

パナマ運河の計画とその技術の変遷について

運輸省港湾技術研究所 正会員 長 野 正 孝
正会員 山 本 修 司

Historical Trend of Planning and Technology on the Panama Canal

Masataka Nagano
Shuji Yamamoto

概 要

中米地峡運河は、16世紀からその必要性が叫ばれていたが、20世紀初頭になって、水路と人造湖、閘門、ダムを擁する構造物として、パナマに完成した。それに至るまで、技術の進歩と計画規模の増大という相克の歴史があった。

すなわち、中米地峡運河の計画は、それぞれの時代に新しく生まれた土木技術を取り入れながら、より優れたものになってきたが、一方では、この200年間に船舶が飛躍的に大型化したことによって、要求される運河の規模が大きくなり、膨大な土量を掘削し、巨大な閘門を建設することを余儀なくさせられてきた。本論では、その歴史について、技術面に焦点をあてて、以下の点について、分析、評価を行った。

第一に、18世紀までのヨーロッパの技術では、この中米地峡に、運河を建設することは不可能であったことを幾つかの角度から傍証した。

第二に、レセップスの時代には、技術的な制約はほぼ解決し、中米地峡運河は、パナマにおいて、その規模は別にして、可能となっていたことを傍証した。すなわち、この時代には、連続して閘門をつなぎ大きな水位差を克服する技術や大きな水圧に耐える鋼鉄製ゲート、近代測量技術、コンクリート技術などがほぼ確立し、水路掘削に不可欠な掘削機械、浚渫船、ダイナマイトなども登場した。

第三に、何故、近代運河に鋼鉄製ゲートが必要となってきたかについて分析した。すなわち、伝統的なヨーロッパの閘門式運河では、その水位差が5mになると限界に達するという経験則があったが、本論では、その原因の一つがゲートの材質にあることを明らかにし、中米地峡運河実現のためには鋼鉄製ゲートが必要であったことを傍証した。

第四に、閘門をコンクリート構造にすることによって、大型の閘門と給水用のダムが可能になったことも明らかにした。すなわち、19世紀末からフランスとアメリカによって行われた現パナマ運河のプロトタイプ計画から、重力式コンクリート構造が不可欠となった背景とその技術水準を分析した。

第五に、パナマ運河の最近の計画と掘削土量の変遷について評価し、将来の運河のあり方を示唆した。

[パナマ運河、閘門、掘削土量、中世～現代]

はじめに

人類が中米地峡運河に挑戦した歴史は古く、現パナマ運河ができる前から、中米地峡の多くの場所で幾つもの運河計画が提案されてきた。また、現パナマ運河が、1914年に20世紀最大規模の土木構造物として完成してから、閘門式運河故の制約などから、新しい運河計画が、今日まで幾度も提案されてきている。

本論では、欧米における閘門式運河の歴史をひもとき、それぞれの時代に提案された中米地峡運河計画との関連の中で、閘門の構造、規模、材料の変遷とその背景にある基本的な土木技術の発展過程について分析した。次に、19世紀の船の大型化とともに、現パナマ運河計画を含む一連の運河計画の水路断面とその決定のための技術論の変遷について示した。最後に、レセブス以降の一連のパナマ運河計画の掘削土量の変遷と日本の大型公共土木工事と土工量の比較を行い、現在の第二パナマ運河構想が抱える問題点を示唆した。

我が国は、交通史上、欧米のように、運河が脚光を浴びた時代を経たおらず、運河や水路輸送の研究は数少なく、パナマ運河の技術的な研究も、1970年の「両洋間運河調査委員会」の海面式運河計画以降、第二パナマ運河の施工技術に関する研究や、その将来需要に関する研究が行われているだけである。パナマ運河という世界的な土木構造物に着目して、その技術発展の過程を分析しているところに本論の新規性がある。

今日、現パナマ運河については、第二の運河の研究の必要性が叫ばれるようになっているが、まず、過去における中米地峡運河とそれに関連する運河の土木技術の変遷を学ぶ必要があると考えて、本論をまとめた。なぜならば、将来、第二パナマ運河で、技術者が検討を必要とするであろう基本的な問題点の多くは、すでに先人が解決してきているからである。

1. 閘門式運河のルーツ

中米地峡運河の必要性は、メキシコを征服したコルテス(Hernando Cortez)によって、1524年に初めて提唱されたが¹⁾、まず、その時代のヨーロッパの運河が、どのようなものであったのか考えてみたい。当時のヨーロッパでは海面(水平)式と閘門式運河という2つの運河の概念がすでに存在していた。

海面式運河は、デルタ内の運河や灌漑水路として、紀元前のエジプト時代から自然発生的に普及していたし、閘門式運河は、河川の水位差やデルタの潮位差を克服するための各種の堰を備えた水路として13世紀以前に北ヨーロッパで誕生していた。近代的といつてよい大きさを備えた閘門式運河は、ブルージュ(Brugge)運河やシュテックニッツ(Stechnitz)運河が最初であるとされ、14世紀のことであった^{2)・3)}。

これらの運河の整備には、川床、河口を浚渫し、丘陵部を開削する技術と木製のゲートを備えた石積み閘門を造る技術が必要であった。

浚渫は、紀元前4000年頃から古代の中国、エジプトなどで排水工、基礎工、土留工など他の土木技術と同様に発達してきた。しかし、これは、掘削とともに、奴隷、囚人、軍隊、農民など大量の労働力の投入を必要とする工事であったために、洋の東西を問わず為政者の力を必要とした。過去の歴史を振り返ると、610年に隋の煬帝が完成させた長江河口の杭州と天津を結んだ大運河では200万人が、17世紀のフランスのブリアル(Briare)運河では6,000人が、ラングドック(Languedoc)運河では8,000人が、運河建設に従事したという記録が残っている^{4)・5)}。

16世紀、大航海時代に入って運河や港湾の整備がヨーロッパで進み始めると、最初、熊手、採泥用のすき、グラブなどが普及し始めた。やがて、16世紀末になると、マッドミルと呼ばれる車輪式の大きな人力浚渫装置が誕生し、ヨーロッパに普及していった⁶⁾。

水位差を克服する木製ゲートについては、17の簡単な堰止めを持ったシュテックニッツ運河が1398年にできた時代には、放堰(開閉用レバー付き片開き木製ゲート)、落とし型閘門(垂れ板昇降式木製ゲート)など様々な形の堰や水門がヨーロッパに存在していたが²⁾、やがて、15世紀にパナマ運河のゲートと同じタイプの観音開きのマイターゲートが、イタリアで誕生し、ヨーロッパの主要運河に普及していった。1450年頃、イタリアの建築家アルベルチ(Leon Battista Alberti)がその概念を唱えたこと、1497年にレオナルド・ダ・

ヴィンチ(Leonardo da Vinci)がミラノ(Milano)運河で実際に設計、施工したことが、マイターゲートの起源とされている^{2)、6)、7)}。コロンブスが新大陸を発見した頃であった。

このように、16世紀初頭のコルテスの時代におけるヨーロッパの技術は、進歩の途上にあり、表-1より、長さ30m、幅10m前後、水深1～2mの小さい閘門の建設を可能とし、平野部の勾配のゆるやかな水路で小さな舳や小舟を通す運河を普及させていた。したがって、もし、この時代、スペイン帝国が中米地峡運河を具体的に検討していたならば、この程度のものであったろうと推論できる。

表-1 14～17世紀初頭のヨーロッパの主な内陸運河の記録

完成時期	水路名	場 所 ・ 特 徴	規 模
1394～96	ブルージュ運河	ベルギーのブルージュのダムメ(Damme)閘門。	閘門規模：長さ30m、幅10m
1391～98	シュテックニッツ運河	バルト海(エルベ川)と北海(リュック)を結ぶ運河。	幹：長さ10m、幅3.3m
1438～39	ヴィアレノ(Viareno)	イタリア北部の運河、ミラノ付近	
1482～？	ミラノ(Milano)運河	レオナルド・ダ・ヴィンチの設計、施工。	閘門6基、最初のマイターゲートの運河
1524 コルテス中米地峡運河提唱 メキシコ・テウアンテペック地峡を推奨			
1548	パデルノ(Paderno)運河	イタリアの代表運河。	閘門規模：長さ30m、幅8m、入口3.3m
1605～42	プリアル運河	ロアール川とセーヌ川を結ぶ長さ54kmの17世紀のヨーロッパの代表的運河。6,000人の軍隊で作業。途中中止。	81mと39m合わせて、120mの水位差を40基の閘門で克服。水路の水深は、1.2m、幅は12m。
1682～92	オルレアン(Orlean)運河	ロアン川とセーヌ川を結ぶ74kmの運河。	水位差69mを27基の木製の閘門で結ぶ。
1666～92	ラングドック運河	ルイ14世とコルベール(Jean B. Colbert)によって、ビスケー湾と地中海を結ぶ運河完成。1869年に8,000人が建設に従事。産業革命前の完成域に達した運河で、18世紀のヨーロッパにおける運河建設の手本になった。	ビスケー湾側、標高差63m、51kmの距離を26基の閘門で結ぶ：頂部4.8km：地中海側186m、184kmを74基の閘門で結ぶ。水路の幅19m、水深2m。閘門は長さ35m、底幅10m、入口の幅6.3m、水位差2.4m。頂上貯水池700万 ³⁾ 。

出典：2)、3)、4)、7)

2. 近世運河の発達と中米地峡運河の挑戦

産業革命とともに、最初にイギリスで河川舟運が発達し、閘門式運河が普及していった。イギリスにおける近代運河の嚆矢は、1761年に完成したワースリー(Worsley)炭坑からマンチェスターを結ぶブリッジウォーター(Bridgewater)運河である。やがて、1830年までにイングランドとウェールズに、3,101kmの運河と2,111kmの改修河川が完成した。国土横断運河として、ケネット(Kennett)川とエーボン(Avon)間、セヴァーン(Severn)川とテムズ川間の運河、カレドニア(Caledonian)運河などができた^{3)、8)、9)}。

フランスでは、ナポレオン戦争で産業革命が遅れ、整備された運河は1830年までに総延長900kmに過ぎなかったが、19世紀半ばまでに2,900kmに達した。ラングドック運河のように国土横断運河もあったが、フラ

ンスでは、主としてセーヌ川流域以北で発展した。現在、4,700kmの運河が利用されている^{3), 8), 10)}。

ドイツでは、19世紀前半までにライン、オーデル、エルベ、ドナウの各水系を結ぶ運河網が完成した。有名なもので、ライン川とエルベ川を結ぶミッドランド(Midlands)運河、ライン川とドナウ川を結ぶレーゲニッツ(Regenitz)運河がある。現在、7,000kmの運河が利用されている^{3), 11)}。イタリアでは、パデルノ(Paderno)運河が1777年に完成し、平野部の多い北部で発展した。北欧では1770年代から、デンマーク人によって北海とバルト海を結ぶ運河が造られ始め、スウェーデンでは、1832年、国土横断運河として、エータ(Gota)運河が完成した。この運河は首都ストックホルムからエーテボリまでの川や湖を結んだ。^{3), 8), 12)}

アメリカでは、17世紀末から五大湖や北部の河川を中心に、多くの計画が提案されたが、実際に建設が始まったのは18世紀末からである。小さな運河の建設から始まり、アメリカ運河史上有名なエリー(Erie)運河の建設が1825年に行なわれた。この運河の完成によって、ニューヨークと五大湖地方が結ばれ、ニューヨークの発展を支えることになった^{3), 8)}。

このように、欧米の運河は、鉄道や道路輸送網が発達する前に、内陸輸送の手段として、ヨーロッパやアメリカ東部を中心に発達したが、その背景には、河口部の低湿地帯などでは、鉄道や道路整備に比べて、技術がそれ程難しくなかったこともある。しかし、これらの運河は、基本的に中世のものと変わるところがなく、閘門も低落差の小さな舢舨や小舟を通すだけのものであった。

たとえば、ケネット川では、水位差41mを長さ37m、幅5.7mの閘門18基で克服していた³⁾。

19世紀にはウェラント(Welland)運河やスエズ運河、マンチェスター運河、キール運河のような外洋船をそのまま航行させる船舶運河(Ship Canal)と呼ばれる新しい概念の運河が登場した^{3), 8), 9), 13), 14)}。

船舶運河の嚆矢は、北部スコットランドの国土横断運河として1822年(1847年完成)に開通したカレドニア運河とカナダのセントローレンス水路に1829年に完成したウェラント運河といわれている。前者は、木製と鑄鉄製のゲートを備えた石積み閘門29基を要所に築き、海軍のフリゲート艦が標高32メートルの湖を昇降できるようにした。後者は、木製ゲートを備えた石積み閘門を39基連続につないで、170トンの帆船が同水路の最後の難関のナイアガラ滝の100mの大落差を昇降できるようにした^{9), 13), 15)}。

これら初期の船舶運河の特徴は、伝統的な低水位差閘門を数多くつないで大きな水位差を克服するというにあった。このアイデアは、中米地峡のような標高差のある運河に夢を与えた。すなわち、表-2に示すように、フランス政府職員ガレラ(N. Garella)のパナマ運河(1838計画:35閘門)やアメリカ軍人チャイルズ(O.W. Childs)大佐のニカラグア運河(1850計画:34閘門)、アメリカ海軍のパナマ運河(1870計画:24閘門)のように閘門の段数が多い運河構想が、19世紀中頃にブームとなったのである¹⁶⁾。

その技術の鍵は、数百人の石工によって多数の同じサイズの閘門を造ること、漏水と沈下を防止する工夫をすること、全体の水供給システムをうまく考えることにあった^{13), 18)}。しかし、まもなく、閘門数の多い運河は、維持管理費と通航時間が掛かることが分かり、このアイデアは時代遅れなものとなった¹⁸⁾。

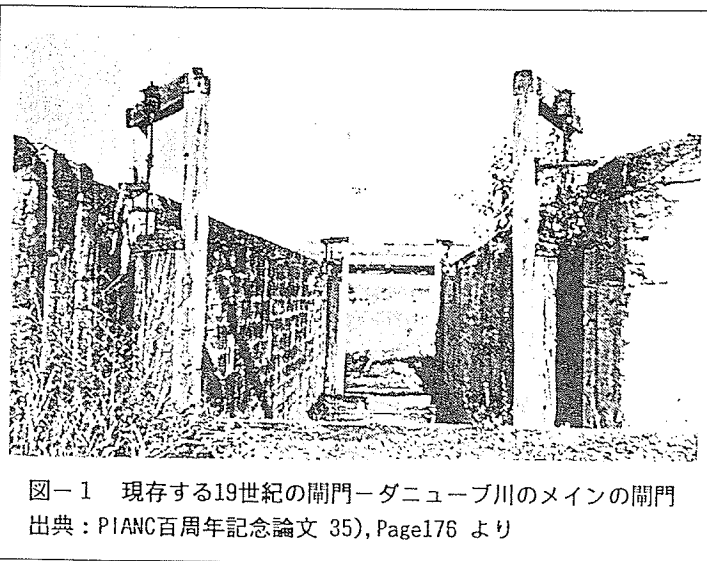


図-1 現存する19世紀の閘門ーダニューブ川のメインの閘門
出典：PIANC百周年記念論文 35), Page176 より

大きな帆船、蒸気船の出現は、一つで大きな水位差を克服する幅の広い大型閘門を必要とするようになった。伝統的な低落差の閘門から鋼鉄製のゲートを持った大落差のコンクリート製閘門に技術は移っていった。

ウェランド運河は技術発展の歴史の証人であり、その後、図-2に示すように、1845年、1887年、1933年と3回にわたってカナダ政府によって拡幅、増強され、鋼鉄製のゲートを備えたコンクリート製閘門に生まれ変わり、8基という少ない閘門で100mの大きな水位差を克服している¹³⁾。

3. パナマ運河を実現させた技術

パナマ運河を実現させた技術には、ダイナマイトの発明、浚渫船の進歩などが特筆できるが、ここでは、中米地峡と測量技術の関係、ゲートの材質問題、初期のコンクリート構造設計技術について評価を試みた。

(1) 測量技術の進歩

中米地峡は、2,800kmあり、地形が複雑に入り組み、人跡未踏のジャングルに覆われていたために、測量調査は捗らず、パナマ運河に絞られるまで、3世紀以上の歳月が掛かった。

スペイン時代の測量技術では最適なルートを探すことは困難であった。近代測量技術の誕生を待つ必要があった¹⁹⁾。近代的な三角測量は、18世紀前半にフランスで行われ始め、18世紀末にはヨーロッパ各国に普及した²⁰⁾。中米地峡の最初の近代測量調査は、ロイド(J. A. Lloyd)によって1829年、パナマで行われた¹⁷⁾。その後、ケリー(F. M. Kelley:1851)らによって、手製の高度計、レベルなどを使って、かなり正確な測量が行われるようになった^{17)、21)}。

1870～75年にかけて、アメリカ海軍は、当時の最新の科学技術を駆使し、軍の総力を挙げて調査し、同じ精度で有カルートを比較検討することに成功した。その結果、運河の候補地としては、ニカラグア、パナマしかないことを確認した^{22)、23)}。レセップスが提唱し、1879年に開催されたバリ会議は、中米地峡運河の比較検討を行い、最も優れた候補地として、現在のパナマ・ルートを選び、これをもって運河ルートを決める技術論争の時代は終わり、1870年代には測量技術の問題は解決した。^{24)、25)}。第二次大戦中から航空機によって、現地踏査をすることなく測量が可能になった。その結果と、16世紀から探検家や科学者が提案し、話題になった運河ルートと突き合わせ、検証した結果、中米地峡には検討評価に値する運河ルートが、30もあったことが判明した²⁶⁾。

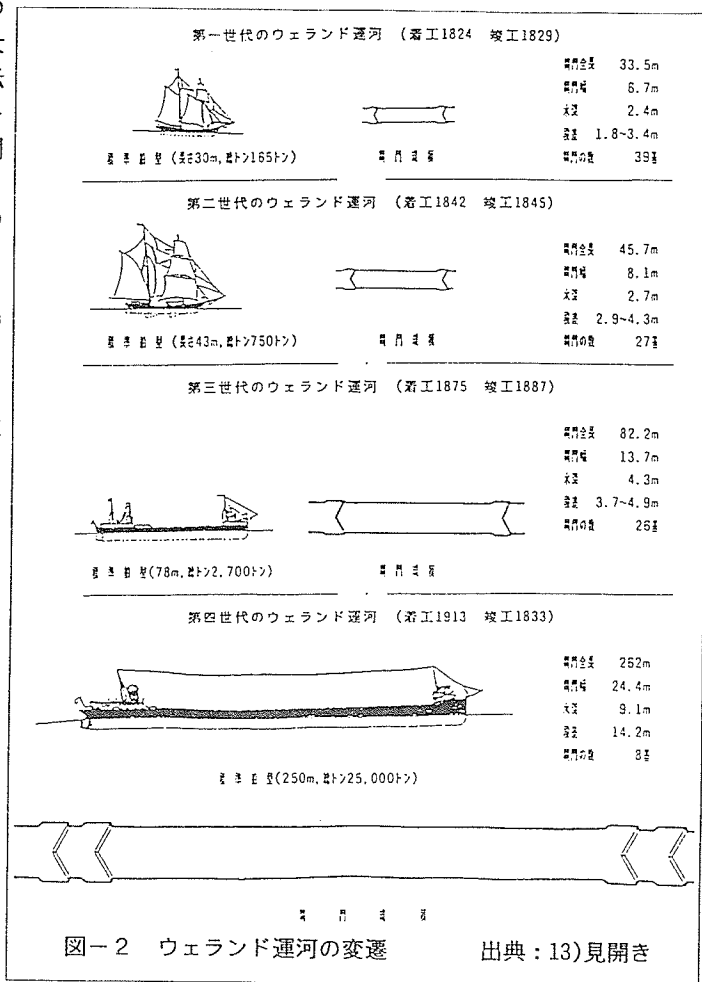


表 ー 2 パナマ運河に影響を与えた船舶運河の計画

年	提案者	場 所	特 徴	規 模	出 典
1829	メリット◎	ウェランド運河	多段式開門運河の嚆矢。ナイアガラ滝の水位差100mを克服。	開門長さ33.5m, 幅6.6m, 水深2.4m、連続39基。	13)
1838	ガレラ○	パナマ	トンネルと多段式開門をつなぐ運河。	運河の総延長54.7km, 幅20m, 水深3.6m, トンネル長さ5,350m, 開門の数太平洋側17基、大西洋側18基。	16), 17)
1845	カナダ政府◎	ウェランド運河	多段式開門運河、第二世代の運河	開門長さ45.7m, 幅8.1m, 水深2.7m、連続27基。	13)
1850	チャイルズ大佐 ○	ニカラグア	ニカラグア湖、サンファン川をつなぐ開門式運河。	運河の総延長290km, 水路幅15m, 水深5.2m, 開門の長さ76.2m, 開門幅18.2m, 開門数両洋側それぞれ17基。	17), 27)
1851	ケリー	コロンビア	アトラト川とサンファン川を結ぶ中米地域で一番南のルート。	吃水2mの船を通す運河。	17)
1869	レセップス ◎	スエズ	紅海と地中海を結ぶ海面式運河。	運河の総延長164km, 幅22m, 水深7.5m	28)
1875	アメリカ海軍 ○	地峡の7つの有望ルート	中米地峡の総合調査。ニカラグア、パナマ以外、ルートが無いことが判明。	想定したパナマ運河の規模、水路延長67.1km, 水路幅18~22m, 水深8.6m, 開門数24基、一段の水位差3.1m。	17), 22)
1876	レセップス(ウィーズ) ▲	パナマ、サン・ブラス、ダリエン	レセップスが提唱したパリ会議で最終的にこのパナマ海面式運河計画が選ばれ、フランス会社はこの計画で着工した。	想定した運河の規模 パナマ海面式運河: 延長73.2km(当初7,720mのトンネル案 - 後に完全な海面式), 幅20m, 水深8.5m。	23)
1887	カナダ政府 ◎	ウェランド運河	多段式開門運河、第三世代の運河。	開門長さ82.2m, 幅13.7m, 水深4.3m、連続26基。	13)
1888	レセップスの開門式運河	パナマ	レセップス、開門式運河に計画変更。	レセップスのパナマ開門式運河の計画、開門数両洋側それぞれ5基ずつ、人造湖水位43m, 開門長さ180m, 幅18m。	29)
1898	フランス新運河会社○	パナマ	新会社、フランスの技術の総力を挙げて設計。	開門4段、大型と小型の開門の2レーン、合計16基。 大型開門: 長さ225m, 幅25m, 水深10m 小型開門: 長さ225m, 幅18m, 水深10m	30)
1901	ウォーカー委員会	パナマ	合衆国政府の最初のパナマ運河計画。	新フランス会社の計画を採用。	31)
1914	地峡運河委員会◎	現パナマ運河	1908年、国防省の要請で現在の開門のサイズが決まる。	開門3段、2レーン 合計12基。開門長さ305m, 幅33m, 水深12.2m。	32), 33), 34)

備考: ◎運河として完成、○計画として破れていて▲計画がまずく失敗した

(2) 木製ゲートから鋼鉄製ゲートへ

15世紀末に登場した木製のゲートと石積み閘門の技術は、ヨーロッパに運河のネットワークを形成する役割を果たした。しかし、当時のヨーロッパの河川運河の閘門は、上流側と下流側の水位差が2～3m、水路水深が2m、幅3～10mが前後の小さなものであった。

1985年のドナウ(H. Donau)らによる論文「低水位差運河から高水位差運河までの変遷(Des écluses de faible hauteur aux ouvrages de franchissement des grandes chutes)」によれば、伝統的な閘門には構造上問題があり、経験的に

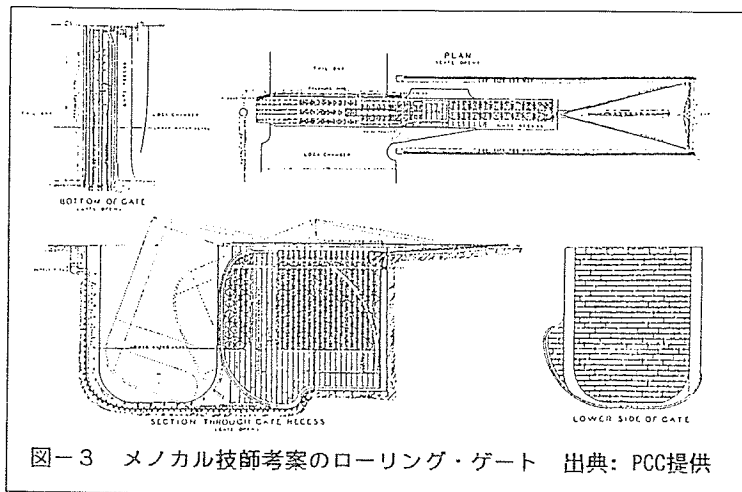


図-3 メノカル技師考案のローリング・ゲート 出典：PCC提供

フランスでは5mを越えて限界に達していたし、1985年の第一回国際航路会議では、安全の面から河川運河の閘門の水位差を5.5m以上にしてはならないという決議も行なわれたとされている³⁵⁾。このように1880年代には、ヨーロッパでも伝統的な運河の水位差に対する構造的な限界が問題となってきたのである。

大型船の運河や急傾斜の山岳運河の場合、一つの閘門で大きな水位差を考える必要があり、その水圧に耐えることができるゲートの材料として、鉄が着目され始めたのは当然のことであった。鋼鉄製の閘門ゲートが可能となった背景には、産業革命による技術革新がある。19世紀初頭には、石炭を利用して鉄を量産する技術が生まれ、19世紀中頃には、ベッセマー(H. Bessemer:1856)、シーメンス(W. Siemens:1857)らによって、大量の鉄を鋼鉄に転換できる転炉、平炉が発明され、鋼鉄の低廉な供給が可能になった³⁶⁾。

その歴史を反映して、まず鑄鉄製のゲートが、クロドニツ(Klodnitz)運河(1822)³⁷⁾やカレドニア運河³⁸⁾などで使われ始め、19世紀後半には、船舶運河の閘門が鋼鉄製になっていった。アメリカ海軍が1870年代から計画を始めた閘門式運河(おそらくニカラグア)では、メノカル(A. G. Menocal)技師が図-3のようなローリングゲートを提案しているが、これが中米地峡運河計画初めての鉄製ゲートであろう。

著者は、1908年に現パナマ運河の計画ができるまでに提案された計画で、パナマ運河に影響を与えた6つの閘門式運河計画を選び、それらの閘門ゲートを木材で建造したと想定して、ゲートの厚さを試算(注:前提条件:式は三辺固定の版の式、木材許容応力度30kgf/cm²、片側閘室空の状態(修理、漏水時想定)、潮位差は無視)すると図-4のような関係が得られた。これによれば、1850年のチャイルズ大佐の計画までは、木材のゲートで水圧に耐えることは可能であったが、1870年のアメリカ海軍調査の計画断面から水圧が大きくなり、木材では1mを越える厚さになり、鉄製の閘門がどうしても必要になってくることが判明した。

1888年、レセブスは、閘門式運河に設計変更を行い、鋼鉄製ゲートの設計を、エッフェル塔を建設したエッフェルに依頼したが、運河会社が倒産したため、このゲートは設計されなかった²⁹⁾。ちなみに、現パナマ運河には、総重量6万トンの鋼材で92枚の扉が造られている³⁹⁾。当時の設計技術では、版構造にすることができず、すべての応力を水平方向の部材に分散させ、蝶番で受ける設計方法が採られている。

(3) 閘門本体の構造設計と水の注排水方法

ポルトランド・セメントは、1820年代にイギリスで誕生し、すぐに陸上の構造物に普及した⁴⁰⁾。パナマ運河のような海水に浸る巨大な構造物に使われるようになるには少し時間が掛かった。問題は2つあった。

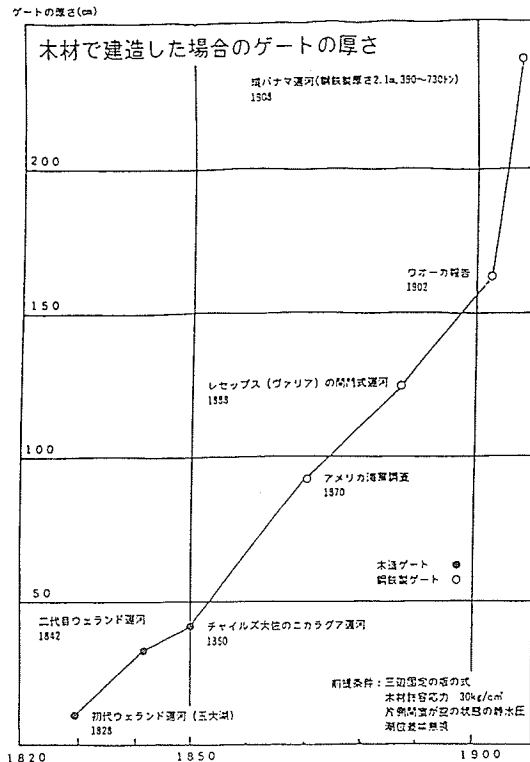


図-4 一連の中米地峡運河の計画と
木製のゲートの厚さ(試算)

パナマ運河の閘門やダム(ガツンダムの余水吐の高さ115ft., 閘門の最大高さ81ft.)の建設が始まった1910年代には、堤高90m(300ft.)のダムが可能になっていた⁴⁴⁾。

さらに新たな問題として、注排水のシステムを変える必要に迫られた。中世からの伝統的な注排水方法は、図-5の左端のように、ゲートの一部にさらに小さなゲートを設けて、そこから水を移動させていた。しかし、1898年のフランスの新運河会社の計画と1904年のアメリカのプロトタイプからは、水量が大きくなり、従来の方法では船が水流に押され、ゲートに叩きつけられる恐れが出てきた。

新しいアイデアとして、図-5(中央)のように、側壁に設けた孔から注排水する方法が提案された⁴⁵⁾。そのためには、大量の水を送る大口径のカルバート(注排水管)を壁中に設ける必要があり、その設計が課題となった。1904年に提出された「ウォーカー(J. G. Walker)委員会報告」の、設計法を以下に考察する⁴⁶⁾。

閘門は、サイドウォールとミドルウォールから構成されており、その構造と作用外力については、底版との連結を無視した単純な直立壁で考えている。設計の考えは、次の通りである。

◎コンクリートの許容応力度: 21.1kgf/cm²(現在よりかなり小さめ)、破壊強度は100~230fkg/cm²⁴⁷⁾。

◎土圧はランキン土圧(内部摩擦角25°)、土の単位体積重量は1.6gf/cm³。地震時土圧は考えていない。

◎サイドウォールについては、図-6の左側に示すように土圧、静水圧及び自重の合力が、ミドル・サード・ゾーンの内側になるような壁厚を考えている。

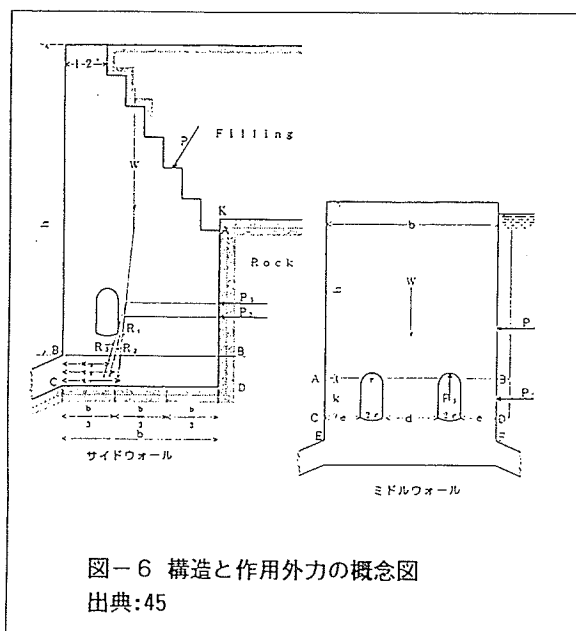
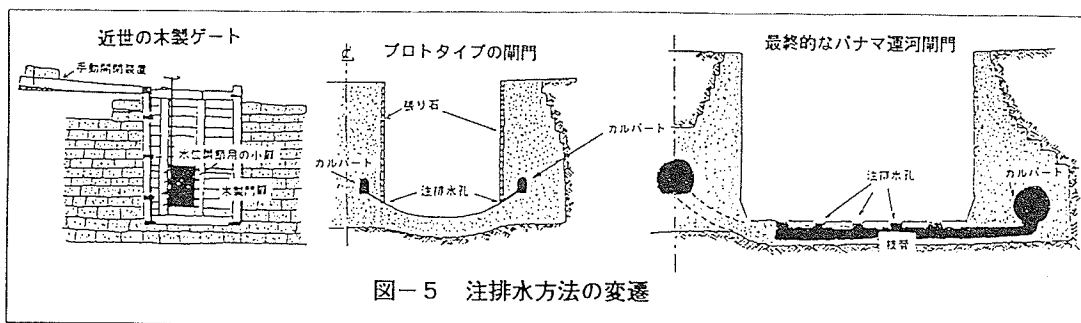
◎サイドウォールの底面の反力の算定においては、コンクリートの引張応力を期待しない計算法を採用しており、現在の地盤あるいは岩盤の応力解析に見られるノーテンション解析が、初歩的ではあるが、行われている。

第一はコンクリートの海水劣化問題、第二は重力式構造物の設計技術であった。第三に、閘門容積が大きくなったことで、注排水(船の待ち)時間をいかに短縮するかという問題が新たに発生した。

第一の海水劣化対策については、当時は石材によって表面を被覆する工法が一般的であった。海水の影響を受ける本格的な構造物は、1847年のイギリスのドーヴァー港のアドミラル・ピアが嚆矢であったが、その時、潮間帯部分のコンクリートを御影石で被覆する対策が採られ、その後、この工法が普及した⁴¹⁾。1904年のパナマ運河のプロトタイプでも図-5(中央)に示すように、表面を御影石で被覆する工法が提案された⁴²⁾。

しかし、1908年の現パナマ運河の最終案の計画では、この工法は提案されなかった(図-5右端)⁴³⁾。「パナマ運河委員会」の閘門の管理責任者アルヴァラド(C. Alvarado: Marine Dep.)は、「劣化を防ぐために、閘門のコンクリートについては、当時の最高の施工管理を行ったので、77年経っているものの、いまだ、十分な強度を有している」と語っている。

次に、重力式構造物の築造技術であるが、アメリカでは、堤高30m(100ft.)を越えるダムの建設は、1880年代から(Sweetwater Dam: 1888)初めて可能となった⁴⁴⁾。



今、計算機の発達によって、我々はこの種の応力解析をすぐに有限要素法で解いているが、このような単純な解りやすい方法で要素に分割して行うという優れた設計法を先人が採用していたことは賞賛に値する。

現パナマ運河の閘門は、1908年の最終設計で、各閘門の通過時間を一時間とするように諸元を設定した。それから逆算して10万トンの水を約8分で注排水出来るようにしたため、底版の全面から水を注排水するシステムになっている（図-5、右側参照）

この底版から給排水するシステムは、その後、ヨーロッパの大型開門に普及していった⁴⁸⁾。

4. 20世紀の運河計画とその技術的課題

運河の規模は、閘門式、海面式運河を問わず、通航船舶の船型と交通量の関係で決まる。基本的な片側1レーンの場合、通航する船の幅と吃水で決まる。現在のパナマ運河は、1914年にできてから77年が経過しているが、その間、戦艦、空母、タンカーなど大きな船を通そうとする試みが、表-3のように数多く行われてきた。その試みは大きく二つに分けられる。第一は、現在の水路に新しい閘門を増設しようとする考えで、第二は、新しい別の水路、もしくは、現在の水路の側に海面式運河を造ろうとする考えである。閘門式運河技術の基本的課題は現在のパナマ運河によって、ほぼ、解決しているが、海面式パナマ運河計画の場合、水路断面が大きくなってきたことによって、膨大な土量が生ずるという新らしい問題に直面している。

表 - 3 20世紀の主なパナマ運河計画

年	計画名	場 所	特 徴	規 模	出 典
1931	第三閘門計画	現運河	超巨艦艦を通すための運河-戦艦"大和"に対抗-二次大戦終戦後工事中止。	閘門長さ366m, 幅42.7m, 水深13.7m, 1レーン, 3段。総掘削土量5,490万 ³ m	49), 50)
1947	海面式運河計画	現運河沿い	現運河に沿って海面式運河を整備。	運河の総延長42km, 幅183m, 水深12~18m、総掘削土量8億1,700万 ³ m	51)
1947	端末溝計画	現運河	現運河に大型閘門を設置。	閘門長さ457m, 幅61m, 水深15.2m, 1レーン, 2段で昇降。	51)
1970	ルート10海面式運河	現運河の15km西側のルート	空母を通過させるために計画した最後の合衆国政府の海面式運河計画。	運河の水路幅168m, 水深25.9m, 総掘削土量 14億2,800万 ³ m	52)
1970	大水深閘門案	新閘門整備	空母やタンカーが通過できる大型閘門。	閘門長さ442m, 幅48.8m, 水深19.8m, 1レーン, 2段で昇降。	52)
1979	永野案	ルート10海面式運河	タンカーを通過させるために永野重雄が計画した海面式運河。	運河の水路幅200m, 水深35.8m、総掘削土量 19億4,000万 ³ m	53)
1981	ロベス・モレノ案	新閘門整備	タンカーを通過させるためにパナマ人が計画した閘門式運河	大小2つの閘門, 2レーン, 2段, 合計8基。閘門長さ427m, 幅57.9m, 水深21.9m, 総掘削土量6億1,100万 ³ m	54)
1982	ベルガーラ案	ルート10海面式運河	タンカーを通過させるためにパナマ人が計画した海面式運河。最大の計画規模。	運河の水路幅450~500m, 水深26m、総掘削土量 24億1,500万 ³ m	55)

(1) 運河の水路断面の変遷

近世のヨーロッパの内陸河川運河計画から最近の新しいパナマ運河計画までの主な運河の横断面の変遷を示し(図-8)、それら運河の断面決定法の歴史的な変遷を以下に考察した。

19世紀に生まれた船舶運河では、船舶の大型化に対応した断面決定方法が次々と編出されてきた。それ以前の近世までの一般的な運河の断面は、経験的に幅水深比を4:1から3:1程度で考えていたようである⁵⁶⁾。1879年に中米地峡運河計画の検討を行ったパリ会議では、すべての運河案に対して、当時のスエズ運河のサ

	断面	断面	単位: m 幅員 水深
1805 プリアル運河			12 1
1882 ラングドック運河			19 2
1843 オレラのバナマ運河			17 4
1850 チャイルズ文化のニカラグア運河			15 5
1888 レセップスのスエズ運河			22 8
1881 フランス露工場のバナマ運河			24 9
1892 アメリカの最初のバナマ運河			46 11
1908 アメリカの最終案			91 13
1880 現在のバナマ運河			152 14
1978 永野建設株式会社工場式バナマ運河			200 33

図-8 運河の水路断面の歴史的変遷

ヒアリングに基づき、大型船(Panamax)のすれ違いが出来るように現在の最小水路幅152mを曲率に応じて192から229mに拡幅する計画が出されている⁵⁹⁾。

以上が、パナマ運河を中心とした19世紀からの船舶運河の断面を設定する考え方の変遷であるが、不確実な部分は、どのような船型を想定するかという点である。理論的には将来の潜在需要を想定したときの便益とコストの差が最大になる所で最適の船型が決まるが、超長期を予測するということに限界がある。

(2) 船舶と運河サイズの変遷

19世紀初頭からの一連の中米地峡運河計画の水路の断面とそれぞれの時代の船の断面に関して、以下のような分析を行った。すなわち、それぞれの時代における個々の運河計画の水路断面と初期の帆船から蒸気船、軍艦、空母、数十万トンのタンカーまでの、その時代の最大船の船型断面のデータベースを作成し^{61)、62)}・⁶³⁾、比較した。運河水路の断面 S (単純化して水路の最小幅(底幅)と水深の積: m^2)、船舶の断面 V (単純化して船幅と吃水の積で考えた: m^2)と時間 t (1800年=0)の関係を調べた結果、図-9の関係と次の事柄が明らかになった。

a) 19世紀以降の運河の計画水路断面(底幅×水深)の増大傾向は、船舶断面(幅×吃水)の大型化傾向と合

イズを適用し、比較検討を行っている⁵⁶⁾。

「ウォーカー委員会報告書」では、初めてロイド統計を利用して、現パナマ運河のプロトタイプの水路と閘門サイズを決定した。曲線部では、曲率に応じて水路幅員を拡大することを初めて行った⁵⁶⁾。当初の現パナマ運河計画の水路幅は92mであったが、これは、最大可航船幅30mの3倍程度、幅水深比7.5:1程度と考えていたらしい³⁴⁾。一方、現パナマ運河の閘門サイズは、1904から1908年にかけて「地峡運河委員会」で再検討されたが、最終的には国防省からの要請で、1908年1月に、長さ305m、幅33.5mに正式に決まった⁵⁷⁾。

1923から1938年には、航行安全、有事の安全保障を考慮して、水路の崩落地帯、狹隘曲線部を幅150mから200mに拡幅した⁵⁸⁾。この時から、パイロットの意見を参考にして、拡幅計画が進められ始めた。

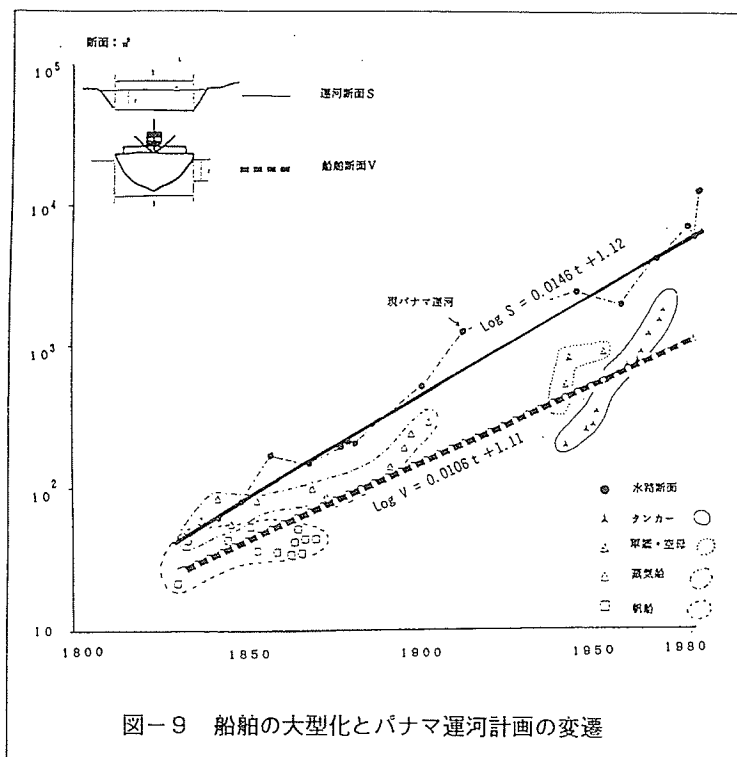
1947年のパナマ運河地帯総督の「海面式運河計画」から、水路幅の検討に、船舶航行模型実験と数値解析の手法が導入された⁵¹⁾。この結果に基づき、1960年代からパナマ運河は、現在の最小水路幅152mに拡幅された。この頃から、水深は、船の沈み込み(Squat)とセイシュ(Surge Seiche effect)を考慮にいれ増深された。1970年の「両洋間運河調査委員会報告書」でも同様の方法が25万DWTのタンカーの水路計画に採られた⁵²⁾。1972年には、現在の水路で船の沈み込みの実船実験も行われた⁵⁸⁾。

最近のクレブラ・カットの拡幅計画では、模型実験と計算機の数値シミュレーション、パイロットの

致している。水路計画断面の回帰式と船舶断面の大型化傾向の回帰式を以下に示す(図-9参照)。

運河断面の大型化(1843~1982): $\log S = 0.0146 t + 1.12$ ($r = 0.986$)

全船舶の大型化傾向(1831~1972): $\log V = 0.0106 t + 1.11$ ($r = 0.939$)



前提: ① 当該年に建造された最も大きな船のデータを入れた。

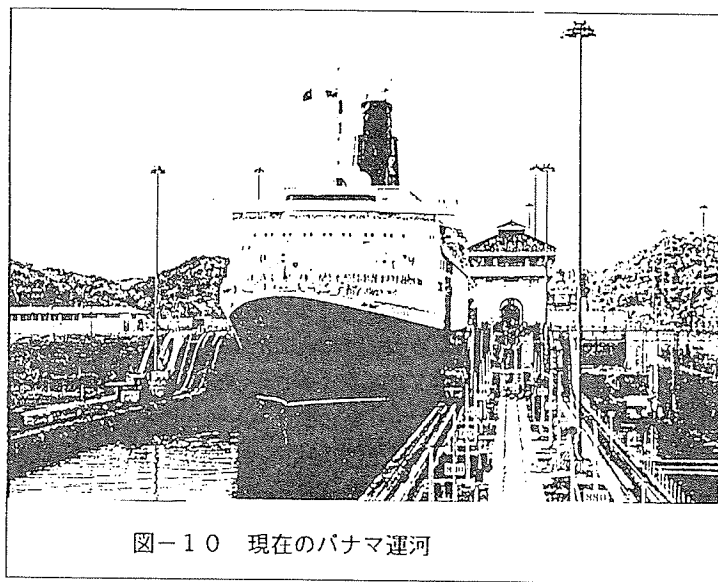
② 帆船のデータから吃水を求めることができなかったため、吃水は帆船の径深の1/2と仮定した。

b) 帆船の時代は1870年代で終わり、スエズ運河では、当初から、当時発展途上にあった蒸気船に焦点をあてて運河計画が作られた。中米地峡運河に関する一連の運河計画も、図-9を見ると、蒸気船に照準を当てて進められてきたと推論出来る。19世紀半ばに全盛時代を迎えた帆船は、中米地峡運河に影響を与えるところとはならなかった。

c) 1914年完成当時のパナマ運河の水路断面は、計画断面回帰

式よりかなり上方に乖離しており、当時としては大きいサイズの運河を考えていたことが読み取れる。

d) 第二次大戦後の計画について見ると、「両洋間運河調査委員会報告書」以降は、スーパー・タンカーのサイズに合わせて運河計画も大きくなっている。同報告書を含めてそれ以前の計画は軍艦、空母を主眼においた計画であった。それ以降の1979年の永野レポート⁶⁴⁾、ベルガーラー(D. Vergara)レポート⁶⁵⁾の水路断面の大型化傾向は、タンカーの大型化の傾向と一致している。



おわりに

以上、パナマ運河を中心に閘門式運河の歴史とその技術発展過程を概観したが、最後にその結論をまとめ、著者の見解を述べる。

a) 19世紀初頭までは技術力の不足から中米地峡に運河はできなかった。

スペイン時代には、17世紀にフランスが建設したラングドック運河の技術水準があり、7～8,000人の労働力が得られれば、当時の標準的な低水位差の河川運河は可能であった。しかし、前述したように、中米地峡のような急傾斜地を、閘門をつないで越える技術は未だ確立しておらず、測量技術も未熟で、小さい運河といえども不可能であったと考えられる。

b) 19世紀半ばには、小さな運河であれば技術的に可能になった。

19世紀前半には、連続して閘門をつなぐシステムで大きな水位差を克服できるようになったこと、土木施工技術も発達したこともあり、小さな船舶を対象とする閘門式運河であれば実現していたと考えられる。

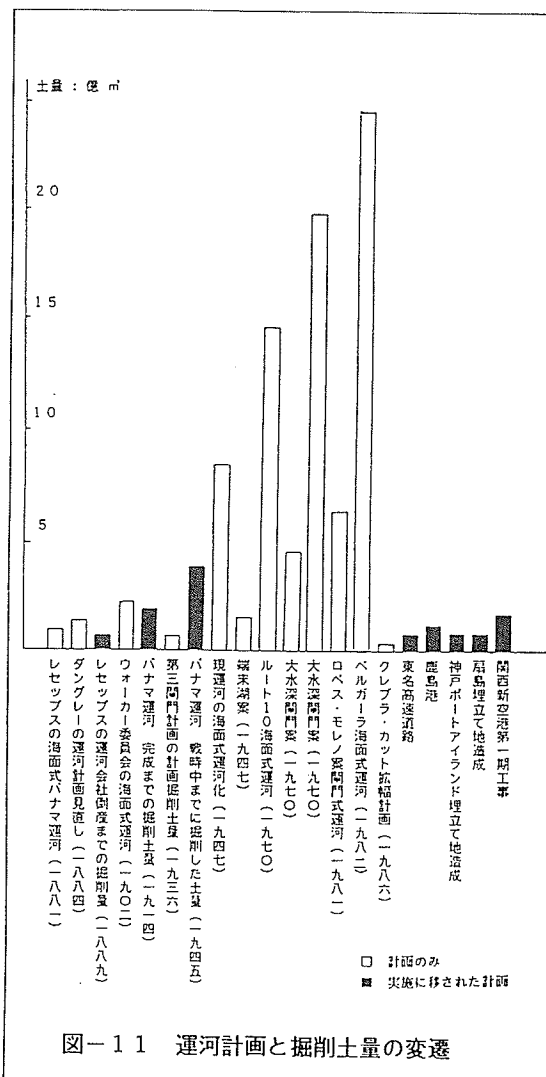


図-1 1 運河計画と掘削土量の変遷

c) レセブスが挑戦を開始した1882年には、高水位差の閘門式運河は可能になっていた。ダム築造技術の進歩、ダイナマイトの発明(A. Nobel:1867)もあり、運河建設の技術はそろっていたと考えられる。彼は7年間で5,970万m³掘削しているので、もし、当初の規模の運河(幅24m,水深8.5m)を、閘門式で計画しておれば、1~2万トンの船を通過させる小さな運河は完成していたと考えられる。

d) アメリカは当時の先端技術を駆使して閘門式運河を完成させた。アメリカは、1914年に現在の閘門式運河(全長80km,水路幅92m,水深12.2m,閘門数12基)を完成させた。詳しくは3節を参照していただきたいが、技術発展の関係から、現パナマ運河のような大きな閘門式運河はこの時期によく可能になったとみるべきである。

e) 船型の大型化と土量の限界

その後のパナマ運河計画については、対象船舶が大型化したことによって、表-3のように、より大きな水路と閘門を持つ運河が要求されてきた。ちなみに、その土量を考えてみると、1945年までにパナマ運河で掘削した土量3億7,000万m³^{34), 58)}は、日本の高度経済成長時代に実施した東名高速道路の掘削(6,600万m³)、扇島の埋立て(8,000万m³)、神戸ポート・アイランドの埋立て(8,000万m³)の総土工事を合わせた2億3,000万m³より多く⁶⁴⁾、日本最大の土工事を誇る関西新空港の第一期工事の埋立て(1億6,400万m³)より多い。さらに、図-11に示すように、現在、組上に載っている海面式運河のどの案も10億m³を越えようとする莫大な土量である。

「両洋間運河調査委員会」では、膨大な土量の掘削

は技術的な問題というより、むしろ、経済・財務・環境・政治の問題であると指摘している。すなわち、この膨大な掘削土量は、予測可能な時間を越えた運河需要予測、財務分析を必要としている⁶⁵⁾。また、新しい運河ルートは、住民の立退を必要とし、広大な土捨て場を牧場や沿岸漁場に求めなければならず、これらは政治問題となる⁶⁴⁾。また、海面式運河では、太平洋の海水が大西洋に流れ込むことにより、大西洋の海洋生物に影響がでることを、水産学者や環境学者は指摘している。

このように、過去150年間、海面式運河ができなかったのは、その計画規模が余りにも大きくなり、膨大な土量が壁となったからである。その時代の最大船型で海面式の大きな運河の計画に指向してきたことに問題があり、そろそろ、発想を転換する時期にきているかもしれない。その意味において、掘削土量が少なく済む閘門式運河を研究することは是非とも必要なことだと思われる。

また、近年の我が国の大都市における物資輸送が、昭和30年代以降、もっぱら自動車輸送に依存してきた結果、大気汚染、交通渋滞の問題が顕在化してきた。さらに、地球規模での炭酸ガスの削減、省エネルギーも叫ばれている。歴史的な視野で見れば、かつての江戸、大阪などの都市の繁栄を支えた低公害型輸送の内陸水運を見直すことが早晩必要になり、新しい観点からの運河研究が今後我が国にとっても必要となろう。

参考文献

- 1) G.W. Goethals: Introduction, 「Transaction of the International Engineering Congress 1915 the Panama Canal I」, ASCE, S.F. California, pp.1~5, Sept.20-25, 1915
- 2) 筑摩書房: 「技術の歴史」, 第六巻, ルネッサンス, pp.386~392, 1978~85
- 3) Americana Corporation: 「The Encyclopedia Americana」, Vol.5, 「Canals」, pp.517~523
- 4) 筑摩書房: 「技術の歴史」, 第六巻, ルネッサンス, pp.404,407, 1978~85
- 5) 長野正孝: 世界港湾発展史, 「港湾」, 日本港湾協会, pp.64, April 1988
- 6) 染谷昭夫訳: ファネーロ・トリリアニの教本, 「PIANC技術情報」, No.5, 国際航路会議日本国内委員会, pp.120~135, 1985
- 7) Donau H, Schroder D. and Tzschucke H.P.: Des ecluses de faible hauteur aux ouvrages de franchissement des grandes chutes, 「Centenary of the Permanent International Association of Navigation Congresses 1885-1985」, PIANC, pp.173~174, 1985 (H.ドナウ, D.シュレーダー, H.P.トシユケ, 「低水位差運河から高水位運河までの変遷」, 国際航路会議百周年記念誌 1885-1985より)
- 8) 平凡社: 「世界大百科事典」, Vol.3, 「運河」, pp.317~319, 1979
- 9) 永井厚: 「トーマス・テルフォードとカレドニア運河」, ニチマ, Sept.1991
- 10) 平凡社: 「世界大百科事典」, Vol.27, 「フランス」, pp.96, 1979
- 11) Americana Corporation: 「The Encyclopedia Americana」, Vol.12, 「Germany」, pp.561
- 12) Gota Canal Steamship Company: 1992 The Gota Canal
- 13) Cowan P.J.: 「The Welland Ship Canal between Lake Ontario and Lake Erie」, Engineering News Record, 見開きとPP.1~4, 1913~32
- 14) Forbes-Lindsay C.H.: 「Panama The Isthmus and Canal」, The John C. Winston Co., Philadelphia pp.295~359, 1906
- 15) 永井 厚: 「トーマス・テルフォードの生涯・その叙物的物語」, ニチマ, Sept.1985
- 16) Mack G.: 「The Land Divided - A History of the Panama Canal and other Isthmian Project」, OCTAGON BOOK, New York, pp.127~130, 1974
- 17) Sullivan J.T.: 「Report Historical and Technical Information relating to the Problem of International Communication by way of the American Isthmus」, Washington Government Printing Office, pp.65~76, 1883
- 18) 永井厚: 「トーマス・テルフォードとカレドニア運河」, ニチマ, pp.103~138, Sept.1991
- 19) 長野正孝(Masataka NAGANO): The Historical Development Planning for the Panama Lock Canal, Proc. of JSCE., No.431/IV- 15, pp.135~136, July 1991
- 20) 筑摩書房: 「技術の歴史」, 第六巻 ルネッサンス, pp.506~515, 1978~85
- 21) Mack G.: 「The Land Divided - A History of the Panama Canal and other Isthmian Project」, OCTAGON BOOK, New York, pp.65~71, 1974
- 22) Ammen D.: 「Inter-Oceanic Ship Canal Question」, 1880

- 23) Sullivan J.T.: 「Report Historical and Technical Information relating to the Problem of International Communication by way of the American Isthmus」, Washington Government Printing Office, pp.118~133, 1883
- 24) Mack G.: 「The Land Divided - A History of the Panama Canal and other Isthmian Project」, OCTAGON BOOK, New York, pp.287~297, 1974
- 25) McCullough D.: 「The Path between the Seas」, A Touchs Book, Simon and Schuster, N.Y. pp.70~100, 1977
- 26) Stratton J.H.: The Future and the Panama Canal, 「Panama Canal The Sea-Level Canal Project」, A Symposium, ASCE., pp.452, 1948
- 27) Mack G.: 「The Land Divided - A History of the Panama Canal and other Isthmian Project」, OCTAGON BOOK, New York, pp.188~189, 1974
- 28) 木内政鋭, 日下正: スエズ運河事情, 土木学会誌 47巻, April 1972
- 29) Mack G.: 「The Land Divided - A History of the Panama Canal and other Isthmian Project」, OCTAGON BOOK, New York, pp.330~333 1974
- 30) Mack G.: 「The Land Divided - A History of the Panama Canal and other Isthmian Project」, pp.410~411, OCTAGON BOOK, New York, 1974
- 31) Walker J.G. and other commissioners: 「Report of the Isthmian Canal Commission 1899-1901」, Government Printing Office, pp.44~48, 1904
- 32) Hodges H.F.: General Design of the Locks, Dams, and Regulating Works of the Panama Canal, 「Transactions of the International Engineering Congress, the Panama Canal II」, S.F. California, pp.1~5, 1915
- 33) 青山士: 「ばなま運河の話」, 吉田印刷所, May 1939
- 34) G.W. Goethals: Introduction, 「Transaction of the International Engineering Congress 1915 the Panama Canal I」, ASCE, S.F. California, pp.28,29, Sept.20-25, 1915
- 35) Donau H., Schroder D. and Tzschucke H.P.: Des ecluses de faible hauteur aux ouvrages de franchissement des grandes chutes, 「Centenary of the Permanent International Association of Navigation Congresses 1885-1985」, PIANC, pp.176,180, 1985
- 36) 平凡社: 「世界大百科事典」, Vol.17 「製鋼法」, pp.195~196, 1979
- 37) Donau H., Schroder D. and Tzschucke H.P.: Des ecluses de faible hauteur aux ouvrages de franchissement des grandes chutes, 「Centenary of the Permanent International Association of Navigation Congresses 1885-1985」, PIANC, pp.175, 1985
- 38) 永井厚: 「トーマス・テルフォードとカレドニア運河」, ニチマ, pp.112~115, Sept.1991
- 39) Hodges H.F.: General Design of the Locks, Dams, and Regulating Works of the Panama Canal, 「Transactions of the International Engineering Congress, the Panama Canal II」, S.F. California, pp.5, 1915
- 40) 日本ポルトランドセメント同業界: 「昔のコンクリート」, 生田印刷所, pp.3, Oct.1936
- 41) 長野正孝: 世界港湾発展史, 「港湾」, 日本港湾協会, pp.89~92, Dec.1988
- 42) Walker J.G. and other commissioners: 「Report of the Isthmian Canal Commission 1899-1901」, Government Printing Office, pp.89~92, Plate 24, 1904
- 43) Cornish L.D.: Design of the Lock Walls and Valves of the Panama Canal, 「Transactions of the International Engineering Congress, the Panama Canal II」, S.F. California, pp.66, 1915
- 44) Americana Corporation: 「The Encyclopedia Americana」, Vol.8, 「Dams」, pp.438
- 45) Hodges H.F.: General Design of the Locks, Dams, and Regulating Works of the Panama Canal, 「Transactions of the International Engineering Congress, the Panama Canal II」, S.F. California, pp.9~14, 1915
- 46) Walker J.G. and other commissioners: 「Report of the Isthmian Canal Commission 1899-1901」, Government Printing Office, pp.178~198, 1904
- 47) Cornish L.D.: Design of the Lock Walls and Valves of the Panama Canal, 「Transactions of the International Engineering Congress, the Panama Canal II」, S.F. California, pp.65, 1915
- 48) PIANC: 「Final Report of the International Commission for the Study of Locks」, Supplement Bulletin No.55
- 49) Edgerton G.E.: 「The Third Lock Project」, January 1941
- 50) ICC: 「The Third Set of Locks」, Panama Canal Twenty-fifth Anniversary Book, August 1941

- 51) 79th U.S. Congress: 「Report of the Governor of the Panama Canal」, Under Public Law 280,
- 52) Anderson R.B. and other commissioners: 「Interoceanic Canal Studies 1970」, 726 Jackson Place N.W., Washington D.C. 20506, Dec. 1970
- 53) KPTMワーキング・グループ: 「第二パナマ運河施工計画書(概要 - 中間報告書)」, May 1983
- 54) Lopez, Moreno Y Asociados S.A.: 「Canal Interoceanico La Alternatives」
- 55) D.Vergara S.: 「El CANAL A NIEVEL」
- 56) Walker J.G. and other commissioners: 「Report of the Isthmian Canal Commission 1899-1901」, Government Printing Office, pp.44~48, pp.98, 1904
- 57) Hodges H.F.: General Design of the Locks, Dams, and Regulating Works of the Panama Canal, 「Transactions of the International Engineering Congress, the Panama Canal II」, S.F. California, pp.2, 1915
- 58) ICC(PCC): 「Isthmian(Panama) Canal Commission Annual Report」, 1915~1988
- 59) PCC: 「Gaillard Cut Widening Feasibility Study -Environmental Report」, Vol.1 and 2, 1987
- 60) Mc.Nally Rand : 「Sailing Ship」
- 61) Lausanne Edita : 「The Great Age of Sail」, 1967
- 62) Moor J.: 「Jane's Fighting Ship 1987-1988」, pp.719~728
- 63) 堀井修身ほか: 「原油タンカーバース調査」, 港研資料 No. 201
- 64) (財)国際臨海開発研究センター: 「パナマ運河代替案構想関連基礎情報収拾分析調査報告書」, pp.122, April 1984
- 65) Anderson R.B. and other commissioners: 「Interoceanic Canal Studies 1970」, 726 Jackson Place N.W., Washington D.C. 20506, pp.105~108, Dec. 1970