

# たたら生産物「玉鋼」の性質に及ぼす 「籠り砂鉄」使用の影響

鈴木 卓夫\*・永田 和宏\*<sup>2</sup>

Effect of the Charge of "Komori" Iron Sand on the Properties of  
"Tamahagane" Steel Produced by "Tatara" Operation

Takuo SUZUKI and Kazuhiro NAGATA

**Synopsis :** The Tatara furnace, so called Nittoho Tatara, was reconstructed in 1977 based on "Yasukuni Tatara" which had been worked before the end of the World War II. Mr. Yoshizo Abe as a leader "Murage" developed the new techniques of direct steelmaking, "Kera-oshi" for Tatara operation only using "Masa" iron sand for the 3 stages of "Komori", "Nobori" and "Kudari". Until the age of "Yasukuni Tatara", the operation had been carried out in 4 stages with "Komoritsugi" following "Komori", and in the first two stages, the "Komori" and "Komoritsugi" iron sands with higher  $(\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{FeO})$  ratio had been used, respectively. In the present work, 7 Tatara operations with 3 stages were carried out using "Komori" iron sand or "Masa" iron sand for the "Komori" stage followed by the last two stages using "Masa" iron sand. The operation using "Komori" iron sand produced more amount and higher carbon content of "Tamahagane" than that only using "Masa" iron sand, because "Komori" iron sand was reduced easier than "Masa" iron sand.

**Key words:** Tatara; direct steelmaking; iron sand; tamahagane; carbon content.

## 1. 緒言

昭和初期の靖国時代までのたたら操業においては、約70時間の操業を「籠り」「籠り次ぎ」「上り」「下り」の4期に分け、それぞれ性状の異なる砂鉄を用いてきた。前報<sup>1)</sup>で、(財)日本美術刀剣保存協会が、昭和52年、島根県仁多郡横田町にある島上木炭鉱工場内に残されていた「靖国鑪」の遺構を利用し、「日刀保たたら」として復元した際、それまでのたたら操業方法とは異なり、真砂砂鉄のみによる操業を村下安部由蔵が開発したことを述べた。

本研究では、通常真砂砂鉄のみを使用した操業と、「籠り期」に酸化の進んだ籠り砂鉄を使用した操業の両者を比較し、生産される「玉鋼」の性質に及ぼす影響を調査した。

なお、昭和54年に(社)日本鉄鋼協会が島根県飯石郡吉田村において行った「復元たたら」においても、籠り期に赤目(あこめ)系砂鉄を使用した操業が行われていて、報告書<sup>2)</sup>にまとめられている。しかしその内容においては、籠り砂鉄の効用については言及されていない。

## 2. 実験

安部由蔵が古法に基づく籠り砂鉄使用による操業ができなかった理由は、籠り砂鉄の埋蔵する場所が国有地、県有

地であったりして籠り砂鉄を確保できなかったことによる。そこで日刀保たたらでは昭和55年にいたり、地元の土地所有者の協力を得、ある程度の籠り砂鉄を確保することができたので、古法を研究しておく必要から、籠り砂鉄使用による操業実験を昭和55年11月から同年12月にかけて3代実施した。また同時期に真砂砂鉄のみを使用した操業を4代実施し、比較した。

### 2・1 砂鉄採取の場所および期間

安部由蔵と木原明の調査のもとに、島根県仁多郡横田町大崎竹崎細谷(ほそだに)から、昭和55年11月2日より同年11月22日にかけて籠り砂鉄を採取した。

### 2・2 砂鉄の採取方法

細谷より原鉱170トンを採取し、これを日刀保羽内谷(はないだに)鉱山において磁選し、3,400kgの精鉱を得た。原鉱におけるT.Feは約2%である。Table 1に示すように精鉱のT.Feは59.41%ある。

### 2・3 操業実施日

昭和55年度の操業は7代行ったが、このうち2代、3代、5代の計3回の操業は「籠り期」に籠り砂鉄を、「上り期」と「下り期」は保羽内谷鉱山で採取した真砂砂鉄を使用して操業を実施した。他の1代、4代、6代、7代は真砂砂鉄のみを使用した。具体的な実施日は次の通りである。ここで「籠り期」は従来の「籠り次ぎ期」を含んでおり、区別されていない。

平成11年6月28日受付 平成11年9月20日受理 (Received on June 28, 1999; Accepted on Sep. 20, 1999)

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

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

Table 1. Composition of iron sands (mass%).

Tatara	Operation	T. Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{Fe_2O_3}{FeO}$
Tonami	Komori	58.05	11.38	70.30	6.24	5.40	4.55	0.88	0.29	0.20	0.14	6.17
	Komoritugi	58.64	17.54	64.28	5.03	4.60	5.80	1.42	0.34	0.13	0.15	3.66
	Nobori	60.37	22.91	60.79	4.61	4.73	4.03	0.91	0.72	0.21	0.20	2.65
	Kudari	60.38	21.30	62.59	7.23	2.69	4.17	0.67	0.32	0.05	0.16	2.93
Yasukuni	Komori	56.55	21.52	66.05	7.90	2.15	5.50	0.57	0.38	—	0.30	3.06
	Komoritugi	56.96	20.33	60.50	8.18	2.46	5.90	0.57	0.58	—	0.27	2.97
	Nobori	58.13	21.20	60.46	7.90	2.24	3.86	0.48	0.70	—	0.29	2.85
	Kudari	59.86	22.85	62.45	7.45	1.67	2.87	0.32	0.42	—	0.27	2.73
Nittoho	Komori*	59.41	20.91	61.71	7.38	3.06	2.43	1.005	0.34	0.27	0.18	2.95
	Others#	61.50	24.66	62.51	5.40	0.69	1.70	0.26	0.86	0.31	0.36	2.53

\*: This iron sand was mined from the Hosodani mine and included phosphorus of 0.052mass% and sulfur of 0.009mass%.

#: This iron sand which was used as "Masa" iron sand for whole stage of Tatara operation was mined from the Hanaidani mine and included phosphorus of 0.071mass% and sulfur of 0.032mass%.



Fig. 1. Operation of Tatara furnace.

第1回目(2代)は昭和55年11月30日から12月6日まで、第2回目(3代)は12月7日から13日まで、第3回目(5代)は12月25日から31日までのいずれも7日間であった。操業には、表村下を安部由蔵が、裏村下を木原明村下代行(現日刀保たたら村下)が務めた。

#### 2.4 操業方法

たたら炉の設備および操業方法は前報<sup>1)</sup>と同じである。炉はFig. 1に示すように箱型で、その長さは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。炉壁底部にホド穴(羽口)が片側20本ずつ両側に合計40本一列に開けられた。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台のピストン型送風機を用い、

間欠的に送られた。

全操業時間は約68時間である。使用送風量は籠り砂鉄を使用した場合で710 m<sup>3</sup>/hrから約24時間後に839 m<sup>3</sup>/hrに増風された。真砂砂鉄のみを使用した場合では775 m<sup>3</sup>/hrから839あるいは904 m<sup>3</sup>/hrに増風された。木炭の装荷は30分毎に行われ、1日目の籠り期では1回に平均8杯、それ以降は平均12杯であった。砂鉄1杯は約4 kgである。木炭は平均3杯(約45 kg)である。なお、木炭はなら、くぬぎ等の落葉樹の雑炭であり、拳大の大きさに砕いてある。

籠り砂鉄の使用時間と使用量をTable 2に示した。第1回目(2代)では初装入から10時間経過するまでに500 kgを使用し、第2回目(3代)では13時間経過するまでに1,100 kgを使用、第3回目(5代)では12時間経過するま

Table 2. Production of "Tamahagane" by Tatar operation with and without "Komori" iron sand.

Run No. (yo)	Operation time (hr)	"Komori" iron sand		"Masa" iron sand (kg)	Charcoal (kg) (+)	Steel (kg) *	Pig iron (kg)	"Tamahagane" (kg) (%) to steel			Slag (kg) (++)
		Charge time (hr)	Amount (kg)					1 <sup>st</sup> grade	2 <sup>nd</sup> grade	Total	
2代	67:35	0-10	500	6,100	9,574 (1.45)	1,385	21	354 (25.6)	202	556 (40.1)	4,910 (74.4)
3代	66:50	0-13	1,100	6,534	11,218 (1.47)	1,558	56.5	408.5 (26.2)	297	705.5 (45.3)	6,420 (84.1)
5代	66:40	0-12	1,105	6,994	10,316 (1.27)	1,339	45	306 (22.9)	199	505 (37.7)	6,780 (83.7)
Mean	67:02	0-12	902	6,543	10,369 (1.39)	1,427	40.8	356 (24.9)	233	589 (41.3)	6,037 (81.1)
1代	67:20	—	—	7,854	9,988 (1.27)	1,362	27	273 (20.0)	173	446 (32.7)	5,320 (67.7)
4代	67:30	—	—	8,837	10,419 (1.18)	1,570	80	280 (17.8)	200	480 (30.6)	6,070 (68.7)
6代	68:20	—	—	7,985	9,884 (1.24)	1,153	20	193 (16.7)	121	314 (27.2)	5,490 (68.5)
7代	69:10	—	—	8,190	11,144 (1.36)	1,307	74	235 (18.0)	95	330 (25.2)	5,020 (61.3)
Mean	68:05	—	—	8,217	10,359 (1.26)	1,348	50.3	245.3 (18.2)	147.3 (29.1)	392.6 (66.6)	5,475 (66.6)
Tonami	68	0-9:57	1,350	11,475	13,500 (1.05)	1,125	1,575				15,200 (118)
						3,712.5 (Total)					
Yasukuni	71	0-17	2,610	12,301	14,900 (1.00)	577#	1,519\$				577\$
						3,728 (Total)\$					

\* : Total product including steel, pig iron and "Kera" weighed 2.0 to 2.5 tons for Nittoho Tatar and that for Tonami Tatar is mean value in 1898. + : Mass ratio of charcoal to iron sand. ++ : Mass% of slag to iron sand. \$ : Mean weight in 1943. #: Different classification on steel excluding low grade ones.

で1,105kgを使用した。以後は真砂砂鉄を装荷した。

全工程を真砂砂鉄のみ用いた操業では、前報で明らかにしたように「籠り期」において湿気のある砂鉄を用いた。

炉内反応状況の調整には「早種」（乾燥した真砂砂鉄）が適宜用いられた。

### 3. 結果

#### 3.1 操業結果

操業結果をTable 2に示す。鋼の中で良質な部分を「玉鋼」と呼び、その等級の区分基準をTable 3に示す<sup>3-5)</sup>。

(1) 「籠り期」に籠り砂鉄を使用した操業で得られた玉鋼の生産量と、全工程真砂砂鉄のみを使用した操業で得られた玉鋼の生産量とを比較してみると、前者の場合、その平均値は玉鋼1級品が356kg, 2級品が233kg, 合計589kg, 後者の場合、玉鋼1級品が245.3kg, 2級品は147.3kg合計392.6kgとなる。これを全鋼量に対する割合で見ると、前者で玉鋼が41.3%, 内1級品が24.9%, 後者では、玉鋼が29.1%, 内1級品が18.2%となり、籠り砂鉄を使用した場合の方が高い収率を得た。

(2) 第3回目(5代)の操業では、砂鉄を十分洗ってT.Feが60~63%と高くなった籠り砂鉄を第2回目(3代)の操業のときとほぼ同量(1,105kg)を使用した。この場合、玉鋼の合計も1級品も収率が少し落ちている。

Table 3. Classification of "Tamahagane".

Grade	Carbon(mass%)	Breaking surface
1 <sup>st</sup> (1級品)	1.0~1.5	Uniform crystal grain
2 <sup>nd</sup> (2級品)	0.5~1.2	Uniform between 1 <sup>st</sup> and 3 <sup>rd</sup>
3 <sup>rd</sup> (3級品)	0.2~1.0	Rough crystal grain

(3) 第2回目(3代)の操業について特記すべきことは、次の通りである。操業第1日目の送風開始から9時間で、数カ所のホド穴で「金花(かねばな)」を確認した。金花とは、ホド突きという鉄棒をホド穴(羽口)へ差し込み、それを抜いたとき、棒の先に付着した鉄が線香花火のように飛び散る様子をいい、このような早い時間に確認できたということは、通常の操業に比べて早期に鉄が沸き(鋸が生成し)始めていることを示している。

(4) 1代から7代いずれの操業でも初ノロ(最初に流出するスラグ)が出る時間は送風開始から9時間半ほどであった。しかし、籠り砂鉄を使用した操業ではいずれも第1日目の出滓と流動が特に良好で、2代では1.5kg, 3代では4kg, 5代では5kgと、他の操業での1~2kgと比べるとノロの出が良かった。特に、3代では普通であれば「湯はね」という道具を用いてノロの流出を促すことが多いが、この時はこの作業を行わなくても自然に吹き出るように沸き出した。このことは従来の真砂砂鉄のみを用いた操業には見られなかった現象である。

(5) 全出滓量の全砂鉄量に対する割合を見ると、籠り砂鉄を使用した操業の場合74.4から84.1%で、真砂砂鉄のみを用いた操業の場合の61.3から68.7%を上回っている。  
 (6) 銑の生産量は、昭和52年は1代平均178kg（鋸に

対し14.8%）、昭和53年194kg%（同13.7%）、昭和54年178kg（同11.3%）、昭和55年46kg（同3.2%）、昭和56年363kg（同20.5%）と昭和55年だけ少なく、これは7代全てに共通している。しかし、この理由は不明である。

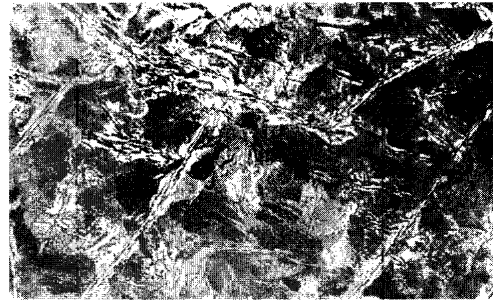
Table 4. Composition of "Tamahagane" steel (mass%).

Iron sand	Grade	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Co	Cu	Al
"Komori" & "Masa"	1 <sup>st</sup>	1.42	0.01	<0.01	0.025	0.004	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.002
	2 <sup>nd</sup>	1.19	0.02	<0.01	0.025	0.005	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.003
	3 <sup>rd</sup>	0.60	0.02	<0.01	0.025	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.005
"Masa"	1 <sup>st</sup>	1.30	0.02	0.01	0.057	0.012	0.01	0.01		0.01		0.01	0.003
	2 <sup>nd</sup>	0.44	0.02	0.01	0.057	0.018	0.01	0.01		0.01		0.01	0.027
	3 <sup>rd</sup>	0.19	0.31	0.01	0.021	0.004	<0.01	0.01		0.01		0.01	0.11
Tonami	Best	1.33	0.04	Tr.	0.014	0.006							
	Other	0.89	0.04	Tr.	0.008	Tr.							
	Zuku	3.61	0.03	0.01	0.033	0.01							
	Zuku	3.55	0.02	Tr.	0.043	0.01							

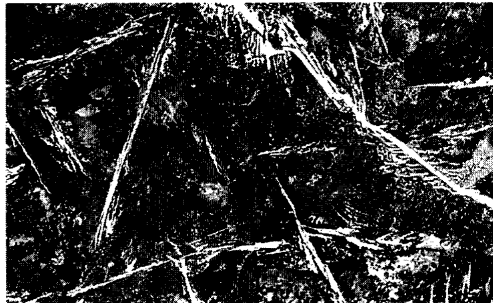
1<sup>st</sup> grade



1<sup>st</sup> grade



2<sup>nd</sup> grade



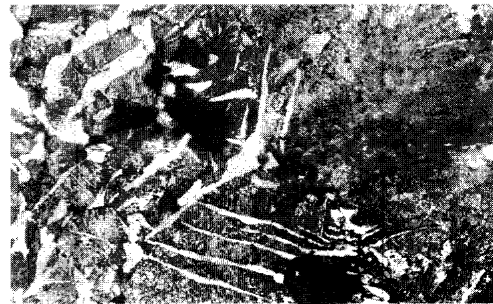
2<sup>nd</sup> grade



3<sup>rd</sup> grade



3<sup>rd</sup> grade



a) (X50)

b) (x50)

(Black area:Parlite, White area:Cementite)

Fig. 2. Texture of "Tamahagane" classified to the grade of 1st to 3rd. a) "Tamahagane" produced using "Komori" iron sand for the first stage of "Tatara" operation in 1980 and b) that produced only using "Masa" iron sand for the hole stages of "Tatara" operation in 1979.

### 3・2 玉鋼の性質

#### 3・2・1 元素分析

Table 4では、籠り砂鉄を使用して得られた玉鋼と真砂砂鉄だけを使用して得られた玉鋼の成分分析値を比較した。後者は昭和54年度第6代の結果である。これを比較すると、炭素濃度は総じて前者の方が高く、またリン濃度と硫黄濃度も前者の方が低いことがわかる。

#### 3・2・2 組織観察

籠り砂鉄使用による玉鋼1級品、2級品、3級品の組織と、比較のために昭和54年度第6代の羽内谷産真砂砂鉄のみ使用による玉鋼1級品、2級品、3級品の組織をFig. 2に示した。

##### (1) 玉鋼1級品

細谷産籠り砂鉄使用の玉鋼は、過共析パーライト組織を呈し、良く発達した初析セメントタイトが棒状に生じている。この初析セメントタイトが発達した組織は、昭和54年度第6代の玉鋼には見られない。

##### (2) 玉鋼2級品

細谷産籠り砂鉄使用の玉鋼は、ウッドマンステッテン組織と、ネット状、棒状の初析セメントタイトが生じている。

##### (3) 玉鋼3級品

細谷産籠り砂鉄使用の玉鋼は、ほとんどが亜共析組織を呈し、ウッドマンステッテン組織と発達したフェライト組織を示している。

## 4. 考察

### 4・1 砂鉄の性状

Table 1には、明治期の伯耆国の砥波鑪<sup>6)</sup>、日刀保たたら<sup>7)</sup>の前身の靖國鑪<sup>7)</sup>における「籠り」、「籠り次ぎ」、「上り」および「下り」各段階で用いられた砂鉄、および日刀保たたらで用いられた本実験での籠り砂鉄と真砂砂鉄の成分の分析値を比較した。これをみると、砥波鑪と靖國鑪にあっては、T.Feは低いものから高いものへと変化していることがわかり、また $(\text{Fe}_2\text{O}_3\text{濃度})/(\text{FeO濃度})$ の比は高いものから低いものへと順次変化していることがわかる。

この数値の移行について俵国一<sup>8)</sup>は「古来の砂鉄製錬法」の第9節「製錬操業」で砥波鑪につき次のように述べている。「鉚押しの場合専ら真砂小鐵用ゆ。此地方にありて砂鐵の種類に依り、籠り小鐵と称するものあり最初之を爐に加ゆ。恰も赤目小鐵に似て粒細かくその條痕も亦赤褐色にして、爐内に於て還元され易きものなるを以て、其温度漸く高まるに従ひ装入す。又他に籠り次小鐵と称する砂鐵あり。爐内の温度漸く高まるに従ひ装入す。次ぎに上り小鐵、終りに下り小鐵を輿ふ。最も還元し難く粗粒にして、鋼を造るべき主要原料となるべきものとす。」

また小塚寿吉<sup>7)</sup>は靖國鑪の操業について、「第1の籠り期は、まだ炉温が上がっていないので装入鉄源は全部炉底壁

を造滓原料としてslagになり、これが炉底に熱を籠らせる役目をする。そのため其の鉄源の砂鉄は特に溶けやすいものを用い、これを籠り小金とって砂鉄でも特に別格扱いにされているものである。次の籠り次ぎ期になると、炉温も次第に上り炉底には滓だけでなく、銑も段々できてはくが、それでも溶けやすい方が望ましいので、先の籠り小金を40%前後混ぜた鉄源を使う。次の上り期になると炉底には銑、滓、ともにあり、十分熱も籠ってくるので次の下り期で鉚を作っていくための鉚種を作るべく、少し硬いすなわち溶けにくい砂鉄を入れていく」と述べている。

本実験で用いた細谷の籠り砂鉄と、通常の実砂砂鉄である日刀保羽内谷鉾山の砂鉄とを比較すると、細谷の砂鉄(酸化度、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{FeO})=2.95$ )は羽内谷の砂鉄(同2.53)に比べてかなり酸化していて、籠り砂鉄としての適性を備えていることがわかる。一方、靖國鑪と砥波鑪に用いられたものと比較すると酸化度はそれほど高くない。すなわち、細谷の砂鉄の酸化度(2.95)は靖國鑪の籠り次ぎ(2.97)、砥波鑪の下り(2.93)にほぼ該当し、これらの鑪に用いられた砂鉄と比べると酸化度は低いことがわかる。特に砥波鑪にあっては、籠り期の砂鉄の酸化度は6.17という高い数値を示していることが注目される。一方、靖國鑪は国家をあげての大事業であった。しかしその靖國鑪でさえ砥波鑪に比較して酸化度の低い砂鉄が用いられているのは、いかに籠り砂鉄の確保が難しいかがわかる。

### 4・2 「籠り期」における籠り砂鉄使用の効果

砥波鑪では銑が約50%生産されており、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{FeO})$ 比が6.17であることから、「籠り期」というまだ十分に温度が上がっていない時期から早期に還元が進み、炭素の吸収が促進されて銑が早くから生成したと考えられる。砥波鑪では送風開始から4時間10分で初ノロと同時に銑も流出し始めている。

細谷の籠り砂鉄使用による操業実験においても初ノロの生成量が多い。

### 4・3 玉鋼の組成と組織から見た籠り砂鉄使用の効果

Table 4で明らかのように、籠り砂鉄を使用した場合は玉鋼1級品の収量も多いが炭素濃度も高い。また、Fig. 2でわかるようにセメントタイト相が良く成長している。これはこの場合、早期に還元が進み、炭素の吸収が促進されたことを示している。

### 4・4 「籠り期」の炉内反応

炉内反応について俵<sup>8)</sup>は次のように述べている。「籠り時期より上り時期において与えられたる砂鉄の一部はその鉄分還元せられ進んで炉内において炭素を十分吸収し銑鉄となり得べし。しかれども他の一部はその鉄分還元せらるるも、十分炭素を吸収し得ざるものあるべく炉底に固着しいわゆる鉚を造るべし。」さらに、炭素を十分吸収した銑鉄は羽口下に滴下して、温度低下と共に鉚を核として晶出し、残りはさらに滴下して銑になるとしている。永田<sup>8)</sup>

は小型たたら炉で鋳の生成機構を研究し、還元した砂鉄が羽口前で炭素を吸収し滴下すること、その鉄の粒の炭素濃度が0.87から2.55%にまで大きくばらついており、これらの粒鉄が鋳の上を覆っている熔融スラグ（ノロ）中で互いに結合し沈下して鋳に結合し、緻密な鋳を成長させることを実証した。

本研究では、「籠り期」において、2種類の砂鉄を装荷する方法を実施した。一つは、酸化度の高い細谷の砂鉄を使用した。他は、通常の羽内谷の砂鉄でこれは真砂砂鉄と呼ばれているもので、粒径は大きく、酸化度は低い。前者は、還元が容易で速やかに鉄になり、炭素を吸収して銑鉄を生成する。一方、後者は、粒径も大きく還元にかかる砂鉄である。後者のみを使う技術は安部由蔵により開発されたが、かれは、この砂鉄に湿り気を与えることにより、炉内の還元帯での滞留時間を長くし、結果として前者と同じ効果を出すことに成功した。

本実験で全造滓量は籠り砂鉄を使用した場合が真砂砂鉄を使用した場合に比べて多い。ノロ（スラグ）が生成する機構は2通りあると考えられる。1つは炉壁が70%以上の $\text{SiO}_2$ と20%程度の $\text{Al}_2\text{O}_3$ からなる粘土でできているので、これと砂鉄中の酸化鉄粒子が接触し反応してシリカ飽和のファイヤライトの熔融スラグが生成する場合である。炉底の形はV字になっており、操業初期はV形の底近くに羽口が来ているので、空気はそこから漏斗状に上昇し、その中の木炭を燃焼し、それに伴い砂鉄が徐々に降下してくる。したがって、酸化鉄粒子が鉄に還元されて炉底に達する確率は大きく、この機構では初期のノロが生成し難いであろう。もう1つの機構は、砂鉄中の酸化鉄と珪石が反応してノロを生成する場合である。砂鉄中の酸化鉄はマグネタイトと少量のイルメナイトからなっており、シリカはアルミナを含む珪石として混合している。平成11年2月に行われた操業では、初期のノロは酸化鉄飽和に近く、粒鉄と共に多数の珪石の粒子がノロ中に観察された<sup>9)</sup>。この状態は、永田<sup>8)</sup>が小型たたら炉で行った、炉壁を耐火レンガで構築しかつ造滓剤となる粘土を使用しない場合、ノロが酸化鉄飽和に近いイルメナイト組成の熔融スラグになる場合と一致している。Table 1を見ると籠り砂鉄の方が真砂砂鉄に比べて $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 濃度が高い。したがって、籠り砂鉄を使用した場合の方がノロの生成量が多くなる。

以上から、「籠り期」の炉内反応では、炉が比較的低い温度にある時期に、十分還元を行わせた上で炭素を吸収させ銑鉄とすることが重要である。このために酸化度の高い砂鉄を使用するか、あるいは炉内の還元帯での滞留時間を長くする必要がある。また、砂鉄中の珪石と酸化鉄を反応させ、ノロを生成させ、生成した鉄の再酸化を防止すると同時に、炉底の保温を図ることが重要である。籠り砂鉄は

酸化度が高く還元され易いと同時に、ノロを生成するための珪石など脈石成分を比較的多めに含んでいることが重要である。この意味で、安部が日刀保たたらを真砂砂鉄のみで操業する方法を開発した時<sup>1)</sup>、砂鉄の湿り気が高すぎると初期のノロの生成を困難にし、低すぎると銑の生成を困難にするという矛盾を、適度な湿り気で両立させたことは注目に値する。

玉鋼中のリンや硫黄は砂鉄以外にも木炭にも起因する。本研究では使用した木炭は同じなので、籠り砂鉄を使用した方がこれらの成分の濃度が低くなっていることは、Table 1の注に示したように、砂鉄中のこれらの成分濃度に依存している。

## 5. 結言

以上、籠り砂鉄使用によるたたら操業への効果は以下のようになる。

(1) 操業の結果からは、通常の真砂砂鉄のみによる操業より、操業初期に籠り砂鉄を使用した操業の方が玉鋼の生産量と品位において優れている。すなわち炭素濃度はより高く、リンと硫黄濃度は低い。また、特に一級品において初析セメントタイトが発達している。また早期に鉄が沸き、ノロの流動もよい。リンと硫黄濃度が低いことは砂鉄中のこれらの成分濃度に依存している。

(2) 砂鉄の性状からは次のことがわかった。

① 昭和初期の靖國鑪までは、約70時間の操業の流れにあってT.Feは低いものから順次高いものへ移行し、酸化度( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )/(FeO)の比は高いものから順次低いものへと移行することがわかった。

② 細谷の砂鉄は通常の真砂砂鉄に比べて酸化しており、籠り砂鉄としての適性を備えていることがわかった。しかし、靖國鑪までに用いられた砂鉄と比較すると、酸化度は小さい。

なお、資料の収集は木原明氏に依頼した。ここに深く感謝する。

## 文 献

- 1) T.Suzuki and K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 905.
- 2) たたら製鉄の還元とその鋳について (たたら製鉄復元計画委員会報告), 日本鉄鋼協会, 東京, (1971).
- 3) 玉鋼品質の研究, 日本美術刀剣保存協会, 東京, (1979).
- 4) 鈴木卓夫: たたら製鉄と日本刀の科学, 雄山閣出版, 東京, (1990).
- 5) 鈴木卓夫: 作刀の伝統技法, 理工学社, 東京, (1994).
- 6) 俵 国一: 古来の砂鉄製錬法, 丸善, 東京, (1993).
- 7) J.Kozuka: *Tetsu-to-Hagané*, **52** (1966), 1763.
- 8) K.Nagata: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 715.
- 9) K.Nagata and T.Suzuki: Reaction Mechanisms and Operation Technique for Tataro Steelmaking, *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000) Jan.