



## 地下構造物の熱・湿気性状に関する研究

小椋, 大輔

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2000-09-22

(Date of Publication)

2008-04-02

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2442

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002442>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

地下構造物の熱・湿気性状に関する研究

2000年8月

小 椋 大 輔

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1-1 はじめに .....	1
1-2 従来の研究 .....	2
1-2-1 多孔質材料中での熱・水分移動に関する研究 .....	2
1-2-2 地下空間の熱・湿気性状に関する研究 .....	3
1-3 本研究の目的と概要 .....	5
<b>第2章 地下構造物及び周辺地盤の熱・水分同時移動の基礎方程式</b> .....	6
2-1 はじめに .....	6
2-2 多孔質材料中における熱・水分同時移動の基礎式 .....	6
2-2-1 多孔質材料内の拡散方程式 .....	6
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 .....	7
2-2-3 支配方程式 .....	11
2-2-4 本論で用いる基礎方程式 .....	13
2-2-5 境界条件式 .....	14
2-3 地下空間の熱・水分の収支式 .....	16
2-4 第2章のまとめ .....	17
<b>第3章 地下構造物の熱・湿気性状の理論解析法</b> .....	18
3-1 はじめに .....	18
3-2 解析に用いる物性値 .....	18
3-2-1 コンクリートの物性値 .....	18
3-2-2 砂質土壌の物性値 .....	24
3-2-3 ローム質砂の物性値 .....	29
3-3 数値計算法 .....	35
3-3-1 基礎方程式の差分法 .....	35
3-3-2 計算上の物性値の取り扱い .....	39
3-4 第3章のまとめ .....	39
<b>第4章 完全埋設型地下室および周辺地盤の熱・水分性状の年間実測</b> .....	40
4-1 はじめに .....	40
4-2 実験概要 .....	40
4-3 実験装置 .....	41
4-3-1 実験地下室 .....	41
4-3-2 計測装置と計測状況 .....	43
4-4 実験条件 .....	43

4-5	実験場所の地盤特性 .....	46
4-5-1	ボーリングによる土質調査 .....	46
4-5-2	地表面近傍土壌の含水率-水分化学ポテンシャル関係の測定 .....	46
4-6	測定結果と考察 .....	48
4-6-1	外界気象 .....	48
4-6-2	地表面日射吸収率 .....	51
4-6-3	地下室内温・湿度変動 .....	52
4-6-4	地下室の結露性状 .....	55
4-6-5	地盤内熱・水分性状 .....	58
4-7	第4章のまとめ .....	63
<b>第5章</b>	<b>完全埋設型地下室および周辺地盤の熱・水分性状の解析 .....</b>	<b>65</b>
5-1	はじめに .....	65
5-2	計算条件 .....	65
5-2-1	解析対象 .....	65
5-2-2	境界条件 .....	66
5-2-3	初期条件 .....	68
5-2-4	解析に用いた物性値 .....	70
5-2-5	計算方法 .....	70
5-3	実測結果と解析結果の比較・検討 .....	71
5-3-1	地下室内温・湿度 .....	71
5-3-2	地盤内温度 .....	76
5-3-3	地盤内水分化学ポテンシャル .....	82
5-4	地盤及び壁体の物性値の違いによる影響 .....	82
5-5	地盤及び壁体を単純熱拡散として扱った場合 .....	86
5-5-1	計算条件 .....	86
5-5-2	結果と考察 .....	86
5-5	第5章のまとめ .....	89
<b>第6章</b>	<b>地盤内水分が地下構造物の熱・湿気性状に与える影響 .....</b>	<b>90</b>
6-1	はじめに .....	90
6-2	計算条件 .....	90
6-2-1	解析対象 .....	90
6-2-2	境界条件・初期条件 .....	91
6-2-3	解析に用いた物性値 .....	94
6-2-4	計算方法 .....	94
6-3	地下構造物及び周辺地盤の熱・湿気特性 .....	94
6-3-1	周辺地盤の熱・水分場 .....	94
6-3-2	地下空間の温・湿度性状 .....	98

6-3-3 壁体の熱・湿気性状 .....	98
6-4 換気回数の影響 .....	99
6-4-1 周辺地盤の熱・水分場への換気量の影響 .....	99
6-4-2 地下空間の温・湿度への換気量の影響 .....	99
6-4-3 壁体の熱・湿気性状への換気量の影響 .....	102
6-5 壁体防湿層配置の影響 .....	106
6-5-1 計算条件 .....	106
6-5-2 「内断湿」の場合 .....	106
6-5-3 「外断湿」の場合 .....	108
6-5-4 各種壁体の比較・検討 .....	109
6-6 常水面深さの影響 .....	111
6-6-1 計算条件 .....	111
6-6-2 常水面深さ6.4mの場合 .....	111
6-6-3 常水面深さ2mの場合 .....	112
6-6-4 常水面深さの違いの比較・検討 .....	113
6-7 第6章のまとめ .....	115
<b>第7章 地下構造物の結露防止の検討 .....</b>	<b>117</b>
7-1 はじめに .....	117
7-2 計算条件 .....	117
7-2-1 解析対象と壁体構成 .....	117
7-2-2 境界条件・初期条件 .....	118
7-2-3 解析に用いた物性値 .....	121
7-2-4 計算方法 .....	124
7-3 結果と考察 .....	124
7-3-1 断熱・断湿の影響 .....	124
7-3-2 吸放湿材の影響 .....	134
7-3-3 換気の影響 .....	134
7-4 第7章のまとめ .....	140
<b>第8章 地下構造物の熱・湿気性状解析の線形近似化 .....</b>	<b>141</b>
8-1 はじめに .....	141
8-2 基礎方程式の線形近似化 .....	141
8-3 地盤内温度性状の線形近似精度の検討 .....	145
8-3-1 計算条件 .....	145
8-3-2 計算方法 .....	145
8-3-3 結果と考察 .....	146
8-3-3-1 外気温年平均値が変化した場合 .....	146
8-3-3-2 外気相対湿度年平均値が変化した場合 .....	151

8-4 地下空間の熱負荷の線形近似精度の検討 .....	152
8-4-1 計算条件 .....	152
8-4-2 計算方法 .....	152
8-4-3 結果と考察 .....	153
8-4-3-1 外気温年平均値が変化した場合 .....	153
8-4-3-2 室温年平均値が変化した場合 .....	156
8-4-3-3 外気温、室温の単位変化に対する応答の時変性の検討 .....	157
8-5 地下空間の温・湿度変動の近似精度の検討 .....	157
8-5-1 計算条件 .....	157
8-5-2 計算方法 .....	158
8-5-3 結果と考察 .....	160
8-5-3-1 外気温年平均値が変化した場合 .....	160
8-5-3-2 外気相対湿度年平均値が変化した場合 .....	160
8-5-3-3 日射量が一定比率で変化した場合 .....	163
8-5-3-4 降雨量が一定比率で変化した場合 .....	165
8-6 第8章のまとめ .....	168
<b>第9章 結論 .....</b>	<b>170</b>
<b>記号表 .....</b>	<b>173</b>
<b>引用文献 .....</b>	<b>176</b>
<b>本研究に関する発表論文一覧 .....</b>	<b>179</b>
A. 原著論文 .....	179
B. 国際会議 .....	179
C. 学術講演 .....	180
<b>謝辞 .....</b>	<b>182</b>

# 第1章 序論

## 1-1 はじめに

近年、地下構造物は都市の土地有効利用や地下空間の持つ有効な特性の利用といった観点から、交通、居住、貯蔵といった多くの利用目的を持って建設されつつある。この地下空間の持つ有効な特性としては、耐震性、防音性といったものがあり、熱環境的には恒温性、高断熱性といった省エネルギーに資するものを有していることが挙げられる。しかし、一方この空間は一般に夏期の結露、地下水の漏水、高湿度環境といったクリティカルな問題を持っており、またその性状は単純ではない。

地下空間の熱的省エネルギー性を評価するためには、室内熱環境に大きく影響を与える周辺の地盤からの熱移動を適切に評価する必要がある。地盤の熱伝導率や比熱といった熱移動に関係する物性値は土壌の含水状態によって大きく変化するが、その状態は地表面境界の降雨の浸透、蒸発及び地盤内における地下水流動等によって変化する。また水分の蒸発、凝縮といった相変化による熱移動量は大きく、特に地表面境界における降雨後の蒸発潜熱量は大きい。すなわち、水分移動は熱移動に大きな影響を与えるため地盤内熱移動を考える場合、これらの影響を適切に評価する必要がある。

地下空間の結露性状、湿度環境は、地盤から壁体を通して流入してくる水分や、換気により室内に持ち込まれる水分の影響を受ける。地盤及び壁体内を移動する水分は水分状態の差によって生ずる以外に温度差によっても生じる。また地下構造物の躯体と地盤との間を完全に防湿することは難しく、躯体は地盤からの熱のみならず水分の移動がある。すなわち、結露防止、湿度環境予測を適切に行うには、地盤と躯体、躯体と室との間における熱と水分両方の移動の考慮が必要である。

地下構造物の熱・湿気環境の制御の観点から、熱的省エネルギー性の評価や結露防止及び高湿度環境抑制を行うためには、上で述べた影響を適切に考慮した熱・湿気環境予測法が必要であると考えられる。以下では、この観点から従来の研究より得られた成果について述べ、本研究の目的と概要を示す。

## 1-2 従来の研究

従来の研究を建築材料、土壌といった多孔質材料中での熱・水分移動に関する研究と、地下構造物の熱・湿気性状に関する研究とについて分けて以下でレビューを行う。

### 1-2-1 多孔質材料中での熱・水分移動に関する研究

土壌、建築材料は一般に多孔質材料であり、材料中の熱と水分の移動については古くから研究が行われている。

材料中での熱と水分の同時移動を統一的に扱ったものとしては、Philip & De Vries[1]のモデルがある。彼らは、水蒸気移動に対しては修正されたFickの法則を、液水移動に対しては不飽和流れに拡張されたDarcy則を用い、温度勾配のある場合の水分移動を、含水率勾配と温度勾配によるものとで表現し、さらに、相変化を考慮した熱移動の式を提示した。

Luikov[2][3]は、多孔質材料を毛細管コロイド材料としてとらえ、水蒸気の移動は分子とモルの移動により、液水移動は毛細管ポテンシャルと浸透圧によるとし、これらの移動を材料空隙の毛細管分布を考慮して定式化し、含水率勾配と温度勾配による移動方程式を導出した。また、Prigogine[4]、De Groot[5]等の非平衡熱力学の理論を多孔質材料に初めて適用し、現象論的方程式を統一的に把握した。

乾燥工学の分野においては、Krischer[6]が、熱水分同時移動方程式を提示し、同時に種々の材料について広範な移動係数の測定を行っている。

Cary & Taylor[7-9]は、非可逆過程の熱力学より物質とエネルギーの流束と駆動力との関係を導き、式に現れる係数間の関係を実験により検討し、更に係数の物理的内容を明らかにした。

松本[10-12]は、建築壁体の結露過程の解析、壁体内の含水率及び熱流の変化の予測を目的に、非可逆過程の熱力学を使用して、壁体の変形、圧力差によるBulkな流れを含む一般式を導き、多層壁体の問題を解くのに適切な水分移動ポテンシャルは自由水基準の水分化学ポテンシャルであることを提示した。更にこの一般式から、従来の現象論的方程式を導き対応させている。

これら基礎式の間関係は前田、松本[13]、池田[14]において明確にされており、Philip & De Vries, Luikov, Krischerのものは松本の温度と水分化学ポテンシャルをポテンシャルとした



式に変形される。なお水分化学ポテンシャルを水分のポテンシャルとして用いることにより、多層で構成される材料を考える場合、基礎方程式の取り扱いが簡便になる。以上、不飽和多孔質材料中の熱水分同時移動の基礎式の導出及び基礎式の検討に関する従来の研究を述べてきたが、本論における基礎式は松本の理論に従う。

### 1-2-2 地下空間の熱・湿気性状に関する研究

地下構造物の熱性状とその解析法については、事務所ビル等大規模な地下室系の熱負荷算定法の研究[15][16]、省エネ型住宅としての地下また半地下住宅の熱性状の調査、解析法に関する研究[17-20]が国内外で多く行われてきており、多次元性の考慮とその解析法[21-26]、地盤熱物性（熱伝導率、温度伝導率）の測定、同定法に関する研究[27-29]、実測調査等、純熱伝導問題としてはかなりの成果が得られてきている。

地下室や周辺地盤の熱性状に関する実測調査を行った研究は多く行われている。Shipp[30]は地盤内温度、含水率及び地下構造物の外壁熱流の測定を行い2次元純熱伝導解析による外壁熱流比較を行っている。松尾、井上他[17][31]は地下室周辺地盤の温度測定を行い、3次元純熱伝導解析による地下室温度性状の把握を行っている。長谷川、吉野、松本ら[18-20]は半地下居室の熱環境性能を長期にわたる実測を基に検討している。また松本ら[29]は地盤の含水率測定、熱物性測定及び熱拡散係数同定も行っている。これら研究では土壌の熱物性値が含水状態に依存することを認識しているが、実測結果の解析時には、いずれも地盤内熱移動を純熱伝導としており、地盤内水分の影響を十分検討しているとはいえない。

既存の地下構造物の熱性状解析法は、前述の通り純熱伝導問題として扱っている研究が多い。地下室の熱性状予測に関して、永田ら[32]および羽鳥ら[33]は地盤を純熱伝導として扱う地下室の熱性状解析を行った結果を実測値と比較し、計算結果と実測値がよく一致しているとしている。しかし解析法で用いる熱拡散係数は地盤温度の実測値と計算値との比較から同定し、日射吸収率は地表面SATの年平均値が地盤温度実測値の年平均値と一致する様に調整することによるものである。つまりこれら値の持つ物理的意味と計算に用いた値が充分に対応しておらず、定量的予測を行う解析法として十分な一般性を有しているとはいえない。

地盤内水分を考慮して地盤内熱移動を取り扱った研究としては Shen and Ramsey[34]のもの

がある。彼らは半地下室の壁体熱性状を地盤内の含水率及び降雨の影響を考慮した解析を行い、含水率による熱伝導率の変化、熱・水分のカップリングが、半地下建物の壁面の熱ロスに対して影響が大きいことを指摘している。松本、小椋[35]は地盤内水分及び降雨を考慮して、地下構造物の熱負荷の検討を行い、降雨が地盤内熱移動に与える影響が地下構造物の熱負荷に大きな影響を与えることを示した。ただし、これら研究では地盤と壁体との間の水分移動、壁体と室との間の水分移動の影響については検討を行っていない。

芝池ら[36]は地盤内の熱・水分移動を考慮し、境界要素法による検討を行っている。ただし、この境界要素法では蒸気拡散支配の領域の方程式が用いられており、水分を多く含む地盤内においては適応が難しいと考えられる。

永田ら[16]は大規模地下構造物の熱・湿気環境予測のプログラムを提案しているが、壁体は蒸気拡散支配であり、地盤からの水分の流出入は与条件として解析する物であり、これも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と考えられる。

Sato and Fukuhara[37]は水分浸透問題の観点から大深度地下構造物において、建物側の取り扱いが不十分であるが、地盤と壁体との間の熱・水分移動を考慮して壁体の熱・水分流について検討している。

地下室の表面結露の問題に関しては、古くから行われておりその問題の重要性は指摘されている[38]。本間、松尾、井上[39]は地下室の壁表面結露問題に関して、種々の壁体構造について壁面温と結露状況を実測し、室温の露点温度と壁面温とによる結露予測が不十分であることを指摘している。長井、松尾、井上、永田[40]は地下室の結露に関して躯体の吸放湿性は考慮せず、換気及び内部発熱の影響を考慮して解析し検討を行っている。

地下構造物は地盤から壁体を通して室内への水分が漏出するのをさけるため、防水処理が行われる。例えばコンクリート躯体の外側にアスファルト防水を設けたり、防水モルタルを躯体室内側に設けるといった方法や、二重壁を設け空気層で生じた漏水等の排水処理をとるといった方法である。これら防水処理は地盤内水分が室内へ浸透するのを避けるため設けられることが多いが、常水面位置が床スラブより深ければ全く防湿層を設けない場合も存在する。一方、地下構造物は夏期の結露や高湿な環境が問題となるが、これらは換気による高湿な外気の流入の他に地盤から壁体を通して流入する水分の影響もあると考えられる。これまでこれら

両者を考慮して地下室温・湿度及び壁体結露性状を検討した研究は行われていない。

### 1-3 本研究の目的と概要

本研究は、地下構造物の熱・湿気性状の予測法を確立し、地盤及び壁体の構成、換気などがこれらに及ぼす影響を明らかにし、熱・湿気環境設計のための簡易予測計算法について提案を行うことを目的として、以下に示す様な検討を行った。

第2章では、第5章以降の解析で用いる多孔質材料中の熱・水分移動の基礎方程式を提示する。さらに地下構造物の熱・湿気性状を検討する解析法について示す。

第3章では、第2章で示した基礎方程式に登場する物性値について、第5章以降の解析で用いる地盤、壁体に関する値を示す。また基礎方程式の数値解析法として採用した前進型有限差分法について述べる。

第4章では、完全埋設型の実験地下室の温・湿度及び周辺地盤の熱・水分場の年間性状の実測の実験概要、実験計画、計測方法について述べ、実測によって得られた室温・湿度性状、結露性状、周辺地盤の熱・水分性状について考察する。

第5章では、第4章の地下室温・湿度及び周辺地盤の熱・水分性状を第2章、第3章で示した基礎式及び解析方法を用いて、実測された外界気象条件を境界条件として計算を行い、実測との比較・検討を行う。また、地盤及び壁体の物性値の違いがもたらす影響を検討し、従来の単純熱拡散方程式による解析結果との比較を行う。

第6章では、地盤内水分が地下構造物の熱・湿気性状に与える影響を数値解析により検討する。地下構造物及び地盤内熱・水分性状に関する基本特性について検討し、壁体防湿層配置、常水面深さ、換気量といったパラメータを変化させた数値解析を行った結果を用いて検討する。

第7章では、住宅用地下室の結露防止、高湿度環境抑制について、室利用条件、防湿層配置、断熱材配置等を変化させた数値解析を行い検討する。

第8章では、地盤内熱・水分性状及び地下構造物の熱・湿気性状の簡易予測手法としての擬線形化方程式により得られた解の近似精度及び適用範囲について検討する。

第9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の熱・水分同時移動の基礎方程式

### 2-1 はじめに

本章では、地下構造物及び周辺地盤の熱・水分性状の研究において、基礎となる地盤及び建築壁体における熱・水分の移動と地下空間の熱及び水分の収支を記述する理論について提示する。

金属やガラスを除き、建築材料は一般に多孔質体である。また地盤は多く水分を含む土粒子で構成される多孔質体である。これらの内部の熱及び水分の移動は同時移動現象である。

この現象を記述する熱・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、大別して三つに分けられる。Philip & de Vriesの現象論的にマクロにみる解析、Luikovの材料内の空隙を毛細管の束とみるマイクロな解析、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のポテンシャルとし、水分の移動に関しては、液水と水蒸気の二相流と考え、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[13]、池田[14]によりなされており、基礎式の妥当性の検討は松本[10]、池田[14]が行っている。本研究では、松本の先の研究を基礎とする。ここでは、移動のポテンシャルとして温度、水分化学ポテンシャルを用いる松本の理論を示し、多孔質材料内の熱・水分同時移動の基礎式を提示する。さらに地下空間の熱及び水分の収支式を示し、これらを地下構造物及び周辺地盤の熱・水分同時移動過程の基礎方程式とする。

### 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

固体内には、種々の形態で水分が存在するが、固体内で平衡状態がくずれると、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平衡状態からのずれ、すなわち水分の化学ポテンシャル差である。平衡状態の水分と同様に、水分の移動形態も気相水分（水蒸気）と液相水分（毛管水吸着水

等) に大別できる。水分を含む多孔質体を空気・水分・固体実質部を成分とする混合体とみなし、水分は液・気相で存在し、空気は不活性とみなし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(気・液相)、空気の流動に関する次の拡散方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
 [\mathbf{J}] &= [\mathbf{C}_{ij}] [\mathbf{F}] \\
 [\mathbf{J}] &= [\mathbf{q}, \mathbf{J}_{1w}, \mathbf{J}_{1a}, \mathbf{J}_{2w}]^T \\
 [\mathbf{F}] &= -[\nabla \ln T, \nabla_T \mu'_{1w}, \nabla_T \mu'_{1a}, \nabla_T \mu'_{2w}]^T
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

ここで、行列 $[\mathbf{C}_{ij}]$ は4行4列の対称かつ正定行列、 $[\mathbf{J}]$ は流れ(flux)を表す列ベクトル、 $[\mathbf{F}]$ は駆動力(force)を表す列ベクトル、 $\mathbf{q}$ は熱流 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 $\mathbf{J}_{1w}$ は気相水分(水蒸気)流 $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ 、 $\mathbf{J}_{1a}$ は乾燥空気流 $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ 、 $\mathbf{J}_{2w}$ は液相水分流 $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$ 、 $T$ は絶対温度 $[\text{K}]$ 、 $\mu_{1w}, \mu_{1a}, \mu_{2w}$ 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 $[\text{J}/\text{kg}]$ 、 $\nabla = \mathbf{i} \partial/\partial x + \mathbf{j} \partial/\partial y + \mathbf{k} \partial/\partial z$ は空間勾配、 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ はそれぞれ $x, y, z$ 方向の単位ベクトル、 $\nabla_T$ は一定温度での空間勾配を表す。また、内部の界面における関係は、

$$\mathbf{J}_{w(12)} = \beta (\mu_{1w} - \mu_{2w}) \tag{2-2}$$

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、気相内の水蒸気分圧、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

$$\begin{aligned}
 \mu_{1w} &= \mu_{v0}(T, P) + \mu_{1v} \\
 \mu_{1v} &= R_w T \ln \frac{p_v}{P} \\
 \mu_{v0} &= \mu_v^0(T) + R_w T \ln P
 \end{aligned} \tag{2-3}$$

$$\begin{aligned}
\mu_{1a} &= \mu_{a0}(T, P) + \mu_a \\
\mu_a &= R_a T \ln \frac{P_a}{P} \\
\mu_{a0} &= \mu_a^0(T) + R_a T \ln P
\end{aligned} \tag{2-4}$$

ただし、 $R_w$  は水蒸気の気体常数( $R_w = R/M_w$ ) [(Pa m<sup>3</sup>)/(kg K)],  $R$  は完全ガスの気体常数 [(Pa m<sup>3</sup>)/(mol K)],  $M_w$  は水蒸気の分子量[kg/mol],  $R_a$  は乾燥空気の気体常数(= $R/M_a$ ) [(Pa m<sup>3</sup>)/(kg K)],  $M_a$  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[J/kg]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  $p_s(T)$ ,  $\mu_{2w}$  に平衡する蒸気圧を  $p_v^2$  として,

$$\begin{aligned}
\mu_{2w} &= \mu_{l0}(T, P) + \mu_{2l} \\
\mu_{2l} &= R_w T \ln \frac{p_v^2}{p_s(T)}
\end{aligned} \tag{2-5}$$

ここに、 $\mu_{2l}$  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、(2-2)式より  $\mu_{1w} = \mu_{2w}$  であるから、 $\mu_{1w}$  は(2-3)式の代わりに(2-5)式の形で表現することができる。

これらの関係を用いて、

$$\begin{aligned}
\nabla_T \mu'_{1w} &= \nabla_T \mu_{v0} + \nabla_T \mu_{1v} - F_w = v_{1w} \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{1v} \\
&= \nabla_T \mu_{l0} + \nabla_T \mu_{il} - F_w = v_{2w} \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{il} \quad (i=1,2)
\end{aligned} \tag{2-6}$$

$$\nabla_T \mu'_{1a} = \nabla_T \mu_{a0} + \nabla_T \mu_a - F_w = v_a \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_a \tag{2-7}$$

ただし、

$$v_{1w} = \frac{R_w T}{P}, v_a = \frac{R_a T}{P}, v_{2w} = \frac{1}{\rho_{2w}} \tag{2-8}$$

ここで、 $v_{1w}, v_a, v_{2w}$  はそれぞれ、気相水分、乾燥空気、液相水分の比容積[m<sup>3</sup>/kg],  $\rho_{2w}$  は液相水分密度[kg/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  $i$  相の水分子の部分比エントロピー [J/kg K] である。水分の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。

$$\begin{aligned} [\mathbf{J}] &= [D_{ij}] [\mathbf{F}_e] \\ [\mathbf{J}] &= [\mathbf{q}, \mathbf{J}_{1w}, \mathbf{J}_{1a}, \mathbf{J}_{2w}]^T \\ [\mathbf{F}_e] &= -[\nabla T, \nabla \mu_{1l} - F_w, \nabla P, \nabla \mu_{2l} - F_w]^T \end{aligned} \quad (2-11)$$

ただし、行列  $[D_{ij}]$  は、4行4列の行列である。また、(2-11)式においては気相の浮力の項 ( $\rho_{1a} F_{1a} + \rho_{1w} F_{1w}$ ) は極めて小さいのでこれを無視した。すなわち、

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

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

ここで、(2-11)式の係数  $D_{ij}$  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。 $D_{01}$ ,  $D_{03}$  および  $D_{02}$  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、圧力拡散および液相水分の干渉効果を表し、 $D_{30}$ ,  $D_{32}$  および  $D_{31}$  は液相水分の熱拡散、圧力拡散およ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すべてを実験によって測定する必要があると考えられるが、これらはすべてポテンシャル  $T$ ,  $\mu_{1l}$ ,  $P$ ,  $\mu_{2l}$  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  $\mathbf{J}_{2w}$  と気相水分流動  $\mathbf{J}_{1w}$  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  $D_{01}=D_{02}=D_{03}=0$ ,  $D_{13}=D_{31}=0$ ,  $D_{23}=0$  とみなしてよい。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は(2-11)式は次のように書ける。

$$q = -D_{00} \nabla T \quad (2-12a)$$

$$J_{1w} = -D_{10} \nabla T - D_{11} (\nabla \mu_{1l} - F_w) - D_{12} \nabla P \quad (2-12b)$$

$$J_{1a} = -D_{20} \nabla T - D_{21} (\nabla \mu_{1l} - F_w) - D_{22} \nabla P \quad (2-12c)$$

$$J_{2w} = -D_{30} \nabla T - D_{32} \nabla P - D_{33} (\nabla \mu_{2l} - F_w) \quad (2-12d)$$

風圧等により外部から圧力差が加えられる場合や、強加熱等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ために、以下の記号を用いて次のように表現される。

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

$$q = -\lambda \nabla T \quad (2-13a)$$

$$J_{1w} = -\lambda'_{Tg} \nabla T - \lambda'_{\mu g} (\nabla \mu_{1l} - F_w) \quad (2-13a)$$

$$J_{2w} = -\lambda'_{Tl} \nabla T - \lambda'_{\mu l} (\nabla \mu_{2l} - F_w) \quad (2-13a)$$

ここで、 $\lambda$  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、水分の状態は液相、気相間で平衡していると仮定し（局所平衡仮定）、新たに水分の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(2-13b)式と(2-13c)式を足し合わせて全水分流に対する拡散方程式は以下となる。

$$J_w = -\lambda'_T \nabla T - \lambda'_\mu (\nabla \mu - F_w) \quad (2-14)$$

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充分大きく、水蒸気流  $J_{1w}=0$  のときの  $J_w=J_{2w}$  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 (水分化学ポテンシャル) およ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, 含水率および温度に強く依存し, 常数として取り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, 水分および熱の収支式をたてる. ただし, 以下の仮定を用いる.

- 1) 多孔質体内部の水分は気・液相間で常に平衡している, すなわち水分の局所平衡仮定をおく.
- 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, 水分収支式をたてると, 気相及び液相のそれぞれについての水分収支より,

$$\frac{\partial(\Phi_o - \psi)\rho_{1w}}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{1w} - W \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial\psi\rho_{2w}}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{2w} + W \quad (2-16)$$

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>],  $\Phi_o$  は絶乾時の材料の空隙率,  $\psi$  は材料の体積含水率[-],  $\Phi_o - \psi$  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,

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\Phi_o - \psi)\rho_{1w} + \psi\rho_{2w}] = -\nabla \cdot J_w \quad (2-17)$$

となる.

熱収支について同様の微小容積について, エンタルピー  $H$ を用いて式をたてると,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(1-\Phi_o)\rho_s H_s + \psi\rho_{2w}H_{2w} + (\Phi_o - \psi)(\rho_a H_a + \rho_{1w}H_{1w})] \\ = -\nabla \cdot q - \nabla \cdot (J_{1w}H_{1w}) - \nabla \cdot (J_{2w}H_{2w}) - \nabla \cdot (J_a H_a) \end{aligned} \quad (2-18)$$

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。

(2-18)式を両辺それぞれについて以下のように展開する。

$$\begin{aligned} (2-18)式左辺 = (1-\Phi_o)\rho_s \frac{\partial H_s}{\partial t} + H_s \frac{\partial(1-\Phi_o)\rho_s}{\partial t} + \psi\rho_{2w} \frac{\partial H_{2w}}{\partial t} + H_{2w} \frac{\partial\psi\rho_{2w}}{\partial t} \\ + (\Phi_o - \psi)\rho_a \frac{\partial H_a}{\partial t} + H_a \frac{\partial(\Phi_o - \psi)\rho_a}{\partial t} + (\Phi_o - \psi)\rho_{1w} \frac{\partial H_{1w}}{\partial t} + H_{1w} \frac{\partial(\Phi_o - \psi)\rho_{1w}}{\partial t} \end{aligned}$$

$$(2-18)式右辺 = -\nabla \cdot q - H_{1w} \nabla \cdot J_{1w} - J_{1w} \cdot \nabla H_{1w} - H_{2w} \nabla \cdot J_{2w} - J_{2w} \cdot \nabla H_{2w} - H_a \nabla \cdot J_a - J_a \cdot \nabla H_a$$

ここで、気相および液相の水分収支式(2-15)、(2-16)式と乾燥空気収支式

$$\frac{\partial(\Phi_o - \psi)\rho_a}{\partial t} = -\nabla \cdot J_{1a} \quad (2-19)$$

にエンタルピー  $H_{1w}, H_{2w}, H_a$  をそれぞれ掛ける。

$$H_{1w} \frac{\partial(\Phi_o - \psi)\rho_{1w}}{\partial t} = -H_{1w} \nabla \cdot J_{1w} - H_{1w} W \quad (2-20)$$

$$H_{2w} \frac{\partial\psi\rho_{2w}}{\partial t} = -H_{2w} \nabla \cdot J_{2w} + H_{2w} W \quad (2-21)$$

$$H_a \frac{\partial(\Phi_o - \psi)\rho_a}{\partial t} = -H_a \nabla \cdot J_{1a} \quad (2-22)$$

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、

$$dH_i = C_i dT \quad (i = s, a, 1w, 2w) \quad (2-23)$$

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  $r$  と定義する。

(2-20)~(2-23)式を(2-18)式に代入して、整理すると以下となる。

$$C\rho\frac{\partial T}{\partial t}+C_{1w}J_{1w}\cdot\nabla T+C_{2w}J_{2w}\cdot\nabla T+C_aJ_a\cdot\nabla T=-\nabla\cdot q+rW \quad (2-24)$$

ただし,

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

#### 2-2-4 本論で用いる基礎方程式

松本の理論に従い, 水分収支式, 熱収支式としてそれぞれ(2-17)式, (2-24)式を提示した.

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  $\frac{\partial\rho_{1w}(\Phi_o-\psi)}{\partial t}$  は充分小さい.
- 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, (2-17)式の左辺は

$$(2-17)式の左辺 \cong \frac{\partial\rho_{2w}\psi}{\partial t} \cong \rho_{2w} \frac{\partial\psi}{\partial\mu} \frac{\partial\mu}{\partial t}$$

となる.

熱収支式 (2-24)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  $C_{1w}J_{1w}\cdot\nabla T+C_{2w}J_{2w}\cdot\nabla T+C_aJ_a\cdot\nabla T$  は潜熱流  $r\nabla\cdot J_{1w}$  に比して小さい.
- 2)  $r\frac{\partial\rho_{1w}(\Phi_o-\psi)}{\partial t}$  は  $C\rho\frac{\partial T}{\partial t}$  に比して小さい.

水分収支式(2-17)式, 熱収支式(2-24)式は以上の結果をまとめて

$$\rho_{2w} \frac{\partial\psi}{\partial\mu} \frac{\partial\mu}{\partial t} = \nabla\cdot[\lambda'_\mu(\nabla\mu-F_w)] + \nabla\cdot(\lambda'_T\nabla T) \quad (2-25)$$

$$C\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\cdot[(\lambda+r\lambda'_{Tg})\nabla T] + \nabla\cdot[r\lambda'_{\mu g}(\nabla\mu-F_w)] \quad (2-26)$$

となる. (2-25)式, (2-26)式を, 地下構造物壁体及び周辺地盤の熱・水分性状を解析するときの基礎方程式とする.

## 2-2-5 境界条件式

空気と接する材料表面では、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<sup>2</sup>s Pa)] が定義できる。伝達層を流れる水分流  $J_w = J_{1w}$  [kg/m<sup>2</sup>s] は、

$$J_w = \alpha'_m (p_o - p_i) \quad (2-27)$$

となる。ここで  $p_i, p_o$  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

$$\frac{\alpha_c}{\alpha'_m C_m \rho_m R_v T} = Le \quad (2-28)$$

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/kg K]、 $\rho_m$  は湿り空気密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $R_v$  は水蒸気の気体常数、 $Le$  はレイシス数[-] ( $Le = (a/D)^{1-n}$ ,  $n \cong 1/3$ )、 $a$  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(2-27)式を温度と水分化学ポテンシャルを用いて表す。

$$J_w = \alpha'_\mu (\mu_o - \mu_i) + \alpha'_T (T_o - T_i) \quad (2-29)$$

ただし、

$$\alpha'_\mu = \alpha'_m \left( \frac{\partial p}{\partial \mu} \right)_T, \quad \alpha'_T = \alpha'_m \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_\mu \quad (2-30)$$

ここで、 $\mu_o, \mu_i$  はそれぞれ空気、固体表面の水分化学ポテンシャル[J/kg]、 $T_o, T_i$  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/(ms J/kg)], [kg/msK]を表す。

空気と接する固体表面での水分移動は、(2-14)式と(2-30)式を併せて以下のようになる。

$$\alpha'_\mu (\mu_o - \mu_i) + \alpha'_T (T_o - T_i) + J_p = -\lambda'_\mu \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - \mathbf{n} F_w \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (2-31)$$

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

また，地表面で水膜が発生する場合，

$$J_p > -\lambda'_\mu \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - \mathbf{n} F_w \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s - \alpha'_\mu (\mu_o - \mu_i) - \alpha'_T (T_o - T_i) \quad (2-32)$$

となり，水膜に関する境界条件式は以下の様になる．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．

$$\mu_i = F_w h \quad (2-33)$$

$$h = \frac{1}{\rho_{2w}} \int \left[ J_p + \alpha'_\mu (\mu_o - \mu_i) + \alpha'_T (T_o - T_i) + \lambda'_\mu \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - \mathbf{n} F_w \right) + \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \right] dt \quad (2-34)$$

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一流を考える．

$$q_{s(a)} + q_r + J_{1w(a)} H_{1w} + J_p H_{2w} = q_{s(s)} + J_{1w(s)} H_{1w} + J_{2w(s)} H_{2w} \quad (2-35)$$

ただし， $q_{s(a)}$ 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発熱[W/m<sup>2</sup>]， $J_{1w(a)}$ 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]， $q_{s(s)}$ は材料側の熱伝導による表面熱流[W/m<sup>2</sup>]， $J_{1w(s)}$ 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]を表し，これらはそれぞれ以下のように表される．

$$q_{s(a)} = \alpha_c (T_o - T_i) \quad (2-36a)$$

$$q_r = \alpha_r (T_o - T_i) + q_{sol} - q_{noc} \quad (2-36b)$$

$$J_{1w(a)} = \alpha'_\mu (\mu_o - \mu_i) + \alpha'_T (T_o - T_i) \quad (2-36c)$$

$$J_{1w(s)} = -\lambda'_{\mu g} \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - \mathbf{n} F_w \right) - \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (2-36d)$$

$$J_{2w(s)} = -\lambda'_{\mu l} \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} \Big|_s - \mathbf{n} F_w \right) - \lambda'_{Tl} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s \quad (2-36e)$$

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(2-32)式を上記表現形式を用いて示す。

$$J_{1w(a)} + J_p = J_{1w(s)} + J_{2w(s)} \quad (2-37)$$

(2-35)式, (2-37)式から  $J_{2w(s)}$  を消去して整理すると,

$$q_{s(a)} + q_r + rJ_{1w(a)} = q_{s(s)} + rJ_{1w(s)} \quad (2-38)$$

ただし,  $r = H_{1w} - H_{2w}$  を用いた。

(2-35)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。

$$\begin{aligned} (\alpha + r\alpha'_T)(T_o - T_i) + r\alpha'_\mu(\mu_o - \mu_i) + q_{sol} - q_{noc} = \\ -(\lambda + r\lambda'_{Tg})\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_s - r\lambda'_{\mu g}\left(\left.\frac{\partial \mu}{\partial n}\right|_s - \mathbf{n}F_w\right) \end{aligned} \quad (2-39)$$

異種材料境界における熱及び水分境界条件式は, 以下のようになる。

$${}_A\mu = {}_B\mu (= \mu), \quad {}_AT = {}_BT (= T) \quad (2-40)$$

$$-{}_A\lambda'_\mu\left(\left.\frac{\partial {}_A\mu}{\partial n}\right|_b - \mathbf{n}F_w\right) - {}_A\lambda'_T\left.\frac{\partial {}_AT}{\partial n}\right|_b = -{}_B\lambda'_\mu\left(\left.\frac{\partial {}_B\mu}{\partial n}\right|_b - \mathbf{n}F_w\right) - {}_B\lambda'_T\left.\frac{\partial {}_BT}{\partial n}\right|_b \quad (2-41)$$

$$-({}_A\lambda + r_A\lambda'_{Tg})\left.\frac{\partial {}_AT}{\partial n}\right|_b - r_A\lambda'_{\mu g}\left(\left.\frac{\partial {}_A\mu}{\partial n}\right|_b - \mathbf{n}F_w\right) = -({}_B\lambda + r_B\lambda'_{Tg})\left.\frac{\partial {}_BT}{\partial n}\right|_b - r_B\lambda'_{\mu g}\left(\left.\frac{\partial {}_B\mu}{\partial n}\right|_b - \mathbf{n}F_w\right) \quad (2-42)$$

### 2-3 地下空間の熱・水分の収支式

地下空間の室空気の熱及び水分の収支式は以下のようになる。

$$c\gamma V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha_j (T_j - T_r) + c\gamma N_v V (T_o - T_r) + Q_r \quad (2-43)$$

$$c'\gamma V \frac{\partial p_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha'_j (p_j - p_r) + c'\gamma N_v V (p_o - p_r) + J_r \quad (2-44)$$

ここで,  $T_o, T_r, T_j$  はそれぞれ外気, 室内および  $j$  番目の壁表面の温度 [K],  $p_o, p_r, p_j$  はそれぞれ外気, 室内および  $j$  番目の壁表面の水蒸気圧 [Pa],  $c\gamma$  は空気の容積比熱 [J/m<sup>3</sup>K],  $c'\gamma'$

は空気の湿気容量[ $\text{kg}/\text{m}^3\text{Pa}$ ],  $V$ は室容積[ $\text{m}^3$ ],  $S_j$ は $j$ 番目の壁表面積[ $\text{m}^2$ ],  $\alpha_j$ は室内側表面の総合熱伝達率[ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ],  $\alpha'_m$ は室内側表面の湿気伝達率[ $\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$ ],  $N_v$ は換気回数[ $1/\text{s}$ ],  $Q_r, J_r$ はそれぞれ室内の熱および水分の発生量[ $\text{W}$ ],[ $\text{kg}/\text{s}$ ]を表す.

なお, 水蒸気圧と温度, 水分化学ポテンシャルの関係は(2-5)式より得られる.

## 2-4 第2章のまとめ

本章では地下構造物及び周辺地盤の熱・水分性状を予測するための基礎となる地盤及び建築壁体における熱・水分の移動方程式を示した. この基礎方程式は, 松本によって定式化されたもので, 熱および水分の移動ポテンシャルとして, それぞれ温度および自由水基準の化学ポテンシャルを用いて, 水分の局所平衡の仮定のもとで表現したものである. 次に地下空間の熱・水分の収支式を示した. 熱及び水分の移動のポテンシャルとしては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の熱・湿気性状の解析を行うことが可能となった.

## 第3章 地下構造物の熱・湿気性状の理論解析法

### 3-1 はじめに

本章では、前章で示した基礎方程式を用いて地下構造物及び周辺地盤の熱・湿気性状の理論解析を行う方法について述べる。まず本論で対象となる材料である壁体及び地盤についてそれぞれコンクリート、砂質土壌、ローム質砂の熱・水分物性値を示し、次に理論解析を行うための数値解析手法について述べる。

熱・水分同時移動理論における熱・水分に関する物性値は、状態量、特に水分化学ポテンシャル（含水率）に強く依存しており、非線型性が大きい。このため理論解析を行うには、数値解析によらざるを得ない。本論の以下に続く章における理論解析には前進型有限差分法を用いた。ここでは数値解析に関して基礎方程式の差分化及び非線型性の大きい物性値の取り扱い方等について述べる。

### 3-2 解析に用いる物性値

#### 3-2-1 コンクリートの物性値

コンクリートの物性値は、不飽和から飽和領域まで適応できる物性値が存在しないため、既存の測定値から推定を含めて構成した。既存の測定値としては以下のデータが存在する。平衡含水率および湿気伝導率[41]、含水率変化も考慮した熱伝導率[42]、透水係数[43]がそれぞれ独立に測定されている。温度および水分化学ポテンシャル勾配に関する気相・液相水分伝導率は、不飽和から飽和まで統一的に測定されたものはないため湿気伝導率及び透水係数の測定値から推定を行った。

気相水分すなわち水蒸気の流れ  $J_{1w}$  [kg/m<sup>2</sup>s] は以下の式で表現できる。

$$J_{1w} = -\lambda'_p \nabla p_v \quad (3-1)$$

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

移動のポテンシャルとして温度および水分化学ポテンシャルを用いて上式を分離すると、

$$J_{1w} = -\lambda'_{\mu g} \nabla \mu - \lambda'_{Tg} \nabla T \quad (3-2)$$

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  $h = p_v / p_{vs} [-]$ ，(2-5)式を用いて以下の様に表される。

$$\frac{\partial p_v}{\partial \mu} = h \frac{\partial p_{vs}}{\partial \mu} + p_{vs} \frac{\partial h}{\partial \mu} = p_{vs} \frac{\partial h}{\partial \mu} \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial T} = h \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} + p_{vs} \frac{\partial h}{\partial T} = h \left( \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - p_{vs} \frac{\mu}{R_v T^2} \right) \quad (3-5)$$

水分化学ポテンシャル勾配および温度勾配に関する気相水分伝導率は，湿気伝導率から(3-3)～(3-5)式を用いて決定される。ただし，測定値は温度 20℃一定の状態における値であり，温度の補正が必要である。この補正は(3-4)，(3-5)式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。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{\mu g} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \cdot \frac{p_{vs}}{p_{vs} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}}} \quad (3-6)$$

$$\lambda'_{Tg} = \lambda'_{Tg} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} \cdot \frac{\partial p_{vs} / \partial T}{\partial p_{vs} / \partial T \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}}} \quad (3-7)$$

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

飽和時の等温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のようになる。

$$J_{2w} = -\rho_w K \nabla \Psi \quad (3-8)$$

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

水頭高さと水分化学ポテンシャルの関係は以下のようになる。

$$\mu = \Psi g \quad (3-9)$$

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.

以上の湿気伝導率および透水係数と気相・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) 湿気伝導率を温度およ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離した. 温度勾配に関する気相水分伝導率の近似曲線を、相対湿度95%まで、この分離したデータを用い、それ以上ではゼロへと近づくようにして作成する. つまり気相の水分移動が相対湿度95%ま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.

以下に測定値および推定値から決定した近似式を示す.

$$\psi = \begin{cases} 0 & (10.1694 \leq \log_{10}(-\mu)) \\ -0.0098 + \frac{0.06395}{\log_{10}(-\mu) - 3.6441} & (5.298 \leq \log_{10}(-\mu) < 10.1694) \\ -3.065454 + 2.267467 \times \log_{10}(-\mu) - 5.208352 \times 10^{-1} \times [\log_{10}(-\mu)]^2 + 3.833344 \times 10^{-2} \times [\log_{10}(-\mu)]^3 & (3.768 \leq \log_{10}(-\mu) < 3.768) \\ 0.1639 + \frac{0.03518}{\log_{10}(-\mu) - 4.9593} & (-3 \leq \log_{10}(-\mu) < 3.768) \\ 0.2412 \times \mu + 0.15972 & (\log_{10}(-\mu) < -3) \end{cases} \quad (3-12)$$

$$\lambda'_{Tg} \Big|_{\theta=20^{\circ}\text{C}} = \begin{cases} 10^{-9.8729 - \frac{0.010101}{\psi}} & (0 < \psi \leq 0.032964) \\ 10^{-10.48931 + 10.38831\psi - 56.45732\psi^2 + 806.5875\psi^3} & (0.032964 < \psi \leq 0.1278) \\ 10^{-8063.5(\psi - 0.13)^2 - 8.361} & (0.1278 < \psi \leq 0.15972) \end{cases} \quad (3-13)$$

$\lambda'_{Tg}$  と  $\lambda'_{\mu g}$  は以下のような関係がある[11].

$$\lambda'_{\mu g} = \frac{\lambda'_{Tg}}{\frac{R_v T \frac{\partial P_{vs}}{\partial T} - \mu}{P_{vs} T}} \quad (3-14)$$

$$\lambda'_{\mu} = \exp^{-75.10212 + 350.007\psi} \quad (3-15)$$

$$\lambda = 1.3 + 3.5 \times \psi \quad (3-16)$$

なお上記近似式は温度 20°C における値であるので温度補正が必要である。温度補正には気相水分伝導率には(3-6),(3-7)式を用い、液相は密度および粘性の変化は小さいものとして無視する。

図3-1～図3-5に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、熱伝導率を示す。

コンクリートのみかけの容積比熱は含有する水分の影響を考慮するため、表3-1に示すような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。

$$c_c \rho_c = 233520 + \rho_{2w} \psi \times 4186.05 \quad [J/m^3 K] \quad (3-17)$$

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	$[kg/m^3]$
比熱	1100	$[J/kgK]$
容積比熱	233520	$[J/m^3 K]$

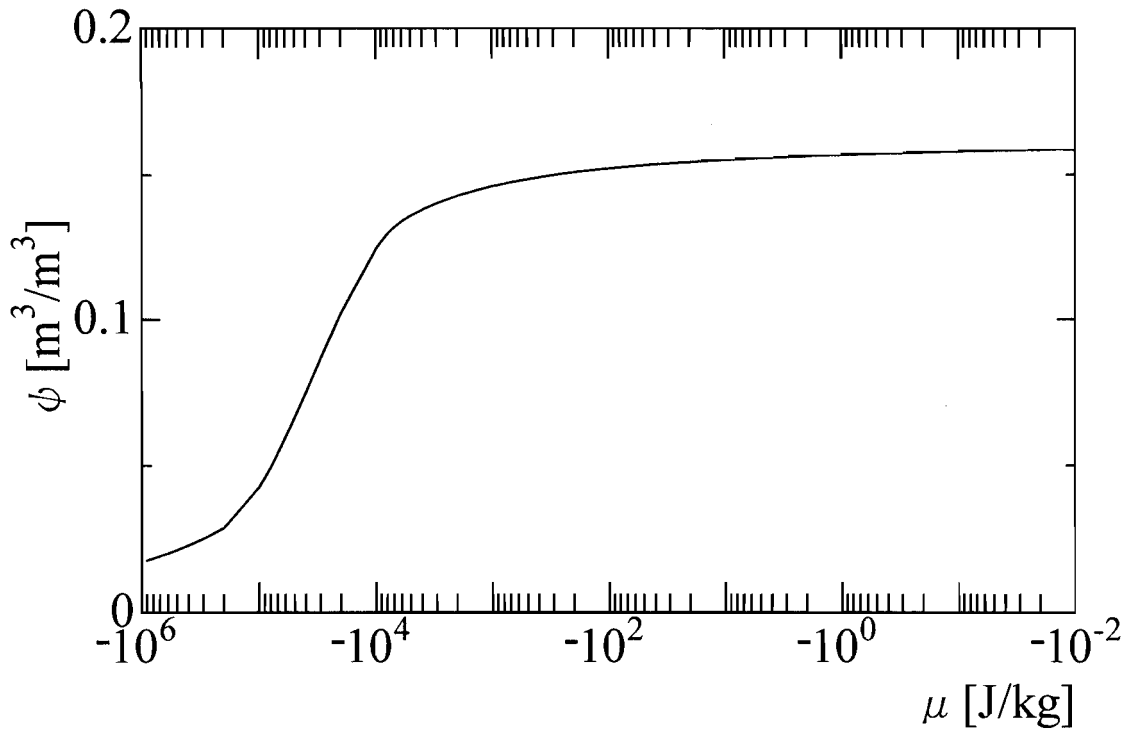


図3-1 コンクリートの含水率-水分化学ポテンシャル関係

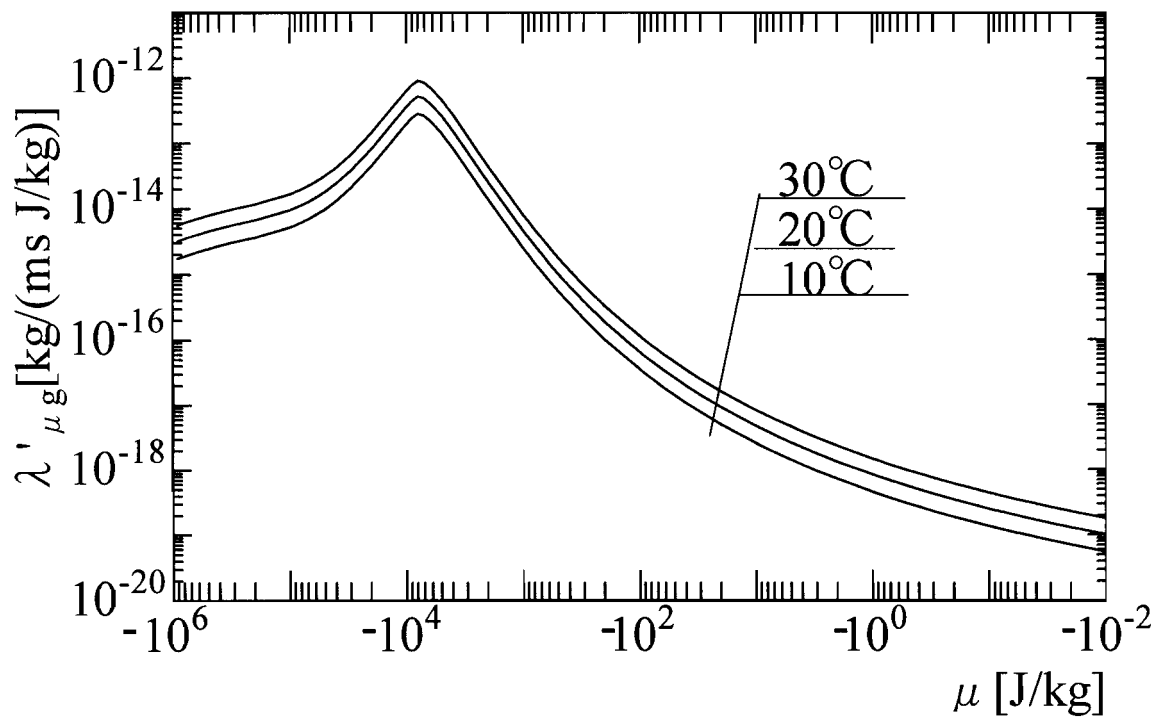


図3-2 コンクリートの水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率

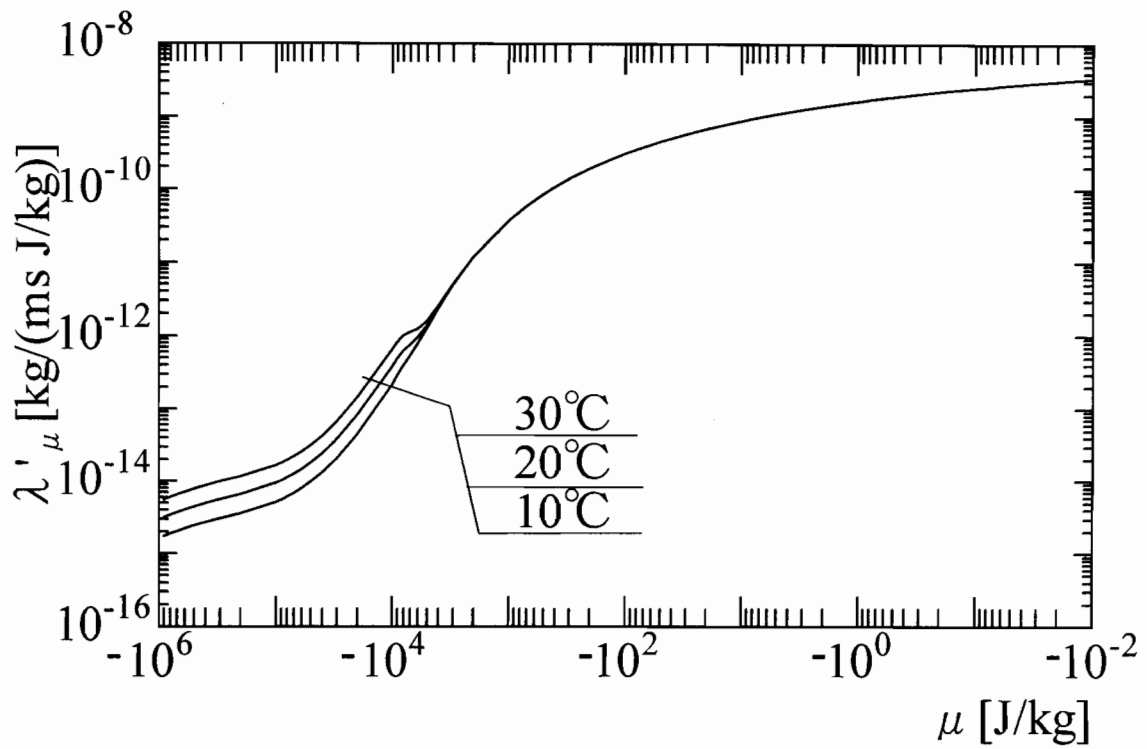


図3-3 コンクリートの水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率

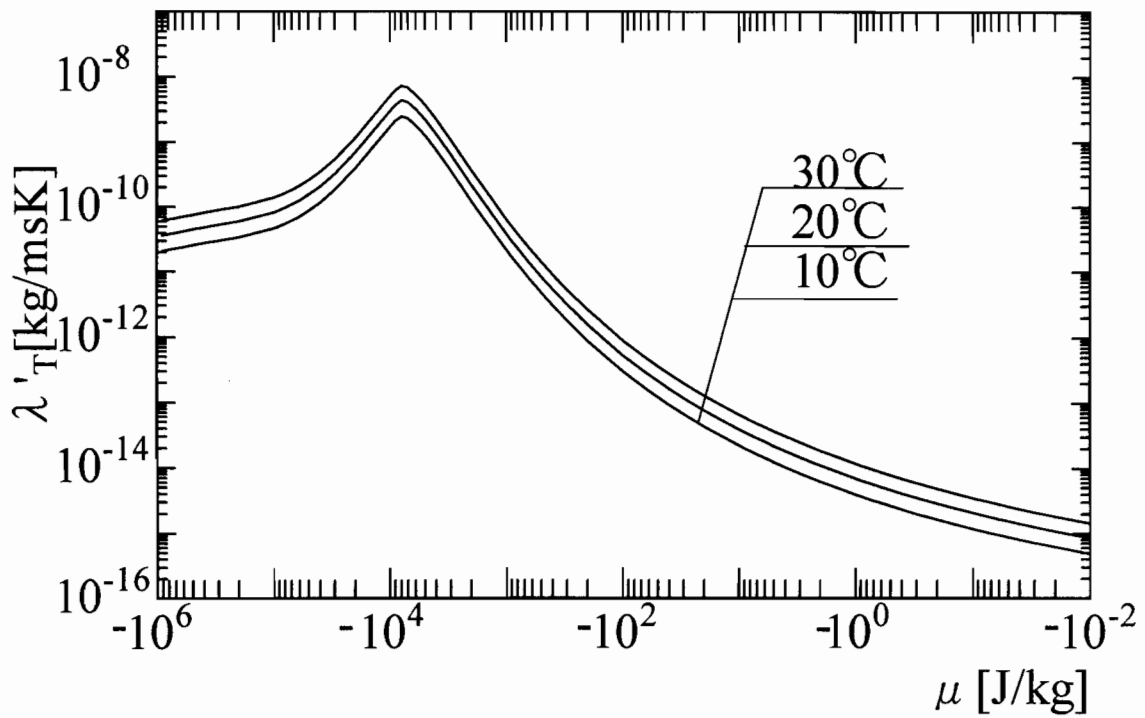


図3-4 コンクリートの温度勾配に関する水分伝導率

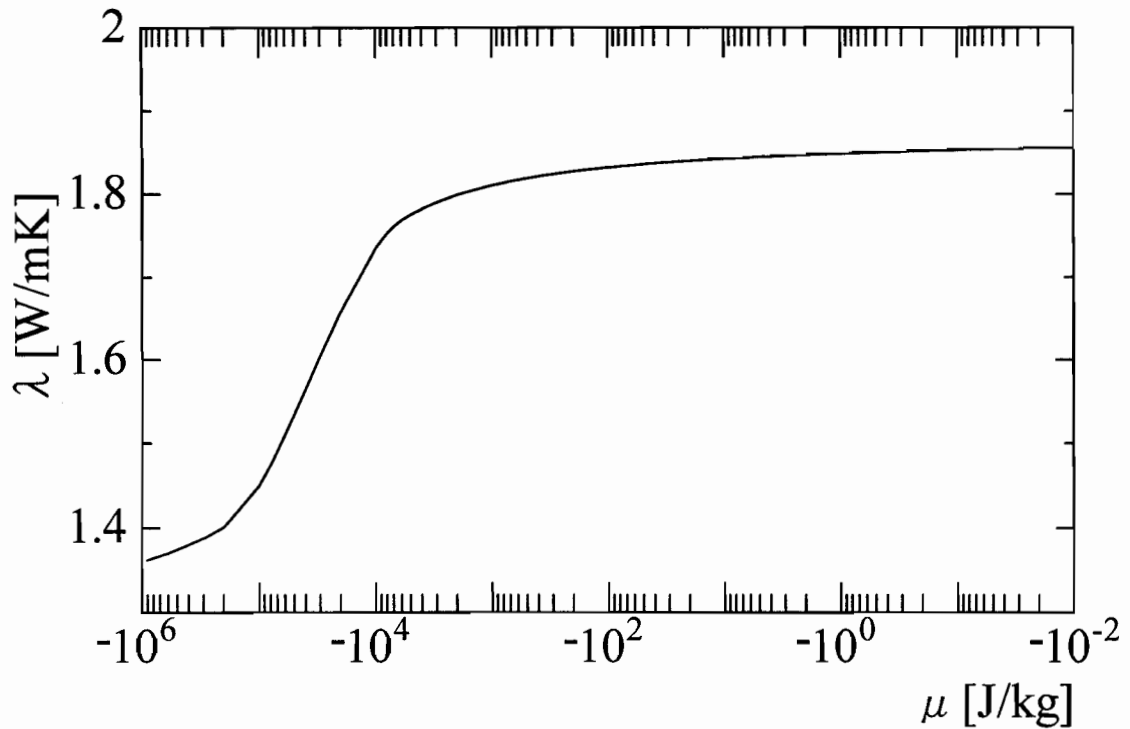


図3-5 コンクリートの熱伝導率

### 3-2-2 砂質土壌の物性値

砂質土壌は Jury[44]により統一的に測定された Plainfield Sand の水分拡散係数及び熱伝導率が存在する。 Plainfield Sand の成分は石英砂 90[%]，粘土 5[%]以下，その他有機水分であり，最大空隙率は 37.5[%]である。これら水分伝導率における移動のポテンシャルは温度と含水率であり，これらを用いた熱流及び気相・液相水分流は以下となる。

$$q = -\lambda \nabla T \quad (3-17a)$$

$$J_{1w} = -\rho_{2w} D_{Tg} \nabla T - \rho_{2w} D_{\psi g} \nabla \psi + \lambda'_{\mu g} F_w \quad (3-17b)$$

$$J_{2w} = -\rho_{2w} D_{Tl} \nabla T - \rho_{2w} D_{\psi l} \nabla \psi + \lambda'_{\mu l} F_w \quad (3-17c)$$

ここで， $\psi$  は含水率（容積基準）[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]， $D_{\psi g}$  は含水率勾配による気相水分伝導率[m<sup>2</sup>/s]， $D_{\psi l}$  は含水率勾配による液相水分伝導率[m<sup>2</sup>/s]， $D_{Tg}$  は温度勾配による気相水分伝導率[m<sup>2</sup>/s°C]， $D_{Tl}$  は温度勾配による液相水分伝導率[m<sup>2</sup>/s°C]である。

これら含水率は温度，水分化学ポテンシャルの関数であり，

$$\psi = g(\mu, T) \quad (3-18)$$

$$\nabla \psi = \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \nabla \mu + \frac{\partial \psi}{\partial T} \nabla T \quad (3-19)$$

と表される。この関係と(3-17), (2-13)式とを用いて、温度と含水率をポテンシャルとした場合の水分伝導率と温度と水分化学ポテンシャルをポテンシャルとした場合の水分伝導率の関係は以下のようになる。

$$\lambda'_{\mu g} = D_{vg} \frac{\partial \psi}{\partial \mu}, \quad \lambda'_{\mu l} = D_{vl} \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \quad (3-20)$$

$$\lambda'_{Tg} = D_{Tg} + D_{vg} \frac{\partial \psi}{\partial T}, \quad \lambda'_{Tl} = D_{Tl} + D_{vl} \frac{\partial \psi}{\partial T} \quad (3-21)$$

含水率の温度依存は小さく、 $\partial \psi / \partial T \cong 0$ とおける。

これら物性値の温度補正は、気相については、コンクリートと同様に(3-6)式を用い、液相については、以下の関係式を用いる。

$$\lambda'_{\mu l} = \lambda'_{\mu l} \Big|_{\theta=20} f_1(T)$$

ただし、

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

Jury の測定値の近似式[45]を以下に示す。

$$D_{vg} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = \begin{cases} a \times 10^{(0.137373 \times 10^4) \psi} & (\psi \leq 0.0047) \\ a \times 10^{0.110362 \times 10 + (-0.495709 \times 10^2) \psi + (0.296899 \times 10^4) \psi^2 + (0.476857 \times 10^5) \psi^3} & (0.0047 < \psi \leq 0.35) \\ a \times 10^{(-0.669523) + (-0.444095 \times 10^2) \psi} & (0.35 < \psi) \end{cases} \quad (3-22)$$

$$D_{vl} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = \begin{cases} a \times 6.56635 \times \psi & (\psi \leq 0.0079) \\ a \times 10^{-0.173466 \times 10 + (0.589689 \times 10^2) \psi + (-0.263483 \times 10^3) \psi^2 + (0.408122 \times 10^3) \psi^3} & (0.0079 < \psi) \end{cases} \quad (3-23)$$

$$D_{Tg} \Big|_{\theta=20^\circ\text{C}} = \begin{cases} a \times 0.028836 (1 - e^{-250\psi}) & (\psi \leq 0.02) \\ a \times 10^{-0.512711 \times 10 + (-0.735882) \psi + (-0.293796 \times 10) \psi^2} & (0.02 < \psi) \end{cases} \quad (3-24)$$

$$D_{Tl}|_{\theta=20^{\circ}\text{C}} = \begin{cases} a \times 0.153569 \times \psi & (\psi \leq 0.0123) \\ a \times 10^{-0.317809 \times 10 + (0.386164 \times 10^2)\psi + (-0.139126 \times 10^3)\psi^2 + (0.196905 \times 10^3)\psi^3} & (0.0123 < \psi) \end{cases} \quad (3-25)$$

$$\lambda + r\lambda'_{Tg}|_{\theta=20^{\circ}\text{C}} = \begin{cases} a \times 1 + (0.22963 \times 10^2)\psi + (-0.287037 \times 10^6)\psi^2 & (\psi \leq 0.02) \\ a \times (0.407536 \times 10) + (0.192233 \times 10^2)\psi \\ \quad + (-0.404658 \times 10^2)\psi^2 + (0.452669 \times 10^2)\psi^3 & (0.02 < \psi) \end{cases} \quad (3-26)$$

ただし、 $a$ は単位換算係数で、 $a = 1.1574 \times 10^{-9}$ である。

ここで、 $\lambda + r\lambda'_{Tg}$ は等価熱伝導率[kcal/mh°C]を表す。

図3-6～図3-10に砂質土壌の平衡含水率、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、熱伝導率を示す。

砂質土壌のみかけの容積比熱は含有する水分の影響を考慮するため、表3-2に示すような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。

$$c_s \rho_s = 1281926 + \rho_l \psi \times 4186.05 \quad [J/m^3 K] \quad (3-27)$$

表3-2 砂質土壌の固体実質部の容積比熱

	比重 [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 [J/kgK]	比容積 [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	小計 [J/m <sup>3</sup> K]	容積比熱 [J/m <sup>3</sup> K]
石英砂	2660	753.49	0.6175	12737645	1281926
粘土	1550	879.07	0.0325	44283	



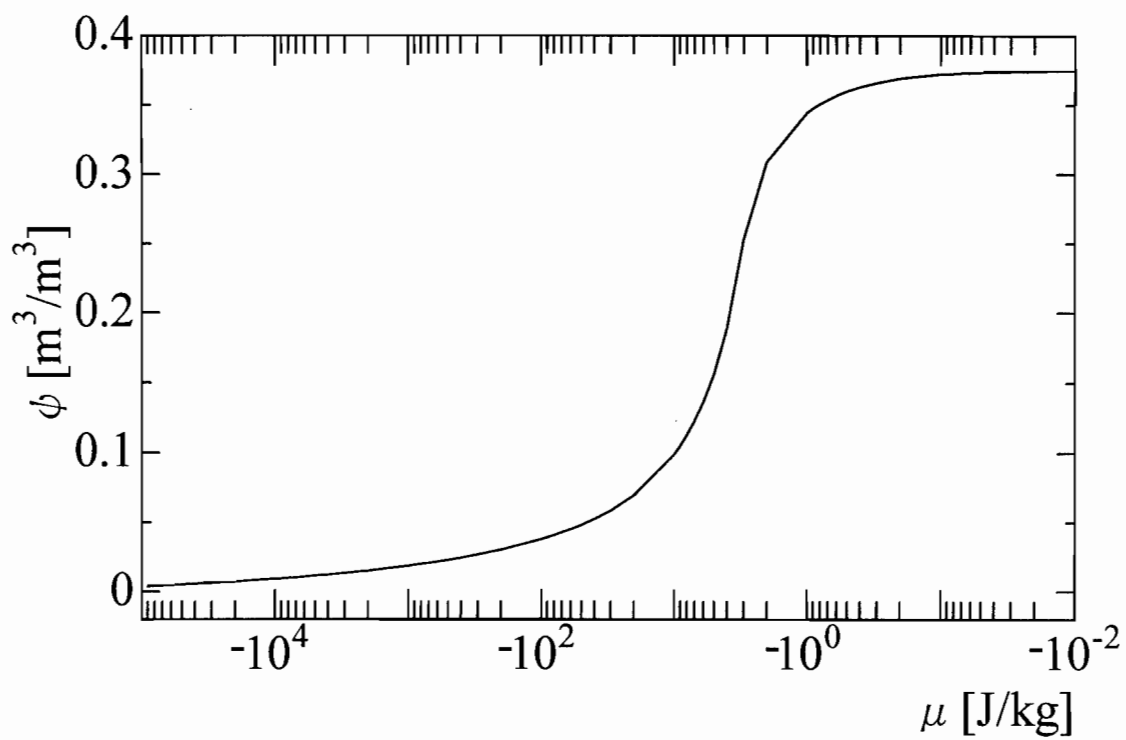


図3-6 砂質土壌の含水率-水分化学ポテンシャル関係

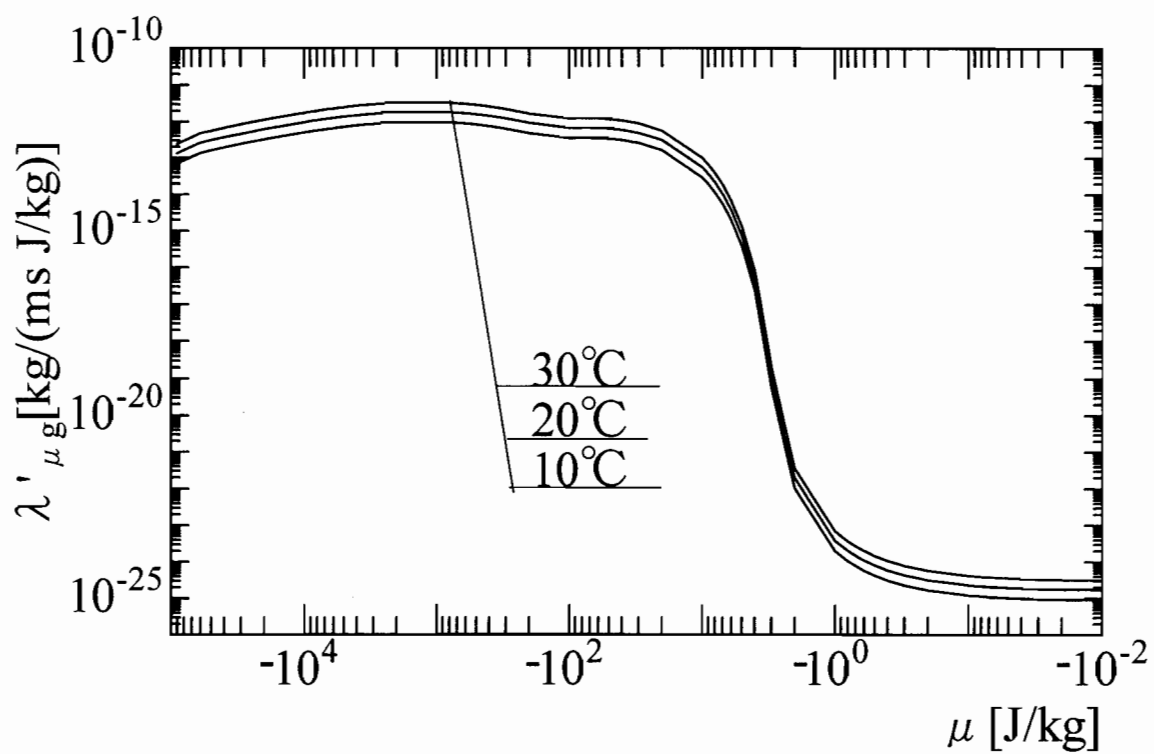


図3-7 砂質土壌の水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率

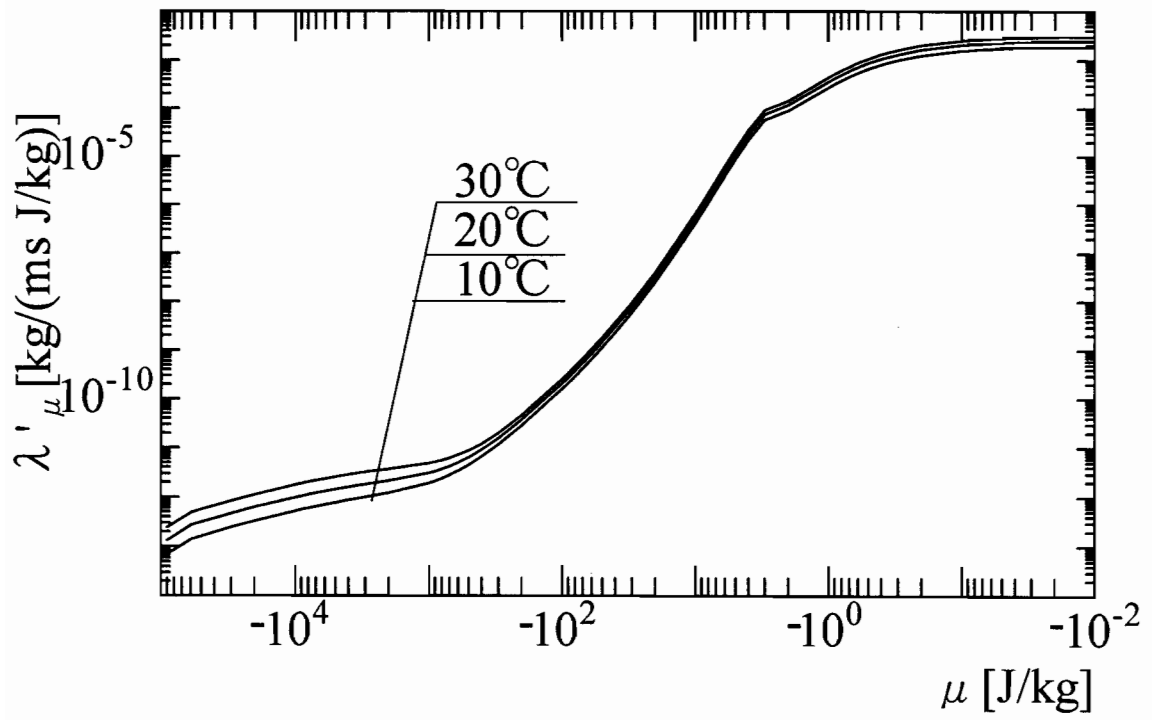


図3-8 砂質土壌の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率

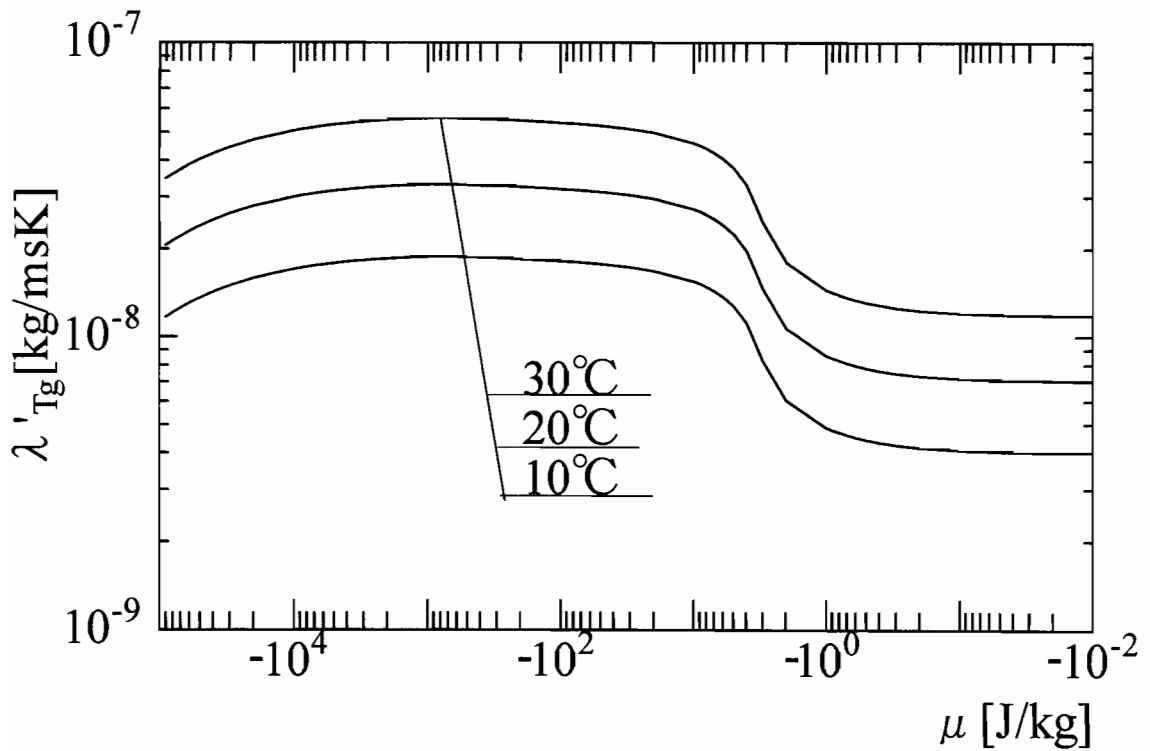


図3-9 砂質土壌の温度勾配に関する水分伝導率

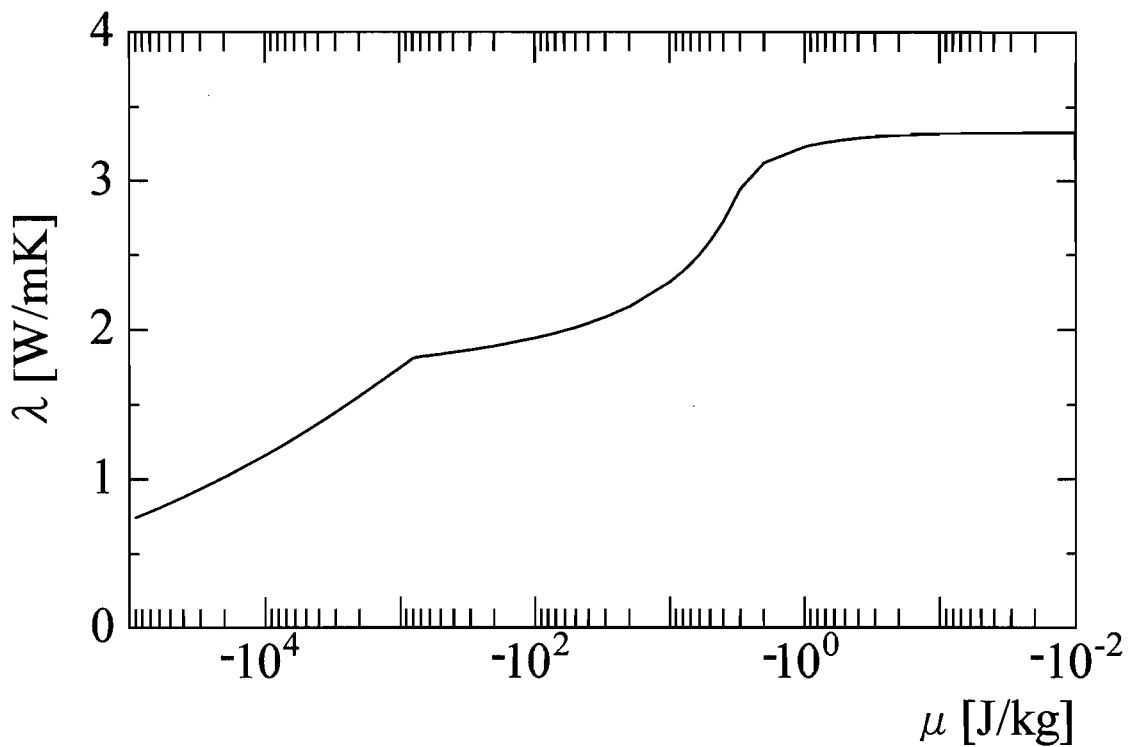


図3-10 砂質土壌の熱伝導率

### 3-2-3 ローム質砂の物性値

ローム質砂の含水率-水分化学ポテンシャル関係，水分化学ポテンシャル勾配による水分伝導率は文献[46]の実験データを関数近似した値[45]を用いた。ローム質砂の含水率-水分化学ポテンシャル関係，水分化学ポテンシャル勾配による水分伝導率の近似式を以下に示す。

$$\psi = \begin{cases} \frac{2.85651 \times 10^{-4}}{2.67008} & (\mu < -794328.) \\ \frac{\log_{10}(-\mu) + 3.76316}{1.40647 \times 10^{-2}} - 2.76316 \times 10^{-1} & (-794328. \leq \mu < -3.16228) \\ \frac{\log_{10}(-\mu) - 8.0941 \times 10^{-1}}{1.3653 \times 10^{-2} \mu + 3.95457 \times 10^{-1}} + 3.95457 \times 10^{-1} & (-3.16228 \leq \mu < -2.37137) \\ & (-2.37137 \leq \mu < 0) \end{cases} \quad (3-28)$$

$$\lambda'_{\mu} = \begin{cases} 10^{\frac{-5.66286 \times 10^{-1}}{\psi + 2.5 \times 10^{-2}} - 5.48322} & (0 \leq \psi < 0.2) \\ 10^{\frac{-1.7058}{\psi - 5.90911 \times 10^{-1}} - 1.23537 \times 10} & (0.2 \leq \mu < 0.3) \\ 10^{\frac{-2.27995}{\psi - 7.84426 \times 10^{-3}} + 1.3139} & (0.3 \leq \psi) \end{cases} \quad (3-29)$$

水分伝導率は気相と液相に分離された値でないため、以下のような方法を用いて分離を行う。まず、(3-1)式の $\lambda'_p$ に相当する値を決定する。水分化学ポテンシャル勾配による気相水分伝導率 $\lambda'_{\mu g}$ は(3-3)式より次のような関係が成り立つ。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_p \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \quad (3-30)$$

ここで、湿気伝導率を以下の関係式で表す。

$$\lambda'_p = D_v \frac{\Phi_0 - \psi}{\Phi_0} \quad (3-31)$$

ここで、 $D_v$ は材料空隙部の水蒸気拡散係数[kg/msPa]、 $\Phi_0$ は絶乾時の空隙率[-]を表す。低含水時には、 $\lambda'_{\mu} = 0$ と考えられ、このときの含水率を $\psi_{low}$ とすると、 $D_v$ は、

$$\lambda'_{\mu g}(\psi_{low}) = \frac{\Phi_0 - \psi_{low}}{\Phi_0} \cdot D_v \left. \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \right|_{\psi_{low}} \quad (3-32)$$

$$D_v = \lambda'_{\mu g}(\psi_{low}) \cdot \frac{\Phi_0}{\Phi_0 - \psi_{low}} \left/ \left. \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \right|_{\psi_{low}} \right. \quad (3-33)$$

となる。(3-31)式に(3-33)式を代入し、さらに、これを(3-30)式に代入すると、

$$\lambda'_{\mu g}(\psi) = \frac{\Phi_0 - \psi}{\Phi_0 - \psi_{low}} \cdot \lambda'_{\mu g}(\psi_{low}) \cdot \left. \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \right|_{\psi} \left/ \left. \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \right|_{\psi_{low}} \right. \quad (3-34)$$

ここで $\mu = R_v T \ln(p_v / p_{vs})$ より

$$\frac{\partial p_v}{\partial \mu} = \frac{p_{vs}}{R_v T} \cdot e^{\frac{\mu}{R_v T}}$$

$$\left. \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \right|_{\psi} \bigg/ \left. \frac{\partial p_v}{\partial \mu} \right|_{\psi_{low}} = e^{\frac{\mu - \mu(\psi_{low})}{R_v T}} \quad (3-35)$$

低含水時には  $\lambda'_{\mu}(\psi_{low}) = \lambda'_{\mu g}(\psi_{low})$  なので(3-34), (3-35)式より

$$\lambda'_{\mu g}(\psi) = \frac{\Phi_0 - \psi}{\Phi_0 - \psi_{low}} \cdot \lambda'_{\mu}(\psi_{low}) \cdot e^{\frac{\mu - \mu(\psi_{low})}{R_v T}} \quad (3-36)$$

上記の様  $\lambda'_{\mu g}$  を  $\lambda'_{\mu}$  から決定する。液相水分の移動がダルシー則に従うとすると  $\lambda'_{Tl} = 0$ 。よって  $\lambda'_{Tg} = \lambda'_{Tg}$  となり, (3-14)式より,

$$\lambda'_{Tg} = \lambda'_{\mu g} \left( \frac{R_v T}{p_{vs}} \cdot \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (3-37)$$

ローム質砂の近似式は温度 20[°C]の時の値であり, 気相水分伝導率, 液相水分伝導率共に砂質土壌の近似式と同様の温度補正を行っている。

熱伝導率の近似式を以下に示す。

$$\lambda = -46.144\psi^4 + 57.8615\psi^3 - 28.8076\psi^2 + 7.75485\psi + 0.588412 \quad (3-38)$$

図3-11～図3-15にローム質砂の平衡含水率, 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, 熱伝導率を示す。

ローム質砂の熱容量は土壌によって固体実質部の容積比熱は大きく変わらないため, 砂質地盤と同じ値 ((3-27)式) を用いる。

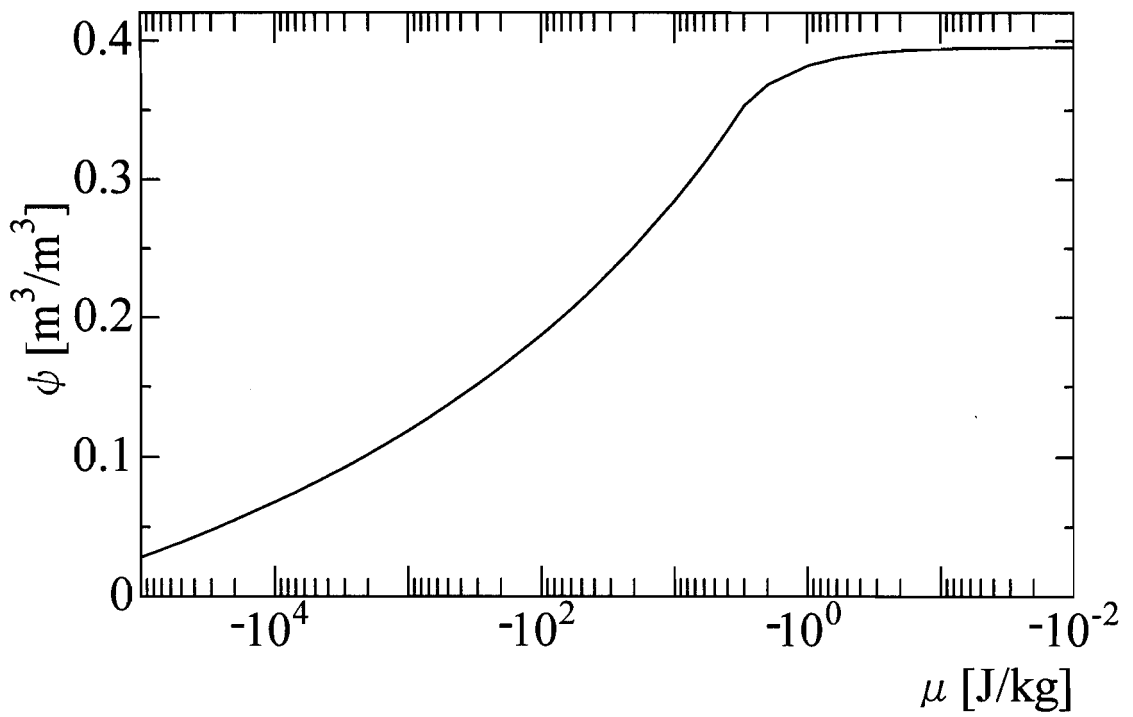


図3-11 ローム質砂の含水率-水分化学ポテンシャル関係

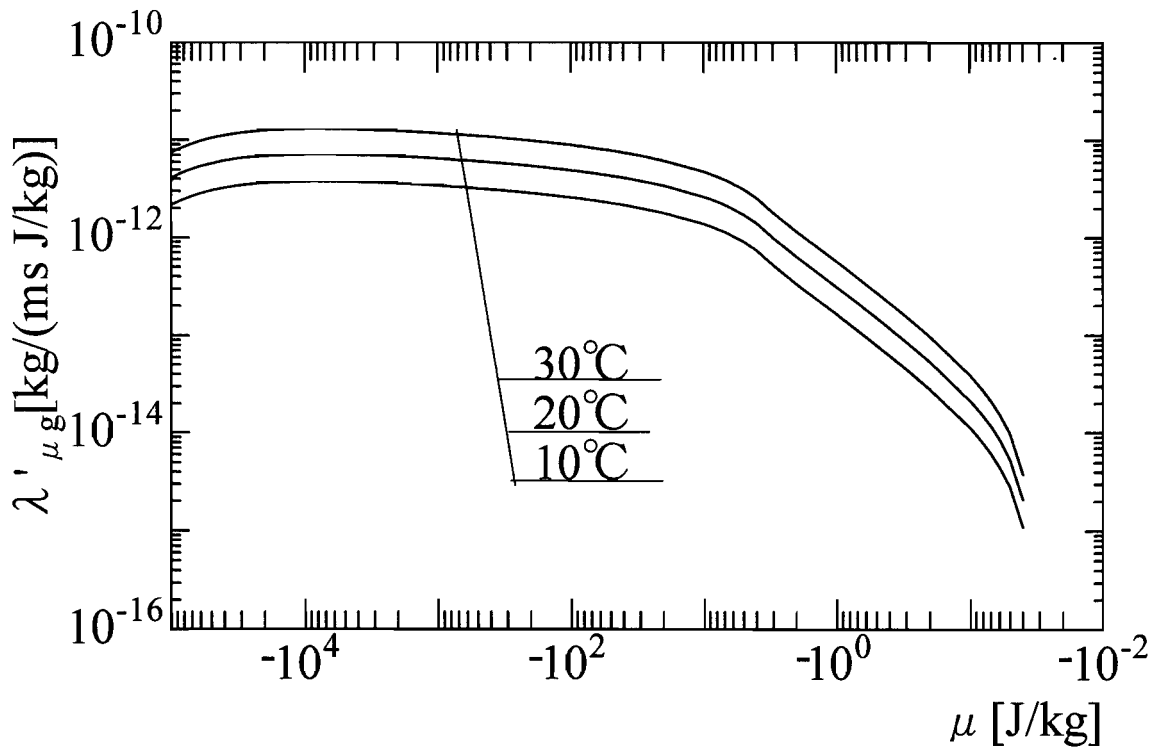


図3-12 ローム質砂の水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率

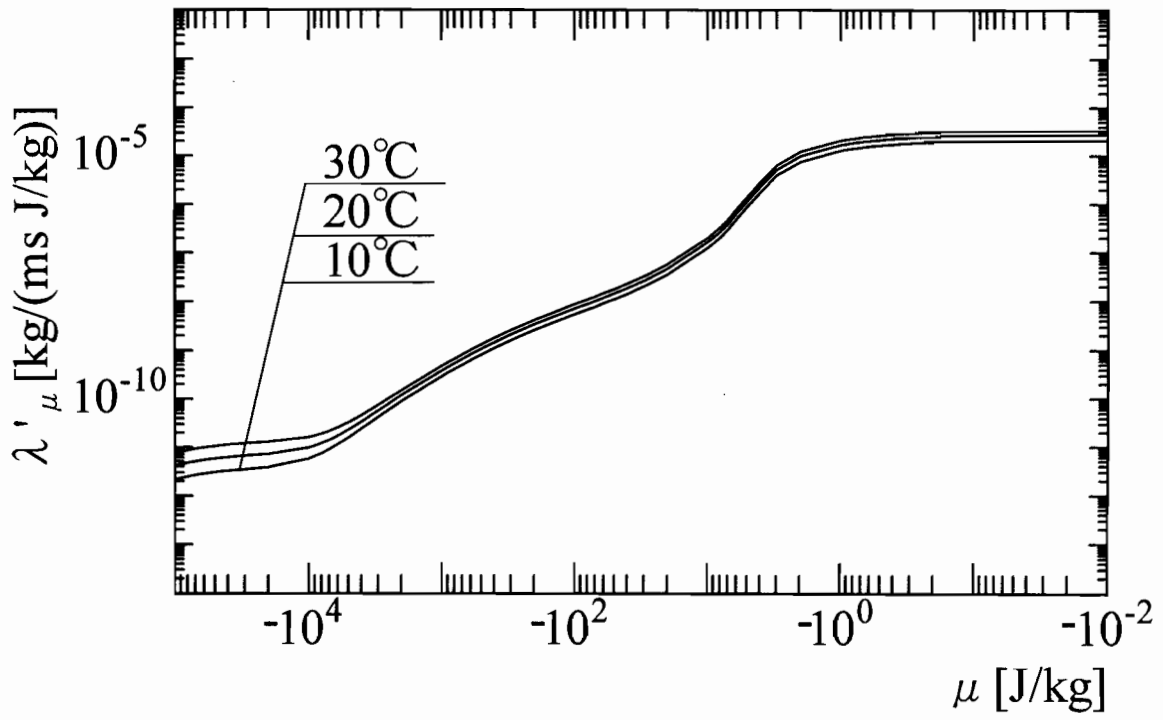


図3-13 ローム質砂の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率

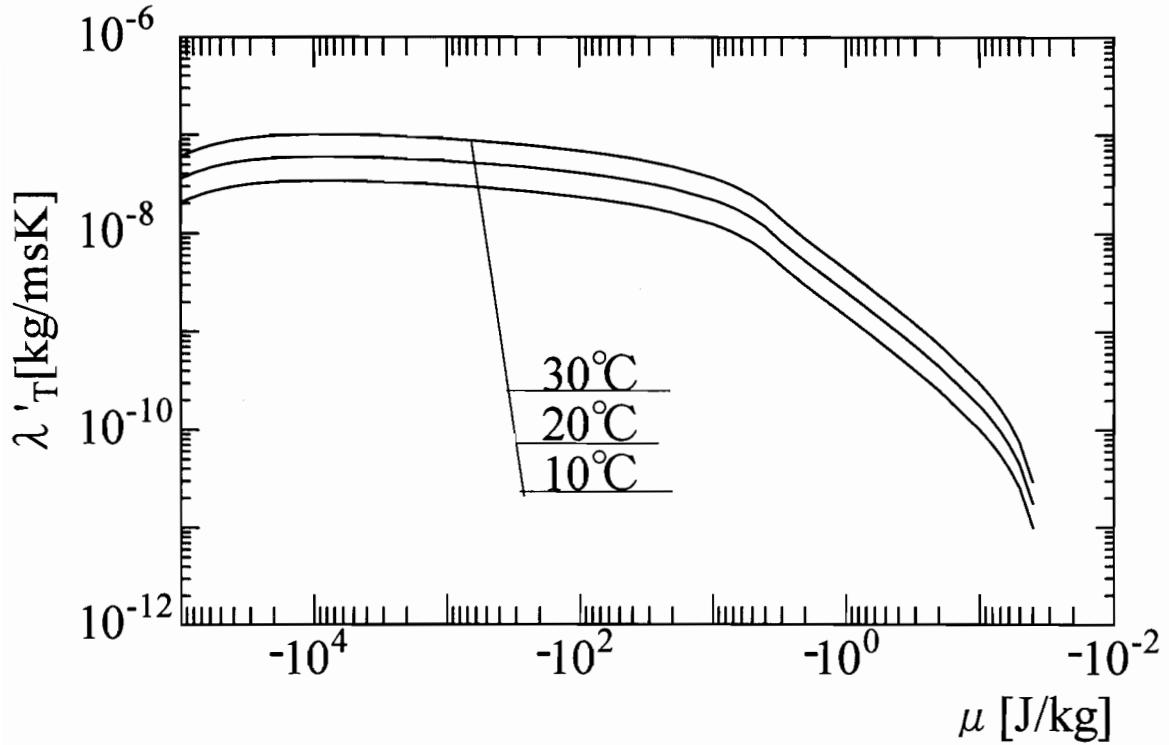


図3-14 ローム質砂の温度勾配に関する水分伝導率

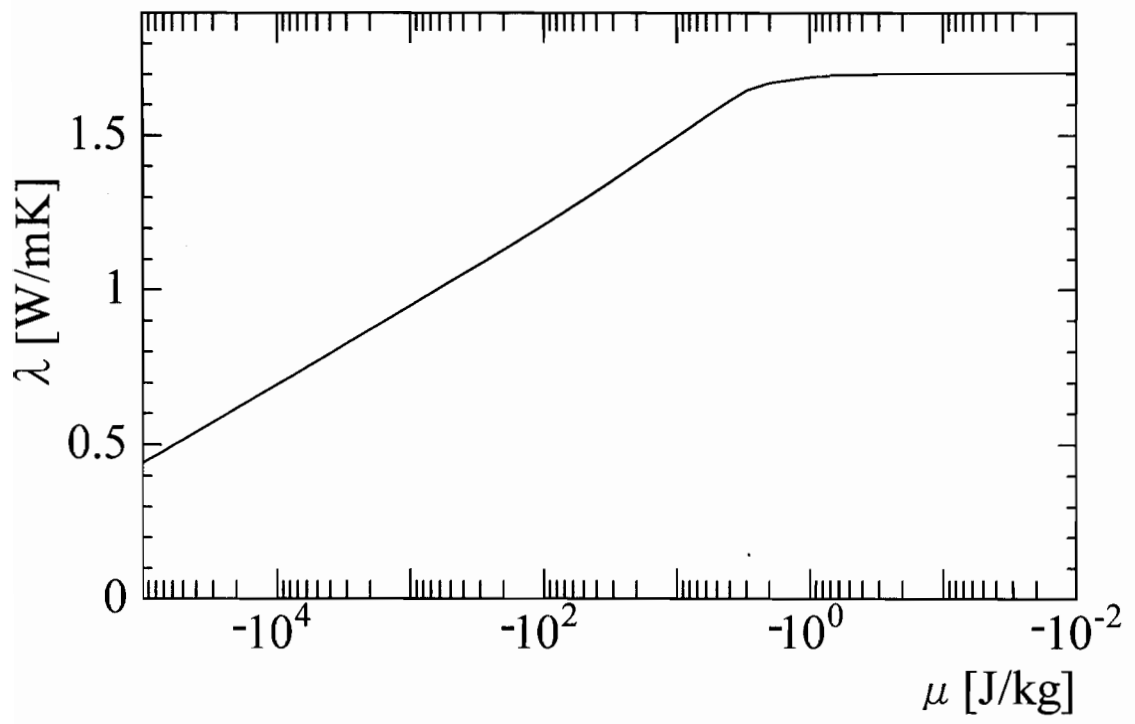


図3-15 ローム質砂の熱伝導率



### 3-3 数値計算法

#### 3-3-1 基礎方程式の差分化

本論で用いる基礎方程式は前述のように非線形であり、解析解を求めることは困難なため、基礎方程式を差分化し数値的に解を求める。第5章以降の地下構造物及び周辺地盤の熱・湿気性状の解析には1, 2及び3次元座標系を用いており、数値計算法は前進型有限差分法を用いる。ここでは計算した次元の中で最も大きい3次元系の基礎方程式の差分化を示す。他の次元の差分化もこれに準ずる。第2章で示した、温度及び水分化学ポテンシャルを移動ポテンシャルとした多孔質体の水分及び熱収支式を3次元系であらわすと次式となる。

$$\begin{aligned} \rho_w \left( \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right) \frac{\partial \mu}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial x} \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial y} \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \lambda'_{\mu} \left( \frac{\partial \mu}{\partial z} - g \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right\} \end{aligned} \quad (3-38)$$

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial x} \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial y} \right\} \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\lambda + r\lambda'_{Tg}) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ r\lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial z} \right\} \end{aligned} \quad (3-39)$$

ただし、記号は前章と同じものを用いており、座標軸はx軸およびy軸は地盤面に平行の水平方向、z軸は地盤面に垂直な鉛直下向き方向とする。

3次元差分式で用いる座標の概要を図3-16に示す。図中の(i,j,k)は、空間のそれぞれx,y,z軸の座標番号を表す。

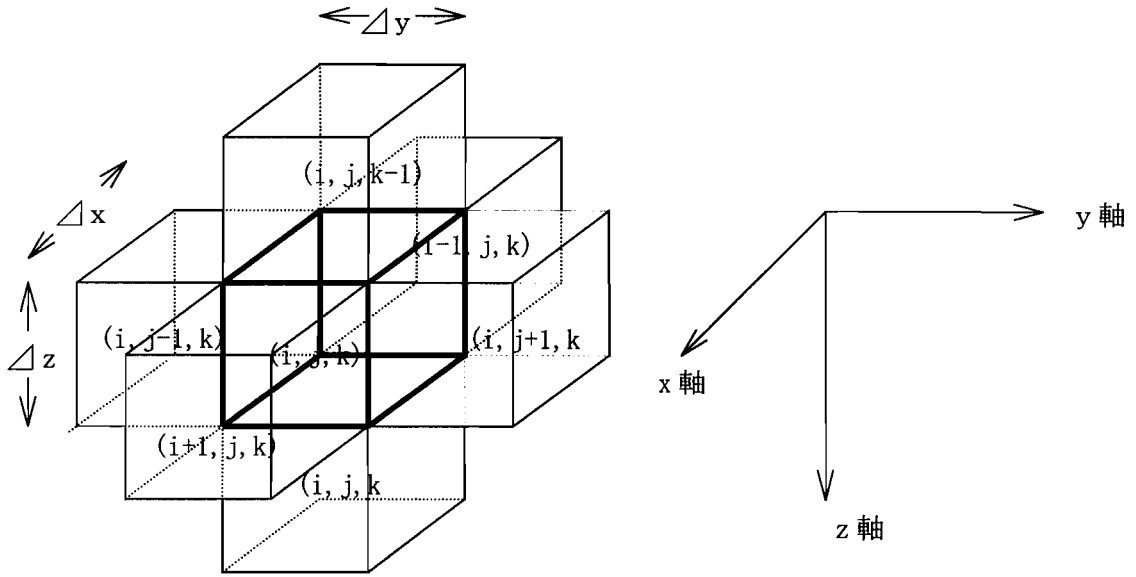


図3-16 3次元差分式で用いる座標の概要

3次元座標系で表された(3-38), (3-39)式を前進型有限差分法を用いて表現すると水分収支式は,

$$\begin{aligned}
 \rho_w \left( \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right)^n \frac{\mu_{i,j,k}^{n+1} - \mu_{i,j,k}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = & (J_{x_{i-1,j,k}}^n - J_{x_{i,j,k}}^n) \Delta y_j \Delta z_k \\
 & + (J_{y_{i,j,k-1}}^n - J_{y_{i,j,k}}^n) \Delta z_k \Delta x_i \\
 & + (J_{z_{i,j,k-1}}^n - J_{z_{i,j,k}}^n) \Delta x_i \Delta y_j
 \end{aligned} \quad (3-40)$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 J_{x_{i,j,k}}^n &= {}_{i,j,k} \lambda^m_{\mu_{i+1,j,k}} \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i+1,j,k}^n}{\Delta_i x_{i+1}} + {}_{i,j,k} \lambda^m_{T_{i+1,j,k}} \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i+1,j,k}^n}{\Delta_i x_{i+1}} \\
 J_{y_{i,j,k}}^n &= {}_{i,j,k} \lambda^m_{\mu_{i,j+1,k}} \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i,j+1,k}^n}{\Delta_j y_{j+1}} + {}_{i,j,k} \lambda^m_{T_{i,j+1,k}} \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j+1,k}^n}{\Delta_j y_{j+1}} \\
 J_{z_{i,j,k}}^n &= {}_{i,j,k} \lambda^m_{\mu_{i,j,k+1}} \left( \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i,j,k+1}^n}{\Delta_k z_{k+1}} + g \right) + {}_{i,j,k} \lambda^m_{T_{i,j,k+1}} \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n}{\Delta_k z_{k+1}}
 \end{aligned}$$

$$\Delta_i x_{i+1} = \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{2}$$

$$\Delta_j y_{j+1} = \frac{\Delta y_j + \Delta y_{j+1}}{2} \quad \Delta_k z_{k+1} = \frac{\Delta z_k + \Delta z_{k+1}}{2}$$

ここで、ポテンシャル  $\mu, T$  の上付き添え字  $n$  は、時間ステップ番号を表し、下付添え字  $i, j, k$  は空間座標番号を表す。水分流の添え字も同様である。水分伝導率については次節で説明を行う。

熱収支式は、

$$c\rho^n \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k = (Q_{x_{i-1,j,k}}^n - Q_{x_{i,j,k}}^n) \Delta y_j \Delta z_k$$

$$+ (Q_{y_{i,j,k-1}}^n - Q_{y_{i,j,k}}^n) \Delta z_k \Delta x_i \quad (3-41)$$

$$+ (Q_{z_{i,j,k-1}}^n - Q_{z_{i,j,k}}^n) \Delta x_i \Delta y_j$$

ただし、

$$Q_{x_{i,j,k}}^n = \left( \lambda_{i,j,k}^n \lambda_{i+1,j,k}^n + r_{i,j,k} \lambda_{i,j,k}^m T_{g_{i+1,j,k}} \right) \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i+1,j,k}^n}{\Delta_i x_{i+1}} + r_{i,j,k} \lambda_{i,j,k}^m \mu_{g_{i+1,j,k}} \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i+1,j,k}^n}{\Delta_i x_{i+1}}$$

$$Q_{y_{i,j,k}}^n = \left( \lambda_{i,j,k}^n \lambda_{i,j+1,k}^n + r_{i,j,k} \lambda_{i,j,k}^m T_{g_{i,j+1,k}} \right) \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j+1,k}^n}{\Delta_j y_{j+1}} + r_{i,j,k} \lambda_{i,j,k}^m \mu_{g_{i,j+1,k}} \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i,j+1,k}^n}{\Delta_j y_{j+1}}$$

$$Q_{z_{i,j,k}}^n = \left( \lambda_{i,j,k}^n \lambda_{i,j,k+1}^n + r_{i,j,k} \lambda_{i,j,k}^m T_{g_{i,j,k+1}} \right) \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k+1}^n}{\Delta_k z_{k+1}} + r_{i,j,k} \lambda_{i,j,k}^m \mu_{g_{i,j,k+1}} \frac{\mu_{i,j,k}^n - \mu_{i,j,k+1}^n}{\Delta_k z_{k+1}}$$

空気と接する固体表面の境界条件式は、地表面境界および壁体室内側表面境界において必要となる。ここでは、地表面の場合のみ示すが、壁体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式は、

$$\begin{aligned} \rho_w \left( \frac{\partial \psi}{\partial \mu} \right)^n \frac{\mu_{i,j,1}^{n+1} - \mu_{i,j,1}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_1 = & (J_{x_{i-1,j,1}}^n - J_{x_{i,j,1}}^n) \Delta y_j \Delta z_1 \\ & + (J_{y_{i,j,1}}^n - J_{y_{i,j,1}}^n) \Delta z_1 \Delta x_i \\ & + (J_{sur}^n z_{i,j,1} - J_{z_{i,j,1}}^n) \Delta x_i \Delta y_j \end{aligned} \quad (3-42)$$

ただし、

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

熱移動に関する境界条件式は、

$$\begin{aligned} c\rho^n \frac{T_{i,j,1}^{n+1} - T_{i,j,1}^n}{\Delta t} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_1 = & (Q_{x_{i-1,j,1}}^n - Q_{x_{i,j,1}}^n) \Delta y_j \Delta z_1 \\ & + (Q_{y_{i,j,1}}^n - Q_{y_{i,j,1}}^n) \Delta z_1 \Delta x_i \\ & + (Q_{sur}^n z_{i,j,1} - Q_{z_{i,j,1}}^n) \Delta x_i \Delta y_j \end{aligned} \quad (3-43)$$

ただし、

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

地下空間の室空気の水分および熱の収支式の差分化式を示す。

水分収支式は、

$$c'\gamma V \frac{p_r^{n+1} - p_r^n}{\Delta t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha'_m (p_{sur}^n - p_r^n) + c'\gamma N_v V (p_o^n - p_r^n) + J_r^n \quad (3-44)$$

熱収支式は、

$$c\gamma V \frac{T_r^{n+1} - T_r^n}{\Delta t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha'_i (T_{sur}^n - T_r^n) + c\gamma N_v V (T_o^n - T_r^n) + q_r^n \quad (3-45)$$

となる。以上より、基礎方程式は差分化され数値解析に適用される。

### 3-3-2 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時は、両方の物性値をたして1/2にした数値平均で求める。異種材料のときは、物性値の極端な違いを考慮するため調和平均を用いる[47]。

同種材料のとき点 $(i-1, j, k)$ と点 $(i, j, k)$ の間の物性値は

$${}_{i-1,j,k} \lambda_{i,j,k} = (\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k})/2 \quad (3-46)$$

異種材料のときの点 $(i-1, j, k)$ と点 $(i, j, k)$ の間の物性値は、その界面を異種境界とし、

$${}_{i-1,j,k} \lambda_{i,j,k} = \frac{\lambda_{i-1,j,k} \lambda_{i,j,k}}{fx(i) \lambda_{i-1,j,k} + (1 - fx(i)) \lambda_{i,j,k}} \quad (3-47)$$

ただし、

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

である。

## 3-4 第3章のまとめ

本章では、前章で示した基礎方程式を用いて地下構造物及び周辺地盤の熱・湿気性状の理論解析を行う方法について述べた。まず本論で対象となる材料である壁体及び地盤についてそれぞれコンクリート、砂質土壌、ローム質砂の熱・水分に関する物性値を近似式、グラフ等を示した。次に理論解析を行うための数値解析手法について述べた。数値解析手法として前進型有限差分法を採用し、基礎方程式の差分化を行った。また、差分化に伴う、物性値の取り扱い手法を述べた。

## 第4章 完全埋設型地下室および周辺地盤の 熱・水分性状の年間実測

### 4-1 はじめに

地下構造物は周囲を地盤に覆われており、地盤内熱挙動は室の温度形成に大きな影響を与える。土壌は水分を多く含み、この水分は降雨の水分浸透や地下水流動による土壌内熱物性値の変化や、降雨後の水分蒸発による潜熱移動等といった形で土壌内熱移動に影響を与える。また地下構造物の室温度は躯体内水分の影響を受け、その躯体内水分は地盤内水分の影響を受ける。すなわち地下構造物の熱・湿気挙動は、地盤内の熱・水分場の影響を受けているといえる。本章では、上記影響について検討を行うため、実験地下室を用いた地下室及び周辺地盤の熱水分性状の年間実測を行った結果及びその考察について述べる。実験地下室を用いた年間実測に関して、その実験概要、実験計画、測定項目および実験場所の地盤特性について述べ、実験測定結果を示しその考察を行う。

### 4-2 実験概要

実験地下室の概要を図4-1に示す。実験は地下空間及び周辺地盤の基本的な熱・水分性状を把握するため、室内発熱及び水分発生がなく一定の換気量のみ与える室内条件で約1年

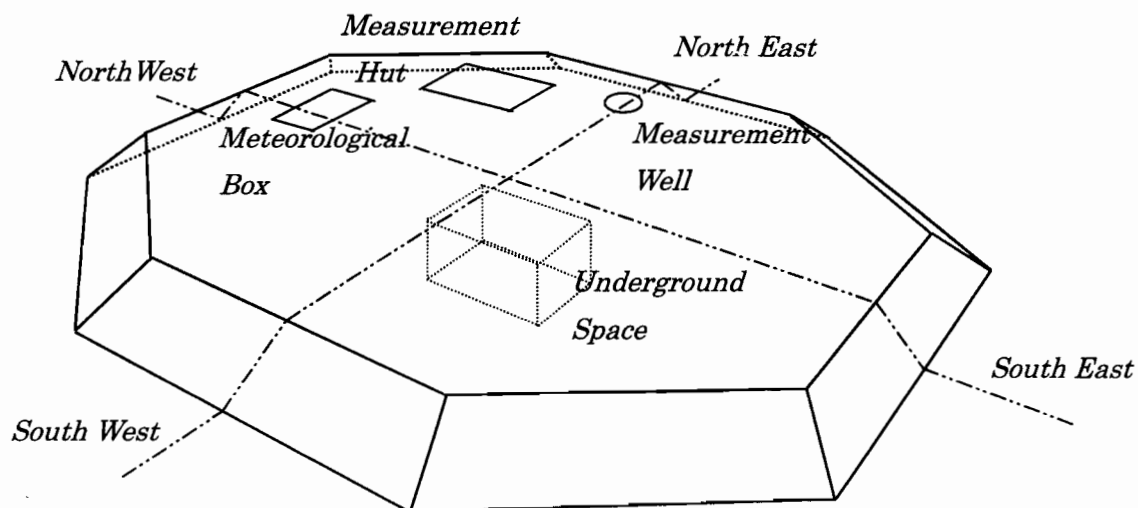


図4-1 実験地下室の俯瞰図

間(1997年8月～1998年8月)に渡って行った。

換気量は、可変風量ファンを用いて一定となるように設定した。測定項目は、地下室内温度、地下室内相対湿度、地下室壁面温度、地盤内温度、地盤内水分化学ポテンシャル、外気温度、外気相対湿度、全天日射量、アルベド(1997年10月まで)、地下水位である。

### 4-3 実験装置

#### 4-3-1 実験地下室

図4-2～4-4に実験用地下室の配置図、平面図、断面図を示す。敷地は三重大学(三重県津市)構内の建築学科棟脇に位置している。実験用地下室は完全に埋設されており、

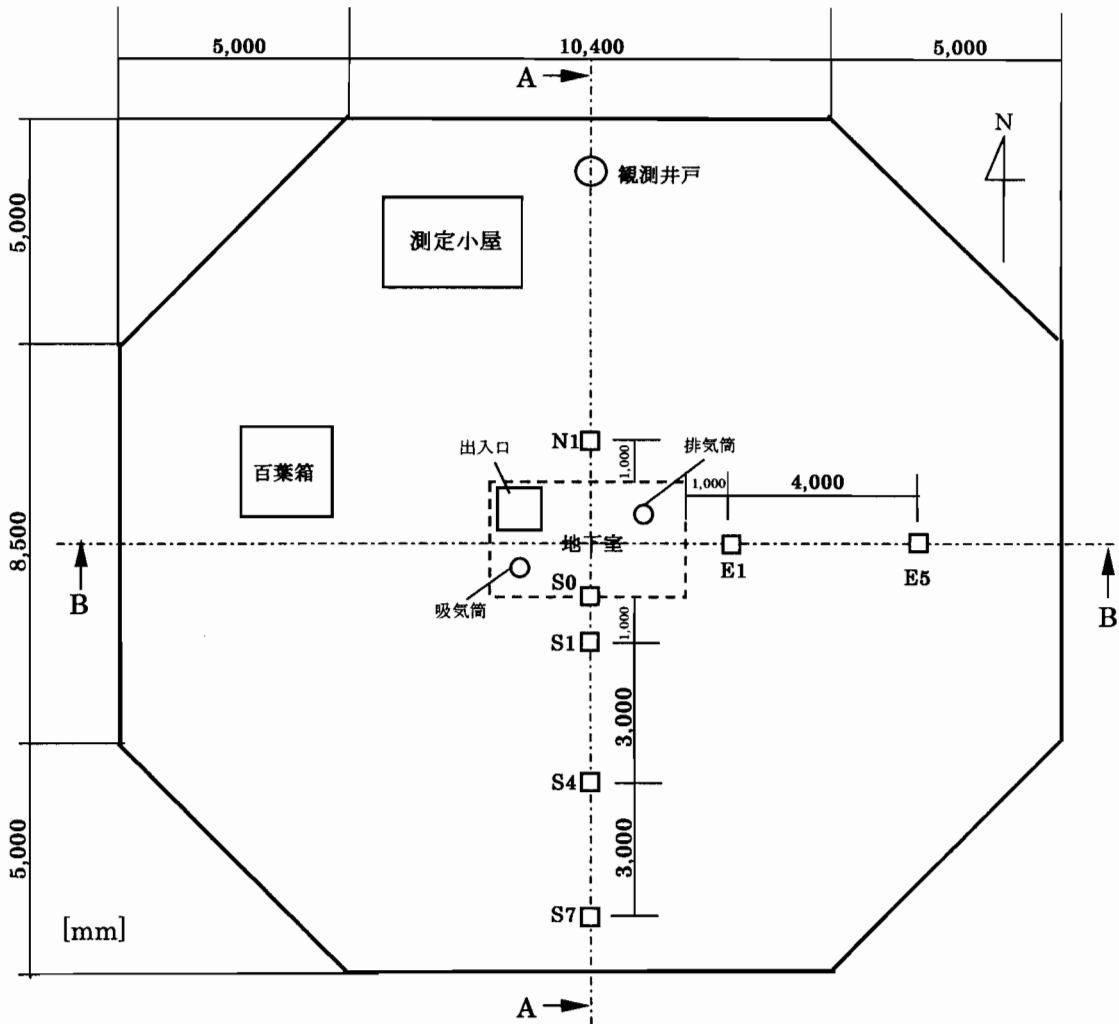


図4-2 実験用地下室の配置図

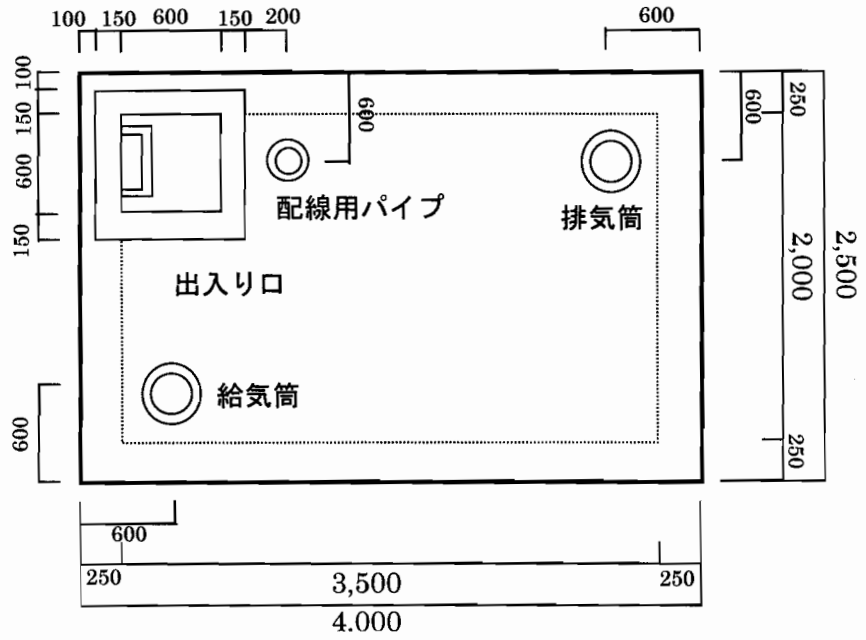


図4-3 実験用地下室の平面図

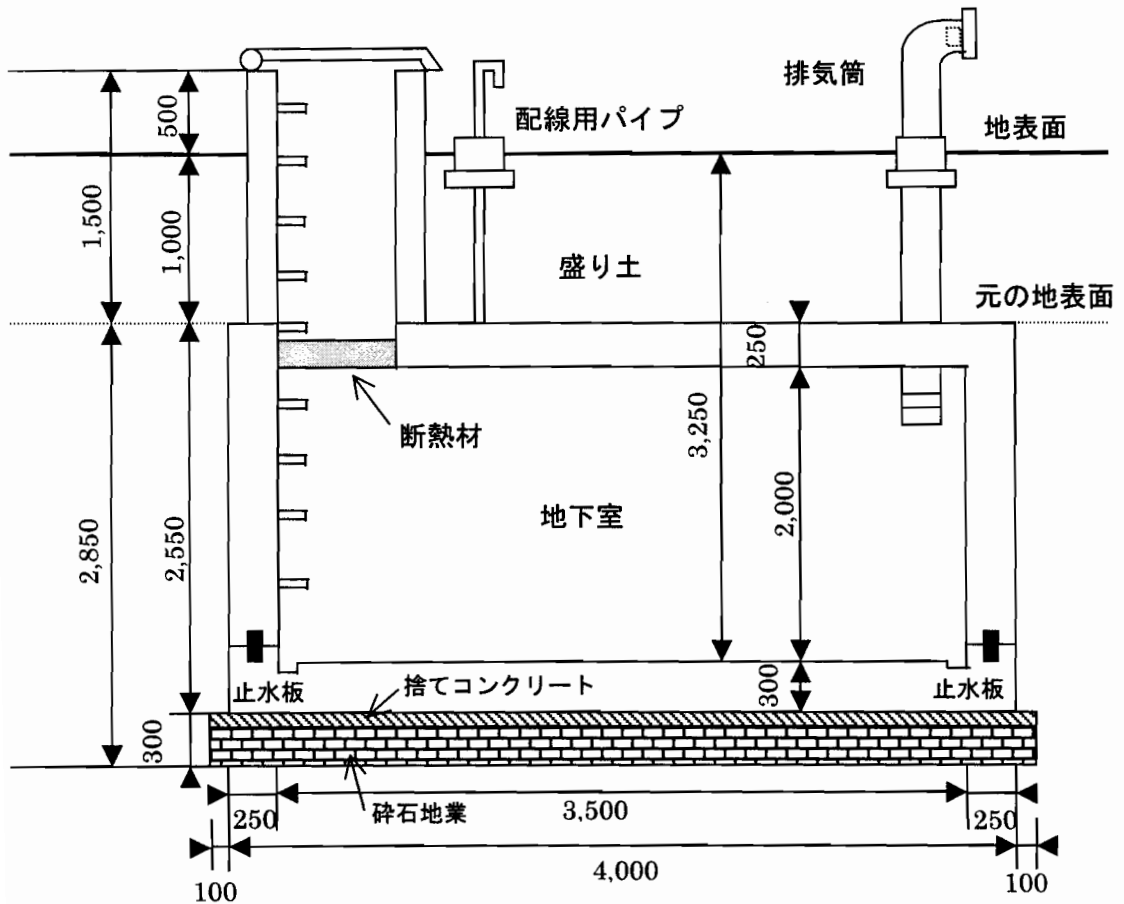


図4-4 実験用地下室の断面図



地表面から地下室天井面までの埋設深さは1.0[m]である。実験用地下室の寸法は、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]であり、床面積7[m<sup>2</sup>]、体積14[m<sup>3</sup>]の空間である。天井、側壁及び床はすべて鉄筋コンクリートで構成されており、壁体は防湿、防水処理は施していない。天井、側壁の厚さは0.25[m]、床の厚さは0.3[m]であり、床下には捨てコンクリート、砕石地業があわせて厚さ0.3[m]敷かれている。地下室と外界をつなぐ部分は0.6[m]×0.6[m]の出入り口、給気筒及び排気筒、配線用パイプだけであり開口部は存在しない。実験中は地下室への熱的外乱の影響を極力抑えるために天井高さの地下室への出入り口の下部（地下室天井面高さ）を断熱材（フォームポリスチレン厚さ10cm）で被う。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が行う。実験用地下室を建設した敷地は、常水面が地盤面から約3[m]の深さにある。そのため地下室床面を常水面より高く保ち、天井面を覆土する目的で地盤面から約1[m]の盛り土を行っている。盛り土の水平方向の領域は地下室の東西南北の外壁から8[m]離れた距離まで設けた。

#### 4-3-2 計測装置と計測状況

図4-5～7に実験用地下室および周辺地盤の計測状況を、表4-1に計測項目をそれぞれ示す。地下室内では図4-5に示すような各壁表面温度と室空気の温度、相対湿度を測定し、結露センサーも設置（1998年7月）した。また図4-6,7中で○が温度測定場所で、×が水分化学ポテンシャルを測定するテンシオメータ測定場所である。外界気象条件は外気温、外気相対湿度、全天日射量、アルベドを測定した。外気温、外気相対湿度は百葉箱内で測定し、全天日射計、アルベドメータは地表面に設置した。常水面深さの変化の計測を行うため実験場所に掘った井戸で水位を計測した。測定時間間隔はテンシオメータと常水面深さは日毎に、それ以外は30分間隔で測定した。

#### 4-4 実験条件

実験は自然状態における温・湿度性状の把握を目的として、室内では熱・水分発生のない状態とし、前述の可変風量ファンにより一定量の換気を与えるようにした。また壁体は鉄筋コ

表4-1 測定詳細

測定項目	測定装置	測定位置	
外気温度及び相対湿度	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 アルベドメーター	盛り土上	
地下水位	物差し	測定用井戸	
地下室内温度	T型熱電対 温湿度センサー	地下室内 6点 3点	
地下室内壁面温度	T型熱電対	天井, 床, 東西南北壁面中央部 計 6点 東南天井隅角部 1点 東南床隅角部 1点	
地下室内相対湿度	温湿度センサー	地下室内 3点	
地盤内温度	T型熱電対	地点	N1, E1, E5 深さ 0.05m, 1.0m, 2.0m, 3.0m
		S0, S1, S4, S7	深さ 0m, 0.05m, 0.1m, 0.5m, 1.0m, 2.0m, 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 深さ 0.7m
		S0, S4, E5	深さ 0.1m, 1.0m, 2.0m, 3.0m

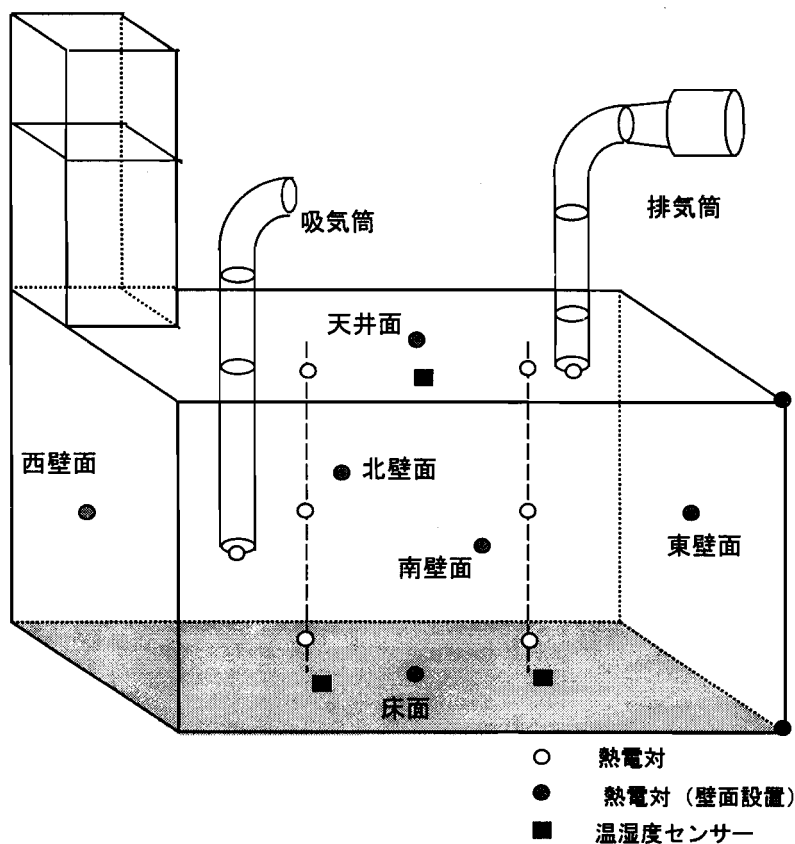


図4-5 実験用地下室内の計測状況

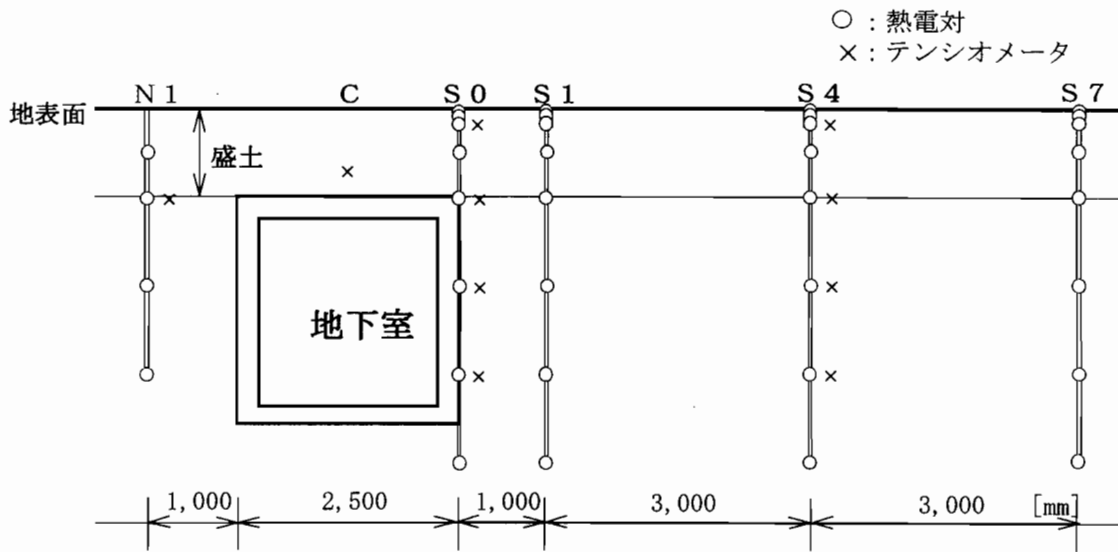


図4-6 地盤内計測状況(A-A断面)

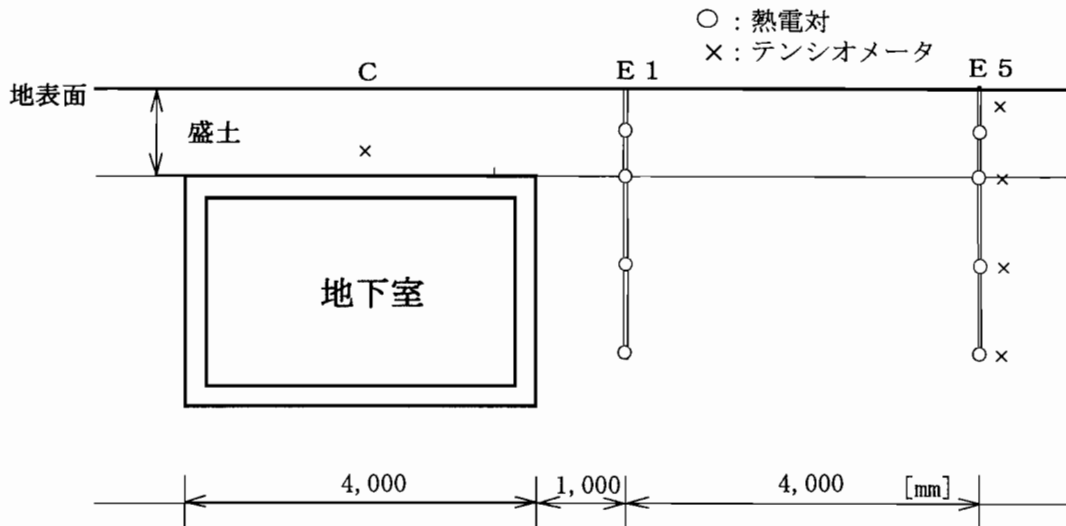


図4-7 地盤内計測状況 (B-B断面)

ンクリート一層で構成されており、壁体に防水・防湿処理は施していない。測定期間は1997年8月2日から1998年8月31日までの約1年間である。換気量の設定値はファンの設定確認の作業を測定と平衡して行ったため1997年9月30日までが換気回数10[1/h]程度であり、それ以降は5[1/h]となるよう設定した。なお、換気量はCO<sub>2</sub>濃度減衰法により測定した。

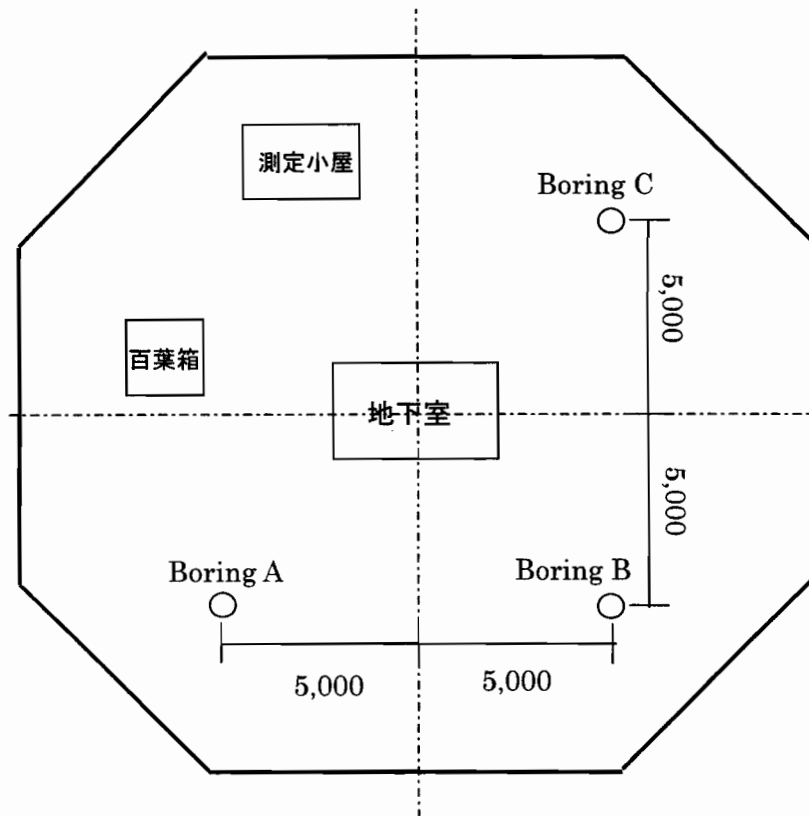


図4-8 ボーリング調査実施地点

## 4-5 実験場所の地盤特性

### 4-5-1 ボーリングによる土質調査

実験場所の地盤特性はボーリングによる土質分布の調査を行った。

実験用地下室の周辺地盤及び盛り土の土壌特性把握のため3カ所でボーリングによる土質調査を行った。図4-8にボーリング調査を行った位置を、表4-2にふるいによる粒土試験によって得られた土質の粒土組成と土質名称を示す。土質の粒土組成の分布は、全点共に大きな違いは見られず、「シルト混じり砂」または「シルト質砂」と分類された。水平方向及び鉛直方向の土壌の違いは大きくはなく、ほぼ一様な地盤と考えられる。

### 4-5-2 地表面近傍土壌の含水率—水分化学ポテンシャル関係の測定

実験用地下室の周辺地盤及び盛り土の土壌推定のため地表面近傍の土壌を採取し、採取

表4-2 土質実験用地下室内の計測状況

位置-深さ[m]	A-0.8~0.9	A-1.6~1.8	A-2.5~2.7
礫分 2~75mm [%]	22.5	16.9	12.0
砂分 75 $\mu$ m~2mm[%]	64.8	68.8	67.4
シルト分 5~75 $\mu$ m [%]	12.7	14.3	20.6
粘土分 5 $\mu$ m未満 [%]	0.0	0.0	0.0
土質名称	シルト混り砂	シルト混り砂	シルト質砂

位置-深さ[m]	B-0.8~1.0	B-1.1~1.3	B-1.4~1.6	B-2.1~2.3
礫分 2~75mm [%]	24.7	16.2	12.6	17.6
砂分 75 $\mu$ m~2mm[%]	63.1	65.6	80.4	68.2
シルト分 5~75 $\mu$ m [%]	12.2	18.2	7.0	14.2
粘土分 5 $\mu$ m未満 [%]	0.0	0.0	0.0	0.0
土質名称	シルト混り砂	シルト混り砂	シルト混り砂	シルト混り砂

位置-深さ[m]	C-0.5~0.7	C-1.5~1.7	C-2.2~2.4
礫分 2~75mm [%]	11.4	23.2	13.7
砂分 75 $\mu$ m~2mm[%]	74.8	61.0	68.8
シルト分 5~75 $\mu$ m [%]	13.8	15.8	17.5
粘土分 5 $\mu$ m未満 [%]	0.0	0.0	0.0
土質名称	シルト混り砂	シルト混り砂	シルト質砂

表4-3 地表面近傍の含水率-水分化学ポテンシャル測定値

	Sample A	Sample B
採取位置	排気筒（地下室直上）付近	S7 地点付近
水分化学ポテンシャル $\mu$ [J/kg]	-3.0	-1.8
体積含水率 $\psi$ [vol%]	27.8	30.0

したサンプルの体積基準の含水率と水分化学ポテンシャルの測定を行った。

測定方法は容器に入れたサンプルにテンシオメータを設置し、土壌水分の吸引圧の測定を行った直後、サンプルの重量と体積の測定を行った。その後24時間乾燥させ、乾燥重量を測定し体積基準の含水率を算出した。

土壌サンプルの採取は地下室直上の排気筒付近の地表面近傍と地下室外壁より7[m]離れたS7地点の地表面近傍から行った。測定結果を表4-3に示す。また図4-9に含水率-水分化

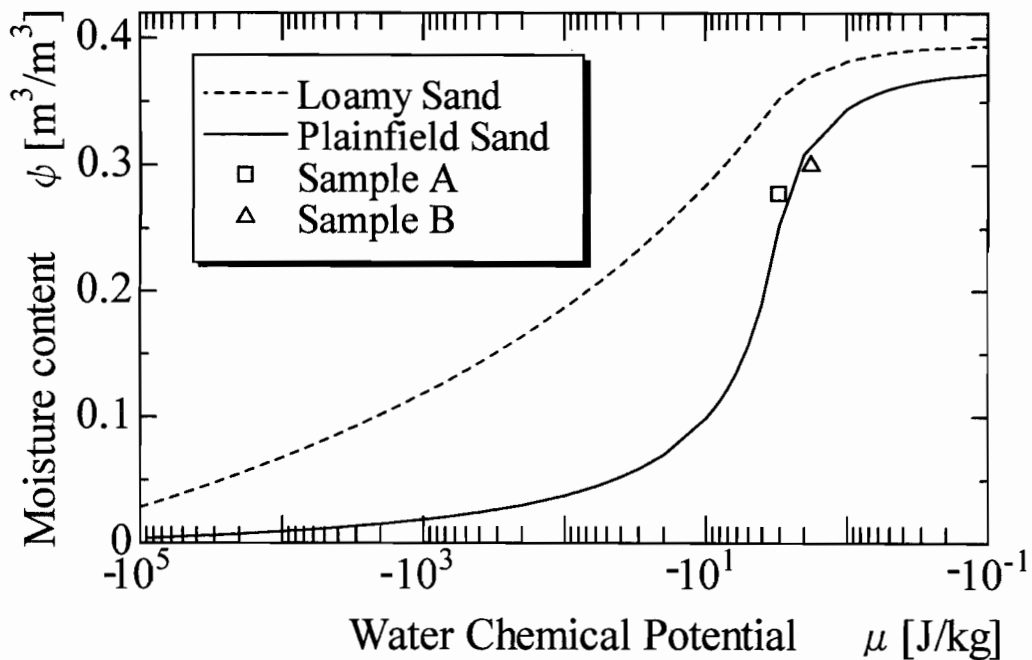


図4-9 地表面近傍の含水率—水分化学ポテンシャル測定値

学ポテンシャル関係を測定値と Plainfield Sand (砂)[44], ローム質砂[46]の近似曲線を併せて示す. 図4-9に示すように測定値は Plainfield Sandの含水率—水分化学ポテンシャル関係の急変域において一致している. 従って実験現場の地表面近傍の土壌は Plainfield Sandの水分性状に近いと推定される.

## 4-6 測定結果と考察

### 4-6-1 外界気象

図4-10～13に測定期間の外気温, 外気相対湿度, 降雨量, 全天日射量を示す. なお, 外気相対湿度については, 1998年5月31日～同年8月31日まで欠測したため, 以下の検討を行い, 欠測期間は津气象台実測値を用いた. 図4-14,15に示すように外気温と相対湿度について実測現場から1km離れた地点にある津气象台測定値と現場実測値を比較した結果, ほとんど差が認められなかった. 従って欠測期間の補間として十分に使用可能であると判断した. 期間中の年平均気温は16.5[°C]で, 年平均相対湿度は73[%]であった. 降雨の年積算量1911[mm]であった. 津气象台の各気象条件の平年値[48]はそれぞれ, 15.1[°C], 71

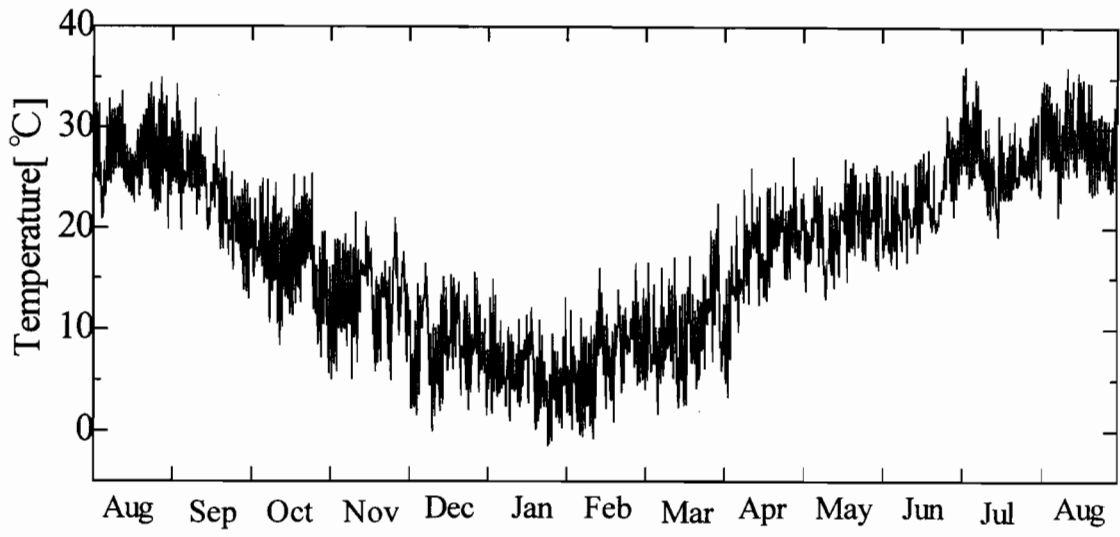


図4-10 外気温度変動

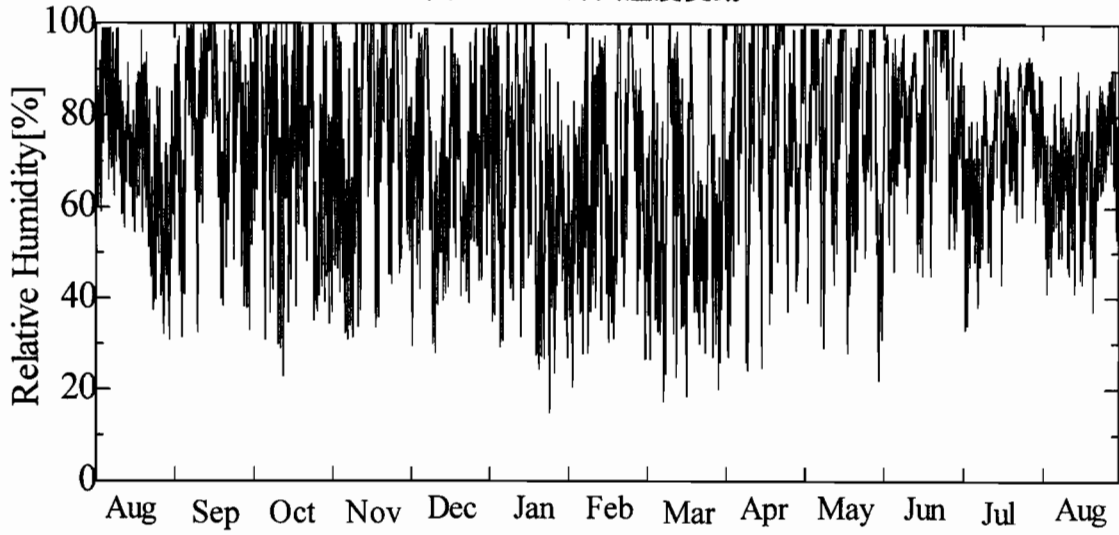


図4-11 外気相对湿度変動

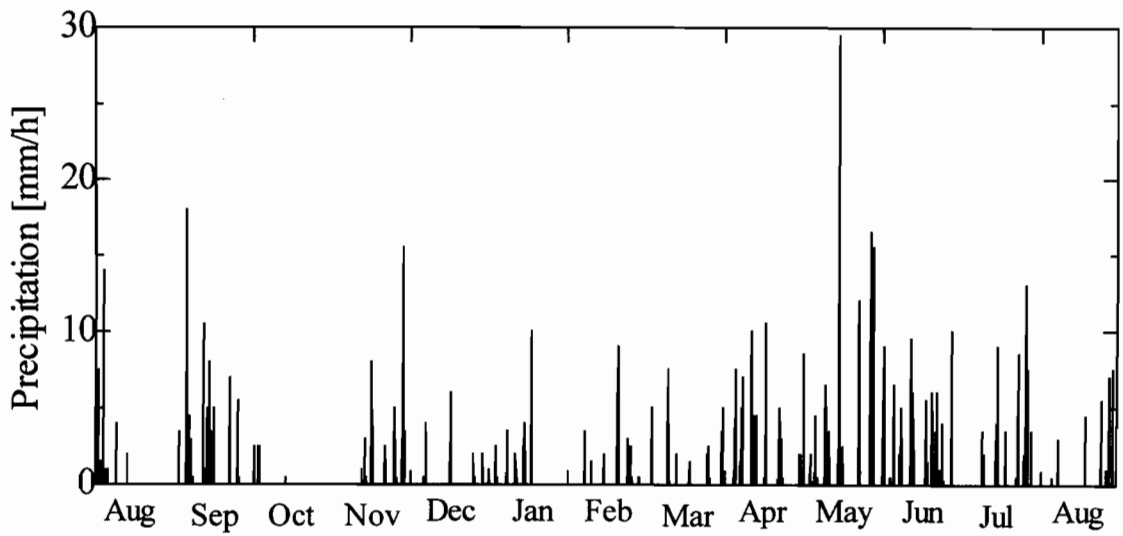


図4-12 降雨量変動

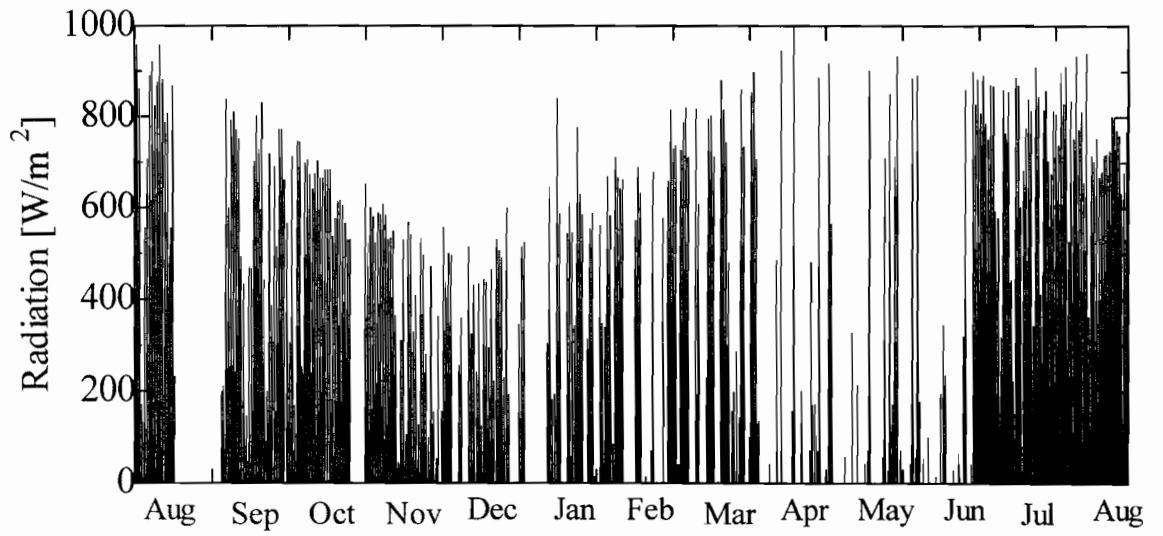


図4-13 全天日射量変動

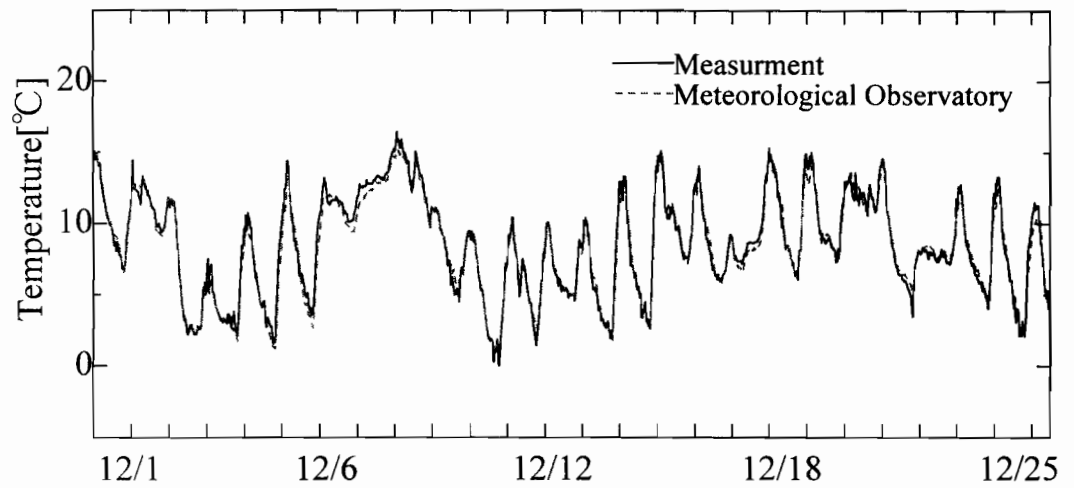


図4-14 外気温度変動の現場実測値と気象台測定値の比較

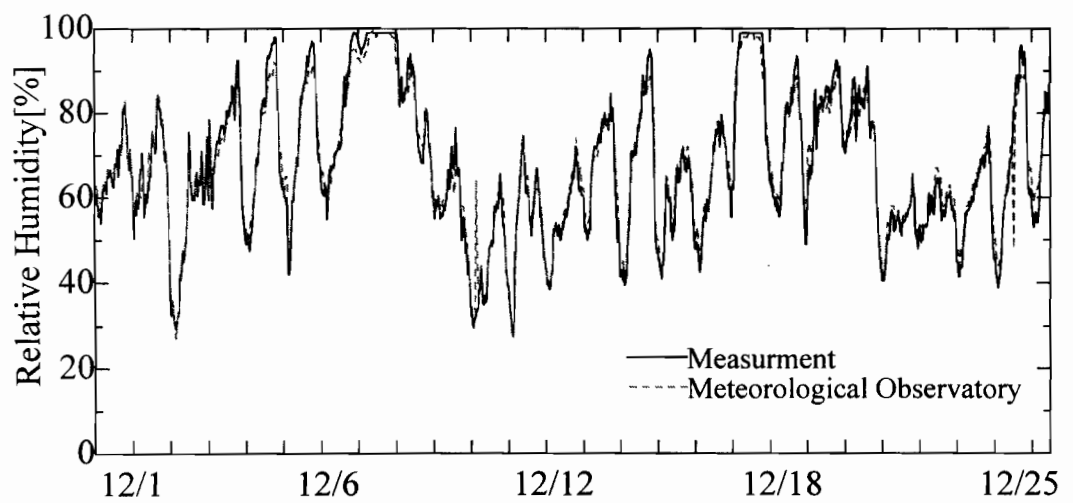


図4-15 外気相対湿度変動の現場実測値と気象台測定値の比較



[%], 1655[mm]であり, 平年より外気温が高く, 降雨量が多い年であったといえる. なお, 全天日射量については, 欠測期間が多い月で3分の2程度あり, 津气象台では全天日射量の測定は行われていないため, 図では欠測期間の値はゼロとしている.

#### 4-6-2 地表面日射吸収率

1997年8月2日16:00～同年10月19日6:30の期間はアルベドメータによって全天日射量と地表面からの反射量の測定を行っている. 地表面日射吸収率について検討を行う前に, 同時に測定を行っている全天日射計とアルベドメータの両機器間での誤差をまず検討する. 図

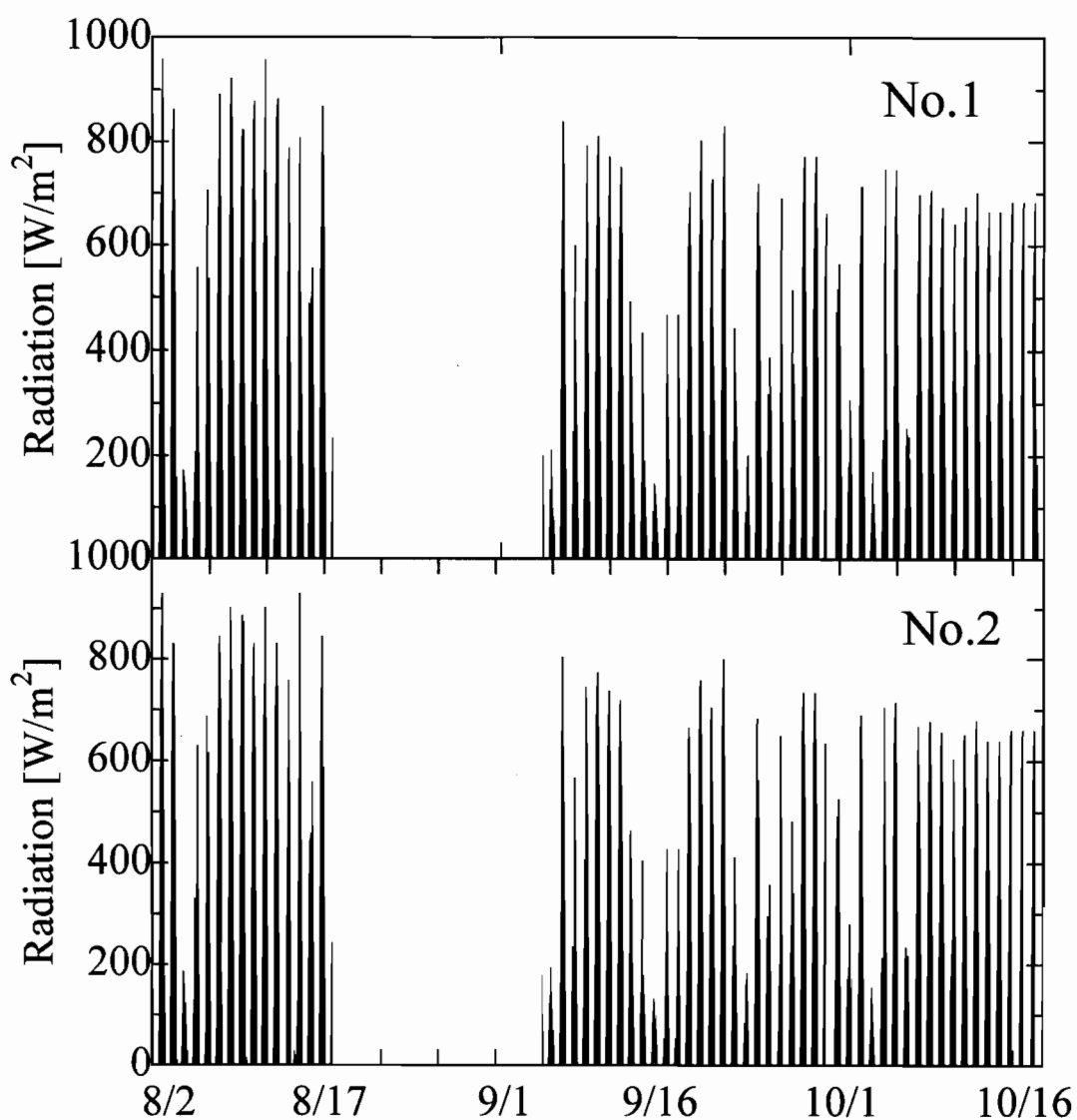


図4-16 全天日射計とアルベドメータの全天日射量測定値の比較

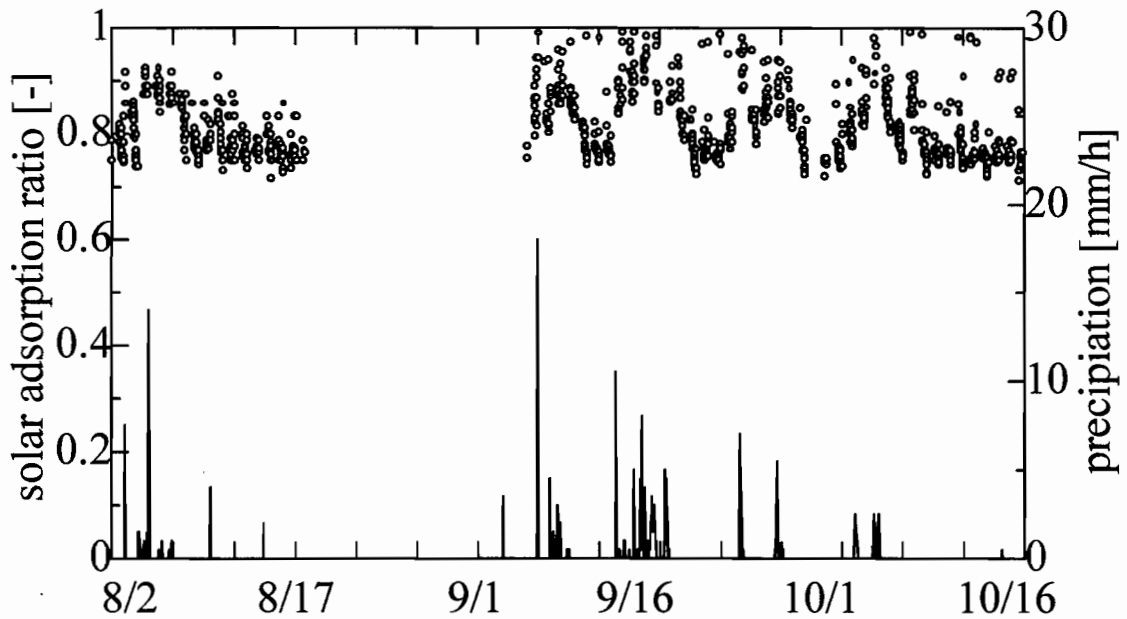


図4-17 地表面の日射吸収率と時間積算降水量

4-16に全天日射計によって測定された全天日射量とアルベドメータによって測定された全天日射量の比較を示す。なお、図中でNo.1は全天日射計による測定値を、No.2はアルベドメータによる測定値を表す。この図より両日射計測定値はほぼ一致しており、全天日射計とアルベドメータとの機器間での誤差はないと言える。

図4-17にアルベドメータによって測定したアルベド（日射反射率）から算出した日射吸収率の変動をこの間の降雨量と併せて示す。図より測定期間では0.7から1.0の間で変動しており、日射吸収率の上昇は降雨後に見られる。これは降雨で地表面が濡れることにより日射反射量が低下したと考えられる。この期間の平均値は0.83であった。

#### 4-6-3 地下室内温・湿度変動

地下室内温度は図4-5で示したように、計6点温度測定を行っている。図4-18に室内温度分布の変動を示す。この図より、各高さにおける水平方向の温度分布は1℃未満であり、ほとんど差が無かった。上下方向の分布も最大で1.5℃程度であり、地下室内の温度分布はほぼ一様であった。従って熱電対により測定された6点の測定値の平均した値を地下室内温度とした。図4-19に地下室内温度日平均値の変動を外気値の日平均値と併せて示す。外気

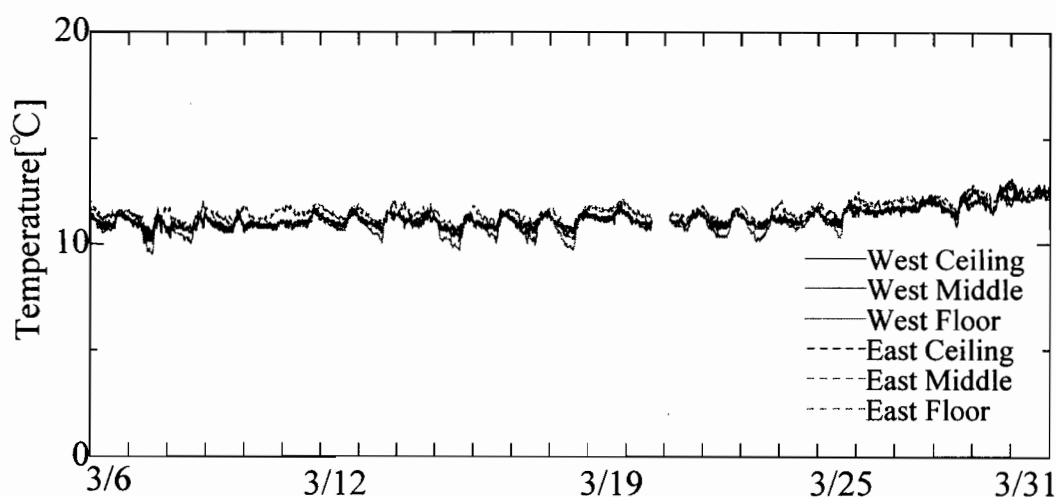


図4-18 地下室内温度分布の変動

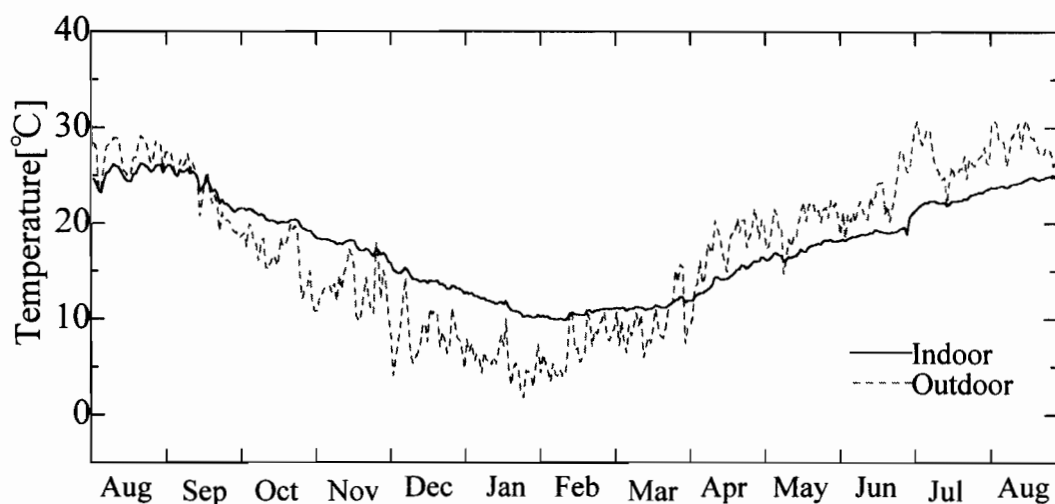


図4-19 地下室内温度日平均値の変動

温度の年振幅が約15[°C]であるのに対し、地下室内温度の年振幅は約7.5[°C]であり半分近くまで減少している。また位相の遅れも1ヶ月間程度見られる。冬期の地下室内温度は夜間における外気温の急激な低下による影響を抑えられ、また日中の温度も外気温より高い値を示している。外気温度が年間最低値-0.9[°C]に対して地下室内温度の年間最低値は9.2[°C]である。夏期の地下室内温度も日中における外気温の急激な上昇による影響を抑えられ、夜間の温度も外気温より低い値を示している。外気温度が年間最高値36.1[°C]に対して地下室内温度の年間最高値は27.2[°C]である。1年を通じて外気温度の日較差は10[°C]程度あるが、換気回数5[1/h]の地下室内では1~2[°C]程度まで減衰している。以上より地下空間の高断

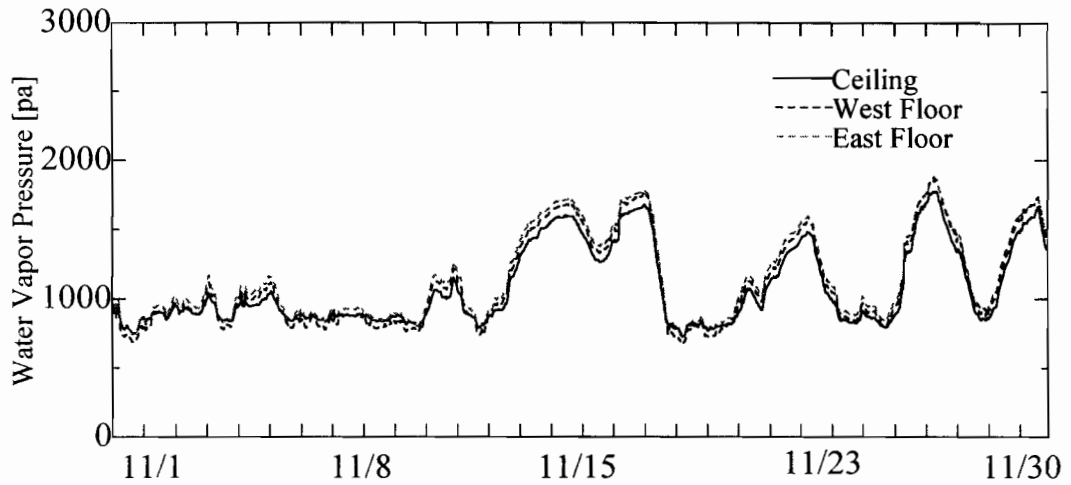


図4-20 地下室内水蒸気圧分布の変動

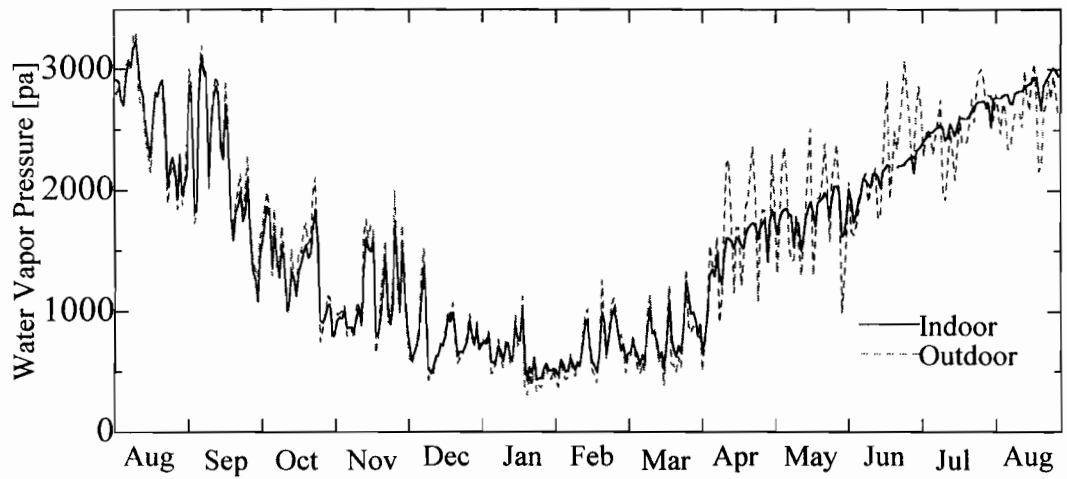


図4-21 地下室内水蒸気圧日平均値の変動

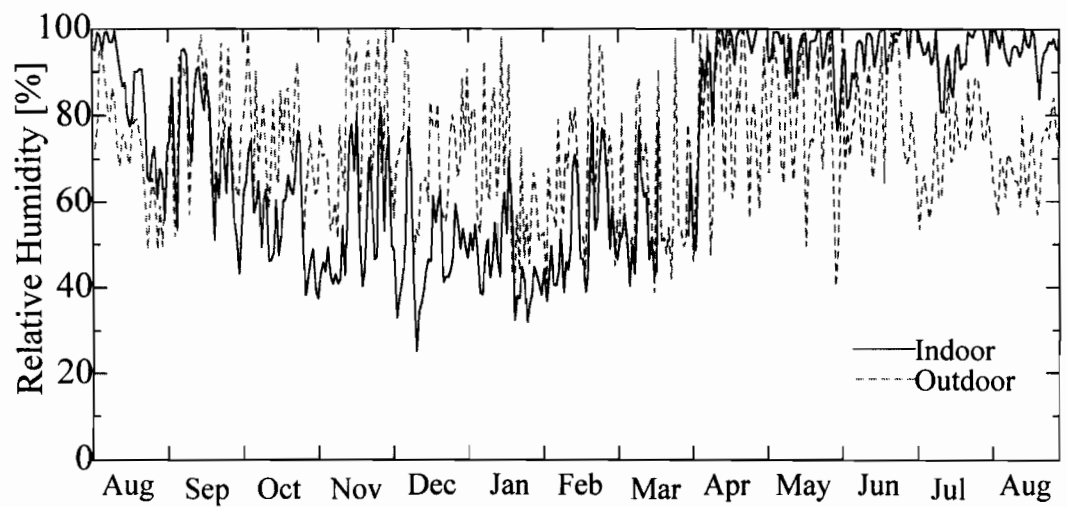


図4-22 地下室内水蒸気圧日平均値の変動

熱性・恒温性が確認できる。また実測期間（1年間：1997年8月31日15:00～1998年8月31日15:00）の地下室内温度の平均値は17.1[°C]であり、この期間の外気温の平均値16.6[°C]よりも0.5[°C]高かった。一方地下室から4m離れた地点の深さ3mの地盤内温度の年平均値は18.1°Cであり、外気温より1.5°C高かった。外気温と地盤内温度の年平均値の差が大きく影響していると考えられる。

地下室内水蒸気圧は図4-5で示したように、計3点の温湿度センサーによって測定を行っている。図4-20に室内水蒸気圧分布の変動を示す。1年間を通じて、天井面近傍の水蒸気圧は床面近傍の水蒸気圧よりも、やや低めの傾向が見られたが、差は最大でも100Pa程度であった。測定に用いた高分子抵抗式温湿度センサーの誤差範囲が100Pa（温度±0.5°C±2%）である事を考慮すれば、上下の差は測定誤差範囲内であり、地下室内水蒸気圧分布はほぼ一様であったと考えられる。

図4-21に地下室内水蒸気圧日平均値の変動を外気値の日平均値と併せて示す。室内水蒸気圧は秋期から冬期にかけては、週単位程度の変動に対して外気値に追随するが、高湿となる春期から夏期にかけては週単位程度の変動に追随しない。これは外気水蒸気圧が室内飽和水蒸気圧より高い値になり室内水蒸気圧の上昇が抑えられることと、外気値が低下した時には壁体からの水分蒸発により室内水蒸気圧の低下が抑えられることによると考えられる。また夏期には次節で述べるように表面結露が発生している。夏期の地下室内湿度に対して、結露発生による水分を含めた壁体の吸放湿の与える影響が大きいといえる。

図4-22に地下室内相対湿度日平均値の変動を外気値の日平均値と併せて示す。室内相対湿度は、秋期から冬期にかけて外気相対湿度を下回り、比較的低い相対湿度を示すが、春期から夏期にかけては90%を越す高湿な状態が続く。この挙動は秋、冬期に室温が外気温より高くなり、春、夏期に室温が外気温より低くなることと対応しており、地下室の夏期における高湿度環境は室温が外気温に対して振幅が減衰し位相が遅れることの影響が大きいことを示している。

#### 4-6-4 地下室の結露性状

地下室の表面結露発生状況を確認するため1998年7月の一ヶ月だけであるが電気抵抗式

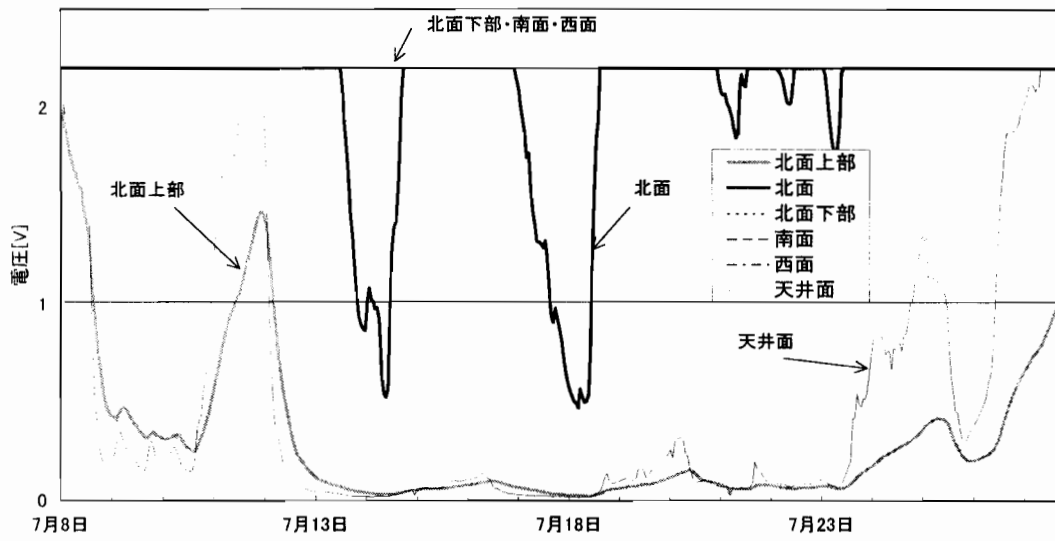


図4-23 結露センサー出力の変動

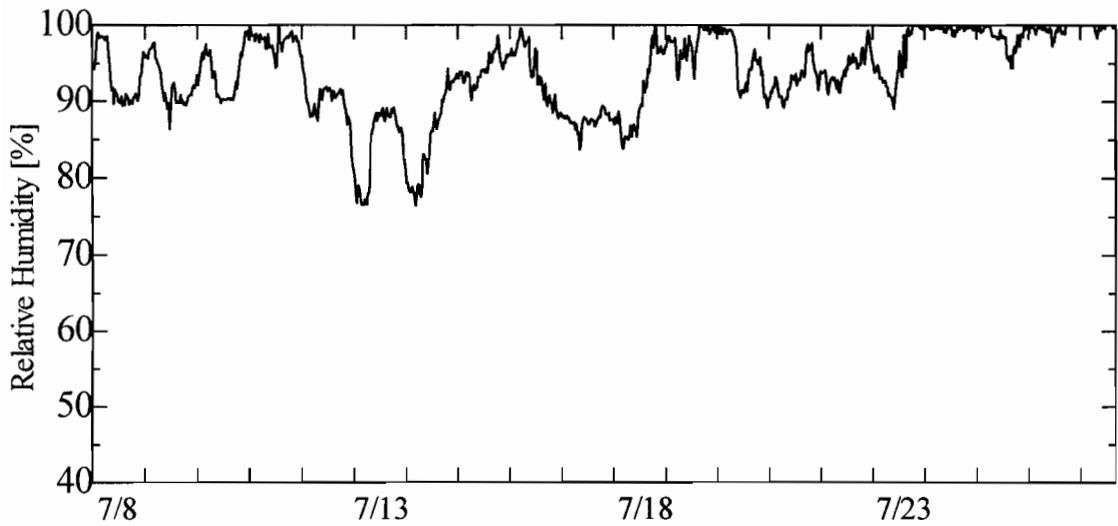


図4-24 室内相対湿度の変動 (7月)

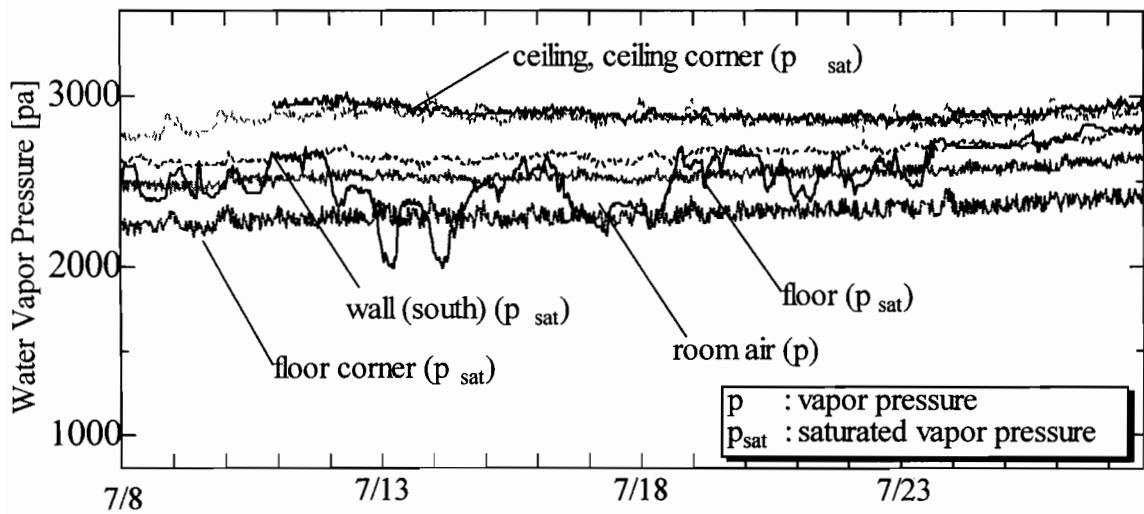


図4-25 室内相対湿度の変動 (7月)

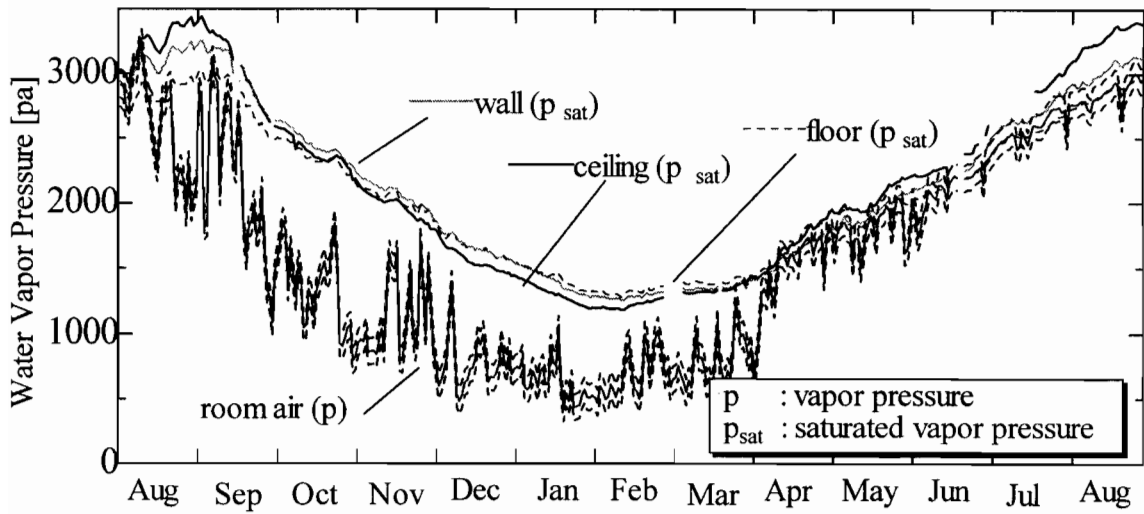


図4-26 室内相対湿度の変動 (7月)

の結露センサを設置した。7月の結露センサーの測定値、室内相対湿度を図4-23,24にそれぞれ示す。結露センサーの指示電圧は最低1[V]で結露と判断されることから1[V]以上を表面結露と判断した。部位別に結露発生をみると北面下部、南面、西面では常に結露が発生し、北面も常時発生に近い。天井面及び北面上部は、数日間だけ結露発生する。室内相対湿度と結露発生状況の対応関係をみると、室内相対湿度が100%近くに一日程度維持されると天井面でも結露が発生する。80%程度まで低下すると北面の結露が発生しなくなっている。表面結露の発生は室内相対湿度の影響を大きく受け、変化に対する応答に時間遅れがある。これには壁体の吸放湿が影響していると考えられる。

次に壁面温度から決定される飽和水蒸気圧と室内水蒸気圧との比較により表面結露の判定を行う。図4-25に室内水蒸気圧と壁面の飽和水蒸気圧の変動を示す。なお室内水蒸気圧は測定誤差が100[Pa]程度は生じるため実測値に±100[Pa]加えたものを示す。表面温度と結露センサーの測定位置が一致している壁面と天井面について以下で比較する。壁面は飽和水蒸気圧による判定は結露センサーの北面の出力値と似た変動をしている。ただし結露センサーでは発生と判定している時期に飽和水蒸気圧の判定で発生していない日も数日ある。天井面においては結露センサーでは7月8,11,25～27日に結露が発生するが、飽和水蒸気圧による判定では7月8,23～27日ではほぼ結露と判断され若干ずれる。飽和水蒸気圧の判定が結露センサーの判定と異なる大きな要因として結露発生による蓄積水分の影響があると考えられる。

ただし壁面飽和水蒸気圧（壁面露点温度）による大略の結露判定は可能と考えられるため、以下ではこの判定による年間結露性状を検討する。図4-26に壁体表面の飽和水蒸気圧と室水蒸気圧の年間変動を示す。実験初年度の8,9月(換気回数10[1/h]程度)は若干床面で結露が発生するが、2年目の8月(換気回数5[1/h])の方が室内水蒸気圧の変動も小さく、床面、壁面において結露が発生し、その期間は長い。この結果からは8月の外気温、外気水蒸気圧の月平均の差はほとんどないことから換気回数を増やすことが結露を防ぐ意味で有効と判断できよう。各壁面の飽和水蒸気圧と室水蒸気圧が一番交差するのは4～6月である。これはちょうど地下室温と外気温が逆転し(図4-19)、なおかつ外気水蒸気圧が上昇する時期(図4-21)であり、この時期に結露発生危険性が最も高くなる。部位別では床面及び壁面における結露発生が長く、10～3月は結露は発生していない。

#### 4-6-5 地盤内熱・水分性状

地表面温度は4点で測定を行ったが、風雨による地表面土壌の浸食でセンサーが露出することも多く、信頼できる値が測定できなかったため、地表面近傍の温度として地表面から5cmの深さで測定された値を以下で検討する。図4-27に7地点の地表面近傍温度変動を示す。測定地点の違いによる温度の差は2℃程度であり1年間を通じてほぼ一致した。つまり地表面では地点の差による違いは小さく1次元性があるといえ、以下では地表面近傍温度は7地点の測定値の平均値を示す。図4-28に地表面近傍（深さ5cm）の温度変動を示す。地表面近傍温度は外気温度に追随し、日振幅では外気温度よりもやや小さい値を示している。しかし夏期の日中には外気温度よりも高い値を示しており、これは日射量が大きいためと考えられる。図4-29にS4地点の地盤内温度の年変動を示す。なおS4地点は地下室長軸方向の壁体外側の水平中央位置から水平に4m離れた地点を意味する。深さ0.5mで日振幅の影響は消え、深くなるにつれ振幅が小さくなり、位相が遅れる。深さ4mで振幅は3.6℃、位相遅れは2ヶ月程度になる。図4-30～34に深さごとの地盤内温度年変動を示す。深さ0.5m,1.0mでは、どの地点の温度変動も大きな差は見られない。深さ2mでは、地下室外壁に接するS0地点で振幅が最も大きく、かつ位相が外気に最も近くなり、地下室の影響がみられている。深さ



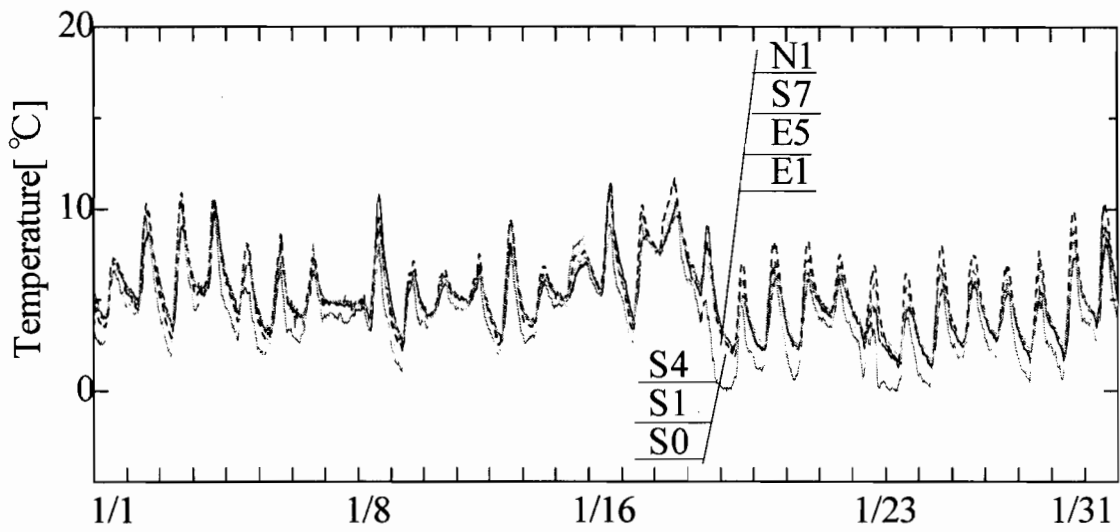


図4-27 地表面近傍(5cm)の各地点の地盤内温度年変動

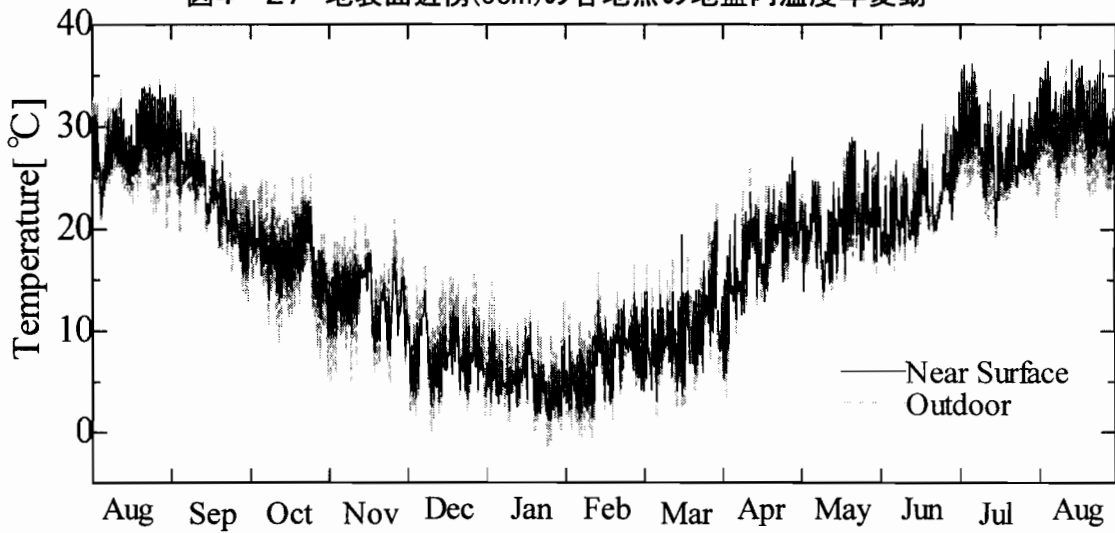


図4-28 地表面近傍(5cm)の地盤内温度年変動

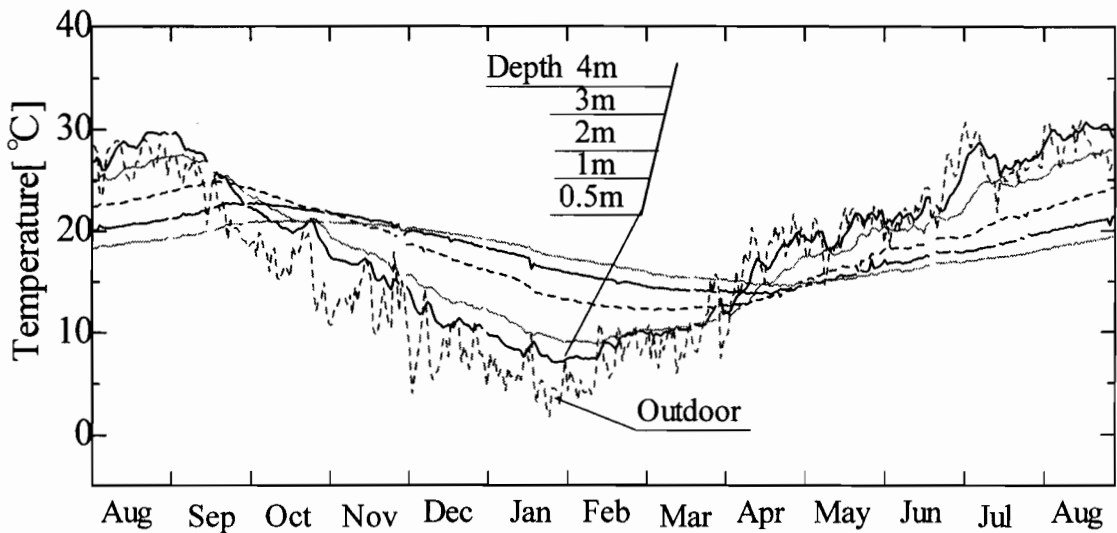


図4-29 S4地点の地盤内温度年変動

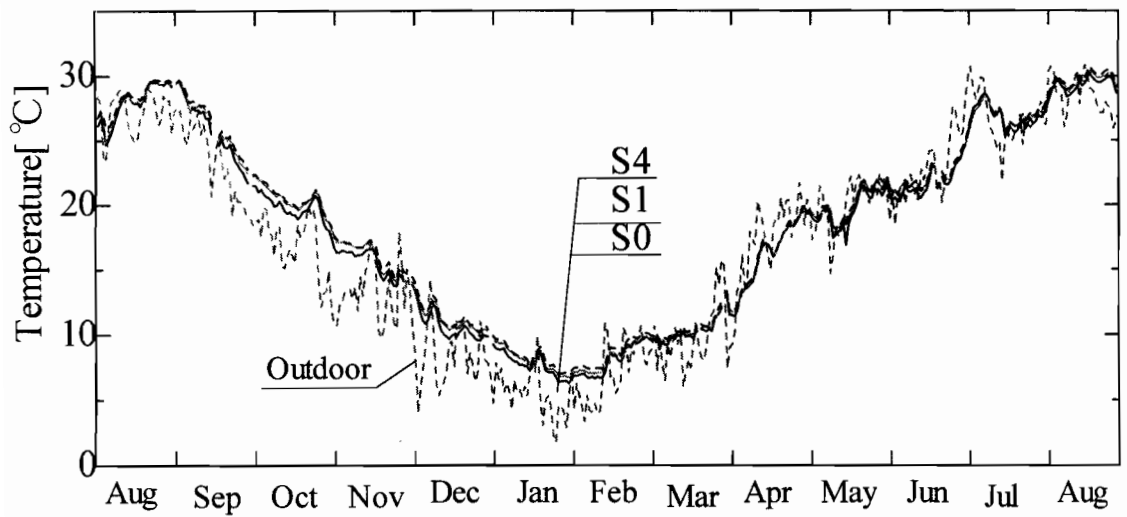


図4-30 深さ0.5mの地盤内温度年変動

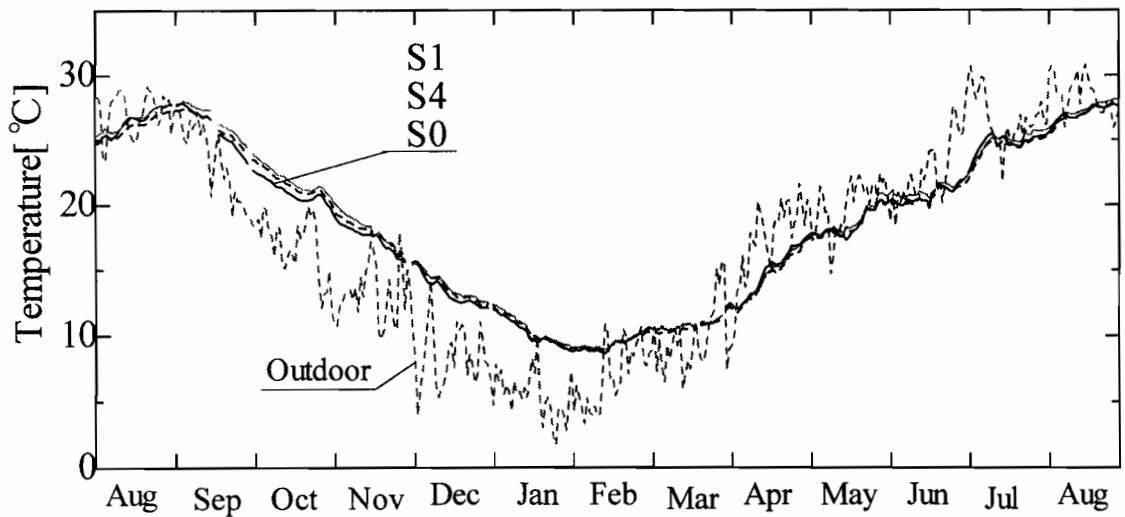


図4-31 深さ1.0mの地盤内温度年変動

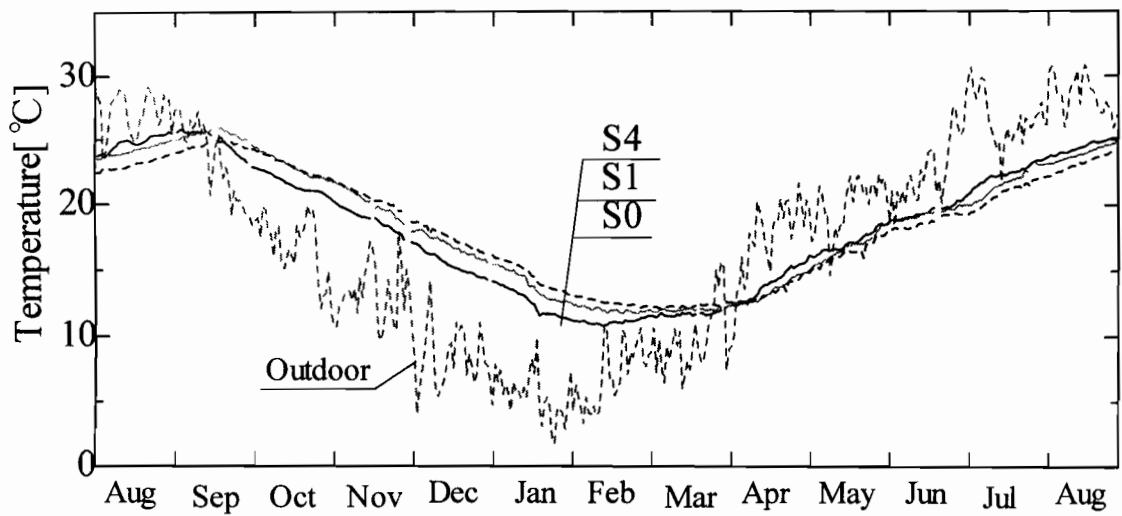


図4-32 深さ2.0mの地盤内温度年変動

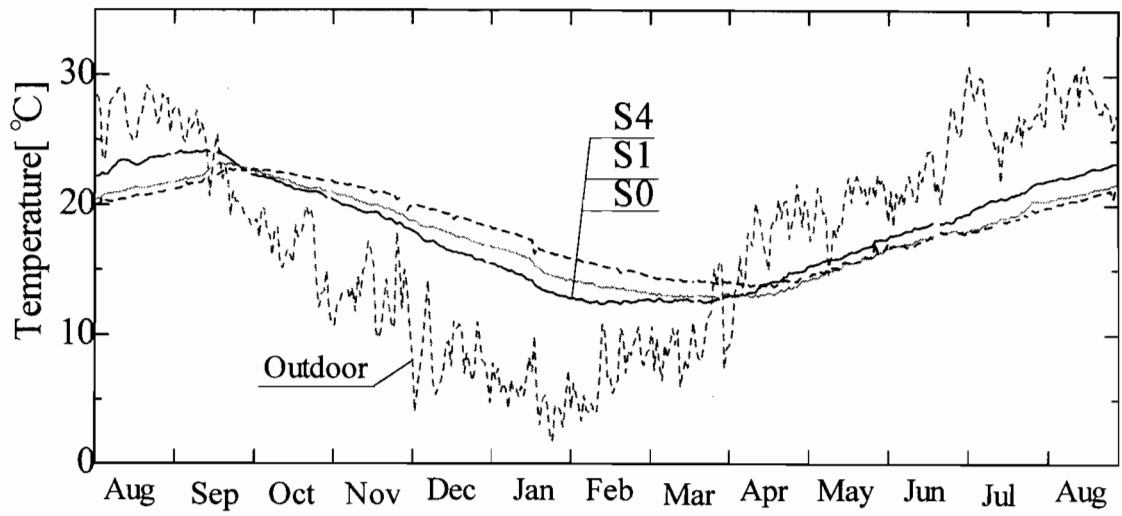


図4-33 深さ3.0mの地盤内温度年変動

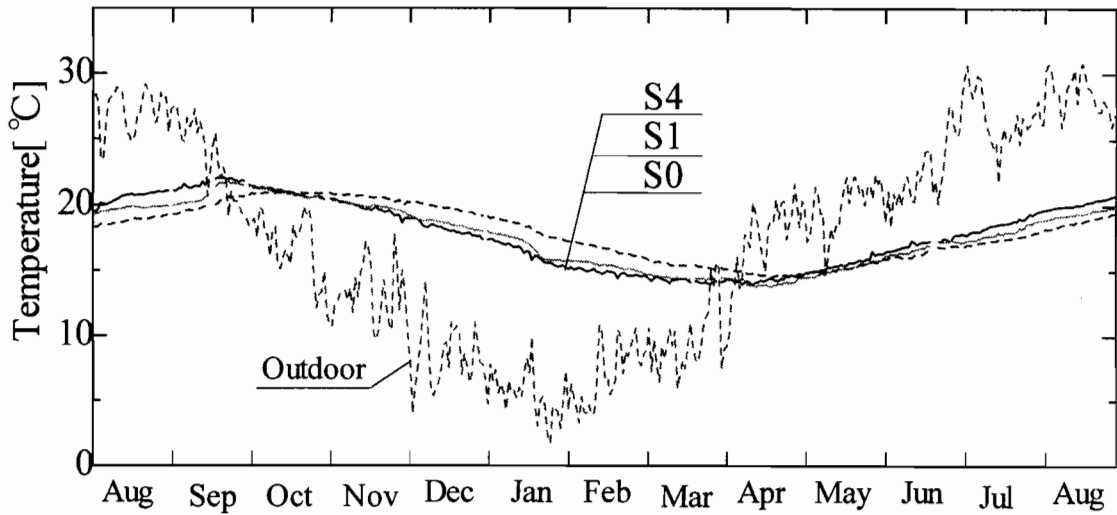


図4-34 深さ4.0mの地盤内温度年変動

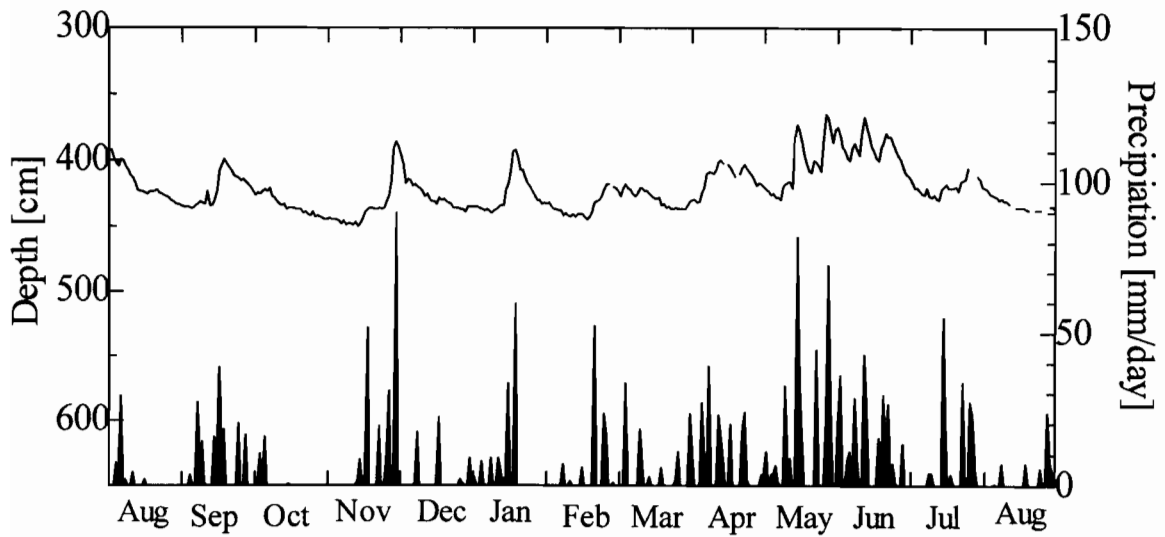


図4-35 地下水位の年変動

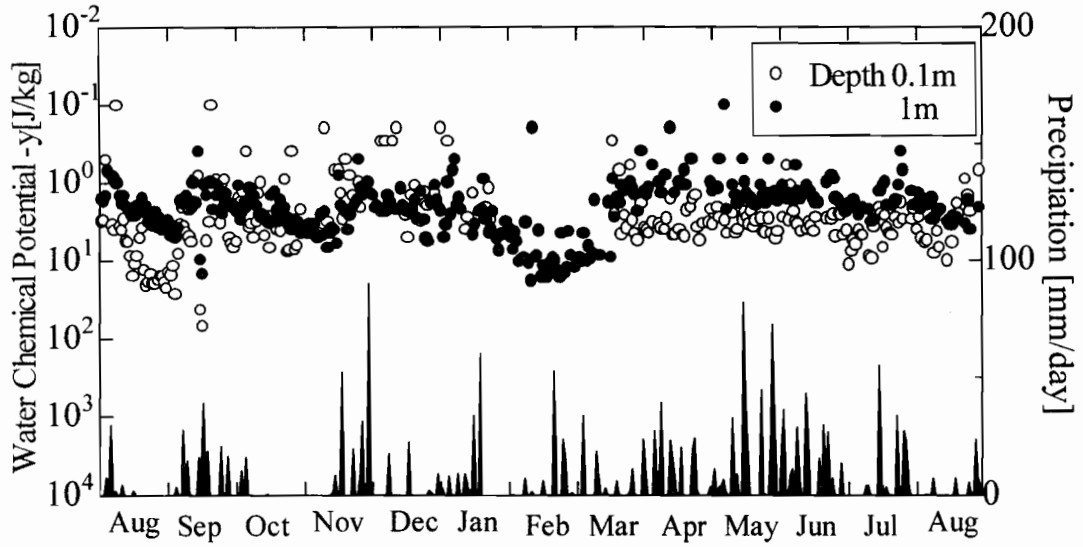


図4-36 S0地点の地盤内水分化学ポテンシャル年変動(0.1,1.0m)

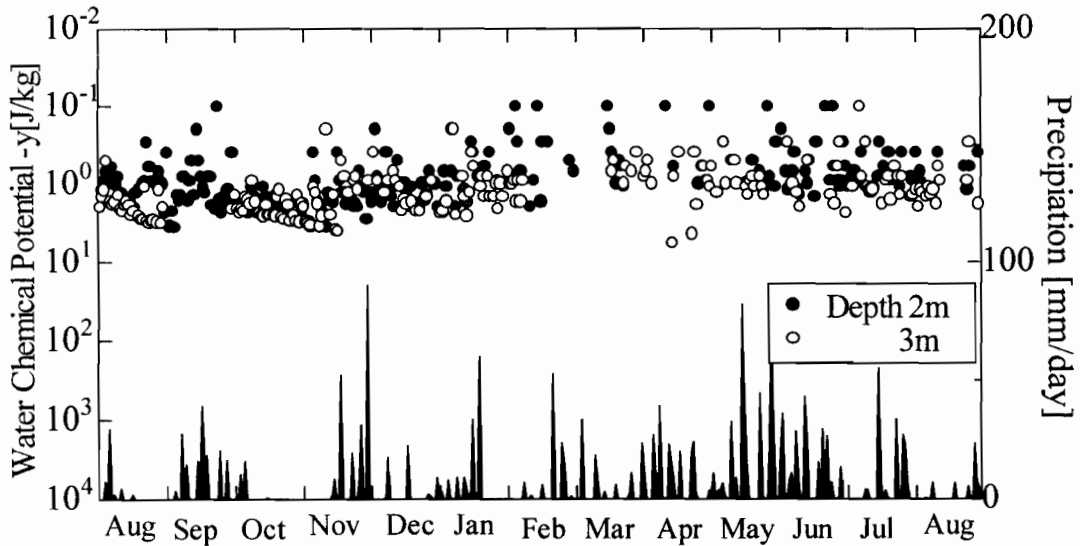


図4-37 S0地点の地盤内水分化学ポテンシャル年変動(2,3m)

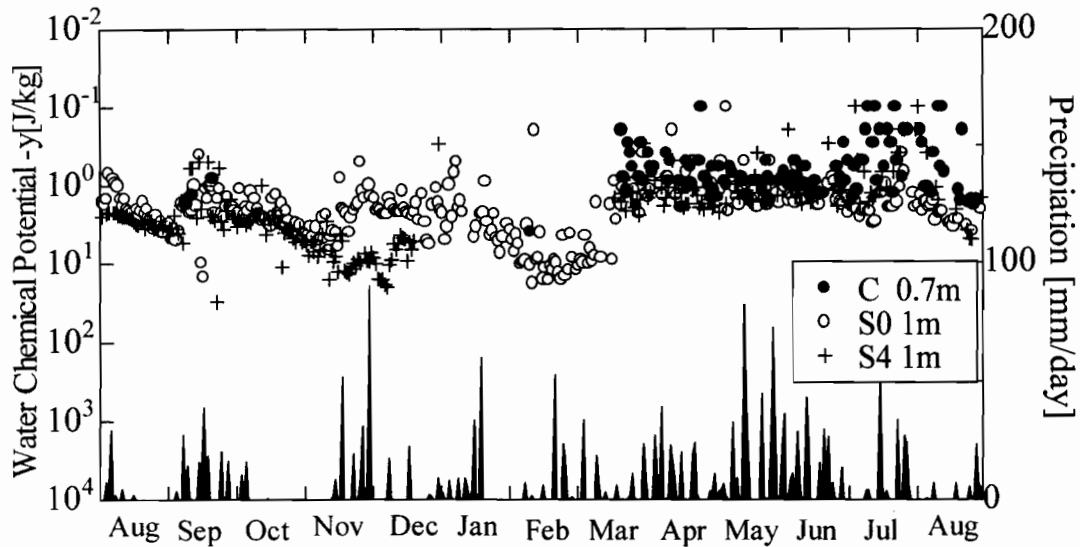


図4-38 深さ1m 近傍の地盤内水分化学ポテンシャル年変動

3mではこの影響がさらに大きくなっており、4mでは位相遅れが1ヶ月程度生じている。深さが0.5m程度では、地盤内温度は水平方向の違いは現れず、鉛直一次元的挙動を示し、地下室より深い地盤では、周辺地盤にその影響が現れている。また地盤内温度の年平均値はS0地点、S4地点の深さ3mでそれぞれ、17.7℃、18.1℃であった。地下室が地盤内温度の年平均値にも影響を与えていることを示している。

図4-35に常水面深さの年変動を示す。同図に降雨の年変動も併せてしめす。年間を通じて、降雨量に応じて常水面が上昇しており、水位の変化は降雨量の多い5月に最大となり85cm上昇した。常水面深さは降雨による上昇以外では特に周期性等はみられない。年平均常水面深さは4.2mであった。図4-36,37にそれぞれS0地点の各深さの水分化学ポテンシャルの年変動を示す。降雨量が多いと値が上昇し、降雨後に低下していく様子がみてとれる。深さ0.1mにおいてその変動がよくわかる。深さ2,3mでは年間を通じて安定している。地表面に近いほど、降雨の影響を大きく受け変化が大きい。深くなるほど年間を通じて安定した挙動を示していることがわかる。水平方向の分布をみるため、地下直上(深さ0.7m図中C)、S0、S4地点(深さ1m)の水分化学ポテンシャル変動を図4-38に示す。Cのみ深さが違うので単純な比較ができないが、全体的に地下室直上(c)、地下室外壁に接する土壌(S0)、さらに離れた土壌(S4)という順の水分化学ポテンシャルの値で変動しており、地下室直上における水分が蓄積し、側壁を流下している可能性が高い。

#### 4-7 第4章のまとめ

本章では地下室の熱・湿気環境形成に対して地盤内水分場及び躯体の吸放湿が与える影響を実験測定から明らかにすることと、第2章で示した解析法による定量的な検討を行うための基礎データの取得を目的として、実験用に完全に埋設された地下室を建設し、自然状態下(室内発熱、水分発生なし)の地下室の温・湿度性状及び周辺地盤の熱・水分場の実験について述べ、測定結果から地下構造物の温・湿度性状、結露性状及び地盤の熱・水分性状について把握を行った。その結果、以下の結論を得た。

1. 地下室内温度は、最高27℃、最低9℃と安定した温度環境であった。室内相対湿度は室温が外気温よりも低くなる春期から夏期にかけて90%を越える日が多く、冬期は40%程

度まで低下した。

2. 夏期の地下室内湿度に対して、結露発生による水分を含めた壁体の吸放湿の与える影響が大きい。
3. 地下室の部位別の表面結露は床面及び壁面における発生期間が最も長かった。また室内相対湿度が100%に1日程度維持されると天井面を含む全壁面で結露が発生することもあった。結露発生の危険性は4～6月に高く、10～3月は発生しなかった。
4. 地盤内温度は地表面の日射吸収、降雨後の水分蒸発の影響を受けた変動を示し、地下室から4m離れた地点の地盤内温度と外気温の年平均値はそれぞれ18.1℃、16.5℃であり、その差は1.5℃生じた。地下室内温度の年平均値は17.1℃となり、両者の間の値であった。
5. 地盤内水分化学ポテンシャルは地表面近傍で降雨の影響を受け変動が大きく、2,3mでは安定した変動を示した。
6. 地下室天井上の地盤に水分が蓄積し、壁面を流下している可能性が高い。
7. 常水面は年間を通じて降雨量に応じた変動をした。降雨量の多い5月に最大で85cm上昇し年平均常水面深さは4.2mであった。

## 第5章 完全埋設型地下室および周辺地盤の 熱・水分性状の解析

### 5-1 はじめに

本章では、地下構造物の熱・湿気性状の一般的予測法の確立を目的とする。前章では、完全に埋設された実験地下室を用いた年間実測により地下構造物及び周辺地盤の熱・水分性状についての定量的把握を行った。ここではこの実測条件のもとで、第3章で示した熱水分同時移動理論を基礎とした解析法による理論解析を行う。そして解析によって得られた結果と実測結果の比較・検討を行い、本解析法による地下構造物及び周辺地盤の熱・水分性状が十分な精度で予測可能であることを示すとともに、地盤及び壁体の物性値の違いによる結果への影響について検討する。

### 5-2 計算条件

#### 5-2-1 解析対象

解析対象は図5-1に示すように地下室を含めた地盤系（前章図4-2参照）を水平方向に対称となるように四分割したものの一つとした。なお、実測結果より地下室空気の温度、水蒸気圧分布が、それぞれ最大1.5℃、100Pa程度の範囲内であることから、室空気は一様と判断し、各壁面表面中央部の温度の差が0.3℃以内かつ土壌組成が水平方向でほぼ一様であることから、地下室の中心軸で水平方向に対称であると判断した。

地下室の寸法は実験用地下室と同じ、長軸内法長さ3.5m、短軸内法長さ2.0m、内法高さ2.0mである。天井、側壁のコンクリート厚さは実験用地下室と同じ0.25mとした。床はコンクリート厚さ0.3m、床下の捨てコンクリート、砕石地業があわせて厚さ0.3mが敷かれているので、床と捨てコンクリート、砕石地業をまとめて厚さ0.6mのコンクリートがあるものとした。水平方向に対する境界面は地下室外壁面から8mとし、地盤底部境界面は深さ11.5mとした。

## 5-2-2 境界条件

境界条件は、地表面及び地下室内側表面では第3種境界条件、地盤底部では第1種境界条件、また地下室中央の対称となる鉛直面及び遠方地盤鉛直面では断熱・断湿とする第2種境界条件とした。ただし地表面及び壁体室内側表面で水分化学ポテンシャルが $-1(\text{J/kg})$ 以上の時は飽和状態とし、水分に関して第一種境界条件( $\mu = -1(\text{J/kg})$ )とし水分の蓄積は考えない。飽和時の水分化学ポテンシャルは $0(\text{J/kg})$ であるが、水分容量項が0に近づくため計算上の発散が生じやすいのでこれを避ける目的で $-1(\text{J/kg})$ とした。飽和状態の水分化学ポテンシャルを $-1(\text{J/kg})$ にしたことが解析結果に与える影響が無いことを、別途計算により確認している。

外界気象条件は、現場で測定された全天日射量、外気温、外気相対湿度の他、津気象台にて観測された降雨量、雲量を用いた。計算には測定値の間の時間では、測定値を直線内挿した値を用いる。現場実測値の欠測時には、外気温、外気相対湿度は津気象台にて観測された値を用いた。全天日射量は1998年1月～6月において約2/3の期間が欠測であった。津気象台では全天日射量は測定されていないが、時別日照時間は測定されている。そこで二宮らの手法[49]により津気象台の時別日照時間を用いて全天日射量を推定し、その結果、現場実測値と推定値は相関係数が0.87とほぼ一致した。従って欠測期間の補間として十分使用可能であると判断し、全天日射量の欠測時はこの推定値を用いた。夜間輻射は、雲量補正した以下のBruntの式[50]を用い、雲量は津気象台測定値を用いる。

$$\begin{aligned} q_c &= \varepsilon(E_s - E_{ob}) \left(1 - k_c \frac{c_p}{10}\right) \\ &= -\varepsilon\sigma T_o^4 \left(0.474 - 0.075\sqrt{f}\right) \left(1 - k_c \frac{c_p}{10}\right) \end{aligned} \quad (5-1)$$

ここで、 $q_c$ は低温輻射 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 $\varepsilon$ は地表面の輻射係数[-]、 $E_s$ は大気の輻射能 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 $E_{ob}$ は完全黒体とした外気の輻射能 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 $c_p$ は雲量(0～10の値をとる)、 $k_c$ は雲量補正係数(本解析では0.75を使用)、 $\sigma$ はStephan-Boltzman 常数 $=5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2 \text{hK}^4]$ 、 $T_o$ は外気温 $[\text{K}]$ 、 $f$ は外気水蒸気圧 $[\text{mmHg}]$ を表す。



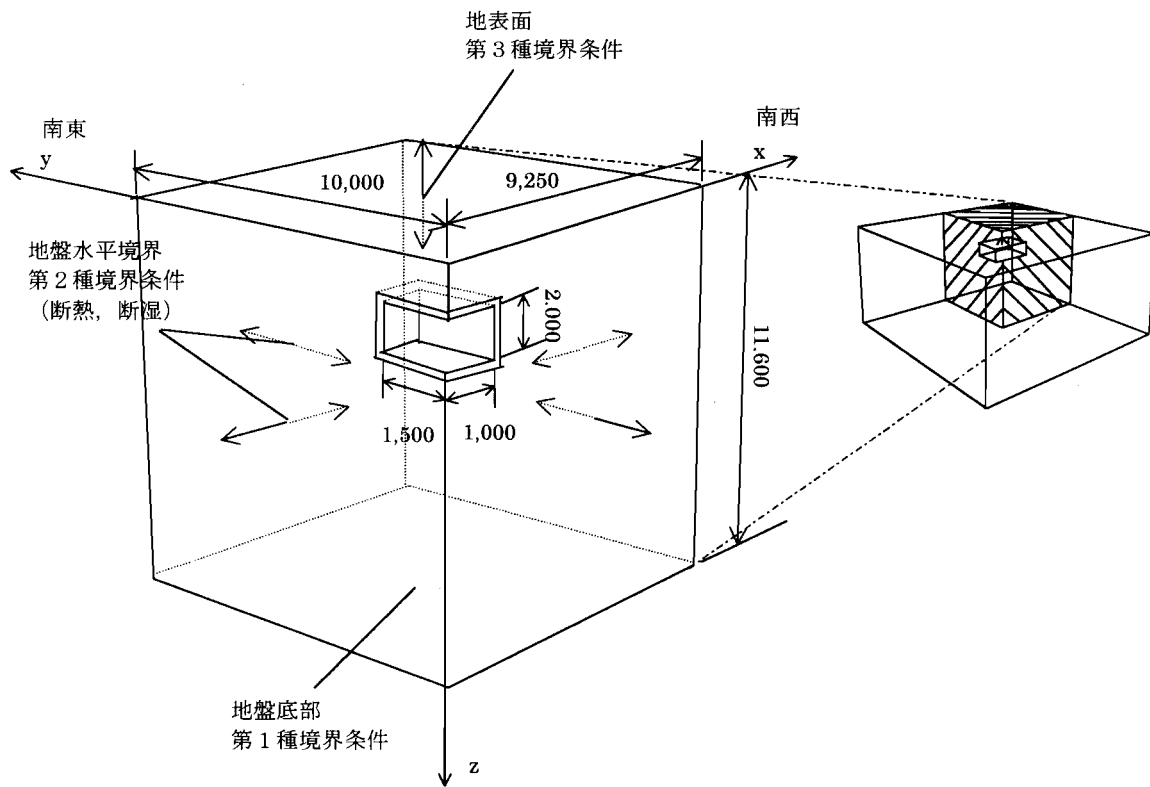


図5-1 解析対象の概要

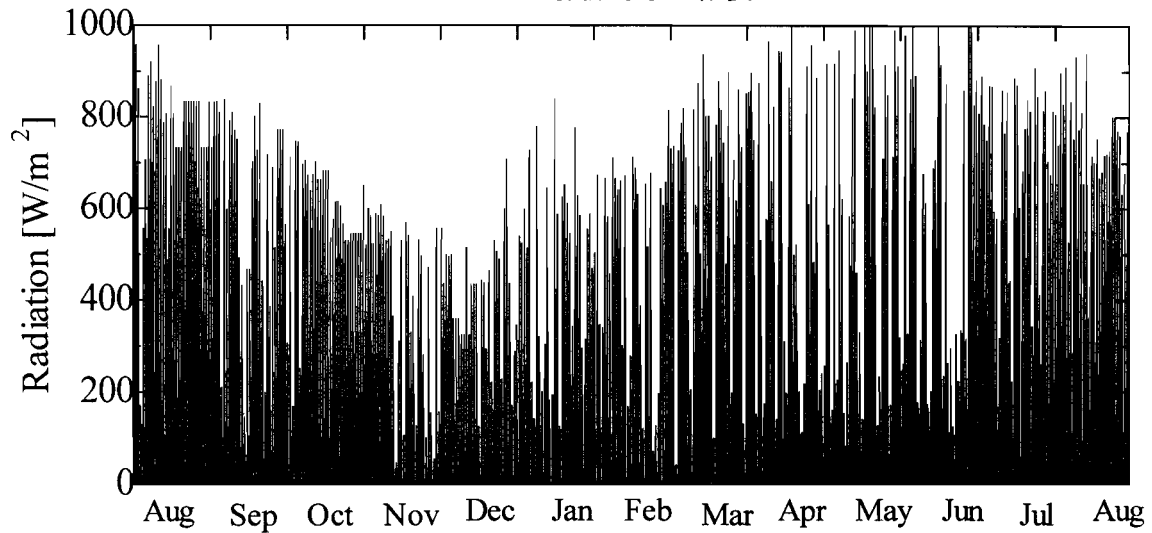


図5-2 欠測の補完を行った全天日射量年変動

図5-2,3にそれぞれ解析に用いた全天日射量, 雲量を示す。

地盤底部境界の温度は, 実測結果から地盤内平均温度を以下のように求めて深さ11.5mで17.9℃を与えた。地下室の影響が比較的小さいS4地点の地盤内温度実測値の年平均値は17.8℃~18.1℃の範囲であった。これの平均をとって地盤内平均温度とした。水分化学ポテンシャルについては以下の検討より決定した値を与える。実測結果により常水面位置

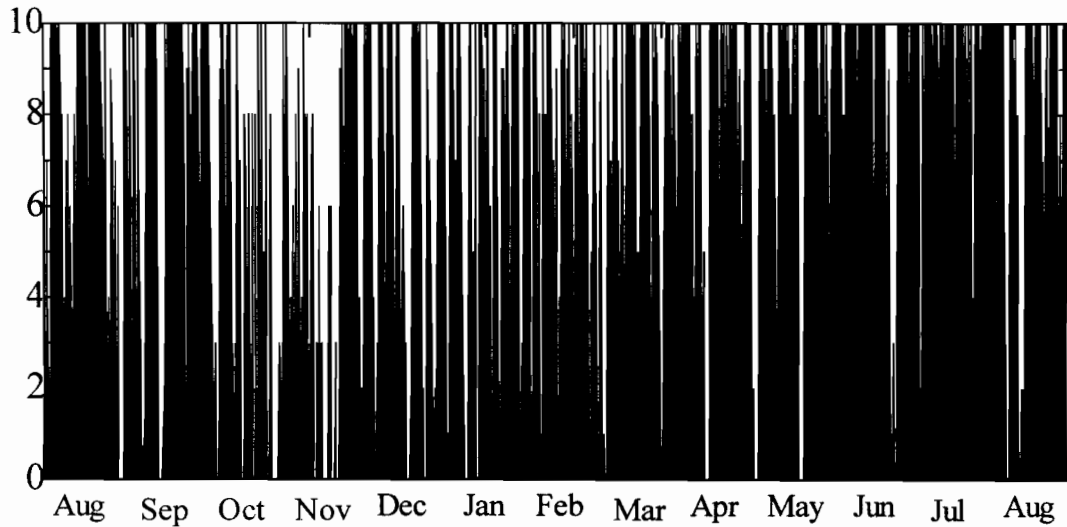


図5-3 雲量の年変動

は年間で最大 85cm 変化した。この常水面位置の変化の影響を検討するため、本解析と同一条件下で常水面位置を 4.15m と 5m の場合について年間一定値として 1次元地盤の熱水分同時移動解析を行った。その結果、地盤内熱水分性状に関して両者の違いはほとんど見られなかった。従って、常水面深さの変動の影響は小さいといえることから、水分化学ポテンシャルに関しては年平均常水面位置 4.33m より深い地盤で  $-1(\text{J}/\text{kg})$  を与えた。

地下室の換気回数は実験条件に合わせて、1997年9月30日までは  $10[1/\text{h}]$  を、それ以降は  $5[1/\text{h}]$  とした。

### 5-2-3 初期条件

初期条件は 1997年8月2日 16:00 の地下室内温度及び相対湿度、地盤内温度、地盤内水分化学ポテンシャルの実測値を用いて以下のように決定する。地下室内温度及び相対湿度の初期値は実測値を用いる。地盤及びコンクリート壁体内の温度は実測が行われている地点の深さ  $0[\text{m}]$ 、 $0.05[\text{m}]$ 、 $0.1[\text{m}]$ 、 $0.5[\text{m}]$ 、 $1[\text{m}]$ 、 $2[\text{m}]$ 、 $3[\text{m}]$ 、 $4[\text{m}]$  の地盤内温度の実測値を鉛直方向に直線内挿し、これをさらに水平方向に直線内挿あるいは一定値として与えることにより、全点の温度を決定する。水分化学ポテンシャルについても同様にして与えた。

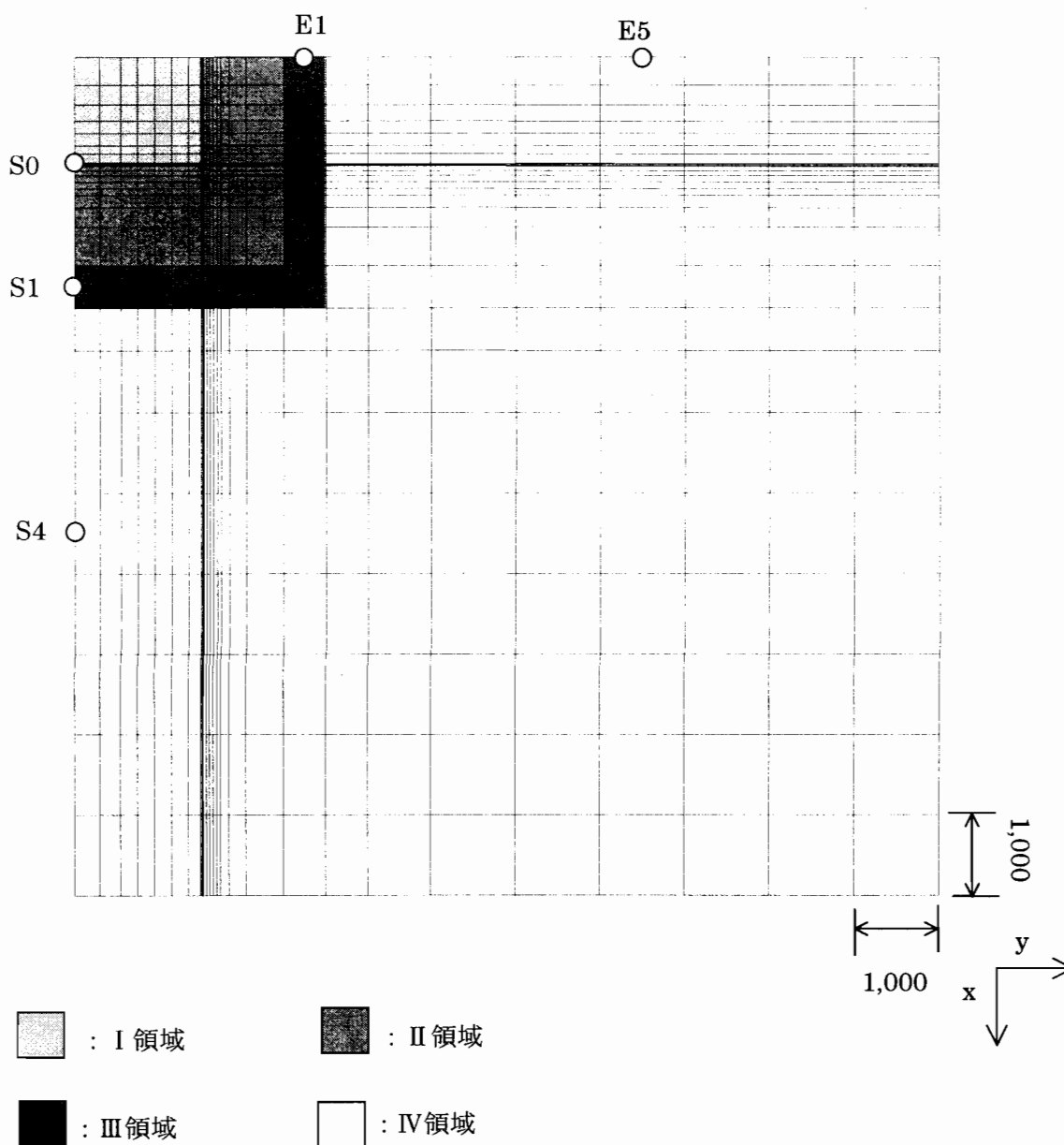


図5-4 温度の初期条件の分布状況（水平方向）

地盤内温度及びコンクリート壁体内温度の初期条件分布状況を図5-4に示す。図中の各領域の初期条件は以下に示す通りである。

I領域：S0地点の地盤内温度測定値を鉛直方向に内挿した値を水平方向に一樣として与える。

II領域：I領域の鉛直分布とIII領域の鉛直分布を水平方向に内挿した値とする。

III領域：S1地点とE1地点の地盤内温度測定値の平均値を鉛直方向に内挿した値を水平方向に一樣として与える。

IV領域：S4とE5の地盤内温度測定値の平均値を鉛直方向に内挿した値を水平方向には一様として与える。

なお、S0,S1といった地点の位置については、前章の図4-2を参照願いたい。

#### 5-2-4 解析に用いた物性値

第3章で述べたように、地表面近傍の土壌はPlainfield Sandと判断され、約1m以深では、シルト混じり砂あるいはシルト質砂と判断された。この結果から、地表面から深さ1mまでをPlainfield Sandとし、それより深い土壌は、粒度組成から判断して性質が近いと思われるローム質砂[35]の測定値を用いた。

壁体のコンクリートの物性値はHedenbladの測定値[31]を元に第3章に示したように推定した値を用いる。ただし水分伝導率は水セメント比が増加すると、相対湿度93%以上の高湿度で数値が10倍程度増加し[41]、この違いが室内温湿度に与える影響は大きいことから、あらかじめ妥当と考えられる値を決定し用いる。これら物性値は第3章で示したように水分化学ポテンシャルおよび温度によって変化する。その他の物性値を表1に示す。対流・輻射熱伝達率は環境工学で一般的に用いられる数値であり、湿気伝達率はLewis関係[25]により対流熱伝達率から求めた値を用いる。なお、室内側、外気側対流熱伝達率について、それぞれ感度解析を行い、本実験条件下では地盤内熱・水分場、地下室温・湿度に対する影響が小さいことを確認した。日射吸収率はアルベド測定値の平均値から算出した値を用いる。アルベドは、降雨による地表面含水状態の変化に伴い変動を示すが、これの変化に対する感度解析を行い、本実験条件下では地盤内熱・水分場に対する影響が小さいことを確認した。

#### 5-2-5 計算方法

計算方法は、前進型有限差分法を用いた。基礎方程式の差分化は第3章に示した通りである。空間刻みは、地盤に関しては鉛直方向で0.025m～1mを、壁体に関しては壁厚方向で0.005m～0.05mをとり、質点総数は室空気を含めて39459点である。なお空気に接する境界表面の空間刻みは結果に与える影響が大きいため、あらかじめ妥当な精度が得ら

表5-1 その他の物性値

項目	(記号)	値	[単位]
空気の熱容量	$(c\gamma)$	1256	$[J/m^3 K]$
空気の湿気容量	$(c'\gamma')$	$7.5 \times 10^{-6}$	$[kg/m^3 Pa]$
地表面輻射熱伝達率	$(\alpha_{ro})$	4.651	$[W/m^2 K]$
対流熱伝達率	$(\alpha_{co})$	18.60	$[W/m^2 K]$
室内側輻射熱伝達率	$(\alpha_{ri})$	5.233	$[W/m^2 K]$
対流熱伝達率 (壁面)	$(\alpha_{ci})$	4.070	$[W/m^2 K]$
対流熱伝達率 (天井面及び床面)		4.360	$[W/m^2 K]$
日射吸収率		0.83	[-]

れる刻みを検討した値を用いた。

壁体表面の妥当な刻みを決定するために、1次元のコンクリート壁体の吸湿・放湿過程について空間刻みを変化させた数値解析を行った。その結果、コンクリート表面の空間刻みは0.005m以下で水分流・熱流ともにほとんど差が無く、この刻みで精度上充分であると判断し、解析でこの値を用いた。

地表面の妥当な刻みを決定するため、1次元地盤の数値解析を本解析と同一の境界条件下で空間刻みを変化させて行った。その結果、地表面近傍の熱水分挙動を日変動含めて詳細に解析するには0.005m程度の刻みが必要であることが分かった。しかし0.5mより深い地盤では地表面0.02mの刻みでも温度、水分化学ポテンシャル共にほとんど変化がなかったことから、この刻みで十分な精度の計算が可能と判断し、解析でこの値を用いた。

時間刻みは通常15秒とし、降雨時及び降雨後の4時間は地表面における計算の発散を防ぐために5秒とした。

### 5-3 実測結果と解析結果の比較・検討

#### 5-3-1 地下室内温・湿度

図5-5に地下室内温度の日平均値の年変動についての実測値と解析値の比較を示す。図5-5より地下室内温度の計算値は実測値とよく一致している。秋期から冬期にかけて、やや計算値が実測値より低くなるが最大でも1℃程度、年平均値で0.2℃である。図5-6～9

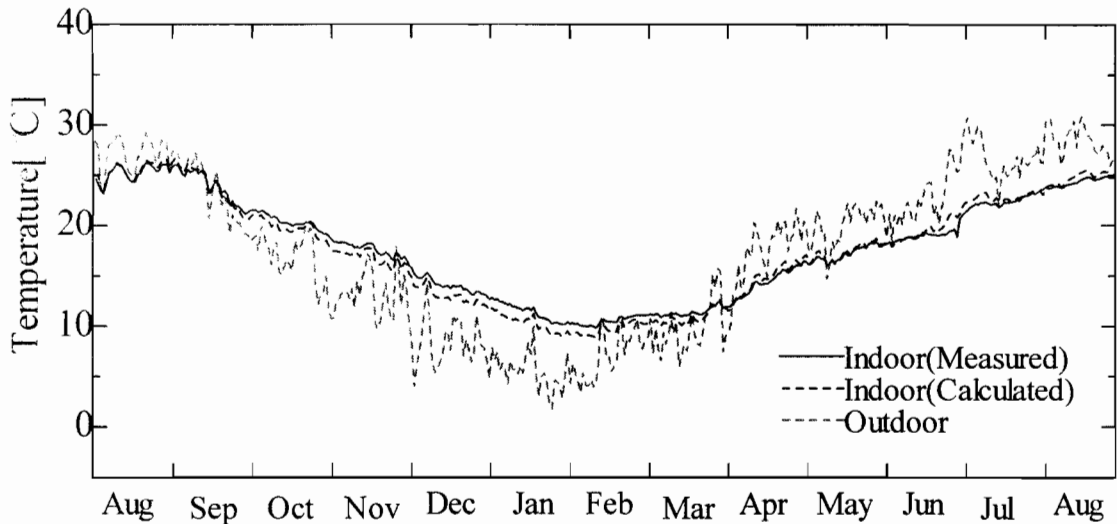


図5-5 地下室内温度年変動（日平均値）の実測値と解析値の比較

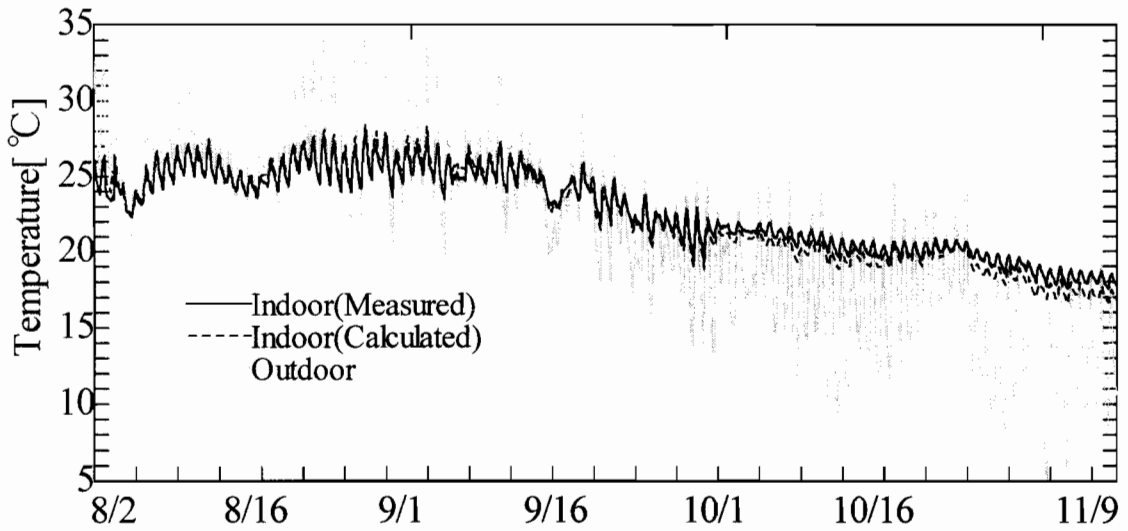


図5-6 地下室内温度変動の実測値と解析値の比較('97/8/2～'97/11/9)

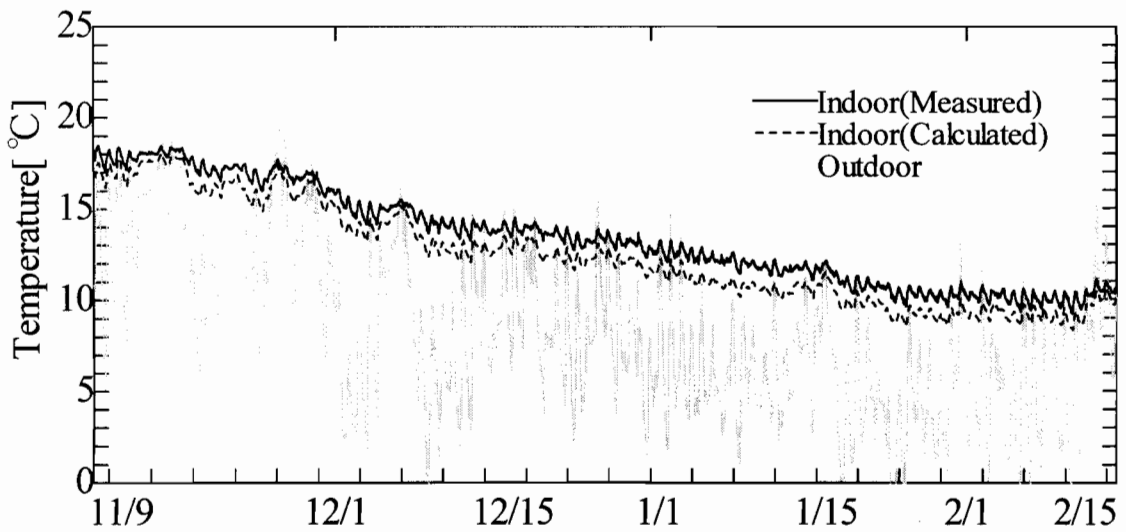


図5-6 地下室内温度変動の実測値と解析値の比較('97/11/9～'98/2/15)

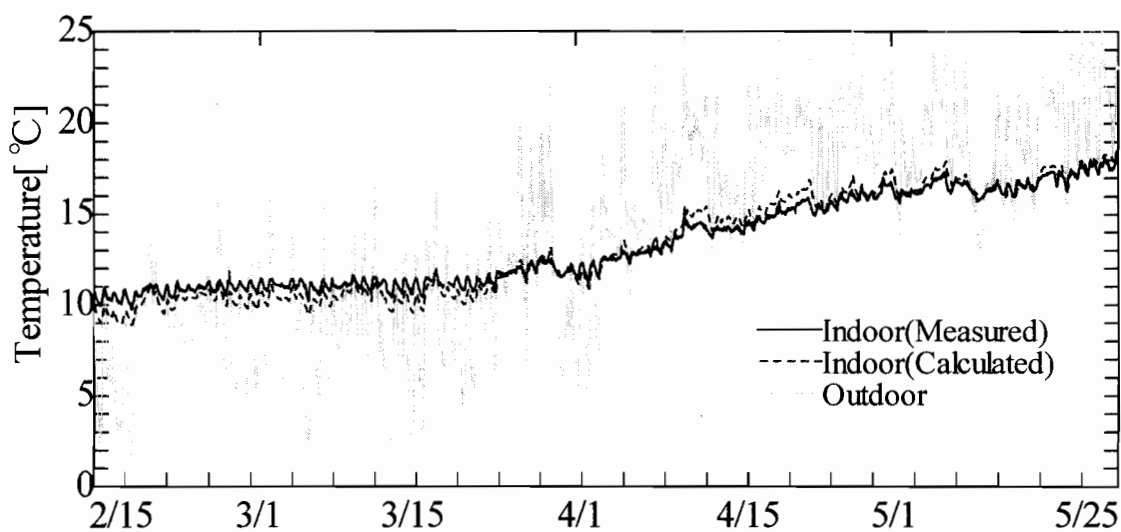


図5-8 地下室内温度変動の実測値と解析値の比較('97/2/15 ~' 98/5/25)

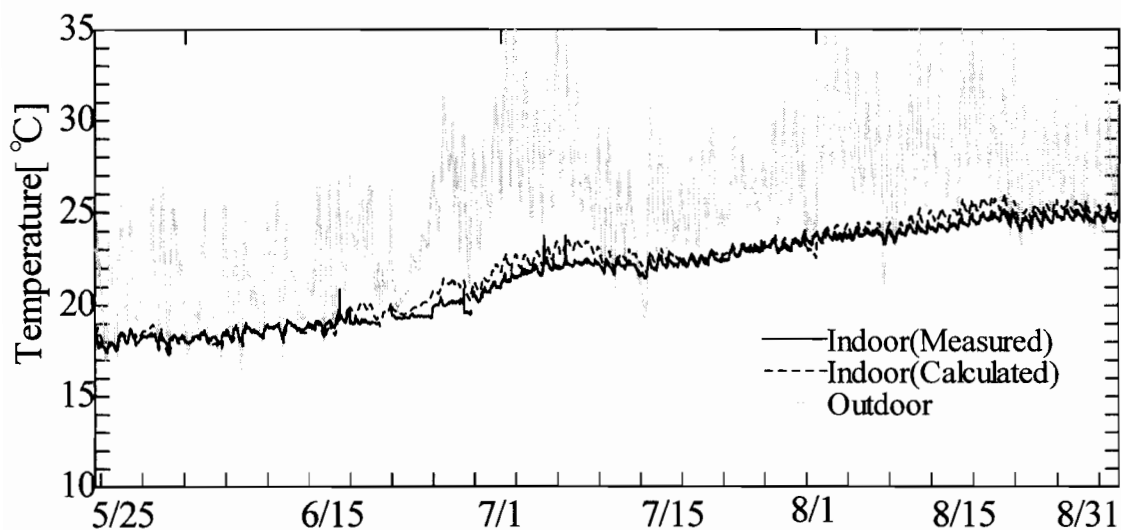


図5-9 地下室内温度変動の実測値と解析値の比較('98/5/25 ~' 98/8/31)

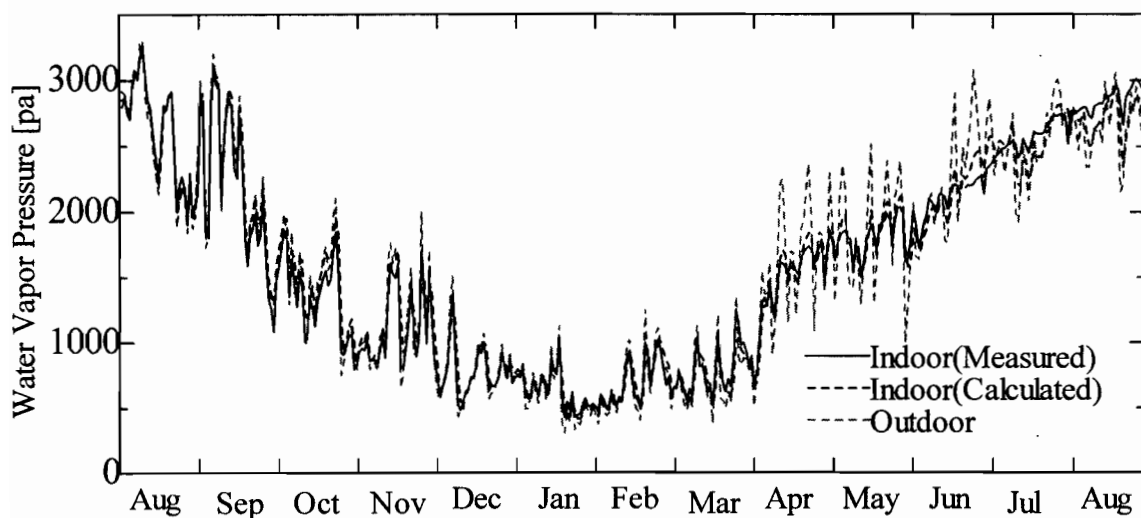


図5-10 地下室内水蒸気圧年変動(日平均値)の実測値と解析値の比較

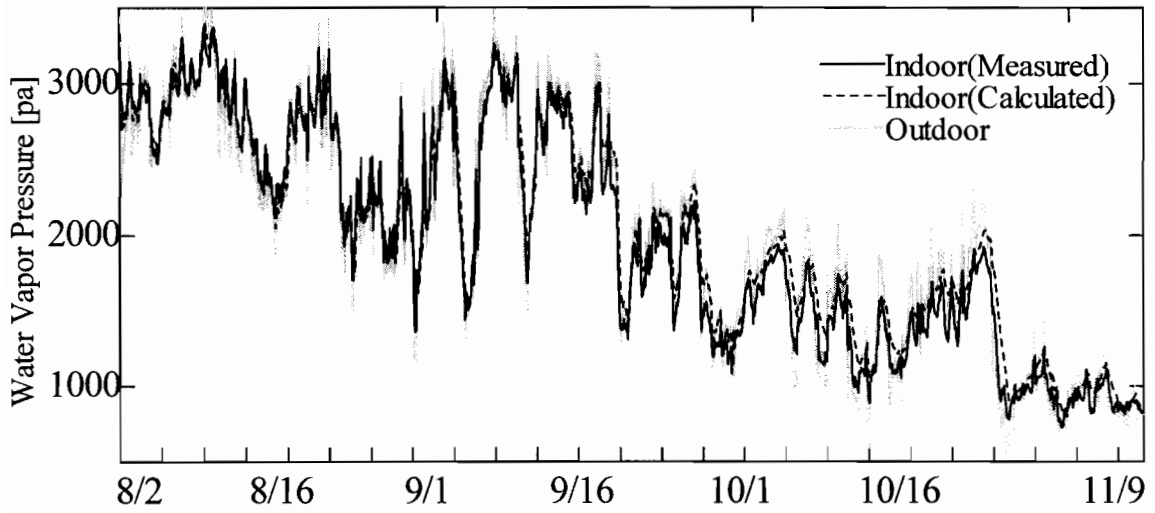


図5-11 地下室内水蒸気圧変動の実測値と解析値の比較('97/8/2 ~' 97/11/9)

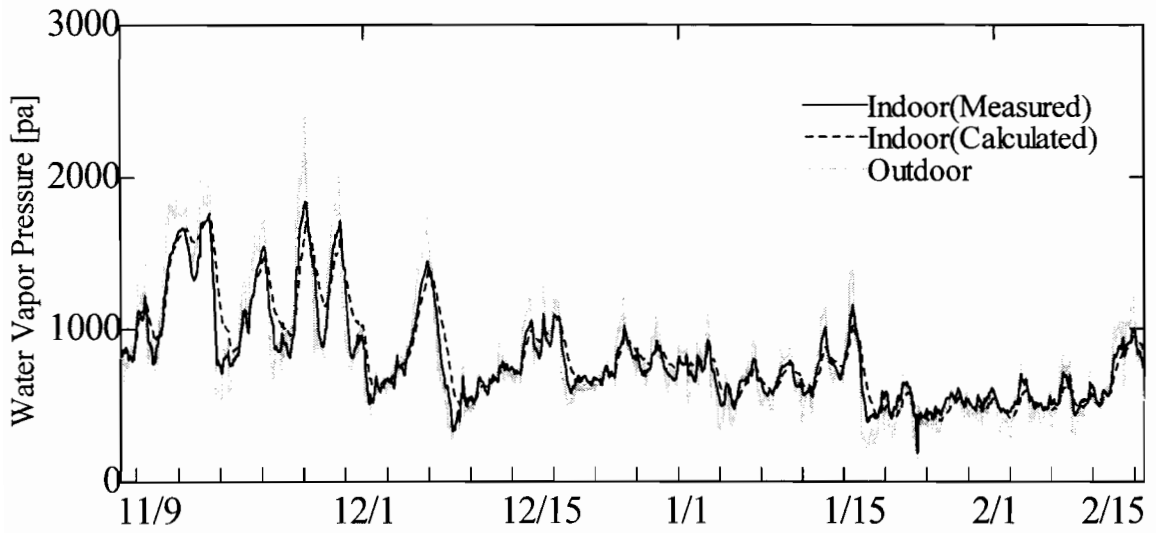


図5-12 地下室内水蒸気圧変動の実測値と解析値の比較('97/11/9 ~' 98/2/15)

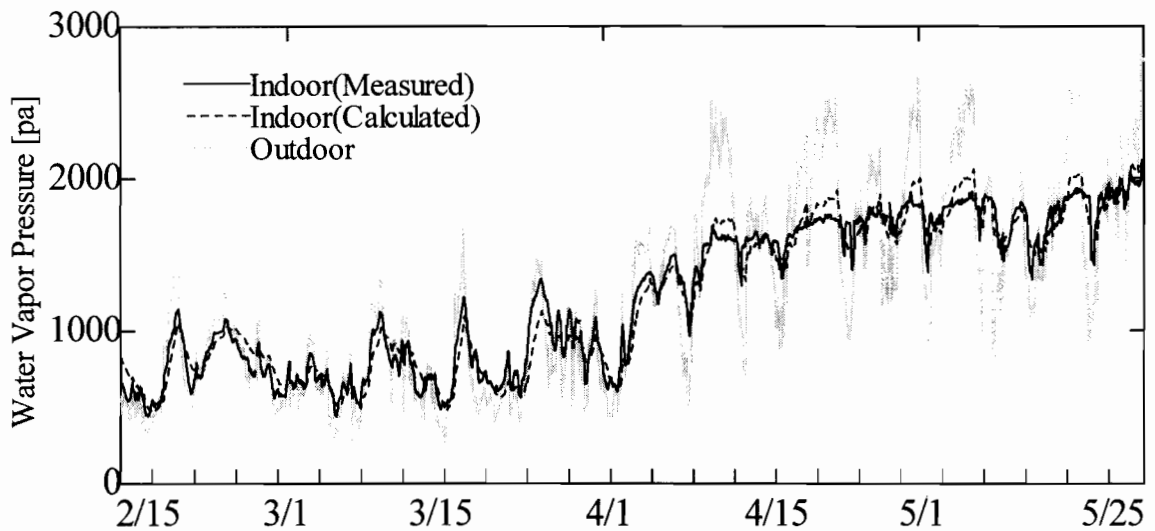


図5-13 地下室内水蒸気圧変動の実測値と解析値の比較('97/11/9 ~' 98/2/15)



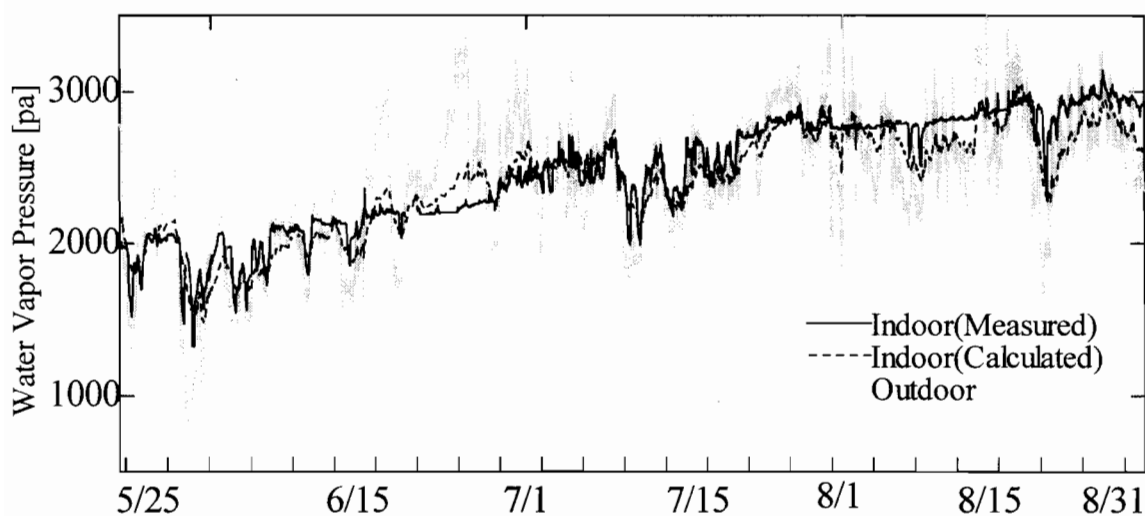


図5-14 地下室内水蒸気圧変動の実測値と解析値の比較('97/11/9 ~ '98/2/15)

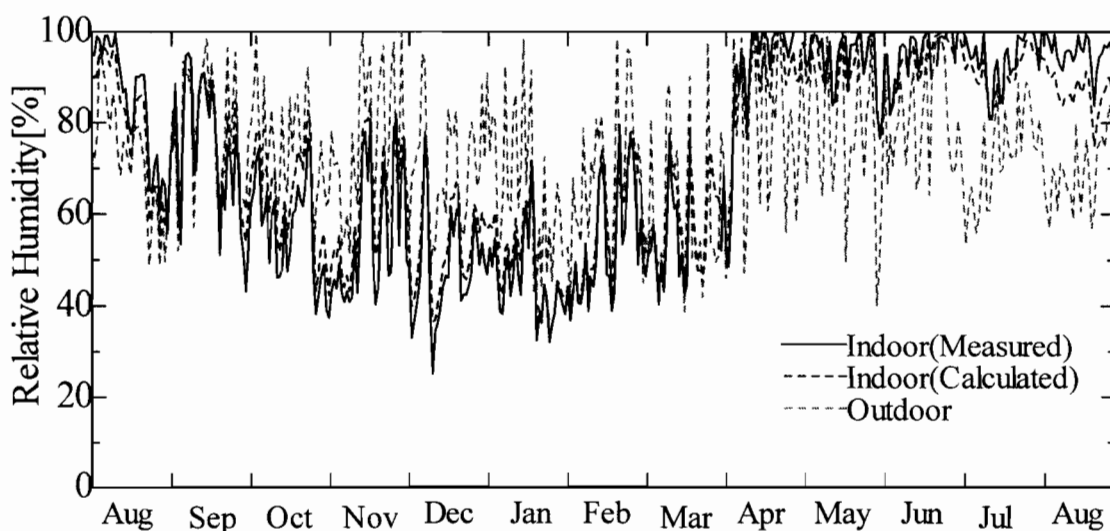


図5-15 地下室内相対湿度年変動（日平均値）の実測値と解析値の比較

に地下室内温度の変動についての実測値と解析値の比較を4つの期間にわけて示す。年間を通じて、解析値の日変動振幅は実測値と一致している。以上より年間を通じて地下室内温度の定量的予測が十分な精度で行えたといえる。

図5-10に地下室内水蒸気圧の日平均値の年変動についての実測値と解析値の比較を示す。図5-6より地下室内水蒸気圧の計算値は実測値とよく一致している。図5-11～14に地下室内水蒸気圧の変動についての実測値と解析値の比較を4つの期間にわけて示す。秋・冬期の変動については外気値と室内値の実測値が近い値である時期であるが、実測値と解析値はよく一致しており、週単位程度の変動もよく再現できている。春・夏期の変動

については室内値が外気値の変動と大きく異なる時期であるが、実測値と解析値は一致がよく、週単位程度の変動もよく再現できている。

図5-15に地下室内相対湿度の日平均値の年変動について実測値と解析値の比較を示す。年間を通じて実測値と解析値はよく一致している。

以上から地下室の熱・湿気性状の定量的予測がよい精度で行えているといえる。

### 5-3-2 地盤内温度

地盤内温度は、まず地表面近傍について実測値と解析値の比較を行う。次に地下室からの熱的影響の比較的小さいS4地点の地盤内部について検討を行い、地下室の影響を比較的大きく受けるS0,S1地点の地盤内部について検討を行う。

図5-16に地表面近傍温度の実測値と計算値の比較を示す。地表面近傍の温度変動は、計算値のピーク温度がやや高いが年間を通じてよい一致を示している。

図5-17～21にそれぞれS4地点の0.5m,1m,2m,3m,4mの地盤内温度の年変動の実測値と計算値の比較を示す。地盤内温度は深さ0.5m,2m,4mのどの深さについても実測値と計算値は位相、振幅ともに一致している。深さ2mにおいて秋期から冬期にかけて計算値が実測値を下回り、最大で2℃程度差が生じた。これが室内温度の誤差に影響していると

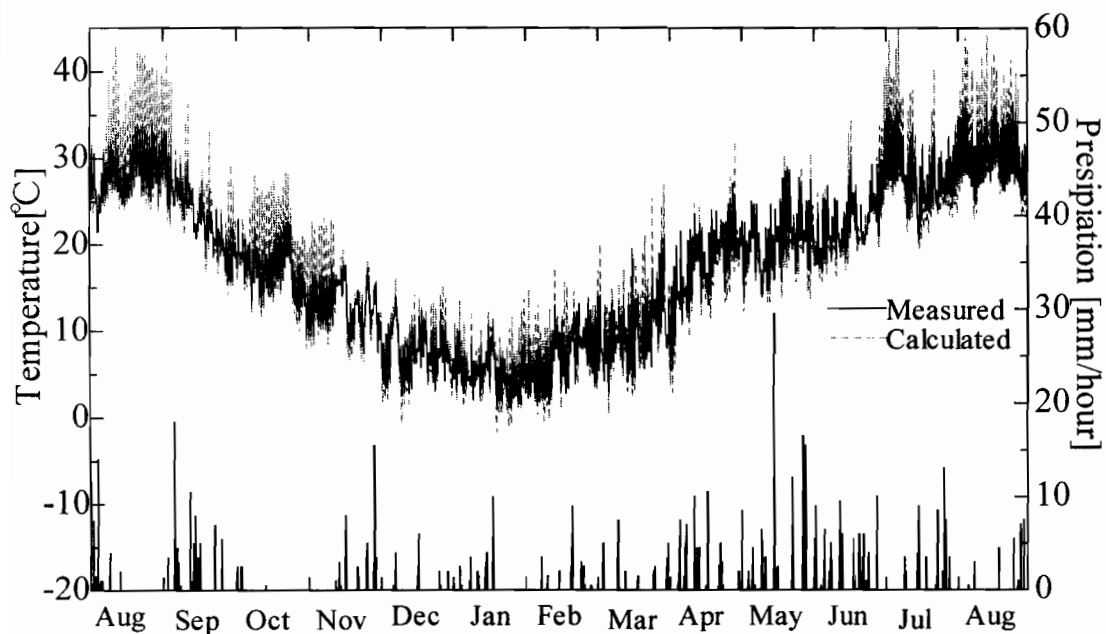


図5-16 地表面近傍温度の実測値と解析値の比較

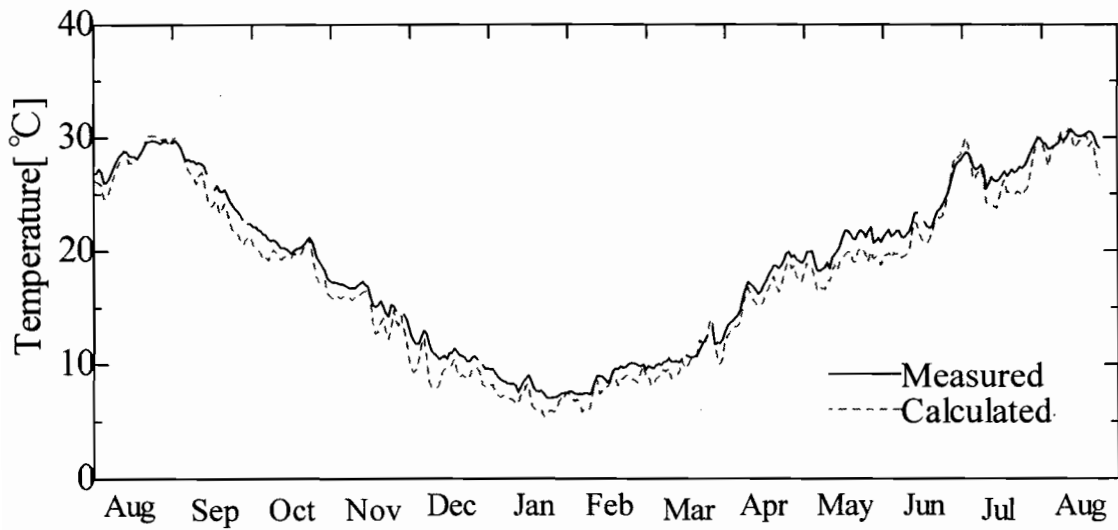


図5-17 S4地点, 深さ0.5mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

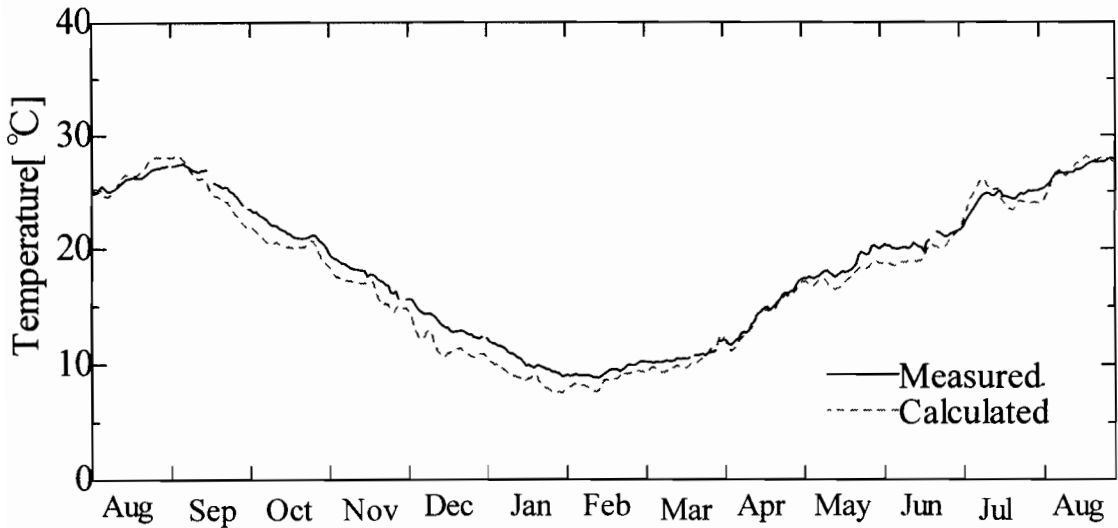


図5-18 S4地点, 深さ1.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

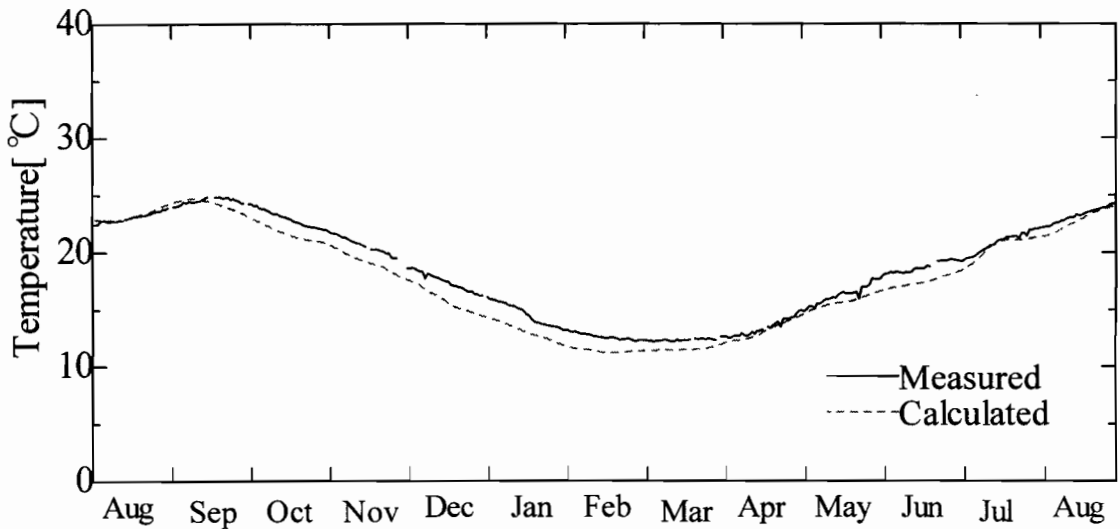


図5-19 S4地点, 深さ2.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

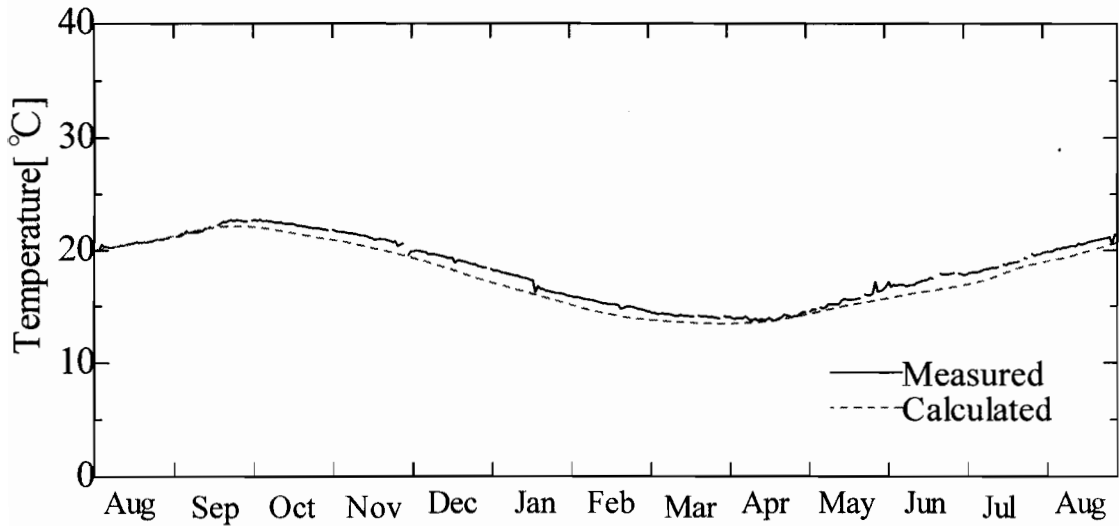


図5-20 S4地点, 深さ3.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

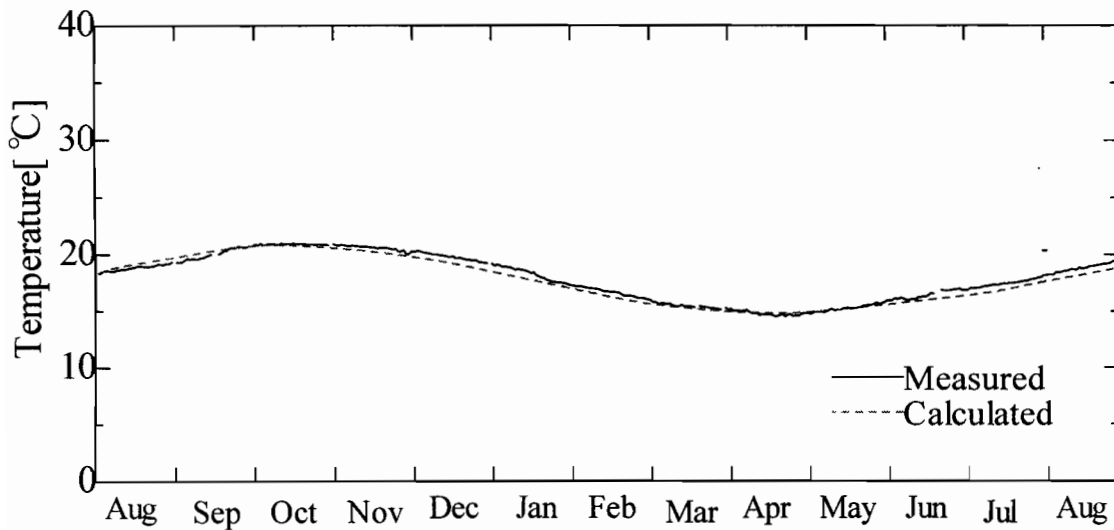


図5-21 S4地点, 深さ4.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

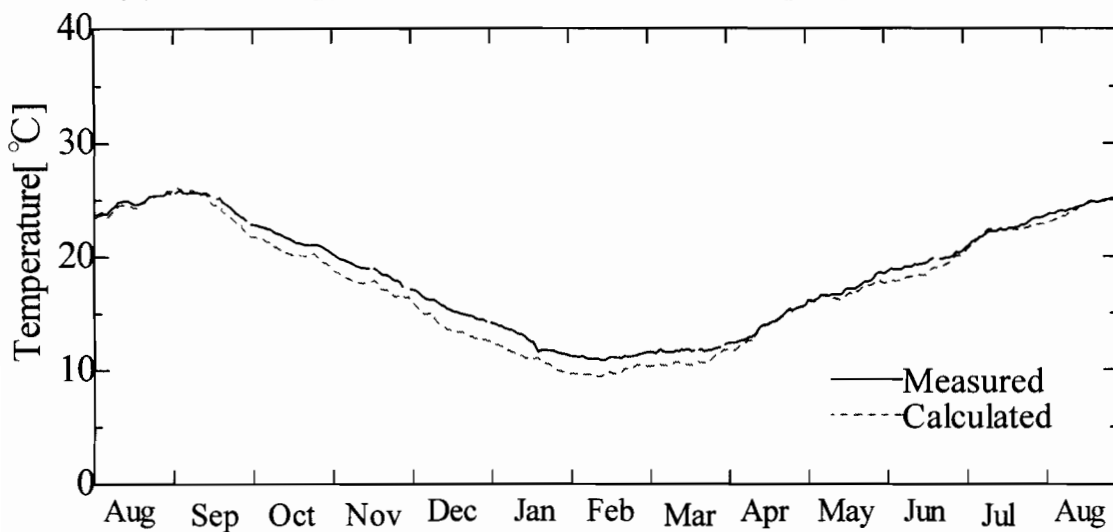


図5-22 S0地点, 深さ2.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

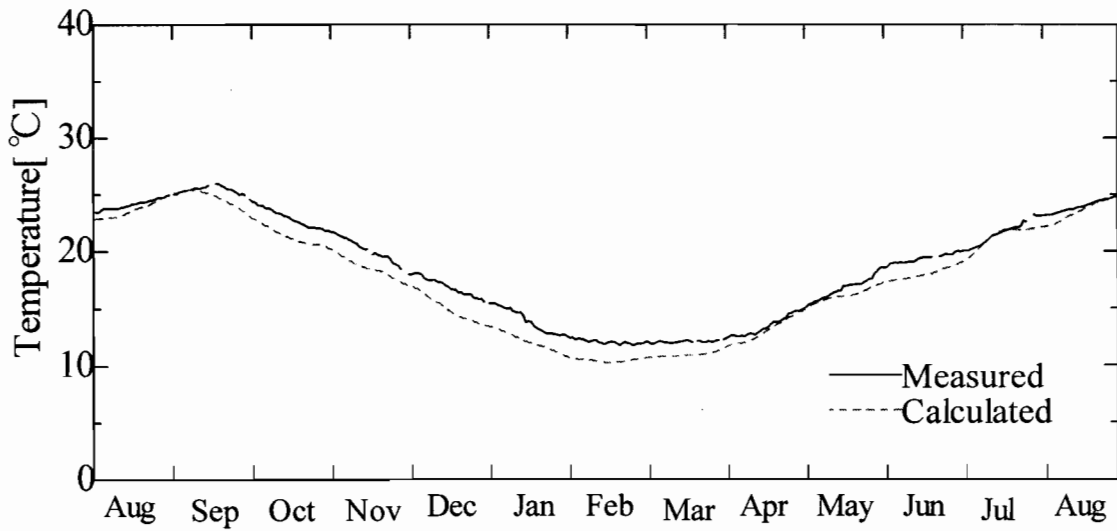


図5-23 S1地点, 深さ2.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

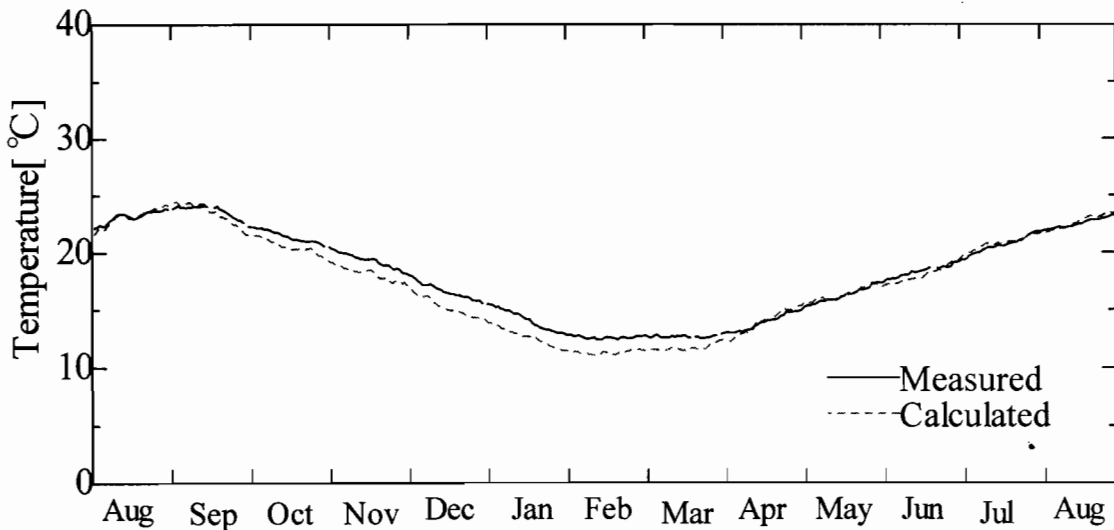


図5-24 S0地点, 深さ3.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

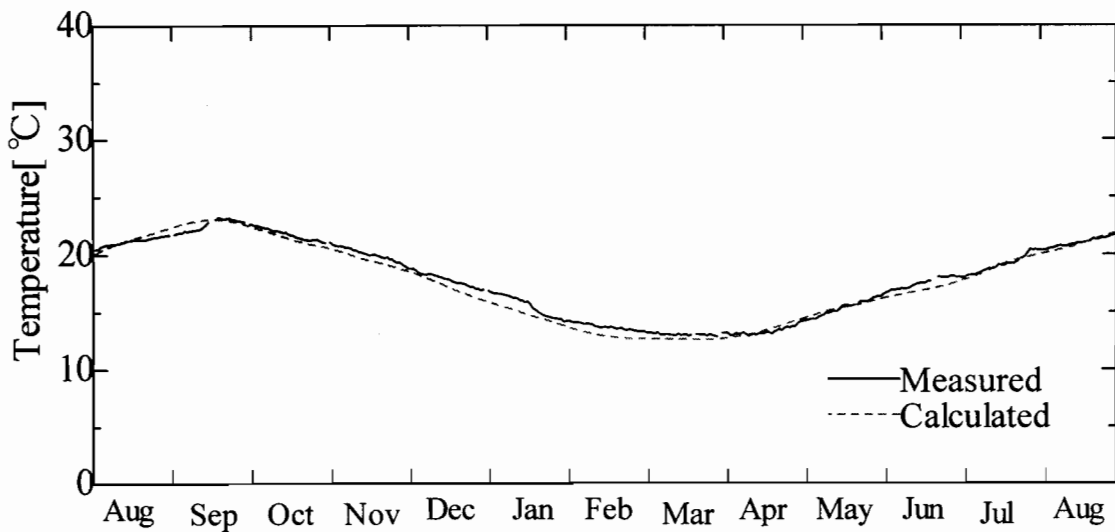


図5-25 S1地点, 深さ3.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

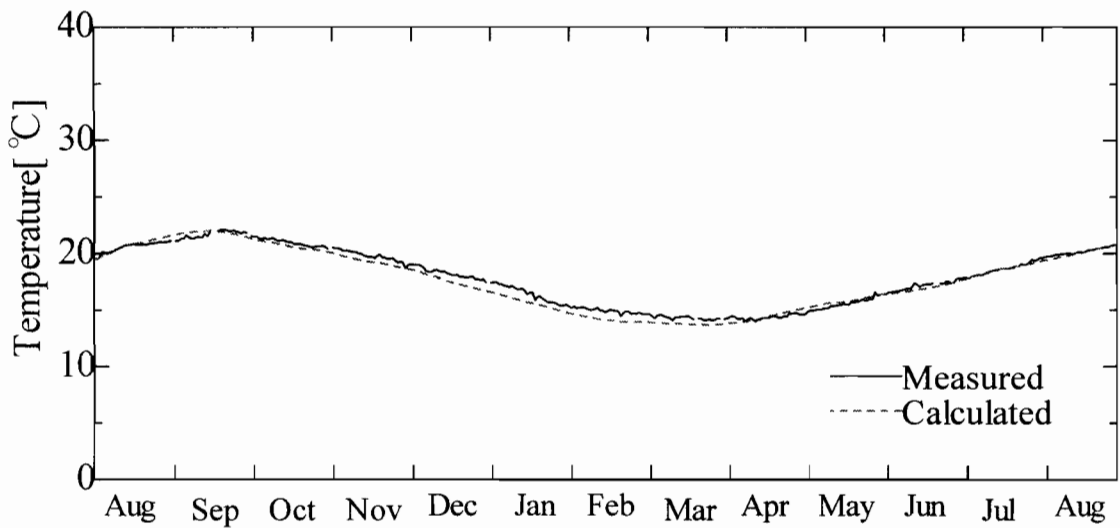


図5-26 S0地点，深さ4.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

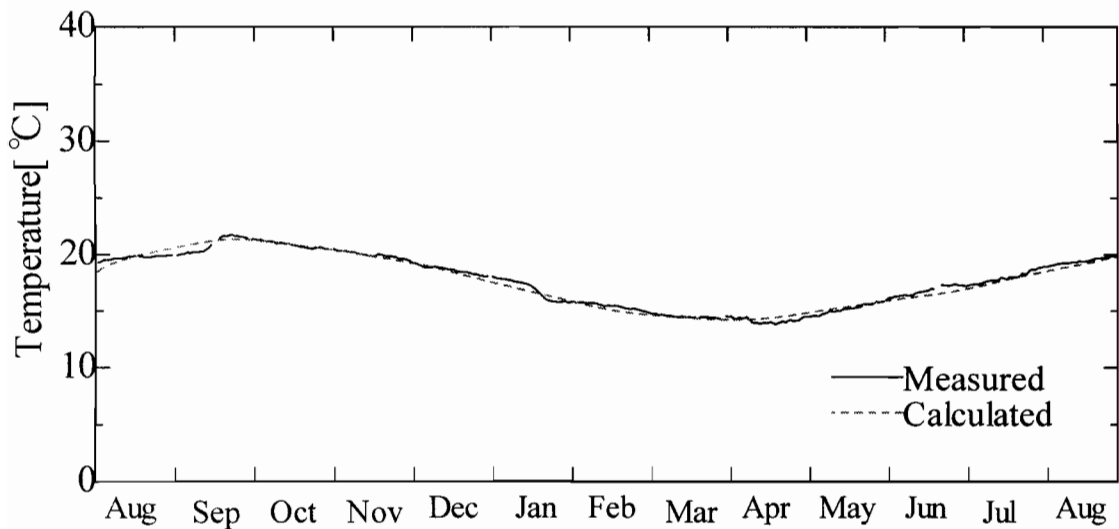


図5-27 S1地点，深さ4.0mの地盤内温度の実測値と解析値の比較

考えられる。

図5-22～27にそれぞれS0,S1地点の2m,3m,4mの地盤内温度の年変動の実測値と計算値の比較を示す。なお，第4章で述べた実測値の検討により，地盤内1m程度の深さまでは地下室の熱的影響は小さいことを確認している。S4地点と同様，どの深さについても実測値と計算値は位相，振幅とも一致している。ただし深さ2mにおいて秋期から冬期にかけて計算値が実測値を下回り，最大で2℃程度差が生じた。

全体的に地盤内温度年平均値の誤差は0.5℃以下であった。各深さでの温度の振幅，年平均値，位相遅れに関する誤差は小さく，地下室の周辺地盤内温度場の予測がよい精度で行えているといえる。

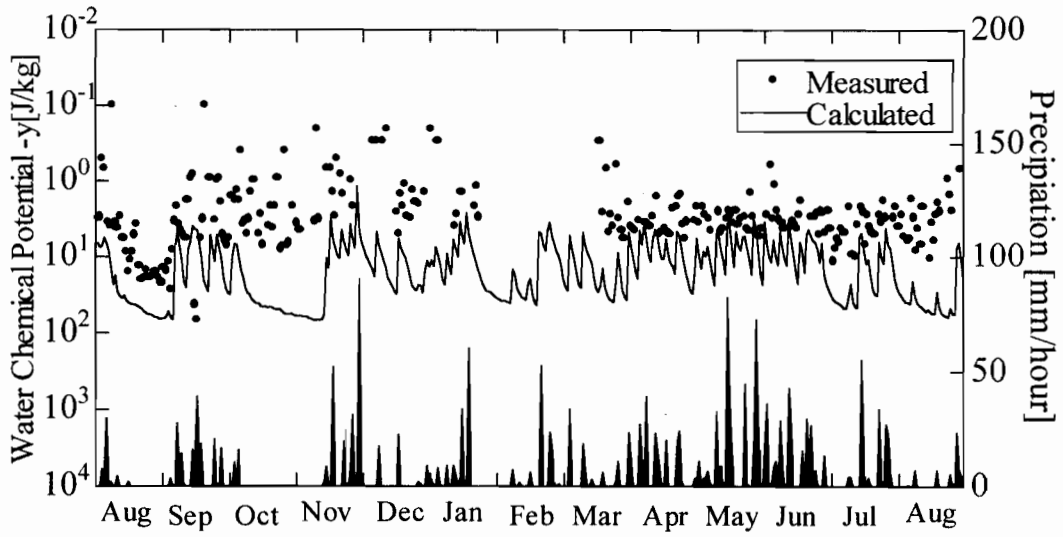


図5-28 S0地点, 深さ0.1mの水分化学ポテンシャルの実測値と解析値の比較

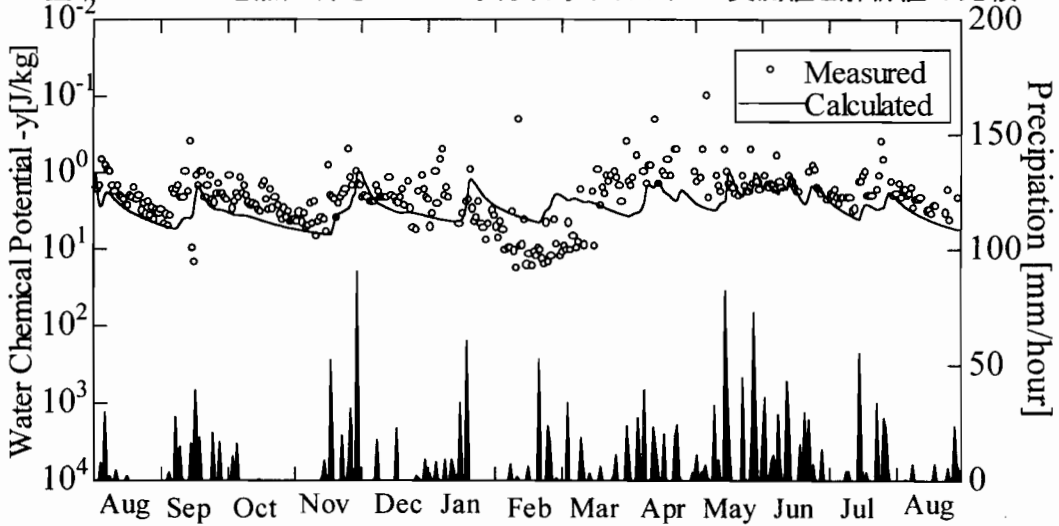


図5-29 S0地点, 深さ1.0mの水分化学ポテンシャルの実測値と解析値の比較

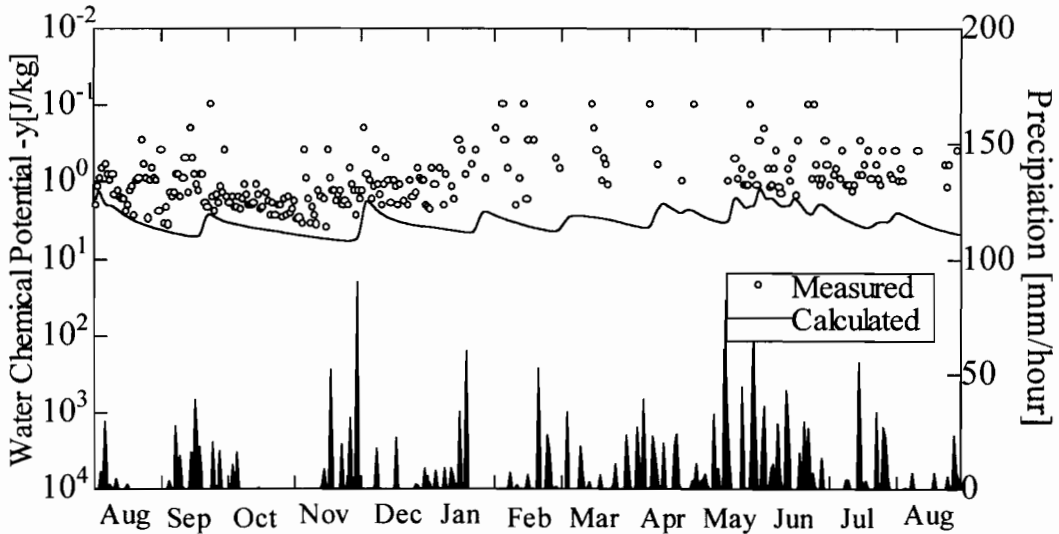


図5-30 S0地点, 深さ2.0mの水分化学ポテンシャルの実測値と解析値の比較

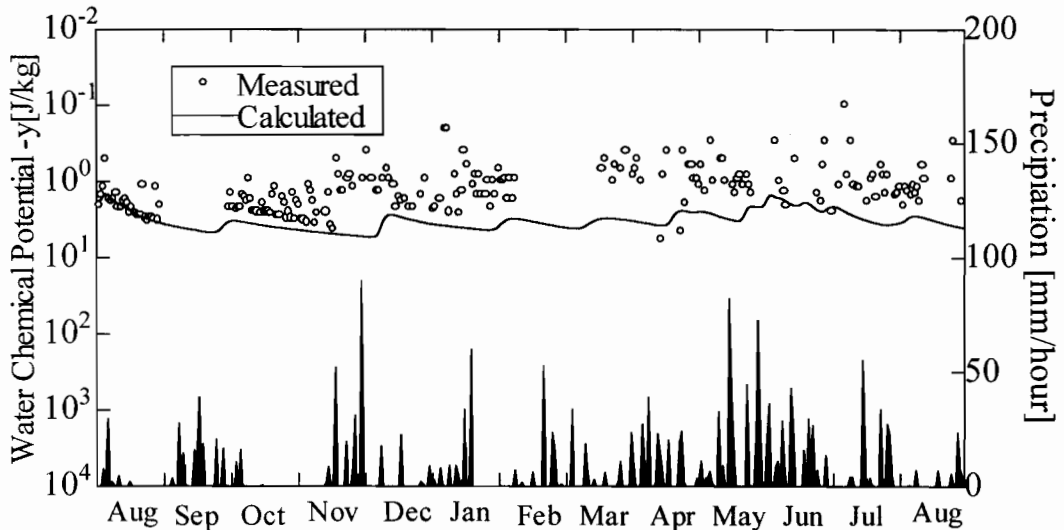


図5-31 S0地点、深さ3.0mの水分化学ポテンシャルの実測値と解析値の比較

### 5-3-3 地盤内水分化学ポテンシャル

図5-28,29にそれぞれS0地点の0.1m, 1mの地盤内水分化学ポテンシャルの実測値と計算値の年変動の比較を示す。図5-28より地表面近傍では、やや実測値が高い値を示すものの降雨時の増加、降雨後の減少について実測値と計算値は大略一致している。図5-29より、深さ1mでも実測値と計算値はよく一致している。以上から地下室の周辺地盤内水分場予測が大略において十分な精度で行えていることがわかる。

### 5-4 地盤及び壁体の物性値の違いによる影響

まず、地盤物性値の影響について検討するため、地盤をPlainfield Sandとローム質砂の二層（以下、基準）をPlainfield Sand（以下、砂）一層あるいはローム質砂一層に変更して計算を行った。図5-32,33にそれぞれ地下室内温度、水蒸気圧の変動をそれぞれ前述の解析結果（以下、基準）とあわせて示す。図5-32より室内温度は、砂一層と基準がほぼ等しい変動を示すが、ローム質砂一層と基準は後半で差が大きく生じている。また室内水蒸気圧については3種類の差は非常に小さい。室温について基準と砂一層の結果がほぼ等しく、ローム質砂一層の結果が異なっていることから、地表面近傍の物性値が、地下室温に与える影響は大きいといえる。次にこれを地盤内温度・水分場についてみる。図5-34,35にそれぞれ深さ1m,4mの地盤内温度変動を、図5-36に深さ1mの地盤内水分化学



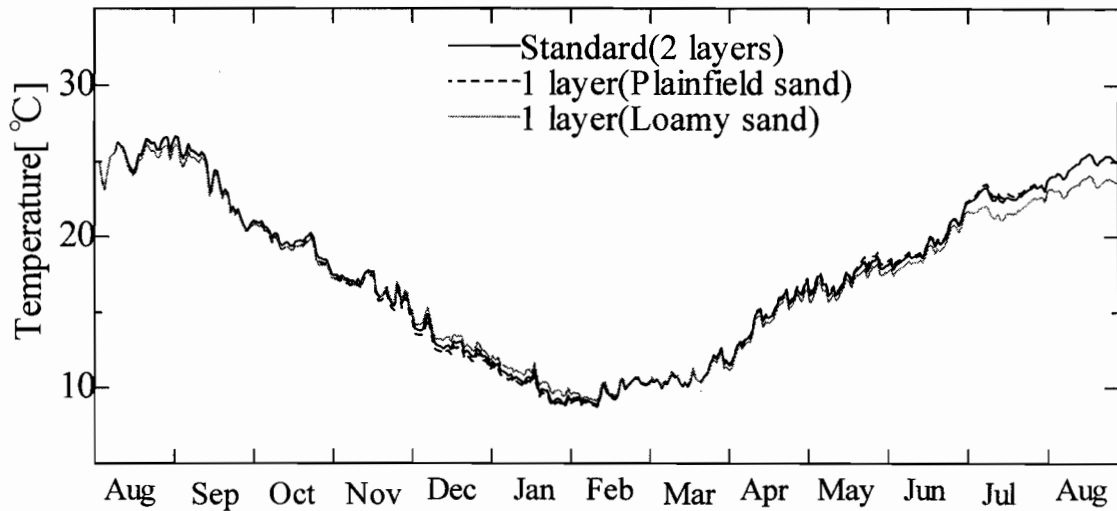


図5-32 地盤物性の違いによる地下室内温度変動

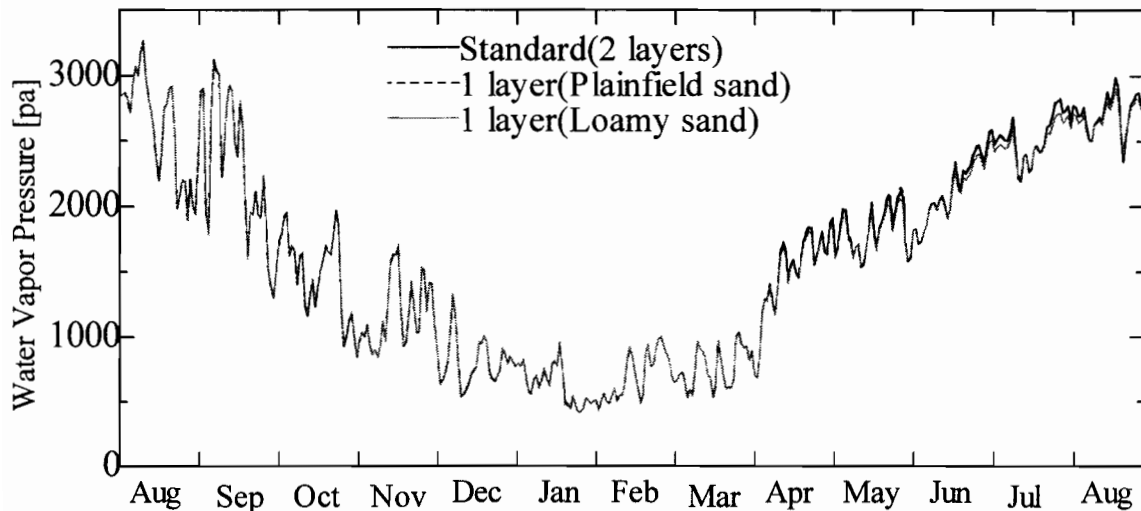


図5-33 地盤物性の違いによる地下室内水蒸気圧変動

ポテンシャル変動を基準の結果とあわせて示す。図5-34より深さ1mでは、砂一層と基準がほぼ等しい変動を示し、ローム質砂一層はこれらより年振幅が小さくなっている。この違いが室温変動の差に影響したと考えられる。同じ深さで図5-36より地盤内水分化学ポテンシャルの変動は砂一層では、基準よりやや乾燥側に平衡移動し、ローム質砂一層では変動が緩やかになっている。図5-35より深さ4mでは、地盤内温度はローム質砂一層と基準がほぼ等しい変動を示すが、砂一層は基準と比べると位相が大きくずれている。深さ1mと4mでそれぞれ結果が異なっているが、地下室温変動は深さ1mの地盤内温度の結果と一致している。

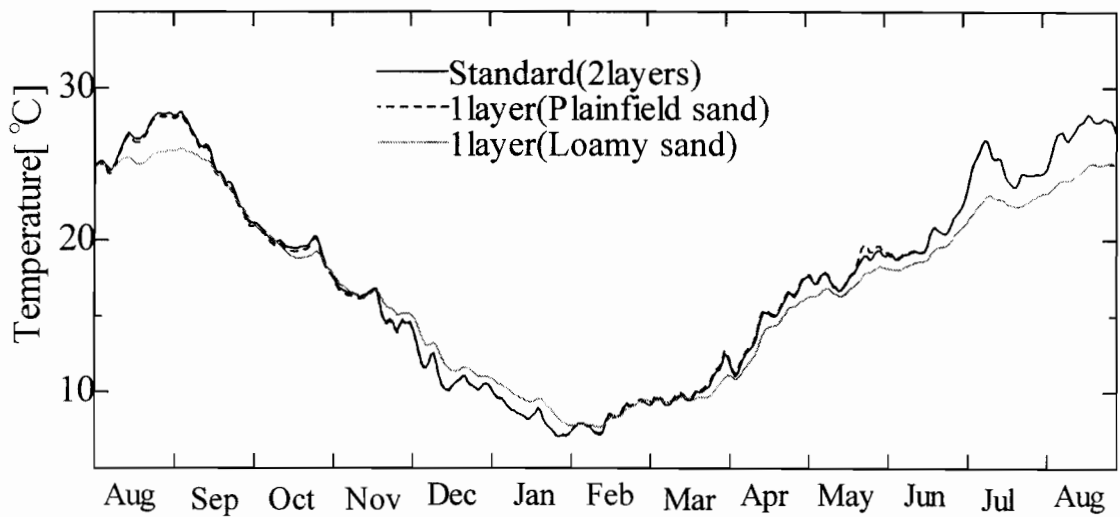


図5-34 地盤物性の違いによる地盤内温度変動 (S0, 深さ1.0m)

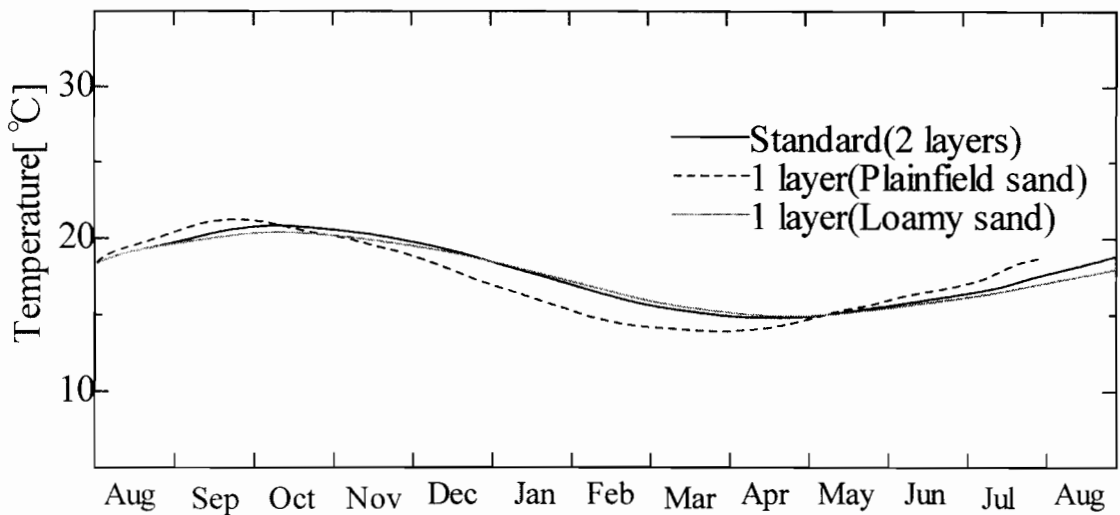


図5-35 地盤物性の違いによる地盤内温度変動 (S4, 深さ4.0m)

以上の結果から、室内温・湿度変動予測において地盤を砂一層とする事で十分であり、地表面近傍の物性値が地下室温にもたらす影響は大きいといえる。ただし、地下室がより深い深度に埋設されていた場合には、地盤物性値の違いの影響があらわれ二層とする必要性が出てくる可能性がある。今後、その近似的取り扱いを含めて成層化地盤の検討が必要である。

次に、コンクリートの水分伝導率の影響について検討するため、高含水時（相対湿度93%以上）の水分伝導率を10倍にした計算を行った。図5-36,37にそれぞれ室内温度、水蒸気圧の年変動を前述の解析結果(基準)とあわせて示す。図5-36より水分伝導率を10倍にした場合の室温は基準より最大で0.8°C低下し、年平均温度では0.5°C下がった。図5-37より

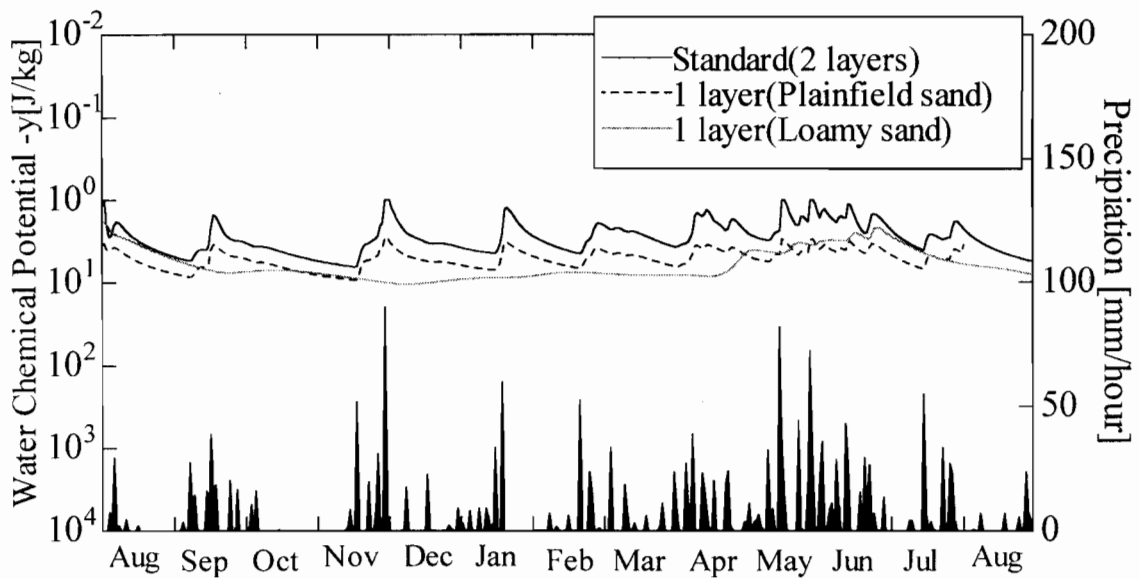


図5-36 地盤物性の違いによる地盤内水分化学ポテンシャル変動 (S0, 深さ1.0m)

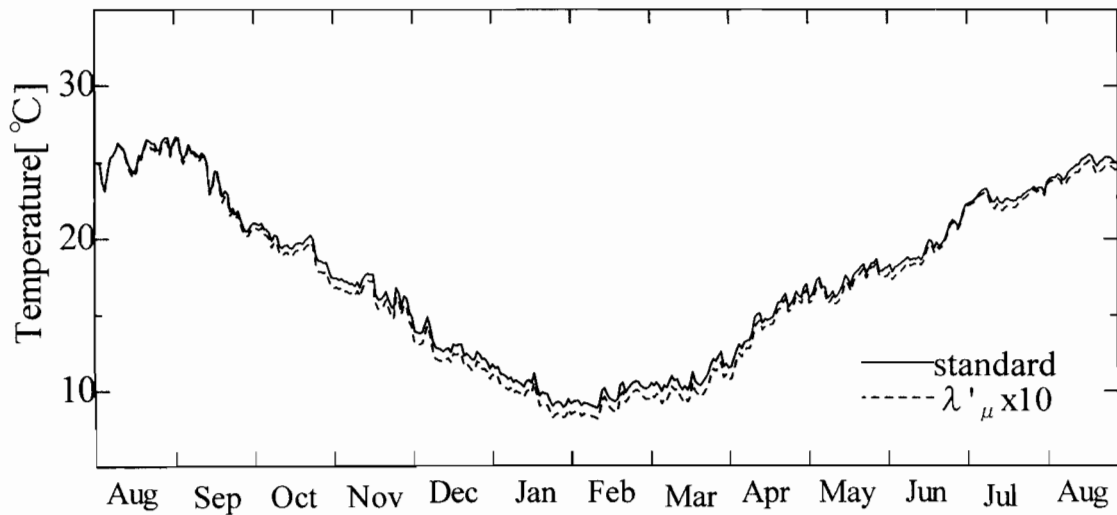


図5-36 コンクリート物性の違いによる地下室内温度変動

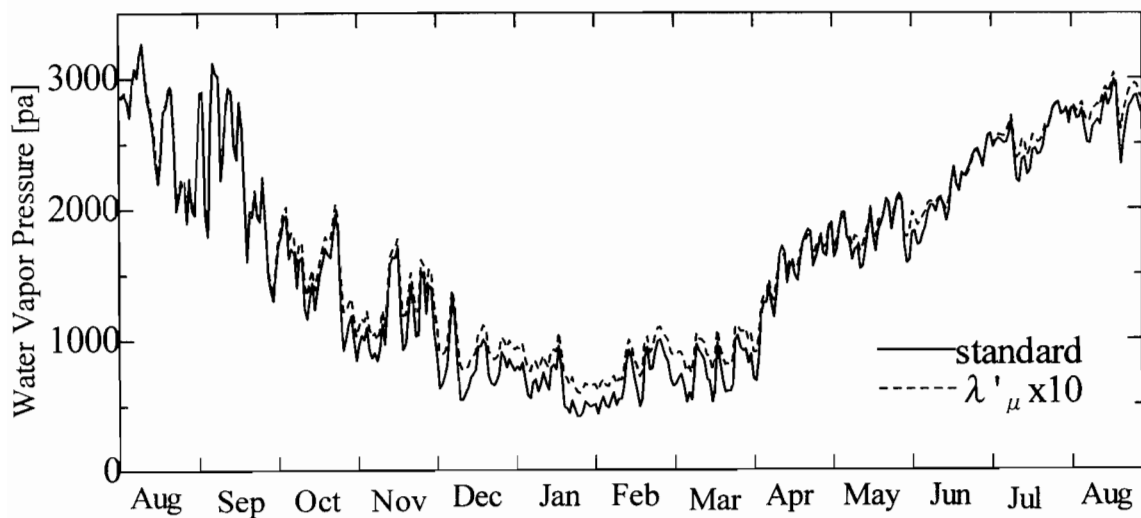


図5-37 コンクリート物性の違いによる地下室内水蒸気圧変動

室内水蒸気圧は、10月から3月にかけて振幅が緩やかになり全体的に上昇し、最大で基準より300Pa上昇し、この差を相対湿度に換算すると20%であった。これは冬期の壁体からの水分蒸発に対して壁体の水分伝導率が大きな影響を及ぼしているためと考えられる。以上から地下室湿気性状に対する壁体水分伝導率の影響は大きいといえ、施工時に用いるコンクリートの組成に対して、また解析時の高湿度状態において用いるコンクリートの水分伝導率に対しては十分な注意が必要である。

## 5-5 地盤及び壁体を単純熱拡散として扱った場合

ここでは、本実験条件下の解析において水分移動を考慮しない事が結果に与える影響について量的把握を行うために、地盤及び壁体を単純熱拡散として扱った場合の数値解析結果を示し、本解析法による結果との比較を行う。

### 5-5-1 計算条件

解析対象は、5-2-1で述べた通りである。境界条件は、水分に関する条件を除いて5-2-2で述べたものを用いる。つまり、地表面境界における降雨浸透、蒸発といった影響を考慮せず、地盤、地下室壁体の水分の移動も考慮しない。初期条件も、水分に関する条件を除いて5-2-3で述べたとおりである。解析に用いた物性値は、水分に関する物性を除いて5-2-4で述べた値を用いる。ただし、熱物性値は含水状態によって変化するため、5-2-3の初期条件で与えた水分に関する初期条件値を用いてその値を決定した。

### 5-5-2 結果と考察

まず、室温・湿度について比較を行う。図5-38,39にそれぞれ単純熱拡散方程式による(以下、純熱伝導)地下室内温度、水蒸気圧の変動を、熱・水分同時移動を考慮した前述の解析結果(以下、基準)と併せて示す。図5-38より、地下室内温度は、基準より年間を通じて数度高い値で変動する。年平均値では、純熱伝導の方が基準の方より1.2℃高くなった。これは後述する地盤内温度変動について両方で生じている差が大きく影響していると考えられる。図5-39より、地下室内水蒸気圧は、冬期から春期にかけては、外気値と室

内の値の差が小さいため、純熱伝導と基準の差は小さいが春期から夏期にかけては、純熱伝導では、基準と純熱伝導の間での差は、特に週単位程度の変動に対して大きくなる。これは結露発生を含めた壁体の吸放湿の考慮の有無がもたらす影響が大きいと考えられる。

次に地盤内温度変動について比較を行う。図5-41にS4地点の深さ1mの地盤内温度変動について純熱伝導と基準の場合の結果を示す。図より冬期に比べ春期から夏期にかけて差が大きくなっている。この地盤内温度の差は室温について生じていたものより大きい。この深さにおける地盤内温度年平均値は、基準より純熱伝導の方が2.3℃大きくなった。またこの差は地表面では2.9℃にもなった。これは基準と純熱伝導の地表面の熱収支で異なる部分である水分蒸発に伴う潜熱移動の影響が大きいと考えられ、地盤内温度予測において水分移動を考慮しなければ、年平均値で非常に大きな誤差を生じる事を示している。また、地盤内熱物性値の変化という観点から見た場合、顕著な位相遅れ、振幅の変化は図より確認できない。つまり熱物性値として含水状態を考慮した適切な値が与えられることで、位相遅れ、変動については大きな誤差もなく予測できる可能性があることを示唆している。

以上から、本実験条件下における地下室の熱・湿気性状についての従来の単純熱拡散方程式による予測と本解析法による予測との差が大きいことが確認でき、水分移動の適切な考慮が必要であることが示された。

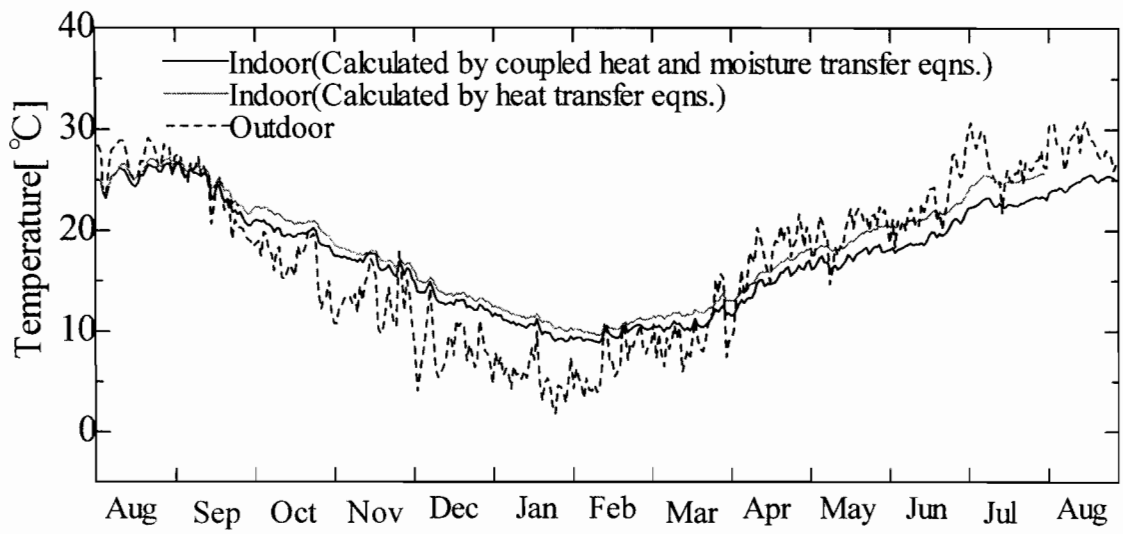


図5-38 単純熱拡散方程式による地下室内温度変動

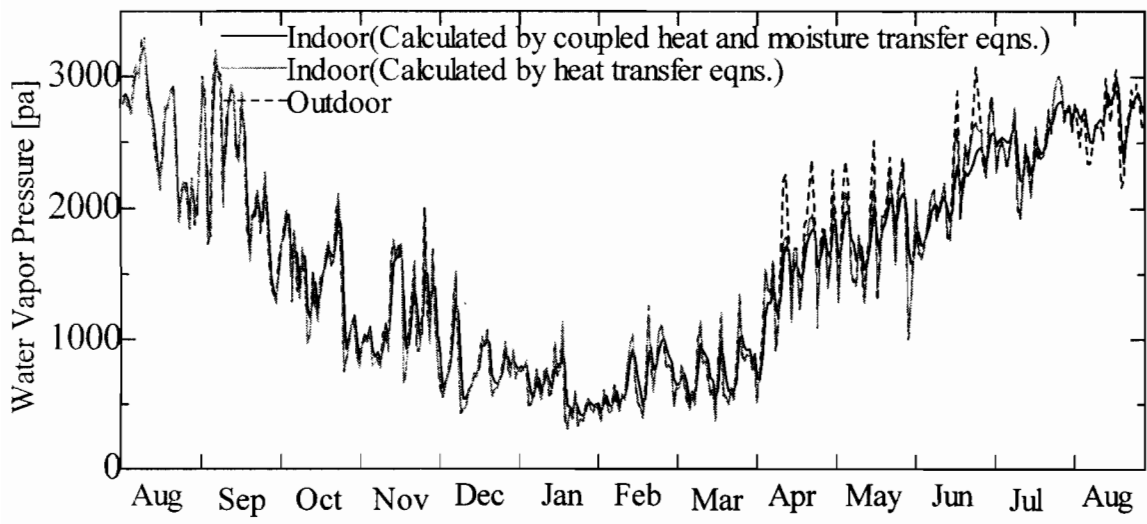


図5-39 単純熱拡散方程式による地下室内水蒸気圧変動

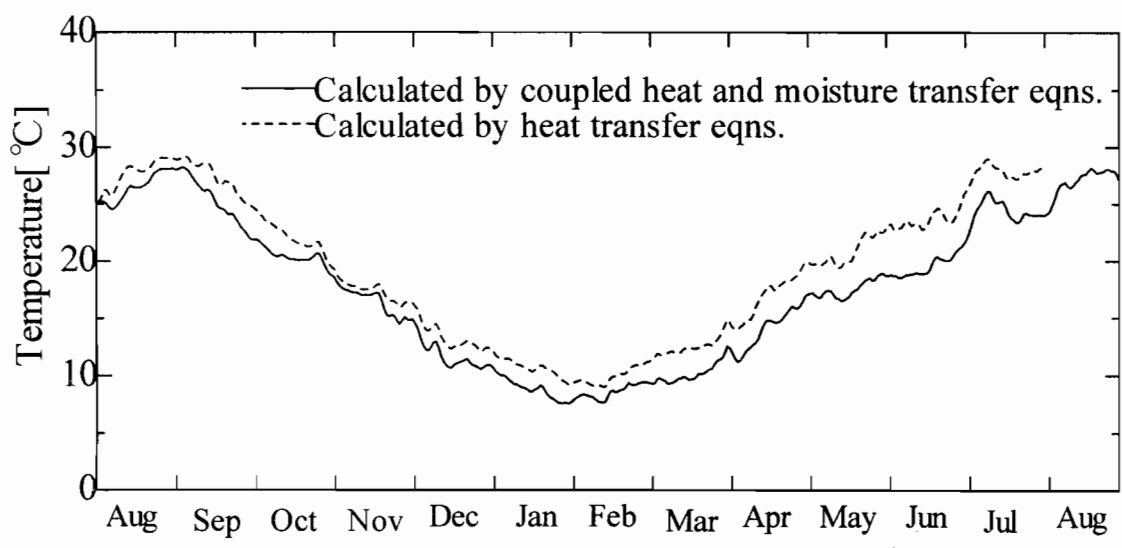


図5-40 単純熱拡散方程式による地盤内温度変動(S4, 深さ1m)

## 5-5 第5章のまとめ

本章では、地下室及び周辺地盤の熱・湿気性状の一般的予測法の確立を目的として、前章で示した完全埋設型の地下室における年間実測結果を用いて、第2章、第3章で示した熱・水分同時移動理論を基礎とした解析法による数値解析を行い、地下室及び周辺地盤の熱・水分性状について実測値と計算値の比較検討を行った。また地盤及び壁体の物性値の違いによる結果への影響を検討し、従来の単純熱拡散方程式による解析結果との比較を行った。その結果、以下の結論を得た。

1. 熱・水分同時移動理論を基礎とした解析法による計算結果は実測結果と年間を通じてよく一致した。従ってここで示した解析法により地下室及び周辺地盤の熱・湿気性状の予測を十分な精度で行うことが可能であり、地下構造物の熱環境設計、防湿設計に利用可能である。
2. 地下室内の湿気性状に対する壁体水分伝導率の影響は大きく、地下室壁体に用いるコンクリートの水セメント比およびその高湿度状態における水分伝導率の値に十分な注意が必要である。
3. 埋設深さ1m程度の地下室内温・湿度環境の予測には地表面近傍の土壌物性値の把握が重要である。
4. 本実験条件下における地下室の熱・湿気性状についての従来の単純熱拡散方程式による予測と本解析法による予測との差が大きく、水分の移動の適切な考慮が必要であることを再確認した。

## 第6章 地盤内水分が地下構造物の熱・湿気性状 に与える影響

### 6-1 はじめに

地盤は多く水分を含む多孔質体であり、地下構造物はこの地盤から壁体を通して室内への水分が漏出するのをさけるため、防水処理が行われる。例えばコンクリート躯体の外側にアスファルト防水を設けたり、防水モルタルを躯体室内側に設けるといった方法や、二重壁を設け空気層で生じた漏水等の排水処理をとるといった方法である。これら防水処理は地盤内水分が室内へ浸透するのを避けるため設けられることが多いが、常水面位置が床スラブより深ければ全く防湿層を設けない場合も存在する。

一方、地下構造物は夏期の結露や高湿な環境が問題となるが、これらは換気による高湿な外気の流入の他に地盤から壁体を通して流入する水分の影響もあると考えられる。これまでこれら両者を考慮して地下室温・湿度及び壁体結露性状を検討した研究は行われていない。

第2章、第3章では、これらが検討可能な解析法を示し、前章でその解析法の妥当性を確認した。

本章ではこの解析法を用いて、上記影響を明らかにすることを目的とする。地盤と地下構造物との間の水分移動に対して大きな影響を及ぼすと考えられる要素として換気回数、防湿層の配置、常水面深さを考え、これらが室温・湿度性状及び壁体の結露性状に及ぼす影響を数値解析により定量的に明らかにする。

まず自然状態下における完全埋設された地下構造物の室温・湿度、壁体内含水率の基本的性状について詳細に把握する。次に壁体防湿層配置の違いの影響、常水面深さの違いの影響を検討し、これらが地下構造物の熱・湿気性状へ与える影響を明らかにする。

### 6-2 計算条件

#### 6-2-1 解析対象

解析対象は図6-1に示すような完全に埋設された地下構造物である。対象は2次元系とする。地下構造物の寸法は内法幅8m、内法高さ3mである。壁体は居室等の現実的利用を考



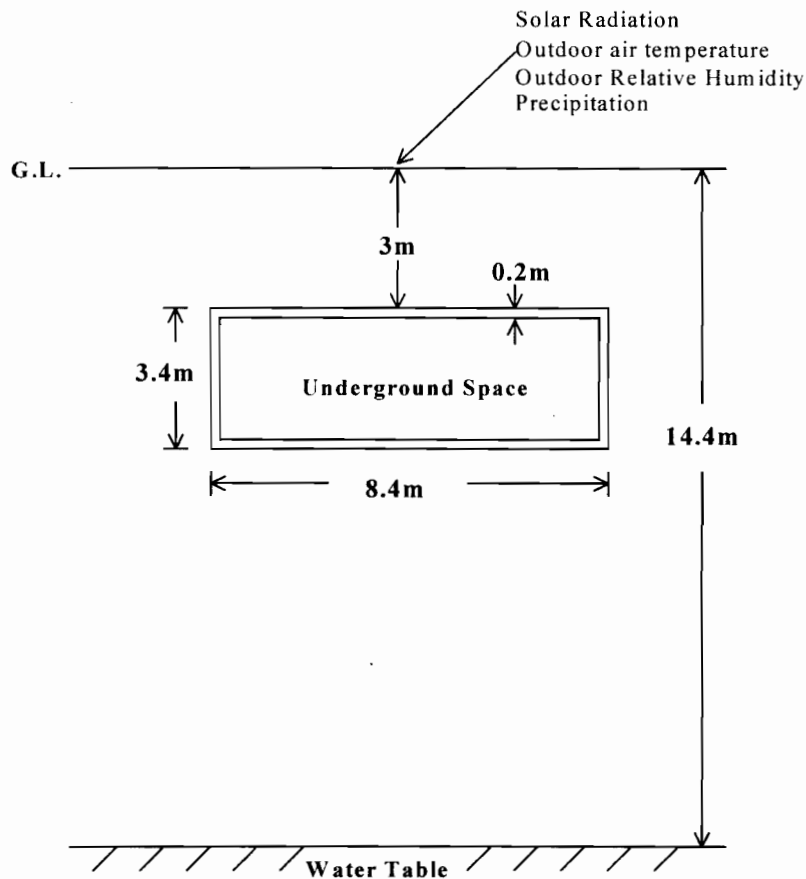


図6-1 解析対象

えると、断熱材といった結露防止のために一般的に使用される材料や内装材も含めた構成が必要となるが、ここでは地盤からの水分の影響を明確にするため厚さ20cmのコンクリート1層で防湿層なしの単純な構成とする。地盤は砂質土壌、地表面は裸地とする。

### 6-2-2 境界条件・初期条件

地盤内の境界条件は、地表面では第3種境界条件、地盤底部では、温度に関しては深さ14.4mで、水分に関しては常水面位置で第1種境界条件とし、温度と水分化学ポテンシャルはそれぞれ $16.4[^\circ\text{C}]$ ,  $0[\text{J}/\text{kg}]$ とした。また構造物中央の対称面及び構造物から10m離れた鉛直面の水平方向では断熱断湿とする第2種境界条件とする。壁体室内側表面は通常、第3種境界条件とし、表面の飽和時には水分に関しては第1種境界条件とし、水分化学ポテンシャル $0[\text{J}/\text{kg}]$ を与える。防湿層は完全断湿（水分流=0）として取り扱う。外界気象条件として、外気温は大阪の測定値をフーリエ級数展開して振幅の大きい順にその主要項、年、日、1/

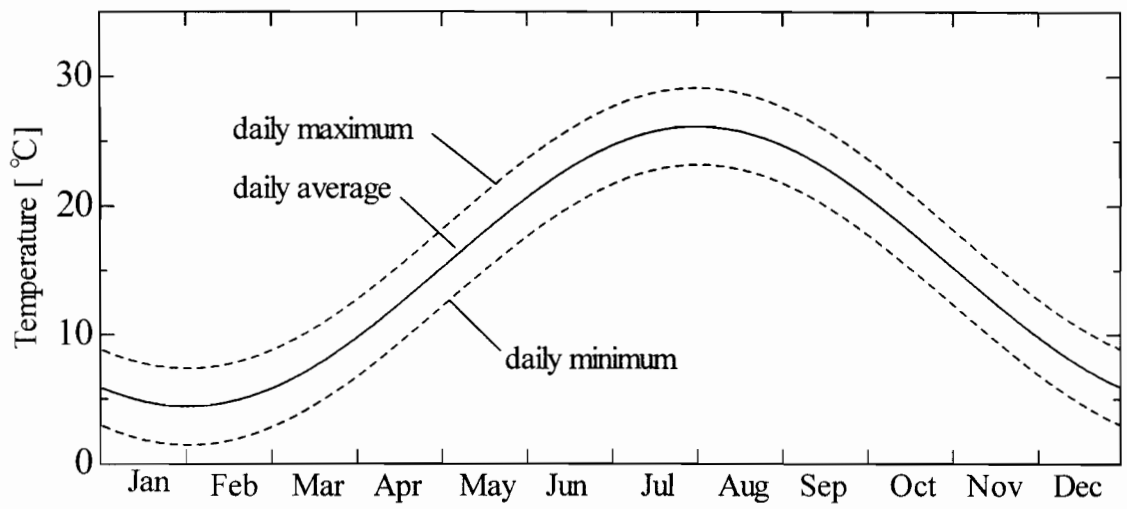


図6-2 a 外気温度年変動

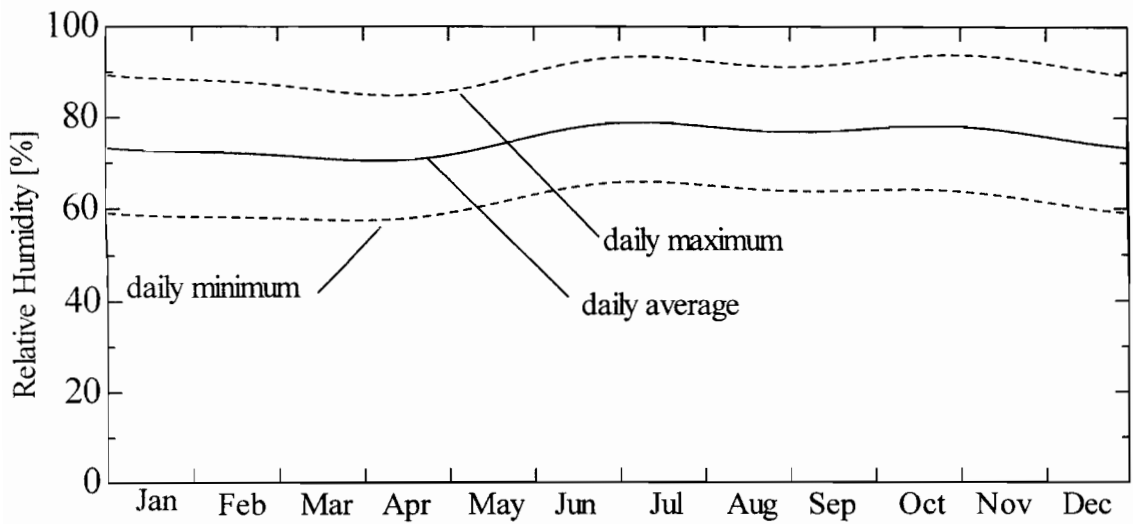


図6-2 b 外気相对湿度年変動

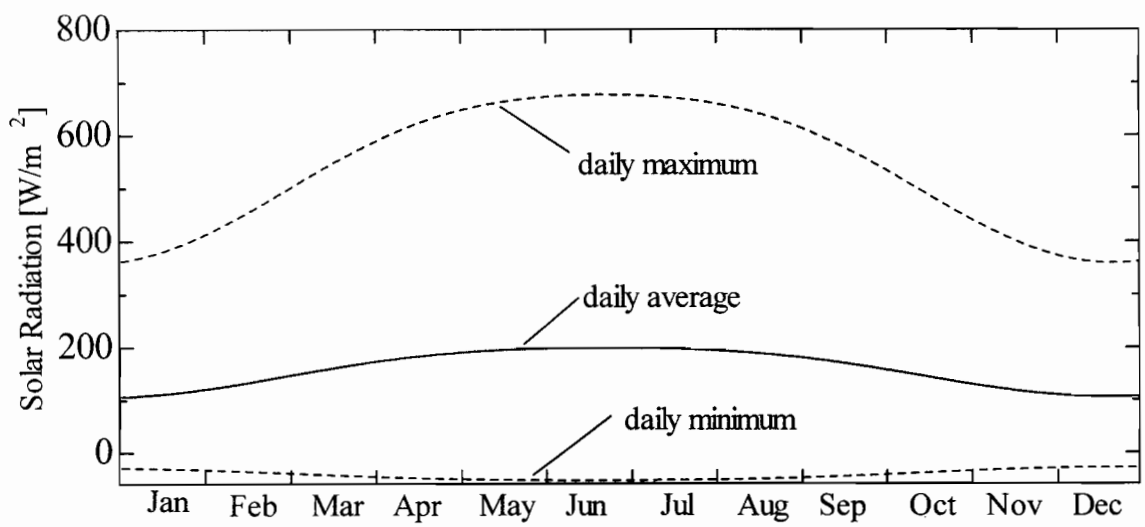


図6-2 c 日射量年変動

表6-1 その他の物性値

項目	(記号)	数値	[単位]
空気の熱容量	$(c\gamma)$	1260	[J/m <sup>3</sup> K]
空気の湿気容量	$(c'\gamma')$	$7.5 \times 10^{-6}$	[kg/m <sup>3</sup> Pa]
熱伝達率	外気側 $(\alpha_o)$	23.26	[W/m <sup>2</sup> K]
	室内側 $(\alpha_i)$	9.30	[W/m <sup>2</sup> K]
湿気伝達率	外気側 $(\alpha'_o)$	$11.4 \times 10^{-8}$	[kg/m <sup>2</sup> sPa]
	室内側 $(\alpha'_i)$	$2.85 \times 10^{-8}$	[kg/m <sup>2</sup> sPa]
日射吸収率		0.7	[-]

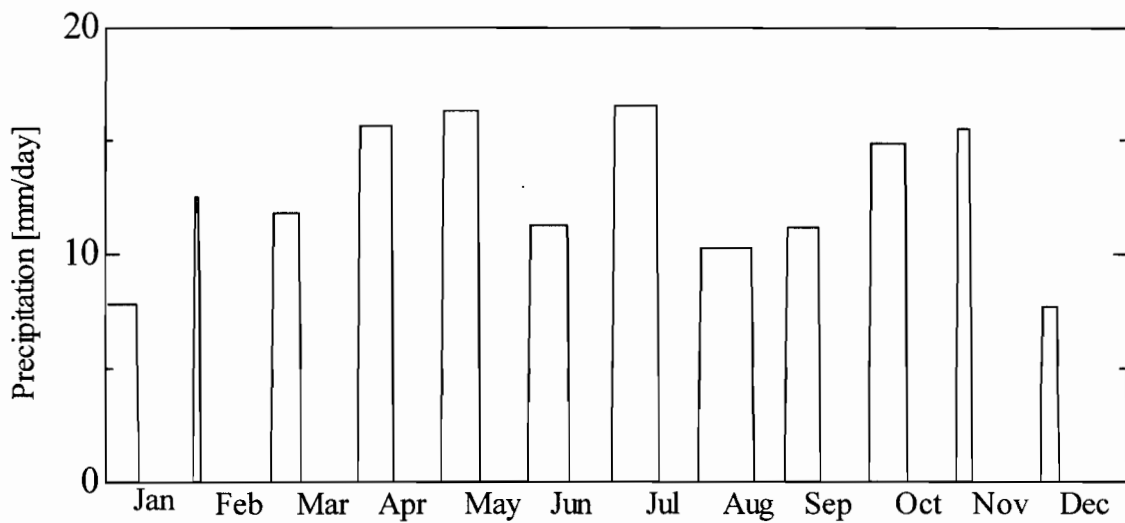


図6-2d 降雨量年変動

2日の周期項を算出し、単純化した基本パターンとして計算に用いることにした。日射量、外気相対湿度も同様の取り扱いを行った。このパターン化は今後、地域特性を検討するのに適当であると考えたからである。降雨は、降雨時と晴天時により大きく熱水分収支が異なるため、この区別を明確にするため級数展開せず、月ごとに平均化し月初めに降雨日数分与えた。夜間放射については計算の単純化のため無視した。図6-2a～2dに外界条件のグラフを示す。室内条件は、熱発生及び水分発生を考えない自然状態とし換気回数のみを変化させる。表面結露発生は、水分化学ポテンシャルが0[J/kg]の時とし、この時表面の水分は蓄積されず除去されるものとする。初期条件は、外界条件の全く等しい鉛直一次元の地盤についてあらかじめ計算された周期的定常状態の計算結果を水平方向に一定として与えた。

### 6-2-3 解析に用いた物性値

材料物性値に関しては、地盤はJuryの測定したPlainfield Sandを、コンクリートはHedenbladの測定値を元に構成したものとし、それぞれ第3章で示した値を用いる。その他の物性値は表6-1に示すとおりである。

### 6-2-4 計算方法

計算方法は前進型有限差分法を用いる。地盤及びコンクリートは以下の様に差分化する。地盤の鉛直方向の空間刻みは地表面で最小の0.025mとし、コンクリートの空間刻みは、室内条件が自然状態であるので室温・湿度は緩やかな変動を示すと考えられるため、若干大きい刻みではあるが厚さ方向に対して最小で0.02m、最大で0.04mに決定した。質点数は地盤、コンクリート室空気の全部で952点である。周期的定常状態を得るための計算助走期間は3年間であった。

## 6-3 地下構造物及び周辺地盤の熱・湿気特性

### 6-3-1 周辺地盤の熱・水分場

図6-3,4にそれぞれ地盤内の温度、含水率の分布を示す。図6-4の含水率分布より水分が地下構造物の天井上に蓄積し、壁面側方を伝って水分が流下する様子が見てとれる。これは降雨によって浸透する水分を示している。天井面上の含水率は年間を通じて高く飽和に近くなる。図6-5に地下構造物周辺地盤の水分化学ポテンシャル年変動を示す。年間を通じて地下構造物の周辺地盤、つまり天井面上、壁面側方の含水率の変動がみられ、降雨の影響が現れている。周辺地盤は遠方地盤と比較すると、天井面上、壁面近傍の平均含水率は高く、床面下は低くなる。降雨の浸透による地盤内水分化学ポテンシャルの変動がよくわかる。ただし、水分化学ポテンシャルの値が $-1[\text{J}/\text{kg}]$ 程度の値以上では、熱・水分の物性値の変化は小さい。このことを考慮して水分化学ポテンシャルの変動をみると、年間を通じた各地点の水分化学ポテンシャルの変動は比較的小さいといえる。以上から、地下構造物の周辺地盤は、降雨浸透、常水面の影響を受け、含水率分布は一様とはならないが、時間的变化は小さいといえる。



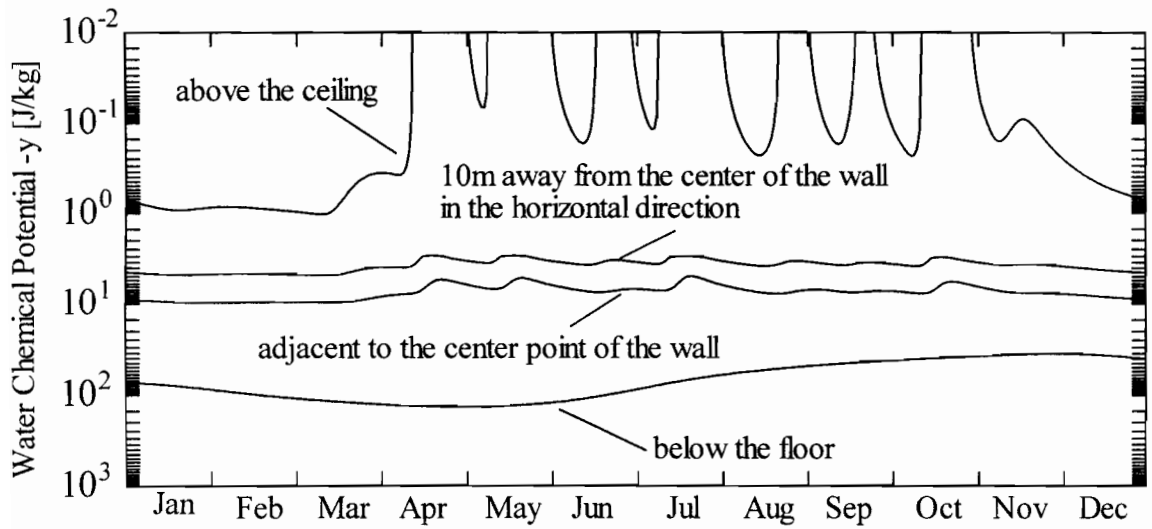


図6-5 周辺地盤の水分化学ポテンシャル年変動 (換気無し)

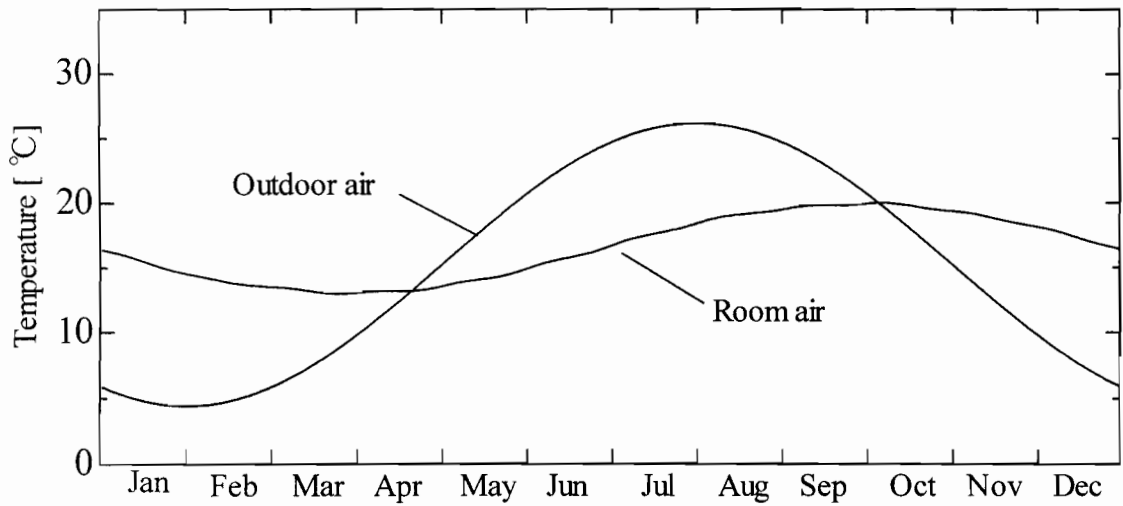


図6-6 a 地下室内温度の年変動 (換気無し)

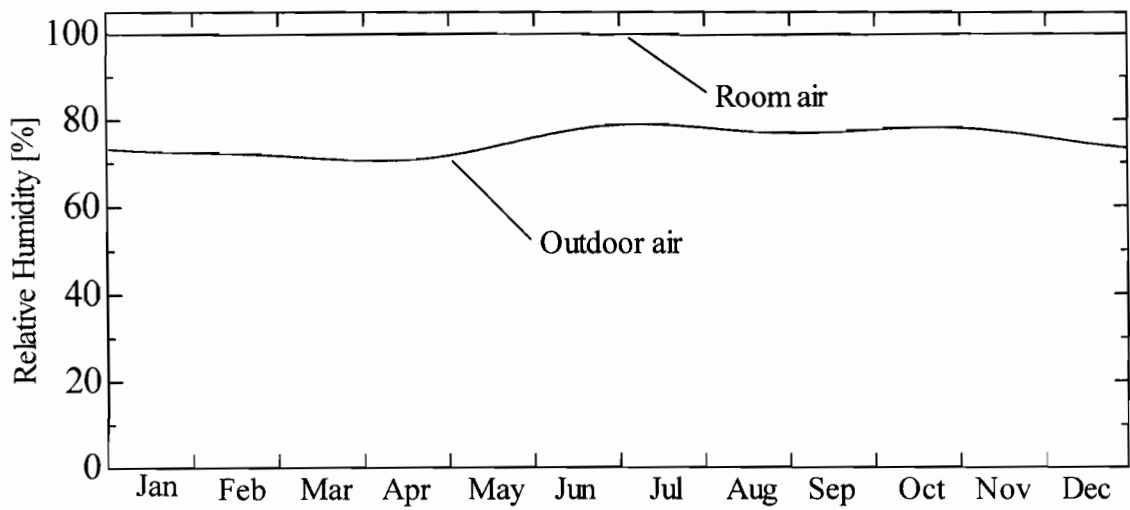


図6-6 b 地下室内相対湿度の年変動 (換気無し)

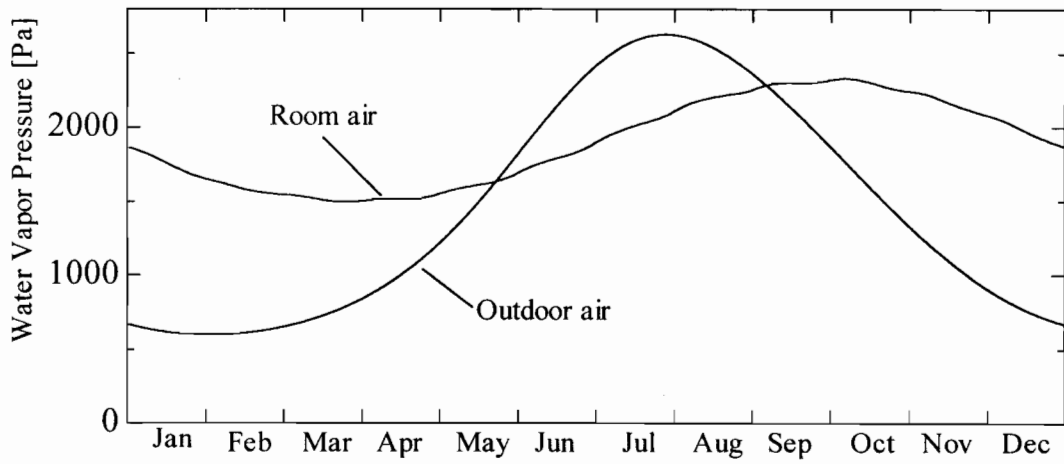


図6-6c 地下室水蒸気圧の年変動（換気無し）

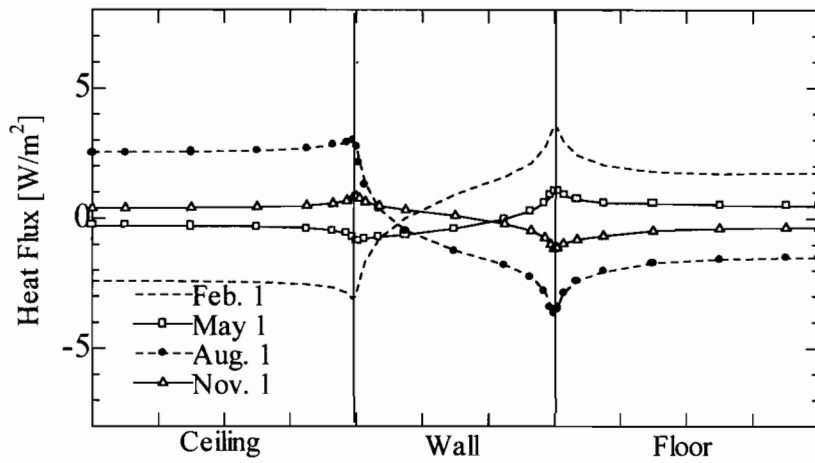


図6-7 室内側表面熱流分布（換気無し）

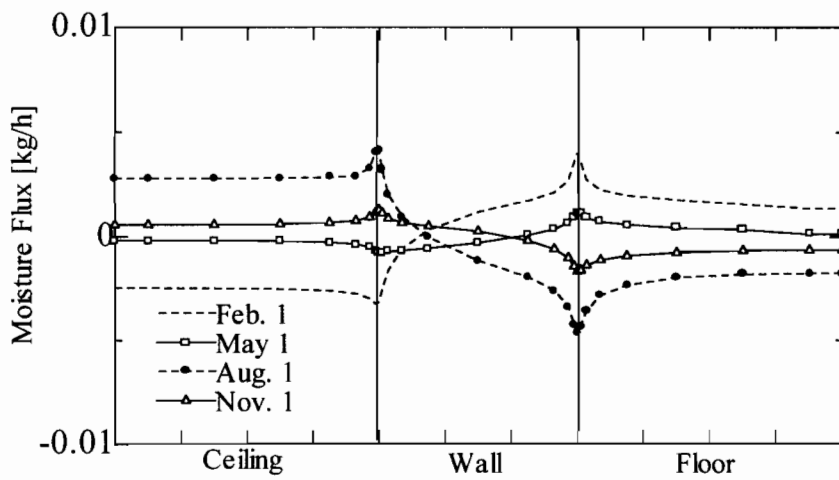


図6-8 室内側表面水分流分布（換気無し）

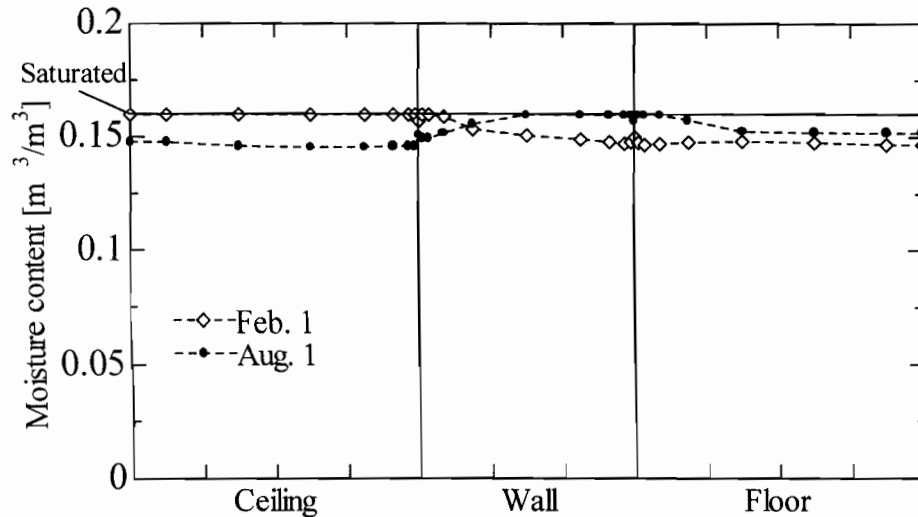


図6-9 室内側表面含水率分布（換気無し）

### 6-3-2 地下空間の温・湿度性状

図6-6a～cにそれぞれ，地下空間の室温，相対湿度，水蒸気圧の変動を示す．室温は今回の計算のような地下3mに埋設した場合においても，年振幅が3.5℃程度あり，地表面からの熱的影響は大きいといえる．室相対湿度は年間を通じてほぼ100%を維持する．これは躯体に防湿層を設けていないため室に水分が供給されるためである．

### 6-3-3 壁体の熱・湿気性状

図6-7,8に室内側壁体表面の熱流及び水分流を示す（室への流入を正とし，横軸は天井面中央位置から壁面を通過して床面中央位置まで室内側表面に沿った位置を表す．1目盛り1m．）．熱流は夏期は天井面から流入し，床面に流出し，冬期は逆方向の流れを示している．水分流は熱流と同様の流れを示している．これは，壁表面の温度差により室空気を通して壁体間の水分流動が生じ，夏期には天井面から室へ流入し，床面へと流出することを示しており，地下構造物の壁体の水分流は一方向性を示さないといえる．図6-9に室内側壁体表面の含水率分布を示す．図より壁体表面の水分状態は年間を通じて高く，夏期には床面隅角近傍で，冬期には天井面及び天井面隅角で表面結露が発生している．これは上述の水分流動の影響を受けていると考えられる．



## 6-4 換気回数の影響

### 6-4-1 周辺地盤の熱・水分場への換気量の影響

図6-10,11にそれぞれ換気回数2.0[1/h]の場合の地盤内の温度分布，周辺地盤の水分化学ポテンシャル年変動を示す。温度分布は室空気が外気の影響を受けるため，地下構造物の周辺地盤にその影響が及ぶ。水分化学ポテンシャル年変動は換気を行わない場合(図6-3)と比較して，天井面上及び側壁近傍ではほとんど差がないが，床面下ではやや乾燥側の値で変動している。降雨の浸透の影響が現れにくい部分では，室内温・湿度の影響を受けやすいと考えられる。言い換えると室内温・湿度が，降雨の浸透の影響が大きい天井面，壁面近傍の地盤の含水率に及ぼす影響は小さいといえる。

### 6-4-2 地下空間の温・湿度への換気量の影響

図6-12a～cに換気回数を変化させた場合の地下空間の室温，相対湿度，水蒸気圧の年変動をそれぞれ示す。図より換気回数の増加に伴い室内温度と水蒸気圧の振幅及び位相は外気の値に近づいていく。

温度と水蒸気圧の換気回数の増加による変化をそれぞれみると，水蒸気圧は換気回数2.0[1/h]の場合で，外気の変動に近くなるが，温度は換気回数5.0[1/h]の場合でも外気との差は大きい。換気量が増加することで，水蒸気圧は壁体の水分流出入量が小さいため外気の状態に近づきやすく，温度は周辺地盤の大きな熱容量のため外気の状態に近づきにくくなっていると考えられる。相対湿度は換気を行わない場合では，年間を通じてほぼ100[%]であったが，換気がある場合，例えば2.0[1/h]の場合，夏期には99[%]，冬期には78[%]になり，換気回数の増加に伴い相対湿度は夏期には徐々に低い値に、冬期には比較的急激に低下する。夏期においては換気回数増加に伴って，室水蒸気圧は上昇し，相対湿度を上げる方向に働くのに対して，室温は上昇し，それによる飽和水蒸気圧の上昇により相対湿度を下げ方向に働いている。その結果，ある程度室温が上昇するまでは相対湿度は下がらず，なおかつ室水蒸気圧上昇に比べ，室温は徐々に上昇するため，相対湿度は徐々に低下していると考えられる。冬期においては換気回数増加に伴って室水蒸気圧は低下し，相対湿度を下げる方向に働くのに対して，室温は低下し，それによる飽和水蒸気圧の低下により相対湿度

温度[°C]

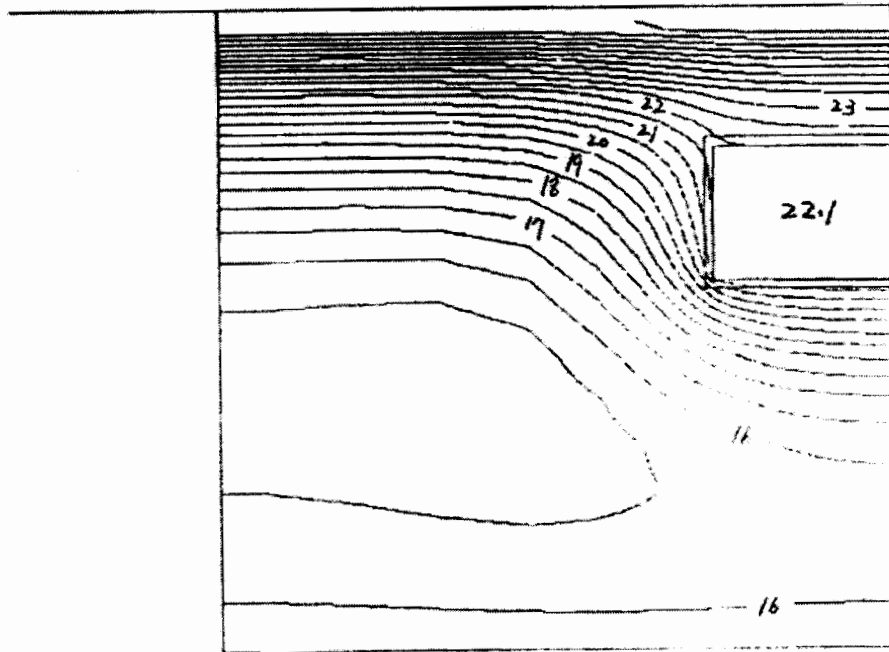


図6-10 地盤内の温度分布（換気2.0[1/h], 8月1日）

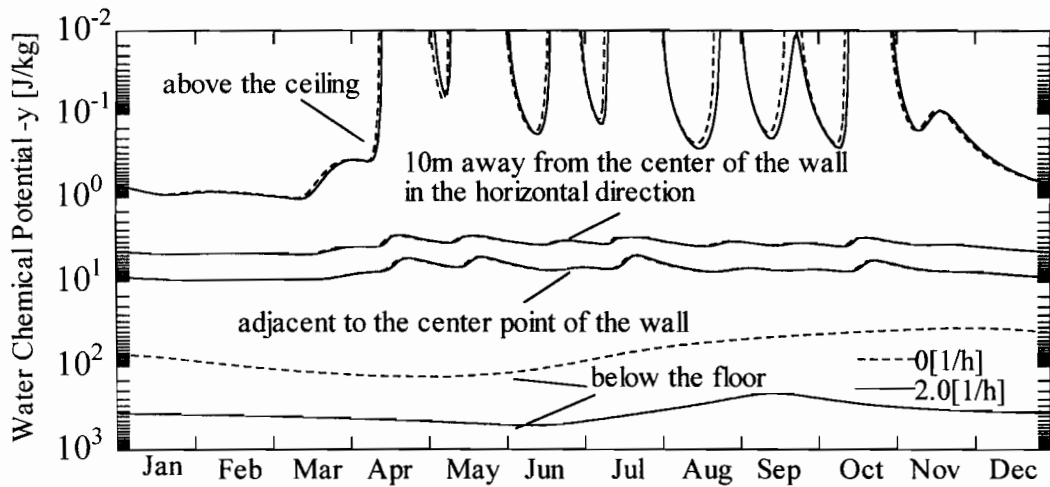


図6-11 周辺地盤の水分化学ポテンシャル年変動（換気0.2,2.0[1/h]）

を上げる方向に働いている。室水蒸気圧は室温に比べ、低下が急激であり、それに応じて室相対湿度も急激に低下していると考えられる。

以上の結果から壁体に防湿層がないような地盤内水分の影響を大きく現れる場合においても、換気回数を充分とることで、室をある程度低湿に保つといえる。

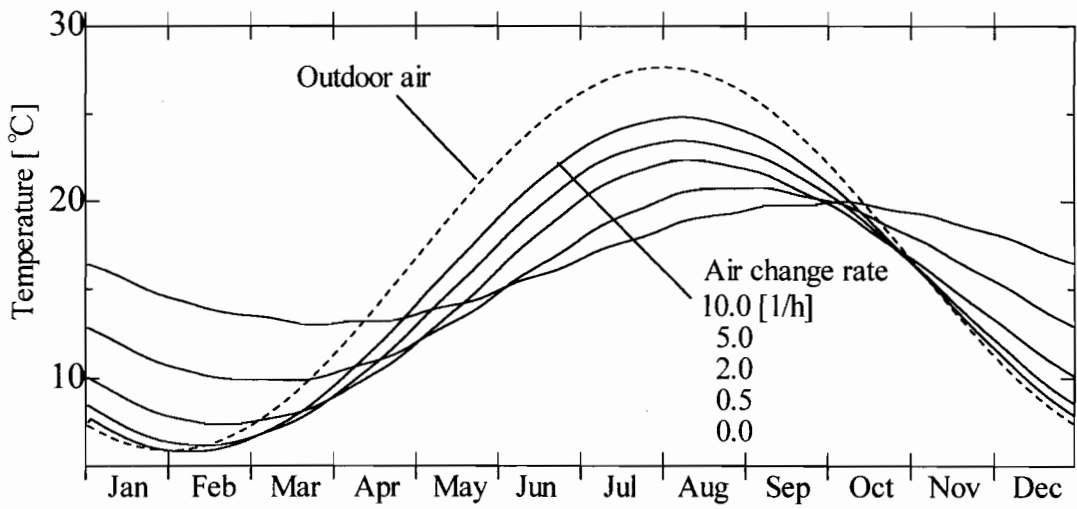


図6-12 a 地下室内温度の年変動

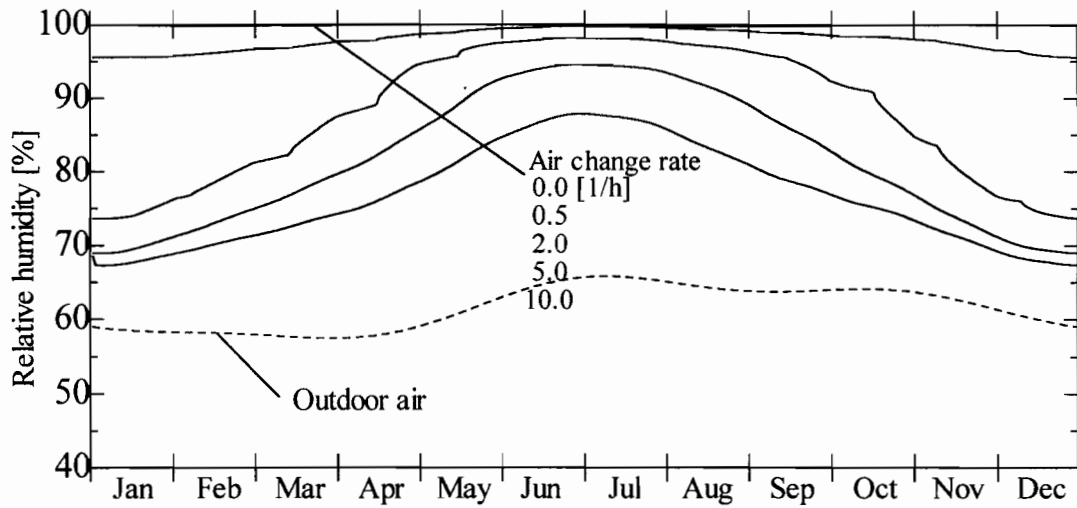


図6-12 b 地下室内相対湿度の年変動

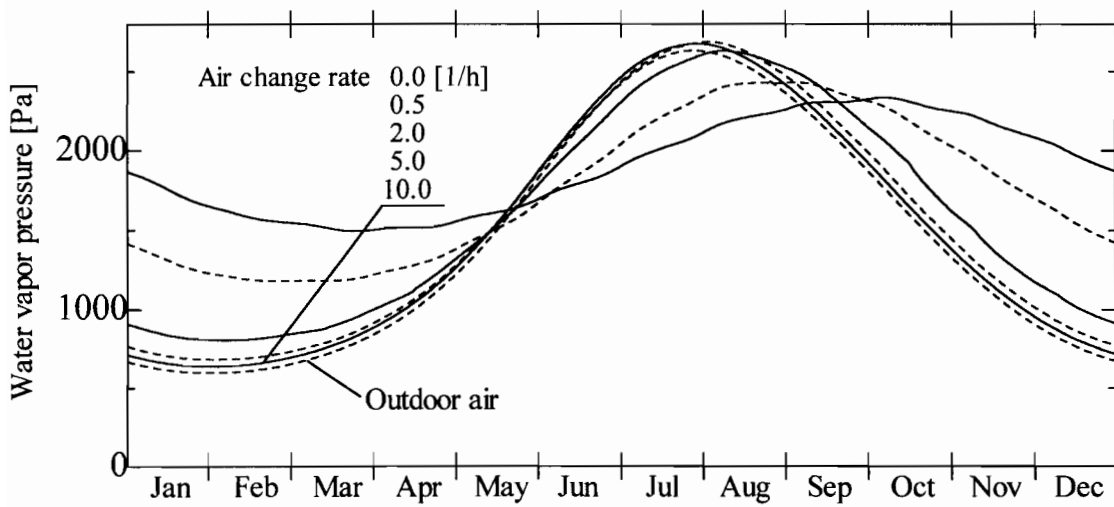


図6-12 c 地下室内水蒸気圧の年変動

表6-2 室温の年平均, 最高, 最低値

場所	換気回数[1/h]	年平均[°C]	年最高[°C]	年最低[°C]
室内	0	16.5	20.0	13.0
	0.5	15.2	20.9	9.8
	2.0	14.7	22.6	7.1
	5.0	14.8	24.0	5.5
	10.0	15.0	25.4	4.4
外気		15.3	29.1	1.5
不易層		16.4		

表6-2に換気回数の違いによる室内温度の年平均, 最高, 最低値を示す. 不易層温度は地表面の熱水分収支によって決定される値であり, 外気年平均気温とは必ずしも一致しない.

本解析の場合, 外気年平均温度より不易層温度の方が約1°C高く, 室の年平均温度は換気回数の増加により不易層温度より低下し, 換気回数2.0[1/h]以上で外気年平均温度よりも下がった. これは, 外気年平均値と不易層温度の違いによる影響, つまり換気からの影響と地盤からの影響の違いによるものと, 壁体の吸放湿による相変化熱の影響によるものの二つが原因としてあげられる. 後者について換気による水分の移動という点から以下で考えてみる. 換気回数2.0[1/h]の場合, 壁体から室への水分流が年平均値で1.26[kg/day]あり, 換気を行うことで, 年間を通じて壁体から外気へ水分流出系となっている. これにより放湿に伴う潜熱が壁体の温度を下げ, 室温を低下させ年平均値にも影響していると考えられる. 従って壁体の吸放湿による相変化熱が地下空間の温度に与える影響は大きいといえる.

#### 6-4-3 壁体の熱・湿気性状への換気量の影響

図6-13,14に換気回数2.0[1/h]の場合の室内側表面熱流及び水分流をそれぞれ示す(室への流入を正とする). 熱流は換気を行わない場合と比較して, 天井面は小さく, 床面周辺は大きくなる. 水分流は夏期に床面周辺で吸湿するが, 他の時期は全部位で放湿する. 図6-15に換気回数2.0[1/h]の場合の壁面全体及び換気による水分流出入の年変動を示す. これより夏期には壁体へ吸湿していることがわかる. これは壁体に防湿層を設けない場合, 地盤から水分供給があることから, 壁体から室へ常に放湿するような事も考えられるが, 夏期に壁体が吸湿性能を持つことを示している.

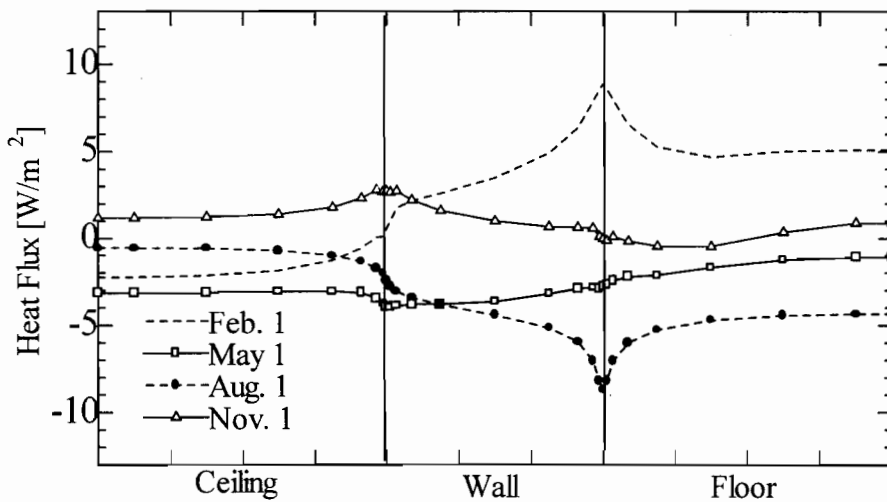


図6-13 室内側表面熱流分布 (換気回数 2.0[1/h])

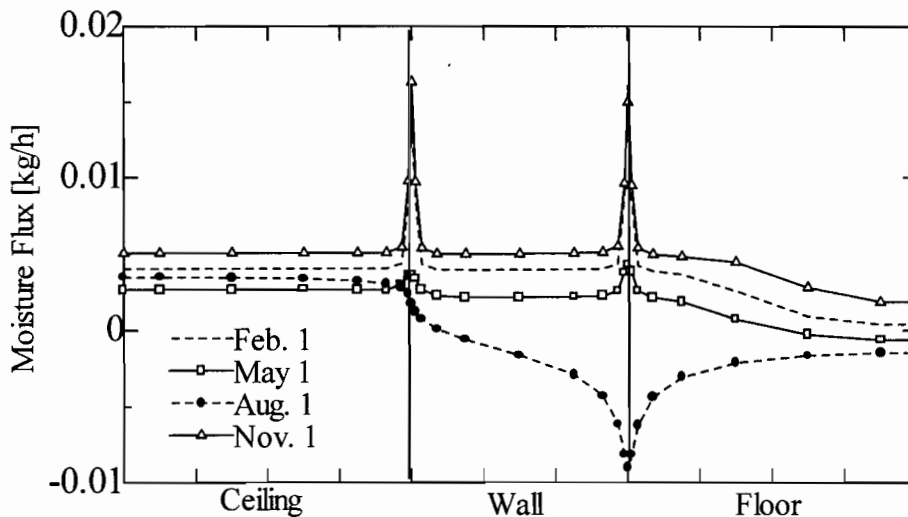


図6-14 室内側表面水分流分布 (換気回数 2.0[1/h])

次に図6-16,17にそれぞれ換気回数2.0,5.0[1/h]の場合の壁体表面の含水率分布を示す。換気無しの場合には冬期に天井面で表面結露が発生したが、換気回数2.0,5.0[1/h]の場合では、図6-16,17より年間を通じて比較的乾燥している。壁面及び床面では、換気回数2.0[1/h]の場合では夏期に広い範囲にわたって表面結露が発生し、換気回数5.0[1/h]の場合では床面隅角近傍のみ表面結露が発生する。両者とも夏期以外は乾燥している。表面結露発生面積の年変動についてみてみると、図6-18に示すように結露発生期間は換気回数0.5[1/h]では4ヶ月に及んでいる。発生部位は床全面及び壁面である。換気回数0.5と2.0[1/h]を比較すると、7月に換気回数2.0[1/h]の方が発生面積が大きくなった。これ以上の換気回数に対しては発生期間及び面積は減少し、換気回数10 [1/h] 以上で発生しなくなる。

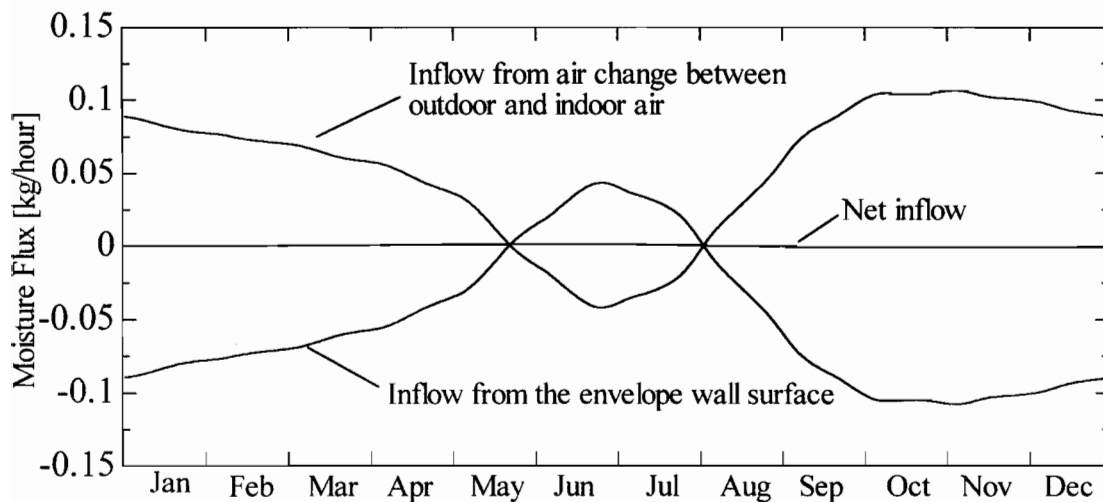


図6-15 室内水分流出入の年変動 (換気回数 2.0[1/h])

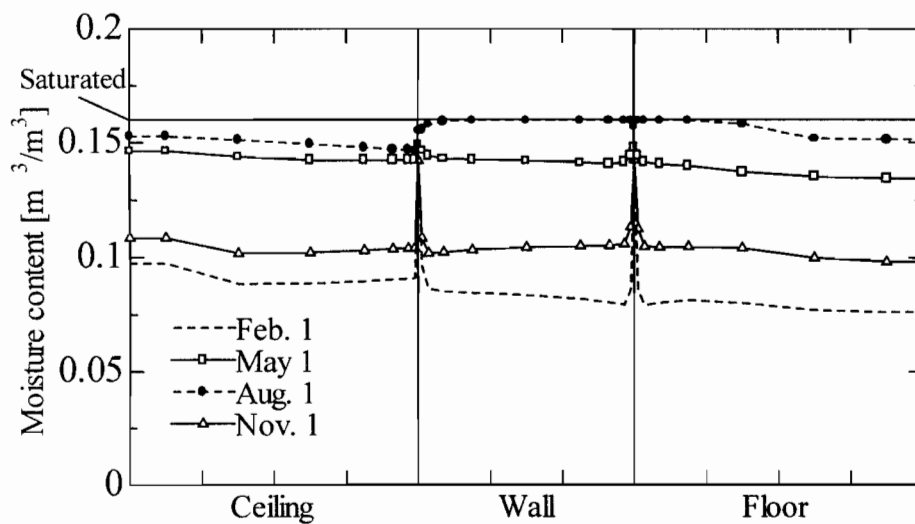


図6-16 室内側表面含水率分布 (換気回数 2.0[1/h])

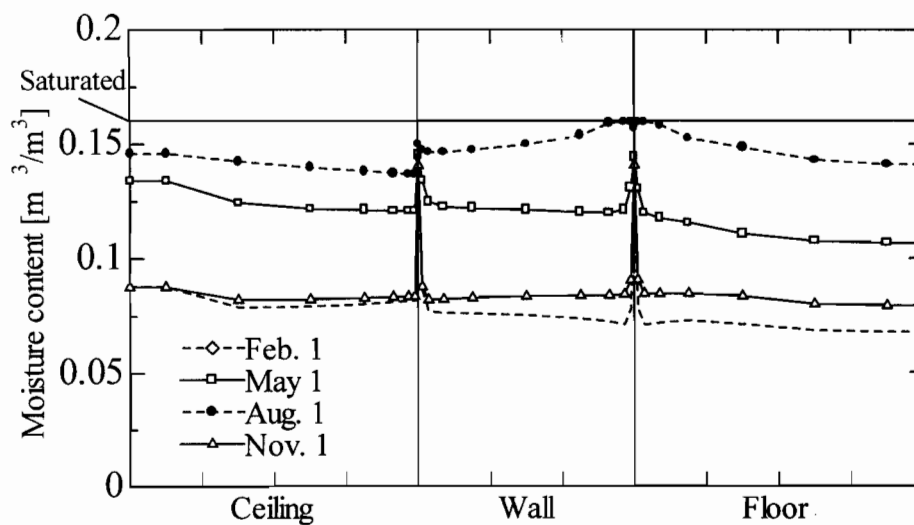


図6-17 室内側表面含水率分布 (換気回数 5.0[1/h])

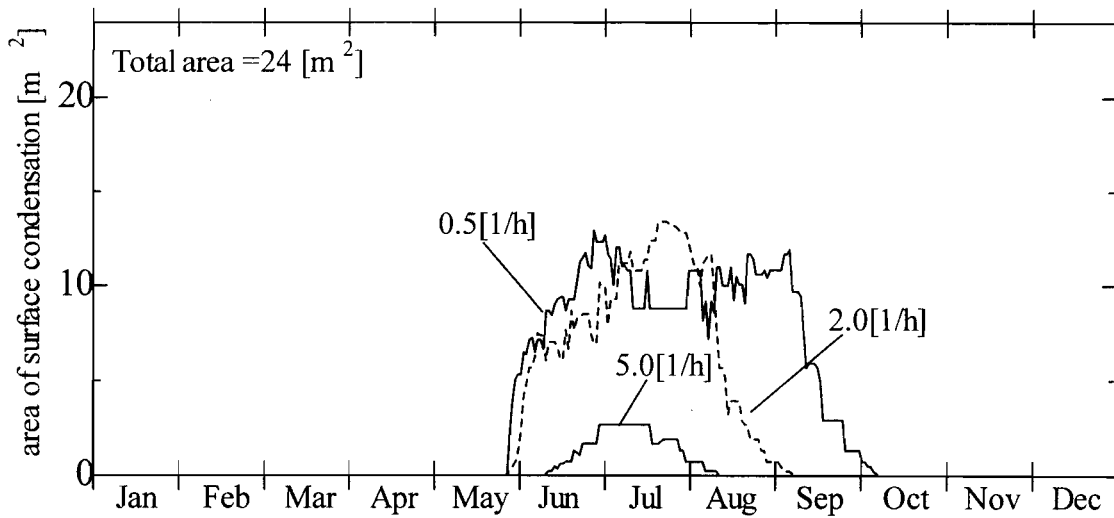


図6-18 表面結露発生面積の年変動

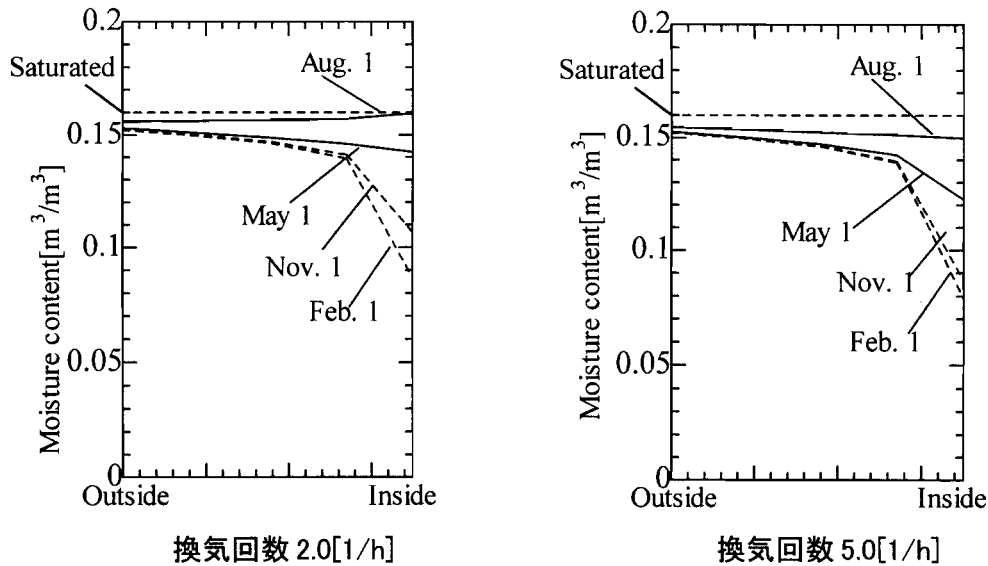


図6-19 壁体内含水率分布（壁面中央高さ）

図6-19に換気回数0,2.0,5.0[1/h]の場合の壁面中央高さにおける壁体含水率分布を示す。換気を行わない場合は壁体はほぼ飽和状態に保たれるが、換気を行う場合、夏期には室内側表面で含水率が非常に高くなり、冬期には低下する。例えば換気回数2.0[1/h]の場合、冬期には室内側表面の相対湿度は78[%]になる。

夏期の壁体表面における結露発生の原因は、外気からの水分流入の影響が大きいといえる。また面積の変化の原因は、換気回数の増加に伴う室温の変化が室水蒸気圧の変化に比べ緩やかなことと換気により持ち込まれる水分量にあると考えられる。前述のとおり、換気回数増加

により室水蒸気圧は外気の高い値にすぐに近づくが、室温は周壁の熱容量により緩やかに上昇して近づく。このため換気量がある程度大きくなるまでは室は高湿度かつ低温かつ周壁温も低いことから表面結露が発生し、同時に換気による持ち込み水分が大きくなることから結露発生面積が大きくなる場合が生じていると考えられる。

以上から、壁体に防湿層が無い場合でも、壁体は吸湿性能を持ち、換気回数を充分とることで室相対湿度を低く保ち、表面結露が抑えられるといえる。

## 6-5 壁体防湿層配置の影響

### 6-5-1 計算条件

解析方法及び対象は前節の通りとし、壁体構成として異なる防湿層配置の地下構造物についてそれぞれ換気回数を変化させた解析を行った。防湿層配置は典型として以下の3種類を考える。1)防湿層を全く設けない場合（以下「透湿」）、2)壁体地盤側表面に防湿層を設ける場合（以下「外断湿」）、3)壁体室内側表面に防湿層を設ける場合（以下「内断湿」）。

なお「内断湿」の解析には壁表面温度が室空気の露点温度より低いとき、表面結露発生とし水分伝達を考え、空気と壁体表面の間では以下の水分伝達式を用いた。

$$J = \alpha'_m (p_r - p_j)$$

ここで、 $J$ は水分流[kg/m<sup>2</sup>s]、 $p_r$ は室空気の水蒸気圧[Pa]、 $p_j$ は壁体表面jでの飽和水蒸気圧、 $\alpha'_m$ は湿気伝達率[kg/m<sup>2</sup>sPa]である。ただし他の計算と同様、これによる水分蓄積は考えない。なお、「透湿」の場合は、前節で検討した対象と同一のため、結果の考察を省く。

### 6-5-2 「内断湿」の場合

図6-20に室相対湿度の日平均値の年変動をそれぞれ示す。室相対湿度は換気回数0.5[1/h]では、夏期に室空気は95[%]をこえる高湿な環境が3ヶ月以上続き、冬期は約40[%]の低湿になる。これは壁体の吸放湿性がないことから、換気によって外気から水分流入の影響が緩和されないためである。換気回数0.5[1/h]と2.0[1/h]の場合を比較すると夏期の相対湿度はほとんど変わらない。表面結露発生面積を図6-21に示す。換気回数0.5[1/h]の場合、結露発生期間は5月半ばから9月まで3ヶ月以上つづき、発生面積最大時には床面及び壁面



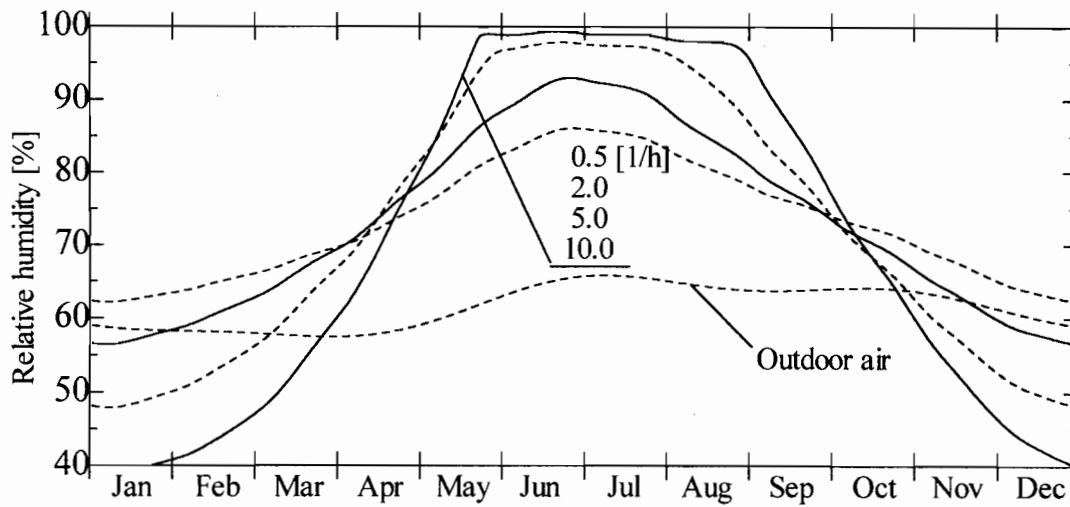


図6-20 「内断湿」の場合の地下室相対湿度の年変動

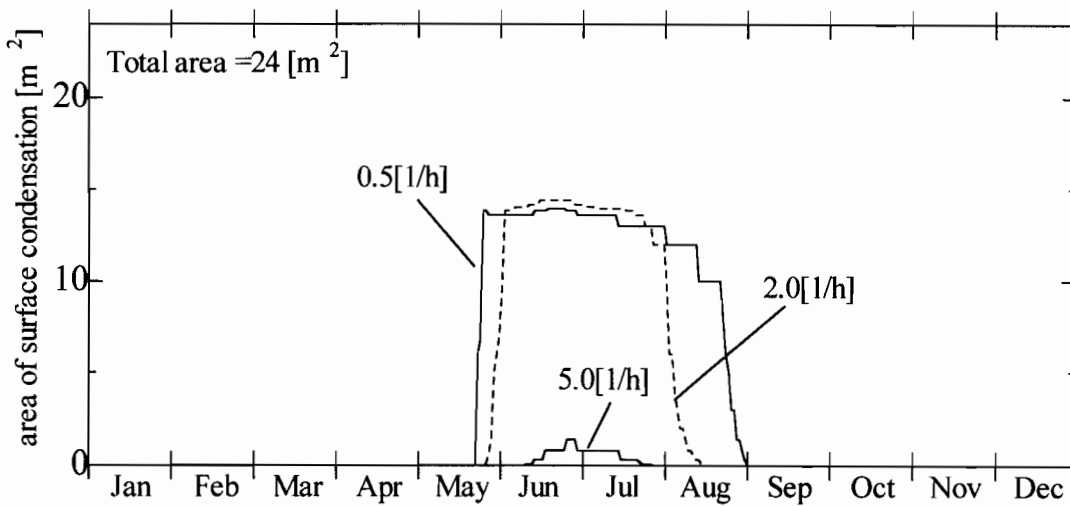


図6-21 「内断湿」の場合の表面結露発生面積の年変動

全面となった。換気回数2.0[1/h]の場合では結露発生期間は2ヶ月強に減少するが、結露発生最大面積は0.5[1/h]の場合よりむしろ大きくなる。それ以上の換気回数になるとその面積は減少し、10[1/h]以上では全く発生しなくなる。この結露発生面積の変化の原因は、換気回数の増加に伴う室温の変化が室水蒸気圧の変化に比べ緩やかなことにある。換気回数増加により水蒸気圧は外気の高い値にすぐに近づくが、室温は周壁の熱容量により緩やかに上昇して近づくため、ある程度換気量をとるまで室は高湿度かつ低温となり、周壁温が低いことから表面結露が発生する。

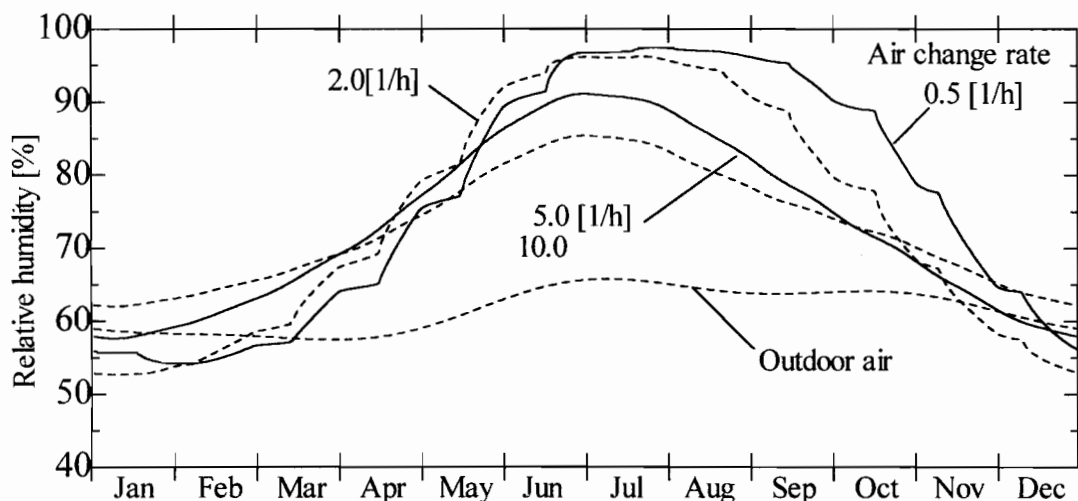


図6-22 「外断湿」の場合の地下室内相対湿度の年変動

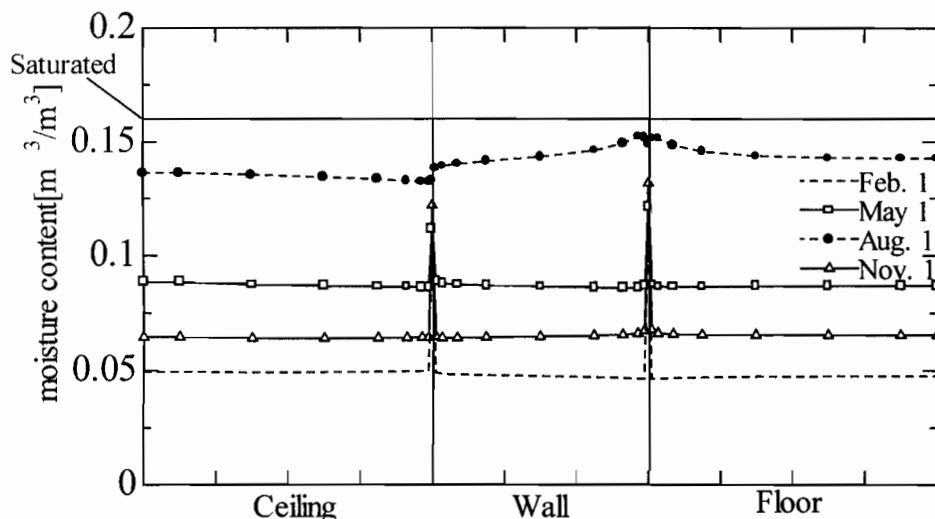


図6-23 「外断湿」の場合の室内側表面含水率分布 (換気回数 2.0[1/h])

### 6-5-3 「外断湿」の場合

図6-22に室相対湿度の日平均値の年変動を示す。換気回数0.5[1/h]の室相対湿度は夏期には95%以上と高く、冬期には約55[%]と低くなる。換気回数2.0[1/h]の場合の室内側表面の含水率分布を図6-23に示す。夏期には床面隅角周辺で高い値を示すが表面結露は発生せず、それ以外の時期は比較的乾燥している。このケースでは換気回数によらず表面結露は発生しない。つまり壁体が外気から流入する水分を十分吸湿することで夏期表面結露の発生を抑えている。ただし表面の水分状態は例えば換気回数2.0[1/h]の場合、最大で床面隅角部で相対湿度が98[%]、表面含水率が15.1[%](飽和16[%])となっており表面結露発生の危険性は高い。

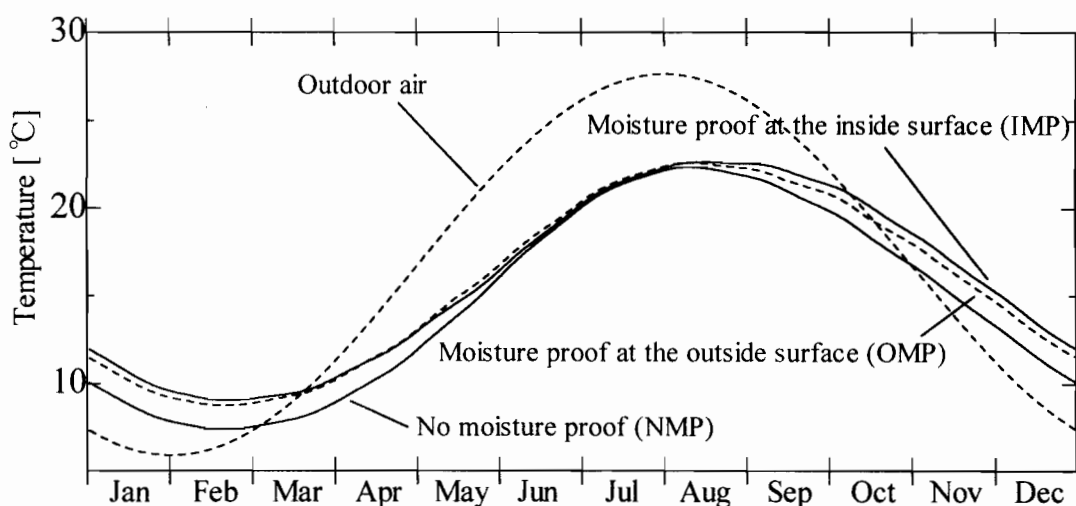


図6-24 a 各種防湿層配置の地下室内温度の年変動

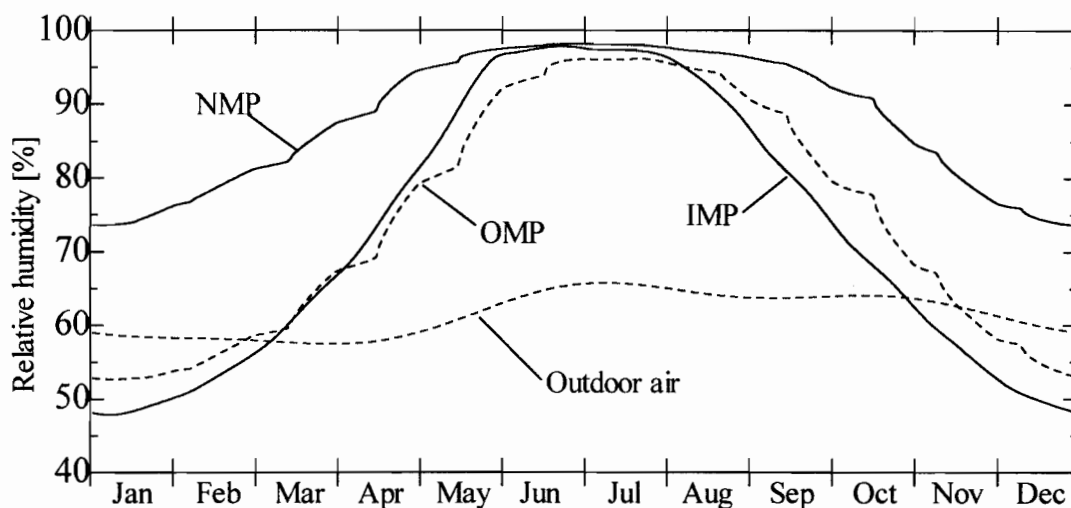


図6-24 b 各種防湿層配置の地下室内相対湿度の年変動

#### 6-5-4 各種壁体の比較・検討

図6-24に換気回数2.0[1/h]の場合の3種壁体における温度、相対湿度年変動を示す(図中、NMP=「透湿」、OMP=「外断湿」、IMP=「内断湿」)。表6-3に各壁体の換気回数の違いによる室内温度の年平均、最高、最低値を示す。図6-24,表6-3より室温は各壁体間で夏期にはほとんど一致するが、冬期には「内断湿」がもっとも高く、「透湿」がもっとも低くなり、年平均値で比較する1.2°Cもある。壁の吸放湿及び表面結露発生にともなう潜熱が室温に与える影響が大きいことを示している。相対湿度は、夏期には「透湿」と「内断湿」がほ

表6-3 各種防湿層配置の地下室内相対湿度の年変動

ケース	換気回数[1/h]	年平均[°C]	年最高[°C]	年最低[°C]
「透湿」	0	16.5	20.0	13.0
	0.5	15.2	20.9	9.8
	2.0	14.7	22.6	7.1
	5.0	14.8	24.0	5.5
	10.0	15.0	25.4	4.4
「外断湿」	0.5	16.1	21.1	11.1
	2.0	15.7	22.9	8.5
	5.0	15.5	24.6	6.3
	10.0	15.4	25.9	4.9
「内断湿」	0.5	16.4	21.2	11.5
	2.0	15.9	22.9	8.8
	5.0	15.6	24.7	6.4
	10.0	15.5	26.0	4.9
外気		15.3	29.1	1.5
不易層		16.4		

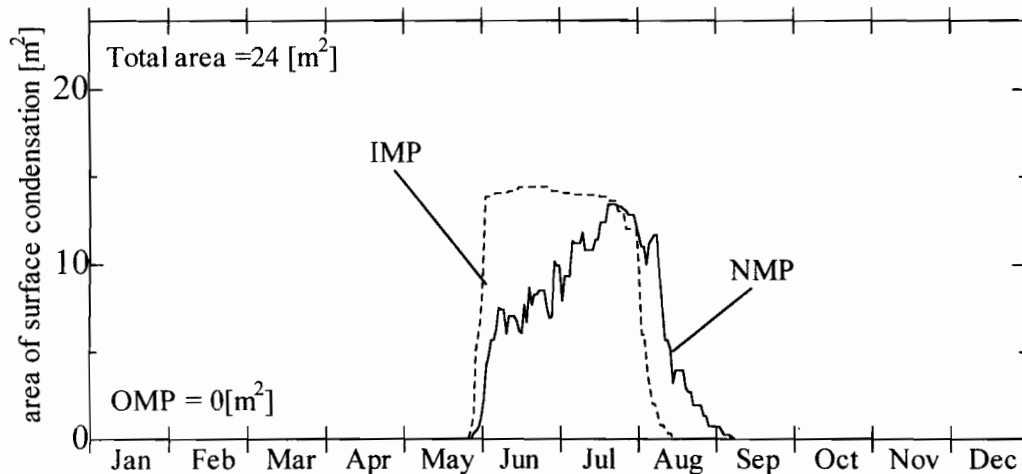


図6-25 各種防湿層配置の表面結露発生面積の年変動（換気回数 2.0[1/h]）

ば等しく95%程度であり、「外断湿」は90%と最も低くなっている。表面結露は「外断湿」以外の壁体で発生するが、10[1/h]以上換気回数をとればどの壁体でも抑えられる（図6-18,6-21）。「透湿」と「内断湿」を比較すると表面結露発生は定性的には等しいが量的には異なる。これは壁体の吸放湿の有無が影響している。また「外断湿」で表面結露が発生しないことから壁体の吸湿量が最も大きいことがわかる。これに対して地盤との水分のやりとりがある「透湿」では表面結露が発生することから地盤内水分の影響は小さくない。図6-25より発生期間で見ると「透湿」が最も長くなるが、発生部位面積で見ると「内断湿」が最も大きく発生した

時の危険度が高いといえる。以上より地下構造物の夏期の結露及び高湿環境を抑えるためには、防湿層は壁体外側に設けることが望ましいといえる。つまり壁体の吸放湿性を十分もたせ、地盤からの水分流入を抑えることが最も有効であるといえる。また室内側表面を防湿する場合は表面結露発生時の危険度が最も高いといえる。それから換気量のある程度大きくとれば防湿層に配置に関わらず表面結露は発生しないが、換気量増加により表面結露が助長される危険性がある。

## 6-6 常水面深さの影響

### 6-6-1 計算条件

解析方法及び対象は5-2節の通りとする。壁体は防湿層を設けない場合とし、常水面深さは2m、6.4m、14.4mの3ケースについて考える。なお地下構造物と常水面深さとの関係は、常水面深さ2mは地下構造物天井面より1m上に水位がある場合で、6.4mは地下構造物床躯体の地盤側表面に常水面がある場合となっている。解析に関して以下の3つの仮定を置く。

- 1) 常水面深さは年間を通じて一定とする。
- 2) 常水面より深い地盤では土中水は静止しているものとする。つまり常水面以下では鉛直方向に静水圧分布が形成されるものとする。
- 3) 常水面深さの位置にかかわらず壁体内部の水分状態は変化するものとする。

なお常水面以下の壁体内部の解析で水分化学ポテンシャルが正となる場合があるが、その計算は飽和時にも不飽和時と同じ方程式を用いる近似解法を用いる。飽和時にも水分容量項を与えて解く手法は水理学で用いられておりここでは同じ考え方を使っている。具体的には飽和時について水分化学ポテンシャルが $-0.01$  [J/kg] の時の水分容量項の値をそれより以上の水分状態においても固定して与えた。水理学ではこの水分容量を比貯留係数と呼ぶ。また常水面深さが14.4mの場合は、前節の「透湿」の場合と等しいので結果の考察を省略する。

### 6-6-2 常水面深さ6.4mの場合

図6-26に室相対湿度の年変動を示す。室温は14.4mの場合とほぼ等しかった。図6-12b,26より室相対湿度は14.4mの場合よりやや高い値で変動するが、その差は非常に小さい。図に

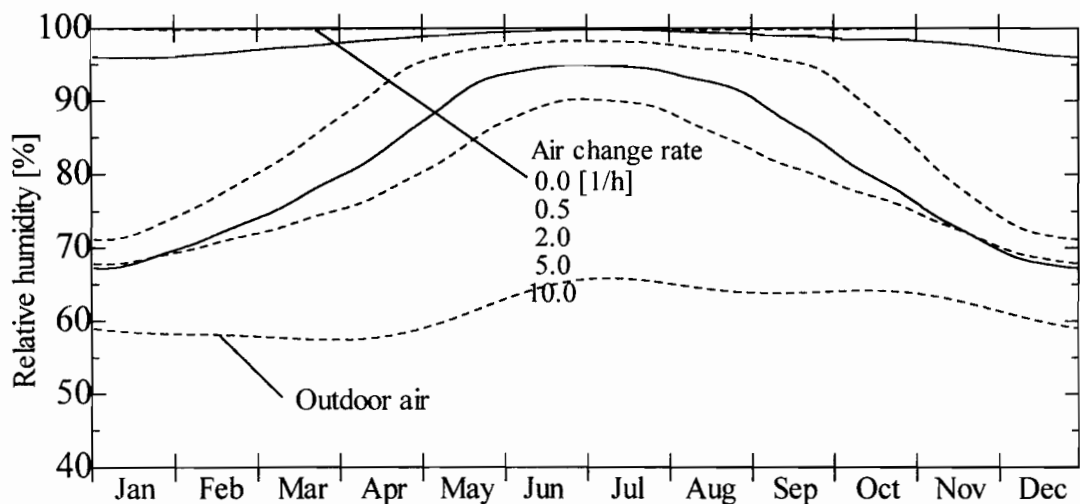


図6-26 常水面深さ6.4mの場合の地下室内相対湿度の年変動

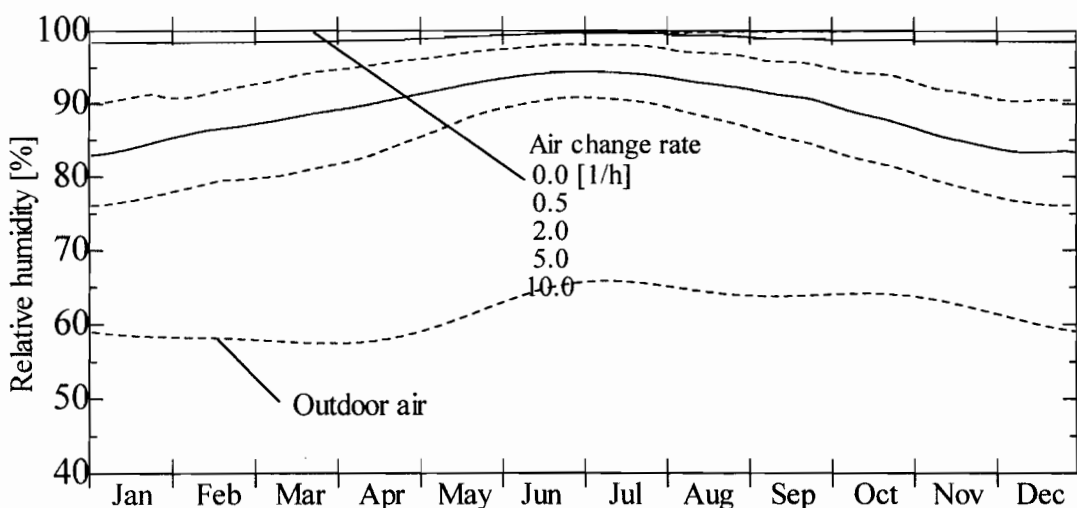


図6-27 常水面深さ2.0mの場合の地下室内相対湿度の年変動

は示していないが表面結露の発生も同様であった。

### 6-6-3 常水面深さ2mの場合

図6-27に室温、室相対湿度の年変動を示す。換気回数が0,0.5[1/h]では、年間を通じて相対湿度はほぼ100[%]であるが、5.0[1/h]以上では、冬期には80[%]程度までさがり、夏期は95[%]程度である。表面結露発生面積の年変動を図6-28に示す。換気回数0.5[1/h]では、結露発生期間は夏期と冬期に及び、夏期は床面及び壁面、冬期は天井面及び壁面で生じる。それ以上の換気回数では夏期に4ヶ月程度生じている。表面結露は25[1/h]で全く発生しなくなる。

#### 6-6-4 常水面深さの違いの比較・検討

まず地下構造物より下に常水面がある場合の比較として常水面深さ14.4m,6.4mを比較・検討する。常水面深さ14.4mと6.4mの場合は室温・湿度，表面結露性状全てにおいてほぼ等しい変動を示した(6-6-2節)。このことから常水面が地下構造物の床面下にある場合，その深さの違いが地下構造物の熱及び水分性状に与える影響はほとんどないといえる。次に常水面が地下構造物の上及び下にある場合について比較・検討する。常水面深さ6.4mと2mの場合の換気回数2.0[1/h]における室温，室相対湿度の比較を図6-29に示す。室温は冬期に常水面深さ2mの方がやや低くなるが，ほぼ等しい変動を示している。相対湿度は夏期には等しい変動を示すが，冬期は2mの方が高い。夏期の相対湿度がほぼ等しくなる理由として，壁面が飽和あるいはそれに近い状態となり両者の平均壁体含水率の差が小さくなることから，室空気と壁体との水分収支が両者ともほぼ等しくなるためと考えられる。また壁表面の結露性状は同じ換気回数であれば，常水面深さが床面下部より深い方が，発生部位面積が小さく，また発生期間も短くなる(図6-18,28)。ただし定性的にみると両者の室温・湿度及び結露性状は等しくなっており，換気回数を十分とれば夏期の湿度が低下し，表面結露が抑制される。これは以下の考察からも推測される。床面壁体外側の地盤で水分化学ポテンシャルは常水面深さが2mの場合は+53[J/kg]，14.4mの場合は最大で-5[J/kg]となるが，室空気の水分化学ポテンシャルは例えば相対湿度99[%]で-1360[J/kg]，90[%]で-14259[J/kg]である。地盤側の水分化学ポテンシャルは絶対値やその変化はせいぜい2桁のオーダーであるのに対して，室空気のその絶対値や変化は3桁以上となっている。室空気と地盤との水分化学ポテンシャルの差を壁体内水分流の駆動力と考えると，常水面深さの違いが劇的な駆動力の変化をもたらすものではない。また水分伝導率等の物性値も上記のような地盤側の水分状態ではその変化は小さい。

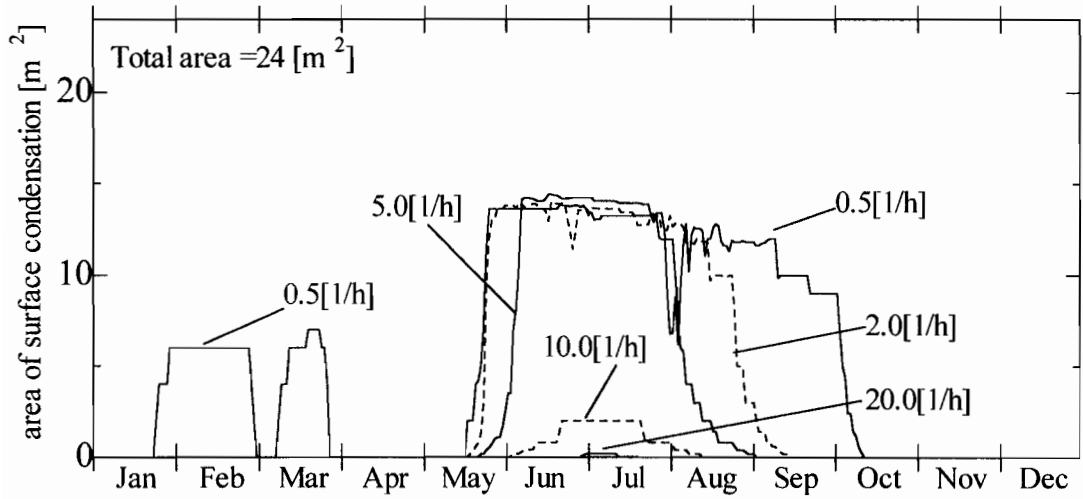


図6-28 常水面深さ2.0mの場合の表面結露発生面積の年変動

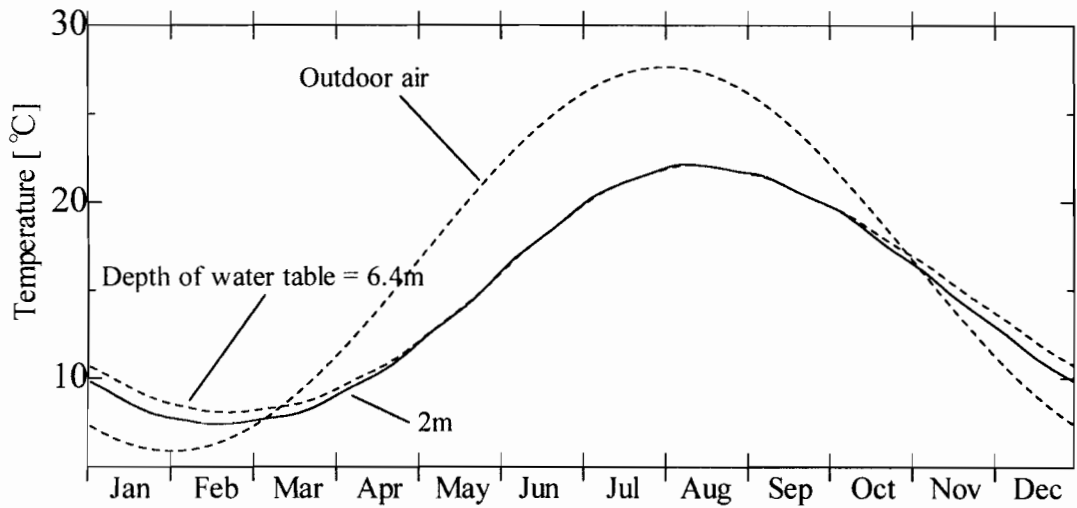


図6-29 常水面深さの違いによる地下室内温度の年変動比較

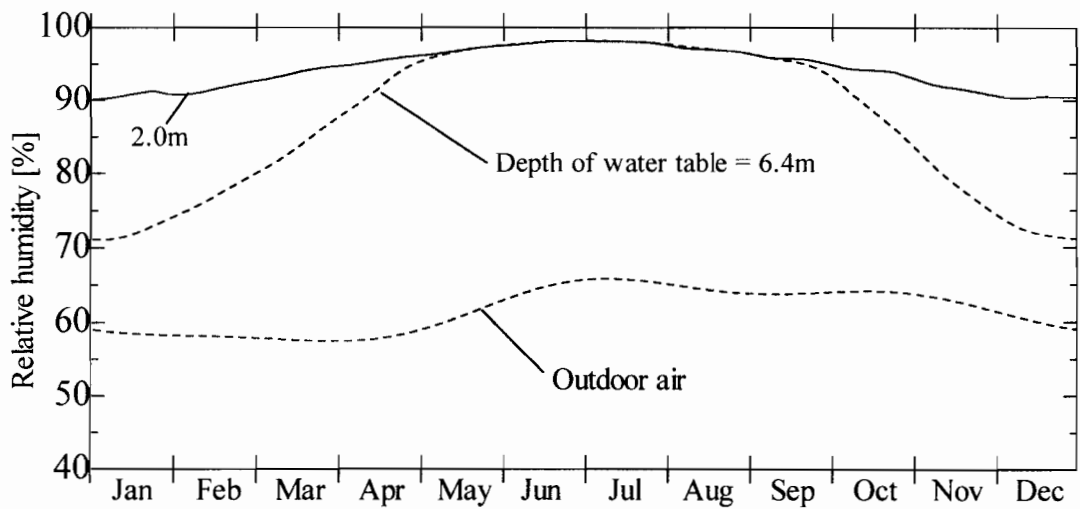


図6-30 常水面深さの違いによるの地下室内相対湿度の年変動比較



従って地下構造物の上と下に常水面が位置する場合において、室温・湿度及び結露性状に対して劇的変化は生じないと考えられる。以上をまとめると常水面深さが床面下の地盤より深い場合、その深さの違いが地下空間の温・湿度及び結露性状に与える影響はほとんどないといえる。また、たとえ常水面が地下構造物の上に存在しても換気回数を十分とることにより表面結露は抑えられ、室温・湿度及び結露性状は常水面深さの違いによって定性的に差はないといえる。

## 6-7 第6章のまとめ

第6章では、地盤と地下構造物との間の水分移動に対して大きな影響を及ぼすと考えられる要素として換気回数、壁体防湿層の配置及び常水面深さを考え、これらが地下構造物及び周辺地盤の熱・水分性状及び壁体の結露性状に与える影響を検討した。解析対象はコンクリートと防湿層のみ（断熱材及び内装材がない場合）で壁体が構成される完全埋設型地下構造物であり、室内条件を自然状態として検討を行い、以下の結論を得た。

1. 壁体の室内側表面の水分流は、壁体間の室空気を介した流出入があり、一方向性を示さない。
2. 壁体防湿層の配置の違い（室内側表面、室外側表面、なし）が、地下空間の温・湿度に与える影響は大きい。
3. 壁体室外側表面に防湿層を設けることが表面結露及び高湿環境を抑えるために最もよい。つまり壁体の吸放湿性を十分もたせ、地盤からの水分流入を抑えることが有効である。
4. 壁体に防湿層が無い場合でも、壁体は吸湿性能を持ち、換気回数を充分とることで室相対湿度を低く保ち、表面結露が抑えられる。常水面が地下室天井面上にあるような場合においても同様である。
5. 壁体の室内側表面を防湿する場合、表面結露発生時の発生面積が最も大きい。
6. 防湿層の配置に関わらず、換気量が小さい場合に表面結露が発生する危険性がある。また表面結露発生面積は換気量によるピークが存在し、換気量増加により表面結露が助長される危険性がある。

7. 防湿層の配置に関わらず、換気量をある程度大きくとれば表面結露は発生しない。
8. 常水面位置が床面下地盤より深い場合、その位置の違いは地下空間の温湿度および表面結露性状に影響しない。
9. 地下構造物の周辺地盤は、降雨浸透、常水面の影響を受け、含水率分布は一様とはならないが、その時間的变化は小さい。

## 第7章 地下構造物の結露防止の検討

### 7-1 はじめに

前章では、地盤と地下構造物との間の水分移動に対して大きな影響を及ぼすと考えられる要素として換気回数、壁体防湿層の配置及び常水面深さを考え、これらが地下構造物及び周辺地盤の熱・水分性状及び壁体の結露性状に与える影響について、壁体をコンクリート一層とした単純な構成の地下空間を対象として検討を行った。その結果、防湿層配置が地下構造物の熱・湿気性状に及ぼす影響が大きいこと、表面結露を防ぐためには防湿層を壁体の外側表面に設けることが有効であること、換気量を充分とることが防湿層配置及び常水面位置に関わらず室相対湿度低下及び結露防止上に有効であることが示された。しかし、実際の地下室の利用においては、このような単純な壁体構成及び室利用条件ではなく、断熱材、内装材といった材料を壁体に貼付したり、居室利用による熱・水分発生が存在する。一般的に地下室の結露を避ける目的で断熱材が使用されるが、その効果については壁体内水分移動の影響を考慮した上で十分に検討されていない。

本章では、地下構造物の居室利用を考慮した現実的な壁体構成を考え、これら構成が地下室の熱・湿気性状へ与える影響を、前章までと同じ解析法を用いて明らかにし、結露防止、高湿度環境抑制の効果について検討する。構造壁体であるコンクリートと断熱材、防湿層、内装材として吸放湿材といった材料を用いて壁体構成を変化させ、室利用条件として自然状態と空調状態を考えた。

### 7-2 計算条件

#### 7-2-1 解析対象と壁体構成

解析対象は図7-1に示すような地下室を考える。対象は2次元系とする。地下構造物の寸法は幅4.8m、天井高さ2.4mで、外気と接する壁体の高さは0.4m、コンクリートの厚さは0.2mとし、防湿層は全く設けないものとする。地盤は砂質土壌、地表面は裸地とする。この壁体構成のモデルを基本モデルと呼ぶ。このモデルに加え壁体構成は図7-2に示すような構成を考えた。図7のそれぞれの壁体構成について以下で説明する。(a)コンクリートの外側に断

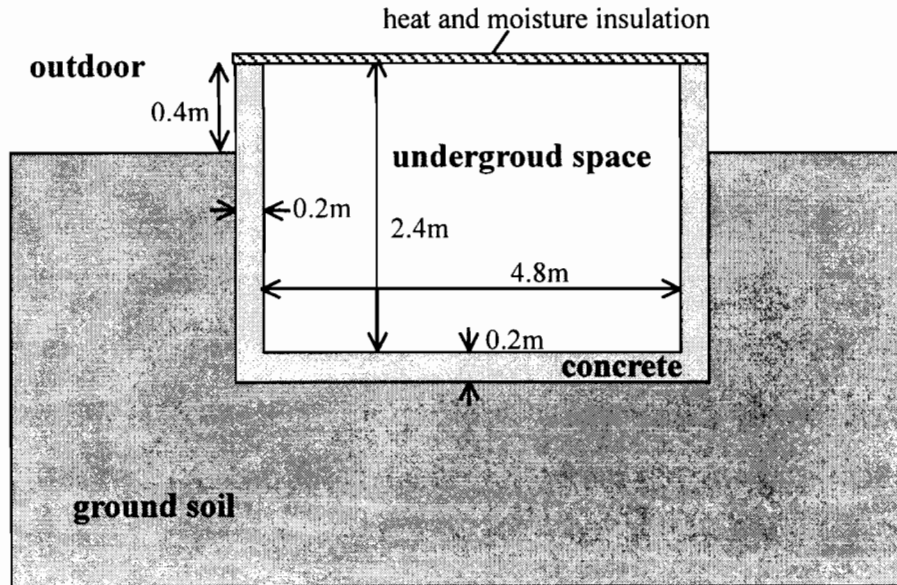
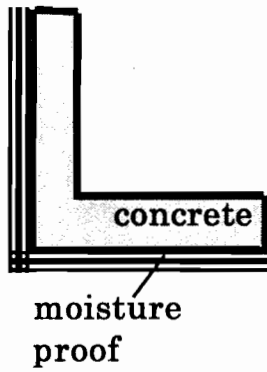


図7-1 解析対象

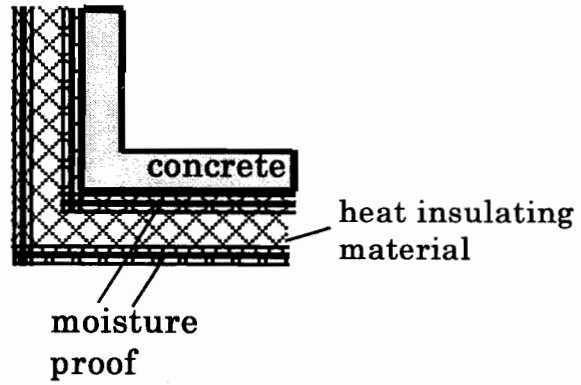
湿のみ施した外断湿モデル, (b) コンクリートの外側を断熱 (断熱材 5cm) 断湿した外断熱・断湿モデル, これら基本モデル、外断湿モデル、外断熱・断湿モデルの室内側にそれぞれ吸放湿材(軟質繊維板 1cm)を施した, (c) 吸放湿材モデル, (d) 外断湿・吸放湿材モデル, (e) 外断熱・断湿・吸放湿材モデル, また室内側に断熱、断湿した(f) 内断熱・断湿モデルである。

### 7-2-2 境界条件・初期条件

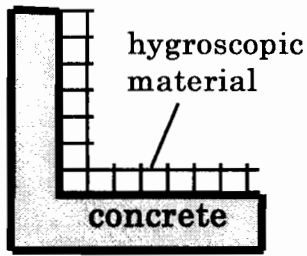
地盤内の境界条件は、地表面では第3種境界条件、地盤底部では、温度に関しては深さ 13.31m で、水分に関しては常水面位置である深さ 3.31m で第1種境界条件とし、温度と水分化学ポテンシャルはそれぞれ  $16.4[^\circ\text{C}]$ ,  $-3[\text{J}/\text{kg}]$  とした。また構造物中央の対称面及び構造物から 10.85m 離れた鉛直面の水平方向では断熱・断湿とする第2種境界条件とする。壁体室内側表面は通常、第3種境界条件とし、表面の飽和時には水分に関しては第1種境界条件とし、水分化学ポテンシャル  $0[\text{J}/\text{kg}]$  を与え、この時表面の水分は蓄積されず除去されるものとする。防湿層は完全断湿 (水分流 = 0) として取り扱う。外界気象条件は神戸で 1991 年 11 月 19 日から一年間の 1 時間ごとに測定されたデータを用いる。図 7-3 ~ 7-6 にそれぞれ外気温、外気相対湿度、全天日射量、降雨量を示す。



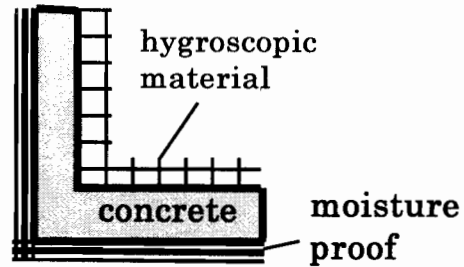
(a) 外断湿モデル



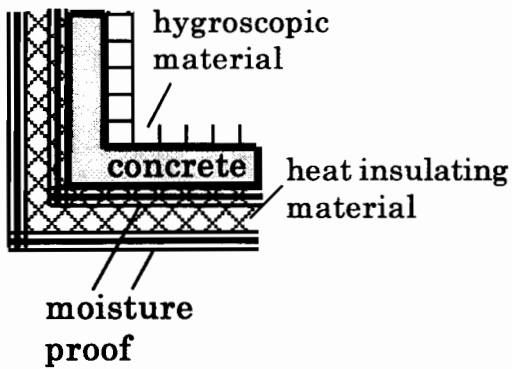
(b) 外断熱・断湿モデル



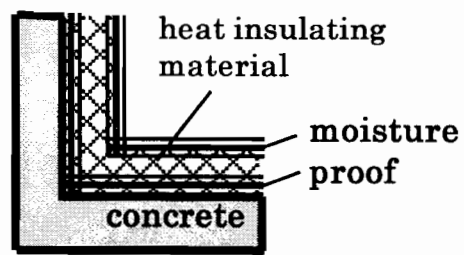
(c) 吸放湿材モデル



(d) 外断湿・吸放湿材モデル



(e) 外断熱・断湿・吸放湿材モデル



(f) 内断熱・断湿モデル

図7-2 各種壁体構成の概要

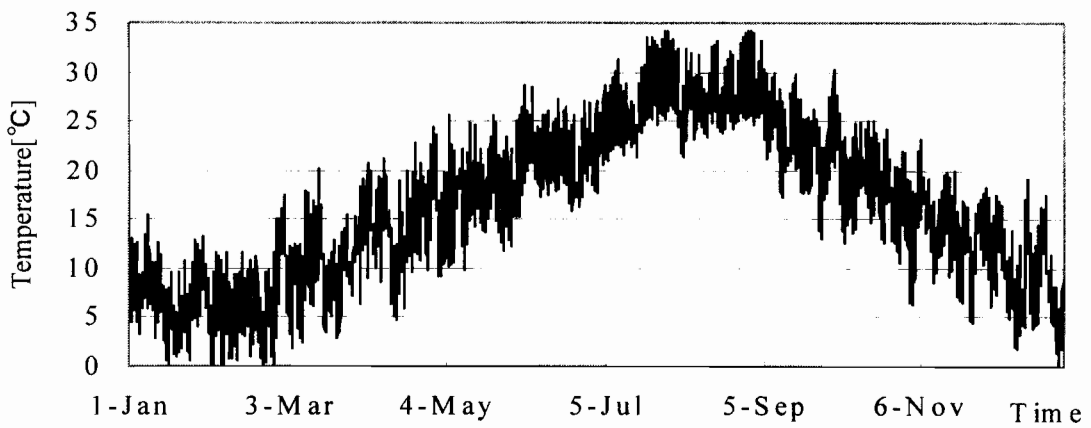


図7-3 外気温年変動

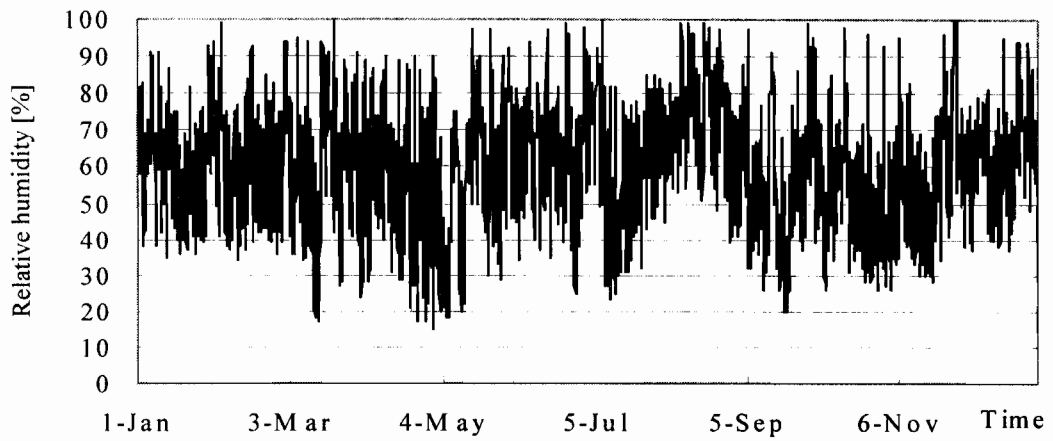


図7-4 外気相对湿度年変動

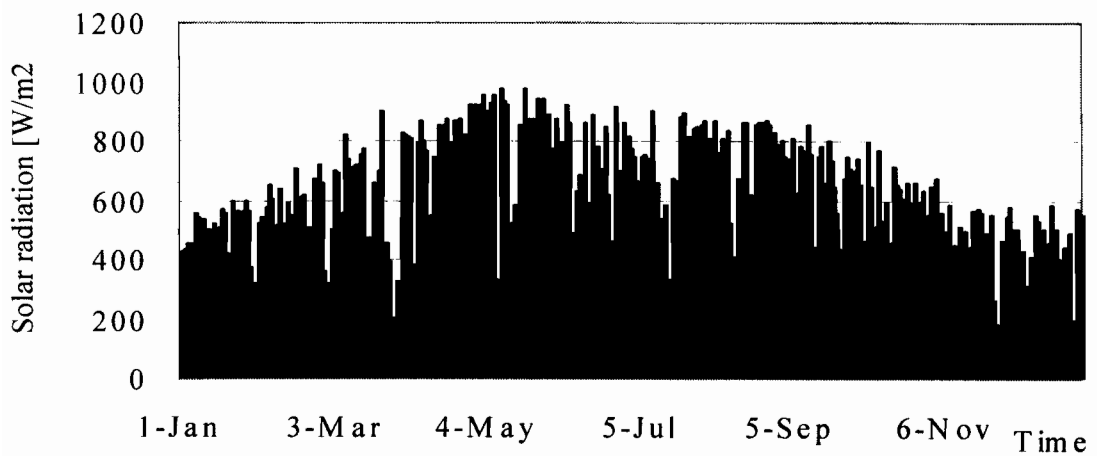


図7-5 全天日射量年変動

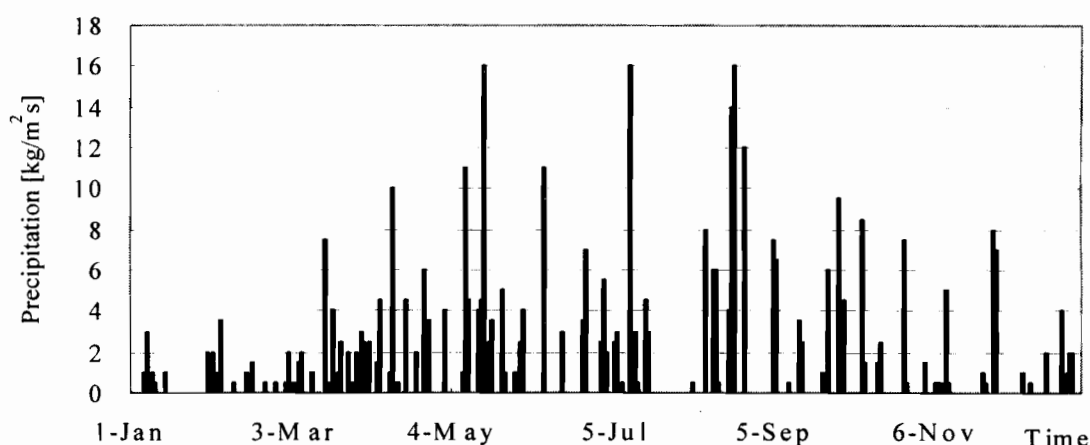


図7-6 降雨量年変動

室内条件は、自然状態と居住状態を想定した。自然状態は、内部発熱及び水分発生のない状態で換気は与えるものとする。居住状態は16時から22時まで単位面積当たりの熱・水分発生量が56[W]、 $3.92 \times 10^{-6}$ [kg/s]あるものとした。(これは床面積20.4 m<sup>2</sup>の居室で人間4人とテレビ1台の熱水分発生がある場合に相当する。)その時間帯に空調を行い室温を20℃以上28℃以下に保つ。換気回数については、基準を0.5[1/h]とした。基本モデル、外断湿モデル、外断熱モデルでは、室内条件が自然状態の場合にのみ換気回数を3.0,10.0[1/h]とした場合も考えた。

初期条件は、地盤、壁体(断熱材の水分状態は除く)の全領域で温度16℃、水分化学ポテンシャル-3[J/kg]とした。室温、室相対湿度は16℃、60%とした。

### 7-2-3 解析に用いた物性値

材料物性値に関しては、地盤はJuryの測定したPlainfield Sandを、コンクリートはHedenbladの測定値を元に構成したものとし、それぞれ第3章で示した値を用いる。吸放湿材は、軟質繊維板を用い池田[14]の測定した物性値を用いる。図7-7～10にそれぞれ軟質繊維板の含水率-水分化学ポテンシャル関係、水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率、温度勾配に関する水分伝導率、熱伝導率を示す。軟質繊維板の容積比熱は次式の値を用いる。

$$c_s \rho_s = (240.0 \times 0.44 + \rho_w \psi) \times 4186.05 \quad [J/m^3 K]$$

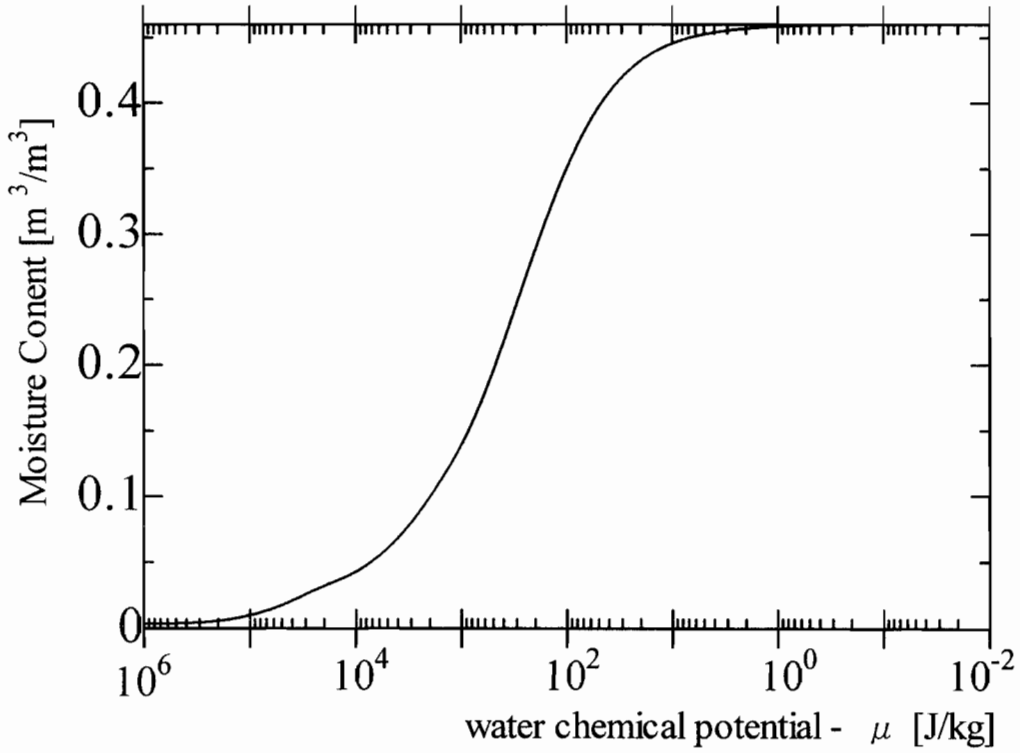


図7-7 軟質繊維板の含水率—水分化学ポテンシャル関係

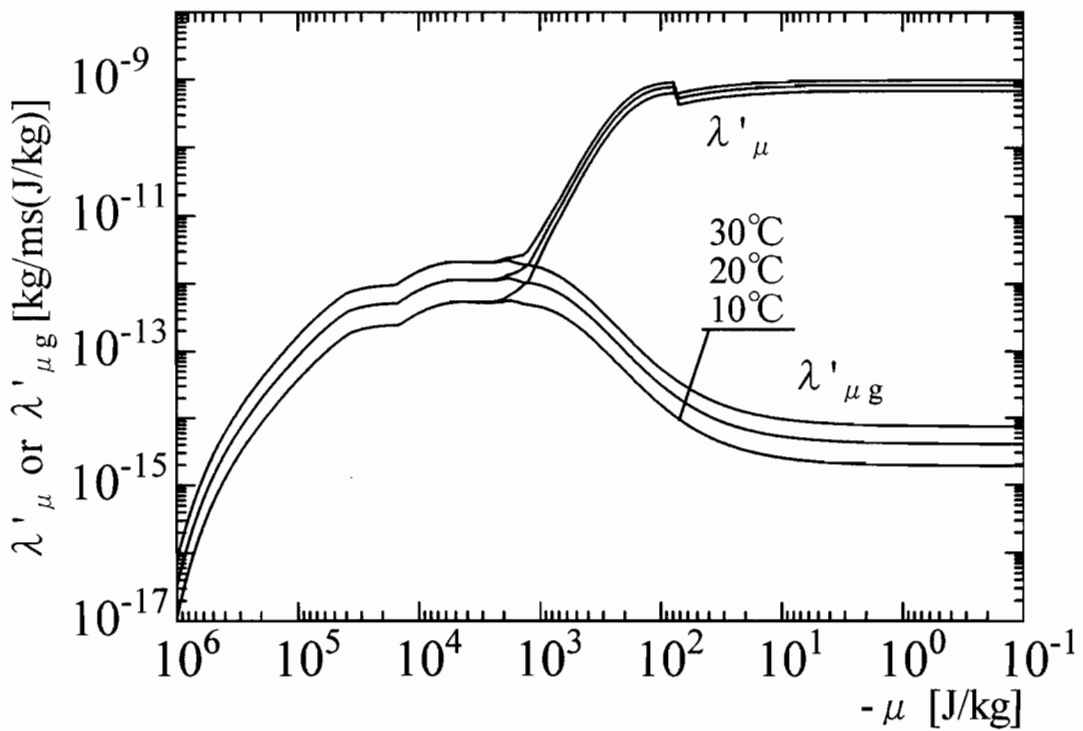


図7-8 軟質繊維板の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率



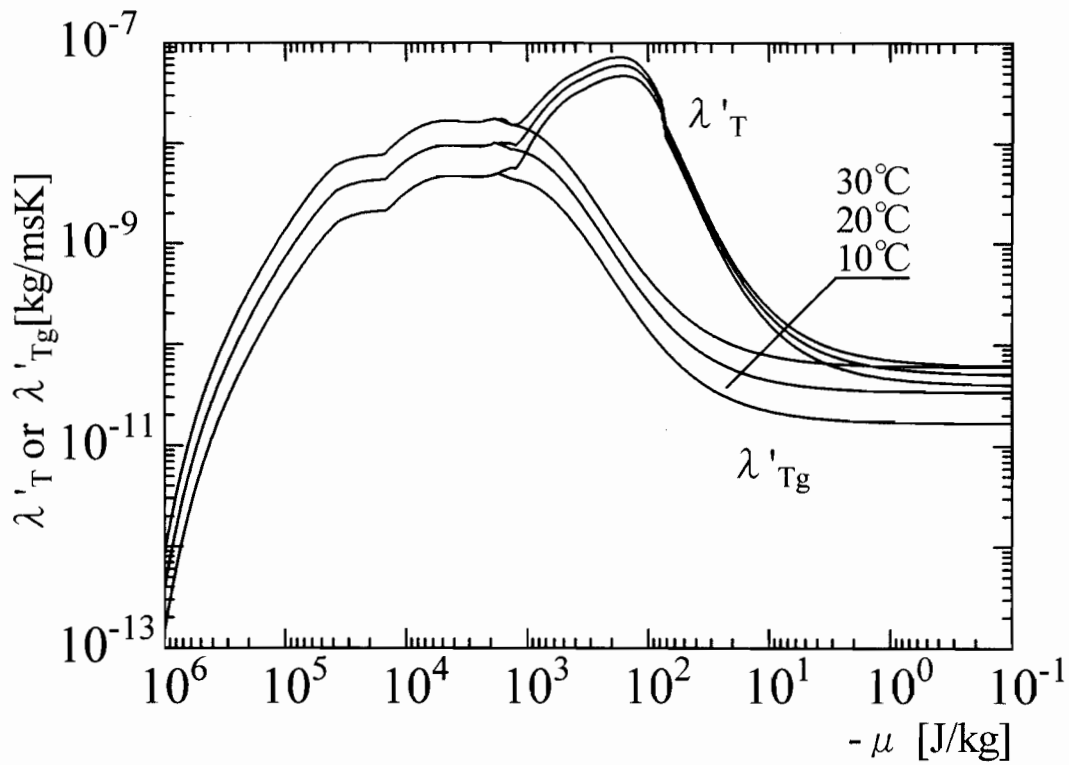


図7-9 軟質繊維板の温度勾配関する水分伝導率

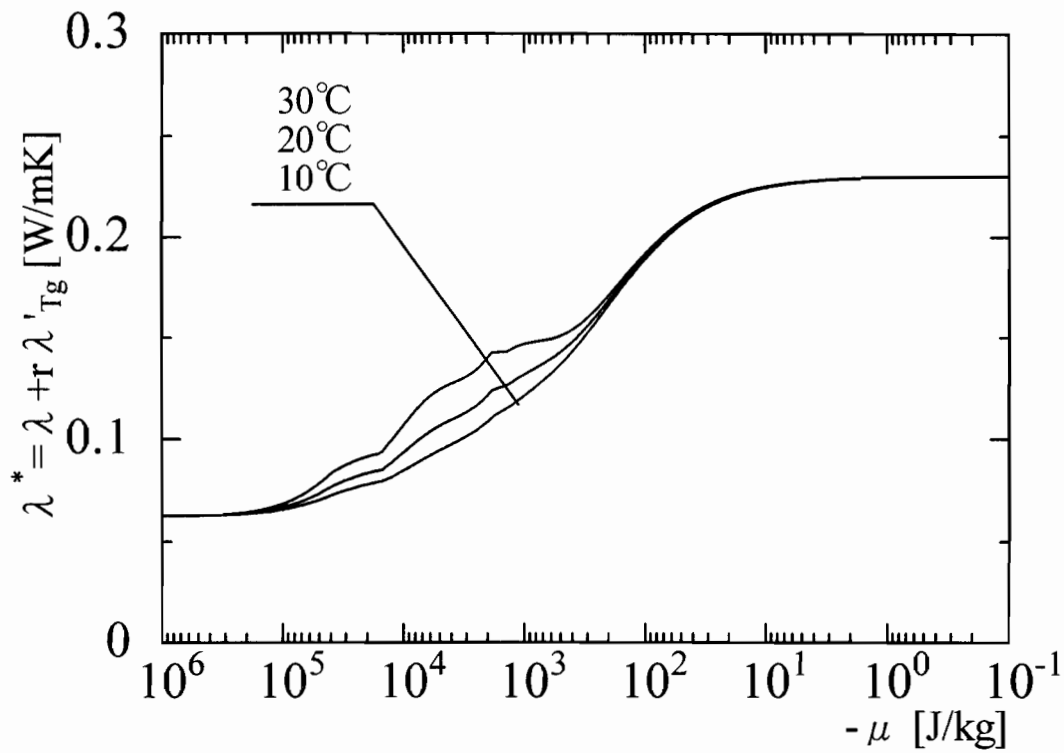


図7-10 軟質繊維板の熱伝導率

表7-1 その他の物性値

項目	(記号)	数値	[単位]
空気の熱容量	$(c\gamma)$	1256	[J/m <sup>3</sup> K]
空気の湿気容量	$(c'\gamma')$	$7.5 \times 10^{-6}$	[kg/m <sup>3</sup> Pa]
熱伝達率	外気側 $(\alpha_o)$	23.26	[W/m <sup>2</sup> K]
	室内側 $(\alpha_i)$	9.30	[W/m <sup>2</sup> K]
湿気伝達率	外気側 $(\alpha'_o)$	$11.4 \times 10^{-8}$	[kg/m <sup>2</sup> sPa]
	室内側 $(\alpha'_i)$	$2.44 \times 10^{-8}$	[kg/m <sup>2</sup> sPa]
日射吸収率		0.8	[-]

断熱材はフォームポリスチレンとし、材料表面に十分な防湿処理が施されているものとして水分移動は考えない。熱伝導率及び容積比熱は次式に示すような一定値を用いる。

$$\lambda = 0.038 \quad [W/mK]$$

$$c\rho = 7.35 \times 10^4 \quad [J/m^3K]$$

その他の物性値は表7-1に示すとおりである。

#### 7-2-4 計算方法

計算方法は前進型有限差分法を用いる。地盤及びコンクリートは以下の様に差分化する。地盤の鉛直方向の空間刻みは地表面で最小の0.025mとし、コンクリートの空間刻みは、あらかじめ妥当な刻みが得られるように、厚さ方向に対して室内側表面で最小の0.01m、内部は0.02mとした。質点数は地盤、コンクリート室空気の全部で1430点である。周期的定常状態を得るための計算助走期間は3年間であった。

### 7-3 結果と考察

#### 7-3-1 断熱・断湿の影響

まず断熱・断湿を施さない基本モデルについて自然状態、居住状態それぞれの場合の室温・湿度性状について検討する。図7-10a～cに基本モデルの自然状態の場合の地下室内温度、相対湿度、水蒸気圧の日平均値の変動を外気値の日平均値と併せて示す。図

7-10より年振幅に関して室温が外気より小さくなっていること、室相対湿度が夏期において90%を越える高い値になり冬期にも60%以下にはならない比較的高湿な環境にあることなど、前章の完全埋設型の地下空間において見られた特性がここでも確認できる。室水蒸気圧は年間を通じて外気値より高い値を示し、地盤から壁体を通して水分が放湿される影響が現れているといえる。次に壁体表面の湿度性状についてみる。図7-11に示すようなA～Cの湿度検討位置における相対湿度の年変動を図7-12に示す。図に示すように、B,C地点において夏期の6～9月初旬にかけて95%を越える高湿となり8月は常に相対湿度が100%になっている。一方A地点では、年間を通じて高湿ではあるものの90%を越えることはない。

基本モデルの居住状態の場合について図7-13a～cにそれぞれ地下室内温度、相対湿度、水蒸気圧の日平均値の変動を外気値の日平均値と併せて示す。居住状態では、年間を通じて自然状態より温度が上昇している。ただしその上昇は極端に大きくはない。これは1日6時間の室温設定時間のみ温度調節を行っているためである。図に示すように室相対湿度は、自然状態に比べ夏期において低下するものの、室水蒸気圧は自然状態より高い値を示している。水蒸気圧の上昇は室内における水分発生の影響が表れているという。室温から決定される飽和水蒸気圧及び室水蒸気圧の上昇の程度について、前者が相対的に大きいと、相対湿度低下が生じているといえる。次に壁体表面の湿度性状についてみる。壁面表面の相対湿度の年変動を図7-14に示す。自然状態と同様、B,C地点において夏期の6～9月初旬にかけて90%を越える高湿となり8月は常に相対湿度が100%になっており、A地点では、年間を通じて高湿ではあるものの90%を越えることはない。

以上から壁体表面の結露を考える上で、最も高い湿度変動を示す地点はB地点の床面隅角部であり、夏期においていずれの条件でもこの地点で結露が発生している。従って以下の検討では床面隅角部表面の相対湿度に注目する。

図7-15,16にそれぞれ自然状態、居住状態の場合の壁体床面隅角部の相対湿度変動の基本モデル、外断湿モデル及び外断熱・断湿モデルの比較を示す。

外断湿モデルでは、自然状態・居住状態ともに相対湿度が基本モデルに比べ低くなった。外断熱・断湿モデル（断熱材5cm）では、自然状態では、相対湿度は外断湿モデルとほとんど差がない。また、居住状態では相対湿度が外断湿モデルに比べて平均的に

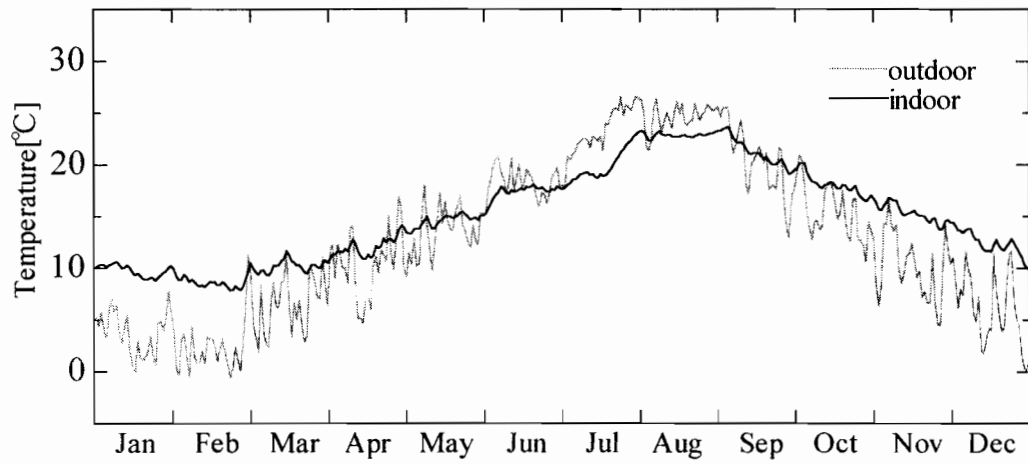


図7-10a 地下室内温度日平均値年変動（基本モデル，自然状態）

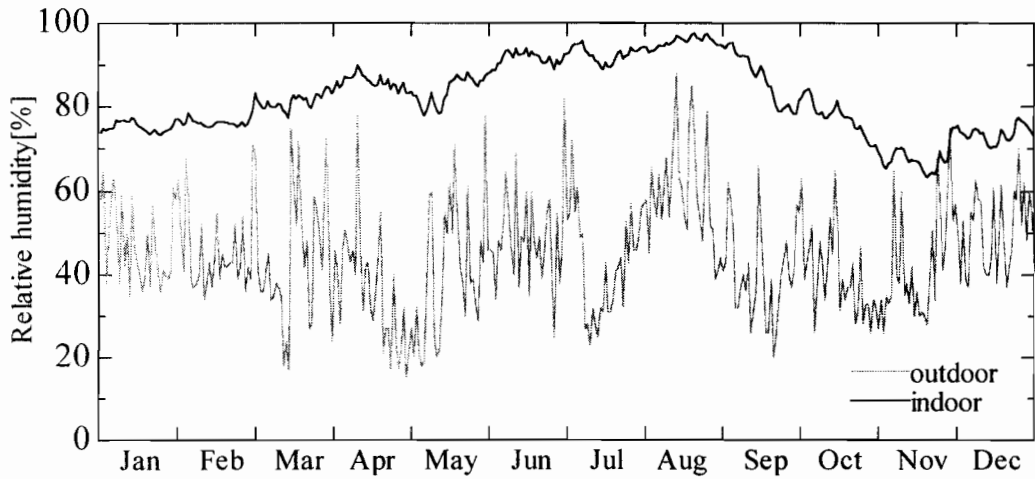


図7-10b 地下室内相对湿度日平均値年変動（基本モデル，自然状態）

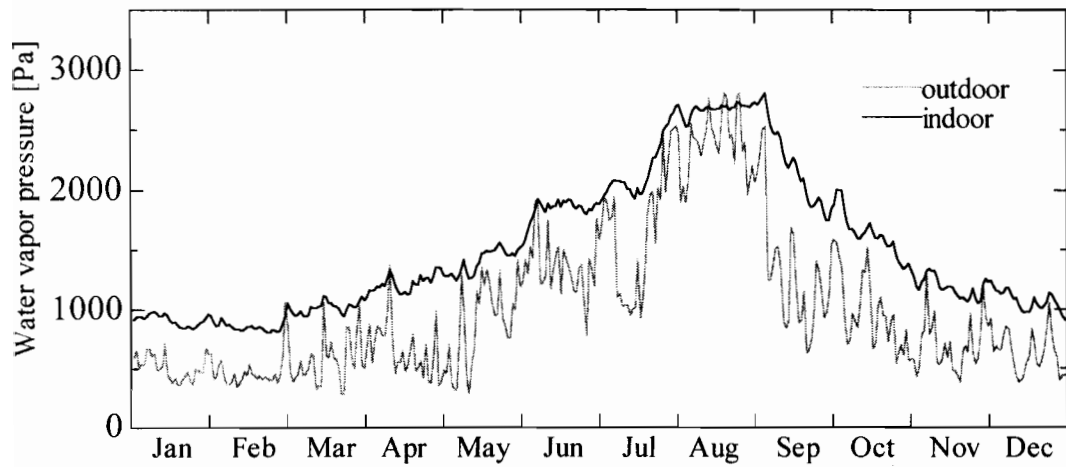


図7-10c 地下室内水蒸気圧日平均値年変動（基本モデル，自然状態）

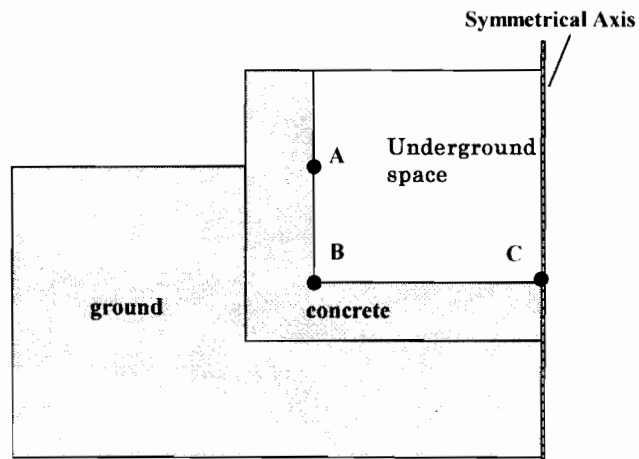


図7-11 地下室壁体の湿度検討位置

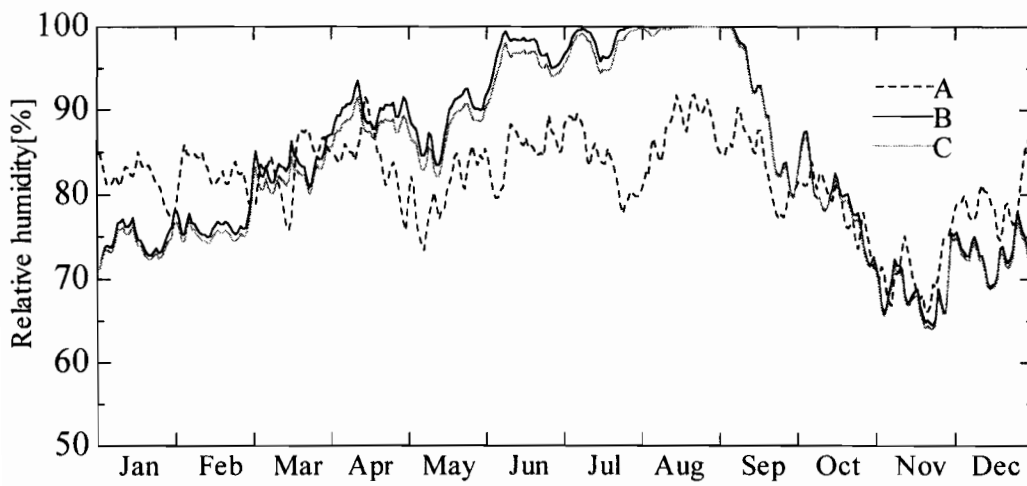


図7-12 壁体表面の相対湿度変動比較 (基本モデル, 自然状態)

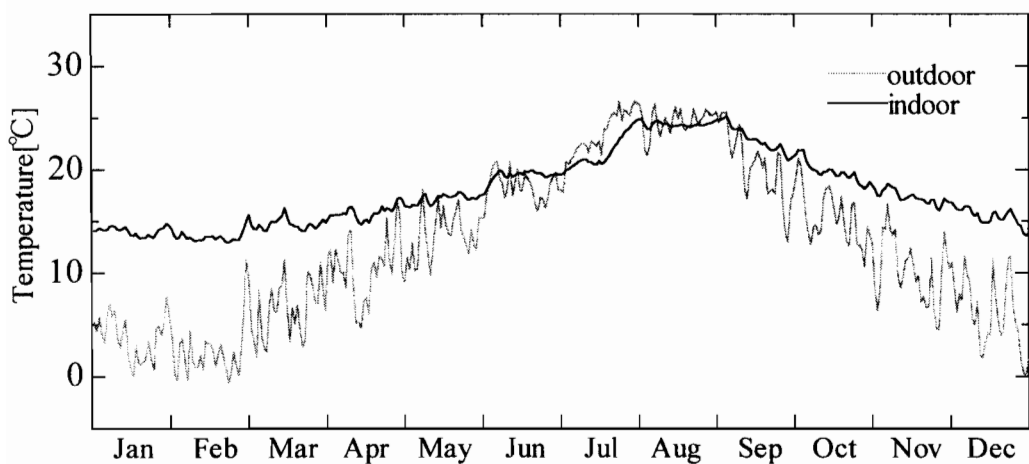


図7-13a 地下室内温度日平均値年変動（基本モデル，居住状態）

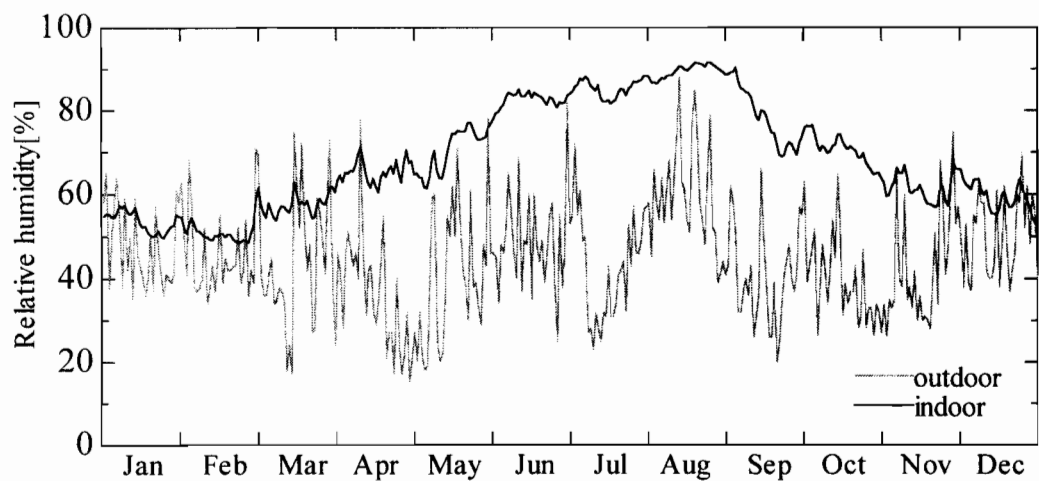


図7-13b 地下室内相对湿度日平均値年変動（基本モデル，居住状態）

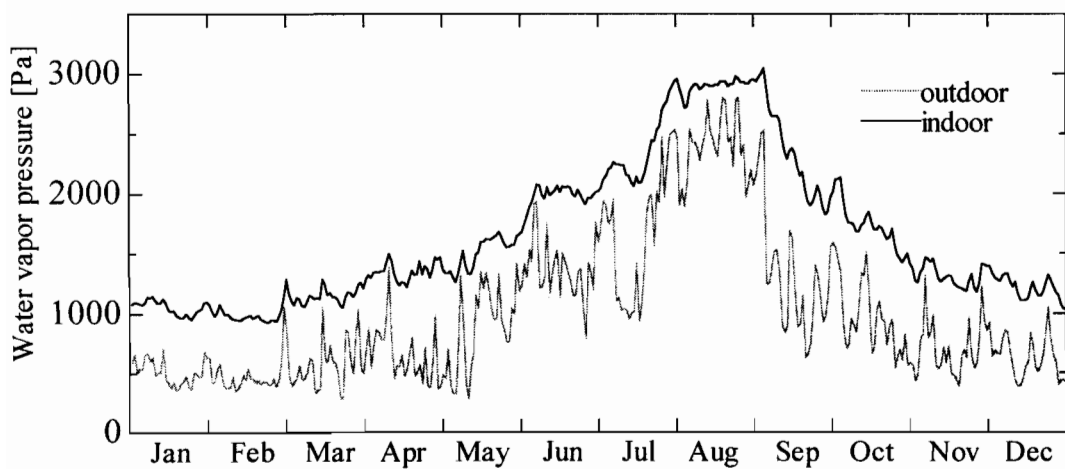


図7-13c 地下室内水蒸気圧日平均値年変動（基本モデル，居住状態）

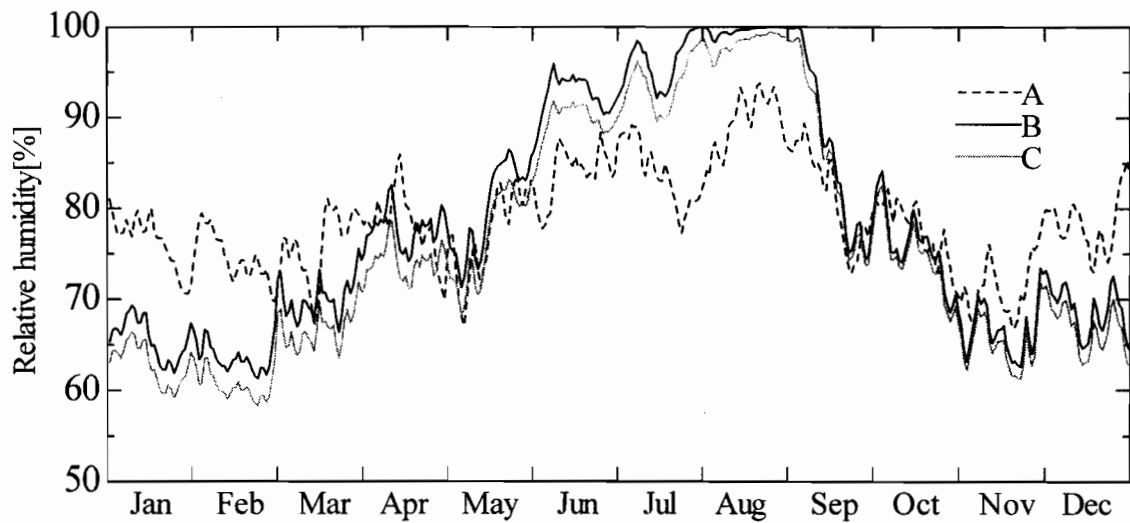


図7-14 壁体表面の相対湿度変動比較 (基本モデル, 居住状態)

7%下がった。このときの自然状態, 居住状態の室温変動を図7-17,18に, 室水蒸気圧変動を図7-19,20に示す。自然状態では, 室温は壁体の種類によって差がほとんどなく, 室水蒸気圧は基本モデルが高く, 外断湿及び外断熱・断湿がほぼ等しい値で変動している。これから壁体の相対湿度変動の差は水蒸気圧の差によって生じているといえる。一方居住状態では, 室温は外断熱・断湿モデルが他より高い値で変動しており, 室水蒸気圧は自然状態と同じく基本モデルが高く, 外断湿及び外断熱・断湿がほぼ等しい値で変動している。これから基本モデルと外断湿の間の差は, 室水蒸気圧の差が大きく影響しており, 外断熱・断湿と外断湿との間の差は室温の差が大きく影響しているといえる。また図7-21,22に示すように内断熱モデルでは激しく変動し結露が多くの日数で発生した。これは, 内断熱モデルでは壁体の吸放湿性がないことから, 外気持ち込み水分が壁体に吸湿されないため, 室相対湿度が上がりやすくなることによると考えられる。

以上から, 結露防止対策において, 地盤との境界を断湿することが有効であり, 断湿に加えて断熱材を配置することは, 室内発熱等がある居住状態の場合には有効であるといえる。

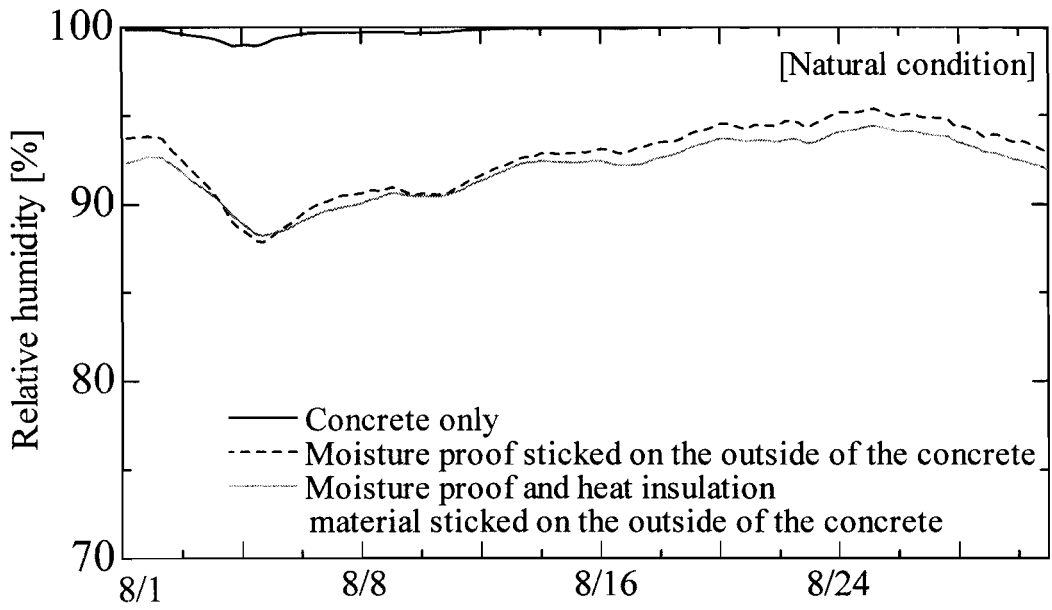


図7-15 壁体床面隅角部相対湿度変動の比較（自然状態）

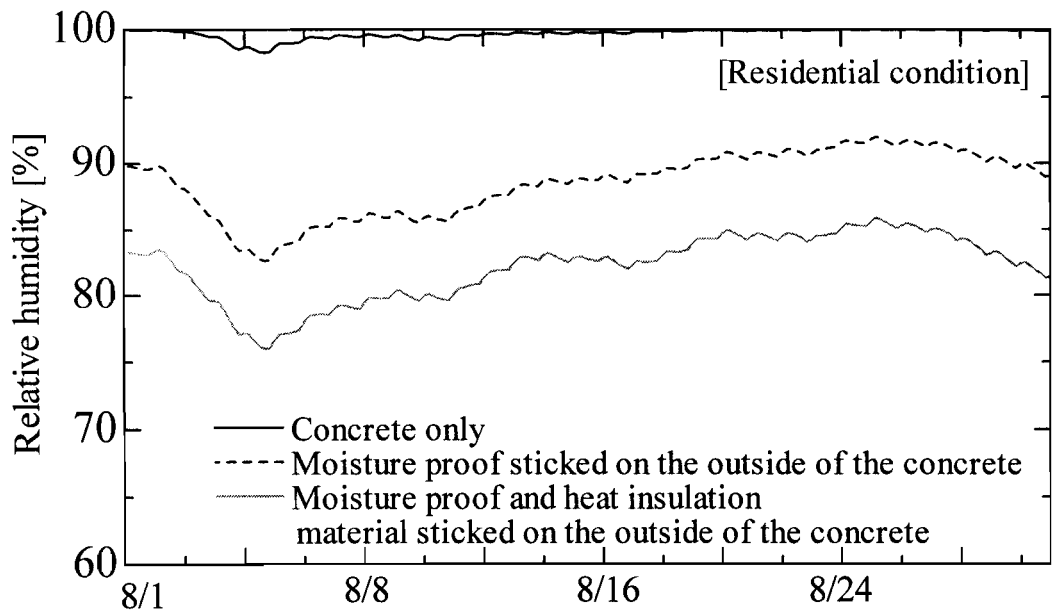


図7-16 壁体床面隅角部相対湿度変動の比較（居住状態）



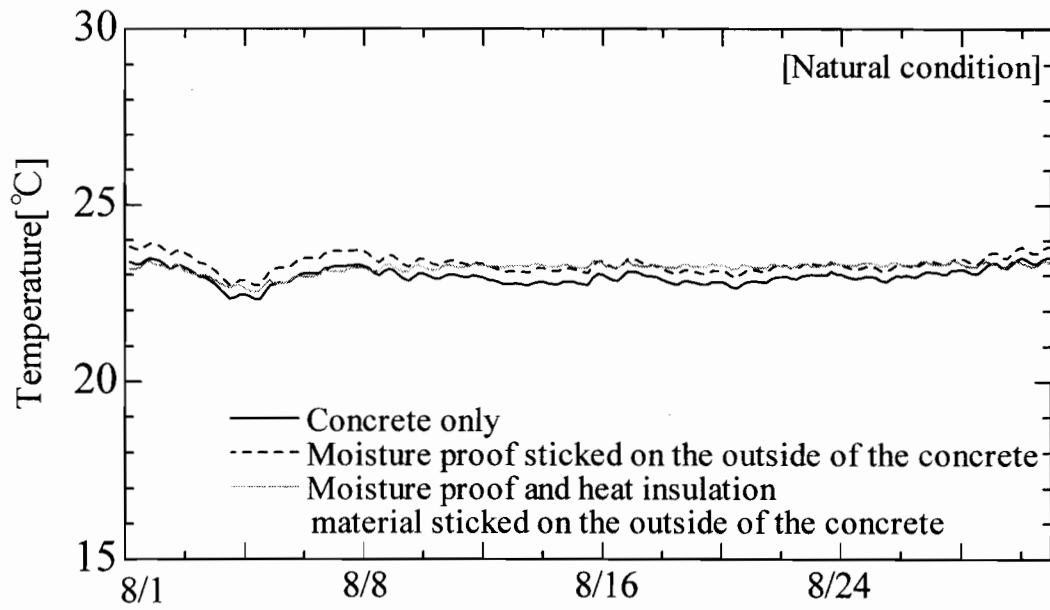


図7-17 室内温度変動の比較（自然状態）

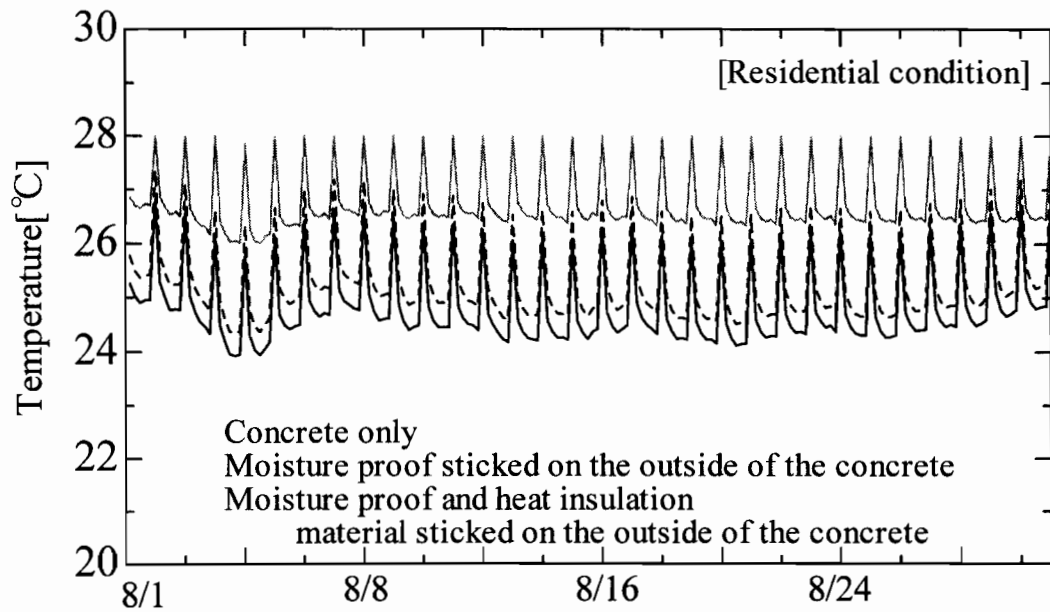


図7-18 室内温度変動の比較（居住状態）

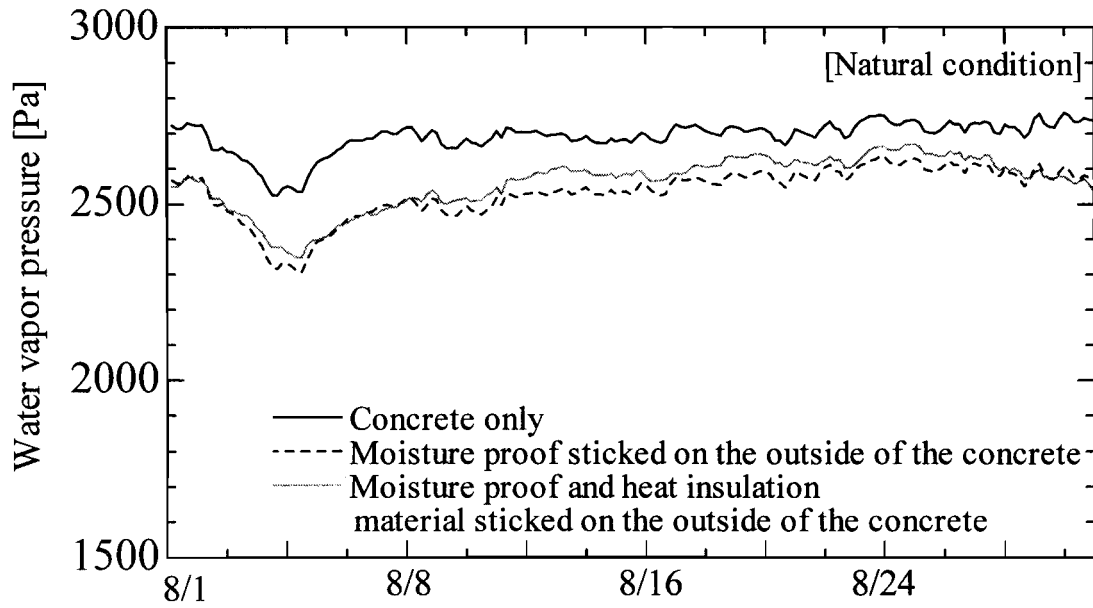


図7-19 室内水蒸気圧変動の比較（自然状態）

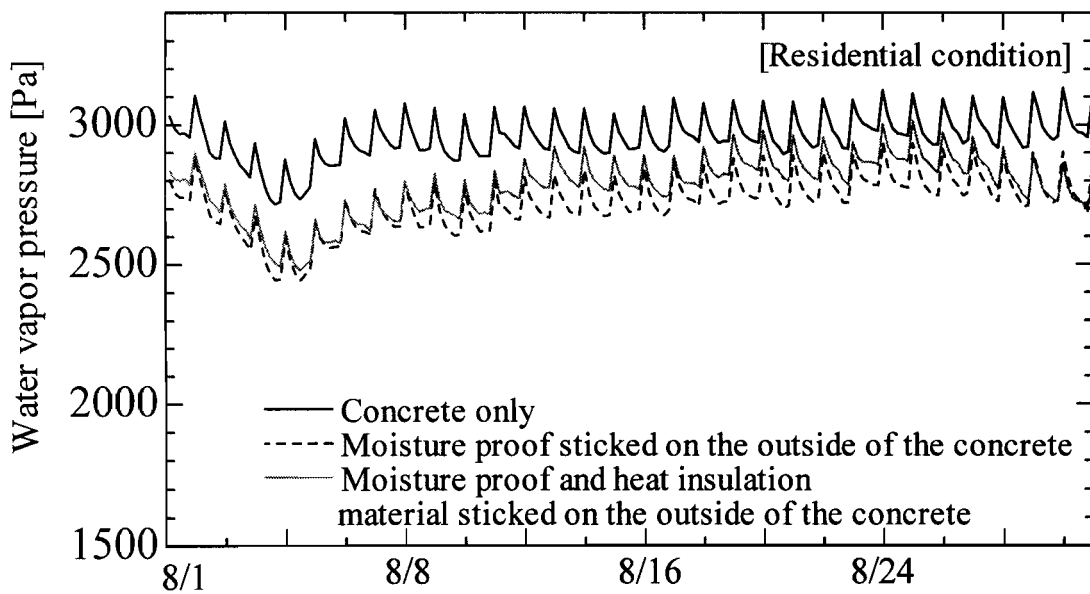


図7-20 室内水蒸気圧変動の比較（居住状態）

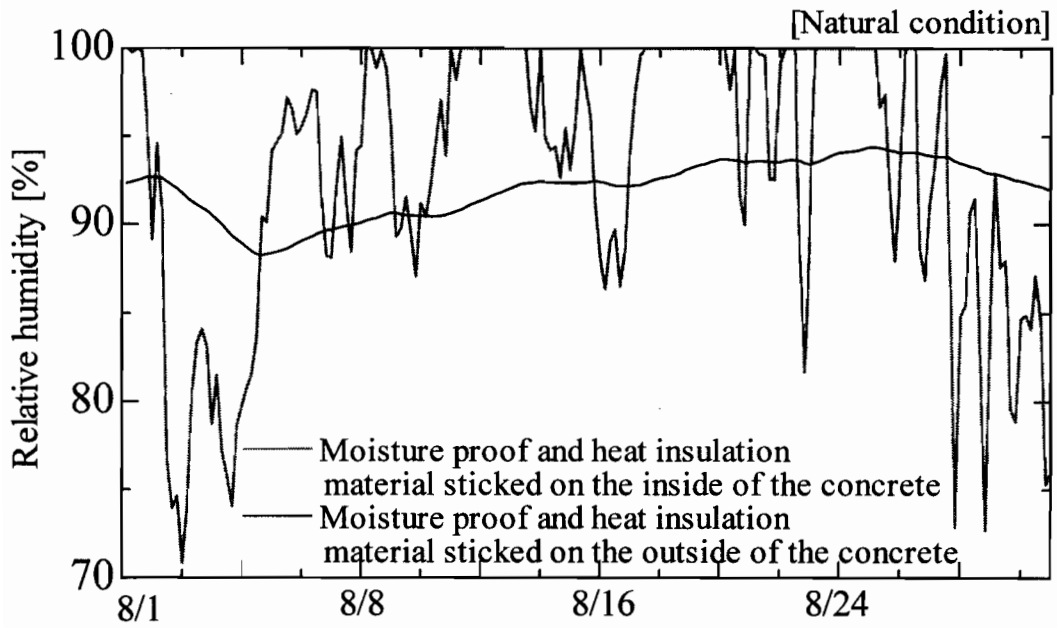


図7-21 壁体床面隅角部の相対湿度変動の比較（自然状態）

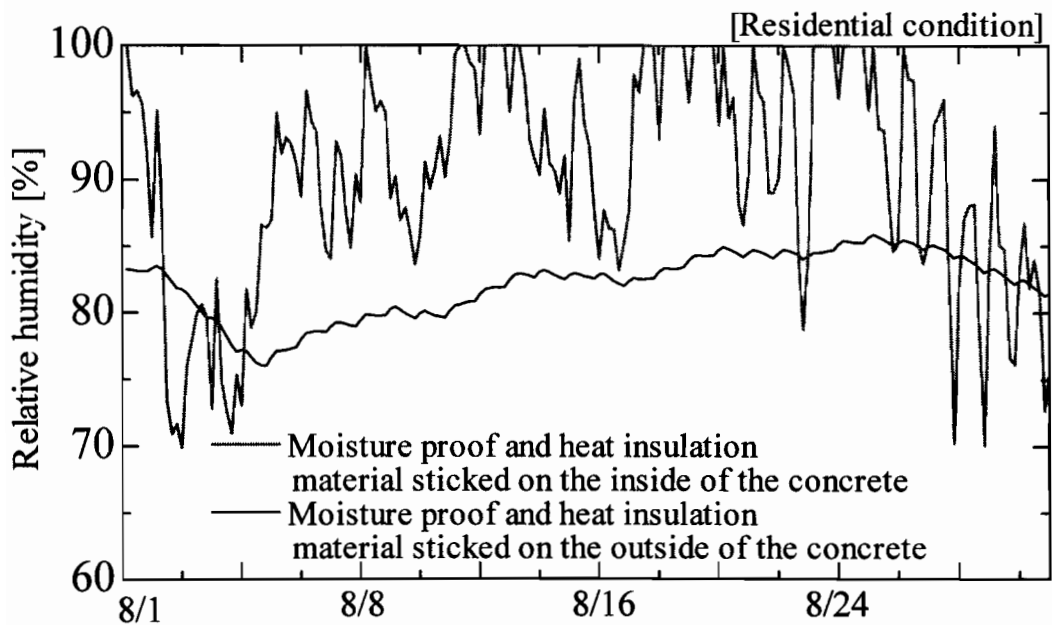


図7-22 壁体床面隅角部の相対湿度変動の比較（居住状態）

### 7-3-2 吸放湿材の影響

吸放湿材の影響については、厚さ1cmの吸放湿材を基本モデル、外断湿モデル、外断熱・断湿モデルそれぞれに貼付し、吸放湿材のない場合との相対湿度の比較により検討する。居住状態の夏期における結果について図7-23に示す。吸放湿材を貼付したモデルは基本モデル、外断湿モデル、外断熱・断湿モデルである。この図の縦軸は、吸放湿材を施した後の相対湿度から施す前の相対湿度を引いた値である。図7-23に示すように、基本モデル、外断湿モデル、外断熱断湿モデルについて吸放湿材が貼付される事で、壁体床面隅各部の相対湿度は低下するが、その効果は小さい。最も効果の大きい外断湿・断熱モデルの場合で、最大5%程度の湿度が低減するが、一定した効果はない。自然状態でも同様の結果となった。

図7-24に外断熱断湿吸放湿材モデルの床面中央部の室内側表面、コンクリートと吸放湿材の境界の相対湿度を示す。(境界の相対湿度は8日ごとの値である。)これを見ると吸放湿材とコンクリートの境界での相対湿度は吸放湿材の室内側表面よりも高くなっている。このことは、他の吸放湿材を施したモデルでも同様であり、また自然状態でも同様であった。特に吸放湿材モデルでは内部結露が生じ、吸放湿材の貼付において、その厚さが1cm程度では結露発生の危険性が増す。

以上から結露防止のために吸放湿材を添付する効果は十分確認できず、むしろ内部結露発生の問題を引き起こす場合があることが示された。夏期に外気より持ち込まれる水分を壁面で吸湿するという事で、室空気の高湿度環境抑制と結露防止をはかるとするのは、それだけ十分な水分容量の確保と内部結露が生じない様にする事が必要であり、室利用条件によっては現実的に困難な問題である。吸放湿材の有効な利用法については種類や厚さといったパラメータのほかに室内での除湿器の併用など室利用条件も十分考慮した検討が今後必要であると考えられる。

### 7-3-3 換気の影響

換気回数の影響を検討するため、基本モデル、外断湿モデル、外断熱・断湿モデル(断熱材 5cm)について自然状態で換気回数を0.5回/h、3.0回/h、10.0回/h一定と

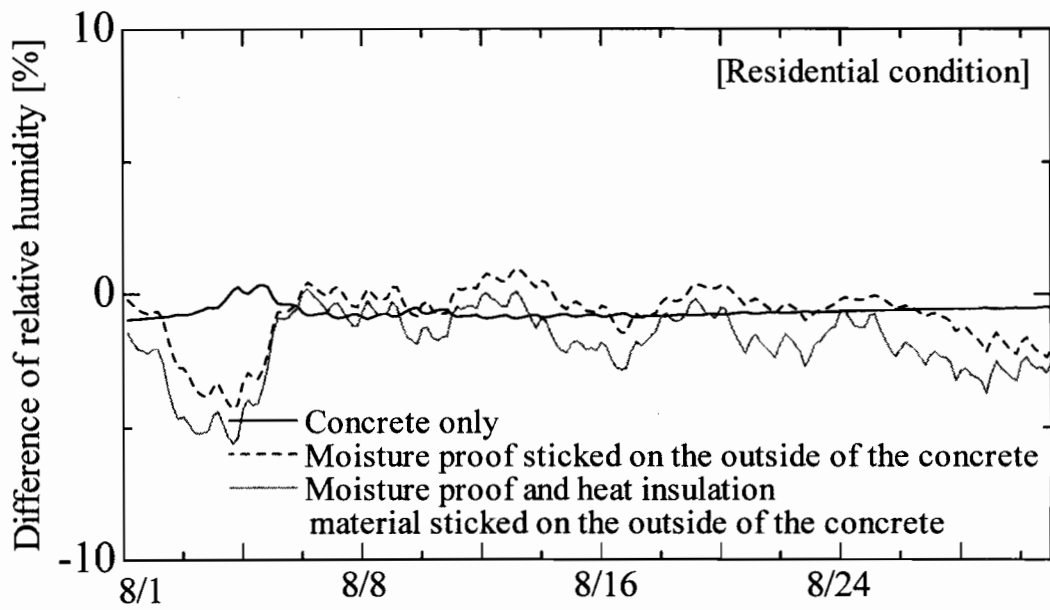


図7-23 吸放湿材の有無による壁体床面隅角部の相対湿度変化の比較（居住状態）

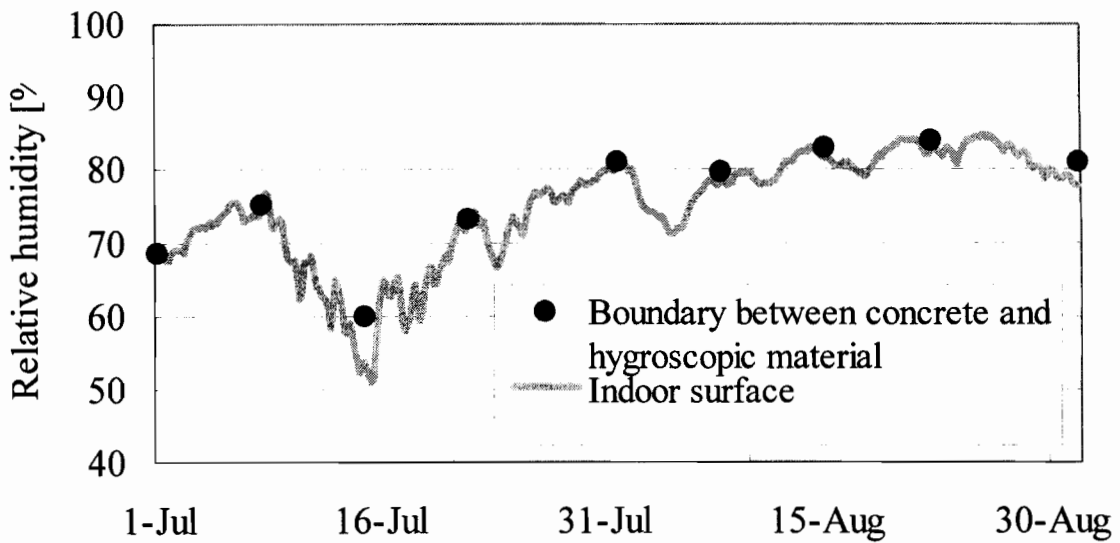


図7-24 床面中央部における表面と内部の相対湿度の比較  
（外断熱断湿モデル，居住状態）

変化させて計算を行った。

図 7-25 ～ 27 にそれぞれ基本モデルの年間、8 月下旬及び 11 月下旬の壁体隅角部室内側表面の相対湿度を示す。基本モデルでは換気回数を増加させると、1 年のうち多くの期間で壁体表面の相対湿度が下がり夏期においても相対湿度が下がった。しかし 11 月 28 日のように換気回数の増加で相対湿度が上がる場合もあった。他のモデルでも同様の結果となった。

図 7-28-30 に基本モデルにおける 8 月下旬の室相対湿度、室温、室水蒸気圧を示す。これらより、夏期において換気回数が増加すると、室水蒸気圧は、室内と外気の値が平均的には差が小さいことから、その値の変化も小さいが、室温は、外気温が高いことから、その値が上昇し、飽和水蒸気圧も上昇する。結果として室相対湿度は低下していくといえる。また図には示していないが、外断湿モデル、外断熱・断湿モデルでは、水蒸気圧は換気回数が少ない方が小さい場合が多いが、温度は換気回数の増加にともなって上がるため相対湿度は低く抑えられる。

次に、基本モデルでの 11 月下旬の室相対湿度、室温、室水蒸気圧を図 7-31 ～ 33 にそれぞれ示す。図より年間を通じて換気回数が増加すれば相対湿度が下がることが多かったが、その理由については夏期の場合とは異なり、水蒸気圧が外気の方が低いため換気により水分が室外に持ち出されることが原因で相対湿度が下がっている。ところが 11 月 28 日には、外気の相対湿度がほぼ 100% まで達しており、換気回数を増やすことにより、室内の相対湿度が高くなり 95% を越えた。このとき、温度については外気と室内でそれほど差がないため換気回数を増やしても室温は上がらないのに対して、水蒸気圧は外気の方がかなり高くなるために、水分が多く持ち込まれ室内の水蒸気圧が上がり温度は上がらず、そのため室内の相対湿度が高くなっていると考えられる。同様の結果が、他の時期にも見られた。

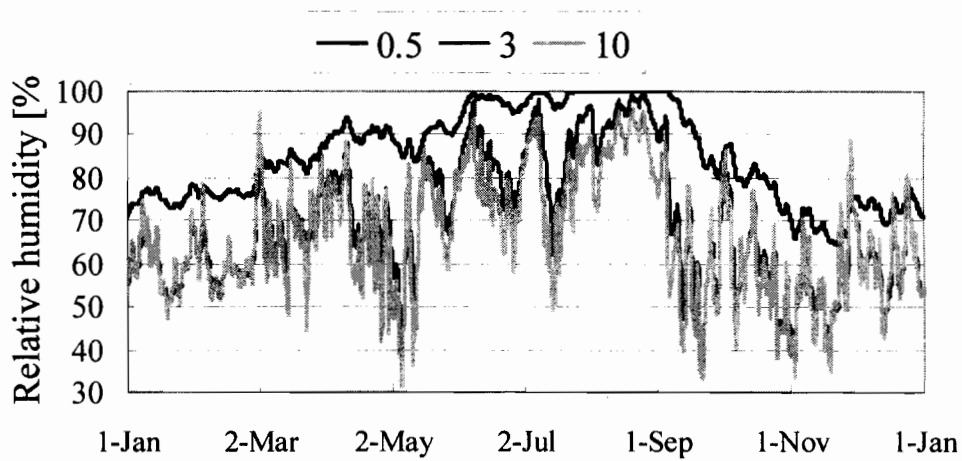


図7-25 各種換気回数の壁体床面隅角部相対湿度変動の比較  
(基本モデル, 自然状態)

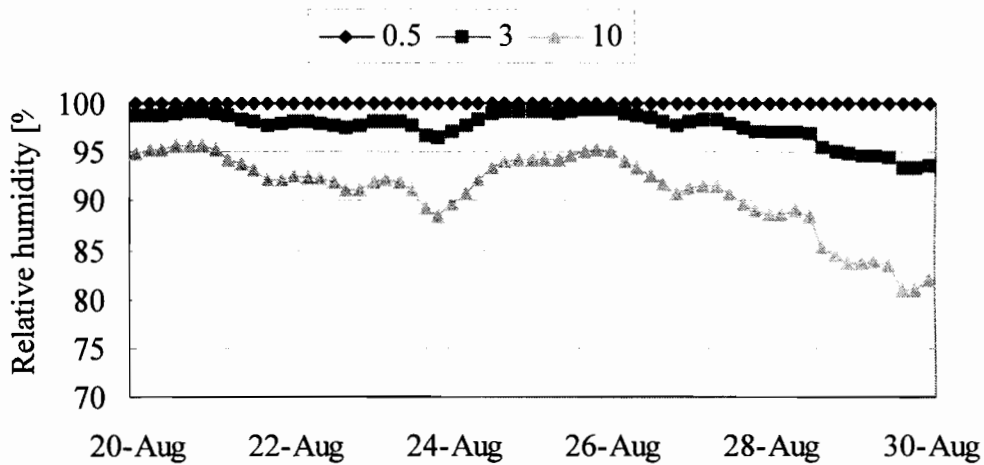


図7-26 各種換気回数の夏期の壁体床面隅角部相対湿度変動の比較  
(基本モデル, 自然状態)

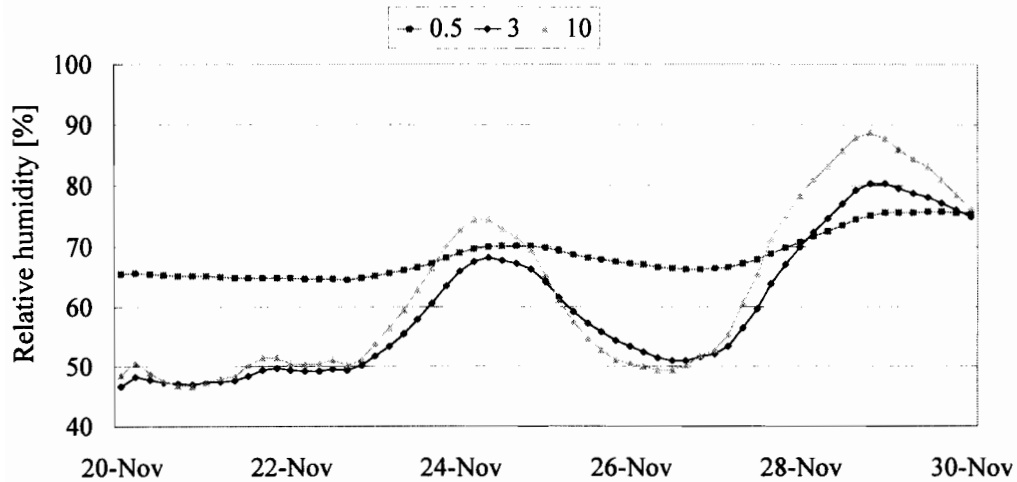


図7-27 各種換気回数の冬期の壁体床面隅角部相対湿度変動の比較  
(基本モデル, 自然状態)

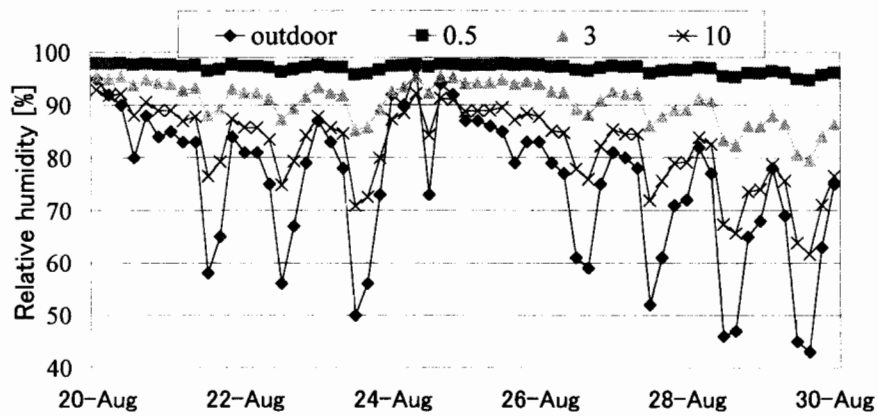


図7-28 各種換気回数 of 夏期の室相対湿度変動の比較

(基本モデル, 自然状態)

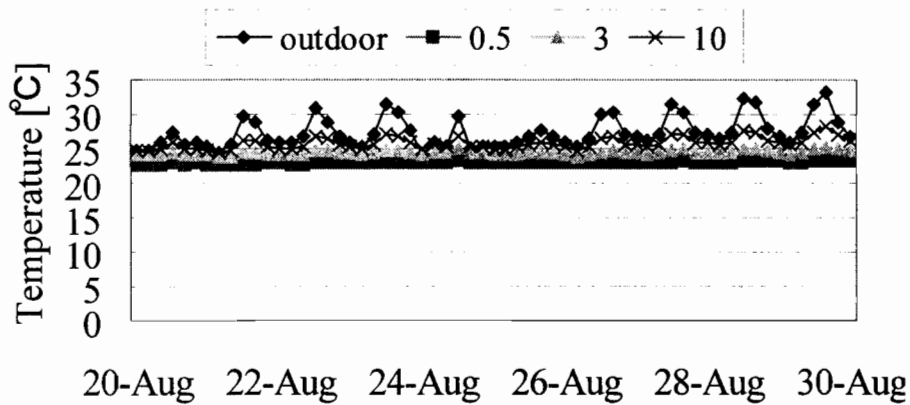


図7-29 各種換気回数 of 夏期の室温変動の比較

(基本モデル, 自然状態)

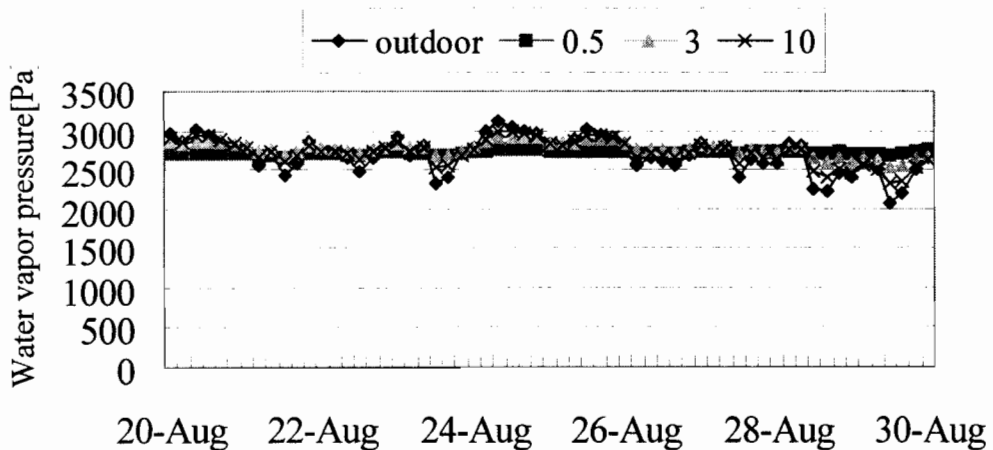


図7-30 各種換気回数 of 夏期の室水蒸気圧変動の比較

(基本モデル, 自然状態)



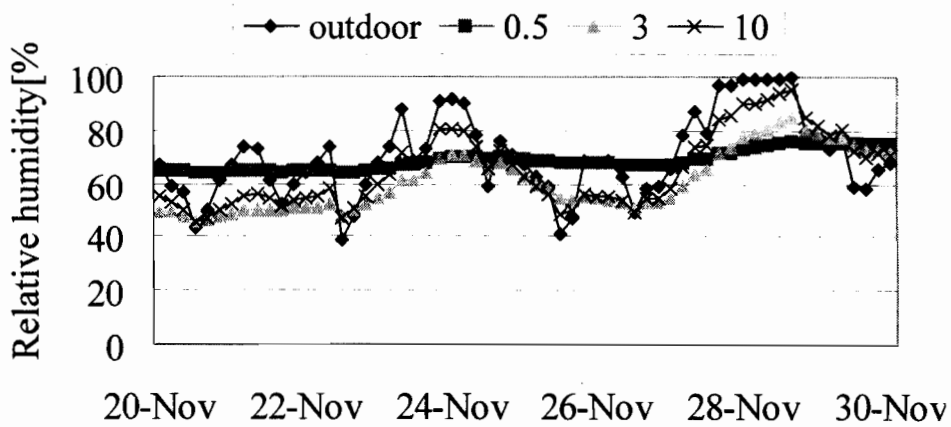


図7-31 各種換気回数 of 冬期の室相対湿度変動の比較  
(基本モデル, 自然状態)

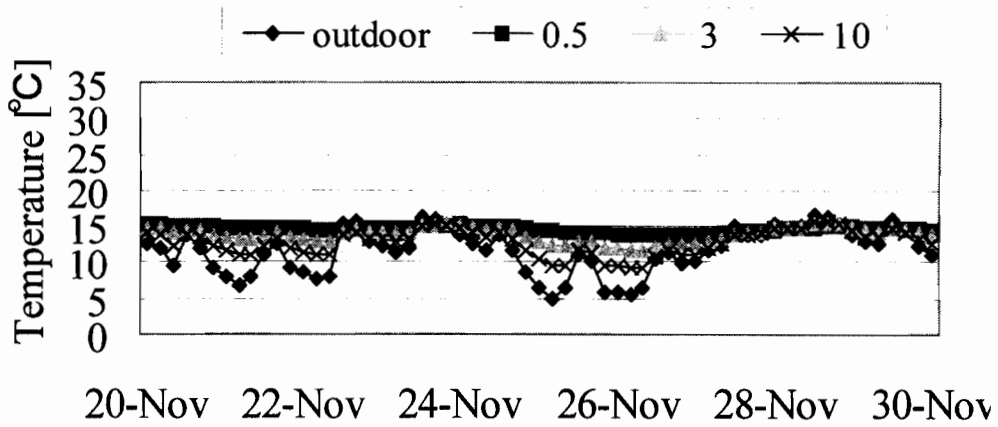


図7-32 各種換気回数 of 冬期の室温変動の比較  
(基本モデル, 自然状態)

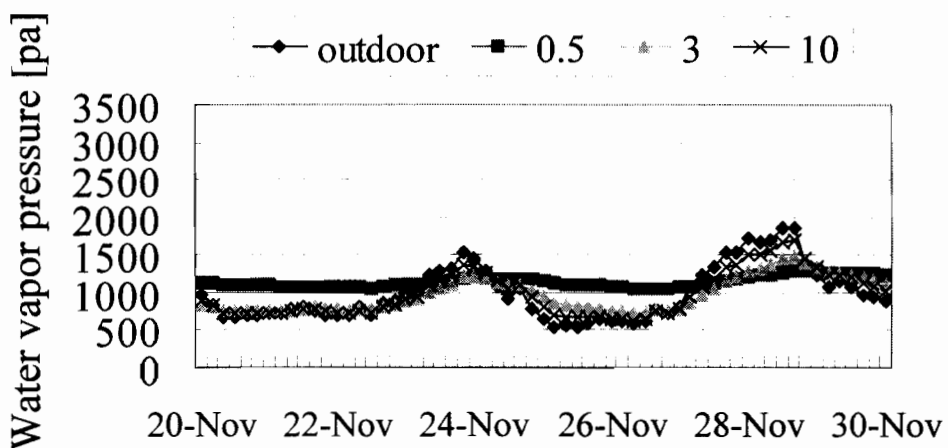


図7-33 各種換気回数 of 冬期の室水蒸気圧変動の比較  
(基本モデル, 自然状態)

このことから、換気回数を増加させることは、外気の相対湿度がほぼ100%まで達するような場合を除いて、結露防止に有効であるといえる。

#### 7-4 第7章のまとめ

本章では、地下構造物の居室利用を考慮した現実的な壁体構成を考え、これら構成が地下構造物の熱・湿気性状へ与える影響を数値解析により検討した。構造壁体であるコンクリートに断熱材、防湿層、吸放湿材といった材料を用いて壁体の構成を変化させ、室利用条件として自然状態と空調状態を考えた。得られた結論は以下の通りである。

1. 地下空間の結露防止対策において、地盤との境界を断湿することが有効である。
2. 地盤との境界の断湿に加えて断熱材を配置することは、室内発熱等がある居住状態の場合には、結露防止に有効である。
3. 自然状態において換気回数を増加させることは、外気相対湿度が100%に達するような高い状態を除いて、結露防止に有効である。

今後の課題として、吸放湿材の有効な利用法については種類や厚さといったパラメータのほかに室内での除湿器の併用など室利用条件も十分考慮した検討が必要と考えられる。またここでは検討していない壁体構成である二重壁とした場合や、地下室が多数室の場合、材料内初期含水状態がもたらす影響について検討が必要と考えられる。

## 第8章 地下構造物の熱・湿気性状解析の線形近似化

### 8-1 はじめに

地下構造物の熱・湿気性状を正しく予測する方法として、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た非線型熱水分同時移動方程式による解析を行い、解析モデルが降雨等を含めた外界条件下でのフィールド実測結果を十分な精度で予測できることを明らかにした。しかしながら本方程式は、熱伝導率等の移動係数が内部状態量（温度、含水率）によって大きく変化する非線型方程式であり、地盤内熱水分性状を求めるには冗長な数値計算を行わなければならない。さらに、例えば外気温等の境界条件の一要素が変化した場合には始めからあらためて計算をやり直す必要があり、地下構造物のような地盤を含む系の熱的設計といった観点からは必ずしも望ましくない。この問題を解決する手法として、基準解近傍での方程式の擬線形化による線形近似の方法[51]があり、これまで多孔質建築壁体の防露設計の観点から本手法の適応範囲及び有効性が示されている[52][53]。

そこで本章では、地盤内熱水分性状及び地下構造物熱湿気性状の簡易予測手法としての擬線形化方程式の適用範囲の検討を行う。まず、擬線形化法による方程式の線形近似化手法について述べる。この手法を用いて1次元地盤の熱水分場に関して外界条件変化に対する適応範囲、地下構造物の熱負荷に対する外界、室内条件変化に対する近似精度、適応範囲について検討する。また単位応答変化に対する擬線形解の時変性について検討するため外気温、室温の基準境界条件からの単位変化に対する解の応答を、年間の4つの日時を初期条件として求め、その時変性について検討する。さらに地下構造物の温湿度変動を伴う自然状態下における外界条件変化に対する近似精度、適応範囲について検討する。

### 8-2 基礎方程式の線形近似化

地盤及び壁体内の熱及び水分の移動方程式は第2章で示した通りであるが、記号の若干の変更を加え再掲する。

$$k(\mu, T) \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda'_\mu (\nabla \mu - \mathbf{n}F_w)] + \nabla \cdot (\lambda'_T \nabla T) \quad (8-1)$$

$$c(\mu, T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T) + \nabla \cdot [\lambda_\mu (\nabla \mu - \mathbf{n}F_w)] \quad (8-2)$$

ここで,

$$k(\mu, T) \cong k(\mu) = \rho_{2w} \frac{\partial \psi}{\partial \mu}, \quad c(\mu, T) = c(\mu) = C\rho$$

$$\lambda_e = \lambda + r\lambda'_{Tg}, \quad \lambda_\mu = r\lambda'_{\mu g}$$

空気に接する固体表面における境界条件は、空気の移動ポテンシャルを  $\mu_o, T_o$  として,

$$\alpha'_\mu (\mu_o - \mu) + \alpha'_T (T_o - T) + J_p = -\lambda'_\mu \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} - \mathbf{n}F_w \right) - \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial n} \quad (8-3)$$

$$\alpha_e (T_o - T) + \alpha_\mu (\mu_o - \mu) + q_{sol} - q_{noc} = -\lambda_e \frac{\partial T}{\partial n} - \lambda_\mu \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} - \mathbf{n}F_w \right) \quad (8-4)$$

ここで,

$$\alpha_e = \alpha + r\alpha'_T, \quad \alpha_\mu = r\alpha'_\mu$$

初期条件は  $t=0$  で,

$$T = \xi_T(x, y, z), \quad \mu = \xi_\mu(x, y, z) \quad (8-5)$$

解くべき方程式(8-1)~(8-5)式の解  $\mu, T$  が外界のポテンシャル  $\mu_o, T_o$  の時の解 (基本解) として得られているとする. 外界のポテンシャルが  $\Delta\mu_o, \Delta T_o$  の変化をした場合すなわち  $\mu_o + \Delta\mu_o, T_o + \Delta T_o$  となった場合の解を  $\mu + h_\mu, T + h_T$  で表せるとして(8-1)~(8-5)式を  $h_\mu, h_T$  で展開し  $h_\mu, h_T$  が充分小さいとして, これらの高次項を無視すると熱・水分同時移動方程式の線形化方程式は以下のような  $h_\mu, h_T$  に関する方程式となる[51].

$$\begin{aligned}
k(\mu) \frac{\partial h_\mu}{\partial t} &= \nabla \cdot (\lambda'_\mu \nabla h_\mu) + \nabla \cdot (\lambda'_T \nabla h_T) \\
&+ \nabla \cdot \left\{ \left[ \frac{\partial \lambda'_\mu}{\partial \mu} (\nabla \mu - F_w) + \frac{\partial \lambda'_T}{\partial \mu} \nabla T \right] h_\mu \right\} \\
&+ \nabla \cdot \left\{ \left[ \frac{\partial \lambda'_\mu}{\partial T} (\nabla \mu - F_w) + \frac{\partial \lambda'_T}{\partial T} \nabla T \right] h_T \right\} - \frac{\partial k}{\partial \mu} h_\mu \frac{\partial \mu}{\partial t}
\end{aligned} \tag{8-6}$$

$$\begin{aligned}
c(\mu) \frac{\partial h_T}{\partial t} &= \nabla \cdot (\lambda_\mu \nabla h_\mu) + \nabla \cdot (\lambda_e \nabla h_T) \\
&+ \nabla \cdot \left\{ \left[ \frac{\partial \lambda_\mu}{\partial \mu} (\nabla \mu - F_w) + \frac{\partial \lambda_e}{\partial \mu} \nabla T \right] h_\mu \right\} \\
&+ \nabla \cdot \left\{ \left[ \frac{\partial \lambda_\mu}{\partial T} (\nabla \mu - F_w) + \frac{\partial \lambda_e}{\partial T} \nabla T \right] h_T \right\} - \frac{\partial c}{\partial \mu} h_\mu \frac{\partial T}{\partial t}
\end{aligned} \tag{8-7}$$

空気に接する固体表面の境界条件は次の様になる。

$$\begin{aligned}
&-\lambda'_\mu \frac{\partial h_\mu}{\partial n} - \lambda'_T \frac{\partial h_T}{\partial n} \\
&= \alpha'_\mu (\Delta \mu_o - h_\mu) + \alpha'_T (\Delta T_o - h_T) \\
&+ \left[ \frac{\partial \alpha'_\mu}{\partial \mu} (\mu_o - \mu) + \frac{\partial \alpha'_T}{\partial \mu} (T_o - T) + \frac{\partial \lambda'_\mu}{\partial \mu} \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} - \mathbf{n} F_w \right) + \frac{\partial \lambda'_T}{\partial \mu} \frac{\partial T}{\partial n} \right] h_\mu \\
&+ \left[ \frac{\partial \alpha'_\mu}{\partial T} (\mu_o - \mu) + \frac{\partial \alpha'_T}{\partial T} (T_o - T) + \frac{\partial \lambda'_\mu}{\partial T} \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} - \mathbf{n} F_w \right) + \frac{\partial \lambda'_T}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial n} \right] h_T
\end{aligned} \tag{8-8}$$

$$\begin{aligned}
& -\lambda_\mu \frac{\partial h_\mu}{\partial n} - \lambda_e \frac{\partial h_T}{\partial n} \\
& = \alpha_\mu (\Delta\mu_o - h_\mu) + \alpha_e (\Delta T_o - h_T) \\
& + \left[ \frac{\partial \alpha_\mu}{\partial \mu} (\mu_o - \mu) + \frac{\partial \alpha_e}{\partial \mu} (T_o - T) + \frac{\partial \lambda_\mu}{\partial \mu} \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} - \mathbf{n}F_w \right) + \frac{\partial \lambda_e}{\partial \mu} \frac{\partial T}{\partial n} \right] h_\mu \\
& + \left[ \frac{\partial \alpha_\mu}{\partial T} (\mu_o - \mu) + \frac{\partial \alpha_e}{\partial T} (T_o - T) + \frac{\partial \lambda_\mu}{\partial T} \left( \frac{\partial \mu}{\partial n} - \mathbf{n}F_w \right) + \frac{\partial \lambda_e}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial n} \right] h_T
\end{aligned} \tag{8-9}$$

さらに、地下室内の熱及び水分の収支式について考える。地下室の熱及び水分の収支式を再掲する。

$$c\gamma V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha_i (T_j - T_r) + c\gamma N_v V (T_o - T_r) + Q_r \tag{8-10}$$

$$c'\gamma V \frac{\partial p_r}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha'_{mi} (p_j - p_r) + c'\gamma N_v V (p_o - p_r) + J_r \tag{8-11}$$

ここで室温および室水蒸気圧の基本解を $T_r, p_r$ とし、外界のポテンシャルが $\Delta\mu_o, \Delta T_o$ の変化をした場合すなわち $\mu_o + \Delta\mu_o, T_o + \Delta T_o$ となった場合の解を $T_r + h_{T_r}, p_r + h_{p_r}$ で表せるとして、(8-10)(8-11)式にこれら代入した式を作り、(8-10)(8-11)式との差をとると以下の式となる。

$$c\gamma V \frac{\partial h_{T_r}}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha_i (h_{T_j} - h_{T_r}) + c\gamma N_v V (\Delta T_o - h_{T_r}) + \Delta Q_r \tag{8-12}$$

$$c'\gamma V \frac{\partial h_{p_r}}{\partial t} = \sum_{j=1}^n S_j \alpha'_{mi} (h_{p_j} - h_{p_r}) + c'\gamma N_v V (\Delta p_o - h_{p_r}) + \Delta J_r \tag{8-13}$$

ただし、水分化学ポテンシャルと水蒸気圧の関係 $\mu = R_v T \ln(p/p_s)$ から、

$$\Delta p_o = p_{vs} \exp \left[ \frac{\mu_o + \Delta\mu_o}{R_v (T + \Delta T_o)} \right] - p_o$$

$$h_{p_j} = p_{vs} \exp \left[ \frac{\mu_j + h_{\mu_j}}{R_v (T + h_{T_j})} \right] - p_j$$

ここで、 $\Delta Q_r$ 、 $\Delta J_r$  はそれぞれ、室内における基準状態からの発熱及び水分発生の変化[W]、[kg/s]である。

(8-6)～(8-9),(8-13),(8-14)式は線形であるから、たとえば外気気象条件の温度、相対湿度、日射量、降雨量といった値全てが変化する場合に対しては、別々の解を求めて重ね合わせれば解が得られる。なお、これらは時変系であるので、合成積を用いた計算を行うには、時間  $t$  を含む重み関数が必要となり煩雑となるが、この時変性が小さい、つまり時不変として取り扱える場合は、この重み関数を用いた合成積は容易であり有用である。境界値の変化分が  $a\Delta T_o$  ( $a$  は定数) の場合には、系は線形であるから、 $\Delta T_o$  の解を求め  $a$  倍した解を求めればよい。他の条件の変化においても同様のやり方を用いることが可能である。

### 8-3 地盤内温度性状の線形近似精度の検討

#### 8-3-1 計算条件

地盤の熱・水分場算定における外界条件変化における線形近似解の適応範囲を明らかにするために図 8-1 に示すような地表面を裸地とする一次元砂質地盤を対象とする。

地盤の境界条件は、地表面で第3種条件、地盤底部では、温度に関しては深さ 14.4m で、水分に関しては常水面位置で第1種境界条件とし、温度と水分化学ポテンシャルはそれぞれ  $16.4[^\circ\text{C}]$ 、 $0[\text{J}/\text{kg}]$  とした。

外界条件は、神戸における実測値(1991年11月19日から1年間)から、外気温、外気相対湿度、日射量、降雨量の値を用いた。図 8-2 に用いた外界条件を示す。ただし、外気温、外気相対湿度は実測値をフーリエ級数展開した値を用い、外気温、外気相対湿度の年平均値はそれぞれ  $16.0^\circ\text{C}$ 、61% であり、外気温の日平均値の年振幅は  $10^\circ\text{C}$  である。なお低温輻射は第5章と同じく Brunt の式を雲量補正した値を用い雲量は降雨時は 10 をそれ以外は 7 とした。地盤の物性値は第3章で示した Jury の測定した Plainfield Sand の値を用いた。

#### 8-3-2 計算方法

計算は(8-1)～(8-9)式を用いて解析を行い、第3章で示したように離散化し前進型有限差分法を用いて行った。図に示すように地盤の空間刻みは、地表面 0.025m を最小として最大 0.6m

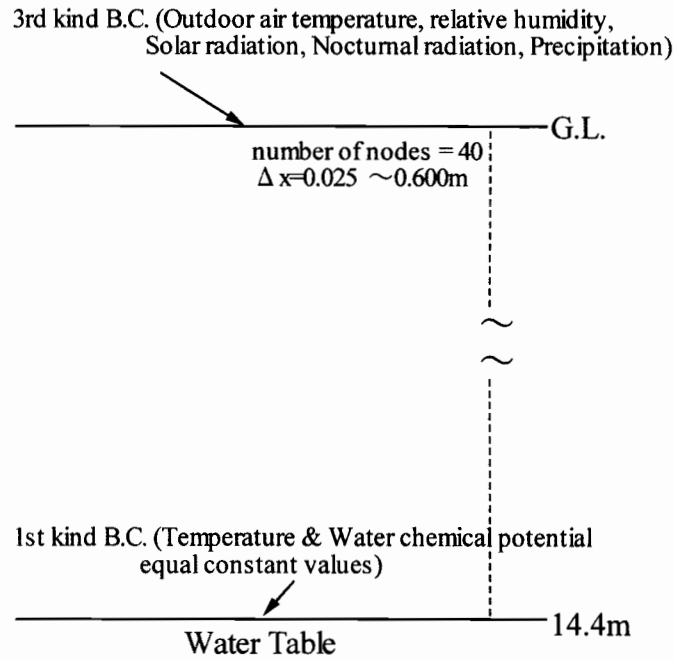


図8-1 1次元地盤の解析対象

であり、総点数は計40点である。なお、線形解である解の変化分を求める(8-6)~(8-9)式中の係数の微分項 $\partial\lambda'_\mu/\partial\mu$ ,  $\partial\lambda'_\mu/\partial T$ 等は数値微分で求め、数値微分の刻み幅は水分化学ポテンシャルについては1~1000の可変、温度については0.1とした。数値計算において基準解 $\mu, T$ 及び解の変化 $h_\mu, h_T$ は(8-1)~(8-4), (8-6)~(8-9)式の差分化式を時間ステップごとに解くことにより、求められる。外界条件の変化は、外気温及び外気相対湿度の年平均値の変化を考え、 $\Delta\mu_o = 1000$ ,  $\Delta T_o = 1.0$ とした。ここから得られる解の変化つまり擬線形解を、基準外界条件下で計算された非線形解である基準解に重ね併せることで、基準外界条件から変化分を加えた外界条件(変化した外界条件)に対応した近似解が得られる。以下の検討では誤差比較のため、変化した外界条件における非線形計算を別途行い、これを正確解と呼び、近似解との比較に用いる。

### 8-3-3 結果と考察

#### 8-3-3-1 外気温年平均値が変化した場合

図8-6に外気温の年平均値が $\pm 3, 5, 10^\circ\text{C}$ 変化した場合の、地盤内年平均温の誤差の地盤内深さごとの比較を示す。ここでの誤差は正確解から近似解を差し引いた絶対誤差であり、図



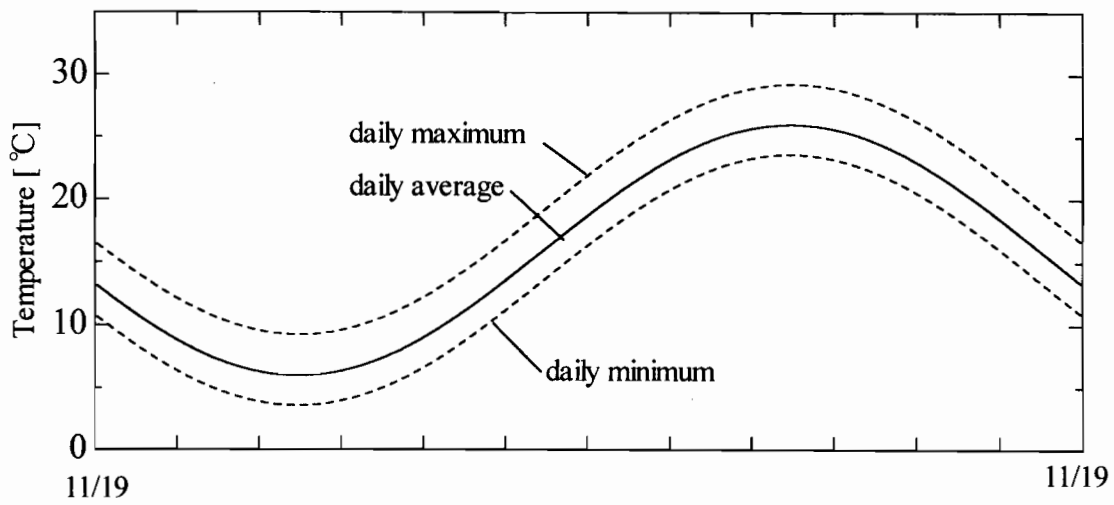


図8-2 外気温の年変動

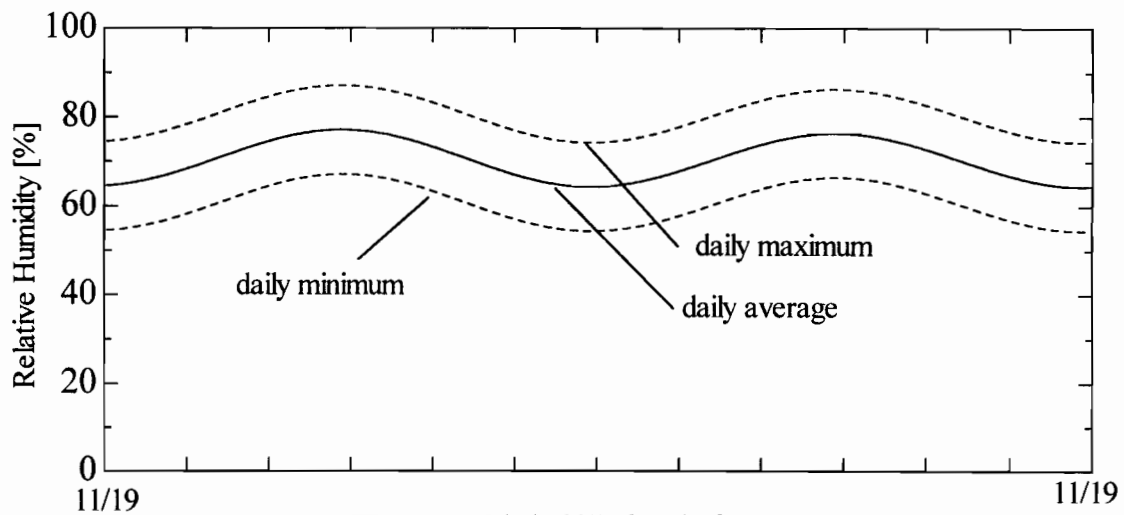


図8-3 外気相対湿度の年変動

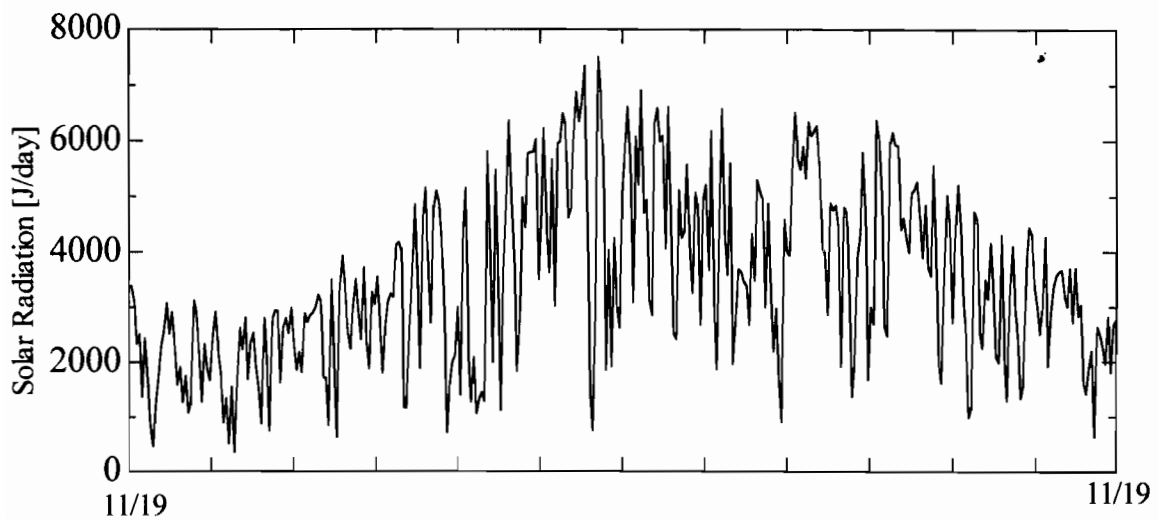


図8-4 日射量の年変動

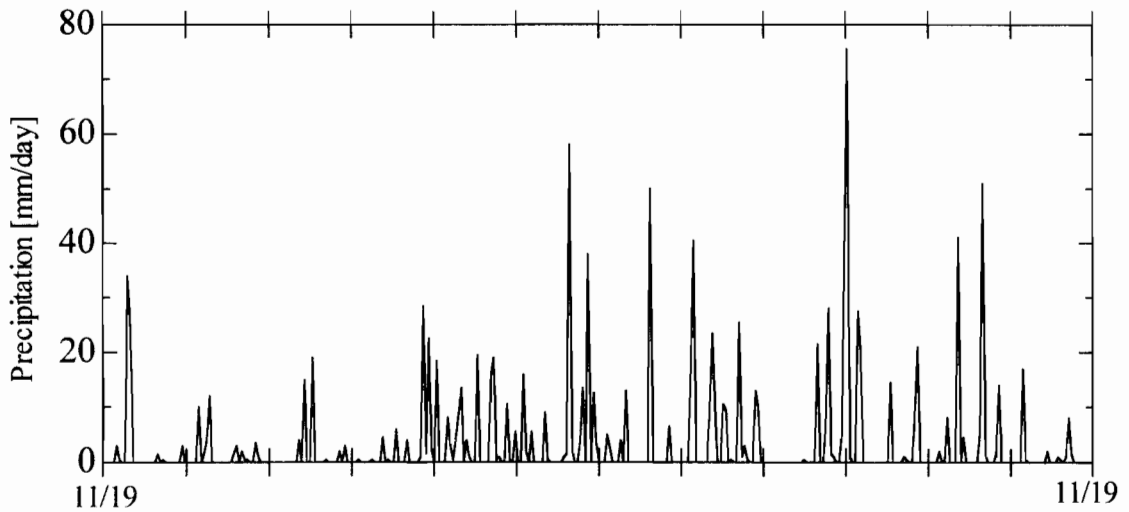


図8-5 降雨量の年変動

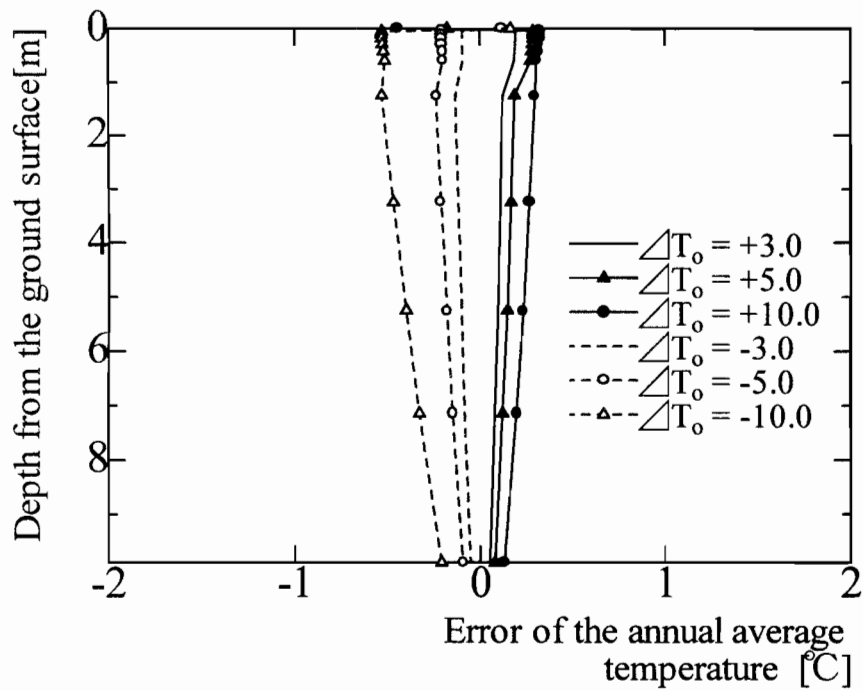


図8-6 地盤内年平均温の誤差比較

中の  $\Delta T_0$  は外気年平均値の変化分を表す。図に示すように、外気温が  $-10^\circ\text{C}$  変化した場合でも正確解と近似解の最大差は  $0.5^\circ\text{C}$  程度と比較的小さい。また外気温上昇の場合の方が誤差が小さく、上昇の方が適応範囲が広いことがわかる。次に地表面の温度変動について検討する。図8-7,8に外気温年平均値が  $\pm 5^\circ\text{C}$  変化した場合の地表面の変動の正確解と近似解の比較を最も誤差が大きい夏期の一週間を取り出してそれぞれ示す。いずれの

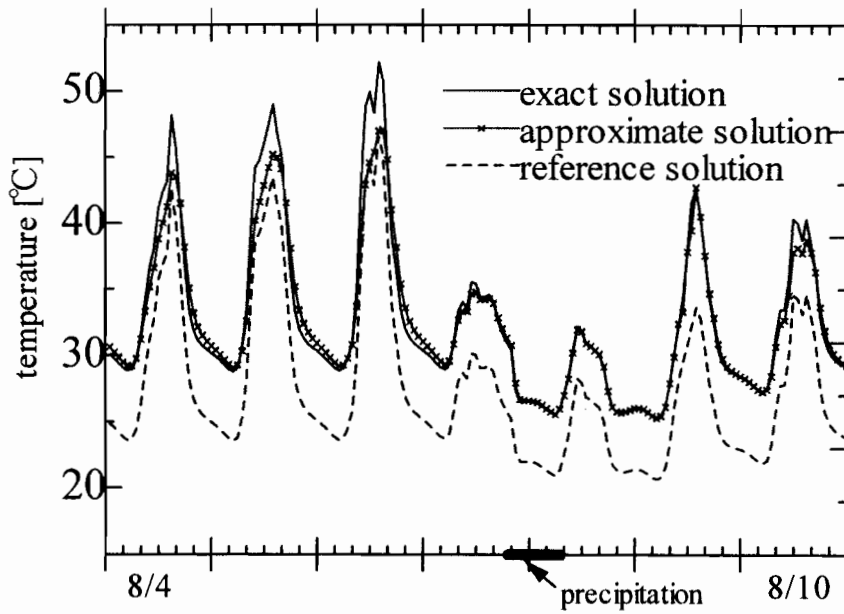


図8-7 地表面温度変動の比較 (8/4 ~ 8/10,  $\Delta T_0 = +5^\circ\text{C}$ )

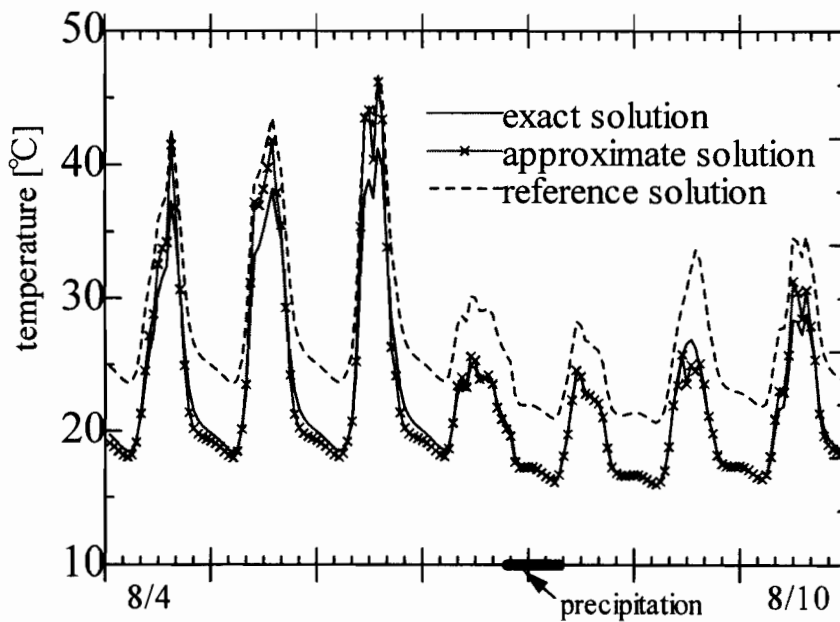


図8-8 地表面温度変動の比較 (8/4 ~ 8/10,  $\Delta T_0 = -5^\circ\text{C}$ )

場合も日中に比較的誤差が大きくなるが、これ以外の時間は降雨時やその後の潜熱移動が大きい時も含めて良い一致を示している。同時期の地表面水分化学ポテンシャル変動を外気温年平均値が $+5^\circ\text{C}$ 変化した場合についてのみ図8-9に示す。外気温の年平均値変化では水分化学ポテンシャルは変化が小さく、その結果、正確解と近似解がよく一致していることが分かる。

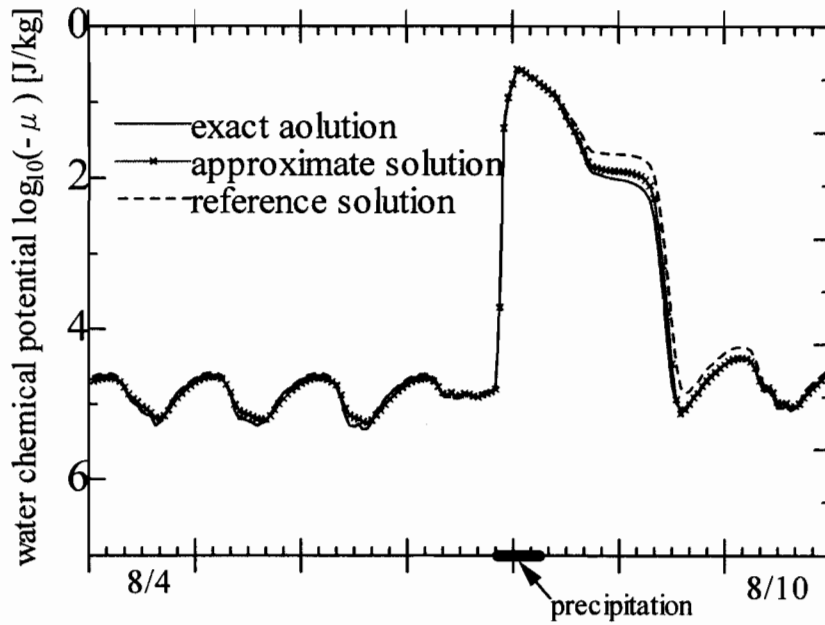


図8-9 地表面水分化学ポテンシャル変動の比較 (8/4 ~ 8/10,  $\Delta T_0 = +5^\circ\text{C}$ )

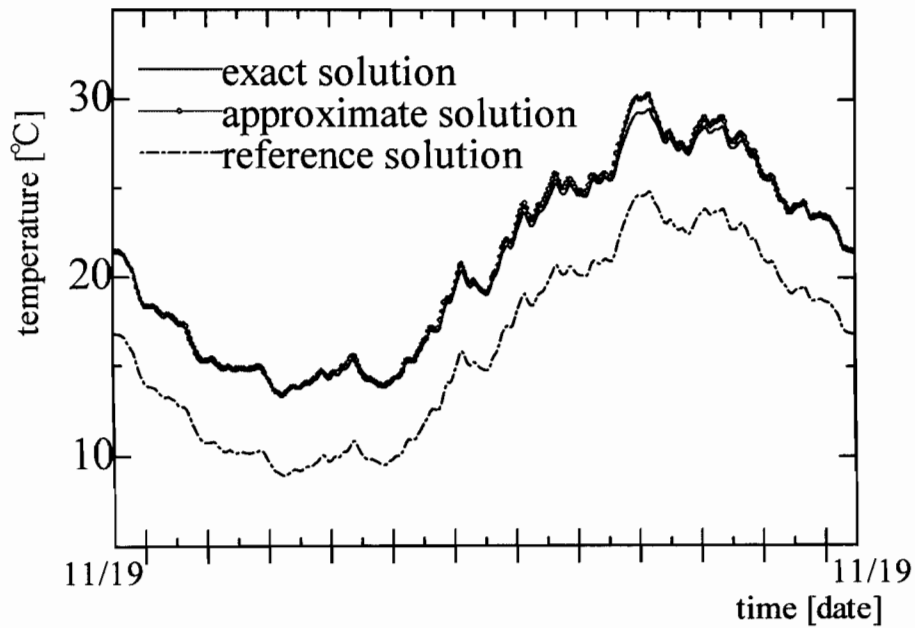


図8-10 深さ1mの地盤内温度変動の比較 (8/4 ~ 8/10,  $\Delta T_0 = +5^\circ\text{C}$ )

次に地盤内温度変動について検討する。図8-10に外気温年平均値が $+5^\circ\text{C}$ 変化した場合の深さ1mの地盤内温度変動の正確解と近似解の比較を示す。図中に解の変化を明確にするため基準解も示している。図に示すように、外気温年平均値が $5^\circ\text{C}$ 上昇した場合には、夏期に最大 $0.7^\circ\text{C}$ 程度の差が生じるが、正確解と近似解は年間を通じて非常によく一

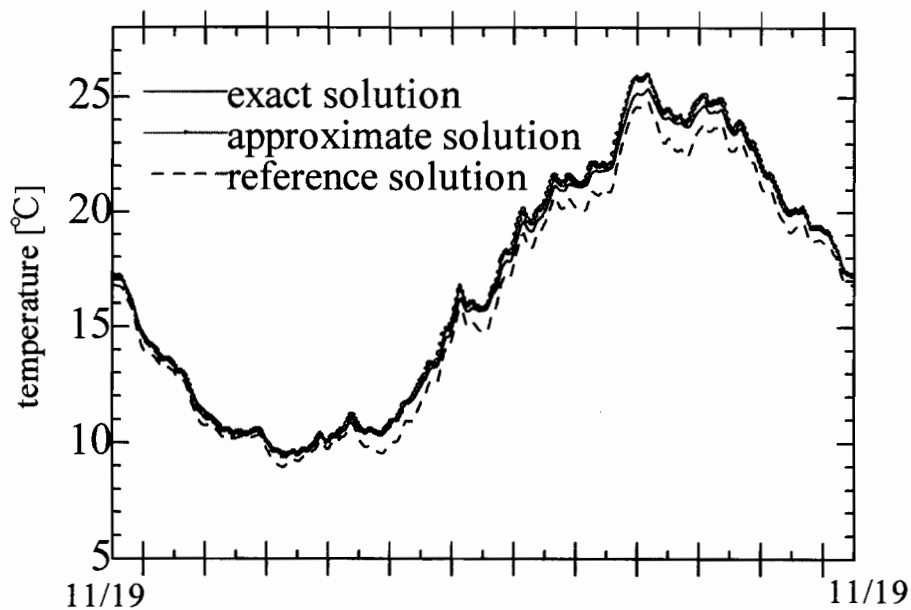


図8-11 深さ1mの地盤内温度変動の比較 (8/4 ~ 8/10,  $\Delta \mu_0 = +36000\text{J/kg}$ )

致している。他の深さにおいても両者の一致は非常によかった。以上のことから、外気温年平均値変化が $\pm 5^\circ\text{C}$ 程度であれば、擬線形近似による予測は十分な精度を有するといえる。

#### 8-3-3-2 外気相対湿度年平均値が変化した場合

図8-11に外気相対湿度年平均値が約20%上昇した場合（水分化学ポテンシャル値で $36,000\text{J/kg}$ ）の深さ1mの地盤内温度変動の比較を示す。近似解と正確解は年平均誤差で $0.3^\circ\text{C}$ 程度とこの場合も比較的よい一致を示した。他の深さも同様の結果が得られた。従って、相対湿度年平均値変化20%程度であれば、擬線形近似による予測は十分な精度を有するといえる。

## 8-4 地下空間の熱負荷の線形近似精度の検討

### 8-4-1 計算条件

解析対象は図 8-12 に示すような第6章で検討を行った対象と同じ完全に埋設された地下構造物である。壁体は厚さ 20cm のコンクリート1層と防湿層なしの単純な構成とする。地盤は砂質土壌、地表面は裸地とする。

地盤内の境界条件も第6章と同じ条件を用い、地表面では第3種境界条件、地盤底部では、温度に関しては深さ 14.4m で、水分に関しては常水面位置で第1種境界条件とし、温度と水分化学ポテンシャルはそれぞれ  $16.4[^\circ\text{C}]$ ,  $0[\text{J}/\text{kg}]$  とした。また構造物中央の対称面及び構造物から 10m 離れた鉛直面の水平方向では断熱断湿とする第2種境界条件とする。壁体室内側表面は第3種境界条件とする。外界気象条件は前節と同じ条件を与える。室内条件は、室温、室相対湿度をそれぞれ  $20^\circ\text{C}$ 、60% 一定とする。地下室と地盤との熱のやりとりを明確化するため換気は行わない。初期条件は、外界条件の全く等しい鉛直一次元の地盤についてあらかじめ計算された周期的定常状態の計算結果を水平方向に一定として与えた。材料物性値は、第6章と同じく地盤は Jury の測定した Plainfield Sand を、コンクリートは Hedenblad の測定値を元に構成したものとし、それぞれ第3章で示した値を用いる。その他の物性値は第6章の表 6-1 に示すとおりである。

### 8-4-2 計算方法

計算方法は前進型有限差分法を用いる。地盤及びコンクリートの差分刻みは第6章と同じ値である。計算は前節と同じ(8-1)～(8-9)式に地下室の収支式である(8-10)(8-11)式を加えた式を用いて前節と同様にして行った。境界条件の変化は、外界条件として外気温の年平均値の変化を、室内条件として室温設定値の変化を考えそれぞれ  $\Delta T_o = 1.0$ 、 $\Delta T_r = 1.0$  とした。ここでは、地下空間の壁面全面からの熱流つまり熱負荷について、その近似精度および適応範囲について検討を行う。次に外気温変化、室温変化に対する解の変化を単位関数で与えた時の応答性状を 2/1, 5/1, 8/1, 11/1 の4つの計算開始日について行い、それぞれの応答の比較を行い、擬線形解の時変性の検討を行う。

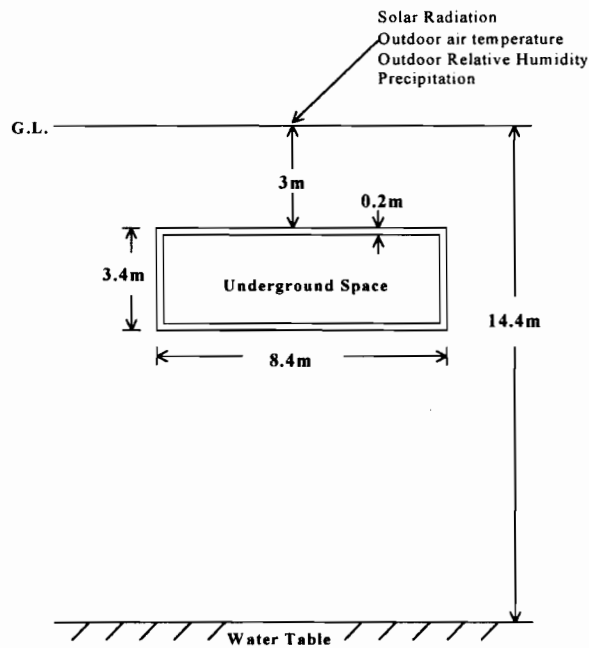


図8-12 解析対象

表8-1 年平均熱負荷の比較（外気温変化の場合，暖房を正）

変化[°C]	近似解[W]		正確解[W]	
	顕熱	潜熱	顕熱	潜熱
+15	-5.0	1.1e-5	-57.0	1.1e-5
+10	18.1	1.1e-5	16.1	1.1e-5
+5	41.2	1.1e-5	40.9	1.1e-5
-5	87.3	1.1e-5	88.4	1.1e-5
-10	110.4	1.1e-5	112.0	1.1e-5
-15	133.5	1.1e-5	135.5	1.1e-5

### 8-4-3 結果と考察

#### 8-4-3-1 外気温年平均値が変化した場合

図8-13,14に外気温年平均値がそれぞれ±10°C変化した場合の日積算顕熱負荷の年変動の正確解と近似解の比較を基準解と併せて示す。両図に示すように，外気温年平均値が±10°C変化した場合には，夏期に若干差が生じるものの年間を通じて一致している。次に図8-

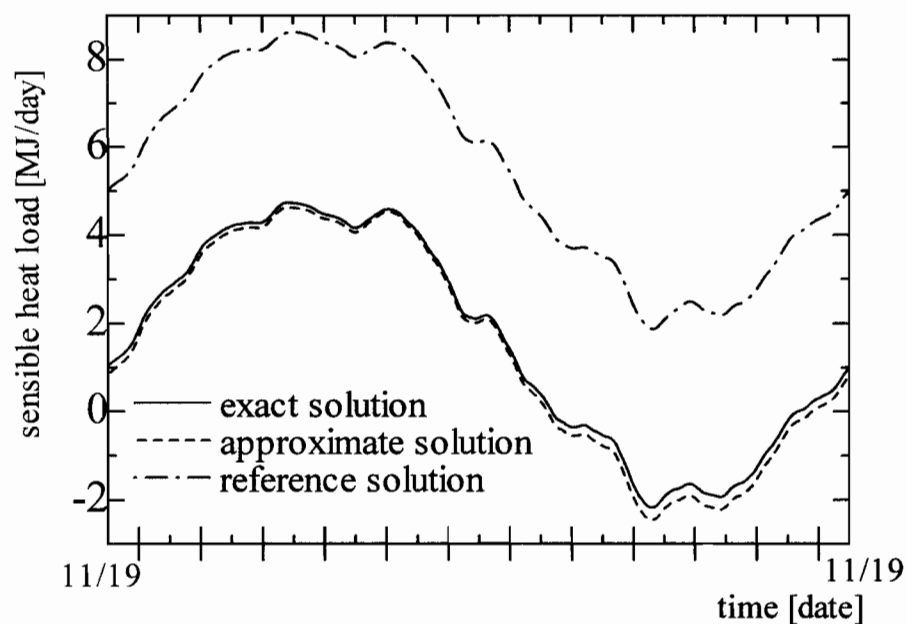


図8-13 日積算熱負荷の年変動の比較 ( $\Delta T_0 = +10^\circ\text{C}$ )

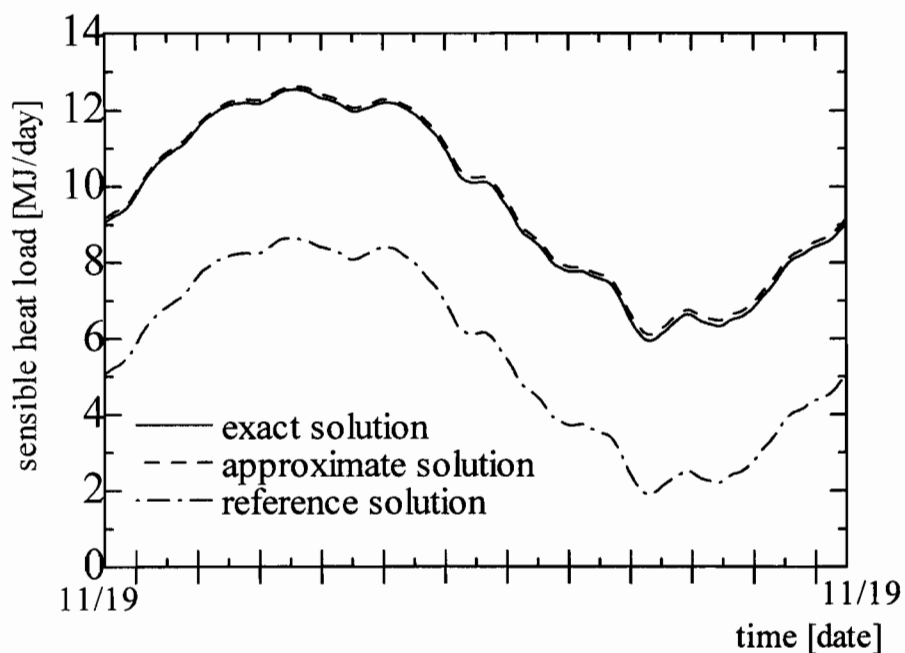


図8-14 日積算熱負荷の年変動の比較 ( $\Delta T_0 = -10^\circ\text{C}$ )

15に室内側表面顕熱流分布の比較を示す。図に示すように正確解と近似解は夏期に天井面で0.3W程度の誤差を生じるが年間を通じて一致している。表8-1に外気温年平均値変化の場合の年平均熱負荷の比較を示す。表より年平均熱負荷では、外気温変化 $+10^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$ で誤差2[W]程度と小さい。また潜熱負荷は表8-1に示すように、外気温年平均値の



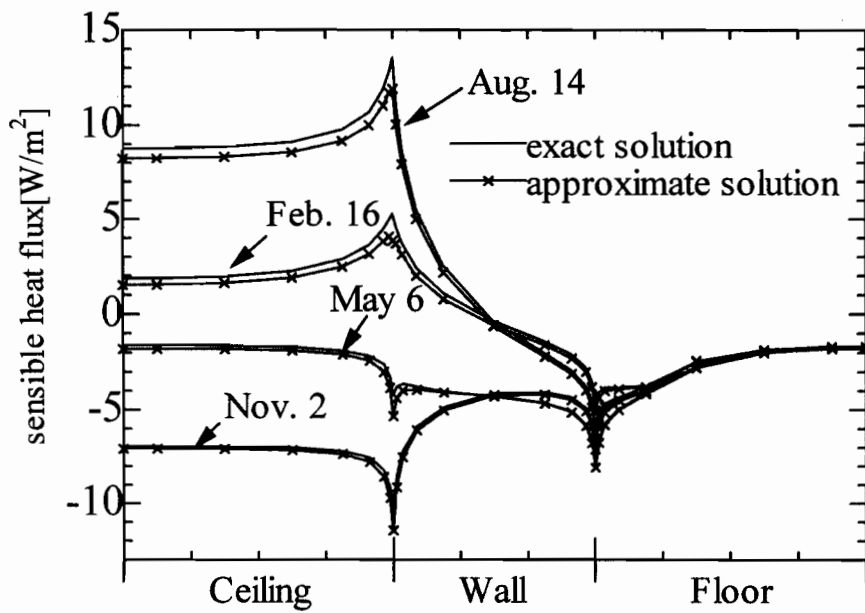


図8-15 壁表面顕熱流分布の比較 ( $\Delta T_o = +10^\circ\text{C}$ , 室内側流入正)

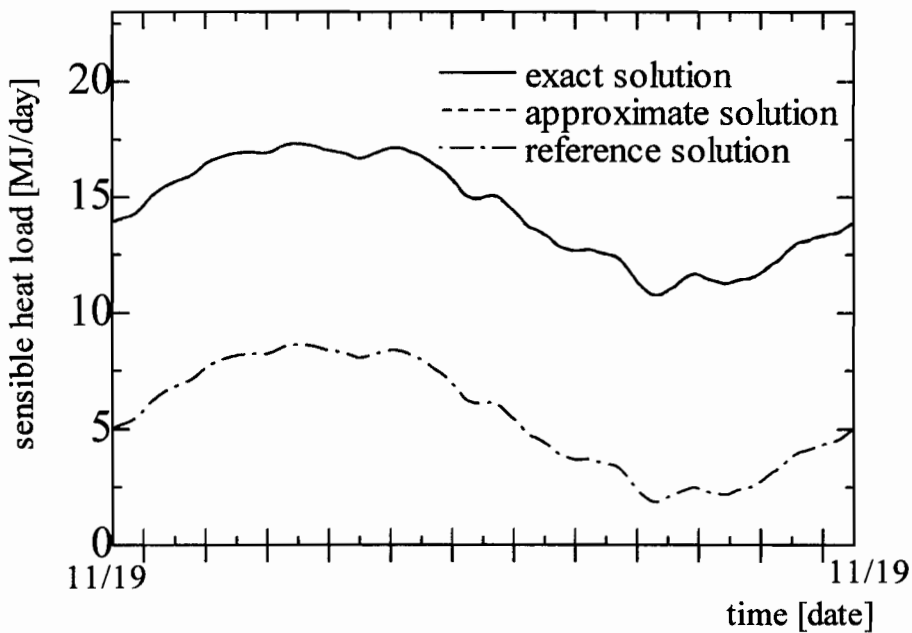


図8-16 日積算熱負荷の年変動の比較 ( $\Delta T_r = +15^\circ\text{C}$ )

変化によって差がほとんど生じなかった以上のことから、外気温年平均値変化 $\pm 10^\circ\text{C}$ 程度は擬線形近似によって十分な精度が得られるといえる。

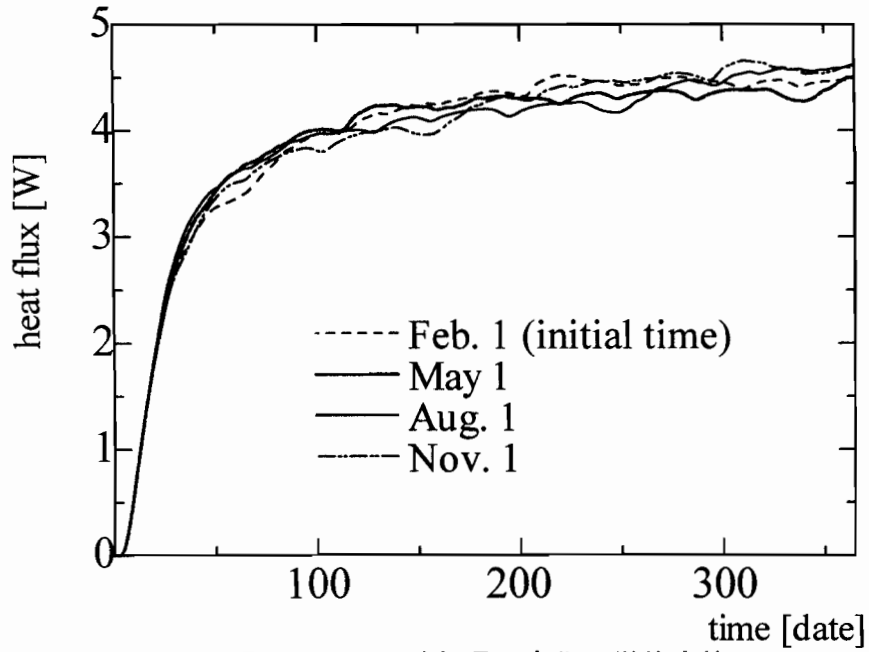


図 8 - 1 7 外気温の変化の単位応答

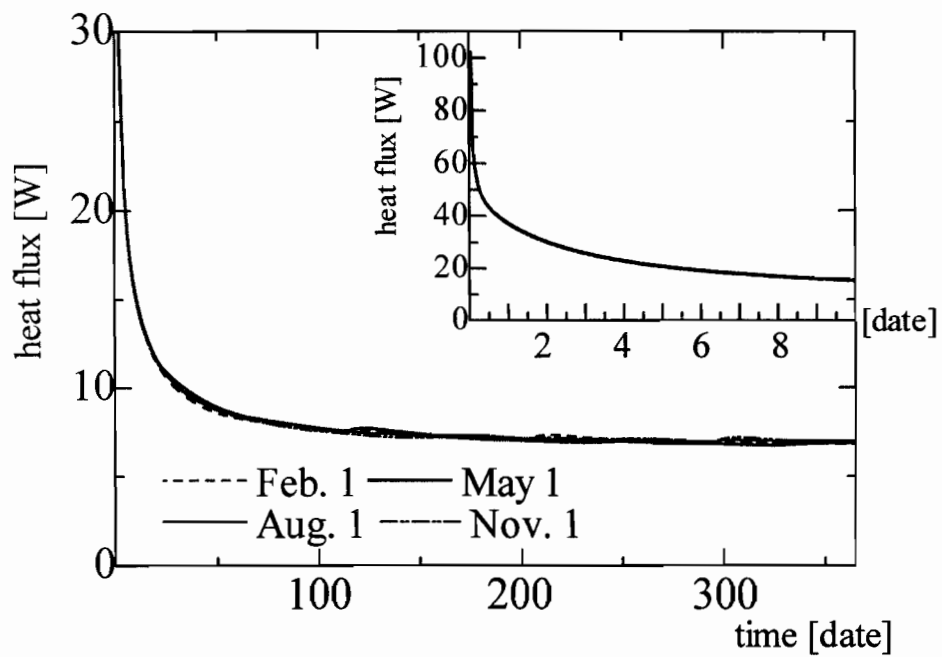


図 8 - 1 8 室温の変化の単位応答

#### 8-4-3-2 室温年平均値が変化した場合

図8-16に室温年平均値が+15℃変化した場合の日積算顕熱負荷の年変動の正確解と近似解の比較を基準解と併せて示す。正確解と近似解は非常によい一致を示している。年積算負

荷は±15℃の範囲内で誤差は1%以内と非常に小さかった。潜熱負荷は外気温年平均値変化の場合と同様ほとんど差が生じなかった。以上のことから室温年平均値変化±15℃程度は擬線形近似によって十分な精度が得られるといえる。

#### 8-4-3-3 外気温、室温の単位変化に対する応答の時変性の検討

図8-17,18にそれぞれ外気温、室温の単位変化に対する室内側表面熱流（それぞれ貫流、吸熱応答）の積算値の4つの開始時期に関する応答の比較を示す。図8-17に示すように、貫流応答は計算開始日の違いで最大0.3W程度の差が生じるが、全体的にはよく一致している。図8-18に示すように、吸熱応答も正確解と近似解はよい一致を示している。従って、ここで計算した対象における外界条件の変化及び室内条件の変化に対する応答は、時変性が小さく擬線形解の合成積を用いた線形近似解が容易に得ることが可能といえる。

### 8-5 地下空間の温・湿度変動の近似精度の検討

#### 8-5-1 計算条件

解析対象は図8-19に示すような地下階型の地下空間を考える。壁体は一般的には地表面近傍外周部に断熱材を貼付する事も考えられるが、ここでは地表面近傍の影響が最も大きい場合を考え、厚さ20cmのコンクリート1層と防湿層なしの単純な構成とする。地盤は砂質土壌、地表面は裸地とする。

地盤内の境界条件は前節と同じ条件を用い、地表面では第3種境界条件、地盤底部では、温度に関しては深さ12.6mで、水分に関しては常水面深さ5.6mとし、この位置で第1種境界条件とし、温度と水分化学ポテンシャルはそれぞれ16.4[℃]、-1[J/kg]とした。また構造物中央の対称面及び構造物から10m離れた鉛直面の水平方向では断熱・断湿とする第2種境界条件とする。壁体室内側表面は第3種境界条件とする。外界気象条件は前節と同じ条件を与える。室内条件は、熱及び水分発生のない自然状態とし換気回数を0.5[1/h]とする。初期条件は、外界条件の全く等しい鉛直一次元の地盤についてあらかじめ計算された周期的定常状態の計算結果を水平方向に一定として与えた。材料物性値は、第6章と同じく地盤はJuryの

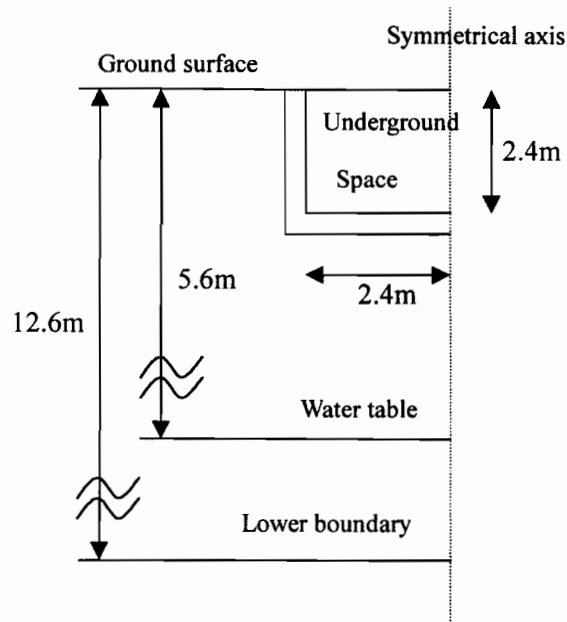


図 8 - 1 9 地下階型地下空間の解析対象

表 8 - 2 基準外界条件からの変化の組み合わせ

変化させる境界条件	外気温度 $\Delta T_o [^{\circ}\text{C}]$	外気水分化学ポテンシャル $\Delta \mu_o [\text{J/kg}]$	日射量 $\Delta q_s [\text{W/m}^2]$	降雨量 $\Delta J_p [\text{kg/m}^2\text{h}]$
変化値	1.0	1000*	$0.05 \times q_{\text{sol}}^{**}$	$0.05 \times J_p^{**}$

\*相対湿度 0.6%に相当

\*\* $q_s, J_p$  はそれぞれ基準条件値

測定した Plainfield Sand を，コンクリートは Hedenblad の測定値を元に構成したものとし，それぞれ第3章で示した値を用いる．その他の物性値は第6章の表 6-1 に示すとおりである．

### 8-5-2 計算方法

計算方法は前進型有限差分法を用いる．地盤及びコンクリートの差分刻みは地盤は地表面で最小 0.025m，コンクリートは室内側表面で最小 0.01m とし，内部は．計算は前節と同じ(8-1)～(8-9)式に地下室の収支式である(8-10)(8-11)式を加えた式を用いて前節と同様にして行った．外界条件の変化は，外気温，外気相対湿度，日射量，降雨量を考えた．それぞれ基準外界条件からの変化は表 8-2 に示すような値とした．ここでは，地下空間の温・湿度変動について，その近似精度および適応範囲について検討を行う．

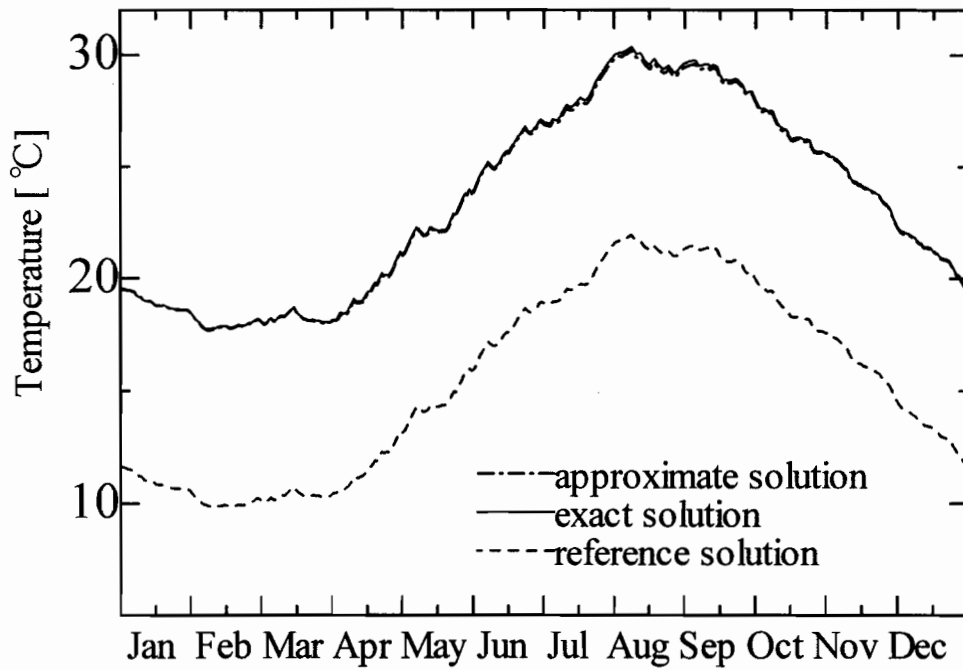


図8-20a 室内温度年変動の比較 ( $\Delta T_0 = +10^{\circ}\text{C}$ )

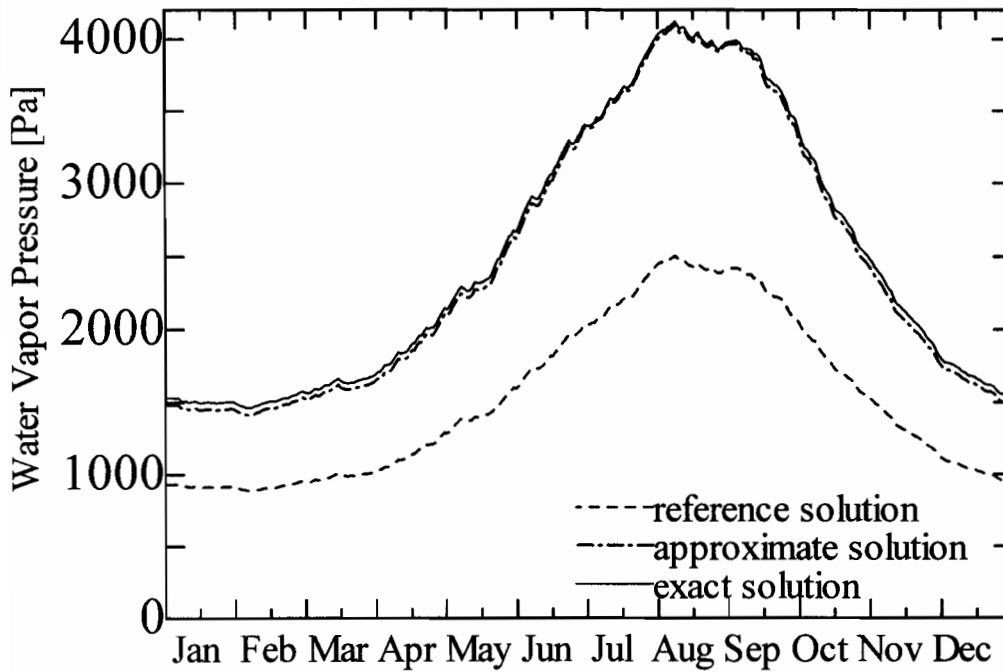


図8-20b 室内水蒸気圧変動の比較 ( $\Delta T_0 = +10^{\circ}\text{C}$ )

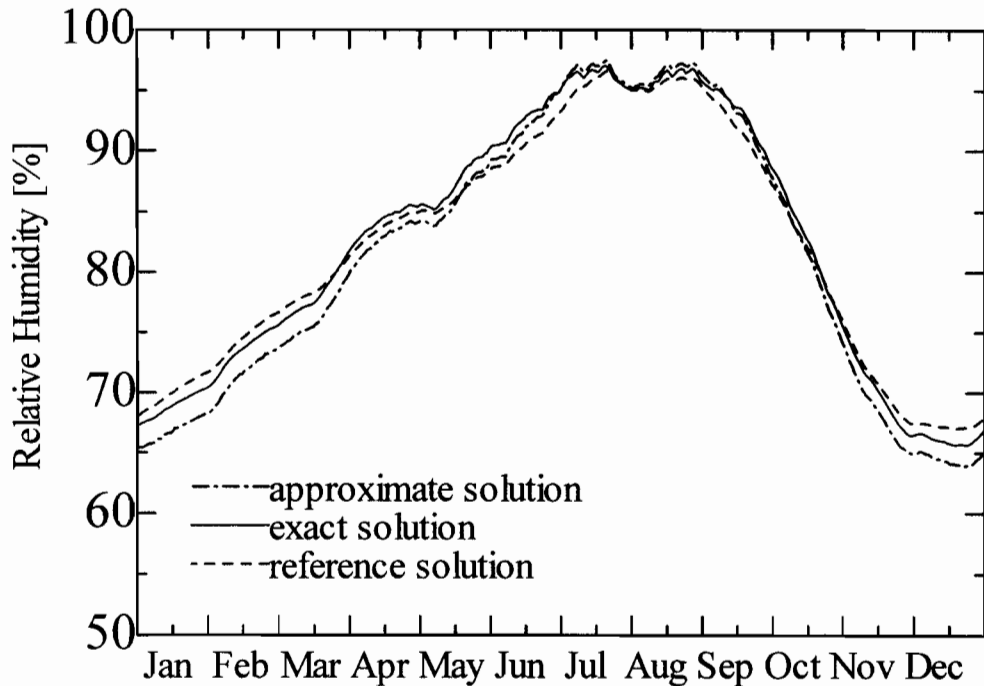


図8-20c 室内相対湿度変動の比較 ( $\Delta T_o = +10^\circ\text{C}$ )

### 8-5-3 結果と考察

#### 8-5-3-1 外気温年平均値が変化した場合

図8-20a～cに外気温年平均値が $10^\circ\text{C}$ 上昇した場合のそれぞれ室内温度，水蒸気圧，相対湿度の変動について正確解と近似解の比較を基準解と併せて示す。図に示すように室内温度，水蒸気圧共に正確解と近似解は非常によい一致を示している。一方相対湿度は，冬期に3%程度近似解が低くなり誤差が生じるが，比較的一致している。次に壁面の熱流及び水分流の比較を図8-21,22に示す。図に示すように熱流及び水分流に関しては正確解と近似解は一致している。外気温年平均値が $10^\circ\text{C}$ 低下した場合においても，同様の結果が得られた。以上から外気温年平均値が $\pm 10^\circ\text{C}$ 程度は擬線形近似によって十分な精度が得られるといえる。

#### 8-5-3-2 外気相対湿度年平均値が変化した場合

図8-23a～cに外気相対湿度が10%上昇した場合(水分化学ポテンシャル変化 $+18000\text{J/kg}$ )のそれぞれ室内温度，水蒸気圧，相対湿度の変動について正確解と近似解の比較を

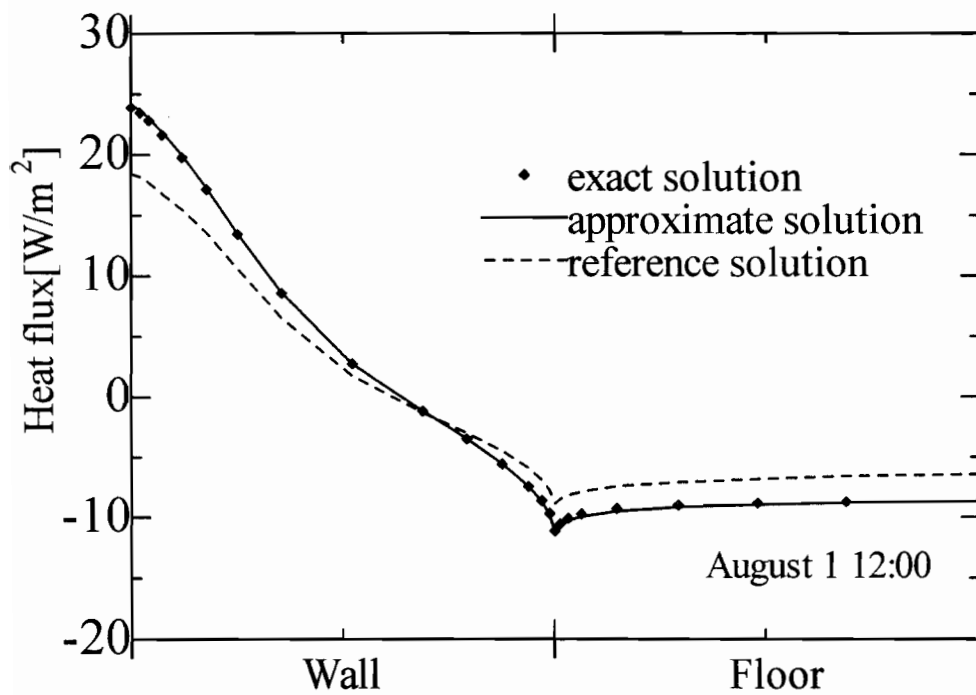


図8-21 室内側表面熱流分布の比較 (August 1,  $\Delta T_o = +10^\circ\text{C}$ )

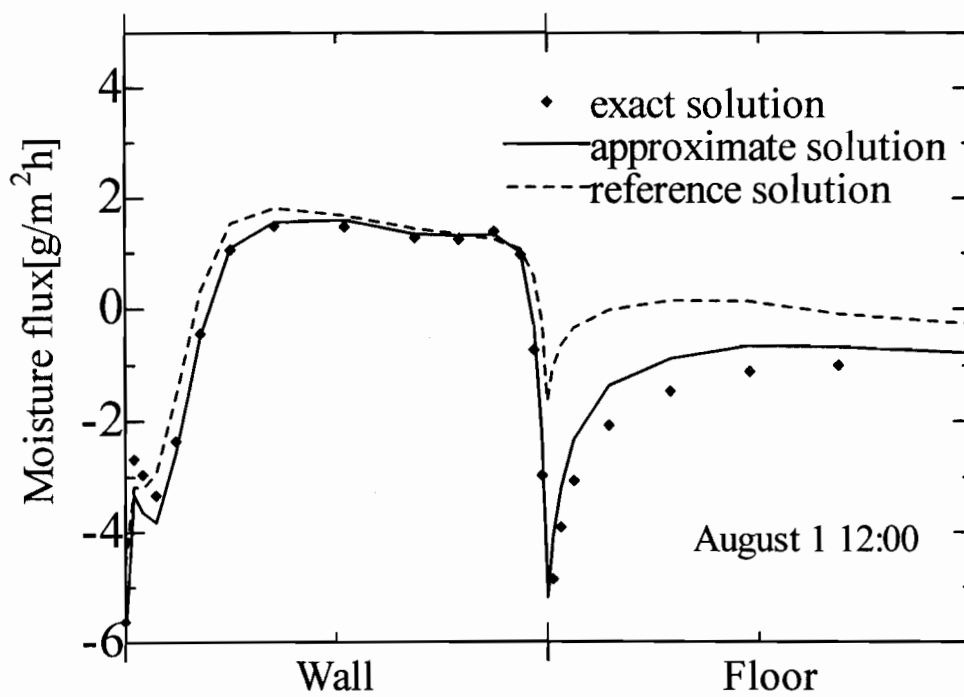


図8-22 室内側表面熱流分布の比較 (August 1,  $\Delta T_o = +10^\circ\text{C}$ )

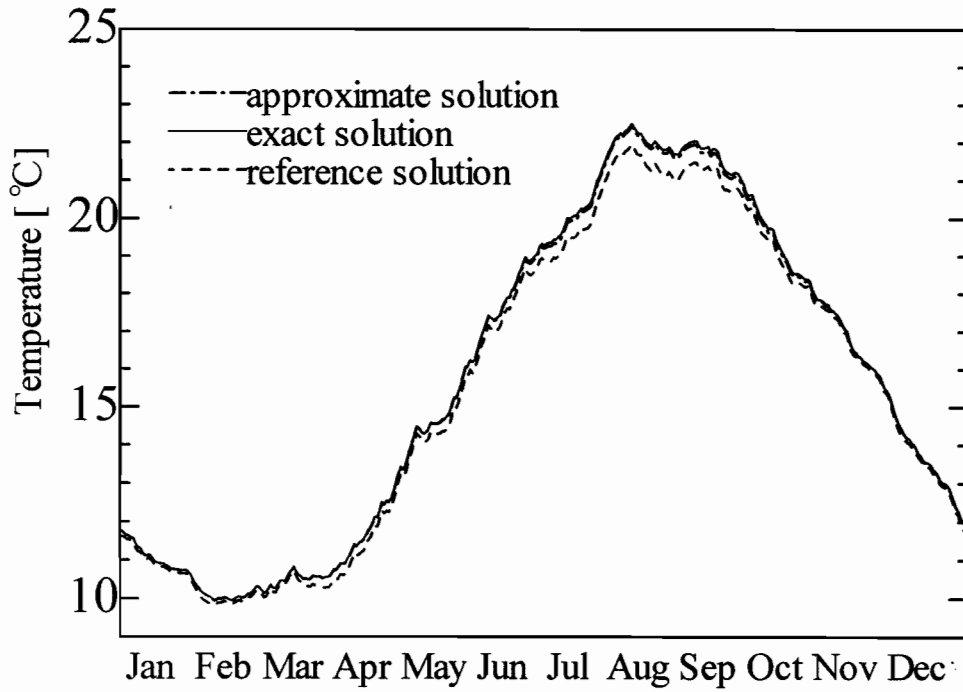


図8-23 a 室内温度変動の比較 ( $\Delta \mu_0 = +18000 \text{ J/kg}$ )

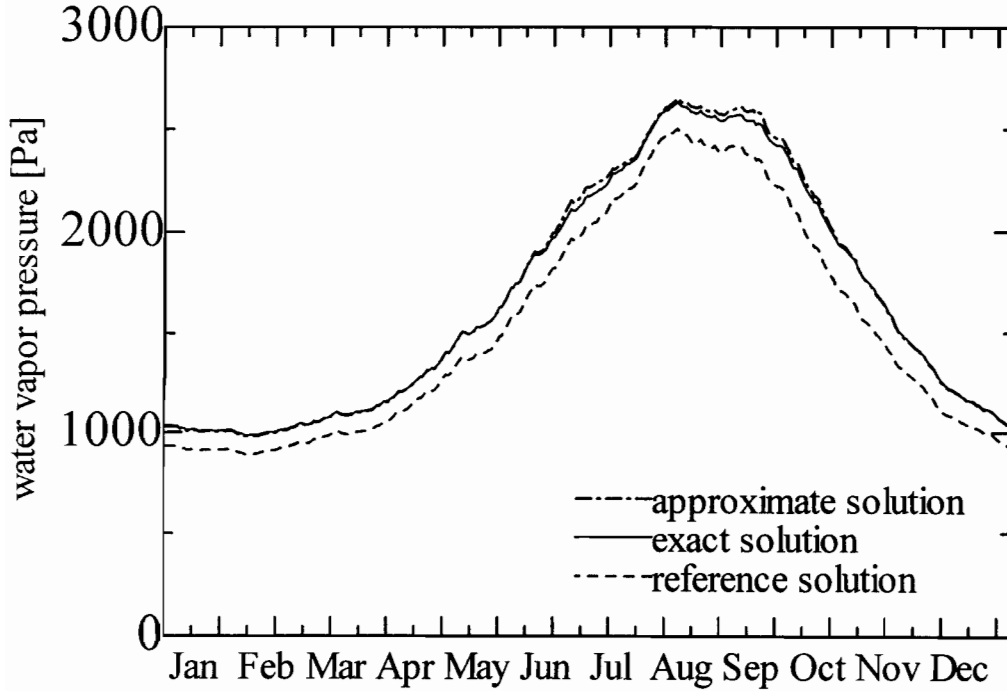


図8-23 b 室内水蒸気圧変動の比較 ( $\Delta \mu_0 = +18000 \text{ J/kg}$ )



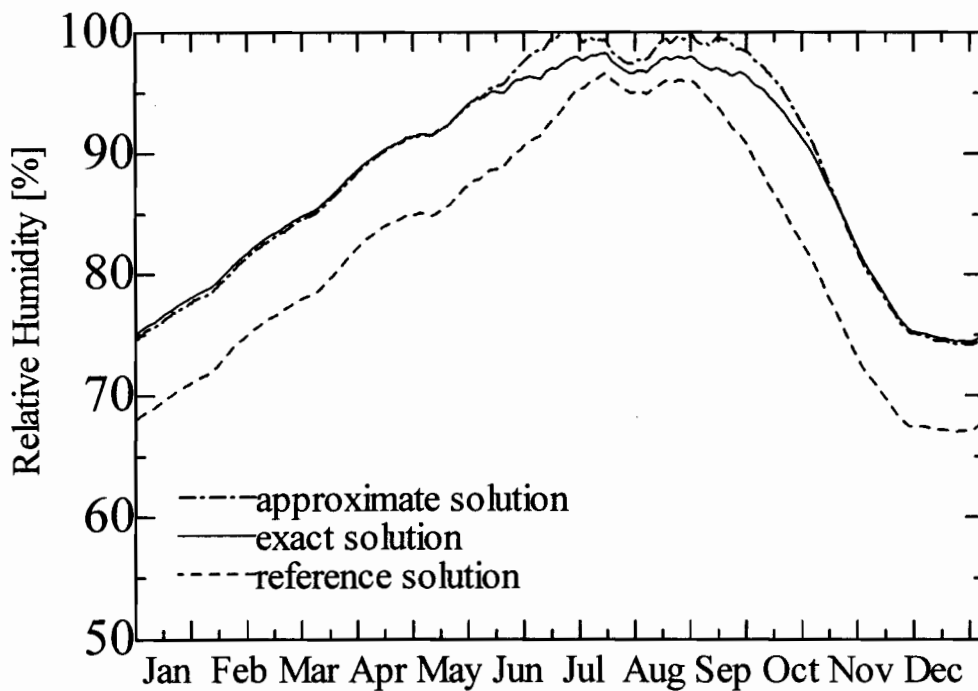


図8-23c 室内相対湿度変動の比較 ( $\Delta \mu_0 = +18000 \text{ J/kg}$ )

基準解と併せて示す。図に示すように室内温度は正確解と近似解は非常によい一致を示している。室内水蒸気圧は夏期にやや高めの値を示すが、年間を通じての一致はよい。一方相対湿度は、夏期に4%程度近似解が高くなり誤差が生じるが、比較的一致している。これは、夏期の水蒸気圧予測がやや悪いことが影響しているものと考えられる。外気温年平均値が $10^\circ\text{C}$ 低下した場合においても、同様の結果が得られた。以上から外気相対湿度年平均値が $\pm 10\%$ 程度は擬線形近似によって十分な精度が得られるといえる。

### 8-5-3-3 日射量が一定比率で変化した場合

図8-24a～cに日射量が1.4倍の場合のそれぞれ室内温度、水蒸気圧、相対湿度の変動について正確解と近似解の比較を基準解と併せて示す。図に示すように室内温度は正確解と近似解は非常によい一致を示している。室内水蒸気圧は変化そのものが夏期に若干あるだけで小さいが、この時期近似解が正確解をやや上回るがは全体的に一致している。一方相対湿度は、夏期に3%程度近似解が高くなり差が生じるが、比較的一致している。夏期の

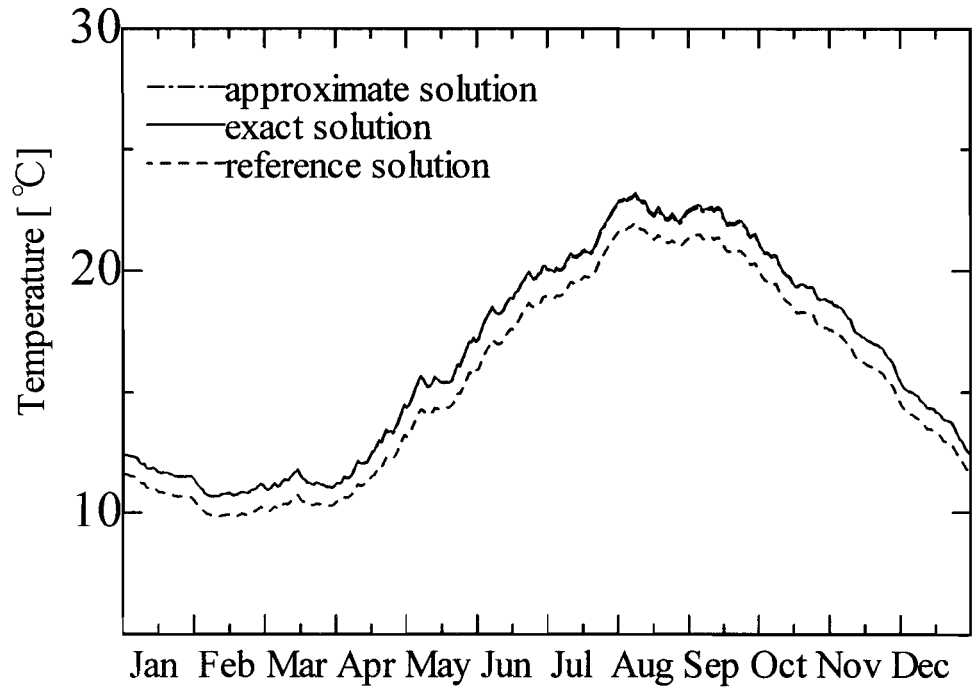


図8-24 a 室内温度変動の比較 ( $\Delta q_{sol}=+0.4 \times q_{sol}$  [W/m<sup>2</sup>])

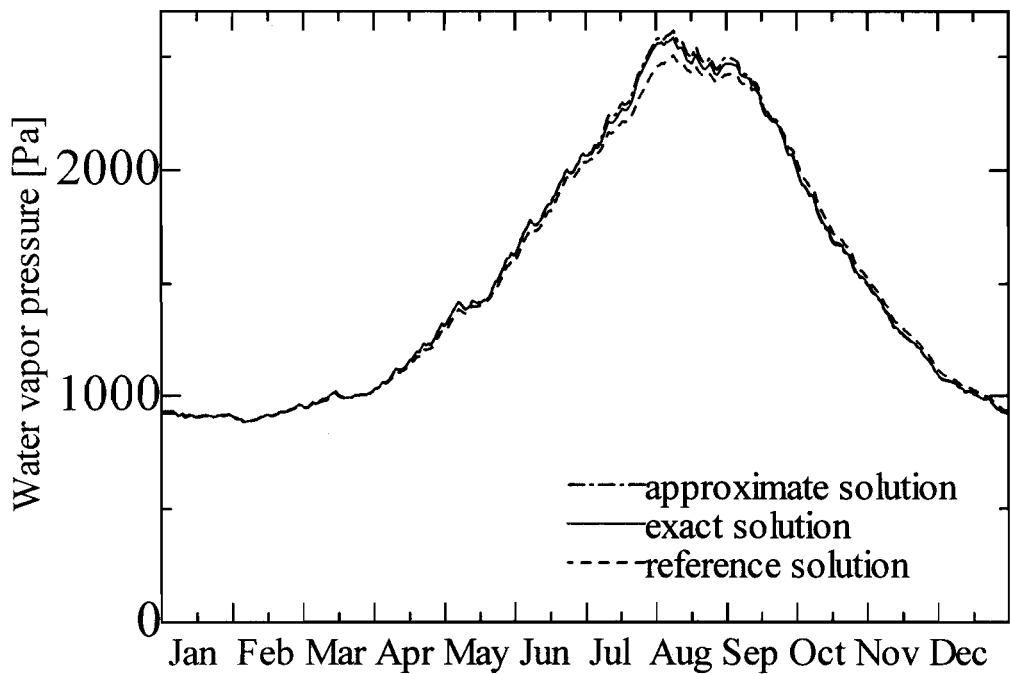


図8-24 b 室内水蒸気圧変動の比較 ( $\Delta q_{sol}=+0.4 \times q_{sol}$  [W/m<sup>2</sup>])

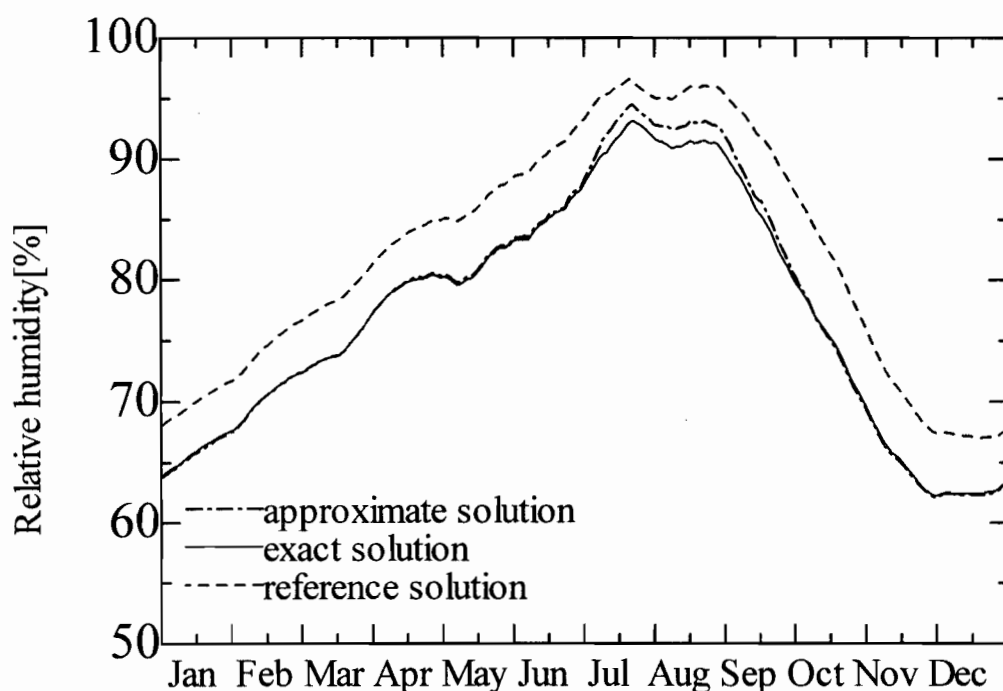


図8-24c 室内相対湿度変動の比較 ( $\Delta q_{sol} = +0.4 \times q_{sol}$  [W/m<sup>2</sup>])

水蒸気圧のわずかな差の影響と考えられる。日射量が0.6倍の場合においても、同様の結果が得られた。以上から外気温年平均値が0.6～1.4倍程度は擬線形近似によって十分な精度が得られるといえる。

#### 8-5-3-4 降雨量が一定比率で変化した場合

図8-25a～cに降雨量が1.5倍の場合のそれぞれ室内温度、水蒸気圧、相対湿度の変動について正確解と近似解の比較を基準解と併せて示す。図に示すように室内温度は正確解と近似解は年間を通じてよい一致を示している。ただし、相対湿度で検討するように図面上微小であるが、年間を通じて近似解が低く変動している。室内水蒸気圧は変化がほとんどないこともありよく一致している。一方相対湿度は、年間を通じて2%程度近似解が高くなり差が生じるが、比較的一致している。これは室温の近似解が年間を通じてやや低い値となっている影響と考えられる。外気温年平均値が10℃低下した場合においても、同様の結果が得られた。以上から外気温年平均値が±10℃程度は擬線形近似によって十分な精度が得られるといえる。

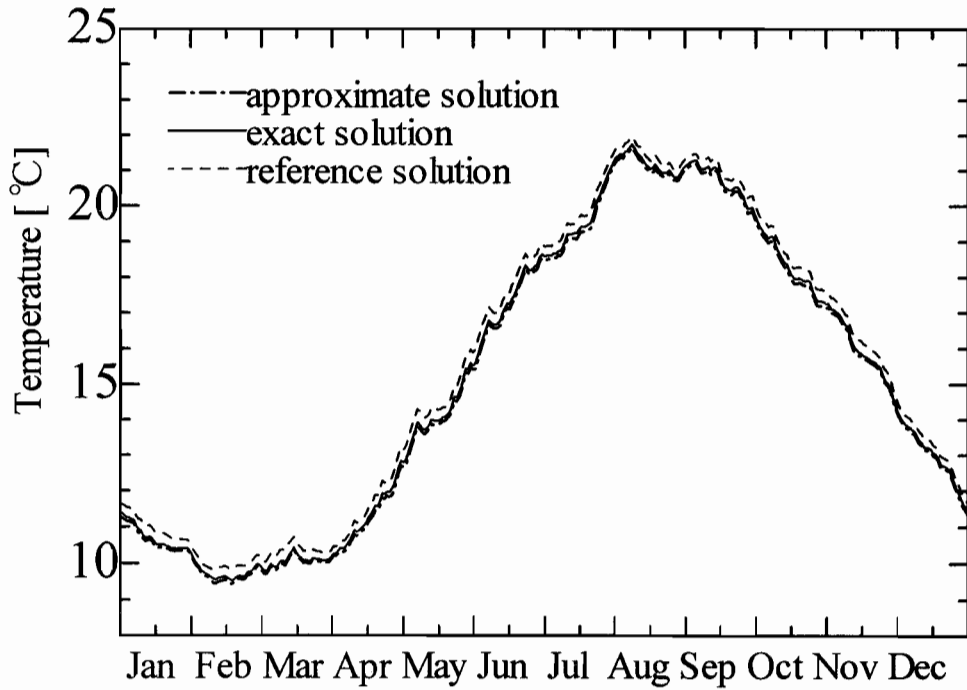


図8-25 a 室内温度変動の比較 ( $\Delta J_p = +0.5 \times J_p$  [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ])

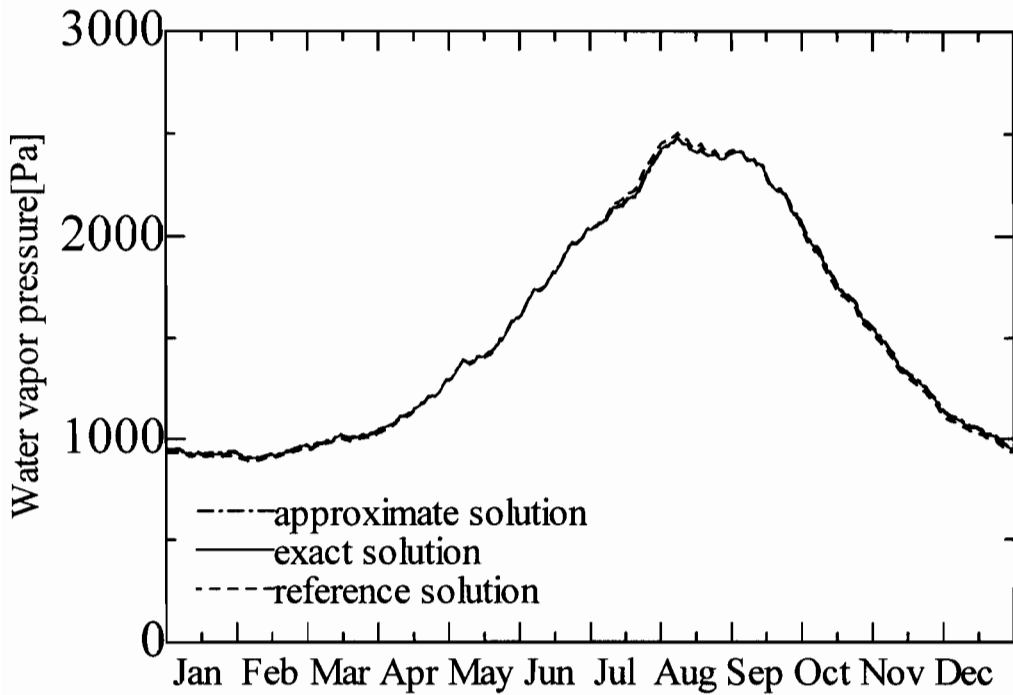


図8-25 b 室内水蒸気圧変動の比較 ( $\Delta J_p = +0.5 \times J_p$  [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ])

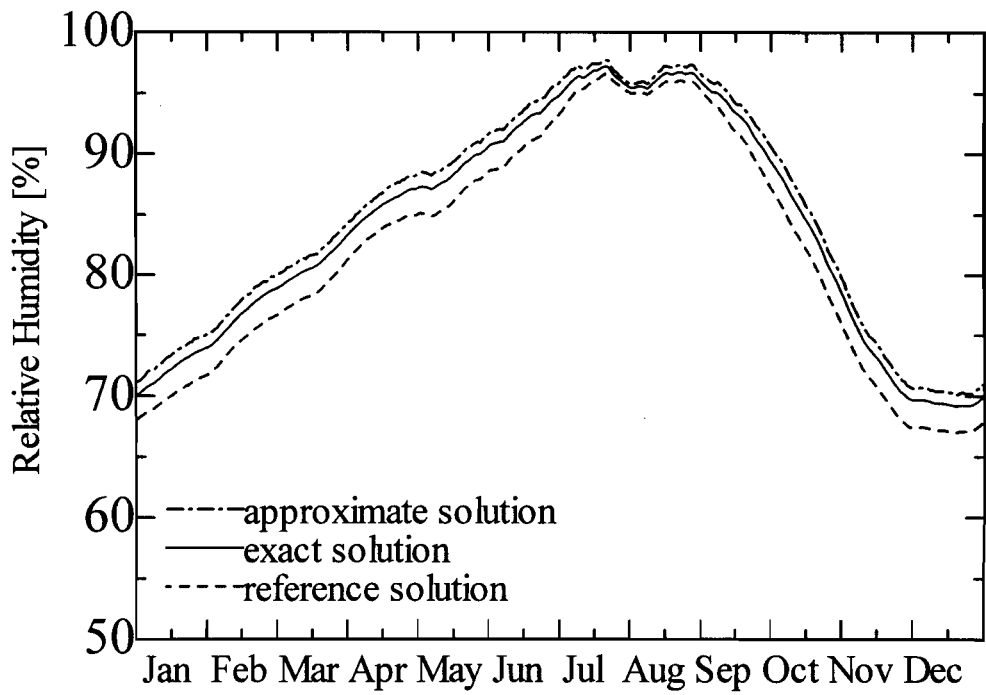


図8-25c 室内相対湿度変動の比較 ( $\Delta J_p = +0.5 \times J_p$  [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ])

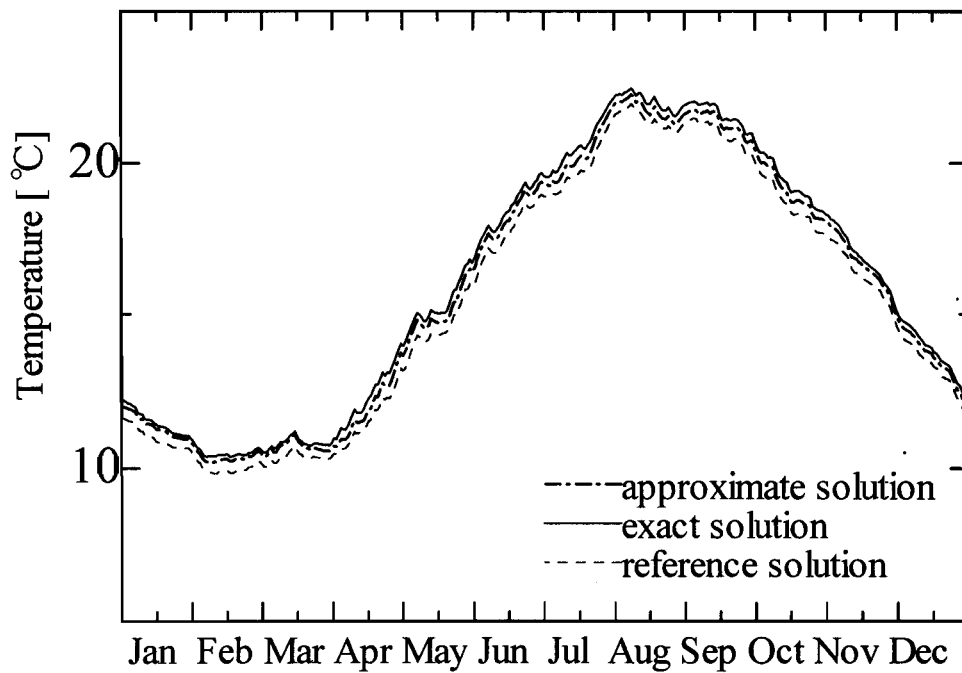


図8-26 室内温度変動の比較 ( $\Delta J_p = -0.5 \times J_p$  [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ])

## 8-6 第8章のまとめ

本章では、地盤内熱水分性状及び地下構造物熱湿気性状の簡易予測手法としての擬線形化方程式の適用範囲の検討を行った。8-2節では擬線形化法による方程式の線形近似化手法について述べた。この手法を用いてまず1次元地盤の熱水分場に関して外界条件変化に対する適応範囲について検討し以下の結論を得た。

1. 外気温年平均値のみの変化に対しては $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 程度、外気相対湿度年平均値のみの変化に対しては20%程度の範囲の変化に対して地盤内温度は十分な精度で予測可能である。

次に地下構造物の熱負荷に対する外界、室内条件変化に対する近似精度、適応範囲及びその時変性について検討し、以下の結論を得た。

2. 室温湿度一定条件の下では、外気温年平均値のみの変化に対しては $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度、室温年平均値のみの変化に対しては $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 程度の範囲の変化に対して熱負荷は十分な精度で予測可能である。
3. 室温湿度一定条件の下での、外気温、室温変化に対する擬線形解の熱流に関する単位応答はいずれも時変性が小さく、合成積による線形近似解析が可能といえる。

さらに地下構造物の温湿度変動を伴う自然状態下における外界条件変化に対する近似精度、適応範囲について検討し以下の結論を得た。

4. 外気温年平均値のみの変化に対しては $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 程度、外気相対湿度年平均値のみの変化に対しては $\pm 10\%$ 程度、日射のみ一定比率の変化に対しては0.6～1.4倍程度、降雨のみ一定比率の変化に対しては0.5～1.5倍程度の範囲の変化に対して室内温・湿度は十分な精度で予測可能である。

以上から単一の外界条件の変化についての適応範囲が明らかとなったが、外界条件は地域によって実際には複合的に変化する。これらの複合的な変化に対する適応範囲を知る必要がある。また、外気温、室温変化に対する解の変化に対する応答の時不変性が確認されたので、これによる重み関数の適応による解の予測がどの程度の精度を有するのか検討する必要がある。

日本における各種外界条件の変化が、外気温の年平均値に関しては約15℃、相対湿度の年平均値に関しては64-80%、日射量に関しては4000-5800MJ、降雨量は810～3000mmであることを以上の結果と考えあわせると、基準境界として外気温に関しては1から2地点、相対湿度に関しては1地点、日射に関しては1地点、降雨に関しては2、3地点についての解が得られていれば、全ての地点の予測が可能となる可能性がある。

## 第9章 結論

本研究は、地下構造物の熱・湿気性状の予測法を確立し、地盤及び壁体の構成、換気などがこれらに及ぼす影響を明らかにし、熱・湿気環境設計のための簡易予測計算法について提案を行うことを目的として、以下に示す様な検討を行った。

第1章では、地盤を含む多孔質材料中での熱・水分移動に関する研究及び地下構造物の熱性状、湿気及び結露性状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、第5章以降の解析で用いる多孔質材料中の熱・水分移動の基礎方程式を提示した。ここで用いられる熱・水分のポテンシャルは温度及び水分化学ポテンシャルである。上式に、地下室内空気の熱・水分収支式を加え、地下構造物の熱・湿気性状予測における基礎方程式とした。

第3章では、第2章で示した基礎方程式中の物性値について、第5章以降の解析で用いる地盤及び壁体に関する値を示した。これらは温度や水分化学ポテンシャルといった基礎方程式中の従属変数によって変化するため、基礎方程式は非線形となる。このため解析には非線形問題の一般的な数値解法である前進型有限差分法を採用し、差分法で必要となる基礎方程式の差分化式を示した。

第4章では、完全埋設型の実験地下室の温・湿度及び周辺地盤の熱・水分場の年間性状の実測の実験概要、実験計画、実験計測方法について述べ、実測によって得られた室温・湿度性状、結露性状、周辺地盤の熱・水分性状について考察した。その結果、(1)地下室温度は年振幅が小さく安定し、相対湿度は春期から夏期にかけて90%を越える高湿な環境となること。(2)地盤内温度は地表面の日射吸収、降雨後の水分蒸発の影響を受けた変動を示すこと、などの結果を得た。

第5章では、第4章で示した地下室温・湿度及び周辺地盤の熱・水分性状を、第2章、第3章で示した基礎式及び解析方法を用いて、実測された外界気象条件を境界条件として計算を行い、実測との比較・検討を行った。また、地盤及び壁体の物性値の違いがもたらす影響を検討し、従来の単純熱拡散方程式による解析結果との比較を行った。その結果、(1)本論で示した基礎方程式を用いた解析による計算結果が実測結果と年間を通じて極めて良く一致



したことから、これが地下構造物の熱・湿気性状予測に適応可能であること、(2)地下室内の湿気性状に対する壁体水分伝導率の影響は大きく、地下室壁体に用いるコンクリートの水セメント比およびその高湿度状態における水分伝導率の値に十分な注意が必要であること、(3)埋設深さ1m程度の地下室内温・湿度環境の予測には地表面近傍の土壌物性値の把握が重要であること、などの結果を得た。

第6章では、地盤と地下構造物との間の水分移動に対して大きな影響を及ぼすと考えられる要素として換気回数、壁体防湿層の配置及び常水面深さを考え、これらが地下構造物及び周辺地盤の熱水分性状及び壁体の結露性状に与える影響を検討した。解析対象はコンクリートと防湿層のみ（断熱材及び内装材がない場合）で壁体が構成される完全に埋設された地下構造物であり、室内条件を自然状態として検討を行った。その結果、(1)壁体の室内側表面の水分流は、壁体間の室空気を介した流出入があり、一方向性を示さないこと、(2)壁体防湿層の配置の違い（室内側表面、室外側表面、防湿層なし）が、地下空間の温・湿度に与える影響は大きいこと、(3)壁体の室外側表面に防湿層を設けることが表面結露及び高湿環境を抑えるためには最もよいことから、壁体の吸放湿性を十分もたせ、地盤からの水分流入を抑えることが有効であること、(4)換気量は小さすぎても、大きくても結露防止上問題が生じる事があり、適切な換気量を考慮する必要があること、などの結果を得た。

第7章では、地下構造物の壁体構成として、より現実的な利用を考慮した構成を考え、地下空間の結露防止において有効となる構成を数値解析により検討した。構造躯体であるコンクリートに断熱材、防湿層、吸放湿材といった材料を用いて壁体構成を変化させ、室利用条件として自然状態と居住状態を与えた解析を行った。その結果、(1)地下空間の結露防止対策において、地盤との境界を断湿することが有効であること、(2)上記に加え、断熱材を配置することは、室内発熱等がある居住状態の場合には、結露防止に有効であること、などの結果を得た。

ここで検討した壁体構成による結露抑制効果は認められるものの、高湿度環境抑制を含めて考えると、まだ不十分である。結露防止の確実性、高湿度環境抑制の観点から、地下室の壁体構成に対する上記の考慮に加え、除湿器等による室内水分の除去が必要である。今後の課題として、室内側表面に吸放湿材を設けることによる室内湿度調整の効果について、そ

の厚さ及び種類に対して室内での除湿器の併用など室利用条件も考慮して確認する必要がある。またここでは検討していない壁体構成である二重壁とした場合や、地下室が多数室の場合、材料内初期含水状態がもたらす影響について検討が必要と考えられる。

第8章では、地下構造物の熱・湿気環境の設計のための簡易計算方法の一手法として、非線形方程式の擬線形化について、それにより求まる線形近似解の精度及び適用範囲の検討を行った。擬線形化法は基準境界条件下における解(基準解)を用いて、基準境界条件からの境界条件変化に対する線形近似解を求め、基準解と線形近似解を重ね合わせることで、任意の境界条件に対する近似解を得ようとする手法である。その結果、(1)外界条件の変化についての適応範囲を明らかにし、外気温、外気相対湿度、日射量、降雨量について日本国内で数カ所程度の外界条件についての解が得られれば、全ての地点で予測できる可能性があること、(2)室温、外気温の単位変化に対する壁面からの熱流の応答を調べ、その時変性が小さいことを確認し、時不変の合成積の利用が可能となること、などの結果を得た。

今後の課題としては、外界条件は地域によって実際には複合的に変化するため、これらの複合的な変化に対する適応範囲を知る必要がある。また外気温、室温変化に対する解の変化に対する応答の時不変性が確認されたので、これによる重み関数の適応による解の予測について検討する必要がある。

## 記号表

$C_i$	: 比熱 (i=1w,2w,a,m,s) [J/kgK]
$C_p$	: 材料のみかけの容積比熱 [J/m <sup>3</sup> K]
$c_\gamma$	: 空気の容積比熱 [J/m <sup>3</sup> K]
$c'\gamma'$	: 空気の湿気容量 [kg/m <sup>3</sup> Pa]
$D_{T_k}$	: 温度勾配に関する気相水分伝導率 [m <sup>2</sup> /s°C]
$D_{T_l}$	: 温度勾配に関する液相水分伝導率 [m <sup>2</sup> /s°C]
$D_v$	: 材料空隙部の水蒸気拡散係数 [kg/msPa]
$D_{w_g}$	: 含水率勾配に関する気相水分伝導率 [m <sup>2</sup> /s]
$D_{w_l}$	: 含水率勾配に関する液相水分伝導率 [m <sup>2</sup> /s]
$F_w$	: 外力[m/s <sup>2</sup> ]
$g$	: 重力(=9.8) [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	: 相対湿度[-]
$H_i$	: エンタルピー (i=1w,2w,a,s) [J/kg]
$J_i$	: 水分流 (i=1w,2w) [kg/m <sup>2</sup> s]
$J_p$	: 降雨 [kg/m <sup>2</sup> s]
$J_r$	: 室内の水分発生量 [kg/s]
$J_{w(12)}$	: 気相から液相の水分変化量 [kg/m <sup>2</sup> s]
$K$	: 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 <sup>2</sup> ]
$q_{sol}$	: 日射吸収量 [W/m <sup>2</sup> ]
$q_{noc}$	: 夜間輻射量 [W/m <sup>2</sup> ]
$Q_r$	: 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 (= $R/M_v$ ) [Pa m <sup>3</sup> /kg K]
$R$	: 一般ガス常数 (=8316.96) [Pa m <sup>3</sup> /kmol K]
$M_v$	: 水蒸気の分子量 (=18.016) [kg/kmol]
$S_{iw}$	: i相の水分の部分比エントロピー [J/kgK]
$S_j$	: j番目の壁表面積 [m <sup>2</sup> ]
$t$	: 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]
$v_i$	: 比容積 (i=1w,2w,a) [m <sup>3</sup> /kg]
$V$	: 室容積 [m <sup>3</sup> ]
$W$	: 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 <sup>3</sup> s]
$\alpha$	: 総合熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha_c$	: 対流熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha_r$	: 輻射熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha'_m$	: 湿気伝達率 [kg/m <sup>2</sup> s Pa]
$\alpha'_T$	: 温度勾配に関する水分伝達率 [kg/m <sup>2</sup> s K]
$\alpha'_\mu$	: 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝達率 [kg/m <sup>2</sup> s (J/kg)]
$\lambda$	: 熱伝導率 [W/m K]
$\lambda'_{Tg}$	: 温度勾配に関する気相水分伝導率 [kg/m s K]

- $\lambda'_{n}$  : 温度勾配に関する液相水分伝導率 [kg/m s K]  
 $\lambda'_T$  : 温度勾配に関する水分伝導率 [kg/m s K]  
 $\lambda'_{\mu_g}$  : 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率 [kg/m s (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導率 [kg/m s (J/kg)]  
 $\lambda'_{\mu}$  : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率 [kg/m s (J/kg)]  
 $\lambda'_p$  : 圧力勾配に関する水分伝導率 [kg/m s Pa]  
 $\mu$  : 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<sup>3</sup>]  
 $\Phi$  : 水頭高さ [m]  
 $\psi$  : 体積含水率 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  
 $\Psi_o$  : 絶乾時の材料の空隙率 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  
 $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$  : 空間勾配  $i, j, k$  はそれぞれ,  $x, y, z$  方向の単位ベクトル  
 $\nabla_T$  : 一定温度での勾配  
 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] Philip, J.R., De Vries, D.A., Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradient, Trans. Ameri. Geoph. Union, Vol.38, 222-232, (1957)
- [2] Luikov, A.V., Transporterscheinungen in Kapillar-porösen Körpern, Akademie Verlag, (1958)
- [3] Luikov, A.V., Mikhailov, Yu. A., Theory of Energy and Mass Transfer, Prentice Hall, Englewood Cliffs, (1961)
- [4] Prigogine, I., Introduction to Thermodynamics of Irreversible Process, Springfield, Thomas, (1955)
- [5] de Groot, S. R., Mazur, P., Non-equilibrium Thermodynamics, North Holland, Amsterdam, (1962)
- [6] Krischer, O., Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs Technik, 2 Auf, Springer V., (1963)
- [7] Cary, J. W., Taylor, S.A., The Interaction of Simultaneous Diffusions of Heat and Water Vapour, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 26, 413-416, (1962)
- [8] Cary, J. W., Onsagar's Relation and the Non-isothermal Diffusion of Water Vapour, J Phy. Chem., Vol. 67, 126-129, (1963)
- [9] Cary, J. W., Taylor, S.A., Linear Equation in Porous Material under Temperature Gradient, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 28, 167-171, (1964)
- [10] 松本 衛, 建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究, 博士論文, (1978)
- [11] 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, 17-20, (1974)
- [12] 松本 衛, 結露蒸発のある壁体の熱水分移動の方程式とそれによる結露過程の計算, 日本建築学会環境工学第6回熱シンポジウム, 湿気, 6, 15-27, (1976)
- [13] 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, 1-11, (1967)
- [14] 池田 哲朗, 結露障害防止に関する基礎的研究, 博士論文, (1979)
- [15] 井上 隆ほか3名, 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, (1989-93)
- [16] 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, 189-192, (1992)
- [17] 松尾 陽, 井上 隆他, 地下居室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)
- [18] 長谷川房雄, 吉野 博, 松本真一, 半地下試験家屋における透過日射を阻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集, 第374号, 33-43, (1987)
- [19] 長谷川房雄, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一, 半地下試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集, 第387号, 22-32, (1988)

- [20] 長谷川房雄, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一, 半地下試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集, 第435号, 1-10, (1992)
- [21] Kusuda, T., Achenbach, P.R., Numerical Analyses of the Thermal Environment of Occupied Underground Spaces with Finite Cover Using a Digital Computer, ASHRAE Transactions, Vol. 69, 439-453, (1963)
- [22] 寺井俊夫, 地盤の内部温度を計算せずに表面熱流を求める方法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 223-224, (1970)
- [23] 赤坂 裕, 土に接する床・壁面の熱取得, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 497-498, (1970)
- [24] 伊丹 清, 寺井俊夫, 2層壁で囲まれた土間床の地盤伝熱の計算法について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 777-778, (1989)
- [25] 永田明寛, 松尾 陽, 井上 隆, 地下室の熱特性に関する研究 -境界要素法による周波数応答解析-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 779-780, (1989)
- [26] 永田明寛, 松尾 陽, 半無限体の熱応答近似法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 735-734, (1990)
- [27] Kusuda, T., Achenbach, P.R., Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States, ASHRAE Transactions, Vol. 71, 61-75, (1965)
- [28] Farouki, O.T., Thermal Properties of Soils, Series on Rock and Soil Mechanics, Vol.11, (1986)
- [29] 松本真一, 吉野 博, 長友宗重, 半地下試験家屋の敷地内における土壌の熱的特性に関する実測, 日本建築学会計画系論文報告集, 第462号, 21-30, (1994)
- [30] Shipp, P., H., The thermal characteristics of large earth-sheltered structures, Ph. thesis, University of Minnesota, (1979)
- [31] 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)
- [32] 永田明寛, 松尾 陽ほか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, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学, 779-780, (1992)
- [33] 羽鳥大輔, 井上 隆, 大沢元毅ほか, 地下室の温熱環境に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学, (1993-1994)
- [34] Shen, L.S., Ramsey, J.W., An investigation of transient, two-dimensional coupled heat and moisture flow in the soil surrounding a basement wall, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.31, No.7, pp1517-1527, (1988)
- [35] 小椋大輔, 松本 衛, 地下空間の熱性状に関する研究 -降雨の影響の検討-, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第32号, 計画系, pp169-172, (1992)
- [36] 芝池英樹, 松本 衛, 2次元地盤接合壁体の周期的熱・湿気特性に関する境界要素解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp917-918, (1992)
- [37] Sato, K., Fukuhara, T., An approach to control system of water budget in underground space environment, France-Japan Workshop on Mass and Energy Simultaneous Transfer, (1992)

- [38] 前田 敏男, 結露防止計画, 結露防止計画(3), 日本建築学会研究報告, vol.38, pp1-3, (1957)
- [39] 本間俊輝, 松尾 陽, 井上 隆, 居室空間としての地下室の研究 一年間壁面温変動と夏期の結露について-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp777-778, (1984)
- [40] 長井, 松尾, 井上, 永田, 地下室の結露に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp1405-1406, (1989)
- [41] Hedenblad, G., Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste, Ph thesis, Lund Institute of Technology, (1993)
- [42] 日本熱物性学会編, 熱物性ハンドブック, 養賢堂, (1990)
- [43] 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)
- [44] Jury, W., Simultaneous transport of heat and mass through a medium sand, Ph thesis, University of Michigan, (1973)
- [45] 岩前 篤, 表層系地盤の熱水分性状に関する研究, 博士論文, (1995)
- [46] Neib, J., E.R.F. Winter, Neue Methoden zur Berechnung der kapillaren Flüssigkeit in porösen Körpern, Wärme und Stoffübertragung 16, pp175-190, (1982)
- [47] 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)
- [48] 国立天文台編, 理科年表, 丸善, (1997)
- [49] 二宮秀與, 赤坂 裕, 松尾 陽, 建築環境設計へのAMeDASの応用 その6 AMeDASに含まれない3気象要素(日射量, 大気放射量, 水蒸気圧)の補充, 日本建築学会環境工学委員会 熱環境小委員会第27回熱シンポジウム資料, pp31-40, (1997)
- [50] 斉藤平蔵, 建築気候, pp149-151, 共立出版, (1974)
- [51] 松本 衛, 室内温湿度解析・防露計算のための壁体を記述する方程式の線形近似について, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, 第26号, pp109-112, (1986)
- [52] Matsumoto, M., Nagai, H., An analysis of moisture variations in building wall by quasilinearized equations of nonlinear simultaneous heat and moisture transfer equations, The International Meeting of CIB W-40 in Victoria, pp1-15, (1989)
- [53] Matsumoto, M., Tanaka, Y., A numerical analysis of moisture behavior in a porous wall by quasilinearized equations, Energy and Buildings, Vol.15/16, pp933-945, (1990/1991)



## 本研究に関する発表論文一覧

### A. 原著論文

1. 小椋大輔, 松本 衛, 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, 27-36, 1995年8月
2. 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 —壁体防湿層配置及び常水面深さの影響—, 日本建築学会計画系論文集, 第529号, 23-29, 2000年3月
3. 小椋大輔, 寺島貴根, 水畑雅行, 松本 衛, 完全埋設型地下室及び周辺地盤の熱・湿気性状の年間実測, 日本建築学会計画系論文集, 第536号, 2000年10月
4. 小椋大輔, 三野誠士, 松下敬幸, 水畑雅行, 松本 衛, 完全埋設型地下室及び周辺地盤の熱・湿気性状の解析, 日本建築学会計画系論文集 (印刷中)

### B. 国際会議

1. Ogura, D., Matsumoto, M., An Analysis of Heat and Moisture Behavior of an Underground Space and its Surrounding Ground, Proc. of Pan Pacific Symposium on Building and Urban Environmental Conditioning in Asia, Nogoya Univ., Japan, 153-162 (1995)
2. Ogura, D., Matsushita, T. and Matsumoto, M., A study of heat and moisture behavior of an underground space - effects of wall structure-, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOISTURE PROBLEMS IN BUILDING WALLS, Porto, Portugal, 22-31 (1995)
3. Ogura, D., Nagai, H., Matsushita, T. and Matsumoto, M., An Analysis of Heat and Moisture Behavior in Underground Space by Quasi-linearized method, Proc. of CIB W40 meeting in Kyoto, Japan, 313-328, (1997)
4. Ogura, D., Matsushita, T. and Matsumoto, M., ANALYSIS OF HEAT AND MOISTURE BEHAVIOR IN UNDERGROUND SPACE BY QUASILINEARIZED METHOD -ACCURACY RANGE FOR OUTDOOR CLIMATE VARIATION FROM THE REFERENCE-, Proc. of Building Simulation '99, Kyoto, Japan, Vol.2, 755-762, (1999)

## C. 学術講演

1. 小椋大輔，松本衛，地下空間の熱湿気性状に関する研究 その1 自然状態下における室内温湿度性状，日本建築学会近畿支部研究報告集 (1994)
2. 小椋大輔，松本衛，地盤内水分を考慮した地下空間の熱湿気性状に関する研究 その1 自然状態下における室内温湿度性状，日本建築学会大会学術講演梗概集 (1994)
3. 小椋大輔，松下敬幸，松本衛，地下空間の熱湿気性状に関する研究 その2 埋設深さの影響，日本建築学会近畿支部研究報告集 (1996)
4. 小椋大輔，松下敬幸，松本衛，地盤内水分を考慮した地下空間の熱湿気性状に関する研究 その2 埋設深さの影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 (1996)
5. 小椋大輔，永井久也，松下敬幸，松本衛，擬線形法による地盤の熱水分挙動の解析－外界条件の変化に対する適応範囲の検討－，日本建築学会近畿支部研究報告集 (1997)
6. 永井久也，小椋大輔，松下敬幸，松本衛，擬線形法による地盤内熱水分性状の解析 (その1) 自然地盤内熱水分場の外界条件変化に対する適応範囲の検討－，日本建築学会大会学術講演梗概集 (1997)
7. 小椋大輔，永井久也，松下敬幸，松本衛，擬線形法による地盤内熱水分性状の解析 (その2) 地下構造物熱水分性状の外界・室内条件変化に対する検討－，日本建築学会大会学術講演梗概集 (1997)
8. 林崎信，澤田剛，水畑雅行，寺島貴根，小椋大輔，地下空間とその周囲地盤の熱・水分性状の実験及び解析 (その1) 実験用地下室と実験計画の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集 (1997)
9. 澤田剛，林崎信，水畑雅行，寺島貴根，小椋大輔，地下空間とその周囲地盤の熱・水分性状の実験及び解析 (その2) 実験用地下室における熱水分解析，日本建築学会大会学術講演梗概集 (1997)
10. 三野誠士，澤田剛，小椋大輔，寺島貴根，水畑雅行，松下敬幸，松本衛，地下空間の熱水分性状に関する研究－夏期から冬期にかけての実験とその解析，日本建築

学会近畿支部研究報告集(1998)

11. 小椋大輔, 松下敬幸, 松本衛, 擬線形化法による地下空間の熱湿気性状解析—自然状態下における外界気象条件変化に対する適応範囲の検討—, 日本建築学会近畿支部研究報告集(1998)
12. 小椋大輔, 松下敬幸, 松本衛, 擬線形化法による地下空間の熱湿気性状解析—自然状態下における外界気象条件変化に対する適応範囲の検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1998)
13. 三野誠士, 小椋大輔, 水畑雅行, 松下敬幸, 松本衛, 地下空間とその周辺地盤の熱・水分性状の実験及び解析(その8)—夏期から冬期にかけての解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1998)
14. 林崎信, 安本峰樹, 水畑雅行, 山口裕之, 寺島貴根, 小椋大輔, 地下空間とその周辺地盤の熱・水分性状の実験及び解析(その6)地下室が周辺地盤の温度性状に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(1998)
15. 三野誠士, 小椋大輔, 松下敬幸, 水畑雅行, 松本衛, 地下空間の熱水分性状に関する研究(その2)—年間実測とその解析—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, (1999)
16. 三野誠士, 小椋大輔, 水畑雅行, 松下敬幸, 松本衛, 地下空間とその周辺地盤の熱・水分性状の実験及び解析(その15)—1年間の解析—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1999)

## 謝辞

神戸大学名誉教授・大阪産業大学教授・松本衛博士のご指導に心から御礼申し上げます。筆者が神戸大学熱環境解析講座に配属されて以来、先生には未知なる物を探求する面白さから出発する研究の醍醐味を、多大なる情熱をもって懇切丁寧に教えて頂きました。本研究をこのような形でまとめることが出来たのも、先生のご指導がなければ不可能なことでした。

三重大学教授・水畑雅行博士のご指導に心より御礼申し上げます。先生のご指導なしでは実験地下室の長期実測は為し得なかった事であり、多くの貴重なデータ取得に惜しみないご協力を頂きました。

本論文をまとめるにあたり、懇切なご指導、ご助言を頂きました神戸大学教授・森本政之博士、同・川谷健博士、同・森山正和博士に深く感謝いたします。

神戸大学助教授・松下敬幸博士には、筆者が神戸大学大学院に在学中より、本研究の全般に渡って明解なご指摘を頂き、日々の研究姿勢等、多くご指導頂きました。深く感謝の意を表します。

三重大学助教授・寺島貴根博士には、実験地下室の長期実測において実測のご指導並びに計測システムの構築に惜しみないご協力を頂きました。深く感謝の意を表します。

研究活動を遂行する上で様々なご指導と励ましを頂きました京都大学教授・鉾井修一博士、京都工芸繊維大学助教授・芝池英樹博士、大阪工業大学講師・佐藤真奈美博士、積水ハウス（株）・岩前篤博士、同・埴淵晴男博士、名古屋大学助手・永井久也博士、（株）浅沼組・恩村定幸氏、京都大学助手・高田暁氏並びに神戸大学大学院博士後期課程・安積弘高氏をはじめとする神戸大学熱環境解析研究室の皆様にご心より感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、助力をいただいた、当時三重大学大学院生の澤田剛氏、林崎信氏、安本峰樹氏、山口裕之氏、当時神戸大学大学院生の三野誠士氏、同学部生の立野和洋氏、中嶋大輔氏の労に厚く御礼申し上げます。

最後に、私事で恐縮ではありますが、今日にいたるまで不肖な息子を多大なる寛容をもって暖かく見守って下さった両親に深く感謝致します。