

氏名	古主 泰子
ヨミガナ	フルヌシ ヤスコ
学位の種類	博士（文化財）
学位記番号	博美第489号
学位授与年月日	平成27年3月25日
学位論文等題目	〈論文〉 建築用和釘における非金属介在物及び酸化皮膜生成への過飽和酸素の影響

論文等審査委員

(主査)	東京藝術大学	教授	(美術学部)	桐野 文良
(副査)	東京藝術大学	教授	(美術学部)	稲葉 政満
(副査)	東京藝術大学	教授	(美術学部)	木島 隆康
(副査)	東京藝術大学	元教授		永田 和宏
(副査)	文化庁	主任文化財調査官		上野 勝久

(論文内容の要旨)

日本古来の製鉄法は、砂鉄を木炭で還元する『たたら製鉄』と脱炭工程の『大鍛冶』の工程からなり、鉄鉄（ずく）や玉鋼、包丁鉄（割鉄）が製造された。これらは『和鉄』と呼ばれ、錆び難く、鍛接が容易という現代鋼に無い特徴がある。和釘は包丁鉄を鍛錬した後、金床の平坦部で角棒の隣り合う2面を90度に交互に鍛打し、延ばして成形するため、胴部の形状は四角形である。和釘は法隆寺の金堂を初めとして、我が国古代以来の木造建築物に用いられてきた。

和釘の最大の特徴は、その錆び難さである。井垣はホウ酸系緩衝液中で測定したアノード分極曲線から、刀及び和釘が非常に小さい不動態維持電流を示すことから、高い耐食性を持つ事を指摘した。その上で、マグネタイト（Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>）皮膜の形成が腐食の進行を抑制すると推定したが、その存在は確認されていない。筆者は古代の和釘が鍛造工程で生成した皮膜に覆われていることに着目し、和釘と現代鋼の皮膜構造を比較した結果、 $\alpha$ -鉄とウスタイト（FeO）の界面の凹凸が大きい現代鋼は密着性が劣るが、和釘は $\alpha$ -鉄とFeOの密着性が良好であり、結晶子サイズ10nm程度の微細な多結晶FeOであることを確認した。このことは、初期酸化に違いがある事を示している。

本研究の目的は、錆び難く、鍛接が容易である和鉄の特徴の根本的要因を究明することと、それが生み出されてくる製造工程を解明することにある。

本研究は、第1章「序論」、第2章から第5章の本論、第6章「結論」で構成されている。

第1章「序論」では、和鉄及び建築用和釘の特徴、先行研究における炭素濃度から推定した製造法の評価と本研究の目的を述べた。

第2章「建築用和釘中の過飽和酸素の存在」では、非金属介在物を含まない鉄相中の酸素濃度を測定し、和鉄とは炭素濃度が不均質で、溶解酸素は過飽和であることを明らかにした。

続いて、第3章「和釘中の過飽和酸素が非金属介在物の生成及び成長に及ぼす影響」及び第4章「和釘中の過飽和酸素が酸化皮膜形成に及ぼす影響」では、透過電子顕微鏡による和釘の観察を通じ、過飽和酸素が非金属介在物構造及び酸化皮膜生成に及ぼす影響を明らかにした。

第5章「和釘の製造」では、包丁鉄を原料に、折返し鍛錬が2～3回行われた後、棒鋼を平らな金床上で延ばして和釘を製造した事を明らかにした。

第6章「結論」では、和釘は錆び難く、鍛接が容易であるという和鉄の特徴を最大限に活かした実用品であり、現代鋼ではこの特徴を代替することが困難であるため、和釘の製造技術は木造建築物の伝統的建技術

とともに、後世に伝承する必要があることを述べた。

本研究における主たる論点と結論は、つぎの通りである。

まず奈良時代から現代までの和釘について分析値を整理すると、酸素濃度が高いという特徴が示されている。これらの分析値は鉄に溶解している酸素の他、非金属介在物中の酸素を含めて測定している。本研究では微小領域の分析装置電子線マイクロアナライザー（EPMA）を用い、1～5 μm径の範囲で溶解酸素濃度を測定した。溶解酸素濃度は0.15～0.38 mass %であった。純鉄中の酸素溶解度は、δ-鉄で0.0084 mass %、γ-鉄で0.003 mass %、α-鉄はさらに小さい値であり、和釘中の酸素濃度は過飽和であることが明らかとなった。

つぎに、非金属介在物は溶解酸素が過飽和となる操業条件下ではFeOを主体とすることに着目し、非金属介在物構造から和鉄の製造条件を明らかにした。和鉄は過飽和酸素により、その反応熱で鋼材表面の温度を上昇させ融解し、鍛造によって母材との密着性を良好にしている。また、加熱鍛造時にはファイヤライトの一部が熔融していることが判明した。このことは加工による歪を緩和すると同時に、釘鍛造温度がファイヤライトの融点近傍であることを指摘することができた。

大鍛冶本場工程では、1528℃を超える温度で鉄塊を回転する事により表面を溶融・凝固させ、溶融状態では鉄と溶融FeOが接触して平衡状態近傍にある。δ-鉄とFeOは酸素濃度0.16 mass %に共晶点を持つ。EPMAによる測定値は、この平衡近傍にあり、酸素が室温で過飽和である事を示している。酸素濃度が高い値を示した備中国分寺の和釘は、過飽和酸素の影響でFeOの非金属介在物が大きく成長していた。酸化皮膜の生成においては、過飽和酸素の鉄が室温でα-鉄とFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>に分解するので、母材との最界面にはFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が存在することに着目し、電子顕微鏡による観察の結果、和釘の母材との界面には約1μmの厚さのFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が存在することを実証した。これは過飽和酸素を溶解する鉄が常温で緻密なFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>を界面に分解生成する結果であり、和釘の界面におけるFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の密着性は過飽和酸素によることを明らかにした。さらに、鍛造時に外層に生成した微結晶のFeO皮膜が保護被膜として釘全体を包み、外界の酸素との接触を遮断することで、その後の腐食を抑制することで耐食性が向上すると結論した。

#### （総合審査結果の要旨）

本論文は、日本古来の製鉄法である『たたら製鉄』により作製された和鉄は現代鋼に比べ錆びにくく鍛接が容易であると言われてきたが、その機構については不明な点が多い。本論文では和鉄の特徴を生かしたものとして建築用の和釘を取り上げ、走査型および透過型の電子顕微鏡を駆使して材料中の酸素に着目して観察ならびに分析を行っている。その結果、製錬時の操業条件において酸素が過飽和となると、非金属介在物の成長と表面にFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>皮膜の生成の2つが生じる。非金属介在物の成長は鍛接を容易にするとともに強固な接合が実現できることを明らかにした。また、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>皮膜の生成はFeの耐食性を向上させるなどFeの安定性向上に大きく寄与する。このようにして製造された和鉄を建築用の釘に仕立てるために折り返し鍛錬を2～3回おこなう。ここでは鍛接が必須で、そのために和鉄中の非金属介在物が和釘の製造工程に寄与することを明らかにしている。これは折り返し鍛錬には非金属介在物の存在が不可欠であることを意味している。このように、和鉄の高耐食性や和釘における鍛錬の容易さといった製錬ならびに製品製造までの基本的な工程を学術面から明らかにした点は大きく評価できる。本論文での成果は鉄鋼材料を専門に扱う日本鉄鋼協会を中心に審査付きの学術誌へ主筆で4報、共著で1報投稿済あるいは投稿中であり当研究領域の内規も満たしている。この他に本研究と関連する論文も数報発表している。

以上のことから、本論文は博士(文化財)の学位を授与するのに十分な論文内容と業績であると判断する。