

世界のトンネル技術 Tunnelling Technology in the World

持田 豊*
Yutaka MOCHIDA

This report intend to recognize that the best way of tunnelling technologies always are harmonized with defficult social and natural conditions and we should consider in any area which have been relationship between social, economical, cultural efforts and transportation.

This technology have to consider environmental condition not only in construction stage but also after construction, also consider any natural conditions and these behavior.

By comparison between European and Japanese technologies, it is cleared how to resolve each recent and future problems and this is my consideration which were generated for a long years engaged both major project i.e. the SEIKAN Undersea Tunnel and the Channel Tunnel.

Keywords: Tunnelling Technology, the SEIKAN Tunnel, the Channel Tunnel

I. はじめに

いろいろな形態、大小に従ってプロジェクトは存在するが、表-1についてまとめたような経過を、プロジェクトの大小により多少の省略はあるであろうがほぼ同様の過程をとるものである。その中で特に強調したい項目を、青函トンネルや英仏海峡トンネル、その他に何年か携わった経験から少し述べてみたい。従ってこれは多少アイディアライズした面を強く述べる結果となるかも知れないことをお断りしておく。

何を遂行するにしても大小の差こそあれ、そのプロジェクトには目的があり効果がある。そして全体的にはそれによって多くの人々がより便利で快適であるようにありたい。これが第一のモチーフ（命題）である。

これらの効果はプロジェクトの域内のみならず域外にも影響を及ぼす。プロジェクトが大きければ大きい程、それは広い効果を持つものと思われる。例えば、現在実施中の英仏海峡トンネルは、かつて栄光ある孤立をつづけた UNITED KINGDOM をヨーロッパ共同体（EC）と結びつけるものであり、目下種々のトラブルに見舞われているデンマークのグレートベルトは、完成後更に短い距離

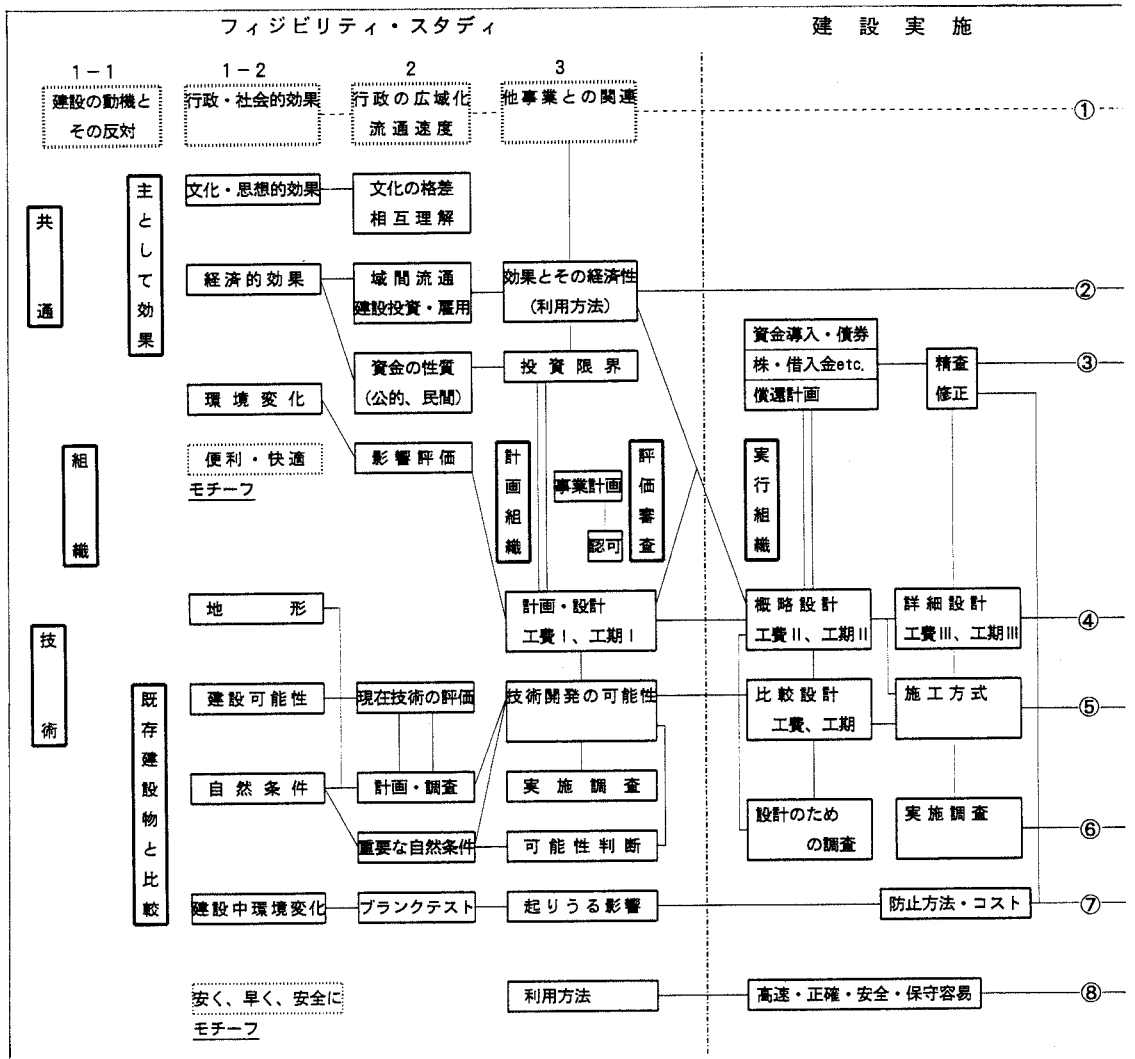
をスンド海峡を通ることによってスウェーデンとつながり、EC全体の流通網は東北で完成し、さきの英仏海峡トンネルと相俟ってECは一国となってしまう。図-1にも見られるように、各地で流通を阻み相互活動のかせとなっている境界、海峡もあり、さらにはアンデス、ヒマラヤ等一連の山脈もある。アルプス山脈として、現在の形では最後の環境影響に対する観点から更にモータルシフトが行われようとしている。これらの障壁は、行政を同一基調の中で共通的に行われるべきものに対する阻害因子となり（国の違いもある）、自由な同一民族間の移動も困難にしている。しかしプロジェクトを進めるに当たって考慮すべきは他の事業が既にあり、それにどのような影響をおよぼすかを考慮せねばならない。このことは経済的にも同様である。あたかも事業による自然等環境の変化と同様である。

一方では、夢としては日韓トンネルや宗谷、間宮海峡等を通じて、直接ヨーロッパ、アメリカ、またアジア各国とつながると近い将来の経済的な三極である東アジア、EC、アメリカが高速大量輸送で結ばれることになる（場合によれば旅客も）。

*正会員 工博

サンコーコンサルタント(株) 代表取締役副社長

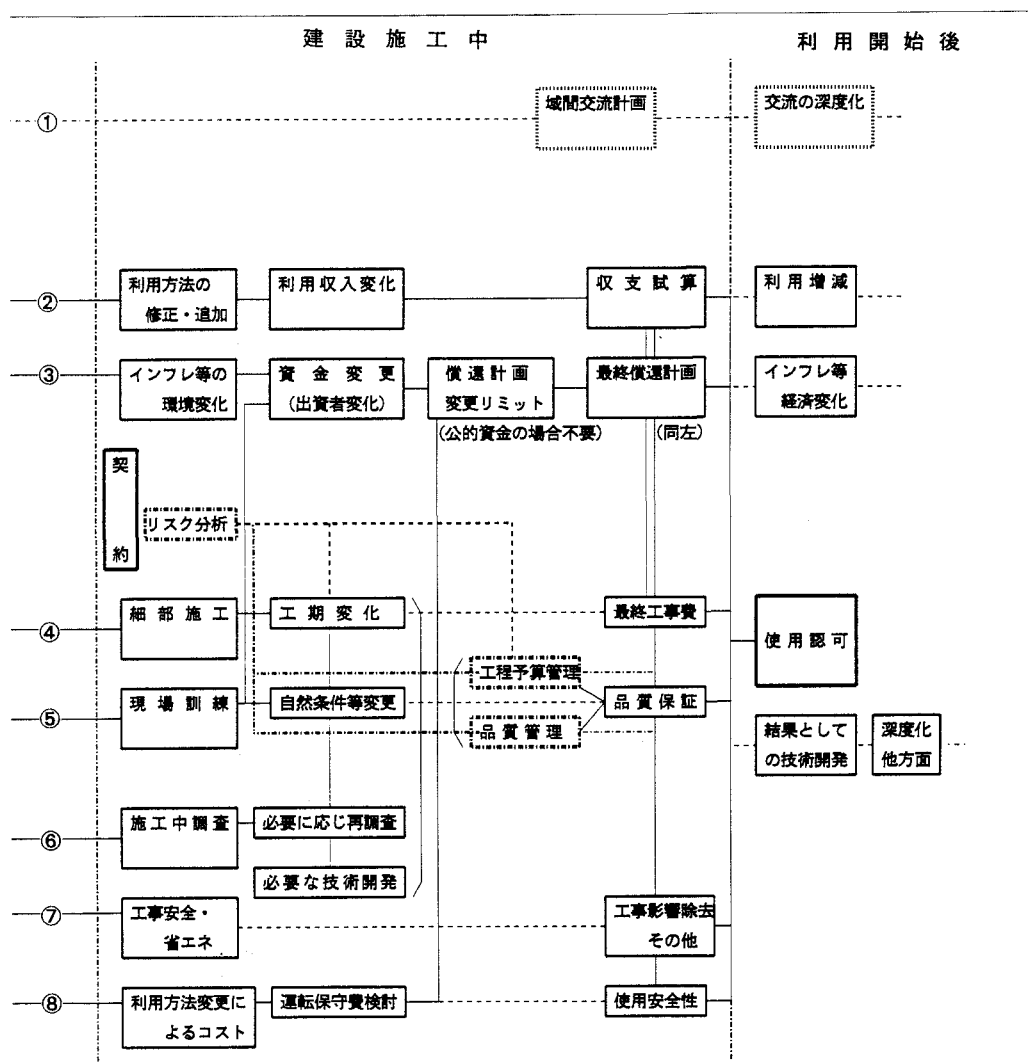
表-1 建設プロジェクトのフロー



今後は、リニアモーターカー、ソーラーカー、etc. を含んで利用手段によって大きく効果が左右されることが言うまでもないが、建設による環境変化も無視出来ない。もともと建設と言うことは何等かの意味で自然の変化をもたらさざるを得ないが、特にトンネルの場合は地下水系の変化とそれによる生態系の変化に特に留意しつつ、対応計画を持つことが望まれる。文化や思想の点では極く近い国々、地域でも恐るべき誤解や無知識があり、かつまた先進国であればある程、独自の文化を持っているだけに孤高状態ではどうしても相互理解と素直な受入れが出来ない。素直な受入れはある程度文化的格差のある所であるが、もともと同一文化であった所以外ではなかなか難しいものである。

これらの効果の中で経済的に大きい効果があり、それが対価として利用に対する反対給付が行われる。これが事業費に対して十分な額であるかどうかと言うことがそのプロジェクトの順位を決定する。但し、将来その地域、域内域間を通じて効果があるとすれば公的資金で全部又は一部がまかなわれることになり、その後の問題は少くなるが、一方ではその時々々の公的機関の都合により取り止めやスローダウンの可能性がないでもないと言うリスクがある。一方、民間資金に全部又は一部をたよる場合、表-1にあるような経過をたどる必要があるし、需要と供給が資金の面でも、又その後、営業収支の面でも多くの考慮されるべき点があるが、民間資金が多い程、公的な経済面での変化は直接的ではない。英仏海峡トンネル

表-1 建設プロジェクトのフロー (つづき)



は殆ど民間資金のみであったから出来たのだと言うことも考えられる（過去のこのトンネルの歴史から）。

一方、以上の効果や計画に対して基礎となるのは概略の工費と工期である。これなくしてはどのような事業計画も成り立たない。便利であると言うことは地形的にも容易にわかることであり、今までそれが無かったことは何か理由があるわけでそれを克服するための概要の計画がなければならない。

上に述べた効果＝それを要求を実現する為に必要な技術が現在あるかどうか、あるとすれば最も確実、迅速に実施しうるものは何かについて或る一方向が示されねばならず、その集約が計画、工期、工費であり、それは経済上の要求とインターフェイスされることになるであろう。

う。英仏海峡トンネルの場合は既存の、少なくとも使用経験のあるテクノロジーの上で実施することをプリンシプルとして、それによって工期は短縮され確実になった。

しかし一方では、英仏両国の安全に対する考え方やその他鉄道そのものに対する技術細部の違い（ひいては安全や保守につながる）によって長い時間を取っていることも事実である。これも2国間をつなぐものであるにも拘らず、2国間が高度な技術を所有し、思想が異なるために生じて来たやむを得ない所であろう。完成後はこれらのトラブルはこれを整理して、かなり減少すると思われる。またこの地域は地質が安定しているため、致命的な自然現象はなかったのであるが、自然条件如何では計画全体の成否がはじめから問われることがないでもない。

名 称	縦 断 面 図	備 考
豊予海峡		調 査 中
紀淡海峡		調 査 中
青函トンネル		営 業 中
ドーバートンネル (イギリス)		トンネル貫通 建 設 中
ジブラルタル海峡トンネル		調 査 中 (1979～)
スダ海峡 (インドネシア)		調 査 中 (1985～)
マラッカ海峡 (マレーシア ーインドネシア)		
グレートベルト (デンマーク)		調 査 中 (1987～1990) 建 設 中 (1990～)
宗谷海峡		
間宮海峡		
ベーリング海峡		
日韓トンネル		上記とスケールが異なる

図-1 世界の海峡トンネル

利用方法の将来の可能性も含めて、これについてはやはり安全で確実に、より早くが要求されて来る。

これら当初の事業決定をするための組織について一方では充分考えねばならない。プロモーター＝計画主体（公的機関である場合が多い）、運営主体、設計施工主体等、相互に関連ある事項を取り扱ったのだが、機能が異なる場合もあり同一個所で考えねばならない場合と部分的に分けられる場合もある。これらを公的機関・コンサル等によるかどうかとも今後の大きい課題である。かつてと違って、著しい速さでスペシャリスト化している現状でそれを如何に結合するか、又それに耐えられる組織と人的構成を持ちうるかが最大の問題点である。つまり組織の問題である。最終的には安く、快適で、安全で、確実に、高速なものを環境を阻害しないで行うと言うモチーフを持つことになる。

II. 対応する技術

要求されるものに対応するのが技術である。特に何よりも重要なのは、なるべく初期段階で可能性のみの判断が下されるような自然条件に対する必要な調査を実施せねばならない。ここで言う可能性とは、資金と工期に或る制約を持ち、モチーフに沿ったものが作れるかどうかを充分考慮することを意味している。また、どうしても建設が必要ならば技術開発の可能性（コスト、工期）を検証しておかねばならない（青函トンネルの場合、どちらかと言えばこちらに属している）。困難な地質とは、一例をあげると、図-2にあるようなプレート境界によるアクティブな力が加わる場合である。この場合は建設中に困難に遭遇し、思わぬコストと工期を要するのみならず、建設後の変形も問題である。高水圧、高地熱、加えるに頻度の多い地質変化、極軟質地盤、流動性地質等についても同様で、建設中に思わぬ現象に遭遇する。これらについてはなるべく早期に、建設する構造物と自然条件との関係、ルートが変えられるかどうか等を検討をして、初期段階で判断を下す必要がある。つまり、現在われわれが現に持っている、又は近く持ちうる技術の範囲内で出来るかどうかである。ここで言う技術とは、工費と工期の制約なしに考えることは出来ない。これが初期段階で最も早く判断すべきことで、ここからすべてが始ると言っても過言ではない。

建設に踏み切れば、計画は周到でなければならない。そしてそのためには自然条件を正確に把握しておくための調査が必要であり、その判断から技術的に正確な計画が環境影響を含めて出て来ねばならない。環境について

は、この場合ブランクテストを主とするアセスメントが基本となるであろう。あくまで自然条件を施工方法に合わせるようなことをしてはならない。

例えば、図-3の青函トンネルのように変化の多い地質と大断層が深い海底で存在する場合では先例とすべきものは、我々の手に入る範囲ではなかった。約30年前、青函トンネルを掘り始めた頃に世界中を回り、「そのものずばりが使えなくとも参考とすべき技術がないか？」と探しに行ったことがある。その時、何十という人々と組織と会い、討論をしたが、別れ際に「グッドラック」と何人かに言われたことがいまだに耳についている。何と言うことをわれわれは始めたのであろうか、また、これからは独力で技術開発をせざるを得ないと言う心細さと、逃れられない決心とが強いエモーションとなったように思われる。

その後の技術の進歩もあり、特にわれわれにとって見逃せないのは機械、金属材料、化学材料および電気等の分野のめざましい発展が大きい助けとなってくれたことである。それで他分野との交流も必要な部分はかなりの程度まで満たされて、何とか建設を終ったものである。

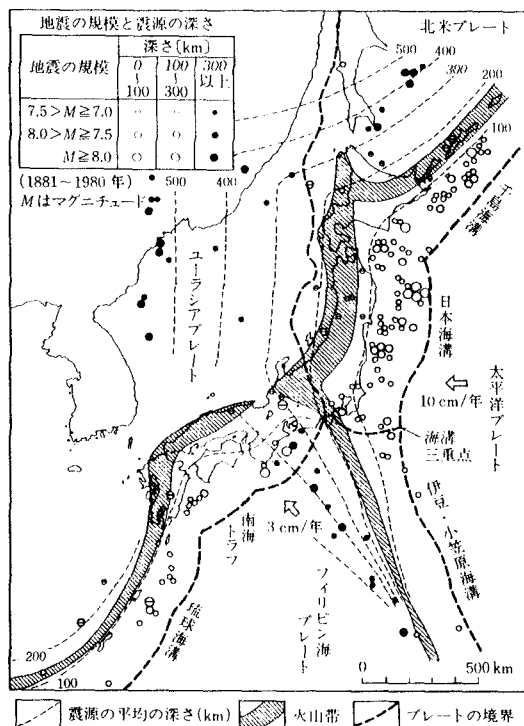


図-2 日本列島周辺のプレート境界

火山帯および深発地震の震源の深さ（1881年～1980年に起こった地震）も示す（『地学』東京書籍による）

技術的裾野の広がりである。そしてこれらが土台となつて、トンネルの技術開発が促進されて行った。相互に作用して、例えば注入用の細粒セメントの開発は、その後、極早強セメントにつながっている。

一方、英仏海峡トンネルは、その歴史も古いだけに調査もよく行きとどいており、且つ自然条件が割合単純であつたために、掘削計画も実際の施工もほぼ順調であつた。しかし、これも一方的に順調ではなく、図-4のように最も安定して、且つ湧水の少いと思われている地質であるチョークマール層をそのアンジュレーション(起伏)を追いつながら(海底ポンプ座が増えるのを厭わずに)建設して行った結果が現在の成功をもたらした。また、青函トンネルでは基準点の測量に膨大な回数と年数を要したが、英仏海峡トンネルでは観測衛星によって簡単にできると言つた年代とともに外的技術の進歩もあつた。

ただ、英仏海峡トンネルは図-5に示されるように最終的にはサービストンネル1本、本トンネル南北各1本、合計3本のトンネルがすべてTBMシールドで掘られている(UK側の一部陸上部を除く)。これらの作業開始時の掘進速度は極めて遅く、習熟訓練、さらには現場にマッチした機械系列の改良が必要であつた。その部分をラーニングカーブとも言うが、このラーニングカーブが、より短く、よりシャープになればなる程、プロジェクトの管理訓練はうまく行っていると言える。

また、デンマークのグレートベルトトンネルでは、掘削対象が Till と呼ばれる洪積世の氷河堆積であるのでルーズなものと同く硬い物ものも含んでいる。

以下、表-1について簡単に記述する。
○致命的な自然条件を検討し、さらに周到な計画が出来た所で計画予算と工期が算定され、それがファイナ

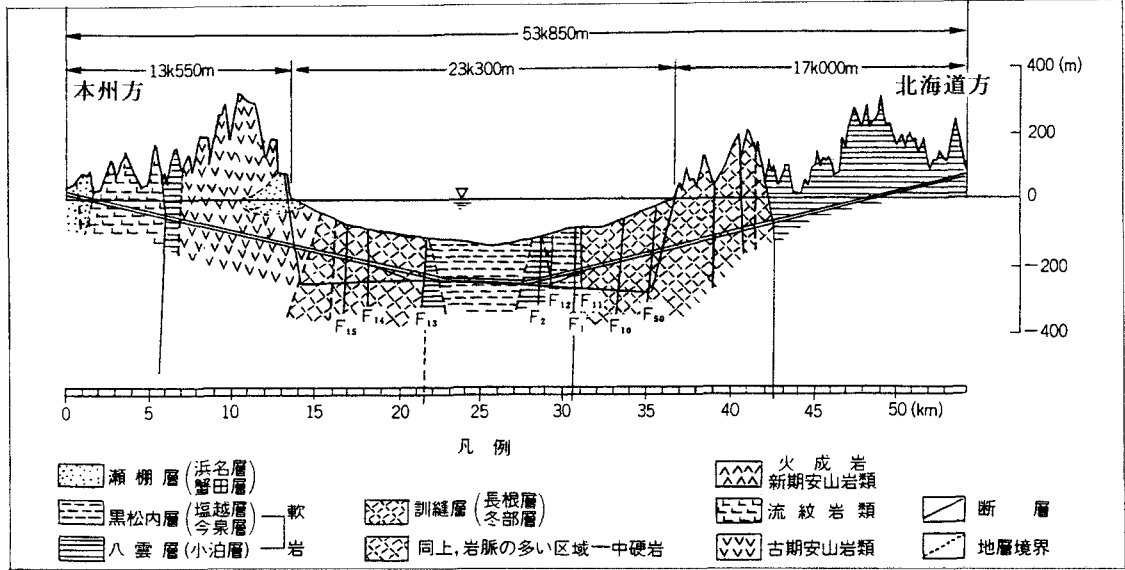


図-3 青函トンネル地質断面図

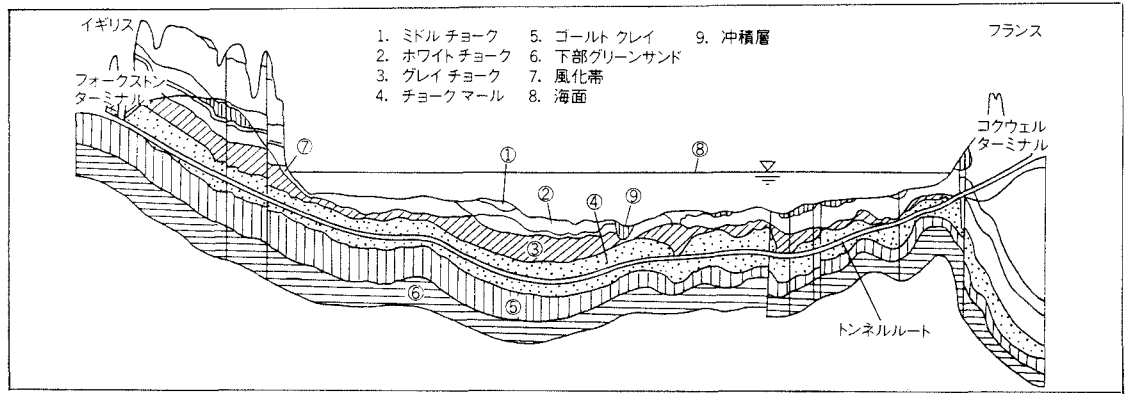


図-4 英仏海峡トンネル地質断面図

ス（公的には他プロジェクトとの経済効果の相違）での資金と償還計画に使われる。この場合は、まず効果から言って、一定の投資限界内であることが望ましいことは言うまでもない。これらがすべて合致したところで、フィジビリティ・スタディは概ね終る。

- ここでも施行する組織が問題となる。プロモーター＝計画主体は、このスタディの終り頃には事業計画認可を要するので事業主体となる必要があるし、又それに变化する必要がある。建設の方でも建設主体が必要で、事業主体が建設主体を兼ねることが日本では多い。
- また、事業計画自体も評価され、審査されねばならないが、これらを実施する組織としては日本では公的機関が多いが、欧米ではその基礎部分をコンサルが作ることも多い。そしてコンサルがマネジメントや工程、予算等の管理に対する評価を行うケースも多い。
- 技術の中味としては、どうしても省力化、機械化（なるべく地質の変化を直接、極端に反映出来ない）が主とならざるを得ない。しかし、今の所残念ながら一つの機械が対応出来る岩種の中は狭いのが通例であり、その条件が適当であれば、つまり、周到な調査と設計にもとづけば素晴らしい偉力を発揮する（逆にオールマイティで地質の中をすべて掘れるようにした機械は、残念ながらまだノーマイティに近い）。その為には機械の合うように地盤を多少改良することが多い。これは適切であれば、充分機械にその能力を発揮させるが、

逆であると、つまり選択した補助工法が不適當、又はいかなる補助工法も受けつけない自然条件であると、多大の工費と工期を消費することになる。また何よりも、改良の度合いを正確に測定する簡単な方法が未だ確実でないことも大きいデメリットの一つである。

- これらがあって契約段階に入るのだが、契約については多くのやり方がある、一概に述べることは出来ないが、欧米は勿論、日本でも国際化とともに精密さが要求されてゆくことになる。
- 施工を始めると、種々の変化が表-1にみられるように起り、常に技術的な工期、工費の変化をファイナンス関連、社会関連の変化を追ってゆき、管理せねばならない。この間には、リスク分析が変化毎に行われ、またそれに伴う品質管理、工程、予算管理が発注者、請負者共に、常にオンラインで行い、さらにそれを評価審査する必要がある。この繰り返しが工程の中で常に生起して来るのである。この部分がコンサルの部分でもある。
- また品質管理、最終的には品質保証があって、建設としては一つのけじめを設け、最終工費が出る（含建設中利子）。
- 一方では利用方法に対する計画認可から始めて建設同様の手順が必要である。英仏海峡トンネルの場合（そして恐らく他の2国間でも）安全等に関する考え方がかなり違っている。根本的には人命第一なのではあるが、それに至る過程では常に“帯に短し褌に長し”のような見方が現れて来るのである。これが地球規模となった場合、特に宗教の違う場合はさらに難しくなるであろう。いづれにせよ、一方では利用方法では常に保守費の軽減が付加されねばならない。

III. 日本と欧米の比較

表-2に一応簡易にまとめてみた。これらの背後には長い歴史の過去と、それが現代に落している影がつきまとい、一概に言い切ってしまうことは出来ない。このような論議そのものは難しい。

多くの反論のあるのを承知の上で一つの試行としてやって見た。しばらく後で、この表を書き直すことになるかもしれないし、非常に言い難いことも多い。個々の問題ではなしに全体としての今の感じとして受け取っていただきたい。

後で言うつもりではあるが、日本の技術は、しかし世界の中で最高レベルの一つである。しかし、そのどれもがオリジナルではない弱味がある。勿論、明治以降、

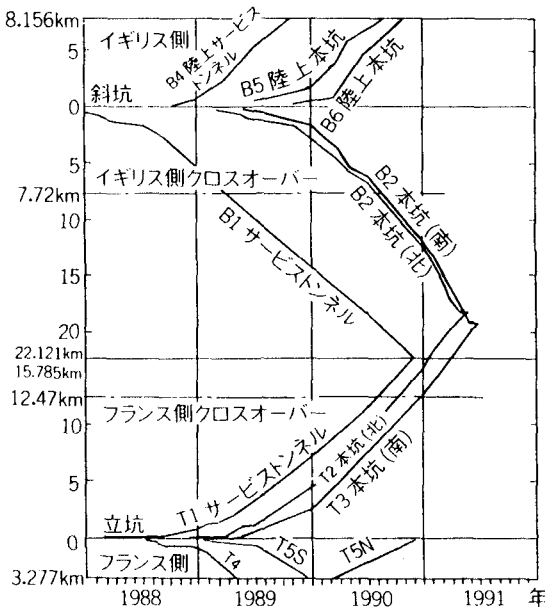


図-5 英仏海峡トンネル実績工程

特に戦後“追い付き、追い越せ”と言う運動の方が主体となってオリジナルをかまっている余裕があまりなかったことも事実である。

計画当初からのアセスメント、リスク分析から施工中の変化を含んだ品質管理、工期・予算管理、完成期に至る品質管理は、特に重要なウェイトを占め、その審査、評価もプロジェクトの死命を制することになりかねない。

一方で、英国等ではエリート教育の場であるオックスフォード大学やケンブリッジ大学には、工学や臨床医学、農学のような実学がなく、日本で言うと文学部、理学部に相当する基礎科が多く、優秀な人材を輩出し、それがシティに集まっているように見える。このように教育そのものが広い分野を持っているだけにオリジナルなものが出易い。

フランスでも、実学はエコールポリテクニクのように良い所もあるが、一方に、深い、伝統的な広い分野、いわばディレクティブイズムのようなものがあるのも、思考の自由さ、オリジナリティの発想に容易であるかも知れない。

IV. おわりに

幸いにして、青函トンネル、英仏海峡トンネルの2大プロジェクトに直接、間接的に関係することが出来てトンネル技術の奥深さを知ることが出来た。また、それは多分、自然自体の持つ奥深さから由来するものであろう。そして、まだまだ人間の力や知識やその持っている機械、手段等は、自然に比べて極めて卑小と言わざるを得ないのが実感である。

これからすると、トンネルのルートや工法を選択する際には細部まで自然条件を調べ、その条件の中で良い部分があれば、徹底的に利用するように努力すべきである。逆に、条件の悪い所はよく調査して、避けることが出来れば最も良い。残念ながら避けられない場合には、ルート、施工条件を変えるか、補助工法を用いる以外にはない。しかし一般的に補助工法で大々的であればある程、非破壊で、改良の範囲と程度を定量的に簡単に出来ないし、これが環境に対して悪影響を及ぼすことも十分配慮の上施工せねばならない。

今の所、日本は教育レベルの高さから、技術者、技能者のレベルも高く、かつラーニングカーブの立上がりも良い。しかし、年々熟練した技能者は高齢化する一方であるし、それを埋める機械化、新材料化もそれ程うまくは進んでいない。従って、日本は自然を開き分けられる国民の一つとして、自然との調和と言うより自然の抜け

道を探りながら、効率的に仕事を進めて行く以外にはない。

表-2 日本と欧米の対比

	J : 日本 F : 欧州またはアメリカ
自然条件	J : プレート境界ゾーン、火山作用（地熱）、極軟質地盤（都市の多くはその上にある）、地震。 F : 部分的にはあるが、強度頻度共に問題にならない。 J : 特殊工法や特殊計画を成立させるか研究させるエモーションになっているし、これはオリジナルなものが多い。（先進ボーリング等は世界的に実施されている。）
技 能 力	J : 江戸時代以降の儒教、明治以降の欧米文化との接触で非常に程度の高い、そして戦後裸からの出発で活気がある、そして無階級に近い。 F : ・文化が古くより進んでいるので、活気が失われている。 ・大きい infraが殆ど19世紀で終わっている、技能の伝承がとぎれている。 ・底辺に階級制があり、活性化をやや阻んでいる。 J : 程度の高さが、現在また今後要求される機械化、コンピューター化になじみ易い基礎をなしている。 F : 程度が不揃いであり、それにより階級が変るメリットも全くないでもないが、Jに比べて少い。
技 術 力	J : 輸入されたもの、学び取ったものを正確に設計・施工する。時によっては、それに加えるハイテク等の他分野の技術を応用し、更に高度技術となっている。つまり技術に壁がない（ボーダーレス）。 F : 自国産であり、原理も自国または近いところであるため大胆な応用をする。デザインも卓越している所が見られる。オリジナルの強みがある。ただ、現在はそれを生かし切っていない所も見られる。これもボーダーレスである。 J : オリジナルなものに欠け、つまり借り着をいくらかデザインを変えても、やはりオリジナルではないことを考えるべき時である。国外ではそう思われている。 F : 管理方法は進んでいる。しかし、環境対応はそれ程でもない。

次いでは、やはり明治以降の欧米に対する“追い付け追い越せ”と言う背後からせきたてるような力が自然条件となり、特に、戦後にあっては殆ど無からの出発であったために、過去とのしがらみを割捨思い切りよく捨て、新しい道を進むことが出来たことも大きいであろう。そして、それを支えたのは、鎖国に伴う世界史的にも奇跡と言われる 250年の江戸時代の平和がもたらした教育の向上の素地が更に累加されて、世界でも高いレベルの教育をそれぞれが持ち得たことが大きい助けとなっているのである。

これからも、海峡の持つ両地域の分断のみならず、多くの自然の障壁を越える技術力と、それを管理し、推進し得る経済的、マネジメント的な能力も増してゆくものと思われる。

個々は、まだ自然条件の探査が必要にして十分な精度ではなく、つまり“自然の声をききながら”と言う手法が、所謂カンの鈍化に追いつける程になっていない。

プロジェクトの可能性の判断すらも、不確かな状態にあることも事実で、単にデータベース、マイグレーション、新計算手法等の解析集約技術からの判断のみに頼ることは、まだ不十分である。

一方では、国際化が進み、それぞれ特色を持ちながらも、得意な分野で協力し、時には競争もしてゆかねばならないので、互いの違いをよく認識し、かつ補完することを考えねばならなくなって来る。

すでに、かつての文明の下降の徴候である、一極集中化、巨大化（首都圏集中や巨大企業の一方的発生と自己目的な膨脹）がみられるようになっていくことも事実であり、それはそれなりのスケールメリットもあるが、一方で身軽に動かない大きいデメリットもある。オーバービューが適切に実施されることが必要となっている。

また、満ち足りたための無駄も多い。さきに述べたように、自然に十分従わず、自然を力でねじ伏せるような技術もあることはある。それが進むと、かつての財テクのように実体に遠ざかった所での作業が多くを占める。

例えば、傭兵や奴隷（現在で一例をあげると、悪い作業環境下の単純労働力への助っ人）によって、人力の実体がなくなったローマのようにならないとは限らない。これらは省力化等による作業環境の適正化が必要である。

もともと欧米を模範として、追い付き、追い越した日本が、その模範である諸外国の文化の下降を見る時に、あまりそれに忠実に引きずられることなく、独自の特に自然と言う、まだまだ学び足りない教師に対して、十分な自らの努力による技術、教養を身につけることにより、

それら下降線を避けることは出来るものと考えている。

文明は、また技術は、このような早いテンポの進歩をする力を持つが、方向を間違うと、自己の意図しない方向へ行くおそれもあるので、その自己アセスメントも、環境アセスメント同様に重要なものである。

完成した利用システムも、社会のニーズに従って不変なものであり得ないし、保守方法も同様である。建設と合わせて総合的にマネージして実体経済に寄与し、推進しよう心がけたいものである。

そのためには、技術者は、変化し、進歩する社会的なニーズの実体化が可能であるために、既に述べた個々の技術そのものを一つづつ克服し、解決し、それらの成果を加えて、表-1の共通と技術を併せて、新しいマネジメントも樹立させることにより、実体のある自然の一部となることが、今後いち早く望まれる所である。

参 考 文 献

- 1)持田 豊：英仏を結ぶ海峡トンネル、セメント・コンクリート、1990.12.
- 2)持田 豊：地盤調査と地盤環境、土木学会地下空洞利用技術に関するシンポジウム講演論文集、1990.12.
- 3)持田 豊：英佛海峡のトンネルで、土木学会誌、1991.1.
- 4)持田 豊：話題の海峡トンネル、トンネルと地下、1992.1.
- 5)持田 豊：供用間近の英仏海峡トンネル、トンネルと地下、1992.3.
- 6)Yutaka MOCHIDA：“KEY CONDITION FOR REALIZATION OF GLOBAL SUPER PROJECTS”，GLOBAL SUPER PROJECTS CONFERENCE講演論文集、World Development Council、1992.2.