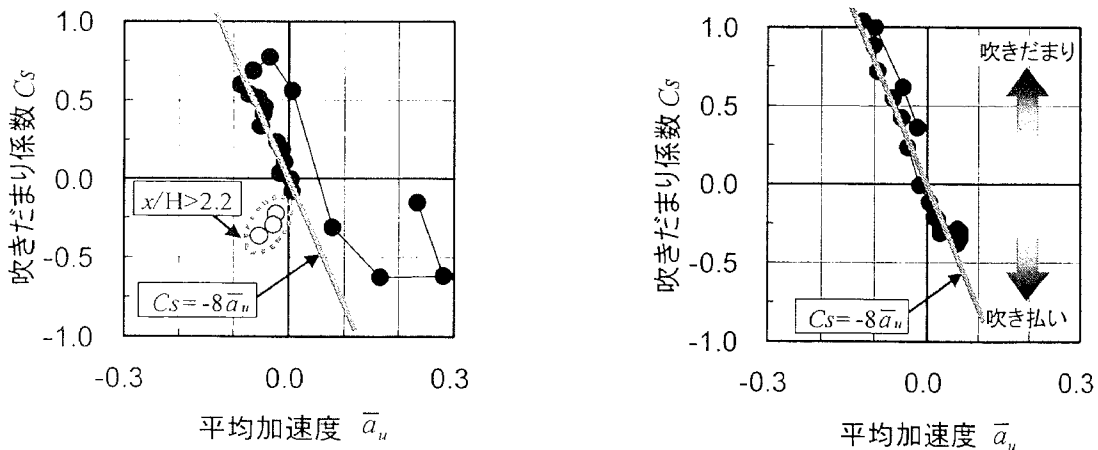


(a) 下段屋根が風上側の場合 (風←)



(b) 下段屋根が風下側の場合 (風→)

図 4.11 屋根面に近接した位置における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と吹きだまり係数 C_s の分布



(a) 下段屋根が風上側の場合 (b) 下段屋根が風下側の場合

図 4.12 屋根面に近接した位置における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と吹きだまり係数 C_s の関係

4.4 まとめ

吹きだめフェンス周りおよび2段屋根建物の屋根上を対象として、2章に示した積雪分布性状と3章に示した気流性状との関連性を検討した結果、以下のことが得られた。

吹きだまり性状と地表面および屋根面近傍における水平方向の平均風速の絶対値とは、フェンス風上側の積雪深が増加する部分において、両者の変化は良い対応を示すが、フェンスのその他の領域および2段屋根建物の屋根面を対象とした場合、両者の関連性は低い。既往の研究においても、障害物の風上側の吹きだまりは、せん断応力の変化に密接に関係することが示されているが、障害物の風下側などの剥離領域内においては、その関係が成り立たないことが示されている。つまり、全ての領域を合わせて見た場合には、両者の相関性は低いと言え、同じ風速値であっても、積雪深は一概には定まらないことがわかる。すなわち、物体の風下側や屋根面の様に、剥離流れの領域内においては、風速値だけを用い、積雪分布を予測することは困難であると言える。

一方、地表面や屋根面に近接した位置における風の水平方向の平均加速度は、積雪分布と良い対応を示し、雪の吹きだまりや吹き払いの形成には、屋根面や地表面に近接した位置における風の水平方向の平均加速度が密接に関係しており、吹きだまり係数 C_s と屋根面に近接した位置における水平方向の平均加速度 \bar{a}_u には、次式に示す負の相関関係があることを明らかにした。

$$C_s = A \times \bar{a}_u \quad (A: \text{比例定数}, A < 0)$$

このことから、一般的な風洞実験や数値流体解析によって、屋根面や地表面に近接した位置における風速分布を得ることで、風雪時に生じる吹きだまりと吹き払いの形成範囲やそのピーク位置を概ね特定することが可能である。

なお、吹きだまりが形成された場合、その近傍の流れ性状は、吹きだまり形状に応じて変化すると考えられる。しかしながら、吹きだまりの形成による気流変化後の雪面近傍における加速度は、積雪前の加速度と類似した分布性状を示すこと、吹きだまりの範囲やそのピーク位置は、積雪深の増加に伴って多少の変化が見られるものの、概ね初期性状を保つことから、積雪前の気流性状を用いて吹きだまりを予測することは、妥当であると考えられる。

5章

気流性状を用いた吹きだまり予測への適用

5.1	はじめに	1
5.2	流れの加速度分布の算定	2
5.2.1	加速度算定の概要	2
5.2.2	二次元流れにおける加速度の算定	3
5.2.3	三次元流れにおける加速度の算定	4
5.3	種々の形状に対する気流性状分布を用いた積雪分布予測	6
5.3.1	直方体周りにおける地表面の積雪分布	6
5.3.2	アーチ型屋根建物における屋根上の積雪分布	8
5.3.3	丘状地形周りにおける地表面の積雪分布	9
5.3.4	階段状屋根建物における下段屋根上の積雪分布	10
5.3.5	階段状屋根建物周りの地表面における積雪分布	12
5.4	積雪分布予測への気流数値計算結果の適用	17
5.5	まとめ	22

5.1 はじめに

4章において、地表面や屋根面に近接した位置における流れの水平方向の平均加速度と積雪分布との間には、負の相関関係があり、この関係を用いれば、気流性状を用いて、風雪時に生じる吹きだまりと吹き払いの形成範囲やそのピーク位置を特定することが可能であることを示した。

本章では、一般的な風洞実験や気流数値計算において得られる平均風速の空間分布から、平均加速度の分布の算定手順を示し、その算定手順を用いて、基本的な形状を持つ建物の屋根面やその周囲、あるいは、地形による吹きだまり性状を求め、加速度分布を用いた吹きだまり性状予測の有効性を検証する。

5.2 流れの加速度分布の算定

5.2.1 加速度算定の概要

4章において、地表面や屋根面に近接した位置における、流れの水平方向の平均加速度 \bar{a}_u と吹きだまり係数 C_s との間には、次式に示す関係があることを示した。

$$C_s = A \times \bar{a}_u \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

従って、地表面や屋根面に近接した位置における流れの水平方向の平均加速度の分布を求めることで、吹きだまり性状を予測することができる。

しかし、風洞実験における現在の計測技術では、流れの加速度分布を直接測定することはできない。従って、測定された離散的な風速の空間分布から、流れの加速度分布を算定する必要がある。また、数値流体計算においても、一般的には、加速度の分布を出力することは行われていないため、風洞実験同様に、最終的に算定された離散的な風速の空間分布から、流れの加速度分布を求める必要がある。

風速の空間分布から流れの加速度を算定するには、空気のような流体の運動を表す次式に示すいわゆるナビエ・ストークスの方程式における慣性項を用いればよい。

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad \dots\dots\dots (5.2a)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad \dots\dots\dots (5.2b)$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial x} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad \dots\dots\dots (5.2c)$$

(5.2)の各式においては、左辺が流体の単位体積当たりの慣性力であり、左辺の括弧の中が、流体が移動する時の風速の時間変化率、つまり加速度を表している。右辺第1項は、その流体に働く圧力による項であり、第2項は、粘性応力による項である。

二次元流れおよび三次元流れの場合について、具体的な加速度分布の算定手順を次に示す。

5. 2. 2 二次元流れにおける加速度の算定

4章で示したように、二次元流れ ($v=0$)、あるいは、左右対称な三次元対象物の中心断面位置の様に、その断面の直交成分の平均風速 \bar{v} が、0とすることができる場合には、(5.2a)式中の加速度の項を用いて、地表面や屋根面に近接した位置における流れの水平方向の平均加速度 a_u を次のように算定することができる。

$$a_u = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、加速度の時間平均値 \bar{a}_u を対象とすることから(5.3)式の右辺第1項が0、二次元流れ、あるいは、物体の中央断面位置を対象としていることから、(5.3)式の右辺第3項の水平直交成分 v の平均値 \bar{v} が0、更に地表面、あるいは、屋根面近傍を対象とすることから(5.3)式の右辺第4項の鉛直成分 w の平均値 \bar{w} を0とすることができる。従って、水平方向の風の平均加速度 a_u を、次式(5.4)により算定することができる。

$$\bar{a}_u = \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \dots\dots\dots (5.4)$$

(5.4)式により求められる加速度の定義では、 \bar{a}_u の符号は、次の状態を意味する。

$\bar{u} > 0$ の領域

$\bar{a}_u > 0$ の場合：風速が増加

$\bar{a}_u < 0$ の場合：風速が減少

$\bar{u} < 0$ （逆流）の領域

$\bar{a}_u > 0$ の場合：風速の絶対値が減少

$\bar{a}_u < 0$ の場合：風速の絶対値が増加

つまり、一般的な流れの定義に従う加速度では、 $\bar{u} < 0$ の領域においては、本研究における吹きだまりとの相関に必要な符号とは異なる符号を示す。つまり、本研究では、その流れの向き (\bar{u} の符号)に関わらず、風速の絶対値の増減を求める必要がある。従って、積雪分布予測のための平均加速度の算定では、次式を用いる。

$$\bar{a}_u = |\bar{u}| \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \dots\dots\dots (5.4)$$

5. 2. 3 三次元流れにおける加速度の算定

一般的な流れである三次元流れにおいて、地表面や屋根面に近接した位置における流れの水平主流方向の平均加速度 \bar{a} は、(5.2a)式および(5.2b)式の左辺を用いて、 u 方向成分および v 方向成分の平均加速度を算定し、合成することにより求められる。

$$a_u = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (5.3a)$$

$$a_v = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (5.3b)$$

ここで、二次元流れの場合と同様に、加速度の時間平均値 \bar{a}_u 、 \bar{a}_v を対象とすることから(5.3)式および(5.3b)式の右辺第1項が0、地表面、あるいは、屋根面近傍を対象とすることから(5.3)式および(5.3b)式の右辺第4項の鉛直成分 w の平均値 \bar{w} を0とすることができる。従って、水平方向の風の平均加速度 \bar{a}_u 、 \bar{a}_v を、次式により算定することができる。

$$\bar{a}_u = \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (5.4a)$$

$$\bar{a}_v = \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (5.4b)$$

この水平2方向の平均加速度 \bar{a}_u 、 \bar{a}_v から、流れの水平主流方向の平均加速度 \bar{a} は、次式により合成できる。

$$\bar{a} = \frac{\bar{u}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \bar{a}_u + \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \bar{a}_v \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

平均加速度 \bar{a}_u 、 \bar{a}_v には、二次元流れの場合と同様に、 $\bar{u} < 0$ あるいは $\bar{v} < 0$ の領域においては、本研究における吹きだまりとの相関に必要な符号とは異なる符号を示すが、(5.5)式において、 \bar{u} 、 \bar{v} をそのまま用いることにより、 $\bar{u} < 0$ あるいは $\bar{v} < 0$ の領域における平均加速度 \bar{a}_u 、 \bar{a}_v の符号が逆になり、本研究における吹きだまりとの相関に必要な符号をもつ流れの水平主流方向の平均加速度 \bar{a} がえられる。

3.4節で示した二段屋根建物周りの地表面近傍における流れを対象として、(5.4a)式、(5.4b)式の各項の分布を図5.1に示す。

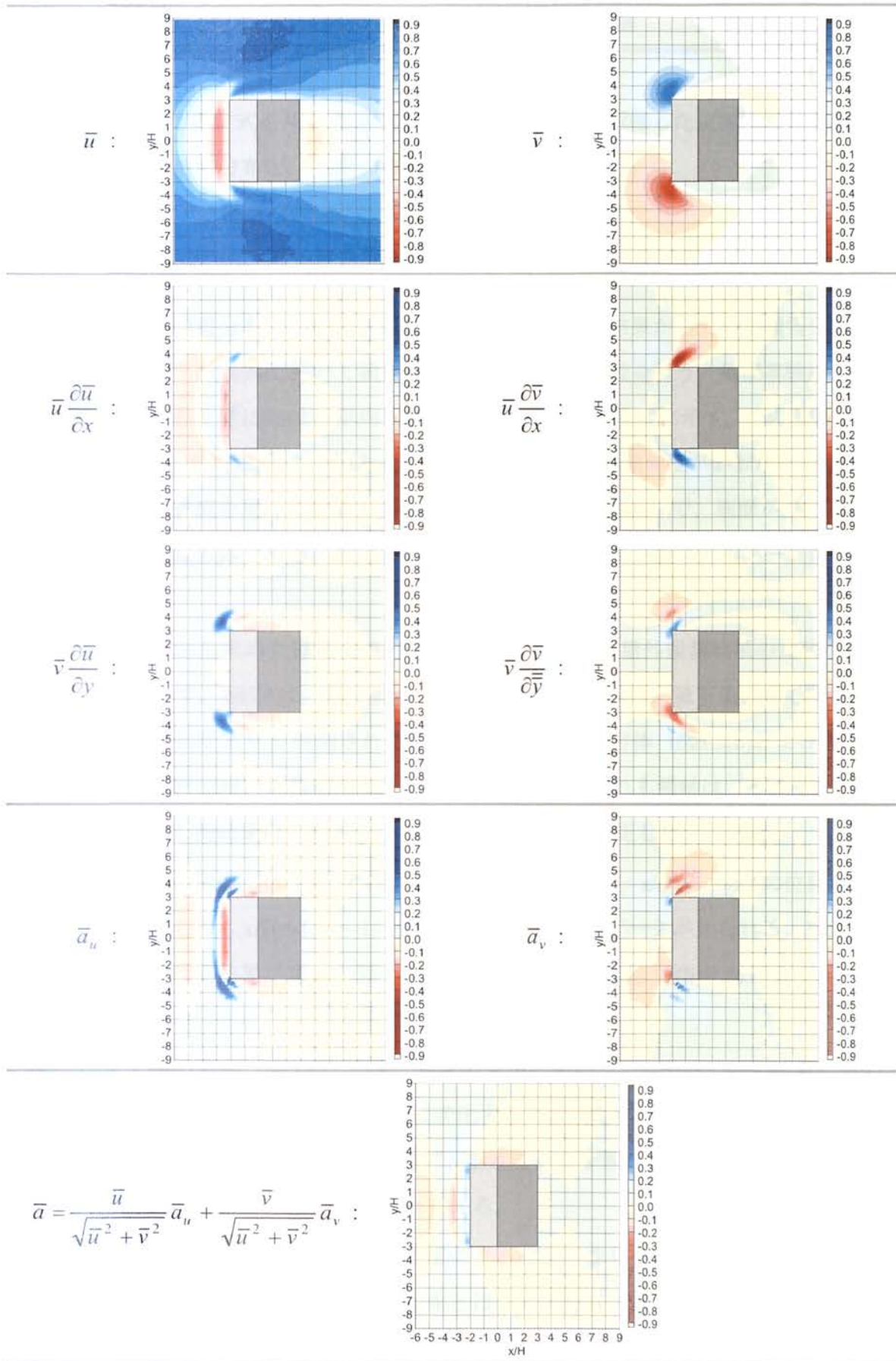


図5.1 加速度の算定過程における各成分の分布

5.3 種々の形状に対する気流性状分布を用いた積雪分布予測

5.2 節に示した算定式を用いた地表面あるいは屋根面に近接した位置における加速度分布から予測した積雪分布と、実際の積雪分布との比較を行う。

5.3.1 直方体周りにおける地表面の積雪分布

直方体周りの積雪分布について、筆者が行った風洞実験結果から求めた積雪分布の予測結果と、老川等³¹⁾が屋外において観測した積雪分布との比較を行う。風洞実験によって測定した直方体中心位置における平均風速ベクトルの分布を図5.2に示す。この実験では、模型高さHにおける平均風速は、約12m/sec、高さ方向の平均風速勾配が $\alpha=1/7$ のべき指数分布に従う平板境界層流を用いている。模型は、高さがH (100mm) で、底面が2H (200mm) の正方形をした直方体である。測定には、トリプルスプリット型ファイバースコープ⁵⁰⁾を用いた。

風洞実験結果から求めた積雪分布予測と、老川等による屋外觀測結果の比較を図5.3および図5.4に示す。図5.3は、風上側の中心断面位置、図5.4は、風下側の中心断面位置である。なお、吹きだまりが観測されたのは、各辺がHの立方体 (図5.3(b)および図5.4(b)) であり、風洞実験で用いた模型形状とは異なるため、いずれも横軸は、それぞれの高さHで無次元化し、予測結果については、壁面位置を ± 0.5 に修正した。

モデル風上側の分布 (図5.3) では、両者の分布において、 $x/H=-1\sim-0.5$ の位置に吹き払いのピークが見られ、 $x/H=-1.5\sim-1$ の位置に吹きだまりのピークが見られる。加速度を用いた予測結果と観測結果が良く一致していると言える。特に図5.3(b)における「 $\triangle-15$ 」および「 $\square-39$ 」の分布に類似していると言える。

モデル風下側の分布 (図5.4) では、両者の分布において、 $x/H=0.5\sim 1$ の位置において、吹きだまりが見られ、その後、吹き払いに変化すること、吹き払いのピークが $x/H=1.5\sim 1.75$ 程度に見られることが類似している。特に、加速度から予測した積雪分布は、図5.4(b)における「 $\square-39$ 」の分布に類似していると言える。

屋外觀測では、完全に正対する風向の風による吹きだまりを測定することは、ほぼ不可能に近く、風洞実験結果を用いた予測結果とは、風向特性が異なることから、完全な一致はしていないが、風上側、風下側とも、概ね両者の対応はよいと言える。

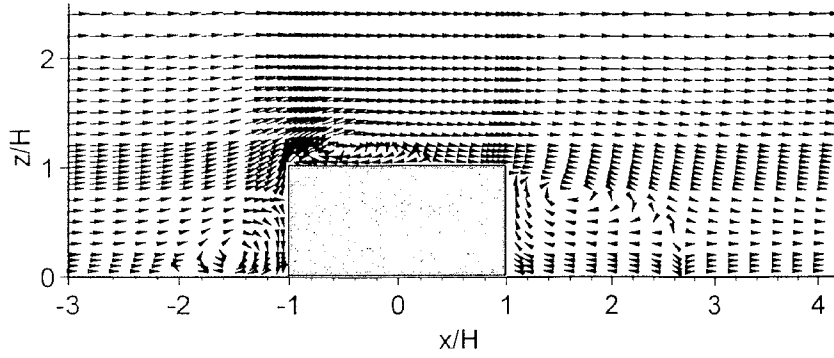
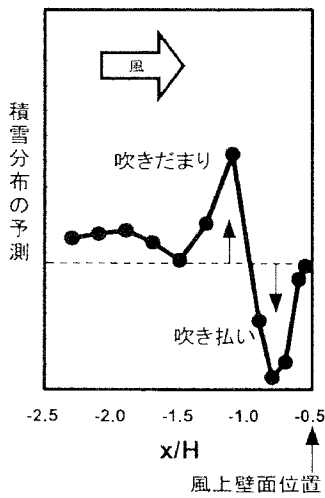
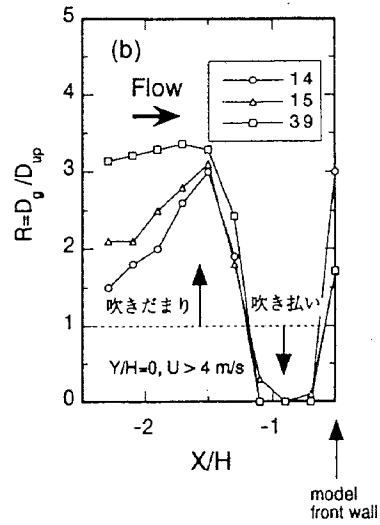


図5.2 風洞実験による直方体中心断面位置における平均風速ベクトルの分布

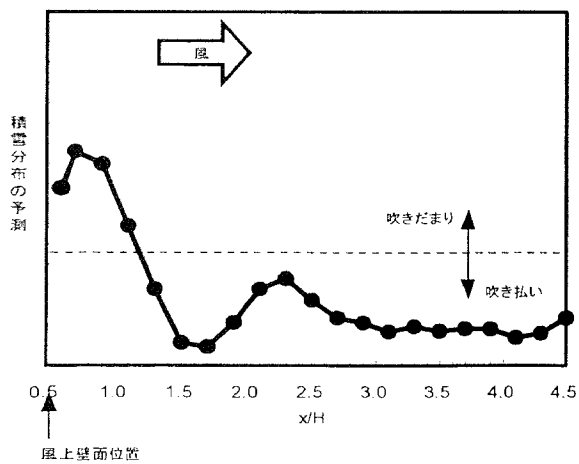


(a) 加速度分布を用いた予測結果

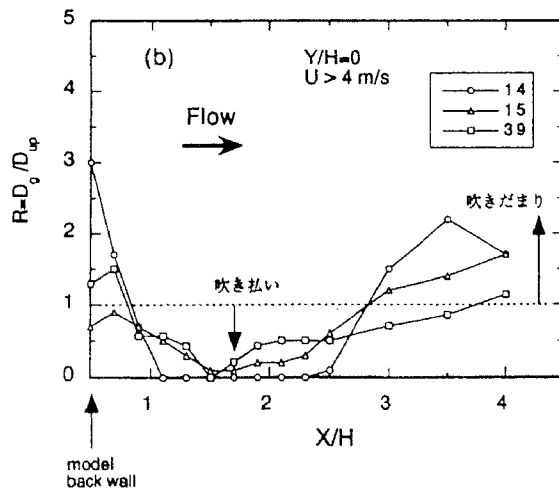


(b) 老川等による野外観測結果³¹⁾

図5.3 建物風上側の中心断面位置における積雪分布の比較



(a) 加速度分布を用いた予測結果



(b) 老川等による野外観測結果³¹⁾

図5.4 建物風下側の中心断面位置における積雪分布の比較

5.3.2 アーチ型屋根建物における屋根上の積雪分布

アーチ型屋根建物の屋根上における積雪分布について、筆者が行った風洞実験結果から求めた積雪分布の予測結果を示す。図5.5に風洞実験によるアーチ型屋根建物モデル周辺の平均風速ベクトル分布を示す。この風洞実験では、模型軒高さ H における平均風速は、約 6.6m/sec 、高さ方向の平均風速勾配が $\alpha=1/9$ のべき指数分布に従う境界層流を用いている。模型は、軒高さ H (40mm)、長さ $4H$ (160mm)、軒から頂部までの高さが $0.4H$ (16mm)の円弧屋根を持つ2次元形状である。測定には、スプリットファイバークロブを用いた。

図5.6にアーチ型屋根建物モデル上における水平方向の流れの平均加速度分布を示し、図5.7に積雪分布の予測結果の模式図を示す。この結果では、風上側の積雪が少なく、風下側の積雪が多い。これは、H.J.Thorburn等³⁶⁾が観測によって示した積雪分布性状に類似しており、予測結果が妥当であると言える。

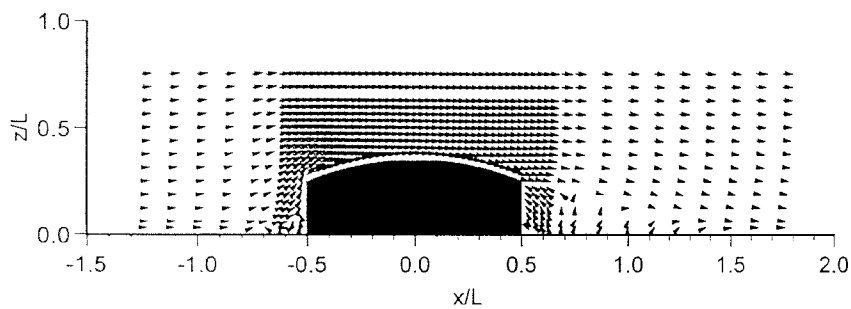


図5.5 アーチ型屋根建物モデル周辺における平均風速ベクトル分布

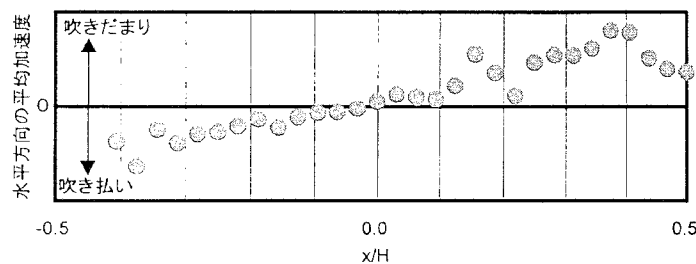


図5.6 アーチ型屋根建物モデル上における水平方向の流れの平均加速度分布

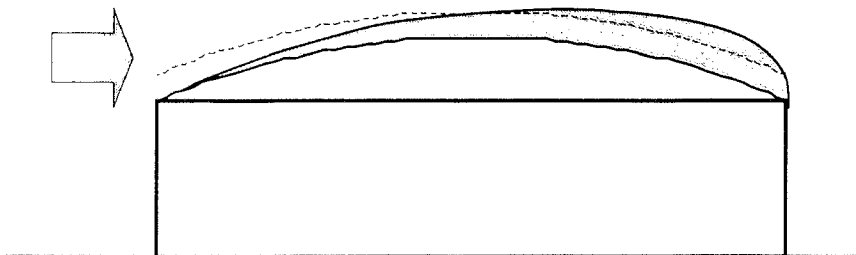


図5.7 加速度分布を基にしたアーチ型屋根建物モデル上の積雪分布の予測結果

5.3.3 丘状地形周りにおける地表面の積雪分布

丘状地形周りにおける積雪分布について、筆者が行った風洞実験結果から求めた積雪分布の予測結果を以下に示す。

図5.8に風洞実験による丘状地形モデル周りの平均風速ベクトル分布^{54), 55)}を示す。この風洞実験では、高さ方向の平均風速勾配が $\alpha=1/7$ のべき指数分布に従う境界層流を用い、丘状地形は頂部高さ H (60mm)、斜面は余弦の2乗で定義される曲線を用いた2次元モデルである。

図5.9に丘状地形モデル上における水平方向の流れの平均加速度分布を示し、図5.10に積雪分布の予測結果の模式図を示す。この結果では、風上側の積雪が少なく、風下側の積雪が多い分布を示す。これは、一般的に知られた分布形状をよく表していると言える。

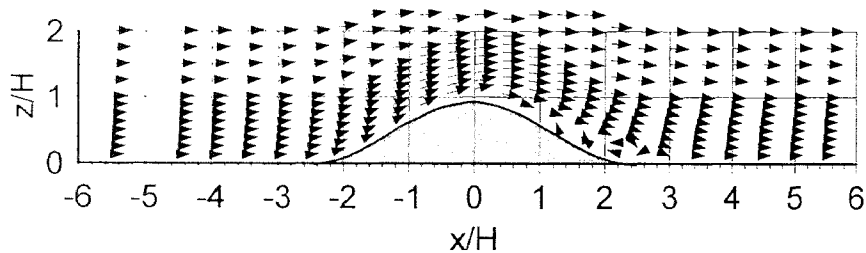


図5.8 丘状地形モデル周辺における平均風速ベクトル分布^{54), 55)}

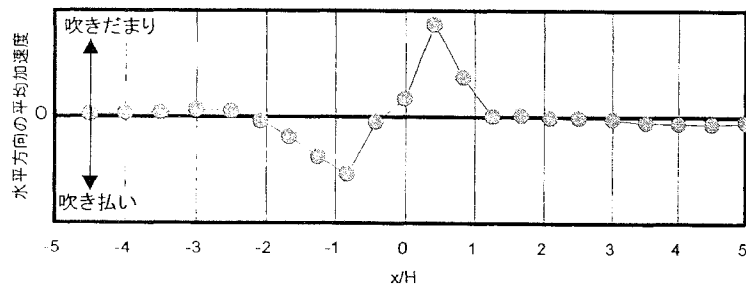


図5.9 丘状地形モデル上における水平方向の流れの平均加速度分布

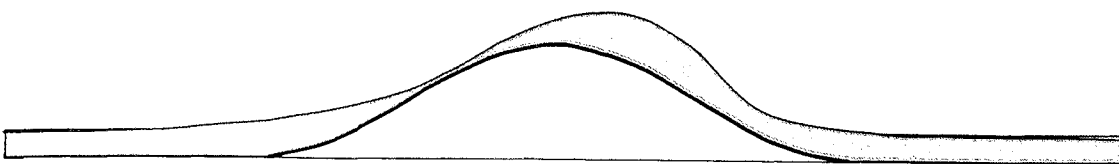


図5.10 加速度分布を基にした丘状地形モデル上の積雪分布の予測結果

5.3.4 階段状屋根建物における下段屋根上の積雪分布

2章で示した観測によって得られた2段屋根建物の下段屋根上における積雪分布の状況を写真5.1および写真5.2に示す。両写真とも、2001年2月20日に撮影したものであり、写真5.1は下段屋根が風上の場合であり、写真5.2は下段屋根が風下側の場合である。

3章で示した階段状屋根建物周囲の気流分布を用いて、下段屋根上における吹きだまり分布の予測を行った結果を、図5.11および図5.12に示す。

4章において、それぞれの風向の場合の中央断面位置における加速度分布と積雪分布は、概ね一致することを示したが、面的な分布性状についても、ほぼ一致していると言える。下段屋根が風上となる場合、積雪分布は、予測結果および観測の両者とも、三角形に近い平面分布を示している。また、予測結果（図5.11）では、屋根の端部において強い吹き払いを示しているが、写真5.1においても、その部分は雪が吹き払われ積雪が全くない。これに対して、下段屋根が風下側となる場合の予測結果（図5.12）では、下段屋根が風上となる場合と比較して、吹き払いが弱く、写真5.2においても、屋根面上のすべてにおいて、積雪が残っている。



写真5.1 下段屋根が風上側の場合の下段屋根上における積雪状況

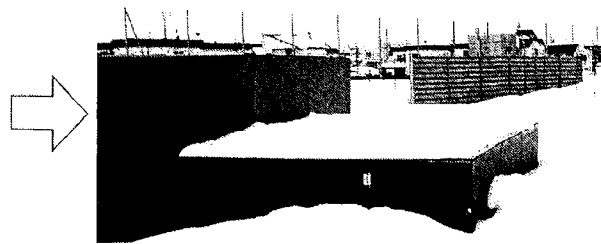


写真5.2 下段屋根が風下側の場合の下段屋根上における積雪状況

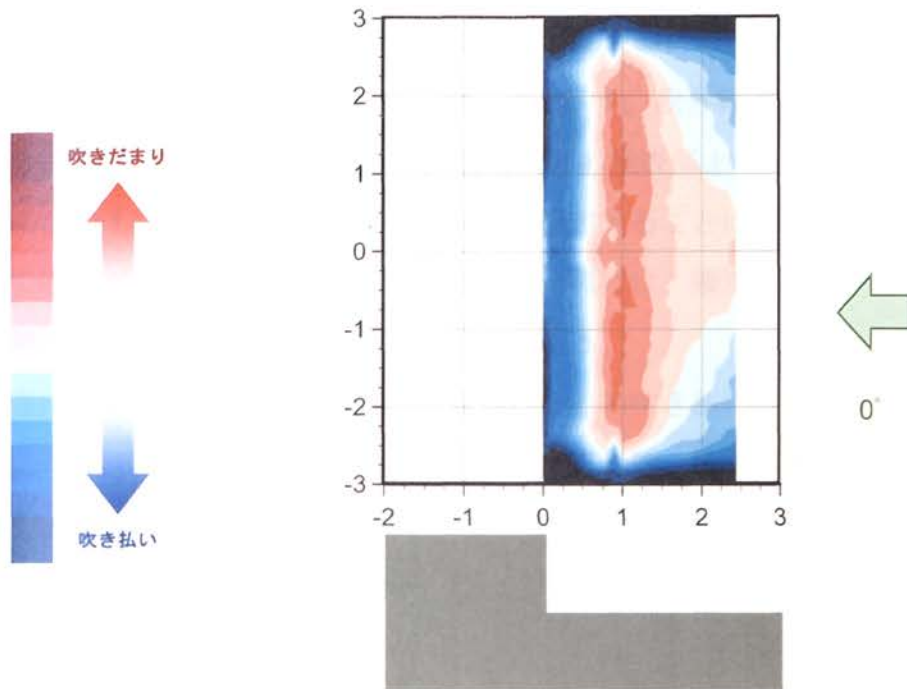


図5.11 下段屋根が風上側の場合の下段屋根上における積雪分布の予測結果

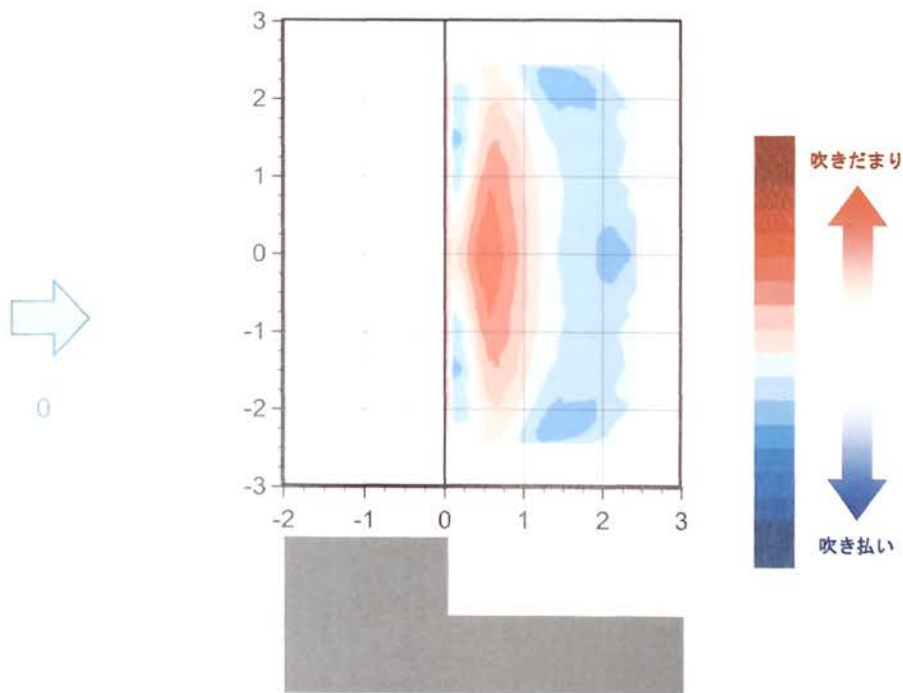


図5.12 下段屋根が風上側の場合の下段屋根上における積雪分布の予測結果

5.3.5 階段状屋根建物周りの地表面における積雪分布

2章で示した観測時に撮影した2段屋根建物周りの地表面における積雪の状況を、写真5.3に示す。また、3章で示した2段屋根建物周りの地表面における気流分布を用いて、積雪分布の予測を行った結果を、図5.13から図5.18に示す。屋外観測では、屋根上積雪は、測定後に、毎回、すべて除雪していたが、建物周囲の地表面上は、除雪を行っていない。従って、写真に示す積雪分布を形成した風向角を特定することはできず、様々な風向角の風による積雪性状が累積した結果であると言え、一概には、積雪分布の予測結果との対比はできないが、両者の比較から概ね次のことが言える。

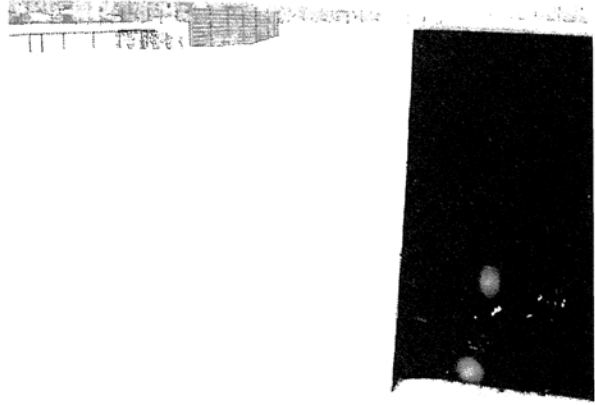
建物風上側において、吹き払いの領域が見られ、その吹き払いの強さは、下段屋根が風上の場合に比べて、下段屋根が風下の場合が強い。これは、観測写真、予測結果ともに見られる現象である。

観測写真、予測結果とも、建物風下側においては、風上側と比較して積雪が少ない性状を示す。

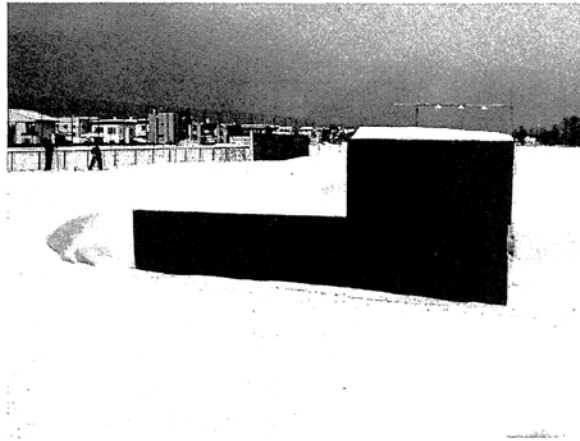
観測写真では、建物側面において積雪が少ない性状を示す。これに対して、積雪予測の風向角が 0° の場合では、積雪が多い結果を示している。しかし、積雪予測の風向角が 10° および 20° の場合に、吹き払いが見られ、観測写真の積雪性状は、風向角の変化によって吹き払われたものと考えられる。



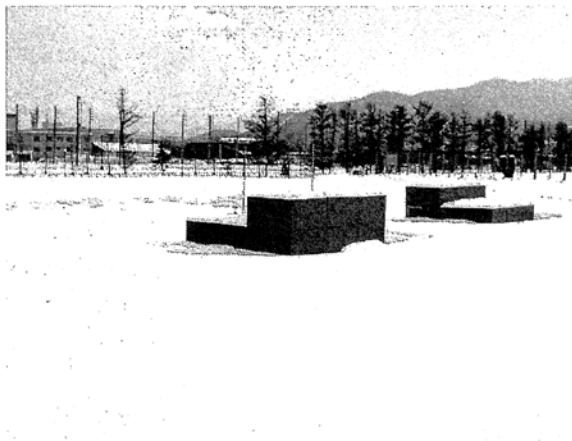
(a) 下段屋根が風上側の場合の建物風上側における吹き払いの状況



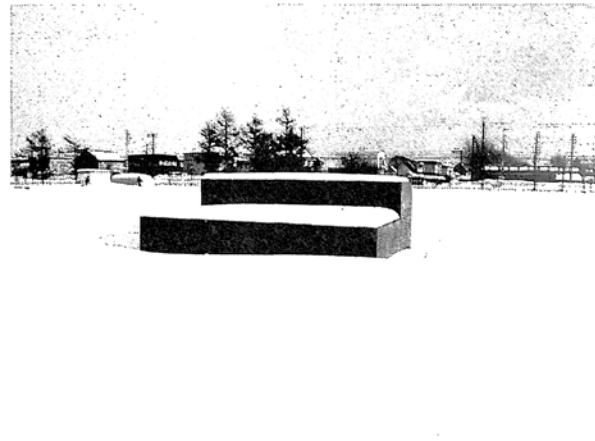
(b) 下段屋根が風下側の場合の建物風上側における吹き払いの状況



(c) 下段屋根が風上側の場合の建物側面から見た積雪の状況



(d) 建物前方と比較して建物後方の積雪が少ない状況



(e) 建物前方から見た積雪の状況

写真5.3 2段屋根建物周りの積雪の状況

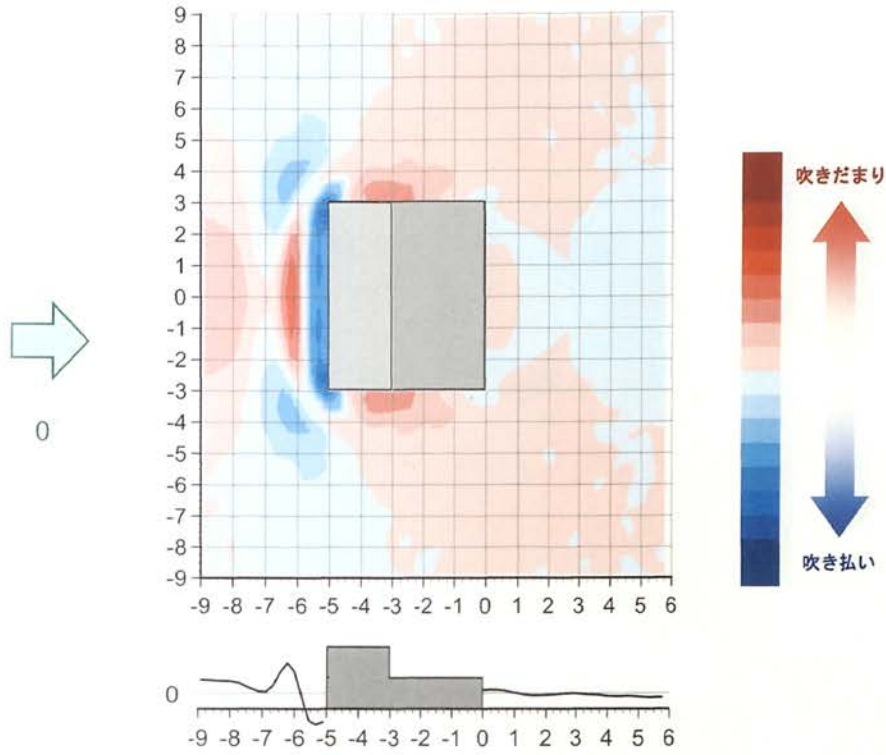


図5.13 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：0°）

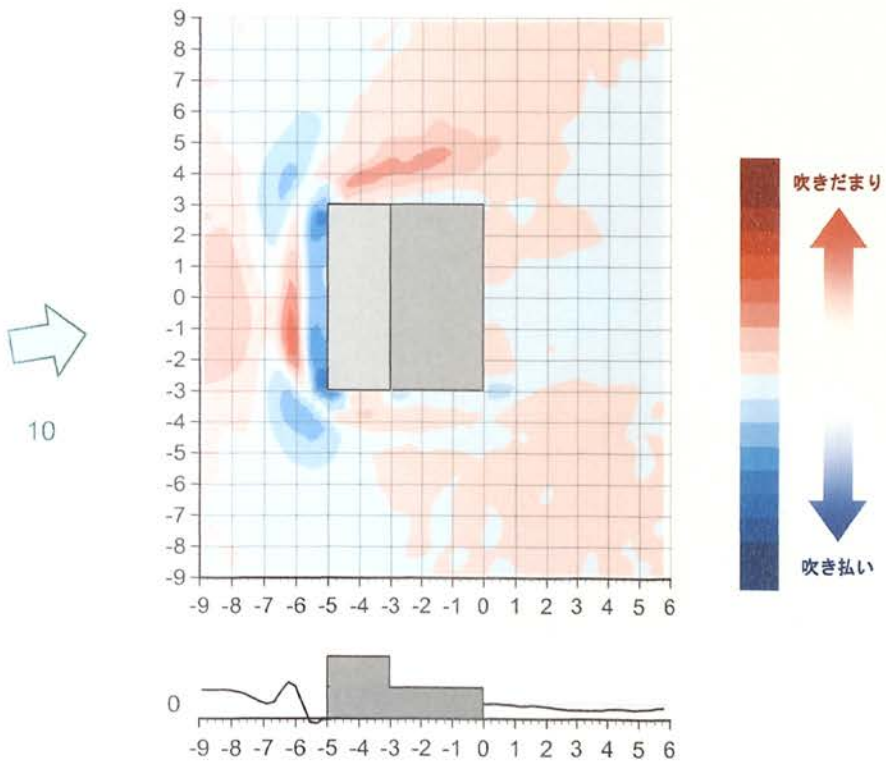


図5.14 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：10°）

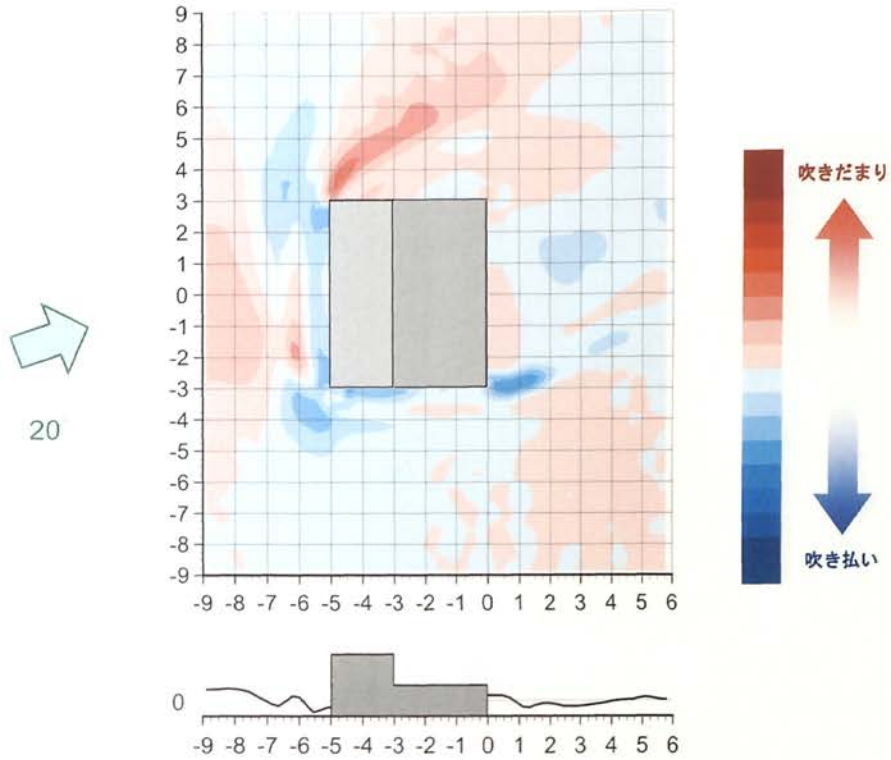


図5.15 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角： 20° ）

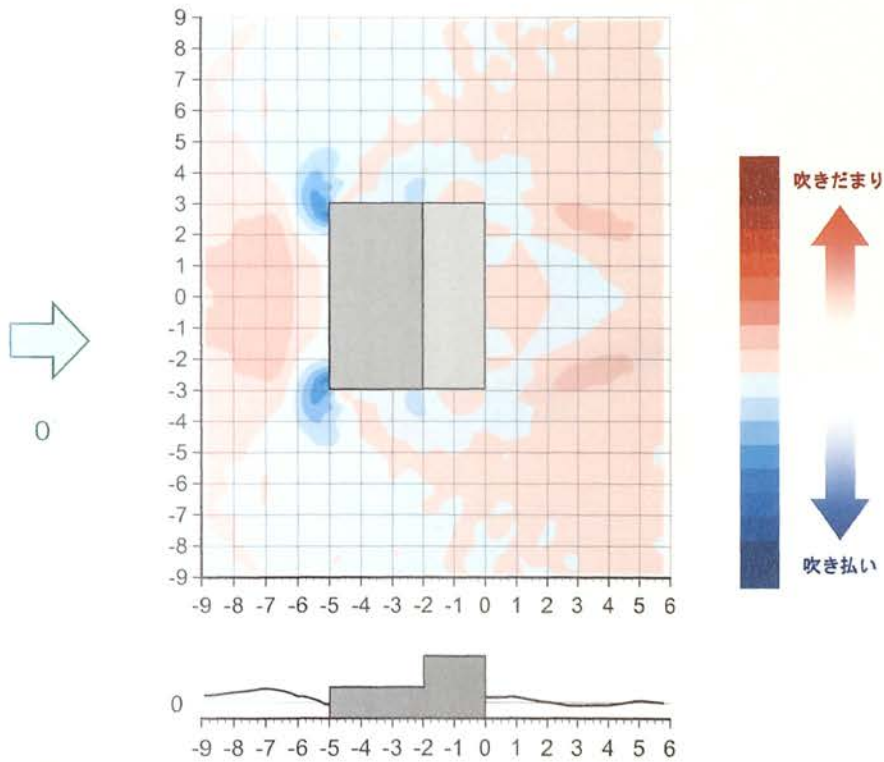


図5.16 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角： 0° ）

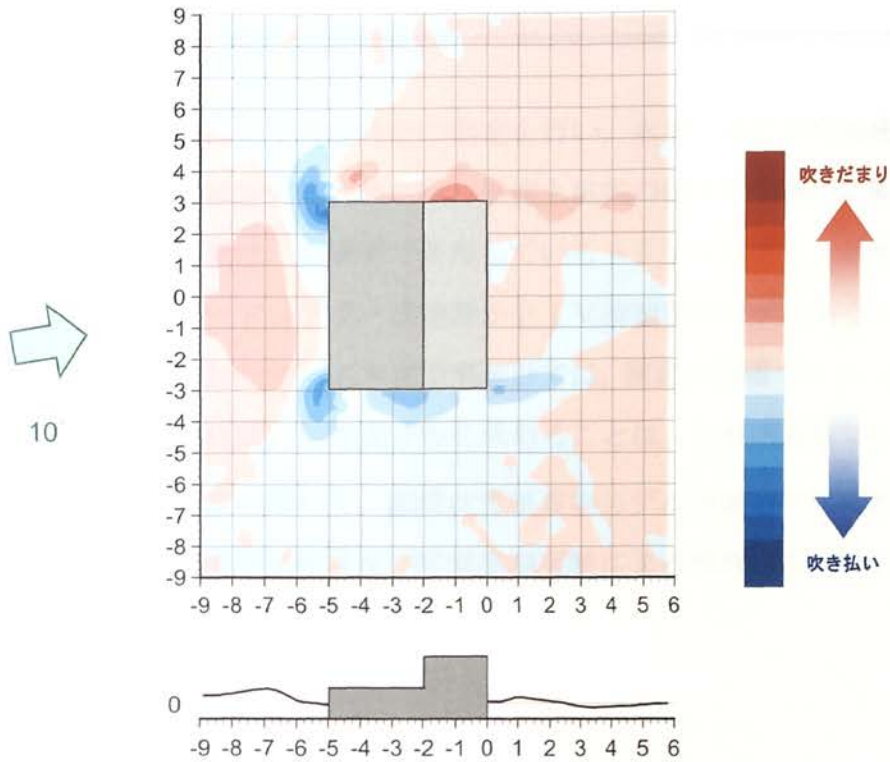


図5.17 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：10°）

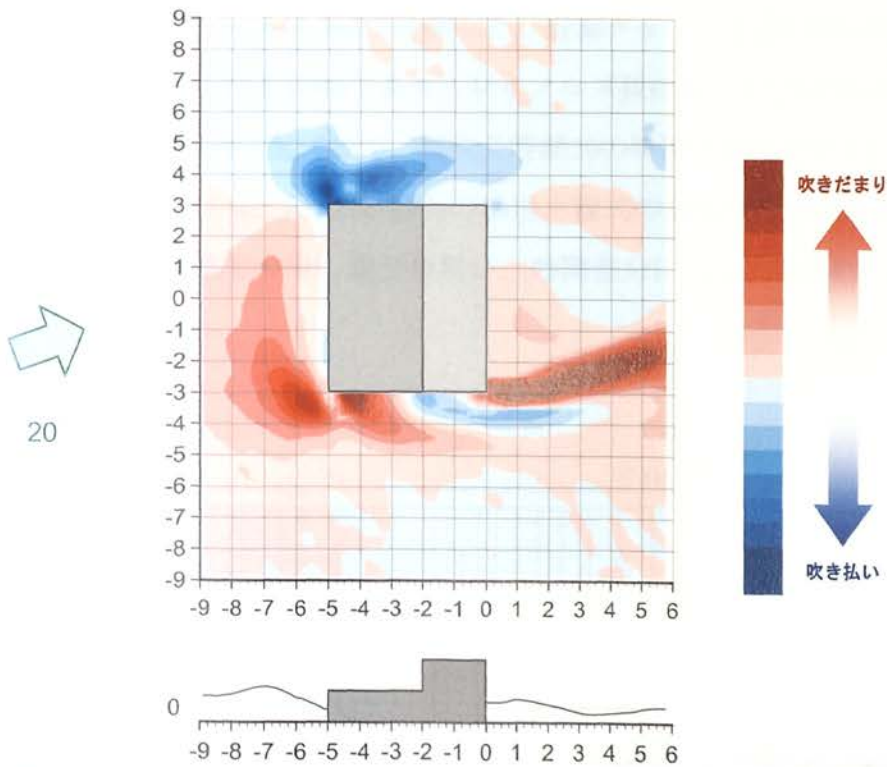


図5.18 下段屋根が風下側の場合の積雪分布予測（風向角：20°）

5.4 積雪分布予測への気流数値計算結果の適用

本研究では、風洞実験により気流性状の測定を行い、水平方向の平均加速度を求めてきた。平均加速度の分布を算定するためには、風速と風向の両者の分布が必要であり、その測定が可能である測定装置は、本研究で使用しているトリプルスプリット型ファイバースコープ⁵⁰⁾のほか、レーザードップラー流速計かPIV流速計のいずれかであり、一般的に用いられている熱線流速計やサーミスタ型風速計では、測定が困難である。これに対して、気流数値計算結果を用いれば、加速度分布を求めることは、比較的容易である。

ここでは、気流数値計算を用いて、階段状屋根建物モデル周囲の平均加速度分布を算定し、風洞実験による加速度算定結果及び吹雪風洞実験による積雪分布の測定結果を比較し、積雪分布予測への適用について検討する。

5.4.1 気流計算の方法

計算には、改良型Launder & Katoモデル⁵⁶⁾を用いた。モデルの概要を表5.1に示す。計算格子は、風方向が建物中心から風上21.5H、風下39.1H、風直角方向38H、高さ方向16Hの領域を、 $113(x) \times 82(y) \times 48(z) = 444,768$ で分割した。計算グリッドを図5.19に示す。最小格子幅は、x, y方向がH/20、z方向がH/40であり、レイノルズ数は $Re=23,120$ である。境界条件を表5.2に示す。計算時間間隔は0.005で、無次元時間20の時間平均値を求めた。平均流の運動方程式、乱流エネルギー k 、乱流散逸率 ϵ の輸送方程式の移流項にはQUICKスキームを、他の空間微分項には2次精度の中心差分を用い、時間差分には1次精度のBackwardスキームを用いた。

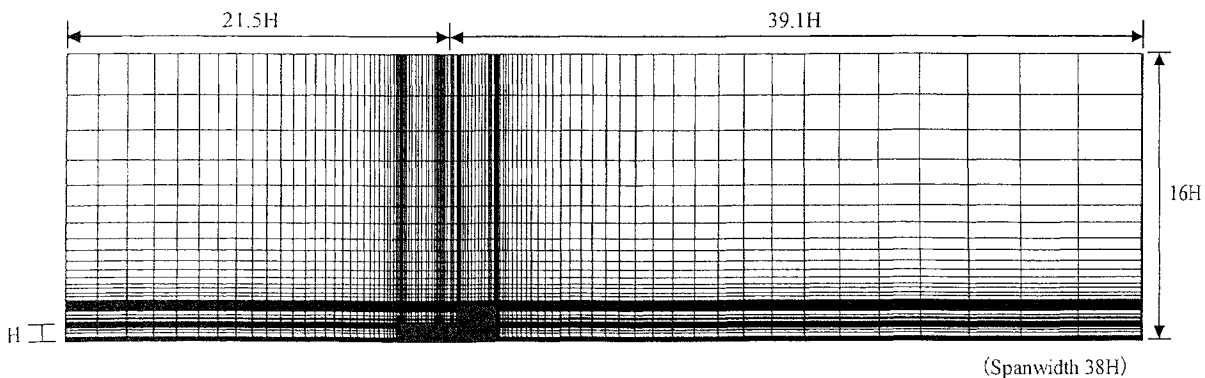


図5.19 計算グリッド

表5.1 改良型Launder & Katoモデルの基礎方程式⁵⁶⁾

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(P + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} C_1 P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad (\Omega/S \leq 1) \quad , \quad P_k = \nu_t S^2 \quad (\Omega/S > 1) \quad , \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2} \quad , \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right)^2}$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad \sigma_1 = 1.0, \quad \sigma_2 = 1.3$$

表 5.2 境界条件

inflow	$\langle u_i(x_3) \rangle$: wind tunnel test result ($\langle u_i(x_3) \rangle \cong x_3^{1/7}$), $\langle u_2(x_3) \rangle = \langle u_3(x_3) \rangle = 0$, $k(x_3)$: wind tunnel test result $l(x_3) = (C_\mu k(x_3))^{1/2} (\partial \langle u_i(x_3) \rangle / \partial x_3)^{-1}$ (at inflow boundary $P_k = \varepsilon$), $\varepsilon(x_3) = C_\mu k(x_3)^{3/2} / l(x_3)$, $\nu_t(x_3) = k(x_3)^{1/2} l(x_3)$
outflow	$\langle u_i \rangle, k, \varepsilon : \partial / \partial x_1 = 0$
upper and side faces of computational domain	$\langle u_n \rangle = 0, \langle u_t \rangle, k, \varepsilon : \partial / \partial x_n = 0$ $\langle u_n \rangle$: normal velocity component, x_n : spatial coordinate normal to the boundary plane $\langle u_t \rangle$: tangential velocity component
solid wall	$\frac{\langle u_t \rangle_p}{(\tau_w / \rho)} (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[E \frac{1}{2} h_p (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2} / \nu \right]$ $\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa h_p} \ln \left[E h_p (C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2} / \nu \right] \quad \varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa h_p / 2} \quad ,$ $k : \partial k / \partial x_n = 0$, $\kappa = 0.4, C_\mu = 0.09, E = 9.0$

5. 4. 2 加速度分布の算定

気流数値計算結果を用いた加速度分布の算定においては、5.2.3項で示した(5.4)式に、 w 方向成分を加えた下記の(5.6)式を用いた。

$$\bar{a}_u = \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (5.6a)$$

$$\bar{a}_v = \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (5.6b)$$

また、気流数値計算結果を用いて、前節で用いている(5.4)式と(5.6)式の両者を用いて加速度分布を算定し、その違いが小さいことを確認した。

5. 4. 3 吹きだまりの予測結果

気流数値計算による地表面近傍の流れの平均加速度分布を図5.20に、風洞実験（3.4.1項の測定方法に準ずる）による流れの平均加速度分布を図5.21に示す。ここで、平均加速度が負の領域を□で示した。気流数値計算の加速度の算定位置は、風洞実験とほぼ同様の地上高さ（ $z/H=1/9$ ）とした。

また、吹雪風洞実験（3.3.1項による測定方法に準ずる）による積雪深（吹きだまり係数 C_s ）の分布を図5.22に示す。ここでは、吹きだまり係数が正の領域を、□で示した。

吹雪風洞実験による積雪深の分布（図5.22）を見ると、モデル風上側に大きな吹きだまりが形成されている。この吹きだまりのピークは、 $x/H=-4$ 付近に見られ、モデル近傍ではやや減少している。またモデル隅角部では、吹き払いが生じている。モデル側面近傍では、吹き払いが生じ、やや離れた位置（ $y/H=5$ ）に、流れ方向の帯状の吹きだまりが形成されている。モデル風下側は、変化の度合いが比較的小さい。

数値計算及び風洞実験による平均加速度の分布（図5.20、図5.21）をみると、両者は、概ね対応した結果を示しており、本計算結果の妥当性が確認できる。両気流分布において、モデル風上側に大きな負の加速度の領域が形成され、そのピークは、 $x/H=-4.5$ 付近にある。これは、図5.22に示したモデル風上側の吹きだまりと比較して、ピーク位置がやや異なるものの、全般的な傾向は概ね一致している。また、モデル風上隅角部では、正の強い加速度が見られ、図5.22の吹き払い位置と一致する。図5.22において見られたモデル側面の帯状の吹きだまりは、図5.20及び図5.21の加速度分布において、類似した負の加速度領域が

形成されているが、図5.22では、モデルと吹きだまり領域が接していないのに対して、加速度分布では、モデルに接している違いが見られる。モデル風下側では、図5.22においては、吹きだまりの凹凸が少ない（等高線が粗）状態であるのに対して、加速度分布においては、等値線が密な状態が見られるが、分布の傾向は類似する。

以上の結果から、気流計算結果による流れの加速度分布は、風洞実験による加速度分布と良い対応を示し、更に、吹雪風洞実験で得られた積雪深分布と比較した場合、建物風上側の吹きだまり領域、風上隅角部付近の吹き払い、建物横直下の吹き払いとやや離れた帯状の吹きだまりなどにおいて概ね良い対応を示した。ただし、本検討で用いたk-eモデルの一般的な特性として、建物風下側の流れの再現性に問題を残すことから、建物風下側の積雪分布の一致度は高くない。

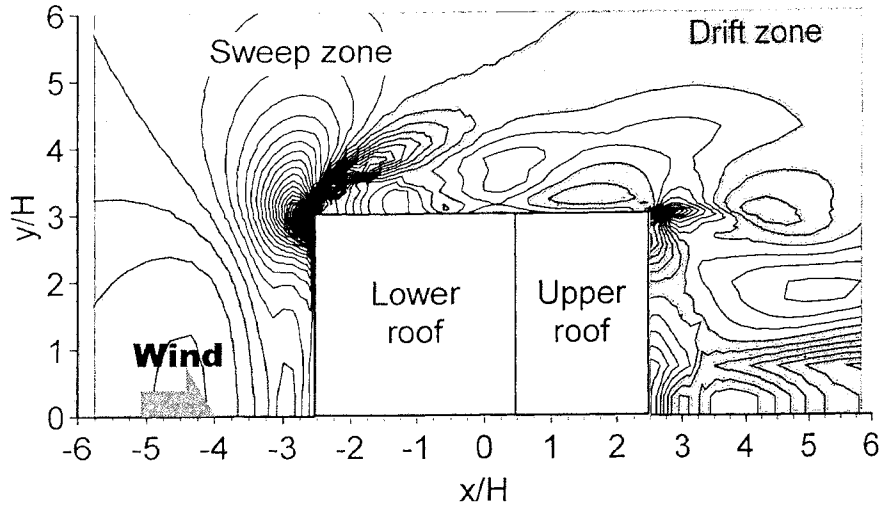


図5.20 気流数値計算による平均加速度分布

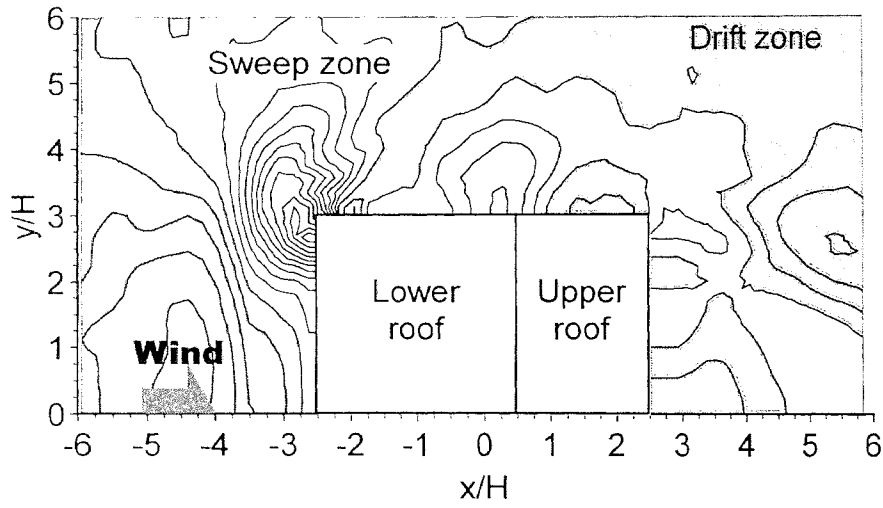


図5.21 風洞実験による平均加速度分布

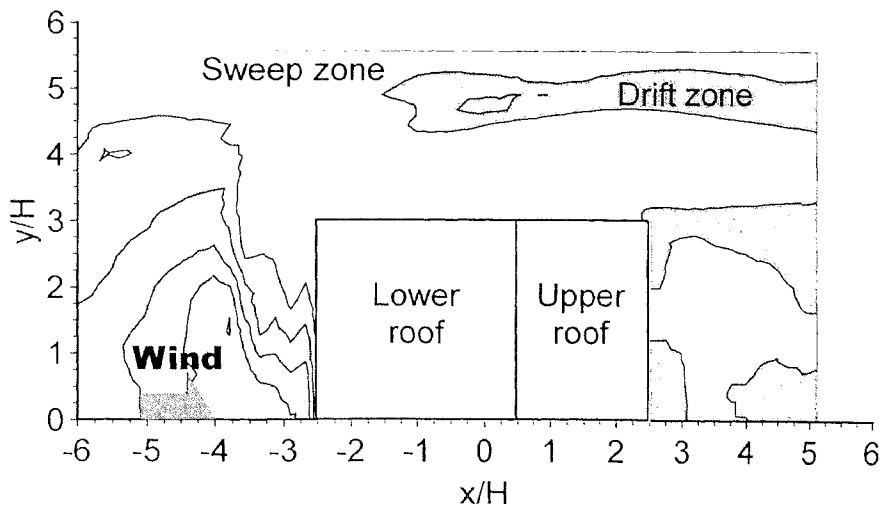


図5.22 吹雪風洞実験による積雪深分布

5.5 まとめ

4章において示した地表面や屋根面に近接した位置における流れの水平方向の平均加速度と積雪分布との間の負の相関関係を用いて、種々の建物や地形周りにおける吹きだまりと吹き払いの予測を試み、その有効性を検証した。

直方体周りの地表面における中心断面位置では、風上側の吹き払いのピーク位置および吹きだまりのピーク位置が一致し、観測による積雪分布と予測結果は概ね一致した。また、風下側の分布では、建物近傍に吹きだまりが形成され、かつ、その背後に吹き払いが形成されること、およびその吹き払いのピーク位置が一致し、観測による積雪分布と予測結果は類似していることを示した。

アーチ型屋根建物モデルの屋根面における積雪分布は、風上側において吹き払いが生じ、風下側に吹きだまりが形成されることが予測でき、これは、既往の研究に示された観測による積雪分布性状に類似しており、予測結果が妥当であることを示した。

丘状地形モデル上における積雪分布の予測結果では、風上側の積雪が少なく、風下側の積雪が多く、また、丘状地形の風上側において、やや積雪が多い分布を示し、これは、一般的に知られた分布形状をよく表していることを示した。

二段屋根建物モデルにおける下段屋根上の積雪分布の予測結果と観測写真の比較において、両者が概ね一致しており、予測結果が妥当であることを示した。また、その周囲の地表面における積雪分布の予測結果においても、観測結果に対応する部分が多く見られることを示した。

風洞実験と比較して、より加速度分布の算定に適すると考えられる気流数値計算を用いた予測結果の検討では、建物風上側の吹きだまり領域、風上隅角部付近の吹き払い、建物横直下の吹き払いとやや離れた帯状の吹きだまりなどにおいて概ね良い対応を示した。ただし、本検討で用いたk-εモデルの一般的な特性として、建物風下側の流れの再現性に問題を残すことから、建物風下側の積雪分布の一致度は高くない。

以上の結果として、地表面や屋根面近傍における風の水平方向の平均加速度を用いた積雪分布予測の有効性を確認した。

6章

結 論

本研究の目的は、建築物の耐雪設計において重要なパラメータである偏荷重分布を、風の流れの性状を用いた予測法を開発することである。

本論文では、上記の目的に対して、2章において積雪分布を調査し、3章において気流性状を調査し、4章において両者の関係を検討し、5章においてその有効性を確認した。以下にそのまとめを示す。

2 章

下部間隙を持つ吹きだめフェンスおよび2段屋根建物を対象とした屋外観測を行い、その周囲や屋根上における積雪分布性状と風向、風速との関係を明らかにした。

下部間隙を持つ吹きだめフェンスでは、吹きだまりがピークを形成する範囲は、フェンスの風上側では $X/H=-2.0\sim-0.67$ 、風下側では $X/H=1.0\sim1.67$ であること、フェンスの風上側ピーク位置は、積雪深の増加に伴い $X/H=-2.0$ から $X/H=-0.67$ に推移すること、風上側の積雪分布に比べて、風下側の積雪分布は、気象条件の違いに影響を受け易く、強風の頻度が高い場合、風下側の積雪深は全般的に小さくなることを示した。さらに、試験体の3次元性の影響を風洞実験により検討し、本章で示した積雪分布性状を、本試験体より長いフェンスにおける積雪分布性状と比較した場合、フェンス風下側の吹きだまり位置よりさらに風下側の範囲($x/H>2\sim2.5$)においては、その流れ性状の違いから、積雪性状が異なる可能性があり、これに対して、フェンス風下側の吹きだまりの形成位置付近($0<X/H<2\sim2.5$)においては、何れもフェンスに直交する類似した流れが観察されることから、フェンス形状の3次元性及び主風向のずれによる吹きだまり性状への影響は少ないことを確認した。

2段屋根建物では、下段屋根上における積雪深分布の形状をⅠ型～Ⅲ型の3つに分類し、それぞれが発生した風向、風速との関係を明らかにした。分類は、積雪深が一定となる分布形状をⅠ型とし、上段壁面側に偏り、下段屋根の軒方向に向かって概ね単調に減少する分布形状をⅡ型とし、下段屋根面中央より上段壁面寄りに積雪深のピークを持つ分布形状をⅢ型とした。下段が風上側の場合、降雪時の平均風速が $2.3\sim2.4\text{m/sec}$ 程度以下では、下段屋根上の積雪は概ね一定(Ⅰ型)となり、それ以上の風速では、分布に偏りが生じる。その時、風向角が 0° および 22.5° の場合は、上段壁面付近が吹き払われる分布形状(Ⅲ型)となり、風向角が 45° の場合では、上段壁面側に偏る分布形状(Ⅱ型)となる。これに対して、下段が風下側の場合、風向角が $0^\circ\sim45^\circ$ の範囲では、風向角による分布形状の差は小さく、風速による差が大きい。積雪がほぼ一定(Ⅰ型)となるのは、平均風速が約 2m/sec 以下の場合であり、下段が風上側の場合と比べて、その風速値はやや低い。平均風速が

3m/sec程度以下の場合には、上段壁面側に偏る分布形状（Ⅱ型）を示し、3m/sec程度以上の平均風速では、 $x/H=0.5$ 付近に吹きだまりのピークを持つ分布（Ⅲ型）を示す。つまり、下段屋根が風上側となる場合では、風向角による依存が大きく、下段屋根が風下側となる場合では、風速による依存が大きいことを示した。また、吹きだまりが形成される風速は、屋根面高さにおいて、平均風速が約2m/sec以上であることを明らかにした。

3 章

二次元の吹き止めフェンス及び下部に開口を持つ吹きだめフェンス、階段状屋根建物を対象として、その周囲の気流性状および吹きだまりの形成に伴う気流の変化を調査し、以下のことを明らかにした。

吹き止めフェンスの場合は、フェンス風上側下部に渦が確認でき、地上付近では $x/H=-1$ ～0の範囲でこの渦による逆流が発生する。フェンス風下側の地上付近では、 $x/H>1$ の範囲で逆流を観察した。

吹きだめフェンスの場合は、下部開口から風が風下に流れ込むため、フェンス前面の渦と逆流域は観察されない。フェンス風下側には、S字の流れと更にその後方に大きな渦領域が見られ、その渦内の風速は比較的低い。フェンス上部から剥離した流れは、 $x/H=8$ より後方で再付着し、その影響で $x/H=3\sim 7$ 程度の地上付近では逆流がみられる。この逆流とフェンス下部からの流れが $x/H=3$ 付近の地上付近で合流する。積雪が進むと、積雪がない場合と比較して、流れの性状に変化がみられる。フェンス風上側では、吹きだまりのピークからの剥離により吹きだまりのピークの風下側に渦が発生する、この渦により、 $x/H=-0.67\sim 0$ の範囲では吹きだまりのピークに向かう流れが形成される。これは、吹きだまりを成長させる方向であることがわかる。また、フェンス下部間隙からの流れとその風下側の逆流は、吹きだまりによって、流れが拘束され、その合流点は、吹きだまりのピーク位置である $x/H=1.67$ と一致している。この流れにより、吹きだまりは、更に成長するものと考えられる。

階段状屋根建物を対象とした実験では、下段屋根が風上側の場合、下段屋根の端部から強い剥離流れが生じ、下段屋根上に渦を形成する。この渦により、屋根面近傍においては、全面に渡って主流方向とは逆の流れを示す。この逆流の最大値は、 $x/H=0.5$ の位置において、 $\bar{u}/U_0=-0.4$ であった。また、下段屋根面上では、 $u'/U_0=0.3$ 程度の比較的大きな値を示しており、剥離域内の風速変動は大きい。下段屋根が風下側の場合では、下段屋根上やその風下側の領域は、上段屋根の風上側端部からの強い剥離流れによる逆流域に覆われている。

下段屋根の端部では、逆流による弱い剥離が確認でき、下段屋根面上は、全面に渡り主流方向とは逆の流れであり、屋根面近傍における逆流の最大値は、 $x/H=1$ 程度において、 $\bar{u}/U_0=-0.3$ 程度を示すが、 $u'/U_0=0.1$ 程度であり、下段屋根が風上側の場合と比較して、風速の乱れが小さいことを明らかにした。

4 章

吹きだめフェンス周りおよび2段屋根建物の屋根上を対象として、2章に示した積雪分布性状と3章に示した気流性状との関連性を検討した結果、以下のことが得られた。

吹きだまり性状と地表面および屋根面近傍における水平方向の平均風速の絶対値とは、フェンス風上側の積雪深が増加する部分において、両者の変化は良い対応を示すが、フェンスのその他の領域および2段屋根建物の屋根面を対象とした場合、両者の関連性は低い。既往の研究においても、障害物の風上側の吹きだまりは、せん断応力の変化に密接に関係することが示されているが、障害物の風下側などの剥離領域内においては、その関係が成り立たないことが示されている。つまり、全ての領域を合わせて見た場合には、両者の相関性は低いと言え、同じ風速値であっても、積雪深は一概には定まらないことがわかる。すなわち、物体の風下側や屋根面の様に、剥離流れの領域内においては、風速値だけを用い、積雪分布を予測することは困難であると言える。

一方、地表面や屋根面に近接した位置における風の水平方向の平均加速度は、積雪分布と良い対応を示し、雪の吹きだまりや吹き払いの形成には、屋根面や地表面に近接した位置における風の水平方向の平均加速度が密接に関係しており、吹きだまり係数 C_s と流れの水平方向の平均加速度 \bar{a}_u には、次式に示す負の相関関係があることを明らかにした。

$$C_s = A \times \bar{a}_u \quad (A : \text{比例定数}, A < 0)$$

このことから、一般的な風洞実験や数値流体解析によって、屋根面や地表面に近接した位置における風速分布を得ることで、風雪時に生じる吹きだまりと吹き払いの形成範囲やそのピーク位置を概ね特定することが可能である。

なお、吹きだまりが形成された場合、その近傍の流れ性状は、吹きだまり形状に応じて変化すると考えられる。しかしながら、吹きだまりの形成による気流変化後の雪面近傍における加速度は、積雪前の加速度と類似した分布性状を示すこと、吹きだまりの範囲やそのピーク位置は、積雪深の増加に伴って多少の変化が見られるものの、概ね初期性状を保つことから、積雪前の気流性状を用いて吹きだまりを予測することは、妥当であると考えられる。

5 章

4章において示した地表面や屋根面に近接した位置における流れの水平方向の平均加速度と積雪分布との間の負の相関関係を用いて、種々の建物や地形周りにおける吹きだまりと吹き払いの予測を試み、その有効性を検証した。

直方体周りの地表面における中心断面位置では、風上側の吹き払いのピーク位置および吹きだまりのピーク位置が一致し、観測による積雪分布と予測結果は概ね一致した。また、風下側の分布では、建物近傍に吹きだまりが形成され、かつ、その背後に吹き払いが形成されること、およびその吹き払いのピーク位置が一致し、観測による積雪分布と予測結果は類似していることを示した。

アーチ型屋根建物モデルの屋根面における積雪分布は、風上側において吹き払いが生じ、風下側に吹きだまりが形成されることが予測でき、これは、既往の研究に示された観測による積雪分布性状に類似しており、予測結果が妥当であることを示した。

丘状地形モデル上における積雪分布の予測結果では、風上側の積雪が少なく、風下側の積雪が多く、また、丘状地形の風上側において、やや積雪が多い分布を示し、これは、一般的に知られた分布形状をよく表していることを示した。

二段屋根建物モデルにおける下段屋根上の積雪分布の予測結果と観測写真の比較において、両者が概ね一致しており、予測結果が妥当であることを示した。また、その周囲の地表面における積雪分布の予測結果においても、観測結果に対応する部分が多く見られることを示した。

風洞実験と比較して、より加速度分布の算定に適すると考えられる気流数値計算を用いた予測結果の検討では、建物風上側の吹きだまり領域、風上隅角部付近の吹き払い、建物横直下の吹き払いとやや離れた帯状の吹きだまりなどにおいて概ね良い対応を示した。ただし、本検討で用いた k-ε モデルの一般的な特性として、建物風下側の流れの再現性に問題を残すことから、建物風下側の積雪分布の一致度は高くない。

以上のように、本論文では、屋根面や地表面に近接した位置における流れの水平方向の加速度と積雪分布の間に負の相関関係があることを示し、その関係を用いて吹きだまりや吹き払いが発生する位置やピークを予測することが可能であることを示し、その有効性を確認した。

将来の課題と発展性

本研究では、雪の吹きだまりに対して、流れの水平方向の加速度が大きく関係し、両者の間に負の相関関係があるとし、吹きだまり係数 C_s と流れの水平方向の平均加速度 \bar{a}_u の関係式として、次式を提案した。

$$C_s = A \times \bar{a}_u \quad (A : \text{比例定数}, A < 0)$$

本式を用いることで、吹きだまりと吹き払いの形成範囲やそのピーク位置を概ね特定することが可能である。しかし、現段階においては、比例定数 A を定めることはできない。比例定数を定めるためには、加速度を算定する地上または屋根上の高さ、加速度算定の基となる風速の基準化の定義を統一し、その上で、多くの事例を検証する必要があると考えられ、今後の課題として進めて行く必要がある。

また、吹きだまりの形成要因は、平均加速度がすべてではなく、その他の要因が存在することも事実である。その他の要因の中では、やはり風速（せん断応力）による影響が大きいと考えられる。このことから、より詳細な両者の関係式として、次式に発展することが予測される。

$$C_s = A \times \bar{a}_u + B \times \bar{u}_h \quad (A, B : \text{比例定数}, A < 0, B < 0)$$

\bar{u}_h は、水平方向の平均風速を示す。平均風速が大きく変化した場合に、吹きだまり性状に違いがみられる現象は、この項を入れることで表現できると考える。しかし、雪粒子が飛散し始める風速は、雪質や気温に大きく左右されることから、この水平方向の平均風速 \bar{u}_h は、吹きだまり係数 C_s や流れの水平方向の平均加速度 \bar{a}_u とは異なり、単純に無次元化することは難しく、比例定数 B を定めることは、更に多くの検討を必要とすると思われる。

謝 辭

本論文は、鹿島技術研究所、北海道工業大学、千葉工業大学の共同研究によって実施した吹きだまり性状予測に関する研究成果を基にして、取りまとめたものである。共同研究に関わった鹿島技術研究所の本郷剛上席研究員、北海道工業大学建築工学科の苫米地司教授、千葉工業大学工学部建築学科の上田宏助教授を初めとして、本論文をまとめるに当たり、ご指導、ご協力頂いた多くの方々に深く感謝致します。

私が学生の頃には、将来、このような論文を書くなどということは、全く思いも寄らないことであった。応援団にはまっていた私は、学部で2年留年し、在学6年目を迎える研究室選択では、応援団の先輩で、大変お世話になった岡崎充隆氏（現 長谷工コーポレーション技術研究所勤務）、木下氏（現 長谷工コーポレーション本社勤務）が在籍されていたという理由だけでその研究室を希望し、その結果として、専攻したのが建築材料および防災研究室、いわゆる川村研究室である。

川村研究室では、川村純夫教授（現 川村風科学研究所所長、大阪市立大学名誉教授）、故木本英爾助教授、木内龍彦助手（現 大阪市立大学講師）、中井重之氏（現 大阪市立大学主査）、そして、私が大学院の時に太陽工業から来られた谷口徹郎助手には、研究のいろはから暖かくご指導頂いた。研究内容はもちろんのこと、川村教授には、大阪北新地の高級クラブに連れて行って頂いたこと、木本助教授、木内助手には、数え切れなくらい飲み連れて行っていただいたこと、中井氏には自宅に招いていただいたことや秘蔵ライブラリで多大にお世話になったこと、谷口徹郎助手には、山陰カニ&コンパニオン旅行に連れて行って頂いたことなど、公私共々、思い起こせばきりが無いほど、皆様には大変お世話になりました。

1989年、M1の夏、木本講師に同行し、阿蘇で開かれた非定常空気力学懇談会に出席させていただいた。ここで、鹿島建設の本郷主任研究員（現 上席研究員）、近藤研究員（現 主管研究員）、鈴木研究員（現 主管研究員）に初めて出会った。と言っても、その時には別段何もなかったわけだが、その翌年、その時のことがきっかけで、川村教授に本郷主任研究員から就職のお誘いを頂いた。今、私が鹿島で研究を行っているのは、その縁である。

入社後、風洞建設に係わっていた私は、吹雪風洞装置を見せていただくために、北海道工業大学を訪れた。1993年7月9日のことである。この時が、本論文を終始ご指導いただいた苫米地司教授との最初の出会いであった。見学を一通り終えた後、権太という手稲駅前の居酒屋で、北海道の海の幸をたらふく頂いた記憶がある。ついでに、お酒もたらふく頂き、その夜の記憶は今なお定かではないが・・・。

その後、3年の後、本郷剛室長（現 上席研究員）の誘いを受けて、本論文の基となった共同研究に参加した。研究を進める中で、本郷上席研究員から、雪で論文を書かないかという進めを受けて、ここに至っている。数年に一度、数センチメートルの雪が積もるだけの和歌山に育った私にとって、「雪」と言われても、当初ピンと来ない存在であったが、本郷上席研究員の計らいで、冬の間、苫米地研究室にお世話になる機会を得た。2年間に渡る合計6ヶ月の間、冬の札幌で過ごした経験は、私にとっては貴重であり、本論文を進める上で大いに役立っている。また、入社10年目を迎えていた私にとっては、学生諸氏と共に過ごした日々は、懐かしさと共に新鮮さを感じる日々であり、研究以外の面でも大きな収穫を得たと実感する。

この様な機会を与えてくれた本郷剛上席研究員、内山正次地震動・風グループ長（現 上席研究員）、丹羽正徳部長（現 技術研究所次長）、大保地震動・風グループ長、高橋克也部長には、深く感謝致します。研究の実施では、吉田正邦上席研究員、本郷剛上席研究員、眞田早敏上席研究員、近藤宏二主管研究員、鈴木雅靖主管研究員、山本学研究員（現 東京支店課長代理）、林田宏二研究員、中山かほる氏、嶋田知恵氏、綿貫久美子氏、太田芳明氏（当時 セコムスタッフサービス）、宮永隆司氏（メジャアメント、代表取締役）、堀田貴欣氏（セコムスタッフサービス）、など、多くの方々のご指導、ご協力、励ましを頂きました。特に本郷剛上席研究員には、本研究の全般にわたりご指導、助言を頂き、また、近藤主管研究員には、本研究の要である加速度算定や気流数値計算においてご指導、ご協力を頂いた。林田宏二研究員、宮永隆司氏には、私が札幌長期出張中に、PIV気流測定を行って頂き、そして中山かほる氏には、締め切り間際の図表の作成に協力頂いた。中山かほる氏の協力無くしては、提出期限に間に合っていなかったかもしれない。

本研究では、数多くの風洞実験と観測を実施している。これらの調査を進めるに当たり、多くの学生諸氏の努力があったことを述べなければならない。

千葉工大上田研究室から卒業論文生として最初に鹿島にやってきたのは、濱田裕史氏と中島大昌氏（1996年度、卒論、フェンス）。彼らは、フェンスの風洞実験をテーマに卒論を書き、濱田氏は、大学院に進学され、現在は、熊谷組で活躍されている。次に、安藤寛子氏（1998年度、卒論、円弧屋根）。彼女は、さらにパワーのある女子学生で、円弧屋根で卒論を書き、彼女も大学院に進学、現在は、小樽の実家の建設会社で活躍されている。そしてもう一人、北村隆一氏（1999年度、卒論、段屋根）もいた。彼は、今、何をしているのだろうか？

北海道工業大学苫米地研究室では、5年間に渡り本論文に関連するフェンスや段屋根な

どの屋外観測と吹雪風洞実験を実施していただいた。卒業論文、修士論文として本テーマを選んだのは、荒島裕重氏（1997年度、修士、フェンス）を筆頭に、西村洋志氏、田辺直樹氏、・・・、毎年、多くの学生諸氏がいた。特に、私が苫米地研究室でお世話になった二冬において、極寒の屋外観測と粉まみれの吹雪風洞実験を共に実施した川村健一氏（1999年度、卒論、フェンス）、布施健太郎氏（1999年度、卒論、段屋根）、中村洋氏（2000年度、卒論、段屋根）、佐藤一人氏（2000年度、卒論、シェルター）らは、印象深い。現在、彼らは、ゼネコンなどの企業で、また、公務員としてそれぞれ活躍している。また、他のテーマを持つ同研究室の学生諸氏にも、ご協力いただいたり、笑わせていただいたり、昼夜を問わずお世話になった。そして、この一連の観測および実験の実施に、無くてはならなかったのが、細川和彦氏（現 北海道工業大学特別研究生、当時 大学院博士課程在学）である。細川氏は、研究室の学生諸氏に的確な指示を出し、かつ、自ら率先して作業をこなすなど、本研究に用いた多くのデータを得ることができたことに対して、多大の貢献を頂いた。これら両大学の多くの学生諸氏に、改めて感謝したい。

そして、文末となってしまったが、本論文執筆にあたり最も感謝の意を表したいのが、苫米地司教授である。二冬に渡り研究室でお世話になることを快く受け入れて頂き、かつ、雪を全く知らなかった私に、雪の厳しさ、雪の大きさ、雪の楽しさなどを、自らフィールドに向いて、一からご教授いただいた。また、論文作成においては、ご指導と共に常に励ましを頂き、また手稲、すすきの両ゴールデンコース、隠密雪害調査など、息抜きと気分転換の場を常時、ご提供いただいた。また、それは、苫米地司教授のゼミの場でもあった。非常に多忙な方であるにもかかわらず、このように終始ご指導いただいたことに、深く感謝致します。

また、加速度の理論形成にご助言をいただきたい日本気象協会の竹内政夫技師長を初め、本論文をまとめるに当たっては、まだまだ多くの方々にご指導、ご協力を頂きました。

改めて、お世話になりました皆様に、深く感謝の意を表します。

2001年9月

土谷 学

参考文献

- 1) 日本建築技術者指導センター：基本建築関係法令集平成13年版，2001.1.15
- 2) 社団法人日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，1993.6.20
- 3) 木村幸一郎，吉阪隆正：風雪による建物周囲の吹き溜まり積雪に関する模型実験，建築学会論文集，pp.66-72，1942.9
- 4) 遠藤明久，苫米地司：活性白土を用いた風洞実験による水平屋根，山形屋根の屋根上積雪形状，日本建築学会構造系論文集，No.357，pp.20-28，1985.11.
- 5) 苫米地司：模型雪を用いた風洞実験による吹きだまりの可視化，流れの可視化，Vol.9，No.32，pp.39-44，1989.
- 6) N. Isyumov, M. Mikitiuk and P. Cookson: Wind Tunnel modeling of snow drifting applications to snow fence, First International Conference on Snow Engineering, Santa Barbara, California, 1988.07.
- 7) T. Tomabechi and A. Endo : Wind tunnel experiments of snowdrift formation behind an elevated building at Syowa Station, Antarctica, Reprinted from the Antarctic Record, No.84, pp.114-119 1985.03.
- 8) 社団法人可視化情報学会：日本の低速風洞，可視化情報学会誌，Vol.14，No.3，1994.
- 9) 野村卓史：最新の風洞実験法に関する比較研究，京都大学防災研究所研究集会13K-5，2001.12.
- 10) 岡内功，伊藤學，宮田利雄：耐風構造，丸善，1977.5.20.
- 11) 財団法人日本建築センター：実務者のための建築物風洞実験ガイドブック，1994.6.1.
- 12) 大熊武司，神田順，田村幸雄：建築物の耐風設計，鹿島出版会，1996.3.30.
- 13) 社団法人日本鋼構造協会：構造物の耐風工学，1997.11.30
- 14) J. D. Iversen : Drifting snow similitude - transport rate and roughness modeling, Journal of Glaciology, 26, pp.293-403, 1980.
- 15) Y Anno and T. Konishi : Modeling the effects of a snowdrift - preventing forest a snow fence by means of activated clay particles, Cold Region and Technology, 5, pp.43-58, 1981.
- 16) R. A. Schmidt: Properties of blowing snow, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.20, No.1, pp.39-44, 1982.2.
- 17) 秦耕二，石原貞夫：吹溜りに関する3次元シミュレーション，土木技術資料，37-3，1995.
- 18) 川上俊一，植松孝彦，苫米地司：数値シミュレーションおよび風洞実験による吹きだまり性状の推定について，寒地技術シンポジウム，Vol.10，pp.5-8，1994.11.

- 19) 竹内政夫：吹雪とその対策(3) 吹きだまりの発生機構と形，日本雪氷学会誌，Vol.62, No.1, pp.41 - 48, 2000.1
- 20) 上田宏，苫米地司：フェンス後方の模型雪の堆積に対する気流の影響，日本風工学会誌，Vol.64, pp.1-8, 1995.7.
- 21) 日本雪氷学会：雪氷辞典，1990.10.1.
- 22) 社団法人雪センター：雪氷関連用語集，1999.3.
- 23) 竹内政夫：吹雪とその対策(1) 吹雪のしくみ，日本雪氷学会誌，Vol.58, No.2, pp.161 - 168, 1996.3.
- 24) 竹内政夫，石本敬志，野原他喜男：吹雪量と飛雪量垂直分布，雪氷，Vol. 37, (3), pp.8 - 15, 1975.
- 25) American Meteorological Society, 1959 : Glossary of Meteorology, Boston, Massachusetts, American Meteorological Society, pp.638.
- 26) 竹内政夫，石本敬志，野原他喜男，福沢義文：降雪時の高い地吹雪の発生限界風速，雪氷学会予稿集，1985.
- 27) 苫米地司，橋本茂樹：屋根面で発生する吹雪に関する一考察，日本雪工学会誌，Vol.9, No.2, pp.2-8, 1993.4
- 28) 社団法人 日本建設機械化協会：新編防雪工学ハンドブック，pp.70, 1988.3
- 29) 佐藤稔雄，半貫敏夫：シャボン玉による流れの可視化と雪の吹きだまり，南極資料，No.62, pp.1-22, 1978
- 30) 坂本弘志，羽二生博之：防雪フェンスに関する風洞モデル実験の確立，寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集，Vol.3, 1989.4.
- 31) 老川進，苫米地司，石原孟：モデル建物近傍における積雪深の日別観測，日本雪工学会誌，Vol.15, No.4, pp.3-11, 1999.10
- 32) 橋本茂樹，苫米地司，上田宏：屋根上積雪と風の諸性状との関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，B1021-1022, 1993.9.
- 33) Michael O'Rourke and Kamek El Hmadi : Roof snow load; Drifting against a higher wall, Proc. West Conf. Annu. Meet, USA, 55th, pp.124-132, 1987
- 34) K. Suda and M. Kikuta : Observations of snow accumulation on the roof of an actual dined structure, Snow Engineering: Recent Advances, Izumi, Nakamura & Sack, 1997.
- 35) 苫米地司，和泉正哲，遠藤明久：屋上積雪の評価方法に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.32B, pp.50-56, 1986.3.

- 36) H. J. Thorburn and W. R. Schriever : Recent failures point out importance of snow loads on roofs, National Builder, Vol.5, pp.18 - 21, 1959.5.
- 37) Taylor, D. A. : Roof snow loads in Canada, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol7, No.1, pp.1 - 18, 1980.
- 38) Price, W.I.J. : The effect the characteristics of snow fences on the quantity and slope of the deposited snow, International Union Geodesy and Geophysics, Pub. No.54, 1961.
- 39) 荒島裕重, 西村洋志, 苔米地司, 本郷剛 : 二次元フェンス周辺の吹きだまり形成と風速の関わりについて, 日本雪工学会大会論文報告集, Vol.14, pp.35 - 37, 1997.11.
- 40) 苔米地司, 伊東敏幸, 新井覚 : 曲面屋根の屋根上積雪状況について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.95-96, 1996.9.
- 41) 苔米地司, 新井覚 : 建築物の積雪荷重と降積雪特性との関係, 寒地技術シンポジウム, pp.122-127, 1995.11.
- 42) 小林大二, 油川英明, 対馬勝年, 木下誠一 : 防雪柵への吹きだまり (高速道路の雪害と対策), 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, pp.258, 1975.10.
- 43) 竹内政夫, 野原他喜男, 石本敬志, 福沢義文 : 防雪柵の性能比較試験, 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, pp.24, 1981.10.
- 44) 福沢義文, 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男 : 防雪柵の性能比較試験 (II), 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, pp.172, 1982.10.
- 45) 金田安弘, 三神多加志, 西村浩一, 安田喜世史, 佐々木一良, 竹内政夫 : 防雪柵周辺の吹きだまりにおける積雪断面観測, 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, pp.266. 1984.10.
- 46) 成瀬兼二 : 防雪網, 防雪柵による吹きだまりと風速分布, 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, pp.168, 1980.10.
- 47) 成瀬兼二 : 防雪網, 防雪柵による吹きだまりと風速分布 (II), 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集, pp.173, 1982.10.
- 48) 社団法人北海道開発技術センター : 道路吹雪対策マニュアル防雪柵編, 1990.3.
- 49) 竹内政夫, 石本敬志, 野原他喜男, 福沢義文 : 防雪柵の研究, 雪と道路, No.1, pp.96 - 100, 1984
- 50) F. E. Jorgensen : Characteristic and Calibration of Triple-Split Probe for Reversing Flows, DISA Information, No.27, pp.15-22, January 1982.1.
- 51) 上田宏 : 変動圧力システムにおける動的応答特性とその補正方法について, 清水建設

- 研究所所報, No.53, 1982.
- 52) 勝田高司, 村上周三, 正田良次: 建築周囲気流に関する実験的研究 (IV) —外壁面突起物周辺における気流の性状に関する風洞実験—, 日本建築学会論文報告集, No.180, 1971.2.
- 53) W. D. Baines: Effects of Velocity Distribution on Wind Loads and Flow Patterns on Buildings, Proc. of Wind effects on Buildings and Structures, Vol. 1, pp.197-225, 1963.
- 54) 土谷 学, 近藤 宏二, 眞田 早敏: 設計風速に及ぼす局所地形の影響 —種々の形状の地形周りにおける風速増幅特性—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.119-120, 1999.9.
- 55) 近藤 宏二, 土谷 学, 眞田 早敏: 設計風速に及ぼす局所地形の影響 —山, 谷周りの風速増減率—, 鹿島技術研究所年報, Vol.49, pp.195-200, 2001.9.
- 56) 近藤宏二, 村上周三, 持田灯: 改良k- ϵ モデルによる建物モデル周辺気流の数値計算, 第8回数値流体力学シンポジウム, pp.363-366, 1994.12.

関連
発表論文

The 4th International Conference on Snow Engineering (ICSE 2000, Trondheim, Norway)

- 1) M. Tsuchiya, T. Hongo, T. Tomabechi, H. Ueda
Wind Effects on Snow Accumulation on Two-level Flat Roofs
2000.06, pp.323 - 328.
- 2) T. Hongo, M. Tsuchiya, T. Tomabechi, H. Ueda
Wind Effects on Snow Drifts around Two-Dimensional Fence
2000.06, pp.397 - 402.

The 5th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE V, Kyoto, Japan)

- 3) M. Tsuchiya, T. Hongo, T. Tomabechi, H. Ueda
Wind Effects on Snow Accumulation on Three-Dimensional Two-level Flat Roofs
2001.10, pp.377 - 380.

日本建築学会構造系論文集

- 4) 土谷 学, 苫米地 司, 本郷 剛, 上田 宏
階段状屋根上の雪の吹きだまりに影響を及ぼす風の流れの特性に関する研究
2002.05, No.555.

日本雪工学会誌／論文

- 5) 土谷 学, 苫米地 司, 本郷 剛, 上田 宏
フェンス周辺の吹きだまりと風のながれの特性
— 風洞実験による吹きだまり形成時の気流測定 —
2001.07, Vo.17, No.3 (Ser. No.60), pp.187<3> - 193<9>.
- 6) 土谷 学, 苫米地 司, 本郷 剛, 上田 宏
フェンス周辺の吹きだまりと風のながれの特性
— 積雪分布に影響を及ぼす気流性状 —
2001.10, Vo.17, No.4 (Ser. No.61), pp.311<3> - 317<9>.
- 7) 土谷 学, 苫米地 司, 本郷 剛, 上田 宏
フェンス周辺の吹きだまりと風のながれの特性
— 風向風速と積雪分布の屋外観測 —
2002.04, Vo.18, No.2 (Ser. No.63)

- 8) 土谷 学, 苫米地 司, 本郷 剛, 上田 宏
2 段屋根建物試験体を用いた吹きだまり性状の屋外観測
2002.04, Vo.18, No.2 (Ser. No.63)

日本建築学会大会／学術講演梗概集

- 9) 本郷 剛, 土谷 学, 苫米地 司, 上田 宏
二次元フェンス周りの雪の堆積に対する気流の影響
1998.09, B-1, pp.105 - 106.
- 10) 苫米地 司, 西村 洋志, 土谷 学, 本郷 剛
2 次元フェンス周辺の吹きだまり性状について
1998.09, B-1, pp.107 - 108.
- 11) 本郷 剛, 土谷 学, 苫米地 司, 上田 宏
二段屋根上の雪の堆積に対する気流の影響 — 低層屋根側より風が吹く場合 —
1999.09, B-1, pp.293 - 294.
- 12) 本郷 剛, 土谷 学, 苫米地 司, 上田 宏
二段屋根上の雪の堆積に対する気流の影響 — 高層屋根側より風が吹く場合 —
2000.09, B-1, pp.87 - 88.
- 13) 土谷 学, 本郷 剛, 苫米地 司, 上田 宏
二段屋根上の雪の堆積に対する気流の影響
— 屋外観測による積雪分布と風洞実験による気流性状との比較 —
2000.09, B-1, pp.89 - 90.
- 14) 土谷 学, 本郷 剛, 苫米地 司, 上田 宏
フェンス周囲の吹き溜まり性状に及ぼす気流の特性
2001.09, B-1, pp.77 - 78.

日本雪工学会大会／論文報告集

- 15) 土谷 学, 本郷 剛, 苫米地 司, 上田 宏
二段屋根上の雪の吹き溜まりに対する気流の影響
1999.12, Vol.16, pp.19 - 20.
- 16) 本郷 剛, 苫米地 司, 上田 宏, 土谷 学
2 次元フェンス周りの雪の吹き溜まりに対する気流の影響

1999.12, Vol.16, pp.27 - 28.

- 17) 土谷 学, 本郷 剛, 苔米地 司, 上田 宏
二段屋根上の雪の吹き溜まりに対する気流の影響
— 3次元流れを考慮した検討結果 —
2000.12, Vol.17, pp.37 - 38.

- 18) 土谷 学, 本郷 剛, 苔米地 司, 上田 宏
2段屋根上の吹きだまり形成に影響を及ぼす気流特性
— 風の水平方向の加速度について —
2001.11, Vol.18, pp.81 - 82.

寒地技術シンポジウム／寒地技術論文・報告集

- 19) 土谷 学, 本郷 剛, 苔米地 司, 上田 宏
2段屋根建物上の雪の吹き溜まりと風の性状の関係
1999.11, Vol.15, pp.543 - 546.

数値流体力学シンポジウム／講演要旨集

- 20) 土谷 学, 苔米地 司, 本郷 剛, 近藤 宏二
建物周りの雪の吹きだまりに予測に対する数値計算の適用
2001.12, Vol.15, pp.158, E02-1. (論文は, CD-ROMおよびWEB公開)

鹿島 技術研究所年報

- 21) 本郷 剛, 土谷 学, 苔米地 司, 上田 宏
二次元フェンス周りの雪の堆積に対する気流の影響
1997.12, Vol.45, pp.57 - 62.
- 22) 土谷 学, 本郷 剛, 苔米地 司
二段屋根上の雪の堆積に対する気流の影響 — 低層屋根側より風が吹く場合 —
1998.09 Vol.46, pp.63 - 68.
- 23) 土谷 学, 本郷 剛, 苔米地 司
二段屋根上の雪の堆積に対する気流の影響
— 高層屋根側より風が吹く場合の気流性状 —
1999.09, Vol.47, pp.161 - 164.