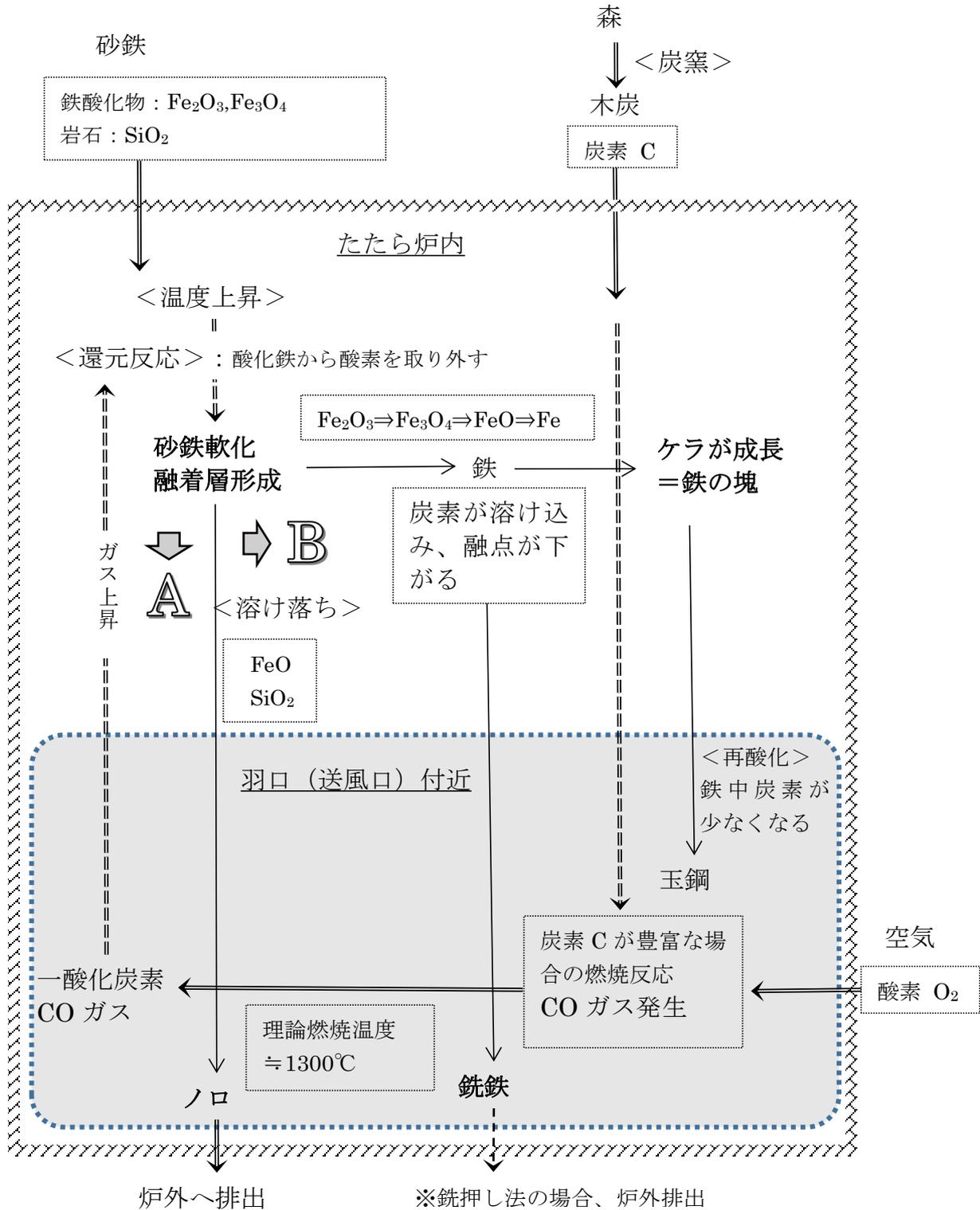


たたら製鉄の概要



※ A 方向への反応傾向がより多いのが銑(ズク)押し法、B が鉞(ケラ)押し法

1. 調査目的

横浜自然観察の森友の会所属プロジェクトである雑木林ファンクラブで製炭した木炭の活用方法として、日本にて古代（古墳時代後期）から行われている「たたら製鉄」の主材料として使用可能かを検証し、今後の製炭の方向性を模索する。

2. 方法

①原料

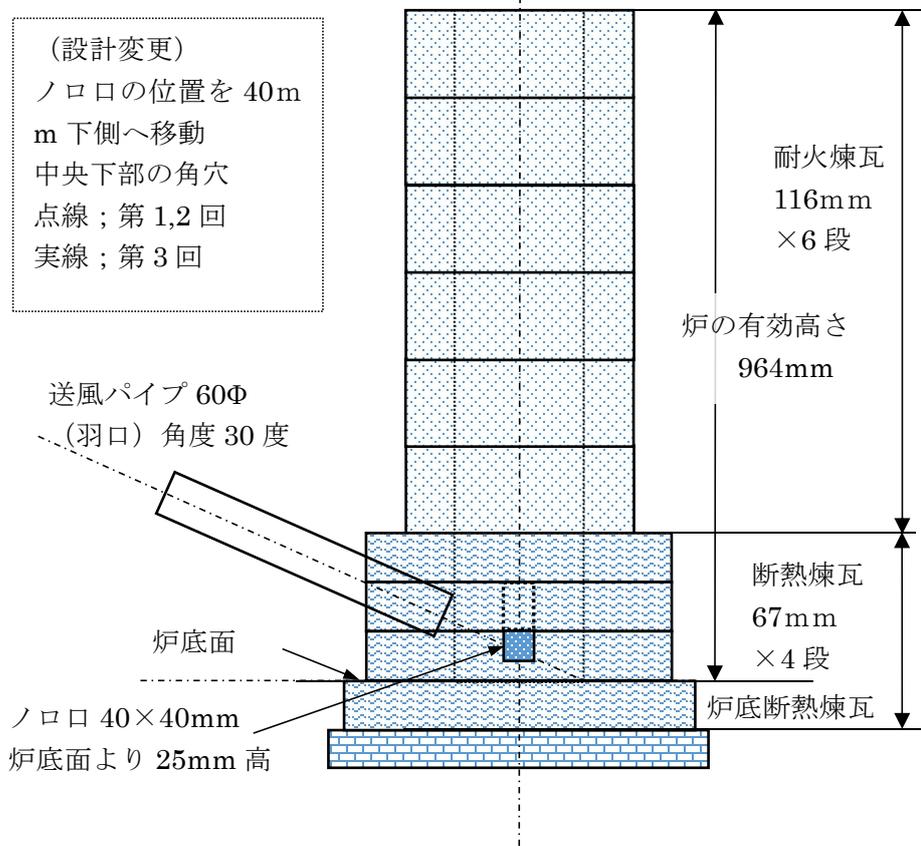
木炭：当横浜自然観察の森園内で、間伐、除伐されたクヌギ、コナラなど広葉樹主体に、すでに製炭されたものを使用した。大きさは 30mm ぐらいの大きさにのこぎりを使って切断したものをを使用した。

砂鉄：鎌倉市稲村ヶ崎海岸にて、磁石選鉱にて採取した。採取にあたっては、ミニたたら参加者や友の会メンバーに応援していただいた。選鉱は、煮沸および乾燥による塩分の除去と磁石による繰り返しの不純物除去を行った。

ホタテ貝殻粉：水酸化カルシウム（消石灰）が主体の添加物。文献などを参考に、砂鉄に含まれるシリカ（ SiO_2 ）などの不純物を溶けやすくするために添加する。

たたら炉の制作：制作は 1 月 26 日から 3 回の活動日を費やした。2 月 6 日より自然乾燥し、2 月 13 日は少量の燃焼コークスを投入して炉下部の乾燥を図った。前二回との設計の差異は、炉下部の断熱煉瓦部分の断熱性を向上するためにコーナー部に断熱煉瓦を補充したこと、およびノロ出し口を 40mm 下げたことである。（図面参照）この理由は、前二回の作業中にノロ出しが出来なかったため、作業中のノロ生成量を予測計算し、溜まったノロが確実に出る位置に排出口のレベルを下げるためである。

ミニたたら炉設計概要



操業：乾燥は木炭のみを挿入して約二時間行う。その後、木炭 350g と砂鉄 200g、貝殻粉 20g（砂鉄と貝殻粉は事前に混合しておく）を交互に装入していく。今回は約 10cm 充填物が降下したら、新たに木炭、砂鉄混合物の順番に装入していく。これを繰り返しながら、挿入間隔が 5 分/回を大幅に伸びるようならば送風量を上昇させ、間隔が早まるようならば送風量を減じる。これを繰り返すこと装入 30 回目にて、一回目のノロだしを実施、装入 40 回目にて、二回目のノロだしを実施する。その後、砂鉄混合物の装入を中止し、木炭のみの装入を行い、炉内の砂鉄を炉の下部に沈降させるクリーニング操業を行い（約 30 分）その後、送風を停止する。

ケラ（鉄の塊）出し：炉内に滞留した鉄の塊であるケラを抽出するため、炉の解体を行う。解体は上部の耐火レンガから順次、煉瓦一個ずつ、タガネ、パールなどにて原型を極力留めながら解体していく。最後のケラは水を貯めたピットに装入して冷却する。冷却したケラは後日、細かく割りながら、残存木炭や一旦溶けて固まって付着したノロなどを除去し、磁石により鉄を分ける。

3. 結果

①操業結果

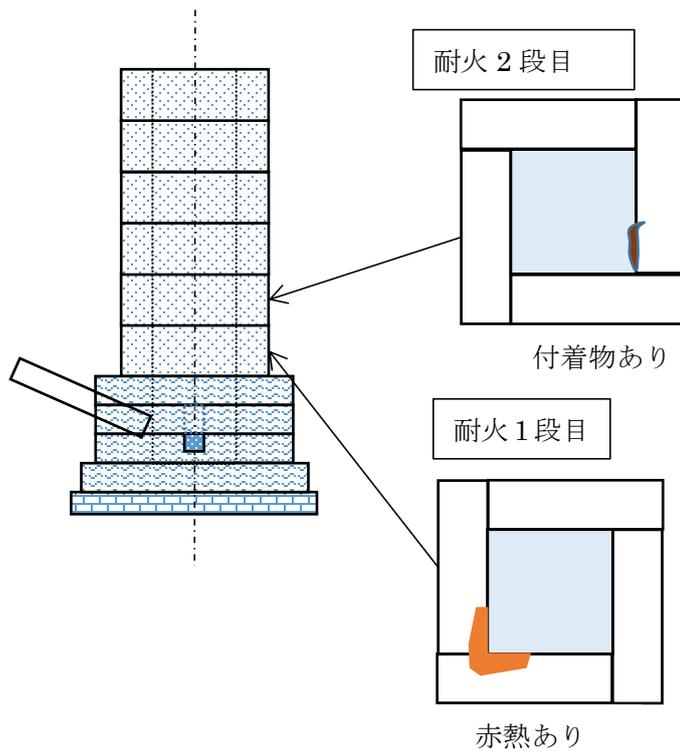
前二回の操業と比べ、ガス漏れも少なく、40回装入後のノロ出しにてノロ流出を確認した。装入状況と送風状況は下表のとおりである。

たたら製鉄 LOG

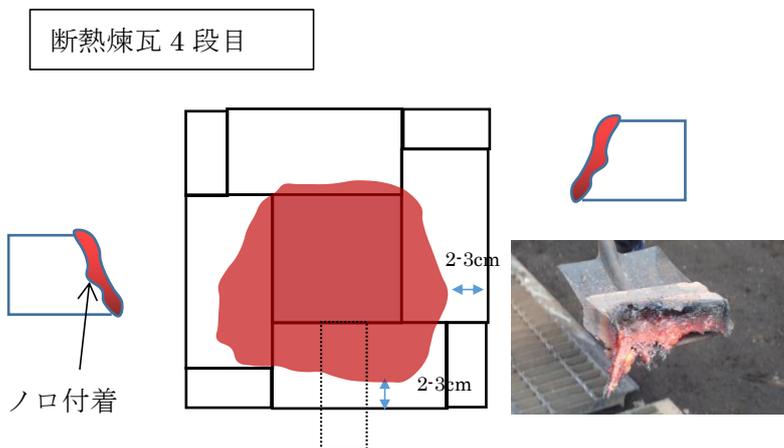
2019 年 2 月 16 日

投入回数	時間	炭(g)	砂鉄(g)+ 貝殻粉(g)	炉温度(°C)		送風量	備考(外気温等)
				中央	炉頂		
加熱	9:05	木炭のみ				送風開始	乾燥開始
乾燥	9:17				430°C		フル充填
	9:30				600°C		
1	11:00	350	220			送風量1.2	
2	11:04	350	220				
3	11:08	350	220			送風量1.1	
4	11:11	350	220			送風量1.0	
5	11:15	350	220				
6	11:20	350	220				
7	11:25	350	220				
8	11:29	350	220				
9	11:33	350	220				
10	11:36	350	220				
11	11:44	350	220				
12	11:48	350	220				
13	11:51	350	220				
14	11:58	350	220				
15	12:02	350	220				
16	12:08	350	220				
17	12:14	350	220				
18	12:19	350	220				
19	12:27	350	220				
20	12:33	350	220				
21	12:37	350	220				
22	12:42	350	220				
23	12:50	350	220				
24	12:54	350	220				
25	12:59	350	220				
26	13:08	350	220				突き棒使用
27	13:13	350	220				
28	13:18	350	220				
29	13:22	350	220				
30	13:27	350	220				ノロ出し ガスのみ(動画あり)
31	13:33	350	220				(開口部より炉底側に溶けたノロ有)
32	13:43	350	220				
33	13:45	350	220				突き棒使用
34	13:51	350	220			送風量1.2	
35	13:55	350	220				
36	13:58	350	220				
37	14:03	350	220				
38	14:08	350	220				
39	14:12	350	220				
40	14:16	350	220				ノロ出し 少量(動画あり)
41		木炭のみ					クリーニング作業として
42		木炭のみ					木炭のみ装入
43	14:30					送風停止	
44							解体開始(動画あり)
45							
46							
47							・初めはできるだけ送風量を抑え気味にした。
48							(来場のたたら経験者からも、送風を上げ気味にするとノロが出ないとの経験談が聞けた)
49							・後半30回以降は充填物の下がりが悪くなったので送風を少し増やした
50							・30回目の時点でのノロ出しは炉底にノロが溜まっているのが確認できた。
51							・解体時に確認したケラの位置は前回、前々回より低め=炉底に固着、であった。
52							
58							
59							
60							

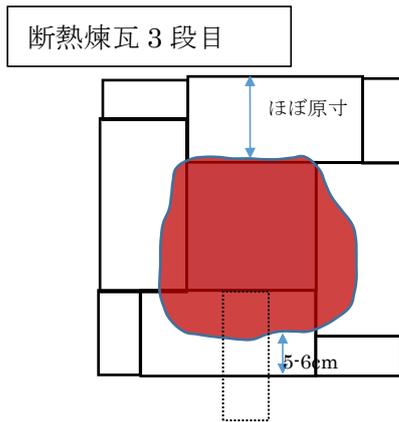
②煉瓦の損耗状況



耐火レンガの損耗状況は、断熱煉瓦から一段目は激しく赤熱があり、かなり高熱であったことが伺えるが二段目には付着物が少し見られるものの煉瓦は健全であった。三段目以降は炉頂部まで煉瓦は健全であった。

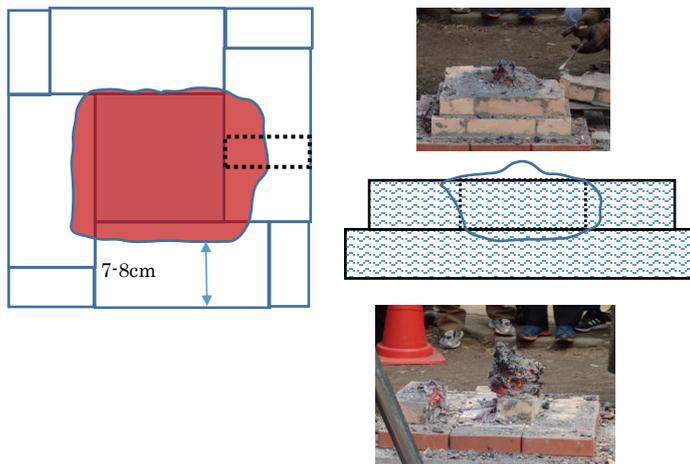


断熱煉瓦の一番上（4 段目）は羽口側とその右左の煉瓦が激しく損耗を受けていて、煉瓦には多量のノロがまだ熔融状態で付着していた。



断熱煉瓦 3 段目は羽口の対面側の煉瓦はほぼ原寸が残存していた。その他の煉瓦は損耗はしているもののノロの付着は比較的少なかった。

断熱煉瓦 2 段目



断熱煉瓦 2 段目にケラが残っていた。ケラは炉底面を形成する断熱煉瓦に 2-3 c m 食い込む形で残存していた。二段目の煉瓦はノロ口側がやや多目に損耗されていた。

③鉄の生成

採取したケラは下の写真のとおりであり、重量は 2.4 k g を示している。



これを小割にしていく作業をした結果、大きいサイズの鉄塊 0.55 k g、鉄の小片 0.57 k g を得ることができた。



生成した鉄を詳細に見てみると、小片の鉄は溶けて固まったノロの周りに皮が巻くように付着していた。

やや大きめの鉄の塊はグラインダーで破面を削ってみると、鉄そのものの破面となっている。

	全体図	詳細図
小鉄片		
鉄の塊		

④ノロの生成

操業後 30 回砂鉄を装入した後、第 1 回目のノロ出しを行った結果、ガスのみが噴出し、溶けたノロは炉外には出てこなかった。ノロ出し口から炉内を観察した結果、ノロが沸騰している状況が見えたので、装入 30 回目の時点ではノロ出し口のレベルまで溶けたノロが溜まっていなかったと思われる。装入 40 回目の第二回目のノロ出しでは溶けた少量ノロが流出した。

第 1 回目 ノロ出し		装入 30 回目に時点 ガスのみが噴出 ノロは炉内に確認で きるものの、流出はな し
第 2 回目 ノロ出し		砂鉄装入 40 回目の 時点 溶けたノロが流出し た。



ノロの比重；ノロ出しにて流出したノロについては少量であったため詳細な観察はしていないが、炉解体後に採取した固化したノロ（左図）について比重を計ったところ、4.2 であった。

4. 考察

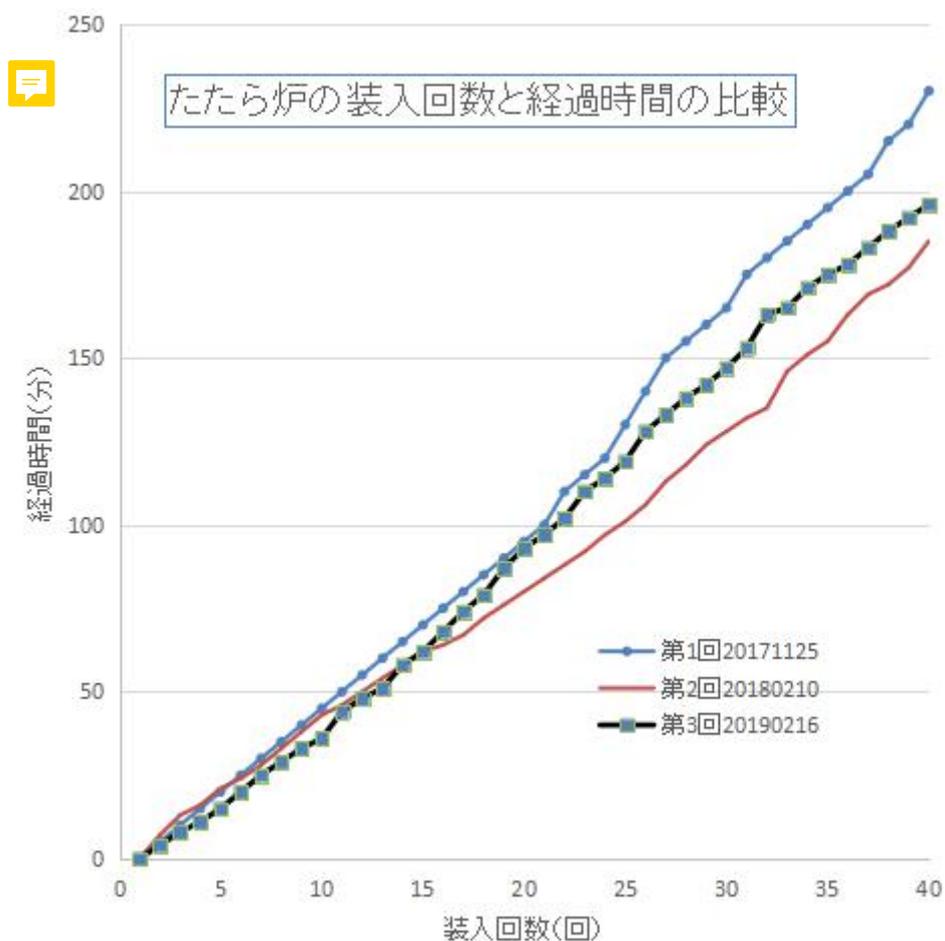
第三回のミニたたらを前二回の操業と比べて総括すると、ノロの流出を炉外にて確認できたことと生成されたケラ（鉄の塊）が極端に少なかったことである。操業および結果を下表にまとめてみた。

	第1回 20171125	第2回 20180210	第3回 20190216
砂鉄種類	稲村ヶ崎海岸採取	同左	同左
砂鉄量 (推定鉄 Fe 量*1)	8.0 k g (3.64 k g)	同左	同左
貝殻粉量 (ノロ/砂鉄量)	20 g (ノロ/200 g)	同左	同左
木炭量 (ノロ/砂鉄量)	300 g (ノロ/200 g)	350 g (ノロ/200 g)	同左
装入間隔(下図参照*2)	遅い	早い	中間
生成ケラ量 (鉄の塊)	2.4 k g	1.8 k g	1.12 k g
鉄収率% *3	66%	49%	31%
ノロの排出	ガスのみ	ガスのみ 但し、炉解体時炉下部に溶けたノロが滞留していた	装入 30 回目時点ではガスのみ 装入 40 回目にてノロ排出確認

*1：砂鉄の選鉱率は 80%と仮定、砂鉄中の Fe 分を 57%とする。

*2：装入間隔の比較 下図「たたら炉の装入回数と経過時間の比較」

*3：生成ケラ量÷推定鉄量×100



つぎに、この結果について、日本古来のたたら製鉄の調査結果や近代製鉄における理論など

も混じえながら考察していきたい。

日本古来のたたらによる製鉄法について、文献としては古いが復刻版が出ている倭國一著「古来の砂鉄精錬法（たたら吹製鉄法）」を参考に整理する。溶けた銑鉄を主に生産する「銑（ズク）押し法」と炉内にケラ（鉄の塊）を残し、炉解体後にその塊を生産物とする「鉾（ケラ）押し法」の2つの精錬方法がある。その差異については、「世界中の古代からの製鉄法を技を科学的に検討したベックの著作の中に、単に使用する鉱石の品位の差と反応の偶然性という説がある」と本書注釈にあるが、本書にその違いを調査分析したいくつかの記述があり、ミニたたらの結果の考察に役立つような知見もあるので、下表に整理した。

	銑（ズク）押し法	鉾（ケラ）押し法
砂鉄	溶けやすい砂鉄(赤目砂鉄 TiO_2 が多い) など、種類にこだわらない 装入量 18 t	比較的溶けにくい砂鉄（真砂砂鉄） 装入量 12.825 t
製錬方法	0:00 送風開始 1:11 砂鉄装入 3:15 ノロを裏湯池より出す 6:20 以後、溶けた銑鉄を 2-3 時間毎に出す 31:15 中央湯池の銑鉄の出方が悪いので両サイドを使う 62:15 突き棒にてケラなどを落とし通風を良くする 84:35 木炭のみとする 84:55 最後の銑鉄抽出	0:00 送風開始 0:53 砂鉄装入開始 4:40 炉内ノロを確認ノロ出し 23:00 鉾中央に生成、中央湯池使用不可より両サイドを使う 34:30 溶けた銑鉄流出 （以後、鉾成長を図るためホド穴＝羽口向き調整／すりあげ） 40:30 溶けた銑鉄流出 46:30 溶けた銑鉄流出 52:30 炉が両サイドに分かれたように中央部の風通し悪い 68:00 釜出し
鉄生成量	銑鉄 4.5 t 鉾 0.337 t 合計 4.8 t	鋼 1.125 t 銑鉄 1.575 t 鉾 1.0125 t 合計 3.7 t
鉄収率	46% （装入鉄分 10.3 t）	47% （装入鉄分 7.72 t）
銑鉄比率	94%	43%
鉄中の炭素品位	高 C の銑鉄が多い	鉾中の炭素品位のばらつき多い。羽口前に低 C の良質な鋼あり

鉾押し法は、現在でも日本刀制作用の鋼を供給するため、（財）日本美術刀剣保存協会により生産が続けられている。古来の技術に則った日本刀を作るための鋼はこの方法でしか生産できないと言われている（文献2）。その理由について、炉を作っている粘土から溶け出すシリカ（ SiO_2 ）と、砂鉄が還元されて出来る FeO の化合物ファイヤライト（ Fe_2SiO_4 ）が良質な介在物として鋼の中で作用し、刀製作時の鍛錬などの加圧が加わって、有効な効果が得られると言われている。もちろん鋼としての特質である適度に低い炭素含有量も必要であるため、現在でも鉾押し法が日本刀制作用鋼を作る方法となっている。ファイヤライトとは、マントルから流れ出る溶岩が固まったかんらん石である。地上に在るかんらん石は Fe の代わりに Mg （マグネシウム）が極端に多い組成となっているが、 Fe のみにてできた鉄かんらん石の比重は 4.1 であり、ミニたたらで生成されたノロの比重と同じである。（3-④参照）

鉾押し法によって、銑押し法に比べ低 C の良質な鋼が作れるのは、溶けた銑鉄を炉外に抽出

してしまう銑押し法に比べ、炉内に鉄の塊＝鋸(ケラ)を残しつつ羽口の向きを調整しながら鋸の成長と羽口前での空気中の酸素による鉄中の炭素の再酸化(＝低C鋼)を図っているからであると思われる。

砂鉄は炉頂部から装入されると、羽口前で送風された空気が木炭と反応して出来たCOガスが対向して炉内を上昇してくるため、酸化鉄が還元(酸素が取られる)される。その反応式は下に参考として記載した。砂鉄はミニたたら炉内を降下するに連れて温度も上昇、軟化し、砂鉄同士が融着層を形成するとともに還元されてできた鉄はC(炭素)を吸収する。鉄は炭素を吸収すると1145℃という低い温度でも溶ける。但し、このときの出来る鉄は飽和状態まで炭素を含んだ鋸物用の鉄＝銑鉄であるため、日本刀など製作用鋼としては適さない。近代製鉄の高炉法では、この銑鉄を効率的に溶けた状態で生産し、後工程にて酸素を用いて炭素を取り除いて加工しやすい鋼にしていく。先述した表で比較した一つの古来の製鉄法＝銑押し法はこの銑鉄を溶けた状態にて多く生産する方法と言える。それに対し、鋸押し法は溶けた銑鉄を炉外に抽出せず、中に鉄の塊を滞留させながら、羽口前にて送風された空気中の酸素により鉄中の炭素を燃焼＝再酸化して鉄中の炭素量を低下させ、日本刀などの作成に適した鋼を作っていると考えられる。ただ、鋸押し法は炉内に鉄の塊を残すため、長時間の操業は難しく炉末期には風通しが悪くなる様子が時系列の製錬状況に記載されており、銑押し法より製錬時間は短い。製錬中期以降に、羽口(空気送風口)の向きを調整(磨り上げ＝すりあげ 文献2)しながら、効率よく狙いの品質の鋼を作るのは、日本古来の製鉄の匠の技といえると思う。最新の高炉製鉄法では炉内の溶融物(鉄とノロ)の量は排出速度などにより適正にコントロールされ、融着層も軟化しにくく溶けやすいという具合に、使用する鋸石の配合調整などによりコントロールされている。鉄収率は、たたら製鉄においては50%程度であるが高炉製鉄法ではほぼ100%である。ノロ中の成分を比較した表を下に示すが、高炉製鉄法ではノロ＝高炉スラグ中の鉄分はほぼ皆無であり、たたら製鉄法が極めて効率の悪い製鉄法であることがわかると思う。しかし、高炉法で出来上がる製品は炭素が3%以上含まれた銑鉄であり、先に述べたように使える鋼とするための別の工程が必要となるため、技術革新の進む近代まで生まれなかった製鉄法である。

		SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	FeO	出典
高炉スラグ		33.8	41.7	13.4	0.4	鉄鋼スラグ協会HP
たたら	鋸押し法	25.24	2.33	6.42	55.04	日立金属 / たたら HP
	銑押し法	28.40	2.83	7.38	36.79	

今回(第三回)のミニたたらでは溶けた銑鉄の排出は行わない鋸押し法を目指して操業を行ったが、出来上がったケラの量が少なかった。ノロの量は、ノロ出しおよび炉解体時のレンガへのノロ付着状況の観察結果から、十分生成している。また、第一回に観察された未還元の砂鉄の融着物も皆無と言える程少なかったことから、鉄酸化物は融着状態では鉄まで還元されずに還元途中の酸化物(FeO)のまま溶けやすいノロの中に溶け込み、最終的にファイヤライト

(Fe₂SiO₄)を作ったと思われる。詳しい分析結果は本テストでは望むべくもないが、ノロの比重が大きかった測定結果から、そのことは類推されると思う。今回の操業は溶けたノロを排出できたことから考えて、炉内温度は十分確保できていると思われる。したがって、砂鉄が溶けやすい条件が重なり未還元の鉄(FeO)を溶けこみながら、鉄の塊ではなくノロとなったものと思われる。温度が十分に高ければ、最終的に、FeOもCOガスと炭素により鉄に還元されるが、今回は、物質収支から考えて鉄は気体として逃げることはないので、FeOの形でノロの中に残ったままとなったと考えられる。木炭中の炭素が羽口前で燃焼する反応式から理論燃焼温度を推定すると1300℃程度であり、還元された砂鉄の溶け落ち温度から考えて、炉内温度と風量などの微妙なバランスにより、ケラが成長するかどうかが決まるようだ。炉体からの熱放散が一定ならば、送風量を増やせば、木炭の炭素燃焼熱により炉内温度は上昇するが、第1回の場合は、炉体放散熱が多く炉内温度はそれほど上昇せずノロの溶け落ちが少なかったため、ケ

ラが成長した。第二回は、炉体放散熱が少なかったためノロを生成するまでの炉内温度はあったが、送風量を抑え気味であったため還元中の砂鉄の溶け落ちを促進するほど炉内温度は上がらず、羽口前にケラが成長したと思われる。

操業末期までケラ(鉄の塊)として残しながら鉄を還元することは、砂鉄の種類や温度条件などを左右する送風技術をコントロールする奥深い匠の技があると再認識させられたミニたたら操業であった。

表 砂鉄の代表的な成分(真砂砂鉄:文献2より) 単位:重量%

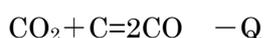
T.Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂
60.43	22.03	61.90	7.68	0.90	0.37	2.38	0.93

<製鉄の還元反応>

COによる還元



カーボンソリューション反応



炭素による直接還元



羽口(空気送風口)前の炭素の燃焼



※+Qは発熱反応、-Qは吸熱反応

5. 後記

たたら製鉄は日本古来の製鉄技術として、未だに研究対象となるような神秘的な匠の技であり、なおかつ美術品としての日本刀の原料として伝統を守りながらその技が伝承されている。私も若いときに日刀保にてたたら製鉄を見学させていただいたことがあるが、その神秘的な作業現場と奥深い技に感動した覚えがある。しかし、産業革命以降の製鉄において、鉄収率50%弱の非効率さでは全く競争力は無いと言える。ただ、美しい刃面を持つ日本刀はこのたたら鋼を用いないと作ることが不可能だと言われている。その玉鋼を微妙な匠の技の製鉄法で作出すたたら製鉄は、今でも森から樹種を選んで木を切り出し、炭窯で木炭を数種類用意すると言われる。まさに自然と対話しながらの製鉄法のように思える。現代人の生活にとっては役に立つ効率性はないが、その難しさから考えても残しておきたい匠の技だと思う。さらに欲を言うと、鎌倉高校のたたらから出た鉄にて日本刀を制作したと聞いているが、鋼の良し悪しを判断する上で我々もそこまで調査を進めてみたい気がする。

最後に、ご協力いただいた友の会、特に雑木林ファンクラブの皆さん、ミニたたら参加者の皆さんに、感謝申し上げます。

<参考文献>

1. 「古来の砂鉄製錬法 たたら吹製鉄法」 俵國一

昭和8年9月27日初版 2007. 6復刻・解説版 慶友社 館充/監修

2. 「たたら製鉄と日本刀の科学」 鈴木卓男 平成2年7月1日