

木造住宅用スチール部材

Structural Steel Shapes for Wood Structures

坂本 義仁 基盤技術研究所 都市工学研究部 主任研究員
沖 晃司 基盤技術研究所 都市工学研究部
今野 和近 基盤技術研究所 都市工学研究部 主査
高阪 廣作 住宅建材チーム スチールハウスグループ マネージャー

Yoshihito Sakamoto
Koji Oki
Kazuchika Konno
Kosaku Takasaka

スチールハウス形鋼は板厚が **1.0mm** 前後と薄いながらも、同一外形の木角材と同等以上の高い曲げ剛性を持ち、 ϕ **5mm** 以下のタッピンネジにより木材との接合が容易に行える。また、木材と比較して、ソリ・ムクリなどの初期不整が少なく、湿度による伸び縮みやたわみなどの経年変化がなく、構造用ランバー材に替えて使用するメリットが大きい。当社は、ソリ・ムクリなどの初期不整や、経年変化が重視される小屋組み、床根太、大引き、天井根太をスチールハウス部材の有望なマーケットと位置付け開発を推進し商品化した。

NKK has developed steel structural members, such as roof truss, floor joist, girder and ceiling joist, for residential wood structures. The structural shapes are unique in their high bending stiffness and thin wall-thickness, approx. 1mm, thank to which they can be connected to wooden members by screws of just less than ϕ 5mm. Also, the shapes are excellent structural members in that they have less initial warping and bump, and less creep.

1. はじめに

近年、木造住宅の生産現場では構造躯体に使用する製材の質の低下が問題となっている。特に問題となっているのは、乾燥によるソリが大きいと言われるグリーン材の流通であり、このような材料の使用により構造的欠陥を招く恐れのあることが指摘されている。

一方、当社が開発を進めてきたスチールハウスの形鋼部材は、**Fig.1** に示すように従来の軽量形鋼と異なり板厚が **1.6 ~ 0.8mm** と薄く、板厚に対して高い曲げ剛性を持ちながらも、接合具として ϕ **5mm** 以下という小径のタッピンネジを使用するため、木材との接合が容易に行えることを特徴としている。また、木材と比較して、ソリ・ムクリなどの初期不整が少なく、湿度による伸び縮みやたわみなどの経年変化がなく、構造用ランバー材に替えて使用するメリットが大きい。

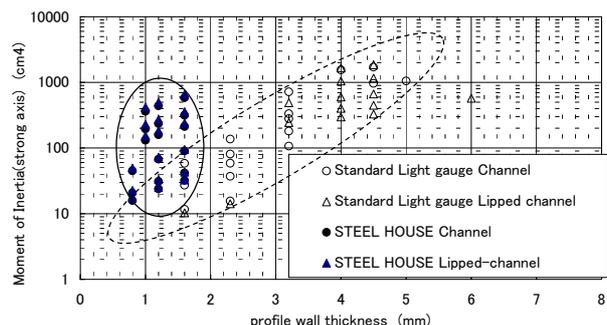


Fig.1 Wall-thickness and moment of inertia

そのため当社は、ソリやムクリが目にとまりやすい天井、経年変化による躯体への影響が大きい床や天井などの曲げ部材、これらをスチールハウス部材の有望なマーケットと位置付け開発を推進してきた。

2. 木造住宅用部材の開発課題

スチールハウス部材は、高い曲げ剛性を持ちながらも、板厚が薄く軽微な接合具によって施工可能なことを最大の特徴としている。しかし、メリットが認識されながらも、これまでスチール部材の適用が一部に限られてきた原因としては、板厚の薄いスチールハウス部材の設計方法が一般に認知されていなかった点、さらに、熱橋効果が大きなスチール部材を使用すると木材に比べて断熱上不利になると理解されていた点など、設計上の不安があったと思われる。そこで、部材開発に当たって、**Fig.2** に示す開発課題を設定した。

3. 構造課題

3.1 座屈

スチールハウス形鋼によって屋根や床を組み上げる場合、通常、形鋼によって構成した骨組みに合板や石膏ボードといった面材をビス止めして使用する。この面材は、枠組壁工法住宅と同様に屋根・床の面内の剛性を付与するとともに、スチールハウスでは形鋼を座屈補剛の意味で重要な構造材として機能している。現在のスチールハウス構造設計指針においては、この面材の座屈補剛を期待した設計法が採用

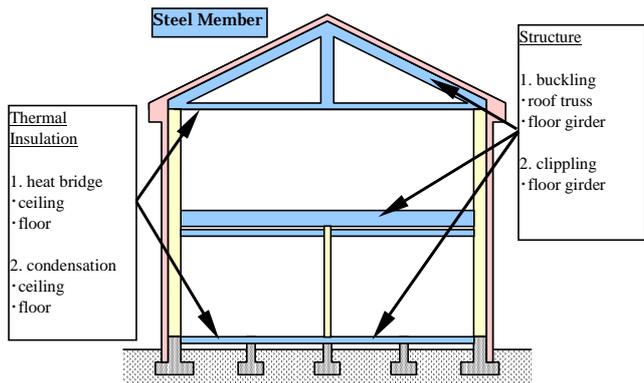


Fig.2 Steel shape's application and tackled problems

されているが、その適用に当たっては、座屈長や応力分布から細長比を評価し、適正な座屈強度を把握することが必要となる。特に、座屈が設計上クリティカルとなる個所は、Fig.3に示す負曲げ領域での座屈挙動である。実験に当たっては、この負曲げ領域での部材挙動に着目し、実況を想定した荷重による単調載荷を実施した。

3.1.1 床架構の実験

床架構ではFig.4に示す「連続梁」の支点部に負曲げ領域が存在する。そこで、応力は実況のモーメント分布を反映するよう考慮し、図のような試験装置とした。さらに「片持ち梁」や「均等曲げ」状態についても実験を実施した。支点部は、実況の支持条件を考慮し、面外への変位・回転を拘束することとした。

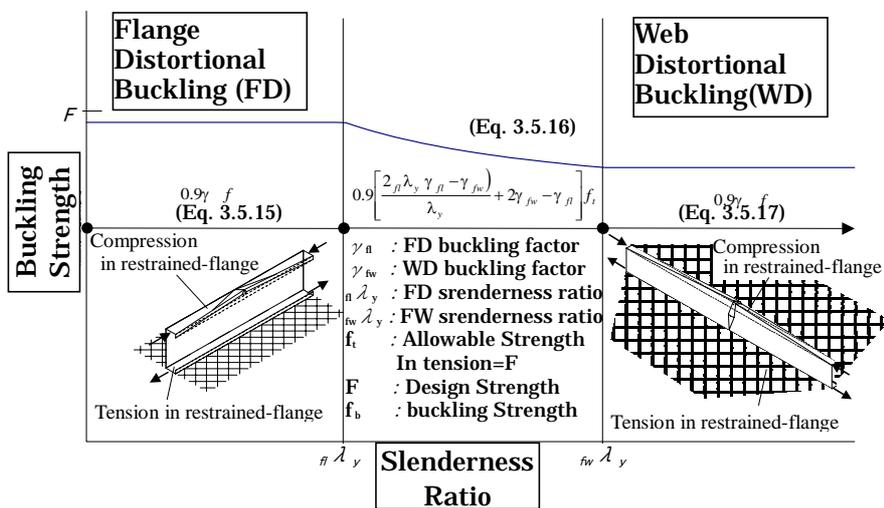


Fig.3 Slenderness and buckling strength

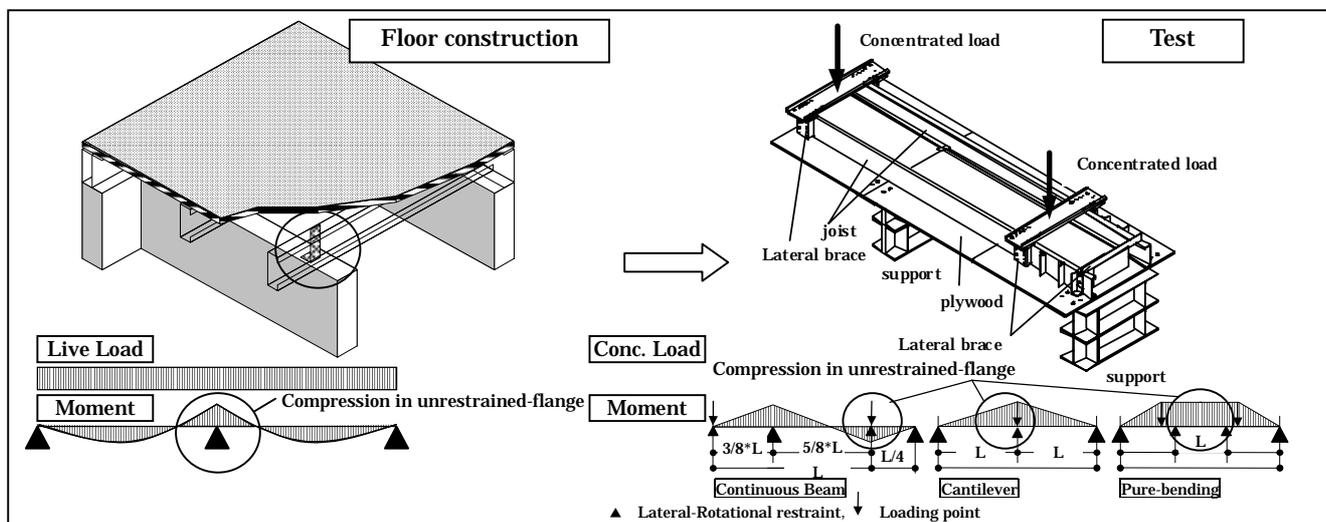


Fig.4 Loading test of floor joist

3.1.2 屋根トラスの実験

屋根トラスでは Fig.5 に示す風荷重時に上弦材に負曲げ領域が存在する。そこで、応力は実況のモーメント分布を反映するよう考慮し、また部材の支持条件については面外への変位を拘束し、図のような試験装置とした。また、積雪時の場合についても、上弦材には圧縮軸力と正曲げによるゆがみ座屈の発生が懸念されるため、実験を実施した。実験状況を Photo 1 に示す。

3.1.3 実験の結果

(1) 床の実験では、「連続梁」、「片持ち梁」、「均等曲げ」とともに指針評価式の計算値と良く対応し、これらの応力状態での評価式の有効性を確認した。

雪荷重 SL を想定した屋根実験は、節点部の負曲げ領域では座屈せず、上弦材の梁中間部のモーメント最大領域にて圧縮フランジが局部座屈し終局に至った。Table 1 のように部材応力度は、降伏点強度まで達した。この実験より、試験体

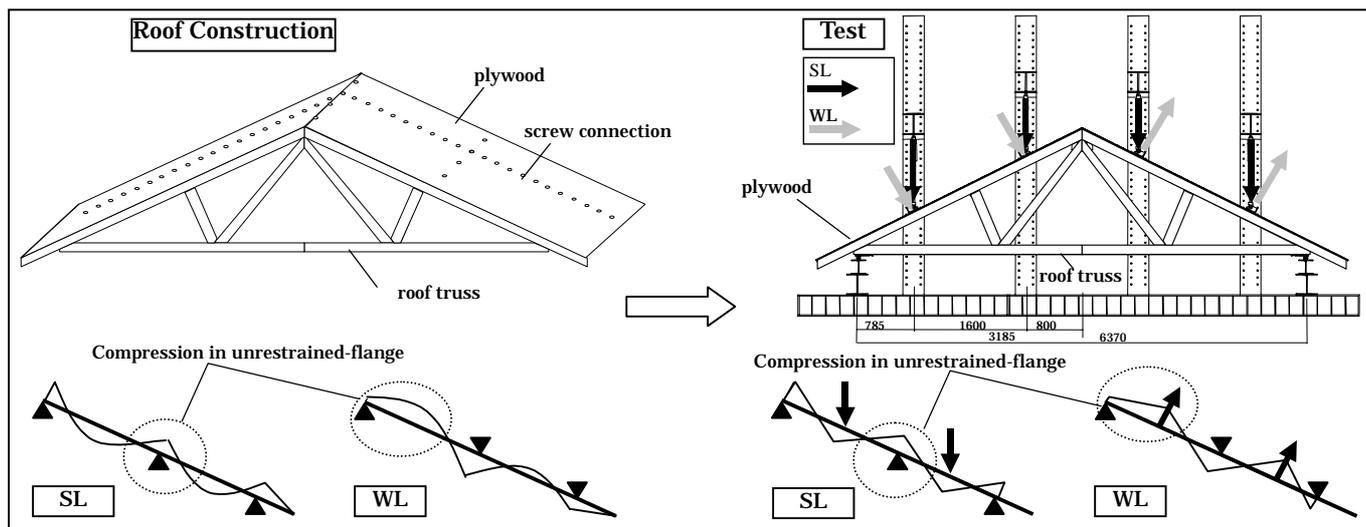


Fig.5 Loading test of roof truss



Photo 1 Loading test of roof truss

規模では直行部材や面材の座屈補剛効果により負曲げ領域の座屈の恐れがないことが確認できた。

(2) 風荷重 WL を想定した屋根実験は、上弦材の web-distortional 座屈により終局に達した。指針評価式に基づく計算値は実験値と良く対応した。実験より、風荷重の場合、負曲げ領域が大きいために web-distortional 座屈の考慮が必要となることが確認された。

Table 1 Test results of floor joist and roof truss

#	Load	L (m)	Steel prof. (mm)	Yield str. (kgf/mm ²)	Buckling str.		Test comp.	Failure pattern
					Test (kgf/mm ²)	Comp. (kgf/mm ²)		
F	Con.beam	1.82	C-140×40×12×1.0	37.8	24.5	24.8*	0.99	SB
	Cantilever	1.365		37.8	33.9	28.0 [○]	1.21	FD
	Pure-bend	0.91		37.8	31.3	28.3 [○]	1.11	FD
		2.73		37.8	27.7	25.2*	1.10	FW
R	SL	6.37 ⁺	C-89×40×12×1.2	35.9	35.7	35.9 [△]	0.99	FL
	WL	6.37 ⁺		35.9	29.2	29.3 [○]	1.00	WD

: F ; Floor joist, R ; roof truss

Failure pattern : FD ; Flange distortional, WD ; Web distortional, SB ; Shear/bending buckling, FL ; flange local buckling

Comp.* ; FD buckling strength, ○ ; FW buckling strength, △ ; yield strength (*, ○ ; Safety factor 1/0.9 is applied to predict net value)

+ : Truss span

3.2 クリップリング

スチールハウス用形鋼は、板厚が薄いため局所的な集中荷重を受けるとクリップリングと呼ばれるウェブの局部座屈を生じる。Fig.6 に示す 1 階床根太の場合、根太の中間部に対して大きな集中荷重が加わるため、クリップリングに対する検討が必要である。AISI 設計指針では、Fig.7 に示す上下フランジ圧縮状態(ITF)と、片フランジ圧縮状態(IOF)についてクリップリング耐力評価式を示しているが、この場合上下から集中荷重を受ける可能性を考えると前者を適用することとなる。

本稿では Fig.6 に示すような合板の拘束が、座屈補剛効果をもたらすと考え、軽量形鋼に床合板をビス止めし、これに載荷した。実験結果は、片フランジ圧縮状態(IOF)の評価式の計算値と良く対応した(Table 2)。これにより束支持部のクリップリング耐力は、合板などの面材の拘束効果を考慮することで、より高い耐力を発現すること、さらに IOF 評価式によって耐力の推定が可能であることを確認した。

4. 断熱課題

4.1 断熱仕様選定のための留意点

住宅の屋根あるいは天井、床の骨組みに、スチールハウス形鋼を使用する場合、鋼材は木材よりも熱伝導率が高いため、

Table 2 Test results of joist clipping

Section	Thick. t mm	Yield str. kgf/mm ²	Max. load test Kgf	Max. load comp.* kgf	Test comp.
C-235×40×20	1.0	35.9	620	680	0.91
C-140×40×12	1.0	36.5	911	919	0.99
C-140×40×12	1.2	32.6	1097	1020	1.08
C-89×40×12	1.0	35.2	999	847	1.18
□-89×44.5	0.5	32.7	294	281	1.04
□-89×44.5	0.8	32.1	577	582	0.99

* : Safety factor 1.85 is applied to predict net value

熱橋による熱損失の防止、防露に対する対応がより厳しく求められる。鋼材による熱橋の影響は、骨組み間に断熱材を配置する充填断熱工法で顕著であり、熱橋対策と言う意味では外断熱工法が望ましい。

屋根トラスの場合、トラスの端部を外壁内側に納める形状とすれば、断熱された野地板内部に骨組みが配置されるため、野地板部分が骨組みよりもクリティカルとなり、スチールハウス形鋼への置き換えに際し防露上特別な検討は不要である。天井、床の骨組みは、断熱された外壁、基礎部分の内部に取り付けられるため、断熱材を貫通する下地胴縁、あるいは、断熱材の室内側（繊維系断熱材の場合は防湿層室内側）がクリティカルとなり、同じく置き換えに際して特別な検討は不要である。

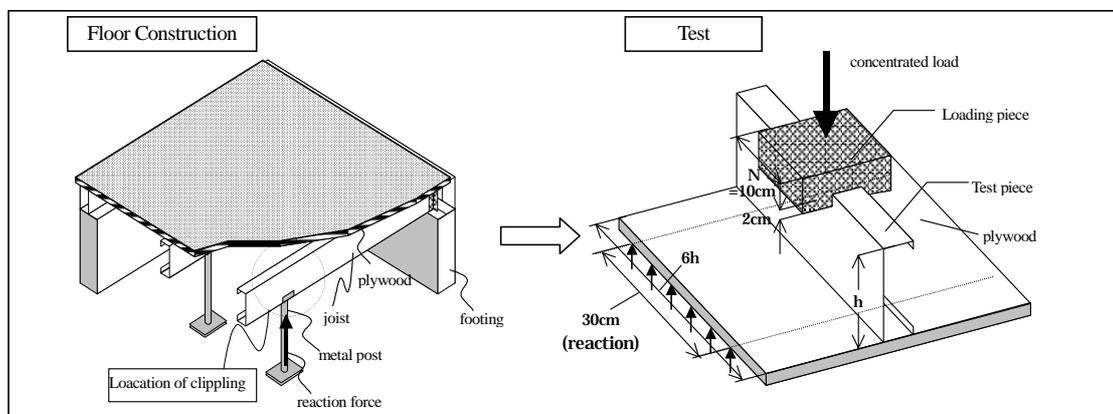


Fig.6 Loading test of joist clipping

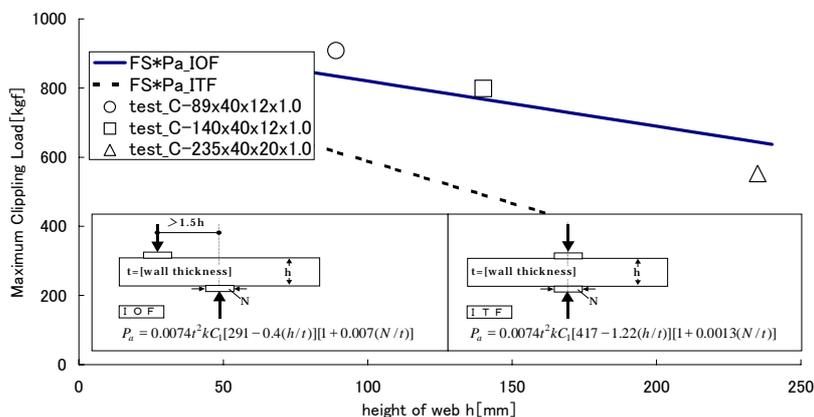


Fig.7 Web-height and clipping capacity

しかし、一般の住宅では充填断熱工法が多く採用されており、木材から鋼材への置き換えに際して熱橋の影響を無視できない。特に、金属熱橋の影響は高断熱化するほど顕著に現れ、省エネ基準などの断熱性能の基準をクリアするために断熱材の厚さを単純に厚くした場合や、熱橋部分の断熱補強の仕方によっては、結露に対して危険側にシフトする例を実大模型実験やシミュレーションでも確認しており、骨組みのディテール、防湿層の配置方法も含め、全体のバランスを考慮した仕様の選定が必要となる。

また、壁と床、屋根と壁など、異なる部位との接合部では一般に熱損失が大きくなる。そのため、KC型スチールハウスの例では、屋根トラスと外壁の間に木製頭つなぎを設けて熱損失の緩和を図っている。しかし、この組み合わせは木材が壁と屋根トラスの間で断熱的に作用するため、壁からの熱損失は減少するが、天井の室内表面結露のリスクが増加する側面があることを実大模型実験により確認しており、熱損失の低減と防露性能確保は、その組み合わせ方によって、相反する方向に作用する場合のあることを十分理解しておく必要がある。

4.2 熱貫流率の検討

部位の断熱性能を評価する指標には、省エネ基準や品確法に規定される熱貫流率の基準値を用いて評価している。熱貫流率は、木材熱橋の場合には、面積加重平均による平均熱貫流率を求め、金属熱橋を含む場合には、二次元あるいは三次元伝熱計算により評価している。

4.3 結露の検討

結露の危険部位は、これまでの実測や多次元シミュレーションにより概ね把握しており、一般的には次のとおりである。

(1) 冬季結露

- (a) 表面結露：外断熱／概ね問題なし。軸間断熱／熱橋部。
- (b) 内部結露：外断熱／非熱橋部防湿層室内側，断熱材を貫通する外装下地部材。軸間断熱／熱橋部防湿層室内側。

(2) 夏季結露

- (a) 表面結露：断熱仕様によらず問題なし。
- (b) 内部結露：断熱仕様によらず非熱橋部防湿層外気側，防湿層を設けない場合，室内ビニルクロスと材材の境界部。

結露の評価は通常二次元伝熱・透湿計算により評価を行っているが、熱橋形状が比較的簡単なモデルでは、結露危険部位に特化した一次元伝熱・透湿計算により、簡易に安全側の評価をすることができる。

4.3.1 簡易結露評価の考え方

屋根充填断熱を例とした、熱橋部の室内側表面温度と一次元伝熱モデルによる計算値との比較例を Fig.8 に示す。ここで、一次元伝熱モデルでの室内側（高温側）熱橋部表面温度は、実測値より低い温度を示すため結露に対して安全側の評価（①，②）となる。また、外気側（低温側）の熱橋部表面

温度は、計算上実際より高い温度を示すが、非熱橋部が低温になることが自明（③）であるので、結露の検討は①～③で、その要素全体の防露設計をすることに対し、実用上の反論はほとんどないと考えられる。

水蒸気圧も同様に一次元透湿計算により評価しており、水蒸気は空気層内で一様拡散するものと仮定している。また、熱橋部側面の透湿抵抗は、金属部材の抵抗値（∞）に代えて、隣接する部材の透湿抵抗に置換して評価している。

結露の判定は、原則として各部材温度 > 露点温度であることを確認することで評価している。

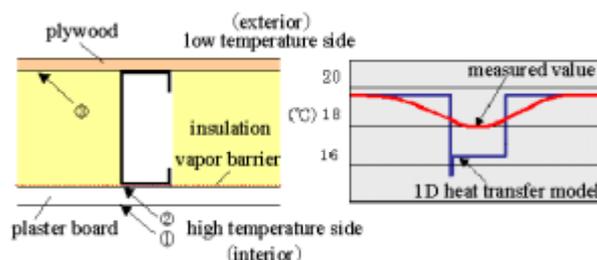


Fig.8 Measured/calculated temp of interior surface

4.3.2 多次元シミュレーションによる検討

隅角部や熱橋部材が複数存在する場合には、二次元伝熱・透湿計算により評価している。隅角部や取り合い接合部などは結果を重ね合わせ、温度低下を考慮した補正を行って評価しているが、複雑な形状の場合には三次元計算を実施している。検討は、冬季結露を中心に、対象地ごとに Table 3 の条件を主に用いるが、外壁の通気層内部や小屋裏、床下、寒冷地の凍結深度を考慮した基礎断熱の評価など、実状に応じた条件の設定を行っている。

Table 3 Parameters of Condensation simulation

	Outside temp.	Outside humidity	Room temp.	Room humidity
Winter	Average day-lowest temp. of a month	Average humidity of a month	20～23℃	60% (RH)
Summer	Average day-highest temp. of a month	Average humidity of a month	26℃	60～70% (RH)

Fig.9 (a), (b)に床モデルの比較検討例を示す。検討地域は東京近郊（地域区分IV地域）とし、外気条件を 0℃，50%と仮定している。(b)は根太の周囲に断熱補強厚さ 20mm を附加した物である。計算は、Fig.10 (a), (b)の分割モデルで二次元伝熱・透湿計算を実施した。

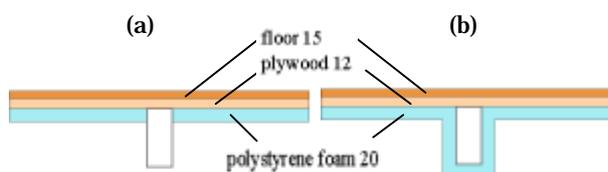


Fig.9 Floor model

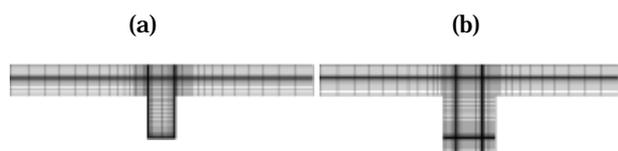


Fig.10 FDM model

Fig.11 (a), (b)に部材温度を示す。(a)では根太が熱橋となり、根太部分の室内側表面に低温域が認められるが、(b)では断熱補強により、影響が緩和されているのがわかる。

室内表面温度から推定した熱貫流率は、(a) : 1.12W/m²K に対し、(b) : 0.95W/m²K であり、(b)は新省エネ基準気密住宅IV地域基準値 0.99W/m²K をクリアしている。

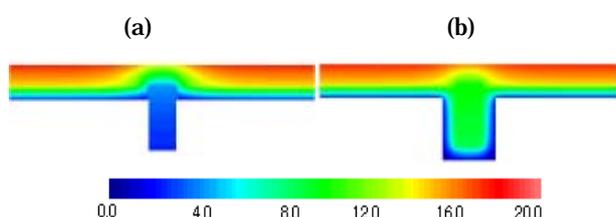


Fig.11 Temperature contour

Fig.12 (a), (b)に結露判定結果として部材温度-露点温度を示す。(a)では根太上部で部材温度が露点温度以下となる内部結露領域(図中青い領域)が認められるが、(b)では内部結露領域が消失しているのがわかる。

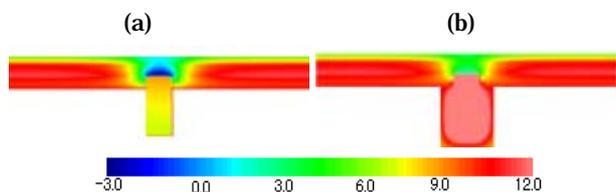


Fig.12 Condensation area contour
(element temp.-dew-point temp.)

以上、二次部材のスチール化に際しての断熱上の課題、仕様検討時の留意点、および断熱・結露検討方法について計算例を交えて紹介した。

5. おわりに

前章にて、スチールハウス用形鋼を木造住宅に適用した場合の構造および断熱上の課題について検討例を示した。スチールハウス用形鋼は、薄板軽量形鋼造(略称)の告示施行を受け、一般建築での部材使用も制度的に可能となり、一昨年に行われた建築基準法の抜本的改正に伴い、木造住宅でも要求される接合強度が明確になったので、今後は木造住宅への一層の普及が予想される。また、昨今は高強度化・高断熱化などハイスペック商品の要望もあるため、当社は、今後も住

宅分野での薄板形鋼応用商品の開発を推進していく。なお、Photo 2~4 は当社が開発した商品の一例である。



Photo 2 Ceiling joist



Photo 3 Floor joist



Photo 4 Roof truss

参考文献

- 1) 鋼材倶楽部. スチールハウス構造設計指針. 鋼材倶楽部, 2000.
- 2) 半谷ほか. “スチールハウス用リップ溝形鋼の負曲げ試験”. 1999年建築学会梗概集.
- 3) LRFD Design Spec. for Cold-formed Steel Struct. Member AISI, 1991.
- 4) 沖ほか. “軽量形鋼屋根トラスの載荷実験”. 2001年建築学会梗概集.
- 5) (財)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, 1992.

<問い合わせ先>

住宅建材チーム

Tel. 03 (3217) 2641 高阪 廣作

E-mail address : ktakasak@lab.tokyo.nkk.co.jp