

30°勾配屋根住宅の立地条件や断熱・換気条件を考慮した小屋裏・通気層 温度解析結果と考察

積雪寒冷地の断熱気密化住宅における小屋裏換気手法に関する研究 (その2)

A NUMERICAL STUDY ON TEMPERATURE IN THE VENTILATED 30° PITCHED-ROOFS IN WINTER WITH DIFFERENT INSULATION AND VENTILATION METHODS, AND CONDITION OF THE HOUSE LOCATION

Study on ventilated roofs of insulated and airtight house to prevent problematic icing
on the roof in cold region Part 2

鈴木大隆*, 本間義規**, 廣田誠一**, 鎌田紀彦***, 坂本弘志****

*Hiroataka SUZUKI, Yoshinori HONMA, Tomohito HIROTA,
Norihiko KAMATA and Hiroshi SAKAMOTO*

Ventilation method in ventilated 30° pitched-roofs are examined to prevent icicle and ice dams forming on the inclined roof of insulated and airtight house. Simulation code that can be approximated measurement temperatures of the experimental house were developed, and was analyzed temperature of ventilating roofs with different insulation thickness and different ventilation method, under the several house location. From the simulation results, the effectiveness of the ridge opening is obvious, and the high insulation thickness can reduce ventilation rate. It also made clear that the ventilation rate of ventilating attic space is rather small for preventing icing at eaves, it especially means normalized opening at eaves or ridge on top should be made bigger anyhow from the architectural point of view.

keywords: *Insulation and ventilation methods, prevention of problematic icing, temperature in the attic space,
temperature in the ventilated roof air space, numerical simulation*
断熱換気方式, 積雪障害防止, 小屋裏温度, 通気層内温度, 数値解析

1 はじめに

本研究は, 近年, 積雪寒冷地で建設されているような断熱気密性に優れた住宅で, 屋根防水の面から長期的信頼性が高い勾配屋根を前提とした場合の, 冬期の屋根面積雪障害の防止を目的とした断熱・換気手法の構法的要件を探ることを主な目的とし, これまで実験建物での実測や解析手法の検討などを行ってきた^{1)~7)}。研究の背景・目的等の詳細は前報(その1)¹⁾に詳しいので参照されたい。

前報では, 換気方式が異なる天井断熱と屋根断熱モデルの実測結果から, ①屋根面積雪時の融雪による障害防止に関しては外気温が0℃以下の場合に小屋裏や通気層内温度をマイナスに保つことが有効であること, ②天井断熱モデルでは外気温との追従性に関して改善すべき点が多く, 断熱・換気条件を見直す必要があること, ③屋根断熱モデルで通気層厚さ30mm程度以上を確保した場合は, 外気温との追従性は良好で, 屋根面積雪による障害防止に高い効果があるが, 軒天換気に棟換気を併用した場合は, 外部条件によって南北面の通気層内温度性状に違いが生じる場合があることなどを報告した。

本報では, まず前報で示した実測結果を再現し得るシミュレーション手法を検討・確立した上で, 数値解析により断熱・換気条件や住宅密集度・住宅形状等の住宅条件が小屋裏換気量 (以下, 換気量と称す) や

通気層内通気量 (以下, 通気量と称す) 及び小屋裏・通気層内部の温度性状に及ぼす影響について比較検討し, 設計上の基礎的知見や今後の検討課題を明らかにすることを主な目的とする。

2 シミュレーション手法の検討

2.1 シミュレーションモデルについて

シミュレーション手法のフローを図1に示す。

傾斜屋根面の積雪分布は, 屋根傾斜角や方位, 周辺気流の影響による吹き溜まりなどにより必ずしも均一な厚さとはならない。一般的には, 積雪厚は屋根面軒先から中央部かけて漸減或いはほぼ同じになり, 屋根頂部は極端に薄くなる傾向がある⁸⁾。同一屋根面での積雪の偏りは, 小屋裏・通気層温度を決める際の熱収支に少なからず影響を与えることが推測されるため, 何らかの考慮を必要とする。屋根形態別の積雪偏分布に関しては, 構造的分野で屋根面積雪荷重を検討する目的から多くの研究が行われているが, その殆どは大規模建築を対象としており, 住宅を対象とした継続的な研究は苔米地ら⁹⁾が行っている他は少ない。また, 既往の研究も, ある建築条件下での実測値をまとめたものが多く, 様々な住宅条件に対して適応できるほどの普遍性を有するまでには至っていないのが現状である。そこで本報では, 屋根面の傾斜方向に片側3分割とし, 初期条件でそれぞれ平均積雪厚さを与え

* 北海道立寒地住宅都市研究所 工修

** 北海道立寒地住宅都市研究所

*** 室蘭工業大学建設システム工学科 助教授・工博

**** 北見工業大学機械システム工学科 教授(流体力学講座)・工博

Hokkaido Prefectural Cold Region Housing and Urban Research Institute, M. Eng.
Hokkaido Prefectural Cold Region Housing and Urban Research Institute
Assoc. Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Kitami Institute of Technology, Dr. Eng.

ること偏分布の影響を考慮した。

各断面の温度計算は、屋根面が全て積雪で覆われていることを条件として、屋根法線方向について1次元非定常熱伝導で扱い、時間に関して後退差分、距離に関して中心差分とする。小屋裏・通気層温度については、風圧係数・外部風速及び風向を与えて換気量を算定し、小屋裏・通気層空間での熱平衡式⁽²⁾をたて、瞬時定常で算出する。ここで風圧係数は、風洞実験⁽²⁾より求めた建物各部の計測値を使用する(3.1, 4.1にその都度示す)。小屋裏換気量は、小屋裏を1室と見なし、通気層換気量は、通気層自体を管と見なした換気モデルとし、流路の動摩擦損失係数を考慮している。また、小屋裏・通気層内部は圧力が未知数であることから、質量収支式を2分法による収束計算により解き、換気量・通気量を算定している^{(2),(3)}。

2.2 積雪・降雪の扱いに関する仮定条件

積雪・降雪の扱いは下記の仮定条件による。

- ①積雪密度は既積雪と新規積雪の2種類で与える。
- ②雪の圧密は次式により考慮する⁽¹⁰⁾。

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{W}{\eta_0 \cdot e^{K \cdot \rho}} \quad (1)$$

ここで、 ρ は雪密度[kg/m³]、 η_0 は粘性係数[kg・day/m²]、Kは定数[m³/kg]、Wは積雪荷重[kg]を示す。

- ③積雪表面及び下面融雪量・再凍結量は熱収支法により計算する。
- ④積雪内では、流下する融雪水の再凍結はないものとし、また液水移動に伴う熱移動は考慮しない。ただし、雪の熱伝導率は次に示す Devauxの経験式(1933)を用いる⁽¹¹⁾。

$$k = 2.9 \times 10^2 + 2.9 \times 10^6 \rho^2 \text{ [W/mK]} \quad (2)$$

ここで、 ρ は雪密度[kg/m³]を示し、 $100 < \rho < 600$ とする。

- ⑤融雪水は積雪上面の場合、積雪厚さにより時間遅れが生じるものとして扱い、下面融雪は積雪内に貯留されずに時間遅れなく流下するものとする。
- ⑥結氷温度は0℃とする。
- ⑦降水が雨が雪かの判定は、降水温度が湿球温度に等しいとし、降水湿球温度が0℃未満の時は雪、0℃以上の時は雨とする⁽¹²⁾。
- ⑧0℃未満の時の降水量から積雪量への換算は次式による⁽¹³⁾。

$$S = (0.091 \theta^2 - 1.81 \theta + 9.47) \cdot R / 10 \quad (3)$$

ここで、Sは降雪量[cm]、 θ は外気温[℃]、Rは降水量[mm]を示す。

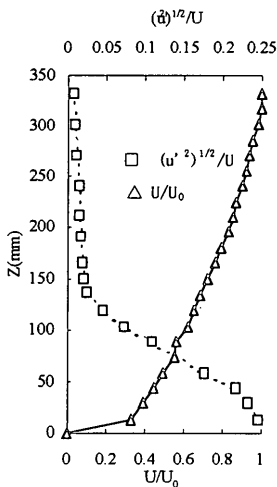
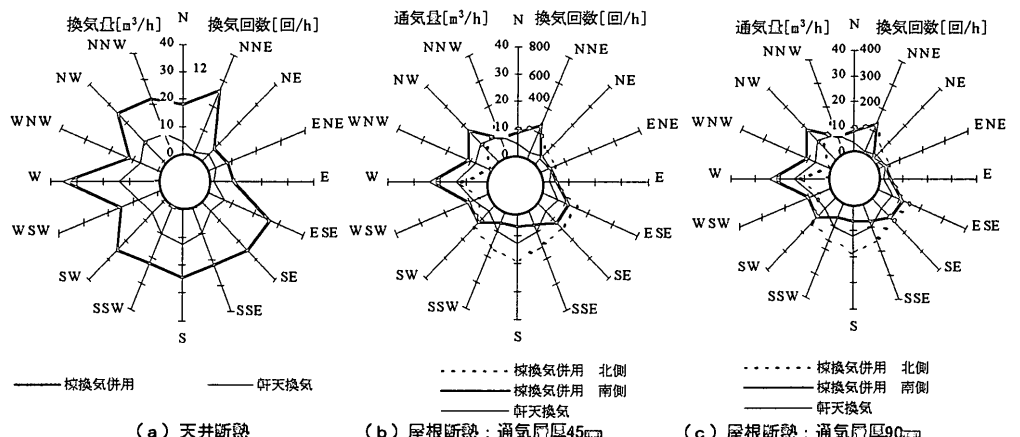


図2 近寄り流れの鉛直分布



ここで示した図は、外部風速3m/sec時(基準高さh=10m)における算定結果
 図3 実験建物における断熱・換気条件に違いによる小屋裏換気量・通気量比較

- ⑨外部風による屋根面積雪の吹飛びは無視できないオーダーとなることから⁽⁹⁾、既報で報告した実験建物における外部風速と積雪厚さの変化の実測値から導いた次記の直線回帰式より考慮する。

$$\text{south : } Y = 0.3440X - 0.0945 \quad (\text{相関係数: } 0.741) \quad (4)$$

$$\text{north : } Y = 0.0628X - 0.4760 \quad (\text{相関係数: } 0.668) \quad (5)$$

ここで、Yは積雪減少率[%/h]、Xは外部風速[m/sec:1h平均]を示す。

- ⑩アルベド(雪面での反射率)はO'neil&Grayの測定値⁽¹⁰⁾を補間して用いる。

- ⑪積雪厚さによる日射透過率の変化はBeerの法則⁽¹¹⁾に従い、減衰係数を30とする。

3 実験建物における小屋裏換気量・通気量の推定と解析手法の検証

3.1 小屋裏換気量・通気量の推定

換気量・通気量の推定のため、実験建物を中心として半径250mの周辺建物を含む1/250スケールの縮小モデルを作成し、北見工業大学構内にある風洞装置⁽²⁾にて風向16方位における実験建物各部の風圧係数を計測した。住宅モデルへの近寄り流れは乱流境界層であり、大気境界層と類似の特性を有している。図2に乱流境界層内の平均速度Uの

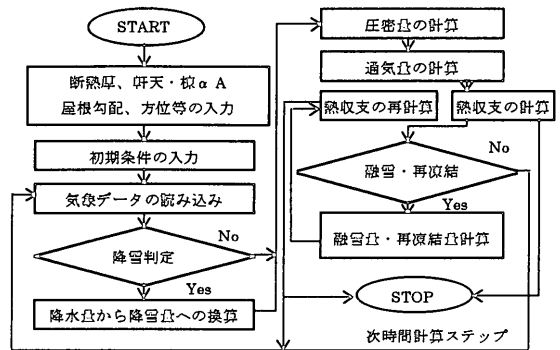


図1 シミュレーションフロー

表1 実験建物の風圧係数計測値(8方位)

風向	南側軒天部分	北側軒天部分	南側棟部	北側棟部
NE	-1.15	-1.15	-1.25	-1.35
N	-0.38	-0.49	-0.97	-0.75
NW	-0.45	0.13	-0.97	-0.62
W	-0.44	0.87	-1.30	-0.81
SW	0.57	0.16	-0.37	-0.27
S	1.24	-0.01	-0.43	-0.30
SE	-0.04	-0.64	-0.78	-1.20
E	-0.74	-0.51	-0.45	-0.69

表2 通気部材特性

有孔ボード αA	67.8cm ² /m ²
棟換気部材 αA	379.0 cm ² /m
通気層摩擦損失係数	λ = 489.0Re ^{-1.13} (Re < 3000)
	λ = 0.46Re ^{-0.26} (Re ≥ 3000)

分布及び主流方向の乱れ成分 u' の分布を示す。風洞内の平均速度分布をべき乗則 $U \propto Z^q$ で近似した時の指数は0.357であり、都市中心部の大気境界層で観測される値に近いものとなっている。計測点は桁行方向壁面18点、妻側壁面6点、屋根頂部4点の計28点である。当該換気量に関連がある部分の風圧係数のうち、代表例として風向8方位の実験建物中央部の計測値を表1に示す。また、測定した各通気部材の有効開口面積、摩擦抵抗係数等を表2に示す。実験建物の形状、周辺条件等は前報を参照されたい。

代表的な天井断熱・屋根断熱モデルの外部風速及び風向の違いによる小屋裏換気量・南北面通気量の算定結果を図3に示す。ここで軒天換気タイプとは表2に示す有孔ボードを巾450mmの軒天井全面に設け給排気する方法をいい、棟換気併用タイプとは軒天換気に加えて屋根頂部にもスリットを設け、同表に示す換気部材を含めて給排気する方法をいう。図から、天井断熱の換気量は屋根断熱の通気量と比べて、その絶対量は大きいものの、換気回数に換算すると小さいことがわかる。また、周辺建物の影響から外部風向によって換気量・通気量に大きな違いが生じる場合があること、断熱手法によらず棟換気併用タイプは軒天換気タイプに比べて小屋裏換気量・通気量を促進する効果があること、屋根断熱モデルでは通気層厚45mmと90mmの違いは殆どないことや、棟換気併用タイプでは風上側の通気量は増加するが殆どは棟換気から排気されるため風下側の通気量が極端に減ずる場合があることなどがわかる。前報¹⁾の検討課題でもあった棟換気併用タイプの南面通気層温度が北面に比べて変動幅が大きくなっていたのは、この面が北を主風向とする卓越風の影響で期間中風下側となる頻度が多く、通気量が減少したことが主因といえよう。

3.2 小屋裏温度・通気層温度のシミュレーション結果と検証

計算は1995.1.25～1995.2.2までの336時間を対象とし、外気温・室内温度・水平面全天日射量・風向・風速は実験建物の実測値を使用し、降水量・雲量については札幌管区気象台のデータ¹⁴⁾を用いる。また、室温は実測値を用い、期間中は概ね $20 \pm 3^\circ\text{C}$ である。

図4、5には代表例として、天井断熱で棟換気併用タイプの小屋裏温度と屋根断熱で軒天換気タイプの通気層温度の実測値と計算値の関係を示す。なお、図4には屋根面積雪深について、実測点に位置する天井断熱・棟換気併用タイプで、実測値と計算値の関係を示す。各温度や屋根面積雪深の計算値は実測値と概ね近似し、同じ変動傾向を示しており、シミュレーション結果は実測の各性状を良く捉えている。ただし、各温度の計算値は $1.0 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 程度低く示す場合がある。これは、計算値が対象期間中は屋根面が積雪で全て覆われている条件で

の算定結果なのに対し、実測では一部屋根面が露出している場合もあり、非積雪部分の日射量等による小屋裏への熱取得が生じていること、屋根面で融雪水の流下がある場合にそれに伴う熱移動を計算値では考慮していないことなどが原因と考えられる。

しかし、本研究のシミュレーションの目的は、各モデルの温度を正確に把えることではなく、異なる住宅条件や断熱・換気条件の相対比較から屋根積雪障害の防止に結びつく要件を導くことであり、本シミュレーション手法はその条件を十分に満たしていると考えられる。

4 一般住宅を想定した場合の検討

4.1 計算条件

シミュレーションは、外部気象データについては1995年1月の札幌管区気象台データ¹⁴⁾を用い、室温は 20°C 一定として、月初めから計算を開始し、助走期間を除いたあとの1/21～1/31の10日間を対象とする。住宅形状は実物換算で外寸 $6.3\text{m} \times 9.9\text{m}$ 、高さ 8.3m の総2階建て、屋根勾

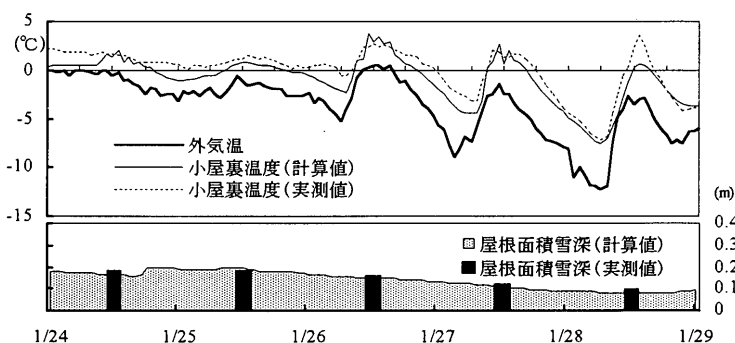


図4 天井断熱・棟換気併用タイプの小屋裏温度に関する検討

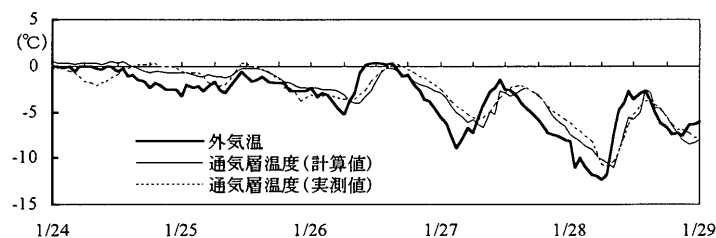


図5 屋根断熱・軒天換気タイプの通気層温度に関する検討

No.	立地条件	断熱方式	換気方式
1	単独立地	天井断熱 $R=8.889 [\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}]$	軒天換気
2			棟換気併用
3	住宅地想定	6.667	軒天換気
4			棟換気併用
5	単独立地	屋根断熱 $R=8.382 [\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}]$	軒天換気
6			棟換気併用
7	住宅地想定	7.353	軒天換気
8			棟換気併用

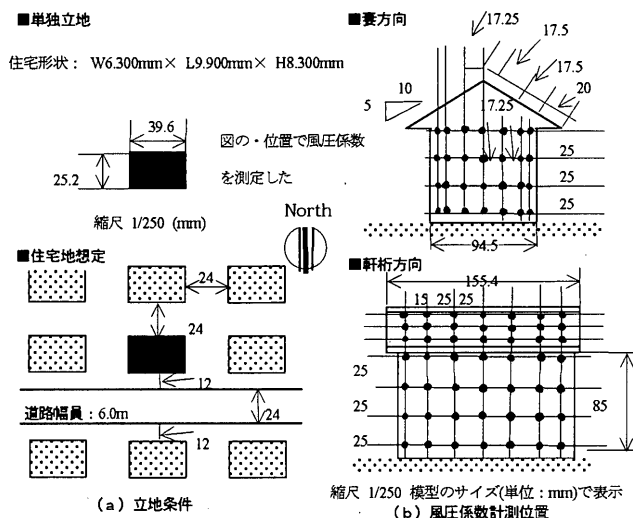


図6 住宅条件と風圧係数計測位置

配は0°、30°、45°の3タイプを想定し、立地条件は最も換気動力が得られやすい単独立地と9戸隣接立地(建坪率:約31%)した住宅地想定との2条件を対象とする。この条件での換気量・通気量を推定するため、まず、これらの条件を満たす1/250スケールの縮小モデルを作成し、前述した風洞装置で風向16方位における各住宅モデルの風圧係数を計測した。

例えば、屋根勾配30°タイプの計測点は桁行方向壁面56点、妻側壁面56点、各屋根面42点の計154点である。なお、様々な住宅条件下における各部の風圧係数については既に赤林らの詳細な報告があるが¹⁵⁾、北海道の傾斜屋根はその設定条件より急勾配であることなどの地域的特殊性による住宅条件の違い、棟換気併用タイプの推定に必要な棟換気口近傍の風圧係数を把握する必要があったことなどから、前述した条件で計測を行った。

本報では屋根勾配30°の住宅形状(図6)に検討対象を絞り、表3に示す立地条件・断熱方式・換気方式の異なる8パターンを対象に数値解析を行う。ここで、天井断熱モデルの断熱条件は3段階設定しているが、各々の熱抵抗値R[mh°C/kcal]は、寒冷地で一般的なグラスウール吹込工法(以下、GWと称す)で厚さ200・300mmの他に、高断熱仕様として400mmを想定したものである。また、屋根断熱モデルの断熱条件は4段階設定しているが、各々の熱抵抗値R[mh°C/kcal]は、寒冷地の屋根断熱工法として一般的な屋根タル木に210°(W=38mm×H=240mm)材を使用し高性能GWを200mm充填し通気層を確保するものの他に、タル木間に全充填

した場合、212°(W=38mm×H=285mm)材を使用し同断熱材を250mm充填した場合と全充填したものを想定したものである。また、住宅地想定では9軒のうち、隣接住戸の影響で各部の風圧係数が最も小さく、換気量の減少が予想される中央に位置する住宅を対象とする。屋根積雪厚の初期条件は軒から棟にかけて20, 15, 10cmの対称形とし、計算対象部位は住宅の東側端部に位置するものとする^{註4)}。屋根断熱モデルについては、前報(その1)や3で前述した通り、通気層厚45mmと90mm

mでは通気量や温度性状に違いが無く、18mmでは温度性状が異なる点や施工性の面で問題があることから、30mmと45mmを対象としている。

4.2 小屋裏換気量・通気量の推定

各立地条件で当該換気量に関連がある部分の風圧係数のうち、代表例として風向8方位の計測値を表4に示す。ここで、表中北側棟・南側棟とは、棟換気部材の換気口両側近傍の計測値をいう。表2の特性を有する各通気部材を使用した場合の立地条件、断熱・換気条件の違いによる小屋裏換気量・南北面通気量の風向別算定結果を図7に示す。

表4 立地条件別風圧係数の計測値(風向8方位)

(a) 単独立地 屋根勾配30度				
風向	北側軒天	南側軒天	北側棟	南側棟
NE	0.52	-0.44	-0.11	-0.51
E	-0.56	-0.56	-0.57	-0.57
SE	-0.37	0.73	-0.35	0.06
S	-0.37	0.73	-0.35	0.06
SW	-0.44	0.52	-0.51	-0.11
W	-0.56	-0.56	-0.57	-0.57
NW	0.73	-0.37	0.06	-0.35
N	0.73	-0.37	0.06	-0.35

(b) 住宅地想定[中央部に位置する住宅] 屋根勾配30度				
風向	北側軒天	南側軒天	北側棟	南側棟
NE	0.09	-0.33	-0.22	-1.04
E	-0.10	-0.11	-0.10	-0.10
SE	-0.26	-0.02	-1.04	-0.22
S	-0.14	-0.16	-0.28	-0.17
SW	-0.26	-0.02	-1.04	-0.22
W	-0.09	-0.12	-0.10	-0.10
NW	0.09	-0.33	-0.22	-1.04
N	-0.17	-0.15	-0.17	-0.28

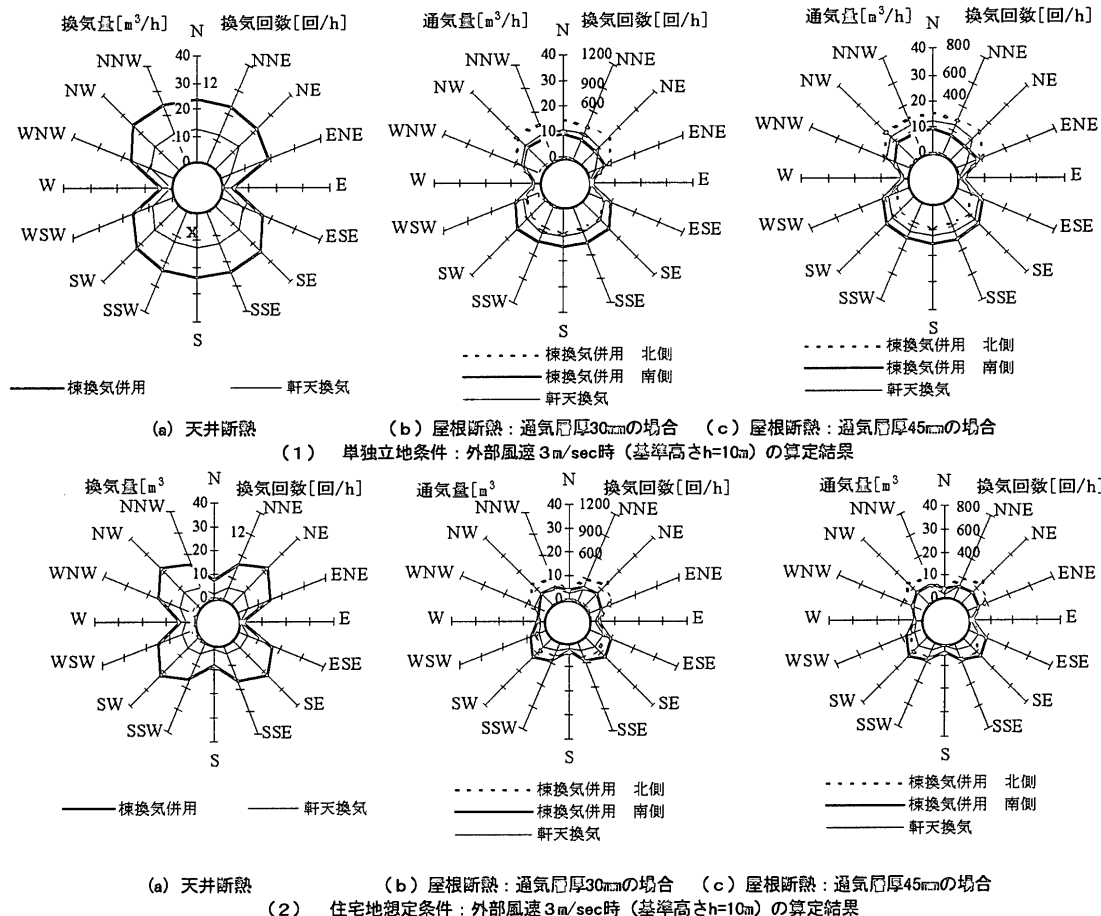


図7 30°勾配屋根住宅における各種条件の違いによる小屋裏換気量・通気量の比較

いずれの条件でも、東西方向の外部風の場合に、換気量・通気量がそれぞれ落ち込んでいるが、これは東西方向（住宅裏側）に換気口を設けない条件²⁾で検討を行っていることによるものと推測される。

立地条件の違いでは、単独立地と比べて住宅地想定は同じ換気手法でも換気量・通気量が10～80%、平均40～60%程度低下することがわかる。また、住宅地想定の場合、断熱・換気条件に係わらず、南北方向の外部風に対しても換気量・通気量が落ち込んでいるが、これは風上側の隣接住宅に影響によるものと推測される。

断熱条件別に見ると、天井断熱では軒天換気タイプに比べて棟換気併用タイプの換気量の促進効果が著しいことがわかる。一方、屋根断熱では南北を主方向とする外部風の場合、棟換気併用タイプは軒天換気に比べて、風上側の通気促進効果はあるものの風下側はそれほどでもない。これは、3.1と同様に、風上側からの通気の相当量が棟換気から排気され、その分、風下側の通気量が減少することによる。

概して、どの立地条件でも、軒天換気タイプは風向により殆ど換気量・通気量が得られない場合もあるのに対し、棟換気併用タイプは東西風向を除いては、比較的安定した換気量・通気量を確保できるのが特徴的である。これは、風向によって同じ高さに位置する軒天部では十分な圧力差が生じない場合があるのに対し、棟頂部はそれらより負圧になっている場合が多く、多少の圧力差が生じ換気が行われるためと考えられる。

4.3 天井断熱モデルの小屋裏温度性状に関する解析

図7のように天井断熱の小屋裏換気量は屋根断熱の通気量と比べて、換気量の絶対値は大きくなるものの、換気回数は相対的に少なくなる。小屋裏温度は、直接外気の流出入、居住空間や屋根面の熱授受により決まるが、換気回数の減少は相対的に居住空間からの熱授受の影響が大きくなることを意味する。これは、天井断熱の性能が小屋裏温度に大きな影響を及ぼすことを示していると考えられる。

このような観点から、表3の通り、天井断熱性能を3条件設定し検討を行った。図8は住宅条件、断熱・換気条件の違いによる1時間毎の小屋裏温度解析結果を、相对比较が容易なよう外気温昇順に並び替えたものである²⁾。

図8(a,b)に天井断熱材の熱抵抗値 $R=4.44$ $4[\text{nh}^\circ\text{C}/\text{kcal}]$ (以下この項では、 $R=$ と称す) と $R=8.889$ の場合の解析結果を示す。単独立地の場合は、住宅地想定条件の場合と比べて、換気手法の違いによる差異は少なく、外気温との追従性が高い。換気手法によって換気量に差異があるにもかかわらず温度性状の違いが顕れないのは、いずれのタイプでも十分な換気量が得られているためと推測される。住宅地想定の場合、棟換気併用タイプの温度性状は、単独立地よりも

やや高く推移しながらも外気温との近似性が高い。しかし、軒天換気タイプは高い温度で推移し、外気温との追従性が悪いことがわかる。

図8(c)は温度性状の改善が必要な住宅地想定における軒天換気モデルを対象として、断熱性能の違いが小屋裏温度に与える影響について示したものである。 $R=4.444$ レベルでは、外気温との追従性が悪く、最も融雪による屋根面障害の起きやすい 0°C 付近を推移するのに対し、断熱性能の向上に伴って小屋裏温度が低く推移する。そして、 $R=8.889$ レベルになれば、外気温の低い部分では、十分とは言えないものの小屋裏温度を概ね 0°C 以下に保つことが可能であることがわかる。

表5(a)に、外気温が 0°C 未満の場合における各天井断熱モデルの2つの条件下(表中条件1とは各小屋裏温度が -1°C 以上、条件2とは各温度が 0°C 以上となる場合)で整理した小屋裏温度の発生頻度の割合を示す。各条件において、表中の数値が大きいほど屋根面積雪障害が生じやすいことを示している。前述したことはこの表からも良く説明できる。さらに、断熱条件と換気条件の関係では、同じ換気条件の場合は天井断熱強化が障害防止に有効であることがわかり、その傾向は換気量に乏しい住宅地想定条件で顕著である。見方を変えれば、ここで検討した以上の断熱強化を図った場合は、本報で設定した換気条件でも上記発生頻度の割合を相当減らす可能性も残っていることを示しているといえよう。

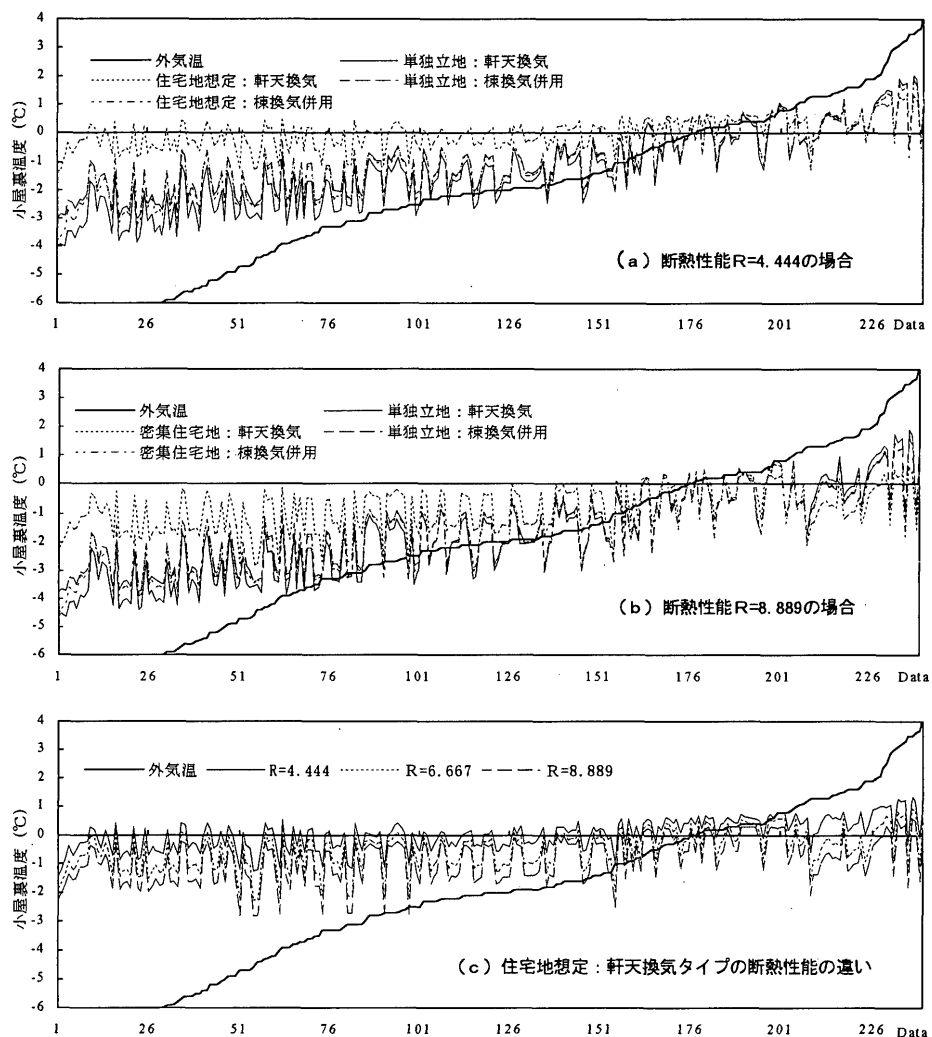


図8 天井断熱モデル小屋裏温度比較

以上の検討から、この計算条件を前提とした場合、単独立地のような通風換気に支障の無い立地条件では、ここで検討したようないずれかの換気手法を講じ、 $R=6.667\sim 8.889$ 程度の天井断熱性能を確保することで、屋根面融雪による障害を防止できる可能性が高いと推測される。しかし、住宅地に建つ場合は、上記の点に留意するだけでは十分とはいえず、上記より更に断熱を強化するか、または設定条件より換気量を増加する必要がある。必要な換気量を自然換気によって確保できるか否かは現時点では不明だが、換気口面積・形状や設置位置などの工夫により、電気エネルギーや機械設備に依存しない建築的手段によって、解決を探る方向で検討を続ける所存である。

4.4 屋根断熱モデルの通気層温度性状

屋根断熱モデルの通気層温度については、冬期卓越風の影響で風上側より通気量が減じ温度変動巾が大きく危険側となりがちな風下側(南面)を対象として比較評価を行う。

図9は立地条件、断熱・換気条件の違いによる1時間毎の通気層温度解析結果を外気温昇順に並び替えたものである^{註)}。また、表5(b-1)、(b-2)に、外気温が0℃未満の場合における各屋根断熱モデルの2つの条件下で整理した通気層温度の発生頻度の割合を示す。

図9(a,b)は、屋根断熱として一般的な断熱仕様である熱抵抗値 $R=5.8$ 82[mh℃/kcal] (以下この項では、 $R=$ と称す)の場合の解析結果を通気層の厚さ別に示したものである。立地条件の違いでは、同じ換気条件で見ると、単独立地は外気温との追従性が良好で外気温が0℃未満時に通気層温度がプラスとなる頻度も少ないのに対して、住宅地想定は外気温が0℃未満では単独立地より高い温度で推移し、外気温が0℃以上では低い温度で推移しており、天井断熱方式と同様に外気温への追従性が低下するとともに、表5に示す頻度も多くなる傾向がある。

一方、換気条件の違いでは、まず通気層厚の違いに着目すると、それぞれの条件下において、通気層厚さ30mmより45mmの方が、外気温との追従性が若干良好となる傾向が見受けられるが、外気温が低い場合を除くとその違いは少ない。次に、換気方式の違いに着目すると、軒天換気タイプより棟換気併用タイプの方が、外気との追従性は良いことがわかる。これは、図7に示すように棟換気併用タイプの風下側通気量が減少する風向はごく一部で、外部風向は絶えず変化するため、殆どの風向に対してこの方式の通気量が優ることによるものと推測される。これらのことは、表5の各発生頻度の割合でもよく説明できる。図9(c)は住宅地想定の場合で、軒天換気タイプを対象に、屋根断熱性能の違いが通気層温度に与える影響について示したものである。断熱性能を向上させることで通気層温度が僅かに低下するが、4.3で述べた天井断熱よりその効果が小さいことがわかる。これは、設

表5 外気温が0℃未満の場合における小屋裏・通気層温度の頻度の割合[%]

(a) 天井断熱モデル

断熱性能 [mh℃/kcal]	単独立地				住宅地想定			
	軒天換気		棟換気併用		軒天換気		棟換気併用	
	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2
R=4.444	18.8	2.3	35.8	2.8	93.8	41.5	39.8	3.4
R=6.667	11.9	2.3	23.3	2.8	63.1	12.5	28.4	2.8
R=8.889	11.4	1.7	18.8	2.8	47.2	5.1	22.7	2.3

(b-1) 屋根断熱：通気層厚30mmモデル

断熱性能 [mh℃/kcal]	単独立地				住宅地想定			
	軒天換気		棟換気併用		軒天換気		棟換気併用	
	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2
R=5.882	39.5	8.5	23.9	2.3	50.6	18.0	48.3	34.1
R=6.912	33.7	5.1	19.9	2.3	46.6	8.4	47.2	31.8
R=7.353	30.9	3.4	18.2	2.3	46.1	7.3	44.9	26.7
R=8.382	25.3	2.4	14.2	2.3	42.8	2.8	42.6	6.3

(b-2) 屋根断熱：通気層厚45mmモデル

断熱性能 [mh℃/kcal]	単独立地				住宅地想定			
	軒天換気		棟換気併用		軒天換気		棟換気併用	
	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2	条件1	条件2
R=5.882	32.6	5.6	21.0	2.3	47.2	12.4	45.5	30.7
R=6.912	27.0	3.4	16.5	2.3	44.5	5.6	43.8	15.3
R=7.353	25.3	2.8	15.9	2.3	42.5	3.9	41.5	9.1
R=8.382	21.3	2.2	12.5	1.7	37.6	2.8	34.1	5.1

※表中の値は発生頻度[%]を示し、条件1とは小屋裏・通気層温度が-1℃以上、条件2とは各温度が0℃以上となる時間を外気温0℃未満の合計時間で除したものである。それぞれ、条件において値が大きいくほど屋根融雪リスクが生じやすいことを示している。

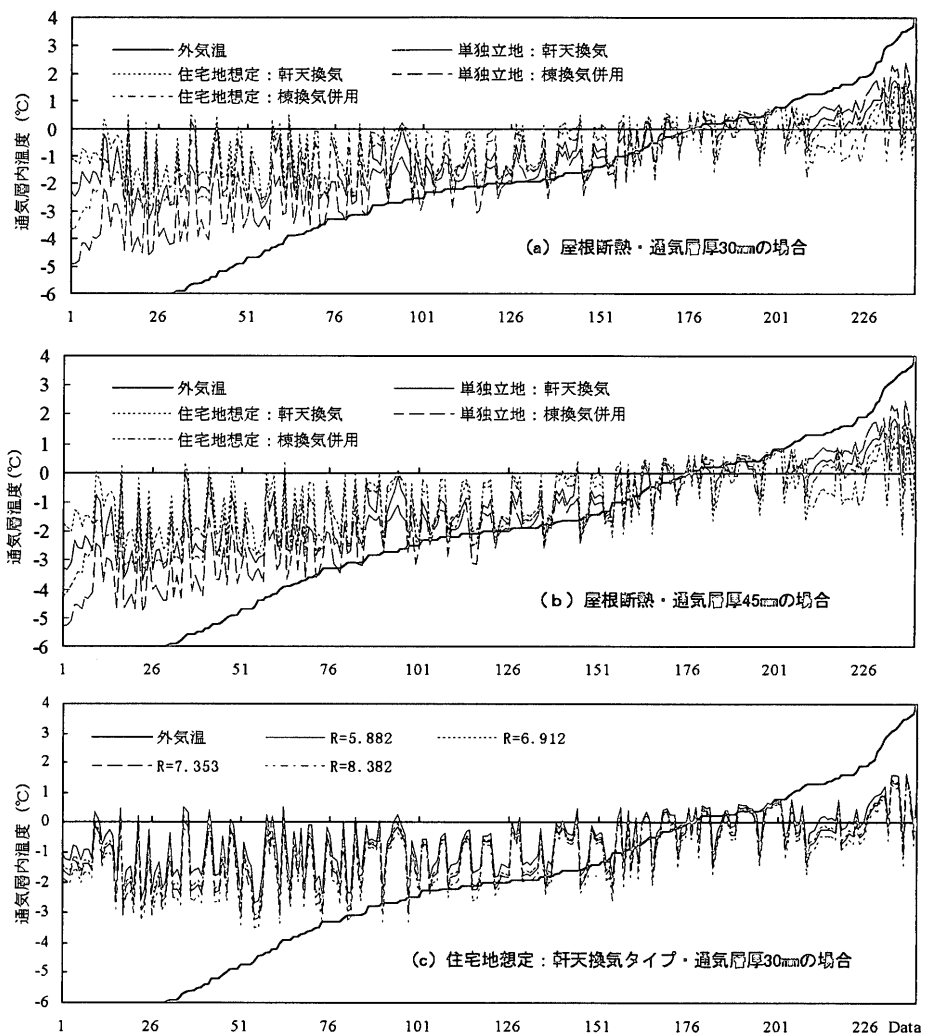


図9 屋根断熱モデルの通気層温度

定したR値の幅(5.882~8.382)が天井断熱のR値の幅(4.444~8.889)より小さいことが理由として考えられるが、屋根断熱の換気回数が大きく、通気層内温度に対しては断熱性能より換気による要因の影響が大きいことを示しているものと推測される。

以上のことから、天井断熱と同様に、住宅地想定条件の場合は、ここで検討した条件では十分といえず、屋根断熱の高断熱化は施工が難しいことを勘案すると、断熱の施工性を優先してR=5.882程度の断熱を前提としながら、設定条件より通気量を増加する方向で検討して行く必要がある。

5 まとめ

本報で得た知見を次に整理する。

- (1)本報で提案したシミュレーション手法は、実測した温度性状を良く捉えることができ、様々な住宅条件、断熱・換気条件に適用できる。
- (2)単独立地に対して住宅地想定では、小屋裏換気量・通気量が大幅に低下する場合がある。
- (3)天井断熱・小屋裏換気方式より屋根断熱・通気層方式の方が少ない換気量・通気量で外気温追従性が向上する。これはこの部分の温度は換気量・通気量そのものより換気回数が支配的であることを示している。
- (4)概して、棟換気併用タイプは軒天換気タイプと比べて換気・通気の促進に有効であり、住宅条件に係わらず、外気温追従性が良好である。
- (5)住宅地想定の場合、屋根面積積雪障害を防止するには、天井または屋根の高断熱化を前提とした上で、一層の換気・通風の促進が望まれる。
- (6)小屋裏・通気層温度の外気温追従性は、換気方式のみならず天井・屋根の断熱性能とも大きな関連があり、特に天井断熱では断熱性能の向上は必要換気量を減らすことに繋がるものと推測される。

本報ではある限定された住宅条件・気象条件下で立地、断熱・換気条件を考慮した数値解析による比較検討を行った。次報では、住宅地に建つ住宅を対象を絞り、屋根形状の違いによる影響や各換気口形状・設置位置の違いによる換気促進効果などを検討した上で、積雪寒冷地における断熱気密化住宅の小屋裏換気・屋根通気手法の構造的要件について報告する予定である。

なお、本研究の実施に当たりご協力頂いた硝子繊維協会に記して感謝の意を表します。

註1) 例えば屋根断熱モデル・棟換気併用タイプの場合の各基本式は次による。

①各構成部材節点温度及び通気層温度は次式より求める。
 1次元非定常熱伝導 $\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ (1-1)
 通気層内温度計算式(瞬時定常) $\sum Q_k = \sum \alpha \cdot S_j \cdot (T_{in} - T_j) + \sum c\rho \cdot V_k \cdot (T_{in} - T_{out}) = 0$ (1-2)

②通気層通気量は次式より求める。
 浮力 $P_i = \Delta h \cdot (\gamma_{out} - \gamma_{in})$ (1-3) 風圧力 $P_{wm} = C_n \cdot \frac{\gamma_{out}}{2g} \cdot V_{out}^2$ (1-4)

通気層摩擦圧力損失 $P_{rd} = \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{\gamma_{in}}{2g} \cdot V_{in}^2$ (1-5)

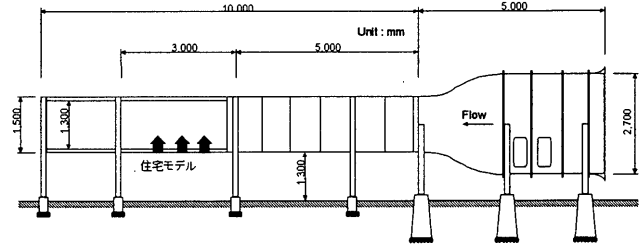
軒天開口重量風量 $G_n = \alpha A_n \cdot \text{sign} \sqrt{2g\gamma_{out}(P_i - P_{wm} + P_i)}$ (kg/s) (1-6)

棟部分重量風量 $G_n = \alpha A_n \cdot \text{sign} \sqrt{2g\gamma_{in}(P_i - P_{wm} + P_i - P_{rd})}$ (kg/s) (1-7)

質量収支式 $\sum G_n = 0$ (1-8)

ただし、 a:熱拡散率 (m²/h) T:温度(°C) t:時間(h) x:距離 (m) j:通気層に面する壁面部位 k:熱流出入口 V_k:各開口換気量(m³/h) T_j:通気層内温度 (°C) T_{out}:外気温度 (°C) Q:熱量 (kcal/h) α:熱伝達率 (kcal/m²h°C) cρ:容積比熱 (kcal/m³°C) Δh:通気層の入口・出口高低差 (m) V_{out}:外部風速 (m/s) T_j:j=a のとき通気層室内側温度 (°C) j=bのとき通気層外気側温度 (°C) S_j:j=a のとき通気層室内側表面積(m²) j=bのとき通気層外気側表面積 (m²) P_i:浮力 (kg/m²) P_{wm}:風圧力 (kg/m²) P_{rd}:摩擦圧力損失 (kg/m²) P_i:通気層内圧力 (kg/m²) λ:摩擦抵抗係数 (-) l:通気層長さ(m) d:等価直径 (m) V_{in}:通気層内風速 (m/s) g:重力加速度 (m/s²) γ_{in}:通気層内空気密度 (kg/m³) γ_{out}:外気密度 (kg/m³) α A_n:各開口の有効開口面積 (m²) n:軒・棟開口番号 sign:平方根内の符号に応じた符号

註2) 住宅各部の風圧係数の計測は、下図に示す吹出し型風洞実験装置を用いて行なった。装置は、北見工業大学機械工学科所有のもので、1.5m×1.5m×長さ15mの風洞内に対象モデルを設置する。



参考図 吹出し型風洞装置の概略

註3) 実験建物における検討(3.)及び一般住宅を対象とした検討(4.)では、小屋裏換気量・屋根通気量は、実測した風圧係数を註1)に示す基本式によって計算・推定している。

実験建物においても、計算値と実測値との比較は行ってない(3.1)。比較を行わなかった理由としては、①実際の建物条件下で各風向別の換気量・通気量を各モデル毎に把握することは非常に難しく、また信頼性に欠けること、②各部の風圧係数と給排気口のαAや通気層の摩擦損失係数を実測にて求めておけば、対象とする小屋裏・屋根通気層の形状は単純であることから、計算により換気量・通気量を正確に捉えることが可能なこと、等があげられる。

註4) 計算部位を東側端部としたのは、①計算期間中、外部風向は北ないし北西を主方向とする頻度が多く、この部分が風下側となるため風上側と比べて温度的には高くなり、屋根面積積雪障害に対しては安全側で判断できると考えたこと、②屋根頂部や軒天部の風圧係数はばらつきが多く、相互比較を行うには計算対象部位を特定した方が良いと判断したこと、などによる。

註5) 換気条件から妻側に換気口を設置する条件を除いたのは、換気口形状の問題から北海道では雪が侵入することが多く、現実的には問題が残っているためである。詳しくは前報(その1)*1)の註2)を参照されたい。

註6) 図8及び図9では、縦軸を-6~4°Cに設定したため、外気温の-6~-13°Cまでの27data分は、グラフ中から欠落している。

参考文献

- *1) 鈴木大陸, 廣田誠一, 本間義規:積雪寒冷地の断熱気密化住宅における小屋裏換気手法に関する研究(その1), 日本建築学会計画系論文集第486号, 1996.4
- *2~4) 鈴木大陸, 本間義規, 廣田誠一ほか4名, 積雪寒冷地にふさわしい屋根工法に関する研究(その1~3), 日本建築学会北海道支部研究報告集No.6 8-6 9, 1995.3-1996.3
- *5~7) 鈴木大陸, 本間義規, 廣田誠一ほか4名, 積雪寒冷地にふさわしい屋根工法に関する研究(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 1995.8
- *8) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説pp201-210, 1996.3
- *9) 苫米地 司, 和泉正哲, 遠藤明久:屋根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, 1986.3
- *10) 本山秀明, 小島賢治:積雪深変化の推定法(乾雪の場合)一積雪層の粘性圧縮を考へて-(北海道大学低温科学研究所業績第2787号), 低温科学物理 篇第44号, 60年篇
- *11) 小野延雄, 石川信敬, 新井 正ほか2名:基礎雪氷講座VI 雪氷水文現象, 古今書院, 1994.5
- *12) 中尾隆志, 佐藤公明:積雪の含水率・温度を考慮した融雪モデルの研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 昭和63年度
- *13) 菊池勝弘, 今久ほか2名, 札幌市における最近10冬期間の降水の特徴, 北海道大学地球物理学研究報告Vol.44, 1984.10
- *14) 平成7年気象庁年報CD-ROM版, 気象庁監修 (財)気象業務支援センター, 1996
- *15) 赤林伸一, 村上周三ほか2名:周辺に建物群のある独立住宅の風圧分布に関する風洞実験および換気量予測, 日本建築学会計画系論文集第456号, 1994.2

(1997年4月18日原稿受理, 1997年9月19日採用決定)