

地球研プロジェクトF S 2 - 4

都市の地下環境に残る
人間活動の影響

平成16年度報告書

平成16年12月
総合地球環境学研究所

谷口真人

地球研プロジェクトF S 2 - 4

都市の地下環境に残る
人間活動の影響

平成16年度報告書

平成16年12月
総合地球環境学研究所

谷口真人

目次

はじめに	1
プロジェクトの目的・概要.....	1
問題の所在・課題.....	3
なぜ地下環境か.....	5
なぜアジア沿岸の都市域か.....	6
どのように明らかにするのか.....	6
プロジェクトの対象時間・範囲.....	8
国際機関との連携.....	8
進捗状況.....	10
研究組織と構成メンバー.....	16
水グループレビュー.....	18
地下水・重力グループレビュー.....	30
都市熱グループレビュー.....	35
地下熱グループレビュー.....	40
社会経済グループレビュー.....	54
都市地理グループレビュー.....	64
物質（汚染）グループレビュー.....	67
プロジェクトメンバー個人報告.....	78

人口増加と集中の著しいアジア沿岸域において、人はどのように都市を形成し持続させてきたのか。過去の都市と自然とのかかわりを復原するとともに、気候変動や人間活動による影響を評価することによって、将来あるべき姿を探求します。食料・エネルギー・健康の基礎となる「熱環境」・「水環境」・「物質（汚染）環境」「社会経済と都市基盤」を縦軸に、「気候変動影響」・「人間活動影響」を横軸に、人間活動の影響が残りやすい「地下環境の指標」を用いて、都市の発達段階と環境変動との関係を明らかにします。

はじめに

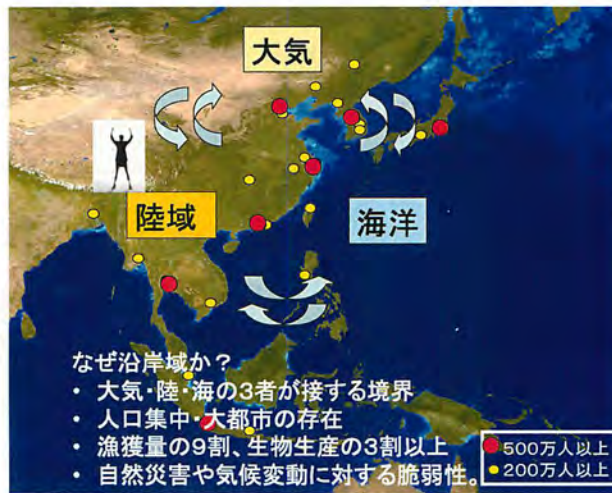
地下の環境問題は、地下水汚染、地下水資源の枯渇、地下熱汚染など、一部で顕在化しているが、一般には目に見えない地球環境問題であるため、潜在的に大きな影響が予想されるにもかかわらず、これまで放置されてきた。しかし、現在の都市への人口集中と経済成長により、このまま放置しておく「未来可能性を食い潰し」続けることになり、地球と生命の貴重な財産である地下環境の持続的有効利用には、正確な現状把握と過去の人間活動の評価、および将来ビジョンの構築が必要である。

都市基盤・社会経済などの都市の発達段階と地下環境問題の発生・推移には強い関連性があり、同様の現象が時間遅れを伴ってアジアの諸都市で発生しているとの認識から、アジア地域の沿海都市の都市発展過程のドライビングフォースと典型的な段階、地下環境問題と経済成長との関係を明らかにすることが重要と考える。そのためには都市の発達段階と地下環境変化の関係、都市政策・都市計画と都市発展・都市地下環境変化との関係、都市間の違いの原因などを明らかにする必要がある。

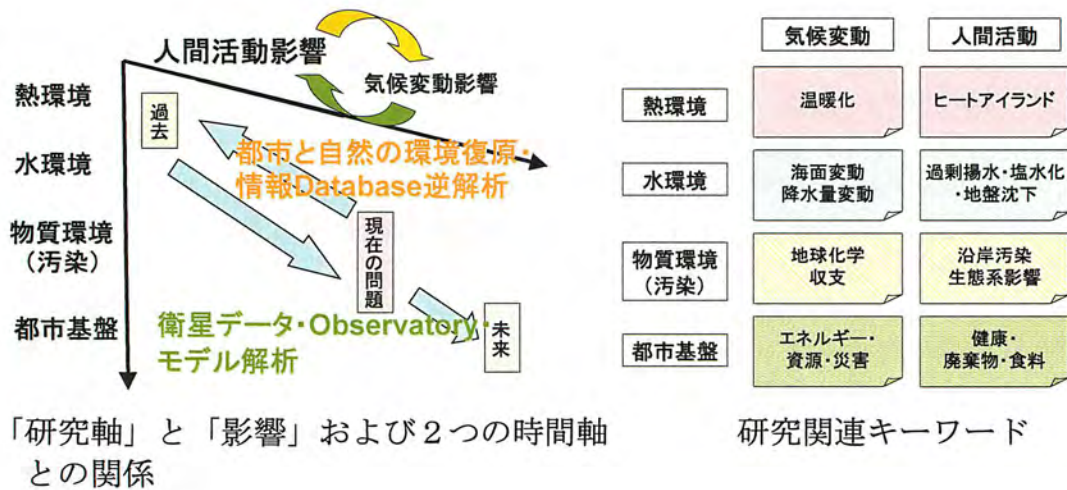
プロジェクトの目的・概要

都市における良質な水資源の確保と、都市から排出される様々な物質による沿岸海洋汚染は、21世紀の大きな地球環境問題である。また、人間活動に伴う都市熱（ヒートアイランド）問題は、地球温暖化に加えて地球熱環境の重要な問題の1つといえる。これら「都市の存在」に起因する環境問題は、都市への人口集中が続く現在、早急に解決しなければならない重要な課題である。当プロジェクトでは、これらの問題に対して、人間活動の影響が残りやすい地下環境指標を用いて、「気候変動影響」・「人間活動影響」・「都市基盤と社会政策」の観点から、過去の自然と都市の復原（現在から過去）を行うとともに、自然－社会統合概念（過去から現在・未来）をとおして、将来の都市のあり方への提言を目指す。衛星を用いた地下水環境変化の推定や、現在の地下熱環境情報を用いた気候変動復原・都市化の影響評価、地下物質環境変化指標による汚染環境の拡大推定など、各種の地下環境情報を用いて都市と水・熱・物質環境との関係を明らかにする。

これらを通して本プロジェクトでは以下の課題を明らかにする。（1）地下環境災害と水資源転化、および地下水資源変動量解明と地下水有効利用の方法論確立、（2）都市基盤の変遷とヒートアイランドの消長、（3）沿岸汚染物質の陸域起源と経路の特定、および都市の発達における汚染物質許容量依存性、（4）都市の発達段階・政治経済の変遷と上記の長期的変動との関係。



都市の地下環境に残る人間活動の影響



問題の所在・課題

(1) 地下環境災害と水資源転化

人口増加と経済成長に伴う地下水の過剰揚水による地盤沈下が、アジアの沿岸都市で次々と発生している。揚水規制により地下水から地表水への水資源転化がアジアの沿岸都市で行われているが、未だ地盤沈下が止まらず沿岸都市での洪水被害が拡大している地域がある一方、逆に地下水位の上昇にともない地下構造物が浮き上がるという新たな問題も生じている。また気候変動による降水量パターンの変動により、表流水から地下水へと水資源が転化されている地域も存在する。水資源転化の要因（自然＋人間）を明らかにし、人口・都市規模や社会経済の推移との関係を明らかにする。

(2) 都市域の拡大・縮小とヒートアイランドの消長

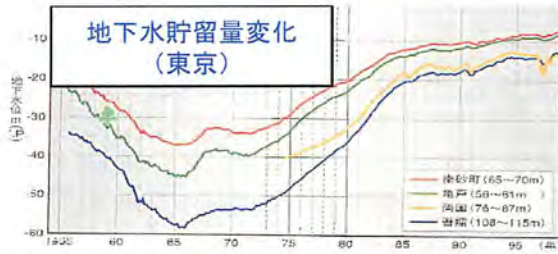
都市化に伴うヒートアイランド現象により、気温のみならず地下の温度も急激に上昇し、地下熱汚染を引き起こしている。都市域の拡大・縮小・ドーナツ化現象等とヒートアイランドの消長との関係を、現在の地下に残存する温度情報をもとに明らかにする。その際、都市化と温暖化の影響の度合いを評価・分離する。また、緯度帯・自然環境の異なる都市間でのヒートアイランドの影響の違いなども明らかにする。また地下温度上昇が時間遅れを伴って再度大気を暖めるフィードバック機構を明らかにし、地下水流動を通して運ばれる熱がもたらす、河川水や沿岸水の温度上昇の影響・生態系への影響などを明らかにする。

(3) 都市発達の汚染物質許容量依存性

硝酸性窒素汚染や産業廃棄物処分場等からの有害物質の流出など、地下環境に係る水質（汚染）問題に関して、地下環境許容量とエコロジカルフットプリントを基にした概念構築と、沿岸生態系への影響評価を行い、地下環境に潜在する未来可能性の略奪の評価として、現在の汚染が将来顕在化するまでの時間遅れの指標などを明らかにする。

(4) 都市の発達段階・社会基盤の変遷と地下環境の長期的変動

アジア地域の沿海都市の都市発展過程のドライビングフォースの共通性と特異性を明らかにし、長期的な都市発展過程を共通のいくつかの典型的な段階に分ける。その上で、地下環境問題と経済成長の関係はクズネツ型（ある一定の経済的閾値を境に改善される）であるかどうかを明らかにし、高密度都市は地下環境変化にとってよいかどうか、技術開発が都市発展と都市地下環境の変化にどのような影響を及ぼしたか、都市間での違いがあるとすればそれはなぜか、などを明らかにする。さらに、都市政策、都市計画が都市発展と都市地下環境変化の関係にどのような影響を及ぼしたか、アジアの都市間で違いがあるとすればそれはなぜか、等を解明する。



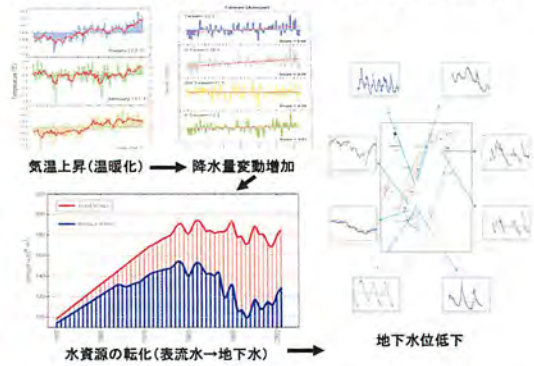
地下水位低下 ⇒ 地盤沈下 ⇒ 揚水規制 ⇒ 地下水位上昇 ⇒ 地下構造物の浮揚

地盤沈下

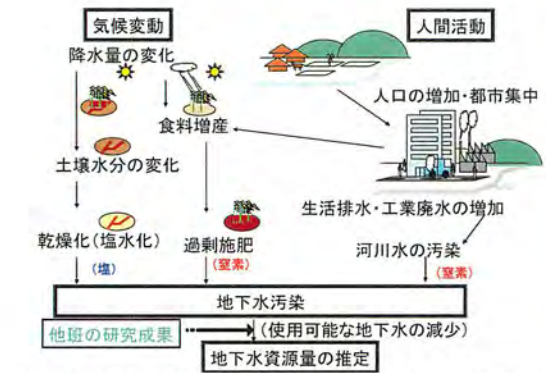


地下環境災害と水資源転化

気候変動 → 人間社会の対応 → 地下水環境変化

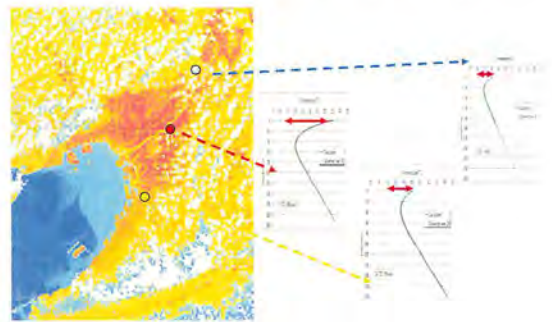


気候変動による人間社会の対応と地下水環境変化

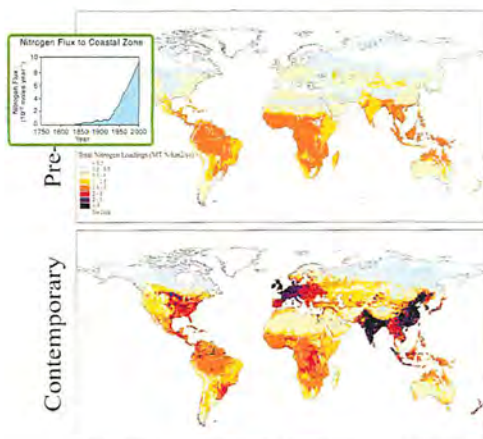


人間活動・気候変動による地下水汚染

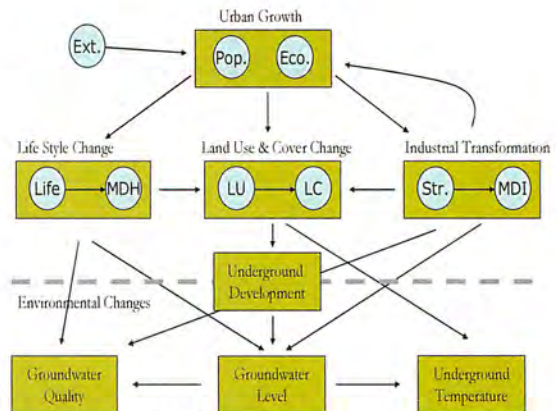
ヒートアイランドと都市の地下熱汚染



都市化による地下熱汚染



沿岸域への物質負荷の増大



都市社会基盤と地下環境問題

なぜ地下環境か

● 地下環境の重要性

水資源としての地下水の重要性は、我が国で考えられている以上に高く、現在、世界人口のおよそ 1/3 が地下水に依存した生活をおくっている（国連『The Millennium Report』2001年）。また地下水は水資源として重要であるばかりではなく、湧水等とおして、人間生活・社会・文化等においても重要な役割を果たしてきた。しかし従来の「地球環境変動研究」は、その殆どが地表面より上の水・大気あるいは海洋によるもののみであり、地下の環境変動問題は目に見えにくく評価しにくい、ということもあって重要であるが放置されてきた。

世界的には、人口増加に伴う地下水利用の増大により、地球規模で $200\text{km}^3/\text{year}$ の割合で地下水資源が減少している（世界銀行報告,2000年）。さらに人間活動の広範囲化に伴う地下環境の利用は、これまでに経験のない深度に及び始め、様々な問題が顕在化している。過剰揚水による地盤沈下を防止するための揚水規制により、都市部での地下水位は回復しつつあるが、水位の上昇にともない地下構造物が浮き上がるという新たな問題も生じている。さらには、硝酸性窒素汚染や産業廃棄物処分場等からの有害物質の流出による沿岸海洋汚染など、地下環境に係る問題は山積しているが根本的な解決には至っておらず、人口増加によってその影響はますます深刻化している。これらの問題は地下環境に依存する社会にとって緊急に解決を要する問題である。

一方、最近の温暖化による降水パターンの変動により、貯水池ダムによる不安定な表流水利用から地下水依存へとシフトする地域が現れ始めている他、気候変動は地下水涵養・流出・貯留量の変化、水質の変化として現れる。このように、有用な地下水資源を含む地下環境は、気候変動の影響をも受けて大きく変動しており、地下環境変動による社会への影響が危惧されている。

● 地下環境の特性

地球環境問題解決のための最重要課題は、人間と自然との相互作用を時空間的に評価することである。地球環境の中に、人間活動の影響がどのような形で保存されているかを考える時、その媒体の記憶容量と人間活動の影響範囲を考慮する必要がある。地球を構成する大気・陸域・海域の中で、大気ではメモリーが小さすぎ、過去の人間活動の影響を十分保存するだけの容量がない（時間情報の不足）。一方海域は、人間活動の地域性を十分残存することができない（空間不均質性の欠如）。したがって、人間活動が自然環境に与える影響を評価するためには、陸域地下環境に積分値として残存する指標を用いて解析することが重要であり、それが地球環境問題に大きく貢献すると考える。

なぜアジア沿岸の都市域か

沿岸域は、地球を構成する大気・陸・海の3者が接する境界であるとともに地球上の人口の60%以上を有し、大都市の多くが存在する。また大陸棚・沿岸域は漁獲量の9割以上、生物生産の3割以上を有する地域でもあり、経済的価値も非常に高い地域である。このように、沿岸域は自然と社会の発展にとって必要不可欠な重要な地域であるばかりでなく、空間・時間的変動も大きく、自然災害や気候変動に対する脆弱性が大きい。

特にアジア沿岸都市では、大都市が形成されており、現在も都市への人口集中が続いている。このように、人口増加・汚染・自然資源の劣悪化などアジア沿岸都市域に存在する脆弱性は、気候変動・海水位変動によりさらに悪化する恐れがある。“沿岸域”の脆弱性を認識し、多くの人々が住むアジア沿岸域の人々の幸せのために、問題の所在と将来のあり方を明らかにする必要がある。

どのように明らかにするか

● 環境復原と未来提言

現在の地下環境に残存する水・熱・物質に関する様々な指標から、過去を復原するとともに、過去から現在への変動のプロセスを「人間と自然とのせめぎあい」として捉えなおし、未来のシナリオ提言を目指す。つまり「現在から過去」と「過去から現在・未来」の2つの時間軸の融合に挑戦する。

- 各研究手法の詳細は、後述のグループレビューにゆずるが、以下に代表的なものを簡単に示す。

地下熱逆解析：現在の地下環境に残存する温度情報を逆解析することにより、過去の気候変動・土地利用変化・都市化プロセスを復原する。

GRACE衛星データと重力測定：重力場の変動を衛星データから捉えることで地下水貯留量の変動を評価し、合わせて現場での重力測定による地下水流動評価を行う。

同位体を用いた汚染物質同定・水文パラメータの特定：各種安定同位体・放射性同位体を用いて、水の起源・滞留時間の推定・汚染物質の同定などを行う。

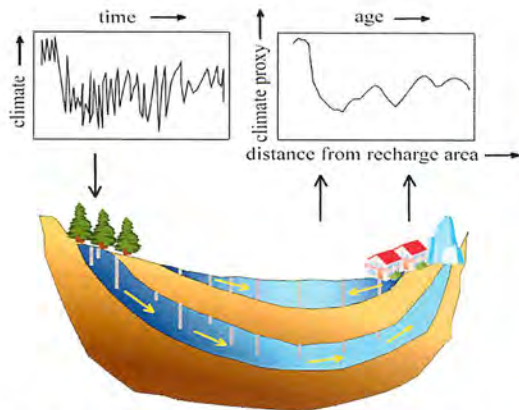
社会経済データ解析：人口動態・経済指標・都市開発指標など、都市社会経済に関する各種統計データの解析により、地下環境問題と都市との関係を明らかにする。

都市復原：歴史資料・古地図などを用いて過去の都市と水環境を復原することにより、各年代における自然環境と人間環境との関係を明らかにする。

物質負荷量解析：人間社会起源の栄養塩や汚染物質の移動形態を明らかにし、沿岸域への負荷量を算定するために、堆積物分析・抽出実験等を行う。

土地利用変動・都市化解析：GIS・衛星データ等を用いて、都市域の拡大・土地利用の変動・地表面温度変動などを解析する。

研究手法の例

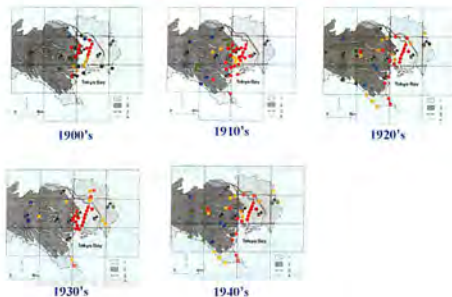


同位体を用いた水文指標の抽出



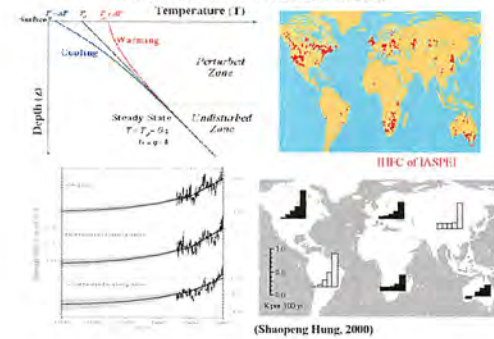
衛星GRACEを用いた地下水調査

東京の歴史的な水質分布

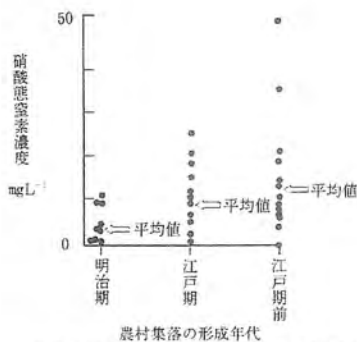


都市の水環境復原

地下温度を用いた気候変動復原

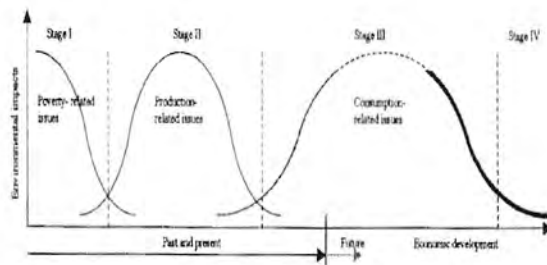


地下温度を用いた気候変動復原



第17図 農村集落の形成年代と集落地下水の硝酸態窒素濃度の関係

集落の形成年代と硝酸態窒素濃度



経済成長と環境変化のモデル化

プロジェクトの対象時間・範囲

(1) 時間スケール

4つの研究軸（社会都市基盤・水・熱・物質）ともに、過去50年をターゲットの中心にし、過去100年までをめぐりにさかのぼって、都市の発達段階と各環境軸（水・熱・物質）との関係を明らかにする。また人間活動の影響を評価するために、ベースとなる自然環境変動を明らかにする意味から、古環境復原（現在から過去）を行うが、各研究軸ごとにさかのぼれる年代が異なるため、最大1000年程度をめぐりに、各研究軸ごとに決定する。

(2) 対象範囲

東京・大阪・(名古屋)・ソウル・バンコク・(台北)を対象都市とする。もう一箇所の海外都市は、ジャカルタ・(マニラ)等の中から、観測施設（井戸など）の整備状況・カウンターパートなどを考慮して最終的に決定する。これらの都市は、4つの研究軸に共通の研究対象都市とする。また、カッコ内の都市は、研究軸ごとに重要と思われる都市を選定し、比較対象都市とする。

なお都市域を研究対象の中心とするが、地下水流動系を考慮して、上流・下流を含めた流域レベルを対象範囲とする。また、レファレンスとしての周辺の非都市域も対象範囲に含める。

国際機関との連携

当プロジェクトでは、地球研の特色の1つである「国際性」の観点から、以下の国際機関と強い連携を持って、プロジェクト研究の推進を行う。

水環境に関しては、**GWSP (Global Water System Project, <http://www.gwsp.org/>)**と**UNESCO-IHP (International Hydrological Program)のGRAPHIC (**G**roundwater **R**esources **A**ssessment under the **P**ressures of **H**umanity and **C**limate Changes, <http://www.chikyu.ac.jp/USE/GRAPHIC/GRAPHIC.htm>)**プロジェクトと強くリンクして、プロジェクト研究を進める。

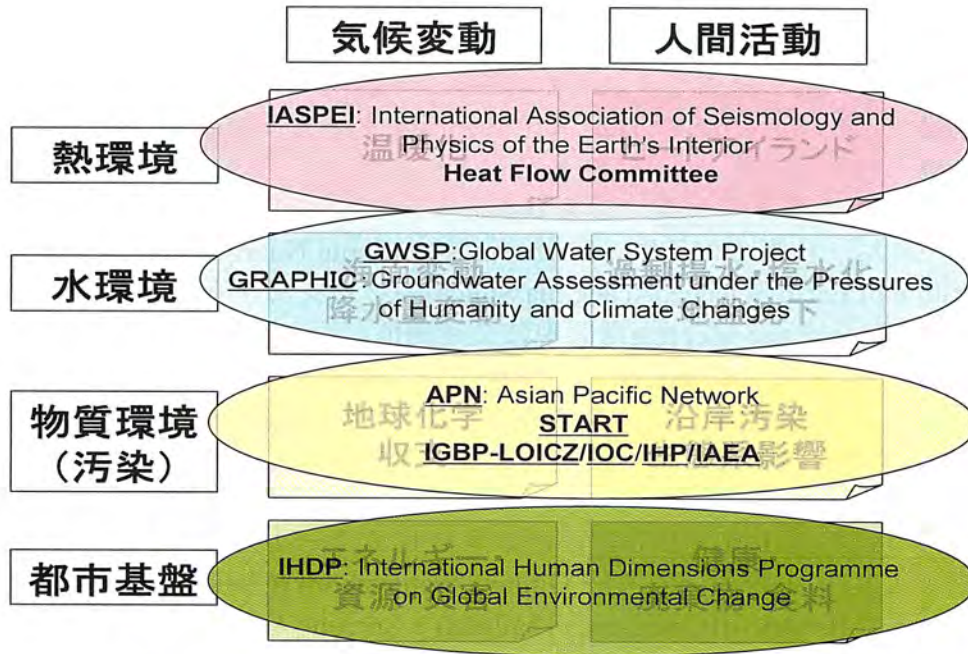
また熱環境に関しては、**IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) - IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) の Heat Flow Commission (<http://www.iaspei.org/commissions/IHFC.html>)**と当プロジェクト地下熱グループの連携により、温暖化・都市化の影響評価を行う。

さらに物質環境に関しては、**APN (Asian Pacific Network, <http://www.apn.gr.jp/en/indexe.html>)**、**START (SysTEM for Analyses Research and Training, <http://www.start.org/>)**、**IGBP (International Geosphere - Biosphere programme) - LOICZ (Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone, <http://www.loicz.org/>)** や **IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission, <http://ioc.unesco.org/iocweb/index.php>)**、**UNESCO-IHP (International Hydrological Program)**、**IAEA (International Atomic Energy Agency, <http://www.iaea.org/index.html>)**との連携により、沿岸域への物質負荷の評価を行う。

社会都市基盤に関しては、**IGBP の IHDP (International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, <http://www.ihdp.org/>)** との強い連携により、人間活動による地下環境変動について評価する。

また地下水貯留量の変動をグローバルに評価する手法として、重力場の変動を衛星デ

一タから捉えることで地球上の水移動を解析するGRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)国際プロジェクトとの連携も図る。



各研究軸の国際機関対応

進捗状況

地球研プロジェクト F S 2 - 4 谷口真人 都市の地下環境に残る人間活動の影響

- 平成16年6月4日 F S 2 - 4 全体会議 (プロジェクトメンバー: 発表者9人、参加者17人)
プロジェクトの研究対象都市・対象時間スケール等を議論し、研究軸(熱、水、物質(汚染)、社会経済・都市基盤)それぞれの中に、(1)現在から過去、(2)過去から現在・未来の時間軸をとり、計8班でプロジェクトを構成することを確認した。
- 平成16年7月5-9日 シンガポール F S 2 - 4 会議 (参加者: 谷口(地球研)・嶋田(熊大)・小野寺(広大)・Guebuem Kim (Seoul National University)・Chung-Ho Wang (Institute of Earth Science, Academia Sinica)のプロジェクトメンバー他、計10人。Asia Oceania Geoscience Meeting期間中に2回開催)
プロジェクトの現地対応機関は、ソウルについてはソウル国立大学、台湾については台湾科学院とすることで合意した。シンガポールについては、地下環境情報不足などの理由でプロジェクトの対象としないことを決定した。
- 平成16年7月16-23日 バンコク F S 2 - 4 会議 (参加者: 谷口(地球研)・西島(九大)・小野寺(広大)・Gullaya Wattayakorn (Chulalongkorn University)・Somkid Buapeng (Ministry of Industry, Thailand)・Suchint Deetae (Kasetsart University)・Bill Burnett (Florida State University)・Anond Snidvongs (START)・鈴木和哉(JICAタイ事務所)他、計3回開催)
バンコクでの対応機関をチュラロンクン大学とタイ水資源局とすることで合意した。また協力機関として J I C A タイ事務所が参加予定。さらに、**START (SysTEM for Analysis, Research and Training, IHDP/IGBP/WCRP のプログラム)**との協力関係を確認した。タイ水資源局所有の観測井戸施設と沿岸域を視察し、プロジェクト開始時のロジスチックを確認した。
- 平成16年7月27-29日 シアトル水循環国際ワークショップ
地球観測計画 GEOS の水循環に関する内容について、日・米・欧の専門家が議論した。地下水部門の強化と **GWSP(Global Water System Project, IHDP/IGBP/WCRP/DIVERSITAS のプロジェクト)**日本代表として参加し、F S 2 - 4 の研究計画を説明した。
- F S 2 - 4 ホームページ (英語・日本語) の開設<http://www.chikyu.ac.jp/USE/>
- 平成16年9月2日 GRAPHIC日本委員会 (参加者: プロジェクトメンバー6人を含む地下環境変動研究者23人が参加)
UNESCO project **GRAPHIC (Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Changes)** の代表者として、日本国内での委員会を主催した。F S 2 - 4 の研究計画を説明し、新たにプロジェクトメンバーを追加した。
- 平成16年10月4-7日 ドイツ・アーヘン「地球熱学に関する国際会議」 (メンバー参加者: 谷口(地球研))

プロジェクト FS2-4 の「熱班」の研究計画を発表し、地域代表性や手法の改善に関して議論した。

- 平成16年11月25・26日 **FS2-4全体会議** (発表者15人、参加者24人)

研究軸「熱、水、物資(汚染)、社会経済・都市基盤」ごとのレビュー報告(8件)、バンコク訪問報告、シンガポール訪問報告、新メンバー研究紹介等を行った。

2005年3月までの予定

- 平成16年12月6-7日 **GWSP(Global Water System Project)専門家会議** (ドイツ・ボン)。GWSP日本代表として参加予定。FS2-4の研究計画を説明予定。
- 平成16年12月13-16日 **AGU(American Geophysical Union)**で、FS2-4関連のセッションをコンビンナーとして開催予定。20件の発表予定。
- 平成16年12月17日 **地球研プロジェクト報告会**でFS2-4の報告
- 平成17年1月7-11日 フィリピン訪問 (参加予定者：谷口(地球研))：Fernando P. Siringan (University of the Philippines)・Joseph M. Foronda (University of the Philippines) とFS2-4について協議し、沿岸域の視察を行う。マニラをプロジェクト対象都市とするかどうかを決める予定。APN (Asian Pacific Network)との連携計画を進める。
- 平成17年2月8-10日 バンコク国際ワークショップ 参加予定者：本プロジェクトメンバー：谷口(地球研)・徳永(東大)・Guebuem Kim (Seoul National University)・Chung-Ho Wang (Institute of Earth Science, Academia Sinica)・Gullaya Wattayakorn (Chulalongkorn University)・Somkid Buapeng (Ministry of Industry, Thailand)・Suchint Deetae (Kasetsart University)・Bill Burnett (Florida State University)・Anond Snidvongs (START)ほか、東アジア地域の関係研究者25人が参加予定。
- 平成17年2月中旬 **FS2-4コアメンバー会議** (参加予定者コアメンバー全員) 3月中旬予定の評価委員会へ向けた準備を行う予定。
- 平成17年3月14・15日 **外部評価委員会**

地球研・谷口 FS 会議

プロジェクト:都市の地下環境に残る人間活動の影響

日時 : 6月4日(金)9:30-21:00(会館内での懇親会含む)

場所 : 京都市国際交流会館 <http://www.kcif.or.jp/jp/footer/05.html>

プログラム

- 9:30-10:00 谷口真人 : プロジェクト説明
- 10:00-10:20 福田洋一(京大) : 重力観測と衛星データを用いた地下水調査ー精密重力測定とその可能性ー
- 10:20-10:40 山野誠(東大) : 地下温度の計測による地表面環境変動の影響評価
- 10:40-11:00 休憩
- 11:00-11:20 中野孝敬(地球研) : トレーサービリティと物質循環
- 11:20-11:40 河本和明(地球研) : アジアの気候要素の長期変動のレビュー 水・熱環境への影響の理解に向けて
- 11:40-13:00 昼食
- 13:00-13:30 金子慎治(広島大) : アジア諸都市の社会都市基盤
- 13:30-14:00 嶋田純(熊本大) : アジアの諸都市の地下水環境
- 14:00-14:30 一ノ瀬俊明(環境研) : アジア諸都市の熱環境
- 14:30-15:00 小野寺真一(広島大) : アジア諸都市の地下物質環境
- 15:00-15:15 休憩
- 15:15-16:45 プロジェクトの都市・時間スケールに関する議論
- 16:45-17:30 アジア都市視察について
- 17:30-18:00 予算・その他
- 18:00- 懇親会 (会館内)

RIHN project 2-4FS meeting
“Human Impacts on Subsurface Environments”

9:00-12:00, July 7, 2004

Carlton Hotel, Singapore, Victoria Room #2: (<http://www.carlton.com.sg/>)

- Introduction of RIHN project 2-4FS
Makoto Taniguchi (RIHN)
- Subsurface environmental data of Asian countries
Jun Shimada (Kumamoto University)
- Subsurface environments of Seoul, Korea
Guebuem Kim (Seoul National University)
- Subsurface environments of Taipei, Taiwan
Chung-Ho Wang (Institute of Earth Science, Academia Sinica)
- Discussion and future works

RIHN project 2-4FS meeting
“Human Impacts on Subsurface Environments”

13:00-17:00, July 23, 2004

Ambassador Hotel, Bangkok, Thailand

- RIHN project 2-4FS
Makoto Taniguchi (RIHN)
Jun Nishijima (Kyushu University)
Bill Burnett (Florida State University)
Henrieta Dulaiova (Florida State University)
Gullaya Wattayakorn (Chulalongkorn University)
Suchint Deetae (Kasetsart University)
- Discussion and future works

“GRAPHIC日本委員会”

GRAPHIC

(Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change)

HP: <http://www.chikyu.ac.jp/USE/GRAPHIC/GRAPHIC.htm>

日時：9月2日 11:00 - 18:30

場所：ぱるるプラザ京都（JR京都駅徒歩1分）・研修室4

11:00 - 12:30

谷口真人：ユネスコ GRAPHIC と学術会議地下水委員会

佐倉保夫：IAH と日本の地下水研究

嶋田 純：気候変動による地下水環境変動

長田昌彦：人間活動による地下水環境変動

山中 勤：地下水統合管理

13:30 - 18:30

総合討論・将来の研究戦略

総合地球環境学研究所谷口プロジェクト全体会議

日時：2004年11月25・26日

場所：同志社・新島会館

25日

- 13:00-13:30 谷口真人(地球研)「プロジェクト進捗状況」
13:30-14:00 安達 一(JICA)「都市の発展と環境—行政・社会ファクターの観点から—」
14:00-14:30 玄地 裕(産総研)「ライフサイクルアセスメント(LCA)手法の紹介と水処理設備のLCA事例」
14:30-15:10 金子慎治・岡村敏之(広島大)「社会経済グループレビュー」
15:10-15:30 休憩
15:30-16:10 小野寺真一(広島大)「物質グループレビュー」
16:10-16:30 林 正貴(カルグリー大)「コメント」
16:30-16:50 小野寺真一(広島大)「シンガポール視察・打ち合わせ報告」
16:50-17:10 西島 潤(九州大)「バンコク視察・打ち合わせ報告と重力測定のプロ案・問題点」
17:10-18:20 総合討論
18:30-20:30 懇親会

26日

- 9:00- 9:40 一ノ瀬俊明(環境研)「都市熱グループレビュー」
9:40-10:20 山野 誠(東京大)・江原幸雄(九州大)「地下熱グループレビュー」
10:20-10:40 休憩
10:40-11:20 福田洋一(京都大)「重力衛星・地下水グループレビュー」
11:20-11:40 徳永朋祥(東大)「地下水障害と水資源転化」
11:40-12:00 河本和明(地球研)「アジア域における数十年規模気候変動」
13:00-13:40 嶋田 純(熊本大)「水グループレビュー」
13:40-14:20 谷口智雅(立正大)・吉越昭久(立命大)「都市地理グループレビュー」
14:20-14:40 高村雅彦(法政大)「タイ・チャオプラヤー川下流の水辺環境について—都市と住宅の環境形成—」
14:40-16:00 総合討論

研究組織と構成メンバー

当プロジェクトを遂行するに当たり、以下の4つの研究軸〔班〕を設ける。

- (1) 水班
- (2) 熱班
- (3) 物質（汚染）班
- (4) 社会経済・都市基盤班

またそれぞれの研究班について、「現在から過去」「過去から現在・未来」の時間軸を考慮して、それぞれ2つの研究グループ、計8つのグループに分けてプロジェクトを推進する。

- (1) 「水グループ」と「衛星・重力グループ」
- (2) 「地下熱グループ」と「都市熱グループ」
- (3) 「堆積環境グループ」と「物質環境グループ」
- (4) 「都市地理グループ」と「社会経済グループ」

これらのグループは、お互いに緊密に連携して、有機的に統合しながらプロジェクトを遂行する。

なお、F S段階での構成メンバーを次表に示す。

構成メンバー

名前	所属	専門
プロジェクトリーダー		
谷口 真人	総合地球環境学研究所	水文学
社会経済・都市基盤班		
金子 慎治	広島大学大学院国際協力研究科	環境経済学
岡村 敏之	広島大学大学院国際協力研究科	開発経済学
長島 啓子	広島大学大学院国際協力研究科	環境社会学
吉越 昭久	立命館大学文学部	地理学
谷口 智雅	立正大学文学部	歴史地理学
安達 一	国際協力機構地球環境部	社会開発学
水班		
嶋田 純	熊本大学理学部	地下水学
福田 洋一	京都大学大学院理学研究科	衛星測地学
徳永 朋祥	東京大学大学院工学研究科	地球システム学
西島 潤	九州大学大学院工学研究科	測地工学
上村 剛史	国立極地研究所研究教育系	地下環境学
河本 和明	総合地球環境学研究所	気象学
熱班		
山野 誠	東京大学地震研究所	地震学
江原 幸雄	九州大学大学院工学研究科	火山学
後藤 俊作	京都大学理学研究科火山研究センター	地球熱学
一ノ瀬 俊明	国立環境研究所地球環境研究センター	環境動態学
玄地 裕	産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター	地域環境学
物質（汚染）班		
小野寺 真一	広島大学総合科学部	環境保全学
中野 孝敬	総合地球環境学研究所	地球化学
北川 浩之	名古屋大学大学院環境科学研究科	地球環境変動学
中山 友栄	京都大学生存圏研究所	住空間環境学
細野 高啓	早稲田大学理工学部	環境復原学
バンコク		
Gullaya Wattayakorn	Dept. of Marine Science, Chulalongkorn University	地球化学
Somkid Buapeng	Department of Groundwater Resources, Ministry of Natural Resources and Environment	地下水学
ソウル		
Guebuem Kim	School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University	沿岸海洋化学
Lee K.K.	School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University	地下環境学
台湾		
Chung-Ho Wang	Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taiwan	地下水学
マニラ		
Fernando Siringan	National Institute of Geological Sciences, University of the Philippines	地球環境学
ジャカルタ		
Rober Delinom	Division of Hydrology, Indonesia Institute of Science, Indonesia	地下環境学

都市の地下水流動・賦存特性に残る人間活動の影響

熊本大学 嶋田 純

1. はじめに

惑星地球に居住する人類の増大は、地球そのものが保有する気候変動に加えて、温暖化という人為的な変動要素の追加を余儀なくさせた。科学技術の進歩と相まって20世紀初頭より急速に増加し始めた人口は、都市部への急激な人口集中を引き起こし、新たな多くの環境問題を台頭させた。この全球温暖化に伴う影響と人口増加にともなう地域的影響の双方が重合して都市域の地下水流動・賦存特性に変化をもたらしている。本稿では、それらに関する研究論文のレビューと今後の研究の方向性についての模索を試みた。

2. 開発途上国と先進国の違い

都市部への人口集中・土地利用変化に伴う地下水環境とくに地下水の流動や存在形態に対する影響は、水質と水量の二つの側面に対して現れている。科学文献データベース (Web of Science) を用いて1996年から2004年までの間の“groundwater”と“urban”というキーワードに関連する文献377件について調べたところ、その殆どが都市域における地下水水質の汚染事例研究であった。それらの原因は、産業廃棄物ピット、下水路、施肥、有機塩素系汚染、ガソリン等々様々な人為起源物質からの地下水への漏洩の実態研究である。これに対し、地下水の流動・賦存・挙動に関連したものは、12件抽出された。それらの中には汚染による水質悪化に関して、地下水流動という観点から取り上げられている事例も含まれていた。これらを概観すると、問題の所在は先進国と開発途上国において状況を異にする部分があることが認識される(図-1, 2参照)。

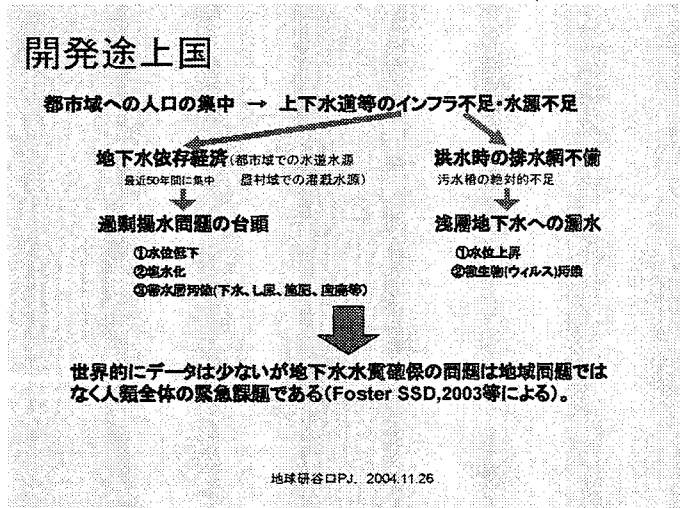
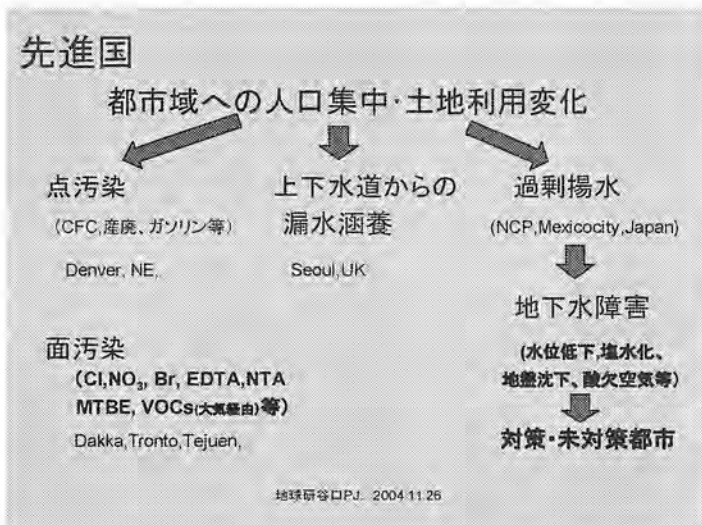


図-1. 開発途上国における都市の地下水流動への人間活動の影響

すなわち、開発途上国においては図-1に示すように、20世紀後半より顕著に顕在化した都市域での水道水源、農村域での灌漑水源としての地下水利用の増大がある。これらの結果として過剰揚水に伴う様々な地下水障害が、開発途上国特有の未処理下水やし尿による地下水汚染問題と重なって大きな環境問題になっている。また、都市部への急激な人口集中が都市のインフラ(下水や上水施設, 雨水排水等)整備に間に合わず、その結果として排水不良による浅層地下水の水位上昇(微生物・ウイルス汚染も含む)等が発生している (Foster, SSD, 2003)。



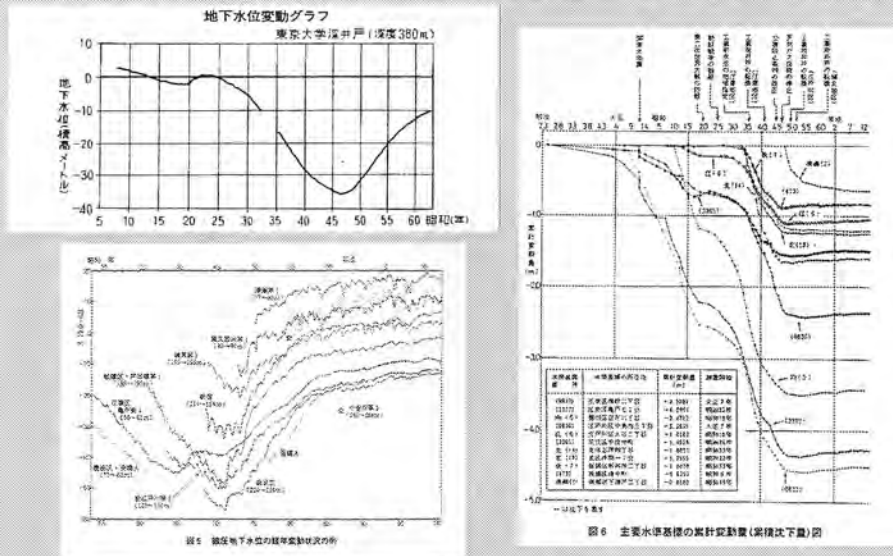
図－２．先進国における都市の地下水流動への人間活動の影響

これに対して先進国の都市部においては、同様な人口集中・土地利用変化によって発生している地下水流動への影響は、①人為的汚染源（化学工場、ガソリンスタンド、産廃施設等）からの点汚染と人為起源物質（Cl,NO₃(生活排水)、Br,EDTA,NTA(化学工場)、)の広域浸透、揮発性物質（MTBE,VOCs等）の大気経由の広域面的汚染、②上下水道網からの漏水(Lerner DN, 2002, Kini YY. *et al*, 2001)、③過剰揚水に伴う地下水障害が認識されている。特に③については、河北平原(Fu, GB *et al*, 2004, Foster,S. *et al*. 2004, Liu, CM *et al*. 2001)、メキシコシティの例 (Birlke P. *et al*, 1998, Esteller MV. *et al*. 2002)、日本及びアジア諸都市(地下水地盤環境に関するシンポジウム 2002-大都市の地下水問題、地下水環境問題に関する研究協議会 2002)の事例が詳しく報じられている。このように開発途上国と先進国では都市化に伴って発生する地下水質への影響は大きく異なっているが、水量に関しては過剰揚水に伴う地下水障害という点で共通した大きな課題になっていることが認識できる。

3. アジアの諸都市における地下水問題の現状

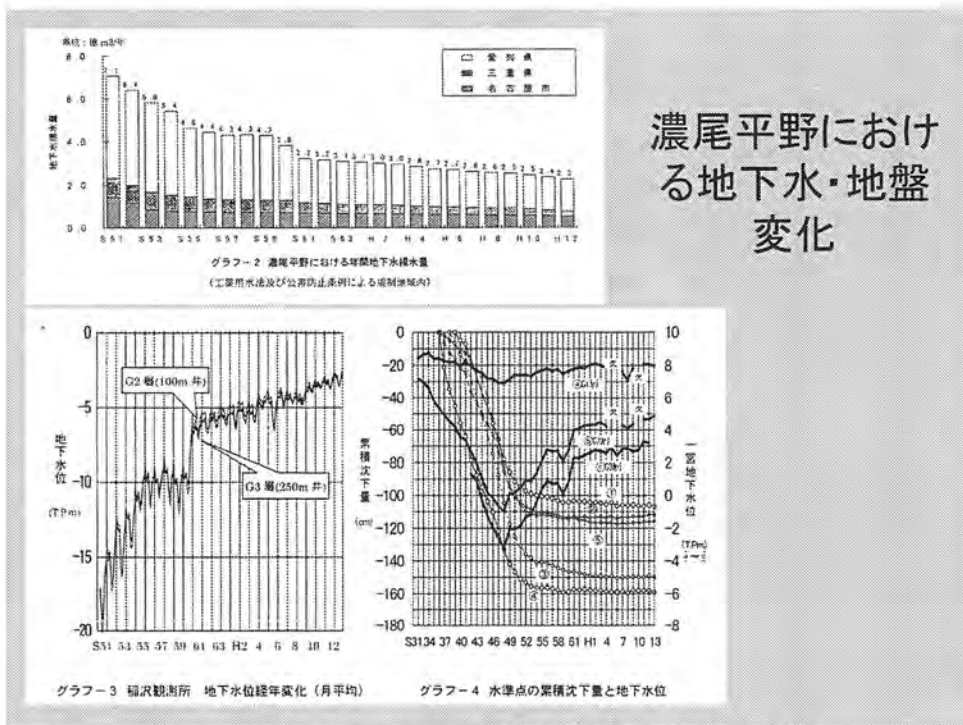
図－３は、関東平野における1935年以降60年間の地下水観測井の水位変化と地盤沈下変動を示したものである。1950年以降の戦後復興と高度経済成長に伴って著しい地下水水位低下が発生し、その結果地盤沈下を初めとする地下水障害が起こり、東京都を中心とする一都三県による揚水規制が1970年前後より開始された。その結果、思いのほか急速な水位回復とそれに伴う地盤沈下の停止が確認されたが、その後、過剰な水位上昇が都市地下部の浸水や建物の浮力上昇障害といった新たな環境問題を台頭させている。

関東平野における地下水変動と地盤沈下変動



地球研谷口PJ. 2004.11.26

図一 3 関東平野における地下水水位と地盤沈下変動



図一 4 濃尾平野における地下水水位と地盤沈下変動

大阪平野における 地下水水位観測

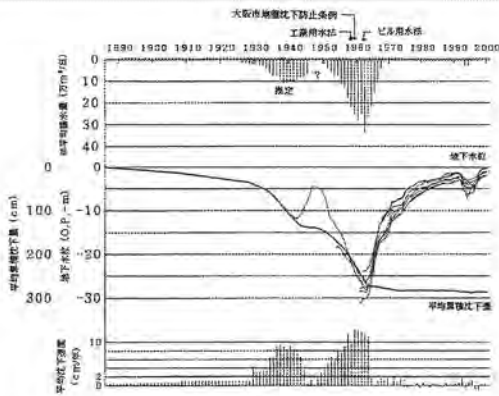


図-2 西大阪地域における長期的揚水量・地下水水位・地盤沈下変動状況



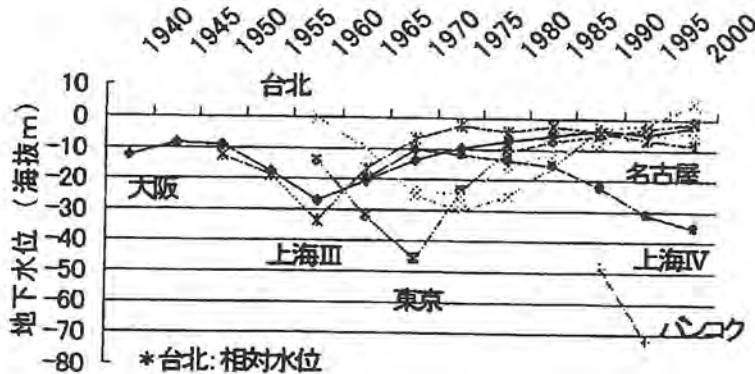
図-4 地下水観測点位置図

地球研谷口PJ, 2004.11.26

図-5 大阪平野における地下水水位と地盤沈下変動

このような地下水水位低下と揚水規制、水位上昇の状態は濃尾平野（図-4）・大阪平野（図-5）でも同様に確認されており、湿潤温帯圏にある我が国の高い地下水涵養量の存在を結果的に裏付けしたものと考えられている。

2002年12月に大阪で開催された“地下水地盤環境に関するシンポジウム2002—大都市の地下水問題—”というシンポジウムにおいて、アジアの大都市（上海、台北、バンコク）と日本の大都市の地下水の現状を比較してその問題点の抽出が行われた。



アジア大都市の地下水水位経年変化比較図

図-6

その結果、アジアの沿岸諸都市においても我が国と同様に、経済発展に伴う過剰揚水が引き起こした地下水水位低下が著しく、その結果地盤沈下等の地下水障害も発生している。また、これらの障害に対して、対策を行って効果が見られた都市（台北）と、あまり効果が見られない都市（上海）、未対策都市（バンコク）に分けることができる（図-6）

参照)。

4. 古水文学的研究手法による地下水帯水層中の気候変動の追跡

地下水の分野では、循環性の地下水と非循環性地下水の存在の認識とともに、様々な滞留時間を持つ地下水流動系が各地に存在していることが環境同位体により明らかにされ、大陸の規模の大きな帯水層や砂漠地帯の涵養量の少ない帯水層においては、放射性炭素や放射性塩素の測定の結果、数万年から数十万年前に涵養された地下水が現在の帯水層中に存在していることがわかってきた。このような古い地下水の存在は、単に滞留時間が長いと言うだけでなく、そこには図—7に示すようにそれらの地下水が涵養された時代の水文状況が保存されていることを意味する。

地下水の涵養プロセスは水循環の一環として行われるものであり、そのためそこに含まれる水文情報には、涵養時のその地域の気温・降水量・降水起源等の多くの情報が反映される。このような過去の水文現象を研究する分野を古水文学と言う。

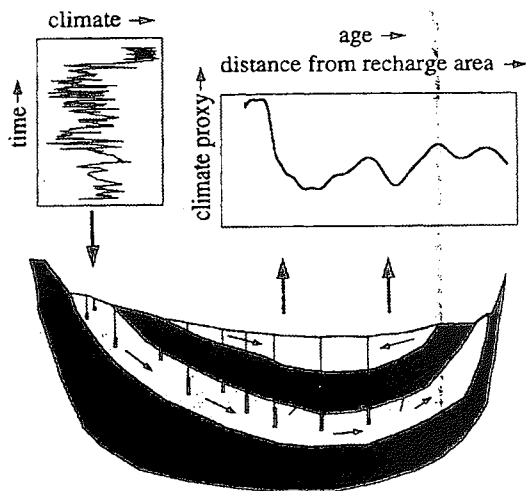


Fig. 1. Aquifers serve as low-pass filtering climate archives. In the recharge area, a high-frequency input signal (top left) corresponding to climatic and environmental conditions is encoded in the groundwater, for example, as stable isotope ratios, concentrations of dissolved noble gases, or conservative chemical species. As this signal is transported with the groundwater flow, short-term variations are smoothed by dispersion. A low-frequency output signal (top right) may be obtained by sampling along flow lines and dating of water samples (for example, with ^{14}C).

図—7 環境同位体による地下水帯水層からの古水文情報の抽出概念図(EOS.No.24,1998)

中国の黄河より北で北京・天津付近までの平原は河北平原と呼ばれ、黄河のもたらす肥沃な土壌と、温暖な気候のため小麦・とうもろこしを主体とする一大穀倉地帯を形成している。この地域の降水量は年平均 500 mm 前後で、同様の穀倉地帯を形成する揚子江沿岸地域に比べると相対的に少ないため、これらの穀物栽培には大量の灌漑水を用いた灌漑農業を行っており、その水源は黄河からの河川水と地域の深井戸に依存している。灌漑用の地下水取水においても、実質的に無管理状態の取水が行われているため、これが原因となって近年著しい地下水位低下が顕在化しており、都市部における生活用水の双方による過剰揚水が重なって、この30年の間に最大 40~50 m もの水頭低下が発生し地域の地下水資源問題として大きく台頭している(近藤他、2001)。

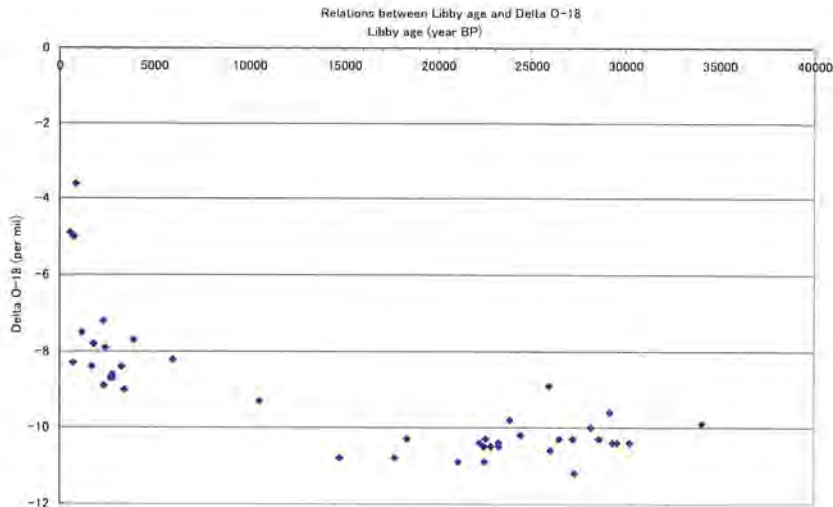


図-8 中国河北平原の地下水の古水文情報 (Shimada *et al.*,2002)

1999年から行われた筑波大学を中心とする日中共同学術調査により、地域の地下水調査が実施されその実態が明らかになった。図-8は、調査地域地下水の安定同位体酸素の同位体比を炭素14濃度から放射性減衰のみを基に算出した(libby年代)地下水年齢に対する関係として示したものである。涵養域である太行山東麓扇状地域では、地下水年齢が若くその安定同位体比は現在の降水水中の同位体比レベルである -8‰ ($\delta^{18}\text{O}$) 近くであるのに対し、地下水年齢が高く水質進化の認められる調査地域東部の深層地下水の同位体比は平均 -10‰ ($\delta^{18}\text{O}$) 近くでその炭素14年齢は2から3万年を示している。これらの酸素同位体比の違いは、涵養時期の気候(気温)の相違を反映していると考えられ、Rozanski (1985)の研究結果($0.5\text{‰}/1^{\circ}\text{C}$)に基づくと、酸素で 2‰ の差はおよそ 4°C 現在よりも寒冷気候下にあったことを示している。これらの結果は、最終氷期以降現在の間氷期までの当該地域の気温変化特性が地下水帯水層中に保存されたものであり、相対的にデータの少ない陸域の古気候情報としてその学術的価値は高い。

河北平原の事例に見られるように、炭素同位体情報をもとにした過去数万年程度の古水文情報(安定同位体比や希ガスによる古気温変動)は、図-9に示すように世界各地の大規模帯水層を持つ地域から報告(IAEA,1995、嶋田1998等参照)されているが、これらは、基本的に全球スケールの気候変動に伴う情報であり、扱っている時間スケールは数千年から数万年が一般的である。一方、この種の古水文学的研究として都市化のような人為的要因による研究例は皆無で、その原因は、多くの場合都市域には地下水涵養域が殆ど存在しないこと、都市化による変化の時間スケールが古水文学的手法の時間分解能よりも短期に且つ急激に起こっていること等が考えられる。

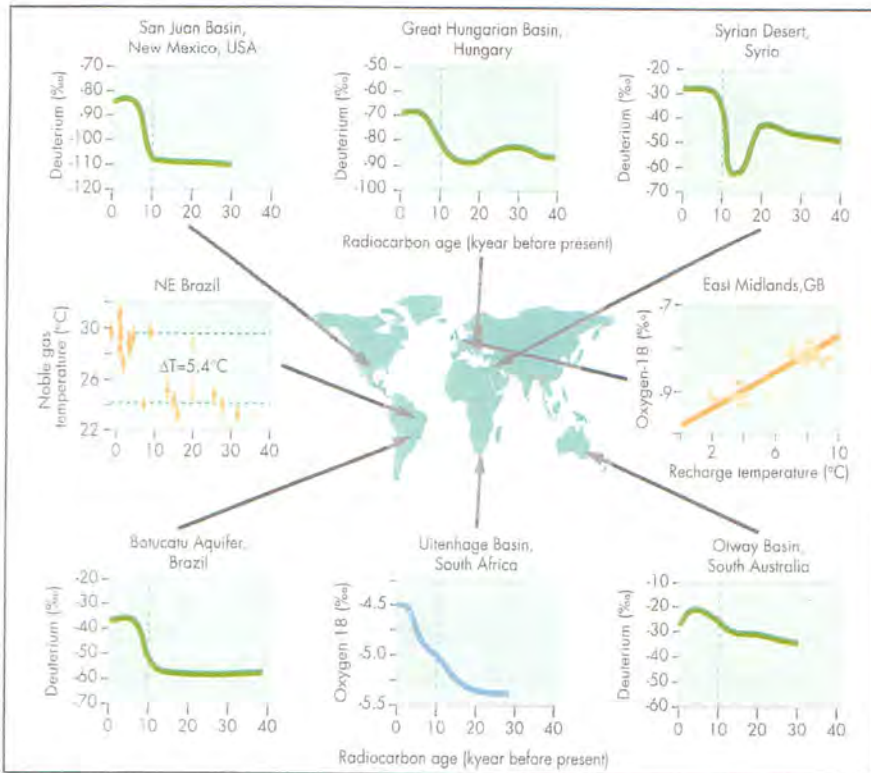


図-9 世界各地の大規模帯水層から抽出された過去4万年間の古気温情報 (IAEA,1995)

5. 地域水循環変化から地球温暖化の影響を読み取る

図-10は、樞根・枝川・中川(1995)によるスリランカの山地部と平地部の過去100年間の降水量を変動を示したものである。図によると、Aの山地部では明らかな降水

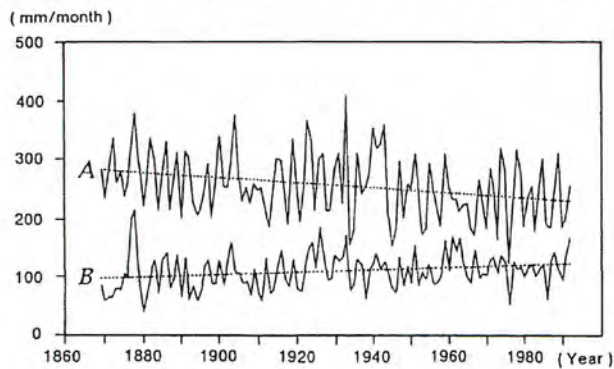


図3. 南西モンスーン季におけるスリランカ南西部の山地6地点(A)と平地6地点(B)の平均月降水量の時系列とトレンド

図-10

量の低減傾向が認められるのに対し、低地部では緩やかな上昇傾向があり、同じ地域でこのような変動の違いをもたらす要因が議論された。スリランカの西方海域の海面水温は図-11に示すように、過去60年間の温度変化は明らかに全球温暖化に伴う上昇傾向が認め

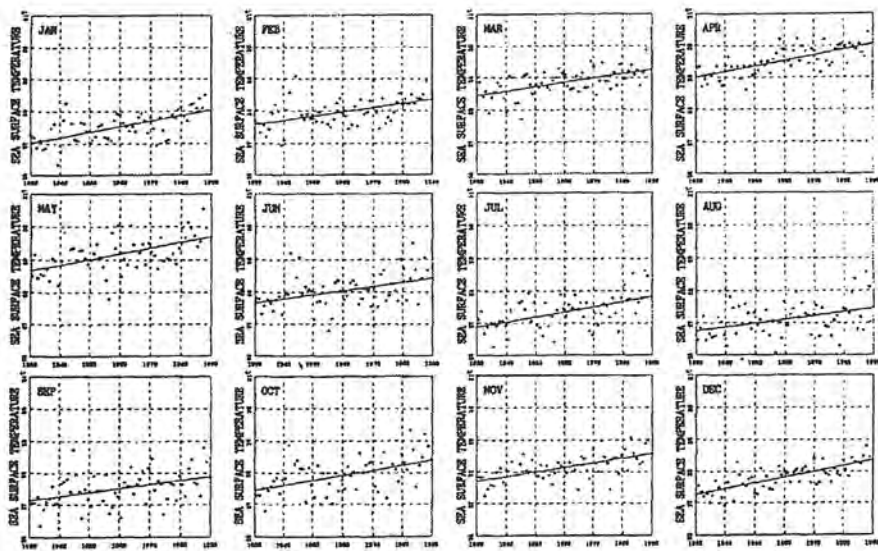


図5. スリランカ西方海域(75-80E, 5-10N)の月平均海面水温(°C)の時系列

図-11

られ、この事実は当然海面からの水蒸気発生量を強化していると考えられる。それにも係わらずスリランカ島の山地部での降水量の低減傾向が認められたことに対して、権根らは図-12のようなメカニズムを想定している。

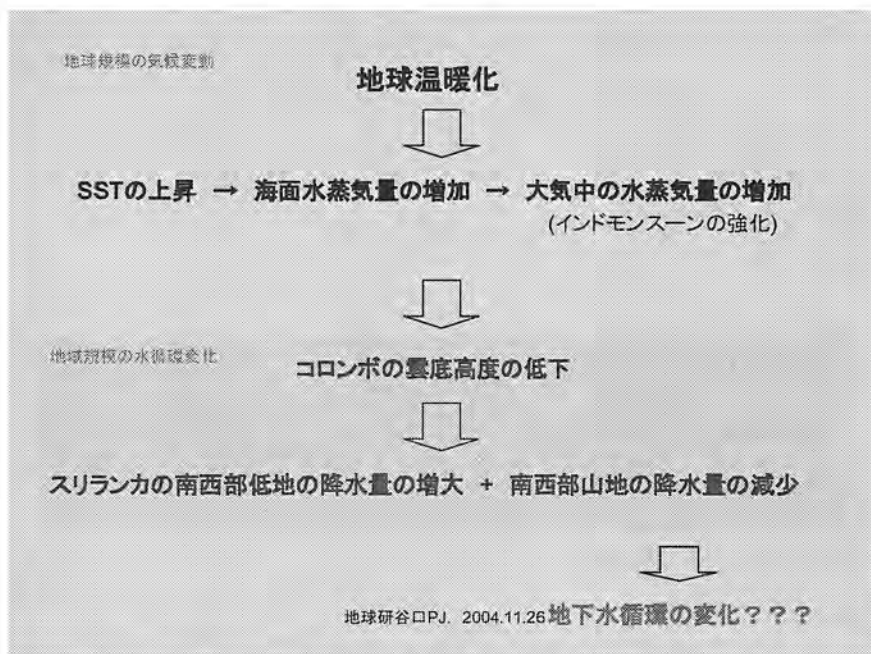


図-12 スリランカに於ける全球温暖化と地域水循環変化

前掲のスリランカの事例は、地域降水量変化に現れた全球温暖化の影響の事例として挙げられるが、水循環の更なるダウンストリームにある地下水流動に関する同様の事例が、台湾において存在していることが、シンガポールの本FS研究の打合せにおいて見出された (Wang, CH. 2004 私信)。

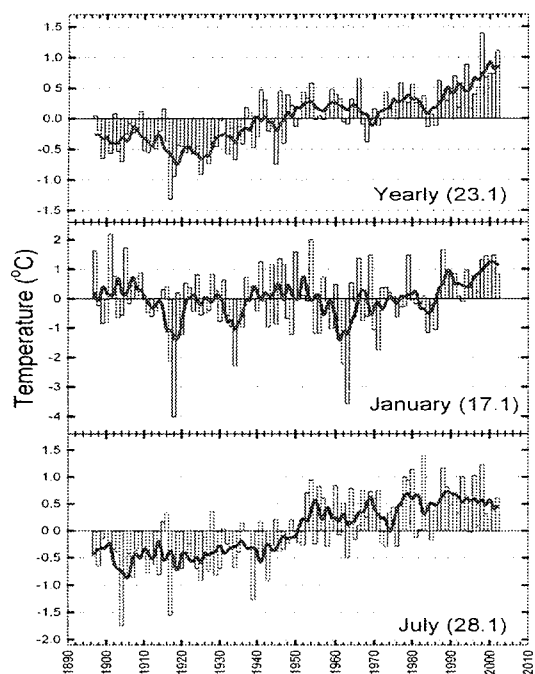


図-13 台湾の長期的気温変化

図-13は、台湾の過去100年におよぶ気温変化を示している。この図より、中緯度にある台湾においては明確な全球温暖化に伴う気温上昇が確認され特に夏季に顕著である。一方図-14に示す降水量の長期変化には、南西台湾において顕著な降水量低下が認められる。

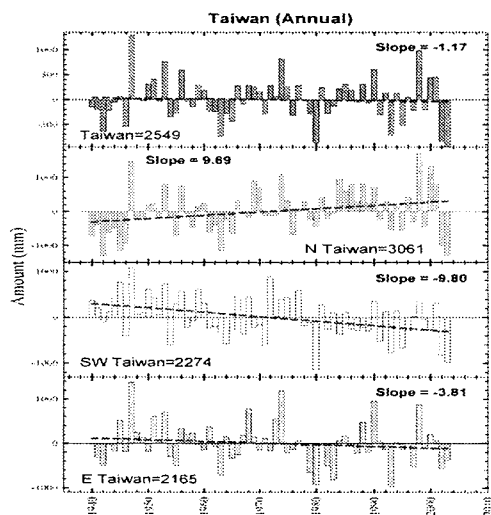


図-14 台湾に於ける降水量の長期的変化

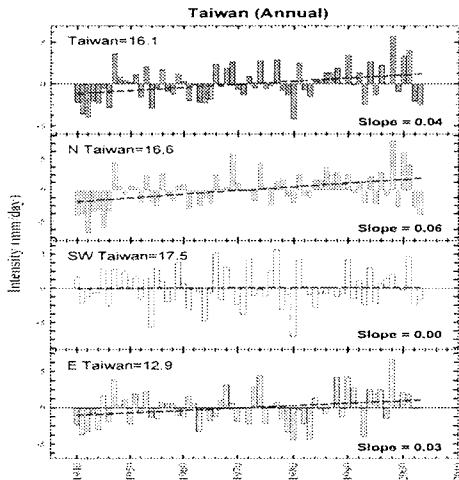


図-15 台湾に於ける降水量変動の長期的変化

また図-15に示した降水量変動は、台湾全土において年々の変動が増大する傾向を示している。このような背景を踏まえ台湾における水利用の対象は、温暖化に伴う変動が大きく、相対的に減少傾向の表流水から相対的に安定した地下水へとその水源変換が過去50年間に渡って全国的に行なわれるようになってきている(図-16)。

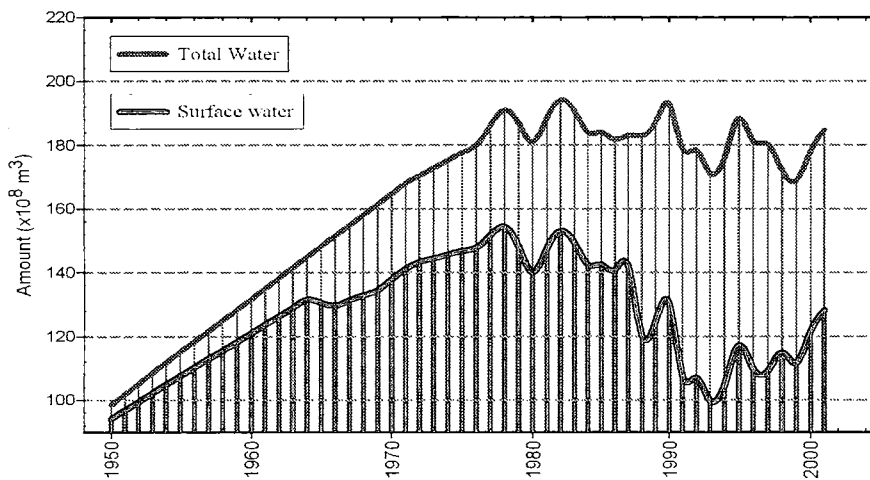


図-16. 台湾における水利用対象水源の変化

その結果、近年全国的に地下水揚水が多くなり、特に降水量減少傾向が顕著な南西部台湾において、図-17に示すような著しい水位低下が確認されている。これら一連の事実は、全球温暖化という気候変化に伴って地域の降水量が変動し、その結果地下水揚水量の増大と水位低下という地下水流動変化が発生したもので、間接的ではあるが、人為的原因で発生した温暖化という地球全体の気候変化が特定地域の地下水環境に及ぼしている影響ととらえることが可能である。このような兆候は、降水量の低減傾向が発生しやすい熱帯・亜熱帯地域や乾燥地域において有意に確認できるものと考えている。

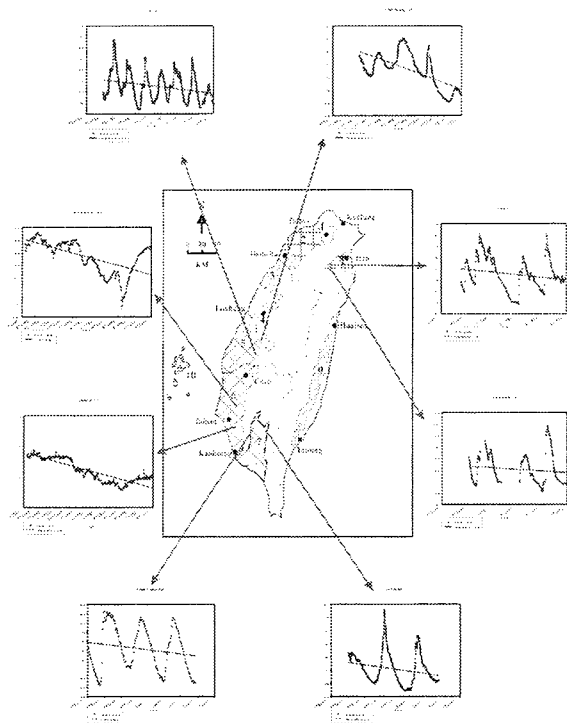


図-17 台湾各地に於ける地下水位変化

6. まとめと今後の課題

以上述べてきた今年度のFS研究の成果として以下の項目が挙げられる。

- ・ 都市の地下水流動・賦存特性に残る人間活動の影響は、先進国と開発途上国で状況はことなるが共通事情として過剰揚水に伴う地下水障害の台頭が挙げられる。
- ・ アジア諸都市における過剰揚水による地下水障害は顕在化しており、対策が成功している場合とそうでない場合が見られる。
- ・ 地下水帯水層からの古水文情報の抽出する技術は確立されてきているが、都市の影響(最近50年程度)を見るには時間スケールが短すぎる。
- ・ 気候変動(全球温暖化)が間接的に地下水環境変動を引き起こしている事例(台湾)が確認された。これらを踏まえた次年度以降の課題としては、代表的な都市を選定し
- ・ 地域の地下水流動の実態把握
- ・ 地域の水文・社会状況とその変動(特に降水量、水利用量、人口等)
- ・ 各都市における地下水位変動データの収集

を基にして、温暖化+都市化に伴う地下水利用の変化・地下水流動の変化の抽出と検証を行って行くことが今後のプロジェクトの課題と考えられる。

【参考文献】

榎根・枝川・中川(1995): SAHCの成果. 大学等における地球圏-生物圏国際共同研究計画成果報告書. 平成7年3月. 163-171.

近藤昭彦・ほか(2001): 中国華北平原の水問題. 水文・水資源学会誌 14(5), 376-387.

嶋田 純(1998): 地下水に秘められたロマンを求めて. 応用地質, 39(1), 60-68.

地下水地盤環境に関するシンポジウム2002-大都市の地下水問題-. 地下水環境問題に関する研究協議会2002. p.122.

Birlke P. et al, (1998): The water balance for the basin of the valley of Mexico and implications

- for future water consumption. *Hydrogeology Jour.* 6(4), 500-517.
- EOS.No.24, 1998
- Esteller MV. and Diaz-Degado C.(2002) : Environmental effects of aquifer overexploitation : A case study in the highlands of Mexico. *Environmental Management* 29(2), 266-278.
- Foster, SSD and Chilton PJ. (2003) : Groundwater: the process and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 358.(1440), 1957-1972.
- Foster,S. *et al.* (2004) : Quarternary aquifer of the North China Plain- assessing and achieving groundwater resource sustainability. *Hydrogeology Jour.* 12(1), 81-93.
- Fu, GB *et al*, (2004) : Hydro-climatic trends of the Yellow river basin for the last 50 years. *Climatic Change.* 65(1-2), 149-178.
- IAEA (1995) : GNIP パンフレット
- Kini YY. *et al*, (2001) : Urbanization and the groundwater budget, metropolitan Soeul area, Korea. *Hydrogeology Jour.* 9(4), 401-412.
- Lerner DN, (2002) : Identifying and quantifying urban recharge: a review . *Hydrogeology Jour.* 10(1), 143-152.
- Liu, CM *et al.*(2001) : Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain. *Water International* 26(2), 265-272.
- Rozanski, K.(1985): Deuterium and Oxygen-18 in European groundwaters links to atmospheric circulation in the past. *Chemical Geology.* 52, 349-363.
- Shimada,J., C.Tang, T.Tanaka, Y.Yang, Y.Sakura, X.Song, and C.Liu (2002): Irrigation caused groundwater drawdown beneath the North China Plain. *Proc. of Int'l Groundwater Conf. , Darwin, Northern Territory, Australia, May 2002.* 1-7.

表層地質や地下水位による地表面温度の地下温度への影響の違いや、バンコクなど、日本と異なる季節変化を示す地域での地下温度への影響の出方についても考察する必要がある。研究の成立に必要な前提条件としては、

- ・長期にわたる地上気温観測データ（年平均、できれば月別平均）が存在すること
 - ・直近に都市化の弱い比較対象地点が存在すること
 - ・ボーリングによる地中温度計測（できれば長期モニタリング）が可能なこと
- の3点が挙げられよう。

文献

- Ahmed, M.E.Y. (1999): Climatic variation and trends in tropical urban city during 1983-1997: A case of Kuala Lumpur and Petaling Jaya, Malaysia, *Proc. ICB-ICUC' 99*, ICUC4.4 (in CD-ROM)
- Bai, Y. and Kubo, S. (2000): Urban heat islands in Shanghai and their impacts. *Proc. Int. Sympo. Climate Change and Variability, and their impacts.* 250-256.
- Baik, J.-J. and Kim, Y.-H. (2003): Urban heat island in Seoul. *Proc. ICUC-5* (in CD-ROM)
- Changnon, S.A. (1999): A rare long record of deep soil temperatures defines temporal temperature changes and an urban heat island. *Climatic Change.* 42, 531-538.
- Choi, G.-Y., Choi, J.-N., and Kim, J.-W. (2000): The temporal characteristics of extreme temperature events in the central Korean Peninsula in summer during the 20th century. *Proc. Int. Sympo. Climate Change and Variability, and their impacts.* 223-228.
- Chung, U.-R., Choi, J.-Y., and Yun, J.I. (2004): Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 in Korea. *Climatic Change.* 66, 127-136.
- Ichinose, T. (2003): Regional warming related to land use change during recent 135 years in Japan. *Journal of Global Environment Engineering.* 9, 19-39.
- Kim, Y.-H., Baik, J.-J., and Choi, B.-C. (2003): Maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Proc. ICUC-5* (in CD-ROM)
- Landsberg, H.E. (1974): Man-made climatic change. *Physical and dynamic climatology.* WMO-No. 347, 262-303.
- Lee, M.-Y. (2000): The impact of climate change on the maximum air temperature, minimum air temperature and diurnal temperature range in Korea. *Proc. Int. Sympo. Climate Change and Variability, and their impacts.* 298-306.
- Mikami, T. (1996): Long term variations of summer temperatures in Tokyo since 1721. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University.* 31, 157-165.
- Mitchell, J.M. (1961): The temperature of cities. *Weatherwise.* 14, 224-229.
- Niitsu, K. (2000): Urban heat island in Bangkok and its impact. *Proc. Int. Sympo.*

- Climate Change and Variability, and their impacts.* 170-176.
- Nomoto, S. (1995): Climatic variation in Yunnan Province, China. *Proc. Int. Sympo. Paleoenvironmental Change in Tropical-Subtropical Monsoon Asia.* 24, 21-31.
- Qian, W. and Lin, X. (2004): Regional trends in recent temperature indices in China. *Climate Research.* 27, 119-134.
- Schaefer, D. (2000): Recent temperature trends and rainfall variabilities in Taiwan. *Proc. Int. Sympo. Climate Change and Variability, and their impacts.* 165-169.
- Yoshino, M. M. (1981): Change of air temperature distribution due to the urbanization in Tokyo and its surrounding regions. *Japan. Tsukuba Univ., Inst. of Geoscience, Science Reports, Sect. A.* 2, 45-60.
- Zhou, H. and Ding, J. (1998): Study on dynamic survey of thermal distribution in Shanghai. *Atmospheric Science Research and Application.* 1, 150-156.
- 足立アホロ (1997): 経済活動が都市温度に及ぼす影響～名古屋市を例として～. *天気.* 44, 621-629.
- 一ノ瀬俊明 (1999): 近世以降の土地利用変化に起因するローカルな気候変動～数値シミュレーションによるアプローチ～. *環境システム研究.* 27, 115-126.
- 大岡龍三・村上周三・持田灯・金相ジン (1998): 数値気候モデルによるバンコクの局地風と都市温熱環境の解析. *風工学シンポジウム論文集.* 15, 103-106.
- 尾島俊雄・村上周三・光本和宏 (1997): 巨大化するアジアの都市におけるヒートアイランド形成に関する CFD 予測～上海の都市化が及ぼす影響に関する検討～. *生産研究.* 49.
- 顧衛・早川誠而・李寧・馬楠 (2001): 急激な都市化に伴う都市気候の変化～中国深セン市を例として～. *天気.* 48, 523-533.
- 藤部文昭 (1998): 関東内陸域における猛暑日数増加の実態と都市化の影響についての検討. *天気.* 45, 643-653.
- 松本淳・山中大学 (2002): 東南アジアにおける気候学・気象学研究事情と気象局の現状. *気象研究ノート.* 202, 303-320.
- 谷田貝亜紀代・安成哲三 (1990): 中国の過去 36 年間 (1951-1986) の気候変動. *日本気象学会講演予稿集.* 57, 77-77.

重力衛星・地下水グループレビュー

- 衛星・地上精密重力測定による地下水変動モニター -

福田洋一

京都大学大学院理学研究科

(fukuda@kugi.kyoto-u.ac.jp)

1. はじめに

地下水の変動により地下での水の質量分布が変化すると、それは地表での重力変化として検出されるはずである。さらに重力の変化は、ある空間的な広がりにおける水質量変化の積分値を反映するので、水位観測とは異なった情報を与えてくれるはずである。このことは、重力変動データを適切に解析することで、地下流水系の規模や変動の様式、あるいは、地下水変動の物理的なメカニズムなどを推定する手がかりを与えてくれる可能性を示している。

地上での精密重力測定により重力の経年変化を検出しようとする試みは随分古くからあり、例えば、琵琶湖周辺での重力測定の歴史は1950年代にまでさかのぼる。しかしながら、当時用いられていたNorth American重力計やWorden重力計では、重力の経年変化を議論するのは精度的に無理があり、重力の経年変化の研究が本格的に実施されるようになったのは、1960年中頃、ラコスト重力計（G型）（写真1）が用いられるようになって以降のことである。

地下水変動が地上の重力変化に及ぼす影響は、地下水系の規模などにもよるが、せいぜい $10 \sim 20 \mu\text{gal} (10^{-8} \text{ ms}^{-2})$ 程度であり、これは、ラコスト重力計（あるいは他のスプリング式相対重力計）の野外での測定精度と同程度、あるいは、それを若干超える程度である。このため、地下水の変動が重力変化を引き起こすことは原理的に明らかであるにしても、長らくは、精密重力測定における一つの誤差要因として研究されたにとどまり、それを積極的に応用、利用しようとする研究は、例えば地熱発電所での熱水貯留層のモニター（例えば、NEDO、2003）など、限られたものであった。

一方、1980年代後半以降、高感度の超伝導重力計や絶対重力計での観測が各地で実施されるようになると、これらの測定精度に比べ、地下水変動の影響は、かなり深刻な誤差要因となってきた。しかしながら、このことは、地下水変動の研究に積極的に重力測定を利用しようとする契機になったことも確かである。さらに、2002年に打ち上げられた衛星重力ミッションGRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)では、全球的な水循環の解明、特に、水資源問題とも関連して、陸水あるいは地下水変動の解明が重要な目的となっている（National Research Council, 1997；福田, 2000）。小論では、これら、地上ならびに衛星での重力（ポテンシャル）測定の現状ならびに、それをを用いた地下水変動研究について簡単に紹介するとともに、今後の展望について述べる。

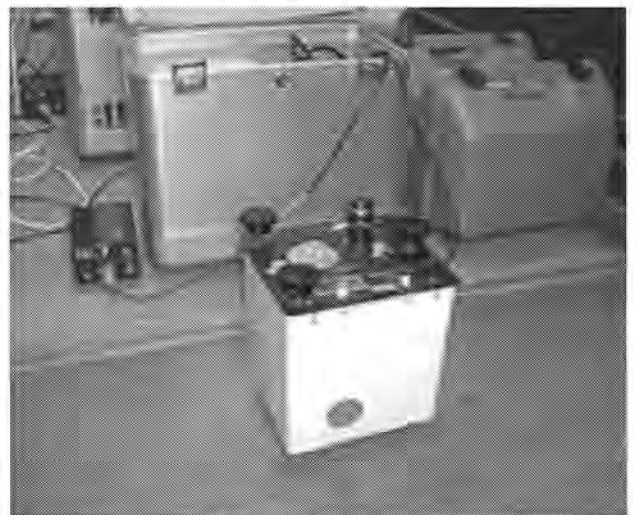


写真1. ラコスト重力計

2. 地上重力観測

2-1. バネ式相対重力計

ラコスト重力計、あるいはシントレックス重力計などポータブルなバネ式の相対重力計による繰り返し精密重力測定は、地震・火山活動の監視などの研究をはじめ、さまざまな目的で盛んに実施されている。バネ式相対重力計の測定精度を規定する最大の要因は、いわゆるドリフトと呼ばれるバネの経時特性の悪さにあり、ドリフトの影響が無視できる極短時間の近地点での測定においては、地盤ノイズがよほど大きくない限り、 μgal オーダーの精度を達成することも十分可能である。しかしながら、通常の野外測定のように測定時間が1日程度になると、重力計の取り扱い、測定によほど注意を払わないと、 $10\mu\text{gal}$ をきる精度を達成することは容易なことではない。このような精度の問題もさることながら、バネ式重力計の最大の欠点は、相対重力計であるがために、変化の基準とすべき重力不変点の重力値が本当に不変であるかどうかの疑問が常につきまとうことである。このことは、得られたデータの解釈に常に曖昧さを残すことになり、重力の経年変化の研究に絶対重力計の利用が望まれる所以である。

しかしながら、バネ式相対重力計による測定は、その簡便さにおいて大きな利点を持つことも確かである。今後の地下水位変動モニターの研究においても、絶対重力計との併用など、測定方法の工夫や改善を行いながら、特に、空間的分解能を高める上で、バネ式重力計の役割は重要である。

2-2. 絶対重力計

現在、全世界で最も広く用いられている（ほぼシェア100%）絶対重力計はMicro-G Solutions社のFG-5絶対重力計である（写真2）。Micro-G社のwebサイト（<http://microgsolutions.com/fg5specs.htm>）にあるFG-5の公称精度は、機差の絶対値精度として $2\mu\text{gal}$ 、確度はノイズの少ない点で $15\mu\text{gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、これまでの使用経験でも、フ



写真2. 絶対重力計 (Micro-G社 FG-5型)

ィールド（と言っても屋外ではむりで、しっかりした $1\text{m} \times 1\text{m}$ 程度の床面と電源の取れる屋社が必要である）における測定でも、条件さえよければ、1~2日間程度の測定で、重力値の確度としては $1\mu\text{gal}$ より良い値を得ている。FG-5による重力の絶対値精度は、基本的にはHe-Ne安定化レーザーの波長（ 633nm ）とルビジウム原子時計の周波数（ 10MHz ）の安定度で規定されているが、実際にはこのほかに、レーザー光軸の鉛直調整や、真空槽の真空度などが適正に保たれているかなども絶対値そのものに影響を与える。これらすべてを考慮し、1台の絶対重力計で常に公称精度の $2\mu\text{gal}$ が保たれていることを保証することは現実問題としてそう容易なことではない。そのため、最近では、FG-5を所有する国内の研究機関の共同で、年に1~2回の頻度で、それぞれの機械を持ち寄りFG-5の精度を確認するための比較測定を実施しており、常にその精度の確認に心がけている。



写真3 絶対重力計 (Micro-G 社製 A10 型)

FG-5は、野外で気軽に測定できるような装置ではないため、それを積極的に地下水変動の研究に応用した例はまだあまりない。しかし、絶対重力計の測定に地下水の変動が影響していることは、間違いなく、例えば、京都でも、絶対重力計で数 μgal 程度の季節的な重力変化があることが確認できているが、その原因の大部分は、地下水の変動であろうと推測されている。ある広がりを持った地域（たとえば京都盆地）での地下水変動に伴う数 μgal 程度のわずかな重力変化を相対重力計のみで検出することは大変困難（実際上不可能）であ

り、絶対重力計の優位性を示す一つの例であろう。実際には、先にも述べたように、相対重力計と絶対重力計を併用した測定が重要となろう。

Micro G社の絶対重力計としては、FG-5以外に野外測定用のより小型化されたA-10型（写真3）がある。A-10の公称精度は $10\mu\text{gal}$ でFG-5より劣るが、これは、主に使用しているレーザーの問題であり、今後、さらに精度向上について改善の余地があると思われる。世界的にみてもA-10の利用実績はまだそれほどないが、地下水変動の研究には、A-10のような野外測定用の絶対重力計の利用の方が有利なことは明らかであり、今後の応用利用研究に期待が寄せられる。

2-3. 超伝導重力計

超伝導重力計は、バネの復元力として超伝導磁場による磁気浮上力を利用した一種の相対重力計であり、その感度・分解能は nGal のオーダーと、他の重力計に比べて圧倒的に高いものである（<http://www.gwrinstruments.com/>; 福田・東, 1999）。このため、超伝導重力観測では、地下水変動がすでに大きなノイズ源となっており、実際、 cm オーダーの地下水位変動、重力値にして $1\mu\text{gal}$ 以下の重力変化がシグナルとして捉えられている。

ところで、現在用いられている超伝導重力計は、基本的にはすべてある場所での重力の時間的変化を観測する据え置き型の重力計であり、さまざまな地点に移動して地下水変動の研究を行うといった目的には適していない。しかしながら、最近、超伝導重力計の小型化が進んでいることから、小型の超伝導重力計を1月程度の間隔で移設し、地下水変動の研究に利用しようとする試みが計画されており（Wilson et al., 2004）、今後の動向が注目される。

2-4. 上下動観測

地上での重力観測では、地下での質量移動（地下水変動）と同時に、測定点の上下動も重力変化として観測され、仮にフリーエア勾配を仮定した場合、 1cm あたり約 $3\mu\text{gal}$ の重力変化に相当する。すなわち、FG-5の公称精度の $2\mu\text{gal}$ あれば約 6mm の上下動に、また、遥かに高感度な超伝導重力計では、 mm オーダーの上下動を十分検出できる感度を持っている。このため、地上での重力測定で地下水のモニターを行うためには、GPS、あるいは水準測量などで、重力計の精度に見合った上下動の測定が必要となることを十分に認識しておく必要がある。

3. 衛星重力観測

2001年3月17日に打ち上げられたGRACEにより本格的な衛星重力観測の時代が始まった。GRACEは、マイクロ波のレーダー・リンクを用いたL-L SST(Low-Low Satellite to Satellite Tracking)による重力場測定衛星で、空間分解能1000km、時間分解能1ヶ月程度で、海面の水位変化に換算してmmオーダーに対応した重力変化(質量移動)が検出可能と言われており(National Research Council,1997)、実際、Tapley et al. (2004)を始めとして、陸水の変動などをとらえた成果が多数、出始めている。

GRACEのデータに関しては、現在、Level 2プロダクトとしては、1月毎に計算された120次x120次のグローバルな重力場の球関数展開係数と、その計算の元になっている軌道に沿ってのRange, Range Rateのデータ、その他、各種の補正量を含んだLevel 1Bプロダクトが一般に公開されている(ただし、データの公開は不定期で2~3ヶ月に1回程度)。繰り返し軌道を取らないGRACEによる重力場変動データとして意味を持つのは、時間的・空間的にある種の平均操作を経たデータであり、このことは、地上の1測点に於ける重力測定データとはあきらかに性格が異なることに注意する必要がある。また、衛星観測は、地上観測と異なり、重力場変化の原因は質量移動のみであり地表面の上下動の影響は(それによる質量再配分を除き)全くうけないことも重要である。

先にあげたTapley et al.(2004)をはじめ、現在、GRACEの成果として公表されているのは、いずれもLevel-2の重力場係数データを用い、適当な空間フィルター処理を施すなどして重力場変動の時間変化を捉えたものである。公表されている情報によると、現状のGRACEの精度は、打ち上げ前の予想より1桁程度低いとされている。このため、空間分解能はそれほど高くないが、それでも、世界各地の季節的な陸水変動はかなりよく捕らえられているようである。GRACEの精度低下の原因は、そのかなりの部分がデータ解析技術の未熟によるものと言われており、今後、データの蓄積、解析技術の進歩で、さらに精度の向上も期待される。

4. 今後の課題

衛星、地上観測とも、重力(ポテンシャル)測定による地下水変動モニターの研究は、まだ、手法として確立されているわけではない。しかしながら、いずれも直接測定が困難な地下での水質量変動をとらえるという意味で、大変魅力的な研究課題であることは間違いない。将来的な研究目標としては、



図1. 絶対重力計、相対重力計、GPSの組み合わせによる測定

1) 衛星重力による地球重力場の微細な変動を解析することにより、グローバルな水循環に伴う重力変化シグナルを検出すること、また、そのための手法を確立すること、

2) その発展応用として、地上精密重力測定データとの連携により、将来の地下水環境モニターの手法を確立すること、

である。

衛星重力に関する研究は、国外ではGRACEを打ち上げた米・独を中心に、現在、そのデータ利用研究が実施されている最中であるが、我が国の利用研究は、まだそれほど実施されていない状況である。今後、グローバルな水循環の立場から、陸水のみに限らず、海洋、極域雪氷などの研究者とも連携をとりながら、研究を進めることが重要であろう。

地上での精密重力測定に関しては、絶対重力計、相対重力計ならびにGPSによる位置測定を連携させた手法の確立（図1）、そのためのテストフィールドの選定などが当面の課題である。特に、ポータブルな絶対重力計の利用は、将来のさまざまな応用を考えても、大変魅力的な研究テーマである。

一方、超伝導重力計の利用については、實際上、フィールドでの利用は困難であり、衛星データの地上検証を目的とした、データ解析を行うことが实际的であろう。同様の試みは、ヨーロッパなどで行われており、我が国では、日本国内の測定点、あるいは、インドネシアの超伝導重力計（現在、ジャカルタ近郊への移設を検討中である）データの利用が考えられる。

参考文献

福田洋一, 東敏博(1999) : 超伝導重力計の原理, 月刊地球, 242, 海洋出版, 478-483.

福田洋一(2000) : 衛星アルティメトリと衛星重力ミッション, 測地学会誌, 46, 53-67.

NEDO(2003) : 重力探査法、貯留層変動探査法技術マニュアル、第4章、NEDO、96-148

National Research Council (1997): Satellite gravity and the geosphere, National Academy Press Washington, D.C., 1-112.

Tapley et al. (2004): GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System, Science, 305, July,

Wilson C. R. et al. (2004) : The Field Superconducting Gravimeter - A Hydro-geologic Sensor, Presented at GGSM2004, Port.

地球研谷口 F S 2 - 4 都市熱グループレビュー

一ノ瀬 俊 明

独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター・主任研究員
千葉大学大学院自然科学研究科・客員助教授

1 日本における都市熱環境政策の動向

南関東を中心として、1981年から1999年までの約20年間に、通年で30℃を超過した延べ時間数が増大し、30℃を超過した面積も拡大している。約20年前には東京周辺でのみ200時間を越えていたものが、最近では関東平野一円に400時間近い高温場が展開しており、夏の暑さからの逃げ場のない状況を感じさせる。

東京において熱中症で病院に搬送された人数も昨今顕著な増加を示している。暑熱の健康影響に関しては、気温が高いということだけではなく、人体の熱収支を考慮しなければならない。住民の健康維持という視点から（環境省が定義するところの）「ヒートアイランド」対策を検討する上では、都市の気温が島状に高くなるという現象だけを議論するのでは不十分であることはいままでのまではない。

2000年以降環境省を中心として、地方自治体におけるヒートアイランド対策体系化の動きが顕著になっている。2001年にはヒートアイランド対策関係府省連絡会議が発足し、2004年には日本政府による「ヒートアイランド対策に係る大綱」策定が予定されている。また、東京都における屋上緑化条例策定（2001年4月）や稠密観測網METROSの展開（2002年7月～）など、いくつかの地方自治体も独自の動きを見せている。

今日ヒートアイランド対策に関してはさまざまな知見の集積や技術開発がなされているものの、実際地方自治体で適用する場合、それぞれの対策に対する明確な評価が必要となる。各種対策の空間スケール、（効果が現れるまでの）時間スケール、効果（日中の暑熱に対するものと夜間の寝苦しさに対するもの）、コスト、そして責任主体などの情報は、今日いまだ十分には整理されていない。

従来都市熱環境の研究は、国内では建築学の分野において最も盛んに行われてきた。建築～街区スケールの観測・数値計算において、日本は国際的な定評を得ている。一方海外では、気象学者・地理学者がこの分野に熱心である。1990年代以降、土木工学の分野でも都市の熱ストレス緩和を志向した研究の展開を見たほか、計算機環境の飛躍的な発展に伴い、モデルによる数値シミュレーションが普及した。また、分野横断的研究会の発足や大規模プロジェクトを通じた観測事例の増加もこの時期の特徴である。とりわけ1990年代後半からは、熱ストレスの小さな都市形態実現のための具体的な街区設計の必要性から、都市キャノピーを考慮した地表メッシュのモデル化、街区レベルの気温・風系分布の計算、夏季における都市高温化対策評価システムの構築など、数値計算の微細化・精緻化が顕著である。この時期における研究成果のみをレビューしておけば、この分野に新規参入する場合でも一通りのバックグラウンド構築は可能であろう。

1990年代後半以降、ほぼ毎年なんらかの関連国際会議が行われるようになった。その代表的なものに、ルースアンブレラとしての国際都市気候学会（IAUC）の発足（2000年）がある。

まちづくりにおける熱環境の保全という視点は、従来日本のプランナーにはなじみの薄いものであった。必要なエッセンスを効率的に伝える目的で書かれたガイドライン、教科書としては、「都市建設のための気候学入門」、「都市及び地域気候・大気汚染マップ

作成ガイドライン」(ともにドイツ)、「都市地表面における植栽と明色塗装に関するガイドブック」(EPA)などがあり、環境省などにおける一連の関連タスクにおいて大いに参考にされている。一方、内容が教条的に適用された場合のリスクも小さくない。日本における対策の難しさとしては、平均風速には恵まれており、風による顕熱輸送にもとづく地物表面の冷却効果が期待できるものの、夏季の暑熱対策が長期間必要(自然面の特徴)、再開発をめぐる合意形成過程の複雑さ(社会・制度面の特徴)などがあげられよう。しかし、こうした体系的知識の普及は、地方自治体における都市マスタープランや環境基本計画の策定に際し、熱ストレスの緩和という視点を正式に位置付けるという意味でも画期的であり、日本のみならず、成長著しいアジアの都市において今後一層重要度が増すであろう。

2003年7月、ソウル市都心を6kmに渡り東西に貫く清溪高架道路(4車線)撤去工事が始まった。旧清溪川の河道が戦後暗渠化され、高架道路へと変貌を遂げたものである。撤去後は緑豊かな高価値ビオトープ、都市内大規模親水空間としての清溪川(チョンゲチョン)が復元される。工事完成後の2006年夏までの都市大気熱環境モニタリングを行い、都心の大規模河川空間復元による暑熱現象改善効果を実証する。ヒートアイランドに代表される都市の暑熱問題に対し、大規模な植栽や水面の導入が一定の効果をもたせることは数値実験を通じて知られてはいたが、都市空間は主たる人間活動の場でもあり、実地での実証は極めて困難であった。このような大規模な都心における自然環境の復元事例は世界的にも初めての試みといえる。

現在筆者は、清溪高架道路周辺の11地点に、韓国気象庁気象研究所などと共同で簡易気象観測ステーション(気温、湿度)を設置し、着工前の2003年6月よりデータ取得を開始した。また、着工初期段階の2003年8月には、集中的な移動観測による体感気候指標の定量化、係留ゾンデ、サーモカメラ、シンチロメーターによる地表面大規模改変の大気環境インパクトの計測・定量的評価を行った。完工後の2006年夏までは、継続的に一連のモニタリング及び集中観測(8月を中心に、6月や10月、必要に応じて冬期にも)を推進する予定である。日本における対策・政策研究を実証できる貴重なチャンスであることはいうまでもない。

2 アジアの都市地下温度と対比するための地上気温データの蓄積状況について

地下温度に記録された地上気温の変遷について、都市化影響の視点から考察した研究としては、Changnon(1999)によるイリノイ州の事例(1889年からの64年間)がある。ここでは、地下温度が0.4°C上昇する間に地表面温度が0.6°C上昇したことが報告されている。地下温度のプロファイルを調べて都市化による温暖化影響を抽出するためには、当該地域における長期の地上気温観測データの存在が必要不可欠である。

実際には地表面温度が地上気温に影響し、かつ地表面温度が地下温度に影響するという構図になっていると考えられるので、地下温度を地上気温で説明するという考え方には若干の飛躍があり、地表面温度自身との比較も必要と思われるが、以下の議論では地表面温度をごく表層の地下温度と位置付け、地上気温と地下温度との関係を議論したい。

以上を踏まえ、今回の研究対象地域であるアジアを中心に、具体的な研究対象地選定のために必要な情報を収集・整理した。

2.1 米国の事例

Mitchell(1961)はアメリカの10大都市を対象に、夏の気温上昇率が大きい傾向を指

摘した。これは、冬の上昇率の大きい日本などアジアの都市と異なる傾向であり、気団の性質の差などに起因するものと考えられている。Landsberg (1974) は、フィラデルフィア (1738-1967) での観測より、都市域の地下水温が 1790 年以來 1.5~2.0°C 上昇していることを指摘した。

2.2 中国の事例

谷田貝・安成 (1990) は、中国国内の 160 地点 (1951-1986)、Qian and Lin (2004) は 498 地点 (1961-2000) を対象に長期的な傾向の分析を行っている。ともに、地域によって上昇 (下降) 傾向が異なることを示している。

局地的な事例解析としては、雲南省の 37 地点 (1958-1987) を対象としたもの (Nomoto, 1995) があり、東で変動が大きく、西で小さいことが示されている。古くからこの地域では、「這辺下雨那邊彩」(こちらでは雨が降り、あちらでは晴れている。) などと諺に謳われているように気象の局地的な差異が大きい。また西双版纳では顕著な高温化が見られ、これは森林の減少 (30 年間で被覆率 70%→30%) によるものと考えられる。

顧ら (2001) は深セン (1979-1997) を対象にした解析で興味深い事実を示している。深センにおけるこの期間の人口は、2 万人から 380 万人へと世界最高の成長速度で急増しており、「深セン速度」なる言葉も誕生している。またこの時期、経済特区の面積は 50 倍に、経済規模は 300 倍に成長を遂げている。気象データは 1953 年より存在するが、135km 東に存在する開発強度の弱い都市シャンウェイとの比較から導き出された都市効果は、1980 年ころから 1990 年ころまで急上昇し、年平均最低気温で 0.07°C/年の上昇となっている。とりわけ乾涼期 (10 月~4 月) での上昇が顕著であると報告されている。

Zhou and Ding (1989) によれば、上海 (1961-) でも地上気温が 13 ヶ所で観測されているが、郊外の 1 地点を除き全て農村部のものであり、中心市街地での観測データは 1990 年代後半における Bai and Kubo (2000) の観測を待たねばならない。1995 年以降、浦東地区の急速な開発が進められており、この地区での高温化が予想される場所である。

2.3 韓国の事例

Baik and Kim (2003) によれば、地上気温は 490 ヶ所で AWS により観測されている (1988-)。これは日本の AMeDAS に相当する。Chung et al. (2004) によれば、それ以前から地上気温観測は 14 ヶ所で行われており (1951-)、ソウルなど一部の都市では 1900 年代から行われていた (Lee, 2000)。そのうち 12 ヶ所は都市 (ソウル、テグー、プサン、インチョンなど) の観測地点であり、都市化影響として約 20 年間に 0.5°C の上昇が報告されている。またこれは冬季に顕著である。

Kim et al. (2003) は、地上観測地点 12 ヶ所 (ソウル、インチョン、デジョン、テグー、クァンジュ、プサンの 6 大都市と直近の郊外 6 地点) において、都心と郊外という 6 つの組み合わせで気温差 (ヒートアイランド強度) の経年変化 (1973-2001) を分析した。この分析から導かれた都市化影響の値は、ソウルで 3.34°C と大きく、沿海都市のプサンでは小さい数値を示していた。またソウルでは近年数値の上昇が停滞しており、すでに都市化が進んでいて成長の安定期に移行していることが伺える。今回のレビュー作業からは、このフィールドが最も本研究の主旨にかなっていると思われた。

また Choi et al. (2000) は、ソウル (1908 年~) とカンヌン (1912 年~) の比較から、ソウルの都市化影響を論じている。

2.4 その他

Niitsu (2000) によれば、バンコク (1931-1998) では最近 40 年間で 2.0°C の上昇 (乾季の最低気温: 最も顕著な上昇) が見られ、これは市内を縦横に走っていた水路網の消失とも関連しよう。Schaefer (2000) は台湾の地上観測地点 21 ヶ所のうち、台北、台南、台中など 5 ヶ所 (1897-1997) のデータより、夏の上昇傾向が大きいことを指摘した。これは都市化の影響よりは ENSO/QBO との関係が大きいものとしている。

2.5 東南アジアの地上気温データ

松本・山中 (2002) は、東南アジア各国の気象業務機関を訪問し、そのキャパシティをレポートしている。そこから読み取れる地上観測気温データの存在状況は以下のとおりである。

タイ

地上観測地点 55 ヶ所 (1910 年代から)

カンボジア

地上観測地点 12 ヶ所

本局: 1906 年以降の月別値 (1975 年~1979 年は欠落)

ラオス

地上観測地点 34 ヶ所

ベトナム

地上観測地点 93 ヶ所 (ホーチミンでは 1897 年から)

マレーシア

地上観測地点 33 ヶ所 (データが長期にデジタル化されている)

フィリピン

地上観測地点 56 ヶ所 (1948 年以降はデジタル化)

インドネシア

19 世紀後半に 1000 地点以上 (近年はデータの空白地帯)

また Ahmed (1999) は、クアラルンプール (年 0.07°C 上昇) とペタリンジャヤ (マレーシア) のデータ (1983-1997) を分析し、1990 年代における上昇の鈍化からピナツボ火山の噴火がもたらした haze の影響を論じている。

2.6 日本の事例

わが国では、都市化の進展と気温上昇との関係を論じた研究事例が豊富である。足立 (1997) は、名古屋を対象に景気と都市気温上昇率の関係性に言及している。藤部 (1998) は、日本全国の多地点のデータを長期に分析し、気団の挙動の経年変化と気温の経年変化を関係づけて議論している。Yoshino (1981) は、東京における 1914 年、1946 年、1976 年の 3 時点で土地利用変化と気温上昇、人口増加を比較分析している。また変わったところでは、Mikami (1996) が東京近郊 (西部) において石川家の日記につづられた天候記録と気象庁の観測記録のオーバーラップ期間 (1876 年以降) を利用し、1721 年以降の 7 月の平均気温を復元した事例もある。

数値計算による気候復元も、上海 (尾島ら, 1997)、1980 年のバンコク (大岡ら, 1998)、東京 (一ノ瀬, 1999; Ichinose, 2003) を対象に行われている。Ichinose (2003) は、19 世紀の東京における実測値との比較も行っている。

3 まとめ

表層地質や地下水位による地表面温度の地下温度への影響の違いや、バンコクなど、日本と異なる季節変化を示す地域での地下温度への影響の出方についても考察する必要がある。研究の成立に必要な前提条件としては、

- ・長期にわたる地上気温観測データ（年平均、できれば月別平均）が存在すること
 - ・直近に都市化の弱い比較対象地点が存在すること
 - ・ボーリングによる地中温度計測（できれば長期モニタリング）が可能なこと
- の3点が挙げられよう。

地球研谷口 F S 2 - 4 地下熱グループレビュー

地下温度分布計測による過去の地表面温度環境の復元

地下熱グループ

山野 誠（東京大学地震研究所）・後藤秀作（京都大学火山研究センター）

1. はじめに

地表面の温度が時間的に変動すると、その影響が熱拡散によって地下に浸透していく。このことを利用すると、掘削孔内の温度分布を解析することによって、過去の地表面温度の変動を推定することが可能となる。この手法を用いて過去の気候変動を復元する研究は、1980年代以後、主に大陸地域で盛んに行われてきており、近年の温暖化に関して重要な成果が得られている。

地表面温度が変動する要因としては、全地球的な気候変動に加えて、ヒートアイランド現象、土地利用の改変、表層土壌の削剥や盛り土など、都市化に伴う人間活動によって引き起こされるものがある。都市の地下温度分布には、これらの人間活動による地表面温度変動の歴史が記録されているはずである。すなわち、地下温度分布を計測して解析することにより、都市の地表面温度（熱的環境）がどのように変化してきたかを復元することができるものと考えられる。

本稿では、地下温度分布から地表面温度変動を復元する原理と解析手法について簡単なレビューをした上で、都市域の地表熱環境の復元において重要となる地下の層構造と地下水流動の影響について議論する。また、孔内温度を長期計測することで得られる情報、研究対象候補地域に存在する地下温度データについても述べる。

2. 地表面温度変動の浸透と気候変動の復元

地表面の温度は、地下の温度構造を考える際の境界条件となる。地表面温度が時間的に変動すると、その変動はしだいに地下へと浸透していく（図1）。この温度変動の伝搬過程は熱拡散方程式によって表され、いわゆる「拡散現象」の一種である。例えば地表面温度が周期的に変動する場合を考えると、この変動が地下温度に及ぼす影響は、深さとともに振幅が減衰し、位相が遅れることになる。

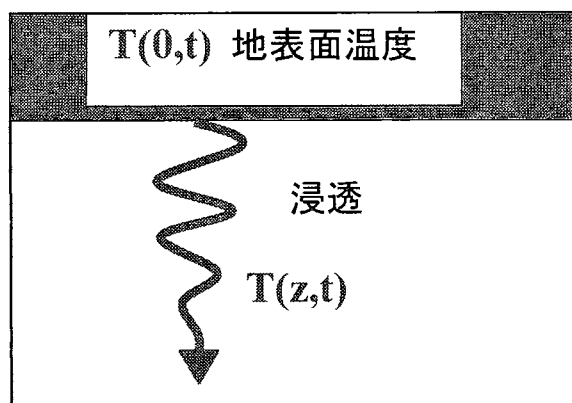


図1 地表面温度の時間変動が地下に浸透していく過程

地表面温度変動が浸透する過程には、それが拡散現象であることに伴ういくつかの特徴がある。

(1) 変動の伝搬に時間を要する

拡散現象によって変動が伝わるには有限の時間が必要であるが、土壌・岩石の熱拡

散率は $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ と小さいため、温度変動の伝搬には非常に時間を要する。この結果として、地下数百mまでの温度分布に過去数百年の地表面温度変動についての情報が記録されることになる。

(2) 拡散によりシグナルがぼやける

温度変動が非常にシャープなものであったとしても、拡散していくにつれてシグナルが広がってぼやけたものとなる。このため、地下温度分布に残る地表面温度変動の記録は、より過去のものほど時間的な分解能が低くなる。

(3) 重ね合わせが可能である

熱拡散方程式は温度について線形であるため、解の重ね合わせが可能である。すなわち、時間的に変動する成分を、定常的な熱の流れによる地温勾配から切り離して扱うことができる。また、時間変動についても、さまざまな周期の変動やステップ状の変動などを重ね合わせる形で解析することができる。

地表面温度変動が地下温度分布に及ぼす影響について解析をする際には、これらの特徴を活かし、また留意することが必要である。

地下の温度構造を考える「地球熱学」の分野においては、地表面温度変動による温度分布の乱れは、地下深部の温度構造を求める際のノイズであり、除去すべきものである。一方、見方を変えれば、温度分布の乱れは過去の地表面温度についての情報を持つシグナルである、とも考えることができる。図2は、ある掘削孔で1970年に測定された孔内温度分布を、1880年から1940年の間に地表面温度が上昇したとして計算される温度分布と比較したものである。測定データは計算結果とよく一致しており、温度プロファイルの大きな曲がりやが地表面温度の上昇によって生じたものであること、このような温度分布の乱れから過去の地表面温度変動について知ることができることを示している。

このような原理に基づいて、地下温度分布から過去の気候変動を復元する研究は、1980

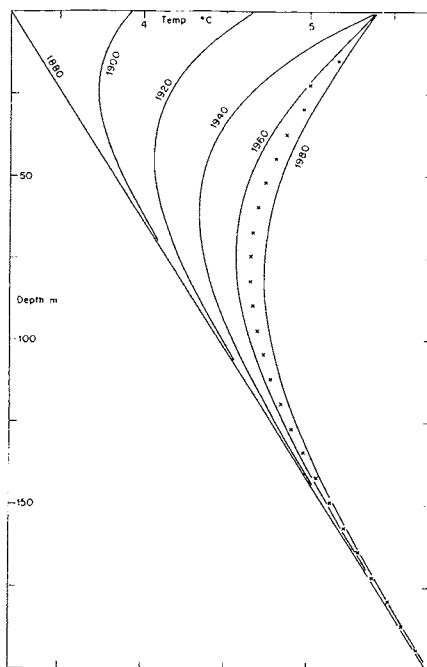


図2 1880年から1940年までの間に地表面温度が直線的に上昇した場合に、観測されるべき地下温度分布の変化 (Jessop, 1990)

年代から北米やヨーロッパを中心として盛んに行われるようになり、現在では地球熱学分野における大きな柱の一つとなっている (Lewis and Wang, 1992 等)。IASPEI (国際地震学地球内部物理学連合) の IHFC (国際熱流量委員会) においても、孔内温度分布からの気候変動復元についてのワーキンググループが設けられ、国際シンポジウムも繰り返し開催されている。IHFC では、気候変動復元のための孔内温度データベースの作成も行われており、800点以上のデータが集められている (図3; Huang et al., 2000)。また、1998～2002年には IGCP (International Geological Correlation Programme) のプロジェクトの一つとして、この分野の研究を世界的に推進し、各国間の情報交換を進める活動が行われた。

他の気候変動復元の手法と比較すると、この地球熱学的手法には、掘削孔内の温度分布から直接的に地表面温度が求められる (温度を反映する指標を用いるのではない)、短周期の変動に関する情報は得られないが長期的な傾向を捉えること



図 3 IASPEI の IHFC によって、気候変動復元のための孔内温度データの収集が行われた孔井の分布

ができる、という特徴がある。また、気象データがない時期、あるいは産業の近代化以前から現在に至るまでの数百年間をカバーすることも重要な特質であり、人間活動による温暖化、都市化といった現象の研究に有効な手段であると言える。

3. 孔内温度分布の解析手法

地球熱学的手法による気候変動（地表面温度変動）の復元は、一般に、掘削孔内の温度を深さ数百 m まで精密に測定し、その温度プロファイルについてインバージョンによる解析を行い、測定データを最もよく説明する地表面温度の変動を求め、という方法で行われている。その際、同じ孔井で時間間隔をおいて（例えば 10～20 年以上）、温度測定が繰り返し行われていることが望ましい。その理由は、温度分布の安定性を確認できること、地表面温度変動以外の要因による温度分布の乱れを判別できること、時間をおいた温度プロファイルを同時に解析することで地表面温度の復元の精度が増すこと、である（Wang and Lewis, 1992）。さらに、近接した複数の孔井において同様な温度変動が復元されれば、その結果はより信頼できるものとなる。

図 4 は、カナダ・ケベック州の近接した 3 本の孔井において、1968 年と 1990 年に計測された温度プロファイルと同時に解析し、地表面温度を復元した例である（Wang et al., 1992）。得られた結果は互いによく似ており、この地域の地表面温度変動がうまく復元できたことがわかる。なお、現在の温暖化に先立って 1900 年頃を中心とした寒冷な時期があったことが示されているが、これはカナダの他の地域における結果にも、共通して認められている。

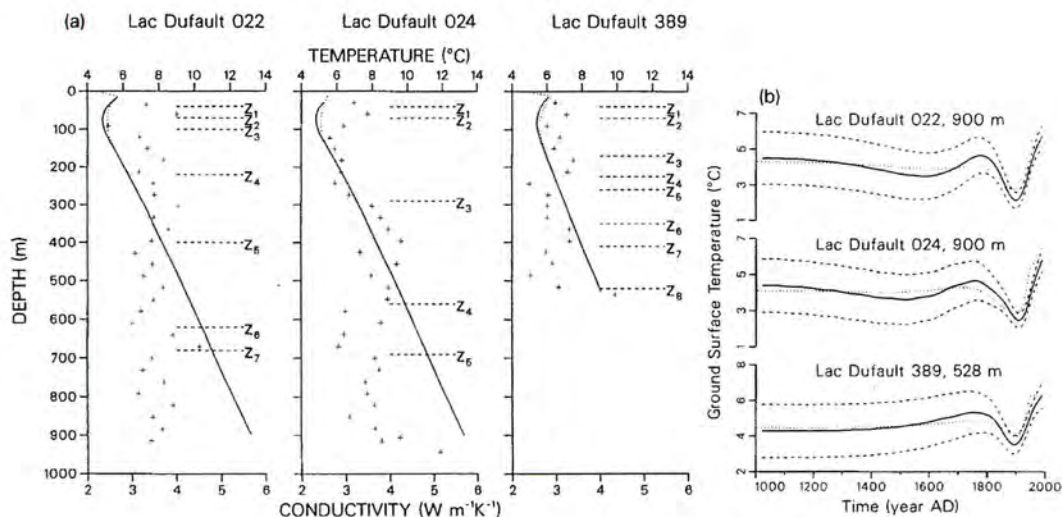


図 4 近接した 3 本の孔井における地表面温度変動復元の結果 (Wang et al., 1992)

このような精密な解析に対し、大陸規模、あるいは全地球規模での統計的な解析も行われている。これは、前節に述べた IHFC による孔内温度データベースを利用したものである。Huang et al. (2000)は、データベース中の個々の孔井について過去 500 年間の地表面温度変動を求めた後、全地球、及び南北各半球における平均を計算した。その結果は、気象データが存在する期間については、気温の平均値の変動と整合的なものとなっている (図 5)。一方、Harris and Chapman (2001)は、北緯 30~60 度の範囲に位置する孔井で測定された地下温度分布の乱れの平均を計算し、同じ領域の平均気温の時間変動を制約条件として解析する、という試みを行っている。

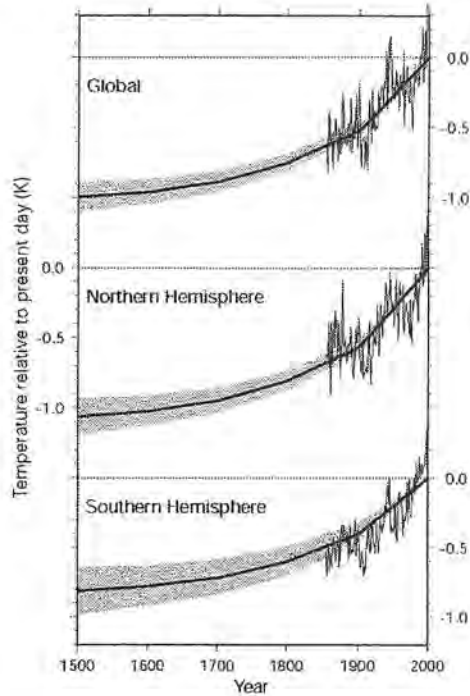


図 5 過去 500 年間の地表面温度変動の復元結果を、全地球、及び各半球について平均したものと、気温の平均値との比較 (Huang et al., 2000)

都市の熱環境を復元する研究においても、多数の孔井における結果を統計的に処理するという方法は、ある広がりを持つ範囲を平均的に見る場合等に有効であると考えられる。また、気温変動のデータが存在する場合、そのデータも制約条件に加えて解析し、

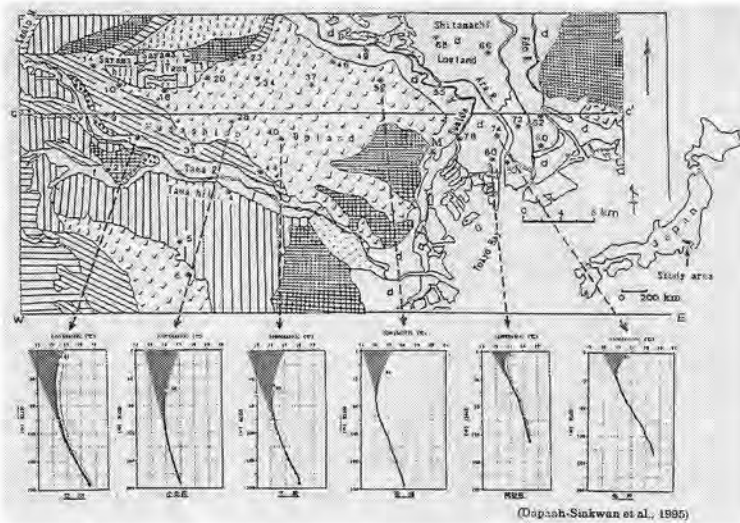


図 6 東京都の地盤観測井において測定された温度プロファイルに見られる、地表面温度上昇の影響 (Taniguchi et al., 1999)

それ以前の温度変動を求めるという手法も、復元精度の向上に役立つであろう。

本研究が対象とする東アジアの大都市の多くは沖積平野上に発達しており、その地下温度構造は地下水の流動の影響を受けているものと予測される。地下水による熱輸送の効果については、これまでも多くの研究がなされてきているが、地表面温度変動の影響と合わせて解析が行われるようになったのは、最近になってのことである。図6は、東京都の地盤観測井で測定された温度プロファイルの例であるが、地温勾配の逆転が見られる深度が場所によって異なっている。Taniguchi et al. (1999)は、これらのデータを解析し、地表面温度上昇の影響の浸透する深さが鉛直方向の地下水流動に依存することを用いて、広域的な地下水流動のパターンを明らかにした。他の地域でも同様な観測と解析が進められており、地球温暖化及び都市化による地表面温度上昇の地下への浸透過程と地下水流動系の関係が論じられている (Uchida et al., 2003 等)。

4. 地下の層構造と地下水流動の影響についての評価

上にも述べたように、本研究の対象地域の多くは沖積平野に位置していることから、その地下は層構造をなしており、各層の熱伝導率には差があるものと予想される。したがって、地球熱学的手法を用いて地表熱環境の復元を試みる場合、地下水流動の影響に加えて地下の層構造が重要な要素になると考えられる。本節では、FS研究の一環として行った、地下の層構造、地下水流動の影響の評価・考察結果について報告する。

[地下構造の影響]

まず、地下構造に関する情報の有無が、地下温度分布から地表面温度を復元する際にどのように影響するかについて、評価を行った。具体的には、地下構造が既知である掘削孔の温度プロファイルに対し、地下構造が一様であると仮定して復元した地表面温度と、層構造の情報を考慮して復元したものとを比較した。使用した温度データは、淡路島北部の掘削孔で得られたものである (図7; Yamano and Goto, 2001)。掘削の結果から深さ700mまでに13の層があることがわかっているが、熱伝導率の値は100mおきにしか得られていない。そこで、層構造を考慮した解析を行う場合には、各層の熱伝導率も同時に推定することにした。また、地下構造が一様と仮定する場合には、熱伝導率を2.5 W/m/Kに固定して計算を行った。

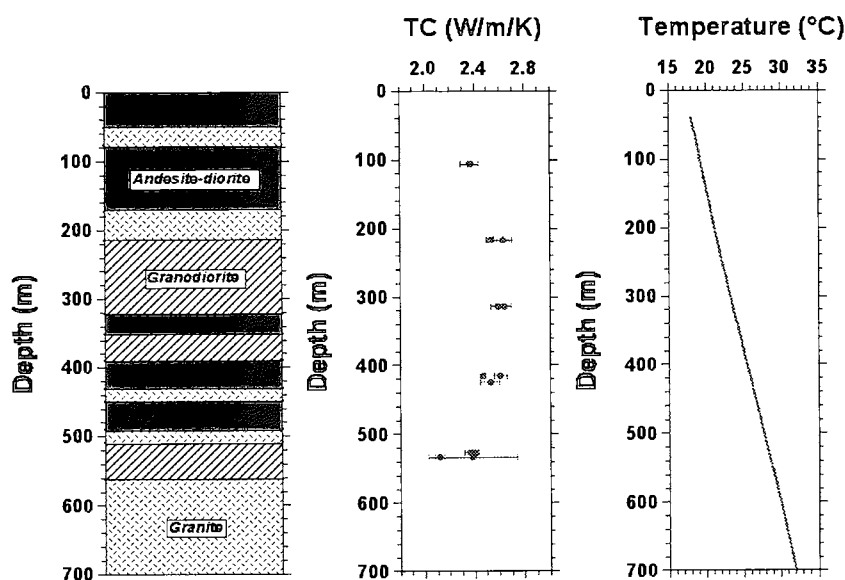


図7 淡路島北部の掘削孔の地下構造、熱伝導率 (TC) と温度分布

図 8 に過去 500 年の地表面温度の復元結果、及び大阪管区气象台における気温の年平均値 (1883 年以降) を示した。単層構造を仮定した場合 (図 8a)、地表面温度は 1600 年頃から 1900 年頃にかけて 2 K (度) 程度上昇し、その後約 1 K 低下した後、1900 年代半ばに再び上昇に転じている。1900 年以降の変動パターンは、大阪の気温データと大きく異なっている。

これに対し、層構造を考慮した場合は、1900 年以前には地表面温度に有意な変化が見られず、1880 年から 1960 年までの変動は大阪の気温データとほぼ一致している (図 8b)。1960 年以降は大阪の気温とのずれが目立つが、この期間については、淡路島中部の洲本市における気温の年平均値と比較的よい一致を示している (図 9)。復元結果には、淡路島と大阪における気温変動の違いが現れていると見るべきであろう。

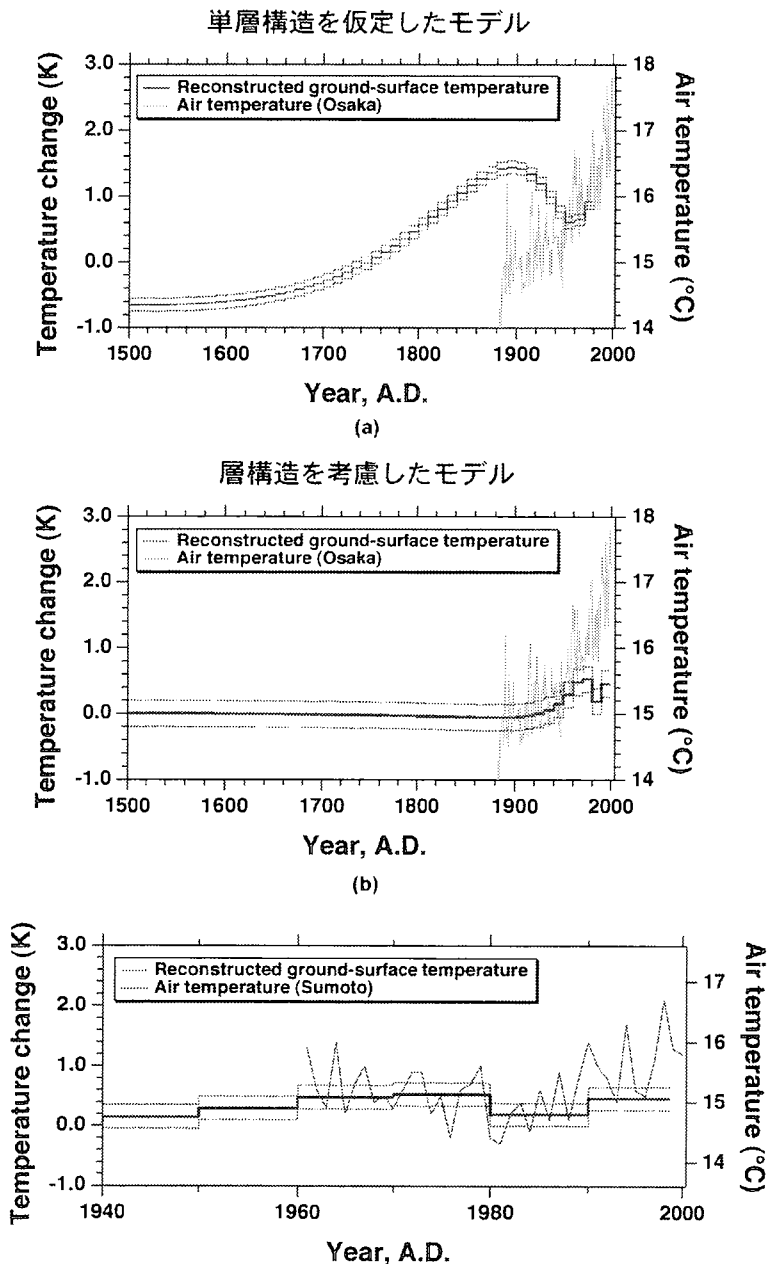


図 8 淡路島北部での地表面温度の復元結果、及び大阪管区气象台における気温の年平均値
 (a) 単層構造を仮定した場合、(b) 層構造の影響を考慮した場合

図 9 淡路島北部での地表面温度の復元結果と洲本市における気温の年平均値

図 10 は、地下温度分布から地表面温度変動に起因する成分を抜き出したものである (赤：測定値、青：計算値、緑：残差)。層構造を考慮した場合、残差が明らかに小さく

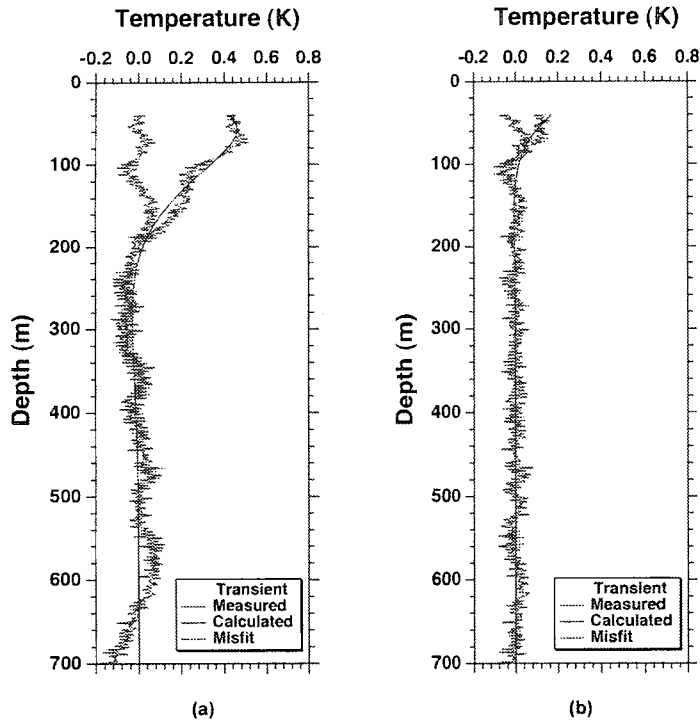


図 10 地下温度分布から地表面温度変動に起因する成分のみを分離した結果
 (a) 単層構造を仮定した場合、(b) 層構造の影響を考慮した場合

なり、温度の計測値がよく説明されることがわかる。単層構造を仮定した場合に残差の振幅が大きいところは、岩相の変化に対応しているようである。また、単層構造の場合、200 m よりも浅い部分で、地表面温度変動に起因する成分自体が大きくなっている。これは、熱伝導率の違いによる温度プロファイルの曲がりを、地表面温度変動によって説明しようとした結果であると考えられる。復元した地表面温度が大きく変動しているのは、これに対応するものである。

以上の結果は、地下が層構造をなしている地域で地表面温度の復元を行う場合、地下構造に関する情報が非常に重要であることを示している。

[地下水流動の影響]

次に、鉛直方向の地下水流動が、地表面温度変動の地下への伝搬に与える影響について考察を行った (Goto et al., in press)。

図 11 は、地表面温度が周期 30 日で正弦波的に変動している場合の、地下温度の変動を示している。a は下向きに 1×10^{-6} m/s (31.5 m/yr) の地下水流動がある場合、c は上向き

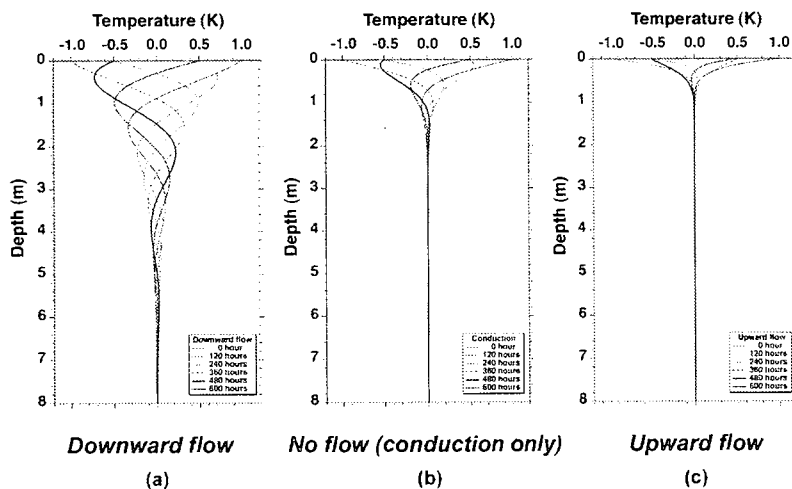


図 11 地表面温度変動の地下への伝搬に対する鉛直方向の地下水流動の影響
 (a) 下向きの流れの場合 (1×10^{-6} m/s)、(b) 流れがない場合、(c) 上向きの流れの場合 (1×10^{-6} m/s)

に 1×10^{-6} m/s の流動がある場合、b は流れがなく、熱伝導のみによる場合である。地下水の流動によって、地表面温度変動の影響が到達する深さに大きな差が生じることがわかる。これは、下向きの流れが温度変動の影響を運搬するのに対し、上向きの流れは温度変動の影響の伝播を阻害するためである。

この温度変動の伝搬のしかたは、地下水流動の速度のほか、変動の周期や地層の熱物性にも強く依存しており、その特性は以下のようにまとめることができる。下向きの流れの場合、地表面温度変動の影響は、(i)変動の周期が長いほど深くまで伝わる、(ii)地下水の流速が速いほど深くまで伝わる、(iii)熱拡散率が大いほど深くまで伝わる。上向きの流れについては、(i)温度変動の影響が伝わる深さに限界があり、(ii)その限界の深さは温度変動の周期、地下水の流速及び地層の熱拡散率によって決まる。

地下水流動の影響が大きい地域においては、これらの特性を考慮して、観測・解析を行うことが必要である。

5. 孔内温度の長期計測

過去の地表面温度環境を復元するにあたっては、孔内温度プロファイルの測定に加えて、孔内温度の長期モニタリングを行うことにより、有用な情報が得られると考えられる。温度の長期計測によって捉えることができるものとしては、まず、地表面温度変動の影響が浸透していく過程そのものがある。図 12 は、チェコにおける観測例であるが、深さ約 40 m で温度を計測することにより、短周期の変動が除去され、温度変動の長期的なトレンドを抜き出して見ることができることがわかる (Cermak et al., 2000)。この場合、25 mK/yr 程度の温度上昇が記録されており、地表面の長期的な温暖化を捉えているものと解釈される。

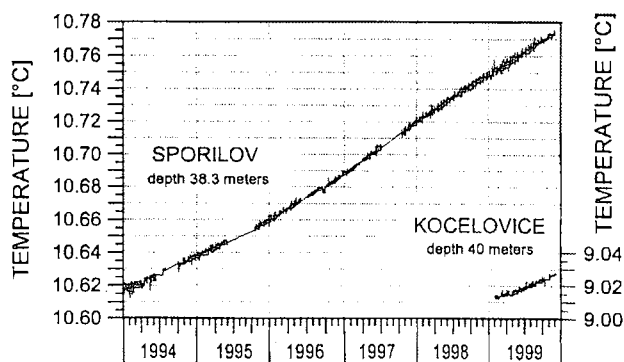


図 12 深さ約 40 m における長期温度記録の例 (Cermak et al., 2000)

この他にも、温度変動の浸透過程を見ることによって、熱輸送のメカニズムを調べる (熱拡散のみか、地下水等の動きの影響があるか)、熱拡散率を求める、地表面温度環境の変動の要因を探る、といったことが可能になる。図 13 は、カムチャッカ半島において行われた土壌温度 (深さ 50 cm と 100 cm) のモニタリングの結果を示している (Yamano et al., 2003)。深さ 50 cm で記録された温度変動 (青) が熱拡散のみで深さ 100 cm に伝わったとして計算される温度 (緑) を実測値 (赤) と比較すると、1 地点では非常によく一致しており、ほぼ熱拡散のみで伝わったものと推定される (a)。一方、他の地点においては、一部の期間 (2 月～5 月) に熱拡散のみでは説明ない変動が見られた (b)。これは、土壌中の水分の凍結・融解によるものと考えられる。

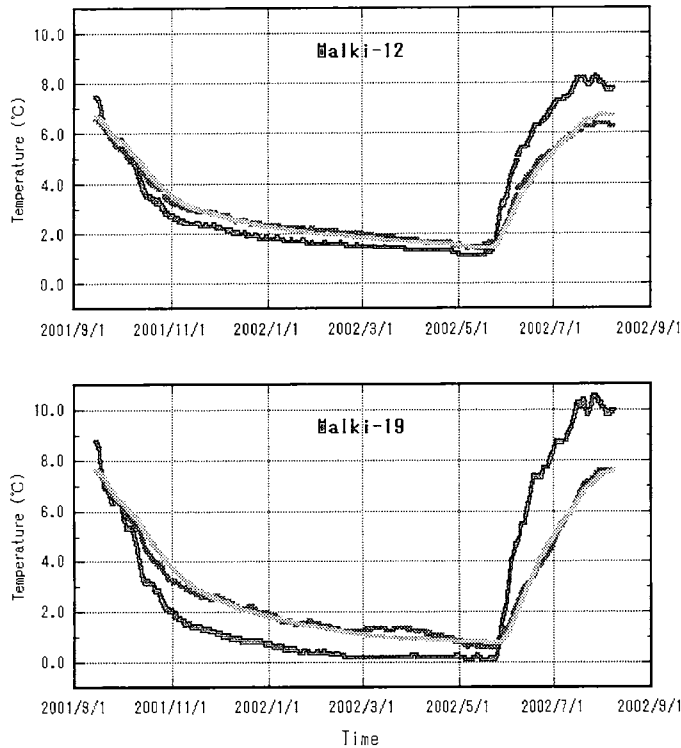


図 13 カムチャッカ半島において、土壌中の深さ 50 cm と 100 cm で得られた長期温度記録 (Yamano et al., 2003)

もう一つの実例として、琵琶湖畔にある掘削孔内での長期計測データを取りあげる。この孔井では、1993 年と 2002 年に行った温度ロギングの結果、深さ 70 m 付近より上で温度が顕著に上昇していることが判明した。その後、深さ 30 m に温度計を設置して長期観測を行っているが、約 20 mK/yr の割合でほぼ直線的に温度が上昇する様子が捉えられている (図 14)。この原因としては、1995 年に博物館が建設されて孔口が建物で覆われたために地表面温度が変化したこと、掘削が行われる以前の 1982 年から 1991 年の間に浚渫した土壌の盛り土が行われたこと、等が考えられる。これは、温暖化以外の原因による地表面温度環境の変化が地下温度に影響を及ぼしている、興味深い例である。他の深度でも長期計測を行うことにより、変動の原因等についてより多くの情報が得られることが期待される。

都市域の地表熱環境の復元を行う際にも、要所において孔内温度の長期計測を実施することにより、熱輸送のメカニズムや温度変動の要因について、温度プロファイル測定では得られない情報を入手することができるはずである。

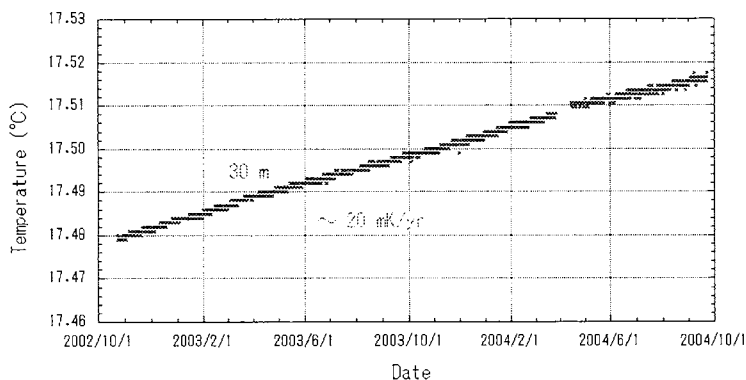


図 14 琵琶湖畔の掘削孔の深さ 30 m における長期温度記録

6. 調査対象地域における既存の地下温度データ

最後に、調査対象の候補になっている地域において、これまでどのような地下温度データが得られているかについて、まとめておく。

国内で対象となっている都市は、東京、大阪、名古屋であるが、これらの都市を含め、日本各地の平野・盆地においては、水文学のグループによって、地下水位や地盤沈下の観測井を利用した温度測定が精力的に行われてきている（図 15; 内田ほか, 2001）。その結果、例えば濃尾平野や関東平野において、地表面温度の上昇に起因する地温勾配の逆転現象が見いだされており、逆転する深度と地下水流動系の関係等について詳しい議論がなされている（Uchida et al., 2003; Miyakoshi et al., 2003 等）。

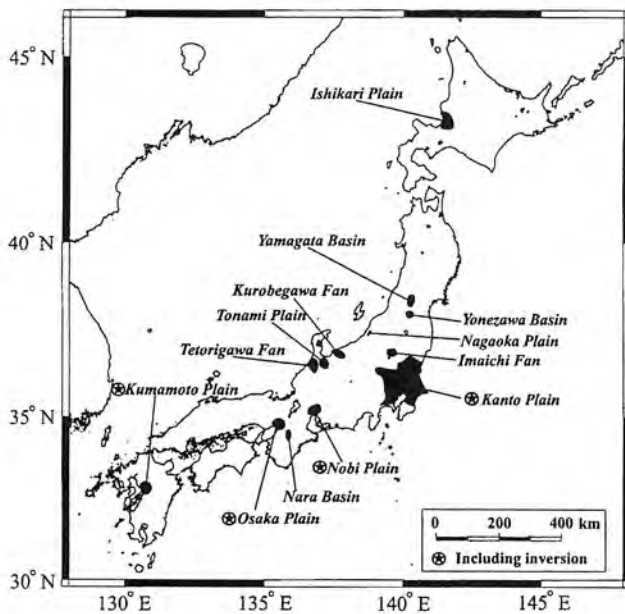


図 15 浅層の地下温度プロファイルデータが収集されている地域（内田ほか, 2001）

大阪地域においては、地下温度プロファイルから推定される近年の地表面温度の上昇量に、場所による違いが見られ、ヒートアイランドの影響の差によるものであろうと解釈されている（図 16; Taniguchi et al., submitted）。地下温度プロファイルから読み取られる地表面の温度上昇には、大都市と地方都市の間でも差があることが指摘されており、まさに都市化による温度環境の違いを反映しているものと言えよう。

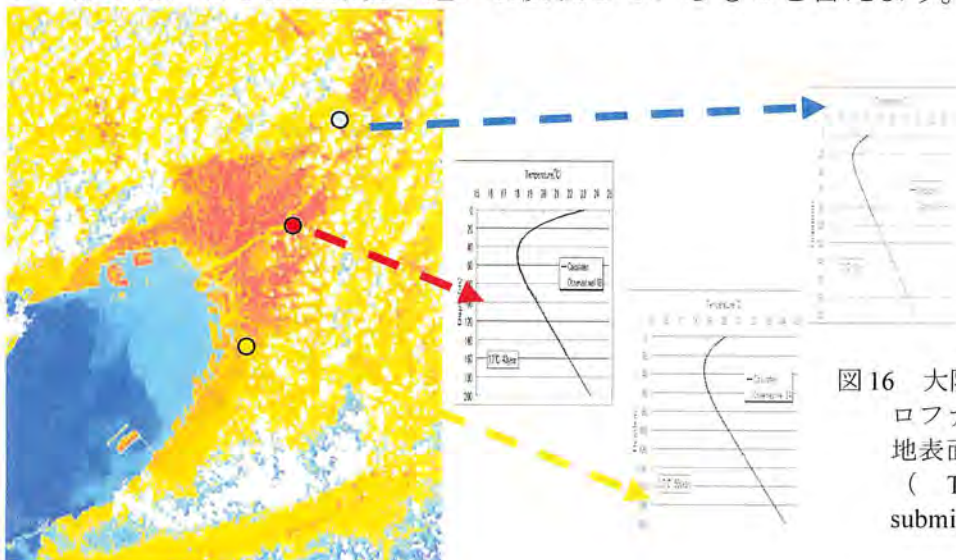


図 16 大阪地域の地下温度プロファイルに見られる、地表面温度上昇量の違い（Taniguchi et al., submitted）

これらの研究に用いられている浅層の地下温度プロファイル（深さ 30～300 m 程度）を、データベース化する作業も進められている（内田ほか, 2001）。一方、より深い孔井（300 m 以上）の温度プロファイルをコンパイルしたデータベースが、最近公開された（坂川ほか, 2004）。本研究を進めるにあたっては、これらのデータベースを活用することも必要であろう。

次に国外について見ると、韓国においては、孔井に関する情報が KIGAM（韓国地球化学鉱物資源研究所）によって収集されており、300 点以上の孔井温度データが存在する（図 17; GSJ and KIGAM, 2001）。これらの中には温度の再計測が可能な孔井もあり、

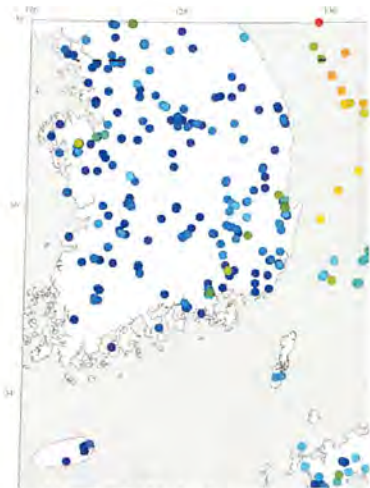


図 17 韓国における地温勾配データの分布（GSJ and KIGAM, 2001）

実際に日本との共同研究として、ソウルを含む複数の地点での温度再計測や地表面温度を復元する解析が試みられている（Okubo et al., 2003）。

台湾では、1980 年代に多数の地点における地殻熱流量データが取りまとめられ、熱流量分布の大まかな様子が明らかにされている（図 18）。しかし、その大部分は比較的浅い孔井における測定であり、しかも地下水流動などの影響を受けていると思われるものが多く、熱流量データとしての信頼性は低いものである。その一方では、西部を中心に地下水の観測井が数多く存在しており、地震発生に関連する地下水変化の観測等にも利用されている。これらの孔井で温度プロファイルの計測を行うことは可能であると考えられる。

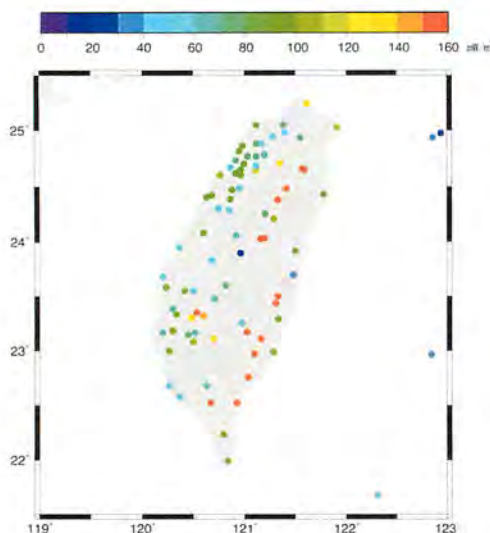


図 18 台湾における地殻熱流量データ

タイにおいては、主に北部の地熱地域を中心に熱流量測定が行われているが、バンコク周辺でのデータはほとんど報告されていない。ここでは、バンコクの地下水観測井を用いての調査が中心になるとと思われる。

上記のように、韓国や台湾には全国規模で数多くの孔井が存在しており、これらを活用すれば広域的な観測・解析を行うことが可能である。ややスケールは異なるが、カナダにおいて広域的な解析を行った例を、図 19 に示す (Beltrami et al., 2003)。これは、カナダ全土から深さ 300 m 以上の孔井を選び (246 点)、過去 500 年間の地表面温度を 50 年間ごとの平均として復元したものである。アメリカとの国境付近で大きな温度上昇が見られるのは、都市化、人間活動の影響が現れているものであろう。より小さなスケールで同様な研究を行うことにより、ソウル、台北といった大都市のヒートアイランド化の状況を浮き彫りにできることが期待される。

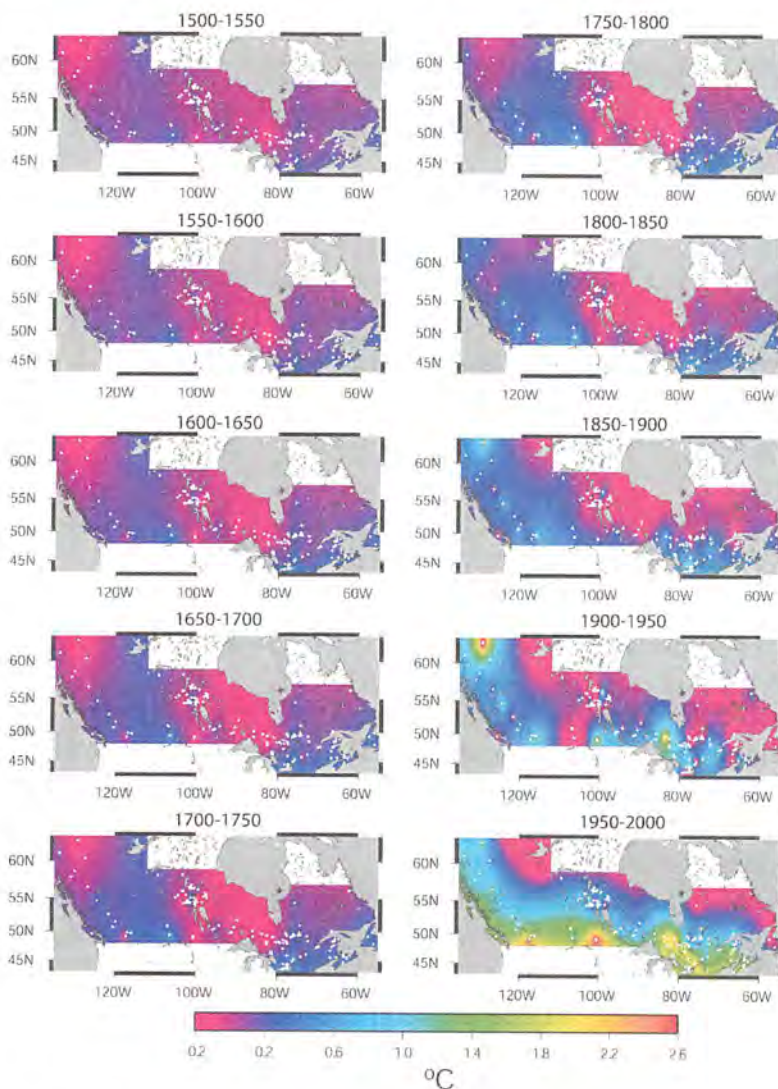


図 19 カナダ全土の孔井温度データを用いた地表面温度変動の復元結果 (Beltrami et al., 2003)

7. まとめと今後の課題

以上、地下温度分布から過去の地表面温度を復元する手法について述べてきたが、その要点をまとめると、以下のようなになる。

- ・掘削孔内の深さ数百 m までの温度分布を測定し、これを解析することにより、過去数百年の地表面温度変動を復元することができる。

- ・この方法により、空間的・時間的に気象データが存在しない部分をカバーして、気候変動や都市化による温度変動を調べることができる。
- ・土地利用の変化など、気温以外の要因による地表面温度の変動も捉えることができる。
- ・同じ孔井で時間間隔をおいて温度分布を測定すること、あるいは近接した孔井での結果を比較することにより、復元の精度を高めることができる。
- ・大都市が発達する沖積平野において解析を行うには、地下の層構造についての情報を得ること、地下水流動の影響を十分に考慮することが必要である。
- ・孔内温度の長期計測を合わせて行うことにより、温度変動の浸透過程について新たな情報を得ることができる。
- ・大都市を含む広域で観測・解析を行うことにより、ヒートアイランド化等の過程を浮き彫りにすることが可能である。

今後の課題としては、以下のような点があげられる。

- ・復元されるのは地表面（直下の）温度であるため、これを気温等と結びつけるためのデータを得る。
- ・個々の孔井から得られる局所的な地表面温度の変動と、広域的な解析によって得られる結果を結びつける。
- ・地表面温度変化以外の要因による地下温度の変動を、他の分野・手法による情報を利用して補正・除去する。
- ・温暖化、都市化によって地下に蓄えられた熱が、将来の都市環境にどのように影響するかを評価する。

参考文献

- Beltrami, H., C. Gosselin, and J.C. Mareschal, Ground surface temperatures in Canada: Spatial and temporal variability, *Geophys. Res. Lett.*, 30(10), 1499, doi:10.1029/2003GL017144, 2003.
- Cermak, V., J. Safanda, M. Kresl, P. Dedecek, and L. Bodri, Recent climate warming: Surface air temperature series and geothermal evidence, *Studia geoph. et geod.*, 44, 430-441, 2000.
- Geological Survey of Japan and Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, *Geoscientific Maps of Southern Part of Korea, Western Part of Japan and Their Adjoining Seas*, 8 pp., Geol. Surv. Japan, Tsukuba, 2001.
- Goto, S., M. Yamano, and M. Kinoshita, Thermal response of sediment with vertical fluid flow to periodic temperature variation at the surface, *J. Geophys. Res.* (in press).
- Harris R. N., and D. S. Chapman, Mid-Latitude (30° -60°N) climatic warming inferred by combining borehole temperatures with surface air temperatures, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 747-750, 2001.
- Huang, S., H. N. Pollack, and P.-Y. Shen, Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures, *Nature*, 403, 756-758, 2000.
- Jessop, A.M., *Thermal Geophysics*, 306 pp., Elsevier, Amsterdam, 1990.
- Lewis, T. and K. Wang, Geothermal research related to past climate, *Eos, Trans. Am. Geophys. Un.*, 73, 265-269, 1992.
- Miyakoshi, A., Y. Uchida, Y. Sakura, and T. Hayashi, Distribution of subsurface temperature in the Kanto Plain, Japan; estimation of regional groundwater flow system and surface

- warming, *Phys. Chem. Earth*, 28, 467-475, 2003.
- Okubo, Y., H.-C. Kim, Y. Uchida, and J. Safanda, Borehole data and climate reconstruction in Korea, *Proc. Int. Workshop "Geothermal/ Dendrochronological Paleoclimate Reconstruction across Eastern Margin of Eurasia"*, Nov. 2002, Matsuyama, Japan, 126-135, 2003.
- 坂川幸洋・梅田浩司・鈴木元孝・梶原竜哉・内田洋平, 日本の抗井温度プロファイルデータベース, *地震*, 57, 63-67, 2004.
- Taniguchi, M., J. Shimada, T. Tanaka, I. Kayane, Y. Sakura, Y. Shimano, S. Dapaah-Siakwan, and S. Kawashima, Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan, *Water Resour. Res.*, 35, 1507-1517, 1999.
- Taniguchi, M., T. Uemura, and Y. Sakura, Effects of urbanization and groundwater flow on subsurface temperature in three mega cities, Japan, submitted to *Geophys. Res. Lett.*
- 内田洋平・佐倉保夫・谷口真人, 日本の浅層地下温度場 —新しい地下温度場の捉え方—, *日本地熱学会誌*, 23, 167-180, 2001.
- Uchida, Y., Y. Sakura, and M. Taniguchi, Shallow subsurface thermal regimes in major plains in Japan with reference to recent surface warming, *Phys. Chem. Earth*, 28, 457-466, 2003.
- Wang, K., and T.J. Lewis, Geothermal evidence from Canada for a cold period before recent climatic warming, *Science*, 256, 1003-1005, 1992
- Wang, K., T.J. Lewis, and A.M. Jessop, Climate changes in central and eastern Canada inferred from deep borehole temperature data, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 98, 129-141, 1992.
- Yamano, M., and S. Goto, Long-term temperature monitoring in a borehole drilled into the Nojima fault, southwest Japan, *Island Arc*, 10, 326-335, 2001.
- Yamano, M., H. Hamamoto, Y. Okubo, A. Miyakoshi, and E.I. Gordeev, Long-term monitoring of borehole and soil temperatures in the Kamchatka Peninsula, *Proc. Int. Workshop "Geothermal/Dendrochronological Paleoclimate Reconstruction across Eastern Margin of Eurasia"*, Nov. 2002, Matsuyama, Japan, 110-117, 2003.

地球研谷口 F S 2 - 4 社会経済グループレビュー

都市化と地下環境変化

社会経済班

広島大学大学院国際協力研究科 金子慎治・岡村敏之

1 はじめに

本稿では、都市化と地下環境変化との関連を考える上で参考となるであろう都市発展のプロセスに関連する研究例や考え方のいくつかをまとめる。「都市というのはどういうものであり、また都市はどうして存在するのか」といった疑問は、非常に基本的ではあるが、同時に都市（「環境」）問題を考える上で本質的かつ重要な点であるといえよう（中村良平・田淵隆俊、1996）。ここでは、上述の基本的な問題意識を出発点としながらも、本研究プロジェクトの文脈の中でいかにそれを研究として具体化するかということに重点を置く。しかし、きわめて大きな漠然とした問題であるため、レビューの量と質はいまだ十分でない。今後、研究フレームや研究方法の具体化と平行して、継続して既存研究のとりまとめを行っていく予定である。

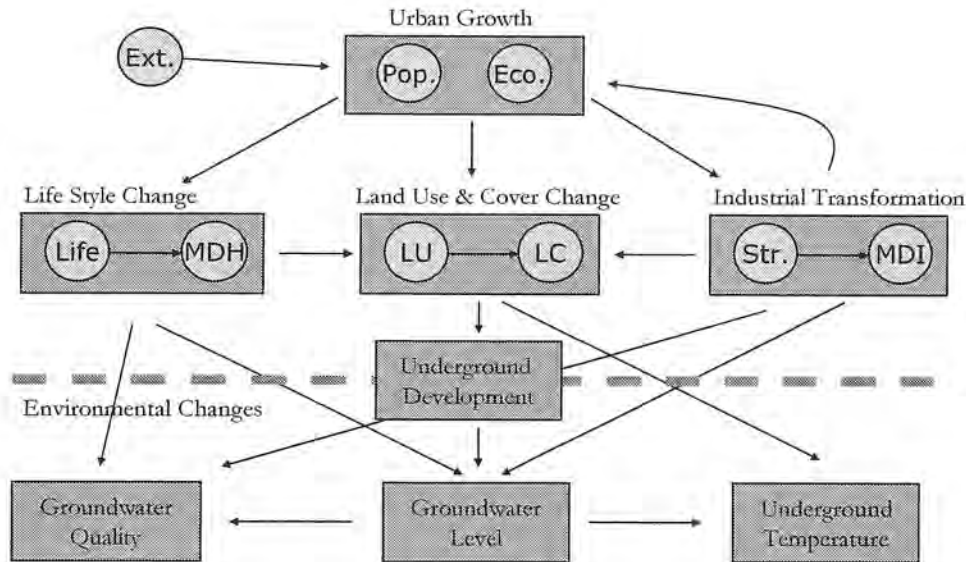
2 研究フレーム

本研究の目的は地下環境変化の計測とその都市発展過程との関連を明らかにすることである。ここで地下環境とは地下水量（地下水位）、地下水質、地下温度である。地下開発はそのこと自体が環境問題と捉えることも可能であるが、他の環境問題である地下水や地下温度に及ぼす影響が大きいと考えられるため、区別して扱うこととした。

環境問題の因果関係を記述する方法として OECD が提唱した PSR（Pressure-State-Response）フレームワークを環境省が DPSE（Driving Force-Pressure-Effects-Response）フレームワークとして拡張した。いくつかの代表的な地下環境問題の因果関係、都市化との関連性を DPSE フレームワークによって捉えることから始める。以下表 1 は一例である。研究が進むにつれ、より詳細な因果関係のメカニズムが明らかにされていくことが期待される。

表 1 都市地下環境問題の DPSE フレームワーク

- Driving forces:
 - － 人口増加、経済成長
- Pressure:
 - － 土地利用変化、水消費量・排水量の増加、地下開発
- State:
 - － 地下水汚染、地下水位の変動、地下温度上昇
- Effects:
 - － 健康被害、地下構造物の破壊、(地下)生態系の変化
- Response:
 - － 都市計画、インフラ整備(技術開発)、規制、補助金、...



Ext. : 外部要因、Pop. : 都市人口、Eco. : 経済水準、Life : ライフスタイル、MDH : 家庭部門の物質需要 (消費)、LU : 土地利用、LC : 土地被覆、Str.産業構造、MDI : 産業部門の物質需要 (消費)

図1 研究フレームワーク

図1は本研究で扱うシステムの全体像と社会経済系の主たる対象領域を点線で区切って示したものである。人口集中、経済活動の拡大によって説明される都市化が起こり、その結果、人々のライフスタイル、土地利用、産業構造が変化する。その結果、地下水需要、排水量が増加し、地表面は大きく人工被覆に改変されていく。これらの要因間の関係の強さは、都市インフラによって、あるいは技術の違いによって変化する。さらに、地理的条件や都市計画、環境政策によっても影響を受ける。以上の枠組みの中で、都市化を記述し、都市化によって地下環境に影響を及ぼすより直接的な要因の変化とどのように関連するかを明らかにすることが目的となる。最終的には定量化、定式化を目標とする。

3 研究仮説

本研究は東京、大阪 (日本)、ソウル (韓国)、台北 (台湾)、バンコク (タイ)、ジャカルタ (インドネシア) のアジア沿海部に位置する主要なメガシティを対象に比較研究を行う。したがって、ここでの研究仮説は、比較研究による成果を見込んで設定する。

1. アジア地域の沿海都市の都市発展過程のドライビングフォースに共通性はあるか？
2. 長期的な都市発展過程を共通のいくつかの典型的な共通した発展段階に分けられるかどうか？
3. 地下環境問題と経済成長の関係はクズネツ型であるかどうか？ (ある一定の経済的閾値を境に改善されるか？)
4. 高密度都市は地下環境変化にとってよいかどうか？
5. 技術開発 (都市インフラ、水消費に関する機器など) が都市発展と都市地下環境の変化にどのような影響を及ぼしたか？都市間での違いがあるとすればそれはなぜか？
6. 都市政策、都市計画が都市発展と都市地下環境変化の関係にどのような

影響を及ぼしたか？都市間で違いがあるとすればそれはなぜか？

4 既存研究

4.1 方法論

都市化のプロセスについては、特に経済成長との関係から、一般に2つの見方がある。ひとつは個別都市における発展プロセスである。もうひとつは都市群あるいは国全体における都市化率の変化プロセスである。最近の研究については、Davis and Henderson(2002)あるいはHenderson (2003)を参照されたい。

アジアの都市化と環境の比較研究は、Ness and Low (2000)が参考になる。Faisalabad (1970-), Khon Kaen (1970-), Cebu City (1903-), Pusan (1971-), Kobe (1970-)の人口変化をシステムダイナミクスモデルで再現し、環境指標との関連を分析している。また、開発したモデルを用いて2020年までの予測も行っている。

4.1.1 発展プロセスについて

初期の都市化は工業化とともに論じられることが多い。いわゆる経済の二重構造論である。伝統的農村社会が工業化を始める都市セクターへの安価な労働供給源となり、都市セクターが勃興する。その後、都市化・工業化とともに農業の近代化が起こり、さらに農村から都市へと人口が移動する (A. W. Lewis (1954, 1958)、G. Ranis and J.C.H. Fei (1961, 1963)、D. W. Jorgeson (1961))。また、途上国の都市インフォーマルセクターの存在とその都市化との関係はトダロモデルとして説明される。

また、雇用の経済学によって都市の起源を説明することも有効である。19世紀末の江戸においては雑業者化が結婚・家族形成を通じて人口増加にプラスの関係がある一方で、大阪では奉公人制度が人口増加にマイナスの影響を及ぼした (斉藤、2002)。

こうした都市勃興から現在までに至る期間を例えば、4つに分けた例がある。(1) 19世紀後半の工業化と都市成長、(2) 20世紀の高度工業化と巨大複合機能都市の出現、(3) 20世紀後半の脱工業化と大都市経済基盤の侵食、(4) 大都市機能再編時代である (松沢編、1996)。こうした長期の都市発展プロセスを表現するための手がかりとして、都市経済の経済分析として立地の優位性、規模の経済、都市集積利益などの計測がある。しかし実証研究にはデータの入手可能性の問題があり、長期間問題に扱うには困難がともなう。長期モデルには段階論とそれぞれの段階ごとのモデル化が必要となるであろう。

4.1.2 経済成長と環境変化

経済成長と環境変化の関係はしばしばクズネッツ環境曲線として表現される。横軸に所得、縦軸に環境負荷をとって、経済と環境の関係を論じるものである。ひとつの論点は、turning point の存在とその経済水準、汚染水準の議論である。もうひとつは所得との関係で説明できない部分が何によって説明できるかである。さまざまな実証研究がなされてきたが、特定の国・地域における個別の問題については逆U字曲線が見られるものの、一般化することはできないということが最近の議論である。

こうした考え方を都市環境問題群との関係で整理したのが、都市環境問題のステージモデルある (Bai, 2003; McGranahan and Songsore, 1994)。貧困起因の問題は経済成長とともに単調に改善し、生産活動に起因する問題 (工業汚染) はいったん悪化し、その後改善される。消費活動に起因する問題 (温暖化、ゴミ問題) は経済成長とともに増加の一途をたどる。こうした議論は現在実証研究として捉えられている問題の動的側面を明らかにするとともに、特に途上国において、こうした問題が段階的に起こっているのでは

なく、圧縮されて複合的に起こっており、問題の因果関係がより複雑になっていることを示唆する。

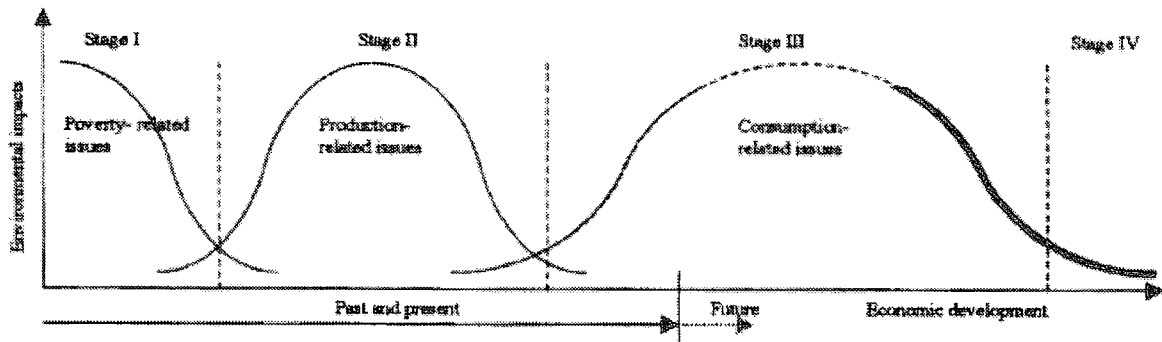
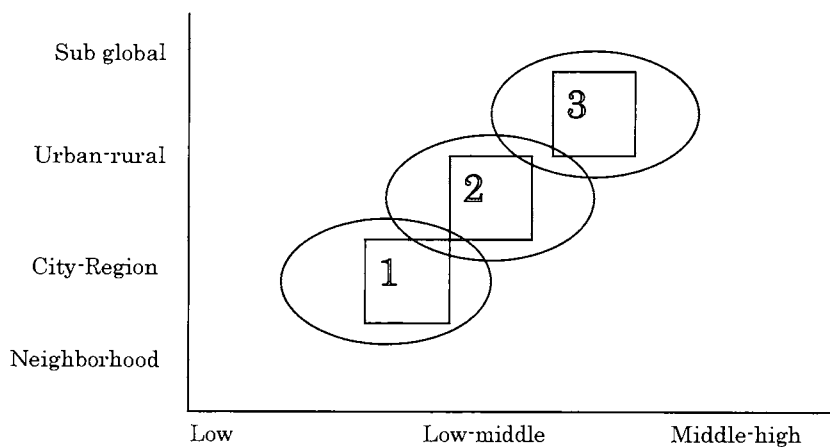


Figure 2: Conceptual illustration of a typical evolution trajectory of environmental problems in developed country cities and an optimistic, potential future projection in relation to economic development. (Bai (2003))

経済成長と環境問題の関係の別の見方として、経済活動が活発化し、環境問題が変遷していくことに応じて、空間的影響範囲が大きくなる傾向がある。都市がもたらす環境負荷が都市域以外へ影響の範囲を拡大していくプロセスである。さらに、地球規模の環境変化が都市域の生態系や人間活動に及ぼす影響も一方で重要である。

Immediate Spatial Impact



(1) Sanitation, access to potable water, squatter settlement and health associated brown agenda issues such as malaria, respiratory disease diarrhoea, contagious disease; (2) Industrial pollution in water and particulate air pollution (3) Air pollution associated with motor vehicle emission and city regional climate conditions.

図3 経済成長と環境影響の空間的広がり

4.1.3 都市形態と環境変化

都市形態と環境の問題には多くの研究蓄積がある都市化と土地利用、都市化と交通の問題が含まれる。IGBP と IHDP の共同プロジェクトである LUCC(Land Use and Cover Change)が先行研究としてある。このうち、FOCUS 1 が社会経済的变化と土地利用の関係を扱っており、本研究との関連性が最も高いと考えられる。

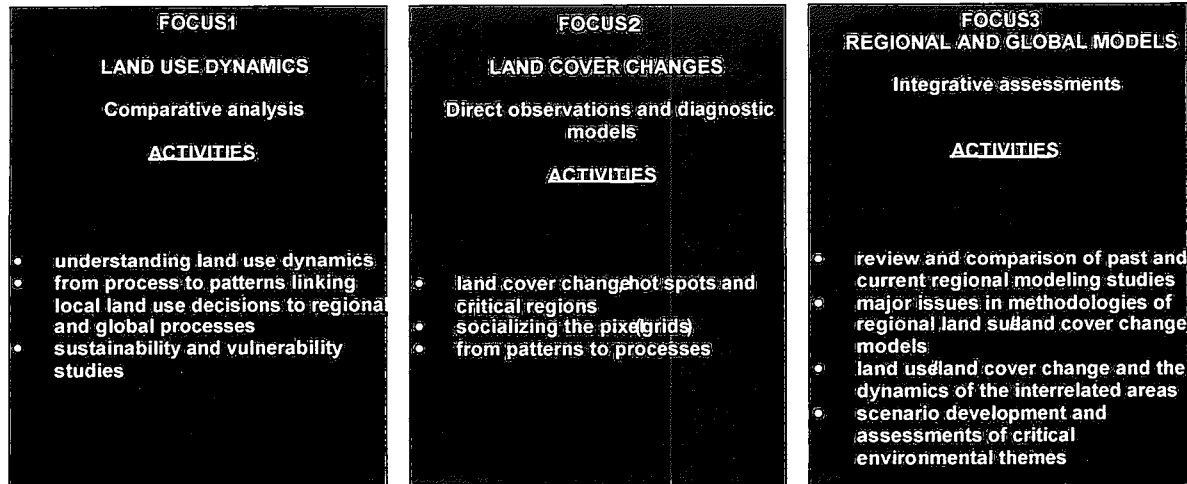


図4 LUCプロジェクトの研究対象

土地利用と環境の関係については、特に大気汚染や温暖化ガス排出問題との関連で研究がなされている。その際、交通はきわめて重要な要因として考慮されている。本研究においても土地利用の変化や都市域の拡大にとって交通が重要となる。都市形態をどのような指標で表現するかについては多様な方法がある。最もよく使われる指標としては人口密度（活動密度）である。都市交通のエネルギー消費や大気汚染物質排出と人口密度の関係では、高密度都市の優位性が指摘されている(Newman and Kenworthy, 1999; Cooper et al., 2001; Kenworthy and Laube, 1996; Lariviere and Lafrance, 1999; McEvoy et al., 2000; Naess and Sandberg, 1996)。こうした議論が地下環境問題にも当てはまるかどうかはひとつの興味である。

4.1.4 都市ライフスタイルと環境変化

ライフスタイルの変化と環境問題に関しては、エネルギー環境問題で扱われることが多い。特に、家電製品の普及（+）、技術進歩（-）が重要である（Munksgaard, 2000）。暖房用燃料などは所得ではなく、人口と同様に増加するのに対し、電力は所得と同様に増加する。ただし、一部照明用、冷蔵庫用の電力消費は人口と同様である(Chow, 2001)。行動変化が省エネルギー技術の進歩よりも大きな改善効果をもたらす（Durrenberger, et al., 2001）。日本では、ほとんどの家電製品の普及が飽和状態であるが、生活環境をよくするような暖房や冷房などの機器の需要はまだ増加傾向にある(Nakagami, 1996; Wilhite, 1996)。生活用水、生活排水と所得の関係では、用途別に見て、経験的にどのような関係にあるかを分析する必要がある。ただし、気候などの違いによる地域差も考慮すべきである。家庭用の水需要に関する分析も多くある。ただし、地域的格差が大きいことや超長期の分析は限定的であることから基礎データの収集など多くの課題が予想される。

4.2 対象都市の比較

本研究プロジェクトでは、アジアの沿岸域の大都市として、東京、ソウル、台北、バンコクを当面の対象としている。本節では、これら4都市の社会経済的な側面として、

- 1) 都市の起源
- 2) 近代以前の都市化と、近代以後のメガシティ化
- 3) 都市域の拡大

について簡単に整理を行う。そして、これらの都市の人間活動を記述する指標を抽出する。

4.2.1 都市の起源

いずれの4都市も、地域の代表的な大都市としての発展は、海洋・河川沿岸立地の利点を生かした 1) 広域的な交流の活発化による「交流拠点都市」としての機能と、2) 広域を支配する安定的な中央政府の首都としての「政治中心都市」（台北を除く）としての機能、をこれらの都市が持ったことに起源をもとめることができる。このことはまた、4都市とも大都市としての歴史が必ずしも長くないことも示している。表2に4都市の起源を整理する。

表2. 研究対象都市の起源

東京	<p>①大都市としての起源 徳川家康の関東八州移封(1590年以降)による都市建設、江戸幕府成立(1603)</p> <p>②遷都：1603年（江戸幕府開府）、1868年（明治維新）</p> <p>③都市立地の特性：舟運（海洋、内陸水運）の拠点、広大な後背地</p>
ソウル	<p>①大都市としての起源 地域の代表都市として成立。朝鮮王朝の成立で首都移転。都市建設の開始</p> <p>②遷都：1394年（朝鮮王朝の成立）</p> <p>③都市立地の特性：舟運（海洋、内陸水運）の拠点</p>
台北	<p>①大都市としての起源 漢人の交易拠点として自然発生的に成立。19世紀後半に清朝が台北府設置</p> <p>②遷都：首都としての性格なし（1895年 台湾総督府設置）</p> <p>③都市立地の特性：大陸との貿易港</p>
バンコク	<p>①大都市としての起源 アユタヤ王国の防衛・交易拠点として成立。</p> <p>②遷都：1782年（ラーマ1世）</p> <p>③都市立地の特性：舟運（海洋、内陸水運）の拠点</p>

4.2.2 近代以前の都市化と、近代以後のメガシティ化

4都市とも、河川とのつながりが非常に大きく、都市建設のために河川改修や運河開削などの自然改変を工業化以前より行ってきた。しかし、東京（江戸）以外は、近代以

前での都市規模拡大は限定的であり、東京が江戸時代末期に人口 100 万人を数えていた以外は、工業化以前の他の 3 都市の人口はせいぜい数万人から数十万人規模であった。

近代以降は、近代国家の首都（または地域首都）として発展する。工業化や死亡率減少による人口増と、代表都市への一極集中化が進行し、20 世紀中期までには、対象 4 都市全てが、世界的なメガシティとして発展する基礎が成立した。

表 3. 都市化の進展（概ね 20 世紀中期まで）

東京	① 近代以前の都市整備 江戸幕府による町割、運河開削、利根川東遷 ② 近代以後の都市整備 市区改正条例(1890～)、震災復興計画（1923～） ③ 人口増加の要因 政治・国内経済の中心。国内の人口増。
ソウル	① 近代以前の都市整備 朝鮮王朝による街路区画の整備（14 世紀～）、清溪川改修 ② 近代以後の都市整備 日本統治下における市区改正 ③ 人口増加の要因 日本統治以前の人口増は限定的。1920 年代以降急増
台北	① 近代以前の都市整備 清朝による台北城建設（19 世紀中期）、港の建設 ② 近代以後の都市整備 日本統治下における市区改正 ③ 人口増加の要因 日本統治以前は移民（貿易、開墾）。1910 年以降は都市整備による人口増
バンコク	① 近代以前の都市整備 チャオプラヤ川の改修、運河の開削 ② 近代以後の都市整備 バドゥンクルンカセム運河の開削による市街地拡大 ③ 人口増加の要因 交易の活発化とラーマ 4 世による開国、国際貿易都市

4.2.3 都市域の拡大と交通

メガシティが成立するためには、例えば以下のような契機や条件が必要である。

- 1) 都市域の拡大を可能にした 都市内交通機関の成立と整備
- 2) 生活供給インフラの整備
- 3) 都市の高密化・高層化を可能とした建設技術
- 4) 都市の効率的発展を促した各種都市計画制度
- 5) 効率的な都市運営を可能にする政府の政策能力

例えば 1) に着目すると、東京の都市域拡大は、モータリゼーション以前における（結果的に）先行的な鉄道整備が、第 2 次世界大戦以降の急激な人口増加を可能にした（ただし顕著なスプロール化が進行した）。（図 5）。またバンコクは、先行的に整備された完

成増路沿いに市街地化が進行した。

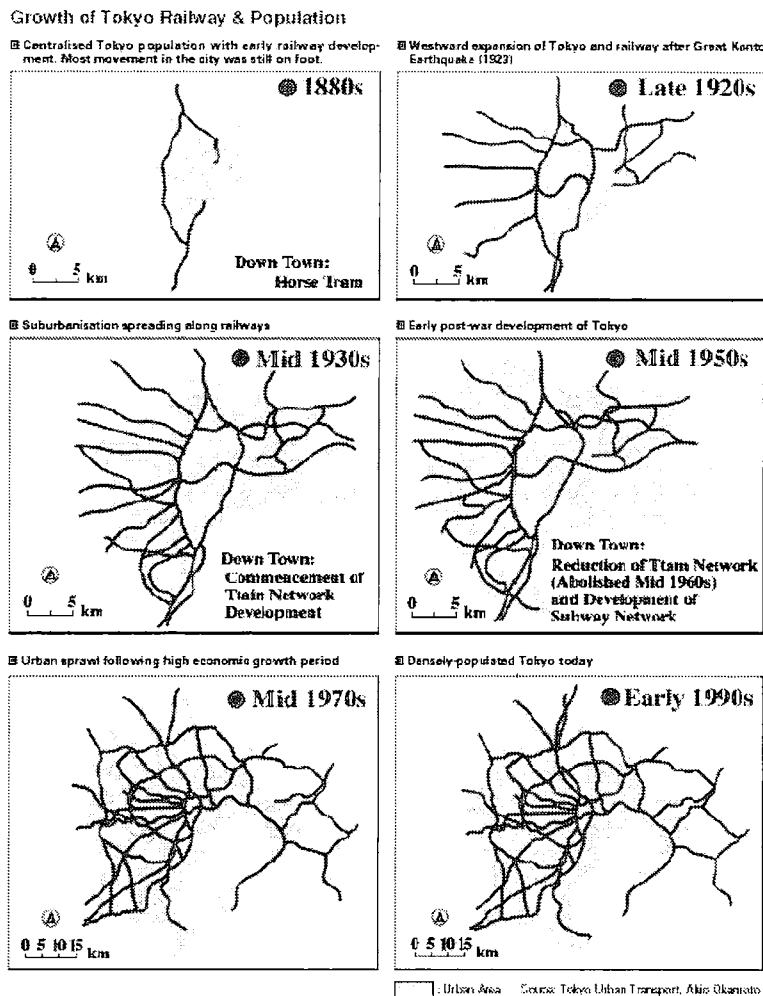


図5. 鉄道ネットワークの整備と市街地化の進行（東京の事例）

出典：Japan Railway and Transportation Review No.4, p16

4.2.4 都市の人間活動を表現する指標

都市域の人間活動を表現する統計指標としては、以下のものが挙げられる。

対象4都市のうち、都市拡大の歴史が長い東京については可能な限り過去100年程度のデータを、他都市については過去50年程度のデータを収集することが必要と考えられる。

また、地下の環境指標の分析と整合されるために、これらの社会経済データ収集に求められるデータの精度や集計単位、収集範囲について今後精査していく必要がある。

都市の人間活動を表現する指標

- ① 社会経済指標
 - 人口、所得
- ② 土地利用
 - 面積、DID人口、人工財被覆率、市街地率、緑地率
- ③ ネットワークインフラ水準
 - 道路延長・面積、鉄道延長、水道管延長・供給量
- ④ マテリアルストック

- 木材、鉄、セメントコンクリート、アスファルトコンクリート、建物床面積
⑤ 消費水準
交通需要（道路、鉄道）、エネルギー消費

5 参考文献

- 中村 英夫 編：東京のインフラストラクチャー，技報堂出版，1997
Okamoto: References-Growth of Tokyo and its Transport Networks, Japan Railway and Transportation Review, No.4, p16, East Japan Railway Culture Foundation, 1995.3
Misao Sugawara: Urban Transportation in Asian Countries, Japan Railway and Transportation Review, p23-29 ,1995.3
黄 蘭翔：日本植民初期における台湾の市区改正に関する考察—台北を事例として—、日本都市計画学会論文集, 27, pp13-18, 1992
李 宣晋、戸沼幸市：台湾における都市整備関連計画(国土、区域、都市レベル)の変遷に関する研究、日本都市計画学会論文集, 104 , pp619- 625, 1993
田中重光：台北の近代化過程における都市計画の影響に関する研究、日本都市計画学会論文集, 31, pp253-258, 1996
黄 永融、鳴海邦硬：清代末期における台北市街地の形成過程とその特質に関する考察、日本都市計画学会論文集,30 , pp439-444, 1995
Akinobu Murakami, Alinda Medrial Zain, Kazuhiko Takeuchi et.al: Trends in urbanization and patterns of land use in the Asian mega cities Jakarta, Bangkok, and Metro Manila, Landscape and Urban Planning, pp251-259, 2005
Yuji Hara, Kazuhiko Takeuchi, Satoru Okubo: Urbanization linked with past agricultural landuse patterns in the urban fringe of a deltaic Asian mega-city: a case study in Bangkok, Landscape and Urban Planning, 2004
松澤俊雄編：大都市の社会基盤整備、東京大学出版会、1996
James C. Davis and J. Vernon Henderson (2002) “Evidence on the political economy of the urbanization process”, Journal of Urban Economics, 53. 98-125.
Vernon Henderson (2003) “The urbanization process and economic growth: the so-what question, Journal of Economic Growth, 8, 47-71.
G. D. Ness and M.M. Low (2000) Five Cities – Modelling Asian Urban Population-Environment Dynamics, Oxford University Press.
Kenworthy, J., Laube, F.B., “Automobile dependence in cities: An international comparison of urban transport and land use patterns with implications for sustainability,” Environmental Impact Assessment Review 16: 279-308 (1996).
Bai, X. 2003, The process and mechanism of urban environmental change: an evolutionary view, It. J. Environment and Pollution, Vol. 19, No.5,pp.528-541.
Takeshi Arai and Tetsuya Akiyama, 2003, Empirical analysis for estimating land use transition potential functions—case in the Tokyo metropolitan region, www.elsevier.com/locate/compenvurbsys
Cooper, J., Ryley, T., Smyth, A., “Energy trade-offs and market responses in transport and residential land use patterns: promoting sustainable development policy,” Urban Studies 38 (9): 1573-1588 (2001).
McEvoy, D., Gibbs, D.C., Longhurst, J.W.S., “City-regions and the development of sustainable energy-supply systems,” International Journal of Energy Research 24: 215-237 (2000).
Naess, P., Sandberg, S.L., “Workplace location, modal split and energy use for commuting trips,” Urban Studies 33 (3): 557-580 (1996).
Lariviere, I., Lafrance, G., Modelling the electricity consumption of cities: effect of urban

- density," *Energy Economics* 21: 53-66 (1999).
- Munksgaard, J., Pedersen, K.A., Wien, M., "Impact of household consumption on CO2 emissions," *Energy Economics* 22: 423-440 (2000).
- Chow, Larry Chuen-ho, "A study of sectoral energy consumption in Hong Kong (1984-97) with special emphasis on the household sector," *Energy Policy* 29: 1099-1110 (2001).
- Durrenberger, Gregor. Patzel, Nikola. Hartmann, Christoph, "Household energy consumption in Switzerland" *International Journal of Environment and Pollution* 15 (2): 159-170 (2001).
- Nakagami, Hidetoshi, "Lifestyle change and energy use in Japan: Household equipment and energy consumption," *Energy* 21 (12): 1157-1167 (1996).
- Wilhite, H., Nakagami, H., Masuda, T., Yamaga, Y, Haneda H., "A cross-cultural analysis of household energy use behavior in Japan and Norway," *Energy Policy* 24 (9): 795-803 (1996).

地球研谷口 F S 2 - 4 都市地理グループレビュー

都市の歴史的水環境の復原
立正大学地球環境科学部 谷口智雅
立命館大学文学部 吉越昭久

1.はじめに

地理学における地域の総合的把握では、自然現象と人文現象を独立に分析するのではなく、この両者の相互関係を含めて究明することが重要である。本来、地域を構成する自然的要素と人文的・社会的要素はそれぞれが独立しているものではなく、両者が相互に複雑に絡み合っている。それゆえ個々の自然・人文現象の枠に捉われず、多面的なアプローチを行うことが必要である。

近年、特定分野あるいは領域に捉われず、地球環境あるいは地域環境を総合的に理解しようとする試みが各方面で行われている。特に、近代における人間活動と環境変化を整理し、21世紀の地球環境への予測を行うことを目標とし、幅広い研究がなされつつある。

人間活動と環境変化を対象とする空間・時間スケールは、地球規模の自然変化を中心とした $10^3 \sim 10^4$ 年のオーダーを扱うマクロスケールから、特に人間活動が盛んになった時代と地域を対象とした $10^0 \sim 10^2$ 年のオーダーを扱うミクロスケールまでと幅広いが、それぞれの研究には異なった意義がある。例えば世界の気候変動の時間スケールを見ると、地球史的規模の温暖期と寒冷期の持続・交代は $10^6 \sim 10^8$ 年、第四期の氷期-間氷期の変動は $10^4 \sim 10^5$ 年、過去 1000 年の変動は $10^0 \sim 10^1$ 年のオーダーで発生している。気候変動に関係する原因によって扱う時間スケールが異なるため、どの時間オーダーで環境変化を扱うかが重要な選択になってくる。

2.今後の予定と課題

環境変化は古環境と現在の環境の差ではなく、既に古環境時人為的影響を受けていた環境が自然的影響と人為的影響を受け、現在の環境が成り立っていると考えられる (図 1)。しかし、現在の環境、現在的人為的影響については、積極的に取り組まれているが、過去の環境、過去の環境に対する人為的影響については、あまり示されていない。このため、過去の環境復原と自然環境に与える人間活動およびその影響についても再評価を行う。また、人為的影響として考えられる人文・社会現象についても、多面的なアプローチを行う。その上で、環境と人間活動の相互関係を示すことを課題とする。

また、地域によって環境に対する自然因子、人文・社会因子は異なっているため、各時代・各地域の地域性、地域差について明らかにする。さらに、各都市の発展過程・規模による比較検討も行う予定である (図 2)。

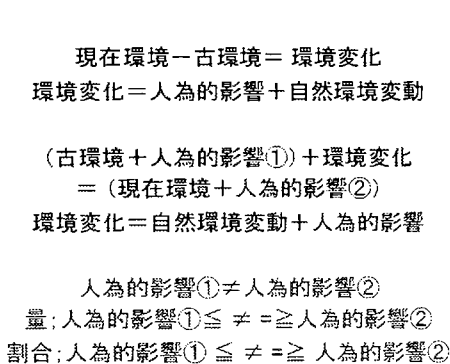


図 1. 環境の成り立ち

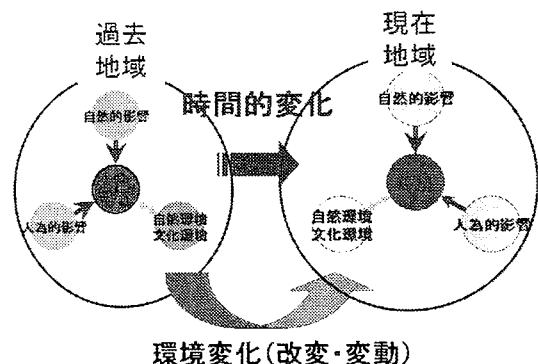


図 2. 環境に対する因子

3.本研究における役割

①都市の自然環境・人間活動とその変化の把握

地理学的な手法を用いた地域分析。自然・人文社会両視点を含めたアプローチ。

②地理学的なアプローチによる歴史的環境の復原

様々な資料（史料）・地形図と現地調査による過去の環境理解。

③環境への人為的影響分析

土地利用、人口など一般的な指標以外の水利用、地下利用、景観などの人為的な影響の考察。また、その自然への影響について。

④都市の比較研究

4.日本・韓国・タイの地域概要

a)日本

日本は、アジア大陸の東縁で、北緯 24～45 度、東経 123～146 を中心に位置する国土面積約 37.7843 万 km² の島国である。気候は南北東西に細長いため南部の温帯、北部の冷帯と地域差があり、四季もある。人口は約 1.28 億人、人口密度約 340 人/km²、1950 年から 2000 年までの人口増加率は 1.5% である。農地面積は 4.83 万 km²、農地肥料消費量は 145.4 万トン、単位面積当たりの消費量は 301 トンになる。

b)韓国

韓国は、中国の東北部から南に突出した韓半島と諸島からなる面積約 9.9268 万 km² で、北緯 33～38 度、東経 125～130 度を中心に位置する。気候は、南部は温帯で海洋の影響が大きく比較的暖かく雨が多く、北部は大陸に接しているため寒暖の差が大きく、冷帯で寒く雨も少ない。年平均降水量は 800～1500mm である。人口 4700 万人、人口密度約 475 人/km²、1950 年から 2000 年までの人口増加率は 2.5% である。農地面積は 1.92 万 km²、農地肥料消費量は 78.2 万トン、単位面積当たりの消費量は 407 トンになる。

c)タイ

タイは、インドシナ半島中心部の南東に位置し、北緯 5～21 度、東経 97～106 度を中心に国土面積約 51.3115 万 km²。国土の大半を平野部が占めており農地面積は国土の約 35% にもなる。気候は、熱帯で年平均気温は 26～28 度、平均湿度 65～80% で、5～10 月に雨季、11～4 月の乾季がある。平均降水量は 1500mm 程度だが、西南モンスーンの影響で 3000mm を越える所もある。人口 6360 万人、人口密度約 125 人/km²、1950 年から 2000 年までの人口増加率は 3.1% である。農地面積は 18.0 万 km²、農地肥料消費量は 155.0 万トン、単位面積当たりの消費量は 86 トンになる。

5.東京・ソウル・バンコクの地域概要

a)東京

東京は、東西約 90 キロメートル、南北約 40 キロメートルの細長い本州部分と、伊豆諸島および小笠原諸島からなる。全国土の 0.6% に当たる 2200 平方キロメートルの土地に、総人口の約 9.5%、約 1200 万人が住む人口稠密な地域である。埼玉・千葉・神奈川の 3 県とともに、人口 3300 万人を擁する首都圏を構成し、政治・経済・文化などの面で高度な機能の集積を有する大都市の中心部である。このため、東京の自然環境は人間の社会活動の影響を大きく受けて存在・変化している（図 3・4）。

東京の都市の拡大

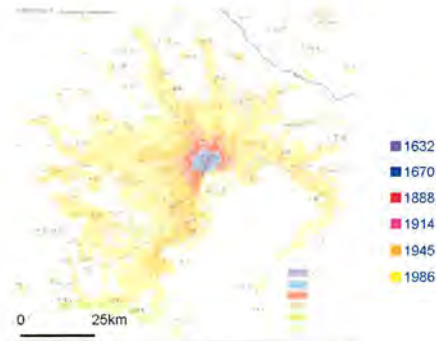


図 3. 東京の都市の拡大

東京の歴史的な水質分布

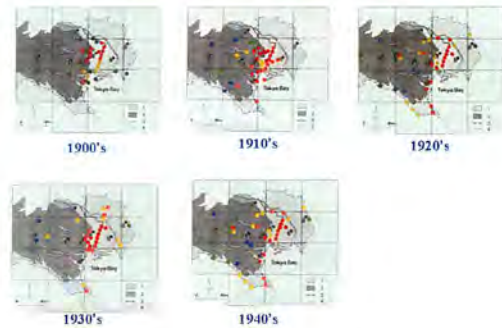


図 4. 東京の歴史的な水質分布

b) ソウル

ソウルは、韓半島の西側の中心部の東経 126 度 59 分、北緯 37 度 34 分に位置する 605.77 km²、市街の中心を漢江が流下している。気候は、四季があり、年間平均気温 13.8 度、年間平均降水量 1200~1400mm である。人口は、現在約 345.8 万世帯、1032.1 万人で、全国人口の約 4 分の 1 を占めている。しかし、1993 年以降、ソウルの衛星新都市への転出により人口が毎年少しずつ減少している。ソウルの生活廃棄物は 1999 年現在一日に 1.765 万トン、1.05 kg/人が発生している。上水道普及率は 99.9%、平均給水量は 444 l/人/日。下水道普及率は 100%で、排出される下水を全て処理しているが、中浪・炭川・加陽・蘭芝の下水処理場の総施設規模は 1 日 581 万トンであり、計画下水量 565 万トンの 102.8%に達している。

c) バンコク

バンコクはチャオプラヤ川の下流 27~56km、北緯 13 度 45 分、東経 100 度 28 分、タイの中央部に位置するに 1568.737 km²のタイの首都である。人口は 1782~1900 年間は緩やかな増加程度で、市街 18 km²に約 60 万であったが、第二次世界大戦後急激な都市化に伴って、1958 年に 160 万から 1986 年の 540 万、1999 年 560 万と急激な人口増加を示した。バンコクの人口は現在約 700 万だが、昼間人口は 1000 万になる大都市である。

アジア巨大都市における物質負荷問題の現状と課題

小野寺真一；広島大学総合科学部
中野孝教；総合地球環境学研究所

1. はじめに

都市には人口が集中しているため、物質も集中する (武内ら, 1998)。すなわち、人々の生活のために、エネルギーや様々な物質が集中し、それらは大量に消費され、様々な廃棄物を排出してきた。廃棄物の排出量はほぼ都市人口に比例している (武内ら, 1998)。しかし、排出された廃棄物が適正に処理されるためには、都市基盤の整備が必要であり、これらは国の経済状況や社会状況、さらにいえば都市の歴史や成熟度に大きく依存する。すなわち、近年急成長してきたアジアの多くの都市では、東京やロンドンでかつてみられた河川や内湾の著しい水質汚濁に直面している (武内ら, 1998)。同時に、地下にも汚染物質は蓄積され、土壌汚染や地下水汚染を引き起こす。ただし、通常、水域の汚染に比べて遅れて問題が顕在化してくる (Domenico and Schwartz, 1990 など)。これらの問題に対しては、地下であるために対策が講じにくく、またその影響範囲の同定も非常に難しい。近年は、バイオリメディエーション技術の進歩により対策が講じられているものの、非常に大きな予算と長い時間を要することになる。このように、地下に蓄積した汚染物質の多くは、浄化されることはほとんどなく、いずれ再び我々の前に様々な形で姿を現すことになる。

現在、巨大都市における汚染物質の蓄積がいくつかの事例で明らかにされてきているが (Domenico and Schwartz, 1990 ; Burt et al., 1993 など)、今後も、多くの成長途上の都市で顕在化してくることが予想される。しかし、地球上の陸域資源が限られてきている以上、環境の悪化を理由に別の地域に遷都することなどはできない。すなわち、都市の持続的な存在のためにも、地球上の人間と自然との共生のためにも、地下における汚染物質の蓄積状況と今後の行方を明らかにしていくことは重要である。また、一方で、周辺環境への影響やそれらとの共存のためにも、巨大都市における汚染物質の蓄積や流出の履歴をさかのぼって推定することも必要である。本稿では、関連の論文をレビューすることによって、巨大都市における地下への物質負荷の現状と課題を見出し、今後の研究の方向性を提案することを目的とする。

2. アジアの巨大都市の特性

アジアの人口増加は著しく、その多くは都市に集中してきた。しか

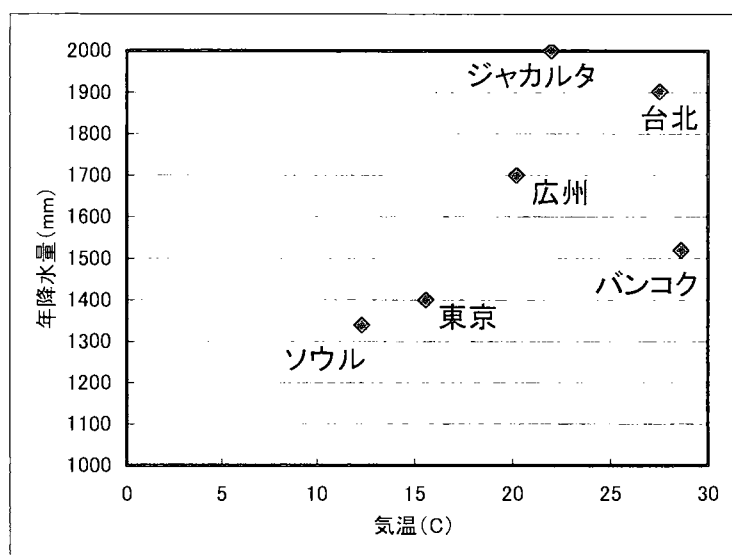


図1 アジアの都市の気候特性

も、その分布には気候的な特徴は顕著ではなく、アジア全体としての人口増加の傾向がうかがえる。図1は、アジアの代表的な大都市の気温と降水量の関係である。降水量は1000mm以上が主で、気温もソウルを除くと15°Cを超えている。気候的には、東京とバンコクは気温の勾配が大きく、一方、東京とジャカルタは降水量の勾配が大きい。

Jiang et al. (2001)によれば、1995年当時で、100万人以上の人口が集中する都市が世界に285ある中で、アジアには153(53%)も分布する。特に、1000万人以上の人口が集中する巨大都市に至っては、世界に8都市ある中で、アジアには6都市(75%)も集中する。内訳は、東京(首都圏)、大阪(近畿圏)、上海、北京、ボンベイ、カルカッタ、カラチ、ソウル(大都市圏)であり、北京のみが唯一内陸に分布する。また、天津、マニラ、ジャカルタ、ダッカ、バンコクはこれに次ぎ、800万人以上である。バンコクを除く4都市も2010年には1000万人を突破すると予測されている。また、巨大都市の立地特性としては、ほとんどが沿岸域に分布する点があげられる。

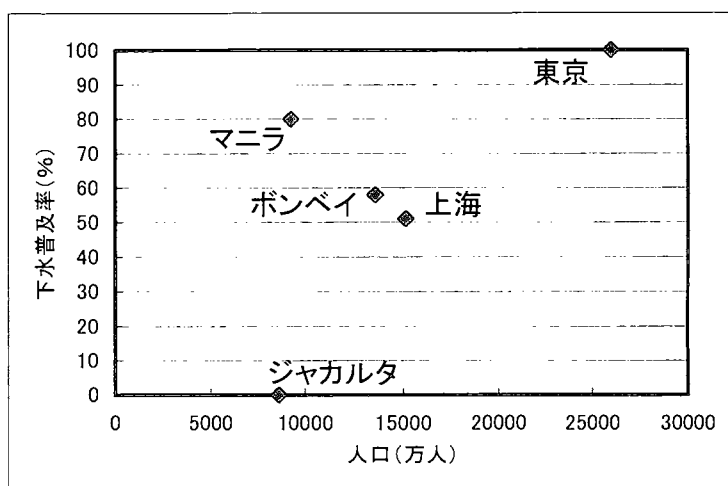


図2 アジアの都市の人口と下水道普及率の関係

表1 アジア巨大都市における大気汚染状況 (Jiang et al.2001)

	Population (million)	Mean annual TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean annual SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean annual NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
<i>Megacity in Asia (developing country)</i>				
Beijing	11.30	377 ^a (1995)	90 ^a (1995)	122 ^b (1995)
Tianjin	9.42	308 ^a (1995)	82 ^a (1995)	50 (1995)
Shanghai	13.58	246 ^b (1995)	53 ^a (1995)	73 ^a (1995)
Bombay	15.14	240 ^b (1994)	33 (1994)	39 (1994)
Jakarta	8.62	271 ^b (1990)	No data	No data
Manila	9.29	200 ^b (1995)	33 (1993)	No data
<i>Megacity in developed country</i>				
Osaka	10.61	43 (1993)	19 (1994)	63 ^a (1994)
Tokyo	26.96	49 (1993)	18 (1995)	68 ^a (1995)
Paris	9.52	14 (1994)	14 (1994)	57 ^a (1994)
New York	16.33	No data	26 (1995)	79 ^a (1995)
Los Angeles	12.41	No data	9 (1995)	73 ^a (1995)

^aSource: [3].

^bLevel is more than double WHO guidelines.

^cLevel exceeds WHO guidelines.

図2は、アジアの主要都市における人口と下水普及率の関係を示す。人口規模はほぼ同等な5都市において、下水道普及率には、大きな差がある。ボンベイや上海における生活排水は、東京に比べて大量に河川や地下水に流入していることを意味し、ジャカルタに至っては、ほとんどが垂れ流しであることになる。結果として、インドネシアでは、BODの排出量が人口にして6倍以上もある中国の約2倍(2,000x10³t year⁻¹)にも達する

(Jiang et al.2001)。また、下水道の処理が行われていないベトナムでは、人口がインドネシアの半分であるにもかかわらず、BOD 排出量は中国を上回っている。以上のように、都市基盤の整備状況は表流水の汚染に大きく関わっていることは明らかである。

また、大気汚染の現状についても表 1 に示す (Jiang et al., 2001)。途上国の巨大都市においては、北京での各値が高いことが示される。ただし、それぞれ都市人口との関係は明瞭ではなく、工業などの産業活動や自動車といった交通手段などの特性との関係が示唆される。また、先進国と途上国の間には、特に粒状物質濃度について大きな開きがある。一方、NO₂濃度にはさほどの差が認められなかった。

3. 地下に隠されている現実“汚染物質蓄積量”を解き明かす

3.1.地下水汚染の現実

日本において、河川の水質汚染は、高度経済成長期最後の 1970 年代をピークとして低減傾向を示す (環境省, 2000)。これに対して、土壌汚染や地下水汚染はその後次々と問題が明らかにされてきた (環境省, 2000)。例えば、農業流域における硝酸性窒素汚染は 1990 年代に入って急激に各地で見出されてきた (鶴巻, 1992 ; Terao et al., 1993 ; 田瀬, 1995 ; 山本ら, 1995 など)。また、有機塩素系物質汚染についても特に都市部や工業地域などで報告されている (村岡・豊口, 1991 ; Sanger and Sakura, 1993 ; Hirata and Nakasugi, 1993 ; 新藤, 1996 など)。図 3 は、有機塩素系化合物の一つであるトリクロロエチレン (TEC) の濃度分布を示したものである (Hirata and Nakasugi, 1993)。この物質は、ドライクリーニングや半導体製品の洗浄などに使用されたため、工場や都市部で点源汚染を引き起こしてきた。これらの蓄積量を見積もっていくためには、インプット量からさかのぼって評価することも必要であるが、汚染物質自体は地下水流動とともに移流拡散していくため、その拡散状態を計算や実測によって評価していく必要がある。

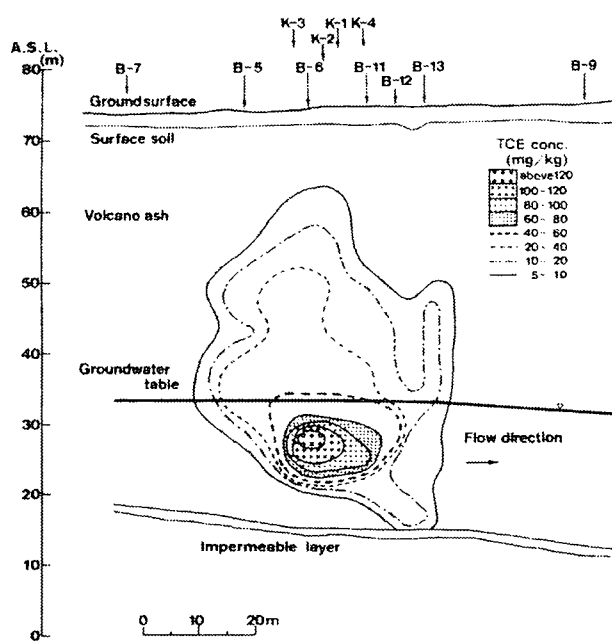


図 3 地下の有機塩素系化合物 (TEC ; トリクロロエチレン) 汚染の例。 (Hirata and Nakasugi, 1993)

以上の点からも、地下の汚染は、河川の汚染や内湾の汚染に比べて後から現れる傾向がはっきりとしている。これは、汚染物質が地下水に到達するまでの時間差と、地下水流動自体に時間を要するためであり、地下水を利用していても実際に無味無臭な汚染物質 (硝酸性窒素や重金属など) であれば、なかなか気がつくことができないためであろう。このような日本や欧米で体験してきた現実を、アジアの各巨大都市や今後成長していく都市において、再現することがないように早期の対策が必要とされる。

また、日本のような都市基盤の整備の進みつつある都市においては、都市からの負荷

は極端に小さくなっている。例えば、瀬戸内海沿岸のいくつかの流域における河川中の窒素濃度を比較すると、都市基盤の構築された広島市（人口 100 万人）を流れる大田川は、都市基盤の整備されていない東広島市（人口 10 万人）や三原市（人口 8 万人）を流れる黒瀬川や沼田川に比べると 1.0mg l^{-1} と半分程度である（斎藤ら，2003）。それに対して、大量に肥料を使用する果樹園流域においては、それらの河川に比べて 5 倍以上にも達する。すなわち、日本のような場合には、むしろ農地の方が地下水中の硝酸汚染は問題となっている。しかし、これも流域としてみた場合には、都市周辺の近郊農業地域を上流側に抱える場合には、地下水流動にともなって輸送されることで、同様の問題を抱えることになる（鶴巻，1992；Terao et al., 1993；田瀬，2000）。

3.2. 地下水面上の不飽和帯に隠された事実

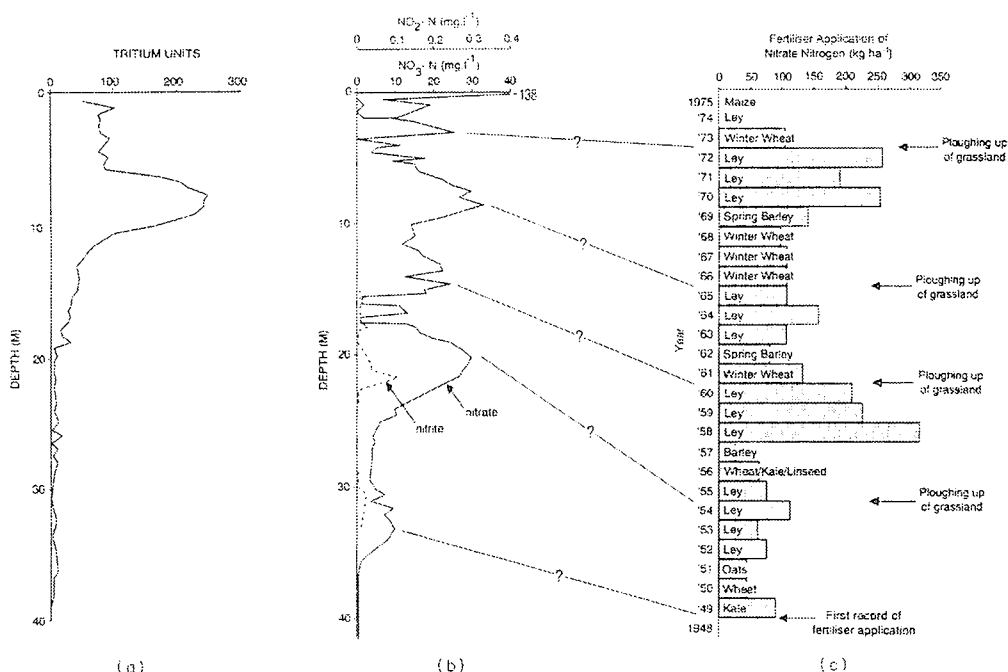


図4 イギリスの台地におけるトリチウム、硝酸性窒素濃度、施肥量の分布 (Parker et al., 1991)

図4に、イギリスの台地におけるトリチウム、硝酸性窒素濃度、施肥量の分布を示す (Parker et al., 1991)。これは、1975年に地下水面までの深度40mのボーリングによって土壌を採取した後、土壌水を抽出し、それぞれの成分を分析した結果である。トリチウムは、1964年の降水が濃度のピークを持つことから、ほぼ1964年の降水が深度9m付近に存在すると同定できる。さらに、土壌水は一般にピストン流的に降下浸透することから、施肥量の増減が土壌水中の硝酸性窒素濃度と対応すると仮定でき、結果として濃度のピークと施肥量との対応からおおよその年代が推定できる。以上から、深度33m程度の濃度ピークは1949年に施肥された窒素が到達したものであることが推定された。この結果は、40m付近にある地下水に汚染物質が到達する直前であることを示す。また、この不飽和帯には約25年間の汚染物質が蓄積されていることを意味し、この時点で肥料をまくことをやめても、25年間は地下水汚染が継続することを示唆する。

図5は、約20年間のイギリスにおける河川の窒素流出量の変化である (Heathwaite and Burt, 1991)。この図は、前述した土地利用変化にともなう施肥量の増加が1950年代から

始まり、その影響が1970年以降顕在化していることを示すものである。すなわち、流域全体が富栄養化してきたことを示している。しかし、不飽和帯に蓄積した窒素を取り除くことは不可能であり、1975年以降大きな問題となってきたことを意味している。

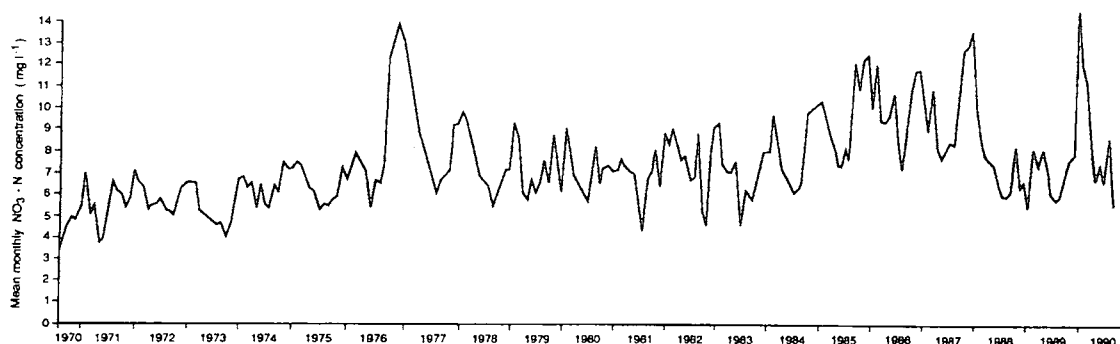


図5 イギリスの河川における硝酸性窒素濃度の長期変化 (Heathwaite and Burt, 1991)

また、直接的な汚染ではないが、大気汚染由来の酸性雨は水素イオンと対になっている陰イオンとして硝酸または硫酸を含んでいる (Cogbill and Likens, 1974; Likens and Bormann, 1995; 佐竹, 1999)。近年は、硫酸が規制されるようになり、先進国では濃度の低下が著しいが、硝酸は横ばい傾向が続いている (Driscoll et al., 1989; Moldan and Celney, 1993; 環境省, 2000)。そのため、土壌中では硝酸性窒素が飽和状態に達し、森林が窒素を吸収する以上に存在するようになり、余剰分の降下浸透及び流出が始まっている地域がある (Christophersen et al., 1990; 佐竹, 1999; 楊, 2003 など)。これらも、図5に示したような傾向と同様に、今後たどっていくことを示唆する。すなわち、将来的には大きな問題になることが予想される (佐竹, 1999)。

3.3. 土壌・植物・堆積物中に隠された事実

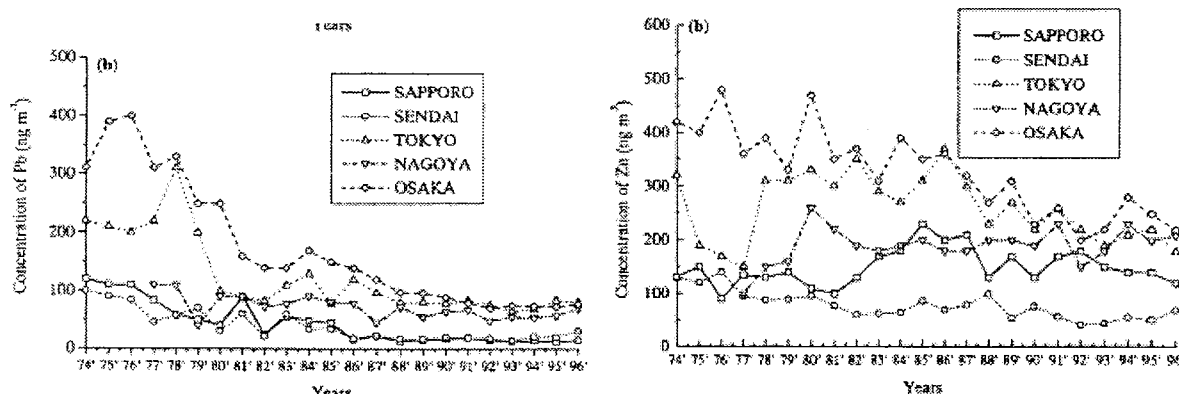


図6 日本各地における大気中のPb及びZn濃度の長期変化 (Var et al., 2000)

近年、土壌・植物・堆積物中で、様々な重金属が計測されてきている (Driscoll et al., 1994)。これらの重金属は、その場に固有のものではなく、ほとんどが汚染の結果そこに存在しているものである。特に途上国では、廃棄物の投棄にともない地下に浸透するケースが多く報告されている (武内ら, 1998; Jiang et al., 2001)。また、様々な排煙物質が大気汚染を引き起こし、その後地下及び海洋を汚染するケースもある (Church et al., 1984; Jichells et al., 1984; Driscoll et al., 1988; 中野, 1998)。本来、汚染物質の蓄積量を評価するという点では、前者の評価が量的には重要となるが、同時に面的汚染という点でその

範囲が広いことから、後者も重要といえる。

図 6 に、日本各地の都市における大気中の Pb (鉛) 及び Zn (亜鉛) 濃度の長期的な変化を示す (Var et al., 2000)。ここでは、札幌、仙台、東京、名古屋、大阪を例に示す。地域性としては、大阪及び東京で濃度が高く、長期変化の特性としては、Pb 濃度は 1970 年代をピークに大きく減衰しているのに対して、Zn 濃度は緩やかに減衰している。

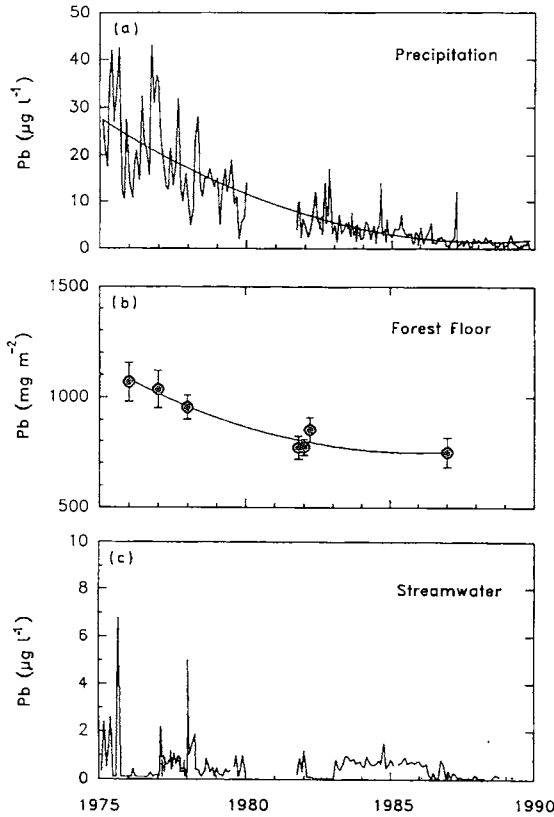


図 7 北米東海岸山地流域における Pb の循環 (Driscoll et al., 1994)

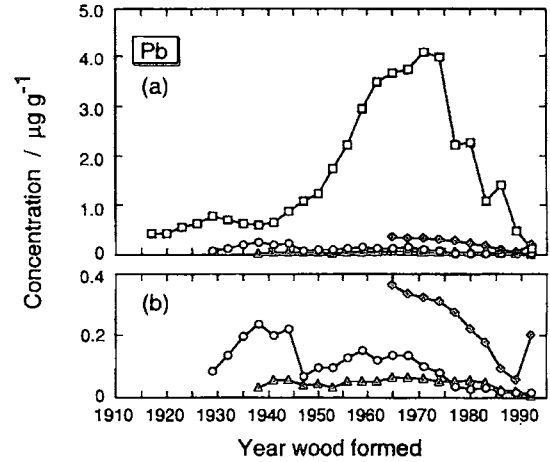


図 8 中国地方各地における樹体中の Pb 成分の分布 (竹田ら, 1998)
□; 竹原、◆; 呉、○; 福富、▲; 益田

図 7 は、北米東海岸のハバートブルック流域における降水、土壌、渓流水中における長期間の Pb 濃度の変動である。林床土壌中の量も渓流水中の濃度も、降水中の濃度と同様に、1970 年代をピークに低下する傾向を示す。土壌中では、表層付近の吸着容量の大

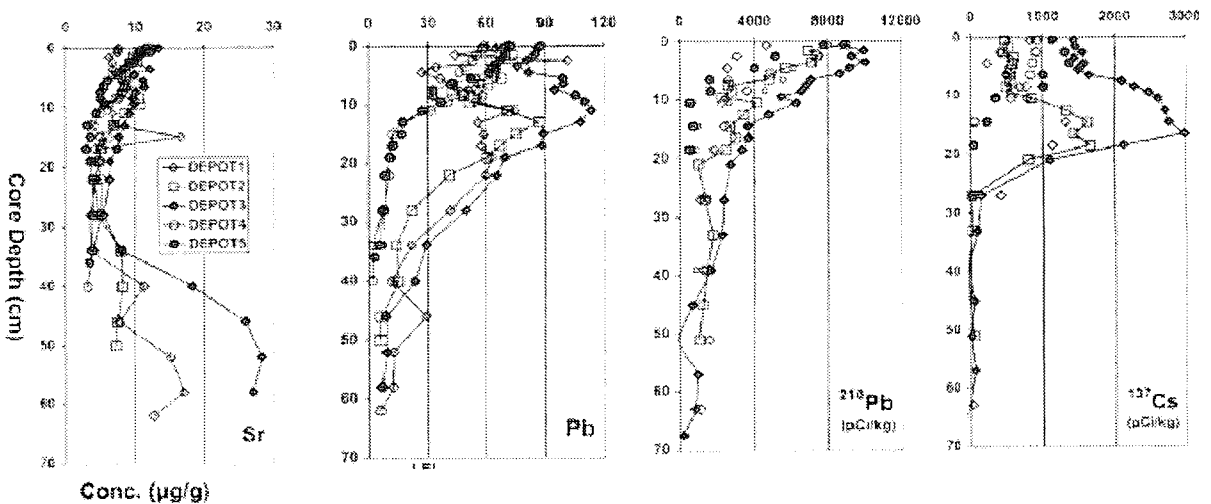


図 9 北米西海岸の池における堆積物中の Sr 及び Pb 含有量、²¹⁰Pb 及び ¹³⁷Cs 含量 (Graney and Eriksen, 2004)

きい環境下で重金属は吸着される。しかし、これらは、酸性環境下で溶脱され流出する傾向がある(安道ら, 2000)。また、土壤に吸着後大気にリサイクルしている例もある(中野ら, 1998)。この流域で結果も、前述の大阪と同様に 1970 年代にピークがあり、その後急激に減衰していることがうかがえる。また、

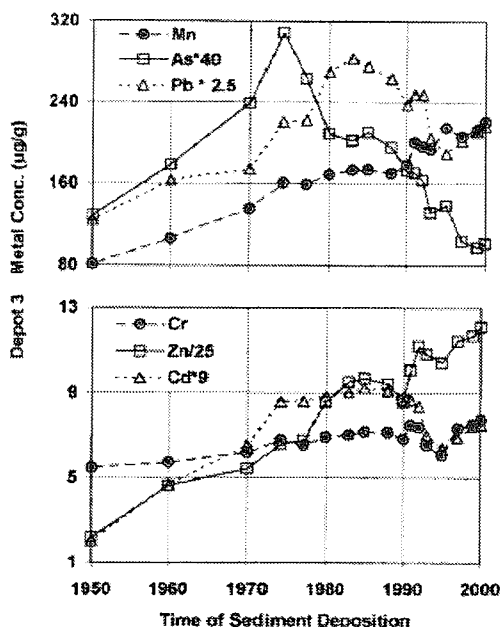


図 10 北米西海岸の池における堆積物の成分から推定される重金属の供給量の変動 (Graney and Eriksen, 2004)

一方、図 9 に北米西海岸ニューヨーク州における池の堆積物中の各種成分の深度分布である (Graney and Eriksen, 2004)。Pb 濃度は表層で高く、大気起源の汚染物質を含んだ堆積物が比較的表層に堆積していることを示す。これに対して、Sr は比較的深層で高濃度を示す。これは、最近の堆積物が Pb などの重金属を多く含むため、Ca と同期するといわれる Sr は酸性雨や大

気汚染物質によってイオン交換して溶脱したことを示す。これに対して、²¹⁰Pb 及び ¹³⁷Cs 含量は堆積年代を示す指標として利用される放射性同位体である。図 10 は、これらの情報をもとに、堆積年代とその堆積物中の重金属濃度である。この結果、As (ヒ素) は 1970 年代にピークを、Pb は 1980 年代にピークを示し現在にかけては低下傾向を示すのに対して、Mn や Zn は現在も上昇中である。Pb で比べた場合には、北米東海岸や日本に比べてピークの時期が 10 年程度遅れていることが確認できる。

堆積年代とその堆積物中の重金属濃度である。この結果、As (ヒ素) は 1970 年代にピークを、Pb は 1980 年代にピークを示し現在にかけては低下傾向を示すのに対して、Mn や Zn は現在も上昇中である。Pb で比べた場合には、北米東海岸や日本に比べてピークの時期が 10 年程度遅れていることが確認できる。

表 2 インドネシア、ジャカルタ湾における堆積性重金属フラックス (µgcm⁻²yr⁻¹) (Williams et al., 2000)

Depth (cm)	Age (yr)	FDW ^a	Dry weight (g cm ⁻³)	Cu flux	Zn flux	Pb flux
0-1	0-2.6	0.375	7.5	1.68	3.51	1.12
5-6	16	0.63	12.6	1.15	4.96	2.59
10-11	29	0.52	10.4	0.58	4.09	1.95
20-21	56	0.74	14.9	0.83	1.40	1.94
30-31	82	0.70	14.1	1.05	1.83	1.57
40-41	109	0.65	13.2	0.79	0.48	0.24

^a Sediment ages are derived from unsupported ²¹⁰Pb data.

^b FDW = sediment fractional dry weight.

さらに、表 2 は沿岸堆積物中における Pb 放射性同位体と各種成分から重金属フラックスを見積もったものである (Williams et al., 2000)。この結果、Pb フラックスのピークは 1980 年代後半 (1984 以降) であることが推定される。この点では、先進国の傾向とは異なり無鉛ガソリンの普及が遅れていたことが示唆される。このように、沿岸海洋堆積物を調査した例は、日本においてもあり、大阪や東京での産業活動との関連が指摘さ

れている (Hirao et al., 1986 : Hoshika and Shiozawa, 1988)。

以上のように、土壌、植物、堆積物中の重金属の分布は、そこで直接投棄された廃棄物の影響だけでなく、大気汚染起源の物質負荷の影響も示す。また、ただ蓄積量を示すだけでなく、蓄積時期や蓄積速度を見積もることができる点で、過去の汚染状況を推定することができる。このような手法を用いることにより、都市の地下に蓄積されている重金属汚染量を明らかにするだけでなく、大気中へのリサイクルや地下水への溶脱の可能性などを予測していくことが必要である。

4. 複合環境問題への危機を回避できるか？

4.1.沿岸域の富栄養化

アジアの巨大都市が沿岸域分布することを考慮すると、海岸への富栄養化を評価していくことが必要である。これについては、現在、陸域起源の栄養塩フラックスに関する観測ネットワークがかなり整備されて、世界的にデータベース化が進んでいる (LOICZ, 2000)。ただし、地下水からの栄養塩流出の影響については十分な調査がなされているとはいえない。世界の平均でみると、実際には、地下水流出量は河川流量のわずかに5%程度であるのに対して、栄養塩の流出量は50%にも達する (Zektser and Loaiciga, 1993)。そのため、地下水による栄養塩の流出量を見積もることは重要である。ただし、瀬戸内海の場合には沿岸において脱窒が生じるため、硝酸性窒素は流出しないことが示されている (Saitou and Onodera, 2004 : Onodera et al., 2004)。

また、実際には、いつから都市化にともなう栄養塩の流出の影響があったのかまで、さかのぼって評価していくことが必要である。

4.2.地盤沈下との相乗効果

不飽和帯は、地下水に比べて汚染に対しさらに遅い応答を示すという点で、問題をより大きくする可能性が高い。その点では、途上国の都市では地下水位を大きく下げたまま揚水している地域が少なくなく (地下水環境問題に関する協議会, 2002)、地盤沈下にまで至っている。このことは、地下水汚染を複雑にするだけでなく、地下水面上の不飽和帯の厚さを増大させることになり、より深刻な汚染物質の蓄積を生じる可能性もある。

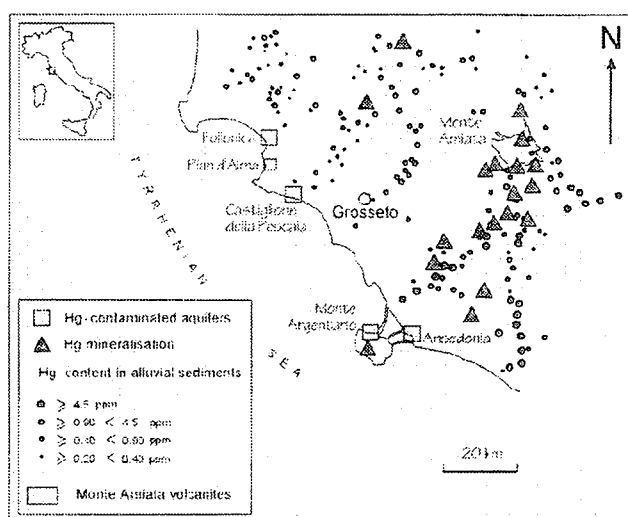


図 11 Hg 汚染の分布 (Protano et al., 2000)

4.3.塩水化との相乗効果

Protano et al.(2000)によれば、塩水化にともなって海水が浸入し、それにともない Hg の溶解度が上昇し、汚染が進行する例が報告されている。また、インドベンガル湾岸に

おいては、地下水の汲み上げにともない還元性の水が上昇することで、地層中から As が溶脱し汚染が進行する例が報告されている。

5. 過去の窒素汚染物質負荷の復元へ向けて

都市基盤の整備されていない大都市域では、硝酸性窒素汚染も重要な問題であるが、いつから問題なのかということをかきのぼって評価することは、海洋の富栄養化問題を評価していくためには必要となる。その点についての指針を以下に示す。

まず、沿岸域では過去の研究によれば、脱窒により硝酸性窒素は消失する傾向にある。そのため、過去の量を評価するためには、消失後変化した形態をもとに復元することが必要となる。脱窒した場合、一部窒素ガスになり、残った硝酸性窒素の同位体比は濃縮されるため高くなる。この点を利用して、涵養時の硝酸性窒素を復元することが可能であると考える。実験的な、評価を踏まえて、現地調査に適応することが課題であろう。

5. まとめ

以上、アジア巨大都市における物質負荷の問題は、都市の発達段階と密接な関係を示すことが示唆された。特に、近年急成長を遂げたアジアの巨大都市は、地下に想像を絶する大量の汚染物質を蓄積し、今後それらは、海洋や汲み上げた水から我々の眼に触れるときがやって来ると考えられる。その前に、その現状と今後の物質輸送を予測することは極めて重要なことである。

また、予期せぬ複合的な問題についても対処していくべく、いくつかの事例をもとにシミュレートしておくことも重要であろう。

さらに、過去を復元して、いつの段階の都市が最も注意を必要とするのかを評価していくことも、今後の都市の発展にとっては重要な情報となるであろう。

参考文献

- 安道幸仁・小野寺真一・成岡朋弘・松本栄次 (2000) : 亜高山帯山地流域における表層土壌の酸緩衝能-斜面スケール及び山地スケールでの変動. 日本林学会誌, 82: 227-233.
- Burt TP, Heathwaite AL and Trudgill ST (1993) : Nitrate; Processes, Patterns and Management, John Wiley & Sons.
- 地下水環境問題に関する協議会 (2002) : 大都市の地下水問題, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2002, 122p.
- Christophersen, N., Robson, A., Neal, C., Whitehead, P.G., Virgerust, B. and Henriksen, A. (1990) : Evidence for a long-term deterioration of streamwater chemistry and soil acidification at the Birkenes catchment, southern Norway. Jour. Hydrol., 116: 307-320.
- Church, T.M., Tramontano, J.M., Scudlark, J.R., Jickells, T.D., Tokos, J.J.Jr., Knap, A.H. and Galloway, J.N. (1984) : The wet deposition of trace metals to the western Atlantic Ocean at the mid-Atlantic coast and on Bamuda. Atmospheric Environment, 17: 1779-1786.
- Cogbill, C.V. and Likens, G.E. (1974) : Acid precipitation in the northeastern United States, Water Resour. Res., 10: 1133-1137.
- Domenico PA and Schwartz FW (1990): Physical and chemical hydrogeology, John Wiley & Sons.
- Driscoll, C.T., Fuller, R.D. and Simone, D.M. (1988) : Longitudinal variations in trace metal

- concentrations in a northern forested ecosystem. *Jour. Environ. Qual.*, 17 : 101-107.
- Driscoll C.T., Likens, G.E., Hedin, J.S. Eaton, J.S. and Bormann, F.H. (1989) : Changes in the chemistry of surface waters: 25-year results at the Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Environ. Sci. Technol.*, 23: 137-143.
- Driscoll CT, Otton JK and Iverfeldt A (1994): Trace metals speciation and cycling. In *Biogeochemistry of Small Catchments*, Moldan, B. and Cerny, J. (eds.): 299-322. John Wiley & Sons, Chichester.
- Graney JR and Eriksen TM (2004) : Metals in pond sediments as archives of anthropogenic activities: a study in response to health concerns, *Applied Geochemistry*, 19, 1177-1188.
- Heathwaite AL and Burt TP (1991) : Predicting the effect of land use in stream water quality, IAHS publication, 203, 209-213.
- Hirao Y, Mabuchi H, Fukuda E, Tanaka H, Imamura T, Todoroki H, Kimura K and Matsumoto E (1986) : Lead isotope ratios in Tokyo Bay sediments and their implications in the lead consumption of Japanese industries, *Geochemical Journal*, 20, 1-15.
- Hirata T and Nakasugi O (1993) : Surface soil gas survey for identifying pollutant source and existing form of organochlorines in subsurface environment, *Hydrogeology*, 4, 39-49.
- Hoshika A and Shiozawa T (1988) : Mass balance of heavy metals in the Seto Inland Sea, Japan, *Marine Chemistry*, 24, 327-335.
- Jiang Y, Kirkman H and Hua A (2001) : Megacity development: managing impacts on marine environments, *Ocean and Coastal Management*, 44, 293-318.
- Jichells, T.D., Knap, A.H. and Church, T.M. (1984) : Trace metals in Bermuda rainwater. *Jour. Geophys. Res.*, D89: 1423-1428.
- 環境省 (2000) 環境白書, 環境省.
- Likens, G. E. and Bormann, F. H. (1995) : *Pattern and process in a forest ecosystem.* Springer-Verlag, New York.
- LOICZ (2000) : <http://data.ecology.su.se/MNODE/>
- Moldan B and Cerny J (1994) : *Biogeochemistry in small catchments.* John Wiley & Sons, Chichester.
- 村岡浩爾・豊口佳之 (1991) : 土壌中の有機塩素系化合物廃棄物の降雨による溶け出しについて, 地下水汚染とその防止に関する研究集会, 1, 89-92.
- 中野孝教・横尾頼子・田瑞鈴 (1998) : 酸性雨研究におけるストロンチウム・鉛安定同位体, *ぶんせき*, 10, 785-790.
- Onodera S, Saito M, Takei T, Hayashi M and Shimada J (2004) : Effects of rainfall and land use on nitrate transport of coastal groundwater in western Japan, *Proceedings of 33th IAH.*
- Parker JM, Young CP and Chilton PJ (1991) : Rural and agricultural pollution of groundwater. In *Downing RA and Wilkinson WB (eds) Applied Groundwater Hydrology*, Clarendon Press, Oxford, 149-163.
- Protano G, Riccobono F. and Sabatini G. (2000) : Does salt water intrusion constitute a mercury contamination risk for coastal fresh water aquifers? *Env. Pollution*, 110, 451-458.
- Saitou M and Onodera S (2004) : Nitrate emission process in a coastal agricultural catchment, SouthWestern Japan, *Proceedings of Int. Nitrogen Conference*
- 齋藤光代・小野寺真一・吉田浩二・峯孝樹・林政輝・重枝豊実 (2004) : 広島県主要河川流域における栄養塩流出の特性, *広島大学総合科学部紀要IV理系編*, 30.
- Sanger D and Sakura Y (1993) : The distribution of contaminants contributed from multiple pollutant sources in groundwater flow system, *Hydrogeology*, 4, 21-38.
- 佐竹研一 (1999) : *酸性環境の生態学.* 愛智出版, 東京.

- 新藤静夫 (1996) : 有機塩素系化合物に起因する地下水汚染の検知技術の改良と汚染規模の定量化手法の開発, 科学研究費補助金 (試験研究 B) 報告書
- 武内和彦・林良嗣・恒川篤史・一ノ瀬俊明・加藤博和・井村秀文・福島茂・小林重敬・城所哲夫・Weiming Lu (1998) : 「地球環境学. 8. 地球環境と巨大都市」, 岩波書店, 290 ページ.
- 竹田一彦・山本昌弘・丸本幸治・佐久川 弘・藤原祺多夫 (1998) : 中国地方のアカ松年輪中の重金属濃度および鉛安定同位体比の測定と海底堆積物との比較. 日本化学会誌, 2, 99-105.
- 田瀬則雄 (1995) : 農業汚染物質の水系への流出経路と形態に関する研究, 科学研究費 (一般 B) 報告書
- 田瀬則雄 (2000) : 土壌層の持つ土地利用メモリーと地中水との相互作用の解明, 科学研究費 (基盤 B2) 報告書
- Terao H, Yoshioka R and Kato K (1993): Groundwater pollution by nitrate originating from fertilizer in Kakamigahara Heights, central Japan, *Hydrogeology*, 4, 51-62.
- 鶴巻道二 (1992) : 地下水汚染・土壌汚染の現状と浄化対策, 工業技術会, 98-113.
- Var F, Narita Y and Tanaka S (2000) : The concentration, trend and seasonal variation of metals in the atmosphere in 16 Japanese cities shown by the results of National Air Surveillance Network (NASN) from 1974 to 1996, *Atmospheric Env.*, 34, 2755-2770.
- Williams TM, Rees JG and Setiapermana (2000) : Metals and trace organic compounds in sediments and waters of Jakarta Bay and the Pulau Seribu Complex, Indonesia, *Marin Pollution Bulletin*, 40, 277-285.
- 山本洋司・朴光来・中西康博・加藤茂・熊沢喜久雄 (1995) : 宮古島の地下水中の硝酸態窒素濃度と $\delta^{15}\text{N}$ 値, 日本土壌肥料学会誌, 58, 252-268.
- 楊 宗興 (2003) : 多摩川流域での窒素飽和の実態解明: その分布と解析, どうきゅう環境浄化財団, 237.
- Zektser IS and Loaiciga HG (1993) : Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future. *J. Hydrol.* 144, 405-427.

地下水環境の変動に伴う都市域地下での問題の発生とその変遷 —東京での例—

徳永 朋祥

東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻

要旨

首都圏の地下環境は、人間活動の変化に伴う地下水変動によって大きく変化してきている。ここでは、最近数10年間の東京における地下環境の変遷を、被圧帯水層の地下水ポテンシャルと地下利用形態の変化に着目して整理する。また、それに伴う地下環境問題の変遷についても示す。さらに、最近行なわれている“余剰”地下水を利用した都市環境改善の試みのいくつかも紹介する。

キーワード: 地下環境、都市地圏、首都圏、地下水、洋構造物

1. はじめに

首都圏の地下環境は、地下水状況の変遷と地下空間利用の進展に伴い、大きく変化してきている。地下水環境変化と人間の地下利用の結果として、我々は様々な地下環境問題を経験してきている。本稿は、首都圏の地下環境の変化とそれに伴う地下環境問題の変遷について整理を行なう。また、現在行なわれている“余剰”地下水を利用した都市域地表環境改善の試みについて、そのいくつかの例を報告する。

2. 首都圏の地質・地下水概況

東京地域には、鮮新世後期以降の堆積物が中新世以前の基盤岩類を不整合に覆って分布している。これらの堆積物は、被圧帯水層システムを構成している。東京都土木技術研究所[1]によると、この被圧帯水層システムは、その下部を比較的厚い泥岩層によって規定されている。また、この泥岩層は、南西方向に向かうにつれて浅くなる傾向を示している。その深度は、東京の北東部では600mよりも深くなっているが、南西部では100m程度の深度に分布している(Figure 1)。この

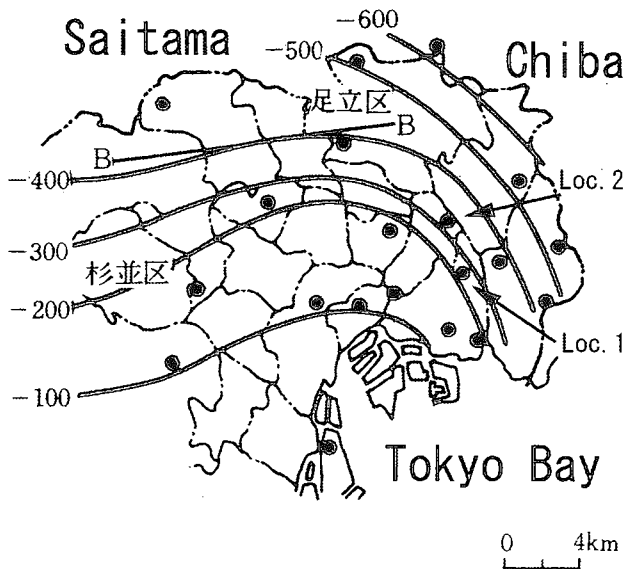


Figure 1 東京における被圧帯水層システム下底深度分布[1] 泥岩層の下位には鮮新世から更新世に堆積した砂岩および泥

岩からなる地層が2000m以上の厚さで分布しており、これが、水溶性天然ガスの貯留層となっている。

上述の被圧帯水層システムに加え、東京地域には不圧帯水層も存在している。川島[2]は、不圧帯水層の水位変化を報告しており、それによると、不圧帯水層の水位は、1970年代以降大きな変化を示していない(Figure 2)。

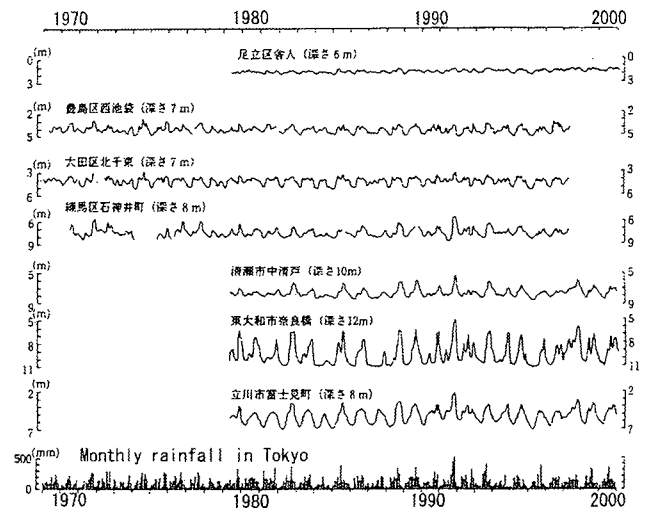


Figure 2 東京における不圧帯水層の水位変化 (月平均データ)。水位は地表面から計測されている[2]。

Figure 3は、被圧帯水層の地下水ポテンシャル変化を、淡水地下水の揚水量(白色のバー)および地層水(黒色のバー)とともに示したものである。地層水は、水溶性天然ガス採取のために揚水されていたものであり、これが東京地域の地盤沈下の主たる要因の一つであった[3]。

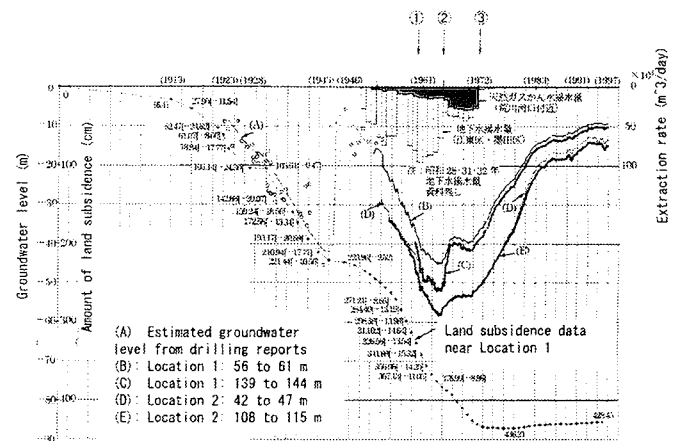


Figure 3 首都圏における1881年から1997年にかけての被圧帯水層の地下水ポテンシャル変化[3]。井戸位置はFigure 1に示されている。詳細は本文参照。

3. 被圧帯水層の地下水ポテンシャル低下による問題の発生

Figure 3に見られるように、1970年代初頭には、被圧帯水層の地下水ポテンシャルは水頭にして50m以上低下していた。この地下水ポテンシャルの低下のために、東京東部の下町一帯では、大きな地盤沈下が発生した(Figure 4)。また、いくつかの被圧帯水層の不圧化もみとめられた(Figure 5)。その結果、帯水層中に侵入した空気中の酸素が消費されることにより酸欠空気の発生とそれに伴う被害が発生した。これは、地下空間開発工事に伴い、酸欠空気が帯水層中を移動し、地下階等において、酸欠空気による死亡事故の発生として表れた問題である(Figure 6)。

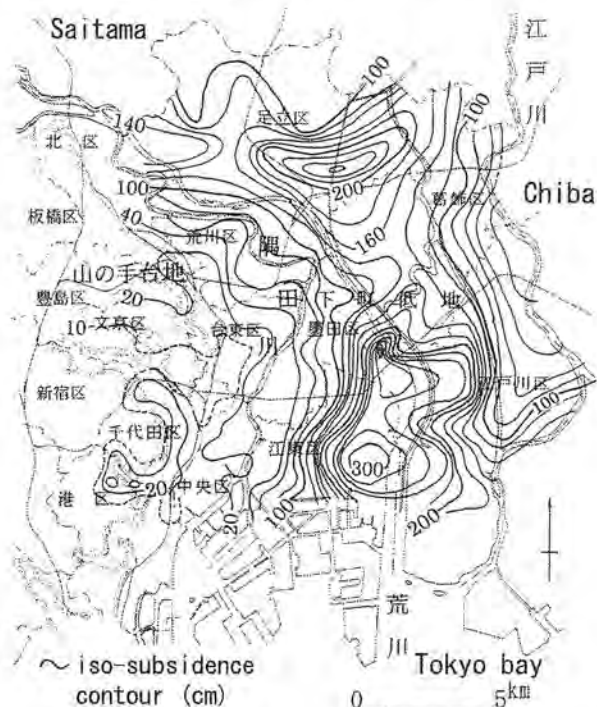


Figure 4. 1938年から1974年までの40年間における地盤沈下状況[3]

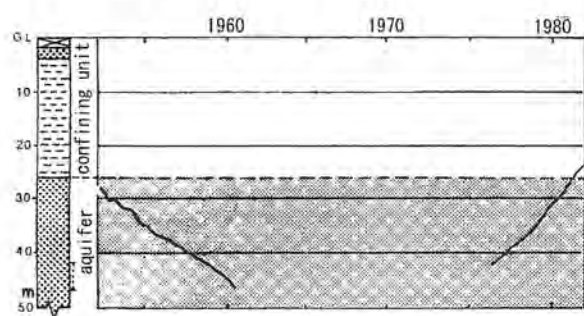


Figure 5. Loc.2(スクリーン深度42から47m)における井戸水位状況[4]。1950年代から1970年代にかけて帯水層が不圧化していることに注意

4. 地盤沈下制御のための地下水利用制限

地下水の過剰揚水に伴う地盤沈下問題が深刻になってきたために、1961年から1974年にかけて揚水規制が実施された。1961年1月には、江東地区が「工業用水法」指定地域となり、江東地区において工業用水用としての新たな井戸の掘削が禁止された(Figure 3の①)。1966年には、江東地区工業用井戸の地表水使用への転換が行なわれ(Figure 3の②)、さらに、1972年には、東京地域における水溶性天然ガスの採取が停止

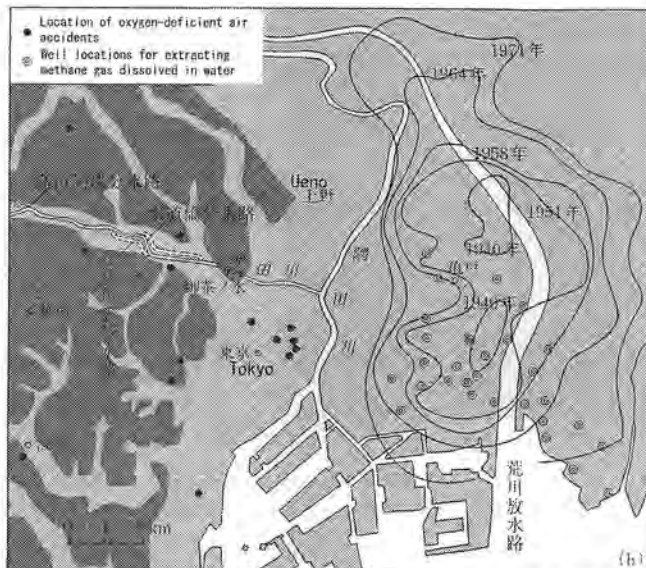


Figure 6. 酸欠空気事故の地点分布。黒丸は、酸欠空気事故が発生した地点を示し、二重丸は、水溶性天然ガス採取井の分布を示す。コンターは、1940年、1951年、1958年、1964年、1971年それぞれのいわゆる「ゼロメートル地域」の分布である[5]。

(Figure 3の③)された。その結果として、被圧地下水のポテンシャルは非常に急速に回復した(Figure 3)。この急速な回復は、東京地域の帯水層が比較的新しいことによる透水性の高さと、関東地域の高い浸透量(1日あたり2~3mmの浸透量)によるものであると考えられている[6,7]。

5. 地下水ポテンシャルの回復に伴う新たな問題の発生

東京地域においては、揚水規制の実施により地盤沈下は沈静化し、また、地下水ポテンシャルの回復も認められた。しかし、その結果として、新たな問題が発生してきている。これは、地下水ポテンシャルが低下していた時期に構築された地下インフラ構造への影響という問題である。以下に、その例を示す。

JR 東日本の東京地下駅は、1965年に設計がなされ、1972年から運用が行なわれている。この地域では、設計時には、被圧地下水の井戸水位は地盤面から35mの深度に位置していた。しかし、揚水規制による地下水ポテンシャルの回復に伴い、1998年には、地下水ポテンシャルが水頭にして地盤面から15mの深度にまで上昇してきた。地下駅構造に対するダメージの可能性に関する詳細な検討の結果、駅中央部の構造物損傷の可能性の有る平衡水位は、地盤面から14.3mであることが示された[8]。JR 東日本では、この対策として、永久グラウンドアンカー工法を採用することとした(Figure 7)。この対策により、地表面から12.8m深度までの水位上昇には対応できることとなった[8]。同様の問題は、東京地域においても(新幹線上野地下駅[9])、大阪における都市再開発事業においても[10]報告されており、地下水ポテンシャル回復にともなう共通した課題となっていることがわかる。廣瀬ほか[11]は、東京地域において報告されている地下水回復に伴うインフラ構造への影響が発生した地点の分布をまとめている。

Figure 3にみられるように、被圧帯水層の地下水ポテンシャルは、現在も回復を続けており、地下インフラ構造の維持管理を行なうためには、地下水回復の速度と最終的な地下水ポテンシャルの正確な予測が求められている。

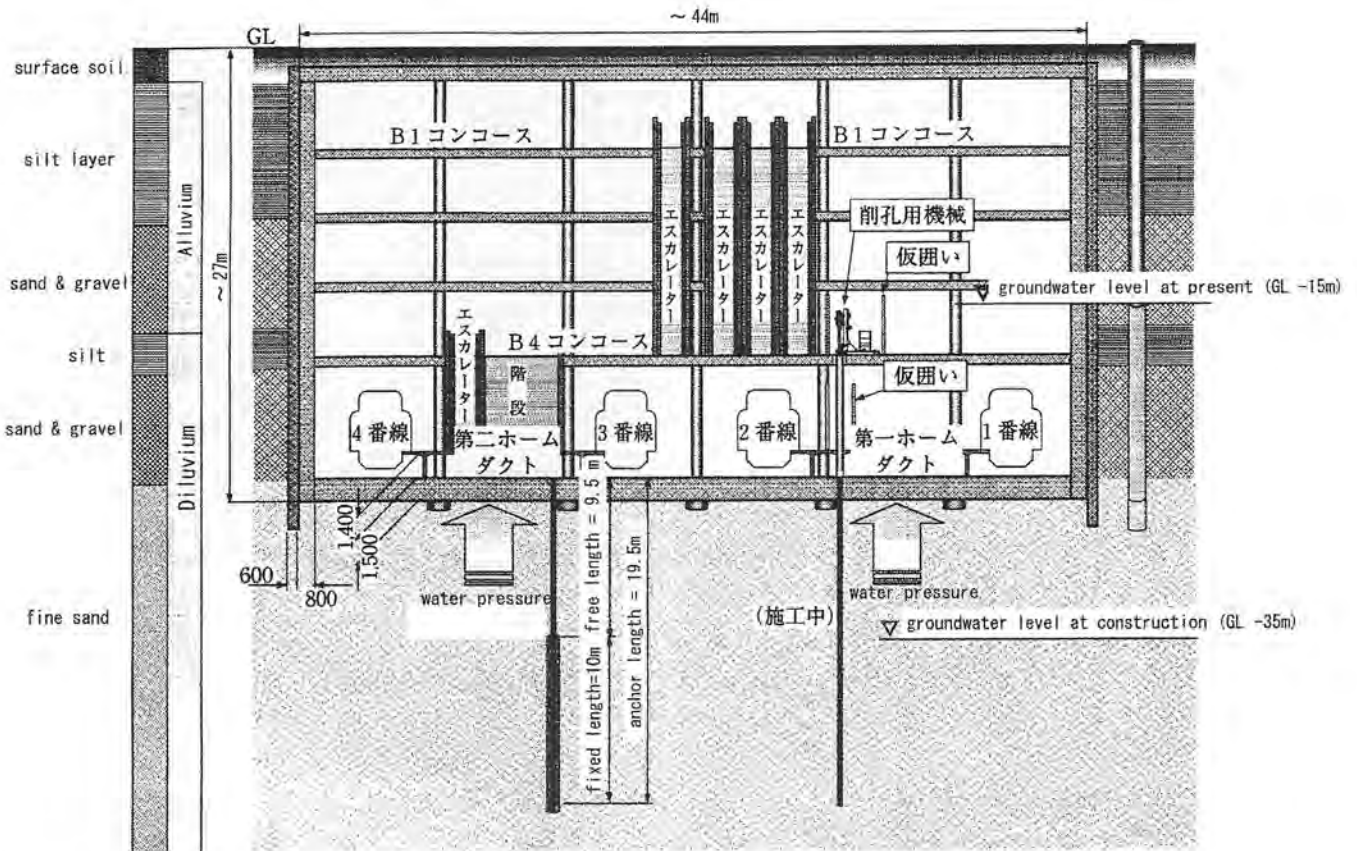


Figure 7. 東京地下駅における地下水状況と対策工事の模式図[9]

6. “余剰”地下水を利用した都市環境改善の試み

首都圏における地下水の回復に伴い、地下構造物への漏水量の増大も発生している。一般に、構造物への漏水は直接下水へと流され、処理されている。しかし、地下構造物への漏水を利用し、都市環境改善を行なう試みがいくつかなされている。

ここでは、その一例として、JR東日本と東京都、国分寺市が実施した例を示す[8]。

JR武蔵野線の国分寺トンネルは、1973年以降供用されているトンネルである。このトンネルは、地域の地下水流動方向と直交しており、1974年および1991年に、地下水面の急激な上昇とそれに伴う問題を経験している。現在では、急激な地下水面上昇を避けるために、トンネルには24本のドレイン孔が設けられ、地下水面制御が行なわれている。2002年からは、排水された地下水を地域の小さな池の復元と河川流量増加のために利用するようになってきている。この結果、地域の地表面水環境の改善に貢献する結果となった(Figure 8)。

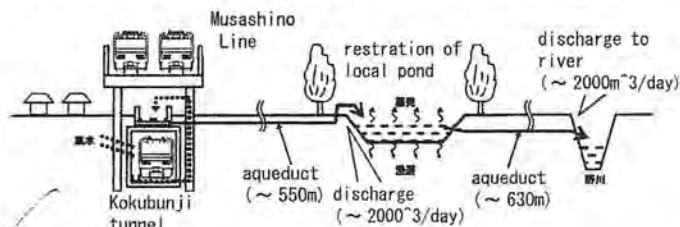


Figure 8. 国分寺トンネルにおけるトンネル漏水の有効利用の例[8]

最近、梶野ら[12]は、“余剰”地下水を利用し、都市域の舗装面温度を制御することにより、ヒートアイランド現象緩和に貢献できる可能性を示している。彼らのアイデアは、地下水温が年平均気温程度であり、夏の舗装面温度よりもはる

かに低いことを利用するというところにある。首都圏等の都市域には、地下水回復に伴う“余剰”地下水が存在していることや、低温の地下水を透水性舗装に供給することにより地表面温度の制御が可能となることを考えると、この手法によって、夏期の都市環境を制御することが可能になることが期待される。

上述の考え方と同様な、また、それ以外の“余剰”地下水を利用した都市環境改善方策は、今後の都市域の持続可能な開発を考える上で重要な視点ではないかと考えている。

7. まとめ

本稿においては、首都圏における地下環境の変遷とそれに伴う課題の変化についてまとめた。首都圏におけるこれらの変化は3つのステージにまとめることが可能であろう。それは、地下水過剰揚水による地表面および地下環境悪化(第1ステージ)、揚水規制による地下水回復(第2ステージ)、地下水回復に伴う新たな課題の発生(第3ステージ)、である。このような変遷を経てきたことを適切に整理し、今後発展するであろう都市域開発プランに反映することは、環境調和型都市開発を行う上で重要な点であろう。また、最後に示したような、すでに発達した都市域において、“余剰”地下水を利用した都市環境改善を検討することも、持続可能な都市開発を行う上で重要な視点であると考えられる。

文献

- [1] 東京都土木技術研究所, 東京都総合地盤図, 1977
- [2] 川島真一, 東京都における地下水位の経年変化, 基礎工, 29(11), pp. 77-79, 2001
- [3] 遠藤毅・川島真一・川合将文, 東京下町低地における“ゼロメートル地帯”展開と沈静化の歴史, 応用地質, 42, pp. 74-87, 2001.
- [4] 遠藤毅・石井求, 東京都平野部の水文地質と地下水位上

- 昇に伴う諸現象. 応用地質, **25**, pp. 111-120, 1984.
- [5] 小島圭二, 地下から見た大都市—東京, 中村和郎・小池一之・武内和彦(編), 日本の自然 地域編3 関東 pp. 111-124
- [6] J. Shimada, The mechanism of unsaturated flow through a volcanic ash layer under humid climatic conditions. *Hydrol. Proc.*, **2**, 43-59, 1988.
- [7] J. Shimada, C. Tang, T. Tanaka, Y. Yang, Y. Sakura, X. Song, and C. Liu, Irrigation caused groundwater drawdown beneath the North China Plain, *Proc. Int. Groundwater Conf., Darwin, Australia*, pp. 1-7, 2002.
- [8] 清水満, 建設工事, 地下構造物に見られる地下水問題. 平成 16 年度日本応用地質学会シンポジウム予稿集, pp. 26-33, 2004.
- [9] 倉沢徳男, 地下水位上昇に伴う構造物の浮上がり防止対策事例—東北新幹線上野地下駅・総武快速線東京地下駅—, *基礎工*, **29(11)**, pp. 72-76, 2001.
- [10] 橋本正, 大阪平野に見られる地下水問題. 平成 16 年度日本応用地質学会シンポジウム予稿集 pp. 1-7, 2004.
- [11] 廣瀬誠・川越健・木谷日出男, 建設工事・地下構造物と地下水, 平成 16 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 419-422, 2004.
- [12] 梶野尚之・徳永朋祥・茂木源人・茂木勝郎・保持壮太郎・坂東和郎, 地下水を用いた舗装冷却システムに関する研究. 平成 16 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 109-112., 2004.

アジア域における数十年規模の気候変動について

総合地球環境学研究所 河本 和明

はじめに

ある領域の気候は気温、降水量と風系によって主に特徴づけられる。地表および地下環境の研究にとって外部条件となる大気や気候の状態とその変動を知ることは重要である。本プロジェクトでの対象はジャカルタ、シンガポールから東京、ソウルまで熱帯から中緯度までのアジア都市域であり、この広い領域の気候はアジアモンスーンに大きく支配される。モンスーンはアジアだけでなくアフリカ西部や規模は小さいがオーストラリアにも見られる現象である。気候の変動は季節変化だけでなく様々な時間スケールを含んでいる。本稿では東アジアの数十年規模の気候とその変動について述べる。

変動の時間スケール

地球の気候変動には様々な時間スケールがあり、例えば 2-7 年の周期を持つ ENSO (エルニーニョ南方振動)、北極振動に代表される 10 年規模の変動、あるいは大気と海洋の相互作用によると考えられる更に長い数十年規模の変動等である。原因としては海洋だけでなく陸面、雪氷、生物圏との相互作用、人間起源の活動や火山噴火など様々な要因が絡み合っている。

よく知られているように今世紀は東アジアの大部分の領域で昇温が認められている。その理由は二酸化炭素をはじめとする温室効果気体の排出増加や都市化に帰されるが、一方中国南東部では寒冷化が報告されており、大気浮遊物質 (エアロゾル) の増加による日傘効果のために気温が下がると指摘する研究者もいる。

ENSO の発達状況と降雨との関連について中国を例にした研究例を紹介する。図 1 に示すように Onset 前年では降雨ベルトは揚子江の北にあり、北西部と南東部では降雨量は少ない。Onset 開始年には中国の大部分で雨は少なく、Onset 開始後には中国の大部分で雨が多い。ENSO の年には北西太平洋で海面温度が高くなるため、温度の海陸対比が小さくなりモンスーンが弱まる。また逆も成立することになる。

降雨量の長期変動については図 2 に示すように中国北部では 1960 年半ば、1970 年代半ば、1980 年代半ばなどに減少傾向が見られる。気象場の客観解析データから循環場を調べたところ Northerly (南向き) 偏差が中国北部の低層に出現し乾燥化に寄与し、高層には低気圧偏差が現れていることがわかった (Ren et al. 2004)。

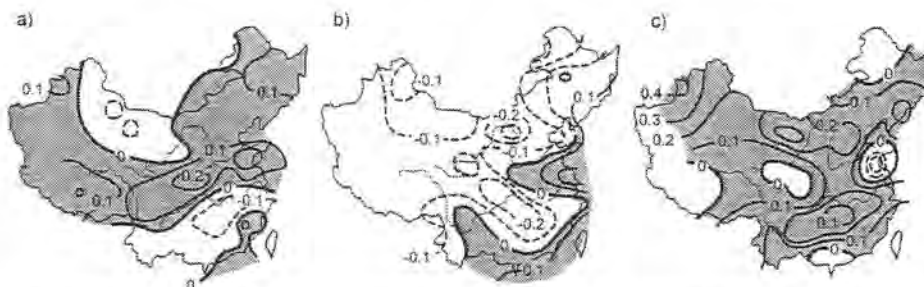


Fig. 4.5. Summer monsoon rainfall anomalies (%) over China a during the year before the onset of El Niño, b the year of occurrence and c the year after onset (Fu and Fan 1999)

図 1

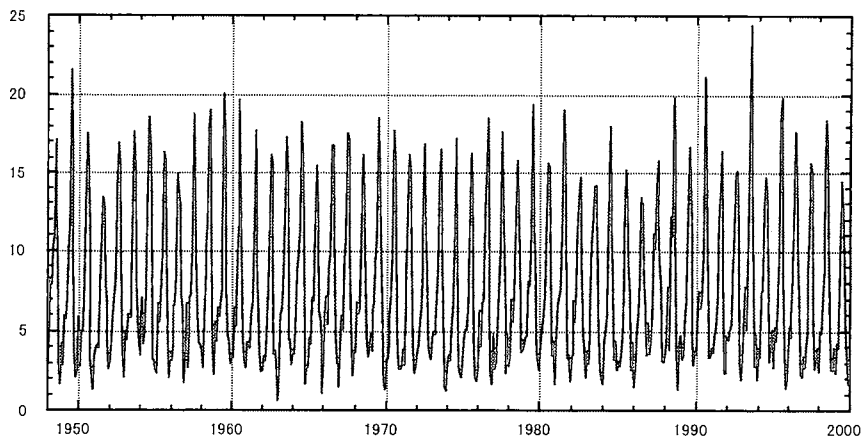


図 2

前世紀を考えると急激な変化(abrupt change)が数度起きた事がわかっている。1920 年代に全球的に気温が上がり熱帯の降雨が増加した。これによって熱帯モンスーンが強化された。これにより一方亜熱帯モンスーンが弱まって中緯度が乾燥したことが知られており、これは最も大きなシグナルと考えられている。1960 年代にはアフリカとインドモンスーンが弱まりサヘル地域では旱魃が頻発した。1970 年代後半からは温暖化が大きく加速していることが知られている。

問題設定

本プロジェクトで考察したい問題は地表・地下環境の変動を規定する外部 **constraint** としての気候変動の影響の寄与はどれほどであろうか (**multi time-scales** 気候変動は地下環境の変化をどれほど説明できるのか) ということである。大気 - 地表 - 地下環境の統一的な理解を深めるために多様なデータや文献を用いて気候およびその短期・長期変動を明らかにし、地表・地下環境変動に関わる要因の定量的解明を目指す。

利用可能なデータセット

本プロジェクトにおいて利用可能なデータセットは以下のものが挙げられる。

0.5 度グリッド日平均降水量 1948 年～現在

大気力学場、水蒸気場：客観解析データ 1958 年～現在

月平均雲量、雲の光学的厚さ、雲頂高度 (280km または 30km グリッド)

1983 年 7 月から 2001 年 12 月まで。ISCCP (国際衛星雲気候計画)

エアロゾルの光学的厚さ (海陸) 1979 年～現在 NASA/GSFC/TOMS グループ

エアロゾルの光学的厚さ、サイズ指数 1983 年 7 月～現在 NASA/GISS グループ

OLR (外向き長波放射) 1974 年～現在

バンコクにおける地下水予備調査と重力測定の実案及び問題点

九州大学大学院工学研究院

西島 潤

1. はじめに

バンコク市内には多数の地下水位観測井が掘削されており、定期的な水位観測及び水質調査が行われている。今年度は本プロジェクト始動に向けての地下水予備調査を 27 本の地下水位観測井で行った。また、本地域において重力変動観測による地下水モニタリングを行う際の手法および問題点についての検討および情報収集も行った。

2. 調査日程および調査内容

調査は 2004 年 7 月 16 日～23 日に行った。調査内容としては以下の内容で行った。

地下水予備調査

- 地下水温度調査 (1m 深度毎)
- ハンディーGPS による井戸の位置測量
- 地下水位測定
- 採水
- 水質測定 (温度・電気伝導度・pH・Eh)

重力測定実施に関する情報収集および実施についての検討

- 井戸周辺の状況調査 (振動・重力計の置けるスペースがあるかどうか)
- 水準測量が定期的に行われているかどうか
- 各観測点間の移動はスムーズに行うことができるかどうか (交通渋滞の有無)
- 観測に要する日数についての検討

3. 地下水予備調査

バンコク市内の地下水帯水層は主に深さの異なる 3 つ帯水層で構成され、浅い方から PD (深さ約 100m)、NL (深さ約 150m)、NB (深さ約 200m) と呼ばれている。また一部に PD よりさらに浅い BK (深さ約 50m) と呼ばれる帯水層も存在する。各観測井は PD、NL、NB の帯水層へそれぞれ掘削されており、それぞれの帯水層毎に地下水位変化や水質の調査が可能になっている。1m 深度毎の地下水温度は、一番浅いところ (地表から約 25m) で約 29°C、深いところ (地表から 200m) で約 37°C であった。PH はほとんどの井戸で 7～10 程度であった。詳細なデータ分析については現在行われている。

4. 重力測定実施に関する情報収集および実施についての検討

重力測定は絶対重力計 (Micro-g, FG5) を用いた基準点連続測定と可搬性に優れるスプリング式重力計 (Scintrex, CG-3M) を用いた基準点と各観測点を結ぶ測線の往復測定に分けられる。測定に要する時間は 1 回 2 分程度であるが、この測定を数回繰り返すため 20 分程度と考えられる。

スプリング式重力計を用いた各観測点の測定点の条件としては、アスファルトやコンクリートなどのしっかりした地面で振動が無い場所が望ましく、重力計の設置に 50cm 四方程度のスペースを必要とする。今回地下水予備調査を行った井戸のほとんどはこの条件を満たすので、地下水井近傍での測定点設置および測定についての問題はほとんど

無いと考えられる。

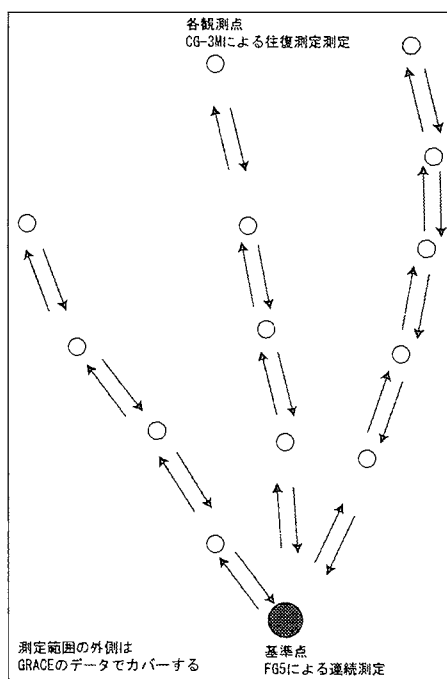
また、測定で得られる重力変動には、シグナルとなる地下水位変化に起因するもののほかに測定点の標高変化、潮汐の影響、気圧変化などのノイズも含まれる。これらの要因のうち標高変化に起因する影響は予想される地下水位変化に伴う重力変動に比べ大きい（約 309 μ gal/m）ため、何らかの手段で標高変化を観測必要がある。標高変化を観測する手法として水準測量と GPS 測量の 2 つが考えられる。JICA バンコク事務所の鈴木氏によると、バンコク市内では水準点の数は多く比較的頻繁に測量が行われているとのことであったので、測量頻度およびデータ使用の可否についての確認を依頼している。水準測量のデータが使用できない場合は、重力測定時に GPS 測量も並行して行う必要がある。潮汐および気圧変化についてはすでにモデルが構築されており、除去することが可能である。

基準点絶対重力計（Micro-g, FG5）を用いた基準点連続測定を行うには、スプリング式重力計の測定条件のほかに AC 電源の確保、防水対策がなされていないので屋根のあるところが挙げられる。また、スプリング式重力計に比べて装置自体が大きくなるため設置に最低 2m 四方ほどのスペースが必要である。この条件を満たす場所については今回情報を得ることができなかつたので、今後の課題として検討していく予定である。

重力測定を行う範囲としては東西方向 50km、南北方向 80km の範囲で 40 点程度の設置を予定している。バンコク市内は交通渋滞がひどいことと移動距離が長いことを考えると、全点観測に要する時間は 10 日程度と予想される。なお、GPS 測量を並行して行った場合は重力測定と併せて 12~14 日程度が予想される。この範囲外については衛星重力ミッション GRACE のデータの使用を検討する。

5. まとめ

今回実施した地下水予備調査では PD, NL, NB と深さの異なった帯水層から予備的なデータを得ることができた。これらのデータは今後の調査計画を検討する際に有用なデータになると考えられる。また、重力測定の実施については測定点設置については特に大きな問題はないが、基準点の設置場所については今後検討を行う必要がある。また、現地で行われている測量のデータが使用不可能な場合 GPS 測量をどのように行うかについても今後検討を行う必要がある。



地球研・谷口プロジェクト「都市の地下環境に残る人間活動の影響」
平成16年度活動報告

九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 江原幸雄

1. はじめに

人間活動に伴う地下熱環境への影響を深度別に整理するとともに、ケーススタディ実施の可能性について具体的に検討を行った。

2. 人間活動による地下熱環境への影響の深度別分類

人間活動の地下熱環境に与える影響について以下のように、深度別に整理した。

対象深度	影響の原因
(1) 0 mレベル	地球温暖化(含む気候変動)・ヒートアイランド現象・・・・・・・・
(2) 1 mレベル	地球温暖化(含む気候変動)・ヒートアイランド現象・・・・・・・・
(3) 10 mレベル	地球温暖化(含む気候変動)・ヒートアイランド現象・・・・・・・・
(4) 100 mレベル	同上・地中熱利用・温泉開発・・・・・・・・
(5) 1000 mレベル	深部温泉開発・地熱開発・気候変動・・・・・・・・
(6) 10000 mレベル	マグマエネルギー、高温岩体、深部熱水の開発・・・・・・・・

そして、さらにそれぞれの対象深度における人間活動による残存指標(測定可能量の例)を検討した。その結果、以下のような指標が抽出された。

(1) 0 mレベル	気象データ(年平均気温、地表面温度等)の経年的変化。
(2) 1 mレベル	1 m深地温の経年的変化。
(3) 10 mレベル	恒温層温度の経年的変化、恒温層深度の変化。
(4) 100 mレベル	浅層地中熱利用による都市浅層地温の経年的変化、温泉開発による地中温度の経年的変化、気候変動に伴う地下温度変化。
(5) 1000 mレベル	深部温泉開発・地熱開発に伴う地下温度の経年的変化、放射性廃棄物の地層処分に伴う地下温度の経年的変化、気候変動に伴う地下温度変。
(6) 10000 mレベル	マグマエネルギー、高温岩体、深部熱水の開発利用に伴う地下温度変化。

以上のような人間活動に伴う熱環境変化の残存指標のうち、特に都市化(気候変動によるものも含む)に伴うものと考えられ、本プロジェクトとリンクされる研究課題をあげると以下のようなものが想定される。

- (1) ヒートアイランド現象(地球温暖化)に伴う気温等の変化
- (2) ヒートアイランド現象に伴う1 m深地温の変化
- (3) 浅層地中熱利用(200 m深程度まで)に伴う地中温度の変化
- (4) 温泉開発(2000 m深程度まで)に伴う地下温度・地下流体流動変化

(5) 地球温暖化（含む気候変動）に伴う地下温度プロファイル（数100m深程度）

以上の4つの課題のうち、いわゆる一般的な都市化の影響と考えられるものは(1)、(2)であり、(5)は都市化の影響も考えられるが、地球温暖化（含む気候変動）の影響がよく保存されていると考えられる。(3)、(4)は個別的な影響と考えられる。以上のような観点から、実証的な研究を進めるために、人口1000万人クラスの巨大都市ではないが、人口120万人の中規模都市であり、種々の都市化の影響が出始めている福岡市を対象として、熱的環境の変化に関し、研究を進めることを検討している。

3. 福岡市の地下環境に残る人間活動の影響の評価とその対策について

上述のように、都市化の影響が出始めている中規模都市である福岡市を取り上げ、今後熱的影響の評価とそれに対する具体的対応策について、特に工学的に検討することにする。

本プロジェクトの全体計画では、アジアの巨大都市がケーススタディを行う地域として選択され、研究が実行される計画であるが、これにより発展段階の異なる都市間における問題点がより明確になされると思われる。しかし、対象の都市が巨大で、かつ国外の場合においては、必ずしも十分なデータの収集が可能でない場合があり、それらを補完するデータの収集も重要と考えられる。このような観点から、都市化が進行し、ヒートアイランド現象などの熱環境問題、繰り返される湯水等の水環境問題、そして閉山炭鉱の影響、海岸埋め立て、中国大陸に起因する酸性雨の問題等物質環境問題等種々の都市化に伴う環境問題が顕在化しつつある福岡市を1つの研究対象フィールドとして、実証的・補完的な研究を実施したいと考えている。その中でも、熱的環境を中心課題として設定したい。また、さらに都市の熱環境問題を解決する工学的な課題も同時に検討したい。

研究計画—地球熱学および地熱工学的立場からのアプローチ—

「福岡市の地下環境に残る人間活動の影響を評価し、その解決法を提案する」

1. 地下温度（深さ100m深程度まで）の地球温暖化および都市化の影響の評価
2. 地下浅層温度（深さ1m深程度）への都市化の影響の評価
3. 都市化による都市熱環境への影響評価
 - (1) 福岡市における都市大気熱環境の経年的変化（数10年間）
 - (2) 福岡市の地下に残されている地球温暖化・都市化の熱的影響
 - (3) 熱環境に与える土地被覆変化の影響
 - (4) 熱環境へ与える大気中への廃熱の影響（冷暖房、自動車等による影響）
 - (5) 都市熱環境問題の工学的解決法の提案
 - (6) アジア諸都市の熱環境問題との比較検討

4. 平成16年度における検討課題

福岡市における熱環境問題に関するデータの収集

- (1) 近年におけるヒートアイランド現象の急激な進行を示す指標の収集
- (2) 現在の福岡市におけるヒートアイランド現象を示す指標の収集

- (3) 福岡市における各種エネルギー消費を示すデータの収集
- (4) 地球温暖化あるいはヒートアイランド現象を実証的に研究するための浅層ボーリング孔の掘削（60m）と温度計測
- (5) 都市熱環境改善のための浅層地中熱利用冷暖房システムの開発と実証的研究の立ち上げ

5. おわりに

平成16年度においては、種々の人間活動による地下熱環境への影響を深度別に分類整理するとともに、福岡市を研究対象地域に選定し、今後の研究内容を整理した。

LCAによる自然水、地下水利用による環境影響評価手法の基礎データ作成 産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター 玄地 裕

背景と目的

地球研谷口プロジェクトは（１）都市基盤の変遷とヒートアイランドの拡大、（２）地下水資源量の変動と地下水の有効利用、（３）沿岸汚染物質の陸域起源と経路の特定、（４）都市の発達段階・政治経済の変遷と上記の長期的変動との関係、といった課題を明らかにするものである。この中で、特に（１）、（２）の課題ではヒートアイランド対策や地下水の有効利用を行う際の水の使用による環境影響やヒートアイランドに対する改善効果の定量化が必須となる。

環境影響や環境問題解決策の定量化手法の一つにライフサイクルアセスメント(LCA)がある。LCAは、製品の環境影響の定量化方法としてISOの14000シリーズの一つとしてすでに国際規格となっている。ISO規格では、主に製品を対象として厳密に評価手順が定められているが、元々は、システムのライフサイクル全体での環境負荷を考慮に入れることが基本であり、さまざまなプロセス間の連鎖や事象間の影響を定量的に考慮するものである。そのため、LCA手法は、環境影響の定量化手法として製品だけではなくインフラ整備、建築物などの都市基盤に対しても適用されつつある。環境アセスメントの分野においても、戦略的環境アセスメントとして設計段階からLCAを実施し、積極的に環境影響の少ない手法の模索を行う動きもある。

本研究では、このLCA手法によって自然水や地下水の有効利用を評価する際に必要となる情報やデータベース整理をおこなう。

具体的には、現状使用されている上水を対象としたインベントリ分析を行い、上水を地下水に置き換える場合の基礎データを作成する。

東京23区上水のインベントリ分析

(1)設定条件と評価対象物質

ヒートアイランド対策などで地下水を利用する際には、緑化に対する散水や冷却塔で使用されている上水の代替効果による環境影響の減少を見込むことができる。そこで、ここでは代表的な上水道として東京23区の水源の一つである荒川水系を対象として単位流量1m³当たりのCO₂排出原単位とエネルギー使用量を算出した。

(2)評価対象とした施設

水源、取水、導水、浄水、送水、配水の設備を検討対象とした。沈殿池からの沈殿物処理は評価対象外とした。施設の耐久年数は、法定上の耐久年数及びその区分に属する施設等の構成比を参考に、40年から100年に設定した。建設等に使用される各材料のエネルギー消費原単位とCO₂排出原単位は産総研NIREVer3のデータを使用した。

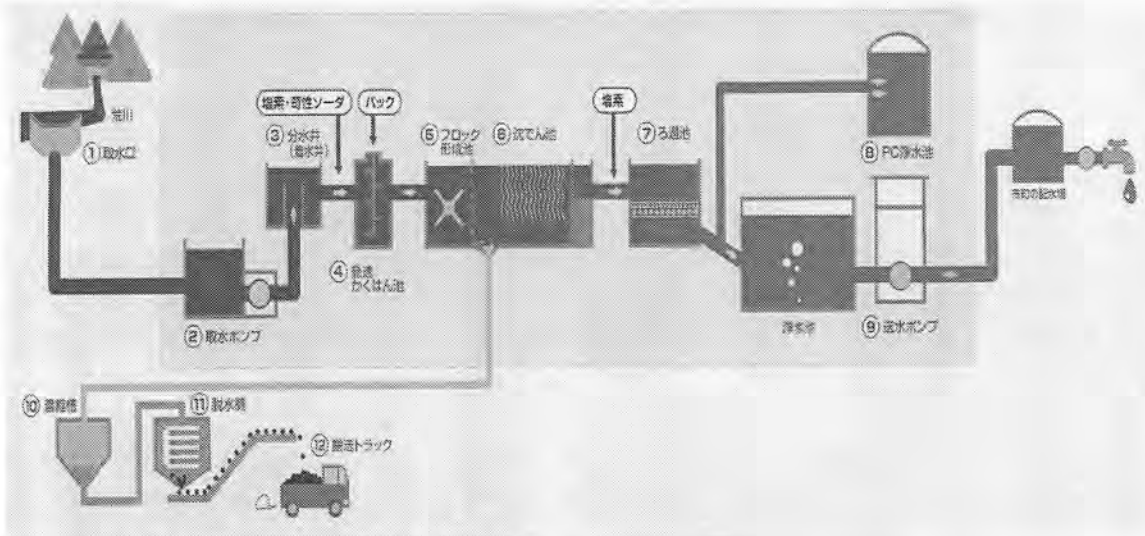


図 システム境界（評価対象とした施設）

表 参考とした施設と耐久年数

	対象とした施設	耐久年数(年)
水源	浦山ダム	100
取水設備	秋ヶ瀬取水堰	60
導水設備	朝霞水路	60
浄水設備	朝霞浄水場	60
送水設備	東京都水道局	60
配水設備	東京都水道局	40

表 使用した原単位（出典はすべて産総研 NIRE Ver.3）

原料・資材等	エネルギー消費原単位	単位	CO ₂ 排出原単位	単位
軽油	46.364	MJ/kg	0.288	kg-co2/kg
電力	7.627	MJ/kWh	0.412	kg-co2/kWh
コンクリート	0.489	MJ/kg	0.095	kg-co2/kg
鉄筋	21.558	MJ/kg	1.594	kg-co2/kg
鋳鉄	21.558	MJ/kg	1.594	kg-co2/kg
塩化ビニル	51.746	MJ/kg	1.975	kg-co2/kg
塩素	13.436	MJ/kg	0.517	kg-co2/kg
苛性ソーダ	10.476	MJ/kg	0.713	kg-co2/kg
次亜塩素酸ソーダ	4.498	MJ/kg	0.237	kg-co2/kg

(3)原材料

各施設等の建設資材の種類と総量のデータ入手ができなかったため、聞き取り調査と文献等から建設資材の種類と総量を推定した。水源から配水施設までの施設ごとの年間流量（平成12年の統計値）を統計値から求め、施設ごとの負荷を年間流量で除することで単位流量(1m³)あたりの負荷を計算した。

(4)配水管

東京都の浄水場別、水系別の配水管に関するデータ入手は困難であった。そこで、東京都23区を対象とし、配管合計値を年間排水量で除することで、単位流量あたりの配管

長さ重量を求めた。なお、コンクリートの比重 2.3、鉄鋼の比重 7.93 で計算した。

表 建設資材総量

	コンクリート (m ³)	鉄鋼 (t)
水源関係	1,750,000	1,750
取水関係	15,000	13,490
導水関係	94,000	9,500
浄水関係	142,200	19,804

(5)運用段階

考慮した各施設で運用時に用いられるものは主に電力であった。また、上水道には消毒用等に薬品が使用されている。浄水場ごとの薬品使用量が得られなかったため、全国の給水人口別薬品使用量と給水規模から薬品使用量を推定した。具体的には、東京都給水人口対 100 万人超以上 (0.34468) を求め、東京都全体での薬品使用量を求めた。次に、東京都全体の年間での浄水量(1,638,523,000 m³)で除することにより、東京都で使用される上水道 1 m³あたりにかかる薬品使用量を計算した。

表 年間流量 (平成 12 年度) と使用電力量

	電力量(kWh)	年間流量(m ³)
水源施設	800,000	91,000,000
取水施設	41,000	2,826,627,000
導水施設	42,000	2,826,627,000
浄水施設	35,257,120	364,041,000
送配水ポンプ及び排水施設	63,137,220	364,041,000
取水ポンプ	19,965,000	---

表 100 万人以上の規模と東京都全体の年間薬品使用量(単位 : t)

	液化塩素	次亜塩素酸ナトリウム	生成次亜塩素酸ナトリウム	液体硫酸アルミニウム	ポリ塩化アルミニウム	苛性ソーダ
100 万人以上合計	6,435	29,981	3,683	31,467	97,216	37,943
東京都合計	2,218	10,332	1,269	10,844	33,504	13,076

以上の検討から、東京都の水道水の CO₂ 排出源単位 : 0.193kg-CO₂/m³, エネルギー消費原単位 : 3.05MJ/m³ を得た。

これらの値は、エネルギー消費量、CO₂ 排出原単位ともに清塚、竹田ら(2004)による浄水施設におけるインベントリ分析による値の約 2 倍の値であった。この理由は、清塚らの文献では、ダムなどの水源設備が評価対象に入っていないこと、送水が自然落下と仮定しているため送配水ポンプの電力が評価対象外であるために負荷が我々の検討の半分であると考えられた。

まとめと今後の課題

東京 23 区を対象として、現状使用されている上水のインベントリ分析を行い、上水を地下水に置き換える場合の基礎データを作成した。システム境界を水源、取水、導水、浄水、送水、配水の設備とし、上水 1m³ を機能単位と定めてエネルギーと CO₂ 排出量を対象物質とした分析を行った。その結果、CO₂ 排出源単位：0.193kg-CO₂/m³，エネルギー消費原単位：3.05MJ/m³を得た。

ライフサイクルアセスメントのインパクト分析において、地下水は水域としてまとめられた扱いをされており、地下水単独での影響評価を行うことはできない。そのため、地下水を水域から分離して取り扱うために、有害化学物質の毒性(発ガン、呼吸器障害)、生態系への毒性、富栄養化といったカテゴリーへのインパクトデータの作成が必要である。また、水の資源としての観点が未整理である。化石資源のような有限の資源としての水の取り扱い、インパクト分析における課題の一つである。さらに水を技術面から評価する場合、水処理などのインベントリ分析が少ないことも LCA 解析を困難にしている一因である。これらの課題のうち、特に地下水の資源としての観点を今後のプロジェクトで整理していく予定である。また、水処理関係のインベントリ分析について情報収集を行い、地下水を有効利用した効果の環境影響低減定量化を可能にすることを目標とする。

参考文献

水資源開発公団浦山ダム <http://www.water.go.jp/kanto/urayama/>

利根導水総合管理所 <http://www.water.go.jp/kanto/tone/top.html>

行田浄水場 <http://www.pref.saitama.jp/A90/BJ04/homepage/frame toppage.htm>

日本水道協会「水道統計の経年分析」(平成 13 年度)

清塚雅彦、竹田憲史(水道技術研究センター)ほか4名、「浄水施設におけるライフサイクルアセスメントの適用」環境システム計測制御学会、9巻2号(2004)、p261

地球研・谷口プロジェクト「都市の地下環境に残る人間活動の影響」

立命館大学文学部 吉越昭久

研究会の発表報告

「歴史時代の環境復原に関する古水文学的研究」2004.3.10 於：地球研

概要：

水文学の分野における環境復原に関する研究は、地形学（第四紀学）や気候学などと比較すると遅れているために、特定の地域における環境復原を総合的に行う場合、不都合が生じる。そこで、水文学における環境復原を他の分野のレベルにまで引き上げることを意図した研究を実施した。

研究の方法は、これまでに残されている古文書・古地図・絵・写真などの歴史的史資料と、現存する資料（地形図・地質図・土地条件図・空中写真・衛生画像・ボーリングデータ・考古学的発掘資料など）を用いて、過去のある時期ごとの水文環境を復原する。具体的には、史資料から時期・場所（地名）などを特定させて、現存する資料から地下の存在する時期の地表面を明確にし、その地形・水文環境を復原した上で、最後にまた史資料で補足・確認した。

研究の対象地域は、京都盆地の鴨川とした。その理由は、京都盆地は古くから日本の政治・経済・文化の中心地であり、多くの史資料が存在している。さらに、長く都市として存続してきたために、そこには地下に過去の都市の遺構が重層的に残されてきた。特に、近年ビルの建設に伴って、発掘調査が実施され、その地点密度は日本では最も高い地域の一つとなっている。以上のようなことが、京都盆地の鴨川を対象にした主な理由である。

また、対象とした時期は、史資料が増加する平安京造営期以降とした。

その結果、以下のようなことが明らかになった。鴨川の環境復原をする場合、連続的に把握することが困難なので、5つの時期を設定して特徴を捉えた。その5つの時期とは、8世紀末の平安京造営期・16世紀末の豊臣秀吉による京都改造期・17世紀後半の寛文新堤建設期・19世紀末の琵琶湖疏水建設期・現代の都市化期であり、この時期に水文環境が大きく変わったと見なすことができる。

平安京造営期には、一部で堤防などの建設は行われているが、鴨川はまだ自然状態に近く、300m近い河川敷の中を網状に流れていた。洪水は頻繁に起こり、鴨川は京都の住民にとって恐れの対象であった。

京都改造期になっても、河川敷の景観にそう大きな変化はないが、芸能の場となり、また政治的にも利用されるようになるなど、利用面での変化が起こり始め、住民の鴨川に対する意識にも変化がみられるようになった。

寛文新堤建設期には、堤防建設によって川幅が約半分程度に狭められたものの、河川敷が納涼や日常的な利用に供されるようになり、ウォーターフロント・ブームの始まりともいえる水に親しむ行為が見られるようになった。

琵琶湖疏水建設期には、疏水（鴨川運河）が河川敷の中を通されたことによって、さらに川幅が狭められ（100数十m）た。そして、現在の姿になるのが、昭和10に起こった鴨川洪水の結果、改修工事が実施され、さらに川端通の開通・京阪電鉄・疏水の地下化工事によってである。このような河川景観上の変化だけでなく、イメージの面でも鴨川は明るくきれいな河川として捉えられるように変化してきたのである。

この研究では、過去における特定の時期の地表面やその景観から、特定の河川断面に

おける水文環境はある程度復原することができたが、鴨川の流路の位置や実態などの平面分布についての詳細は、まだ十分に明らかにできなかった。また、今回対象にしなかった時期についても、補足するような研究が必要となる。今回の研究は、まだ事例研究の域にとどまっていて、他の地域の他の河川にもこの方法が適用できるか、検証できていない。このような課題は、今後の研究で解決していかねばならない。

配布資料：吉越昭久（2004）『歴史時代の環境復原に関する古水文学的研究
—京都・鴨川の河川景観の変遷を中心に—』
2002.2003 年度立命館大学学術研究助成報告書 p39

問題設定

仮説：「河川流域において、開発など人間活動が活発な時期ほど、洪水などの災害を多発させ、その堆積物によって、地下に当時の地表にあった諸情報を取り込むことが容易になる。」

検証：① 時代ごとの流域内の人間活動の種類・内容・規模などの把握
（発掘調査報告書・ボーリングデータ・古記録などからの研究）
② 洪水の頻度と規模の把握
（古記録・発掘調査報告書・地形図・空中写真・堆積物などからの研究）
③ ①と②の関係に関する考察

解説：

地表面の下、特に都市の地下には、過去の様々な情報が残されている。水文環境に限定しても、例えば、発掘調査報告書などを用いることで、過去に起こった洪水記録（破堤場所、洪水流の通過場所、湛水場所、土砂の堆積場所など）を求めることができる。さらに、年代を求める手法を用いたり、花粉や微生物資料が得られれば、湛水した状態の期間なども判明する。これらの情報と、古文書や古地図から得られる情報とを重ね合わせることで、より実態に近づけることが可能となる。

また、同様な手法で、過去の人間活動の種類・内容・規模を求めることができる。

最後に、両者の関係を統計学的・河川学的・歴史学的・水文学的などの面から考察して、一般論を導く。

谷口FSでの役割

1. 世界の都市に関する地理学的情報を提供することができる。
2. 特定の都市については、考古学・歴史学的史資料と地下から得られた情報の関係を考察することができる。

現在の研究紹介

1. 京都における過去の水文環境の復原
（特に、鴨川にかかわった洪水の復原）
2. 災害文献および史資料データベースの作成
3. 京都における過去の時代毎の地表面の復原

都市の歴史的な水環境の復原

谷口智雅

立正大学地球環境科学部

1.はじめに

近代の約 100 年間においては、人類の活動は都市への集中を示した。都市の急激な人口増加とインフラストラクチャーの整備によって、都市とその周辺では著しく自然が変化した。近代における自然と人間の相互関係を扱う時、都市は絶好の研究の場となる。都市の自然環境を理解するためには、現在の自然環境だけではなく過去の自然環境についても把握し、現在の状況がどのような過程を経て形成されてきたのかを知ることが必要である。都市の自然環境へのアプローチについて考えると、都市の自然は単なる「自然」というより、人工的改変を受けて成り立っている自然であり、都市の自然科学的な研究は人文・社会的要素を考慮に入れて行なわなければならないということになる。

ここで、都市の河川を取り巻く水環境について見ると、上下水道、水質汚濁、洪水、河川改修など様々な問題がある。河川を中心とした人間活動に関わる「水」は、人為的な影響を非常に受けて変化しており、自然的の状態を基本として、その上に人為的影響を受けた過程を整理し、人間活動による都市内の「水」へのインパクトを明らかにすることが求められる。換言すれば、都市の水文環境には多くの要素が係わっており、水と人間生活との関係を総合的に研究する必要があると言える。

2.研究会発表要旨 (2004 年 2 月 17 日、地球研・大セミナー室)

発表題目；環境認識からとらえた都市の水環境の変遷－文学作品から見た環境変遷を中心に－

東京における河川を中心とした都市水文研究について概観すると、都市域の水環境の現状と問題、都市の発展過程が水循環と環境に及ぼす影響などの観点から様々な研究が行われてきた。このように、近現代を含めた水文環境の把握は非常に重要な課題であるが、科学的資料の得られない時代の環境変化を理解することは大変困難である。このため、本研究では水質分析資料の得られない時代の河川環境を理解するため、文学作品や史誌などに見られる河川や水路などについて書かれた記述から、20 世紀初頭における東京の水質分布の復元を行った。

その結果、20 世紀初頭には都市中心部を流れる隅田川、神田川などで水質汚濁が見られ、特に浅草、本郷などの人口密集地の水路では生活排水による水質悪化が顕著であった。汚れた水域は、都市の拡大とともに武蔵野台地上や隅田川左岸の地域にまで広がったが、良好な水域が都市内や武蔵野台地の湧水池や湧水池を水源とする河川の上流部で見られた。

また、地域的特色を概観すると、東京の 20 世紀初頭の河川・水路の水質汚濁は人口密集地で進行し、低地や台地の縁で顕著である傾向が得られた。

さらに、都市の総合的な水文環境を理解するためには、河川・質（水質・負荷量など）だけでなく、地下水・量（水量・水位など）についても当然把握する必要がある。このため、地下水および水量についても歴史的な水文環境の復原について予察的報告を行った。

3.仮説検証型問題設定

地域を理解する方法の一つとして景観研究が地理学の分野で行われているが、ここでは景観を個々の単なる形態的に映し出されたものとして捉えず、自然の立地条件と人間活動の相互から映し出された事象として取り上げられている。このため、水辺景観においても、土地利用を含む周辺の環境、利水や治水などの河川・水路など機能、地域に映し出された景観に過去の水環境の痕跡を見いだすなど、様々な対象として説明することが重要である。ここで、都市の水辺環境への地理学的なアプローチについて考えると、都市の水辺は単なる「自然」というより、人工的改変を受けて成り立っている場合が多い。このため、都市の水辺環境研究は、人との関わりを十分に考慮に入れて行なわなければならない。また、この逆も成り立つであろう。したがって、総合的な理解が求められる。本来、地域の水辺を取り巻く環境にはその地域の習慣、風土にあった独特の情景があり、最近の水辺の再生・復活のみならず都市計画や集合住宅のプランニングなどにも、その土地の歴史や伝統を生かすことが求められるようになってきている。それは身近な都市の自然の再認識につながっているとと言える。このことから、都市の水辺景観評価についても、従来手法にとどまらない、新たな手法や検討が必要である。

一方、過去の水辺の景観および変遷について見ると、各時代に写された写真を比較した研究を一般に見ることができるとは至っていないものは少ない。これは現在の都市河川の景観評価が親水性や都市空間との調和に重点が置かれている場合が多く、これと自然状態を多く残す過去の水辺景観を同じ基準で評価することは困難であることが挙げられる。もちろん、現在と過去の景観を比較するため地図、写真、統計などを用いる方法において、単に写真を羅列しただけでは各時代の景観の特色を十分に比較はできない。これらの問題を解決するためには、過去の地域性や環境知覚を考慮に入れた景観分析が必要になってくる。近年、環境研究の多くが自然科学・物質科学に重点を置いた観測・測定によってデジタル的に行うことが主流であるが、単なる視覚的なものにとどまらない水辺の景観・風景研究は、今後の環境を考えるうえで、重要な研究課題と言える。現在見られる景観を含め、地域に映し出された景観に水文現象の変化の痕跡を見いだすこともできる。地下水位の低下による湧出地点の変化、井戸の形態、水利用、土地利用などの水文景観から理解する手段は、水文観測データの得られない地域・時代については有効な手法の一つと言える。

4.研究での役割

東京の河川を中心とした多くの研究は数値化された調査資料が存在する年代、すなわち昭和・平成年代が中心であり、水文観測データが得られない江戸、明治・大正時代の水文環境変化について述べているものは少ない。このため、谷口（1997）は文学作品に書かれた河川の景観描写や当時撮影された写真などから、明治・大正を含む歴史的な水質環境を復原し、近代化以降の約100年間の水質変化を示した。

都市の総合的な水文環境を理解するためには、現在の環境だけではなく、過去の環境についても理解することが大変重要である。さらに、河川・質（水質・負荷量など）だけでなく、地下水・量（水量・水位など）についても当然把握する必要がある。このため、地下水および水量についても河川・水質と同様の手法を用いた歴史的な水文環境の復原を行い、都市の総合的な歴史的な水環境の把握を進める。

しかし、古水文環境の理解の一手段として、記載文章・景観からのアプローチは近過去（過去100年程度）が適当と思われるが、ここで幾つかの問題を挙げられる。

第一に、資料の性格上、 10^0 あるいは 10^1 より詳細な復原が不可能であり、変化・復原

のレベルが限定される。次に、当然ながら個々の資料（文章）は単位や地名なども含め統一された書かれ方をしていない。この点について人文・社会分野などを含む多面的な分析によって補うことが必要である。第三に、広域的な分析には不向きで、比較的狭い範囲あるいは地点の復原となる。しかし、点としての復原の可能性を有している。最後に、実際に井戸や地下水について書かれている記載文章の検索に非常に手間が掛かるなどである。

このような問題は他分野で行われてきた史料による歴史的環境復原過程でも挙げられている課題であり、これら問題を解決しながら、歴史的環境復原のアプローチを行う予定である。

5. 参考論文

谷口智雅（1995）：東京における文学作品中の生物的・視覚的水環境表現からみた水質評価。陸水学雑誌，**56-1**，19-25.

谷口智雅（1995）：文学作品よりみた戦前の東京の河川環境について。日本河川協会編：『1993年度 日本河川水質年鑑』，山海堂，961-965.

谷口智雅（1997）：文学作品から見た20世紀前半の隅田川の水質の変遷。地理学評論，**70**，642-660.

谷口智雅（1998）：写真からみた隅田川の水辺景観の変化。地域研究，**38-2**，21-28.

谷口智雅（1999）：東京における歴史的な水環境の復元－文学作品からみた20世紀前半の隅田川の水質変化－。水利科学，**245**，15-30.

Tomomasa TANIGUCHI（1999）：Changes in water quality of the Sumida River in Tokyo from 1900 to 1960 Estimated from Literary Works, the Science Report of the Tohoku University, 7th Series(Geography) special issue, **49-2**, 227-232.

谷口智雅（2002）：近代化以降の東京の人口と工場の分布。防衛医科大学校進学課程研究紀要，第25号，53-61.

谷口智雅（2003）：東京の水辺景観の変化。防衛医科大学校進学課程研究紀要，第26号，11-19.

谷口智雅（2004）：上海蘇州河における環境保全と水辺景観，環境情報研究12号，13-20.

