



鉄の歴史 ⑧

たたら製鉄法の技術史的・冶金学的考察

館 充 東京大学名誉教授
Mitsuru Tate

Some Historical and Metallurgical Considerations on Iron and Steel Making Technology in Premodern Japan

1 本稿の目的

本稿はたたら製鉄法、すなわちわが国古来の製鉄法に関するこれまでの諸研究に基づいて、その起源と近世にいたるまでの発展の技術史的・冶金学的考察を試み、いくつかの問題について私見を提示して読者諸賢の批判を仰ごうとするものである。考察は穴澤による次のような総括^①に沿って進めることとする。

①日本における製鉄は古墳時代後期に、岡山、北九州を中心として始まった。原料は当初は鉱石、炉の形式は箱形であった。

②奈良—平安時代、すなわち律令制の中央集権国家の時代には、国の指導のもとに、全国的に製鉄が行われるようになった。原料としては主に砂鉄が用いられ、箱形炉とならんで豎形炉も出現した。奈良時代末以降には（銑）鉄の鑄造が行われるようになった。

③中世に入ると製鉄は中国地方を中心として行われるようになり、この動きは近世にはますます強まった。

したがってわが国の製鉄は砂鉄だけを原料として行われたのではないが、ここではその広がりや継続性に注目して、砂鉄を原料とする製鉄だけを取り上げることとする。

さらに朝鮮—韓国を介する間接的なものであるにせよ、あるいは直接的なものであるにせよ、わが国製鉄技術の源流と考えられる中国の製鉄技術の発展^②との関連に注目する。また同時に西欧製鉄技術との対比を念頭に置くこととする。

2 日本における製鉄の起源

わが国における鉄器の使用と（鉄素材の加工によるその）製造は弥生時代に遡ることが知られている。またこの時代の後期における鉄器の使用と製造の普及、さらには鉄素材としての鉄錠の供給元とされる朝鮮—韓国における製鉄の発展状況からみて、鉄素材の製造すなわち製鉄もこの時代に始まったのではないかとする見解^③もあるが、遺跡・遺物などの考

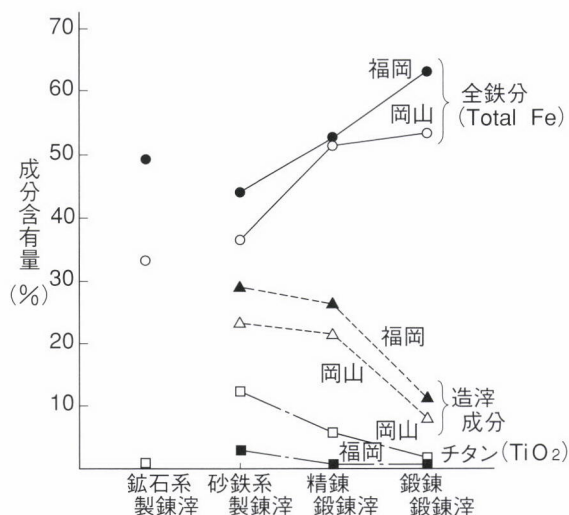


図1 製鉄滓、精錬滓及び鍛錬滓の組成の差異^④

古学的調査の裏付けをもって遡り得る製鉄開始時期は古墳時代、確実には6世紀というのが定説のようである⁴⁻⁶⁾。とくに大澤は被葬者への供献物として古墳に埋納され、副葬品によって年代を判定できる鉄滓（供献鉄滓）の調査によってこの問題を検討した。すなわち福岡・岡山など西日本各県を主とする5～8世紀の出土試料約150を、その組成の特徴によって製鉄滓、精錬滓、鍛錬滓に分類することによって、6世紀中頃を境としてそれ以前の鉄滓はすべて鍛錬滓であるのに対して、それ以後のものは過半数が製鉄滓であるという結果を得たのであった^⑥（図1）。またそのさい製鉄滓のTiO₂およびVの含有量から、岡山県の3試料を除いて、すべてが低TiO₂含有量の砂鉄を原料とするものと推定された。なお6～7世紀の製鉄遺構と推定されている岡山県（大蔵池南）、広島県（金クロ谷）などの遺跡の調査によって、この時期の製鉄炉が箱形炉と総称される水平断面が長方形または楕円形の低炉であったことが知られている。

3 古代の製鉄法

穴澤の総括^②は生まれたばかりのわが国の製鉄技術が坦々



図2 小鉄塊（流山市富士見台Ⅱ遺跡出土）（図は同一磁着度の鉄塊群を示す）（流山市教育委員会提供）

たる発展の道を歩んだことを意味するものではなかった。以下に述べるようにそれはむしろ苦難の道であった。

3.1 「小鉄塊」法

わが国の古代の製鉄人は奈良時代にいたるまで、炉床残留滓を破碎してそのなかに分散していた小鉄塊（径～0.007m、重さ～0.005kg）を取り出し、それを精錬・鍛接して鉄材または鉄器をつくっていたという事実が知られており^{7,8)}（図2）、これを実験的に確認するため、小鉄塊の製造・分離・鍛接・加工の全体系を再現する試みも行われている⁹⁾。またこれに関連する現象として、スラグの流動性を良好に保つことができない場合には、生成した鉄塊（または鉄粒）がスラグ中に分散した状態になることが、実験たたらでの作業でしばしば認められている。排滓できることが鋳塊の生成の条件であるというたたら関係者の指摘もある。さらに古代ヨーロッパ（ローマ時代以前）でも、自然通風炉、強制通風炉を問わず、slag tapping不能の場合がしばしばあり、そうした場合には生成鉄が分散状態となるので、その鍛接のさい酸化防止の対策が講ぜられたとされている¹⁰⁾。すなわち「小鉄塊」法はスラグの分離不能のため余儀なく行われたプロセスであったとみられる。

3.2 砂鉄製錬滓の性状と「小鉄塊」法

スラグの分離不能（＝流動性不良）の原因は何であったろうか。それは偏に砂鉄製錬滓の特異性によるものであったのだろうか。

大澤は上述の供献鉄滓の研究⁶⁾で低TiO₂砂鉄製錬滓はファヤライトと酸化鉄（ウスタイトまたはマグネタイト）を主成分とすると述べているが、同じ趣旨の報告は早くからなされ

ている。すなわちTiO₂含有量が1%程度の砂鉄製錬滓はウスタイト・ファヤライトが主成分で、融点は1170～1200℃という報告¹¹⁾や、TiO₂ 5%程度のスラグのX線回折でTiO₂化合物は認められず、FeOはすべてファヤライトとして存在したという報告¹²⁾がそれである。スラグのこのような鉱物組成はヨーロッパの可鍛鉄製造炉とも共通なものであった。すなわちTylecote¹³⁾はブルーム炉（Bloomery）のスラグについて、その組成は一般にファヤライトを主成分とするもので、融点は1200℃程度であったと述べている。またOelsenとSchürmann¹⁴⁾はドイツのレン炉（Rennfeuer）のスラグの調査結果に基づいて、組成は高Fe含有量の鉄シリケート（ファヤライトより高FeO側の組成）を基本とするものであり、融点は1100～1200℃と述べている。

しかし高TiO₂砂鉄を使用してスラグのTiO₂含有量が10%程度ないしそれ以上になると、酸化鉄に比べてスラグ化されたチタン鉱物が多くなるという報告¹¹⁾や、ファヤライトとウルボスピネル（Ulvospinel 2FeO・TiO₂、融点1395℃）を認めたという報告¹⁵⁾があり、さらに20%をこえるTiO₂を含有するスラグ試料についてイルメナイト（Ilmenite FeO・TiO₂、融点1415℃）とシュードブルーカイト（Pseudobrookite FeO・2TiO₂、融点1494℃）が観察されている¹⁶⁾。これらのTiO₂鉱物の出現するTiO₂含有量の閾値は必ずしも一定ではないが、TiO₂含有量の上昇につれてFeO/TiO₂比の小さい鉱物が現れるようになる傾向は普遍的なものである。いずれにしてもこれらチタン鉱物の融点はファヤライト（融点1205℃）に比して格段に高いので、これらを含むスラグの処理にはより高い温度を必要とすると考えられている。

こうして低TiO₂砂鉄製錬の段階でスラグの流動性不良＝分離不良を招いた原因はスラグの性状の特異性ではなく、単な

る炉温不足それも1200℃程度の炉床温度を実現しえなかったという技術の未熟にあったと考えられる。製鉄遺跡の出土品にしばしば鉄塊系遺物や鉄滓とならんで、「小鉄塊」とは両立しないはずの流出滓がみられることは、炉内でのプロセスの不均一な進行が炉温不足と重なっていた可能性を示唆している。一方高TiO₂砂鉄製錬の場合は高融点のTiO₂化合物を含むスラグの特異性に由来するより高い炉温の要求を満たすことが容易でなかったという事情にあったと考えられる。

3.3 古代製鉄技術の改良

奈良時代まで「小鉄塊」法の実施を余儀なくされていた古代製鉄技術が、同じ奈良時代の末に鑄鉄鑄物の生産、そしておそらく銑鉄の製造を行い得るにいたるまでになされた改良はどんなものであったろうか。

(1) 低TiO₂砂鉄製錬の場合

砂鉄精錬に複数羽口を備えた箱形低炉が選ばれたのは、それが所与の鑄能力のもとで粉状原料である砂鉄の処理に適合すると考えられたためであろうが、それは同時に水平断面方向のプロセスの不均一な進行の克服を、炉温の上昇とならぶ課題としていたと思われる。これらの課題の解決策の一つは、この型の炉のその後の発展の歴史が示しているように、排水・防湿のための地下構造の構築による炉底からの放熱の減少であったことは明らかであるが⁵⁾ (図3)、これとともに増風と送風の分配の調節 (例えば片側送風から両側送風への移行⁵⁾) などの処置が多面的になされたと推察される。いずれ

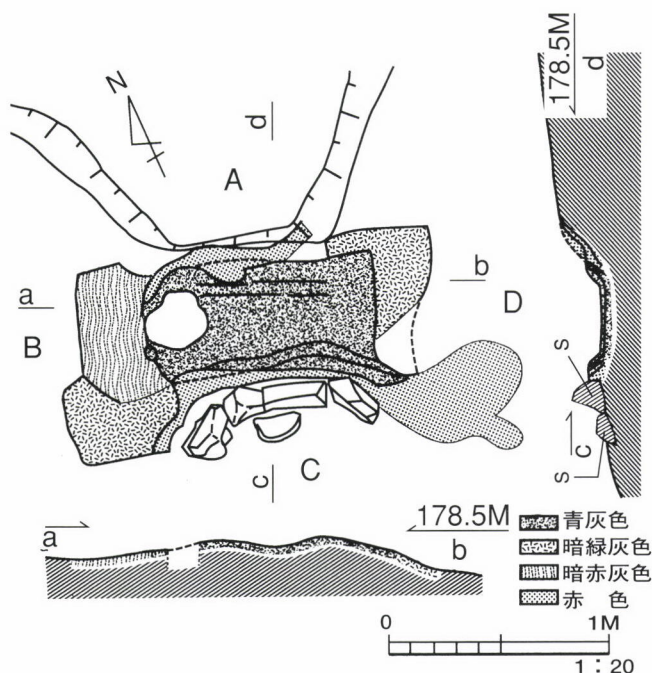


図3 大蔵池南遺跡4号炉 (6世紀末～7世紀始) 址の平・断面図 (単純な炉底構造をもつ初期の箱形炉の1例) (『糠山遺跡群久米開発事業に伴う調査委員会報告書』)

にしてもこの場合の炉床温度の目標は1200℃の程度であり、したがってそれが達成された段階でも生産されたのは主として固体の鉄塊 (低炭素鉄) で、その大きさは後続の精錬・鍛錬工程の処理能力に見合うものであったと思われる。他方1200℃はFe-C系状態図の共晶点温度をこえる温度であることから、少なくとも部分的には銑鉄が生成された可能性があり、さらに原料砂鉄種によってはその生成量が相対的に多い場合もあったと思われる。ただし鑄鉄そのものの製造についていえば、低炭素鉄の再溶解という別法もありえたことを考慮する必要があるだろう。

(2) 高TiO₂砂鉄製錬の場合

TiO₂含有量19.08%の柄実 (スラグ) で銑押しを行った明治期の佃谷 (島根県) の例¹⁷⁾ に鑑みれば、TiO₂ 20%程度のスラグを熔融状態に保つのに1400℃をこえる炉床温度が必要とは考えにくい、低TiO₂砂鉄製錬の場合に比べて相対的に高い炉温が必要であり、関東地方などに踏鞴によって送風を行う竪形炉が導入されたのはこの要求を満たすためであったと考えられている。群馬県の菅の沢遺跡はその例で水平断面がほぼ円形 (径約0.6m) で羽口1本をもつ半地下式竪形炉3基を備えて銑鉄がつくられたとされている¹⁸⁾ (図4)。しかし竪炉による粉状の砂鉄の製錬には通気・荷下がりに係わる本質的な

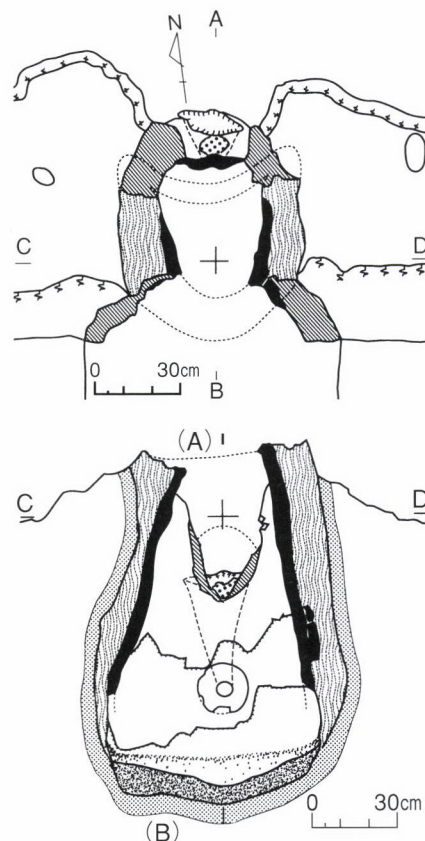


図4 菅ノ沢遺跡1号炉 (10世紀前半) の図¹⁸⁾ ((A) は平面図、(B) 鉛直断面図、点線は傾斜羽口を示す)

困難が避けられなかったのではないかとと思われる。古代竪炉を模擬した房総風土記の丘の竪形炉での実験は羽口の大径化、大傾斜化によって操業を大きく改善できることを示したが、同時に TiO_2 12.06%を含有する砂鉄を使用し、 TiO_2 11%のスラグを流出させる一方、排出不能の残留滓を生成してスラグ組成の不均一性を示している^{19, 20)}。竪炉で生成したとみられる鉄塊が鼠鉄や白鉄の組織を示す場合もあれば、低炭素鉄の組織を示す場合もあって多様であること²¹⁾も炉内でのプロセスの不均一な進行を示唆している。

なお箱形、竪形いずれの炉でも鉄鉄がつくれ、それが鋳鉄として利用されるにいたったことは、古代日本の製鉄技術が大局的には中国のその影響下にあったことを示すものであろう。

4 中・近世の製鉄技術

穴澤による総括③は直接には中国地方の鉄が全国的に流通して、各地方の小規模製鉄を圧倒するにいたったことを示すものであるが、同時に竪形炉による高 TiO_2 砂鉄製錬が衰退の道をたどり、箱形の「たたら」法が主流となったことを意味する。ただし関東地方とならんで竪形炉製錬法が盛んであった東北地方では、北上山地などに中国地方の箱形炉製錬技術が導入され、近世まで独自の製鉄圏が存続した。

4.1 竪形炉製錬法衰退の原因と鉄鉄精錬法の開発

竪形炉による高 TiO_2 砂鉄製錬法の衰退の理由の一つはこのプロセスそのものの上述の困難のため安定な操業が難しかったことにあったであろうが、それに加えてこのプロセスの経済性に係わる問題があったと考えられる。すなわち高 TiO_2 砂鉄製錬に必要な高温を実現すれば、主製品は汎用の鉄（低炭素可鍛鉄）ではない鉄鉄となって、その精錬工程が不可欠となり、造滓材を加え TiO_2 を希釈するなどの方法で低温操業を行えば、製品を低炭素可鍛鉄とすることは可能であるが、鉄歩留の低下と木炭消費量の増加が避けられないということであった。こうしていずれにしても低 TiO_2 砂鉄という有利な原料を用いる中国地方の箱形炉製錬法に経済的に太刀打ちできなかったのではなかろうか。それはまた能率的な鉄鉄精錬法の開発がこのプロセスの存立の前提となっていたことを意味するものであろう。

鉄鋼主産地である中国地方で鉄鉄精錬の課題意識が成熟した時期は不明であるが、「中世には鋳物師が恒常的かつ広範囲の遍歴を行いながら、『鍋・釜』などの鋳鉄製品だけでなく、『鋤・鍬』などの錬鉄製品、さらには『打鉄・熟鉄』などの鍛冶材料の売買にも携わった」²²⁾とされていることから、鉄鉄精錬がおこなわれた可能性が推察される。

4.2 近世たたら製鉄法の前駆形態としての「野だたら」製鉄法

本床とよばれる大規模な地下構造を備え、高殿とよばれる上屋のなかに構築される永代たたらは、箱形炉製錬法の長い歴史と1600年代に行われた鉄穴流し（慶長15—1610年）や天秤鞆（元禄4—1691年）などの技術革新を背景として、安永年間（1772—1780年）に定形化をみたとされており²³⁾、その前駆形態が「野だたら」とよばれるプロセスであった。それはとりまなおさず中世の箱形砂鉄製錬炉であった。

「野だたら」について鉄山必要記事は次のように述べている²⁴⁾。「鐵山ノハシマリハ、フミフキト申テ今ノ鑄物師ノ高殿ヲ用ヒテ鐵涌セシナリ、フムフキ多多良ト云ヒシハ、重ネ言葉ナルベシ。刃鐵ヲ第一ニ吹シナリ、鉄ハ僅ニ涌程涌セテ、始終皆刃鐵計ヲ押タルヨシ」。また土井²⁵⁾は野だたらの実態を述べた次のような文書を引用している。「当時鍛冶屋ニ用ひ候ふいご様のものにて、一夜に付鉄四五駄、式拾駄も吹き候事、（中略）、察するに所々壺々年程づつも吹き場所替いたし候もの」。さらに土井は箱形の野だたらのなかには「内法縦0.7m、横1.7m、高さ0.9m」という規模に達したのものあることを示し、操業について次のように述べている。「使用された炉、ふいご、砂鉄等を考慮すれば、温度が十分上がらないので、銅ないし鋳を生産するのにむいていたといえるが、山陽で赤目系、山陰で川砂鉄などが用いられた関係から、かなりの溶鉄もつくられ、生成量からすれば鋳、鉄あい半ばした」。すなわち原料砂鉄の選択によって鉄鉄もつくられるようになってはいたが、鞆の能力が不十分であったため炉温が十分には上がらず、依然として低炭素鉄をも生成する状態にあったと見ることができる。

4.3 近世企業たたらの出現

高橋は奥出雲地方のたたら師達の家々に伝わる文書の研究に基づいて次のことを明らかにした²⁶⁾。

①「近世企業たたら」、すなわち鞆の技術革新を背景として18世紀始めに奥出雲に現れた大規模永代たたら経営では、この地方が鉄鉄の製造には不向きとされる真砂砂鉄の産出地帯であるにもかかわらず、専ら鉄押しを行い、製出鉄鉄を系列下の大鍛冶業者のもとで精錬して、割鉄（＝包丁鉄すなわち錬鉄、低炭素可鍛鉄）として出荷する一貫体制をとっていた。

②鉄押しのさい副産する鋳は、当初これを破碎する手段がなかったため放棄されたが、1760年代以降はこれを碎いて銅（約1/3）を選別し、残りの歩鋳（約2/3）すなわち粗鋼は鉄鉄とともに精錬して割鉄とした。したがって近世企業たたらの収入源は8割が割鉄、2割が銅という構成になっていた。

「近世企業たたら」の出現は間接製鉄法体系の確立という

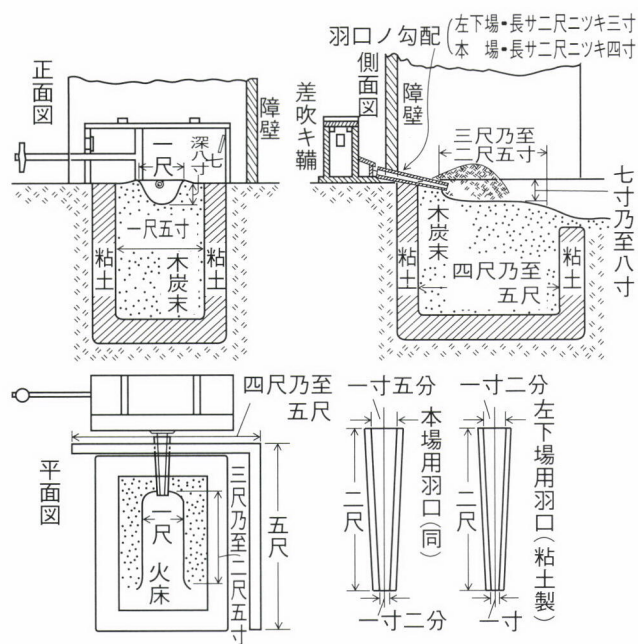


図5 大鍛冶炉の図
(山田賀一：鉄と鋼，4（1918），p. 348）

歴史的課題が企業レベルで達成されたことを意味するが、併せて次のことを示している。

第一は天秤竈という送風技術の革新によって溶銑主産の操業すなわち銑押しが可能となったということである。それは炉床温度の上昇を意味するが、そのことはまた副産される粗鋼の炭素含有量の上昇をももたらし、それをかつての低炭素鉄から鋳に変え、それによって鋳押し法の開発を可能にしたと考えられる。

第二は専ら行われる銑押しの製品である銑鉄の精錬工程が整ったということである。ただしこの工程である大鍛冶法は左下場・本場のいずれも、浅い炉床での横吹であって、銑鉄の精錬法として開発されたというよりは、1段階法として行われてきた組成不均一の鉄塊の精錬・鍛錬法の改良—銑鉄の予備精錬段階の追加による2段階化—によって成立したものという印象が強い²⁷⁾ (図5)。

5 鋳押し法と日本式間接製鉄法の評価

5.1 鋳押し法

高橋は少なくとも奥出雲では鋳押し法が行われるのは1850年代（安政3年以降）と述べており²⁸⁾、その独特の操業法としての形成の時期は遠く遡るものではないようであるが、高品質の鋼を生成する直接製鋼法として国際的に知られている。

ヨーロッパの直接製鋼法は方法としては直接製鉄法（低炭素可鍛鉄製造法）と同じもので、高炭素鉄としての鋼はその生成に都合のよい条件のもとで、偶然の所産として得られるとされていた²⁹⁾。その条件の一つは鉾石で、鋼をつくるのに

有利な鉾石として有名だったのがジーゲルランド地方の高Mnの菱鉄鉾および褐鉄鉾であった。この鉾石が直接製鋼法に有利な理由については定説はないが、Körberら³¹⁾、Heynert³²⁾ による注目すべき研究がある。彼らはFeO-MnO固溶体の900℃における還元と生成還元鉄への浸炭の実験を行い、MnO濃度の上昇とともに平衡CO₂分圧が低下し、これに対応して鉄中炭素濃度が上昇することを認めたのである³²⁾。この結果を直ちに実系（FeO-MnO-SiO₂を主成分とする融体）に適用することはできないが、もしその場合にもMnOの共存によって、CO₂分圧が下がれば、相対的に低い温度で浸炭が進むので、銑鉄を生成するおそれのない温度で高炭素鋼をつくることも可能と推測される。

砂鉄に含有されるTiO₂にもFeOと化合物をつくって、その還元を妨げる働きがあるという説³³⁾がある。するとMnと同様な効果が期待できることになるが確かではない。いずれにしても真砂砂鉄および木炭という不純物含有量の少ない原料・燃料を使用し、こもり、上り、下りとしだいにスラグのFeO濃度を低くして³⁴⁾、浸炭を促進する条件をつくりだす一方、炉壁浸食による羽口の後退とともに高温域を後退させて、銑鉄の生成を抑制しつつ高炭素濃度の固体鉄の生成を計るのが鋳押しの基本ということではなかろうか。もちろんプロセスは不均一に進行するから生成する鋳の組成も不均一であり、したがってその破碎と選別の工程が不可欠である。さらに多少とも同時に生成する溶銑以外の鉄部分は溶融過程を経ないため、砂鉄中の脈石や未還元酸化鉄を巻き込んでおり³⁵⁾、加熱・鍛錬による清浄化と均一化も不可欠である。日本の鋼の高品質はこのような複合的な工程の所産であったと考えるべきではなかろうか。

5.2 日本式間接製鉄法の評価

永代たたら製鉄—大鍛冶精錬の日本式間接製鉄法は砂鉄という分散のかつ低品位の国内資源を活用し、技術者・労働者の技術と技能に依拠して、高品質の鉄鋼を生産する独自の体系であった。それはこの体系の周辺にあった諸技術・技能とともに製鉄技術の伝統を形成し、幕末・明治期における近代製鉄技術の自主的受容の基盤となったものであった。しかしその第一段階である製鉄プロセスには低い鉄歩留（～50%）、高い木炭消費量（～3.5kg/kg製品）、短い炉寿命（3～4日）＝低い稼働率、低い労働生産性など、経済性にかかわる重大な弱点があって、ヨーロッパの高炉のように後続工程に刺激を与えてその変革を促すことができなかった。また後続工程である精錬プロセス＝大鍛冶法はその重要性にふさわしい独自性と内発的な発展の要素を備えていなかった。こうして日本式間接法は間接製鋼法へと発展せず、最終的には汎用鉄材の生産法としての役割を失うこととなった。鋳押し法は

このような日本式間接法がその退路を直接法への回帰に求めたものであった。しかしこのプロセスは間接法の製錬プロセスの抱えていた弱点のすべてを継承したうえ、非溶解法であるが故の製品鋼の不均一性の克服のための処理工程を必要とし、間接法と同じく労働集約的といわれる日本の製鉄技術の性格³⁵⁾を脱することができなかった。それは砂鉄という原料、木炭という燃料とともに鎖国下の日本製鉄業の著しく制約された生産規模に相応するものにほかならなかった。

6 終わりに

本稿ではわが国の製鉄の主流が古代から近世にいたるまで、砂鉄を原料とするものであったという認識のもとに、砂鉄製・精錬技術の歴史の巨視的な把握を試み、事実に基づいて検証されるべき多くの仮説を提出した。鉍石製・精錬技術や地方・地域による製鉄事情の差異などをほとんど無視する結果となったことを遺憾とする。

本稿の記述にあたり穴澤義功氏から受けた多面的な協力に深謝を捧げる。

文献

- 1) 穴澤義功：第14回横田たたら研究会における講演、(1995年8月)
- 2) 中国冶金簡史，北京鋼鉄学院《中国冶金簡史》編写小組編，科学出版社，(1978)，第4章，p. 148
中国では、早く春秋戦国時代に銑鉄・可鍛鉄および塊煉鉄・塊煉浸炭鋼という2系列の鉄素材製造技術が発展して、独特の生産体系が形成されていた。漢代にはこれに炒鋼法、百煉鋼、銑鉄脱炭鋼、灌鋼法などの製鋼技術が加わって空前の開花期を迎えたが、その後これらの技術のすべてが一様に発展したのではなく、隋・唐・宋・元の時代を通じて、溶鉍（高）炉製銑法と炒鋼法が大きく発展して間接製鉄法の技術体系が中国製鉄技術の骨格をなすにいたった。汎用の鉄が銑鉄ではなく可鍛鉄—鋼であったことから、間接製鉄法は製銑法の発展の当然の帰結であった。なお河南省鞏県鉄生溝など漢代の製鉄遺跡では水平断面が円形だけでなく、長方形や楕円形などの製錬炉（溶鉍炉）も見出されている。また炒鋼法は発掘された遺構の調査と1950年代の「大躍進期」に行われた土法製鉄運動のなかで得られた知見を総合して、土中に構築された偏楕円体状の炉に燃料と銑鉄片を投入し、攪拌しながら、上から空気を吹きつけて精錬を行う方法であったと推定されている。
- 3) 潮見 浩：東アジアの初期鉄器文化，吉川弘文館，(1982)，第3章，p. 260
- 4) 森 浩一・炭田友子：考古学から見た鉄（森 浩一編「日

本古代文化の探究 鉄」），社会思想社，(1974)，p. 9

- 5) 河瀬正利：前近代日本の鉄生産（国際金属歴史フォーラムしまね〔BUMA—Ⅳ〕における講演、1996, 1月、松江）
- 6) 大澤正巳：古墳出土鉄滓からみた古代製鉄（たたら研究会編「日本製鉄史論集」），(1983)，p. 85
大澤による鉄滓の組成による分類法（図1）は合理的なものではあるが、図からも推察されるように製錬滓と精錬滓との差が必ずしも明瞭でないという問題がある。これは一方では初期の製錬プロセスがファヤライト組成ないしそれより高FeO含有量のスラグを生成するのを常態としていたという事実、また他方では精錬用の粗鉄がしばしば多量の造滓成分、端的にいって製錬滓を含有していたという事情を反映するものであろう。ただし鍛錬滓には梔形滓という別名もあり、このことを含めて判定は様々な状況証拠を総合して行われたと思われる。
- 7) 穴澤義功：シンポジウム「古代の鉄生産—中世を見通して」資料，たたら研究会，(1987)，p. 45
- 8) 穴澤義功：千葉県立房総風土記の丘年報15，(1992)，p. 113
- 9) 山口直樹：千葉県立房総風土記の丘年報14，(1991)，p. 114
山口直樹：千葉県立房総風土記の丘年報15，(1992)，p. 52
- 10) R.F.Tylecote：JISI, April (1962)，p. 340
- 11) 湊 秀雄・佐々木 稔：たたら研究，14 (1968)，p. 90～102
- 12) たたら製鉄復元計画委員会報告：たたら製鉄の復元とその鉤について，日本鉄鋼協会，(1971)，p. 89
- 13) R.F.Tylecote：JISI, January (1962)，p. 19
- 14) W.Oelsen und E.Schürmann：Arch. f.d.Eisenhüttenw., 25 (1954)，s. 507
ブルーム炉やレン炉はいずれも低炭素可鍛鉄をつくるものであったが、スラグのFeO含有量が高いことは生成鉄の炭素濃度を低位に保つのに寄与したと考えられている。この点は初期のたたら製鉄法でも同様であろう。ただしFeOの影響の評価にあたってはその活量係数の値の評価が必要であることはいうまでもない。
- 15) 高橋恒夫：古代製鉄鉄滓の金属組織（「古代日本の鉄と社会」），平凡社選書78，(1978)，p. 241
- 16) 田口 勇：仙台藩製鉄遺物の分析化学的研究（「みちのくの鉄」），アグネ，(1994)，p. 311
- 17) 俵 国一：古来の砂鉄製錬法，丸善，(1933)，p. 94～106
- 18) 飯島武次・穴澤義功：考古学雑誌，55 (1969) 2, p. 123
- 19) N.Yamaguchi, Y.Anazawa, M.Tate and M.Sasabe：ISIJ International, 37 (1997) 2掲載予定
- 20) 国立歴史民俗博物館研究報告，第58集，(1994)，p. 209
- 21) 大澤正巳：第8回横田たたら勉強会資料（1989, 7月）
- 22) 網野善彦：中世の鉄器生産と流通（講座「日本技術の社

- 会史」第五巻 採鉱と冶金) 日本評論社, (1983年), p. 29
- 23) 飯田賢一: 鉄の語る日本の歴史 (上), そしえて (株), (1976), p. 79~84
- 24) 下原重伸: 鉄山必要記事 (日本科学古典全書 第十巻), 朝日新聞社, (1944), p. 106
- 25) 土井作治: 近世たたら製鉄の技術 ((22) と同じ), p. 69
土井は銑鉄とともに鋳すなわち高炭素の鋼部分をも含有する粗鋼がつくられたと述べているが、この段階では永く箱形炉の製品であった低炭素鉄が生成していたと考えべきではないか。
- 26) 高橋一郎: 金属博物館紀要, No.11, (1987), p. 76
- 27) 俵 国一: (17) と同じ, p. 107
俵は中国地方の左下場、本場から成る大鍛冶法 (鍊鉄製造法) についての叙述に続けて「奥州に於ける鍊鉄製造法」についての叙述を付記している。岩手県気仙郡で行われていたもので、底部に水を貯めて使用されるところから水炎土とよばれる粘土製の瓶 (径0.3m、深さ0.3m) を用いることに特徴があり、天保年間 (1830~42) に常陸国の人によって発明されたとされているが、俵はこれを「著しく近代製鉄技術の影響を受け改良せられたる観あり」と評している。
- 28) 高橋一郎: 古文書からみた山陰地方のたたら (黒岩俊郎編「金属の文化史」), アグネ (1991), p. 65
- 29) L.Beck (中澤護人訳): 鉄の歴史II (2), たたら書房, (1978), p. 45~67
- 30) F.Körber und W.Oelsen: Zeitsch. f. Elektrochem., 46 (1940), s. 188-194
- 31) G.Heynert, E.Schürmann und J.Willem: St. u. E., 78 (1958), s. 1496-98
- 32) ドイツ鉄鋼協会編 (盛 利貞・藤村侯夫・小島 康訳): 高炉製鉄法の基礎理論, アグネ (1979), p. 75
本書によれば還元鉄への浸炭量は次式によって与えられる。
$$[C]_r / [C]_e = (P_{CO}/P_{CO_2})_r / (P_{CO}/P_{CO_2})_e$$

ここで $[C]_r$ 、 $[C]_e$ はそれぞれ実および飽和炭素濃度を表す。また P_{CO} 、 P_{CO_2} はそれぞれ気相の CO 、 CO_2 の分圧、添字 r 、 e は実ガス組成およびブーダール平衡組成を表す。これによれば Mn の効果は CO_2 の分圧を下げることによって右辺の値を大きくし、実炭素濃度を上げることにある。ただし上の式によって与えられる $[C]_r$ の値は実ガス組成のもとで到達可能な上限値であり、実際の炭素濃度はさらに温度に強く依存する浸炭速度によって左右される。
- 33) ドイツ鉄鋼協会編 (盛 利貞・藤村侯夫・小島 康訳): 高炉製鉄法の基礎理論, アグネ (1979), p. 111
 TiO_2 - FeO 化合物の形成が浸炭を促進するとすると、この化合物が生成しにくい低 TiO_2 の真砂砂鉄が鋳押しに用いられるのはなぜかという疑問が生じる。同じ理由で高 TiO_2 砂鉄に比べて浸炭しにくく、したがって銑鉄を生成しにくいという解釈も可能であるが、現段階ではいずれも仮説の域を脱しない。
- 34) 小塚寿吉: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1763~78
- 35) (12) と同じ, p. 102~103
- 36) 奥村正二: 小判・生糸・和鉄, 岩波新書, (1973), p. 125
(1996年9月27日受付)