

ジャカルタ -JAKARTA-

都市としてのジャカルタ

オランダと日本の統治時代を経て、1949年から独立、現在ではASEAN（東アジア諸国連合）の本部が置かれる世界都市として発展しています。1900年は人口わずか12万人でしたが、独立後から急速に増加し、2005年では886万人を抱えるまでに至っています。ジャカルタ周辺都市を含む都市圏（Jabodetabek）を中心に、経済活動が活発化しています。

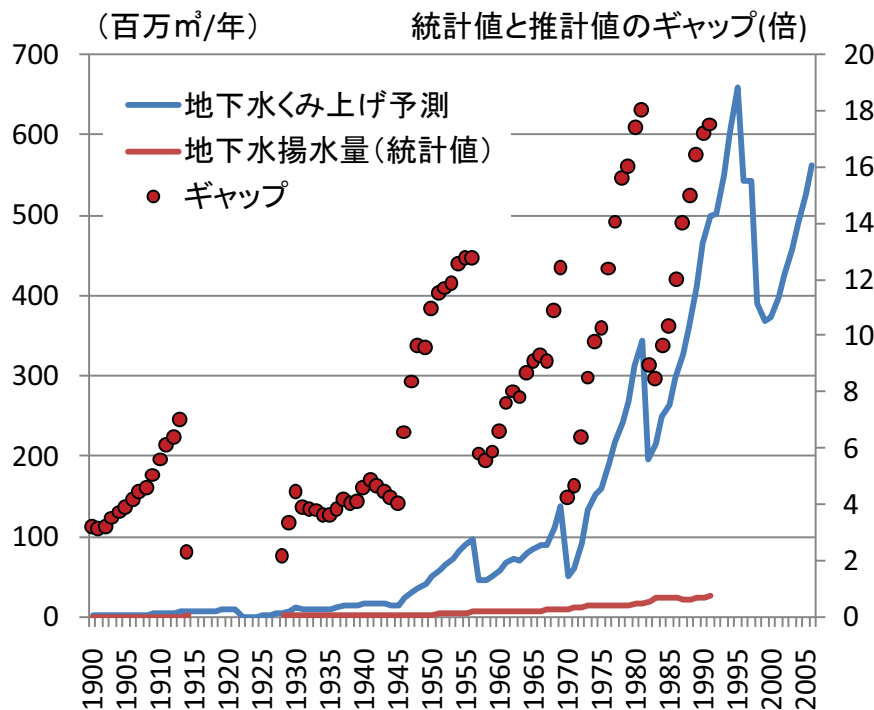
ジャカルタはインドネシアにおいて最も経済水準が高い地域ですが、貧富の差も著しく、貧困層が住むスラム街の整備が急がれています。



地下水揚水量の統計値と推計値のギャップ：ジャカルタの事例

豊田知世(国際協力機構研究所)・金子 慎治(広島大学)

Defined stages of urbanization and land subsidence for Asian megacities



ジャカルタでは、地下水の過剰揚水による地盤沈下が深刻化している。地盤対策には、地下水揚水量の制限が有効だが、ジャカルタをはじめ多くの途上国では、地下水揚水量の正確な数値は把握されていない。ジャカルタの近年の地盤沈下のスピードをみると、公表されている量以上の地下水が汲み上げられていることが考えられる。

都市で使用される水の量は、都市の産業構造や1人あたりの水需要量によって異なるため、ほかの都市を参照すると、都市全体の水需要量を推計することが可能である。そこで、ジャカルタの水需要量を推計し、水道による給水量の差から地下水揚水量の推計を試みた。

その結果、公表されている地下水量を大きく超える量の地下水が揚水されている可能性が示唆された。

ジャカルタの地下水

近年、地下水の水位低下や地盤沈下が顕在化している地域です。都市面積の6割以上が、海拔ゼロメートル以下の低湿地帯にあるため、雨季にしばしば洪水が発生しています。地盤沈下によって、洪水被害はますます深刻化しており、とくに海岸付近では、満潮時に海水が浸水するほど深刻な状況になっています。

政府も地下水利用の抑制策に乗り出しましたが、効果はまだ見えていません。代替となる地表水源も確保できていない状況で、地下水災害の途上にあるといえます。



都市域の過剰揚水に伴う 地下水年代の若返りメカニズム

利部 慎(熊本大学)・嶋田 純(熊本大学)・Robert Delinom(LIPI)・Fajar Lubis (LIPI)

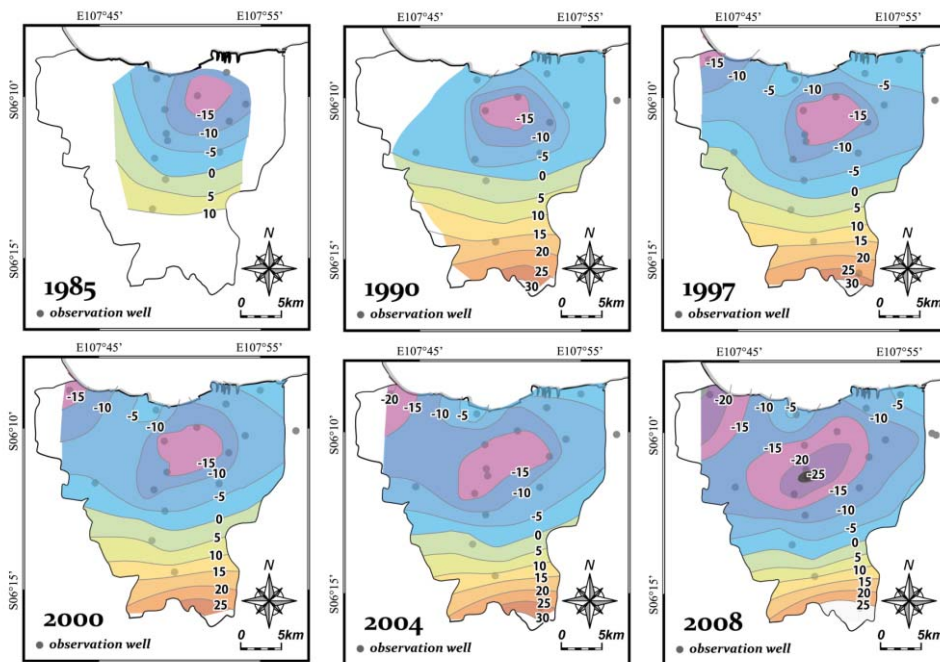
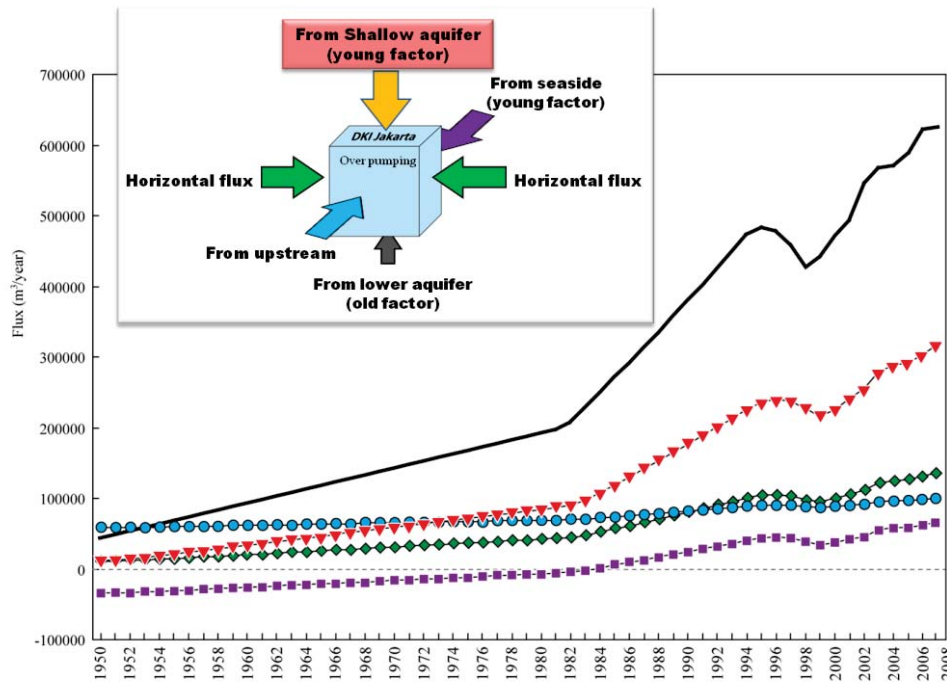


図1 主要帯水層における地下水ポテンシャルの経年変化
(Kagabu et al. 2010より転載)

Jakarta地域から得られた地下水の多くは、その安定同位体($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD)特性から、ほぼ同標高の地域で涵養されていると考えられ、その後、水文地質構造に沿うように、選択的に浅層や深層の帯水層中を流動する。また、地下水ポテンシャルの分布から、都市部における深層地下水の過剰揚水による明確なポテンシャル低下域がみとめられ、これにより浅層地下水あるいは海水の深層地下水への引き込みが起こっていることが、水質やBr:Cl比、CFC-12分析から明らかになった。



Jakarta地域で、特に都市化しているDKI Jakartaの範囲に該当する深層地下水を対象として、1950年から2008年までの各年において対象領域へ入り込むFlux量を計算した。その結果、1980年代中ごろから対象内へ向かう6方向のFlux成分で最大となったのが鉛直下向きのFlux成分であり、2000年代には全Flux成分の約5割を占めるようになった。この結果は実測されたCFC-12やSF₆分析とも整合的で、若い地下水の指標となるこれらのトレーサーが深層地下水においても検出されることから、浅層の若い地下水の引き込みが示唆された。さらに、実測値と計算値が整合した結果が得られた。

図2(上) DKI Jakarta範囲の主要帯水層に向かう地下水Fluxの経年変化

(Kagabu et al. 2010より転載)

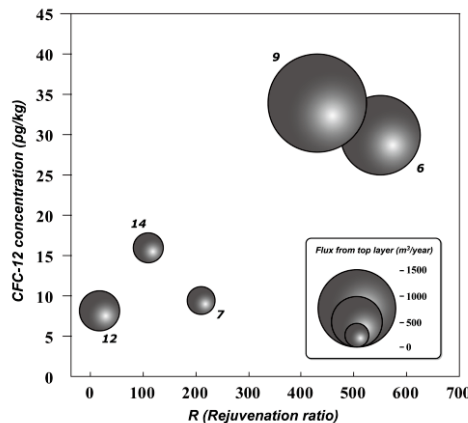


図3(左) 実測された¹⁴CとCFC-12の関係および計算された鉛直下向きFluxの量

(Kagabu et al. 2010より転載)

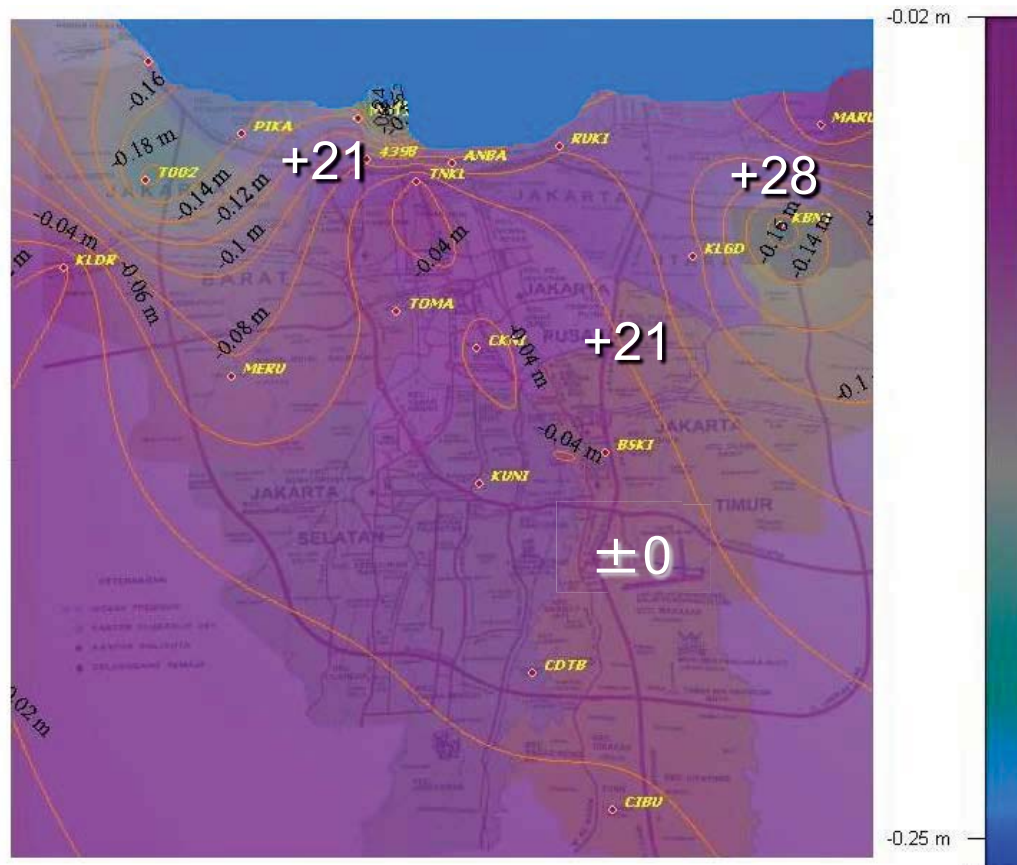
地盤沈下と地下水

福田洋一(京都大学)・西島潤(九州大学)・長谷川崇(京都大学)



ジャカルタでの地盤沈下については1926年にはすでに報告があり、海岸沿い地域での冠水や建物被害などを引き起こしている。特に最近では、開発が進む海岸地域での地盤沈下が顕著で、その原因の一つは、過剰な地下水の揚水にあると考えられている。

これらの原因を探るため、GPSによる地盤変動測定と同時に、重力測定による地下水変動の検出を試みた。このため、新たにMicro-G LaCoste社の野外用の絶対重力計A10(#017)を採用した。このような目的で絶対重力計が使用されるのはこの研究が初めてである。



相対重力計で測定された2008 – 2009の重力変化 (μgal)
 コンターはGPSで測定された高さ変化 (m) を示す。

A10絶対重力計を用いたジャカルタでの最初の測定は2008年8月に実施された。しかしながら、高温多湿な熱帯域の地盤ノイズの大きいジャカルタ市街地での測定には多くの困難が伴いこの時の測定では良好なデータを取得するには至らなかった。この時の経験を生かし、また、重力計の整備も行い、2009年にはジャカルタ市街地でも数点の絶対測定に成功している。

2008年のデータがないために絶対重力測定での変化は得られていないが、同時に実施した相対重力計での測定では、図に示したように海岸に近い測定点での重力の増加が観測された。これはGPSで測定された地盤沈下と整合するものである。

Fukuda Y., J. Nishijima, M. Taniguchi (2010): Applications of Absolute Gravity Measurements for Environmental Issues, Proc. 5th Kentingan Physics Forum, Sahid Jaya Solo Hotel, July 14, 2010, 85–88.

Abidin, H.Z., et al(2010): Land Subsidence Characteristics of the Jakarta Basin (Indonesia) and its Relation with Groundwater Extraxtion and Sea Level Rise, IAH Selected Papers on Hydrogeology No. 16, Chapter 10, pp.113 –130.

ジャカルタの地下熱環境

都市の急速な成長に伴い、ジャカルタ市内の温度は上昇を続けてきました。その影響が地下に浸透し、地下温度の上昇がおきています。人間活動によって地下水流動が変化していることも、地下温度分布に影響を与える可能性があります。



孔井温度データを用いた地表面温度変化の復元

Rachmat Fajar Lubis (Research Center for Geotechnology, Indonesian Institute of Sciences, Bandung-Indonesia) · Robert Delinom (Research Center for Geotechnology, Indonesian Institute of Sciences, Bandung-Indonesia)

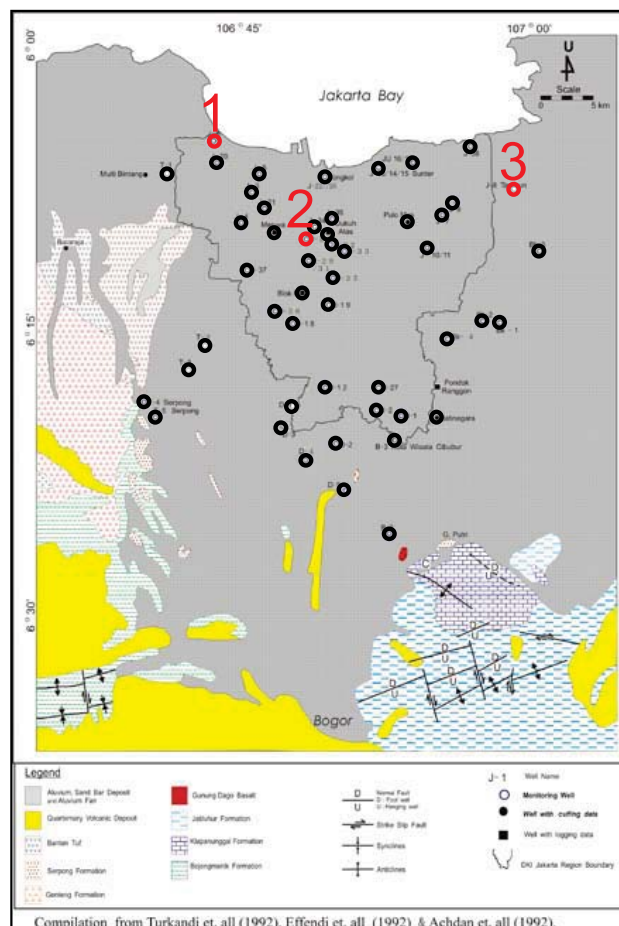


図1
研究対象地域

○ :観測井



観測井における
地下温度プロ
ファイル測定
の様子

近年の地表面温度の上昇は、地下の熱環境にも影響を及ぼしている。地表面から地下へ熱が伝わることによって地下温度分布が乱されており、孔井内の温度分布を測定することにより、最近の気候変動に関する情報を得ることができる。

気候変動や都市化に伴う地表面温度の上昇が地下熱環境に及ぼす影響を評価するために、ジャカルタ地域の観測井(図1)において地下温度プロファイルの測定と長期温度モニタリングを実施した。また、これらのデータを解析して過去の地表面温度変動の復元を行った(Delinom et al, 2009 and Lubis et al., 2009)。

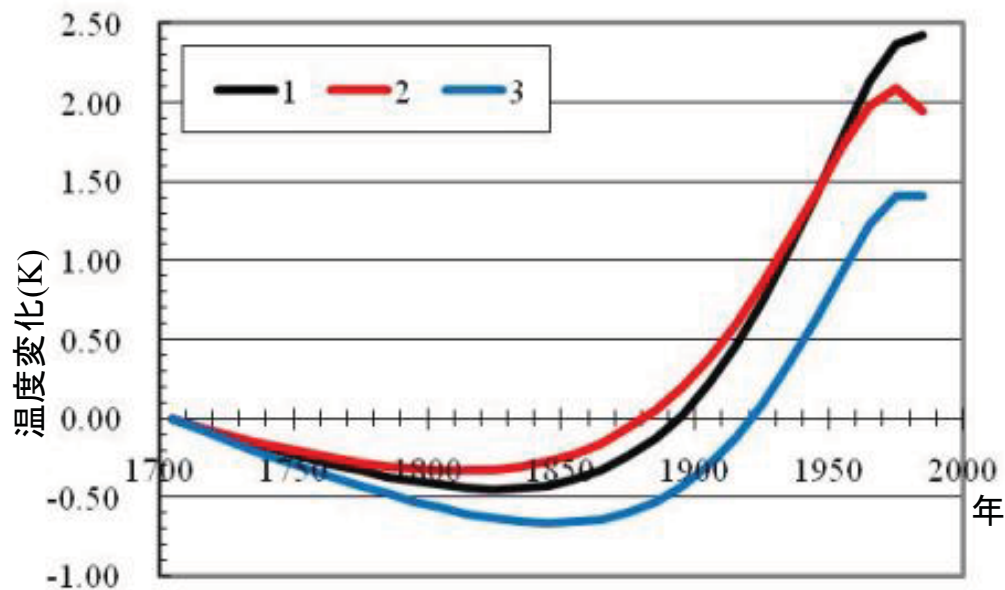


図2 観測井1～3(図1)における温度データを用いた地表面温度変動の復元結果

地表面温度変動の復元結果(図2)は、過去100年間で2K以上の温度上昇を示している。これはジャカルタの気温データが示す上昇量とほぼ同程度である。この地表面温度の上昇は、ヒートアイランド現象と全地球的な温暖化の両方の結果である。全地球的な気温上昇は過去100年で0.5～0.7Kであり、地下温度プロファイルより推定した地表面温度上昇量の30%以下となる。すなわち、ジャカルタにおける地下温度上昇の大部分は、地球温暖化よりもむしろ都市化によって起きていると考えられる。

Delinom et al.(2009) The contribution of human activities to subsurface environment degradation in Greater Jakarta Area, Indonesia . Science of The Total Environment, 407,93129–3141.

Lubis et al. (2009) Reconstructions of climate change and surface warming at Jakarta using borehole temperature data. From headwaters to the ocean (Taniguchi et al. (eds.)), Taylor & Francis group, London, 541–546.

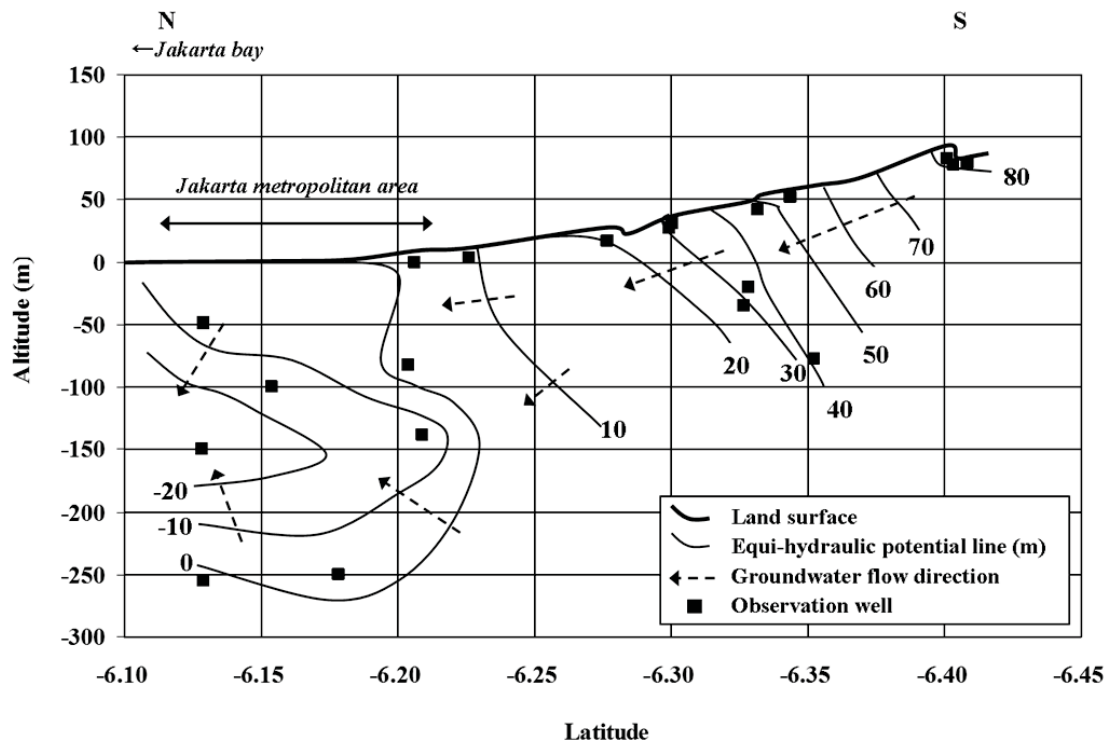
ジャカルタの地下水汚染

家庭排水や工業廃棄物の負荷により、所々で高濃度の「硝酸性窒素」が検出されています。その一方で、ジャカルタの中心部では低い傾向を示しており、中心部に関しては早い段階から公衆衛生システムの整備が進んでいたことが考えられます。



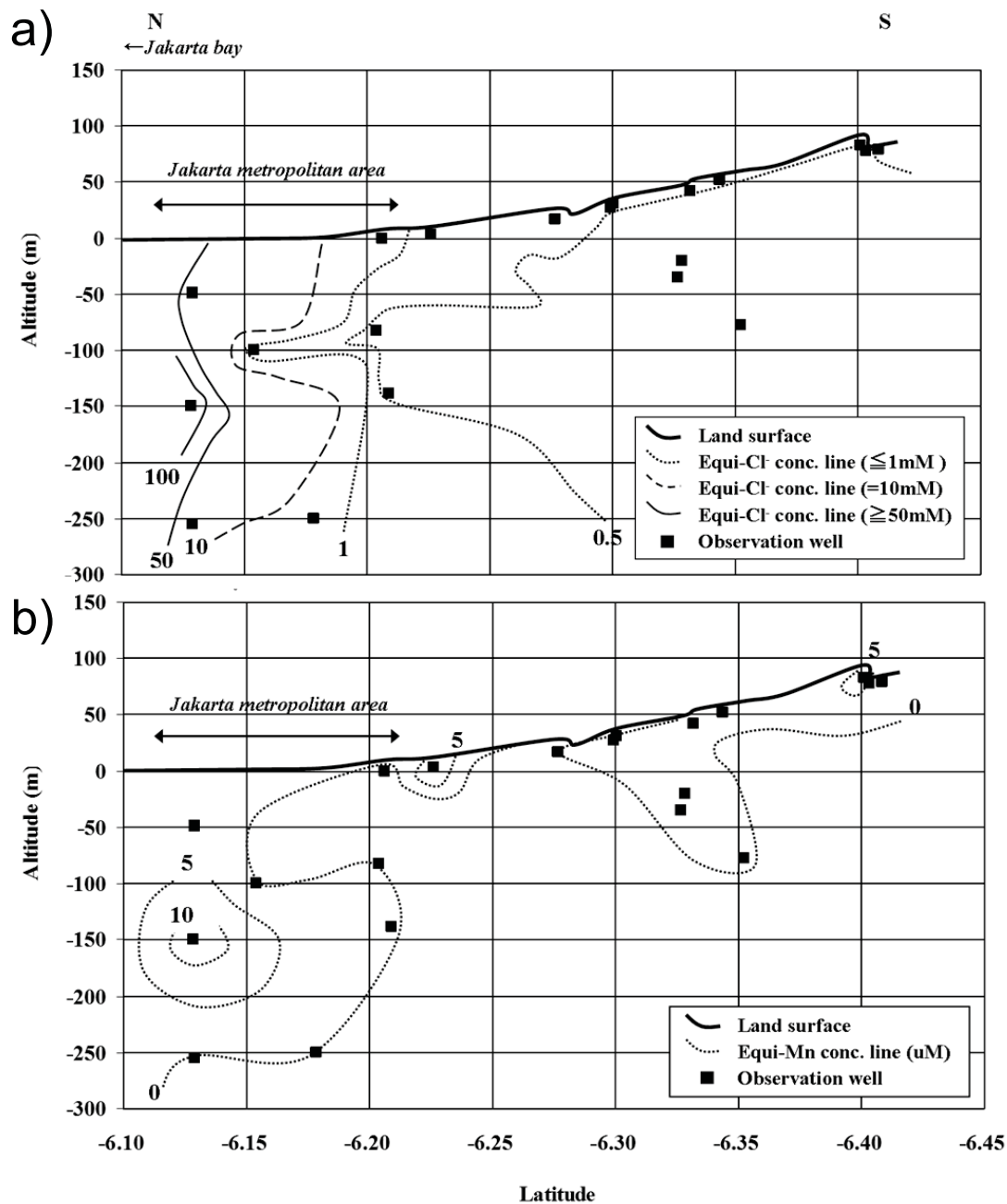
地下水の塩水化・重金属汚染

小野寺 真一(広島大学)・齋藤 光代(愛媛大学)



ジャカルタの都市部は沿岸域に位置する。通常、沿岸域は地下水流出域に相当し、地下水の流動方向は上向きになる。しかしながら、地下水のポテンシャル分布から、ジャカルタ都市部においては、地下水が下向きに流動していることが明らかになった。恐らく、都市部における過剰揚水により地下水位が低下した結果、このような地下水流動の変化が生じたものと考えられる。

Figure 1. ジャカルタ都市部～郊外における水理水頭分布



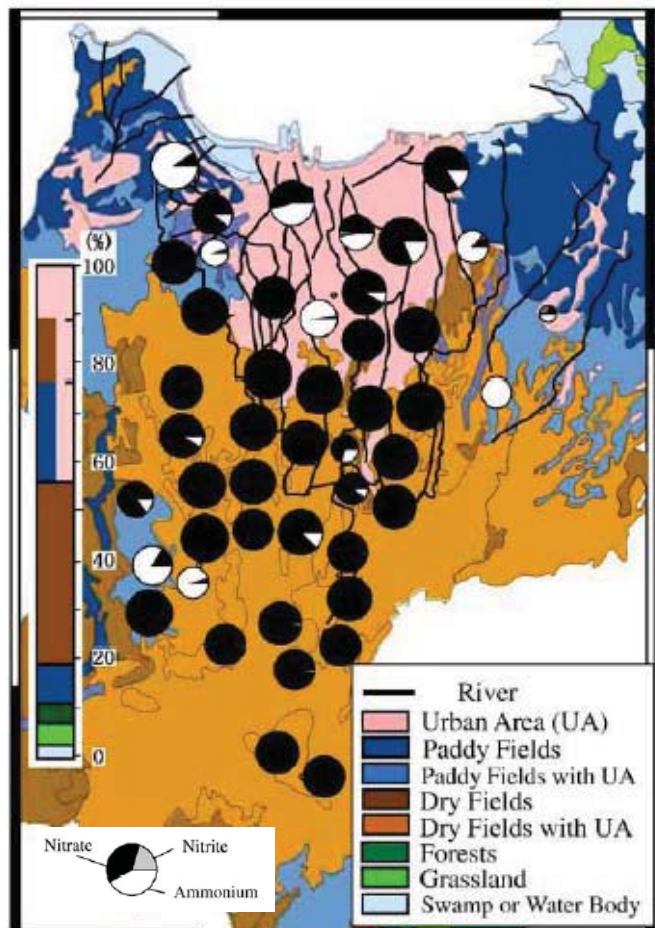
地下水中の塩化物イオン濃度 (Fig.2a), マンガン濃度 (Fig.2b) の分布から, 双方の高濃度領域は, 地下水ポテンシャルの低いエリアに集中していることが明らかになった。すなわち, 地下水位の低下にともない, 海水および汚染された地表水・浅層地下水がより深部の地下水へ吸い込まれ, 結果的に塩水化および重金属汚染が拡大していると考えられる。ただし, マンガンについては, 還元状態での地層からの溶出という可能性も考えられるため, 今後検証が必要である。

Figure 2. a) 地下水中の塩化物イオン濃度および b) マンガン濃度の分布

Onodera et al. (2009). "Effects of intensive urbanization on the intrusion of shallow groundwater into deep groundwater: Examples from Bangkok and Jakarta." *Science of the Total Environment* 407: 3209–3217.

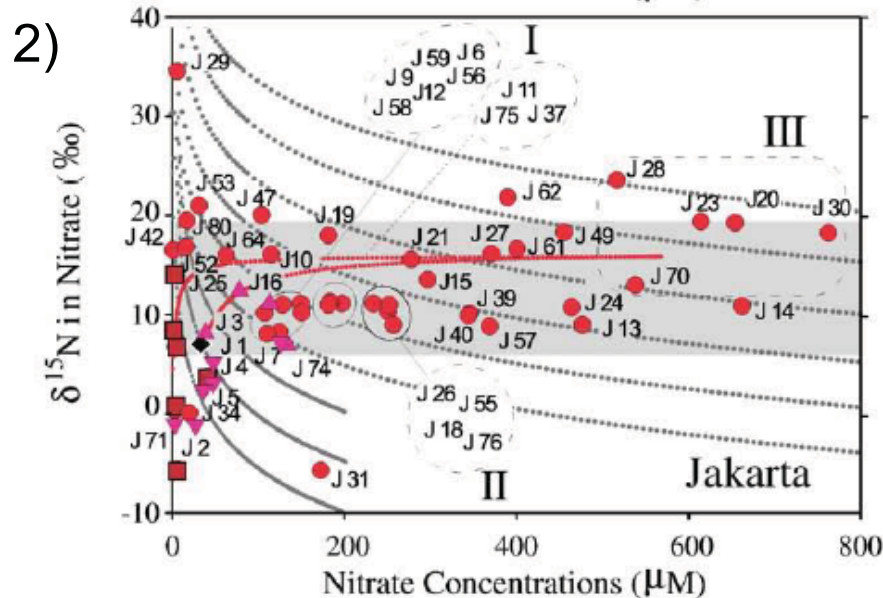
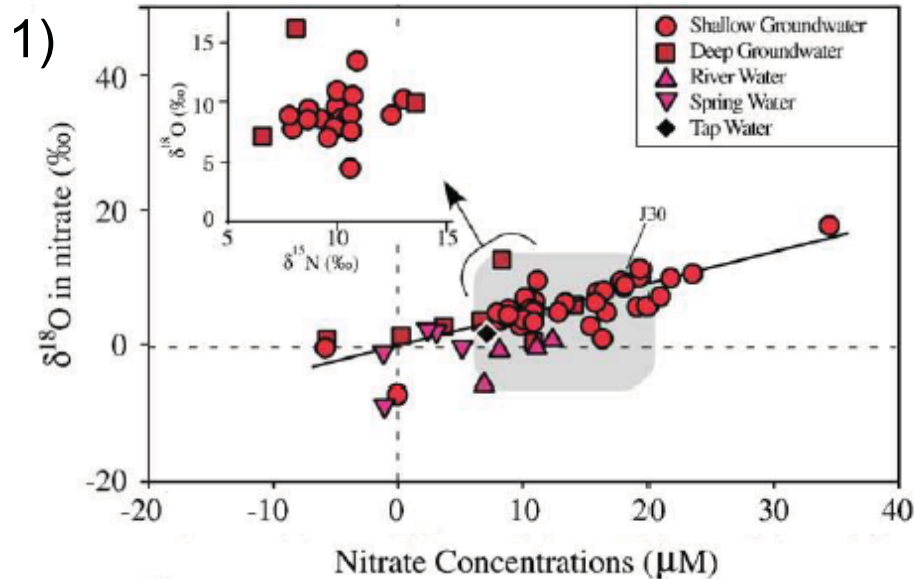
地下水の硝酸汚染

梅澤有(長崎大学)・細野高啓(熊本大学)・小野寺真一(広島大学)



ジャカルタの浅層地下水の溶存無機態窒素は、都市部や水田ではアンモニアが、郊外の耕地では硝酸が卓越していた。これは、他の地域でもみられるように、還元環境では脱窒が、酸化環境では硝化作用が起きていたためであると考えられる。硝酸濃度は平均で $185\mu\text{M}$ であったが、最大でも $763\mu\text{M}$ であり、WHO(世界保健機構)の定める飲用水における硝酸濃度基準を上回るものはなかった。

Figure 1. ジャカルタ都市部～郊外における地下水中の溶存無機態窒素の構成と濃度分布



表層水である河川水柱の硝酸の同位体比が、硝酸の汚染源の値を反映していると仮定すると、硝酸は、人間や家畜からの排泄物の硝化に由来するものが多いことが示唆された。また、地下水の流れに沿って、硝酸濃度の減少に伴って同位体比が増加する場合、脱窒作用が起きていることが示唆される。この脱窒作用は、高温多湿のアジア平野部において、地下水汚染の軽減に大きく寄与していると考えられた。

Figure 2. 1) 地下水、河川水中の硝酸の窒素・酸素安定同位体比 および 2) 硝酸の濃度別の窒素安定同位体比

Umezawa et al. (2009). "Sources of nitrate and ammonium contamination in groundwater under developing Asian megacities." *Science of the Total Environment* 407: 3219–3231.

都市化が地下水湧出におよぼす影響

梅澤有(長崎大学)・細野高啓(熊本大学)・小野寺真一(広島大学)・Delinom R. (LIPI)

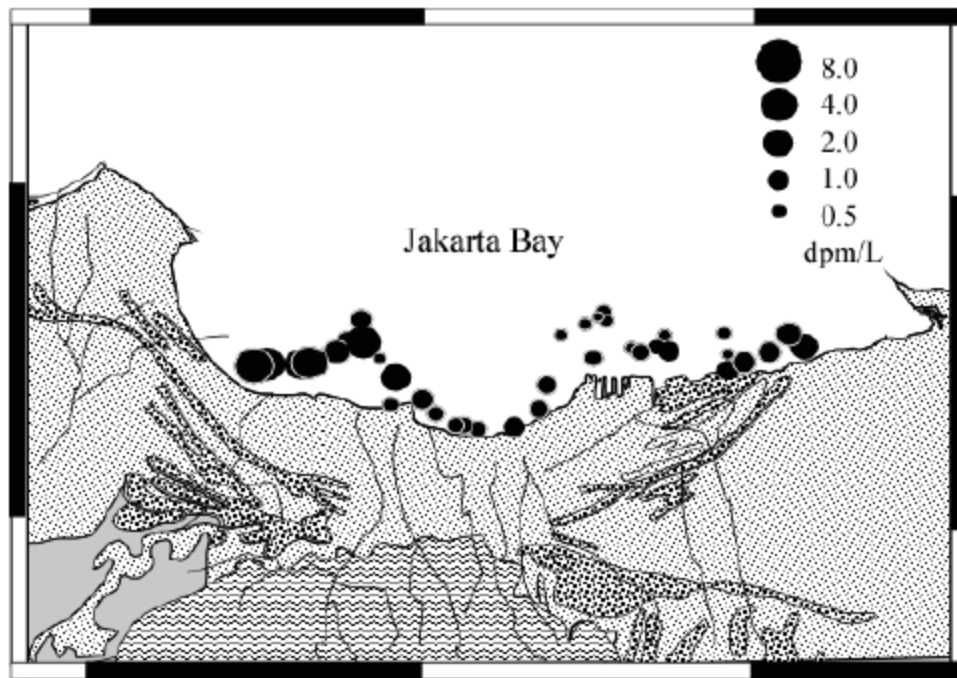


図1. ジャカルタの都市部沿岸域のRn濃度 (dpm/L) の分布

地下水に多く含まれることの多い ^{222}Rn は都市部の埋立地近傍において低く(i.e. 0.8–3.0 dpm/L), 西部のマングローブ林の広がる沿岸部に行くにつれて6.0 dpm/Lまで増加した。都市郊外において ^{222}Rn と電気伝導度を指標とすると、Rn濃度の増加は、地下水の直接の流出ではなく、地下水によって一部を涵養された河川水によるフラックスと対応していることも示唆された。このように、都市の埋立地近傍において、地下水の直接的な流出量が少ないという事実は、ジャカルタ都市部の沿岸域において、地下水ポテンシャル面が低くなっている地域が多く、塩水の侵入が確認されているという事実とも矛盾しないものであった。

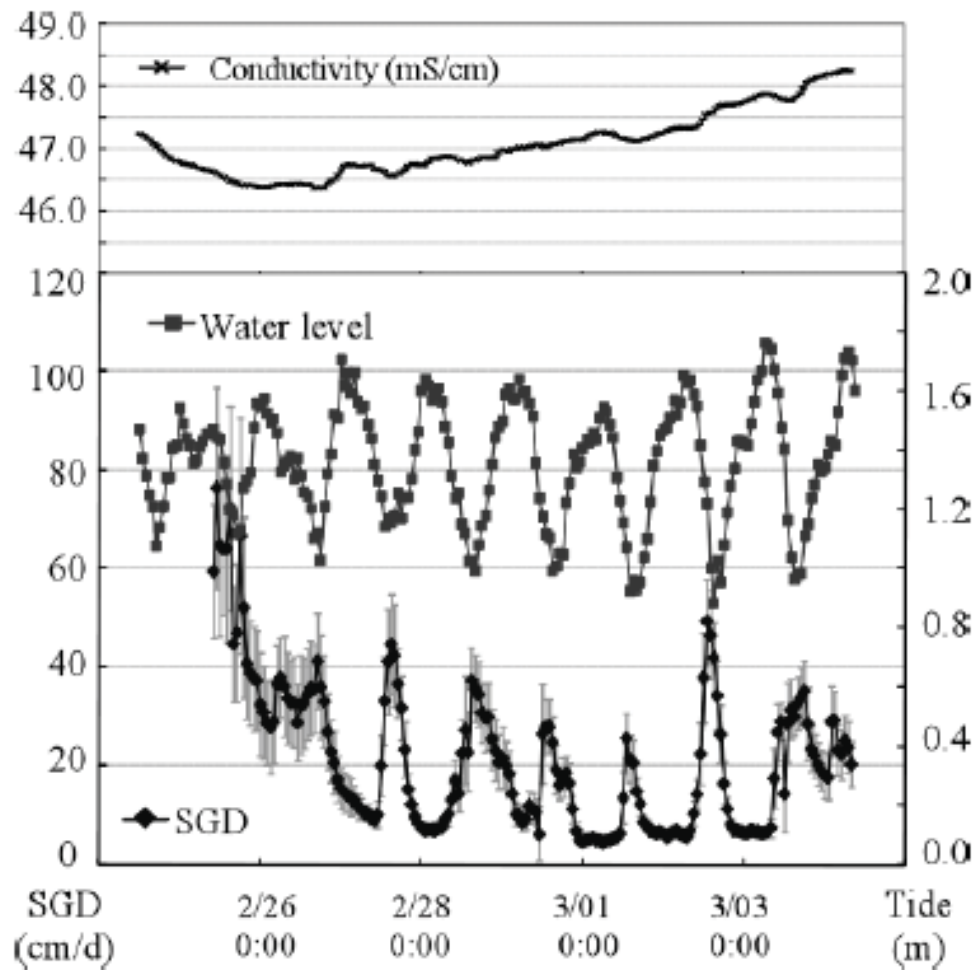


Figure 2 都市部に隣接した砂浜(岸から50m地点)において、シーページメーターによって測定されたSGDと水深、電気伝導度の時系列変動

ジャカルタ都市部に隣接した砂浜の複数地点においてシーページメーター(湧出量自動測定器)によって観測された地下水湧出量(SGD: submarine groundwater discharge)は1.0 ~ 200 cm/dayであり、幅広い値を持っていた(Fig. 2)。観測した全ての地点において高い湧出量は低潮位時に記録された。しかしながら、SGDの増加に伴って電気伝導度の低下は見られなかったことから、このSGDは、淡水の湧出というよりは、再循環した海水の湧出によるものであることが示唆された。これらの地域では、Rnの時系列観測でも、塩分の低下を伴わないRn濃度の増加が観測されていることも、再循環の寄与の大きさを支持するものであった。