

スチールハウスの腐食環境と耐久性

Corrosion Environment and Durability of Steel Framed Houses

本田和彦^{*(1)} 野村広正^{*(1)}
Kazuhiko HONDA Hiromasa NOMURA

抄録

スチールハウスの耐久性を明確にするため、スチールハウス実験棟を利用した住宅屋内における腐食環境とめっきの腐食速度の測定、フレームに使用するめっき鋼板形鋼間及び形鋼と合板との接合部の耐久性、めっき鋼板と木質系材料の接着性に関する調査を行った。この調査により、住宅屋内は穏和な腐食環境であり、めっき鋼板の腐食速度は非常に小さいこと、各接合部の耐久性は十分に確保されていることが明らかになった。

Abstract

In order to clarify the endurance of steel framed houses, we did the following: measurement of corrosion environment and corrosion speed of coating indoors, using steel framed experimental houses, research on the endurance between coated steel sheets for frames as well as joint areas between sections and plywood, and research on adhesion of coated steel sheets and wooden materials. This study has shown that there is a mild corrosion environment indoors with very little speed of coated steel sheets' corrosion and that the endurance of each joint area is adequately secured.

1. 緒言

スチールハウスの耐久性を明確にするためには、フレームに使用するめっき鋼板形鋼の耐食性や、ドリルねじを使用した接合部の耐久性を調査するとともに、使用される環境を定量化し、腐食速度を決定することが重要である。

新日本製鐵では、スチールハウスの普及を目的とした鋼材倶楽部の活動の一環として耐久性に関する研究¹⁻⁴⁾を行うとともに、スチールハウス実験棟を利用した住宅屋内における腐食環境とめっきの腐食速度の測定、めっき鋼板形鋼間及び形鋼と合板との接合部の耐久性、めっき鋼板と木質系材料の接着性に関する調査を行った。

本報ではこの調査結果を述べる。この結果は、スチールハウスに限らず工業化住宅部品、木造ツーバイフォー住宅部品のスチール化にも応用が可能である。

2. 亜鉛めっき鋼板の耐食性とスチールハウスの腐食環境

フレームに使用される亜鉛めっき鋼板は長期の耐食性に優れるため、これまで屋外建材用として多く使用されてきた。屋外環境における亜鉛めっき鋼板の大気暴露試験結果はいくつか公表されており、表1にそのうちの結果の一つを示す⁵⁾。表1より日本の大部分の地域では、目付量550g/m²の亜鉛めっき鋼板の推定寿命が50年であることが分かる。

大気中における亜鉛めっき鋼板の腐食に大きな影響を与える環境因子は、湿度の上昇や降雨、硫黄酸化物、海塩粒子等である。これら環境因子の影響を受けにくい屋内では、当然屋外に比べ腐食速度が小さくなる。例えば、空調のある室内での冷間圧延鋼板の腐食速度は屋外の1/1000であると報告されている⁶⁾。

従って、スチールハウスの寿命を定量化するに当たり、屋内の腐食環境を測定し、めっき鋼板の腐食速度を測定することは極めて重要である。辻川らはACMセンサ^{7,8)}を使用した住宅内部の腐食環境測定結果から、屋内での鉄及び亜鉛の腐食速度が極めて小さいことを報告している。新日本製鐵では、富津市の海浜地帯に建設したモニターハウスと田園地帯である熊本県久木野村に建設したモニターハウスを使用し、屋内の腐食環境と腐食速度の測定を行っている。このうち富津市のモニターハウスの結果について以下に報告する。

環境測定は、イオンクロマトグラフィーによる付着物分析(塩素イオン、硫酸イオン、硝酸イオン)、二酸化鉛法による硫黄酸化物の分析、モニターハウスの様々な部位に取り付けたACMセンサと温・湿度センサによる腐食環境計測を行った。また、溶融亜鉛めっき鋼板、溶融Zn-5%Alめっき鋼板(以下、Zn-5%Alめっき鋼板と略す)、溶融55%Al-Znめっき鋼板(以下、55%Al-Znめっき鋼板と略す)を住宅内外に暴露し、それぞれの腐食速度を精密化学法⁹⁾で測定した。

壁体内(1階和室外壁内)及び屋外(百葉箱)の付着物をイオンクロ

^{*)} 鉄鋼研究所 表面処理研究部 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 ☎293-8511 ☎0439-80-2271

表1 暴露試験測定のおとめ⁹⁾

環境区分			年間腐食減量(g/m ² /y)		推定寿命
大気環境	地域の例	暴露地番号	範囲	推定	550g/m ²
人工的汚染の少ない場所 (日本の大部分の地域)	田園地域 内陸地域	1, 5, 6, 12, 26, 27	4 - 16	10	50年
	人工的汚染の多い場所 (人口稠密地域)	市街地域	2, 7, 8	3 - 18	15
工業地域		3, 8, 11	8 - 19	15	33年
海塩粒子濃度の高い場所 (海岸線より2km程度の 範囲)	海岸地域	4, 10, 13, 17, 19, 20, 21, 23 - 25	11 - 21	20	25年
		海塩粒子高濃度地域	20, 22, 26	15 - 37	30
直接海水の作用のある所	飛沫地域	14, 16	34 - 104	70	7年

表2 住宅内外の付着物の分析

部位	Cl ⁻ (mg/m ²)	NO ₃ ⁻ (mg/m ²)	SO ₄ ²⁻ (mg/m ²)	SO ₃ *
1階外壁内	5.2	1.5	0.3	0.005
軒天	47.5	11.2	32.5	0.042(百葉箱)

*二酸化鉛法による硫酸化物の分析結果 mg/(day・100cm² PbO₂)

マトグラフィーで分析した結果と、硫酸化物を二酸化鉛法で定量した結果を表2に示す。塩素イオンを例にとると壁体内の付着量は屋外の付着量の1/9程度であることが分かる。また、亜鉛の腐食速度に大きな影響を与える硫酸イオンや硫酸化物も壁体内の方が屋外より遙かに少なく、スチールハウスの壁体内は穏和な腐食環境であることが推定できる。

いずれの壁体内においても、ACMセンサから得られる日平均電気量Q(C/day)は2年間経過した時点で10⁻⁴オーダーであった。鋼材倶楽部の共同実験で得られためっき鋼板の腐食速度とQの関係(図1参照)¹⁰⁾に照らし合わせると、溶融亜鉛めっき鋼板の腐食速度は1g/m²/y程度と非常に遅いことが推定される。実際の各種亜鉛系めっき鋼板の腐食速度を壁体内と屋外とで比較して図2に示す。いずれのめっき鋼板の腐食速度も壁体内では屋外より遙かに遅く、1/10以下の腐食速度であった。

以上より、スチールハウス内は穏和な腐食環境であり、各種亜鉛系めっき鋼板の腐食速度は十分遅いことが分かった。

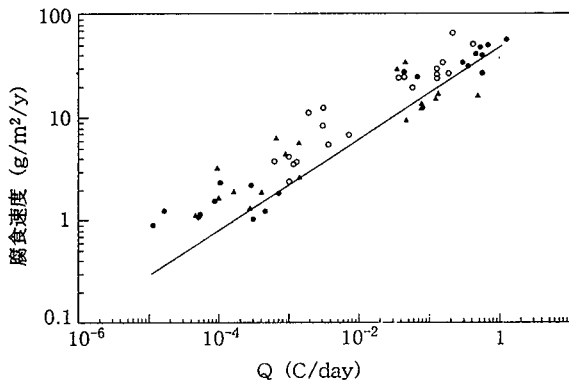


図1 亜鉛めっき鋼板(Z27)の腐食速度とACMセンサ出力の関係¹⁰⁾

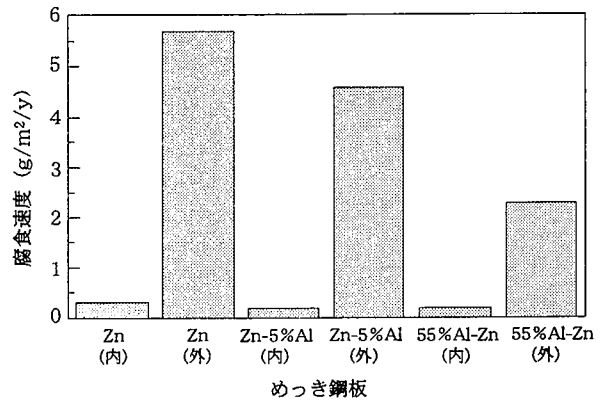


図2 住宅内外に暴露しためっき鋼板の腐食速度

3. スチールハウスに適用可能な接合方法の耐久性

3.1 形鋼間の接合部

スチールハウスは木造ツーバイフォー住宅の枠材を木材から亜鉛めっき鋼板に、釘をドリルねじに置き換えた住宅である。工場である程度フレームの加工、組立てを行うことによって現場での施工を軽減する方法がとられている。こうした工場内での接合方法には、ドリルねじによる接合の他に“かしめ”や“リベット”を使用した接合が適用可能と考えられる。

ドリルねじによる形鋼間の接合部耐久性については、鋼材倶楽部で相当数の試験が実施されており、亜鉛めっき厚20μmを施せば実用上十分な耐久性を確保できることが既に分かっている^{1,3,4)}、それ以外の接合方法についてはまだ検討されていない。そこで、ドリルねじ以外の接合方法を使用した接合部のせん断耐力を測定し、その耐久性をドリルねじを使用した場合と比較した。

実験には板厚0.6mm、めっき付着量Z18の溶融亜鉛めっき鋼板を使用し、接合方法としてかしめ接合とワンサイドリベット接合を使用した。ワンサイドリベットの直径は4mmとし、表面処理とし

て20 μ mの電気亜鉛めっきを行った。ドリルねじは、20 μ mの電気亜鉛めっきを行った直径4.2mmのものを使用した。

図3にせん断耐力を評価した試験体の形状を示す。試験体は、150mm \times 60mmの鋼板を85mm重ね合わせ、図に示すように2点で接合した。試験は腐食促進試験前後の接合部の最大せん断耐力を測定し、耐久性を調査した。せん断耐力は、図3に示す試験体の両端に引張力を加えることによって接合部にせん断力を作用させ、その耐力を測定した。

腐食促進試験は表3に示すサイクル腐食試験(以下、CCTと略す)を使用した。表3のCCTは屋外環境を模擬したCCTの一つであり、塩水噴霧 \rightarrow 乾燥 \rightarrow 湿潤 \rightarrow 冷凍のサイクルを1日に1サイクル行う。本試験ではこのCCTを8週間行い、2週間ごとにせん断耐力を評価した。

供試材の最大せん断耐力を測定し、耐久性を評価した結果を図4に示す。熔融亜鉛めっき鋼板を使用した試験体の平面部は、CCT 2週間で赤錆発生が見られ、CCT 4週間でめっきが完全に無くなり全面赤錆となっていた。従って、CCT 8週間は熔融亜鉛めっき鋼板の寿命の2~4倍の試験期間にあたる。

かしめ接合は、CCT 8週間まで大きな耐力の変化は観察されず、接合部の破壊形態も腐食試験前後で差が見られなかった。一方、ワンサイドドリベット接合はCCT 8週間で若干の耐力低下が見られたが、接合部の破壊形態はいずれも鋼板の母材破断であり、CCT前後で差が見られなかった。CCT後のリベットには赤錆の発生が観察されたが、せん断耐力試験においてリベット自身が破壊するようなことは観察されなかった。ドリルねじ接合の最大せん断耐力もCCT 8

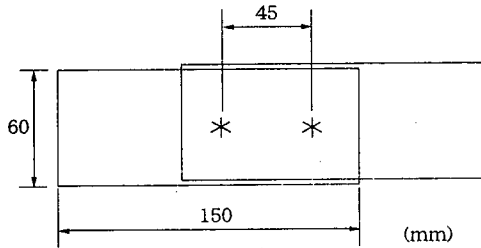


図3 せん断試験片形状

表3 サイクル腐食試験の条件

塩水噴霧(5% NaCl, 35 $^{\circ}$ C, 6h) \Rightarrow 1h \Rightarrow 乾燥(70 $^{\circ}$ C, 60% RH, 4h) \Rightarrow 2h \Rightarrow 湿潤(49 $^{\circ}$ C, 95% RH, 4h) \Rightarrow 2h \Rightarrow 冷凍(-20 $^{\circ}$ C, 4h) \Rightarrow 1h \Rightarrow 24h/1cycle
--

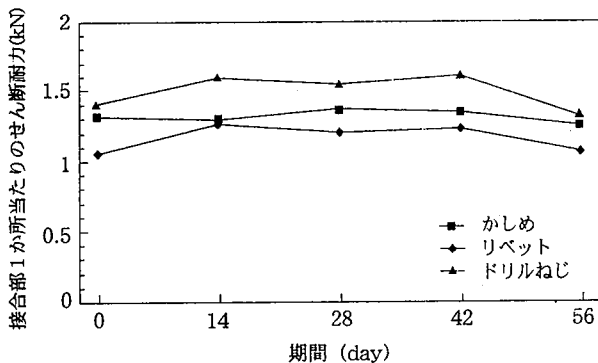


図4 せん断耐力の経時変化(Z18)

週間で若干低下が見られたが、接合部の破壊形態はいずれも鋼板の母材破断でありCCT前後で差が見られなかった。ドリルねじはCCT 2週間で赤錆発生、CCT 4週間で全面赤錆であったが、せん断耐力試験でドリルねじ自身の破壊は観察されなかった。

実際のめっき鋼板の使用ではめっきがなくなった時点で寿命であり、それ以上使用されることは考えられない。調査したかしめ接合、ワンサイドドリベット接合は、いずれもめっき鋼板に赤錆が発生した時点ではせん断耐力の低下は起こらなかった。従って、どの接合方法による接合部の耐久性も、ドリルねじによる接合部と同様に十分めっき鋼板の寿命まで確保されていることが明らかになった。

3.2 形鋼と構造用合板のドリルねじ接合部

スチールハウスでは、枠材に使用される形鋼間の接合部以外に、壁や床に使用される形鋼と構造用合板の接合部が存在する。この接合部の数は全体の約6割に達するため、こうした接合部の耐久性も重要である。そこで、ドリルねじで接合した形鋼-構造用合板接合部について、腐食前後の接合部のせん断耐力と引抜き耐力を測定し、耐久性を調査した。

図5にせん断耐力試験に使用した試験体を示す。試験体は厚さtの9mmの構造用合板と厚さ1mmの熔融Zn-5%Alめっき鋼板(Y18)を重ね合わせ、2本のドリルねじで接合した。ドリルねじは合板側より打設した。また、図6に引抜き耐力試験に使用した試験体を示す。試験体は厚さ9mmの構造用合板と厚さ1mmの熔融Zn-5%Alめっき形鋼を重ね合わせて1本のドリルねじで接合した。ドリルねじはせん断耐力試験と同様に合板側より打設した。また、構造用合板とめっき形鋼の間には、図6に示すように引抜き試験時に合板を

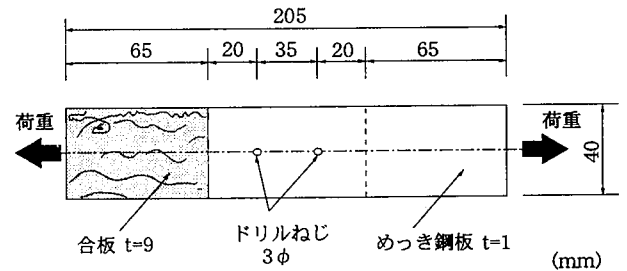


図5 せん断耐力測定試験体概要

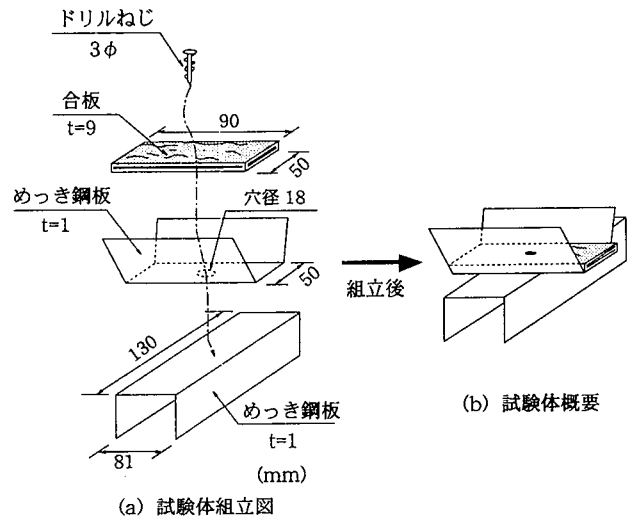


図6 引抜き耐力測定試験体概要

持ち上げるため曲げ加工しためっき鋼板を挿んだ。曲げ加工しためっき鋼板には、接合部にあたる中心に直径18mmの穴を開け強度に影響しないよう考慮した。

試験体の耐久性を評価するために使用したCCT¹¹⁾の条件を表4に示す。表4のCCTは、屋外環境を模擬したCCTの一つであり、塩水噴霧→乾燥→湿潤のサイクルを1日に3サイクル行う。耐食性評価を行う試験体は、めっき鋼板面(ねじ先端側)が鉛直線に対して20度になるように傾けて置き、めっき鋼板がサイクル腐食試験中の塩水噴霧にさらされるようにした。CCTは60サイクル行った。腐食試験終了後には、強度試験に加えて試験体の断面観察を行い、ドリルねじによる接合部の腐食状況を調査した。

せん断耐力試験におけるドリルねじ1本当たりの最大耐力を図7に、剛性を図8に示す。引抜き強度試験における最大耐力を図9に示す。なお、せん断耐力試験における剛性は、図10に示すドリルねじ1本当たりの荷重とずれ変位の関係図より、ドリルねじ1本に0.5kN作用した点における割線剛性で定義した。いずれの値も腐食試験前後で大きく変わることはなかった。

本実験では、せん断耐力の比較を最大耐力で行っているが、実際のスチールハウスにおける壁の許容耐力は壁全体の性能で決定しているため、ドリルねじ1本当たりの許容耐力は明確でない。但し、別途実施した解析によれば、壁の前後層間変形角が1/300程度での接合部のずれ変位は0.5mm前後であることが推定されるため、図10より、短期許容耐力発揮時にドリルねじ1本に作用する力

表4 サイクル腐食試験の条件¹¹⁾

塩水噴霧(5%NaCl, 35°C, 2h)⇒乾燥(60°C, 30%RH, 4h)⇒湿潤(50°C, 98%RH, 2h)⇒	8h/1cycle
---	-----------

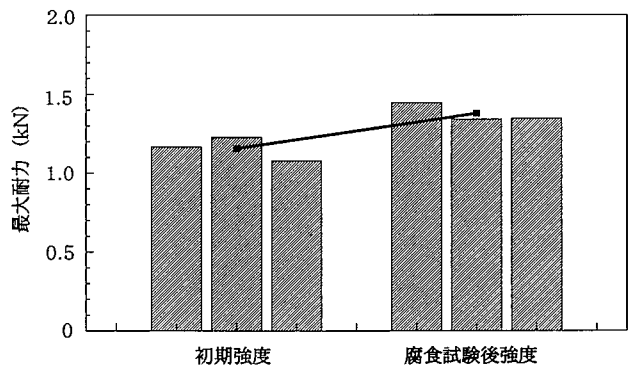


図9 接合部引抜き耐力試験結果

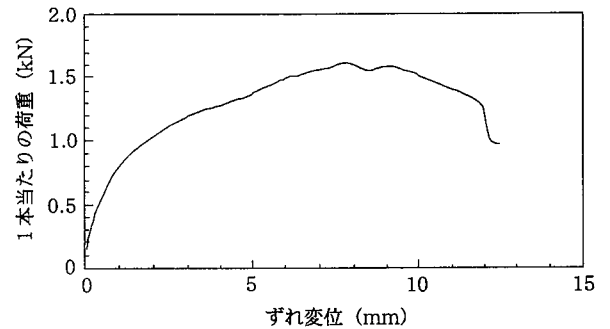


図10 せん断試験時の荷重と変位の関係

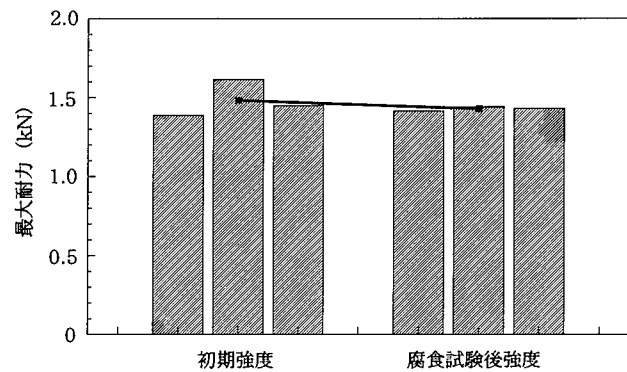


図7 接合部せん断耐力試験結果

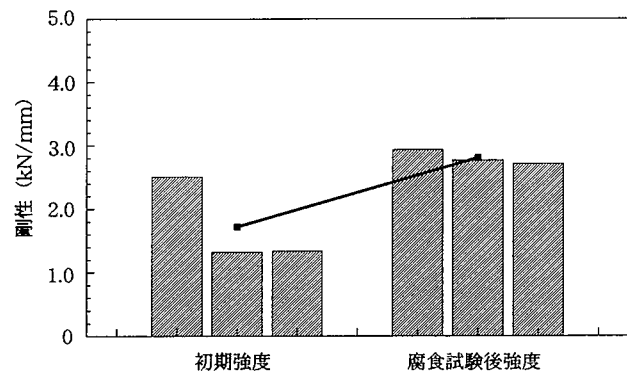


図8 接合部せん断耐力試験結果

は、最大耐力の約1/2.5程度であると考えられる。従って、短期耐力に及ぼす腐食の影響はかなり小さいと推定される。

CCT60サイクル終了後の試験体は、ドリルねじの全面で赤錆が発生していた。また、めっき鋼板表面は白錆に覆われ一部赤錆発生が起こっており、めっきはほぼ消耗されている状態であった。破壊形態は、初期であってもCCT60サイクル終了後であっても、せん断耐力試験では荷重の増大とともに合板の支圧破壊が発生してドリルねじが次第に傾斜していく破壊モードが観察され、また引抜き強度試験では荷重の増大とともに合板の支圧破壊が発生してドリルねじが抜け出す破壊モードが観察された。

図11は合板とめっき鋼板のドリルねじ接合部を断面観察した結果である。また、図11の白線で囲った部分のX線マイクロアナライザー(CMA)観察を行った結果を図12に示す。めっき鋼板、ドリルねじのいずれも亜鉛の腐食が主であり、地鉄の腐食はほとんど観察されなかった。従って、めっき鋼板とドリルねじの接合強度は、腐食試験前後で変化していないと推測される。

以上の結果より、接合初期状態であっても、めっきが消耗されめっき鋼板の寿命と推定される腐食状態であっても合板の支圧破壊が支配的であるため、せん断耐力、引抜き耐力とも腐食前後でほぼ同じ値になったと考えられる。

3.3 めっき鋼板と木質系材料の接着性

プレハブ部品では、めっき鋼板と各種ボード類(木質系材料)をドリルねじと接着剤とで良好に接合する性能が求められている。ドリルねじによる接合部の耐久性については、前章で示したように十分めっき鋼板の寿命まで確保されているが、めっき鋼板と木質系材料の接着性について検討した例は少ない。そこで、一般的なパネル用接着剤を使用してめっき鋼板と木質系材料の接着性を検討した。

めっき鋼板としては溶融亜鉛めっき鋼板(Z27)、Zn-5%Alめっき

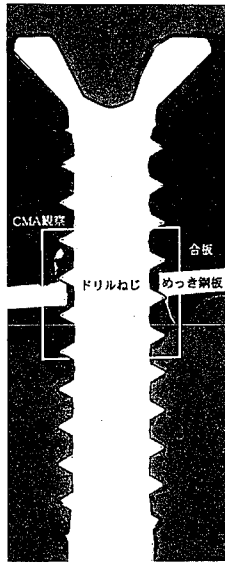


図11 ドリルねじ接合部の断面写真 (JASOM609 60サイクル終了)

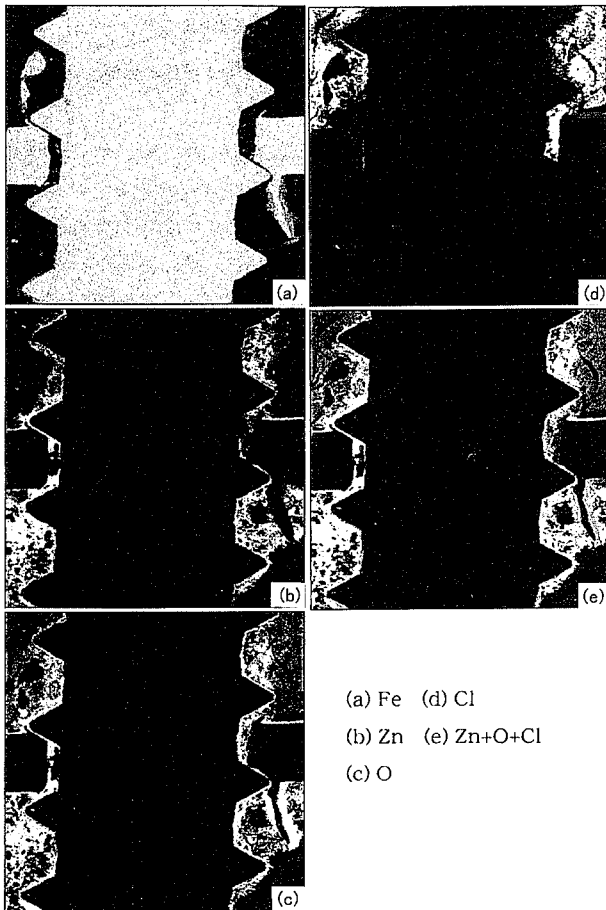


図12 ドリルねじ接合断面のCMA観察結果 (JASOM609 60サイクル終了)

鋼板(Y18)及び55%Al-Znめっき鋼板(AZ150)を使用した。いずれも板厚は0.8mmである。木質系材料としてはベニヤ(板厚5mm)、米松(板厚5mm)、パーティクルボード(板厚20mm)、石膏ボード(板厚12mm)を使用した。接着剤としては2液混合型のエポキシ系

接着剤と1液型のウレタン系接着剤を使用した。いずれも住宅のパネル接着に使用されているものである。

接着性試験はJIS A1613 壁用ボード類の接着強さに準じた引張りせん断試験を行った。接着耐久性試験としては煮沸繰り返し試験(JIS K6852)と塩水噴霧試験(JIS Z2371)を行った。試験片の破壊形態は、WB：木質系材料の破壊、SB：めっき鋼板の破壊、WAF：木質系材料側の界面はく離、SAF：鋼板側からの腐食によらない界面はく離、COR：鋼板側の腐食による破壊、CF：接着剤の凝集破壊の6形態で評価した。

初期及び煮沸繰り返し試験後の接着性はめっき種間に差異はなかったため、溶融亜鉛めっき鋼板を例にとり、エポキシ系接着剤の結果とウレタン系接着剤の結果を図13、図14に示す。試験片の破壊形態は接着剤の凝集破壊(CF)と木質系材料の破壊(WB)のみであった。いずれの試験片でもめっき鋼板の界面からのはく離はなく、一般的なパネル用接着剤でめっき鋼板と木質系材料は良好に接着できることが分かった。

木質系材料として最も強度の高い米松、接着剤として凝集力の高いエポキシ系を例にとり、図15～図18に塩水噴霧試験後のせん断応力の経時変化と破壊形態を示す。いずれのめっき鋼板でもせん断応力は塩水噴霧試験の期間に比例して低下した。破壊形態は初期では接着剤の凝集破壊であったものが、水の進入により米松の界面からのはく離の割合が増加し、更に接着剤下のめっき鋼板の腐食に起因する破壊も増加した。めっき種間での強度低下の差異は接着剤とめっき界面での腐食の進行の差に対応しており、塩水噴霧240時間以上では耐食性の高い55%Al-Znめっき鋼板とZn-5%Alめっき鋼板が高いせん断応力を保持した。以上の傾向は、接着剤をウレタン系とした場合でも、また、他の木質系材料でもほぼ同じであった。なお、第2章で述べたように実際の住宅は塩水噴霧環境より遙かに穏

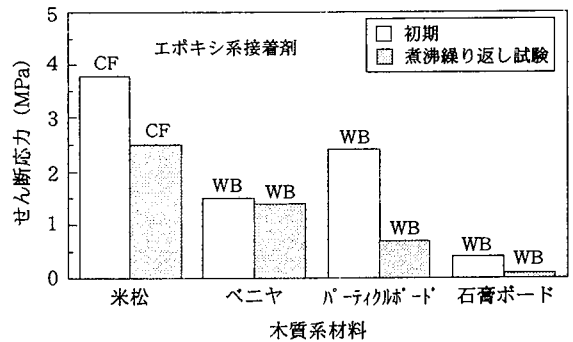


図13 溶融亜鉛めっき鋼板と木質系材料の接着性

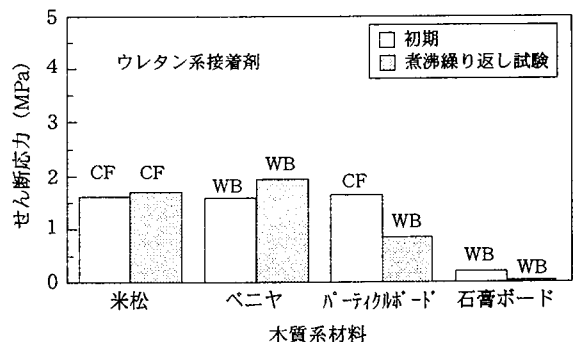


図14 溶融亜鉛めっき鋼板と木質系材料の接着性

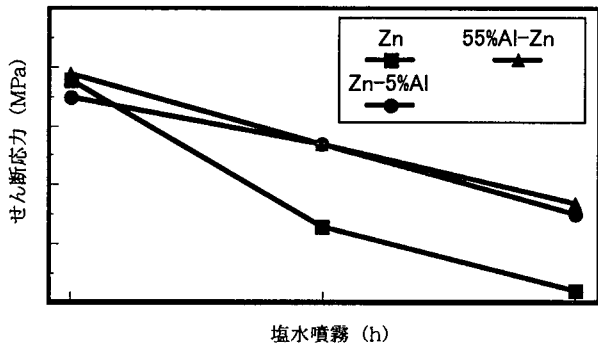


図15 塩水噴霧試験後のめっき鋼板と米松の接着性(ボンド系)

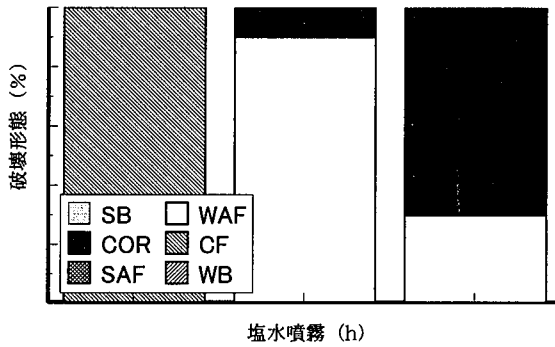


図16 接着試験片の破壊形態(溶融亜鉛めっき/米松)

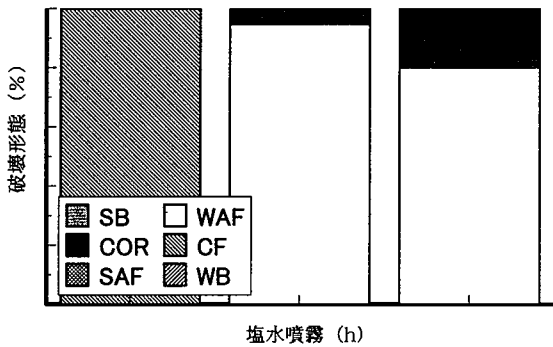


図17 接着試験片の破壊形態(Zn-5%Alめっき/米松)

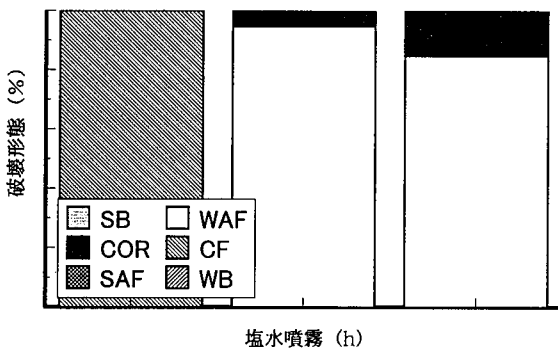


図18 接着試験片の破壊形態(55%Al-Znめっき/米松)

和な環境であり、溶融亜鉛めっき鋼板の接着耐久性も実用上全く問題の無いレベルである。

以上より、スチールハウスに使用される各種めっき鋼板と木質系材料は一般的なパネル用接着剤で良好に接着できること、塩水噴霧下の接着耐久性の面ではZn-5%Alめっき鋼板と55%Al-Znめっき鋼板が優れていることが分かった。なお、接着耐久性試験としては冷熱サイクル試験、室内暴露試験、屋外暴露試験も実行中である。結果については別の機会に報告したい。

4. 結言

新日本製鐵では、住宅屋内環境測定と暴露試験、スチールハウスに使用可能な接合方法の耐久性調査等を行っている。以下に得られた結果をまとめる。

- (1)ACMセンサを使用したモニターハウス内の腐食環境測定結果より、スチールハウス内は穏和な腐食環境であり、各種亜鉛めっき鋼板の腐食速度は十分小さい。
- (2)かしめ接合、ワンサイドドリベット接合を使用した接合部の耐久性を調査した結果、めっき鋼板が全面赤錆となるまで劣化させた試験体であっても最大せん断耐力の低下は見られなかった。従って、これらの接合部の耐久性は、ドリルねじと同様に十分めっき鋼板の寿命まで確保されている。
- (3)形鋼と構造用合板の接合部は、せん断耐力、引抜き耐力ともめっきが消耗されめっき鋼板の寿命と推定される腐食状態であっても、接合初期状態の耐力と大きく変わることはなかった。従って、接合部の耐久性は十分めっき鋼板の寿命まで確保されている。
- (4)スチールハウスに使用される各種めっき鋼板と木質系材料は一般的なパネル用接着剤で良好に接着できること、接着耐久性の面ではZn-5%Alめっき鋼板と55%Al-Znめっき鋼板が優れている。

参考文献

- 1) 作本好文：表面技術. 45, 859(1997)
- 2) 中村清徳, 野村広正, 山本誠志, 松本雅充, 辻川茂男：日本建築学会大会学術講演梗概集, 22211, 1996, p.421
- 3) 山本誠志, 松本雅充, 中村清徳, 野村広正, 辻川茂男：日本建築学会大会学術講演梗概集, 22211, 1996, p.423
- 4) 作本好文：材料と環境. 46, 274(1997)
- 5) 後藤春雄：鉛と亜鉛. 27, 23(1990)
- 6) 永井武, 有働康夫, 辺見善三：日本金属学会誌. 49, 860(1985)
- 7) 辻川茂男：日本鉄鋼協会フォーラム資料, 9452, 1997, p.1
- 8) 元田慎一, 鈴木揚之助, 篠原正, 兒島洋一, 辻川茂男, 押川渡, 糸村昌祐, 福島敏郎, 出雲茂人：材料と環境. 43, 550(1994)
- 9) 松本雅充：腐食防食シンポジウム資料, 111, 1996, p.26
- 10) 鋼材倶楽部スチールハウス耐久性分科会編：スチールハウスにおける表面処理鋼材の耐久性に関する研究とその考察, p.42
- 11) JASO Technical Paper TP-91001