ISSN 2186-5647

4-25

近代建築における銅板屋根の維持保全

－採取した既存銅板の劣化調査－

日大生産工（院）○田中　良　　日大生産工　大久保　通則
同　　高橋　進　　同　　中川　一人
同　　廣田　直行　　同　　松井　勇
同　　永井　香織

1　はじめに

銅板屋根は、経済性・加工性・耐久性に優れ、耐用年数は100年[1)]とも言われている。明治期に建造された重要文化財約350件の内、約2割が銅板屋根を用いている。近年、これらの建造物は銅板の脱落および損傷、漏水等によって葺き替えが実施されている。葺き替えに際し、人工緑青銅板を用いる例もあるが、化学処理や経年変化で色調のコントロールは難しく、思うような外観を維持しにくいのが現状である。

保存の考え方は文化庁の重要文化財（建造物）保存活用標準計画の作成要項[2)]において「保全にあたっては、文化財が最も魅力的な存在であった時期の景観や環境を前提としながら、活用を図る必要がある」としている。これによると保存は創建時の技術を継承すること、当初材をできる限り残すことが大切であると考える。

本研究では、既存の工業規格等[3)4)]をもとに評価項目を定め、銅板の性能を検討した。本報告では、目視観察と硬度試験による劣化程度を確認した結果を報告する。

2　保全の現状

現在の銅板葺き替えでは、近代建築や神社仏閣に分類される文化財で改修が実施されている。改修は防水性に重点をおく為、現状で防水性能が維持できないと考えられる場合、材料や工法を変えて施工が行われている。写真1に銅板屋根の劣化状況を示す。写真1（a）で銅板の下地となる木材は部分的に腐食が認められる箇所があったが、銅板本体に大きな損傷が認められる箇所は無く、目視では再利用の可能性がみられる事例であった。しかし、物件によって写真1（b）の状況から接合部のはぜが切れてしまい、新規に葺き替える必要の場合がある。

既存の銅板が再利用された事例はあるが、普及するまでには至っていない。調査によって銅板の損傷部を目視で確認することはできるが、微小な部分までは難しいことが現状である。

3　試料概要

試験に用いた試料を表1に示す。主に重要文化財として指定のある建造物を中心に竣工年1700年初期～1900年後期までの計6件から採取した。銅の純度はすべての試料で約99.7%以上である。採取位置は表1に示すとおり、それぞれ異なっている。試料Cについては2箇所より採取し、事前に目視で亀裂の確認できた試料Dは損傷部と健全部の2箇所を採取した。

試料G・Iは比較として、現行のJASS12に規定のりん脱酸銅およびタフピッチ銅（JIS H 3100）をそれぞれ用いた。

4　目視観察

4.1　試験概要

硬度増加率と目視による損傷レベルの相関を確認する為、観察を実施した。

試料は、表面の酸化被膜を取り除く為、硝酸によって母材（銅板）がみえる状態まで表面の酸処理を実施した。その際に表面の起伏形状等が無くならないよう、十分に注意をしながら処理を行った。観察はマイクロスコープ（K社製VHX-5000）によって、表面および断面の2方

(a) 下地の状況　　(b) はぜ切れの様子
写真１　銅板屋根の劣化状況

A study on maintaining integrity of the copper plate roof in historical modern architecture
－ Investigation of deterioration of existing copper plate collected －

Ryo TANAKA, Michinori OKUBO, Susumu TAKAHASHI, Kazuto NAKAGAWA, Naoyuki HIROTA, Isamu MATSUI, Kaori NAGAI

向とした。また、板厚およびはぜ部の曲率半径Rを測定した。硬度測定位置①～⑦を図1に示す。板厚は図1に示すように長手方向に対して垂直に測点②～⑥を測定し、曲率半径Rは、曲面外側の測点③～⑤を円と想定し、それを半径とした。

4.2　損傷の有無

はぜ部曲面における観察位置（表面部）を図1に、損傷の有無を表2に示す。工業規格銅板は、最小半径R（R=0.6mm）と半径R=0.9mmの2種を観察した。シワ・割れが観察された試料はB、D2、F、G1、G2の計5試料であった。シワの状況は文献[3]より、5段階評価とした。

試料D2は小さな割れが数箇所にあり、全ての試料中でもっとも損傷が大きかった。さらには採取時、割れが内部に達して割裂を起こした状態でもあった。写真2・3より試料D1・D2は同じ建物から採取したが、D2は上はぜ部、D1は下はぜ部で降雨の影響を受けやすい為、損傷が著しかったとみられる。試料Fはシワがほとんどみられず、割れが発生していた。シワがなく、割れのみがみられた要因として、波打銅板の為、表面の凹凸が板厚の薄い箇所に割れが起きたと考えられる。

工業規格の試料GおよびIでは、曲げ加工後の表面部に違いがみられ、写真4より試料Gでは微小なシワのような跡が確認された。また、写真5より試料Iは加工時に曲げの影響でできたシワ等の跡はみられなかった。

その他の試料では表面部及び断面部で、大きな損傷跡はみられず、健全な状態であった。

4.3　板厚と局率半径R

表2に測点②～⑥の5箇所を平均した板厚を示す。板厚の最大は試料A=0.72mm、最小は試料F=0.23mmであった。試料Aについては1700年に建造されたもので、銅の製造時に手加工で板状に延ばした[5)6)]とみられ、板厚は均等でなく、他の試料より厚みのある銅板であった。全ての試料が仕様書[1)]の厚さより薄く、さらに緑青被膜の生成によって母材が初期の厚さより薄くなったとみられる。

板厚と曲率半径Rの関係を図2に示す。図の●印が損傷無し、○印が損傷ありを示しており、板厚が0.2～0.3mmの範囲で損傷のある試料が多く分布している。点線の傾きは文献[3)]のグラフより損傷の有無の閾値を示したものである。一般に板厚が厚く、曲率半径Rが小さい程、損傷を受けやすい傾向にあるが、今回の結果では板厚が薄く、曲率半径がR=0.4～1.0mmの範囲の試料ではそのような傾向はみられなかった。

5　硬度試験

5.1　試験概要

はぜ接合部の硬度が亀裂へ与える影響や、年代による銅板の硬度推移を調べる為、硬度試験を実施した。

約10×10mm寸法のはぜ折り曲げ部の銅板を樹脂埋めして断面方向より研磨したものを試料とした。研磨後の表面は硬度に影響を与えないよう、マイクロポリッシャーによる仕上げを行った。測定位置について、測点①および⑦については曲げの影響を受けない硬度の基準とした。測点③~⑤は曲面部分の硬度とした。

表 1　試料概要

試料名	A	B	C	D	E	F	G	I
地域	関東	関東	関東	関東	関東	北陸	JIS H 3100 りん脱酸銅 C1220 質別　1/4H	JIS H 3100 タフピッチ銅 C1100 質別　1/4H
竣工/改修 年代	1700 初期	1900 初期	1900 初期	1900 後期	1900 後期	1200 初期 1900 後期		
採取位置	平葺き	平葺き	棟飾り・鼻先	平葺き	瓦棒	平葺き		

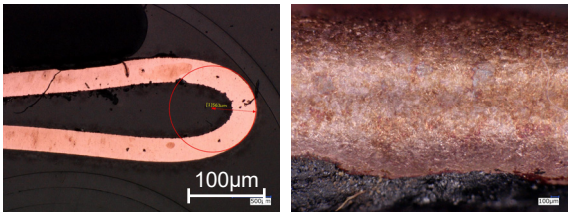


写真 2　試料 D1 曲率半径 = 0.56mm

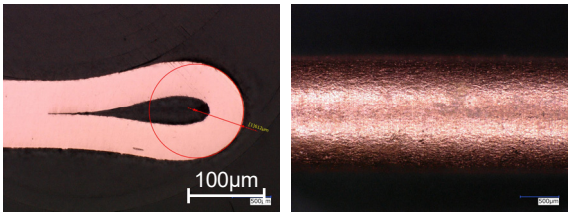


写真 4　試料 G1 曲率半径 = 0.61mm

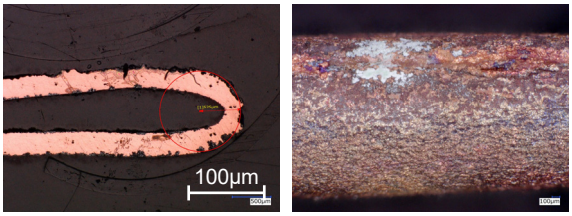


写真 3　試料 D2 曲率半径 = 0.53mm

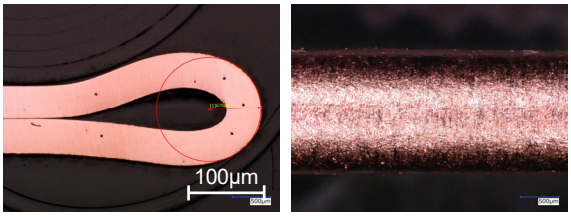


写真 5　試料 I1　曲率半径 = 0.68mm

試験は微小硬度計（F社製 FM-300）により、試験荷重HV0.05（490.3mN）、荷重時間10sとしてビッカース硬さを測定した。

5.2　測点による硬度の推移

表2に硬度の測定結果、図3～図10に各測点の硬度測定結果を示す。ビッカース硬さの基準値は最大で試料E=100.7HV、最小で試料G1=75.9HVであった。工業規格銅板G及びIで比較して硬度に大きな違いはみられない為、材質が大きく異なる試料はないとみられる。

図3より試料Aはどの測点においても硬度が一定でなく、材質のバラツキが非常に大きいからとみられる。図4より、試料Bは頂点部（測点③～⑤）において硬度が上昇しており、目視観察による損傷の有無と相関がみられる。

図5の試料Dでは健全部（D1）と損傷部（D2）で測点による硬度を示しており、損傷部では頂点の硬度が増加している。これに対して、健全部では測点によって硬度が変化することなく、一定である。損傷部における硬度の要因として、加工硬化が考えられ施工時の曲げ方法が影響しているとみられる。

図9・10では材質が異なる工業規格銅板で硬度の変化を確認した結果である。曲率半径Rが小さい場合、試料G1と試料I1のどちらでも測点および試料別で硬度のバラツキが増加し、特に試料G1では頂点部（測点③～⑤）で増加している。試料Gで半径Rが大きくとも、硬度の増減が大きく、試料別によるバラツキも大きい。曲げ加工による硬度の影響は、曲率半径が小さい方が大きい傾向にあるとみられる。

年代別で硬度のバラツキをみると、表2の標準偏差で試料Fを除いて、年代が新しくなるにつれて、小さくなっている。また、図3～9の測点および試料別のバラツキも同じように小さくなっている。年代の古い銅板においては銅の他に僅かに鉛や鉄等の不純物が含まれるとみられ、硬度が変化しやすい。

硬度に影響を与える大きな要因の1つとして、銅板の葺き方が影響していると考えられる。図5の試料D2は平葺き、図8の試料Eは瓦棒葺きで比較すると、試料Eの硬度は非常に大きく、曲げ加工による硬度増加は小さい。これより、試料Eの曲率半径=0.63mmより、試料D2の曲率半径=0.58mmが小さく、加工硬化の影響によって硬度が大きくなったと思われる。

5.3　曲率半径Rと硬度増加率

表2に硬度の基準値と曲げ加工による硬度増加率の関係を示している。硬度の基準値が小さい程、硬度増加率は小さくなると考えられる。しかし、試料C1では基準値=75.9%、硬度増加率=118.4%を示している。他の試料と比べて基準値が小さく、増加率が最大となっており、その傾向はみられなかった。

曲率半径Rと硬度増加率の関係を図12に示す。硬度増加率は測点④の硬度を測点①および⑦の平均値で除して求め、百分率で示したものである。図の○印は工業規格銅板のG1、G2、I1、I2を示し、●印は採取した銅板を示している。○印の工業規格品は曲率半径が小さくなるに従い、硬度増加は大きくなる傾向を示している。しかし、●印の採取銅板は半径R=0.4～1.0mm、硬度増加率100～130%の範囲で幅広く分布しており、両者の関係は相関性がみられ

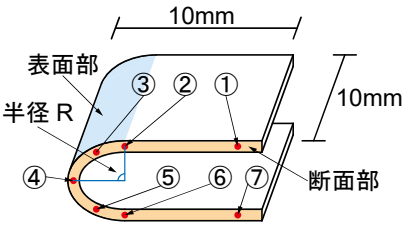


図１　硬度試験　測点①～⑦

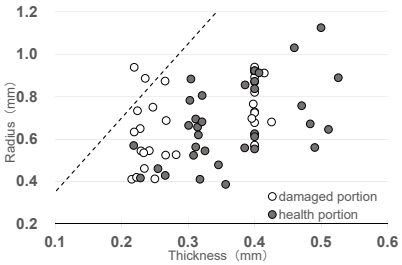


図２　板厚と曲率半径

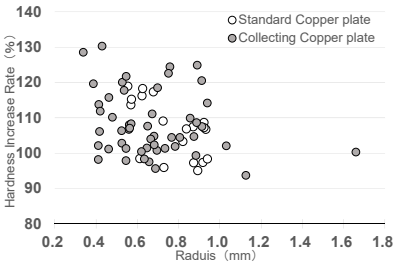


図 12 曲率半径と硬度増加率

表２　目視による観察結果と硬度測定値

試料名			A	B	C1	C2	D1 健全部	D2 損傷部	E	F	G1 R=0.6mm	G2 R=0.9mm	I1 R=0.6mm	I2 R=0.9mm
試料数			5	5	2	6	3	6	6	6	5	6	5	3
目視観察 損傷の有無			無	シワ小	無	無	無	割れ小 シワ大	無	波打銅板 割れ一部	シワ小	シワ小	無	無
平均板厚(mm)			0.72	0.38	0.29	0.35	0.32	0.24	0.32	0.23	0.4	0.4	0.4	0.4
平均R半径(mm)			1.55	0.72	0.48	0.78	0.62	0.58	0.63	0.58	0.63	0.87	0.60	0.89
硬度	基準値	(HV)	80.1	86.6	75.9	80.3	82.6	80.0	100.7	89.1	81.4	86.2	83.7	76.4
	全平均値		82.1	91.5	83.4	83.1	84.0	76.7	102.8	90.8	86.1	86.1	85.7	76.1
	標準偏差		6.1	6.2	6.3	4.0	2.6	3.9	3.7	5.5	3.0	3.3	0.5	3.0
	硬度増加率(%)		106.9	113.7	118.4	105.8	103.3	108.8	104.7	106.1	114.3	99.5	111.9	105.5

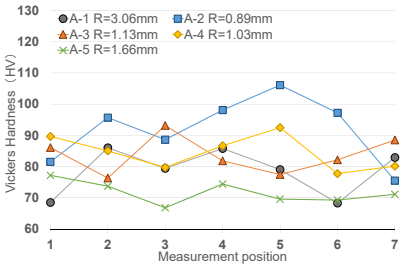


図 3　試料 A 各測点の硬度

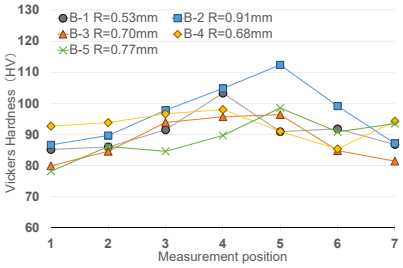
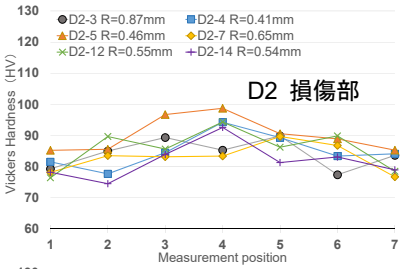


図 4　試料 B 各測点の硬度



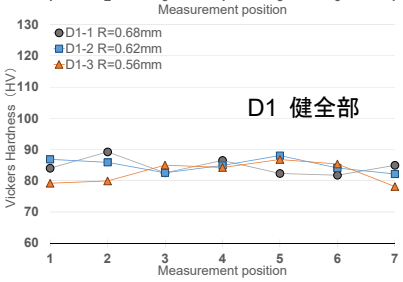


図 5　試料 D 各測点の硬度度

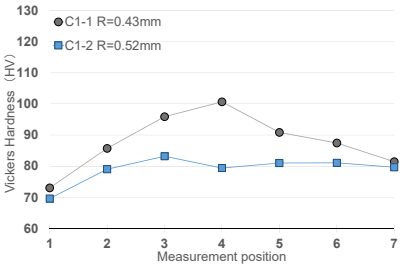


図 6　試料 C1 各測点の硬度

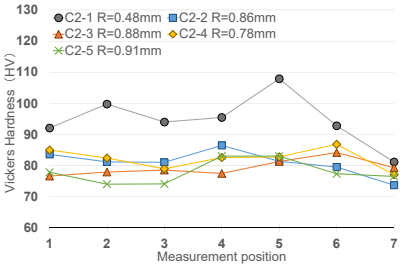
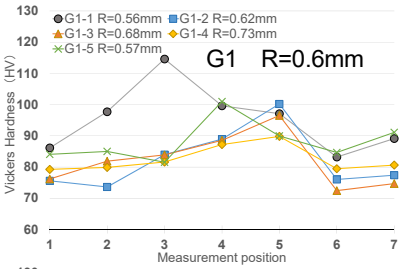


図 7　試料 C2 各測点の硬度



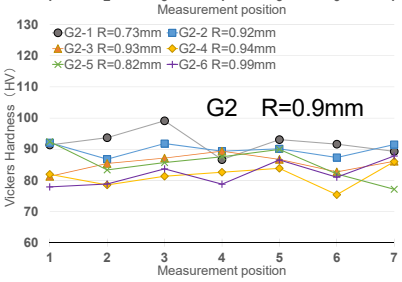


図 10　試料 G 各測点の硬度

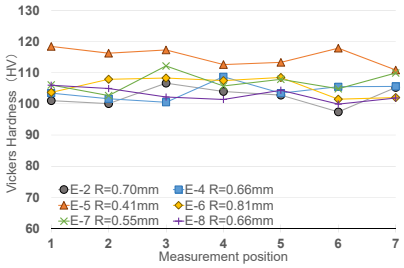


図 8　試料 E 各測点の硬度

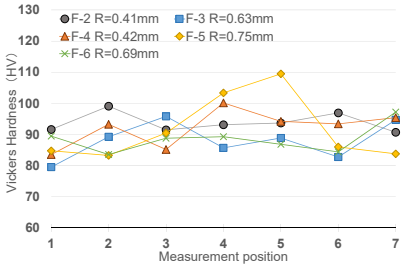
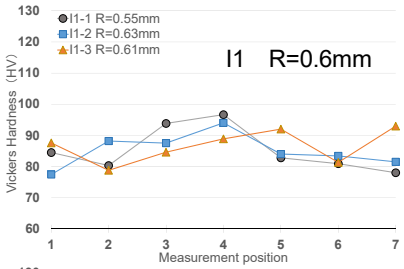


図 9　試料 F 各測点の硬度



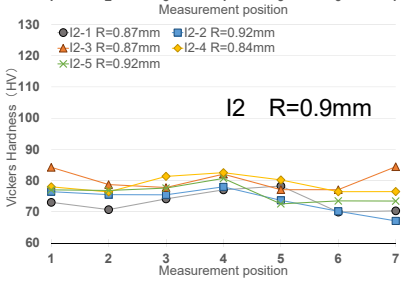


図 11　試料 I 各測点の硬度

ない。これは年代による材質が異なる為と考えられる。

6　まとめ

本報告における結果を要約する。

(1) 試料の損傷は主にシワや亀裂、割裂が多く確認された。

(2) 目視で損傷が確認された試料は曲面頂点部で硬度が大きくなる。

(3) 損傷が認められない試料は曲面部も含めて硬度がほぼ一定である。

(4) 半径Rの大きさに関わらず、板厚が薄いと損傷が確認されやすい。但し、半径Rが小さい程硬度は上昇しやすい関係にある。

(5) 曲げ加工部の硬度は曲率半径が小さい程、硬度が大きくなる傾向にある。

(6) 重要文化財建造物の銅板劣化を調査する場合、はぜ部分を観察することが望ましい。

(7) 今回調査した銅板の劣化は局所的な劣化はみられるが、全体的に健全な銅板が多くみられた。

【謝辞】

本報告にあたり、銅板サンプルの提供及び試験機の支援等、様々な形でご支援をいただきました皆様にここに記して感謝の意を申し上げます。

【参考文献】

(1) 銅板屋根構法委員会：銅板屋根構法マニュアル，社団法人日本銅センター，pp23～pp28 pp94～pp100，2004

(2) 文化庁：重要文化財（建造物）保存活用計画の策定について（通知）-重要文化財（建造物）保存活用標準計画の作成要領，文化庁報告書・通知，2000. 3

(3) 日本伸銅協会：日本伸銅協会技術標準 JCBA T307 銅および銅合金薄板条の曲げ加工性評価方法，日本伸銅協会，2007

(4) 日本規格協会：ビッカーズ硬さ試験－試験方法 JIS Z 2244，日本規格協会，2009

(5) 文化財建造物保存技術協会：文建協通信No.127，文化財建造物保存技術協会，pp15-pp21，2017.01

(6) 田中良、永井香織、松井勇：近代建築における銅板屋根の維持保全に関する研究 -銅板の材質及び緑青被膜の分析-，2017年度日本建築学会大会学術講演梗概集，2017

(7) 田中良、永井香織：近代建築における銅板屋根の維持保全に関する研究 -緑青銅板の組成分析調査-，2016年度日本建築学会関東支部研究報告集，2017