

表面錆からみた稲荷山鉄剣の材質

技術トピックス
トピックス村田 朋美*・佐々木 稔*²・田口 勇*²Discussion on the Steel Used for Inariyama Sword
Based on the Analysis of the Rust

Tomomi MURATA, Minoru SASAKI, and Isamu TAGUCHI

1. はじめに

稲荷山鉄剣は昭和 47 年埼玉県行田市稲荷山古墳の第 1 主体部から出土したもので、その後昭和 53 年奈良市元興寺文化財研究所で保存処理が行われた際、剣身に金象嵌の銘文が発見され、多くの人々の深い関心を引き起こすことになった。本年 4 月には国宝としての指定を受け、現在行田市のさきたま資料館に保存、陳列されている。

本鉄剣の保存処理の過程で、剣身表面から剝離した幾片かの錆はそのまま前述の元興寺研究所に保存されていた。昨年我々はその錆の一部を提供していただき、解析する機会に恵まれた。ここではその解析結果に基づき、現存する日本最古の文字を有する鉄剣の材質および製鉄技術について考察してみたい。

2. 鉄剣銘文とその読み方 (1 例)

写真 1 および図 1 に鉄剣の外観と、判読されている剣身表面の 57 字、裏側の 58 字を示す。この銘文の読み方は史学者によつて違いがあるが、ここでは代表例としてさきたま資料館の説明書にあるものを紹介しておく。

「辛亥の年七月中記す。乎獲居の臣。上祖、名は意富比埜。其の兒、多加利足尼。其の兒、名は日已加利獲居。其の兒、名は多加披次獲居。其の兒、名は多沙鬼獲居。其の兒、名は半豆比。其の兒、名は加差披余。其の兒、名は乎獲居の臣。世々、杖刃人の首と為り今に至る。獲加多支鹵大王の寺、斯鬼の宮にある時、吾、天下を左治し、この百練の利力をつくらしめ、吾が奏事の根元を記す也」

この銘文の解釈には諸説がある¹⁾が、本鉄剣を鉄器として検討する上で必要な事項に限つて述べる。「辛亥年」は 471 年あるいは 60 年後の 531 年の両説があるが現在では前者をとる学者が多いといわれる。「獲加多支鹵大王」は雄略天皇に当たるとするのが一般的である。「宋

書倭国伝」にある「倭国王武、宋に使を遣して方物を献じて上表し…」の倭国王武も雄略天皇とされている。「百練」は本来炭素量の多い鉄を加熱、鍛打して脱滓、脱炭を行い、清浄な鋼とする工程を百回繰り返すという定量的な意味があつたと考えられる²⁾。しかし、5 世紀も後半になるとこの「百練」も、十分に鍛錬したという程度の表現に変わつているのかもしれない。「利刀」はこの両刃の剣を指す語としては意外な感じを受けるが、刀身の正確な測定結果によると剣先で約 5 mm の反りが認められ、やはり「切れる刃のついた大刀」を表している。

3. 調査した錆試料と解析方法

入手した錆試片は 1 個の重量が 0.01 ~ 0.1 g、計 10 個であつた。可能な限り原形を残すという方針で最大の錆片 (0.1 g、鉄剣表の「多加披」付近から採取) を機器分析用とし、その結果に基づいて 5 個の小片 (合計 0.1 g) を主要成分の化学分析に供した。残つた 4 個の錆片は実験終了後返却した。機器分析用の錆片 (写真 2, 3) は表面錆の垂直断面が観察できるように樹脂に埋め込み、鉄錆中の水溶性成分の溶出を避ける上から水を使わず研磨した。研磨した試料は、まず偏光顕微鏡によつて錆層を観察し、錆の進行状況を把握した後錆層中の元素分布と非金属介在物に注目して、コンピュータ制御 X 線マイクロアナライザー (以下 CMA と略称) を使つて解析した。化学分析用の錆片はわずか 0.1 g の少量なので、含有成分のうち Cu, Mn, Ca, Mg, Al, Ti を選び、高周波誘導結合発光分光分析法 (ICP 法) によつて定量分析した。

4. 解析結果および鉄材質についての考察

4.1 錆の構造と元素分布

試料断面の CMA による反射電子像を写真 4 に示す。明るい部分は高密度な黒錆層 (Fe_3O_4) に、暗い部分は赤錆層 ($\alpha, \gamma-FeO \cdot OH$) に対応し、それらが層構造を形成

昭和 58 年 6 月 7 日受付 (Received June 7, 1983) (依頼技術トピックス)

* 新日本製鉄(株)第一技術研究所 Ph.D. (R & D Laboratories- I, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

*² 新日本製鉄(株)第一技術研究所 工博 (R & D Laboratories- I, Nippon Steel Corp.)

している。さらに黒い線状の部分は錆層に生じたき裂である。この写真から地鉄側は黒錆層が多く、表面側(環境側)では赤錆と、き裂が多いことが理解できる。

この試料断面の中央における反射電子像と、Fe, Cu,

裏 表



写真1 稲荷山鉄剣の外観

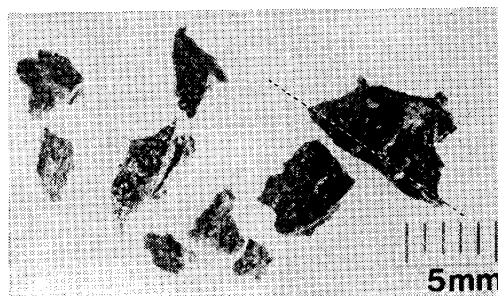
Ca の濃度測定結果を写真5に示す。また Cu の高濃度の個所を選んで定量した値は写真6の付表に記載した。便宜上 CuO として計算した値は 2.4% から 90% になっており、腐食の過程で濃縮したことがうかがわれる。写真5で明らかなように Cu の濃縮は黒錆層に部分的に集中している。Ca は後述するように非金属介在物の主要な成分であり、黒錆中に元の形を溜めて数多く残存している。なお Si の分布について調べた結果は、一部を除いて Cu の分布個所と一致していた。一方、錆層のき裂内に Si と O のみが高い部分が数箇所認められたが、これは腐食の過程で混入した砂粒と考えている。

同じ黒錆層でも Fe 濃度が極めて高い部分の反射電子像(写真6)をみると明るい網目状の組織が観察された。これは炭素鋼のパーライト組織中のセメンタイトに酷似している。微小焦点X線回折法で測定した結果、やはりセメンタイトであることを確認した³⁾。古墳の埋蔵個所で腐食が極めて緩慢に進行した結果、フェライトのみが均一に腐食され、もとのパーライト中のセメンタイトの分布が残存したものと考えられる。通常は腐食生成物が流出するか密度の低い錆層に変化していくためパーライト組織も失われる例がほとんどで、著者らの知る限り、今回のような例は報告されていない。腐食による体積膨張が黒錆層で約2倍程度と仮定しても、もとのフェライト粒径は 20~30 μ となり、平均炭素量は 0.2~0.3% と推定される。

鉄剣表面錆の平均組成を知るために残りの錆小片について行つた化学分析結果を表1に示した。Cu, Mn は共に高いが Ti は低い。

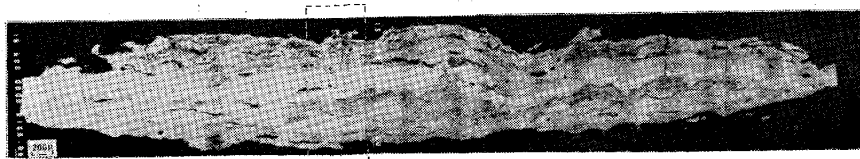
4.2 埋蔵状態での錆層の形成と Cu の濃縮

埋蔵されている状態では、還元反応を分担する酸素の鉄表面への拡散は、厚い錆層によつて律速されている。



(点線は観察断面)

写真2 入手した錆片



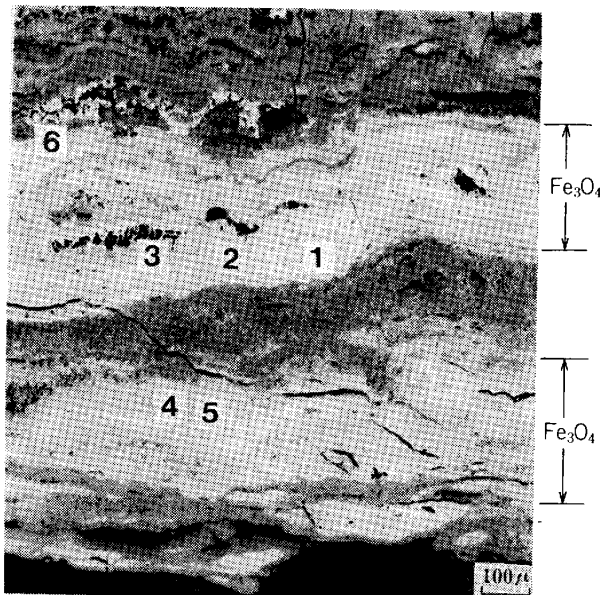
(点線は写真4の分析区域)

写真3 最大試片断面の CMA 像

表

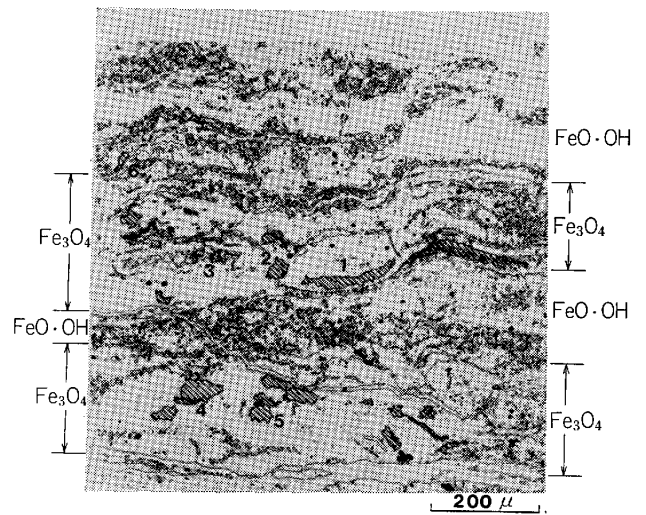
1 至 17 裏
 1 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 2 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 3 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 4 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 5 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 6 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 7 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 8 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 9 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 10 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 11 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 12 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 13 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 14 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 15 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 16 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 17 其 兎 多 加 美 披 余 其 兎 多 手 獲 居 其 兎 多 半 乙 比
 18 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 19 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 20 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 21 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 22 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 23 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 24 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 25 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 26 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 27 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 28 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 29 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 30 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 31 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 32 杖 刀 人 首 奉 妻 妻 至 今 獲 加 多 支 鹵 大
 33 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 34 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 35 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 36 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 37 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 38 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 39 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 40 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 41 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 42 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 43 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 44 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 45 王 寺 在 斯 鬼 宮 時 吾 在 治 天 下 令
 46 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 47 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 48 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 49 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 50 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 51 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 52 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 53 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 54 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 55 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 56 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 57 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 58 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 59 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 60 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 61 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 62 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 63 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 64 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 65 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 66 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 67 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 68 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 69 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 70 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 71 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 72 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 73 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 74 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 75 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 76 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 77 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 78 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 79 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 80 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 81 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 82 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 83 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 84 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 85 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 86 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 87 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 88 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 89 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 90 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 91 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 92 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 93 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 94 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 95 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 96 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 97 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 98 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 99 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也
 100 作 此 百 練 利 刀 記 吾 奉 妻 根 也

図1 稲荷山鉄剣表裏の文字



明るい部分: Fe₃O₄
暗い部分: α, γ FeO·OH

写真4 錆層の反射電子像



白色: 鉄濃化域, 黒点: Ca 濃化域, 斜線: Cu 濃化域
CuO としての濃度 (%)

1) 2.2 2) 43 3) 56 4) 2.4 5) 33 6) 90

写真5 錆層中の含有成分濃度分布

しかし FeO·OH の Fe₃O₄ への還元反応が錆層中で生じ、鉄の腐食は緩慢に進行する⁴⁾。そして現代の耐候性鋼のように非晶質層が一様に地鉄を覆う状態にならない限り、錆は不連続な層状構造を形成し、その結果層状剝離をつづけることになる。

地鉄中に Cu が含まれていると、溶出した 2 価の鉄イオン、Fe²⁺ の水酸化物、Fe(OH)₂ が銅の触媒的作用によつて、Fe₃O₄ として安定化しやすくなるのが最近の研究で明らかにされた⁵⁾。10⁻⁶ M 程度の Cu イオン濃度があれば Fe₃O₄ 生成反応がかなり促進され、Cu イオン自体は凝集して Cu₂O あるいは CuO を形成し濃化する。こうして含銅鋼の場合緻密な Fe₃O₄ 層生成の

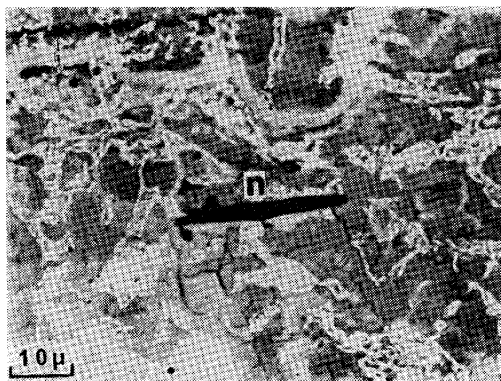


写真6 錆層中に発見されたセメンタイト (白色のネット)と介在物 (n)

表1 鉄剣表面錆試料*の化学組成

成分	Cu	Mn	Ca	Mg	Al	Ti
%	0.35	0.18	0.025	0.006	0.018	<0.01

* 小片5個,合計0.1gをICP法で分析.

おかげで腐食反応は大幅に抑制される。しかし Fe_3O_4 がある厚さまで成長すると体積変化のため地鉄との整合性が無くなり、き裂やはく離が生じ、その部分は錆層形成の初期と同じく $FeO \cdot OH$ が生成する (写真4, 5)。

前述のごとく錆層の Cu 成分は CuO に換算してベルト状部分で 2~3%, スポット状部分で 43~90% であった。このような錆層中の Cu の濃化と存在状態は含銅耐海水鋼の錆 (10年間海中で使用後解析) に極めて似ている⁹⁾。以上の解析結果と、発掘時に鉄剣近傍に銅製品の遺物が無かつたことと合わせ考え、鉄剣に Cu が含有されていたとして間違い無いと言えよう。ちなみに錆片の化学分析によると 0.35% の Cu が平均的に錆層に含まれている (表1)。1500年間土壌中であつたというものの、古墳上部で、かつグリ石を敷きつめた上に置かれてあつたためか 0.001 mm/年以下という極め

て緩慢な腐食速度であり、いわゆる錆の流出を考慮したとしても地鉄中の Cu 成分は 0.2~0.3% 程度と推定できる。古墳出土鉄剣で Cu を含んでいた例は幾つも報告されており、含銅磁鉄鉱を製錬して得られた鋼であれば妥当な値と言える。

4.3 非金属介在物の組成と使用された地鉄の製法との関係

今回の試料は錆片ではあるが、腐食反応が極めて緩慢に進行して生じた密度の高い錆層には、精錬中生成した酸化物、あるいは未分離のスラグが残留しているのではないかと予測して検討を進めた。

写真6に細長く伸びた珪酸塩系の介在物を示したが、これは結晶を析出していない非晶質の珪酸塩である。本試料中のほとんどはこのタイプの介在物であつた。そのうち代表的な4つの介在物の含有成分を CMA で定量した結果を表2aに示した。介在物の基本成分は CaO , Al_2O_3 , SiO_2 でそれに若干の FeO , MnO , MgO , K_2O , Na_2O 分と極く少量の TiO_2 を含んでいる。このうち FeO , MnO は鋼の精錬時に鋼の側から供給されたと仮定し、残る6成分の CaO , MgO , K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 の成分量を 100% に基準化し、改めて各成分の比率を計算したのが表2bである。また群馬県安中市二子塚出土の直刀 (5世紀後半の型式) における介在物の分析例を比較試料として同じ表の下欄に示した。本鉄剣試料の4つの介在物と、比較材としての直刀の介在物の成分比は非常に似ていることがわかる。介在物組成のこのような共通性は、古代の武器製作用の素材と考えられている鉄錠 (板状で両端はやや薄くなり、扇形になつている。重量は 20~900g までいろいろある) においても見出される。したがってスラグ系珪酸塩質介在物の成分に共通性をもたらず鋼の精錬法を検討する必要がある。

表2a CMAによる錆層中のガラス質介在物の定量分析結果

介在物 No.	化 学 成 分 (%)									合 計
	FeO	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	
1	19.0	2.0	12.3	2.8	2.4	2.8	7.3	0.6	38.4	87.6
2	10.8	0.9	13.8	5.1	3.8	1.7	11.2	0.6	50.4	98.3
3	2.8	1.7	20.1	2.9	2.1	1.6	8.3	1.1	58.3	98.9
4	8.9	1.3	11.7	3.3	3.0	1.9	11.7	0.7	56.2	98.7

注) 介在物 No. 1 には他に Cl, P, S が含まれており、これらを合わせると数%になると推定される。

表2b ガラス質介在物の主要化学成分比率 (6成分を100に基準化)

介在物 No.	成 分 比 (%)					
	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂
1	18.6	4.5	3.6	4.5	11.1	58.2
2	16.0	5.9	4.4	2.0	13.0	58.5
3	21.5	3.1	2.2	1.7	8.9	62.4
4	13.4	3.8	3.4	2.2	13.4	64.1
平均	17.4	4.3	3.4	2.6	11.6	60.8
比較材*	15.8	2.7	2.5	0.7	10.3	68.0

* 群馬県安中市築瀬二子塚出土直刀 (健全)

中国の古代冶金史をみると、前漢の時代 (BC202-AD8) に製鉄史上画期的な技術進歩があつたとされている⁸⁾。それによると鉄錠石を型型炉で還元して鉄錠を作り、さらに熔融、半熔融状態で空気酸化を行つて脱炭し、鋼にするという炒鋼法 (一種のバドル法) が発明され、近世に至るまで中国の各地で行われてきた。17世紀の啓蒙技術書である「天工開物」(宗応星著)⁹⁾にはその時代の操業法が図解されている。それによると鋼の製錬時「潮泥灰」なるものが添加されている。「潮泥灰」

表 3 銅含有量の多い古墳出土鉄器の分析例

番号	鉄器	出土古墳	化 学 成 分 (%)							
			C	P	S	Cu	Mn	Ca	Si	Ti
1	鉄鋌	奈良市大和6号墳	0.10	0.009	0.009	0.21	<0.01	0.039	0.057	<0.001
2	"	"	0.27	0.018	—	0.12	0.001	<0.005	0.089	0.001
3	"	"	0.71	0.027	0.003	0.11	0.002	<0.005	0.25	0.002
4	直刀	群馬県安中市築瀬二子塚	—	0.014	—	0.21	tr	—	0.13	—
5	"	千葉県八日市場市神崎古墳	0.35	0.020	0.005	0.22	0.01	—	0.16	<0.01
6	"	同上 米倉古墳	0.14	0.035	0.010	0.21	<0.01	—	0.13	<0.005

注) 試料鉄器は比較的健全であり、メタル部分を採取して分析されたものである。

は波静かな浅い海底に推積する泥状物質を採取して焼き、砕いて細粒部分を篩い分けたものである。「潮泥」は貝殻、砂、カオリン系粘土からなり、これを仮焼した「灰」であれば CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 分を含有した灰状物質であろう。したがって精錬過程で造滓材として使うことは現代から考えても理にかなっている。

しかしながら「潮泥灰」の使用を5世紀まで遡らせることができるだろうか。残念ながらそれを裏づける中国古代の文献は見つかっていない。ただ漢代にはすでにソーダガラスの製造技術が西方より伝わっており¹⁰⁾、珪砂粉、石灰、木灰（あるいはソーダ灰）に粘土を加え「潮泥灰」と同様の組成のものを作っていたかもしれない。介在物の組成は、その鋼が炒鋼であるかどうかを判定する一つの重要な指標となる¹¹⁾ので、当時使用された造滓材の原料を明確にし、「天工開物」の記述の裏付けをする必要がある。

4.4 鉄剣各部の構造と金属組織の推定

我が国で5～7世紀の古墳から出土する鉄器は、炒鋼品と判定あるいは推定されるものが多い。鉄鋌と直刀のいくつかの分析例を、従来の文献から引用して表3に示した。これらはいずれも金属部分を分析したものである。直刀についてはCuの含有量が高いものを中心に掲げている。

これらの例からわかるように直刀の各部で炭素量だけでなく、Cu含有量も異なっている。これは素材が不均一であることを端的に物語っており、この点で鉄鋌も同様に不均一な組成を有し、直刀の素材であつたと考えても矛盾は無い。

鉄剣については調査例がないが、本鉄剣がどのように作られたか推定してみよう。さきたま資料館に陳列してある鉄剣をガラスケースを通して注意深く観察すると棟金が錆びて剥落し、剣身の真中に板状で、腐食がさほど進行していない箇所がある。これは刃金ではないかと思われる。そうであれば板状の刃金を挟んで、上下に棟金を鍛接した構造になつているはずである。「日本刀の科学的研究」¹²⁾を著わした俵國一は、古墳出土の直刀10振を切断し、金属組織学的調査を行つている。その中の42号刀は、中心に炭素量0.4～0.5%の刀金が有り、両側に棟金が張られている。棟金は硬軟接合の鋼を何回

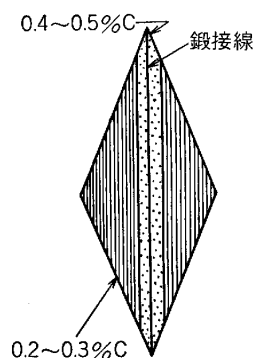


図2 推定される稲荷山鉄剣の断面構造と炭素量

も折り返して鍛錬し、十分に練り上げられていて、平均炭素量は0.2～0.3%である。本鉄剣がこの42号刀と類似の構造だとすると、図2に示すように棟金は0.2～0.3%の焼入れ処理を受けていない炭素鋼で、比較的軟らかく、フェライト粒径が20～30 μ の象嵌しやすい鋼ということになる。また銘文に示された「百練」の鋼ということもできよう。一方中に挟まれた刃金用鋼としては、炭素量が0.4～0.5%以上で、特に焼入れしなくとも放冷のみでかなり硬化する鋼が使われたのではないかと考えられる。ちなみに42号刀の場合、刃金の硬さはHV:～300程度になつている。表裏で115文字が象嵌され、かつ「利刀」であるためにはこのような素材と構造の組み合わせになるであろう。

4.5 原料鉱石についての考察

本鉄剣に使用された地金には、もともとCu含有量が高いこと、そして同様な組成を持つ鉄器の分析例が多いことは既に述べたとおりである。鉱石中のCuは還元製錬過程で銑鉄に入り、酸化精錬の過程でもスラグに移らない。したがってCuはもとの鉱石に多く含有されたものと考えられ、含銅磁鉄鉱が原料鉱石であつたと言える。

すでに俵國一はCu含有量の多い直刀の分析結果から、それらが「大陸で製作されたもの…」という考えを述べられている。窪田蔵郎は表3に示した鉄鋌1の分析値より、中国本土での製造を推定している¹³⁾。その根拠は今世紀に入つてからのデータではあるが、含銅磁鉄鉱を産出する大きな鉱山は、中国の山東半島から、揚子江下流域にかけて存在し、漢代から製鉄が盛んに行われた

とされている地域に相当する。また本鉄剣が製作された5世紀は倭国と直接の、あるいは百済を介して間接の交易が盛んになった時代といわれている。このような背景のもとに、中国製の炒鋼製品、半製品がもたらされ、その中にはCu含有量の高いものもかなりの割合であつたとしても、けつして無理な推測ではないと思われるのである。

5. お わ り に

稻荷山鉄剣の表面錆を解析し、使用されたもとの地金の材質を検討した結果、古代中国で開発された一種の間接製鋼法である炒鋼法によつて製造された鋼と推定された。この鋼に見られる非金属介在物や化学組成の特徴は、我が国の古墳から出土する多くの鉄器および半製品と考えられる鉄錠に見出され、明らかに砂鉄製錬による鋼の特徴とは異なるものである。本鉄剣で使用された地金はCu含有量が高く、そのため埋蔵環境下で錆層に濃縮し、結果的に密な Fe_3O_4 層を形成して腐食の進行抑制に寄与したと言えよう。本鉄剣が1500年もの間、比較的健全な状態に保たれた理由の1つに挙げてよいと思われる。

本研究を進めるに当たり、多大な御便宜をはかつていただいた元興寺文化財研究所、増沢文武氏、奈良国立文化財研究所、町田章氏に深く感謝の意を述べる。また古代刀剣の製作法や解析結果につきご意見、ご教示を賜つ

た石井昌國氏、文化庁工芸課、安藤孝一氏に厚く感謝する。この分野の研究は多数の証拠固めをして初めて実を結ぶ性格を有しており、今回の検討結果も鉄錆に残された情報の活用という試みである。推論の個所は今後の検討課題と考えている。

文 献

- 1) たとえば、シンポジウム鉄剣の謎と古代日本 (1979) [新潮社].
- 2) 佐々木稔: 鉄と鋼, 68 (1982) p. 178
- 3) 松尾宗次: 未発表資料
- 4) 岡田秀弥, 細井祐三, 内藤浩光: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 133
- 5) H. TAMURA et al.: J. Colloidal Interface Sci., 90 (1980), p. 100
R. FURUICHI et al.: Memoirs of the Faculty of Engr., Hokkaido Univ. Vol. XIII (1974) 4, p. 316
- 6) 佐藤栄次, 村田朋美: 未発表資料
- 7) 石井昌國: 古代の刀剣, 「鉄」(森浩一編) (1979) [社会思想社]
- 8) 北京鋼鉄学院編写組「中国古代冶金」北京(1978) [文物出版社]
- 9) 宗応星著, 藪内 清訳: 天工開物(1971) [平凡社]
- 10) 由水常雄: ガラスの道 (1973) [徳間書店]
- 11) 佐々木稔, 村田朋美, 伊藤 叡: 古代における炒鋼品とその製品, たたら研究会 25 周年記念論文集 (1983年11月)
- 12) 倭 國一: 日本刀の科学的研究 (1982) [日立印刷]
- 13) 窪田蔵郎: 鉄の考古学 (1973) [雄山閣]