

# 沿岸域における地下水環境変遷状況の追跡技術

高本 尚彦 白石 知成  
(技術研究所) (技術研究所)

## Technology for Tracking Long-term Groundwater Changes in Coastal Areas

Naohiko Takamoto and Tomonari Shiraishi

沿岸域や海底下の地下水には、流れが遅い、あるいはほとんど動かない地下水が存在する場合があります。そのような地下水場の状態がどのように形成されたかを明らかにしていくことは、沿岸域の地下水環境の開発や保全においても重要である。本研究では、現在の場の状態の情報となる堆積物コアから抽出した間隙水の水質情報を、海水準変動や塩濃度変化、堆積物の堆積といった長期的な変遷を考慮した非定常の2次元断面地下水流動解析で再現することにより、過去から現在までに至る地下水環境への変遷状況を追跡する方法論の例示を行った。

Slower and stagnant groundwater may be present in coastal areas and under the seafloor. It is important for the development and conservation of the groundwater environment in coastal areas to clarify what gives rise to such slower and stagnant conditions. In this study, a two-dimensional unsteady groundwater flow simulation of a vertical cross section is carried out to investigate long-term variations such as changes in sea level, salinity and sedimentation. The simulation was able to replicate the quality of pore water extracted from a sediment core, therefore proving this methodology for tracking changes in the groundwater environment from past to present.

### 1. はじめに

沿岸域では都市の開発に伴って、地下水利用による地下水の塩水化や地下構造物による地下水流動の阻害などが問題となっている<sup>1),2),3)</sup>。一方で、沿岸域や海底下の地下水には、流れが遅い、あるいは長期間ほとんど動かない停滞性の地下水が存在する場合がある<sup>4),5)</sup>。このような地下水は、気候の変化、海水準変動といった自然現象の長期的な変遷の影響を受けて現在に至っていることとなり、複雑な地下水環境を示す場合もある。沿岸域における地下構造物の建設に伴う地下水環境の開発・保全のためには、地下水環境の実態把握や評価が非常に重要であり、現在の地下水場の状態がどのように形成されたかを明らかにしていくことは重要なこととなる。

本研究では、地下水流動が活発でない難透水性堆積物が堆積した地域を例として、現在の場の状態の情報となる堆積物コアから抽出した間隙水の水質情報を、海水準変動や塩濃度変化、堆積物の堆積といった長期的な変遷を考慮した非定常の地下水流動解析で再現することにより、過去から現在までに至る地下水環境への変遷状況を追跡する

方法論の例示を行うとともに、対象地域の地下水環境の実態把握を行った。

### 2. 研究対象地域の概要

本研究では、難透水性の粘土・シルト質堆積物が広範囲に厚く堆積している茨城県南部に位置する霞ヶ浦を対象とした(図-1)。

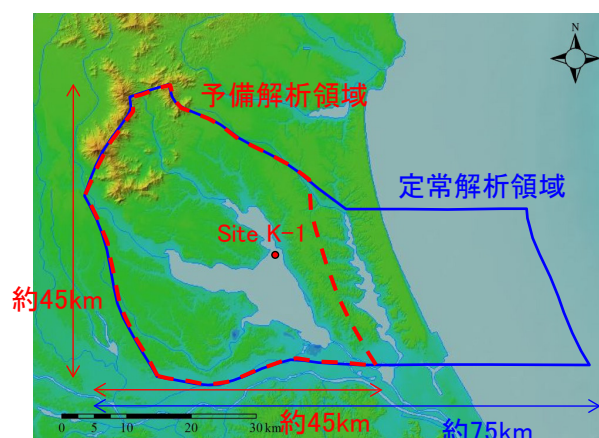


図-1 研究対象地域および解析領域

霞ヶ浦は日本第2位の広さを持つ淡水湖であるが、低鹹汽水・淡水化したのは西暦1400～1600年頃で、

湖底の粘土・シルト質堆積物のほとんどが海成の堆積物であり、海水準変動の影響を強く受けている<sup>6)</sup>。霞ヶ浦では、約1万年前の海水準はE.L.(Elevation Level)-36m付近であり、その後海水準の急激な上昇に伴い堆積物の堆積が進み、海水準は約6500年前～5500年前にE.L.+3m付近となった<sup>7)</sup>。そしてこの時期が完新世の最高海水準となり、この時期以降は海水準が徐々に低下し、現在に至っている。

このような海進・海退期の影響を受け形成された霞ヶ浦湖底の粘土・シルト質堆積物を対象に、図-1に示す湖奥に位置するSiteK-1地点(掘削深度15.25m、水深6.6m)にてオールコアボーリングを実施し、粘土層中の貝類・有機物の放射性炭素年代、珪藻化石、コアから抽出した間隙水の溶存イオンの分析結果を既往調査で得ている<sup>8)</sup>。SiteK-1地点におけるコア間隙水の溶存イオンの分析結果のうち、海水の主成分であるCl<sup>-</sup>濃度とNa<sup>+</sup>濃度の深度プロファイルを図-2に示す。間隙水の溶存イオン濃度は深度が深くなるにつれて高くなり、深度約1～2m以深では現在の霞ヶ浦の湖水や周辺の地下水の値より高くなっていった。このことから、間隙水は明らかに現在の周辺地下水とは異なる水であり、コア間隙水には堆積物が堆積した当時の湖に存在していた汽水が現在においても保存されていると考えられた。このコア間隙水の深度プロファイルを、次章以降に示す地下水流動解析により再現することを試みた。

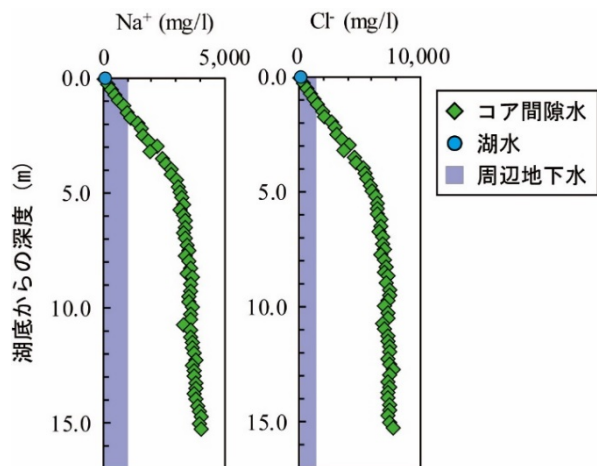


図-2 SiteK-1地点におけるコア間隙水中のCl<sup>-</sup>濃度、Na<sup>+</sup>濃度の深度プロファイル

### 3. 地下水流動解析の概要

#### 3.1 解析手法

霞ヶ浦湖底の粘土・シルト質堆積物は、上述したように海水準変動に伴う長期的な変遷の影響を強く受けていると考えられる。従って、霞ヶ浦における

海水準変動、塩濃度変化、堆積物の堆積過程といった変遷を考慮した非定常の地下水流動解析を行うこととした。なお霞ヶ浦は過去1万年間において沈降部となっているが<sup>7)</sup>、霞ヶ浦の沈降量や沈降速度が不明のため、堆積過程のみを考慮して解析を行うこととする。

霞ヶ浦の湖底堆積物の間隙中には比較的高い塩濃度が検出されていることから、塩濃度の密度が地下水流動に影響を与えていると考えられる。従って、密度勾配を考慮した飽和浸透流・移流分散の解析を実施するために、岡山大学西垣名誉教授、三菱マテリアル(株)、(株)ダイヤコンサルタント共同開発のDtransu-3D・EL<sup>9)</sup>を用いて解析を行った。本コードは密度勾配を考慮した飽和・不飽和浸透流及び移流・分散問題を対象とした解析コードである。

間隙水の深度プロファイルを再現するには、3次元の非定常解析を行う必要がある。しかし、湖内における塩濃度変化や堆積物の堆積速度の3次元情報が不足していることから、後述する解析の境界条件等の設定の観点から3次元モデルによる解析は難しい。従って、本研究では2次元鉛直断面による解析を行うこととした。ただし、3次元モデルと2次元鉛直断面モデルでの予備解析(仮想の同じ解析条件を使用した解析)を行うことで、2次元鉛直断面での解析による再現で問題がないかの事前検討も行うこととした。

#### 3.2 解析モデル・物性値

解析モデルは、側方の境界条件の影響が調査地点の地下水流動に直接的に影響しないようにする必要があるが、モデル領域が大きくなると、海域の海水準変動等を考慮する必要が出てくることから、非定常解析における計算効率が悪くなる。そこで、予備解析と2次元鉛直断面解析における境界条件を抽出するための定常解析用の解析モデルとして、霞ヶ浦流域のほぼ全流域となる南北約45km、東西約75kmの領域で広域の3次元メッシュモデルを作成した(図-1、図-3)。

そして、予備解析に使用する3次元モデルは、広域の3次元定常解析モデルから霞ヶ浦東側の尾根付近より西側の南北約45km、東西約45kmの領域を抽出したモデルを使用した(図-1、図-3、節点数:269280、要素数:255192)。水平方向のメッシュ長は約150m～1,500mでSiteK-1地点付近のメッシュ長が小さくなるようにした。また鉛直方向はE.L.-1kmまでをモデル化し、コア間隙水から得られた深度プロファイルと比較するために、メッシュ

長は G.L.(Ground Level)-30m までを 2m メッシュとし、それ以深は G.L.-30m~E.L.-100m までを約 20~100m メッシュ、E.L.-100~-1,000m までを 100m メッシュとした。

2 次元鉛直断面モデルについては、SiteK-1 地点の東西断面を解析断面に設定した(図-3、節点数：13660、要素数：10416)。

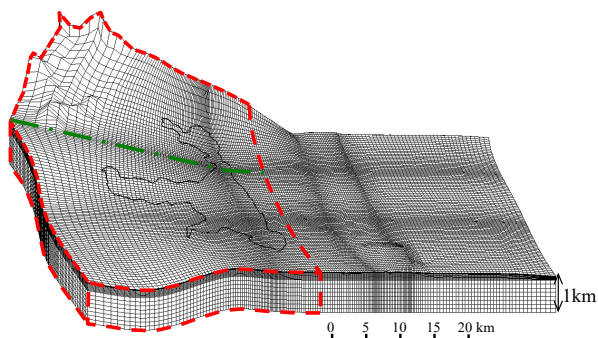


図-3 3次元有限要素メッシュモデル

モデル化した領域内の地質を既往文献<sup>6),10),15)</sup>に基づいて区分した(図-4)。なお、図-4に示す水理地質断面図(A-A'断面)は、SiteK-1 地点における湖水域周辺の E.L.-200m までを示している。

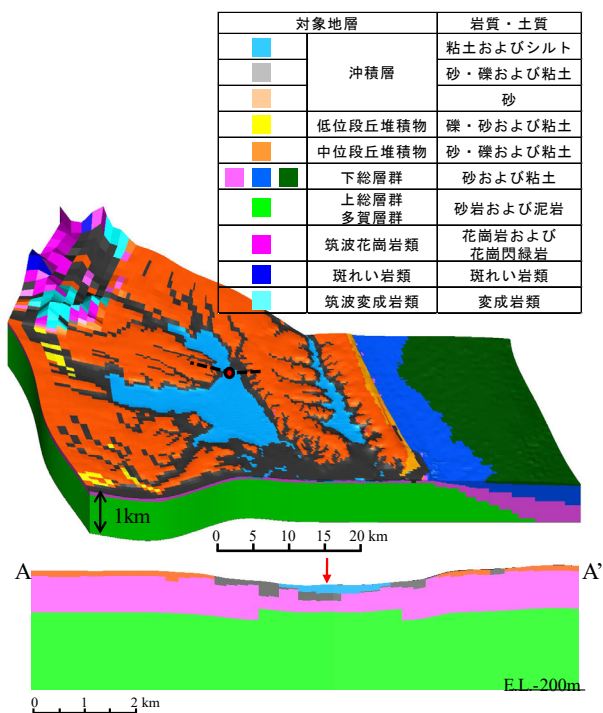


図-4 3次元水理地質構造モデル

解析に使用する物性値は、既往文献<sup>16)-21)</sup>を基に表-1に示した値を初期値として設定した。なお、分子拡散係数に関しては、塩濃度でプロファイルの再現を評価することから、既往の文献<sup>22)</sup>を参考にして Cl<sup>-</sup>の値(2.03×10<sup>-9</sup>m<sup>2</sup>/s)を用いた。

表-1 初期物性値

対象地層	岩質・土質	透水係数 (m/s)	間隙率	比貯留 係数 (1/m)
沖積層	粘土およびシルト	4.0×10 <sup>-6</sup>	0.10	2.0×10 <sup>-3</sup>
	砂・礫および粘土	1.0×10 <sup>-4</sup>	0.15	1.0×10 <sup>-4</sup>
	砂	9.0×10 <sup>-5</sup>	0.30	2.0×10 <sup>-4</sup>
低位段丘堆積物	礫・砂および粘土	3.0×10 <sup>-5</sup>	0.15	1.0×10 <sup>-4</sup>
中位段丘堆積物	砂・礫および粘土	5.0×10 <sup>-4</sup>	0.15	1.0×10 <sup>-4</sup>
下総層群	砂および粘土	2.0×10 <sup>-4</sup>	0.15	2.0×10 <sup>-4</sup>
上総層群 多質層群	砂岩および泥岩	2.0×10 <sup>-5</sup>	0.03	3.3×10 <sup>-6</sup>
筑波花崗岩類	花崗岩および 花崗閃緑岩	3.0×10 <sup>-7</sup>	0.05	3.3×10 <sup>-6</sup>
斑れい岩類	斑れい岩類	3.0×10 <sup>-7</sup>	0.01	3.3×10 <sup>-6</sup>
筑波変成岩類	変成岩類	3.0×10 <sup>-7</sup>	0.008	3.3×10 <sup>-6</sup>

## 4. 非定常予備解析

### 4.1 解析条件

深度プロファイルを再現するための長期的な変遷を考慮した非定常解析を行う際に、2次元鉛直断面での解析による再現で問題がないかを把握するため、非定常の予備解析を行った。予備解析では、霞ヶ浦東側の尾根付近より西側を抽出した3次元モデルと2次元鉛直断面モデル(図-3)で実施して、解析結果の比較を行った。

予備解析では堆積過程は考慮せず、仮想として、現在の湖盆地形において海水準が上昇し、湖水域に海水が浸入する過程の解析を行った。初期条件は、水頭に関しては定常解析結果を用い、濃度に関してはゼロとした。境界条件は表-2のように設定した。

表-2 非定常予備解析における境界条件

境界	設定条件
上部境界(湖水域)	水位変化(0m→3m) 濃度変化(c/c <sub>0</sub> =0→1)
上部境界(陸域)	水頭固定(地表面標高) 濃度固定(c/c <sub>0</sub> =0)
側方境界(東)	水頭固定(定常解析結果)
側方境界(その他)	不透水
下部境界	不透水

陸域の上部境界に関しては地下水面が不明なため地表面標高の水頭固定、濃度ゼロとなる濃度固定とし、湖水域の上部境界は図-5に示すように、水位変化、濃度変化境界とした。また塩濃度は現海水と同じ濃度 c<sub>0</sub>を湖水域全域に与え、解析結果はその濃度で除した海水の混合率(c/c<sub>0</sub>)で示した。東側の側方境界は、広域の定常解析結果に基づく水頭固定とし、東側以外の側方境界および下部境界は不透水境界とした。また解析期間も仮想として設定したが、



3次元解析に時間を要したため1400年間までとした。なお、解析における計算単位は年である。

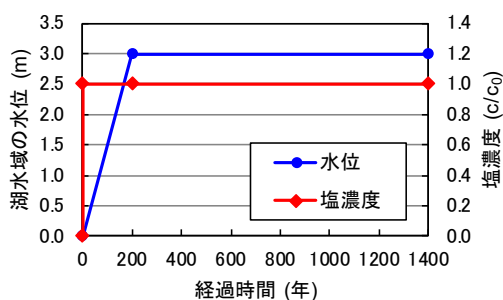


図-5 非定常予備解析における湖水域の水位変化・塩濃度変化の境界条件

## 4.2 解析結果および考察

1400年後の3次元および鉛直2次元の非定常予備解析比較結果を図-6に示す。なお、図-6に示す全水頭は淡水換算の全水頭で、断面図は図-4に示すA-A'断面と同じ断面で、全解析領域から湖水域周辺のE.L.-200mまでを示した図である。

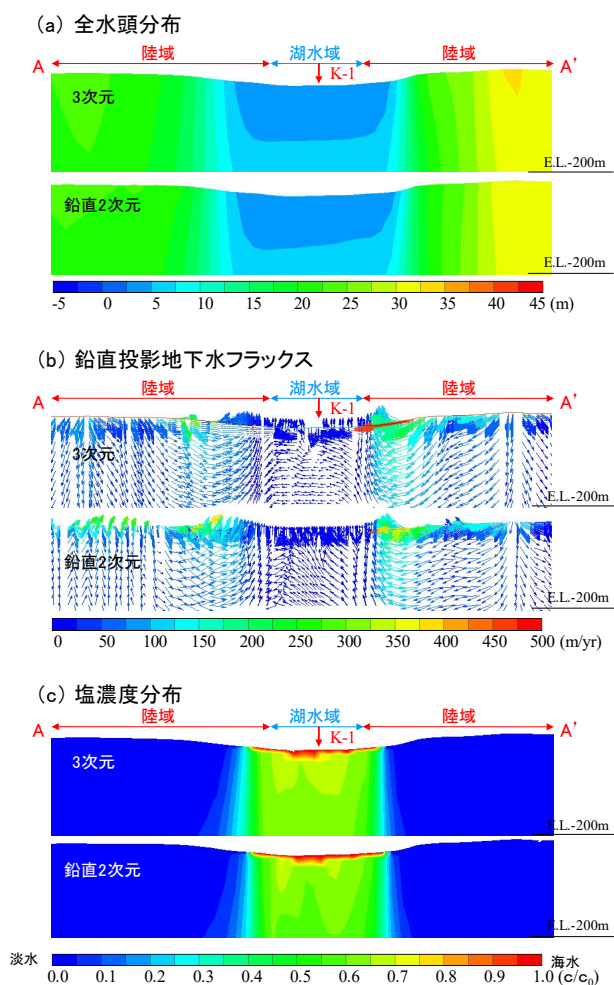


図-6 東西断面における1400年後の3次元および鉛直2次元の非定常予備解析比較結果

図-6に示すように、3次元モデルと2次元鉛直断面モデルの非定常予備解析の結果は、以下に述べるように大局的には同様な傾向であった。

全水頭分布(図-6(a))は、湖水域で水頭が低く、湖周辺の陸域で高くなっており、霞ヶ浦の西側台地より東側の台地の方が水頭は高くなっている。一方で、湖水域の鉛直方向の全水頭分布は、湖水域の約E.L.-100m以浅では+2.5~5.0mの全水頭、その周囲は5.0~7.5mの全水頭となっており、密度差を考慮しなければ周囲から水が流れてきて、湖水域の深部では上向き流れが生じているといえる。この全水頭分布に逆らって、密度差により海水が浸入していくことが鉛直投影地下水フラックスや塩濃度分布から分かる。

鉛直投影地下水フラックス(図-6(b))は、霞ヶ浦周辺では湖へ向かうフラックスが卓越し、陸域の方がフラックスは大きく、陸域における鉛直下向きの流れから湖岸付近に湧き出るような流れとなっている。一方、湖水域内の地下水フラックスについては、両解析結果で異なる傾向を示している。3次元解析結果では、SiteK-1地点付近以外の表層のフラックスは鉛直上向き流れとなっているが、SiteK-1地点付近のみ表層は鉛直下向きの流れが卓越している。それに対し2次元解析結果では、湖水域の表層のフラックスはいずれも鉛直上向きとなっている。またE.L.-40m以深では、3次元解析結果では概ね東から西向きへの水平流れへととなっている。これは東側台地の高い水頭の影響が表れていると考えられる。それに対し2次元解析結果では、3次元解析結果より上向き成分が増加している。また、湖水域内の粘土層の鉛直方向の地下水流速は、3次元解析結果では概ね $10^{-1}\text{m/y}$ ( $10^{-9}\text{m/s}$ )オーダーであったのに対し、2次元解析結果では概ね $10^0\text{m/y}$ ( $10^{-8}\text{m/s}$ )オーダーと3次元解析結果よりも大きくなっている。これらの解析結果の違いから、2次元解析結果では3次元解析結果に比べ、解析結果を過大に評価している可能性がある。

塩濃度分布は(図-6(c))、SiteK-1地点付近が最も海水が鉛直方向に入り込んでおり、E.L.-30m付近で $c/c_0=0.7$ 程度となっている。それ以深ではSiteK-1地点周辺の方が深部まで海水が入り込んでおり、広い範囲で $c/c_0=0.5\sim 0.7$ となっている。

また、SiteK-1地点における深度35mまでの3次元と2次元鉛直断面の非定常予備解析における圧力水頭と塩濃度の比較結果を図-7に示す。

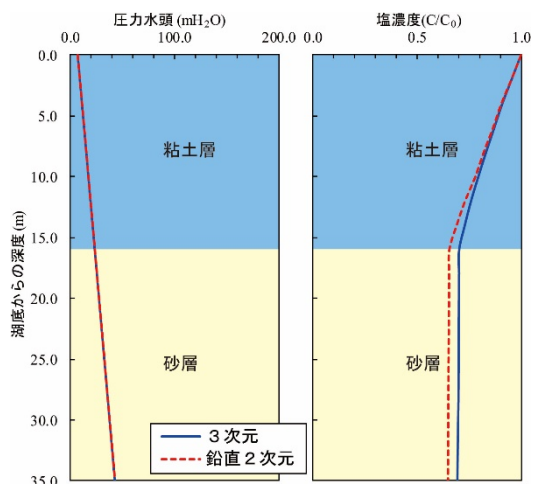


図-7 SiteK-1 地点における 3次元および鉛直 2次元の非定常予備解析比較結果

図-7より SiteK-1 地点における予備解析の両結果は、圧力水頭に関しては全く同じ結果となり、ほぼ静水圧に近い分布となっている。一方、塩濃度に関しては、深部の砂層に向かうほど塩濃度の差が大きくなり、2次元鉛直断面解析結果の方が僅かに塩濃度は低くなった。2次元解析では3次元の質量保存を保証しないため、この違いは前述したように、2次元解析結果において解析結果を過大に評価していることが原因と考えられる。しかし塩濃度に関しては、絶対値に僅かな違いがあるものの、その傾向はほとんど同じであることから、長期的な変遷を考慮した非定常解析を東西の2次元鉛直断面で実施しても、深度プロファイルの再現に対して概ね問題ないと考えられる。

## 5. 2次元鉛直断面非定常解析

### 5.1 解析条件

前章の非定常の予備解析の結果、長期的な変遷を考慮した非定常解析を2次元鉛直断面で実施しても問題ないと考えられることから、ここでは霞ヶ浦における海水準変動、塩濃度変化、粘土・シルト質堆積物の堆積過程といった変遷を考慮した2次元鉛直断面での非定常解析を行った。本研究では、既往調査結果<sup>8)</sup>から得られた珪藻化石分析結果と堆積物中の貝類・有機物の放射性炭素年代の測定結果を基に、塩濃度変化と堆積物の堆積過程に関する長期変遷の条件を設定することとした。

解析期間は、ボーリング地点において海水が浸入した以降となる9000年前<sup>23)</sup>から現在までの9000年間とした。境界条件は表-3のように設定した。3次元定常解析において、境界条件の海域の海水準変

化の違いが、2次元鉛直断面東端節点の全水頭に与える影響がほとんどなかったことから、東側の側方境界は、広域の定常解析結果に基づく水頭固定とし、東側以外の側方境界および下部境界は不透水境界とした。ただし東側の側方境界に用いた3次元定常解析結果は、時間ステップ毎に堆積当時の湖水位で湖水域を水頭固定した3次元定常解析結果を使用した。また陸域の上部境界に関しては、時期によって地下水面が異なるような条件を設定することが妥当であるが、堆積当時の陸域の地下水面は不明であることから、陸域の上部境界は地表面標高の水頭固定とした。湖水域の上部境界は図-8に示すような水位変化、濃度変化境界とした。水位変化は、古奥東京湾地域における海水準変動曲線<sup>20)</sup>を基に設定した。塩濃度の変化は、前述したように既往調査の珪藻化石分析結果<sup>8)</sup>を基に設定している。珪藻は珪酸質(ガラス質)をふくむ細胞膜をもつ単細胞の藻類で、淡水から海水域を通じて水圏で最も繁栄しており、それらの化石を調べることにより過去の環境を知ることが可能となる。具体的な塩濃度の設定は、藻化石分析結果における海水種、汽水種、淡水種に分類した構成比のうち、海水-汽水種の構成比の変化状況を基に設定した。塩濃度の入力および出力は、現海水と同じ塩濃度 $c_0$ で除した海水の混合率 $(c/c_0)$ とした。なお初期条件は、水頭に関しては湖水域をE.L.-36m、陸域を地表面標高に水頭固定をした場合の3次元定常解析結果を用い、濃度に関してはゼロとした。

表-3 非定常2次元鉛直断面非定常解析における境界条件

境界	設定条件
上部境界(湖水域)	水位変化 濃度変化
上部境界(陸域)	水頭固定(地表面標高) 濃度固定( $C/C_0=0$ )
側方境界(東)	水頭固定(定常解析結果)
側方境界(その他)	不透水
下部境界	不透水

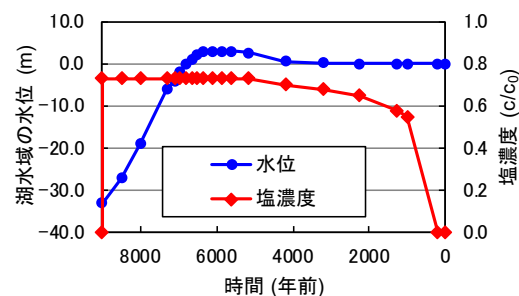
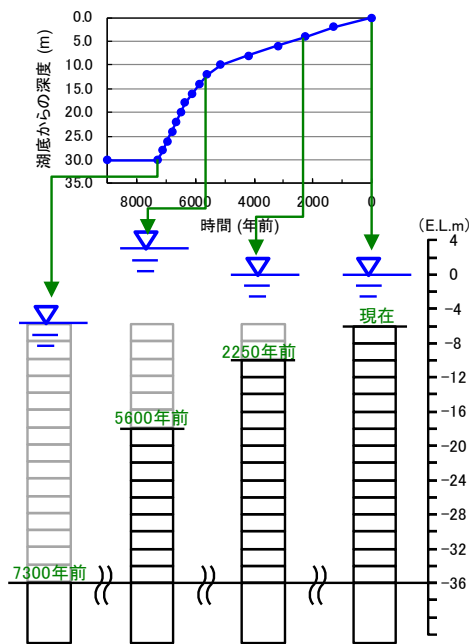


図-8 非定常2次元鉛直断面解析における湖水域の水位変化・塩濃度変化の境界条件

堆積過程に関しては、徐々に堆積していく過程をモデル化する必要があるが、本研究では解析モデルが G.L.-30m までを 2m メッシュとしていることから、湖域内の粘土・シルト質堆積物が 2m ずつ堆積させるように解析を行うこととする。実際にメッシュを堆積させて解析を行うのは難しいことから、**図-9** に示すように、予め現在の湖底まで存在するメッシュを作成しておき、堆積当時に堆積していた高さより上のメッシュの透水係数を高透水のメッシュ(水域)として扱うことで堆積過程を再現した。堆積物の堆積速度も既往調査の放射性炭素年代の結果<sup>9)</sup>を基に、**図-9** に示すような湖底深度と堆積年代の関係で、霞ヶ浦に海水が浸入した 9000 年前以降から、堆積物の厚さが 2m 分となる堆積期間で時間ステップを区切って、解析条件を変えながら解析を行った。具体的には、時間ステップを区切る前の最終解析結果の水頭および塩濃度を、次の時間ステップの解析における初期条件として与え、堆積物は圧密を考慮せず瞬時に 2m 分堆積するものと仮定し、次の時間ステップに対応する境界条件を用いて解析を行った。



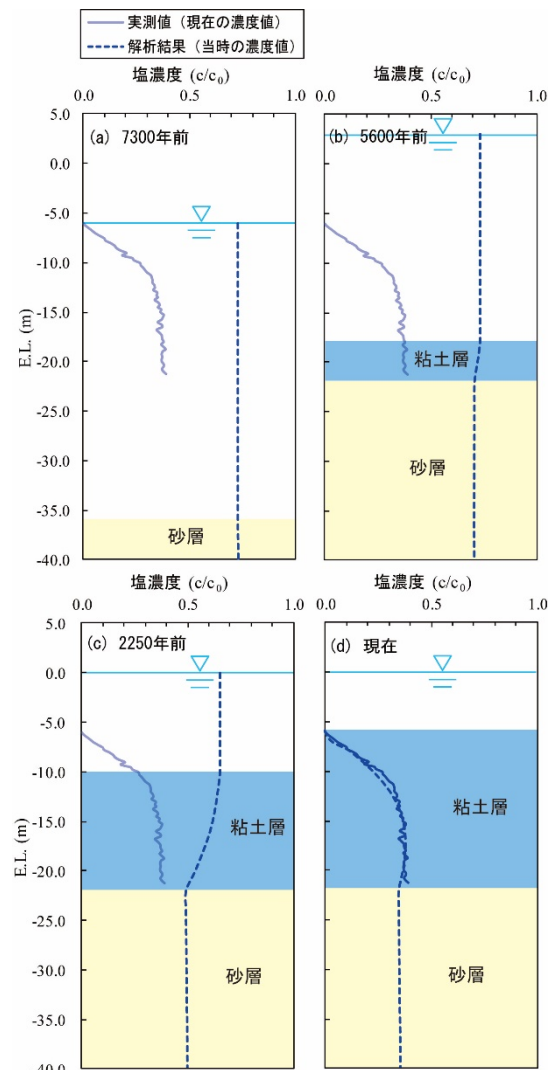
**図-9** 解析期間における湖底深度と堆積年代の関係および解析の堆積過程イメージ図

## 5.2 解析結果および考察

コア間隙水から得られた両地点における間隙水中の塩濃度プロファイルを再現するために、主として構成地層の透水係数をパラメータとして、既往文献<sup>16)・21)</sup>で示される透水係数の範囲内で変化させて、試行錯誤的に多くの解析を実施した。最終的に、沖

積層の粘土・シルト性堆積物( $4.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ )と上総層群の砂岩および泥岩( $2.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ )の地層の透水係数を小さく設定することで、実測濃度プロファイルに最も良く再現することに成功した。

SiteK-1 地点において最も良く再現できた 2 次元鉛直断面非定常解析結果の塩濃度プロファイルの経時変化を**図-10**に示す。なお図中には、その時代における湖水位と湖底堆積物の堆積している高さ及び実測された堆積層間隙水中の塩濃度プロファイルも示している。本研究のようなパラメータの同定を目的とした逆解析問題は、無数に解が存在し、本解析結果はある条件下での結果に基づいたものであるが、既往調査のプロファイルを概ね再現できたということは、その解析に用いた境界条件の塩濃度変化が対象期間における SiteK-1 地点の塩濃度の変遷状況を反映している可能性があると考えられる。



**図-10** 2次元鉛直断面非定常解析結果の SiteK-1 地点における塩濃度プロファイルの経時変化

7300年前(図-10(a))は、海水準が E.L.-6m で、湖底深度も E.L.-36m と水深が大きい環境であり、霞ヶ浦に海水が浸入した以降は、約 26%( $c/c_0=0.73$ )の塩濃度である当時の汽水が湖底堆積物中に浸入する状況が続いていたと考えられる。そして海進に伴い急速に堆積が進んでいく中で、汽水の浸入が海進最盛期に近い 6100 年前まで同様に続いていたと考えられる。5600 年前(図-10(b))になると、海水準が E.L.+3m まで上昇して、粘土層の堆積が始まり、湖底深度が E.L.-18m まで堆積が進んでいる。この時期における汽水中の塩濃度は引続き変化しないが、E.L.-22m 以浅の粘土層と E.L.-22m 以深の砂層で塩濃度の差が生じ、E.L.-22m 以深の砂層において塩濃度の低下が僅かに認められ、同様な状況が 5150 年前まで認められた。E.L.-22m 以深は砂層となっていることから、濃度拡散による濃度低下は生じていないため、この濃度低下は東側台地の高い水頭に起因する側方からの淡水地下水によるものであることが考えられる。その後、海水準が現在と同じレベルまで低下し、湖底深度も E.L.-10m まで堆積が進み、また汽水の塩濃度も約 23%( $c/c_0=0.65$ )まで低下した 2250 年前(図-10(c))には、E.L.-22m 以深の砂層において、5600 年前と比べて一様に塩濃度の低下が生じており、E.L.-22m 以浅は湖底に向かって濃度が増加するプロファイルとなっている。上述したように砂層においては濃度拡散による濃度低下は生じていないため、この濃度の様な低下も側方からの淡水地下水による希釈と考えられる。一方、E.L.-22m 以浅の粘土層においては、下方への濃度拡散によって濃度低下が生じていると考えられるが、解析結果の粘土層中の地下水は、鉛直上向きの流れが水平方向の流れより大きくなっていったことから、粘土層中では拡散だけでなく、淡水地下水によっても濃度が希釈されることで塩濃度が低下していたと考えられる。そして 2250 年前以降も淡水地下水によって堆積物中の濃度が低下しつつ、霞ヶ浦が徐々に淡水化したことにより、最終的には浅い深度に向かって濃度が減少するような現在のプロファイルとなったと想定される(図-10(d))。既往調査<sup>8)</sup>では、粘土層中の間隙水の端成分の1つである淡水地下水がいつの時代のものであるか不明であったが、本解析により、地下水は、現在の淡水地下水だけではなく、粘土層の堆積が始まった以降の淡水地下水であることが考えられる。

以上のように、長期変遷を考慮した非定常解析を行うことにより、現地調査の濃度プロファイルを再現できるだけでなく、上述したように過去約 9000

年間の地下水環境の変遷状況が明示でき、地下水環境の実態把握が可能となった。

## 6. おわりに

地下水流動が活発でない難透水性堆積物が堆積した霞ヶ浦の地域を例として、海水準変動、塩濃度変化、堆積物の堆積といった長期的な変遷を考慮した非定常の2次元鉛直断面地下水流動解析を行った。その結果、現在の場の状態の情報となる SiteK-1 地点の堆積物コアから抽出した間隙水の塩濃度プロファイルを概ね再現することができた。長期的な変遷を考慮した非定常の地下水流動解析を行う上で、既往調査で実施した珪藻化石分析結果と堆積物中の貝類・有機物の放射性炭素年代の測定結果は、解析条件における塩濃度変化と堆積物の堆積過程の重要な情報となり、それらの情報を解析で考慮することで、間隙水の塩濃度プロファイルを再現でき、より詳細な地下水環境の変遷状況の把握が可能となった。湖奥に位置し、湖岸に近い SiteK-1 地点では、陸域からの淡水地下水の影響を受けやすい環境であり、堆積時に地層内に取り込まれた汽水の塩分が、堆積後の湖水およびその周辺域の地下水環境の変遷を伴った地下水流動変化によって相応に洗い流されたと考えられる。

沿岸域のような塩淡水境界が存在するような環境においては、本研究で示してきたような調査結果に基づく解析技術を用いることによって、地下水環境の変遷状況の追跡と現在の地下水環境場の把握が可能となり、地下構造物の建設に伴う地下水環境の開発・保全において重要な情報を得ることが期待できる。

本研究では非定常の2次元鉛直断面地下水流動解析により地下水環境の変遷状況および実態の把握を試みたが、気候変化や陸域における地下水位変動(不飽和)などを考慮できていないことから、より現実に近い変遷状況を把握するためには、気象条件や陸域における地下水位変動が把握できた場合には、それらを考慮したモデルへと発展させる必要がある。またより厳密に地下水環境の変遷状況や実態を把握するためには3次元の非定常解析を行う必要がある。ただし、3次元の非定常解析を行うためには、3次元の塩濃度変化や堆積物の堆積過程の情報をより多く取得することが不可欠である。一方、地下水流動解析の対象となる地盤や岩盤は不均質で不確実性の高い媒体であることから、確からしさの検証については困難であると考えられる。また本研究の成果を基に、さらに将来予測につなげていくためには、



気候変化等の予測の妥当性の問題もあることから、今後の解析においては不確かさの幅を持って示していく必要がある。

## 謝辞

本研究の実施に当たり、熊本大学の嶋田純名誉教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科の徳永朋祥教授には多くのご助言・ご協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

## <参考文献>

- 1) 八谷陽一郎, 日野剛徳, 下山正一, 三浦哲彦: "白石平野における地下水塩水化メカニズム", 土木学会論文集, No.706/VII-23, pp.51-59, 2002
- 2) 小野昌彦, 本高雄大, 嶋田純, 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 利部慎, 工藤圭史: "沿岸域における地下水位の回復に伴う地下水塩水化現象の解明—熊本県荒尾市における事例—", 地下水学会誌, 56-3, pp.189-208, 2014
- 3) 高坂信章: "地下構造物による地下水流動阻害とその対策", 地盤工学会誌, 64-2, pp.6-9, 2016
- 4) 嶋田純: "環境同位体を利用した古水文情報の抽出", 日本水文科学会誌, 35-3, pp.103-110, 2005
- 5) Kriete, C., A. Suckow and B. Harazim: "Pleistocene meteoric pore water in dated marine sediment cores off Callao, Peru. Estuarine", Coastal and Shelf Science, 59, pp.499-510, 2004
- 6) 斎藤文紀, 井内美朗, 横田節哉: "霞ヶ浦の地史: 海水準変動に影響された沿岸湖沼環境変遷史", 地質学論集, 36, pp.103-118, 1990
- 7) 遠藤邦彦, 小杉正人, 松下まり子, 宮地直道, 菱田量, 高野司: "千葉県古流山湾周辺域における完新世の環境変遷史とその意義", 第四紀研究, 28-2, pp.67-77, 1989
- 8) 高本尚彦, 嶋田純, 徳永朋祥: "難透水性湖底堆積物コアの間隙水を用いた霞ヶ浦の完新世における古水文状況の復元", 地下水学会誌, 58-3, pp.273-288, 2016
- 9) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎: "飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析的手法に関する研究", 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.135-144, 1995
- 10) 坂本亨: "磯浜地域の地質", 地域地質研究報告, 5 万分の 1 地質図幅, 地質調査所, 55p, 1975
- 11) 坂本亨, 相原輝雄, 野間泰二: "石岡地域の地質", 地域地質研究報告, 5 万分の 1 地質図幅, 地質調査所, 50p, 1981
- 12) 宇野沢昭, 岡重文, 坂本亨, 駒澤正夫: "20 万分の 1 地質図幅「千葉」", 地質調査所, 1983
- 13) 奥田義久: "海洋地質図「鹿島灘海底地質図」(20 万分の 1)", 地質調査所, 1986
- 14) 宮崎一博, 笹田政克, 吉岡敏和: "真壁地域の地質", 地域地質研究報告, 5 万分の 1 地質図幅, 地質調査所, 103p, 1996
- 15) 吉岡敏和, 滝沢文教, 高橋雅紀, 宮崎一博, 坂野靖行, 柳沢幸夫, 高橋浩, 久保和也, 関陽児, 駒澤正夫, 広島俊男: "20 万分の 1 地質図幅「水戸」(第 2 版)", 地質調査所, 2001
- 16) 土質工学会: "岩の調査と試験", 540p, 1989
- 17) 土質工学会: "土質試験の方法と解説", 615p, 1990
- 18) 土木学会: "水理公式集", 713p, 1999
- 19) 才田進, 濱里学, 飯島康夫: "ルジオンテストと揚水試験による花崗岩岩盤の浸水性評価に関する考察", 地下空間シンポジウム論文・報告集, 土木学会地下空間研究委員会編, 12, pp.64-68, 2007
- 20) 久保田富次郎, 三浦理司, 高木強治, 松森堅治: "井戸調査と地質資料からみた恋瀬川流域の水理地質と地下水環境", 農林工学研究所技報, 207, pp.35-52, 2008
- 21) 越谷賢, 丸井敦尚: "つくば市周辺地域における三次元水文地質モデルの構築と帯水層の透水性の推定への適用", 地学雑誌, 121-3, pp.421-440, 2012
- 22) Ingebritsen, S. E., W. E. Sanford and C. E. Neuzil: "Groundwater in Geologic Processes, Second Edition", Cambridge University Press, 564p, 2006
- 23) 井内美朗, 斎藤文紀: "海跡湖の地史—3, 霞ヶ浦, アーバンクボタ, 32, pp.56-63, 1993