

相馬地域出土鋳型から復元した鉄器類の鋳造実験と組織観察

東京都立産業技術研究センター 佐藤健二

1 はじめに

福島県相馬地域の発掘調査から、平安時代前期の大規模な鋳造遺跡が発見された。相馬市大坪字山田地内の山田A遺跡（注1）から、原形を推定できる多数の獣脚付容器、風鐸、仏具などの鉄器類の鋳型が発掘され、また、新地町の向田A遺跡（注2）からは鋳込み前の梵鐘の竜頭、鐘身の鋳型が原形をとどめる極めて良い状態で発掘された。これらの鋳型片から、原形を想定し、真土型によって鋳型を作成し、鋳鉄による復元実験を行った。

これらの鋳鉄品の復元実験を行った際の鋳造条件を検討するため、復元品の組成分析を行い、さらにマイクロ組織を解析した結果を報告する。

2 実験方法

1) 材料及び溶解条件

溶解鋳造実験の材料には日本美術刀剣保存協会（以下、日刀保と略す）のたたら銑鉄（以下、鑪銑と略す）と製鉄メーカーのなまこ（以下、銑鉄と略す）を使用した。表1に成分分析結果を示す。

鑪銑は2.3%C、0.02%Siと亜共晶鋳鉄の組成で、Si量が少ないことを特徴とする。しかし、0.12%Pと燐

がかなり多く含まれる。銑鉄は4.31%C、2.02%Siであり、炭素当量（CE値＝%C + (%Si +

表1 実験に用いた材料の成分分析結果 (mass%)

試料No.	Total C	Si	Mn	P	S	Ti
鑪銑 *1	2.27	0.022	0.008	—	—	0.002
鑪銑 *2	2.31	0.02	0.05	0.12	0.029	—
銑鉄 *3	4.31	2.02	0.50	0.085	0.01	0.039

*1 Total C：燃焼-赤外線吸収法、Si：二酸化珪素重量法、Mn：誘導結合プラズマ発光法、P：モリブド燐酸青吸光度法、S：燃焼-赤外線吸収法、Ti：誘導結合プラズマ発光法

*2 発光分光分析法

*3 製鉄メーカーの分析値による

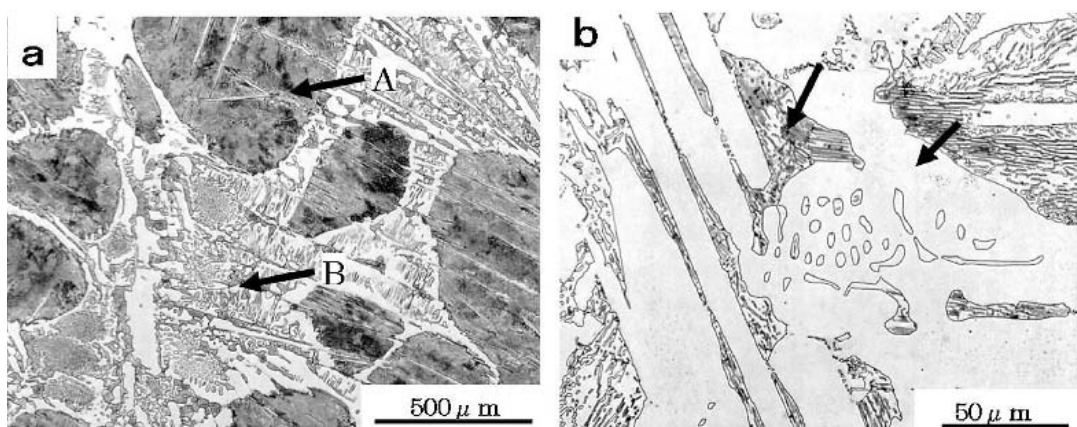


図1 鑪銑のマイクロ組織、(b)は拡大組織

%P)/3.2) では、 $CE = 4.97$ となり、過共晶組成である。

図1に鑄鉄のマイクロ組織を示す。(a)のAの領域は初晶オーステナイトで、共析変態によってパーライトとなっている。Bの領域はセメンタイト(Fe_3C)共晶のレデブライトである。(b)の拡大組織の矢印の灰色部が層状のパーライト、白の組織がセメンタイトである。

溶解には、シリカライニングの高周波誘導溶解炉 表2 材料の配合比(%)

(鉄換算:30 kg 溶解)を用いた。溶解時のそれぞれの復元品の材料配合比を表2に示す。なお、復元品は梵鐘、獣脚付容器(羽釜タイプ、獅嚙タイプ)、風鐸(乳有、無)の3種類である。

試料記号	銑鉄	鑄鉄	備考
梵鐘1	0	100	
梵鐘2	50	50	
梵鐘3	10	90	0.5%Ti+木炭
容器1(羽釜)	50	50	
容器2(羽釜)	50	50	
容器3(獅嚙)	70	30	
風鐸1(乳付)	70	30	
風鐸2(乳付)	50	50	
風鐸3(乳無)	50	50	

梵鐘は1回目と3回目では銑鉄の配合比を少なくした。このことは配合計算から鉄材中のC%とSi%が低下することを示している。また、3回目実験(梵鐘3)では、福島県産の砂鉄のTi(チタン)量が多

いため、この砂鉄の還元によって得られた鑄鉄は日刀保の鑄鉄よりもTi量が高いことが考えられる。このため、Ti添加によって1回目(梵鐘1)の鑄造の際に起こったカーボンボイリングを抑制できる可能性があるため、敢えて添加元素として選定した。高周波誘導溶解炉では、溶湯の脱炭が大きいことが知られていることから、粉碎した木炭はC%調整のため、加炭剤として添加した。なお、溶解時には特に脱酸剤や接種剤等を使用せず、大気中で溶解後、藁灰でノロ(スラグ)を掻き取る作業を行った。

2) 鑄造方案と試料採取位置

図2に梵鐘3の型ばらし後の外観を示す。笠形につながる湯口から溶湯を鑄込み、竜頭の上部に揚がり設けた落とし込みの鑄造方案である。竜頭の肉厚が鐘身の肉厚に比べ、数倍厚いため、竜頭から鑄込んだ場合、鑄型壁が過熱され、凝固時間がかなり遅くなる可能性がある。もし竜頭上部に大きな湯口を設ける方案にした場合には、凝固の遅れに起因する欠陥が発生することが懸念される。このため、このような方案が採用されることが多いと考える。ただし、通常の工業部品のような共晶近傍のCE値で、かつSi量が2%前後のねずみ鑄鉄では、凝固時の引けが少なく、図2のような細かい揚がりでも有効と考えられが、Si量が少なく、白鑄鉄になりやすい組成では、引けが強く、竜頭部の特に上部側では、綺麗な鑄肌模様と十分な寸法精度が得られない可能性がある。

梵鐘1~3の成分分析用試料は堰あるいは揚がりから採取し、また、マイクロ組織観察は同様に堰あるいは揚がり部で行った。

図3に獣脚付容器(羽釜タイプ)の外観を示す(注2)。矢印で示す獣脚付容器(羽釜タイプ)上部の鑄型の見切り線部に生じた約1.5 mm厚の鑄ばりを欠き取り、組織観察用及び成分分析用試料とした。同様に風鐸では、外壁面の上部側の見切り線部に生じた鑄ばりをたがね欠いて成分分析用試料とした。なお、風鐸のマイクロ組織観察は行っていない。



図2 型ばらし時の梵鐘3の外観



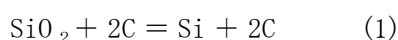
図3 獣脚付容器（羽釜タイプ）の外観

3 実験結果

1) 梵鐘の組成分析とミクロ組織

表3に梵鐘1～3の化学分析結果と配合による各元素の歩留まりを100%とした計算値を示す。配合上の計算値から、梵鐘1、2は亜共晶組成、梵鐘3は過共晶組成である。ただし、梵鐘3の配合C量は、湯面に被覆した木炭を注湯前に掻き取ったため、おおよその値で示した。梵鐘の分析結果からは、梵鐘1は過共析組成で、梵鐘2はC%が低い側の亜共晶組成で、梵鐘3は過共晶組成である。

溶解過程での成分変化については、特にCが大きく減少した。Cの歩留まりは、梵鐘1で64%、梵鐘2では82%である。Si量は梵鐘1で0.11%、梵鐘2で0.09%、梵鐘3で0.24%、それぞれ溶解時でのSiの増加が認められた。この理由として、直前に行った溶解によってSi量の高い溶湯がわずかに炉壁に残っていたこと、また、Si%が比較的低い溶湯であるため、高い溶解温度で溶湯が保持されることによって、溶湯表面のスラグや炉材のシリカ(SiO₂)が(1)式の反応によって還元されることが考えられる。



3.0%C-1.0%Siの溶湯では、この反応の平衡温度は1350℃で、これ以上の溶湯温度では、反応が右に進行し、溶湯のSiが増加する。

従って、溶解条件としては以下のことが考えられる。本実験での溶解時間は材料投入から注

表3 梵鐘1～3の成分分析結果と配合計算値 (mass%)

試料No.	Total C	Si	Mn	P	S	Ti
梵鐘1	1.47	0.13 * ¹	0.037	0.099	0.017	0.001
梵鐘2	2.37	1.17 * ¹	0.19	0.091	0.024	0.012
梵鐘3	4.62	0.26	0.71	—	—	0.31
梵鐘1配合	2.29	0.02	0.029	0.12	0.029	0.002
梵鐘2配合	2.89	1.08	0.27	0.093	0.014	0.02
梵鐘3配合	5.0+	0.022	0.011	0.12	0.027	0.506

Total C: 燃焼-赤外線吸収法、Si: 二酸化珪素重量法、Si*¹: 誘導プラズマ発光法、Mn: 誘導結合プラズマ発光法、P: モリブド燐酸青吸光度法、S: 燃焼-赤外線吸収法、Ti: 誘導結合プラズマ発光法、*2: 発光分光分析、(-): 分析していない

湯まで2時間程度を要したが、鑄型の調整等の段取りで時間を要した場合、さらに30分ほどの湯待ち時間が生じる。この間、溶湯は1500℃以上の温度で保持されたため、著しい脱炭と加珪が起り、特に梵鐘1と梵鐘2ではCが低くなったと考えられる。高周波誘導溶解炉は周波数に依存する表面効果があり、特に表面での加熱効果があるため、脱炭を促進したと考えられ、小型炉の場合には溶湯の(表面積/体積)比が大きいため、脱炭がさらに促進されやすい。

図4に梵鐘1の外壁面の拡大写真を示す。梵鐘1では、笠形の表面は注湯～凝固時に発生したガスの影響で全面があばた状になっている(A)。鐘身は湯回り不良で多数の穴が生じており(矢印B)、また、鐘身に生じた穴から亀裂が発生している(矢印C)。同様に口縁にも数カ所亀裂が生じている(矢印D)。

鑄造時の状況は以下のようなものである。鑄込み温度は表1のCの分析値からも推察できるように凝固開始温度が1420～1430℃であるため、鑄込み温度は1500～1550℃程度であったと思われる。C量の低下は湯流れ性を悪くし、さらに凝固・冷却時の収縮を大きくする。このため、湯回り不良の欠陥発生と割れの原因となったと考えられる。注湯から凝固までのガスの発生も湯回りに影響を与えた可能性がある。

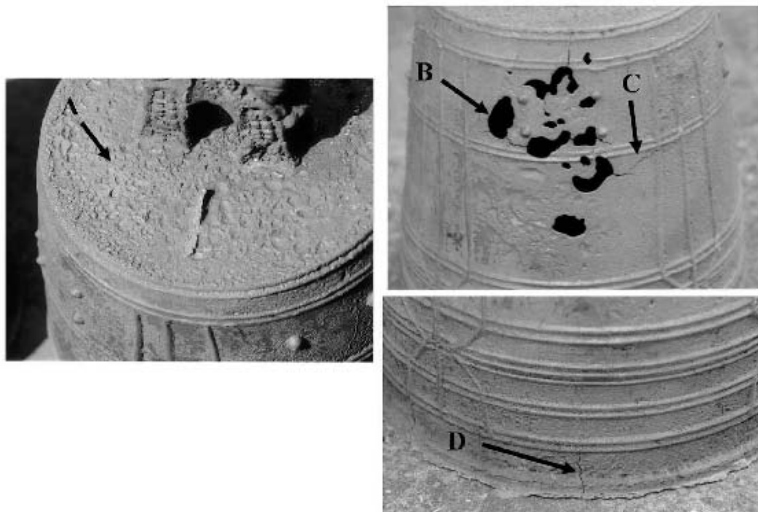
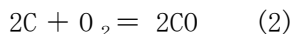


図4 梵鐘1の外観

また、低Siの溶湯は注湯時に溶湯を吹き上げるカーボンボイリングが起りやすいことが知られている。カーボンボイリングは鑄型内の空気(酸素)あるいは溶湯に含まれる酸素と溶湯のCが反応する(2)式によって生成したCOによって引き起こされる。



ここで、酸素との親和力が高い(酸化物の生成自由エネルギーが低い)元素、例えば、鑄鉄では、Siが含まれる場合には、(3)式の反応によって安定な酸化物を生成し、カーボンボイリングが抑制される。



実際に鑄型に注湯直後から、火花が湯口から吹き上げ、凝固が終了するまで続いていたとのことである。

亀裂の発生については凝固後の大きな収縮によるものである。凝固後、梵鐘は収縮するが、内壁面側が中子によって拘束されるため、表面側に大きな引張応力が発生するため、割れを発生させた。

これらのことから、2回目以降(梵鐘2、3)の鑄造実験では、梵鐘の温度がまだ高い状態

で中子の取りはずしを行い、さらに中子の構造も工夫し、型ばらしがしやすいようにした。

図5に梵鐘2の外観の拡大写真を示す。笠形は梵鐘1に比べ、平坦となっているが、矢印Aに示す堰の部分に引け巣が生じている。また、矢印Bで示す鐘身の縦帯の間は铸肌状態が悪く、梵鐘1ほどはひどくないが、ガスによって



図5 梵鐘2の外観

生じたと思われるあばた模様が観察される。この理由としては、梵鐘1に比べ、Si量が増したが、C量が2.4%と低く、CE値では2.73と亜共晶鑄鉄のCが低い側にある。このため、引けが強くなったことと、溶解温度が高くなり、溶湯の溶存酸素が増加することによると考える。

図6に梵鐘3の外観を示す。これまで鑄込んだ梵鐘1、2に比べ笠形面は非常に平滑で他の鑄肌面も綺麗である。過共晶鑄鉄では凝固時に黒鉛の晶出量が多いため、膨張することで鑄型との密着性が改善され、良好な鑄肌が得られた。

注湯時には、これまでの梵鐘鑄込みで観察された湯口からの火花の吹き上げはなかった。

C%が高いことやTi添加によるものと考えられる。ちなみにTiは0.5%の添加に対して0.2%のロスがあり、酸素との反応に寄与し、スラグ化したと考える。

梵鐘から直接試料を採取できなかったため、梵鐘1～3の揚がりあるいは堰のマイクロ組織観察を行った。従って、湯の流れによる鑄型の局所的な加熱が組織に影響を及ぼし、例えば、鐘身の代表的な組織と若干異なることが考えられる。



図6 梵鐘3の外観

図7に梵鐘1の堰部の光学顕微鏡によるマイクロ組織を示す。これ以降に述べる試料は#2400の耐水研磨紙で研磨後、1 μ mのダイヤモンドペーストで鏡面に仕上げた。腐食液には

5% ナイタル (5% 硝酸-エチルアルコール液) を用いた。過共析組成であるため、白い粒界部はセメンタイト (a, b)、黒い素地部分はパーライトである。(c) の白矢印で示す針状の組織は初析セメンタイトで、(d) の矢印で示すセメンタイトの中央に観察される灰色の粒子は MnS (硫化マンガン) である。

図 8 に同組織の走査型電子顕微鏡 (SEM) 組織を示す。腐食液によってフェライト素地は腐食され、セメンタイトの粒界部は盛り上がっている様子が解る。また、写真左の白矢印で示す

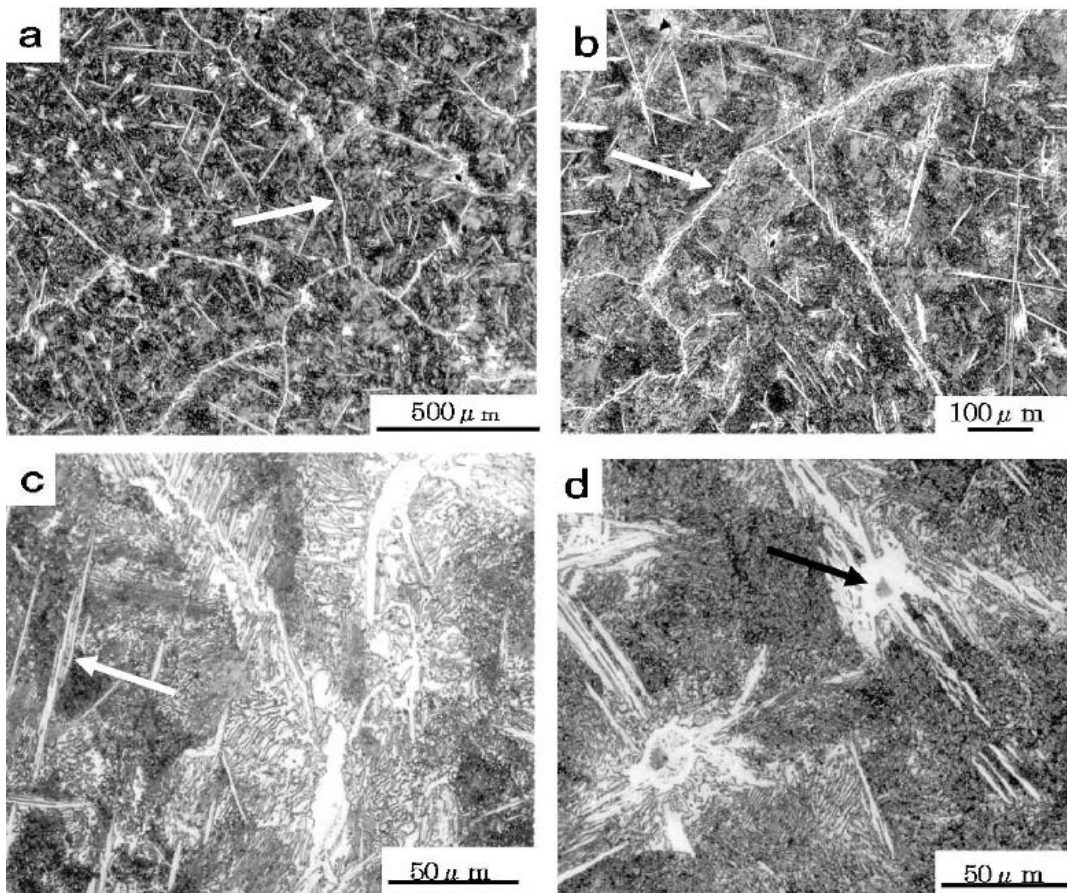


図 7 梵鐘 1 堰部のマイクロ組織

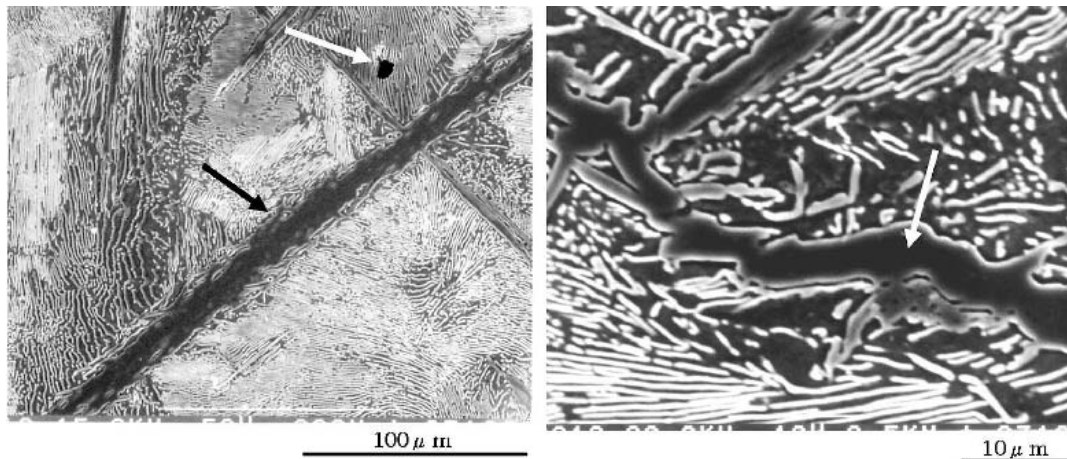


図 8 SEMによる梵鐘 1 のマイクロ組織

粒子は黒く観察され、エネルギー分散型分光器（EDAX：日本フィリップス社）による点分析で MnS であることが確認された。

図 9 に梵鐘 2 の堰の光学顕微鏡によるマイクロ組織を示す。亜共晶組成であるため、初晶オーステナイトがデンドライト（樹枝状晶）状であり、白い粒状の組織はセメンタイトである (a)。(b) の拡大組織では、パーライト化した初晶オーステナイトの境界に微細な共晶黒鉛が観察される。(c) は堰の中央部であり、デンドライト状の初晶オーステナイトの粒界にはセメンタイトの晶出が認められる。(d) は (c) の拡大組織である。

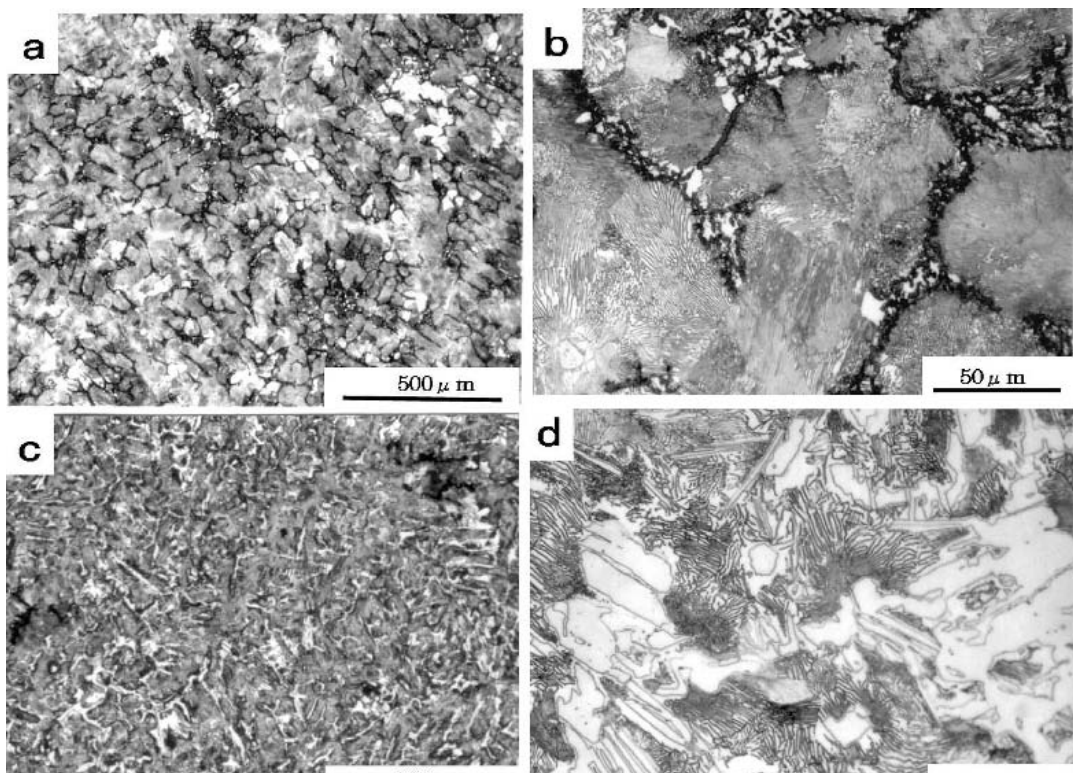


図 9 梵鐘 2 の堰（5 mm 厚）のマイクロ組織 (a)、(b) 端、(c)、(d) 中央

図 10 に揚がりの外観と矢印部で破断した破面の様相を示す。梵鐘側の細い部分（7 mm 径）は白铸铁であるが、揚がり上部の太い部分（10 mm 径）は斑铸铁である。図 11 に堰（5.4 mm 厚）の破面の様相を示す。破面はねずみ铸铁である。

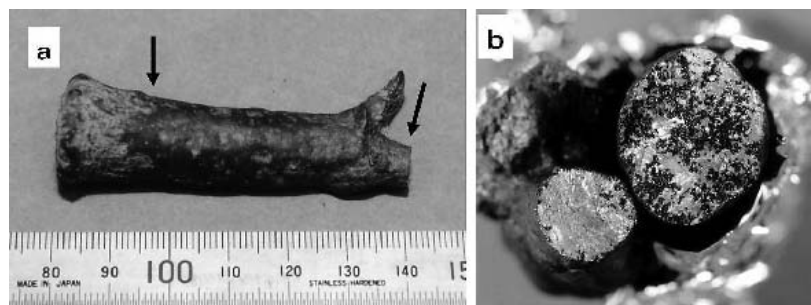


図 10 梵鐘 3 の揚がりの外観と破面 (a) 長手方向、矢印は破面観察部、(b) 破面の外観

これらの白铸铁－斑铸铁－ねずみ铸铁の組織の遷移についてこれまで次のような検討がなされている(注 4)。Maurer は C 量と Si 量による組織の変化を表した Maurer の組織図を示した。

Si 量の低下及びC量の低下によって白銑化し、これらの元素の増加は斑鑄鉄→パーライト鑄鉄→フェライト鑄鉄へと変化する。Greiner と Klingenstein は $(C\% + Si\%)$ と鑄物の肉厚の関係を調べ、 $(C\% + Si\%)$ の増加と肉厚の増加は白鑄鉄→斑鑄鉄→パーライト鑄鉄→フェライト鑄鉄へと変化する組織図を示した。白鑄鉄とパーライト鑄鉄の境界線については Jungbluth と Brügger が鑄鉄の肉厚とC量、Si量との関係を調べた。



図 11 梵鐘 3 の堰の破面

これらの試験片の鑄型条件と鑄込み条件は異なるが、例えば、梵鐘 3 の 4.62% C, 0.26% Si では、白鑄鉄-パーライト鑄鉄（パーライト地+片状黒鉛）の境界領域にあると予想される。従って、熱影響の大きい堰はねずみ、小さい揚がり径は白鑄鉄、太い径は斑鑄鉄になっている。

図 12 に揚がり断面のマイクロ組織を示す。レデブライト（セメンタイト-オーステナイト共晶）の素地に塊状の黒鉛が晶出しており、揚がりの上部と下部では明らかに組織が異なり、径の大きい上部が黒鉛の晶出量が多い。(c) はパーライトと片状黒鉛からなる塊状組織である。(d) は塊状黒鉛の晶出する領域で、塊状黒鉛の円周状に片状黒鉛が晶出する形態をとり、形状的には B 型黒鉛（バラ状黒鉛）に似ているが、素地がパーライトであり、B 型黒鉛は周辺部に向かって片状の黒鉛が粗大化するが、この組織は周辺部の黒鉛がむしろ若干微細である。また、

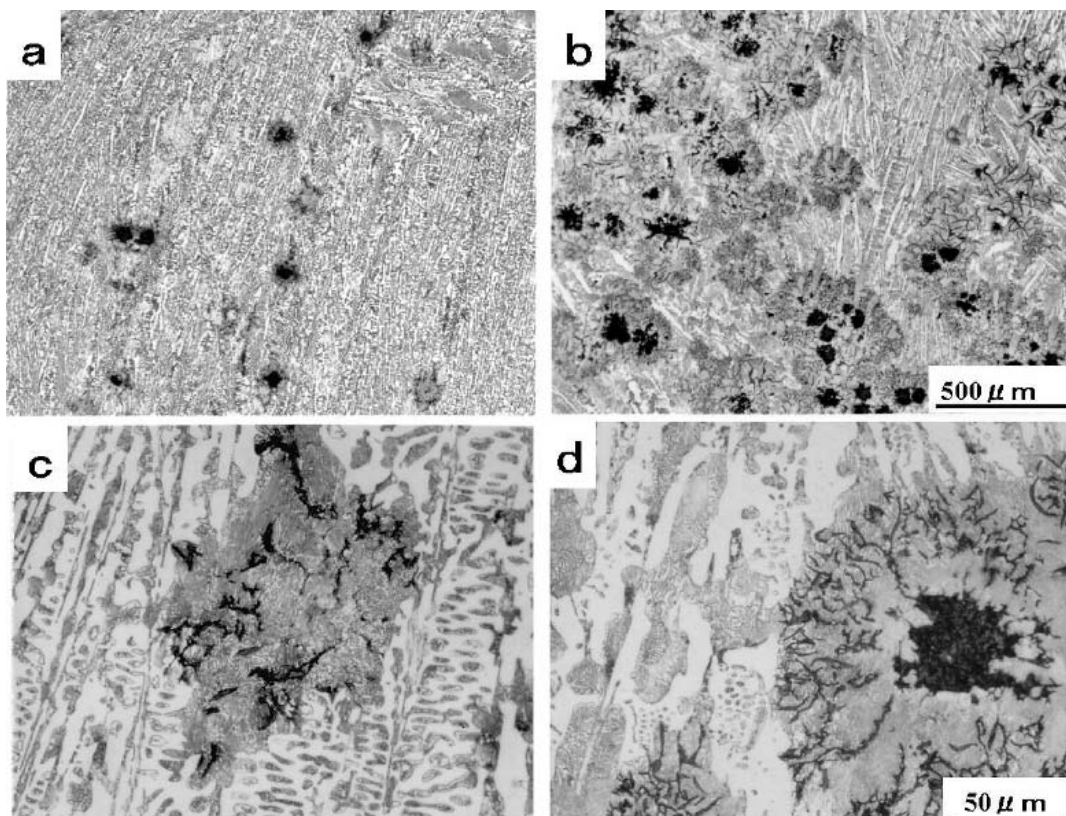


図 12 揚がり部のマイクロ組織 (a)、(c) ; 下部 ϕ 7mm、(b)、(d) ; 上部 ϕ 10mm

レデブライトの組織は揚がりの径に依存し、細い径の下部側のレデブライトが微細である。

図 13 に堰断面のマイクロ組織を示す。堰では、パーライト地に片状黒鉛が晶出した形態をしめすが、堰の端の片状黒鉛が微細である。(c) の矢印はステダイト（燐化鉄共晶）である。(c)、(d) では、パーライト地に微細な共晶状黒鉛が晶出した領域（コロニー状）が観察される。

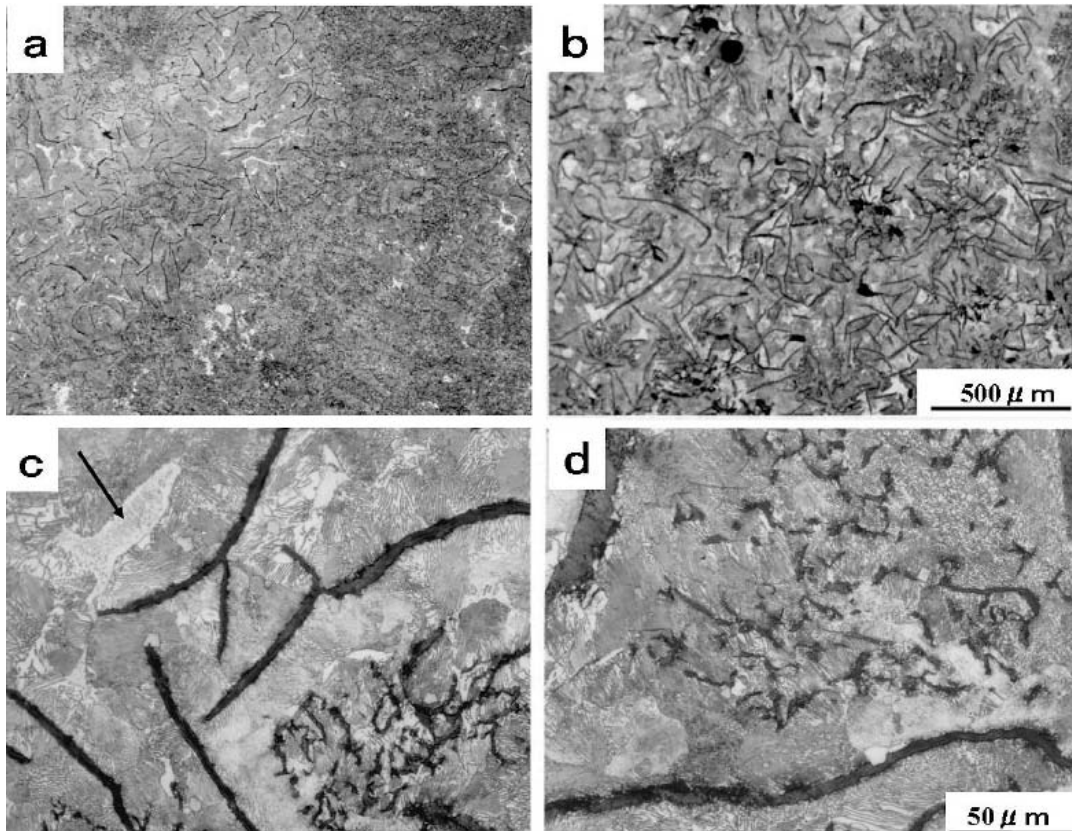


図 13 梵鐘 3 の堰のマイクロ組織 (a)、(b) 端、(c)、(d) 中央

表 4 に獣脚付容器と風鐸の成分分析結果と配合組成を示す。なお、配合比は表 2 に示すようである。配合組成はそれぞれの元素の歩留まりを 100% とした。

この分析結果から、鑄造復元品は 3.0 ~ 3.5% C、1.7 ~ 2.1% Si の範囲にあり、組成的にも比較的ばらつきが少ない。それぞれの試料の No. 1 ~ No. 3 では、0.2% ~ 0.5% 炭素量が減少した。梵鐘の鑄込み実験の際に認められた脱炭が起こっている。Si 量は配合計算値に比べ 0.3 ~ 0.6% 増加しているが、この増加の割合は梵鐘の鑄造時の値に比べて数倍高い値である。また、同一配合比で溶解しているにも関わらず、成分のばらつきが多少生じている。これは注湯準備ができて型合わせなどに時間がかかり、溶湯が高温で保持される湯待ち時間の違いによるものと思われる。

図 14 に獣脚付容器（羽釜タイプ）の見切り線部に生じた鑄ばりの断面組織を示す。組織観察は銜に最も近い位置の鑄ばり（1.5 mm 厚さ）の根元である。(a)、(b) 共に初晶オーステナイト（共析変態によって素地はパーライト）のデンドライトが観察されるが、(b) の表面では、表層部に素地とは異なる組織（1 層）が観察される。図 15 にそれぞれの位置における拡大組織を示す。

図 14 (a) の鋳ばり中央部では、3 種類の組織から構成される。白色で楕円状のデンドライトは全面が白色のフェライトの場合と周囲はフェライトで中央部が暗灰色のパーライトの場合である ((a) の拡大組織 (c) の矢印 A 参照)。これらの粒界の黒色部はパーライト地に片状黒鉛を晶出した領域である。これよりもやや明るい灰色部分はフェライト地に微細な共晶黒鉛を晶出した組織である (図 15 矢印 B を参照)。図 14 (b) の表面部では、(a) と同様な組織であ

表 4 獣脚付容器と風鐸の成分分析値と配合計算値 (mass%)

試料No.	Total C	Si	Mn	P	S
容器1(羽釜タイプ)	3.19	1.79	0.35	0.083	0.022
容器2(羽釜タイプ)	3.24	1.73	0.32	—	0.022
容器3(獅嚙タイプ)	3.52	2.05	0.42	0.12	0.030
容器1(羽釜タイプ)配合	3.70	1.42	0.36	0.096	0.016
容器2(羽釜タイプ)配合	3.31	1.02	0.26	0.103	0.02
容器3(獅嚙タイプ)配合	3.70	1.42	0.36	0.096	0.016
風鐸 1	3.26	1.77	0.35	0.083	0.021
風鐸 2	3.01	1.80	0.29	—	0.023
風鐸 3	3.13	1.76	0.30	—	0.024
風鐸1配合	3.70	1.42	0.36	0.096	0.016
風鐸2配合	3.31	1.02	0.26	0.103	0.02
風鐸3配合	3.31	1.02	0.26	0.103	0.02

Total C, S: 燃焼-赤外線吸収法、Si、Mn: 誘導結合プラズマ発光法、P: モリブド燐酸青吸光度法、(—): 試料が少ないため、分析していない

るが、暗灰色の領域では、パーライト地に片状黒鉛を晶出する形態と、パーライト地に粒状の微細なセメントイトを晶出 (図 15 (d) 矢印 D を参照) する 2 つの形態が観察される。また、やや粗大なセメントイトも観察される (図 15 (d) 矢印 C を参照)。

鋳ばりは 1.5 mm と薄いのが、獣脚付容器 (羽釜タイプ) 表面に近い部分を試料として採取したため、白銹化しておらず、片状黒鉛と共晶状黒鉛を晶出する形態である。また、鋳ばりの表

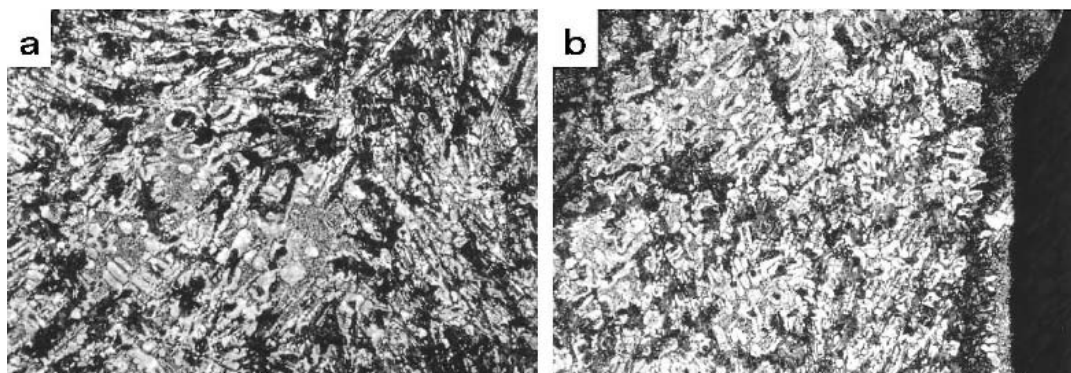


図 14 獣脚付容器 (羽釜型) のマイクロ組織、鋳ばり厚さ; 1.5mm (a) 断面の中央部、(b) 表面部

面側組織は中央部に比べ、凝固速度がやや大きいため、セメントイトを晶出している。

図 16 に図 14 の表面で観察される表層部のマイクロ組織を示す。(a) は暗灰色、(b) は明灰色の領域である。(a) はパーライト地に片状黒鉛が晶出した形態で、パーライト (初晶オーステナイト) の粒界に沿って黒鉛が晶出する。(b) では、フェライト地の共晶黒鉛 (矢印 B) とフェライトのデンドライト (矢印 C) が観察され、デンドライトのアーム間隔も図 15 に比べ、若干狭い。

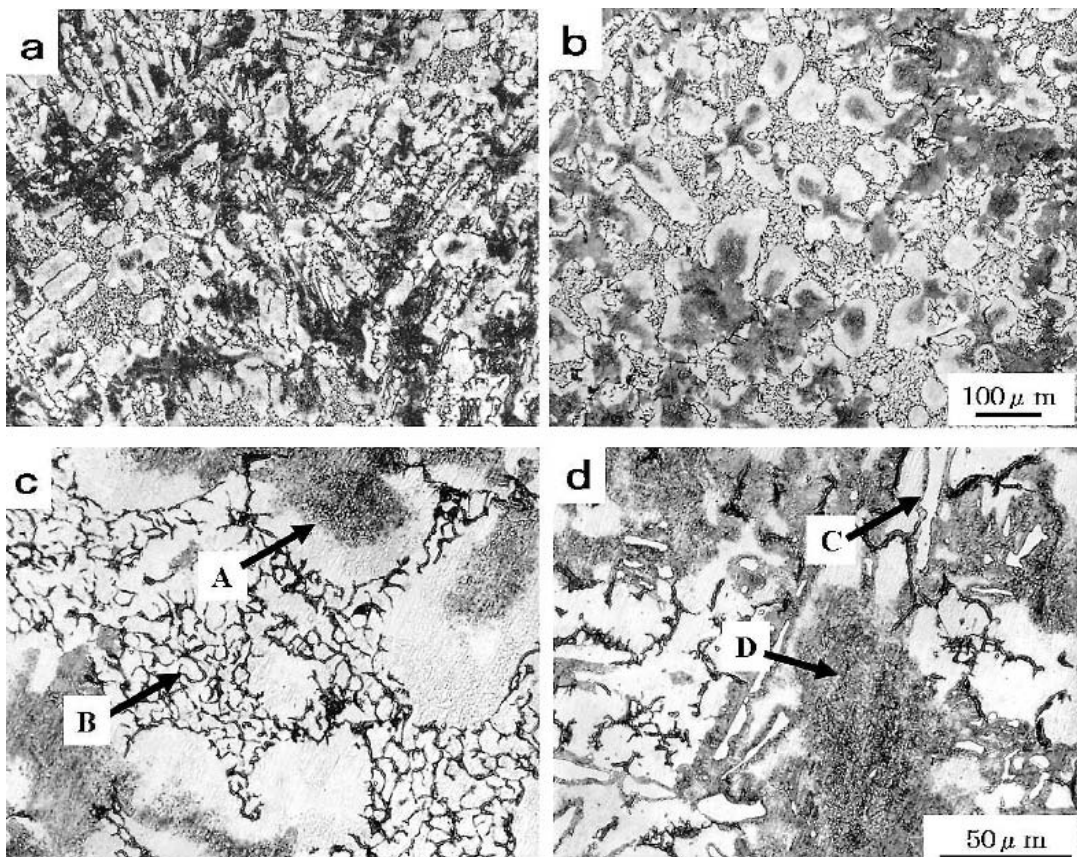


図 15 獣脚付容器（羽釜型）鋳ばりの拡大組織 (a)、(b) 中央、(c)、(d) 表面

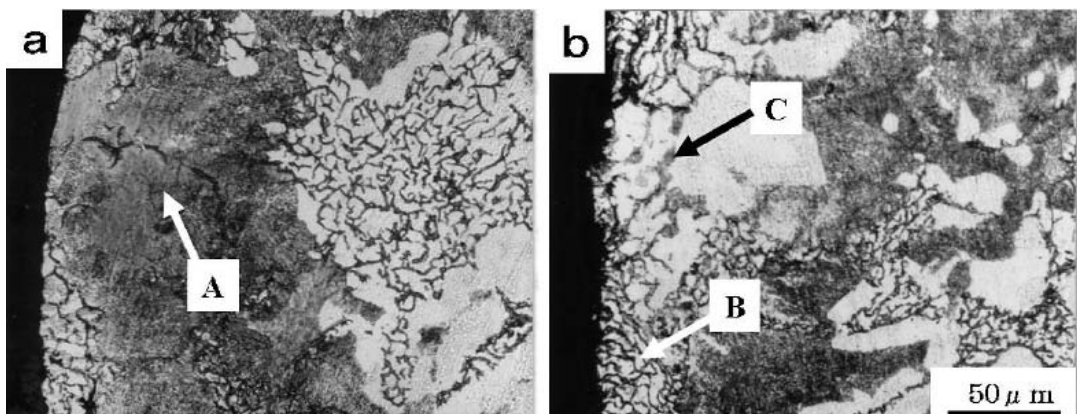


図 16 鋳ばり表面部の拡大組織

2) 鋳鉄溶湯の脱炭

梵鐘 1 では、著しい C 量の低下（脱炭）が起こったことから、高周波誘導溶解炉を用い、鑪銑による脱炭実験を行い、そのマイクロ組織観察を行った。溶解炉には 4kHz の高周波誘導溶解炉を用い、シリカるつぼで表 5 の組成の鑪銑 1.3 kg を図 17 の溶解線図に従って溶解し、6 号珪砂の CO₂ 型に鋳込んだ。試験片サイズは 10 × 30 × 100 mm である。試料の組織観察位置は押し湯直下の試験片上端面である。

鑪銑の溶解後、昇温し、1550 ~ 1600℃で 10 分間保持した。電源を切って、るつぼ中で自

然冷却した際、溶湯面から激しく火花が吹き上げた。この火花は溶湯中に溶解した酸素が溶湯の炭素と反応し、CO となって放出されることによって起こると考えられる。液相線温度付近から、再度加熱し、同様に 10 分間保持を行い、放冷させ、さらに加熱後に 5 分の保持後、鑄型に鑄込んだ。

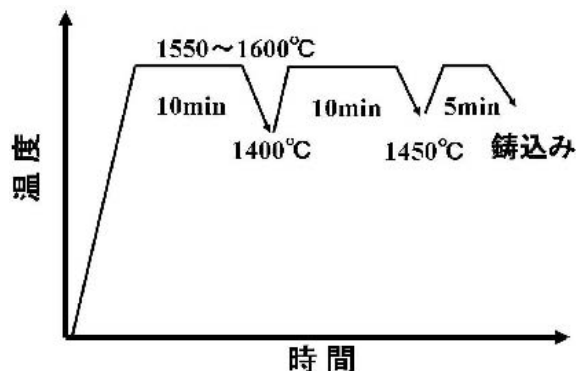


図 17 脱炭実験の溶解工程

表 5 に鑄込み試料と比較のための梵鐘 1 の成分分析結果を示す。試料は繰り返し加熱・保持のサイクルによって、0.55% 脱炭した。Si と P は、ほぼ元の材料成分と一致し、Mn と S も若干減少した。梵鐘 1 は脱炭実験の試料よりも脱炭が著しいが、Si と Mn が増加した。この理由については、3-1) 項で述べた。

表 5 鑄鉄の脱炭後の試料の成分分析結果 (mass%)

試料No.	Total C	Si	Mn	P	S	Ti
鑄鉄 *1	2.27	0.022	0.008	—	—	0.002
鑄鉄 *2	2.31	0.02	0.05	0.12	0.029	—
脱炭試料*2	1.65	0.02	0.01	0.13	0.016	—
梵鐘1	1.47	0.13	0.037	0.099	0.017	0.001

* 1 Total C : 燃焼-赤外線吸収法、Si : 二酸化珪素重量法、Mn : 誘導結合プラズマ発光法、P : モリブド磷酸青吸光度法、S : 燃焼-赤外線吸収法、Ti : 誘導結合プラズマ発光法

* 2 発光分光分析法

図 18 に断面のマイクロ組織を示す。組織は灰色のパーライトとセ

メンタイトから構成されている。セメンタイトは初晶オーステナイトの粒界と内部にも針状の形態で分布している (a)。拡大組織 (b) では、図 7 の梵鐘 1 よりもセメンタイトが塊状の形態をしている。塊状セメンタイトの中央部には灰色で粒状の MnS が観察される。

以上の結果から、梵鐘 1 の溶解条件は高温で溶湯をやや長時間保持されたことによって、C 量が低下し、これに伴って液相線温度が上昇した。このことは溶湯の湯流れが悪くなり、また、引け性が強くなり、図 4 の外観に示すように湯回り不良と割れを引き起こしたと考えられる。

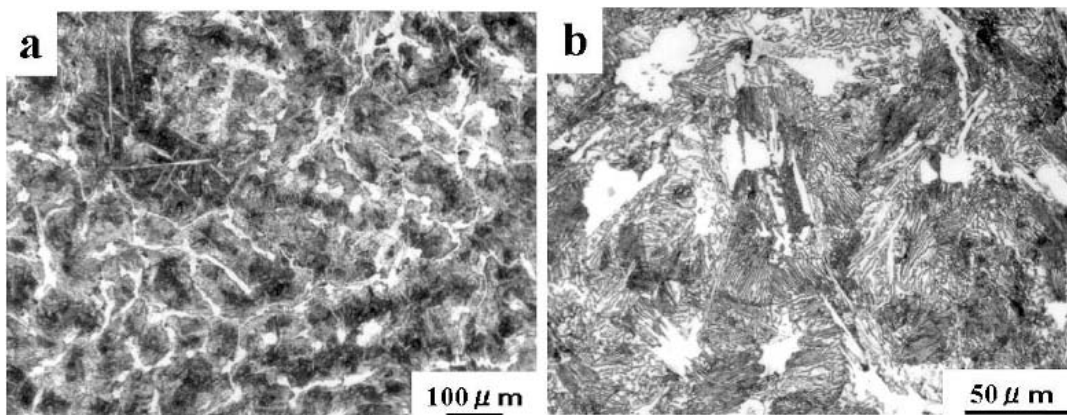


図 18 脱炭実験による試料のマイクロ組織 (a) セメンタイトの分布、(b) 拡大組織

3) 梵鐘の組成と組織の検討

今回の復元実験で制作した鑄鉄鑄物は、獸脚付容器と風鐸を除き、いずれも Si 量の少ない範囲である。これらを Fe-C 系 2 元合金平衡状態図(注 5) で示すと、図 19 のようになる。ただし、黒鉛が晶出していない梵鐘 1 及び鑪鉄は Si 量が 0.1% 程度以下であることから、C% でのみで示した。また、Si は黒鉛化促進元素であるため、黒鉛が晶出し、かつ Si 量の多い梵鐘 2、梵鐘 3、獸脚付容器 (●)、風鐸 (△) は炭素当量 (CE; = C% + (Si% + P%)/3.2) を便宜的に C% として表示した。

梵鐘 1 は過共析炭素鋼で液相線温度が 1430°C であるため、鑄込み温度が +100°C 程度とすると、溶解温度が高くなり、かつ凝固収縮及び凝固後の収縮が大きい。梵鐘 2 は鑪鉄よりも C% が高く (CE 値で)、かつ Si を 1.2% 含むため、黒鉛化が促進されるが、図 9 の堰の組織では、粒界に黒鉛の晶出やセメントタイトの晶出が観察された。梵鐘 3 の Si 量は少ないが、C が過剰に入ったため、過共晶であり、堰の組織は完全パーライト地に片状黒鉛と共晶黒鉛が晶出した。獸脚付容器 (羽釜タイプ) と風鐸は共晶に非常に近い亜共晶組成で、液相線温度も低く、鑄造性が最も良い条件である。また、Si 量も高いため、黒鉛化が促進される。獸脚付容器 (獅嚙タイプ) 3 は他の組成に比べ、C、Si が共に高い。

相馬地域から発掘された鉄塊系遺物の解析例として、大沢は山田 A 遺跡の鉄類の組織を 2 例報告している (注 6)。平成 3 年度の「砂鉄製錬系小鉄塊」は亜共晶の白鑄鉄で、初晶オーステナイトの晶出量は図 1 よりも若干多く、組織の大きさから、凝固速度が大きいと推定される。また、「鑄込み失敗鉄斧」の内部組織はレデブライトで、組織写真からは塊状黒鉛の晶出が見られず、組織的には共晶組成と推定される。平成 8 年度の「鉄塊系遺物」の 3 例は過共析鋼、1 例は過共析鋼と亜共晶白鑄鉄、1 例はフェライト + 若干のパーライトである。詳細な成分分析値が報告されていないが、相馬地域周辺から採取された砂鉄を原料とした製鉄によって得られた「ずく」を鑪で溶解・鑄造したと仮定する。この時の製錬鉄の Si 量は 0.2 ~ 0.6% 程度 (注 7) と想定される。また、溶解によって加炭されることと、炉の昇温過程での Si のロスと、炉自体の昇温能力と鑄造性を考慮するならば、大まかではあるが、鑄造鉄器は上述の値以下の低 Si で、C の組成範囲は図 19 の横矢印の範囲と考える。ただし、Si 量は溶解時に舶載鉄器の同時投入がないものと仮定している。Si 量が少ないことで白銑化しやすいが、梵鐘の場合、打鐘音の減衰が少ないことが機能として求められるため、横

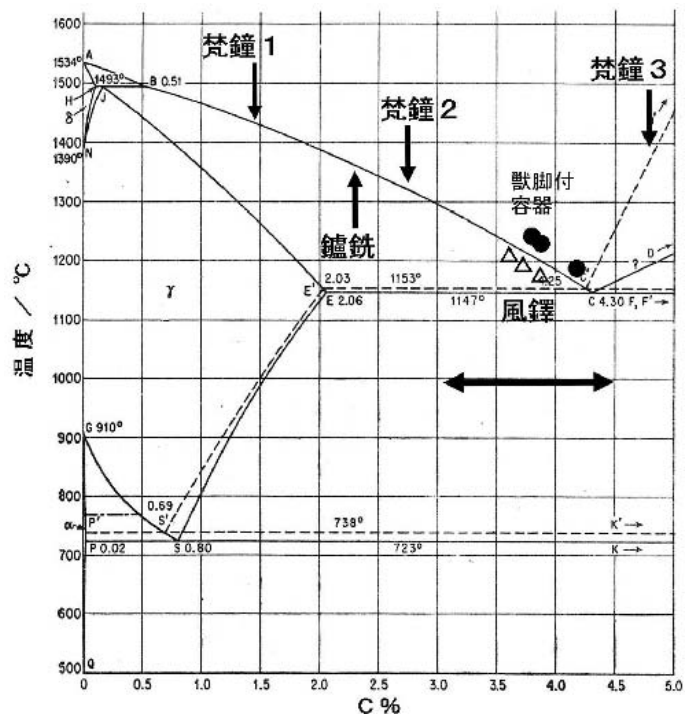


図 19 Fe-C 系 2 元合金状態図上での復元品の C 量

矢印のC量がやや低い側の成分範囲が妥当と考える。

4 おわりに

相馬地域の9世紀前半と推定される大規模な製鉄遺構から発掘された鉄器の鋳型を基に、鋳鉄品の復元実験を行った。結果は以下のものである。

梵鐘1 (1.47%C-0.13%Si; 過共析鋼) は湯回り不良と割れが生じた。梵鐘2 (2.37%C-1.17%Si; 亜共晶鋳鉄) は若干の肌荒れと堰の引けが観察されたが、音の減衰も少なく、鐘としての機能が最も優れる。梵鐘3 (4.62%C-0.26%Si; 過共晶鋳鉄) は最も鋳肌と形状が良好であったが、片状黒鉛の晶出によって、打鐘音の減衰が著しい。

梵鐘の堰の部分の組織比較では、それぞれの組成に対応した組織である。梵鐘1は初晶セメンタイトとパーライト、梵鐘2は初晶オーステナイト(パーライト)の周りが共晶黒鉛及びセメンタイトの組織である。梵鐘3はパーライト素地に片状黒鉛とコロニー状の共晶黒鉛が晶出する組織である。

獣脚付容器と風鐸は組成範囲がほぼ同程度で(3.0~3.5%C-1.7~2.1%Si; 亜共晶鋳鉄)、最も鋳造性に優れる。獣脚付容器表面に最も近い領域の鋳ばりの組織では、初晶オーステナイト粒の周囲に共晶黒鉛あるいはセメンタイトの晶出も観察された。復元品は薄肉のため、これらの混在する組織であることが考えられる。

最後に鋳造した鉄器類の化学分析をしていただきました小酒部雅敏氏(スタンダード試験、(現)当センター南支所)並びに佐々木幸夫氏(当センター材料グループ)に深く感謝いたします。

<注・参考文献>

- (注1) 福島県教育委員会・福島県文化センター・地域振興整備公団「本文2、第2編 山田A遺跡」『相馬開発関連遺跡調査報告V』1997年
- (注2) 福島県教育委員会・福島県文化センター・地域振興整備公団「向田A遺跡」『相馬開発関連遺跡調査報告I』1989年
- (注3) 鈴木勉氏の提供による
- (注4) 例えば、岡田正三、依田連平『金属材料組織図説—鋳鉄編』養賢堂1953年、42—49
- (注5) M. Hansen: “Constitution of Binary Alloys”, McGraw-Hill, 2nd Ed., NY USA, (1964)
- (注6) 福島県教育委員会・福島県文化センター・地域振興整備公団「大澤正己 付編7、相馬市山田A遺跡出土製鉄関連遺物の金属学調査(平成3年度・平成8年度分析調査試料)」『相馬開発関連遺跡調査報告V』1997年
- (注7) 福島県教育委員会、福島県文化振興事業団「平井昭司、加藤将彦、村岡弘一、岡田往子:「まほろん」における復元たたら製鉄からの鉄塊とスラグ中の元素分析及び金属学的組織」『福島県文化財センター白河館研究紀要2004』2005年