

大阪湾への地下水による栄養塩流出とその長期変動に関する評価

○小野寺真一^{*1}, 清水裕太^{*2}, 有本弘孝^{*3}

広島大学大学院総合科学研究科准教授^{*1}, 大学院生^{*2}

地域地盤環境研究所次長^{*3}

1. はじめに

瀬戸内海流域における地下水は、河川水に比べて海洋生物にとって重要な成分であるケイ素やリンを大量に含んでいる (Onodera et al., 2007)。流出量という点では、地下水は河川のわずか数パーセント程度であると報告されているが (Zektser and Loaiciga, 1993), 川の水に比べて高濃度の栄養塩 (窒素, リン, ケイ素など) を含むため, 海への栄養塩供給という点では, 地下水が大きく寄与することが明らかにされている (Slomp and Cappellen, 2004)。その一方で、大阪平野においては、1960年代に最大 30m も水位が低下し、地盤沈下も生じ、海水も一部で地下水に浸入した。すなわち、この間は、地下水が海洋に流出していなかったということになる。

本研究において、昨年度は現在の情報をもとに解析を実施し、大阪湾の栄養塩供給に対する地下水流出の重要性を確認した。特に、リンにおいてその重要性が示された。地下水自体の流出量は、河川流出の数%に過ぎないのに対して、地下水によるリンの寄与は、河川の 4 割程度にも及ぶことが確認できた。海水中の濃度分布から

も、河川の流入のない海域でリン濃度が高いことが確認できた。

本年度は、長期間の地下水流出量と栄養塩流出量の変動を明らかにし、将来の海洋環境の保全に向けて地下水の保全の重要性を評価することを目的とした。特に、1) 現在の地下水の涵養年代を明らかにし、栄養塩の供給年代を評価し、2) 最近 50 年間の土地利用によって変化する地下水への栄養塩負荷の変遷と、地下水中の塩分分布により推定される地下水-海洋間のフラックス情報を評価した。また、3) 河川の洪水時を含む流出量の評価についてもモデル計算を実施したが、まだ課題を残している。

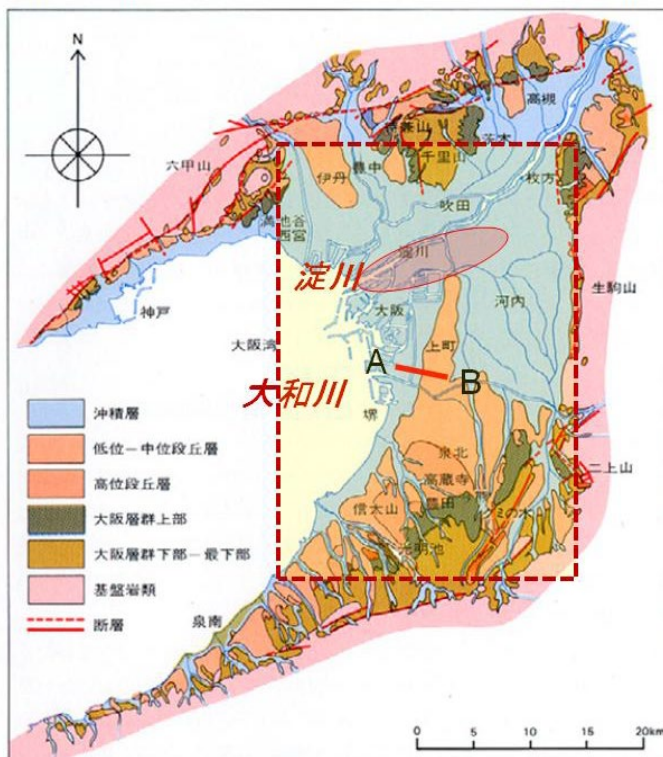


図1 大阪平野の地質図(市原 1966 より)及び集中採水地域(赤丸地域) *赤点線の範囲は、昨年度の採水範囲

2. 研究地域及び方法

本年は、1) 大阪平野の中央部付近(図1丸囲み部分)を代表として、15地点の観測井で地下水調査(採水及び測水)を実施した。採水した地下水は、表層数m(G1)、深度30m(G2)、深度60m(G3)の3種類の帯水層である。ここでは、特に空気に触れないように採取したのち、溶存フロンガス(クロロフルオカーボン;CFC11、CFC12)およびSF6濃度を測定し涵養年代を推定した。また、2)最近50年間の地下水への栄養塩フラックス及び地下水から海洋へのフラックスを推定するため、それぞれ土地利用をもとにマテリアルフローを考慮した負荷モデルによる計算を実施するとともに、地下水中の塩分分布から塩水化の進んでいる地域では地下水流出はなく塩水の侵入した領域、塩分のほとんどない地域は地下水が流出した地域として昨年実施した地下水流出モデルで、50年間の平均フラックスを推定した。さらに、3)50年間にわたる洪水時を含む河川から海洋への栄養塩流出量の変動を明らかにするため、SWATモデルを淀川流域等に適用した。

3. 結果と考察

1) 地下水の涵養年代

図2に、CFC12を使用した大阪平野の地下水の涵養年代の分布を示す。測定を行った地下水の深度は10m~60mの範囲と、比較的浅層の地下水である。地下水の涵養年代は、図のようにおおよそ40年~60年程度前ということが明らかになった。場所によっては、沿岸から3km付近のように40年前のやや若い水も確認できた。一般に、地下水流出域に当たる本地域のような場所では、地下水年代は100年~1000年に至ると言われている。しかし、本結果は、明らかに若い水が混入していることを示した。具体的には、塩分も高いことから、海水の侵入が示唆された。

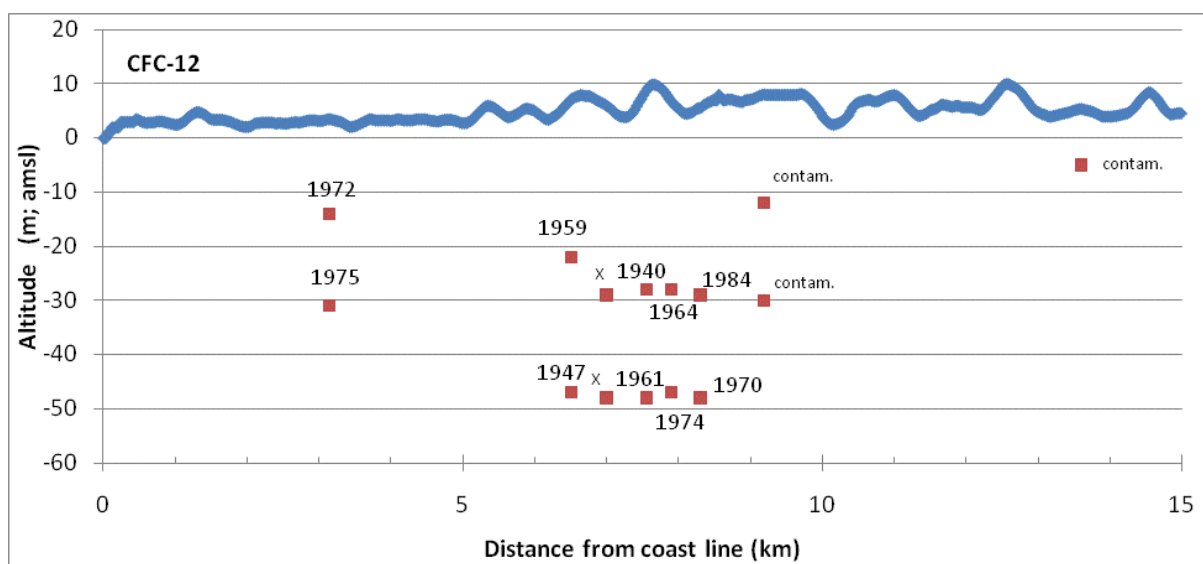


図2 大阪平野中央部における地下水年代の分布(海岸から15kmの沿岸域)

*数字は推定涵養年代を示す、xは低濃度のため推定不可、contamiは大気濃度以上の濃度で推定不可

2) 50年間の地下水への栄養塩負荷

図3に、1970年及び2000年における窒素収支モデルで見積もった窒素負荷量の分布を

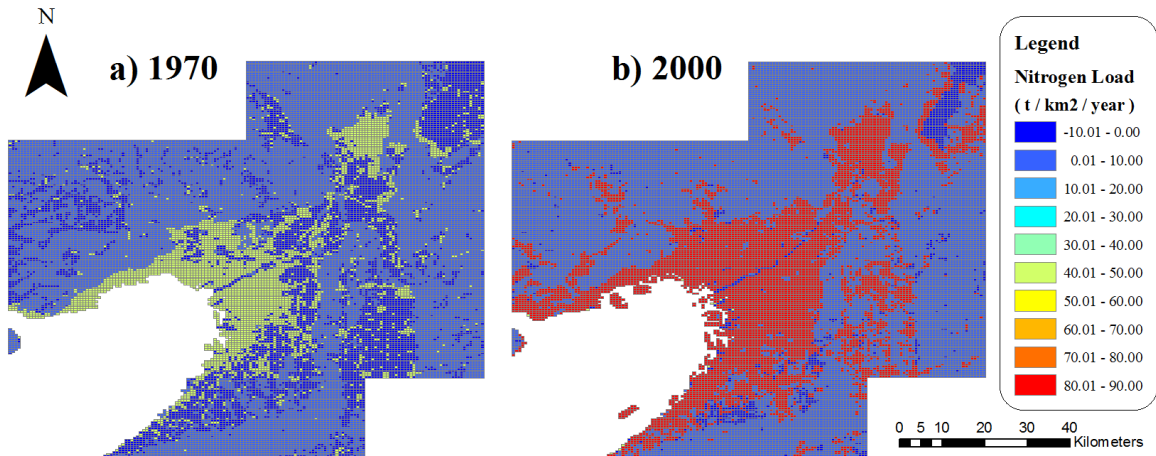


図3 1970年及び2000年における窒素収支モデルで見積もられた窒素負荷量の分布

示す。2000年では、平野中央部付近で1970年に比べて負荷量は倍に、さらにその範囲も拡大している。河川のCODやBOD濃度は、下水道の普及にともない最近30年間で改善されたものの、流域圏での負荷量は減少したとはいえない現状が確認できた。すなわち、河川への汚濁は改善されたとしても、下水に流入しない部分の負荷量、すなわち地下への負荷は存在していたことを考慮する必要がある。これは、昨年度の地下水中の硝酸性窒素濃度の測定結果において、地下水涵養域では環境基準 (10mg l^{-1}) に近い値を示す地点がみられたことと整合する。

3) 50年間の栄養塩フラックスの推定

図4は、50年平均での北部、南部、中央部における地下水流出域の平均栄養塩濃度及び等塩素イオン濃度線の分布を示す。この地下水中の塩分分布(塩素イオン濃度)から50年平均での地下水流出のパターンを3区分した。北部は、一部塩水の流入が確認され(平均2000ppm; 海水の1割)、1960年の揚水最盛期に地下水流出がストップしていたことが、中央部は、最も塩分が高く(平均6000ppm; 海水の3割)、地下水流出はほとんどなかったことが、南部は塩分が淡水レベル(平均100ppm; 海水の0.5%)で、常に地下水が流出していたと推定できた。昨年の成果によれば、現在の河川流出に対する地下水流出の割合は、4%であ

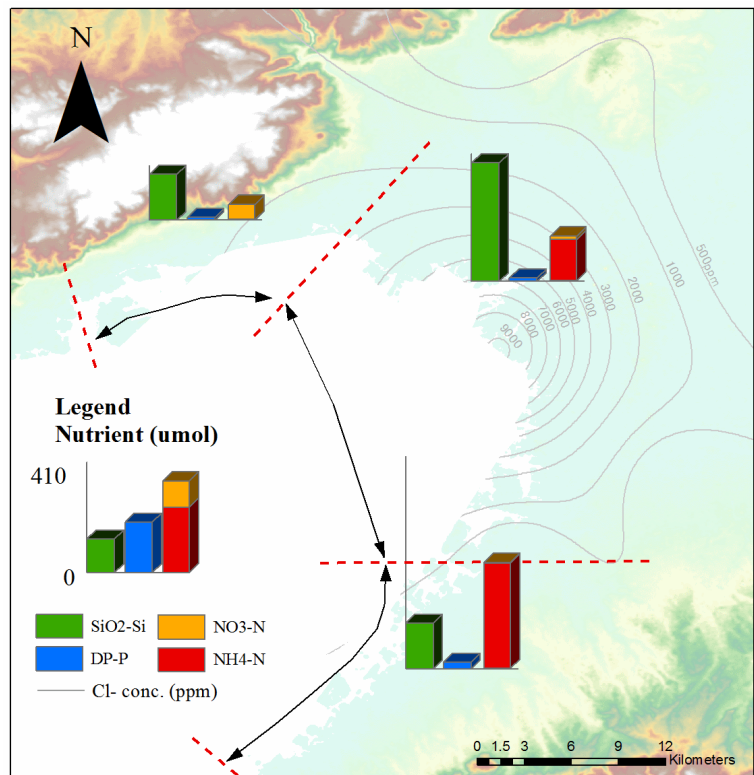


図4 地下水流出域(北部、南部)及び非流出域(中央部)の栄養塩平均濃度分布、及び塩素イオン濃度分布(等値線はppm単位)

ると見積もられたが、今から 50 年前から数 10 年間は 2%程度まで減少していたことが、また、それ以前の自然状態（およそ 80 年前）のころには、8%程度であったと推定される。

また、それぞれの地域における沿岸地下水中の平均的な栄養塩パターン（図 4）は、リンが地形地質を反映して中央部及び南部で高いことが、シリカが滞留時間を反映して中央部で高いことが、溶存窒素については、北部のみ硝酸性窒素がわずかに検出されているが、ほとんどの形態はアンモニア性窒素であることが示された。昨年度の結果から、リンの供給という点では、現在においても地下水の役割は大きい。80 年前の自然状態にあった時代には、よりリンの供給が多く、河川流出とほぼ同等であったことが推定される。一方、地下水低下最盛期（50 年前）には、現在の半分であったと推定され、よりリンの供給が少なかったものと考えられる。その一方で、河川による汚濁物質の供給は現在より多く、それによる供給が地下水の減少分を補っていたものと推定される。

また、中央部の涵養年代（図 2）をみると、海岸線からの距離に比例していないこと、深度 30m と深度 60m の地下水における差も明瞭ではないことがわかる。すなわち、平均して地表付近から地下水涵養が鉛直下方に向けて生じ、内部でよく混合していると考えられる。地表付近には河川網が存在し、そこに塩水遡上によって侵入した塩水が、揚水にともなう地下水位の低下に合わせて、地表付近から一様に吸い込まれたと考えるのが適当であろう。ここで、60m の地下水層がおおよそ 40 年間で置き換わったと仮定すれば、その侵入速度は 1 年で 1.5m、地下水フラックスは間隙率を 10% とすれば 1 年で 150mm と見積もられる。この値は、通常の山地涵養域での涵養量（300mm～600mm）に比べると小さいが、深部地下水への涵養という点では非常に大きい。

以上の値に従って栄養塩も流入したと考ええると、特に、水質汚濁期（1970 年前後）に河川中に含まれていたと考えられる硝酸性窒素に関しては、現在の地下水中には検出されていないことから、地下水中で微生物分解（脱窒）によって消失したと考えられる。河川流量が降水量の 50%（600mm）、地下水を吸い込んでいたとするエリアを河川流域の 10% とすると、地下水への吸い込みにもなう浄化量は、地表の河川を流下する窒素量の数%に及ぶと見積もられた。

4) 河川からの栄養塩流出量の見積もりに向けて

本研究の枠組みでは、大阪平野の流域において、観測地点における水流出量が再現できただけである。ただし、広島県の流域では、20 年間の栄養塩流出の再現に成功しているため、今後、大阪でも長期の評価を行っていく予定である。

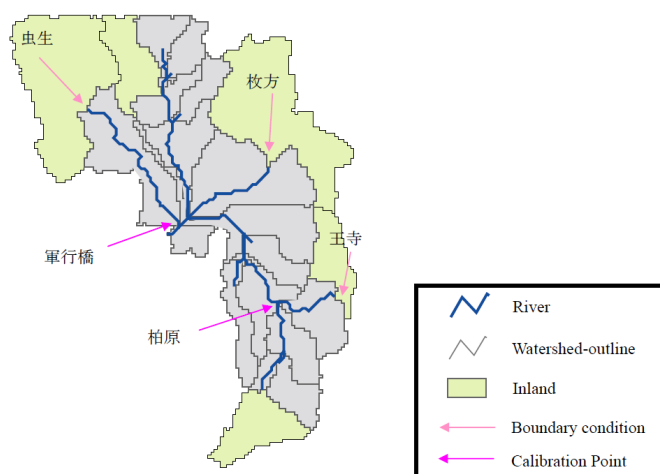


図 5 大阪平野における SWAT モデルの適用範囲