

12. 地下水の適正利用を目指した総合的な地下水管理

Integrated groundwater management for appropriate use of groundwater

松田康弘* 大東憲二** 佐伯茂雄**

Yasuhiro MATSUDA, Kenji DAITO, Shigeo SAEKI

ABSTRACT ; The groundwater has a constant water temperature, an excellent water quality, and if the pumping facilities are set up, a large quantity of groundwater is pumped up easily from the main aquifer in all continents. About two billion people are using groundwater. If groundwater is pumped excessively, the lowering of groundwater level generates land subsidence and groundwater salinization. Moreover, extending area below sea level is the one of causes of increasing floods. In this research, the case of groundwater management in the world and the ideal way of integrated groundwater management for appropriate use of groundwater without problems such as land subsidence and groundwater salinization is studied. And the action of the Tokai Three-Prefecture Investigation Committee on Land Subsidence, which aimed integrated groundwater management, is introduced.

KEYWORD ; Groundwater Resources, Groundwater Management, Land Subsidence

1. はじめに

地下水は年間を通じてほぼ一定の水温で水質も良好であり、ポンプ等の揚水施設を設置すれば、容易に水を確保できることから、あらゆる大陸で主要な帯水層から大量の水が汲み上げられており、世界全体で 15～20 億人もの人々が地下水に依存している。地下水は人類共通の資源であるとともに、その利用価値は非常に高い。しかし、過剰な地下水の汲み上げは地下水位を低下させ、地盤沈下や塩水化、また海に近い沖積平野部では地盤沈下により海拔 0m 地帯が増加し、洪水などの自然災害の被害を増大させることも考えられる。

本研究では、世界が求める地下水資源の重要性を考慮し、地下水を利用している世界各国・各地域で、地盤沈下や塩水化といった地下水障害問題を引き起こさずに利用していくための適切な地下水管理のあり方について考察した。また、世界各地における地下水管理の事例紹介と併せて、地下水の適正利用を目指した総合的な地下水管理を実践している東海三県地盤沈下調査会の活動状況も紹介した。

2. 地下水管理の基本的な考え方

地下水障害のメカニズムは複雑であり、持続可能な地下水の利用・保全に向けて地下水位・地盤沈下量など地下水に係わる情報を継続的にモニタリングすることが重要であり、技術的な評価ができる体制を整備することが重要である。また、水循環という観点からは、地下水は広範囲にわたっているため、地下水を持続的に利用・保全していくためには、国や自治体といった関係機関が、連帯及び調整できるシステムをさらに広域的に拡充・充実していく必要があり、地下水についての技術的評価を基に各地域が調整・合意を図った上で条例制定するなどの体制の整備が必要である。地下水障害を発生させないよう適正な管理と保全の下に、地下水を持続的に有効利用していくことが社会活動上重要である。

*大日コンサルタント株式会社 Dainichi Consultant Inc., **大同工業大学 Daido Institute of Technology

地下水を利用していく段階で、地下水障害が水利用者に直接影響を及ぼさない限り、地下水管理には積極的にはならない。自由な需要かつ規制のされていない資源の基では、図1に示すような悪循環となり、悪循環を図2に示すような好循環にするためには、水（地下水）の管理だけではなく水・土地利用者の管理をしていかなくてはならない。つまり、水文学的局面（供給サイド）と社会経済的局面（需要サイド）の双方を管理していかなくてはならない。

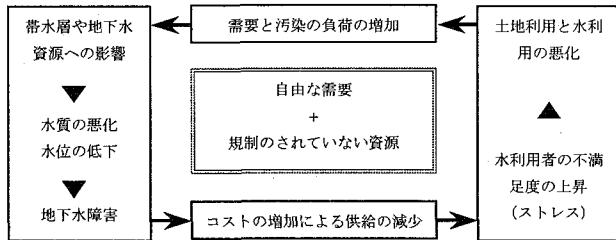


図1 地下水資源の開発の悪循環

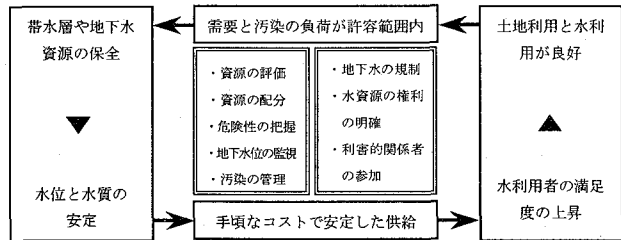


図2 地下水資源の開発の好循環

3. 世界の地下水利用と管理

地下水の過剰な採取は、地盤沈下や塩水化などの深刻な環境問題を引き起こす原因であり、それは時に我々の生命・財産を奪いかねない。しかし、地下水やその土地に関する地質データ、地盤構造、地下水揚水量、井戸の数、地盤沈下・地下水位の状況、水質調査等といった地下水管理をしていく上で重要な情報が、一律に管理されているケースはあまりにも少ないのが現状である。以下に近年発展が目覚しく、早期から地下水問題に対して積極的に対策を行っている上海とバンコクの地下水利用と管理について述べる。

3.1 上海の地下水利用と管理

上海の地下水は、1920年代から上海西部・東部の工業地域を中心に、深井戸の設置数が増加してことや、都市部での高層ビルの建設・人口増加に伴い、生活用水として利用することにより増加していった。1960年代には、地下水位の急激な低下に伴って、地下水が枯渇する井戸や、都市部での地盤沈下、沿岸部では海水の逆流により地下水の塩水化などの環境問題が発生した。そこで、地下水の過剰汲み上げによる地盤沈下等の環境問題を改善するために、地下水採取箇所を現在では800箇所余りまで削減したほか、地下水の利用は生活用水のみに規制し、大部分の工業用水を地表水に転換した。また、地表水（水道水・湖水など）を帯水層に逆注入することで、地下水の水位が回復し、地盤沈下は緩やかになってきた。しかし、近年では都市周辺の地域での開発が進み、地下水の利用は規制されているが、地下水の利用が増加しており、現在でも地盤沈下が進行している地域もあるため、地下水利用の規制の見直しも考慮しなければならない。

3.2 バンコクの地下水利用と管理

バンコク市とその周辺地域では、50年以上地下水を利用しており、最近20年間の地下水利用は急速に増加している。1980年代はじめ、首都圏水道公社（Metropolitan Water Authority 以下MWA）および民間所有による大量の地下水汲み上げにより、バンコク首都圏での地盤沈下や塩水化の問題が発生した。これに対しタイ政府は、1983年5月に地下水の取水規制を発表し、地下水の利用者に利用の自粛を求めた。その規制地域としては、バンコク首都圏を3つの地域に分別し（表1参照）、MWAに対しては、Critical Area No.1とNo.2において、1987年より段階的に地下水の使用を禁止し、2000年までには、個人地下水利用も含めた地下水汲み上げ量を800千 m^3/day 以下に抑えることを目標とした。これにより、MWAは地下水を代替するため、表流水からの供給能力の強化を図る必要があり、浄水場、送配水網の拡充が急務となった。現在、バンコク首都圏で実施中の「バンコク上水道配水網改善事業」の完成により、地下水利用はさらに減少されると予測される。なお、タイ政府は1989年から地下水採取を原則禁止としており、地下水採取が必要な場合には、毎年政府からその揚水量について許可を得なければならないことになっている。

表1 タイ政府による Critical Area の分別

Critical Area No.1	: 年間10cm以上の地盤沈下が進行している地域
Critical Area No.2	: 年間5cmから10cm以下の地盤沈下が進行している地域
Critical Area No.3	: 年間5cm未満の地盤沈下が進行している地域

4. 統合的な地下水管理

濃尾平野は日本で最も地盤沈下、地下水の管理が積極的に行われている地域であり、その管理の統一性も高い地域である。ここでは、濃尾平野における地下水管理について述べる。濃尾平野は、古くから地下水を農業用水、生活用水として利用してきた。しかし、1960年代からの高度経済成長に伴い、工業用水としての需要が増大し、急激な地下水の低下が確認され、激しい地盤沈下を引き起こすこととなった。その結果、濃尾平野はその面積の約77%において地盤沈下が確認された。海拔ゼロメートル地域は約395km²に及び、全国の主要地盤沈下地域の中で最大のゼロメートル地帯となった。地盤沈下激甚期の1973年には、名古屋市港区において年間最大沈下量23.5cmを記録し、海拔0m地域の拡大を招いた。

濃尾平野では、地盤沈下の増大に伴い、愛知県、岐阜県、三重県で行われていた地盤沈下に関する調査を統合的に行うために、昭和46年8月に建設省国土地理院中部・近畿地方測量部（現 国土交通省）を中心として、中部地方建設局、東海農政局、名古屋通商産業省（現 経済産業省中部経済産業局）、運輸省第五港湾建設局（現 国土交通省）、愛知・岐阜・三重の三県、名古屋市、名古屋港管理組合および四日市港管理組合で組織された東海三県地盤沈下調査会を発足させ、これまで各自自治体が個別に行っていた調査を一本化した。昭和50年2月には東海三県地盤沈下調査会が改組され、前述の組織に学識経験者が加わり、計量部

会と解析部会が設置された。従来の地盤沈下測量は計量部会で取り扱い、地盤沈下解明の各種調査の解析を解析部会で取り扱うこととなり、沈下の実態と原因を調査究明することとなった。地盤沈下の原因を究明し、その対策を立てるために行った調査・研究の流れを図3に示す。将来予測研究では、地盤調査、水準測量、地下水位調査、揚水量調査などに基づき、濃尾平野の地下水盆の構造を推定し、また地下水利用に対する将来の地盤沈下、地下水位を予測するシミュレーションを行うことにより濃尾平野の地盤沈下対策の支援を行っている。

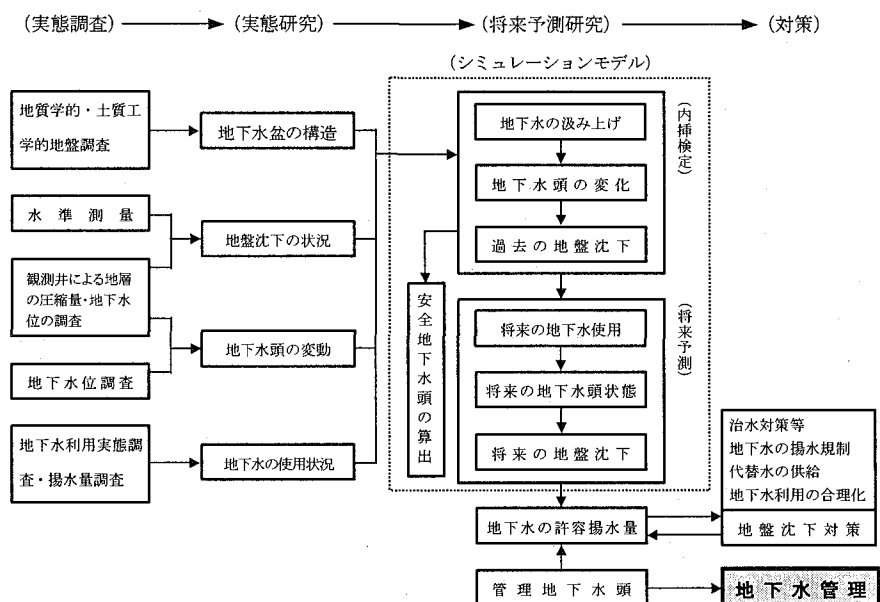


図3 広域地盤沈下対策作業の流れ

昭和49年に愛知県・名古屋市が、昭和50年に三重県がそれぞれ公害防止条例による地下水揚水規制を実施し、岐阜県では自主規制による対策が立てられ、地下水揚水量の軽減、地下水利用の合理化による節水などの対策を立てた。そして、昭和60年の地盤沈下防止等対策関係閣僚会議において、地盤沈下防止等対策要綱が定められた。この要綱は、濃尾平野（伊勢平野北部を含む）における地下水の過剰採取による地盤沈下を防止し、併せて地下水の保全を図るため、地下水の採取制限、代替水源の確保及び代替水の供給、節水及び水使用の合理化、地盤沈下による災害の防止又は復旧等に関する事項を定め、同地域の実情に応じた総合的な対策を推進することを目的としているものである。このような、様々な地下水揚水規制により、濃尾平野の地盤沈下は沈静化していった。

5. 濃尾平野における今後の地下水利用

濃尾平野では適切な地下水管理により、地盤沈下は沈静化し、地下水位は上昇を続けている。今後は地下水の有効利用について検討を行う段階である。ここでは、大東ら（1992）の濃尾平野の適正揚水量配分計画を基に、濃尾平野の地下水位の将来予測を行った。統合的な地下水管理において、シミュレーションによる地下水位の予測は、今後の地盤沈下の対策・地下水利用について重要になる。

5.1 解析範囲の概要

濃尾平野の解析対象領域を図4に示す。解析領域面積は1,164km²であり、これはほぼ濃尾平野を含んでいる。この図に示されている有限要素の平面分割における一要素は、南北1.8km、東西2.2kmの三角形要素である。また、濃尾平野南部の東西方向の地盤断面図を、図5に示した。濃尾平野において地下水を汲み上げている主な被圧帯水層は、図5に示す第一礫層、第二礫層、第三礫層である。このモデルの帯水層は、上から第一礫層を主とする第一被圧帯水層（G1）、第二被圧帯水層（G2）、第三被圧帯水層（G3）の三層とし、第三被圧帯水層（G3）の下面までを解析対象深度とした。また、それらの帯水層の間にある主要な圧密層を上から第一粘土層（C1）、第二粘土層（C2）、第三粘土層（C3）として、それぞれの層を深度方向に四等分割した。

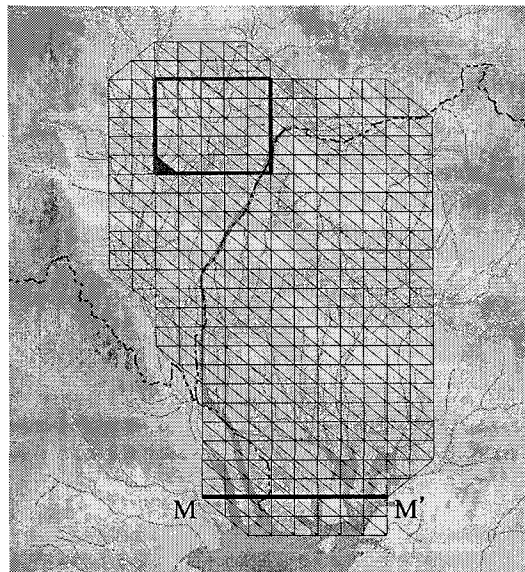


図4 解析範囲の対象領域

5.2 揚水量の集計方法

モデルに与えた揚水量の集計方法について述べる。濃尾平野の地下水揚水量の把握は、東海三県地盤沈下調査会が中心となり、各行政機関の協力で昭和50年以降毎年行われている。これらの揚水量データは、井戸の存在する市町村コード、国土基準メッシュコード、地盤標高及び井戸のストレーナ深度等により、月単位で集計されている。しかし、データの集計方法が統一されていないため、今回解析を行うための揚水量配分は、昭和36年から昭和52年までは、植下・佐藤（1979）の研究で集計された揚水量を配分した。昭和53年から昭和61年までは、大東ら（1992）の研究で集計された揚水量を配分した。昭和62年から平成13年までの地下水揚水量は、平成3年から平成13年までは各井戸について帯水層（G1・G2・G3・第三紀層）別に地下水の揚水量が集計されているが、昭和62年から平成2年までの揚水量は、各井戸ごとに総量で集計されている。このため、今回用いた三次元地盤モデルの帯水層の深度で各井戸の揚水量を比例配分することにより、帯水層別の揚水量を求めた。

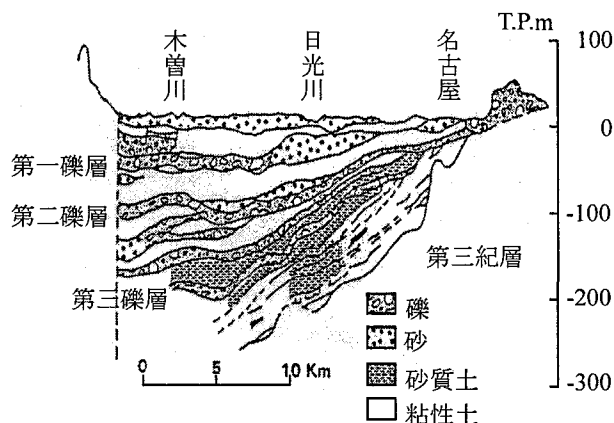


図5 濃尾平野南部の東西地盤断面図

5.3 将来の地下水位予測

平成14年以降の地下水位を予測するために、今後の地下水揚水量の変化を想定する必要がある。今回の解析では、図6に示すように、平成14年以降、地下水揚水量は1000万m³/yearで徐々に増大させ、平成19年に2.7億m³に達し、それ以降は年間2.7億m³を維持させた場合の平成25年時点の地下水位予測した。

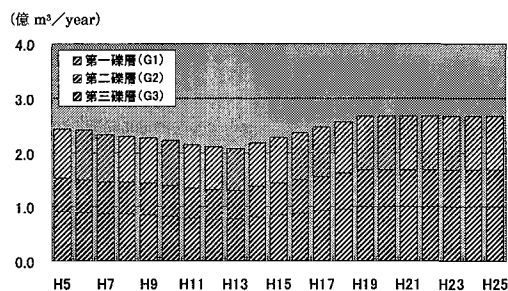


図6 揚水量の推移（想定）

5.4 解析結果

十四山観測所付近の地下水位予測結果を図7に、濃尾平野全体の地下水位の変化予測を図8に示す。地盤沈下防止等対策要綱に定められている地下水採取目標量 2.7 億 m^3 まで増加させるために、年間 1000 万 m^3 の割合で揚水量を増加させており（目標量到達年：平成 19 年），地下水位は低下することが予測される。図7より，平成 15 年から平成 19 年までの地下水位の変化は，十四山観測所付近の G1 層・G2 層共に地下水位は緩やかながら低下するが，目標地下水位まで低下することはない。平成 19 年以降（地下水揚水量 2.7 億 m^3 を維持）は，平成 23 年頃まで地下水位は低下を続け，それ以降は一定となっており，G1 層においては目標地下水位近くまで低下する。しかし，G3 層地下水位においては，平成 17 年頃から目標地下水位を下回ることが分かり，その後も地下水位は低下を続け，目標地下水位下で安定する。また，図8の濃尾平野全体の地下水位の変化を見ると，G1 層では急激な地下水位の低下は発生していないが，G2 層においては平野南部地域において地下水位の低下が見られる。G3 層に至っては，平成 13 年の地下水位等高線図と比較して地下水位が低下していることがはっきりと分かり，T.P.-10m 地域は平野中央部から南部にかけて広がっていることが分かる。

5.5 濃尾平野における今後の地下水利用と課題

地下水揚水量を目標量まで増加させても，急激な地下水低下は見られないため要綱に定められている目標量を見直すことも考えられる。今回のシミュレーションでは，地下水位の将来予測をするにあたって，揚水量変化の割合を濃尾平野全体に適用したが，地下水の豊富な地域や涵養能力が高い地域の揚水量配分を考慮して地域別の地下水位予測をすれば，地下水の有効利用のための資料となると考えられる。地下水の汲み上げが地盤沈下の進行に繋がってしまう軟弱地盤地域（濃尾平野南部）においては揚水量の規制をし，涵養能力が高く地下水の汲み上げにより地盤沈下が発生する可能性が低い地域（濃尾平野北部）の地下水を，下流域の水資源として代替することも可能である。また，今回のシミュレーションに用いた実績揚水量のうち，帯水層別に把握されているのは名古屋市を除いた愛知県域だけである。その他の地域の地下水揚水量については，今後，詳細なデータを収集整理する必要がある。

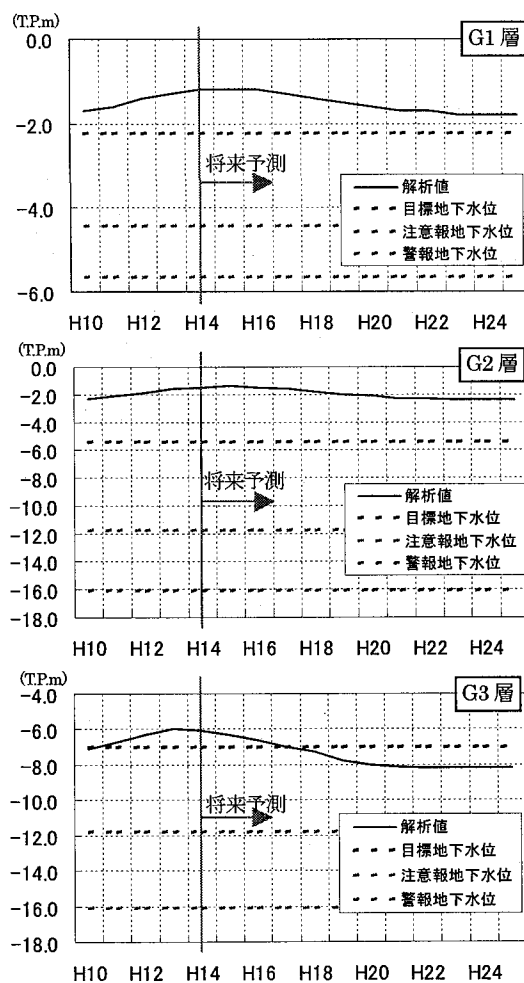


図7 十四山観測所付近の地下水位予測

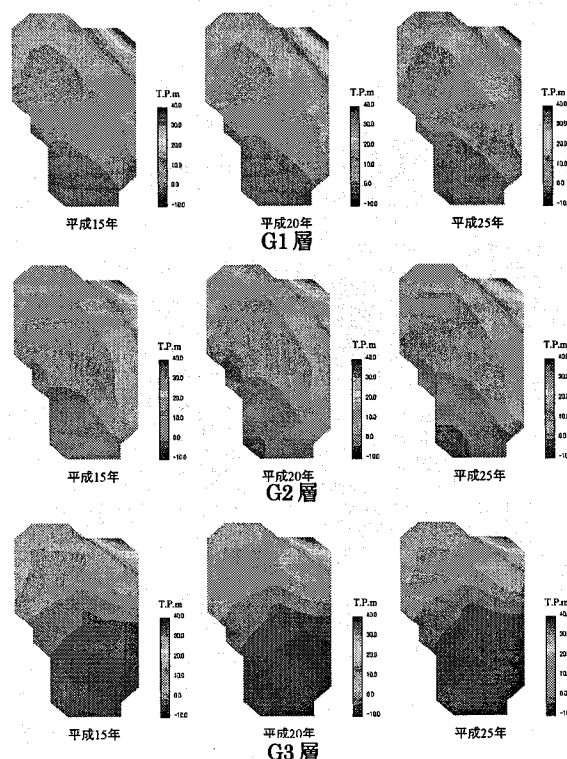


図8 濃尾平野全体における地下水位等高線図

6. まとめ

以下に示す社会的見地と工学的見地から、本研究をまとめた。

(1) 社会的見地

適切な地下水管理を行うためには、地下水の公水的な考え方や地下水流動阻害問題を水利害関係者に教育し、水の需要と供給のバランスを把握した上で地下水開発の計画を立てる必要がある。日本のように周りを海に囲まれ、隣接国のない国では、統合的な地下水管理を実現できる可能性が比較的高い。地下水が表流水と同じく市町村境界、または国境をまたぐ場合があるため、隣接する国（地域）の生活水準、水資源に対する考え方、地下水の利用目的、文化の違い等により、地域ごとに違った地下水管理が行われている。アメリカやヨーロッパなどの地下水資源の豊富な地域では、地下水管理の違いはあまり問題にならないが、アフリカや西アジア地域等の乾燥地帯では、水資源に対する考え方の違いは生死にかかわる問題であるため、水資源確保のための紛争が発生している地域もある。このため、国家レベルでの連帯した地下水管理を行うことが重要である。

(2) 工学的見地

地下水を利用する際に地下水位の監視は重要である。地下水の有効利用するためには、管理目標地下水位に対する地下水位実測値と、シミュレーションモデルによる地下水位予測の結果により、揚水規制の効果の有無を検討する必要がある。また予測シミュレーションを行う上でボーリングデータや揚水量データが重要となってくるため、各行政機関におけるデータベースの統一が望まれる。

濃尾平野では、統合された地下水管理のもと、地盤沈下等の地下水障害防止のための地下水管理を実施してきた。今後の濃尾平野においては、地下水の有効利用を考えた地下水管理を行うことが必要である。

参考文献

- 1) 第3回世界水フォーラム：世界の水と日本，pp.36-39，2003.
- 2) The 3rd World Water Forum：Groundwater Problem of the Urban Areas Developed on Asian Lowland，pp.1-10，p.21，2003.
- 3) 国土交通省 土地・水資源局水資源部：日本の水資源，pp.90-91，p.123，pp.156-159，p.285，p.303，pp.305-306，2003.
- 4) Metropolitan Water Authority：バンコク上水道整備事業概要，p.263，p.276，1999.
- 5) World Bank：Sustainable Groundwater Management Concepts and Tools，pp.15-29，2003.
- 6) 東海三県地盤沈下調査会：濃尾平野の地盤沈下と地下水，pp.5，pp.101，pp.214，1985.
- 7) 東海三県地盤沈下調査会：平成14年における濃尾平野の地盤沈下状況，p.1，p.8，p.19，pp.31-33，pp.37-38，2003.
- 8) 濃尾平野地盤沈下防止等対策調査委員会：要綱対象地域の現況及び要綱実施状況，p.1，p.38，2003.
- 9) The 3rd World Water Forum：Groundwater Problem of the Urban Areas Developed on Asian Lowland，pp.37-42，2003.
- 10) 大東憲二・植下 協：濃尾平野の地盤沈下地域を拡大させた平成6年異常渇水，地下水学会誌，第38巻，第4号，pp.283-284，1996.
- 11) 大東憲二・天谷重治・向出剛一：臨海沖積平野の地盤環境保全のための地下水管理に関する考察，地下水学会誌，第34巻，第4号，pp.274-280，1992.