



鉄の歴史 私見・鉄の歴史の周辺で-8

砂鉄連鎖の技術世界

Japanese Traditional Technologies Using Sand Iron as Iron Resource

佐藤 進
Susumu Sato

佐藤経営・技術コンサルタント事務所

1 はじめに

明治維新後、日本に西欧の製鉄技術が技術移転され、それが発展して現在に至っている。それ以前の時代には、6世紀頃から始まったといわれる伝統的な製鉄技術のたたらによる鉄作りが、19世紀の終り頃まで千年以上も続いた。たたらは、日本独特の製鉄資源である砂鉄を原料とし、半熔融の玉鋼を生産し、それから日本刀などの武器、大工道具用の刃物、ならびに農具の鎌、鋏など政治や生活に多大の影響をもつ物の生産を行っていた。筆者は、これを一括して砂鉄連鎖の技術世界と呼ぶことにしたい。西欧の製鉄法と比較すると、生産性が劣るので、競争力を失い大正年間に消滅してしまったが、千年以上もこの国で続いた技術で、色々な面で、現代にその影響を留めていると感じられる点が多いので、その技術システムを現代技術と比較することにより、それが育んだ技術文化を見てみたい。

ここで採り上げる課題は、(1) 砂鉄は、どのような性質を持った鉄鉱資源なのか、(2) たたらは、近代製鉄プロセスと比較したとき、どのような性格をもった技術であったのか、(3) 玉鋼を原料とする日本刀の作刀を現代の高純度鋼をベースとする刃物作りと対比した場合、どのような技術であったか、の3点である。

2 砂鉄—高炉法が受容を拒否した難製鉄資源

日本の前近代の製鉄の主要な鉄鉱原料は、砂鉄である。田部三郎の鉄鋼原料論¹⁾によると、世界の砂鉄の埋蔵量は約20億トンで、そのうち60%は、日本とニュージーランドで占め、日本には約7億トンあるといわれている。このように、砂鉄は、日本固有の製鉄資源であり、また、その産地は、北海道、本州、四国、九州、種子島と日本全国に分布している。

明治期のたたらから高炉への転換の技術史^{2,3,4)}が語るものは、製鉄原料として砂鉄使用をかなり早くから諦め、もっぱら鉄鉱石をベースとしながら、木炭からコークスへの転換が主要な技術課題であった。しかし、この技術文脈の裏側で、何とか砂鉄が近代の連続製鉄で使えないかと、必死の努力を重ねた3つのプロジェクトがあった。一つは、幕末の武田斐三郎の北海道古武井の木炭高炉の建設²⁾、二つ目は、明治初期の広島鉄山での黒田正暉による角炉の開発²⁾、三つ目が、井上角五郎、江藤捨三の砂鉄団鉱使用による北海道輪西のコークス高炉操業⁵⁾である(図1)。この3つのプロジェクトを振り返ることにより、製鉄資源としての砂鉄の特質を明らかにしたい。

2.1 北海道古武井高炉²⁾

古武井高炉建設のねらいは、木炭高炉による砂鉄精錬である。幕末の安政3年(1856年)に、現在の北海道亀田郡尻岸内町古武井に、砂鉄を原料とした木炭高炉が、武田斐三郎によって建設された。翌年には有名な釜石で大島高任による大橋高炉⁶⁾がつくられている。この高炉の形式、寸法などは、不明であるが、作られた時期から推定すれば、図2(a)に示す高さ7m弱の釜石大橋高炉と同一カテゴリーに属する木炭高炉だったろうと思われる。この時期、全国で多くの木炭高炉が作られたのは、それ以前につくられた大砲製造用の反射炉用の原料として、たたら鉄は不合格で、輸入高炉鉄は合格との認識が広まったのが原因と言われている。その中の一つが古武井高炉であったが、この高炉は、実際には操業されなかったようだ。原料砂鉄の粒が細かく、送風がうまく出来なかったのではないかと想像されている。

2.2 黒田正暉による角炉の開発と操業²⁾

たたらの連続化への研究として、広島鉄山での黒田正暉による落合角炉の研究がある。彼は、明治18年に工部大学治

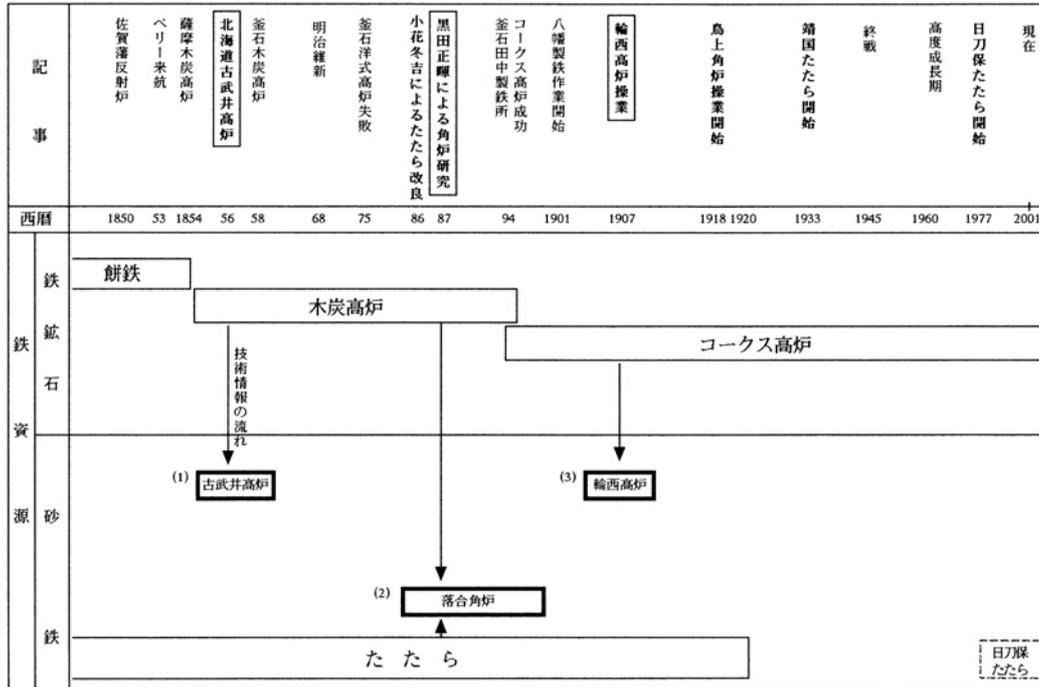


図1 砂鉄活用の3つのプロジェクトの位置付け

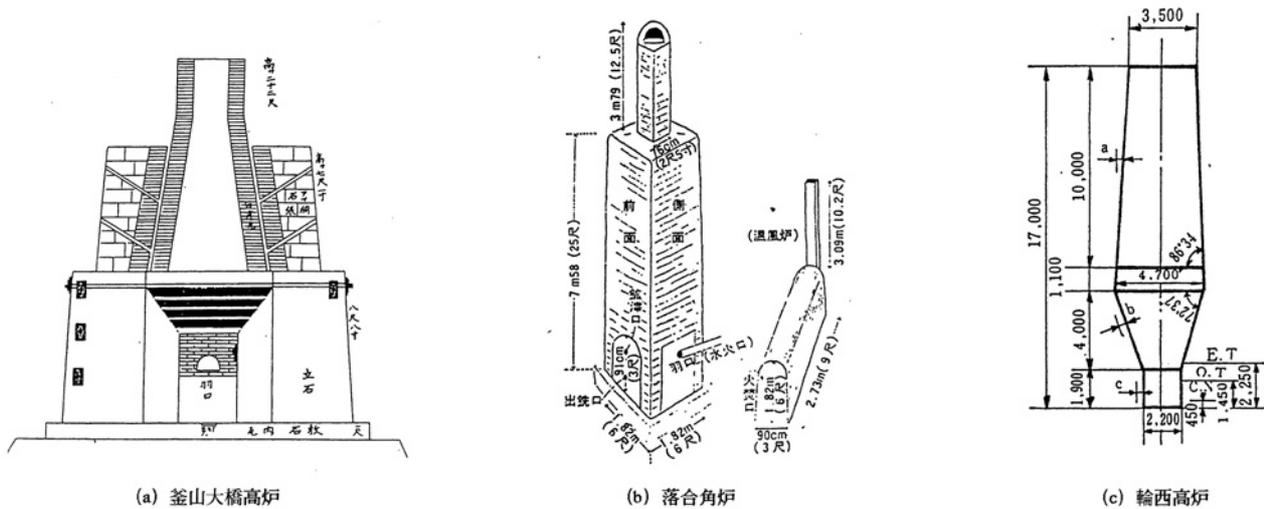


図2 砂鉄活用の3つのプロジェクトの炉

金科を卒業以来、在来のたたら法の近代化を長期に追及して、高炉に似た角炉を開発し、一定の成果を収めた。角炉の外観は、図2 (b) に示すようなもので、この角炉の朝顔部は、約4メートルあり、従来のたたら炉の高さが、1.2メートル程度であることに比較すれば、炉高を高めるとともに操業の連続化を意図したものであることがわかる。角炉の操業は、ベースとしては、通風性の良いたたら滓を原料として使用し、その1基の年間生産量は、たたら4～5倍であり、1日の出鉄量は、1.3～1.4トン程度で、平均40日程度の連続操業が可能であった。角炉はたたら大幅な改善ではあったが、その成果は限定的と言わざるをえず、砂鉄の使用、真の連続化、

大幅な生産性向上にはいたらなかった。

2.3 井上角五郎、江藤捨三の団鉱使用によるコークス高炉操業⁵⁾

輪西高炉は、コークス高炉で砂鉄を原料として精錬する最初の試みであった。明治42年(1907年)に、北海道炭鉄汽船(KK)は北海道輪西に50トンの高炉(図2 (c))を建設し、砂鉄の基本的難点である細粒の性質を団鉱化し(図3)、また操入率も30%前後に下げ操業したが、50日ほどしか連続操業が出来なかった。砂鉄に含まれているチタンが高還元雰囲気では還元され、ペーアとよばれる粘性の高い難溶解物が生じ、



図3 砂鉄団鉱の外観

これが炉底に堆積して、操業を困難にしたからであった。

これら3つのプロジェクトの結果は、砂鉄特有の(イ)細粒(0.1~1mm)である、(ロ)含有するチタンが還元雰囲気ですラグの粘度を上げる2つの性質が、連続操業での通風機能、スラグ分離機能障害となり、高炉法は砂鉄を主原料として使用することを拒否したと言えよう。それでは次に、砂鉄を原料としたたたら製鉄とはどのような技術なのか、見ることにしよう。

3 たたらの操業—操業不安定が常態の技術システム

1977年から、日刀保たたらへの操業が開始されたことによって、その操業の詳細を知ることが出来るようになった。最近、永田、鈴木によってなされた報告⁷⁾によれば、操業は「靖国たたら」の遺構を改築して、安部世由蔵村下の指導の下に行われた。この報告では、標準作業が記載されているが、実際の操業記録によると、たたらへの操業は、技術担当者である村下が、常時炉に密着して炉況を判断しながら、砂鉄と木炭の装荷を行っていく操業であることがわかる。安部村下は、たたらへの操業の秘訣として、「人間飯を食べ過ぎても腹が減っても体調が狂う。たたらも同じで、砂鉄や木炭を入れ過ぎても足らなくても炉の調子は悪くなる。いかに無理なく砂鉄や木炭を入れることが大切」つまり「快食、快便が大切」と述べている。このような秘訣を軸として、村下自身が計測器であり、それを使っての絶えざる測定—判断—アクションのサイクルの連続の上に操業が遂行される、ヒト—プロセス密着型技術システムと考えられる。このようなことから、村下を長年続けると、炎を見続けるため、片目を失明するものが多いという⁸⁾。また、「こうじと村下はよく寝るほうが良い」という諺も伝わっているほど、3日3晩寝ることが難しいようである。

菅谷たたらへの還元実験に参加した大蔵明光は、砂鉄の還元反応、けらの形成過程について、次のように述べている⁹⁾。

「装入された砂鉄は、数秒で木炭中をぬって落下していくが、それは数秒間のことで、予熱される程度の変化しかなく、降下し、炉底に堆積した砂鉄が、加熱され還元されていくものと考えられる。操業開始時から20時間経過した時点では、砂鉄は固体のままか、あるいは半溶融状態で反応し、十分吸炭して液状になることなく、そのままの状態を保っている。けらの温度は、1,300~1,400℃であるから、十分な吸炭が行われなければ、溶融する可能性はない。(中略)このようにして出来たけらの上部に漸次装入した砂鉄が堆積し、一部はけらに成長し、また一部は、 $\text{FeO} \cdot \text{SiO} \cdot \text{AlO}$ の鉱滓成分となって流出する。羽口近くの高温度部のけらは、吸炭が進行し、銑鉄となる。このようにたたら内の反応は、主として固体間反応である」と述べている。上記のような炉内の砂鉄の動き、温度の分布から考えて、著しい不均一な反応の分布状況であると推測出来る。高炉法では、原料鉱石はシャフト部で、充分予熱され、還元され、溶解部に達して、その安定性を維持しているのに比較すれば、たたらへの操業の不安定性は容易に想像される。このような操業の結果として、溶融状態が不均一で、Cの含有量も0.2%から1.7%以上の広い範囲に分布している。

近代技術が、標準化、安定化を基本要素としていることを考えるなら、たたらへの技術は正にその対極の技術と言えよう。砂鉄という近代技術を寄せつけない難製鉄資源を使って鉄を作るたたら技術は、経験豊かな船頭があらしの海で、風と波に翻弄される船を操りながらの航海するのに似た技術ではなかったのかと筆者には想像される。

4 刀鍛冶の果たした機能の多彩さ

4.1 高純度鋼刃物用の実用化

長い間、高炉—転炉(平炉)で大量生産される鋼は、たたらで作られた玉鋼よりPやSの不純物の含有量が、高いため鋼質が劣るとされて来たが、1980年頃には技術の進歩により、高炉—転炉のシステムで、玉鋼よりP,Sが低い鋼の生産が実用化された¹⁰⁾。すなわち、1970年頃には、転炉の前後に脱Sと真空脱ガスが追加され、80年前には脱Siと転炉の底吹法が導入された。80年代には、脱P法を開発するとともに、真空脱ガスに酸素吹込を行う、脱C調整法が開発され、これによって転炉での高純度鋼の製造システムは完成した。このシステムで作られる高純度鋼はP,Sは、玉鋼並みかそれよりも低く、Cは、狭い範囲にコントロールが可能で、しかも、介在物が非常に少なかった。

1980年代の初め頃、このシステムにより筆者達が開発した材料の一つに、刃物用の材料があり、それは洋刀に加工後、輸出され、例えばアマゾンのジャングルなどでの伐採等に使用

われた。またその材料の優秀性から世界的に有名なドイツのゾーリングゲン地帯の刃物工場の材料として用いられるようになっていた。当時、筆者は心中ひそかに、我々は有名な玉鋼を超えたのではと思った。この鋼の成分の一例を、玉鋼との比較で示す(表1)。

4.2 玉鋼→日本刀、高純度刃物用鋼→洋刀の作刀システムの比較

今でこそ、日本刀は美術品として、取り扱われているが、そもそもは切れる刃物の製造から始まった。良く切れる刃物を作るという立場で、玉鋼→日本刀、高純度鋼刃物用鋼→洋刀の作刀システムを比較すると両者の違いはどのような所に鮮明に現われるだろうか。

表1 高純度鋼 (SK5) と玉鋼の化学成分の比較

	化学成分 (%)					備考
	C	Si	Mn	P	S	
高純度鋼 (SK5)	0.84	0.20	0.43	0.019	0.004	1981年 新日鉄室蘭
	0.88	0.20	0.38	0.008	0.006	
玉鋼	1.78	0.02	0.02	0.046	0.006	日刀保 たたら ¹²⁾
	1.47	0.02	0.01	0.025	0.004	

両者の比較に入る前に、日本刀の作り方を簡単に解説しておこう^{11,12)}。原料の玉鋼は、先ずたまへしと呼ばれる工程で小割にされる。ついで日本刀の皮金(サイド)、刃金(刃)になる部分には高炭素材を、心金(コア)、棟金(棟)になる部分には、低炭素材をあてることにし、それぞれ別々に後工程の鍛錬処理が行われ、刀の各部分にあてられる。それぞれの材料は、小片に割られたものを、小さな山積みにした後、和紙にくるみ、その上から粘土汁をかけた後、加熱鍛錬される。この積み沸かしと呼ばれる工程の機能は、鍛造と溶接である。このようにして小ブロックになったものを鍛錬して延しては、タガネを入れて折り返し、また鍛錬を繰り返す、このような折り返し鍛錬を6回~15回行う。その後成分の違う材料が日本刀の各部分になるような材料の組み合わせ工程の造り込みを行う。それを刀の形に鍛造した後、土置きと呼ばれる工程で、刀になる部分には薄く、その他の部分には厚く粘土汁をかぶせ、刀の部分では焼き入れの効果を利用し、硬くなるようにする。焼入→あいとり(焼鈍)をへた後、研ぎを行って完成する(図4)。

現代においては、よろず材料の基本的性質として、性質が均一で、不純物、介在物が少ないことが要求される。高純度鋼刃物用鋼は、これらの条件を全部クリアーしているが、玉鋼は、砂鉄という難鉄資源をベースとした超不安定プロセス

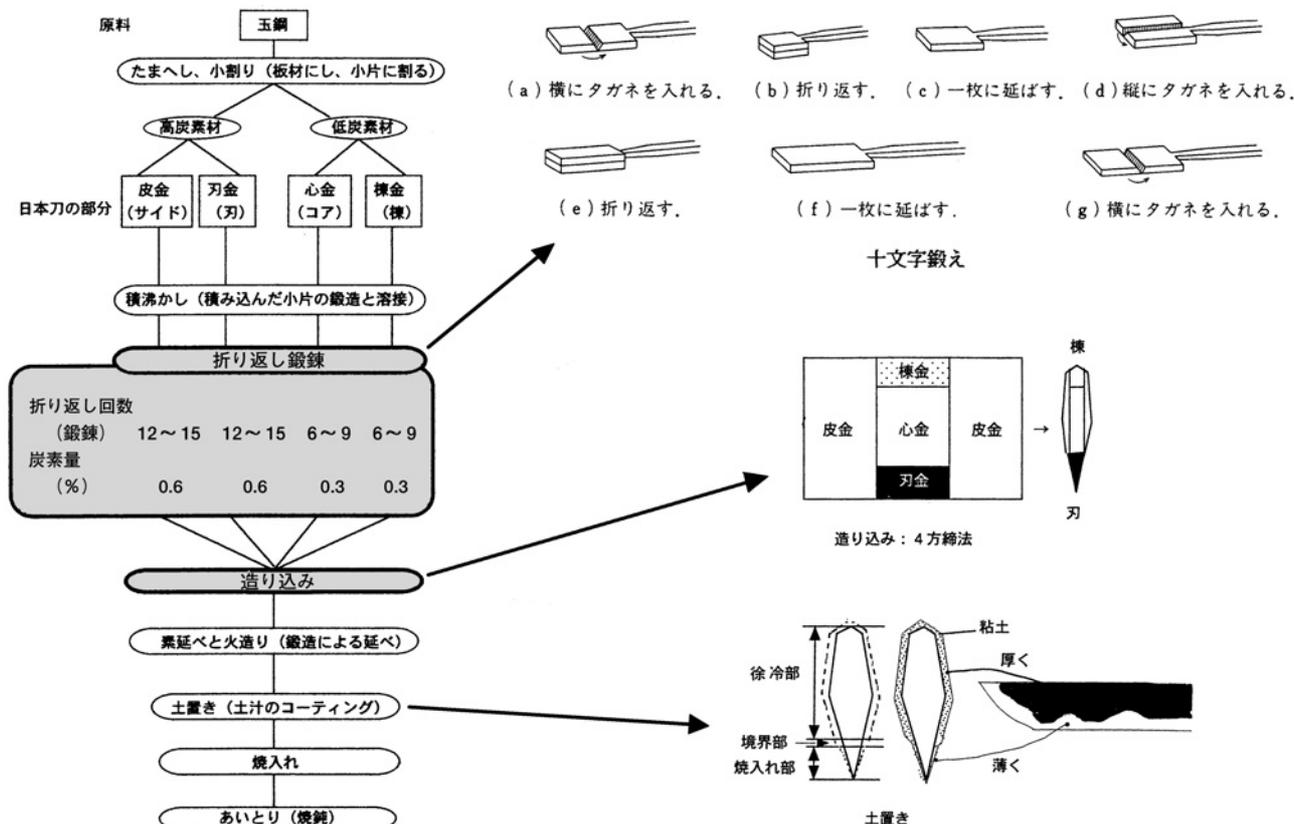


図4 日本刀の作刀工程解説図

によって作られた半溶融鉄なので、成分は甚だしく不均一、ノロかみ、介在物も非常に多い。良い点としては、低温還元であるためP,Sの不純物が低く、鍛造性が良いと言われている。高純度鋼→洋刀の場合には、製鉄会社は、製品刃物の厚さまで薄くした板状の材料(冷延帯鋼)を提供し、加工業者は、それを、打抜—焼入れ—焼き戻し—刃つけの工程を担当するだけである。この時の刃の製造法は、丸鍛(材料は一体で、造り込みをしない)の作り方である。これに対して、日本刀の作刀では、刀鍛冶は、たまへし(小割り)—積沸かし(小片の鍛造と溶接)—折り返し鍛錬(6回~15回)—造り込み—素延べと火造り(鍛造による延べ)—土置き(土汁のコーティング)—焼入れ—あいとり(焼鈍)の工程を行っている¹¹⁾。特に、折り返し鍛錬では、6回から15回にもわたる、反復の鍛錬という大作業量をこなしている。刀鍛冶の行う工程の内、本来の刃物作りの工程は、造り込み以下の工程のみに相当し、それ以前のたまへし—積沸かし—折り返し鍛錬の工程の持つ機能は、現在の鉄鋼製造の視点からみれば、材料の製造工程と位置付けられる。折り返し鍛錬の工程で行われている機能を現代風に表現すれば図5に挙げたように、夾雑物(脈石)除去、介在物除去、成分のレベル調整と均一化、炭化物調整、結晶粒調整、形状変化、表面きず防止など、現在の全製鉄工程全般の機能に及んでいるのに驚かされる。このように広範囲な技術的な仕事を、1人で、折り返し鍛錬という1工程の中で、経験と勘を頼りに高いレベルで達成している。現代の製鉄の技術体系は、各工程に機能を分化した作り方を行っており、現代の製造システム呼び方では、モジュラー型(機能分離型)アーキテクチャー*と呼ばれているのに対し、折り返し鍛錬で見たように、砂鉄連鎖の技術による日本刀の作刀はこれとは対象的なインテグラル型(機能統合型)アーキテクチャーであると理解することが出来る。

また、日本刀の優秀性を形造るもう一つの特徴である造り込みも、玉鋼のC成分に大きな幅があったがゆえに、材料を組み合わせるといふ考え方が生じてきたと思える。これもインテグラル技術アーキテクチャーの例証と言える。

以上のような比較から日本刀の作刀を見て来ると、砂鉄を原料とした鉄から、実用に耐える刃物を実現することは途方もない難事業だったことが分かる。このような膨大かつ複雑な難作業が1人の刀鍛冶の力量に託されたがゆえに、一方から見れば、名工を輩出する土壌があり、また、名工が腕をふるう余地が多く、従って作品を洗練する余地もあり、機能的

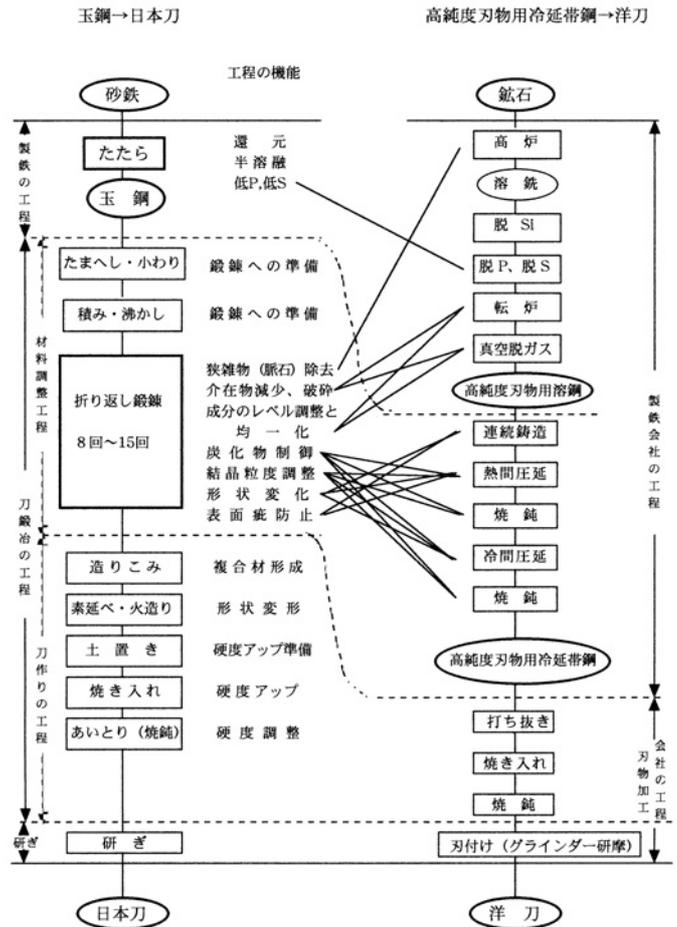


図5 玉鋼→日本刀、高純度刃物用冷延鋼→洋刀システムの比較

にも、美的にも優れた日本刀が生まれたと筆者は推論している。比喩的に言えば、日本が世界に稀な瘦せた鉄鉱資源しかなかったからこそ、日本刀はその土壌の上に日本人の知恵と努力の結晶として咲いた一輪の美しい花だったという気がする。

5 砂鉄連鎖の技術世界が育んだ技術文化

たたら製鉄では、その原料が砂鉄という希代の難製鉄原料であったがゆえに、たたら作業の遂行にとって、ヒトはモノへの密着による絶えざる観察、判断、アクションが不可欠であった。このような不安定をベースとする操業の遂行では、作業者の能力向上、チームワークの重視によるヒトとヒトの密着が絶対の必要条件であった。また、作業量は、膨大で、

*アーキテクチャーとはシステムのもつ性質の見方である。「ある人工物製造システムがある場合、それはどんな構成要素に切り分けられ、それぞれの構成要素にどんな機能が振り当てられ、構成要素間の相互依存関係がどのようになっているか」を見るための解釈である。インテグラル技術では「摺り合せの妙」が基本である。例えば玉鋼と折り返し鍛錬の組み合わせによる高品質の日本刀の作刀に、この典型例を見ることが出来る。モジュラー技術では「摺り合せ」は省略され、「組み合わせの妙」により製品の完成が計られる。この典型例はパソコンである。藤本隆宏、他：ビジネス・アーキテクチャー、有斐閣、(2001)

骨惜しみは許されなかった。そこでは、勤労精神こそがベースであった。また、日本刀の作刀では、玉鋼という半溶融の鉄材料からスタートしているのが、刀鍛冶は、刃物に適格な材料（介在物の除去、成分の均一化など）にするために折り返し鍛錬を行い、ここで膨大な仕事を費やさなければならなかった。刀鍛冶の本来工程の作刀では、良い刀を作るための材料選択の眼力が常に要求された。またバラエティに富む玉鋼の基本特性を逆手にとって、成分の違う鋼を機能に応じて組み合わせるといった造り込みの発想を生み、形が湾曲し、良く切れ、強くて、軽い日本刀に独特の特性の開発に成功した。また、実用機能を作るこの複雑工程は、一方では多彩な鉄のマイクロ組織を現出することから日本刀の美にも道を開いた。また、日本刀と同様な工程で作られた精緻で多様な日本の大工道具は、五重塔に代表される木を素材とした日本独特の建築文明の形成にも大きく貢献している。このように見るならば、砂鉄こそは、精緻な道具を作ることと、またそれを駆使することに高い価値観を置く、通常“匠”とよばれる伝統的な日本技術文化の基礎を形作る鍵であったと考えられる。

これまで見てきた砂鉄連鎖の技術文明は、近代技術の持つ標準化、安定化、人力を軽減の思想を基礎にもつ西欧の近代技術文明とは対極の文明と言わなければならない。この技術文明が、生んだ技術文化は、こころ、手、目を重視し、現場、現物主義、実践精緻主義の技術文化と言えよう。たたら、日本刀、大工道具を生んだ日本の伝統的技術文明は、明治維新後導入された西欧の近代技術によってすたれていったが、千年以上にわたって生き続けたこのような技術文化は、明治期の工業化時期にも近代工業に参加した鍛冶職人達や中小企業として独立した職人達によってうけつがれ¹³⁾、やがて技術者にも大きな影響を与えた。4章で述べたように、日本の鉄鋼の現代技術は基盤的には西欧技術に基礎を置いているので、モジュラー型（組み合わせ）アーキテクチャーであるが、高純度鋼製造システムの開発でも、その1例を見ることが出来るように、高炉—転炉の基本システムをベースにして、脱S、脱Pなどの操作をインテグラル（摺り合わせ型）に付加した

もので、ここでも日本の技術文化による技術発展を見ることが出来る。戦後の日本のリーディング産業の鉄、自動車、IC、エレクトロニクスの中で、鉄とICは産業の米と言われ、多くの産業に影響を与えてきた¹⁴⁾。これらの産業中で、唯一前近代の技術史を持つのは鉄のみであり、これを分析することによりこの国の伝統技術文化の特質を知ることが出来ることと筆者は考えている。

今日、自動車やエレクトロニクスでも、日本の技術には、“匠”の技術（インテグラル技術）があると言われるのは、明治以後導入された西欧技術と日本の伝統的技術文化がハイブリッド化されて、この国の技術文化を形作っているからだと思う。

参考文献

- 1) 田部三郎：鉄鋼原料論，ダイヤモンド社，(1963)
- 2) 大橋周治：幕末明治製鉄論，アグネ，(1991)
- 3) 飯田賢一：日本鉄鋼技術史，東洋経済新報社，(1979)
- 4) 吉田光邦：技術と日本近代化，日本放送出版協会，(1977)
- 5) 佐藤進：輪西高炉の成立と砂鉄，ふえらむ，12 (2000)
- 6) 近代鉄鋼業の成立，釜石製鉄所，(1957)
- 7) 永田和宏，鈴木卓夫：たたら製鉄の炉内反応機構と操業技術，鉄と鋼，86 (2000)，64.
- 8) 斎藤潔：鉄の社会史，雄山閣，(1990)
- 9) 大蔵明光：たたら復元で何がわかったか？，金属，4 (1970)
- 10) 最近の高純度鋼溶製技術の進歩，日本鉄鋼協会，(1992)
- 11) 佐々木直彦，堀井胤匡：鉄と鋼，86 (2000)，45.
- 12) 鈴木卓夫：作刀の伝統技法，理工学社，(1994)
- 13) 尾高焯之助：職人の世界・工場の世界，リプロート，(1993)
- 14) 安部忠彦：新リーディング産業が日本を変える，日本プラントメンテナンス協会，(2000)

(2001年8月7日受付)