

古構造学的視点から見たスガントイプ吊橋の由来*

Origin of Seguin Type Bridge from viewpoint of Extinct Structure History

小林 一郎** 村上 梨沙*** 本田 泰寛**** 星野 裕司*****

By Ichiro KOBAYASHI, Risa MURAKAMI, Yasuhiro HONDA, Yuji HOSHINO

概要

著者らは現在、古構造学の確立に向けた研究をおこなっている。本稿では、1825年にマルク・スガンによって設計されたトゥルノン橋を事例として取り上げる。同橋はワイヤーケーブルや補剛桁の採用により評価されている。しかし、主塔の配置やケーブルの張り方などの独創的な試みに対しては、現在では採用されていない構造のため、顧みられることは少ない。これらの構造について、特に地形に着目した古構造学的視点で見直すことにより、トゥルノン橋の構造が成立した必然性を明らかにした。当時の条件下では、ワイヤーケーブルや補剛桁の採用は主塔の配置やケーブルの張り方などの独創的な構造でのみ可能であり、トゥルノン橋の構造の成立が軽量吊橋の発展にも多大な影響を与えていることが明らかになった。

1 はじめに

著者らは現在、古構造学の確立に向けた研究をおこなっている。本稿では 1825 年にマルク・スガンによって設計されたトゥルノン橋を事例として取り上げる。一般的な橋梁史研究では、橋長の更新といった数値的な記録、または、画期的な技術革新や新たな構造を創造した技術者に主眼をおく。しかし、エヌビック社の RC 橋や、ノエによって建設された鉄道橋のように、従来の視点では評価が困難な事例も数多く存在する。そのような橋梁に対して、古構造学的な視点から橋梁の由来を学ぶことで、橋梁史の新たな側面を明らかにする。例えば、エヌビック社の RC 橋は会社の商品として、ノエの鉄道橋は地方における地域開発という視点から評価を試みた^{1),2)}。

今回取り上げたトゥルノン橋は、ワイヤーケーブルおよび補剛桁の採用によって大幅な自重軽減と工期短縮を実現したことにおいて評価されている³⁾。しかし、橋梁自体の構造は、2 径間構造やケーブルの張り方など今日では採用されなくなった構造であるため、肯定的な評価は少ない。

本稿では、それらの構造にも当時なりの合理性を見出すことができるのではないかと考え、特に地形に着目した古構造学的な視点からスガントイプ吊橋の構造の由来について考察する。

2 19 世紀のフランスの橋梁

19 世紀前半の近代吊橋はチェーンを採用した重量吊橋が主流であり、まだ桁を補剛するという認識がなかった。このため、それらの橋梁は風が原因で破損することが多かった。例えば、イギリスのトーマス・テルフォードは 1826 年に当時最長径間 176m のメナイ橋を建設したが、たびたび風による損壊を受けた⁴⁾。その後の吊橋は、風による振動や揺れを少なくすることが重大な課題のひとつであった。

この当時のフランスでは、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のみ石造アーチ橋が建設されていた。しかし、1820 年代以降に産業革命がおこり橋梁の必要性が高まると、石造アーチ橋と比較して安価で長スパンを短期間で建設可能な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 年にはクロード・ナヴィエによってイギリスの吊橋に関するレポートも出された⁵⁾。その後、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⁶⁾。

しかし、1850 年にアンジェで 223 名の犠牲者を出した落橋事故が起きた。かつてないほどの大規模な事故を重く受け止めた内務大臣によって、2 年後に実質的に吊橋の建設を禁止する通達が出された。それ以後フランスにおいて経済的な構造物であった吊橋はほとんど建設されなくなり、再び信頼性の高い石造アーチ橋や新たな橋梁として鉄橋が建設されていった。

*keywords : 古構造学、トゥルノン橋、地形

**正会員 工博 熊本大学大学院自然科学研究科教授

***学生員 熊本大学大学院自然科学研究科

****正会員 博(工) 熊本大学学術研究員

*****正会員 博(工) 熊本大学大学院自然科学研究科准教授
(〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目 39 番 1 号)

3 スガントイプ吊橋の特徴

フランスの産業革命は当時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、それに伴う販路拡大を行っていったのである。アノネイに工場を構えていたスガン社は販路を拡大し、1820年代にはスイスのフランス語圏にまで販路を広げている⁷⁾。この同族企業によって、ローヌ河の東西を結ぶ吊橋が次々と架けられていった。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。本稿では、これらの吊橋をまとめてスガントイプ吊橋と呼ぶこととする。

(1) ローヌ河の8橋の吊橋

ここでは、1831年のヴィカの論文⁸⁾で報告された8橋の吊橋の構造について整理する。この論文は、当時の建設省の長官ベキーがローヌ河に架けられた吊橋の架橋技術を広く普及させるためにヴィカに調査させたものである。図-1、表-1は8橋を上流から示したものである。表-1では、メインケーブルの本数の確認ができないものについては複数と記入している。また、本稿では便宜上、橋脚上の塔を主塔、橋台上の塔を側塔とする。



図-1 ローヌ河の吊橋の位置(作成：村上)

表-1 ローヌ河の吊橋(作成：村上)

①ヴィエンヌ橋(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サンタンデール橋(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ボーケール橋(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	

(2) 構造上の特徴

8橋の吊橋の構造には多くの共通項があることが分かったが、それらは最初に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) ワイヤーケーブルの使用

2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った。しかし、フランスではチェーンの作製が技術的に困難で、チェーンの輸入も経済的な理由から困難であったため、ワイヤーケーブルが採用された。このワイヤーケーブルの採用によって、その後の吊橋構造は軽量吊橋が主流となっていった。

b) 補剛桁の採用

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。スガントイプ吊橋は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橋軸方向の桁の剛性を補っている(写真-1)。これは、補剛トラスとして、現代の吊橋にも受け継がれている。

c) 複数のメインケーブル

スガントイプ吊橋は、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-2)。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。現在の吊橋は、二面吊で片側には1本のケーブルにまとめている。



写真-1 トゥルノン橋(撮影：小林)



写真-2 トゥルノン橋(撮影：小林)

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。このような定着方法を本稿では、背越定着と呼ぶこととする(写真-3)。この定着法により、各径間はそれぞれ独立した構造で、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橋とも同様の基本構造をもつ(写真-4)。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年まで全土で建設された。

e)マッシブな石造の塔門

当時の吊橋には、例えば、メナイ橋のようなマッシブな門状の主塔が見られる。この形状は技術革新や機能主義、合理主義の台頭により、マッシブな主塔は不要になったことにより、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、アンダンス橋やトゥルノン橋などは主塔と同様の側塔が採用されている(写真-5)。ヴィエンヌ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を固定するための小さな柱が建てられていた(写真-6、写真-7)。



写真-3 アンダンス橋の主塔(撮影：小林)

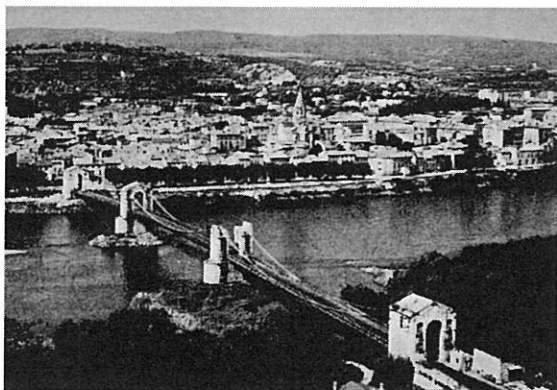


写真-4 3径間のサンタンデオル橋
(出典：<http://bourgsaintandeol.free.fr/>)



写真-5 アンダンス橋の側塔
(出典：<http://fr.structurae.de/>)

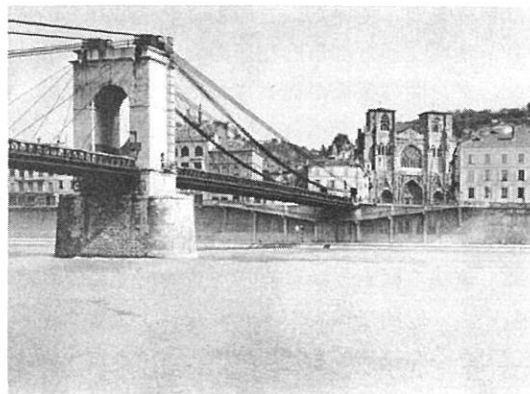


写真-6 ヴィエンヌ橋(絵葉書より)



写真-7 ボーケール橋(絵葉書より)

4 スガン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、フランス独自のスガン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、その構造に適應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、イギリスの吊橋の構造を転用することは不可能であり、架橋地点に適した構造に変更する必要があった。本章では、トゥルノン橋(図-2)⁹⁾を例に、古構造的視点からスガンタイプ吊橋の構造の由来を探る。

(1) 架橋地点

2章で述べたように、当時のフランスにはほとんど橋が架かっていなかった。特にローヌ河は流れが速く水位の変動が激しいため、リヨンと地中海を結ぶ300km間に橋梁はほとんどなかった¹⁰⁾(図-3)。産業革命期に入り東西の交通が活発化すると、ローヌ・アルプ地方の企業は事業を拡大するために、ローヌ河を挟んだ東西の交通路を手に入れる必要があった。特に、リヨンとポン＝サン＝テスプリの中間地点の架橋は東西交通の時間短縮に最も有効であった。また、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の影響を受けやすく不安定であり、地方都市に住む人々は架橋を望んでいた。このような地域社会の要求、つまり、地域交通と都市内交通の発展を目的としてトゥルノン、タン間の架橋が提案された。これを受け、吊橋の架橋について関心を示していたマルク・スガンがこの橋を設計することになった。

次に、架橋地点の選択について、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た。一方、都市間交通の視点から見ると、当然交通量の多い地点に架橋される。トゥルノン側には城(写真-5)があり、すぐ側には港も存在する。これより、この周辺に人口が集まり都市が発展していたことが推測される。これらの理由により、架橋地点が決定された(図-4)。

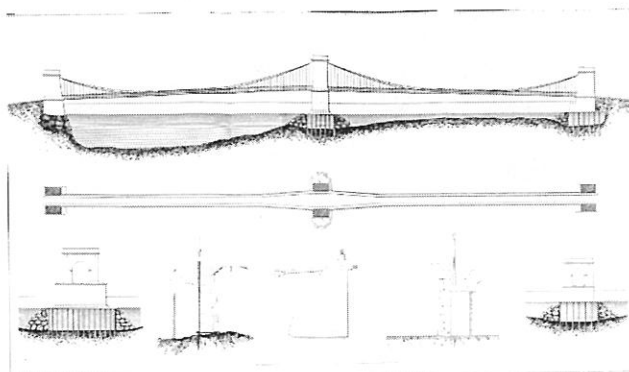


図-2 トゥルノン橋の概要(文献⁹⁾より引用)



図-3 産業革命以前のローヌ地方(作成:村上)

(2) 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、川幅はおおよそ170mで、架橋位置が湾曲部であるため、外側の河床(トゥルノン側)は深くなっており(図-5)、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。

吊橋の設計に当たって、まず検討されたことは図-5のa)に示した単径間吊橋の建設であったと推測される。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、最小限に食い止めるために設計されたのは図-5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、現在では図-5のc)に示したような3径間吊橋が主流であるが、この場合、河川中の橋脚を河床の深い位置に橋脚を建てなくてはならない。このことから、技術的にも、地形的にも困難であったと推測される。



写真-5 トゥルノン城(絵葉書より)



図-4 トゥルノン橋の架橋地点(作成:村上)

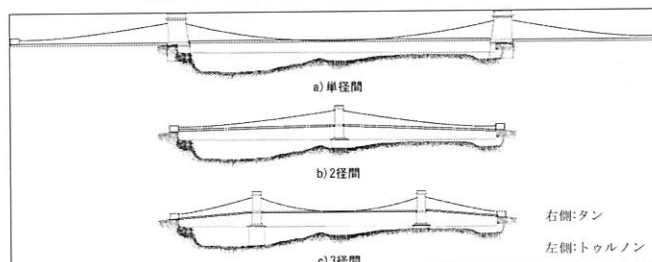


図-5 トゥルノン橋のスパン割(作成:村上)

(3) 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、これらを繋ぎ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。また、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、水平方向の揺れに対応している。この構成はトゥルノン橋の構造に冗長性を与えた。つまり、メインケーブルを6本で構成することによって、ケーブルの破断による即時の落橋を防いだのである。

(4) 定着方式

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で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-6に示したように塔頂に設置された铸铁製の定着装置と、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る¹¹⁾。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。

(5) 塔門の形式

まず、主塔の形式について述べる。当時は古代ギリシャや古代ローマの様式を再現しようとする新古典様式の時代であった。例えば、代表的な建築物にパリの凱旋門(1836年)がある。トゥルノン橋の主塔はローマン様式の石造門となっており、ヨーロッパでは橋の上に塔門が建てられることは特異なことではない¹²⁾。例えば、古代ローマ時代のフラヴィアン橋は両側に凱旋門が建てられた。また、構造的にも、トゥルノン橋の主塔はケーブルの張力に耐えるため、マッシブな主塔が必要とされた。

次に、側塔の形式について述べる(図-7)。最初の案では、図-7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-7のb)に示すように橋台上に側塔を建てることになった¹³⁾。これにより、側塔がない場合は図-8の①に示すように張力が水平方向のみに作用していたのに対し、側塔を建てることにより図-8の②に示すように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¹⁴⁾まで減少したため、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、側塔の後方の基礎にケーブルを定着するための十分なスペースが確保できなかった(写真-6)。このため、主塔と同様に背越定着が採用された。

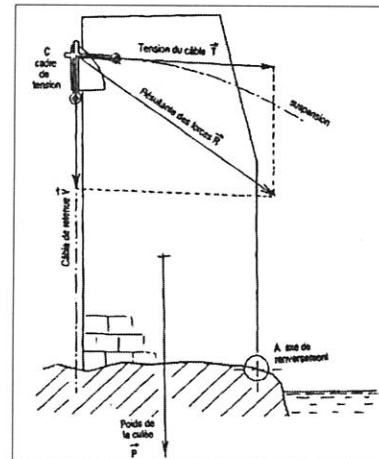


図-6 定着方法(文献¹¹⁾より引用)

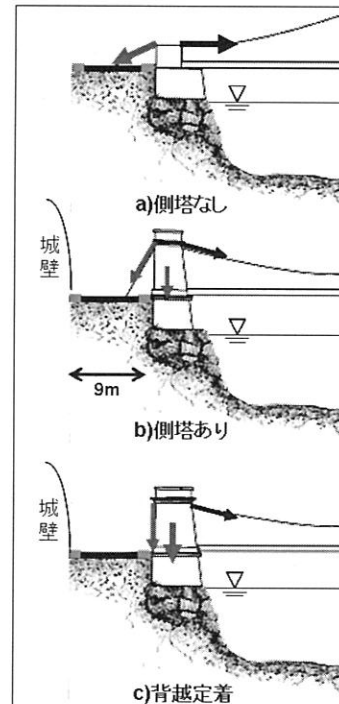


図-7 トゥルノン橋の側塔(作成：村上)

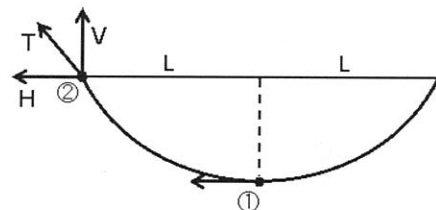


図-8 ケーブルの張力(作成：村上)



写真-6 トゥルノン橋と城壁(絵葉書より)

5 スガントイブ吊橋に対する古構造学的評価

トゥルノンに橋を架けるには、イギリスの吊橋の構造は地形的に適さなかった。特に、河床の状況や橋台後方の地形は架橋時の大きな障害であったことが分かった。また、イギリスで使用されたチェーンケーブルも、フランスで製作・輸入が困難であった。スガンはこれらの問題を克服した結果、この架橋地点でのみ成立する構造を創造するに至った。つまり、トゥルノン橋の構造は架橋地点の地形、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。このトゥルノンの地形に適応した構造は、主塔、側塔の両方で背越定着を採用することにより、各径間が独立した構造を有していた。例えば、ボーケール橋のように左岸側の橋桁が破損しても他の径間の橋桁に影響を及ぼさない構造となっている（写真-7）。この構造により、1つの径間の揺れが他の径間に影響を及ぼしにくくなり、補剛桁とともにチェーンを用いた重量吊橋が抱えていた風に対する問題にひとつの解を示した。

この構造を持った吊橋は産業革命により橋の必要性が高まっていたため、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。また、単径間で独立した構造を連続して配置することで、川幅の広い地点でも架橋が可能であったため、サンタンデオール橋やボーケール橋のように多連の単径間吊橋も建設された。これらの吊橋の成功はヴィカの論文によってフランス全土に伝えられ、スガン社だけでなく様々な企業によってフランス各地の河川に建設され、急速に普及していった。つまり、トゥルノンに橋を架けるために成立した構造は、その構造上の特徴ゆえに意図せずして、フランス全土に応用可能な構造を有していたのである。

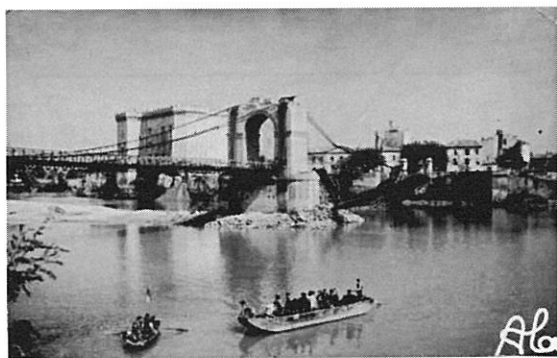


写真-7 ボーケール橋(絵葉書より)

6 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、近代吊橋の構造上の問題と産業革命期のフランスの橋梁について述べた。

(2) 3章では、ヴィカの論文に報告された8橋の吊橋の構造を整理し、それを基にしてスガントイブ吊橋の構造上の特徴を示した。

(3) 4章では、トゥルノン橋を事例として取り上げ、その構造の由来を古構造学的視点から分析した。

(4) 5章では、古構造学的視点からトゥルノン橋の由来を分析したことにより明らかになったことを整理した。本橋は架橋地の地形とワイヤーケーブルの使用という条件により、この構造でしか成立することはなかったことが明らかになった。また、トゥルノン橋が単径間構造を有していたため、多連の吊橋にも応用可能であった。

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。

参考文献

- 1) 本田ほか、古構造学の創生に向けて、土木史研究講演集、Vol.25、pp.57-60、2006。
- 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) 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。
- 4) 川田忠樹、『吊橋の文化史』、技報堂、pp.118-123、1981。
- 5) Navier, C., Rapport et Mémoire sur les ponts suspendus, 1823。
- 6) Guy Grattesat, Ponts de France, Presses des Ponts et Chaussées, pp.103, 1982。
- 7) ミッシェル・コットほか、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、土木史研究論文集、Vol.15、pp.363-365、1995。
- 8) L. Vicat, Ponts Suspendus en Fil de Fer sur le Rhône, Annales des Ponts et Chaussées, pp.93-144, 1831。
- 9) Seguin, M., Des ponts en fils de fer (『鉄線の橋について』)、第2版、1826。
- 10) 小林ほか、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、土木史研究論文集、Vol.15、pp.178、1995。
- 11) Michel Cotte, Le choix de la révolution industrielle, PUR, pp.170, 2007。
- 12) 馬場ほか、『景観と意匠の歴史的展開』、信山社、pp.43、1998。
- 13) 文献3、pp.95。
- 14) 『構造力学公式集』、土木学会編、pp.301-302、1974。