

パラダイム・シフトとしてのトゥルノン橋の誕生* *The Birth of Tournon Bridge as a Paradim Shift**

小林 一郎**

*By Ichiro KOBAYASHI***

1. はじめに

マルク・スガン(Marc Seguin) はフランス産業革命期の傑出した人物として、下記のような業績を残したとされている。

- ① フランスへの吊橋の導入 (1821-1825)
- ② 鉄線によるケーブルの発明 (1822-1825)
- ③ 水中コンクリート及び鉄筋コンクリートの先駆的な使用 (1824-1825)
- ④ 船舶交通用の高圧蒸気機関の建設 (1825-1828)
- ⑤ 多管式ボイラーの発明と製造 (1827-1828)
- ⑥ 機関車で牽引される鉄道のフランスへの導入 (1826-1828)
- ⑦ フランスにおける最初の機関車の製作 (1828-1835)
- ⑧ 貨車及び客車のための鉄道の経営 (1830 年以降)

もちろん、これらは弟たちとの共同経営による幾つかのスガン社の業績とも言えるが、すべてのアイデアの源がマルクであり、指導者としてすべての事業の運営を行ったのが彼であるのでここではマルク個人の業績とした。これらは、すべてローヌ・アルプス地方の地域開発に関連した交通体系の整備に関するものである。

なお、4 人の弟たちは、生涯スガン社の経営に参画しているが、それぞれの才能によって、大体の役割分担が決まっていたようである。1824 年のトゥルノン橋着工の時点で、長男マルクは 38

才、次男カミーユ(Camille)は 31 才で、金銭感覚に優れ、主に経理を担当した。三男ジュール(Jules)は 28 才で、工学的才能に恵まれ、後に独立し、吊橋の設計・施工のためのスガン社を起こし、約 40 橋の吊り橋の建設に関係した。1831 年にスイスのフリブール(Fribourg)でシャレー(Chaley)が、当時世界最大スパン 271m のスガン・タイプ吊橋の建設に成功するが、彼はジュールの会社の技術者であった。1825 年以降で「吊橋技術者のスガン」といえばジュールのことを指すことが多い。このため、最近まで、吊橋に関する技術開発の多くはジュールによるとする説があった。27 才の四男ポール(Paul)は、オーガナイザーとしての才能に優れ、トゥルノンの現場の監督をしていた。五男シャルル(Charles)は、26 才で、一家で唯一土木工学を修めていたため、実質的な土木工事関連の交渉に当たっていた。革命以前のフランスの社会は、大家族制で、家父長のもと家族全員で家業に従事するのが通例であったが、この一族のチームワークの良さは、アノネイでも評判であった。

近代橋梁史に直接関係のある①から③までの業績を一言で言えば、ワイヤーケーブルの吊橋を開発したということになる。ただし、これをどのように評価すれば良いのであろうか。吊橋という構造形式は太古の昔から世界各地で使用されているし、近代吊橋はすでに、イギリスにおいてチェーンケーブルによる形式が一般化されていた。1826 年トーマス・テルフォード(Thomas Telford)によって完成したメナイ橋を近代吊橋の始まりとする考えやジョン・ローブリング(John Roebling)のブルックリン橋の 1883 年の完成をもって、近代吊橋の形式が完成したとする見方もあるだろう。スガンの業績として、ワイヤーケーブルの発明は認めるが、橋梁構造としての

*Key Words: 土木史、吊橋、フランス、パラダイム・シフト

** 工博、熊本大学教授 工学部環境システム工学科
(熊本市黒髪 2 丁目 39-1、
TEL 096-342-3536、FAX 096-342-3507)

吊橋に新たな発明などなかったとする意見もないではない。土木技術史において、何をもって「始まり」とするかは案外と難しい問題である。

さて、本論にはいる前に、「発明」とは何か、について考えたい。中島は「発明プロセスの文脈主義的再構成」という副題の小論の中で、発明を「ある人工物を、しかるべき文脈で実用化すること」という基準から捉えることを提案している。つまり、単に無から何かを発明するだけでなく、「既存のものを他の文脈に置き換えることで達成される」種類の発明が存在しているはずであるし、そのような観点で科学史を捉え直すことの重要性を指摘している²⁾。

ここでは、上記のような種類の発明を「パラダイム・シフト型の発明」と呼ぶこととする。さらに、スガンの吊橋を土木技術の開発におけるパラダイム・シフト型の発明の一典型としてとらえ、再度その詳細を検討することとする。その際、上部工については、ナヴィエ(Claude Navier)の「吊橋に関する覚え書き」^{3),4)}とスガンの「鉄線(fils de fer)の橋について」^{5),6)}という、初期のフランスの吊橋に関する二大文献を読み比べながら、両者のワイヤーケーブル吊橋に関する考え方の違いを振り返る。なお、本論文は著者等の3つの論文^{1),7),8)}を基に再構成したものである。

2. 吊橋建設までのマルク・スガン¹⁾

フランス革命前の地方の商業主の子弟としては一般的なことであったが、マルクは、家庭内で初等教育を受けた。その後、パリで評判の高いサント＝バルブ中学へ通った。しかしそれは、約3年間のことで、高等の工学教育というには不完全で、二次的なものであった。父が革命の終り頃には、仕事を新しくするために、マルクを必要としたため、1803年には、アノネイ(Annonay)に戻っている。パリ滞在中の彼の人格形成に大きな影響を与えたのは、当時、工芸学校の実践者であった大伯父ジョセフ・モンゴルフィエとの出会いであった。モンゴルフィエは熱気球の生みの親であり、すでに当時のフランスでは、名士であった。

アノネイに帰ってから、勤勉で自発的なマルク

の性格が、科学や技術に関する野心的な独学の計画を実行させる事になる。独学は主として、当時発行されていた雑誌・マニュアルの類の読書によってなされた。天与の才能が環境によって徐々に開花しはじめる。市内での読書会、科学や技術に対する関心を常に喚起する一家や町の間精神といったものがその背景にあった(図-1参照)。

1818年に27才で結婚するまでの十数年間、余暇を定期的な学習のために使う生活が続くが、この時期の終り頃、彼は書物から得た知識を確実なものにするために家の中に化学の研究室を作っている。店での仕事や知的生活とならんで、親戚や知人達の製紙工場へ通うことが、何よりの知的な刺激となっていた。そこは技術革新と工業化の宝庫であり、主として製紙関係のイギリスの新製品を見ることが出来た。

1815年、スガン社はその経営戦略を変更し、毛織物の販売のために製作をも行うこととした。この選択は、これまでスガン社が築いてきた製造業者との友好関係を自ら放棄することを意味し、財政・販売に関する組織を根本的に改革せざるを得なくなった。それまで、南仏ラングドック地方を主要な販路としていたが、アノネイ近郊のサン＝マルク(Saint-Marc)の工場の建設を決めたことによって、一家はパリ地方やベルギーといった



図-1 ローヌ川と周辺都市(著者作成)

北フランスへ技術情報を収集する旅をすることになる。以後、北フランスや英国への旅行が毎年のように行われることとなる。

この家族工場は、技術面の責任者であるマルクのもと、その後の2年間で大いに発展していく。サン＝マルク工場では、マルクを中心として、製品価格を低く抑えるために、効率良く糸を紡ぎ、織り、生地に仕上げるための機織機の改良がおこなわれた。

当時は機織り用の機械は必要な台数すべてを納入業者(例えば英国出身のパリの機械工 ジョン＝コリエ)から仕入れるのではなく、見本一台を購入し、それをもとに、自らが機械そのものを作っていかなければならなかった。このため工場内に、木工及び鉄工用の仕事場を造ったが、ここには、製紙工場で働いていたボイラーや機械関係の優秀な職人が集められた。

新たな事業展開の可能性を探し求めていたスガン社は、これ以降、毛織物の販売と並んで新たに能力を持った機織り機の製造・販売を手掛けることになる。さらにマルクは、工場内に機械類の動力エネルギーとなる水車の設置に関する重要なノウハウを手に入れた。1818年から22年の間、彼らの第一の目標は、ごく平凡な機織り機の製作であったが、第二の目標が実現されるようになると地方の技師としての「スガンの長男」の評判は徐々に広がっていった。これと平行して、化学に関する研究室がサン＝マルクの工場内に移設された。そこでマルクは、本格的な工業の研究室のスタイルをとるようになる。もちろんそれは直接的にはスガン社の染色技術に関する研究のためであったが、鉱物、金属、あるいは地域の企業のための様々な製品に関する化学分析も出来るものであった。

スガン一家によって英米流の実利的研究が始まり、砂糖のシロップ、リンゴの粉末や保存用の肉の乾燥法などがこの研究室を経て製品化されていった。しかし、経済的な面からは、ここの活動の中心はあくまで毛織物の製造と販売であった。兄弟によるいくつかの技術的な試みによって、販路は拡大しフランス南西部の広い範囲に及び、1820年代のはじめにはスイスのフランス語

圏まで達している。しかし、毛織物の商売は、競争の激化で厳しいものになっていった。特に市民層への綿製品の普及に直面すると、スガン社の経営は停滞し、発展はほとんど望めなくなった。唯一の成功は「紙」であった。彼らは製品を改良し、フランス市場でトップの品質を得、国外にも輸出出来るようになった。

3. 19世紀初頭のフランスにおける橋梁建設の限界

ルネッサンス以降、徐々に改善が加えられた石造橋の技術は、18世紀の後半に、特にフランスのパロネ(J-R Perronet)と土木大学出身の技術者によってその全盛期を迎えた。たとえば、半円のアーチにおいてはサグ・スパン比は1/2となるが、ヌムールのロワニユ川の石橋では1/16となり、ほとんど桁橋と言えるほどに扁平なものになった。

ただし、フランス革命とその後の政治的混乱によって、1815年のナポレオン戦争終結の時点で、ルイ王朝時代に土木技師団によって建設された道路網の50%は維持管理されないまま放置され、多くの橋梁が破壊されていた。また、戦勝国への賠償金の支払いはフランスの戦後復興の大きな重荷であった。王政復古時代の1820年代になって、それまで建設が中止されていた運河網の再建を優先する法令が出され、フランスにおける交通革命が始まった。しかし、これは、起伏に富むローヌ炭田地帯の交通事情を根本的に改善するものとはならなかった。また、大都市近郊の長大橋梁に関しては、依然として石橋が多く、たとえば、1822年にはボルドーのピエール橋(全長500m)が完成している⁹⁾。このような情勢の中、長スパンで安い橋梁の切り札として、吊橋がにわかに脚光を浴びた。

1821年と23年にはナヴィエのレポート(文献3))が出され、吊橋への関心に拍車をかけた。ナヴィエの著書はレポートの域を遥かに越えたもので、徹底した調査と彼自身が作成した吊橋に関する数学モデルの解析法が示されている。その内容は、第一部で、放物線形状のケーブルに対す

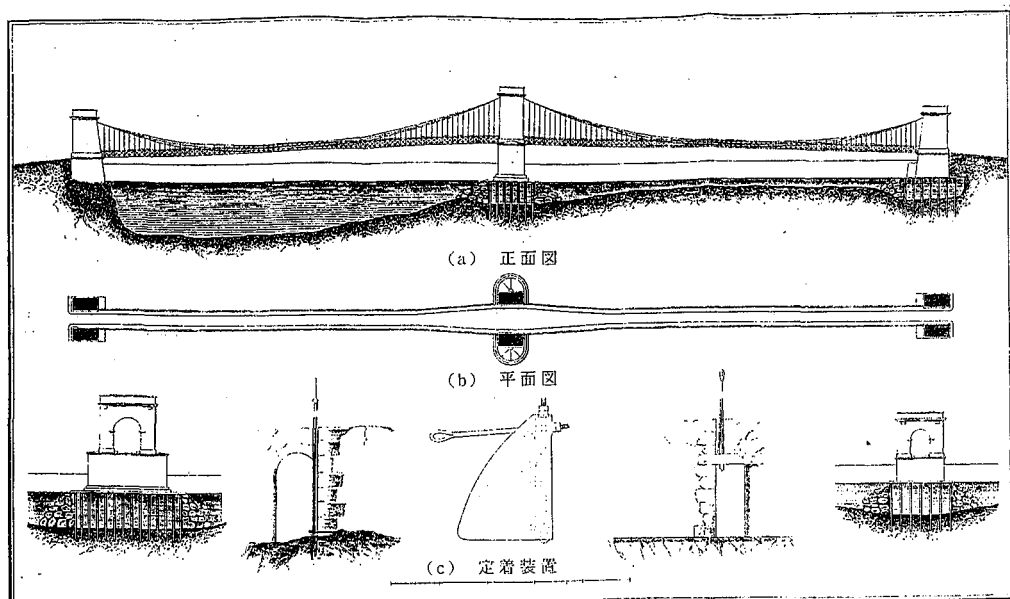


図-2 トウルノン橋の概要 (文献6) より引用)

る橋軸方向の任意点での力の釣合を微分方程式で示してある。更に第二部では、フーリエ級数を用いた偏微分方程式の解として、振動問題の解析を試みている。これは、橋梁の全体構造の解析法を数学的、演繹的手法で示した最初のものである。

ただし、フランスで最初の近代吊橋は1811年に銀行家のドゥレセルが自宅と砂糖の精製工場を結ぶために架けた私用のもので、スパン52mのチェーンと鉄線を併用したものであった。ワイヤーケーブルの使用が一般化するまでは、鉄の板を束ねてケーブルにしたものやチェーンの代わりに鉄棒を用いたものなど色々な試みがなされている。また、ナヴィエのアンヴァリッド橋は1824年の5月に建設が始まったが、実際に施工に当たった技術者の認識不足等があり完成に至っていない¹⁰⁾。

さて、ローヌ右岸にあるアノネイの商工業主がローヌ・アルプ地方で商業販路を拡大する際の最大の問題点が、左岸アルプス方面の交通路の確保であった。必要に迫られて、マルク等は、吊橋の建設とその営業権の取得を国に申請することとなる。

4. トウルノン橋の概要

図-2は文献6)に示されたトウルノン橋の概要を示したものである。ローヌ川中流のタン(Tain)とトウルノン(Tournon)を結ぶ各89mの2径間の吊橋である。写真-1は第1トウルノン橋と第2トウルノン橋(手前)で、トウルノン側から吊橋を見ている。第2橋は1847年に完成したが、これは完成直後から第1橋の桁下高が十分でなく船舶の航行に支障をきたしたことでと拡張が原因で建設された。第1橋はこの時点で桁の高さが、2m以上嵩上げされ、歩道橋として使用された。初期のスガン・タイプの吊橋の特徴のひとつに、一車線の幅員で、中央の橋脚上に車の離合出来る空間を設けていることが挙げられる。これらの橋のいくつかは、拡張計画のなかで廃橋となっている¹¹⁾。

なお、本橋(実際には嵩上げ後の橋)はフランスにおいて歴史的記念物¹²⁾に指定されていたが1965年に大規模船舶の航行に伴う河道の改修計画によって廃橋となった。メインケーブル(写真-2)や高欄の一部はトウルノンの郷土博物館に展示されている。

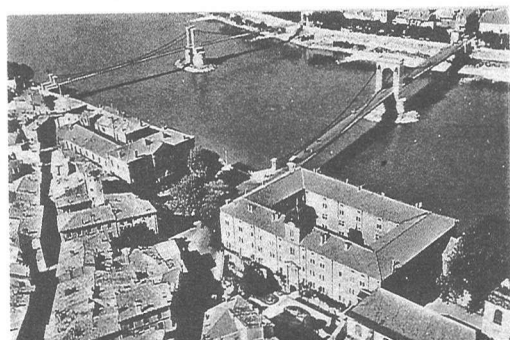


写真-1 トゥルノン橋（絵はがきより）

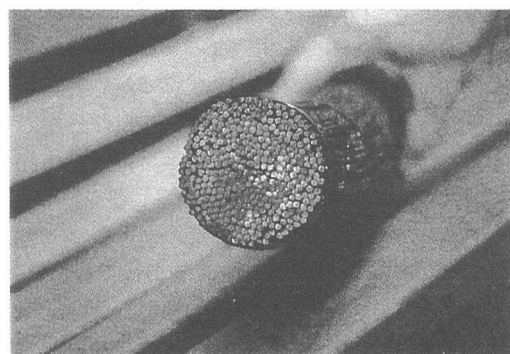


写真-2 ケーブルの断面（著者撮影）

また、スガン兄弟は本橋の工事に先だって、歩行者用の実験橋を、1822年にアノネイ近郊のサン＝マルクの自社工場に沿って流れるカンス川に、1824年にドローーム県のサン＝ヴァリエのガロール川に架けている。これらの実験橋より得た情報からいくつかの改善がなされた。たとえば、後述するように、トゥルノン橋には補剛桁が用いられることとなった。また、1823年のデュフル(Defour)によるジュネーブの吊橋設計にはマルクのアイディアが多く取り入れられている。

5. ワイヤークーブルの選択

ワイヤークーブルのアイディアは、直接的にはマルクのそれまでのロープに関する知識から出ていると思われる。初めは麻等の自然繊維を用いたものが試みられ、次に細い鉄線を束ねて使うことが検討された。ただし、ロープの使用はローヌ地方では、日常的なものであった。流れの速いローヌ川を船で遡るには、強力なロープで岸から曳航する必要があったが、これはごく当たり前のこと

であった。たとえば、荷を満載した4連の平底船を引くには40頭以上の馬が必要であり、これに用いるロープは長さが4～500mのものが用いられた。更に、麻等の自然繊維を用いたロープを用いる橋に関しては、フランス・アルプス地方やスイスにおいて、フランス軍の軍事技術者(Military Engineer)が仮設橋梁としてワイヤー・ブリッジ・タイプのものや少数の歩兵の渡河用には3本ロープ式の吊橋を盛んに用いたが、これはルネッサンス以降の手法である。

さらに、直接的にワイヤークーブルの開発をしなければならなかった要因は、高品質のアイバーの製作がフランスでは困難であったことによる。鉄製品の技術はイギリスと比べるとかなり遅れていた。また、すべての部材をイギリスから直接輸入することは、当時のフランス政府の国内産業保護政策のため不可能であった。一方で、鉄線は比較的安価で高品質のものが手に入る状況であった。

1821年から22年の冬にかけて、マルクは土木出身のプラニョル(Plagniol)の協力を得て、吊橋の計画案を立てるが、ここでは、既にワイヤークーブルが用いられることになっている。1821年12月8日号の世界報知新聞(Le Moniteur)で、マルクは、フィラデルフィア近郊のスクールキル川で細くて長い歩道橋の建設に、それぞれ2本のケーブル(真鍮製)とワイヤーが用いられたことを知り、自らもワイヤークーブルを用いることを最終的に決断したようである。1822年2月には、カンス川の実験橋において、1.2ミリの鉄線8本からなるケーブル6本が使用された。

ケーブルの製作はアノネイ郊外のスガン社のサン＝マルクの工場で行われた。そこには、工作用の機械や小規模の溶鉱炉を備えた鍛冶場があり、化学の研究室も併設されていた。はじめに、工場で弟のポールとともにマルクが鉄線の強度試験、計測、データ整理を行った。ケーブルにおいても同様の実験が行われ詳細なデータが得られた。次いで、ポールがケーブルの製作を担当した。他の商品同様に鉄線の注文を行うのは兄弟の次男であるカミーユの仕事であった。

鉄線の製作は少なくとも8ヶ所の工場で行われ、スガン社に納入された。それらの内の何割かは、以前からスガン社と取引のあったリヨンの鉄製品を扱う商人から買い取ったが、それらの品質は極めて良かったようである。複数の会社の製品にバラツキのあることが危惧されたため、各社の製品について試験が行われた。結果的にはそのバラツキはほとんどなく、マルクらは、それらの製品をすべて同一のものと見なしてよいと判断している。ただし、価格も含めて、取引先として最も望ましい会社の選択を行うために、組織的に試験用の鉄線の購入を始めたのは、1823年の2月のことであった。

当時、鉄線の生産地として、最も優れていたのは、北フランスのフランシュ＝コンテ地方であったが、1825年まで、ケーブル用の鉄線の購入先は一定していない。筆者らの推定によれば、1825年から31年まで18番鉄線(直径3mm)が500kg購入された。このうちにはフランシュ＝コンテ地方の5社が含まれている。恐らく、当時のフランスでは最良の鉄線が用いられたものと考えられる。吊橋のワイヤーケーブルへの鉄線の使用は初めてではなかったが、スガン社の突然の大量購入の希望に、多少の在庫があった所も含めて、供給が追いつかなかったようである。このため、1824年冬にはカミーユがフランシュ＝コンテ地方を訪れているし、恐らく、マルクも1823年の英国旅行の帰途にこの地に立ち寄ったであろう¹³⁾。

実験の目的は各製鉄所に伝えられた。その後の実験結果に基づいて、詳細な技術的指示の記載された注文書が出された。「我々は鉄線を最も好ましい細さになるように望んでいる。鉄線を18番に達するまで、焼き鈍しせずに引き出してもらいたい」¹⁴⁾。

製作上の技術的要求については、はじめは良い結果が得られなかったばかりか、価格面でも、スガン社の望むレベルまでに引き下げられてはいなかった。その後、このような技術面での要求に答えることの出来る会社が数社現れてきた。たとえば、ムレ・ヴェーユオレイユ(Mouret Veillorille)は、「焼き鈍しせずに鉄線を引き出すこと」というスガン社の注文に十分の理解を示

した。1825年には、このような会社が大半の量の鉄線の供給者となっている¹⁵⁾。

鉄線の輸送は樽に入れて行われた。量や製作上の技術的な問題以外にマルク達を悩ませたのが、鉄線の長さであった。しばしば、彼らの注文よりも短いものが送られてきた。サン＝マルクの工場に着くと、鉄線はケーブル製作のための処理が施された。防錆のために、沸騰した亜麻仁油の中に入れられたが、これは、一酸化鉛で表面を覆うためである。3mmの鉄線は、力学的な理由¹⁶⁾によって選択されただけでなく、腐食防止のため、それ以上に細いものを用いない方が有利であるという判断によるものであった。オイル処理によって一酸化鉛と鉄の間に気泡が出来ることを防いだ。これは、各鉄線に塗られるニスの効果を高めるためのものであった¹⁷⁾。

メインケーブルの引張り強度の推定については、ナヴィエは公式発言を控えることによって、マルクの張力に関する実験に同意する立場を表明した。ここでも、外力と伸びの関係を求めたマルクの実験的アプローチが優れていることが示されていた¹⁸⁾。一方、ケーブルの酸化はスガン達にとって長い間心配の種であった。防錆対策は引張り強度の推定やメインケーブルの数学モデルといった問題以上に、ナヴィエの手になる土木局のレポートにおいて明瞭に批判の対象となっていた。ナヴィエを中心とする中央の技術者達のワイヤーケーブルに対する批判の大きな理由のひとつは、まさしく防錆の問題にあった。

いろいろの防錆法が試みられたが、決定的なものは見つけられなかったようである。ニスの塗られた鉄線は、順序よく並べられるように、2つの鑄鉄製の軸受けの間に巻き取っていった。ケーブルは鉄線によって規則的にバンドされ、現場で再びニスの上からタールが塗られた。

2つの軸受け間の距離は30mであった。この軸受けを抜き取り、同様の作業を繰り返せば、3本の30mケーブルが作られる。これらのケーブルをチェーンのように繋ぐことによって約90mの本橋のメインケーブルが完成された。1本の連続したケーブルでない点からみると、本橋は当時の英米式のチェーンケーブルの変種であったと

も考えられる。技術者は常に蓄積された過去の知恵を応用しながら、新しい構造を作り出していくものである¹⁹⁾。吊橋においても、歴史は後退しつつ未来に入っていく。

橋脚や橋台にケーブルを固定するための鑄鉄製の定着装置(図-2(c))はリヨンの鑄物工場に発注された。ロワール・エ・イゼール(Loire et Isere)という工場で、当時、この地方では最も優れたものであった²⁰⁾。スガンは、この部品の木型をリヨンに送っている。兄弟の一人ジュールはこの時期にリヨンに駐在し、デュフォ(Duphot)鑄物工場と協力し、スガン社が必要とする鑄鉄製品の製作の監督を行っていたので、木型の製作や部品の仕上げ等の仕事はスガン社にとっては容易なことであった。

建設の期間中、ケーブルに関連した細々とした部品はポールの指導の下、アノネイのスガン社の工房で製作された。そこは橋梁の現場とは独立した製作所であつたらしい。1822年から23年にかけて、紙製品に関連した機械の試作には、多くのレポートを書いたマルクであったが、今回は、ノートにも現場手帳にも部品の製作に関する細かい記述は見られない。このことから兄弟の間に完全な分業体制が出来上がっていたことがわかる。ポールは特にサン＝マルクにおいて技術面での主要な仕事を、カミーユは商業や金融面を担当していたし、1824年から25年の本橋の建設の時期、シャルルがスガン社の本来の業務である毛織物や製紙用のフェルトの商売を行っていた。

6. ケーブル構造に関する論議

マルクが吊橋に関して最初に示した独自性は、メインケーブルの長さや張力の決定であった²¹⁾。1820年の時点では、まだナヴィエの報告書は出ていない。彼は、イギリスの事例を参考に、メインケーブルの形状を懸垂線と仮定し、ケーブルの長さを求めている。次に床版の重量を等分布荷重として、ケーブルに載荷した場合の張力を力の多角形を用いて求めている。ケーブルの長さを図解法を用いて求めることは、当時のフランスではすでに一般的であったが、張力を求めることは稀で

あった。このことは、土木局の技術者に対して、彼の計画を説得力のあるものにした。

しかし、理論的研究は、マルクにとって関心の中心を占めるものではなく、数学は他の道具と同じく必要な時に一時的に用いるものであった。彼は、数値計算に関しても優れた天分を示していたが、実験を重視した。ナヴィエの理論計算にすら飽き足らず、ケーブルの長さの決定には模型を用いているが、その数は10を下らなかった。多少自嘲的なユーモアで「直接実験するのは最も簡単で有効な方法である!」と述べている²²⁾。

サグとスパンの関係もメインケーブルの形状を決定する際に重要なものであるが、マルクはこれを特に重視していた。「数値計算と実験」からサグ・スパン比として1/10から1/12を推奨しながらも経験に基づくものとして、「サグとスパンの間に存在すべき関係の正確なルールを与えることは、容易ではない。立地条件、橋の規模、橋台などに用いる材料をはじめ多くの条件によって、様々に変化する。」と述べている。トゥルノン橋ではケーブルの固定点間89mに対してサグ8m、つまりサグ・スパン比1/11が用いられている²³⁾。

さて、トゥルノン橋に関しては、次の3つの文献にメインケーブルの張力の推定に関する記述がある。

a. 1822年11月にトゥルノン橋の計画案の提出に関連して出されたのが「タン＝トゥルノン橋の覚え書き」²⁴⁾である。ここでは、一種の図解法が用いられている。

b. 文献5)は、1823年の鉄線の試験(後述)と秋のバリ行きの間(恐らく、夏の間)に書かれた。実際の出版されたのは翌年初めである。ここでは、結果的に、ナヴィエの式の近似式が用いられたことになる。

c. 文献6)はトゥルノン橋の完成後、1826年に出された。この中では、ケーブルのモデル化に当たってはいくつかの変更が行われている。最終的には、ナヴィエの式が用いられている。

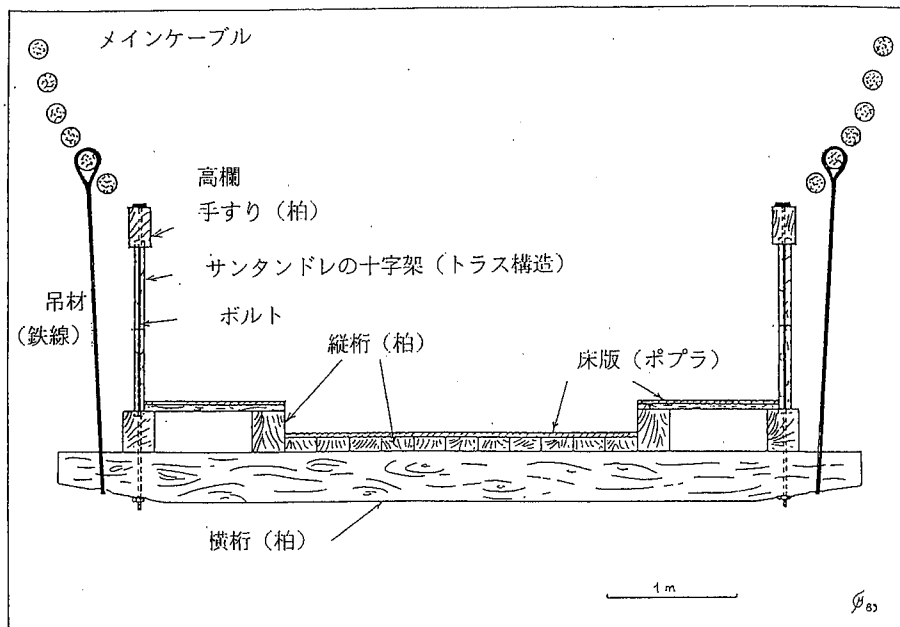


図-3 桁の断面図 (著者作成)

3つの解析法でトゥルノン橋のデータを用いた数値解析の結果を文献 8) に示したが、a.258tf, b.239tf, c.254tf (ナヴィエの式) とほぼ妥当な張力推定が行われている。

静的解析と並んで、ナヴィエを筆頭とする土木局の技術者が、懸念したのは①橋軸直角方向の風による橋の動揺と②馬車や歩行者による上下方向の振動に対する方策であった。技術者を納得させ得るような、明確に回答出来なければ、吊橋建設の許可はおりなかった。

マルクはローヌ渓谷における強風に対して水平方向への桁の揺れの対策として、はじめは耐風用のケーブルを設置すること考えていた。しかし、これは、早々に放棄された。ナヴィエのイギリスの吊橋のレポート (特にユニオン橋の例) には耐風ケーブルは効果無しと結論づけられていた。この、対応策として、マルクは2本のメインケーブルの間隔を桁よりも少し広げ、ハンガーを鉛直方向から数度傾けて設置することとした (図-3 参照)。これらの対策は有効で、トゥルノン橋においては、水平方向の振動は抑えられている。しかし、マルクが危惧したのは、むしろ、平行に配置したケーブル間の長さの違いからくる相互の摩

擦であった。多数の縦桁の採用もまた水平方向の振動を避けることに寄与した。

第二の問題は、より困難なものであった。歩行者による振動、あるいは嵐による強風時の振動によって生じるいわゆる「共振現象」である。ナヴィエは正弦曲線を用いて、吊橋の固有値を出しているが、それが、外部の要因によって共振する可能性については言及していない。ナヴィエは当時のイギリスの吊橋に関する事故のいくつかについて、その原因の特定を誤っているようである。一方、マルクは生活実感に即した直観から共振現象を理解していた。「橋の揺れを生じさせるような、全ての原因についてその結果を考える必要がある。激しい風や軍隊の歩行はイギリスの初期の吊橋が耐えなければならなかった最も厳しい試験であった」²⁰⁾と述懐している。マルクは、当時としては共振現象を正しく理解した数少ない技術者であった。

マルクの物理的な直観は、恐らく吊橋の実験観察から来ていると思われる。彼は、1821年から22年の冬にかけ、サン＝マルクの工場敷地内のカンス川に実験橋を架けている。また、トゥルノン橋建設の初期の協力者であるプラニョルも

1822年にショメラックのペイル川に吊橋を架けている。カンス川橋はアノネイ地方で評判となったが、数カ月後には安全上使用を中止せざるをえなくなり、その後取り壊された。当時、この吊橋を訪れた人々の最大の楽しみは橋を揺することであった。マルクの眼前で、実物大模型による共振実験が日々繰り返されていたのである。一方、ペイル川橋は嵐によって落橋したものと思われる。直接現場の調査を行ったにもかかわらず、マルクをはじめ協力者たちの誰もこの事故に注目しなかったらしく、原因についての考察は見あたらない²⁶⁾。

共振対策のもうひとつのアイデアは、1826年にスガン社のアドバイスの下に書かれたアルデッシュ県知事の手紙が全てを尽くしている。「数多くの人々が規則的に行進するために生じる結果（橋の揺れ）を防ぐために、本橋（トゥルノン）を渡るとき足並みを揃えることを止めるという警察当局の規則を軍当局が遵守されますようお願い致します」²⁷⁾。

いずれにしても、マルクの結論は桁の剛性を高めることであった。彼は次のように述べている。「吊橋の床版や梁の第一条件は、極力剛性を高くすることである」。「ただし、そのためには、各部材間の接合には十分の注意を払う必要がある」。

しかし、マルク自身は、高欄と床版の間を補強することは1823年の終わりまでは考えていなかった²⁸⁾。大工の棟梁のバルジョとの幾度かの議論を通して、徐々に形を表して来たのが「サン・タンドレの十字(croix de Saint-André)」の形を踏襲した高欄による補剛で、「ジュピターの矢(trait de Jupiter)」と呼ばれる木造建築の接合法で部材の接合が行われた。これも、中世以来の大工のギルド内で伝えられたものである。この高欄は、マルクによって1824年夏サン＝ヴァリエ(Saint-Vallier)のガロール(Galaure)川橋にはじめて用いられた。「大変固い手すりには剛性が高く、15人から20人が橋の上を歩いても、ほとんど振動を感じない様である。私は3人の弟達と歩調を合わせて歩いてみたが振動しなかった」。「建設に際して、床版の剛性を高めることに高欄が寄与するかという観点で考えた。ナヴィエ氏の定式を

用いて柔構造である場合のたわみを求めると500kgの馬が通過するとき、11cmとなるはずであるが、これがほとんど求められなかった」²⁹⁾。

この評価は恐らく楽観的なものであろう。しかし、30mの吊橋はマルクの方法の有効性を示していた。このアイデアの起源について、マルクは「アメリカでは、通常1/7のサグースパン比が用いられる。これは強度の点で優れているが、鉛直方向の振動に対しては不適当である。・・・しかし、この場合彼らは、床版を重くし、高欄を用いて剛性の向上を図っている」³⁰⁾としているが、1826年（トゥルノン橋完成の翌年）に遅ればせながら出されたこの本には、補剛桁の直接的なインスピレーションの源を示しているというよりも、自らの選択の正当性を示そうとしているように思われる。

いずれにしても、マルクの振動対策は構造の剛性の向上であり、桁の重さを上げることで橋のフォルムを変更することでもなかった。彼は、他の人のアイデアを多く取り入れているが、それらを再分類し、ひとつの調和した技術として構成し直した。

ナヴィエは著書の中で振動問題に関連した2つの事項に取り組んでいる。ひとつは重量の重い馬車の通過に伴う床版の変形であり、もうひとつはそれによって生じるメインケーブルの振動である。1825年8月のトゥルノン橋の載荷実験において、スガン社の軽量桁は変形しやすいものであることが示された。弾性に富むワイヤーケーブルは、荷重によって懸垂線に変形したが、桁等に損傷はみられなかった。載荷実験においては、合計69トンの分布荷重と馬車による5トンの集中荷重がかけられ、桁中央でのたわみは32.5cmに達している。

結果は、この規模の十分に補剛された吊橋に対して、マルク自身が予想していたたわみを上まわるものであった。しかし、馬車の通過時のたわみ易さは、メインケーブルのたわみに木製桁のたわみが連動しているためであり、むしろ、後にスガン・タイプの吊橋の動的特性のメリットと考えられたものであった。これらは、1823年春の模型実験でも確かめられていたことである。

7. 基礎工と橋門建設における技術革新

スガン・タイプの吊橋の特徴のひとつは、メインケーブルの定着方法にある。隣りあう橋門の上に図-2に示した一組の定着装置を配置し、それで長さの調整を行い、定着装置は別に用意された橋門に沿って鉛直下方に緊張された定着用のケーブルで、橋門基部に定着される。従って、トゥルノン橋は構造上は2径間連続ではなく、1径間の吊橋が2連ある形式である。

スガン兄弟は吊橋の長さを 100m 以内と想定していたので、たとえば、300m の幅の川には3連から4連の吊橋を架ければいいことになる。このような形式であれば、どのような長さの川であっても、橋脚さえ施工可能であれば、吊橋の建設は可能となる。マルクにとって、吊橋とは渓谷に1径間で架かっているものではなく、都市部の交通の要衝に架けるものであった。その意味で、このような形式は合理的なものと言える。

更に、トゥルノンにおいてこの方式を選択しなければならなかった要因は、トゥルノン側の地形にある。トゥルノン側は切り立った花崗岩の岩山がローヌ川に迫っており、アンカレッジを設ける

余地がなかった。このため、マッシブな橋門そのものをアンカレッジとして利用するしかなかった。このような幾つかの理由から、橋門-橋脚一体構造がスガン・タイプの橋の最も重要な構造となる。

以下に、トゥルノン橋の建設の経過の概要を述べる。本橋の架設地点は、トゥルノンとタン間でローヌ川が最も狭くなる地点が選ばれた。しかし、右岸側の水面すれすれに障害となる花崗石があったためにトゥルノン側の橋台は位置を移動させることとなった。しかし、この選択が本橋の工事の風景を平凡なもの（つまり、中世から続く伝統的な石工の世界の風景）から今日的なものに一変させる契機となった。特にローヌの流れの速い場所での仕事に悩まされていたスガン兄弟は水中コンクリートを用いた基礎建設の可能性を検討し始めた。ここでは兩岸の工事を橋台工事、河川中央の工事を橋脚工事と呼ぶ。

矢板締切りの止水工は困難な仕事だったようである。締切り内の用地が発破によって作られたが、それは深さ 1 m に及んだ。1824 年 8 月はじめ、橋台の最初の上張り用の石材が設置された。この石を基礎に固定するために長さ 30 cm の鉄製の繋ぎ材が使用されている。トゥルノン側では

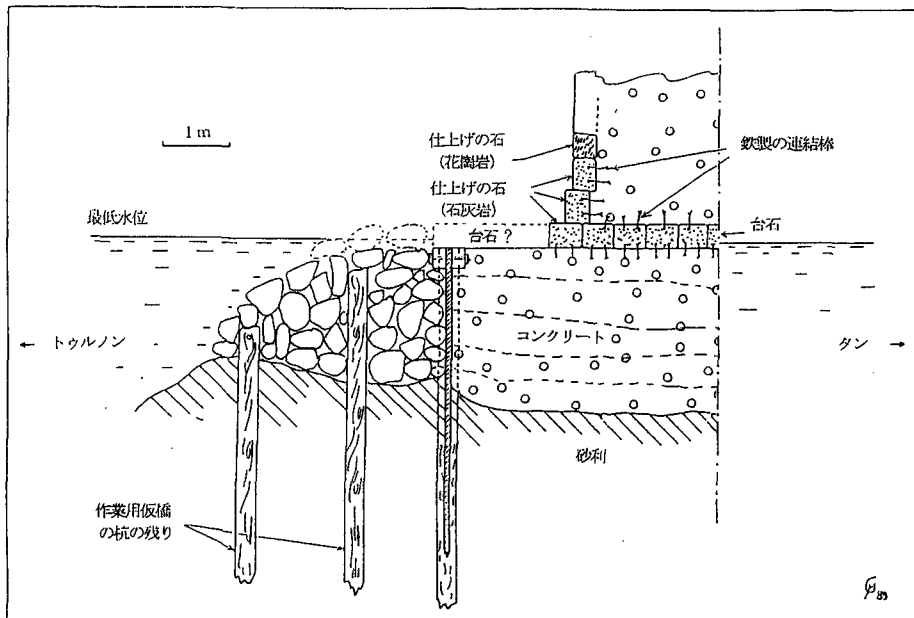


図-4 タン＝トゥルノン橋の橋脚の断面図（著者作成）

石のブロックと岩、あるいは、水平に置いた長さ 1.8 m の繋ぎの石と内部の石材とを繋ぐのに用いられた。

鉄の繋ぎ材は、はじめは上張り用の石材の保持のために用いられたが、台石の均一的な強化にも効果を発揮した。繋ぎ材は水平方向だけでなく、基底の岩と橋台を繋ぐために鉛直方向へも用いられた。水平の鉄の棒は橋台の基底の岩の中に鉛直に接着された棒で補強されていた（図-4 参照）。

8月8日、タン側の杭は連結され、矢板締切りのための板杭の打ち込みが始まった。杭の連結、杭頭の切断、板杭の設置、浚渫という一連の工事は8月の終わりまで続けられた。9月1日には水中コンクリートの最初のバッチを打つ事が出来た。

流れが強く、水位がしばしば急変し、さらに河床の砂利は透水性の高い場所であったため、矢板締切りの止水は、この現場での最大の困難のひとつとなった。潜水ケーソン (le caisson immergé : 底のないオープンケーソンを直接川底に打ち込む工法) といった中小河川に用いられた旧来の方法³¹⁾はローヌでは通用しなかった。解決策として、全く新しい方法ではなかったが、直接水中コンクリートを水面下の矢板締切り内に打設する事になった。ヴィカ (Vicat) の水硬性石灰の使用 (例えば 1822 年のスイヤックのドルドーニュ橋の基礎工事) は古くから知られたローマンセメントのテクニックを多くの技術者に再認識させることとなった³²⁾。

一方、元来この地方では程度の差はあっても、石灰は水硬性を持っていたし、人々はそれをよく利用していた。スガン兄弟にとって最も幸運であったことは、ラファルジュ³³⁾の会社のターユ産の石灰を入手出来たことである。この時期、マルクは水中での立方体の供試体の性状の試験や破壊試験に専心している。この地方のもので、試験された石灰は皆水硬性のあるものであったが、特にターユ産は結果がよかった³⁴⁾。破壊試験の方は際だった特徴が得られなかったのか、マルクは何のコメントも残していない。ただし、コンクリートの基礎と石積みの構造物には 1825 年の試験

時もその後も問題は起きていない。フランス国内のナヴィエやケノの吊橋の施工事例には水硬性コンクリートの使用の記録はない。石灰石はローヌを通してタンまで運ばれ、そこで加工された。陸路または水路による運搬あるいは焼き入れの加工は地方の小さな会社に一定価格で委託されていた。タンやトゥルノンの採石場からの砂利の供給も同様であった。ただし、これらの外部への委託製品については均質のものが得られるよう、購入時にスガン社で厳格な検査が行われた。

コンクリートの生産、管理、さらには、9月1日から開始された打設等によって、現場の実員の補充が必要となった。すべてを手仕事で行っていた最初の段階ではスガン兄弟は、コンクリート関係に 108 人を配属したが、内 60 人は打設のためであった。9月11日に完成したタン側の橋台の工事を通して、実員は 200 人で、その内 150 から 170 人は労務者であった。水中コンクリートの必要量は橋脚で 340m³、タン側の橋台で 180m³ と見積もられていたが、これは多めの見積りのように思われる。また、マルクは、日産 24m³ と試算したが、この方法を用いる限り、始めは 10m³ 程度で、最大でも 15m³ であった³⁵⁾。

異なる文書の中でコンクリートの配合法のいくつかが示されているが、それらの間には大きな違いはない。たとえば、生石灰の塊 2 籠に対して砂 3 籠と如雨露 3 杯の水といった具合である。砂の中に入れた石灰は水で湿らせた後、混ぜられた。このようにして出来た「山」は砂で覆って一時間放置された。その後、ひと「山」につき 3、4 人が鉄具のついた突き棒で押しつぶしながら、混ぜていった。準備が出来ると採石場のくず石が砂利として混ぜられた。コンクリート 1 立米当たりの原価は 320kg の生石灰に対して 0.5m³ の砂と 0.67m³ の砂利から計算されたが、当初の予想では 1 立米当たり 32.5 フランで、その内石灰が 14.5 フラン、労賃が 6 フランであった。労賃はすぐに 10 フランになり、その後材料費に近いものになっていった。

打設は上流側から 30 から 40cm の厚さで何層かに分けて行われた。こうすれば、コンクリートの層の均質性を保ち、河床の砂や泥などの堆積物

を河の流れで取り除くことが出来るのである。橋脚の基礎は深さ 2.4m になる予定であった。まだ固まらないコンクリートの層の表面に石(図-4の台石)が置かれ、長い突き棒で固められた。表面の凹凸が次の層との付着力を強めた。

1824 年 9 月 1 日、タン側の橋台で最初の打設実験が行われた。その頃にはコンクリートの生産は日産 11m³ に達していたが、第一層を打ち終わるのに 6 日が必要であった。第二層の打設がはじまった 9 月 7 日には天候が悪化し、ローヌの水位が上昇した。それにもかかわらず、橋脚のための浚渫とコンクリートの打設の間に矢板を支える石積みの工事などが継続して行われた。12 時間で固まると見積もられていたコンクリートの硬化度の検査も行われたが、打設 8 時間後に、屈強な作業員が全力で鉄のシャベルを突き刺したが、4、5 cm 貫入しただけで、しかも引き抜くのは容易ではなかった。

このように順調に行われた工事の状況を一変させたのが、1824 年 11 月の大洪水であった。マルク自ら「初めての落胆」と書き記した洪水による現場の破損³⁶⁾が、彼らの事業のやり方を根本から変更する契機となった。このことが、結果的に、マルクの技術に対する人々の全般的な信頼を得る要因となった。

洪水後の現場の混乱の收拾と並行して、マルクは仕事の方法と現場の組織についての批判的考察に取り組む。この時期に浚渫、釣り鐘型潜水機、使用機材、施工法、そして特にコンクリートの生産法について、色々の覚え書きが書かれた。実際のコンクリート生産能力は、24m³の試算に対して 15 m³と低かった。労働者を大量に使うことで、ようやく 20 m³になった。労働者の賃金ははじめの予定より上昇していたし、現場の実働可能数から考えると、これ以上の生産性の向上は望み薄であった。ローヌの水位の変動の激しさに対してコンクリートの打設時間は長過ぎた。経済的問題よりも技術的問題で壁に直面していた。

12 月 15 日のマルクの現場手帳には、2つの基本的な決定事項が記載されている。その第一は、作業用の橋梁の放棄である。この橋は二度と再び

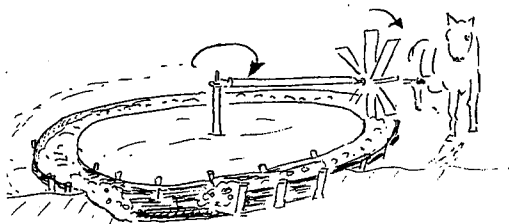


図-5 コンクリートミキサー (著者作成)

造られることはなかった。大半の杭は洪水に抵抗したが、矢板に近すぎるし、釣り鐘の使用には邪魔になると考えられた。また、2 艘の運搬船が連結され、杭に係留して作業用の橋の代用として使用された。

次いで、水平に回転するコンクリート・ミキサーが作られたが、図-5 のようなものであったと思われる。それは木製の回転する溝で、4 分の 3 の高さまで土中に埋められ、その中で鉛直方向に回転する車がコンクリートを攪拌する。半径 2m のミキサーと攪拌用の車は、動物によって動かされていた。このミキサーの生産能力は 1 回につき 1.2~1.5m³が見込まれていた。この機械について、マルクに何らかの予備知識があったかどうかはわからないが、ひとつの難局を乗り越える、彼の独創的な技術能力を示していると言える。11 月の洪水がコンクリートの生産についても新しい方法を作り出すことになった。

あまり好条件とは言えない冬場であり、水位は依然として高いままであったが、とにかく工事は再開された。12 月 20 日からは再び矢板の建設が始められた。1 月に入ると氷結が始まり、遂にローヌの水位が下がり始め、浚渫用のバケット 2 台が同時に使われた。18 日には、はじめてコンクリート・ミキサーの実験が行われ、良好な結果が得られた。1 回にほぼ 1 m³で、その日の合計は 15 m³に達し、その後すぐに日産 25 m³を達成するようになる。ひとつの壁は乗り越えられた。「コンクリート用の機械は素晴らしい働きである。40 人分の仕事をする」³⁷⁾と記されている。

1 月 25 日から、フレッシュ・コンクリートの上に最初の台石が置かれたが、ローヌの水位は最低水位から 30cm 上がっているだけであった。2 月 3 日には橋脚のコンクリート打設は完了した。

現場手帳に記された「12月15日のルール」は逆境を前にしたマルクの意志と新しい技術の蓄積のはじまりを象徴している。これは現代的な企業で行われているレベルの現場の改良であった。つまり、労働力の削減、技術革新による生産量の増大、現場での困難を乗り越えるための機械の開発、現場管理の合理化への努力等である。これらの事柄を個々に見ると、それらは必ずしもスガン兄弟にとって新しいことではなかった。それらのことは明文化されてはいないが、長年にわたるスガン社の特徴であった。しかし、この現場でのいくつかの出来事が、そのような姿勢をふるいたたせより強固なものとした。施工の速さも、この会社の特徴である。18ヶ月の工期は11月の洪水にもかかわらず契約通りに履行された。

「スガンの吊橋」は多くの労働力と長い期間に渡る建設という伝統的な石造橋の建設現場の常識を打ち破った。石材や木工といった中世以来の職能集団を中心とした複雑な命令系統を持った建設現場を、マルクという現場監督が全権を持つ

て、意志決定を行うという近代的なものに変えてしまった。このこともまた、以後のスガン社の吊橋建設の常識となった。

次に橋門の建設がはじまる(図-6)。橋台後方の基礎内でメインケーブルを定着する方法が検討されていたが、トゥルノン側の橋台で多少滑動に対する不安があることが述べられている。そこで、橋台上に石造の門を建てることにしたが、その転倒に関する実験的研究が1824年の2月から4月にかけて行われている。メインケーブルにより橋門上部作用する力による橋軸方向への転倒だけでなく洪水時の水圧に対する安定性も問題にしている。マルクは橋門自体が曲げにより破壊することはないと考えていたが、曲げによるひび割れとその対策に腐心している³⁸⁾。

アルル近郊のフルク橋(現存する最古のスガン・タイプ吊橋)は、歴史的記念物に登録され、現在も供用中であるが、橋門に関してのひび割れ等の不都合は生じていないようである。ただし、橋門は後に、より細い橋門や門柱で橋台に力を伝達する構造へと変化していく。しかし、この時点ではまだ、橋台とケーブル定着装置の連成による力学的挙動はマルクとナヴィエの議論の中心的なテーマのひとつで、「トゥルノン橋に関する報告書」の中でも、ナヴィエはマルクの解決策に対してより厳密な解答を求めている。

橋台と橋門を均質につくるためには、橋台で用いたのと同じ手法が用いられた。すなわち、石積み内部にはコンクリートを使用し、さらに補強の鉄棒が用いられた。橋門の場合、マルクが配慮したのは、橋門基部での曲げによるひび割れであり、この対策として鉄棒の設置が決められた³⁹⁾。

基礎工のときと同じく、基礎の石造部と3つの橋門の柱の基部との間の付着を確実なものとするため、鉄棒が用いられた。鉄棒はさらに柱の内部の最上部まで使用され、門上部のアーチ部にも水平方向に入れられた。「各門柱に4本ずつの鉄棒が使われた。それは、床版のレベルの下方0.5mから門のアーチの付け根の高さまでのあいだである」⁴⁰⁾。

この構造は鉄筋コンクリートの先駆けを思わせるものであるが、「土や石材で十分用を足す構

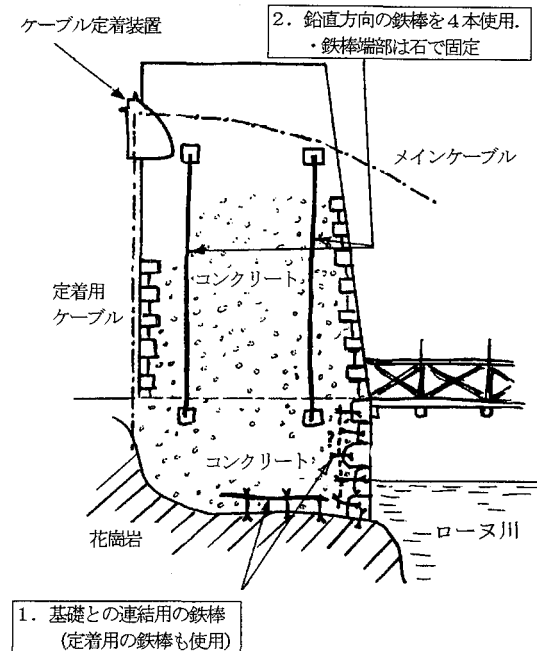


図-6 橋門の配筋予想図 (著者作成)

造の場合、その中に鉄のような高価なものを入れる必要ない」とするナヴィエの影響下にあった当時の土木技術者には否定的なものであった⁴¹⁾。その後、鉄筋コンクリートの研究は19世紀末まで待たなければならなかった。

結果的にマッシブな橋台を用いることとなるもうひとつの技術的特長は、橋門上でのメインケーブルの連結法である。橋門上で引張力を受け止めるために橋門上の石造部に定着装置を設ける必要があったが、この装置の構造そのものが、橋梁の全体構造を決定するキーポイントであった。図-1(c)(定着装置)に示すような铸铁製の連結装置で直交する2本のボルトからなるもので、ケーブルの長さを調整出来るようになっていた。メインケーブルを水平方向のボルトで橋門上に定着すると同時に、橋脚基部に固定する鉛直方向の定着用ケーブルを橋門上で鉛直方向のボルトによって定着装置に接続する。この装置は橋門上の圧縮力の配分に最適な形状をしていたが、それは数学的に求められたものではなく、ひとえに経験的なアプローチから導かれたものであった。

スガン兄弟は木の場合と同じく、石の強度についても丁寧に調べ、その結果を記録している。鉄線の場合にも発揮された材料特性に関する関心は、スガン家の人々に共通する特質であり、特に技術者であり企業家であるマルクにおいては顕著である。工学的な問題点を正確に分析しようとする時、彼らはいつも科学的であり、特に組織的で経験的であった。

8. 桁の剛性向上への木材の使用

最初の案と最終的に建設された床組の間には重要な進歩の跡を見ることが出来る⁴²⁾。それは基礎工の場合と異なりマルクの思考の賜であった。彼は、施工の始まるまで、一人で十分の時間をかけてこれらの問題に取り組んだ。さらに、木材の強度に関する詳細な情報を探している。当時、中小河川はもとより、ローヌ川においても木橋が最も多く架けられていた⁴³⁾。このため、木の床組に関する技術は飛躍的に発展していたが、吊橋のようにたわみ易い構造における木製の高欄や

床組の挙動の検討は新たに解決されなければならない問題であった。

トゥルノン橋の建設に至るまでのマルクの床組や高欄の設計を振り返ると、それらは初めから明確な形が決められていたのではなく、徐々にその形式が完成していったことがわかる。

図-7に高欄の変遷を示し、それぞれの概要を次に述べる。

a. トウルノン橋(1822年の計画案)

鉄のフェンスで最上部の手すりには細いケーブルを用いている。縦桁のみが剛性を持つ。

b. ジュネーヴの吊橋(1822年計画、23年完成)

この橋はマルクとデュフルによって計画された歩道橋で、施工は後者が行った。ここでは、縦桁が2本配置されている。

c. トウルノン橋(1823年の設計案)

サン＝タンドレの十字と垂直材にボルト・ナットを用いたトラス形式を初めて提案した。

d. トウルノン橋(1825年完成)

トラスの上下弦材の機能が明確に意識され、垂直材のボルトは横桁と高欄を一体化させ、張力が導入されている。

図-8には床組の変遷を示し、その概要を述べる。

a. カンス川橋(歩道橋、1822年完成)

床組は典型的な木橋のものであり、横桁の上に縦方向の床版が固定されている。さらに、それらを上方の2本の主ケーブルと横桁の下方に配置された4本のケーブルで支えている。補剛トラスはまだ考えられていない。

b. ジュネーヴの吊橋(1822計画、23年完成)

この橋はマルクとデュフルによって計画され、施工は後者が行った。大きくなった横桁の下と上に縦桁が配置され剛性の向上をはかった。

c. トウルノン橋(初期の案、1822年計画)

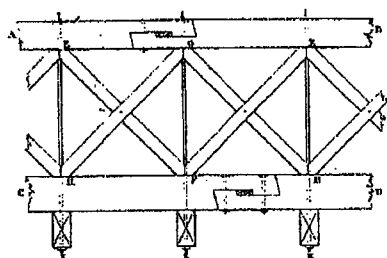
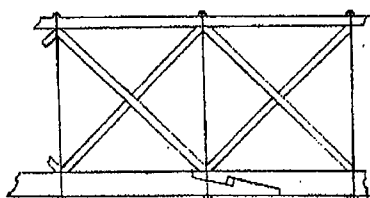
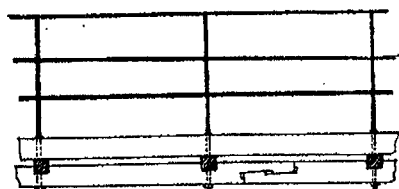
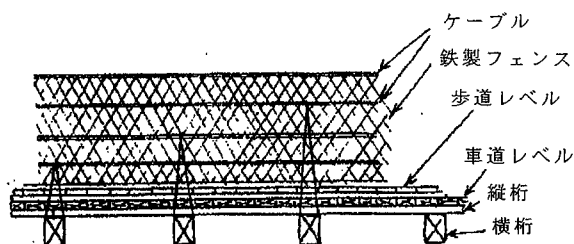


図-7 高欄の変遷図 (著者作成)

木製の床版の下に連続した縦方向の梁を配置し、さらにマルクの吊橋の中では補剛トラスのアイデアが初めて登場した。

d. ガロール橋 (歩道橋、1824 年完成)

マルクの吊橋の中で、初めて高欄に補剛トラスが用いられた。トラスには鉛直方向に鉄製のボルトが用いられている。

e. トウルノン橋 (最終案、1825 年完成)

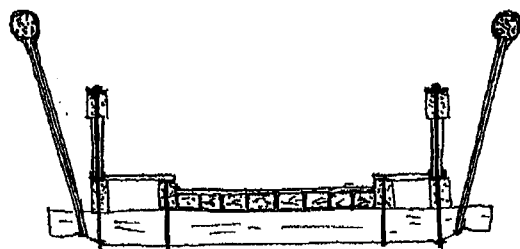
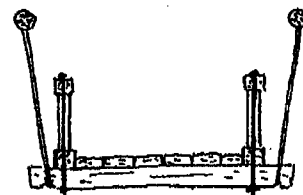
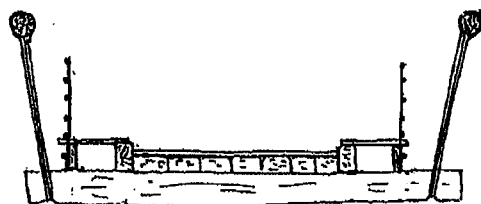
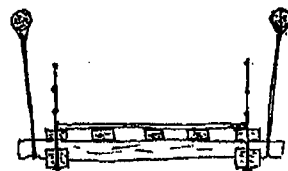
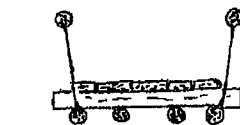


図-8 床組の変遷図 (著者作成)

メインケーブルの場合と同じくナヴィエとの論争によって、マルクの直観的・現実的アイデアが熟していったものと思われる。ナヴィエは動揺や振動の問題を数学的に解析することの重要性には同意していた。この問題は二人にとって吊橋における最も重要かつ困難な問題であるという共通の認識があったが、興味深いことには、二人の思考法とそれから得られた結論は全く対照的なものであった。

ナヴィエは理論上の予測から「床組が重ければ、

それだけ振動は抑えられる」とし、重量桁モデルを推奨した。実際に彼の設計したアンヴァリッド橋は、鑄鉄の床版が用いられることになっていたが、土木局によって拒否され、より弾性のある木製の床版に替えられた⁴⁴⁾。この点に関してはマルクの考えに傾いた土木局の技術者の判断にナヴィエが従わされたと言ってよい。

これに対してマルクは全く反対の結論に達した。彼は完全に木製の極力軽い桁を選んだ。ワイヤーケーブルの場合と同じく、床組においても、彼の選択はいくつかの異なる理由によるが、それらは、決して矛盾してはいない。第一の理由は、経済的なものである。スガン社としては、まず何よりも最も安い案を採用する必要があった。第二の理由は、企業としての技術力のレベルの問題である。ローヌ地方はフランスの中でも先進的な地域ではあったが、労働力の質、特に、鑄鉄や鉄の生産能力を考えると、木を使わずに短期間に安くて良い橋を建設することは不可能であった。

現実を直視すれば、スガン社には木の床組以外の選択の余地はなかった。特に、この地方の木工技術は水準が高く、優秀で知的レベルの高い大工を集めることが出来た。後年、蒸気船の建設において、冶金やボイラーの職人を集めなければならなかったとき、スガン社の望むレベルの者を集めることが出来なかった⁴⁵⁾ことを考え合わせると、木の床組を選択したことは適切なだけでなく幸運な判断であったと言える。木製床組もまた「スガン・タイプの吊橋」の独創的で基本的な要素のひとつとなった。

マルクは、技術的には桁もメインケーブルも軽くて剛性の高いものにすべきであると考えていた。ナヴィエの理論だけでなく、1820年代のイギリスのテelfordやパーローの大規模吊橋やフィンレイによるアメリカの初期の吊橋の基本形式はみな重量吊橋であった。しかし、軽量の桁のアイデアの源は、1821年にブラウンによって完成した軽量桁のツィード川のユニオン橋である。マルクはこの橋の建設コストの安さに注目し、トゥルノンの橋梁計画に吊橋を用いることを決断したと述べている⁴⁶⁾。

9. まとめ

本論文は1825年完成のトゥルノン橋における技術開発についてその詳細を記した。橋梁構造に関連したものとしては、

- ①小径の平行線ケーブルの開発
- ②鉄線の破壊強度と張力の推定
- ③補剛桁の開発
- ④吊橋の振動対策
- ⑤単径間吊橋構造の提案

等があげられる。

また、施工中になされたこととして、

- ⑥水中コンクリートの基礎工への使用
- ⑦先駆的な補強コンクリートの使用
- ⑧コンクリートミキサーの開発

等がある。

「より安く、より短期間に建設可能な橋梁」の開発という19世紀初頭のフランス（さらにはヨーロッパ大陸）において求められた新しいパラダイムに対する、スガンのアイデアが「ワイヤーケーブル吊橋」であった。しかし、この時点では、それは、あくまで、ローヌ地方の橋梁建設業者の偶然のあるいは成り行き上の発想に過ぎない。

偶然がその後、当然のこととして新しい文脈の中で読み解かれるためには、ナヴィエをはじめとするフランス政府土木局の当代きつての秀才たちを説得しうる論理構築が必要であった。さらには、それらの論理を構造物として実現させるためには、マルクの要求を満足させうる完成度の高い材料および構造の供給が保証されなければならなかった。フランスに中世以来培われてきた石材や木材の加工技術、あるいは、当時のフランスに興った鉄やセメントに関する生産技術がこの問題を解決した。この限りにおいて、19世紀初頭の「最先端の応用科学に基づく工学」と「中世以来の伝統的手工業技術」がマルクの発想を「軽量吊橋の発明」へと向かわせたといっても良いだろう。

さらに、「より安く、より短期間に建設可能な」という今日にも通じる価値基準に基づく橋の実現は、設計のみで達成されるものではなく、基礎工や橋脚の施工の効率化といった現場の近代化が重要な鍵となる。トゥルノン橋の現場では、

⑨軍隊並の厳格な規律の遵守

⑩施工コストの削減

⑪新しい施工機器の開発と省力化

などがこれに当たる。

トゥルノン橋が、イギリスタイプの重量吊橋（第1世代の吊橋ともよばれる）に対して、「軽量吊橋（第2世代の吊橋）」と呼ばれるのは、上記の①から⑪までの事柄の総体が時代を画する発明であったからである。さらに付言すれば、現代の吊橋建設は、依然として1825年の時点でシフトしたパラダイムの中にあるといえるのである。

注と参考文献

- 1) ミッシェル・コット、小林一郎:1815年から35年の間のマルク・スガンにおける技術革新と技術移転について、土木史研究、第15号、pp.363-374、1995。
- 2) 吉川弘之監修：新工学知第2巻 技術知の本質—文脈性と創造性、東京大学出版会、1997。
- 3) Navier, C.: Rapport et Mémoire sur les ponts suspendus (「吊橋に関する報告と覚え書き」)、第1版、第1部 1821年、第2部 1823。
- 4) Navier, C.: Rapport et Mémoire sur les ponts suspendus (「吊橋に関する報告と覚え書き」)、第2版、1828。
- 5) Seguin, M.: Des ponts en fils de fer (「鉄線の橋について」)、第1版、1824；なお、タイトル *des fils de fer* は通常「針金」と訳されるが、ここでは鉄線とした。また、*fer* は鉄であるが、*fer forgé* あるいは *fer soudé* (いずれも鍛鉄のこと)の形容詞が省略されたものと考えて良い。本文献中にも *fer* と *fer de fonte* (铸铁)を区別している箇所もあり、当時の文章で *fer* とあればほぼ鍛鉄と考えられる。本論文中でも特に注記せず鉄線と書くが、これは鍛鉄製のワイヤーを意味している。
- 6) Seguin, M.: Des ponts en fils de fer (「鉄線の橋について」)、第2版、1826。
- 7) 小林一郎、ミッシェル・コット:マルク・スガン設計のタン=トゥルノン橋の基礎工について、土木史研究、第15号、pp.75-186、1995。
- 8) 小林一郎、ミッシェル・コット、山下真樹：世界初の本格吊橋トゥルノン橋の上部工について、土木史研究、第16号、pp.89-104、1996。
- 9) Grattasat, G.: Ponts de France, Presses de l'ENPC, pp.87-115, 1982。
- 10) デジャルダン社が、吊橋を55年11ヶ月有料とする権利を得ることで請け負った。19世紀前半の吊橋は全てこのように民活で建設された。工事中止の直接の原因は、ジャン=ゼリゼ側の2個の石造のアンカレッジ(単なるカウンターウェイトで地盤とは何カ所かのシャフトでボルト締めされていた)の上流側のボルトが最大で60cm 浮き上がったことによる。デジャルダン社は工事再開の条件として権利の拡大(通行料の値上げや有料期間の延長など)を求めたが、認められなかったため、権利を放棄し、工事から手を引いた。設計者ナヴィエは「自らの名作」を実現する機会を失ったとされているので、設計に問題があったとは考えられていない。
- 11) Journal Tournon Tain, No216 4.1, 1993。
- 12) 山下真樹、小林一郎：フランスにおける歴史的記念物に指定された橋梁について、土木史研究、第15号、pp.29-44、1994。
- 13) F.S.27:note des fils de fer; F.S.186:factures du pont de Tournon; F.S.106:cahier de comptes du pont de Tournon; F.S.211-3: éléments comptables et correspondance.これらの文献から、当時スガン社と取引のあった鉄工所はフランシュ・コンテ地方やブルゴーニュ地方の次のような業者であった。:シャンパニョール(Champagnole)あるいはモレ(Morez)のVandel Ainé社、シャンパニョール(Champagnole)のMuller frères 社、ボーモット(Beaumont)のGauthier fils 社、ブサンソン近郊のロド(Lods)のVautherin et Vuillier 社、ベルフォール(Belfort)のMigeon et Grand-villard 社、ブサンソン近郊のシュヌシー(Chenecey)のMouret et Veillorelle 社、シャティヨン(Chatillon)のDubost 社、ブサンソン(Besançon)のVeuve fleur 社。また、スガン社へ鉄の納入を行っていたのは、リヨンのSaint-Antoine岸にあったPeillon-Marcellin 社とOdon Dufournel 社であった。
- 14) F.S.163:lettre de Seguin et Cie à Vandel du 30 juin 1824。
- 15) F.S.211-3 :observations de MM Mouret Veillorelle fils de Chenecy sur les fils de fer, s.d.; F.S.211-3:note des commissions données aux fabriques。
- 16) 文献 5)および Michel Cotte, L'entreprise Seguin et Cie, diplôme E.H.E.S.S.Paris 1987。
- 17) F.S.211-6:manuscrit du livre, ch IV, 1823; 文献 6)、PP.53-57。
- 18) Claude Navier, 1^{re} et 2^e Rapports sur le pont de Tournon-Tain; 1822. et 1823.; F.S.27 : manuscrits。
- 19) ファーガソン, E. S. :技術屋の心眼、第1章

- 「工学における設計の特質」、pp.13-58、平凡社、1995。
- 20) F.S.106: cahier de comptabilité du pont de Tournon et Pierre Cayez, Métiers Jacquard et hauts fourneaux, aux origines de l'industrie lyonnaise, Lyon 1978.
- 21) Cotte, M.: L'approche mathématique du pont suspendu chez Marc Seguin 1822-1826, VARIA, XLVI12-3, pp.233-257, 1993.
- 22) 文献 4) 第2版、pp.60-62 と pp.113-114、実際の実験については、F.S.: note pour la passe.
- 23) F.S.211-6: chapitre II, un texte voisin dans la seconde édition, p.36.
- 24) F.S.27: en particulier Description du pont de Tournon-Tain, 25 mars 1822. および Mémoire du pont de Tournon-Tain, 30 novembre 1822.
- 25) F.S.211-6, manuscrit du livre, p.13.
- 26) Billington, P.D.: History and Esthetics in Suspension Bridges, ASCE(ST)103, pp.1655-1672, 1977.; 1850年のアンジェでの事故以降、ヨーロッパでの吊橋建設熱は急速に衰えていく。これは主に、メインケーブルの防錆の問題であったとされるが、たとえばピリントンにもあるように、吊橋の振動に関する注意が不足していたと言える。この点に関しては、アメリカ人だけでなくヨーロッパ人も、事故から学ぶことが少なかったと言える。
- 27) F.S.27: lettre du préfet de l'Ardèche au maire de Tournon, 16 janvier, 1826.
- 28) 文献 4)、p.62; 1823年夏の草稿には「重量が大きく増加するわけではないので、高欄はどのように造ることも出来る」と記している。
- 29) 文献 4)、pp.72-73.
- 30) 文献 4)、p.36.
- 31) Mesqui, J.: Le pont en France avant le temps des ingénieurs, Picard, pp.228-270, 1986.
- 32) たとえば、Gauthey: Traité de construction des ponts, 2, Paris, pp.276-281, 1813.
- 33) 現代のフランスの大手建設会社のひとつラファルジュ社の創始者。1830年までのローヌ河の吊橋群のセメントを提供して会社の基礎を築いた。
- 34) F.S. 22: 1825
- 35) 2籠の石炭は 48kg に相当するので、一山は $48/320=0.15\text{m}^3$ となる。50山で 7.5m^3 に当たる。半日で50山より 15m^3 となる。
- 36) F.S. 27: Journal du pont, 1824.
- 37) F.S. 186: Note de Seguin Aine, 1824.
- 38) 文献 4) 第2版: note 2 pp.105 110, planche no 3 fig.24.
- 39) Guillerme, A.: BATIR LA VILLE, Champ Vallon, 1995. 第3章「石灰からセメントへ」は示唆に富むものである。欧米での土木史研究の活発化によって、鉄筋コンクリートの前史は今後数年の間に従来のものとは大きく変わってくると思われる。この本の中でも、1820年代におけるスガンによるトゥルノン橋の基礎工
- 事とスガンザンのコーダン橋の基礎における木杭列の補強のために用いられた鉄筋の前例が示されている。また、1833年のブリュネルのレンガ積みへの鉄筋モルタルの使用についても言及されている。
- 40) F.S.210-21: note manuscrite de Seguin Aine, sans date; F.S.22: l'implantation de ces barres se fait, pour la pile, entre le 30 mars et le 12 avril 1825.
- 41) 前掲書文献 39)、p.195; 1820年代においては、セメントと石、鉄とコンクリート等を併用する時の熱膨張率の違いが議論されている。ナヴィエは石積みの繋ぎ材として鉄を用いることは可との結論を出している。しかし、鉄とコンクリートについては言及していない。主な理由は力学的なものでなく、構造物の中に必要以上に高価なものを用いることは避けるべきとの考え方による。
- 42) F.S.27: les notes et descriptions des différents projets de 1822; F.S.211-6, le manuscrit du livre, 1823; F.S.22, le deuxième journal de chantier 1824 et la deuxième édition du livre, Des ponts en fil de fer 1826.
- 43) Gauthey: Traité de construction des ponts, No2, 1813, ouvrage cité, livre no 3, ch 2, "principaux ponts de bois", le pont Morand à Lyon et en Avignon, p.141; たとえば、リヨンのモラン橋やアヴィニヨンの木橋。
- 44) 文献 4) 第3章、pp.200-234; 254.
- 45) 1825年の8月から、スガン社はローヌ河の蒸気船に関する会社(スガン・モンゴルフィエ・デーメ社)の経営に参加し、トゥルノンの北20kmのアンダンスの現場に、次の吊橋を架けている。
- 46) F.S.95: intervention à l'Académie du 15 septembre 1823. あるいは、文献 4)、p.7.

注: F.S.はアルデッシュ県の古文書資料庫内のスガン文庫(Fonds Seguin)を示す。