

吊橋のお話し

0. 始めに

吊橋は、多くの人が興味を持っていますし、地域のランドマークとしても親しまれています。近代的な長径間の吊橋は、一般の人が実際の設計や架設に関わることは殆んどできません。また、特に吊橋だけを専門とする世襲的な職業集団ありません。そのため、本四架橋が一段落した現在の時点で、これまでの経験を技術移転することが途切れることに対する不安があります。日本の山間部は谷が深い地形が多いので、生活道路として簡易な歩道専用の吊橋（以前は釣橋と使いました）が各地に見られます。これらの吊橋は、橋梁工学の知見が無くても、地元の大工や鍛冶屋などを含めた技術集団が工夫して架設しました。つまり、案外、身近に建設できる構造です。現在は知識産業が花盛りになって、言わば不器用なインテリ集団だらけであって、自分の手で何かを作ることはしなくなりました。手に技術を持つことの選択範囲が少なく、また技術者への尊厳が失われています。日本の伝統的な大工さんの落ちぶれようと、村の鍛冶屋の消滅は悲しい現実です。技術教育の目線を、もう少し大衆化したところに置くことは、結果的に、より高度な技術開発の基礎を築きます。吊橋の建設技術は、決して易しいものではありませんが、一般の人に興味を持ってもらい、吊橋を含め、橋梁工学、さらには土木工学全体を専門にしたいとする若い人が増えてくることを期待して、この小文をまとめました。

1. 原始的な吊橋は昔からあったこと

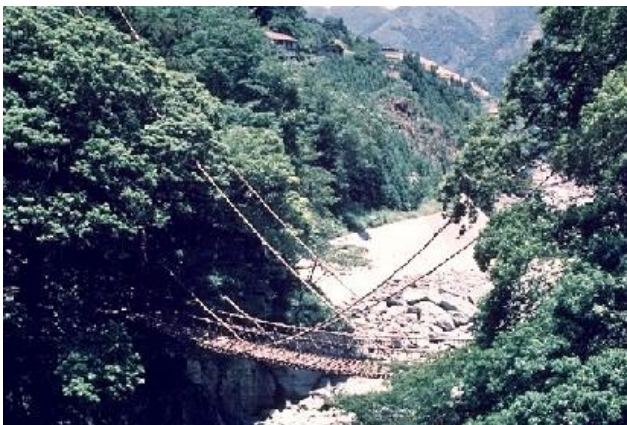


図1 徳島県祖谷（いや）のかずら橋（倉西 茂）



図2 三重県伊勢二見ヶ浦の夫婦岩（中日新聞）

原始的な吊橋として、植物のかずら（葛）を使って架けられた徳島県祖谷（いや）のかずら橋が有名になりました（図1）。ここは、平家の落人部落であったことと、本四架橋現場に近いこともあって、一種の観光資源となりました。同じような橋は、他の地域にも見られます。外見にかずらを使っていますが、安全な通路にするためワイヤロープを使っています。三重県、二見ヶ浦の夫婦岩は、人が渡る目的はありませんが、外国人は Rope Bridge と言います（図2）。兎に角、谷を渡るならば、ケーブル一本を手掛かりにします。通路幅を持たせることができませんので、籠を吊り下げる籠渡しが名所浮世絵にあり（図3）、いまでも私的に使っている場所があるようです。北斎の名所図絵に、当時としては有名であった歩道吊橋を描いたものがあります（図4）。橋梁工学的に見れば幾らか不合理な構造図ですが、典型的な無補剛吊橋の変形を描いています。近代の歩道専用の小吊橋は、放物線のケーブルに眼が行きます。実は、歩道を真っ直ぐに構成するケーブルにも大きな引張力を持たせていることで、橋として実用になるのです。現存しているかは不明ですが、郵便切手の図柄に採用された黒部溪谷、櫛平、奥鐘の吊橋が一例です（図5）。歩道専用の吊橋は、その地域の観光ランドマークになる場合があります。上高地にある河童橋（初架橋 1891）が一例です（図6）。



図3 広重名所図会の飛騨の籠渡し（部分）



図4 葛飾北斎の名所図絵から



図5 黒部溪谷の吊橋



図6 長野県上高地の河童橋（中日新聞）

2. 小吊橋の構造は実践的な工夫があること

車両通行に利用する中小吊橋は、左右二本の放物線ケーブルを使って床横桁を吊り、縦桁を渡して通路にします。通路の曲げ変形と捩れ変形を抑えるため、構造上の工夫が必要です。歩道専用の吊橋は、手すりも含め、複数の水平ケーブルを別に張って通路を補強します。放物線状のケーブルは、歩道部を水平に支え、全体重量を持たせます。放物線ケーブルだけでは、曲げ変形を抑える作用が大きくなりません。通路部の水平ケーブルに大きな引張力を作用させれば、歩道橋としての実用的な曲げ剛性が得られます。似た構造は、電車の架線構造に見ることができます。放物線ケーブルが別にあって、パンタグラフが当たる電線を水平に吊ります。水平に保つ電線部は、放物線ケーブルとは独立させた端部に、張力を加える錘をぶら下げる個所を見ることができます。この水平反力は内部応力の性格を持つ力であって、ケーブル自体に曲げ剛性が無くても、曲げ変形を抑えます。昔の路面電車の架線は、適当な間隔で横に張ったケーブルで支えていましたので上下の変位差が大きく出ます。相対的にパンタグラフも大きくしてあります。歩道専用の吊橋の、通路部に引張力を加える水平ケーブルは、上下の撓みだけでなく、支間方向と直交する方向の水平変位も抑えます。吊橋の補剛桁は、支間方向の上下の曲げ変形を抑える目的に使います。桁自体には支間方向の水平軸力を作用させません。放物線ケーブルの水平力成分は、曲げ変形を抑える作用もします。しかし、幅員方向の水平変位と捩れ変形を抑える作用が小さいので、簡易な吊橋では横変位と捩れを抑える耐風索(storm cable)を別に張ります(図7)。

3. 補剛トラスの座屈変形が頻発したこと

図7に示した道路吊橋は、歩道専用吊橋の構想をそのまま引き継いだ補剛トラスを採用しています。放物線ケーブルが横桁を吊り、その上にトラスを組み上げます。トラス自体は上横構の無いポニートラスです。この形式の吊橋は、上弦材が横方向に蛇行するような座屈変形が頻発しました。筆者が調査したのは1969年です。橋の上で重量車が対向できない渋滞が起きて、どちらも譲らない活荷重満載状態になったときに、大きな音を立てて上弦材が変形したそうです。上弦材の補修後、橋の入り口に荷重制限の標識が付きましたが、その後の交通マナーが格段に向上したそうです。このような経験を反映し、中小規模の吊橋は、トラスの上弦材を吊り、上路形式にすることが標準になりました(図8)。



図7 耐風索を配置した小規模の道路橋吊橋
愛知県天竜川上流、錦橋(おきんばし)

4. 捩れ剛性の向上には上下の横構が必要であること

吊橋は長大橋に適した形式です。しかし、水平変位と捩れの影響を考える必要があることがタコマ吊橋の崩落事故(1940)で明らかになりました。結論から言うと、捩れ剛性が大きい補剛桁構造にすることです。トラス形式を採用する場合、下横構を省く構造、または上が開いたポニートラス構造は、大きな捩れ剛性が得られません。アメリカの金門橋(Golden Gate Bridge, 1937)は、当初、トラス構造の下面が開いていましたが、その後、下横構を増設する補強工事が行われました。



図8 箱ヶ瀬橋、(福井県九頭竜ダム湖)。瀬戸大橋のテストケースにした吊橋

5. 単純吊橋は一次の不静定構造であること

両端をヒンジで支持した単純桁を、放物線ケーブルで吊った形式が単純吊橋です(図9)。この形式は、構造力学的に言えば一次の外的不静定構造(力の釣り合い条件だけで解析できない構造)ですので、その内部応力は不明です。架設工事次第で、ケーブルの水平反力、それに関連して補剛桁の応力も変化します。力学的には、完成時、自重のみの載荷状態で補剛桁の応力が0になるように架設工法を計画します。気温の変化があればケーブルが伸び縮みしますので、それに引かれて桁も曲げを受けます。ケーブルは、塔を立てて支え、塔頂でケーブルを固定する金具(サドル)で橋軸方向の変位を固定します。このとき、塔を自立させるように曲げ剛性を大きくすると、塔の基部に余分な曲げ応力が発生しますので、不静定次数が上がります。これを避けるため、中小吊橋ではタワー基部をヒンジにしたロッキングタワーが採用されます。ケーブル形状は、サドル間で測った径間とサグ(ケーブルの描く高さ)が変動します。九州の若戸吊橋は、支間が長く、塔の剛性も大きいので、塔を自立させた構造です。そうすると、塔頂の前後でケーブル張力の水平成分が異なります。つまり、不静定次数が上がります。完成時に、この差が最小になるようにサドルを固定することを計画すると、ケーブルだけを張り渡す架設時にサドルの前後で水平反力に差を付けなければなりません。これは不可能ですので、サドル全体を塔頂で径間の外側にセットバック(後退)させておいて、架設の進行に合わせて中央径間側に移動させました。長大吊橋では、サドルの移動ではなく、塔全体の弾性変形で塔頂間の伸縮に対応させる施工をします。

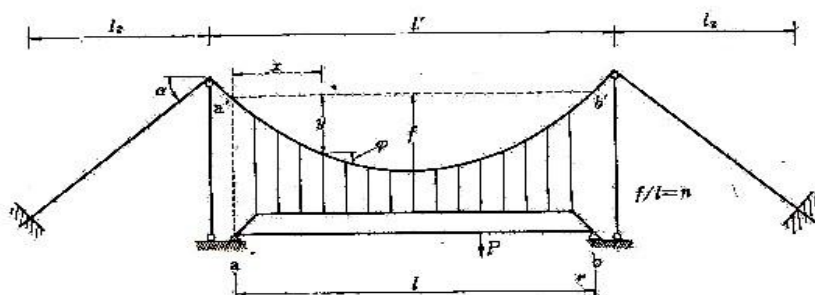


図9 単純吊橋の幾何学的形状

6. 吊橋計算の力学モデルは引張軸力を受ける梁

吊橋完成後、活荷重(自動車荷重などの総称)による応力と変形の追加分は、原則として死荷重(自重)で生じる応力とは独立に計算します。これを考えて吊橋補剛桁変形の微分方程式を扱います。橋梁工学では、大きな重量の鉄道車両や自動車が橋の上を移動しますので、どの位置に荷重が載ったときに最大または最小応力になるか、の解析が重要な課題です。この全体を影響線解析と言い、橋梁工学固有です。弾性的な構造物であると、変形が大きくなければ、力と変形とが比例すると仮定した理論(線形理論または弾性理論と言います)で解析ができます。吊橋の桁は、普通の橋桁に較べれば相対的に大きな変形が出ますので、活荷重が大きくなると、線形理論とはズレてきます。数学的には非線形の微分方程式です。このことを考えた計算理論を撓み理論と言います。非線形の構造であると、影響線を使う設計計算法が利用できませんので、試行錯誤的に数値計算をしなければなりません。コンピュータが利用できなかった時代、数値計算を効率的に進める方法について、実践的な研究が行われました。パソコンの性能が格段に上がりましたので、手計算の時代に較べて数値計算の労力はずっと楽になりました。しかし、吊橋の力学条件は橋梁ごとに多様ですので、どのような条件にも利用できる便利なコンピュータプログラムはありません。すべてコンピュータ任せにする、言わば「丸投げ」ではなく、コンピュータと対話するような形で計算を進めることが必要です。

7. ケーブル・桁・支点・塔の構成は遊動円木の性質に似ること

吊橋の補剛桁を桁端部で支持する方法は、二つの構造モデルがあります。一つは、桁端部を遊動円木のように支持する構造。もう一つは、単純支持桁の支承構造を基本とする考えです。どちらの場合も、補剛桁は橋軸方向の移動を考え、接続する路面に伸縮装置が必要です。標準的な吊橋の塔は、塔頂のサドルから伝わる鉛直力を支える垂直の柱です。吊材は主ケーブルから鉛直に補剛桁を吊り下げます。橋軸方向から見ると、ケーブル・吊り材・補剛トラス・塔が垂直面内に並びますので、支間方向では、補剛桁と塔との間に隙間が必要です。したがって、吊橋の力学モデル（図 9）で見るように、塔頂間距離よりも補剛桁の支間を短くします。塔を通り抜けて補剛桁を連続させたいとなると、塔柱を傾斜させ、英字の A のように、塔柱下部を開かなければなりません。斜張橋は、この形式の塔構造を見ることが多くなりました。幅員が狭い吊橋は、横荷重に対する塔の倒れの安全率を上げるため、塔の基部を開くことも行われます。長大支間の吊橋の桁端は、ケーブル吊り材ではなく、塔の或る高さの個所から補剛桁端部を吊る遊動円木構造か（図 10. a）、下から支える（図 10. b）ようなリンク構造に構成します。中小吊橋では、アバット（橋台）で水平移動を許す通常の支承構造で補剛桁を支え、ロッキングタワーのヒンジ支点を外側に外しています。

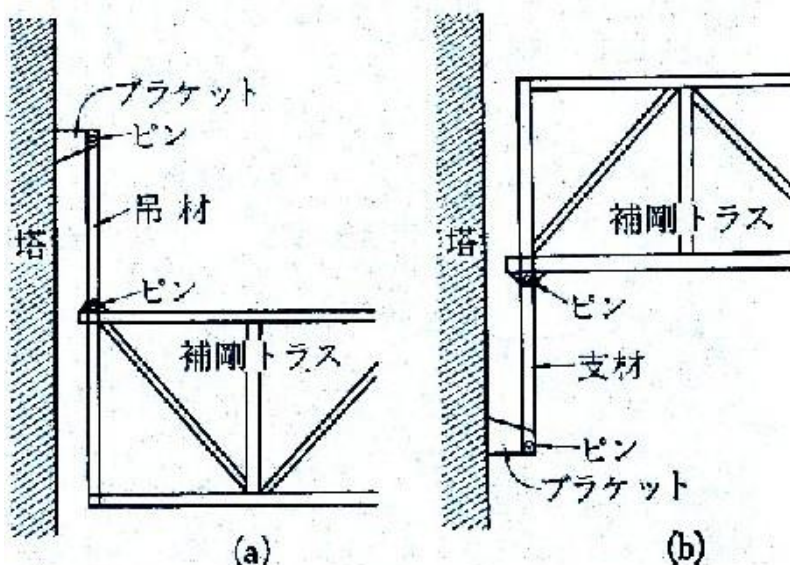


図 10 遊動円木式の桁端の支持構造

8. 橋軸方向水平力を吸収する構造の工夫

吊橋は、自重の大部分が吊り材を介して主ケーブルに伝えられますので、支点反力と剪断力とは、同じ支間で考える単純桁よりも大幅に小さくなります。日本では地震がありますので、橋軸方向に補剛桁の移動を許すことと、地震で生じる水平力を吸収させることを同時に考えます。補剛桁が橋軸方向に水平移動することを拘束する方法として、支間中央で、主ケーブルの吊り金具を補剛桁に固定させるか、斜め部材 (center diagonal stay) を設ける例を見ることができます。補剛桁の橋軸方向慣性力は、一部がケーブルに伝わり、補剛桁が左右逆対称に変形します。しかし、これだけでは水平力を取り切れませんので、斜張橋のように塔から斜めのケーブル (tower stay) を張るか、念のため、桁端部に弾性的な拘束を工夫します。支承の水平移動の遊間を超えて、支承と伸縮装置を破壊させないようにするためです。支間中央で、補剛桁全体重量の水平震度相当の水平力が作用したときの変位量の計算が必要です。これは、吊橋中央に対して左右独立した吊橋構造系を考え、左右のケーブル水平力に差があって、桁が左右逆対称に変形するときの弾性エネルギーを計算すれば得られます。風荷重のような水平荷重による横変形は、補剛桁の横方向の曲げ剛性と同時に、塔高さで支えた横方向の振り子状の復元力とで抵抗するとして計算します。橋の専門家が吊橋の写真を撮影するとき、全体景観と同時に、このような細部構造にも目が行きます。

9. 夏冬で縦断勾配が変化すること

吊橋は、外的不静定構造物ですので、大地とケーブルとの相対的な温度差があると、ケーブルの長さが伸縮し、補剛桁に曲げ変形が出ます。ケーブルの長さ変化は、ケーブル全長に温度変化分と線膨張係数とを乗じて求めます。この長さ変化分を相殺するように不静定のケーブル水平反力の増分を計算します。温度変化は、標準温度（20℃）±30℃程度です。線膨張係数は $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ を使います。夏冬で桁の最大撓み差は、橋全体の長さの 1/1000 程度ですので、目視では殆んど分りません。実際の吊橋で、温度変化による縦断勾配の変化を測定した例を筆者は知りません。夜昼の温度変化程度では有意な測定が難しいでしょう。夏・冬と季節を変えて測定することは、機会を選ぶことが必要ですが、興味が無いと実行できない嫌いがあります。

10. 吊橋の変形と振動

吊橋では、自重の大部分は吊材を介してケーブルで持たせます。したがって、普通の桁橋の断面寸法をそのまま採用しても、長い支間を渡すことができます。吊橋がスマートに見える一つの理由です。大きな自動車荷重を安全に通行させるには、橋全体に或る程度の曲げ剛性を持たせる必要があります。普通の道路橋では、活荷重が載るときの最大撓み制限が支間の 1/600～1/800 程度です。鉄道橋は、この制限が厳しく 1/1000 以下に抑えます。瀬戸大橋は、道路と鉄道とを通す併用橋ですので、他の吊橋の眺めと比較すると、ややゴツイ感じを受けます。吊橋のケーブルは、桁全長の中央を支える形になりますので、マクロに見れば 2 径間連続橋の性質を持ちます。普通の単純橋とは違って、曲げ応力や撓みが最大になる個所は、吊橋全長の 1/4 付近です。また、桁は、等間隔の吊材で吊っていますので、相対的に径間の短い連続橋の性質も示します。中小径間の吊橋は、良く揺れる感触を持ちます。人の振動体感 は、3～5Hz が最も感度が高いのですが、これは 20～30m の単純橋の固有振動数に相当します。一般的に言う と、橋の振動は波動の性質が強く、その速度は大体 200m/sec です。音速よりもやや低めです。この波動が橋の全長を往復し、境界条件などで同期することで固有振動数が決まります。最も周期の長い振動は、近似的にメートルで測った(支間長/100)秒です。1000m 級の長大吊橋では、10 秒にもなります。振動解析をするときの力学モデルを解くと、第一次の固有振動モードは、吊橋全体を一波形とする解が得られますし、振動測定の波形をフーリエ解析すると、この長周期振動数が得られることがあります。しかし、これは、パルス状の波動が全長を往復するときの周期が解析されています。吊橋全体が、このような大きな波形で振動が発現することはありません。また、もし、そのような波形が観察されれば、破壊に繋がる危険な現象です。後で説明するタコマ吊橋は、中央に節のある振れの二次の振動波形が起きて崩壊につながりました。電力送電線では、強い風を受けて、全体が縄跳びのような大きな振幅の跳躍振動(galloping)が発生することがあって、電線の取り付け部を破壊させる厄介な問題があります。

11. 耐風安定性に関係する変形と振動

吊橋の設計計算時には、吊橋側面に作用する風は、静的な荷重として扱います。しかし、タコマ吊橋（正確には旧タコマ吊橋、1940）は、風に煽られてリボンがはためくように振れ振動をした挙句に疲労で落橋しましたので（図 11）、風の動的な作用も含めた耐風安定性の研究が始まりました。タコマ吊橋は、撓み理論による設計理論を忠実に追求し、トラス形式ではなく、経済的なプレートガーダー形式の補剛桁が採用されていました。建設されている吊橋の補剛桁は、殆んどがトラス形式を採用していることに注意して下さい。トラス形式は、横から見れば風が通り抜けるように隙間の多い構造です。タコマ吊橋のプレートガーダーは、横から見た厚みは小さいのですが、橋幅が相対的に広いので、結果的に航空機の翼のように、風向き次第で大きな揚力を受けます。風速が大きくなっても、振動が持続するように風荷重の方が動的に同期することがあります。これが**自励振動**です。この場合には、支間中央に節のある逆対称モードの上下動、または振れ振動が見られます。普通、上下振動と振れ振動とが連成することはありません。この連成振動は**羽ばたき振動**(fluttering)と言い、航空機の翼で起こることが恐れられています。吊橋の風による振動は、最初、上下振動が起こり、或る風速以上になると、振れ振動に変わることが実験的に分りました（平井敦）。これを**限界風速**と言います。補剛桁の振れ剛性が小さいと、振れ振動が出易くなります。薄板状の断面が振れ振動を起こすと、風速方向からの見かけの厚みが大きくなり、その厚みでの**カルマン渦**の発生周期との同期が起こります。風速がさらに上がると、同期がずれて、この振れ振動が出なくなることも実験的に確かめられています。



図 11 タコマ吊橋が風を受けて振動した 16mm ムービー (Prof. Farquharson) 1940
インターネットで動画で見ることができます。

12. 横変形と横振動

吊橋は、支間に対して相対的に幅員が狭いので、横方向の変形、または振れが大きく出易い性質があります。振れは、もし水平変形と合わさると、言わば橋面を横にめくるような変形か、その逆の振り子のような変形になります。しかし、普通は、ケーブルが左右にありますので、遊動円木のような変位になって、振れとは連成しません (図 12)。つまり、横変形と振れとは独立した力学系として計算することができます。振れに対する剛性は、桁を並列させた構造では横分配係数を計算することで間接的に解決しています。吊橋は、2主桁橋の性質があります。横方向の変形は、主に補剛桁の横方向の曲げ剛性で持たせることと、振り子として働く復元力で持たせます。横方向は風荷重を主に考えます。それによる応力は大きくないのですが、変形が大きく出易いので、中小吊橋では、放物線状に耐風索 (storm cable) を張ることが効果的ですし、経済的です (図 7 参照)。歩道専用の吊橋は、床構造を軽量にできますので、主ケーブルのサグも小さくできます。そうすると、水平方向の変位を抑える効果が低くなります。ロンドンのテームス川に架けられたミレニアムブリッジが起こしたような、思わぬ大きな水平振動を起こすことがあります。ミレニアムブリッジでは、デザイン上の外見構造を変えないようにするため、水平振動の減衰率を上げるような機械的なダンパーを敷設しました。

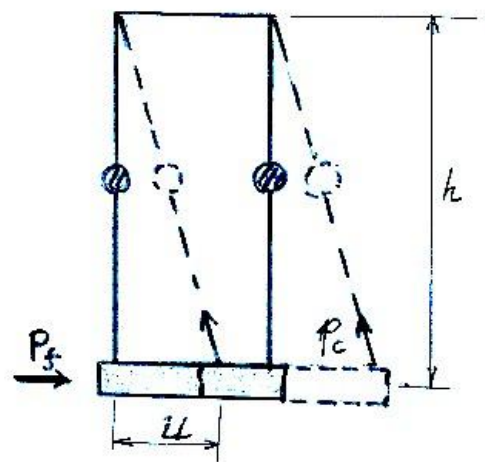


図 12 振り子状の横変位

13. 建築構造への応用

橋の設計には、景観を考えたデザイン感覚が必要です。しかし、橋の自重は大きく、通行させる鉄道や自動車の重量も大きいので、力学計算を踏まえた上で、材料の無駄を省く合理的な構造を提案しなければなりません。多くの建築デザイナーが橋の設計に興味を示すのですが、力学計算の専門知識が必要になるところで手が止まります。橋は、見かけによらず、動的な挙動を示しますので、良い設計は、デザイナーと解析技術者の共同作業が望ましいのです。吊橋のアイディアを入れた設計として有名になった建築構造は、丹下健三(1913-2005)のデザインによる吊屋根構造の代々木第一体育館があります(図 13)。日本では丹下健三の名前の方が有名ですが、海外では、構造計算を担った坪井善勝(1907-1990)とのペアの作品として知られています。吊屋根構造では、大きな移動荷重を載せる必要がありません。結果的に、動的な変形が大きく出ることが予想に無かったので、体育館完成後、疲労などを起こす欠陥構造が問題になりました。吊橋は、適度な剛性の補剛桁を使うなど、変形を抑えるための工夫があります。また、変形に対応する注意も払います。建築構造では、耐震設計を考えるとき以外、変形や振動を扱う必要性を考えなかったためです。



図 13 代々木第一体育館 1964 (ウィキペディア)

14. 終わりに：橋の解析とコンピュータの利用

構造計算にコンピュータが利用できるようになって、手計算で数値解析をする労力が大幅に軽減されるようになりました。コンピュータを利用するには、それに合わせるように理論式を再構築することも必要です。その実践的な方法が、FEM(有限要素法)に代表されるような、マトリックスを道具として使う計算術です。数学の専門書に線形代数の表題のあるのが、マトリックスを扱う参考書です。マトリックスの数値計算に使うプログラミング言語は、FORTRAN が主流でした。パソコンの機能が向上しましたので、従来、事務処理計算用と考えられていた EXCEL でも、多くの数学系の組み込み関数を利用できるようになって、科学技術計算にも手軽に利用できるようになりました。線形計算では、マトリックスの積、逆マトリックスの計算ができる関数があります。吊橋の計算では、撓み理論が非線形の微分方程式を扱うのですが、計算手順を工夫して線形計算の繰り返しで半自動的に実行させることができます。一時代前の大型計算機を利用していた環境では、計算ソフトをブラックボックス化しておいて、これを商業目的に使いました。中身がどうなっているかに頓着なく、コンピュータで計算したと言えば頭から信用することが普通になっていました。結果的に技術移転の努力もしなくなりました。情報技術は年々進歩していますので、気が付いて見ると、今までのドル箱であった計算ソフトが時代遅れになってしまいました。中身をブラックボックス化してしまったので、改良しようにも手掛かりがなく、大きな技術の空洞化が起きています。この空洞を埋めるためには、技術を狭く囲い込むのではなく、広く眼にするような一般化・大衆化・啓蒙化が必要になっています。現在ではインターネットの普及で、情報公開が便利になりましたので、時代は良い方向に進むと期待しています。