

1. 研究の背景と目的

現在，乾燥地域を中心に地球上では砂漠化が急速に進行している．UNEP(United Nations Environment Programme)によると，100カ国で10億人もの人が土地の劣化の影響を受け，世界中の陸地の3分の1が砂漠化の影響に見舞われているとしている[1]．また，人口増加も著しく，2040年代には世界の人口は90億人に達すると予想されている[2]．人口増加に伴って食糧増産のための農地開発による土壌の劣化や水需要量の増加などの問題が発生するため，特に乾燥地において人口増加は大きな問題となっている．乾燥地におけるこれらの問題に対処するためには，淡水資源を確保していくことが必要であるが，乾燥地ではすでに地表水・降水等の利用は高度に進められていると考えられ，また，海水淡水化は経済的な面からの課題が多い．地下水に関しても利用が進められているが，乾燥地の地下水は現在の水循環系とは独立したものである場合が多く[3]，持続可能な地下水利用ができない枯渇型資源となっている場合があり，問題が残されている．

本研究では，地下水流動シミュレーションを用いて乾燥地において貯水池周辺で適切な量の揚水を行うことで枯渇型の資源ととらえられる地下水ではなく，貯水池から涵養している地下水のみを利用することが可能であるか，揚水量と涵養量の関係から評価を行う．また，揚水を行うことで水位が下がり動水勾配が大きくなり，涵養量が増加する誘発涵養[図1]の効果について涵養量や揚水する位置による違いの評価を行う．

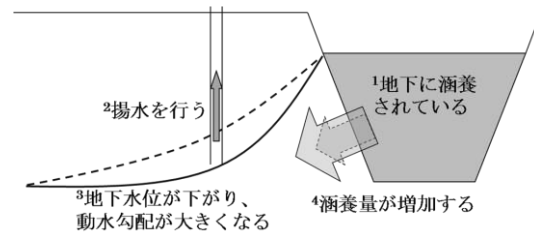


図1 誘発涵養のイメージ

地下水の混合比の推定を，酸素水素安定同位体比を用いて行う．酸素および水素の安定同位体(^{18}O および ^2H または D)の存在量の変化量は非常に小さく，基準となる値(^{16}O および ^1H)との相対比(δ 値)を千分率で表す[4]． δ 値は式(1)で表される． R_x および R_{standard} は D/H または $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の観測値と基準値をそれぞれ表し， δ_x は δD または $\delta ^{18}\text{O}$ を表す． A の水と B の水が $x:(1-x)$ の比率で混じっているとすると， x は式(2)で求められる．ここで， δ_{obs} : δ 値の観測値， δ_A, δ_B : 混合している二種類の水の δ 値である．

$$\delta_x = (R_x/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000 \quad (1) \quad x = (\delta_{\text{obs}} - \delta_B)/(\delta_A - \delta_B) \quad (2)$$

数値解析には DHI 社の FEFLOW を用いる．FEFLOW は式(3)~(5)で表される地下水流動や物質移行に関する構成方程式を解く[5]．ここで， h : 水頭， S_0 : 比貯留係数， q_i : 各方向の流速成分， Q_p : 質量増分， K_{ij} : 透水係数テンソル， ε : 間隙率， R : 遅延係数， C : 濃度， D_{ij} : 分散係数テンソル， \mathcal{G} : 減衰係数， Q_c : 濃度増分を表す．

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = Q_p \quad (3) \quad q_i = -K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon R C) + \frac{\partial}{\partial x_i} (q_i C) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \varepsilon R \mathcal{G} C = Q_c \quad (5)$$

2. 研究地域

本研究ではエジプト南部に存在するナセル湖周辺を研究対象地域とする．ナセル湖は

1960年代のアスワンハイダム建設によってナイル川途中に誕生した人造湖であり[6], エジプトは平均の降水量が年間30mmにも満たない乾燥地域である[7]. 現在の水供給量は年間645億 m^3 で, そのうち555億 m^3 をアスワンハイダムからの取水に頼っている[6]. この量は隣国のスーダンとの条約によって定められた量であり, 増やすことはできない[6]. また, エジプトでは人口増加が著しく, 2050

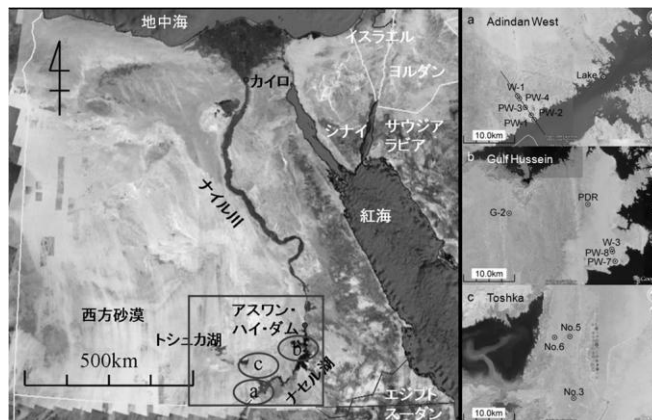


図2 研究地域と各地域の観測井の位置

年には現在の1.5倍に当たる1.2億人に達すると予測されている[2]. ナセル湖周辺では湖水を利用した大規模灌漑計画(Toshka計画)が進められているが[8], 蒸発によってかなりの量の水が失われることが考えられる. 灌漑による開発では水路を通してビルハルツ住血吸虫の被害が広がることも考えられるが[9], 地下では中間宿主である巻貝類が生息できず[10], 被害の拡大を抑えることも期待される. 図2に研究地域の位置と, 各地域に位置する観測用の井戸の位置を示す.

エジプトの帯水層はヌビア帯水層と呼ばれている. ヌビア帯水層は大まかには閉ざされたシステムと考えることができる. 数万年前, サハラ砂漠が湿潤だった時期に涵養された地下水が蓄えられており, 現在の涵養量は非常に小さい[11]. そのため, 計画的な揚水を行わないと地下水を枯渇させる恐れがある.

3. 観測データ解析

現地調査によって得られたAdindan地域の井戸水とPattersonら[12]による化石地下水の酸素水素安定同位体比は図3に示されるようになる. W-1の井戸水は化石地下水と同程度の同位体比であり, W-1で得られた地下水と湖水が混合しているものとして, 湖水の混合比を求めると表1のようになる. トリチウム濃度は図4のようになり, 湖に近い井戸ほど高い値を示しており, 湖水が涵養していることを示している.

	$\delta^{18}O$	δD	混合比 ($\delta^{18}O$ より)	混合比 (δD より)
Lake	-0.56	5.22	5%	-6%
PW-1	-3.19	-17.53	29%	21%
PW-2	-4.98	-38.03	46%	46%
PW-3	-5.76	-45.96	53%	56%
PW-4	-9.59	-77.10	88%	94%
W-1	-10.89	-82.24	100%	100%

表1 各井戸の δ 値と湖水の混合比

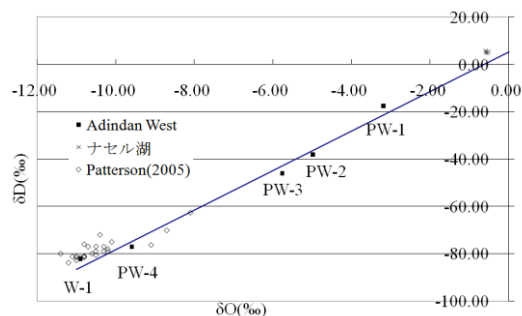


図3 Adindan地域と化石地下水の酸素水素安定同位体比

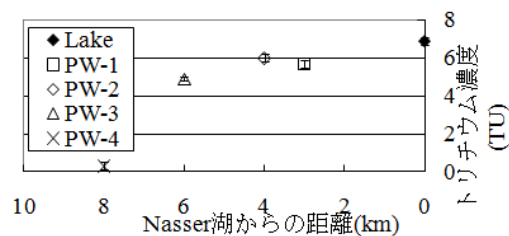


図4 各井戸のトリチウム濃度

4. 数値解析

4.1. Adindan地域の地下水流動

Adindan地域は, 湖に直交する方向に観測用の井戸が掘られており, また, 南北方向の

流れは非常に小さいため[11], そこで, 観測井にそって 2 次元断面モデルを作成する. 観測井の地下水位データより, ナセル湖完成前はナイル川に向かって地下水が流れていたことが分かっている[13]. モデルの概要を図 5 に示す. 東側境界は湖の水位変動を, 降水がほとんどないため上側境界は流量 0 を与え, 西側境界には初期水位分布を支えるだけの一定流量を与える. また, 難透水性の層が分布しているため, -42m (amsl)において下側境界として流量 0 を与える.

フィッティングパラメータとして透水係数, 比貯留係数, 間隙率があげられるが, 文献値からある程度値の範囲を決めてシミュレーションを行い, 観測値とのフィッティングの具合を確かめる. その結果, 透水係数: $9.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$, 比貯留係数: $1.5 \times 10^{-6} \text{m}^{-1}$, 間隙率: 20% の場合がよく観測値とあっており, この値を利用して次の揚水量計算を行う[図 6].

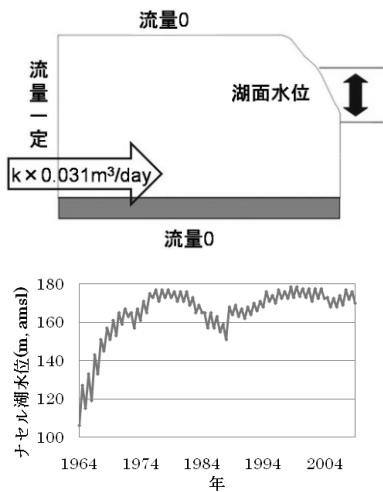


図 5 モデルの概要(上)と東側境界の湖水位変動(下)

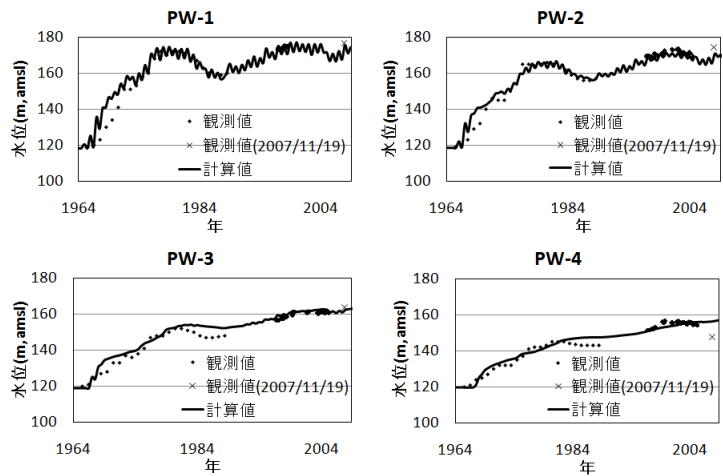


図 6 得られた物性値における計算値と観測値の比較

図 7 に, 湖の中央から 10km 離れた地点で揚水を行う場合(左)と 20km 離れた地点で揚水を行う場合(中央)の結果, そして 10km 離れた地点で, 揚水量と涵養量がつりあう年間単位奥行き当たり 3400m^3 の揚水を行う場合の地下水位(右)を示す.

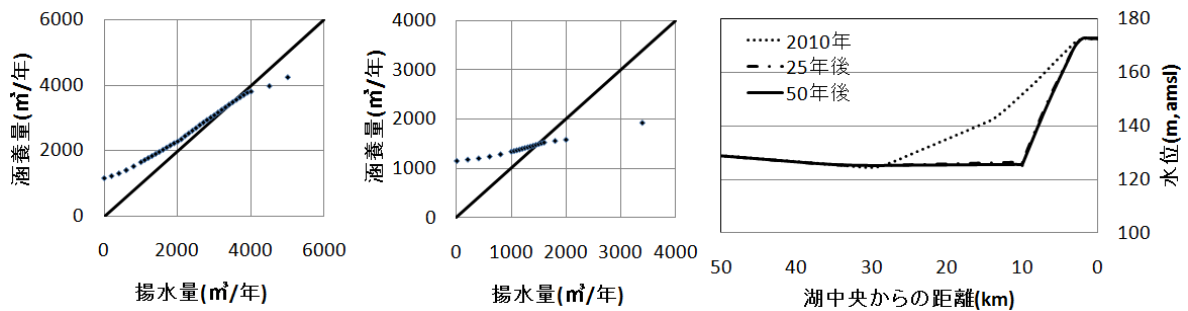


図 7 揚水を行う場合の揚水量と涵養量の関係および地下水位分布

4.2. 酸素水素同位体比による混合比推定

FEFLOW を用いて酸素水素安定同位体比による混合比の推定を行う. 初期条件として地下水に化石地下水の濃度を与え, 湖側の節点に境界条件として湖水濃度を与える. その二つの濃度と計算結果から式(2)を用いて混合比 x を求める. また, 分散長は Neuman が求めたモデルスケールと分散長の関係式[14]から約 2500m を得, これをもとにいくつか値を振って観測値と比較する. さらに, 1. 現地の地層の状況から想定されるため異方性を与える, 2. 地下水からの流出濃度をその時の節点の濃度にする, という条件も含めて計算

を行う。その結果を表 1 に、また、ケース 5 のときの深さ方向への混合比を図 8 に示す。

	観測値	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
透水係数($\times 10^{-5}$ m/s)	-	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
縦分散長(m)	-	2500	1500	100	1500	1500
横分散長(m)	-	25	15	10	15	15
分子拡散係数($\times 10^{-9}$ m ² /s)	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
異方性(最小/最大)	-	1.0	1.0	1.0	0.2	1.0
流出濃度条件	-	×	×	×	×	○
PW-1	74%-75%	96.8%	96.7%	98.2%	96.1%	94.0%
PW-2	51%-57%	82.4%	81.0%	79.0%	80.8%	76.8%
PW-3	41%-50%	51.4%	44.3%	4.2%	45.2%	39.9%
PW-4	6%-13%	24.0%	15.2%	0.0%	15.2%	13.1%

表 2 湖水の混合比の計算結果

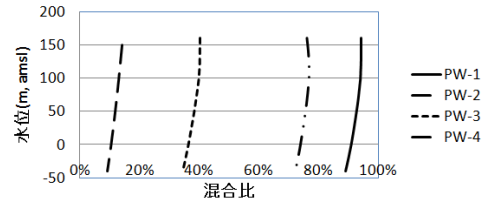


図 8 深度方向の混合比

5. 考察とまとめ

数値解析の結果、水位の観測値と計算値は比較的あっているが、酸素水素安定同位体比による湖水と地下水の混合比は特に湖に近い井戸において再現できなかった。井戸の標高・位置データや現地調査をもとに考えると、湖に最も近い井戸は水位が最高になるときに水平距離で 100m ほどまで水面が近付くことから 90% 湖水が混合している状況は妥当である。これは、湖水の同位体比を観測値が代表しているとし、値を固定して考えていることに問題があると考えられる。ナセル湖の源流である青ナイルと白ナイルの河川水の同位体比は異なっており[15]、季節によって流れ込む比率も異なる[16]。また、ナセル湖の水量 $1.6 \times 10^{11} \text{ m}^3$ に対して流量は $8.4 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{y}$ であり[15]、湖水の同位体比が年間で変動することが考えられる。よって、湖水と湖に近い井戸の年間を通した同位体比のデータをとることでより正確な混合過程を考えることができると考えられる。

一方、揚水を行うことで誘発涵養が起き、涵養量が増加することが示された。また、揚水する位置によってその値も変動することが分かった。二次元での検討であるため、量的な議論を行うことは余り適切ではないが、単位奥行き年間 3400 m^3 の揚水量をナセル湖全域で行うと年間 34 億 m^3 の揚水ができ、これは Toshka 計画による導水量に匹敵する[8]。

参考文献

- [1] UNEP, Global Deserts Outlook, 2006, 164p.
- [2] United Nations, <http://esa.un.org/unpp/index.asp>, (accessed 2009-11-05)
- [3] UNDP (United Nations Development Programme), Developing Renewable Groundwater Resources in Arid Lands; A Pilot Case- The Eastern Desert of Egypt, 2002.
- [4] Herczeg A.L., and Cook P., Environmental Tracers in Subsurface Hydrology, Kluwer Academic Publishers, 2000, 79-110.
- [5] Diersch, H.-J.G., WASY Software FEFLOW Reference Manual., 2005.
- [6] Frenken, K., Irrigation in Africa in figures AQUASTAT Survey, FAO WATER REPORTS, 2005.
- [7] 気象庁, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/monitor/nrmlist/Africa.html>, (accessed 2009-11-05).
- [8] UNEP, Impacts on Africa's Lakes Case Studies of Africa's Changing Lakes. Africa's Lakes Atlas of Our Changing environment, 2006, 32-37.
- [9] WHO, http://www.who.int/neglected_diseases/preventive_chemotherapy/sch/en/index.html, (accessed 2009-11-10).
- [10] 佐々木猛智, 貝の博物誌, 東京大学総合研究博物館, 2002, 196p.
- [11] Thorweihe, U. and Heintz, H., Groundwater Resources of the Nubian Aquifer System NE-Africa, 1998.
- [12] Patterson L.J., Sturchio, N.C., Kennedy, B.M.K. et al., An Electronic Journal of the Earth Sciences, 6, 1-19, 2005
- [13] Geostrazivanja Company. Supply and installation of 23 piezometers within the High Aswan Dam reservoir area, report to U.A.R. Minist. of the High Dam. 1965.
- [14] Neuman, S.P., Water Resources Research, 26, 8, 1749-1758, 1990.
- [15] Aly, A.I.M., Froehlich, K., Nada, A. et al, Environmental Geochemistry and Health, 15, 1, 37-49, 1993
- [16] Swain, A. The Journal of Modern African Studies, 35, 4, 675-694, 1997.