

委員会報告

21世紀の新しい地下空間利用に向けて

ADVANCED USE OF UNDERGROUND SPACE IN THE 21ST CENTURY

地下空間利用技術に関する研究小委員会

By Subcommittee on Use of Underground Space

1. ま え が き

21世紀を目指した内需主導型経済構造への変革が求められ、社会資本の整備・充実に向けて豊かで安全な質の高い国土づくりが進められつつある。中でも限られた国土の高度かつ有効利用に加え新しい空間として地下空間の利用・開発が脚光を浴びている。特に、大都市における地下空間利用は地価高騰、都市機能の施設の肥大化・過密化・老朽化、および再開発に対応し、交通問題の解決に絡んで熱いまなざしが注がれている。こういった背景にあってそれに技術的に対応すべく、去る昭和62年6月に土木学会「土構造物および基礎委員会：委員長 中瀬明男（東工大）」において「地下空間利用技術に関する研究小委員会：委員長 佐藤邦明（埼玉大）、副委員長 日比野敏（電中研）、幹事長 大西有三（京大）」が設置された。この委員会は広く産・官・学の中堅の若手委員37名（平成元年1月現在）からなっている。活動を進めるにあたって内容が広範でかつ多岐に及ぶため、委員会発足当初は従来の経緯、成果、実績、および将来の方向について文献調査や現状把握に努め、その後研究活動の方向づけを行った。その過程で研究の進め方は主要研究テーマ、①エネルギー・生産（主査・幹事：花村哲也（大成建設）幹事：竹林亜夫（清水建設））、②廃棄物処分（主査・幹事：小田匡寛（埼玉大）幹事：丸山 誠（大林組））、③都市地下空間：地下街・貯蔵・貯留（主査・幹事：西 淳二（都市地下空間活用研）幹事：山本毅史（鹿島建設））、④防災・コミュニティ・法制・管理（主査・幹事：江藤剛治（近畿大）幹事：吉野耕一（フジタ工業））、⑤交通・輸送・通信（主査・幹事：堀江 興（東京都）幹事：嶋村貞夫（鴻池組））の5つの

分科会に分けて、それぞれの分科会ごとに研究活動を進め、委員会に持ち寄って討論・勉強しつつ全体をまとめる方向で遂行することにした。しかし、今日、地下空間利用に関する社会の関心は非常に高く、政府の取組みはもとより各方面において地下空間利用にかかわる委員会、研究会、勉強会、シンポジウム、学協会等で研究・開発が進められつつある。かかる状況を踏まえ、土木学会において各方面のニーズを的確に把握し、研究方向を中間的に確認しつつ遂行するのが好ましいという結論に至り、昭和63年10月19、20日に地下空間利用に関するシンポジウムを開催した。その結果、このシンポジウムは大変盛況（参加者427名）であった¹⁾。また、このシンポジウムの折参加者各位に地下空間利用に関するアンケートをお願いしたが、その結果によると、地下空間利用に関する関心がきわめて高いことが再確認されたと同時に、この種のシンポジウムを定期的に開いて欲しいとの要望が強く寄せられた。さらに、この地下空間利用に関するシンポジウムを契機に土木学会はもとより建設業界においても一段と地下空間利用技術への関心が強まり、併せて当委員会への期待も高まってきた。新たに当研究委員会への参加希望が相次ぎ、委員会としては、その活動を一層充実するために上述した5分科会に加え、大都市における大規模地下空間建設にかかわる建設技術分科会を新たに設けて地下空間のマスタープラン、経済性、環境、防災といった問題をより具体的に検討することとした。

以下に、本研究小委員会の活動を通じて得られた知見および昨今の地下空間利用の動向について中間的にまとめたので報告する。

2. 地下空間利用の歴史的経緯および新しい動向・展開

(1) 地下空間利用の歴史的概観

地下空間の利用は古代の素朴な形態から現代の高度技術を駆使したものまで多種多様である。ここで、今後の地下空間利用を考えるにあたって歴史的経緯を要約し、技術の歩みを振り返ってみることとする²⁾⁻⁶⁾。

地下空間利用は原始時代の素朴な自然洞窟における穴居生活、また地下墳墓に始まったといえよう。約1万年前に氷河期が去って間もなく、人類は洞穴、岩陰での生活から空ぼりで囲んだところに深さ1~2mの竪穴を掘り屋根をかけ、竪穴式住居に住んだ。また、宗教活動の場としての石窟寺院、修道場として使われた石窟および仏教の地域では石窟仏寺が多数残されている。かなり大規模な窟洞(やおどん)住居は中国で今日も使われており、冬の暖房、夏の冷房、省エネルギーなど利点が多い。

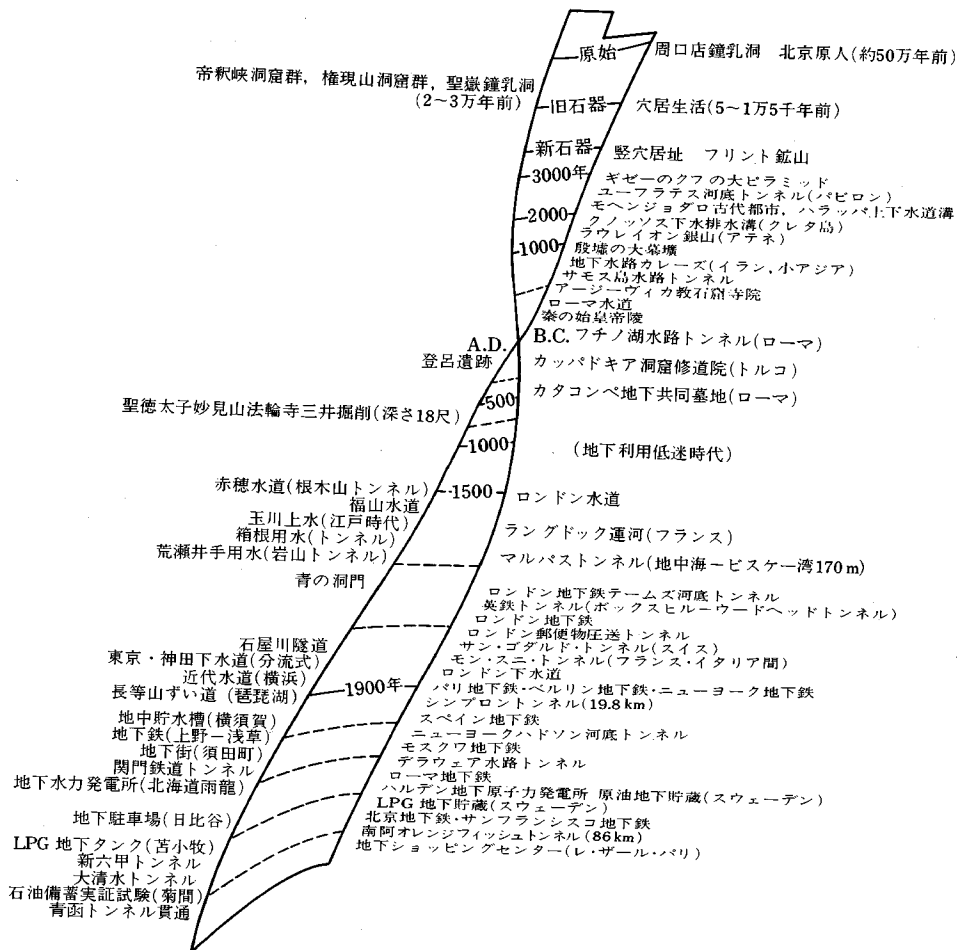
墳墓は屍の永久保存、靈魂の不滅、敬神宗祖および死

者の世界への畏敬を思い古代より地下空間の形をとってきた。形態はトンネル墳、室墳、カタコンベ墳(地下墓地)、立坑墳といったいろいろである。

水源・水路の確保は古今東西において人にとって不可欠のものであって、古くから(地下)井戸、地下貯水池、地下水路、カナート、水路トンネルなど世界各地で遺跡としてだけではなく、今日においても使用されている。

線状地下空間として最も古く伝統的につくられたトンネルは紀元前千年以前から掘られ、水路、交通、戦略、排水に供するものなどが挙げられる。また鉱山はトンネルを掘ることが目的ではないが、鉱物資源と水資源を採取するのに用いられていた。古い時代のトンネルは掘りやすい石灰岩、砂岩、のような軟らかい地山に多く作られ、現代のように水を含む軟らかい土質地盤には掘れなかった。

地下空間の恒温・保存性を利用して武器、軍の施設、穀物、ワインなどの貯蔵庫が作られてきた。日本に比べて欧米、中国、インド、西アジアは歴史的にみて地下空



図一 地下(空間)利用の歴史(日本大百科全書(1987), ほかより作成)^{3), 8)}

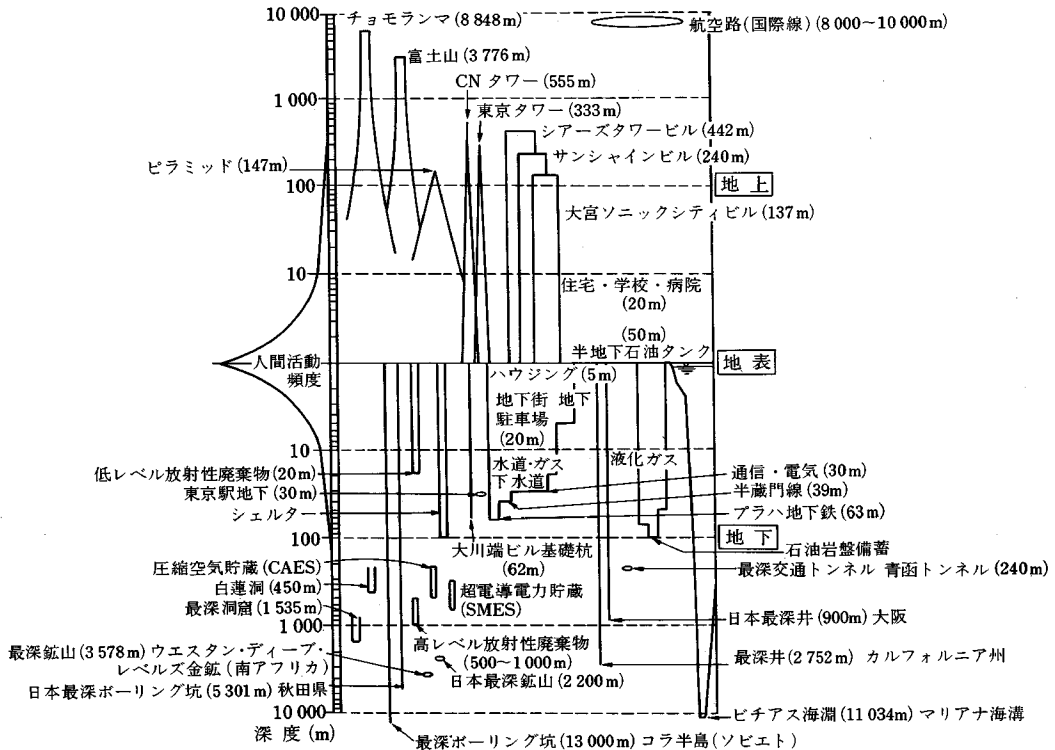


図-2 人類が到達した深さと人工空間の鉛直利用階層 (ギネスブック (1988) 等より作成)⁹⁾

間利用が早くから進んだ。

世界で初めて地下鉄道がロンドンに開削埋戻工法によって誕生したのは1863年とされている。蒸気機関車を地下鉄道に走らせたこともあった。その少し後に世界で最初に円筒シールドを組み立て都市トンネルが掘られたのはニューヨークであった。今日、世界の主要都市には地下鉄道が良く発達しており、全世界で最も営業距離の長いニューヨークは総延長407 km、東京は217 kmである。

近代・現代に入っているいろいろなニーズに応じ、多様な新しい技術に支えられて大規模な岩盤空洞（石油備蓄、地下発電所等）が建設され、長大トンネルも掘られるようになってきている。

図-1にはこれら地下空間の歴史的な経緯を描いている。

一方、人工空間の利用を階層（ゾーニング）別に見るため図-2に選択的に示した。人類が到達した地下（空間）利用は鉱山や交通のためのものが深いですが、都市のライフライン、インフラストラクチャー、地下鉄道、水路、ハウジングなどは地表近傍にあり、全体からみれば浅いものがほとんどである。昨今、関心が高い大深度地下利用が50~100 m程度で考えられている⁹⁾。

結局、地下空間の利用は原始の時代からあったし、有

史に入っても盛んであって利用形態もさまざまである。従来利用されてきた地下空間は機能的にみると、

- ① 資源の採取
- ② 物の貯蔵・備蓄・格納
- ③ 人・物・情報の輸送
- ④ 生産と活動・居住
- ⑤ 安置・処分

の中におおむね含まれる。

いずれも、岩盤（土質）地盤に作られ、拠点的か線状の構造となる。また、人が絶えずかわるものとそうでないものに分かれる。

(2) 地下空間利用の社会的ニーズと新しい動向

地下空間利用は、さまざまな分野で種々の規模で行われており、地盤条件もそれぞれ異なり、それらの必要理由も個々で違っている。

地下空間利用の分類もいまだ枠を拡大しつつある段階であり、ここではエネルギー関連、交通・輸送・通信関連、および市民生活関連（都市地下空間利用）に大別して⁹⁾、既存あるいは構想例について簡単に述べる。

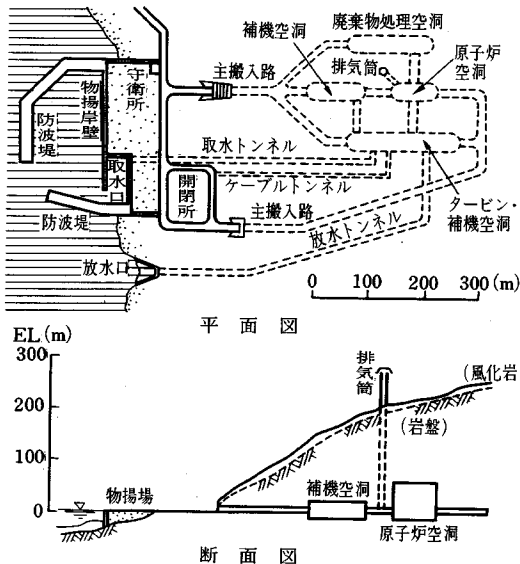
まず、エネルギー関連については水力の揚水式地下発電所、超電導電力貯蔵 (SMES) (Superconductive Magnetic Energy Storage)、圧縮空気貯蔵 (CAES) (Compressed Air Energy Storage)、石油備蓄、原子力

発電所の地下立地，地下変電所，放射性廃棄物処分などが挙げられる。

揚水式地下発電所は，地下に設置することにより地形の制約を受けることなく発電所位置の選択やスペースの確保が可能となり，ポンプの押し込みヘッドの確保ができることから地下空洞内に設置されている。空洞の規模は大きく¹⁰⁾，その容積は約 20 万 m³ に達する。空洞の規模が大きいため周囲の岩盤は硬岩の場所が選ばれる。これまでに，北は北海道から南は九州まで，日本全国で 20 地点以上で建設されている。

超電導電力貯蔵および圧縮空気貯蔵は，揚水式地下発電所と同様に，夜間の余剰電力を超電導電力あるいは圧縮空気として貯蔵しておき，昼間に電力需要がピークに達するときに利用する方式である¹¹⁾。超電導電力貯蔵¹¹⁾では電気を貯蔵するときに超電導コイルに生ずる力を周囲岩盤で支持することになる。コイルの直径と貯蔵電力量の大きさにもよるが，支持岩盤は硬岩が必要となる。圧縮空気貯蔵の場合，圧縮空気の圧力は 60 kg/cm² 程度が考えられており周囲岩盤もこの圧力に耐える強度を有することが必要である。西ドイツのフントルフでは岩塩の中に空洞を作り，圧縮空気貯蔵が行われている。

石油の地下備蓄に関しては，実証プラントが愛媛県の菊間に建設された¹²⁾。この空洞は高さ 15 m，幅 20 m，長さ 112 m で，水封方式により石油が備蓄される。さらに現在，本格的な石油備蓄基地の建設が申木野，久慈，菊間で始まっており，完成すれば合計で 500 万 kl の石油を備蓄する空洞となる。これらの空洞も規模が大きく，岩盤は堅固なところが選定され，山間地の地表面下 50～300 m の位置に建設される。



図—3 横型全地下式原子力発電所の概念図¹³⁾

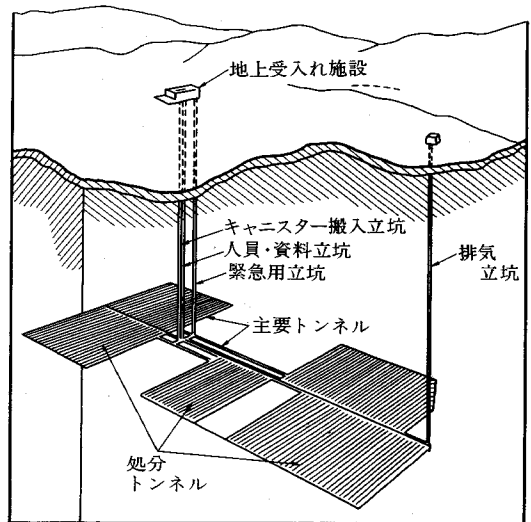
地下式原子力発電所は，原子炉やタービンなどの施設を地下に設置するもので，日本などの人口稠密で，山岳地の多い場合に有望な立地方式と考えられている。図—3に概念設計の一例¹³⁾を示す。地下空洞の規模が大きく，その個数も 2, 3～数個必要となり堅固な岩盤のところに設置される。外国においてはすでにいくつかの建設例があり，フランスのショーズにあるアルデンヌ原子力発電所は 1967 年に開業し，現在 30 万 kW の出力で商業運転をしている。

わが国の原子力発電設備容量は昭和 63 年度において 2788 万 kW であり，発電設備全体の 20 % を超え，石油代替エネルギーの主流として今後ますます重要になってくると思われる。この原子力発電に伴い発生する放射性廃棄物を地下貯蔵・処分する方法が現在検討されている。各種の方式が考えられるが，高レベル廃棄物の場合の概念を図—4¹⁴⁾に示す。同図の場合，空洞の規模自体はそれほど大きくないが，長期間の空洞の安定性，地下水対策が必要となる。周囲岩盤は堅固なところで地表からは 500～1000 m 程度の深さが考えられている。

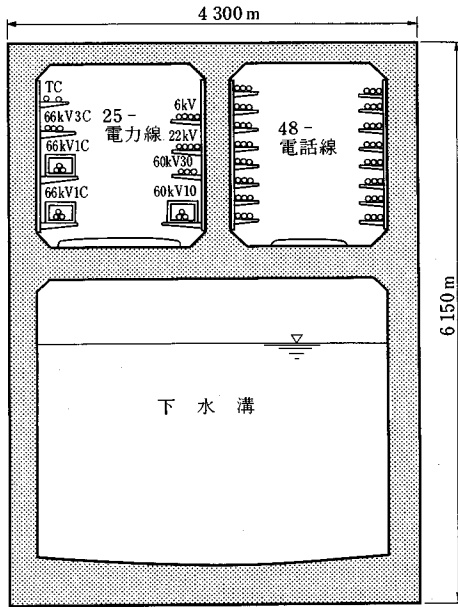
次に交通・輸送・通信関連としては鉄道トンネルと道路トンネルが代表的な例であり，トンネルは直径 10 m 程度である。地盤条件としては硬岩～軟岩であり，場合によっては土質地盤中にも建設されている。

通信関連では，近年都市部において共同溝が建設されるようになり電話線などが電力線や下水溝と共同して地下に設置されるようになってきた。共同溝の規模は図—5¹⁵⁾に示すように，比較的小規模であるが，都市の地下であるためほとんどが土質地盤である。

さらに都市地下空間利用について，現在わが国で利用されている市民生活関連のものとしては，地下街，地下



図—4 高レベル廃棄物地層処分の概念の一例¹⁴⁾



図—5 品川共同溝の断面¹⁵⁾

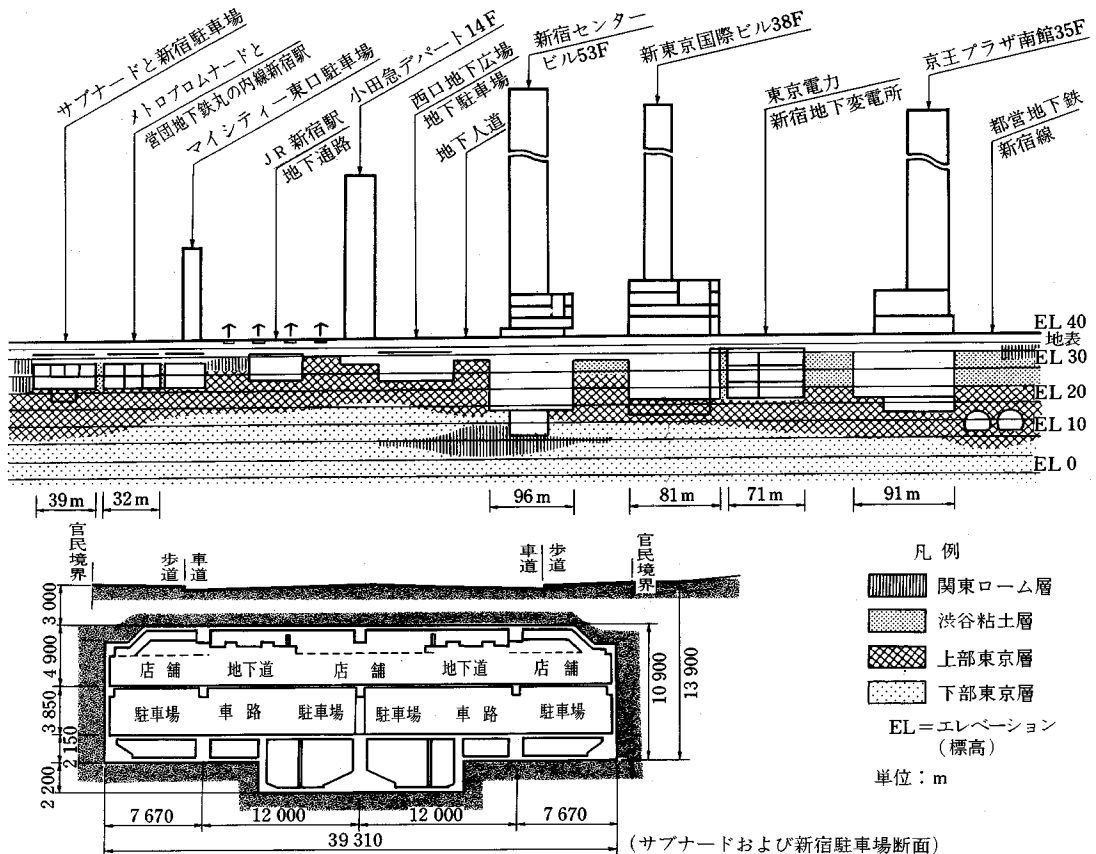
駐車場、地下鉄、地下駅などが最も身近なものであり、その他地下貯水池や地下変電所等を挙げるができる。

図—6¹⁶⁾には東京の新宿周辺の地下利用の状況を示す。鉄道の駅を中心として地表直下に地下街や地下駐車場が形成されている。地下鉄は地下街などよりさらに深部の地下10~20 mのところを走っている。この場合、地下空間としては地表から20~30 mまでが利用されており、より深いところは未開発となっていることがわかる。

地下街の規模は個々の例により異なるが、大きいものでは延べ面積が6~7万m²、地下駐車場では1~2万m²に達する。地下駅はその掘削土量でみれば大きいものでは40~85万m³に達する。

地下貯水池は、近年都市部において集中豪雨などによる洪水対策として作られている¹⁷⁾。地下に貯水用のトンネルを掘削し、集中豪雨時の河川水を一時的に貯留し、洪水を防止するものである。

地下変電所は、市街地での変電所建設が土地価格の高騰の影響などを受け、用地難となり公園やビルの地下に設置されるようになったものである¹⁸⁾。変電所建物の容



図—6 新宿周辺地下利用の状況¹⁶⁾

積は10万 m^3 に達する巨大なものもあり、地表からの深さは約30mになる場合もある。

これら都市地下利用の場合、地盤条件は山岳地帯と異なりほとんどが土質地盤であり、軟質で地下水の影響を受けやすい特徴を有している。

海外の例でみると市民のリクリエーションセンターや水泳プールなどが地下空洞内に建設されたり、工場の廃熱を地下空洞内に熱水として貯蔵し、家庭の暖房に活用することなど市民生活に密着した施設が利用されている。

そのほかの利用例としては、大谷の例が挙げられる。栃木県は古くから大谷石の産地として有名であり、その採掘跡は巨大な空間となっている。この地下空間は年間を通じて温度や湿度がほぼ一定であり、この恒温・恒湿の特性を利用して果物などを貯蔵する岩盤低温倉庫として活用したり、振動が非常に少ないことを利用してホログラフィスタジオに活用している。さらには地下空間の隔離性により清浄な空間が得られるために生ハム熟成室として利用されている。

地下空間の恒温性を利用した海外の例としては、ミネソタ大学土木鉱山工学科の建物の例を挙げることができる。それは地下33.5mの砂岩層内に4500 m^2 の地下スペースを建設し、外気温度の季節変動が激しいのに対して地下の恒温性を有効に活用している。

以上、地下空間利用のごく概略を述べたが、これらの利用は、個々の目的に沿って開発された、いわば単発的な利用である。今後開発される都市地下空間利用は、個々の利用を包含し、さらに都市のデザインとして総合的な開発となる必要がある。

地下空間の利用は歴史的にみても決して目新しいものではなく、今日においても新しく拡大しつつあることは上述したとおりである。にもかかわらず昨今地下空間利用に関する関心が高く、かつ政府、各省庁、民間において具体的な検討・協議および開発研究が進んでいる。「今、なぜ地下空間なのか？」について考えてみる。このことを考える際に、次の論点を念頭においておくと考えやすい。1つは国際的観点に立ったとき、わが国における現状の国土・都市基盤の改善志向（対外的な社会資本（ストック）の見劣り、豊かさの追求）が求められていること。次は、それに対応する内需主導型経済への方向転換（民間活力の誘導、余剰資金の還流も含め）がある¹⁹⁾。さらに、地下空間の新しい機能の再認識や可能性の拡大が将来の先端技術の発展に道を開くであろうといったことが考えられている。これらを支える事柄を現状から具体的に列挙すれば次のようになる。

- ① 新しい大型プロジェクト・構想（石油地下備蓄、東京湾横断道路、CAES、SMES、放射性廃棄物

地層処分）

- ② 都市における地下空間の高度計画的利用・長期展望（地下鉄道、上下水道、ガス、通信ケーブル、地下街、等）
 ③ 都市機能の地上・地下の一体化と再開発
 ④ 都市交通問題の解消（職住間距離の接近、空洞化防止）
 ⑤ 地下高騰への対応
 ⑥ インフラストラクチャー・ライフラインの安全性強化・向上
 ⑦ 都市防災（防災空間の確保、危険物の地下化）
 ⑧ 都市環境の保全・整備（風致、騒音、車の排気ガス、公園の確保）
 ⑨ 21世紀へ向けての新しい地下空間の創造・活用。

これらは大づかみにわが国の経済成長における国際的および国内的方向づけを背景とした都市問題が地下空間に向けて見直し論、対策論および未来論として混沌と表面化したものと読み取れよう。

わが国において地下空間といえ、地下街や地下鉄道のような都市に作られるものと岩盤空洞のようにそうでないものに分けられるが、昨今、どちらかといえば都市におけるものに焦点が当てられている。つまり、都市問題の解消に地下空間が浮上してきた感がある。しかし、都市地下空間をより広範囲に普及・促進しようとする際、大きな阻害要因は建設費に占める用地費（地価）の割合が高くなることである。従来、地下街、地下駅、地下鉄道、下水などの建設にあたってはできる限り民地やその地下を避けて公共用地、事業主の土地、河川、道路、公共水域といったもの、あるいはそれらの地下を利用して地下空間を建設してきた。そうすることによって用地費や用地補償費を少なくすることができるわけである。現状で私有地の下に地下空間を設定しようとした際、民法207条（土地所有権の限界）により同269条の2（地下・空間を目的とする地上権）を適用して区分地上権を設定するため補償処置がとられた。

昨今しばしばいわれている大深度地下（空間）利用というのはこういった視点から急激に脚光を浴びるに至ったものである。表一には各省庁における地下（空間）利用への対応・取組みについて示した。山岳トンネルを掘っている人にとって今日都市地下空間でいわれている50~100m程度の深さが大深度といえるかどうかいぶかる向きもあろう。山岳と都市では諸条件が違いすぎるので同一視できないが、今いわれている大深度というのはむしろ「既存の建物や構造物の基礎の達している地盤より深いところ」を指す。現在の通説では土地所有権は土地所有者の利用によって利益の存する範囲に及ぶと限定的な解釈にたつ（この解釈は民法207条：「土地ノ所有

表一 地下（空間）利用に関する各省庁の対応・取組み等

省 庁	内 容
運 輸 省	大深度地下鉄道
環 境 庁	(大深度) 地下開発と環境の関わり
科学技術庁	地中環境利用に関する研究開発, 等
厚 生 省	大深度水道施設, 等
建 設 省	地下利用に関する技術開発, 都市計画, 大深度地下空間利用, 道路地下空間, 地下河川, 建築物等の地下空間, 等
消 防 庁	大深度地下空間の利用に係わる消防防災対策, 等
通商産業省	大深度地下空間利用問題, 等
農林水産省	大深度地下利用と農業基盤整備事業, 等
郵 政 省	大深度地下利用 (通信網の地中化促進, 通信施設の安全・信頼性の向上, 郵便輸送の迅速化・効率化, 等)

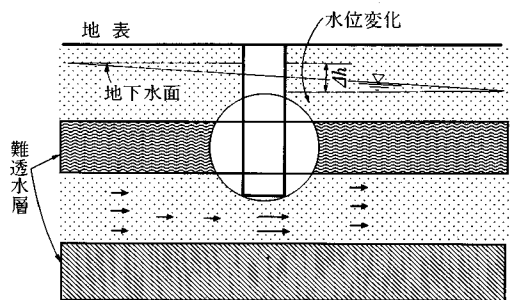
権ハ法例ノ制限内ニ於テ其上下二及フ」に制限を付けた見方)²⁰⁾。

(3) 必要なソフト面および防災・環境保全等の課題

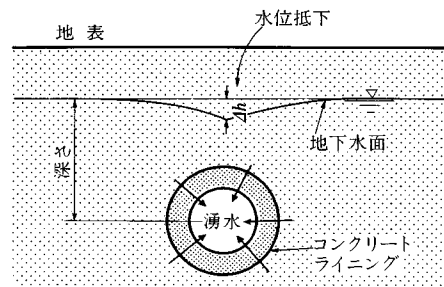
地下空間利用の発展が土地対策や交通問題はもとより都市問題全体に少なからぬ影響を及ぼすことは明白に予測できる。従来にまして今日いわれている大深度地下利用が合理的に推進されれば、地下空間の建設機会の自由度は飛躍的に増し、人・物・情報の流れは大きく変わることは明らかであろう。しかし、それを可能にするためには、ハード技術はいうに及ばずソフト面の対応が均衡したものとならなければなるまい。ここで、これらに関する都市地下空間利用が深度化した場合も念頭において重要と思われるものを挙げると、①法制、②防災、③環境保全、④地下情報の整備、⑤マスタープラン策定等がある。まず、大深度地下空間利用において法制上最も関心のもたれている点は民有地の地下(いわゆる大深度)の利用に私権制限を加えられるか否かである。もし私権に制限を加えることができたとすれば、そのあり方については検討がなされるところである。現時点では国の関係機関(関係省庁)等で検討がなされており、遠からず調整がなされた立法化へ向かうものと思われる。現在しばしば使われている大深度地下という用語は、技術者の頭に定着しているような物理的な大深度とは必ずしも一致していないのであって、むしろ法制上民有地に私権制限を加えられそうな深さという意味を含んでいる。その大深度の上限が大都市では場所によって違いますが既存の構造部に影響のない深さ、ほぼ50m程度以深という感じで使われる。もちろん、この大深度には掘削技術や工費の制約が関与する。また、すでに上述したように今までの多くの地下構造部・空間は事業主や公共用地の中あるいは下に作られて、民地の利用を最小限にとどめ用地補償を少なくする(あるいは、事業主体が地下利用による他者への影響を避ける)よう努力が払われた。したがっ

て、大深度地下利用ということは地下の利用に伴う法的自由度を得ると同時に事業許諾者を少数に絞り込むことを可能にするものであろう。

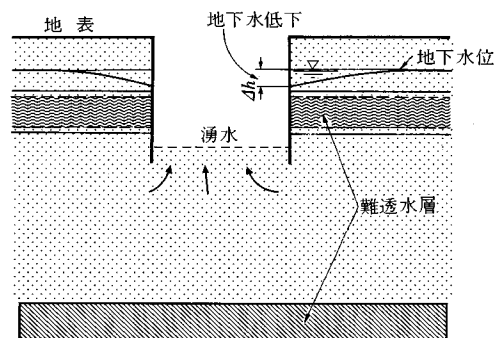
次に、防災については地下空間が浅かろうが深かろうが避けて通れないわけであり、火災発生時等万一の場合における利用者あるいは施設の安全確保である。地下街、地下鉄道・道路等の地下空間は地上からの閉塞性が増し、それは深層化すればするほど、避難、防災、救助等の消防防災対策・活動に制約が加わる。このことは大深度地下空間においては、地上への避難路が長くなりかつ限られること、利用者の避難誘導、消防隊の現場への接近、消防活動、濃煙・熱気流の対策、火災の早期発見・早期消化、救助・救急手段等に一層の配慮を要すること



(a) 地下空間による流れの閉塞



(b) 地下空間への湧水



(c) 開削工事

図一七 地下空間による地下水変化

になる。

さらに、地下空間開発に伴う環境問題は従来扱われてきた、いわゆる地下水障害や建設工事による地下水問題が中心となろうが、地下道路のような地下空間においては排気ガス換気塔による空気汚染などが考えられよう。地下空間による地下水環境変化は工事中（短期）のものと完成後操業中（長期）におけるものに分けられようが、地下空間の周辺および限定範囲に及ぶものが考えられる。その影響形態は構造物の形態・深度、地形・地質、利用形態および建設工法に依存し、その具体的影響は帯水層における流れの阻害と湧水、線状地下空間に沿う新たな地下水流等による地下水の低下・上昇、およびその結果誘発されるであろう地盤変動となる。図一七には地下鉄道のような線状地下空間が難透水層と帯水層を部分的に閉塞した場合およびその空間内への湧水を示し、また開削空間における流れの干渉を描いている。地下鉄道のような長い線状構造にしても地下街のような拠点的空間にしても地下帯水層の広がりや規模に比べれば、そのスケールは十分小さいとみてよいため広域的には地下水環境を大きく変えることは考えにくい、どちらかといえば局所的な影響にとどまるように思える。これについては現在検討が進められている。

ややソフトな問題となるが、地下情報は地形・地質はもとより既存の地下構造物に関する諸情報（深さ、構造物、利用形態、建設率等）をもっと利用しやすくかつシステム化しておくことが大切である。

一方、地下空間の経済性はそれを構造物として建設費や維持管理費を考えるだけでなく、都市機能の改善、環境の改善、ライフラインやインフラストラクチャーの安全性向上、地価対策波及効果、防災空間の確保、緊急性といったものを総合的に評価して考えるのが肝要である。それには地下空間利用に関するマスタープランが要る。

3. 地下空間利用における将来への視点

(1) 地下空間利用の展望

地下空間の開発についてどう思うかという問いに、たいていの人は“地下利用大いに結構、しかし私はもぐらの生活はしたくない”と答えるというアンケートが報告されている。また、アメリカのある有名デパートでその職員に地下で働く気があるかどうか聞いたところ、ほぼ全員が「否」と回答したが、その後、現在の職場でも窓はなく、地下の売り場でも内装、室温、職場条件が同一であると指摘するとみんなの答えがひっくり返ったという話が伝えられている。このように地下は一般には近寄りがたく、暗いといったイメージで捉えられているが、そこには従来からの慣習、閉塞感、なんとなく恐ろしい

という感覚などからくる多分に気分的なものや情報不足が作用しているものと思われる。しかし、実際には人類は地下を利用したさまざまな居住、地下に存在する自然資源から恵みを受けて今日の隆盛に至ったことを忘れてはならない。近頃にはわかに脚光を浴びるようになった地下空間の利用は、従来からのうさんくさいイメージを払拭できるように、十分な配慮が必要である。

近代的地下空間利用の先進国である欧米とわが国のそれとを比較した場合、気象条件、地下水条件が異なることは明白であるが、それ以上に文化の差からくる百年、二百年という長いレンジの物の考え方や身近な地下室の存在が決定的な違いを醸し出している。欧米諸国での地下空間は暮らしに結び付いた地下室をどのように作り、どう使ったらよいのかのノウハウを十分蓄積したうえで、現在の地下空間開発につなげている。一方、わが国での対応はかなり対症療法的な側面があったことは否めない。地下空間の利用はわれわれ地上で生活する人類が宇宙空間や海洋空間の利用とともに、地球という星を垂直方向に利用しようとする素晴らしいアイデアである。国土の狭小なわが国においての長期的展望に立ったマスタープランの作成がスムーズに行われることが、先人の遺産に貢献する日本人の使命ではないだろうか。たとえば、快適な地下居住の広範な設計方法の確立は、砂漠を多く抱える乾燥地帯の国々への技術協力として十分魅力があろう。気温の変化の激しい乾燥地帯でも、地中は適温に保たれており、利用価値の高いソーラーエネルギーやハイテク技術を活かして併用すれば見通しの開けるプロジェクトになり、国際協力への展開が望め、国際化の時代に大きな貢献が可能となろう。

次にハードウェア技術の側面について考えてみる。地下空間は広い。最大の利用深度は4000mにも及ぶ（南アフリカの金鉱山）。都市部における比較的浅い部分の地下利用、すなわち地下鉄、各種地下ユーティリティ、上下水道が一般的である。深部地下資源の開発には高度なハイテク技術が使われている。このようにすでに種々の構造物が地下に造られているとしたら、地下構造物建設の技術的課題は何であろうか。

地下空間の利用といってもさまざまな形態があり、それぞれに相応の技術が蓄積されてきた。したがって、過去の例からそれほど逸脱しないような構造物であれば大深度といえども問題なく建設が可能となる技術的背景は備わっていると考えてよい。しかし、社会的、技術的要求は安全性や経済性も加味してとどまることを知らない。また、技術的対応も今後ますます緻密さが要求されることとなるのは明白である。地下構造物を深いところに建設する場合、複雑な地盤の経済的な先行予測、既存の掘削技術の大深度掘削への適用の可否、地下水環境へ

の影響—特に洪積帯水層とのかかわりと地下水の三次元的な挙動把握—地下の恒温性・定湿性・吸音性・耐震性を含む自然条件に対する耐性を十分引き出すための地下建設技術、安全施工のための自動化ロボット技術、および莫大な掘削土の処理は今後の検討が期待される。

地下の利用にかかわるソフトウェアの整備は不可欠であり、地下空間を安全に、かつ効率的に利用するためには法律の側面から技術論、芸術論に至るまでの幅広い議論が求められ、技術者だけでなく、政治学、心理学、社会学などの専門家の参画が必要であろう。

地下空間は空間利用三次元化の着想の最たるものである。その着想は多層構造の導入であり、地球を空に浮かぶ飛行機に見立てるとイメージしやすい。航空機は限られた空間に見事な多層構造を作りだしており、また第一級の空港施設にしてもしかりである。地下空間利用ソフトウェア作りは、これからの課題であり、不可欠となる。

地下利用は現在の自然破壊、公害に対しても安全や利用役割を明確にして行うべきである。そのためには、地下利用 PA というものが必要となるのではないだろうか。PA とは、もともとパブリック・アクセプタンス（公衆の受容）という言葉を訳したもので、アメリカの原子力関係の PR に盛んに使われている。地下利用の内容に関して一般市民に納得してもらうコミュニケーションが不断に必要なことはつい忘れがちであるが、今後ますます重要になるであろう。

建築設計では建築物をその立地する自然の地形といかに調和させるかが問題となる。地下住宅によるリゾート開発デザインといった話題は身近な問題として捉えられる。地下空間をうまく利用した住居や建築物は自然との調和、エコロジーの尊重を唱え、子供の情操教育的効果、土や緑などの自然を視覚的に身近に感じる効果が望めると心理学者も指摘している。

新しい地下空間需要は、すでに開発された空間に、当初予定されていない新たな地下建築空間が割り込んでくれば、その空間全体が調和を失うことは必須である。その場合、地下空間利用は地上の空間秩序を尊重して、増大する空間需要に応えることができるよう、慎重な配慮が必要である。これが成功すれば、地下空間が位置的に至近距離にありながら独立した空間として利用できるため、刷新的な都市空間の開発が展望できることになる。地下の利用は徐々に一般的になりながら、さまざまでも自由な形態で人々のふれあいの場になる可能性を秘めているが、前例にこだわらない柔軟な対応など今後文化面での対応も欠かせない。

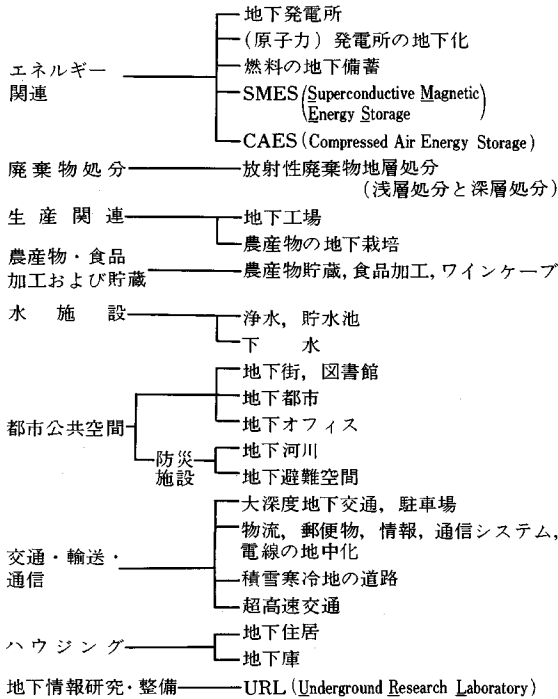
地下利用の具体例として取り上げられるスウェーデンの地下下水処理場、都市交通の地下化、電線の地中化は、基本的には汚いもの・醜いものは地下への発想のもとに

都市景観・都市環境の保全のためのコスト負担を国民が受け入れたものである。言い換えると、従来の地下空間開発には、“Going Under to Stay on Top” すなわち地上の最適利用のために地下を利用しようという発想がある。これはもちろん、現在では最適なものの考え方といえるが、さらに将来的には地上のための地下空間であるとともに、より安全で、より快適な空間の確保を目指して地下空間そのものの独立した利用法を考えていく姿勢も必要ではないだろうか。

地下空間の掘削技術も利用法も多様化した今日地下空間を人間が生み出し得る「新たな空間」と考えれば、その展望・可能性は非常に大きいものとなる。いま、仮に経済性を傍らにおいて、人間空間という観点から地上の人工空間と地下のそれを対比しておのおのの特徴を明示し、地下にあった方がよいものは、地下化の方向で再考することが望まれよう。周知のように地上の代表的空間といえば、建築物であり人が生活の拠所としている。それに代わるものは地下空間では中国のヤオトンのようなものがある。また、道路、鉄道のような地上交通は機能的に地下にあってもよいし、地上のガスタンクや貯蔵庫といったものはむしろ地下にあった方がよいものもある。地上の緑、水、太陽、気候、風景、生物系といったものは地下に求め難いが、人工空間は人間の精神的な面、自然への定着観、歴史観、経済性といったものを考えなければ、合理的にはちょうど地表を鏡面にたとえた上下に映る像のようなもので、利用面からすれば地上と地下に大差はないようにもみえる。

ここで、今日いろいろな方面でいわれている将来の地下空間利用について重点的にまとめてみる。表—2 は現状および新しい地下空間利用の可能性についてまとめたものである。これらは大別してエネルギー関連、廃棄物処分・格納、生産関連、水施設、都市公共空間、交通・輸送・通信、ハウジング、農産物・食品加工・貯蔵および地下情報研究・整備に分けられる。こういったものの中には現在建設されつつあるもの、あるいは作られた実績のあるものもあるが、全く新しい地下空間と大規模プロジェクト・構想として検討されているものもある。わが国の地形・地質は大陸にある欧米のものとはかなり違っており、岩盤地山と土質地盤がかなりはっきりしているため、都市と都市以外の地下空間は区別しやすい。都市における地下空間の地震発生時の避難空間として利用することは今後注目され、また地下工場や農産物の地下空間による集約的高生産栽培も地下特性の活用に結びつく可能性がある。さらに、高情報化都市においては情報拠点とそのネットワークシステムの安全性確保のために地下空間が有望視される。将来の地下空間利用の発展を考えると、地形・地質はもとより地下情報の研究・整備

表-2 地下空間の現状や将来の利用形態



が急がねばなるまい。URL (Underground Research Laboratory) では今日諸外国 (ヨーロッパ, アメリカ, 等) において, 高レベル放射性廃棄物処分にかかわる原位置の実験に用いられている。具体的にはストリパ (Stripa, スウェーデン, 花崗岩), グリムセル (Grimsel, スイス, 花崗岩), モル (Mol, ベルギー, 硬質粘土層), 西ドイツのテストサイト (岩塩, 粘土層, 等), ホワイトセル (Whiteshell, カナダ, 花崗岩), カールズバット (Carlsbad, アメリカ, 岩塩), ハンフォード (Hanford, アメリカ, 玄武岩), ネバダ (Nevada, アメリカ, 凝灰岩), ドリッグ (Drigg, イギリス, 泥炭層), 等が良く知られ, 地質, 岩盤, 水理, バリヤー, 等の調査・試験が行われている。わが国においてもこの種の調査・研究が積極的に取り組まれようとしており, 今後深部における岩盤空間利用の発展を飛躍的に促すものとなる。

一方, 地下空間利用が急激に社会的関心事として浮上してきた背景には都市の機能・秩序の回復はもとより, 日本の都市があまりに計画性に乏しく環境・風致といったことへの配慮の欠如, といった点が挙げられる。また, 道路の地下化・掘り込み化の裏には騒音・排気ガス対策への配慮があり, 通信ケーブル, 電線の地下化には都市の美化はもとより情報基盤の安全性向上にも目が向けられている。

(2) 都市地下空間の掘削・施工技術

地下の掘削・施工技術はいうまでもなく経済性を前提

にニーズによって産み出されるものである。その際, ①従来の技術, ②既存の技術の延長, ③新しい技術開発のいずれかによって実際へ対応することになる。

今日, 都市地下空間にかかわる主要な掘削・施工技術は次のものが挙げられる。

① 開削工法 (鉛直掘進) : これは拠点の地下空間, 開削トンネル, 地下空間へのアプローチの掘削・施工に用いる。

② シールド工法 (水平掘進) : シールド (Shield : 盾 (たて), 防御 (物)) 工法は地盤内に没した状態で線状地下空間を掘る有力な技術の1つである。これには, 地山安定処理, シールドおよび覆工 (ライニング) が3大構成要素となる。

地山安定処理は切羽が自立 (開放型) するか崩壊 (密閉型) するかにかかわり, それによって手掘り式, 泥水式, 土圧式, 気泡式といった工法を選定する。覆工にはセグメントや場所打ち (ECL 工法 : Extruded Concrete Lining) などがある。

③ (都市) NATM (New Austrian Tunnelling Method) : NATM はロックボルト (rock bolt) と吹付けコンクリートによりトンネルや空洞を掘る方法であって, NATM の原理は空間周辺地山の有する強度を有効に活用するというもので, もともと岩盤について開発されたものである。しかし, 都市における岩盤でない土質地盤についても最近応用される例が増えている。シールド工法より安価に施工でき, 水の少ない締まった地層に有効である。

④ 立坑の施工技術 : シールドトンネルのようなものの掘削にあたって機械や資材の搬入, 掘削土の搬出などに立坑が必要となる。浅いものは矩形断面とし, 深いものは円形断面をとり, 深度は20~50 m程度のものが多い。工法としては矢板工法, 連続壁工法が主流である。

上述した主要な工法(技術)のほかには地下掘削にあたって補助技術や地盤改良工法が用いられる。

一般的にみて地下空間は深くなるほどより高度な建設技術を要し, 施工費用もかかる。次に地下空間の大深度化に伴う掘削技術の主流をなすであろうシールドトンネルにおける今後の技術課題は,

- ① 大深度化, 耐高水圧, 大口径, 特殊断面, 可変断面, 拡大・分岐・接合, シールド機械の軽量化。
- ② 長距離化, 高速施工, 自動化, ロボット化, 低コスト化。
- ③ より厳しい施工条件への対応 (急曲線, 急勾配, 全土質対応, 排土処理, 工事環境保全)。

などが挙げられよう。

4. むすび

ここ2,3年の間に、地下空間利用への社会的関心が急激に高まり官はもとより民間においても加速度的に議論が表面化してきた。21世紀へ向けて内需主導型経済への方向転換と相まって社会資本整備の新たな展開において地下空間利用の見直しや長期展望について注目されているところである。今日の地下空間利用は都市内を中心とした「都市型」のものと、岩盤空洞のような「都市以外」のものに分けられる。また、人が常々かかわるものとそうでないものに大別される¹⁾。

先史時代に始まる地下空間利用は近代・現代に入って急激に拡大し、大都市の諸問題とも絡まって今後へ向けて再確認されつつある。この際、地下空間について長期展望に立った方向づけを真剣に考える必要がある。特に、大都市における地下空間利用は今までややもすると消極的で計画性を欠く面があったことは否めない。次のような諸点は適正利用という面から肝要であろう。

- ① 秩序ある計画的利用
- ② 合理化された高度利用・開発（立体化・多重利用、再開発等）および地下空間のシステム化
- ③ 地下特性の発展的活用
- ④ 経済性と利用技術の開発
- ⑤ 社会的および人間工学的視点
- ⑥ 法制
- ⑦ 地下情報の整備とデータ化
- ⑧ 科学技術の発展と生活様式の変化
- ⑨ 防災・安全性と環境への配慮

これらの中で、③、④はどちらかといえばハードな技術に支えられ、⑤～⑨はソフト面に負うところが多い。いずれにしても総合的に絡まってくる。

昨今、科学技術の進歩は目覚ましく、社会の様相が激しく変貌するためそれらに応じた地下空間の適正利用を図ることは肝要である。また、都市における地下空間は地上建築物、交通といったものを含め都市計画と密接不可分の要素となる。

地下空間は人工空間そのものであり、しかも地下に作る。したがって、それは科学技術そのものによるところが大である。その意味で土木技術はもとよりいろいろな周辺技術に期待がかけられるのは当然であろう。しかも地下空間の個性によってそれにかかわる技術は変わるし、個々の特性に合致した技術が開発されることが望ましい。

最後に、本論は小委員会活動の一環として地下空間利用に関する歴史的経緯を踏まえ昨今の動向を要約し、今後の可能性について中間的にまとめたものである。今後の地下空間における社会的ニーズおよび利用の多様な可能

性からみて、本研究小委員会の長期展望に立った活動が多くの方々より求められており、土木学会活動の担う役割が痛感される。本論に対する建設的なご意見、ご批判を学会小委員会までお寄せいただければ幸いです。

なお、本稿原稿のワープロ打ちおよび図-1, 2の作成には吉野耕一氏（フジタ工業）、小田部淳氏（建設企画コンサルタント）および粕谷太郎氏（鉄建建設）の協力を得た。

参考文献

- 1) 佐藤邦明：地下空間利用技術に関する研究小委員会の経過報告，地下空間利用に関するシンポジウム，土木学会・土構造物および基礎委員会・地下空間利用技術に関する研究小委員会，pp.1～7，1988。
- 2) 土木学会誌編集委員会：地下空間利用の現状，土木学会誌，pp.2～57，1987。
- 3) 科学技術庁資源調査所：地下空間利用に関する基礎資料，資料第115号，昭和59年3月。
- 4) レイモンド・スターリング：地下空間利用の現状，国際地下空間シンポジウム，読売新聞社・都市みらい推進機構・日本建築センター，pp.24～41，1987。
- 5) 地下空間利用技術に関するテクノロジーアセスメント委員会：地下空間利用技術に関するテクノロジー・アセスメント，日本産業振興協会・エンジニアリング振興協会，昭和63年3月。
- 6) 松本嘉司：大深度地下鉄道の可能性と課題，大深度地下鉄道セミナー，鉄道総合技術研究所，pp.1～23，昭和63年9月。
- 7) 日本大百科全書17：地下利用の歴史，pp.167～173，349～350，1987。
- 8) 青木栄一・大出 健訳：ギネスブック，講談社。
- 9) 土木学会：地下空間利用に関するシンポジウム，p.82，1988。
- 10) 本島 陸・日比野敏：卵型空洞掘削時の実測結果による岩盤挙動の検討，電力中央研究所報告，No.383057，1984。
- 11) 電力土木技術協会：電力施設地下構造物の設計と施工，p.10，1986。
- 12) 文献11)，p.924。
- 13) 日比野敏，ほか：地下式原子力発電所の立地調査技術，電力中央研究所総合報告，No.1，p.5，1987。
- 14) 文献11)，p.1057。
- 15) 建設産業調査会：地下構造物ハンドブック，p.30，1987。
- 16) 小林健郎：大都市の地下 新宿の場合，エネルギーレビュー，第6巻，第3号，pp.28～32，1986。
- 17) 橋本 固・渡辺義方・濱田圭一郎・鞠谷和重：大阪の地下ダムの計画と施工，土木学会誌，第71巻，第6号，pp.2～8，1986。
- 18) 文献11)，p.817。
- 19) 経済企画庁総合計画局編：社会資本整備の新たな展望—21世紀へのシナリオ—，昭和62年6月。
- 20) 模範六法編集委員会：模範六法（昭和55年版），三省堂，pp.607～613，1979。（1989.1.20・受付）