

山岳トンネル工法の今昔

A SHORT HISTORY OF DEVELOPMENT IN ROCK TUNNELLING

横 田 高 良*

By Takayoshi YOKOTA

1. トンネルとのかかわり

トンネルを掘る技術は、その時代の社会の必要性和密接に関係しながら発達してきた。また、トンネルを掘る道具も、トンネルを掘る場所の地質の状態に応じて進歩してきた。

人類がトンネルを掘り始めた頃は、もっぱら軟らかい所が選ばれ、素手あるいは簡単な石器などを用いて掘り進み、支保は木にたよっていたと推定される。その後、のみとハンマーが考案され、掘削能率は素手の時代に比べ格段と向上し、対象地質もやや硬質なものにまで広がった。さらに、社会の要請として硬い地盤にトンネルを掘ることが必要になると、そこで人類は火を使って岩盤を熱し、水で急激に冷却すれば岩盤がもろくなり、のみとハンマーで掘れるようになることを発見した。こうしたトンネルを掘る技術は、近世になって火薬の発見から発達した穿孔発破技術へと受け継がれている。そして現在では、TBM (トンネルボーリングマシン) や各種シールド機などに代表される機械掘削やとりわけ山岳トンネル工法では NATM (New Austrian Tunnelling Method) の時代となっている。

これらのトンネルを掘る技術は、人類が誕生してから今日まで、長い時間をかけて、必要に応じて着実に発達してきたものである。

近代のトンネル掘削技術、特に山岳トンネル施工技術に焦点をあてれば、次の事項をエポックメイキングなものとしてあげることができる。

- ① ダイナマイトの利用と削岩機の発明
- ② 木製支保工に代わる鋼製支保工の採用
- ③ TBM による急速掘進
- ④ 油圧削岩機の開発
- ⑤ NATM の導入

これらのトンネル施工技術はいずれも欧米から導入されたものであるが、わが国は世界に比類のない複雑な地質に恵まれた(?) ため、今日では、日本のトンネル施工技術は欧米をしのぐまでに発達したといえよう。

古くから、わが国のトンネル技術者の中で二つの議論が交わされている。一つは「トンネル工学は経験工学である」というものであり、もう一つは「設計が先か、施工が先か」というものである。最近の、NATM による成果は、こうした昔からの論議に新たな議論を投げかけるものである。

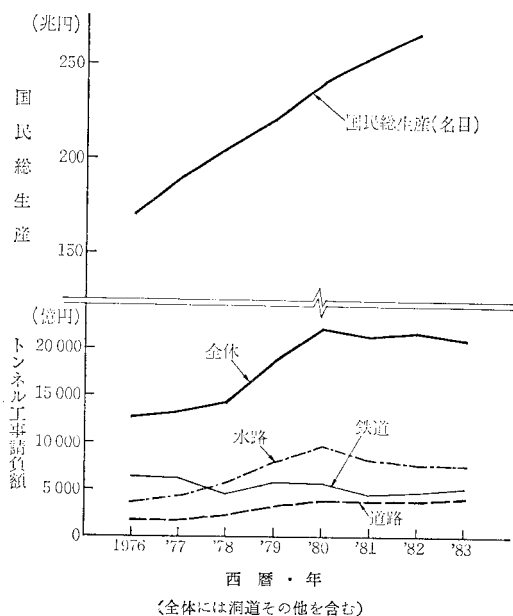
2. トンネルの置かれている立場

建設業が経済社会において果たしている役割は、道路・河川・公園・下水道といった社会資本および住宅・工場・ビルなどの建築物の整備を可能にするということである。

この役割は、国民総生産 (GNP) や全就業人口に占める割合により知ることができよう。建設業全体では、これらはそれぞれ約 20% と約 10% である。産業規模としてはかなり大きなものとなっている。

トンネルについてみれば、工事請負額は、昭和 55 年頃から年間約 2 兆円規模で推移している。建設投資総額は約 50 兆円 (たとえば昭和 57 年) であることから、建設業全体に対しては 4% 程度の工事高となっている。GNP

* (株) 熊谷組 土木本部 土木工務部長
(〒162/東京都新宿区津久戸町 17-1)



図一 国民総生産とトンネル工事請負額の推移²⁾

は、最近数年間では前年度に対する増加率が5%程度であるが、先に述べたように、トンネル工事請負額はここ4、5年横ばい状態が続いている。

国土の70%が山地・丘陵で占められているわが国の地形的特質から、狭い可住地で高い経済活動を維持し発展させていかなければならない。

人の交流、物流そして文化交流の必要性からトンネルの潜在的需要は多く、トンネルの経済活動・文化交流に果たす役割は衆目の認めるところである。

ここで、用途・目的からトンネルを分類すると

- ① 運輸施設（鉄道・道路・地下鉄など）
- ② 水路（灌漑・上水道・発電用）
- ③ 公益事業（下水道・ガス・電気・通信設備用）

に大別される。

国全体の国土政策や経済政策との整合性を確保しながら、五箇年計画に基づき道路整備・治水事業・下水道整備などが推進されてはいるものの、実力をつけてきた経済力とは裏腹に、社会資本の整備が欧米に比べ質・量ともに遅れていることが指摘されており、今後は、公益事業関係のトンネル工事の増大が予想される。さらに、国土の均衡ある発展を図り、わが国の産業経済・国民生活を向上させるために不可欠な社会資本である高速自動車国道の建設も着実に推進されつつある。

3. 山岳トンネル工法の移り変わり

わが国における道路トンネルの古いものとしては234年前に竣工した九州耶馬溪の「青の洞門」が有名であ

る。延長182mのトンネルを30年かけ、僧禅海が一人で掘削したものと伝えられている。

水路トンネルとしては、「箱根用水」として知られている、芦ノ湖の水を富士・箱根間の大きな谷へ導びいた灌漑用水路「深良用水」があげられる。トンネル延長は1280mである。農民の手により両坑口から掘り進められ、約4年を要し、今から314年前に完成した。

歴史によれば³⁾、戦国時代のみならず徳川家康を始めとする江戸時代初期の将軍・諸大名は農業政策に重点をおいたようである。これは、戦国時代の武士といえど本職は農民が大半であったことによる。したがって、戦に勝つためには農民を大切にしておく必要があったわけである。農民に対する処遇を端的に表わしたのものとして「士農工商」という身分階級制があるが、豊臣秀吉の時代の「士商工農」からこの「士農工商」への転換には、農業政策に重点をおいた江戸幕府の政治姿勢が如実に示されている。「深良用水」築造の裏にはこうした時代背景がある。

このトンネルは、深良村と芦ノ湖の間にある駿河戸山の下を掘り抜くことにより湖の水を引き、農産物の生産高を上げ、農民生活の向上を図る目的で計画された。

深良村と芦ノ湖の間を山越えて調査が重ねられた。その調査や部落間の交流に使用されたのは、山の頂上を避けて最短距離で結ばれる谷間の道であった。そしてトンネルのルートとしてはその日常の通いなれた道の下が選ばれた。

1280mという延長と水路としての水の流れを計算に入れた勾配を測量して決めることは、当時の技術からすれば大変なことであったと想像できる。そこで、その測量が容易な点からも、歩いて通っている道ならばという配慮がルート選定に大きくかかわっていたことは十分うなずける。

現在では、谷間はトンネルを掘る場合に避けるべきルートの一つである。それは、地形的にも地質的にも多くの問題をかかえており、工事に際しての苦勞が多いことによる。しかし、この時期はそうした実績があったわけでもなく、掘り進める方向は決めやすいことからそうしたと想像するのが妥当と思われる。

昨年、NHKが北陸東海スペシャルとして、「箱根用水トンネルの謎」を探る特別番組を組んだ。その時に、このトンネルの掘削・測量に一体どんな技術が用いられたのかを推理してほしいとの依頼を受け、東大の高橋裕教授をコーディネーターとし、私のほかに4名のトンネル技術者が推理の会議に臨んだ。平面図と縦断図をもとに、座談会形式で推理する場面が放映されたのをご記憶の方もあろうと思う。その番組の中でも話したことであるが、この当時は掘る道具も測量する道具も立派なもの

があったわけではなかった。したがって、測量——むしろ見通しがきくといった方が正しいか——のしやすい場所を選んで掘った結果、谷間のため地質的にも軟らかく、また当時の道具に合った掘りやすい所を掘り進んだものと考えられる。それが成功の最大の秘訣といえよう。実際にトンネルを見ると、右に左に随所でカーブしており、推定結果を裏付けるものとなっている。

この工事の何よりもすばらしいことは、貫通時の水準誤差が 1 m であったことである。

「深良用水」完成後約 60 年経て、福田履軒が富士山の高度測量を行っている⁹⁾。その時の高さは 3885.96 m と記されている。明治 31 年、陸軍省陸地測量部が行って得た 3778.0 m との差はわずか 107.96 m、今日富士山の標高として知られている 3776 m に対する誤差は約 3% である。260 年前における測量としてはかなり精度のよいものと判断される。

「深良用水」工事着手の背景には、こうした測量技術の浸透、言い換えれば、徳川幕府の学術の開発に意を注いだ姿勢があったことが読みとれる。

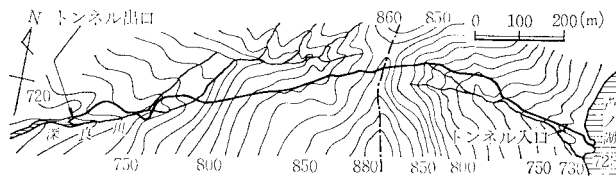
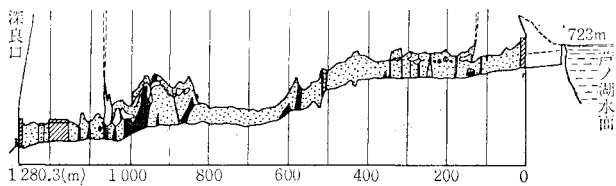
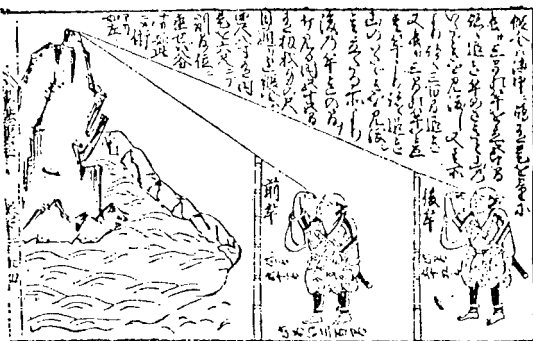


図-2 箱根用水トンネル平面図⁹⁾



この図は、距離 1 に対し高さ 20 の割合にしてある。
 ■ は凝灰岩の部分。 ■ は後にコンクリートで覆工したところ。
 ■ は安山岩などの岩のかたいところ。

図-3 箱根用水トンネル断面図⁹⁾



(鈴木重次「算法重宝記」正徳、1715 年)⁹⁾

図-4 竿を進退させて山の高さを測る

封建社会も終り、文明開化が進み、近代化の推進力として鉄道が登場した。明治 3 年、山陽鉄道大阪—神戸間の石屋川トンネル(延長 61 m、河底トンネル)がわが国最初の鉄道トンネルとして誕生した。これは、英国人技師の設計・監督により完成したものである。

その後のわが国における山岳トンネル工法は、明治時代の、トンネルの頂部に最初に導坑を掘り順次切広げと同時に上部から下部へ掘り進みトンネルを完成させる頂設導坑式、いわゆる日本式から今日のロックボルトと吹付けコンクリートにより地山が持っている支持機構を最大限に利用する NATM へと大きく変貌した。

山岳トンネル工法の選定では、地質と加背(トンネル掘削断面の大きさ)との関係が最も重要なファクターである。具体的には、切羽が自立できる加背であることが大原則であり、この判断を誤まれば、工事が不経済となるばかりでなく、作業の安全性は著しく悪化することが多い。

加背の大きさの観点からは、山岳トンネル工法は全断面掘削工法・上部半断面先進工法(上半先進工法)・導坑先進工法(これには頂設導坑・底設導坑・側壁導坑の各方式がある)に大別される。

木製支保工の時代、すなわち戦後に鋼製支保工が登場するまでの斧指技術の時代には工法も限られていたため、加背の大きさの選定は今日ほど複雑ではなかったであろう。

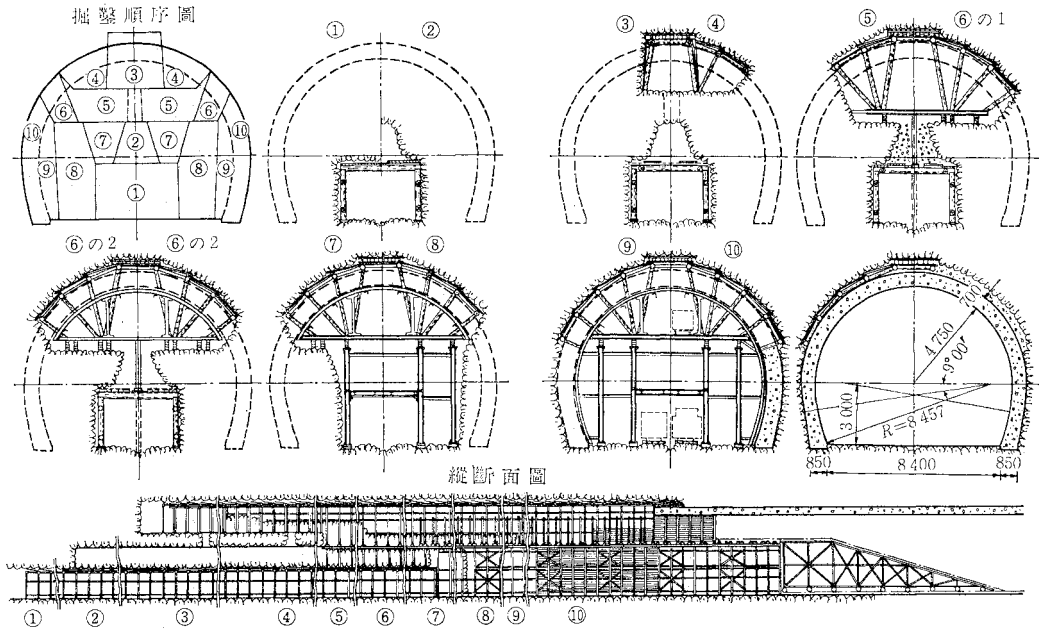
しかし今日では、NATM の導入とともに土質工学・岩盤力学を始めとする学問がトンネル施工法に重要な位置を占めるようになり、理論と実際という対比がトンネルの世界にも浸透してきている。

また、以前は鉱山・炭鉱関係で使用され、発達してきた自由断面掘進機や 1950 年代以降欧米で開発された硬岩掘削を対象とした全断面掘進機(TBM)が昭和 40 年代に導入された。これらは、トンネル工事における省力化・急速施工・コストダウンの課題を少しでも解消する目的で投入されたものである。さらに、作業環境の改善あるいは周辺環境との調和といったメリットもあり、最近ふたたび見直される気運となっている。

もちろん、こうした諸工法の発展は、トンネル工事用の機械や材料の開発や改良なしには達成できなかったことである。紙幅の関係で、これらの各種機械の詳細にまでは触れられないが、トンネル工事の生産性の向上・安全性の向上への貢献は銘記されるべきである。

4. 需要と供給の原則

このような、わが国のトンネル施工技術の推移を見る



(東海道新幹線丹那トンネルの選定ならびに施工に関する技術的研究を主目的とした研究会がすでに昭和 16 年前後に行われている。これは、その当時の掘削方式案である。)

図-5 大断面トンネル掘削順序図²⁾

と、特に戦後の欧米との技術の交流による急速な進展には目を見張らせるものがある。これには、その技術が向上する要素すなわち勉強の場が多くあったことが幸いしている。また、これは戦後の荒廃した国土を早く復興しようとする努力と持ち前の勤勉さ抜きには考えられないことである。

世の中には、古くから「需要と供給」という原則が働いており、今日でもその原則はすべてのものに対して適用するものである。

終戦直後の国土の荒廃から生じた需要に対し、早くなんとかしようとする供給との出会いにより、それを満たすために技術は進歩を迫られ、それらが一つ一つかなえられて、今日の、われわれを取り巻く技術へと発展してきたといえよう。すなわち、経験する場が多くあればあるほど、技術はそれなりに向上するものである。戦後の復興というよい教材が必要と供給のバランスを作り出し、今日の技術隆盛の原動力となったことは事実である。

こうした技術の進歩を語るにあたっては、測定技術の進歩という側面を見逃すことはできない。

トンネルでいえば「一寸先は闇」、そこからの解放である。戦後に育った私であるので、先輩諸師のいわれる本当の「一寸先」とは異なるかもしれないが、一つの体験として、黒四ダム建設における関電トンネルでの大破砕帯との遭遇について触れたい。

わずか 90 m を突破するのに約 8 か月と当時の金で 6 億円 (現在に換算すれば約 30 億円) を費した。関電トンネル

は、悪地質と大湧水 (642 l/s と 42 kgf/cm² の水圧) の中で、当時やっと出始めた鋼アーチ支保工 (ここでは古レールを加工した) とこれも当時やっと緒についたばかりの全断面掘削工法で、35 m² の断面を月進 375 m 掘削し、当時としては画期的な出来事としてわが国のトンネル技術者の中でも話題の工事であった。

しかし、いったん山が悪くなると、正直なところお手上げの状態となった。連日の検討会ではなかなか妙案が出ず、わが国のトンネルの権威者が集まり、あらゆる対策が検討された。今振り返ってみると、現在のようにいろいろな測定技術や方法がなく、試行錯誤の連日であった。これらの測定技術があれば短時間で安くできたと思われる。しかし、こうした多くの苦労と工夫の蓄積が今日の測定技術の発展につながっていることは確かである。

トンネルの対象としての地山は、いろいろな要素により、人間の顔が人それぞれ異なっているように同じものはない。こうした異なる条件の地山であっても、現在は、これらを模型化し、予想される荷重を人為的に加え、その変状を測定することにより実施工での挙動を把握することができる。また同時に、支保構造体の挙動を時間との関係で追跡することができ、材料の適否まで解明することができる。これは測定技術の発達の大きな成果である。測定技術の進歩は「一寸先は闇」のトンネル掘削を先が見えるいわゆる「明るさ」とまではいかなくとも、随分と自信をもって行えるようにした。

5. トンネル標準示方書の行方

わが国における戦後の山岳トンネル工法の発達の中でもとりわけ次の二つの事柄は特筆に価するものである。

一つは、鋼製支保工を始めとする欧米からの技術導入を契機とする機械化工法の急速な発展である。もう一つは、近年の NATM 導入以後の科学的に管理されたトンネル工法の驚異的普及と定着である。

NATM は、1962 年、オーストリアのザルツブルクで開催された第 13 回国際岩盤力学学会議において命名された。

この工法の実質的な発明者であるラブセビッツ博士は、この工法の構想を現場の経験の中で練り上げ、実用化した。数多くの計測と現場での掘削によって変化する地山の挙動の観察を行い、それらの現象を説明する強力な理論を構築した。NATM の誕生には、こうした実験と検証という自然科学の長足な発展の基礎となった真理発見の方法が活用されている。この意味においても、NATM は合理的であるといえよう。

わが国では昭和 51 年、膨張性土圧に悩まされた上越新幹線中山トンネルで初採用、成功して以来、施工実績は急増の一途をたどっている。

現在、「トンネル標準示方書」が、昭和 61 年刊行に向けて、土木学会トンネル工学委員会を中心に改訂中である。この新しい「標準示方書」では、NATM はわが国の山岳トンネルの標準工法と位置付けられており、従来の山岳トンネル掘削工法はむしろ特殊工法の扱いを受けている。

このような NATM の隆盛により、日本のトンネル技術は基礎学問の発展と同調し、経験と勘はいまだに生きているものの、理論と実際との融合の可能性は著しく高まっている。

先にも触れたが、工法発展の過程において、機械や材料の開発は見逃すことができない。NATM の隆盛の要因には削岩機の油圧化や吹付け機械の開発と計測機器と

測定法の進歩がある。とりわけ油圧削岩機は従来の空圧式の数倍の能力を持ち、作業性を向上させた。また、昭和 50 年代初頭以降のコンピューターの驚異的進歩と低廉化と大衆化は計測結果の解析力向上の原動力となっている。

6. 二つの議論

素材の不均質性のために、トンネル工学は常に不測な条件下にあり、このことが実験や理論の構築あるいは施工技術をも容易ならぬものになっている。

理論と実際がなかなか融合せず、経験と勘が重視されることから「トンネル工学は経験工学である」との議論が昔から現在に至るまで続いている。これは別な言葉で言えば「書物を読むよりは実務に学べ」ということである。

戦前の木製支保工の時代につくられた「隧道十訓」⁸⁾には、トンネル工事遂行上のノウハウが示されている。

- 一、地相は人相、山の性状
- 一、山の緩みは気の緩み
- 一、石硬くとも山堅いとは限らない
- 一、流汗淋漓、崩壊の徴
- 一、埃立たぬに水ないものか
- 一、肩のしまりは身のしまり
- 一、天道掘らずに中割するな
- 一、鼻梁は腰紐キチンとしめたらシャンとする
- 一、遣らずは両方
- 一、荷を担ったら足元に気をつけよ

これらの意味するところは、今日のトンネル工事においても金科玉条とすべきものが多い。

しかし、木を組み立てて行う支柱式支保工は、実験によってその効果を確認するといった手段をとることは不可能であった。したがって、幾つかのトンネル工事経験による技術の蓄積こそあれ、新しいトンネルについては常に未知な領域であった。

ところが最近の NATM では、岩盤力学などとの連

表一 NATM に関する土木学会技術賞受賞状況

昭和・年度	受賞工事名	受賞者	対象事項
53	上越新幹線 中山トンネル(中山工区)	日本鉄道建設公団東京新幹線建設局 (株) 熊谷組	強膨張性地山における吹付けコンクリートとロックボルト併用を主体とするトンネル工法の設計・施工
54	東北新幹線 第1, 第2平石・第1栗須トンネル	日本国有鉄道仙台新幹線工事局	風化地盤(マサ土)における NATM の本格的施工
56	多摩ニュータウン 三沢川分水路(合流部・落蓋坑)	東京都建設局 住宅・都市整備公団南多摩開発局	立坑 NATM の採用、土被りの浅い軟弱・大断面に垂直縫地工法と NATM の組合わせ工法を開発・成功
57	有間ダム(トンネル洪水吐)	埼玉県、飛鳥建設(株)・フジ工業(株) 特別共同企業体	大口径、変断面型トンネル洪水吐の設計と施工(破砕性古生層における)
58	横浜高速鉄道三号線 三ツ沢上町駅 三ツ沢下町駅	横浜市交通局	わが国初の都市部における大断面 NATM の採用・成功、きわめて低廉な工事費で施工

携によって、より理論的・数値的な予測と解析が可能となった。つまり事前にトンネルの性状をある程度推定することができるようになったわけである。この一例としては FEM や BEM などによるトンネル掘削時の地山の応力や変位の推定である。また、比較的容易に、掘削によって起こる地山の変状の有無の目安とすることができるものとして、地山強度比があげられる。これらは、先に述べた「一寸先は闇」に対する「明るさ」の一つといえよう。

千変万化の岩を対象とするトンネル工学の世界では依然として経験至上主義の根強いものがあるが、高度な技術追求のためには、科学的管理による施工が今後ますます要求されなければならない。

もう一つの「設計が先か、施工が先か」の議論については、NATM 以前では二つの立場があった。一つは、物をつくる順序に重きをおく「設計が先」とする立場である。しかし、トンネルは切羽から先の状況は掘ってみないとわからない。すなわち、「一寸先は闇」であって設計にこだわらずに「施工が先」とする立場がもう一つの立場である。後者については、切羽で仕事をしている坑夫の判断で、たとえ設計で支保工間隔が明示されていても、現場に合った間隔に変更されるという状況がその根拠である。このあたりがトンネルづくりの難しさであり、技術者の腕の見せどころでもある。

一方、NATM 以後は、NATM の最大の特徴の一つである計測による地山評価の設計へのフィードバックにより設計・施工の一体化が図られるようになった。また、設計段階で地山の事前評価が可能となり、現象の予知さえかなり高い確実性を持つようになった。

「一寸先は闇」の時代から解放されつつある現在、この議論は口角泡を飛ばすほどの大事ではなくなってきている。

7. 技術者の楽しみ

NATM は一つの技術革新である。また、最近ふたたび見直されてきている全地質型 TBM 工法も一つの技術革新である。両者のわが国での共通点は、島国日本の地質をより効果的に施工できる全地質型工法であるというところに認めることができよう。

「必要は発明の母」であり、必要に迫られて技術は進歩するものである。ある技術の開発によって従前は不可能とされていたことが可能となるという例は技術史上枚挙にいとまがない。

NATM 以後の山岳トンネル工法の将来は、社会の発展とともにどのように変容していくであろうか。「人生は短く、芸術は長し」であるが、楽しみなものである。

参考文献

- 1) (財) 矢野恒太記念会：日本国勢図会 1984 年版、国勢社。
- 2) (社) 日本トンネル技術協会：トンネル年報。
- 3) 樋口清之編：徳川家康おもしろものしり 雑学事典、講談社。
- 4) 大塚本夫：トンネル工学、朝倉書店。
- 5) 土木学会編：明治以前日本土木史、昭和 11 年 6 月。
- 6) 松崎利雄：江戸時代の測量術、総合科学出版。
- 7) 鉄道省 新幹線 丹那隧道研究会編：新幹線 丹那隧道研究会記録、昭和 17 年 9 月。
- 8) 斎藤徹ほか：トンネル工学概論、土木工学社。
- 9) 横田高良：トンネルについて、建設機械、1978 年 5 月号。

(1984. 7. 31・受付)

●ご案内●

土木学会論文集編集委員会論文集第VI小委員会

『土木学会論文集・第VI部門』の第2号は、昭和60年3月15日の発行です。論文等を投稿ご希望の方は、別掲の投稿要項等をごらんのうえ本年11月末日までにおよせ下さい。ただし、不詳点等は事務局編集課（電話・03-355-3441番、内線151または156）あてご下願います。