



鉄の歴史

タイルコート著「A History of Metallurgy」における鉄の歴史 1

History of Iron in “A History of Metallurgy” Described by Dr. Tylecote

沖森麻佑巳

Mayumi Okimori

(株) 日鐵テクノリサーチ
常務取締役 かずさ事業所長

序 タイルコート博士と「鉄の歴史」

ロナルド・フランク・タイルコート博士 (1916～1991) (図1) は、マンチェスターで生まれ、マンチェスター大学で溶接の応力集中の研究を行い1942年に科学修士号を得て企業に就職し、その後1952年にPh博士号を取得した。1939年から世界中の遺跡を発掘し、自らはローマ時代、中世、それ以降の遺跡発掘を指揮し、イラン、アフガニスタン、トルコへの国際発掘隊のメンバーとして活躍した。ロンドン大学・考古研究所の考古冶金学の教授で「冶金歴史学」の編集者として活躍し、1976年に冶金の歴史入門書として「冶金の歴史」(A History of Metallurgy)¹⁾を発行し(1992年に第2版)、1991年に75歳で逝去された。

タイルコート博士は著作において、古代から現代に至るまでの冶金の歴史を独特の視点で紹介した。対象にしている金属は、現代文明を支える代表的な鉄、銅をはじめ鉛、錫、亜鉛、金、銀などとそれらの合金、近代になり発見されたアルミニウムやチタン等の軽金属等の広範囲に及んでいる。そし



図1 タイルコート博士

て異なった文明における冶金の技能と技術の発展とそれらの関連が注意深く述べられている。論点の一つとして、世界中で「純銅～砒素含有銅～錫含有銅～鉄」という「金属の連鎖」が生じ、その連鎖は異なった地域で生じ伝播期間も異なっていることと、冶金の知識と伝播に関する理論の正当性が述べられている。別の論点では、文書の証拠よりも物質的証拠に重要性を置き、例えば炉のデザインや製造されたスラグおよび金属の成分を解析し、現代の金属産業を支える諸技術が人類の長い経験と考察の積み重ねの中から生まれたことが科学的に明らかにされている。

本紹介では、博士の著作における金属を「鉄」に絞り、新石器時代～中世～産業革命～現代までの「鉄の技術史」を上記の論点に注目しながらまとめることにする。この試みが、鉄鋼産業界のグローバル化やエネルギーや環境に関する新しい社会的課題へ対応するためのヒントになれば幸甚である。

1 新石器時代の金属

新石器時代の人達は、儀式に鉄の赤い酸化物を使い、壁や壺の装飾に銅鉱石の緑色を施していた。銅の青色を塗布した壺を加熱したら黒色に変化することや、鉛の釉を加熱すると金属鉛の小さな塊が出現することが見出され、ファイヤンスとして知られている釉の石英ガラスの中に銅が発見された。これらの経験によって冶金技術が始まったと言われている。新石器時代では天然銅と隕鉄が知られていた。玉や針や錐のような小さな銅製品が天然銅から造られていた。イランのアリ・コッシュの小さな銅の玉はBC7000～6000年と考えられており0.4 mmの厚みをもつ箔を巻いたものであった。BC5000～4000年のものと推定されているシアルクの針のミクロ構造は、何度も加工されていることを示しており、天然銅を火中で加熱すると軟化して更に加工できることは知識

として得られていた。しかし、銅の焼鈍温度は800℃程度であり、溶解させるには1084℃以上で強制通風が必要であったが、新石器時代では不可能であった。

隕鉄は通常10%のニッケルを有しており、石器時代の人たちにとってはナイフや斧等の道具に最も利用価値があった。西部グリーンランドのケープヨーク地方の新石器時代の人々は8%ニッケルを含む隕鉄からナイフをはじめ道具を製造していた。隕鉄を単に冷間で鍛造すると割れが生じるので、注意深く焼鈍し冷間鍛造する必要があった。一方、玄武岩の中で生成した鉄の小片は鍛造して薄片にすることが可能であったが、3%以上のニッケルを含むことは稀であった。そこで少量しかニッケルを含まない鉄が、銅や青銅時代の地層で発見された場合は、銅溶解の間に鉄分を有するフラックスやスラグが還元されて鉄が発生したと考えられ、この発見から鉄時代の幕が開けたのであった。

2 銅および青銅時代 (BC7000～BC2000年)

2.1 銅および青銅製造技術の伝播

銅や青銅の製造技術は、チグリス・ユーフラティス河の流域地帯から発生し、水中に投げ入れられた石によって発生した輪が周辺に伝わっていくように、ヨーロッパ、インド、ロシアや中国に伝わっていったと推定されている。例えばR.J フォーブスは「技術の歴史」の中で古代冶金技術の伝播ルートを描いているが、年代や詳しい道筋は明確にされていない²⁾。

一方、タイルコートの論文では、銅や青銅を生産した遺物が発見された場所とその推定年代を詳しく述べてある。それを基に地図に再構成したものが図2であり、チグリス・ユーフラティス河の周辺で発生した青銅技術の伝播ルートが記載されている。最初の青銅製造技術はどこで発生したのか？ 紀元前5000年以前ではトルコのカタル・ヒューイク (BC.7000～6500年) やソ連国境にあるイランのアナウ (BC.5500～4500年) で銅遺物が発見され、イラクのテッペ・ギアン (BC4000～3500年)、ウル (BC3500年)、シリアのアムク (BC3500年)、イランのタル・イ・イブリス (BC3800年)、テッペ・ヤーヤ (BC3800年)、さらにパレスティナのアブ・マタール (BC3500年)、イスラエルのティムナ (BC3200年) などで銅や青銅が発見された。これらの地域が青銅技術の発祥地であろう。これらの地域からさまざまなルートで青銅技術が伝播して行ったと考えられている。

まず、イタリアに青銅技術が伝わって行ったルートとして、アナトリア地域、ロード島からエゲ海を通してギリシアを経るルートと、黒海沿岸、ドナウ河からブルガリア、ユーゴスラビアを経るルートがあったと推定されている。前者のルートでは、トロイ戦争で有名なトロイ (BC3000年) では砒素を含んだ銅、レスボス島 (BC3000～2600年) では銅が発見され、ギリシア半島やクレタ島の青銅はBC2500年後と言われている。後者のルートではイランからコーカサス山脈を越えて青銅技術が伝わり、BC3000年頃と推定されるモルダビアのカルブーナやハンガリーのティザボルガールでは同地の鉱山から得られた銅製品が発見された。

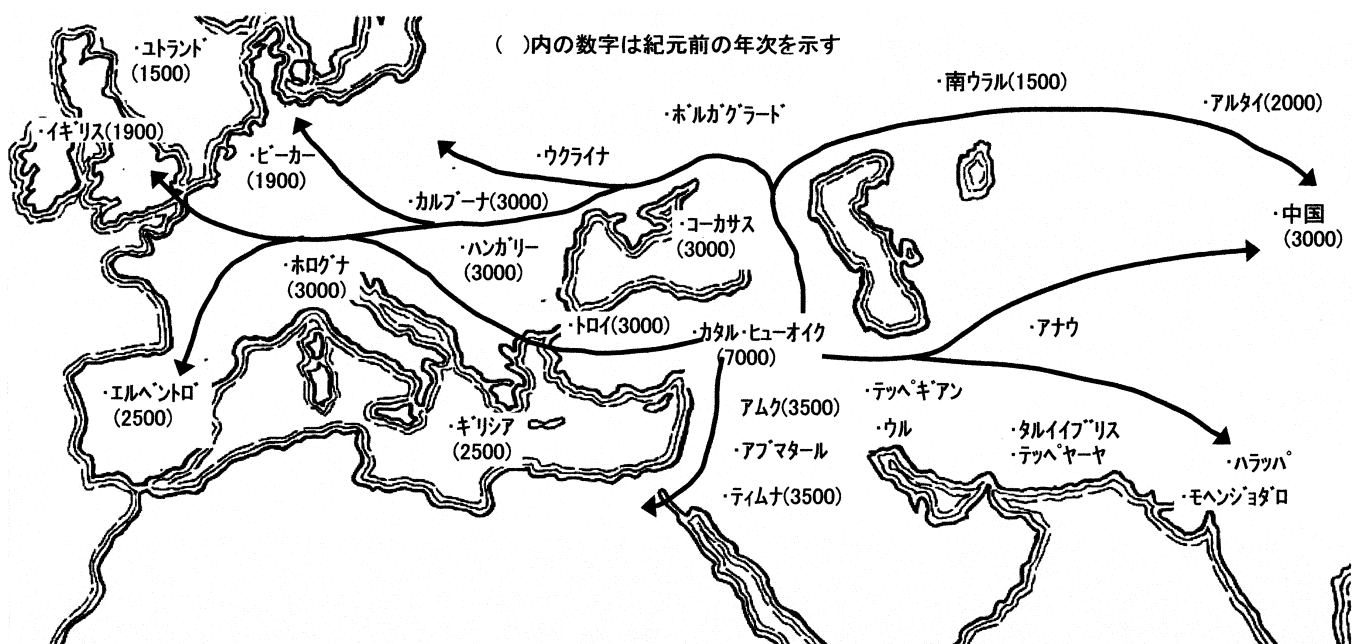


図2 銅製造技術の伝播

次はイタリアを経て、イベリア半島やオランダ、ユトランド半島から、最後にイギリス島に至るルートである。

BC3000～2500年頃には、イタリアのボログナでは砒素とアンチモンを含んだ銅を、イベリア半島では砒素含有銅をビラ・ノバ・デス・ペドロやエル・ペンドロで精錬していたようである。オランダのビーカー墳墓では、放射性同位元素¹⁴C測定で紀元前1940～625年と推定された銅加工品が発見され、ユトランド半島に技術が伝わった。イギリス島とアイルランドには、イベリア半島からとヨーロッパ大陸からの二つの伝播ルートによって紀元前1900年頃に青銅製造技術が伝わり、ヨーロッパを横切って北への技術伝播は非常に速かったと考えられている。

上記のように西方への伝播に対して、インド、ロシア、中国への伝播は下記のように推定されている。インドには、内陸のバルチスタンやアフガニスタンを經由してではなく、困難さの少ない南イランやペルシア湾を經由して、モヘンジョダロ、ハラッパに、砒素や錫を含んだ青銅を製造する技術が紀元前2500～2000頃に伝播した。さらに東方のガンジス盆地 (BC1500～300年) やタイランド (3000～2300年) でも銅が製造されていた。ロシア、中国への伝播には、中央アジアルートかもしくは北方ルートが推定されている。中央アジアルートはアナトリア、イラン地方から始まって、コーカサス山脈を横切るかアムダリアを過ぎカシュガルや天山を経て、中国では紀元前3000～2500年に銅を基本にした合金が出現した。北側ルートは北コーカサスからボルガグラード (BC2000～1800年) を經由したルートと考えられている。

2.2 坩堝法および溶融炉による青銅製造技術

2.2.1 銅石器時代

(1) 地面に掘った穴による青銅製造

銅鉱石を溶融する最初の炉として地面に掘った穴を考えるのは合理的であろう。このタイプの炉の代表例はイスラエル・ティムナで発見されており、穴の大きさは直径が50 cm程度で、鉄分が22～43%と多いファイヤライト系スラグが発見されている。製造された道具は、斧、錐、ハンマー、槍頭、ピン、装飾品等の多岐に渡っていた。

2.2.2 初期青銅時代

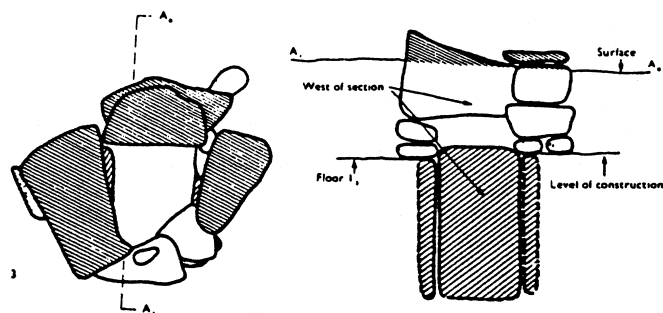
(1) 坩堝法による青銅製造

初期青銅時代に銅鉱石や錫鉱石を溶解し精錬するために坩堝炉が使用された。図3はティムナで発見された坩堝を入れる炉で、土中に4個の石板が四角に組まれており、この上にさらに石が組み上げられ炉が作られ、轆に繋がった羽口がセットされていた。炉中には麦藁を混合させた粘土から造られた坩堝に木炭と鉱石が一杯に詰め込まれ、羽口から空気が吹

き込まれた。鉱石は $(\text{Cu-Fe})_{12}(\text{As-Sb})_4\text{S}_{13}$ のような銅-砒素-アンチモン系であり、木炭による焙焼でカワ $(\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS})$ やカラミ $(\text{CaO} + \text{FeO} + \text{SiO}_2)$ が生成され、カワが焙焼酸化されて銅が製造された。

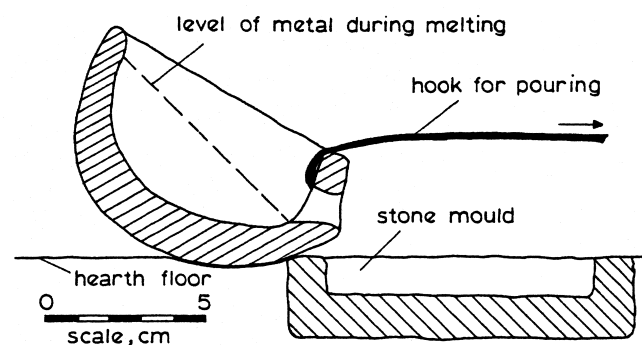
坩堝の形状は11種類に系統的に分類され、坩堝形態学が提唱されている。一つのグループは底が三角形や尖った坩堝や丸い坩堝で、炉中で小石などによって倒れないように保持する必要がある。他はその必要がない底が平らな坩堝や足台の付いた坩堝である。特に棒が差し込めるようにしたボート型坩堝やスプーン型坩堝は、人が鑄型に溶解した銅を汲み出せるようにしたものであろう。ギリシアのケオスで発見されたボート型で側壁に出湯孔が開いた坩堝は、小枝などに挟んで運ばれたあと図4のようにフックをかけて、孔から銅の溶湯を鑄型に注ぎ込んだ。この方式の出湯孔は近代の転炉の出鋼孔と同じである。

坩堝法で処理したスラグは鉄分が数%で極めて低く、木炭の中で還元性雰囲気十分に保たれたことが示されている。このことは、イスラエルで発見された鉄分18～6%を含む粗銅を不活性雰囲気の中で再溶解した結果、鉄分が3.4～0.07%まで減少し、非常に低い鉛成分は何ら変化しないことから判明している。



7 Square stone crucible furnace from Timna (after Rothenberg and Lupu¹³⁾)

図3 内部に坩堝を入れる石製の四角な炉



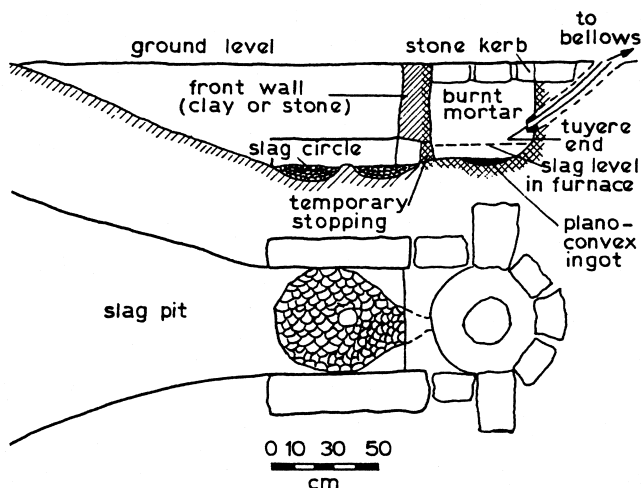
11 Method of using LBA crucible as found at Keos, Greece

図4 石坩堝からの銅の出湯

(2) 熔融炉による青銅製造

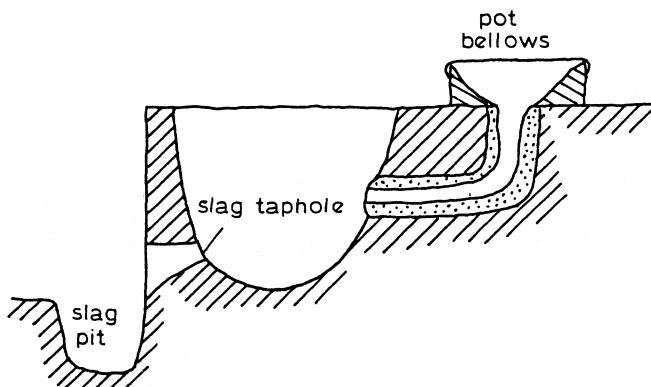
青銅の需要が増加し生産能力を拡大する要求に対応して、小さな地面に掘った穴や坩堝に代わって、新しい熔融炉が採用されるようになった。図5のように土地に大きな穴を掘って、その中に石を積み、高さ50 cm程度の炉を組み立て、炉には斜め上から空気を吹き込む羽口が置かれていた。炉の前方にはスラグを流し出す一層深いスラグピットが掘られており、炉とスラグピットの間にはスラグ排出孔があった。排出孔は炉中で鉱石を溶解している時は詰められていた。溶解が完了して排出孔が開けられ、半球状の炉底に青銅を残して、スラグがピットに排出された。図6のようにキプロスのアプリキで、このスラグ排出法はより積極的に熔融炉とスラグ排出炉の高さに差をつける方式にまで発展した。

上述の炉ではスラグは炉外に排出されるが、スラグの中に一部金属が流れ出ていくことも有り得たし、炉内に残った金



16 Copper smelting furnace from Timna, Israel (after Rothenberg and Lupu²)

図5 地面に穴を掘った銅熔融炉



18 Method of use of elbow-type tuyere found at Apliki, Cyprus

図6 肘型羽口を使用した銅熔融炉

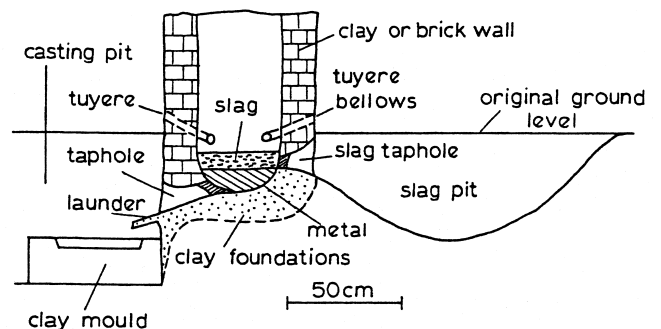
属(青銅)を取り出すには炉の壁を壊さねばならず、次に溶融作業には炉を再構築する必要が生じた。これに対処するために、比重差でスラグが金属の上に浮いていることに注目して、図7のように炉前方の低い位置には青銅の出湯孔を、炉後方のやや高い位置にはスラグの排出孔を設置した新しい型式の炉が築造された。この考え方はまさしく近代の高炉の排滓孔と出鉄孔の配置の考えに同じである。

坩堝法に比較して炉で溶融処理する銅製造では酸化性雰囲気になっている。よってスラグ中には坩堝法に比較して酸化した鉄分は40～60%まで非常に多めに含まれていた。スラグにはカワ($\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS}$)が含まれており、スラグを粉碎してカワを取り出し、再び熔融炉を活用して珪石を添加して焙焼酸化し98%純度の銅塊を得ることができた。

2.3 羽口技術

羽口は、既に青銅時代から存在していた。銅や青銅が坩堝内で製造されていた時代には、縦型炉内や地面に掘ったピット内に坩堝が置かれ、その坩堝上に積まれた丘状の木炭の中に、空気を吹き込む羽口がセットされていた。粘土製の羽口は、轆に接続する側の一端は内径20 mmで、炉内側の他端は内径5 mmで狭くなっておりテーパが付いていた。しかも表面には溝が刻まれており、羽口を煉瓦に取り付け易くする工夫が施されていた。図8のように炉の壁に水平に保持した羽口から、非常に強い空気を直接金属に吹きつけるために、斜め下方向に空気を吹き込む孔を有した羽口も採用されていた。

銅、青銅が炉の中で溶解・精錬された場合も、溶湯金属の斜め上から空気が吹き込まれた。図9によると炉の壁にセットされた羽口は銅もしくは鉄製の二重管で、内管の直径および外管と内管の間隔も約2 cmである。羽口の先端に付着した金属地金が発見され、中央に約2 cmの孔が開いていた。また、羽口の周りにはスラグが小山となって付着していた。



21 Type of smelting furnace capable of producing Minoan oxide ingots

図7 スラグと溶融銅の排出できる炉

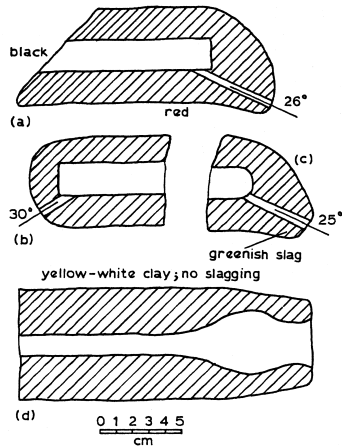
この地金とその周辺に付着するスラグの全体は、現在の純酸素転炉法の複合吹錬の炉底羽口に成長するマッシュルームと称されているものに酷似している。青銅時代のマッシュルームは、熔融したスラグ内には浸漬しているが溶湯内に入っていないので、空気が吹き込まれて冷却した羽口の先端で上吹きのスプラッシュが成長し、その周りにスラグが冷えて成長したものであろう。いずれにしても現代のガス・インジェクション冶金学の大きなテーマである羽口技術が、数千年以前の青銅時代から存在していたのは非常に興味深い。

2.4 鑄型技術

青銅時代から現代に通じる技術として鑄型があり、既に分割鑄型と中子が出現していた。当時の鑄型は、凍石、粘土、青銅、銅などの材質からできあがっていた。もっとも簡単な2分割の青銅製鑄型は図10のように斧用であり、各々の半鑄型には凹凸(ダボ)が付けられていて、一定の位置が決定され一体型化することが可能であった。この鑄型は、粘土の中子が鑄型の上部に嵌められており、孔の開いた斧の製造に使

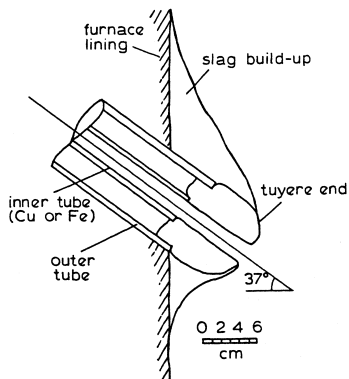
われたようである。図11に示すようにイラクのモスルで発掘された巧みに組み立てられた6個の部品から成り立っている鑄型は、鋳を製造するために使用され、紀元前600～700年頃と考えられている、この鑄型は精度が非常に高いので、ロスト・ワックス用の蠟の鑄造用に使用されたと考えられている。この鋳の鑄型では底部に先の尖った大きな釘のような中子が設置されていた。

中国においても分割鑄型が使用されていた。この技術は後にヨーロッパに伝播し使用されサミアン細工として知られている。乾燥粘土や芯(粘土)のあるワックスからできていたパターン即ち模型の上に、湿った粘土の塊を押し付けて、鑄型は造られた。乾燥させられた粘土製鑄型は、ホゾにより隣同士が連結されて組み立てられた。中子も採用されていた。鑄造物が設計された側壁厚みを有するように、チャプレット



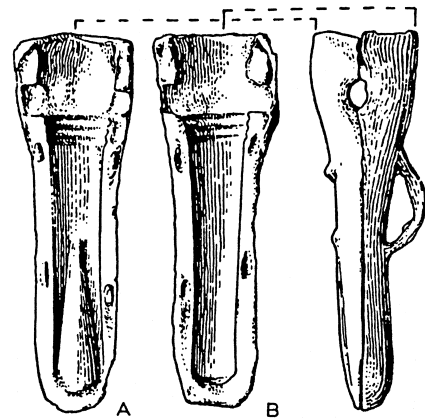
22 Types of tuyeres found at Tel Zeror, Israel

図8 様々な形の羽口



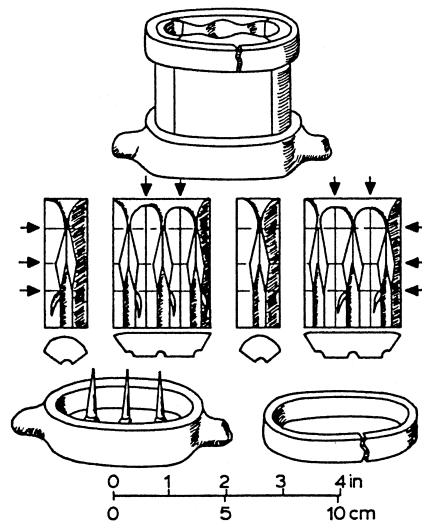
17 Type of inclined tuyere reconstructed from remains found at Timna, Israel (after Rothenberg and Lupu²)

図9 羽口とマッシュルーム



26 Examples of bronze moulds with trunnion cores

図10 斧用の分割鑄型



25 Bronze arrowhead mould from Mosul, Iraq (after Maryon²⁵; courtesy of The American Journal of Archaeology)

図11 中子付き鑄型

と称される金属製スパーサーが、鑄型と中子の間の空間に設定されていた。チャプレットは鑄造される金属よりは若干溶融点が高く、表面がわずかに溶解して強度を失うことなく鑄造金属と結合した。

3 鉄器時代の鉄製造技術 (BC2000～AD500年)

3.1 鉄製造技術の発生

FeO がフラックスの役目を果たして銅鉱石を精錬する際に炉の底部でスラグと共に還元された鉄が発見されたことから、鉄器時代は始まったといわれている。小アジアの人達が誰よりも先に鉄を利用できたという理由は、長い間彼らが銅溶融を実施してきたという、年代的に見て銅、青銅の製造技術が先進的な場所であった事実以外には、有り得ない。

鉄は最初に短剣として使用されたようである。その理由は錫青銅や鉛青銅の剣は延性がなく破損してしまっていたが、鉄の曲がった剣は真っ直ぐにすることができたからである。紀元前11世紀にルリスタンの鍛冶屋が青銅の柄が付いた鉄の剣を製造しており、イランのマリク・テベで発見された。紀元前8世紀頃までに鉄は大量生産が始まっており、コルスバードのサルゴン宮殿 (BC720～705年) では160トンの鉄が発見され、多くのものは先端が尖った断面が四角な棒で、アッシリア王国への貢物であったと推定されており、続く5世紀におよぶ期間にこの鉄棒が商業品として使用された。

3.2 鉄製造技術の伝播

小アジアでは紀元前2000年頃から鉄を使用した人達が地域を支配しており、当地域で鉄器時代が始まったと一般的には認められている。アナトリアのアラカ・ヒューイックイラン地方で、紀元前1500～1000年頃に鉄の大量生産を開始したようである。その後、以下に述べるように大きく分類して五つのルートで鉄製造技術が東西の世界に伝播して行った。

第一は、BC1000年頃にアナトリアからパレスティナの海岸にあるテル・ゼロールやゲラルルを経由してエジプトに到達し、その後、BC200年頃にスーダンに到達したルートである。ゲラルルではBC1350年頃のナイフや鍛冶屋の炉が発見され、エジプトでは、ナウクラティスにおいてシナイ半島から運ばれたと推定される鉄鉱石、スラグ、紡錘形をした貨幣用の鉄棒が発見された。テーベではBC667年のアッシリア占領時代の鋸、鑿、錐、やすり、鎌などの道具群が発見され、これらは浸炭や焼入れを受けた鍛造鉄であった。

第二のルートは、BC400～300年頃にエジプトから北アフリカの地中海沿岸に沿ってカルタゴに至り、さらに西進してナイジェリアのトーゴランド (ノック文明：BC400～200年) に伝播し、その後に南進して南アフリカに到着したルートである。ノック文明では大きな径で羽口から空気を吹き込んでいる炉があり、スラグは排出していなかった。スラグを破碎して得た鉄塊を叩きながら鉄片を製造し、清浄度の高い介在物の少ない鉄が製造されていた。

第三のルートは、アナトリアから発生した鉄製造技術がヨ

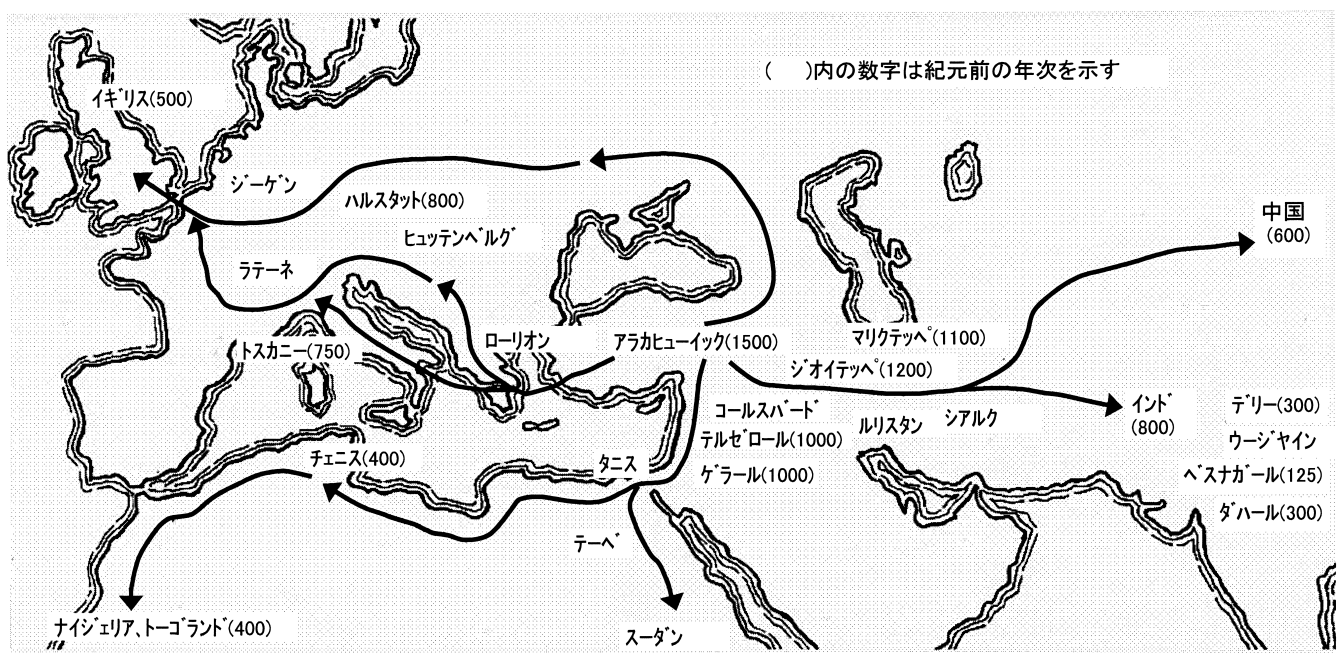


図12 鉄製造技術の伝播

ヨーロッパを横断しながらイギリスに到達したルートで、以下の二つの場合が考えられている。一つは、ギリシアに伝わり、オーストリア、イタリア、スイスを通り伝播するルートで、最後はBC500年頃にイギリスに達した。別のルートは、コーカサス山脈を通してドニユーブ河を経てBC800年頃までにオーストリアのホールスタットに伝わり、スイスのラ・テネを経てイギリスに至るルートである。これらの地域における炉形式は、鉢型炉、シャフト炉、ドーム状炉の三つの型式があり、ドーム炉はヨーロッパとイギリスだけで発見されている。ギリシアではBC500年頃（ヘレニズム時代）に轆から空気が吹き込まれる縦型炉が使用されていた。イタリアのエトルリアにはBC750年頃にトスカニー地方の鉱山に支えられてエトルリア文化が出現し武器を製造していたが、ニッケルを30%含有した槍が発見されており隕鉄を知らないうちに混ぜ入れたもの推定されている。

第四のルートはインドおよび中国に至るルートである。インドにはイランから鉄製造技術が伝播し、BC800年からイランのシアルクから伝わって鉄製造が始まり、ウージャインではBC500年の炉が発見されている。BC400年には小アジアとヨーロッパと同様な技術レベルに到達していた。有名なデリーとダハールの柱はBC300年頃と推定されており、コラナークの寺院と同じで構造的にはローマ時代の浴場の柱に似通っていた。ベスナガールではBC125年に鉄製楔が製造されていた。インドで発展した重要な技術として、坩堝による鋼の製造があげられる。鉄塊と不均質な鋼と木炭が坩堝の中に入れられ密閉化されて、強制通風している炉中で4時間程度過熱された。この方式で製造された鋼は1~1.6%の炭素を含みウーツ鋼として知られており西洋に輸出され、ダマスカス鋼と同一のものと考えられている。中国は他の地域とは異なった鉄の歴史が残っている。中国はBC600年に鉄器時代に入り、BC500年ころには鉄鍋が製造され、その後BC200年頃までに鉄製の鋳型が使用されており、記録ではBC91年に高炉から鉄が出湯開始した。漢時代における多くの技術的な特徴は、坩堝鋼の製造、ピストン式送風機からの轆への空気を吹き込み、白銑鑄鉄や可鍛鉄の製造、焼入れ技術の適用などであった。

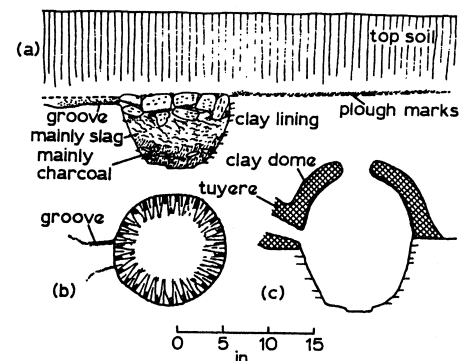
このように、銅、青銅製造技術は約5000年前後を経過して西はイギリス、東は中国まで伝播していったのに対して、鉄製造技術は約1500年で東西に伝播した。当然、これは銅、青銅技術が確立された後に鉄技術が伝播したためと考えられている。

3.3 鉄の溶融精錬炉

3.3.1 初期鉄器時代

鉄を製造するための最も簡単な炉の形式は鉢型炉である。

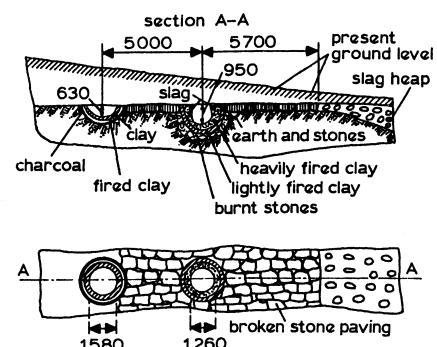
炉は地面や岩につくった穴に過ぎないが、上部をおそらく粘土で作成された屋根構造で覆っていた。屋根には短い羽口が設定されており、内部には木炭と鉱石が入れられ、轆から空気が吹き込まれた。図13のように、西ブランドンのダーハン州では深さは約200 mm、直径320 mm、屋根の高さは約200 mmの鉢型炉が発見された。炉内には粉碎された鉄鉱石と木炭と一緒に装入されるかもしくは層状にされて、最高温度は1150℃くらいの高温の木炭炎の中に入れられた。この方式ではスラグを流出させる穴は付けられていなかったもので、スラグは塊となって炉の底部を形作っていた。同じく図14のようにオーストリアのヒュッテンベルグでは地面に、直径1200~1600 mm、深さ約600~1000 mmの二つの穴が掘られて、木炭を燃料として用いてスラグは排出されていなかった。これらの地面に孔を穿った炉は、ローマ時代になるまでに徐々に、前述図5の銅溶融炉のスラグを排出する方式に取って替わっていった。ローマ時代まではヨーロッパに存在した炉にはスラグ流出技術は導入されていなかったことが



a section; b plan; c conjectural reconstruction

32 An example of an EIA bowl furnace from West Brandon, County Durham (from G. Jobey¹⁵)

図13 初期鉄器時代の鉢型炉



36 Early Iron Age bowl furnaces from Huttenberg, Austria; dimensions in mm (after Coghlan¹⁴)

図14 スラグ排出のない鉢型炉

大きな特徴であった。

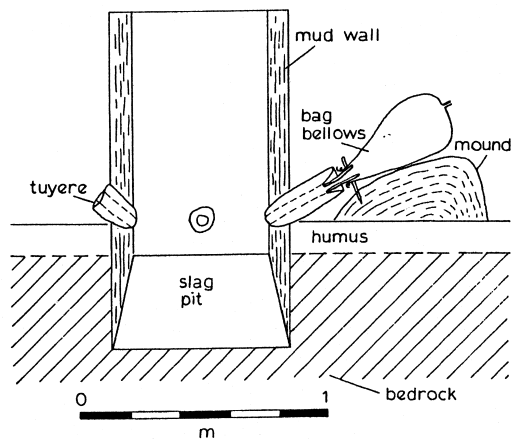
次に発達したのは縦型炉であり、BC500年のヘレニズム時代のギリシアで発掘されている。図15のように壺表面に描かれた炉の高さは、傍に立っている人と同じくらいであり、炉から出た鉄塊が鍛造されようとしている。炉の上部には鍋のような形をした中に水の入った蓋が置かれており、轆から炉の中に吹き込まれた空気と発生した高温の排気ガスが、冷却されるようになっており、外気とのシールの役目の果たしていた。同じような蓋はハンガリーのギアラルで発見された石を組んだ炉の上部にも置かれており、その蓋の先は煙道につながっていた。この蓋と煙道の構造は、現代の排気ガス回収・冷却装置であろう。同様なBC300年頃の縦型炉がナイジェリアで発見されており、図16のように粘土製で高さ約1000 mm、轆から空気が吹き込まれ、羽口が炉の下部に設置されていたが、スラグは排出できなかった。

これらの中間的な炉がドーム状の炉である。この炉は地面



34 A shaft furnace from Greece (6th BC) depicted on a vase showing a smith forging a bloom in front with the bellow behind(after Blummer)

図15 ギリシアの蓋の付いた縦型炉



38 Low shaft furnace from near Jos, Nigeria; African EIA — 300BC

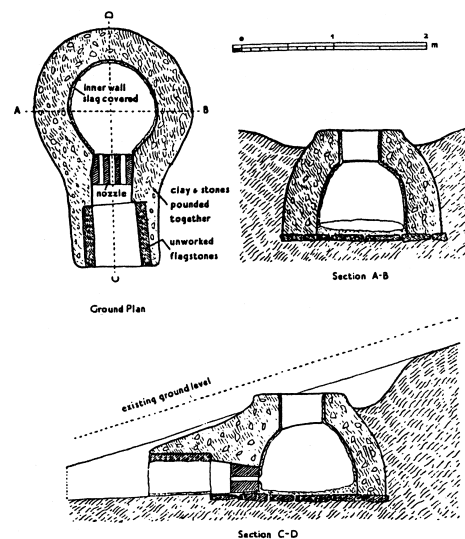
図16 初期鉄器時代の背丈の低い縦型炉

の上に直接ドームを構築し、中の空間が炉になっており、木炭や鉱石を上部から入れ、羽口はドームの裾に設置されていた。図17のように、ドイツのエングスバッハタルで発掘され、ドームの直径と高さは約1000 mmで、スラグは排出できなかった。同じ形式の炉が、イギリスは北ヨークシャーのレービスハームでも発見されている。スラグの排出有無は、鉄の製造効率や品質に大きく影響するが、上記のように初期鉄器時代の三つの形式の炉は、スラグを排出しないという点では一致していた。

初期鉄器時代の鉄を製造した際のスラグ成分に関しては、BC7世紀のトルコ・シルチでは、スラグは $(\text{FeO}) = 56\%$ 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 14\%$ と酸化鉄分は非常に多く、酸化鉄分 $(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 68\%$ の鉄鉱石が使用されたことを反映している。また $(\text{SiO}_2) = 9\%$ 、 $(\text{CaO}) = 5\%$ で、塩基度 $(\text{CaO}) / (\text{SiO}_2) = 0.5$ 程度である。このスラグは自然通風した炉からのスラグと考えられている。同じく紀元後25年のイギリスでは、 $(\text{FeO}) = 53\%$ 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 23\%$ 、 $(\text{SiO}_2) = 16\%$ 、 $(\text{CaO}) = 3\%$ で、塩基度 $(\text{CaO}) / (\text{SiO}_2) = 0.2$ 程度でスラグ組成は大きく変化していなかった。

3.3.2 ローマ鉄器時代

ローマ鉄器時代では、初期鉄器時代から継続してきた簡単な鉢型炉は、図18のように炉の直径が2ft (600 mm) と大型化する傾向があり、地面に穴を掘ってスラグを排出するピットを有するようになっていた。当時代は、縦型炉が主流で高さは高くなってきた。図19のように西ヨーロッパで適用された炉は、直径は約1ft (300 mm) であったが、高さは約11ft (3,300 mm) であった。羽口を有しており轆から空気を吹き



37 Domed furnace from Engsbachtal, Germany (after Coghlan¹¹⁴)

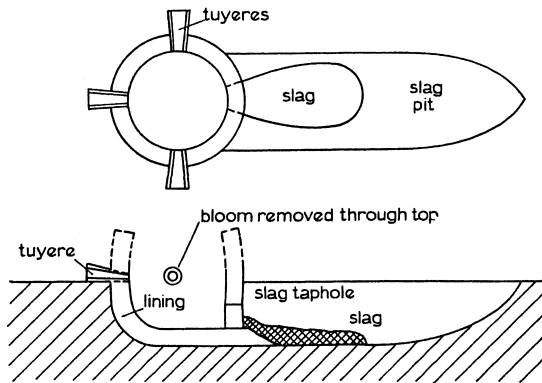
図17 ドイツのドーム型炉

込んでいたと考えられる。炉の下部からはスラグを排出することが可能で、しかも現代の高炉のように排出するスラグを炉の近傍に開けたスラグピットに導くランナーが設置されていた。他の特徴的な煙突炉が、紀元後1世紀にローマ・サクソニーに存在しており、紀元後4～5世紀に東イギリスに拡大した。この煙突炉は、図20のように高さ約1300 mmで羽口を4本有し、反応が起きている炉の直下にスラグピットを有しており、ピットと炉の間は麦藁の栓がしてあった。溶解のある時点で炉の外部温度を見ながらスラグを流出させることも可能であった。

スラグ排出は青銅時代に発明されていたので、初期鉄器時代とローマ鉄器時代の大きな違いは大型化にあった。一般的にローマ時代は、ギリシア時代に対して実用性や組織化を進

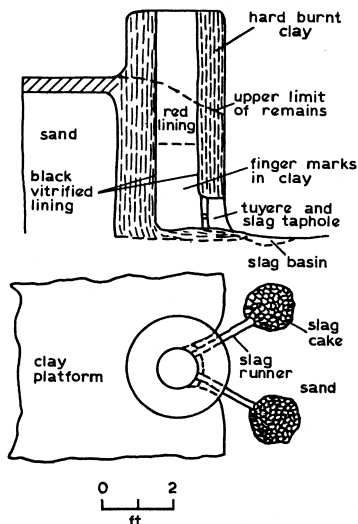
めたといわれているが、鉄製造技術に関しても同様であり、多くの遺跡は初期鉄器時代からローマ鉄器時代に鉄塊製造炉の大型化が進んだことを示している。

炉容では、紀元後2世紀のオーストリア・ブルゲンランドの縦型炉は直径が1 mあり、イギリスのジェラシックスクラップの炉は1.4 mもあった。ディオクレティアヌス皇帝(AD245～313年)の時代には皇帝軍の武器すべては、32工場による自前の製作であった。フランスでは高さが15～20 mに達する300,000 トンのスラグが発見されており、約75,000 トンの鉄、約3～4 kgの鉄塊を約15～20 百万個製造する際に発生したと推定されている。スラグ成分に関してはローマ鉄器時代は初期鉄器時代と大きな変化はなかった。イギリスのアッシュ・ヴィッケンで発見されたスラグは、 $(\text{FeO}) = 62\%$ 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 8\%$ で、 $(\text{SiO}_2) = 21\%$ 、 $(\text{CaO}) = 0.4\%$ で、酸化鉄が多く塩基度が非常に低く、石灰添加は実行されていなかった。一方、労働を分割することは進み、木炭と一緒に炉に入れる前に鉱石は焙焼され、5～10 kgの鉄塊は第2の炉で鍛造を受けて小型にされた。鉄の品質に関しては、ローマの釘の炭素含有量は、長い釘が短い釘よりも含有量が多いという特徴を持っている。これは意図的になされたもので、増加する打ち込み力に耐えうるだけの強度を長い釘に与えたのである。



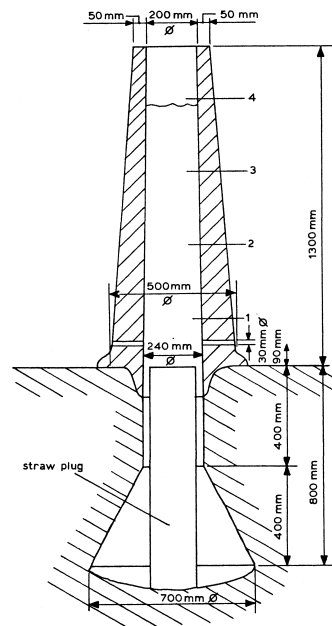
41 Developed bowl furnace of the Roman period which was used well into the medieval period without change, scale same as Fig.40

図18 ローマ時代の鉢型炉



40 Plain shaft furnace of type found in Eastern Europe

図19 スラグ排出可能な縦型炉



42 Pit-type shaft furnace from Northern Europe and Jutland (reconstruction by R. Thomsen)

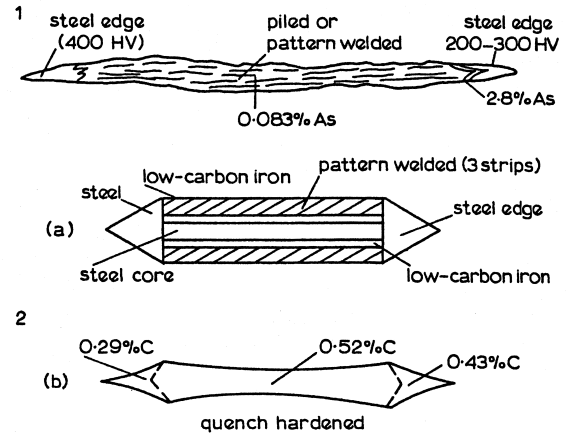
図20 炉の下にピットのある縦型炉

紀が鍛造された鉄製武器の開始といわれており、鉄を使って鋏、鎌、鑿を製造した紀元前5～3世紀の鉄製鋳型が87個発見されている。記録ではBC91年に高炉から鉄が出湯開始し、青銅と同様な規模で鋳造鉄が製造され、重さ1.4kgの鉄鍋が製造された。漢時代（紀元前200年）の炉は炉頂の直径が1.4 m、レンガで造られており、粘土の羽口があり、炉内には赤鉄鉱、磁鉄鉱が混合した砂鉄と木炭が装入されていた。

漢時代の鉄の製造には多くの技術的な特徴があった。考古学的な証拠は少ないがインドのように坩堝鋼の製造の伝統があった。水車駆動のピストン式送風機による空気の吹き込みは、他の国々のような袋や壺や手風琴よりも効果的であった。戦国時代と漢時代（紀元前475～紀元後24年）の鋳型は白鉄鋳鉄からできていた。白鉄鋳鉄は4%以上の炭素を含み、燐の含有量の少ない鉄鉱石と木炭を使って製造されていた。鍛造ができる炭素の低い鉄を900℃～1000℃で加熱して造った可鍛性のある鉄で、鋏、鋤、釘が製造された。鋼製の剣はマルテンサイト組織を持っていた。このように中国では紀元前24年に鍛造鉄、鋼、焼入れ硬化させた鋼が製造されていたわけであり、極めて高度な鉄器製造技術を有していたと考えられている。

3.4 焼入れ、焼き戻しと剣

焼き入れと焼き戻しは、特に鉄の特性を発揮できる技術であり、現代の鉄鋼材料では最も重要な技術である。初期鉄器時代の早い時期に焼入れ硬化と焼き戻しを計画的に使用した証拠はなく、鉄と鋼に600～700℃において冷間鍛造と焼鈍を交互に実施して、焼入れと焼き戻しと同じ効果を得ていた。BC1100年のフィリスティン剣の刃は炭素含有量が0～0.8%まで変動し非常に低い温度800℃以下で加工を受け850℃で焼鈍されていた。AD700年のルリスタンの剣は、1000℃から大気に冷却され850～700℃で焼鈍され、炭素は平均0.1%、最大0.6%で、炭素が拡散しないように700～800℃でパイの皮のように50層が重ねられ鍛造を受け、硬度は108～153HVで青銅よりは軟らかかった。焼入れ技術はBC900年頃にエジプトで最初に行われたと言われており、例として斧があげられる。斧の炭素は中心部のゼロから刃先端部の0.9%に変化し、900～800℃の温度から急冷却されて硬いマルテンサイトの刃先端部が得られている。水中に入れられて焼入れ処理を受けた斧は、中心部から熱が流れて行って焼鈍処理を受け、端部そのものの444HBから端部から離れた部分の70HBまでの硬度分布となっていた。ロー



46 Section of pattern welded Swords of the Roman period

図21 ローマ時代の模様鍛接法で製造した刀剣

マ時代ではポーランドのクラコワで発見された貯蔵庫には、433HV～724HVまで焼き入れ硬化した斧や剣が発見されている。しかし、ヨーロッパのホールstattやラ・テヌから発掘された遺物から、焼入れは大量に行われていなかったと推定されている。

3.5 模様接合法

ローマ時代に、薄板と線や棒と一緒にして接合する模様接合法という技術が使用され、複雑であるが簡単に判別される模様を武器に取り付け、これは品質保証印として評価されていた。模様接合法は、AD300年の初頭にライン地方やホルシュタイン地方に出現し、本方式で製造された剣はポーランドからイギリスまで広範囲に知られている。図21に示されているように、製造された剣は、炭素分の高い鉄と低い鉄が時々折り返されながら鍛造され、接合部にあるスラグや酸化物や成分が模様を引き起こした。剣が強靱であったかどうかは明らかでないが、炭素0.43%の剣の端部は700HVであり、研磨された組織それ自体は素晴らしいものであった。

参考文献

- 1) R.F.Tylecote: A History of Metallurgy (Second Edition), The Institute of Materials, (1992)
- 2) R. J. フォーブス: 技術の歴史, 岩波書店, (1956), 6.

(2003年12月19日受付)