

本資料は 年 月 日付で
登録区分変更する。 [東海事業所技術情報室]

ニアフィールド核種移行解析における 数値解の安定性に関する研究(II)

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書要約版)

1996年3月

株式会社 三菱総合研究所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話:029-282-1122(代表)
ファックス :029-282-7980
電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

この
者だけ
ないよ

◎ 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

関係
を行
して

下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注
意して下さい。

本資料の問い合わせは下記に願います。

〒 319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33
動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所
環境技術開発部・地層処分開発室



PNC T
J1222 96-003

1996年3月

ニアフィールド水理/核種移行解析における 数値解の安定性に関する研究（II）

伊藤武彦*, 篠崎剛史*, 角田弘和*

要 旨

ニアフィールド水理／核種移行解析には緩衝材中および緩衝材の周辺母岩中での水理／核種移行プロセスを組み合わせたモデルが用いられ、コードの開発にあたり様々な数値解析／離散化手法が使用される。従って、性質を十分に把握したうえで解析コードを用いることは、解析結果もしくは評価の信頼性の観点から重要である。本研究ではモデル／コード適用範囲と数値解等の安定性について評価体系を確立する。

昨年度に引き続き「Release」および「Meshnote」について複数パラメータ／複数崩壊系列を考慮した、より複雑なケースに関するベンチマーク・テストを実施した。さらに「Meshnote」固有の問題(Reservoir, MixingCellの体積、自動時間増分機能)についても検討を実施した。より複雑なケースに関しても、両コードとも昨年度結果が適用可能であることが示された。

三次元飽和／不飽和浸透流解析コード「TAGSAC」に関して内容調査および性能解析を行い、その適用範囲と安定性について検討を実施した。また実際にコードが使用されている問題を対象として、空間および時間分割の最適な組み合わせを決定する指針を作成した。

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：070D0264

事業団担当部課室：環境技術開発部 地層処分開発室

事業団担当者：石川 博久

* (株) 三菱総合研究所 総合安全研究センター



PNC T
1222 96-003

March, 1996

Numerical Stability of the Calculation Model of the Nearfield Groundwater Flow and Transport of Radioactive Dissolved Constituents (Ⅱ)

Takehiko Itoh*, Tsuyoshi Shinozaki*, Hirokazu Tsunoda*

Abstract

In the calculation of the nearfield groundwater flow and transport of radioactive dissolved constituents, various numerical models and discretization methods have been applied to simulate convective and diffusive through Backfilling Material (Bentonite) and rock region.

In order to obtain accurate solutions efficiently, various parameters should be defined based on the criteria which depends on calculation models and methods.

Continuous to last year, some benchmark problems which are more complicated cases, are applied to 2 typical near-field calculation codes ("Release" and "Meshnote") to get the criteria for accuracy, stability and efficiency. In this year's benchmark problems, multiple decay chains and plural parameters efficients are considered. In addition to these cases, characteristic of "Meshnote" parameters and function(such as volume of Reservoir, Mixing Cell, and automatic decision of time-step)are considerd. For both "Release" and "Meshnote", last years result can be appliedto any cases. Last years result is valid for wide range of parameters and very complicated decay chains.

Some actual benchmark problems are applied to three dimensional calculation code for groundwater flow ("TAGSAC"), under a saturated-unsaturated condition. In this study, hydrological analysis is carried out to investigate the fundamental function and capability of the code, to evalate numerical stability of the calculation, and therefore to obtain the criteria for accuracy, stability, and efficiency.

Work performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : Hirohisa Ishikawa (Geological Isolation Technology Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works)

* : Mitsubishi Research Institute, Inc. Research Center for Safety Science

目 次

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 1. | 本研究の背景および目的 | 1 |
| 2. | 「TAGSAC」コード概要 | 3 |
| 2.1 | コードの機能 | 3 |
| 2.2 | 無次元化 | 4 |
| 3. | 「TAGSAC」評価手法 | 5 |
| 3.1 | 解析方針 | 5 |
| 3.2 | 最適分割の評価基準 | 6 |
| 4. | 「TAGSAC」一次元予備解析 | 8 |
| 4.1 | 予備解析モデル | 8 |
| 4.2 | 解の安定性 | 10 |
| 4.3 | 最適分割に対するパラメータの感度 | 12 |
| 4.4 | まとめ | 13 |
| 4.4.1 | 解の安定性 | 13 |
| 4.4.2 | パラメータの感度 | 13 |
| 5. | 「TAGSAC」関連の理論解 | 14 |
| 6. | 「TAGSAC」ベンチマーク・テスト | 15 |
| 6.1 | 評価項目 | 15 |
| 6.2 | 広域水理問題 | 16 |
| 6.2.1 | 問題の概要 | 16 |
| 6.2.2 | ベンチマーク用解析モデルおよび条件 | 16 |
| 6.2.3 | 均質物性領域における最適な空間分割法 | 19 |
| 6.2.4 | 不均質物性領域における最適な空間分割法 | 20 |
| 6.2.5 | 要素形状の影響 | 21 |
| 6.2.6 | まとめ | 23 |
| 6.3 | 掘削問題 | 32 |
| 6.3.1 | 問題の概要 | 32 |
| 6.3.2 | ベンチマーク用解析モデル | 33 |
| 6.3.3 | ベンチマーク・テスト (1)(マニュアル例題の評価) | 35 |
| 6.3.4 | ベンチマーク・テスト (2)(パラメータの感度評価) | 37 |
| 6.3.5 | まとめ | 38 |
| 6.4 | 処分坑道周辺の不飽和領域問題 | 49 |

| | | |
|-------------|-------------------------------------|-----------|
| 6.4.1 | 問題の概要 | 49 |
| 6.4.2 | ベンチマーク用解析モデルおよび条件 | 50 |
| 6.4.3 | ベンチマーク・テスト(1)(基本ケースの評価) | 52 |
| 6.4.4 | ベンチマーク・テスト(2)(パラメータの感度評価) | 54 |
| 6.4.5 | まとめ | 55 |
| 7. | 「TAGSAC」まとめと今後の課題 | 67 |
| 8. | Release/Meshnote ベンチマーク | 70 |
| 8.1 | 本年度研究目的 | 70 |
| 8.2 | 複数パラメータを変化／複数崩壊系列を考慮したベンチマーク | 72 |
| 8.2.1 | [Release:時間分割] 解析ケース | 72 |
| 8.2.2 | [Release:時間分割] 解析結果 | 74 |
| 8.2.3 | [Release/Meshnote:空間分割] 解析ケース／結果 | 75 |
| 8.3 | Meshnote 特有の機能に関するベンチマーク | 76 |
| 8.3.1 | 非線形吸着項に関する感度解析 | 76 |
| 8.3.2 | Reservoir 体積に関する感度解析 | 77 |
| 8.3.3 | Mixing Cell 体積に関する感度解析 | 78 |
| 8.3.4 | Reservoir/Mixing Cell 体積に関する解析のまとめ | 78 |
| 8.3.5 | 地下水量 Qmix に関する感度解析 | 79 |
| 8.3.6 | 自動時間増分機能について | 79 |
| 9. | [Release/Meshnote] 本年度研究のまとめ | 80 |
| 参考文献 | | 82 |

1. 本研究の背景および目的

ニアフィールド水理／核種移行解析には、緩衝材中および緩衝材の周辺母岩中の水理／核種移行プロセスを組み合わせたモデル（例えば、拡散モデル、移流分散モデル）が用いられる。これらのモデルは、室内試験および原位置試験から得られる水理／核種移行メカニズムに関する知見をもとに構築されるものである。実際の解析において、解析対象の形状およびその中の現象を記述するモデルは、計算機上でコード化され、解析的／数値的手法によって解かれる。解析コードの開発にあたっては様々な数値解析／離散化手法が使用される。したがって、これらの解析コードは、基本的なモデルの考え方、モデル設定の前提条件、数値解法等によって特有の性質を有する。したがって、これらの性質を十分に把握したうえで解析コードを用いることは、解析結果もしくは評価の信頼性の観点から重要なことである。

本研究は、ニアフィールド水理／核種移行解析を行うためのモデル／コードのパラメータ空間における適用範囲と数値解等の安定性についての評価体系を確立することを目的に実施するものである。平成6年度は、ニアフィールド核種移行解析モデル／コードのうち比較的単純にコード化されている緩衝材中の核種移行解析コード「RELEASE」と「MESHNOTE」を選び、ベンチマーク・テストの結果をもとに、コードの使用にあたってのパラメータの最適な設定（高精度な結果を短い計算時間で得られるような設定）のための指針を作成し、2つのコードで異なる定式化を採用している場合の優劣を評価した。また、ベンチマーク・テストによって得られたパラメータの最適設定指針は実解析においても妥当であることを示した。しかしながら、これらのベンチマーク・テストにおいては一つのパラメータだけを変化させ、他のパラメータは固定かつ単数崩壊系列の場合について実施された。

本年度研究においては平成6年度に引き続いて、ニアフィールド核種移行解析プログラム「RELEASE」と「MESHNOTE」のベンチマーク・テストをさらに複雑なケースについて実施する。また同様の手法によって三次元飽和／不飽和浸透流解析プログラム「TAGSAC」を対象として、内容調査、性能解析を行うことにより、その適用範囲と安定性についての

検討を実施し、評価体系の確立に向けての知見を得る。具体的には、モデルの前提条件および解析コードの機能と限界を調査することにより評価項目を抽出し、それぞれの項目を評価するために適当なベンチマーク・テストを実施する。さらに、ベンチマーク・テストの結果をもとに、コードの使用にあたっての精度／計算時間を考慮したパラメータの最適な設定のための指針を作成する。

「RELEASE」と「MESHNOTE」で離散化手法として用いられている有限差分法および「TAGSAC」で用いられている有限要素法は、近似解法であるため格子あるいは時間分割を細かくすればそれだけ精度が高い数値解が得られる。しかしながら、分割を細かくすることにより非常に多くの計算量（記憶容量、計算時間）が必要となるため、できるだけ少ない計算量で許容範囲内の精度を得ることが求められる。本研究では、効率的に高精度な解を得ることができる空間分割と時間分割の最適な組み合わせを決定する指針を作成することとする。

2. 「TAGSAC」コード概要

2. では「TAGSAC」コードが有する主な機能の概要および無次元化の手法などについて述べる。

2.1 コードの機能

以下に、「TAGSAC」コードが有する主な機能の概要について述べる。

1. 三次元飽和／不飽和浸透流を有限要素法によって解くプログラムであり、空間の離散化には8節点アイソパラメトリック要素を使用している。
2. 取り扱う境界条件は下記の通りである：
 - 第一種境界条件
 - 第二種境界条件
 - 固定流量境界条件
 - 不透水境界条件
 - 自由浸出境界条件
3. 非定常計算における時間積分法は前進オイラー、後退オイラー、中央差分の3つから選択可能である。しかしながら「TAGSAC」では、前進オイラー法を使用すると十分にタイムステップを細かくしても数値解が収束しない場合があるため、本研究ではそのような場合でも計算が可能な後退オイラー法を使用した検討を実施する。
4. 複数の物性領域からなる不均質モデルを取り扱うことができる。

2.2 無次元化

「TAGSAC」を用いるにあたっては様々な空間および時間スケールの問題を対象とする場合があるため、本研究では得られた指針の無次元化を行う。文献¹⁾によると、飽和／不飽和浸流で記述される現象は：

- 長さの次元をもつパラメータ：サクション ψ_0
- 速度の次元をもつパラメータ：飽和透水係数 K_0

により無次元化される。

$$x^* = \frac{x}{\psi_0}, y^* = \frac{y}{\psi_0}, z^* = \frac{z}{\psi_0} \quad (2.1)$$

$$t^* = \frac{K_0 t}{\psi_0} \quad (2.2)$$

$$\psi^* = \frac{\psi}{\psi_0} \quad (2.3)$$

$$C^* = \psi_0 C = \frac{\partial \theta}{\partial \psi^*} \quad (2.4)$$

$$K^* = \frac{K}{K_0} \quad (2.5)$$

3. 「TAGSAC」評価手法

3.1 解析方針

「TAGSAC」で離散化手法として用いられている有限要素法は近似解法であるため、格子あるいは時間分割を細かくすればそれだけ精度が高い数値解が得られる。しかしながら、三次元モデルにおける計算では非常に多くの計算量(記憶容量、計算時間)を必要とするため、できるだけ少ない計算量で許容範囲内の精度を得ることが必要となる。本研究では、効率的に高精度な解を得ることができる空間分割と時間分割の最適な組み合わせを決定する指針を作成する。「RELEASE」と「MESHNOTE」の場合には対象が一次元軸対称領域であるため実問題そのものについてベンチマーク・テストを実施することが可能であった。しかしながら「TAGSAC」の場合には三次元を対象としておりまた物性の非線形性も顕著であることから、実問題そのものに対してベンチマーク・テストを実施することは困難である。したがって本研究では以下の3種類の問題：

- 広域水理問題
- 掘削問題
- 処分坑道周辺の不飽和領域問題

を対象としてとりあげ、これらの問題を簡略化したベンチマーク・テストを実施する。なおこれらの問題については、6.において後述する。本研究の実施手順を以下に示す：

1. まず一次元モデルを用いた予備解析により、「TAGSAC」の基本的な解析性能に関する調査や数値解の安定性に関する検討を行う。また理論解との比較により、数値解の精度に関して考察する。
2. 3種類のベンチマーク問題が有する特徴を抽出した上で、その各々に応じて簡略化したベンチマーク・モデルを設定する。
3. ベンチマーク・テストから得られた知見により、各問題に応じた指針を作成する。

4. 作成した指針を各実問題に適用し、その妥当性を検証する。

3.2 最適分割の評価基準

解析結果の評価にあたっては、既存の解析解および理論解、実験解との誤差を比較することによって精度を評価することが可能である。しかしながら、本研究で対象とする三次元の飽和／不飽和浸透流のように非線形な問題に関しては問題の複雑性のため解析解および理論解は存在しておらず、直接精度を判断することは困難である。そこで本研究では、解の安定性および一様性に関する検討を行うことにより数値解の評価を実施する。本研究で用いた評価基準について述べる。

1. 解の安定性

本研究では時間積分に後退オイラー法を用いた場合について検討を実施した。しかしながら、一般に安定であるとされている後退オイラー法を用いた場合においても、数値計算の特性上、従属変数の空間勾配が急激に変化している領域では物理的に妥当ではない数値解の空間的振動を生じる場合があった(4.2にて後述)。無次元化された従属変数の空間的な振幅を W として：

$$W_{max} \leq \varepsilon_s = 10^{-3} \quad (3.1)$$

の条件を満たす場合に、数値解は安定であるとした。

2. 解の一様性ある空間(ないしは時間)分割幅 N_1 において得られた解を F_1 、その分割幅に対して半分の大きさの分割幅 $N_2 = \frac{N_1}{2}$ において得られた解を F_2 として：

$$\text{Max} |\overline{F_2(i)} - \overline{F_1(i)}| \leq \varepsilon_c = 10^{-3} \quad (3.2)$$

ただし $\overline{F_1}, \overline{F_2}$ は無次元化した値とする

の条件を満たす場合に、空間(ないしは時間)分割幅 N_1 を一様なレベルと考える。なお非定常問題を扱う場合には空間分割幅を $\frac{1}{2}$ 倍とした場合にも、かつ時間分割幅を $\frac{1}{2}$ 倍にした場合にも、一様性の条件を満たす空間および時間分割幅の組み合わせを一様な分割レベルとした。

一方、一次元の単純な不飽和浸透流に関しては理論解が存在する場合があり、数値解の精度を判断することが可能である。一次元予備解析(4.にて後述)において求めた最適分割による数値解の精度を理論解(5.にて後述)と比較し、本研究で用いた最適分割の評価基準について検討する。

4. 「TAGSAC」一次元予備解析

一次元の不飽和浸透流モデルを用いて予備解析を実施する。4. では解の安定性に関する検討と最適分割に対するパラメータの感度について検討を行う。

4.1 予備解析モデル

用いた予備解析モデルの基本ケースについて以下に述べる。解析対象および境界条件を図 4.1-1 に示す。また初期条件および土壤特性を以下に示す。解析対象の大きさや初期条件および境界条件は Philip(1969) の理論解(文献¹⁾、文献²⁾、5. にて後述)と同じ設定とした。また土壤の不飽和特性は、本研究で対象とするベンチマーク問題(6. にて後述)と同じ条件を用いた。

- 解析対象：地表以深 25.0(m) の均質土壤
- 初期条件：一様な圧力水頭値(飽和度) $\psi_n = -650.0(m) / \theta = 0.25$
- 境界条件：
 - $\psi_s = -20.0(m) / \theta = 0.60 (z = 0.0(m))$
 - $\psi_n = -650.0(m) / \theta = 0.25 (z = -25.0(m))$
- 土壤特性：
 - 飽和透水係数 : $10^{-5}(cm/sec)$
 - サクション : $10^3(m)$ (ただしサクションは $\theta = 0.0$ 時の圧力水頭の絶対値)
 - 間隙率 : 0.5
 - 比貯留係数 : 10^{-5}

なお用いた不飽和特性曲線を図 4.1-2 に示す。

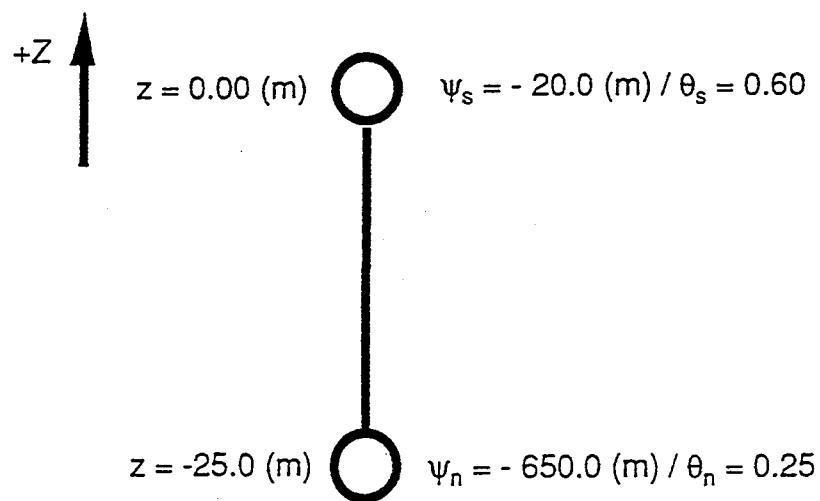
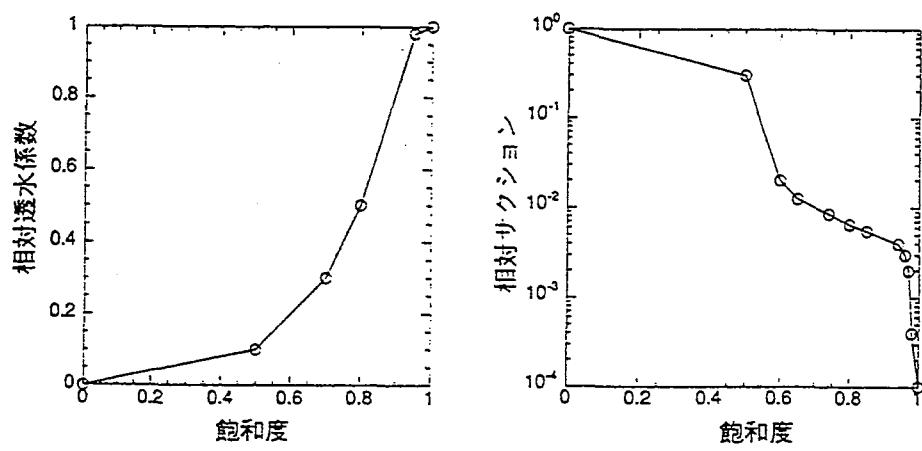


図4.1-1 一次元予備解析モデルおよび境界条件



飽和度と相対透水係数の関係

飽和度と相対サクションの関係

図4.1-2 予備解析モデルで用いた不飽和特性曲線

4.2 解の安定性

数値計算の特性上従属変数の空間勾配が急激に変化している領域では物理的に妥当ではない数値解の空間的振動を生じる場合がある。特に水分が浸潤していく前線つまり自由表面では従属変数の勾配が急激に変化するため、解が最も不安定となりやすいと考えられる。ここでは自由表面およびその近傍での解の安定性に着目して検討を行った。解析の結果、計算のごく初期に自由表面およびその近傍で解の空間的振動を生じ、時間経過とともに減衰する傾向が確認された。解の振動が減衰するまでの時間を T_0 とし、得られた知見を以下に示す。

1. 自由表面およびその近傍での解の空間的振動は計算のごく初期にあらわれるものであり、時間経過とともに減衰する。
2. この振動は空間分割幅 Δz やタイムステップ幅 Δt を小さくしても基本的には抑制できない。 T_0 と Δz および Δt は以下のように関係づけられる：
 - T_0 と Δz の関係
 Δz を小さくすることにより T_0 を小さくすることが可能である(図 4.2-1)。
 - T_0 と Δt の関係
 Δt を小さくしても T_0 には影響は生じない。ある Δz に対して $\Delta t \geq T_0$ とした場合には空間的振動を生じず、逆に $\Delta t \leq T_0$ とすることによって振動を生じる場合がある(図 4.2-2)。
3. したがって着目するタイムスケールに応じて最適な時間および空間分割の組み合わせを選択する必要がある。すなわち安定な数値解を得るために、着目するタイムスケールが小さい場合にはあらかじめ格子データとして空間分割幅を小さく設定することが必要条件となる。
4. また基本ケースに比べより定常状態に近い初期条件を与えた場合について検討した結果、 T_0 がより短くなることが確認された。初期条件の設定によってもこの空間的振動は変化すると考えられる。

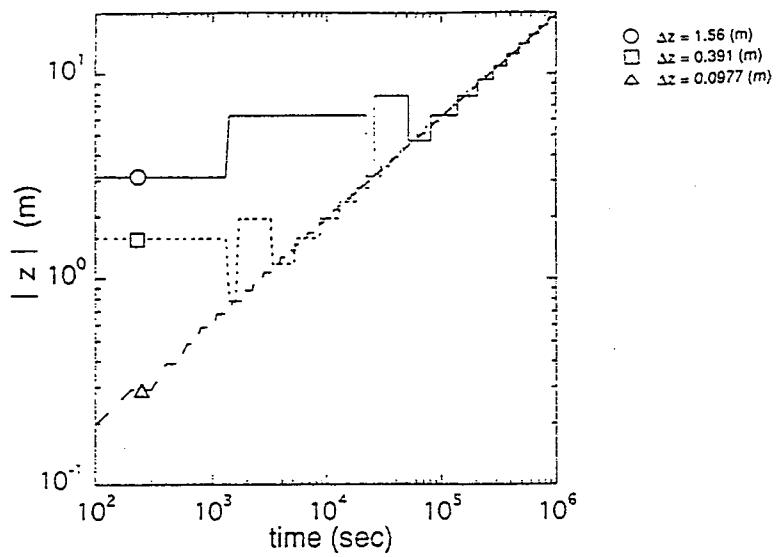


図4.2-1 一次元予備解析モデル解析結果：自由表面位置の経時変化
 T_0 の Δz 依存性の検討 ($\Delta t = 10^2$ (sec))

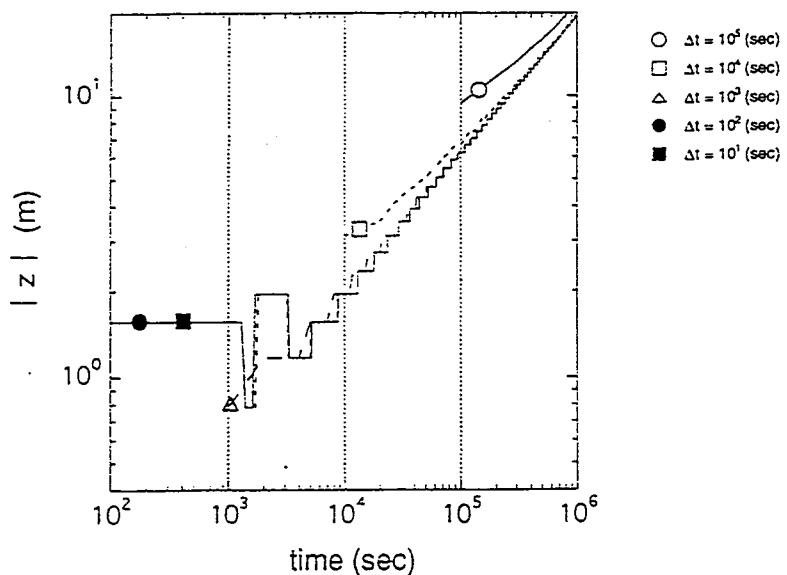


図4.2-2 一次元予備解析モデル解析結果：自由表面位置の経時変化
 T_0 の Δt 依存性の検討 ($\Delta z = 0.391$ (m), 鉛直64分割)

4.3 最適分割に対するパラメータの感度

4.1 で示した予備解析モデルの基本ケースにおいて注目するタイムスケールを変化させた場合、また基本ケースからパラメータ：

- ・ 鉛直方向平均動水勾配 (境界水頭値差 $\Delta\psi = |\psi_s - \psi_n|$)
- ・ 不飽和特性
- ・ 解析対象領域の大きさ (定常解析)

を変化させた場合に関して最適分割を決定し、最適分割に対するパラメータの感度を評価した。なお解の精度の評価にあたっては 3.2 で述べた基準を用いた。

4.4 まとめ

予備解析では主として、数値解の安定性に関する検討と最適分割に対するパラメータの感度に関する検討を実施した。得られた知見を以下に示す。

4.4.1 解の安定性

着目するタイムスケールに応じて最適な時間および空間分割を行う必要がある。すなわち着目するタイムスケールが小さい場合には、安定な数値解を得るためにあらかじめ空間分割幅を細かくした格子データを作成することが必要である。また初期条件は、その設定により定常状態に達するまでの所要時間が異なるため、解の安定性に影響していると考えられる。

4.4.2 パラメータの感度

以下の場合には最適な空間および時間分割の組み合せは、より厳しい（分割幅が細かい）条件となることがわかった。

- ・ 着目するタイムスケールが短い場合
- ・ 鉛直方向平均動水勾配が大きい場合
- ・ 飽和度が低い場合

また最適な空間分割では要素あたりに許容される水頭値の偏差の最大値は一定であることがわかった。

5. 「TAGSAC」関連の理論解

本研究で対象とする三次元のベンチマーク問題に関しては問題の複雑性のため解析解および理論解は存在しておらず、直接精度を判断することは困難である。そのような場合には、解の安定性および一様性に関する検討を行なうことにより数値解の精度を評価する。一方、予備解析で用いた一次元鉛直の不飽和浸透流モデルに関しては Philip(1969)(文献¹)、文献²⁾により理論解が求められており、安定性および一様性の評価から得た最適分割による数値解の精度を判断することが可能である。

5. では一次元予備解析において得た最適分割による数値解を理論解と比較し、3.2 で示した最適分割の評価基準について検討した。一次元予備解析において安定性および一様性の評価から得た最適分割による数値解を Philip による理論解と比較し、検討を行なった。4.3 において求めた最適分割による数値解を理論解と比較したところ、RMS 値(2乗平均値)は約 $1.0 \times 10^{-4} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ の範囲に収まっていた(ただし、この値は両者の解の形式の違いによる補間誤差を含んでいる)。すなわち 3.2 で示した評価基準から得た最適分割による数値解は、許容範囲内の精度を有することが確認される。

6. におけるベンチマーク・テストでは、3.2 で示した解の安定性および一様性に関する検討を行なうことにより、数値解の精度を評価する。

6. 「TAGSAC」ベンチマーク・テスト

6.1 評価項目

6. では、実際に「TAGSAC」を使用して解析が実施されている例として以下の3種類の問題をとりあげる：

- 広域水理問題
- 掘削問題
- 処分坑道周辺の不飽和領域問題

ベンチマーク・テストは以下の手順で実施する。

1. 3種類の問題に特徴的な評価項目を抽出し、その各問題に応じて簡略化したベンチマーク・モデルを設定する。
2. ベンチマーク・テスト実施結果から得られた知見により、各問題に応じた指針を作成する。
3. 得られた指針を各実問題に適用し、その妥当性を検証する。

6.2 広域水理問題

6.2.1 問題の概要

広域的な地下水流动の定常解析について検討する。文献³⁾では「TAGSAC」を用いて東濃地域を対象とした広域水理解析を実施している。6.2ではこの解析例を対象としたベンチマーク・テストを作成し、様々な条件下での解の精度および安定性について検討することにより最適な空間分割を決定する。文献³⁾において用いられている東濃地域の $8(km) \times 7(km) \times$ 深さ $3(km)$ の領域の水理地質構造モデルを図 6.2-1 に、境界条件を図 6.2-2 に示す。

6.2.2 ベンチマーク用解析モデルおよび条件

(1) 基本ケースの概要

ベンチマーク・テストの対象とする東濃地域の解析例(以下、東濃解析例とする)の特徴を考慮してベンチマーク用解析モデルを設定した。図 6.2-3 に対象および条件を示す。

ベンチマーク・テストに先立ち、基本ケース解析条件における予備解析を実施した。水平および鉛直方向動水勾配は上部境界における流束と水平方向平均動水勾配の関係により決定されることがわかった。したがって 6.2 では、上部境界における流束と水平方向平均動水勾配を様々な条件下で変化させた場合について検討する。

(2) パラメータ

基本ケースからパラメータを以下に示す範囲で変化させた場合について、パラメータの感度を評価する。なお各パラメータはそれぞれ独立に変化させ、それ以外のパラメータは基本ケースと同じ値とする。

1. 飽和透水係数

東濃解析例では透水性が異なる 7 つの領域(飽和透水係数 $K = 5.4 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-4}(cm/sec)$)が用いられている。ベンチマーク・テストでは基本ケース($K = 10^{-6}(cm/sec)$)の $10^{-2} \sim 10^2$ 倍の範囲を考慮する。

2. 水平方向平均動水勾配

水平方向平均動水勾配 ix は、基本ケースの $0.1 \sim 50.0$ 倍($ix = 0.002 \sim 1.0$)の範囲を考慮する。これは基本ケースにおける側方境界間の水頭値差 $\Delta\phi = |\phi_1 - \phi_2| =$

$10(m)$ に対して $\Delta\phi = 1.0 \sim 500(m)$ の範囲に相当する。

3. 不飽和特性

不飽和特性(飽和度と相対透水係数の関係および飽和度と相対サクションの関係)の影響を評価するため、 $\Delta\phi$ を一定として ϕ_1 および ϕ_2 を変化させた場合について検討する。 ϕ_1 に関しては基本ケースの $\phi_1 = -20(m)$ に対して $\phi_1 = -820 \sim -20(m)$ の範囲を考慮する。これは上部境界面では飽和度 $\theta = 0.13 \sim 0.60$ に相当する。

4. 上部領域における流束

文献³⁾によると、未固結層から岩盤への年間浸透量は約 $14 \sim 250(mm/year) \div 4.4 \times 10^{-10} \sim 7.9 \times 10^{-9}(m/sec)$ の範囲であるとのことである。ベンチマーク・テストでは、基本ケース ($q_0 = 6.6 \times 10^{-9}(m/sec)$) の $10^{-1} \sim 10^1$ 倍 ($q = 6.60 \times 10^{-10} \sim 6.6 \times 10^{-8}(m/sec)$) の範囲を考慮する。

(3) ベンチマーク方針

6.2 では以下に示す方針で検討する。なお最適分割の決定にあたっては、基本ケースで用いたサクション ($\psi_0 = 10^3(m)$) および飽和透水係数 ($K_0 = 10^{-6}(cm/sec)$) により変数を無次元化する。

1. 均質物性領域を対象としたモデル

均質物性領域における最適な分割法を検討した。4. では最適分割において要素あたりに許容される水頭値の偏差の最大値は一定であった。6.2においても同様であると予想され、したがって動水勾配が大きい領域では他の領域よりも要素分割を細かくする必要があると考えられる。図 6.2-4 に示す 3 種類の格子(均等格子、鉛直方向不均等格子、水平方向不均等格子)を用いて、より少ない要素数で効率よく高精度な解を得る最適な空間分割を決定した。

2. 不均質物性領域を対象としたモデル

東濃解析例では不均質物性領域を対象としているため(図 6.2-1)、ベンチマーク・テストでは物性が異なる領域の境界面付近における空間分割法について検討する必要がある(図 6.2-5)。境界面においては水頭値 ϕ (飽和度 θ) および流束($= K \cdot r(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial x}$) は連続であるため、飽和透水係数 K が互いに大きく異なる場合

には動水勾配 $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ も大きく異なり、したがって動水勾配に応じた空間分割を行う必要があると考えられる。

3. 要素形状の影響

不均等分割を行う場合あるいは不規則な形状の対象をゆがみのある要素を用いて分割する場合には、均等な要素あるいは直方体要素（立方体要素）を用いた場合と比較して数値解の精度が低下することが考えられる。6.2 では以下の 3 つの項目について要素形状の影響を評価した（図 6.2-6）。

- ・隣接要素間格子幅比
- ・要素のゆがみ
- ・要素のアスペクト比

6.2.3 均質物性領域における最適な空間分割法

4. では最適分割において要素あたりに許容される水頭値の偏差の最大値は一定であった。一方、6.2.2 で示したように基本ケースでは座標位置により動水勾配が著しく異なるため、動水勾配が大きい領域では他の領域よりも要素分割を細かくした不均等格子を用いることにより、均等格子分割に比べ効率的に高精度な数値解を得ることが可能であると考えられる。ここでは 3 種類の空間分割法（均等格子、鉛直方向不均等格子、水平方向不均等格子）について検討する（図 6.2-4）。

6.2 においては定常解析であるため解の一様性を検討することにより精度を評価する。一様性の評価基準は (3.2) では $\varepsilon_c = 10^{-3}$ であるが、 $\varepsilon_c = 10^{-2}$ とした場合についても併記する。

(1) 均等格子

パラメータを変化させた場合の最適な均等格子分割を決定した。

(2) 鉛直方向に不均等な格子分割

図 6.2-4 に示すような鉛直方向に不均等な格子を用いた場合の最適分割における要素数と均等格子を用いた場合の最適分割における要素数との関係を図 6.2-7 に示す。鉛直方向に不均等な格子を用いた場合は、均等格子を用いた場合と比較して $\varepsilon_c = 10^{-3}$ とした場合には約 0.5 倍、 $\varepsilon_c = 10^{-2}$ とした場合には約 0.7 倍の要素数である。均等格子に比べ、より少ない要素数を用いて効率的に高精度な数値解を得ることが可能である。

(3) 水平方向に不均等な格子分割

図 6.2-4 に示すような水平方向に不均等な格子を用いた場合の最適分割における要素数と均等格子を用いた場合の最適分割における要素数との関係を図 6.2-8 に示す。水平方向に不均等な格子を用いた場合は、均等格子を用いた場合と比較して $\varepsilon_c = 10^{-3}$ とした場合には約 0.94 倍、 $\varepsilon_c = 10^{-2}$ とした場合には約 1.0 倍の要素数であり、均等格子と比較して要素数には顕著な差がない。これは対象全域における解の精度を評価したためであると考えられる。なお水平方向に不均等な格子に関しては、ある特定座標位置における解のみを評価した場合についても検討する（6.2.5 において後述）。

6.2.4 不均質物性領域における最適な空間分割法

東濃地域の解析モデルでは、飽和透水係数が異なる領域が複数存在しており対象が不均質となっている。したがって 6.2.2 で述べたように、領域の境界面付近における空間分割について検討を行う必要があると考えられる。本項目では鉛直方向ないしは水平方向に飽和透水係数が異なる 2 領域が層をなしている場合の空間分割法を検討する(図 6.2-5)。図 6.2-1 に示した東濃解析モデルを参考とし、飽和透水係数は $10^{-8} \sim 10^{-4}$ (cm/sec) の範囲を考慮する。解の精度の評価にあたっては 3.2 において示した基準を用いる。

(1) 鉛直方向不均質

2 領域がともに水平方向 500(m) × 深さ 250(m) の大きさである準二次元モデルを用い、鉛直方向に飽和透水係数が異なる 2 領域が層をなしている場合の空間分割法について検討した。なお、飽和透水係数以外の土壤特性および境界条件は基本ケースと同じ設定とし、また物性が同じ領域内では均等格子を用いた。

解析の結果、上部領域にあたえられる流束とその飽和透水係数の関係が、対象全体の全水頭分布および鉛直方向動水勾配に対して支配的であると考えられる。上部領域に比べ下部領域ではその飽和透水係数の影響が少なく、また流束が与えられる上部境界付近では特にその飽和透水係数に応じた格子分割を実施する必要があることがわかった。

(2) 水平方向不均質

2 領域がともに水平方向 250(m) × 深さ 500(m) の大きさである準二次元モデルを用い、水平方向に飽和透水係数が異なる 2 領域が層をなしている場合の空間分割法について検討する。なお、飽和透水係数以外の土壤特性および境界条件は基本ケースと同じ設定とし、また物性が同じ領域内では均等格子を用いた。

解析の結果、鉛直方向の格子分割幅は 2 つの領域のうち飽和透水係数が小さい領域の影響が支配的であると考えられる。鉛直方向の格子分割幅に関しては 2 領域のうち飽和透水係数が小さい領域の影響が支配的であり、水平方向の格子分割幅に関しては領域の飽和透水係数が小さい場合にはそれに応じて格子幅を細かくする必要があることがわかった。

6.2.5 要素形状の影響

使用する要素の形状の影響について評価を行う。具体的な評価項目は隣接要素間の格子幅比の影響、要素のゆがみの影響、および要素のアスペクト比の影響である(図6.2-6)。これらの場合には立方体ないしは直方体要素による解析に対して精度が低下することが考えられる。ここでは6.2.2で示した基本ケースおよび基本ケースから最適分割に関してパラメータをより厳しい条件側へ変化させた場合:

- ・ $ix = 1.0 (\Delta\phi^* = 5.0 \times 10^{-1})$: 基本ケースでは $ix = 0.02, \Delta\phi^* = 1.0 \times 10^{-2}$
- ・ $\phi_1^* = -8.2 \times 10^{-1} (\theta = 0.13)$: 基本ケースでは $\phi_1^* = -2.0 \times 10^{-2} (\theta = 0.60)$
- ・ $q^* = 6.60 \times 10^0$: 基本ケースでは $q^* = 6.60 \times 10^{-1}$

について検討した。なお各パラメータはそれぞれ独立に変化させることとし、それ以外のパラメータは基本ケースと同じ値とした。解の精度の評価は6.2.3において決定した最適な均等格子による解との比較により行った:

$$\text{Max}|\overline{F(i)} - \overline{F_0(i)}| \leq \varepsilon_e = 10^{-3}$$

ただし $\overline{F_0(i)}$ は最適な均等格子による解、 $\overline{F(i)}$ は精度を評価するべき解とする。

(1) 隣接要素間格子幅比の影響

鉛直中央面 ($x = 250(m)$) 上における解のみの精度を評価する場合の不均等格子分割について検討した。鉛直方向は均等格子、水平方向は中央面を含む要素の格子分割幅を最小幅 Δx_{min}^* とし、そこから離れるにしたがい等比数列的に格子幅を大きくする。 n 番目の要素の水平方向格子分割幅 Δx_n^* を:

$$\Delta x_n^* = r^{n-1} \times \Delta x_{min}^* (r > 1)$$

とし、中央面に対して対称とする。また最小格子分割幅を Δx_{min}^* 、隣接要素間格子幅比(以下ストレッチ比とする)を r とする(図6.2-6 参照)。許容されるストレッチ比 r は $\varepsilon_e = 10^{-3}$ とした場合には約 $1.4 \sim 1.6$ 、 $\varepsilon_e = 10^{-2}$ とした場合には約 $2.2 \sim 2.8$ であった。

(2) 要素のゆがみの影響

要素のゆがみの影響について検討した。水平面(xy 平面)上の要素を全体的にゆがませる場合と鉛直面(xz 平面)上の要素を全体的にゆがませる場合について検討した。

6.2.3において決定した最適な均等格子を用い、数値解の精度を評価する。頂角が約50度以下では誤差が急激に増加する傾向を有することがわかった。許容される要素の頂角(鋭角)は $\varepsilon_e = 10^{-3}$ とした場合には水平面に関しては約42～48度、鉛直面に関しては約48～60度であった。一方 $\varepsilon_e = 10^{-2}$ とした場合には水平面に関しては約25～32度、鉛直面に関しては約40～43度であった。

(3) 要素のアスペクト比の影響

xz 面における格子分割は6.2.3において決定した最適な均等格子とし、奥行き方向(y 軸)を様々な条件下(Δy^* および y 軸方向の層数)で変化させた格子を用いた解析を行い、要素のアスペクト比の影響に関する検討を実施した。少なくともアスペクト比が約 $10^{-5} \sim 10^5$ の範囲では有意な誤差は生じないことがわかった。

6.2.6 まとめ

(1) ベンチマーク・テスト

ベンチマーク・テストの結果得られた知見を以下に示す。

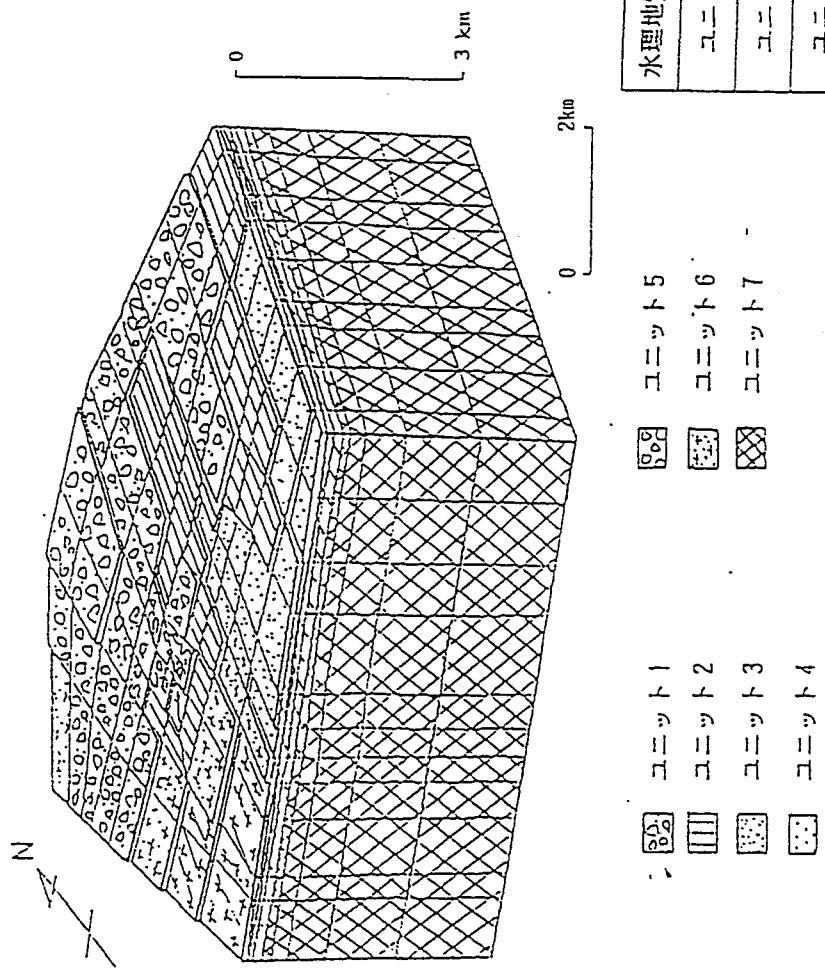
1. 水平あるいは鉛直方向の動水勾配が大きい領域では、空間分割幅を細かくする必要がある。
2. 鉛直方向に不均等格子を用いた場合には、効率的に高精度な数値解を得るために空間分割が可能である。また特に対象の中央部における解を評価する場合および対象の物性が水平方向に不均質な場合には、水平方向に不均等格子を用いることにより、均等格子に比べ少ない要素数で効率的に高精度な数値解を得ることが可能である。
3. 要素の頂角が直角から離れている場合には、頂角(鋭角)を約40～50度以下とすると誤差が急激に増加することがわかった。また動水勾配が存在しない方向(y軸方向)の要素のアスペクト比に関しては、 $10^{-5} \sim 10^5$ の範囲では有意な誤差は生じないことがわかった。なお、最適分割におけるアスペクト比(>1)の最大値は 10^2 程度である。
4. 一様性の評価基準を $\epsilon_c = 10^{-3}$ とした場合の最適分割幅は約 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ (無次元化された値)の範囲であり、これを東濃解析例において用いられている対象の大きさに適用すると $10^6 \sim 10^7$ オーダー程度の要素および節点となる。 $\epsilon_c = 10^{-2}$ とすることにより最適分割幅は約10倍となるため、 $10^3 \sim 10^4$ オーダー程度の要素および節点により空間分割を行うことが可能である。

(2) スケールアップに関する検討

東濃解析例では $8(km) \times 7(km) \times$ 深さ $3(km)$ の領域を対象としている。一方、本ベンチマーク・テストでは $0.5(km) \times$ 深さ $0.5(km)$ の領域を対象として検討を行ってきた。対象をスケールアップし $8(km) \times$ 深さ $3(km)$ の準二次元モデルを用いた場合について最適分割を決定したところ、最適な格子分割幅は対象のスケールには関係なく動水勾配すなわち対象の飽和透水係数と上部境界における流束の関係によって決定されることが確認された。

(3) 東濃モデル評価

上部境界にあたえられる流束とその飽和透水係数の関係が最適な空間分割幅に対して最も支配的である。東濃解析例では、地下深部に比べ地表面付近において Δz を細かくしている。しかしながら、図 6.2-1 に示した水理地質構造モデルにおいて地表面が高透水性の未固結堆積物(ユニット 1)の場合に対して難透水性の砂岩(ユニット 3／凝灰質、細～中粒)の場合には飽和透水係数が 5.4×10^{-4} 倍となっているが、地表面近傍の鉛直方向格子幅は同じ値($\Delta z = 50(m)$)としている。本ベンチマーク・テストの結果から、地表面の飽和透水係数に応じた格子分割を実施する必要があると考えられる。水理地質構造モデル(図 6.2-1)の水平面(xy面)上への投影図および鉛直面(yz面)上への投影図を図 6.2-9 および図 6.2-10 に示す。頂角(鋭角)が約 40 ~ 50 度以下である要素を用いているため、有意な誤差を生じていることが考えられる。また 6.2.3 で検討した鉛直方向不均等な格子分割において許容される鉛直方向の隣接要素間格子幅比の最も厳しい条件は約 3.0 であったが、東濃解析例では 2.5 が最大であるため有意な誤差を生じる原因とはなっていないと考えられる。



| 水理地質ユニット | 透水係数 (cm/s) | 岩相 |
|----------|----------------------|----------------|
| ユニット 1 | 1.0×10^{-4} | 未固結堆積物 |
| ユニット 2 | 1.9×10^{-6} | 砂岩 (中～粗粒) |
| ユニット 3 | 5.4×10^{-8} | 砂岩 (緻灰質, 細～中粒) |
| ユニット 4 | 2.1×10^{-6} | 礫岩 (細～中粒) |
| ユニット 5 | 6.6×10^{-6} | 礫岩 (中～粗粒) |
| ユニット 6 | 2.4×10^{-5} | 風化花崗岩 |
| ユニット 7 | 6.3×10^{-6} | 花崗岩 |

図6.2-1 東濃地域の水理地質構造モデル

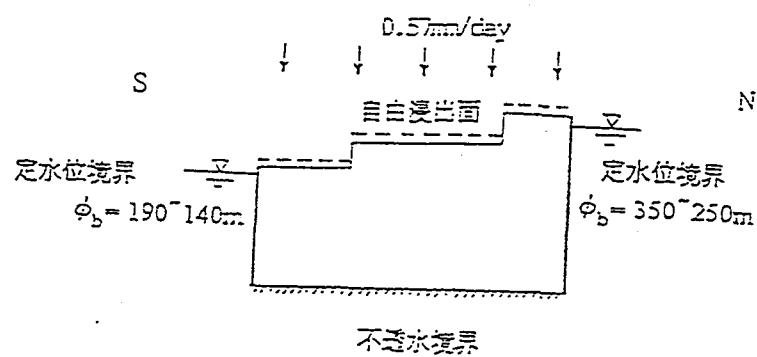
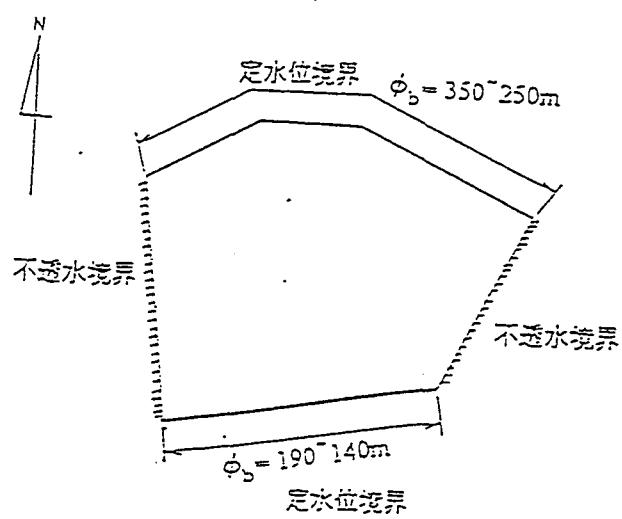


図6.2-2 広域水理問題境界条件

-  固定水頭境界条件
-  固定流量境界条件
-  不透水境界条件

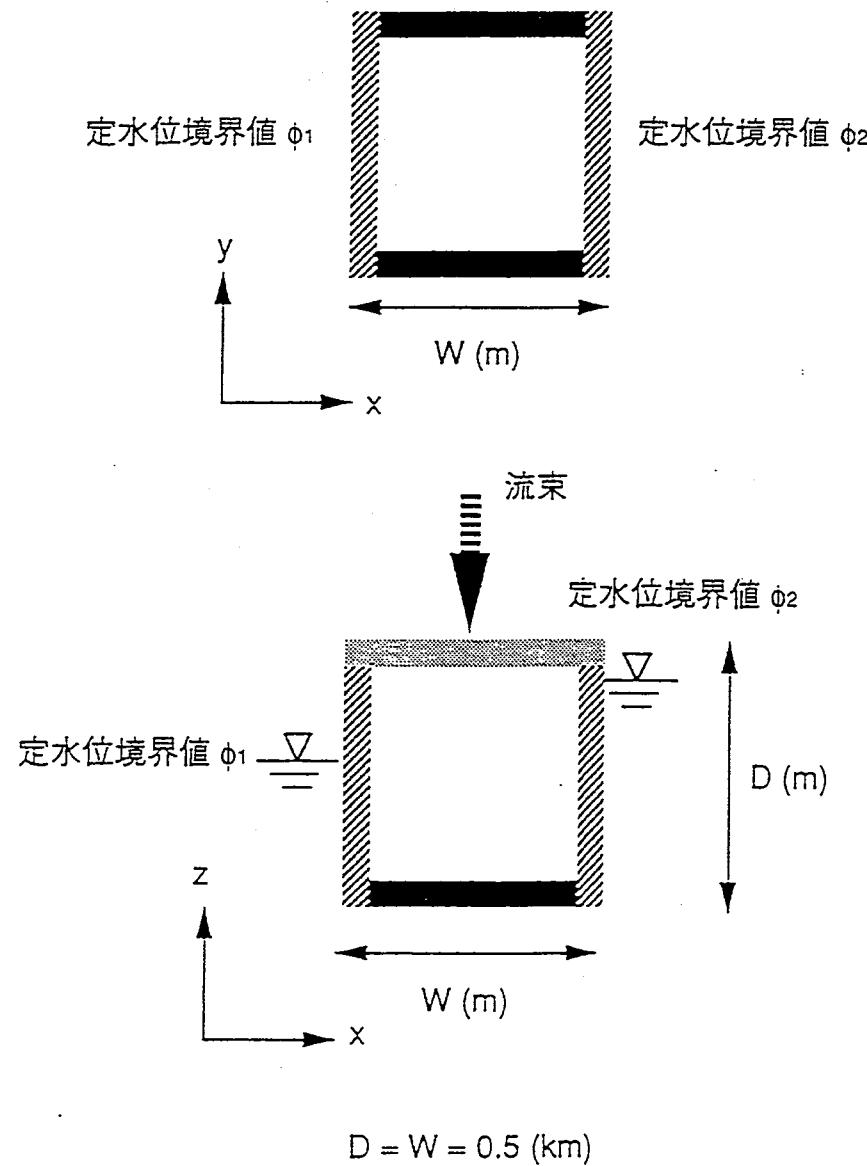


図6.2-3 ベンチマーク・テスト用解析モデルおよび境界条件

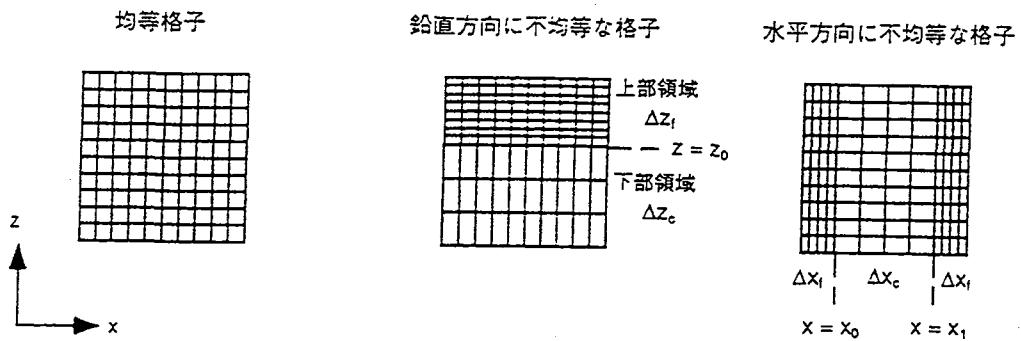


図6.2-4 空間分割法（均質物性領域）

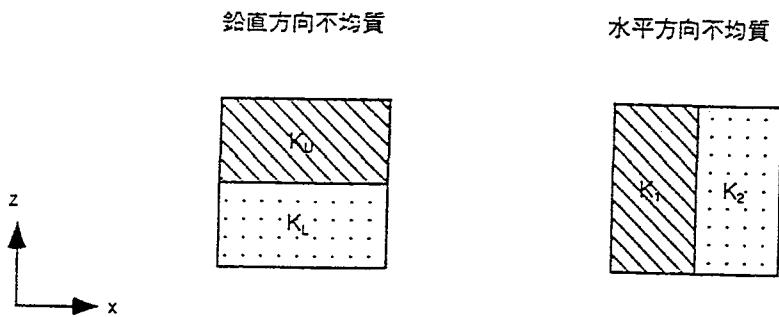


図6.2-5 空間分割法（不均質物性領域）

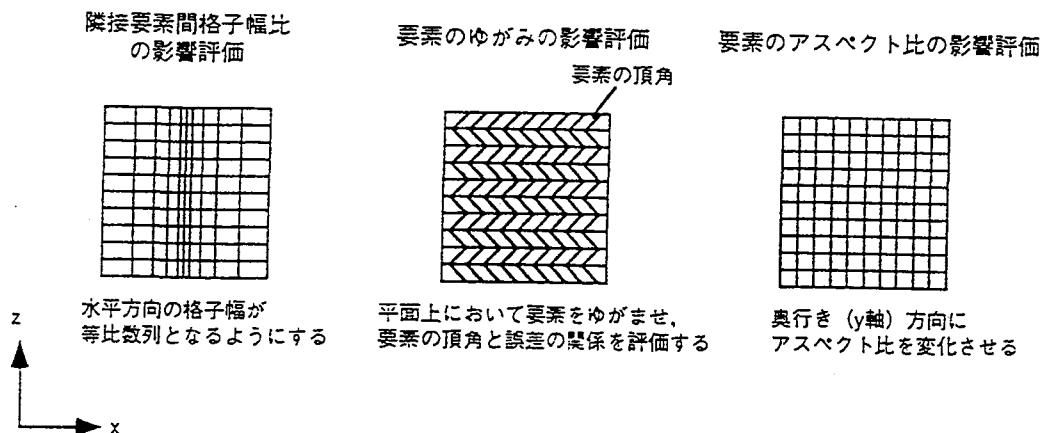


図6.2-6 要素形状の影響評価

図6.2.7 鉛直方向不均等格子：最適分割における要素数とパラメータの関係

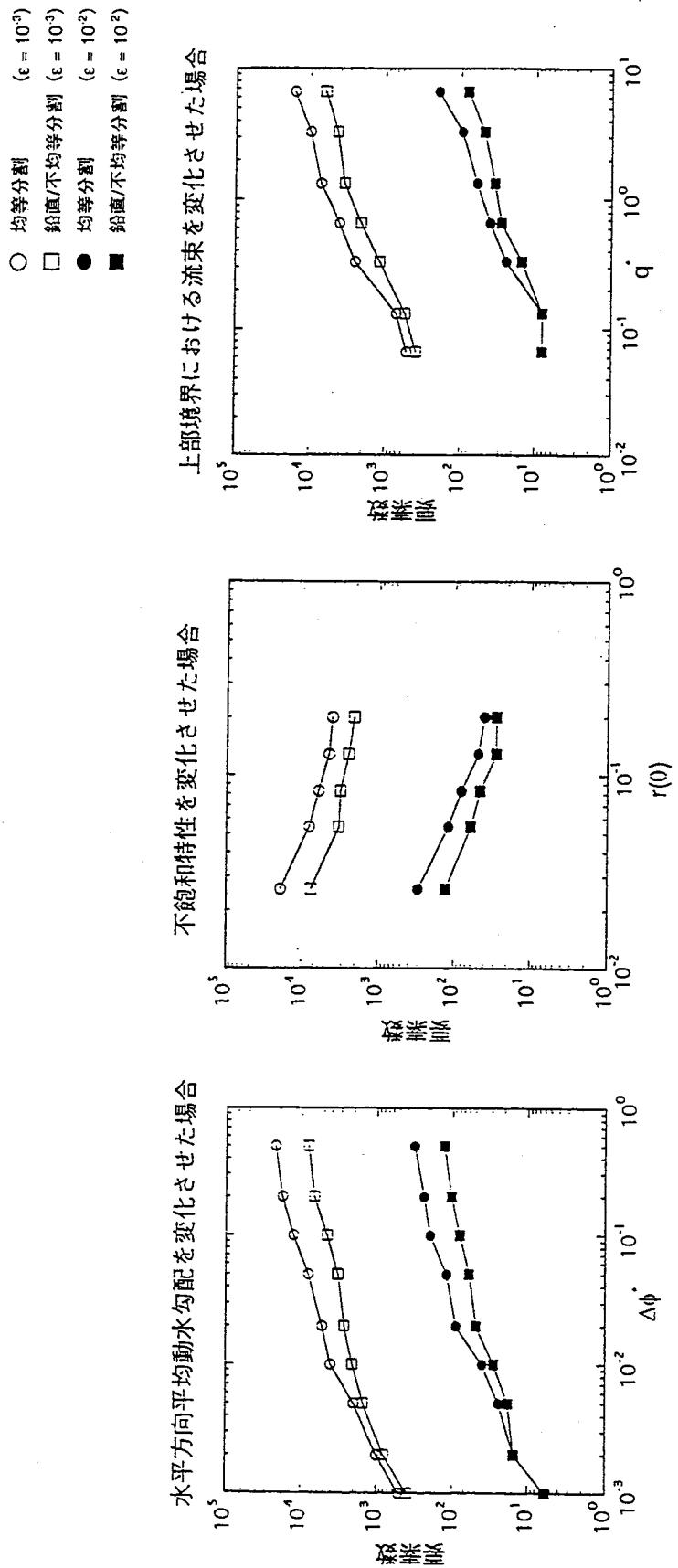
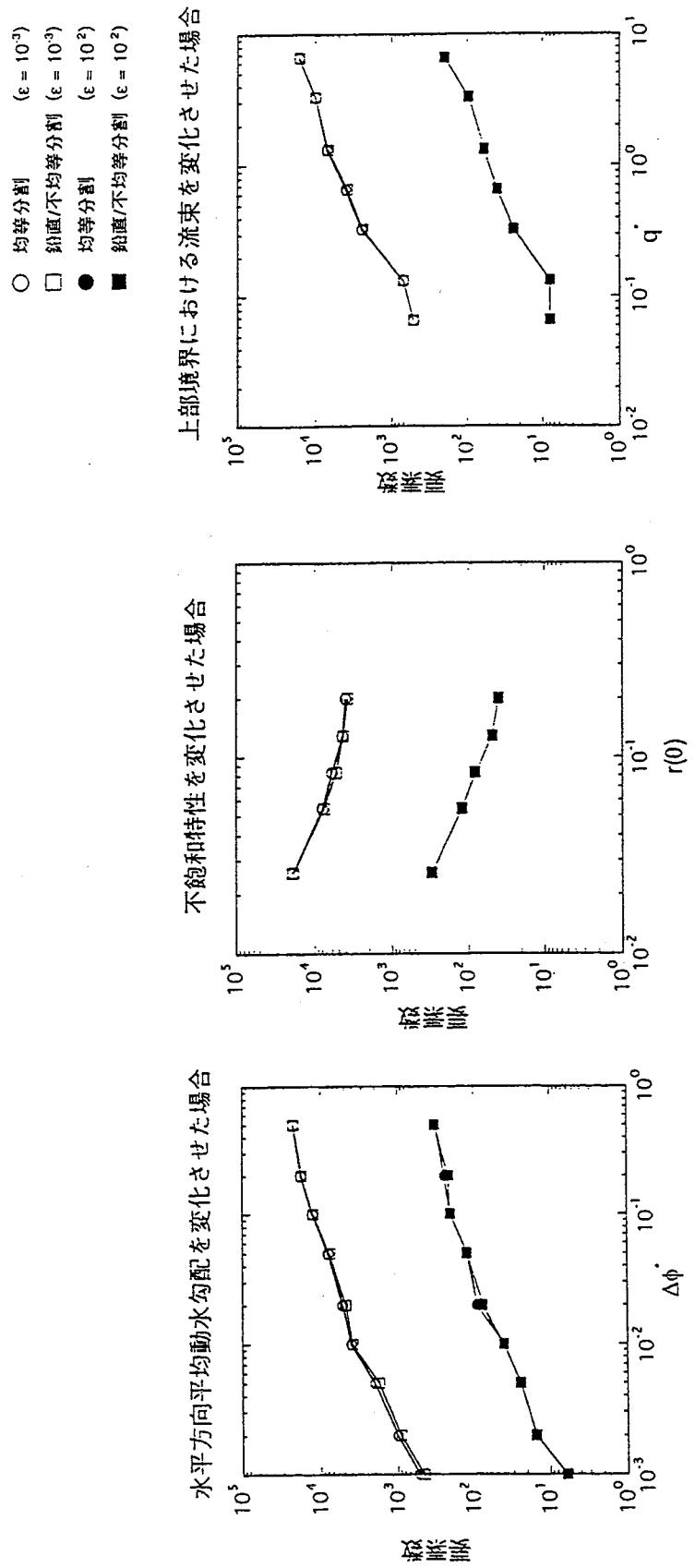


図6.2-8 水平方向不均等格子：最適分割における要素数とパラメータの関係



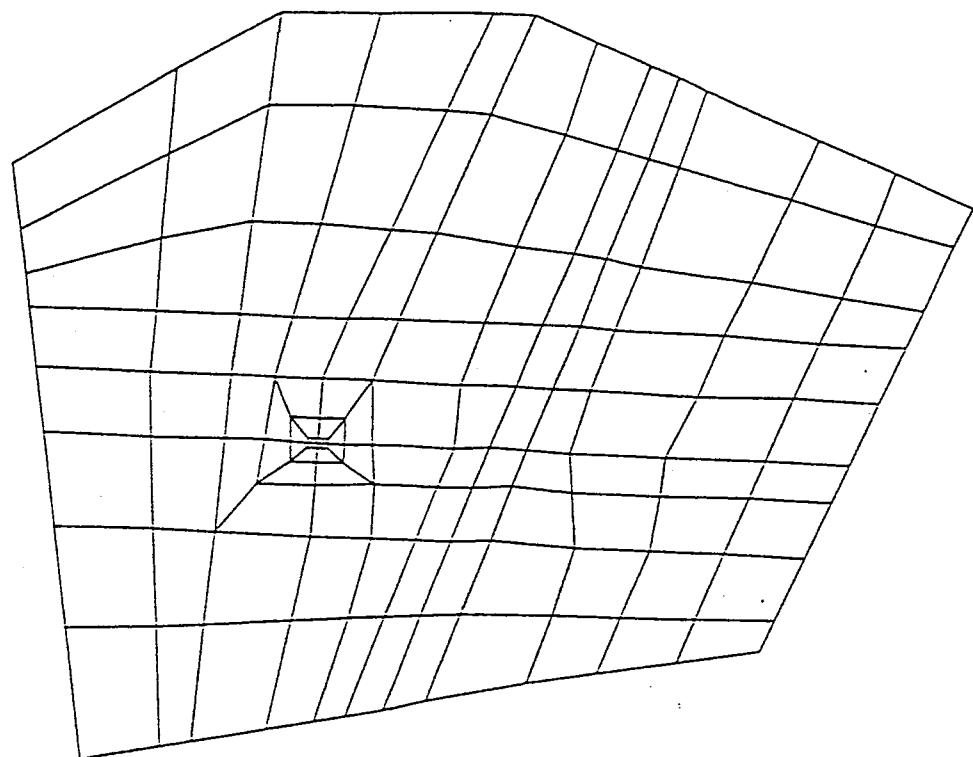


図6.2-9 東濃解析モデル：水平断面

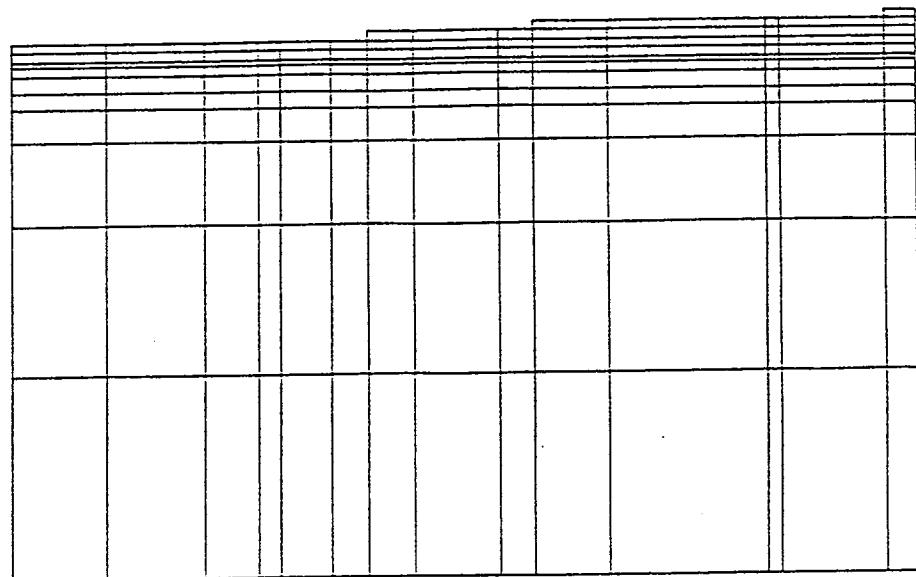


図6.2-10 東濃解析モデル：鉛直断面

6.3 掘削問題

6.3.1 問題の概要

立坑掘削時の地下水流動の非定常解析について検討する。TAGSAC マニュアルに添付されている例題(以下「マニュアル例題」とする)を対象としたベンチマーク・テストを作成し、様々な条件下における解の精度および安定性を検討することにより最適分割の組み合わせを決定する。マニュアル例題で使用されている解析モデルおよび境界条件を図 6.3-1 に、掘削過程を図 6.3-2 に示す。解析対象は均質物性領域(飽和透水係数 $K = 10^{-4}(cm/sec)$)である。また側方境界により設定される水平方向平均動水勾配は $ix = 0.2$ である。初期条件は掘削開始以前の定常状態を使用する。マニュアル例題で用いられている要素分割を図 6.3-3 に、時間分割を図 6.3-4 に示す。解析の結果、掘削部周辺では動水勾配が大きくなつており、他の領域に比べて格子分割幅を細かくする必要があると考えられる。

6.3.2 ベンチマーク用解析モデル

(1) ベンチマーク用解析モデル

マニュアル例題では掘削部の左側と右側の領域では境界条件が異なっており(図6.3-1)、それぞれの領域では最適分割の組み合わせが異なることが予想されるためベンチマーク・テストでは掘削部に対して左右に2分割したモデルを用いて最適分割を決定する。掘削部側方境界が自由浸出条件となっている左側領域をモデルA、不透水条件となっている右側領域をモデルBとする。ベンチマーク用解析モデルおよび条件を図6.3-5に示す。掘削部境界値($\phi_{A2}(t), \phi_{A3}(t), \phi_{B2}(t), \phi_{B3}(t)$)にはマニュアル例題解析結果を用いる。初期条件にはモデルA、モデルBとも、それぞれ掘削開始以前の定常状態を用いる。また以下のようにマニュアル例題と同じパラメータ設定としたモデルを基本ケースとする：

- ・飽和透水係数 : $K = 10^{-4}(\text{cm/sec})$
- ・水平方向平均動水勾配 : $ix = 0.2(\phi_{A1} = 50(\text{m}), \phi_{B1} = 40(\text{m}))$
- ・掘削速度 : $V_e = 2.5(\text{m/day})$
- ・掘削休止期間 : $T_s = 2(\text{day})$

(2) ベンチマーク方針

まず基本ケースに対して最適分割を決定し、マニュアル例題を評価した。さらに基本ケースからパラメータ(後述)を変化させた場合について最適分割を決定し、その感度を評価した。

(A) マニュアル例題の評価

基本ケースに対して解の安定性および一様性の条件(後述)を満たす最適分割を決定し、マニュアル例題を評価した。以下に示す掘削問題に特徴的な項目に着目して検討した。

1. 掘削部周辺での格子分割

掘削部領域では他の領域に比べて格子分割幅を細かくする必要があると考えられる。モデルAおよびBに対してそれぞれ図6.3-6に示す3種類の格子(均等格子、水平方向不均等格子、鉛直方向不均等格子)を用いた場合について、最適な格子分割を決定した。なおタイムステップはマニュアル例題と同じ設定とした。

2. 自由表面を含む要素が移動する場合の時間分割法

均等および不均等なタイムステップを用いた場合について、最適な時間分割を決定した。空間分割には、最適な空間分割（後述）を用いた。また自由表面を含む要素が移動する場合の時間分割法についても検討を実施した。

(B) パラメータの感度評価

基本ケースからパラメータを変化させた場合について最適分割を決定し、その感度を評価した。パラメータはそれぞれ独立に変化させ、それ以外のパラメータは基本ケースと同じ値とした。また基本ケースで用いたサクション ($\psi_0 = 10^3(m)$) および飽和透水係数 ($K_0 = 10^{-4}(cm/sec)$) により、変数を無次元化した。なお掘削速度 V_e と掘削休止期間 T_s に関しては、それぞれ基本ケースで用いた値により正規化を行う。

(3) 解の精度の評価

解の安定性の評価には (3.1) を用いた ($\varepsilon_s = 10^{-3}$)。6.3 では 1 日毎の解を評価したため、 $T_0 \leq 1(day) = 86400(sec)$ である場合には解は安定であるとした。また解の一様性の評価には (3.2) を用いた ($\varepsilon_c = 10^{-3}$)。

6.3.3 ベンチマーク・テスト (1)(マニュアル例題の評価)

6.3.3 ではまず解の安定性について検討を実施し、さらに解の一様性を評価した。また解の一様性を検討する際には、6.3.2 で述べた掘削問題に特徴的な評価項目についても検討した。

(1) 解の安定性に関する検討

解析の結果、4. の一次元予備解析と同様に計算のごく初期において解の空間的振動を生じ、時間経過とともに減衰する傾向が確認された。水平方向と鉛直方向の格子幅が等しい直交格子を用いて解析を行った結果得られた、格子幅 $\Delta x = \Delta z$ と解の振動が減衰するまでに要する時間 $T_0(\text{sec})$ の関係を図 6.3-7 に示す(ただし掘削部領域における格子幅は、それ以外の領域と同じないしはそれ以下の格子幅とする)。解の安定性の評価基準より、格子幅が 10(m) 以下の場合には数値解は安定であると考えられる。

(2) 解の一様性および最適分割に関する検討

一様性の条件を満たす空間および時間分割を検討し、さらに解の安定性を考慮して最適分割を決定した。

(A) 空間分割に関する検討

モデル A およびモデル B に対して、それぞれ図 6.3-6 に示す 3 種類の格子(均等格子、水平方向均等格子、鉛直方向均等格子)を用いて、少ない要素数で効率よく高精度な解を得られる最適な空間分割を決定した。

(B) 時間分割に関する検討

均等および不均等なタイムステップを用いた解析を実施した。なおここでは得られた最適な均等格子を用いて、一様な時間分割を決定し最適な時間分割とした。また自由表面を含む要素が移動する場合の時間分割法に関しても検討した。

1. 均等なタイムステップによる検討

モデル A および B に対して最適な均等 Δt_{opt} を決定した。モデル B に比べモデル A の方がより厳しい条件であり、より厳しい条件側を採用し $\Delta t_{opt} = 5 \times 10^2(\text{sec})$ とした。

2. 自由表面を含む要素が移動する場合の時間分割法の検討

モデル A に対して自由表面を含む要素が移動する場合の時間分割法を検討した。均等な $\Delta t_{opt} = 5 \times 10^2(sec)$ を用いた場合の解析結果を基準として、図 6.3-8 および図 6.3-9 に示す 2 種類の時間分割を用いた解析結果をそれぞれ比較する。なお空間分割に関しては得られた最適な均等格子を用い、解の評価にあたっては $4(day) = 345600(sec)$ 後の結果を使用した。均等な $\Delta t_{opt} = 5 \times 10^2(sec)$ を用いて得られた解と比較した結果、図 6.3-8 に示した時間分割法を用いた方が、図 6.3-9 に示した時間分割法を用いた場合に比べタイムステップのストレッチ幅(公比) r が大きいにもかかわらず解の精度が高かった。すなわち、自由表面を含む要素が移動する場合には Δt を小さく設定するべきである。以下においては、自由表面を含む要素が移動する場合にはタイムステップを小さく設定した。

3. 不均等なタイムステップによる検討

モデル A に対して、 Δt を等比数列的に増加させる場合について許容されるストレッチ幅 r を求めた。 $\Delta t_{opt} = 5 \times 10^2(sec)$ を基準として：

$$\Delta t_n = r^n \times \Delta t_0, \Delta t_0 = \Delta t_{opt}$$

とする。自由表面を含む要素が移動する場合には Δt を小さく設定する ($\Delta t = \Delta t_{opt}$)。最適な均等 Δt を用いた場合の解と比べ誤差の最大値を評価したところ許容される r の最大値は約 1.4 であった。

6.3.4 ベンチマーク・テスト(2)(パラメータの感度評価)

基本ケースからパラメータを変化させた場合について最適分割の組み合わせを決定し、パラメータの感度を評価した。6.3.3ではモデルBに比べモデルAの方が最適な空間および時間分割幅に関する条件が厳しいことがわかった。より厳しい条件側としてモデルAを対象としてベンチマーク・テストを行った。なお解析にあたっては均等格子を用いた。

(1) 飽和透水係数を変化させた場合

基本ケースの $10^{-4} \sim 1.0$ 倍 ($K^* = 10^{-4} \sim 1.0$) の範囲で K^* を変化させた場合について考慮した。一様性の条件を満たす ($\Delta x_{con}^*, \Delta z_{con}^*$) は $K^* = 1.0, 10^{-2}$ の場合には安定性の条件を満たすが、 $K^* = 10^{-4}$ の場合には安定性の条件を満たさない。

(2) 水平方向平均動水勾配を変化させた場合

基本ケースの $0.1 \sim 10.0$ 倍 ($ix = 0.02 \sim 2.0$) の範囲で ix を変化させた場合について考慮した。 $ix = 0.02 \sim 2.0$ の範囲で変化させる場合には安定性よりも一様性の条件の方が厳しい。

(3) 掘削速度を変化させた場合

基本ケースの $10^{-1} \sim 10^1$ 倍 ($0.25 \sim 25.0(m/day)$) の速度で深度 $10(m)$ まで掘削を実施した場合について考慮した。 $V_e^* = 10^{-1} \sim 10^1$ の範囲で変化させる場合には安定性よりも一様性の条件の方が厳しい。

(4) 掘削休止期間を変化させた場合

$2.5(m/day)$ の速度で深度 $10(m)$ まで掘削を実施し、基本ケースの $10^{-1} \sim 10^1$ 倍 ($0.2 \sim 20.0(day)$) の間掘削を休止後、再び $2.5(m/day)$ の速度で深度 $20(m)$ まで掘削を実施する場合について考慮した。 $T_s^* = 0.1 \sim 10.0$ の範囲で変化せる場合には安定性よりも一様性の条件の方が厳しい。

6.3.5 まとめ

(1) ベンチマーク・テスト

ベンチマーク・テストの結果得られた知見を以下に示す。

1. 掘削周辺領域では他の領域と比較して空間分割幅を $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 程度に細かくする必要がある。最適な空間分割では許容される隣接要素間格子幅比は鉛直方向では約 3.3、水平方向では約 3.6 である。水平方向および鉛直方向に不均等格子を用いることにより、均等格子に比べそれぞれ約 0.7 倍、0.8 倍の要素数で効率的に高精度な数値解を得ることが可能である。
2. 時間経過とともにタイムステップを等比数列的に増加させ、効率的に高精度な数値解を得ることが可能である。許容されるストレッチ幅(公比) r は約 1.4 であり、また自由表面がある要素から別の要素へと移動する時刻においてはタイムステップを Δt_{opt} と小さく設定する必要がある。なおこの場合には均等タイムステップを用いる場合に比べ約 $\frac{1}{5 \times 10^3}$ 倍のステップ数である。
3. 本研究においてパラメータを変化させた場合について最適分割を決定した範囲では、対象の飽和透水係数が低い ($K = 10^{-8}(cm/sec)$) 場合を除き、安定性よりも一様性の条件の方が厳しくなっている。

(2) マニュアル例題の評価

6.3.3において得られた最適な空間分割(304 要素)を図 6.3-10 に、また最適な時間分割($30(day) = 2.592 \times 10^6(sec)$ まで 128 ステップ)を図 6.3-11 に示す。

最適な空間分割(304 要素)ではマニュアル例題(143 要素)に対して約 3.5 倍の要素数を要することとなる。これは一様性の条件が厳しかったためであり ($\varepsilon_c = 10^{-3}$)、ここではマニュアル例題と同程度の要素数からなる最適な空間分割を求めた。マニュアル例題で用いられている要素数を $C_0 = 143$ 、最適分割格子で用いられている要素数を $C_1 = 304$ として：

$$\Delta x'_{opt} \doteq \Delta x_{opt} \times \sqrt{\frac{C_0}{C_1}}$$

$$\Delta z'_{opt} \doteq \Delta z_{opt} \times \sqrt{\frac{C_0}{C_1}}$$

求められた $(\Delta x'_{opt}, \Delta z'_{opt})$ の組合せを新たに最適分割とした。新たに得られた最適な空間分割(144要素)を図6.3-12に示す($\varepsilon_c = 3 \times 10^{-3}$ 程度に相当する)。

ベンチマーク・テストの結果、掘削領域からの距離によって格子分割幅を変化させる場合には許容される隣接要素間格子幅比は鉛直方向に関しては約3.3、水平方向に関しては約3.6である。マニュアル例題で用いられている隣接要素間格子幅比の最大値は鉛直方向および水平方向ともに2.0であり、許容範囲内に収まっている。

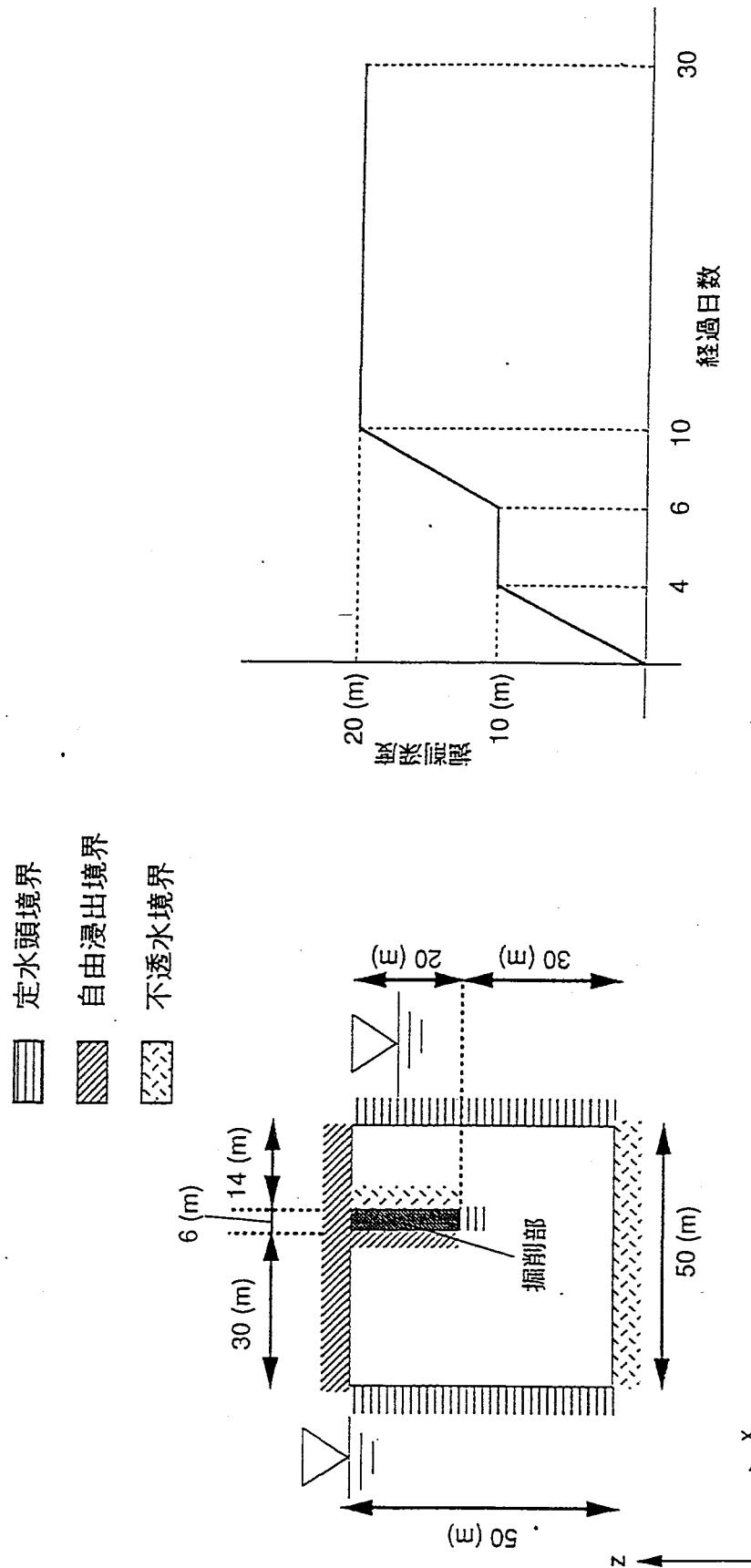


图6.3-1 挖削解析例：对象、境界条件

图6.3-2 挖削解析例：掘削過程

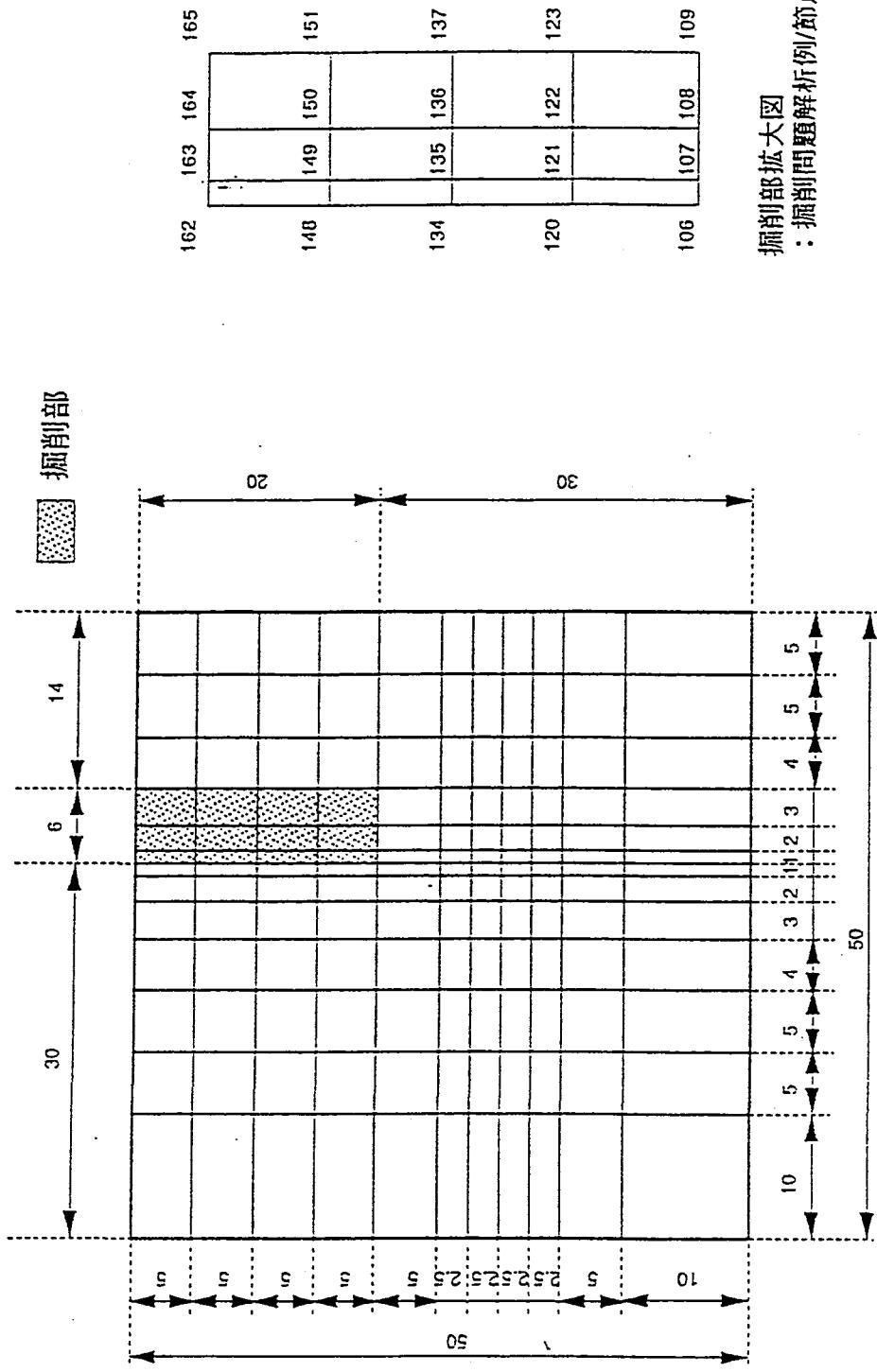


图6.3-3 挖削解析例：要素分割图

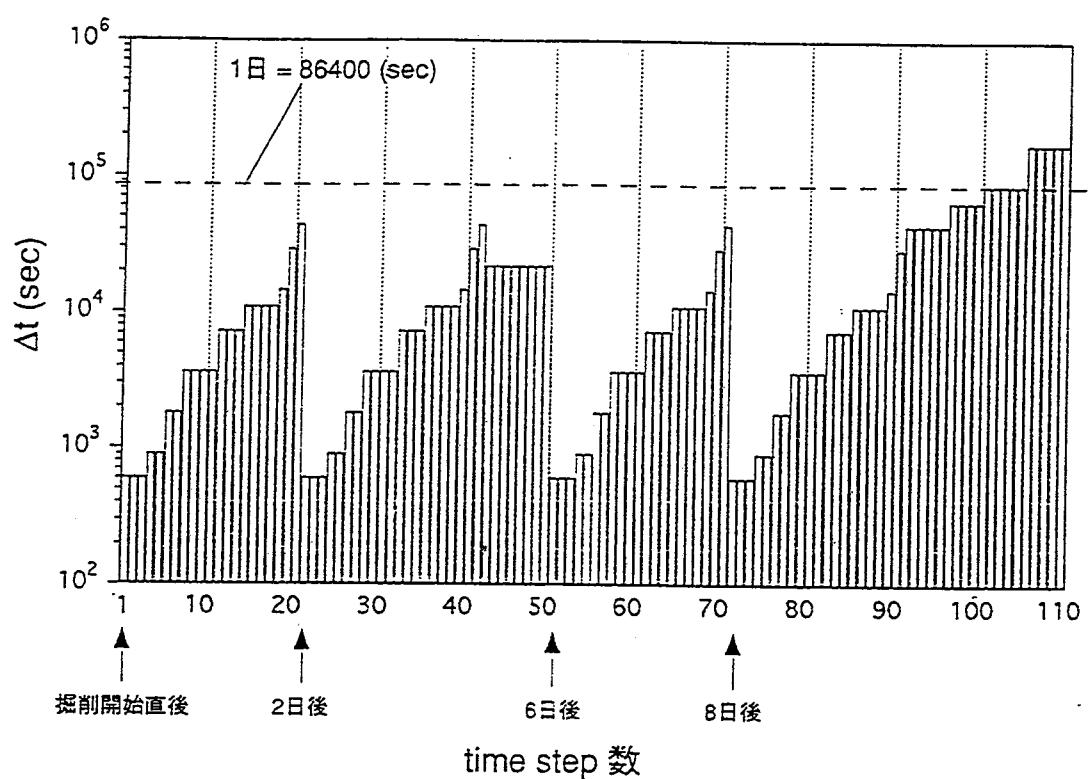
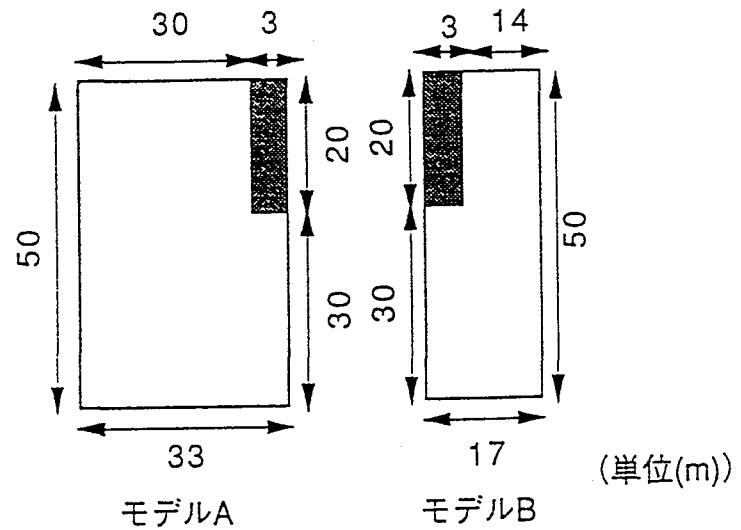


図6.3-4 挖削解析例：時間分割例

対象：



- 定水頭境界
- ▨ 自由浸出境界
- ▨ 不透水境界

境界条件：

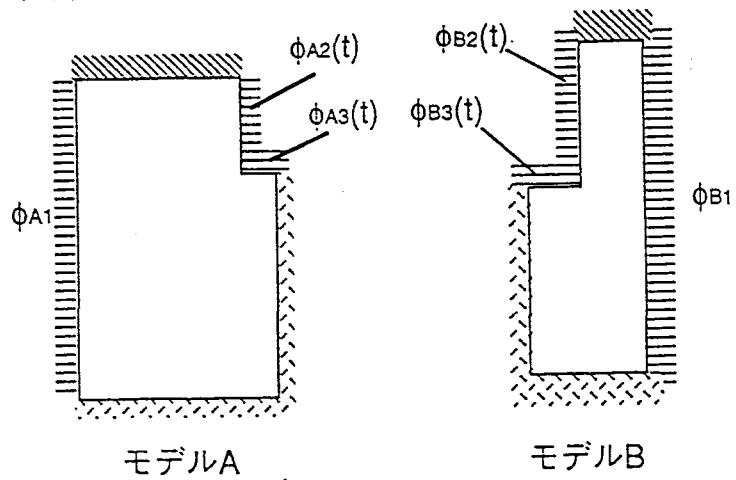
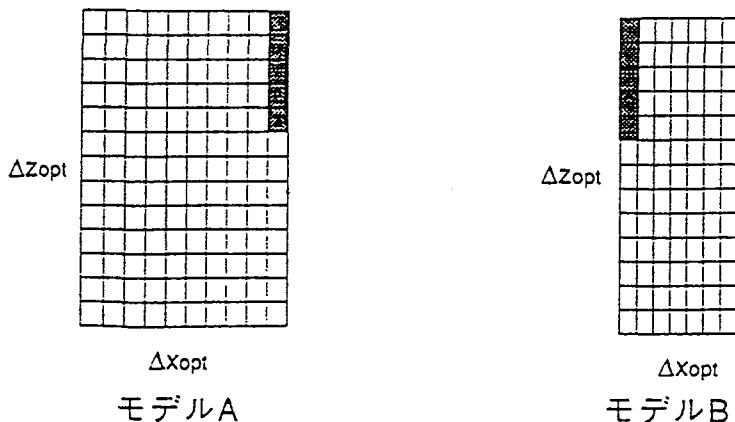
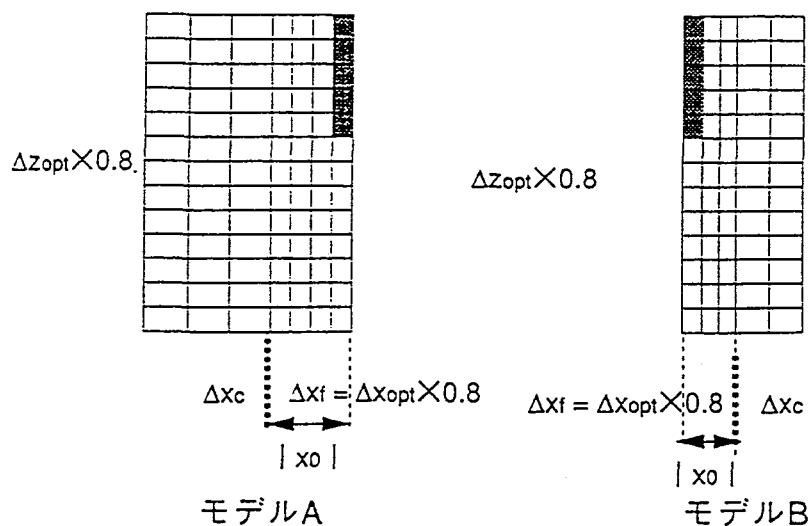


図6.3-5 ベンチマーク用解析モデルおよび条件

均等格子



水平方向不均等格子 (鉛直方向均等)



鉛直方向不均等格子 (水平方向均等)

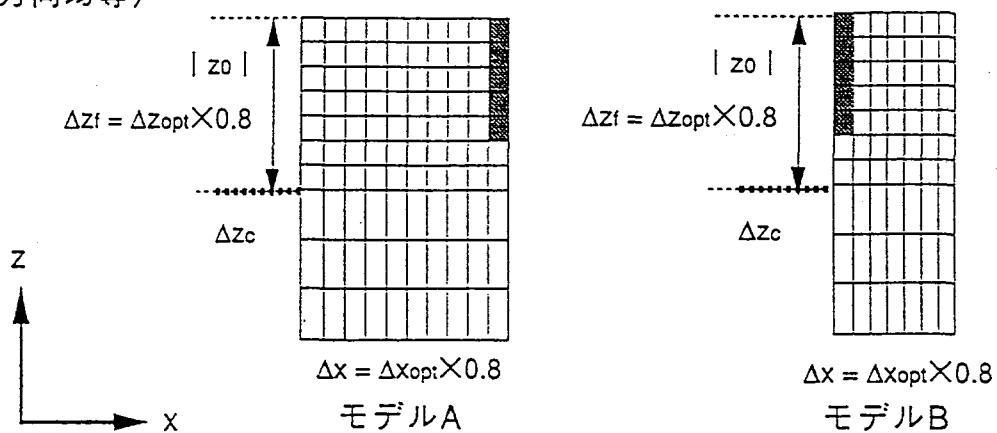


図6.3-6 ベンチマーク用解析モデル：空間分割例

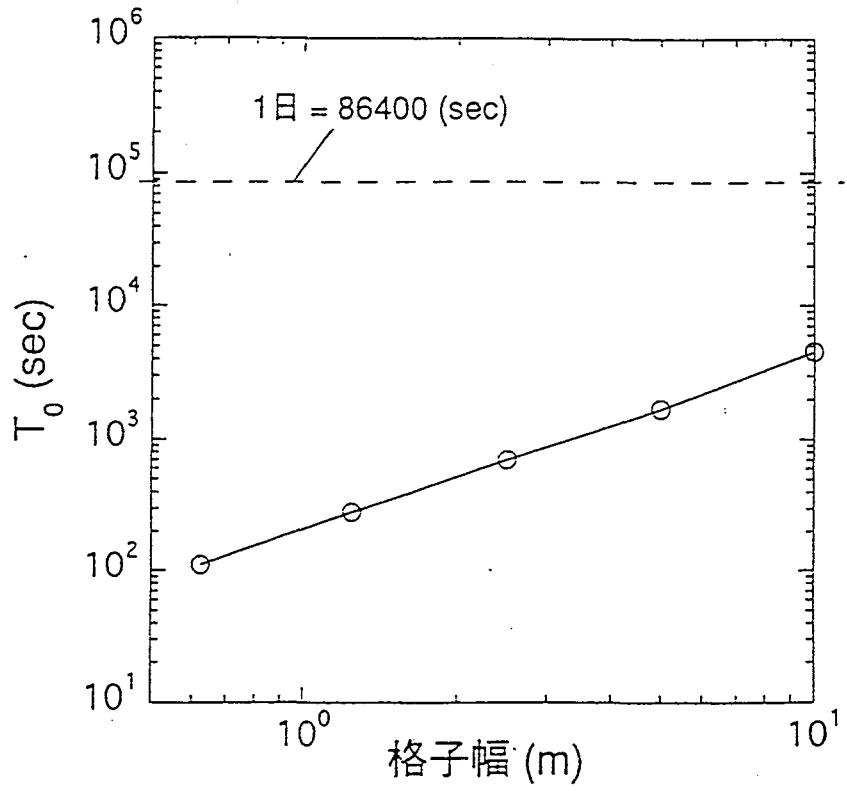


図6.3-7 解の安定性評価：モデルA

均等格子を用いた場合、格子幅と T_0 の関係

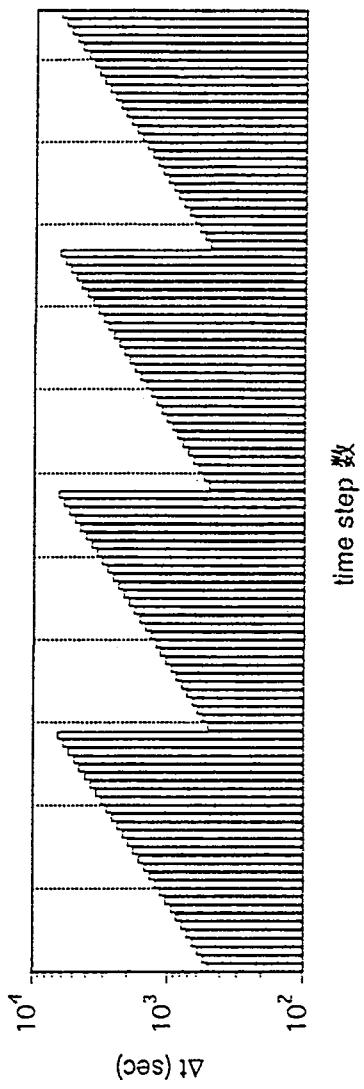


図6.3-8 最適な時間分割の検討：時間分割例（1）

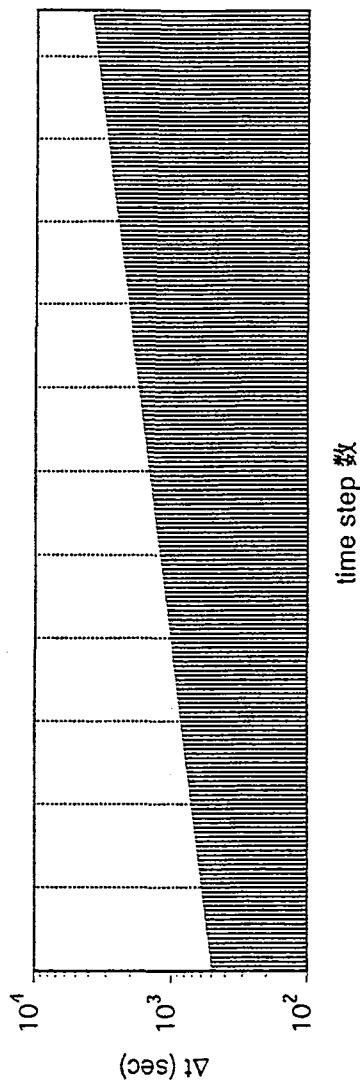


図6.3-9 最適な時間分割の検討：時間分割例（2）

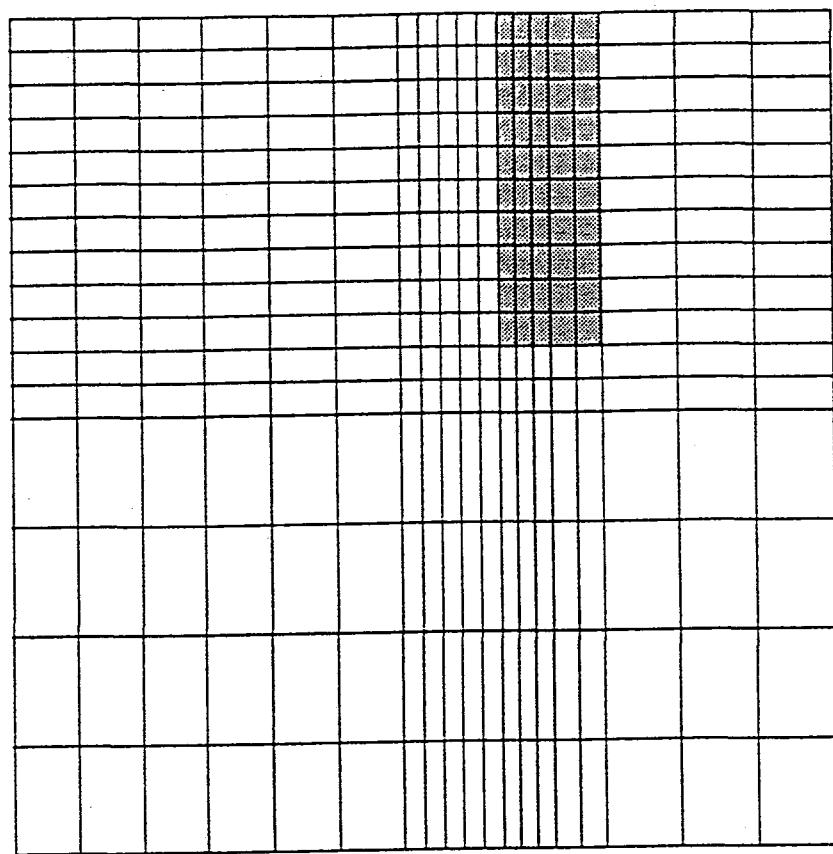


図6.3-10 最適な空間分割 (1) (304要素)

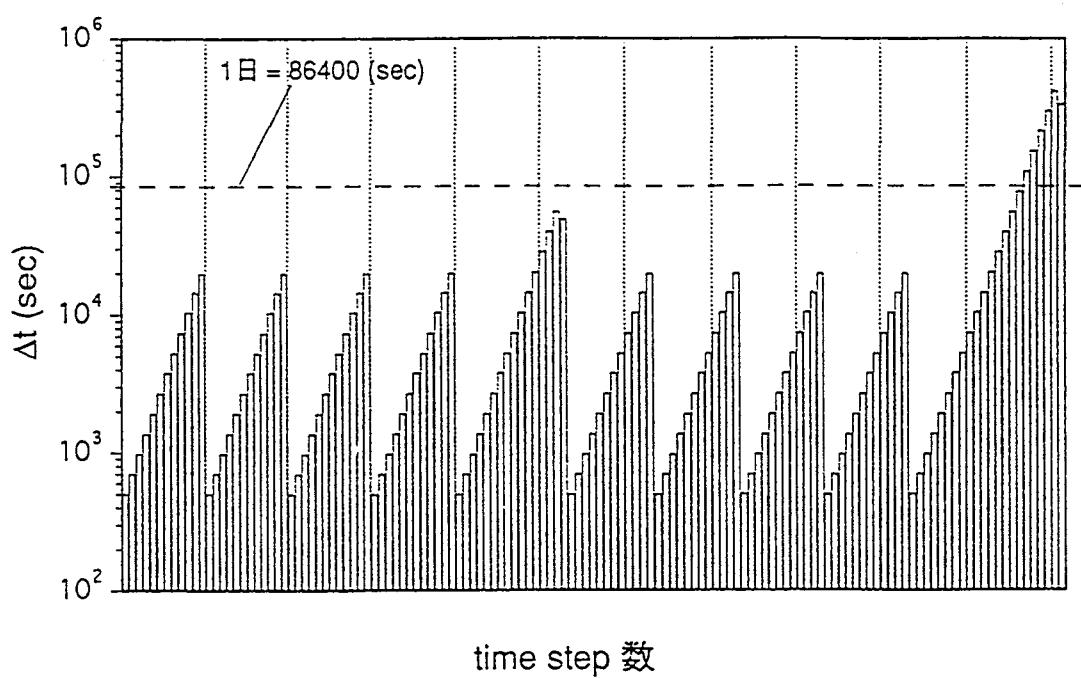


図6.3-11 最適な時間分割

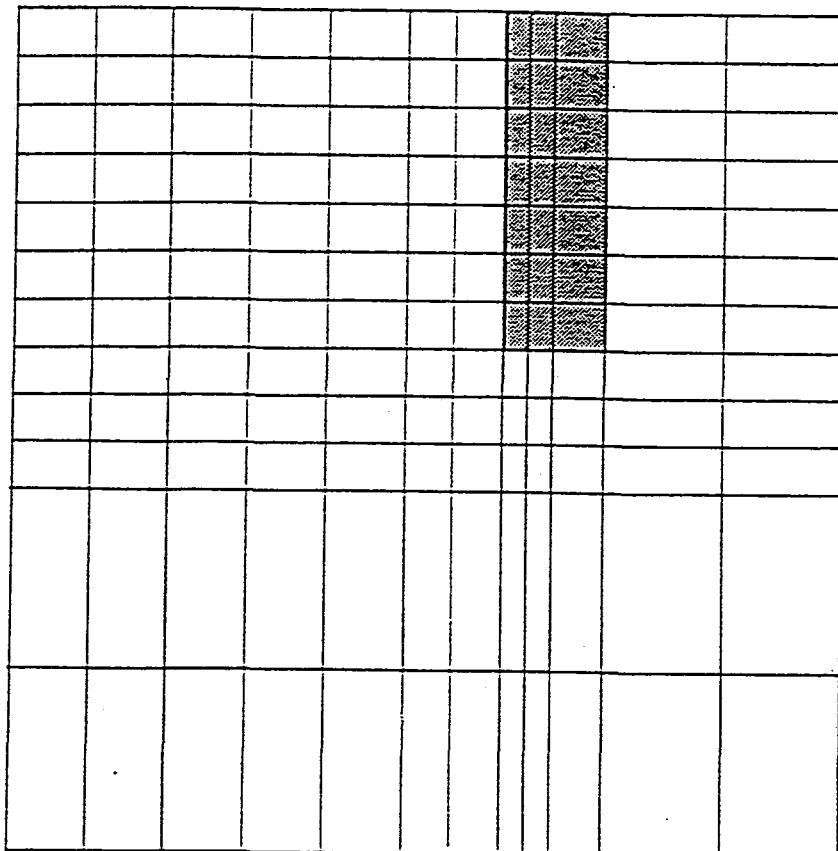


図6.3-12 最適な空間分割（2）（144要素）

6.4 処分坑道周辺の不飽和領域問題

6.4.1 問題の概要

処分坑道周辺の非定常地下水流动解析について検討する。図 6.4-1 に示すような処分坑道周辺領域を対象とした解析モデル(以下「基本解析モデル」とする)に関するベンチマーク・テストを作成し、様々な条件下における解の精度および安定性を検討することにより最適な空間および時間分割の組み合わせを決定する。

解析対象は $15(m) \times$ 深さ $23(m)$ の準二次元領域であり、母岩(飽和透水係数 $K = 10^{-5}(cm/sec)$) およびゆるみ領域($K = 10^{-4}(cm/sec)$) からなる。また側方境界により設定される水平方向平均動水勾配は $ix = 0.05$ である。初期条件には処分坑道掘削開始以前の定常状態を使用する。

図 6.4-2 に示す要素分割(288 要素)を用いて解析した結果、タイムステップ $\Delta t (= 10^1 \sim 10^3(sec))$ には依存せず、計算のごく初期において自由表面形状の空間的振動を生じ時間経過とともに減衰する傾向が確認された。4. および 6.3 において解の空間的振動は Δx のみに依存していたが、6.4 では境界付近におけるメッシュ形状の影響についても検討する必要があると考えられる。

6.4.2 ベンチマーク用解析モデルおよび条件

(1) ベンチマーク用解析モデル

格子幅の影響および境界付近におけるメッシュ形状の影響をそれぞれ独立に評価するため、基本解析モデルを簡略化したベンチマーク用解析モデルを設定した。ベンチマーク用解析モデルおよび条件を図 6.4-3 に示す。解析対象は均質物性であると仮定し、またトンネル断面形状は矩形とした。初期条件には処分坑道掘削開始以前の定常状態を使用した。また以下のように基本解析モデルと同じパラメータ設定としたモデルを基本ケースとした：

- ・飽和透水係数 : $K = 10^{-5} \text{ (cm/sec)}$
- ・水平方向平均動水勾配 : $ix = 0.05 (\phi_1 = 16.0 \text{ (m)}, \phi_2 = 15.25 \text{ (m)})$

(2) ベンチマーク方針

6.4 では基本解析モデルに対して最適な空間および時間分割の組み合わせを検討する。ベンチマーク・テストでは、まず基本ケースにおける最適分割を決定し、さらに最適分割に対するパラメータの感度を評価する。

(A) 基本ケースにおける最適分割の決定

基本ケースに対して解の安定性および一様性(後述)を検討し、最適分割を決定する。

1. 解の安定性の評価

以下の各要因が解の安定性に及ぼす影響を評価する(後述)。

(a) 格子幅

格子幅が異なる様々な直交格子を用いた解析を実施する。

(b) メッシュ形状

直方体要素とゆがみのある要素(平行六面体要素)を様々な要素数比で組み合わせたメッシュを用いて解析を実施し、各解析結果を比較する(ただし総要素はほぼ同数とする)。またゆがみのある要素のみを用いて解析を行い、用いた要素数と解の安定性の関係を検討する。

2. 解の一様性の評価

一様性の条件を満たす空間および時間分割を決定する(評価基準については後述)。

(B) パラメータの感度評価

基本ケースからパラメータを変化させた場合について最適分割を決定し、パラメータの感度を評価する。各パラメータはそれぞれ独立に変化させ、それ以外のパラメータは基本ケースと同じ値とする。空間分割には均等格子、時間分割には均等なタイムステップを用いる。また基本ケースで用いた飽和透水係数 ($K_0 = 10^{-5}(\text{cm/sec})$) およびサクション ($\psi_0 = 10^3(\text{m})$) により得られた指針を無次元化する。

(3) 解の精度の評価

6.4 では自由表面の鉛直座標値 z の精度を評価する。解の安定性の評価には(3.1)を用いる ($\varepsilon_s = 10^{-3}$)。また解の一様性の評価には(3.2)を用いる。一様性の評価基準は(3.2)では $\varepsilon_c = 10^{-3}$ であるが、 $\varepsilon_c = 10^{-4}$ とした場合についても考慮する。

6.4.3 ベンチマーク・テスト (1)(基本ケースの評価)

(1) 解の安定性

(A) メッシュ形状の影響評価

図 6.4-2 に示した要素分割 (288 要素) では側方境界付近において要素にゆがみが生じている。6.2 で示したように頂角が 45° 以下ないしは 135° 以上である要素を用いる場合には、直方体要素を用いる場合に比べて解の精度が低下していた。解の安定性に対するメッシュ形状 (要素のゆがみ) の影響を評価した。

(a) 直方体要素およびゆがみのある要素を用いた場合の検討

直方体要素とゆがみのある要素を、ほぼ同要素数で様々な比率により組み合わせた場合について各解析結果を比較した (図 6.4-4)。解析の結果、直交格子の比率が高くなるほど空間的振動が少なくなっている。ゆがみのある要素の比率が低くなるほど解は安定であり、メッシュ形状は自由表面形状の空間的振動に影響していると考えられる。

(b) ゆがみのある要素のみを用いた場合の検討

ゆがみのある要素のみを用いて要素数を変化させた解析を実施し、解の安定性を検討した (図 6.4-5)。直交格子とほぼ同要素数のゆがみのある要素を用いた場合には自由表面形状の空間的振動が顕著であることがわかった。またゆがみのある要素のみを用いて直交格子と同じ程度の安定性を得るためには、4 倍以上の要素数が必要であり多くの計算量を費やすこととなる。

(B) 格子幅の影響評価

水平方向と鉛直方向の格子幅が等しい直交格子 ($\Delta x = \Delta z$) を用いて解析を実施し、解の安定性を評価した。格子幅を細かくした場合には空間的振動は小さくなることがわかった。

(2) 解の一様性

解の一様性の条件を満たす空間および時間分割を決定した。基本ケースに対して、水平方向と鉛直方向の格子幅が等しい直交格子 ($\Delta x = \Delta z$) および均等なタイムステップを用いた場合を考慮した。一様性の条件を満たす空間および時間分割 ($\Delta x_{con}, \Delta t_{con}$)

を以下に示す：

- $\varepsilon_c = 10^{-3}$ とした場合 : $(\Delta x_{con}, \Delta t_{con}) = (1.0(m), 10^3(sec))$
- $\varepsilon_c = 10^{-4}$ とした場合 : $(\Delta x_{con}, \Delta t_{con}) = (0.5(m), 10^2(sec))$

6.4.4 ベンチマーク・テスト(2)(パラメータの感度評価)

基本ケースからパラメータを変化させた場合について一様性の条件を満たす空間および時間分割を決定し、パラメータの感度を評価する。ここでは空間分割には均等格子を、時間分割には均等なタイムステップを用いた。

1. 飽和透水係数を変化させた場合

基本ケースでは飽和透水係数 $K = 10^{-5}(\text{cm/sec})$ である。 K^* に関しては、基本ケースの $10^{-3} \sim 10^1$ 倍 ($K = 10^{-8} \sim 10^{-4}(\text{cm/sec})$, $K^* = 10^{-3} \sim 10^1$) の範囲を考慮し、 K^* と一様性の条件を満たす ($\Delta x_{con}^*, \Delta t_{con}^*$) の関係を決定した。

2. 水平方向平均動水勾配を変化させた場合

基本ケースでは側方境界間の水頭値差 $\Delta\phi = 0.75(m)$ 、つまり水平方向平均動水勾配 $ix = 0.05$ である。 ix に関しては、基本ケースの 0.1 ~ 5.0 倍 ($ix = 0.005 \sim 0.25$) の範囲を考慮し、 ix と ($\Delta x_{con}^*, \Delta t_{con}^*$) の関係を決定した。

6.4.5 まとめ

(1) ベンチマーク・テスト

ベンチマーク・テストの結果得られた知見を以下に示す。

1. 数値解(自由表面位置)の空間的振動は、空間分割に影響しておりタイムステップには依らない。
2. 格子分割幅および要素のゆがみが解の安定性に与える影響は顕著であり、可能な限り直交性が高く、細かいメッシュを作成する必要がある。
3. 飽和透水係数が小さく $K^* = 10^{-3}$ ($K = 10^{-8}$ (cm/sec)) の場合には $K^* = 10^1$ ($K = 10^{-4}$ (cm/sec)) とした場合と比較して、空間分割幅を $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{3}$ 、タイムステップ幅を $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{4}$ 程度に細かくする必要がある。また水平方向平均動水勾配が大きく $ix = 0.25$ の場合には $ix = 0.005$ とした場合と比較して、空間分割幅を $\frac{1}{8} \sim \frac{1}{3}$ 、タイムステップ幅を $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 程度に細かくする必要がある。

(2) 基本解析モデルを用いた評価

6.4.1において示した基本解析モデルを用いて、ベンチマーク・テストで得られた知見を検証した。文献⁴⁾などによると、橿円型の微分方程式：

$$\Delta\phi = f$$

の解を反復的に求めることにより、なめらかで直交性が高い格子を得ることができる。ここでは橿円型微分方程式の解を利用した格子生成を行い、得られた格子を用いて解析を実施した。なお解析にあたっては、 $\varepsilon_c = 10^{-4}$ とした場合の一様性の条件を満たす均等タイムステップ $\Delta t = 10^2$ (sec) を用いた。橿円型微分方程式の解を利用した格子生成によるメッシュを図 6.4-6 に示す：

- ・メッシュE1 (672 要素)
- ・メッシュE2 (1372 要素)

図 6.2-7 に示すゆがみのある要素 1(672 要素) およびメッシュE1 を用いた場合について解析結果を比較した。 10^3 (sec) 後および 10^4 (sec) 後の $\frac{dz}{dx}$ の符号分布を図 6.2-8 お

および図 6.2-9 に示す。メッシュE1 を用いた場合には解の空間的振動がより少ないことがわかる。

また同様に、図 6.2-10 に示すゆがみのある要素 2(1344 要素) およびメッシュE2 を用いた場合について解析結果を比較した。 $10^3(sec)$ 後および $10^4(sec)$ 後の $\frac{dz}{dx}$ の符号分布を図 6.2-11 および図 6.2-12 に示す。メッシュE2 を用いた場合に関しても解の空間的振動をほとんど生じていないことがわかる。

なおメッシュE1 で用いられている格子幅は約 $0.54 \sim 0.82(m)$ で $\varepsilon_c = \text{約 } 10^{-3}$ に相当し、メッシュE2 で用いられている格子幅は約 $0.38 \sim 0.55(m)$ であり $\varepsilon_c = \text{約 } 10^{-4}$ に相当すると考えられる。格子のゆがみが解の安定性に与える影響は大きく、また可能な限り直交性が高いメッシュを作成する必要があることが示された。

- 母岩 ($K = 10^{-5}$ (cm/sec))
- ゆるみ領域 ($K = 10^{-4}$ (cm/sec))
- 定水位境界 ($\phi_1 = 16.0$ (m), $\phi_2 = 15.25$ (m))
- 固定水頭境界 ($\psi = 0.0$ (m))
- 不透水境界

対象：

初期条件：

$(ix, iz) = (0.05, 0)$ とした場合の定常状態

境界条件：

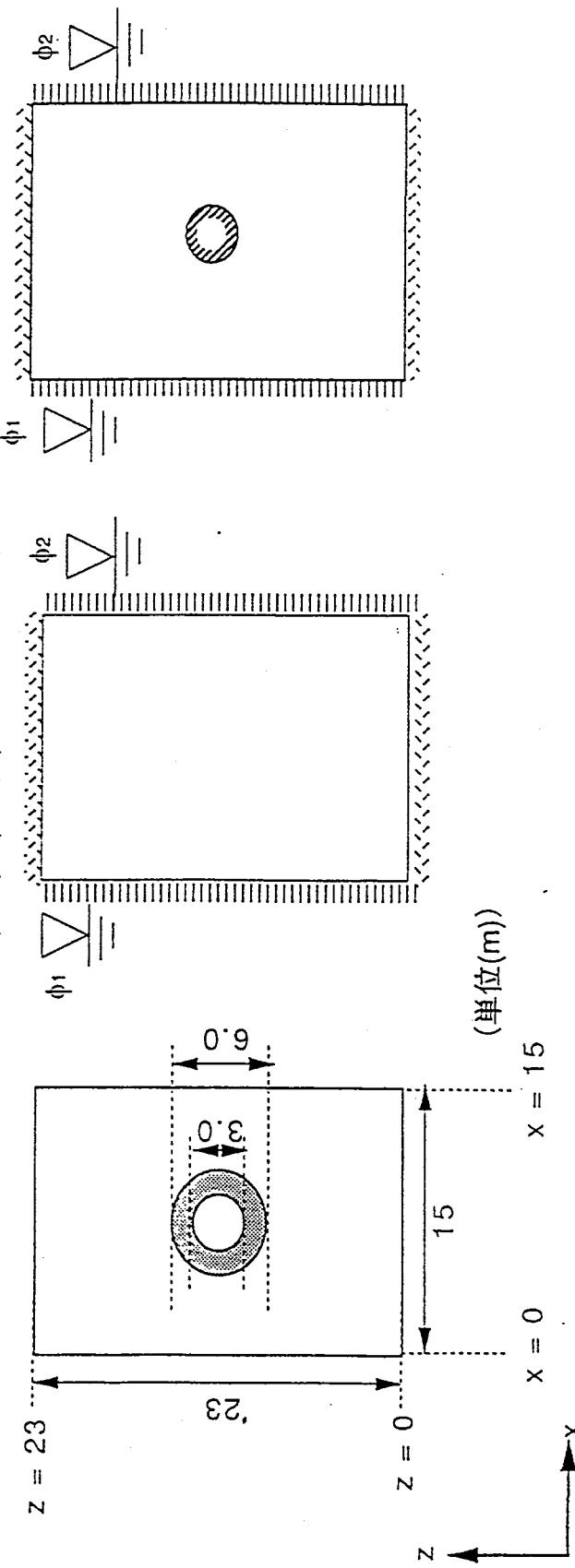


図6.4-1 基本解析モデル：対象、初期条件、境界条件

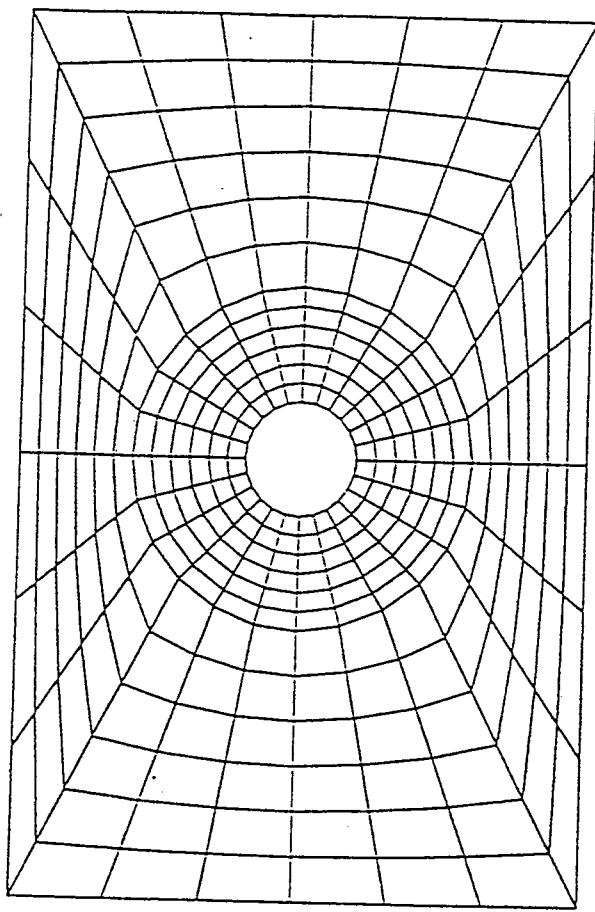
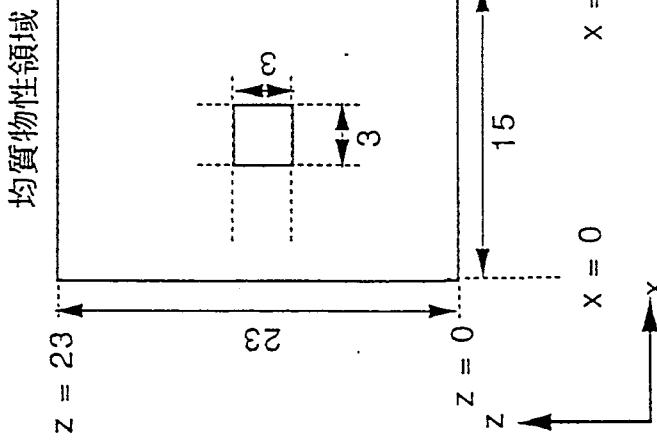


図6.4-2 基本解析モデル要素分割図（288要素）

-  定水位境界 ($\phi_1 = 16.0$ (m), $\phi_2 = 15.25$ (m))
-  固定水頭境界 ($\psi = 0.0$ (m))
-  不透水境界

対象 : $K = 10^{-5}$ (cm/sec)

初期条件 :
 $(x, iz) = (0.05, 0)$ とした場合の定常状態



境界条件 :

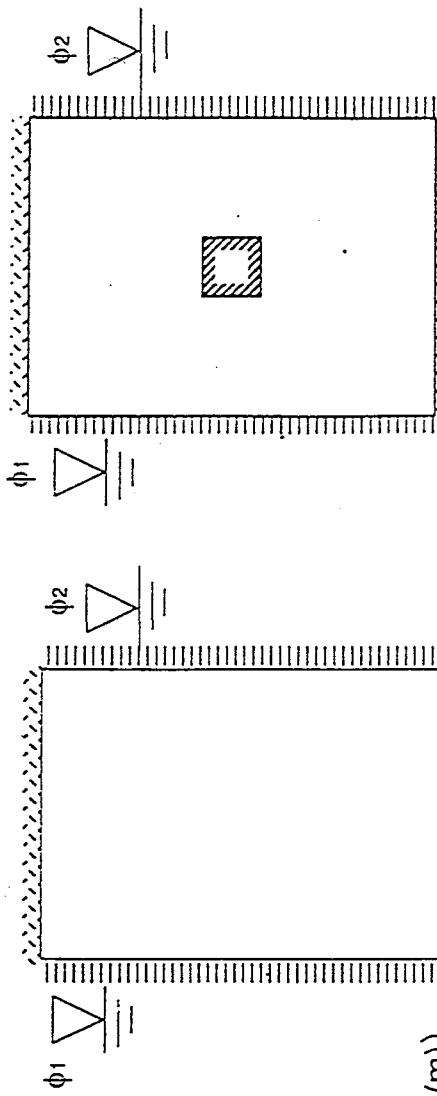


図6.4-3 ベンチマーク用解析モデル（基本ケース）：対象、初期条件、境界条件

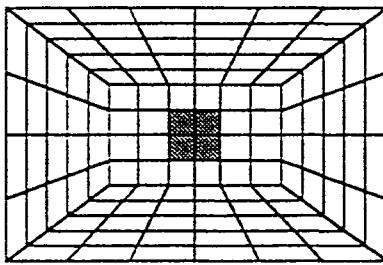
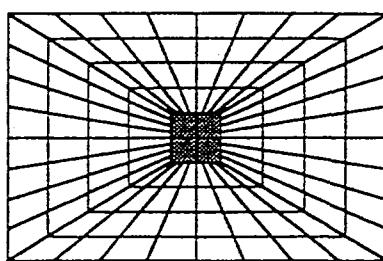
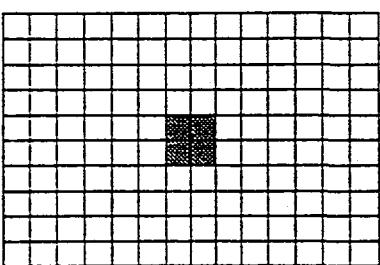
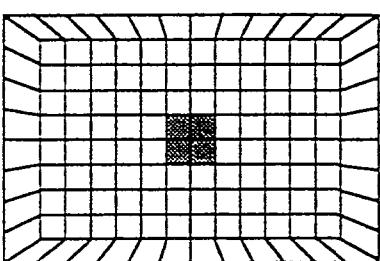
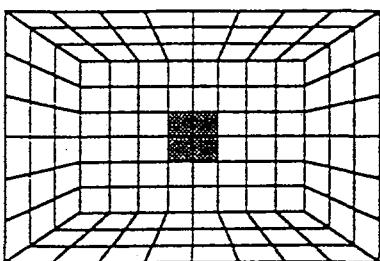
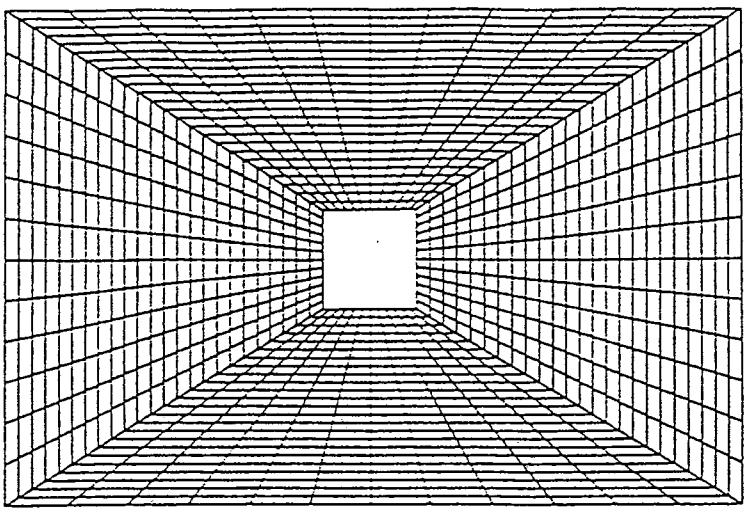


図6.4-4 メッシュ形状の影響評価：要素分割例

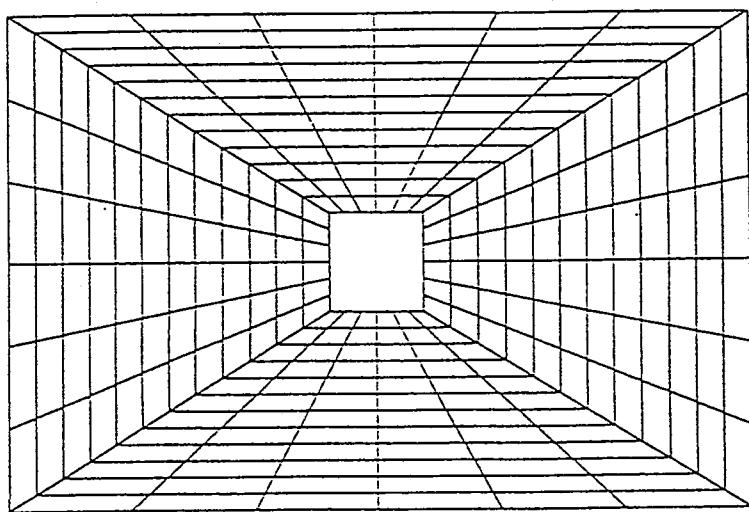
直方体および球がある要素を用いた場合の検討

ψがある要素のみを用いた場合の検討

図6.4-5 メッシュ形状の影響評価：ψがある要素割例

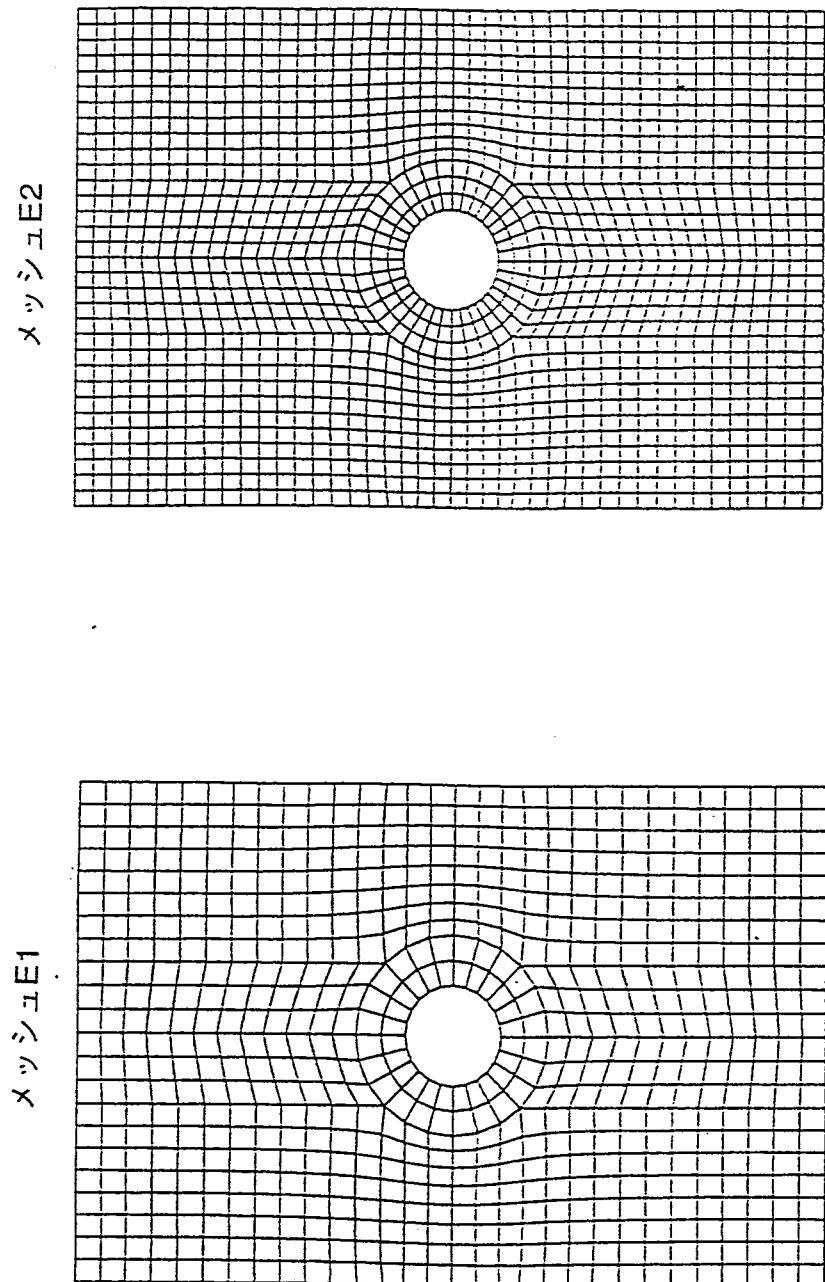


1152要素



288要素

図6.4-6 ベンチマーク問題の検証：橢円型微分方程式による格子 要素分割図



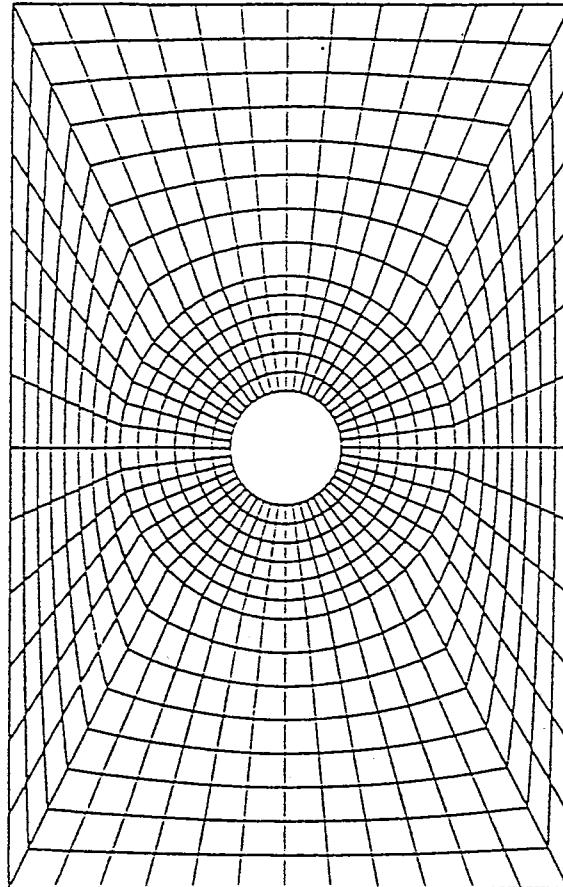


図6.4-7 ベンチマーク問題の検証：ゆがんだ格子1（672要素）

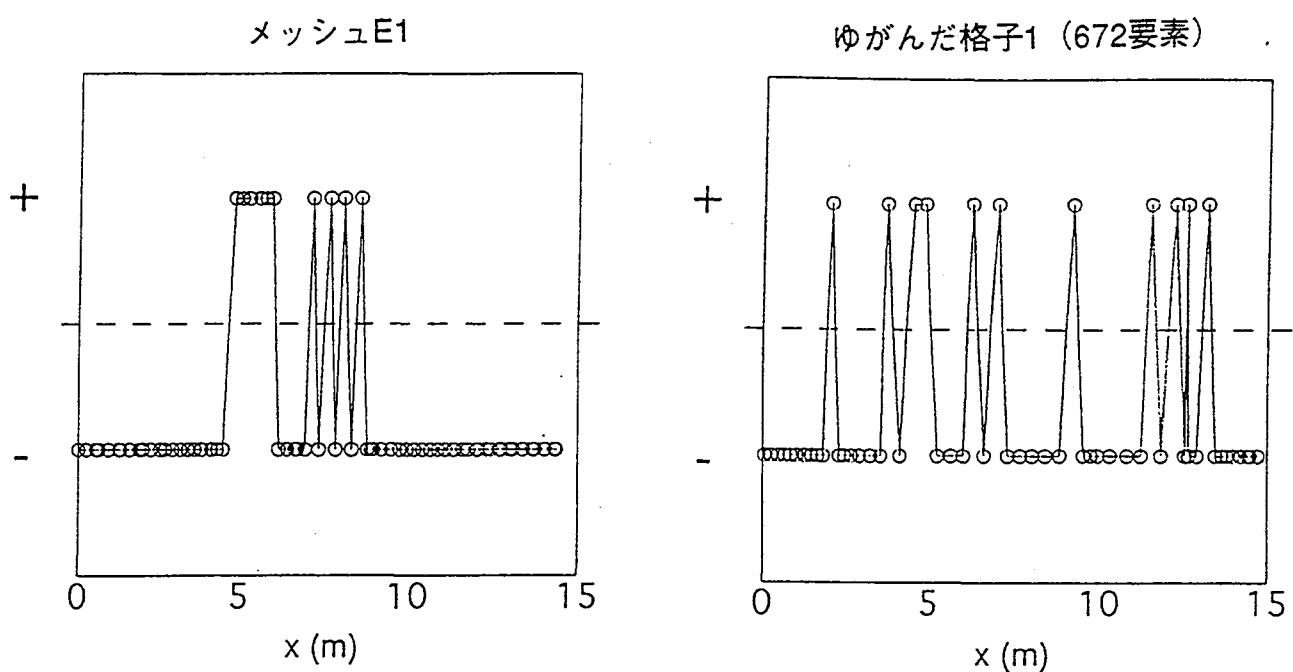


図6.4-8 ベンチマーク問題の検証：自由表面形状の空間的振動

10^3 (sec)後の自由表面位置zのxに関する微分係数 $\frac{dz}{dx}$ の符号分布

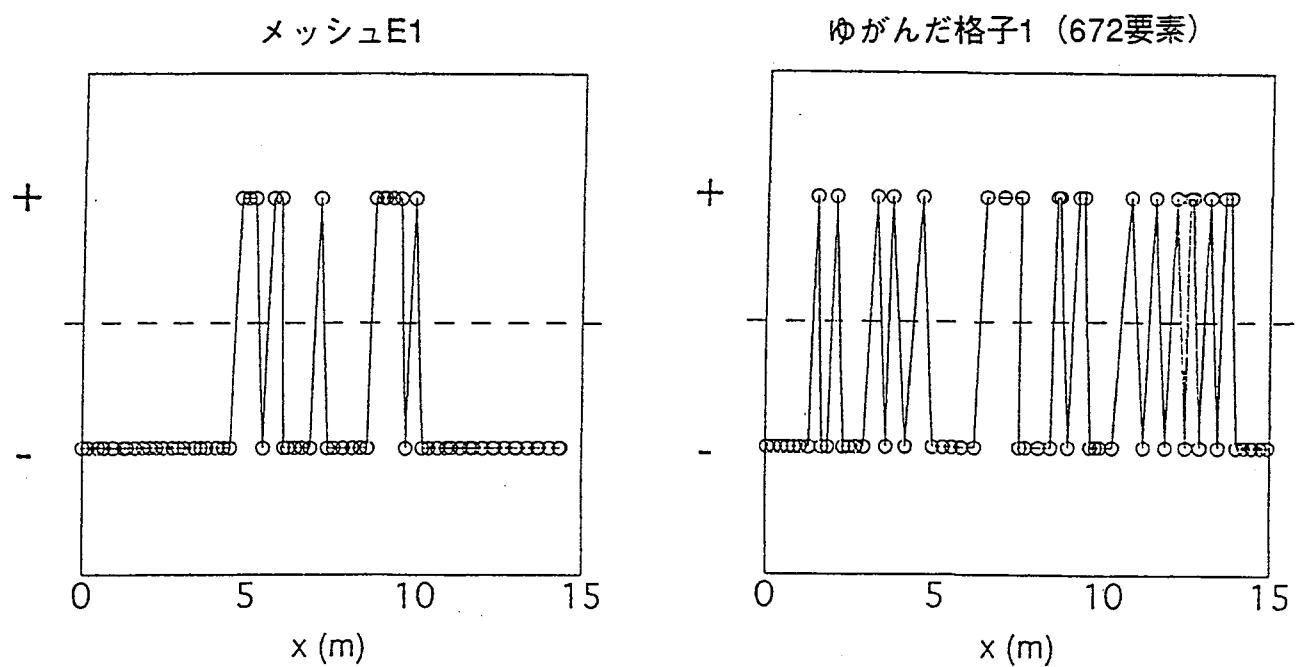


図6.4-9 ベンチマーク問題の検証：自由表面形状の空間的振動

10^4 (sec)後の自由表面位置zのxに関する微分係数 $\frac{dz}{dx}$ の符号分布

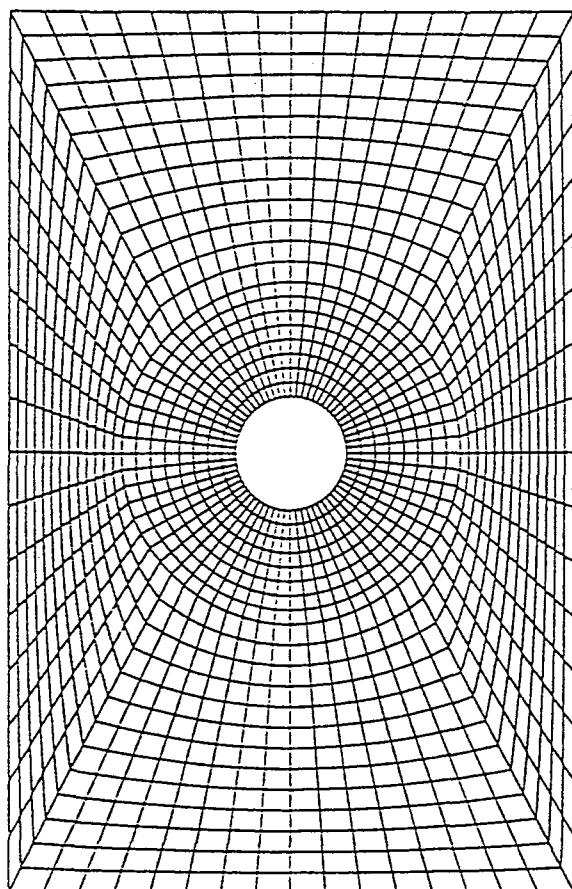
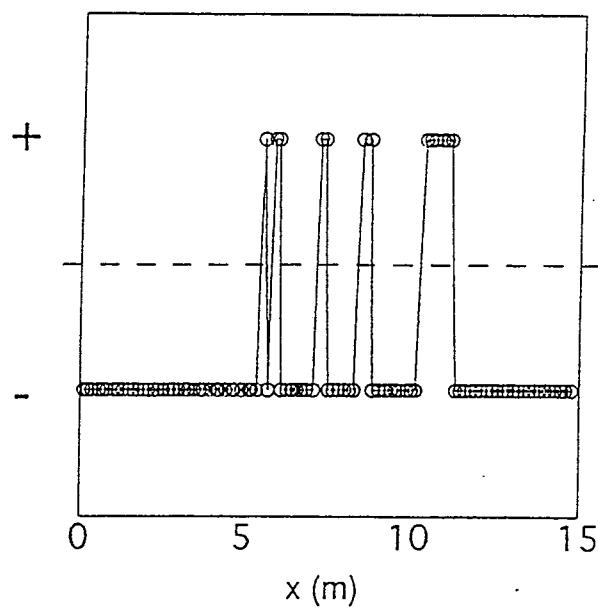


図6.4-10 ベンチマーク問題の検証：ゆがんだ格子2（1344要素）

メッシュE2



ゆがんだ格子2 (1344要素)

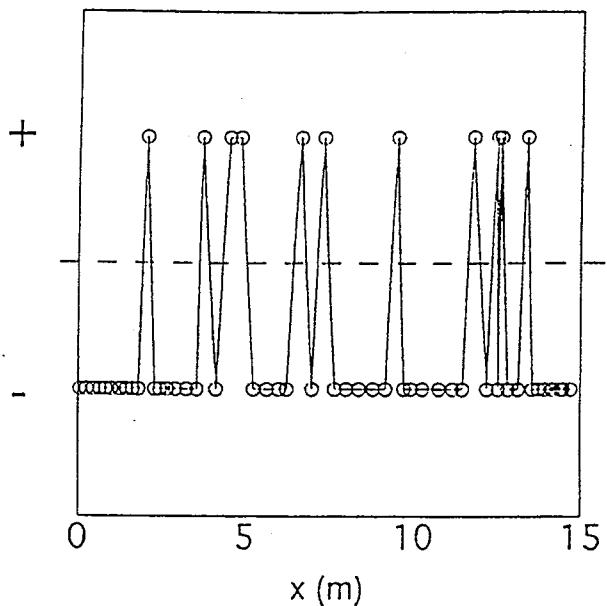
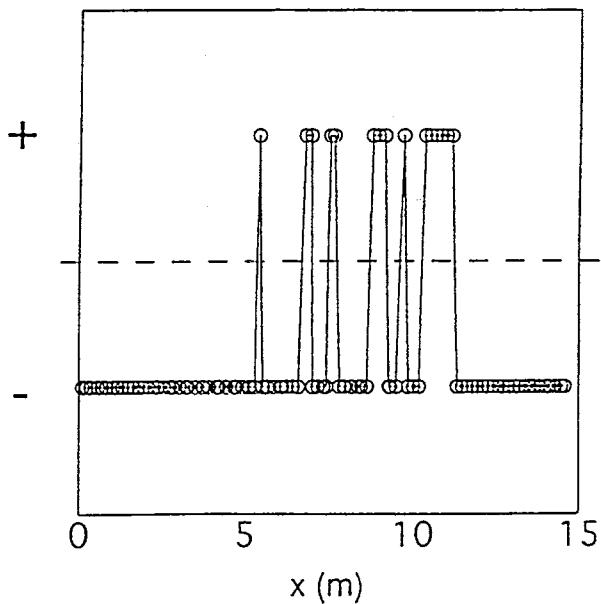


図6.4-11 ベンチマーク問題の検証：自由表面形状の空間的振動

10^3 (sec)後の自由表面位置 z の x に関する微分係数 $\frac{dz}{dx}$ の符号分布

メッシュE2



ゆがんだ格子2 (1344要素)

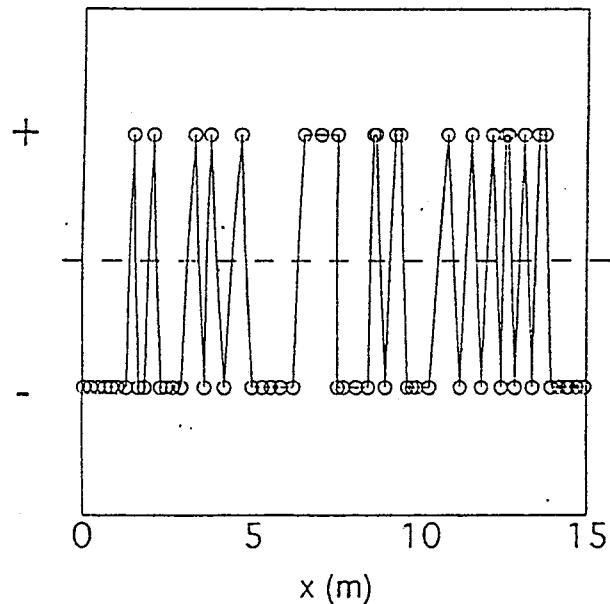


図6.4-12 ベンチマーク問題の検証：自由表面形状の空間的振動

10^4 (sec)後の自由表面位置 z の x に関する微分係数 $\frac{dz}{dx}$ の符号分布

7. 「TAGSAC」まとめと今後の課題

本研究では効率的に高精度な解を得ることができる空間分割と時間分割の最適な組み合わせを決定する指針を作成した。「RELEASE」と「MESHNOTE」の場合には対象が一次元の軸対象領域であるため実問題そのものについてベンチマーク・テストを実施することが可能であった。しかしながら「TAGSAC」の場合には三次元を対象としておりまた物性の非線形性も顕著であることから、実問題そのものに対してベンチマーク・テストを実施することは困難である。したがって本研究では3種類の問題：

- 広域水理問題
- 挖削問題
- 処分坑道周辺の不飽和領域問題

を対象としてとりあげ、これらの問題を簡略化したベンチマーク・テストを実施した。

「TAGSAC」で対象とする三次元の不飽和／飽和浸透流のように非線形な問題に関しては問題の複雑性のため解析解および理論解は存在しておらず直接精度を評価することが困難である。本研究では解の安定性かつ一様性の条件を満たす空間および時間分割を最適分割とした。なお理論解が存在する一次元の不飽和浸透流に関して本研究で用いた安定性および一様性の評価基準を検証し、その妥当性を確認した。

なお「TAGSAC」では非定常計算における時間積分法は前進オイラー、後退オイラー、中央差分の3つから選択可能であるが、前進オイラー法を使用すると十分にタイムステップを細かくしても数値解が収束しない場合があった。本研究ではそのような場合でも計算が可能な後退オイラー法を用いて検討した。

ベンチマーク・テストによって得られた知見を以下に示す。

1. 最適な空間分割では要素あたりに許容される従属変数の偏差の最大値は一定であることがわかった。したがって動水勾配が大きい領域ではその他の領域に比べて空間分割幅を細かくすることにより、均等格子を用いた場合に比べより少ない要素／節点数で効率的に高精度な数値解を得ることができた。
2. 非定常解析時には基本的に、時間経過とともに段階的にタイムステップを大きくすることにより、効率的に高精度な数値解を得ることができた。本研究で対象としたベンチマーク問題では従属変数の変化量は計算開始直後で最も大きくまた時間経過とともに減少しており、最適な空間分割と同様に最適な時間分割においても 1 ステップあたりに許容される従属変数の変化量の最大値は一定であると考えられる。
3. 非定常解析時には、計算のごく初期に従属変数の空間勾配が急激に変化している領域において物理的に妥当ではない数値解の振動を生じ、時間経過とともに減衰する場合があった。この振動はタイムステップには基本的に依存せず、
 - 空間分割幅
 - メッシュのゆがみ

の影響を受けていることがわかった。安定な数値解を得るためにには、直交性が高いメッシュを作成する必要があることがわかった。

平成 7 年度研究によって得られた知見により、以下に示すようなコードの改良が必要であると考えられる。

1. 自動時間増分機能

現在の「TAGSAC」ではタイムステップはあらかじめ利用者がデータとして入力することになっているが、最適な時間分割は状況に応じて変化するため解析の進行にしたがい自動的に決定される機能を追加することが望ましい。具体的には、1 ステップあたりの従属変数の変化量を設定しておき、ベンチマーク・テストで得られた指針にもとづいて自動的に時間分割を決定する方法が考えられる。

2. 格子生成機能

直交性が高いメッシュを作成するために、「TAGSAC」とは独立したプリ・プロセッサにおいて楕円型微分方程式などを利用した格子生成を行うことが望ましい。また格子幅に関しては、従属変数の勾配が大きな領域において格子を細分化する適応格子法(文献⁵⁾)を「TAGSAC」に組み込み要素分割の自動最適化を行うことが考えられる。

8. Release/Meshnote ベンチマーク

8.1 本年度研究目的

平成 6 年度「ニアフィールド核種移行解析における数値解の安定性に関する研究」では、ニアフィールド核種移行解析コード”Release.mult.rev1”*(以後 Release と略す) および”Meshnote”に関して、単数崩壊系列の場合に解の精度／安定性に関するベンチマークテストを実施した。この研究では Release、Meshnote 両コードについて、解の精度／安定性を保ちうるタイムステップ／分割幅の限界を導いているが、これらは

- 分割幅(分割数)
- 拡散係数
- 分配係数
- 溶解度
- 半減期

など解析条件を決定するパラメータ中の 1 つを変化させたベンチマーク結果から求められたものであり、より実問題に近いような、複数パラメータを同時に変化させた場合、複数崩壊系列の場合などについての考察は加えられていない。

そこで本平成 7 年度研究では、昨年度研究の成果を実問題に適用可能かを判断するために、Release コードについて

- 解析条件を決定するパラメータを複数同時に変化させた場合
- 複数崩壊系列を考慮した場合

についてのベンチマークテストを実施する。

また Meshnote コードが独自に有している機能についても考察を加える。具体的には、

*複数崩壊系列に対し、溶解度分割を考慮した改良版 Release

- 非線形吸着に関する解の精度／安定性
 - 境界条件決定に必要な Reservoir(内側)、Mixing Cell(外側) の体積、地下水量 (Qmix) が解析結果に及ぼす影響
 - 自動タイムステップ決定機能の妥当性
- について評価を行なうこととする。

8.2 複数パラメータを変化／複数崩壊系列を考慮したベンチマーク

8.2.1 [Release:時間分割] 解析ケース

複数パラメータを変化させた場合

- 核種 $x \Rightarrow$ 核種 $y \Rightarrow$ 核種 z

で表される崩壊系列についてのベンチマークを行なう。各核種のパラメータ値としては、平成6年度研究で用いた値から3つの代表値を選定し、それらを適当に組み合わせた16ケースに関し実施した。なお、分割数は30分割(分割幅=0.033m)、50分割(分割幅=0.020m)とした。

複数崩壊系列を考慮した場合

このベンチマークケースの際に注目すべき点は溶解度分割が生じることである。これによりある核種があるセル内で沈殿を生じるか否かは、全崩壊系列中に含まれるこの核種の同位体量の総和により決定されることになり、崩壊系列同士の相互作用が考えられる。

解析ケースを下記に示す。(A)(B)では、単数崩壊系列としてベンチマークを行ない、(C)では(A)(B)の組合せによる複数崩壊系列を模擬し、同位体存在比を変化させベンチマークを実施した。最後に(D)として4系列からなる崩壊系列についてのベンチマークを実施し、タイムステップ決定式の妥当性を評価した。

(A) 系列 1:Am-243 \Rightarrow Pu-239 \Rightarrow U-235 \Rightarrow Pa-231

(B) 系列 1:Pu-242 \Rightarrow U-238 \Rightarrow U-234 \Rightarrow Th-230 \Rightarrow Ra-226

(C) 系列 1:Am-243 \Rightarrow Pu-239 \Rightarrow U-235 \Rightarrow Pa-231

系列 2:Pu-242 \Rightarrow U-238 \Rightarrow U-234 \Rightarrow Th-230 \Rightarrow Ra-226

ただし、同位体存在比は以下の3ケースを用いベンチマークを実施した。

同位体存在比

| ケース名 | U-235 | U-238 | U-234 |
|------|-------|-------|-------|
| 3-1 | 0.80 | 0.10 | 0.10 |
| 3-2 | 0.33 | 0.33 | 0.33 |
| 3-3 | 0.10 | 0.40 | 0.40 |

(D) 系列 1:Am-243 \Rightarrow Pu-239 \Rightarrow U-235 \Rightarrow Pa-231

系列 2:Pu-242 \Rightarrow U-238 \Rightarrow U-234 \Rightarrow Th-230 \Rightarrow Ra-226

系列 3:Am-241 \Rightarrow Np-237 \Rightarrow U-233 \Rightarrow Th-229

系列 4:Pu-240 \Rightarrow U-236 \Rightarrow Th-232

8.2.2 [Release:時間分割] 解析結果

複数パラメータを変化させた場合

すべての解析ケースにおいて、ある分割数に対するタイムステップの上限は、複数核種が存在することによる相互影響ではなく、各核種が単独で崩壊するとして算出されたタイムステップの中で、一番小さいもの（一番条件の厳しい核種）に依存することが確認された。

複数崩壊系列を考慮した場合

複数崩壊系列が存在し、同位体存在比を変化させたケースでもタイムステップの上限に相互影響は認められないことが確認できた。

Release タイムステップの上限について解析結果のまとめ

以上をまとめると、

- 複数核種が存在することによる相互影響はない
- 溶解度分割による相互影響はない

ことがベンチマークにより示され、崩壊系列全体のタイムステップの上限は、

- 各核種が単独で存在するとしてタイムステップを決定

したものの中で、

- タイムステップが最小のものを採用

すれば、安全であることが確認された。

8.2.3 [Release/Meshnote:空間分割] 解析ケース／結果

続いて、解析精度を保ち得る分割幅の上限について、

- 複数パラメータを変化させた場合
- 複数崩壊系列を考慮した場合

の両者について、前節[Release:時間分割]で採用したケース中の数例を用いて Release/Meshnote 両コードのベンチマークを行なった。

解析結果

Release/Meshnote 両コードとも複数パラメータを同時に変化させた場合／複数崩壊系列を考慮した場合とも解の精度に影響は見られなかった。

8.3 Meshnote 特有の機能に関するベンチマーク

8.3.1 非線形吸着項に関する感度解析

Meshnote コードでは吸着量 (S_i) は溶液濃度 (C_i) に対して、下記の Langmuir 型非線形吸着モデルで与えられる。

$$S_i \equiv \frac{\alpha_i C_i}{1 + \beta_i C_i} \quad (8.1)$$

(ここで添字 (i) は核種を表し、 α_i, β_i はそれぞれ、核種ごとに決定される吸着定数である。)

本研究では、上記式中 β の値を変化させることにより、非線形吸着項に関するベンチマークを実施した。解析ケースとしては、核種が単独崩する場合 および 複数崩壊系列を考慮した場合を選定した。

解析結果

両ケースの結果とも、非線形吸着項の係数を変化させることにより、緩衝体外部への放出率の履歴は変化するが、解の精度には影響がみられなかった。

8.3.2 Reservoir 体積に関する感度解析

Reservoir の体積をパラメータとして、解析結果への影響／解の精度への影響に関するベンチマークを実施した。

初期核種量が豊富な場合

この場合には、Reservoir の体積を変化させることにより、解の精度への影響は全く見られなかった。というよりはむしろ、Reservoir の体積を変化させても、放出率への影響が全く見られなかった。

初期核種量が微量な場合

この場合には、インベントリ内の核種が解析途中で枯渇する場合が存在する。実際のベンチマークでも、Reservoir の体積を大きくとったケースでは、枯渇する現象が認められた。

Reservoir の体積に関するベンチマークのまとめ

核種が十分にインベントリ内にある場合には、Reservoir 濃度は溶解度によって規定される。しかし、初期核種量が極めて少ない場合には、解析中に Reservoir 内に沈澱がなくなり、それ以降は隣接セルとの Flux のやりとりにより濃度が規定される。このようなケースの場合には、Reservoir に可溶な核種量は

$$(Reservoir \text{ 体積}) \times (\text{溶解度})$$

で決定されるため、体積が大きいほど早く未飽和な状態になる。このような現象がベンチマーク結果からも、正しく模擬されていることが示された。

また、Reservoir の体積による解の精度への影響がないことも示された。

8.3.3 Mixing Cell 体積に関する感度解析

核種が単独で崩壊するケースのベンチマークを Mixing Cell の体積をパラメータに実施した。結果として、Mixing Cell の体積による解の精度の変化は認められなかった。

8.3.4 Reservoir/Mixing Cell 体積に関する解析のまとめ

以上に見られるように、Reservoir/Mixing Cell の体積を変化させることによる解の精度は認められなかった。これは、Meshnote コード内部において、Reservoir, Mixing Cell の体積は境界条件を設定する目的でのみ存在し、空間分割に何ら影響を与えず、緩衝材を何分割するかによってのみすべての緩衝材中のセルサイズは決まってしまうためであろう。

8.3.5 地下水量 Q_{mix} に関する感度解析

核種が単独で崩壊するケースのベンチマークを Q_{mix} の値をパラメータに実施した。

解析結果

| $Q_{mix}(m^3)$ | 10^4 | 10^3 | 10^2 | 10^1 | 10^0 | 10^{-1} |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| 放出率 (10^{-5} mol/yr) | 3.800 | 3.800 | 3.796 | 3.759 | 3.426 | 1.816 |
| $Q_{mix}=10^4$ からのずれ | — | 0.00% | 0.11% | 1.08% | 9.84% | 52.2% |

Q_{mix} を $10^0 \sim 10^1$ より小さくとると、急激に外部への放出率が小さくなり始め、 Q_{mix} を小さくするに従い外部への放出率が小さくなる。これは、緩衝体外部への放出率が

$$(MixingCell \text{における濃度}) \times (Q_{mix})$$

により与えられるため、 Q_{mix} が小さいケースでは Mixing Cell に流入してきた核種量を外部へ完全には放出できなくなるために起こる現象であると思われる。

8.3.6 自動時間増分機能について

崩壊系列中に極端に半減期が短い核種を疑似的に挿入し、タイムステップがそれに応じて短くなるかを中心にベンチマークを行なった。

解析結果

| | (参考) | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 |
|----------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 最小半減期 (yr) | (2.15×10^6) | 2.15×10^1 | 2.15×10^2 | 2.15×10^3 |
| 最大タイムステップ (yr) | (3294) | 2.47 | 30.0 | 77.7 |

各解析ケースにおけるタイムステップの最大値は、崩壊系列中で一番短い半減期を持つ核種に合わせて自動的に設定され、どのケースでも中間に挟まれた半減期の短い核種を解析し損ねることなく、正しく模擬できていることが確認できる。

9. [Release/Meshnote] 本年度研究のまとめ

本年度研究では、昨年度に引き続きニアフィールド核種移行解析コード Release と Meshnote について、より複雑なケースでのベンチマークを行ない、昨年度得られた指針が複雑なケースでも成立するものかについて考察を加えた。その結果、

Release:時間分割 各核種が単独で崩壊すると仮定し、昨年度結果

$$\Delta t = \kappa \frac{R}{D} (\Delta r)^2 \quad (9.1)$$

$$R = 1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} Kd \cdot \rho \quad (9.2)$$

(ここで ΔT :タイムステップ (yr)、 R :遅延係数、 Δr :分割幅、 D :拡散係数 (m^2/yr)
 ε :空隙率、 Kd :分配係数 (m^3/kg)、 ρ :緩衝材密度 (kg/m^3) k :定数 (1.00) である。)
に従って、各々のタイムステップ上限を決定後、崩壊系列中で最も小さいものに設定すれば良い。

Release/Meshnote:空間分割 昨年度結果

| | | | |
|-----------------|---------------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| Release | 100 分割時から ($\Delta r = 0.0098m$) | 誤差 0.1%以内 | 15 分割以上 |
| | | 誤差 0.5%以内 | ($\Delta r = 0.065m$) 7 分割以上 |
| Meshnote | 100 分割時から ($\Delta r = 0.0098m$) | 誤差 0.1%以内 | 20 分割以上 |
| | | 誤差 0.5%以内 | ($\Delta r = 0.049m$) 7 分割以上 |

と同様に設定すればよい

ことが示された。

これは以下のようない由によるものであろう。時間／空間的に安定か否かを決定する条件は、あるセル内での濃度勾配によって決定される。この勾配が解析全体で最も急になる

のは、解析開始直後の最内側のセルで起こると思われる。たとえ、解析中に溶解度分割が起ころうが、崩壊／生成が起ころうとも、解析開始直後の最内側セルでの濃度勾配と比較するとはるかに小さい。

従って、解析全体の条件はここで決定されることになり、これを与えるのが昨年度のベンチマーク結果である。このため、より複雑なケースでも結果に影響はないものと思われる。

一方、Meshnote 特有の機能に関しても

- 非線形吸着に関する解の精度／安定性
- 境界条件決定に必要な Reservoir(内側)、Mixing Cell(外側) の体積、地下水量 (Q_{mix}) が解析結果に及ぼす影響
- 自動タイムステップ決定機能の妥当性

に関する検討が行なわれた。

非線形吸着に関する解の精度／安定性については、吸着係数を変化させても解の精度に影響がないことが確かめられた。

Reservoir, Mixing Cell の体積、地下水量 (Q_{mix}) は、境界条件の設定のみに影響を及ぼし、解の精度自体を低下させるものではないことも示された。

また、半減期が短い核種の存在下では、それに応じ短いタイムステップが設定されることも確認された。

これらは、Meshnote の時間決定方法が、全セル／全核種の濃度を監視していることによるものだと思われる。たとえ初期状態では存在しない核種でも、始めの数ステップ後には極微量ではあるが生成されることによるため、始めの数ステップ以降は、崩壊系列全体の全核種の濃度変化を監視していることになる。これにより、全セル／全核種を通じて一番条件の厳しいタイムステップが設定される。

参考文献

- [1] 洪水の数値予報(その第一歩), 日野・太田・砂田・渡辺共著, 森北出版, 1990.
- [2] Peter S.Huyakorn, George F.Pinder,
“COMPUTATIONAL METHODS IN SUBSURFACE FLOW”, Academic Press,
1983.
- [3] 我が国を対象とした地下水流動解析 その1 中部日本を対象とした地下水流動解析,
柳澤・今井・古屋・若松・梅田, PNC TN 7410 92-019, 1992.
- [4] Klaus A.Hoffmann, Steve T.Chiang,
“COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR ENGINEERS VOLUME 1”, 1993
- [5] V.Parthasarathy, Y.Kallinderis and K.Nalajima,
“A Navier-Stokes Method with Adaptive Hybrid Prismatic /Tetrahedral Grids”,
AIAA-95-0670, 1995
- [6] C.A.J.Fletcher.”Computational Techniques for Fluid Dynamics Volume II”, Springer-Verlag, 1988.
- [7] C.A.J.Fletcher.”Computational Galerkin Methods”, Springer-Verlag, 1984.
- [8] Dale A.Anderson, John C. Tannehill, Richard H. Pletcher.”Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer”, Hemisphere, 1984.
- [9] Suhas V. Patankar. ”Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere, 1980.
- [10] 矢川元基,”流れと熱伝導の有限要素法入門”, 培風館, 1983.