

明後期に鑄造された紅夷大砲の金属学的調査

－崇禎十一年（1638）紅夷大砲を中心に－

鄭 巍巍

庄子 哲雄

糸藤 春喜

張 建華

FUSUS Vol.7 抜刷 2015年1月

アジア鑄造技術史学会誌

明後期に製造された紅夷大砲の金属学的調査 - 崇禎十一年 (1638) 紅夷大砲を中心に -

鄭巍巍¹⁾、庄子哲雄²⁾、糸藤春喜³⁾、張建華⁴⁾

概要

本研究では、崇禎十一年 (1638) に製造された紅夷大砲の化学成分分析と金属組織観察を行い、大砲の材質並びに製造プロセスを明らかにし、明代後期の紅夷大砲製造並びに鉄鋼技術のレベルについて検討することを目的とする。

研究手法としては、大砲の現位置における金相観察、並びにその際に発生した研削粉による化学成分分析である。また、砲口に近い位置にて微小片試料を採取し、より詳細な組織観察並びに成分の分布をEDX、SEM、XPSを用いて行った。その結果、砲尻部は、ねずみ鑄鉄組織を示し、砲口近くの砲身部の組織は、パーライトと初析セメンタイトおよび低融点共晶ステダイトを有する均質な過共析鋼組織であることが分かった。大砲の表面近傍には、脱炭鑄鉄鋼固有の組織的な勾配は観察されていないことより、本大砲は、表面からの脱炭によって得られた鑄鉄脱炭鋼とは異なる。砲身は鑄鉄と鑄鋼によって製造された可能性が高い。

キーワード

鑄造大砲、鑄鉄、鑄鋼、過共析鋼組織、鑄鉄脱炭鋼、ステダイト、レデブライト

1. 緒言

紅夷大砲の中国への伝来は万暦初年 (1573年) にまで遡る。当時、閩 (福建省) と呂宋商人の頻繁な往来によって、呂宋にて製造された呂宋大砲の存在が初めて明代の中国に伝えられた⁽¹⁾。『明史・和蘭伝』においては、西洋大砲は赤い髪を持つオランダ人が作ったため、紅夷砲と名付けられたことが記載されている⁽²⁾。その後、紅夷大砲は西洋各国が製造した前装滑膛式大砲の通称として使用されるようになった。

万暦四十七年 (1619年) 三月、遼東に起こった明対女真族勢力の戦い、サルフの戦いにおける明の全敗は、明廷が本格的に紅夷大砲を導入しようとするきっかけとなった。紅夷大砲の伝来は、西洋の呂宋大砲を真似て製造した青銅製紅夷大砲の段階、イエズス会からの購入段階、西洋戦艦の沈没船から大砲を回収して使用した段階、そして地方官吏の出資による鑄鉄製紅夷大砲の製造段階の四つの段階があった。具体的には、初めは万暦四十七年 (1619) 九月、西学を提唱する徐光啓⁽³⁾の命令を受け、刑部尚書である黃克纘 (1550-1634) は、福建省の呂宋から帰国した大砲製造職人を集め、28門の青銅製呂宋大砲を真似て製造させた。しかし、鑄造品質や大砲操作などの問題が原因で、遼東戦役においては、あまり役立たなかった⁽⁴⁾。その後、再び、徐光啓の命令に従って、徐の友人でもある李之藻 (1563-1630) と楊廷筠 (1557-1628) の出資により、天啓元年 (1621) イエズス宣教師の紹介でマカオから四門の紅夷大砲が購入された。その中の一門は、後の寧遠戦役で戦功を立てた⁽⁵⁾。しかしながら紅夷大砲を購入したマカオでは、大砲製造事業は初期発展時期のため、大砲製造数量の制限があり、益々高まる明廷の大砲に対する需要を満すことができなかった。そのため、明廷は広東沿海に沈んだヨーロッパ戦艦に装備されていた大砲に注目し、沈没船から大砲を引揚げることになった。おおよそ42門の大砲を回収し、明と後金の戦場に運ばれた⁽⁶⁾。この意味では、紅夷大砲は明軍の戦場である程度普及していたと言えるが、後金を退治するため入手した紅夷大砲であったが、明廷の度重なる敗戦によって紅夷大砲は後金に奪われ、逆にこれらの大砲で攻撃される立場となった。崇禎年間 (1636-1644) になって、後金からの攻撃に追われた九邊などの前線地域では、軍隊の官吏が出資し、紅夷大砲が製造されるようになった。本研究の研究対象である紅夷大砲は、このような背景において製造されたものである。

紅夷大砲の伝来に関する研究は、これまで数多く行われてきた⁽⁷⁾。同時に、紅夷大砲の伝来に伴う火砲製造関連理論や製造技術知識の伝来に関する研究も盛んに行われてきた⁽⁸⁾。19世紀ロシアのP. Anosov氏を代表とする冶金学者たちがダマスкас鋼 (damascen steel) の花紋顕示原理を研究したことがきっかけとなり、古代金属組織学が誕生した。以来、現代の多様な分析機器を用いた古代金属製品の化学成分や組織を観察、分析する研究手法は、冶金史において重要な研究方法の一つとなってきた。またこれまで、中国国内では、金属学の視点からの大砲研究もいくつか行われてきた。延慶県四海鎮營盤、柳溝城遺跡から出土した明代の大將軍砲、三眼銃及び一種の手榴弾である手雷の材質についても金属組織学的調査研究が行われている⁽⁹⁾。これらの研究成果により、明代鉄砲の砲身の材質はねずみ鑄鉄であり、箍などは鍛鉄で、手雷の材質は白鑄鉄であることが解明されている。劉鴻亮、孫淑雲らは大

量の大砲サンプルを分析し、清代大砲とアヘン戦争中に使用された英国大砲の金属組織を示し、材質の比較を行っている⁽¹⁰⁾。しかしながらこれらの分析においては、金属の成分分析や詳細な組織観察は行われておらず、金属組織観察などによる鑄造プロセス分析などに踏み込んだ研究とはなっていない。また、大砲の砲耳サンプルより一ヶ所のみを採取するケースがよく見られるが、砲耳一ヶ所の分析結果をこの大砲の材質であるとする根拠を示す必要がある。中国古代金属組織研究に関する研究としては、北京科学大学が編輯した冶金史における金属組織研究シリーズ⁽¹¹⁾を挙げることができよう。金属組織に関する先行研究を概括すると、殷商 (BC 1600-BC 841)、春秋 (BC 841-BC 475)、戦国 (BC 475-BC 221) 時代から秦 (BC 221-BC 206)、両漢 (BC 206-BC 220) まで青銅器や鑄鉄や百煉鋼⁽¹²⁾の金属組織研究が集中的に行われているのに対し、出土文物の数が限られていることもあるが、元明代の鑄造品、特に大型鑄造品である大砲に関する金属組織学的研究は極めて数少なく、特に明代の鉄砲の金属組織学的研究は殆ど行われていないのが現状である。また、著者らによる最近の研究によれば、紅夷大砲の製造年を260年ほど遡る明代初期に製造された洪武大砲 (1377年) が、これまでの鑄造史を覆して、鑄鉄ではなく、鑄鋼により製造された可能性が示されている⁽¹³⁾。

本研究の調査対象である紅夷大砲は、このような時代背景の中で、西洋大砲の設計並びに鑄造技術を取り入れるとともに、山西地域での鑄造原料を用いて製造されたものである。紅夷大砲に関する金属学的研究は、火砲史分野に属するが、加えて鉄鋼技術史や東西文化交流史とも密接に関連しているため、本研究で得られる知見は、これらの分野にも活用され、有意な情報を提供することが期待される。

2. 紅夷大砲の外形構造と銘文

本研究の調査対象である紅夷大砲は、現在山西省芸術博物館の庭に展示されている。大砲全長260cm、内径10cm、最も太い部分である薬室部の外径は33cmである。外観の鑄バリから、鑄型は、長手方向に七段に分かれ、砲身の周方向に対して円筒状鑄型と推定された。鑄バリの情報を総合すると、紅夷大砲は、砲口を上に向け、一体として鑄造されたものと推定される。砲身中央部2ヶ所に、湯口部を打折して整形した破面が残されている。この2ヶ所より給湯され、初めは湯は下降して薬室部を形成し、その後、砲口に向けて上昇し、砲身を形成するとともに砲口を形成するように鑄込まれたものと思われる。図1からも分かるように鑄肌は、概して荒れが見られ、特に砲口部は鑄造時の発生ガスが残留したことによる大きな肌荒れが見られる (図2)。

大砲の薬室部に沿って、下記のような銘文が鑄込まれている⁽¹⁴⁾。

崇禎戊寅歲仲夏吉日、捐助建造紅夷大砲。總督軍門盧象昇、總督軍門陳新甲、總督軍門陳貴、巡撫都御史葉廷貴、分守太監牛文炳、巡按監察御史張寰極、巡按監察御史秦廷奏、鎮守京左都督王朴、中監太監楊林茂、戶部郎中王士章、分守冀北兵備道朱家仕、分巡冀北兵道樊師孔、整飭陽和兵備道竇可進、大同左衛兵備道聶明楷、監軍屯牧兵備道鄭獨復、張洪。督工監造：中軍參游吳□、梁承爵。紅夷大砲一位重五百斤、裝放用藥一斤四兩、封口鐵子一個重一斤、群子九個。如日久不放者、每年須用稻糠煨潤一次。試放用藥一斤、垂為永式。

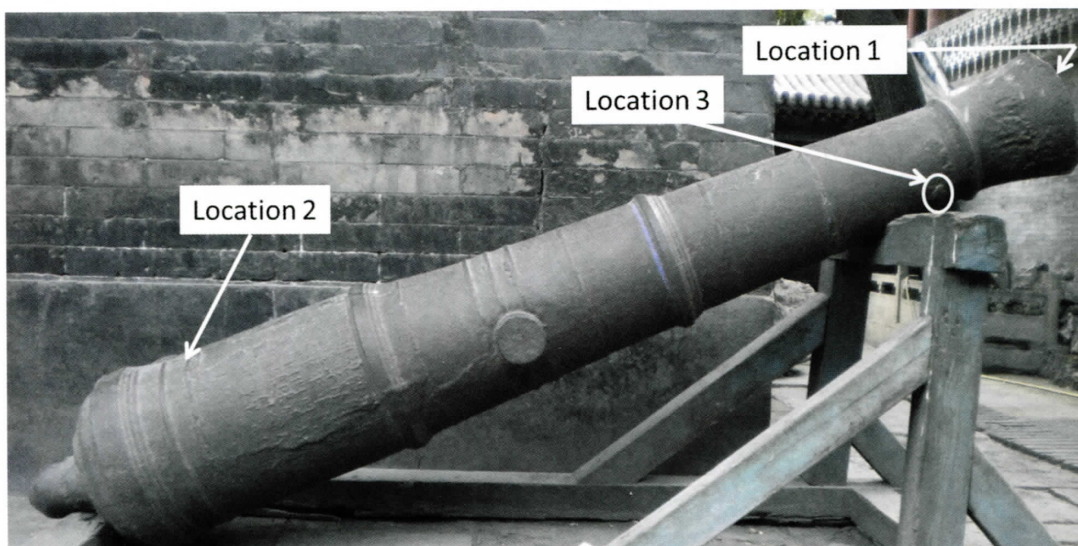


図1 崇禎十一年 (1638) 製紅夷大砲 (写真：鄭巍巍 2011年8月)



図2 砲口部の拡大写真 (写真：鄭巍巍 2014年1月)

この銘文によると、宣太總督盧象昇をはじめとする総計16名の官吏、中官などが出資し、この紅夷大砲を製造したことが記されている。また、この大砲の重量は500斤 (297.5 kg) であり、使用する火薬の量は毎回一斤四量 (0.744 kg)、砲口に設置する鉄の弾丸の重さは一斤 (0.595 kg)、散弾九個と書かれている。しばらく使用されていない場合は、稲の糠に浸ける必要があること、また試作発射する場合には、火薬の質量は一斤 (0.595 kg) にすることが規則となっていることなど詳細な規制が銘文に鑄込まれている。

盧象昇 (1600-1638) は、字建斗、宜興の出身で、天啟二年 (1622) 進士に合格、崇禎8年 (1635) ~崇禎9年 (1636) にかけて巡撫湖廣、總理江北、河南、山東、湖廣軍務を⁽¹⁶⁾、また崇禎9年 (1636) から崇禎11年 (1638)、兵部左侍郎⁽¹⁷⁾、山西陝西軍務⁽¹⁸⁾を歴任している。総督として、山西の軍務を担当中、後金からの攻撃が数回あったことが記録に残されている。本研究で取り扱う大砲の紅夷大砲は、おそらく後金からの攻撃に対抗するために製造されたことは想像に難くない。

3. 洪武大砲の金属学的調査手法とその実験手順

本調査では、始めに砲身の代表的部位における金属組織の相違の有無を明らかにするために、大砲の砲口 (図1の Location 1) と砲尻部 (図1の Location 2) の2カ所を金相調査対象として選択した。これらの部位について金属組織学的調査を行うため、上記2ヶ所について表面層を研削・研磨し、鏡面に仕上げた後に腐食し、携帯型デジタル顕微鏡にて金相観察を行った。その際、研削粉をマグネットにより採取し、化学成分分析に供した。また詳細は後述するが、Location 1近傍の砲身の凸部より、小片試料を採取 (Location 3) した。それぞれの位置を図1に示す。具体的手順は、以下の通りである。

3.1 粗研削並びに研削粉末の収集

はじめに調査対象位置について、回転式研削機 (Emax Evolution, Nakanishi) と超高速鋼工具 (TX 06 Minitor Co., Ltd) を用いて、対象部を平滑化する。この際、研削による平滑化に伴い発生する研削粉は、ビニール袋内のマグネットにより、直接の接触を避けるように留意して採集し、その後速やかに別のビニール試料袋に保管し、元素成分の分析用に供する。また採取された研削粉末の重量より、研削、研磨面を円と仮定して、その研磨深さ、換言すれば組織観察面の表面からの深さを推定すると砲口と砲尻において、それぞれ1.2 mm、0.96 mmとなる。

3.2 鏡面仕上げ作業

ある程度平滑化された試料表面について、同じ回転式研削機の工具を取り変えて粗さ120番より2000番までの水研磨紙により段階的に表面の鏡面度を向上させ、最終段階でダイヤモンドペースト1/2 μ mの研磨剤にて表面を鏡面に仕上げる。

3.3 組織現出のための鏡面の腐食

金属組織を現出させるために鏡面仕上げされた表面について4% ナイタール液 (4% 硝酸/エタノール液) を十分に含ませた脱脂綿にて軽く腐食する。

3.4 金属組織観察

携帯型デジタル現場顕微鏡 (SCALAR 社製 DG-3x, 倍率25倍~200倍) にて研磨、腐食した表面の金属組織を観察

するとともに、顕微鏡に附置された写真撮影記録装置 (CF compact flash memory card) に組織を観察倍率と共に記録する。

3.5 硬さ測定

組織を写真撮影後、調査対象部位が水平に近い場合には、携帯型ショア硬さ計 (Hard Scope, Imai Testing Machine MFG Co. Ltd., Japan) にて硬さを測定する。10点程度を測定し、平均値とバラつきを評価した。この硬さ計により主組織の平均的な硬度と同部位の機械的性質を推定することが可能である。このショア硬さは一般的なビッカース硬さに換算することができる。

3.6 化学成分の分析

採取された研削粉について成分分析を行った。C、Sの分析は、それぞれ JIS G1211・3、JIS G1215・4 燃焼および赤外線吸収法に準拠し、堀場製作所 EMIA-320V 装置を用いて実施した。Si、P、Mn、Mo等の諸元素は、JIS G1258・1 ICP 発光分光分析法に準拠し、島津製作所の IPS-7510装置を用いて実施した。Oについては不活性ガス融解-赤外線吸収法により分析を行った。ただし、Oについては、対象酸素量が現在の鉄鋼材料の酸素量に比して著しく多いため検量線の精度が保証されないため、参考値として取り扱う。

3.7 エネルギー分散型 X 線分析法による局所的成分分析

砲口近傍の突起部 Location 3より採取した小片試料について走査型電子顕微鏡 (SEM)、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) 並びに X 線光電子分光分析法 (XPS) による詳細な組織観察と局所的化学成分分析並びに化学的状態解析を行った。使用した SEM 装置は、HITACHI 製大電流ショットキーエミッション型 SU-70であり、EDX 分析は、附置の EDAX 社製エネルギー分散型 X 線分析装置 Genesis APEX2を用いた。分析条件は、ビーム加速電圧20 kV で、分析は付属のソフトウェア Genesis Imaging/Mapping Version 6.41Jを用いた。また XPS 装置は、Ulvac-phi "Quantum 2000" を使用し、X 線照射径 100 μm とし、試料表面清浄のために、0.5 kV Ar イオンビームを1分間照射後に分析に供した。

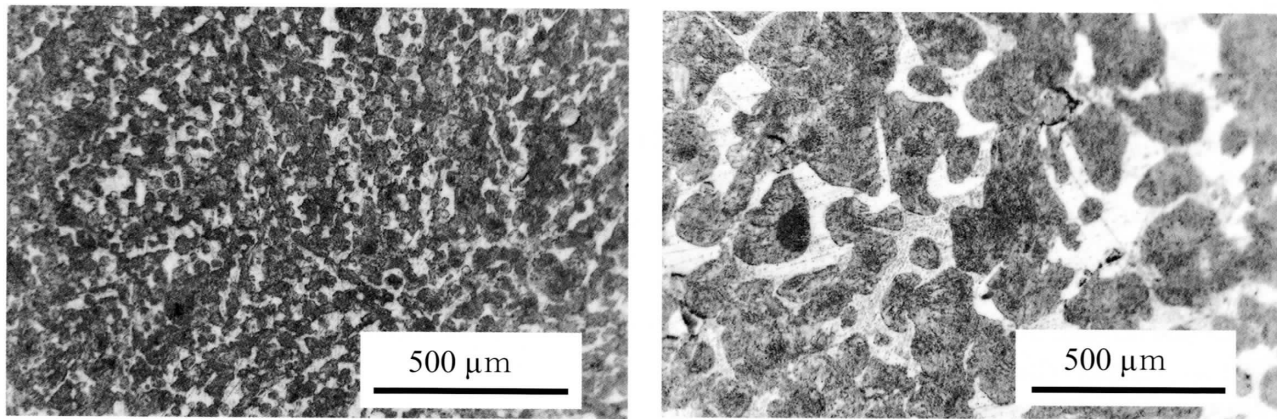
これらの機器分析に加えて、介在物の組成を分析するため、オージェ電子分光 (AES) 分析法による成分分析も行った。オージェ分光分析には、ULVAC-PHI 製「PHI 680 Scanning Auger Nanoprobe」を用い、ビーム径は 28.5 nm であり、定量分析値の単位は at% である。

4. 調査結果

4.1 砲口部と砲尻部の金属組織

砲口 (Location 1) と砲尻 (Location 2) 部に於ける金属組織の観察結果を、それぞれ図 3 (a) と図 3 (b) に示す。図 3 (a) に示す砲口の組織写真は、円形状の丸みを帯びた黒色の下地母相組織と不定形の白色の組織を示している。このような混在組織は、炭素鋼の亜共析鋼組織あるいは過共析鋼組織によく見られる組織である。炭素含有量に依存して、共析鋼炭素量 0.77 mass% 以下の場合には、亜共析鋼と呼ばれ、初析フェライトとパーライトの混合組織となる。それ以上の場合には、過共析鋼となり、初析セメンタイトとパーライトの混合組織となる。本部位については、観察面が水平でないため、現位置での硬さ測定が出来なかったため、初析フェライトであるか、あるいは、初析セメンタイトであるかの判別は出来ないが、後に示す化学組成の結果から、亜共析鋼である可能性が示されている。黒い部分はオーステナイトから共晶したパーライトで、白い不定形の部分は初析フェライトで、旧オーステナイトの結晶粒界に形成されて分布している様子が示されている。一部のパーライトは形状が粒状を示しており、その周辺をフェライトが取り囲んでいる様子が見える。この粒状パーライトに着目して平均的粒径を求めてみると、平均結晶粒径は 33 μm であった。組成分析によれば、炭素量は 0.45-0.51 mass% であり、亜共析鋼組織の鑄鋼であることが示唆される。

図 3 (b) に示している砲尻部の組織を見ると、後掲する当該部の炭素量 2.8-2.85 mass% から判断して、典型的な鑄鉄組成にも関わらず、鑄造組織としての凝固組織並びに黒鉛は観察されず、白い部分に球状化したパーライト組織が分散分布している。白色部には、黒い点が多く見られる鑄鉄固有のチル組織であるセメンタイトとオーステナイトの共晶、レデブライトの形成が見られる。黒鉛形成の抑制は、このレデブライトの生成によるものと思われる。また一部にはレデブライトとパーライト粒内あるいは界面に微細な割れが観察される。代表的粒状パーライトの平均粒径は 100 μm であり、砲口部に比して著しく粒径が大きい。この相違は、鑄造時の冷却速度の違いによるものと思われる。これらの結果は、紅夷大砲は、鑄造時の下部 (薬室側) と上部 (砲口側) で、含有炭素量が異なり、下部は鑄鉄組成、上部は鑄鋼組成であり、一門の大砲において、異なる材質、つまり、鑄鉄と鑄鋼によって鑄造されていた可能性を示唆している。さらなる考察は、採取微小片についての観察並びに分析結果を含めて後に行う。



(a) 砲口 (Location 1) 部

(b) 砲尻 (Location 2) 部

図3 紅夷大砲の金属組織

4.2 紅夷大砲の化学組成

予想を覆す組織観察結果をさらに検証するために、元素成分分析並びに現位置にて実施した硬さ測定結果について述べる。分析結果を表1に示す。化学成分分析は、前述の方法で採った紅夷大砲の研削粉末と砲口から一番目の箍の下 (Location 3) で採取した試料を分析したものである。

表1 紅夷大砲の化学組成 (mass%)

試料名		C	Si	Mn	P	S	N	O
Location 1	Surface	0.51	0.79	0.02	0.48	0.33	-	-
	Inside	0.45	0.84	0.02	0.52	0.36	-	-
Location 2	Surface	2.80	0.85	0.05	0.96	0.75	-	-
	Inside	2.85	0.49	0.04	1.00	0.54	-	-
Location 3		1.44	2.01	0.07	0.48	0.37	< 0.02	0.3

分析結果から見ると、紅夷大砲の砲口部 (Location 1) の炭素量は0.45-0.51 mass%であり、観察された金属組織と整合性のある炭素量となっている。砲尻部 (Location 2) の炭素量は2.80-2.85 mass%であり、ねずみ鑄鉄に対応する炭素量を示している。砲尻部 (Location 3) 1.44 mass%、過共析鋼の炭素量を示している。紅夷大砲の砲口から薬室まで、それぞれ異なる炭素量 (亜共析鋼組成の鑄鋼と鑄鉄組成) を示しており、異なる材質によって鑄造されたことを示唆している。鑄造法は薬室部を下の砲口を上部に向けた鑄造で、その中間より下側にある湯口から溶湯を注入すると想定すれば、初めに鑄鉄成分の溶湯を注いで薬室部を形成し、その後鑄鋼組成の溶湯を注いで、砲身を形に作ったことを示唆しており、鑄鉄と鑄鋼という異なる材質によって鑄造が行われていたことを示唆している。

炭素量が2 mass%以下の鑄鋼鑄造になると、融点が高くなるばかりではなく、黒鉛の形成が無く、鑄物を造る場合の熱収縮や変態収縮による割れや引け巣の発生が多くなるので、鑄物を造りにくくなることは知られている。紅夷大砲の外観には砲口周辺の表面に熱収縮による割れが観察されず、ガス抜け後の表面の凹凸が観察されている。

ケイ素の含有量については、砲口部では0.79-0.84 mass%であり、砲尻部では0.49-0.85 mass%であるのに対して、Location 3の試料のケイ素は2.01 mass%、高めの数値を示している。鑄鉄にはケイ素が通常1.5-2.5 mass%含まれ、黒鉛の形成を促進し熱収縮を少なくするとともに、流動性を高めて鑄造性を改善する働きがある。紅夷大砲の砲口と砲尻部のケイ素の数値は概して低めである。

リン並びにイオウは、共に鑄鉄溶湯の表面張力への影響を通じて鑄鉄の流動性に大きな影響を及ぼすことが知られている。本試料のリンの含有量は、砲口と砲尻において、それぞれ0.48-0.52 mass%及び0.96-1.00 mass%であり、砲尻部は高い数値を示している。イオウ含有量は、砲口と砲尻において、それぞれ0.33-0.36 mass%及び0.54-0.75 mass%であり、同様に砲尻部は少し高めの数値を示している。Location 3の試料のリン及びイオウ含有量は、それぞれ、0.48 mass%、0.37 mass%であり、砲口の成分に近い数値を表している。

Pohl及びScheilの文献によれば、リンとイオウの含有量は、表面張力の低下による流動性の向上に有効¹⁹⁾であったことが推定される。また溶湯の凝固開始温度 (LT) は、その化学組成 (mass%) の関数として下記実験式が提示されている⁽²⁰⁾。絶対温度として表示すれば、

$$LT (^{\circ}K) = 1599 - 107C - 26.6Si - 61.4P + 9.7Mn + 7.6S + 0.5Ni - 21.7Cr + 273$$

この式で示すように、各組成中炭素 (C)、ケイ素 (Si) 及びリン (P) が最も大きな重みをもっている。上述の流

動性に影響するリンは、凝固開始温度を低下させる。しかし、イオウ (S) は、僅かながら凝固開始温度を上昇させる。具体的には、Table 1に示してある炭素1.44 mass%の化学組成についてLTを計算すると、1667.2 Kとなり、砲口部炭素量0.51 mass%に対応する化学成分の場合、1769.6 Kであり、鑄鋼と同様な凝固開始温度範囲を示している。

以上の論拠から、本試料中のリンとケイ素は、試料の凝固開始温度を低下させ、注湯時に十分な流動性を与えていたことで、厚肉で長尺の紅夷大砲の鑄込みに成功したものと推察される。またイオウは、セメントイト (チル) を増して、鑄物を硬くかつ脆くさせ、しかも収縮量が増し、割れを発生し易くするので、出来るだけ少ない方が良いとされている。紅夷大砲の高イオウ値の起源は、鉄鉱に含まれるイオウのほか、製鉄の際の石炭燃料に帰することができよう⁽²¹⁾。

Mn含有量は、0.02 mass%と著しく少ない。イオウの弊害は、Mnを添加して凝固後期にMnSを形成させることで防げる。現代技術では、鑄鉄に必要なMn量は、イオウの約3倍と言われている。実際のMn含有量は、現在のJIS規格におけるFC200～300で0.6～0.8 mass%である。紅夷大砲の場合は、イオウ含有量と比較してMn含有量は極めて低く、後にデータを示すようにMnSとしての存在は確認されてない。イオウの悪影響を相殺するには、量的に不十分であったと思われる。その結果、材質的に延性が低かったものと推察される。

4.3 材質の特徴と硬さ

紅夷大砲の材質の特徴を判断する上で、金属組織に加えて、化学成分からもその特徴について言及する。Table 1によると、紅夷大砲の砲口と砲口周辺の炭素量は、それぞれ0.51 mass%と1.44 mass%であった。砲尻では、表面から少し深いところは2.85 mass%であった。炭素量の数値は、場所によって異なっている。これら炭素量及び推定金属組織を基にFe-C平衡状態図から考えると、紅夷大砲は、亜共析鋼、過共析鋼並びにねずみ鑄鉄で鑄造された可能性が示唆されるが、砲口と砲口近くの砲身において、そのような大きな炭素量の変化をもたらすことは鑄造においては甚だ困難であり、砲口部の炭素量は、鑄鋼組成の溶湯が、凝固時に巻き込まれたガスあるいは鑄造時に発生したガスにより酸化が進行し、脱炭現象が生じた結果として亜共析組成を示したと考える方が妥当であろう。

これらの組織をさらに確認するため、現場並びに実験室で測った硬度および組織を分析する。現位置での紅夷大砲の砲尻部 (Location 2) のショア硬度測定結果は、10点の平均値としてHS50.5であった。この数値をビッカース硬度に換算すればHV360となり、一般のねずみ鑄鉄の硬度HV200～230程度に比して、大きな値を示している。また、本研究では、Location 3における採取試料に対して、微小ビッカース硬度計 (荷重50g) を用いて、組織の硬度を直接測定することにより、組織の種類を推定することができた。初析セメントイトと想定される網目状組織の硬度はHV909であり、母相のパーライトHV267に比して、極めて高い硬度を示した。この硬度は、セメントイト組織の典型的な硬さである。この結果は、炭素含有量に合わせて考慮すると、採取試料は、過共析鋼である可能性を強く支持するものである。砲口部の組織が過共析組成の鑄鋼であるかどうかをさらに検証するため、Location 3で採集した小片試料について、詳細な金属組織並びにEDX及びXPS分析を行った。

4.4 採取微小片試料についての詳細組織観察と化学成分分布調査

図4には採取した微小試料の断面について、試料の表面近傍より4か所 (A、B、C及びG点と称する)、表面からすこし内部に入った1ヶ所 (D点)、表面からさらに内部に入ったところから2ヶ所、つまり試料の下縁より2か所 (E及びF点) について組織現出のために腐食をした後の低倍率組織を示している。図で示されているように、試料の端から中心部までの均質な組織分布、すなわちパーライトとセメントイトが観察される。また、全体的に、黒色斑点が分布しており、黒鉛のように見えるが、それはそこを起源としてパーライト内のセメントイトの密度の多い

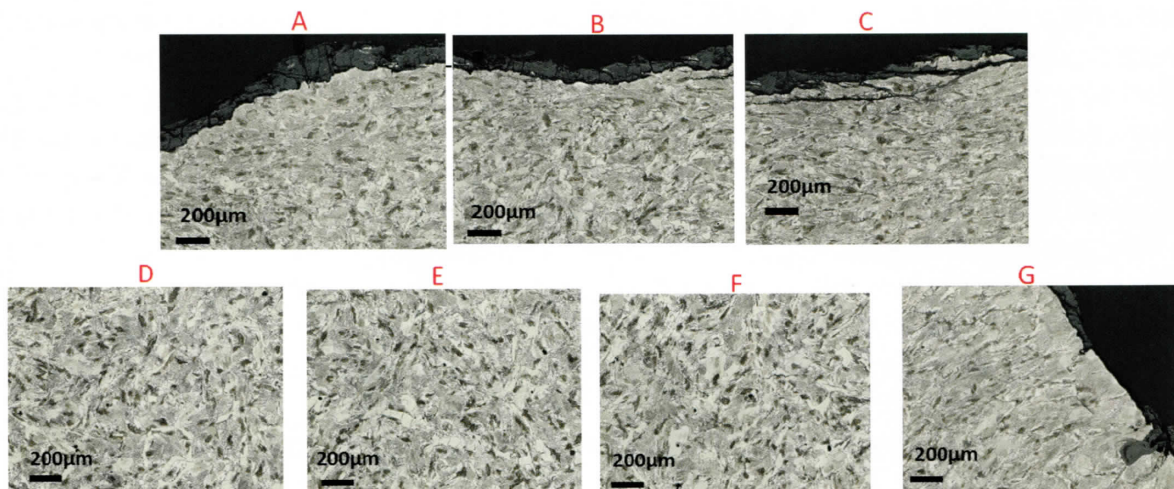


図4 試料 (Location 3) の低倍率組織図

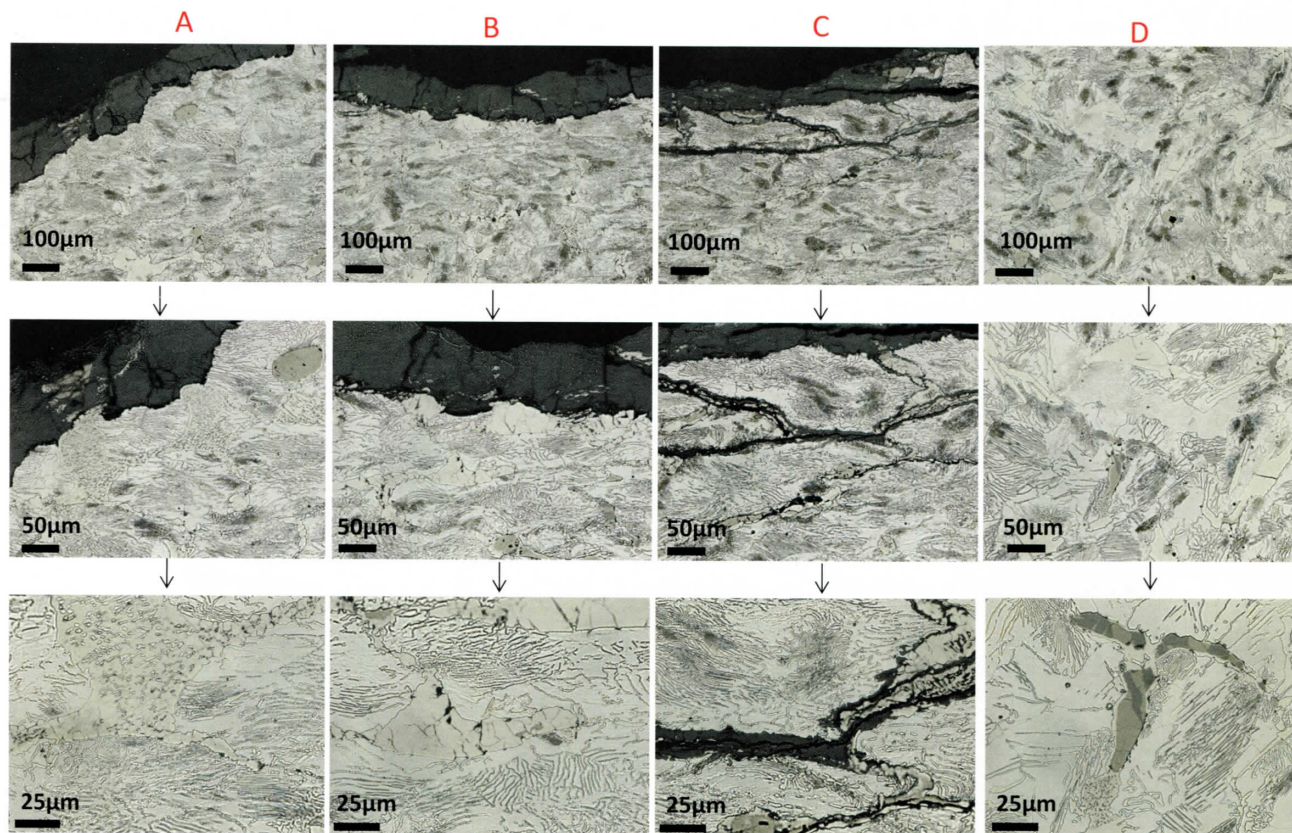


図5 試料 (Location 3) の各倍率金属組織図

部分が黒色斑点に見えているのである。G 部には方向性を持った結晶成長が見られ、デンドライト様を示している。特に表面近傍には黒色斑点が見られず、一部脱炭が生じていた可能性を示唆している。

図5は試料の上縁部におけるA、B、C、および中心部D観察点における拡大図(それぞれ100 μm 、50 μm および25 μm のスケールで示す)を示している。Aの50 μm スケール図では、右上の黄色い楕円形の組織が観察され、それは硫化鉄FeS介在物と思われ、その根拠は後のEDX分析とAES分析で詳しく説明する。Aの25 μm スケール図では、左上に白色セメンタイト中に層状のステダイト(Fe-Fe₃C-Fe₃P)と思われる共晶組織が観察され、真ん中の黒っぽい部分は、パーライトの中のセメンタイトの密度が多い部分であると思われる。Bの25 μm スケール図では、真ん中にセメンタイトが観察され、セメンタイトは旧オーステナイト粒界上に連続的に析出しているのではなく、大きな塊状のセメンタイトとして析出している。特徴的なのは、セメンタイトに割れが観察され、その割れは、空隙ではなく固体で充填されている。この割れは、 casting時の収縮割れの可能性を示しており、その部分は後掲のEDX分析により示されるが、酸素の存在が確認されている。その左上の白い組織はセメンタイトの析出が疎なフェライトと判断できる。Cの50 μm スケール図と25 μm スケール図とも、図面の真ん中に黒い色を示している割れが観察される。それは、凝固中に酸化物が形成され、その巻き込みの可能性が高い。Dの100 μm スケール図では、凝固組織に方向性がみられないランダムな組織を示している。50 μm と25 μm スケール図では、中心部にステダイト組織と思われるものが観察される。また、観察点A、Bと同様に、フェライト、パーライトとセメンタイトが観察される。

図6では、試料の下部左と右に位置する観察点E、Fおよび上部右に位置するG点における100 μm から25 μm のスケールで示す拡大組織図である。Eの50 μm から25 μm スケール図においては、セメンタイトは粒界上に連続的に析出しているのではなく、大きな塊状のセメンタイトとして析出していることが観察され、その一部がステダイトとなっている場合が多い。図6の観察点Aにおける組織と同様に、これらのセメンタイト並びにステダイトに沿って割れが観察され、 casting時の収縮割れの可能性を示しており、その部分は後掲のEDX分析により示されるが酸素の存在が確認されている。図面の右上の黄色いぼい組織は、一般にはMnSの存在が期待されるが、Mn量が極めて少ない事もあり、後のEDX並びにAES分析結果からも明らかのように、FeとSのみ検出されておりFeS介在物と思われる。観察点Fの50 μm から25 μm スケール図の中心部に、粒界上に沿ってセメンタイトの割れと酸化物が観察され、観察点Eと同様に casting時の収縮割れの可能性を示している。

観察点Gの表面近傍には黒色斑点が見られない表層が200 μm 程度存在している。ここは砲身表面に近いところであり、 casting時に生じた部分的な表面脱炭の可能性がある。25 μm スケール図では、方向性を持った結晶成長が見られ、デンドライト様を示している。

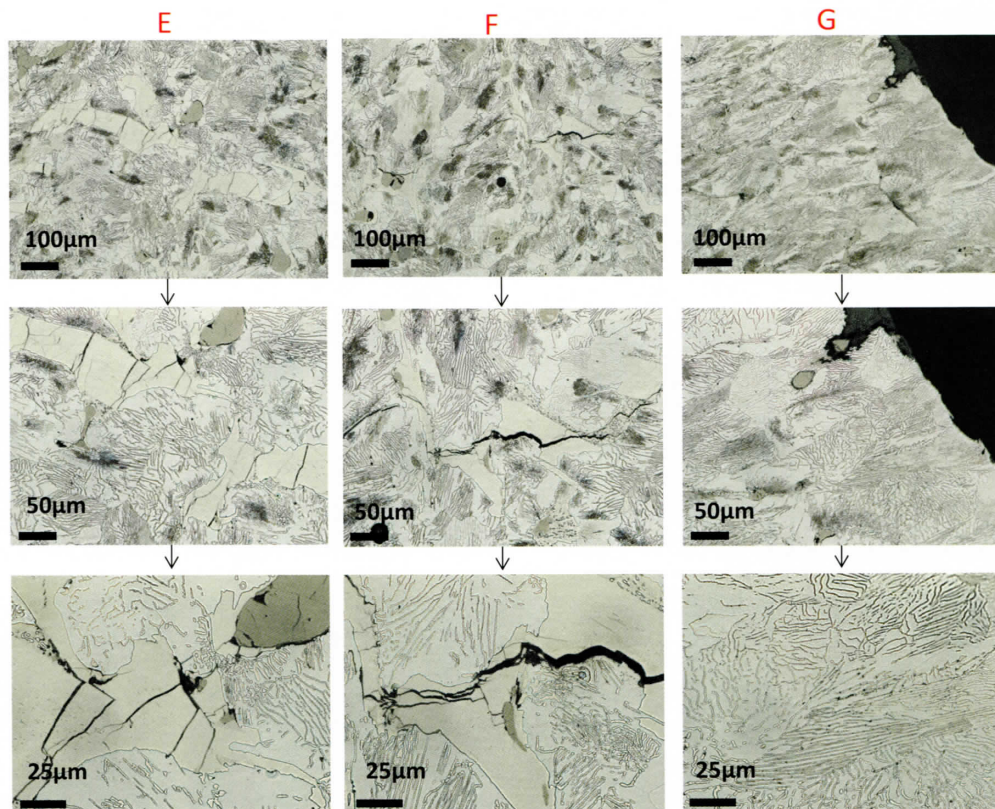


図6 試料 (Location 3) の各倍率金属組織図

紅夷大砲の砲口部の組織に各元素の分布、並びに主たる非金属介在物における各主要成分の局部的分布を観察するため、Location 3より採集した小試料においてEDX分析を行った。

図7では、試料 (Location 3) の低倍率EDX像を示している。本観察には、計測上、電気伝導を確保するために試料周辺を包んだAl箔の影響がAl分析図面の上部に見られ、本分析では対象としない。

図7は、観察領域の主要元素を示しており、主成分の鉄に加えて、炭素、ケイ素、リン、イオウ各成分と組織との関連を示しており、介在物並びにセメンタイトを含む典型的な組織についての結果を示す。主なる成分は鉄と炭素であるが、その他に不純物として、イオウ、リン及びケイ素、酸素が明瞭に検出されている。鑄造凝固時に右上に向けて形成されたと考えられるデンドライト組織に沿って、酸素が検出されている。同様な方向性が、炭素及びリンにも観察されている。酸素と炭素の存在は近接しており、酸素が存在する近傍には炭素が見られるが、一部の炭素が存在しても酸素が存在しない場所もある。酸素の存在は、収縮割れによるものと想定され、割れた後に材料内、若しくは大気の酸素により酸化が進行したものと推定される。イオウも一部凝固組織に沿って存在する場所もあるが、総じてランダムに分布しているように見られる。図8は図7の拡大図であり、各元素の分布を示している。図7に比して、リンとイオウの偏在は見られるが、それぞれは、異なる組織に偏在している。前者は、初析セメンタイトと思われる白色帯状組織の一部に含まれているが、イオウは、比較的円形の介在物と対応しており、鉄の存在も確認できることから、硫化鉄 (FeS) として晶出したものと考えられる。リンは不定形白色初析セメンタイト内の一部に分布している。

図8では、セメンタイトとステダイトの割れを明確に示している。SE上に長く伸びている組織はリンが濃縮していることより、ステダイトであると考えられる。その組織の上部はリンが存在しないことより、セメンタイトと考えられる。いずれにおいても、組織に垂直な割れが多数みられ、そこには酸素の存在が見られる。すなわち、酸化物が形成されていると考えられる。

図8において、円形状の介在物についてFeSと推定したが、EDXのFeについては、Feが黒色を示し、元素として存在していないように見えるが、これはFeのX線の場所的な相対強度の関係でそのように見えているものである。確認のために、同介在物より小さな領域を分析できるオージェ電子分光分析により同一介在物の成分分析を行った。図9 (a) は分析部を示し、結果を図9 (b) に示す。この結果より、Feは54.02%、Oは13.05%、そしてSは32.93%であり、Feの3か所のピーク位置と強度は、S及びMnS形成元素Mnが存在しない近接場所でのFeの波形並びにFeの標準スペクトル線とほぼ一致し、Mnの最強ピークの影響は観察されていない。加えてMnの545 eVの第二ピークも観察されない事より、介在物にはMnが存在していないと言える。この事は、前述のようにMnの含有量からみても合理的である。従って、円形介在物の主成分はFeとSであり、すなわちFeSであり、一般的に期待さ

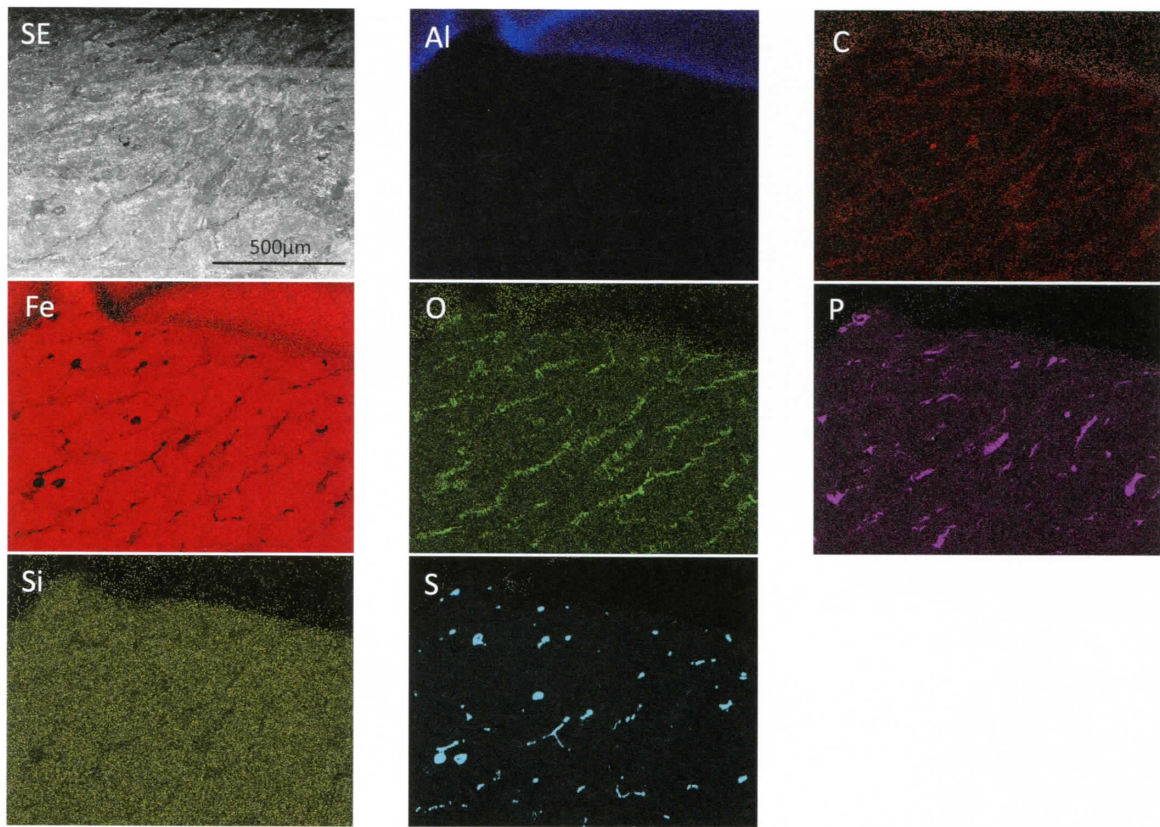


図7 試料 (Location 3) の低倍率 EDX 像

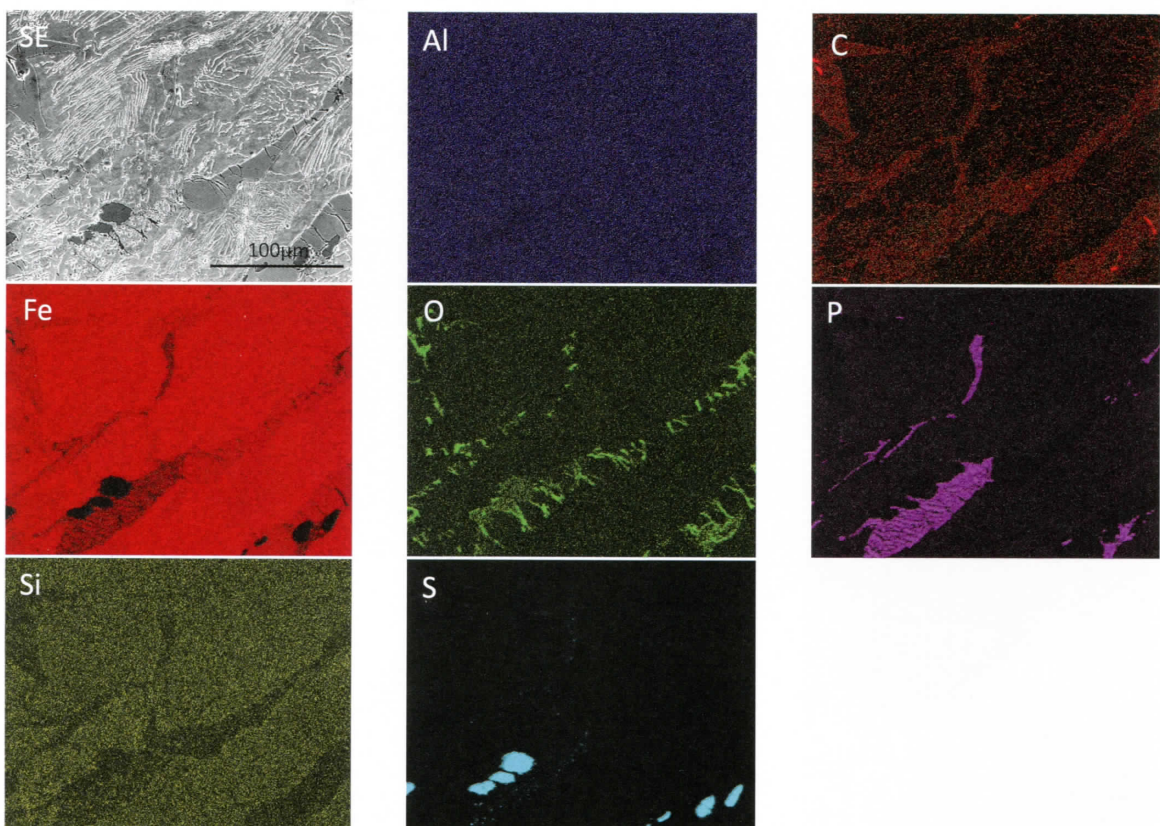


図8 試料 (Location 3) の中倍率 EDX 像

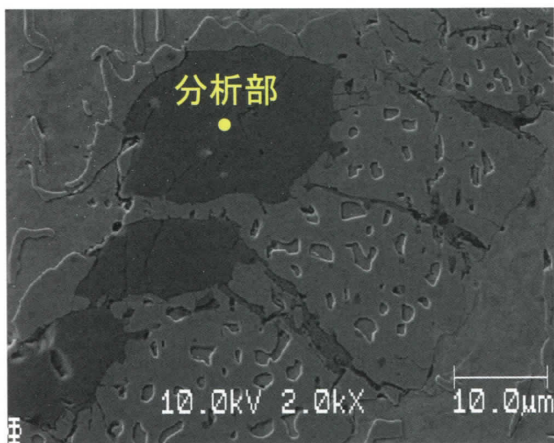
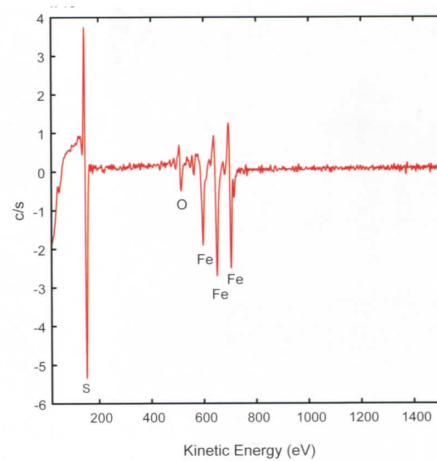


図9 (a) オージェ電子分光分析



(b) オージェスペクトル

れる Mn 及び MnS は存在しない事が確認される。

図10は、試料 (Location 3) の高倍率 EDX 像であり、各元素の分布を示している。図8に比して、リン及びイオウの偏在が顕著である。リンのEDX 分析結果が示しているように、帯状組織内に多くの層状のリン偏析が見られ、ステダイトの共晶形成組織と極めて類似していることを示している。EDX により推定される相は、 Fe_3C 、 Fe_3P 、 FeS 、 $FeSi$ 及び SiO_2 である。これらの形態によれば、3元系共晶、2成分系共晶あるいは一部は包晶により形成された可能性が示されている。

EDX による成分分析結果と形成相の関係をさらに検討するために、XPS 分析を行った。図11は、観察部位を示しており、それぞれ上と下の赤丸部にそれぞれ、リンとイオウの偏析が確認されている。赤色四角範囲は走査 X 線視野で、黄色四角形は分析範囲である。光電子分光分析結果を図12 (a) と図12 (b) に示す。

図12 (a)、図12 (b) は XPS 分析結果であり、図面に示す各エネルギーのピーク値に合わせて、対応する化合物をそれぞれ推定した。図12 (a) においては、上から下へ順番に見て行くと、 $C1s$ については、284 eV に肩状段差があり、 Fe_3C に対応すると思われる。 $O1s$ については530 eV から532 eV にピークが見られ、 Fe 酸化物、 Si 酸化物が示唆される。 $S2p$ については、162 eV に弱いピークが見られる。 $P2p$ については、134 eV 付近にピークが見られ、

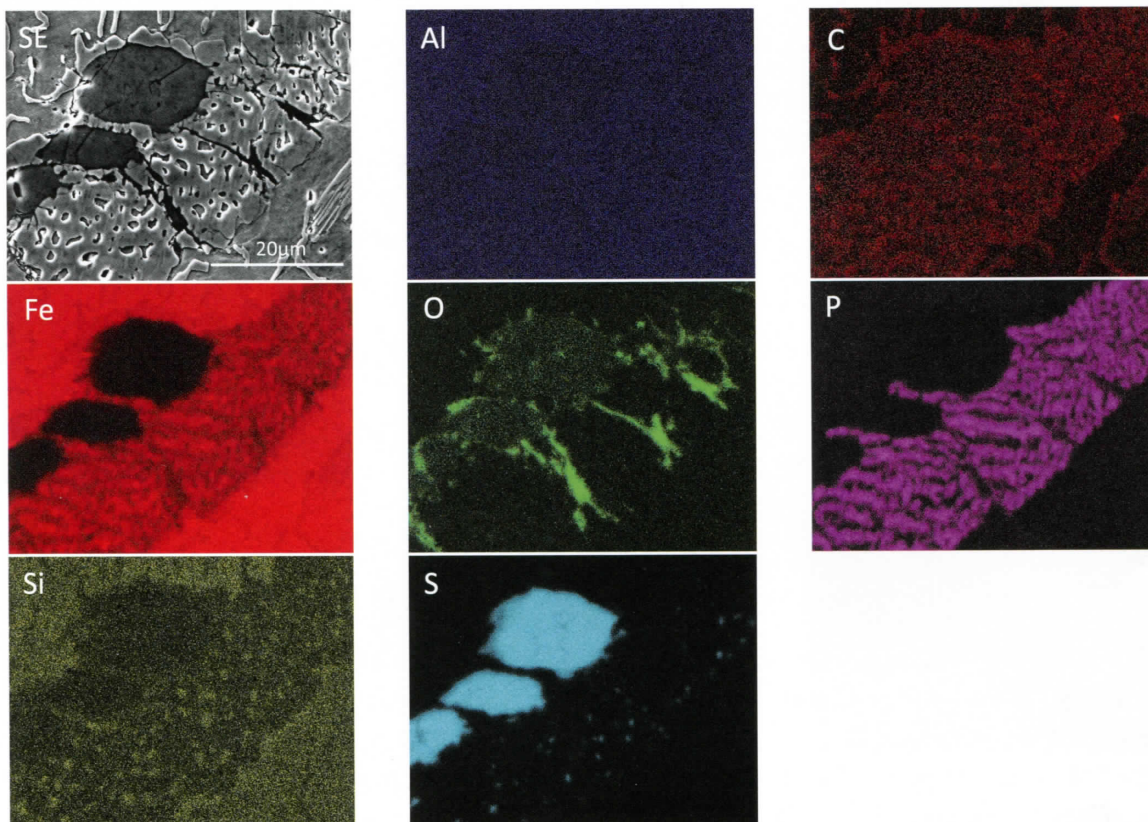


図10 試料 (Location 3) の高倍率 EDX 像

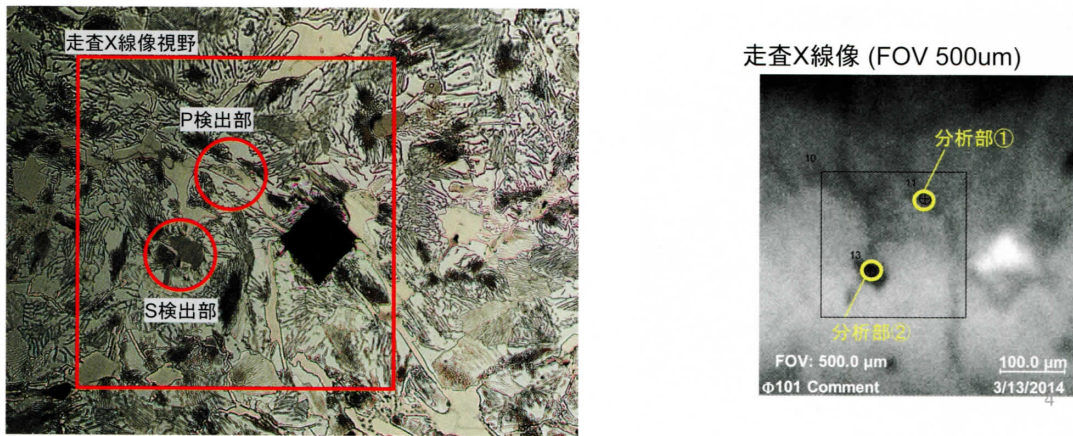


図11 XPS 分析位置

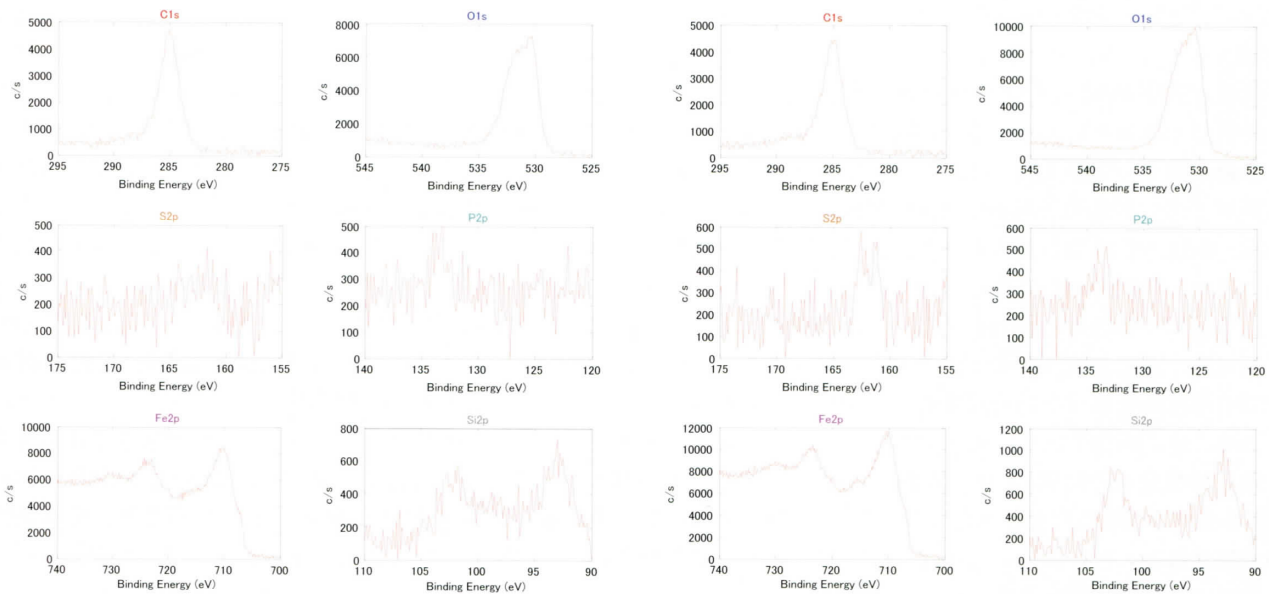


図12 (a) 分析部①の XPS 分析結果

図12 (b) 分析部②の XPS 分析結果

単体 (129 eV) より高い結合エネルギー状態にあり、129.4 eV の小さなピークは Fe3P に対応する。133.7 eV 近傍のピークは、FePO₄ に対応すると推測できる。Fe2p の 707 eV の肩部は金属 Fe、710 eV は酸化物と炭化物に対応すると推測される。Si2p については、102 eV にピークが見られ、酸化物を形成していると推測する。ケイ素については 103 eV に SiO₂ の存在が示唆されるが、FeSi に相当するピークは認められない。EDX の結果に示される Fe、Si、及び O の共存は、711 eV のピークが Fe/SiO₂ の可能性を示唆する⁽²²⁾。

図12 (b) においては、C1s、O1s、P2p、Fe2p および Si2p は、分析点①と同様な結果を示しており、S2p については、S 単体では 164-165 eV にピークが見られるが、162 eV 付近にシフトしている。Fe との化合物としては、FeS、FeS₂ が候補に挙げられる。以上の結果によれば、いずれにしても、本鑄鋼は数種の共晶形成により鑄造時の流動性を高め、ある程度の尺度の大砲を製造することができたと考えられる。

分析点①及び②において XPS により検出された元素については、同部の EDX 分析により、図10に示すと同様な同一の元素が検出されており、これらの元素が表面のみならず、組織内に存在している事が確認されている。

5. 考察

明崇禎十一年 (1638) 在銘鑄造大砲紅夷大砲の金属学的調査を行い、金属組織、化学成分、EDX および XPS の分析結果に基づき、紅夷大砲の製造に反映されている明の鉄鋼技術の特徴について考察する。

砲口、砲尻および小片試料の化学成分によると、紅夷大砲の砲口部 (Location 1) の炭素量は 0.51 mass% であった。砲口に近い中間部 (Location 3) では、1.44 mass% であり、砲尻では、表面から少し深いところは 2.85 mass% であった。Fe-C 状態図から見れば、それぞれ亜共析鋼組織、過共析鋼組織とねずみ鑄鉄である。ここで二つのポイントを考えたい。一つ目は、大砲の砲口部の材質は亜共析鋼、過共析鋼であるかという点。二つ目は、もし鑄鋼であれば、

鑄鋼と鑄鉄の接合鑄造は当時既に実現可能であったのか。鑄鋼を溶かす高温技術、あるいは鑄鋼の融点を低下するための技術は存在していたのかという点である。

中国古代鑄鉄の熱処理技術を遡ると、鑄鉄脱炭鋼という材質があることは知られている。これらは、凝固後のねずみ鑄鉄を酸素環境下で酸化脱炭させることによって造られる。この脱炭後熱処理による材料の靱性向上手法が、中国古代の農具製造過程に用いられていたことが確認されている⁽²³⁾。表層の化学成分のみ見れば、鋼の成分と類似する。しかし、鑄鉄脱炭鋼の金属組織は、表面から内部に向けて、鋼から鑄鉄組織へと変化が見られるのが一般的である。すなわち、鑄鉄脱炭鋼の金属組織の特徴として、酸化による炭素の拡散消失により、炭素量が減少した結果、表面層はフェライトになる。さらに内部に行くに従って、炭素量が増加しており、また同時にパーライトが観察される。亜共析組織を経て過共析組織そして炭素2.1 mass% 程度を境に鑄鉄組織となるのである。例えば、河南繩池漢魏時代の鉄斧の金属組織を観察した結果によれば、斧の刃から中心向け10 mmの試料で、端から5 mm以内の組織はフェライトであり、中心へ向かってパーライトが増えることが観察された⁽²⁴⁾。また中心部に細かな黒鉛が残っていることは鑄鉄脱炭鋼のもう一つの特徴である。

砲口部 Location 1の炭素量は0.51 mass% で、亜共析鋼組成を示しているが、現地における観察は表面のみであり内部に向けての詳細な観察は出来ていない。しかしながら前述のように、近傍の砲口部 Location 3においては、炭素量1.44 mass% であり、組織も過共析鋼組織と考える事が妥当であることより、Location 1部の亜共析組織は、過共析組織が溶湯表面における酸化・脱炭により炭素量が低下し亜共析組織を示したものと考えられる。鑄鉄脱炭鋼であるかどうかをさらに確認するために、Location 3より採取された小片試料についてEDX 分析を行った。その結果としては、図7のA-F 観察点に示しているように、全体としてセメントイトとパーライトにより構成した均質な組織が観察され、表面から内部に向けて組織の勾配が観察されてない。脱炭した場合、金属の表面層にフェライト相がより多く形成されることが特徴であるが、紅夷大砲にはこの特徴は確認されておらず、鑄鉄脱炭鋼でない事が明らかである。また組織の硬度の数値も過共析鋼組織であることを示している。明代における過共析鋼組織の案例研究があり、明前期に鑄造された洪武大砲(1377年)は、過共析鋼組織を持つ鑄造大砲であることが論じられている⁽²⁵⁾。洪武大砲は、優れた均質なセメントイトとパーライト組織を示している。紅夷大砲の砲口部の組織は、洪武大砲の組織と同様の特徴を示している。洪武大砲の金属学的調査によって、明初期に鑄鋼技術が存在していた可能性が示唆されている。紅夷大砲の砲口部も過共析鋼であることは、明代鑄鋼技術の存在を裏付けている一つの傍証といえる。洪武大砲との製造年代は261年ほど離れており、鑄鋼技術がいかに伝わってきたのかという点は、一つの課題として解明されることを期待するが、同じ山西地域に、その地域の特徴的技術である坩堝製錬技術に基づいて製造された可能性が示唆される。

融点の高い鑄鋼製品を作るには、少なくとも二つ基本的な技術が必要である。一つは、鋼の融点まで溶かす高温技術。もう一つは、これらの温度に耐える溶融炉の耐火材料があることである。高温技術については、明の技術著作『天工開物』⁽²⁶⁾ および物理学者方以智(1611-1671年)の著作『物理小識』⁽²⁷⁾ において、それぞれ石炭、コークスで製錬することが記されている。これらの記述より、明において既にコークスが使用されていたことが分かる。石炭やコークスを使用することによって、高温まで上げることが可能となる。また、紅夷大砲が製造された山西地域では、古くから坩堝製錬法が普及し⁽²⁸⁾、近代までこの方法が使用されてきた⁽²⁹⁾。坩堝材質の耐火温度について、漢代においては既に坩堝材質の耐火温度は1853K ~ 1883K と推測され、過共析鋼組織を有する鋼の融点より上回る事が何堂坤らの考古学的研究で明らかになっている⁽³⁰⁾。高温技術の存在を裏付ける事実として、漢代の脱炭スラグ技術、製錬の時の耐火物材料並びに鑄物砂の種類を上げる事が出来よう。特に鑄物砂については、SiO₂ 43.57 mass%、Al₂O₃ 37.28 mass%、Fe₂O₃ 3.46 mass%、K₂O 0.63 mass%、Na₂O 0.26 mass%、C 13.66 mass% と記述されており、耐火物材料として炭素を用いる事により耐火性能を向上させたものと思われる⁽³¹⁾。また、元代(1271-1368)には、低炭素量(2.0 mass%)の鑄鉄梵鐘の製造ができるようになった⁽³²⁾、これは、その年代には既に高温技術が存在していたことを示している。これらの技術が如何に明まで伝えられてきたか今後の研究に期待するが、紅夷大砲に現れた鑄鋼技術とこれらの高温技術の関係性は無視できない。紅夷大砲が鑄鋼であるとすれば、当時このような過共析鋼組織を持つ鋼の鑄造がいかに行われていたかは、関心深いところである。洪武大砲の製造方法でもすでに論じたように、これまで、梵鐘の雲岡石窟の遼金寺院鑄造遺跡に関する資料に、坩堝から直接鑄型注湯し、鑄造する方法が記されている⁽³³⁾。この鑄造遺跡の構造を詳細に見ると、鑄型を円心として、直径30メートルの円に沿って、30個の融鉄炉を均等に配置されている。一つの融鉄炉に内径15センチ、高さ30から40センチの坩堝が設置してあり、それぞれねずみ鑄鉄と灌鋼⁽³⁴⁾を融かし、注湯の準備を整える。紅夷大砲はこのように大量の坩堝を用いて、まずねずみ鑄鉄湯を、砲尻部へ注湯し、その後、砲尻部が凝固しない内に、砲身上部に坩堝で融かした灌鋼の湯を連続して注湯して鑄造されたと推測される。

紅夷大砲のEDX 並びにXPS 分析結果並びに化学成分分析の章で計算されたように、リンは流動性を高めるばかりでなく、凝固開始温度も低下させ、また低融点共晶(ステダイト)を形成することにより注湯時に十分な流動性を

与えていたため、厚肉の紅夷大砲の鑄込みに成功したことが推察される。このリンの起源については、鉄鉱石にもともと含まれていたリン含有量の他、製錬中に動物の骨を加えることによりリンを増やすこともある。宋の詩人蘇軾は、文集「東坡先生類相感志」に、このような文章を残している：「羊の骨：鑄鉄が溶けないため、中へ羊の骨の灰を混ぜると、溶けるようになる」⁽³⁵⁾。鉄の湯の流動性を良くなる理由は、製錬中にリンを加えることによって、融点の低いステダイトが形成されることが今回の分析で明らかになった。

本研究の研究対象である紅夷大砲は西洋大砲の構造、つまり、内径対各部位の肉厚、内径対長さの砲身設計を使用し、発射性能を改善させようとしていたと思われるが、鑄造品質の面からみれば、理想的とは言えない。紅夷大砲のEDX分析結果が示しているように、組織に割れが観察され、これは鑄造収縮による割れであると考えられ、割れと共に酸化物が形成されたと考えられる。組織内部の割れは、鑄造品質を低下させる大きな要因である。洪武大砲の製造年代より261年経過したにもかかわらず、単に鑄造品質の面から評価すれば、洪武大砲のほうが遥かに優れた品質を持つことが分かった。また、紅夷大砲の砲口の写真(図2)に示すように、蜂の巣状の凸凹が表面に多数残されている。これは注湯のあと、空気が上へ抜けるとき残された形跡であり、砲口が上向けに鑄造されたことと見ることができる⁽³⁶⁾。

6. 結論

明崇禎十一年(1638)に鑄造された紅夷大砲の外観並びに化学成分と金属組織を調査し、以下の結論を得た。

- (1) 砲口の外表面の炭素量は1.44 mass%で、過共析鋼成分を有している。砲口の先端部の炭素量は0.45-0.51 mass%であり、過共析鋼が脱炭して亜共析鋼になったものと考えられる。砲尻の外表面炭素量は2.80 mass%であり、ねずみ鑄鉄成分を有している。紅夷大砲においては砲尻部の靱性、砲口の強度をあげるため、それぞれ鑄鉄、並びに鑄鋼で鑄造されたと考えられる。
- (2) イオウ含有量は砲口部では0.27-0.36 mass%の範囲内であり、砲尻部では0.54-0.75 mass%である。製錬に石炭を燃料として使用したことが示唆される。リンの含有量は砲口部では0.48-0.52 mass%、砲尻部では0.96-1.0 mass%である。マンガンの含有量は砲口と砲尻はそれぞれ0.02-0.07 mass%、0.04-0.05 mass%である。ケイ素は砲口と砲尻においてそれぞれ0.79-0.84 mass%、0.49-0.85 mass%を示し、砲口の局部では2.01 mass%と高い数値を示している。
- (3) 金属組織は、砲尻部では黒鉛が生成しないチル組織が観察され、セメントタイトとレデブライトの組織とオーステナイトから生成したパーライト組織が示されている。レデブライトの存在は、比較的急速に冷却されたことを示唆している。一方、砲口近くの砲身では、パーライトと初析セメントタイトおよび低融点共晶ステダイトを有する過共析鋼組織が観察されている。即ち、本調査対象の紅夷大砲の砲口部は、鑄鋼として製造された可能性が極めて高く、組織の均一性より鑄鉄脱炭鋼ではないと考えられる。

1) 同志社大学院生(現東北大学研究生)、2) 東北大学、3) 中国山西省芸術博物館

謝辞

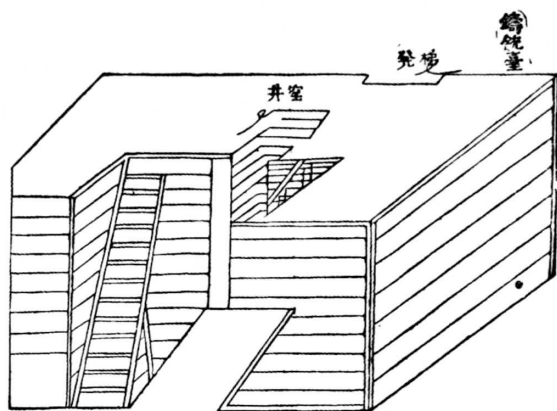
本研究を進めるにあたり、試料のご提供にご協力頂いた山西省芸術博物館副館長の王平氏、並びに化学組成分析と組織観察並びに組織要因の分析にご指導、ご協力頂いた東北大学工学研究科安斎浩一教授、同板村正行准教授並びに東北大学未来科学技術共同研究センター橋本篤氏に厚く御礼申し上げます。また北京科学技術大学梅建軍教授、北京大学の陳建立准教授、並びに山西省考古研究所の張慶捷氏には山西大同遼金鍊鉄遺跡に関する情報を提供いただきましたこと、衷心より感謝致します。

文献&脚注

- (1) 黄一農：「歐洲沈船與明末傳華的西洋大砲」、『中央研究院歷史語言研究所集刊』、第75本、第3分冊、2004、p.577
- (2) “和蘭、又名紅毛番、地近佛郎機。……萬曆二十九年駕大艦、攜巨礮、直薄呂宋。呂宋人力拒之、則轉薄香山澳。……其所恃惟巨舟大礮。舟長三十丈、廣六丈、厚二尺餘、樹五桅、後為三層樓。旁設小臆置銅礮。桅下置二丈巨鐵礮、發之可洞裂石城、震數十里、世所稱紅夷礮、即其製也。”張廷玉：『明史』第325卷、中華書局、1974、pp.8434-8437
- (3) 徐光啓(1562-1633)：“字子先、號玄扈、上海人。萬曆卅二年進士、崇禎初以禮部尚書入閣參機務。從意大利人利瑪竇學天文算法火器、盡通其術、而尤專精於曆。與意人龍華民、鄧玉函、羅雅谷等修正曆法、曰西洋新法曆書。譯著之書甚多、其幾何原本前六卷、尤著名。篤信天主教旨、教名保錄、年七十二卒、贈太保、諡文定。”『明人傳記資料索引』、p.459
- (4) 黄一農：「歐洲沈船與明末傳華的西洋大砲」、『中央研究院歷史語言研究所集刊』、第75本、第3分冊、2004、pp.578-581

- (5) 黃一農：「歐洲沈船與明末傳華的西洋大砲」，《中央研究院歷史語言研究所集刊》，第75本，第3分冊，2004，pp.582-594
- (6) 黃一農：「歐洲沈船與明末傳華的西洋大砲」，《中央研究院歷史語言研究所集刊》，第75本，第3分冊，2004，pp.595-617
- (7) 方豪：「明末西洋火器流入我國之史料」，《東方雜誌》，40.1:pp.49-54；方豪：「明清間西洋機械工程學物理與火器入華考略」，《方豪六十自定稿》，臺北：自印本，上冊，pp.289-318；張小青：「明清之際西洋火炮的輸入及其影響」，《清史研究集》，第四輯，四川人民出版社，1986，pp.48-106；馬楚間：「西洋大砲對明金態勢的改變」，《明末清初華南地區歷史人物功業研討會論文集》，香港中文大學歷史學系，1993，pp.11-30；歐陽琛、方志遠：「明末購募西炮匍兵始末考」，《文史》，2006.4；黃一農：「歐洲沉船與明末傳華的西洋大砲」，《中央研究院歷史語言研究所集刊》，第75本，第3分冊，2004，pp.573-634；黃一農：「明末薩爾淞之役的潰敗與西洋火炮的引進」，《中央研究院歷史語言研究所集刊》，第79本，第3分冊，2008，pp.377-413；董少新、黃一農：「崇禎年間援華葡兵新考」，《歷史研究》，第5期（2009），p.65-86；黃一農：「明清之際紅夷大砲在東南沿海的流布及其影響」，《中央研究院歷史語言研究所集刊》，第81本，第4分冊，2010，pp.769-832；周錚：「天啓二年紅夷鐵炮」，《中國歷史博物館館刊》，1983年6月，pp.105-109；馬楚間：「西洋大砲對明金態勢的改變」，《明末清初華南地區歷史人物功業研討會論文集》，香港中文大學歷史學系，1993，pp.11-30；郭永芳、林文照：「明清間西洋火砲火槍傳入中國歷史考」，《亞洲文明論叢》，黃盛璋編，四川人民出版社，1986，pp.199-214；郭永芳、林文照：「明清間我國對西方傳入火砲火槍的製造和研究」，《亞洲文明》，第二集，黃盛璋編，安徽教育出版社，pp.195-216
- (8) 黃一農：「比例規在火炮學上的應用」，《科學史通訊》第十五期，民國八十五年（1996），pp.4-11；黃一農：「紅夷大砲與明清戰爭—以火炮測試技術之演變為例」，《清華學報》，民國八十五年（1996），26.1: pp.31-70；尹曉東：「17世紀傳華西洋銅炮製造技術研究—以『西法神機』、『火攻擊要』為中心」，《中國科技史雜誌》，第30卷，第4期，2009，pp.377-395；尹曉東：「窮理學中的彈道學知識」，《力學與實踐》，2010.32: pp.128-133；尹曉東：「火器論著『兵錄』的西方來源初探」，《自然科學史研究》，2005年第2期；徐新照：「明代火器文獻中的科技成就及其對軍事的影響」，《軍事歷史研究》，2000年第2期；徐新照：「從西法神機和火攻擊要看明末對銃炮彈藥學的認識」，《歷史檔案》，2002第1期；
- (9) 程瑜、李秀輝、範學新：「北京市延慶縣出土兵器的初步研究」，《文物科技研究》，2010年第七輯，科學出版社；《中國冶金史論文集》，第五輯，科學出版社，2012，pp.355-369
- (10) 劉鴻亮、孫淑雲：「鴉片戰爭時期中英鐵炮材質的優劣比較研究」，《清華學報》，新三十八卷第四期（民國九十七年十二月）pp.563-598
- (11) 孫淑雲主編：『中國古代金屬材料顯微組織圖譜·總論』，科學出版社，2011；『中國古代金屬材料顯微組織圖譜·鋼鉄論』，科學出版社，2011；『中國古代金屬材料顯微組織圖譜·有色金屬論』，科學出版社，2011
- (12) 百鍊鋼について、世界百科大辞典の「刀劍」項目においてこのように述べている：「製鉄技術の発達は〈百鍊鋼〉といわれる鉄刀を生みだすが、何回となく焼きを入れ反復鍛えあげた剛刀で、その鋭利のほどは、〈水に竜舟を断ち、陸に犀甲（さいこう）を刺（き）る〉（《淮南子》脩務訓）との修辭が残る。」
- (13) 鄭巍巍、庄子哲雄、糸藤春喜、張建華：「明初に鑄造された洪武大砲の金属組織学的調査」，《日本金属学会誌》，投稿予定。
- (14) 成東：「明代後期有銘火炮概述」，《文物》，1993年第4期，pp.79-86；王兆春：『中國軍事科技通史』，p.227，解放軍出版社，2009
- (15) 明代の重量单位においては、1斤約595gである。
- (16) 張廷玉：『明史』，261卷，中華書局，1974，pp.6759-6766
- (17) 吳廷燮：『明督撫年表』，第2卷，中華書局，1982，p.120
- (18) 張廷玉：『明史』，261卷，中華書局，1974，p.6762
- (19) *Handbook of Cast Iron*, Version 3, 1976, p.134
- (20) L.F Porter: *Factors Effecting Fluidity of Cast Iron*, Trans. A.F.S. 60, 1952, p.725
- (21) 宋元明清の出土物の分析に依れば、硫黄含有量は0.1%以下の場合には木炭によって製鍊され、0.4%以上の場合石炭によって製鍊されたとの研究結果によれば、紅夷大砲は製鍊する際、石炭を使用したことが言えよう。黄維、李延祥、周衛榮、劉宇生：「川陝晉出土宋代鐵錢硫含量與用煤煉鐵研究」，《中國冶金史論文集》第四輯，科學出版社，2012，pp.462-473
- (22) データ出典：NIST XPS Database, <http://srdata.nist.gov/xps/>; Ulvac-phi, Inc., MultiPak 9.4.0.7 Database; Physical Electronics, Inc. Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy
- (23) 田長壽主編：『中國鑄造技術史—古代卷』，航空工業出版社，1994，p.116
- (24) 楊寬：『中國古代冶鐵技術發展史』，上海人民出版社，2004，pp.229-233

- (25) 鄭巍巍、庄子哲雄、糸藤春喜、張建華：「明初に鑄造された洪武大砲の金属組織調査」, 投稿予定。
- (26) 宋應星 (1587-1666) : 『天工開物』, 卷十「錘鍛・冶鐵」, 『四部精要』, 第13卷, p.1110
- (27) 方以智 (1611-1671) : 『物理小識』, 卷七, 「金石類・煤炭」, 『四部精要』, 第13卷, p.1187
- (28) Donald B. Wagner: *Chemistry and Chemical Technology*, Ed. by Joseph Needham, *Science and Civilization in China* Vol.5, Part 11, Cambridge University Press, 2007, pp.38-46
- (29) E. T. Nyström : *The Coal and Mineral Resources of Shansi Province, China*, Transactions of the American Institute of Mining Engineers, 1904, pp.854
- (30) 何堂坤、林育煉、葉萬松、余扶危 : 「洛陽坩鍋附著鋼の初步研究」, 第4卷, 第1期, 1985, p.59
- (31) 何堂坤、林育煉、葉萬松、余扶危 : 「洛陽坩鍋附著鋼の初步研究」, 第4卷, 第1期, 1985, pp.62-63
- (32) 韓佔明、陳建立、李延祥、韓汝玢 : 「大鐘寺館藏鐵鐘分析報告」, 『大鐘寺古鐘博物館建館20週年紀念論文集』, pp.230-252
- (33) 2011年12月12日日付の山西日報 A02版において、遺跡に関する紹介してある。
- (34) 灌鋼とは、銑鉄と鍊鉄を混ぜて溶け合うことによって作られた中間炭素量の鋼のことである。その製鍊方法はこのような記載がある。「熟鉄（注：製鍊した鍊鉄にあたる）を打って指先の幅ほどの薄片とし、長さは一吋半ばかりとする。この鉄片を束ねて強くしめ、生鉄（注：炉から取り出したもので銑鉄にあたり）。それから履き古し草履でその上を被い [泥はねばりついているから、早くは焼けない]、その底に泥を塗り、堅炉に入れて送風する。火力がまわると、生鉄はまず溶けて熟鉄の中にしみこみ、両者がすっかり混ざり合う、取り出して打ち鍛え、さらに製鍊してさらに打つ。一回ではすまない。俗に団鋼といい、また灌鋼というのは、これである。」宋應星(1587-1666)撰、藪内清訳、『天工開物』十四「製鍊」、平凡社、1884年第14刷、p.271
- (35) “羊頭骨：鑄鐵不消 以羊頭骨灰致之 乃消融。” 蘇軾：「東坡先生物類相感志」, 卷九 (明抄本), p.61; “鑄鐵不銷, 以羊頭骨致之乃銷。” 『六臣注文選』, 第三, 「四部叢刊」 (景宋本), p.1136
- (36) 注：本研究対象の紅夷大砲の湯口が砲身の中間部にあるため、湯口より上部、砲口にまで湯を行き渡らせるには、坩鍋製鍊設備が砲口より高い所に設置する必要がある。これについて、技術的な観点からどのような実現しているかは、簡単に説明する。紅夷大砲を鑄造する際、したの図に示すような鑄造台において鑄型を固定し、台の上に炉を置いて、注湯して鑄造された事が記されている。図にいては、台の幅は四丈 (12.44m)、奥は四丈 (12.44m)、高さは1丈6尺 (4.98m) となっている。(換算：明においては、1丈=10尺、1尺=31.1cmである)。尹曉東は (17世紀傳華西洋銅砲製造技術研究—以「西法神機」、「火攻擊要」為中心・中國科技史雜誌, 第30卷, 第4期 (2009) :pp.377-395) 紅夷大砲の鑄造技術について論じている。



(図の出典：湯若望口述 (明) 焦勗著『火攻擊要』叢書集成本)

Metallurgical Study of the Cannon casted in the Late Ming Dynasty – A Dutch-style cannon with inscription Year 11th of Chongzhen –

Wei-Wei Zheng ¹⁾*, Tetsuo Shoji ²⁾, Haruki Itofuji ²⁾ and Jian-Hua Zhang ³⁾

1)Doshisha University, 2)Tohoku University, 3)Shangxi Province Art Museum

* Graduate Student (From Oct.1 2014, research student of Tohoku University)

Abstract

The microstructure and chemical composition of a Dutch-style cannon with the inscription of the Year 11th of Chongzhen period (1638), was studied. The purpose of this study is to analyze the chemical composition and microstructure of the Dutch-style cast iron cannon. The materials of this cannon was obtained by a local iron steel technology where the casting was based upon the western cannon technology. An emphasis was placed on to examine any characteristic process and any advancement of the heavy section casting technology during the late Ming dynasty. The microstructural analysis was performed on site, and on a small piece of sample taken from the location close to the muzzle of the cannon for more detailed metallurgical examination. Following the detailed chemical composition and microstructural examination, it turned out that the gun breech has a chemical composition range of minor elements: C: 2.80-2.85 mass%, S: 0.54-0.75 mass%, P: 0.96-1.00 mass%, Si: 0.49-0.85 mass%, Mn 0.04-0.05 mass%, and shows a gray cast iron microstructure. The sample taken from the position close to gun muzzle has a chemical composition of minor elements: C: 1.44 mass%, S: 0.37 mass%, P: 0.48 mass%, Si: 2.01 mass%, Mn 0.04-0.05 mass%, O 0.3 mass%, and shows hypereutectoid microstructure.

SEM, EDX and XPS analysis have been conducted on the small sampled piece, respectively. Based upon these observations, it was concluded that the muzzle part of the Dutch-style cannon has a hypereutectoid microstructure. There seems no microstructure gradient from the surface to inside. It has a significant difference from the microstructure of decarburized cast iron steel.

This microstructure contained a eutectic phase in pro-eutectoid cementite, which suggests the formation of steadite Fe-Fe₃C-Fe₃P with a low melting temperature. This finding strongly suggests that, beside the cast iron technology, there is a possibility that cast steel technology was put in use for the Douche-style cannon manufacture during the late Ming Dynasty in China.

Keywords

Ming dynasty, cast cannon, chemical composition, hypereutectoid microstructure, cast steel, decarburized cast iron steel, cast iron