地下ダム——その考え方と展望

松尾新一郎
正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

河野伊一郎
正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科



Shin-ichiro Matsuo



Iichiro Kono

はしがき

最近，「地下ダム」あるいは「地中ダム」という言葉が新聞やテレビジョン，あるいは雑誌などにもしばしば報道されるようになったので，専門家や関係者でない人であっても，この言葉を初めて耳にするということはないと思う．しかし，ここに至ってその言葉が，使う人びとによって勝手勝手に，非常に広い意味にも使われるようになり，ときには発案者である筆者らも奇妙に感じるような使われ方をしている場合もある．会誌編集委員会からの本文執筆依頼もそれらとは無関係ではないと思われるので，ここで，その地下ダムの意味なり，効用等を発想の源に立ち返って整理し，将来の展望をもあわせて述べてみたいと思う．

1. 地下ダムの構想

(1) 構想の誕生と地下ダム第一号

筆者らが初めて「地下ダムの構想」を提示したのは昭和 39 年である．土木学会関西支部年次学術講演会において「地中ダム化による地下水規制[1]」，その翌年，『東南アジア研究』誌上で「タイ国における地下水開発の構想とそれに伴なう土質改良について[2]」の稿中である．

その後，地下ダムに関する理論的[3]，実験的研究[4]が継続され，また，現地における調査[5]も積極的に実施されて今日に至っている．

なお，戦前の昭和 18 年，京都大学名誉教授（農学）の可知貢一博士によって，同じ「地下ダム」という言葉がすでに使われていたことを，その後に発見した．可知は，那須野ケ原水利開発計画論[6]の展開の中で地下水強化の一構想として湧水阻止壁（地下ダム）という名称を用いている．彼の考え方も筆者らの考えている地下ダムの意味とほとんど等しいと理解することができる．ただし，その中では水収支に関する定量的な考察等が必ずしも十分なされていないが，この点については，後述するいわゆる広域地下水（当時はそのような用語はなかったと思われる）に関する調査・研究が当時のレベルではほとんどなされ得なかった事情からであろうと想像することができる．

一方，筆者らは，上述の昭和 39 年以来，学術講演会や学術誌上などにおいて，地下ダムの有利性，必要性を説いてきたが，一方では広域地下水の調査の精度の問題，地下ダムの施工の費用，周辺に及ぼす影響の問題等，あるいは初めての試みであって，過去の実例がないということで関係機関の協力が得られなかったことなど

の障害に遭遇した．しかし一昨年，著者（松尾）の指導のもとに小規模ながら長崎県野母崎町の樺島（かばしま）において地下ダム（第一号）が施工されたのである．施工後の効果に関する観測等については，経費などの制約があって必ずしも十分に行われていはいないが，毎夏ごとの水ききんが解消されたという現地からの報告を受けている．

（2） 地下ダムの意味

昭和50年1月26日の日本経済新聞には，「国土庁は，地下水は公水との基本認識のもとに地下水管理制度の確立をめざしているが，このほどその一環として建設省近畿地方建設局に地下ダム（地下水かん養）の実験……云々」と報道され[7]，また，その後も，水資源開発公団総裁が「関東平野に数個の地下ダムを検討中……云々」と語ったということが新聞などで報道された．

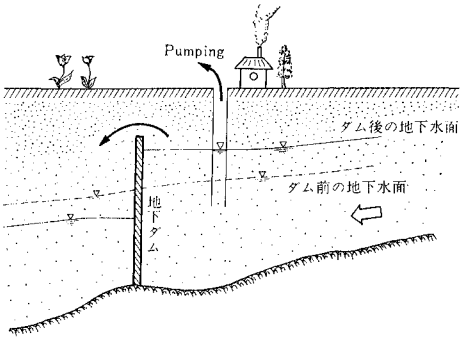
それらの真意を必ずしも熟知してはいないが，しばしば耳にする地下ダムは，地下滞水層への水の注入のみを意味しているもののようにも受け取られているようである．なるほど，地盤はそのままで地下水として水を貯留する機能が非常に大きいこと，あるいは盆地のように，基盤などがもともと地下ダムの機能を有しているような地下構造の地域（例えば奈良盆地）も少なくない．しかし，地盤に水を注入してここに貯水することはあくまでも地下水かん養であって，本来の地下ダムとは考えていない．ちなみに“Dam”という語を辞書で引いてみるといずれも〈堰き止める〉である．河川の流れを堰き止めるのが河川ダムであって，貯水量が少なくなった池に水を導入するのはダムとは言わないのと同様，水の地下注入はあくまで地下水かん養と呼ぶべきである．しかし，以下に述べる地下ダムの効果をより増大させる目的で地下水かん養は補助的に考慮されなければならない重要な事項であることは確かである．河川ダムにおいて，河川の流量が少ないがために，他水系の水をこれに導入することに相当すると考えられる．

地下ダム（地中ダム）の意味として，筆者らは文献3)の中で次のように述べている．「地下水流の存在する滞水層中に不透水性の壁，あるいはそれに準ずるものをつくり，その上流側と下流側で水位の差を生じさせ，上流側で地下水が貯留されるものを地下ダムと呼ぶ」．さらに，「地下水の無効放流を防ぎ，水需要の少ない時期にこれを地下貯留し，意欲的な地下水利用を図る．また，地下水が高すぎること，低すぎることによる弊害を除去するため，あるいは河川，湖沼などの地表水と連結している地下水が，地表水の水面変動から有害な影響を受けるのを防ぐために地下ダムを設ける」．

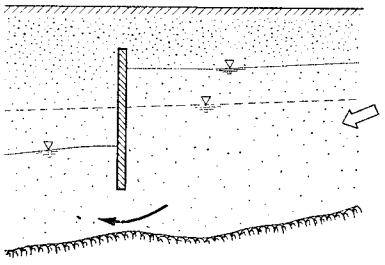
図—1 は地下ダムの概念図であり，上流側で地下貯留が行われ，下流側では水位が低下し，土地の乾燥化が現われる．図—2 は地下ダムが地下水流を完全に止水せずとも，その効果を発揮しうる模式図である．

地下水流は地表水流に比較してきわめて緩慢である．すなわち，河道貯留に比べて地下滞水層中の貯留の効率が高いことはいうまでもない．したがって，降雨時の河川のように急激な増水によって短時間に海洋へ流出するというような無効放流は少ない．しかし，地域によって時期による地下水位の差が大きい事実は，地下水流量が時期によって増減していることを意味しており，特に海岸近傍地域では無効に放流されている地下水流のあることが理解できよう．ここに，地下ダムによる地下水流の堰き止め，地下貯留の意義が存在する．それは，日本におけるように地形（滞水層）が比較的急傾斜をなし，地下水流が存在するところにこそ効果があり，その地域の特性，特に滞水層，地下水流の状態と密接な関係を有していることが強調されなければならない．

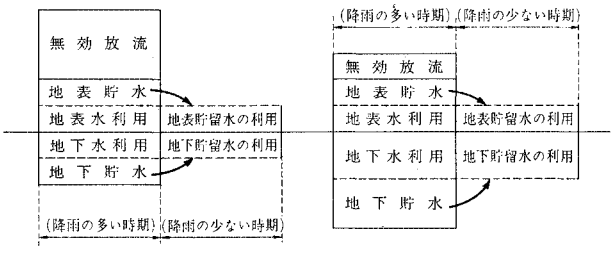
図—3 は，それら地下ダムが無い場合と，地下ダムに



図—1 地下ダムの概念図



図—2 不完全止水でも地下ダムの効果が現われる



（1）地下ダム前の水利用　　（2）地下ダム後の水利用

図—3 地下ダム構築前と構築後の水利用の比較

よるコントロールがなされた場合との水利用の効率の差を模式的に示したものである．

（3） 地下ダムの特徴

筆者らがこれまで実施してきた研究・調査などから，地下ダムの特徴を河川ダムのそれと比較して考察してみると次のようである[3]．

① 河川ダムでは比較的早く一定水面形に達するのに対して，地下ダムにおいては，特に自由地下水帯では時間的遅れが大きい．したがって，地下ダムによる地下水貯留はダムサイトで満水し，越流してからも長時間にわたって上流での地下貯留が行われる．

② 比較的小規模な地下ダム（ダムサイトにおける地下水位上昇量が小さい）であっても，水面の上昇は上流遠方まで及び，したがって，河川ダムのように堤高が高くなくとも比較的大きな効果を期待することができる．

③ 土中の間隙は全体積の約 1/2 であるから，貯留能力の小さい被在地下水帯を除いたとしても地下の貯留容力は莫大である．例えば，奈良盆地の調査例[8]によれば，地下ダム地点における ±5 m の利用水深の場合に地下水位変動の範囲は数 km で，数千万 m^3 に及ぶ地下水貯留が可能と推定されている．

④ 地下貯留される水の温度，水質は年間をとおしてほとんど変化することなく，良好な性質を維持できる．

⑤ 地下ダムの施工は漸次，部分的に行うことができその効果，種々の影響を確かめながら工事を進めることができる．河川ダムのように全体を一時に施工する必要がない（図—2 参照）．

⑥ 河川におけるダムのように家屋や土地の水没といった不利なことは起こらず，地表面はほとんど従前どおり利用することができる．地下水位変動による土地の乾燥・湿潤化が現われる利害も生じるが，それらについては，あらかじめ調査の必要がある．

⑦ 地下ダムの構築は，注入工法，止水板施工などにより比較的簡単に施工することができ，工事の精密さは河川ダムほどには要求されない．地震などによるダム破壊の危険性は全くない．

⑧ 水需要の少ない時期や雨期に無効放流されている地下水を有効に利用することができるほかに，地下水位調節用としての地下ダムが考えられる．また，地下水流を所定の方向に導く導水壁の役割を課することも可能である．

⑨ 地下ダムがつくられると考えられる地点は，地層（滞水層）構成が複雑で，現在の地下探査の精度も必ずしも十分でないこともあり，河川のバックウォーターの計算のような精度は現段階では望むべくもないが，これらは後に述べる広域地下水の調査のあり方などに関連して，今後鋭意研究されなければならない課題である．

⑩ 上述の広域地下水の調査精度とも関連し，また，地下水の挙動が地表水の場合に比して緩慢であるため，あるいは，水位変動や地下貯留が長期にわたるため，地下ダムを取り除く必要が生じたとき非常な困難が予想される．そのような危険性が予想される場合には〈air curtain 止水工法〉による地下水流の遮断を考えている．この工法は，簡略にいえば，一時的に地下水帯に空気を圧入し，これによって地下水流を部分的に弱める．地下ダムの効果・影響を長期観測によって判定した後に，半永久的な地下止水壁を構築する方法である．この〈air curtain 止水工法〉については，筆者らの現在の研究課題としている．

⑪ 地下ダムが有効であるかどうかについて，地層（滞水層）の状態のほかに十分な地下水補給（地下水流）の有無が重要であることは河川ダムの場合と同様である．そのために，地下水の人工かん養が必要となる地域も多く，また，それによって地下ダムの効果をより大きくすることができよう．その人工かん養についてはここでは詳しくは触れないが，井戸による水の地下圧入，地下水かん養のための貯水池（オランダなどで多用されている）などが考えられているが，わが国の特性（土地が狭いこと，層が水平方向に堆積しているため鉛直方向の透水性が小さいことなど）を考慮して，射出水などによる鉛直透水柱造成による地下水かん養の強化の方法についても研究がなされている[9]．

2．広域地下水調査と地下ダム

地下ダムの構想が実現へ移されることに関して，広域地下水の調査方法およびその精度と深い関連があることはいうまでもない．

最近になって研究論文や単行本[10]の中にも「広域地下水」という用語がしばしば使われるようになって特異な感じはなくなったと思われるが，それが使われるようになったのはここ十数年であるように思われる．その用語はともかくとして，東京や大阪の地盤沈下が問題となり，その原因が地下水の過剰くみ上げであると指摘されて[11]，このような広域にわたる地下水の調査・研究の必要性が広く認められるようになったことは否定できない．しかし，その後もしばらくは圧密現象と地下水位に注目が集まり，広域地下水が研究テーマとして深い関心を集めるようになったのは，用水不足の問題が報じられるようになった昭和年代後半であろうと記憶している．いみじくも，ときを同じくして電子計算機が普及し，地下水の数値シミュレーションができるようになって，その定量的な考察がある程度可能になったといえるであろ

う．筆者らも，琵琶湖総合開発計画に伴う琵琶湖水面の利用水深の増大とそれに伴う周辺地の地下水位変動[12]を研究対象として取りあげたころから本格的に広域地下水調査に興味を持った．広域地下水の定義は，個人差はあると思われるが，筆者らは「地下水をかん養，流動（変動），流出（揚水）という循環過程でとらえる，あるいはそれに準ずる取扱いをする場合にこれを広域地下水と呼ぶ」と解釈している．

その取扱いの難しさは，なんといっても土質，地質（滞水層）の構成の複雑さ以上であろう．ボーリングによって滞水層の位置を確かめ，その連続性を想定して図面上に線を引いてみても，広域地下水の性状を把握するという点では，精度上きわめて貧弱で，信頼性の低いものであるといわざるを得ない．物理的・電気的地下探査法によって地層の連続性を探査するのも有力な補助手段である．しかし，現段階では地下水そのものの挙動（例えば地下水位の分布，変動）を調査して，そのデータを解析して滞水層の性状を推測し，その結果，得られた諸値を境界条件として新たな地下水挙動を算定（推定）するという方法が，地下水そのものに焦点を合わせたときにはより確かなものとなるであろう．筆者らが解析方法として用いている「準深」（等価透水層厚さ）もこうした考え方に基づいたものであり，水収支研究グループ（文献11)）の地下水シミュレーションの考え方も同様であると考えられる．したがって，高価なボーリングも結構ではあるが，地下水位変動の観測はそれ以上に貴重な資料となりうることを忘れてはならない．例えば，地下水に関しては日本以上に深刻であるオランダにおいては，全国的な地下水位観測網をめぐらして，地下水位や塩分濃度を定期的に観測しているのは参考になろう．

表面水（地下水に対して）は，慣行水利権の問題もあるが，次第に公共の資源としての位置づけが進んできた．しかし，地下水についてはいまだ明確ではない．特定の地域については「工業用水法」，「建築用地下水の採取の規制に関する法律」，あるいは地方の条例などに規定されているといはいえ，それ以外の地域では基本的には土地の所有権は地下水にも及ぶことが民法に定められている．いうまでもなく地下水は流動しており，公共的なものであるはずである．先般「地下水保全法案（仮）」が流産に終わったが，その原因の一つに広域地下水の難しさ，不明確さをあげることができよう．しかし，近い将来，地下水が公共の資源として位置づけされることは確かであろうし，また，そうなければならないと考えられる．そのためにも広域地下水の調査・研究の重要性について強調しすぎることはないであろう．その結果，地下ダムの有効性が一段と明確になるものと予想される．

ここで，広域地下水調査の一例として，地下ダムによる水収支に関する F.E.M. シミュレーションの一部を示すことにしよう．

3. 地下ダムの検討例

これまで，筆者らは，奈良盆地，京都府乙訓郡，静岡県三島市，その他いくつかの地域で地下ダムのための調査を実施してきたが，ここでは，沖縄県の宮古島で実施した調査[13]の概要を紹介したいと思う．

図—4 は宮古島の平面図であるが，同図中の **ABCD** 領域が地下ダムを含めた広域地下水調査の対象領域である．紙数の関係もあるので，そのうちの主要部分を箇条書きにすると以下のとおりである．

① **AB** は海岸線であるがここに地下ダムを想定する．

② **AD**, **BC** は断層によって地下嶺線となっていることが判明しているので，地下分水嶺とする．

③ 地質構成は不透水性基盤岩（島尻層群）の上に多孔質透水性の宮古島石灰岩がある．

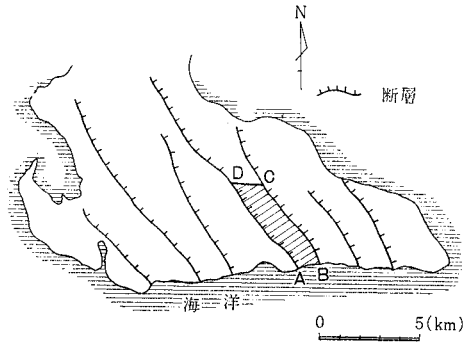
④ 平均降雨量は 2 300 mm/year で，そのうちの約 1/3 が地下水かん養に寄与していると推定されている．したがって，平地での地下水かん養量は一様に 2.5 mm /day とする．

⑤ 貯留係数（S）は，対象領域の地下水が主として不圧地下水であることから，$S=0.1$ とする．

透水性については，現在の地下水位分布を解析して，透水量係数[a] $T=3\,000,\ 1\,500,\ 200,\ 50\ \mathrm{m^2/day}$ の4種類の区分から成り立っているものとする．

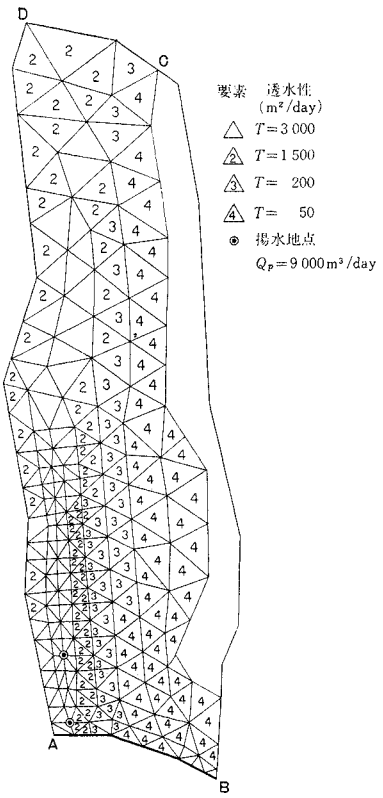
⑥ **図—5** は対象領域を三角形有限要素に区分したものである．同図中の⊙印の2地点は地下水揚水地点であり，両地点で各 $9\,000\ \mathrm{m^3/day}$ の揚水を行うものとする．

⑦ 有限要素法を用いて地下ダムが無い場合の地下水面の1年間の変動状態を示したものが**図—6**である．全体的に地下水面が低下し，かつ海岸近傍で海水の内陸浸

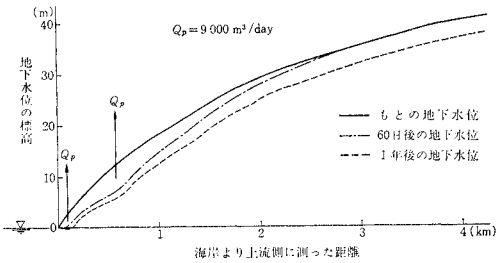


図—4 宮古島の南部平面図

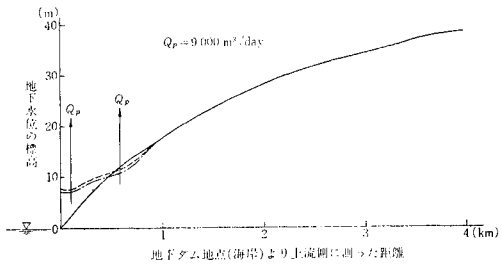
a) 透水量係数とは，透水係数に地層の厚さをかけたものをいう．



図—5　有限要素シミュレーション



図—6　地下ダムが無い場合の地下水位の変化



図—7　地下ダムが有る場合の地下水位の変化

入の危険があることを予測することができよう．

⑧　地下ダムを海岸線（図—4 の AB，図—6 の 0 地点）につくった場合の地下水面の 1 年間の変動の状態を示したものが図—7 である．もちろん図—6，7 ともに揚水量は 9 000 m³/day×2=18 000 m³/day である．

⑨　地下ダムが無い場合（図—6）と有る場合（図—7）の地下水位の年間変動をみると，地下ダムの効果は明白である．すなわち，地下ダムが無い場合には，日時の経過とともに領域内の地下水位低下が進行するのに対して，地下ダムの構築によって地下水位の低下を防止できる．言い換えると，地下水の無効放流を無くして，年間平均してより多くの地下水の揚水が可能であることを実証している．

5．用水問題と地下ダムの展望

構想や工法の実現に対する評価は絶対的なものではなく，社会の要請なり周囲の種々の状況によって変わりうるものであることは，いうまでもなかろう．

地下ダムの構想についても，可知による地下ダムの提案は，広域地下水の定量的評価という点での学術的レベルが低かった戦前ということもあろうが，やはり用水不足という問題が現在ほど深刻でなかったということにからんで，関係者らの注目を集め得なかったがためにその後の展開が断ち切られていたといえるであろう．それでは，現在の地下水利用の現状はどのようであろうか．

わが国における用水の概算量は昭和 47 年の資料で 960 億 m³/年 といわれているが，そのうちの約 750 億 m³/年 が淡水である[14]．また，地下水開発量は約 130 億 m³/年 で，これは総淡水用水量の 17% を占めていることになる．その用途別内訳は，工業用水が約半分，農業用，上下水道用などが各 1/4 という割合になっている．

一方，わが国の総面積 36 万 km² の 20% が平地として，それは約 7 万 km² である．ここにおける地下水の賦存量を概算するために，滞水層の平均厚さを仮に 200 m としても（間隙率を 0.5 として）7 万億 m³ の地下水量となる．それは現在利用されている地下水の実に 500 倍以上である．日本の年間の総降雨量が約 6 000 億 t であるから，実に 12 年間分をも貯留しうることになる．もちろん，それらをすべて利用できるわけではないが，地下に貯留されている水量，地下の貯留容量がいかに莫大であるかをうかがい知ることができよう．地下水の過剰揚水によって地盤沈下などの災害をこうむってはいるが，“さわらぬ神にたたりなし” 的でなく，技術的にそれらを克服する努力を惜しまず，地下貯留容量の大きさに注目し，その合理的利用を図る価値は十分あるといえよう．

さて，筆者らが地下ダム構想を発表した昭和 30 年代の後半から用水問題が緊急を要する重要課題として社会問題化し，河川ダムもある程度見直され積極的な河川ダ

ム開発が進められてきてはいるが，それにもおのずと限度があろう．上述したように，地下ダムの構想を研究テーマとして取り上げたころから，学術的には電子計算機の普及によって数値モデルによる広域地下水のシミュレーションが可能となり，その研究が進められ，ある程度定量的な推定が可能となってきた．これらの傾向，すなわち用水需要の増大と用水確保の難しさ，一方では広域地下水の研究の進展，それらによって技術的な問題はもちろん，経費的な観点（採算面）からの地下ダムの実現に対する制約も次第に取り除かれるものと考えられる．

水資源はすでに無限のものではないことは周知の事実として広く認識されているところである．その限られた資源をより有効に利用してゆかなければならない現実の問題（日本の宿命）として，地下ダムの構想が近い将来においていくつかの適地が選定され，実現されるであろうことが期待される．

参考文献

1) 松尾新一郎・河野伊一郎：地中ダム化による地下水規制，土木学会関西支部年次講演集．pp. 105～106, 1964 年．
2) 松尾新一郎：タイ国における地下水開発の構想とそれに伴なう土質改良について，東南アジア研究．Vol. 3, No. 2, pp. 56～57, 1965 年．
3) 例えば，松尾新一郎・河野伊一郎：地下水規制のための地中ダムの構想，土木学会誌，Vol. 53, No. 3, pp. 9～13, 1968 年．
4) 松尾新一郎・河野伊一郎：細管網モデルによる地中ダム化の実験，第 22 回土木学会年次学術講演会，pp. 80-1～4, 1967 年．
5) 松尾新一郎編：奈良市域における地下水開発に関する研究，奈良市報告書，1969 年．
6) 可知貫一：地下水強化と農業水利，地人書館，p. 214, 1943 年．
7) 水利科学：水ニュース，No. 103, p. 120, 1975 年．
8) 松尾新一郎・河野伊一郎：地中ダム化と水収支，第 21 回土木学会年次学術講演集，pp. 24-1～3, 1966 年．
9) 例えば，松尾新一郎・河野伊一郎・木暮敬二：地下水開発の構想とそれに伴う土質改良，土木施工，Vol. 11, No. 2, pp. 43～51, 1969 年．
10) 例えば，水収支研究グループ：地下水資源学，共立出版，1973 年．
11) 広野卓蔵・和達清夫：西大阪の地盤沈下について（第 1～第 3 報），災研報告，2, 3, 6 号．
12) びわ湖総合開発協議会：びわ湖周辺地帯の土質，地質，地下水の性状に関する研究，近畿地建，1962 年．
13) 井波久治：平面 2 次元地下水の水位変動の解析に関する研究，京都大学大学院工学研究科修士論文，1976 年．
14) 土木学会：土木工学ハンドブック，技報堂，p. 2677, 1974 年．
15) Matsuo, S.: Underground Dam, International Symposium on Hydrology in Tokyo, 1975.

（1976.7.1・受付）

建設材料学

樋口芳朗著（東大教授） A5・2100円

本書は主要な建設材料について「なじみ」を覚えるとともに，建設材料全般についての要を得た知識が修得できるよう平易に書かれたもので，特に建設技術者として念頭においておくべき重要な要点を成功例，失敗例を示し具体的に解説。これから建設工学を学ぼうとする方々の教科書または実務に携わる技術者の参考書

新版 土木材料実験

編集委員会編 委員長 国分正胤（武蔵工大教授） A5・9月末刊

セメント，骨材，コンクリートの配合，強度，木材，アスファルトなど土木材料の実験項目のすべてを網羅。試験方法は操作の順を追って詳細に解説し，重要な参考資料ももれなく収録。今回，JISの改訂に伴い大幅に補足改訂を施した最新決定版

コンクリート工学演習 全改訂新版

村田二郎監修（都立大教授） A5・2500円

コンクリート工学の全部門にわたり，五技択一の問題形式によって詳細な解説と解答を付した**コンクリート技士・主任技士受験者の参考書**。土木・建築両学会の基準改訂に伴い全面的に補足改訂を加えた新版。45－48年度精選問題と解答。49－50年度全問題つき

《好評発売中》

廃水処理プロセス

W.W.エッケンフェルダー著
松井三郎監訳 A5・2500円

水処理工学

井出哲夫編著 A5・7500円

図解土木講座

アスファルト混合物の知識 〈新刊〉

小谷 昇他著 B5・2300円

鋼構造（Ⅰ） 〈新刊〉

三宅政光/森野安信著 B5・2100円

技報堂出版
東京都港区赤坂1-11-41
（電）585－0166