

地下水管理に関する一考察

Groundwater Management Strategy

建設省 河 川 局 正員 梅 本 良 平
建設省 土 木 研 究 所 正員 吉 野 文 雄
建設省 土 木 研 究 所 正員 寺 川 陽
(財)国土開発技術研究センター 正員 鈴 木 茂 昭

1. はじめに

地下水は、従来よりその安定性、水質の清浄性、経済性のゆえに貴重な水資源として利用されてきており、現在わが国では年間 140 億 m³が各種の用途に利用されている。しかし、地下水の過剰な揚水によって地下水位の低下や地盤沈下及び地下水の塩水化等の地下水障害が発生している地域も多いことから、地下水の有限性が叫ばれるとともに、適正な利用のための管理計画が求められている。

元来、地下水は自然の水循環の中の一形態であり、地下水管理は水資源管理の一部として、地下水を国民共有の資産とする基本理念のもとに、地下水利用を秩序づけることにある。Pacenkらは、管理のニーズを「現在及び将来において資源に対する過剰な負荷がかからないように保護するためのステップを進める必要性」と定義づけ、ニューヨーク州における地下水管理のニーズを表現する14の因子を表1のように定義している。¹⁾

表1 地下水管理の必要性をあらわす因子

(文献1)より引用)

分 類	副 分 類	因 子	評 価 項 目
水資源の需要	人間の需要	1. 飲料水	年間利用量のトータル及単位面積あたりの利用量。
	人間の需要	2. 飲料水以外	同上。灌漑用水、工業用水等生活以外の水利用を除く。
	自然システムの需要	3. 生態系の維持	表流水との伏設—環元関係、特に湿地や沿岸地域について。
水資源の容量	水 量	4. 最大揚水可能量による制約	自然条件のもとでの涵養量、地下水頭の低下に伴う地表部からの強制涵養を含む。
	水 質	5. 水質浄化能力の限界	生物活動、化学、滞留時間。
	水 質	6. 水文地質的な汚染防止の限界	難透水層の存在による浸透の抑制、地表から帯水層までの距離等。
負 荷	水 量	7. 土地利用に起因する揚水可能量の減少	揚水した水の消費的利用、地表面の舗装等による涵養量の減少。
	水 量	8. 地下水採取の程度	地下水位の低下、塩水侵入、地表水の枯渇。
	水 質	9. 土地利用活動による涵養水の水質悪化	点源及面源からの単位面積あたり汚濁負荷量。
	水 質	10. 地下水水質の悪化	汚染物質の種類、汚染範囲、程度及び汚染源制御ののちに水質が回復するのに要する時間。
地域的な管理施策		11. 未開発の地下水資源を保全する必要性	かなりの容量の清浄な地下水の存在
		12. 代替水の供給可能量	地域的な表流水開発、導水、浄水のポテンシャル。
		13. 揚水—配水システムの非弾力性	揚水ネットワークの中央集中化及相互連続性の程度(多くの揚水センターを連結した集中管理システムは、個々の独立した井戸によるものと比べ、供給の安定性が高い)
		14. 地域的な管理、財政面での制約	一般大衆及行政機関の知識並びに外部の援助なしに問題を解決する能力。

1980年 1 月30日から31日にかけて、アラバマ州バーミングハムで、米国東南部諸州の地下水管理に関する会議が開催

された。参加者は、連邦政府及州政府の行政担当者、さく井会社の代表、コンサルタントエンジニア、州の水資源研究所の代表、学識経験者等広範にわたった。D.H.Howells 等は、これを総括した報文²⁾の中で、地下水行政に関する将来の提言として次の10項目をあげている。

- ①地表水の問題への取り組みとバランスを保つために州レベルでの地下水行政を強化すること。
- ②地下水と地表水との連結利用を促進すること。
- ③既存の地下水データの有効利用のために、データシステムの自動化を図ること。
- ④工学、地質学に関する大学のカリキュラムの中で、地下水水文学、井戸水理等の十分な教育を行うこと。
- ⑤地下水水文学、井戸水理等に関する最新の技術を付与できるような、継続的な教育の機会を整備すること。
- ⑥州レベルでの総合的な地下水管理計画を立案し施行すること。その際、汚染物質に特に注意を払うこと。
- ⑦州政府は、地域的な揚水過剰問題の解決に協力し、被害を予防する計画・管理に力点を置くこと。
- ⑧適正な井戸の施工、揚水、排水の地下注入量、報告の義務づけ等に関する規制策を立案・施行すること（既に施行されているところでは強化を図る）
- ⑨帯水層システムの水文地質、地表水—地下水の水量水質面での関連、帯水層の流量と涵養量、地下水管理のための実用的な数値シミュレーションモデル、排水の浸透処理の影響—特に汚染物質の挙動等についての調査・研究を促進すること。
- ⑩井戸の配置、設計、施工、操作について技術の向上を図ること。

会議は、アラバマ、フロリダ、ジョージア、ミシシッピ、ノースカロライナ、サウスカロライナ、テネシー、バージニアの各州を対象としたものだが、以上の提言は、他地域についてもあてはまる一般的なものと考えてよいと思われる。

わが国でも、科学技術庁資源調査会は、昭和49年10月に、資源調査会報告第69号「地下水の保全・使用に関する調査報告」を公表し、この中で

- ①地下水の合理的使用にあたっては、地下水域毎に、国及び地方公共団体による総合的な管理を行うこと。
- ②地下水を管理するために、地下水の状態・変動・使用可能量・涵養等に関し、十分な科学的評価を行うこと。
- ③地下水の使用を規制する場合の代替水源については十分な配慮を行うこと。
- ④地下水に公水的性格を与える方向で、その保全・使用のための総合的な地下水法制を整備すること。

の4項目を指摘している。次いで今年の7月には、資源調査会報告第90号「地下水の保全・使用に関する第2次調査報告書」³⁾の中で、今後の施策として

- ①地下水管理技術の研究の促進
- ②地下水の保全・使用のための地下水涵養等技術の研究開発の促進
- ③災害時非常用地下水の取水設備の計画的整備及び管理の強化のための検討
- ④帯水層の熱的利用に関する研究の促進及び指導指針の作成
- ⑤地下水保全・使用のための管理体制及び組織の拡充強化

等の諸点をあげている。

今後こうした答申に沿った調査研究や事業の推進が期待されるところであるが、諸外国においては、すでに地下水法の形で地下水の管理を明確に打ち出しているところもある。本稿ではまず、海外における2,3の地下水管理事例を紹介し、続いて今後わが国で地下水管理を行っていく場合のプロセスを考えてみたい。

2. 海外における地下水管理事例

(2-1) アリゾナ州における地下水管理⁴⁾

アリゾナ州は乾燥地域にあり、従来より地下水が重要な水資源であった。地下水資源の開発はSalt River Valley及びSanta Cruz Basinにおいて20C初頭より行われ、利用量は以来1930、40年代を通じて増加の一途をたどり、1950年代後半には年間60億 m^3 にも達した。その後灌漑面積の減少によって横ばいないし若干減少の傾向が見られたも

の、自然涵養量を大幅に上回る揚水が続けられた結果、地下水位は大きく低下した。図1はSanta Cruz Basinにおける経年的な地下水位低下を示す。地下水利用地域の大部分で1923年から1972年までの50年間で60m以上の低下が見られ、著しいところでは100 m以上に達したところもある。

年間揚水量の約半分、30億 m^3 が過剰揚水量だとみられるが、これを削減するために考えられたのが、代替水源としてコロラド川の水を年間10億 m^3 （平均的に取水するとして31.7 m^3/s ）導水する、中央アリゾナプロジェクトである。このプロジェクトの完成時においても地下水の管理が必要であることにはかわりはなく、1980年に制定された地下水法では、地下水揚水量を制約し、制御するのみならず、2025年を目標に安全揚水量以内に削減することをうたっている。

地下水法では、図2に示すように、州内に、積極的な地下水管理をはかる4つの区域（AMA区）と、灌漑農地の拡大を抑制する2つの区域（INA区）とを設けた。前者すなわちAMA区域では、地下水水利権を有する者のみが揚水できることになっており、又1975年1月1日から1980年1月1日の間に実際に灌漑が行われた農地以外では灌漑が禁止されている。水利権は、他人に譲渡することが可能だが、あくまで土地に付随した権利であるとされている。農地以外の目的に土地を転用する場合には、水利権は3600 $\text{m}^3/\text{エーカー}/\text{年}$ に固定される。（注；1エーカーは約4047 m^2 ）

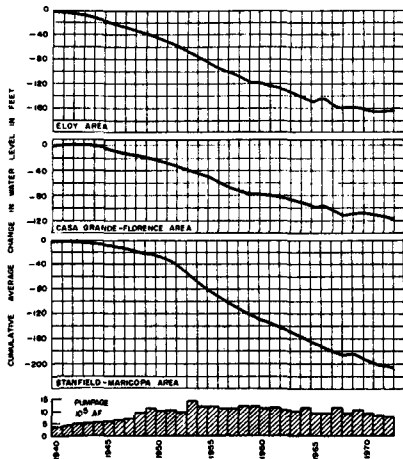


図1 Santa Cruz Basinにおける累加地下水位低下量 (feet)〔下段の棒グラフは推定年揚水量(10 acre-feet)〕(文献3)より引用)

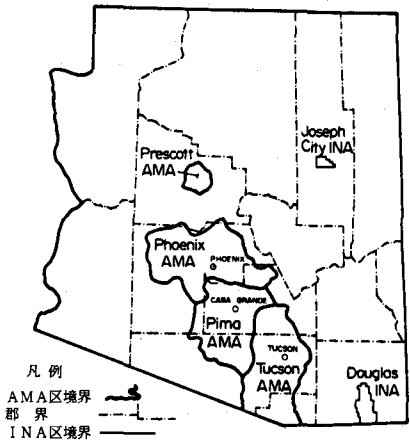


図2 アリゾナ州におけるAMA地区及びINA地区の設定（文献3）より引用）

一方INA区域では、揚水量を制限するため、灌漑農地の拡大は禁止されているが、灌漑以外の目的の利用者はその利用が合理的である範囲内において規制の対象としていない点がAMA区域と異なる。

これら以外の区域では、新規の灌漑、工業用水、生活用水のための地下水開発に対する法的規制はかけられていない。又、AMA区域、INA区域ともに、揚水能力が毎分130 ℓ 以下の家庭用井戸は規制の対象にされていない。

地下水の管理は、従来からあったアリゾナ州水協議会に地下水管理部門を加えてできたアリゾナ州水資源局が担当することになっている。すべての地下水利用者は、規制の対象からはずされているものを除き、①井戸に揚水量計測装置を設置すること、②年揚水量を報告すること、③最高限度5ドル/エーカーの地下水利用税を支払うこと、の3点を義務づけられており、利用税の使途としては、1ドル相当分を管理機関の維持費、2ドル相当分を地下水人工涵養等流域水有効利用のためのコストとして、残り2ドル相当分を、農地の買収及水利権処分に割りあてることになっている。

地下水法は、AMA区域内における積極的な地下水管理をうたっているものの、同時に水資源局の権限及び施策の範囲（限界）を以下のように規定している。

- ①既存の地下水利用者に対し、地下水水利権を付与する。ただし、州の経済状況の変化に伴う新規利用者への権利の譲渡や、揚水量が過剰にならない限りにおいての新規水利権の付与を許すことができる。
- ②農業用、工業用、生活用を問わず、すべての地下水利用者に対し、一連の管理計画に規定される厳しい節約策を講じることを義務づける。具体的には、灌漑面積1エーカーあたり、生産物1単位あたり、人口1人あたり、という具合に利用量原単位を定め、年次計画に応じてこれを減らしていくこととする。
- ③灌漑農地とそれに付随する地下水水利権を、管理機関が購入し処分することができる規定を設けた。(場合によっては最も効果的な地下水揚水量削減策と考えられるが、今世紀末にかけて農地の都市化が進むことが予想されるため、こうした方策は2006年以降にはじめて導入することになっている。)
- ④地下水人工涵養プロジェクトを含む流域水の有効利用を促進することを規定した。これには、洪水の貯留利用、排水の再利用、流域管理、気象改変等も含まれている。これらに必要なコストは、地下水利用税によってまかなうこととする。

(2-2) 西ドイツにおける地下水の水質管理⁵⁾

西ドイツにおいては、飲料水の70%以上を地下水に依存している。そのため地下水資源の水質保全が重要な国家的課題となっており、連邦法及び州法によって水質保全策が規定されている。その基本となるのが、地下水保全区域の設定と、その中での活動の規制、ならびに地下水の水質モニタリング制度である。

Knorrは、地下水が地下帯水層中を50日間流下する間に、その中に含まれているかなりのバクテリアやビールスは除去され、衛生面での危険がほとんどなくなることを報告している。同様に、分解や吸着が容易に起こる化学物質についても、50日間の帯水層流下によって除去されるとしている。

地下水保全区域の設定はこうした考え方に基づいたものであり、飲用に供する揚水井周辺の一定の範囲から汚染源を追放しようという考え方をとっている。規制の程度は、地下水の流速や流向、対象とする汚染物質の持続性や移動性によって決定される。すなわち、飲料用揚水井への距離が近い程、規制対象とされる活動の数が増えることになる。

地下水保全区域の規制内容は、科学的ないし工学的な基礎資料とともに公示される。区域設定の技術指針として“Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete (Grundwasser)” (飲料水障害区域のための指針) が作成されているが、この中で井戸からの距離に応じて4つまでの区域に区分して、それぞれに対する規制内容を設定することになっている。図3にその概念図を示す。ここで、ゾーンⅠは、井戸周辺10mの領域、ゾーンⅡは、地下水の流動に50日間を要する等距離線で仕切られる領域、ゾーンⅢ_Aは井戸からの距離2kmの線で仕切られる領域、ゾーンⅢ_Bはそこから流域界までの領域である。地下水の流動50日分の距離は、たとえば次式で $t=50$ 日となる x の値を計算することによって得られる。

$$t = \frac{n_e}{v_o} x - \frac{n_e}{v_o} \cdot \frac{Q}{2\pi m v_o} \ln\left(\frac{2\pi m v_o}{Q} x + 1\right)$$

ここで t : 地下水の到達時間 (日)

n_e : 有効空隙率

v_o : 自然状態での地下水の流動速度 (m/日)

x : 流動距離 (m)

Q : 揚水量 (m³/日)

m : 帯水層厚 (m)

農業、工業、建設業等40~50の分野毎に、各領域で活動が許されるものが定められており、これらは具体的に先述のマニュアルに規定されている。当然のことながらより高位の規制域では、低位の規制域での規制対象となる活動を含んで更にいくつかの活動が規制されるという形になっている。

こうした規制は、多くの団体と利害が衝突することになるので、その調整が必要とされる。1981年現在、西ドイツにおける規制状況は表2のとおりであって、規制が必要とされる地域14,000個所に対して、既に規制がなされているの

は、半数に満たない6,700 個所である。面積でみると、地下水保全区域は、Ⅲゾーンまで入れても全国土面積の約10 %と比較的小さいようにも見えるが、これは都市域、農村域を含めた平均的な数値であって、各種用途に対する地下水需要の大きい都市域ではかなりの面積比を占めることになるため、規制の実施にあたっては強力な行政的・政治的施策が必要とされているのが実情である。

その他、地下水汚染防止に関連している法制として、“水を汚染する恐れのある物質の取り扱い規則”及び“植物保護条例”があげられる。前者は、水汚染の危険のある生産物や化合物の貯蔵・取り扱いを許可制とするものであり、後者は保全区域内での殺虫剤の使用を制限するものである。

ところで、地下水保全区域の設定は西ドイツの制度が最も古いとされているが、現在ではヨーロッパの他のいくつかの国々においても同様な区域の設定が行われている。表3はこれらを比較できる形で整理したものである。⁶⁾

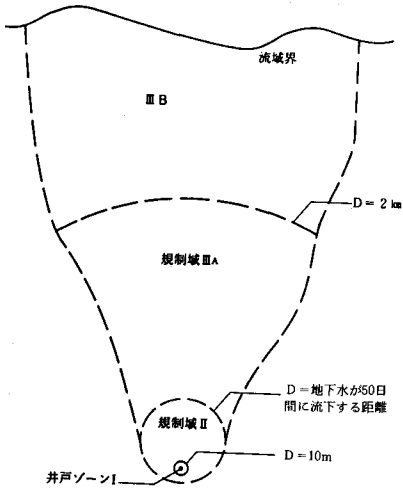


図3 地下水規制域の概念（文献5）より）

表2 西ドイツにおける地下水保全区域
設定状況（文献5）より）

規制区域	個 所 数	規制区域の面積 (km ²)	国土面積に占める割合
規制が必要とされている区域	14,000 (100%)	ゾーンⅠ＋Ⅱ 3,261	1.3 %
		ゾーンⅢ＊ 21,980	8.9 %
		合計 25,241	10.2 %
規 制 済	6,700 (48%)		
規制準備中	4,100 (29%)		
未だ準備作業が開始されていない	3,200 (23%)		

＊ ゾーンⅢがⅢA、ⅢBに分けられているものについては、ゾーンⅢAのみ対象とした。

表3 各国 地下水保全区域の設定条件（文献6）より）

西 ド イ ツ	オーストリア	ベルギー	フィンランド	オランダ	フランス	チエスロバキア	ス イ ス	ハンガリー
ゾーンⅠ 10～100m	保 全 域 50日間の流動距離	緊急保全域 100 m又は 24時間の流動距離	取水地域	集水区域 230 m 50～60日間の流動距離	緊急保全域 10～20 m	第1次衛生保全域 10～50m	ゾーンⅠ 10～20m	保 全 域 50日間の流動距離
ゾーンⅡ 50日間の流動距離		近郊保全域 100～300 m 50日間の流動距離	近郊保全域 60日間の流動距離	近郊保全域	近郊第2次衛生保全域	ゾーンⅡ >100 m 10日間の流動距離		
ゾーンⅢ _A 2 km	局 所 的 保 全 域	圏外保全域	圏外保全域	保 全 域 10年間の流動距離	圏外保全域	圏外第2次衛生保全域	ゾーンⅢ _A 200 m	水文地質的保全域 25～100年間の流動距離
ゾーンⅢ _B				保 全 域 25年間の流動距離			ゾーンⅢ _B	
				灌 養 域				

3. 地下水管理の考え方

地下水管理のフローチャートの一例を図4に示す。

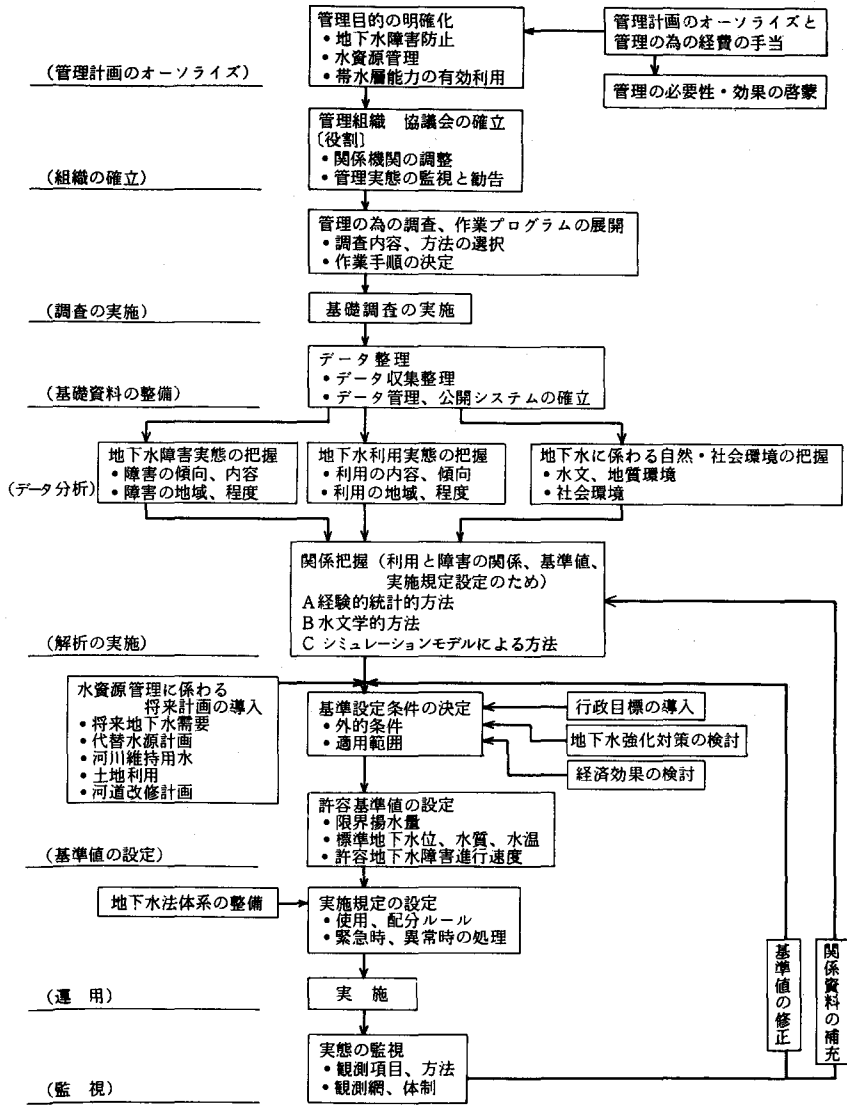


図4 地下水管理のフローチャート

表4は地下水管理の目的を整理したものだが、それぞれの地域での管理目的に対応した基準指標を選定し、基準値を設定し、最終的にはそれを許容揚水量の形に変換するというプロセスが必要とされる。この場合、基礎データの収集・整理が最重要であることはいうまでもないが、モデルを用いた解析も場合によっては有力な手段となる。表5は、地下水に係わるモデルの種類を整理したものである。

表4 地下水管理の目的

大 目 的	小 目 的	対 象 事 項
国土保全	地盤沈下の防止	「地盤沈下」
	水量・水質の保全	「塩水化の防止」「表流水環境の保全」 「地下水質汚染の防止」「地下水位の維持」「水質保全」
地下水資源の利用	水資源の開発	「水資源の開発」
	渇水対策	「渇水対策」
地下空間 (帯水層) の有効利用	蓄熱利用	「蓄熱利用」
	土壌帯の浄化機能の利用	「土壌浄化」
	洪水の貯留空間としての利用	「治水能力の増大」

表5 地下水に係るモデル化の方法

種 類	理 論 的 背 景	モ デ ル 名
理論式 統計的 手法に基づいた 方法	理論式から一般的傾向を 求める方法	水 理 公 式
		回 帰 式
	統計データをもとに障害 と要因の相関関係を求める 方法	重 回 帰 式
マクロな水収支 に基づいた方法	水収支関係を求める方法	水 収 支 式
		タンクモデル
数値シミュレ ーションに基づい た方法	地下水運動則を考慮した 方法	水平二次元モデル
		断面二次元モデル
		準三次元モデル
		三次元モデル
	障害、機構等の再現を重 視したもの	圧密沈下モデル
		水質拡散モデル*
		物質収支モデル*
模型実験による 方法	相似な物理現象を利用し た方法	平行板モデル
		膜 モ デ ル
		電気アナログモデル
		コンピューター ハイブリッドモデル

* 水温も含む。

4. おわりに

三本木氏は、著書「比較水法論集」⁷⁾の中で、西ドイツ、フランス、オランダにおける地下水管理について紹介しているが、それらをふまえ、地下水管理の意義、手法等について論じていくくたりの中で、「地表水との総合管理」についてふれている。少し長くなるが引用してみたい。

『地下水と地表水とは、物理的にも経済的にも相補うものである。ここで物理的とは、地下水と地表水との水文学的相互依存性をいい、経済的とは、それぞれの利用可能性の社会的限界に着目するものである。従って地下水の保全と利用の問題を適切に処理するためには、単に地下水のみを視野におくことはできない。このような観点から地下水と地表水とを総合的に管理するための地理的な単位として、主要な河川の流域をとるべきことは、世界各国の共通認識でもある。(1966年国際河川の水利用に関するヘルシンキ会議、1976年国際水法学会カラカス会議、1977年国連水会議等)この重要な課題について、管理機能の面からいえば、機構上の一元化、又はそれに到らずとも理念上の一元化(関係機関及び国民各層のコンセンサス)が必要であり、又地方的創意の発見・普及・制度的認知という過程での各種施策の総合体系化を行うことが不可欠であると思われる』

地下水と地表水を総合的に管理するためには、言うまでもなく地下水の人工涵養を水利システムの中に組み込んでいくことが不可欠である。^{8) 9)}

わが国においても、地下水の保全・管理・利用が水問題の重要な一側面になりつつあるが、地下水人工涵養や地下ダムをはじめとして、実効ある施策を可能ならしむべく、今後制度面の一層の整備が望まれるところである。

〔参考文献〕

- 1) R.G.Giese; "Promoting a Management Program for Ground Water" Ground Water Vol.20 No 5 Sep - Oct. 1982.
- 2) D.H.Howells他; "Groundwater Management in the Southeast" J. of ASCE Vol.108 WR3 Oct. 1982.
- 3) 科学技術庁資源調査会編「日本の地下水資源－地下水の保全・使用に関する第2次調査報告書」地下水技術協会 1983年7月
- 4) P.C.Briggs; "Groundwater Management in Arizona" J. of ASCE Vol.109 WR3 Jul. 1983
- 5) Government of the Federal Republic of Germany; "Water Protection Zone as a Tool of Ground-water Quality Conservation in the Federal Republic of Germany" U.N.-E.C.E Seminar on Ground-water Protection Strategies and Practices, Athene (Greece) 10-14 Oct. 1983
- 6) H.G.van Waegeningh; "Basic Concepts of Groundwater Management in relation to Land Use Planning" 5)と同じ Seminar
- 7) 三本木健治; 「比較水法論集」水利科学研究所 1983年7月
- 8) 建設省; 「地下水涵養技術の開発」 1981年3月
- 9) 吉野・寺川; 「地下水人工涵養と地下貯水池構想」 月刊 水 25-2, 1983年2月
- 10) 建設省土木研究所河川部水文研究室; 土木技術資料第19巻第9号「地下水利用特集」1977年9月
- 11) 建設省土木研究所河川部水文研究室; 土木技術資料第23巻第10号「地下水特集」1981年10月