

# ウォーターカーテンによる地下水位制御

赤井 浩 一\*

写真-1 実験用水槽

## 1. まえがき

水路からの浸透水を地盤へ流入せしめることによって地下水位を一定の高さに保持しようとする試みは決して目新しいものではないと思われる。しかし、このようないわゆるクリーク工法に関する従来の理論的ならびに実験的研究は、ほとんどすべて地下水位が水平な場合を対象としているのに対し、現実の地下水はある一定の勾配をもって山地から河川・湖沼・海岸へと流れている。したがって、このような伏流水の存在がクリーク工法の効果におよぼす影響を調べる必要がある。

この報告は室内の浸透実験において、伏流水に対応するものとして、山側から一定流量を流して地下水面を作り、さらに模型クリークより注水した場合に現われるウォーターカーテン (water-curtain) の形成機構を述べ、琵琶湖岸で行なわれた大規模なクリーク工法に関する現地実験によって実際への適用の可能性を検討するものである。

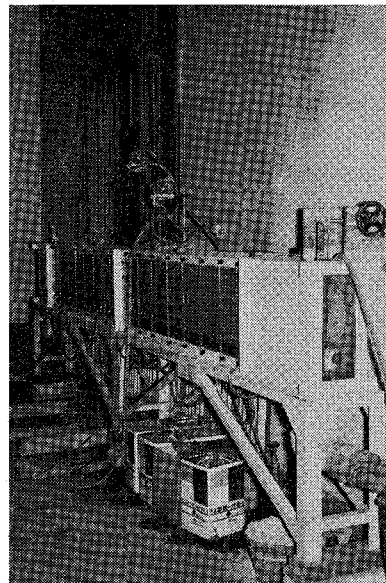
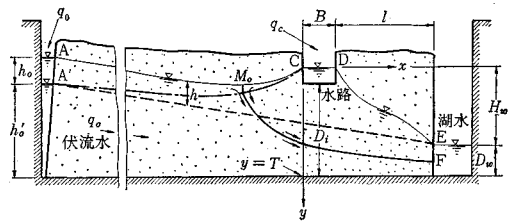


図-1 実験用砂模型地下水の流れ系

## 2. 実験装置と方法

実験装置の本体は写真-1に示すような鋼製水槽であって、長さ 400 cm、幅 25 cm、高さ 50 cm の寸法を有し、前面 300 cm の部分はガラス張りになっている<sup>1)</sup>。この中に長さ 315 cm、幅 23 cm、高さ 40 cm の長方形砂模型を作成してこれを地盤とみなした。地盤表面に設けた模型水路の大きさは 5 cm × 10 cm × 23 cm で、鉛直方向に長い形とした。

実験に用いた砂は有効径 0.13 mm、均等係数 1.78、乾燥密度 1.56 g/cm<sup>3</sup>、間げき比 0.69、透水係数 2.38 × 10<sup>-2</sup> cm/sec の豊浦標準砂である。なお、実験装置下流端の水槽部の水位は任意に変化させることができ、上流端部ではブリキ板で支えた薄い溝が掘られている。そし



て伏流水とみなされる供給水をこの溝に注入した (図-1 参照)。浸透水の自由水面と各点での速度ポテンシャルを測定するために、鋼製水槽の底面と裏側面にはごく密な間隔で水圧観測用の細孔を明け、水圧計に連結するビニール管がとり付けられるように作られている。

実験の方法としては、模型水路および下流端境界の水位を所定の位置にし、上流側から一定流量の注水を行なって定常状態になったときピエゾメーターで水位をよみとる。定常状態とはピエゾメーターの水位が時間的に変

\* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科

化しなくなった状態とした。つぎに水路より注水を行ない、各時刻ごとの水位変化および定常状態での水面形を測定した。また流量はビュレットからの注入水をメスシリンダーに受けて求めた。

### 3. ウォーターカーテンの形成

流量  $q_0$  の地下水流（伏流水）のある滞水層へ、ある地点で水路から流量  $q_c$  の浸透水を注ぐときの流れ系（図-1 参照）では、両者の境界  $M_0F$  は上流自由水面と接続する一つの流線である。この境界を横切る流れはなく、両者はあたかも一種の水膜で境されているようにみえる。この意味でこの境界はウォーターカーテンとよばれる。

伏流水の流量  $q_0$  と水路からの流量  $q_c$  の大小関係により上述の境界は移動し、両者の勢力の平衡でその最終位置が決まる。図-2 において当初の単位奥行きあたり  $q_0 = 1.39 \text{ cm}^3/\text{min}/\text{cm}$  の流量による水面形が最下部の線であり、これが図-1 の当初の地下水面  $A'E$  に対応している。流量  $q_c = 4.35 \text{ cm}^3/\text{min}/\text{cm}$  を水路から浸透させると、自由水面は時間的に上昇を始める。この図の場合に

図-2 水路からの浸透による地下水面の上昇

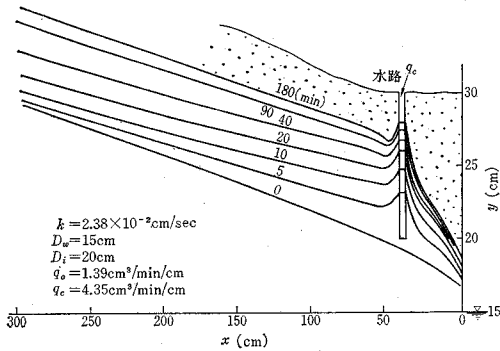
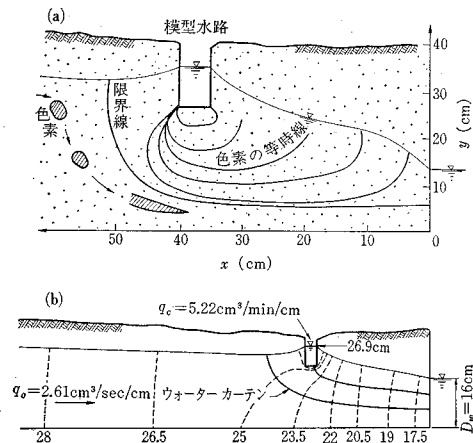


図-3 ウォーターカーテンの発達過程と平衡状態における流線網



は、浸透開始後約3時間ではほぼ定常状態となる。このときの水の流動を色素の動きから観察すると、図-3 (a) のようにウォーターカーテンの拡大が認められ、これを境として上流からの水流と水路からの浸透流とが分離されることがわかる。すなわち、上流からの伏流水中に流した色素はウォーターカーテンで境される境界線の下にもぐり、この部分で速度が大きくなることを見出された。なお平衡状態における流線網は図-3 (b) のようである。

結局、伏流のある場合の水路への注水による地下水位の上昇は、水路からの浸透水がウォーターカーテンを作り、これが止水板の役割を果たして上流からの水をせき上げるという機構によって行っている。そして、水路への注水量  $q_c$  の大小によりウォーターカーテンの勢力圏に大小のあることが確かめられ、またこの境界線が  $\psi = q_c$  なる流線であることも理解できる。

### 4. 地下水位の上昇に関係する諸因子<sup>2), 3)</sup>

#### (1) 地下水位上昇量 $h$ と水路への注水量 $q_c$ の関係

伏流水と水路からの浸透水からなる流れ系を解析するにあたって、前述した地下水位の上昇機構を基礎にして考えを進めるならば、まず第一に水路への注水量  $q_c$  がウォーターカーテンの勢力を決め、この勢力によって上昇量に大小の変化が生ずるのであろうから、 $h$  と  $q_c$  との間に何らかの関係があるに違いない。この両者の関係をプロットしたものが図-4 である。この図より、両者の間にはある幅をもった直線関係が存在することが認められる。この図の各点は、種々の下流端境界水位  $D_w$ 、水路底高  $D_i$  および伏流水の流量  $q_0$  について行なった実験結果を含んでいるが、 $h$  におよぼす影響因子としては他のものよりはるかに  $q_c$  の影響が大きいことが示されている。

#### (2) 地下水位上昇量 $h$ と伏流水の流量 $q_0$ の関係

図-4 地下水位上昇量と水路への注水量の関係

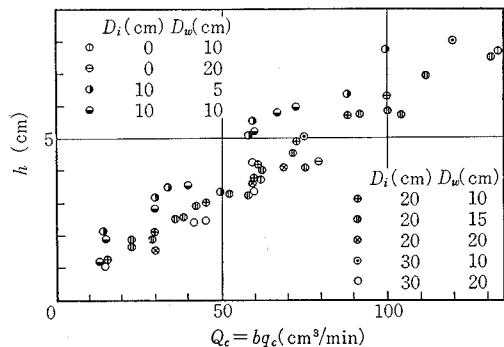


図-5 地下水位上昇量と伏流水の流量の関係

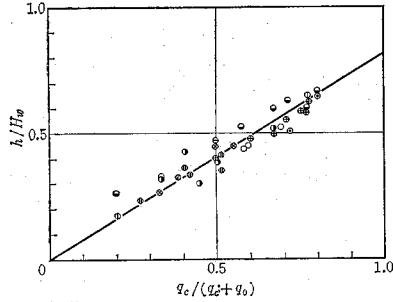


図-1 において、水路水位と下流端境界水位の差  $H_w$  はほぼ  $(q_c+q_0)$  に比例すると考えられるので、 $h/H_w$  を  $q_c/(q_c+q_0)$  に対してプロットした結果が図-5 に示されている。これは先の 図-4 よりも相関の良い直線関係であって、これより

$$\frac{h}{H_w} = 0.8 \times \frac{q_c}{q_c+q_0} \dots\dots\dots (1)$$

なる関係が成立することが知られる。

(3) その他の関係

地下水位上昇量  $h$  におよぼすその他の因子として、水路水深  $H_c$  または水路底の標高  $D_i$  や水路の形状などが考えられ、これらについても実験的に検討したが、ここに問題となっているウォーターカーテンの形成には先の水路への注水量  $q_c$  と伏流水の流量  $q_0$  が最も支配的な影響をもつことが判明した。

5. 琵琶湖沿岸でのクリーク工法の適用性の検討

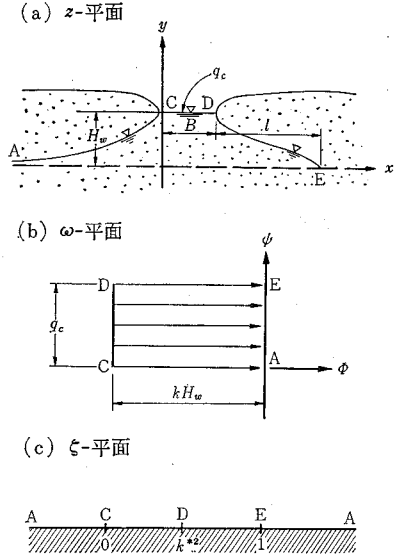
先に琵琶湖の水資源を十分活用しようとする開発計画にともなう周辺の内陸地域の地下水問題について、主に地質学的・地下水理学的考察を加えた。その結果、湖水位変動にともなう周辺地下水位の低下は、各地区での地下水流の性状や地層条件とも関連してかなりの相違がみられるが、計画最大湖面低下 3m を想定した場合、湖東では平均して湖岸から 3~5km 付近までの範囲が影響を受けること、また湖西ではその影響はせいぜい湖岸から約 2km の範囲にとどまることが予想された<sup>4)</sup>。

このような湖周辺の地下水位低下を前述したクリーク工法によって抑制し、湖水面の低下後もかなり高所に維持できるかについて検討してみよう。先の報告の表-1 に掲げた湖岸各地区での滞水層定数を用い、水路幅  $B=5m$ 、水深 3m、水路より湖岸までの距離  $l=300m$  (図-6 参照) として、P.-Kochina の式<sup>5)</sup>

$$Q = \frac{kHK}{K'} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $K$  および  $K'$  はいずれも第 1 種完全だ円積分

図-6 水路浸透による流れ系



を用いて各地区で算出した浸透流量を求めると表-1 のようになり、これが上記の寸法の水路からの浸透可能な流量である。

表-1 水路からの浸透可能な流量

地 区	地 名	透水係数 $k$ (cm/sec)	流 量 $Q$	
			(t/min/km)	(t/h/m)
野洲・日野川	牧	$1.40 \times 10^{-2}$	11.0	0.66
愛知川	柳川	$5.53 \times 10^{-2}$	43.6	2.61
犬上川	八坂	$2.92 \times 10^{-2}$	23.0	1.38
姉川	八木浜	$1.74 \times 10^{-2}$	13.7	0.83
石田川	貫川	$4.00 \times 10^{-2}$	31.5	1.89
安曇川	薬園	$3.60 \times 10^{-1}$	284	17.0

一方、前述の室内実験の結果をもとにして、低下した地下水位を回復上昇させるために必要な浸透流量を各地区で算出すると表-2 のようである<sup>6)</sup>。この表の数値から地域的なクリーク工法の適用の可能性を調べてみると、湖東の中主地区(日野川・野洲川流域)や姉川地区では他の地区に比べて水路へ注入すべき流量はきわめて少なくてよいことがわかる。これに反して湖西の安曇川地区では、表-2 の必要浸透流量が表-1 の浸透可能流量より少なく出ているが、比較的多量の注入流量が必要であって、クリーク工法による地下水位の維持は経済的にみて困難ではないかと推論される。

琵琶湖沿岸でのクリーク工法採択の可能性は、上述の室内実験と表-1, 2 の結果から一応見当がつけられた

表-2 地下水位回復のために必要な水路からの浸透流量

地 区	地 名	$k$ (m/h)	流 量 $Q$ (t/h/m)
野洲・日野川	あやめ	0.54	0.04
愛知川	柳川	2.00	0.20
犬上川	八坂	1.06	0.13
姉川	八木浜	0.63	0.04
安曇川	薬園	12.9	0.62

が、実際の現地地盤に対して果たして水路への注水による浸透が可能であるかどうか大いに关心的问题である。そこで、湖東の野洲郡中主町あやめ浜において行なわれた現地クリーク実験の結果から検討を行なうことにする。この実験は、昭和42年12月から43年3月までの期間に建設省琵琶湖工事事務所によって実施されたものである。この地点で地盤は地表より約5mまでが均質な砂層、それ以下は粘土層となり、自然地下水面は地表から1m未満にある。

実験施設の規模ならびに数量はつぎのとおりである(図-7参照)。

① 排水溝(仮想琵琶湖)

底幅3m×延長100m×深さ6m  
のり勾配 湖岸側1:1.5, 内陸側1:2

② 注水溝(クリーク)

底幅1m×延長50m×深さ3m  
のり勾配1:1.5

③ 排水・注水施設

排水ポンプ6"×4台, 注水ポンプ6"×2台  
流量計(フロート式RH型流量計)6台

④ 水位観測井

注水溝の近傍116ヵ所において地下水位の同時観測が行なわれたが、いずれも測定深度の水圧をできるだけ高感度で測定しようとして、1.5"径の管の先端部のみにストレーナーが設置されている。

クリーク実験は排水溝の水位を自然水位から3m低下させた場合、付近地盤にどのような地下水位変動が生ずるか、また注水溝から注水した場合どのような水位変動があるかを調べることを目的としている。実験はつぎの3種類について行なわれた。

① 実験(1)

排水溝水位: 自然水位から3m低下させる。  
注水溝水位: 注水しない。

② 実験(2)

排水溝水位: 自然水位から3m低下させる。水位低下速度は1m/日とする。  
注水溝水位: 自然水位を保つように注水する。

③ 実験(3)

排水溝水位: 自然水位から3m低下させる(実験(2)から継続して実験(3)に入る)。  
注水溝水位: 自然水位から50cm上昇させて、その水位を保つように注水する。水位上昇速度は50cm/3時間とする。

各実験開始後約1週間で達成された平衡水位と実験(2)に対する時間的な水位低下曲線が図-8に示されており、これによって注水溝への注水が内陸側の地下水位を上昇させている効果が明らかにみられる。また各実験段階において、ほぼ平衡状態となった水位につき中央断

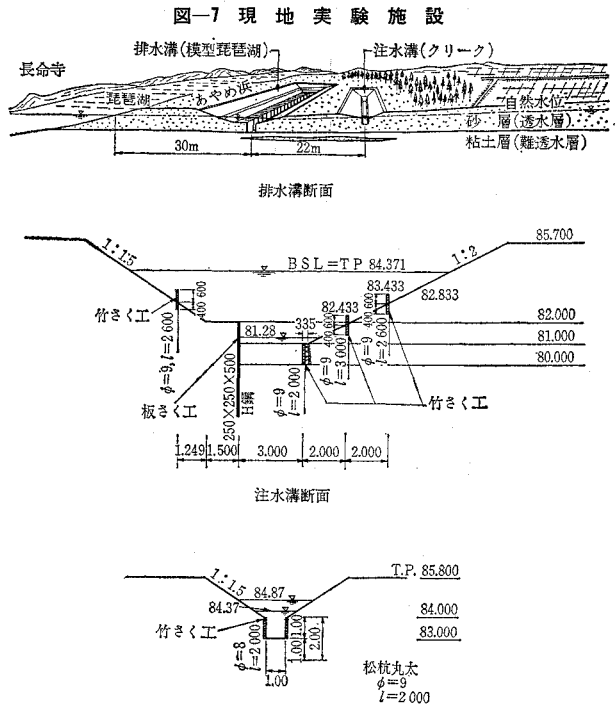
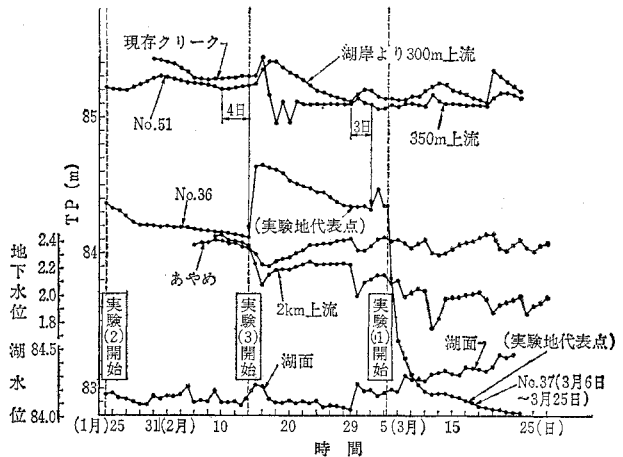


図-8 調査地水位と周辺地下水位の関係



面で流線網を作成したものが図-9である。

この図に描かれた流線網によりウォーターカーテンの形成状況を調べよう。各観測井の記録より実験(2)について平面的な流線網を作成したのが図-10であって、内陸側の最低地下水位を示す点から約10m上流で伏流水の流線は左右に曲がり、注水溝を避けて排水溝へ流入している。また図-9の断面図において、伏流水の流線は室内実験のように注水溝の下部を圧縮された断面で水が流れると考えるよりも、上述のように左右にう回して排水溝に向かうと考えるほうが妥当である。これは室内実験が純粋に二次元的な現象であったのに対し、現地の注水溝が有限長さであるための三次元的な効果である。

図-9 平衡状態における流線網 (断面図)

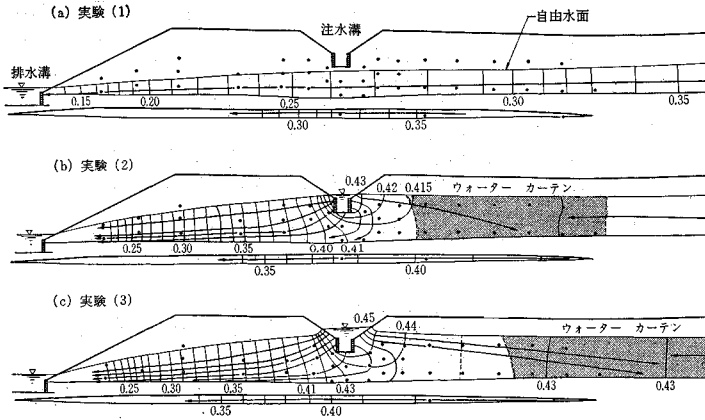
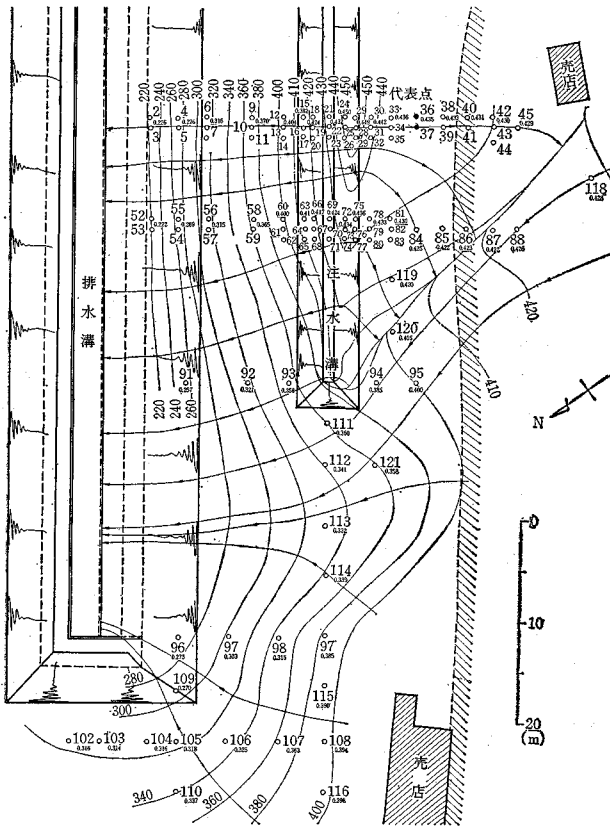


図-10 平衡状態における流線網 (平面図)



しかし、このような相違があるにせよ、注水溝前面にウォーターカーテンが形成されて内陸の地下水をせき上げていることは事実であり、しかも注水溝の水位を高く保つことによって、ウォーターカーテンの勢力を増大せしめ、地下水維持の効果を大にすることも明らかである。

一方実験中の流量については、各実験段階での排水量・注水量は平衡状態においてつぎのとおりである。

- 実験(1) 排水量 0.80 t/min  
注水量 0
- 実験(2) 排水量 0.92 t/min  
注水量 0.29 t/min
- 実験(3) 排水量 0.91 t/min  
注水量 0.31 t/min

これより排水溝の低下水位を維持させるために必要な排水量の約 1/3 の注水を注水溝に対して行なえばよいことが知られる。

なおこの現地実験において、自然地下水位の動水勾配 (4/1 000~5/1 000) と同程度の動水勾配を有する地点は排水溝より約 120 m 内陸側と推定され、

排水溝からの排水による影響範囲はほぼこの程度と考えられる。また、この実験の注水溝と同じ規模のクリークを延長 1 km 設けた場合には、実験(2)と同じ注水水位のとき 0.64 t/min、実験(3)と同じ水位のとき 0.90 t/min が必要である。先の室内実験の結果をこの地区に適用すると、必要水量は 0.04 t/h/m であるから 1 km あたり 0.67 t/min となり、今回の実験(2)の結果と非常に良く一致することが判明した。

## 6. あとがき

本文では水路からの浸透水を地盤へ流入せしめることによって地下水位を高所に保持しようとするいわゆるクリーク工法に関して、地下伏流水のある場合にはウォーターカーテンによるせき上げが最も支配的な役割をすることを明らかにした。すなわち室内模型実験によって伏流水のある滞水層へ、ある地点で水路から一定流量の浸透水を注ぐときの流れ系では、両者の境界はあたかも一種の水膜のようになり、これが止水板の役割を果たして上流からの水をせき上げるという機構を究明した。そして地下水位の上昇に関する諸因子のうち、とくに水路への注水量と伏流水の流量の効果を定量的に調べた。

このようなウォーターカーテンの形成機構が果たして現地においても実際に認められるかどうかを検証するために、琵琶湖岸の砂質地盤に対して実施された大規模なクリーク注水実験の結果を引用して論じた。それによると、現地では流れ系は三次元的となって必ずしも室内の二次元浸透実験と一致しないが、注水溝前面にはウォーターカーテンの発生が認められ、このため伏流水のせき上げ効果がみられた。なお注入すべき水路への流量を検討したところ、室内実験の結果から推定され

るものと良く一致することがわかった。

終りに室内実験に関して、岐阜大学工学部講師 宇野尚雄氏、現地実験のデータについては建設省琵琶湖工事事務所前所長（現河川局河川計画課建設専門官）稲田 裕氏、現所長 金屋敷忠儀氏はじめ開発課の諸氏、ならびに（株）応用地質調査事務所大阪事務所の所員各位に負うところが多い。付記して深甚の謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 赤井浩一・宇野尚雄：土中の準一次元非定常浸透流に関する研究，土木学会論文集 127号，昭和 41年 3月，pp.

14-22.

- 2) 赤井浩一・宇野尚雄：琵琶湖周辺地下水位維持調査報告書，近畿地方建設局琵琶湖工事事務所・財団法人防災研究協会，昭和 42年 3月，pp. 33-50.
- 3) 宇野尚雄：地下水位が浅い地盤への水路からの定常浸透における浸透量と水面形，土木学会論文集 157号，昭和 43年 9月，pp. 28-41.
- 4) 稲田 裕・赤井浩一・宇野尚雄：琵琶湖周辺の地質・地下水調査，土木学会誌 52 卷 4号，昭和 42年 4月，pp. 24-30.
- 5) Polubarinova-Kochina, P.Ya.: Theory of Groundwater Movement, Princeton Univ. Press, 1962, pp. 130-133.
- 6) 赤井浩一・宇野尚雄：琵琶湖岸土層調査報告書，近畿地方建設局琵琶湖工事事務所・財団法人防災研究協会，昭和 41年 3月，pp. 136-144. (1967.8.20・受付)

人工軽量骨材コンクリート設計施工指針（案）

内容：1章 総則／2章 軽量骨材／3章 軽量骨材コンクリートの品質／4章 軽量骨材の取扱い／5章 配合／6章 練りまぜおよび運搬／7章 コンクリート打ちおよび養生／8章 試験／9章 設計に関する一般事項  
 付録：1 骨材中に含まれる粘土塊量の試験方法／2 軽量粗骨材の浮粒率試験方法／3 構造用軽量細骨材の比重および吸水量試験方法（案）／4 構造用軽量粗骨材の比重および吸水量試験方法（案）  
 体裁：B 6判 53 ページ 定価：300 円 会員特価：250 円（〒 50）  
 申込先：土木学会 東京都新宿区四谷一丁目

<p>工学博士 宅安 勝・古川一郎・小西保則 共著  <b>橋 梁 力 学</b> (最新刊)        A 5判 420頁 上製 定価 2,500円        第二次世界大戦後、橋梁の型式・工法・設計理論などは急速に進展した。しかし、これを総合的にまとめて詳述した図書は余り見当たらない。本書は現時点におけるこの学問をできる限り詳細に展望し、さらに発展させる一助となりううように努めている。        【主要目次】基礎理論（反力条件、静定および不静定、静定・不静定の判定、変形仕事、仮想仕事の法則、マックスウェルの法則、カスチリアノの法則、ミューラー・プレスローの重心法、三連モーメントの定理、たわみ）ゲルバー橋（影響線、ゲルバー橋の影響線）連続橋（連続けた、連続合成けた、格子けた）箱げた（せん断流とせん断流中心、単純振り、曲げ振り、単純合成箱げたの応力解析、準箱げたと換算厚、連続箱げたの偏心荷重による解、設計計算例）アーチ橋（3 ヒンジアーチ、2 ヒンジアーチ、タイド・アーチ、固定アーチ、バランスド・アーチ、ランガー橋、ローゼけた橋、ラーメン橋）曲線橋（曲線けたの応力式、曲線けたの変形式）等々</p>	<p>中村 慶一 著 <b>アルゴル・プロ</b> A5 200頁        グラミング入門 価 800円        W・リイ 著 <b>技術者の夢</b> B6 240頁        猪瀬 寧雄 訳 価 480円        大地 羊三 著 <b>変形法による</b> A5 150頁  <b>構造解析</b> 価 650円        小貫 義男 著 新編 <b>土木地質</b> A5 464頁        価 1,500円        本間 仁 監修 <b>水工学便覧</b> B5 1,250頁        沼知福三郎 修 価 10,000円        成瀬・本間 監修 <b>土木設計データ</b> B5 800頁        谷藤 修 ブック 価 4,500円        成瀬・谷藤 監修 <b>土木施工データ</b> B5 1,100頁        沼田・種谷 修 ブック 価 6,000円        尾崎 幸男 著 <b>写真測量概説</b> A5 240頁        価 1,000円        長田 正夫 著 <b>基準点測量</b> A5 208頁        価 800円        — 平均法と点検・検査 —        ◎ 他に関係図書多数 目録呈 ◎  <b>森北出版 K. K.</b>        101 東京都千代田区神田小川町 3-10        振替東京34757 電話 東京(292)2601</p>
--	---