

スチールハウスの断熱性能に関する研究

Study on Thermal Insulation and Thermal Bridge of Steel Stud Walls

須田 敬之^{*1)}

Noriyuki SUDA

杉田 浩司^{*4)}

Koji SUGITA

菅野 良一^{*2)}

Ryoichi KANNO

清水 潤^{*5)}

Jun SHIMIZU

宇野 暢芳^{*3)}

Nobuyoshi UNO

抄 録

充填断熱仕様のスチールハウスの断熱性能に関する報告である。充填断熱の壁体では、軽量形鋼が熱橋となり、壁体の熱抵抗が低下し熱貫流量が増加すると共に、壁体内や内装材表面で結露が発生する可能性がある。そこで、軽量形鋼の板厚、形状、材質等をパラメータとした壁体の断熱性能試験を行い、各パラメータが壁体の熱貫流率と壁体内外の表面温度に与える影響を調査した。特に、軽量形鋼の熱伝達距離や熱伝導率を変化させることで、壁体の熱貫流率を小さくできるが、同時に軽量形鋼の表面温度は露点を下回る可能性があるため、注意する必要があることなどを示した。

Abstract

This study is on the thermal insulation properties of filling insulation walls of steel framed houses. In the walls with filling insulation, thermal bridges of the light-weight sections increase the overall thermal transfer and the possibility of surface condensation inside and outside the walls. To examine the thermal insulation characteristics, thermal transmission property tests are conducted considering the plate thickness, shape, material type, etc. as experimental parameters. The tests show that the thermal transfer distance and the thermal conductivity of material affect the thermal insulation characteristics. It is also shown that the filling insulation walls may increase the possibility of surface condensation.

1. 緒 言

スチールハウスは、木造ツーバイフォー(以下、2×4と呼ぶ)住宅の枠材を木材から建築構造用表面処理軽量形鋼(以下、軽量形鋼と呼ぶ)に置き換えた住宅である。鋼材は木材に比べ熱を伝えやすいことから、軽量形鋼が熱橋となり、壁体の熱抵抗の低下に伴う熱貫流量の増加や、壁体内や内装材表面での結露発生に伴う耐久性の低下が危惧される。従って、断熱性能の確保と防露に関する技術開発が課題である。また、断熱性能は、住宅金融公庫の融資基準の一つであり、近年では、LCA(Life Cycle Assessment)の観点からも議論されているため、早急な課題解決が求められている。

しかしながら、板厚が1.6mm以下の軽量形鋼を用いたスチールハウスの壁体での熱橋現象に関する知見は少なく、設計上配慮すべき点についても明確になっていない。従って、これらの熱橋現象に関するデータを蓄積、分析し、スチールハウス用の断熱仕様を確立することが重要である。

2. スチールハウスの断熱・防露性能に関する研究動向

海外では、軽量形鋼にスリット等の加工を加え、熱の伝達距離を長くして熱橋の影響を緩和する技術などが開発され、既に販売され

ている¹⁾。しかし、夏場の高温多湿など、日本の気候はスチールハウス先進国のアメリカ合衆国やカナダの気候とはその傾向が異なるため、そのまま日本国内に適用することは難しい。日本では、鋼製部材を構造材料とする鉄骨系プレハブ住宅において、鋼製部材と他部材との間に断熱材を介在させて、熱の伝達を遮断し熱橋の影響を緩和する技術もみられる。しかし、2×4形式のスチールハウスに適用する場合には、部品数の増加や介在する断熱材が耐力壁の耐荷性能を低下させる可能性があり、直接的な適用は難しい。

日本のスチールハウスの断熱・防露性能に関する研究は、1996年以降、鋼材倶楽部断熱性能分科会(以下、断熱分科会と呼ぶ)を中心に行われている。断熱分科会での活動目標は、スチールハウス用の断熱仕様の早期確立と住宅金融公庫の承認の獲得である。具体的な課題は、新旧の省エネルギー基準を満足する断熱性能の確保と壁体内でも結露をしない防露性能の確保である。このため、数値解析やモニターハウスでの実測調査等に基づいた各種検討が行われている²⁻⁶⁾。この結果、断熱性能と防露性能の確保が可能な外張断熱工法により、1997年12月に住宅金融公庫の第3条承認を獲得するに至っている。

図1はモニターハウスの実測結果の一例である。このスチールハ

*1) 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 ☎293-8511 ☎0439-80-3165
*2) 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員 Ph. D.

*3) 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主幹研究員
*4) 建材開発技術部(薄板営業部 兼務)
*5) 建材開発技術部(薄板営業部 兼務) マネジャー

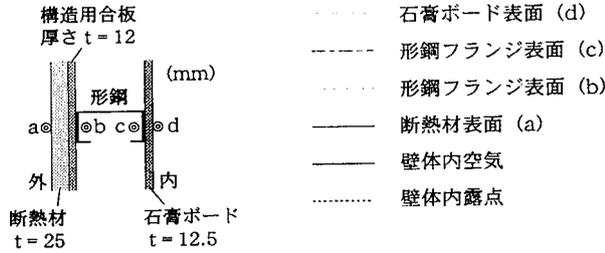
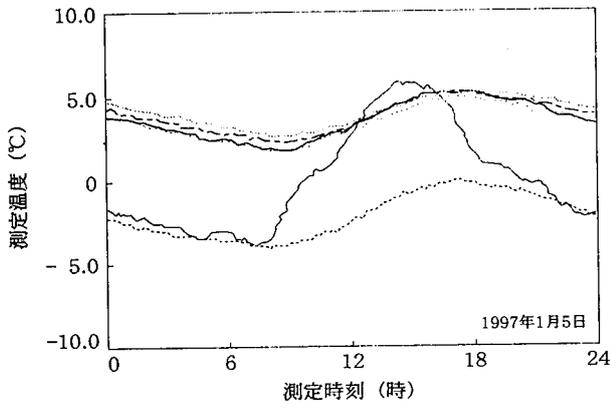


図1 モニターハウス実測結果

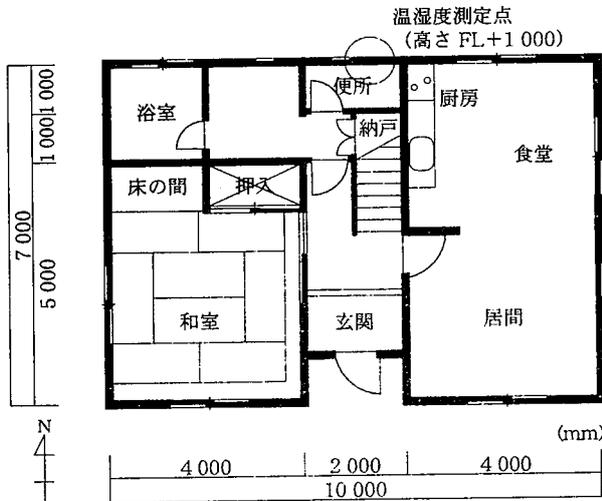


図2 モニターハウス1階平面図

ウスは熊本県阿蘇群久木野村に立地し、延床面積135m²の2階建ての住宅である。断熱仕様は厚さ25mmの断熱ボードを外壁側に設けた外張りである。図中の値は1997年1月5日の1階北側(図2参照)の壁体内外の温度履歴である。また、壁体内の温湿度から算出した露点温度も併せて示している。断熱材外側の表面温度(a)は大きく変動しているが、断熱材の内側に位置する軽量形鋼の温度(b, c)の変動は小さく、露点温度との比較でも結露発生の心配はない。夏の測定結果もほぼ同様で、夏季結露も生じない結果となっており、年間を通し外張りの断熱材が壁体内の防露に有効に働いていることが分かる。

3. 本研究の位置付け

現在、スチールハウスでは、外張断熱を標準的な仕様として普及活動中であるが、コストや本州での認知度では充填断熱より劣るので、充填断熱をスチールハウスに適用する要望も少なくない。スチールハウスに充填断熱を採用した場合、図3の内壁表面を撮影し

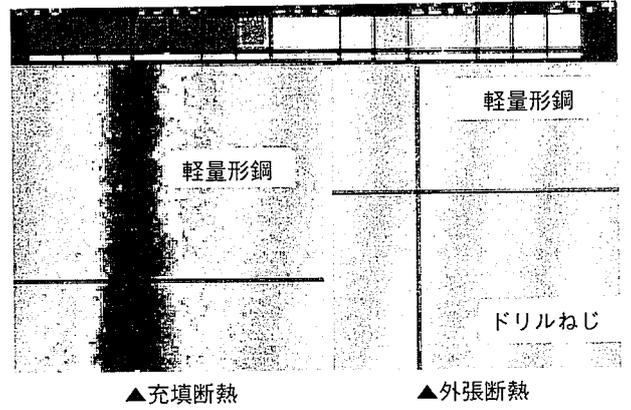


図3 内壁表面温度分布

た赤外線映像に示すように、軽量形鋼が熱橋となり、外張断熱時にはない局部的に温度の低い部分が生じ、結露に十分な配慮が必要となる。しかしながら、適用地域の限定等を行うことで適用の可能性もあり、充填断熱は、スチールハウスの今後の普及のために検討すべき課題といえる。ところが、板厚が1.6mm以下の軽量形鋼を用いた充填断熱の壁体の熱橋現象に関する知見はほとんどないのが現状である。

そこで本研究では、スチールハウスへの充填断熱の適用に向けて、壁体の熱貫流率と壁体内外の表面温度のデータを蓄積し、形鋼板厚、形状、材質等の各パラメータが断熱性能や防露性能に与える影響を検討した。

4. 壁体の熱貫流率と壁体の温度分布に関する実験

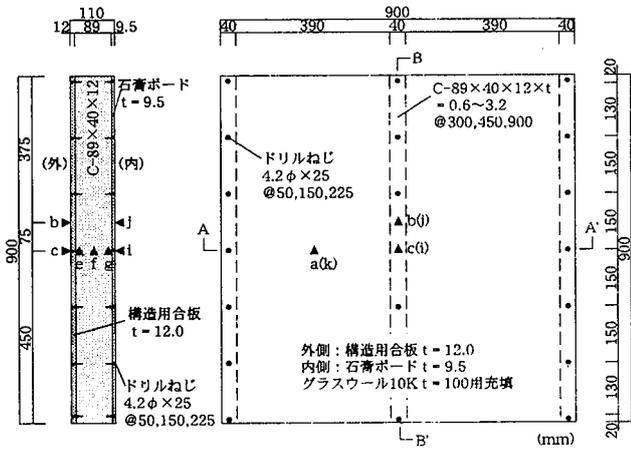
本実験により、充填断熱の壁体の熱貫流率と壁体内外の温度変化に関するデータを蓄積し、各パラメータの影響度を明らかにし、併せて、壁体内外での結露発生の可能性について考察した。

4.1 試験概要

試験体の概要を図4に示す。配置間隔455mmの3本の軽量形鋼 C-89×40×12×t=1.0に構造用合板(厚さ12.0mm)、石膏ボード(厚さ9.5mm)をスチールハウス用ドリルねじ(4.2mm径、配置間隔150mm)で接合し、壁体の内部にグラスウール10K(厚さ100mm用)を充填した900mm×900mmの充填断熱の試験体を基本形(試験体No.1)とした*1。また、温度測定用の熱電対の取り付け位置(a~k)を、図4中に▲の記号で示す。熱電対は軽量形鋼のウェブ面、構造用合板と石膏ボードの表面、ドリルねじの頭部に設置している。

試験のパラメータは、表1に示すように、1) 軽量形鋼の板厚(試験体No.2,3,4,5)、2) 軽量形鋼の配置間隔(試験体No.6,7)、3) 構造用合板及び石膏ボードの接合ねじ間隔(試験体No.8,9)、4) 熱伝達距離の影響を確認するための軽量形鋼の形状(試験体No.10,11)、5) 素材の熱伝導率の影響を確認するための軽量形鋼の材質(試験体No.12,13)とした。試験体No.10は海外の断熱スタッドの事例^{7,8)}を参考に、図5に示すように軽量形鋼のウェブ面にウェブ面積の30%程度のスリット状の開口を設置している。試験体No.11は、図6に示すように軽量形鋼のウェブ面をΣ形に折り曲げて、熱の伝

*1 K C型スチールハウスの面材の仕様は、構造用合板厚さ9.0 石膏ボード厚さ12.5であり、本試験体仕様とは若干異なる。



(a) B-B'断面図 (b) 立面図
(c) A-A'断面図 (d) 熱電対取付位置
図4 試験体No.1~11概要図

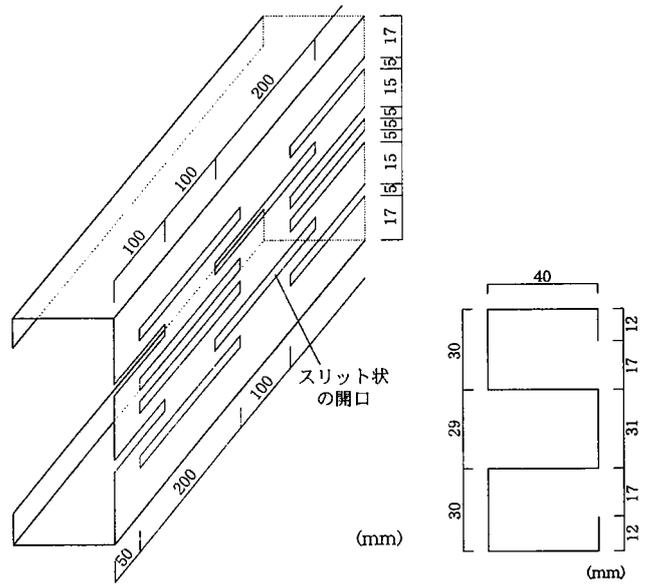


図5 有孔形鋼の概要図 図6 Σ形形鋼の断面図

℃、石膏ボード側(室内側)が30℃になるように温度差を与え、試験体の熱貫流率と各点の表面温度を測定した。本来ならば、冬季の温度条件を再現し、構造用合板側を-5℃程度とした設定が最適と考えられるが、恒温室の冷却能力の理由から構造用合板側を10℃と設定した。

4.2 試験結果と各パラメータの影響

表2に測定した熱貫流率と各部の温度を示す。表中の温度は、試験室温度が実験ごとに設定温度から多少ずれるため、構造用合板側を10℃、石膏ボード側を30℃に置き換え、比例計算により基準化している。

パラメータ別の熱貫流率を図7に示す。いずれの試験体も、木製2×4材を用いた試験体の熱貫流率より大きい値となるが、軽量形鋼の板厚、配置間隔、形状、材質を変えることで、熱貫流率を小さくし、断熱性能を向上できることが分かる。以下、各パラメータごとに試験結果をまとめる。

1) 軽量形鋼の板厚の影響

板厚2.3mm以上の場合は板厚1.4mm以下の場合と比較して熱貫流率は8%程度大きくなる。この傾向は、図8(a)の表面温度の測定結果からも確認でき、板厚が厚いほど、軽量形鋼間(e-f-g)の温度変化は小さくなり、より熱が伝わりやすくなっている。

一方、板厚2.3mm以上の場合は板厚が大きくなるほど熱貫流率は大きくなるが、板厚1.4mm以下の場合には板厚が大きくなるほど熱貫流率は小さくなる傾向にある。この原因は不明だが、熱貫流率の差が0.01~0.02kcal/(m²h℃)程度と小さく、測定誤差に起因している可能性もあり、正確な傾向の把握は今後の課題である。

2) 軽量形鋼の配置間隔の影響

軽量形鋼の配置間隔が900mm、450mm、300mmと小さくなるに従い、熱貫流率は0.12~0.17kcal/(m²h℃)ずつ増加する傾向にあり、軽量形鋼の本数が1本増加することで熱貫流率が25%程度増加する。しかし、図8(b)に示すように、各部の表面温度はほぼ同程度であり、単に軽量形鋼の本数の増加が断熱性能を低下させていることが分かる。

3) 軽量形鋼への面材の接合ねじ間隔の影響

面材の接合ねじ間隔の変化に伴う熱貫流率の変化は、0.01kcal/

表1 試験体とパラメータ

No.	形鋼板厚 (mm)	形鋼間隔 (mm)	ねじ間隔 (mm)	形鋼形状	形鋼素材
1	1.0	450	150	C	普通鋼
2	0.6	450	150	C	普通鋼
3	1.4	450	150	C	普通鋼
4	2.3	450	150	C	普通鋼
5	3.2	450	150	C	普通鋼
6	1.0	300	150	C	普通鋼
7	1.0	900	150	C	普通鋼
8	1.0	450	50	C	普通鋼
9	1.0	450	225	C	普通鋼
10	1.0	450	150	C孔	普通鋼
11	1.0	450	150	Σ	普通鋼
12	1.0	450	150	C	SUS
13	1.0	450	150	C	Al
14	2×4	450	150	■	木材

達距離を変化させた。また試験体No.12,13では、基本形の軽量形鋼が普通鋼をベースとしためっき材であるのに対し、ステンレス鋼(SUS304)とアルミニウム合金(Al)の軽量形鋼を用い、素材の熱伝導率を変化させた。さらに、試験体No.14は基本形の軽量形鋼を木製(S.P.F材)の2×4材に置き換えた比較用の試験体である。なお、試験体数は各試験体1体とした。

これらの試験体では、熱貫流率と壁体内外の表面温度に各パラメータが与える影響をより明確にするため、外装材や外装材と構造用合板の間の通気層は設けていない。また、実施工時の充填状況のばらつきを考慮して、安全側の試験となるよう軽量形鋼のウェブ内側への断熱材充填は行っていない。(図4で網かけなし)

JIS A 1420に基づいて試験した。構造用合板側(外気側)が10

表2 表面温度と熱貫流率の測定結果

No.	熱貫流率 (kcal/m ² h°C)	表面温度(°C)												
		外	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	内
1	0.64	10.0	10.9	14.6	15.0	11.8	19.0	21.2	22.9	28.5	26.2	26.5	29.2	30.0
2	0.66	10.0	11.3	14.1	14.9	12.4	19.3	21.5	23.6	28.7	26.2	26.7	29.2	30.0
3	0.63	10.0	11.0	14.4	15.3	12.2	20.1	21.7	23.2	28.7	26.4	26.5	29.1	30.0
4	0.69	10.0	10.8	14.8	15.5	11.9	20.3	21.5	22.7	28.6	25.5	25.6	28.9	30.0
5	0.70	10.0	11.0	14.9	16.9	12.4	20.8	21.8	22.6	28.5	24.7	25.5	28.8	30.0
6	0.81	10.0	11.1	13.9	14.8	12.3	19.5	21.1	22.9	28.8	26.6	26.6	29.3	30.0
7	0.52	10.0	10.8	—	—	11.6	—	—	—	28.7	—	—	29.1	30.0
8	0.62	10.0	11.1	15.1	16.0	12.1	19.2	21.3	22.8	28.7	26.2	26.0	28.8	30.0
9	0.65	10.0	10.8	14.6	16.1	12.0	19.7	21.4	23.2	28.8	26.6	26.1	29.0	30.0
10	0.54	10.0	11.2	13.1	14.0	11.9	15.5	20.2	25.2	28.4	27.2	27.8	29.0	30.0
11	0.58	10.0	11.0	13.9	14.9	12.3	18.2	21.2	24.0	28.8	26.7	26.7	29.1	30.0
12	0.55	10.0	11.0	13.4	13.6	12.2	18.1	21.1	24.2	28.7	26.9	26.8	28.9	30.0
13	0.73	10.0	10.6	14.7	15.1	11.8	20.4	21.5	22.9	28.8	25.8	25.4	29.0	30.0
14	0.43	10.0	11.0	11.7	11.8	12.0	13.5	20.1	26.5	28.6	28.3	28.4	29.1	30.0

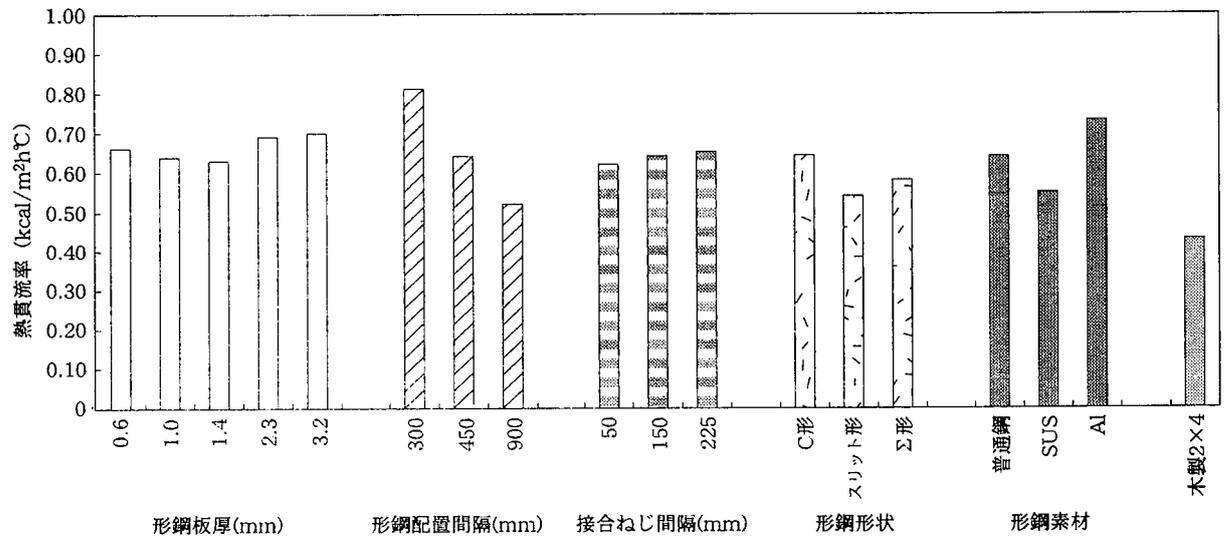


図7 パラメータ別熱貫流率の変化

(m²h°C)程度とわずかであり、図8(c)の表面温度も試験体間での変化が小さい。従って、面材の接合ねじ間隔が断熱性能に与える影響は小さいといえる。

4) 軽量形鋼の形状の影響

軽量形鋼のウェブ面にスリット状の開口を設けた場合、通常の軽量形鋼と比較して熱貫流率は15%程度小さくなる。また、軽量形鋼をΣ形にした場合の熱貫流率は通常の軽量形鋼より10%程度小さくなる。スリット状の開口を設けた場合とΣ形の場合の軽量形鋼の熱伝達距離は、それぞれ通常の軽量形鋼の3.25倍(最短距離)と1.90倍となるため、熱の伝達距離が長くなるほど、熱貫流率は小さくなる事が分かる。同様の傾向は、図8(d)に示す温度の測定結果からも確認でき、熱の伝達距離が長くなるほど、軽量形鋼間(e-f-g)の温度変化は大きくなる。スリット状の開口を設けた場合は、2×4材の温度分布にかなり近づき、より熱が伝わりにくくなっている様子が分かる。

5) 軽量形鋼の材質の影響

ステンレス鋼(SUS)の場合は普通鋼と比較して15%程度熱貫流

率が小さくなり、アルミニウム合金(Al)の場合は15%程度熱貫流率が大きくなる。各材質の熱伝導率λ(kcal/(mh°C))は、ステンレス鋼(λ=13)<普通鋼(λ=46)<アルミニウム合金(λ=175)の関係にある*2ことから、軽量形鋼の熱伝導率が大きくなるほど熱貫流率は大きくなる傾向にあるといえる。同様の傾向は図8(e)の表面温度の測定結果からも確認でき、熱伝導率の小さいステンレス鋼(SUS)では軽量形鋼間(e-f-g)の温度変化が大きくなり、熱伝導率の大きいアルミニウム合金(Al)では軽量形鋼間(e-f-g)の温度変化は小さくなる。

4.3 壁体内外での表面結露に関する考察

以上のように、軽量形鋼の板厚や形状や材質を変えることで、壁体の熱貫流率を減少させ、断熱性能を向上させることができる。しかしこれに伴って、壁体内での軽量形鋼の温度差は大きくなり、低温部では露点温度を下回る可能性がある。そこで、石膏ボード表面と壁体内の軽量形鋼表面での結露発生の可能性について検証する。

*2 新省エネルギー基準⁹⁾ 表2.1.4 材料の熱伝導率表による。

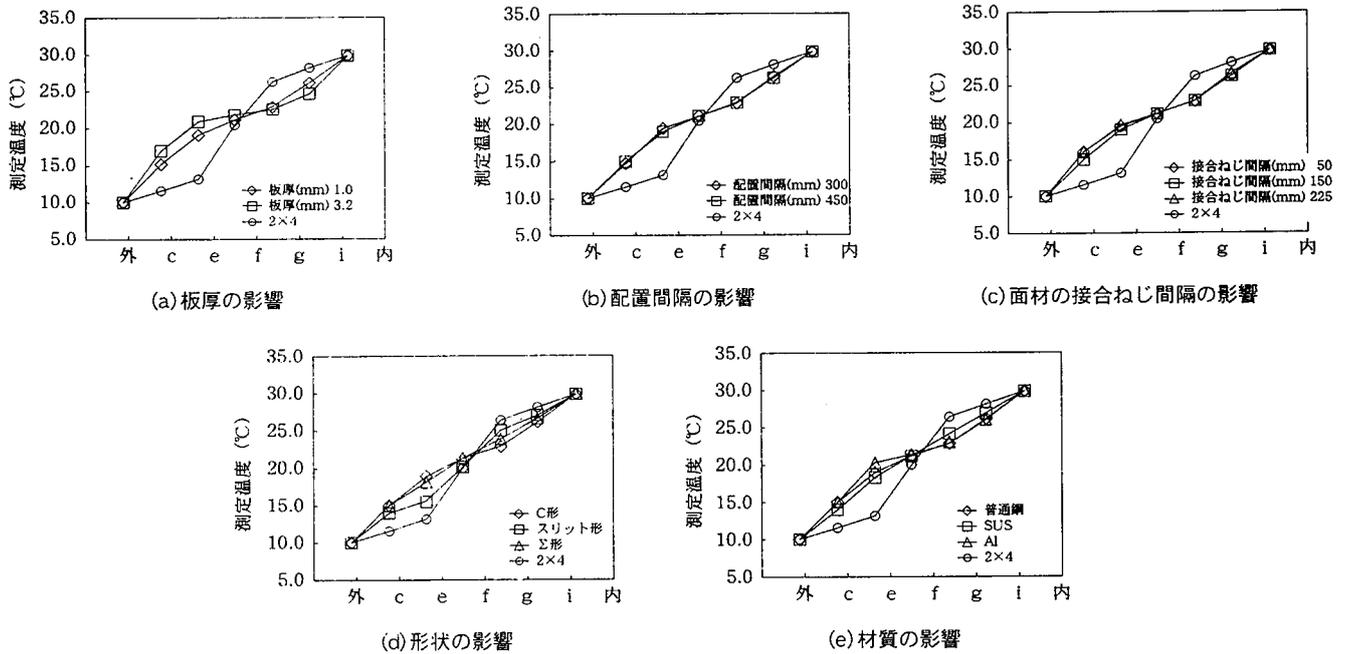


図8 パラメータ別表面温度比較

特徴的な試験体の熱貫流率と、壁体の温度と室内気温との温度差の関係を図9に示す。壁体の温度については、石膏ボード表面で最も低温となるi点(ドリルねじの頭部)での測定値と、軽量形鋼表面で最も低温となるe点(合板側)の測定値を対象とした。図中の試験体No.15の値は、図10に示す外張断熱の試験体についての要素試験結果である。なお、外張りの断熱ボードは厚さ25mm、熱伝導率 $\lambda = 0.034 \text{ kcal}/(\text{mh}^\circ\text{C})$ である。やや低いグレードの断熱仕様のため、熱貫流率の測定値は $0.82 \text{ kcal}/(\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C})$ であり、断熱性能は一連の試験体の中で最も劣る。

図9より、熱貫流率が小さくなり断熱性能が向上するにつれ、内装材表面では室外の低温部の影響が少なくなり、石膏ボードの表面温度と室内気温との温度差は減少し、結露が発生しにくくなる状況が確認できる。一方、断熱性能が向上するにつれて、軽量形鋼の合板側では室内気温の影響を受けにくくなり、軽量形鋼の表面温度と室内気温との温度差は逆に増加し、軽量形鋼表面で結露は発生しやすくなる。

仮に冬季の室内環境を気温 20°C 、湿度 $50\%^{*3}$ と仮定し、壁体内も同じとした場合、その露点温度は約 9.3°C となるため、図9において室内気温との温度差が -10.7°C 以下の部位については結露が生じることになる。この条件を本試験結果に適用した場合、石膏ボードの表面では結露が生じないものの、軽量形鋼の形状や材質を変化させて断熱性能を向上させた試験体の軽量形鋼表面では結露が生じるようになる。壁体内で部材の表面温度が露点温度を下回る現象は、 2×4 材を用いた試験体でも生じるが、木製部材は素材としての吸湿性が高いため問題が顕在化していない可能性が大きい。

一方、外張断熱の試験体No.15では、図11に示すように、軽量形鋼の外側(低温側)に位置する断熱材により熱が遮断され、軽量形鋼の表面温度は充填断熱の場合を大きく上回り、図9の室内気温との温度差においても結露の心配はない結果となっている。

石膏ボード表面温度1点(Δ) 軽量形鋼表面温度e点(\diamond)
 No. 1 (基本形) No.12 (SUS)
 No. 5 ($t=3.2$) No.13 (AI)
 No.10 (スリット形) No.14 (2×4)
 No.11 (Σ 形) No.15 (外張断熱)

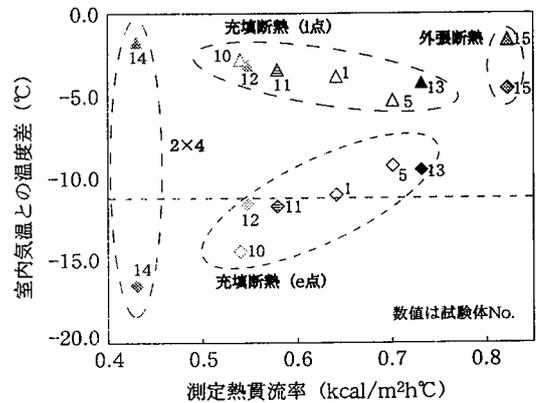


図9 測定熱貫流率・表面温度の室内気温との温度差

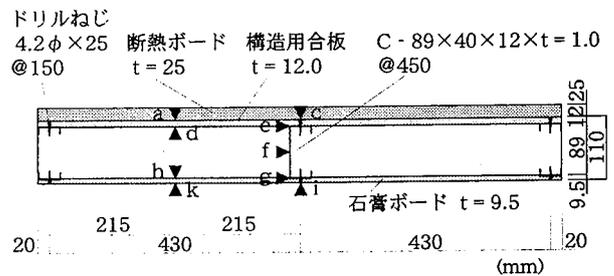


図10 試験体No.15の断面図

このように、充填断熱仕様において、軽量形鋼の板厚や形状や材質を変え断熱性能を向上させても、軽量形鋼表面の防露上は、必ずしも性能向上につながらないため注意する必要がある。しかしながら、試験体No.15の試験結果が示すように、やや低いグレードの厚さ25mmの断熱ボードであっても、外張りとするだけで防露性能が大きく改善されることを考慮すれば、軽微な外張断熱で防露性能を

*3: 建築学体系28独立住宅. 新訂第1版. 彰国社. 1973. 2.12 a. 住宅の室内気候による。

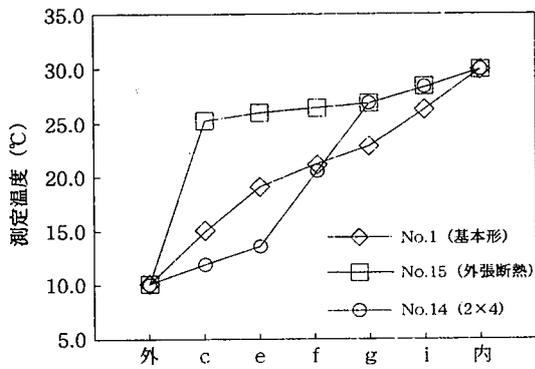


図11 外張断熱仕様の壁の表面温度

確保し、充填断熱で断熱性能を確保する併用工法も、今後の検討対象となりうると考えられる。

5. 結 言

本検討により、充填断熱仕様の壁体において、軽量形鋼の形状や材質を工夫し、熱伝達距離や熱伝導率を変化させることで、壁体の熱貫流率を小さくできるが、同時に軽量形鋼の表面温度は露点を下回る可能性があるため、注意する必要があることなどが明らかとなった。

一方、本検討は壁体の一般部を対象としており、断熱・防露性能がより顕著に現れる壁の隅各部等についての評価は今後の課題である。

なお、図1, 2の久木野村のモニターハウスの実測は、鉄鋼6社(川崎製鉄, 神戸製鋼所, 新日本製鐵, 住友金属工業, 日新製鋼, NKK)の共同研究として鋼材倶楽部にて実施されたものである。

謝 辞

スチールハウスの断熱性能の研究開発を進めるにあたり、委託研究を通じて北海道工業大学 鈴木憲三教授, 熊本大学 石原修教授にご指導をいただきました。ここに厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Lindab Profil AB: Yttervaggsgreklar(製品カタログ)
- 2) 砂川雅彦 ほか: スチールハウスの構造・耐久性・断熱性に関する研究・その11 断熱・気密仕様等に関する検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学II. 1997, p.13
- 3) 堀ノ内康丈 ほか: スチールハウスの構造・耐久性・断熱性に関する研究・その12 外壁・天井・床の実質熱貫流率の計算. 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学II. 1997, p.15
- 4) 海江田貴光 ほか: スチールハウスの構造・耐久性・断熱性に関する研究・その13 外壁・天井・床の表面結露の判定. 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学II. 1997, p.17
- 5) 樋口誠六 ほか: スチールハウスの構造・耐久性・断熱性に関する研究・その14 モニターハウスの熱橋と気密性に関する実測調査. 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学II. 1997, p.19
- 6) 須田敬之 ほか: 鋼製スタッド壁の熱橋に関する実験的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集環境工学II. 1997, p.11
- 7) Blomberg, T. et al.: Sustainable Steel Conference, Orlando, 1998, IISI and SRI
- 8) Meo, L. et al.: Sustainable Steel Conference, Orlando, 1998, IISI and SRI
- 9) 住宅・建築省エネルギー機構: 住宅の新省エネルギー基準と指針. 住宅・建築省エネルギー機構, 1996, 184p.