

平成 23 年度

修士論文

地下構造物の壁体の簡易貫流熱負荷算定法  
に関する研究

指導教員 永井久也 教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

水上 裕士

# 目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	2
1.2 従来の研究	3
1.3 本研究の目的と概要	5
第2章 地下構造物及び周辺地盤における熱・水分同時移動方程式	6
2.1 はじめに	7
2.2 多孔質材料中における熱・水分同時移動の基礎式	7
2.2.1 多孔質材料内の拡散方程式	7
2.2.2 解析に用いる熱・水分移動ポテンシャルと拡散方程式	8
2.2.3 支配方程式	11
2.2.4 本論分で用いる基礎方程式	14
2.2.5 境界条件	14
2.3 地下空間の熱・水分収支	18
2.4 第2章のまとめ	18
第3章 解析対象の地下構造物及び 周辺地盤における熱・水分性状と熱負荷の理論解析法	19
3.1 はじめに	20
3.2 解析対象	20
3.3 解析に用いる物性値	23
3.3.1 コンクリートの物性値	23
3.3.2 砂質土壌の物性値	30
3.3.3 その他の物性値	37
3.4 数値計算法	38
3.4.1 基礎方程式の差分化	38
3.4.2 計算上の物性値の取り扱い	41
3.5 第3章のまとめ	42

<b>第4章 地下構造物の周辺地盤の熱性状の等方性確認実験</b>	<b>43</b>
4.1 はじめに	44
4.2 実測概要	44
4.3 実測対象および実測装置の概要	44
4.3.1 実測対象概要	44
4.3.2 計測装置と実測条件	45
4.4 実測結果	48
4.4.1 実測対象地下構造物の壁面顕熱流の等方性の確認	48
4.4.2 内部発熱と全熱負荷の比較	50
4.5 理論解析結果と実測結果の比較	51
4.5.1 部位別壁面顕熱流・温度比較	51
4.5.2 内部発熱と全熱負荷の比較	63
4.5.3 平均放射温度と室温の比較	64
4.6 第4章のまとめ	65
 <b>第5章 地下構造物の貫流熱負荷の線形近似予測理論</b>	 <b>67</b>
5.1 はじめに	68
5.2 線形近似予測理論概要	68
5.3 第5章のまとめ	69
 <b>第6章 完全埋設型地下構造物における貫流熱負荷の線形近似予測</b>	 <b>70</b>
6.1 はじめに	71
6.2 解析対象および解析手法の概要	71
6.2.1 解析対象	71
6.2.2 計算条件、基準外界気象条件	71
6.2.3 解析手法概要	72
6.3 各部位の熱負荷の比較	73
6.4 各部位における基準外乱変動に対する室顕熱流単位応答の時変性	76
6.5 近似単位応答を用いた線形近似予測	84
6.6 任意の床面積における線形近似予測	85
6.6.1 適用手法概要	85
6.6.2 線形近似予測結果と一般性の検討	85
6.7 第6章のまとめ	87

<b>第7章 単層壁で構成される一般形状の地下構造物における線形近似予測</b>	<b>88</b>
7.1 はじめに	89
7.2 解析対象および解析手法の概要	89
7.2.1 解析対象及び基準外界気象条件	89
7.2.2 解析手法概要	91
7.3 各部位の熱負荷の比較	92
7.4 各部位における基準外乱変動に対する室顕熱流単位応答の時変性	95
7.5 近似単位応答を用いた線形近似予測	104
7.6 任意の床面深さにおける線形近似予測	107
7.6.1 適用手法概要	107
7.6.2 線形近似予測結果と一般性の検討	109
7.7 第7章のまとめ	112
 <b>第8章 結論</b>	 <b>113</b>
 記号説明	 118
 引用文献	 122
 謝辞	 124

# 第 1 章

## 序論

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

今日の人類の快適な生活環境は化石燃料等の資源を消費することで成り立っている。しかしながら、その化石燃料等の資源を消費してきたことで莫大な量の二酸化炭素を排出してきた。その結果、人類は現在問題になっている地球温暖化という弊害を生み出してきた。そういった現在の環境問題に世界各国は京都議定書の発効による二酸化炭素排出削減目標を定め、二酸化炭素の排出削減による地球温暖化の抑制に取り組んでいる。

こうした世界各国の環境に対する関心の高まりの中、我が国では国全体の二酸化炭素の全排出量のうち約 1/3 を建築関連が占めている。その中でも注目すべきなのは冷房、暖房の運用エネルギーが 2/3 を占めていることである。運用エネルギーとは冷暖房等による建築物が出来上がってから運用する際に消費されるエネルギーのことである。このことから現在建築関連の企業は省エネルギー技術の開発、環境共生を目指した自然エネルギーシステムの開発による環境負荷低減につながる建築物の開発に重点を置いている。

そうした現在の建築業界の流れの中にあって、地下構造物に関する省エネルギー技術の開発は進んでいないのが現状である。都市部での土地の有効利用、交通、住居、貯蔵といった多くの利用目的を持った地下構造物は地下空間の耐震性、防音性、恒温性、高断熱性などの省エネルギーに資する有効特性のために多く建設されている。しかしながら、地下構造物は地上の構造物とは異なり地下空間の結露、地下水の漏水、高湿度など快適な居住環境を妨げる問題を有しており、その性状も単純ではない。

地下空間が持つ様々な熱的問題点と省エネルギー性を正しく把握する為には、まず地下空間の室内環境と熱負荷に大きく影響を与える周辺地盤による熱・水分移動を把握する必要がある。地盤は多孔質体であり、降雨や地下水といった水分の影響を多く受ける。つまり、地盤内の含水状態により熱・水分移動に関係する物性値も大きく変化する。また、地表境界での蒸発、凝縮などの相変化による影響は大きく、状態量変化に伴う物性値の変化による非線形性も大きくなる。その他に、地盤から地下構造物の躯体を通して流入してくる熱と水分が結露発生や地下空間の高湿度環境へ及ぼす影響も大きい。このような地下構造物の熱・水分環境を適切に把握する為には、熱・水分の両方の移動を考慮し、周辺地盤と地下構造物の躯体、躯体と地下空間を一つの連成系として取り扱う必要がある。

そういった中で、現在は地下空間の高精度の負荷計算手法が無い為、地下の空調機器の適切な選定が行われていないのが現状である。本研究では、こうした地下の空調機器の適切な選定を行い空調機器のランニングコストの低減を達成し、環境負荷を低減するために地下構造物の簡易熱負荷予測算定手法の提案を目的としている。

## 1.2 従来の研究

これまで、地下構造物の熱負荷算定手法に関する試みについては多くの研究が成されており、種々の手法が提案されている。そこで従来の研究とその問題点について以下で述べる。

地中に設けられた地下空間は、大地の極めて大きな熱容量により年間を通じて安定した室内気候を有し、温熱環境及び省エネルギーの観点からも有利な特性を持っている。しかし、その大きな熱容量ゆえに、地下室内外の熱挙動の把握は容易ではなく、周辺地盤に接する地下室の躯体を通過する熱量の算定に際しては、通常の壁とは異なる取り扱いが必要となる。また、地下空間の熱・湿気環境及び熱負荷性状を正しく把握する為には、地下構造物の躯体と地盤内の含水状態による物性値の変化や、熱・水分の影響を同時に考慮する必要がある。

井上[1]、永田[2]は大規模地下空間の熱湿気環境予測プログラムの開発に関する研究を行った。彼らは代表的なエネルギーシュミレーションプログラムである HASP の熱負荷計算部の ACLD への適用または単独でも地下空間の温湿度・壁体の吸放湿、顕潜熱負荷の計算が可能なプログラムを提案している。しかし、このプログラムは周辺土壌の物性値などが含水状態に強く依存し、地下空間の熱・湿気性状と熱負荷に与える影響が大きいにもかかわらず、計算負荷が大きくなるのを避ける目的で、地中壁体は 1 次元線形熱・水分同時移動、地中部分に関しては 3 次元単純熱伝導として扱っている。さらに、地盤からの水分の流入は与条件として解析するものであり、水分を多く含む地盤や結露が生じる危険性がある場合については適応が難しいなどの問題がある。

佐藤[3]は大規模地下構造物の熱負荷算定法を提案する目的で長時間の実測を行い、地中温度のモデル化、実測値と計算値の比較検討による熱物性値の影響と簡易計算法などを提示している。また、居住施設としての地下構造物に関する研究としては、松尾[4][5][6][7]らの居住施設としての地下空間の熱特性に関する研究や、長谷川[8][9][10]らの半地下家屋における熱環境性能に関する研究が行われた。これらの研究は半地下住居の熱環境を把握するために長期実測を行い、地盤物性値の測定及び同定、透過日射の影響などを検討している。しかし、これらの研究はいずれも地盤内の熱移動を単純熱伝導として扱っており、水分による影響を検討していない。

住居施設としての半地下建物における熱負荷算定に関する研究としては、住居室として地下室を deep、shallow、slab on grade の三つに分け、種々の実測を行った Mitalas[11][12]による研究がある。彼は実測結果を基に上記の三つの半地下を基本とする種々の形態係数、セグメント、断熱仕様、土壌の熱伝導率などによって細分化された半地下室モデルを提示し、地下室の熱損失係数 (BHLFs) を求めることによって暖房シーズンにおける地表面以下の熱損失計算を行い、最大暖房負荷算定手法を提案している。また、ASHRAE[13]による手法も Mitalas と同様、最大暖房負荷算定手法を示している。Sobotka ら[14][15]は規模、断熱仕様、埋設深さなどが異なる内部発熱条件下での二つの半地下室に対して長期にわた

る実測を行い、その結果を基に単純熱伝導とした 2 次元有限要素法による計算結果と Mitalas、ASHRAE、European CEN and ISO 基準によって算出された値と比較検討し、Mitalas の手法において良く一致している。しかし、基本的には土壌の熱伝導率などの係数を実測値と計算値との比較により同定することや降雨量など外界気象が異なる地域における予測誤差の増大等の問題があり、定量的予測を行う手法として十分な精度と一般性を有しているとはいえない。

地下構造物の躯体と地盤内の熱・水分移動を考慮し、地下空間・躯体・地盤を一つの連成系として扱った研究としては、小椋[16][17]の自然状態下での地下構造物と周辺地盤の熱・湿気性状に関する研究がある。彼は完全埋設型実験地下室を用い、換気のみ状態下での地下室と周辺地盤の熱・水分における長期にわたるフィールド実験と熱・水分同時移動を考慮した理論解析を行い、地下室内壁面での結露性状と、地下室と周辺土壌における熱・水分性状を精度良く予測できることを示している。また、地下構造物の熱負荷算定法も提案している。しかし、この研究は換気回数が非常に大きい状態で行われており、外界気象の影響が大きくなる問題、また熱負荷算定法に関しても実負荷実験無しの数値解析のみによるものであり、実負荷実験による精度の検証は行われていない。

完全埋設型実験地下室を用いて内部発熱状態下での長期間にわたるフィールド実験を行った研究としては朴[18]の地下構造物の熱負荷特性及びその予測法に関する研究がある。彼は地下構造物の熱負荷及び熱・湿気環境形成影響を与える地下室の躯体と周辺地盤の熱・水分性状とその影響を実験測定の見直しから明らかにすると共に、フィールド実験実測結果を単純熱伝導と熱・水分同時移動理論を用いて数値的に解析し、地下構造物と周辺地盤の熱・水分性状及び地下構造物の熱負荷手法としての妥当性と精度の見直しを行った。また、計算時間短縮の観点から 2 次元モデルによる簡易予測手法の見直しを行い、その予測精度と適用範囲を明らかにした。しかし、簡易予測手法である 2 次元モデルですら 1 年分の熱負荷計算を行うには現在筆者らが所有する最速のパソコンでも 20 時間以上の計算時間を要し、設計の観点から好ましい手法であるとはいえないという問題がある。

そこで、計算時間の短縮により設計業務における通常の負荷計算プログラムに現実的に組み込めるようにするため行った研究として山添[19]が行った地下構造物熱負荷の簡易予測手法に関する研究がある。彼は各種外界条件の微小変化に対する地下構造物内表面擬線形顕熱流単位応答を用いて線形近似予測を行った。外気温変化に対する地下室内表面顕熱流の時変性の有無を確認し、非線形熱・水分同時移動モデルを用いて算出した解を基準解として、東京の外界気象条件下で算出された近似貫流単位応答を用いて基準地域である東京及び他地域における熱負荷を予測する手法の見直しを行い、予測精度を明らかにした。さらに予測精度向上のために地表面における水分蒸発を考慮した SAT を用い、その結果さらなる予測精度向上が見られた。しかし、簡易計算を行う前段階において表面擬線形顕熱流単位応答を算出するため長時間にわたる計算時間が必要となる熱・水分同時移動理論に基づく計算を行う必要があることに加え、熱・水分同時移動理論は計算が複雑であるため、実用化には問題が残った。



### 1.3 本研究の目的と概要

本研究は、山添[19]の論文で示された地下構造物の表面擬線形顕熱流解を用いた簡易熱負荷予測手法を用い、その予測精度のさらなる向上や設計段階における本手法の一般化を目的としている。本研究では住宅規模の任意形状の地下構造物に対して貫流熱流の線形近似予測手法を適用する際に、実務レベルでの使用を考慮し、予め基準となる形状の地下構造物において線形近似予測手法に必要な表面擬線形顕熱流単位応答を算出しておき、それを基準解として使用することで任意形状の地下構造物の貫流熱流の線形近似予測を行い十分な熱負荷予測が可能であるか検討を行った。本手法で十分な線形近似予測精度が得られる場合、実務ではあらかじめ算出された基準単位応答を使用するため、上記で述べた長時間の計算時間を必要とする熱・水分同時移動理論に基づく計算を行う必要がなく、計算時間の問題の解消につながる。

以下に本論文の概要を示す。

第2章では第6章及び第7章、第8章の非線形数値解析で用いる地下躯体及び地盤内部での熱・水分移動の基礎方程式を提示している。

第3章では解析対象となる地下構造物の概要や解析に使用する物性値の取り扱いを示すとともに、基礎方程式の差分化、計算上の物性値の取り扱いといった数値計算法について述べる。

第4章では数値解析の前提条件である等方性の確認を行うため、フィールド実験実測結果による熱性状を検討する。

第5章では地下構造物の熱負荷の線形近似予測手法の概要について述べる。

第6章では完全埋設型実験地下室を解析対象として熱負荷の線形近似予測を行い、熱負荷予測制度の検討を行う。

第7章では単層壁で構成される地下構造物において、部位ごとに近似単位応答を作成し、それを任意の形状の地下構造物の線形近似予測に使用した場合の予測精度について検討を行う。

第8章では各章で得られた結論についてのまとめと今後の課題と展望を述べる。

## 第 2 章

# 地下構造物及び周辺地盤における 熱・水分同時移動方程式

## 第2章 地下構造物及び周辺地盤における熱・水分同時移動方程式

### 2.1 はじめに

本章では、地下構造物とその周辺地盤の熱・水分性状を研究する場合、基礎となる地下空間を含む地下構造物の躯体及び周辺土壌における熱・水分の同時移動方程式を提示する。

一般に、建築材料は多孔質体であり、土壌とコンクリートは水分の影響を受ける多孔質体である。また、水分は地下構造物及び周辺土壌の熱環境を構成する重要構成要素のひとつであり、これらの内部の熱・水分の移動は同時移動現象である。

このような多孔質材料中の熱・水分の同時移動現象を記述する熱・水分同時移動方程式に関する研究は多く行われているが、三つに大別できる。Philip & de Vries の現象論的にマクロに見る解析、Luikov の材料内の空隙を毛細管の束とみるミクロな解析、松本の非可逆過程の熱力学を用いて材料内の移動を考慮した解析である。いずれも最終的には、温度と含水率あるいは水分の化学ポテンシャルを移動ポテンシャルとし、水分の移動に関しては、水蒸気と液水の二相流と考え、熱移動に関しては、移流、相変化を含めた熱収支を考える基礎方程式が導かれる。

この整理は前田、松本[20]、池田[21]により成されており、基礎式の妥当性の検討は松本[22]、池田が行っている。ここでは、本研究の基礎となる移動の駆動力として温度と水分化学ポテンシャルを用いる松本の理論を示し、多孔質材料内（躯体、地盤）の熱・水分同時移動の基礎式を提示する。また、地下構造物の室内空間の熱・水分の収支を示し、地下構造物及び周辺地盤の熱・水分同時移動過程における最終的な基礎方程式を提示する。

### 2.2 多孔質材料中における熱・水分同時移動の基礎式

#### 2.2.1 多孔質材料内の拡散方程式

多孔質体系を以下のようにモデル化する。すなわち、多孔質体は、固体実質部、乾燥空気、水分の三成分とし、乾燥空気は液相に対して不活性で気相のみに存在するものとする。従って、系は水蒸気、乾燥空気、固体実質部の三成分から成る気相と、液水（吸着水も含む）、固体実質部の二成分から成る液相によって構成される連続体とみなす。また、固体実質部の変形は無視し得ると仮定する。

固体内に存在する様々な形態の水分が何らかの作用により平衡状態が崩れると、これらの水分は全てそれぞれのメカニズムに従って同時に移動する。いずれの形態の水分に対しても移動の駆動力は水分の化学ポテンシャルの差である。このような多相系の均一混合体に非平衡熱力学の方法を水分移動過程に適用すると、熱、水分、乾燥空気の流れと駆動力の構成関係が得られる。

$$\begin{aligned}
 [J] &= [C_{ij}] [F] \\
 [J] &= [q, J_{1w}, J_{1a}, J_{2w}]^T \\
 [F] &= -[\nabla \ln T, \nabla_T \mu_{1a}', \nabla_T \mu_{2w}']^T
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

ここで、行列 $[C_{ij}]$ は4行4列の行列であり、対称かつ正定行列、 $[J]$ は流れ（Flux）を表す列ベクトル、 $[F]$ は駆動力（Force）を表す列ベクトル、 $q$ は熱流 $[W/m^2]$ 、 $J_{1w}$ は気相水分（水蒸気）流 $[kg/m^2s]$ 、 $J_{2w}$ は液相水分流 $[kg/m^2s]$ 、 $T$ は絶対温度 $[K]$ 、 $\mu_{1w}$ 、 $\mu_{1a}$ 、 $\mu_{2w}$ はそれぞれ気相水分、乾燥空気、液相水分の化学ポテンシャル $[J/kg]$ である。

また、内部の界面における関係は、

$$J_{w(12)} = \beta(\mu_{1w} - \mu_{2w}) \tag{2.2}$$

ただし、 $\beta \geq 0$  である。

### 2.2.2 解析に用いる熱・水分移動ポテンシャルと拡散方程式

気相内の湿り空気は、十分な精度で完全ガスとみなすことができる。従って、気相内の水蒸気圧、乾燥空気分圧をそれぞれ、 $p_v[Pa]$ 、 $p_a[Pa]$ 、全圧を  $P(\equiv P_g)[Pa]$ と表すと、水蒸気、乾燥空気ポテンシャル $\mu_{1w}$ 、 $\mu_{1a}$ は

$$\begin{aligned}
 \mu_{1w} &= \mu_{v0}(T, P) + \mu_{1v} \\
 \mu_{1v} &= R_w T \ln \frac{P_v^1}{P}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\mu_{v0} = \mu_a^0(T) + R_a T \ln P$$

$$\begin{aligned}
 \mu_{1a} &= \mu_{a0}(T, P) + \mu_a \\
 \mu_a &= R_a T \ln \frac{P_a}{P} \\
 \mu_{a0} &= \mu_a^0(T) + R_a T \ln P
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

ただし、 $R_w$ は水蒸気の気体常数（ $R_w = R/M_w$ ） $[(Pa \cdot m^3)/(kgK)]$ 、 $R$ は完全ガスの気体常数 $[(Pa \cdot m^3)/(mol K)]$ 、 $R_a$ は乾燥空気の気体常数 $(=R/M_a)[(Pa \cdot m^3)/(kgK)]$ 、 $M_w$ は水蒸気の分子量 $[kg/mol]$ 、 $M_a$ は乾燥空気の分子量 $[kg/mol]$ 、 $\mu_{v0}$ 、 $\mu_{a0}$ はそれぞれ温度  $T$ 、圧力  $P$  の水蒸気及び乾燥空気の水分化学ポテンシャルである。

液相水分の化学ポテンシャル $\mu_{2w}$ は自由水の飽和水蒸気圧  $p_s(T)$ 、 $\mu_{2w}$ に平衡する水蒸気圧を  $p_v^*$ として、

$$\begin{aligned}\mu_{2w} &= \mu_{l0}(T, P) + \mu_{2l} \\ \mu_{2l} &= R_w T \ln \frac{P_v^2}{P_s(T)}\end{aligned}\quad (2.5)$$

ただし、 $\mu_{2l}$  は自由水基準の化学ポテンシャル[J/kg]である。平衡状態では、式 2.2 より  $\mu_{1w} = \mu_{2w}$  であるから、 $\mu_{1w}$  は式 2.3 の代わりに式 2.5 の形で表すことが可能であり、これらの関係を用いて次のように表現できる。

$$\begin{aligned}\nabla_T \mu_{iw}' &= \nabla_T \mu_{i0} + \nabla_T \mu_{iv} - F_w = v_{1w} \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{iv} \\ &= \nabla_T \mu_{i0} + \nabla_T \mu_{il} - F_w = v_{2w} \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{il} \quad (i=1,2)\end{aligned}\quad (2.6)$$

$$\nabla_T \mu_{1a}' = \nabla_T \mu_{a0} + \nabla_T \mu_a - F_w = v_a \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_a \quad (2.7)$$

ただし、

$$\mu_{1w} = \frac{R_w T}{P}, v_a = \frac{R_a T}{P}, v_{2w} = \frac{1}{\rho_{2w}} \quad (2.8)$$

ここで、 $\rho_{2w}$  は液相水分密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\mu_{1w}$ 、 $\mu_{2w}$ 、 $\mu_a$  はそれぞれ気相水分、液相水分、乾燥空気の比容積[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]を表す。

また、Gibbs-Duhem の関係から、

$$\nabla_T \mu_{1a} = \frac{1}{\rho_{1a}} \nabla P - \frac{\rho_{1w}}{\rho_{1a}} \nabla_T \mu_{1w} = \frac{R_a T}{P - p_v^1} \nabla P - \frac{R_a}{R_w} \frac{p_v^1}{P - p_v^1} \nabla_T \mu_{1w} \quad (2.9)$$

また、化学ポテンシャルの定義より、

$$\nabla_T \mu_{iw} = \nabla \mu_{iw} + S_{iw} \nabla T \quad (i=1,2) \quad (2.10)$$

ただし、 $S_{iw}$  は i 相の水分の部分比エントロピー[J/kgK]である。化学ポテンシャルとして自由水基準の化学ポテンシャルを用い、(2.6)～(2.9)式を 2.1 式に代入して整理すると、拡散方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}[J] &= [D_{ij}] [F_e] \\ [J] &= [q, J_{1w}, J_{1a}, J_{2w}]^T \\ [F_e] &= -[\nabla T, \nabla \mu_{1l}, -F_w, \nabla P, \nabla \mu_{2l} - F_w]^T\end{aligned}\quad (2.11)$$

ただし、行列 $[D_{ij}]$ は、4行4列の行列である。2.11 式の気相の浮力の項 ( $\rho_{1a}F_{1a} + \rho_{1w}F_{1w}$ ) は極めて小さいので無視して表すと

$$\nabla P - (\rho_{1a}F_{1a} + \rho_{1w}F_{1w}) \cong \nabla P$$

となる。また、 $S_{iw} = (\partial\mu_{iw}/\partial T)_{P, \gamma_{2w}(\mu_{iw})}$  である。

ここで、式 2.11 の係数  $D_{ij}$  は広義の伝導率である。行列の対角部の係数  $D_{00}$ 、 $D_{11}$ 、 $D_{22}$ 、 $D_{33}$  はそれぞれ、熱伝導率、気相の水分伝導率、透気率、液相の水分伝導率である。 $D_{01}$ 、 $D_{03}$  及び  $D_{02}$  は、それぞれ拡散の熱効果、圧力の熱効果を示す伝導係数であり、 $D_{10}$ 、 $D_{12}$ 、 $D_{13}$  は気相水分の熱拡散、圧力拡散及び気相水分の干渉効果を表し、 $D_{30}$ 、 $D_{32}$  及び  $D_{31}$  は液相水分の熱拡散、圧力拡散及び気相水分の干渉効果である。 $D_{20}$ 、 $D_{21}$ 、 $D_{23}$  も乾燥空気に対する同様な効果を示す項である。多孔質体は一般に複雑な構造をしており、厳密にはこれらの係数全てを実験によって測定する必要があると考えられるが、これらは全てポテンシャル  $T$ 、 $\mu_{1\rho}$ 、 $P$ 、 $\mu_{2l}$  またはその一部によって変化し、常数とみなすことができず、また相互効果に関する項の測定には相当高精度の測定が必要であること、液水流動  $J_{2w}$  と気相水分流動  $J_{1w}$  の区別を外部からつけることの困難さなどから、その測定値を得ることは一般に困難である。従来理論や実験結果から次のように近似できる。相互効果の程度から判断して  $D_{01}=D_{02}=D_{03}=0$ 、 $D_{13}=D_{31}=0$ 、 $D_{23}=0$  とみなして良い。また同様に、 $D_{10}+D_{20}=0$ 、 $D_{11}+D_{21}=0$  と近似できる。

以上より、通常の状態に対して式 2.11 は次のように書ける。

$$q = -D_{00}\nabla T \quad (2.12a)$$

$$J_{1w} = -D_{10}\nabla T - D_{11}(\nabla\mu_{1l} - F_w) - D_{12}\nabla P \quad (2.12b)$$

$$J_{1a} = -D_{20}\nabla T - D_{21}(\nabla\mu_{1l} - F_w) - D_{22}\nabla P \quad (2.12c)$$

$$J_{2w} = -D_{30}\nabla T - D_{32}\nabla P - D_{33}(\nabla\mu_{2l} - F_w) \quad (2.12d)$$

風圧などにより外部から圧力差が加えられる場合や、強加熱などによる多孔体内部での水分の相変化(蒸発)速度が大きく圧力上昇の生じる場合を除けば、通常  $\nabla P = 0$  とみなすことができる。従って、その場合に必要な式は、 $D_{00}$ 、 $D_{10}$ 、 $\dots$  を、その内容を明示する為に、以下の記号を用いて次のように表現できる。

$$D_{00} = \lambda, \quad D_{10} = \lambda'_{Tg}, \quad D_{30} = \lambda'_{Tl}, \quad D_{11} = \lambda'_{\mu g}, \quad D_{33} \equiv \lambda'_{\mu l}$$

$$q = -\lambda \nabla T \quad (2.13a)$$

$$J_{1w} = -\lambda'_{Tg} \nabla T - \lambda'_{\mu g} (\nabla \mu_{1l} - F_w) \quad (2.13b)$$

$$J_{2w} = -\lambda'_{Tl} \nabla T - \lambda'_{\mu l} (\nabla \mu_{2l} - F_w) \quad (2.13c)$$

ただし、 $\lambda$ は熱伝導率[W/m<sup>2</sup>K]、 $\lambda'_{Tg}$ 、 $\lambda'_{Tl}$ はそれぞれ温度勾配に関する気相、液相水分伝導率[kg/msK]、 $\lambda'_{\mu g}$ 、 $\lambda'_{\mu l}$ はそれぞれ水分化学ポテンシャル勾配に関する気相、液相水分伝導率[kg/ms(J/kg)]を表す。

ここで、水分の状態は局所平衡と仮定する。つまり液相、気相間で平衡していると仮定し、新たに水分化学ポテンシャルを  $\mu \equiv \mu_{1l} = \mu_{2l}$  のように定義する。これを用いて式 2.13b と式 2.13c を足し合わせると全水分流に対する拡散方程式は以下ようになる。

$$J_{1w} = -\lambda'_T \nabla T - \lambda'_\mu (\nabla \mu - F_w) \quad (2.14)$$

ただし、

$$\lambda'_T = \lambda'_{Tg} + \lambda'_{Tl}, \quad \lambda'_\mu = \lambda'_{\mu g} + \lambda'_{\mu l}$$

多孔質体内の含水率が十分大きく飽和状態に近い場合、水蒸気流  $J_{1w}=0$  の時の  $J_w=J_{2w}$  の式は広義の Darcy の式であり、 $\lambda'_\mu$  は Darcy の式の水分伝導率の値と一致する。また、このとき  $\lambda'_T \cong 0$  となり、 $\lambda'_\mu / \rho_w = \lambda'_p$  である。

水分伝導率  $\lambda'_T$ 、 $\lambda'_\mu$  は含水率または水分化学ポテンシャル及び温度の関数であり、その値は乾燥時から飽水時までの含水率の全範囲にわたって、含水率及び温度に強く依存し、常数として扱うことは一般にできない。

### 2.2.3 支配方程式

多孔質体内部の微小容積について、以下に示す仮定を用い、熱及び水分の収支式をたてる。

- 1) 多孔質体内部の水分は気・液相間で常に平衡している。(水分の局所平衡仮定)
- 2) 多孔質体内は均質(Homogeneous)であり、等方性(Isotropic)を有する。
- 3) 履歴(Hysteresis)は存在しない。

これらの仮定の下で、多孔質体の微小容積について水分収支式をたてると、気相及び液相水分のそれぞれについての水分収支は以下となる。

$$\frac{\partial(\Phi_0 - \psi)\rho_{1w}}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{1w} - W \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial\psi\rho_{2w}}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{2w} + W \quad (2.16)$$

ここで、 $\rho_{1w}$ 、 $\rho_{2w}$  はそれぞれ気相、液相水分の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\Phi_0$  は乾燥時の材料の空隙率、 $\Psi$  は材料の体積含水率[-]、 $\Phi_0 - \Psi$  は含水率  $\Psi$  の時の空隙率[-]、 $t$  は時間[s]、 $W$  は水蒸気から液水に相変化水分量[kg/m<sup>3</sup>s]を表す。

2.15 および 2.16 式の和より水分収支式は、

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\Phi_0 - \psi)\rho_{1w} + \rho_{2w}] = -\nabla \cdot J_w \quad (2.17)$$

通常  $(\Phi_0 - \psi)\rho_{1w} \ll \rho_{2w}$  であるので  $(\Phi_0 - \psi)\rho_{1w}$  の寄与は無視できるので、水分収支式は次式となる。

$$\frac{\partial\psi\rho_{2w}}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{2w} \quad (2.18)$$

$J_w$  及び  $J_{1w}$ 、 $J_{2w}$  は拡散方程式 2.14 及び 2.13b、2.13c 式で与えられる。2.18 式の  $J_w$  は温度  $T$  を含むので、水分収支のみで水分場の解析はできず、温度  $T$  に関する関係式が必要である。

熱収支を同様に微小容積について、エンタルピー  $H$  を用いて式をたてると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \Phi_0)\rho_s H_s + \psi\rho_{2w} H_{2w} + (\Phi_0 - \psi)(\rho_a H_a + \rho_{1w} H_{1w})] \\ = -\nabla \cdot q - \nabla \cdot (J_{1w} H_{1w}) - \nabla \cdot (J_{2w} H_{2w}) - \nabla \cdot (J_a H_a) \end{aligned} \quad (2.19)$$

ただし、 $H_s$ 、 $H_a$ 、 $H_{1w}$ 、 $H_{2w}$  はそれぞれ固体実質部、乾燥空気、水蒸気、液水のエンタルピー[J/kg]を表す。



2.19 式を両辺それぞれについて以下のように展開する。

$$\begin{aligned}
 2.19\text{式左辺} &= (1 - \Phi_0) \rho_s \frac{\partial H_s}{\partial t} + H_s \frac{\partial(1 - \Phi_0) \rho_s}{\partial t} + \psi \rho_{2w} \frac{\partial H_{2w}}{\partial t} + H_{2w} \frac{\partial \psi \rho_{2w}}{\partial t} \\
 &\quad + (\Phi_0 - \psi) \rho_a \frac{\partial H_a}{\partial t} + H_a \frac{\partial(\Phi_0 - \psi) \rho_a}{\partial t} + (\Phi_0 - \psi) \rho_{1w} \frac{\partial H_{1w}}{\partial t} + H_{1w} \frac{\partial(\Phi_0 - \psi) \rho_{1w}}{\partial t} \\
 2.19\text{式右辺} &= -\nabla \cdot q - H_{1w} \nabla \cdot J_{1w} - J_{1w} \cdot \nabla H_{1w} - H_{2w} \nabla \cdot J_{2w} - J_{2w} \cdot \nabla H_{2w} - H_a \nabla \cdot J_a - J_a \cdot \nabla H_a
 \end{aligned}$$

ここで、気相及び液相の水分収支式 2.15、2.16 式と乾燥空気収支式

$$\frac{\partial(\Phi_0 - \psi) \rho_a}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{1a} \quad (2.20)$$

にエンタルピー<sup>°</sup>  $H_{1w}$ 、 $H_{2w}$ 、 $H_a$  をそれぞれ掛ける。

$$H_{1w} \frac{\partial(\Phi_0 - \psi) \rho_{1w}}{\partial t} = -H_{1w} \cdot \nabla J_{1w} - H_{1w} W \quad (2.21)$$

$$H_{2w} \frac{\partial \psi \rho_{2w}}{\partial t} = -H_{2w} \cdot \nabla J_{2w} - H_{2w} W \quad (2.22)$$

$$H_a \frac{\partial(\Phi_0 - \psi) \rho_a}{\partial t} = -H_a \cdot \nabla J_{1a} \quad (2.23)$$

気相内のガスは完全ガス、液相内の水分はその濃度に無関係とすると、各成分の定圧比熱を  $C_i$  と記号すると、エンタルピーの変化  $dH_i$  は、

$$dH_i = C_i dT \quad (i=s, a, 1w, 2w) \quad (2.24)$$

となる。また、 $H_{1w} - H_{2w}$  は水の気相から液相への相変化熱であり、これを  $\gamma$  と定義する。  
2.21～2.24 式を 2.19 式に代入して、整理すると以下となる。

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} + C_{1w} J_{1w} \cdot \nabla T + C_{2w} J_{2w} \cdot \nabla T + C_a J_a \cdot \nabla T = -\nabla \cdot q + \gamma W \quad (2.25)$$

ただし、

$$C\rho = C_s \rho_s (1 - \Phi_0) + C_a \rho_a (\Phi_0 - \psi) + C_{1w} \rho_{1w} (\Phi_0 - \psi) + C_{2w} \rho_{2w} \psi$$

### 2.2.4 本論文で用いる基礎方程式

松本の理論に従い、水分及び熱の収支式としてそれぞれ式 2.17、2.25 を提示した。ここでは、これらに対して妥当と考えられる近似を行い最終的な基礎方程式を示す。

水分収支式 2.17 式において、一般的に以下の仮定が成立する。

- 1)  $\frac{\partial \rho_{2w} \psi}{\partial t}$  に比して  $\frac{\partial \rho_{1w} (\Phi_0 - \psi)}{\partial t}$  は十分小さい。
- 2) 含水率は温度依存が小さいことから  $\psi \cong f(\mu)$  とおける。

以上から、式 2.17 の左辺は

$$2.17\text{式左辺} \cong \frac{\partial \rho_{2w} \psi}{\partial t} \cong \rho_{2w} \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t}$$

となる。

熱収支式 2.25 式において、一般的に以下の仮定が成立する。

- 1) 液水移動による顕熱流  $C_{1w} J_{1w} \cdot \nabla T + C_{2w} J_{2w} \cdot \nabla T + C_a J_a \cdot \nabla T$  は潜熱流  $\gamma \nabla \cdot J_{1w}$  に比して小さい。
- 2)  $\gamma \frac{\partial \rho_{1w} (\Phi_0 - \psi)}{\partial T}$  は  $C \rho \frac{\partial T}{\partial t}$  に比して小さい。

式 2.17 の水分収支式と式 2.25 の熱収支式は以上の結果をまとめて、

$$\rho_{2w} \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda'_\mu (\nabla \mu - F_w)] + \nabla \cdot (\lambda'_T \nabla T) \quad (2.26)$$

$$C \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(\lambda + \gamma \lambda'_{Tg}) \nabla T] + \nabla \cdot [\gamma \lambda'_{\mu g} (\nabla \mu - F_w)] \quad (2.27)$$

となる。式 2.26 及び式 2.27 を、地下構造物の壁体及び周辺地盤の熱・水分性状解析における基礎方程式とする。

### 2.2.5 境界条件式

空気と接する材料の表面では、対流による熱伝達層と相似な水分伝達層が生じる。気体内拡散方程式を用い、対流熱伝達率と相似な取り扱いをすることにより、湿気伝達率

$\alpha'_m [kg / (m^2 s Pa)]$  が定義できる。伝達層を流れる水分流  $J_w = J_{1w} [kg / m^2 s]$  は、

$$J_w = \alpha'_m (p_0 - p_i) \quad (2.28)$$

となる。ここで、 $p_0$ 、 $p_i$  はそれぞれ固体表面、空気の水蒸気圧[Pa]である。

熱と水分の拡散の相似性より

$$\frac{\alpha_c}{\alpha'_m C_m \rho_m R_v T} = Le \quad (2.29)$$

ここで、 $\alpha_c$  は対流熱伝達率[W/m<sup>2</sup>K]、 $C_m$  は湿り空気の定圧比熱[J/kgK]、 $\rho_m$  は湿り空気密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $R_v$  は水蒸気の気体定数、 $Le$  はレイヌ数[-]  $\left( Le = \left( \frac{a}{D} \right)^{1-n}, n \cong \frac{1}{3} \right)$ 、 $a$  は湿り空気の温度伝導率[m<sup>2</sup>/s]、 $D$  は湿り空気中の水蒸気の拡散係数[m<sup>2</sup>/s]である。通常  $Le \cong 1$  と近似できる。

次に式 2.28 を温度と水分化学ポテンシャルを用いて表す。

$$J_w = \alpha'_\mu (\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T (T_0 - T_i) \quad (2.30)$$

ただし、

$$\alpha'_\mu = \alpha'_m \left( \frac{\partial p}{\partial \mu} \right)_T, \alpha'_T = \alpha'_m \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_\mu \quad (2.31)$$

ここで、 $\mu_0$ 、 $\mu_i$  はそれぞれ空気、固体表面の水分化学ポテンシャル[J/kg]、 $T_0$ 、 $T_i$  はそれぞれ空気、固体表面の絶対温度[K]、 $\alpha'_\mu$ 、 $\alpha'_T$  はそれぞれ水分化学ポテンシャル、温度勾配による水分伝達率[kg/(msJ/kg)]、[kg/msK]を表す。

空気と接する固体表面での水分移動は、式 2.14 と式 2.31 を併せて以下のようになる。

$$\alpha'_\mu (\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T (T_0 - T_i) + J_p = -\lambda'_\mu \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - n F_w \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (2.32)$$

ここで、 $J_p$  は降雨量[kg/m<sup>2</sup>s]、 $n$  は固体表面の内向法線ベクトルを表す。

また、地表面で水膜が発生する場合、

$$J_p > -\lambda'_\mu \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - n F_w \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s - \alpha'_\mu (\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T (T_0 - T_i) \quad (2.33)$$

となり、水膜に関する境界条件式は以下ようになる。この時、水膜の厚さは充分小さく水の熱抵抗は無視できるものとみなす。

$$\mu_i = F_w h \quad (2.34)$$

$$h = \frac{1}{\rho_{2w}} \int \left[ J_p + \alpha'_\mu (\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T (T_0 - T_i) + \lambda'_\mu \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s + n F_w \right) + \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \right] dt \quad (2.35)$$

次に空気と接する材料表面での熱収支を考える。水分の相変化に伴う熱、水分移動に伴う顕熱移動を考慮してエンタルピー流を考える。

$$q_{s(a)} + q_r + J_{1w(a)} H_{1w} + J_p H_{2w} = q_{s(s)} + J_{1w(s)} H_{1w} + J_{2w(s)} H_{2w} \quad (2.36)$$

ただし、 $J_{1w(a)}$ は空気層側の気相水分伝達による表面水分流[kg/m<sup>2</sup>s]、 $J_p$ は降雨による液相の表面水分流[kg/m<sup>2</sup>s]、 $J_{1w(s)}$ は材料側の気相水分の表面水分流[kg/m<sup>2</sup>s]、 $J_{2w(s)}$ は材料側の液相水分の表面水分流[kg/m<sup>2</sup>s]、 $q_{s(a)}$ は空気層側の対流伝達による表面熱流[W/m<sup>2</sup>]、 $q_r$ は日射吸収、低温輻射による表面熱流[W/m<sup>2</sup>]、 $q_{s(s)}$ は材料側の熱伝導による表面熱流[W/m<sup>2</sup>]を表し、これらはそれぞれ以下のように表される。

$$q_{s(a)} = \alpha_c (T_0 - T_i) \quad (2.37a)$$

$$q_r = \alpha_r (T_0 - T_i) + q_{sol} + q_{noc} \quad (2.37b)$$

$$J_{1w(a)} = \alpha'_\mu (\mu_0 - \mu_i) + \alpha'_T (T_0 - T_i) \quad (2.37c)$$

$$J_{1w(s)} = -\lambda'_{\mu g} \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - n F_w \right) - \lambda'_{T g} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (2.37d)$$

$$J_{2w(s)} = -\lambda'_{\mu l} \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - n F_w \right) - \lambda'_{T l} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (2.37e)$$

ここで、 $\alpha_r$ は輻射熱伝達率[W/m<sup>2</sup>K]、 $q_{sol}$ は日射吸収量[W/m<sup>2</sup>]、 $q_{noc}$ は夜間輻射量[W/m<sup>2</sup>]を表す。

水分に関する境界条件式は式 2.33 を上記表現形式を用いて示す。

$$J_{1w(a)} + J_p = J_{1w(s)} + J_{2w(s)} \quad (2.38)$$

式 2.36 及び式 2.38 から  $J_{2w}(s)$  を消去して整理すると、

$$q_{s(a)} + q_r + rJ_{1w(a)} = q_{s(s)} + rJ_{1w(s)} \quad (2.39)$$

ただし、 $r=H_{1w}-H_{2w}$  を用いた。

2.36 式のそれぞれの項を書き直すと、以下のような空気と接する固体表面の熱に関する境界条件式となる。

$$\begin{aligned} & \left( \alpha + r\alpha_T' \right) (T_0 - T_i) + r\alpha_\mu' (\mu_0 - \mu_i) + q_{sol} + q_{noc} = \\ & - \left( \lambda + r\lambda_{T_g}' \right) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s - r\lambda_{\mu_g}' \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - nF_w \right) \end{aligned} \quad (2.40)$$

異種材料境界における熱及び水分境界条件は以下のようにになる。

$$\begin{aligned} & {}_A\mu = {}_B\mu (= \mu), \quad {}_AT = {}_BT (= T) \\ & {}_A\lambda_\mu' \left( \frac{\partial {}_A\mu}{\partial n} \Big|_b - nF_w \right) - {}_A\lambda_T' \frac{\partial {}_AT}{\partial n} \Big|_b = -{}_B\lambda_\mu' \left( \frac{\partial {}_B\mu}{\partial n} \Big|_b - nF_w \right) - {}_B\lambda_T' \frac{\partial {}_BT}{\partial n} \Big|_b \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} & - \left( {}_A\lambda + r{}_A\lambda_{T_g}' \right) \frac{\partial {}_AT}{\partial n} \Big|_b - r{}_A\lambda_{\mu_g}' \left( \frac{\partial {}_A\mu}{\partial n} \Big|_b - nF_w \right) = \\ & - \left( {}_B\lambda + r{}_B\lambda_{T_g}' \right) \frac{\partial {}_BT}{\partial n} \Big|_b - r{}_B\lambda_{\mu_g}' \left( \frac{\partial {}_B\mu}{\partial n} \Big|_b - nF_w \right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

### 2.3 地下空間の熱・水分の収支式

地下構造物の室内空気の熱及び水分の収支式は以下のようになる。

$$c\gamma V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha_i (T_j - T_r) + c\gamma N_v V (T_0 - T_r) + Q_r \quad (2.43)$$

$$c'\gamma V \frac{\partial p_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha_m' (p_j - p_r) + c'\gamma N_v V (p_0 - p_r) + J_r \quad (2.44)$$

ここで、 $c\gamma$  は空気の容積比熱[J/m<sup>3</sup>K]、 $c'\gamma$  は湿気容積[kg/m<sup>3</sup>Pa]、 $V$  は室容積[m<sup>3</sup>]、 $N_v$  は換気回数[1/s]、 $Q_r$ 、 $J_r$  はそれぞれ室内の熱及び水分の発生量[W]、[kg/s]、 $T_0$ 、 $T_r$ 、 $T_j$  はそれぞれ外気、室内及び  $j$  番目の壁表面の温度[K]、 $S_j$  は  $j$  番目の壁表面積[m<sup>2</sup>]、 $\alpha_i$  は室内側表面の総合熱伝達率[W/m<sup>2</sup>K]、 $\alpha_m'$  は室内側表面の湿気伝達率[kg/m<sup>2</sup>sPa]、 $p_0$ 、 $p_r$ 、 $p_j$  はそれぞれ外気、室内及び  $j$  番目の壁表面の水蒸気圧[Pa]を表す。なお、式 2.5 より水蒸気圧と温度、水分化学ポテンシャルの関係は得られる。

### 2.4 第2章のまとめ

本章では、地下構造物とその周辺地盤における熱負荷及び熱・水分性状を予測するための基礎となる地下構造物の躯体及び地盤における熱・水分の移動方程式を示した。松本によって定式化されたこの理論基礎式は局所平衡の仮定をおいて、熱及び水分の移動ポテンシャルとして温度及び自由水基準の水分化学ポテンシャルを用いて表現したものである。この基礎式は躯体及び地盤内部の水分状態が蒸気拡散支配状態から飽水状態にわたる全ての含水率の範囲に対して適用できるものであり、熱移動について伝熱、対流、水分移動に伴う熱流を、水分の移動は液状水、水蒸気の形で起こるものを含んだ式となっている。次に地下構造物内空間の熱・水分の収支式を示した。熱及び水分の移動ポテンシャルとして温度と水蒸気圧を用いて表現したものである。水分の移動ポテンシャルとして水分化学ポテンシャルと水蒸気圧が用いられているが、両者の関係は自由水基準の水分化学ポテンシャルの定義から一意に決定される。以上から熱及び水分の移動ポテンシャルとして温度、水分化学ポテンシャルを用いた基礎式により統一的に地下構造物と周辺地盤における熱負荷及び熱・水分性状の解析を行うことが可能になる。

## 第 3 章

### 解析対象の地下構造物及び周辺地盤における 熱・水分性状と熱負荷の理論解析法

## 第3章 解析対象の地下構造物及び周辺地盤における

### 熱・水分性状と熱負荷の理論解析法

#### 3.1 はじめに

本章では、解析対象である地下構造物と第2章で示した基礎方程式を用いて内部発熱条件下での地下構造物及びその周辺地盤の熱負荷、及び熱・水分性状における理論解析を行う方法について述べる。

熱・水分同時移動理論における材料の熱・水分関連物性値は材料内の水分状態（含水率または水分化学ポテンシャル）への依存性が強く非線形性が大きい。したがって、内部発熱条件下での地下構造物とその周辺地盤の熱負荷及び熱・水分性状を精度良く予測する為には数値解析による理論解析を行わなければならない。

以下に第4章ならびに第6章で解析対象となる実験地下室の躯体と周辺地盤の材料、つまりコンクリートと砂質土壌の熱・水分関連物性値を示す。次に、第5章に示す熱・水分同時理論による解析を行う為の基礎方程式の差分法、数値解析法、非線形性が大きい材料の物性値の取り扱い方などについて述べる。

#### 3.2 解析対象

解析対象とする地下構造物は1997年に三重大学(三重県津市)構内の建築学科棟脇の敷地に建設された実験地下室とする。実験地下室は完全に埋設されており、地表面から地下室の天井面までの埋設深さは1.0[m]である。実験地下室の寸法は、長軸内法長さ3.5[m]、短軸内法長さ2.0[m]、内法高さ2.0[m]である。また、実験地下室の床面積及び体積はそれぞれ7[m<sup>2</sup>]、14[m<sup>3</sup>]である。図3.1～3.4に完全埋設型実験地下室の俯瞰図、配置図、平面図、断面図を示す。

実験地下室の天井、床及び側壁は全て鉄筋コンクリートで構成されており、防湿・防水処理は施していない。実験地下室躯体の寸法は、天井及び側壁の厚さ0.25[m]、床の厚さ0.3[m]である。さらに、床下には捨てコンクリートと砕石地業を併せて厚さ0.3[m]敷かれている。実験地下室と外界をつなぐ部分は0.6[m]×0.6[m]の出入り口、給気筒、排気筒及び配線用パイプだけであり開口部は存在しない。実験期間の間は実験地下室への熱的外乱の影響を極力抑える為に天井高さの地下室への出入り口下部(地下室の天井面高さ)を断熱材(フォームポリスチレン厚さ0.1[m])で被う。



### 第3章 解析対象の地下構造物及び周辺地盤における熱・水分性状と熱負荷の理論解析法

実験地下室の換気は天井面に設けた給気筒と排気筒によって行い、排気筒の出口に設置された可変風量ファンによって換気量の調整を行う。実験地下室が建設された敷地は、常水面が地盤面から約 3.0[m]の深さにある為、地下室の床面を常水面より高く保ち、天井面を覆土する目的で約 1.0[m]の盛り土を行っている。盛り土の水平方向における領域は実験地下室の東西南北の外壁から 8.0[m]離れた距離まで設けた。

なお、今回の解析では図 3.2 のようにこの地下室の短辺方向の 2 次元モデルとした。また、図 3.3 のように実験地下室の床は厚さ 0.3[m]のコンクリートの下に厚さ 0.3[m]の捨てコンクリートと砕石事業が敷かれている為、本解析では床を厚さ 0.6[m]のコンクリートとした。なお、本来は 3 次元系で検討を行うべきであるが、計算の簡略化の為、ここでは 2 次元系としている。2 次元熱水分同時移動モデルによる予測精度については別途検討を行っており、文献[18]を参照されたい。水平方向に対する境界面は地下室の外壁面から 8.0[m]とし、地盤底部境界面は深さ 16.5[m]とした。

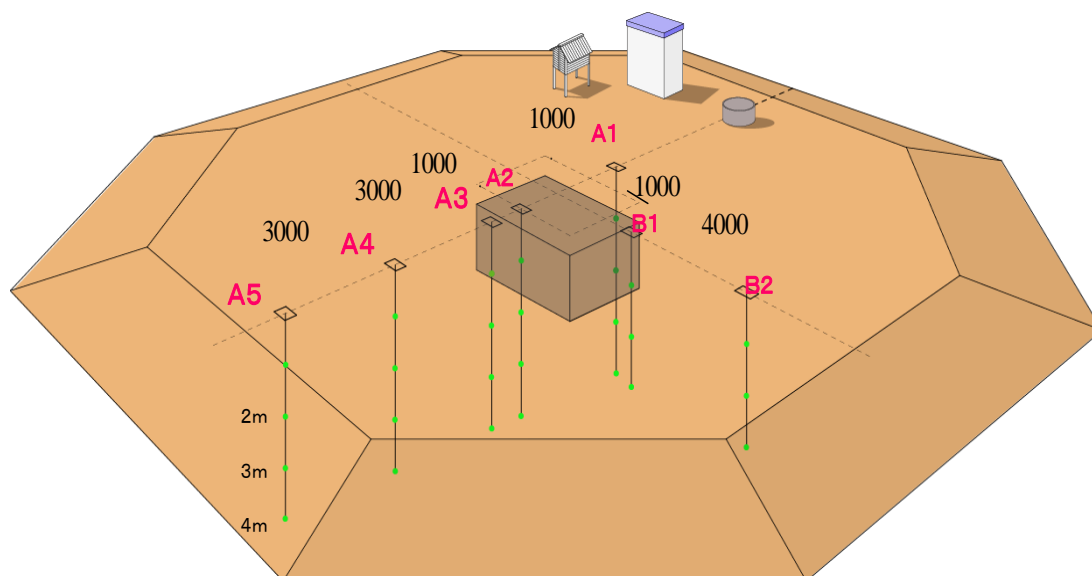


図 3.1 実験地下室の俯瞰図

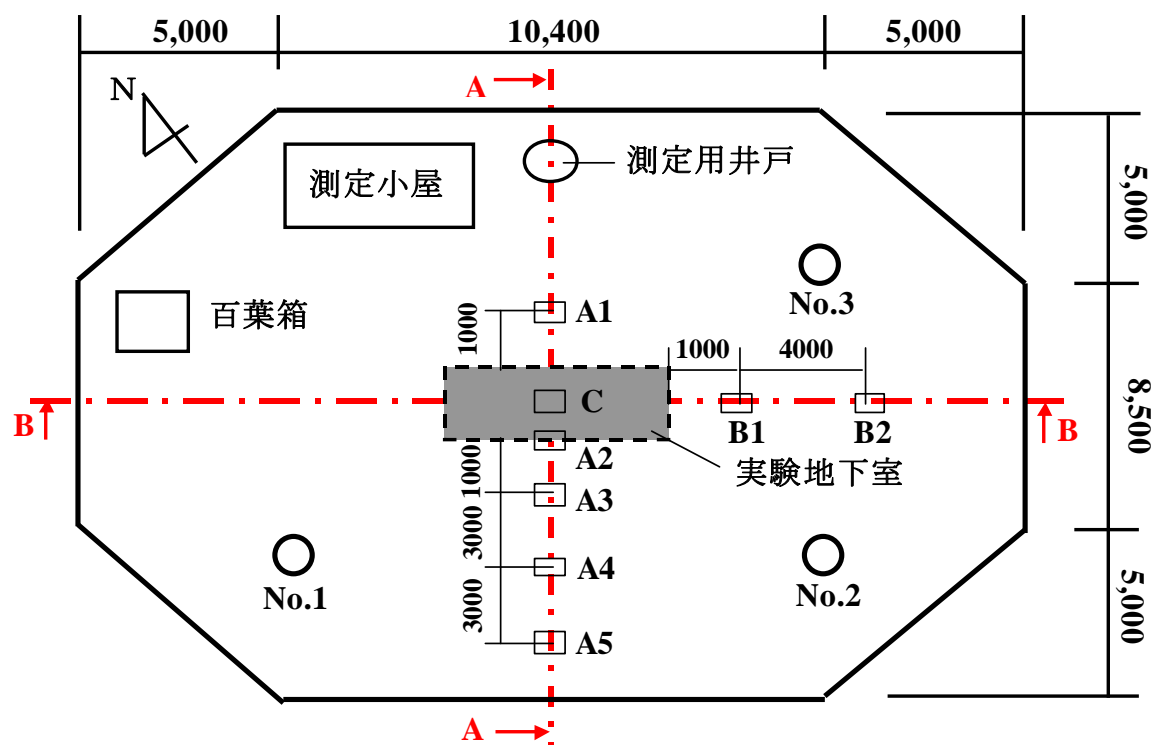


図 3.2 実験地下室の配置図 (単位: mm)

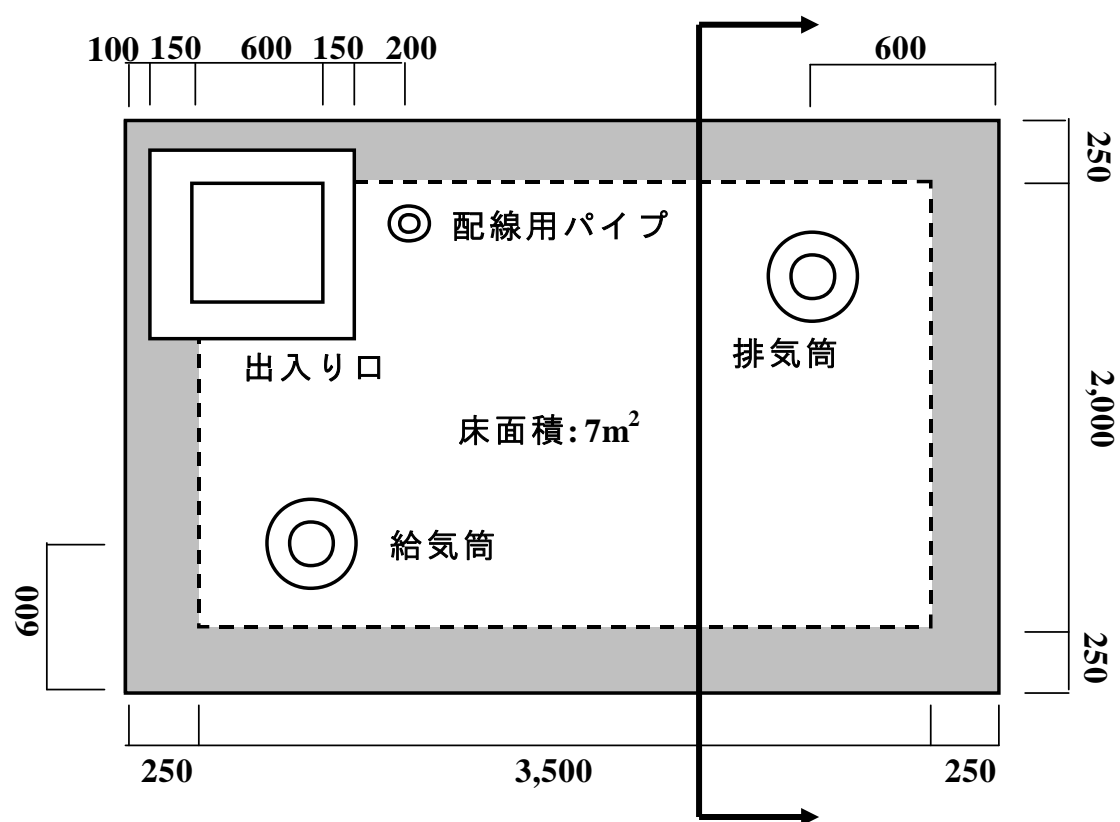


図 3.3 実験地下室平面図と 2 次元断面位置

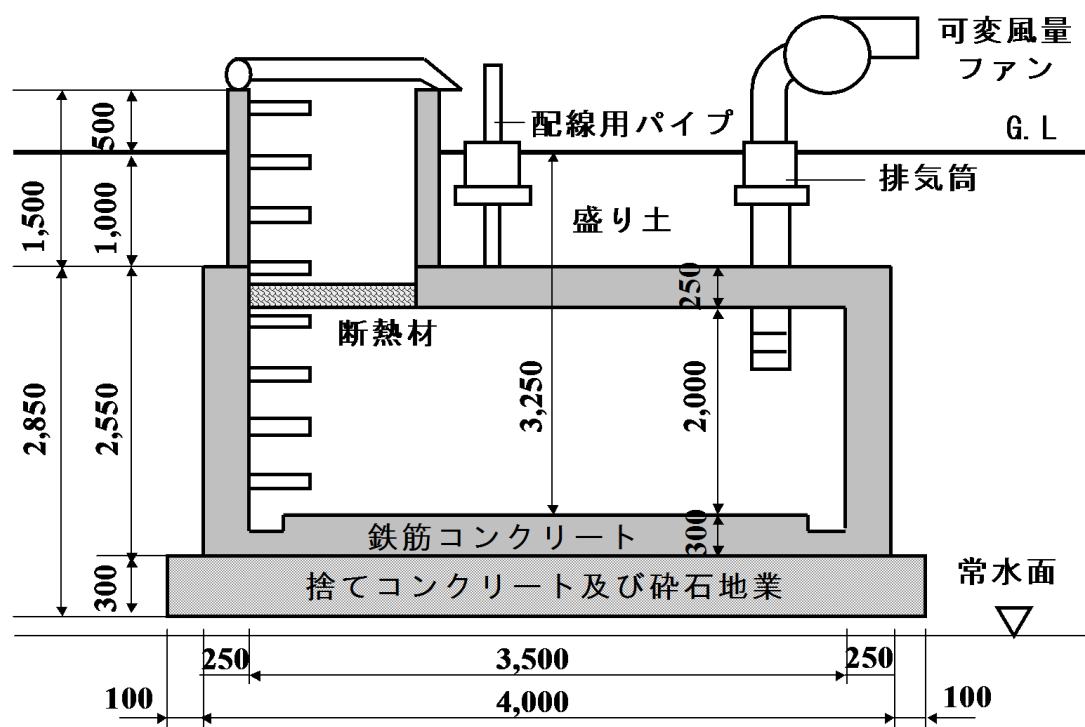


図 3.4 実験地下室の断面図 (単位: mm)

### 3.3 解析に用いる物性値

#### 3.3.1 コンクリートの物性値

本解析に用いるコンクリートの物性値は、現在不飽和領域から飽和領域まで適用できる物性値が存在しない為、既存の値と Goran[25]の測定値から推定を含めて構成した小椋[16]による物性値を用いた。また、ここで用いたコンクリートの最大空隙率は 15.97[vol%]であり、関連物性値は小椋の自然状態下地下構造物の熱・水分性状に関する研究[17]によってその適用の有効性が証明されたものである。

コンクリートにおける既存の測定値としては、Goran による平衡含水率及び湿気伝導率[25]、含水率の変化も考慮した熱伝導率[26]、透水係数[27]がそれぞれ独立に測定されている。しかし、温度及び水分化学ポテンシャル勾配に関する気相・液相水分伝導率においては、不飽和領域から飽和領域まで統一的に測定されたものが無い為、湿気伝導率及び透水係数の測定値から推定を行った[16]。

気相水分の流れ  $J_{1w}$  [kg/m<sup>2</sup>s] は以下の式で表される。

$$J_{1w} = -\lambda_p' \nabla P_v \quad (3.1)$$

ここで、 $\lambda_p'$  は湿気伝導率 [kg/msPa]、 $P_v$  は水蒸気圧 [Pa] を表す。

上式を移動ポテンシャルとして温度及び水分化学ポテンシャルを用いて分離すると、

$$J_{1w} = -\lambda_{\mu g}' \nabla \mu - \lambda_{Tg}' \nabla T \quad (3.2)$$

ただし、

$$\lambda_{\mu g}' = \lambda_p' \frac{\partial p_v}{\partial \mu}, \quad \lambda_{Tg}' = \lambda_p' \frac{\partial p_v}{\partial T} \quad (3.3)$$

となる。

なお、上式の右辺の微分は相対湿度  $h = p_v/p_{vs}$  [-]、式 2.5 を用いて以下のように表される。

$$\frac{\partial p_v}{\partial \mu} = h \frac{\partial p_{vs}}{\partial \mu} + p_{vs} \frac{\partial h}{\partial \mu} = p_{vs} \frac{\partial h}{\partial \mu} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial T} = h \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} + p_{vs} \frac{\partial h}{\partial T} = h \left( \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - p_{vs} \frac{\mu}{R_v T^2} \right) \quad (3.5)$$

水分化学ポテンシャル勾配及び温度勾配に関する気相水分伝導率は、湿気伝導率から式 3.3～3.5 を用いて決定される。ただし、ここで用いた測定値は温度 20℃ 一定の状態における値である為、温度の補正が必要である。このような温度補正は式 3.4 と 3.5 の温度変化に関する項について比をとって以下のように決定する。

$$\lambda_{\mu g}' = \lambda_{\mu g}'|_{\theta=20^\circ\text{C}} \cdot \frac{p_{vs}}{p_{vs}|_{\theta=20^\circ\text{C}}} \quad (3.6)$$

$$\lambda_{Tg}' = \lambda_{Tg}'|_{\theta=20^\circ\text{C}} \cdot \frac{\frac{\partial p_{vs}}{\partial T}}{\frac{\partial p_{vs}}{\partial T}|_{\theta=20^\circ\text{C}}} \quad (3.7)$$

ここで、添え字  $\theta = 20^\circ\text{C}$  は 20℃ の時の値を意味する。

飽和時の温度場における液相水分流  $J_{2w}$  [kg/m<sup>2</sup>s] はダルシー則より以下ようになる。

$$J_{2w} = -\rho_w K \nabla \Psi \quad (3.8)$$

ここで、 $K$  は透水係数[m/s]、 $\Psi$  は水頭の高さ[m]である。

水頭の高さと水分化学ポテンシャルとの関係は以下ようになる。

$$\mu = \Psi g \quad (3.9)$$

ここで、 $g$  は重力加速度[m/s<sup>2</sup>]である。

移動ポテンシャルを水分化学ポテンシャルとした場合の水分流は、

$$J_{2w} = -\lambda'_{\mu} \nabla \mu \quad (3.10)$$

ただし、

$$-\lambda'_{\mu} = K \frac{\rho_w}{g} \quad (3.11)$$

となる。

以上の湿気伝導率及び透水係数、気相・液相の水分伝導率の関係を用いて、以下の手順で水分伝導率を決定した。

- 1) 湿気伝導率を温度及び水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率に分散した。相対湿度 95%までは、この分散したデータを用いて温度勾配に関する気相水分伝導率の近似曲線を用い、95%以上の領域では値がゼロへと近づくように作成する。つまり、気相水分移動は相対湿度 95%までの領域で支配的であると仮定した。
- 2) 温度勾配に関する気相水分伝導率から水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率を換算した。
- 3) 透水係数を飽和時の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率に換算し、水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率の測定値と併せてプロットし、2) で求めた気相水分伝導率の近似曲線値を差し引き、これを水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分の伝導率とし近似曲線を作成する。
- 4) 温度勾配に関する液相水分伝導率はダルシー則に従うとしてゼロとする。

以下にコンクリートにおける測定値及び推定値から体積含水率の領域別に決定した近似式を示す。

$$\psi = \begin{cases} 0 & (10.1694 \leq \log_{10}(-\mu)) \\ -0.0098 + \frac{0.06395}{\log_{10}(-\mu) - 3.6441} & (5.298 \leq \log_{10}(-\mu) < 10.1694) \\ -3.065454 + 2.267467 \times \log_{10}(-\mu) \\ -5.208352 \times 10^{-1} \times [\log_{10}(-\mu)]^2 \\ + 3.833344 \times 10^{-2} \times [\log_{10}(-\mu)]^3 & (3.768 \leq \log_{10}(-\mu) < 5.298) \\ -0.1639 + \frac{0.03518}{\log_{10}(-\mu) - 4.9593} & (-3 \leq \log_{10}(-\mu) < 3.768) \\ 0.2412 \times \mu + 0.15972 & (\log_{10}(-\mu) < -3) \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\lambda'_{T_g} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = \begin{cases} 10^{-9.8729 - \frac{0.010101}{\psi}} & (0 < \psi \leq 0.032964) \\ 10^{-10.4893 + 10.3883\psi - 56.45732\psi^2 + 806587.5\psi^3} & (0.032964 < \psi \leq 0.1278) \\ 10^{-80635(\psi-0.13)^2 - 8.361} & (0.1278 < \psi \leq 0.15972) \end{cases} \quad (3.13)$$

$\lambda'_{T_g}$  と  $\lambda'_{\mu g}$  は以下のような関係がある[27]。

$$\lambda'_{\mu g} = \frac{\lambda'_{T_g}}{R_v T \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T}} \quad (3.14)$$

$$\lambda'_{\mu d} = \exp^{-75.10212 - 350007\psi} \quad (3.15)$$

$$\lambda' = 1.3 + 3.5 \times \psi \quad (3.16)$$

なお、上記の近似式は温度 20℃における値である為、温度補正が必要である。温度補正において気相水分伝導率には式 3.6 と 3.7 を用い、液相水分伝導率は密度及び粘性の変化は小さいものとして無視する。

コンクリートの見かけの容積比熱は含有水分の影響を考慮する為、表 3.1 に示すコンクリートの固体実質部の容積比熱に含水率に応じた水分の容積比熱を加える。また、図 3.5～3.9 に本研究に用いたコンクリートの平衡含水率、温度勾配あるいは水分化学ポテンシャル勾配に関する気相・液相水分伝導率及び熱伝導率を示す。

$$c_c \rho_c = 233520 + \rho_{2w} \psi \times 4186.05 \quad [J/m^3 K] \quad (3.17)$$

表 3.1 コンクリートの固体実質部の容積比熱

比重量	2303.2	[kg/m <sup>3</sup> ]
比熱	1100	[J/kgK]
容積比熱	233520	[J/m <sup>3</sup> K]

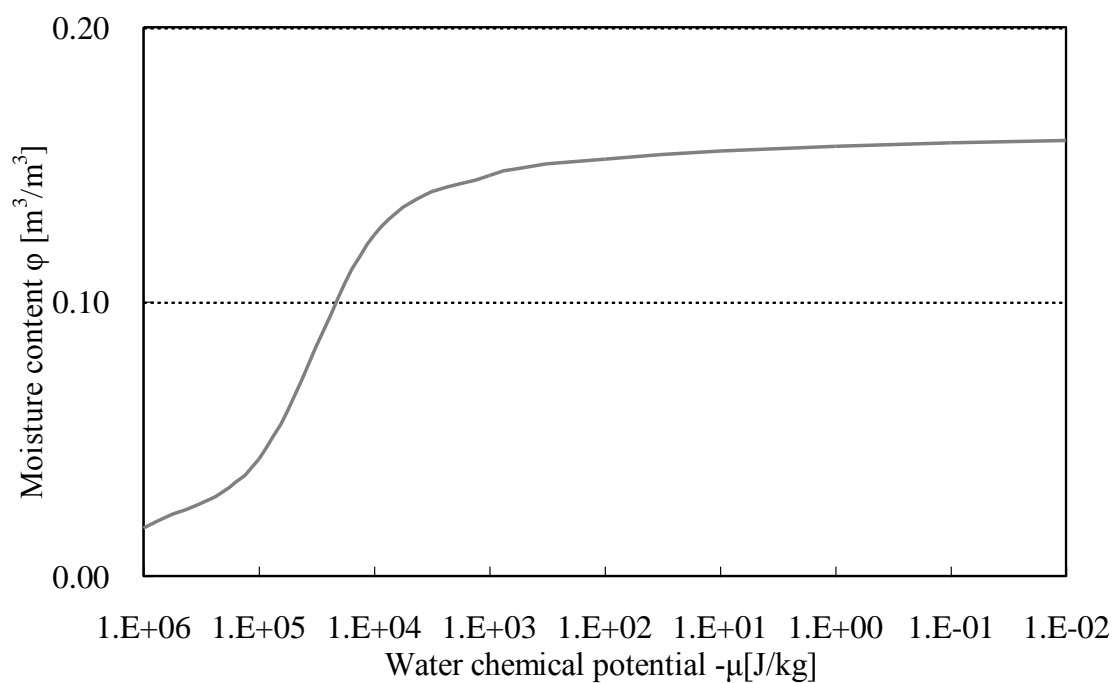


図 3.5 コンクリートの含水率-水分化学ポテンシャル関係

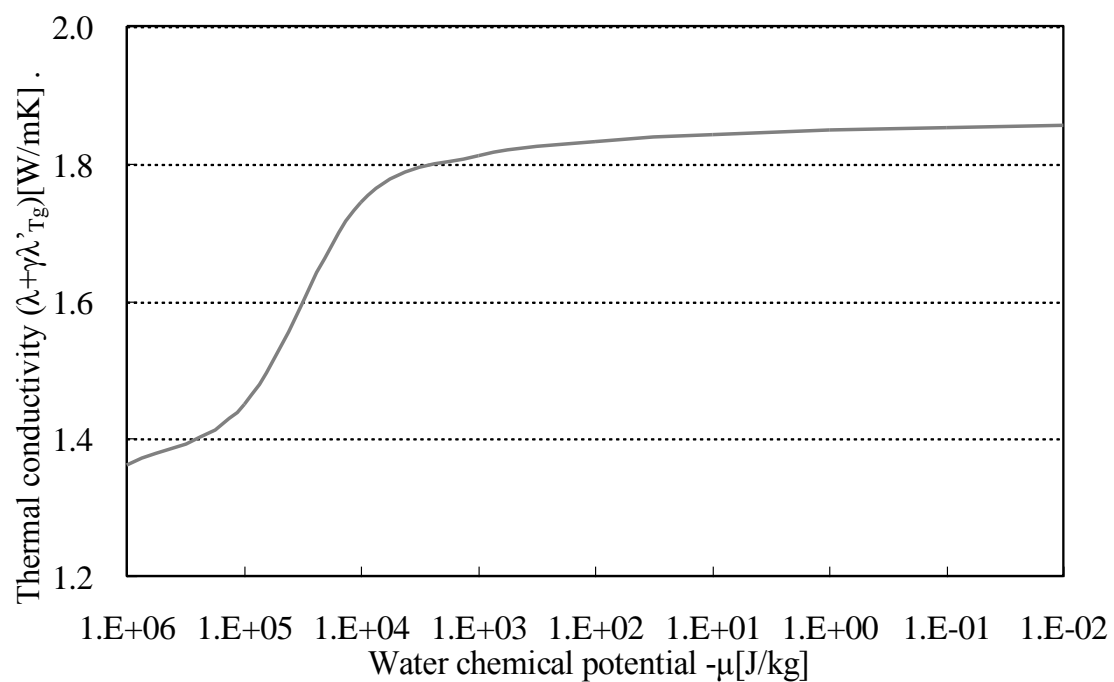


図 3.6 コンクリートの熱伝導率

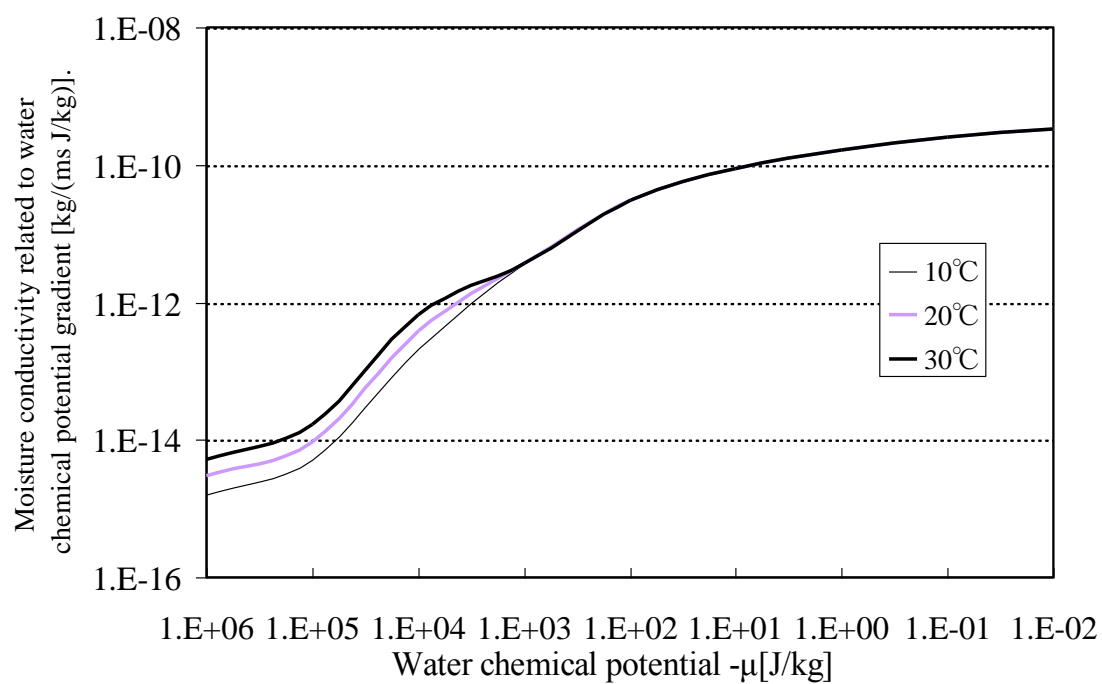


図 3.7 コンクリートの水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率( $\lambda'_{\mu}$ )



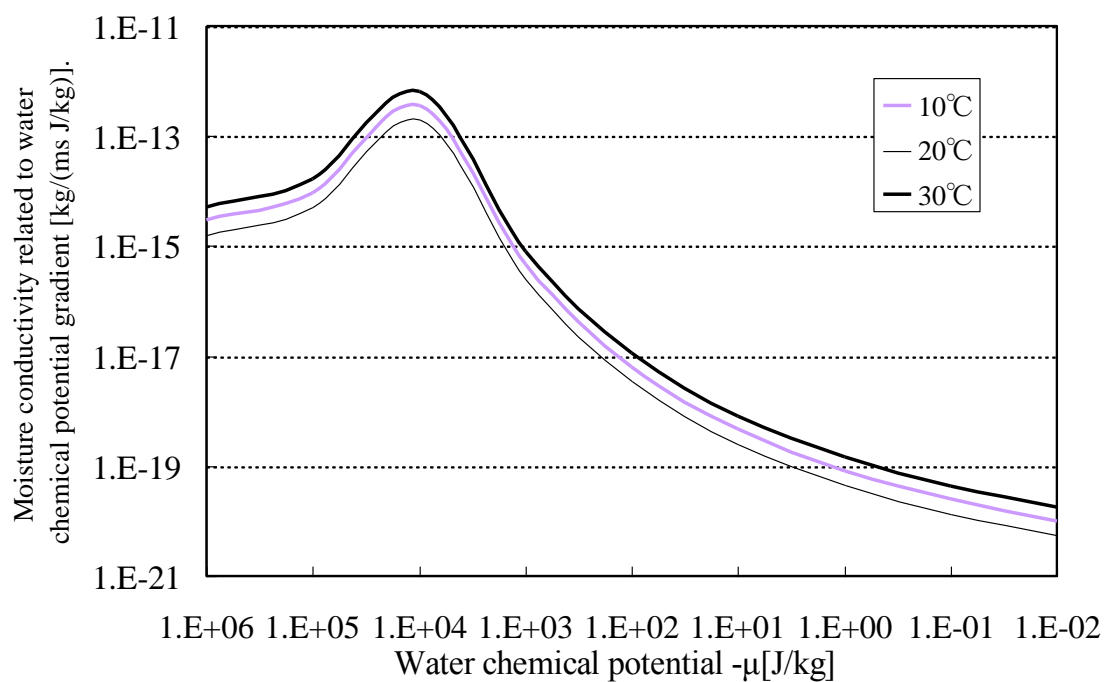


図 3.8 コンクリートの水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率( $\lambda'_{\mu g}$ )

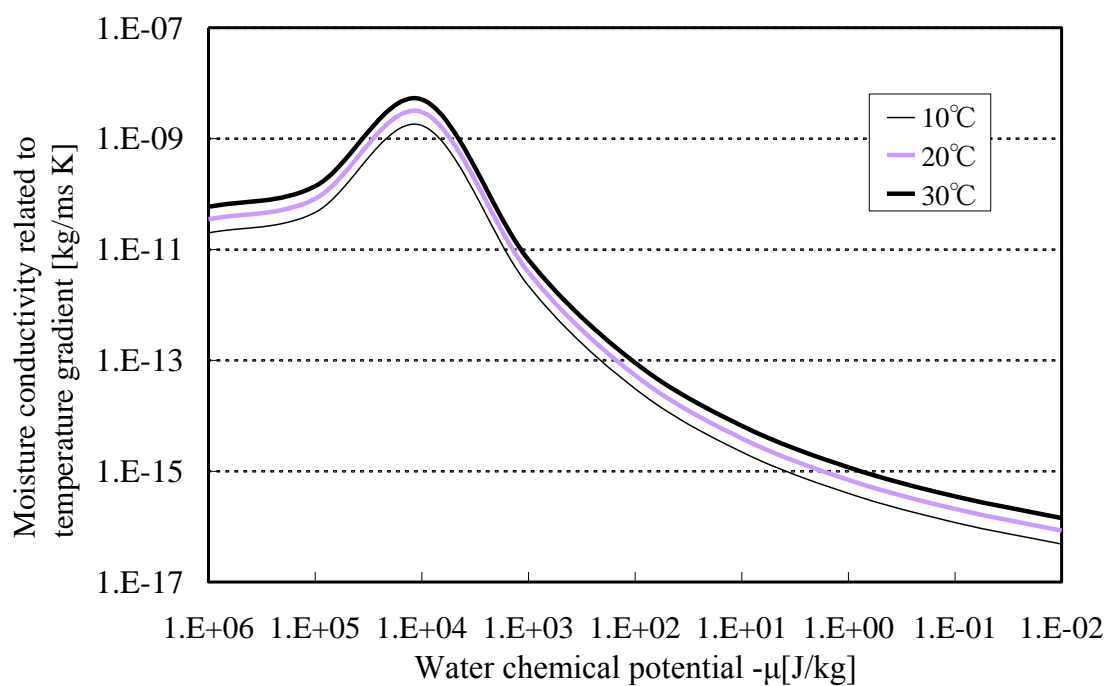


図 3.9 コンクリートの温度勾配に関する水分伝導率( $\lambda'_T$ )

### 3.3.2 砂質土壌の物性値

本研究の対象である実験地下室の周辺地盤はボーリング調査の結果から Plainfield Sand、つまり砂質土壌であることを示した。砂質土壌の水分拡散係数及び熱伝導率は Jury[23]によって統一的に測定された値が存在する。また、砂質土壌の成分は石英砂 90[%]、粘土 5[%]以下、その他有機水分で構成されており、最大空隙率は 37.5[%]である。砂質土壌の水分伝導率における移動ポテンシャルは温度と含水率であり、Jury によって測定された各拡散係数の近似式を以下に示す。

$$a \times 10^{(0.137373 \times 10^4) \psi} \quad (\psi \leq 0.0047)$$

$$D_{\psi g} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = a \times 10^{0.110362 \times 10 + (-0.495709 \times 10^2) \psi + (0.296899 \times 10^4) \psi^2 + (0.476857 \times 10^5) \psi^3} \quad (0.0047 < \psi \leq 0.35)$$

$$a \times 10^{(-0.669523) + (-0.444095 \times 10^2) \psi} \quad (\psi \leq 0.0047) \quad (3.18)$$

$$D_{\psi l} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = a \times 6.56635 \times \psi \quad (\psi \leq 0.0079)$$

$$a \times 10^{-0.173466 \times 10 + (0.589689 \times 10^2) \psi + (-0.263483 \times 10^3) \psi^2 + (0.408122 \times 10^3) \psi^3} \quad (0.0079 < \psi) \quad (3.19)$$

$$D_{Tg} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = a \times 0.028836 (1 - e^{-250\psi}) \quad (\psi \leq 0.02)$$

$$a \times 10^{-0.512711 \times 10 + (-0.735882) \psi + (-0.293796 \times 10) \psi^2} \quad (0.02 < \psi) \quad (3.20)$$

$$D_{Tl} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = a \times 0.153569 \times \psi \quad (\psi \leq 0.0123)$$

$$a \times 10^{-0.317809 \times 10 + (0.386164 \times 10^2) \psi + (-0.139126 \times 10^3) \psi^2 + (0.196905 \times 10^3) \psi^3} \quad (0.0123 < \psi) \quad (3.21)$$

$$\lambda + r\lambda'_{Tg} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = a \times 1 + (0.22963 \times 10^2) \psi + (-0.287037 \times 10^6) \psi^2 \quad (\psi \leq 0.02)$$

$$\begin{aligned} & a \times (0.407536 \times 10) + (0.192233 \times 10^2) \psi \\ & + (-0.404658 \times 10^2) \psi^2 + (0.452669 \times 10^2) \psi^3 \end{aligned} \quad (0.02 < \psi) \quad (3.22)$$

ただし、 $a$  は単位換算係数で、 $a=1.1574 \times 10^{-9}$  である。また、 $\Psi$  は体積基準含水率 [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]、 $D_{\Psi g}$  は含水率勾配に関する気相水分拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]、 $D_{\Psi l}$  は含水率勾配に関する液相水分拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]、 $D_{Tg}$  は温度勾配に関する気相水分拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ ]、 $D_{Tl}$  は温度勾配に関する液相水分拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}^\circ\text{C}$ ]、 $\lambda + r\lambda'_{Tg}$  は等価熱伝導率 [ $\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$ ] を表す。

上記の式 3.18～3.22 の拡散係数は温度  $20^\circ\text{C}$  一定の場合の値である。拡散係数は含水率のみならず温度にも強く依存する。したがって、まず  $D_{\Psi g}$ 、 $D_{Tg}$  の温度補正を行う。蒸気拡散支配時の水蒸気流  $J_g$  は次式で示される。

$$J_g = -\lambda'_p \nabla P_v \quad (3.23)$$

ただし、 $\lambda'_p$  は湿気伝導率 [ $\text{kg}/\text{msPa}$ ]、 $P_v$  は水蒸気圧 [ $\text{Pa}$ ] を示す。  
水分化学ポテンシャル  $\mu = R_v T \ln(P_v/P_{vs})$  から式 3.23 は、

$$J_g = -\lambda'_p \frac{\partial P_v}{\partial T} \nabla T - \lambda'_p \frac{\partial P_v}{\partial \Psi} \nabla \Psi \quad (3.24)$$

水蒸気圧  $P_v$  を相対湿度  $h$  と飽和水蒸気圧  $P_{vs}$  の積 ( $P_v = h \times P_{vs}$ ) で表すと、

$$J_g = -\lambda'_p h \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \nabla T - \lambda'_p P_{vs} \frac{\partial h}{\partial \Psi} \nabla \Psi \quad (3.25)$$

式 5.25 より、拡散係数  $D_{\Psi g}$ 、 $D_{Tg}$  は次のように表せる。

$$D_{\Psi g} = \lambda'_p P_{vs} \frac{\partial h}{\partial T} = \lambda'_p P_{vs} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \frac{\partial h}{\partial \Psi} \frac{P_{vs}}{P_{vs} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}}} = D_{\Psi g} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \frac{P_{vs}}{P_{vs} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}}} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} D_{Tg} &= \lambda'_p h \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} = \lambda'_p h \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big/ \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \\ &= D_{Tg} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big/ \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \end{aligned} \quad (3.27)$$

次に  $D_{\Psi l}$  と  $D_{Tl}$  の温度補正を行う。液水移動が Darcy 則に従うものとして算定した補正関数[21]を用いる。

$$D_{\Psi l} = D_{\Psi l} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} f_1(T) \quad (3.28)$$

$$D_{Tl} = D_{Tl}|_{\theta=20^{\circ}\text{C}} f_2(T) \quad (3.29)$$

ここで、

$$f_1(T) = 0.0234(T - 273.15) + 0.532 \quad (3.30)$$

$$f_2(T) = 0.000147(T - 273.15)^2 + 0.0184(T - 273.15) + 0.5732 \quad (3.31)$$

ただし、 $T$  は絶対温度[K]である。

Jury による測定値の近似式は状態量として体積基準含水率  $\Psi$  を用いているが、本研究では自由水基準の水分化学ポテンシャル  $\mu$  を用いる為、以下の換算を行う。

水分伝導率  $\lambda'_{\mu}$ 、 $\lambda'_{\mu g}$ 、 $\lambda'_{\mu l}$ 、 $\lambda'_{Tg}$ 、 $\lambda'_{Tl}$  と  $D_{\Psi}$ 、 $D_{\Psi g}$ 、 $D_{\Psi l}$ 、 $D_T$ 、 $D_{Tg}$ 、 $D_{Tl}$  の関係は次より得られる。含水率  $\Psi$ 、水分化学ポテンシャル  $\mu$  と温度  $T$  の間には一意の関係がある。

すなわち、

$$\mu = g(\psi, T) \quad (3.32)$$

これより、

$$\nabla \mu = \frac{\partial g}{\partial \psi} \nabla \psi + \frac{\partial g}{\partial T} \nabla T \quad (3.33)$$

式 2.13 と式 2.14 に式 3.33 を代入して、水分化学ポテンシャル  $\mu$  の代わりに含水率  $\Psi$  水分の状態量とした拡散方程式が得られる。

$$q = -\lambda \nabla T \quad (3.34a)$$

$$J_w = -D_T \nabla T - D_{\psi} \nabla \psi + \lambda'_{\mu} F_w \quad (3.34b)$$

$$J_{1w} = -D_{Tg} \nabla T - D_{\psi g} \nabla \psi + \lambda'_{\mu g} F_w \quad (3.34c)$$

$$J_{2w} = -D_{Tl} \nabla T - D_{\psi l} \nabla \psi + \lambda'_{\mu l} F_w \quad (3.34d)$$

ただし、熱及び水分拡散係数は、

$$\begin{aligned} D_T &= \lambda'_T + \lambda'_{\mu} \frac{\partial g}{\partial T}, D_{\psi} = \lambda'_{\mu} + \lambda'_{\mu} \frac{\partial g}{\partial \psi}, D_{Tg} = \lambda'_{Tg} + \lambda'_{\mu g} \frac{\partial g}{\partial T} \\ D_{\psi g} &= \lambda'_{\mu g} \frac{\partial g}{\partial \psi}, D_{Tl} = \lambda'_{Tl} + \lambda'_{Tl} \frac{\partial g}{\partial T}, D_{\psi l} = \lambda'_{\mu l} \frac{\partial g}{\partial \psi} \end{aligned} \quad (3.35)$$

通常の条件では  $\partial g / \partial T$  の値は小さいので、 $\partial g / \partial T \approx 0$  と近似し得る場合が多い。本論では  $\partial g / \partial T \cong 0$  とする。各拡散係数は以下のようになる。

$$\begin{aligned} D_T &= \lambda'_T, D_{\psi} = \lambda'_{\mu} \frac{\partial g}{\partial \psi}, D_{Tg} = \lambda'_{Tg} \\ D_{\psi g} &= \lambda'_{\mu g} \frac{\partial g}{\partial \psi}, D_{Tl} = \lambda'_{Tl}, D_{\psi l} = \lambda'_{\mu l} \frac{\partial g}{\partial \psi} \end{aligned} \quad (3.36)$$

ただし、液相水分の移動が Darcy 則に従うとして、 $\lambda'_{Tl} \cong 0$ 、 $\lambda'_T \cong \lambda'_{Tg}$  とする。含水率  $\Psi$  と水分化学ポテンシャル  $\mu$  の関係については、上記の通り平衡含水率式  $\psi = f(\mu, T)$  の温度依存性は小さいので、含水率  $\Psi$  を水分化学ポテンシャル  $\mu$  のみ関数  $\psi = g(\mu)$  で表す。砂質土壌の含水率  $\Psi$  と水分化学ポテンシャル  $\mu$  の関係の近似式を次に示す。

$$\psi = \begin{cases} 0.37519 & (0 \leq \mu) \\ 0.030667\mu + 0.37519 & (-1 \leq \mu < 0) \\ 0.39779 + \frac{0.04018}{\log_{10}(-\mu) - 0.75433} & (-3.16228 \leq \mu < -1) \\ -0.01814 + \frac{0.10713}{\log_{10}(-\mu) - 0.0847} & (-978207 \leq \mu < -3.16228) \\ 0 & (\mu < -978207) \end{cases} \quad (3.37)$$

表 3.2 に本解析に用いた砂質土壌(Plainfield Sand)の固体実質部を石英 95[%]、粘土 5[%]として求めた熱容量を示す。

固体実質部(絶乾状態時)の熱容量は  $1281.928[\text{KJ}/\text{m}^3\text{K}]$  であるが、対象となる地盤内には水分が存在し、水分による熱容量の増加を考慮しなければならない。地盤の熱容量は固体実質部の容積比熱に含水率に応じた水分の容積比熱を加えたものになり、次式で示される。

$$c_s \rho_s = 1281928 + \rho_l \psi \times 4186.05 \quad [\text{J}/\text{m}^3\text{K}] \quad (3.38)$$

ただし、 $\rho_l$  は液水水分の密度であり、本解析においては  $1000[\text{kg}/\text{m}^3]$  一定とした。

表 3.2 砂質土壌の固体実質部の容積比熱

単位	比重	比熱	比容積	容積比熱
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kgK]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[J/m <sup>3</sup> K]
石英砂	2660	753.49	0.6175	1237645
粘土	1550	879.07	0.0325	44283
合計	□			1281928

また、図 3.10～3.14 に砂質土壌の平衡含水率、温度勾配、並びに水分化学ポテンシャル勾配に関する気相・液相水分伝導率及び熱伝導率を示す。

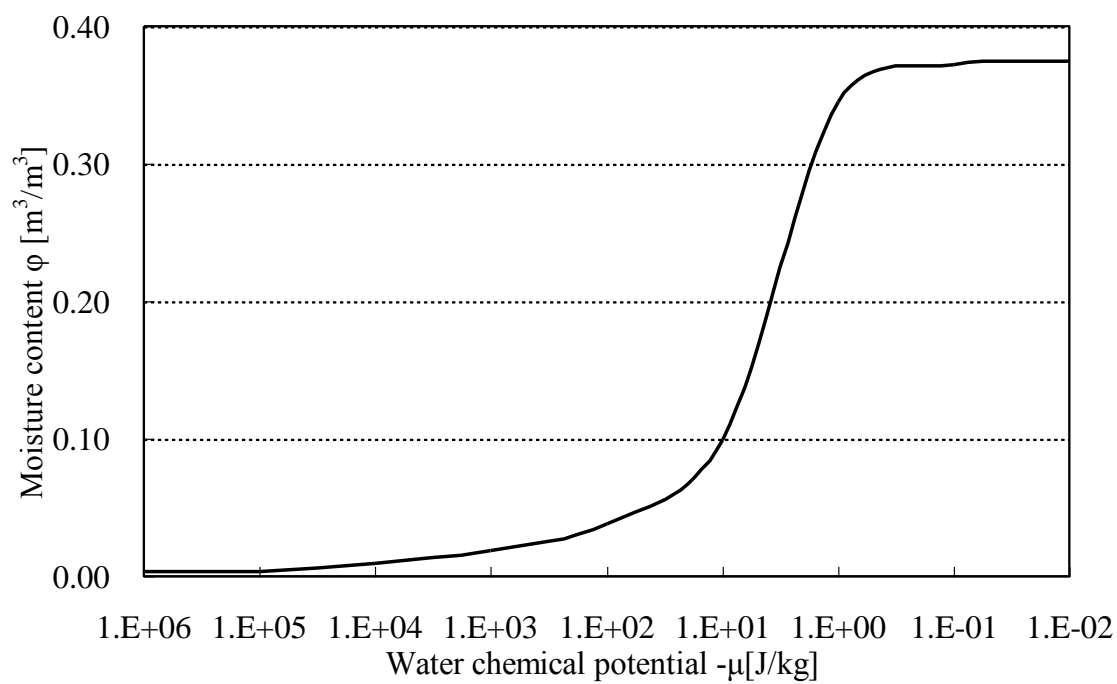


図 3.10 砂質土壌の含水率-水分化学ポテンシャルの関係

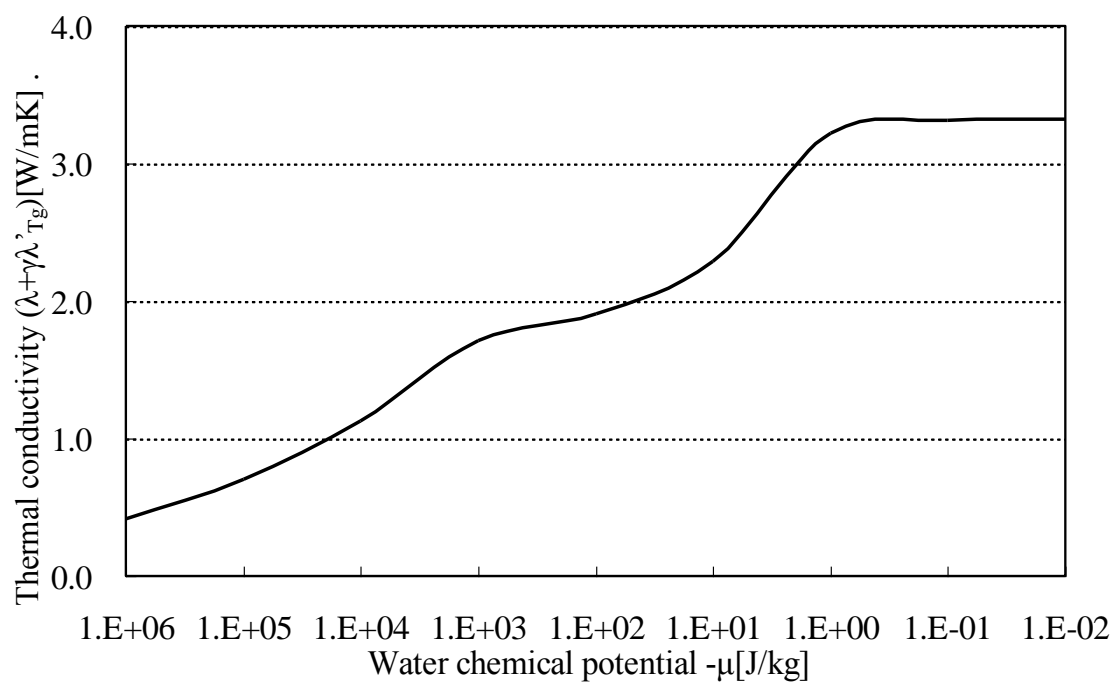


図 3.11 砂質土壌の熱伝導率

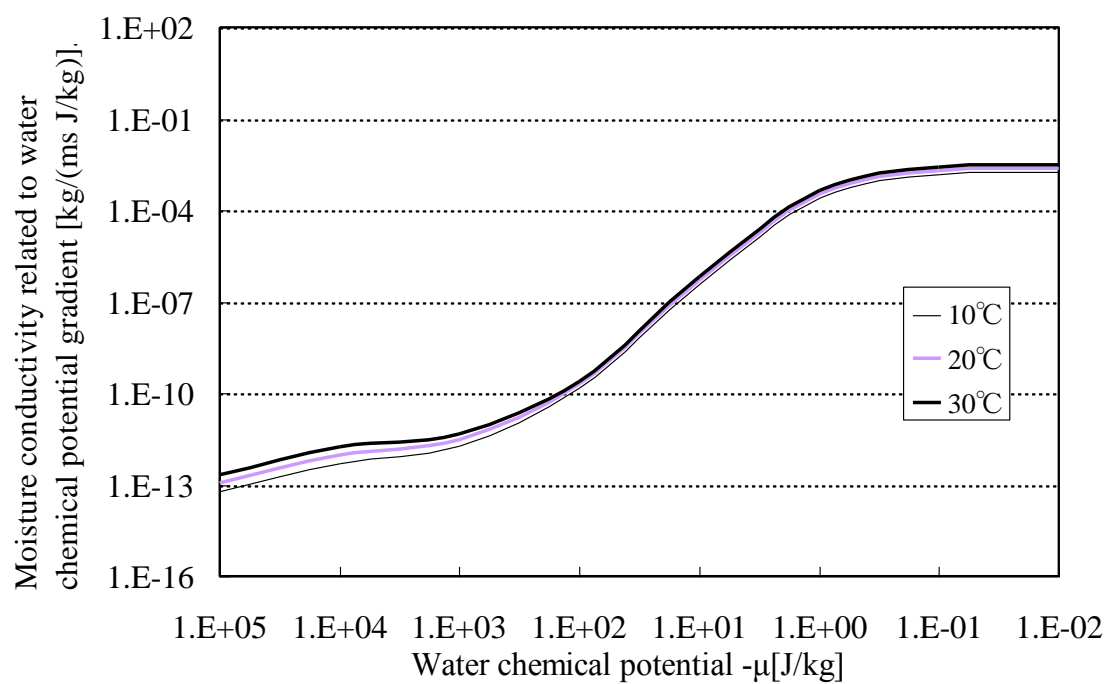


図 3.12 砂質土壌の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率( $\lambda'_{\mu}$ )

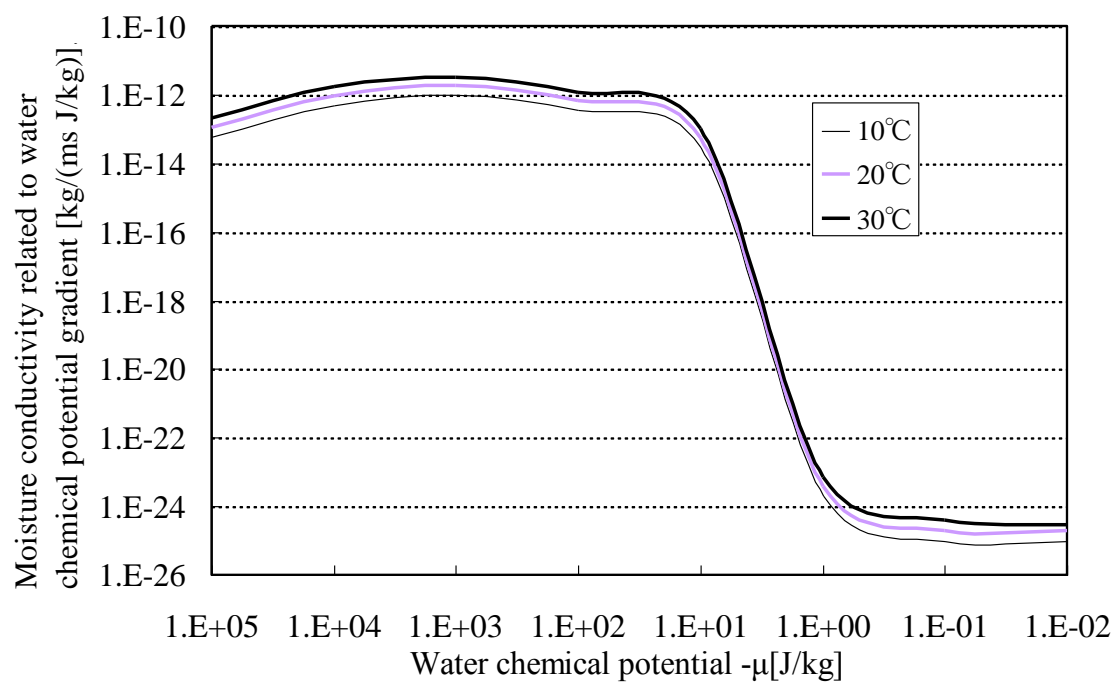


図 3.13 砂質土壌の水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率( $\lambda'_{\mu g}$ )

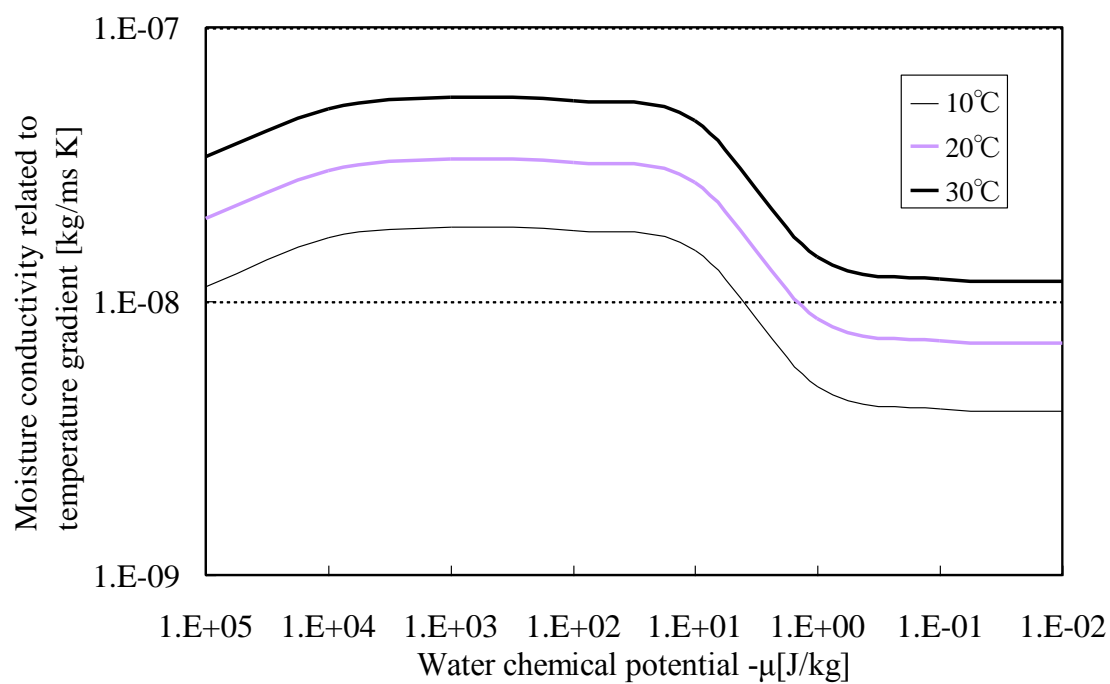


図 3.14 砂質土壌の温度勾配に関する水分伝導率( $\lambda'_{Tg}$ )



### 3.3.3 その他の物性値

地表面での低温放射  $q_e$  は、Brunt の式を雲量補正して用いる。

$$q_e = \varepsilon(E_s - E_{ob}) \left(1 - k_c \frac{C_p}{10}\right) \\ = -\varepsilon \sigma T_o^4 (0.474 - 0.075\sqrt{f}) \left(1 - k_c \frac{C_p}{10}\right) \quad (3.39)$$

ここで、 $q_e$  は低温放射[W/m<sup>2</sup>]、 $\varepsilon$  は地表面の輻射係数[=0.9]、 $E_s$  は大気放射能[W/m<sup>2</sup>]、 $E_{ob}$  は完全黒体の放射能[W/m<sup>2</sup>]、 $C_p$  は雲量、 $k_c$  は雲量補正係数、 $\sigma$  は Stephan-Boltzman 常数=5.67×10<sup>-8</sup>[W/m<sup>2</sup>hK<sup>4</sup>]、 $T_o$  は外気温度[K]、 $f$  は外気の水蒸気圧[mmHg]を示す。

表 3.3 に雲量補正係数[29]を示す。ただし、雲量が全く無い場合の補正係数が 1 である。なお、本解析においては  $k_c=0.7$  を用いた。

表 3.3 雲量補正

上雲層	中雲層	下雲層
0.8	0.3	0.15

その他、本解析に用いた飽和水蒸気圧  $P_{vs}$ [Pa]は以下の Goff-Gratch の近似式[30]を用いる。

$$\log_{10} P_{vs} = 2.78614 + 1.079574 \left(1 - \frac{273.16}{T}\right) - 5.02800 \log_{10} \left(\frac{T}{273.16}\right) \\ + 1.50475 \times 10^{-4} \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{273.16} - 1\right)}\right] + 0.42873 \times 10^{-3} \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T}\right)}\right] \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial P_{vs}}{\partial T} = P_{vs} \ln 10 (10.76574 \times \frac{273.16}{T^2} - \frac{5.2800}{T \ln 10} \\ + 1.50475 \times 10^{-4} \times \frac{8.2969}{273.16 \times 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{273.16} - 1\right)}} \\ + 0.42873 \times 10^{-3} \times 4.76955 \ln 10 \times \frac{273.16}{T^2 \times 10^{4.76955 \left(1 - \frac{273.16}{T}\right)}}) \quad (3.41)$$

ここで、 $T$  は絶対温度[K]である。

水分の液相から気相への相変化熱[J/kg]は温度効果を考慮して次式で与える。

$$r = 597.5 - 0.599(T - 273.16) \quad (3.42)$$

### 3.4 数値計算法

#### 3.4.1 基礎方程式の差分化

本論で用いる基礎方程式は前述したように非線形であり、解析解を求めることは困難であるので、基礎方程式を差分化し数値的に解を求める。

解析対象は地下構造物の躯体、室内空間及び周辺地盤であり、その性質上取り扱う差分点が非常に多い為、前進型有限差分法を用いる。

第2章で示した、移動ポテンシャルとして温度及び水分化学ポテンシャルを用いる多孔質体の熱・水分同時移動の基礎方程式を3次元系で表せば、次式となる。

水分の移動式

$$\begin{aligned} \rho_w \left( \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda'_\mu \frac{\partial \mu}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda'_\mu \frac{\partial \mu}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial y} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \lambda'_\mu \frac{\partial \mu}{\partial z} - g \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial z} \right\} \end{aligned} \quad (3.43)$$

熱の移動方程式

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial y} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial z} \right\} \end{aligned} \quad (3.44)$$

ただし、座標軸の x 軸及び y 軸は水平方向（地盤面に平行）、z 軸は鉛直方向（地盤面に垂直）とする。

式3.43及び式3.44を前進型有限差分法を用いて表現すると水分収支式は以下の様に表せる。

$$\begin{aligned} \rho_w \left( \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right)^n \frac{\mu_{i,j,k}^{n+1} - \mu_{i,j,k}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = & \left( J_{x_{i-1,j,k}}^n - J_{x_{i,j,k}}^n \right) \Delta y_j \Delta z_k \\ & + \left( J_{y_{i,j,k-1}}^n - J_{y_{i,j,k}}^n \right) \Delta z_k \Delta x_i \\ & + \left( J_{z_{i,j,k-1}}^n - J_{z_{i,j,k}}^n \right) \Delta x_i \Delta y_j \end{aligned} \quad (3.45)$$

ただし、水分流  $J$  は

$$\begin{aligned} J_{x_{i,j,k}}^n &= \lambda_{\mu_{i+1,j,k}}^m \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i+1,j,k}^n}{\Delta_i x_{i+1}} + \lambda_{T_{i+1,j,k}}^m \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i+1,j,k}^n}{\Delta_i x_{i+1}} \\ J_{y_{i,j,k}}^n &= \lambda_{\mu_{i,j+1,k}}^m \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i,j+1,k}^n}{\Delta_j y_{j+1}} + \lambda_{T_{i,j+1,k}}^m \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j+1,k}^n}{\Delta_j y_{j+1}} \\ J_{z_{i,j,k}}^n &= \lambda_{\mu_{i,j,k+1}}^m \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i,j,k+1}^n}{\Delta_k z_{k+1}} + \lambda_{T_{i,j,k+1}}^m \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n}{\Delta_k z_{k+1}} \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\Delta_i x_{i+1} = \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{2}, \Delta_j y_{j+1} = \frac{\Delta y_j + \Delta y_{j+1}}{2}, \Delta_k z_{k+1} = \frac{\Delta z_k + \Delta z_{k+1}}{2}$$

ここで、 $\mu$  と  $T$  の上付き添え字  $n$  は時間ステップ番号を表し、下付き添え字  $i, j, k$  は3次元空間でのそれぞれの  $x, y, z$  軸の座標番号を示す。熱流の添え字も同様である。

熱収支式は、

$$\begin{aligned} c\rho^n \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = & \left( Q_{x_{i-1,j,k}}^n - Q_{x_{i,j,k}}^n \right) \Delta y_j \Delta z_k \\ & + \left( Q_{y_{i,j,k-1}}^n - Q_{y_{i,j,k}}^n \right) \Delta z_k \Delta x_i \\ & + \left( Q_{z_{i,j,k-1}}^n - Q_{z_{i,j,k}}^n \right) \Delta x_i \Delta y_j \end{aligned} \quad (3.47)$$

ただし、熱流  $Q$  は

$$\begin{aligned}
 Q_{x_{i,j,k}}^n &= \left( \lambda_{i+1,j,k}^m + r_{i,j,k} \lambda_{Tg_{i+1,j,k}}^m \right) \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i+1,j,k}^n}{\Delta x_{i+1}} + r_{i,j,k} \lambda_{Tg_{i+1,j,k}}^n \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i+1,j,k}^n}{\Delta x_{i+1}} \\
 Q_{y_{i,j,k}}^n &= \left( \lambda_{i,j,k+1}^m + r_{i,j,k} \lambda_{Tg_{i,j,k+1}}^m \right) \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n}{\Delta y_{j+1}} + r_{i,j,k} \lambda_{Tg_{i,j,k+1}}^n \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i,j,k+1}^n}{\Delta y_{j+1}} \\
 Q_{z_{i,j,k}}^n &= \left( \lambda_{i,j,k+1}^m + r_{i,j,k} \lambda_{Tg_{i,j,k+1}}^m \right) \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n}{\Delta z_{k+1}} + r_{i,j,k} \lambda_{Tg_{i,j,k+1}}^n \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i,j,k+1}^n}{\Delta z_{k+1}}
 \end{aligned} \quad (3.48)$$

以下に地表面境界及び壁体の室内側表面境界における空気と接する固体表面の境界条件式を示す。ただし、ここでは地表面境界の場合のみ示すが、壁体の室内側表面境界も同様にして差分化する。

水分移動に関する境界条件は、

$$\begin{aligned}
 \rho_w \left( \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right)^n \frac{\mu_{i,j,1}^{n+1} - \mu_{i,j,1}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_1 &= (J_{i-1,j,1}^n - J_{i,j,1}^n) \Delta y_j \Delta z_1 \\
 &+ (J_{i,j-1,1}^n - J_{i,j,1}^n) \Delta x_i \Delta z_1 \\
 &+ (J_{sur_{z_{i,j,1}}}^n - J_{z_{i,j,1}}^n) \Delta x_i \Delta y_j
 \end{aligned} \quad (3.49)$$

ただし、

$$J_{s_{z_{i,j,1}}} = \alpha'_\mu (\mu_o^n - \mu_{i,j,1}^n) + \alpha'_T (T_o^n - T_{i,j,1}^n) + J_p^n$$

熱移動に関する境界条件は、

$$\begin{aligned}
 c \rho^n \frac{T_{i,j,1}^{n+1} - T_{i,j,1}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_1 &= (Q_{i-1,j,1}^n - Q_{i,j,1}^n) \Delta y_j \Delta z_1 \\
 &+ (Q_{i,j-1,1}^n - Q_{i,j,1}^n) \Delta x_i \Delta z_1 \\
 &+ (Q_{sur_{z_{i,j,1}}}^n - Q_{z_{i,j,1}}^n) \Delta x_i \Delta y_j
 \end{aligned} \quad (3.50)$$

ただし、

$$Q_{sur_{z_{i,j,1}}}^n = (\alpha + r \alpha'_T) (T_o^n - T_{i,j,1}^n) + r \alpha'_\mu (\mu_o^n - \mu_{i,j,1}^n) + q_{sol}^n - q_{noc}^n$$

地下室内部空間の室空気の水分及び熱の収支式の差分化式を示す。

水分収支式は、

$$c'\rho'V\frac{p_r^{n+1}-p_r^n}{\Delta t}=\sum_{j=1}^n S_j\alpha'_m(p_s^n-p_r^n)+c'\rho'N_vV(p_o^n-p_r^n)+J_r^n \quad (3.51)$$

熱収支式は、

$$c\rho V\frac{T_r^{n+1}-T_r^n}{\Delta t}=\sum_{j=1}^n S_j\alpha_i(T_s^n-T_r^n)+c\rho N_vV(T_o^n-T_r^n)+q_r^n \quad (3.52)$$

となる。

### 3.4.2 計算上の物性値の取り扱い

計算上の熱及び水分の物性値は、隣り合う点と同種材料の場合、両方の物性値を足して1/2にした数値平均で求める。しかし、異種材料の場合は、物性値の極端な違いを考慮する為に調和平均を用いる[31]。

同種材料の場合、点 $(i-1, j, k)$ と点 $(i, j, k)$ の間の物性値は、

$${}_{i-1,j,k}^x\lambda_{i,j,k}=\frac{\lambda_{i-1,j,k}+\lambda_{i,j,k}}{2} \quad (3.53)$$

異種材料の場合、点 $(i-1, j, k)$ と点 $(i, j, k)$ の間の物性値は、その境界を異種境界とし、

$${}_{i-1,j,k}^x\lambda_{i,j,k}=\frac{\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{fx(i)\lambda_{i-1,j,k}+(1-fx(i))\lambda_{i,j,k}} \quad (3.54)$$

ただし、

$$fx(i)=\frac{\Delta x_i/2}{(\Delta x_{i-1}-\Delta x_i)/2}$$

である。

### 3.5 第3章のまとめ

本章では解析対象となる地下構造物の詳細及び内部発熱条件下での地下構造物とその周辺地盤の熱負荷及び熱・水分性状における理論解析に用いるコンクリートと砂質土壌の熱及び水分に関する物性値の近似式などを示した。次に地下構造物の躯体、室内空間、周辺地盤内の熱負荷及び熱・水分性状における数値解析法として前進型有限差分法を用い、熱・水分移動の支配方程式の差分法について述べた。また、差分法による計算上隣り合う点と同種材料の場合または異種材料の場合における物性値の取り扱い手法を述べた。

## 第 4 章

# 地下構造物の周辺地盤の熱性状の 等方性確認実験

## 第4章 地下構造物の周辺地盤の熱性状の等方性確認実験

### 4.1 はじめに

本論において地下構造物の熱性状の解析を行う際には、前提条件として地下構造物は等方性であるという点がある。しかしながら、本論において解析対象とする地下構造物における過去のフィールド実験で詳細な熱性状の実測は行われてこなかった。

そこで本章では、地下構造物の熱負荷の解析を行う際の前提条件である地下構造物の熱性状の等方性の確認を行うため、フィールド実験を行い、その結果について述べるとともに、非線形熱・水分同時移動モデルを用いて計算した解と実験地下室において計測した壁面温度・熱流の実測値との部位別比較、内部発熱と全熱負荷の計算値と実測値の比較を行い、非線形計算解の正確性の検討を行う。また、平均放射温度と室温の比較を行い室内の快適性の検討を行う。

### 4.2 実測概要

本実験は内部発熱状態での地下構造物とその周辺地盤における詳細な熱性状を把握し、等方性の確認を行うため、実験地下室の室内に設置した温風式電熱ヒーターによる内部発熱と一定量の換気を行う条件下で約3か月間（2009年10月1日～2010年12月31日）行った。ただし、本実験では室内における湿度の制御は行っていない。

換気は地下室上部に設置された可変風量ファンを用いて行った。（ただし、実験開始時から2010年11月5日の期間は換気を停止している。）主な測定項目は、地下室内温度と室内相対湿度、地下室壁体室内側表面熱流、地下室の各壁面温度、外気温と外気相対湿度、全天日射量、降雨量などである。

### 4.3 実測対象および実測装置の概要

#### 4.3.1 実測対象概要

本章での実測対象地下構造物は、第3章で示した三重大学構内の建築学科棟脇の敷地に建設された完全埋設型実験地下室である。



### 4.3.2 計測装置と実測条件

図 4.1 及び 4.2 に実験地下室及び周辺地盤の計測状況を示す。また、表 4.1 に計測項目及び詳細を示す。図 4.1 に示すように実験地下室の内壁面には各壁表面温度と各壁面熱流、室空気の温度、室内相対湿度、CO<sub>2</sub> 濃度計及び内部発熱用温風式電熱ヒーター2 台(サーモスタットによる ON/OFF 制御)を設置した。なお、各壁面熱流の測定は 2010 年 8 月 26 日から開始している。また、周辺地盤の温度及び水分化学ポテンシャルの測定状況は図 4.2 に示す。ただし、○は温度の測定場所で、×が水分化学ポテンシャルを測定するテンシオメータの測定場所である。外界気象条件は外気温度、外気相対湿度、降雨量、全天日射量、アルベドを測定した。外気温度及び外気相対湿度は百葉箱内で測定し、全天日射量、アルベドメータは実験場所の地表面付近に設置した。常水面深さの変動を計測する為に実験場所に掘った井戸で水位を計測した。また、測定期間の間、実験場所の地表面は平坦な砂地として管理された。測定時間間隔は 1 分で自動計測を行った。図 4.3～図 4.6 に CO<sub>2</sub>濃度計、電力計の値を変圧している CT、サーモスタット及び温風式電熱ヒーターの写真を示す。

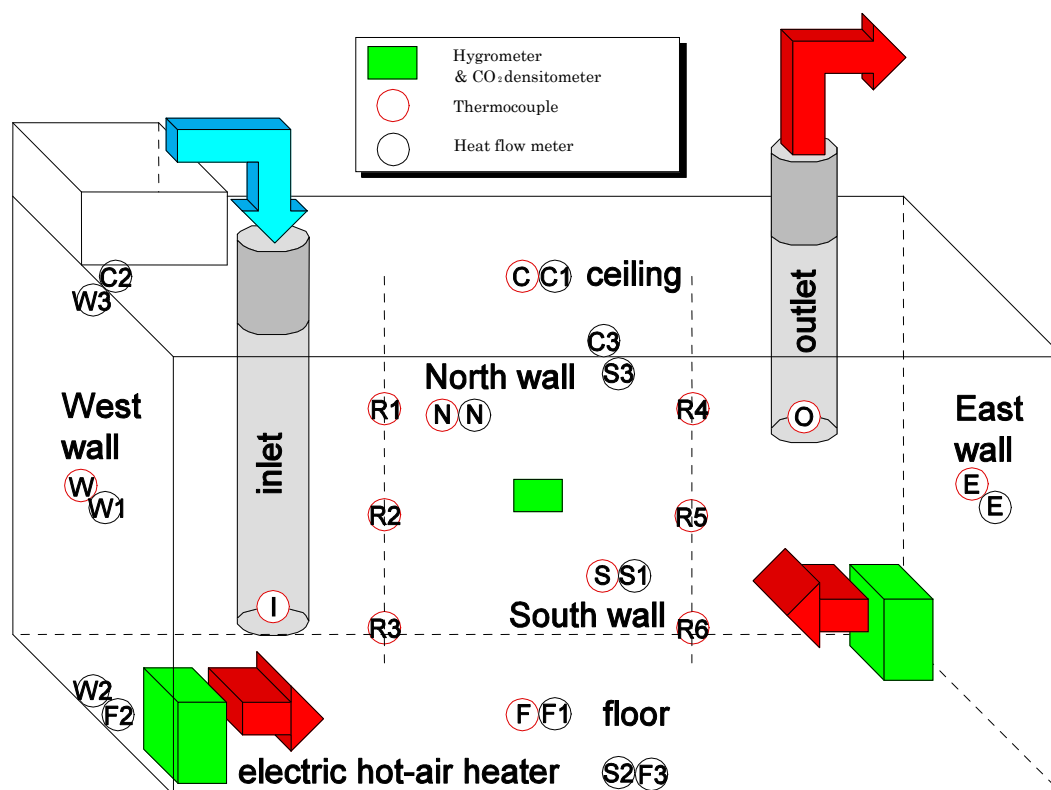


図 4.1 実験地下室の内部計測状況

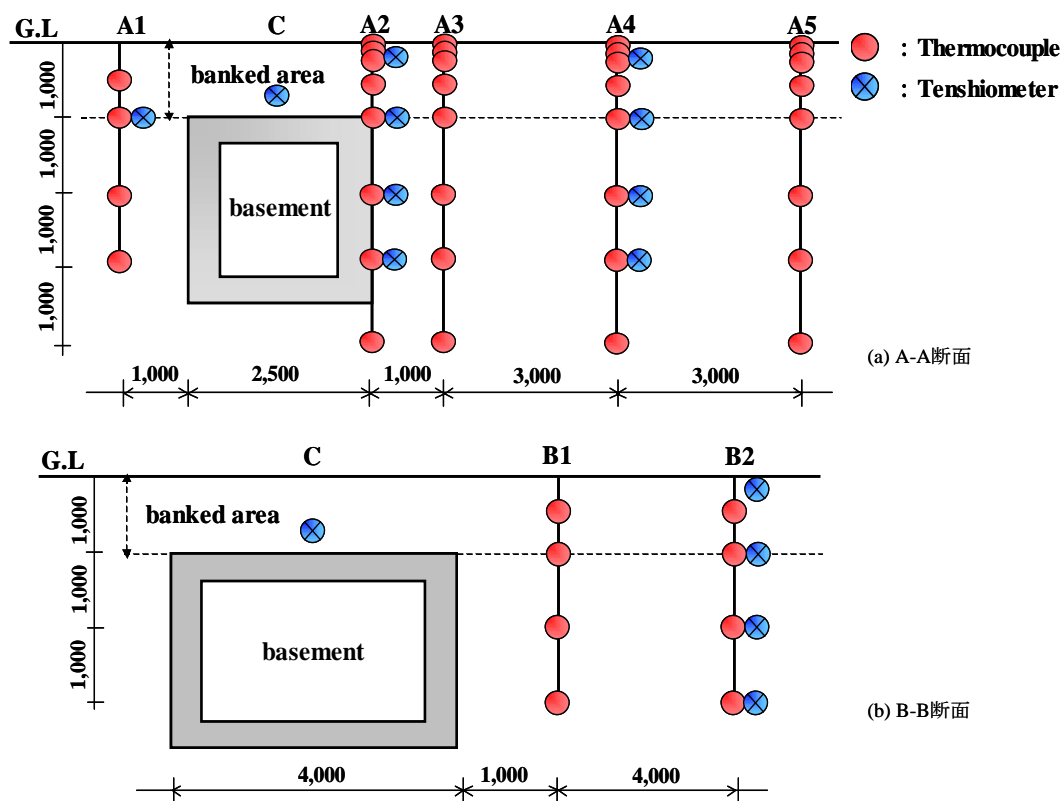


図 4.2 地下室周辺地盤内の計測状況 (単位: mm)

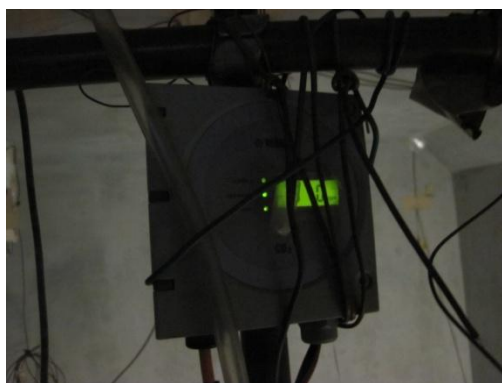


図 4.3 CO<sub>2</sub>濃度計



図 4.4 CT

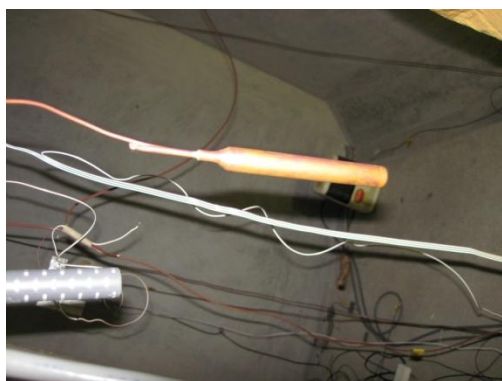


図 4.5 サーモスタット



図 4.6 温風式電熱ヒーター

## 第 4 章 地下構造物の周辺地盤の熱性状の等方性確認実験

表 4.1 計測項目及び位置

測定項目	測定装置	測定位置		
外気温及び 相対湿度	温湿度センサー	百葉箱		
日射量及び 日射吸収率	全天日射計 アルベドメータ	盛り土上		
CO <sub>2</sub> 濃度	CO <sub>2</sub> 濃度計	地下室内 1 点 百葉箱内 1 点		
電力使用量	電力計	地下室内 1 点		
地下水位	水位計	観測井戸		
地下室内温度	T 型熱電対	地下室内 8 点		
地下室内相対湿度	温湿度センサー	地下室内 1 点		
地下室内壁面温度	T 型熱電対	天井、床、東西南北壁面 計 6 点		
地下室内壁面熱流	熱流計	天井、床、東西南北壁面 計 14 点		
地盤内温度	T 型熱電対	地点	A1	深さ
			B1	0.05m , 1.0m
			B2	2.0m , 3.0m
			A2	0m , 0.05m
			A3	0.1m , 0.5m
			A4	1.0m , 2.0m
			A5	3.0m , 4.0m
地盤内水分化学 ポテンシャル	テンシオメータ	地点	C	0.7m
			A1	1.0m
			A2	0.1m , 1.0m
			A4	2.0m , 3.0m
			B2	

## 4.4 実測結果

### 4.4.1 実測対象地下構造物の壁面顕熱流の等方性の確認

ここでは前章で示した実験装置を使用し、等方性が確認できると思われる箇所において測定された壁面熱流を比較し、熱流の等方性の確認を行う。図4.7～図4.9に日平均壁面熱流の壁上部、中央部、下部同士での比較結果を示す。比較を行う期間については、温風式電熱ヒーターによる暖房が始まった2010年11月～2010年12月の2ヶ月間とする。(南壁上部の熱流は12月24日からのデータが欠測のため、23日までのデータで比較を行っている。)

図に示すように壁上部、中央部において熱流は概ね一致していると言えるが、下部においては南壁と西壁で熱流の違いが見られる。これは11月5日から換気を行っており、換気によって生じる風速が熱流計に影響を及ぼし、正確な熱流の実測が困難であったと考えられる。以上の事から、熱流に方位による違いはなく、等方性が確認できたと言える。

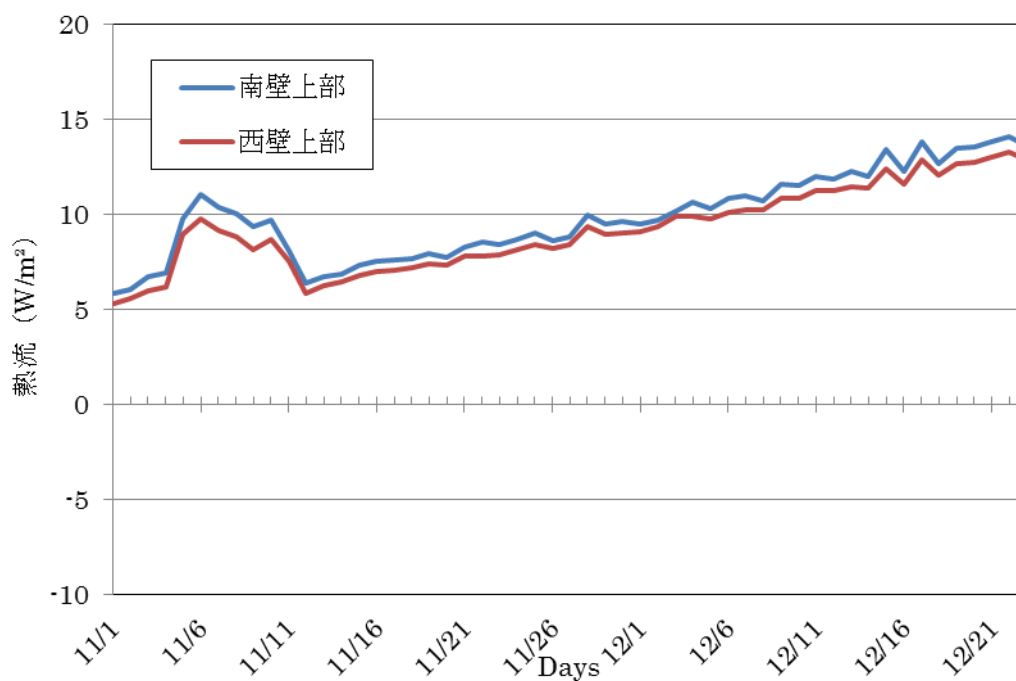


図 4.7 壁上部における日平均熱流比較

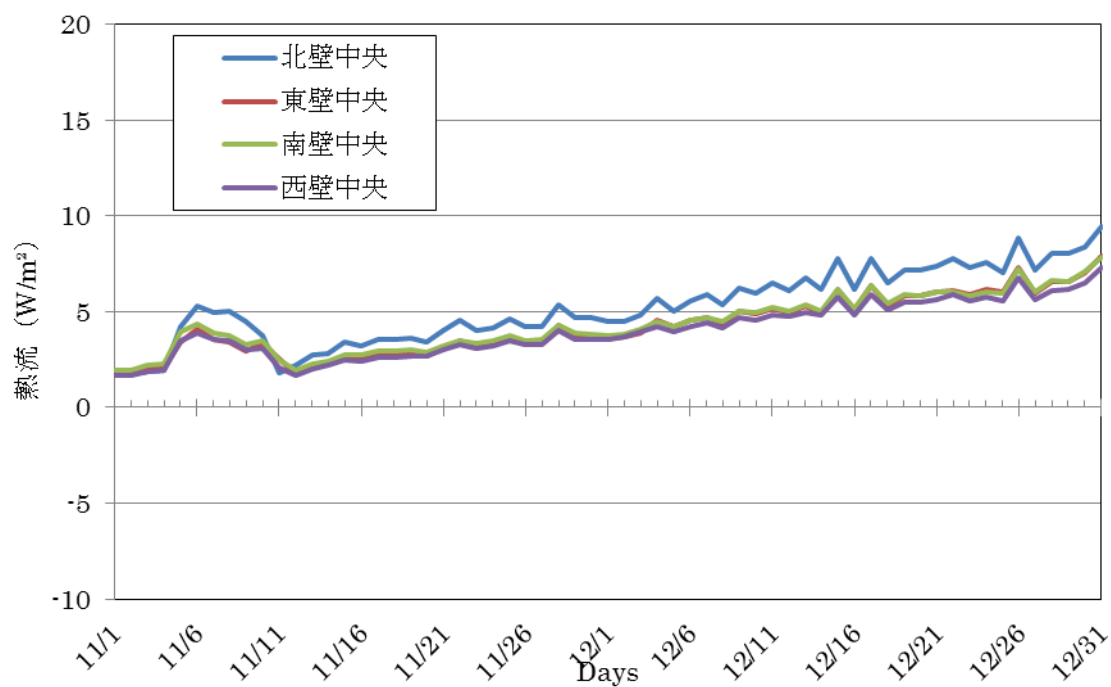


図 4.8 壁中央部における日平均熱流比較

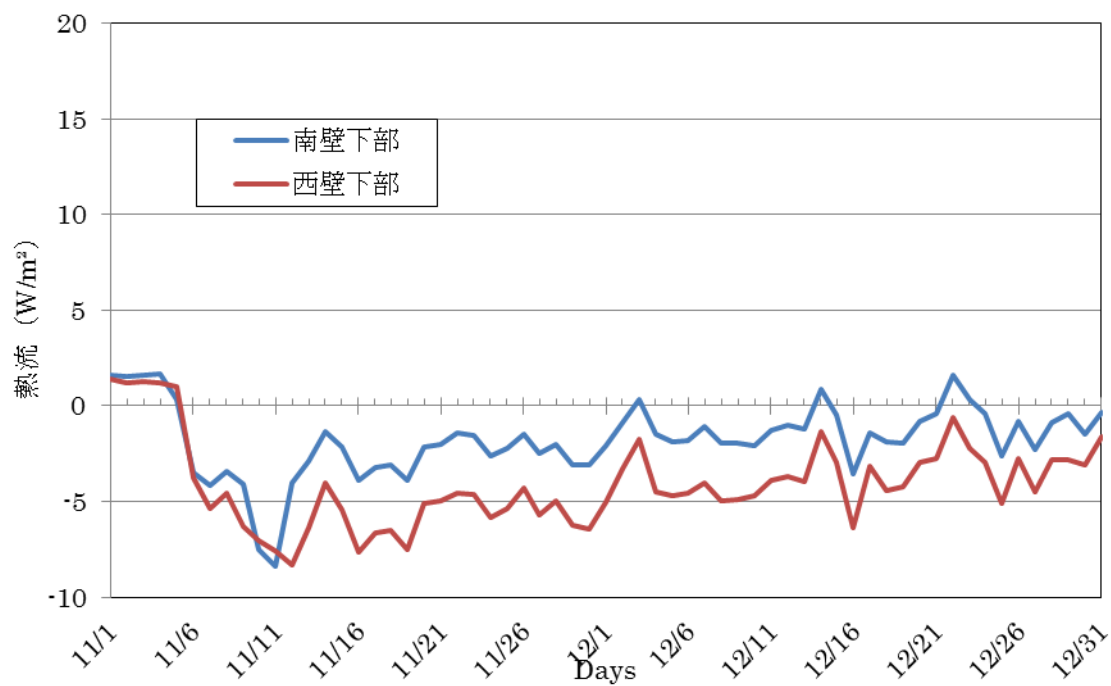


図 4.9 壁下部における日平均熱流比較

#### 4.4.2 内部発熱と全熱負荷の比較

実験地下室では温風式電熱ヒーターによって暖房を行っている。このヒーターによる内部発熱と貫流熱負荷、換気熱負荷を合計した全熱負荷の比較を行う。取り扱う顕熱流については、天井、床、南壁及び西壁は各面で測定している3ヶ所の顕熱流の平均値をその面の平均顕熱流とする。また、4.4.1で各壁面の等方性の確認を行ったので、北壁及び東壁はそれぞれ南壁、西壁の平均熱流を用いることとする。また、換気回数については、回数の計測は行っていないため、内部発熱と全熱負荷が一致するように換気回数を求め、3.2回/hとした。また、換気回数を3.2回/hから1回/h毎に変化させた2.2回/hと4.2回/hとして求めた全熱負荷との比較も行い、換気回数による熱負荷の違いを示す。

結果として図4.10に日平均内部発熱と全熱負荷の比較を示す。全熱負荷について、括弧内に換気回数を示す。換気回数3.2回/hの全熱負荷は内部発熱と概ね一致している事が判る。しかし、この換気回数は推定値であるため正確な回数とは言えない。また、換気回数1回/h毎で平均して熱負荷に約70Wの違いが生じる事が判った。11月5日までは換気を行っていないため、全熱負荷は全て一致している。また、11月5日～11日は12日以降と比べ内部発熱、全熱負荷ともに大きくなっているが、これは11月5日～11日は12日以降よりも換気量が多かったためと考えられる。

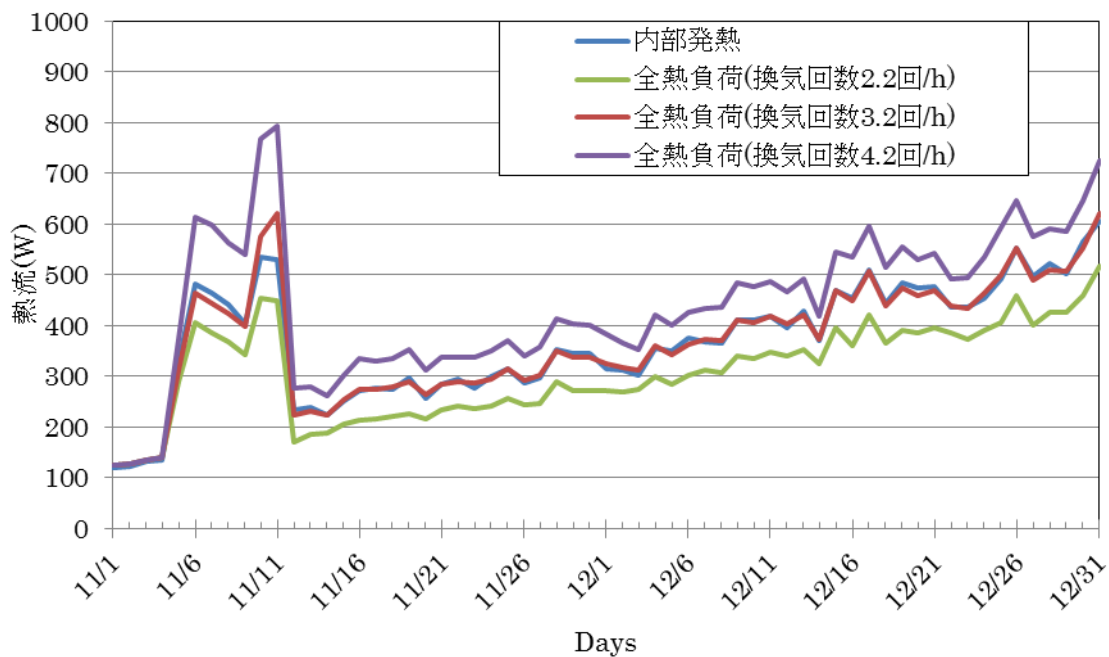


図 4.10 内部発熱と全熱負荷の比較

## 4.5 理論解析結果と実測結果の比較

### 4.5.1 部位別壁面顕熱流・温度比較

図 4.1 で示した実験地下室において計測している壁面熱流及び温度と非線形熱・水分同時移動方程式を用いて計算した解の比較を行う。図 4.11～図 4.24 に部位別壁面熱流比較、図 4.25 に部位別平均壁面熱流差を示す。図から判るように各面中央部では比較的良く一致しているが、隅角部では計算値と実測値に違いが見られる。また、方位別に見ても、東西方向は南北方向に比べ差が大きくなっている事が判る。これは東西方向の方が室の幅が狭いため、南北方向と比べ隅角部から受ける影響が大きい為と考えられる。また、全ての点において計算値の方が実測値よりも大きくなっている。

次に図 4.26～図 4.31 に部位別壁面温度比較、図 4.32 に部位別平均壁面温度差を示す。図から判るように天井面、床面では多少違いが見られるが壁面中央部では精度良く一致している。また、違いが見られる天井面、床面では、天井面は実測値の方が高く、床面は実測値の方が低くなっている。これは、実際は室内温度に分布があるためと考えられる。以上の事から、壁面温度は比較的精度良く予測できているが熱流には違いが見られる。これは、実際は地下室内の空気に温度分布があり、局所的な比較において熱流に違いが生じていると考えられる。また、各面中央部では比較的一致しているが、隅角部では計算値と実測値に違いが見られた。これは、隅角部は熱流が複雑であり計算で正確な熱流を求める事は難しいためと考えられる。

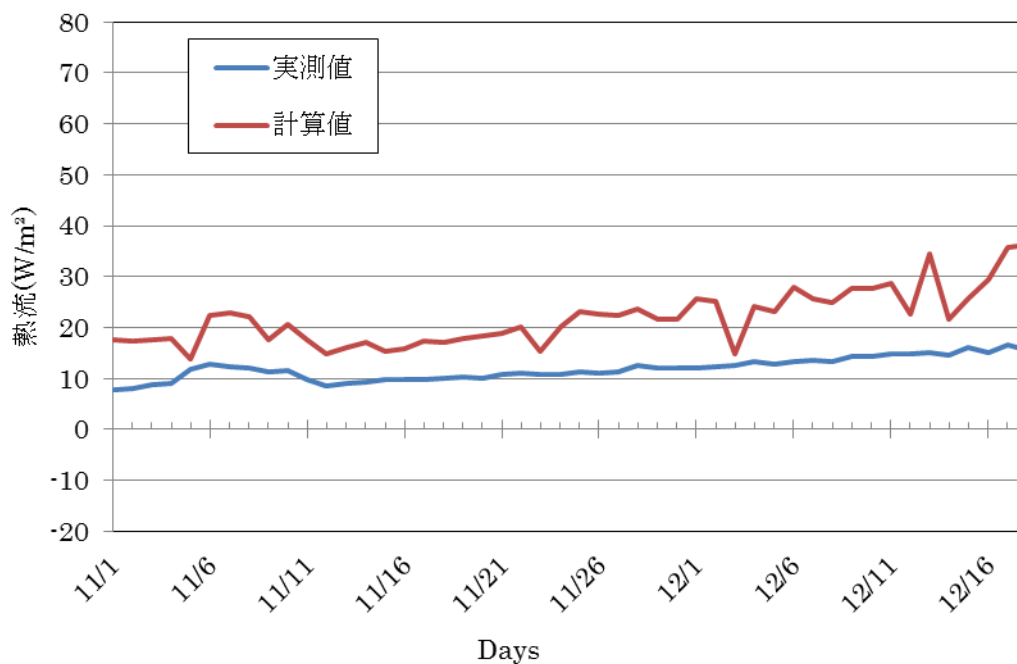


図 4.11 天井面南側の熱流比較

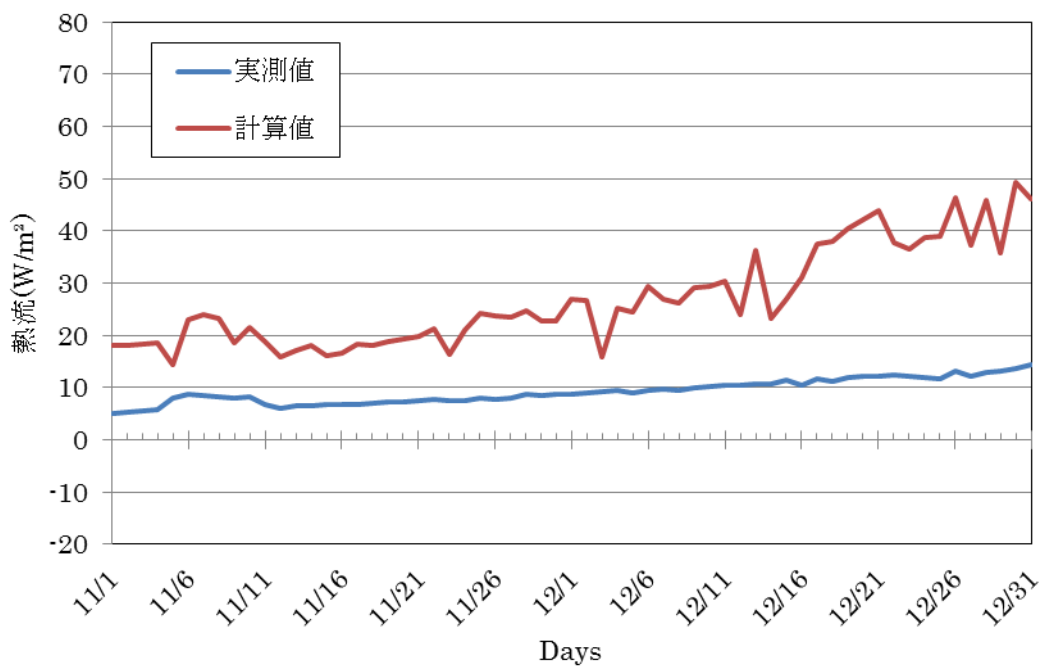


図 4.12 天井面西側の熱流比較

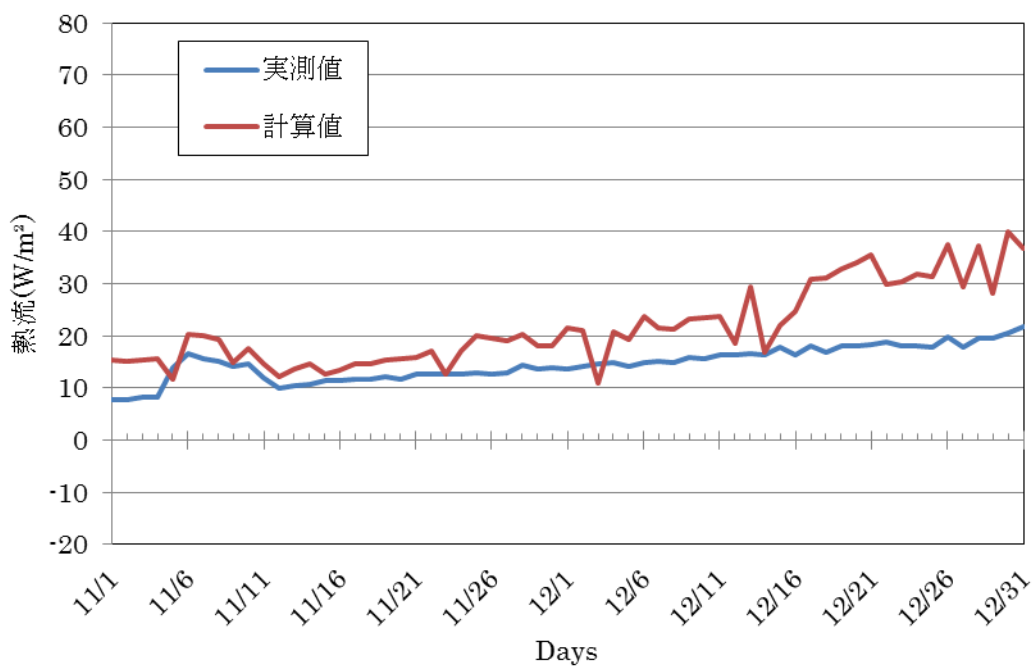


図 4.13 天井面中央の熱流比較



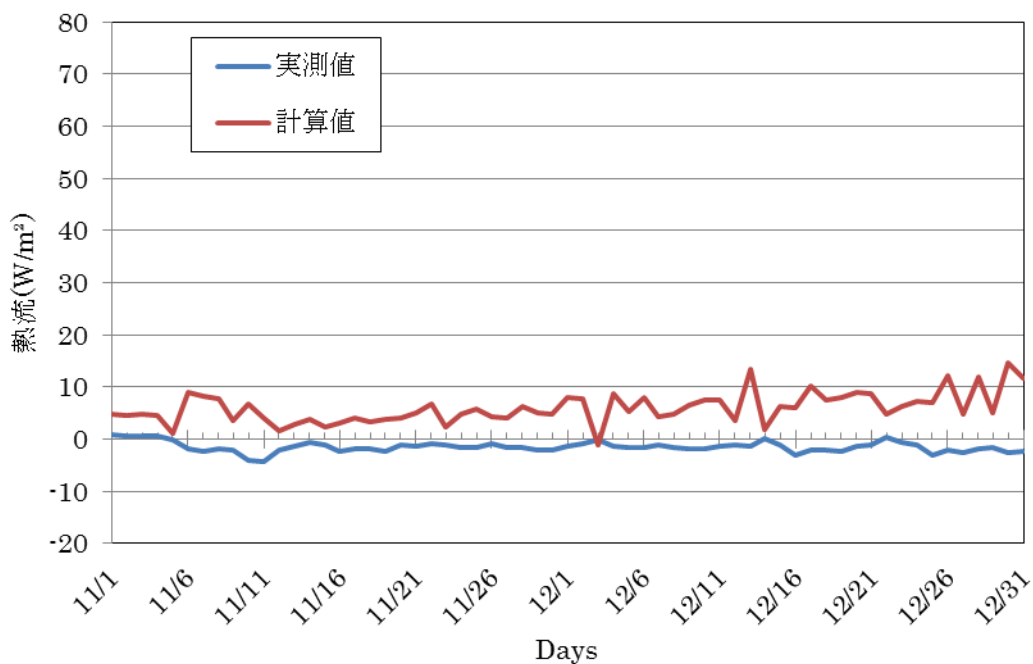


図 4.14 床面南側の熱流比較

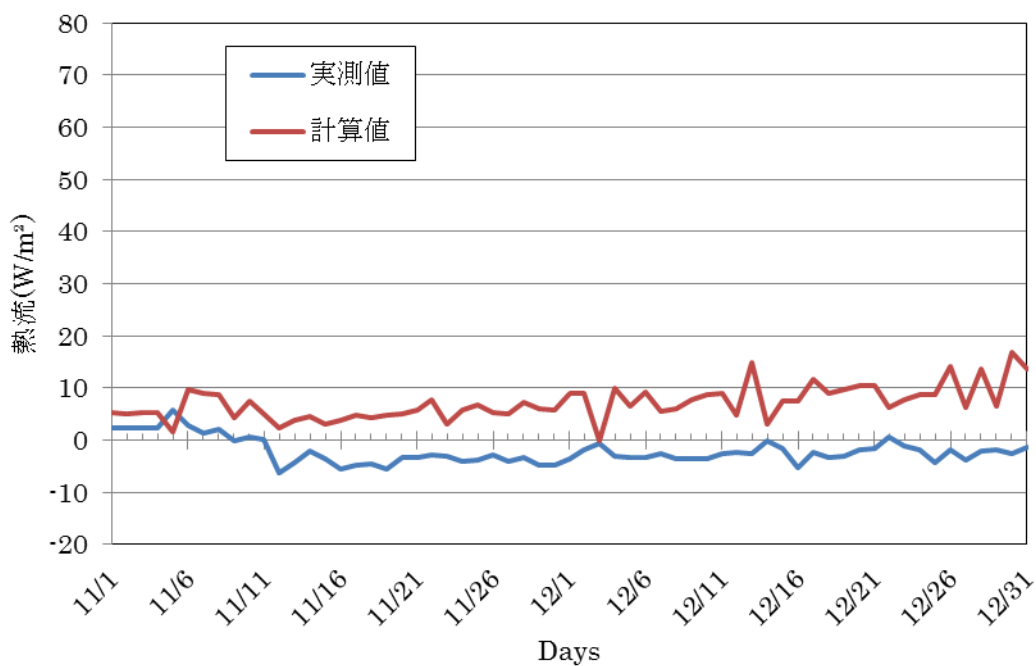


図 4.15 床面西側の熱流比較

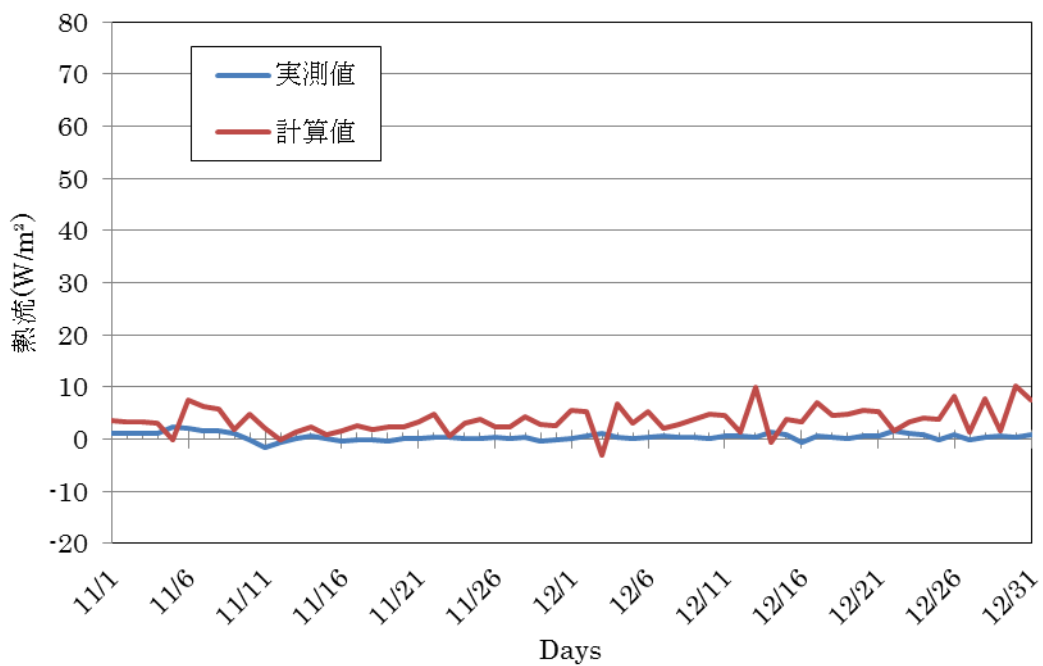


図 4.16 床面中央の熱流比較

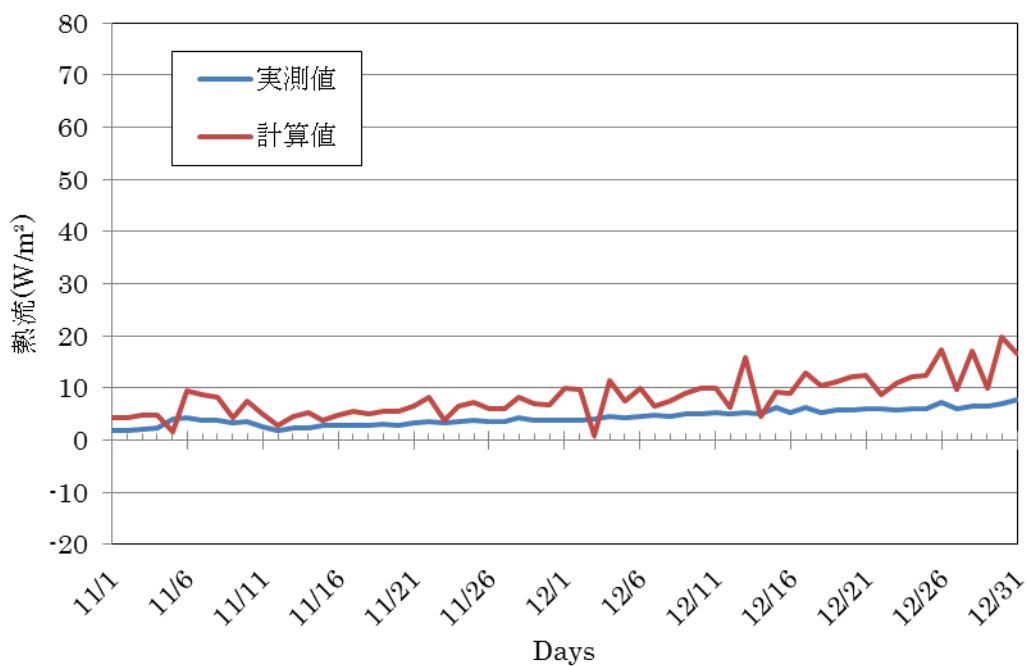


図 4.17 南壁面中央の熱流比較

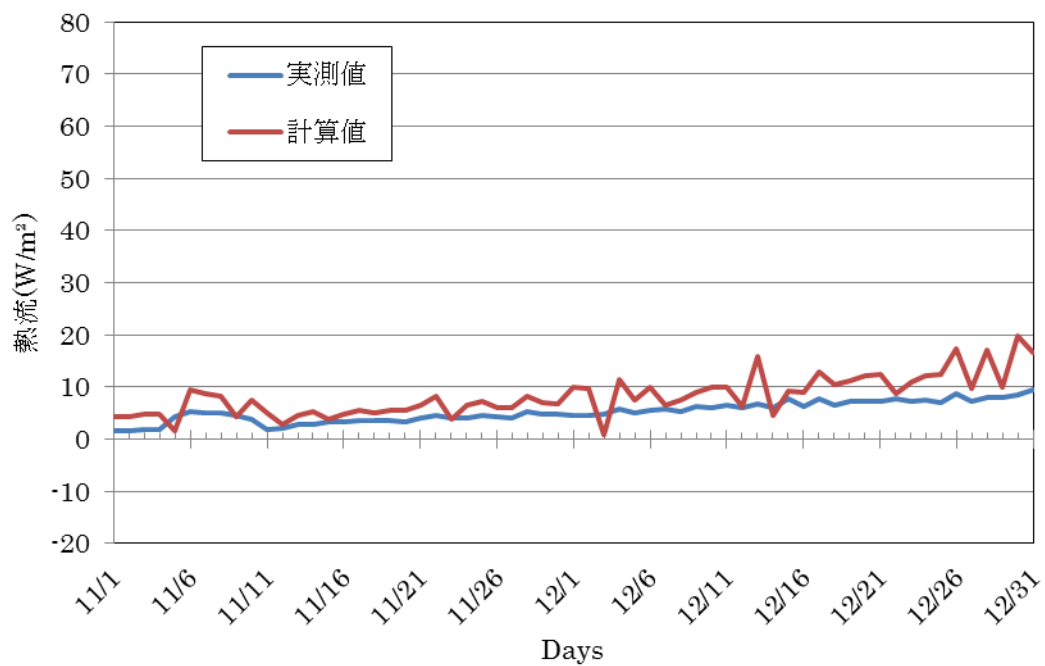


図 4.18 北壁面中央の熱流比較

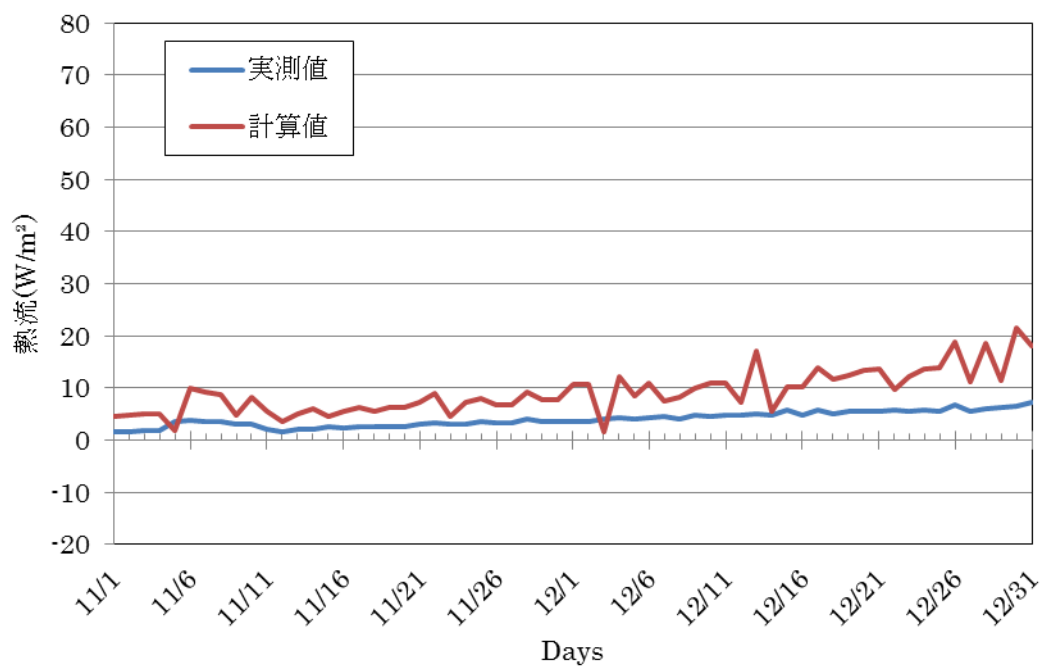


図 4.19 西壁面中央の熱流比較

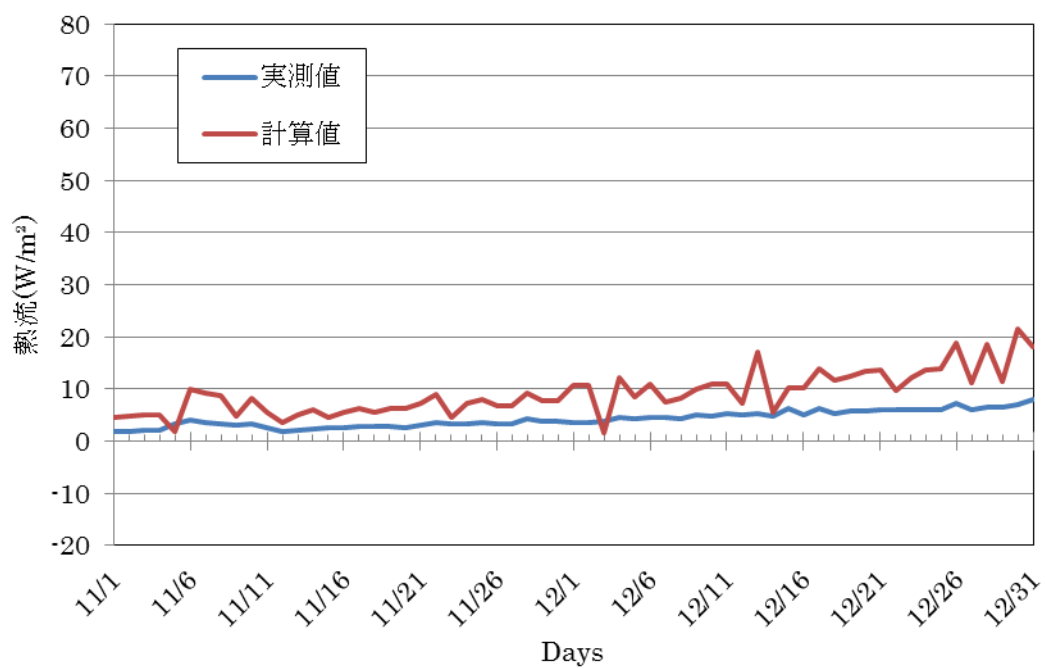


図 4.20 東壁面中央の熱流比較

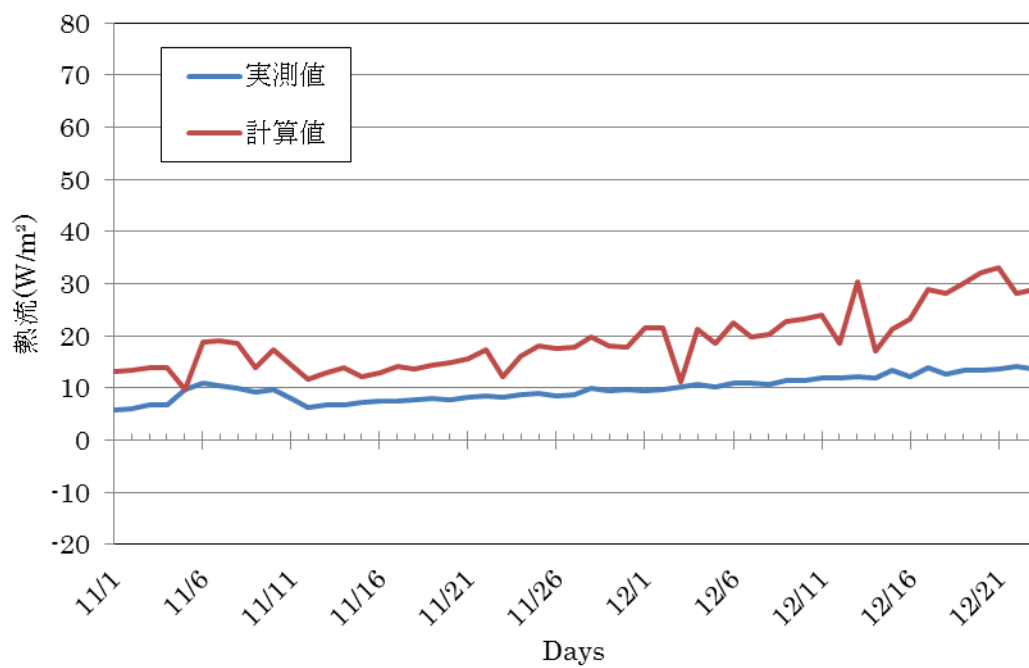


図 4.21 南壁面上部の熱流比較

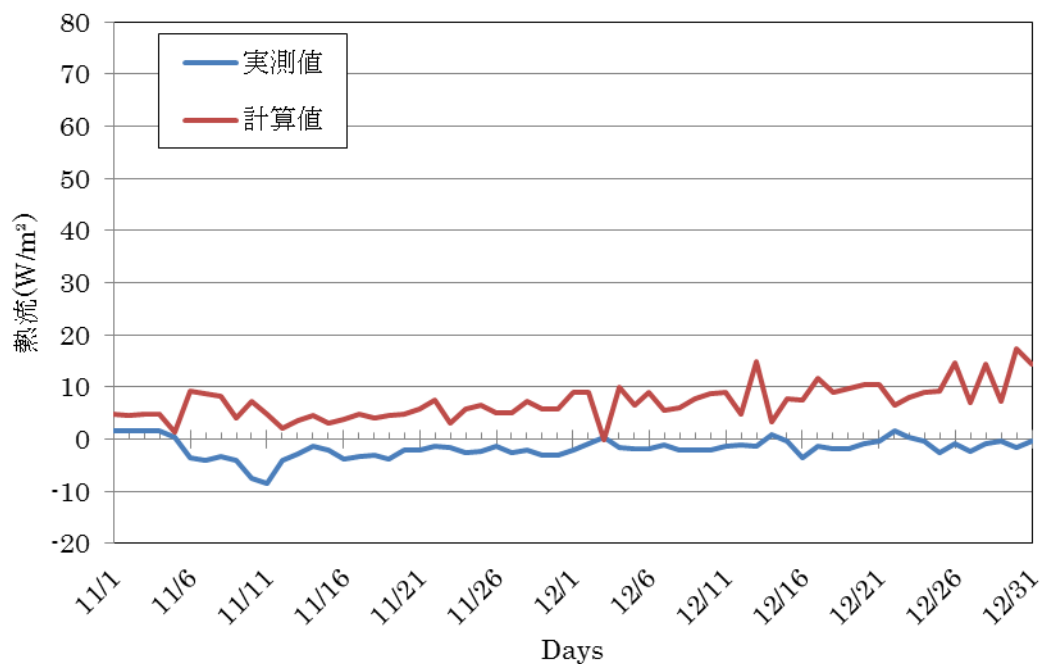


図 4.22 南壁面下部の熱流比較

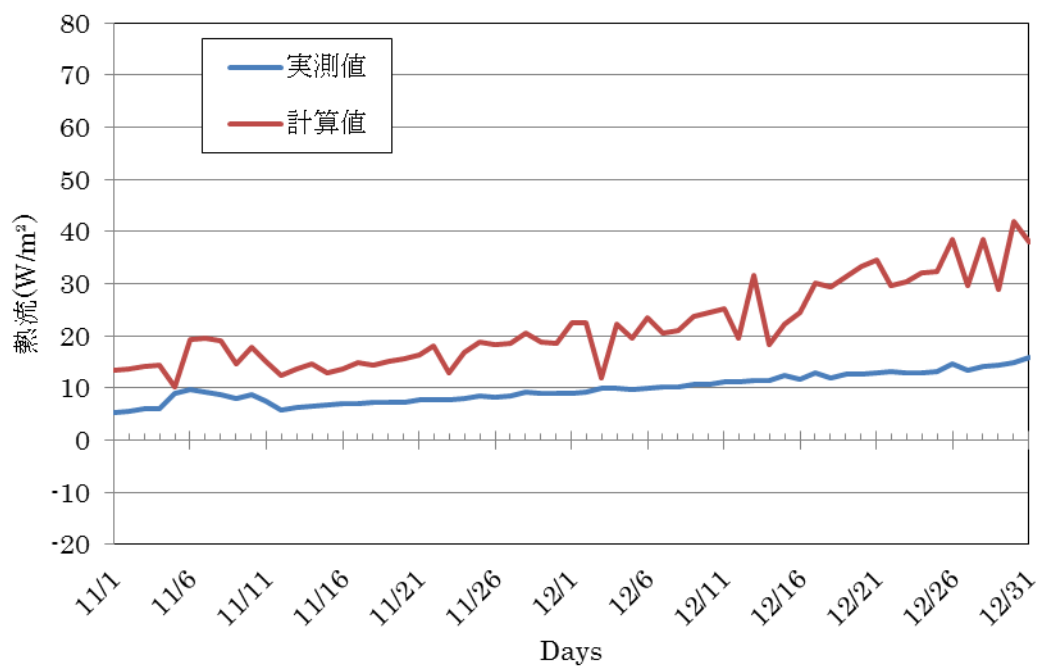


図 4.23 西壁面上部の熱流比較

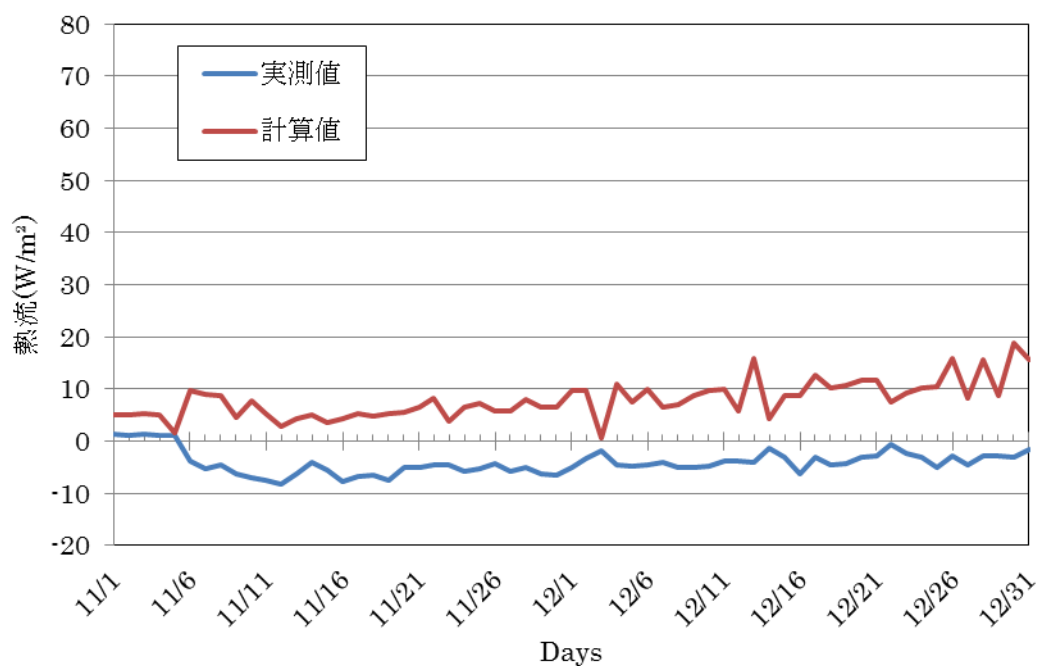


図 4.24 西壁面下部の熱流比較

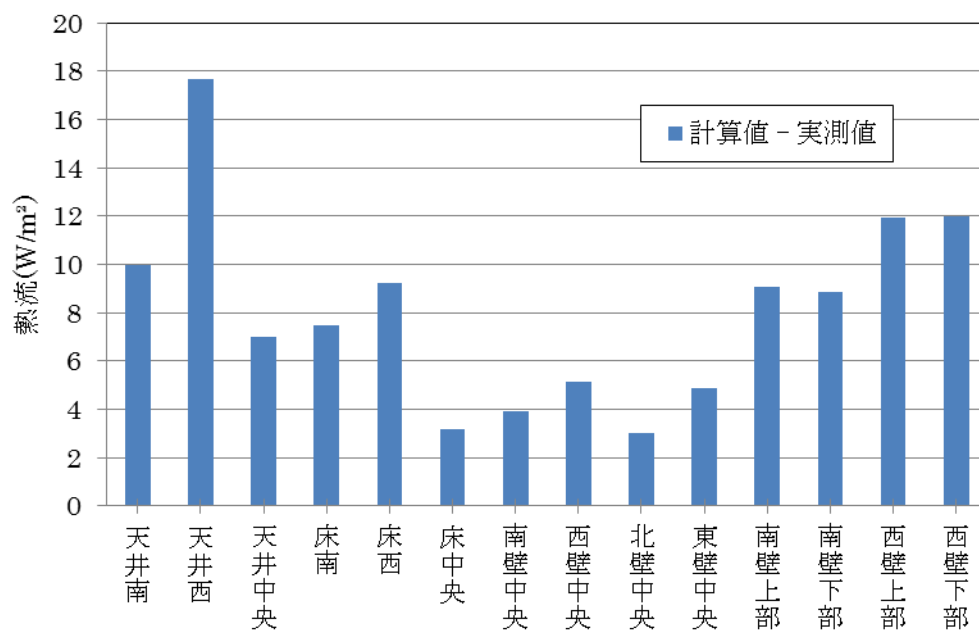


図 4.25 部位別平均壁面熱流差

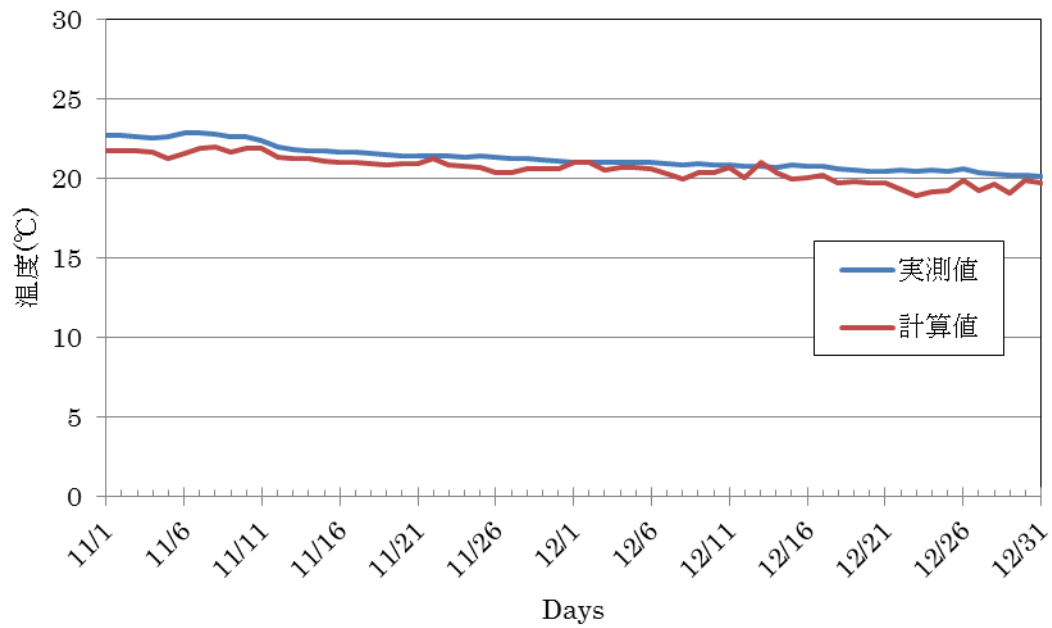


図 4.26 天井面中央の壁面温度比較

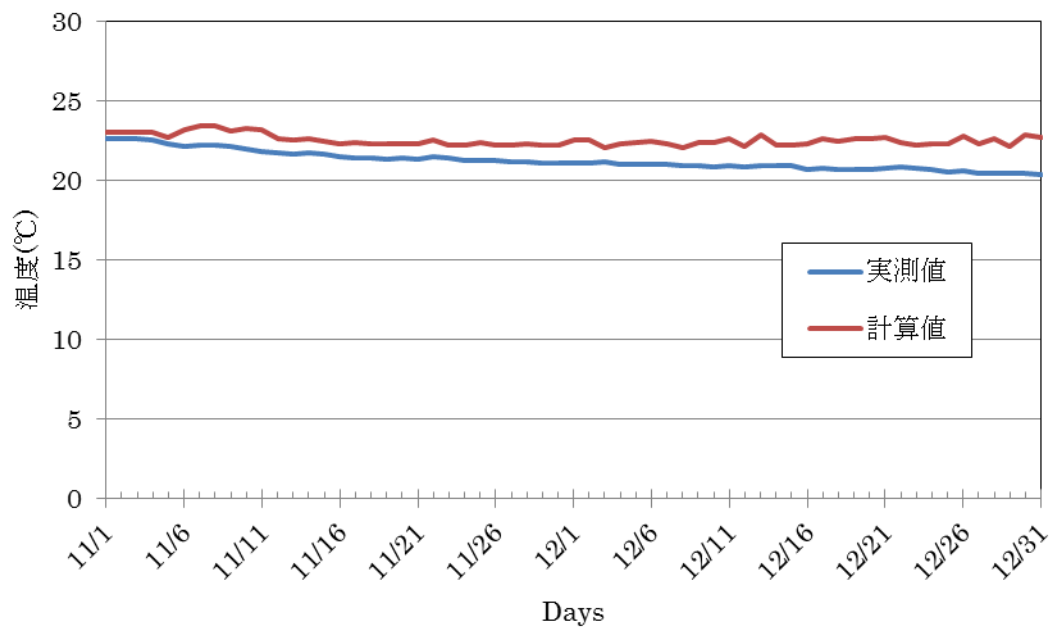


図 4.27 床面中央の壁面温度比較

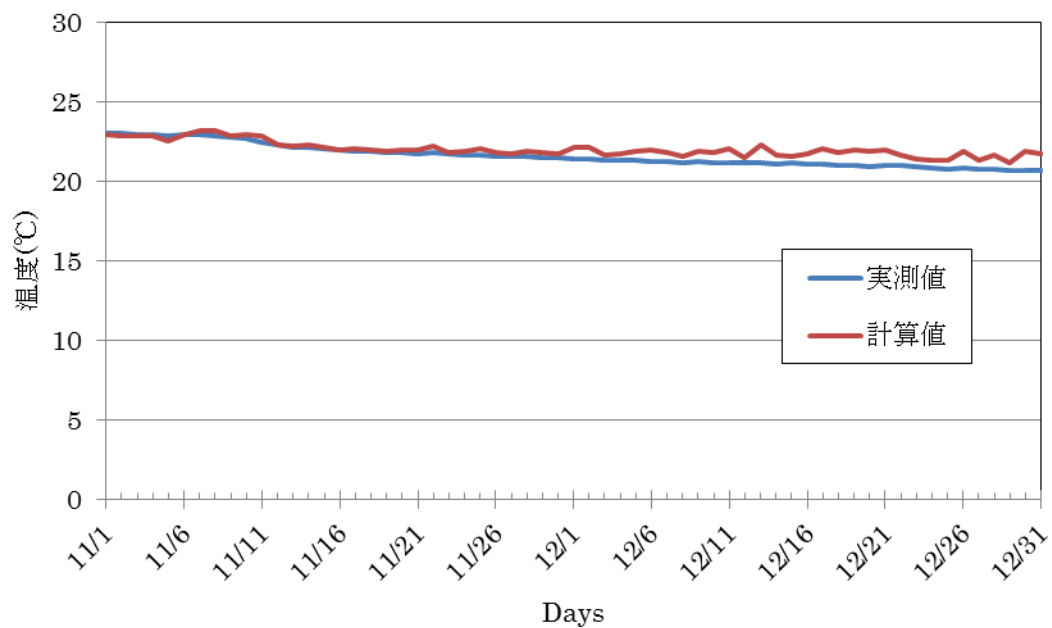


図 4.28 南壁面中央の壁面温度比較

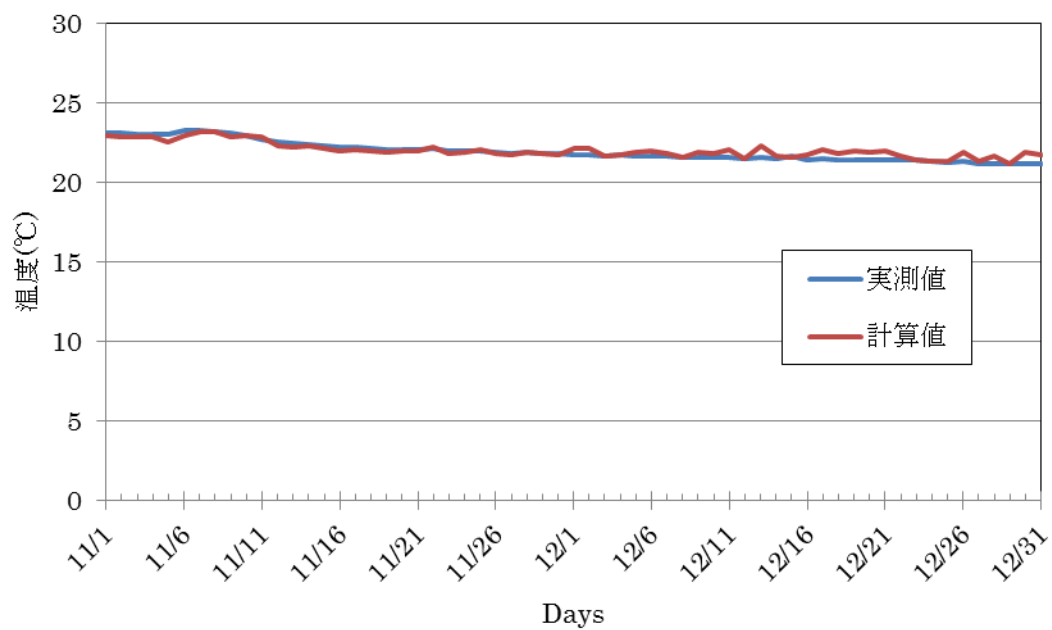


図 4.29 北壁面中央の壁面温度比較



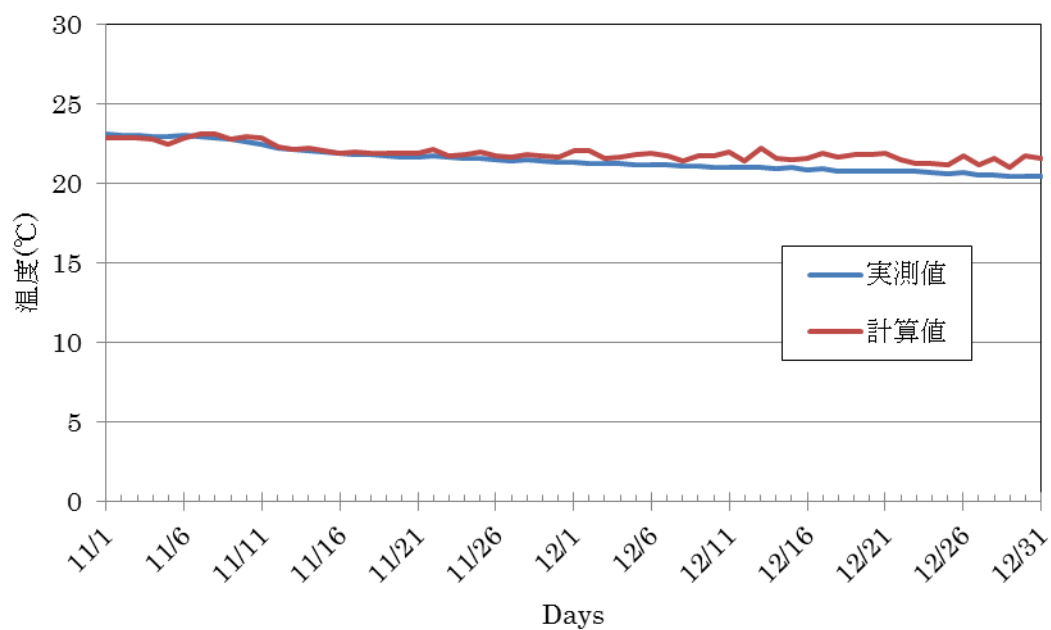


図 4.30 西壁面中央の壁面温度比較

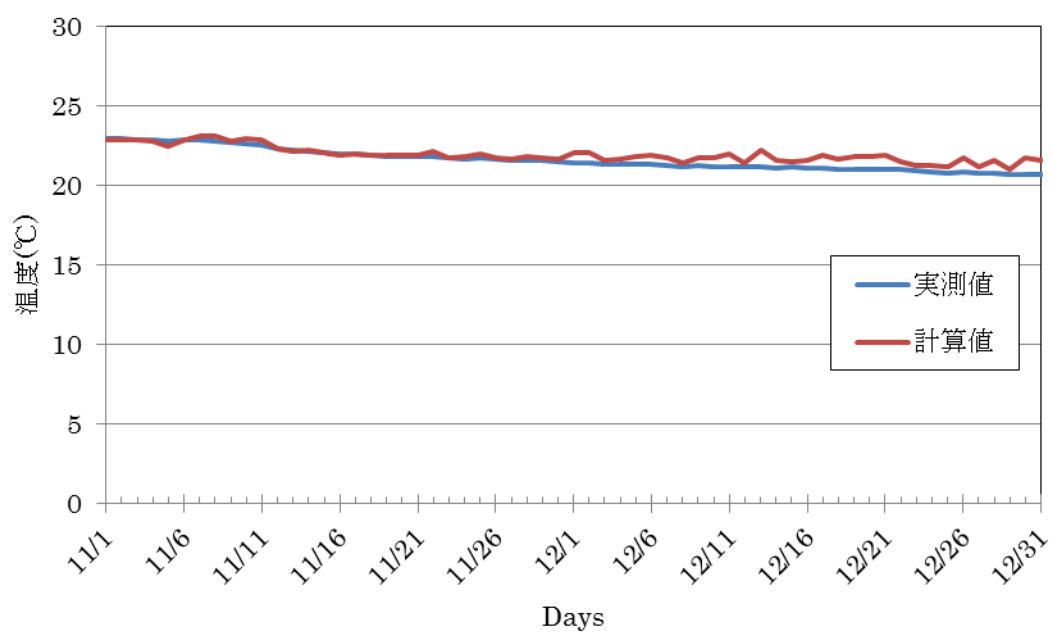


図 4.31 東壁面中央の壁面温度比較

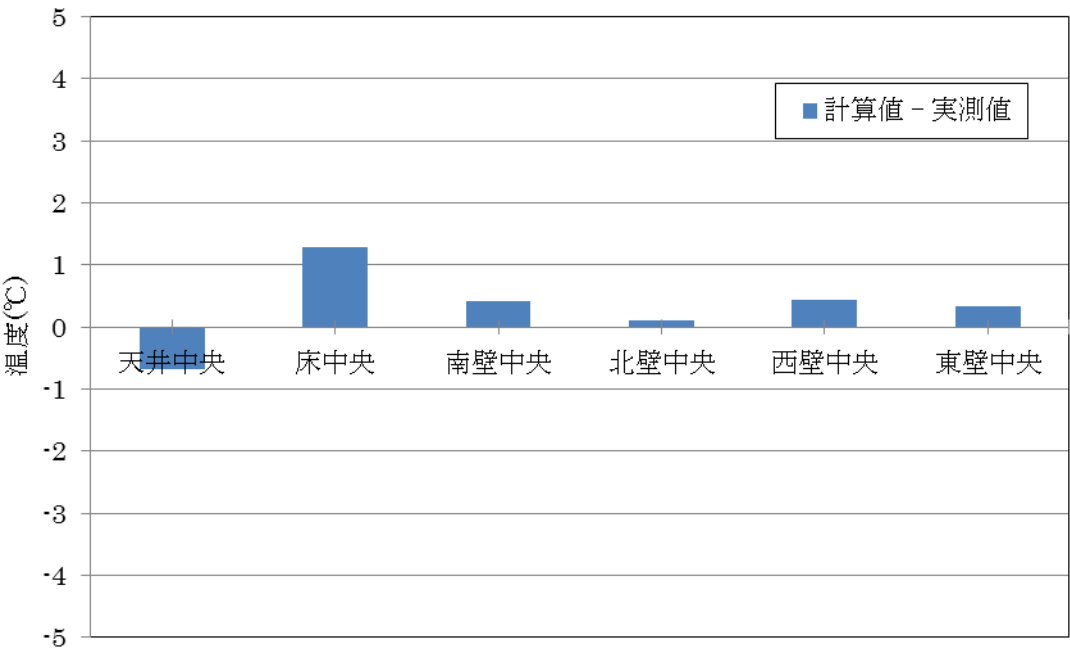


図 4.32 部位別平均壁面温度差

#### 4.5.2 内部発熱と全熱負荷の比較

ここでは、内部発熱と全熱負荷の実測値と計算値の比較を行う。実測値の換気回数は、全熱負荷が内部発熱と良く一致していた 3.2 回/h とした。また、計算値の全熱負荷については換気回数を 3.2 回/h と 2.2 回/h の二つで比較を行う。

図 4.33 に内部発熱と全熱負荷の比較結果を示す。全熱負荷について、括弧内に換気回数を示す。内部発熱と実測値の全熱負荷は 4.4.2 で示した通り良く一致している。全熱負荷の計算値に関して、11 月 23 日、12 月 3 日、13 日、22 日、30 日の前後で熱負荷に大きな変動が見られるが、この日は雨が降っており、降雨による水分性状の変化が計算結果に影響を与えたと考えられる。換気回数を 3.2 回/h とした全熱負荷の計算値と実測値の比較について、計算値の熱負荷の方が大きくなっている。4.5.1 での部位別壁体表面顕熱流比較で全ての点において、計算値の熱流の方が大きくなっていたため全熱負荷も計算値の方が大きくなったと考えられる。また、全熱負荷の計算値(換気回数 3.2 回/h と 2.2 回/h)について、換気回数が 2.2 回/h の方は換気熱負荷が減少した分、内部発熱に近い値となっているが、貫流熱負荷が大きいため内部発熱、実測値と比べて大きい値となっている。

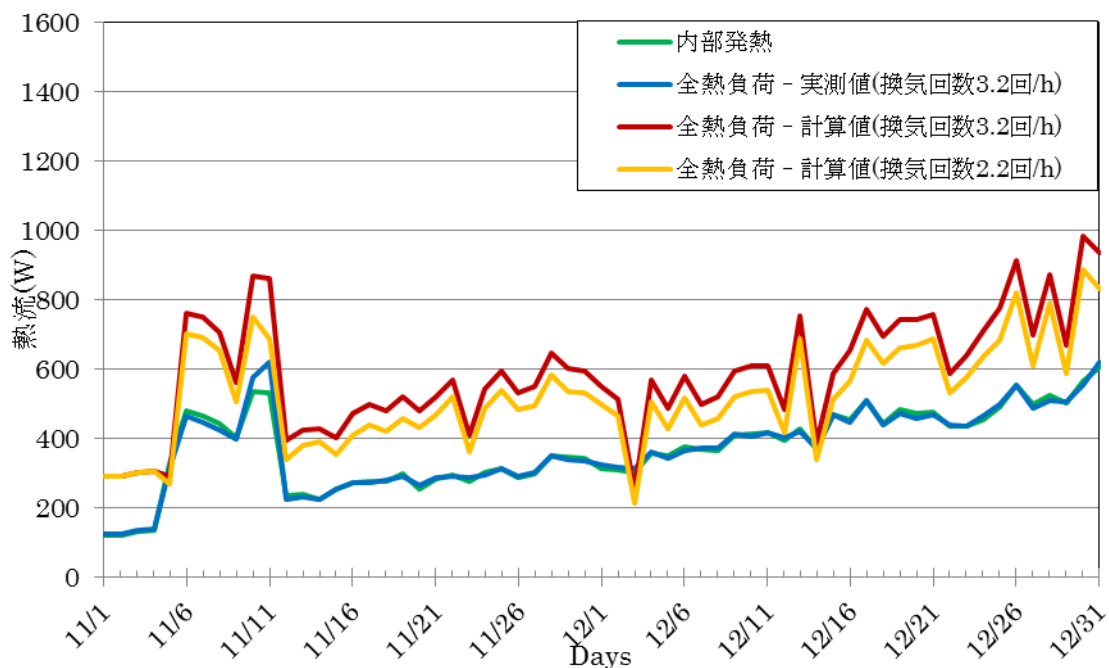


図 4.33 全熱負荷と内部発熱比較

## 4.5.3 平均放射温度と室温の比較

ここでは、地下室の平均壁面放射温度と室温の比較を行う。地下構造物の躯体はコンクリート単層壁であり断熱処理は施されていないため、平均放射温度は室温よりも低くなると予想される。実際に比較したものを図 4.34 に示す。図から平均放射温度は室温よりも低く、室温がほぼ一定であるのに対し、平均放射温度は徐々に低下しているのが判る。これは、地下室壁体が周辺土壌の温度から影響を受けているためと考えられる。しかし、地下室は断熱処理されていないにもかかわらず平均放射温度は 12 月でも 20℃を下回っていないことが判る。以上の事から、地下空間は断熱性に優れていることが判る。

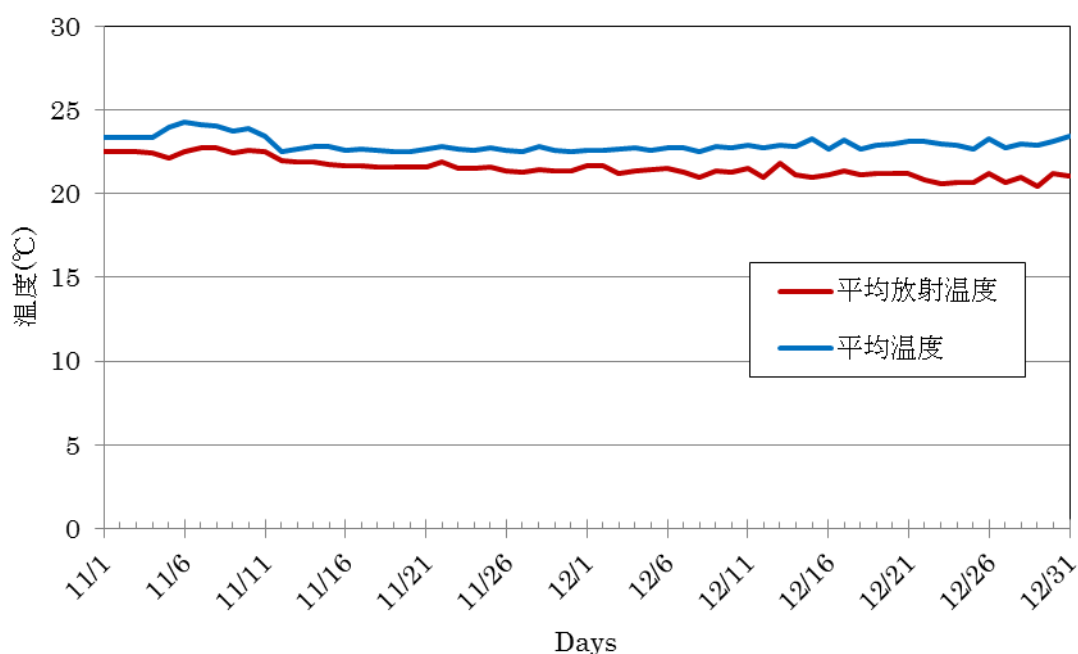


図 4.34 平均放射温度と室温の比較

## 4.6 第4章のまとめ

内部発熱条件下での地下構造物及びその周辺地盤における熱負荷の特性と熱・水分性状を把握するためフィールド実験を行い、完全埋設型実験地下室におけるフィールド実験の実験装置の概要、実験方法及び計測方法を示した。また、2010年11月～2010年12月の2ヶ月間、地下室壁体表面顕熱流について、対称であると思われる箇所を比較し、顕熱流の等方性の確認を行った。

さらに、非線形熱・水分同時移動モデルを用いて計算した解と実験地下室において計測した壁面表面温度・顕熱流の実測値との部位別比較、内部発熱と全熱負荷の計算値と実測値の比較を行い、非線形計算解の正確性の検討を行い、平均放射温度と室温の比較を行うことで室内の快適性の検討を行った。

得られた結論は以下の通りである。

1. 壁面下部での比較では南壁と西壁に違いが見られるが、これは換気によって生じる風速が熱流計に影響を及ぼし、正確な熱流の実測が困難であったと考えられる。そのため、壁体表面顕熱流に方位による違いはなく、等方性が確認できたと言える。
2. 温熱式電熱ヒーターによる内部発熱と地下室の貫流熱負荷と換気熱負荷を合計した全熱負荷の比較を行った。換気回数の計測は行っていないため、内部発熱と全熱負荷が一致する様に換気熱負荷を求め、3.2回/hとした。また、換気回数を2.2回/h、4.2回/hとして求めた全熱負荷との比較を行い、換気回数による全熱負荷の違いも示した。
3. 比較結果から、換気回数3.2回/hの全熱負荷は内部発熱と概ね一致している事が判る。しかし、これは推定値であるため、正確な回数とは言えない。また、換気回数1回/h毎で平均して熱負荷に約70Wの違いが生じる事が判った。また、11月5日までは換気を行っていないため、全熱負荷は全て一致している。11月5日～11日は12日以降と比べ内部発熱、全熱負荷ともに大きくなっているが、これは11月5日～11日は12日以降よりも換気量が多かったためと考えられる。
4. 部位別壁体表面顕熱流比較において、各面中央部においては計算値と実測値が比較的一致していることが判った。それに対して、隅角部では計算値と実測値に違いが見られた。また、方位別で見ると、東西方向の方が南北方向と比べ計算値と実測値の違いが大きい事が判った。これは東西方向の方が室の幅が短く、壁面の隅角部における熱流の影響が大きいと考えられる。以上の事から、各面中央部は比較的精度良く顕熱流を予測できるが、隅角部の正確な予測は難しいと考えられる。
5. 部位別壁面温度比較において、天井面と床面は多少計算値と実測値の違いが見られるが、どの面も概ね一致した。また、天井面は計算値の方が実測値よりも高く、床面は計算値の方が実測値よりも低い結果となった。これは、実際の地下室内の空気には温度分布があるためと考えられる。

6. 内部発熱と全熱負荷の比較では、計算値が内部発熱、実測値よりも熱負荷が大きい事が判った。部位別熱流比較で全ての箇所において計算値の方が実測値より熱流が大きくなっていたため、全熱負荷でも計算値の方が大きくなった。計算値の全熱負荷で換気回数を1回/h 少なくしたものと比較しても、内部発熱や実測値よりも大きくなった。これは計算値の貫流熱負荷が実測値に比べて大きく、換気負荷の減少分の影響が少なかったためであると考えられる。
7. 平均放射温度と室温の比較では、平均放射温度は室温よりも常に低く、室温がほぼ一定なのに対し、平均放射温度は徐々に低下していることが判った。

## 第 5 章

### 地下構造物の貫流熱負荷の線形近似予測理論

## 第 5 章 地下構造物の貫流熱負荷の線形近似予測理論

### 5.1 はじめに

本章では、第 6 章～第 7 章で使用する地下構造物の貫流熱負荷の線形近似予測を行う際の線形近似予測理論を示す。

### 5.2 線形近似予測理論概要

本研究では、各種外界条件の微小変化に対する地下構造物内表面擬線形顕熱流解を用いて線形近似予測を行う。

対象とする系が線形、時不変である場合の任意の励振と応答はディアメルの定理[33]で表現され、Impulse 関数あるいは Dirac のデルタ関数に対する系の応答である重み関数を  $h_{\phi}(t)$  とすれば、任意の外乱  $\Theta(t)$  に対する応答  $q(t)$  は次式で表現される。

$$q(t) = \int_0^{\infty} h_{\phi}(\tau) \Theta(t - \tau) d\tau = \int_0^{\infty} h_{\phi}(t - \tau) \Theta(\tau) d\tau \quad (5.1)$$

本研究で対象とする系は非線形熱水分同時移動系であるので、重み関数  $h_{\phi}(t)$  は時変系であり、また線形系のように論理的に求めることはできず、各種外乱に対する地下室内表面平均顕熱流の近似単位応答を用いて任意の外乱に対する地下室内表面貫流熱流を求めることは極めて困難となる。しかしながら、各種外乱の励振に対する重み関数（単位応答の導関数）の時変性が極めて小さく、これを近似的に時不変として取り扱うことが可能であれば、線形近似的に関数表現した単位応答を用いて式 5.1 により各種外乱に対して応答を求めることが可能となる。

なお、ここでは通常の負荷計算同様に離散的に得られている外乱(各種外界気象データ)に対する適用を考え、第 6 章～7 章で示す近似単位応答から応答係数を算出し、応答係数法により外気温度との畳み込み演算を行った。本論では、第 6 章～7 章においてこれらの応答係数を用い、東京の拡張アメダスデータを用いた気象条件下での任意形状の地下構造物の室内表面貫流熱流を算出する。



### 5.3 第 5 章のまとめ

本章では地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測を行う際に使用する線形近似予測手法について示した。あらかじめ非線形熱水分同時移動理論を使用して算出された外乱の単位変化に対する室顕熱流単位応答から得られる近似単位応答を使用し、近似単位応答から算出される応答係数と本研究で外乱とした外気温の畳込み演算を行うことで地下構造物の貫流熱流予測が可能となる。その結果、線形近似計算の計算時間のみを考えると、非線形熱水分同時移動理論によって貫流熱流を算出する際に比べて計算時間の大幅な短縮が可能になる。次章では本章で示した線形近似予測理論を用いて実際の地下構造物をモデル化し、貫流熱流の線形近似予測を行う。

## 第 6 章

### 完全埋設型地下構造物における 貫流熱負荷の線形近似予測

## 第 6 章 完全埋設型地下構造物における熱負荷の線形近似予測

### 6.1 はじめに

本章では、三重大学構内の完全埋設型実験地下室をモデルに、第 2 章で示した非線形熱水分・同時移動方程式を使用して解析した貫流熱負荷を正確解とし、前章で示した線形近似理論を用いた貫流熱負荷予測の精度の検討を行う。また、貫流熱負荷の線形近似予測を行う際に問題となる多大な計算時間を解消するため、ある基準の床面積の地下構造物において温熱環境毎に分割して室顕熱単位応答を算出し、それを基準単位応答として任意形状の地下構造物への適用し、貫流熱負荷の線形近似予測、検討を行う。

### 6.2 解析対象および解析手法の概要

#### 6.2.1 解析対象

本章でのシミュレーションに使用する解析対象の地下構造物は、第 3 章で示した三重大学構内の建築学科棟脇の敷地に建設されたコンクリート単層壁の完全埋設型実験地下室である。

#### 6.2.2 計算条件、基準外界気象条件

第 2 章で示した非線形・熱水分同時移動方程式を使用して解析を行う際には、計算の簡略化の為に 3 次元系を短辺方向の 2 次元系としている。境界条件は地表面及び地下室の内壁面表面は第 3 種境界条件とした。地盤底部は第 1 種境界条件とし、温度及び水分化学ポテンシャルはそれぞれ（年平均気温）、 $-1.0\text{J/kg}$  とした。また地盤計算領域側面は地下室壁体から  $8.0\text{[m]}$  の位置とし、断熱・断湿とする第 2 種境界条件とした。地下室内条件は室内温度  $22^{\circ}\text{C}$ 、室内相対湿度  $50\%$  で年間一定である。

解析に用いた物性値は、Jury により測定された Plainfield Sand の値[23]とし、コンクリートの物性値については、Hedenblad の測定値[25]を基に小椋らが推定した値[32]を用いた。解析に用いたコンクリート及び Plainfield Sand の平衡含水率曲線、並びに熱伝導率（ $\lambda + r\lambda'_{Tg}$ ）は図 3.5、図 3.6、図 3.10、図 3.11 に示した通りである。また、数値解析に用いたその他の物性値を表 6.1 に示す。なお、湿気伝達率は Lewis 関係により対流伝達率から求めた値[22]とし、地表面日射反射率（吸収率）はアルベド実測値の年平均値で一定、夜間放射は雲量補正した Brunt の式から大気放射を推定している。

計算方法は前進型有限差分法を用いた。地下室及びその周辺地盤の空間刻みは、地盤については鉛直方向が 0.025～2.0[m]、水平方向が 0.01～1.0[m]である。壁体については 0.01～0.05[m]とした。質点数は解析領域（9.25[m]×16.5[m]、水平方向は対称性を考慮し、室の中央から半分の領域）に対して 1128 点（24×47）である。計算時間刻みは 15 秒とし、降雨時及び降雨後 15 分間は発散を防ぐ為 5 秒間隔とした。

表 6.1 解析に用いた物性値

空気の容積比熱 $c\gamma$ [J/m <sup>3</sup> K]		1256.0
空気の湿気容量 $c'\gamma'$ [kg/m <sup>3</sup> Pa]		$7.5\times 10^{-6}$
総合熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> K]	室内側 $\alpha_i$	9.30
	外気側 $\alpha_o$	23.26
湿気伝達率 [kg/m <sup>2</sup> s Pa]	室内側 $\alpha'_{mi}$	$2.85\times 10^{-8}$
	外気側 $\alpha'_{mo}$	$1.14\times 10^{-7}$
地表面日射吸収率／地表面放射率 0.83 [-]／0.9[-]		

解析に用いる外気温、外気相対湿度、水平面全天日射量、降雨量の基準外界気象条件は、拡張アメダスの 1 時間毎のデータを用い、基準地域は東京とした。

また、室内温湿度は年間を通して 22℃、50%一定とした。

### 6.2.3 解析手法概要

本章では住宅規模での地下構造物の室表面貫流熱流の簡易計算手法の確立を目的に、基準となる室顕熱流単位応答を算出し、それを基準単位応答として任意形状の地下構造物の室表面貫流熱流の線形近似予測を行う際に使用した場合の精度検証を行う。

前章から判るように、地下構造物は同じ室内でも地表面からの距離等によって貫流熱流が大きく異なる。よって、室全体の室顕熱流単位応答で線形近似計算を行い、それを任意形状の地下構造物に適用した場合、予測精度が悪化する恐れがある。そこで本章では任意形状への基準単位応答の適用を考慮し、天井面、床面、壁面を貫流熱流によって分割し、分割したそれぞれの部位ごとに室顕熱流単位応答を算出し、それを基準単位応答として使用し、任意形状の地下構造物の室表面貫流熱流の線形近似予測を行う。しかしながら、室顕熱流単位応答を複数使用して室表面貫流熱流の線形近似予測を行う場合、室全体で一つの室顕熱流単位応答で線形近似計算する場合に比べ近似する単位応答の総数が多くなるため、線形近似による誤差が大きくなる可能性がある。そのため本章では線形近似予測精度を検討する際に基準単位応答を作成した地下構造物において貫流熱流予測を行う際に、室全体で一つの室顕熱流単位応答を作成した場合と、部位毎で室顕熱流単位応答を作成した場合との比較を合わせて行う。

### 6.3 各部位の熱負荷の比較

図 6.1～6.3 に天井面、壁面、床面の各部位の非線形解の年変動を示す。天井面と床面においては 0.25m 毎の 4 つの地点、壁面においては 0.2m 毎の 10 地点に分割し、それぞれの部位ごとの熱流を比較する。天井面と床面には中央部から隅角部に向かって 1～4 の番号で、壁面においては上部から下部に向かって 1～10 の番号で表示している。壁面では地表面に近い部位は貫流熱流の年間変動が大きく、天井面と床面では隅角部に近くなるほど年間変動が大きい結果となった。よって基準単位応答を使用して貫流熱流の線形近似予測を行う際には、貫流熱流の違いを考慮し、基準単位応答を複数作成して線形近似計算を行うこととした。本論では、室顕熱流単位応答を、図 6.4 のように天井は **Ceiling-A** ならびに **Ceiling-B**、壁面は **Wall-A**～**Wall-D**、床面は **Floor-A**～**Floor-C** の合計 9 つの部位に分けて算出し、計算を行う。図 6.5～6.7 に分類後の各部位の非線形解の年変動を示す。

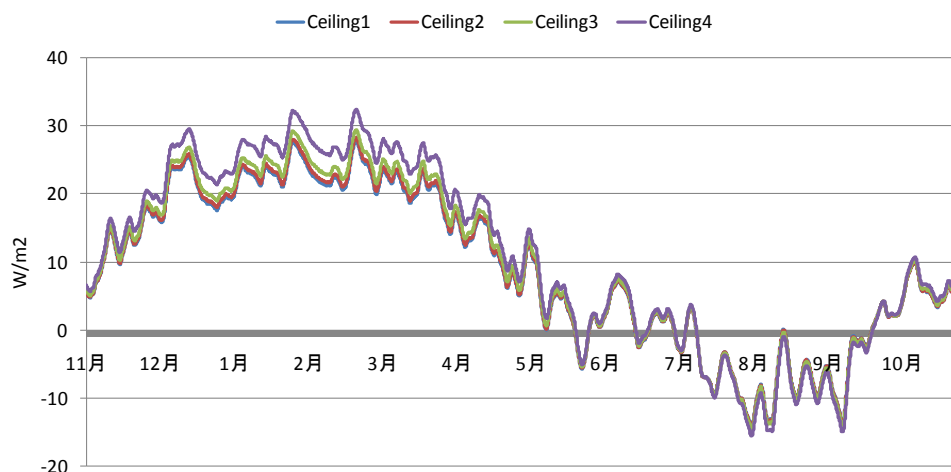


図 6.1 天井面の各部位の貫流熱流比較

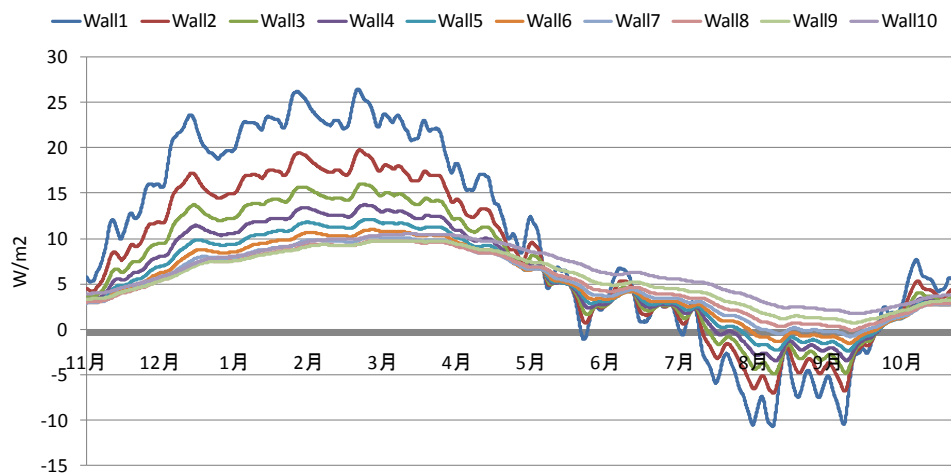


図 6.2 壁面の各部位の貫流熱流比較

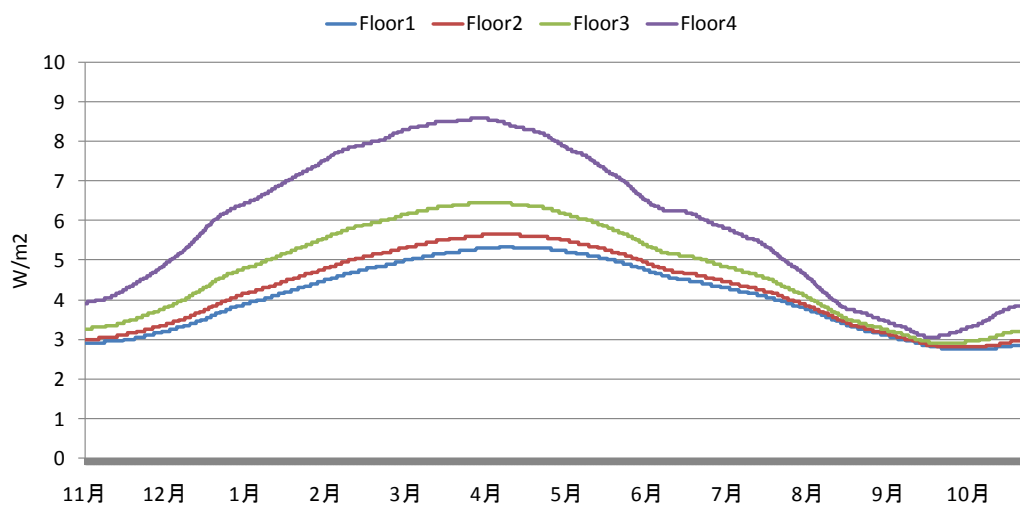


図 6.3 床面の各部位の貫流熱流比較

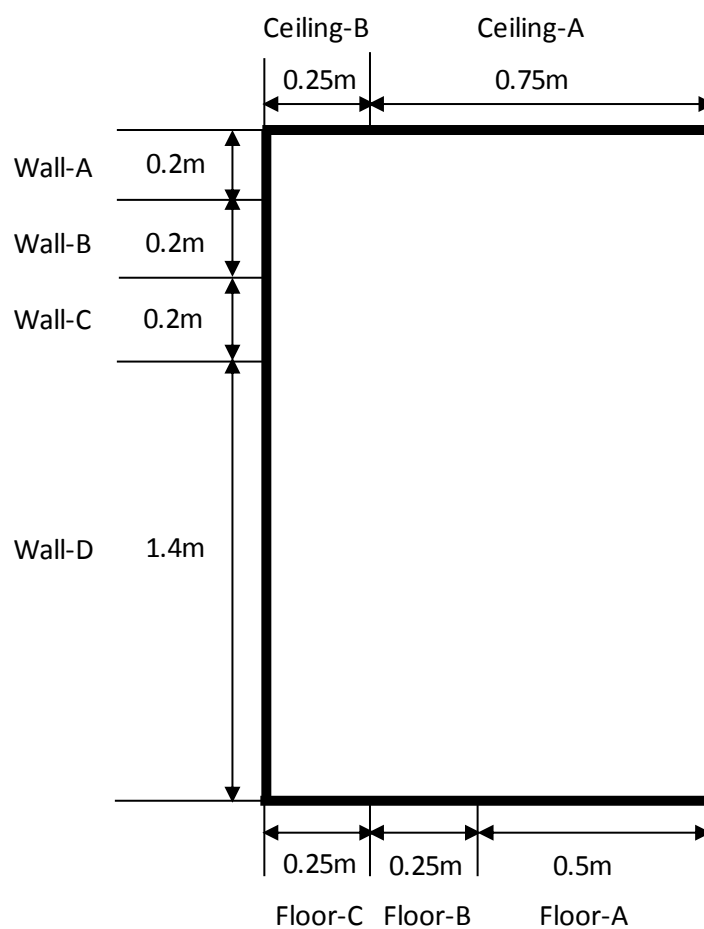


図 6.4 各部位の分割概要図

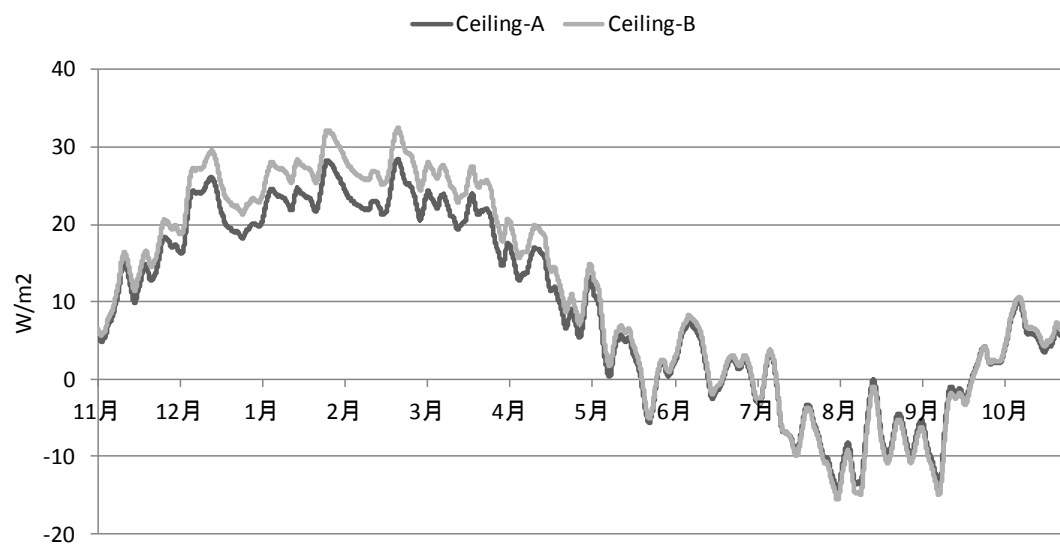


図 6.5 天井面の各部位の貫流熱流比較(分類後)

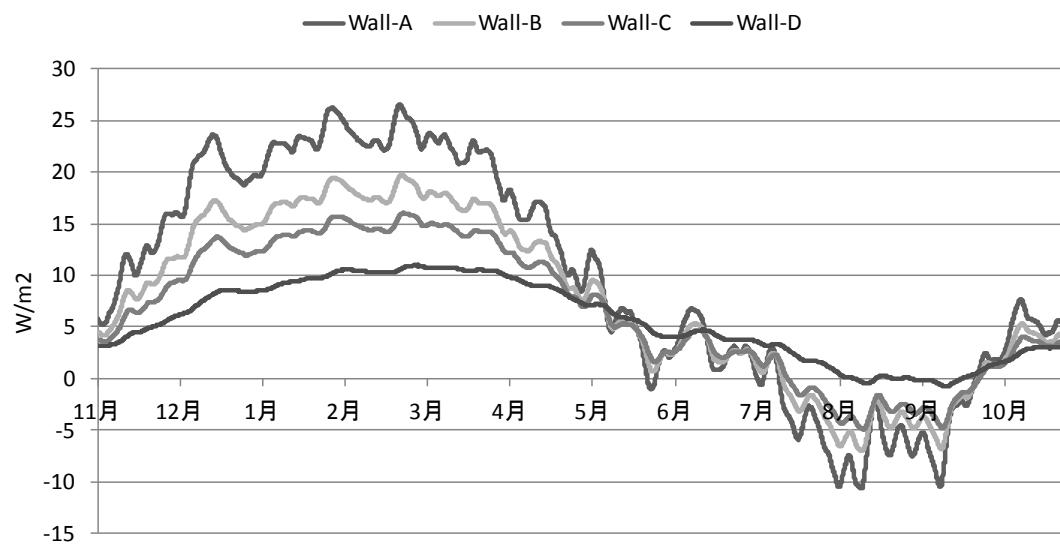


図 6.6 壁面の各部位の貫流熱流比較(分類後)

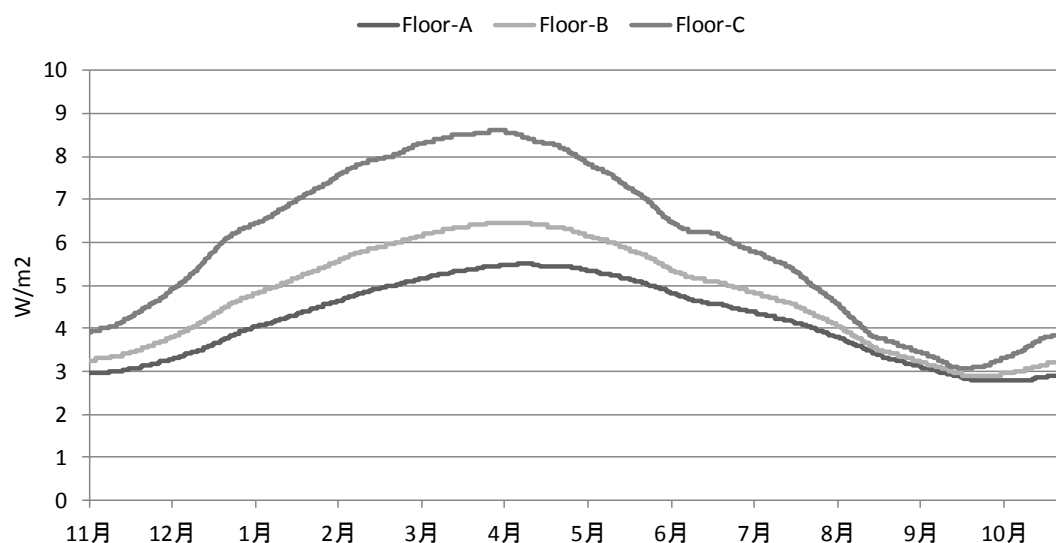


図 6.7 床面の各部位の貫流熱流比較(分類後)

#### 6.4 各部位における基準外乱変動に対する室顕熱流単位応答の時変性

前節の分割概要に基づき、本節では各部位において非線形熱水分同時移動理論により基準地域における外界気象条件の微小変化に対する擬線形解を算出し、その時変性の有無を確認することで、外界気象が任意に時間変動する場合の室内表面貫流熱流を線形近似的に予測することが可能であることを確認する。しかしながら、各種外界気象条件の微小変化に対する地下室内表面での湿流変化については、非線形基準解による湿流に比して無視し得るほど小さく、負荷計算問題においては算出する必要が無いことが山添[19]の論文で示されたため、非線形熱水分同時移動方程式を用いた非線形計算において、外界条件が単位変化した場合の地下室内顕熱流の応答を算出し、基準非線形解との差から単位応答(貫流応答)を算出した。なお、外界条件については、山添[19]の論文よりその応答が最も大きい外気温を外乱とした。

図 6.8～図 6.17 に基準外気温が 3 月、6 月、9 月、12 月のそれぞれ 1 日 0 時に単位変化した場合の各部位ならびに室全体の地下室内表面顕熱流の単位応答を示す。図に示すように、各図の各時期の曲線はほぼ一本の曲線とみなすことができる為、単位応答の時変性は小さく、概ね一本の曲線と近似可能と言える。図 6.18～図 6.21 に各部位の地下室内表面顕熱流の単位応答の近似曲線を示すとともに各単位応答の平均値から指数項 3 項で近似した外気温変化に対する地下室内表面平均顕熱流単位応答の近似関数を示す。



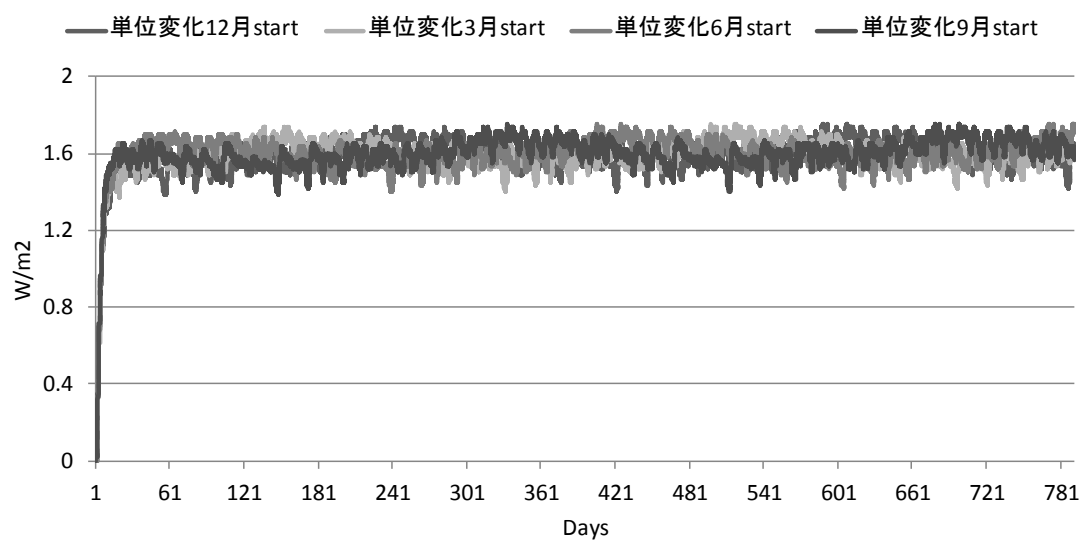


図 6.8 Ceiling-A の室顕熱流単位応答

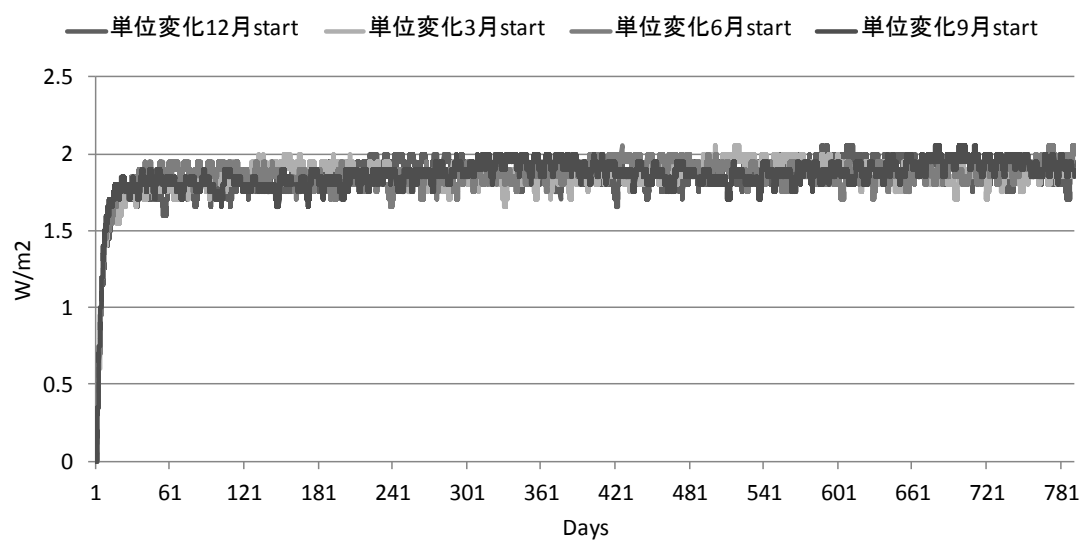


図 6.9 Ceiling-B の室顕熱流単位応答

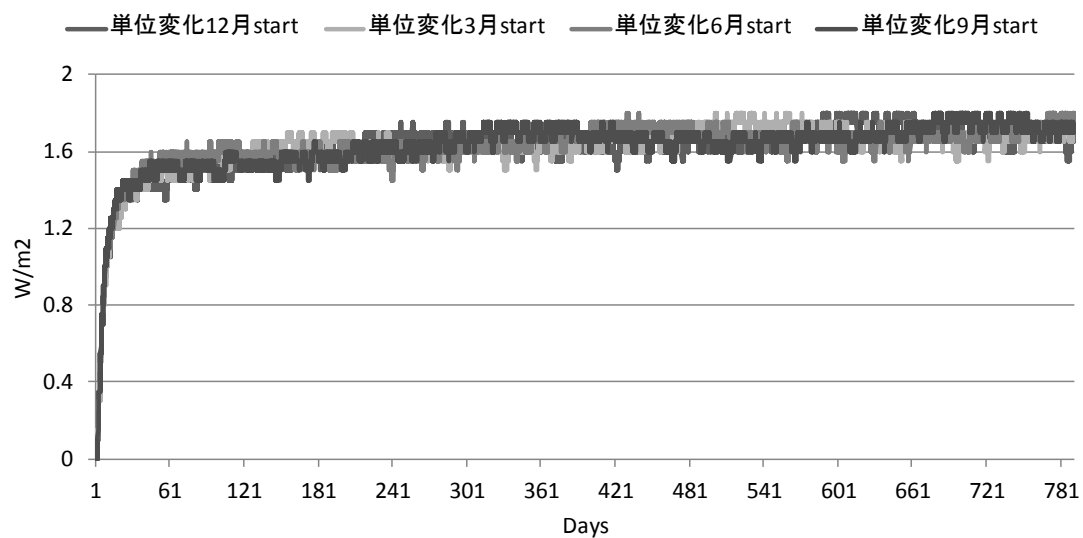


図 6.10 Wall-A の室頭熱流単位応答

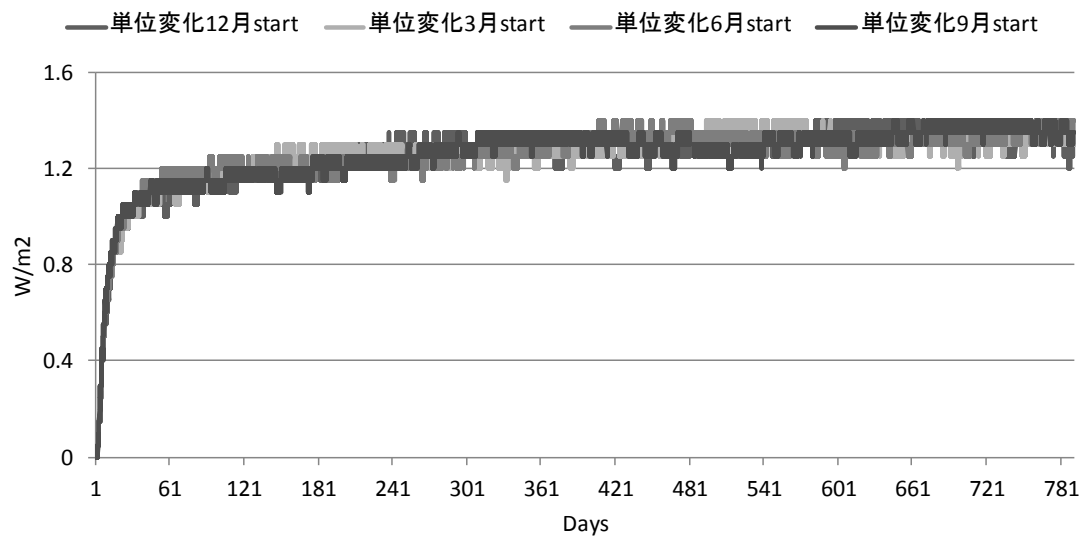


図 6.11 Wall-B の室頭熱流単位応答

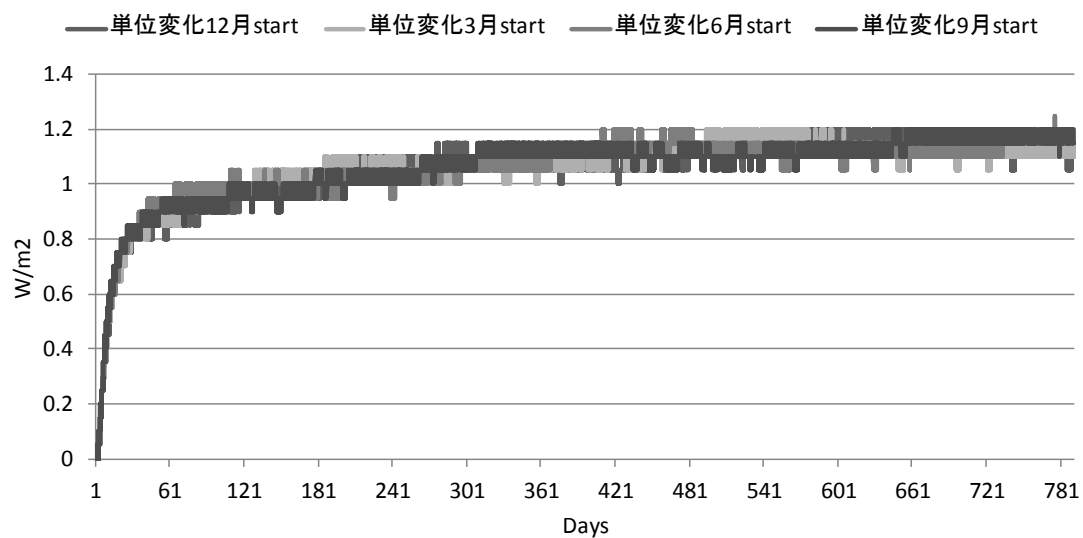


図 6.12 Wall-C の室頭熱流単位応答

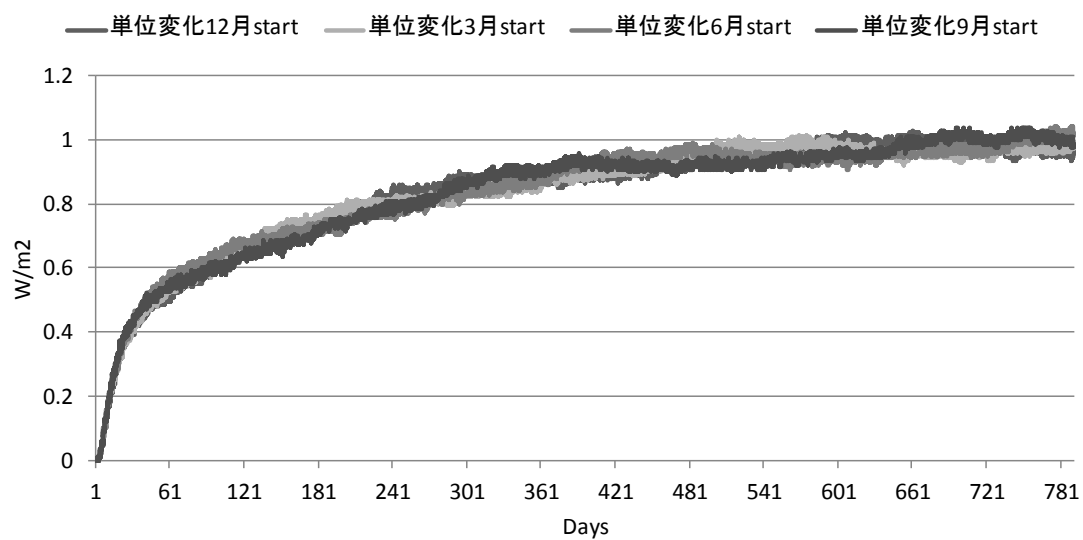


図 6.13 Wall-D の室頭熱流単位応答

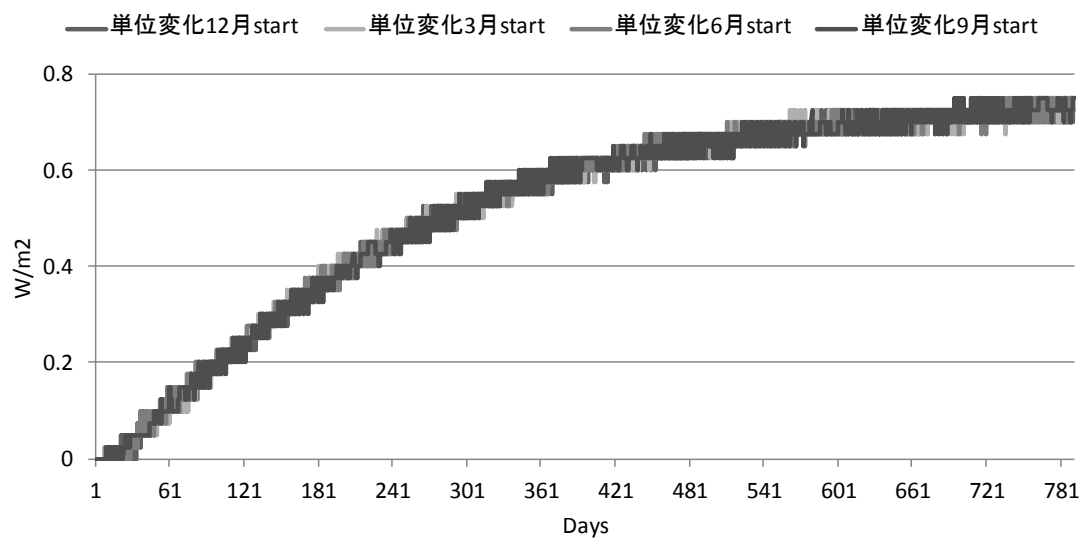


図 6.14 Floor-A の室頭熱流単位応答

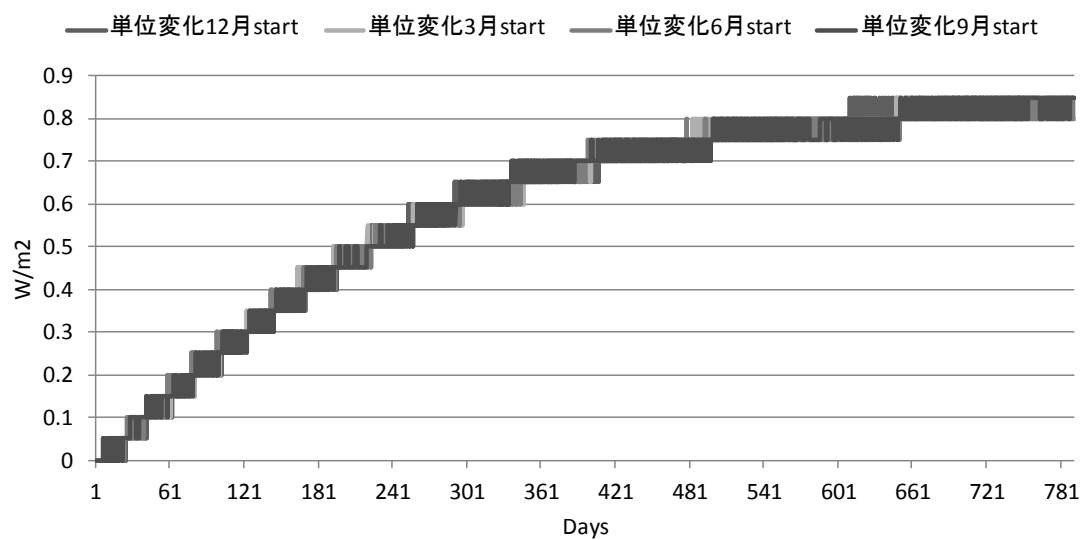


図 6.15 Floor-B の室頭熱流単位応答

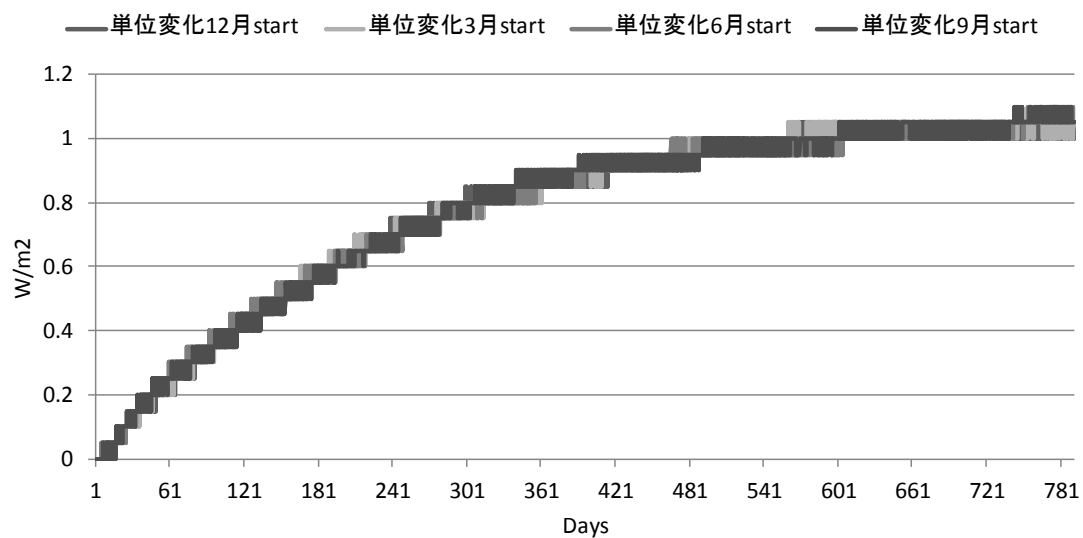


図 6.16 Floor-C の室顕熱流単位応答

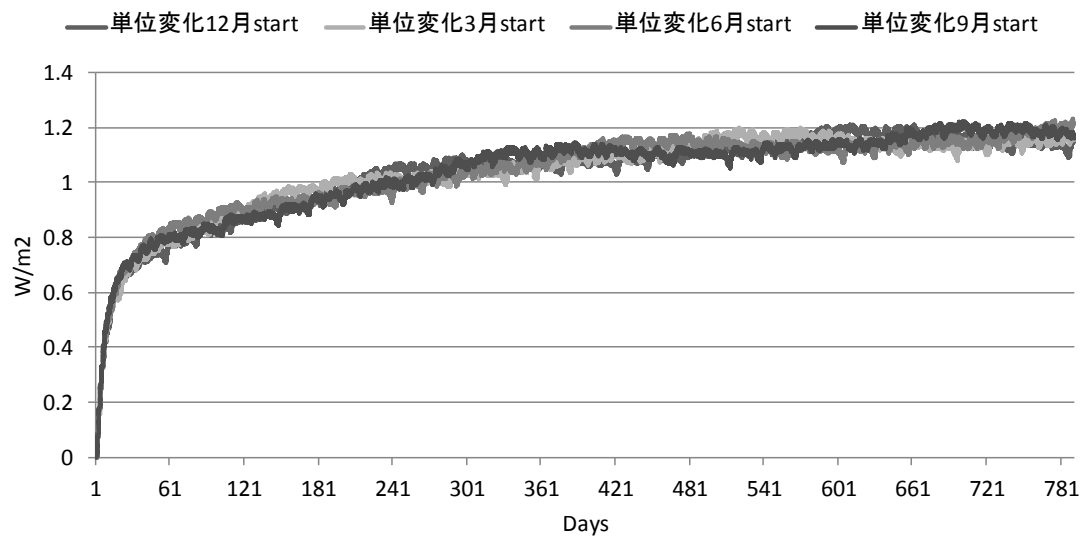


図 6.17 室全体の室顕熱流単位応答

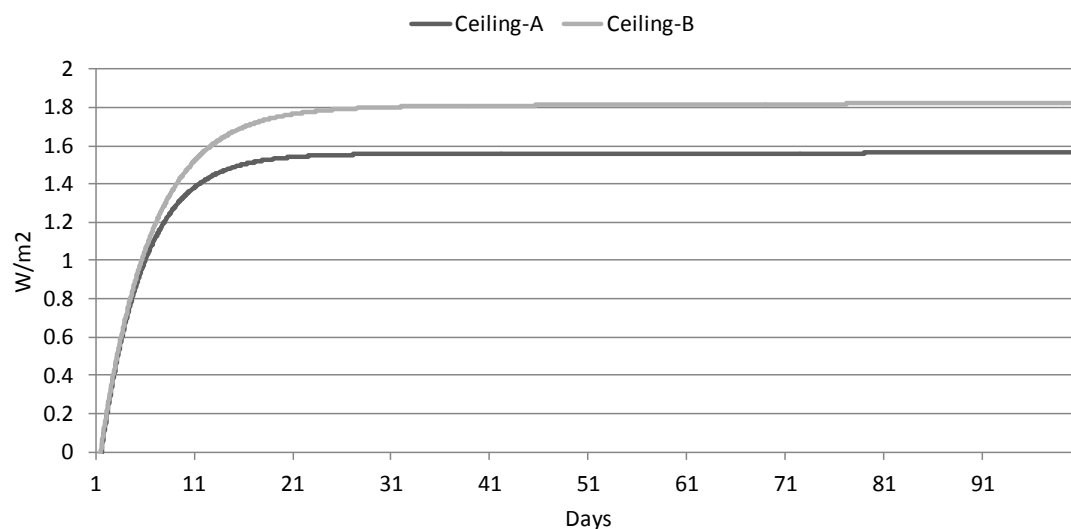


図 6.18 天井面の各部位の室顕熱流単位応答の近似曲線

Ceiling-A  $\phi(t) = 1.65 - 0.67e^{-0.00025t} + 0.58e^{-0.0003t} - 1.84e^{-0.0096t}$

Ceiling-B  $\phi(t) = 1.94 - 0.6e^{-0.00011t} + 0.46e^{-0.00012t} - 2.04e^{-0.0081t}$

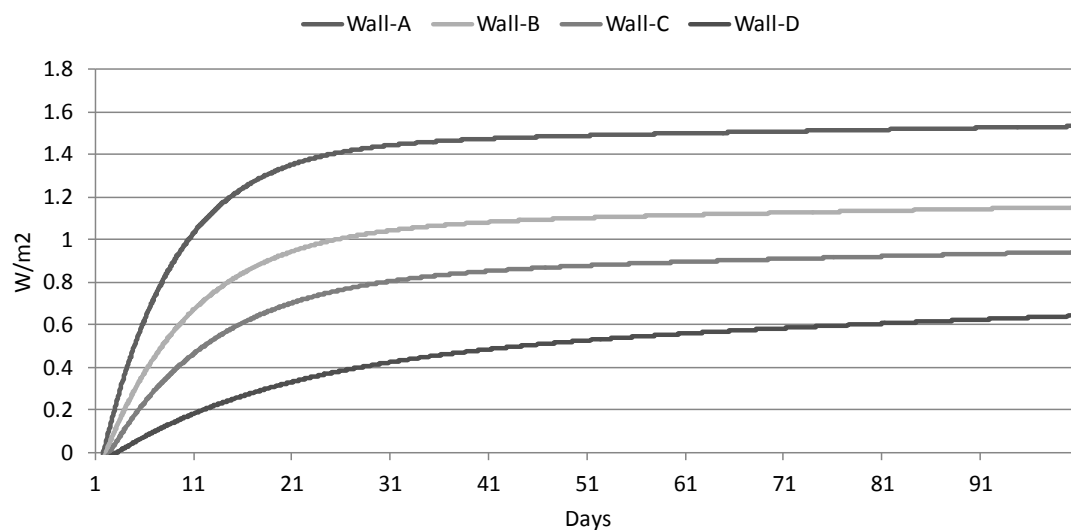


図 6.19 壁面の各部位の室顕熱流単位応答の近似曲線

Wall-A  $\phi(t) = 1.71 - 0.7e^{-0.00019t} + 0.43e^{-0.0002t} - 1.62e^{-0.0056t}$

Wall-B  $\phi(t) = 1.35 - 0.7e^{-0.0002t} + 0.4e^{-0.00022t} - 1.19e^{-0.0046t}$

Wall-C  $\phi(t) = 1.15 - 0.5e^{-0.00025t} + 0.17e^{-0.00039t} - 0.95e^{-0.0039t}$

Wall-D  $\phi(t) = 0.98 - 1.01e^{-0.00025t} + 0.48e^{-0.00033t} - 0.52e^{-0.0024t}$

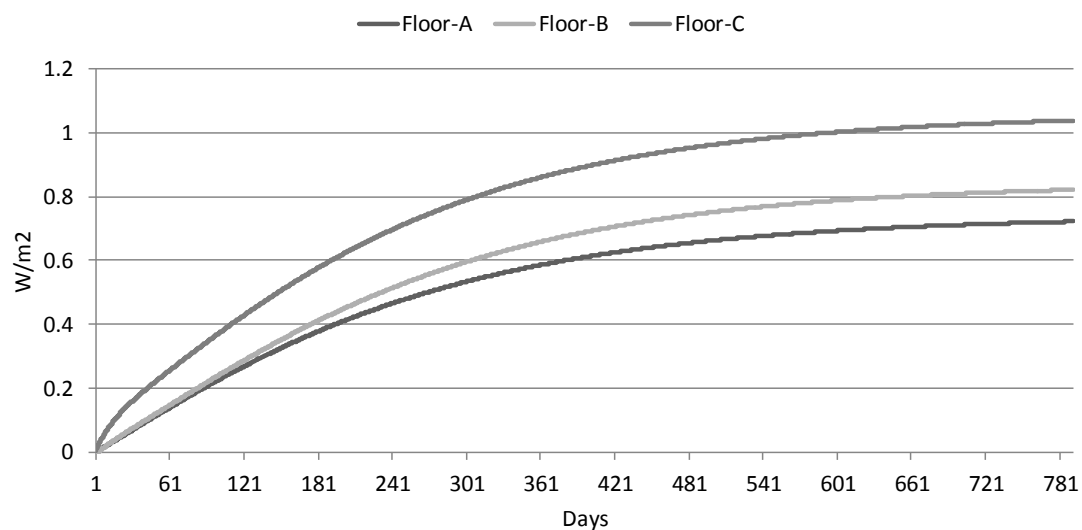


図 6.20 床面の各部位の室顕熱流単位応答の近似曲線

Floor-A  $\phi(t) = 0.74 - 0.97e^{-0.00021t} + 0.23e^{-0.00048t} - 0.0016e^{-0.0048t}$

Floor-B  $\phi(t) = 0.84 - 1.49e^{-0.00023t} + 0.66e^{-0.00039t} - 0.017e^{-0.003t}$

Floor-C  $\phi(t) = 1.06 - 1.37e^{-0.00022t} + 0.4e^{-0.0005t} - 0.087e^{-0.003t}$

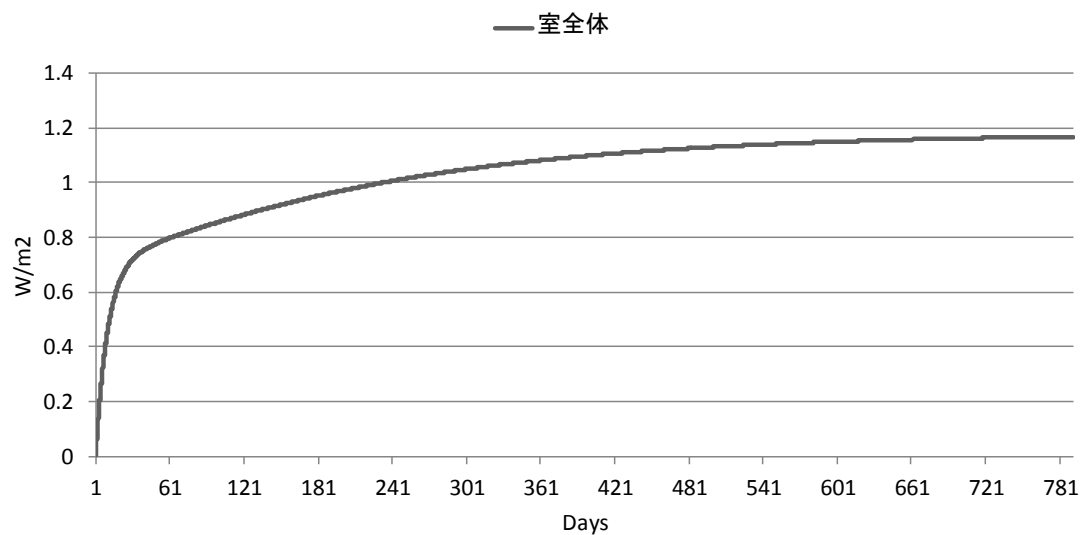


図 6.21 室全体の室顕熱流単位応答の近似曲線

室全体  $\phi(t) = 1.18 - 0.75e^{-0.00022t} + 0.27e^{-0.00034t} - 0.7e^{-0.0043t}$

## 6.5 近似単位応答を用いた線形近似予測

本章では、第4章で示した線形近似予測理論ならびに前節で示した地下室内表面平均顕熱流単位応答の近似関数から得られる応答係数と外気温との畳み込み演算によって室表面貫流熱流の線形近似計算を行い、予測精度の検討を行う。

前節で室顕熱流単位応答を算出した時と同様の大きさである2次元断面寸法2.0m(W)×2.0m(H)の地下構造物の室表面貫流熱流を室全体で一つの室顕熱流単位応答で線形近似予測した場合と各部位毎に算出した室顕熱流単位応答を使用して線形近似予測した場合の比較結果を図6.22に示し、非線形解の貫流熱流の年間最大値に対する線形近似解の一致率を表6.2に示す。図6.22ならびに表6.2が示すように、降雨量が多く、土壌内部状態量の非線形性が比較的大きく、また地表面での水分蒸発量が大きくなる夏場を除けば年間を通して概ね予測できており、比較的精度良く正確解を再現できていることが判る。また、室顕熱流単位応答を部位ごとに複数算出することによる線形近似の誤差についても、2種類の線形近似結果の差は14.8W/mと大きな差は見られず、本手法は有効であることが判った。

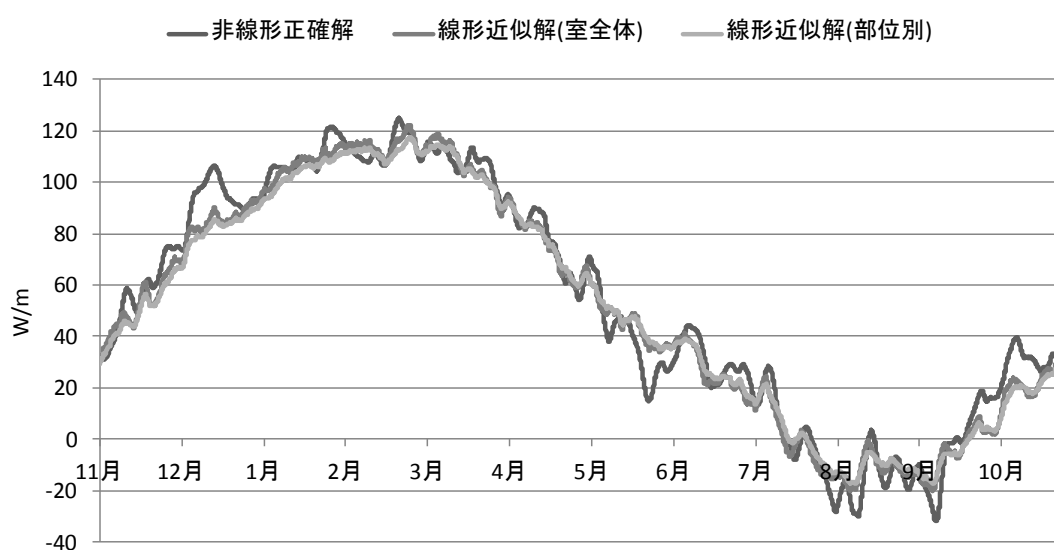


図 6.22 2次元断面寸法2.0m×2.0mの地下構造物の線形近似予測結果

表 6.2 2次元断面寸法2.0m×2.0mの地下構造物の年間最大負荷の一致率

	年間最大負荷 (W/m)	非線形解との差 (%)
非線形正確解 (W/m)	124.83	
線形近似解(室全体) (W/m)	122.36	-1.97
線形近似解(部位別) (W/m)	117.62	-5.77



## 6.6 任意の床面積における線形近似予測

### 6.6.1 適用手法概要

本節では、任意の床面積の場合に前節で示した基準単位応答を使用して線形近似計算を行う。計算対象として2次元断面の大きさが3.5m(W)×2.0m(H)と5.0m(W)×2.0m(H)の2種類の場合を対象として室表面貫流熱流の線形近似予測を行った。ここで問題になるのが、基準単位応答の適用手法についてである。そこで本論では、以下の2種類の適用手法を検討する。まず1つめの適用手法は、単純に基準単位応答を算出した部位寸法と予測したい任意寸法の地下室の部材寸法の比率から適用する近似単位応答を決める場合である。そして2つめの適用手法は、熱流の大きな隅角部は、基準単位応答と同じ適用領域(長さ)とし、その他の部分の適用範囲を部位比率により決定する場合である。上記の2種類の適用手法による線形近似計算結果を比較し、より非線形解を再現している手法を本論での適用手法とする。

### 6.6.2 線形近似予測結果と一般性の検討

2種類の計算対象における2種類の適用手法の比較結果を図6.23～6.24および表6.3～6.4に示す。結果が示すように、2つめの適用手法の方が貫流熱流の予測精度が高いことが判った。よって任意の床面積に基準単位応答を適用する際には熱流の大きな隅角部は、基準単位応答と同じ適用領域(長さ)とし、その他の部分の適用範囲を部位比率により決定する手法が有効であることが判った。

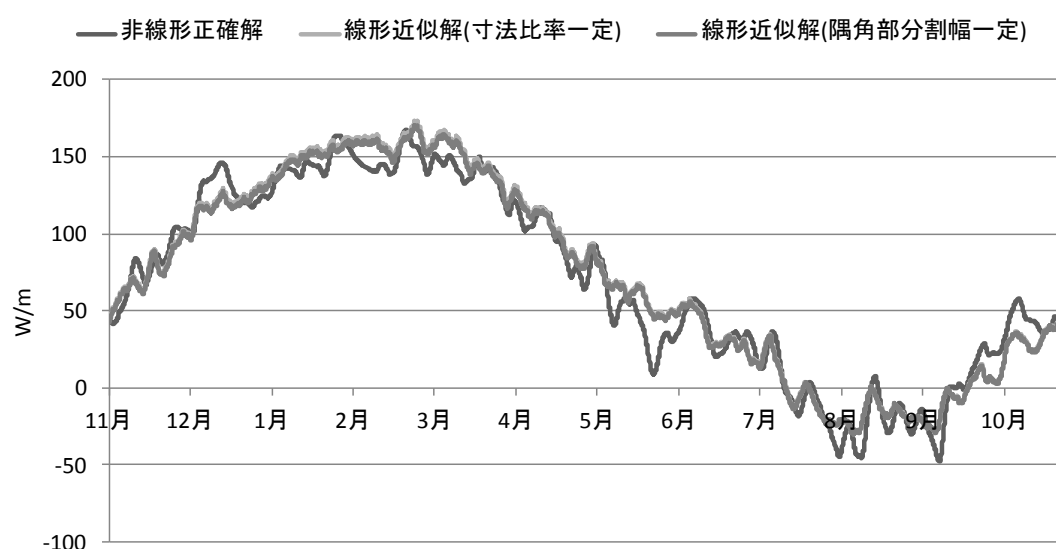


図 6.23 2次元断面寸法 3.5m×2.0m の地下構造物の線形近似予測結果

表 6.3 2次元断面寸法 3.5m×2.0m の地下構造物の年間最大負荷の一致率

	年間最大負荷 (W/m)	非線形解との差 (%)
非線形正確解 (W/m)	167.39	
線形近似解(寸法比率一定) (W/m)	173.12	3.43
線形近似解(隅角部分割幅一定) (W/m)	170.37	1.78

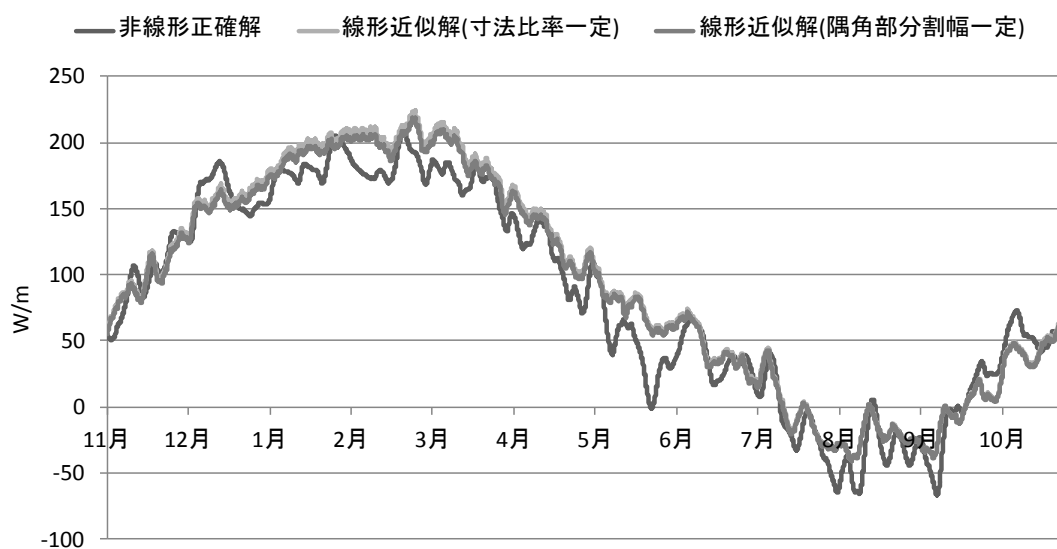


図 6.24 2次元断面寸法 5.0m×2.0m の地下構造物の線形近似予測結果

表 6.4 2次元断面寸法 5.0m×2.0m の地下構造物の年間最大負荷の一致率

	年間最大負荷 (W/m)	非線形解との差 (%)
非線形正確解 (W/m)	208.45	
線形近似解(寸法比率一定) (W/m)	223.88	7.40
線形近似解(隅角部分割幅一定) (W/m)	218.38	4.76

## 6.7 第6章のまとめ

本章では、三重大学構内の完全埋設型実験地下室をモデルに、第2章で示した非線形熱水分・同時移動方程式を使用して解析した室表面貫流熱流を正確解として前章で示した線形近似理論を用いた熱負荷予測の精度の検討を行った。また、住宅規模での任意形状の地下構造物にも本手法が適用できるよう、あらかじめ算出した基準単位応答を使用して一般化する手法について検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

1. 計算対象となる地下構造物の天井面・壁面・床面をそれぞれ複数に分割して部位毎に比較した結果、各部位の隅角部に近づくほど熱流の値が大きくなっており、部位によって貫流熱流に違いがあることが判った。よって、基準単位応答を作成する際には貫流熱流の違いによって基準単位応答を別々に作成し、適用する必要があることが判った。
2. 外気温変化に対する地下室内表面顕熱流の単位応答は時変性が小さく、非線形熱水分同時移動モデルを用いた数値計算により数値的に得られる単位応答を関数近似表現することが可能であることが判った。
3. 基準単位応答を作成した際の2次元断面寸法である2.0m(W)×2.0m(H)の2次元断面熱流を基準単位応答を使用して算出した。室全体で一つの室顕熱流単位応答を作成し、線形近似予測を行った場合と比べ、懸念されていた基準単位応答を複数使用することによる予測精度の低下については、2種類の線形近似結果の差は14.8W/mと大きな差は見られず、本手法は有効であることが判った。
4. 本手法の一般化を目的に基準単位応答を住宅規模における任意形状の寸法の地下構造物に適用する手法について検討を行った。その際に、基準単位応答の適用手法が問題になるため、①単純に基準単位応答を算出した部位寸法と予測したい任意寸法の地下室の部材寸法の比率から適用する近似単位応答を決める場合と②熱流の大きな隅角部は、基準単位応答と同じ適用領域(長さ)とし、その他の部分の適用範囲を部位比率により決定する場合の2つのケースで検討を行った。その結果、②の手法に基づいて線形近似計算を行った場合の方が①の適用手法よりも予測精度が高く、室内表面貫流熱流の線形近似予測を行う際にはこの手法を使用する必要があることが判った。よって本章において算出・整理された基準単位応答を使用することでコンクリート単層壁完全埋設型地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測が可能であることが判った。

## 第 7 章

# 単層壁で構成される一般形状の 地下構造物における 線形近似予測

## 第 7 章 単層壁で構成される一般形状の地下構造物に

## における線形近似予測

### 7.1 はじめに

前章では天井面、床面、壁面の各部位を貫流熱流ごとに分割して室顕熱流単位応答を作成し、地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測を行った。その結果、線形近似解は第 2 章で示した熱水分同時移動理論を用いて算出した非線形正確解を比較的精度よく再現し、室顕熱流単位応答を複数作成することによる線形近似の誤差も小さく、本手法は妥当性があることが判った。

そこで本章では、前章のような完全埋設型の地下構造物ではなく、より一般的な形状かつ住宅規模の地下構造物を解析対象とし、基準単位応答の作成ならびに任意形状の地下構造物の線形近似計算への適用を検討する。

### 7.2 解析対象および解析手法の概要

#### 7.2.1 解析対象及び基準外界気象条件

前章では天井面、壁面、床面の各部位を細かく分割し、貫流熱流毎に分割し、複数の室顕熱流単位応答を使用して室内表面貫流熱流の線形近似計算を行った。さらに、算出した室顕熱流単位応答を基準単位応答として任意床面積の地下構造物に適用して室内表面貫流熱流の線形近似予測を行い、十分な精度が得られることが判った。しかしながら前章の計算対象は実際の地下構造物と異なり、完全埋設型の地下構造物であった。実際の地下構造物はこのような形状ではないため、一般的な形状である上部に地上階が存在する形状の地下構造物を計算対象に検討を行う。

本章では図 7.1～7.2 に示す地下構造物を解析対象とする。解析領域は前章同様対象地下構造物の短辺方向での 2 次元系とし、対称性を考慮し、断面の半分にあたる水平方向は幅 1.0m、床面深さは 3.0m を計算領域とした。しかし床面深さについては、前章のような基準単位応答を複数作成するため、図 7.1 で示した 3.0m のものに加え、2.0m、4.0m の 3 種類の地下構造物を対象とした。なお、天井面については、地上階と地下階の温度差がなく、貫流熱流が発生しないという仮定条件で解析を行う。よって本章では床面と壁面において室顕熱流単位応答を作成し、室内表面貫流熱流の線形近似計算を行う。

基準外界気象条件は前章と同様とし、室内温湿度も同様に年間を通して 22℃、50%一定とした。

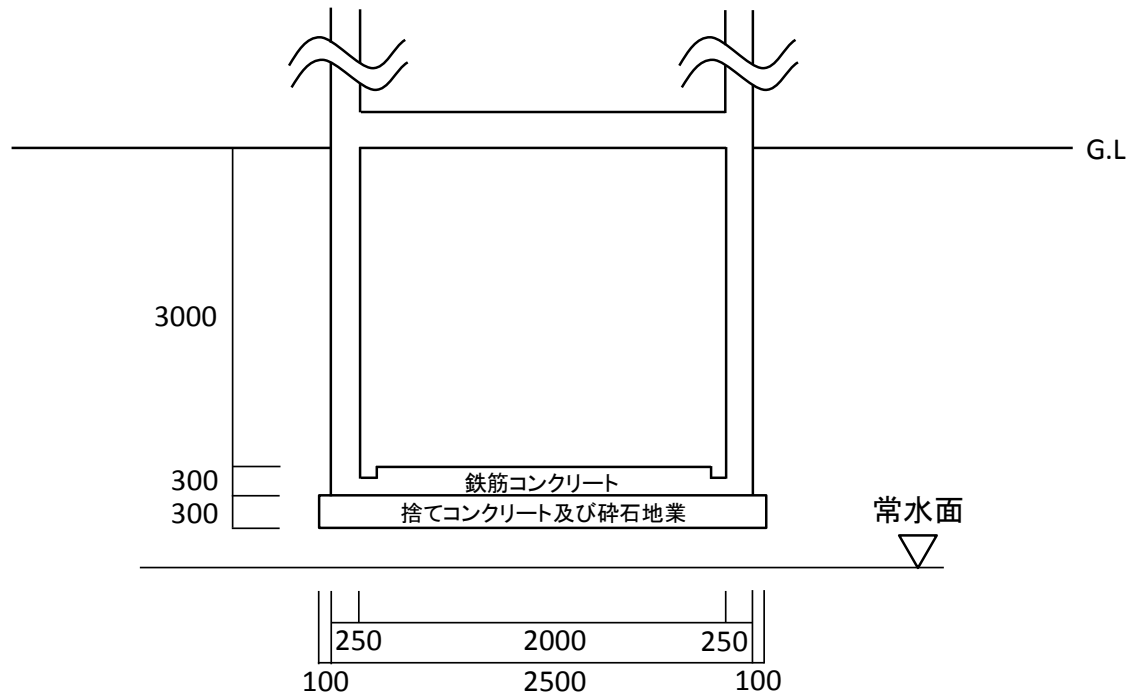


図 7.1 解析対象地下構造物断面図

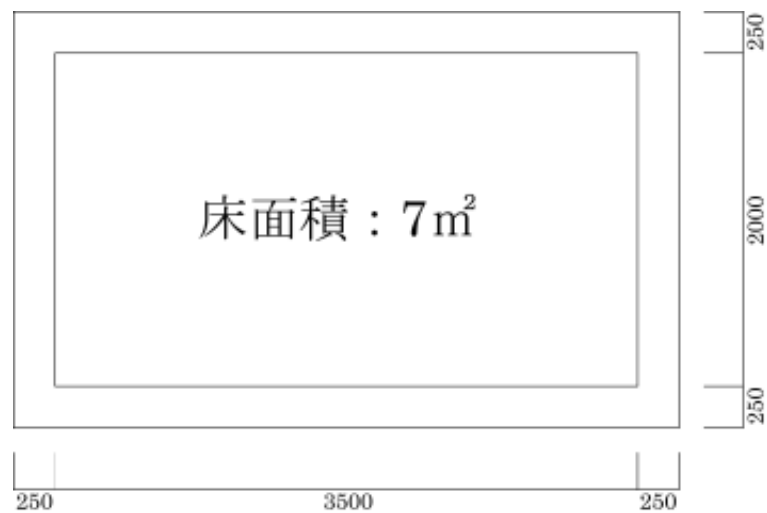


図 7.2 解析対象地下構造物平面図

## 7.2.2 解析手法概要

本章では、一般的な形状であり、住宅規模の地下構造物における室内表面貫流熱流の線形近似計算を任意形状の地下構造物に適用するため、ある基準の床面深さにおいて前章と同様、貫流熱流別に分割して室頭熱流単位応答を作成し、それを基準単位応答として任意形状の地下構造物に適用し、室内表面貫流熱流の線形近似計算を行った場合の精度検証を行う。

本章では前節で示した通り床面深さが 2.0m、3.0m、4.0m の 3 種類の地下構造物を対象とした。図 7.3～7.5 に壁面ならびに床面の分割概要図を示す。

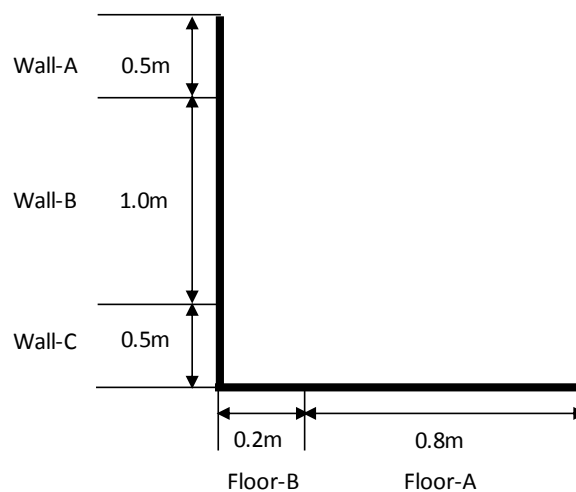


図 7.3 分割概要図(床面深さ 2.0m)

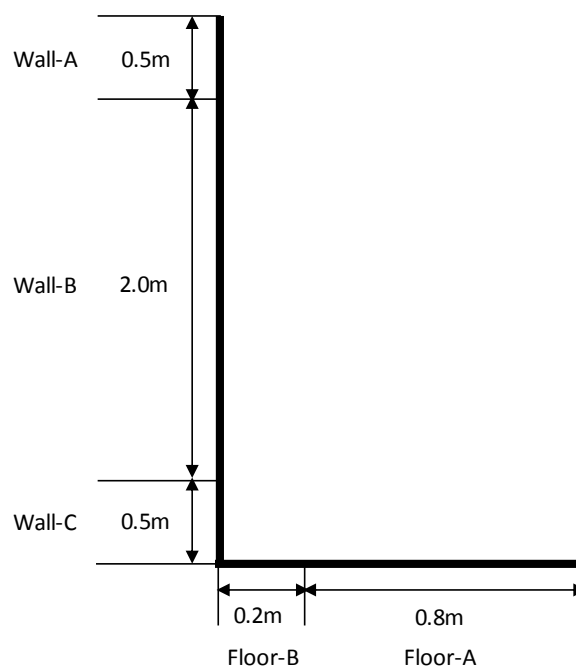


図 7.4 分割概要図(床面深さ 3.0m)

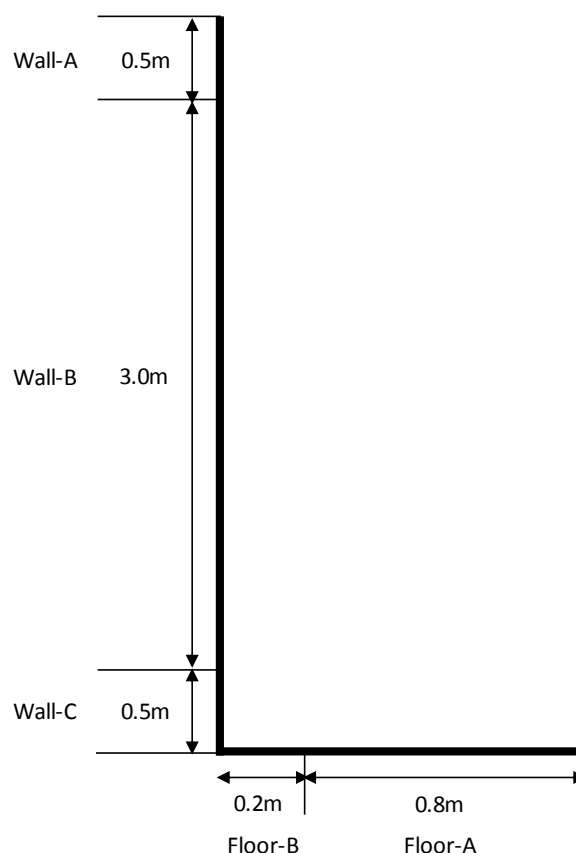


図 7.5 分割概要図(床面深さ 4.0m)

### 7.3 各部位の熱負荷の比較

本節では前節で示した分割概要に基づき、床面深さの違いによる貫流熱流の差異を検討し、基準単位応答を適用する際の適用手法について考察を行う。

結果として図 7.6～7.10 に各深さにおける同一記号の部位の年間の貫流熱流の変動比較を示す。図 7.6～7.10 が示す通り、壁面では Wall-A 以外の部位において床面深さによって貫流熱流に違いがみられ、床面においては全ての部位において違いが見られた。よって 3 種類の基準深さにおいて室顕熱流単位応答を算出する際には Wall-A においては床面深さに関わらず共通の室顕熱単位応答を、それ以外の全ての部位においては床面深さ毎に室顕熱流単位応答を算出しなければいけないことが判った。なお、次節以降で地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似計算を行う際に使用する Wall-A の部位の室顕熱流単位応答は床面深さ 3.0m での貫流熱流をもとにして算出することとする。



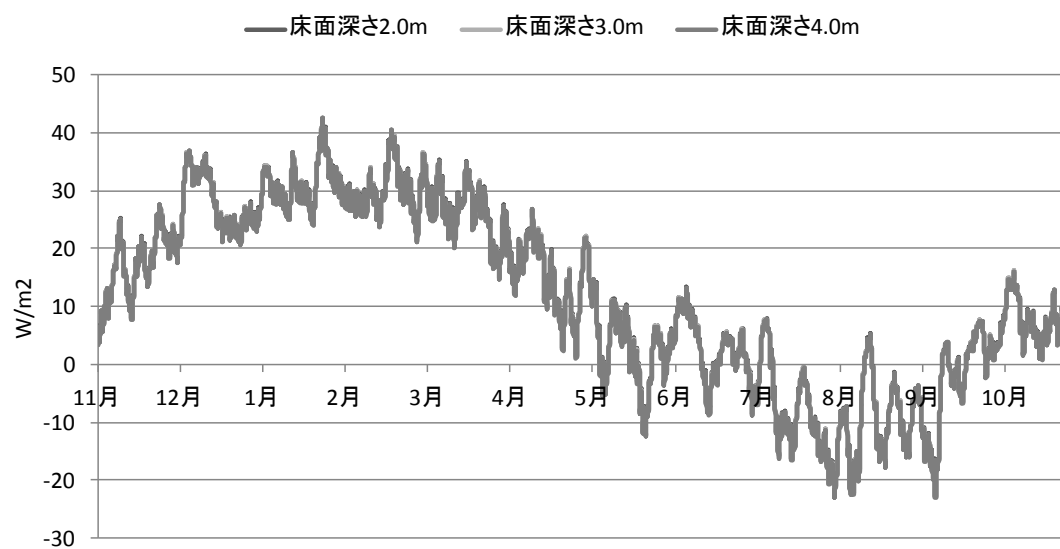


図 7.6 各床面深さ貫流熱流比較(Wall-A)

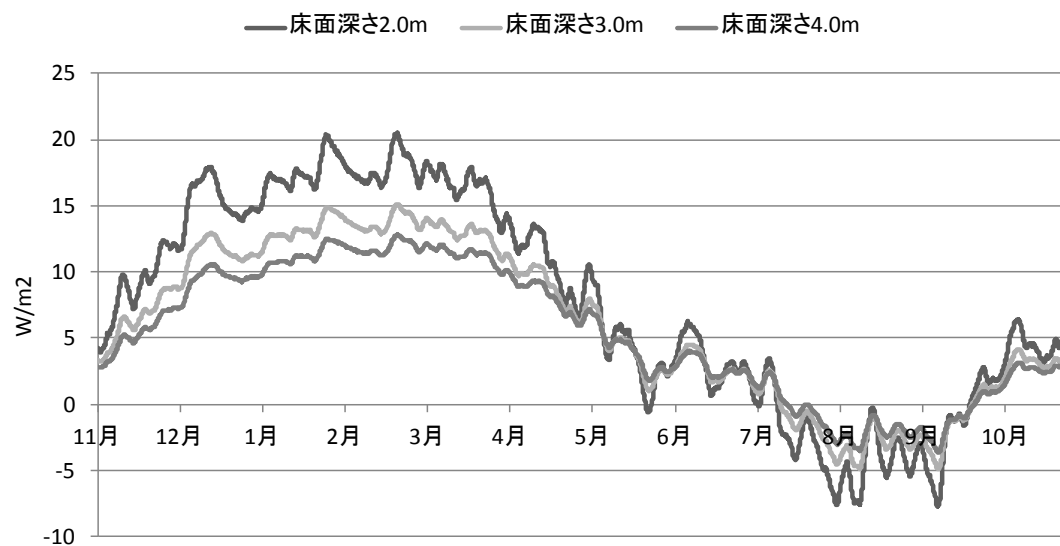


図 7.7 各床面深さ貫流熱流比較(Wall-B)

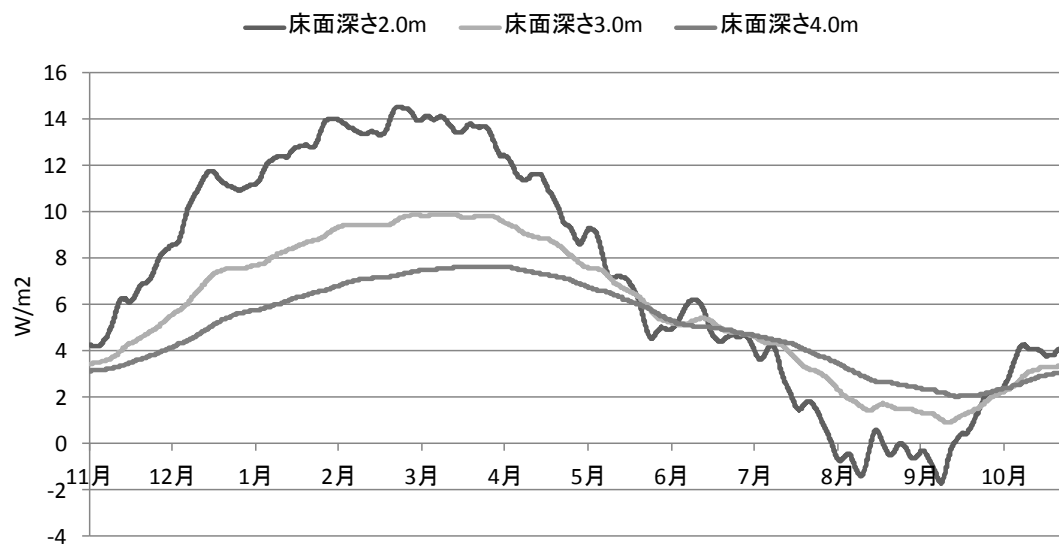


図 7.8 各床面深さ貫流熱流比較(Wall-C)

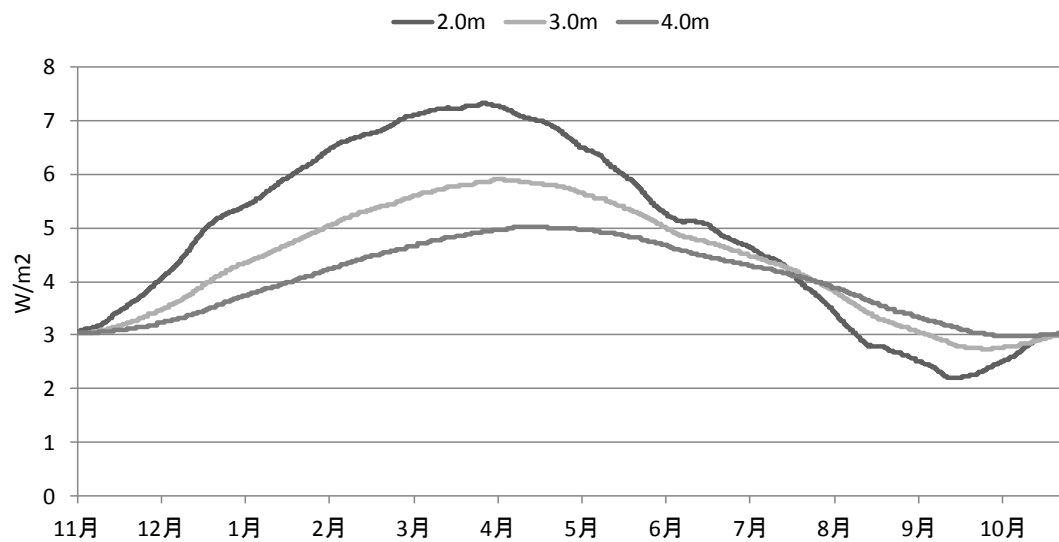


図 7.9 各床面深さ貫流熱流比較(Floor-A)

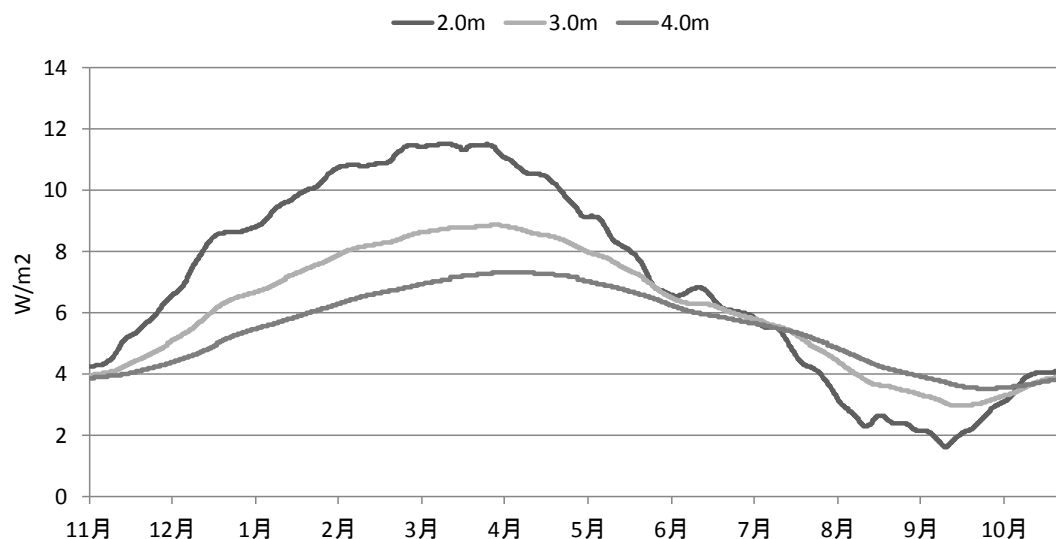


図 7.10 各床面深さ貫流熱流比較(Floor-B)

#### 7.4 各部位における基準外乱変動に対する室顕熱流単位応答の時変性

本節では前章同様、前節の分割概要に基づき、各部位において非線形熱水分同時移動理論により基準地域における外界気象条件の微小変化に対する擬線形解を算出し、その時変性の有無を確認することで、外界気象が任意に時間変動する場合の室内表面貫流熱流を線形近似的に予測することが可能であることを確認する。なお、外界条件についても、前章と同様応答が最も大きい外気温を外乱とした。

図 7.11～図 7.23 に基準外気温が 3 月、6 月、9 月、12 月のそれぞれ 1 日 0 時に単位変化した場合の各部位の地下室内表面顕熱流の単位応答を示す。図に示すように、各図の各時期の曲線はほぼ一本の曲線とみなすことができる為、単位応答の時変性は小さく、概ね一本の曲線と近似可能と言える。図 7.24～図 7.27 に各部位の地下室内表面顕熱流の単位応答の近似曲線を示すとともに各単位応答の近似曲線から指数項 3 項で近似した外気温変化に対する地下室内表面平均顕熱流単位応答の近似関数を示す。

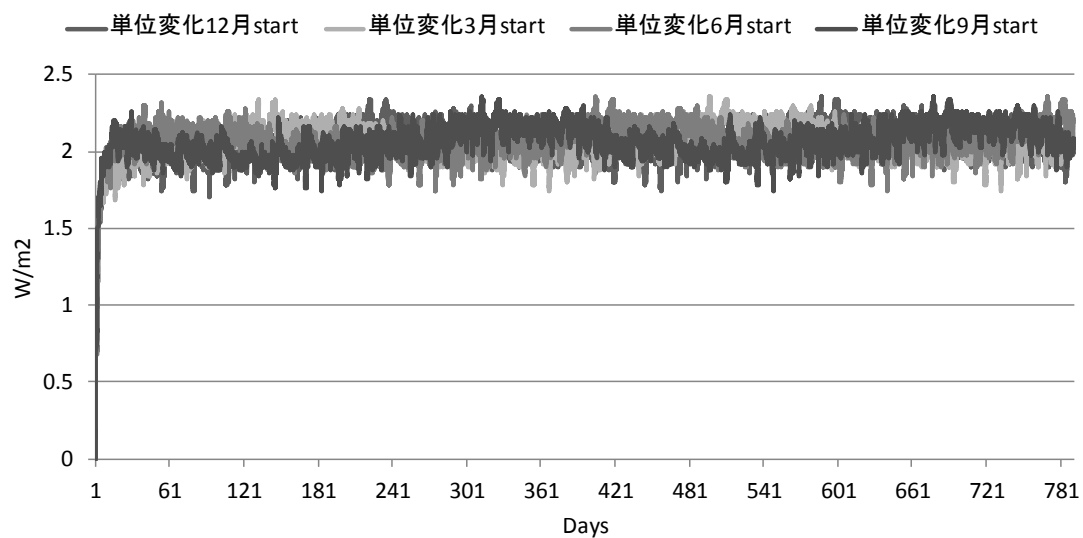


図 7.11 Wall-A の室顕熱流単位応答

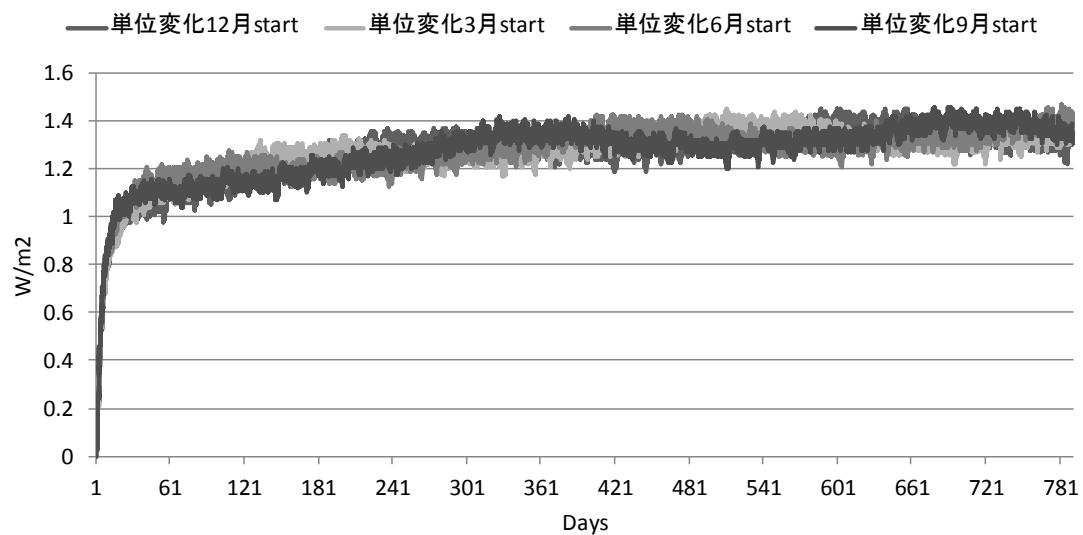


図 7.12 Wall-B の室顕熱流単位応答(床面深さ 2.0m)

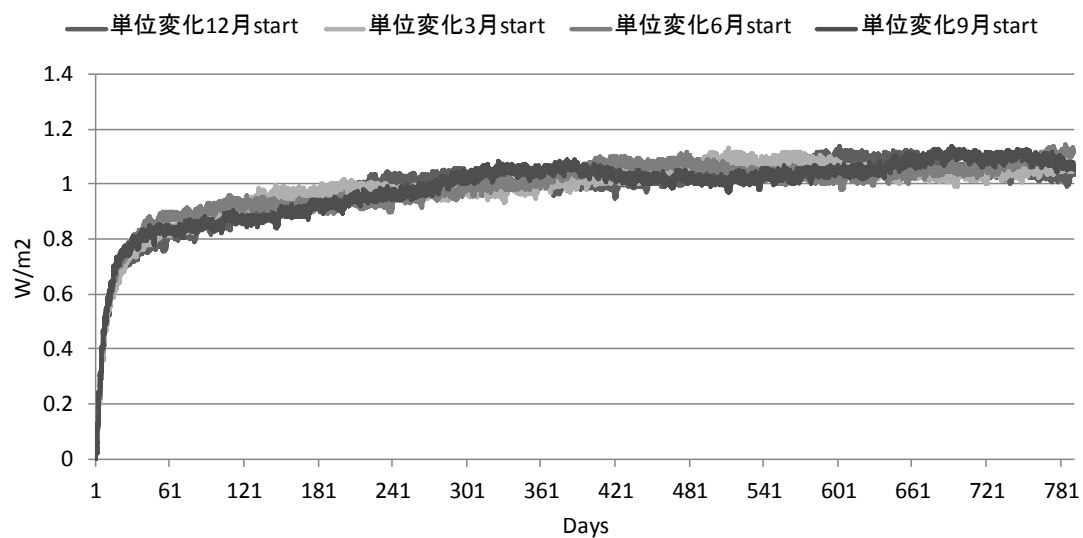


図 7.13 Wall-B の室顕熱流単位応答(床面深さ 3.0m)

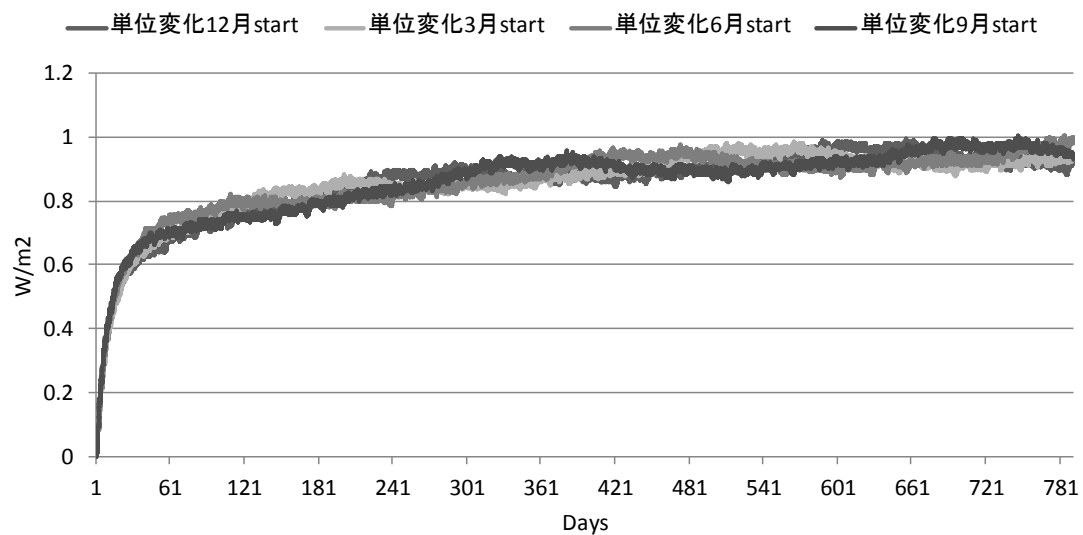


図 7.14 Wall-B の室顕熱流単位応答(床面深さ 4.0m)

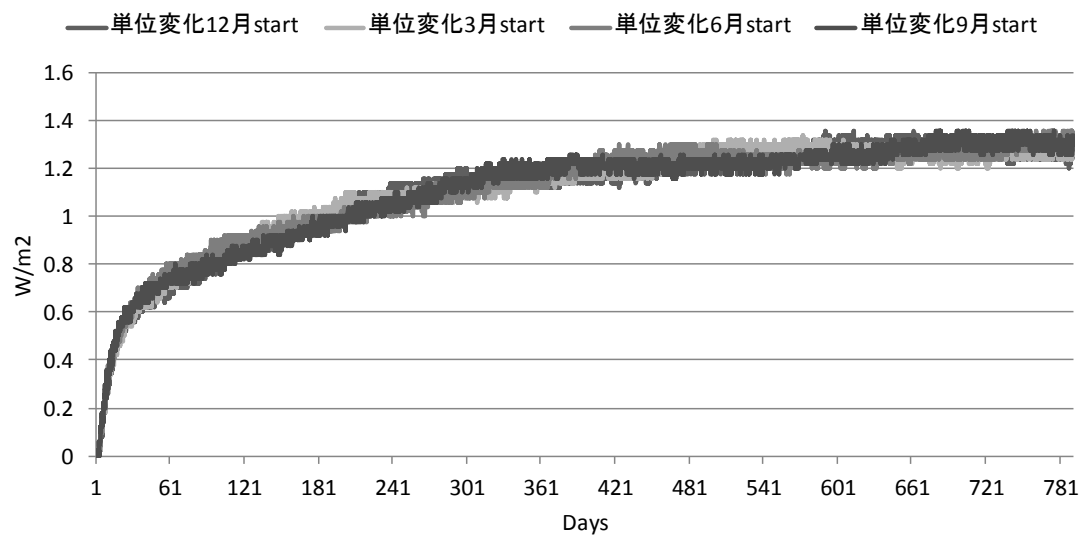


図 7.15 Wall-C の室顕熱流単位応答(床面深さ 2.0m)

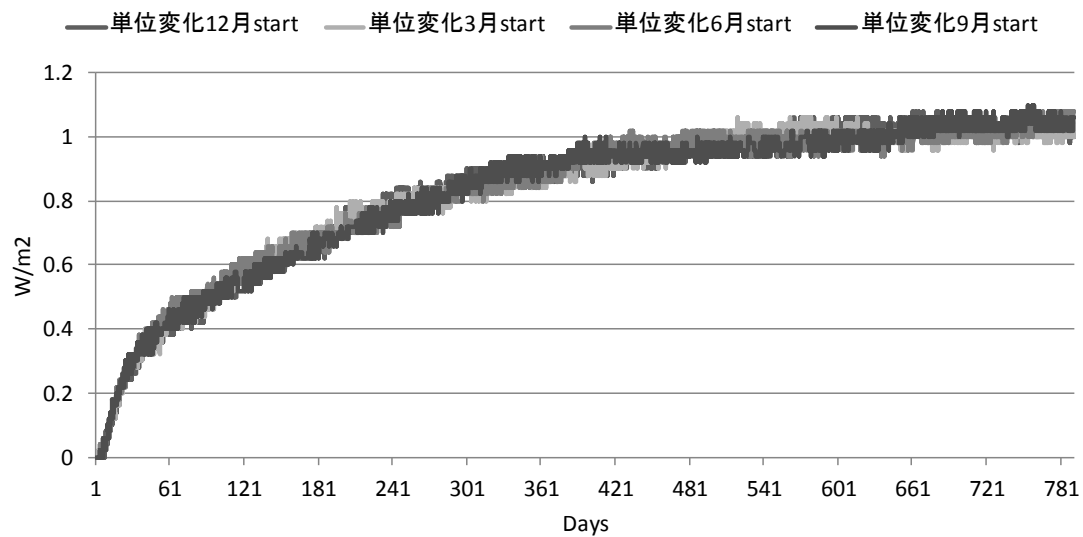


図 7.16 Wall-C の室顕熱流単位応答(床面深さ 3.0m)

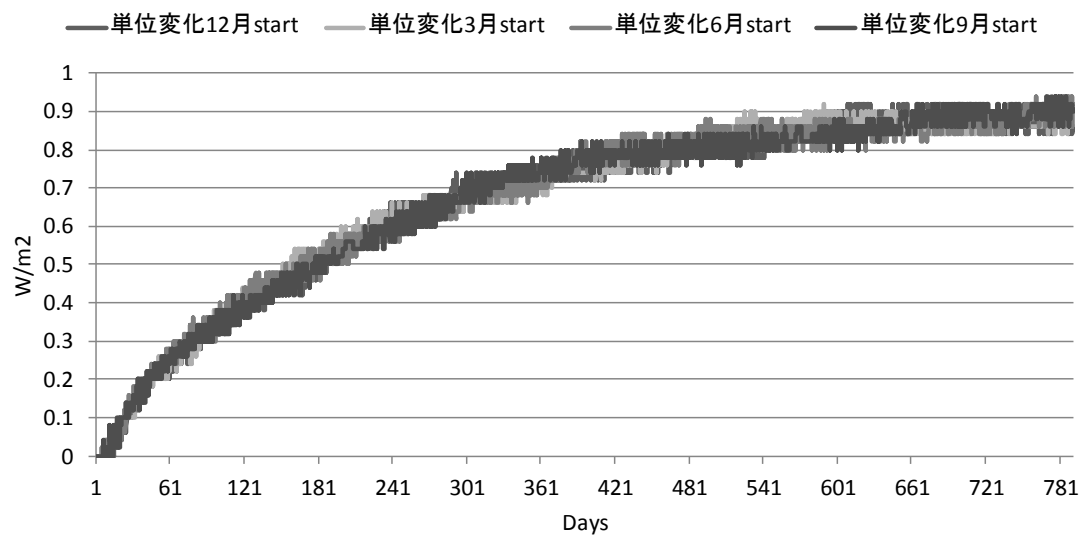


図 7.17 Wall-C の室顕熱流単位応答(床面深さ 4.0m)

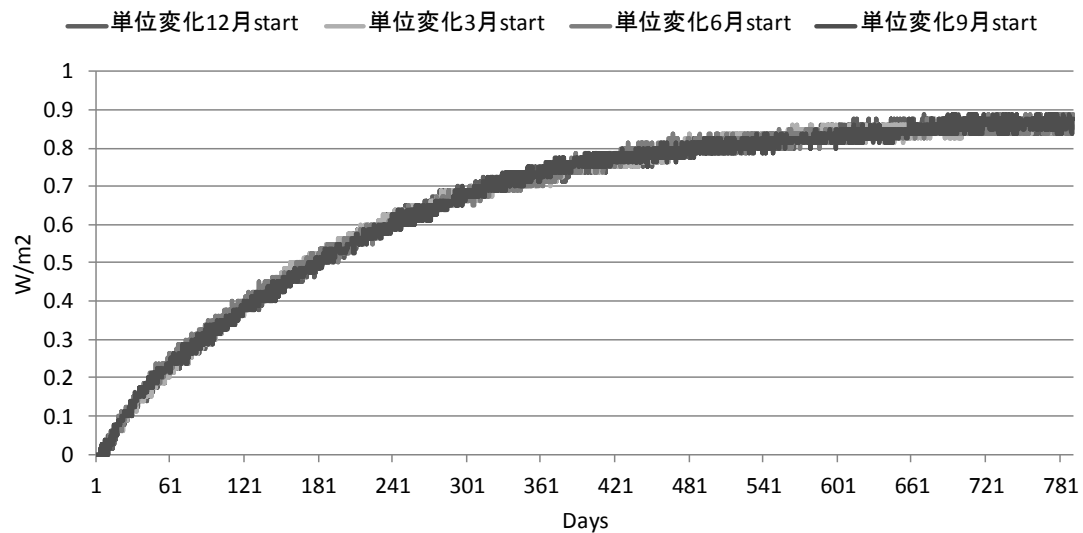


図 7.18 Floor-A の室顕熱流単位応答(床面深さ 2.0m)

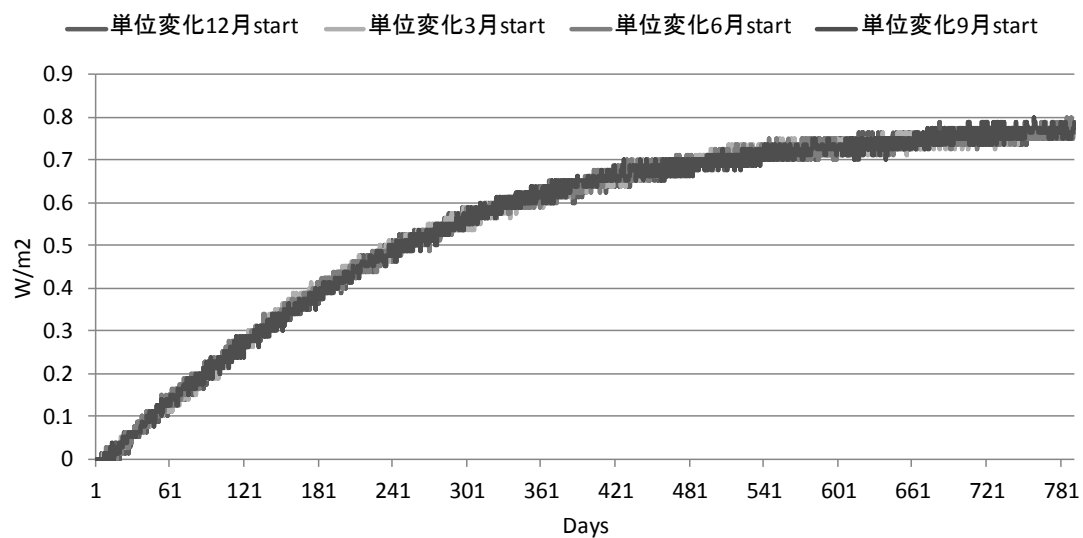


図 7.19 Floor-A の室顕熱流単位応答(床面深さ 3.0m)

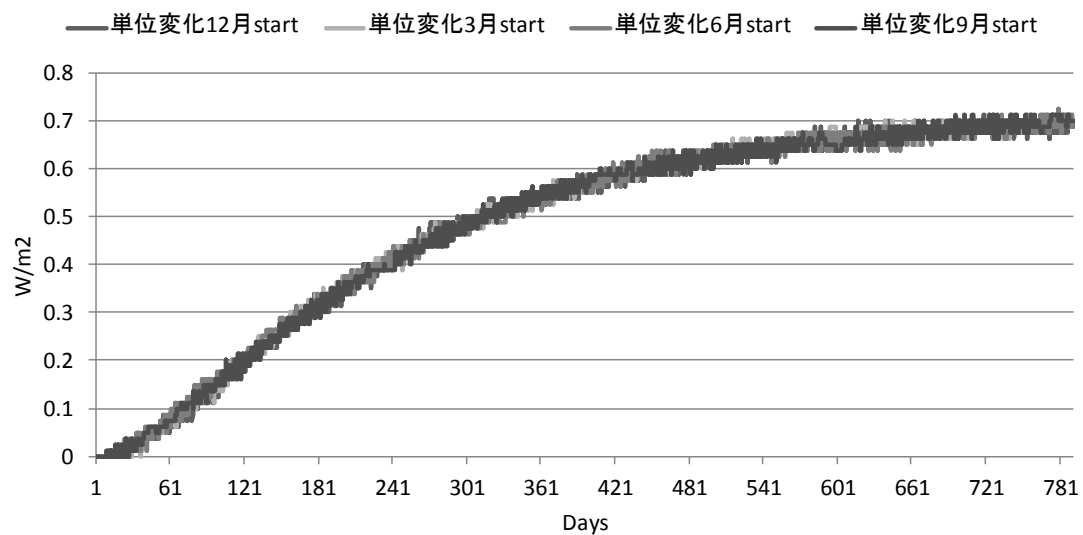


図 7.20 Floor-A の室顕熱流単位応答(床面深さ 4.0m)



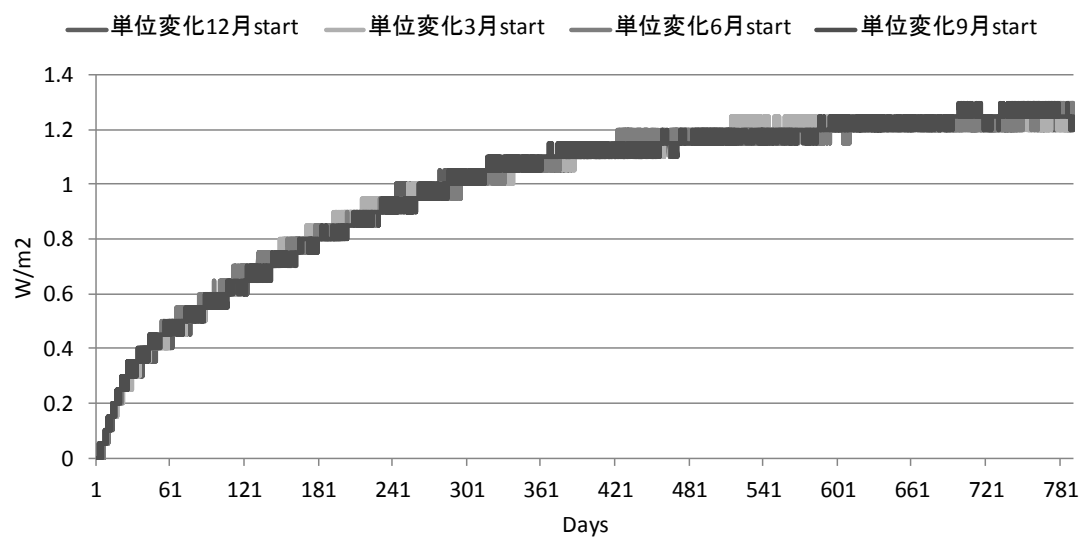


図 7.21 Floor-B の室顕熱流単位応答(床面深さ 2.0m)

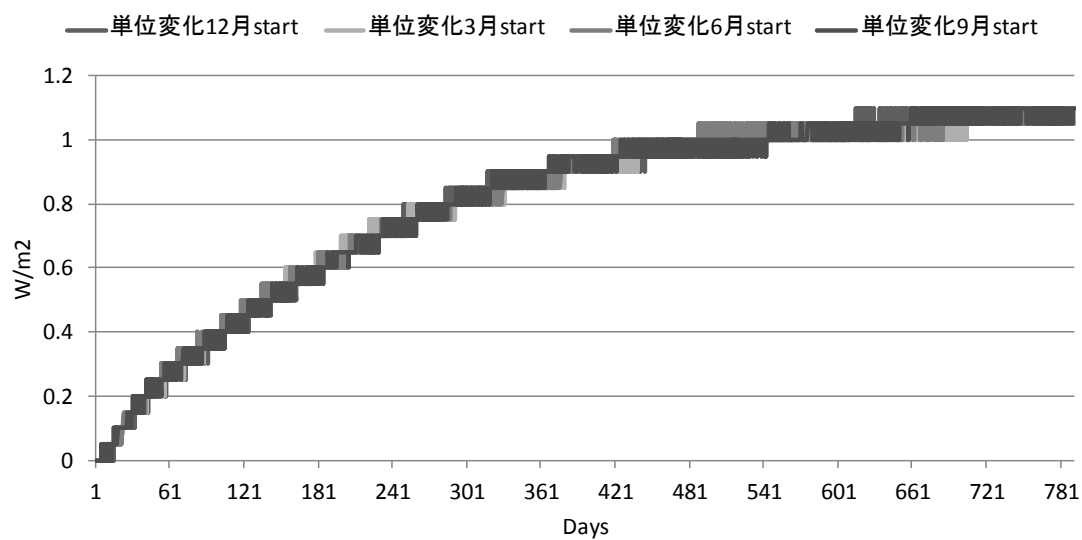


図 7.22 Floor-B の室顕熱流単位応答(床面深さ 3.0m)

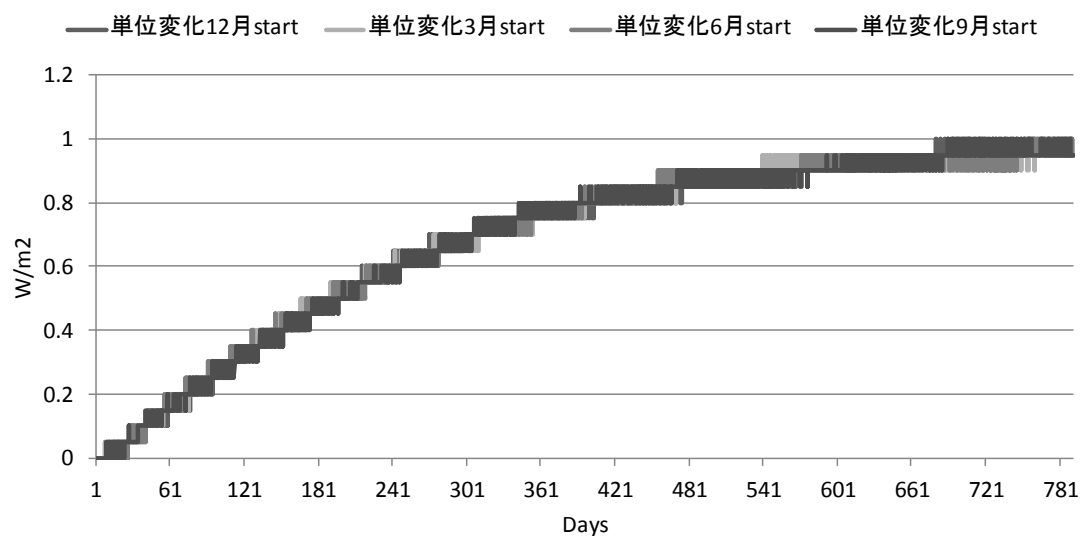


図 7.23 Floor-B の室顕熱流単位応答(床面深さ 4.0m)

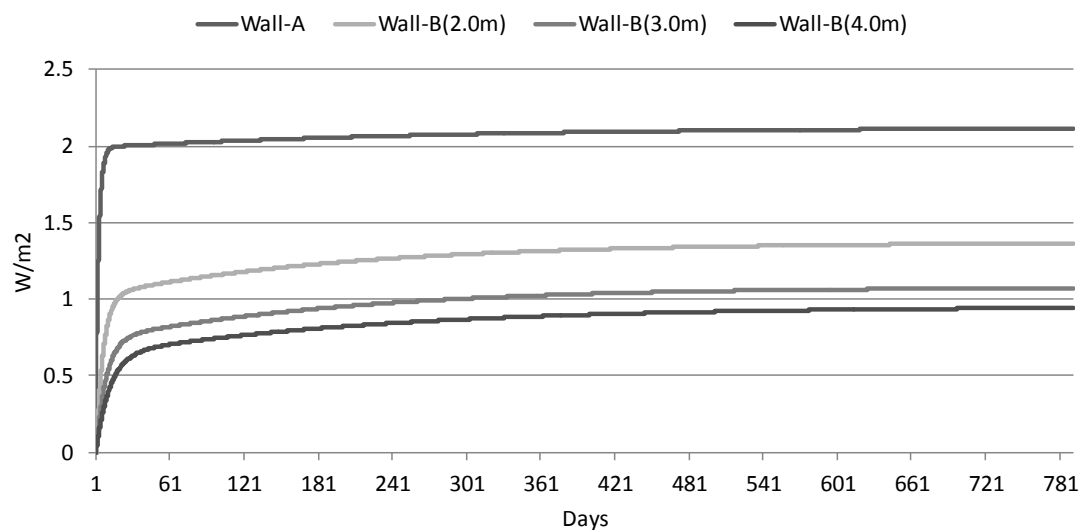


図 7.24 Wall-A、Wall-B 各種単位応答近似曲線

$$\begin{aligned}
 \text{Wall-A} \quad \phi(t) &= 2.12 - 1.04e^{-0.00015t} + 0.94e^{-0.00017t} - 1.58e^{-0.0129t} \\
 \text{Wall-B(2.0m)} \quad \phi(t) &= 1.37 - 0.72e^{-0.00022t} + 0.37e^{-0.00023t} - 1.08e^{-0.0072t} \\
 \text{Wall-B(3.0m)} \quad \phi(t) &= 1.08 - 0.66e^{-0.00026t} + 0.32e^{-0.00033t} - 0.77e^{-0.0052t} \\
 \text{Wall-B(4.0m)} \quad \phi(t) &= 0.95 - 1.07e^{-0.00021t} + 0.75e^{-0.00022t} - 0.64e^{-0.0038t}
 \end{aligned}$$

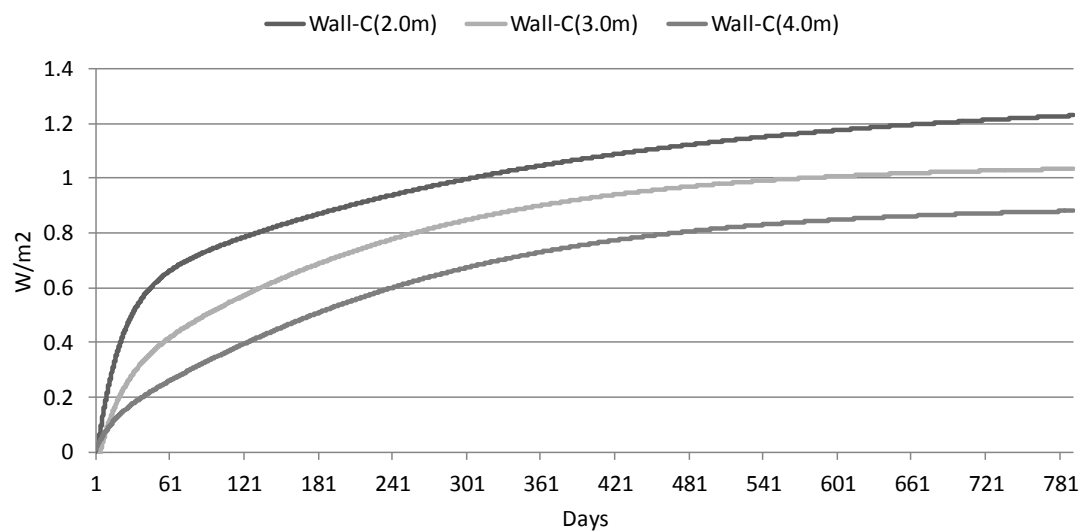


図 7.25 Wall-C 各種単位応答近似曲線

$$\text{Wall-C(2.0m)} \quad \phi(t) = 1.30 - 1.03e^{-0.00013t} + 0.30e^{-0.00015t} - 0.61e^{-0.0022t}$$

$$\text{Wall-C(3.0m)} \quad \phi(t) = 1.05 - 1.22e^{-0.00023t} + 0.44e^{-0.00037t} - 0.34e^{-0.0022t}$$

$$\text{Wall-C(4.0m)} \quad \phi(t) = 0.90 - 1.27e^{-0.00022t} + 0.49e^{-0.00037t} - 0.11e^{-0.0027t}$$

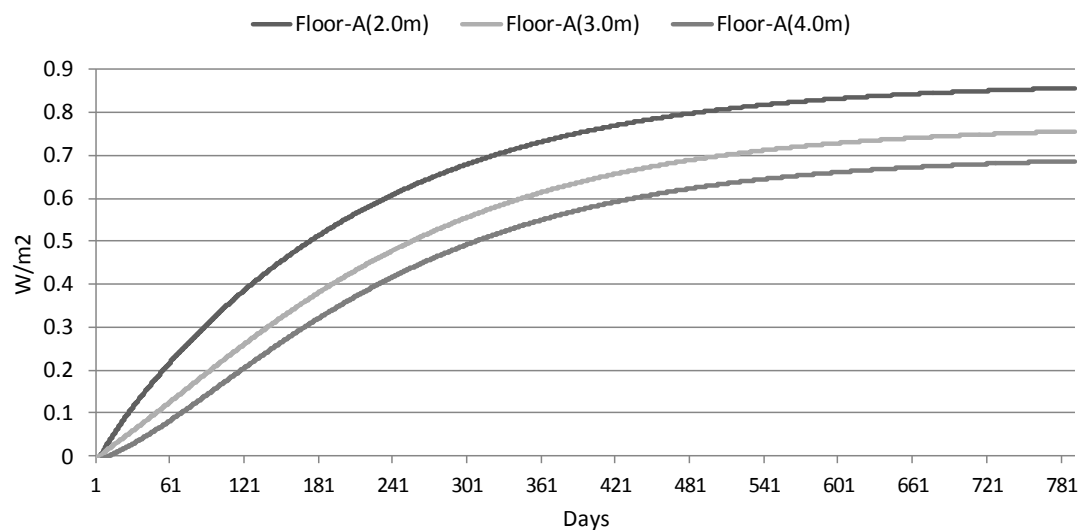


図 7.26 Floor-A 各種単位応答近似曲線

$$\text{Floor-A(2.0m)} \quad \phi(t) = 0.87 - 1.06e^{-0.00023t} + 0.19e^{-0.00039t} - 0.022e^{-0.0032t}$$

$$\text{Floor-A(3.0m)} \quad \phi(t) = 0.77 - 1.36e^{-0.00024t} + 0.59e^{-0.00043t} - 0.011e^{-0.0052t}$$

$$\text{Floor-A(4.0m)} \quad \phi(t) = 0.70 - 1.27e^{-0.00024t} + 0.56e^{-0.00048t} - 0.0067e^{-0.005t}$$

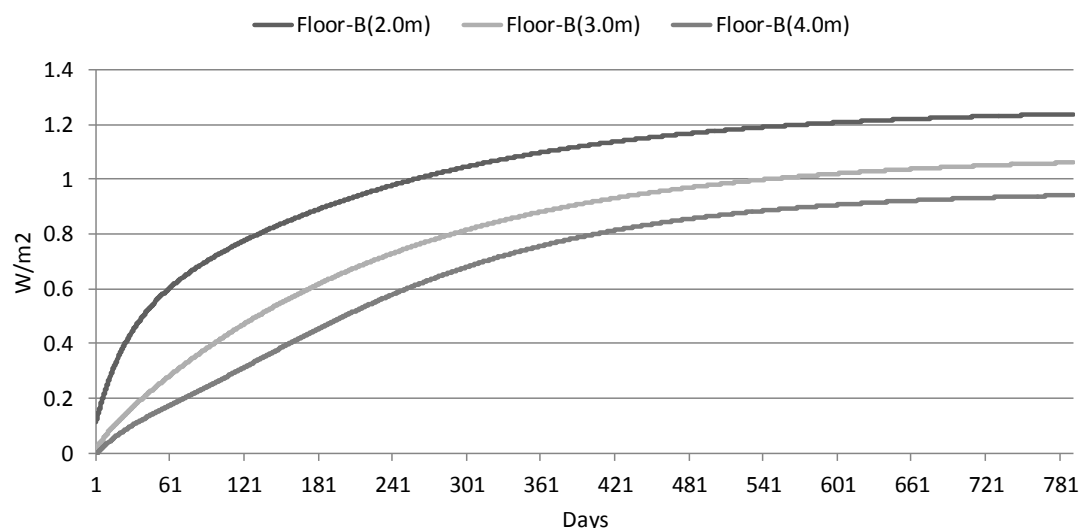


図 7.27 Floor-B 各種単位応答近似曲線

$$\text{Floor-B(2.0m)} \quad \phi(t) = 1.26 - 1.21e^{-0.00021t} + 0.40e^{-0.00028t} - 0.34e^{-0.0017t}$$

$$\text{Floor-B(3.0m)} \quad \phi(t) = 1.09 - 1.30e^{-0.00020t} + 0.25e^{-0.00028t} - 0.03e^{-0.0043t}$$

$$\text{Floor-B(4.0m)} \quad \phi(t) = 0.96 - 1.69e^{-0.00024t} + 0.96e^{-0.00054t} - 0.24e^{-0.0014t}$$

## 7.5 近似単位応答を用いた線形近似予測

本節では、第5章で示した線形近似予測理論に基づき、前節で示した地下室内表面平均顕熱流単位応答の近似関数から得られる応答係数と外気温との畳み込み演算によって室内表面貫流熱流の線形近似計算を行い、予測精度の検討を行う。

本節では基準単位応答を算出した際の計算対象である 2 次元断面寸法 2.0m(W)×2.0m(H)、2.0m(W)×3.0m(H)、2.0m(W)×4.0m(H)の3種類の地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測を行った。比較結果を図 7.28～7.30 に示し、非線形解の室内表面貫流熱流の年間最大値に対する線形近似解の一致率を表 7.1～7.3 に示す。結果を見ると、前章と同様非線形解をよく再現していることが判った。よって本手法は有効な簡易熱負荷算定手法であることが判った。

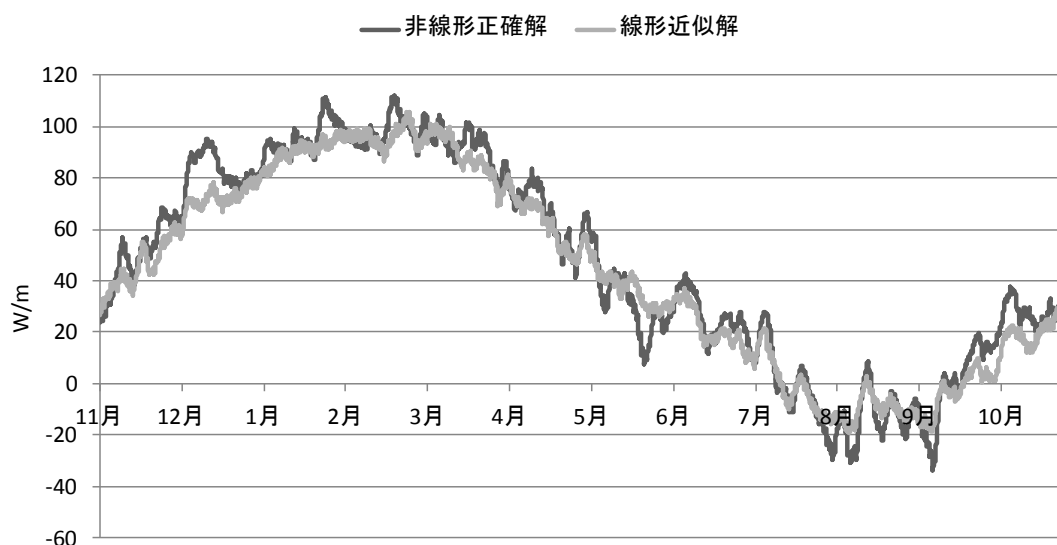


図 7.28 2次元断面寸法 2.0m×2.0m の地下構造物の線形近似予測結果

表 7.1 2次元断面寸法 2.0m×2.0m の地下構造物の年間最大負荷の一致率

	年間最大負荷(W/m)	非線形解との差(%)
非線形正確解	112.12	
線形近似解	105.78	-5.65

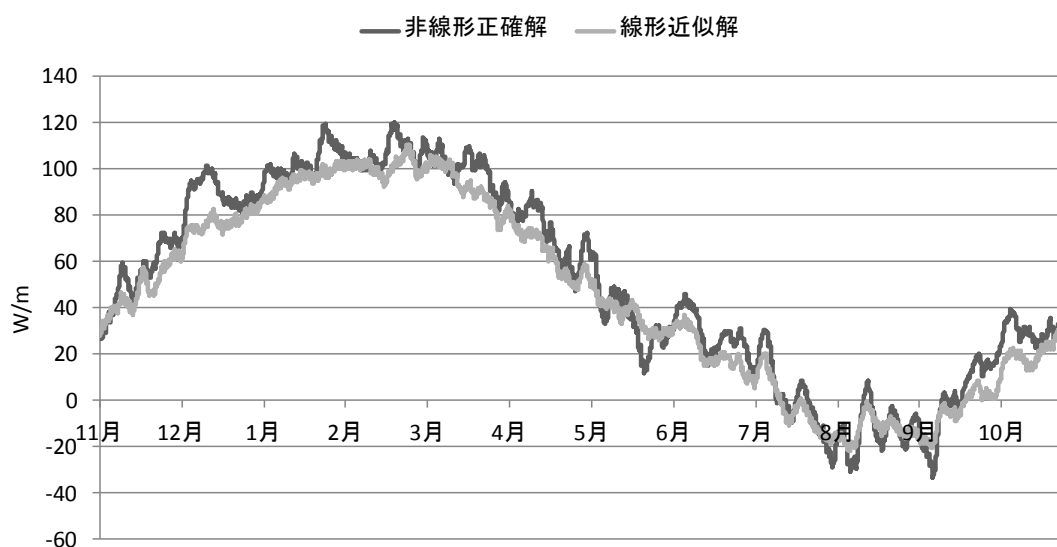


図 7.29 2次元断面寸法 2.0m×3.0m の地下構造物の線形近似予測結果

## 第7章 単層壁で構成される一般形状の地下構造物における線形近似予測

表 7.2 2次元断面寸法 2.0m×3.0m の地下構造物の年間最大負荷の一致率

	年間最大負荷(W/m)	非線形解との差(%)
非線形正確解	120.04	
線形近似解	110.51	-7.94

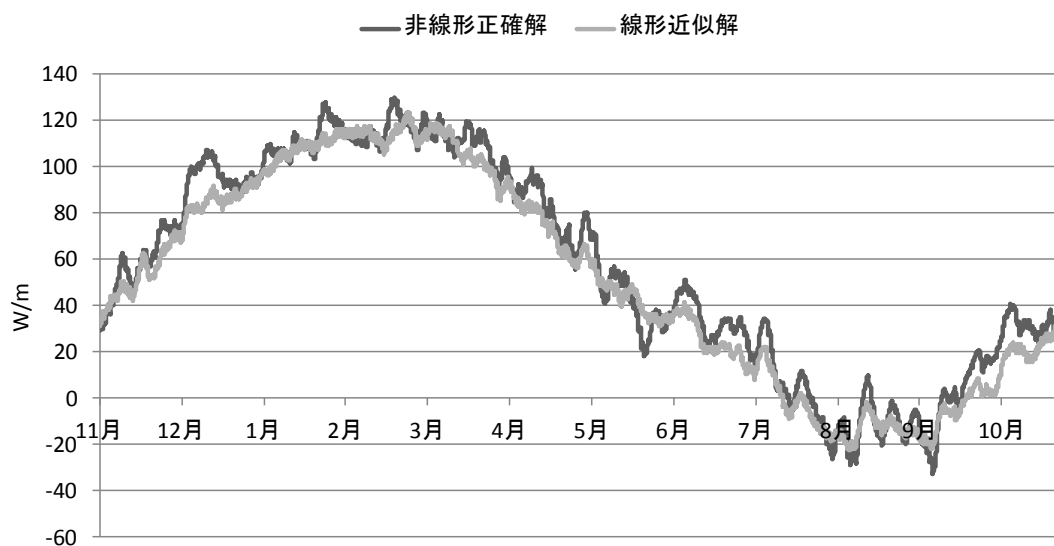


図 7.30 2次元断面寸法 2.0m×4.0m の地下構造物の線形近似予測結果

表 7.3 2次元断面寸法 2.0m×4.0m の地下構造物の年間最大負荷の一致率

	年間最大負荷(W/m)	非線形解との差(%)
非線形正確解	129.74	
線形近似解	123.70	-4.66

## 7.6 任意の床面深さにおける地下構造物の熱負荷の線形近似予測手法

### 7.6.1 適用手法概要

本節では、7.4 で算出した外気温変化に対する各部位毎の室表面熱流単位応答を基準単位応答とし、基準単位応答から得られる応答係数と外気温との畳み込み演算により、任意床面深さの地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測を行う。

本節での解析対象は深さ 2.25m と 3.25m の 2 種類の床面深さの地下構造物とした。床面積については両方とも基準単位応答を算出した解析対象と同様に 2.0m×3.5m とした。まず 2 種類の計算対象の壁面分割概要図を図 7.31～7.32 に示す。

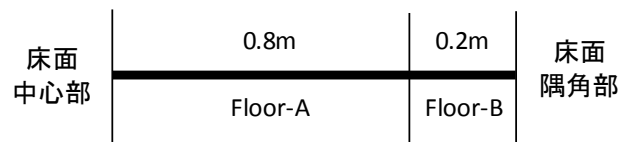
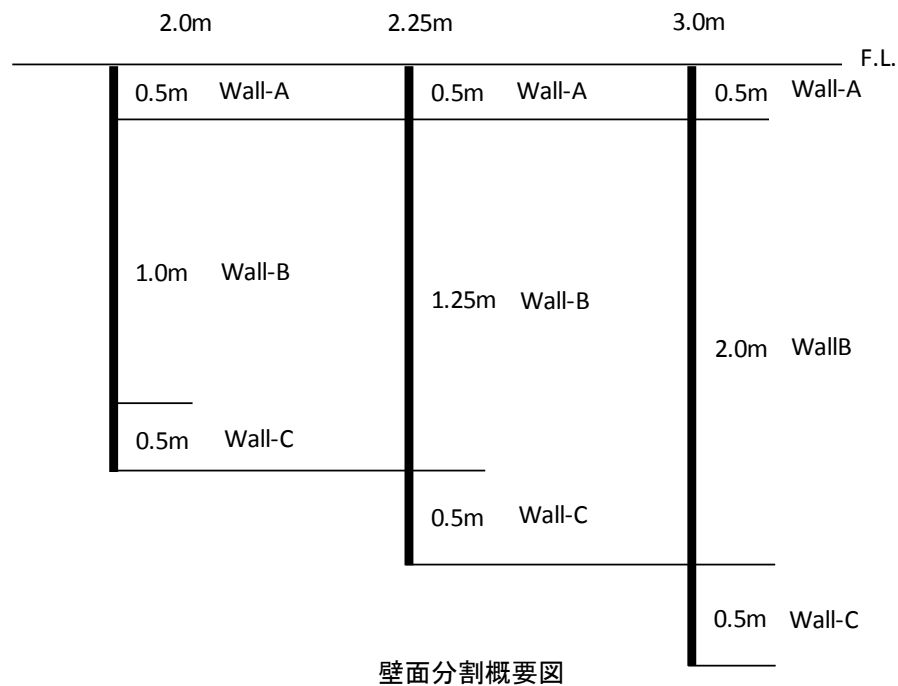


図 7.31 床面深さ 2.25m の分割概要図

## 第 7 章 単層壁で構成される一般形状の地下構造物における線形近似予測

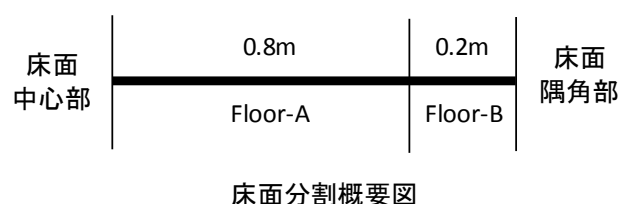
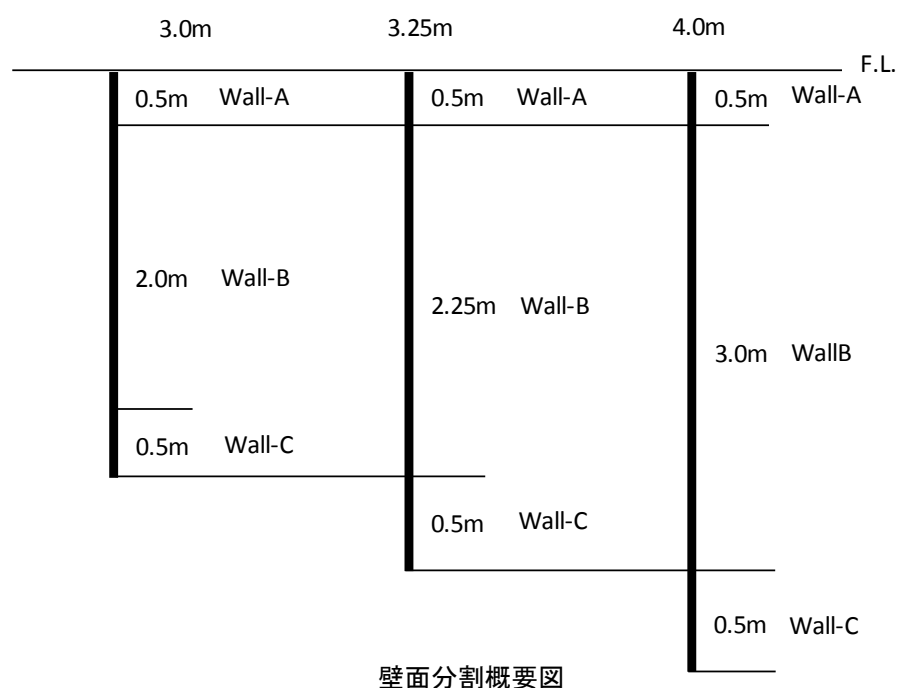


図 7.32 床面深さ 3.25m の分割概要図

本節でも前章同様基準単位応答の適用手法が問題となってくる。そこで本節でも 2 種類の基準単位応答の適用手法を用意し、より一般的な精度が得られる適用手法を検証する。深さに関係なく適用できることが確認された Wall-A 以外の部位については、一つ目の適用手法として、該当深さに近い近似単位応答から得られた貫流熱流を適用した場合を、二つ目の適用手法として、床面深さに応じその上下 2 種類の近似単位応答から算出された貫流熱流を位置(深さ)に応じて加重平均して適用した場合を想定した。本節ではこれら 2 種類の適用手法で室内表面貫流熱流を線形近似予測した場合の予測精度を検証する。なお、Wall-A においては 7.3 で示した通り床面深さ 3.0m での熱流から算出された室頭熱流単位応答を基準単位応答として使用する。



## 7.6.2 線形近似予測結果と一般性の検討

近似単位応答の検討結果を代表して2種類の床面深さにおける Wall-B の単位面積当たりの貫流熱流比較結果を図 7.33～7.34 に示し、熱流の年間最大値の比較結果を表 7.4～7.5 に示す。結果が示すように、2 つめの適用手法の方が 1 つめの適用手法に比べて非線形解との差が少なく、貫流熱負荷の予測精度が高いことが判った。よって任意の床面深さに基準単位応答を適用する際には、床面深さに応じその上下 2 種類の近似単位応答から算出される貫流熱流を位置(深さ)に応じて加重平均して適用し算出する手法が必要であることが判った。

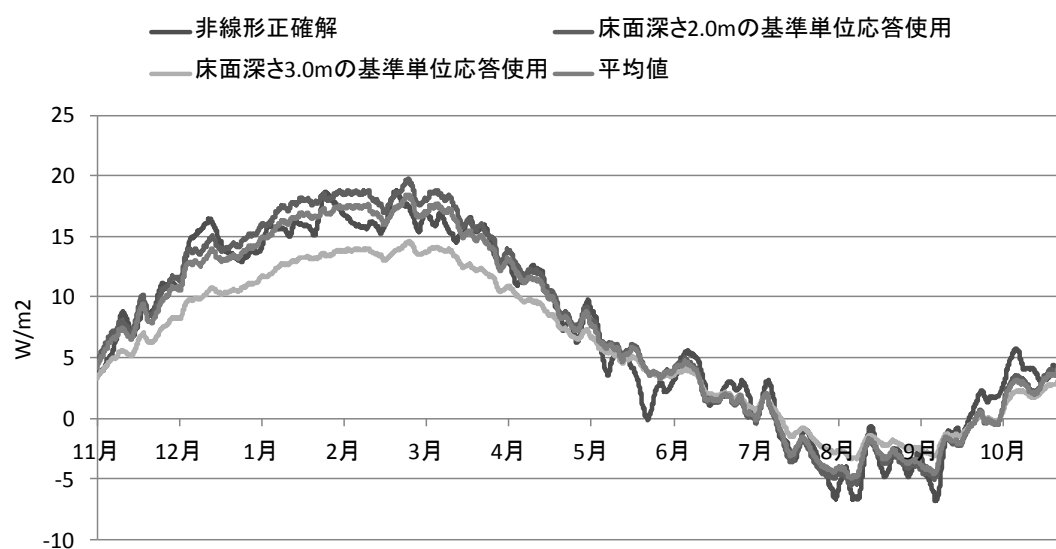


図 7.33 床面深さ 2.25m の Wall-B の貫流熱流の線形近似予測結果

表 7.4 床面深さ 2.25m の Wall-B の貫流熱流の線形近似予測結果

	年間最大値(W/m²)	非線形解との差(%)
非線形正確解	18.776	
2.0m	19.784	5.37
3.0m	14.612	-22.18
平均値	18.491	-1.52

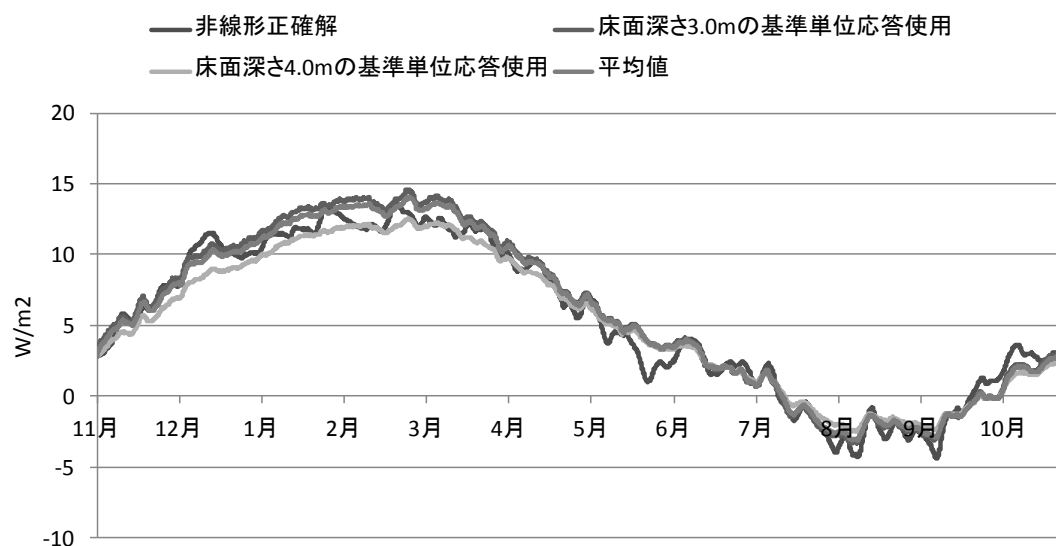


図 7.34 床面深さ 3.25m の Wall-B の貫流熱流の線形近似予測結果

表 7.5 床面深さ 3.25m の Wall-B の貫流熱流の線形近似予測結果

Wall-B	年間最大値(W/m <sup>2</sup> )	非線形解との差(%)
非線形正確解	13.59	
3.0m	14.61	7.51
4.0m	12.54	-7.71
平均値	14.09	3.71

最後に 2 種類の計算対象における室内表面貫流熱流の線形近似予測結果を図 7.35～7.36 および表 7.6～7.7 に示す。結果が示すように、非線形正確解との差はそれぞれ-1.8%、0.2% と非常に小さく、非線形正確解を極めて精度よく再現できていることが判る。

よって本章で算出した基準単位応答を使用し、上記の適用手法を用いることで、任意床面深さのコンクリート単層壁地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測が可能であることが判った

## 第7章 単層壁で構成される一般形状の地下構造物における線形近似予測

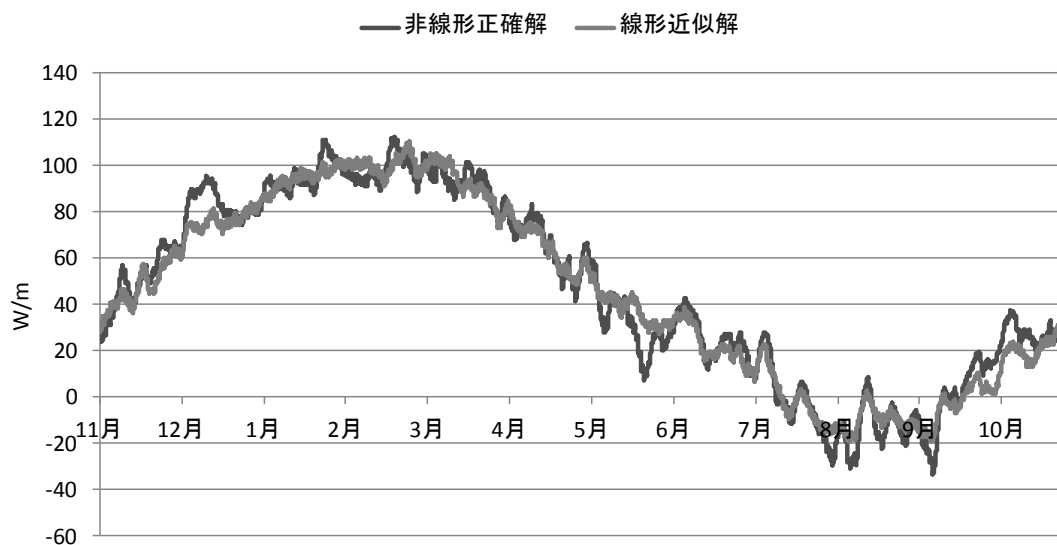


図 7.35 2次元断面寸法 2.0m×2.25m の地下構造物の線形近似予測結果

表 7.6 2次元断面寸法 2.0m×2.25m の地下構造物の年間最大負荷の一致率

	年間最大負荷(W/m)	非線形解との差(%)
非線形正確解	112.28	
線形近似解	110.24	-1.81

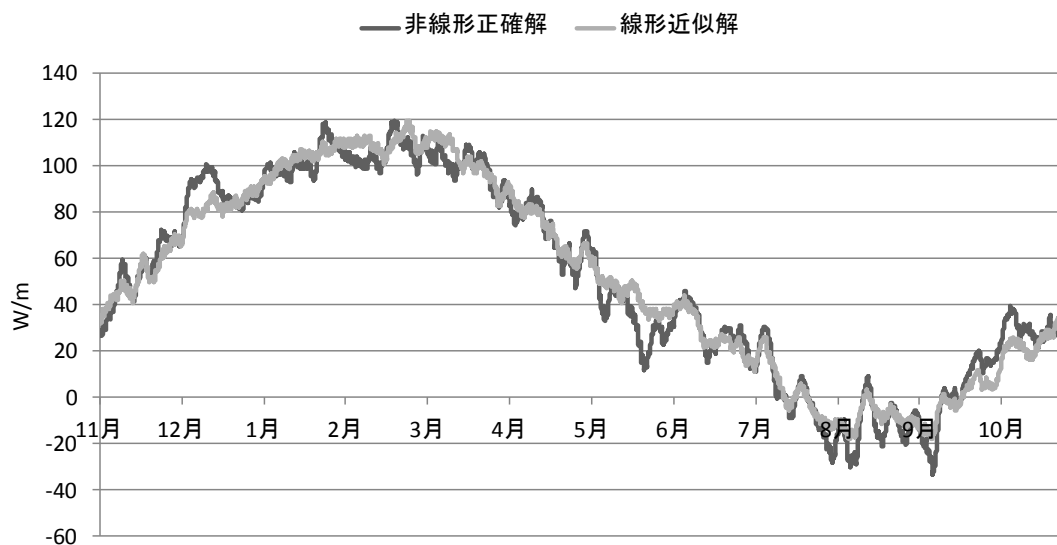


図 7.36 2次元断面寸法 2.0m×3.25m の地下構造物の線形近似予測結果

表 7.7 2 次元断面寸法 2.0m×3.25m の地下構造物の年間最大負荷の一致率

	年間最大負荷(W/m)	非線形解との差(%)
非線形正確解	119.44	
線形近似解	119.69	0.21

## 7.7 第 7 章のまとめ

本章では実際の住宅に近い一般形状の地下構造物を対象に第 2 章で示した非線形熱水分・同時移動方程式を使用して解析した室表面貫流熱流を正確解として前章で示した線形近似理論を用いた熱負荷予測の精度の検討を行った。また、住宅規模での任意形状の地下構造物にも本手法が適用できるよう、あらかじめ算出した基準単位応答を使用して一般化する手法について検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

1. 計算対象の部位を複数に分割して貫流熱流を比較し、貫流熱流毎に分割して室顕熱流単位応答を算出することとした。
2. 外気温変化に対する地下室内表面顕熱流の単位応答は時変性が小さく、非線形熱水分同時移動モデルを用いた数値計算により数値的に得られる単位応答を関数近似表現することが可能であることが判った。
3. 基準単位応答を作成した際の 2 次元断面寸法である 2 次元断面寸法 2.0m(W)×2.0m(H)、2.0m(W)×3.0m(H)、2.0m(W)×4.0m(H)の 3 種類の地下構造物の 2 次元断面熱流を線形近似計算で算出したところ、比較的精度よく非線形正確解を再現できていることが判った。
4. 本手法の一般化を目的に基準単位応答を住宅規模における床面深さが異なる地下構造物に適用する手法について検討を行った。その際に、前章同様基準単位応答の適用手法が問題になるため、深さに関係なく適用できることが確認された Wall-A 以外の部位については、①該該当深さに近い近似単位応答から得られた貫流熱流を該当部位に適用した場合、②床面深さに応じその上下 2 種類の近似単位応答から算出される貫流熱流を位置（深さ）に応じて加重平均して適用した場合とで比較し、検討を行った。その結果、②の手法に基づいて線形近似計算を行った場合の方が予測精度が高かったため、任意形状の地下構造物に基準単位応答を適用する際には②の床面深さに応じその上下 2 種類の近似単位応答から算出される貫流熱流を位置（深さ）に応じて加重平均して適用する手法を用いる必要があることが判った。よって本章で算出した基準単位応答を使用することでコンクリート単層壁地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測が可能であることが判った。

## 第 8 章

## 結論

## 第8章 結論

本研究は地下構造物の表面擬線形顕熱流単位応答を用いた簡易熱負荷予測手法の確立を目的としている。住宅規模の任意形状の地下構造物における貫流熱流の線形近似予測手法を行う際に、予め基準となる大きさの地下構造物において室顕熱流単位応答を算出しておき、それを基準単位応答として使用することで任意形状の地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測を行い、十分な熱負荷予測が可能であるか以下の検討を行った。

第1章では、地下構造物の熱負荷算定手法に関する研究のレビューを行い、本研究の目的と概要を示した。

第2章では、熱及び水分の移動ポテンシャルとして温度及び水分の化学ポテンシャルを用いた多孔質コンクリートと土壌中での水分二相系の熱・水分同時移動の基礎方程式を記述した。これらの方程式は熱移動については伝導、対流を、水分移動に伴う熱流を水分移動は液状水、水蒸気の形で起こるものを含んだ式となっており、その内部含水率の範囲に無関係に、乾燥状態から飽水状態までの全てのコンクリート及び地盤内部含水状態に対して適用できるものである。

第3章では、本研究で解析対象とする実験地下室の概要と第4章以降の内部発熱条件下での地下構造物とその周辺地盤の熱負荷及び熱・水分性状における理論解析に用いるコンクリートと砂質土壌の熱及び水分に関する物性値の近似式などを示した。また、熱・水分移動の支配方程式の差分法について述べた。

第4章では、内部発熱条件下での地下構造物及びその周辺地盤における詳細な熱性状を把握するためフィールド実験を行い、完全埋設型実験地下室におけるフィールド実験の実験装置の概要、実験方法及び計測方法を示した。また、2010年11月～2010年12月の2ヶ月間、地下室壁体表面顕熱流について、対称であると思われる箇所を比較し、顕熱流の等方性の確認を行った。さらに、非線形熱・水分同時移動モデルを用いて計算した非線形解と実験地下室において計測した壁面表面温度・顕熱流の実測値との部位別比較、内部発熱と全熱負荷の計算値と実測値の比較を行い、非線形計算解の正確性の検討を行い、平均放射温度と室温の比較を行うことで室内の快適性の検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

1. 壁面下部での比較では南壁と西壁に違いが見られるが、これは換気によって生じる風速が熱流計に影響を及ぼし、正確な熱流の実測が困難であったと考えられる。そのため、壁体表面顕熱流に方位による違いはなく、等方性が確認できたとと言える。

2. 温熱式電熱ヒーターによる内部発熱と地下室の貫流熱負荷と換気熱負荷を合計した全熱負荷の比較を行った。換気回数の計測は行っていないため、内部発熱と全熱負荷が一致する様に換気熱負荷を求め、3.2 回/h とした。また、換気回数を 2.2 回/h 、4.2 回/h として求めた全熱負荷との比較を行い、換気回数による全熱負荷の違いも示した。
3. 比較結果から、換気回数 3.2 回/h の全熱負荷は内部発熱と概ね一致している事が判る。しかし、これは推定値であるため、正確な回数とは言えない。また、換気回数 1 回/h 毎で平均して熱負荷に約 70W の違いが生じる事が判った。また、11 月 5 日までは換気を行っていないため、全熱負荷は全て一致している。11 月 5 日～11 日は 12 日以降と比べ内部発熱、全熱負荷ともに大きくなっているが、これは 11 月 5 日～11 日は 12 日以降よりも換気量が多かったためと考えられる。
4. 部位別壁体表面顕熱流比較において、各面中央部においては計算値と実測値が比較的一致していることが判った。それに対して、隅角部では計算値と実測値に違いが見られた。また、方位別で見ると、東西方向の方が南北方向と比べ計算値と実測値の違いが大きい事が判った。これは東西方向の方が室の幅が短く、壁面の隅角部からの距離が近いためと考えられる。以上の事から、各面中央部は比較的精度良く顕熱流を予測できるが、隅角部の正確な予測は難しいと考えられる。
5. 部位別壁面温度比較において、天井面と床面は多少計算値と実測値の違いが見られるが、どの面も概ね一致した。また、天井面は計算値の方が実測値よりも高く、床面は計算値の方が実測値よりも低い結果となった。これは、実際の地下室内の空気には温度分布があるためと考えられる。
6. 内部発熱と全熱負荷の比較では、計算値が内部発熱、実測値よりも熱負荷が大きい事が判った。部位別熱流比較で全ての箇所において計算値の方が実測値より熱流が大きくなっていったため、全熱負荷でも計算値の方が大きくなった。計算値の全熱負荷で換気回数を 1 回/h 少なくしたものと比較しても、内部発熱や実測値よりも大きくなった。これは計算値の貫流熱負荷が実測値に比べて大きく、換気負荷を減少分の影響が少なかったためであると考えられる。
7. 平均放射温度と室温の比較では、平均放射温度は室温よりも常に低く、室温がほぼ一定なのに対し、平均放射温度は徐々に低下していることが判った。

第 5 章では、地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測を行う際に使用する線形近似予測理論について示した。あらかじめ非線形熱水分同時移動理論を使用して算出された外乱の単位変化に対する室顕熱流単位応答から得られる近似単位応答を使用し、近似単位応答から算出される応答係数と本研究で外乱とした外気温の畳込み演算を行うことで地下構造物の貫流熱流予測が可能となる。その結果、線形近似計算の計算時間のみを考えると、非線形熱水分同時移動理論によって貫流熱流を算出する際に比べて計算時間の大幅な短縮が可能になる。



第6章では、三重大学構内の完全埋設型実験地下室をモデルに、第2章で示した非線形熱水分・同時移動方程式を使用して解析した貫流熱流を正確解とし、前章で示した線形近似理論を用いた室内表面貫流熱流予測の精度の検討を行った。また、貫流熱流の線形近似予測を行う際に問題となる多大な計算時間を解消するため、ある基準の床面積の地下構造物において貫流熱流毎に分割して室顕熱単位応答を算出し、それを基準単位応答として任意形状の地下構造物への適用し、室内表面貫流熱流の線形近似予測、検討を行った。得られた結論は以下の通りである。

1. 計算対象となる地下構造物の天井面・壁面・床面をそれぞれ複数に分割して部位毎に比較した結果、各部位の隅角部に近づくほど熱流の値が大きくなっており、部位によって貫流熱流に違いがあることが判った。よって、基準単位応答を作成する際には貫流熱流の違いによって基準単位応答を別々に作成し、適用する必要があることが判った。
2. 外気温変化に対する地下室内表面顕熱流の単位応答は時変性が小さく、非線形熱水分同時移動モデルを用いた数値計算により数値的に得られる単位応答を関数近似表現することが可能であることが判った。
3. 基準単位応答を作成した際の2次元断面寸法である2.0m(W)×2.0m(H)の2次元断面熱流を基準単位応答を使用して算出した。室全体で一つの室顕熱流単位応答を作成し、線形近似予測を行った場合と比べ、懸念されていた基準単位応答を複数使用することによる予測精度の低下については、2種類の線形近似結果の差は14.8W/mと大きな差は見られず、本手法は有効であることが判った。
4. 本手法の一般化を目的に基準単位応答を住宅規模における任意形状の寸法の地下構造物に適用する手法について検討を行った。その際に、基準単位応答の適用手法が問題になるため、①単純に基準単位応答を算出した部位寸法と予測したい任意寸法の地下室の部材寸法の比率から適用する近似単位応答を決める場合と②熱流の大きな隅角部は、基準単位応答と同じ適用領域(長さ)とし、その他の部分の適用範囲を部位比率により決定する場合の2つのケースで検討を行った。その結果、②の手法に基づいて線形近似計算を行った場合の方が①の適用手法よりも予測精度が高く、室内表面貫流熱流の線形近似予測を行う際にはこの手法を使用する必要があることが判った。よって本章において算出・整理された基準単位応答を使用することでコンクリート単層壁完全埋設型地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測が可能であることが判った。

第7章では、実際の住宅に近い一般形状の地下構造物を対象に第2章で示した非線形熱水分・同時移動方程式を使用して解析した室表面貫流熱流を正確解として前章で示した線形近似理論を用いた熱負荷予測の精度の検討を行った。また、住宅規模での任意形状の地下構造物にも本手法が適用できるよう、あらかじめ算出した基準単位応答を使用して一般化する手法について検討を行った。得られた結論は以下の通りである。



1. 計算対象の部位を複数に分割して貫流熱流を比較し、貫流熱流毎に分割して室顕熱流単位応答を算出することとした。
2. 外気温変化に対する地下室内表面顕熱流の単位応答は時変性が小さく、非線形熱水分同時移動モデルを用いた数値計算により数値的に得られる単位応答を関数近似表現することが可能であることが判った。
3. 基準単位応答を作成した際の2次元断面寸法である2次元断面寸法 2.0m(W)×2.0m(H)、2.0m(W)×3.0m(H)、2.0m(W)×4.0m(H)の3種類の地下構造物の2次元断面熱流を線形近似計算で算出したところ、比較的精度よく非線形正確解を再現できていることが判った。
4. 本手法の一般化を目的に基準単位応答を住宅規模における床面深さが異なる地下構造物に適用する手法について検討を行った。その際に、前章同様基準単位応答の適用手法が問題になるため、深さに関係なく適用できることが確認されたWall-A以外の部位については、①該該当深さに近い近似単位応答から得られた貫流熱流を該当部位に適用した場合、②床面深さに応じその上下2種類の近似単位応答から算出される貫流熱流を位置（深さ）に応じて加重平均して適用した場合とで比較し、検討を行った。その結果、②の手法に基づいて線形近似計算を行った場合の方が予測精度が高かったため、任意形状の地下構造物に基準単位応答を適用する際には②の床面深さに応じその上下2種類の近似単位応答から算出される貫流熱流を位置（深さ）に応じて加重平均して適用する手法を用いる必要があることが判った。よって本章で算出した基準単位応答を使用することでコンクリート単層壁地下構造物の室内表面貫流熱流の線形近似予測が可能であることが判った。

今後は、一般的な住宅規模の地下構造物における断熱材等の壁体構成を考慮し、任意の壁体構成条件で室内表面貫流熱流の線形近似予測が可能となるよう基準単位応答の算出、また基準単位応答を任意の壁体構成の地下構造物に適用する際の適用手法について検討していく必要がある。

## 記号説明

$c\gamma$  : 空気の容積比熱  $[J/m^3K]$

$c'\gamma'$  : 湿気の容積比熱  $[kg/m^3Pa]$

$C_i$  : 比熱 (i=1w,2w,a,m,s)  $[J/kgK]$

$C\rho$  : 材料のみかけの容積比熱  $[J/m^3K]$

$D_v$  : 材料空隙部の水蒸気拡散係数  $[kg/msPa]$

$D_{Tg}$  : 温度勾配に関する気相水分伝導率  $[m^2/S^\circ C]$

$D_{Tl}$  : 温度勾配に関する液相水分伝導率  $[m^2/S^\circ C]$

$D_{vg}$  : 含水率勾配に関する気相水分伝導率  $[m^2/S]$

$D_{vl}$  : 含水率勾配に関する液相水分伝導率  $[m^2/S]$

$g$  : 重力加速度 (=9.8)  $[m/s^2]$

$F_w$  : 外力  $[m/s^2]$

$H_i$  : エンタルピー (i=1w,2w,a,m,s)  $[J/kg]$

$J_i$  : 水分流 (i=1w,2w)  $[kg/m^2s]$

$J_p$  : 降雨量  $[kg/m^2s]$

$J_r$  : 室内の発生水分量  $[kg/s]$

$J_{w(12)}$  : 気相から液相の水分変化量  $[kg/m^2s]$

$K$  : 透水係数  $[m/s]$

$Le$  : ルイス数  $[-]$

$N_v$  : 換気回数  $[1/s]$

$p$	: 水蒸気圧	$[Pa]$
$p_j$	: j 番目の壁表面水蒸気圧	$[Pa]$
$p_o$	: 外気の水蒸気圧	$[Pa]$
$p_r$	: 室内の水蒸気圧	$[Pa]$
$p_{sat}$	: 飽和水蒸気圧	$[Pa]$
$P$	: 大気圧	$[Pa]$
$q$	: 熱流	$[W/m^2]$
$q_{sol}$	: 日射吸収量	$[W/m^2]$
$q_{noc}$	: 夜間輻射量	$[W/m^2]$
$Q_r$	: 室内の熱発生量	$[W]$
$r$	: 水の相変化熱	$[J/kg]$
$R_v$	: 水蒸気のガス常数( $=R/M_v$ )	$[m^3 Pa/kmolK]$
$R$	: 一般ガス常数 ( $=8316.96$ )	$[m^3 Pa/kmolK]$
$M_v$	: 水蒸気の分子量 ( $=18.016$ )	$[kg/kmol]$
$S_{iw}$	: i 相の水分の部分エントロピー	$[J/kgK]$
$S_j$	: j 番目の壁表面積	$[m^2]$
$t$	: 時間	$[s]$
$T$	: 温度	$[K]$
$T_j$	: j 番目の壁表面温度	$[K]$
$T_o$	: 外気温	$[K]$
$T_r$	: 室温	$[K]$
$V$	: 室容積	$[m^3]$
$W$	: 材料単位体積、単位時間に水蒸気から液水に相変化した量	$[kg/m^3s]$

$\alpha$	: 総合熱伝達率	$[W/m^2K]$
$\alpha_c$	: 対流熱伝達率	$[W/m^2K]$
$\alpha_r$	: 輻射熱伝達率	$[W/m^2K]$
$\alpha'_m$	: 湿気伝達率	$[kg/m^2sPa]$
$\alpha'_T$	: 温度勾配に関する水分伝達率	$[kg/m^2sK]$
$\alpha'_\mu$	: 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率	$[kg/m^2s(J/kg)]$
$\lambda$	: 熱伝導率	$[W/mK]$
$\lambda'_{Tg}$	: 温度勾配に関する気相水分伝導率	$[kg/msK]$
$\lambda'_{Tl}$	: 温度勾配に関する液相水分伝導率	$[kg/msK]$
$\lambda'_T$	: 温度勾配に関する水分伝導率	$[kg/msK]$
$\lambda'_{\mu g}$	: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝達率	$[kg/ms(J/kg)]$
$\lambda'_{\mu l}$	: 水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝達率	$[kg/ms(J/kg)]$
$\lambda'_\mu$	: 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率	$[kg/ms(J/kg)]$
$\lambda'_p$	: 圧力勾配に関する水分伝達率	$[kg/msPa]$
$\mu$	: 自由水基準の水分化学ポテンシャル( $=\mu_{1l}=\mu_{2l}$ )	$[J/kg]$
$\mu_i$	: 化学ポテンシャル (i=1w,2w,a)	$[J/kg]$
$\rho_i$	: 密度 (i=1w,2w,a,m,s)	$[kg/m^3]$
$\psi$	: 体積含水率	$[m^3/m^3]$
$\psi_0$	: 絶乾時の材料の空隙率	$[m^3/m^3]$

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad : \text{空間勾配 } i, j, k \text{ はそれぞれ、 } x, y, z \text{ 方向の単位ベクトル}$$

#### 添え字

$1w$  : 気相水分

$2w$  : 液相水分

$a$  : 空気

$i$  : 室内

$m$  : 湿り空気

$o$  : 外気

$r$  : 室空気

$s$  : 実質部

$p$  : 降雨

$T$  : 温度

$\mu$  : 水分化学ポテンシャル

## 引用文献

- [1] 井上 隆、他 3 名、大規模地下構造物の熱負荷算定法に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、1989-93
- [2] 永田明寛、松尾 陽、大澤元毅、大規模地下空間の熱湿気環境予測プログラムの開発、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.189-192,1992
- [3] 佐藤隆満、八乙女巖、射場本忠彦、井上 隆、大規模地下構造物の熱負荷計算法に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、1989-1992
- [4] 松尾 陽、井上 隆、他、地下住居の熱特性に関する研究、日本建築学会大会講演梗概集環境工学、1985-88
- [5] 松尾 陽、坂本雄三、井上 隆、他、住宅地下室の温熱環境制御技術に関する研究、日本建築学会大会講演梗概集、1990-92
- [6] 永田明寛、松尾 陽、他 5 名、住宅地下室の温熱環境制御技術、その 4.地盤に接する壁体の熱損失と地中温度分布、日本建築学会大会講演梗概集 D 環境工学、pp.779-780、1992
- [7] 羽島大輔、井上 隆、大澤元毅、他、地下室の温熱環境に関する研究、日本建築学会大会講演梗概集 D 環境工学、1993-1994
- [8] 長谷川房雄、吉野 博、松本真一、半地下実験家屋における透過日射を防止した状態での熱環境性能に関する長期実測、日本建築学会計画系論文報告書、第 374 号、pp.33-43、1987
- [9] 長谷川房雄、長友宗重、吉野 博、松本真一、半地下実験家屋における透過日射がある状態での熱環境性能に関する長期実測、日本建築学会計画系論文報告書、第 387 号、pp.22-32、1988
- [10] 長谷川房雄、長友宗重、吉野 博、松本真一、半地下実験家屋における暖房状態での熱環境性能に関する長期実測、日本建築学会計画系論文報告書、第 435 号、pp.1-10、1992
- [11] Mitalas, G.P., Basement heat loss studies at DBC/NRC, Ottawa. Division of Building Research, National Research Council of Canada, DBR Paper No.1045,1982
- [12] Mitalas, G.P., Calculation of Below-Grade Residential Heat Loss. ASHRAE Trans.,93(1), pp.743-783,1987
- [13] ASHRAE., 1993 ASHRAE Handbook-Fundamentals, Chapter 25.Atlanta:American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,Inc,1993

- [14] Sobotka, P., Yoshino, H., Matsumoto, S., Thermal performance of three deep basements: a comparison of measurements with ASHRAE Fundamentals and the Mitalas method, the European Standard and the two-dimensional FEM program, *Energy and Buildings*, 21(1), pp.23-24,1994
- [15] Sobotka, P., Yoshino, H., Matsumoto, S., The Analysis of Deep Basement Heat Loss by Measurements and Calculations, *ASHRAE Trans.*, 101(2), pp.186-197,1995
- [16] 小椋大輔、地下構造物の熱・湿気性状に関する研究、博士論文、2000
- [17] 小椋大輔、松本 衛、自然状態下における地下構造物の熱・湿気性状の解析、日本建築学会計画系論文集、第 529 号、pp.23-29、2000
- [18] 朴 卿淳、地下構造物の熱負荷特性及びその予測法に関する研究、博士論文、2007
- [19] 山添康彦、地下構造物の簡易熱負荷算定手法に関する研究、修士論文、2009
- [20] 松本、前田、結露蒸発の生じない場合の壁の吸放湿の基礎式について、空気調和衛生工学会近畿支部環境工学委員会資料 11、pp.1-11、1976
- [21] 池田哲朗、結露障害防止に関する基礎的研究、博士論文、1979
- [22] 松本 衛、建築壁体における熱・水分の同時移動及び水分蓄積に関する研究、博士論文、1978
- [23] Jury, W., Simultaneous transport of heat and mass through a medium sand, Ph thesis, University of Michigan, 1973
- [24] 理科年表 CD-ROM2005、国立天文台編、丸善株式会社
- [25] Goran. Hedenblad, Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement and Cement Paste, Ph thesis, Division of Building Materials Lund Institute of Technology, 1993
- [26] 日本熱物性学会編、熱物性ハンドブック、養賢堂、1990
- [27] 日本コンクリート工学協会編、コンクリート便覧、技報堂、1976
- [28] 松本 衛、気液同時移動の場合の熱水分の移動方程式、日本建築学会近畿支部研究報告集、計画系、pp.17-20、1974
- [29] 前田敏男、他、新建築学大系 8、音・光・熱・空気・色・伝熱学、彰国社、1969
- [30] 松本 衛、他、新建築学大系 10、環境物理、彰国社、1994
- [31] パタンカー、S.V.原著、水谷、香月共訳、コンピュータによる熱移動と流れの数値解析、森北出版、1985
- [32] 松本 衛、小椋大輔、自然状態下における地下構造物とその周辺地盤の熱・湿気性状の解析、日本建築学会計画系論文集、第 474 号、pp.27-36、1995
- [33] 松本 衛、建築環境工学、第 5 章・熱環境と建築伝熱、オーム社、pp.139-185、1978

## 謝辞

筆者の指導教員である永井久也教授には本研究のテーマを与えてくださり、筆者の質問に対して常に適切に、熱心に多大なご助言を頂きました。永井教授のご助言により、本論文の完成に至りましたことをここに深く感謝申し上げます。

また、環境設備系の北野博亮助教、三重大学技術専門職員の岩田剛技官には研究活動の際にご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

最後に環境設備系研究室の学生の皆様には励ましの言葉を頂き、大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。