



たたら製鉄の生産性と製品品質に及ぼす 装荷比（砂鉄／木炭）の影響

久保 善博*・佐藤 豊*²・村川 義行*²・久保田 邦親*³

Influence of the Loading Ratio (Ironsand/Charcoal) on Productivity and Quality of the Products
by Tataru Ironmaking Process

Yoshihiro KUBO, Yutaka SATO, Yoshiyuki MURAKAWA and Kunichika KUBOTA

Synopsis : The Japanese traditional steel making method which manufactures steel “Kera” or pig iron “Zuku” from iron sand and charcoal is so called “Tataru” steel making process. The influence of the loading ratio of iron sand to charcoal on the “Tataru” steel making was investigated. In the case of the loading ratio is equal to 1, high carbon steel “Kera” was produced at the high yield accompanied with viscous slag “Noro”. In the meantime, in the case of the loading ratio is equal to 1.5, the carbon content of the produced steel “Kera” was low at the low yield accompanied with a lot of low viscous slag “Noro”. In the case of low loading ratio, so called “light charge”, iron sand was well deoxidized and carbonized in the furnace and became to high carbon steel “Kera” at the high efficiency. In that case, the slag “Noro” became to viscous one because of the reduction of FeO content.

On the contrary, in the case of high loading ratio, so called “heavy charge”, the deoxidization of iron sand was insufficient and most of iron sand was discharged as a slag “Noro” to the outside of the furnace. As the result, produced steel “Kera” yield lowered. During the “heavy charge” operation, the composition of the slag “Noro” became FeO-rich, and then the fluidity of the slag “Noro” increased. It was clarified that the controlling of the loading ratio was an important factor which affected both to the quality and productivity of steel “Kera” and the fluidity of slag “Noro” on “Tataru” steel making process.

Key words : iron sand, Tataru, loading ratio, Kera, Noro, Japanese sword

1. 緒言

砂鉄を木炭で還元し鋼や銑鉄を生産する方法をたたら製鉄という。たたら製鉄は日本古来の製鉄方法であり、日本全国の砂鉄の採取されるところで小規模なたたら操業が行われ、武器や農機具、鍋釜などの製造に必要な鉄が得られていた。特に良質な砂鉄を豊富に埋蔵する中国山地は、近世において日本の大部分の鉄をまかなうほどの一大生産地であった。そのたたら製鉄も、明治以降、大量生産が可能な洋式製鉄法のまゝに、大正期には全て姿を消した。第二次大戦時に、軍刀用の玉鋼生産のため靖国たたらとして一時再興されたが、終戦とともにその火は消えている。今日では、島根県横田町で（財）日本美術刀剣保存協会の運営する「日刀保たたら」が、日本刀の材料である玉鋼を生産するために年3~4回の操業をするのみである。

日刀保たたらでは、1代（ひとよ）の操業で、砂鉄約10トン木炭約10トンを消費し、2~3トンの鋳（けら）と呼ばれる鋼と銑鉄の塊を生産している。操業には3日3晩（約70時間）を要し村下と呼ばれる技師長は、その間不眠不休で砂鉄を装荷し、炉況を判断しながら長時間の操業を

安定に保つよう的確に処置をしていく。たたら製鉄においては昔から「一土、二風、三村下」といい、釜土の配合や送風量の調整、そして砂鉄の装荷量など操業技術の重要性を説いている。しかし、村下の技術は、一子相伝的に伝えられてきたため、そのほとんどが謎に包まれている。実際、たたら製鉄において操業を安定に保ち品質の良い鋳を作り出す技術は、かなりの熟練を要するものである。このたたら製鉄の閉鎖性と技術的難易度のために、これまでも多くの研究がなされてきたにもかかわらず¹⁾、村下の操業技術についての詳細な報告はなされなかった。たたら製鉄における操業技術と製鉄メカニズムの解明には、操業条件を変えることにより起こる炉況の変化を正確に捉え、操業を安定に維持できる高度な職人としての技術が要求されるものと考えている。

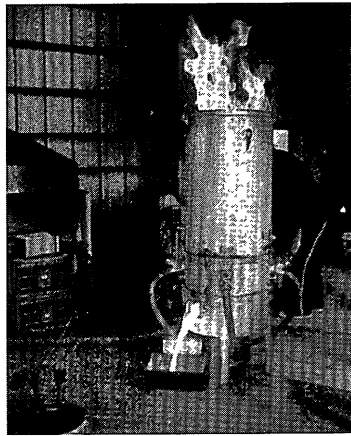
本研究では、小型たたら炉を使用して、いろいろな操業条件の中で特に装荷比（砂鉄／木炭）に着目し、装荷比が操業の安定性や鋳の品質および歩留まりにどのような影響を与えるかを調べた。炉況を安定に保ち、歩留まり良く品質の良い鋳を生産するための村下の技術の一部を解明することを試みた。

平成16年4月26日受付 平成16年9月2日受理 (Received on Apr 26, 2004, Accepted on Sep 2, 2004)

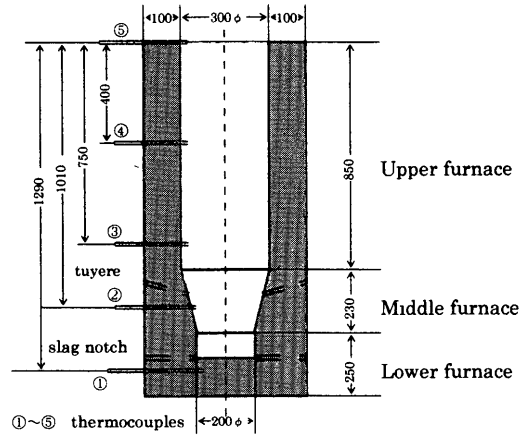
* 刀鍛冶 (Japanese Sword Smith, 495-5 Saijo-cho Osa Hibagun Hiroshima 729-5722)

* 2 和鋼博物館 (Wakou Museum)

* 3 日立金属 (株) 冶金研究所 (Metallurgical Research Laboratory, Hitachi Metal Ltd)



(a)



(b)

Fig. 1. (a) A view of Tataru furnace (b) Size of Tataru furnace (mm)

2. 操業実験

2.1 操業準備

2.1.1 たたら炉

Fig. 1(a)に操業風景, Fig. 1(b)にたたら炉の構造を示す。炉の外側は直径50mmの円筒形の鉄板で、内側は粘土でできており、上釜、中釜、下釜の3つからなる。上釜は炉壁の厚さ100mmで、繰り返し使用する。中釜と下釜は日刀保たたら元釜に相当し、鋤の成長とともに浸食されるため、操業ごとに作り替える。操業前に築炉し十分乾燥しておく。釜土は横田町産の粘土を使用し、羽口数は4本、羽口角度は鋤押し法の平均的角度である23度とした²⁾。羽口内径は、炉外壁面で30mm、先端部で10mmになるようにした。

2.1.2 温度測定

温度測定はFig. 1(b)に示すように①炉底②羽口③上釜下部④上釜-中部⑤炉頂の5ヶ所をPR熱電対により測定した。炉底は炉径中心部を測定し、他は炉内壁より1cm内側を30分間隔で測定した。2代においては炉底温度①の測定は省略し、羽口温度②の測定は熱電対の溶損を避けるため光高温計(チノーIR-HS)を用いた。

2.1.3 ガス分析

オルザットガス分析計により図1の②, ③, ④の3ヶ所からCO, CO₂, O₂の3種類ガス測定をした。

2.1.4 送風

淀川電動送風機DH-3S型で送風し、内径50mmの送風管に調節弁を取り付け送風量を調節した。風速は、微風速計(柴田科学機器工業SA-12型)を調節弁の風下1mに取り付け30分ごとに測定した。

2.1.5 砂鉄

島根県仁多郡横田町内の斐伊川産砂鉄を使用した。分析値をTable 1に示す。Fe₂O₃/FeO(酸化度)は2.37と低く、TiO₂の少ない(1.46%)典型的な真砂砂鉄である。炉内での

Table 1. Chemical compositions of iron sand and clay for furnace construction. (mass%)

	C	SiO ₂	MnO	P	S	NaO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O
Iron sand	0.049	5.79	0.35	0.074	0.024	0.25	0.03	0.21
Clay for furnace		55.56	0.082	0.032	0.007	2.25		1.42

CaO	MgO	V ₂ O ₅	TiO ₂	Cu	Al ₂ O ₃	T Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	M-Fe
0.58	0.22	0.39	1.46	<0.01	1.77	62.9	25.81	61.08	0.07
	1.08	0.01	0.66	0.005	27.63	1.88	0.27	2.39	<0.01

砂鉄降下速度に影響を及ぼすと考えられる砂鉄水分量は、乾燥砂鉄に水分を添加し、操業を通して1% (w/w)に調整した。また、操業初期には、造滓剤として川砂を10% (w/w)添加した砂鉄を、こもり用砂鉄(10kg)として使用した。

2.1.6 木炭

約3cm径に切ったなら炭を使用。分析値は、水分5.7%、揮発分21.9%、固定炭素70.3%、灰分2.1%であった。

2.2 操業方法

操業前日までに炉を十分に乾燥させておき、炉底に点火後、炉頂部まで木炭を充填し送風を開始した。送風開始から2時間は、蓄熱のため砂鉄は装荷せず、木炭のみを2kgずつ装荷した。1回の木炭装荷量は操業を通して2kgとした。2時間後、最初の砂鉄(初種)を装荷し、続いて木炭を装荷した。以後炉頂から約10cm木炭が下がるたびに砂鉄、木炭の順に装荷していった。第1回目の操業(1代)は初種を含め4回は砂鉄1kgとし、それ以後は砂鉄2kg(装荷比1)一定で装荷を続けた。第2回目の操業(2代)では、1代同様砂鉄1kgで開始し5回目の装荷から2kgに増やしたが、さらに途中から砂鉄量を増やし3kg(装荷比1.5)にした。この装荷比1.5を以後ヘビーチャージと呼ぶ。各操業とも初種から2時間経過を目安にノロを出し(初ノロ)、以後は30~40分ごとにノロ出しを行った。砂鉄を全て装荷後、木炭が燃焼して十分下がるのを待って、炉を解体し鋤を取り出し空冷した。風量は、操業初期に10.2L/s

Table 2. (a) Operating data of Ch. 1, (b) Ch 2

(a) Operating data of Ch. 1.

操業時間 (時 分)	砂鉄 (kg)	木炭 (kg)	備考
0		18	なら炭充填、送風開始
0 27		2	炎高70~80cm
0 47		2	
0 52		2	
1 07		2	
1 25		2	炎高60~70cm
1 49		2	炭(小)に変える
2:00	1	2	初種 (こもり用砂鉄) 装荷
2:20	1	2	
2:42	1	2	
2:51	1	2	
3 00	2	2	炎高約70cm
3 14	2	2	
3 30	2	2	こもり用砂鉄終了
3 45	2	2	
4 03	2	2	表初ノロ出し① (1 0kg)
4 20	2	2	
4 34	2	2	
4 46	2	2	裏ノロ出し②
4 56	2	2	13 53裏ノロ自然流出② (3 65kg)
5 10	2	2	炎高約90cm
5 20	2	2	
5 39	2	2	14 30表ノロ出し③ (2 7kg)
5 48	2	2	
6 07	2	2	
6-15	2	2	15 20表ノロ出し④ (5 0kg)
6 29	2	2	
6 40	2	2	
6-53	2	2	
7 03	2	2	裏ノロ出し⑤ (5 4kg)
7 16	2	2	
7-31	2	2	
7 44	2	2	裏ノロ自然流出⑥ (4 0kg)
7 56	2	2	
8 03	1	1	砂鉄木炭終了 吹き下ろし
8:15			表ノロ出し⑦
8 30			裏ノロ出し⑧
8 45			表ノロ出し⑦
9 00			裏ノロ出し⑧
			表ノロ⑦ (7 3kg) 裏ノロ⑧ (3 05kg)
9-30			送風停止 鋳出し空冷

(b) Ch. 2.

操業時間 (時 分)	砂鉄 (kg)	木炭 (kg)	備考
0		18	なら炭充填 送風開始
0 40		2	
1 06		2	
1 17		2	
1 43		2	
2:00	1	2	初種 (こもり用砂鉄) 装荷
2 13	1	2	
2 36	1	2	
2 58	1	2	炎高約50cm
3 15	2	2	羽口Ⅲノロ付く 下がり遅い
3 36	2	2	
3 52	2	2	こもり用砂鉄終了
4 08	2	2	
4 28	2	2	炎高約70cm
4-45	2	2	表初ノロ出し①(1 06kg)
4 57	2	2	
5 14	2	2	13 18裏ノロ出し② (2 0kg)
5:26	3	2	炎高約70cm
5-45	3	2	表ノロ出し③(1 96kg)
6 06	3	2	
6 18	3	2	14 15裏ノロ出し④(3 3kg)
6 34	3	2	
6-49	3	2	14 45表ノロ出し⑤(3.76kg)
7 02	3	2	炎高約60cm
7 18	3	2	15 15裏ノロ出し⑥(4 5kg)
7-35	3	2	
7-48	3	2	15-46表ノロ出し⑦(3 96kg)
8 00	3	2	羽口安定 炎高約75cm
8 18	3	2	裏ノロ出し⑧(5 8kg)
8 28	3	2	
8 50	3	2	16 45表ノロ出し⑨(3 66kg)
9-02	3	2	
9-15	3	2	裏ノロ出し⑩(5 9kg)吹き下ろし
9 45			表ノロ出し⑪(3 86kg)
10-10			表ノロ自然流出⑫(2.76kg)
10 24			裏ノロ出し⑬ (2 5kg)
10 38			表ノロ出し⑭(0.86kg)
10 50			裏ノロ出し⑮ (0 2kg)
10 55			表ノロ出し⑯ (0.5kg)
11 00			裏⑰(0 6kg)表⑱(0 2kg)送風停止 鋳出し空冷

になるように設定し、以後風速調整弁は操作しなかった。

3. 結果

3.1 操業結果

1代2代とも操業は極めて順調であった。羽口が詰まり炉温が低下するトラブルもなく、ノロも順調に流出した。各操業記録を Table 2(a), (b)に、砂鉄と木炭の積算装荷量を Fig 2に示す。

3.1.1 風量変化

操業時の風速から風量を算出した。風量変化を Fig. 3に示す。操業初期の炉温上昇期以外はほぼ同じであった。こもり期は10.2L/sで、操業後半は、10.7~10.8L/sに自然増風した。これは、炉壁の浸食に伴い羽口が後退し、羽口内径が増大したためと考えられる。

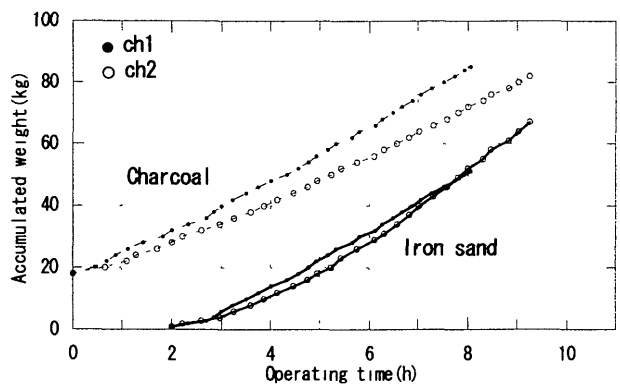


Fig 2 Accumulated weight of iron sand and charcoal charged into furnace.

3.1.2 炉内温度の変化

炉内温度の変化を Fig 4(a), (b)に示す。1代の炉内温度は多少の変動はあるものの全体的に緩やかに上昇しており、

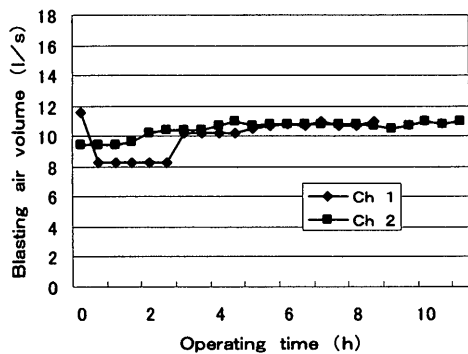


Fig. 3. Operating data of blasting air volume

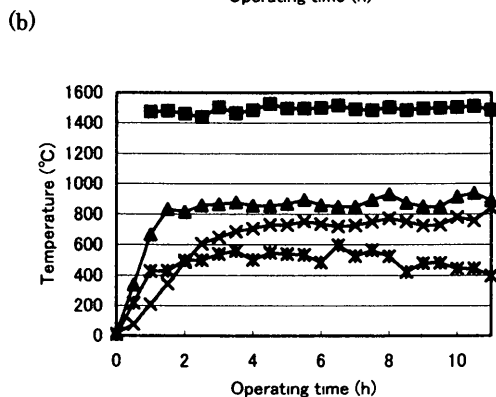
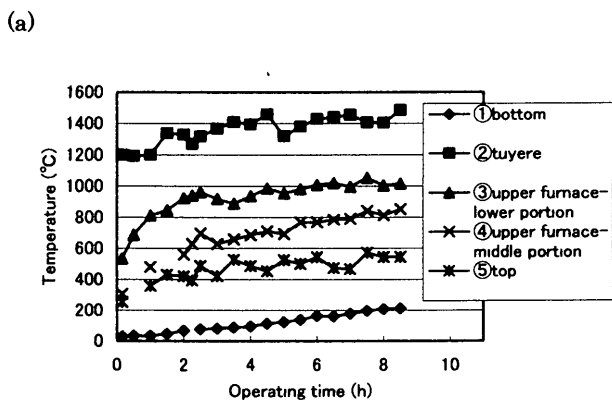


Fig. 4 Temperature changes in the furnace for (a) Ch 1 and (b) Ch 2

羽口や湯路が詰まるトラブルがなく操業が極めて安定していた事実と一致する。炉底温度①は操業とともに直線的に上昇し、終了時には200°Cに達した。羽口温度②は、送風開始直後は約1200°Cであったが、徐々に上昇し操業後半は1400°C台で安定していた。1代の羽口温度は、熱電対の保護管にたびたびノロが付着し溶損したため、測定困難であった。上釜-下部温度③は操業とともに徐々に上昇し、後半には1000~1050°Cに達した。上釜-中部温度④も同様に、操業後半には800~850°Cに達していた。炉頂温度⑤は約500°C辺りで小刻みに変動しており、砂鉄装荷の前後で約100°Cの温度差があることが確認できた。1代の炉内温度の変化は、安定操業下で炉の蓄熱が順調に進んでいったことを示している。

熱電対による羽口部分の温度測定は困難であったので、

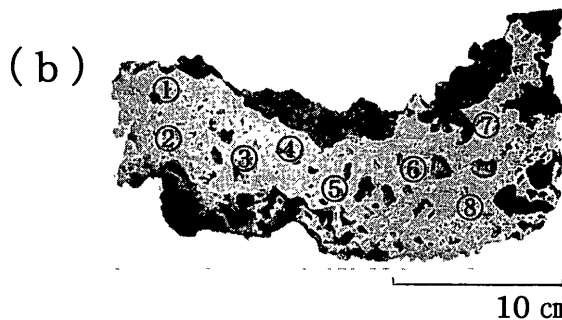


Fig. 5 Cross-section "Kera" (Master ingot) for (a) Ch. 1 and (b) Ch. 2

2代では光高温計により測定した。2代の羽口温度②は、操業を通じて1500°C前後で安定しており、1代よりも50~100°C近く高めの値になった。羽口の目視観察では、1代と2代ではそれほど差は認められず、この温度差は測定位置の違いによるものと考えられる。2代では、上釜-下部③温度と上釜-中部④温度は、操業後半にはほぼ一定となり、1代のような緩やかな温度上昇は見られなかった。炉頂温度⑤は1代同様500°C前後で小刻みに推移した。

3.1.3 炉内ガス測定

炉内COガス成分は、初種装荷前、1代2代とも、②羽口部で約10%、③上釜-下部と④上釜-中部で20~25%であった。その後の測定は安定せず、CO、O₂とも信頼できる測定値は得られなかった。

3.2 鋳の品質

鋳の断面写真をFig. 5に、各鋳の代表的な組織写真をFig. 6に、鋳の化学組成をTable 3に示す。1代は、ずっしりとまとまりの良い鋳で、直径25cm、中心部厚み約12cmであった。炭素量0.74~1.78% (平均1.21%)の比較的高炭素の鋳で、鋳底や破砕面には一部銹鉄も観察された。Fig. 6(a)の鋳のミクロ写真ではセメントタイトの析出があり、鋳炭素量の分析値に一致するものであった。2代は直径28cm、中心部厚み約10cmで、1代よりも薄径の大きな鋳であった。炭素量0.17~1.75% (平均0.85%)の比較的低炭素の鋳であった。Fig. 6(b)ではパーライトが見られ共析鋼に近いことが分かる。1代の鋳から得られた玉鋼は、その炭素量から判断して、日刀保たたら玉鋼1級品(C% 1.0~1.5)に相当し、2代は玉鋼2級品(C% 0.5~1.2)に相当

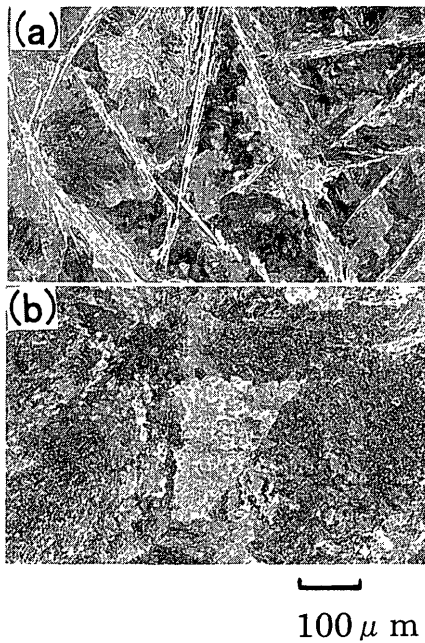


Fig 6 Optical micrographs of “Kera” for (a) Ch. 1 and (b) Ch. 2.

Table 3. Chemical composition of “Kera” sampled from Ch 1 and Ch. 2.

Ch	position	C	Si	Mn	P	S	V	Co	Cu	Al	Ti
1	1	0.95				0.007					
	2	1.78				0.021					
	3	1.10	<0.01	<0.01	0.012	0.006	0.01	<0.01	<0.01	0.003	0.01
	4	1.67	<0.01	<0.01	0.009	0.005	0.03	0.01	<0.01	0.011	0.01
	5	1.00				0.006					
	6	0.74				0.008					
2	1	0.17				0.005					
	2	0.18				0.003					
	3	0.66				0.004					
	4	0.60	0.01	<0.01	0.014	0.017	<0.01	<0.01	<0.01	0.007	0.01
	5	1.20	0.25	0.06	0.034	0.005	0.11	<0.01	<0.01	0.32	0.22
	6	1.75				0.005					
	7	1.03				0.005					
	8	1.21				0.006					

Table 4. Total mass balances for Ch. 1 and Ch. 2.

Ch	Iron sand (kg)	Charcoal (kg)	Feed Ratio Iron sand/Charcoal	Kera Weight (kg)	Yield (%)	Slag Weight (kg)	C(%) In Kera
1	50	85	1	17.2	34.4	32.1	1.21
2	67	82	~1.5	17.8	26.5	47.38	0.85

するものであった。

3.3 収支比較

操業収支を Table 4 に示す。1代の砂鉄使用量は 50 kg。ノロや木炭を除去したあとの鉬総重量は 17.2 kg で、その内 0.2 kg は鉬上部に積もっていた粒鉄と海面鉄である。出滓量は表湯路（出滓口）が 20.0 kg、裏湯路が 12.1 kg で総出滓量 32.1 kg であった。砂鉄に対する鉬の歩留まりは 34.4% であった。2代の砂鉄使用量 67 kg、鉬重量は 17.8 kg で、内 0.35 kg は粒鉄と海面鉄であった。出滓量は表湯路

Table 5. Chemical compositions of “Noro” (Slag) for (a) Ch. 1 and Ch. 2.

(a) Ch 1

Slag No	SiO ₂	P	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T·Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	M Fe	FeO/SiO ₂	Slag output kg
①2 00	27.82	0.13	2.43	3.3	41.2	50.8	1.53	0.62	1.83	1.0
②2 40	28.83	0.11	2.21	4.04	41	50.07	2.49	0.32	1.74	3.65
③3 26	28.45	0.1	2.25	4.31	42.1	51.96	1.84	0.39	1.83	2.7
④4 20	29.52	0.1	2.15	4.97	41	50.29	2.17	0.38	1.70	5.0
⑤5 00	28.08	0.092	2.14	4.35	44	53.68	2.52	0.55	1.91	5.4
⑤5 40	25.68	0.09	2.12	4.42	46.3	55.78	3.67	0.41	2.17	4.0
⑦6 15	25.20	0.093	2.1	3.95	47	55.22	5.29	0.36	2.19	7.3
⑧6 30	26.23	0.096	2.25	4.17	45.6	54.55	3.89	0.48	2.08	3.05

(b) Ch.2

Slag No	SiO ₂	P	TiO ₂	Al ₂ O ₃	T·Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	M Fe	FeO/SiO ₂	Slag output kg
①2 45	29.5	0.14	2.3	7.46	38.87	49.54	0.01	0.35	1.68	1.06
②3 14	29.51	0.13	2.21	7.91	38.99	49.76	0.01	0.35	1.69	2.0
③3 45	26.83	0.12	2.08	7.37	42.63	53.98	0.53	0.3	2.01	1.96
④4 16	25.55	0.1	1.93	6.98	44.89	56.44	0.93	0.37	2.21	3.3
⑤4 45	23.88	0.1	1.93	6.62	46.72	58.74	1.13	0.27	2.46	3.76
⑤5 15	22.49	0.09	1.87	6.23	48.9	60	2.52	0.5	2.67	4.5
⑦5 46	21.83	0.08	1.8	6.04	49.74	60.46	3.37	0.38	2.77	3.96
⑧6 18	19.85	0.073	1.69	5.54	52.27	61.43	5.88	0.41	3.09	5.8
⑧6 45	18.49	0.066	1.53	5.09	54.22	64.75	5	0.39	3.5	3.66
⑨7 15	21.87	0.071	1.62	5.93	50.69	60.93	4.22	0.38	2.79	5.9
⑨7 45	17.65	0.074	1.69	4.94	54.23	64.44	5.48	0.31	3.65	3.86
⑩9 10	21.57	0.097	1.87	6.04	49.86	58.65	5.78	0.23	2.72	2.76
⑩8 24	23.7	0.12	1.87	6.74	47.44	57.78	3.27	0.24	2.44	2.5

が 22.58 kg、裏湯路が 24.8 kg、総出滓量 47.38 kg であった。砂鉄に対する鉬の歩留まりは 26.5% であった。1代と2代の収支比較から、装荷比が小さい方が、歩留まりが良く高炭素の鉬ができ、出滓量が少ないことが明らかになった。

3.4 ノロの成分変化

各ノロの化学組成を Table 5 に示す。FeO-SiO₂系ノロの粘性に影響を及ぼす³⁾ SiO₂, FeO, T·Fe 成分の経時変化を Fig. 7 に示す。1代2代とも、操業の進行に伴いノロ中の T·Fe, FeO は増加していくが、ヘビーチャージである2代の方が増加の割合は大きい。造滓成分である SiO₂ や Al₂O₃ は減少していくが、減少割合も2代の方が大きい。1代2代とも初期のノロには Fe₂O₃ はわずかしこ存在せず、操業が進むにつれ増加していくが、このことは、装荷量の小さいこもり期に、炉内の還元が十分進んでいることを示している。Table 5 の1代ノロ②と⑦（それぞれ(a)と(b)）、2代ノロ①と⑨（それぞれ(c)と(d)）のマイクロ写真を Fig 8 に示す。棒状ファイヤライト (2FeO·SiO₂) がよく発達しており、そこに白色樹状のウスタイト (FeO) と灰白色角型結晶のウルボスピネル (2FeO·TiO₂) が分散している。1代2代とも、砂鉄装荷量の増加に伴いウスタイトの増加が見られるが、その傾向は Fig 8(d) から明らかなように2代において顕著である。FeO/SiO₂ 比の経時変化を Fig. 9 に示す。1代では、初期のノロは流動性はあるがやや粘調であった。操業の進行に伴い、粘性は減少し流動性は向上していった。

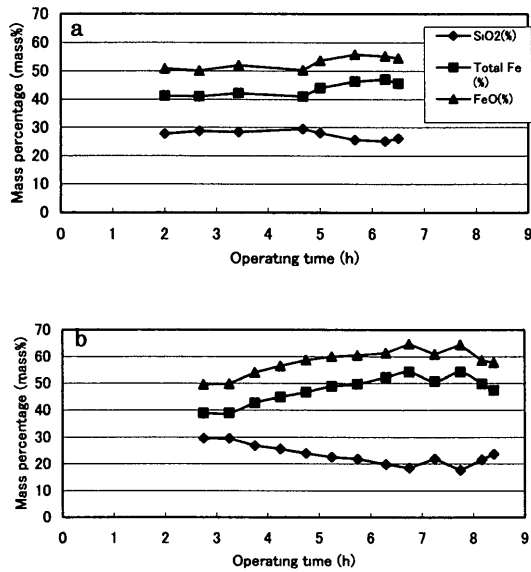


Fig 7. Change of chemical compositions of Noro for (a) Ch 1 and (b) Ch 2.

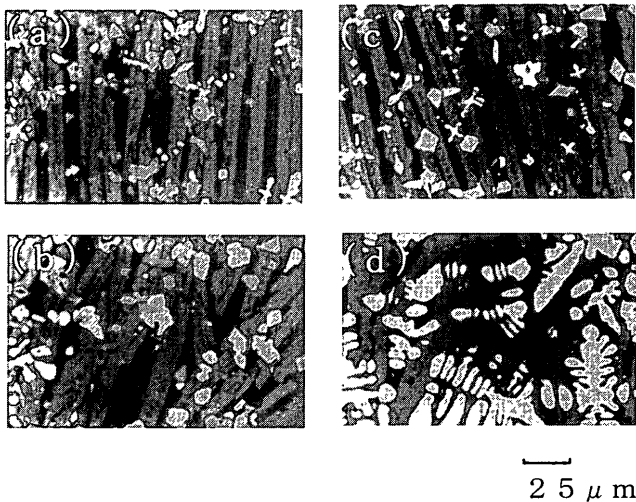


Fig. 8. Optical micrographs of Noro for (a) Ch. 1, (b) Ch. 1, (c) Ch. 2 and (d) Ch. 2

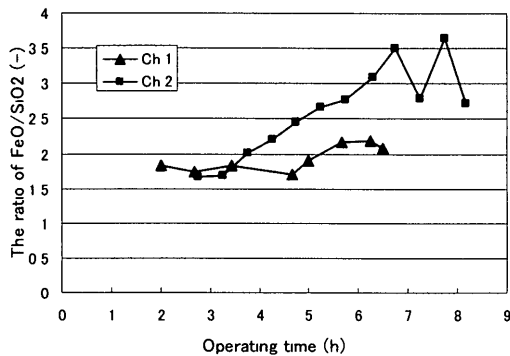


Fig. 9. Changes of FeO/SiO₂ ratio for Ch 1 and Ch 2

2代でも、1代とほぼ同じ挙動を示したが、装荷比を1.5に増やした操業後半のノロは、大量にしかも水のように流れ出した。ノロの流れ方の観察とその化学成分から、ノロの流動性の向上とFeO濃度は正の相関があることがわかった。

た。また、砂鉄装荷量の増加に伴いノロ中のFeO濃度が増加することは、操業後半のノロが重たく感じるという観察結果にも一致した。真砂砂鉄を用いた今回の操業条件においては、ノロの流動性を維持するには、最低50%程度のFeO濃度が必要であることがわかった。

4. 考察

4.1 炉温変化

1代で炉温が緩やかな上昇を続けたのは、安定操業下で炉の蓄熱が進んだものと考えられる。ヘビーチャージ操業では、上釜-下部③と上釜-中部④で、1代よりも温度はやや低く、1代のような操業を通しての緩やかな温度上昇は認められなかった。過剰な砂鉄の装荷により、炉温の上昇が妨げられた可能性も考えられる。1代の熱電対による羽口温度は1400°C台で、2代の光高温計による羽口温度は1500度前後であった。この温度差は測定位置の違いによるものと考えられ、装荷比の違いによる羽口温度の差は明らかにできなかった。

4.2 ガス測定

オルザット法によるガス測定は不安定で、検証に耐えうる測定値は得られなかった。今後、ガスクロマトグラフィーの使用も検討すべきであろう。また、たたら炉では、炉内ガス圧が低いと、ガス採取時の空気の混入も考えられる。さらに、2代の鋳の炭素濃度のばらつきから、ヘビーチャージ操業では、炉内ガス雰囲気が均一でないことも予想された。1ヶ所からのガス測定では、炉内ガス濃度を正確に把握することはできないのかもしれない。炉内での還元反応を推測するためにも、信頼性の高いガス測定法の確立が重要である。

4.3 鋳の品質

1代の鋳は、炭素量0.74~1.78%で平均1.21%、Pは平均0.011%、TiO₂は平均0.01%であった。炭素量から日刀保たたら玉鋼1級品に相当するものと判断された。品質検査のため、鋳を拳大に破碎後、加熱し薄くつぶし焼入れした。その後、薄くつぶした鋼を積み重ね、日本刀製作と同じ折り返し鍛錬を行った。粘りのある硬い良質な鋼であった。折り返し鍛錬の感触からも、1代の鋳は日刀保玉鋼1級品に相当するものであった。

2代の鋳は、炭素量0.17~1.75%で平均0.85%、Pは平均0.024%、TiO₂は平均0.16%であった。鍛錬の結果、やや低炭素ではあるが粘りのある良質な鋼であることがわかった。2代の鋳は、化学分析値と試験鍛錬の感触から、玉鋼2級品に相当するものであった。

4.4 操業収支の比較

2代では、1代より砂鉄装荷量を増やしたにもかかわらず鋳重量は増加せず、出滓量が増加し、鋳歩留まりは低下した。鋳炭素量はTable 3に示すように、1代は高く、2

代はやや低かった。また、Table 5からノロ中のFeO濃度は2代の方が高く、砂鉄中のFe分の多くが、鋳にならずノロとして炉外に排出されたことがわかった。ヘビーチャージ操業では、鋳歩留まりは低下し、出滓量は増える。過剰な砂鉄は十分な還元作用を受けず、ノロとして排出される。さらに、炉の還元力も低下させるために、鋳の炭素量は低下すると考えられる。本実験において、装荷比1.5は操業は可能であるが、炉の還元能力を超えたオーバーチャージであると言える。

4.5 FeO/SiO₂の経時変化

Fig. 7に示すように、1代2代とも操業の進行に伴い、ノロ中のSiO₂は減少し、FeOが増加したが、Fig. 9に示すようにFeO/SiO₂比の増加傾向は2代の方が大きかった。ヘビーチャージ操業の2代では、過剰に装荷された砂鉄が十分な還元を受けずにノロになったため、ノロ中のFeOが増え、相対的にSiO₂が減少し、FeO/SiO₂比が増加したと考えられる。1代のFeO/SiO₂比は、操業初期には1.82、後期では2.19になったが、2代では初期の1.68が、後期で最高3.65まで上昇した。FeOとSiO₂が2対1で反応し2FeO・SiO₂（ファイヤライト）を生成すると仮定した場合、重量比は2FeO/SiO₂=2.395である。1代のノロは操業を通じてFeO/SiO₂比が2.395以下のSiO₂リッチなノロであり、FeO-SiO₂系スラグでは、粘度が高く流動性の低いノロであることは明らかである。2代の後半のヘビーチャージ時のノロは、FeO/SiO₂が2.395以上のFeOリッチなノロであり、FeO-SiO₂系スラグにおいては、粘度が低く流動性の良いノロである。これは、1代2代とも操業初期は粘調なノロであったが、操業が進むにつれ流動性が増してきたこと、特に2代では、操業後半において大量のノロが水のようにさらさらと流れ出た事実をよく説明するものである。TiO₂の少ない真砂鉄を用いた操業においては、安定操業を維持するのに重要なノロの流動性は、ノロ中のFeO濃度によって決定されており、最低50%程度のFeO濃度が必要なのである。このノロ中のFeO濃度の高さが、たたら製鉄の低歩留まりの最大の原因であるといえよう。

4.6 Fe, TiO₂, Pの収支について

これまで多くのたたら製鉄実験において、たたら操業の不安定性および作業の煩雑さのため、各成分の収支計算はなされてこなかった。本実験においては、入量である砂鉄と木炭、出量である鋳およびノロの重量を正確に測定し、Fe, TiO₂, Pの入出量を試算した。Fe, TiO₂, Pの収支をTable 6に示す。砂鉄のTotal Feは62.9%であるから、1代におけるFe入量は31.45kgである。生成した鋳の炭素量を平均値の1.21%とすると、鋳中のFe量は16.99kgである。Table 5からノロ中の全Fe量を計算すると、14.15kgとなる。1代におけるFe入量は31.45kgで、出量は16.99(鋳)+14.15(ノロ)=31.14kgとなり、入出量はほぼ等しい。砂鉄に対する鋳の歩留まりは34.4%で、Fe歩留まり（鋳Fe/砂鉄Fe）

Table 6. Total mass balances of Fe, TiO₂, P in operation for Ch 1 and Ch 2

Ch	Composition	Input (kg)	Output(kg)		
			Kera①	Noro②	Total①+②
1	Fe	31.45	16.99	14.15	31.14
	TiO ₂	0.7300	0.0017	0.6956	0.6973
	P	0.0370	0.0018	0.0313	0.0331
2	Fe	42.14	17.65	23.08	40.73
	TiO ₂	0.9782	0.0027	0.8570	0.8597
	P	0.0496	0.0043	0.0430	0.0473

は16.99/31.45=54.02%である。

2代においても同様に計算すると、Fe入量は42.14kgとなる。鋳の炭素量を0.85%とすると鋳中Fe量は17.65kgであり、ノロ中Fe量は23.08kgとなる。よってFe入量42.14kg、出量は17.65(鋳)+23.08(ノロ)=40.73kgとなり、2代においても入出量はほぼ等しくなる。砂鉄に対する鋳の歩留まりは26.5%であり、Fe歩留まりは17.65/42.14=41.88%である。1代では、鋳Fe量(16.99kg)>ノロFe量(14.15kg)であるが、2代では鋳Fe量(17.65kg)<ノロFe量(23.08kg)である。ヘビーチャージ操業の2代では、砂鉄中Fe分の多くが、鋳にならずノロになって流出したことがわかる。

Table 6から砂鉄中のTiO₂は、鋳中に取り込まれるのはわずかで（約0.3%）、そのほとんどがノロとして排出されることがわかる。

砂鉄中のPは、1代2代多少の差はあるものの、10%以下が鋳中に取り込まれ、90%以上はノロとして排出されることがわかる。

4.7 浸食された炉壁量の推計

浸食された炉壁重量を試算した。

1代において、砂鉄からのSiO₂入量は50kg×5.79%=2.895kgである。こもり用砂鉄に添加した1kgの川砂に約60%のSiO₂が含まれると仮定すると、川砂からの入量は0.6kgになる。操業中に浸食された炉壁量をXkgとすると、炉壁から供給されたSiO₂は0.5556Xkgである。鋳中のSiO₂量は、<0.001%であるので無視する。ノロ中の全SiO₂はノロ成分表から計算すると8.757kgになる。よって、炉壁からノロに供給されたSiO₂量は8.757-2.895-0.6=5.262kgとなる。0.5556X=5.262であるので、浸食された釜土Xは9.471kgとなる。

2代では11.24kgの炉壁が浸食され、6.245kgのSiO₂が供給されたことになる。

この計算から、2代の方がより多く炉壁が浸食されていたことが明らかとなった。過剰な砂鉄が炉壁の浸食を促進するものと考えられる。ヘビーチャージ操業によるノロの増加は、砂鉄装荷量の増加だけによるのではなく、過剰な砂鉄による炉壁の浸食も一因となっているようである。鋳の直径が2代の方が大きいことも、炉壁の浸食が進んでいたことを示すものである。

4.8 装荷比について

ライトチャージでは、鉬は高炭素になり歩留まりは上がる。しかし、ノロは粘調になり流出量は少なくなる。ヘビーチャージでは、鉬は低炭素になり歩留まりは下がる。しかし、ノロは流動性がよくなり流出量が増える。つまり、ライトチャージでは、砂鉄中の鉄分は十分還元され効率よく鉬になるが、ヘビーチャージは、十分な還元を受けずにノロとなって排出される。また、ヘビーチャージでは、過剰な砂鉄により炉壁の浸食も促進される。

では、本実験と同じ送風量で、装荷比を1以下または1.5以上にするとどうなるであろうか。

装荷比1.5以上では、砂鉄は十分な還元を受けずにさらに大量のノロとして炉外へ排出されるであろう。当然、炉の還元力は低下するため、鉬の炭素量はさらに低下すると思われる。限界を超えたとき、大量の生鉄降り現象により炉温低下を引き起こし、操業不能に陥るであろう。

装荷比1以下ではどうなるのだろうか。筆者は、本実験に用いる装荷比決定のため、装荷比0.5~0.9で予備実験を行った。ノロは非常に粘りが強く、湯路から流れ出すことはなかった。炉内に溜まったノロは羽口を塞ぎ、ついには操業停止に陥ってしまった。操業を維持するために湯路から掻き出したノロは、赤みを帯びたスポンジ状であり、ノロに混じり親指大の銑鉄も掻き出された。装荷比1以下では、ノロの流動性が低く操業は不可能であるが、銑鉄が生成されるような還元状態であることが推察された。

これらは、送風量一定の場合であるが、通常増風すれば炉温の上昇を期待できる。そこで、装荷比1以下のノロが粘調な条件で、増風により炉温上昇を図れば、ノロの流動性は回復し、操業可能になるかもしれない。現在、たたら製鉄法により銑鉄を主に生産する「銑押し法」の操業条件は解明されていないが、この「低装荷比増風操業」というのが、高炭素の銑鉄を流し取る、いわゆる銑押し操業法の本質であるのかもしれない。もちろん装荷比と送風量以外にも、砂鉄の種類や羽口角度、木炭の種類など、銑押し法に最適の条件があることは言うまでもない。

5. 結言

真砂砂鉄を用い、送風量一定で、木炭に対する砂鉄装荷量（装荷比）の差が、操業および生成物にどのような影響を与えるかを調べた。

装荷比1での操業は安定しており、歩留まり良く高炭素の鉬ができた。比較的粘調なノロが流出し、流出量は少

なかった。装荷比1では、砂鉄は十分な還元浸炭を受け、Fe分の多くは高炭素の鋼となり鉬に吸収された。結果的に、ノロ中のFe分は不足し比較的粘調なノロとなって流出した。

装荷比を1.5に増やすと、鉬の炭素量は低くなり、歩留まりは低下した。そして、流動性あるノロが大量に流出した。過剰な砂鉄が、炉中間部の炉温上昇を妨げていることも推察された。炉温低下は、砂鉄が降下中に受けるCOガスによる間接還元の低下も引き起こすであろう。結果的に、ヘビーチャージ操業では、砂鉄は十分な間接還元を受けずに炉底に達し、ノロとなり排出される。ノロ中のFeO濃度の上昇に伴い、流動性のある重たいノロが大量に流出することになる。装荷比1.5は、たたら炉の能力を超えたオーバーチャージとすることができる。

たたら製鉄において、ノロの流動性は、操業を安定に保つために極めて重要である。ヘビーチャージ気味で操業すれば、ノロの流動性は増し、羽口や湯路が詰まるトラブルも少なくなるが、歩留まりは低下し低炭素の鉬ができる。逆に装荷比を絞り操業すれば、歩留まり良く高炭素の鉬ができるが、ノロの粘性が高くなり、羽口や湯路が詰まりやすく、操業は困難になる。ノロの流動性を維持できる範囲で装荷比を絞り操業することが、高炭素の鉬を歩留まり良く生産する村下の重要な役割といえよう。

たたら操業の秘訣を聞かれて、故安部由蔵村下が次のように答えている。「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、砂鉄や木炭を入れす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かが大切」つまり「快食、快便が大切である」と⁴⁾。

本研究は、この安部村下の言葉を科学的かつ定量的に説明したものである。

実験に協力して頂いた元日立金属の松村剛治氏、成分分析にご尽力頂いた(株)キグチテクニクスの原田輝美氏、7年間村下養成員として指導して頂いた日刀保たたらの木原 明、渡部勝彦両村下に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 鈴木卓夫：たたら製鉄の還元と「日刀保たたら」の操業技術の解明 学位論文、東京工業大学、(2001)、153
- 2) たたら製鉄還元計画委員会：たたら製鉄の還元とその鉬について（たたら製鉄還元計画委員会報告）、日本鉄鋼協会、東京、(1971)
- 3) 日本鉄鋼協会編：第3版 鉄鋼便覧 第1巻基礎、丸善、東京、(1981)、44
- 4) K Nagata and T Suzuki *Tetsu-to-Hagane*, **86** (2000), 64