

西ヨーロッパにおける運河のリフトとインクラインの変遷について

日本国有鉄道清算事業団 正会員 長野 正孝
(前運輸省港湾技術研究所)

A Study on the Development of Lift and Incline in the Western Europe Canal

By Masataka NAGANO

概要

本論は、リフトやインクラインが、近代閘門式運河の発展史との関わりにおいて、いかなる技術発展の過程を辿り、どのようにヨーロッパの運河網の発展に寄与していったかを分析、評価するものである。

最初に、中世の黎明期において、閘門式運河とインクラインの技術が誕生した経緯を考察した。第二に、産業革命の初期の時代に、水資源保護という観点から、運河網を形成するシステム技術の一つとして、インクラインの技術が普及していった背景と要因を明らかにした。第三に、19世紀末から20世紀前半にかけて、ドイツなどで鉄道との競合の中で、輸送力向上、水資源保護の観点から、リフトが節水槽付き閘門とともに定着し、発展していった過程とその要因を明らかにした。第四に、戦後のヨーロッパの国際運河網の形成のために、リフト、インクラインの技術は、不可欠なものになり、閘門とは20～30mの水位差を境に棲み分けが行われ始めたことを明らかにした。最後に、これらの技術のさらなる発展の可能性を概観するとともに、これらの技術を我が国に適用した場合の可能性について示唆した。

【ヨーロッパ、運河、リフト、インクライン】

はじめに

運河建設技術の課題は、傾斜のある水路で、いかに経済的かつ安全に船を通過させるかにある。一般的に傾斜水路で船を安全に通航させる技術として、閘門とインクライン、リフトの三つが挙げられる。ヨーロッパでは、これらの技術がその時代の要請に応じて発展を遂げ、今日の運河の骨格を形成していった。

これらの技術は、当然のことながら、その時代の運河の役割、通航船の種類、規模、土木構造物を構成する材質、施設を動かす動力などの変化に応じて、その姿を変えてきた。このような視点を踏まえ、我が国では余り知られていないリフトとインクラインの技術が、閘門式運河の発展との関わりの中でヨーロッパの運河網の形成に影響を与え、その地位を確立させてきたかを分析、評価した。

具体的には、各時代における

- ① インクライン、リフトと閘門式運河の関係
- ② 個々の技術の発展とその特徴
- ③ 輸送構造の変化に伴うこれら技術の消長
- ④ 今後の運河の可能性

について、評価、分析した。まず、理解を深めるために、表 - 1のように運河発展の歴史を四つの時代に分けて、閘門、インクライン及びリフトの歴史的な変遷を概観し、論を展開してゆきたい。

表 - 1 ヨーロッパ運河網と閘門、リフト及びインクラインの変遷

| | 中世 | 17～19世紀初頭 | 19世紀末～20世紀初頭 | 現代 |
|--------|---|---|--|---|
| 閘門 | 10世紀頃、北ヨーロッパで2～3mの水位差を制御する小さな石積みの閘門が誕生。 | 小さな石積み閘門を数多くつないで大きな水位差を克服、国土を横断する運河が実現。 | 英国、ドイツなどで鉄筋コンクリート製の大水位差閘門、節水槽付き閘門、鉄製ゲートが誕生。パナマ運河が完成。 | 世界中に10～30mの落差を1基の閘門で克服する大水位差閘門、節水槽付き閘門が完成、普及。 |
| インクライン | 斜路で船を昇降させる装置が古代中国に存在。 | ドライ方式の小さな施設が普及を開始。 | ウエット方式が開発されるも、リフト、閘門に比べて不経済であったため普及せず。 | ベルギー、ロシアにおいてウエット方式で1,000トンの大型インクラインが登場。 |
| リフト | その起源はさだかでない。 | 水力を利用した小規模のものは誕生していたらしい。 | 英国で本格的なリフトが誕生。その後、ベルギー、ドイツ、フランス、カナダに伝播。 | ドイツ、ベルギーで1,000トンの船を昇降させる大型リフトが登場。 |
| 運河網 | 北ヨーロッパの一部で運河網が登場。 | 山岳運河が登場。英国の近代運河網の発達。 | 北ヨーロッパ全域を運河で結ぶ計画が進む。 | EC幹線運河網の整備がほぼ完了。ライン川とドナウ川が結ばれた。 |

1. 黎明期のリフトとインクライン

(1) 中世の閘門式運河とインクラインの発展

ローマ時代、ヨーロッパでは、河川のかなり上流まで、底の平らな船で往来していた記録が残っており、人工の水路としての運河はかなり古い時代から出現していた。これら河川や運河を航行する船は、もっぱら、人力、風の力、河川の自然の流れ、馬による牽引に頼る小さなものであった。次第に運河に対する新しい機能が要請されるようになった。現在、我々が閘門と呼ぶ水流を塞ぎ止め、船の航行を授ける装置については、10世紀以前には存在していたし、16世紀には木製のマイター・ゲート付き閘門が北ヨーロッパの低湿地に普及していた。この時代の閘門の規模は小さなもので、その材質が石、木材であったために、構造上、強度に限界があり、2～3mの水位差を制御するに止まっていた^{1)・2)}。17世紀のフランスでは、この技術によって、分水嶺を越えて大西洋と地中海を結ぶ運河(Midi運河)も実現した。数百メートルの標高差を越えるためには、閘門を数多くつなぐ必要があり、精緻な技術が要求された²⁾。

一方、閘門より大きな水位差を克服できるインクラインは、さらに古い時代から存在していた。紀元前1000年頃の中国の時代より、河川の急流部、水位の違う水路が交差する地点では、人力や家畜の力で、小舟を昇降させるための原始的な斜路が普及していた。17世紀になって、ヨーロッパで車輪付きの台車で引き揚げる装置が提案され始めた³⁾。人力や家畜を利用したリフト(昇降機)も、中世には、建築現場などで普及していたが、運河に使われ始めた起源はさだかではない。詳しくは今後の調査に委ねたい。

中世までのインクラインは、主として急流河川を遡上するための手段として用いられてきた。一方、閘門は、オランダ、ドイツなどのゆるやかな低湿地の水路で普及していた。このように、中世ではインクラインと閘門は、別の環境での棲み分けが行われていたと考えられる。

(2) 近世運河の発達とインクラインの普及

近世の代表的な運河としては、英国のカレドニア(Caledonian)運河(1822)、スウェーデンのエータ(Gota)運河(1832)、カナダのウェランド(Welland)運河(1829)などの多段閘門式運河が挙げられる。しかし、技術的には、木製のゲート(一部、鉄が使われ始めた)付きの石積み、もしくは煉瓦積みの閘門を数多く繋いで落差を克服する技術であったことは、中世の技術と本質的に変わるところは無かった⁴⁾。

しかしながら、この時代に着目すべき点は、運河をネットワーク・システムとして扱う発想が生まれたことにある。すなわち、英国における産業革命は、運河時代(1757~1830's)と呼ばれるブームを呼び、運河の交通量の増大を促した。閘門システムだけでは、分水嶺付近では昇降を繰り返し、消費する水資源を確保することが困難となった⁵⁾。そのため、水路橋、トンネル、ダム、ポンピング・ステーションなどを組合わせて水系全体で、できる限り水を涵養し、資源としてうまくコントロールするトータル・システムの考えが要求され始めたのである。

水資源をコントロールする個別の技術としては、テルフォード(T. Telford)、レイニー(J. Rainie)らによって水路橋(Chirk Aqueduct:1801, Pontcysyllte Aqueduct:1805)、水路トンネル(Chirk Canal Tunnel)、ポンピング・ステーション(Claverton pumping station 1810's)などが、この時代に登場した。^{6), 7)}

表-2 世界のインクラインの変遷

| 年 | 国名 | 運河名(地名) | 諸元(m) | | | | | | |
|------|----|----------------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
| | | | 水位差 | 勾配 | 船長 | 船幅 | 船のトン数 | トン重量 | 備考 |
| 1788 | 英 | (Ketley) | 21.3 | 1:25 | 5.8 | 1.8 | 5 | | ドライ |
| 1790 | | (Shropshire) | 61.3 | | 5.8 | 1.8 | 5 | | ドライ |
| 1809 | | Birmingham | 3.6 | | 21.8 | 2.4 | 40 | | ドライ |
| 1831 | 米 | Morris | 11.0 | 1:10 | 24.0 | 3.2 | 70 | | ドライ |
| | | | ~30.4 | ~12 | | | | | |
| 1850 | 独 | Monkland | 29.3 | 1:10 | 21.3 | | 35 | | ドライ |
| 1876 | 米 | Georgetown | 11.6 | 1:12 | 34.1 | 5.1 | 135 | ? | ウェット |
| 1880 | | Oberlandisher | 25.0 | 1:12 | 14.3 | | 50 | | ドライ |
| 1891 | 日 | 琵琶湖疏水 | 36.0 | 1:15 | - | 2.5 | 5 | | ドライ |
| 1893 | 仏 | (Meaux) | 12.2 | 1:25 | | 3.8 | 70 | | ドライ |
| 1900 | 英 | (Foxton) | 22.0 | 1:4 | 24.4 | 4.6 | 70 | ? | ウェット |
| 1968 | 伯 | (Ronquie' res) | 67.5 | 1:20 | 91.0 | 12.0 | 1,350 | 5,500 | ウェット |
| 1969 | 仏 | Rhein-Marne | 44.5 | 1:25 | 42.5 | 5.5 | 350 | 894 | ウェット |
| 1973 | 中 | Hanjian River | 33.0 | 1:7 | 24.0 | 10.7 | 150 | 400 | ? |
| 1974 | 仏 | Motech | 14.3 | 1:33 | 125 | 6 | 350 | - | 木根 |
| 1983 | 仏 | Forserannes | 13.6 | 1:20 | 88 | 6 | 350 | - | 木根 |
| 1985 | 露 | Krasnoiasnk | 101.0 | 1:10 | | 12.0 | 1,500 | 6,720 | ウェット |

水を消費することなく船を昇降できることが、インクラインの特徴であり、これらの施設とともにこの時代に、普及したことは当然のことであった。

表-2 に示すように、1788年にイングランドのケトレー(Ketley)で最初のインクラインが誕生してより同様のタイプのものが約1世紀の

出典：PIANC:「Ship Lift」、京都府河川局、「Stre'py Thieu」、「Ronquie' res」より著者編集

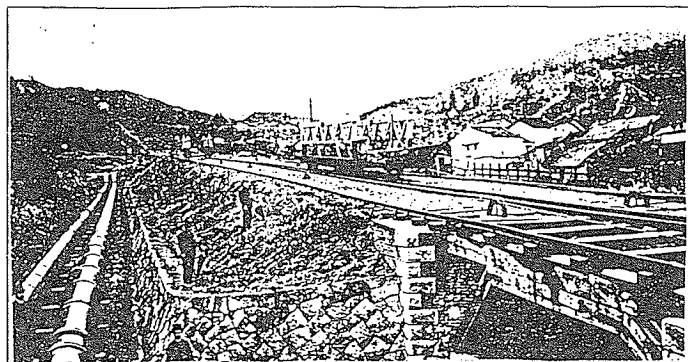


写真-1 1891(明治24)年頃の蹴上のインクライン: 京都府蹴上

間に世界で10基程登場した^{8)・9)}。これらのインクラインは、5~70トンの船を車輪付き台車に載せて、ガイドレールの付いた斜路を昇降させるもので、ドライ方式のインクラインと呼ばれた^{8)・9)}。運河を航行する19世紀初頭の船は、もっぱら馬によって曳かれる小さな木造の船で、簡単な木製もしくは石造りの斜路の上を容易に引き揚げる事ができた⁹⁾。動力としては、次第に水力や蒸気機関が使われ、台車が使われるようになっていったと考えられるが、この時代のインクラインの

変遷については概観するに止め、詳細な技術発展過程の分析は、今後の報告として割愛したい。

この時代、インクラインは、水資源の保全という観点から登場し、連続的な傾斜面が得られる地形条件の処で、閘門に代わって普及し、運河システムの一部を補完するものとなったと考えるべきである。

この技術は、すぐに、アメリカ、ドイツ、日本に伝わった。日本の場合、技師田辺朔郎が淀川から琵琶湖までの運河「琵琶湖疏水」を1891年完成させたが、水路トンネル、閘門と組合わせてインクラインを導入した。このインクラインは京都蹴上に建設され、当時の30石船(4.5ト)を水位差36m(Rail to Rail 38.1m)を昇降させるシステムであった(写真-1)。斜路長さ582m(サミットプレーン方式、両勾配型、勾配1:15、ゲージ幅:2.515m)のドライ(台車方式)のインクラインを完成させた^{9)・10)}。台車は蹴上発電所からの電気で作動された。田辺はモーリス運河の技術を学んだと言われているが、規模としては、それより100年前の小型木船を運ぶイングランドのインクラインと変わるところは無かった。

(3) インクラインの構造変化と限界(ドライ方式からウエット方式へ)

やがて、これらの初期に誕生したインクラインは、19世紀後半になり、二つの理由で発展を停止することになる。一つは、鉄道の発展に伴う英国の運河時代の終焉であり、二つ目はドライ方式によって、大型化する蒸気船を運ぶことが難しくなったことが考えられる。後者については、木製の小舟に代わって大型の鉄製の蒸気船が運河を就航するようになり、船体構造上の制約から水を張ったタンクに船を入れ、タンクごと台車で運ぶ(ウエット状態)方式が要請された。ドライ方式とウエット方式の違いを図-1に示す。

最初のウエット方式のインクラインは、1876年、アメリカのポトマック川のジョージタウン(Georgetown)に建設されたもので、長さ34.1m、幅5.1m、水深2.4mのタンクに135トンの船を入れ、11.6m昇降させるものであった。1900年に英国のフォクストン(Foxton)でウエットのインクライン(70トンの船)が建設されるが、その後、1960年代まで建造されることはなかった。⁸⁾

100トンを超える蒸気船からウエット方式が必要になったようであるが、船の大型化に対応してインクラインの構造が追従できなかつたとも考えられるが、ウエット方式の場合、船の重量に比して水とタンク、台車重量が大きくなり、経済的でなくなり、より経済的なリフトや閘門に代替していったと考えるべきであろう。

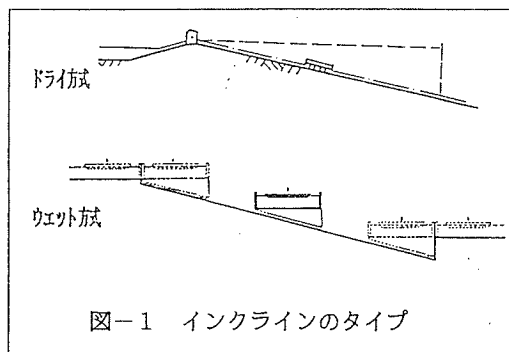


図-1 インクラインのタイプ

に100トンの船を乗せ、15.4m(文献12)は14m)の水位差を垂直に昇降させるもので、タンクがシリンダー(直径91cm)とピストンの上に装着され、ピストンは二つのシリンダーの中の水が交互に移動することによって、二つのタンクが交互に昇降するシステムであった。しかし、このリフトの場合、タンクのガイドが不完全であったこと、タンクを支えるピストン軸の破損などが頻繁に起こり、すぐに動かなくなった^{8), 12)}。水圧式リフトはピストンとシリンダーの駆動部の構造に精度の高い技術が必要とし、当時の機械技術、材料の水準では無理があったと考えられる。1888年に完成したフランスのフォンテネット(Fontinettes:(Neufosse`運河))のリフトも水圧式であったが、シャフトの基礎の崩壊、タンクのパッキングなどに問題があり、大規模な修理を要したという⁸⁾。フランスは、これ以降、リフトを造ることはなく、インクラインに力を注ぐようになる。1893年にウルク(L'Ourque)運河のモー(Meaux)で70トンの船を12.2m昇降させるためのウエット方式のインクラインを完成させている⁸⁾。

一方、表-3に示すように、ベルギーのサントル(Centre)運河のルヴィエールの4基のリフト(ウダン(Houdeng)〜ルヴィエール(La Louvie' re)間のウダン・ジョオニー(Houdeng-Geognies:1888)、ウダン・エムリ(Houdeng- Aimeries:1914)、ブラクニ(Bracquegnies:1914)、ティユー(Thieu:1914))とカナダの五大湖の二つのリフトは、アンダートン・リフトの技術を利用して建設されたが、これらが水圧式リフトの最後となった。これらは現役で今も活躍しており、稼働しているリフトでは最古のものである。^{8), 12), 13), 14)}

表-3 19世紀末からの世界のリフト

| 年 | 国 | 地名 | 諸元 (m) | | | | | | |
|------|---|---------------|--------|------------|------|-----|-------|-------------|--------------|
| | | | 高さ | タンクのサイズ・重量 | | | | 船のトン数 (ton) | 方式 |
| | | | | 長さ | 幅 | 水深 | 重量 | | |
| 1875 | 英 | Anderton | 15.4 | 22.8 | 4.8 | 1.4 | 240 | 100 | 桁 |
| 1888 | 仏 | Fontinettes | 13.1 | 40.1 | 5.6 | 2.0 | 800 | 300 | 桁 |
| 1888 | 伯 | La Louvie' re | 15.4 | 43.2 | 5.8 | 2.4 | 1,050 | 360 | 桁 |
| 1899 | 独 | Henrichenburg | 16.0 | 68.0 | 8.6 | 2.5 | 2,340 | 800 | フオート |
| 1904 | 加 | Peterborough | 19.8 | 42.4 | 10.0 | 2.7 | 1,714 | 800 | 桁 |
| 1907 | | Kirkfield | 14.8 | 42.4 | 10.0 | 2.7 | 1,714 | 800 | 桁 |
| 1907 | 英 | Anderton | 15.4 | 22.8 | 4.8 | 1.4 | 240 | 100 | カウンターウェイトに改良 |
| 1917 | 伯 | La Louvie' re | 16.9 | 43.2 | 5.8 | 2.4 | 1,050 | 360 | 桁 |
| 1917 | | | 16.9 | 43.2 | 5.8 | 2.4 | 1,050 | 360 | 桁 |
| 1917 | | | 16.9 | 43.2 | 5.8 | 2.4 | 1,050 | 360 | 桁 |
| 1934 | 独 | Niederfinow | 36.0 | 85.0 | 12.0 | 2.5 | 4,300 | 1,000 | カウンターウェイト |
| 1938 | | Rothensee | 18.7 | 85.0 | 12.2 | 2.5 | 4,000 | 1,000 | フオート |
| 1962 | | Henrichenburg | 13.7 | 90.0 | 12.0 | 3.0 | 5,000 | 1,350 | フオート |
| 1975 | | Luneburg | 38.0 | 100.0 | 12.0 | 3.3 | 5,700 | 1,350 | カウンターウェイト |
| 1995 | 伯 | Strepy Thieu | 73.0 | 112.0 | 12.0 | 3.5 | 7,500 | 1,350 | カウンターウェイト |

出典：PIANC:「Ship Lift」, Supplement to Bulletin No.65

b) フロート式リフト

フロート式の原理は、図-2(b)に示すように、鉄製のフロート(浮き)内の空気量を増減させることにより、浮力を調整して、フロートに連結したタンクを昇降させる方法である。

ドイツの最初のリフトは、1899年に完成したドルトムンド(Dortmund)～エムス(Ems)運河のハイリッヒェンブルグ(Henrichenburg)のリフトで、5本のフロートで、800トンの船を14～16mの落差を昇降させる方式のものであった。

その仕組みは図-4に示すような装置で、フロートの全浮力は、3,100トンで、それに対応する荷重は800トンの船を浮かした長さ68m、幅8.6m、深さ2.5mのタンク(水1,540トン、タンク自重760トン)とバランスするように設計されていた^{9)・12)・15)}。

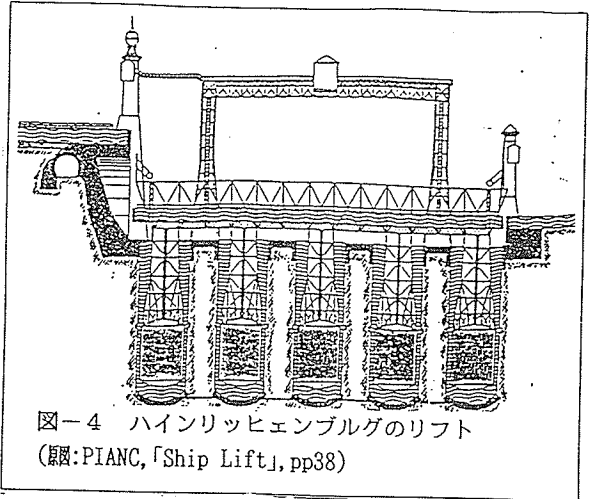


図-4 ハイリッヒェンブルグのリフト
(図:PIANC,「Ship Lift」, pp38)

空気量をコントロールしてフロートを昇降させる方式は構造的に簡単であり、信頼性があつたが、大きな水位差を克服するにはフロートの長さに限界があつた。水位差が大きくなったときには、そのストロークを支えるタンクのシャフトの構造、フロートタンクのサイズが巨大化してゆくことが問題となつた。ハイリッヒェンブルグの二つのリフトのフロートの場合、その長さが36mもあつたのである。

c) カウンターウェイト式リフト

図-2(c)のような巻上げ装置(滑車と動力)とフレームを使う方法で、フレーム頂部に数多くの巻上げ装置を付け、フレーム中央部のタンクと反対側のウェイト(金属塊)とのバランスをとりながら中央のタンクを昇降させる方式であつた。最初のこの方式のリフトは1838年、英国のグランドウエスタン(Grand Western)運河に建設された。このリフトは落差14m、わずか8トンの船を昇降させる小さなものであつた。鉄のアンクルで補強した木製のタンクをケーブルで昇降させる装置であつた。^{9)・11)}

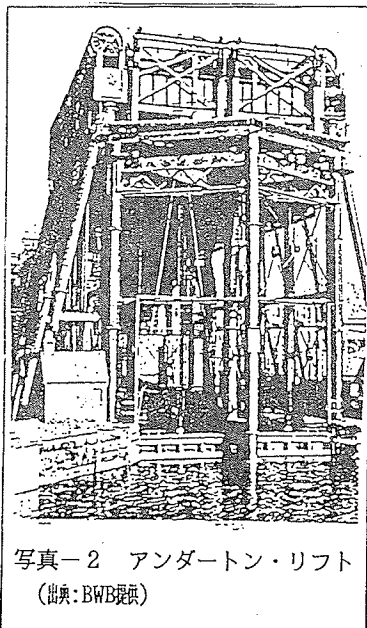


写真-2 アンダートン・リフト
(出典:BWV複製)

アンダートンのリフトも1908年に写真-2のように、カウンターウェイト方式に改造された^{9)・11)}。現在、施設は残っているが、稼働していない。英国水路局(BWB)は観光資源として活用を図るべく修復中である。

歴史的に見て、19世紀初頭の水圧式から始まり、20世紀になり技術的に簡単なフロート式に移行するも(Rothensee, 1938; Henrichenburg, 1962)、水位差30mを超えるリフト(Niederfinow, 1934; Luneburg, 1975)になつてカウンターウェイト方式に変化していったと考えられる。カウンターウェイト方式の場合、ロープの長さタンクを支えるフレーム構造のみで、水位差が克服できることが大きな特長であつた。

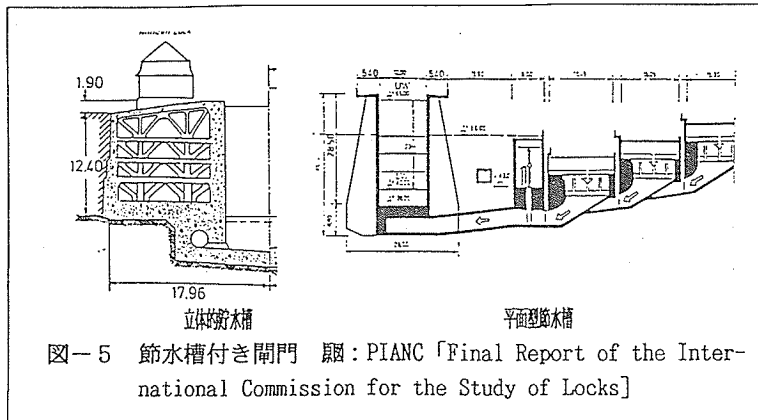
d) その他(カウンターバランス方式)

トラス・ビームの片側にタンクを載せ、もう一方に少し重い(軽い)水タンクを載せて槌子(て)の原理でバランスさせ、昇降させる方法であつた。観覧車のようなアイデアも出現したが、この方式は、両端のポイントに数百トンの重量を載せた巨大なビーム(フレーム)の実現性に無理があり、アイデア倒れに終わった¹¹⁾。

(3) 19世紀末から20世紀前半のヨーロッパにおける開門式運河とリフト、インクラインの関係

ドイツとオランダ、ベルギーの運河は、19世紀末から発展を開始した。大型バージの通航が可能な大河を中心として蒸気船の航行が可能な運河ネットワークが形成され、19世紀に登場した鉄道とも競い合うことができた。蒸気船のための大型の開門の建設技術については、1880年代からパナマ運河、マンチェスター船舶運河などの研究を通じて、マスコンクリートの開門技術がほぼ確立していた²⁾。

この時代、ドイツのミッテランド運河、エムス運河など主要運河では、1,000トンの船を通過させる計画が進められていた。ミッテランド運河の場合、ライン川からエルベ川、オーデル川まで河床の標高が異なる五つの河川を横断する必要があった。高い処を走る運河からそれぞれの河床まで大型の開門で昇降を繰返せば、運河の水が大量に失われ、運河の水収支バランスが崩れること、通航に時間が掛かることが問題となった。これらの問題を解決するために、水路高架橋(Elbe河の全長900mの水路橋など:当時世界最大)で河川の上空を渡り、当該河川群との連絡にはリフト(1934:Niederfinow:4段の開門から36mのリフトに改造など)や節水槽付き開門(Minden開門)が使われ始めた¹²⁾・¹⁷⁾。この時代、より少ない開門、リフト数で、短時間で昇降し、より水の損失が少ないシステムが形成されていった。



節水槽付き開門については、カリニー(Graf Caligny)らによって研究がなされ、立体的に貯水槽を配した構造(ミンデン開門)と平面的に水槽を並べた方式(ハインリッヒェンブルグの開門など)が誕生した。ハインリッヒェンブルグでは、1908~1917年にドルトムント~エムス運河(ミッテランド運河の一部)の第二世代の施設として、長さ95m、幅10m、水深3mの平面型節水槽付きの開門(水位差:14m)

が完成した⁸⁾・¹²⁾。この第二世代の節水槽付き開門は75%の水の節約を可能とした。節水槽の原理は開門に隣接して、水位が違う多層の水槽を備えて、そこに水を貯え、一回の昇降ですぐ下の層に落とし、貯え、順次それを繰返すシステムで、同じ水を繰返して使うことによって水の節約を図るシステムである。このような節水槽付き開門は、ドイツによって20世紀初頭に開発された。この時代、節水型水槽付き開門とリフトが15m以上の水位差をカバーし始めたのであった。

ベルギーでは、すでに中世から完成していたシェルデ川とマース(ミューズ)川河口が形成する北部の低湿地の運河網とフランス北部のダンケルクの水系を結ぶために、西部の丘陵地帯を貫通する運河の整備が19世紀初頭から渴望されていた。この地域では、10世紀頃より石炭が産出されていたし、ベルギーがスペイン、オランダ、フランスなどに占領されてきた歴史からも明らかのように、古くから地誌兵要上の拠点であった。しかし、この地域の運河化は、高低差がある上に、開門調整の水の確保が障害になっていた¹⁸⁾。

19世紀初頭、ベルギーがオランダ、フランスに併合されていた時代に、石炭輸送と軍事物資の輸送のためにこの丘陵地帯に小さな運河の整備が進んだ。くしくも同じ時期に整備が始まった鉄道との競争(1830)の中で行われた。ベルギーの独立後、政府は、イギリスからの技術導入を図り、サントル運河(1917)に4基のリフトの建設を決定した¹⁸⁾。いち早く、リフトの技術を英国から導入したため、後にドイツで誕生する節水槽付き開門の導入は行われなかった。

4. 現代のヨーロッパの運河網とリフト、インクラインの役割

(1) 大水位差開門の登場

表-4に示すように、1960年代から1970年代にかけて20mを超える大水位差開門が数多く完成したが、アメリカ(Chattahoochee R., Snake R., Columbia R.)、ポルトガル(Douro R.)の開門は船がダム堰堤を通過するための施設であった。運河開門としては、ドイツのエルベセッテン運河のウエルツェン(Welzen)開門とライン川水系のメイン川とドナウ川を結ぶ運河、旧ソ連のボルガ(Volga)～カマ(Kama)運河、ドニエプル(Dnepr)-バグ(Bug)運河の一連の開門がある¹⁶⁾。1960年代以降、ダムの建設によって世界に20mを超える大水位差開門が普及するようになったと見るべきである。

表-4 世界の主な大水位差開門

| 年 | 国 | 運河名 | 開門数 | 開門サイズ(m) | | | | 備考 |
|---------|-------|------------------|-----|----------|-------|----|-----|-------------|
| | | | | 水位差 | 長さ | 幅 | 水深 | |
| 1961～66 | 旧ソ連 | Volga-Kama運河 | 4 | 23～33 | 115 | 15 | 2 | |
| 1961～75 | 米 | Snake River | 4 | 31～32 | 206 | 26 | 5 | ダム開門 |
| 1968 | 米 | Columbia River | 2 | 21, 34 | 206 | 26 | 5-6 | ダム開門 |
| 1972 | ポルトガル | Douro運河の4開門 | 4 | 22～35 | 92～81 | 12 | 4 | ダム開門 |
| 1975～84 | 米 | Tombigbee Rivers | 2 | 21, 26 | 183 | 34 | 4-5 | ダム開門 |
| 1976 | 独 | Elbe-Setten運河 | 1 | 24 | 190 | 12 | 4 | Uelzen節水型開門 |
| 1981 | 旧ソ連 | Dnepr-Bug運河 | 1 | 39 | 290 | 18 | 6 | 世界一の水位差 |
| 1992 | 独 | Main-Donau運河 | 3 | 24～28 | 190 | 12 | 4.0 | |

出典：PIANC, 「Final Report of International Commission for the Study of Locks」, No.55

(2) ヨーロッパの運河網の標準化とリフト、インクラインの役割

鉄道との競争に破れ、19世紀後半から運河の拡幅、整備を停止した英国は別にして、ヨーロッパ各国は、それぞれの国の事情で違う船型の運河網を考えてきた。

フランスでは、1880年にフレシネが国内運河網の標準化計画を実施に移し、基準となる船を長さ38.5m、幅5.05mのフランドルのペニッシュ船350ト(現在クラスIと呼ばれている一番小さいサイズ)としていた¹⁷⁾。

ドイツでは二つの基準が存在していた。一つはライン川自航船サイズと呼ばれている2,000トバージ(長さ95m、幅11.5m、吃水2.7m:現在クラスV)があった。もう一つはミッテラント運河など主要幹線について、1,000トバージ(長さ67.0m、幅8.2m、吃水2.5m:現在クラスIIIと呼ばれている)があった。

その外、ヨーロッパ各国で19世紀末からの規格で600トナージ(長さ50.0m、幅6.1m、水深2.40m:開門長さ55~60m、幅7m:現在クラスIIと呼ばれている)というサイズがあった¹²⁾。

1957年、パリで開催された欧州運輸閣僚会議(ECMT: European Conference of Ministers of Transport)の場で、ヨーロッパの運河網を共通の基準で整備してゆく必要性が提起され、各国の利害を調整する長い審議を経て、クラスIVと呼ばれる1,350トンの標準船舶(長さ80.0m、幅9.5m、吃水2.5m:開門長さ85m、幅12m)が航行できる運河、水路ネットワークを共同で構築すべきであるという決議が採択された。

この決議に基づき、各国は、1960年代より、欧州全域の運河網としての幹線運河の拡幅、整備に取り組んできた¹⁶⁾。そして、30年間で、主要幹線の拡幅はほぼ完了し、現在、直面している課題は、分水嶺や急傾斜地、国境での幹線運河の接続が残り、そのためのリフト、インクライン、節水槽付き開門の建設が各国で進められてきた。現在の各国の幹線運河整備概況を以下に述べる。

(1) ドイツ

1,350トンのクラスIVの船をハンブルグからミッテランド運河をつなぐために、1976年に開通したのがエルベ~セイテン運河(ハンブルグの南からミッテランド運河に向かって掘られた長さ115kmの運河)である。

上流のミッテランド運河と下流のエルベ川の水位差が61mをウエルツェン開門の大水位差節水槽付き開門(23m)、リュネブルグ(38m)のリフトのたった二つの施設で克服した。

リュネブルグのリフトは、1975年に完成した現在のところ世界最大のリフトで、2基のタンク(それぞれ重量5,700ト、長さ116m(有効長100m)、幅12m)で昇降させている。駆動方式はカウンターウェイト方式である。このリフトに起こった問題としては、想定していた以上の応力が、機械の部分に集中することが判明したこと(途中で装置、機械の改良が行われた)、45km離れたウエルツェン開門が水を落とした時に発生した波が、セイシュとして数十cmの波高で伝わってくることであった。それ以外、大きな問題もなく、今日まで稼働している。⁶⁾このリフトが、ストレーピーティユーの原型になった。

ライン~マインドナウ川を結ぶ運河は、総延長3,400kmあるが、マインとドナウ川間170kmの運河化が最後まで残されていた。この区間は標高400mのまったく水の無い分水嶺で、昔から近代化の要請は高かったものの、技術的に困難を極めたために永らく残されてきた。ドイツは1960年代からこの運河の残された171kmの区間(最高点406m、標高差175m)の運河化計画に着手した。リフト方式ではなく、大水位差の節水槽付き開門とポンプをつなぐ方式を採用し、30余年の歳月をかけて、大型開門16基(うち節水型の大水位差開門5基、ポンプを備えた開門5基)、ポンプステーション、ダム、発電所などを備えたトータルシステム技術として1992年に完成した^{18)、19)、20)}。

マインドナウ運河でリフトではなく大水位差開門が採用された背景には、維持管理が開門の方が簡単なこと、ドナウ川からの水供給が可能であったことである。ドイツの今後残された課題はライン~ローヌ川の連絡とハンブルクとミッテランド運河を中心とするバイパスの整備であるが、今後も大水位差開門やリフトの整備によってこれらの運河の近代化を図ってゆくことであろう。

(2) ベルギー

ベルギーは西部丘陵地帯に国際幹線運河を通し、フランス北部と結ぶことによって、ヨーロッパの内水面交通の中心となることを国策として、大型のインクライン、リフトの整備を進めてきている¹⁴⁾。

ベルギーは、1968年にシャルルロワ(Charleroi)~ブリュッセル(Brussels:Bruxelles)運河のロンキエール(Ronquie' res)に世界最大級のインクラインを完成させ、サントル運河でも世界最大のリフトを建設中(1995年完成予定)である。以下に世界的に有名なベルギーの施設を紹介する。

a) ロンキエールのインクライン

戦後になり、このシャルルロワ〜ブリュッセル運河のルートが前述の1957年のECMTの決議に基づく主要幹線運河計画の対象となり、1968年、10基(ブリュッセル側7基、シャルルロワ側3基)の閘門とロンキエールのインクライン(68mの落差克服)で、1,350ト型船舶の航行を可能にする第三世代の運河として完成した⁹⁾・²¹⁾。

当初、多段式閘門運河やリフトの検討も行われたが、閘門通航時間が掛かること、地形的にリフトよりインクラインが勝れていること、多くの閘門より一つのインクラインの方が安価であったことなどからインクラインに決定した。このインクラインは、再び新しい時代を創ったものとして評価されている。

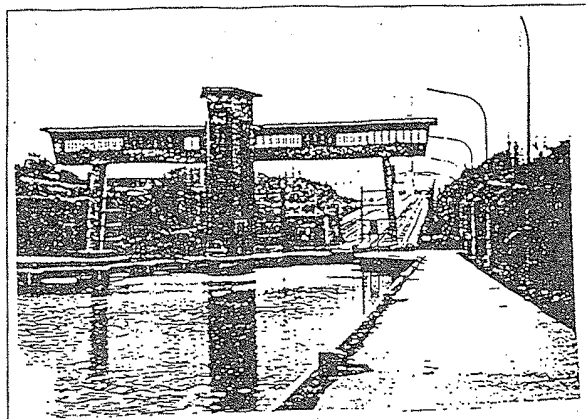


写真-3 ロンキエールのインクライン
(著録1992:10)

この結果、かつてはブリュッセル〜シャルルロワ間が3〜4日掛かっていたものが、現在では約1日の行程になっている。インクラインにすることによって水資源の節約にも寄与した。このインクラインはブリュッセルの南約1時間の所にあり、夏の休日ともなると観光名所となり、巨大なタンクがゴロゴロと音を立てて昇降する様をタワーの展望台から眺めたり、遊覧船で直接航行する観光客が多い(写真-3)。

最近までは、世界一のインクラインであったが、1985年に旧ソ連で完成したクラスノイアスク(Krasnoïarsk)のインクラインに追い越された。この旧ソ連のインクラインの規模は水位差101m、タンク重量6,720ト、船の積載限界1,500トである⁹⁾。

b) ストレピエ〜ティユーのリフト

ストレピエ〜ティユーのリフトは、現在のサントル運河の4基の360ト型のリフト(前掲)に代わる施設として、北部フランスとベルギーを結ぶために建設中(写真-4)で、1995年頃完成予定である。完成の暁には世界最大(1,350トの船を水を張った総重量約8,000トのタンクで73mを昇降させる)のリフトになる。タンクは写真-4に示すように、高さ110mの堅牢な塔の両側に抱かれた構造になっている。リフト通過のために要する時間は約1時間である。このリフトはカウンタ間ウエイト方式で、ドイツのリューネブルグのリフトの影響を受けていると推論できる。1万ト近い重量を70m以上昇降させる方法として、カウンターウエイト方式が選ばれたのは前に述べたように当然のことであった。規模の違いはあれ、その方式と鋼鉄製の柱で組んだ枠にタンクを吊すという構造は、今世紀初頭に改造されたアンダートンのリフトと基本的には変わっていない。ストレピエ〜ティユーのリフトの諸元を以下に記す¹³⁾。

すなわち、表-2,3,4から読み取れることであるが、20世紀に入り、水位差15mを超えるあたりから、経済的な優位性、技術の信頼性からインクラインではなく、リフト、節水槽付き閘門が支配してきた。ロンキエールの場合、長さ1432m、標高(水位)差68mという長い傾斜地におけるケースとして、過去の延長上にない技術として、20世紀後半に完成した姿で登場したことが注目に値する。

ロンキエールのインクラインの諸元を以下に示す。²²⁾

| ロンキエールのインクラインの諸元 | |
|------------------|------------------|
| 斜路の長さ(掘削部分) | 1,432m(1,032m) |
| 幅 | 14.7m |
| 勾配 | 5% |
| タンク総重量 | 5,000~5,500ト |
| タンク諸元:長さ,幅,水深 | 91.1m:12.0m:3.7m |

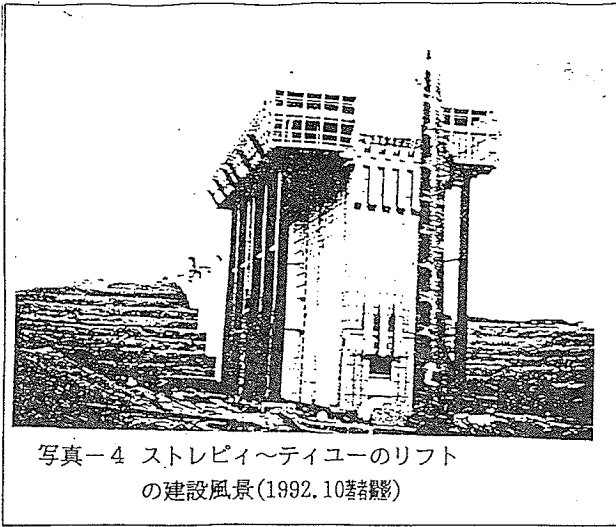


写真-4 ストレピィ〜ティユーのリフト
の建設風景(1992.10撮影)

| | |
|-------------------|--------------|
| ストレピィ〜ティユーのリフトの諸元 | |
| タンクの重量 | 7,200〜8,400ト |
| 長さ | 112m |
| 幅 | 12m |
| 水深 | 3.35〜4.15m |
| 落差 | 73m |
| 昇降速度 | 0.2m/sec |

(3) フランス

フランスでは、セーヌ川水系(マルヌ、ウワーズ川)、ローヌ川水系、ロアール川、ダンケルク周辺、ライン川などでは上流まで大きな船が航行できたが、これらの河川は山や丘陵によって分断されていた。中世より低水位運河網は北部平野部に広がった。19世紀初頭までは、サントル運河、サンカンタン(St.

Quentin)運河(1810)、ローヌ〜ライン運河、マルヌ〜ライン運河(1834)、ブルゴーニュ運河など多くの運河が建設され、現在のフランスの運河網の骨格が形成された。その時代まで、高い技術水準を誇っていたが、その後、続いた戦乱で蒸気船に対応した運河の拡幅整備が立ち後れて、今日に至っている^{1), 4)}。

フランス運輸省のランヴォワーズ(Francois Renvoise)氏によれば、現在、フランス政府は運河整備の遅れを挽回すべく、北運河(ダンケルク)からベルギーのサントル運河を中心とする運河網とセーヌ川水系を幹線運河で結ぶことを最重要課題としている。古いサンカンタン運河、北運河を拡幅して、クラスIV(1,350ト)のバージをベルギーからセーヌ川流域まで通行させる基本計画を作成中である。現在、「水面傾斜式」(Pente d'eau)もしくは水の楔(くさび)と呼ばれる特殊なインクラインで、これらを結び計画を持っている。

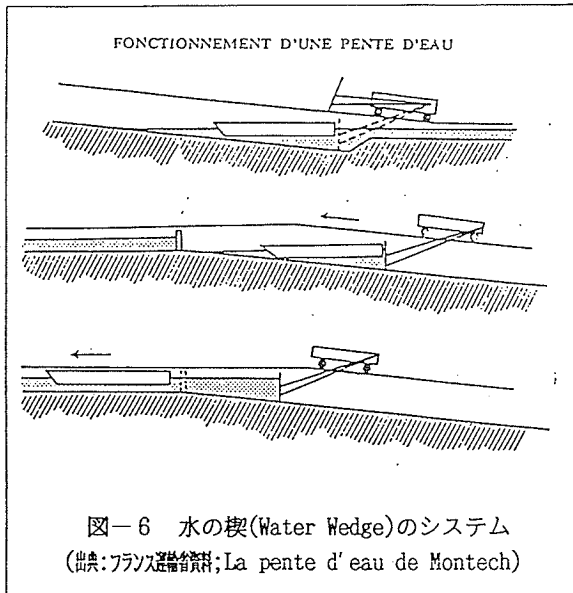


図-6 水の楔(Water Wedge)のシステム
(出典:フランス運輸省資料; La pente d'eau de Montech)

分水嶺を越える場合、水が不足するため、通常の場合、リフト、インクラインが考えられるが、フランスでは余分なタンクを運ぶ必要がない新しいシステムを考案中である。具体的には、図-6のように斜路に版をスライドさせながら、水面ごと電車で押上げ(下げ)る方法で、鋼鉄製のタンクを運ぶ必要がなく、これがいちばん経済的な方法であると結論付けている。ベルギーのインクラインタイプ(ロンキエール)に似ているが、システムとしては若干違っている。

プロトタイプがミディ運河のモンテシュ(Montech)とフォンスランヌ(Fonserannes)の2ヶ所で実験中である。最終的には1,350トのバージを浮かべた水塊を電気機関車で30m以上の落差を押し上げるシステムの完成を目指している。

当面のモンテシュの開発目標は日中13時間で13隻のバージと200隻のヨットをなんら障害なく運ぶことである^{8), 23)}。

この技術は、当然のことながら版と水路の間の水漏れが心配されるわけであるが、漏水分は上流から供給が可能であるし、水密性についてはクリティカルな制約ではないとのことである。

おわりに

19世紀に誕生した近代のリフトやインクライン、20世紀初頭に誕生した大水位差閘門の技術は、今、新しい技術展開を図りながら、ヨーロッパ運河網を完成しつつある。最後にリフトやインクラインの今日までの発展についてまとめるとともに、今後の可能性について展望することによって結びに代えたい。

まず、今までの分析をまとめ、次のような結論を得ることができた。

- (1) 中世まで閘門とインクラインは棲み分けがはっきりしており、独立した関係にあった。
- (2) 運河の近代化が始まった18世紀末から19世紀末までにインクライン、リフトは、水資源の節減という観点から運河網を形成する上で不可欠な施設となった。
- (3) リフト、インクラインのコストは閘門と比べれば、はるかに高いが、水供給が困難な場所では、原理的に水の損失がないので（漏水による損失はある）システムとしては優れている。閘門を連続的に建設したり、ポンプや節水槽を備えた閘門よりはコストが安い場合がある。また、時間節約も大きな要素である。
- (4) 20世紀初頭から約半世紀の間、インクラインは、コストの点から節水槽付き閘門、リフトに押されて建造されることは無かった。
- (5) 20世紀後半から、20mを越える水位差を有する閘門が出現したが、1930年代からドイツ、ベルギーで30mを越えるカウンターウェイト式のリフトが登場した。
- (6) 水位差が20～30mまでは、水の利用がある程度許せば大水位差閘門式運河が普及している。²¹⁾
- (7) リフトは水圧式、フロー式、カウンターウェイト式に時代変遷を経て構造が変化していった。
- (8) リフト、インクラインの水位差については、地形条件が許せば100m以上のものも可能となろう。
- (9) 船のサイズであるが、船型が大きくなれば、図-7に示すように、船型とタンク総重量の関係からみて、船型の約5倍でタンクの総重量が増加するので早晚限界がくる。

フランスの「水の楔」インクラインのような新しいシステムを今後考える必要がある。

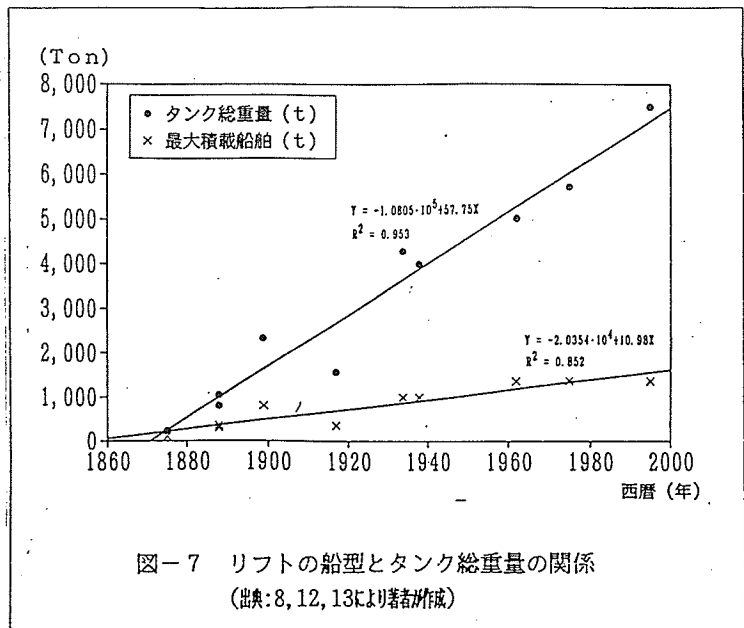


図-7 リフトの船型とタンク総重量の関係
(出典:8, 12, 13より著者作成)

最後に日本の運河の可能性について以下に提案する。

- (1) 今まで、日本の河川は短く急峻で運河に適さないと観念的に理解されてきた。しかし、ヨーロッパでは、現在、日本の河川勾配を凌駕する急峻な河川の水路化に挑戦し成功してきている。すでに、完成を見たロンキエールのインクラインやメイン～ドナウ運河と大阪湾から琵琶湖を通過し若狭湾に抜ける日本横断運河(仮)を図-8で比較して見る限り、日本横断運河の方がより容易である。
- (2) 河川行政、水利用などの条件は異なるが、基本的にはヨーロッパの既存の閘門、インクライン、リフト、運河トンネルなどの技術によってその実現は夢ではないと考えられる。
- (3) 著者の考えでは、大阪湾口から枚方までは淀川を遡上し、枚方から天ヶ瀬ダムまでリフト(節水型閘門)で2～3段程上がり、必要に応じて堤防沿いの高架水路橋(一部河川)で瀬田までつなぐ(その間、名神、新幹線などの橋梁は下をくぐる)。瀬田で、琵琶湖と閘門で結ぶ。その後、琵琶湖に出て木ノ本まで湖上を航行し、その付近から琵琶湖の湖面(標高85m)と同じ標高で水路トンネルで進み、北側の出口から敦賀港までウエットのインクラインで結ぶ構想(全長140km)が妥当である。これらの施設はヨーロッパのそれより規模は小さい。百年前の技術で田辺は琵琶湖疏水を完成させたが、現代の技術では若狭湾までの運河は夢ではない。
- (4) その経済効果は、今後の検討に委ねたいが、鳥取から富山付近までの経済圏域と大阪湾経済圏を結び役割を果たすのみならず、北朝鮮、ロシアとの国際貿易にも貢献することは疑う余地のないところである。

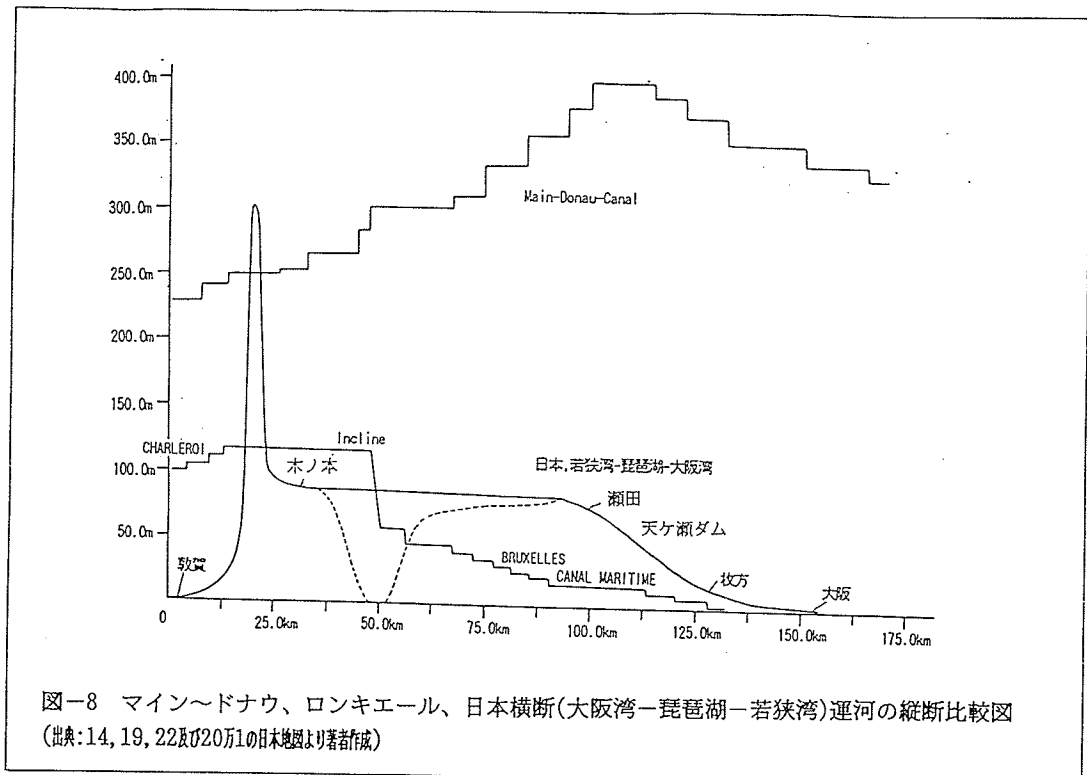


図-8 マイン～ドナウ、ロンキエール、日本横断(大阪湾-琵琶湖-若狭湾)運河の縦断比較図
(出典:14, 19, 22及び20万1の日本地図より著者作成)

参考文献

- 1) Tenaud R. (テナー・ロツ): Introduction Les Reseaux des Voies Navigables Francais et Europeens, Hydro-technique de France, pp.1, Nov. 1980 (フランス運輸省提供資料)
- 2) 長野 正孝:「パナマ運河計画史の技術的評價に関する研究」, pp9,23, 1991 Dec.
- 3) Donau H.,Schroder D., Tzschucke H. P.: Des ecluses de faible hauteur aux ouvrages de franchissement de grandes chutes, 国際航路会議(PIANC)100周年誌, 1985
- 4) 長野 正孝:「パナマ運河の計画と技術の変遷」, 「土木史研究」No.12, 土木学会, 1992 June
- 5) Briefing Paper of the History of British Waterways, British Waterways Board
- 6) Sivewright W.J.:「Civil Engineering Heritage - Wales and Western England」, The Institute of Civil Engineers by Thomas Telford Ltd, Telford House, 1986
- 7) 永井 厚:「トーマス・ワットとカレドニア運河」, ニチマ, 1991 Sept.
- 8) PIANC:「Ship Lift」, Report of a Study Commission within the framework of Permanent Technical Committee I, Supplement to Bulletin No.65, PP.12,13,19~21,47~58,87~98,99~103,109~120, 1989
- 9) 京都市水道局:「地上インクライン(パンフレット)」
- 10) 平凡社:「世界大百科辞典」26, 琵琶湖疏水, pp150
- 11) Laurent J., de Fays R., Dambrain M.:「La Canal du Centre, Ministère des Travaux Publics Belgique」, PP.71, 1988 Dec.
- 12) 福田秀夫・喜田貞夫:「運河・開門」, 理工図書株式会社(東京土木技術社), PP.258~264, 1944 Sept.
- 13) 「Stre'py Thieu」, Ministry of Public Works Gov. of Bergium (Booklet)
- 14) 「The Waterways in Bergium」, PP.23~30,74~77,63~66, 1985
- 15) Die Kanalstufe Henrichenburg/ Waltrop, Bundesminister für Verkehr Abteilung Binnenschifffahrt und Wasserstraßen(ドイツ運輸省の資料)
- 16) PIANC:「Final Report of the International Commission for the Study of Locks」, No.55
- 17) 運輸省第五港湾建設局:「日本横濱運河に伴う経済調査報告書」, pp.104~106, 1964
- 18) PIANC:「The Waterways in Bergium」 PP.74~77,63~66 1985
- 19) 「Binnenschifffahrt und Bundeswasserstraßen Jahresbericht 1989」, Der Bundesminister für Verkehr, PP.Anlage 26, 1989
- 20) Bergmeier W.:On The Development of a European Waterway System, PIANC Bulletin No.64, PP.5~10, 1989
- 21) Chara G.:Le Canal Main-Danube, Development de la Construction des Ecluses D'epargne sur la Section sud du Canal, PIANC Bulletin No.64, PP.28~35, 1989
- 22) 「Ronquie' res」, Ministry of Public Works Gov. of Bergium (Booklet)
- 23) フランス運輸省ラングネーヌ氏(Francois Renvoise)よりの資料