

# 明治橋に使用された鋼、錬鉄、鑄鉄材料に関する調査

## Study for Iron and Steel Materials of Meiji-Bashi Bridge

楠 隆\*, 大田孝二\*\*, 杉原伸泰\*\*\*, 中村聖三\*\*\*\*

Takashi KUSUNOKI, Koji OHTA, Nobuyasu SUGIHARA, Shyozo NAKAMURA

\*新日本製鐵(株) 〒476-8686 愛知県東海市東海町5丁目3番地

\*\*ヤマト設計(株) 〒135-0031 東京都江東区佐賀1丁目1番3号

\*\*\*日立造船鉄構(株) 〒592-8331 大阪府堺市築港新町1丁目5番1号

\*\*\*\*長崎大学 〒852-8521 長崎県長崎市文教町1丁目14番

Meiji-bashi bridge was constructed in 1902, and is continuously used for more than 100 years. The materials applied in the bridge are minutely investigated to ascertain and discuss their material levels and their characteristics caused by the manufacturing methods in the period of Meiji era. By the investigations it becomes clear that there used 3 different materials of steel, iron(wrought iron by puddle furnace) and cast iron in Meiji-bashi bridge. It is specially noted that the steel of this bridge is historically precious in the point that it stands at the dawning time of the Japanese steel-bridge engineering.

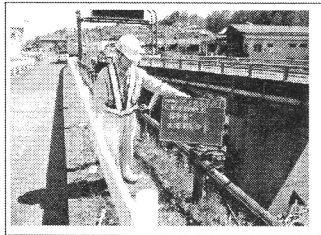
Key word: Meiji-bashi bridge, steel, wrought iron, material investigation, chemical analysis, EPMA, hardness tests

キーワード：明治橋，鋼材，錬鉄，材料調査，化学分析，EPMA，硬さ試験

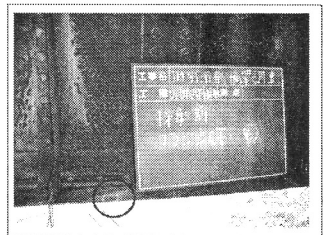
### 1. はじめに

明治橋は、明治35年(1902年)2月竣功で、上部工に用いられた鉄・鋼製部材は英国製と考えられている。官営八幡製鉄所の高炉操業開始が明治34年(1901年)であるから、国産鋼材が工業生産される直前の時期である。従って、貴重な輸入鋼材であると同時に、当時の鋼材製造の指針になったとも考え

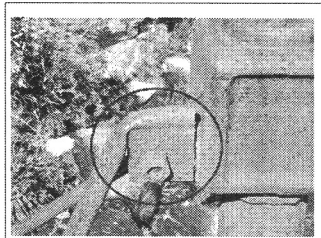
られ、歴史的にも貴重な遺産である。明治橋の上部工を構成する鉄・鋼製部材は、鉸桁、床版、高欄等で、鋼、錬鉄(パドル炉鋼)<sup>1)</sup>、鑄鉄等が各々の特性を考慮して適宜使用されたものと思われる。今回、明治橋調査の一貫として、これらの部材よりサンプルを採取し、化学成分、組織、機械的特性等の調査に供した。本稿では、供試材と調査内容及び考察結果を報告する。



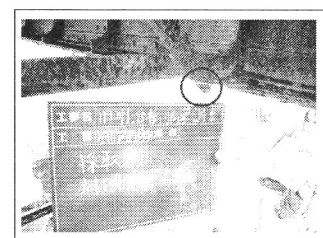
①高欄支柱



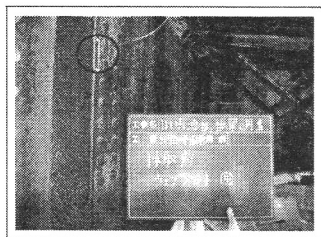
⑥主桁下フランジ



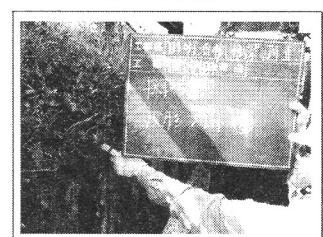
②ボルト・ナット



⑦-1 対傾構



⑤ウェブプレート



⑧波形プレート

写真-1. サンプル採取状況(代表例)

### 2. 供試サンプル

今回、材料調査のため明治橋上部工から採取した供試サンプルは、高欄から①高欄支柱、②ボルト・ナット(高欄支柱と波形プレートとを接合)、③高欄プレス、鉸桁から④ウェブプレート、⑤スティフナー、⑥主桁下フランジ、⑦対傾構、床版から底板として使用されている⑧波形プレートである。各供試サンプル採取位置を図-1に、採取状況の代表例を写真-1に示す。供試サンプルは⑦対傾構から採取したサンプルを除き、何れも各部材から30mm程度切り取り採取した。

### 3. 調査項目と調査結果

今回は、限られた供試サンプル量から最大限の情報を得るべく以下の調査を行った。即ち、1)化学成分分析、2)清浄度試験、硬さ試験として3)ロックウェル硬さ試験、或いは4)ビッカース硬さ試験、金属組織観察として5)マクロ組織観察、

表-1. 試験項目一覧

調査項目	①高欄支柱 ③高欄プレス	②ボルト・ナット	④ウェブプレート ⑥主桁下フランジ	⑤スティフナー ⑦-2対傾構 ⑧波形プレート	⑦-1対傾構
1) 化学成分分析	○	○	○	○	○
2) 清浄度試験	-	-	○	○	-
3) ロックウェル硬さ試験	-	○	-	-	-
4) ビッカース硬さ試験	-	-	○	○	-
5) マクロ組織観察	-	○	-	-	○
6) ミクロ組織観察	○	○	○	○	○
7) 介在物分析	-	-	○	-	-
8) 引張試験	-	-	-	-	○

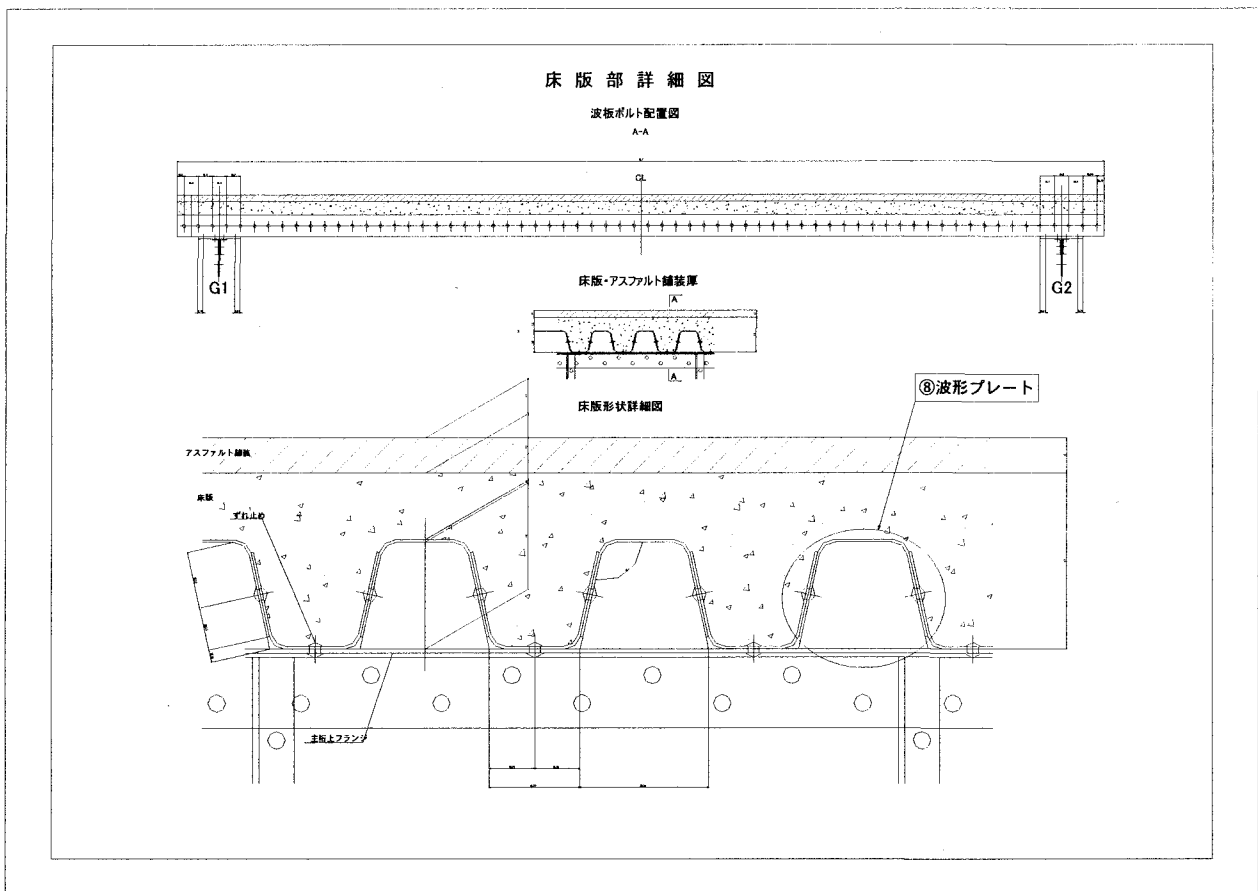
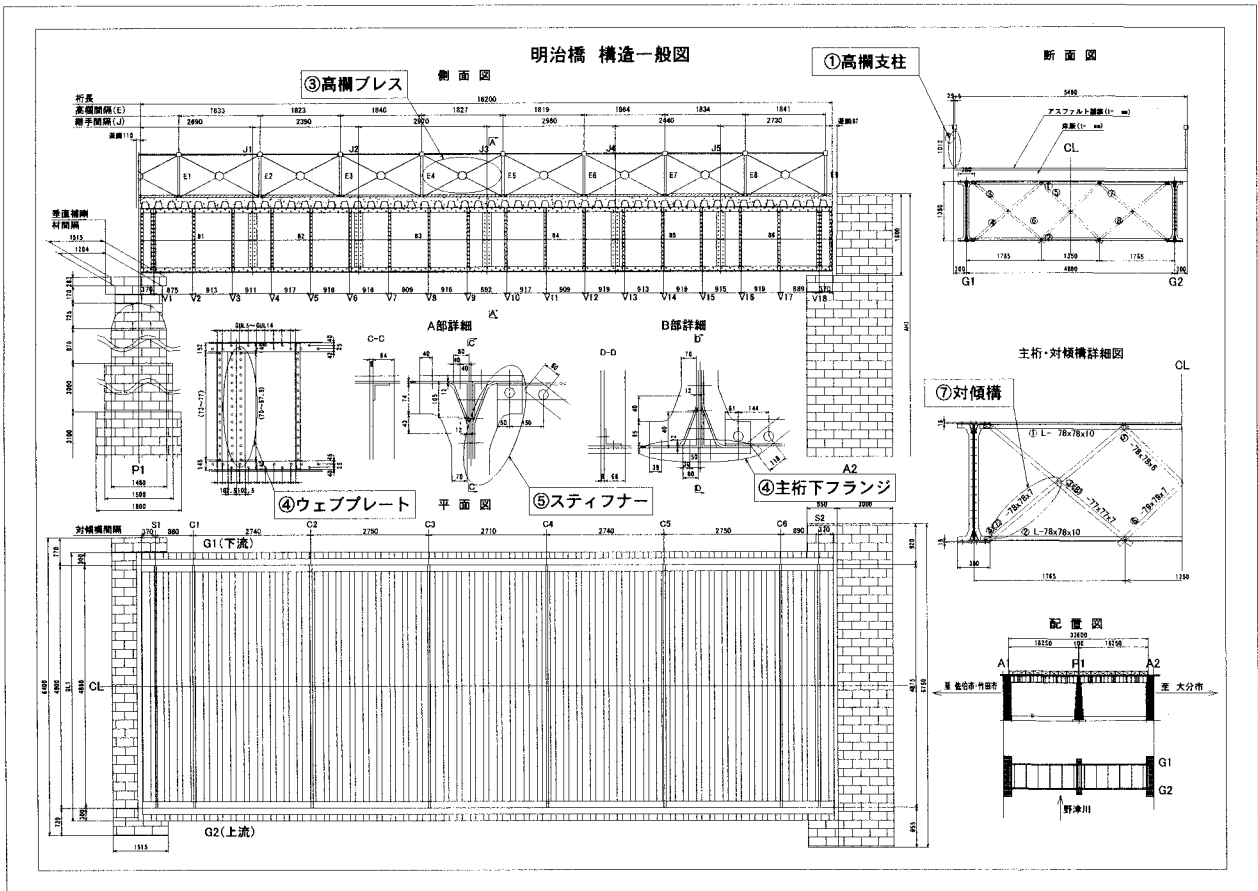


図-1 サンプル採取位置

表-2. 化学成分分析結果一覧 (%)

分析試料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ti	N	O
①高欄支柱	3.32	1.88	0.4	1.53	0.1	0.43	0.05	0.06	0.001	0.002	0.16	0.11	—	—
②-1ボルト	0.01	0.09	<0.01	0.447	0.038	0.01	0.04	0.001	<0.001	—	0.004	—	0.0077	—
②-2ナット	0.01	0.17	0.02	0.374	0.116	0.04	0.03	<0.001	<0.001	—	0.003	—	0.009	—
③高欄プレス	3.3	2.06	0.41	1.49	0.099	0.05	0.05	0.06	0.001	0.002	0.16	0.11	—	—
④ウェブプレート	0.17	0.02	0.44	0.065	0.06	0.05	0.01	0	0.002	0.002	0.001	0.002	—	—
⑤スチフナー	0.17	0.04	0.52	0.059	0.046	0.03	0.01	0.01	0.002	0.002	0.003	0.002	—	—
⑥主桁下フランジ	0.17	0.02	0.46	0.059	0.056	0.04	0.01	0	0.002	0.002	0.002	0.002	—	—
⑦-1対傾構	0.22	0.02	0.5	0.073	0.067	0.07	0.07	0.004	0.004	—	0.005	—	0.0027	0.0106
⑦-2対傾構	0.15	0.02	0.41	0.057	0.056	0.04	0.01	0	0.002	0.002	0.002	0.002	—	—
⑧波形プレート	0.11	0	0.42	0.113	0.065	0	0.01	0.01	0.003	0.002	0.007	0.002	—	—
SS400の実例	0.16	0.2	0.96	0.015	0.006	—	—	—	—	—	—	—	—	—
JIS G3101 SS400	—	—	—	≤0.040	≤0.040	—	—	—	—	—	—	—	—	—
JIS G3106 SM400A	≤0.23	—	2.5×C	≤0.035	≤0.035	—	—	—	—	—	—	—	—	—

JIS G1257 鉄及び鋼-原子吸光分析方法、JIS G1258 鉄及び鋼-誘導結合プラズマ発光分析方法(ICP)

JIS G1253 鉄及び鋼-火花放電発光分光分析方法(QV)、燃焼-赤外吸収法(JIS G1211, 1215 付属書4)

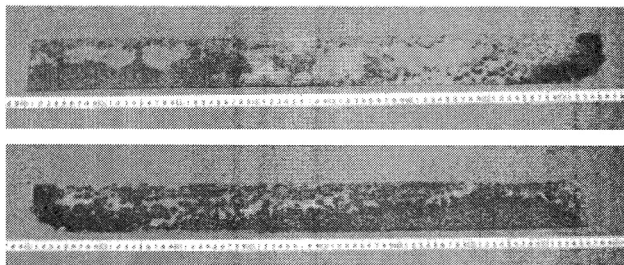


写真-2. ⑦-1 対傾構

6)ミクロ組織観察、7)介在物分析調査(EPMA)、8)引張試験、等である。この内、7)介在物分析調査と8)引張試験を除く1)~6)の調査は極少量のサンプルがあれば試験可能であり基本的には全ての供試サンプルについて実施した。7)介在物分析調査については特徴的な介在物について、また8)引張試験については引張試験片採取が可能な⑦-1 対傾構(写真-2)から採取したサンプルについて実施した。試験項目一覧を表-1 に示す。

### 1) 化学成分分析結果

分析結果の一覧を表-2 に示す。①高欄支柱と③高欄プレスは何れも炭素(C)を 3.3%含む鉄であった。材質的な性能よりも形状的な面を重視し、铸造により比較的容易に種々の形状の部材を製造可能な鉄を採用したと思われる。②ボルト・ナットは、炭素(C)含有量が 0.01%と比較的低く、珪素(Si)含有量も高くは無い。また、マンガン(Mn)、その他 銅(Cu)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)、モリブデン(Mo)、バナジウム(V)等の合金元素も添加されていない事から、化学成分的には強度が低く、また燐(P)、硫黄(S)の含有量が共に高い事から、特に硫黄(S)の効果により切削性は良好で当時のネジ切等の加工には適していたものと推定される。燐(P)が高い効果としては強度と耐候性が期待できるが、当時は未だ耐候性についての効果は知られてはいない。④ウェブプレート、⑤スチフナー、⑥主桁下フランジ、⑦対傾構については、炭素(C)含有量が 0.15~0.22%、マンガン(Mn)含有量が 0.41~0.50%の間であり、珪素(Si)含有量が 0.02%である。その他の 銅(Cu)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)、モリブデン(Mo)、バナジウム(V)等の合金元素は添加されていないトランプメントレベルであり、ほぼ、同一化学成分系である事から、同一の材質を狙って製造された同一成分目標の鋼材であると考えられる。また、燐(P)含有量が 0.057~0.065%、硫黄(S)の含有量が 0.046~0.060%と高い事が特徴的で JIS G3101 SS400 鋼の成分範囲である「0.040%以下」は満足していない。また、成分的特徴からマンガン(Mn)及び若干の珪素(Si)によって脱酸されたリム鋼として铸造されたものと推察される。⑧波形プレート

についても前述④~⑦の鋼材と類似の化学成分であるが、炭素(C)含有量が 0.11%と若干低めである事、珪素(Si)含有量が 0.00%である事、また燐(P)の含有量が 0.113%と一段と高い事などの点で異なっており前者とは異なる成分目標の鋼材で、マンガン(Mn)のみにより脱酸されたリム鋼と考えられる。

### 2) 清浄度試験

清浄度試験は鉄材を除く④~⑧の鋼材サンプルについて実施した。試験結果を表-3 に示す。

④ウェブプレートと⑥主桁下フランジの清浄度は比較的高(清浄性が悪い)く、⑤スチフナーと⑦対傾構、⑧波形プレートについては前者より介在物の個数が少なく、清浄度も比較的良好と思われる。何れの鋼も伸展した介在物が多数認められた。後述する EPMA による分析でマンガンサルファイト(MnS)である事が確認されており、硫黄(S)の含有量が高いため、マンガン(Mn)と結びつき硫化マンガン(MnS)が多数生成し、これが熱間加工により伸展したものと考えられる。また、その他の介在物としてはマンガンシリケート(Mn-Si-O)が確認されており、熱間加工で伸展せず破断した形態を示している。マンガンシリケートの存在は製鋼段階の主たる脱酸材がマンガン(Mn)、珪素(Si)であった事を示し当該鋼材がリム鋼であった事を示している。

表-3. 清浄度試験結果(JIS G0555 鋼の非金属介在物の顕微鏡試験)

試験サンプル	板厚内位置	清 浄 度			
		d A	d B	d C	d
④ウェブプレート	表面直下	0.108	0	0	0.108
	1/2 t	0.058	0	0	0.058
⑤スチフナー	表面直下	0	0	0.012	0.012
	1/2 t	0	0	0.025	0.025
⑥主桁下フランジ	表面直下	0.075	0	0.004	0.079
	1/2 t	0.096	0	0	0.096
⑦-2対傾構	表面直下	0.021	0	0.017	0.038
	1/2 t	0.042	0	0.004	0.046
⑧波形プレート	表面直下	0.008	0	0.012	0.021
	1/2 t	0.029	0	0.008	0.038

### 3) ロックウェル硬さ試験

②ボルト・ナットについては鋼材の強度レベルを把握するため、ロックウェル硬さ(HRB)試験を行った(表-4、写真-3 参照)。測定は各サンプルについて3点測定し、平均値を求めた。結果は、ボルト・ナット各々 82.0、73.5 であり、引張強さに換算すると、概ね 515 MPa、450 MPa で、強度的には JIS G3101 SS400 鋼、JIS G3106 SM400 鋼(何れも引張強さは 400~510 MPa)と同レベルである。

表-4. ボルト及びナットの硬さ試験(ロクウェル硬さ試験)

試験サンプル	測定結果	平均値	JISによる 強度区分
	HRB		
②ボルト	71.3	82	JIS B1501 4.8
	83.5		
	86.3		
②ナット	68.4	73.5 (136HV)*	JIS B1502 4
	80.9		
	71.3		

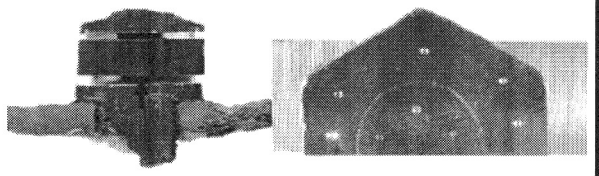


写真-3. ボルト及びナットの硬さ試験(ロクウェル硬さ試験)位置

4) ビッカース硬さ試験

②ボルト・ナット・鋳鉄材以外の各部材についてはビッカース法により断面かたさ試験を行った。試験結果を図-2 に示す。④ウェブプレート、⑤スティフナー、⑥主桁下フランジ、⑦-2 対傾構、⑧波形プレートは、何れもほぼ安定した板厚方向の硬さ分布を示しており、ビッカース硬さ(Hv500)で約 125~160 である。引張強さに換算すると 415~525 MPa で、強度的には JIS G3101 SS400 鋼、JIS G3106 SM400 鋼(何れも引張強さは 400~510 MPa)と同レベルである。

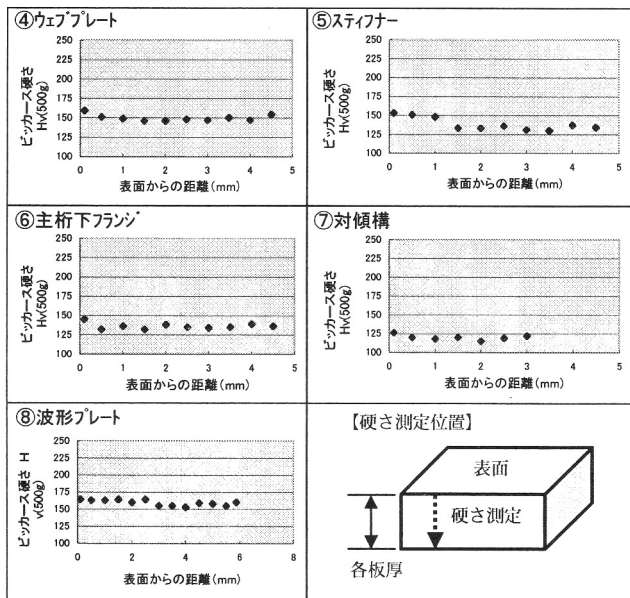


図-2. ビッカース硬さ試験結果

5) マクロ組織観察

マクロ組織の観察は②ボルト・ナット(写真-4)、⑥主桁下フランジ、⑦-1 対傾構(写真-5)、⑧波形プレートについて行った。

②ボルト・ナットについては大型で多数の介在物が存在し、前述の清浄度的には④ウェブプレート、⑥主桁下フランジ、⑤スティフナー、⑦対傾構、⑧波形プレート等とは比較にならない程汚いものである。ボルトの組織は軸方向と一致した筋状であり圧延或いは押し出し形成されたものと考えられる。また、ネジ山の加工は、介在物の著しい変形を伴っていないことからバイトによる旋盤加工と考えられる。一方、ナットについては組織が不規則に流動しており、鍛造による成型と考えられる。⑥主桁下フランジ、⑦-1 対傾構、⑧波形プレートについては、鋼材内部の割れ、濃厚な偏析は認められず、②ボルト・ナットのような大型介在物も認められなかった。

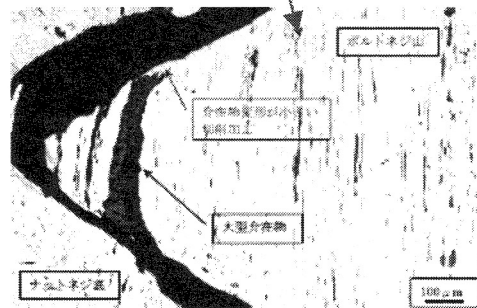
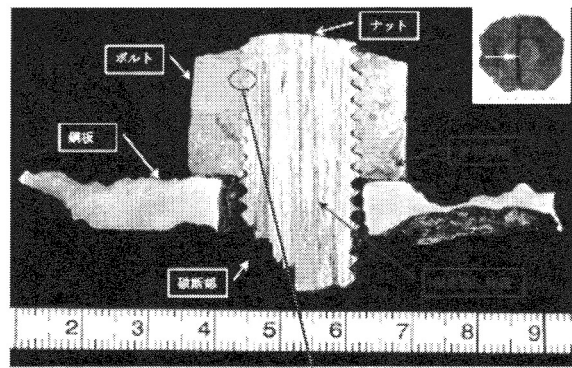


写真-4. マクロ組織(②ボルト・ナット)

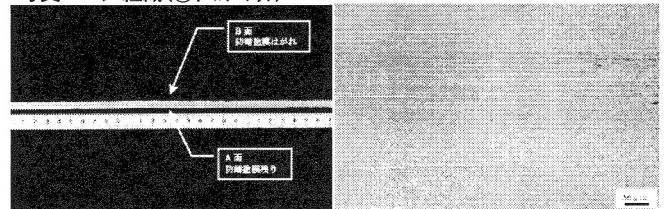


写真-5. マクロ組織(⑦-1 対傾構)

6) ミクロ組織観察

①高欄支柱と③高欄プレスについては、黒鉛、フェライト、パーライトからなる鋳鉄のミクロ組織<sup>2)</sup>を呈している(写真-6 参照)。②ボルト・ナットについてはフェライト主体の組織に介在物が多数分布した組織を呈している(写真-7 参照)。化学成分及びマクロ・ミクロ組織から、鍛鉄(ハドル炉鋼)と考えられる。介在物の数、大きさが他に比べて多く大きいのは半溶融状態での精錬に起因しているものと思われる。また、④ウェブプレート、⑤スティフナー、⑥主桁下フランジ(写真-8 参照)、⑦-1,2 対傾構(写真-8 参照)については何れも同様なフェライト、パーライト組織である。④ウェブプレート、⑥主桁下フランジ、⑦-1 対傾構についてはフェライトバンドを伴う組織を呈しており、現状の SS400 鋼クラスの鋼材においても良く見られる一般的なミクロ組織であるが、フェライトバンドの形成については、燐(P)の偏析により発生する事が知られている<sup>3)</sup>。特に写真-9 に示す⑦-1 対傾構のミクロ組織についてはフェライトバンドの幅及びパーライトの析出が表層側よりも板厚中心部が大きくなっており、燐(P)濃度が高い事と燐(P)及び炭素(C)の偏析が関与しているものと考えられる<sup>3)</sup>。

7) 介在物分析(EPMA)調査

介在物分析調査については、特徴的かつ代表的な介在物、即ち ④ウェブプレートの1箇所(伸展した介在物)、⑥主桁下フランジ2箇所(伸展せず破断した介在物と伸展した介在物)について EPMA 分析を行った(写真-10,11 参照)。前述の如く、分析の結果、伸展した介在物は硫化マンガン(マンガンサルファイド: MnS)であり、伸展せず破断した介在物はマンガンシリケート(Mn-Si-O)である事が確認

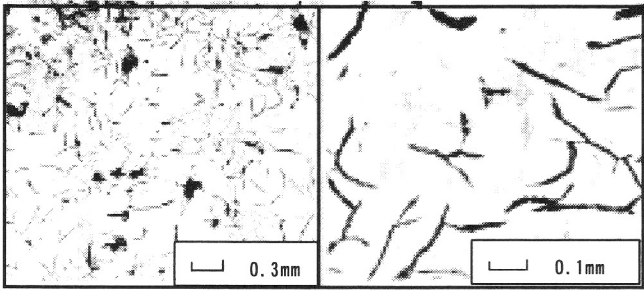


写真-6. ミクロ組織(③高欄プレート)

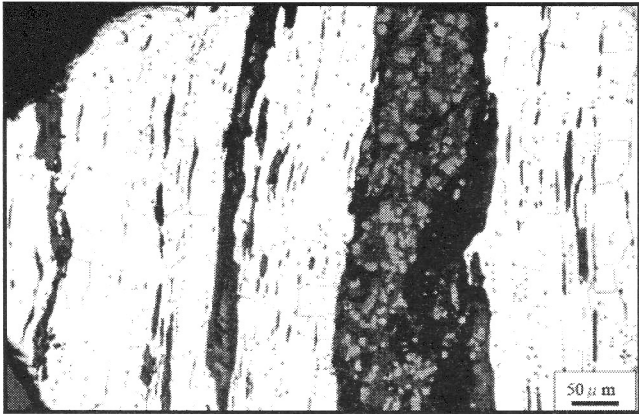


写真-7. ミクロ組織(②プレート)

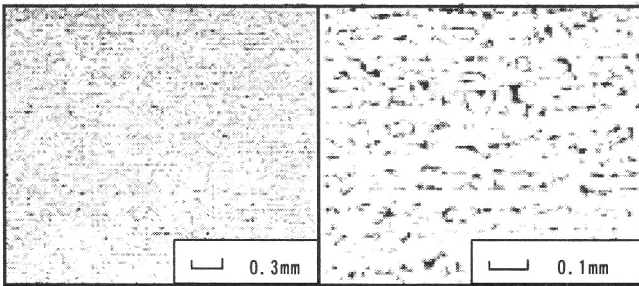


写真-8. ミクロ組織(⑥主桁下フランジ)

表層

板厚中心部

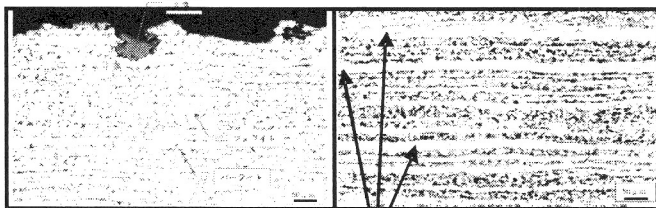
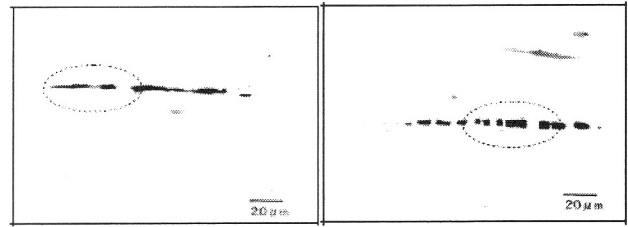


写真-9. ミクロ組織(⑦-1 対傾構)

された。

### 8) 引張試験

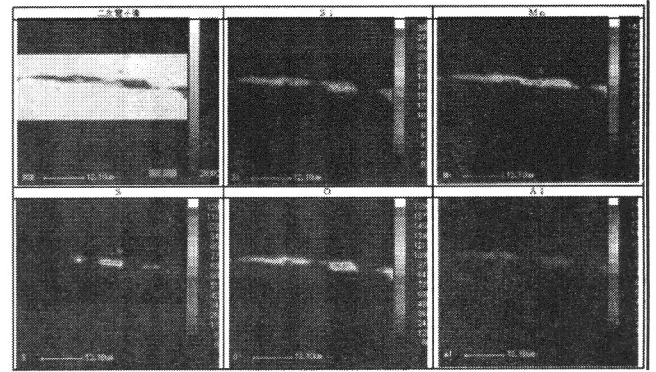
引張試験については引張試験片採取及び加工が可能な⑦-1 対傾構について実施した。試験結果を JIS G3101 SS400 鋼と対比して表-5、試験片外観を写真-12に示す。試験結果はSS400の規格値を充分満足しており、引張強度と降伏強度の比(降伏比)についても現状の鋼材と同レベルである。



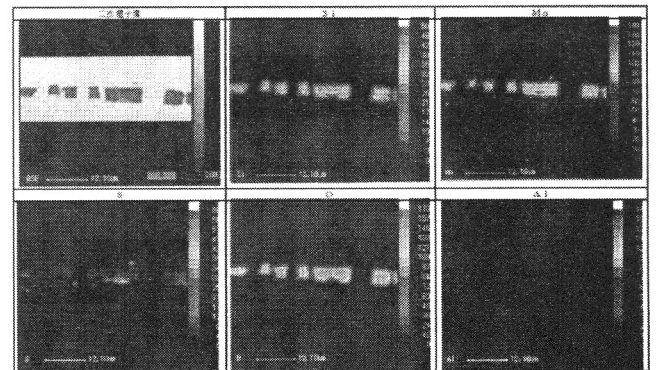
④Iビームフラット

⑥主桁下フランジ

写真-10 介在物像



④Iビームフラット



⑥主桁下フランジ

写真-11. EPMA(電子線マイクロアナライザ)像

表-5. 引張試験結果

試験サンプル	上降伏点 (MPa)	下降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
⑦-1 対傾構	299	296	430	31
SS400 の実例	291	—	440	30
JIS G3101 SS400	245	以上	400~510	21 以上

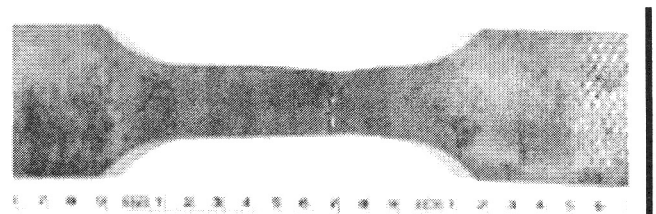


写真-12 引張試験片外観

#### 4. 考察

明治 35 年(1902 年)に建設された明治橋の各主要部材に使用された鉄・鋼材料を調査した結果、化学成分分析結果から、炭素(C)を 3.3%程度含む鑄鉄と炭素(C)を 0.2%程度含む炭素鋼、炭素(C)を 0.01%程度を含む鍊鉄(ハドル鋼)であった。

炭素鋼についてはフェライト・パーライトを主体とする組織で、清浄度は比較的汚れており現代の鋼材の数倍から 10 倍程度の介在物が存在し、熱間加工の段階で伸展した多数の MnS 系介在物、伸展せず断裂したマンガンシリケート(Mn-Si-O)系介在物が存在している。化学成分、介在物の特徴等から、製鋼・鑄造段階では溶融精錬を行ったリム鋼であったと考えられる。フェライトバンドの幅、パーライト析出等が板厚中心部で大きいことから、燐(P)及び炭素(C)の偏析は板厚中心の方が大きいと考えられ、表面の鉄純度が高く、中心部程含有成分の濃度が高くなるリム鋼の特徴を示している。尚、偏析は溶融状態から凝固する過程で生ずる特徴的冶金現象であり、またマンガンサルファイド(MnS)等の伸展した介在物の存在から、熱間で加工(圧延)された事が判る。対傾構から採取したサンプルで行った引張試験では降伏点(YP)=299MPa、引張強さ(TS)=430MPa、伸び=30%と JIS G3101 SS400 鋼の要求を十分に満足している。他の部材についても、硬さ試験の結果同レベルの硬さであり引張試験特性も類似したものと推定される。但し、燐(P)、硫黄(S)の含有量が高いため、化学成分的には JIS G3101 SS400 鋼の要求を満足していない。従って、低温靱性、溶接性は期待できない。しかし、リベット、ボルト・ナット等で接続し、溶接しない構造では、溶接割れ、溶接熱影響部の靱性劣化等を生じないため問題とならなかったものと思われる。

鍊鉄(ハドル鋼)と考えられるボルト・ナットについては、炭素(C)が 0.01%と非常に低く、フェライトを主体とする組織で、燐(P)、硫黄(S)の含有量が高く、介在物も多量に含まれた鋼材で、他鋼材と比較して靱性等の品質面では劣る鋼材である。

#### 5. まとめ

明治 35 年(1902 年)に建設された明治橋について、使用された主要な鉄・鋼製部材について詳細な調査を行い、当時の鋼材の製造方法、性能・品質レベルについて考察を試みた。

今回調査の結果、明治橋には鋼、鍊鉄(ハドル鋼)、鑄鉄の3種類の材料が使用されていた。特に、鋼材については、燐(P)、硫黄(S)の含有量が高くまた介在物の存在も多いため、靱性、溶接割れ感受性等が相当劣位であったと推定されるが、最も基本的な要素である強度レベルについては概ね現在の構造物鋼と同レベルの鋼板であり、現在の橋梁用鋼板の仕様に繋がるものであったと考えられ、我が国における鋼製橋梁技術発展の歴史を確認する上でも、貴重な結果と思われる。

#### 【参考文献】

- 1)大田、深沢 橋と鋼 p441~445, (株)建設図書
- 2)(社)日本金属学会 鑄鉄 p3~5, 東活印刷(株)
- 3)門間、須藤 鉄鋼材料とその熱処理 p9, 27~29, (株)東北活版社