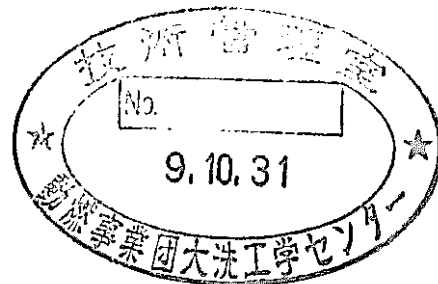


コンクリート内部の水分移動・放出の解析作業

1997年 9 月



清水建設株式会社

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

1997年9月

コンクリート内部の水分移動・放出の解析作業

小畑益彦*

中村雅彦*

要 旨

本報告書は、コンクリート表面が加熱された場合のコンクリート内部の水分移動や表面から放出する水量を評価することを目的として、清水建設保有解析コード「T-Mics」を用いて実施した「コンクリート内部の水分移動・放出の解析作業」結果を取りまとめたものである。

解析結果の要約を以下に示す。

(1) 「コンクリートからの放出水測定実験」のシミュレーション解析

大洗工学センターで実施された5つの温度履歴パターン（120℃～350℃）の実験について、各温度履歴パターンの温度および放出水量実測結果の平均値を対象にシミュレーション解析を行った結果、通常のコンクリート物性の範囲で解析により得られた放出水量履歴は実測値と良い対応を示した。最高温度が350℃の温度履歴パターンを除いた4パターンでは、同じ透水係数を用いて解析した結果が最も実測値に近い値を示した。

(2) 主要パラメータの感度解析

コンクリートの諸物性が放出水量に与える影響を評価するため、主要なパラメータである透水係数、解析開始時水分損失、熱伝導率の感度解析を行った。その結果、透水係数と解析開始時の材軸方向水分損失分布（特に加熱側表面近傍）が放出水量に与える影響が大きいことが示された。

(3) 「もんじゅ実機躯体コンクリート放出水挙動確認試験」のシミュレーション解析

温度および放出水量実測結果の平均値を対象にシミュレーション解析を行った結果、(1)の解析とほぼ同じ物性値を用いて解析値と実測値が良好に一致した。

(4) 実機事故想定温度条件での解析

(1)と(3)のシミュレーション解析に基づいてコンクリート諸物性を設定し、5つの温度履歴条件に対して放出水量の予測解析を行った。その結果、放出水量計算値が最も大きい値を示したのはA435/10のケースで、約5kg/m²であった。

本報告書は、清水建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団殿との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：09C1957

事業団担当部課室：安全工学部 プラント安全工学室 三宅 収

* 清水建設株式会社

目 次

1. はじめに	1
2. 解析作業の概要	2
2.1 全体概要	2
2.2 コンクリートからの放出水量測定試験	2
2.3 解析	2
2.3.1 解析コードおよび解析概要	2
2.3.2 解析内容	3
3. 解析コード	5
3.1 コードの概要	5
3.2 数学モデル	5
4. コンクリート内部の水分移動・放出の解析	14
4.1 大洗工学センターで実施された「コンクリートからの放出水測定実験」の 計算	14
4.1.1 目的	14
4.1.2 「コンクリートからの放出水測定実験」のシミュレーション解析 ..	14
4.1.3 主要パラメータの感度解析	31
4.2 実機事故想定温度条件での適用計算	52
4.2.1 目的	52
4.2.2 「もんじゅ実機躯体コンクリート放出水挙動確認試験」のシミュレー ション解析	52
4.2.3 実機事故想定温度条件での解析	58
5. まとめ	67
5.1 大洗工学センターで実施された「コンクリートからの放出水測定実験」の 計算	67
5.2 実機事故想定温度条件での適用計算	67
参考文献	68

1. はじめに

ナトリウム漏えい事象において、コンクリートから放出される水分は重要な要素である。実機における種々の事象・環境条件における放出水量を推定するためには、実験的な検討だけでは十分カバーしきれないことも考えられ、解析的検討により補足する必要がある。

コンクリートは水を多く含む多孔質材料であり、内部に温度勾配が生じると水分が移動する。コンクリート表面が十分にシールされていなければ、コンクリート表面と雰囲気との間にも水分の流入出が生じる。コンクリートは高温になるほど熱の移動と水分の移動が互いに影響しあう性質があるため、高温領域でのコンクリート内部の水分移動を評価するためには、熱の移動との連成を考慮する必要がある。

そこで、熱水分同時移動解析コードを用いて、コンクリート内部の水分移動・放出を解析的に検討する。

2. 解析作業の概要

2.1 全体概要

本作業では、動力炉・核燃料開発事業団（以下、事業団と記す）の大洗工学センターで実施された「コンクリートからの放出水測定実験」¹⁾の実験データに対して、清水建設株式会社（以下、当社と記す）所有の熱水分同時移動解析コード「T-Mics」を用いて、シミュレーション解析を行って諸物性の特性を推定し、主要ないくつかの物性についての感度解析により、それらの物性が放出水量に与える影響の検討を行う。

また、前記の検討に基づいて諸物性を仮定し、実機事故想定温度条件における放出水量を算定する。なお、実機事故想定温度条件には「もんじゅ実機躯体コンクリート放出水挙動確認試験」²⁾の条件も含むものとし、その実験データと放出水量算定値の整合性も考慮して、一部の物性を調整するものとする。

2.2 コンクリートからの放出水量測定実験

「コンクリートからの放出水量測定実験」¹⁾は、「ナトリウム漏えい燃焼実験－Ⅱ」における、加熱コンクリートからの放出水量評価に資することを目的として事業団が実施されたものである。

実験は、200mmφ×200mmHのコンクリート供試体を、高さ方向に1次元的に熱および水分が移動するような装置により加熱し、コンクリート表面から放出される水分をキャリアガスにより回収装置に導き、計量するものである。

温度履歴を5つのパターン（L120、L160、L350、U120、U150）として、各温度パターンについて3体（L350は2体）の試験を実施している。

2.3 解析

2.3.1 解析コードおよび解析概要

(1) 解析コード

解析コードは、熱と物質（水分）移動に関するBazantの理論³⁾に基づいた数学モデルに改良を加えた前述の当社の解析コード「T-Mics」の1次元版とする。

「T-Mics」は、質量保存とエネルギー保存を満足する熱水分移動モデルについて、実験的・経験的に無視しうる項目を落として簡素化することにより、熱と水分の過渡的挙動（非定常状態）を有限要素法により容易に計算できるコードである。

コンクリートの諸物性（透水係数、比熱等）は、高温になると温度依存性、圧力依存性が強くなる。本来、それらの諸物性はコンクリート材料固有のものであり、解析の対象とする材料毎に実験的に定めなければならない。しかし、物性を

評価する実験は非常にコストと労力を要するため、「T-Mics」では既往の実験のシミュレーション等よりデフォルトの物性が用意されている。

解析可能な温度範囲は0℃～800℃である。

(2) 解析概要

解析は、以下の2ケースである。

a. 大洗工学センターで実施された「コンクリートからの放出水測定実験」¹⁾の計算

b. 実機事故想定温度条件での適用計算

解析における諸物性の設定については、コンクリート調合・含水率試験結果等を活用し、温度・圧力依存性のある物性については「T-Mics」のデフォルトを用いることを基本とする。

解析緒元として、要素分割は等分割とし、1要素の長さは2.5mmとする。解析時間は4時間を原則とし、解析時間刻みは0.1分とする。

2.3.2 解析内容

(1) 「コンクリートからの放出水測定実験」¹⁾の計算

解析ケースは、5つの温度履歴パターン（L120、L160、L350、U120、U150）を対象として、5ケースとする。

解析対象のコンクリート形状が200mm Hであることから、解析範囲は200mmの全長とする。

境界条件として、温度については各温度履歴パターンにおける3体（L350は2体）の平均値より設定する。非加熱側の温度境界については実測温度履歴を用いる。加熱側の温度境界については、その近傍の実測値と解析値ができるだけ一致するような温度履歴を仮定する。相対湿度については、実験装置の仕様よりほとんど乾燥状態であると予測されるため、0とする。

解析は、温度履歴と放出水量履歴の実測値をシミュレートするような透水係数と熱伝導率を試行錯誤で推定する。

さらに、いくつかの温度履歴パターンについて、透水係数（10ケース）・解析開始時水分損失（4ケース）・熱伝導率（3ケース）をパラメータとして17ケースの感度解析を行う。

(2) 実機事故想定温度条件での適用計算

解析ケースは5ケースとする。その中には、「もんじゅ実機躯体コンクリート放出水挙動確認試験」²⁾の実験条件のケースを1ケース含むものとする。

もんじゅのコアコンクリート形状が500mm Hであることから、解析範囲を500mmとする。

境界条件は、温度については別コードによる表面近傍温度解析値より設定し、相対湿度については0とする。

解析は、(1)の「コンクリートからの放出水測定実験」のシミュレーション解析により推定された物性を用いることを原則とするが、「もんじゅ実機躯体コンクリート放出水挙動確認試験」の放出水量実測値との整合性も考慮して、一部の物性を調整する。

3. 解析コード

3.1 コードの概要

コンクリートや他の格納容器材料は、自由水または毛細管水、吸着水、化学的結合水のような様々な形の大量の水を伴った、非常に多くの細かな気孔を含んでいる。高温や厳しい熱環境では、かなりの量の水の放出と蒸発が生じ、水が気孔を通して移動することにより圧力勾配を誘発する。これらの誘発された気孔圧力、温度勾配や水の放出による収縮ひずみによる熱応力は、格納容器構造物の最大引張応力より大きい内部応力を生じさせる可能性があり、また、構造物の亀裂と爆裂を引き起こす可能性もある。

原子炉格納容器によく用いられる材料である通常の構造コンクリートは、長年安全性の研究で興味を引いてきた。原子力事故の制限を扱っているケースでは特にそうである。コンクリート製格納容器の内壁に対する高温と圧力は、格納容器壁の経年化による進行性の劣化を誘発する可能性がある。水の存在下での高温の影響は、水の喪失に加え、気孔圧力を誘発し、徐々にひびわれにつながる収縮を引き起こす。亀裂は、漏洩の通路をつくって、結果として格納容器機能の喪失に導くこともある。

本解析作業に使用する解析コード「T-Mics」は、加熱した多孔性の物質について、熱と質量の連成した移動をシミュレートし、その結果として生ずる応力を評価するプログラムである。均質媒体を仮定した有限要素解析を用いて、時刻により変化する温度/圧力境界下のコンクリート製格納容器壁を通した温度や気孔圧力分布、湿分移動速度を算出する。また、温度勾配、気孔圧力と高温下での結合水の放出によって起こる内部応力も算出する。温度、気孔圧力、および、熱移動計算によって算出された結合水の喪失による体積変化が、応力解析の入力荷重として使われる。

3.2 数学モデル

コンクリートは多孔性の材料である。この材料に高温が作用するとき、その気孔内の水の圧力は増加する、そして、その物体内で湿分移動が誘発される。コンクリート物体内の従属変数の扱いは、保存式と水に関する状態式によって容易にされる。温度、気孔圧力とコンクリート内の湿分含水量の関係は、時間に関するエネルギーと質量の2つの保存式によって表される。同じ変数に関係する状態式が、その解析の中で保存式を補足する。

計算された圧力、温度と水喪失による収縮は、コンクリート内部のひずみを誘発する。応力解析の数式化は、結果として生ずる変形、応力、過大な応力によって生じるひびわれに関する情報を与える。

(1) コンクリート中の水の状態

コンクリート中の水の状態は、自由水または毛細管水と、吸着水または化学的結合水に分類される。図3-1は、気孔システムの中で水の状態の概要を示す。化学的に結合された水は、強くその表面に付着して、その固体の構成要素部分とみなされる。吸着水は、気孔表面を幾層の分子膜でおおう。吸着水の量または吸着水の分子膜の数は、気孔システムの相対湿度の減少とともに減少する。気孔壁で、一番内側の吸着水は、運動に関して影響されにくいとみなされる。間隙の残りは、加熱によって移動できる自由水によって満たされると仮定される。このように、毛細管水は一部が自由水、一部が吸着水である。また、水は蒸発可能と蒸発不可能に区別される。蒸発可能な水の一部は自由水と同じで、残りの蒸発可能な水は吸着水の外側の層を含んでいる。

コンクリート構造物が高温加熱を受けるとき、脱水された水と称される結合水の相当量が放出されて、気孔内で圧力が誘発される。これが、その気孔を通した毛細管水の移動を引き起こす。したがって、加熱したコンクリート構造物内の熱と質量移動は、連成されてエネルギーと質量保存式によって記述される。

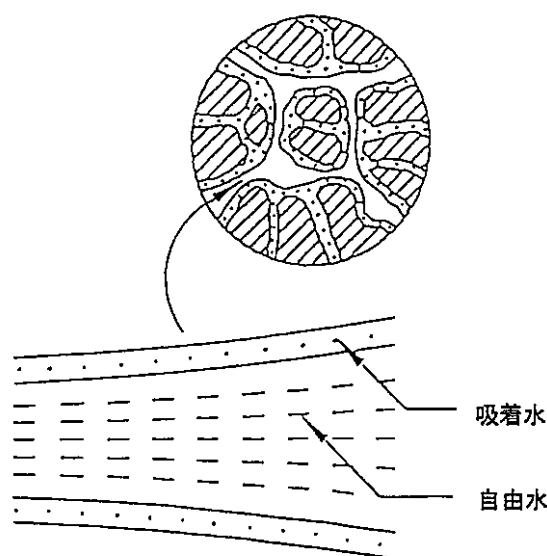


図3-1 気孔システム内での水の状態

(2) 熱と質量移動解析

湿分は、液体、蒸気、あるいは組合せられた形で、拡散、毛細管作用、圧力と温度勾配の結果として、気孔構造物を通して移動する。濃度勾配による拡散質量流束は、Fickの法則によって与えられる。一方、毛細管作用と圧力勾配による質量流束は、Darcy式によって与えられる。液相では、質量流束は主に毛細管の力によって起こり、気相では、圧力勾配が低いときには、質量流束は主に拡散によって起こる。

しかしながら、低い圧力勾配でも、気中での水蒸気の拡散の大きさの程度は、比較的小さい気孔サイズの毛細管作用による拡散よりも小さい。そして、また、比較的小さい気孔サイズについては、いくつかの吸着水の分子膜が、空隙をほとんど満たしている。それゆえ、液相と気相での移動の区別なく、Darcy式に表されているように毛細管の力と圧力勾配のによる湿分流動を表すために、有効透水係数を使うことができる。

そのような理解と仮定で、このプログラムの中の質量移動解析は、従来の透水計算と比較すると単純化されている。コンクリート内の低い間隙率を考慮することにより、コンクリート中の間隙内の湿分拡散の効果を無視する。この仮定は、このタイプの材料によく表れる。これは、他に2つの実用的な長所を有している。ひとつめは、解析の公式化が、他と比較して非常に単純になることであり、ふたつめは、その解析の実施に必要な物性が扱いやすくなることである。有効値としての透水係数の決定は、データの実験的収集を単純化する。全体として、コンクリートを通しての気流を無視することにより、この複雑な質量移動問題の全解法が、実行可能となる。

連成された熱と質量移動のために用いられる数学的モデルは、BazantとThonguthaiによって紹介されたモデル⁴⁾に基づいている。そのモデルは、以下に示す追加仮定に基づいている

- ① Dufour効果が無視しうる、
- ② 材料が均質、等方性で、全ての物性が有効値として表されうる、
- ③ 一般的なDarcy則が適用できる。

(a) 保存式

質量の保存は、

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\text{div } J + \frac{\partial W_d}{\partial t} \quad (3-1)$$

で表される。ここに、湿分の質量流束は、

$$J = -\frac{a}{g} \text{grad } p - a_1 \text{grad } T \quad (3-2)$$

である。エネルギーの保存は、

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = C_a \frac{\partial W}{\partial t} + C_w J \text{grad } T - \text{div } q \quad (3-3)$$

で表される。ここに、熱移動率は、

$$q = -\lambda \text{grad } T \quad (3-4)$$

である。

(b) 状態式

支配式(3-1)から(3-4)は、自由水含水量(W)、圧力(p)、温度(T)に関する状態式によって補足される。解析において、その扱いは、水圧 p を飽和圧力 p_s との関係で $\phi = p/p_s$ と表し、その大きさによって3つに分類する。自由水含水量の評価を、以下に示す。

a. 不飽和領域 ($\phi < 0.96$ について)

この領域では、水の状態は、使用されるコンクリートの種類に依存する吸着等温線の形で与えられる。このプログラムでは、BazantとThonguthai³⁾によって与えられた以下のようなデフォルトの吸着等温線を使用する。

$$W = C_E \left(\frac{W_I}{C_E} \phi \right)^{1/m(T)} \quad (3-5)$$

ここで、 $m(T)$ は以下で表される。

$$m(T) = 1.0 - \frac{0.9 \left(\frac{T - T_I}{T_I} \right)^{1.5}}{14.3 + 0.87 \left(\frac{T - T_I}{T_I} \right)^{1.5}} \quad (3-6)$$

このプログラムでは、また、他の種類のコンクリートについて、ユーザー指定された吸着等温線を使うこともできる。そのような吸着等温線は、一般的多項式の形で以下のように表すことができる。

$$W = D_1 + D_2 T + D_3 T^2 + D_4 T^3 + D_5 \phi + D_6 \phi^2 + D_7 \phi^3 + D_8 T \phi + \dots + D_{16} T^3 \phi^3 \quad (3-7)$$

定数 D_1, D_2, \dots, D_{16} は、コンクリート供試体より実験的に得られたデータの線形回帰適合によって得ることができる。

b. 飽和領域 ($\phi > 1.04$ について)

この領域では、状態式は、蒸気テーブルの中で与えられるように水の熱力学特性に基づいている。水量は、以下で与えられる。

$$W = \frac{\text{有効間隙比 } e}{\text{水の比容量 } \nu} \quad (3-8)$$

そのような水のための有効間隙には、弾性体積膨張による間隙の増加と、吸着水の減少や部分的な脱水が評価されている。この有効間隙は以下のように表される。

$$e = \left(e_0 + \frac{W_d(T) - W_{d0}}{\rho_0} \right) P(\phi) \quad (3-9)$$

ここに、 $P(\phi) = 1.0 + 0.12(\phi - 1.04)$ は気孔圧力による弾性膨張の効果を含めるために使われた関数であり、差分 $W_d(T) - W_{d0}$ は、初期温度 T_i に対する吸着水の重さの減少を表す。

c. 遷移領域 ($0.96 \leq \phi \leq 1.04$ について)

この領域では、実験によりデータを取得することが困難なため、次善の策として、BazantとThonguthai³⁾は、遷移領域を不飽和領域で表された下限と飽和領域で表された上限の2つの限界を線形に結ぶことにより、人為的に表した。これらの仮定した2つの限界での屈折点は、計算困難や不安定性を引き起こすおそれがある。プログラム上でのそのような計算の困難さや実行中の不安定性を避けるために、 $\phi_1 = 0.96$ と $\phi_2 = 1.04$ での遷移限界上での座標と傾斜をつり合わせた、いわゆるS字型関数を使用して、より慎重でスムーズな遷移領域を展開している。

図3-2は、デフォルトの吸着等温線での自由水含水量を示す。

(c) 透水係数

数学的モデルの中で用いられる透水係数は、対象とするコンクリートについて実験的に取得する必要がある。そのような透水性に関する相互関係は、Bazantによる実験データの適合に基づいて、以下のように設定する。

$$T \leq 100^\circ\text{C} : a = a_0 f_1(\phi) f_2(T) \quad (3-10)$$

$$T > 100^\circ\text{C} : a = a_0 f_2(100^\circ\text{C}) f_3(T) \quad (3-11)$$

ここで、 a_0 は初期温度 T_i での透水係数である。

関数 $f_1(\phi)$ は、以下のように表される。

$$\phi \leq 1 : f_1(\phi) = \gamma + \frac{1 - \gamma}{1 + \{(1 - \phi) / (1 - \phi_c)\}^4}$$

$$\phi \geq 1 : f_1(\phi) = 1 \quad (3-12)$$

ここで、 ϕ は相対湿度、 ϕ_c は遷移湿度 (0.75) である。係数 γ は、 T_i で0.05、95℃で1.0の値であり、 T_i から100℃の範囲では、 $\gamma = 0.05 + 0.95 (T - T_i) / (100 - T_i)$ により線形補間する。関数 $f_2(T)$ は、100℃以下での透水性の温度依存性を与え、以下のように表される。

$$T \leq 100^\circ\text{C} : f_2(T) = \exp \left\{ 2700 \left(\frac{1}{T_i + 273} - \frac{1}{T + 273} \right) \right\} \quad (3-13)$$

ここで、数値 2700 は、複数分子吸着層に沿った水移動に関する起動エネルギーを気体定数によって除した比率を表している。関数 $f_3(T)$ は、以下のように表される。

$$T \geq 100^\circ\text{C} : f_3(T) = \exp \left\{ \frac{T - 100}{0.881 + 0.214 (T - 100)} \right\} \quad (3-14)$$

この相互関係は、図3-3で示されるようなコンクリートの透水係数のデフォルトとして使用されている。他のコンクリート仕様については、ユーザーは実験的に得られたデータに適合するように、固有の相互関係を提起する必要がある。

図3-4は、コンクリート中の結合水の脱水量 (W_a) のデフォルトを示している。

(d) 境界条件

表面での熱と湿分移動に関する境界条件は、以下のように表される。

$$n \cdot J = K_s (p - p_{en}) \quad (3-15)$$

$$n \cdot q = h_r (T - T_{en}) + C_w K_s (p - p_{en}) \quad (3-16)$$

ここで、 n は表面での外部方向の単位法線ベクトルである。

本解析コードの適用は、現在、下記の境界条件に限定されている。

a. 湿分/圧力

シールのケース (境界において湿分流動がない)、すなわち表面での $J = 0$

アンシールのケース：

- ① 境界において完全な湿分移動、すなわち $p = p_{en}$
- ② 圧力の時間依存、すなわち $p = p_{en}(t)$
- ③ 相対湿度の時間依存、すなわち $\phi = \phi_{en}(t)$

b. 温度

- ① 境界において完全な熱移動、すなわち $T = T_{en}$
- ② 温度の時間依存、すなわち $T = T_{en}(t)$

(3) BazantとThonguthaiのモデル³⁾に追加・改良を加えた点

「T-Mics」が、文献3)のモデルに追加した機能および改良を行った主な項目を以下に示す。

- ① コンクリートの諸物性を、ユーザーが独自に定義できるようにした
- ② 応力解析機能を追加した
- ③ 遷移領域の状態式にS字型関数を用いて、解の安定性を向上させた

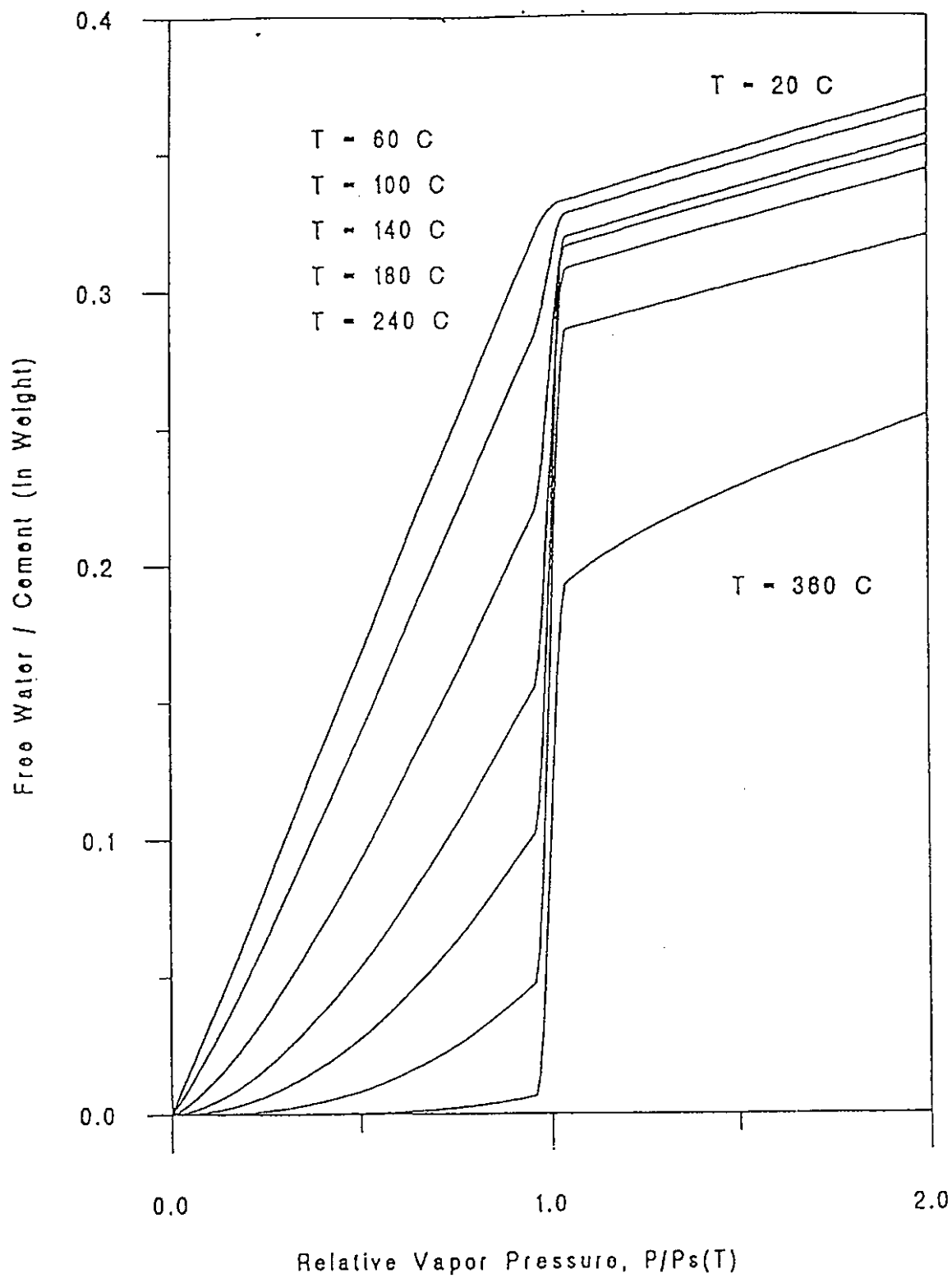


図3-2 吸着等温線

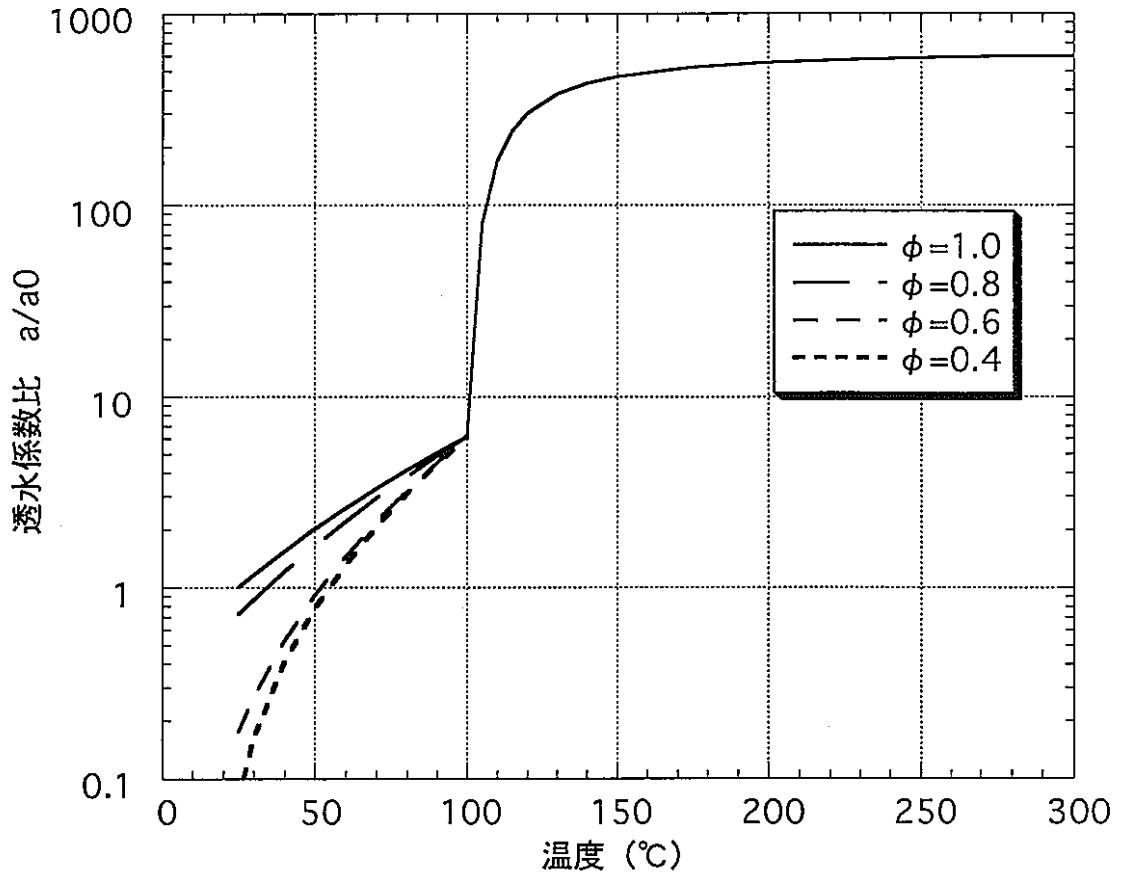


図3-3 透水係数比 (初期温度 $T_i=25^{\circ}\text{C}$)

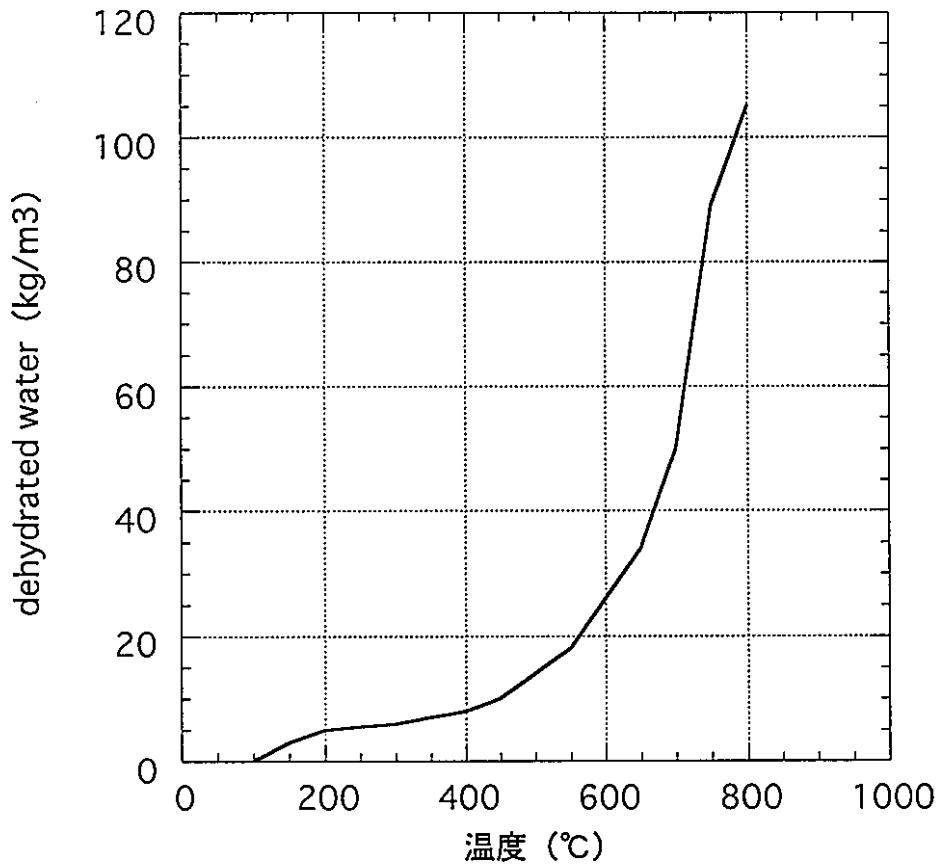


図3-4 結合水の脱水量

記号の説明

a	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	コンクリートの透水係数 (入力)
a_0	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	初期温度 T_i での透水係数 (入力)
a_1	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	熱水分流束 $a_1=0$
C	$(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	コンクリートの等圧比熱 (入力)
C_a	$(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	自由水の吸着熱 (入力)
C_E	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	コンクリートの単位体積あたりのセメント質量 (入力)
C_w	$(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	水の気化熱 (温度・圧力依存性 ASME Steam Table使用)
e	(-)	有効間隙比
e_0	(-)	初期温度 T_i での有効間隙比 $e_0 = W_i \nu$
h_r	$(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	コンクリートの表面熱伝達率
g	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	重力加速度
J	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	湿分の質量流束
λ	$(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	コンクリートの熱伝導率 (入力)
k_s	$(\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	質量移動係数
p	(Pa)	コンクリート気孔内の水蒸気圧
p_{en}	(Pa)	雰囲気の水蒸気圧 (入力)
p_s	(Pa)	飽和水蒸気圧 (温度依存性 ASME Steam Table使用)
q	$(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	熱流束
t	(s)	時間
T	(K)	温度
T_{en}	(K)	雰囲気温度 (入力)
T_i	(K)	初期温度 (入力)
W	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	コンクリートの単位体積あたりの含有自由水質量
W_d	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	単位体積あたりの脱水質量 (入力)
W_{d0}	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	初期温度 T_i での単位体積あたりの脱水質量 $W_{d0}=0$
W_i	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	コンクリートの単位体積あたりの飽和含水質量 (入力)
ρ	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	コンクリートの密度 (入力)
ρ_w	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水の密度 (温度・圧力依存性 ASME Steam Table使用)
ϕ	(-)	コンクリート気孔内の相対湿度
ν	$(\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	水の比容量

4. コンクリート内部の水分移動・放出の解析

4.1 大洗工学センターで実施された「コンクリートからの放出水測定実験」の計算

4.1.1. 目的

「コンクリートからの放出水測定実験」¹⁾の実験結果のシミュレート解析を行うことにより、解析コード「T-Mics」に用いるコンクリートの諸物性を推定し、また、主要なパラメータについて感度解析を行うことにより、それらのパラメータが放出水量に与える影響を評価することを目的とする。

4.1.2 実験結果のシミュレーション解析

(1) 解析条件

実験は、5つの温度履歴パターン（L120、L160、L350、U120、U150）について、各温度履歴パターン毎に3体（L350は2体）ずつ行われた。解析は、この5つの温度履歴パターンを対象として、5ケース行う。

シミュレーションの目標とする温度・放出水量は、各温度履歴パターンの3体（L350は2体）の実測値の平均値とする。なお、放出水量実測値とは、実験において加熱側表面と側面より放出された水量の和とし、非加熱側から放出された水量は含まない。

コンクリートの諸物性の設定方法は下記のとおりである。

- ・熱伝導率 λ は、コンクリートの実測温度履歴に最も整合する値を推定する。
- ・初期温度での透水係数 a_0 は、実測放出水量履歴に最も整合する値を推定する。
- ・単位セメント質量 C_E ・初期単位水量 W_T ・コンクリートの密度 ρ は、コンクリートの調合より設定する。
- ・飽和含水量 W_i ・解析開始時自由水量・損失水量は、含水率試験結果に基づき、密度 ρ を 2300kg/m^3 として設定する。飽和含水量は非加熱側の平均的含水量を丸めた値、損失水量は非加熱側と加熱側の含水量の差を折線分布とし、折点位置の値を丸めた値とする。解析開始時自由水量は、飽和含水量より損失水量を差し引いた分布とする。
- ・透水係数 a ・コンクリートの比熱 C ・脱水量 W_d の温度依存性等は、解析コードのデフォルト値を用いる。
- ・自由水の吸着熱 C_a ・コンクリートの初期相対湿度 ϕ_i は、常用値を用いる。
- ・コンクリートの初期温度 T_i ・雰囲気温度 T_m は、実測温度履歴より設定する。初期温度は一様分布とし丸めた値とする。加熱側温度履歴は、加熱側から15mmの位置の温度実測値と解析値が最も整合する履歴を推定する。非加熱側温度履歴は、非加熱側表面温度実測値を折れ線履歴とし、折点の温度を丸めた値とした履歴とする。

- ・加熱側雰囲気の水蒸気圧 p_{em} は、実験条件を考慮して設定する。
- ・非加熱側表面では、コンクリート表面と雰囲気の間には水分の流入出がないものとする。

解析緒元を表4-1に示す。

表4-1 解析緒元

解析次元	1次元
解析モデル全長	200mm
要素分割	80要素に等分割（1要素の長さ：2.5mm）
解析時間	240分
解析時間刻み	0.1分

(2) 解析結果

解析値が実測値と最も良く適合した時に使用したコンクリートの諸物性を表4-2に示す。

1時間毎の放出水量の平均実測値と解析値とを比較して表4-3に示す。また、各加熱パターン毎に温度履歴と放出水量履歴の解析結果と実測結果を比較して、図4-6～図4-10に示す

また、解析による1時間毎の断面の圧力分布、水量分布、温度分布を図4-11～図4-15に示す。

推定された透水係数は、L350を除く4つの加熱パターンで $1.6 \times 10^{-12} \text{m/s}$ (25℃換算) となり、一般的なコンクリートの値とされている $1 \times 10^{-14} \text{m/s} \sim 1 \times 10^{-10} \text{m/s}$ のほぼ中央値であった。L350 (最高温度が約350℃) は他の4つの加熱パターン (最高温度が180℃以下) の約2.5倍の $4.1 \times 10^{-12} \text{m/s}$ (25℃換算) であったが、一般的なコンクリートの範囲内にある。

推定された熱伝導率は、L350では $1.5 \text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{℃}$ 、他の4つの加熱パターンでは $2.1 \text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{℃}$ であった。L350では、試験体端部の温度が試験体中央部の温度より高い時も低い時もあり全体的に側面からの熱流入出が均衡しているのに対し、他の4つの加熱パターンでは、常に試験体端部の温度が試験体中央部の温度より高く、側面から常に熱が流入している。従って、L350の熱伝導率の推定値は実際の物性に近く、他の4つの加熱パターンの熱伝導率の推定値は1次元解析における見掛けの値であり、実際の物性より大きめに出ているといえる。

図4-6～図4-10を見ると、いずれの加熱パターンについても温度履歴および放出水量履歴の解析値が、実測値の平均値と良い一致を示している。但し、温度レベルの低いL120とU120では、実測値、解析値ともに放出水量履歴が揺らいでいる。これは、最高温度が100℃を少し上回った時に、コンクリート内部の水の蒸発の影響で実験的には加熱のコントロールが難しくなり、解析的には透水係数等の物性が急激に変化する領域であるため、実測値、解析値ともに不安定となるためと考えられる。

図4-11～図4-15を見ると、水量が急激に低下する位置は、圧力最大位置と一致している。L160、L350、U150については、水分の流れが圧力最大位置より加熱側では加熱側に、圧力最大位置より非加熱側では非加熱側となっている様子がうかがえる。非加熱側への水分の移動は100℃を越える範囲に限られている。これは、透水係数の設定値が100℃を境に急激に小さくなるため、100℃以下の領域には水分が移動し難くなるためである。

表4-2 コンクリートの諸物性

項目 \ 加熱パターン	L120	L160	L350	U120	U150
初期温度における透水係数 a_0 (m/s)	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	3.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}
25℃における透水係数(m/s)	1.6×10^{-12}	1.6×10^{-12}	4.1×10^{-12}	1.6×10^{-12}	1.6×10^{-12}
透水係数a	図4-1参照				
熱伝導率 λ (kcal/m·hr·℃)	2.1	2.1	1.5	2.1	2.1
コンクリートの比熱C (kcal/kg·℃)	図4-2参照				
自由水の吸着熱 C_a (Kcal/kg)	0	0	0	0	0
コンクリートの密度 ρ (kg/m ³)	2300	2300	2300	2300	2300
単位セメント質量 C_E (kg/m ³)	300	300	300	300	300
初期単位水量 W_T (kg/m ³)	149	149	149	150	150
飽和含水量 W_i (kg/m ³)	105	105	105	120	120
脱水量 W_d (kg/m ³)	図4-3参照				
コンクリートの初期温度 T_i (℃)	10	10	15	10	10
コンクリートの初期相対湿度 ϕ_i	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
雰囲気温度 T_a	解析結果の両表面 (0mm,200mm) 温度参照				
雰囲気の水蒸気圧 p_a	0	0	0	0	0
解析開始時自由水量, 損失水量	図4-4参照			図4-5参照	

表4-3 放出水量の平均実測値と解析値の比較

単位：kg/m²

	L120		L160		L350		U120		U150	
	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値	実測値	解析値
1時間後	0.17	0.06	0.07	0.11	0.43	0.87	0.00	0.09	0.08	0.12
2時間後	0.25	0.30	0.64	0.57	2.15	2.63	0.17	0.14	0.39	0.46
3時間後	0.62	0.38	0.99	1.06	4.27	4.17	0.28	0.27	1.04	1.08
4時間後	0.77	0.64	1.74	1.54	6.39	5.73	0.69	0.61	1.92	1.82

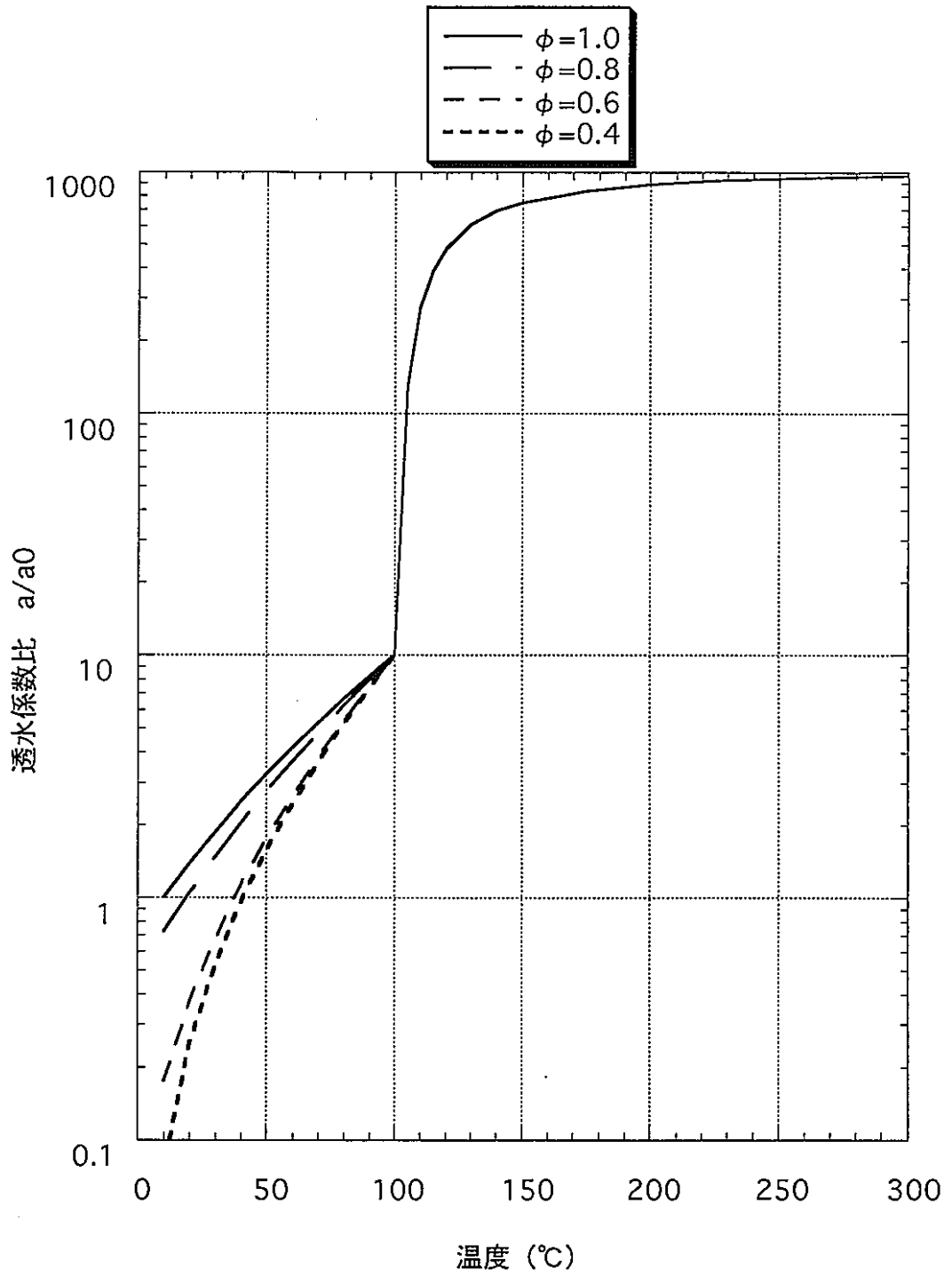


图4-1 透水係数比 (初期温度 $T_1=10^\circ\text{C}$)

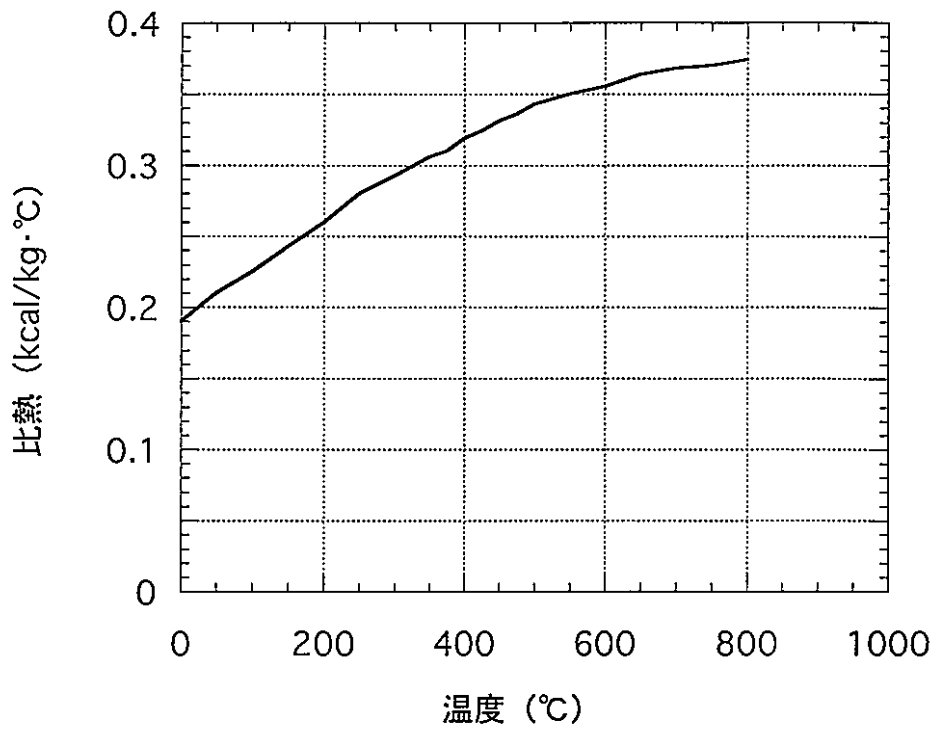


図4-2 コンクリートの比熱

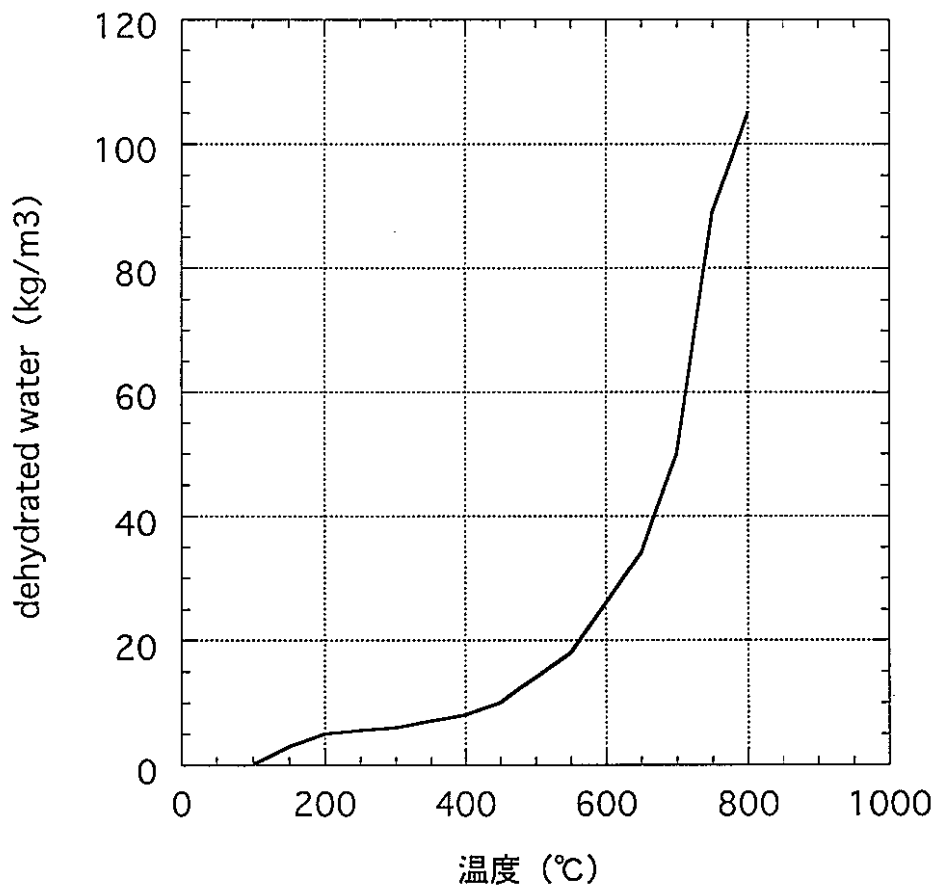


図4-3 脱水量

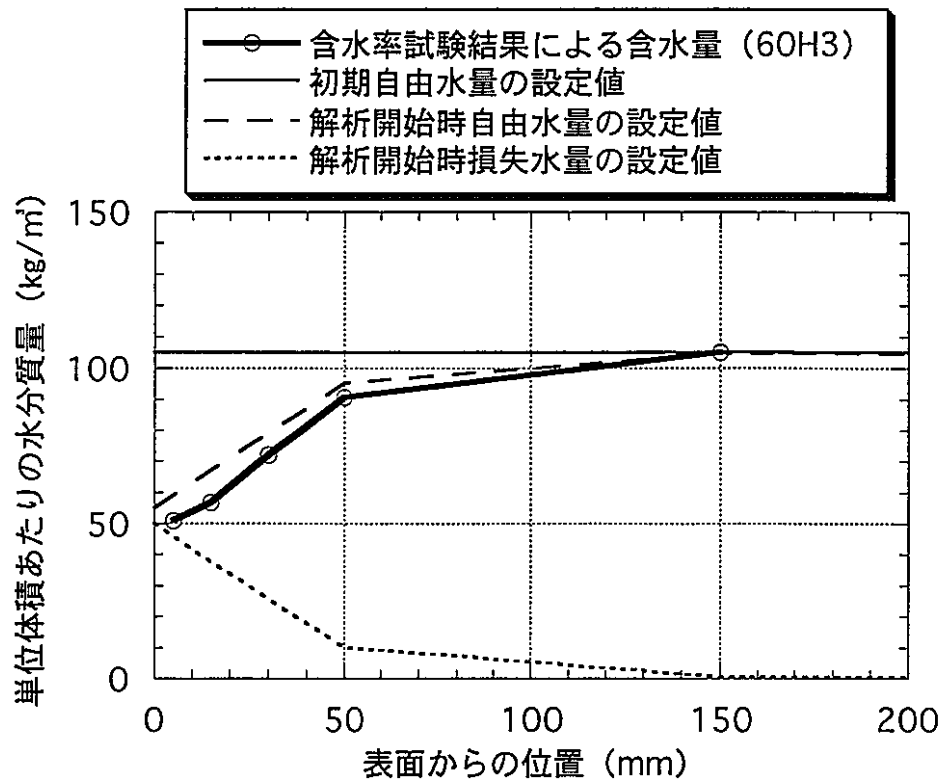


図4-4 L120・L160・L350の解析開始時自由水量、損失水量

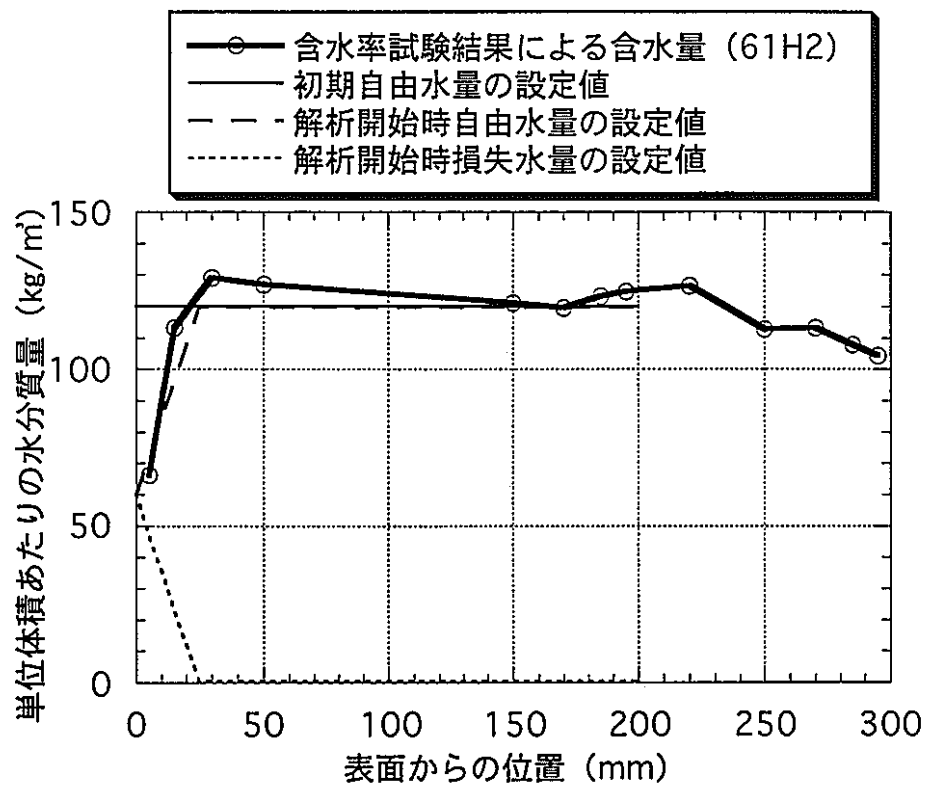
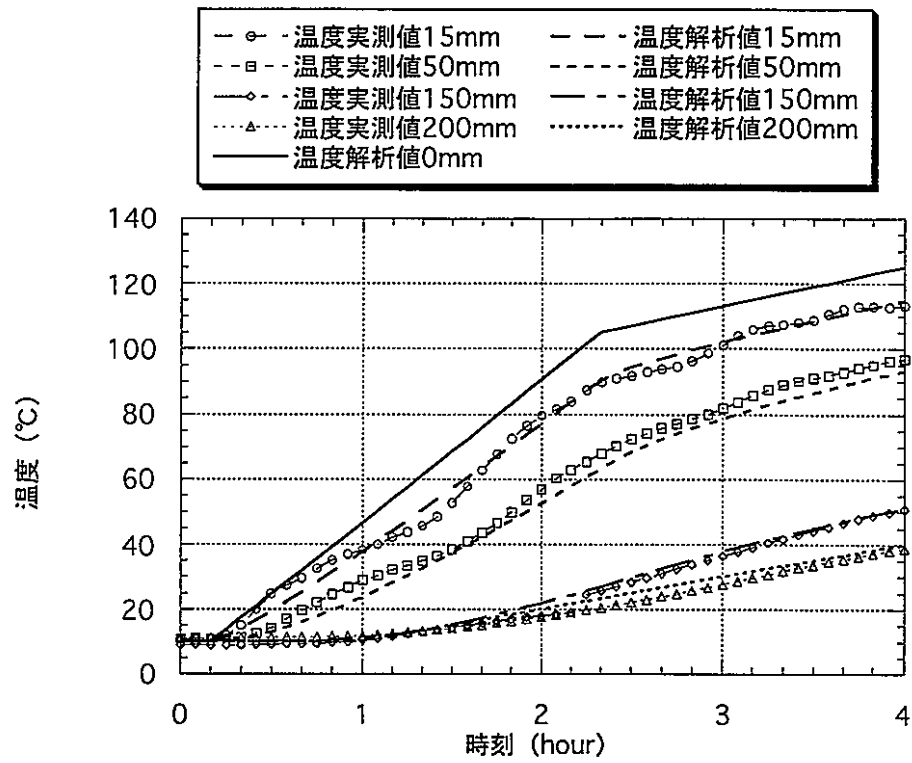
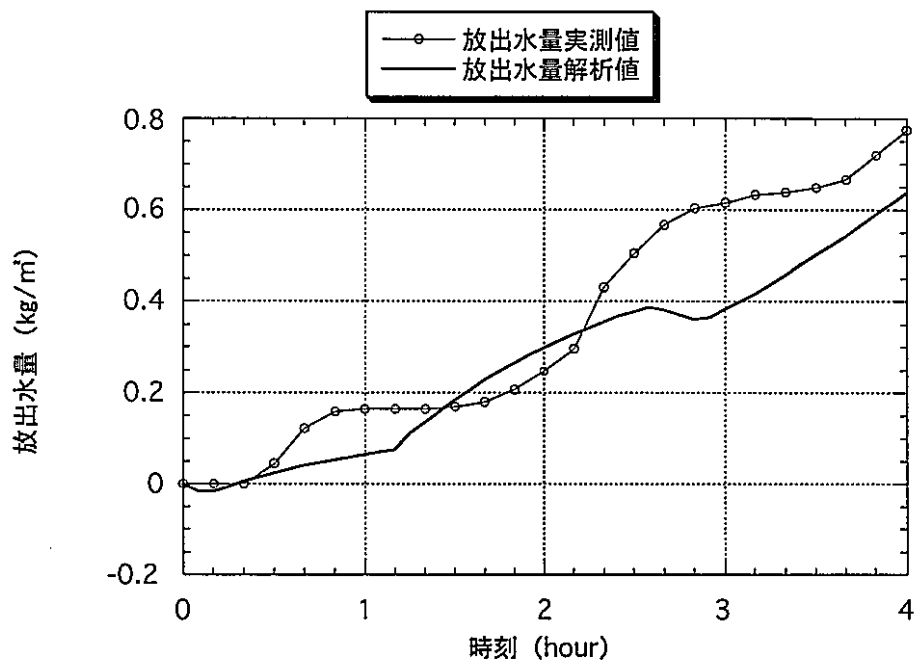


図4-5 U120・U150の解析開始時自由水量、損失水量

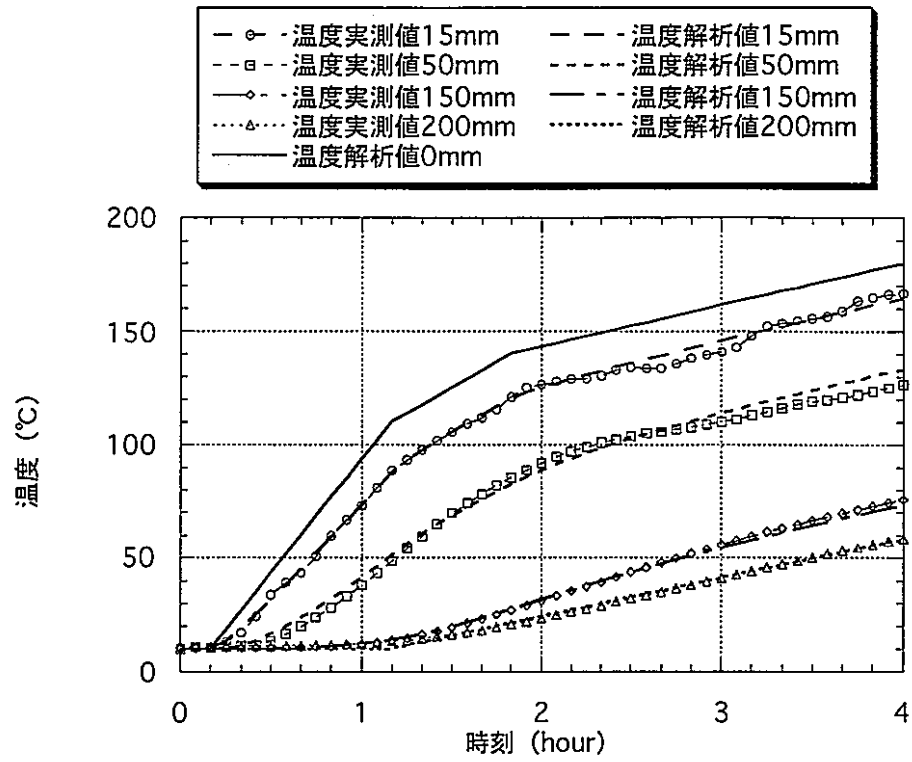


a. 温度履歴

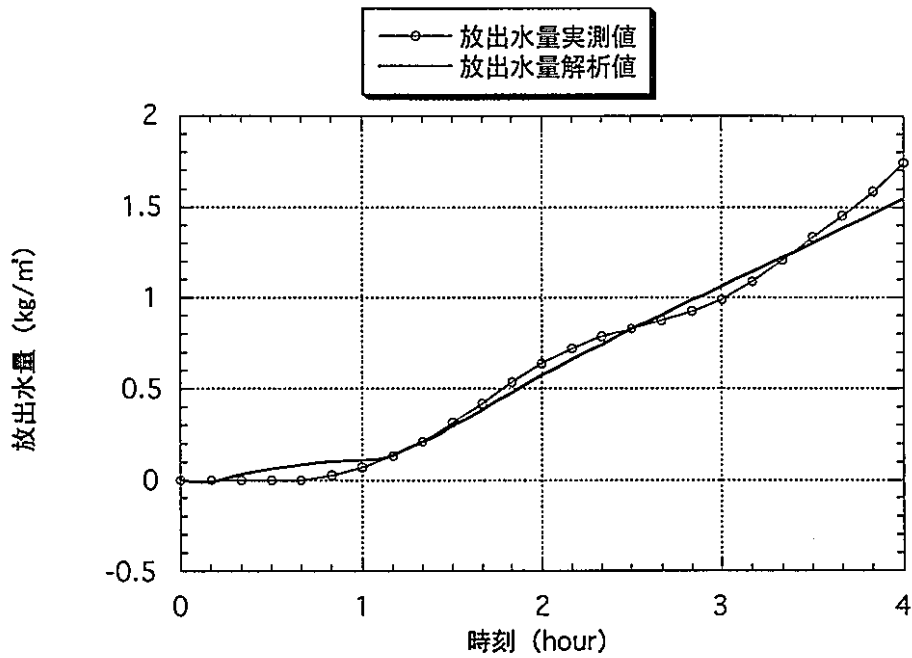


b. 放出水量履歴

図4-6 実測結果と解析結果の比較 (L120)



a. 温度履歴



b. 放出水量履歴

図4-7 実測結果と解析結果の比較 (L160)

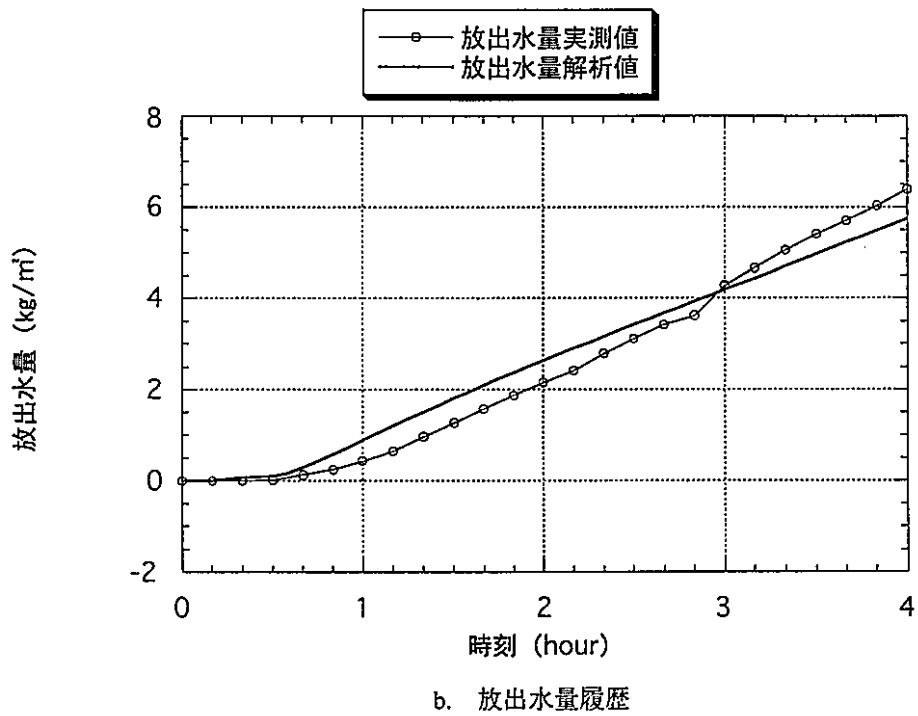
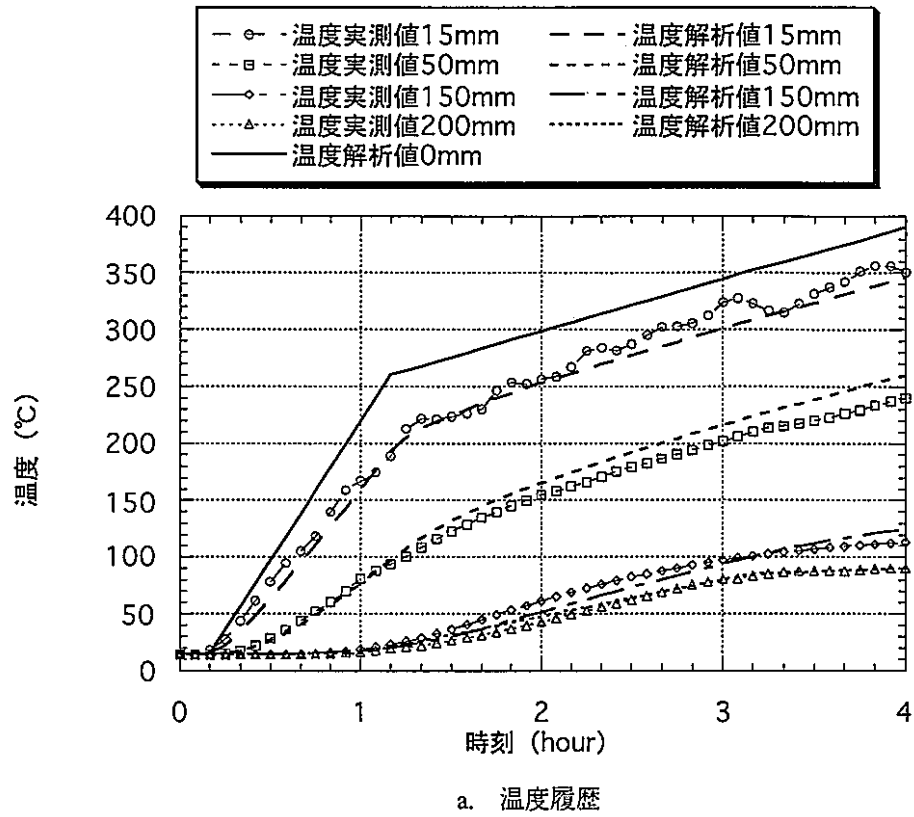


図4-8 実測結果と解析結果の比較 (L350)

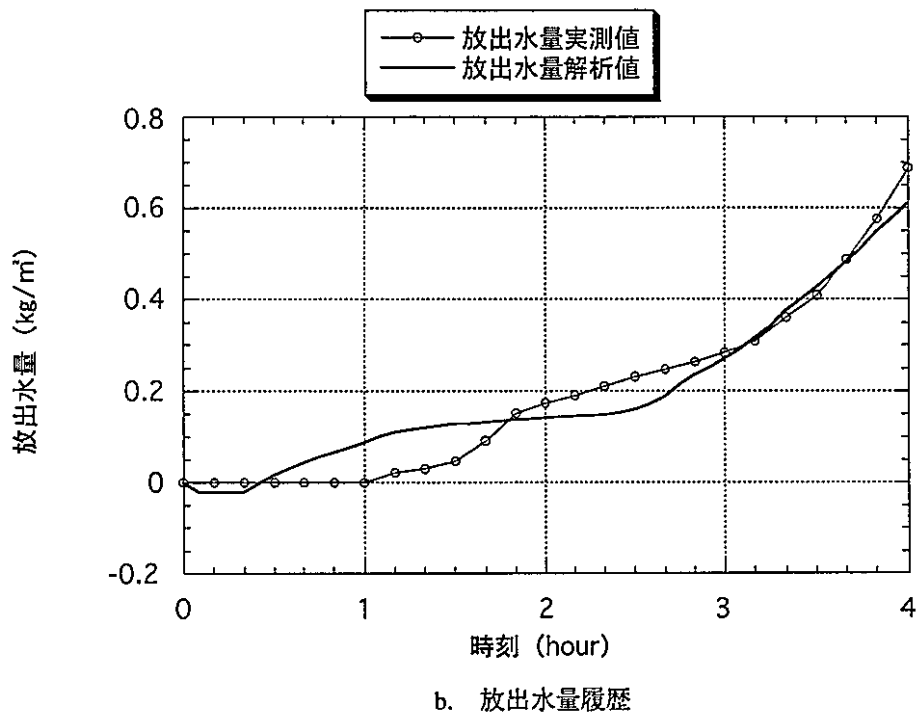
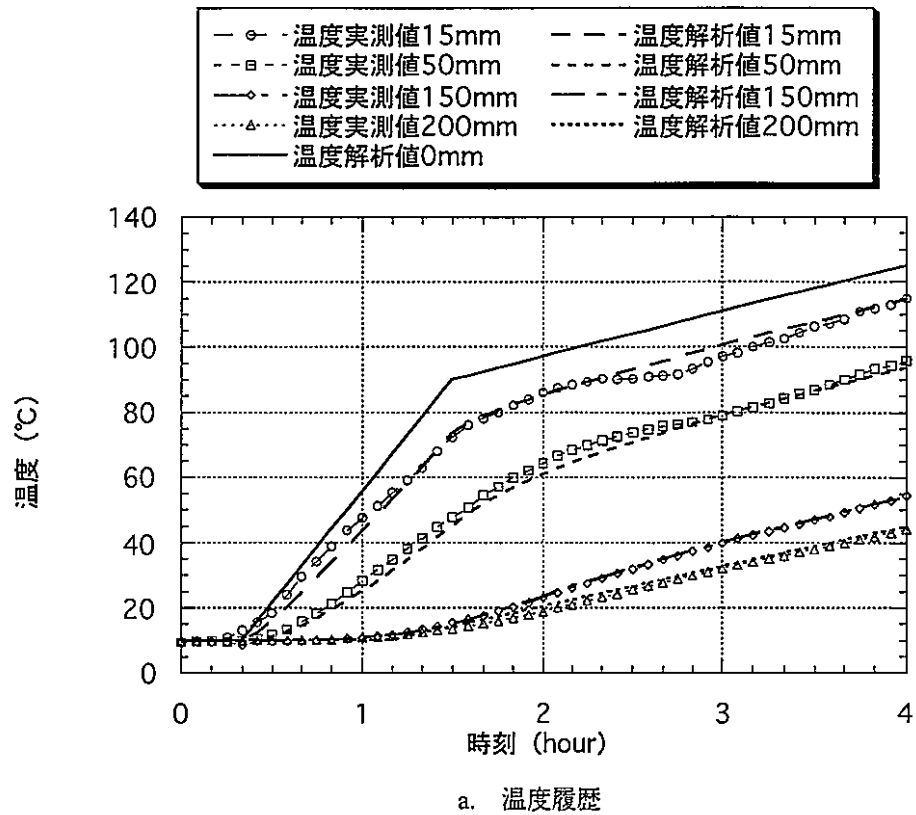
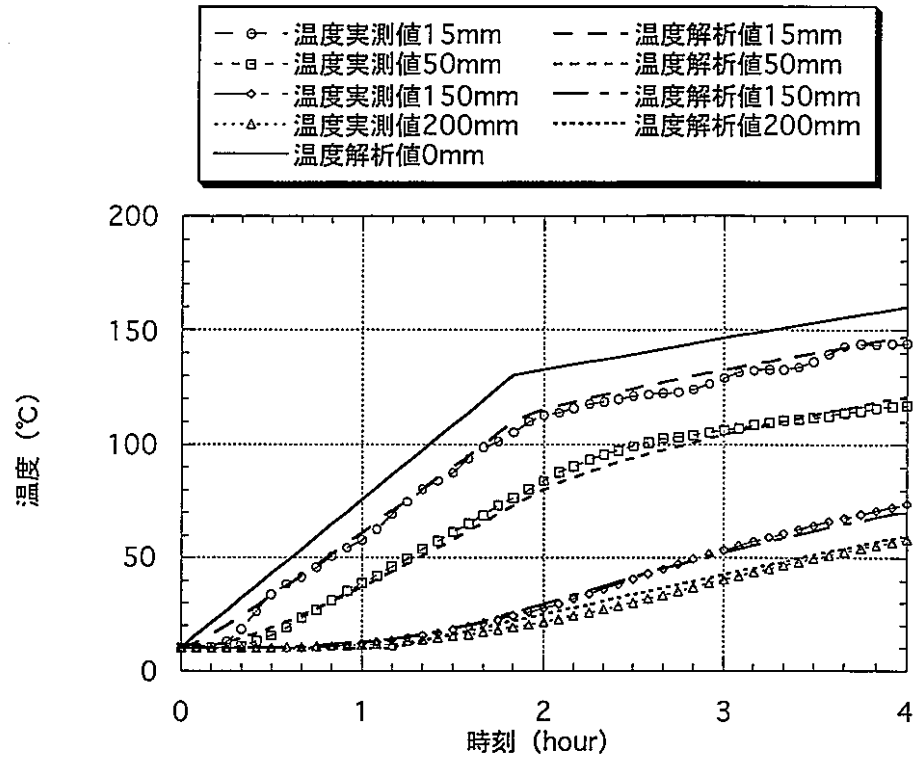
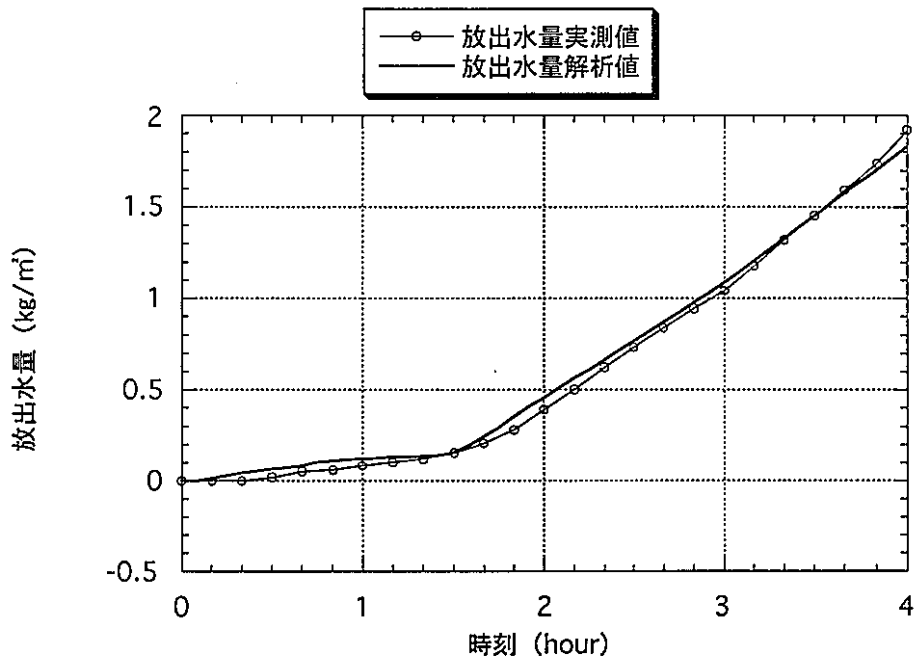


図4-9 実測結果と解析結果の比較 (U120)



a. 温度履歴



b. 放出水量履歴

図4-10 実測結果と解析結果の比較 (U150)

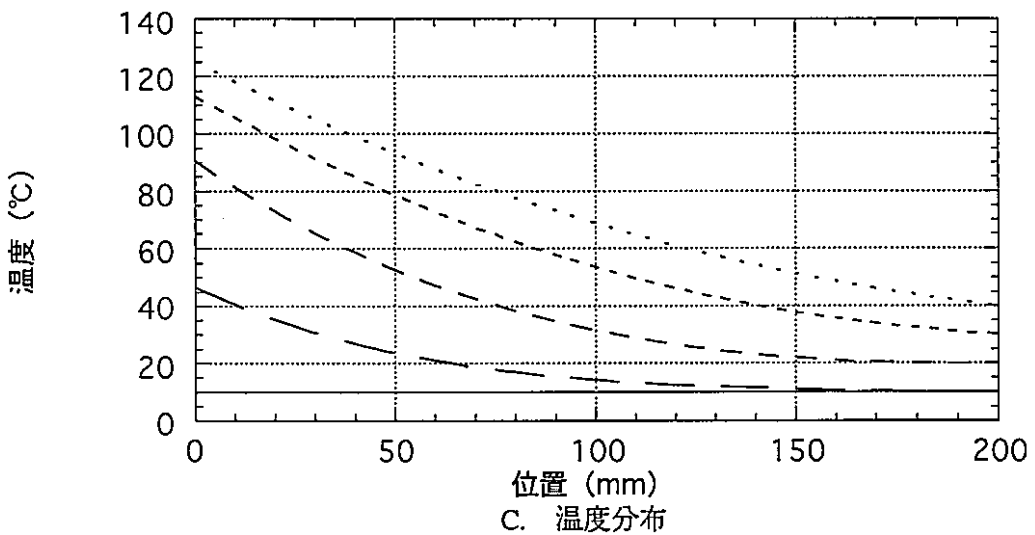
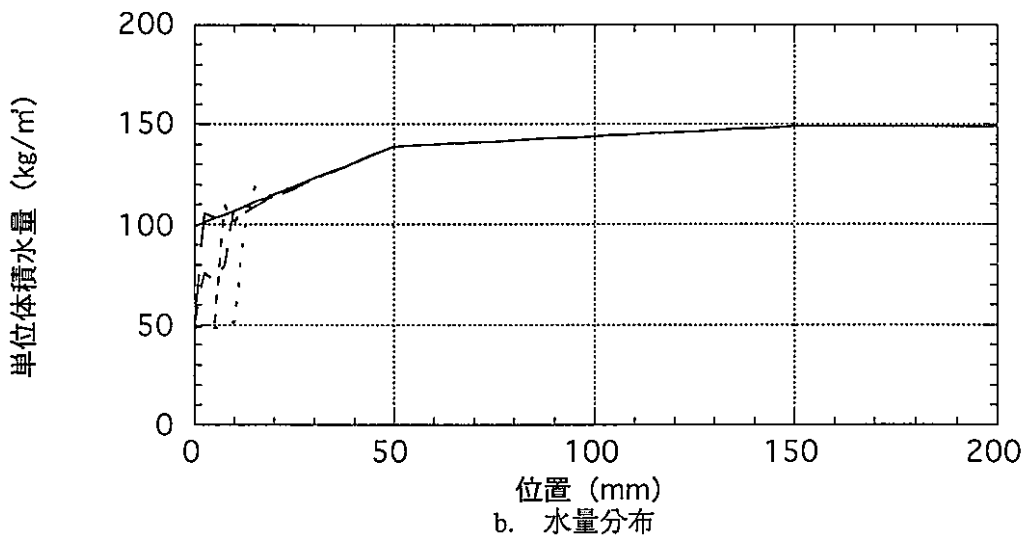
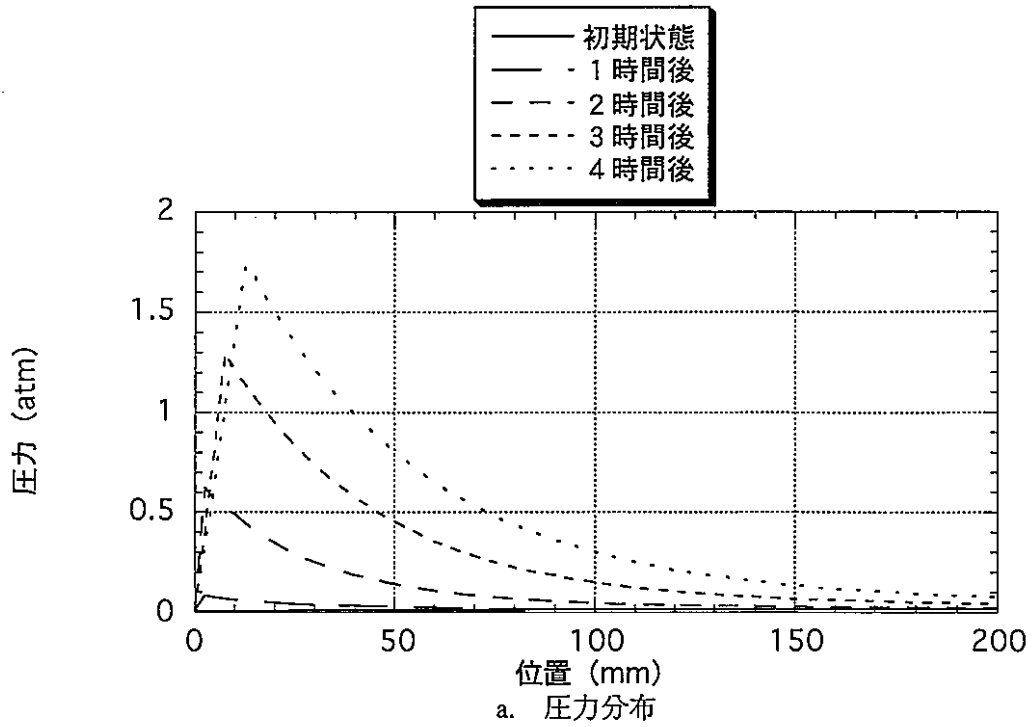


図4-11 圧力・水量・温度の材軸方向分布 (L120)

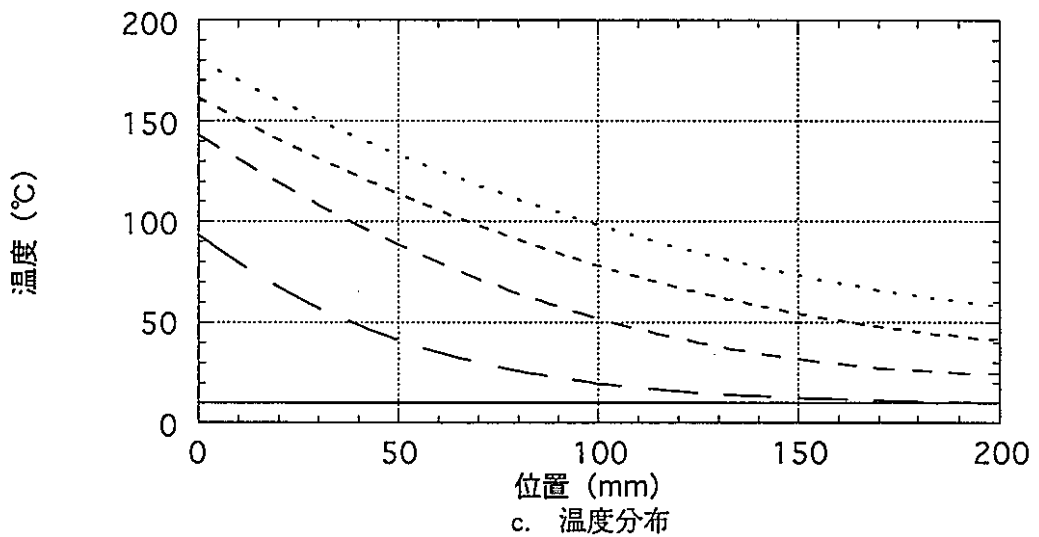
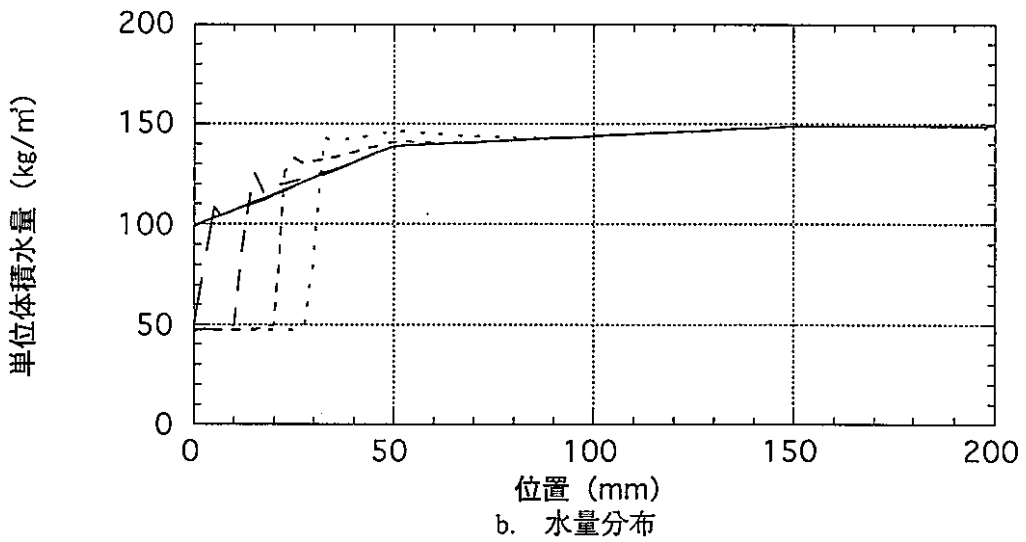
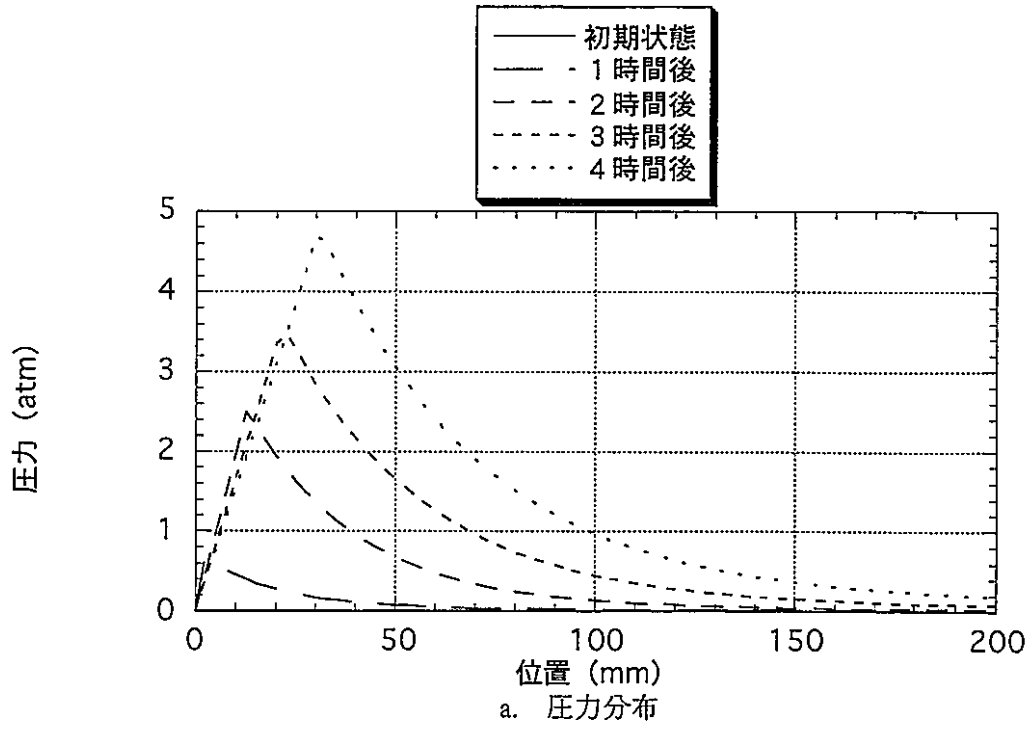


図4-12 圧力・水量・温度の材軸方向分布 (L160)

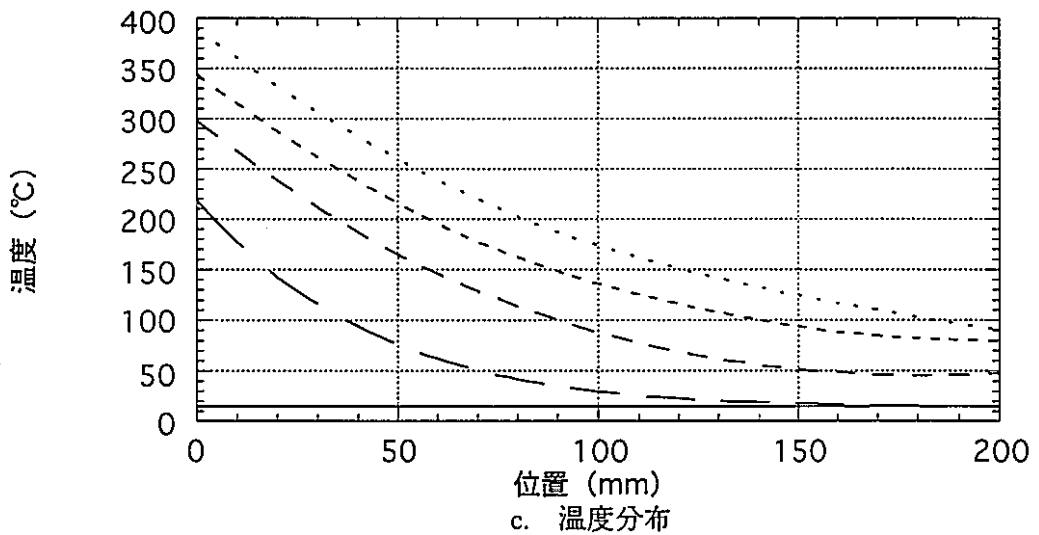
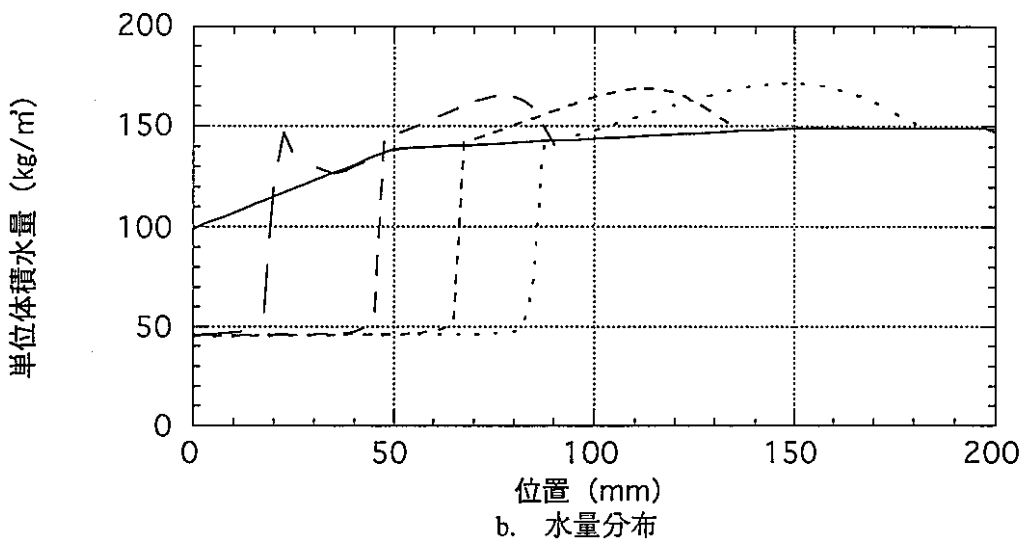
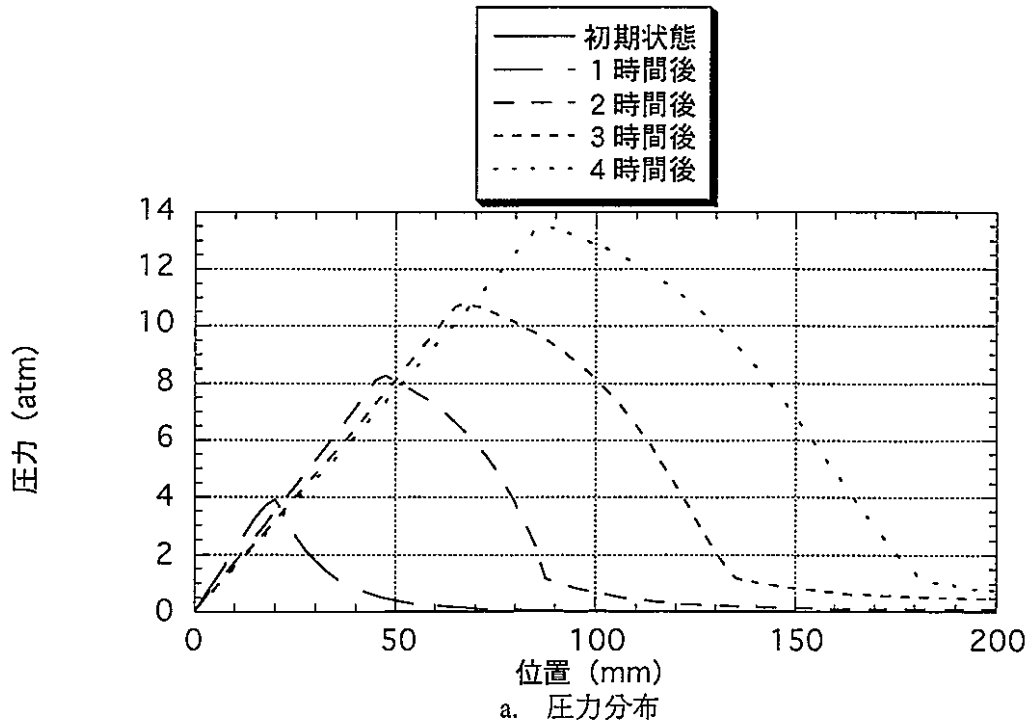


図4-13 圧力・水量・温度の材軸方向分布 (L350)

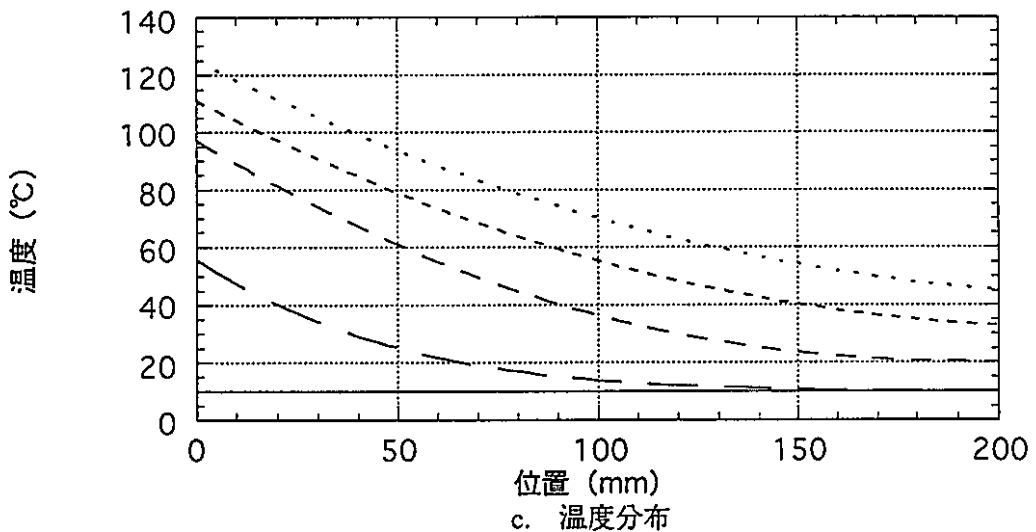
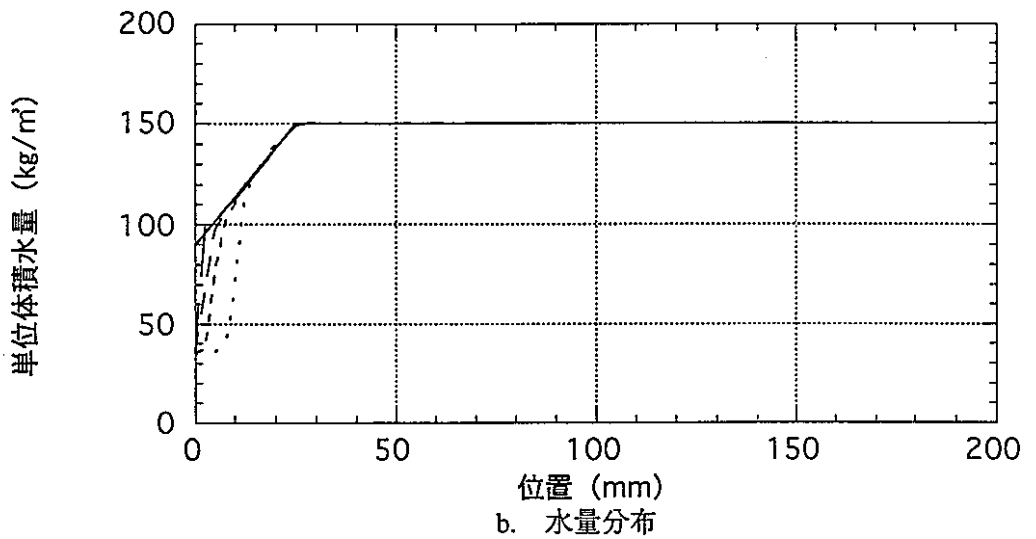
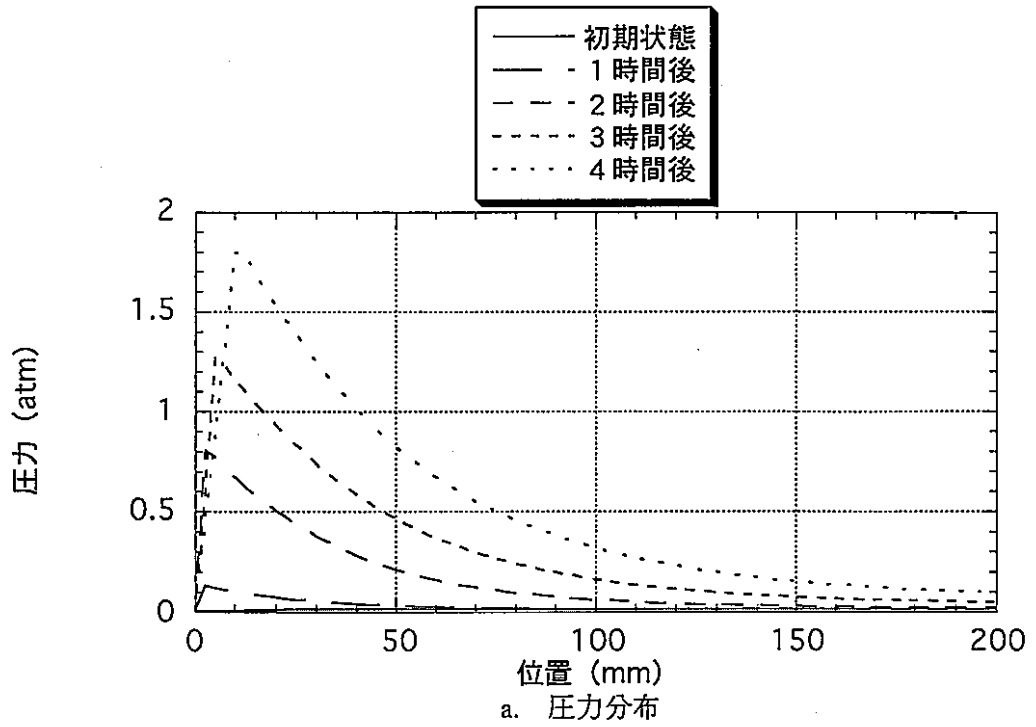


図4-14 圧力・水量・温度の材軸方向分布 (U120)

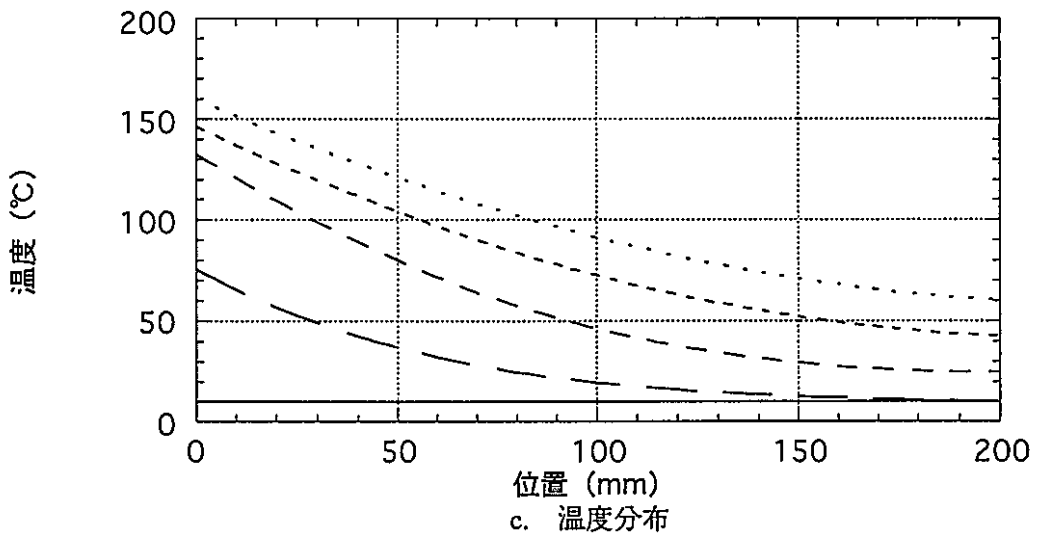
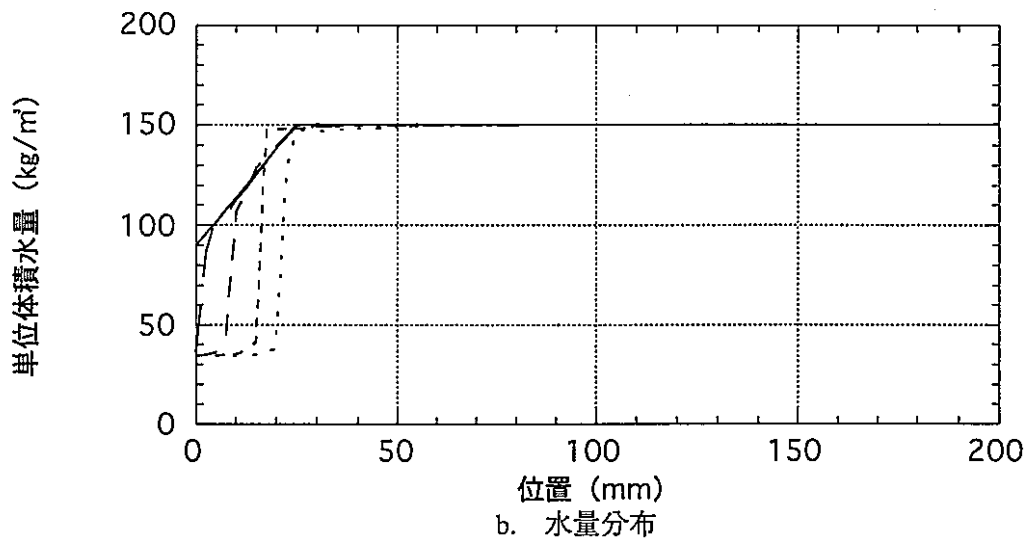
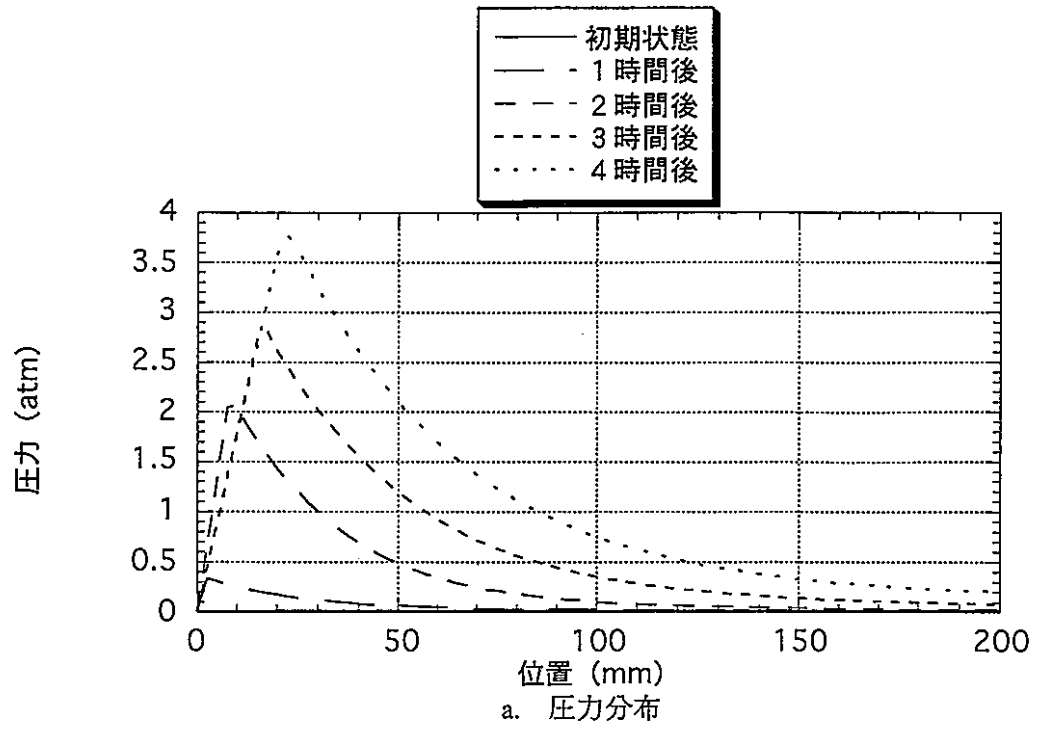


図4-15 圧力・水量・温度の材軸方向分布 (U150)

4.1.3 主要パラメータの感度解析

コンクリート表面から放出される水分量に影響があると考えられる以下の3つのパラメータについて感度解析を行った。

- ・ 透水係数
- ・ 水分損失（解析開始時）
- ・ 熱伝導率

なお、一般的には雰囲気湿度（水蒸気圧）と風速が放出水量に大きな影響を与えることが知られているが、本検討では、実験条件においても実機における雰囲気条件においてもほとんど乾燥状態で、放出された水分もコンクリート表面近傍に滞らないため、感度解析の対象から外した。

(1) 透水係数の影響

4.1.2で設定した物性値（表4-2参照）のうち、透水係数のみを変化させて放出水量の比較を行った。透水係数は、各温度履歴パターンとも実測値の上下限をもとに設定した。表4-4に透水係数の一覧を示す。各温度履歴パターンにおける1時間毎の放出水量解析値を、各試験体の実測値とあわせて表4-5～表4-9に示す。また、放出水量履歴を比較して図4-16～図4-20に示す。

実験による放出水量のばらつきが全て透水係数に起因したと仮定すると、透水係数のばらつきは1:2～1:100と非常に大きい。推定した透水係数は、25℃に換算して $1.6 \times 10^{-13} \sim 1.6 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ の範囲にあり、全て通常のコンクリート物性内にある。

表4-4 透水係数 a_0 の一覧

単位：m/s

対象とした 実測値	温度履歴パターン				
	L120	L160	L350	U120	U150
上限	1.0×10^{-11}	3.0×10^{-12}	1.0×10^{-11}	1.5×10^{-12}	2.0×10^{-12}
平均	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	3.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}
下限	1.0×10^{-13}	0.3×10^{-12}	1.0×10^{-12}	0.7×10^{-12}	0.5×10^{-12}

表4-5 放出水量の比較（L120）

単位：kg/m²

	解析値			実測値		
	$a_0=1.0 \times 10^{-13} \text{ m/s}$	$a_0=1.0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$	$a_0=1.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$	1-1	1-2	1-3
1時間後	0.06	0.06	0.06	0.11	0.38	0.00
2時間後	0.30	0.30	0.39	0.14	0.52	0.08
3時間後	0.40	0.38	0.84	0.54	0.98	0.33
4時間後	0.46	0.64	1.47	0.64	1.22	0.46

表4-6 放出水量の比較 (L160)

単位：kg/m²

	解析値			実測値		
	$a_0=3.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$	$a_0=1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$	$a_0=0.3 \times 10^{-12} \text{m/s}$	5-1	5-2	5-3
1 時間後	0.11	0.11	0.11	0.10	0.07	0.04
2 時間後	0.35	0.57	0.88	1.13	0.22	0.56
3 時間後	0.64	1.06	1.64	1.43	0.43	1.11
4 時間後	0.94	1.54	2.68	2.33	0.93	1.97

表4-7 放出水量の比較 (L350)

単位：kg/m²

	解析値			実測値	
	$a_0=1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$	$a_0=3.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$	$a_0=1.0 \times 10^{-11} \text{m/s}$	2-1	2-2
1 時間後	0.60	0.87	1.29	0.00	0.86
2 時間後	1.85	2.63	3.80	0.77	3.53
3 時間後	3.00	4.17	5.88	2.90	5.64
4 時間後	4.29	5.73	7.88	5.32	7.47

表4-8 放出水量の比較 (U120)

単位：kg/m²

	解析値			実測値		
	$a_0=0.7 \times 10^{-12} \text{m/s}$	$a_0=1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$	$a_0=1.5 \times 10^{-12} \text{m/s}$	3-1	3-2	3-3
1 時間後	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00
2 時間後	0.14	0.14	0.15	0.17	0.11	0.25
3 時間後	0.23	0.27	0.31	0.27	0.27	0.31
4 時間後	0.51	0.61	0.73	0.82	0.57	0.67

表4-9 放出水量の比較 (U150)

単位：kg/m²

	解析値			実測値		
	$a_0=0.5 \times 10^{-12} \text{m/s}$	$a_0=1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$	$a_0=2.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$	4-1	4-2	4-3
1 時間後	0.12	0.12	0.12	0.22	0.04	0.00
2 時間後	0.37	0.46	0.61	0.43	0.33	0.42
3 時間後	0.79	1.08	1.53	0.87	0.89	1.37
4 時間後	1.31	1.82	2.53	1.41	1.67	2.69

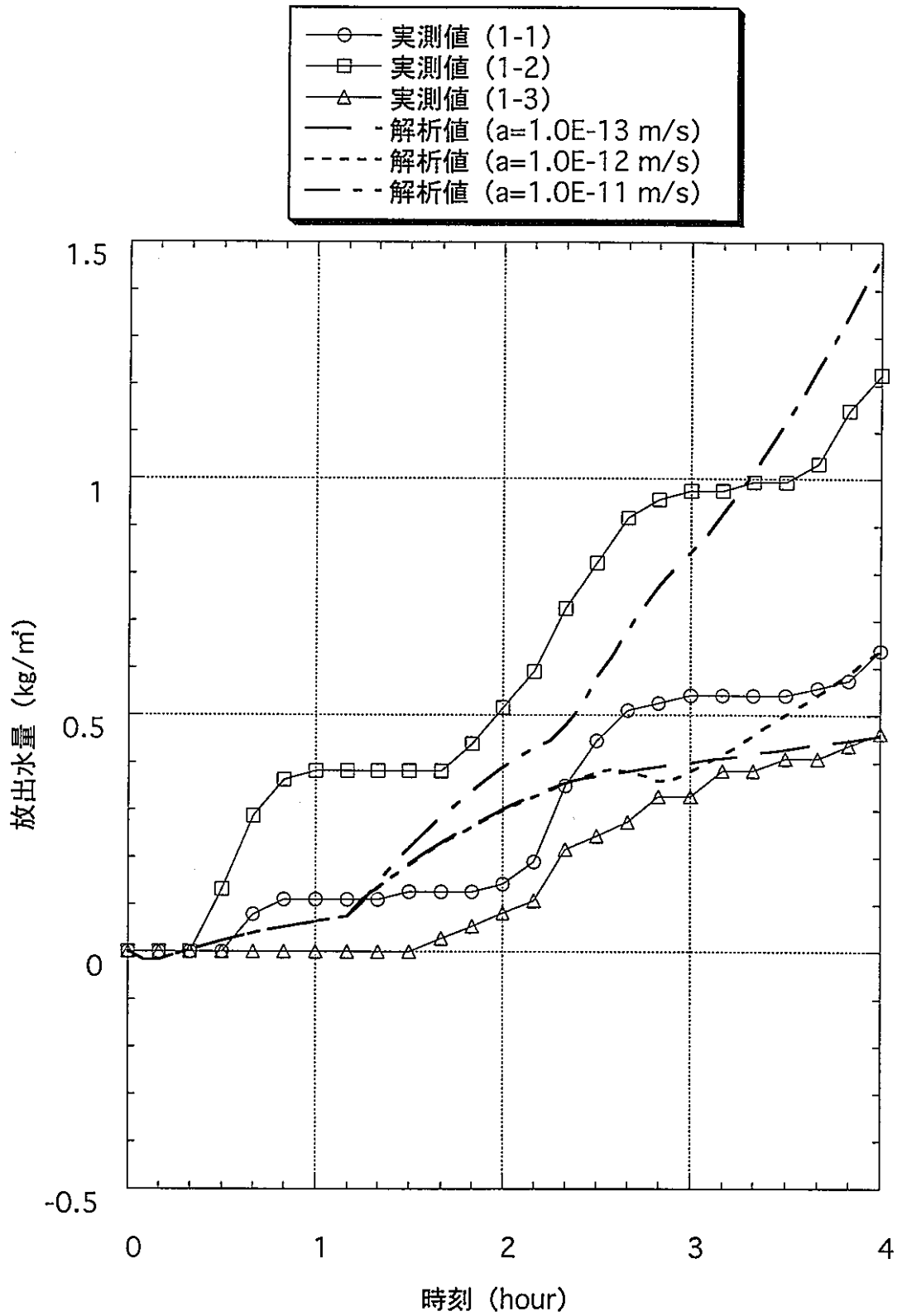


図4-16 透水係数の感度解析による放出水量履歴の比較 (L120)

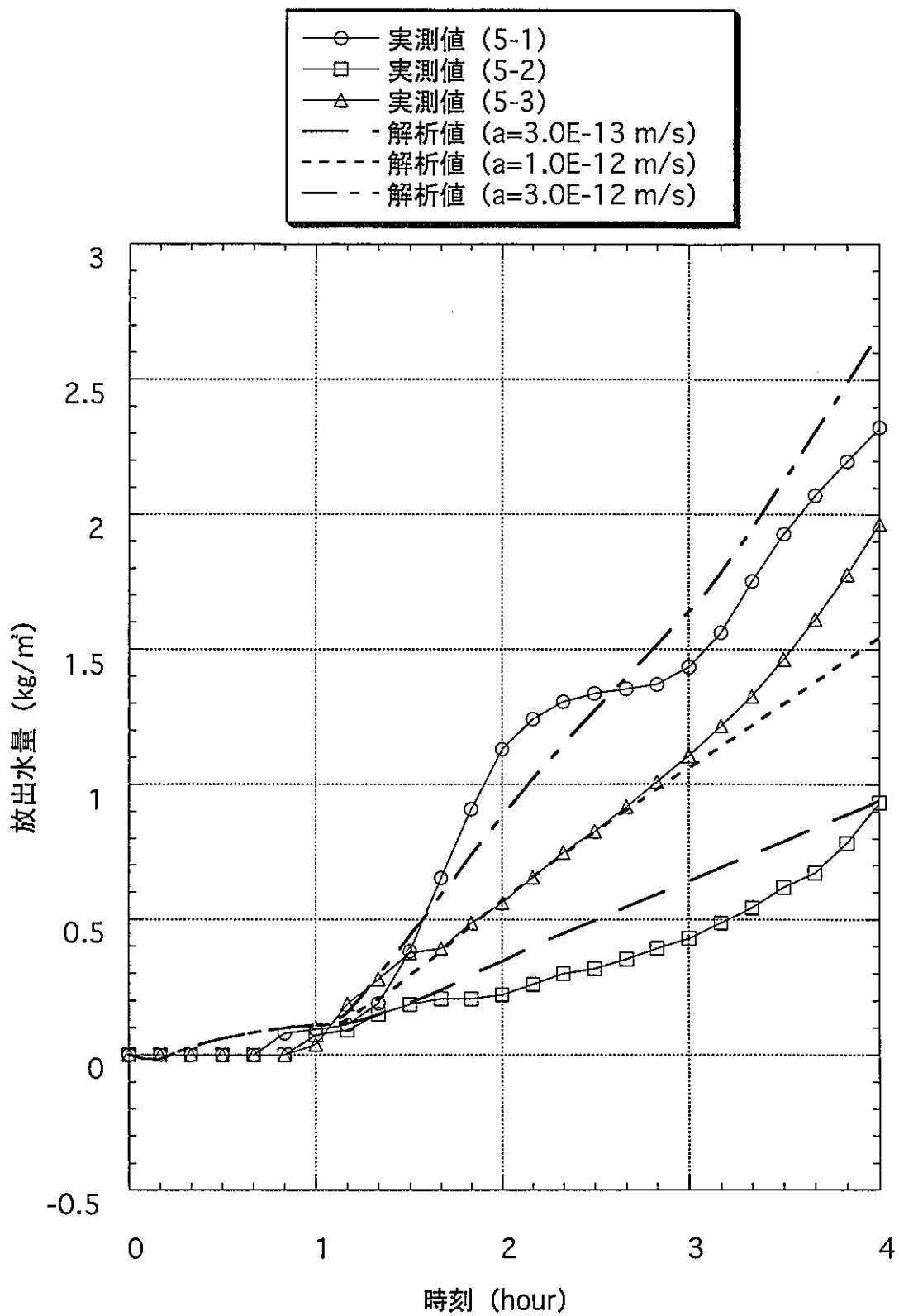


図4-17 透水係数の感度解析による放出水量履歴の比較 (L160)

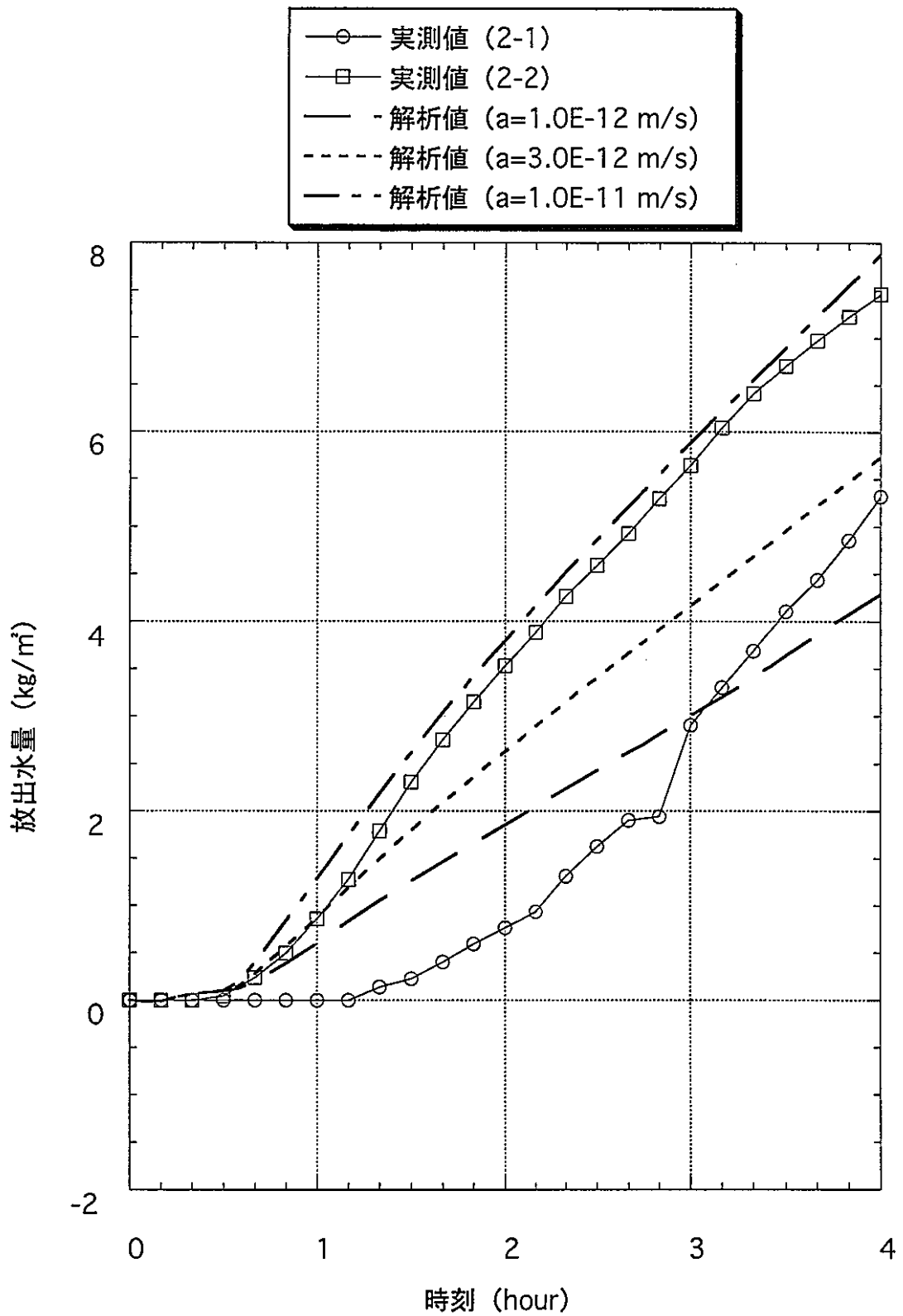


図4-18 透水係数の感度解析による放出水量履歴の比較 (L350)

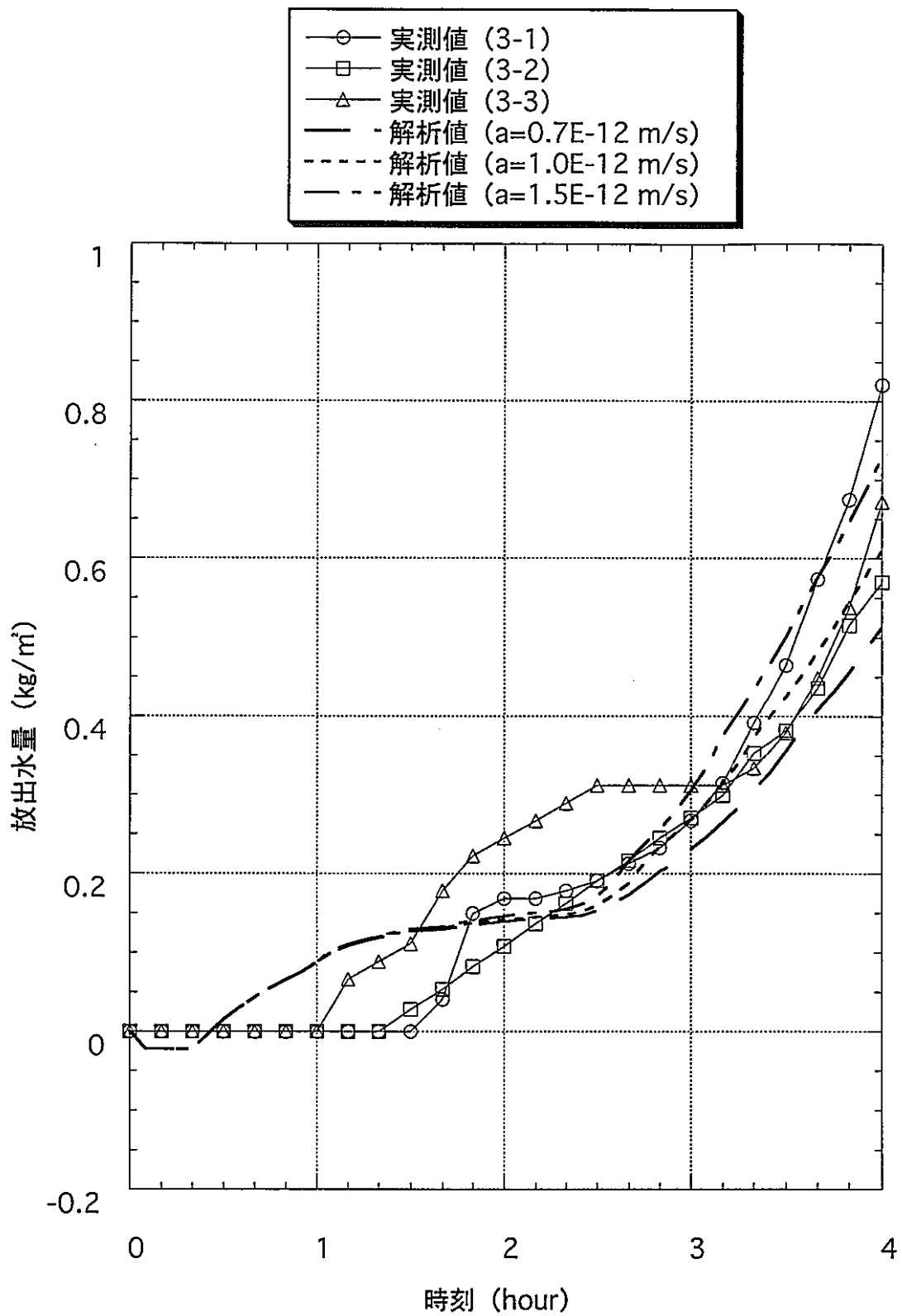


図4-19 透水係数の感度解析による放出水量履歴の比較 (U120)

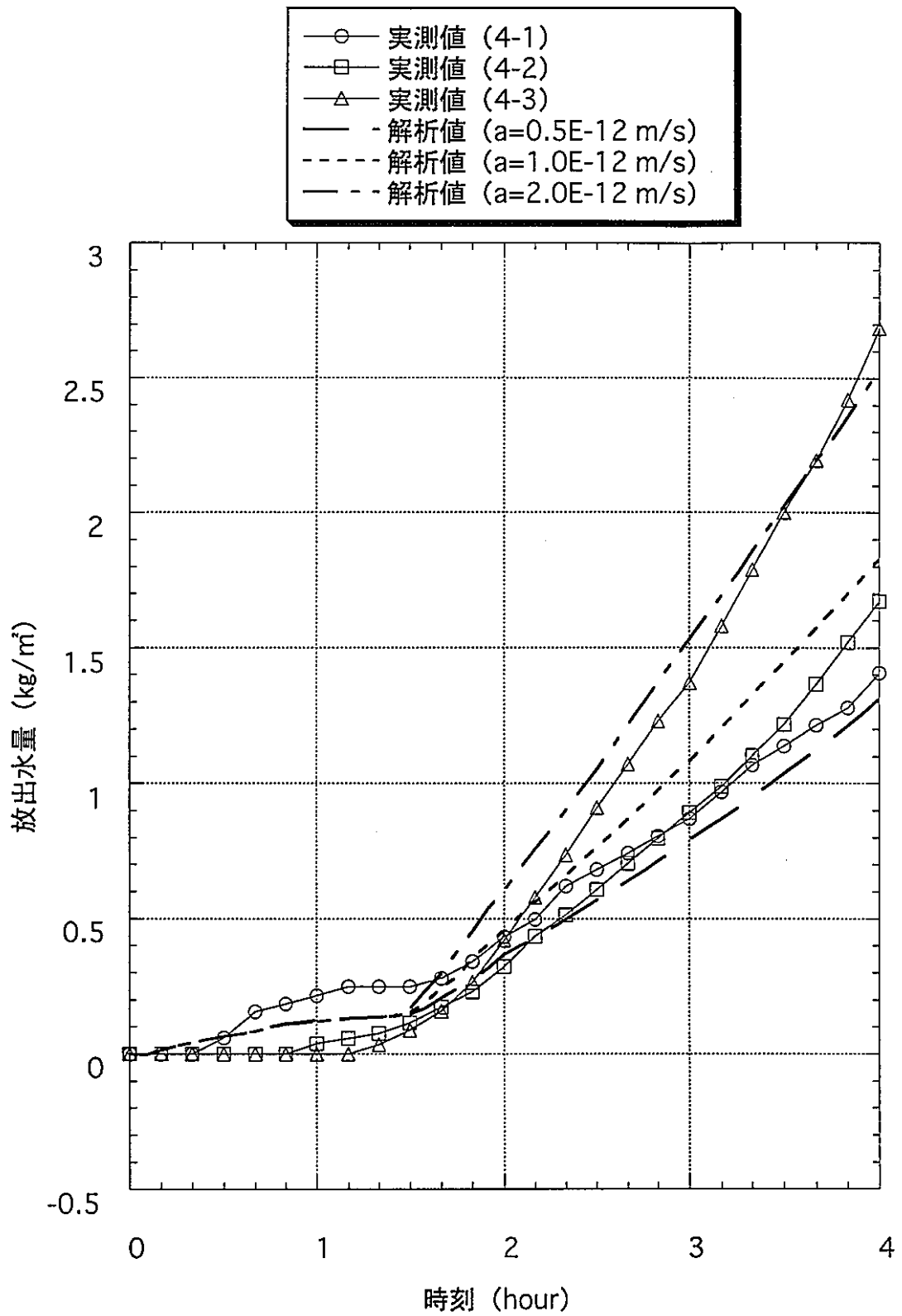


図4-20 透水係数の感度解析による放出水量履歴の比較 (U150)

(2) 水分損失の影響

解析開始時の水分損失の影響を検討するため、含水量分布が異なって温度レベルが同じ程度のL160（含水量分布は図4-4参照）、U150（含水量分布は図4-5参照）について、下記の3つのパターンの解析開始時水分分布を対象に比較を行った。

- ①水分損失の位置依存性考慮（含水率試験に基づいて、解析開始時水分損失を材軸方向に変化させたパターン）
- ②水分損失一様（部材全体の解析開始時総水分損失が①と同量になるような、一様な水分損失としたパターン）
- ③水分損失なし

L160とU150の解析開始時水分損失分布設定値をそれぞれ図4-21、図4-22に示す。各温度履歴パターンにおける1時間毎の放出水量解析値を、各試験体の実測値とあわせて表4-10～表4-11に示す。また、放出水量履歴を比較して図4-23～図4-24に示す。

4時間後の放出水量解析値は、水分損失を考慮すると無視した場合と比較して、水分損失一様（水分損失の位置依存性無視）の場合にはL160で約20%低減、U150で約10%低減、水分損失の位置依存性を考慮した場合にはL160で約45%低減、U150で約25%低減した。

4時間後の水分損失なしの場合と水分損失の位置依存性考慮の場合の放出水量解析値の差異は、L160では約1.2kg/m²、U150では約0.6kg/m²であり、それぞれ水分損失総量（L160：2.0kg/m²、U150：0.75kg/m²）の約60%、約80%であった。U150では、水分損失が加熱側表面近傍に限られているため、水分損失総量のほとんどが放出水量の差異となっている。

これらの結果より、水分損失、特に加熱側近傍の水分損失分布が放出水量に与える影響の大きいことがわかる。

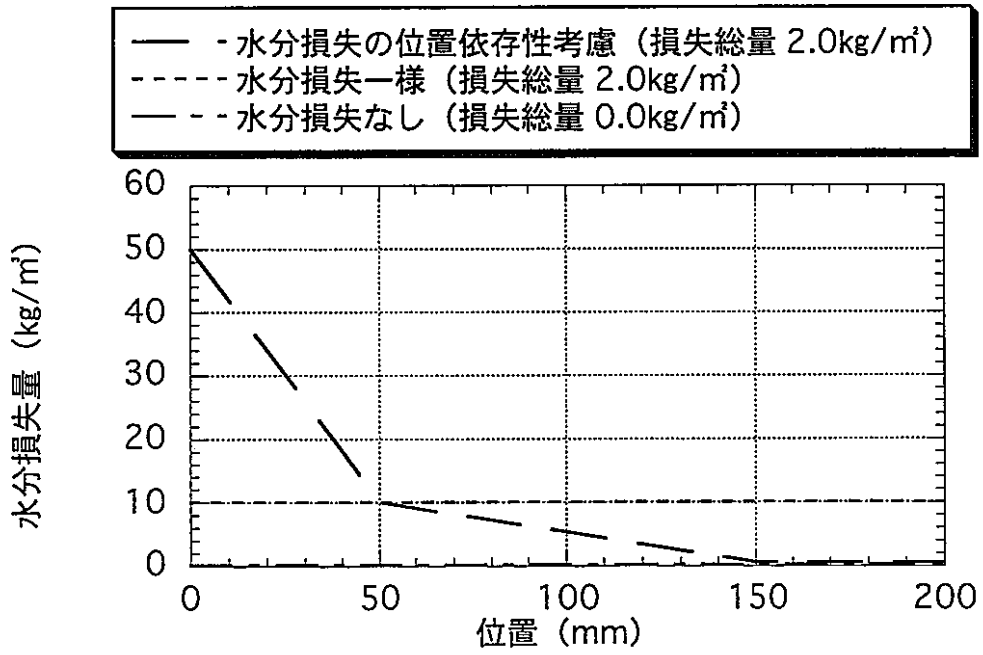


図4-21 解析開始時水分損失分布の設定値 (L160)

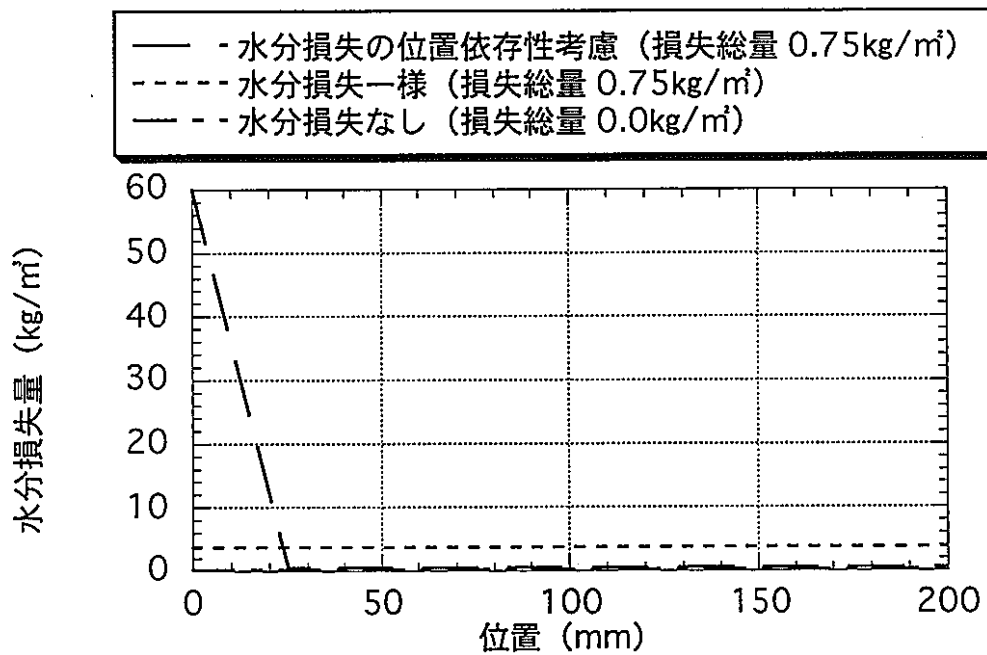


図4-22 解析開始時水分損失分布の設定値 (U150)

表4-10 放出水量の比較 (L160)

単位：kg/m²

	解析値			実測値		
	水分損失の 位置依存性 考慮	水分損失 一様	水分損失 なし	5-1	5-2	5-3
1 時間後	0.11	0.18	0.22	0.10	0.07	0.04
2 時間後	0.57	0.81	1.00	1.13	0.22	0.56
3 時間後	1.06	1.51	1.90	1.43	0.43	1.11
4 時間後	1.54	2.23	2.74	2.33	0.93	1.97

表4-11 放出水量の比較 (U150)

単位：kg/m²

	解析値			実測値		
	水分損失の 位置依存性 考慮	水分損失 一様	水分損失 なし	4-1	4-2	4-3
1 時間後	0.12	0.23	0.22	0.22	0.04	0.00
2 時間後	0.46	0.71	0.78	0.43	0.33	0.42
3 時間後	1.08	1.45	1.60	0.87	0.89	1.37
4 時間後	1.82	2.19	2.41	1.41	1.67	2.69

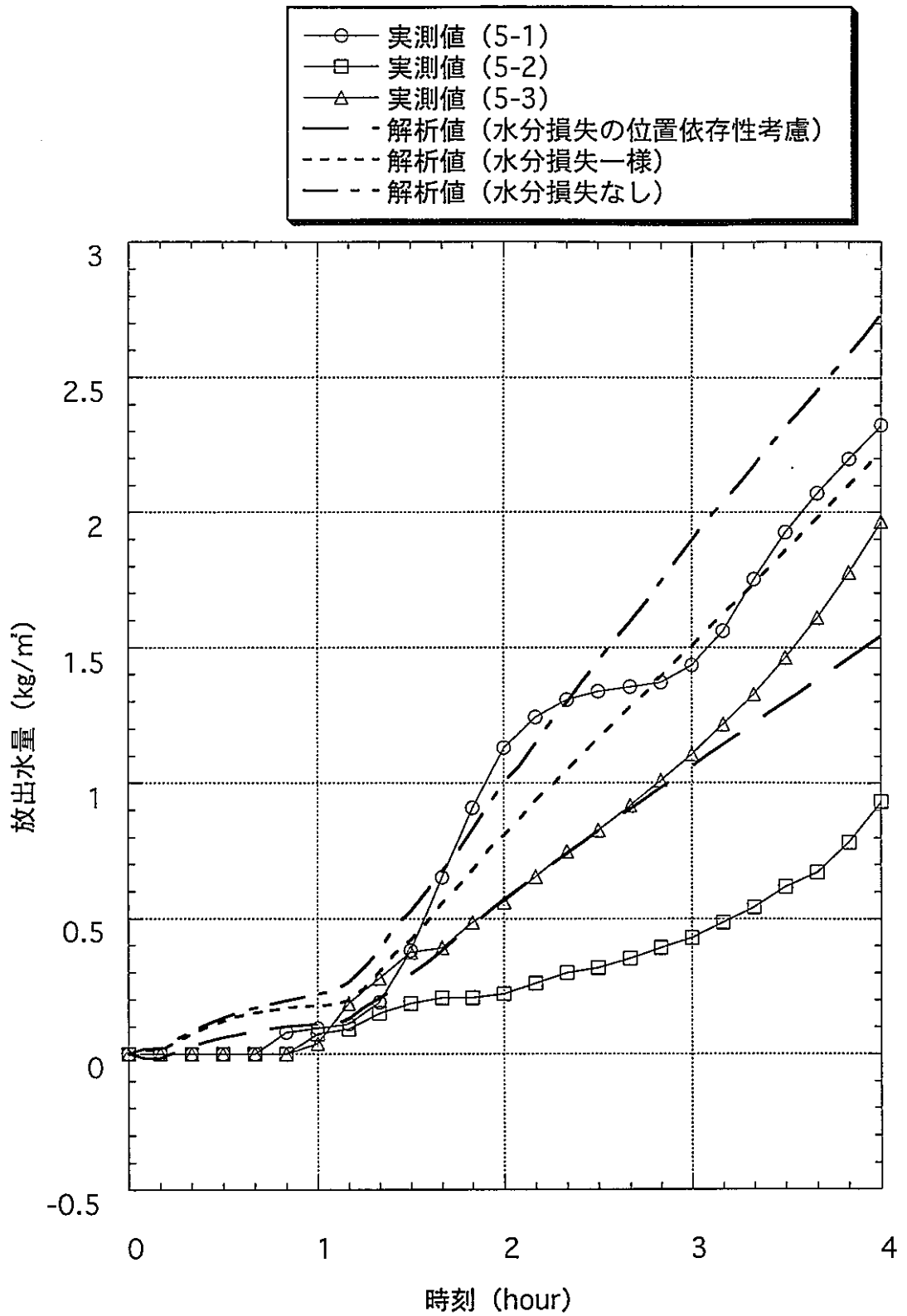


図4-23 水分損失の感度解析による放出水量履歴の比較 (L160)

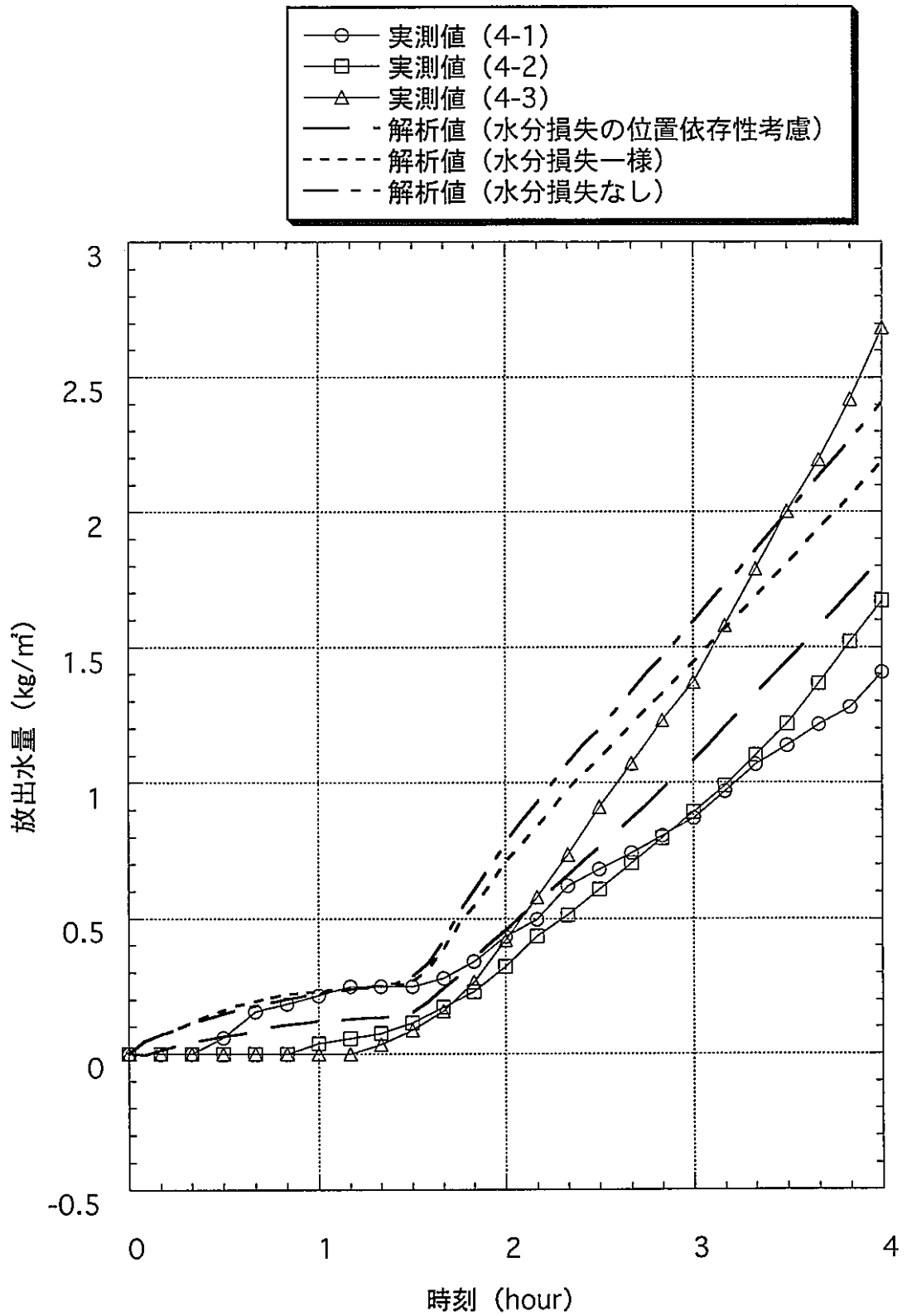


図4-24 水分損失の感度解析による放出水量履歴の比較 (U150)

(3) 熱伝導率の影響

L350を対象に、熱伝導率をパラメータとして比較を行った。L350を選定した理由は、L350の実験において試験体側面での熱の流入出が均衡しており、見掛けの熱伝導率が実際の物性に近いと考えられること、また、温度レベルが高いため、熱伝導率の違いによる影響が大きいことである。しかし、試験体の材軸方向長さである200mmでは、解析において非加熱側へ逃げていく熱量の影響が出ることが予想されるため、熱伝導率の違いによる比較は、材軸方向長さを1000mmとして行った。

コンクリートの熱伝導率は、一般的に、透水係数と違ってばらつきが少なく、1.0～2.0kcal/m・hr・℃程度である。熱伝導率の設定は、L350を除く加熱パターンの見掛けの熱伝導率の推定値も考慮して以下のとおりとする。

- ・ $\lambda = 1.0 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{℃}$
- ・ $\lambda = 1.5 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{℃}$
- ・ $\lambda = 2.1 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot \text{℃}$

1時間毎の放出水量解析値を、実測値の平均値とあわせて表4-12に、解析による放出水量履歴を比較して図4-25に示す。また、1時間毎の温度分布を図4-26、図4-27に、圧力分布を図4-28、図4-29に示す。

熱伝導率が高いほど温度が高くなることから圧力も高くなり、全時刻を通して熱伝導率が最大のケースの圧力のピーク値は最小のケースの約1.5倍となっている。しかし、放出水量については、熱伝導率が最大のケースが最小のケースの1.2～1.3倍であり、比較的放出水量の差異が小さい。

試験体長さの差異を比較すると、2時間後までは温度分布解析値に差異がほとんどないため放出水量解析値にも差異がない。3時間後からは解析範囲200mmのケースのほうが1000mmのケースより温度が高くなっている。これは、試験体長さ200mmの場合に非加熱側表面において熱伝達機構により雰囲気へ流出する熱量が、200mmより長い試験体の場合に非加熱側のコンクリートに熱伝達機構により移動する量よりも小さいためである。そのため、解析範囲200mmのケースのほうが放出水量解析値が若干大きくなっている。もし、加熱時間が十分長ければ、試験体が長いほど水を多く含んでいるため、放出水量も多くなると考えられる。

表4-12 放出水量の比較

単位：kg/m²

	解析値				実測値の 平均値 (試験体長さ 200mm)
	解析範囲1000mm			解析範囲 200mm	
	$\lambda = 1.0$ kcal/m·hr·°C	$\lambda = 1.5$ kcal/m·hr·°C	$\lambda = 2.1$ kcal/m·hr·°C	$\lambda = 1.5$ kcal/m·hr·°C	
1 時間後	0.79	0.87	0.93	0.87	0.43
2 時間後	2.30	2.63	2.91	2.63	2.15
3 時間後	3.60	4.12	4.59	4.17	4.27
4 時間後	4.81	5.52	6.16	5.73	6.39

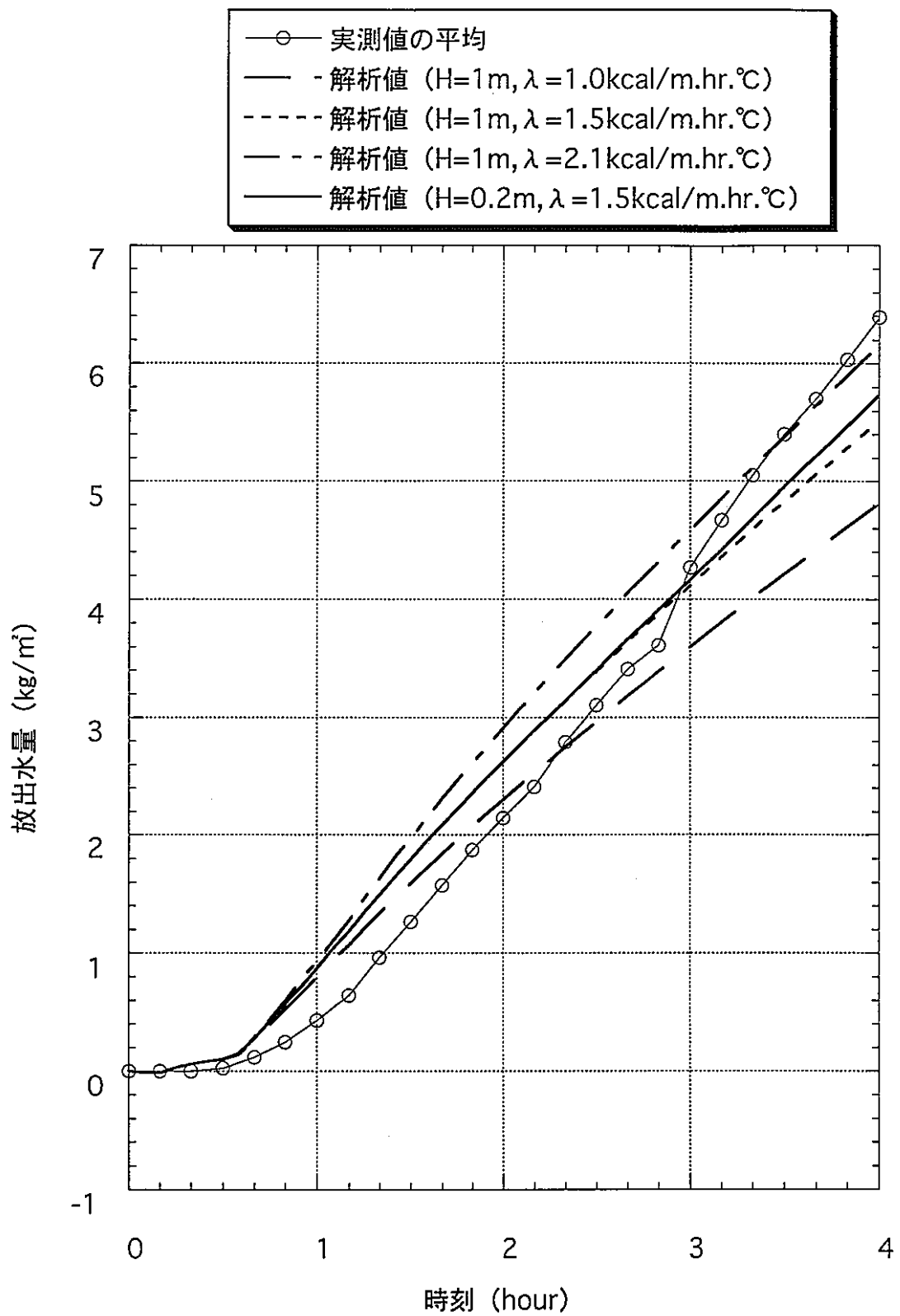


図4-25 熱伝導率の感度解析による放出水量履歴の比較 (L350)

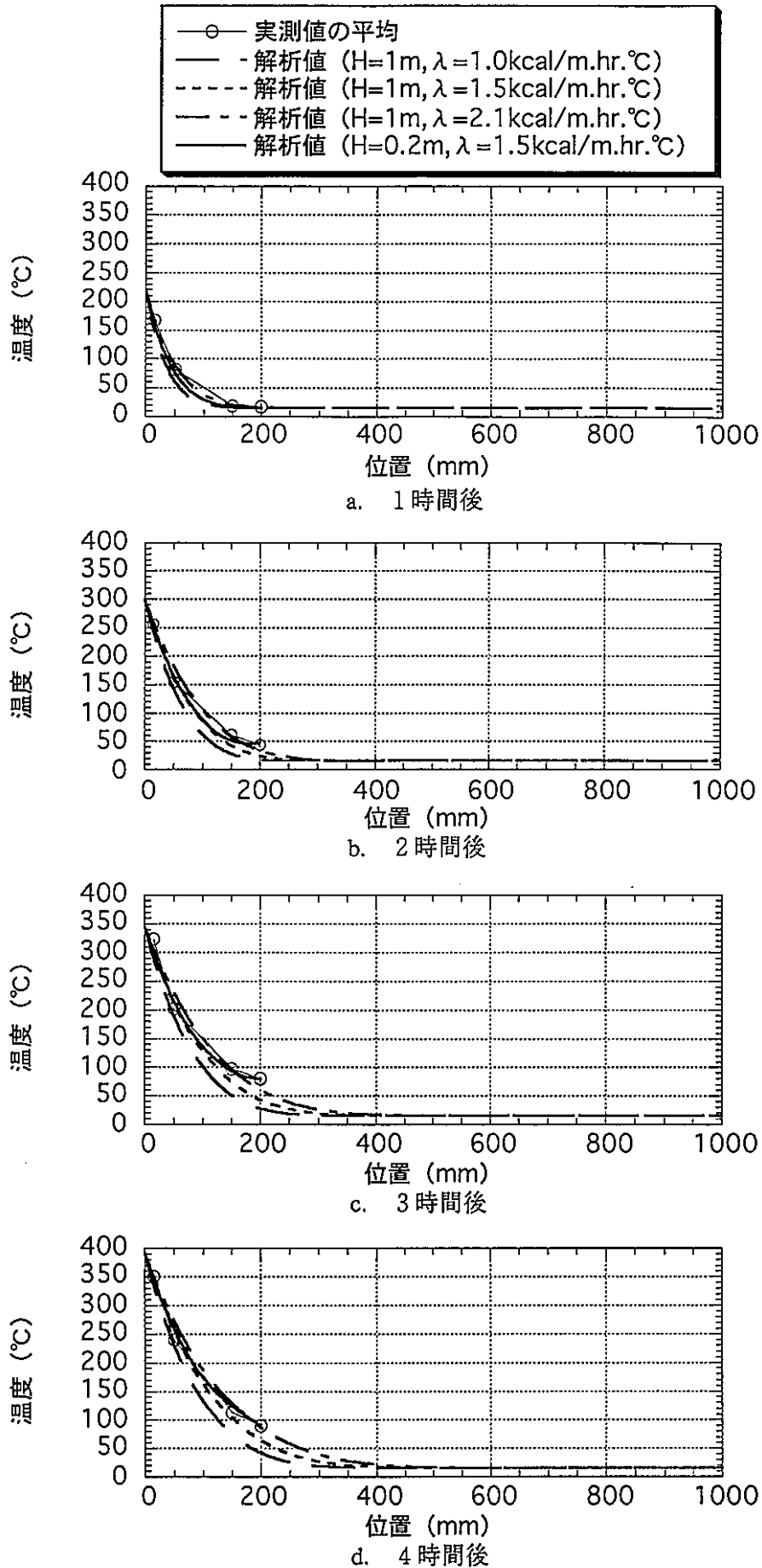


図4-26 熱伝導率の感度解析による材軸方向温度分布の比較

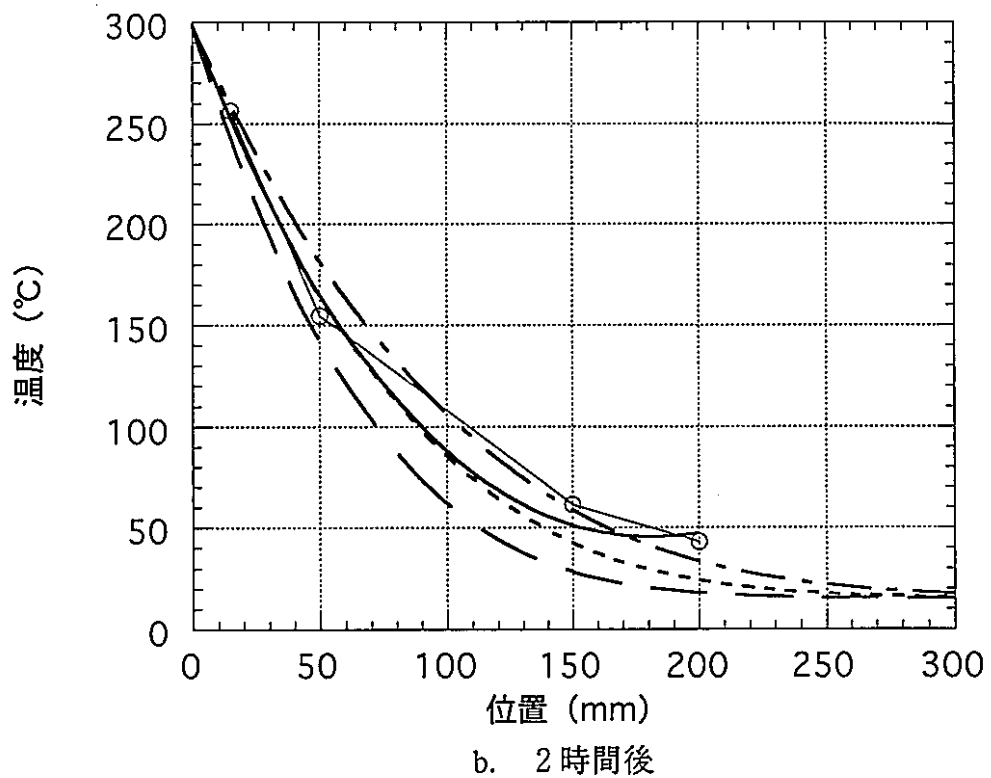
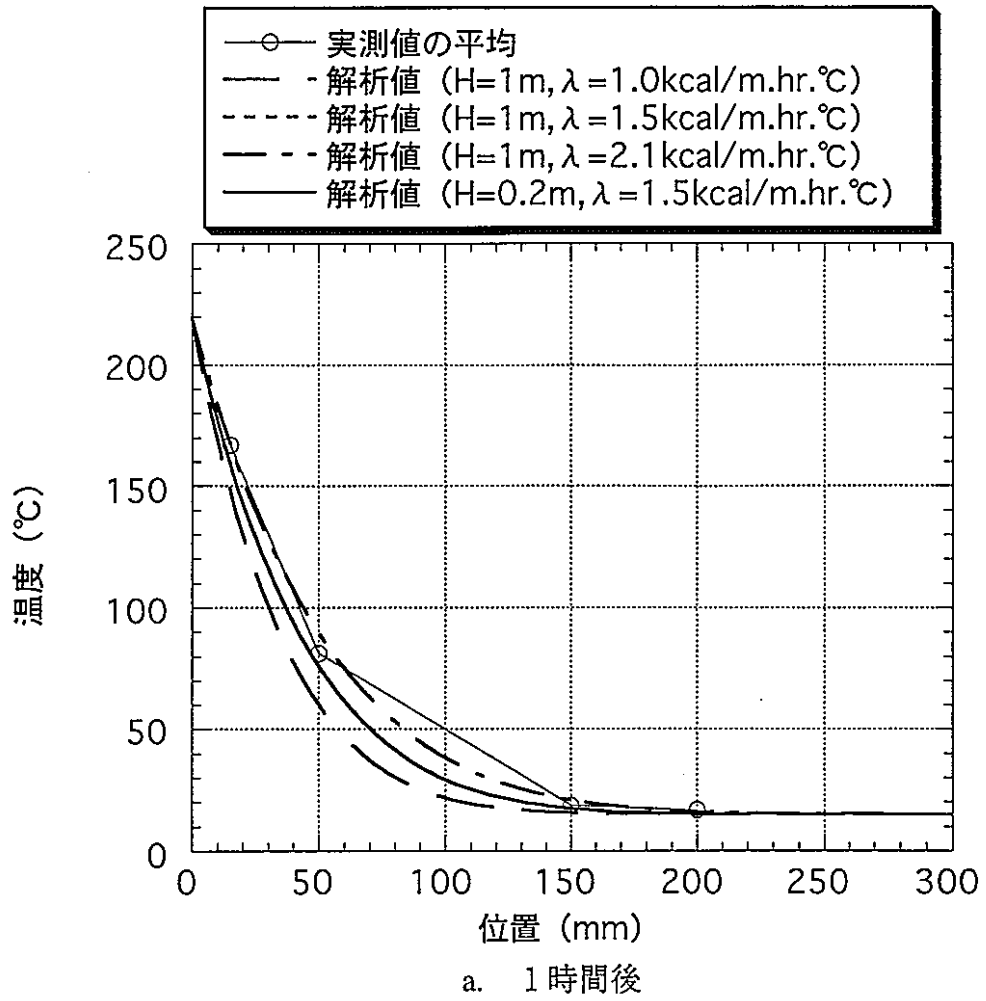


図4-27(1) 熱伝導率の感度解析による材軸方向温度分布の比較の部分拡大

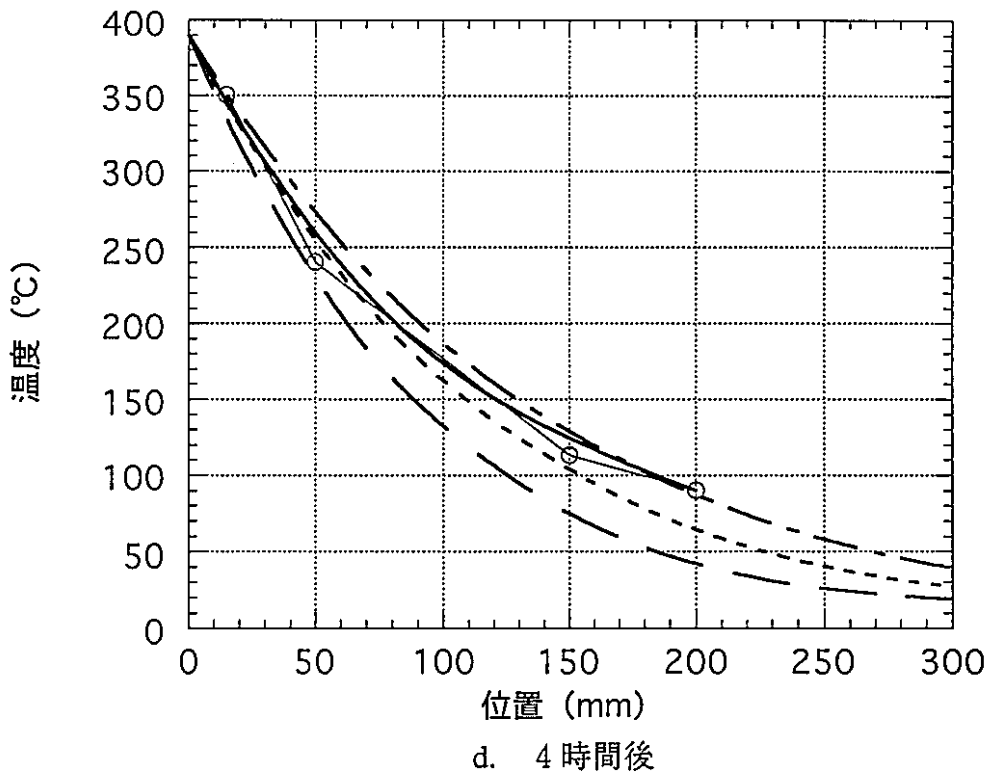
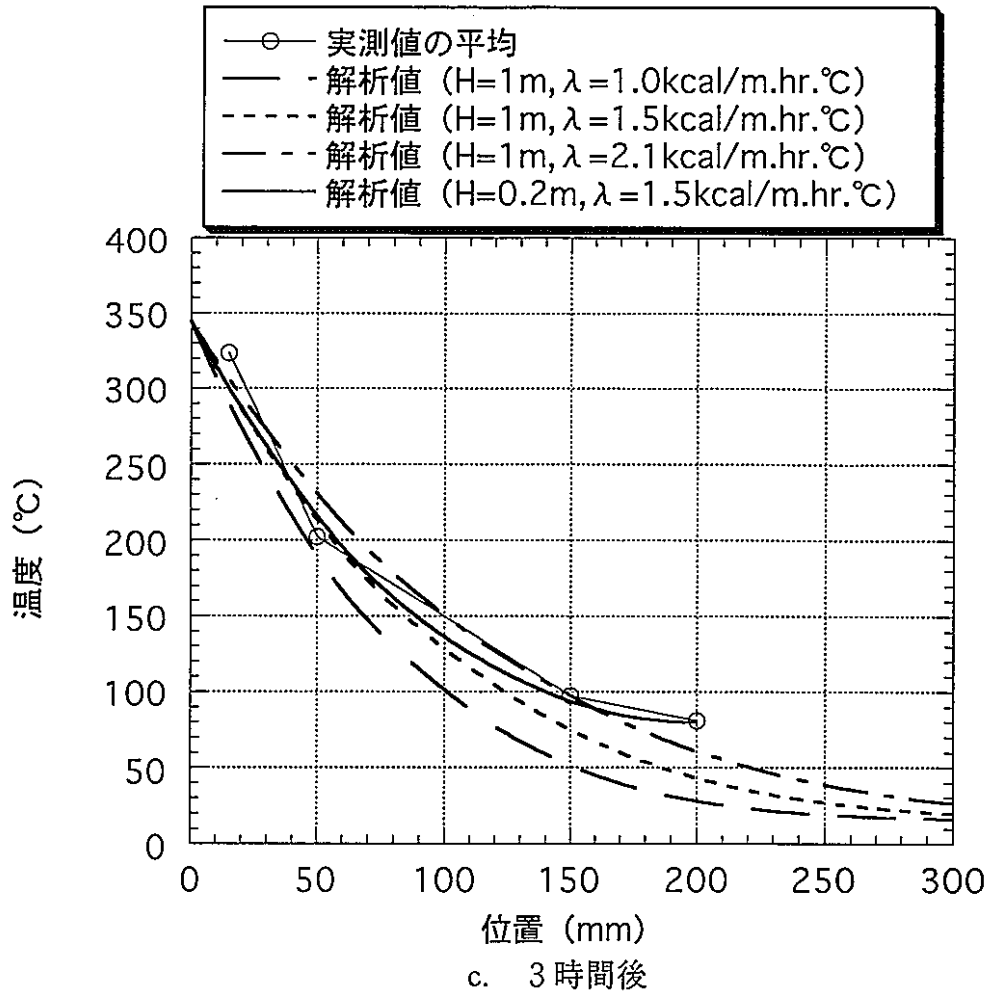


図4-27(2) 熱伝導率の感度解析による材軸方向温度分布の比較の部分拡大

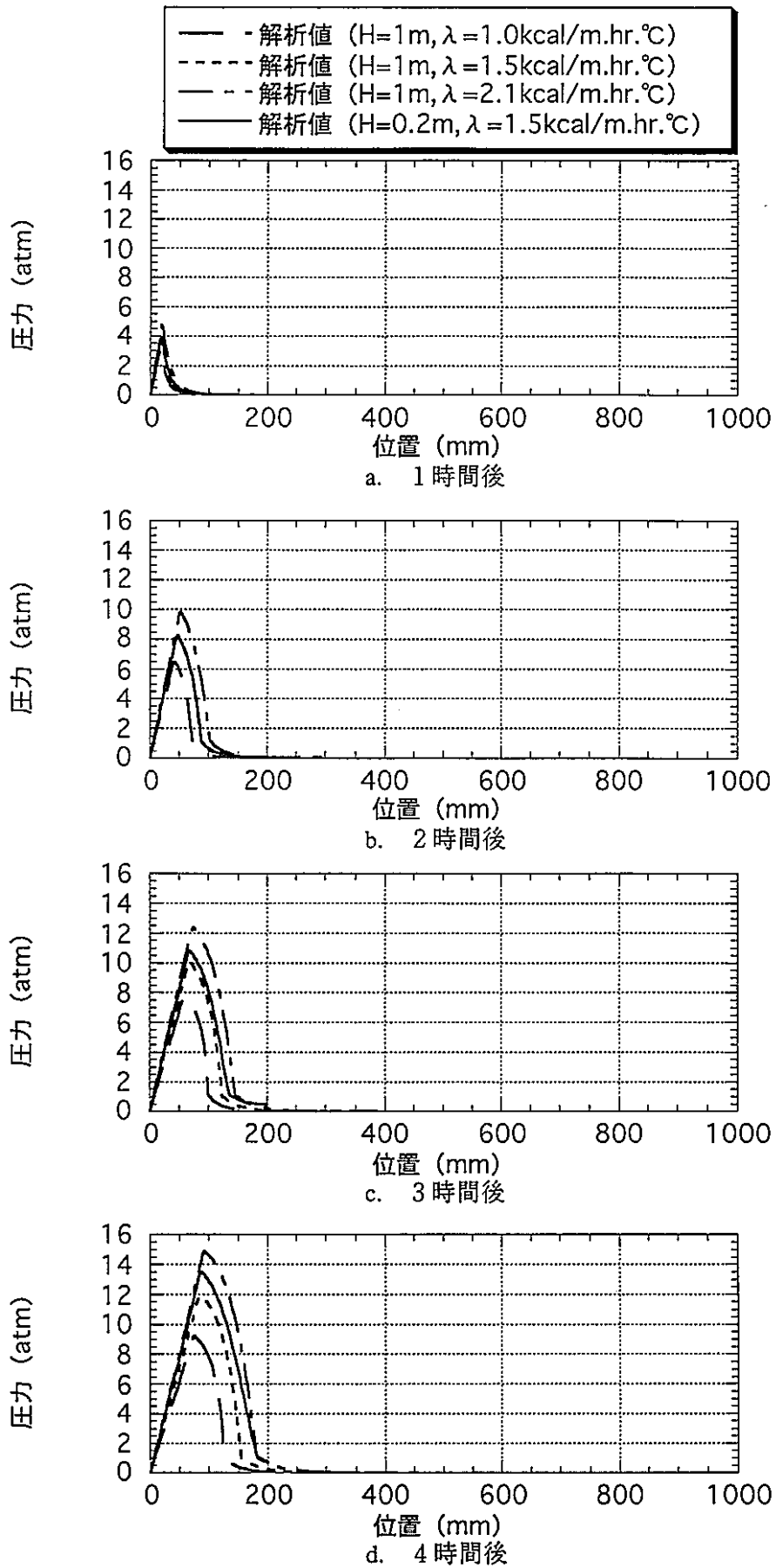


図4-28 熱伝導率の感度解析による材軸方向圧力分布の比較

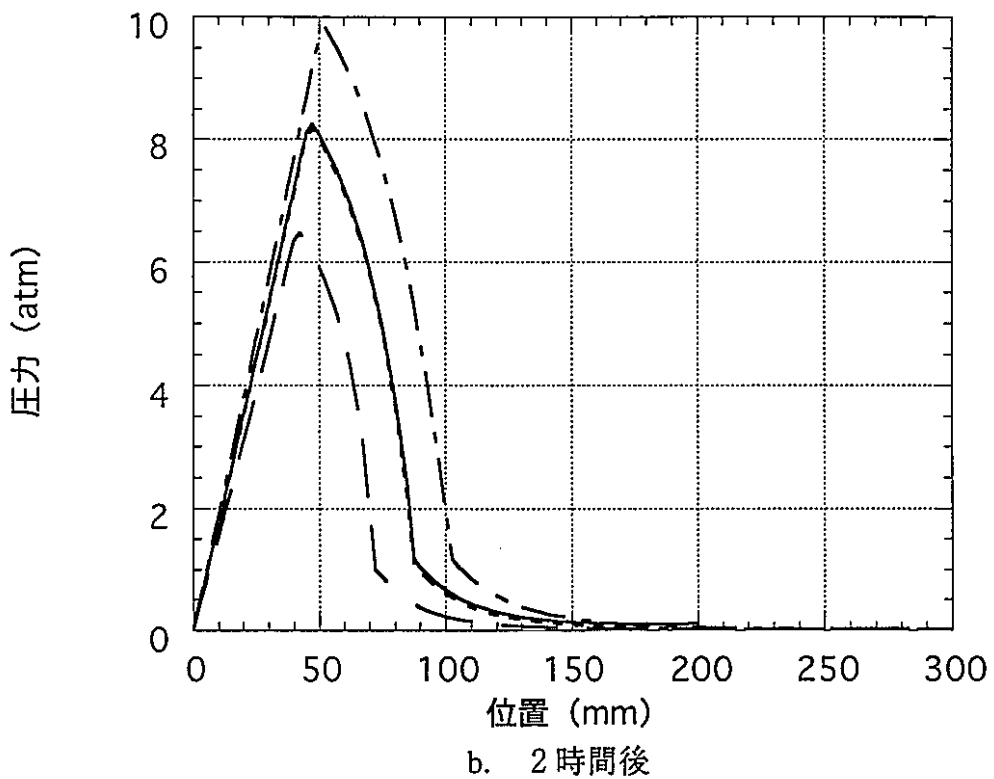
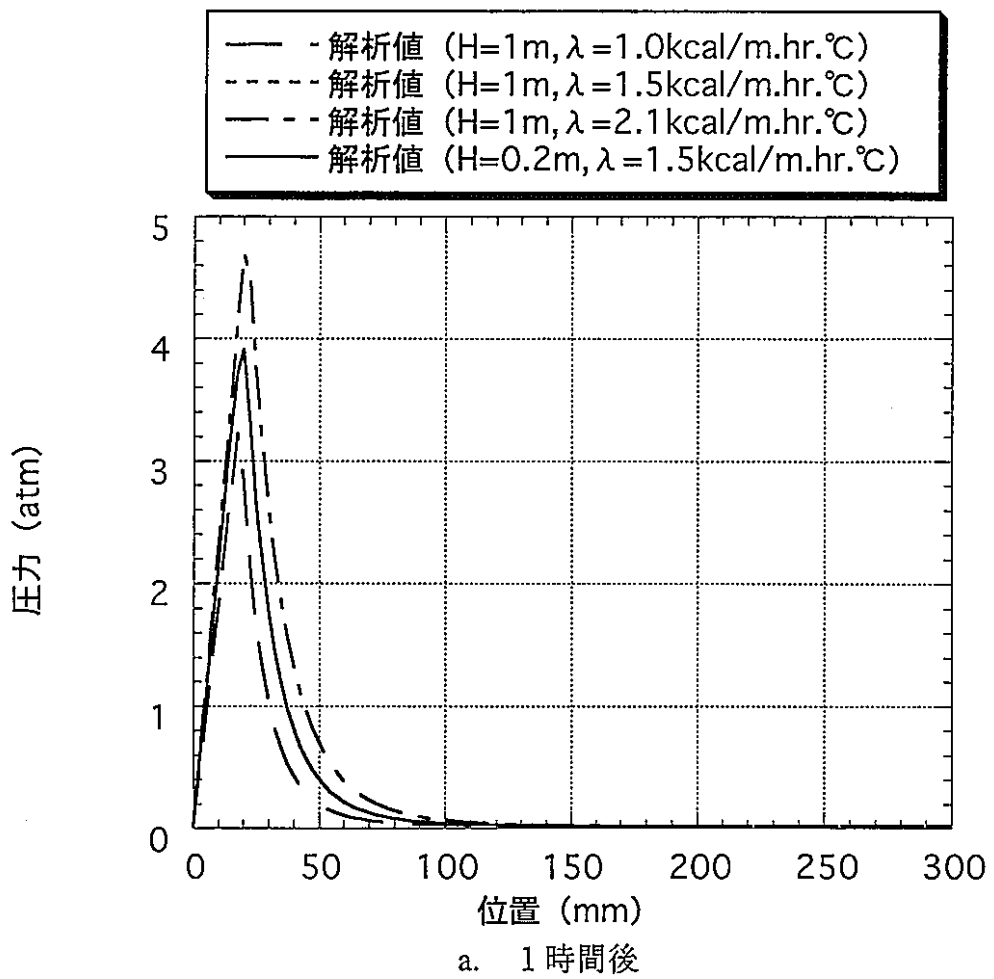


図4-29(1) 熱伝導率の感度解析による材軸方向圧力分布の比較の部分拡大

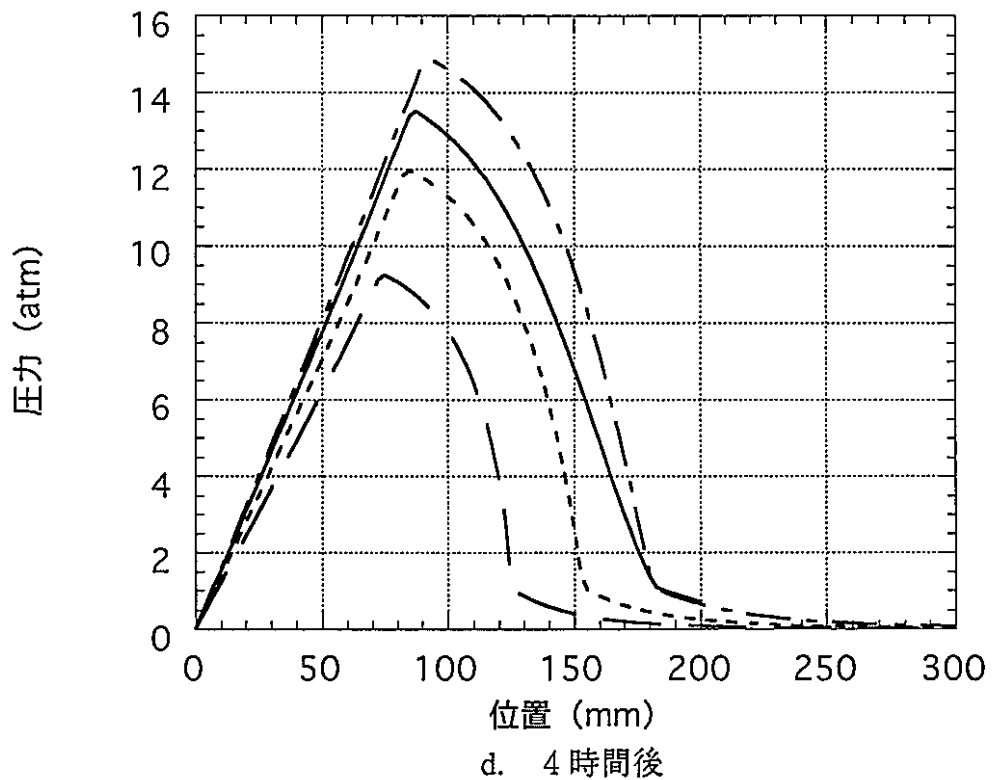
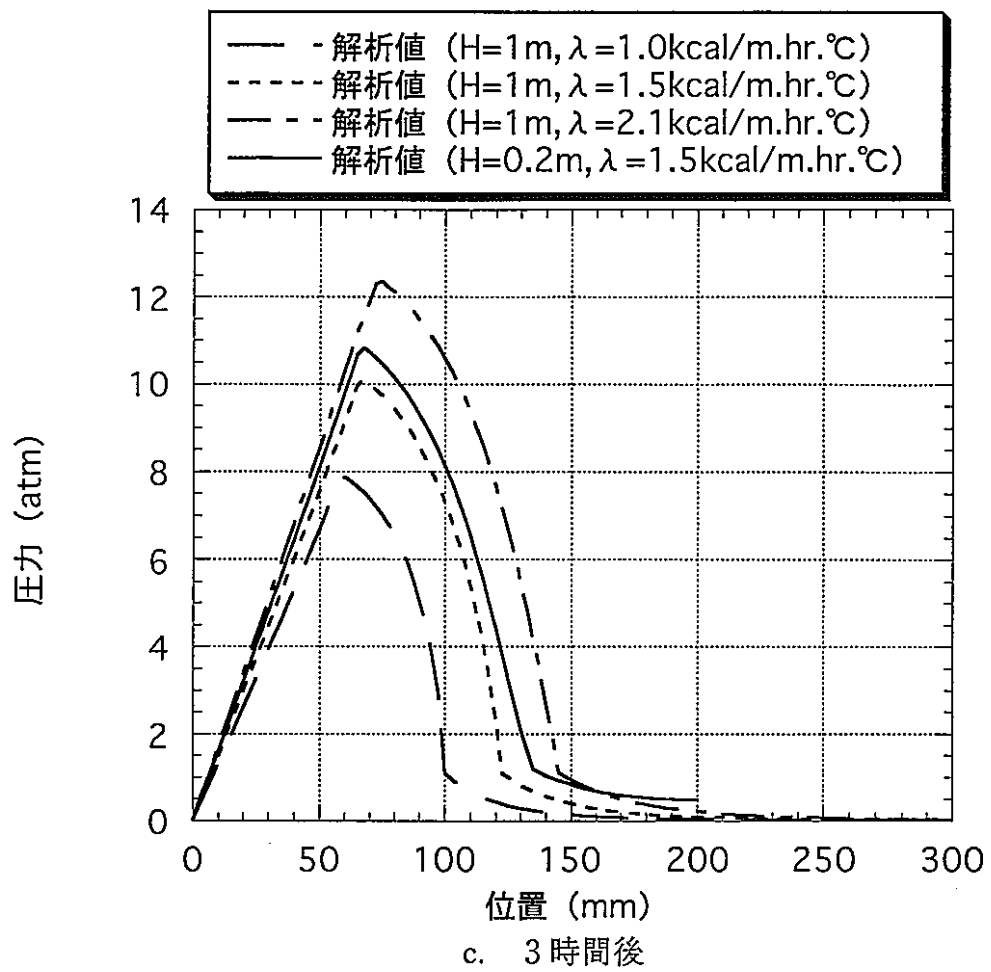


図4-29(2) 熱伝導率の感度解析による材軸方向圧力分布の比較の部分拡大

4.2 実機事故想定温度条件での適用計算

4.2.1 目的

前節で推定された諸物性や各種パラメータの感度解析による評価、および、「もんじゅ実機躯体コンクリート放出水挙動確認試験」²⁾のシミュレーション解析により、もんじゅ実機コンクリートの諸物性を推定し、その条件下で実機事故想定温度条件での放水量履歴を推定することを目的とする。

4.2.2 「もんじゅ実機躯体コンクリート放出水挙動確認試験」のシミュレーション解析

(1) 解析条件

実験²⁾は、実機事故想定温度条件A446/10（図4-33参照）を対象として、6体行われた。試験体は、100mmφ×500mmHの円筒形のコアコンクリートである。シミュレーションの目標とする温度・放水量は、実測値の平均値とする。ただし、試験体B3にはひびわれが存在するため、放水量については試験体B3を除く5体の平均値を目標とした。

コンクリートの諸物性の設定方法は下記のとおりである。

- ・熱伝導率 λ は、コンクリートの実測温度履歴に最も整合する値を推定する。
- ・初期温度での透水係数 a_0 は、実測放水量履歴に最も整合する値を推定する。
- ・単位セメント質量 C_E ・初期単位水量 W_T ・コンクリートの密度 ρ は、コンクリートの調合より設定する。
- ・飽和含水量 W_i は、「コンクリートからの放出水測定実験」¹⁾の含水率試験結果に密度 ρ を乗じ、平均的な値をまるめた値とする。解析開始時の水分損失はないものと仮定する。
- ・透水係数 a ・コンクリートの比熱 C ・脱水量 W_d の温度依存性等は、解析コードのデフォルト値を用いる。
- ・自由水の吸着熱 C_a ・コンクリートの初期相対湿度 ϕ_i は、常用値を用いる。
- ・コンクリートの初期温度 T_i ・雰囲気温度 T_{en} は、実測温度履歴より設定する。初期温度は実測値を折線分布とし折点の温度を丸めた値とした分布とする。加熱側温度履歴は、実機事故想定温度条件A446/10とする。非加熱側温度履歴は、非加熱側表面温度実測値を折れ線履歴とし、折点の温度を丸めた値とした履歴とする。
- ・加熱側雰囲気の水蒸気圧 p_{en} は、実験条件を考慮して設定する。
- ・非加熱側表面では、コンクリート表面と雰囲気の間水分の流入出がないものとする。

解析緒元を表4-13に示す。

表4-13 解析緒元

解析次元	1次元
解析モデル全長	500mm
要素分割	200要素に等分割（1要素の長さ：2.5mm）
解析時間	180分
解析時間刻み	0.1分

放出水量履歴実測値については、以下のとおりに設定した。

- ・試験体A1,A2,B3については、試験後に装置内部に付着していた水を、回収された水と同じ履歴で放水されたと仮定し、回収された放出水量履歴に加える。
- ・試験体B1,B2,A3については、5分間の平均値をその中心時刻での値と仮定する。

(2) 解析結果

解析値が実測値と最も良く適合した時に使用したコンクリートの諸物性を表4-14に示す。なお、比較のため4.1.2で用いた物性もあわせて示している。

1時間毎の放出水量の解析値を表4-15に示す。また、温度履歴と放出水量履歴の解析結果と実測結果を比較して、図4-30に示す。

推定された透水係数は、 1.0×10^{-12} m/s（25℃換算）となり、4.1.3の透水係数感度解析で推定された値 1.6×10^{-13} m/s～ 1.6×10^{-11} m/sのほぼ中央値であった。

透水係数の違いによる影響をみるため、推定された値の2倍である 2.0×10^{-12} m/s（25℃換算）で解析を行った。その結果を各試験体の放出水量履歴実測値とあわせて図4-31に示す。ひびわれの存在するB3試験体の放出水量履歴実測値が、透水係数を 2.0×10^{-12} m/sとした解析値とよい一致を示している。ひびわれの存在により、みかけの透水係数が約2倍になったといえる。B3試験体をのぞく他の5体は、そのばらつきが透水係数に起因していると仮定しても、透水係数のばらつきは1:1.3と小さい。

推定された熱伝導率は、 0.7 kcal/m・hr・℃であった。本実験では、試験体端部の温度が試験体中央部の温度より常に低く、側面から熱が流出しているため、この推定されたみかけの熱伝導率は、実際の物性より小さめに出ているといえる。

図4-30を見ると、放出水量実測値が実験解析開始後しばらくしばらく微量なのに対し、解析値は解析開始直後よりすぐ上昇し始めている。これは、実験では加熱開始直後に目標の温度レベルに若干追いついていないこともあるが、コンクリー

トコアの加熱側表面近傍の自由水の量が、解析で設定した飽和含水量より小さい、即ち、表面近傍の水が試験開始前にある程度損失していたことによるものと考えられる。

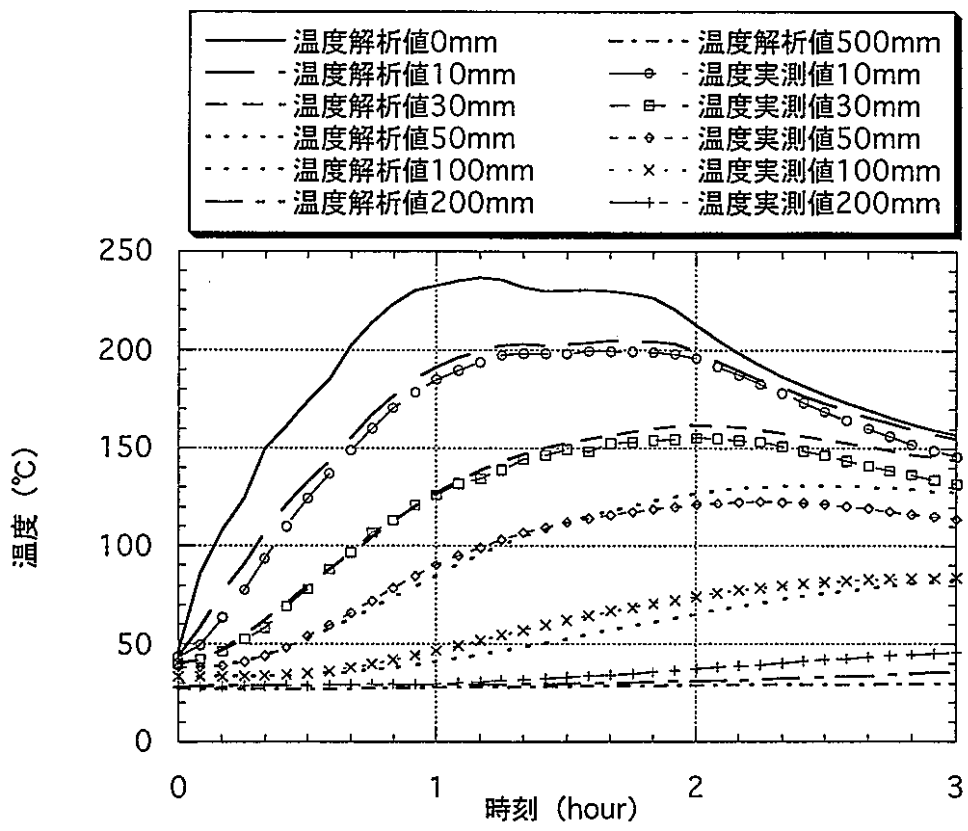
解析による1時間毎の断面の圧力分布、水量分布、温度分布を図4-32に示す。水量が急激に低下する位置は、圧力最大位置と一致している。水分の流れが圧力最大位置より加熱側では加熱側に、圧力最大位置より非加熱側では非加熱側となっている。非加熱側への水分の移動は100℃を越える範囲に限られている。

表4-14 コンクリートの諸物性

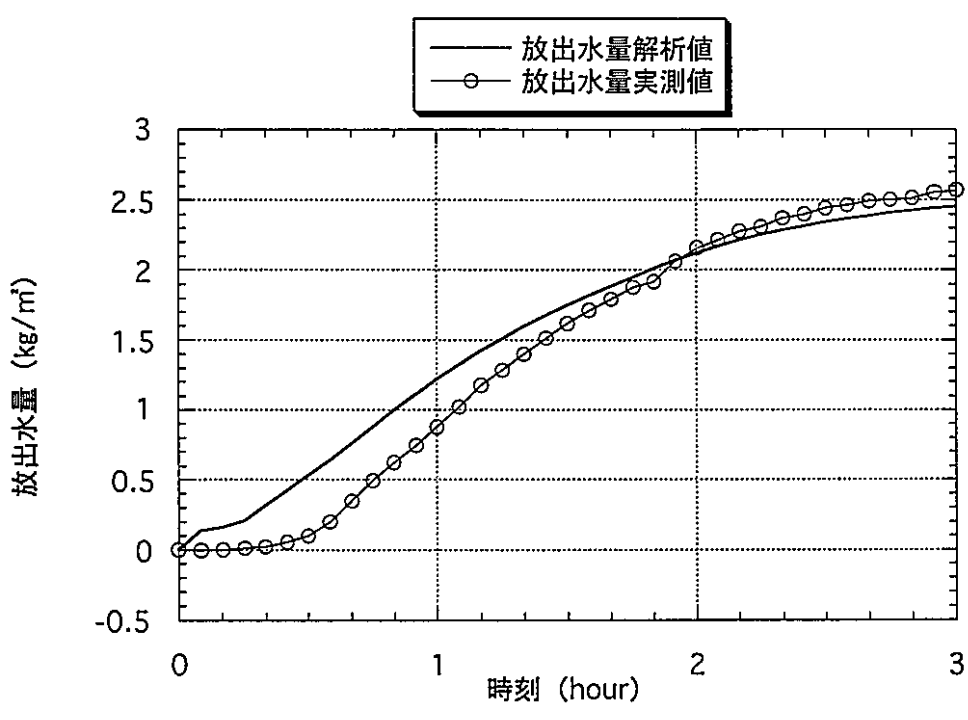
項目 \ 加熱パターン	もんじゅ	L120 L160	L350	U120 U150
初期温度における透水係数 a_0 (m/s)	$1.0 \sim 1.7 \times 10^{-12}$	1.0×10^{-12}	3.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}
25℃における透水係数(m/s)	1.0×10^{-12}	1.6×10^{-12}	4.1×10^{-12}	1.6×10^{-12}
透水係数 a	図4-1参照			
熱伝導率 λ (kcal/m·hr·℃)	0.7	2.1	1.5	2.1
コンクリートの比熱 C (kcal/kg·℃)	図4-2参照			
自由水の吸着熱 C_a (Kcal/kg)	0	0	0	0
コンクリートの密度 ρ (kg/m ³)	2300	2300	2300	2300
単位セメント質量 C_E (kg/m ³)	298	300	300	300
初期単位水量 W_T (kg/m ³)	164	149	149	150
飽和含水量 W_i (kg/m ³)	110	105	105	120
脱水量 W_d (kg/m ³)	図4-3参照			
コンクリートの初期温度 T_i (℃)	25~45	10	15	10
コンクリートの初期相対湿度 ϕ_i	0.95	0.95	0.95	0.95
雰囲気の水蒸気圧 p_m	0	0	0	0
解析開始時損失水量	0	図4-4参照		図4-5参照

表4-15 放出水量の解析値

	放出水量 (kg/m ²)
1 時間後	1.22
2 時間後	2.12
3 時間後	2.46



a. 温度履歴



b. 放出水量履歴

図4-30 実測結果と解析結果の比較

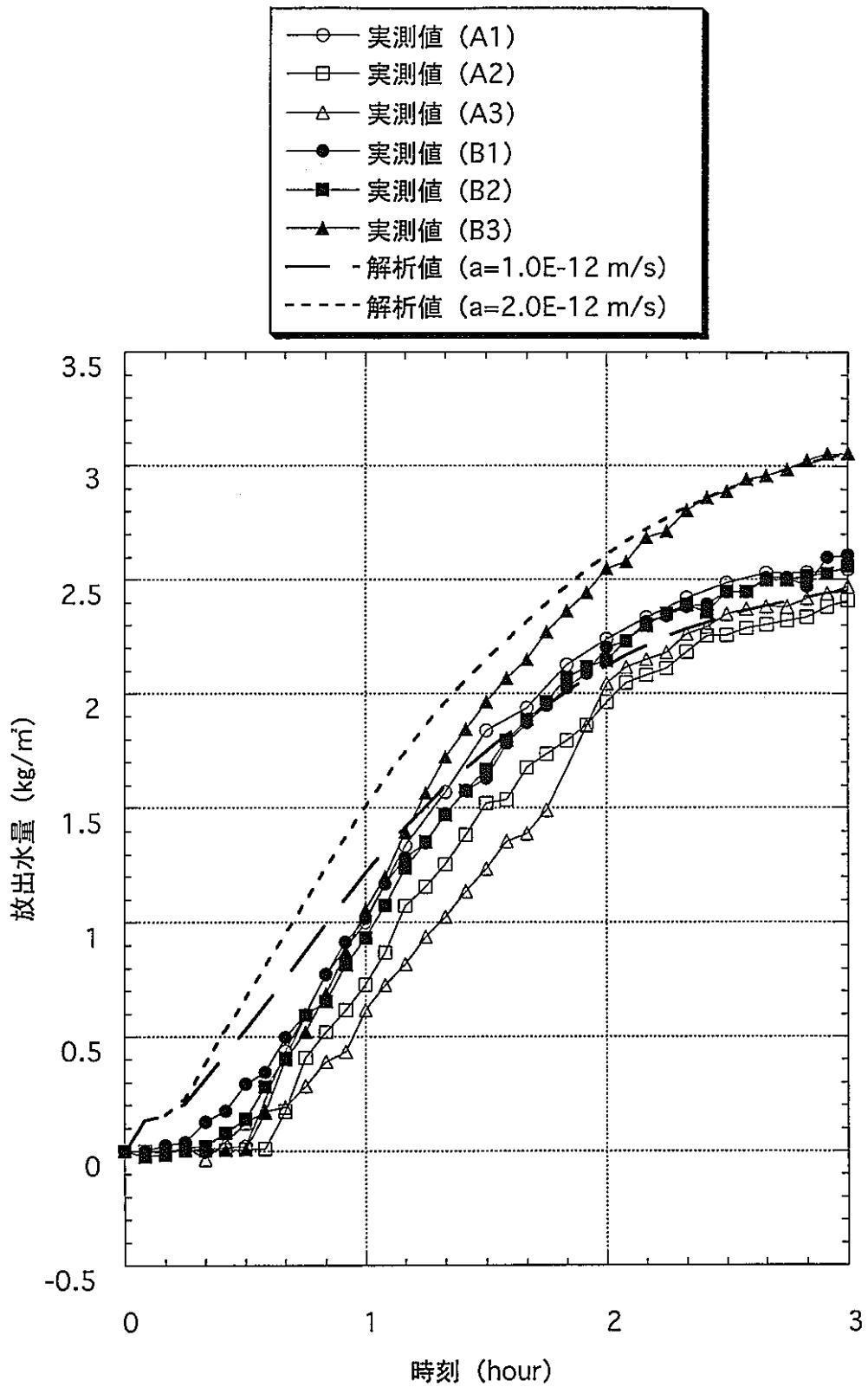


図4-31 透水係数の感度解析による放出水量履歴

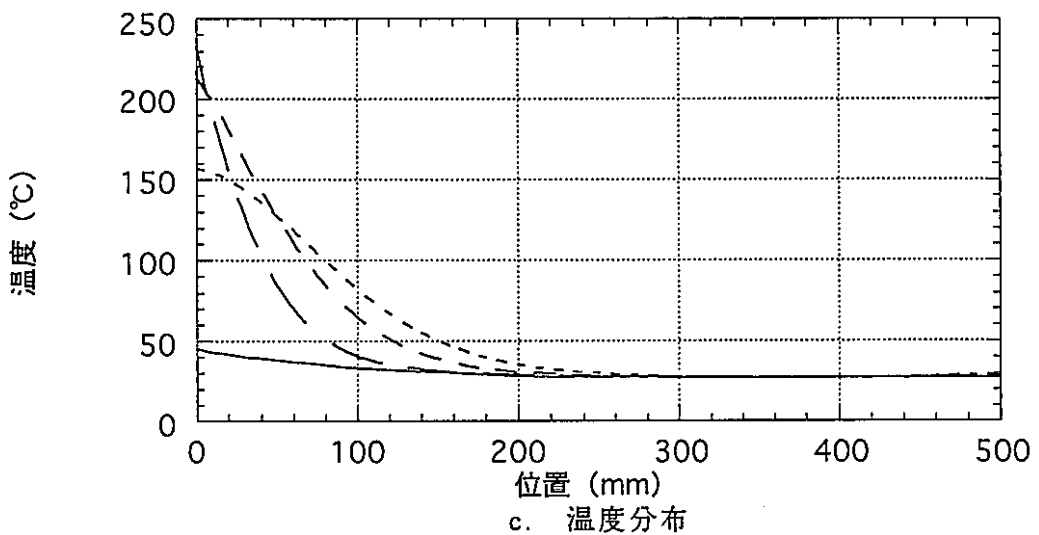
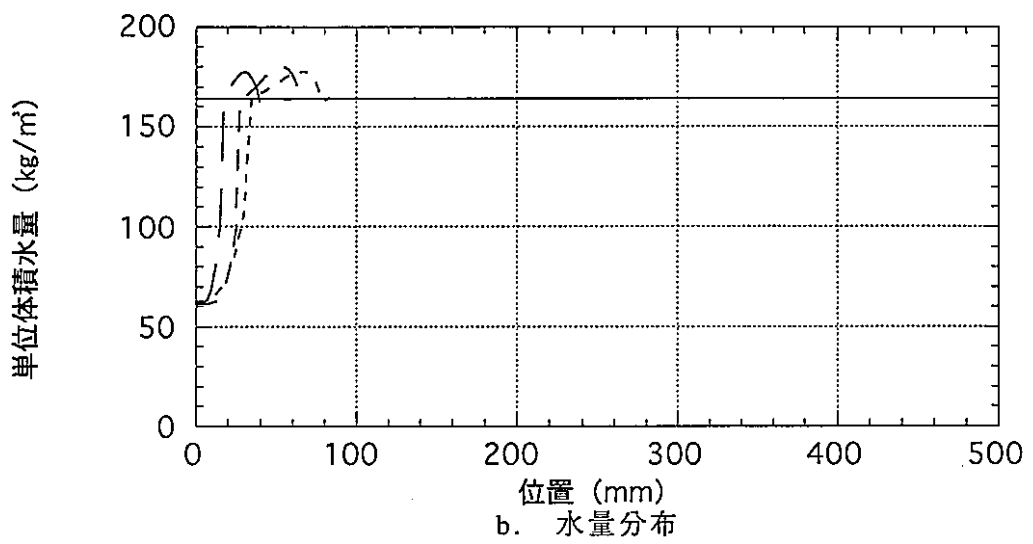
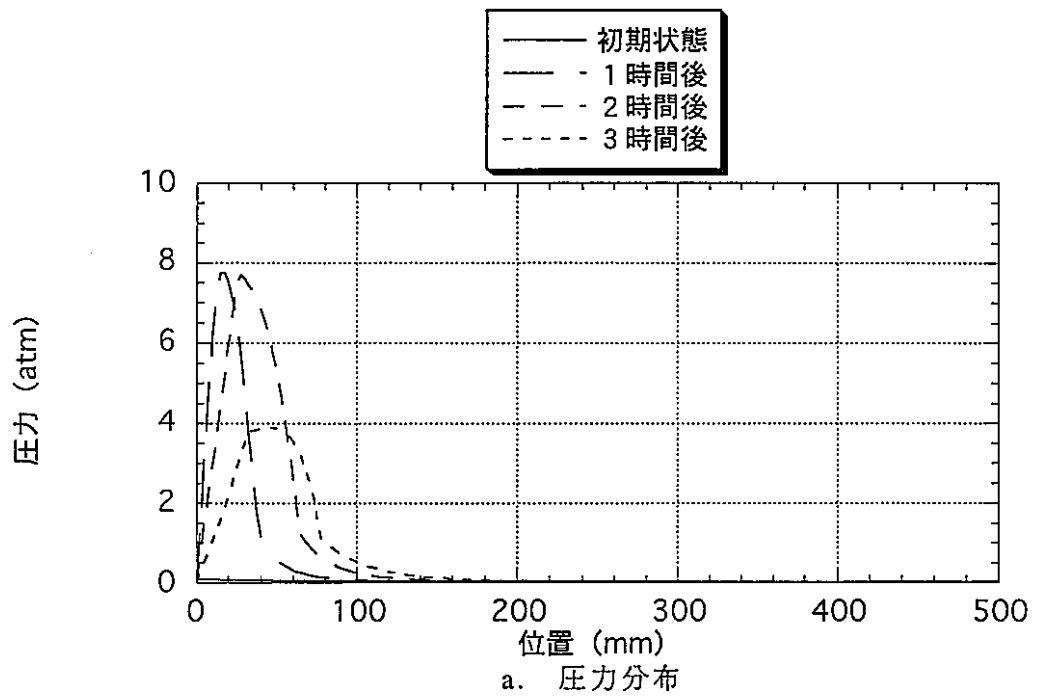


図4-32 圧力・水量・温度の1時間毎の材軸方向分布

4.2.3 実機事故想定温度条件での解析

(1) 解析条件

以下に示す5つの実機事故想定温度条件について、放出水量の計算を行う。

- ・ A446/01
- ・ A446/03
- ・ A446/10
- ・ A446/30
- ・ A435/10

これらの事故想定温度条件における温度履歴を図4-33に示す。

コンクリートの諸物性を表4-16に示す。表中には、4.1.2および4.2.2のシミュレーション解析に用いた値も参考として併せて記している。基本的に4.2.2で用いた値と同じ値である。但し、熱伝導率については、 $\lambda=1.5\text{kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot\text{°C}$ とする（4.2.2では、実験時の側面への熱の流出を考慮したみかけの熱伝導率である。4.1.3の熱伝導率の感度解析による検討より、L350試験体では実験時の側面への熱流入出収支のバランスがとれているため、L350の熱伝導率推定値を用いる）。また、コンクリートの初期温度は45°C一様とし、初期温度における透水係数は、 $a_0=1.7\times 10^{-12}\text{m/s}$ （25°Cで $1.0\times 10^{-12}\text{m/s}$ に相当）とする。

解析緒元を表4-17に示す。A446/01は、最高温度が100°C以下であることから、水分の移動が加熱側表面の極近傍に限られると予測されるため、加熱側表面近傍の要素を細かく分割している。

表4-16 コンクリートの諸物性

項目	解析条件	実機事故 想定温度 条件解析	もんじゅ 放水挙 動確認試 験のシミュ レーション解析	コンクリートからの放出水 測定試験のシミュレーション解析		
				L120 L160	L350	U120 U150
初期温度における透水係数 a_0 (m/s)		1.7×10^{-12}	$1.0 \sim 1.7 \times 10^{-12}$	1.0×10^{-12}	3.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}
25℃における透水係数(m/s)		1.0×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.6×10^{-12}	4.1×10^{-12}	1.6×10^{-12}
透水係数a	図4-1参照					
熱伝導率 λ (kcal/m·hr·℃)		1.5	0.7	2.1	1.5	2.1
コンクリートの比熱C(kcal/kg·℃)	図4-2参照					
自由水の吸着熱 C_a (Kcal/kg)		0	0	0	0	0
コンクリートの密度 ρ (kg/m ³)		2300	2300	2300	2300	2300
単位セメント質量 C_E (kg/m ³)		298	298	300	300	300
初期単位水量 W_T (kg/m ³)		164	164	149	149	150
飽和含水量 W_I (kg/m ³)		110	110	105	105	120
脱水量 W_d (kg/m ³)	図4-3参照					
コンクリートの初期温度 T_I (℃)		45	25~45	10	15	10
コンクリートの初期相対湿度 ϕ_I		0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
雰囲気の水蒸気圧 p_{en}		0	0	0	0	0
解析開始時損失水量		0	0	図4-4参照		図4-5参照

表4-17 解析緒元

	A446/01を除くケース	A446/01
解析次元	1次元	
解析モデル全長	500mm	
要素分割	200要素に等分割 (1要素の長さ： 2.5mm)	加熱側表面と加熱側表面から10mmの位置との間：1要素の長さ0.5mm 非加熱側表面と加熱側表面から10mmの位置との間：1要素の長さ2.5mm
解析時間	120分~240分	
解析時間刻み	0.1分	

(2) 解析結果

0.5時間毎の放出水量解析値を表4-18に示す。表4-18には、加熱側表面温度が最大となる時刻の値もあわせて示している。また、放出水量履歴を図4-34に示す。最終的な放出水量は、A446/01で0.14kg/m²、A446/03で1.20kg/m²、A446/10で2.71kg/m²、A446/30で2.42kg/m²、A435/10で4.88kg/m²と推定された。A446/10の放出水量が、4.2.2のシミュレーション解析による値より約10%大きいのは、熱伝導率の違いによるものである。

1時間毎の断面の圧力分布、水量分布、温度分布を図4-35～図4-39に示す。A446/01では水の流出が表面より約0.5mm以内の範囲に限られており、非常に放出水量が少ない。

表4-18 放出水量

単位：kg/m²

	A446/01	A446/03	A446/10	A446/30	A435/10
0.5時間後	0.04	0.18	0.55	0.91	1.44
1.0時間後	0.08	0.48	1.37	1.86	2.87
1.5時間後	0.14	0.73	1.98	2.28	3.96
2.0時間後	0.14	0.90	2.40	2.42	4.51
2.5時間後	0.14	1.07	2.61	—	4.75
3.0時間後	0.14	1.17	2.71	—	4.88
3.5時間後	—	1.19	—	—	—
4.0時間後	—	1.20	—	—	—
加熱側表面温度最大時 ()内はその時刻 (hr)	0.13 (1.333)	0.65 (1.306)	1.71 (1.250)	1.81 (0.972)	3.53 (1.278)

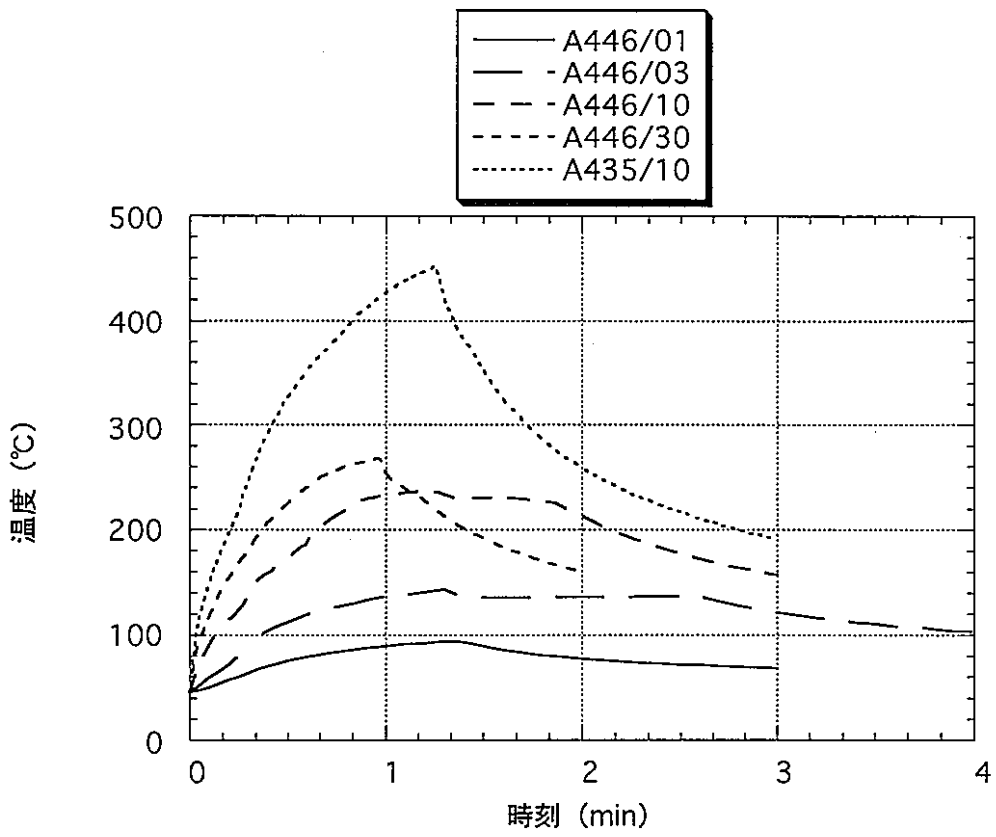


図4-33 実機事故想定温度条件

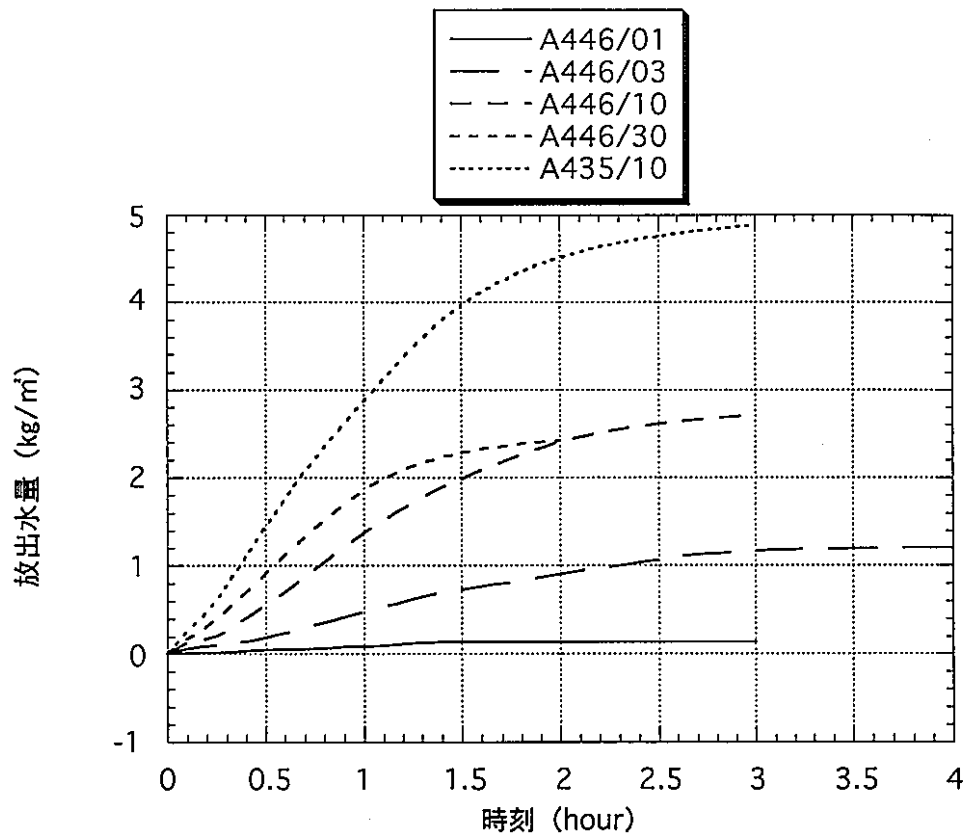


図4-34 放出水量履歴

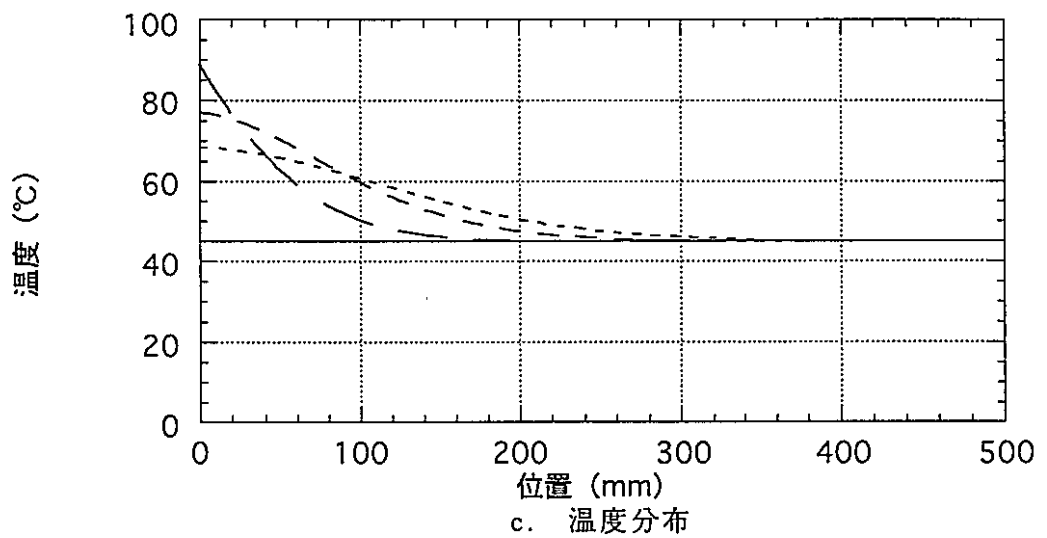
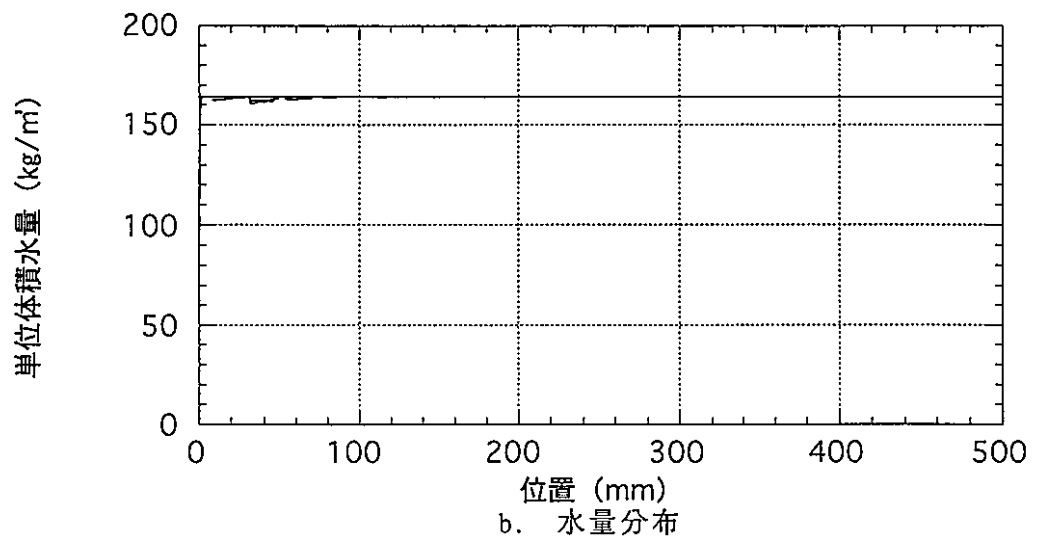
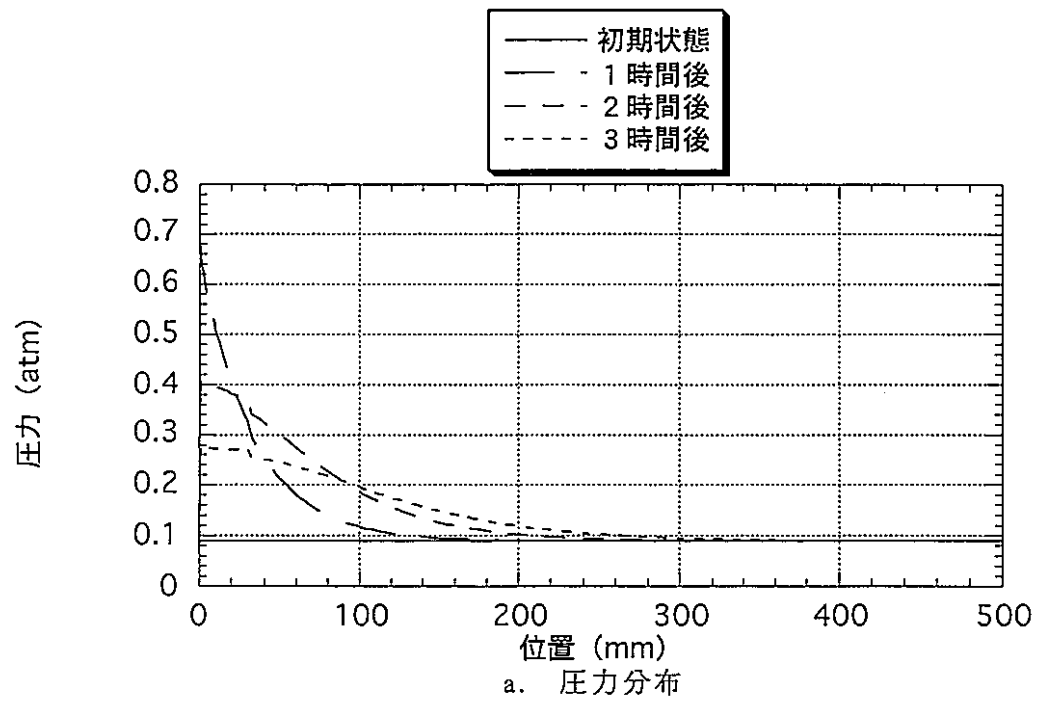


図4-35 圧力・水量・温度の1時間毎の厚さ方向分布 (A446/01)

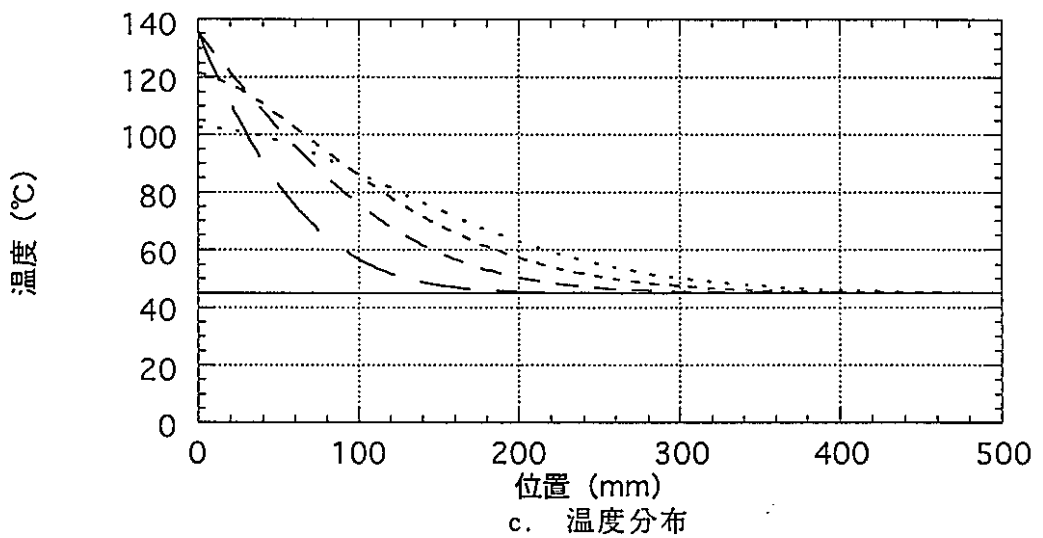
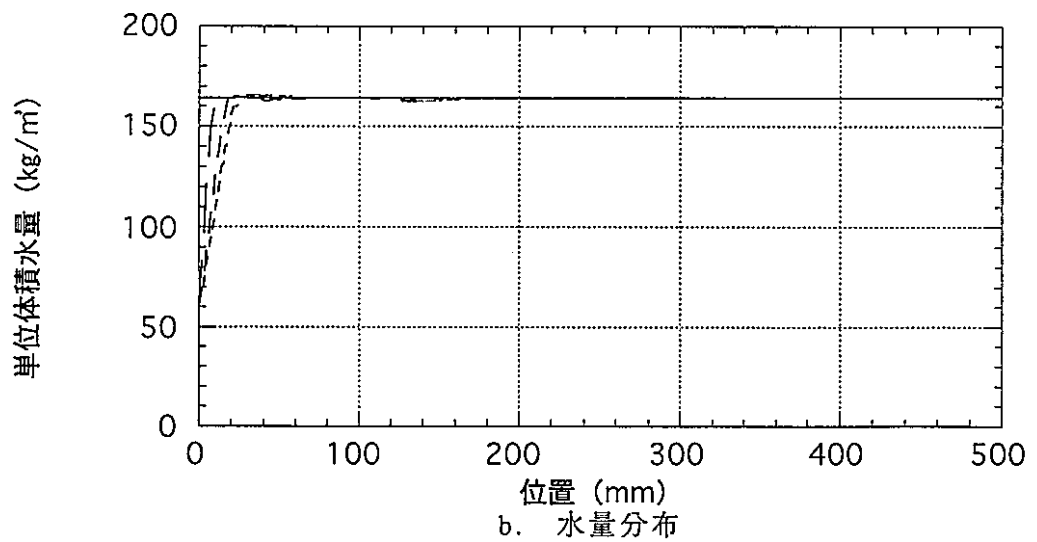
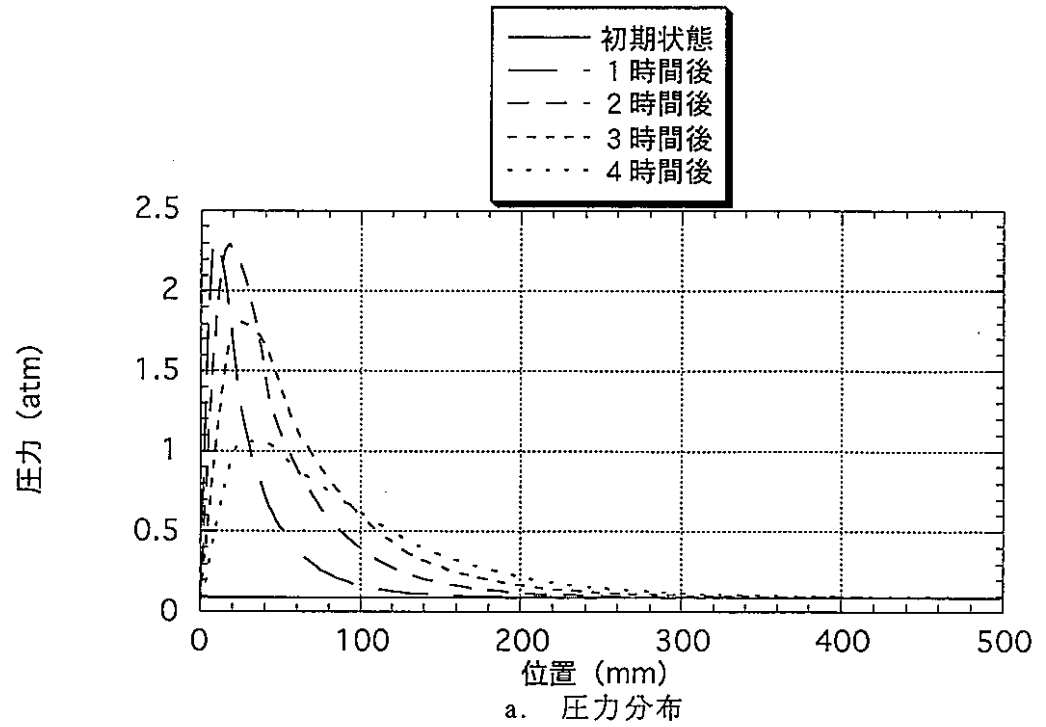


図4-36 圧力・水量・温度の1時間毎の厚さ方向分布 (A446/03)

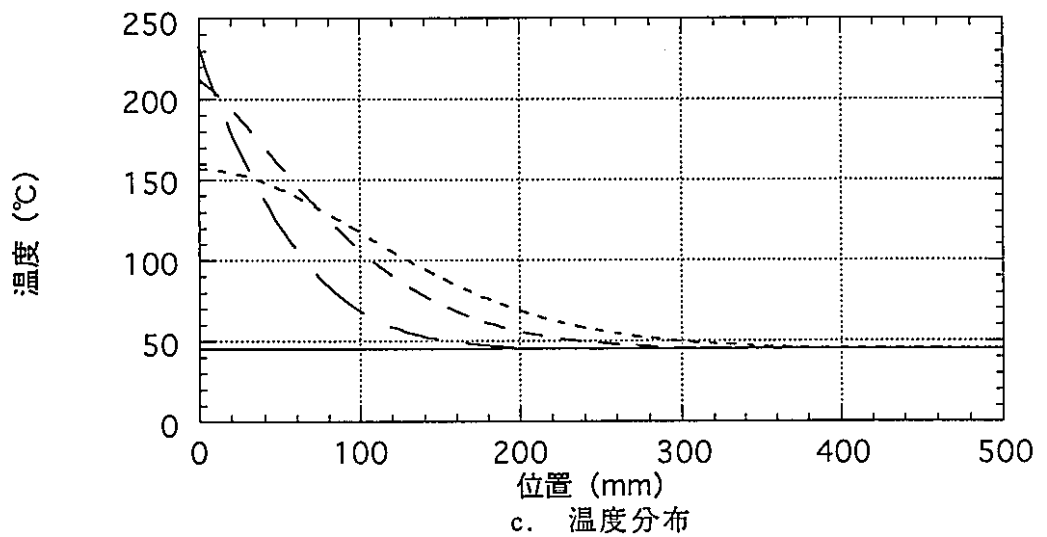
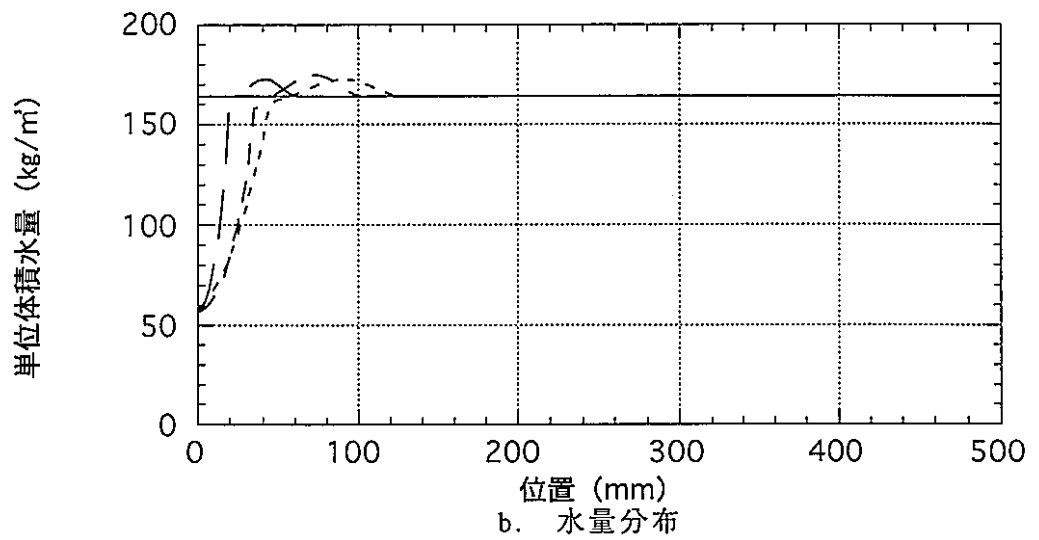
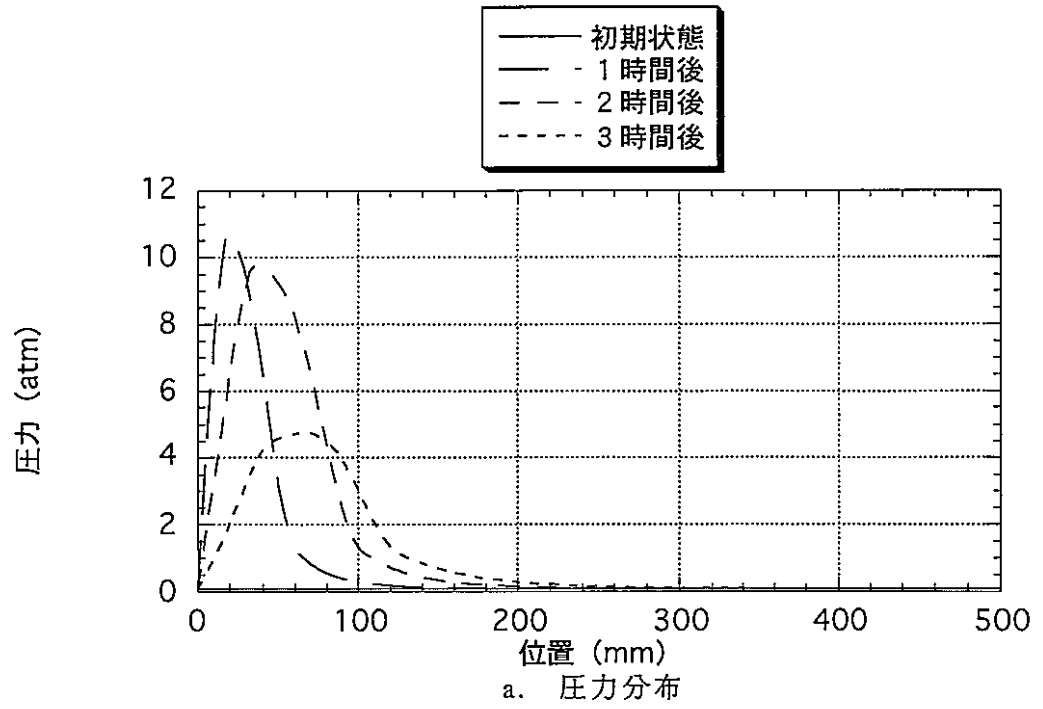


図4-37 圧力・水量・温度の1時間毎の厚さ方向分布 (A446/10)

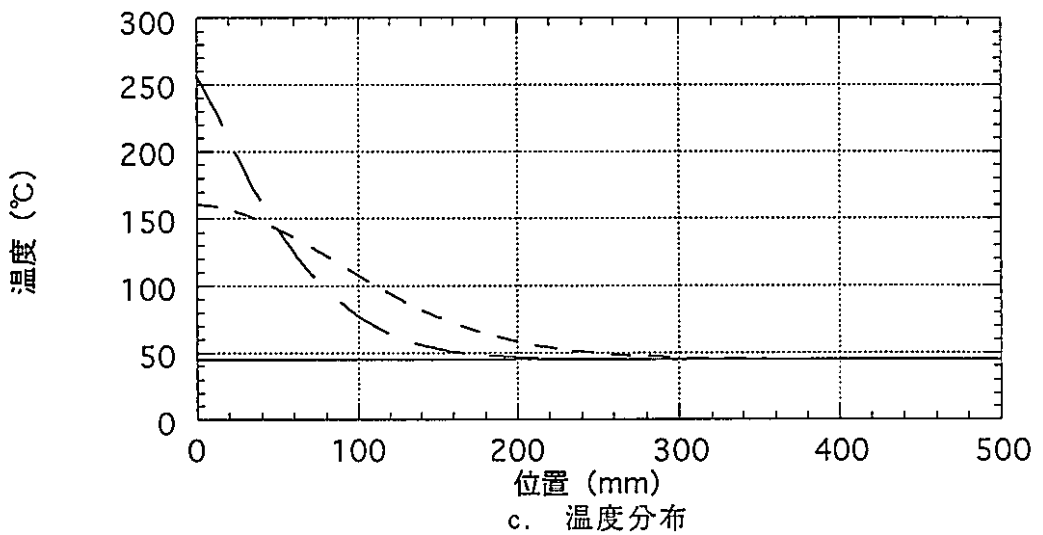
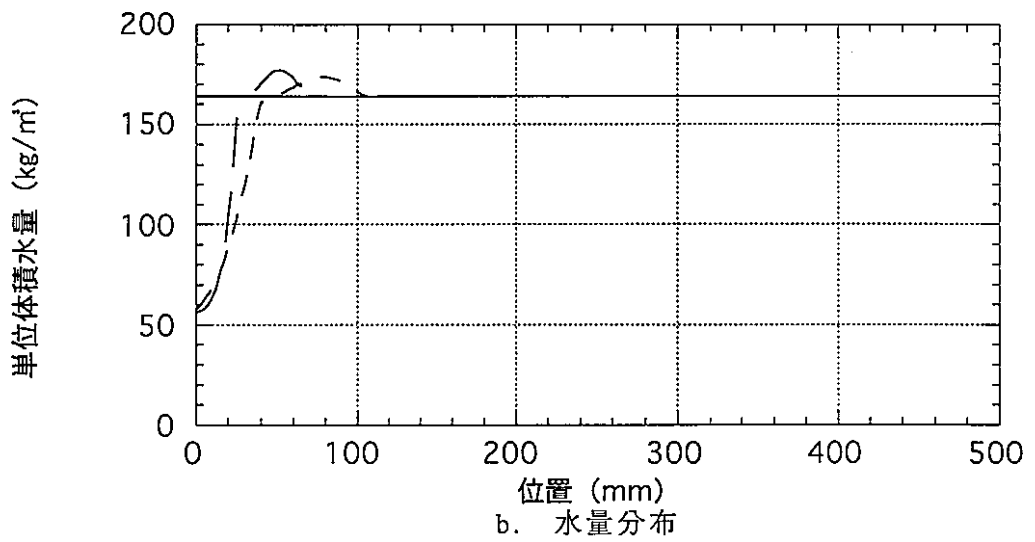
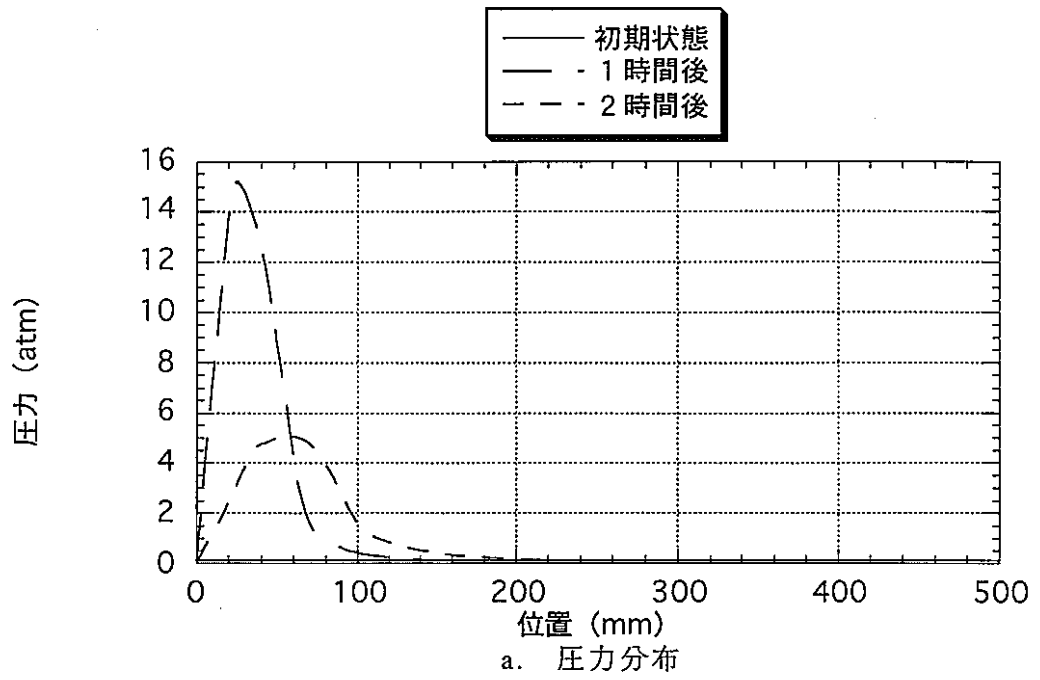
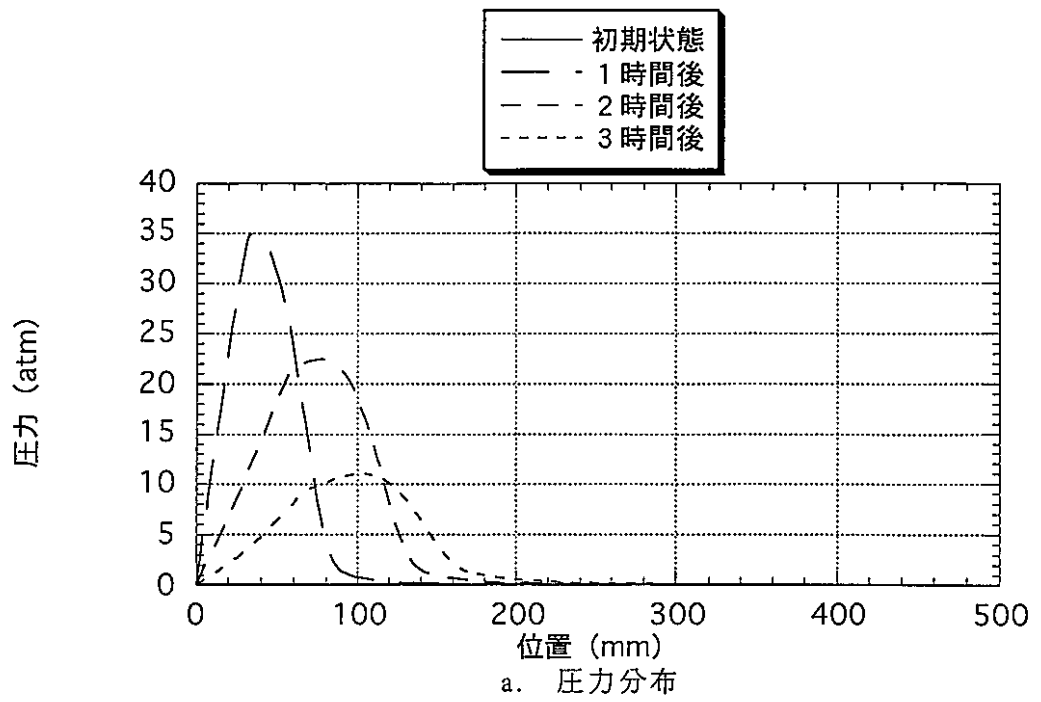
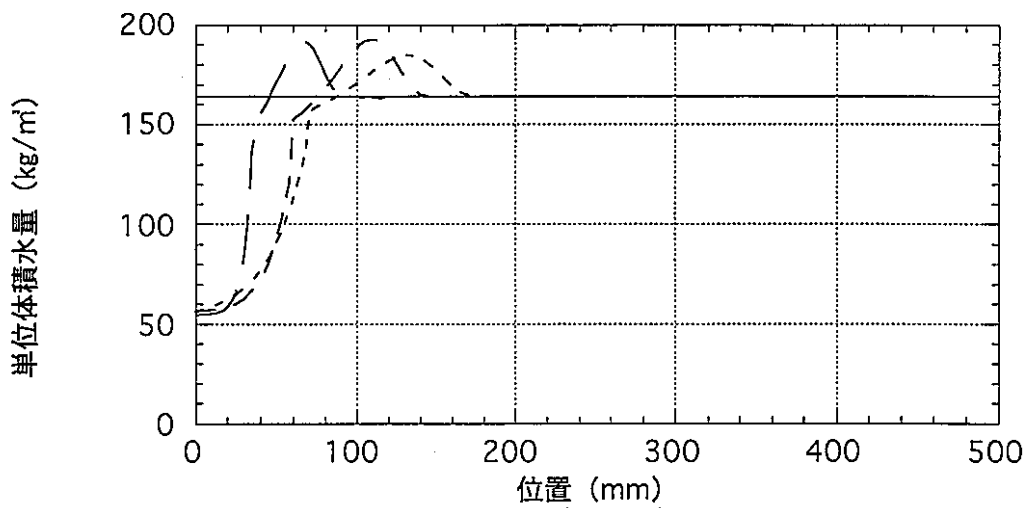


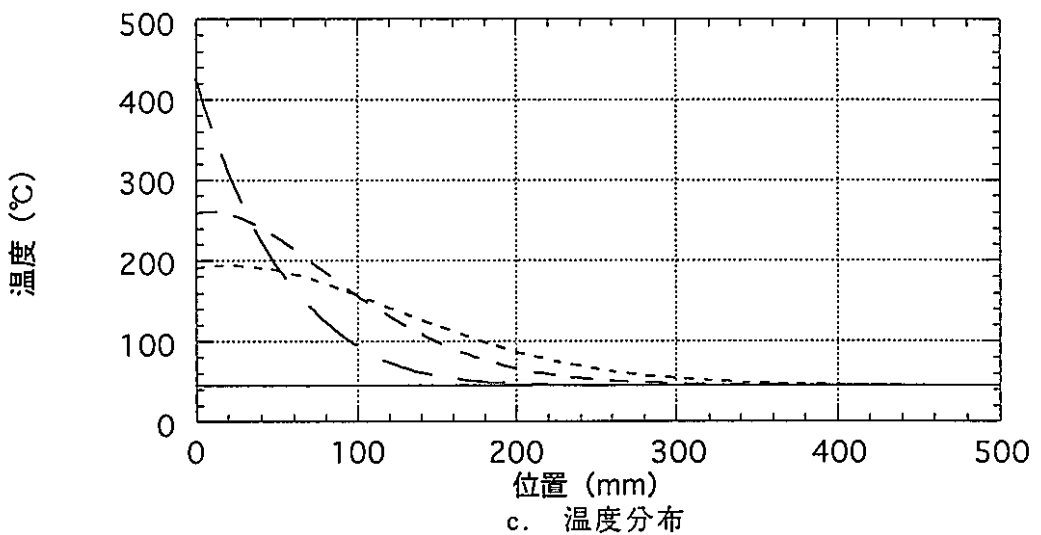
図4-38 圧力・水量・温度の1時間毎の厚さ方向分布 (A446/30)



a. 圧力分布



b. 水量分布



c. 温度分布

図4-39 圧力・水量・温度の1時間毎の厚さ方向分布 (A435/10)

5. まとめ

コンクリート表面が加熱された場合のコンクリート内部の水分移動や表面から放出する水量を評価することを目的として、清水建設保有解析コード「T-Mics」を用いて「コンクリート内部の水分移動・放出の解析作業」を行った結果、以下の知見が得られた。

5.1 大洗工学センターで実施された「コンクリートからの放出水測定実験」の計算

(1) 「コンクリートからの放出水測定実験」のシミュレーション解析

5つの温度履歴パターン（L120、L160、L350、U120、U150）について、各温度履歴パターンの温度および放出水量実測結果の平均値を対象にシミュレーション解析を行った結果、通常のコンクリート物性の範囲で、解析により得られる放出水量履歴は実測値と良い対応を示した。最高温度が約350℃となるL350を除いた4パターンでは、同じ透水係数（25℃において $1.6 \times 10^{-12} \text{m/s}$ ）を用いた解析結果が、最も実測値に近い値を示した。

(2) 主要パラメータの感度解析

コンクリートの諸物性が放出水量に与える影響を評価するため、主要なパラメータである透水係数、解析開始時水分損失、熱伝導率の感度解析を行った。その結果、透水係数と解析開始時の材軸方向水分損失分布（特に加熱側表面近傍）が放出水量に与える影響が大きいことが示された。熱伝導率については、透水係数と比較してばらつきが小さい性質の物性であるため、通常のコンクリートの範囲で値が変化しても放出水量の差異が小さいことが示された。

5.2 実機事故想定温度条件での適用計算

(1) 「もんじゅ実機躯体コンクリート放出水挙動確認試験」のシミュレーション解析

温度および放出水量実測結果の平均値を対象にシミュレーション解析を行った結果、5.1(1)の解析とほぼ同じコンクリート物性値（透水係数は25℃において $1.0 \times 10^{-12} \text{m/s}$ ）を用いた解析により得られる放出水量履歴が実測値と良好に一致した。

(2) 実機事故想定温度条件での解析

5.1(1)と5.2(1)のシミュレーション解析に基づいてコンクリート諸物性を設定し、5つの温度履歴条件について放出水量の予測解析を行った。その結果、放出水量予測値は、A446-01で 0.14kg/m^2 、A446-03で 1.2kg/m^2 、A446-10で 2.7kg/m^2 、A446-30で 2.4kg/m^2 、A435-10で 4.9kg/m^2 となった。

【参考文献】

- 1) 株式会社ペスコ,"コンクリートからの放出水測定実験 -ナトリウム漏洩燃焼実験 -Ⅱにおける放出水量の推定-",PNC PJ9409 97-002,1996
- 2) 執筆中
- 3) Zdenek P. Bazant, and Werapol Thonguthai, "Pore pressure and drying of concrete at high temperature", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 104, No. EM5, Proc. Paper 14077, October, 1978, pp. 1059-1079