

鉄の橋から鋼の橋へ

成瀬輝男 (有) 成瀬橋梁研究所 代表
Teruo Naruse

From Iron Bridge to Steel Bridge

1 まえがき

その昔、鉄という材料は高価な貴重品だった。武器や生活具、装飾品といったものは別として、橋のような大きなものに鉄を使うようになったのは、いつ頃からだろうか。

釘やカスガイの類は別として、橋の主要部材に初めて鉄を使ったのは中国である。先頃亡くなったイギリスの中国研究家J. ニーダムは、中国の古文書を克明に調べあげた上で、「鍊鉄のチェーンを使った吊橋が現われたのは、+6世紀よりも遅くはなく、ほぼ確かなところ+1世紀」としている。渓谷の間に鉄鎖を張り渡し、その上に木の床板や欄干をつけて、人が歩けるようにしたものである。

時代はずっと下り18世紀末になると、それまで橋といえば石橋か木橋しかなかったヨーロッパで、鑄鉄のアーチ橋が架けられ始めた。ここでは近代の鉄の橋の系統的な発展の出発点として、また全鉄製の橋の始まりとして、第1号のイギリスのアイアンブリッジから話を始めるとしよう。

2 産業革命とアイアンブリッジ

世界文化遺産に指定されている鑄鉄のアーチ橋「アイアンブリッジ」(図1)の完成は1779年、場所はイングランドのコールブルクデールである。全鉄製の橋第1号の登場がなぜイギリスなのか、ざっとその背景を探ってみよう。

18世紀後半のイギリスは、黄金色の次世紀に向けて発展の途上にあった。対外的には植民地帝国としてインド・アフリカ・アメリカとの通商で富を貯え、国内では農業が振興して穀物の価格は下がり、食生活に困窮することはなくなっていた。この時期の人口増は50年間でほぼ50%という高率の伸びである。

18世紀前半から開発されていた石炭製鉄が軌道にのり、高性能の蒸気エンジンを使いこなすようになると、従来の



図1 世界最古の全鉄製の橋「アイアンブリッジ」(1779)

木炭に代わって石炭が工業用燃料の主役として脚光を浴び、林業はすたれていった。こうした環境の中で、人口の増加分はそのまま工業用労働力にシフトし、新規の労働人口がまた需要の増大をもたらして、産業革命を引き出す大きな要因となった。

イギリスの産業革命(約1760~1850年)の揺りかごの地であったコールブルクデールは、19世紀に入ってからすっかり寂れ、いま往時の隆盛の面影を垣間見せるのは点在する博物館だけであるが、かつては世界一の製鉄量を誇ったこともあった土地である。

他国ではまだ貴重品であった鉄が、この土地には潤沢にあり、生産者は鉄という古くて新しい材料の新用途の開発に熱心であった。工場内の馬曳き貨車のレールに鉄を使い、鉄船を造ってセバーン川に浮かべたりもした。生活面でも、窓枠・階段の類に鉄材を用いた跡は今でも随所に残っているし、揺りかごや棺桶まで鉄で作った記録もある。まさに揺りかごから墓場まで、鉄の世界だったわけである。

セバーン川は当時毎年のように出水を繰り返していた。かつての木炭製鉄時代に、流域の森林の大規模な伐採が行



図2 サンクトペテルスブルクの鑄鉄橋 (1783)

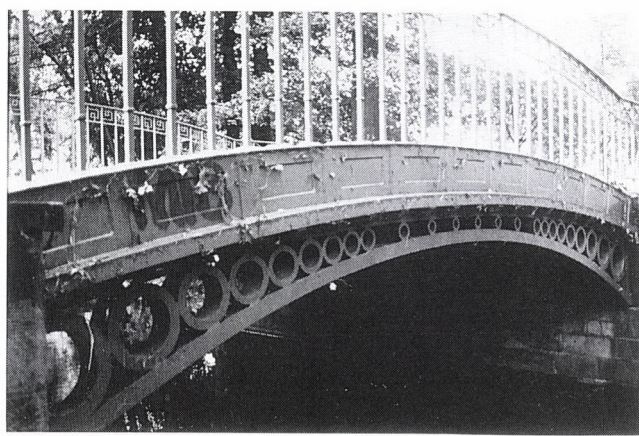


図4 ベルリンのシャロッテブルク公園の橋 その2 (1800~3)

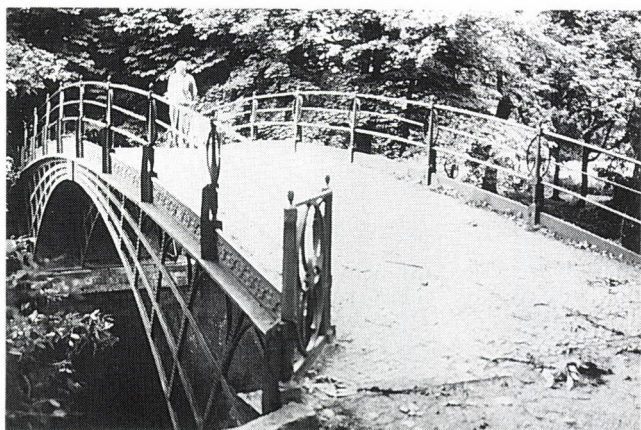


図3 ベルリンのシャロッテブルク公園の橋 その1 (1800~3)

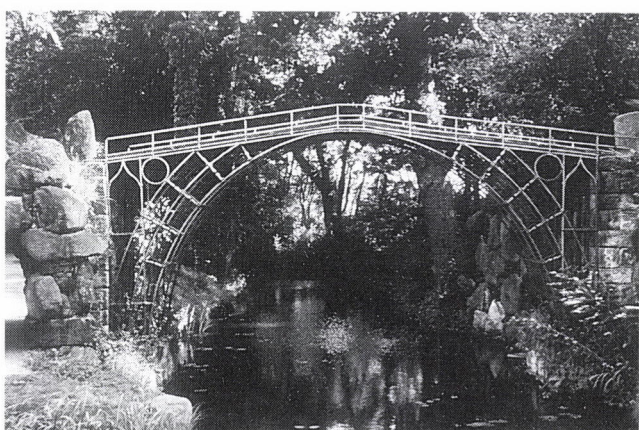


図5 「アイアンブリッジ」を模写したヴェルリッツ庭園の橋 (1791)

なわれたためである。木橋を架けてはすぐに流され、石橋を架けても基礎を洗掘されて長持ちせず、それではということで鉄の橋の建設が起案されたのである。起案・出資者はコールブルクデール製鉄所の経営者（ダービーIII、1750～91年）と彼を囲む地元の有力者達である。

完成後も橋体全部が水に吞まれる大出水は一度ならずあったが、目論みは的中、丈夫で水通しの良い橋は流されることはなかった。洪水のあと、次第に水位が下がって橋の姿が再び濁流の上に現われてくると、住民達は歓声をあげて喜んだという。

イギリス名物となった鑄鉄の橋の名はアイアンブリッジ、橋詰めの集落の名前もいつの頃からかアイアンブリッジ村となった。小規模な修理を重ねながら橋は軽車両も通してきたが、1934年すべての車両の通行を禁止、1950年にはそれまで私有だった橋を州が買い上げ、同時に通行料金の徴収も廃止した。文化財としての認識が深まったためである。

アイアンブリッジが出来てから15年間、イギリスで鉄の橋が架けられたという記録はない。やはり当時の建設材料

として、鉄は割高であったのである。アイアンブリッジは土地柄と条件に恵まれたから出来たのであろうし、また多分にモニュメンタルな意味もこめられていたのであろう。その後18世紀末になると、鑄鉄アーチ橋はリバイバルの時期を迎え、1795～99年の5年間に十指を越す建設が行われている。

3 ヨーロッパ大陸の鑄鉄橋

この頃ヨーロッパ大陸の方はどうだったかというと、ロシアがイギリスから輸入してサンクトペテルスブルグの公園に架けた鑄鉄アーチ橋2橋（図2がその一つ、1783年完成）、プロシャの殿様がベルリンのシャロッテンブルク庭園に架けた2橋（図3および図4、1800～3年完成）が現存する鑄鉄橋として挙げられる。

面白いのはドイツのデッサウにあるヴェルリッツ（Wörlitz）庭園内に架かっている橋（図5、1791年完成）で、これはイギリスのアイアンブリッジの側面形を1/4に縮小した錬鉄製の歩道橋である。この地方の殿様が造らせたもの

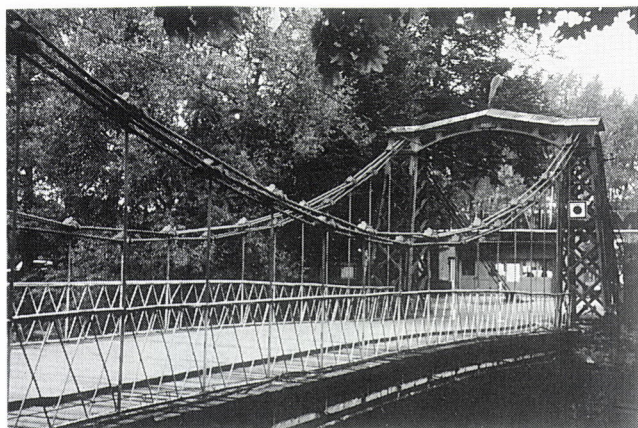


図6 ポーランドのマラパネに現存する古い吊橋 (1827)

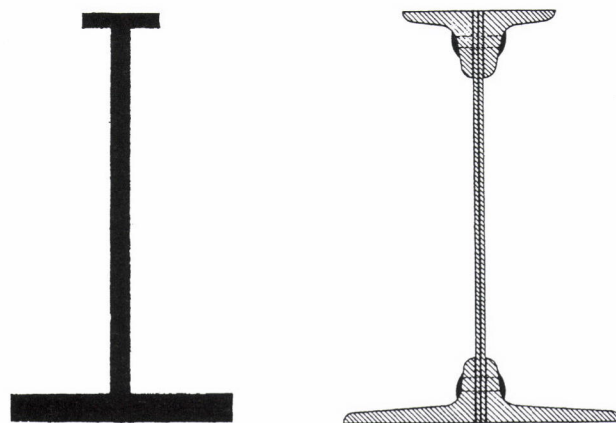
だが、先進国イギリスの例に倣うことは当時のハイカラ趣味に通じたのであろう。この庭園はゴルフ場にしたら45ホールは入りそうな広大なもので、鉄の小橋がほかに2橋、その他にも様々な装飾的な橋が数多く架かっている。

フランスでも、セヌ河に鑄鉄アーチ橋ボンデザール橋が1804年に開通した。ボンヌフの下流側に隣接する歩道橋で、これは長年パリの添景として親しまれ、画の主題にされることが多かったが、20年ばかり前に撤去・架替工事が行なわれた。新橋は鋼橋だが、もとの外観を忠実に模写している。ついで、シテ島のやや上流のオステルリッツ橋も鑄鉄アーチで1807年に開通した。これは本格的な公道橋だったが、1930年代に架替えられ、往時の面影をとどめていない。

群雄割拠の大陸にいま一つ勢いがいないのは、産業革命の出遅れもあるが、18世紀末の大陸で大はフランス革命から小は各地の農民の反乱まで、動乱が連続した影響もある。前記の初例でもわかる通り、この中で比較的前向きに鉄の橋に取り組んだのはフランス、それにフリードリッヒ大王率いるプロシャである。

当時ヨーロッパ最強の軍団を有した大王は、1740年代にシュレージエン（現ポーランド）を手中にすると、そこにいくつかの製鉄所を建設した。この地方では鉄鉱石が採れたのである。

1754年にできたマラパネ（Malapane, 現在のポーランド名Ozimek）の製鉄所は、最初は木炭高炉で操業していたが、1790年代から技術先進国イギリスに倣って、燃料にコークスを使い始めた。軍需のかたわら、これもイギリスに倣っていくつかの鉄の橋が造られたが、そのうち公道としてもっとも古いのは1796年にできた鑄鉄アーチ橋である。鉄の橋を語るときしばしば引用されてきたこの橋の建設地点は、ブレスラウ（Breslau, 現在のポーランド名Wrocław）の西南西35kmのLaasan村であるが、1945年に敗走するドイツ軍が木っ端微塵に爆破してしまった。建設200年記念行事



(a) 鑄鉄梁の標準的断面 (b) 最初期の鍊鉄梁の例

図7 梁の断面形

として、先頃この橋のあったStriegau川川底の浚渫を試みたが、全46tあったはずの鉄材のうち、収穫は3t余の残材だけであったそうである。

因みに、いまなお操業しているマラパネ製鉄所の正面玄関前には、1827年にできた吊橋が現存している（図6）。鑄鉄の塔の中心間隔は31.56m、幅員は4.66m、車両重量制限4.2t、補剛トラスらしきものが付いているが、これは構造材というより高欄とみるべきである。丸棒の吊り材はすべて鍊鉄であろう。この年代の吊橋の現存例としては、スコットランドのUnion吊橋（1920年完成）について、おそらくヨーロッパ二番目のものである。現在のマラパネ製鉄所は、140年余の歴史を経た今もHütte（製鉄所）の看板は出ている。高炉らしきものは見当らず、銅の精練と若干の機械加工を行なっているようである。

4 その後の鑄鉄橋

イギリスの鑄鉄橋建設の歴史は丁度百年続いた。というのは、1878年に起きたスコットランドのテイ湾の鉄道橋の崩壊事故をきっかけに、その翌年以降新規の鉄道橋に鑄鉄を使うことは禁じられたからである。道路用の鑄鉄橋も新設は急減した。

鑄鉄橋トラブルが頻発した最大の要因は、鉄道の出現（1825年）である。機関車荷重は瞬間に増大し、やがて建設当時の橋の想定荷重を超えた。鑄鉄が圧縮には強いが引張りには脆くて弱いことは古くから経験的にも知られていて、図7 (a) の鑄鉄梁の断面で圧縮側に比して引張側フランジが大きいのは、この経験則を示すものである。鉄道橋の場合、鑄鉄は一般に圧縮力を主に受けるアーチリブや橋脚柱などに多用され、主として引張りを受ける部材には鍊鉄が用いられていたのであるが、それでも問題は続発し

た。

自重すなわち死荷重の支配的な道路橋と違って、大きな列車荷重の載る鉄道橋ではアーチリブにも曲げによる引張り力がかかり働く。鑄鉄管を積み上げた柱状の橋脚でも、強風下では曲げが働く。嵐をついて橋上を列車が走行中、高さ27mの橋脚群もろとも橋体が薙ぎ倒され、75人の犠牲者を出した上記テイ湾の事故は、後者の例である。

鑄鉄橋建設の終焉が鋼橋の時代の始点ときびすを接していることは、注目に値する。近代製鉄技術を構成するベッセマー転炉（1856年発表）シーメンス・マルティンの平炉（1864年開発成功）およびトーマス炉（1878年発表）の三大発明は、テイ湾事故当時すでに完成していたのである。鋼の時代は駆け足でやってきた。5.1万tの鋼材を使ってスコットランドにフォース鉄道橋が完成したのは、1890年のことである。

鋼の時代はすでに始まりつつあったこの時代まで、なぜ問題含みの鑄鉄が使われていたのであろうか。結果的にいえば材料特性の認識の甘さ、設計施工技術の未熟さということになるのだろうが、当時の視点で考えると鑄鉄は錬鉄に比べてはるかに安かったのである。加えて鑄鉄は造形の自由度も豊かであり、構造材としてそれなりに利点もあったのである。

史上最大の鑄鉄橋は、ロンドンでテムズ河を渡る道路橋サウザーク橋（Southwark、最大アーチ支間73m、1819年完成、1921年架替）である。大きいわりに建設年代が遡るのは、この辺りから後の大径間橋梁は錬鉄橋が主流になっていったからである。

鑄鉄の道路橋はともかくとして、鑄鉄を主部材に使った鉄道橋がイギリスで今なお供用されている事実は驚きである。大規模な例として挙げられるのは、ニューカースル駅から歩いてすぐのハイレベル橋（1849年完成）である。上段が鉄道、下段が道路のダブルデッキ構造であるから、下段に立つと鑄鉄のアーチリブの全容が手の届く距離で仔細に観察できる。吊材など引張材には基本的に錬鉄を使っている。いまは枝線となった鉄道の走行頻度は多くはないが、150年近くを経てなお現役で働いている。イギリス人は古いものを大事にするから、この鑄鉄アーチはまだまだ使い込むことになりそうである。

ヨーロッパ大陸の経緯もイギリスと似ている。鑄鉄の鉄道橋のトラブルがあまりに多いことから、一時は石造アーチ橋のリバイバル時代もあったりした。鑄鉄橋の立場でいえば、鉄道の急激な発展の時代に生まれ合わせたのが不幸だったのかも知れない。

日本の鉄の橋は、開国直後に錬鉄橋から始まり、30年もすると鋼橋の時代に移行したから、鑄鉄橋の時代というも

のではない。鑄鉄アーチをヨーロッパから輸入して架けた例など、いくつかの事例はあるが、散発的で十指に満たない。国産とはっきりしている橋の一つに東京の八幡橋（明治11年京橋に弾正橋として架設、その後移設をされ江東区深川八幡横に現存、アーチリブが国産の鑄鉄部材、図11）がある。橋脚柱に鑄鉄管を用いた例はかなり多く、今でもそのいくつかは私鉄に建設当時の姿で残っている。

5 錬鉄の橋

話は鑄鉄時代から鋼の時代の幕開けまで飛んでしまったが、19世紀の鉄の橋は錬鉄抜きでは語れない。とくにトラス形式の大型橋梁については錬鉄が主材料であった。まず錬鉄の生産の工業化の過程を展望してみよう。

コークス高炉は18世紀中頃までコールブルクデールで見られなかったが、その後イギリス全土に急速に広まった。技術的に熟してきたのである。

次の課題は、高炉からえられた銑鉄を錬鉄に精錬する方法の開発であった。この段階でまだ木炭に依存していた錬鉄精錬の状況を打破するべく登場したのが、H. コートによる錬鉄の精錬法である。コークス炊きの反射炉の中で銑鉄を手作業でかき回し（パドル）ながら脱炭し、これを何回も圧延・除滓して精錬するもので、発明は1783年、というアイアンブリッジが出来た直後のことである。

実験的に成功したといっても現場では種々の問題が待ち受けていた。この方法が本格的に工業生産の軌道に乗ったのは次世紀、それも鉄道が走るようになってレールの需要が急増してからである。

1830年代になると、錬鉄板を組み合わせた部材が登場してくる。図7(b)はその原点ともいえるものであるが、注目すべき点が二つある。一つは腹板を2枚千鳥重ねにして交互に継いでいる点である。一つは鑄鉄梁の慣用手法に倣って、引張フランジの方を大きくしている点である。

当時の技術者が板の接合でどんな苦労をしたか、別の実例で示そう。図8のブリタニア鉄道橋（1850年完成、材料はすべて錬鉄、1970年の火災被害によって架替）の製作にさいして供給可能な板のサイズは、700×3600mmまでだった。人間労働に制約されたパドル法で得られる鉄塊は350～360kgが標準であったから、大板の生産は困難であったのである。

この程度の板で大型の橋体を造るとなると、至るところ継手だらけになるのは当然である。図9を見ると、腹板は幅610mmの板を上下方向に3ないし4段つないでいる様子がわかる。垂直方向に走る継手が見えないのは、T断面の垂直補剛材が腹板の添接材を兼用しているからである。

小さな板を綴り合わせて1万tの構造物を組み上げるとき、つぎにひかえる問題は全数175万本という気の遠くなるような数のリベット打ちである。板の孔明けはパンチング機械がすでに開発されていたから良いとして、リベット打ちは1850年代中頃以前はまだ機械化されていなかった。当て盤を使って25mm径のリベットをハンマーを振るって叩き、鉋頭を形成したのである。

鑄鉄橋第1号のアイアンブリッジの支間長は30m、鑄造単位は半径間、というと20m近くの長さである。この70年も前の橋に比べても、当時の鍊鉄橋構造の継手数の多さと効率の悪さがわかる。

近代化されていた高炉と圧延工程の中間にあってボトルネック化していた精練工程に、根本的解決を求めたのは、いわば時代の要請であった。鋼の時代は来るべくして来たのであるが、その背後にはこうした事情もあったのである。

話をブリタニア橋に戻そう。狭い箱桁の内部に蒸気機関車を通して煙の問題はどうだったのか、これは興味のあるところであるが、その辺の事情に触れた文献は見当たらない。これは推定だが、その頃のロンドンの地下鉄が、地表のと

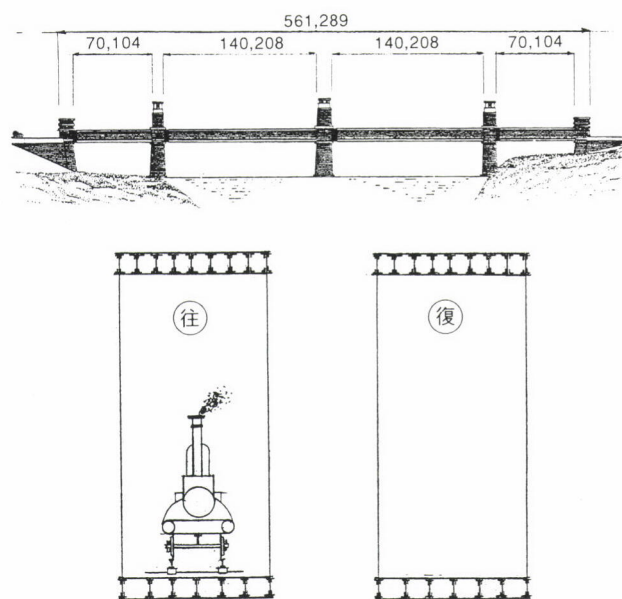


図8 箱桁第一号ブリタニア鉄道橋 (1850)

単位: m

ころどころに排煙塔を立ち上げるだけで、蒸気機関車を走らせていたことを考えると、それほど問題視しなかったのかもしれない。

ブリタニア橋は建設の最中から話題を呼び、外国からの見学者が大勢やってきたが、この形式をそのまま真似た例は出ていない。唯一の類似例はプロシヤが鉄道橋として架けた一群のラチス橋である(図10)。箱の内部に列車を走らせるところは同じだが、壁も天井も網状のラチス構造だから、内部は明るく、煙も抜ける。大陸の鉄板の供給事情がイギリスより悪かった時代であるから、小断面のフラットバーや山形材を網状に組んだ方が実際的だったのであろう。また、イギリスの無煙炭に比べ褐炭系が多い大陸では、煙の問題をより深刻に捉えたということもあるのかもしれない。

以上紹介した箱桁やラチス橋は、鍊鉄の橋としてはやや特殊な例で、19世紀に鍊鉄が多く使われたのはトラス橋である。ただ、必ずしも全部材が鍊鉄というわけではなく、

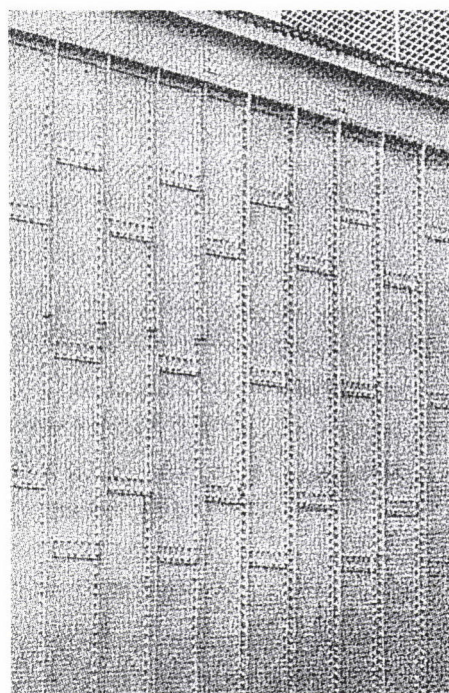


図9 ブリタニア橋の腹板

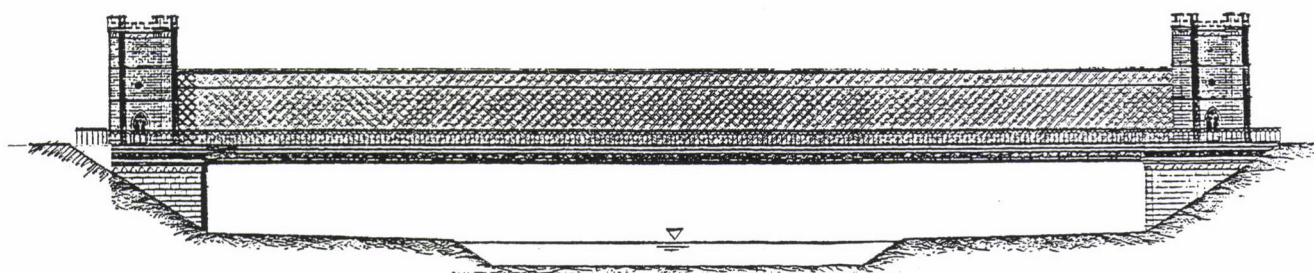


図10 プロシヤが架けたラチス式鉄道橋の一例

錬鉄は下弦材や斜材など引張材に使い、端柱や上弦材などの圧縮部材には鋳鉄を用いることもあった。とくに、アメリカの場合ほとんどのトラスがこの混淆型であった。

日本の錬鉄橋第一号は、慶応4年(1868)8月に長崎に出来た桁橋「くろがね橋」である。鋳鉄橋よりも錬鉄橋の方が先に出来てしまったわけである。設計はオランダ人、組立は官営長崎造船所であるが、材料をどこから輸入したか、日本での加工が組立だけなのか板の切断からすべてを行なったのか、その辺を明示する資料はない。この橋自体も、昭和初年にスクラップにされてしまって現存しない。

図11の八幡橋にも錬鉄が使われている。前記したようにアーチリブは鋳鉄で、その鋳造が日本で行なわれたことは確認されている。しかし、吊り材、筋違、タイ材などに使われている錬鉄の出処を確認する資料はない。幕末のころに数藩が築造していた反射炉は、動乱を経てもはや機能しなくなっていたと考え、一般に推定されているように、多分輸入材なのであろう。

日本の錬鉄橋時代は明治30年代初頭で終わった。その後も、桁橋腹板の山形補剛材など小部材に錬鉄材を使うことはあったが、大勢は急速に鋼橋に移行していった。

錬鉄時代は短かったが、今も供用中の橋をとくに見かける。われわれが知らないうちにお世話になっている橋を一つ挙げよう。JR中央本線多摩川橋梁の上り線のプレートガーダー橋は、430m全長が錬鉄製である。今年で創架100年ということになるが、幹線鉄道でこの長寿は珍しい。今後さらに頑張ってもらいたいものである。

6 そして現代の鋼橋

イギリスの統計でみると、鋼の生産量が錬鉄を上回ったのは1885年である。磨耗し易い錬鉄レールは急速に鋼に代り、橋梁も1900年頃までに鋼橋に転換を終えた。他の国々が多少遅れたといっても、この5~10年後には概ね鋼橋に転換を終えた。アメリカの鋼生産は、1880年代末には先進国イギリスを超越し、新大陸に鋼構造大国を現出した。

19世紀末に現われた鉄筋コンクリート橋、また今世紀前半に端を発するプレストレスコンクリート橋は、最初は小規模橋梁に用いられていたが、やがて適用支間長を拡大し、鋼橋の好敵手に成長していった。

ここで現代の状況を展望してみると、鋼構造とコンクリート構造は、中規模以上の橋については、競合の段階を過ぎて共存の時代に入りつつあるようにみえる。19世紀の橋が引張材に錬鉄、圧縮材に鋳鉄と使い分けが行なわれた

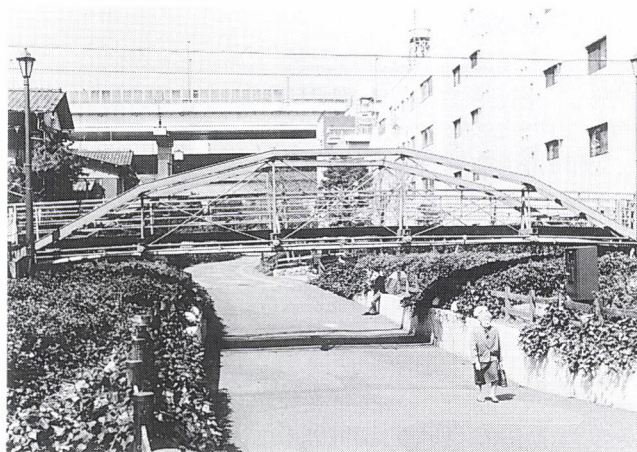


図11 東京江東区の八幡橋 (1878)

ように、現代の世界の橋の潮流を鋼橋の視点から眺めると、引張材に鋼、圧縮材にコンクリートという使い分けの傾向が、かなりはっきり出てきている。こうした傾向が、鋼橋における鋼材の使用量の頭打ち要因になっていることもまた事実である。

例えば大きな吊橋でいうと、桁には軽量の鋼材を用い、主として圧縮力をうける塔柱にはコンクリートを使うといった使い分けが、世界的な流れになってきている。また中規模の桁橋などでは、圧縮側にコンクリートを利用した合成構造を適用するといった具合である。小径間の橋でも、最近のヨーロッパの状況を見ると、 π 形断面の2主桁の合成桁がコンクリート橋よりも経済的とされている。

若き溢れるコンクリート構造に押されて、鋼橋の衰滅を懸念する議論も一時はあったが、これは杞憂だった。軽量故に現場の施工性とくに都市内の迅速施工に適する利点、また多少の損傷を受けても修復可能ないわゆる板金加工が容易であるという特質は、鋼橋の本質的な強みである。軽量かつねばりのあることは耐震性の面で当然有利であり、震災経験を活かしてさらに改善の方向に向かっている。

豊かな信頼性、品質の安定性、それらに比較した場合の価格の安さなど、鋼材のもつ利点は大きい。21世紀の鋼橋は合成構造・複合構造の時代になろうが、そうした形をとりながら鋼構造は多用されていくと考える。強化プラスチック材の橋梁への試用はすでに始まっていて、イギリス・アメリカ・デンマークなどで、すべてプラスチック製の歩行者用斜張橋が誕生するなど、開発気運が活発化しているが、鋼構造に競合できる時代はまだまだ先のことであろう。

(1997年9月8日受付)