

トンネル技術の歩み

(元) 宮崎大学教授

村上良丸 (工博)

1. 地下掘削のおこり

地下を生活の本據とするモグラのような動物はいるが、そこを積極的に開発して、金、銀、銅、鉄などの有用鉱物を採掘したり、導水渠や交通用のトンネル、地下街などを建設する動物は、人間だけである。しかし、人間のこの地下掘削活動の開始は、比較的新しく、第4氷期ヴェルム（1～3万年前）の頃に始まったと思われる。

海面が現在より 100m 以上も低下し、北方では凍結したこの極寒期を乗りきるために、人間は弓矢や刀槍類を発明し、集団で行動した。この時、水に浸すと柔らかくなって加工し易く、乾くと硬くなって、鋭利な刃物になるフリント石は、武器として最高の貴重品だった。

このフリント石が多数出土するドーバー海峡周縁は、その絶好の採取地だった。北岸のノーフォーク（英）に近いグライムズ・グレーブズにあるその遺跡の1つは、図-1に示すように、4 m×3 mの楕円形立穴を12m程下ろした底から四方に、1人がやっと通れる小さな坑道が、掘りまわされており、ピックとして使った鹿の枝角とショベルにした牛の肩甲骨が散乱していたという。

また、同海峡南岸のベルギー側にも、Spiennes鉱山遺跡があり、その坑道は2万㎡にわたって展開している（図-2）。この坑道には、下端がベル形になった多数の立穴があり、下から掘り上ったことを示している。そしてこの坑道には、落盤で圧死した坑夫の遺骸があった。鹿角を握ったままの彼は、坑道での圧死者第1号といえよう。

フリント石は、フランスでも採掘され、その石器は、南部フランスのラスコーやスペインのアルタミラなどの洞窟遺跡やスイスの各地からも出土している。そして、ジブラルタル海峡をこえて北アフリカの各地からも出土しており、特にサハラ大砂漠の略中央にあるタッシリ高原の岩壁面にも、多数の線刻画を残している（図-3）。また、最も美しい西欧型短剣のフリント石製のものが、ナイル河畔テーベの最古のエジプト王墓から出土したといわれる。これらは、クロマニヨン人と呼ばれる西欧民族の移動足跡を示しているのかもしれない。

2. 鉱山業の誕生

フリント石のような有用鉱物を、地下から発掘して加工する最初の採鉱技術を開発した古代エジプト人は、ナイル川河口部にいた地中海系の先住民族を征服した。そして彼らの王族や貴族の墳墓とするために、マスタバ墳、ついで壮大なピラミッドの建設に着手した。これを指導したのは、王族でも貴族でもないイムホテプ（Imhotep）という平民である。5,000年の昔に、史上最初に実名で登場した彼を、＜学問・芸術の神＞、＜医術の神＞、＜大工の神＞などとして、現在の全エジプト人が尊崇している。

イムホテプの努力のおかげで、ナイル河下流域に、史上最初の大文明国を樹立した古代エジプト人は、

1085℃で熔融する銅（鉄は1530℃）に、3～33%の錫を熔融することで硬度をまし、いわゆる青銅にする技術を開発して、それで斧や剣などの武器と共に、ノミなどの各種の加工用道具を造った。

ナイル河畔に多かったクジャク石から青銅をつくることに成功した古代エジプト人は、シナイ半島で銅山を発見した後、造船業を興して、紅海や東地中海にも発展した。やがてキプロス島で、大量の銅鉱石を発掘し、4500年の昔に、職業としての鉱山業を独立させ、いわゆる＜青銅器文明＞を開花させた。

一方、コーカサス山脈南部の山岳地帯にいた別なクロマニオン人の一派は、鉄器の製作に成功し、それを持って、3700年ほど昔に、中東のシリアを経て、ナイル川河口部の下エジプトに侵入し、そこを約100年間占據して、古代エジプト人からは、ヒリソスと呼ばれた。

この南下の途中で、死海南方のヨルダン地溝を通ったと思われる彼らの中にいた鉱山屋が、＜エドム＞と呼ばれていた所で金脈を発見し、その採掘を始めたようである。旧約聖書創世記（14章）に＜ホリ人＞の名で登場する彼らは、絶壁に横穴式の住居を掘って住み、近くの横孔の奥で採金した（図-4）。ペトラと呼ばれるこの地は、アッシリア帝国の前衛地として、前7世紀に登場し、最古のシリア語である＜アラム語＞を話す人達という意味で＜ナバヤーティ＞と呼ばれ、紀元前後には＜ナバタエ王国＞をつくって繁栄したが、紀元105年にローマ帝国（トラヤヌス帝）に亡ぼされた。彼らの真の故地は小アジア東端（シリアの北方）の山地クルジスタン地方と思われる。

前述のように、ナイル川河口部の下エジプトの経営に失敗したヒクソスと呼ばれた小アジア出身のヒッタイト族は、一層の改良をした鉄製武器をもって約3300年ほど昔に、再度、南下を試みた。これをシリア山中のカデシュで阻止したのが、エジプトの大王ラーメス2世（在位1290～1223BC）で、BC1286年のことである。

南下をあきらめたヒッタイト軍は、鋒先を東に転じて、ユーフラテス川下流域のメソポタミアにはいり、そこを早くから開発していたイラン高原出身のエラム人（地中海系人種）を皆殺しにして、アッシリア帝国を樹立した。

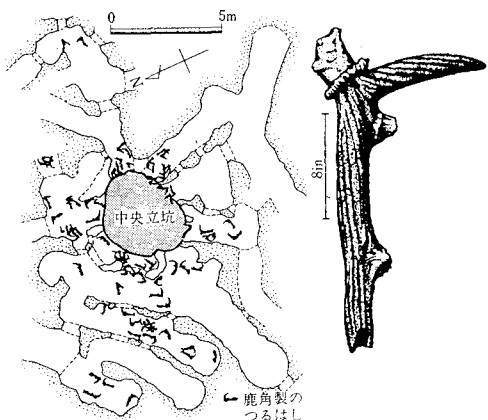
このアッシリア帝国が、中央アジアの草原を故地とした遊牧民アーリア族の一派であるペルシア人に敗れて瓦壊した時（BC612年）、その本国（小アジア）の首都ボガズ・キョイ市（アンカラの東方150km）も消滅した。黒海と東地中海のほぼ中央にあったこの町の近くには、現在のカイセリ市があり、その西南には、＜カッパドキヤ＞の名で知られる月世界を思わせる不毛の大地が展開している。そこに林立する尖塔状の石灰華の岩（図-5）には、小さな横穴が掘られており、そこでキリスト教の隠者たちが、6～7世紀頃生活したことを示している。カイセリとその近くの町からは、ベシリオスやグレゴリオスなどの大主教が出ており、そこは現在でも東方キリスト教修道院の中心になっているという。

驚くべきことには、この地下には、数kmにわたって坑道が掘られており、所々に、数層になった地下集落が形成されているという事実である。これについての発表や十分な研究は、まだないが、その起源は恐らく、ボガズ・キョイ消滅時にまで遡るであろう。そしてこれが史上最初の生活空間としての地下利用であろう。

3. ヨーロッパ内部での鉱山業の発達

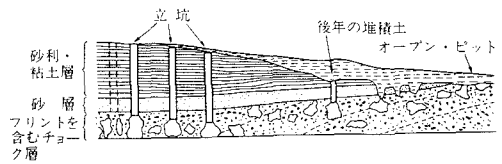
現在の第4間氷期の到来後、アフリカ大陸の北東端でピラミッドを築いて青銅器文明を拓いた古代エジプトと、小アジア東部の山地で、製鉄技術の源流をひらいて、メソポタミアに進出した別なクロマニオン人一派の活躍を紹介したが、ヨーロッパ大陸内部、とくにスイスからイタリアにかけての南ヨーロッパに残って、現代の西欧文明の基礎を築いたクロマニオン人本流の鉱山業活動にふれておく必要がある。

第4間氷期の到来と共に、ベルギーや中部フランスの山地で、フリント石の採掘・加工をしていた技術者の一部は、スイスやオーストリアのアルプス山岳地帯に移った。ここで彼らは、フリント石に代る新しい鉱



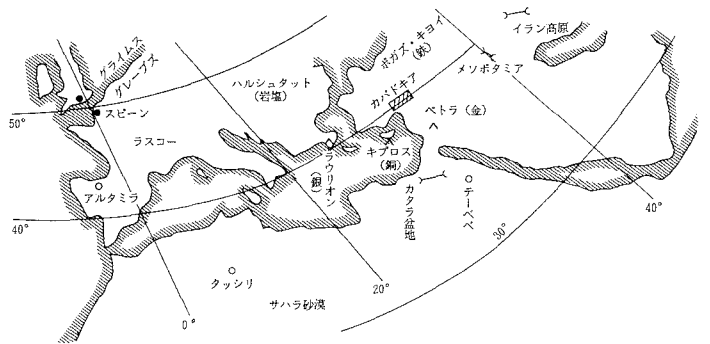
(a) 地底平面図 (b) ピックとして使用した鹿の枝角

図-1 Grimes Gravesフリント鉱山遺跡⁴⁾



(上) 地層縦断面図 (下) 坑道の落盤で圧死した坑夫遺骸

図-2 Spiennes遺跡

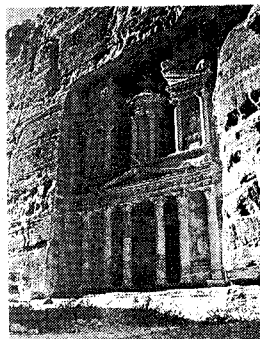


- フリント石採掘地
- 使用フリント石出土
- △ 鉱山
- ▽ 地下都市遺跡
- 導水トンネル

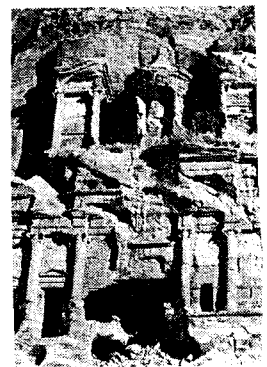
図-3 先史時代の地下掘削遺跡



(a) ペトラ遺跡付近のヨルダン地溝



(b) <ファラオの宝庫>



(c) 人工岩窟の住居跡

図-4 ペトラ遺跡

物として、銅や鉄、そして岩塩の発掘をした。

中でも南北をアルプスの連山に押えられて東西に長いオーストリアの中央北部にあるザルツブルグは、“塩の城”という意味で、内陸部の中部ヨーロッパへの食塩の重要な供給地だった。

このザルツブルグ南東60kmの所にある小湖ハルシュテッターゼの西岸にへばりつく小村ハルシュタットは、標高2109mで屹立するアルプスの峻峰の山麓にあって、舟でこの湖を渡るしか交通手段のない所である。そしてこの小村の裏山で採掘されていた岩塩が、＜ザルツブルグの塩＞だった。

舟でこの湖を渡って、小道をはい上るしか方法のない裏山の約400mの高さの所にある小さな森の中で、1846年に1体の人骨が発見された。それから18年間の調査で993基の墓、土葬にした2000体余の男女と子供の遺体、火葬にした骨を入れた多数の壺などを含む6084件の出土品が得られた。

美しい晴着をつけた遺体のそばに、武器や勲章、腕環、ネックレス、ブローチなどが置いていた。これらの副葬品の大半は、青銅製であるが、黄金製や象牙の柄のついた鉄製の長剣、二股になって美しい柄つきの短剣などもあった。これらは中央アジアの草原で活躍したスキタイ系騎馬民族のものである。

墳墓の近くにあった山城の跡は、石塁と空壕で囲まれ、内側には、長方形の立穴が掘られ、住居にされていたようである。

水平に対して25°から60°の角度で、山腹に掘り込んだ高さ1～1.8mの数本の急な斜坑があり、その底から岩塩層まで種々の方向に坑道が出ていた。それらの長さは、大半が100m前後であるが、最長は坑口から390m、最深は地表下100mに達していた。考古学者は、この掘削起源は、3000年位昔に遡ると推定したという。

高さ1m位の天井を、木材で支持した坑道は、所々で12m×12m位の広間に拡大されている。照明には、粗い綿布で巻いた樹脂が使われ、木柄のついた青銅のピッケルやノミ、木製のショベル、小さな木槌、採掘した塩を詰めて運ぶ背負式の皮袋などと共に、羊毛の衣服や、スリッパ型の革靴などが、何れも良い保存状態で残っていた（図-6）。

事故で死んだ坑夫の遺体と人糞もあった。前者は火葬し、後者は分析された。その結果、この坑夫は、トウモロコシ、大麦、そら豆、リンゴを食べて、十分な栄養をとっていたことが判った。したがって、この坑夫は、奴隷でも騎馬貴族でもなく、熟練した鉱山技師だった。そして採掘した岩塩と交換に食糧や衣服、金属器具類などの全てを入手し、美しい鉄剣や装身具をつけていたといえよう。

ザルツブルグの西隣のチロル地方には、ヨーロッパ最古といわれる銅山遺跡ミッテルベルグがある。また約80km東方には、有名なBisenerz（鉄山）があり、ごく少量のマンガン以外の異物は全く含まない鉄鉱床が今日でも露天掘りされている。ここで得られた1%のマンガンを含む鉄鉱石を、木炭で赤熱し、ハンマーで叩いて、表面に炭素粒子を吸着させ（浸炭法）、鍛鉄と呼ばれる鋼組織に変え、それを再び赤熱して、水で急冷すると（焼入れ）、粗鋼が出来る。これで造ったのが＜ヘラクレスの剣＞といわれる古代最高の“魔法の名剣”だった。それを大量生産してローマ軍に持たせたシーザーは、銅剣のケルト人を、スイス、フランスからイングランドにまで追放し、アウグストゥスは、北アフリカ（エジプト）から小アジア、ギリシャを席卷して、大ローマ帝国を樹立し、今日の西欧圏世界の基をひらいた。

4. トンネル掘進技術の起源

（1）概説

有用鉱物を採取するために掘る鉱山の坑道とは異って、水を通したり、地下通路にするために造る、いわゆるトンネルの起源は、先史時代に遡り、人類が誇る“数学”の起源に一致する。

現在の第4間氷期が到来した約1万年前に、イラン高原に点在するオアシス地帯でトウモロコシをつくり、麦や米の原生種を栽培し、羊やヤギ、ロバ、そして牛を家畜化して、それにひかせる木製の鋤や自動播種装



図-5 カップパドキアの尖頭状石灰岩群の奇景

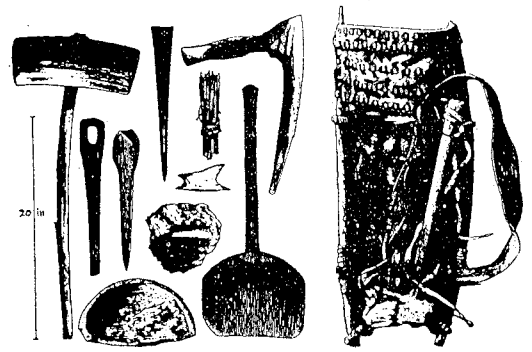


図-6 ハルシュタット岩塩鉱山遺跡に残っていた採鉱工具

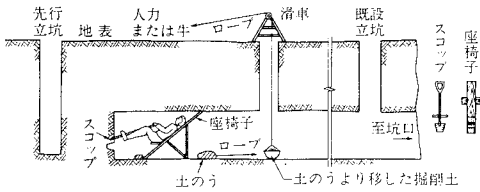


図-7 ガナートの掘進要領

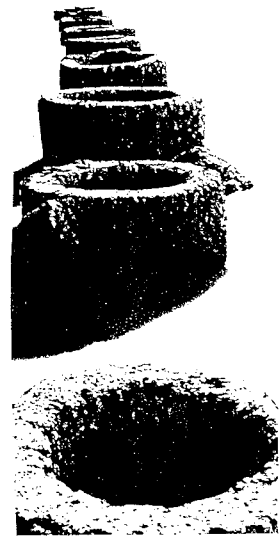


図-8 地上にあるガナート井戸の例（サハラ砂漠）

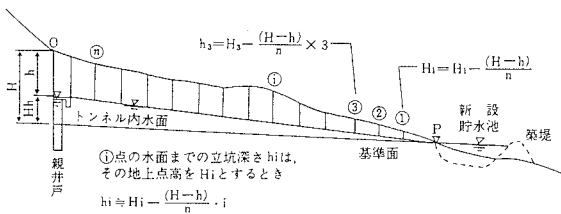


図-9 ガナートの計画勾配設定要領

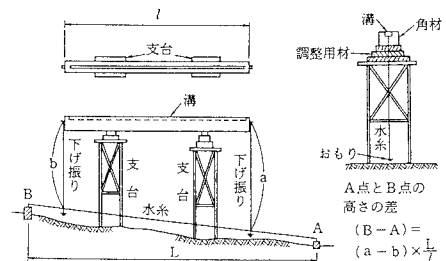


図-10 水準測量具コラペーテスの原理

置まで工夫して，“農耕文明”を拓いたのは、＜エラム人＞と呼ばれる地中海系人種である。

やがて彼らは、西のザグロス山脈を越えてメソポタミアにはいり、その山麓地帯を開拓して、＜シュメル文明＞を開花させた。彼らは、イラン高原で、6000年以上の昔に発明した導水トンネルの建設方法を駆使して、メソポタミア原野の開拓をした。このトンネルは、幅 0.6m、高さ 1 m 程度の小断面ではあるが、その長さは普通、数kmから十数kmで、80kmに達するものもあるという。地表下数mの土層に造られたこの導水トンネルは、今日もなお、この地方の農業経営に使われているという。

今日では、＜ガナート＞と呼ばれているこの農業用導水トンネルの呼称は、アラビア語の＜カナート＞からきており、ペルシア時代には＜カフレーズ＞、＜カーレーズ＞などと呼ばれていた。

西では小アジアから北アフリカ、東では中央アジアから中国のトルファン盆地（坎兒井——カールジン）にまで普及している。以下に、数学の起源に直結するこのトンネルの計画、測量方法と施工方法について述べることにする。

（２）ガナートの掘進方法

ガナートのような、ごく小断面の土砂トンネルを、地表下数mの浅い位置につくるには、今日の北欧の工兵が使っている Kicking法と呼ばれる方法が使われたであろう。それは図－７に示すように、一枚の狭い板に、簡単な加工をして、仰向けに腰かけ、入口の方を見ながら（backsight）、足でスコップを使って掘進する。こうすれば、掘進方向が定まり、楽で、呼吸も便利である。

ガナート切羽の 1 回の掘進を 10cm とすれば、発生土量は 0.06 m^3 （約 100kg）。それを 10 個位の羊の皮袋に詰め、立穴の下で待機している補助者に、ロープで引寄せさせる。補助者は、引寄せた皮袋内の土砂を、地上から下げられているかごにあける。それを地上の作業員が、ロープと滑車で引き上げたであろう。

先行して地表から掘り下げる立穴は、直径 1.5m とすれば、掘り易いが、土量は深さ 1 m 当り 1.8 m^3 （約 3 t）になり、深くなるほど、その捲上げは難しくなる。滑車の心棒を青銅にしたり、捲き上げに牛を使うなどの改良と工夫が行なわれたであろう。

こうして先行する深さ 5 m 位の立穴の掘下げ（約 10 m^3 ）に、4 日を要したとすれば、立穴間 20m のトンネル部分の掘進（土量 6 m^3 ）は、日進 5 m でバランスする。

地上の捲上げ隊を含めて、立穴隊とトンネル隊にそれぞれ 4 名、道具や食糧の運搬に 2 名を当てたとすれば、総勢 10 人で編成されるガナート掘進隊は、1 年で約 2 km 近くを掘ったであろう。こうして出来たガナートの一例を、図－８に掲げる。

（３）ガナート建設測量の原理

まず、山麓にある川の水を集めて造った親井戸 O の水面と、導水目的地の予定貯水面 P の間の相対的な標高差 H を、図－９の要領で実測する。それには、O P 間の地上に、20m 位の一定長のロープを使って標石（中心杭）を並べる。

次に、各標石位置の地盤高 H_i を、予定貯水池の計画水面を基準にして実測する。現代ならこれには、レベル（水準儀）を使うが、先史時代には、隣接標石間に、上面に溝をほった長さ 3 m 位の木材を水平に据え（溝に水をはって確める）、両端に吊るした下げ振りと、標石 A B 間に張ったロープとの交点で、下げ振りの方を切断する（図－10）。

（註）トンネル（tunnel）という用語は比較的新しい。それは 12 世紀頃、イギリスで使われていた筒に液体を入れる道具の fonel（じょうご）からきた tonel（地下への通路）が変化したものといわれる。わが国では、“くりぬき”、“穴道”、“洞門”、“洞道”などといわれていたが、明治以降は“隧道”となり、それが＜トンネル＞に統一されたのは、昭和 40 年頃からである。

こうして得られる2本の糸の差($a - b$)を求め、それに両標石A B間の距離 L と角材長 ℓ の比 L / ℓ (一定)を乗じると、両標石間の相対的なレベル差が得られる。これを計画貯水池側から順次、代数的に加えて行けば、各標石位置の地盤高 H_i が得られる(図-9参照)。

こうして、各標石位置での地盤高 H_i と、そこでの通水面位置を計算で求めるが、それには、加減乗除と比例配分の算法が必要で、その時始めて数学が誕生した。

(4) 数学の誕生

ペルシア湾奥のチグリス、ユーフラテス両川の下流域には、5,000年以上の昔に、エラムの建設したウル、ウルク、ニップール、ラガシュなどの諸都市があった。そこからは、各種の金属器具の他に、円筒の印章や最古の楔形文字板などが出土し、考古学ではそれを、<シュメル文明>とよんでいる。

これらの諸都市とイラン高原を結ぶザグロス山脈西麓の丘陵地にあった人類最古の都市スサが、この<エラム王国>の首都だった。ここから出土している多数の楔形文字板のうち、最古の約100枚は、数学に関するもので、その中には、山や川、森などを表わすものもあるという。

このシュメル算法の数字記号は、 $\uparrow$ と $\downarrow$ の2種類だけで表示されており、その配列と組合せで、小数を含む全ての数があらわされている。すなわち、前者は1、それを並べて9までの数を表わし、10は後者で示す10進法であるが、60になると再び $\uparrow$ に戻る(図-11(a))。したがって60進法でもある。こうして、 $\uparrow\downarrow$

$\uparrow\downarrow$ は、 $60 + 24 = 84$ を表わすと同時に、 $1 + \frac{24}{60} = 1.4$ という小数を示すこともある。現在の研究では、

混乱を避けるために、前者を(1, 24)、後者は(1 : 24)と表示している。

この複雑な表記方法で、掛け算や逆数の表、 $\sqrt{2}$ の値などを刻んだ粘土板が出土しているが、特に、直角三角形を等間隔の5本の平行線で6分割した時の、各線分の長さで分割部分の面積を示す数列は(図-11(b))、注目に値しよう。それはガナートの立穴深さを求める算法に直結するものである。

$L / \ell = 6$ を基本にして、数千に及ぶ標石間のレベル差を算出するコラバーテス測量の算法では、60個づつに区切って処理する60進法は合理的である。そしてガナート建設のために考案された左から右へ横書きするシュメル算法板こそ、アラビア数字の起源になったであろう。

チグリス川派川のディヤラ川流域からモスルにかけてのイラン北東部の丘陵地帯に導水して、そこを開発したのは、<サンムラマト女王>といわれ、その名は、アッシリア帝国の首都ニネベの遺跡から出土した王名板に記されている。ギリシア神話では、半神半人の絶世の美女<セミラミス>として伝えられており、ギリシア人史家ディオドロス(BC46)は、「偉大な将軍で大政治家、しかも大土木技師」だったと述べている。

砂漠の灌漑と飲料水を確保するガナート施設の維持と建設を担当する技師は、現在でも、この地方では深く尊敬されているという。

5. 古代のトンネル

(1) イエルサレムへの給水トンネル

旧約聖書によれば、ダビデ(在位1004~965BC)が造り、ソロモン(同961~922BC)が仕上げたイエルサレム古城は、東丘オペルの麓にあるケデロン谷の<ギホンの泉>から飲料水を得ていた(図-12)。

当初は、ここから城内に掘り上げた階段つきの斜坑を使って、この水を汲んでいたが、ソロモン王没後にイスラエル王国は、南北に分裂した。そして北朝がBC722年に、アッシリア帝国の部将だったサルゴン2世(在位722~705BC)に亡ぼされた時、孤立した南朝のユダ王ヒゼキア(在位715~687BC)は、城外にあったギホンの泉を塞ぎ、城内に造る“シロアムの池”まで、トンネルで導水する計画を樹てた。

直線距離で 330mに過ぎないこの導水トンネルは、素人によって、両坑口から掘進されたため、容易に交会せず、何度も切羽から地表まで立穴を掘り上げて、相互の切羽位置を確認して、カーブを入れながら、やっと貫通させたので、全長は 525mになった。

1881～3 年に行なわれたパレスチナ文化財団の調査によれば、この導水トンネルの幅は 0.6mだった。そして貫通を記念したヒゼギア王の石板碑文が出土した。そこには、現存最古の草書体ヘブライ文字（最初のアルファベット）で、次のように書かれていた（図-13）：

「アッシリア王の攻撃に備えて、両側から掘進したこのトンネルは、全長の略半分の中央点近くで、両側の作業員が、互いの槌音をききながら、歓喜の声を上げて、貫通させた。」

（２）サモス島の上水道トンネル

エーゲ海で距てられて、アテネの東対岸にある Samos島は、小アジアから幅 1.5kmの海路で分離された面積 500km²（淡路島は 590km²）の小島であるが、ピタゴラス（582-493 B C）とイソップ（620-560 B C）を生んだイオニア人の都市である。ペルシアのキュロス大王から、B C 545年に、ここの僭主に任命されたポリキュラテス（？- 522 B C）は、50丁のオールをもつ赤塗りの橈船を 100隻つくり、1000人の弓兵を乗せて、エーゲ海第一の海軍にした。これによって、対立するペルシアとエジプトの間で巧みに勢力を伸ばし、来襲したスパルタ軍の40日間に及ぶ攻囲にも耐えて、それを撃退した。

この僭主の下で、2人のギリシア人が活躍した。1人はテオドロスで、宝石の加工職人として出発し、当時のギリシア最大の神殿をサモス島に建て、後に小アジアのエフェソスに、アルテミスの大神殿を計画した。それは長さ 130m、幅70mで、高さ18mの屋根を支えるのに 127本の柱があったという。

いま1人は、ユウパリニスと云い、アテネ西方のメガラ市出身で、サモス港の裏山（標高 270m）に、1kmに近いトンネルを掘って、同港へ飲料水を供給した（図-14）。ヘロドトスはこれを、当時の世界の三大偉業の一つとして紹介している（他の2つは、やはりサモス島にある当時の世界最大だった神殿と、水深35mに達するサモス港に築かれた長さ 350mの大防波堤）。

現存するこのサモス島トンネルは、1822年に発見された。断面積は約 1.7m²で、しっ喰で覆工されている。長さ約 1kmのこのトンネルは、作業立杭を使わずに、両坑口から掘進したため、中央点付近に、方向で 5.4m、高さで 2.7mの食違いを残し、直角に近い立体曲りが入っている。この狂いを補償するためにユウパリニスは、トンネルの床下に溝を掘って陶管を埋め、上流側坑口には 2.4m、下流側には 5.4mの深いピット（集水桝）を掘って、流水勾配を 1/166 にしている。

このトンネル完成後数年して、アテネの僭主ペイシストラトス（？- 528 B C）に招かれたユウパリニスは、そこに最初の上・下水道を造ったことでも有名である。彼は、ピラミッドを建設したImhotepに次いで、史上に実名で登場する2番目の土木技術者である。

（３）ローマ時代のトンネル

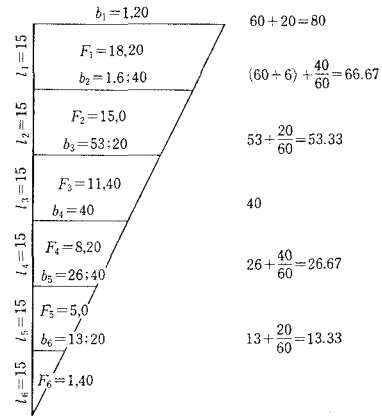
今日のヨーロッパ文明を築いたのは、クロマニヨン人の後裔を自負するローマ人で、北イタリアにいた先住のケルト人を北方に駆逐し、カルタゴを倒して、スペインの鉱山経営をひきつぎ、ライン川以西の全ヨーロッパと中東、北アフリカを掌中に納めた。そして精力的に道路の整備と都市の地下開発を進めた。現在の文明世界は、その遺産の上に成立っている。

はじめに、ローマ建国の伝説を、簡単に紹介しておこう。小アジア西北端の、ダーダネルス海峡近くの丘にあったトロヤは、黒海とエーゲを結ぶ交通の要衝で、有史以前から繁栄していた。ここの占據に失敗したギリシアの将軍アエネアスは、イタリアに逃れて、そこにラチウム王国をつくった。その14代目の王のとき内紛が起り、追放されて巫女になった王女レア・シルヴィアが双子を生んだが、棄てられた。

狼に育てられていたこの双子を拾ったのは、羊飼いだった。やがて成人して、ロムルスとレムスの兄弟に

1: 𐎶	6: 𐎶𐎶	12: 𐎶𐎶𐎶	60: 𐎶𐎶𐎶𐎶	120: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶
2: 𐎶𐎶	7: 𐎶𐎶𐎶	20: 𐎶𐎶𐎶𐎶	70: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	180: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶
3: 𐎶𐎶𐎶	8: 𐎶𐎶𐎶𐎶	21: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	80: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	200: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶
4: 𐎶𐎶𐎶𐎶	9: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	30: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	90: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	
5: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	10: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	40: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	100: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	
	11: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	50: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	101: 𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶𐎶	

(a) 記数法



(b) 直角三角形の6分割表

図-11 シュメル数字と算法例

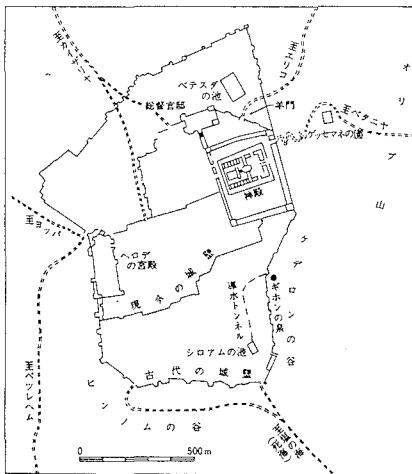


図-12 新・旧のイエルサレム城

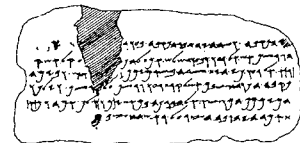


図-13 シロアム導水トンネル貫通時のヒゼキア王の碑文

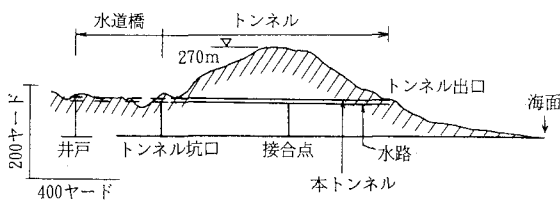


図-14 Samos島の上水道トンネル
(メガラ出身のEupalinis技師の施工)

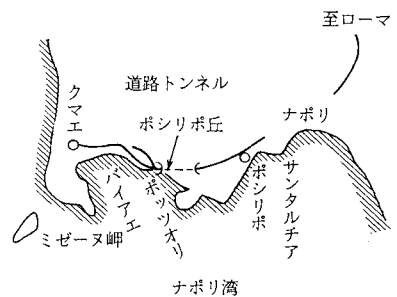


図-15 ローマ時代のナポリ周辺

なったこの2人は、力をあわせて王位篡奪者を倒した。そして自分達が棄てられた場所に、新しい町を造ろうとしたが、その場所で大喧嘩となり、レムスが殺された。1人になったロムルスが、チベレ川のほとりに造ったのがローマ市であるという。こうしてローマ王になったロムルスは、100人の元老院議員を選んで、市政に参与させた。これが後に、ローマ貴族の＜パトリキ＞になった。

ロムルスから5代目の王位には、エトルリア人がなり、38年間も統治した。エトルリア人は、北のアルプス方面から鉄器をもって南下し、イタリア半島を積極的に開発した民族といわれる。その王が、ローマ市を商業の中心として発展させ、人口26万人位の先史時代最大の都市にしたといわれるが貴族に暗殺され、その子のセルヴィウスが、6代目の王位についた。彼は、市壁の強化や人口調査を行なったが、やはり貴族に暗殺された。これにこりて、7代目のローマ王になったエトルリア人は、絶対的な王政を執り、＜貴族＞と＜平民＞の両方から嫌われ、出陣中に追放された（BC510）。

こうしてエトルリア人の王族を放逐したローマ市民は、＜兵員会＞をつくり、王と同じ権力をもつ＜執政官（コンスル）＞2名を選んで運営することにしたが、その任期は1年だった。これが＜ローマ共和政＞のはじまりである。

何れにしても、イタリア半島を開発したのは、アルプス出身のエトルリア人で、その土木技術は、非常に高かった。彼らは、7つの丘に囲まれたフォーラム谷の沼地に、馬車が乾し草を積んで通れる位の大きな下水渠を造った。後年＜クロアカ・マキシマ＞と呼ばれ、その一部は、19世紀末まで使われたが、直接、チベレ川に放流したため、間もなく同川は汚染されて、飲料水が得られなくなった。

このため、BC 312年に盲目の執政官アッピウスが造らせた16.5kmの＜アッピア水道＞を皮切りに、紀元100年頃までに、7本の水道が完成したことが記録されており、その累加延長 370kmのうち、地下構造部分は 254kmで、その57kmは、純粋なトンネルと推定されている。当時のローマ市人口は 120万人と推定されているので、市民1人当りの1日給水量は、約1000ℓで、今日の大都市での 350～250ℓ（中小都市での 250～100ℓ）に比べて、如何に潤沢だったかを物語っている。

こうした大下水渠や上水道の他に、ローマ人は、軍事と交通用に道路トンネルをつくり“全ての道は、最短距離でローマに通じる”ように心掛けた。

ガリア人を追って北上したシーザーは、シンプロン峠（標高2005m）でアルプスを越える最初の道路を拓き、ベルン市の北で、溪流沿いの岩山の山腹に、長さ 900m余りのトンネルを掘った。馬で通れる位の大きな断面のこのトンネルには、20～30mの間隔で横穴状の多数の斜坑が掘られており、それは採光と換気にも役立ったことを示している。

ナポリ西郊のポシリポ丘の下には、平行する2本の古いトンネルが現存し、軍用と一般用に使われたことを物語っている。前者は、後に初代ローマ皇帝アウグストゥスとなったオクタヴィアヌスの命令で、BC36年に、技師コッセイウスがつくったといわれ、埋没していたのを1846年に発掘した。“Seiano”と呼ばれるこのトンネルは、馬で通るに十分な断面があり、採光と換気のために、多数の立穴を有する長さ約1kmのもので、完全に軍用かつ皇帝用だった。

これと平行して内陸側に、もっと長い一般用のトンネルが掘られており、その幅は 7.6m、高さは9mで、現在も使われ、市電を通してているが、立穴は全くない。当初の長さは約 1.2kmだったと云われるが、数度にわたる坑口の崩落で、現在の坑口高さは23mになっており、トンネルの全長は約 900mといわれる。この一般用のトンネルを、紀元1世紀頃のローマ哲人セネカは、「牢獄でも、この孔倉より暗いものはない……風が全く吹かないので、ホコリが凄まじく、どんなトーチランプでも、お互の顔を見分けることができない……」と述べている。

古代最大のトンネルは、4代皇帝クラウディウス（在位AD41～54）が造ったフキノ湖干拓用のトンネルである。ローマの東約80kmのイタリア半島のほぼ中央にあったアペニノ山中のこの湖は、約 150km²の面積を有していた。これを西南岸の山体に、長さ約5kmのトンネルを掘って、チレニア海に注ぐリリ川に放流しよ

うというもので、トンネル幅は 2.7m、高さは 6 m 以上を有している。

シーザーが計画したこのトンネルの工事にクラウディウス帝は、即位と同時に着手した。担当技師に指名されたナルシスは、3 万人の奴隷と数千頭の馬を使い、22本の立坑と斜坑（最大深 120m）を下ろして、10年がかりで、この大トンネルを掘った。地山の堅硬な部分を除いて、天井にはアーチ状の切石覆工をし、悪い地山の所には、インバートをつけた。

完成の知らせを聞いて喜んだクラウディウス帝は、放流に先立って、この湖上で模擬海戦を行なうことにした。全国から集めた19,000人の死刑囚を数百の軍船に分乗させて戦わせ、最後まで生き残った者を放免しようという壮絶なもので、48kmに及ぶ湖岸には、近衛兵を配置して、逃亡者を殺させた。

この壮絶な模擬海戦を満喫した後、同帝は放水を命じたが、開けた水門はすぐ、沈んだ軍船の破片で詰まり、水は流れなかった。クラウディウス帝は激怒してローマに帰ったが、ナルシス技師には、名誉挽回のチャンスを与えた。

トンネル内を掃除し、勾配を修正するのに1年を要した。2度目の通水式は、トンネル出口側の河原に特設した会場で行なわれた。皇帝夫妻臨席の下で、全土から集った招待者への宴席がはられ、剣闘士の決闘試合後、通水の合図が出された。今度はトンネルから大奔流が出て、あたりは洪水となり、宴席は流され、皇帝以下全員が命からがら逃げるという破目になった。

6. 近世のトンネル

ローマ人の努力で、社会資本の基礎を支える種々の地下構造物（Infrastructure）を整備した西欧社会は、その遺産の上に約 1,500年間、安住した。それがいわゆる中世であるが、工学技術的には、見るべきものがない、いわゆる“暗黒時代”である。

そのヨーロッパで、トンネル事業が再開されたのは、17世紀の後半で、口火を切ったのは、フランス人のピエール・ポール・リキュー（Pierre Paul Riquet）という、土木技術には、ずぶの素人だった。

50歳代半ばで、徴税吏を退官した後、150年前にレオナルド・ダ・ヴィンチ（1452～1519年）が構想した大西洋と地中海を結ぶ運河計画に興味をもち、ボルドーで大西洋に注ぐガロンヌ川と、ベジェで地中海に入るオード川を結ぶ運河案（図-16）の現地踏査をし、自宅の裏庭に、大きな地形模型を造って研究した。

その結果、自信を得たリキューは、その計画をまとめて1662年に、太陽王ルイ14世（在位1643～1715年）の宰相コルベールに提出した。時にリキューは、58歳だったという。

ガロンヌ川上流のツールーズ市から始まり、オード川の分水嶺までの51kmは、32個のロック（閘門）で62 m上り、標高 186mの峠に、5 kmの水平区間を設けて、付近の溪流を集め、その東端から地中海までの 184 kmを64個のロックで下がる全長 240kmの、この壮大なランゲドク運河（Languedoc）の計画は、宰相コルベールとルイ14世をすっかり魅了した。

早速、技術委員会が設置された。その専門家たちから出された疑問に答えるために、リキューは、予定ルート上に、幅 6 m、深さ 2.7mの運河を、自費で43kmつくった。これに要した日数は、1665年 5月から10月までの僅か5か月だったという。当時の日本は、4代将軍家綱（在位1651～80年）の時代だった。

こうして、この運河の工事は、翌1666年にフランスの国営工事として、正式に始まったが、奇妙な経緯で、このルート上に、運河トンネルが誕生し、それが西欧では、ローマ時代以来の最初のトンネルとなった。

この運河の地中海側入口のベジェの町の西方で、8番目のロックの上流10kmの所にあるマルパス丘を通過するルートは、コースを変更して、掘削土量を減らすように、技術委員会から云われたリキューは、同所の作業員を他所に移し、選抜した小数の作業員に、秘密裏に、トンネルを掘らせた。

こうして長さは 155mにすぎないが、幅 6.7m、高さ 8.2mという当時の世界最大の断面をもってマルパス・トンネルが、1679年から '81年にかけて掘削された。西坑口に残しておいた地山は、黒色火薬による発

破で除去したため、火薬を使った最初のトンネルといわれるが、それはトンネル自体の掘進に使ったのではない。トンネル開通の報告をうけたルイ14世は、運河の開通宣言をしたが、工事は実際には、1692年（元禄5年）までかかった。

このマルパス・トンネルより50年近くも前に、日本最初の大トンネルが、加賀百万石の居城・金沢につくられた。飛騨山地から北にのびた丘陵が、日本海に落ちる北線の丘（標高50m）にある金沢城は、前田利家（1538-99年）が造ったが、最大の難点は、水の確保だった。それを解決するために、この丘の西麓を北流する犀川の水を、上流11km付近（上辰巳町東岩——標高 95.25m）で取水して、城内へ導水する計画を進めていたが、幕府はそれを、謀反につながると見て許可しなかった。しかし1631年に、民家1000戸を焼いた城内からの出火で、「城内の飲料水と防火用水の確保」という名目で、3代将軍家光が許可した。

それと同時に着工した3代目城主の前田利常は、小松出身の板谷兵四郎を技師長に任じて、この導水路工事に当らせた。多年にわたって、この計画を研究していたと思われる板谷技師は、1632（寛永9）年4月に着工し、同年末までの僅か9か月で、上流側に3km余りのトンネルを掘った。そして下流端には、有名な兼六園をつくり、中間の原野に余剰水を放流して、そこを肥沃な農地に変えるために、更に2年をついやした。しかしその後の板谷技師の消息は、ぶつりと切れ、工事の記録は皆無という。そして現在は、城内の片隅に「板谷神社」と呼ばれる小さな祠が残っている。

この辰巳用水路は、板谷技師の建設後 160年以上たった1799年と、その後の1809年、さらに1855年の3回、補修され、その折の絵巻物3本が現存している。それは現在の取水口より 0.6km下流で犀川の水をとり、約 2.7kmを、全部で66本の横穴を使って施工したことを示しているという。内空断面は、幅、高さとも 1.8m程度で、上半部は、半円状に仕上げられている。

地質は、上流の方から、凝灰岩、凝灰質泥岩、泥岩と変化し、一部に砂岩をはさんでいるが、何れもツルハシで掘れる程度の硬さで、しかも無覆工のままで、360年近くも自立しており、今日も尚、使用されているわが国最初の大トンネルである。

施工は多分、対岸に設けた標高差 2m位の 4箇所の観測台のそれぞれと等高の区間にわけ、各接続端に、1/10～1/20程度の勾配を入れたようである。こうして4つの区間に分け、それぞれの両端（8工区）から、互いに競争しながら掘進したようである。

9か月で 2.7kmを掘るには、月進 300mで、これを 8工区に分けると、1切羽の月進は37mで、平均 1.2mの日進が必要で、昼夜兼行の作業で進められたろう。しかし対岸からの視認が困難だった沢では、非常に苦労をしたようである。上流の東岩取水口から約 2kmの所の沢には、その谷間沿いに完全なヘアピン・カーブのトンネルがはいっており、<彦兵衛穴>と呼ばれる横穴の近くには、間違った位置に掘った横穴や、カーブを誤って掘り過ぎたトンネルの跡などが残っており、当時の苦労を偲ばせるという。

わが国ではまた、マルパス・トンネルより15年前の1666年 8月25日に箱根用水トンネルに着工して、4年後の1670年 2月15日に完成した。これによって、“芦ノ湖”の水を富士山麓の湖尻村に導水し、530町歩の田畑かんがい成功した。それは同村名主の大庭源之丞の努力で、江戸浅草の豪商・友野与右衛門が資金を出し、箱根神社別当の助力で、4代将軍家綱の許可を得て着手したもので、今日も使われている。標高1860mの外輪山湖尻峠を突破したこのトンネルは、長さ1.28kmで、平均 2m四方の角型断面を有しており、出口下流側には、約 9kmの開水路が掘られている。総工費は 7,335両で、延べ83,000人を要したと記録されている。

さらに1750（寛延3）年 8月には、有名な“青の洞門”が、大分県山国川のほとりに屹立する景勝地競秀峰の絶壁に掘られた。このトンネルは、越後出身の僧禅海がスポンサーとなって資金を集め、長州の石工岸野平右衛門が、手ノミで掘った。長さ約 220mで、中間に換気と採光のために、4か所の窓式横穴がある。

トンネルの断面は、最終的には、幅 9m、高さ 6mにまで拡大され、騎馬のまま通れる大きさになったといわれ、現在は、その一部だけが国道として残っている。歩行者から 4文、牛馬の通行には 8文とったわが

国最初の有料道路である。1774（安永3）年8月24日に88歳で他界した禅海は、1町歩余りの田畑と銀200貫を羅漢寺に寄付するように遺言した。

1681年に、ランゲドク運河のマルパス・トンネルを造って以降、90年間近く、再びヨーロッパはトンネルを造らなかったが、それを再開したのは、イギリスの炭坑技師J. ブリンドリー（James Brindley, 1716～72）だった。貧しい小作人の息子に生まれ、小学校も出なかった彼は、水車大工から機械工になり、蒸気エンジン付きのポンプを発明するなどして有名になり、ブリッジウォーター3世侯（the third Duke of Bridgewater, 1736～1803年）に、炭坑技師として採用された。当時同侯は、マンチェスター東方のWorsleyに炭坑をもち、そこで採掘した石炭を運び出すために、ロック付きの運河を計画していた。これを長さ約180mのローマ式の多スパン高架の水路橋を架けて、全てのロックをなくし、水路長を著しく短縮する提案をした。この水路の炭坑側には、坑道口にプールを設け、その水を坑道に入れて、採炭切羽まで舟が直接进入して、石炭を積み、それをロープで坑道前のプールに引戻し、数隻を一行につないで、出口側に造った幅2～3mの運河水路に出し、両側から馬で牽引する方法を案出した。そしてマンチェスター側の下流終端は、Castle Hillという丘の下に横穴を掘り、石炭を積んだままの小舟を入れ、石炭を引上げる立穴を用意した。

多くの反対を押切って造った奇想天外のこの運河17kmが出来た時、さすがのブリンドリーも怖くなって、1761年（10代将軍家治の治世2年目）7月17日の開業式には、仮病を使って出席しなかった。しかしこの運河のおかげで、マンチェスターの石炭価格は、それまでの半額以下となり、石炭の最も安い所として、英国工業の中心地になった。それでこの日を英国では、産業革命発端の記念日にしている。

ブリンドリー技師は、この最初の運河を、マージー川河口のリバプール市まで延ばそうとしたが、大出費のため、ブリッジウォーター侯は渋った。やがて独立したブリンドリーは、マンチェスター市のワーズレー運河終端の丘に、プレトン・ブルーク（Preton Brook）という長さ1,133mのトンネルを掘って南下し、その後の小丘陵の横断に、長さ118m、520m、386mの短い3本のトンネルを使った。イングランド中央のバーミンガム市の北で、英本土の脊梁ペニン山脈を横断する時、長さ2,650mの当時の世界最長のトンネルHarecastleを掘った。

この時、英国で初めて、手ノミと黒色火薬を使っての〈せん孔・発破〉作業が行なわれたが、硬岩と出水に悩まされて、大変な苦勞をした。そして、換気のために掘った立坑の下で、火をたくことまで試みたが、そうした多くの苦勞がたたって、ブリンドリーは1771年9月27日に、55歳で急逝した。

1777年（この前年に平賀源内がエレキテルをつくり、翌年に本居宣長が、古事記伝の第1巻を発表）に開業したこのハレキャッスル・トンネルの断面は、幅2.7m、全高3.7mで、水面上の高さは1.8mだった。このトンネルのおかげで、バーミンガムからリバプールまでの貨物運賃が、1/4に下がったといわれる。こうして、バーミンガムから更に南下して、テムズ川沿いにロンドンの西北郊まで出るイングランド中央を南北に縦走する全長225kmの大運河は、幅こそ3m程度であるが、Grand Trunk Canal（壮大な幹線運河）と呼ばれて、現在も使われている（図-17）。

これらの運河トンネルの通過には、“legger”と呼ばれた文字通りの「人足」が当たった。トンネルの入口に待機していた彼らは、馬にひかれたハシケがくると、馬をはずして積荷の上に、両舷側から翼状に張り出す架台をとりつけ、その上に仰向けに寝て、トンネル壁を足で蹴って、ハシケを推進した（図-18（a））。空荷の時は、竿を使ったが、水底にさすと、たまっている泥土のために、引き抜くのが容易でないで、壁に竿当て用のくぼみをつけた。

この要領だと、全長2,650mのハレキャッスル・トンネルの通過には、2時間以上かかった。このネックを解消するために、片側に幅1.5mの曳行通路（後にはチェーンを設置）を設けて、幅4.3m、全高4.9m（水面上の高さは2.7m）にした第2トンネルが、47年後の1824年（わが国では翌年に、“異国船打払令”が出た）に開通した。担当技師は、後に英国土木学会の初代会長になったT. テルフォード（Thomas Telford, 1757～1834）だった。

また、マンチェスター市から北東に進み、コルダー川を渡り、リーズ市をへて、北海に出る運河もつくられ、西のマージー川でリバプールに出る運河と結ばれた。かくして、ブリテン島を東西に横断して、北海とアイリッシュ海が結ばれた。この運河が、ペニン山脈を横断する所につくられたのが、英本土最長の長さ4,950mをもつStandegeトンネルで、その工事には17年を要し、1811年（11代将軍家斉の文化・文政期）4月4日に開通した。それから133年後の1944年（昭和19）12月21日にこれが閉鎖された時、深さ2.4mでつくられたトンネルの水深は、沈泥のため、1.5mに減っていたという。

18世紀後半に全盛を極めた英本土の運河交通は、Inland Navigationと呼ばれ、その建設技術者は、Navigator，略してNavyといわれたが、それが海軍々人を指すようになったのは、運河建設の終わった19世紀半ばからである。

運河交通が最盛期だった19世紀初頭の英本土の運河延長は19,200kmに達し、それを横断するのに約25,000本の橋があったという。運河の水辺に座って、静かに通るハシケを眺めていた老いたブリッジウォーター候は、“運河時代は終りだな”とつぶやいたという。彼は1803年に67歳で他界した。

その頃、ヨーロッパ大陸での運河建設は本格化し、それは蒸気船の誕生と一致した。英国とは異って、公営で建設・管理された大陸の運河幅は、8mを基準とし、トンネル内も、その幅で通され、レンガ覆工された。

1802年に、B. ナポレオン（1769～1821年）の命令で着工されたパリからベルギーに向けての運河の1期工事96kmが始まった。この運河には3本、合計18.4kmのトンネルがあった。最も短いトロンコイ（Tronquoy）は、1,081mだったが、滞水砂層の突破に手間どり、＜リングカット工法＞が案出されたが、その開通は、5,460mのリケヴァル（Riqueval）トンネルの開通と一緒に、1810年だった。最も長い11,810mのノワリユー（Noirieu）トンネルの完成は、1822年になった。（この前年に、伊能忠敬が大日本沿海輿地全図を完成）。それは現在でも世界最長の運河トンネルである。

しかし当時は既に、小型蒸気船の時代になっていたので、この長いトンネルに入ることは、煙りのために危険として、全ての船長が拒否した。困ったフランスの運河当局は、「このトンネルを最初に通った船には、通行料を永久免除する」と公告した。やっと一人の船長が応募し、おっかなびっくりで、トンネルに入ったが、無事に通り抜けた。自分の船を、Grand Souterrain（大穴倉）号と改名した彼は、19世紀末まで、このトンネルを無料通行して、大いに稼いだといわれる。

この運河をブリュッセル市まで延長するために、ベルギー領に入った所のシャルロイ（Charloi）で、長さ1,290mのトンネルが、1828年に掘られた。この時遭遇した軟弱地山の克服に、＜断面の上半部を先進掘削・覆工し、後方の下半部分をベンチ状に掘り下げながら、側壁を逆巻覆工する掘進工法＞が開発された。これはわが国に導入されて、＜ベルギー工法＞と呼ばれ、良い地山では、上半部分を貫通・覆工したのち、下半大背部を掘り、側壁部は、“抜き掘り”で飛びとびに掘って、“逆巻”で側壁のコンクリートを打設する方法が、最近まで、日本の山岳トンネル掘進工法の主流になっていた。

7. 現代のトンネル

（1）掘進工法

イギリスで全盛を極めた運河は、それを横断する陸路交通を阻害しただけでなく、狭くて浅い水路幅と水深のため、新しく登場した大きな蒸気船が通れず、間もなく邪魔物視されるようになった。それは既に、運河の創始者ブリッジウォーター候がつぶやいた通り、19世紀の到来とともに、英国では内陸運河の建設はなくなり、“Navy”は水兵の呼称に変わった。

こうした中で、運河に代る新しい交通手段として登場したのは、1825年（文政8年、外国船打払令）に、ジョージ・スチーブンスン（George Stephenson）が開発に成功した蒸気機関車である。そしてこれが、

一般乗客を乗せた列車をひっぱって、1830年（前年に松平定信没）9月15日に、リバプール〜マンチェスター間を走り、いわゆる“鉄道時代”を開幕した。この時、終端リバプールの地下駅に入るために、進入部の街路下に、開削埋戻工法で、最初の鉄道トンネルがつくられたという。

その後、急速に進展した英国の鉄道建設では、線路勾配平坦化のため、丘陵・山地部では、トンネルが不可避で、Kilsby (2,210m)、Littleborough (2,623m)、Box (2,926m)などの、かなり長いトンネルが、1834年以降1840年（わが国では1837年に、大塩平八郎の乱）までに、次つぎと建設され、1846年には、長さ4,836mの2本のWoodheadトンネルが、オープンした。

鉄道の建設は、ヨーロッパ大陸でも、直ちに始まり、1835年には、ベルギーに最初の鉄道トンネルCump-tieh (925m) が誕生した。そしてフランスやドイツで、地質に応じた断面の掘削順序と覆工までの支保工型式が工夫された。

最初のアルプス横断鉄道トンネルは、現在の仏・伊国境のFrejus峠（標高 2,528m）の下に掘られた。しかし一般には、ここの東24kmにあるMont Cenis峠の方が有名なので、＜モンスニ・トンネル＞として知られている（図-19）。

レマン湖（スイス）南方で、現在はフランス領のサボワ地方を領していたヴィットリオ・エマヌエレ2世を補佐して、イタリア全土を統一した大宰相カブール（C. B. Cavour, 1810〜61）の努力で、クリミア戦争後の1857年（ハリスとの下田通商条約締結）8月17日に着工されたこのトンネルは、途中、1861年（皇女和宮降嫁）のイタリア統一とカブールの死をはさんで、1871年（明治4年、廃藩置県）9月17日に正式開業された。

長さ 13.38km、断面の幅 7.4m、内高 6 mのこの複線鉄道トンネルは、イタリア側坑口のピエモンテ村出身の技師ジャーマン・ソメイユ（Germain Sommeiller）が開発した史上最初の圧縮空気駆動パーカッション（打突）型の削岩機と黒色火薬を使って、50年かかるだろうといわれていたこのトンネルを14年間で完成した。ソメイユは、電気のなかった時代の圧縮空気の製造やトンネル内の換気にも、大変な苦勞をした。彼は開通式の1週間前に他界したという。

1875年（明治8年、ロシアと千島・カラフト交換条約締結）2月9日には、20年間にわたって苦闘した米国のフーザック（Hoosac）トンネルが開業した。この工事では、ニトログリセリンに続いて、ノーベルが発明したダイナマイトが、初めて使用された。

長さ14,984mのスイスのゴットハルド（Gothard）トンネルの工事を請負ったのは北イタリアのジェノア（Genoa）出身のファブール（Louis Favre, 1825〜79）である。1872年8月7日に国際入札されたこの工事を彼は、8年の工期と8000万フランの金額で落札した。この落札金額の10%に当たる 800万フランを供託金として提出したファブールには、1880年8月23日の納期より遅れれば、はじめの6か月間は5000フラン/日、次の6か月間は、1万フラン/日の割合で、この供託金を没収し、逆に早く出来れば、この割合で、褒賞金を出すことにした。

この厳しい契約条件下でファブールは、仮設物と機械類以外は全て下請に出し、予定以上の工程を上げた時には、ボーナスを出した。

ダイナマイトは支給し、後には馬に代えてエア駆動の機関車を導入したが、電気がなかった時代だったので、照明には灯油ランプを使い、換気には、削岩機用のエアの放出を当てた。このため貫通までに最長 8 kmにも達した坑道での作業環境は、極度に劣悪化し、そこでの温度は41℃に達した。

作業員は、十二指腸に寄生虫が発生し、半年も働くと、貧血や関節の硬直が起り、1年で廃人状態になったという。その犠牲者の数は、恐らく 800人に達したであろう。それでも不屈の努力で、この工事の大半を完遂した1879年7月19日の夕方（来客案内の直後）に、ファブールは心臓発作で急逝した。時に54歳だったという。

竣工引渡は、延びた工期に対する違約金の計算でもめ、1881年10月1日になったが、開業は予定通り、

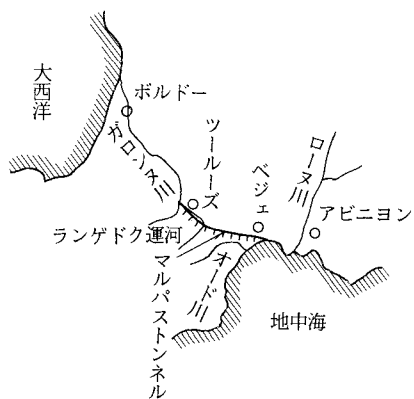


図-16 ランゲドク運河

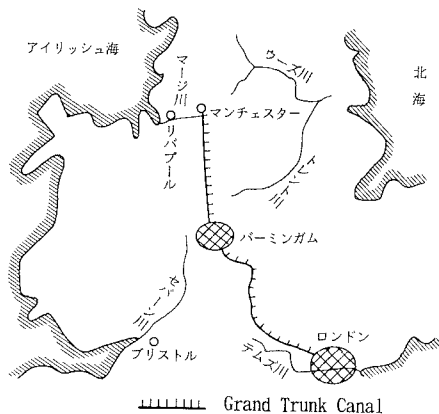
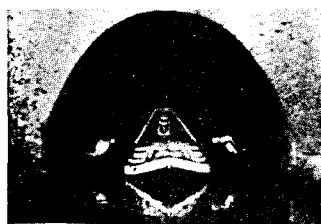
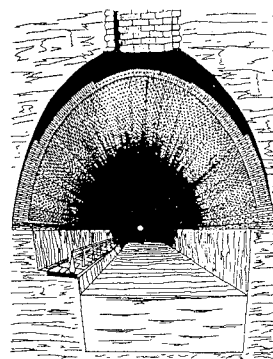


図-17 イングランド中央部とGrand Trunk運河



(a) “legger” をのせたハンケ



(b) 片側にハンケ曳行路をもつ運河トンネル

図-18 英国運河トンネルの通行要領



図-19 初期のアルプス横断鉄道トンネルの位置

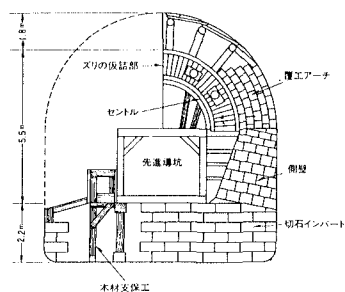


図-20 シンプロン・トンネル 大土庄区間
(イタリア側 4.5km地点) の切石覆工要領図

1882年（明治15）1月1日に始まった。

このゴットハルド・トンネル工事の南工区で、現場監督をしていたハンブルグ市生まれの若いドイツ人技師A. ブラント（Alfred Brandt）は、圧縮空気製造時の発熱で生じる水車タービンのエネルギー・ロスと、送気管途中の漏気が、エア削岩機の効率を下げることに気付いた。

間もなく独立した彼は、エアの代りに圧力水で動かす水圧式削岩機をつくり、坑外に設置する水車タービンで駆動するポンプで、毎秒2ℓの圧力水（100気圧）を、切羽にあるこの削岩機2台に送り、その王冠型ビットを、12tの圧力で岩面に押しつけ、毎分3～4回の回転で、岩を圧碎し、径70mmの穿孔をする工夫をした。

この水圧式削岩機4台をもってブラントは、1880年に、アールベルグ（Arlberg）トンネル（10.4km）の西工区を請負った。東工区（オーストリア側）は、ゴットハルド・トンネル工事にいたフェロックス（Ferroux）がとり、改良したエア削岩機8台で、径29mmのせん孔をした。両者とも、日進5.44mの進行率を出し、5年の工期を420日間短縮して、3年半でこのトンネルを完成し、33,600ポンドの褒賞金を獲得した。このトンネルの開業は、1884年（明治17）である。

A. ブラントは、スイス・イタリア国境のレオネ山（Leone、標高3553m）の直下に計画された長さ19.8kmのシンプロン（Simplon）トンネルの工事でも請負った。1898年8月12日に落札したこの工事に、同年8月16日に着手し、11月13日から本格的な施工にはいった。この間に、イタリアとスイスの坑口前に、水車タービンを設置し、削岩機だけでなく、特設した大送風機で、毎分最大6000m³の送風が出来るようにした。これは、中心間隔20mで掘る2本の導坑（幅3m、高さ2.5m）の一方に送られ、両坑を200m間隔でつないだ横坑を通して、他方から排気するようにした。この導坑の一方を拡大して、単線の本トンネルとし、他方は維持作業用に使い、後年の複線化にあてることとした。この“平行導坑方式”の採用こそ、人類最初の長大トンネルを、最大被高2135mの所に掘れた基礎になっている。

ゴットハルドでの経験からブラントは、環境の整備こそが、士気と能率の向上につながると確信し、前述の坑内換気の他に、坑内気温の上昇には、撒水で対処する手配もした。こうした直接的な対策の他に、彼は坑外に、シャワー室つきの更衣室を用意し、蒸気乾燥器つきの洗濯場や娯楽室も用意した。また、冬には暖房のはいる食堂をつくり、1食4ペンスという当時としては、破格の安さで、ホテル並の食事を出し、たっぷり栄養をとらせた。

こうした準備と資金集めに奔走したブラントは、ベンチや机で仮眠するだけで、1日24時間働き通しだったといわれる。このため着工1年後の1899年（明治32）11月29日に、脳卒中で急死した。

その後は、パートナーだったK. ブランダン（Karl Brandan）が継ぎ、スイス側は、E. ロッチャーフロイラー（Edward Locher-Freuler）というスイス陸軍大佐が指揮した。

やがて工事は、2100mをこえる未曾有の大被高下で、岩片が横にはじける＜山跳ね＞現象に遭遇しただけでなく、大出水区間（平均48t/分、最大1.25t/秒）、56℃と47℃の熱水噴出、55℃の地熱など、それまでに人類が経験したことのない、地下の多くの恐怖状態に遭遇した。また、大土圧区間では、インバート部を先進させて、そこに切石を2.2mの厚さで詰めた上を掘って、厚さ1.8mの切石覆工をして、単線断面を確保した（図-20）。

こうした筆舌に尽し難い多くの困難を克服して、1905年2月24日に導坑が貫通した。それは掘進開始以来、2392日目、貫通誤差は、水平20cm、垂直9cm、延長は79cm短かったという。こうしてこのトンネルは、1906年（明治39）6月1日に開業された。

この長さを越えたのは、67年後の1982年（昭和57）に完成した日本の大清水トンネル（22,235m）だけである。そしてこの間になされた唯一の進歩は、ナチス・ドイツが開発したタングステン合金鋼を刃先に使って、その寿命を飛躍的にのばし、現場におく研磨所を不要にしたこと位であろう。

(2) シールド工法

市街地や水路横断に使うシールド機は、軟弱地盤掘進時の作業員を防護する“楯”という意味で、現代の“万能の天才” M. I. ブルネル (Marc Isambard Brunel) が、考案・命名したトンネル掘進機である。彼はこれによって、19世紀の前半に、ロンドン市内のテムズ河底に、外幅11.3m、外高 6.9mという大断面トンネル (長さは 452m) を造った。

この工事は、地質調査のミスから、ヘドロのたまった河底に、直接、トンネルを造ることになり、大変難航した。1825年 (外国船打払令) 3月2日に着工して、河心近くまで行った1828年1月12日に遭遇した大出事故のため、河底に8年間放置された。この重量80tの1号機を、140tの2号機 (図-21) で置き換えたのは、1836年3月である。

この2号機も、多くの苦労をしながら、1840年8月に、やっと南岸に到着した。それから13か月かけて、ここの立坑 (外径15m、壁厚 0.9m、深さ15m) を下げ、シールド機を再発進させて、側壁に穴をあけて、トンネルを全通させたのは、1841年 (天保の改革開始) 8月12日午後2時と記録されている。ユーフラテス川河底につくったといわれる伝説上のものを別とすれば、これは人類が造った最初の水底トンネルである。この年ブルネルは、ヴィクトリア女王 (1819~1901年) から、Sirの爵位を貰った。

世界中の注目を集めていたこのトンネルは、1843年3月25日 (土) に公式に開業され、前年暮に卒中で倒れていたブルネルも、驚異的な精神力で、この式典に出席した。一般開放後、僅か3か月で、世界中からきた 100万人の人が、高さ25mのラセン階段を下り、450mのトンネルを歩いて、対岸の立坑を上ったという。

しかし無策のまま、通行人から1ペニイとっていたこのトンネルは、間もなくあきられ、5,000ポンドの予定だったブルネルへの完成報酬も、1,700ポンドで打ち切られた。それでも雨の日だけは浮浪者が集ったので、“Hades (黄泉の国) ホテル”という異名がつけられた。

不自由な身体と失意の中で、晩年を送った老ブルネルは、1849年12月12日に、80年の生涯を閉じた。しかしこのトンネルは、16年後の1865年 (第2次長州征討) に East London Railway社に買収され、今日もロンドン環状地下鉄線の一環として使われている。

テムズ川横断に使った2番目のシールド機は、1865年に P. W. バーロー (Peter W. Barlow) が出願したもので、彼はこれを使って Tower橋の下に、簡易鉄道用の径 2.2mのトンネルを造ろうとした。

その前年に、南アフリカの Cape Colonyで生まれ、そこの学校を出た19歳の青年 J. H. グレートヘッド (James Henry Greathead) が、彼の事務所に入った。新しい水底トンネルの建設方法を彼から習ったグレートヘッドは、このシールド機による上述のトンネル工事を担当することになって、1869年に、僅か9か月で、長さ 402mの水底トンネルを、両岸に下ろした立坑間に造った。時にグレートヘッド氏は、僅か25歳だったという。

使用した簡易シールド機は、図-22に見るように、中央に正六角形の通路を残すように組んだ铸铁枠の各頂点から、合計6本の支柱を出して、外周の铸铁筒を支える外径 2.5m位の小さなもので、3人で作業した。

幅 0.9mで、2.5tの自重しかないこのシールド機は、3枚の铸铁セグメント (幅90cm) で組立てた覆工に反力をとって、6個のスクリュウ・ジャッキで、先行して前方に掘っておいた地山開口内に押込んだ。

この時の経験に基いて、1886年 (明治19) に、City & South London Ry. 社が計画していた「Tower橋の下流側につくる第3のテムズ川横断トンネルで、北岸のCity区と南ロンドンを結ぶ」5km区間の建設に参画したグレートヘッド氏は、この全てを、彼の考案した新しいシールド機で施工し、1890年 (明治23) に完成した。

ちなみに、テムズ川北岸で、街路の開削埋戻で1863年 (文久3) 以来21年間かけて造られていたロンドン内環状鉄道線21kmが完成したのは、1884年 (明治17) であるから、施工速度には大差ないが、路面交通に及ばず支障は、はるかに少なく、爾後、駅部を除いて、ロンドンの地下鉄路線は全て、シールド機で施工されることになった。

なお、最初に施工された上述の複線 5 km 区間には、ケーブル・カーを通す計画だったが、竣工した時、電車に変更された。それ以来、ロンドンの地下鉄は、断面が小さいので、“チューブ”鉄道と呼ばれるようになった。そして、その後、標準断面は、内径 3.56m に統一されたので、この最初の区間の 3.25m は、1922～23 年（大正 11～12）に、電車の止まる夜間だけの作業で、3.56m に拡大された。

Speed（速さ）、Safety（安全）、Simplicity（単純）の 3 つの S をモットーに施工したグレートヘッドは、その後、ロンドンの中環状線 64km を駅部を除いて、全てシールド機で建設した。前端上部にフード状の突出部をつけたり、切羽が押出してくる軟弱層突破用に、前面に取りはずしの出来る胸壁板用の支柱を設けるなどの工夫をしたが、シールド機の直径は、4 m 以内だった。

やがて止水用に圧縮空気も使われるようになったが、その結果、“ケーソン病”が発生した。これを治癒する“エア・ロック”を発明したモイヤー（Sir E. Moir）は、ブルネルのトンネルの近くに、外径 8.2m の Blacwall トンネル（1,358m）を、1897 年（明治 30）に完成した。そして 20 世紀初頭には、前面に掘削刃つきの回転円板を取付けた機械シールドも、Price が開発した。

米国のニューヨークでも、ハドソン川やイースト川の横断道路トンネルに、相ついで採用され、その直径も 10m 前後となったが、石ころを含む所には適さないもので、ヨーロッパ大陸や日本では、普及しなかった。

このシールド工法を復活させたのは、日本である。まず、1965 年（昭和 40）頃、「前面隔壁（bulkhead）の外側に、掘削刃のついた回転円板を設け、発生する掘削土砂とまぜるベントナイト水を、隔壁を通したパイプで送り、泥水状態（slurry）にしたものを、別なパイプで吸引し、地上までポンプ輸送する」泥水シールド機を開発した。次いで 1974 年（昭和 49）には、「掘削してゆるんだ土砂を、隔壁の前進で加圧し、適当に固めて、スクリー・コンベアで、シールド機内に取出し、ベルト・コンベアで後送してトロに積み、坑外に搬出する」土圧バランス式シールド機（Earth-Pressure Balancing Shield = EPBM）を実用化した。後者を使って、ドーバー海峡下に、日本とドイツの業者が、“Chanel トンネル”を掘ったのは、最近における最大のニュースである。

（3）TBM 機の登場

沖積層や洪積層には、砂利や転石が含まれるし、普通の地山は、 $200 \sim 1,000 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリート程度の強度をもち、多少の湧水を伴っている。こうした所でトンネルを掘進するために登場しているのが、TBM 機（Tunnel Boring Machine）である。前面に掘削刃を取付けた回転円盤の軸を支持し、掘進の反力を取るために、4 本の脚柱を、放射状に掘った孔壁に当て、その伸縮を利用して前進させる。

掘削刃は、地山の硬軟に応じて、ギア型のものから、ソロバン玉状のものまで工夫されているが、地山が硬くなる程、装置が頑丈になるので、この型式の TBM 機は、岩強度が $1,500 \text{ kg/cm}^2$ 位が限度で、それ以上の硬い岩の所では、せん孔・発破の方が有利といわれている。

何れにしても、現在の所、円形断面しか掘れず、底面を平らにする交通用の、馬蹄形とかカマボコ形の断面にするには、2 次掘削が必要なのが、最大の欠点である。

（4）NATM と地山力学

支保工や型枠を使つての覆工の代りに、掘削と同時に、その地山に密着してすぐ、せん断強度を発揮する材料で覆工すれば、その地山は元のままで、恒久的に安定しているであろうと考え、その材料としての吹付コンクリートを開発させたのは、オーストリアの（故）ラプセビッチ教授（Prof. von Rabcewiz）である。

第 2 次大戦後、スイスのダム建設でのトンネル工事に関与していた彼は、この考えに基づいて、ショットクリート（Shotcrete）と名付けた＜打設するとすぐ、高いせん断強度を出す＞吹付コンクリートと、それを射出する吹付器（gun）を、スイスとオーストリアの業者に開発させた。そしてこれによるトンネルの施工方

法をNATM (New Austrian Tunnelling Method) と名付けて、1956 (昭和31) に特許をとった。

1960年代にザルツブルグ市 (オーストリア) で、徹底的な国際研究会を続けて、ついに、Geomechics (地山力学) という理論分野が開発された。これはガナート建設の始めに誕生した、数学の起源に比敵するものであろう。

オーストリアの技師や熟練工たちは、この考えに基づいて、ドイツや米国の都市内で、苦勞していた街路面下の軟弱地層での地下鉄工事やドイツ新幹線工事のトンネルに挑戦した。その成功は、この工法と理論の正しさを証明している。わが国でも、独自の立場で、この工法の実用化が進んでいることは、衆知の事実である。

現在のこの工法は、任意の地山と断面に適用できるが、通常の地山での施工速度は、TBM機に及ばないし、常に熟練した施工作業員が不可欠である。

(5) 沈埋工法

陸上で造った適当な長さのトンネル構造体の両端を、仮壁で塞いで水上に浮上させ、水底トンネル建設の現場まで曳行し、用意していた所まで沈め、既設部分と水中で連結し、仮壁を除去して、内部を仕上げて、所定のトンネルをつくるのを「沈埋工法」と呼んでいる。十分に深い所なら、必ずしも水底に着地させる必要はなく、アンカー (碇り) をつけて、水中に浮べておくことも、理論的には可能であるが、戦時における国防上の観点から、まだ実現していない唯一の土木工法である。

沈埋工法のアイデアは、1850年頃から、米国にあったといわれるが、それが実行されたのは、20世紀の初頭である。それは、デトロイト市 (米) とウィンザー市 (カナダ) の間を流れるデトロイト川 (幅 800m, 最大水深12.7m) の底に造られた。

スエズ運河に比敵する船舶航行数のあるデトロイト川横断には、橋を架けることは、非現実的だったので、トンネルを掘る計画が樹てられ、1872～3年 (明治5～6) に着手されたが 500m位導坑を掘った所で、出水にあい、浸水して放棄された。

20世紀にはいて、ここでの米・加連絡は、5社、10隻の航送船で行なわれ、その最小間隔は、15分にまで減り、乗船待機時間の最大は、3時間をこえた。こうした状態を打開するために、Michigan Central鉄道会社が、1905年に、複線の鉄道トンネルをつくる決意をして、「デトロイト川トンネル社」を設立し、その顧問技師として、3人を招いた。

その第一は、New York Central鉄道副社長のウィルガス氏 (William J. Wilgus) で、架線に代る第3軌条方式の発明者として有名だった。次は、ボストン市交通委員会の主任技師カールソン氏 (Howard A. Carson) で、ルーフ・シールド機の開発者および、最初の沈埋かん Shirly Gut 96mの施工者として有名だった。3番目のキンニア氏 (W. S. Kinnea) は、ミシガン・セントラル社の主任技師で、部下のダグラス技師 (B. Douglas) が、現場を担当した。

数案の検討から、ウィルガス氏提案の沈埋工法案がきまった。それは、デトロイト市の北約39kmにある St. Clair造船所で造った長さ80mの2本の鋼殻円筒10個を現場に曳行して、予め浚せつしておいた水底の溝 (trench) に沈めて連結し、外周に水中コンクリートを打設した後、陸岸から1かんづつ、内部にたまっている水を抜いて、厚さ50cmの覆工コンクリートを打って、水底トンネルを完成しようというものである (図-23)。

実際の工事は、厚さ 9.5mmの鋼板で、リベット製作された内径 7.1m、長さ80mの鋼殻円筒2本を、中心間隔 8mで並べ、それを 3.7m間隔で設ける横隔板で連結した。重量約 600トンのこの鋼筒の両端を、厚さ 5cmの木板7層で塞ぎ (仮隔壁)、進水させた。

これを予め準備しておいた現場の水底溝 (trench) の上の水面まで曳行し、そこのディレッキ船2隻につないで、かん体上に4個のフロートをのせた。そして、かん内への注水に続いて、フロートへもゆっくりと

水を入れ、ディレッキで調整しながら、水底溝内に沈めた。

既設かんと継手部の溝底には、予め木杭が打ってあった。それと新設かん継手部の底との隙間には、潜水夫がくさびを打込んだ。ついで潜水夫は、両かん端部に、鎖りをはり、牽引具の操作で、新設かんと既設かんの方へ引寄せた。

新設かんからは、その端隔壁より43cmだけ鋼殻が突出しており、その前面には、ゴム・ガスケットが貼られ、既設かん端部に用意した突起板に接触して、新・旧かん継手の水密化を確保した。外縁に設けた木板との間には水中コンクリートを打ち、その外側の溝内には、土砂を埋戻した。

以上の手法の大半は、現在の円形断面沈埋かんの工法に継承されている。

この全く初めての水底トンネル建設方法は、シールド工法より、はるかに安全で、合理的であり、迅速に施工できるので、これから後の水底トンネル建設方法の主流となり、米国全土にひろまり、現在も踏襲されている。この工法で建設された多くの水底トンネルのうち、とくに有名なのは、1969年（昭和44）に出来たサンフランシスコ湾横断のBARTチューブ（5,820m）である。

20世紀後半の陸上交通の主流となったのは、自動車である。それを通す道路トンネルは、2車線のものを数本、並べて行くのが原則となっている。しかし水底トンネルは、出来れば、もっと多車線の1本ものが望ましい。

低地国オランダのロッテルダムでは、その港内横断に吊橋を考えていたが、そこに外幅24.8m、外高8.4mの矩形断面のトンネルをつくり、内部に往復分離の4車線車道、幅5mの自動車道路と歩道及び各種ケーブル類を納めることを提案したのは、クリスチャニ・ニールゼン社（Christiani Nielsen）である。1937年（昭和12）6月に、つり橋として落札したこの会社は、同額で、上記のトンネルを実施する提案をし、造船所での実物大実験で、かんと水底の溝内の隙間を、確実に砂で充填できる方法を示した。

かくして承認されたMaasトンネル（全長1,070m）のうち、渡海部分の584mがこの方法で施工されることになり、その両端に大きな立坑が下ろされた。

本格的着工後間もなく、ナチス・ドイツ軍が侵入したが、その占領下で工事は続けられ、1942年（昭和17）2月に竣工した。立坑には軸流換気ファンとエスカレータが用意された。

クリスチャニ・ニールゼン社は、第2次大戦後、ベルギーのアントワープ港内に、この工法でE3シェルト（Scheldt）トンネルをつくった。それは往復分割の6車線車道、複線鉄道、自転車道、各種ケーブル類収納路を納める外幅47.8m、外高10mの大断面トンネル（図-24）であるが、その長さは510mにすぎない。このすぐ横に、35年前に、ヨーロッパ大陸最初のシールド工法でつくった直径7m、長さ1,700mという道路トンネルがあり、両工法の差異を歴然とさせている。シェルト・トンネルが開通した1969年（昭和44）には、人類が初めて月面に降り立ったので、その発案者の名前をとって、J. F. ケネディー・トンネルと呼んでいる。この年、東京港横断の6車線トンネルが着工され、1975年（昭和50）に竣工した。

8. むすび

交通路は、直線で水平に近いものほど有利である。それは、山のトンネルは長いほど、そして水中のトンネルは短いほど有利なことを意味する。それは同時に、陸上トンネルの工事が、地質に支配され、種々の工法が開発されてきたことを示した。一方、新しく登場した水底トンネルは、それに加わる外力が、はるかに単純で明瞭である。そして浮力とバランスをとれば、水中では無重量となり、橋梁のような基礎工は不要である。また水深30m以下では、事実上、水流の影響はないであろう。したがって、水中トンネルの建設が可能な時代は、すぐそこまできている。

東海の孤島日本を、この水中トンネルで結び、琉球列島から台湾、また千島列島からアリューシャンをへて北米大陸へ、そしてもっと現実的には、唐津から壱岐・対馬を経て、朝鮮、また平戸から五島列島をへて

上海へ至る通路トンネルが出来る時代を、トンネル家は夢見ているであろう。