

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-22-0084_改0
提出年月日	2021年2月25日

VI-5-77 計算機プログラム（解析コード）の概要

- GETFLOWS

目 次

1. はじめに.....	1
1.1 使用状況一覧.....	2
2. 解析コードの概要.....	3
3. 解析手法について.....	4
3.1 一般事項.....	4
3.2 解析コードの特徴.....	4
3.3 数値解法.....	4
4. 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)	6
4.1 検証 (Verification)	6
4.1.1 室内変水位試験.....	6
4.1.2 揚水試験.....	11
4.1.3 地下水面の応答問題.....	16
4.2 妥当性確認 (Validation)	20
4.3 評価結果.....	20
5. 引用文献.....	21

1. はじめに

本資料は、添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）GETFLOWSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
VI-2-1-3	地盤の支持性能に係る基本方針	Ver. 6. 64. 0. 2

2. 解析コードの概要

項目 \ コード名	GETFLOWS
使用目的	浸透流解析
開発機関	(株) 地圏環境テクノロジー
開発時期	2019年 (初版開発時期 2000年)
使用したバージョン	Ver. 6.64.0.2
コードの概要	<p>GETFLOWS (General purpose Terrestrial fluid FLOW Simulator) は、陸域における流体流動、物質及び熱輸送挙動を解析する三次元汎用数値シミュレータである。本シミュレータは、等温、非等温状態における多相多成分流体システムを対象とし、実験室スケールから流域スケールの三次元問題を安定かつ高速に解くことが可能である。適用事例は、一般的な地下水解析、河川流出解析、洪水・はん濫解析、地表水・地下水の相互作用解析、汚染物質を含む移流分散解析など多岐に渡る。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証(Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは積分型有限差分法を用いた三次元汎用数値シミュレータであり、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の解析に広く利用されていることを確認している。 ・水-空気2相流解析の標準的問題を例に、理論解と解析結果を比較し、よく一致していることを確認している。 <p>【妥当性確認(Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは、土木、環境、資源、エネルギー、農林水産、災害・防災などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。

3. 解析手法について

3.1 一般事項

GETFLOWS は、様々な流体现象を評価するために非常に大規模な三次元非定常問題を高速で解析することを目的として開発されたものである。

3.2 解析コードの特徴

本シミュレーションは、地表流動および地下水流動について、統一的な数学モデルの下で同時に扱うことを可能にし、対象とする水循環系をより自然に捉えることを可能にした解析コードである。

主な適用分野は、ダム建設計画や貯水・湧水量予測などの「水資源問題」、重金属、農薬等による土壌・地下水汚染や放射性廃棄物の地層処分などに代表される「水環境問題」、洪水予測、豪雨時における斜面崩壊、土石流被害予測などの「水災害問題」である。

3.3 数値解法

空間離散化は、複雑な地形起伏や地盤物性分布を、三次元格子を用いてモデル化し、それぞれの格子体積および隣接格子間の絶対浸透率を正確に評価する。

三次元格子モデルの概念を図 3-1 に示す。格子システムは大別して役割の異なる 3 つの層（大気層、地表層、地下地盤層）から構成される。各層の概要を以下に示す。

地表層格子では河川や斜面を流れる地表水、湖沼・海洋の停留水を表現する。層流状態の空気相の流動も同時に考慮される。地表水の移動は地表面格子層に沿う浅水流として扱い、質量保存式と拡散波近似を適用した運動量保存式により記述される。場所による地表水の移動し易さの相違は土地利用や被覆状態に応じた等価粗度係数として考慮され、個々の格子に与えられる。また、地表層の間隙率は通常 1.0 であり、毛細管圧力 0 であるが、地下浸透・湧出においては疑似毛管効果が計算され、浸透・湧出が整合的に表現される。

地下地盤層を構成する格子は、一般化ダルシー則に従った多相多成分流体流動を表現する。個々の格子には地層の水理物性（間隙率、絶対浸透率、毛細管圧力、相対浸透率）を与え、流体相圧力と飽和率、濃度が状態量（未知量）として解かれる。

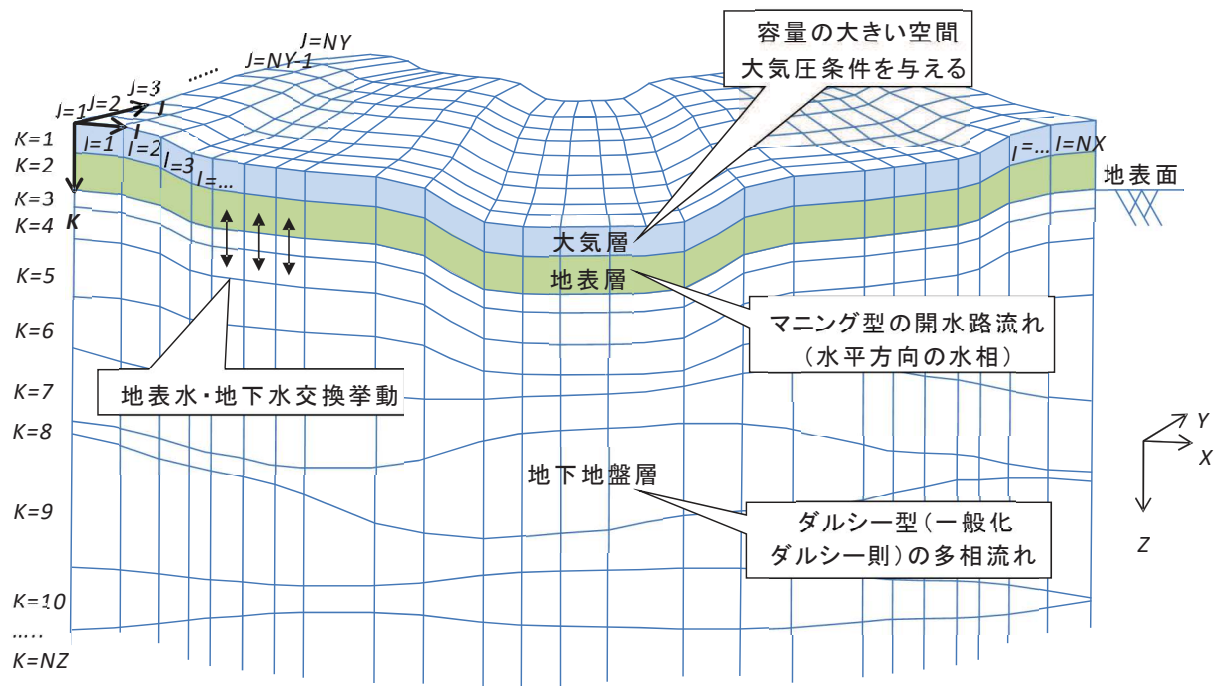


図 3-1 三次元格子モデルの概念

4. 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

4.1 検証 (Verification)

本解析コードの検証として、変水位試験における変水位の経時変化、揚水試験における被圧帯水層内圧力の経時変化、及び潮位変動問題における水位応答について解析を実施し、理論解と比較する。

4.1.1 室内変水位試験

(1) テストケース

変水位試験系の概念を図 4-1 に示す。断面積 $A[m^2]$ 、長さ $L[m]$ の試料の変水位試験系を対象とし、ある初期水頭差を与えた際の変水位の経時変化を求め、理論解と比較する。流出側は標準大気圧条件で定圧境界とする。

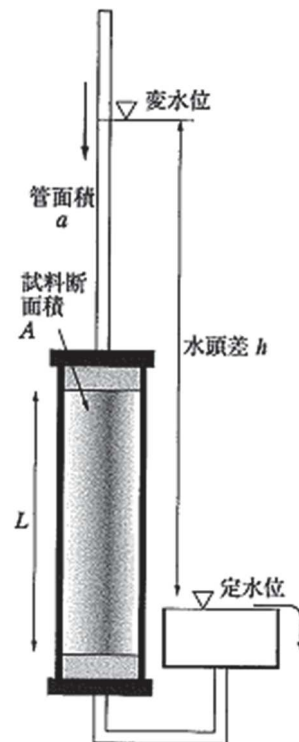


図 4-1 変水位試験系の概念

変水位試験系の水頭差 $h[m]$ の経時変化の理論解は次式によって与えられる。

$$\ln h = -\frac{kA}{aL}t + \ln h_0 \dots \dots \dots (4.1)$$

ここで、 k は透水係数 $[m/s]$ 、 A は試料断面積 $[m^2]$ 、 L はカラム長 $[m]$ 、 a はカラム上部の管面積 $[m^2]$ 、 h_0 は初期水頭差 $[m]$ である。

(2) 解析モデル

解析に用いる格子モデルを図 4-2 に、格子モデルの諸元を表 4-1 に示す。

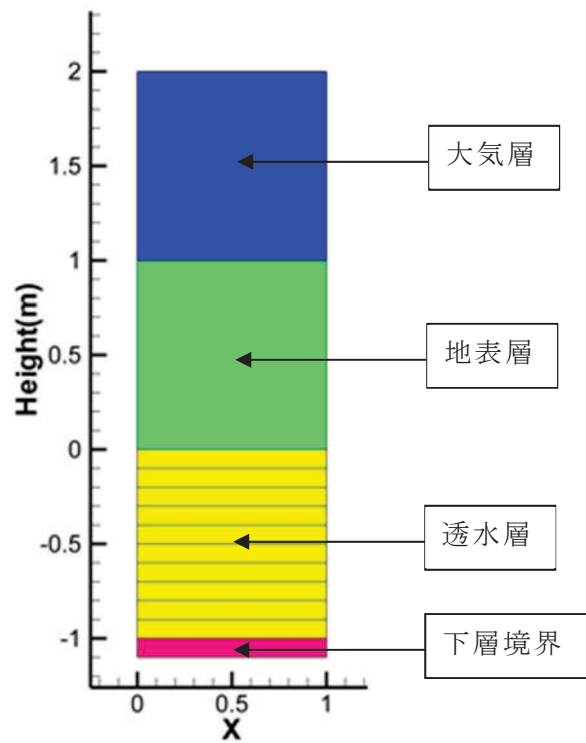


図 4-2 格子モデル

表 4-1 格子モデルの諸元

	記号	単位	設定値
格子数	NNBLK	[-]	13
X 方向分割数	NX	[-]	1
Y 方向分割数	NY	[-]	1
Z 方向分割数	NZ	[-]	13
カラム長	L	[m]	1.05
試料断面積	A	[m ²]	1
管断面積	a	[m ²]	1
重力加速度	g	[m/s ²]	9.80665

(3) 解析条件

解析に用いる条件について、流体物性を表 4-2 に、地層物性を表 4-3 に示す。また、ケース設定を表 4-4 に示す。

表 4-2 流体物性

	記号	単位	設定値
水相密度	ρ_w	[kg/m ³]	998.2
水相圧縮率	C_f	[1/Pa]	0
水相粘性係数	μ	[Pa・s]	1.002×10^{-3}

表 4-3 地層物性

	記号	単位	大気層	地表層	透水層	下層境界
密度	ρ	[kg/m ³]	2500	2500	2500	2500
間隙率	ϕ	[-]	1.0×10^{30}	1.0	0.3	1.0×10^{30}
絶対浸透率	K	[m ²]	9.87×10^{34}	9.87×10^{34}	1.00×10^{-12}	1.00×10^{-12}
圧縮率	C_r	[1/Pa]	0	0	0	0

表 4-4 ケース設定

	記号	単位	Case 1	Case 2	Case 3
初期水頭差	h_0	[m]	2.05	11.05	1.15

(4) 結果

Case1~Case3 における、解析結果と理論解の比較を図 4-3~図 4-5 に示す。

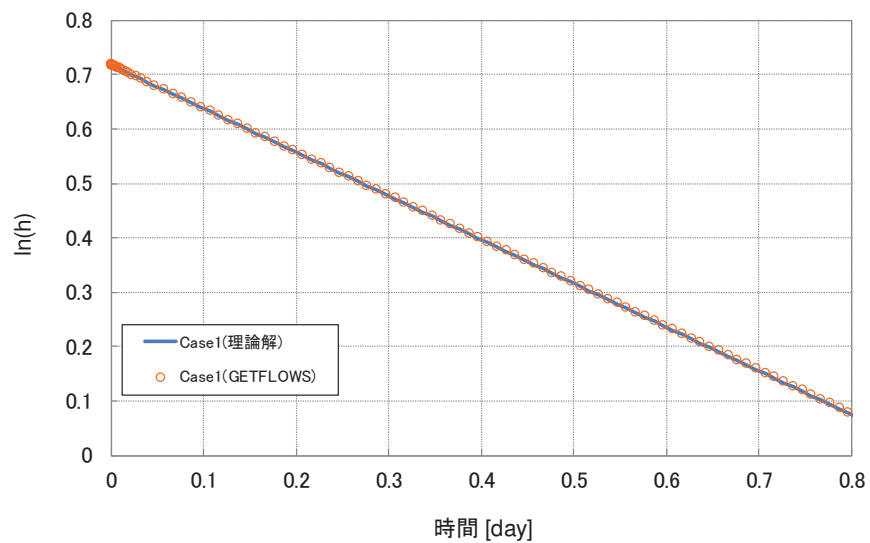


図 4-3 解析結果と理論解の比較 (Case1)

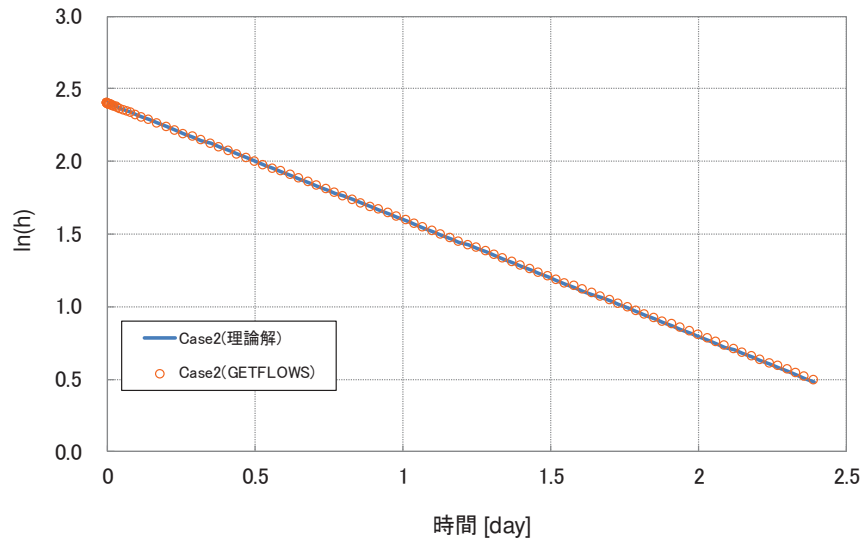


図 4-4 解析結果と理論解の比較 (Case2)

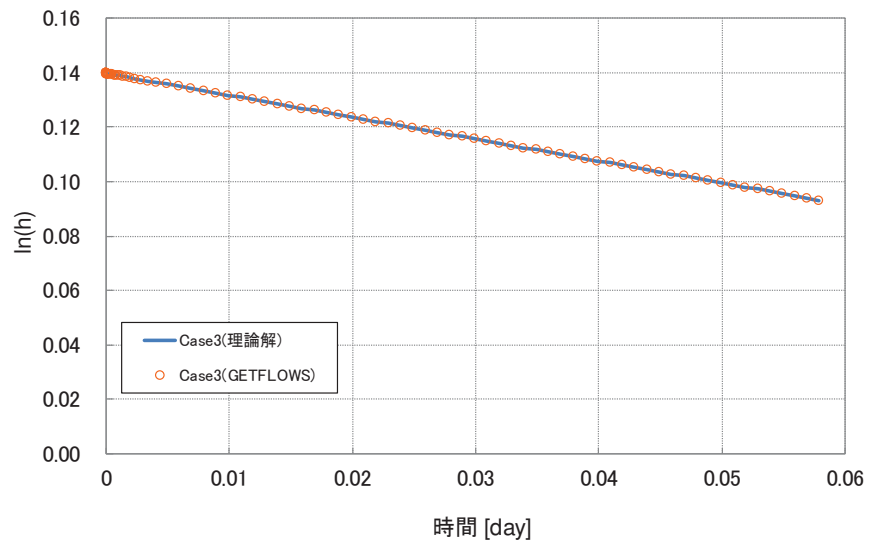


図 4-5 解析結果と理論解の比較 (Case3)

(5) 誤差評価

誤差評価は RMSE(平均二乗平方根誤差)で行った。データ数を N , 理論解を T_i ($i=1, \dots, N$), GETFLOWS の解析結果を A_i ($i=1, \dots, N$) とすると RMSE は次式で表わされる。各ケースにおける誤差を表 4-5 に示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (T_i - A_i)^2} \dots \dots \dots (4.2)$$

表 4-5 各ケースにおける誤差

	初期水頭差 [m]	比較点数	比較期間 [day]	水位の RMSE [m]
Case1	2.05	100	0.8	8.690×10^{-4}
Case2	11.05		2.25	2.438×10^{-2}
Case3	1.15		0.058	1.691×10^{-5}

4.1.2 揚水試験

(1) テストケース

水平被圧帯水層からの揚水の概念を図 4-6 に示す。飽和した厚さ H [m] の一様な被圧帯水層を想定し、一定流量 Q [m³/s] で揚水した際の定常及び非定常状態の圧力 P [Pa] を求め、解析結果と比較する。定常状態での圧力場の理論解は水の圧縮性を考慮していないため、計算でも条件を合わせた。一方、非定常水位の理論解では流体圧縮性が考慮されているので、計算もそれに準じた。

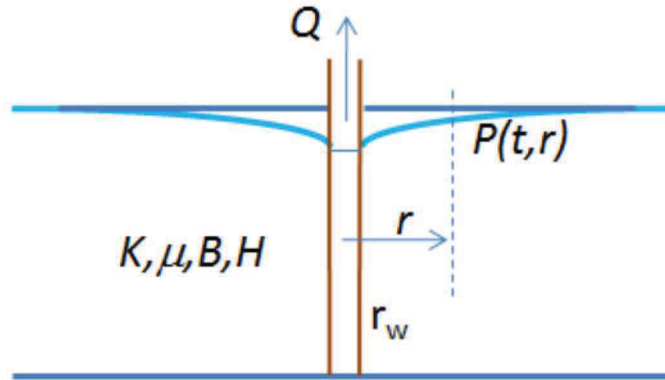


図 4-6 水平被圧帯水層からの揚水の概念

一定流量で揚水しているときの、定常状態での揚水井からの距離と圧力との関係は次式で与えられる。

$$P = P_0 - \frac{Q\mu}{2\pi KH} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r}\right) \cdot \dots \cdot \dots \cdot (4.3)$$

ここで、 P_0 は影響半径 r_e [m] における圧力 [Pa]、 Q は揚水量 [m³/s]、 μ は粘性係数 [Pa · s]、 K は絶対浸透率 [m²]、 H は地層厚さ [m]、 r は坑井中心からの距離 [m] である。

一方、非定常状態における、任意の時間における任意の地点での圧力の理論解は次式で表される。

$$P_i - P(t,r) = \frac{QB\mu}{2\pi KH} \left(\frac{1}{2} \ln t + \frac{1}{2} \ln \frac{K}{\phi\mu C_t r_w^2} + 0.40454 \right) \cdot \dots \cdot \dots \cdot (4.4)$$

ここで、 P_i は初期圧力 [Pa]、 B は容積係数 [-]、 t は時間 [s]、 ϕ は間隙率 [-]、 C_t は合算圧縮率 [1/Pa]、 r_w は坑井半径 [m] である。

(2) 解析モデル

解析に用いる格子モデルを図 4-7 に、格子モデルの諸元を表 4-6 に示す。

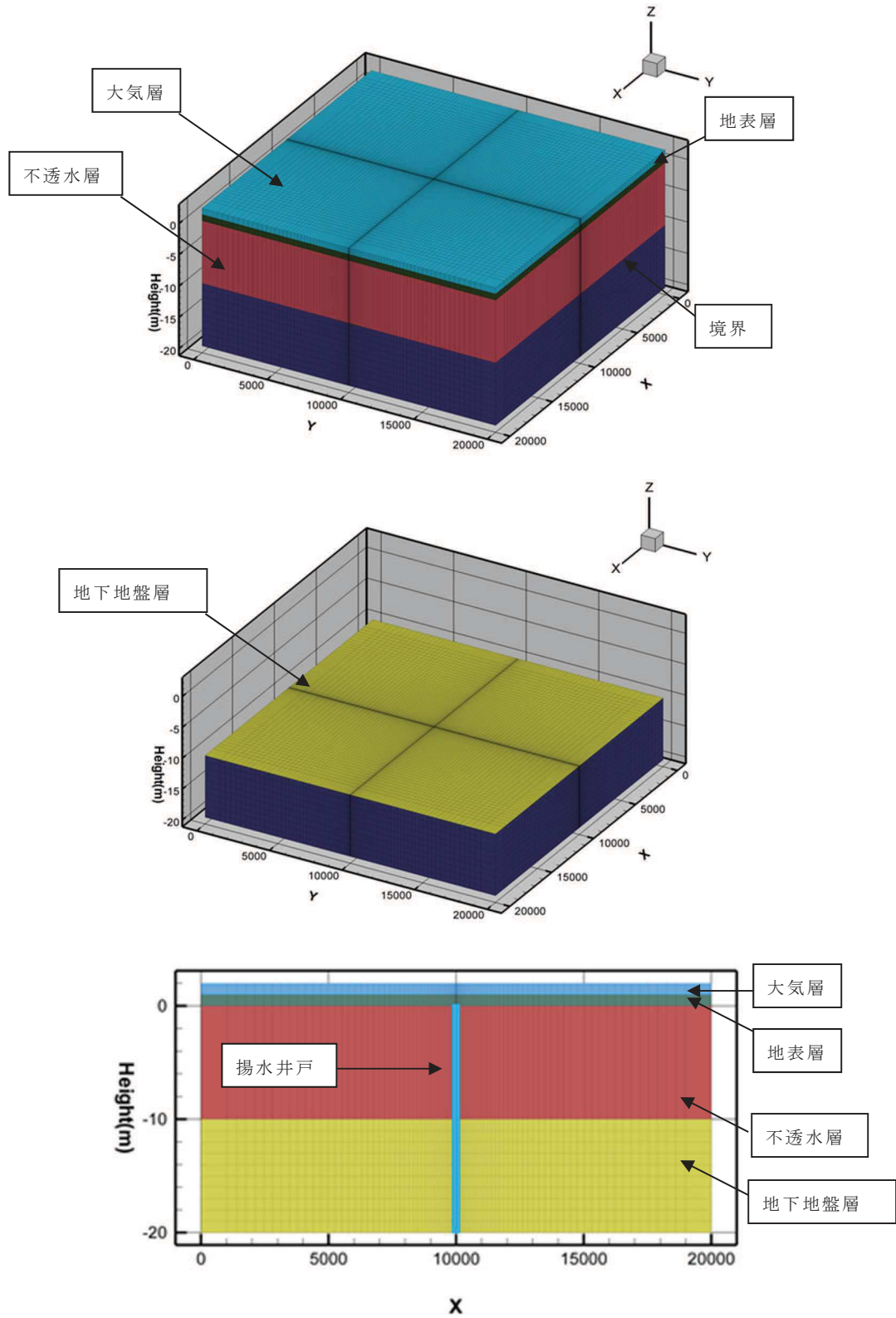


図 4-7 格子モデル

表 4-6 格子モデルの諸元

	記号	単位	設定値
格子数	NNBLK	[-]	132613
X 方向分割数	NX	[-]	101
Y 方向分割数	NY	[-]	101
Z 方向分割数	NZ	[-]	13
重力加速度	g	[m/s ²]	9.80665
層の厚さ	H	[m]	10
揚水量	Q	[m ³ /s]	1.736×10 ⁻⁴
坑井半径	r _w	[m]	0.01
影響半径	r _e	[m]	10000
初期圧力	P _i	[MPa]	0.106372
影響半径圧力	P ₀	[MPa]	0.106372

(3) 解析条件

解析に用いる条件について、流体物性を表 4-7 に、地層物性を表 4-8 に示す。

表 4-7 流体物性

	記号	単位	設定値
水相密度	ρ_w	[kg/m ³]	998.2
水相圧縮率	C _f	[1/Pa]	4.59×10 ⁻¹⁰
水相粘性係数	μ	[Pa·s]	1.002×10 ⁻³

表 4-8 地層物性

	記号	単位	大気層	地表層	地下地盤層	不透水層	境界
密度	ρ	[kg/m ³]	2500	2500	2500	2500	2500
間隙率	ϕ	[-]	1.0×10 ³⁰	1.0	0.5	1.0	1.0×10 ³⁰
浸透率	K	[m ²]	9.87×10 ⁻⁶	9.87×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻¹²	0	1.0×10 ⁻¹²
圧縮率	Cr	[1/Pa]	1.02×10 ⁻¹⁰	1.02×10 ⁻¹⁰	1.02×10 ⁻¹⁰	1.02×10 ⁻¹⁰	1.02×10 ⁻¹⁰

(4) 結果

非定常解析における解析結果と理論解の比較を図 4-8～図 4-9 に示す。

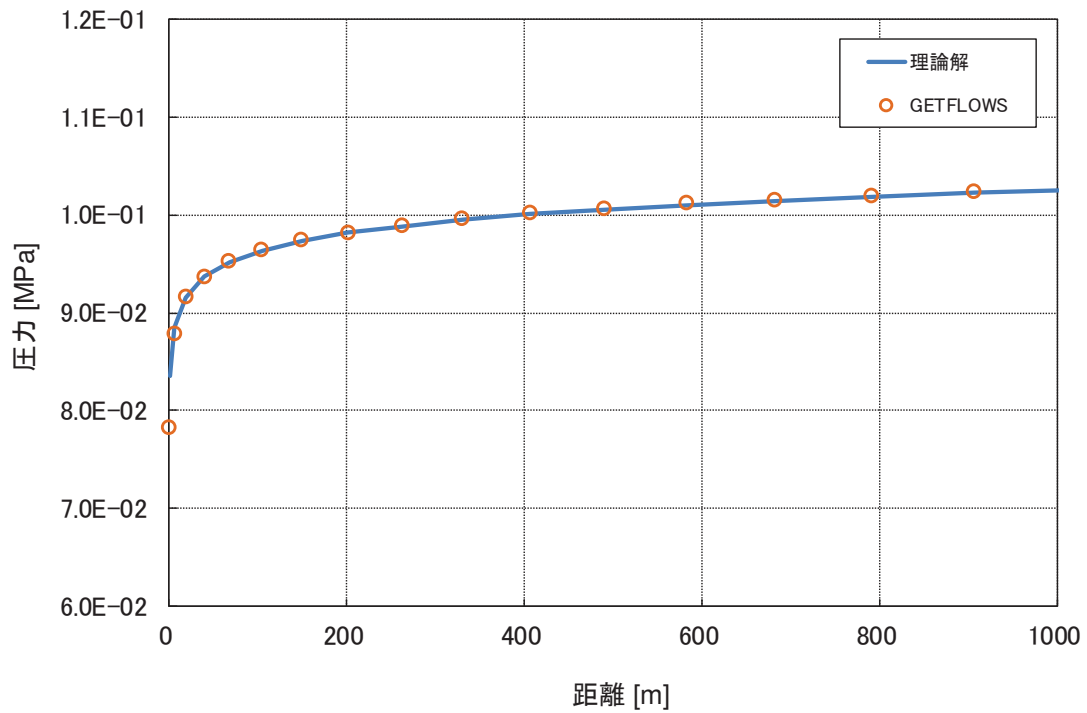


図 4-8 非定常解析における解析結果と理論解の比較
(20.5 日後の揚水井からの距離と圧力)

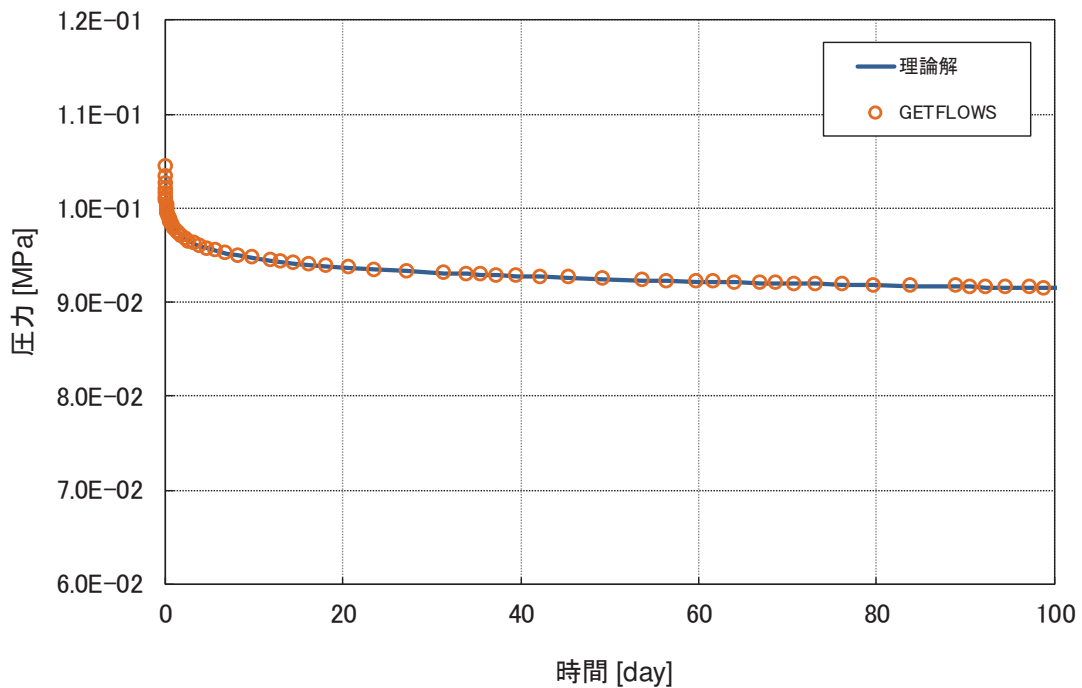


図 4-9 非定常解析における解析結果と理論解の比較
(39.6 m 地点での圧力経時変化)

(5) 誤差評価

誤差評価は RMSE(平均二乗平方根誤差)で行った。データ数を N, 理論解を T_i ($i=1, \dots, N$), GETFLOWS の解析結果を A_i ($i=1, \dots, N$) とすると RMSE は次式で表わされる。20.5 日後の揚水井からの距離と圧力での誤差を表 4-9 に, 39.6m 地点での圧力経時変化での誤差を表 4-10 に示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (T_i - A_i)^2} \dots \dots \dots (4.5)$$

表 4-9 20.5 日後の揚水井からの距離と圧力での誤差

時間 [day]	距離 [m]	比較点数	RMSE [MPa]
20.5	0~1000	16	3.121×10^{-4}

表 4-10 39.6 m 地点での圧力経時変化での誤差

時間 [day]	距離 [m]	比較点数	RMSE [MPa]
0~100	39.6	64	9.697×10^{-5}

4.1.3 地下水面の応答問題

(1) テストケース

周期的に変動する水面（潮汐運動を行う海域など）に隣接する被圧帯水層の水位応答を求め、理論解と比較する。水面変動に対する被圧帯水層内の地下水面応答の理論解は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \zeta_i(t, x) &= a \cdot \exp(-mx) \cos(\sigma t - mx) + h \\ \sigma &= 2\pi/T \\ m &= \sqrt{\sigma S / (2kb)} \\ S &= \rho_w g \phi b (C_f + C_r) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (4.6)$$

潮位変動に伴う地下水面応答の概念を図 4-10 に示す。ここで、 a は潮位振幅[m]、 x は海岸部からの距離[m]、 t は時間[s]、 T は周期[s]、 S は貯留係数[-]、 k は透水係数[m/s]、 b は被圧帯水層厚[m]、 ϕ は有効間隙率[-]、 h は平均海水位[m]、 ρ_w は液相密度[kg/m³]、 g は重力加速度[m/s²]、 C_f は液相圧縮率[1/Pa]、 C_r は地層圧縮率[1/Pa]である。

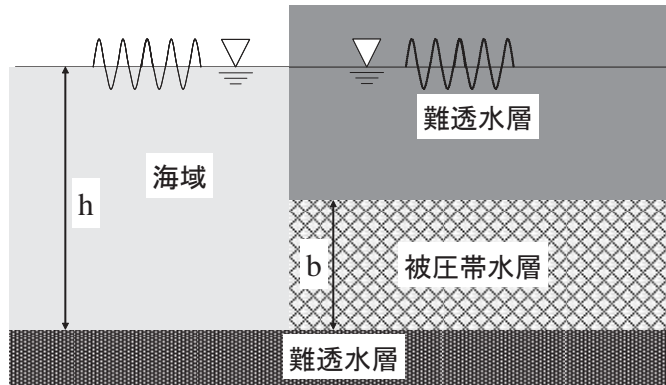


図 4-10 潮位変動に伴う地下水面応答の概念

(2) 解析モデル

解析に用いる格子モデルを図 4-11 に、格子モデルの諸元を表 4-11 に示す。

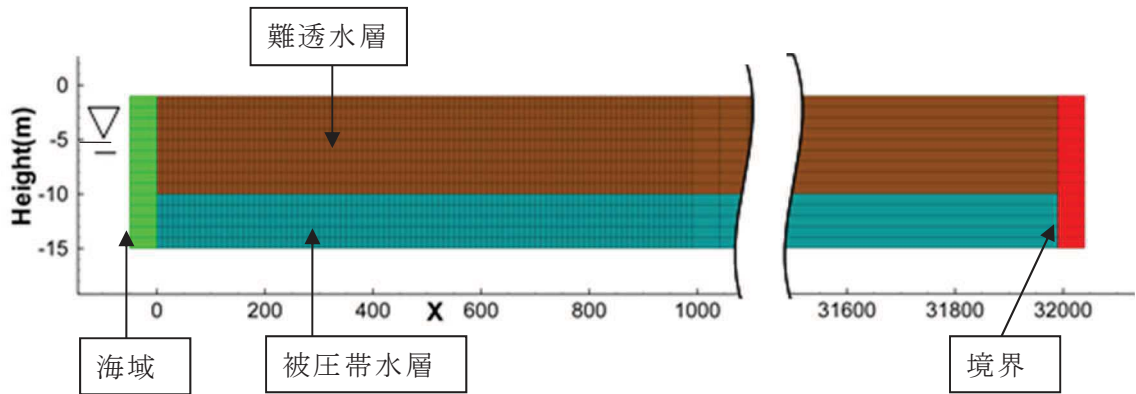


図 4-11 格子モデル

表 4-11 格子モデルの諸元

	記号	単位	設定値
格子数	NNBLK	[-]	3417
X 方向分割数	NX	[-]	201
Y 方向分割数	NY	[-]	1
Z 方向分割数	NZ	[-]	17

(3) 解析条件

解析に用いる条件について、流体物性を表 4-12 に、地層物性を表 4-13 に示す。
また、潮位変動条件を表 4-14 に示す。

表 4-12 流体物性

	記号	単位	設定値
水相密度	ρ_w	[kg/m ³]	1000
水相圧縮率	C_f	[1/Pa]	4.59×10^{-10}
水相粘性係数	μ	[Pa · s]	1.002×10^{-3}

表 4-13 地層物性

	記号	単位	難透水層	被圧帯水層	境界	海域
密度	ρ	[kg/m ³]	2500	2500	2500	2500
間隙率	ϕ	[-]	0.2	0.2	1.0×10^{30}	1.0×10^{30}
浸透率	K	[m ²]	0	1.0×10^{-12}	9.87×10^{34}	9.87×10^{34}
圧縮率	C_r	[1/Pa]	1.02×10^{-10}	1.02×10^{-10}	1.02×10^{-10}	1.02×10^{-10}

表 4-14 潮位変動条件

	記号	単位	設定値
初期水位	h_0	[m]	-5
潮位振幅	a	[m]	1
周期	T	[s]	86400
被圧帯水層厚	b	[m]	5
平均海水位	h	[m]	-5

(4) 結果

海岸からの距離と水位の関係による解析結果と理論解との比較を図 4-12 に示す。

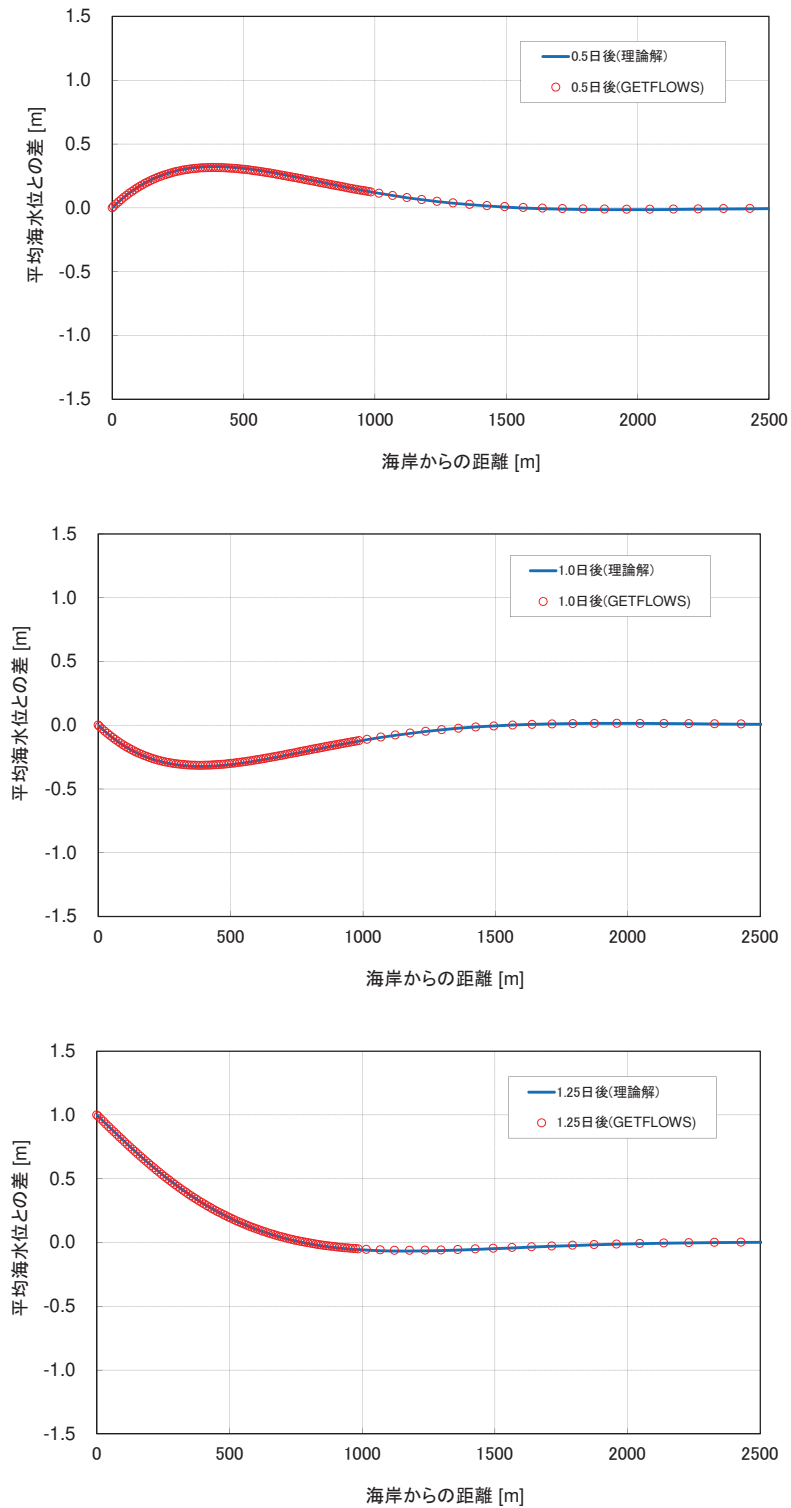


図 4-12 海岸からの距離と水位の関係による解析結果と理論解との比較

(5) 誤差評価

誤差評価は RMSE(平均二乗平方根誤差)で行った。データ数を N, 理論解を T_i ($i=1, \dots, N$), GETFLOWS の解析結果を A_i ($i=1, \dots, N$) とすると RMSE は次式で表わされる。海岸からの距離と水位の関係による誤差を表 4-15 に示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (T_i - A_i)^2} \dots \dots \dots (4.7)$$

表 4-15 海岸からの距離と水位の関係による誤差

経過日数 [day]	比較区間 [m]	比較点数	RMSE [m]
0.5	0~2500	120	4.582×10^{-4}
1	0~2500		5.162×10^{-4}
1.25	0~2500		3.516×10^{-4}
1.75	0~2500		2.547×10^{-4}

4.2 妥当性確認 (Validation)

本解析コードは、土木、環境、資源、エネルギー、農林水産、災害・防災などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。

4.3 評価結果

4.1 及び 4.2 より、本解析コードを用いることは妥当である。

5. 引用文献

登坂博行著, 2007, 地圏水循環の数理 (東京大学出版会, p. 142pp. 218-226)

土木学会, 1999, 水理公式集 (pp. 350-351.)