

Techno Scope

幕末の鉄づくりをふりかえる にらやま 葦山反射炉

江戸時代末期、先人たちは西洋の技術を学び、優れた鉄鋼を生産する技術を習得していった。葦山反射炉は国内に唯一現存する実用炉であり、「明治日本の産業革命遺産」として2015年に世界遺産に登録された。当時の鉄づくりにはどのような技術が生かされていたのだろうか。



葦山反射炉(静岡県伊豆の国市)は、北側2炉と南側2炉の連双式2基4炉で構成される。高さは15.6m、底部面積5×6m。石製の基礎の上に建設されている。外側は伊豆石の組積造、内側は伊豆天城山産出の土で作られた耐火レンガのアーチ積である。(2021年10月29日まで反射炉本体補修工事中)

写真提供:伊豆の国市

幕末の日本を守る大砲

江戸時代末期の1853年、伊豆下田にペリーが来航し、日本には国防上の脅威が高まった。江戸幕府は、江戸湾

海防の責任者であった葦山代官の江川英龍に、大砲を作るために反射炉の建造を命じた。江川は「大砲鑄造法」(オランダ人ヒューゲニン著)を頼りに、すでに反射炉の建造を行っていた佐賀藩の援助を受け、伊豆葦山に反射炉を建設した。当時は薩摩、那珂湊、萩などでも反射炉の建設が行われた(図1)。幕末には幕府や各藩によって日本の海岸線に約1,000箇所の「台場」と呼ばれる大砲の射場が建設され、そこに数千台に及ぶ大量の大砲が設置された。

2015年、製鉄・製鋼に関する資産を含む「明治日本の産業革命遺産」が、ユネスコの世界遺産に登録された。これには日本国内の萩、鹿兒島、葦山、釜石、佐賀、長崎、三池、八幡の8エリア23構成資産が含まれ、反射炉としては萩と葦山が含まれている。

当時作られた反射炉のうち、実際に稼働した反射炉で現存するのは葦山だけである。しかし、葦山反射炉でどのように鉄を溶かし、大砲を鑄造したかなど、製造技術の詳細は明らかになっていない。

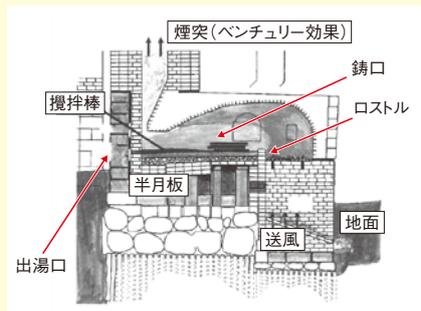
葦山反射炉の大砲製造についての調査研究に取り組んだのが(株)木村鑄造所の菅野利猛氏である。菅野氏は

◆ 幕末に建造された主な反射炉(図1)



◆ 葦山反射炉の構造 (図2)

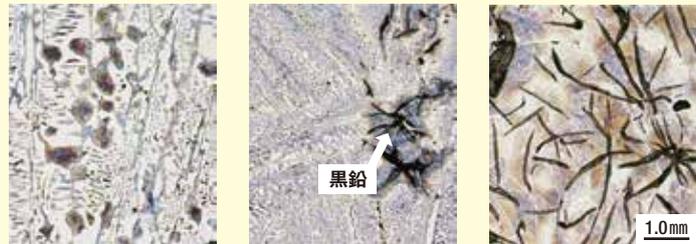
溶解室はドーム形をしている。溶解材料を鑄口に挿入し、炎や熱を反射させて材料を溶解する



葦山反射炉保存修理報告書 (葦山町教育委員会) (1987)22を元に作成

◆ C成分比と鑄造組織との関係 (図3)

(φ30×250mmの組織写真)



[C4.24%]
風鈴と同じ成分、
チルにより加工不可

[C4.31%]
茶釜と同じ成分、
チルにより加工不可

[C4.53%]
大砲と同じ成分、
引張強度 100 MPa

*チル鑄鉄：黒鉛が析出してない鑄鉄で、硬くて脆いために加工ができない。

資料提供：菅野利猛氏

2004年から本格的な調査研究を開始し、溶解材料、製造工程、設備などの解明に取り組み、これによりこれまでわからなかった事実が徐々に明らかになってきた。今回はその一部分である、大砲の溶解材料と溶解温度との関係を中心に紹介する。

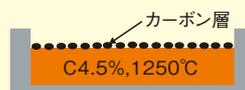
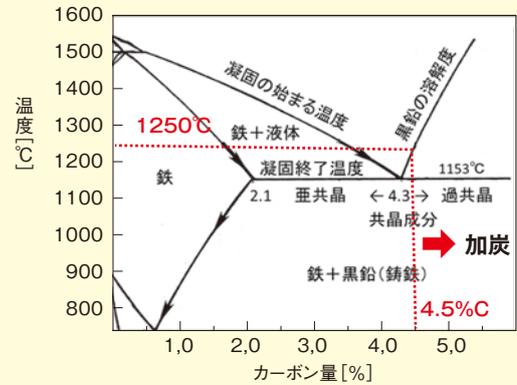
反射炉で鉄は溶けたのか

反射炉とは、大砲を作るために材料の鉄を溶かす溶解炉である(図2)。背の高い煙突の下部にあるロストルと呼ばれる部分に、木炭や石炭、コークスなどの燃料を置き燃焼させる。溶解材料は、甑炉(木炭と砂鉄を交互に入れ溶湯を作る炉)で製作した鑄物を使用した。鑄口と呼ばれる部分に溶解材料を挿入し、反射炉の熱によって溶解する。溶湯はノロ*1とともに出湯口付近に溜まる。この溶湯を攪拌棒で攪拌して、溶湯温度を均一にし、溶湯とノロの分離を行う。炉内の溶解室はドーム形をしており、そこに炎や熱を反射させて材料を高温にすることから「反射炉」と呼ばれる。できた溶湯を鑄型に流し込んで大砲を鑄造した。

実際にこのような簡単な構造の炉で、鉄は溶けたのか、という謎が研究者の間で長年議論されてきた。C成分の少ない鉄が溶ける温度は1536℃だが、ここまでの高温を実現することはできたのだろうか。この謎に対して、これまで「溶けるはずがない」と結論付けた研究者も多かった。

*1 ノロ:材料中の不純物と炉壁内部から排出される異物。鉄滓ともいう。

◆ 過共晶鑄鉄の製造方法 (図4)



溶湯を過共晶鑄鉄にするためには、Cを4.5%以上にする必要がある。溶解材料の投入時よりC濃度を増やすには、溶湯表面に黒鉛を敷き1250℃で保持すればよい。当時は、正確な成分分析はできなかったと思われるが、C濃度を高くすれば低温で溶け、低くすれば高温で溶けることを知っていたのだと考えられる。

一般に鑄鉄には、FeやCを基本に、Si、Mn、P、Sなどの成分が含まれている。鉄基地中には黒鉛あるいは炭化物が分散しており、黒鉛や炭化物の形状や組織により材料特性が変化する。鑄鉄中のSiは、鉄基地中に固溶して硬さを高める性質があり、また黒鉛化作用の強い元素である。

江戸時代末期までの日本では、鑄鉄の主体はチル(Chill)鑄鉄だった。チルの語源は「冷やす」という意味で、溶湯の冷却速度が速く、黒鉛があまり析出していない鑄鉄の呼び名である。チル鑄鉄は硬くて脆いために切削加工ができず、鑄物を大砲に加工することはできない。当時日本国内で容易に手に入る砂鉄はSi成分が少なく、Siが多く含まれる銑鉄は貴重であった。Siの低い銑鉄でチル化しない鑄物を作る方法が、長い間解明されていなかった。

当時の大砲の成分と組織を調べると、Si成分は少ないが黒鉛が十分に析出している例が見つかった。この例は、チル鑄鉄ではなくC成分が4.3%を超える「過共晶鑄鉄」であった。過共晶鑄鉄では溶湯の温度が下がって最初に析出するのが黒鉛であり、この黒鉛を核として鋼中で片状黒鉛が成長するため、チル鑄鉄になることを回避できる(図3)。当時の人々は、C成分を増やせば硬くて脆いチル鑄鉄にならない方法を知っていたと考えられる。

そこで菅野氏は、過共晶鑄鉄の製造方法を以下のように推測した。反射炉で材料を溶解し、その後黒鉛を溶湯表面に敷いて1250℃で保持する。すると溶湯中のCは4.5%が高まり、その結果溶解温度を低くすることができる(図4)。

この仮説を検証するために、小型反射炉で溶解実験を行ったところ、予想どおりの温度で材料の溶解に成功した。つまり反射炉では、従来考えられていた脱炭や精錬ではなく加炭を行ったこと、これによりSiが低くてもチル鑄鉄でない溶湯を作ることができた、という仮説が裏付けられたのである。

かめ こうせん 「亀の甲銑」を使った3砲目

葦山反射炉の大砲に使用された溶解材料は、1砲目と2

砲目はSiがあまり含まれていない島根・石見の砂鉄であった。ところが3砲目では材料が変わり、「亀の甲銑」と呼ばれる銑鉄が300貫(1,125 kg)と溶湯全体の23%使われている、と当時の日記を調べていく中でわかった(亀の甲銑の他には岩手・釜石の岩鉄(磁鉄鉱)が使われた)。亀の甲銑とは、溶湯の表面に亀の甲のような模様が見られる銑鉄であり、良質の溶湯の証拠とされている(図5)。この独特な模様は、溶湯表面に形成した酸化膜(SiO₂)によってマランゴニ対流*2が起ることによって現れ、Siが0.5%以上含まれている時に生じることがわかっている。つまり亀の甲銑は、Siを含む銑鉄であり、当時得られる材料としては貴重なものだったと思われる。

実は、亀の甲銑が使用された記述は、2015年に世界遺産に認定された後、当時の日記を整理している中から発見された。亀の甲銑がすぐれた鑄鉄品質につながることは分かったものの、その産地や製造方法は明らかになっていない。これはまだ解明されていない大きな謎である。

作られた大砲はどこへ行ったのか

葦山反射炉で製作された大砲の数は諸説あるが、幕府が1857年に18ポンドカノン砲という鉄製大砲1砲目の製作を開始したのを始めとして、鉄製4砲、青銅製3挺以上を製作した記録が残っている。

短い期間で製作が終わった理由は、大砲の弾の進化に追いつけなかったため、と考えられる。葦山反射炉で作られた大砲の弾は球形であったが、その後、先端が尖ったロケット形状のライフルカノン弾へと移行していった。

ちょうど時期を同じくして、米国では南北戦争が起こっていた。北軍が勝利した理由の一つはロケット形の大砲を使っていたからだ、という説がある。南軍が使っていた球形に比べ、ロケット形は弾丸飛行距離が長く、目標を正確にとらえることができる。南北戦争後、球形の大砲は使われなくなり、同様な理由から葦山反射炉の弾は使われなくなったのではないかと考えられる。

では葦山反射炉で作られた大砲は、その後どうなったのか。残念ながら1砲目、2砲目の鑄造や試打ちの記録は見つからないが、材料に亀の甲銑を使った3砲目では試打ちをした記録が残っている。しかし、この大砲も現在は残っていない。

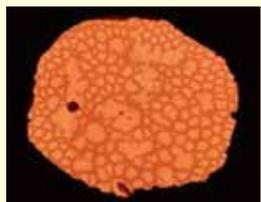
これについては、実戦では大砲の強度や耐衝撃性が不足して破裂した可能性が高いと考えられる。加工ができる

*2 マランゴニ対流：表面張力の不均一によって起こる対流で、重力に無関係で生じる。

◆鑄鉄溶湯の湯面模様(図5)



笹の葉模様(悪い溶湯)



亀の甲銑による亀甲模様

亀甲模様は、溶湯中でSiが優先的に酸化し、Siの酸化膜(SiO₂)が形成されるために模様が見れる。

資料提供：菅野利猛氏

INTERVIEW

今も残る反射炉の謎に取り組む

葦山反射炉の研究に取り組んできた（株）木村鑄造所の菅野利猛氏に、これまでの研究の感想と今後の活動について、お話をうかがった。



菅野利猛氏
（株）木村鑄造所 専務

— どのようなきっかけで、研究を始めたのですか。

1998年に当社が葦山反射炉に24ポンドカノン砲のレプリカを寄贈しました。その後2004年ごろから本格的な調査を開始して、葦山反射炉について鑄造工学的な考察を行いました。2015年には世界文化遺産に決定し、多くの方から注目されるようになったと思います。

— 葦山反射炉を研究して、よかったと思うことは何ですか。

溶解温度の謎が解けた時は、とてもうれしかったですね。溶湯の上にカーボンを入れると濃度が上がって、溶解温度が下がる。葦山反射炉は、過共晶鑄鉄を大量に作る設備だったのです。これに気づくまでに10年ぐらいかかりました。

これまでわからなかった謎が、ある日突然解けた時は、とてもうれしいものです。葦山反射炉ができたのは今から150年以上も前の話で、材料や工程などわから



江戸時代末期に葦山反射炉で製作された大砲を、当時の資料などを元に復元鑄造した24ポンドカノン砲（榎木村鑄造所製作）。

過共晶鑄鉄で大砲を作ったとしても、過共晶鑄鉄の引張強さは100 MPa程度しかない。試打ちは半分の火薬で行うので問題ないが、実戦となると大砲の強度が足りずに割れてしまう可能性が高い。葦山反射炉に限らず、当時国内で製作された大砲がほとんど残っていないのは、そのような理由があったのではないかと。

ないことがたくさんあります。根気よく当時の古文書を調べるうちに手掛かりを偶然見つけたこともありました。鑄鉄の材料開発でも、目の前のテーマがうまくいかない時、少し時間をおいてみると解決できることがあります。時間が経てば、自分の考え方も変わるし、実験方法も変わる。そうしているうちに長年の謎が解けることもありました。

もう20年以上、反射炉と付き合っていますが、佐賀や萩の反射炉を家族と一緒に訪ねた楽しい思い出があります。また研究者や多くの人たちと出会って、良い仲間がたくさんできたこともたいへん印象に残っています。

— 今後、取り組みたい研究テーマは何ですか。

「亀の甲銃」はどこから来たのか。これが最大の謎として残っています。文献には「3砲目の大砲の材料の一部に亀の甲銃を使った」との記述が残っています。亀の甲の模様はSiが含まれている証拠であり、Siが入っていれば過共晶鑄鉄ができる。亀の甲銃が優れていることは知られていたと思われそうですが、いったいどこから手に入れたのか。当時、鉄に関する情報は武器に関する機密事項なので、あまり記録は残っていないかもしれませんが、今後もぜひ調査を続けたいと思います。このような調査活動を多くの人に知ってもらい、「鑄造」への興味を深めてもらえるといいと思います。

葦山反射炉にはこれ以外にも、まだ解明されていない謎が多く残っているという。海外の新しい技術を取り入れ、自らの手で実現していった鉄づくりの歴史。大いなるロマンとともに、改めて振り返ることは大いに意義深い。

- 取材協力 菅野利猛氏（株）木村鑄造所
- 文 杉山香里