

## スガントイプ吊橋の由来に関する古構造学的分析及び評価\*

Analysis and Evaluation on Origin of Seguin Type Suspension Bridge from the Viewpoint of Paleostructurelogy

本田 泰寛\*\* 小林 一郎\*\*\* 星野 裕司\*\*\*\* 岩田圭祐\*\*\*\*\*

By Yasuhiro HONDA, Ichiro KOBAYASHI, Yuji HOSHINO, Keisuke IWATA

### abstract

The purpose of paleostructurelogy is just to encompass all the bridges constructed in the world. Its concept derives from paleontology which aims to illustrate all the extinct organisms and to clarify the organic evolution. In the case of bridge, it is generally a remarkable engineer or an innovative aspect on which we focus for historical research. However, according to paleontology, it is the bridges consisted of a structure which is no longer employed today. The authors named such bridges 'paleostructure' and named our research 'paleostructurelogy'. It is such bridges on which we should focus. For case study, eight suspension bridges (Seguin Type Suspension Bridge) constructed on the Rhône River in 1825-1830 are chosen. They have some structures forgotten today while being well known of use of wire cable and stiffened deck. Firstly, the details of their structure are described. Secondly, the origin of their structure is analyzed from the viewpoint of design logic and bridge history. Finally, Seguin Type Bridge is positioned not the start of modern bridge but the extension of stone bridge.

### 1. はじめに

#### (1) 研究の背景と目的

筆者らは現在、古生物学に倣った古構造学の創設に向けて、橋梁を対象にした事例研究をおこなっている<sup>1),2)</sup>。橋梁史は、主として橋長の更新や新たな構造を開発した設計者に着目し技術発展という文脈の中で位置付ける。つまり橋梁史とは、技術革新の歴史である。一方、現在では利用されなくなった構造を有する橋梁は、技術発展の過程においてすでに淘汰されたものとされ、着目されることはほとんどない。筆者らの提唱する古構造学はこれまで着目されることのなかった橋梁を対象として、その構造の由来を解明することを大きな目的とする。

近年、例えば国際競争力の強化、個性や地域性の発揮というように、橋梁に対する要求は多様化しつつあり、新たな価値観を確立する必要性が認識されている<sup>3)</sup>。従来の橋梁史では取り上げられなかった橋梁を積極的に評価し、その事例を蓄積していくことは、今後我が国における橋梁設計に寄与するものと考えられる。

今回、事例研究の対象として1825年にフランスのローヌ河に建設されたトゥルノン橋を取り上げる。トゥルノン橋は、マルク・スガン（以下、スガンと表記）によ

って建設された吊橋である。スガンは円管ボイラの開発や鉄道の敷設を手がけた民間エンジニアであり、繊維工場も経営する企業家でもあった。

橋梁史におけるトゥルノン橋の意義は、それまでチェーンケーブルと鋳鉄製の床版を用いた吊橋（以下、重量吊橋と表記）が主流となっていた時期にあって、はじめて本格的なワイヤーケーブルと補剛桁を採用した吊橋（以下、軽量吊橋と表記）として完成された点にある<sup>4)</sup>。一方で、塔の形状やケーブルの張り方、全体的な外観など、現代では既に見られなくなった部分も見られ、全体として見れば吊橋として完成されているとは言い難い。それにもかかわらず、トゥルノン橋と共通した特徴を持つ吊橋はローヌ河を中心に数多く建設された。本稿では、これらのうち1830年までにローヌ河に建設された8橋をスガントイプ吊橋とし、構造の由来と当時としての合理性、さらに消滅していった背景を明らかにする。

#### (2) 論文の構成

本稿では、2章で古構造学の視点を整理する。3章では、吊橋の歴史を実例として、古構造学的視点について概説する。4章では、1830年までにローヌ河で建設された8橋の吊橋の構造を詳述し、スガントイプ吊橋の構造上の特徴を抽出する。5章ではトゥルノン橋を事例に、主として地形との関連性から構造の由来を明らかにする。6章では、スガントイプ吊橋に対する古構造学的な評価を提示し、2, 3の考察を加える。最後に7章で本研究のまとめを示す。

\* key word 古構造学、トゥルノン橋、地形  
\*\* 正会員 博（工） 熊本大学大学院 学術研究員  
\*\*\* 正会員 工博 熊本大学大学院 教授  
\*\*\*\* 正会員 博（工） 熊本大学大学院 准教授  
\*\*\*\*\* 学生員 熊本大学大学院  
(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

## 2. 本研究の視点の整理

### (1) 古生物学と古構造学

古生物学は、自然をありのままに記述する自然史科学の一分野である<sup>5)</sup>。目的は、過去の地球に生存していた全ての生物を描き尽くし、生物の進化を解明することとされる。つまり古生物学においては「全てを尽くす」ということ自体に学問的価値が認められている。同様に古構造学では、現在では絶滅した橋梁の事例を蓄積し続けていくこと自体が目的となる。

古生物学では、多くの場合新たに発掘された化石を手がかりとして、形態の復元や機能の推定が進められる。従って研究の発端は、化石というモノ自体に着目することであり、対象とする生物が当時の環境でいかに生存していたのかが記述されていくのである。こうした古生物学の考え方を参考に、古構造学では、例えば「〇〇設計による橋梁」、「〇〇技術を初めて導入した橋梁」といった点ではなく、まず橋梁の構造や形態、すなわち橋梁というモノそのものに着目する。その上で、それがどのように機能していたのか、ということを書き記述してゆくことが重要となる。

### (2) 設計論的視点

古構造学が対象とする橋梁は、実現に至った要因がそのまま消滅の要因となっている。例えば、20世紀初頭にエヌビック社が開発したRC橋は、全固定構造や装飾を特徴としている(エヌビックタイプRC橋)。これらの特徴は、RC橋の普及段階では肯定的に評価されていたが、後には否定的な評価へと変わり、徐々に消滅していった<sup>6)</sup>。このことは、橋梁の完成時には技術的に成功したものであっても、時間の経過とともに外的要因が変化することによって、失敗事例となったことを意味している。このような事例の構造と与条件をひとまとめとして記録しておくことで、橋梁設計における成功と失敗を同時に学ぶことができる。

### (3) 土木史的視点

古生物学が生物を対象とするのに対し、古構造学では人工物を対象としている。これらの事例を見る時、現在の橋梁や構造との比較を通すと、構造上の欠点などを指摘することはできても、その橋梁が完成に至った理由を明らかにすることはできない。すでに著者らが文献1)で述べたように、当時の人物史や橋梁史、当時の時代背景など様々な与条件との関係を明らかにする必要がある。これは土木史的な視点からの分析に相当する。ただし古構造学においては、対象とする橋梁が現在では用いられなくなった構造を有するため、新たな着眼点を設定する必要がある。

本稿では、トゥルノン橋をはじめとするスガンタイプ吊橋を研究対象として、主に上記の設計論および土木史的な視点からの分析をおこなう。

## 3. 吊橋の歴史

### (1) 現代の吊橋

川田によれば<sup>7)</sup>、近代吊橋の始まりはアメリカのジェームズ・フィンレイによって1801年に建設された、ジェイコブズ・クリーク橋(図-1)であるとされている。同橋は、中央スパン21mのチェーンケーブルを用いた吊橋であった。ジェイコブズ・クリーク橋が近代吊橋の祖とされている主な理由は、「①橋台を設けたこと、②主ケーブルを2本にまとめたこと、③そのケーブルを主塔で同じ角度にしたこと、④ケーブルから吊材を下げたこと、⑤その吊材に橋桁を取り付けたこと」である。例えば『吊構造<sup>8)</sup>』ではヴェラザノ・ナロウズ橋(図-2)をはじめとする10橋が著名な吊橋として挙げられているが、これらはいずれも上記の要件を満たしている。さらに付言すると、2本の主塔を持った3径間構造であることも構造上の共通点としてあげることができる。

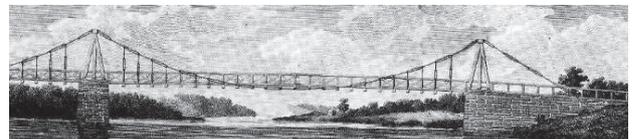


図-1 ジェイコブズ・クリーク橋と同型の吊橋(文献7)より転載)

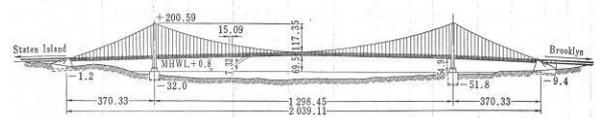


図-2 ヴェラザノ・ナロウズ橋(文献8)より転載)

吊橋の発展において、現在見られる吊橋、とくに長大吊橋はひとつの技術的な到達点であり、その姿は吊橋の究極の形であると認識される。例えば、前述した要件が近代吊橋の原型であるという認識のもとで吊橋の歴史を見れば、吊橋の祖としてジェイコブズ・クリーク橋へとたどり着くであろう。一方で、上述した近代吊橋としての要件に一致しない吊橋は、詳細な考察の対象外になってしまう可能性が高い。

### (2) 1820年代までの吊橋

既にいくつかの文献で明らかにされているように、実際には図-3<sup>9)</sup>に示すような現在の吊り床版橋に近い橋梁なども建設されていた。前節で述べたような視点で見ると、当時建設されていたであろう多様な吊橋のほとんどは、近代吊橋の原型になるまでには至らなかったものと



図-3 カシミール地方に架けられた吊橋(文献9)より転載)

して捉えられる。しかし、「ケーブルを用いた吊構造の渡河装置」として考えると、ジェイコブズ・クリーク橋を含めたこれらの橋梁は、設計者がその時置かれた状況の中でたどり着いた独自の解として見ることができる。古構造学は、これらの橋梁には等しく考察の価値があるという前提に立ち、現在の標準的な橋梁の形との比較ではなく、それぞれの橋梁がその形態で完成された由来を明らかにする。

### (3) 1820年代のフランス

19世紀初頭のフランスでは、国道網の整備は大部分が完成していた。しかし、橋梁が架けられた場所は少なく、交通の要衝や大都市部に石造アーチ橋が建設されていた。例えば、1822年にはピエール橋が完成している。石造アーチ橋の特徴は、死荷重による断面力が主体的で、活荷重を考慮する必要がなかった。また、施工が終わればほとんど管理は不要で、大規模な崩壊事故の例もなかったために最も信頼度の高い橋梁であった。しかし、1スパンの工期は約1年かかり、一般的に30mほどが1スパンの限界の長さであった。例えば、現在は断橋として残るローヌ河のアヴィニョンのサン・ベネゼ橋（橋長900m）は、10年近くの歳月をかけて完成した。

1820年代以降は、ナポレオン帝政崩壊後の王政復古の時代であり、産業革命の時代でもあった。この時期に、それまで戦争の動乱で中止されていた運河網の再建により第1次交通革命も始まった。また、都市の発展に伴う都市間道路や都市内道路の整備も進められていくが、ここでは従来の石造アーチ橋と比較すると短期間の施工が可能で、かつ長スパンを実現できる吊橋が注目され始めた。フランス政府はイギリスへ吊橋の調査のために数人の技術者を送っており、1823年にはナヴィエによってイギリスの吊橋に関する論文も出された<sup>10)</sup>。ナヴィエはこの論文で、吊橋の歴史的な発展やイギリスの吊橋の調査報告だけでなく理論的な構造解析まで行っている。そして、その翌年にはパリ市内でチェーンケーブルを用いたアンヴァリッド吊橋を設計している。この橋梁は結局実現することはなかったが、吊橋への注目はさらに高まり、デュフルやスガンによって、ワイヤーケーブルを用いた橋梁が各地に建設された。その数は200橋にも及び、1831年から1847年の間にフランスで建設された162橋のうち、137橋が吊橋であったという統計もある<sup>11)</sup>。

## 4. スガンタイプ吊橋の特徴

1830年頃までに、ローヌ河にはトゥルノン橋を含む8橋の吊橋が建設された。それらは、イギリスの吊橋を参考にしながらも、ワイヤーケーブルの採用など独創的な構造を有していた。本章では、ヴィカによって1831年に作成された「ローヌ河の鉄線ケーブル吊橋<sup>12)</sup>」と題するレポート（以下ヴィカレポート）より、スガンタイプ吊橋の構造上の特徴を整理する。

## (1) ヴィカレポート

ヴィカはフランス土木局のエンジニアで、主としてコンクリートに関する研究を実施した。水硬性セメントに関する理論確立や土木構造物へのコンクリートの適用など、その実績は今日でもよく知られている。ヴィカはまた吊橋に対しても大きな関心を寄せ、1830年代には落橋事故の分析や鉄線ケーブルの作製と定着方法に関する論文を数編発表している<sup>13)</sup>。

トゥルノン橋の完成以降、フランス土木局は吊橋の普及を目論んでいた。そこで土木局長官ベキーは、ヴィカに命じてローヌ河に架かる吊橋の調査を命じた。ヴィカレポートは50ページにわたるもので、8橋の現況報告およびいくつかの改善点の提案が盛り込まれている。なおヴィカレポートで、ヴィカはスガンのメインケーブル架設工法に対して批判的な見解を示した上で、エアスピニング工法を考案するに至っている<sup>14)</sup>。これは、スガンによる吊材としての鉄線ケーブルの導入がきっかけとなって、今日へと至る吊橋の施工法が確立されたことを示すものである。ここには、過去に対する否定を通じて、新たなものが生み出された一例を見ることができる。

## (2) ローヌ河の8橋の吊橋

ここでは、ヴィカレポートで報告された8橋の吊橋の構造上の特徴について述べる。図-4、表-1は8橋を上流から示したものである。また表-1は、ヴィカレポートから確認できた8橋それぞれのデータと、全体の形状が確認できる絵葉書や図面などを参考に作成したものである。



図-4 ローヌ河の吊橋の位置(作成: 本田)

表-1 ローヌ河の吊橋(作成: 本田)

①ヴィエヌ橋(1829)				②サブロン橋(1828)			
橋長	径間数	最大径間	ケーブル	橋長	径間数	最大径間	ケーブル
172m	2	86m	複数	180m	2	90m	7本
③アンダンス橋(1827)				④トゥルノン橋(1825)			
橋長	径間数	最大径間	ケーブル	橋長	径間数	最大径間	ケーブル
180m	2	90m	4本	170m	2	85m	6本
⑤ヴァランス橋(1830)				⑥サンタンデル橋(1830)			
橋長	径間数	最大径間	ケーブル	橋長	径間数	最大径間	ケーブル
220m	2	110m	5本	255m	3	85m	複数
⑦ボーケル橋(1829)				⑧フルク橋(1830)			
橋長	径間数	最大径間	ケーブル	橋長	径間数	最大径間	ケーブル
446m	4	127m	7本	140m	2	70m	4本

表中、メインケーブルの本数が確認できなかったものについては「複数」と記入した。

なお、本稿では便宜上、橋脚上の塔を主塔、橋台上の塔を側塔として区別している。

#### a) ヴィエヌ橋

本橋は2径間で構成されている。現在、橋台部分はケーブルベントが用いられているが、ヴィカレポートの記述によれば建設当初は側塔であったようである。またメインケーブルは主塔の橋脚部で固定されていたが、写真-1では主塔の頂点を通して架けられていることが確認できる。他にも斜めステイヤ、メインケーブルよりサグ・スパン比の小さい補強ケーブルが張られていることが分かるが、これらが完成後に追加されたものであるかは定かではない。本橋は現在、歩道橋として利用されているが、桁は鉄製トラスへと変更され、メインケーブルは1本にまとめられている（写真-2）。

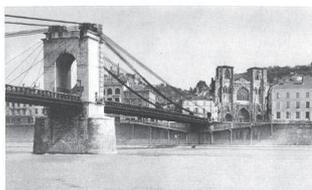


写真-1 ヴィエヌ橋(絵葉書より)

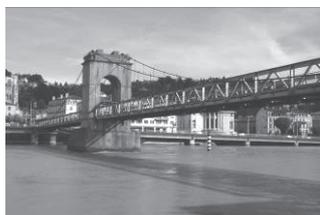


写真-2 現在のヴィエヌ橋(撮影:本田)

#### b) サブロン橋

本橋は2径間で構成されており、橋脚上には主塔を有するが、橋台上には側塔はない。また図面からは、中央の橋脚上の幅員が馬車の離合のために広がっていることが分かる(図-5)。本橋は1933年に撤去されているが、現存時の絵葉書からは、メインケーブルが複数のケーブルを並置するフェストゥーン式に架けられていたことが確認できる(写真-3)。これらのケーブルは、橋脚部では主塔を介して橋脚付近で固定され(以下、背越定着と表記)、橋台部ではケーブルベントを介して固定されている。

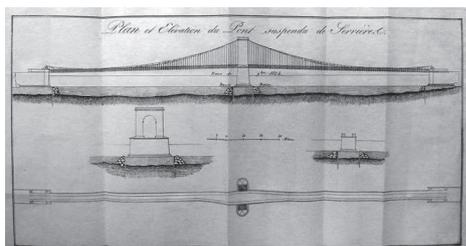


図-5 サブロン橋一般図

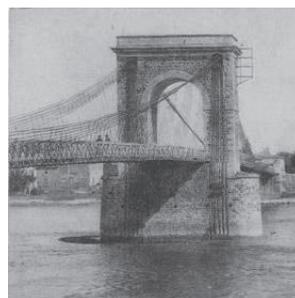


写真-3 サブロン橋(絵葉書より)

#### c) アンダンス橋

本橋は2径間で構成されており、橋台上には側塔を有する。メインケーブルの張り方は建設時と同じくフェストゥーン式となっている(写真-4)。ケーブルの定着は、主塔部、側塔部ともに背越定着となっている(写真-5)。現在は桁部分が鉄製トラスへと変更され、車道として利用されているものの、主塔および側塔、ケーブルの定着方法は建設当時の状態が保たれている。



写真-4 アンダンス橋(撮影:本田)



写真-5 ケーブル定着部(撮影:本田)

#### d) トゥルノン橋

トゥルノン橋は8橋の中で最も早い1825年に建設された。径間数は2つで、主塔と側塔では背越定着によってメインケーブルが定着されている。本橋は、桁下の高さが十分でなく船舶の往来に支障をきたしたため、2m以上嵩上げされた(写真-6)。また写真からは、建設時は門型であった主塔と側塔がいずれも柱状に変更されていることと、橋台部分は背越定着となっていないことがわかる。1847年には下流150mの位置に第2橋も建設され、現在でも歩道橋として利用されている(写真-7)。なお第1橋は、改修後には歩道橋として使用され、歴史的記念物にも指定されていたが、1965年の河道改修により撤去された。

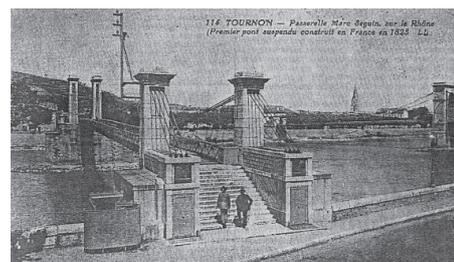


写真-6 トゥルノン橋(絵葉書より)

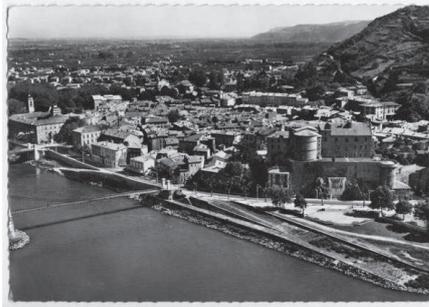


写真-7 トゥルノン第一橋(後)と第二橋(前)(絵葉書より)



写真-10 サンタンデオル橋(絵葉書より)

#### e) ヴァランス橋

本橋は2径間で構成され、橋台上のケーブル定着にはケーブルベントが用いられている。本橋も、ヴィカレポートの記述からは建設当初は側塔が用いられていたものと考えられる。写真-8からは、片面5本ずつ設置されたメインケーブルが2本に束ねられていることが確認できる。主塔部分では背越定着となっていないことから、建設後にケーブルに大幅な変更が加えられたものと考えられる。本橋は架け替えのために1911年に撤去された。



写真-8 ヴァランス橋(絵葉書より)

#### f) サンタンデオル橋

本橋は3径間で構成され、橋台上には側塔が設置されている。またメインケーブルには斜めステイが設置されていることが確認できる(写真-9)。主塔、側塔ともにメインケーブルは背越定着となっている。他の7橋と異なる点として、主塔の塔頂部は屋根を付けたような形状となっていることがあげられる。本橋は1つの主塔の塔頂が破損したが、1944年に撤去されるまでそのまま使用された(写真-10)。



写真-9 サンタンデオル橋(絵葉書より)

#### g) ボーケール橋

本橋は4径間で構成されており、8橋の中ではスパン、橋長ともに最大である。メインケーブルは片面に7本ずつフェストゥーン式に張られ、主塔部では背越定着、橋台上ではケーブルベントによって定着されている(写真-11)。設置の時期は不明であるが、主塔からは斜めステイが張られ、吊材は橋桁の途中からかけられている(写真-12)。架橋地点には中洲が2つあることから、河川中の工事は1つの橋脚のみであったと思われる(写真-13)。



写真-11 ボーケール橋(絵葉書より)



写真-12 ボーケール橋(絵葉書より)



写真-13 ボーケール橋(絵葉書より)

本橋は、サンタンデオル橋と同じく、1つの主塔の塔頂と左岸側の橋桁が破損したが、橋桁は修復されて使用されていた（写真-14）。本橋は現在撤去されている。



写真-14 ボーケール橋(絵葉書より)

#### h)フルク橋

本橋は2径間で構成され、主塔と側塔を有している。現在は桁部分が鉄製トラスに変更され、車道として利用されている（写真-15）。メインケーブルは片面に4本ずつ張られ、フェストゥーン式に設置されている。ケーブルの定着は主塔部では背越定着であるが、側塔ではアンカーブロックに固定されている（写真-16）。トゥルノン橋やアンダンス橋のように、側塔を有する場合は背越定着となっていることから、本橋も建設当初は同様の定着方法をとっていたものと思われる。

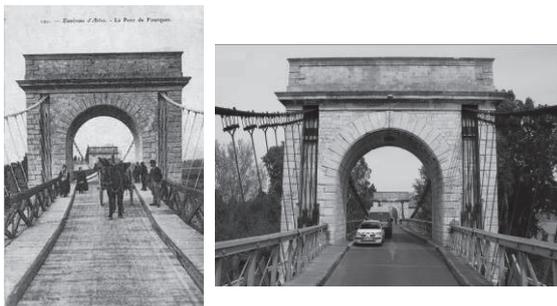


写真-15 フルク橋

(左:絵葉書,右:現況(撮影:本田))



写真-16 フルク橋のケーブル定着部(撮影:本田)

#### (3)構造上の特徴

8 橋の吊橋の構造には多くの共通点があり、それらは最も早く建設されたトゥルノン橋の構造に集約される。その他の橋の構造は、この橋のバリエーションと考えられる。ここでは、トゥルノン橋を中心としてスガントイプ吊橋の構造上の特徴を整理する。

#### a)ワイヤーケーブル

3章で述べたように、19世紀前半はチェーンケーブルを用いた重量吊橋が主流であり、トゥルノンでの架橋計画の際にスガンが構想していたのも、重量吊橋を導入することであった。しかし、技術的、経済的な理由からチェーンの作製や輸入が困難であったためにワイヤーケーブルが採用された。ここには近代吊橋のアイデアを見ることができる。ただし、鉄線製作技術の限界から1本のケーブルの長さは30mが限界で、これをつなぎ合わせることで必要な長さを得ていた。さらに、継手部分の強度が十分得られなかったため、最終的に作製できるケーブルの長さは最大100m程度(ケーブル3本分)であった。ケーブルの両端をリング状の継手でつなぎ合わせたケーブルは、いわばチェーン式とワイヤー式の間接的な構造であり、吊橋のケーブルとしては不完全なものであった。先にも述べたように、ヴィカはその批判にもとづいて、エアスピニング工法を開発し、吊橋におけるワイヤーケーブルの可能性を大きく広げた。その結果、スガンの開発したワイヤーケーブルは消滅していった。

#### b)補剛桁

スガンは経済的、技術的な理由から木製の軽量桁を採用した。ワイヤーケーブルと木製の軽量桁の採用により、安価な軽量吊橋の建設が可能となったが、桁の剛性不足という問題が浮上した。この問題に対して、スガンはトラス形式の高欄を用いて桁の剛性を補っている（写真-17）。これは現在の補剛桁に共通する構造と考えることができるが、実際には木材を組み合わせているため、高欄自体の曲げに対する強度が弱かった。このため、垂直材にボルト締めで張力を入れ、床版の横桁と高欄を一体化することでハウトラスに近い構造とし、曲げに対する強度を高めている。このような木構造的な発想は、鉄構造トラスの導入によって消えていくことになった。



写真-17 トゥルノン橋の補剛桁(撮影:本田)

ここまで、近代吊橋との共通点となるワイヤーケーブルと補剛桁について見た。それぞれの形や発想は近代吊橋へと受け継がれてはいるが、微細に見てみるとそれぞれは異なった構造として見る事ができる。

c)複数のメインケーブル

スガタイプ吊橋は、二面吊りで両側とも複数のケーブルを主塔に15~20cm間隔に並べている(写真-18)。また、イギリスの吊橋も数本のメインケーブルを張っていた。ケーブルの製作方法や架設工法が発展した現在では、吊橋のメインケーブルは両面とも1本にまとめられている。



写真-18 トウルノン橋のメインケーブル(撮影:本田)

d)背越定着

主塔、側塔のいずれにおいても、メインケーブルは塔頂に設置された鋳鉄製の定着装置と、反対側の塔背面に沿って張られた定着用ケーブルで固定されている(前出写真-5)。この定着法により、各径間はそれぞれ独立した構造となっている。表-1にあげた8橋のうち6橋が2径間で、他の2橋は3径間と4径間の構造であるが、8橋とも同様の構造となっている。この定着方法は他の国では見られないが、フランスではこの8橋以外の吊橋にも多く見られ、1850年まで各地で建設された。

e)マッシブな石造の塔門

前節で見たように、スガタイプ吊橋の主塔の形状は、マッシブな石造の塔門となっていた。この形状は技術革新や機能主義、合理主義の台頭により、現代のラーメン構造やトラス構造へ変化した。

一方、側塔についてはいくつかのバリエーションが見られる。8橋について比較すると、アンダンス橋(前出写真-4)やトウルノン橋(前出写真-6)などは主塔と同様の側塔が採用されている。ヴィエンス橋やボーケール橋などは側塔を持たず橋台の上にはケーブルベントが建てられていた(前出写真-11)。

5. スガタイプ吊橋の構造の由来

スガンは、イギリスの吊橋を参考にしながら改良を重ね、フランス独自のスガタイプ吊橋の構造を考案した。その背景のひとつとして、イギリスとフランスにおいて吊橋の架橋過程の差が挙げられる。イギリスではすでに吊橋の構造は確立しており、その構造に適応する地点に吊橋を建設した。例えば、メナイ吊橋の架橋は新しい構造への挑戦ではなく、長スパンの吊橋への挑戦であった。

一方、フランスでは、橋の需要が高まった地点に架橋

されたため、地形や社会精度の違いにより、転用しただけでは機能しないものが多く、改良が必要であった。本章では、トウルノン橋(図-6<sup>15)</sup>)を例に、古構造学的視点からスガタイプ吊橋の構造の由来を明らかにする。

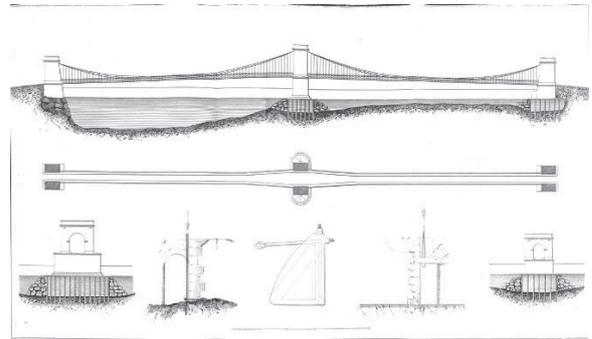


図-6 トウルノン橋の概要(文献15)より転載)

(1) ローヌ河について

トウルノン橋が建設されたローヌ河はフランス4大河川のひとつで、スイスのレマン湖よりさらに上流のフルカ峠を水源とする国際河川である(図-7)。河川長812kmのうち520kmがフランス国内を流れている。ローヌ・アルプ地方の中心都市リヨンでソーヌ川と合流した後に、西側のマッシフ・セントラル(中央山塊)と東側のアルプス山脈に挟まれるローヌ渓谷を南下し、アルル付近で大ローヌと小ローヌに分岐して地中海へと流れる。表-2にフランス4大河川の流域面積と河口での平均流量を示す。表からは、ローヌ河の流量1700m<sup>3</sup>/sが他の3河川と比べて突出して多いことがわかる<sup>16)</sup>。



図-7 フランスの主要河川および山脈(作成:本田)

表-2 4大河川の流域面積と河口平均流量(文献16)より作成)

	流域面積(km <sup>2</sup> )	河口平均流量(m <sup>3</sup> )
ローヌ川	99500	1780
ガロンヌ川	55000	1085
ロワール川	117000	935
セーヌ川	78700	500

その理由のひとつは、流域にアルプス山脈など年間降水量が 2000mm を越える地域を持っていることである。もうひとつの理由は、流域内には異なる気候帯が存在していることが挙げられる。上流部は、アルプスの融雪のため夏季に流量が増加する一方、下流側は地中海性気候で冬に雨量が多くなり、流量が増加する。このため、年間を通して大きな流量を保つことになる。

また、図-8<sup>17)</sup>の 4 大河川のみ注目すると、平均勾配は、特に河口からおよそ 400km 以下の中流域から下流域にかけては、ローヌ河が他の 3 河川よりも大きくなっている。さらに図-9<sup>18)</sup>をみると、ローヌ河がリヨンの盆地を抜けたあたりに勾配の遷急点が見られる。この遷急点以降はローヌ渓谷の谷地形を流下していくため流速は大きくなる。トゥルノン橋をはじめとするスガントイブ吊橋が架けられたのはこの渓谷を流れる場所に相当し、橋脚数を減じ、1 スパンで大きく渡る架橋計画が採用された模様である。

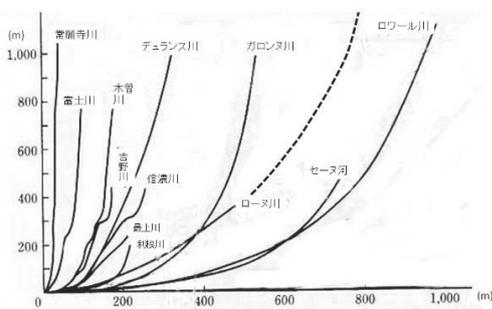


図-8 日本とフランスの河川の縦断曲線図(文献 17)を修正)

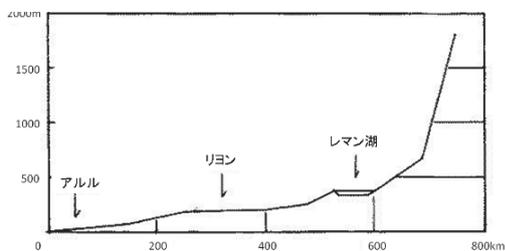


図-9 ローヌ川縦断図(文献 18)を修正)

トゥルノン橋が完成する 1824 年まで、ローヌ河には、リヨンの市内のギョティエール石橋とモルランの木橋、ボン・サン・テスプリの石橋、アヴィニョンのボンパ木橋以外に橋梁は架けられていなかった。上記 2 橋の石造アーチ橋は橋長がおよそ 800m であり、架橋地点はローヌ河の中でも川幅が広く水深も浅くなっている。この事実からは、ローヌ河における架橋について次のようなことが言える。一点は、川幅が大きくても、水深が小さい場所ならば石造アーチ橋を架けることは可能であった。もう一点は、川幅が 200m 程度となる場所は谷地形であるため水深・流速が大きくなることから、石造アーチ橋を架けることはほとんど不可能に近かったということである。トゥルノン橋の建設は、架橋条件が厳しいローヌ河の狭隘部に橋梁を建設するはじめての試みであったと言える。

## (2) 架橋地点

スガンによってローヌ架橋にはどのような意味があったのだろうか。ここでは、地形や人の移動という観点から架橋地点決定の経緯について考えてみたい。

ローヌ河から西側への移動は、マッシフ・サントラル(中央山塊)によって大きく阻まれている(図-7 参照)。また、中央山塊は北西方向へと緩やかに傾斜しており、ここを源流とする河川のほとんどは、大西洋側へと流れるロワール河とガロンヌ河に合流している。従って人の交流の方向はこれら 2 つの河川に沿うこととなる。

また 4 大河川のうち、ローヌ河のみが国際河川(全長の半分がスイス領内)であり、地中海へとつながっている。つまりローヌ河は、フランス内陸部を地中海やスイスとつなぐ位置にある。人や物資の移動も必然的にこれに沿うこととなり、その結果南北方向への移動を軸とした商業圏が形成されることとなった。フランスの動脈とも言えるパリ〜リヨン〜マルセイユを結ぶ線(PLM)は、早くから国道や鉄道が整備されてきた重要な路線である。これは、主要都市を結ぶための交通網整備であるが、単に大都市を結ぶラインと言うよりは、フランス東部の地形によって必然的に生まれた交通路であった。

こうした背景を考えると、ローヌ架橋には対岸を結ぶ、という以上の意味を見出すことができる。19 世紀初頭に起こったフランスの産業革命は、各地にあった同族企業の経営戦略を大きく転換させた。すなわち、伝統的な手工業や商業を営む企業は、技術革新による機械化と大量生産によって販路を拡大していくようになる。スガン社はローヌ右岸のアノネイに毛織物やフェルトを製作する工場を構えていたが、1820 年代には産業革命の先進地であったスイスのフランス語圏へと販路を拡大している。つまりスガン社にとって「ローヌ河を渡る」ということは、トゥルノンとタンというローヌ河を隔てた都市をつなぐだけでなく、ローヌ以西の地域とアルプス山脈周辺の都市との交通路が確保されることを意味していた。それは、従来の南北交通で確立されたものとは異なる商業圏に達するという意味を意味している。

ところが前述したように、当時のローヌ河には、リヨンから地中海までの 300km の間に橋梁はほとんどなかった。当時の地方都市では経済的、技術的な面から石造アーチ橋を建設することは困難で、船で兩岸を行き来していた。しかし、渡船による交通は洪水時の影響を受けやすいため、ローヌ河周辺の都市は架橋を望んでいた。アノネイに拠点を置くスガン社としては、リヨンとボン・サン・テスプリの中間地点での架橋が好都合であることは明らかである。ここでトゥルノンの位置を見てみると、ローヌ河に東から合流するイゼール川渓谷へ入っていく地点となっていることがわかる。アノネイからスイス方面への移動を考えると、トゥルノンは極めて都合のよい場所であった。

次に、トゥルノンにおける架橋地点決定の背景を、架橋地周辺の状況から考える。地域交通の視点から見ると、

架橋による商品輸送のコストダウンが目的であるため、渡橋料にも反映される工費を低く抑えることが望ましい。一般的に橋長が大きくなると工費も増加するため、できるだけ川幅が狭い場所が選ばれている(図-10)。また、



図-10 トゥルノン橋の架橋地点(作成:本田)

右岸側にはトゥルノン城およびトゥルノンの中心市街地が隣接しており、上流側には港も存在している。対岸への移動や物資運搬の利便性といった点にも、この付近が架橋地として決定した妥当性を見ることが出来る。また、右岸側の側塔付近では、多くの建築物が花崗岩の岩盤に直接建てられている(写真-19)。当然、スガンらはメインケーブルの定着や巨大な石造塔門の建設を想定していたに違いないが、こうした岩盤の存在は、架橋地選定での大きな要因となったと考えられる。



写真-19 トゥルノン城(撮影:本田)

### (3) 2 径間構造

ローヌ河での架橋例が少ない理由に、河川中での工事が技術的に困難だったことがあげられる。これより、河川中の工事は極力少なくすること、つまり可能な限りスパンを長くすることが求められた。また、架橋地点に着目すると、川幅はおよそ170mで、架橋位置が湾曲しているために、右岸川の河床(トゥルノン側)は深くなっており(前出図-6)、切り立った花崗石の岩山が岸まで迫って崖になっていた。

イギリスの重量吊橋の導入を想定していたスガンらは、まず図-11のa)に示す単径間吊橋の建設を計画したのと考えられる。単径間の場合、河川中の工事は不要となり工事は円滑に進む。しかし、当時の技術ではワイヤーケーブルの長さは100m程度が限界であったため、170mの単径間吊橋は技術的に不可能であった。河川中の工事は避けることはできなかったが、最小限に抑えるために

設計されたのは図-11のb)に示した2径間吊橋であった。このスパン割であれば、1径間は85mとなりワイヤーケーブルも採用可能であった。また、図-11のc)に示すような3径間にしようとした場合、ケーブルの長さは余裕を持って取ることができるが、河床の深い位置に橋脚を建てる必要が生じるため、施工や治水の問題が大きくなる。

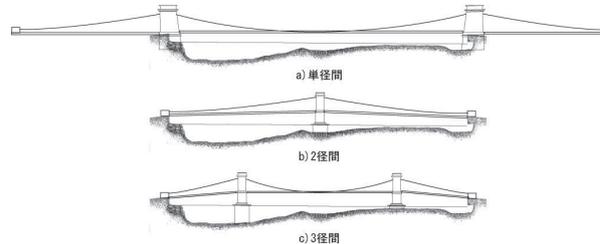


図-11 トゥルノン橋のスパン割(作成:本田)

### (4) メインケーブルの形式

スガンは3mmの鉄線を束ねて30mのケーブルを作製し、これらの両端を繋ぎあわせて全長90mのメインケーブルとしていた。このケーブルを橋梁に架設する作業はほぼ人力で行われたため、1本のケーブルの直径が制限され、メインケーブルは2面吊で両側とも6本ずつの複数で構成された。これら6本のケーブルをフェストゥーン式に張り、ハンガーを傾けて架けることで、床版に生じる水平方向の揺れが軽減されている。また、メインケーブルが複数本となることで、なんらかの理由で仮に1本のケーブルが破断するようなことがあっても、その他のケーブルによって床版の即時の落下を防ぐ役割も果たしていたものと推測される。

### (5) 背越し定着

すでに述べたようにワイヤーケーブルの長さは100mが限界であり、2径間を1本の連続したメインケーブルで繋ぐことは不可能だった。このため、側径間から張られたメインケーブルを中央の主塔部に固定する必要があり、そのための定着方式が考案された。主塔に達したケーブルは、図-12に示すように塔頂に設置された鋳鉄製のケーブル角度変換装置と、反対側の塔背面に沿って張られた定着用ケーブルで固定される<sup>19)</sup>。この定着はメインケーブルが複数で構成されていたため可能であった。

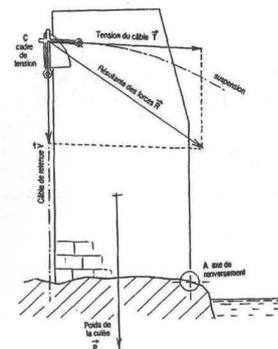


図-12 定着方法(文献19)より転載)

## (6) マッシブな石造の塔門

トゥルノン橋の主塔と側塔はローマン様式の装飾が施された石造の門となっている。こうした装飾自体は、当時としては珍しいものではない。例えばパリの凱旋門（1836年完成）に代表されるように、当時は古代ギリシアや古代ローマの様式を用いる新古典主義の時代であり、構造物の装飾としては日常的に取り入れられていた。また橋上設置物として見た場合、塔門を設置することは決して新たな試みではない。古代ローマ以降フランスに建設された橋梁を見ると、フラヴィアン橋（写真-20）など同様の例を多数確認することができる（写真-21～写真-25）。つまり橋上に構造物を設置しようとした場合、既往の装飾様式を取り入れた塔門とすることは当時の橋梁建設においてはごく普通のことであったと言える。

また、構造上の必要性からも、このようなマッシブな塔門が必要であった。この点について、側塔を例に見てみたい。最初の案では、図-13の a) に示すように橋台後方の基礎内でメインケーブルを定着する計画であった。しかし、メインケーブルの張力に対する橋台の強度が十分に得られなかったため、図-13の b) に示すように橋台上に側塔を建てることになった<sup>20)</sup>。これにより、側塔がない場合は張力が水平方向のみに作用していたのに対し、側塔とすることで塔門にかかる張力は鉛直方向と水平方向に分散して作用した。鉛直方向の張力は橋台部分の重量で支持し、水平方向の張力は4分の1程度まで減少したため<sup>21)</sup>、側塔は張力に対する十分な強度を持つことができた。しかし、架橋地点は城壁のすぐそばであり、河岸沿いに歩道と車道を含め幅員9m程度の道路も通っていたため、側塔の後方にケーブルを定着するための十分なスペースを確保することができなかった。このため、主塔と同様に背越定着が採用された。

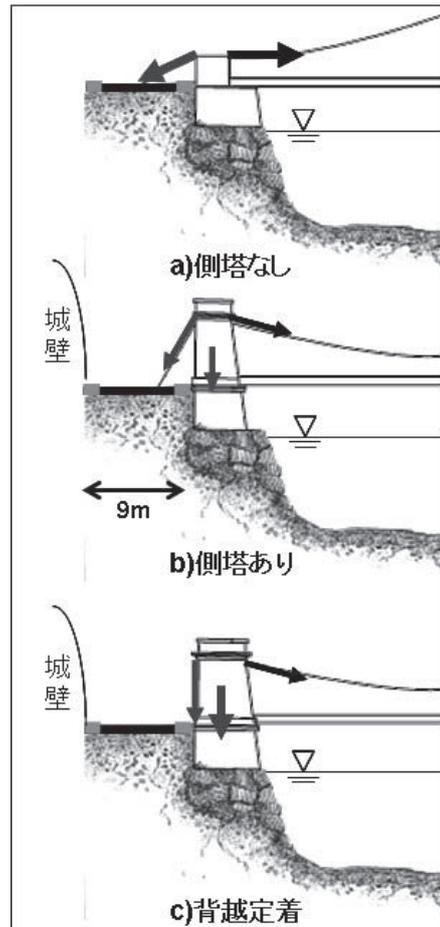


図-13 トゥルノン橋の側塔(作成:本田)



写真-20 フラヴィアン橋(撮影:本田)



写真-21 オルテズ橋(撮影:本田)



写真-22 アントルヴォー橋(撮影:本田)



写真-23 ソスペル橋(撮影:本田)



写真-24 ソーヴェール・ドゥ・ベアルヌ橋  
(撮影:本田)



写真-25 サン・マルトリー橋(撮影:本田)

## 6. まとめ

### (1) スガンタイプ吊橋に対する古構造学的評価

トゥルノン橋の構造は架橋地点の地形、チェーン式ワイヤーケーブルの使用という条件の下でしか成立し得なかった。その構造は、主塔、側塔の両方で背越定着を採用することにより、各径間が独立したものであった。写真-20 は左岸側の橋桁が大きく損傷したボーケール橋を示したものである。写真からは、ひとつの径間の甚大な破損が、隣接する径間には影響を及ぼしていないことが見て取れる。この構造を持った吊橋はローヌ河地方へと短期間で広がった。これらの地方は地形条件が類似している場所が多く、3章の表-1 に示したようにほとんどの吊橋が2径間吊橋であった。

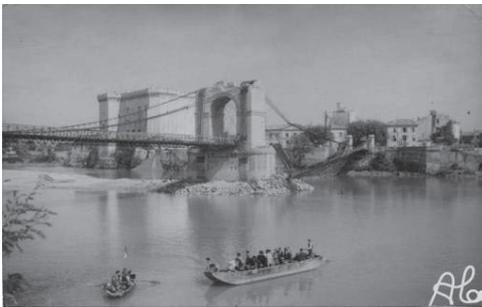


写真-26 ボーケール橋(絵葉書より)

スガンタイプ吊橋は、世界の吊橋が重量吊橋から軽量吊橋へ遷移する過程の契機として位置付けられている。しかしそれはあくまでも完成後150年以上が経過した現在から見た評価、すなわちワイヤーケーブルや補剛桁の導入という点に着目した場合の評価である。しかし、これまで見てきた内容を考えると、スガン自身が軽量吊橋技術の普遍化を目指していたとは言い難い。スガンによる理論的研究の主たる目的は吊橋の建設申請に対するフランス土木局の質問への回答であり、トゥルノン橋建設の目的はローヌ河を越えるための交通路を確保することであった。このように考えた場合、トゥルノン橋には全く異なる解釈が成立する。トゥルノン橋の構造上の特徴である①小規模径間を連続してつなげること、②各径間が構造として独立していること、の2点は、いずれも、長大スパンを目指す現在の吊橋よりは、小径間の連続で川幅の大きな場所を渡る石造アーチ橋に通じるものである。また、背越定着導入による力学的な要因は無視できないが、マッシブな塔門の導入がもたらした都市の入り口としての役割は、ローマ時代から建設されてきた石造アーチ橋において培われていたものである。古構造学的な分析を通すと、建設時点におけるトゥルノン橋は、石造アーチ橋の時代から続く設計思想の延長として位置付けることができる。

### (2) 設計論的考察

トゥルノン橋の由来を橋梁設計という観点から見ると、以下のような示唆を得ることができる。

#### ① 地形の特殊性に配慮した構造

トゥルノン橋のスパン割り、ケーブルの定着、さらには側塔の形態は、架橋地の地形条件を考慮したことによって決定されていった。この例からは、独創的な構造の出現を決定づける最大の要因は地形であったとすることができる。また、吊橋は必ずしも長大スパンを渡すためだけの構造ではなく、たとえ川幅が狭く空間の限られた都市内であっても選択されうるという視点が得られる。

#### ② 在来技術の組合せによる問題解決

マッシブな塔門や単径間独立構造は、石造アーチ橋という存在があってこそ生まれたアイデアである。さらに、鉄線ケーブルや木製補剛桁を製作する技術そのものは、ローヌ地方に根付いていたものであり、トゥルノン橋建設のために開発されたものではない。ここには、新たなものを作り出すために在来技術を組み合わせることの重要性を見ることが出来る。

#### ③ 先進技術の代替物としての在来技術

トゥルノン橋という軽量吊橋の誕生は、当時のフランスでは輸入・製作が困難であったチェーンをワイヤーケーブルに置き換えたことに端を発する。このことは、先進国の技術が使えない場合に、それを在来技術でどのように代替するかが重要であることを示している。

## 7. おわりに

本稿では、古構造学の確立に向けた事例研究として、1825年にマルク・スガンによって架橋されたトゥルノン橋を事例として取り上げ、古構造学的視点から構造の由来を分析した。本研究の成果を以下に記す。

(1) 2章では、古構造学の視点に関する整理をおこなった。また、分析の視点として設計論および土木史的な視点の重要性を述べた。

(2) 3章では、吊橋の歴史を実例として古構造学的視点について説明した。また、産業革命期のフランスの橋梁建設の状況についてまとめた。

(3) 4章では、ヴィカレポートに報告された8橋の吊橋の構造を詳細に記述した。さらに、スガンタイプ吊橋が有する5つの構造上の特徴を示した。

(4) 5章では、トゥルノン橋を事例として取り上げ、その構造の由来を主に架橋地点の地形との関係から分析した。

(5) 6章では、スガントイプ吊橋に対して古構造学的視点から評価をおこなった。ここでは単径間独立構造と石造塔門に着目して、スガントイプ吊橋が石造アーチ橋的な設計思想に立脚したものであるという解釈を示した。また、トゥルノン橋の構造の由来を分析した結果得られた設計論的視点からの考察を述べた。

### 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費・基盤研究(C) (課題番号19560539) の補助を受けたものです。記して謝意を表します。

フランスでの現地調査および資料調査の際には、ナント大学名誉教授のミシェル・コット氏に多大なるご協力・ご教示をいただきました。心から御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 本田ほか：「橋梁史研究の一手法としての古構造学の創設」、Vol.26、pp.1-8、2007.6
- 2) 本田ほか：「ドゥ・ラ・ノエによって建設されたブルターニュ地方の鉄道橋梁群に関する研究」、土木史研究講演集、Vol.27、pp.31-32、2007
- 3) 例えば、谷口博明：「新しい価値観の共有を」、橋梁と基礎 vol.37 No.1、p.5、2003 など
- 4) 小林ほか：世界初の本格吊橋トゥルノン橋の上部工について、土木史研究論文集、Vol.16、pp.89-104、1996.
- 5) 間嶋隆一、池谷仙之：『古生物学入門』、朝倉書店、1991.10.18.
- 6) 前掲 1)
- 7) 川田忠樹：『吊橋の文化史』、p.81、技報堂出版、1981
- 8) 日本鋼構造協会編、『吊構造』、p.4、日本鋼構造協会、1975
- 9) Bernard Marrey : Les Ponts Modernes, p.115, Picard, 1990
- 10) Navier,C. : Rapport et Mémoire sur les ponts suspendus, 1823
- 11) Guy Grattesat, Ponts de France, presses des Pontset Chaussées, p.103, 1982
- 12) L. Vicat : Ponts Suspendus en Fil de Fer sur le Rhône, Annales des Ponts et Chaussées , pp.93-144, 1831
- 13) 例えば、スガントイプ吊橋のケーブル定着方法について検討した論文としては、"Influence sur le mode d'attache des chaînes sur la résistance des piliers des ponts suspendus", annales des Ponts et Chaussées, pp.394-397, 1832
- 14) Vicat: Nouvelle manière de confectionner les câbles en fil de fer, Annales des Ponts et Chaussées, 1834
- 15) Seguin,M: Des ponts en fils de fer, 1826
- 16) G. Labrune: La géographie de la France, pp.16-17, NATHAN, 1993
- 17) 高橋裕：河川工学,東京大学出版会,p.285,1990
- 18) 大矢雅彦：「地形分類からみたローヌ川下流平野の特色」、早稲田大学理工学研究所報告第 134、p92、1991
- 19) Michel Cotte : Le choix de la révolution industrielle, PUR, p170, 2007
- 20) 前掲 4)、p.95
- 21) 土木学会編：『構造力学公式集』、土木学会、pp.301-302、1974