

銅板葺き大屋根に関する研究（その2）

——一文字葺き——

中川 恭次 喜田 大三 武田 寿一
西村 清一 住野 正博 守屋 正裕
中村 嶽 本間 義教

Study on Copper-Shingled Roof (Part 2)

——Flat Lock Seams——

Kyoji Nakagawa Daizo Kita Toshikazu Takeda
Seiichi Nishimura Masahiro Sumino Masahiro Moriya
Takashi Nakamura Yoshinori Homma

Abstract

The authors presented Part 1 of this paper on a copper-shingled roof of the Red Brass Method, where experiments were conducted on wind effects, watertightness, frost damage, condensation, weather resistance and color changing of copper. Similar investigations were made of a copper-shingled roof with flat lock seams in the study reported in this paper, Part 2. As a result, the following were clarified. (1) The design wind load of the roof was taken as -350 kg/m^2 to -700 kg/m^2 based on the results of wind tunnel tests. (2) The average strength of copper nails was 30.9 kg and standard deviation was 8.8 kg. (3) The strength of a flat lock seam was 2,000 kg/m² for an overall hanger and 1,100 kg/m² for a piece hanger.

概 要

前報（その1）では、丹銅板重ね葺きに関して、耐風圧力、防水性、耐凍害性、耐結露性、耐久性、更に銅板生地の光沢の維持について調査した。また、銅板一文字葺きにしても、一部同様の調査を行ない報告をした。

この報告は、高層建築物の大屋根に銅板一文字葺き仕上げを採用するにあたり、設計用風荷重に対する安全性を検討したものである。その結果、以下の事が明らかとなった。(1) 銅板大屋根の設計用風荷重は、風洞実験結果を基に算出し、大屋根の部位に応じて、 $-350 \text{ kg/m}^2 \sim -700 \text{ kg/m}^2$ とした。(2) 釘単体の平均保釘力は 30.9 kg、標準偏差は 8.8 kg であった。(3) 銅板一文字葺きの耐力は、通し吊子では約 $2,000 \text{ kg/m}^2$ 、部分吊子では約 $1,100 \text{ kg/m}^2$ であった。

1. はじめに

近年、屋根の銅板葺き仕上げは、硬質木片セメント板、バーライト混入モルタルなどの下地材料の開発により、木造以外の建物においても施工が可能となり、最近では、高層建物においても使用されるようになった。

しかし、屋根の銅板葺き仕上げに関して、設計・施工は、経験的に行なわれているのが現状であり、多くの問題点を含んでいる。このため、標題（その1）では、問題点の解明のため丹銅板重ね葺きと一文字葺きについて各種実験を行ない報告した。

本報告は、某宗教法人普門館を施工するにあたり、主

に銅板一文字葺きの耐力について、設計用風荷重に対する安全性を検討したものであり、併せて、これまでに行なった調査研究により得た知見を報告するものである。

2. 設計風圧力

2.1. 目的

本調査は、銅板大屋根に作用する風洞実験で調査し、最適な設計用風荷重を決定することを目的として行なったものである。

2.2. 実験装置

2.2.1. 風洞 実験は、(株)大林組研究所所有のエッフェル型吸込式風洞（写真-1）で実施した。

2.2.2. 風速測定装置 風速の測定には、定温度型熱線風速計 (Model 21, KANOMAX) を用いた。風速の記録は、風速計の出力をデジタルボルトメータで刻み時間 $\Delta t = 0.08$ 秒でA/D変換し、平均化時間 $T = 30$ (データ個数 $N = 375$ 個) として計算機 (FC 3200, 精工舎) に取込み、平均値および標準偏差を算出した。

2.2.3. 風圧力測定装置 風圧力の測定には、差圧タイプの圧力変換器 (KMP-111, 東京航空計器) を用いた。風圧力の記録は、風速と同様に、平均化時間 $T = 30$ 秒で、平均値および風圧係数を算出した。

2.3. 実験方法

2.3.1. 風洞気流 当建設地は、中高層ビルの林立する市街地にある。このため、実験では一般的な都市域の風の性状を模擬することとし、風洞床面にラフネスブロックを並べ強制的に乱流境界層を作成した(写真-2)。この結果、平均風速の鉛直分布が、(1)式で表わされる乱流境界層が得られた (図-1)。実験風速は、模型頂部高さ(風洞床面上 208.7 mm) で約 10 m/s として行なった。

$$U_z = U_0 (Z/Z_0)^{1/4.5} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

- U_z : 風洞床面上 Z (mm) 高さの平均風速 (m/s)
- U_0 : 風洞床面上基準高さ Z_0 (mm) の平均風速 (m/s)
- 1/4.5: 風洞床面の粗度を表わす係数

2.3.2. 模型 模型は縮尺 1/200 で製作し、周辺部の建物や地形の高低差などは模型化しなかった(写真-2)。

2.3.3. 調査風向 調査風向は、予備実験の結果を基に東側壁面に正対する風向を 0 度とし時計回りに、45, 60, 90, 120, 135, 180度の7風向とした (図-2)。

2.3.4. 測定点 風圧力の測定孔は、大屋根面138点、塔屋16点、の総計154点とした。

2.4. 実験結果

模型屋根面および壁面に作用する風圧力は、模型頂部高さにおける速度圧で無次元化した風圧係数で示した。風圧係数の算出は次式による。

$$c = P/q_0 \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

c : 風圧係数

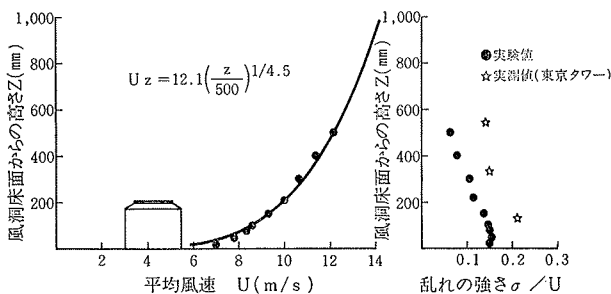


図-1 プロフィール

- P : 風圧力 (kg/m^2)
- q_0 : 基準速度圧 (kg/m^2) $= (1/2)\rho U_{\text{top}}^2$
- ρ : 空気密度 ($\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$)
- U_{top} : 模型頂部高さの風速 (m/sec)

大屋根面の最大負圧は稜線沿いで発生した。特に、東屋根面の稜線沿い、トップライト東面の両端とその下端沿いでは、風向が120度~145度の範囲において-1.4以上の大きな風圧係数を示し、風向135度のときピーク値を示した。風圧係数の極値は、東面では、-1.95、南面と北面では、ともに-0.82、西面では-1.08であった。塔屋の風圧係数の極値は、南側塔屋では-0.92、北側塔屋では-0.86であった。

2.5. 設計用風荷重

設計用風荷重は、建築基準法施行令第87条、建設省告示第109号の規定に従い算出した。算出式は次式で表わされる。

$$P = c \cdot q \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

- P : 風圧力 (kg/m^2)
- c : 風圧係数 $= c_e + c_i$
- c_e : 風洞実験で求めた風圧係数 (または建築基準法施行令第87条等に示された風圧係数)
- c_i : 室内圧係数 ($= \pm 0.2$)
- q : 速度圧 (kg/m^2) $= 120^4 \sqrt{h}$ ($h \geq 16$ m)
- h : 地上からの高さ (m)

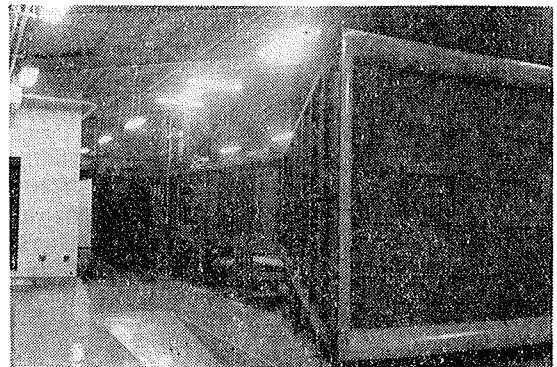


写真-1 風洞外観

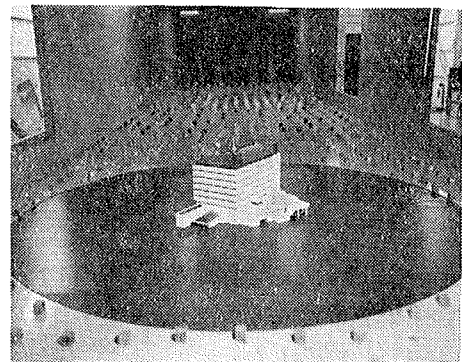


写真-2 模型

(3) 式中の風圧係数 c_e は、風洞実験で得られた極値を用いた。また、速度圧は、実験気流が鉛直方向に速度勾配を有する気流であるため、実験と同一条件の建物頂部高さ (G. L. +41.73 m) の速度圧 ($q=305 \text{ kg/m}^2$) を用いた。

計算の結果、設計用風荷重として、図-2 に示した風荷重値を提案した。

3. 銅板一文字葺きの耐力試験

3.1. 目的

本調査は、銅板一文字葺きの耐力が、先に提案した設計風荷重に対して十分な耐力を有するか否かを、静的引張り試験により検証したものである。

調査は、銅板一文字葺きの耐力が、はぜ部の強度、或いは釘の保釘力に支配されるため、次の2項目について行なった。①釘単体の保釘力調査、②実大モデルによる耐力調査。

3.2. 実験方法

3.2.1. 釘単体の保釘力調査

① 試験体 試験体数は、実大モデルのスカイモルタル一打設当たり2本とし3打設、計6体製作した。釘は、40 mm の格子交点上に打ち込んだ (図-3)。

② 引抜き方法 釘の引抜きは、鉛直方向の単純引抜きとした (図-3)。

3.2.2. 実大モデルによる耐力調査

① 試験体 試験体は2体とし、1体は部分吊子 (釘本数4本/枚、55.4本/m²)、残り1体は通し吊子 (釘本数7本/枚、97本/m²) とした (図-4)。

② 載荷方法と載荷点 載荷方法は、等分布荷重である風圧力を近似的に表わし、且つ、境界条件を満足させるため、48点のトーナメント方式による静的引張り載荷とした (写真-3)。

③ 測定項目と測定点 測定項目は、引張り荷重、銅板中央部とはぜ部の変位量とした。

3.3. 実験結果

3.3.1. 釘単体の保釘力試験結果 保釘力試験結果は、表-1 に示した。実験した96本の平均保釘力は、30.9 kg/本、最大値 53.6 kg、最小値 15.0 kg、標準偏差 8.8 kg であった。

3.3.2. 実大モデル実験結果 実大モデル実験結果は、表-2 に示した。荷重-変位曲線は、通し吊子の結果を図-5 に、部分吊子の結果を図-6 に示した。

通し吊子は、荷重 880 kg 時に釘が抜け破壊した (写真-4)。この時の耐力は、2,032.8 kg/m²、平均保釘力は、20.95/本であった。

部分吊子は、荷重 490 kg 時にはぜが外れ破壊した (写真-5)。この時の耐力は、1,131.9 kg/m²、平均保釘力は、20.41/本であった。

3.4. 銅板一文字葺きの耐力評価

銅板一文字葺きの耐力を求めるため、実大モデルによる耐力実験を行なったが、耐力は、保釘力或いは、はぜ強度に支配されることがわかった。

保釘力については、保釘力試験の平均保釘力が約 30 kg/本 (標準偏差約 9 kg) に対し、実大モデルの破壊時保釘力約 20 kg/本と3割強の保釘力低下となった。これは、荷重の伝達機構 (てこの作用) の相違によるものと考えられる。

はぜの強度については、本実験では行っていないが、前報の結果では、横はぜの平均強度は 132 kg/m、標準偏差 6.0 kg/m、縦はぜの平均強度は 383 kg/m、標準偏差 38.0 kg/m であった。単位面積当たり (縦7例、横2列、面積1.01 m²) のはぜ強度を横はぜのみの強度から求めると約 920 kg/m²、縦はぜと横はぜの強度から求めると 1,620 kg/m² となる。部分

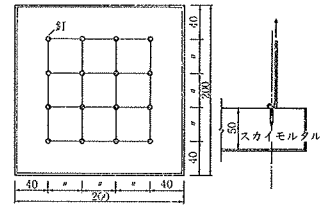


図-3 保釘力試験体

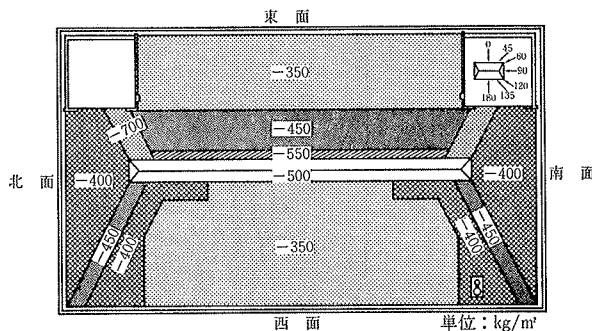


図-2 設計用風荷重

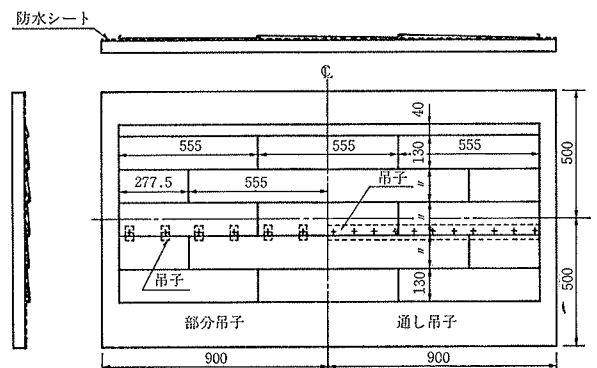


図-4 実大モデル試験体

吊子モデルのはぜ強度は、約 1,130 kg/m² であり、横はぜのみの強度から求めた約 920 kg/m² に近い値であった。

このように、銅板一文字葺きの耐力評価する場合、釘或いは、はぜ個々の強度から推定することは、耐力を過大評価する可能性があり危険である。また、部材の強度のバラツキも考慮する必要がある。

そこで、銅板一文字葺き部分吊子の耐力を、荷重・耐力係数設計法 (LRFD, Load and Resistance Factor Design) により検討した。なお、設計荷重は、先に示したが、施工性を考慮し設計荷重 - 450 kg/m² 以上の範囲では、設計荷重を - 700 kg/m² とし吊子枚数を 4 箇/枚、- 450 kg/m² 以下では - 450 kg/m² とし吊子枚数を 3 箇/枚として評価を行なった。

3.4.1. 安全指標 β による評価 設計荷重 700 kg/m² は、再現期間 138 年に 1 回期待される荷重である。そこで、再現期間 100 年に 1 回期待される荷重 Q_0 を、再現期間換算係数 R_t を用いて求めると

$$R_t = 0.61 - 0.1 \cdot \ln \{t / (t - 1)\} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$t = 100 \text{年} \rightarrow R = 1.07, \quad t = 138 \text{年} \rightarrow R = 1.10$$

$$Q_0 = 700 \cdot (1.07 / 1.10) = 663 \text{ Kg/m}^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。期待荷重 Q_0 の分散係数 V_q は、文献 3) より、

$$V_q = (\delta_u / U) = (7.22 / 28.9)^2 = 0.063 \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここで、 U は統計期間 138 年最大風速の平均値、 δ_u はその標準偏差を用いた。保釘力の分散係数 V_k は、

$$V_k = \delta_k / P_k = 8.80 / 30.9 = 0.28 \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。ここで、 P_k は平均保釘力、 δ_k は保釘力の標準偏差である。銅板一文字葺き (部分吊子) 耐力 R_0 を、実験結果より 1,100 kg/m² (平均保釘力 20 kg/本、釘本数 55 本/m²) とし、安全指標 β を求めると、

$$\beta = \ln(R_0 / Q_0) / V_q + V_k = 1.76 \quad \dots\dots\dots(8)$$

となった。

次に、文献 1) の結果を用いてはぜ強度について β を求める。但し、荷重は横はぜのみで負担するものと仮定した。はぜの分散係数 V_h は、

$$V_h = \delta_h / P_h = 0.55 / 13.2 = 0.04 \quad \dots\dots\dots(9)$$

となった。ここで、 P_h ははぜの平均強度、 δ_h は、はぜ強度の標準偏差である。耐力 R_0 を 924 kg/m² (はぜの長さ: 7 m/m²) とし、安全指標 β を求めると、

$$\beta = \ln(R_0 / Q_0) / V_q + V_h = 4.44 \quad \dots\dots\dots(10)$$

となつ。 β 値は、大きいほど安全であり、 $\beta \geq 3$ が望ましいとされている。保釘力から求めた。安全指標 β は 1.76 と 3 以下の値であり、耐力は、設計風荷重に対して

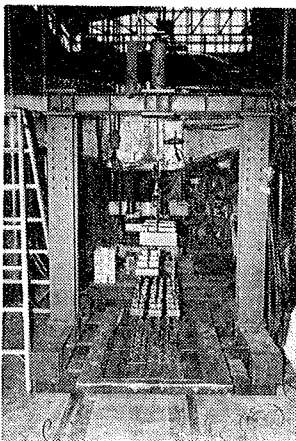


写真-3 トーナメント式 載荷装置

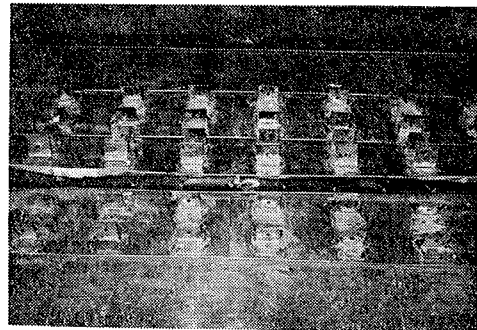


写真-4 破壊状況 (通し吊子)

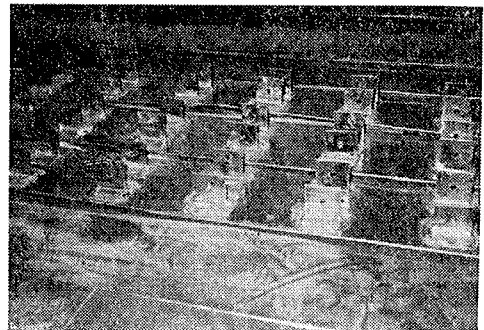


写真-5 破壊状況 (部分吊子)

	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	全体
平均値	34.8	32.0	27.2	28.7	32.0	30.9	30.9
最大値	49.9	49.3	42.8	43.9	53.6	40.8	53.6
最小値	20.8	15.0	17.7	18.3	15.4	22.8	15.0
標準偏差	9.0	11.0	8.2	7.6	9.2	6.4	8.8

表-1 保釘力試験結果

	釘本数		破壊荷重		破壊時保釘力 (kg/本)	破壊状況
	1枚当り	m ² 当り	実験 (kg)	kg/m ²		
通し吊子	7	97	880	2032.8	20.95	釘が抜ける
部分吊子	4	55.4	490	1131.9	20.41	はぜが外れる

表-2 実大モデル試験結果

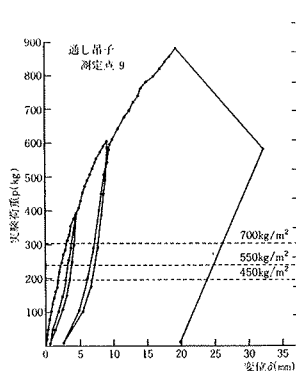


図-5 荷重-変位曲線 (通し吊子)

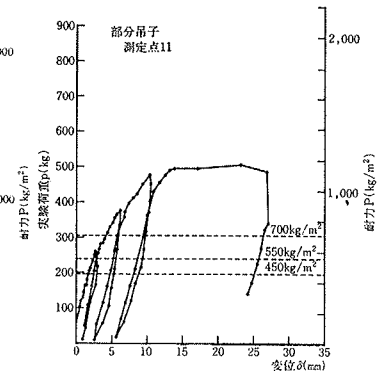


図-6 荷重-変位曲線 (部分吊子)

安全であるとは言いがたい。このため、耐力低減による評価を行なうこととした。

3.4.2. 耐力低減による評価 LRFDの考えに従えば、平均値 R_0 を持ち、バラツキが分散係数 V_r で与えられる耐力 R は、安全指標 β で示される安全性を保持する為には、1より小さい耐力係数 $\phi(\beta, V_r)$ で、 $R = \phi R_0$ と低減して評価しなければならない。ここで、耐力係数 $\phi(\beta, V_r)$ は、次式で与えられる。

$$\phi = \exp(-0.55\beta V_r) \quad V_r = V_k \text{ or } V_h \quad \dots\dots\dots(11)$$

従って、保釘力について低減した耐力 R を求めると、

$$\phi = \exp(-0.55 \times 1.76 \times 0.28) = 0.76 \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$R = \phi R_0 = 0.76 \times 1,100 = 836 \text{ kg/m}^2 (\geq 700 \text{ kg/m}^2)$$

となった。次に、はぜ強度について低減した耐力 R を求めると、

$$\phi = \exp(-0.55 \times 4.44 \times 0.04) = 0.90 \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$R = \phi R_0 = 0.90 \times 924 = 831 \text{ kg/m}^2 (\geq 700 \text{ kg/m}^2)$$

となった。

この結果、銅板一文字葺き部分吊子(吊子4箇/枚)の耐力は、設計用風荷重 700 kg/m^2 に対し十分な耐力を有するものと判断した。また、設計用風荷重 450 kg/m^2 に対し、部分吊子3箇/枚として、同様に耐力評価を行なったところ、これも十分な耐力を有するものと判断した。

4. まとめ

大屋根の銅板仕上げに関し、一連の調査研究を実施し設計・施工指針を確立した。ここでは、総括として前報の結果も含め得られた知見を述べる。

(1) 耐力について

銅板葺きの耐力は、はぜ強度および保釘力に支配され、単位面積当りのはぜ長さや釘本数により決まる。はぜの長さは、葺き足の長さとも関連し、葺き足の長さが長いと単位面積当りのはぜ長さが短くなり、且つ、銅板がたわみ易くなりはぜの変形が大きくなるため耐力は低下する。逆に、葺き足が短いと耐力は高くなる。本調査における丹銅板重ね葺き(葺き足150mm)および一文字葺き部分吊子(葺き足130mm)の耐力は、 $1,000 \text{ kg/m}^2$ 余りであった。また、はぜの強度は、丹銅板重ね葺きでは約 1.5 kg/cm 、一文字葺き部分吊子では約 1.4 kg/cm であった。

実大モデル試験の保釘力は、釘単体保釘力に比べ約2/3に低下した。また、保釘力は、下地材により異なり、センチリーボードでは比較的安定した保釘力を示したが、スカイモルタルでは保釘力のバラツキが大きかった。このため、スカイモルタル下地では、施工管理が重要である。

(2) 防水性、凍害性について

凍結試験では、はぜ部分、重ね部分の極端な立上り、破断、変形などは見当らなかった。また、一文字葺きは横はぜよりも縦はぜの動きが多くみられ、経時に伴い累積されるようである。重ね葺きでは重ね部の水の出入は自由であるから、或程度の水が入る影響で初期の立上りは多いが、経時による累積はみられなかった。

散水時、一文字葺きの施工当初のはぜには水の浸入が困難であるが、散水の繰返しに従い、はぜと下地を連結する釣子の部分に毛細管現象による浸水がみられるようになり、その部分に凍結が生じた。

重ね葺きの縦の重ね部は、当初から水の浸入が容易であるが、重ね葺きの特徴は侵入した水を順次水下に流下させることが可能であるように、雨水を下地迄到達させない構造になっている。しかし、重ね部の隙間が大きいと浸入水量が多く、奥深くなり好ましくない。特に勾配が緩い場合には毛細管現象による下地の漏水が著しくなるので、十分な防水が必要である。

インクラック(変色防止塗料)の塗布面には撥水作用がみられ、水滴の付着が少ないので凍結時は有利である。

(3) 変色について

通常の銅板葺きは、緑青の発生を期待するものであるが、リン脱酸銅、無酸素銅および丹銅板の変色は、屋外暴露した場合、1日から2日で変色が目立ち始め、数日後には厚い酸化膜による黒褐色の外観を呈する。この外観は、暴露開始から1年経過後もほとんど変化せず、材質の差異による影響は認められなかった。

また、緑青を発生させずに銅板の光沢を長期間保持する場合、変色防止塗料としてインクラックを塗布する方法がある。その効果は、屋外暴露1年経過後も効果は十分に発揮されており、促進耐候性試験600時間後でも塗膜劣化はなく、初期の素材の色調、光沢が保持されていた。変色を防止する場合、銅板はきわめて変色しやすいため、出荷前に変色防止塗装が必要であり、1回塗りではピンホールが多く、十分効果を得るには、最低2回塗りが必要である。また、折曲げ加工などによる塗膜損傷部は、1日経過すると変色するため、補修塗りは施工と平行してその日のうちに実施する必要がある。なお、調査結果を基に変色防止塗装仕様、施工指針を確立した。

参考文献

- 1) 中川恭次, 他: 銅板葺き大屋根に関する研究(その1) 丹銅板葺き, 大林組技術研究所報, No. 28, (1984), pp. 52~32
- 2) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, (1981改定版)
- 3) 菊地原英和: 日本各地の年最大風速(1929~1966) 順位と出現確率, 気象庁観測技術資料, 第34号, (昭和46. 1)