

たたら製鉄の炉内反応機構と操業技術

永田 和宏*・鈴木 卓夫*²

Reaction Mechanisms and Operation Technique for "Tatara" Steelmaking

Kazuhiro NAGATA and Takuo SUZUKI

Synopsis : "Tatara" was a traditional box-type furnace in Japan and had produced steel and pig iron directly until 1923. After then, because of the low productivity, Tatara was not commercially operated but only for producing the materials of Japanese sword in little. In 1977 with the blank ages after the World War II, Japan Institute of Art Japanese Sword reconstructed the Tatara furnace, called "Nittoho Tatara". Then, Mr. Yoshizo Abe as a leader "Murage" realized his own technique for the Tatara operation because of the technique transfer only by oral instruction to the Murage's family. The 3rd Tatara operation in 1999 winter has been studied on the effect of fire flame (so called "Hose") and sound from furnace, the color and viscosity of slag (so called "Noro") flowed out from furnace and the condition of tuyers to the productivity of "Kera" including steel (so called "Tamahagane") and pig iron (so called "Zuku"), etc. This operation met the trouble of air blowing to the furnace in the final stage. Though many efforts had been made to recover the stable operation, the activity of furnace was stopped in shorter operation time than the other two operations. From the experiences of the recover, the fundamental treatments to make the operation stable have been cleared and also the reaction mechanisms to produce.

Key words : Tatara; steelmaking; operation; pig iron making; reaction mechanisms.

1. 緒言

たたら製鉄とは、粘土で築いた箱形の低炉で、原料に砂鉄を用い、木炭を燃料とし、送風動力に鞆(ふいご)を使用して行う日本古来から行われてきた製鉄技術である。日本における製鉄技術の開始期は、製鉄遺跡から見た場合、上限は6世紀後半で朝鮮半島から伝えられた技術と考えられている。時代が進むにつれて変革がなされ、江戸中期に技術的に完成し、「永代鑪(たたら)」あるいは「企業たたら」と呼ばれている¹⁾。その技術的特徴は次の点にある。「高殿(たかどの)」という建物の中で、湿気の防止と保温のための大がかりな地下構造を有し、その上に箱形の炉を粘土で築く。下部から空気を脈動的に吹き込むと同時に、木炭と砂鉄を交互に装荷し、3昼夜1操業で約3トンの鋼と銑鉄を生産し、1操業毎に炉を造り直す。

明治以降たたら製鉄は生産性に劣るため、輸入鋼に対抗出来ず、ついに大正12年に商業生産を終えた。明治期におけるたたら製鉄研究は(財)日本美術刀剣保存協会が文化庁の補助事業として島根県仁多郡横田町で高殿式たたらを復活した。これを「日刀保(にっとうほ)たたら」という。その目的は国の重要無形文化財に指定されている日本刀の製作技術を材料(和鉄)の面から

保護し、また、たたら製鉄技術の伝承を養成することであった。

日刀保たたらの操業はそれまでのたたらとは少し異なり、3昼夜全工程を一種類の「真砂砂鉄」だけで操業し、鋤(けら:鋼)を生産することにある。その開発には村下(むらげ:たたら操業の長(おさ))安部由蔵(あべよしぞう)の功績が大きい^{4,5)}。

従来、たたら操業技術は一家相伝であり村下から直接得た技術のノウハウともいべきものはほとんど記載がない。そこで本研究では、「日刀保たたら」の操業から村下の操業技術について調査を行い、その内容と炉内反応機構を考察する。

2. 日刀保たたら炉の構造

炉の地下構造は昭和初期から第2次大戦終了まで操業された「靖国鑪」の遺構を改築したものである。Fig. 1に示すように、深さ333 cm、幅970 cm、奥行き364 cmの長方形の穴底に排水溝があり、下から荒砂、坊主石、砂利、木炭、粘土の層が重なり、その上に、中心に本床、その両脇に小舟が配置されている。本床の上に構築された箱形炉の構造をFig. 2に示す。炉の長さは2,700 mm、高さは両端で1,200 mm、中で1,100 mm、幅は両端で761 mm、中で873 mmと中が少し低く、膨らんでいる。ホド穴(羽口)は片側20本ずつ両側に合計40本が一行に開けられた。炉底

平成11年8月23日受付 平成11年10月21日受理 (Received on Aug. 23, 1999; Accepted on Oct. 21, 1999)

* 東京工業大学(Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku Tokyo 152-8552)

* 2 (財) 日本美術刀剣保存協会 (Japan Institute of Art Japanese Sword)

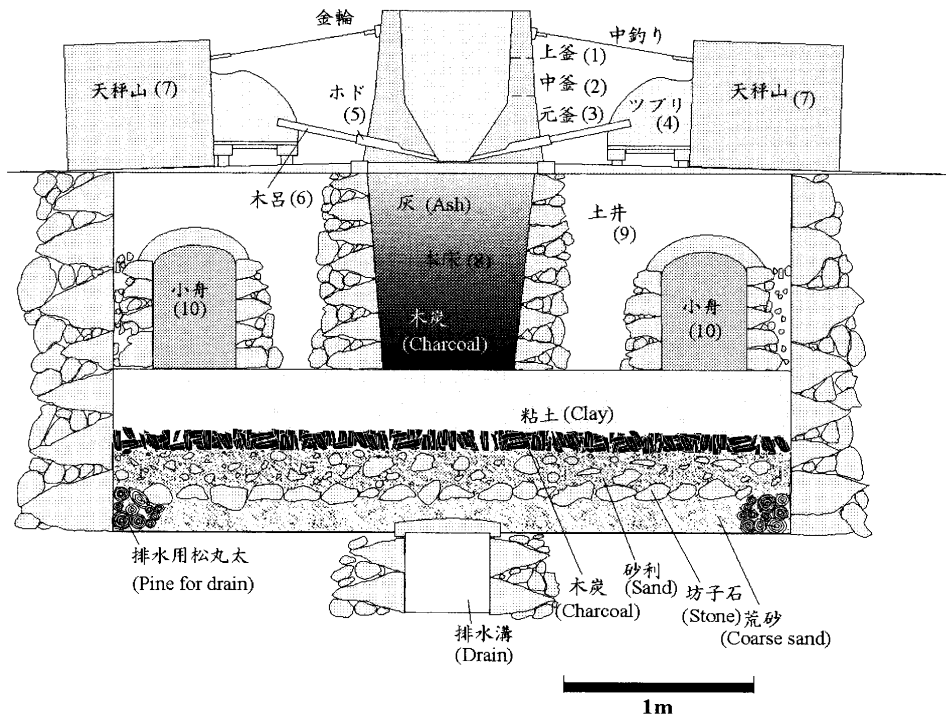


Fig. 1. Construction of the underground and furnace of the Nittoho Tataru. (1) Uwagama, (2) Nakagama, (3) Motogama, (4) Tsuburi, (5) Hodo (tuyer), (6) Kiro (bamboo pipe), (7) Tenbin-yama, (8) Hondoko, (9) Doi (clay), (10) Kobune (tunnel).

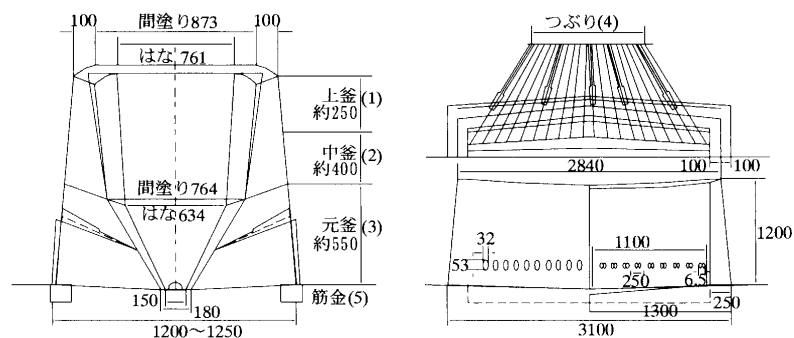


Fig. 2. Construction of the Nittoho Tataru furnace. (1) Uwagama, (2) Nakagama, (3) Motogama, (4) Tsuburi, (5) Sujigane.

(元釜)はV字型になっており、羽口の角度は19~24°で炉底に向かって斜めに開けられる。羽口の間隔は120mmである。炉は1代目(ひとよめ:代とは操業回数を示す単位)毎に壊される。送風は4台の鞆(ピストン型電動送風機)を用い、間欠的に送られる。炉の両脇には天秤台と呼ばれる炉と同程度の高さの台があり、ここにそれぞれ送風管が来ており、「つぶり」と呼ぶ送風分配箱から「木呂」と呼ぶ送風管を通して羽口に送風される。炉の両端の炉底には溶融スラグ(ノロ)を流出させるための直径10cm程度の穴が中心と左右に3本開けられており、通常は木炭粉を詰めて塞いである。中心の穴を「中湯池」(なかゆじ)と呼び、操業の初期に開けられる。両脇の2つの穴を「四つ目湯池」(よつめゆじ)と呼び、中湯池を粘土で閉じた後、操業中頃から使われる。

なお、ホド穴の大きさや角度は操業に大きく影響するのでその開け方は秘伝とされてきた。下原重伸は「鉄山秘書」(釜塗之事)²⁾の中で、「先つ元釜程塗、中板を取残し土を掃除して、他の役人は休、其間に村下は保土を切なり、秘密秘伝といふ、此保土穴の事也。」と述べ、また俵国一は「古来の砂鉄製錬法」²⁾第4章「炉の築造」で、「保土配りをなす等は爐築中最も重要なものとし、其技術は一家相伝にして秘密を守り村下一人之を司るものとす。」とあり、さらに、「爐の内外を乾燥するため夜を徹して一人之を司る。」と述べている。「日刀保たたら」においても代々表村下がこの任にあたり、炉の乾燥から来る炉体の変形、とくに「ホド穴」の変形に常に注意を注ぎ、これを秘伝としてきた。

3. 操業

平成10年度日刀保たたら第3代目の操業において、送風開始（平成11年2月3日）から鋳出し（平成11年2月6日）に至るまでの4日間の作業を観察し、①炎の状態、②ホド穴の状態、③出滓の状態、および④炉内から発生する音を記録し、良好な操業のあり方、炉の不調時の対応について調査した。なお、温度測定には波長650nmの放射温度計を使用した。

たたら操業の標準作業⁶⁾は、下灰（したはい）・築炉・砂鉄と木炭の装荷・鋳（けら）出しの順で行われ計6日間かかる。この内、製鉄操業は送風開始から鋳出しまでの約70時間である。下灰作業とは、木を燃して熾（おき）となったところを「しなえ」と呼ぶ長柄の木の棒で叩き締める操作である。炉床を固く叩き締めておくことにより炉床の損耗を少なくすることが出来る。その上にFig. 2に示す元釜、中釜、上釜を築く。

元釜、中釜を一晩木を燃やして乾燥し、翌朝、上釜、木呂および「つぶり」を据え付ける。木炭を上釜の中程まで装荷し、送風を開始する。乾燥の際の火種が残っているのですぐに木炭の燃焼が始まり、徐々に炉の温度が上昇する。その間に上釜を「かなしばり」と呼ぶ鉄の帯で補強し、炉周りには前回使用した釜土を砕いた土を敷き詰め叩き締める。ホド穴に「ホド蓋」と呼ぶ木栓をし、火勢を強くして木炭を炉一杯に装荷する。この木栓は木炭の燃焼が盛んになり空気がホド穴から吸引されるようになると取り外される。ホド穴は羽口と木呂管の繋ぎ目に開けてある穴で、ここから羽口先端の炉内を観察すると同時に羽口の補修を行う。なお、炉壁は最初内側が膨張し外に反るので天秤台との間に「押し棒」と呼ぶ鉄パイプを入れ、反りを防止する。操業が進行すると今度は逆に内側が収縮し内に反るので「かな引張り」と呼ぶ鉄線で引っ張る。

操業は表村下と裏村下で炉の長手方向に対し半分ずつ担当する。また、小金町（砂鉄置き場）側の半分を「ワテ」、反対側を「マエ」と呼び、4分割した領域について木炭と砂鉄の装荷量を記録した。砂鉄は羽内谷鉱山から採取され、磁力選鉱されている。木炭はならやくぬぎ等の雑炭で、拳大に砕かれている。

送風開始より約1時間後に「初種」と称する砂鉄を種鋤（木製のシャベル、1杯で約4kg）で表、裏のワテ、マエにそれぞれ各1杯ずつ計4杯装荷し、木炭を「竹簍（みの）」（1杯で約15kg）で表、裏各1杯ずつ装荷する。この後30分毎に砂鉄と木炭の装荷を繰り返す。木炭は壁際に装荷し、砂鉄も壁際から約15cm辺りに壁に沿って入れて行く。

標準操業では、送風開始より約20時間までを「籠り」（こもり）、以後16時間までを「上り」（のぼり）、以後28時間30分を「下り」（くだり）に区分し、この間の砂鉄と木炭の装荷量および送風量には標準的な値がある⁴⁾。

Table 1. Works for Tatara operation.

1日目 8:30	乾燥した中釜の上に乗釜を築く。
9:13	長目の木炭の燃焼した方を下にしてV字型の炉壁に並べる。
9:30	拳大の木炭を中釜まで入れる。
10:00	つぶり台、木呂管設置完了。
10:17	送風開始（ほど穴に木栓をする。）12回/分(775m ³ /hr)
10:30	上釜中程まで木炭を入れる。
11:30	上釜一杯に木炭を装荷。
12:33	初種（表と裏に種すきで砂鉄各1杯）と木炭を裏に各1杯装荷。
13:17	砂鉄各2杯と木炭各2杯、中湯池に粘りノロ、中湯池温度1175℃。中湯池から出る炎に鉄が酸化する時発する沸花あり。送風量12回/分(775m ³ /hr)送風圧12cm水柱。
13:40	砂鉄各3杯と木炭各2杯。以後30分毎に砂鉄と木炭を装荷。（“籠り”に入る）
14:50	中湯池から鉄棒を挿入し炉底に風が回る様にした。ノロ粘く珪石粒多い。(Slag sample 1) 頻繁にホド穴の掃除をする。
15:38	以後木炭量を各2.5杯に増加。 ホド穴より燃焼している木炭上に還元した砂鉄が炭素を吸収して液化し丸く光って見える。
16:15	表湯池付近に溶融ノロの溜まりがある。黒くガラス化しているが珪石粒多い。(Slag sample 2)
17:00	この頃頻繁にほど穴の掃除を行う。村下が裏の木炭の大きさが大きいと注意。
19:00頃	表より初ノロ流出。
23:40	この頃から砂鉄各4杯木炭各3杯に様子を見ながら徐々に増加させた。（「上り」に入る）
2日目 0:15	中湯路から四つ目湯路にノロ出口を変更。
8:38	送風量12.5回/分に増加。炎は山吹色で操業は順調。送風量約775m ³ /hr送風圧6.5cm水柱。 表ワテと裏マエのノロ流出。ノロの出ている側の炎は大きい。(Slag sample 3)
8:55	裏ワテ湯池温度1358℃
9:22	ホド穴より“チンチン”と“しじる音”が聞こえる。炎は山吹色。
10:07	送風量13.5回/分に増加(872m ³ /hr)。炎が少し赤みを増す。
11:30	この頃より“早種”を度々使用する。
14:03	送風圧12cm水柱。
18:59	表マエ端のホド穴温度1377℃。
20:40~3日目 2:10	まで裏マエの砂鉄装荷量を2杯に減量。 以後回復するが、木炭量を表と裏それぞれ2杯と2.5杯に減量。 早朝から炉況悪い。表の炎が弱い。9:28頃回復。
9:14~10:10	表ワテとマエの砂鉄量各3杯に減量。木炭も1.5杯に減量。送風圧9cm水柱。
10:40	回復。砂鉄表ワテ4杯、マエ5杯、裏ワテ4杯、5杯マエ。（“下り”に入る） 以後砂鉄量をそれぞれ3~5杯に調整し、それに伴って木炭量も1.5~4杯の間で調整。
11:37	表ワテのノロ温度1266℃。
13:00	裏ワテの木炭が順調に落ちない。13:40回復。
14:25	表ワテ、裏マエ湯池ノロ温度1248℃。表ワテホド穴No.1温度1274℃。送風圧ワテ9cm、マエ6cm。
16:30	表マエ湯池温度1300℃。裏ワテ湯池温度1245℃。
17:40	ホド穴からの噴出し弱い。
18:09	送風量14回/分(904m ³ /hr)に増加したが、20:00に13.5回/分(872m ³ /hr)に戻した。
20:30	裏ワテ、マエ共に砂鉄、木炭装荷せず。以後、砂鉄各2杯に木炭1杯に減量。 裏の通風状態が悪化。
24:00	砂鉄と木炭を表、裏共に減量。
4日目	状態回復せず。
3:37	通風状態が全体に悪化。青い炎が少し出る程度。表はしじれ音弱い。裏は風の音のみ。 砂鉄を表、裏のワテ、マエに各1杯を装荷し、終了。木炭装荷せず。 送風量13回/分(839m ³ /hr)。送風圧ワテ8cm、マエ7cm水柱。
4:15	表マエよりノロ流出。(Slag sample 4)
5:00	送風量12回/分(775m ³ /hr)に減らす。
5:17	送風停止。
5:50	炉の解体開始。
9:15	鋳出し。

4. 操業結果

Table 1に操業の記録を示した。また、Fig. 3には、砂鉄、木炭および早種⁴⁾の装荷量を操業時間に対して表わした。操業を見ると、送風開始から9時間後（19:00頃）に初ノロが出ており、また、23時間後には鋳が成長している時に発する「チンチン」あるいは「ジジジ」という「しじる音」が聞こえ操業は順調に進んでいることが分かった。しかし、33時間目（2日目20:40）から約6時間裏マエの砂鉄量が減量され、40時間目からは表と裏共に5時間程木炭の装荷量を減らしている。その後は砂鉄、木炭共に装荷量が非常に不安定になっている。58時間目にはついに裏への砂鉄と木炭の装荷を一時中止するが炉況は回復せず、67時間で送風を停止した。結局、この時の操業は実質2昼夜半で終了している。これは通風に支障を来たためである。また、今回の操業では最後までホド穴の木栓は外されなかった。

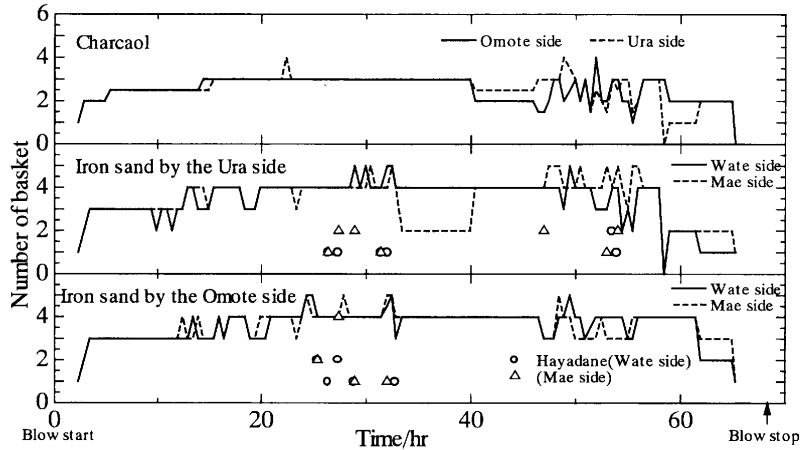


Fig. 3. Operation of Tataro furnace from start to stop of blowing. One basket of iron sand weighs about 4 kg and one basket of charcoal weighs about 15 kg.

炉解体後の元釜の炉壁は羽口上約10cmの辺りで最も厚さが減っていたが、まだ10数cmの厚さが残っていた。また、羽口での厚さは15cm程度であった。鉾は幅約90cm、長さ約2.5m、厚さ約50cmあり、表の方が裏より厚かった。なお、表ワテ側に「やまぶし」と呼ばれる突起が生成していた。これは、操業の終わり頃装荷された砂鉄が還元して積もったものである。

4・1 炎の観察

木炭は炉壁近傍に入れるため中は凹んでおり、炎は中心部より炉壁近傍で勢い良く上がる。炎の上がり方は両壁近傍で対称でなく、表と裏でも偏っていた。炎の色も場所により微妙に異なりこれらを均一にするべく砂鉄や早種の挿入量が調整された。

(1) 操業が順調な場合

炎を“ホセ”と呼び、山吹色の場合「山吹きボセ」あるいは「キワダボセ」ともいい、砂鉄・木炭・風の量が適当で操業が順調なことを示す。操業4日間において炎の色は多少異なり、「籠り期」は赤黄色であるが、「上り期」は赤色が少なく黄色が強かつ火勢が強くなる。「下り期」は上り期とほぼ同じである。

(2) 操業が不調な場合

ホセの色が黒みがかかる場合「黒ボセ」といい、砂鉄の装荷量が多すぎるとき（以下ヘビーチャージという）に起こる。一方、ホセの色が赤みがかかる場合「赤ボセ」といい、砂鉄の装入量が少なすぎるとき（以下ライトチャージという）に起こる。炎は紫色がかかることがあり、風が足りないときあるいはライトチャージのときに起こる。これを「やかんボセ」といいこのとき木炭の表面に灰が残り白く見える。

(3) 回復の仕方

黒ボセのときはやや砂鉄を減量し、赤ボセのときはやや砂鉄を増量し、やかんボセのときは風をやや強くし、砂鉄は増量しながら様子を見るが、早く回復させる必要がある

ときは「早種」（はやだね）を使用する。

4・2 ホド穴の観察

(1) 操業が順調な場合

ホド穴の色が光り輝き、満月の様な状態が続く。この場合「ホド突き」（ホドの状態を調べるときに用いる鉄製の細長い道具）で、ホドから炉内へこの棒を挿入したとき炉の奥深くまで通る。ホド突きをホドから引き抜いたときホド突きの先に火花が確認出来る。

ホド穴にノロが垂れ下がるように付着している場合でも、ホド突きで突くことによって「パリ・パリ」と剥れるような感触で簡単にとれる。

鉾の成長の具合は、ホド突きをホド穴深く差し込んだときの感触（磁石のようにすいつく）によって判断する。

(2) 操業が不調な場合

ホド穴から覗くと中が黒い色をしているときは全く不調な場合で、砂鉄が全く足りないか、逆に「生鉾降」（なまこおり）といって砂鉄が溶けないでそのまま降りてくるときに起こる。赤黒く見えるときはヘビーチャージを起こしており、黄白色で光り輝き過ぎるときはライトチャージを起こしている。ホド突きは炉の奥深くまで通らず、ホド穴にノロが粘りついてホド突きで突いても粘って取れない。ホド突きでホドを突き、引き抜いたときにホド突きの先端に粘いノロが多量に付着している。

(3) 回復の方法

ヘビーチャージを起こしているときは、やや軽めに砂鉄を装入し、また砂鉄に湿り気を与えて、砂鉄の降下を遅らせる。ライトチャージを起こしているときは、やや多めに砂鉄を装入するか、早種を使用する。

ホド穴が黒く見える場合には、「ホド突き」と「打ち貫き」という道具を用いて、ホドの中のノロを完全に除去して通風をよくし、同時に隣の状態の良いホドの保全により状態の悪いホドを蘇生させ、ホドの状態を連鎖的に回復させることが出来る。逆に不良のホドをそのまま放置してお

くと、吹けが悪くなり温度が低下して隣のホドへ影響し、バランスが崩れて送風を阻害し次々と隣のホドへ伝染することがある。

(4) ホド穴の管理方法

操業約70時間におけるホド穴の管理で重要なことは、良い通風状態を常に保つことであり、そのためにはノロの除去の他、次のことが心がけられる。

① 細長いホド穴の底部(カワラ)は常に平らに保ち、風が滑らかに送られるようにする。常にホド穴の中を観察しカワラに凹凸が生じたときはホド突き、竹ベラなどを用い粘土で平らに補修する。

② 炉の乾燥が進み、または炉壁が侵食されてホド穴の太さや形が変形し、場合によっては順調な送風が出来なくなる。細くなったときにはホド突きで削って広げ、太くなったときはホド穴の内側に竹ベラで粘土を塗って細くする補修作業を行う。

③ 木呂管からの風漏れに注意する。鞆で起こされた風は一度たたら炉の両脇にある風箱(かざぼこ)に集められ、ここからそれぞれ20本の木呂管によって炉内に送られる。木呂管は竹製で、その上に紙が巻かれ、さらに粘土を塗って仕上げているが、ときにはひび割れを生じて風漏れが起こり、ホド穴へ適量の風を送ることが出来なくなることが極く希れにある。

4.3 ノロの観察

(1) 操業が順調な場合

30分おきに自然に安定して流出し、粘らず流動性の良いものが出る。色は黄赤色で、外観からは蟹の甲羅のように見え、これを「蟹ノロ」という。

(2) 操業が不調な場合

出滓がない、あるいはあっても少ない、また道具を用いても粘ってなかなか流れ出ない場合は、ライトチャージやヘビーチャージ等が考えられる。多く出過ぎる時はヘビーチャージを起こしているときで、この状態が長く続くと鉬が良く成長せず、玉鋼の歩留りが低下する。赤味が強く、輝きが弱く、ノロ塊を持ったとき重い感じがする場合は、主に未還元のスダ鉄がノロへ流出している。総じて「イズホセ」の出が弱い。イズホセとは「湯池穴」(ゆじあな)から出る炎のことをいい、これは風の抜けが悪い状態を示す。

(3) 回復の仕方

「湯ハネ」という道具を用いて、湯池穴を突き、湯池穴に固まったノロを除去し、ノロの流れを良くする。ノロの出が悪いときは、同時に湯池口に近いホド(1番目から5番目くらい)もノロの付着、ヘビーチャージ、ライトチャージなどが原因で不調なときである。したがってホドの管理を十分に行い、ノロの通る道を造る。つまり風の通りを良くし、イズホセの出を活発にさせることによって出滓を促進させる。ただしあまり出し過ぎると炉の温度が下

Table 2. Products of Tataro operations in 1997 to 1999 (kg).

Grade	1999				1998	1997	
	1 st run	2 nd run	3 rd run	Mean	Mean	Mean	
Tama-hagane	1 st	277	360	237	292	497	811
	2 nd	397	363	301	354	570	504
	3 rd	972	854	618	815	601	228
Mejiro	104	136	107	116	136	254	
Dousita	298	338	287	308	317	275	
Orosigane	449	455	317	407	179	52	
Pig iron	41	52	8	34	49	133	
Total	2,538	2,558	1,875	2,326	2,349	2,257	
Iron sand				10,233	10,325	10,375	
Charcoal				10,545	10,725	10,413	

1st, 2nd and 3rd grade are called Tamahagane and classified in mass%C of 1.0–1.5, 0.5–1.2 and 0.2–1.0, respectively⁵⁾. Mejiro is small particle of Tamahagane, Dousita and Orosigane are low grade steel. Pig iron is the sum of Kera-Zuku produced in the bottom of Kera, Ura-Zuku collected under Kera and Nagare-Zuku flowed out from the furnace during operation. In this case, pig iron is almost Kera-Zuku.

がるので注意する。

ノロ出しを終えたあとは、湯池穴へ炭、または炭の粉を詰め、湯池口を常に高温に保ち、湯池口でノロが固まらないようにする。

4.4 音の状態

砂鉄の溶ける音と炎の上がる音を聞く。炉内で砂鉄を溶かし鉬に成長させることを「しじる」という。良く鉬が育っているときは炉の外側で静かに聞いていると、「ジ・ジ・ジ」という音がする。これを「しじる音」といい、多く聞こえるほど良い。音が聞こえないあるいは聞こえても小さいときは鉬の成長が不調なときである。

またしじる音が高いときは同時に炎の上がりも良く、「ゴー・ゴー」というリズムカルな音をたてる。反面音が不良のときは炎の上がりも悪く、「グーグー・グーグー」という炉がきしむような音となる。これは炉が風を嫌い、風を受け付けない感じで、このときは木炭の降下も悪くなる。これらを回復させるには全ての観察を総合的に行って判断する。

4.5 生産量と品質

炉を解体した後取り出される鉬は、玉鋼の1級品(炭素濃度1.0–1.5 mass%), 2級品(0.5–1.2%)および3級品(0.2–1.0%)⁵⁾、玉鋼の小粒の目白(めじろ)、品質が劣る銅下(どうした)と卸鉄(おろしがね)、さらに鉬の下部に生成する鉬銑(けらずく)からなっている。銑にはこの他、鉬の下に液体で溜まる裏銑(うらずく)と、ノロと共に流出した流れ銑(ながれずく)がある。

平成10年度の3代の操業での生産物を、平成8年度の4代の平均と9年度の4代の平均と共にTable 2に示した。銑はほとんどが「鉬銑」である。Table 1に示した記録は第3代の操業工程である。各年度の平均値と比較すると、平成10年度の第1代と第2代の全生産量は例年並みである。第3代だけ操業状態が悪く全生産量が落ちている。しかも、銑の生産量は極端に少ない。平成8年度と比べると、9年

Table 3. Composition of slags sampled during Tataro operation (mass%).

No.	Time	T. Fe	M. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	S
1	1d/14:50	72.71	62.72	5.31		3.27	12.79	3.07	0.45	1.52	0.022
2	1d/16:15	62.67	51.53	6.81		3.84	17.25	4.24	0.66	2.59	0.024
3	2d/8:38	12.40	1.82	11.11		1.67	59.39	13.50	0.89	3.01	0.012
4	4d/4:15	42.85	0.13	52.67		2.32	28.69	6.55	0.54	1.86	0.029
Masa Iron sand*		60.23		23.10	62.83	1.11	7.88	2.01	0.87	1.06	0.021
Clay of furnace		4.11		1.58	4.12	0.47	64.00	17.69	0.99	0.19	0.016

*:This iron sand was mined at Hanaidani and the composition is mean value.

度、10年度と次第に1, 2級品が少なくなり、3級品や卸鉄が増加している。また銑の生産量も減少している。すなわち、還元した鉄への炭素の吸収量が減少している。この原因について考えられることは、炉内温度が低くなっており、炭素を吸収する領域および時間が短くなっていることである。このことは地下構造が築後20年以上経過しており、湿気の遮断効果が低くなってきていることが考えられる。

5. 考察

5.1 炎と炉内反応

村下は多年の経験から、炎の色は「山吹ボセ」あるいは「キワダホセ」（木の名前で黄色をしている）とも呼んで、赤みが少なく黄色の強いものを良い炎としている。これは、いわゆる還元炎を意味している。そしてこの還元炎を持続するためには、砂鉄の装荷量と送风量に気をつけていることが分かる。なお、赤みの多い炎から還元炎への移行の時期は、昭和56年日刀保たたら第1代の操業において実施した炎の色の推移調査から、送風開始後8~9時間で起きていることが分かっていて、以後の操業においてもほぼ同様であることが確認されている。

5.2 ホド穴管理の重要性

村下はホド穴が満月色の状態で続くことが最も良いとしている。この色は炎が山吹色をしているのと同様に砂鉄がよく炉内で還元し、炭素を十分吸収していることを示している。そのために村下はホドの管理を余念なく行うが、これは結果として通風状態を良く保つことに専念していることが分かる。

5.3 鞆による断続通風の効果

操業が順調であると2日目のはじめの頃より、「ジ・ジ・ジ」という音が聞こえだし、これは鉞が育ってきたこと、つまり鉄が沸いて来たことを示す。そしてこのときは同時に風の吸収（炉上への吹き上がり）と排出（湯池口からの吹出し）が良好であるときでもある。鞆と一般のファンとの基本的な相違は、鞆は断続通風で強い風圧を出せるのに対し、ファンの場合は連続通風で風圧が弱いことにある。強い送風では、風が炉内へ送られたとき、充填されている木炭が、この風の力によって押しやられ、風の通りが良くなり燃焼効果が上がる。Table 1に示したように送風圧は水柱で6から12 cmある。たたら製鉄の送風、特に

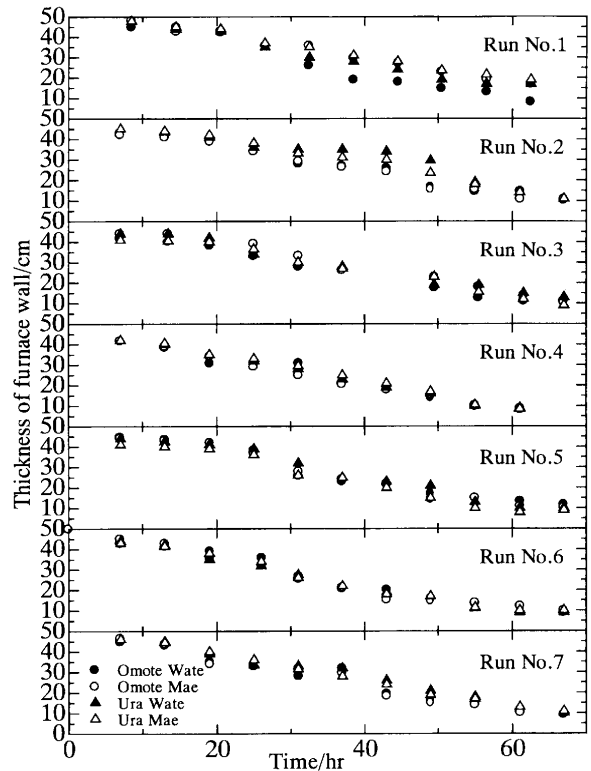


Fig. 4. Change of wall thickness of the Nittoho Tataro during 7 operations by Mr. Yoshizo Abe in 1978⁴⁾. The wall thickness was determined from the length of tuyer at 4 parts of Tataro furnace.

大型炉では、燃え上がった炭が風力によって押しやられ、次の休風時に効率よく新しい炭が降下する状態をつくる。連続送風の場合はこの効果が少ない。そしてこれがたたら製鉄における「正しい呼吸法」と言われ、その音のあり方に注意が払われる。

5.4 ノロによる炉内状況判断

Table 3に今回の操業の各段階で採取したスラグの分析値を示した。試料No. 1は送風開始後約4.5時間後に中湯池で採取されたもので、ノロは粘く珪石粒が多い。また、金属鉄が多い。この時期、Fig. 4に示すように羽口の長さで計測した元釜の炉壁はまだほとんど浸食されていない。ただし、このデータは、日刀保たたら開設当時の昭和53年度に、安部由蔵によって行われた7代の操業について調査したものである。空気はV字形の炉底近傍の羽口から漏斗状に吹き上がっており、装荷された砂鉄中の酸化鉄成分は還元されて鉄になる一方、砂鉄中のアルミナを含む珪石粒な

どは脈石成分として酸化鉄と反応して、酸化鉄飽和に近いファイヤライト組成の低融点スラグを形成する。しかし、温度が十分上がっていないため、未反応の珪石粒や、細かい金属鉄粒がスラグ中に懸濁する。永田⁷⁾は耐火煉瓦で構築した炉の内部に粘土を内張りしない場合、生成するスラグは酸化鉄飽和に近いファイヤライト組成に近くなることを明らかにしている。

試料No. 2は6時間後の試料である。黒くガラス化しているが珪石粒がまだ多い。炉の温度が上がり、表湯池付近にノロの溜まりができ、熔融スラグは生成しているが、未反応の珪石粒や、細かい金属鉄粒がスラグ中に懸濁している。この時点でも元釜の炉壁の侵食はほとんど進んでいない。

試料No. 3は約22時間後に湯池から流出したノロである。すでに完全に熔融しており金属鉄成分が非常に少なくなっており、シリカ飽和に近いファイヤライト組成のスラグが生成している。この時期では、炉底に鉞が成長しており、元釜の炉壁も20%程度溶けており、その分だけホド穴も後退し、同時にその傾斜分だけ鉞の厚さが高くなっている。したがって、羽口から漏斗状に上昇する空気は炉壁近傍を通り、壁際の木炭を燃焼して、壁の温度を上げると共に、砂鉄中の酸化鉄と炉壁が反応するようになり、シリカ飽和に近いファイヤライト組成のノロを生成する。この反応は解体後の炉壁を見ると、羽口上約10cm辺りで起こっている。羽口近傍に流れ落ちてきたノロは、羽口前で炭素を吸収した固液共存状態の粒鉄を含んだまま、鉞と炉壁の間を流れ落ち、粒鉄は鉞に溶着して成長させ、ノロは元釜の炉壁を溶解しながら炉底に溜まり、湯池から流出する。鉞はこのようにして成長するので次第に厚くなり、横幅も広がる。したがって、玉鋼は鉞の真中ではなくマエとワテ両側のそれぞれ中心部分に生成する。

試料No. 4は、66時間後に採取されたもので、この時期は炉の状況が悪くほとんど炎が立っていない状態で、最後に表マエから流出したノロである。熔融しており、金属鉄もほとんど含まれていないが、酸化鉄飽和に近いファイヤライト組成である。これは炉壁の温度が十分上がってなく、装荷した砂鉄が還元されずまた炉壁とそれほど反応しないでそのまま降下してノロになったものである。実質58時間で操業が終わったため、羽口における元釜の壁の厚さは15cm程度残っており、Fig. 4での結果と良く一致している。

出雲地方においては、たたら操業で最も重要なものを土とし、2に風、3に村下としている。そしてこの土の重要性について俵国一²⁾は「古来の砂鉄製錬法」第4章「鉞押し」の中で釜土の効用について「鉞は十分熔融する能はず従って自から爐外に流れ出ることなく漸次爐内に蓄積する。製錬作業の進むに従ひ爐壁の材料たる粘土は次第に浸蝕され一種の媒熔剤の働をなすべし。」と説明している。

そしてさらに、「爐材は適当なる酸性媒熔剤にあたるべし。実地操業に於て之等熔剤の不足来し生成せる柄実の流動性悪しき時は、別に珪石の粉を砂鉄と共に加ふ。」と述べていて、土の選定にはSiO₂が重要な役目を果たすことを説明している。そしてまたさらに「鉄山秘書」²⁾は「水晶砂の交る土なをよし。」と述べているが、水晶砂とはSiO₂のことである。釜土は風化の進んだ花崗岩から採取される。Table 3には壁土の組成を示す。アルミナを含む珪石であることが分かる。花崗岩と流紋岩はSiO₂とAl₂O₃がそれぞれ70.18 mass%と14.47%、72.80%と13.49%で共に玄武岩や安山岩、閃緑岩より濃度が高いことが分かる。⁸⁾

次に「蟹ノロ」を最もよいノロとしている理由は、「イズホセ」に勢いがあるとき、つまり湯池穴からの風の抜けが良いときに押し出されるように流出し、十分熔融しているからである。なお、外観が蟹の甲羅のようになるのは、熔融された軟らかいノロの表面を強い風が流れることによって起きる現象である。

5・5 早種

早種⁴⁾は通常30分毎の砂鉄装荷時間の合間に、ホド穴や炎の状態等から判断して、砂鉄がうまく降下していないところに局部的に装荷し、炉況を早く回復させる。早種には十分乾燥された真砂砂鉄が用いられ、これは降下が早いことから早種と呼ばれている。基本的にはなるべくこの早種に頼らず、適度な湿り気を帯びた真砂砂鉄⁴⁾だけで通常の操業が行われる。「日刀保たたら」でこの技法を活用する重要性と理由については前述したが、これにはホド穴や炎の正しい見方が要求される。

早種を必要とする判断基準は、ホド穴の色（砂鉄の降りたの少ないところは燃えが強く温度が上がり過ぎて黄白色に強く光り輝く）、ホド突きで突いたときの感触（ノロの中に酸化鉄が少ないため粘りを感じる）、および炎の状態（炎の高さが低い）などにある。万一この診断に誤りがあった場合、逆効果となる危険性がある。特に最も注意を要する操業初期の「籠り期」にあっては基本的な技術を順守し、早種をなるべく使わないよう心がける。

早種の装入については昭和53年度の全7代の記録を前報⁴⁾で示したが、この内容を見ると「籠り期」において早種が用いられたのは第1代目、第6代目、第7代目の3回で、しかもこの3回はすべて籠り期の後半に用いられている。

6. 結言

かつて、故安部由蔵村下に、たたら操業の秘訣はどこにあるかについて質問したことがある。そしてこれに対して同氏は、「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」と答えて

いる。以下この格言のもとに本研究で得られた結果を示す。

(1) 砂鉄と木炭，とくに砂鉄の装荷は炉に負担をかけないよう，ヘビーチャージやライトチャージに気をつけ，時には早種を用いて炉内の調整を行う。

(2) よい出滓を得るためには，よい釜土の選定が重要である。

(3) 以上を円滑に行うためには，送風の仕方が重要である。とくに鞆による送風は効果的である。

なお，平成10年度第3代操業の記録および操業技術の調査は日刀保たたら村下 木原明氏[†]にご協力頂いた。ここに

深く感謝する。

文 献

- 1) I.Takahashi: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **1** (1996), 854.
- 2) 俵 国一：古来の砂鉄製錬法，丸善，東京，(1993)。
- 3) J.Kozuka: *Tetsu-to-Hagané*, **52** (1966), 1763.
- 4) T.Suzuki and K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 905.
- 5) T.Suzuki and K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 911.
- 6) 鈴木卓夫：たたら製鉄と日本刀の科学，雄山閣出版，東京，(1990)。
- 7) K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 715.
- 8) 粘土の事典，岩生周一ら編，朝倉書店，東京，(1985)。

[†] 昭和52年の日刀保たたら開設時に表村下を安部由蔵が，裏村下を久村欽治（くむらかんじ）が務めた。安部由蔵は明治35年生まれ。大正14年まで地元でたたら製鉄に従事し，「靖國鑪」では昭和9年から終戦まで村下職を務めた。久村欽治は明治36年生まれ。昭和12年より「樋の廻（ひのさこ）たたら」（島根県能義郡布部）で安部由蔵に技術を学び，昭和15年から終戦まで同たたらにおいて村下職を務めた。そして両者の技術は現在，木原明（選定保存技術保持者，日刀保たたら村下）に引き継がれ，高殿式たたらの操業技術（ここでは鉚押し）が伝承されている。