

「大鍛冶場」工程における脱炭反応に関する二三の考察

加藤 恵之*・塗 嘉夫*²・坪田 一一*²・松永 久*²・横井 崇光*³

Some Considerations of Decarbonizing Process at the “Ohkajiba” Furnace

Yoshiyuki Kato, Yoshio Nuri, Kazuichi Tsubota, Hisashi Matsunaga and Takamitsu Yokoi

Synopsis : “Ohkajiba”, which is the Tataro steelmaking process in Edo and Meiji eras, early modern times, corresponds to the recent steelmaking shop process including blooming mill process of the integrated iron and steel works. Those processes include the decarbonizing process of pig iron, Zuku and Bugera, the removal process of inclusions, mainly oxides, the homogenizing process and manufacturing process of products such as “Hocho-tetsu and Waritetsu”, mild steel.

Considering the thermal technology in early modern times, it was supposed not to be able to melt low carbon steel such as the Hocho-tetsu though pig iron was probably able to melt due to its low melting point. It means decarbonizing process at the “Ohkajiba” should basically be half-melt reaction or solid reaction. In spite that the rate of decarbonizing process under this half-melt reaction or solid reaction supposed to be extremely slow based on the general modern metallurgical reaction kinetics, decarbonizing rate at the “Ohkajiba” was very fast based on the some descriptions¹⁻⁵⁾ about the operation at the “Ohkajiba”. That rate is equal to that in large size open-hearth furnaces, though it is slower than that of large size basic oxygen furnaces. Those facts are amazing for modern metallurgists.

In this report, supposed operations with decarbonizing process in the “Ohkajiba”, information from a modern blacksmith of Japanese swords and the simulation results were proposed and some considerations from the point of view of modern metallurgy were discussed through those results.

Key words : steelmaking, charcoal, Tataro, Ohkajiba, decarbonization, carbon content, Sage-tetsu, Zuku

1. 緒言

近世、明治時代の高鍛たたら製鉄業の「大鍛冶場」は、現代風に言えば、一貫製鉄所の製鋼工場・分塊／鍛造工場の工程に相当する。即ち、原料である銑（ずく）、歩鋸（ぶげら）を脱炭し、夾雑不純物（主として酸化物系介在物）を取り除き、化学成分の均一化を図り、成形して半製品（包丁鐵、割鐵）を製造する工程である。

当時の熱技術レベルでは炭素含有量が高く、融点の低い銑は溶融することができるが、炭素含有量が低く融点の高い軟鋼（包丁鐵）は溶融することはできず、この大鍛冶場における脱炭反応は、基本的に半溶融状態または固体での脱炭である。この半溶融状態または固体での脱炭反応は、現在の常識的な冶金反応速度論によれば、非常に遅いことが想定されるにもかかわらず、大鍛冶場作業についてのいくつかの記述¹⁻⁵⁾を基に脱炭反応を算定してみると、非常に速く、現代の大型純酸素転炉よりは遅いが、大型平炉のそれに匹敵する、ということは現代製鋼技術者にとって驚嘆すべき事実である。

本稿では、大鍛冶場作業での脱炭反応に関し、想定される作業の内容、現代刀匠の経験、シミュレート実験の結果

などから、現代冶金学からのありうる解釈について考察を加えてみたい。

2. 「大鍛冶場」における作業

近世以降の大鍛冶場の設備、作業内容についてはいくつかの記述¹⁻⁵⁾があるが、細かい点については必ずしも一致しているわけではない。ここでは「大鍛冶場」における脱炭反応について考察を加えるに当たって前提となる作業の内容を最大公約数的にまとめておく。

まず大鍛冶場の設備であるが、大きく分けて、「左下場（さげば）」と「本場」という二つの作業場がある。「左下場」と「本場」とは羽口の大きさ、角度など細かい点を除けば同じような構造、築炉方式の加熱、溶解炉である。文献によって多少異なるが、その概要を館ら⁵⁾の整理に基づき Table 1 に示した。さらに大鍛冶炉の一例⁴⁾を Fig. 1 に示した。

次に大鍛冶場作業であるが、「左下場」と「本場」とではかなり異なるようである。

「左下場」と「本場」の役割分担について、脱炭反応の見地から必ずしも明確ではない。明治期の大鍛冶場作業の

平成 16 年 4 月 30 日受付 平成 16 年 6 月 23 日受理 (Received on Apr. 30, 2004, Accepted on June 23, 2004)

* 山陽特殊製鋼株式会社研究開発センター (Sanyo Special Steel Co., Ltd., Research & Development Center, 3007 Nakashima Shikama-ku Himeji 672-8677)

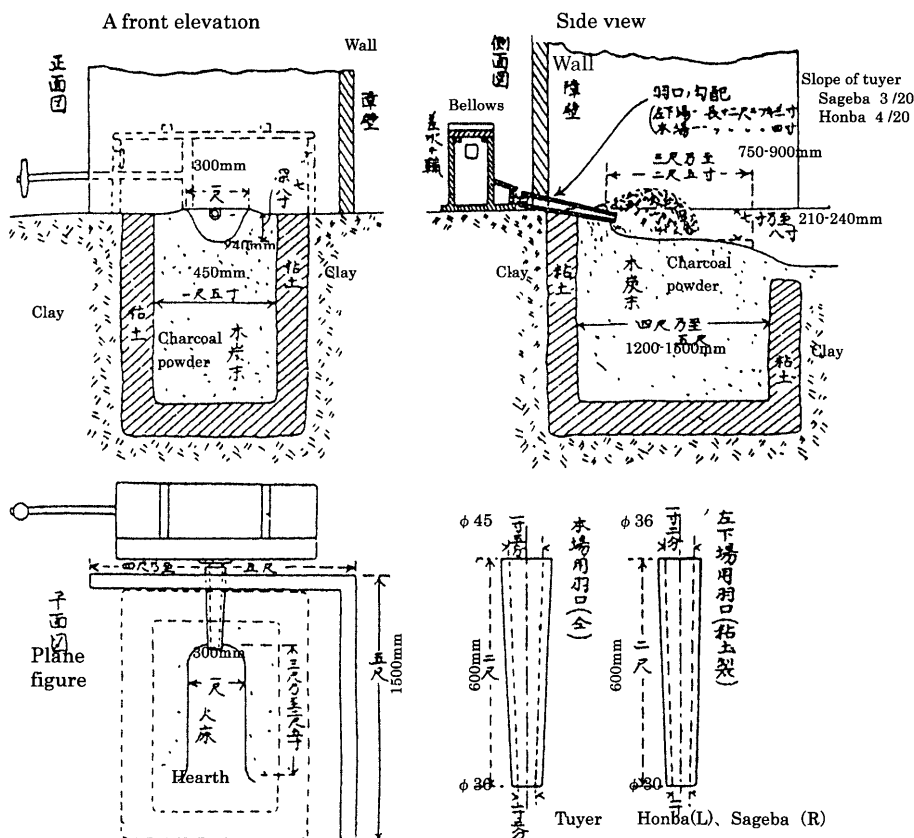
* 2 元山陽特殊製鋼株式会社 (Former Sanyo Special Steel Co., Ltd.)

* 3 全日本刀匠会 (Japanese Sword Smith Association)

Table 1. "Ohkaji" furnace equipment.⁵⁾

Year (AD)	Area(m ²)		Foundation(m ³)		Furnace(m ³)		Tuyers(mm)*	Bellows	Literature
	Sageba	Honba	LxWxD	LxWxD	LxWxD	LxWxD			
1784	6 42x7 03		1 82x1 82x1 51	1 15x0 27x0 15			(36-25)x106	fukisashi x2	1)
1883	3 63x4 85	4 85x5 27	1 51x1 51x1 51	1 21x0 45x0 45				fukisashi	
1897	4 2x4 2	6 3x6 0	1 2x1 5x1 3	1 2x0 3x?			S (25-30)x350 H (30-40)x480	fukisashi	2)
			(1 21~1 51) ³	1 21x0 35x0 76			S (36-30)x600 H (45-36)x600	fukisashi	3)
				0 83x0 37x0 23			"	fukisashi	4)

* S Sageba, H Honba

Fig. 1. An example of "Ohkaji" furnace.⁴⁾

記録を見ても、山田⁴⁾は、「左下場」では銑・歩鋤平均3%前後の炭素含有量から0.7%程度までの脱炭を行い、その後「本場」にて0.1~0.2%まで仕上げ脱炭を行い、鍛造成形して「割鐵」を作るとしている。他方、俵²⁾の調査記述によれば、左下鉄の断面の炭素含有量と本場での「卸し鐵」の断面のそれとは、ばらつきも大きく、統計的に有意差は認められない。また、近世高殿たたら法の大鍛冶場遺跡の発掘調査結果^{6,7)}を見てもこの点については明確ではない。

したがって、「左下場」と「本場」作業の意味合いについては、20世紀1970年頃まで支配的であった平炉製鋼法の生産性向上のために時に採用されたアクティブミキサー併用法のような2段製鋼法に対応するものなのか、それとも「本場」作業ではあまり脱炭反応の寄与は少なく、専ら夾雑不純物（主として酸化物系介在物）を取り除き、化学成分の均一化を図り、成形する機能を担っていたのか、現時点では判断することは難しい。

大鍛冶場作業では火窟に原料鉄（左下場では銑・歩鋤、本場では左下鐵）と熱源である木炭とを適当量装入し、ふいごからの送風により木炭を燃焼し、発生する熱で原料鉄を一部溶融または半溶融／固体状態で脱炭を図るプロセスである。ただ、「左下場」作業の方が取扱単位も300kg程度と大きく、羽口寿命も長く、生産性も高かったし、歩留も一見高かったようである。それに対し、「本場」作業では取扱単位も1桁小さく、羽口寿命も短く、歩留も60~70%程度²⁾と、現代製鋼法から見ると異様に低い。左下場では取扱単位も大きく、脱炭絶対量も多いため、装入原料も羽口からの送風を妨げないように門型に組み合わせるとか木炭の装入にもいろいろノウハウがあったようである。

大鍛冶炉操業の場合、たたらに比し、酸化鉄の還元エネルギーを必要としないのでその分エネルギー原単位は少なく済むが、大型化が進むにつれて、高殿たたら地下構

造の小舟に相当すると思われる防湿のために石や鉄滓でつくられた伏樋状の地下構造を有するものも発達している⁸⁾。しかし、防湿のために配慮している一方、左下の作業においては脱炭反応促進のためと思われる水添加湿操業²⁹⁻³¹⁾が工夫されている。この点についての一層の解明が必要である。

3. 左下場・本場における脱炭反応速度

前述のごとく、「左下場」「本場」の二段階で行われる脱炭プロセスで、「左下場」でどの程度まで脱炭しているのか、「下げ鉄」の炭素量を定量的に明示した情報はきわめて少ない。

「鉄山必用記事」の大鍛冶に関する記述³⁾では、「左下鉄」の炭素含有量を想像できる情報はいっさい述べられていないし、山田⁴⁾も分析値は示していない。俵²⁾は「下げ鉄」サンプル3例、本場「卸し鉄」サンプル1例についてその断面の炭素含有量を示しているが、このサンプル例では「下げ鉄」の炭素含有量は「・・・所に依り其の有する炭素量極めて不同なり、多きは1.5%に達する局部あるも大部分は殆ど炭素を有せざる純鉄より成れり。・・・」とあり、本場「卸し鉄」断面の炭素含有量とでは、断面内の炭素含有量のばらつきが大きく統計的には有意な差は認められない。したがって、現時点では左下場、本場の二段脱炭機能の分別については不明確であるが、左下場本場をあわせたトータルの脱炭反応をマクロに見てみると、「鉄山必用記事」第七第10節「鍛冶仕事の次第」、第11節「手子の銘目に於ても二番三番切と言う事」の記述によれば、大鍛冶トータル工程における平均tap-to-tapは、最大で2h強、平均ヒートサイズは120kg、平均製鋼歩留は70%弱であった。主原料鉄・歩留の平均炭素量を3.0%、製品「割鉄」の平均炭素含有量を0.1%とすれば、マクロ的な平均脱炭速度は0.03~0.1%C/minのオーダーであり、純酸素転炉法の約1/10の脱炭速度ではあるが、約五十年前までの主要製鋼法であった酸素製鋼導入以前の大型平炉鉍石法の脱炭速度(0.01%C/min以下)よりはむしろ速い。一方、製鋼歩留の方は「鉄山必用記事」では平均70%と極めて低い。これは

「狭義の鋼中夾雑物が多いため」と解釈されがちであるが、少なくとも「釧に成間敷所を悉く折り取り捨て、正味宜しき処計り」を使えば、(精錬しても鋼になりそうもない部分、即ち、ノロ噛みの多いところは捨ててしまって、鋼になりそうな部分、即ち、スラグのほとんど含まれていそうもない鉄を原料にして云々の意)ということから判断すると原料に使われる鉄、歩留はスラグの付着していないものであると考えられる。原料鉄中のトータル [O] は、固体鉄中の溶解酸素せいぜい10ppmと、いわゆる酸化物系非金属介在物中の酸素分であり、高々数千ppm、非金属介在物トータルで見ても、高々1~2%であり、脱炭量よりも少なく、大部分はFeの酸化ロスと思われる。現代の溶鋼製造法の場合、Feの酸化ロスは蒸発ロス、飛散ロスを加えても、高々数%で、10%を超えることはありえない。

4. 現代冶金学から想定されるいくつかの脱炭反応モデル

上述の①マクロ的な脱炭速度が非常に速いということ、②製鋼歩留が異様に低いということの2点が現代製鋼技術者の常識を超えており、これらをふまえて脱炭速度について考察を加えてみる。

4.1 脱炭速度について

ここでは鉄の脱炭速度の程度をmass%/minとg/(cm²・min)のデイメンションから検討してみる。まず、mass%/minの視点から見ると、平均脱炭速度は0.03~0.1%C/minのオーダーであり、現代製鋼法と比べても相当速い。

次に、流束(Flux)、g/(cm²・min)の視点から見た推測結果をTable 2に示した。鉄脱炭時の反応界面積の見積もりは不確かではあると思われるが、Table 2の反応界面積を用いると鉄脱炭速度は、おおむね1.9~4.8×10⁻³g/(cm²・min)のオーダーであると推測される。この値を反応界面積の評価が可能な100t塩基性平炉の値¹⁴⁾と比較してみる。10⁻²のオーダーはスラグ/メタル界面反応、10⁻⁴のオーダーは耐火物/メタル界面反応で脱炭が進行する場合であり、10⁻³のオーダーは塩基性平炉全体の脱炭速度のオーダーに

Table 2 Estimated result of decarbonizing rates.

Operation	[C]mass%		Weight (kg)	Area of reaction (cm ²)	Time (min)	Rate of decarbonization	
	Before de-C	After de-C				(g/min)	(g/cm ² ·min)
A)Decarbonization of pig iron“Zuku”	3 63 ¹²⁾	0 7 ⁴⁾	319 ²⁾	40,900 (ϕ 6cm-lump ²⁾)	120 ¹³⁾	77 9	1 91×10 ⁻³
				16,300 (ϕ 15cm-lump ²⁾)			4 76×10 ⁻³
	3 63 ¹²⁾	0 7 ⁴⁾	168 75 ¹³⁾	21,630 (ϕ 6cm-lump ²⁾)	120 ¹³⁾	41 2	1 90×10 ⁻³
				8,650 (ϕ 15cm-lump ²⁾)			4 76×10 ⁻³
B)100 t basic open hearth furnace			100×10 ³ ¹⁴⁾	a)480,000 (Slag/Metal) ¹⁴⁾		5983 96	1 25×10 ⁻²
				b)1080,000 (Refractory/Metal) ¹⁴⁾		216 04	2 00×10 ⁻⁴
				c) a)+b)		6200	3 97×10 ⁻³
C)Hot spot of oxygen jet in LD furnace ^{1 5)}							1 ~2×10 ⁰
D)Vacuum degassing (RH)	0 05	0 001	300		20	735,000	

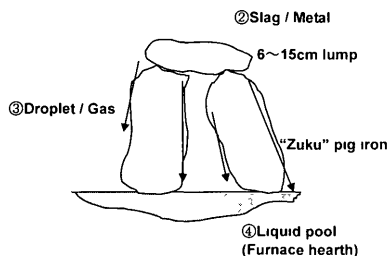
① Solid phase diffusion
Fe Oxide / Fe

Fig. 2 Schematic diagram of decarbonization sites.

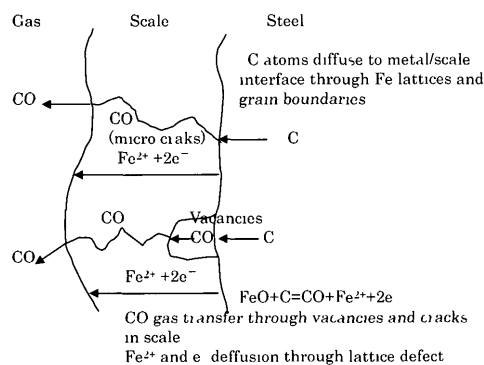
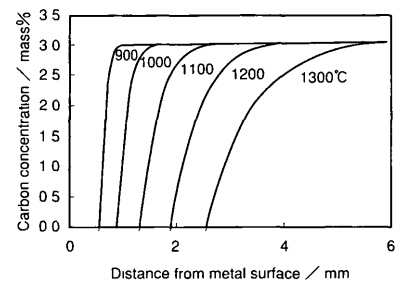
Fig. 3 Decarbonization mechanism of plain carbon steel with simultaneous mill scale formation¹⁷⁾

Fig. 4. Calculation of decarbonization of "Zuku" pig iron during heating (Heating time: 60 min).
 $k_c = 0.118 \exp(-29.7/RT)$ (cm^2/s)¹⁹⁾
 $D = 0.633 \exp(-37.46/RT)$ (cm^2/s)²⁰⁾

相当する。なお、現代の製鋼法の主流である転炉の火点部における脱炭速度は $1 \sim 2 \times 10^0 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ のオーダーであると言われている¹⁵⁾。

4・2 脱炭サイト別の脱炭速度の推測¹⁶⁾

ここでは、銑脱炭の脱炭サイトそのサイト別の脱炭速度の推測を試みる。考えられる脱炭サイトはFig. 2に模式的に示したように、

- ① 昇温時の銑表面からの脱炭、すなわち「固相内C拡散による脱炭」、
 - ② 銑溶解時の溶融状態のスラグ/メタル界面における脱炭、
 - ③ 溶解後の火窪への落下時液滴/気相界面における脱炭、
 - ④ 火窪部における液体プール表面の脱炭、
- の4カ所の脱炭サイトがクローズアップされる。

次にこれらのサイト別の脱炭速度を推測してみる。

4 2 1 固相内C拡散 (酸化鉄/Fe)

銑が溶解するまでの昇温時は銑表面が酸化し酸化鉄が生成するであろう。このような温度場ではFig. 3¹⁷⁾に示したような脱炭現象の起こる可能性がある。

スケールの生成と脱炭が同時に起こる場合の炭素の濃度プロファイルは、半無限スラブの場合、Fickの第二法則をベースとして構築したN. Birksら¹⁸⁾の理論に、酸化速度係数 k_c を適用することにより推定できる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

炭素の拡散係数 D が一定であると仮定して求めた一般的解より、式(2)が導出される。

$$\frac{C_0 - C}{C_0 - C_s} = \frac{\text{erfc}(x/2\sqrt{Dt})}{\text{erfc}(k_c/2D)^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 k_c : 酸化速度係数、 t : 時間、 C_0 : 初期炭素濃度、 erfc : 補誤差関数であり、スケール/金属界面での炭素濃度、 C_s は非常に小さい($\leq 0.01\%$)ことにより、炭素の濃度プロファイルは式(3)が得られる。

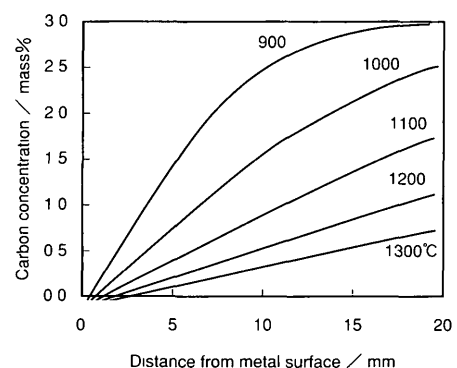


Fig. 5. Another calculation of decarbonization of "Zuku" pig iron (in case with 1000 times larger diffusion coefficient in Fig. 4.)

$$C = C_0 \left[1 - \frac{\text{erfc}(x/2\sqrt{Dt})}{\text{erfc}(k_c/2D)^{1/2}} \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)に目的とする鋼材の k_c および D を代入すると、各温度、各時間における任意の炭素濃度を求めることが可能となる。ここでは、 k_c はFeO中のFeの拡散係数¹⁹⁾を、炭素の拡散係数 D はR. P. Smith²⁰⁾の値を用いて式(3)によりCの濃度プロファイルを試算した結果をFig. 4に示した。1300°CではFe-C状態図より判断すると、銑が溶解していると考えられるので、ここでは脱炭が1100°Cで起こると仮定するとおよそ1 mm強の脱炭層厚が存在する。この範囲のCが初期 $C = 3.0 \text{ mass\%}$ から $1.5 \text{ mass\%}$ に低下、初期の銑サイズ $\phi 10 \text{ cm}$ 、脱炭時間 60 min とすると $1.91 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ のオーダーの脱炭速度と見積もれる。

以上は、特に加圧力を受けない固体鉄中のCの拡散一表面での脱炭と固体鉄表面での鉄の酸化反応の競争反応の考察結果であるが、草川のコメント²¹⁾に指摘されているように、本場での卸し作業のように、鍛錬による加圧、応力がかかっている状態では、見かけの拡散係数が条件によっては3桁ぐらいは十分大きくなりうる²²⁾ので、Fig. 5にCの拡散係数を3桁大きくした場合の競争反応の計算結果を示したが、固体での脱炭も無視できなくなる。

4 2 2 スラグ/メタル界面

Table 3に示した藤井の100t塩基性平炉における研究結果¹⁴⁾からスラグ/メタル界面における脱炭速度を見積もった。結果はTable 2に示したように $1.25 \times 10^{-2} \text{ g/(cm}^2 \text{ min)}$ の値が得られる。

4 2 3 液滴/気相

L. A. Bakerら²³⁾は液滴のレピテーション実験を行い物質移動を式(4)のように表した。

$$J = \frac{DPNu}{RTd} \ln(1+y) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 J ：酸素の流速($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 D ： O_2 -CO混合ガスの拡散係数($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)、 Nu ：Nuselt数、 y ：バルクガス中の酸素のモル分率、 P ：ガス圧(atm)、 R ：気体定数($82.07 \text{ cm}^3 \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$)、 T ：ガスフィルム温度(K)、 d ：液滴径(cm)である。

L. A. Bakerら²⁴⁾は液滴脱炭は気相中の拡散律速で説明出来るとし、最終的に液滴脱炭量を液滴径と落下高さの関数として式(5)を提案した。

Table 3. Decarbonization rates in basic open hearth furnace and high frequency induction furnace.¹⁴⁾

100t basic open hearth furnace	
Contact area of slag to bath (F_1)	480,000 cm^2
Area of hearth	1080,000 cm^2
Mean rate of decarbonization (C=0.40%)	0.0062%/min
Total rate of decarbonization (C=0.40%) (A)	6.200g/min
Rate of decarbonization by reaction of hearth (B)	216.04g/min
A-B=C ₁	5.98396/min
Oxygen content of bath (C=0.40%)	0.0163%
$C_1/\text{O}_2\% \times 10^4$	36.71g/min
High-frequency induction furnace	
Area of free surface (F_2)	28.26 cm^2
Rate of decarbonization from free surface ($\text{O}_2=20\%$) (D)	0.0608g/min
$D \times (F_1/F_2) = C_2$	1.03268g/min
Oxygen content of bath (C=0.40%)	0.0030%
$C_2/\text{O}_2\% \times 10^4$	34.42g/min

$$\Delta\%C = 0.0039 \frac{S^{0.5}}{d^2} (1 + 0.63d^{0.3}S^{0.25}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 d ：液滴径(cm)、 S ：落下高さ(cm)である。式(5)に基づき、液滴の落下時の脱炭量を液滴径と落下高さをパラメーターにして試算するとFig. 6の結果が得られる。

今、銑脱炭量 $\Delta\%C$ (3-0.2=2.8%)、落下高さ30cm、径0.1cmと仮定すると、 $8.44 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$ オーダーの脱炭速度となる。液滴落下時の液滴径、落下高さ、温度など値が不明であるので、正確な推測は困難ではあるものの、落下高さ30cm、径0.1cmと仮定できれば、銑脱炭時の液滴/気相サイトの寄与は相当大きくなり得ると推測できよう。

4 2 4 液体プール (火窪底部)

液滴の落下した火窪底部では自由表面における脱炭と考える。Table 3に示した高周波誘導炉の値から求めると $2.16 \times 10^{-3} \text{ g/(cm}^2 \text{ min)}$ 程度と見積もれる。

しかし、火窪底部に落下した液滴は熱容量が十分でなく、凝固速度も速いと考えられることからこの場所における脱炭反応は活発には起こりにくいのではないかと推測される。

以上 銑脱炭時の脱炭サイトを考え、おおざっぱな仮定の下にサイト別の脱炭速度の推測を試み、推測結果をまとめてTable 4に示した。オーダー評価の結果は、液滴/気相>スラグ/メタル>液体プール>酸化Fe/Feの順になった。しかしながら、おおまかな脱炭速度のオーダー評価は可能であるものの、成分等の情報不足、筆者らの知見と解

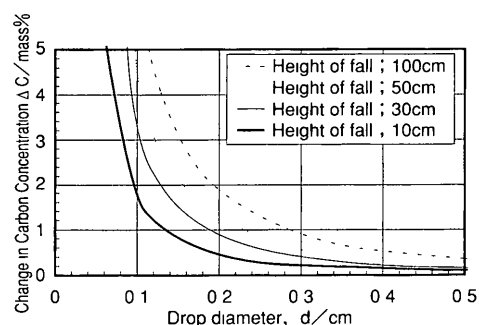


Fig. 6. Influence of droplet diameter and falling height on decarbonization of liquid droplets $P=1 \text{ atm}$, $T=1933 \text{ K}$

Table 4 Decarbonization sites and estimated decarbonization rates

Decarbonization sites	Evaluation	Decarbonization Rate($\text{g/cm}^2 \text{ min}$)
①Solid phase diffusion, FeOxide/Fe	Temperature, 1200°C, Time, $t=60 \text{ min}$ Oxidation rate coefficient, $K_c = 0.118 \exp(-29.7/RT) (\text{cm}^2/\text{s})$ Diffusion coefficient of C, $D = 0.663 \exp(-37.46/RT) (\text{cm}^2/\text{s})$	1.91×10^{-4}
②Slag/Metal	Estimated by the data in 100t Basic open hearth furnace	1.25×10^{-2}
③Droplet/Gas	Decarbonization of "Zuku" pig iron, $\Delta\%C = 3 - 0.2 = 2.8 \text{ mass}\%$, Height of fall, $S=30 \text{ cm}$, Diameter of droplet, $d=0.1 \text{ cm}$ partial pressure $P=1 \text{ atm}$, Gas temperature in the atmosphere $=1933 \text{ K}$	8.87×10^{-1}
④Liquid pool	Estimated by the data of free surface in high frequency furnace	2.16×10^{-1}

析力不足により、サイト別の寄与度の特定には至らなかった。推測に必要な諸因子の値が明らかになれば、本領域の解析と推測精度が高まり、ずく脱炭現象の理解が更に深まるものと思われる。

5. シミュレート実験の試み

大鍛冶場の銑の「左下」のシミュレート実験として、Si, Mnの低い木炭銑を使用し、保持温度を変え、また大鍛冶炉の炉床の木炭（粉炭）に水を含ませて加熱により蒸発する水蒸気雰囲気の中、空気吹付けによる脱炭を試みた。

5.1 実験方法

供試材の銑は往時と同じレベルのSi, Mnの低い木炭銑を使用した（Fig. 7：広島県 久保善博氏 提供）。Table 5にその化学成分を示す。また、Fig. 8に使用した大鍛冶炉の模式図を示す。通常は「おろし」工程を中心に使われている炉を使用し脱炭実験を行った。実験条件はTable 6に示すように、①銑が溶解しない温度域(1130~1150°C)における脱炭の調査、②銑を溶解させたときの脱炭調査、すなわち銑をおろした時の脱炭量の調査を行った(1250~1300°C)。これは高温領域では銑が簡単に溶解するも、脱炭する十分な時間を経過しないうちに炉床に到達し、再び銑として凝固してしまうことが予測されるため脱炭調査を行った。③の実験は水心子正秀⁹⁾の「剣工秘伝志」の「銑をろし略方のこと」や俵國一²⁾の「古来の砂鉄製錬法」

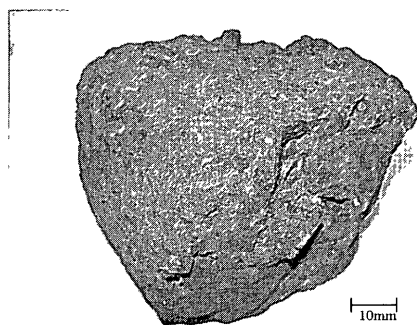


Fig. 7. Appearance of charcoal pig iron.

Table 5. Chemical composition of charcoal pig iron.

	(mass%)				
	C	Si	Mn	P	S
Charcoal pig iron	3.75	0.07	0.20	0.080	0.012

Table 6. Experimental conditions and results.

Test	Furnace hearth	Heating temperature x time	Region of phase diagram	Result of Observation
①	Dry	1130-1150°C x 60min	($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$)	Not melted
②	Dry	1250-1300°C x 30min	($\gamma + \text{L}$) → L	Pig iron (remelted)
③	Wet	1130-1150°C x 30 min (preheating) +1160-1190°C x 50 min +1250°C up x 15 min	($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) → ($\gamma + \text{L}$) → Melt down	"Hachime-tetsu" (Lump mass increased)

の記述にあるように炉床を2尺程深く掘り、その中に炭の粉を入れ、よく固めてその上に水を一桶入れるとあり、羽口下に大量の水を含ませる方法が江戸時代から少なくとも明治32年まで行われていた「左下（下げ）」の方法と思われる。今回の実験は、これらの方法を参考にしつつ、大鍛冶炉の羽口高さの下、約150mmほどの深さに掘り、粉の炭を敷き固め、約1リットルの水を含ませた。加熱（木炭の燃焼熱）によりまず予熱を行い、炉床より立ち上る水蒸気流の中で1130~1150°Cの($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) 2相域に保持（30分）すべく空気量調整（手動）をした。念のため途中で中断して銑を取り出し形状観察をしている。引続いて速やかに1160~1190°Cまで昇温維持してさらに50分間保持した。炉の内部の状況は羽口から観察を行った。熱電対は試料が溶け落ちて触れない位置を狙い、試料から30mm（羽口中心線から直角方向に離れた）位置で、試料の高さ中央にセットした。

5.2 実験結果

脱炭調査結果をFig. 9に示す。木炭銑の脱炭は実験③でC=3.75%から終点C=0.57%(0.37~0.95%)まで下がったことが確認できた。実験①では脱炭量は $\Delta C\% = 1.8\%$ 、実験②では $\Delta C\% = 0.5\%$ と少なかった。実験①の銑の加熱では塊りの角の部分から銑鉄が殻を破ってとけて流れでたものがあり（Fig. 10）、抜け殻は表面脱炭(C=1.38%)していた。流れ出た銑の脱炭量は少ない。実験②の結果は不十分な脱炭であるが「左下」の結果をFig. 11に示す。小さい穴は外

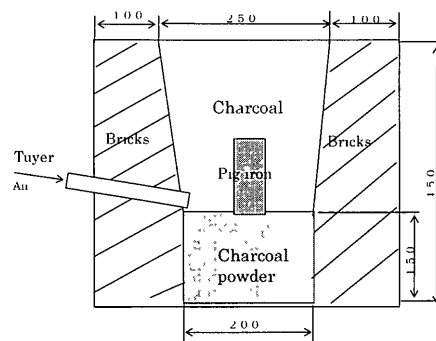


Fig. 8. Schematic diagram of experimental "Ohkaji" furnace.

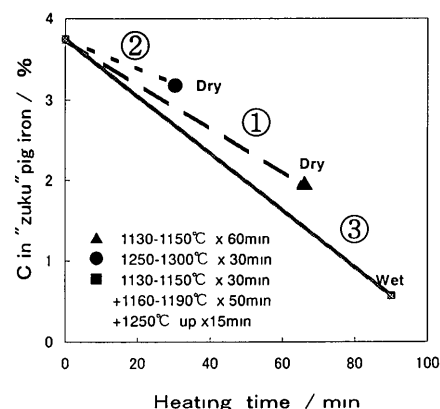


Fig. 9. Results of "Zuku" decarbonization

周の一部に見られるも、全体に内部はよく詰まり、銑の再凝固の様相を呈していた。この状態から大きな脱炭は進行していないものと思われる。

実験③では途中の予熱段階で溶解していないことを確認し、さらに温度を上げた、その後は羽口から試料の表面状況を確認しているが、そのまま空気の当たっている面は溶解せず、もとの形状を維持していたため、空気の当たらない羽口とは反対側の面が順次溶落ちて下に溜まったものと推測される。さらに最後の段階では一気に温度を1250℃以上まで上げて銑全体を溶解させるため送風量をあげた。最後の昇温のための送風量アップの直後から「ぶつぶつ」

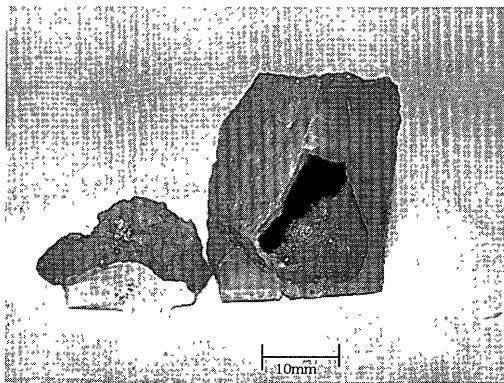


Fig. 10 The cast-off skin of pig iron (R) and the molten pig iron (L) after heating.

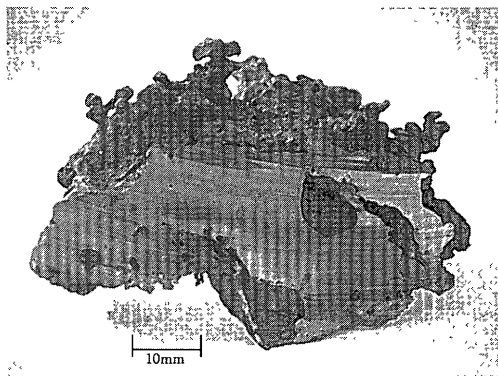


Fig. 11 An cross section of "Sage-tetsu" (an example of insufficient decarbonization, C%=3.0%).

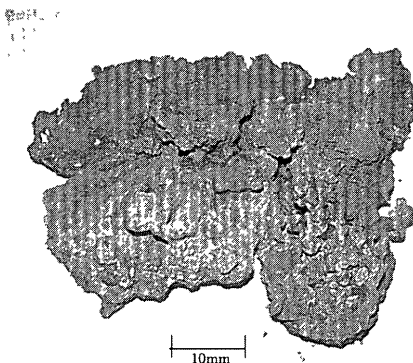


Fig. 12. Appearance of "Hachime-tetsu" after decarbonization (C=0.57%).

という「左下鐵」の沸く音が確認できた。この沸く音は4~5mはなれても聞こえた。Fig. 12は「左下」工程の終わった蜂目状の鉄（蜂目鐵）の外観を、またその断面の状態をFig. 13に示す。「左下」工程が順調に進行したものは断面全体に直径 $\phi 0.2 \sim 2.0$ mmの針で突いたような穴が点在していた。ところが炉床に接している部分ではC=3.35%と高く十分脱炭が進行していないところがあった。この部分は硬く切断も時間がかかり、また火花試験でもスパークが出にくい銑鉄特有の状況を示していた。「左下」が進行していない部分は簡単な火花試験等で工程の合否判断が容易にできる。

5・3 実験結果に対する考察

今回の実験では、銑の効率的な脱炭は固相域での十分な予備加熱→二相域($\gamma+L$)での保持とそれに伴う溶融と水蒸気を含む高温酸素雰囲気が大いなる脱炭速度を得る要因であることを確認した(Fig. 14)。炉の中では空気のよく通る雰囲気の中で予熱のための保持、かつ組織が固液二相域で空気吹付けを行い、順調な脱炭が得られるためには蜂目状の無数の穴を伴った組織を得ることが必要であると考えられる。刀鍛冶の技術伝承の中では銑の左下工程では炉床への水添加湿の方法があるも、高温での H_2O の解離に伴う発生期の酸素などの要因がどのように効いているかは今回のシミュレート実験では明らかにすることができなかった。

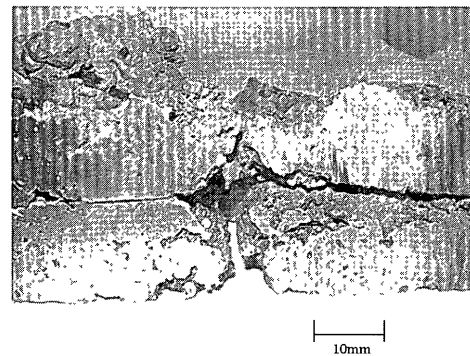


Fig. 13 Cross section of "Hachime-tetsu" after decarbonization (C=0.57%).

Stage	1	2	3
Hearth (Dry/Wet)	Wet	Wet	Wet
Operation	Preheating 1130~1150℃	Heating 1160~1190℃	Heat up→Melt down >1250℃
Time(min)	30	50	15

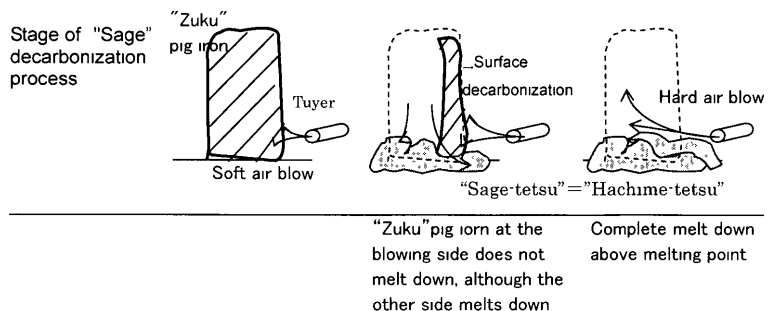


Fig. 14 Stages of "Sage" decarbonizing process

6. 考察

近世以降の高炭たたら製鉄業の大鍛冶場作業における脱炭反応の特徴は、現代製鋼技術者の目から見ると、常識的な製鋼反応速度論から類推したときに信じられないほど、脱炭反応速度が速い点と一方では製鋼歩留が異様なほど低いことである。本稿ではこの2点について半定量的考察を加えてみたい。

現代製鋼法、即ち、転炉法、平炉法、電気炉法の生産性向上、品質向上のための技術発展の方向はいくつかあるが、大きなものを二つあげるとすれば、一つは脱炭反応のために必要な酸化剤の酸素ポテンシャルをあげることと鋼浴の攪拌強度を上げることであった²⁵⁾。しかし、大鍛冶場作業はこの方向での技術発展ではない。

一方4・2節で検討した脱炭サイト別の反応モデルだけで大鍛冶場の脱炭反応速度を説明しようとする、製鋼技術者の目から見ていささか不自然な前提を設けないと説明できないことになる。即ち、主反応を固相拡散に依る炭素原子移動と考えると説明できず、何らかの、例えば鍛錬作業に伴う拡散係数の増大を仮定せざるを得ず、そうなると本場作業はともかく、左下場での脱炭は説明できない。次に平炉鉬石法のスラグメタル反応あるいはメタルプールをイメージした脱炭反応を考えて試算してみても、当然のことではあるが、特に、鍛冶炉のような構造の木炭とふいご送風による空気燃焼による熱供給ではメタルプールの維持そのものが難しく、とても合理的には説明できない。脱炭反応速度向上の一手段として反応界面積増大を図る溶銑粒滴脱炭モデルが考えられるが、20世紀中頃に英国BISRAで精力的に研究された研究結果^{23,24)}から見ると、4・2・2節で検討したように、相当不自然な前提条件、0.1 mmの溶銑粒が30 cm落下を前提としないとそれなりの脱炭速度は説明できない。

以上考察したごとく、通常の脱炭反応速度論から想定される反応モデルで説明しようとする、相当不自然な前提条件を置かざるをえず、したがって、大鍛冶場、特に左下場での脱炭反応はこれらの常識的な脱炭反応モデル以外に脱炭反応促進メカニズムを考える必要がある。

そこで、シミュレート実験の試みでは、「鉄山必用記事」¹⁾には記述のないものの一部の文献^{2,9)}、現代刀匠の見解¹¹⁾に見られる水添作業を付加してみた。実験結果はそこそこの脱炭速度が得られており、しかも順調に脱炭反応が進行した左下鉄の断面には主としてH₂ガスと思われる細かい気泡が数多く存在しており、大鍛冶場での左下作業における水添作業の重要性が示唆されているといえよう。大鍛冶炉の、反射炉でもなく、外気開放型の火窪の構造上から単位時間当たりの熱放散と発熱量とのバランスはもともと悪く、水を添加すれば、このバランスがますます悪化することは自明である。この対策として、鉄の酸化熱を利用

していたためトータルの製鋼歩留が異様に低い結果につながっていたのではないかと推察される。

残念ながら、本シミュレート実験では試料の厳密な温度、雰囲気成分の推移などを明確にすることはできなかったもので、冶金学的に定量的な考察は今後の研究に待ちたい。

7. 結言

近世以降の高炭たたら製鉄法においては、直近の靖国たたら、日刀保たたら操業を除いて間接製鉄法が主流であった。したがって、高炭たたら操業のみならず大鍛冶場の操業も経済的にも品質的にも重要であった。しかしながら、大鍛冶場作業における冶金反応、特に脱炭反応についての現代冶金学的研究は、高炭たたらの操業のそれと比べるときわめて少ない。本報告において、諸文献の記述、現代刀匠の経験およびシミュレート実験から大鍛冶場における脱炭反応について現代冶金学による解釈を試み、水添反応の重要性を指摘した。大方のご批判を仰げれば幸いである。

文 献

- 1) 下原重伸著、館 充訳：現代語訳鉄山必用記事、丸善、東京、(2001)、139
- 2) 俵 國一著：古来の砂鉄精錬法（たたら吹き製鉄法）、丸善、東京、(1933)、107
- 3) 前田六郎：和鋼・和鉄、河出書房、東京、(1943)、99
- 4) G Yamada *Tetsu-to-Hagané*, **4** (1918)、348
- 5) 雀部 実、館 充、寺島慶一編：近世たたら製鉄の歴史、丸善プラネット、東京、(2003)、123
- 6) 島根県教育委員会編：志津見ダム建設予定地内埋蔵文化財発掘調査報告書6 中原遺跡（付編）、島根県教育委員会、松江、(1999)、89
- 7) 島根県教育庁埋蔵文化財調査センター編：志津見ダム建設予定地内埋蔵文化財発掘調査報告書15 殿淵山遺跡・獅子谷遺跡（2）分析・総括編、島根県教育委員会、松江、(2003)、169
- 8) 島根県教育庁埋蔵文化財調査センター編：志津見ダム建設予定地内埋蔵文化財発掘調査報告書15 殿淵山遺跡・獅子谷遺跡（1）遺構・遺物編、島根県教育委員会、松江、(2002)、83
- 9) 水心子正秀著：剣工秘伝志、1821 [黒江二郎編：水心子正秀とその一門、雄山閣出版、東京、(1979)、210]
- 10) 横井崇光：私信（2003）
- 11) 真鍋純平：http://www.net135.or.jp/~katana/ (Nov 16, 2004)
- 12) J Kozuka *Tetsu-to-Hagané*, **52** (1966)、1763
- 13) M Tate: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn*, **4** (1999)、140
- 14) T Fujii *Tetsu-to-Hagané*, **46** (1960)、473
- 15) K Gunji *Trans. Iron Steel Inst. Jpn*, **10** (1970)、1
- 16) 松永 久、坪田一一、加藤恵之、壺 嘉夫：「前近代における鉄の歴史」フォーラム第5回講演会予稿、日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部会、東京、(2000)、22
- 17) N Birks and G H Meier著、西田恵三・成田敏夫訳：金属の高温酸化入門、丸善、東京、(1988)、188
- 18) N Birks and W Jackson *J Iron Steel Inst*, **208** (1970)、81
- 19) 日本鉄鋼協会編：第3版鉄鋼便覧第I巻基礎、丸善、東京、(1981)、586
- 20) R P Smith: *Trans. Metall. Soc., AIME*, **230** (1964)、476
- 21) 草川隆次：私信(2000)。
- 22) 日本金属学会編：転移論 その金属学への応用、丸善、東京、(1971)、277
- 23) L A Baker, N A Warner and A E Jenkins *Trans. AIME*, **230** (1964)、1228
- 24) L A Baker and R G Ward *J Iron Steel Inst*, **205** (1967)、714
- 25) 松永 久：転炉製鋼法の20世紀、中澤護人記念シンポジウム予稿集、日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学部会、東京、(2001)、61