

地下空間における自然換気の解析と評価
— デリンクユ地下都市の事例 —

名古屋大学工学部 建築学科
佐々木 聡美

1996年2月

目次

1. はじめに	4
1.1. 背景・目的	5
1.2. 概要	5
2. 現地調査	6
2.1. デリンクユについて	6
2.2. 空間形態	8
2.2.1. 調査方法	8
2.2.2. 空間の構成	8
2.3. 温熱環境(温度・湿度)	12
2.3.1. 調査方法	12
2.3.2. 測定結果	12
2.4. 空気の流れ	13
2.4.1. 調査方法	13
2.4.2. 観測結果	13
3. プログラムの説明	18
3.1. 換気計算網基本式	18
3.2. プログラムの説明	19
3.2.1. 計算用入力データ作成プログラム	19
3.2.2. 煙流動計算プログラム	21
4. 測定データの解析	22
4.1. 空間形態のモデル化と室温設定の計算	22
4.1.1. 空間形態のモデル化	22
4.1.2. 室温設定の計算	26
4.2. 非定常計算	28
4.2.1. 境界条件	28
4.2.2. 計算条件	29

4.2.3. 外気温一定計算	29
4.2.4. 外気温周期定常計算	29
5. 想定条件による解析	32
5.1. 温熱環境条件	32
5.1.1. 外気温	32
5.1.2. 内部発熱	32
5.2. 空間形態条件	32
5.3. 計算結果・考察	33
5.3.1. 季節変動による比較	33
5.3.2. 発熱分布による比較	40
5.3.3. 開口条件の差による比較	46
参考文献	50

図目次

図 2-1	カッパドキアの範囲	7
図 2-2	地下都市の位置	7
図 2-3	調査範囲	9
図 2-4	平面図	10
図 2-5	正投影図〈視点：北東上方〉	11
図 2-6	北側面図	11
図 2-7	測定地点・空気の流れ〈イメージ図〉	13
図 2-8	温度・絶対湿度の校正	14
図 2-9	温度分布	17
図 2-10	絶対湿度分布	17
図 3-1	煙流動プログラムの流れ	21
図 4-1	モデル化のイメージ	23
図 4-2	モデル	24
図 4-3	9-18 時 各時刻の流量〈T=150S〉	27
図 4-4	9-18 時 流量比較〈T=150S〉	27
図 4-5	5-7-8 階の温度分布	27
図 4-6	外気温一定計算の結果 1〈T=900S〉	30
図 4-7	外気温一定計算の結果 2〈T=900S〉	30
図 4-8	外気温変動	31
図 4-9	周期定常計算の結果	31
図 4-10	室温分布比較	31
図 5-1	日最高・最低気温、月別平年気温	34
図 5-2	外気温変動	34
図 5-3	全体の流れ	35
図 5-4	外気流入量変化〈季節変動による比較〉	36
図 5-5	各開口の流量変化 1〈季節変動による比較〉	37
図 5-6	各開口の流量変化 2〈季節変動による比較〉	38
図 5-7	各節点の温度変化〈季節変動による比較〉	39
図 5-7	外気流入量変化〈発熱分布による比較〉	42
図 5-8	各開口の流量変化 1〈発熱分布による比較〉	43
図 5-9	各開口の流量変化 2〈発熱分布による比較〉	44
図 5-10	各節点の温度変化〈発熱分布による比較〉	45
図 5-11	モデル	46
図 5-12	各開口の流量変化 1〈開口条件の差による比較〉	47
図 5-13	各開口の流量変化 2〈開口条件の差による比較〉	48
図 5-14	各節点の温度変化〈開口条件の差による比較〉	49

表目次

表 2-1	温度・相対湿度・空気の流れの測定・観測データ	15
表 2-2	温度・絶対湿度の校正值	16
表 4-1	圧力損失の考察	23
表 4-2	節点と開口の設定	24
表 4-3	節点のデータ	25
表 4-4	開口のデータ	25
表 4-5	入力室温・外気温	26
表 4-6	発熱量の算出	30
表 5-1	入力発熱量	40
表 5-2	発熱量の算出〈上層・下層集中〉	41
表 5-3	開口の設定	46

1. はじめに

1.1. 背景・目的

原始から現代に至るまで、我々は地下空間をさまざまな形態で利用してきた。原始時代人類は、自然につくられた洞窟を住居として利用した。その後技術の発展にしたがって、地下空間を人工的に開発するようになり、その規模、深度が拡大、利用形態が多様化してきた。

可住面積の少ない日本では、過密化する都市部でのオープンスペース確保の手段として、地下空間の活用が望まれている。都市景観の向上を目的とした、交通・通信・エネルギー・廃棄物搬送システム、景観阻害施設(電線)の地中化など、機能の設置場所としての利用が現状の利用主体であり、今後も利用需要が予想される。これは地下空間の持つ閉鎖性を生かした利用形態である。一方、居住など人間活動が関与する利用ではこの閉鎖性が問題となる。自然光・眺望・外気の不足など、地上で享受できる自然環境の欠如が、身体・心理に与える影響については未解明の点が多い。また地下におけるそれらの環境の快適な供給・維持は大深度になればなるほど技術面、エネルギー面でより困難になる。そのため現実には、地下街など比較的浅い深度で平面的な利用の他に、一般的な地下の有人利用の実例は乏しい。

トルコ、カッパドキア地方の地下都市デリンクユは、火山の噴火によって形成された凝灰岩の地質に地下8層に(約40m)にわたって開発されたものである。鉛直方向の経路だけで地表とつながっており、紀元前から1千年以上、1万人規模で居住していたと推定されている^[1]。

本研究ではデリンクユでの現地調査をもとに、環境要素の1つである換気について浮力作用のみの自然換気であったと仮定し、その機構を換気網シミュレーションにより分析する。

1.2. 概要

本論文の概要を示す。

現地調査の整理・考察 (2章)

換気網計算の基本とシミュレーションに利用したプログラムの説明 (3章)

シミュレーションと結果考察 (4,5章)

今後の研究課題 (6章)

2. 現地調査

2.1. デリンクユについて

アナトリア高原(標高約 1000m)は、紀元前 2000～1200 年にかけてヒッタイト族が統一国家を形成した地である。ペルシャ語で“名馬の産地”を意味する‘カッパドキア’の範囲は、ローマ期、ストラボンの『地理誌』によると図 2-1 であるが、時代によって変遷がある。現在では、アナトリア高原の中心に広がる奇岩地帯を指している。

この地帯一帯は、数百万年前の火山の噴火活動によって数百 m に及ぶ凝灰岩の層が形成されている。この凝灰岩は簡単な道具で掘削できるほど軟質なものである^[2]。掘削の容易さからはやくから地下を開発・利用していたと推定される^[3]。

また地理的位置から、宗教的、民族的に複雑で、融合、興亡の激しい歴史を持つ。その歴史の中で、宗教的迫害、異民族の侵入・攻撃を受けた時期に、地下深くに避難場所を求めたと考えられている^[4]。

現在カッパドキアでは 36 地下都市が確認されている。主な地下都市の位置は図 2-2 である。地下都市デリンクユには 52 本の換気シャフト(深さ 70～85m)があり、1 万人規模で利用されていたと推定される。調査対象の地下都市デリンクユは、観光用として公開されている箇所、地下都市全体のほんの一部である。実際、地下都市内部には、民家に通じているため塞がれた通路、落盤のため閉ざされた通路がみられる。

筆者らは 95 年 9 月 20 日(水)～24(日)の 5 日間に、地下都市デリンクユを調査した。本研究室では 94 年の 11 月半ばに冬期における温度・空気の流れを測定している。今回の調査では、中間期における温湿度・空気の流れを測定し、実測により空間形態を把握した。人員と時間的な制約から、照明のされていない部分、空気の流れが認められず換気に大きく関与していないとおもわれる部分は、調査範囲から除いた(図 2-3)。以下地下都市を 8 階層に分けて考えていくが、これは一般にこの地下都市の説明に使用されているものであり、本論を通してこれに従う。また階はすべて地階であるので、“地下”を省略して各階を呼ぶことにする(例：地下 2 階→2 階)。

以下の節では、調査項目(空間形態・温熱環境・空気の流れ)別に、調査方法を説明し、調査結果を整理・考察する。

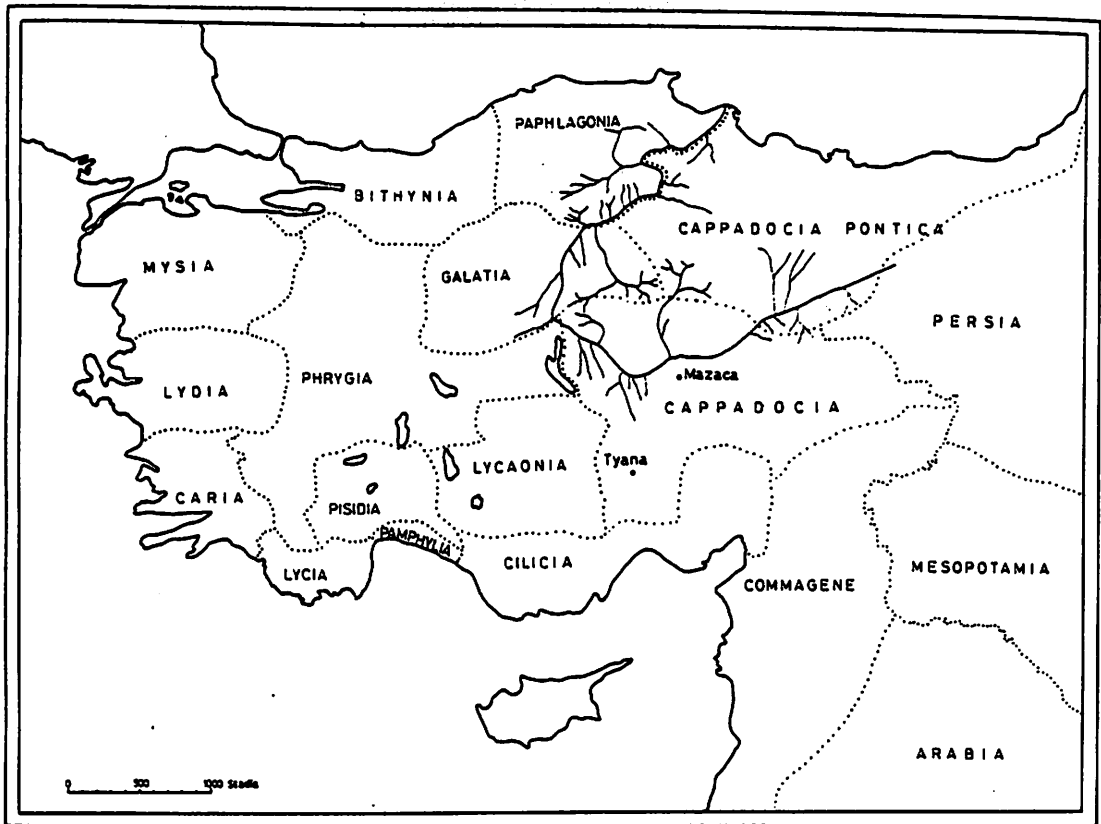


図 2-1 カップドキアの範囲

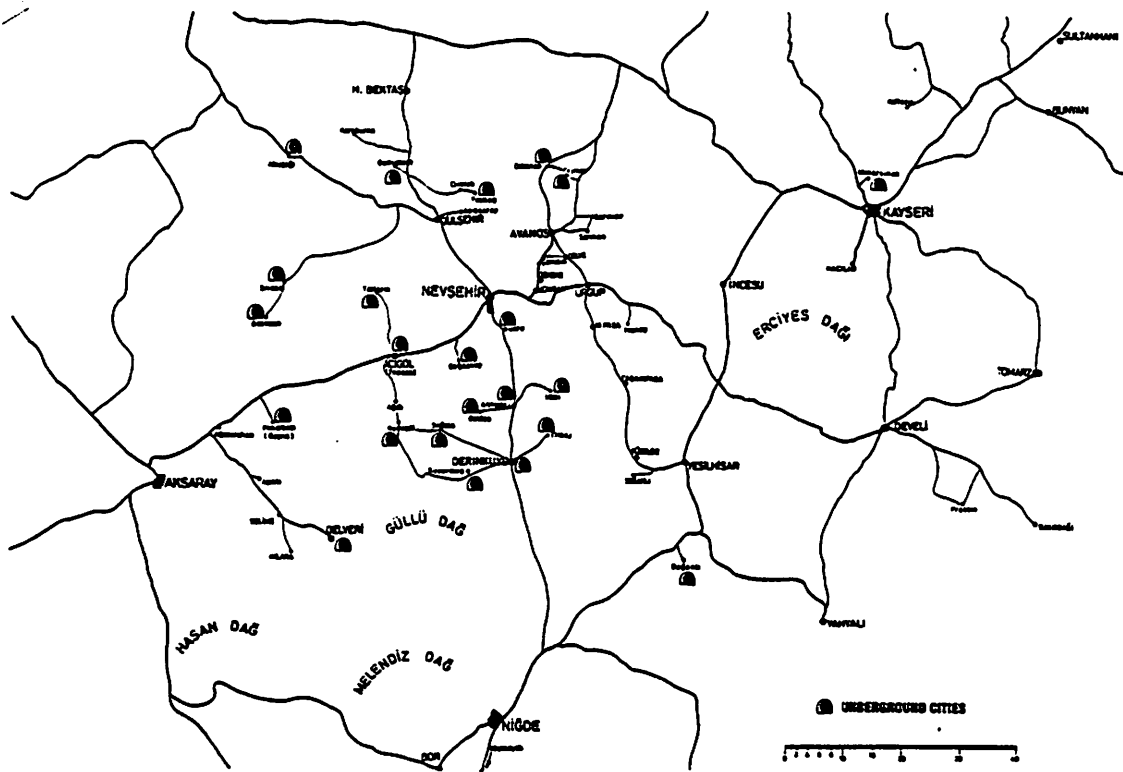


図 2-2 地下都市の位置

2.2. 空間形態

2.2.1. 調査方法

調査の1日目は、一通りのビデオ撮影を兼ねて地下都市内を歩き回り、全体の位置関係を把握した。2～5日目の4日間を通して実測し、以下の項目の測定値を得た。

測定項目：室の平面形態・代表天井高、通路・開口部の奥行・幅・代表高、3～8階間の各床レベル差、階段の蹴上・踏面

(代表天井高・代表高とは、その室又は通路・開口の天井高・高さの平均であろうと思われる1地点での測定値である)

測定器具は、主に簡単な超音波距離測定器<ピッキョリ 13、SONIN社>を使用し、使用困難な箇所は歩測に依った。各測点の方位を確認するために方位磁針を使用した。床レベルは、まず、3階のシャフトとの開口部より水糸をたらし、4・5・8階のシャフトとの開口部で印を付け3～8階間の各床レベル差を得た。3階より上階は、階段数に蹴上をかけて床レベル差を推定した。

2.2.2. 空間の構成

全体の構成は地表面から垂直に掘り下ろされた換気シャフト(直径 1.5m の円筒状、深さ 42.5m)を中心に、1階から8階の各階層がそれを取り巻くように配置されている。一人がどうにか通ることのできる程度の通路が各階層を結んでいる。1-4-5階、1-2-5階の2ルートがある。3-5階、5-7階をつなぐ通路に石の扉がある。1に家畜小屋、寝室(学校、礼拝堂は対象外)、2階に、キッチン、貯蔵室、ワイン庫がある。3階はトンネルと呼ばれている通路に続く小部屋。4階は居室。5階は上層階と下層階をつなぐ部屋。7階は教会で、井戸がある。8階は小部屋。

各階の平面図を図2-4に、CADで作成したを正投影図を図2-5に、北側面図を図2-6に示す。また、イメージ図を図2-7に示す。

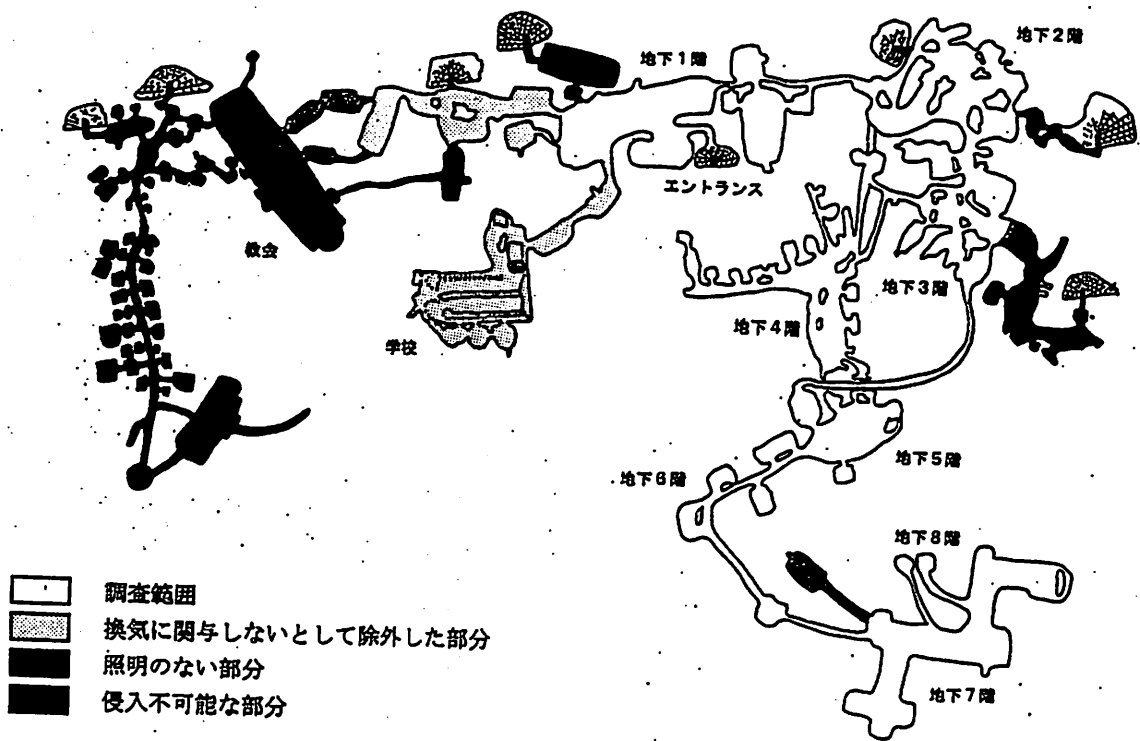
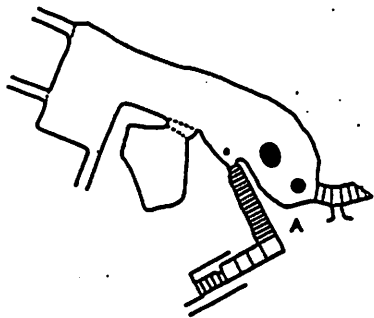
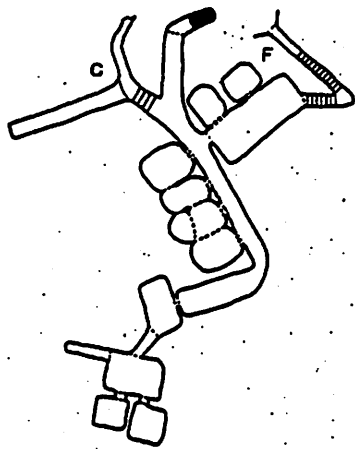


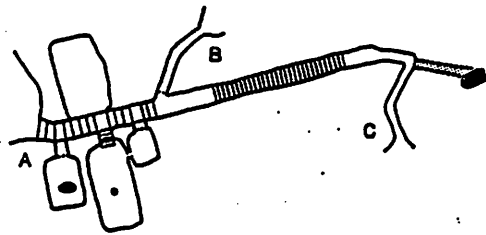
図 2-3 調査範囲



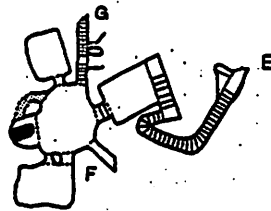
地下1階



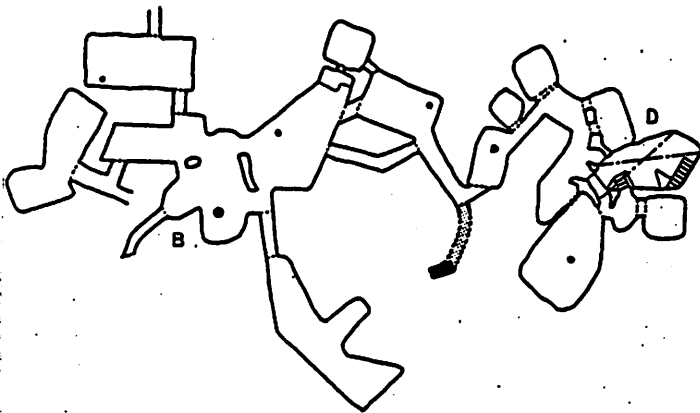
地下4階



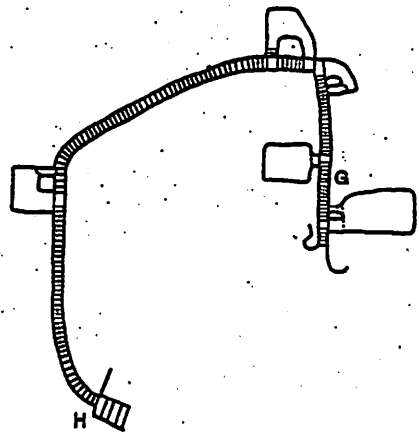
地下1階から地下2, 4階への通路



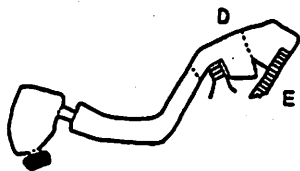
地下5階



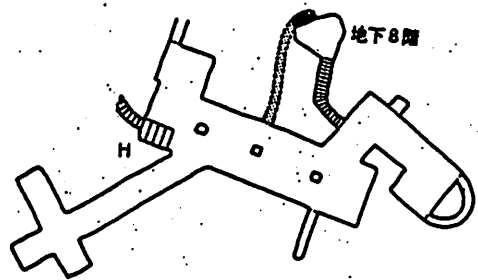
地下2階






地下6階



地下3階



地下7, 8階

-  換気シャフト
-  水平方向の換気シャフト (推定部分)
-  室と地上を結ぶ竪穴 (推定部分)

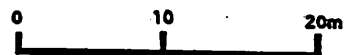


図 2-4 平面図

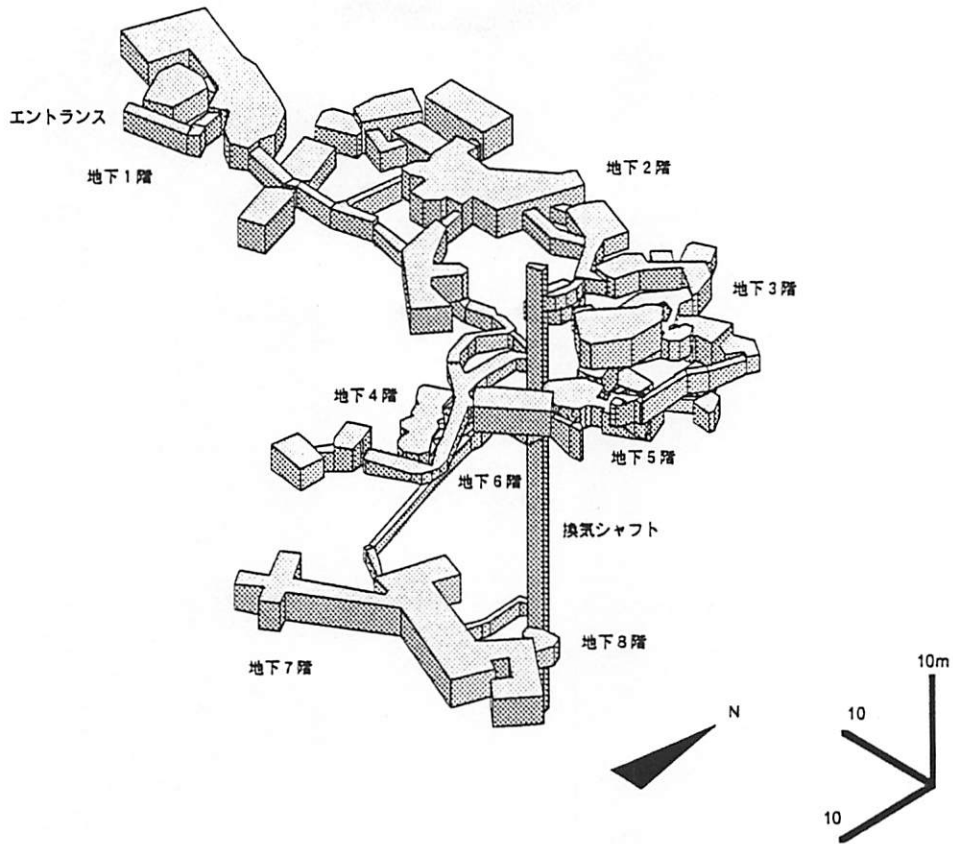


図 2-5 正投影図 <視点：北東上方>

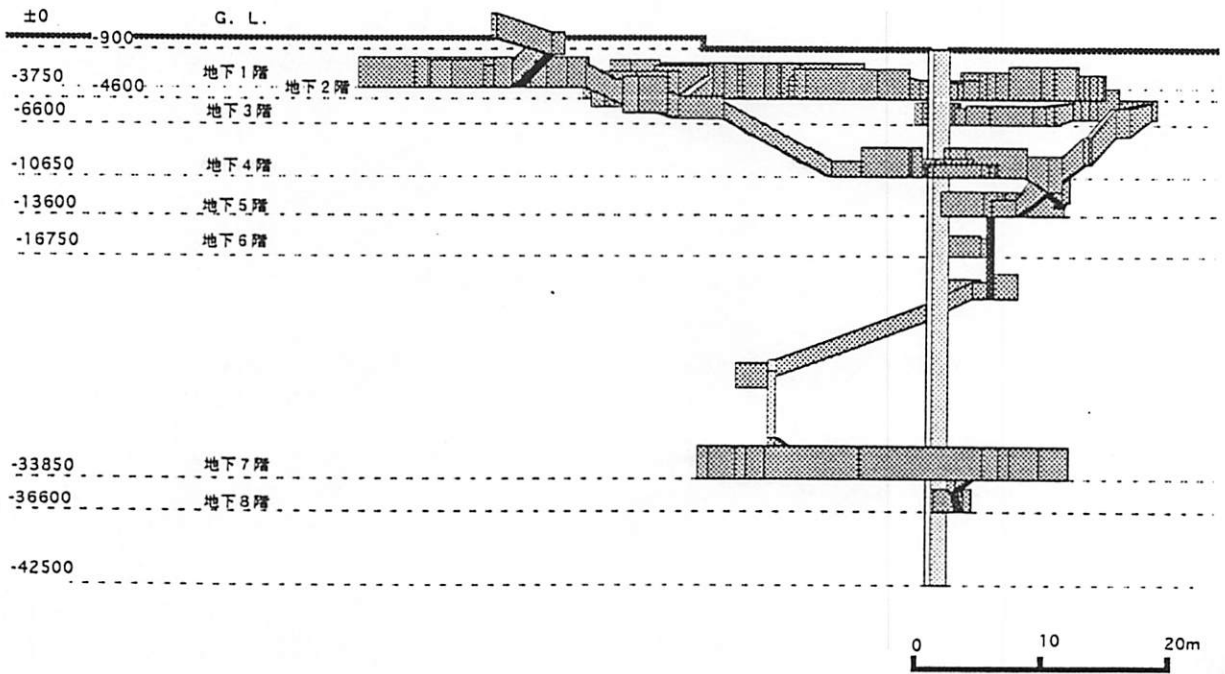


図 2-6 北側面図

2.3. 温熱環境(温度・湿度)

2.3.1. 調査方法

2.3.1.1. 調査方法

9月22日、9時から18時まで3時間毎に(計4回)、デジタル温湿度計により、温度・相対湿度を空間内の20地点と地上で測定する(図2-7)。内部発熱要素として照明器具の個数と発熱量を確認する。

2.3.1.2. 測定機器の校正

温湿度の測定に使用したデジタル温湿度計の仕様を示す。

測定機器：デジタル温湿度計 TRH-CA (神栄株式会社 電子機械部)

仕様：

1)仕様温度範囲 0～50℃(本体及びプローブのグリップ部)

2)測定範囲 温度：-20～80℃
湿度：20～99.9%RH

3)測定精度 温度：±0.3℃
湿度：±2%RH

4)検知素子 温度：サーミスタ
湿度：高分子湿度センサ(シエイ・ヒューメント HPR-MQ)

測定機器をアスマン式乾湿計で校正した。両機器で、調査の前後(調査前 9/8、調査後 10/20)に室内温湿度を測定し(常温と30分冷房後)、測定値4点から相関を調べた。校正結果を図2-8に示す。絶対湿度は、温度・相対湿度とも測定値、温度は校正值・相対湿度は測定値、の二通りで校正した。相関の高い後者の校正を使用する。

2.3.2. 測定結果

測定1回の所要時間は約1時間である。その間、観光客が絶えず入退場、地下都市内を移動しており、その影響(発熱・蒸散源の移動)を少なからず受けている。観光客の人数は、～100人(9時)、～30人(12、15時)、～10人(18時)程度である。

デジタル温湿度計による各時刻の測定結果を表2-1に示す。

校正した温度(94年冬期測定データ^[a]を含む)・絶対湿度を表2-2に示す。校正に使用したの測定値の範囲が、調査の測定値の範囲を包括していないため、校正の精度はやや。温度(94年冬期測定データを含む)・絶対湿度を、深さ方向に分布をとり図2-9, 2-10に示す。地下10m以深ではほぼ恒温・恒湿であることが確認できる。シャフト側では温度・湿度共、室内側より若干低めの値となった。

照明器具は地下内にはほぼ均等に設置されていた。詳細は4章で述べる。

2.4. 空気の流れ

2.4.1. 調査方法

温湿度測定と同時に目測により、発煙管<光明理化学工業(株)>、気流検査器<AS-1型、光明理化学工業(株)>で発生させた煙の流れを、通路・開口部(室-シャフトの接合部)で観測する。

2.4.2. 観測結果

通路での観測は、9時・12時の観測では通路内のみ、15時の観測では通路の入口・通路内・出口でそれぞれ観測した。時間の制約上18時の観測はできなかった。温湿度と同じく観光客の移動の影響(通路の遮り、発熱源の移動)を受けている。

8階シャフトから室内側7階、5階の方向へ20~40cm/sの流れを、5階から4階、1階の方向へ、5~20cm/sの流れを観測した。5-2階間はほとんど流れがなかった。1階-地上間、2-1階間の流れの方向は時刻により変化した(図2-5)。5、4、3階の室-シャフトの接合部ではわずかに、開口の上部で室からシャフトへ、下部でシャフトから室への流れが観測された(表2-1, 図2-7)。

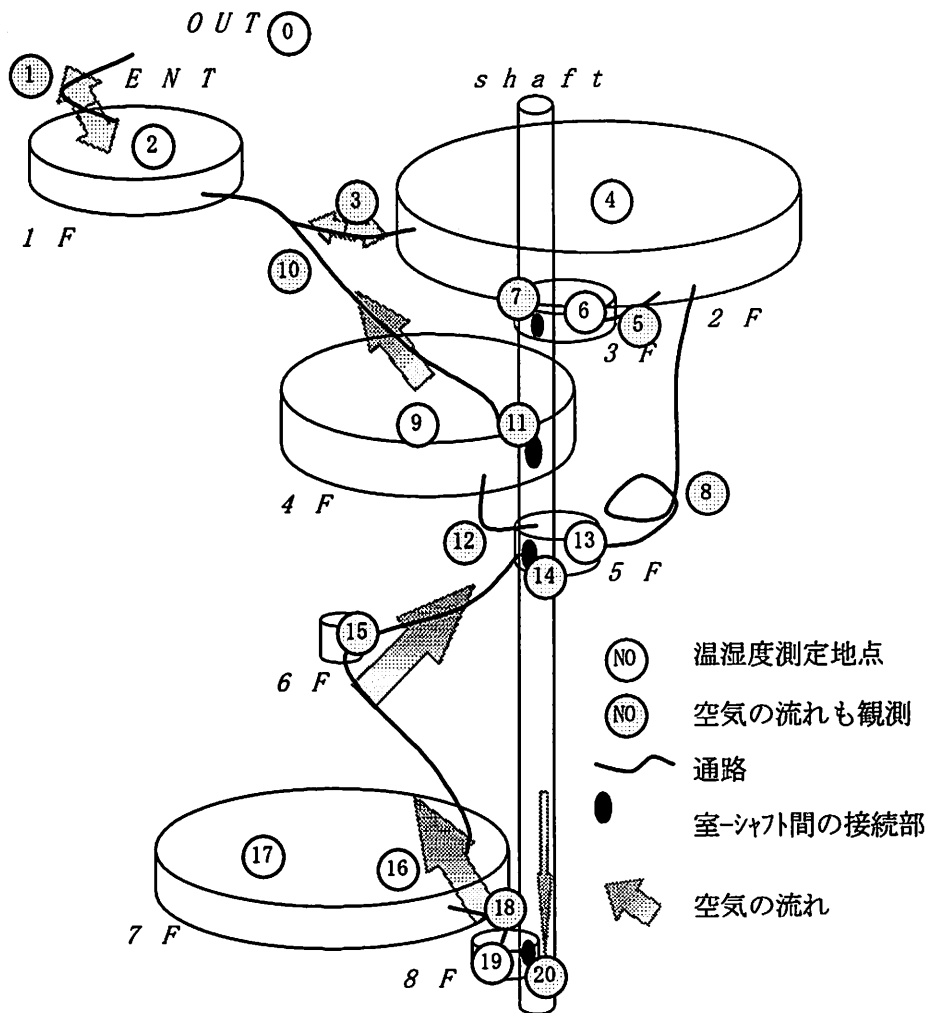
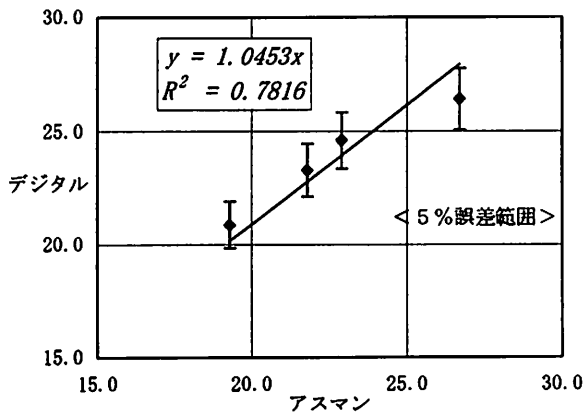


図2-7 測定地点・空気の流れ <イメージ図>

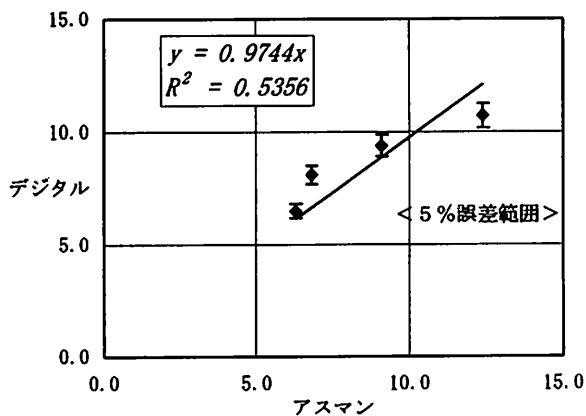
<温度の校正>

℃	調査前		調査後	
アスマン乾球温度計	26.7	22.9	21.8	19.3
デジタル温湿度計	26.4	24.6	23.3	20.9



<絶対湿度の校正1>

10 ⁻³ kg/kg'	調査前		調査後	
アスマン乾球温度計	12.4	9.1	6.8	6.3
デジタル温湿度計	10.7	9.4	8.1	6.5



<絶対湿度の校正2>

10 ⁻³ kg/kg'	調査前		調査後	
アスマン乾球温度計	12.4	9.1	6.8	6.3
校正(湿)+デジタル(湿)	11.3	9.5	7.0	6.5

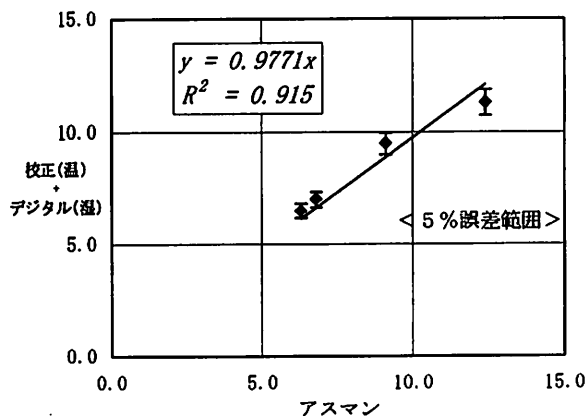


図 2-8 温度・絶対湿度の校正

測定時刻: 9:35-10:45

NO.	温度		湿度		空気の流れ	
	(°C)	(%)	流速(cm/s)	方向		
0	18.6	24.8				
1	16.2	95.0	20	→		
2	14.8	97.2	-			
3	14.2	96.4	無			
4	16.3	92.4	-			
5	15.8	91.8	無			
6	14.6	89.0	-			
7	13.3	90.2	微	←		
8	13.6	95.0	微	→		
9	13.1	93.3	20	→		
10	-	-	-			
11	13.0	94.2	10	→		
12	12.5	91.4	10	→		
13	13.4	88.3	-			
14	12.7	89.0	微	←		
15	13.2	88.0	10	→		
16	12.7	90.0	-			
17	12.2	87.0	-			
18	11.2	87.7	20	→		
19	-	-	-			
20	11.3	88.8	30	→		

測定時刻: 11:57-12:58

NO.	温度		湿度		空気の流れ	
	(°C)	(%)	流速(cm/s)	方向		
0	22.2	11.7				
1	19.3	33.3	20	←		
2	15.4	90.6	-			
3	15.6	83.4	30	→		
4	16.8	91.1	-			
5	15.9	92.2	渦			
6	14.8	90.0	-			
7	13.8	89.4	20	→		
8	13.7	95.0	渦			
9	13.3	96.6	無			
10	13.0	97.0	-			
11	12.4	95.8	渦			
12	12.6	95.7	渦			
13	12.8	94.2	-			
14	12.7	94.0	渦			
15	13.0	90.3	40	→		
16	12.8	91.5	-			
17	13.1	92.2	-			
18	12.4	92.0	30	→		
19	12.8	85.1	-			
20	12.8	86.2	30	→		

測定時刻: 14:54-16:04

NO.	温度		湿度		空気の流れ	
	(°C)	(%)	流速(cm/s)	方向		
0	23.5	21.0				
1	17.4	65.5	5-渦-無	←		
2	17.0	70.0	-			
3	16.5	81.6	10-無-微	←		
4	16.9	91.0	-			
5	16.3	91.5	微-渦-無	←		
6	15.4	90.6	-			
7	13.3	94.5	渦			
8	14.0	90.5	微-微	→		
9	13.4	96.6	微-15-渦	→		
10	12.8	96.0	-			
11	12.5	97.0	渦			
12	12.7	95.2	15-渦-40	→		
13	12.5	94.9	-			
14	12.5	94.6	渦			
15	12.7	91.6	40-30-20	→		
16	12.1	95.1	-			
17	12.5	93.3	-			
18	12.4	92.2	30	→		
19	12.3	91.6	-			
20	12.2	93.0	40	→		

測定時刻: 17:24-17:56

NO.	温度		湿度		空気の流れ	
	(°C)	(%)	流速(cm/s)	方向		
0	20.7	30.2	-			
1	15.8	96.3	-			
2	15.5	96.6	-			
3	17.0	77.7	-			
4	17.0	87.0	-			
5	16.8	88.6	-			
6	15.9	87.0	-			
7	14.5	86.0	-			
8	14.0	90.6	-			
9	13.6	96.6	-			
10	13.2	96.5	-			
11	12.9	96.0	-			
12	12.7	95.5	-			
13	12.8	95.0	-			
14	12.6	95.0	-			
15	12.6	94.7	-			
16	12.1	94.4	-			
17	12.3	93.5	-			
18	12.4	92.8	-			
19	12.0	92.5	-			
20	11.9	92.0	-			

(渦は開口の上部は室からシャフトへ、下部はシャフトから室への流れが観測されたもの)
 (空気の流れ'→'は、シャフトから室・入口方向への流れを示す)
 (流れの流速'10-20-30'は、通路の'入口-通路内-出口'の流速を示す)

表 2-1 温度・相対湿度・空気の流れの測定・観測データ

温度校正値 (°C)

測定地点	No.	床レベル	9:00	12:00	15:00	18:00	94冬
地上	0	0.0	17.8	21.2	22.5	19.8	6.0
ENT(階段)	1	-1.4	15.5	18.5	16.6	15.1	8.0
B1	2	-3.8	14.2	14.7	16.3	14.8	10.6
通路(B1-B2)	3	-5.7	13.6	14.9	15.8	16.3	10.5
B2	4	-4.6	15.6	16.1	16.2	16.3	-
通路(B2-B3)	5	-5.7	15.1	15.2	15.6	16.1	-
B3(room)	6	-6.6	14.0	14.2	14.7	15.2	-
B3(shaft)	7	-6.6	12.7	13.2	12.7	13.9	-
通路(B2-B5)	8	-10.0	13.0	13.1	13.4	13.4	-
通路(B1-B4)	9	-6.0	12.5	12.7	12.8	13.0	-
B4(room)	10	-10.6	-	12.4	12.2	12.6	10.4
B4(shaft)	11	-10.6	12.4	11.9	12.0	12.3	-
通路(B4-B5)	12	-12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	-
B5(room)	13	-13.6	12.8	12.2	12.0	12.2	10.6
B5(shaft)	14	-13.6	12.1	12.1	12.0	12.1	-
通路(B5-B7)	15	-25.0	12.6	12.4	12.1	12.1	-
B7(柱)	16	-33.9	12.1	12.2	11.6	11.6	10.5
B7(奥)	17	-33.9	11.7	12.5	12.0	11.8	-
通路(B7-B8)	18	-35.0	10.7	11.9	11.9	11.9	-
B8(room)	19	-36.6	-	12.2	11.8	11.5	9.0
B8(shaft)	20	-42.5	10.8	12.2	11.7	11.4	-

絶対湿度校正値 ($10^{-3}\text{kg/kg}'$)

測定地点	No.	床レベル	9:00	12:00	15:00	18:00
地上	0	0.0	3.4	1.8	3.9	4.8
ENT(階段)	1	-1.4	11.1	4.7	8.4	11.1
B1	2	-3.8	10.6	10.2	8.6	10.9
通路(B1-B2)	3	-5.7	10.0	9.3	9.7	9.4
B2	4	-4.6	10.2	10.5	10.6	10.2
通路(B2-B3)	5	-5.7	9.8	9.9	10.1	10.1
B3(room)	6	-6.6	9.5	9.7	10.2	10.1
B3(shaft)	7	-6.6	8.9	9.0	9.2	9.0
通路(B2-B5)	8	-10.0	9.0	9.0	8.8	8.8
通路(B1-B4)	9	-6.0	8.5	8.9	8.9	9.1
B4(room)	10	-10.6	-	9.3	9.1	9.4
B4(shaft)	11	-10.6	9.0	8.9	8.9	9.1
通路(B4-B5)	12	-12.0	8.0	8.6	8.5	8.5
B5(room)	13	-13.6	8.4	9.0	8.9	9.0
B5(shaft)	14	-13.6	8.3	8.8	8.7	8.9
通路(B5-B7)	15	-25.0	8.1	8.2	8.1	8.3
B7(柱)	16	-33.9	8.4	8.7	8.6	8.4
B7(奥)	17	-33.9	7.5	8.4	8.2	8.0
通路(B7-B8)	18	-35.0	7.1	8.0	8.0	8.1
B8(room)	19	-36.6	-	8.2	8.4	8.4
B8(shaft)	20	-42.5	7.5	8.2	8.4	8.2

表 2-2 温度・絶対湿度の校正値

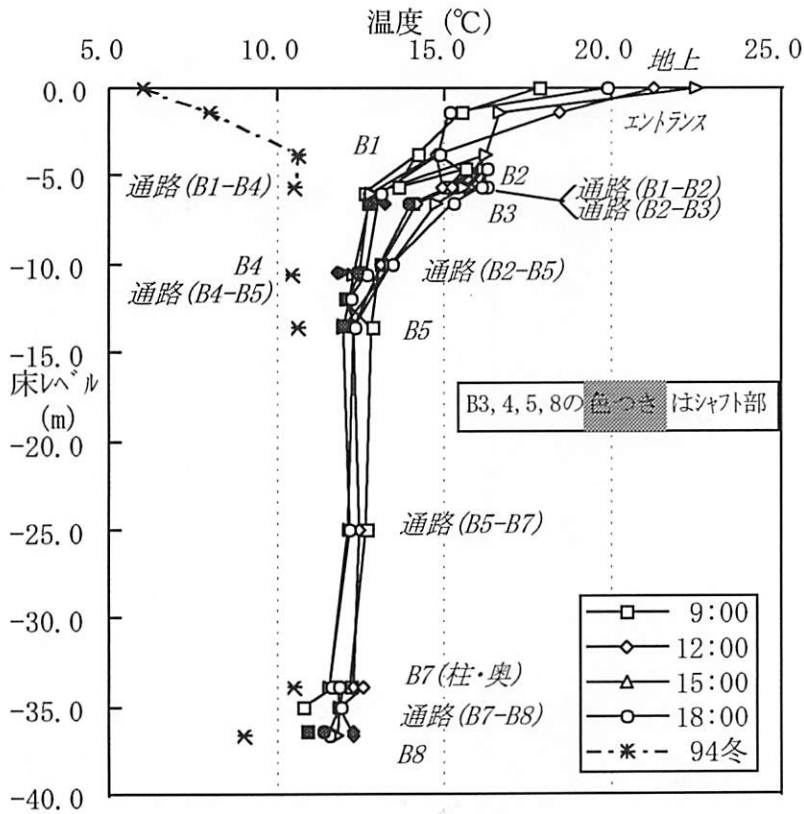


図 2-9 温度分布

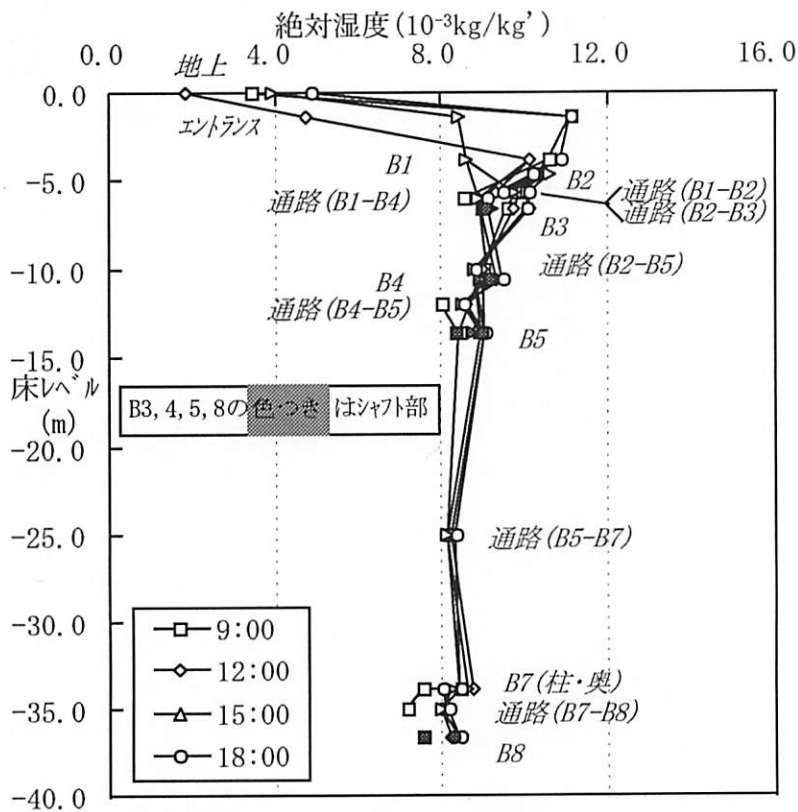


図 2-10 絶対湿度分布

3. プログラムの説明

換気計算の基本^[9]と換気計算に使用したプログラムの説明をする。

3.1. 換気計算網基本式

$$Q = f(\Delta p) \quad \text{流量と圧力差の関係式 (1)}$$

$$\sum_{\text{ループ}} p = 0 \quad \text{圧力和式 (2)}$$

$$\sum_{\text{1節点}} Q = 0 \quad \text{流量収支式 (3)}$$

(1) 開口の前後に圧力差があれば、そこに流れが生ずる

室(全圧≒静圧とみなされる空間)及び地上(外気)は圧力をもつ《節点》とし、室の《開口》(窓、出入口、隙間)は、圧力損失のある流路(速度圧のある空間)とする。

開口の前後の圧力差は風力、浮力あるいは機械力によって生じるが、ここでは浮力によるもののみを考える。いま外気の密度を ρ_o (kg/m³)、室内空気の密度を ρ_i (kg/m³)とし、床面高さの室内圧をそれと同じ高さの静止外気圧を基準としてあらわし、 p_i とする。床面高さを原点として上方に高さ h をとれば、 h の高さの室内圧は $p_i - \rho_i gh$ 、同じくその高さの静止外気圧は $0 - \rho_o gh$ となるから、 h の高さの壁面に作用する圧力差 Δp は、

$$\Delta p = p_{io} = (p_i - \rho_i gh) - (0 - \rho_o gh) = p_i - (\rho_i - \rho_o)gh$$

となる。 p_{io} の添字 io は i (室)から o (外気)へ向かう圧力を意味し、これが正のときは室内→外気へ作用する圧力差があることを意味する。

開口の圧力損失が抵抗係数(流量係数)であらわされる場合、(1)式の関数 f は、

$$Q = \alpha A \sqrt{2\rho \cdot \Delta p}$$

となる。 A :開口面積 α :流量係数 (抵抗係数 ζ : $\zeta = 1/\alpha^2$) ρ :上流側の密度

(2) 一周できるループ(回路)上にある節点について、2節点間の床面の圧力差ベクトル(各節点の床面圧力の降下)の和はゼロである。

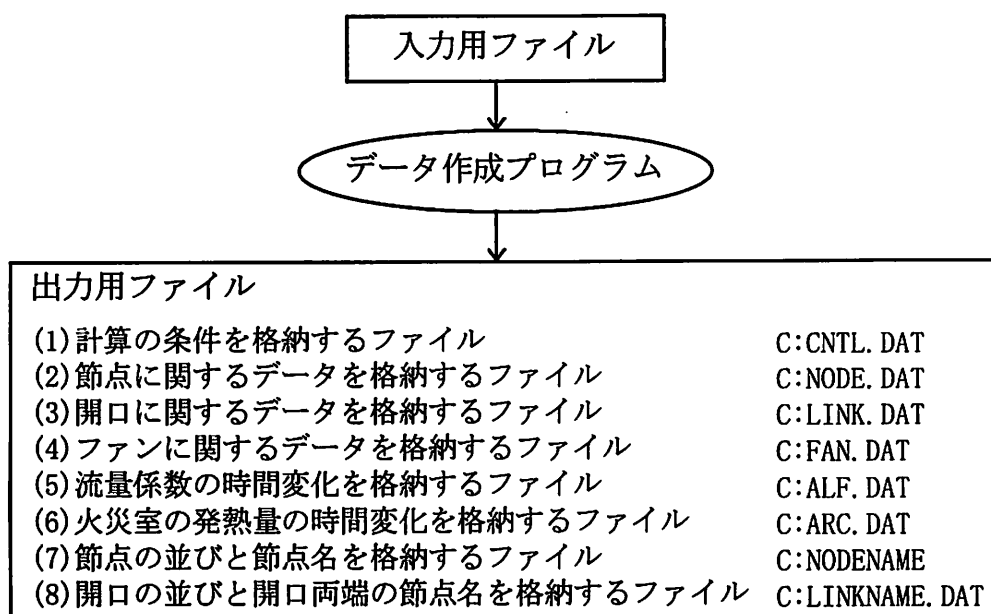
(3) 節点 i につながる開口の正味流量の和はゼロである。

3.2. プログラムの説明

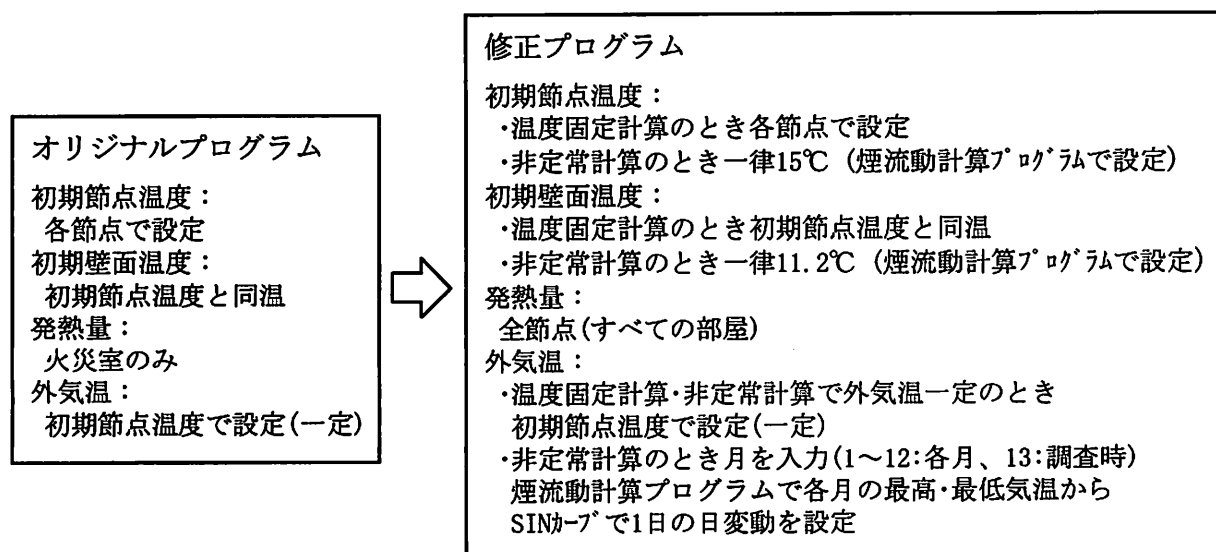
換気計算には一層ゾーンモデルの煙流動計算プログラム^[10]を利用した。プログラムは計算用入力データ作成プログラム(3.2.1.)と煙流動計算プログラム(3.2.2.)の2つで構成され、後者はメインプログラムと多数のサブルーチン群が含まれている。計算対象の地下都市は、空間形態、発熱・熱損失の捉えかたで、プログラムの想定する対象と大きく異なる。適用のためプログラムを若干修正した。

3.2.1. 計算用入力データ作成プログラム

所定の形式で入力したデータを、煙流動計算用のデータ形式に変更して出力する。入力用ファイルは、プログラムの実行ファイルがあるディレクトリからファイル名を指定して読み込まれる。出力用ファイル名は固定されており、プログラム実行毎に更新される。



入力データで修正した箇所：



各入力データの説明を修正箇所を含めて説明する。

(1) 計算条件に関するデータ

コメント：72文字以内のコメント文

出力装置番号：計算結果の出力装置 CRT:6、ファイル:22以上

計算のレベル：計算のレベルは3段階ある。

レベル1:温度固定の定常計算

レベル2:火災室の発熱量が一定の場合の非定常計算

レベル3:火災室の発熱量が時間変化する場合の非定常計算

計算は全てレベル2、発熱量は全節点で設定(一定)。

圧力和収支の許容誤差：0.001Pa

許容繰り返し回数：20回

計算時間間隔：2s

計算終了時間：1800s/178000s

計算結果の出力時間間隔：60s/3600s

節点温度の定常判定：0.0℃ (計算終了時間まで計算するため)

火災室番号：修正後設定無し

火災荷重：修正後設定無し

外気風速：設定なし(風圧力なし)

月(1~13)：外気温日変動のためデータ

(2) 節点に関するデータ

節点名 / 初期節点温度(℃) / 横幅(cm) / 奥行(cm) / 高さ(天井高)(cm) / 発熱量(kw)

(3) 開口に関するデータ

上流節点番号 / 下流節点番号 /

開口の向き(0:水平方向の流れの開口 1:垂直方向の流れの方向) / 流量係数 /

幅(cm) / 上端高さ(cm) / 下端高さ(cm) /

開口両端の節点の床面高さの差(下流-上流)(cm)

(4) ファンに関するデータ

設定なし(機械力なし)

(5) 流量係数の時間変化に関するデータ

設定なし

(6) 火災室の発熱量の時間変化に関するデータ

設定なし

プログラムでは、グラフ理論を用いて、節点・開口を行列化して扱う。行列化するために節点番号と開口番号の付け替え(変更)をサブルーチン(REORDER)で行なう。

(7) 節点の並びと節点名に関するデータ

変更前の節点番号 / 変更前の節点番号に対応した節点名

(8) 開口の並びと開口名に関するデータ

変更前の開口番号 / 変更前の開口の上流節点番号 / 変更前の開口の下流節点番号

3.2.2. 煙流動計算プログラム

煙流動計算プログラムの流れを図3-1に示す。

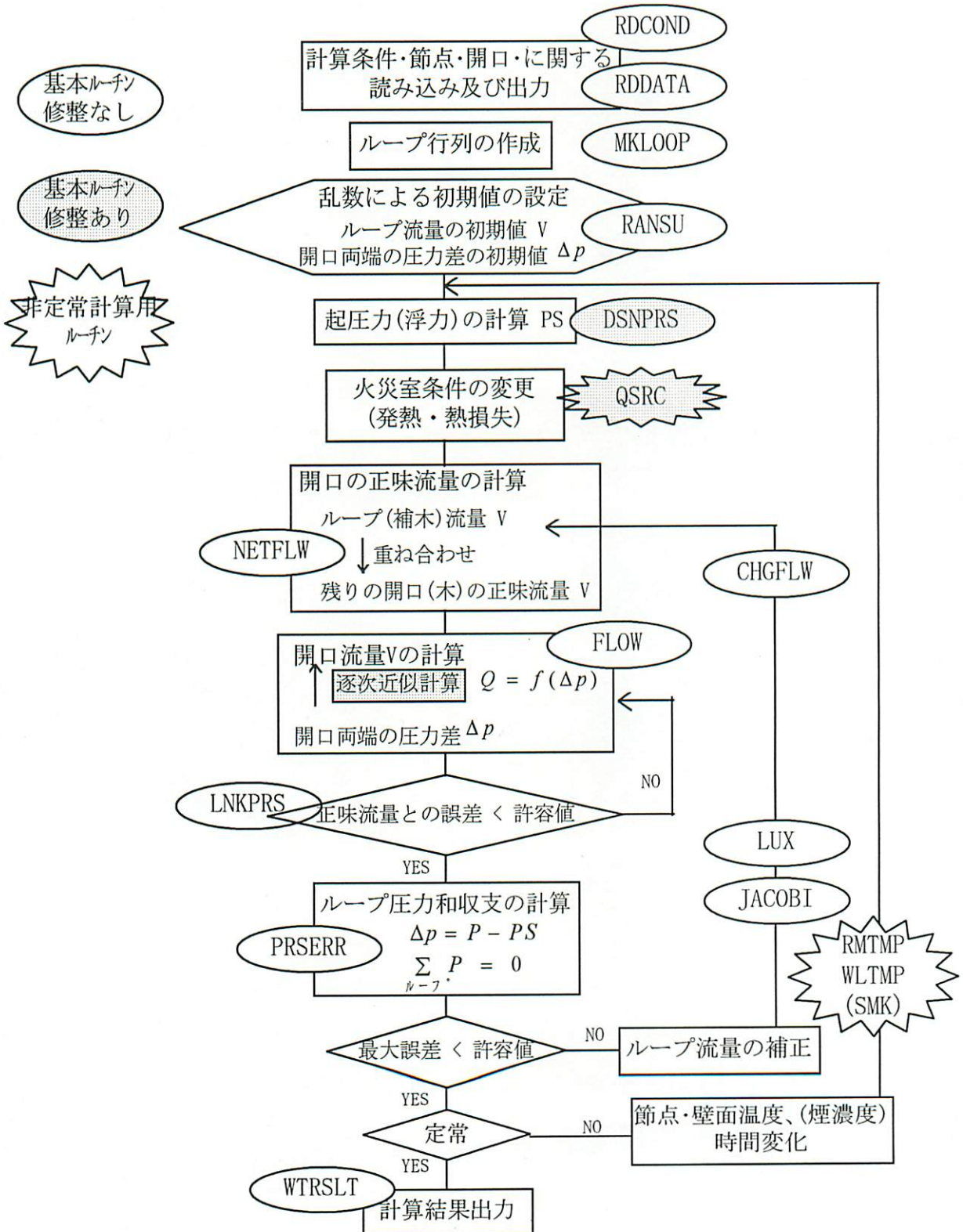


図3-1 煙流動プログラムの流れ

4. 測定データの解析

現地調査の測定データをもとに換気計算を行い、調査時の換気状況を分析する。

換気計算では、開口での空気の流れの方向・流量と、節点の温度(熱収支設定)が計算結果である。4.1. では節点温度を設定(固定)して、開口での空気の流れの方向・流量の結果からモデルをチェックする。4.2. ではまず外気温を固定した(外気温一定)計算で節点の熱収支を設定し、設定をチェックした後、外気温周期定常計算を行なう。

4.1. 空間形態のモデル化と室温設定の計算

計算対象のデリンクユ地下都市の空間形態は、プログラムで想定されているオフィスビルのような一般の建物の形態とは大きく異なる。そのためプログラムへ入力する空間形態には適切なモデル化が必要である。

本節ではモデル化の過程を説明し、室温設定の計算によりモデル化が適切かを確認する。

4.1.1. 空間形態のモデル化

モデル化の過程を説明する。モデル化のイメージを図 4-1 に示す。

4.1.1.1. 空間の区分

換気網計算では、空間を《節点》と《開口》に区分する。3 章で説明したように、《節点》は圧力のある室(全圧=静圧とみなされる空間)及び地上、《開口》は圧力損失のある流路(速度圧のある空間)とする。

まず地下空間を‘室’、‘通路’、‘シャフト’、‘室-シャフト間の接続部’に区分する。定義に従うと‘室’は節点に、‘通路’、‘シャフト’、‘室-シャフト間の接続部’は開口となる。

通路は室と室をつなぐ流路であるが、体積(それに伴う発熱・壁との熱収支)をもち、その両端においてレベル差のある空間である。体積、発熱は両端の室に分散させ、レベル(位置)は通路の下流の室(地上→シャフト→室→地上を流れの正の方向とする。開口における流れの正の方向は、上流節点→下流節点。つまり通路では、下層階の室が上流、上層階の室が下流。)の床レベルとする。

シャフトは定義に従うと流路であるが、その体積をゼロと考えることはできないため、節点とする。温度分布を考慮して、室-シャフト間の接続部のある位置(3, 4, 5 階の室の床レベル)で区切り、4 節点に区分する。区分したシャフトをつなぐ開口ではシャフトでの圧力損失を考慮した流量係数を与えなければならない。

4.1.1.2. 開口の抵抗係数(流量係数)の算出

前項で区分した開口での圧力損失を考察する^[1]。摩擦抵抗、形状抵抗による圧力損失を考え、流量係数を算出する。摩擦抵抗係数はコンクリートの値($\lambda=0.03$)を用いる。形状抵抗による圧力損失は、すべての開口で入口、出口、曲りによるものを、シャフト、室-シャフト間の接続部で上記に加えて分流・合流によるものを考慮する(表 4-1)。

シャフト、室-シャフト間の接続部では、流れの方向によって流量係数を変えなければならないが、流れの方向と流量係数は一様に決まらないので、分流での値で設定する。

節点・開口の設定を表 4-2 に、モデルを図 4-2 に、各節点・開口のデータを表 4-3, 4 に示す。

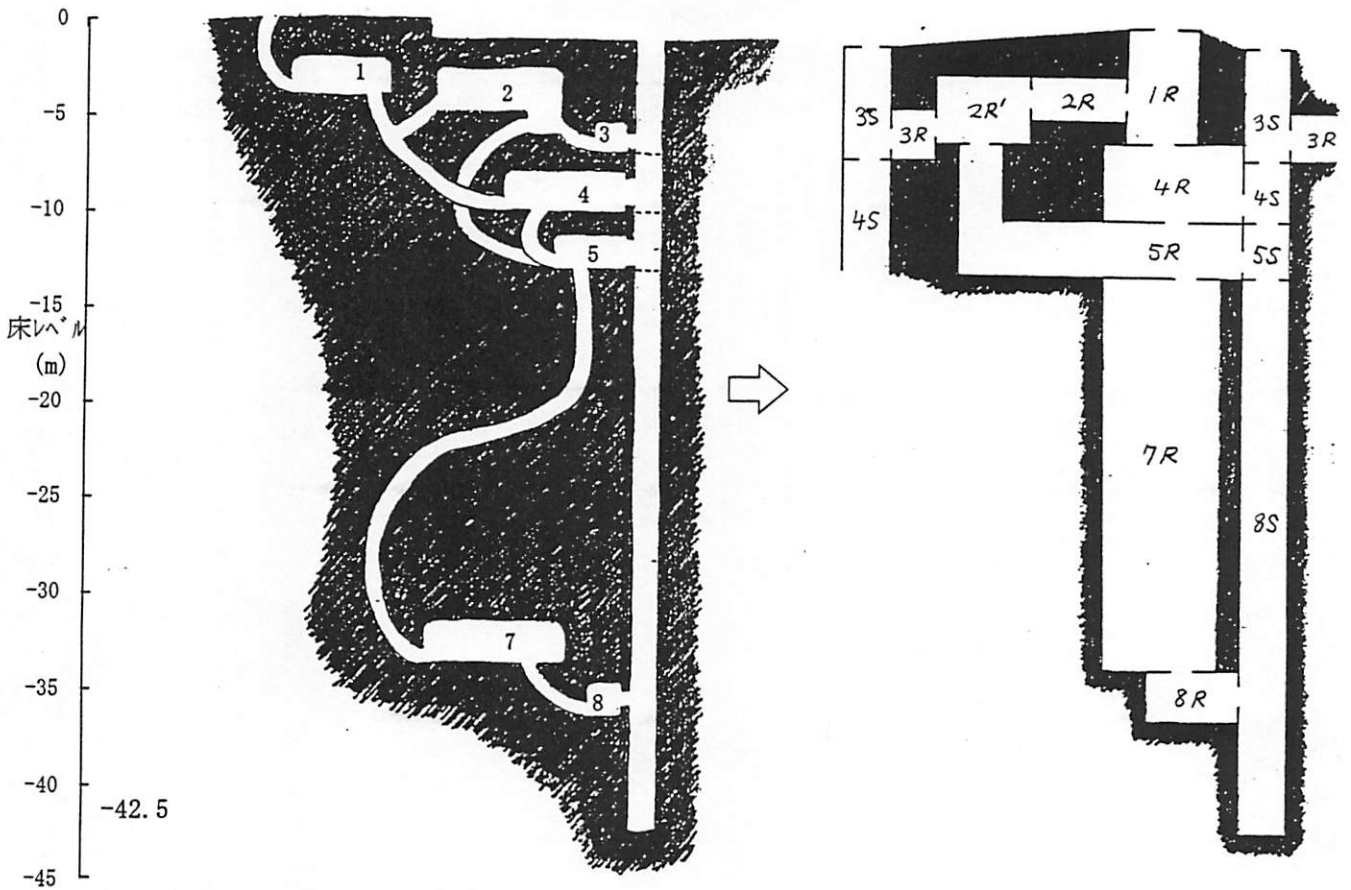


図 4-1 モデル化のイメージ

<仮定> 節点(部屋,シャフト)のうち 部屋 における 速度=0
 摩擦損失係数 $\lambda=0.03$ (エンクリト)

<記号説明> 等価管径d: 円形以外の断面 → 円形断面 $d = 4A/S$ A:断面積, S:周長
 ζ_{in} : 入口形状抵抗係数
 ζ_{out} : 出口 "
 ζ_{bend} : 曲り "
 $\zeta_{合分}$: 合分流 "

採用流量係数

備考は曲りの角度と合分流の面積比・流量比

幅 B(m)	高さ H(m)	断面積 A	等価管径 d	長さ L(m)	開口 No.	節点	摩擦抵抗		形状抵抗					合計抵抗係数		流量係数		備考			
							$\lambda \cdot L/d$	ζ_{in}	ζ_{out}	ζ_{bend}	$\zeta_{分流}$	$\zeta_{合流}$	$\zeta_{計}$	$\lambda \cdot L/d \cdot \zeta_{計}$	α	ζ_{bend} 角度	S_b/S_a	Q_b/Q_a			
部屋-部屋																					
1.00	1.90	1.81	1.31	12.11	1	OUT-1R	0.28	0.20	1.00	1.25					2.45	2.73	0.81	90			
1.10	1.80	1.88	1.37	31.25	2	1R-4R	0.89	0.20	1.00	0.13	-0.08	0.00	1.27	1.33	1.98	2.02	0.71	0.70	30	0.52	
0.80	1.70	1.02	0.89	15.70	12	1R-2R	0.53	0.20	1.00	0.23	0.70	-0.50	2.13	0.93	2.88	1.48	0.81	0.83	30,20	0.52	
1.50	2.00	3.00	1.71	0	13	2R-2'R	0	0	1.00	0			1.00		1.00		1.00				
0.80	1.20	0.72	0.80	1.00	14	2'R-2'R	0.04	0.20	1.00	0			1.20		1.24		0.90				
0.80	2.30	1.38	0.95	17.92	15	2'R-5R	0.58	0.20	1.00	8.00			9.20		9.78		0.32	80,210,30			
0.80	1.80	1.23	1.07	0	3	4R-5R	0	0.20	1.00	0			1.20		1.20		0.81				
0.80	1.80	1.08	0.90	51.20	4	5R-7R	1.71	0.20	1.00	1.10			2.30		4.01		0.50	80,20			
0.80	1.30	0.78	0.82	8.13	5	7R-8R	0.22	0.20	1.00	0.50			1.70		1.82		0.72	80			
部屋-シャフト																					
0.80	0.80	0.54	0.72	0	18	3S-3R	0	0.20	1.00		1.50	-0.20	2.70	1.00	2.70	1.00	0.81	1.00		0.28	0.1
1.30	1.30	1.89	1.30	0	17	4S-4R	0	0.20	1.00		1.00	-0.20	2.20	1.00	2.20	1.00	0.87	1.00		0.80	0.1
1.30	1.70	3.08	1.75	0	18	5S-5R	0	0.20	1.00		0.30	-0.40	2.00	0.80	2.00	0.80	0.71	1.12		1.48	0.2
1.30	1.00	1.30	1.13	0	9	8S-8R	0	0.20	1.00		2.50	1.80	3.70	2.80	3.70	2.80	0.52	0.80		0.82	0.3
シャフト-シャフト																					
1.50	1.40	2.10	1.45	8.80	10	3S-SHAF	0.14	0.80	1.00		-0.08	0.00	1.54	1.80	1.88	1.74	0.77	0.78		0.28	0.1
1.50	1.40	2.10	1.45	4.00	9	4S-3S	0.08		1.00		-0.08	0.10	0.94	1.10	1.02	1.18	0.88	0.82		0.80	0.1
1.50	1.40	2.10	1.45	3.00	8	5S-4S	0.08		1.00		-0.05	0.30	0.95	1.30	1.01	1.38	0.88	0.88		1.48	0.2
1.50	1.40	2.10	1.45	23.00	7	8S-5S	0.48		1.00		0.22	0.40	1.22	1.40	1.70	1.88	0.77	0.75		0.82	0.3

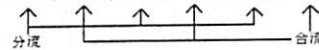


表 4-1 圧力損失の考察

節点		開口				
NO.	NAME	NO.	上流節点	下流節点		
1	1R	1	1	1R	0	OUT
2	2R	2	5	4R	1	1R
3	2'R	3	6	5R	5	4R
4	3R	4	7	7R	6	5R
5	4R	5	8	8R	7	7R
6	5R	6	9	8S	8	8R
7	7R	7	10	5S	9	8S
8	8R	8	11	4S	10	5S
9	8S	9	12	3S	11	4S
10	5S	10	13	SHAFT	12	3S
11	4S	11	13	SHAFT	0	OUT
12	3S	12	2	2R	1	1R
13	SHAFT	13	3	2'R	2	2R
0	OUT	14	4	3R	3	2'R
		15	6	5R	3	2'R
		16	10	5S	6	5R
		17	11	4S	5	4R
		18	12	3S	4	3R

表 4-2 節点と開口の設定

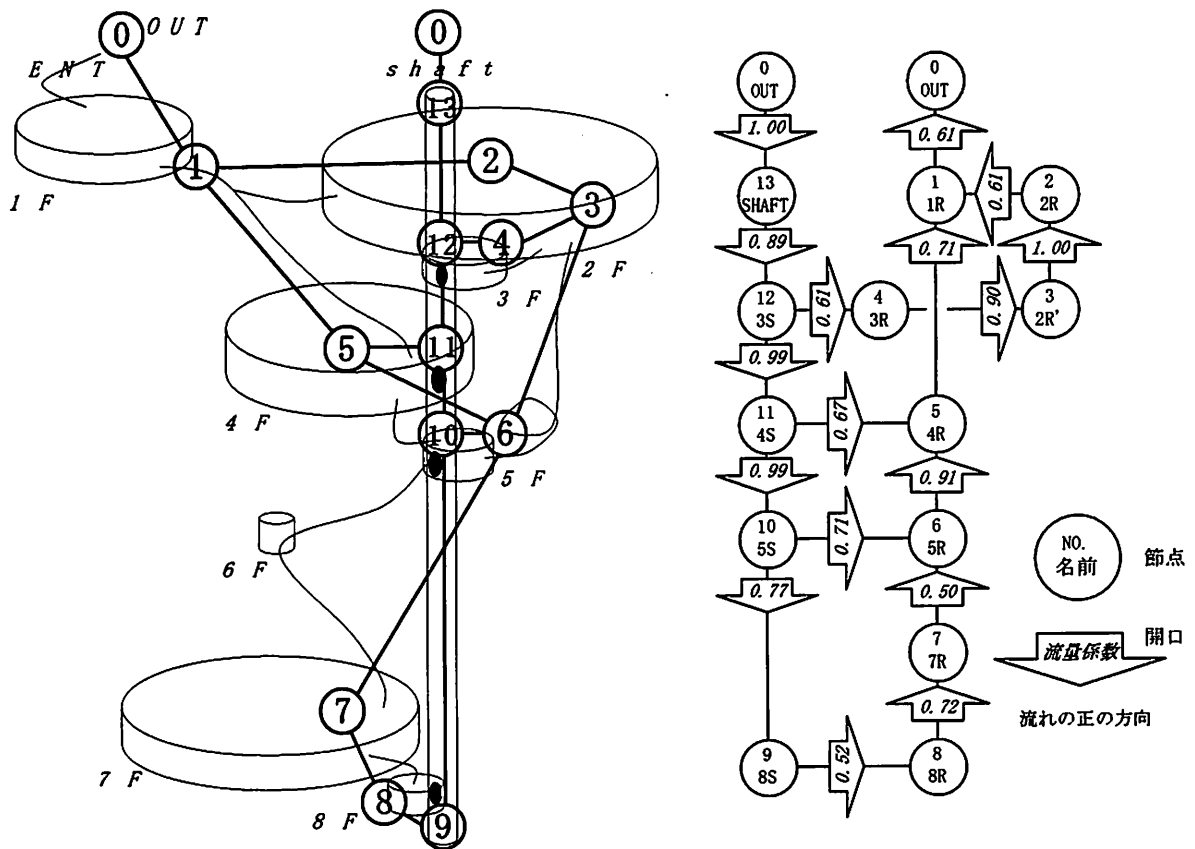


図 4-2 モデル

節点		床レベル (m)	節点入力データ			床面積 m ²	表面積 m ²	容積 m ³
NO.	NAME		幅(m)	奥行(m)	高さ(m)			
1	1R	-5.70	10.0	12.6	2.0	125.6	340.6	248.8
2	2R	-4.60	8.0	9.9	2.2	79.4	236.2	171.4
3	2'R	-5.70	8.0	8.3	1.8	66.5	191.7	119.7
4	3R	-6.60	4.0	6.3	1.6	25.2	83.7	40.8
5	4R	-10.60	8.0	10.1	2.0	81.1	234.1	160.6
6	5R	-13.60	8.0	9.8	1.8	78.4	220.9	141.1
7	7R	-33.90	10.0	16.1	2.2	160.7	434.0	347.1
8	8R	-36.60	3.0	3.2	1.6	9.5	39.1	15.4
9	8S	-42.50	1.5	1.4	28.9	2.1	171.8	60.7
10	5S	-13.60	1.5	1.4	3.0	2.1	21.6	6.3
11	4S	-10.60	1.5	1.4	4.0	2.1	27.4	8.4
12	3S	-6.60	1.5	1.4	5.7	2.1	37.3	12.0
13	SHAFT	-0.90	20.0	20.0	0.9	400.0	872.0	360.0
0	OUT	0.00	0.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0

表 4-3 節点のデータ

NO.	開口		開口入力データ							
	上流節点	下流節点	ION	流量係数	幅(m)	上端(m)	下端(m)	レベル差(m)		
1	1	1R	0	OUT	1	0.61	1.00	1.90	0.00	-5.70
2	5	4R	1	1R	1	0.71	1.10	1.80	0.00	-4.90
3	6	5R	5	4R	1	0.91	0.80	1.60	0.00	-3.00
4	7	7R	6	5R	1	0.50	0.60	1.80	0.00	-20.30
5	8	8R	7	7R	0	0.72	0.60	1.30	0.00	-2.70
6	9	8S	8	8R	0	0.52	1.30	1.50	0.50	-5.90
7	10	5S	9	8S	1	0.77	1.50	1.40	0.00	28.90
8	11	4S	10	5S	1	0.99	1.50	1.40	0.00	3.00
9	12	3S	11	4S	1	0.99	1.50	1.40	0.00	4.00
10	13	SHAFT	12	3S	1	0.89	1.50	1.40	0.00	5.70
11	13	SHAFT	0	OUT	1	1.00	20.00	20.00	0.00	-0.90
12	2	2R	1	1R	0	0.61	0.60	1.70	0.00	1.10
13	3	2'R	2	2R	0	1.00	1.50	2.00	0.00	-1.10
14	4	3R	3	2'R	0	0.90	1.30	1.40	0.00	-0.90
15	6	5R	3	2'R	1	0.32	0.60	2.30	0.00	-7.90
16	10	5S	6	5R	0	0.71	1.80	1.90	0.20	0.00
17	11	4S	5	4R	0	0.67	1.30	1.30	0.00	0.00
18	12	3S	4	3R	0	0.61	0.60	0.90	0.00	0.00

IONは開口の向き 0:水平方向の流れの開口 1:垂直方向の流れの開口
 レベル差(m)は開口両端の節点の床レベルの差(下流節点-上流節点)

表 4-4 開口のデータ

4.1.2. 室温設定の計算

まず9時の測定値で室温・外気温を設定し、その温度での空気の流れの方向・流量を計算をする。計算結果を観測結果(空気の流れ、表 2-1, 図 2-7)と比較する。

計算は $t=150s$ でほぼ収束した。地下内部で5階シャフト→8階→5階室と $0.43kg/s$ (流速では約 $20\sim 45cm/s$) の流れがあり、外気がシャフトからわずかに ($0.08kg/s$) 取り入れられるという結果になった(図 4-3)。5階室→1階室の流れが、5-2-1 と流れている点を除けば(観測では5-4-1 の流れがみられ5-2-1 の流れはほとんどなかった)ほぼ観測結果と一致する。

この計算は、節点の熱データを温度設定で与えているため、結果は測定値に大きく左右される。12-18時の測定値で同様に計算した(図 4-3)が、5階シャフト→8階→5階室、5階シャフト→5階室の流れにばらつきがみられた(図 4-4)。これは7-8階の温度分布による(図 4-5)と考えられる。15時の測定値では7階の室温が8階の室温よりもわずかに低いため流れが逆方向になった。温度差の大きい9時に比べ、温度差の小さい12時、18時では流量が少ない。わずかな温度分布の差でも流れが変わることがわかる。入力室温・外気温を表 4-5 に示す。

ROOM		温度 TEMP(°C)			
NO.	NAME	9:00	12:00	15:00	18:00
1	1R	14.2	14.7	16.3	14.8
2	2R	15.6	16.1	16.2	16.3
3	2' R	15.6	16.1	16.2	16.3
4	3R	14.2	14.2	14.7	15.2
5	4R	12.4	12.4	12.2	12.6
6	5R	12.8	12.2	12.0	12.2
7	7R	12.1	12.2	11.6	11.6
8	8R	10.7	12.2	11.8	11.5
9	8S	10.8	12.2	11.7	11.4
10	5S	12.1	12.1	12.0	12.1
11	4S	12.4	11.9	12.0	12.3
12	3S	12.7	13.2	12.7	13.9
13	SHAFT	17.8	21.2	22.5	19.8
0	OUT	17.8	21.2	22.5	19.8

表 4-5 入力室温・外気温

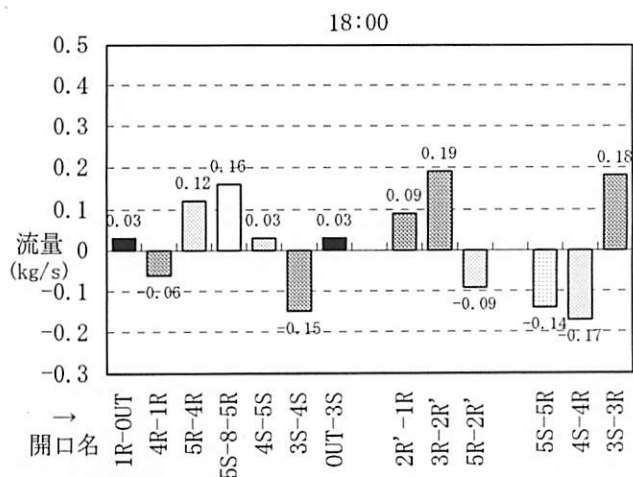
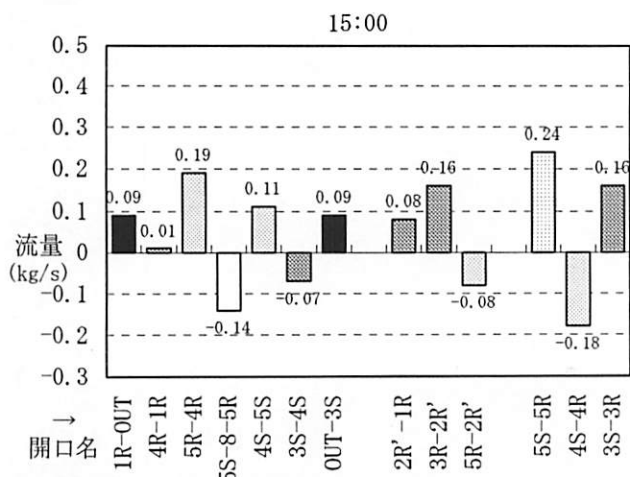
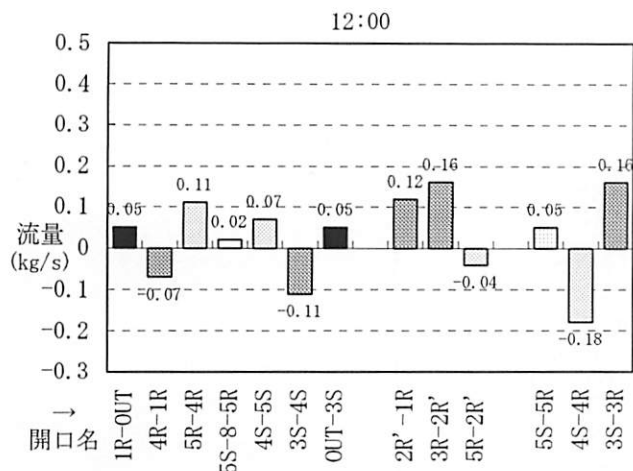
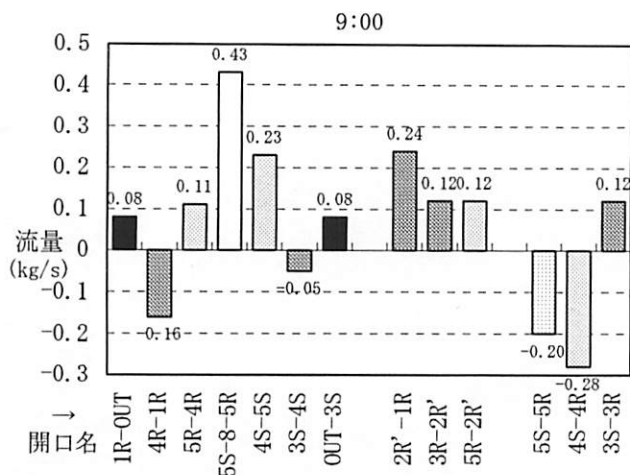


図 4-3 9-18時 各時刻の流量 $t=150s$

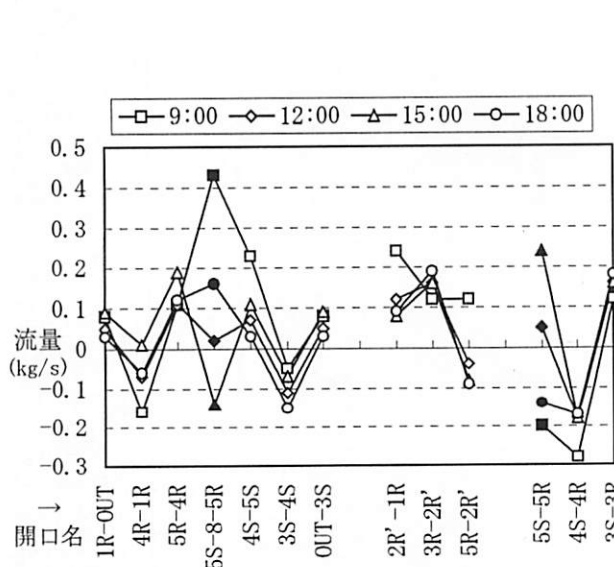


図 4-4 9-18時 流量比較 $t=150s$

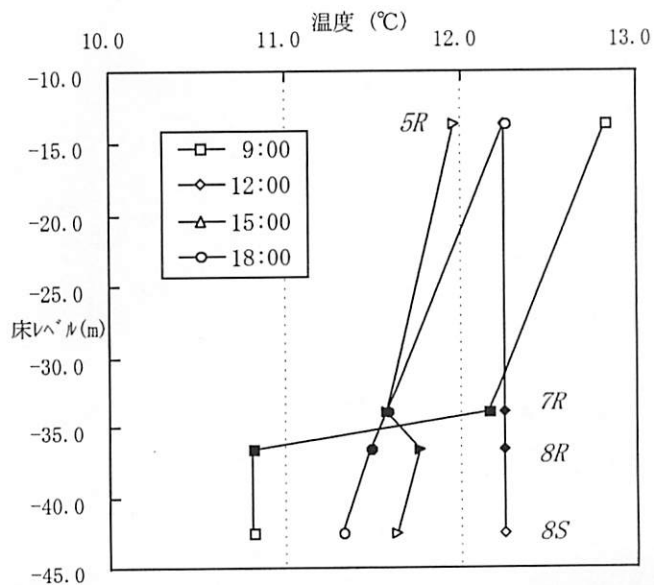


図 4-5 5-7-8階の温度分布

4.2. 非定常計算

境界条件として 1)周壁との熱収支 2)内部発熱 3)外気温を考える。まず 1)周壁への熱損失、2)内部発熱を設定し、3)外気温が一定の計算結果で設定が適当か確認する。9-18時の外気温の測定値から 3)外気温の変動を想定し、外気温周期定常計算を行なう。

4.2.1. 境界条件

4.2.1.1. 周壁との熱収支

プログラムでは、放射熱伝達、対流熱伝達による熱収支を考慮している。

$$Q_r = -\frac{A_w \cdot \varepsilon_w \cdot \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_g^4)}{1 - (1 - \varepsilon_w) \cdot (1 - \varepsilon_g)}$$

$$Q_c = -\alpha_c A_w (T_w - T_g)$$

Q_r :放射熱伝達 Q_c :対流熱伝達 A_w :表面積 T_w :壁面温度 T_g :ガスの温度
 ε_w :壁面の放射率 0.9
 ε_g :ガスの放射率 0.5
 σ :形態係数 $5.67042E^{-11}$
 α_c :対流熱伝達率 0.00465 ()

壁体を半無限体近似して熱伝導を計算し、壁体表面温度変化を計算する過程で、初期壁面温度が半無限での壁体温度となる。測定結果から室温は深度につれて収束する(図 2-9)ので、地下7階の中間期・冬期の温度測定値の平均(11.2℃)を初期壁面温度として設定した。なお壁体(凝灰岩)の各熱定数のうちデータの無いものは(熱伝導率は比重量との関係より^[12]、比熱は岩石・コンクリートの値を参考に^[13])推定した。熱伝導率は、1.0~0.1の幅で推定してあるが、1.0、0.1それぞれで設定し試算した結果の比較でほとんど差が無かった。

比重量^[14] : 1480 (kg/m³)
熱伝導率 : 1.0~0.1 (kcal/m・h・℃)
比熱 : 0.21 (kcal/kg・℃)

4.2.1.2. 内部発熱

発熱の設定は定常設定である。調査時の、地下内の照明器具(7.20kw)と観光客の人体の発熱(9.02kw)から計算される値をもとに入力発熱量を設定した(表 4-6)。観光客人数は、床面積に比例して分散させた(0.12人/m², 地下内70人)。

4.2.1.3. 外気温

まず、外気温一定(9時 17.8℃)の計算を、次に外気温の測定値を線形で結び変動を設定し(図 4-7)、周期定常計算を行なう。

4.2.2. 計算条件

非定常計算時の時間の流れ、収束条件は以下のとおりである。

時間増分値：いずれも 2s

計算結果出力時間：外気温一定計算時 60s

周期定常計算時 3600s

計算終了時間：外気温一定計算時 1800s

周期定常計算時 178000s

室温が定常に到達したと判定する変化量の値：いずれも 0.0deg

4.2.3. 外気温一定計算

9時の測定値を初期節点温度とし、外気温一定(9時 17.8℃)の計算結果から、周壁への熱損失と内部発熱の設定が適当かを確かめる。

空気の流れは下層部で、5階シャフト→8階→5階室(0.50kg/s)、5階室→4階室(0.28kg/s)、4階室→1階室(0.05kg/s)とひとつの流れがあり、外気がシャフトからわずか(0.03kg/s)流入する。室-シャフトの開口部では、室からシャフトへ流れ、地下内部で空気が循環している。5階の室-シャフトの開口部では、両方向の流れがあった。流量の結果は、観測結果とほとんど一致している(図4-6)。

温度は約5分で、すべての節点温度が11~13℃の範囲にほぼ収束した(図4-6)。測定結果では上層階で室温が15、16℃付近なので、熱損失の設定が実際より大きく設定されているか、発熱量が小さく設定されている可能性がある。

2.2.2.で触れたように、調査測定値は観光客(発熱源)の入退場・移動の影響を受けている。発熱量の設定は定常設定であるので、調査状況に合致させることができない。平均的な調査状況より推定したものなので、初期設定のままとする。周壁との熱収支のうち、放射熱伝達によるものを除いて設定し試算してみる。節点温度の範囲はやや広がった(図4-7)。放射熱伝達の影響(ガスの放射率)が過大設定であったと考えられる。また空気の流れも観測結果により近くなった。周壁との熱収支の設定は対流熱伝達のみとする。入口付近(1、2階)で測定値が高い理由は、観光客の入退場による空気の乱れの影響も考えられる。

4.2.4. 外気温周期定常計算

想定した外気温変動で周期定常計算を行い、調査時の換気状況を分析する。

空気の流れは、前項の外気温一定の結果と同じである(図4-8)。外気の流入はわずかで、地下内部で空気が循環している。外気の流入の影響を受けるシャフトの上部(3S)で、外気変動に合わせて温度変化がある。その他の節点温度はほとんど一定である(図4-9)。

室温分布の測定値と計算結果の比較を図4-10に示す。計算結果は測定値より範囲が狭く収束している。

以上の結果分析から、調査時の換気状況を外気温周期定常計算によりほぼシミュレーションできたといえる。

節点	床面積	電球	0.06kw/コ	人	0.12kw/人	計	
NO.	NAME	S (m ²)	コ	発熱(kw)	0.12/m ²	発熱(kw)	発熱(kw)
1	1R	125.64	24	1.44	15	1.81	3.25
2	2R	79.37	24	1.44	10	1.14	2.58
3	2'R	66.51	12	0.72	8	0.96	1.68
4	3R	25.16	3	0.18	3	0.36	0.54
5	4R	81.13	26	1.56	10	1.17	2.73
6	5R	78.39	11	0.66	9	1.13	1.79
7	7R	160.69	18	1.08	19	2.31	3.39
8	8R	9.53	2	0.12	1	0.14	0.26
9	8S	2.10	-	-	-	-	-
10	5S	2.10	-	-	-	-	-
11	4S	2.10	-	-	-	-	-
12	3S	2.10	-	-	-	-	-
13	SHAFT	400.00	-	-	-	-	-
0	OUT	0.00	-	-	-	-	-
計		1034.82	120	7.20	75	9.02	16.22

表 4-6 発熱量の算出

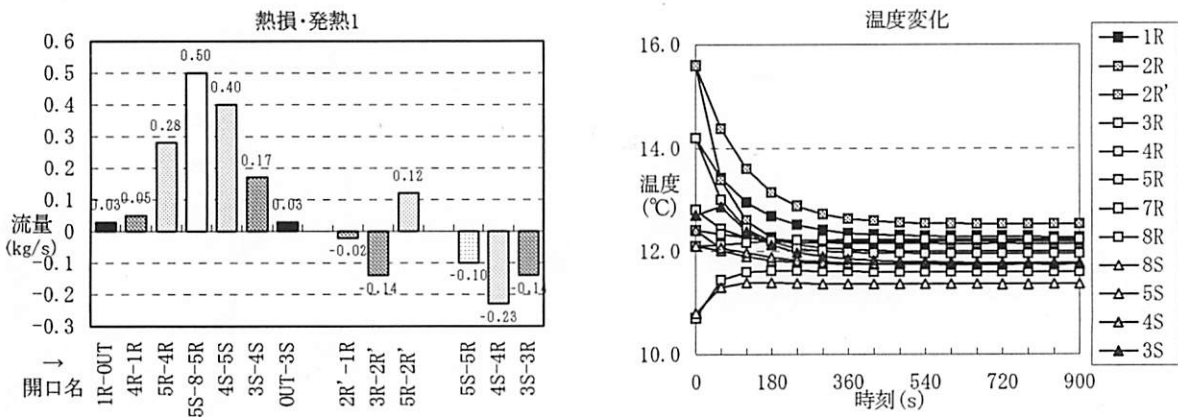


図 4-6 外気温一定計算の結果 1 <t=900s>

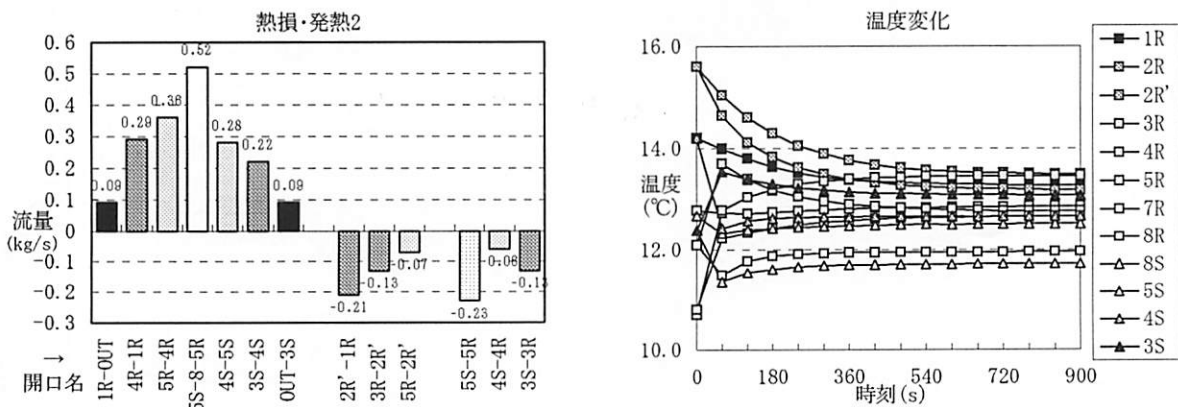


図 4-7 外気温一定計算の結果 2 <t=900s>

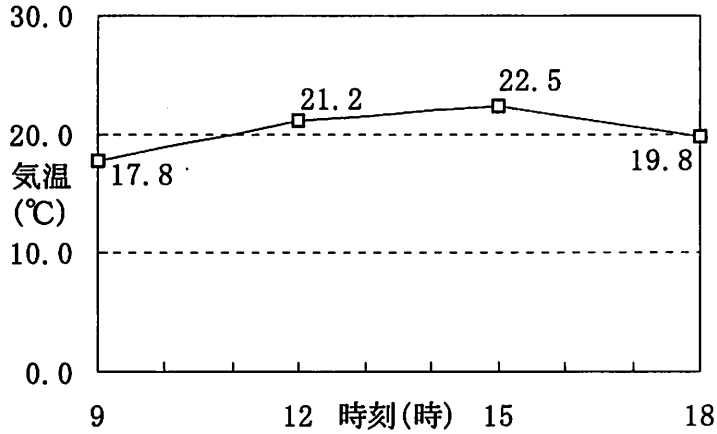


図 4-8 外気温変動

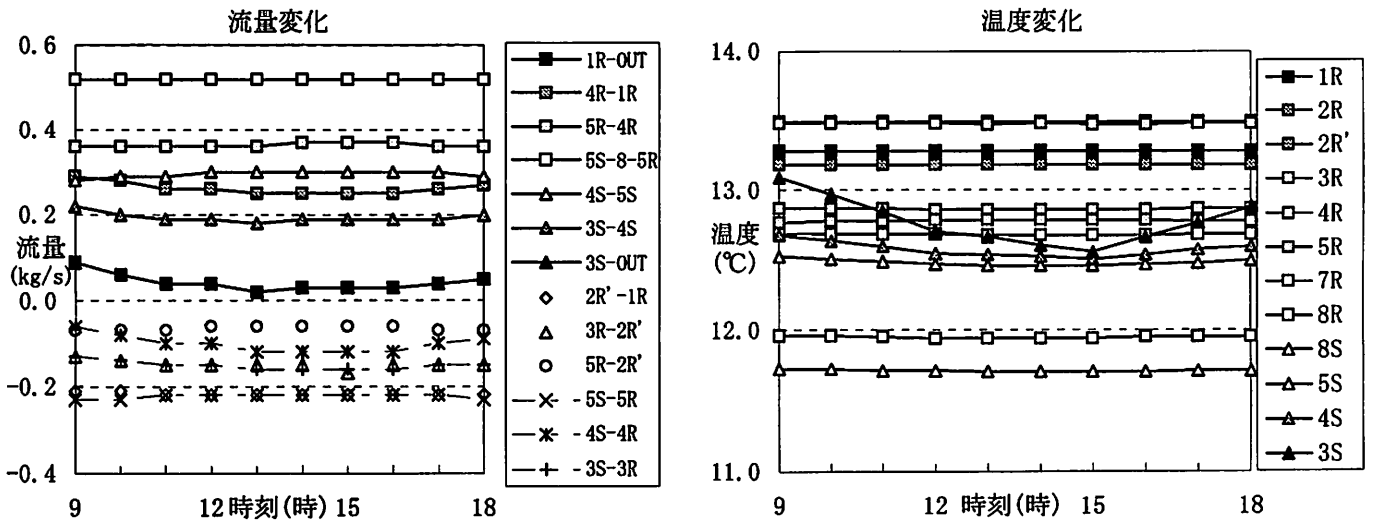


図 4-9 周期定常計算の結果

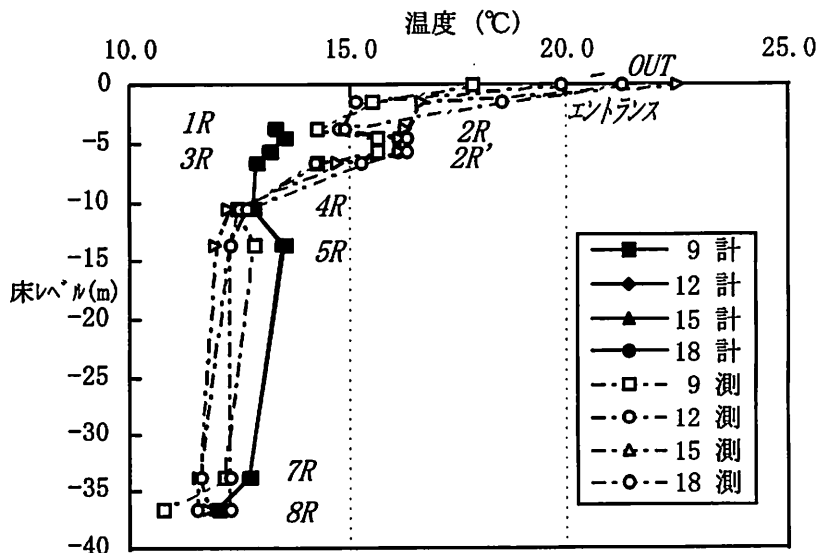


図 4-10 室温分布比較

5. 想定条件による解析

外気温の変動、居住時の発熱の変化・空間形態を想定し、周期定常計算を行なう。結果を比較、分析する。

5.1. 温熱環境条件

5.1.1. 外気温

月別日最高・最低気温(図 5-1)から、夏期・冬期・中間期の外気変動を想定する。夏期 8 月、冬期 12 月、中間期 4 月のデータを用いる。月別日最高・最低気温は月平均値ではないため、そのまま 1 日の最高・最低気温とすると日較差が大きい(約 30℃)。1 日の最高気温時刻を午後 2 時、最低気温時刻を午前 2 時とし、SIN カーブで想定する(図 5-2)。想定した外気変動で周期定常計算を行ない、季節変動を分析する。

5.1.2. 内部発熱

2 章で触れたように、地下 3 階までに居住空間があり、それより下は非常用だったとされている^[16]。発熱なし、2 倍、上層(地下 1-2 階)に集中、下層(地下 7 階)に集中の 4 モデルを、中間期の外気変動で周期定常計算を行ない、中間期・分散(基本型)と比較する。

5.2. 空間形態条件

地下 1, 2 階には、天井に直径 20~100cm の穴を塞いだ跡がある。これらの穴は、居住当時に地表とつながっていて、コミュニケーション、穀物などの投入口として、利用されていたと考えられる。また換気にいくらかの影響を及ぼしていたと予想できる。モデルにこれらの穴を考慮したモデルを、中間期の外気変動で 5.1.2. と同様の周期定常計算を行ない、比較する。

5.3. 計算結果・考察

5.3.1. 季節変動による比較

地下都市内全体の空気の流れを模式化したものを図 5-3 に示す。上部に外気温の範囲を示しているがそれぞれ、 30°C 、 -10°C 付近の設定であり、その範囲ではおおよそこのような流れになるということである。外気温が低く(約 15°C 以下)、外気の流入が一定以上ある時、各部屋に外気(新鮮な空気)が送り込まれる。外気温が高い時は、流入はわずかで、地下内部でのみ循環する。

外気流入量の変化を詳しくみる(図 5-4)。シャフトから流入する方向が正である。流入の方向が逆転するのは、外気温 26°C 付近であるが、部屋から流入する量はほとんどゼロに近い(MAX でも 0.1kg/s)。シャフトからの流入量が大きく増加する(流量の変曲点)のは、外気温 11.5°C 付近であり、壁面温度(11.2°C)とほぼ一致する。

その他の開口での空気の流れ・流量の変化を図 5-5, 6 に示す。図 5-5 はシャフトから主要室(8-5-4-1)のメインの流れ(左側:地上から 5 階シャフトまで \downarrow 、右側:5 階シャフトから 8 階、部屋側主要室を通過して 1 階まで \uparrow)。グラフの形は外気流入量(左上)とほぼ同形である。常に流れの方向が一定(常に正)である。図 5-6 は室-シャフトの開口部の流れ(左側)と 5-2-1 の流れ(右側)である。

各節点の温度変化を図 5-7 に示す。一定の床面積がある 1R(家畜小屋、寝室)、2R, 2R'(キッチン、貯蔵庫)、4R(居室)、7R(教会)では、発熱の設定が一定以上あり、室温は $6\sim 14^{\circ}\text{C}$ に保っている。外気温 -15°C の時、外気流入のない 3R と、外気流入(4S から -12°C)のある 4R を比べると、前者が 2.1°C 、後者が 7.8°C である。

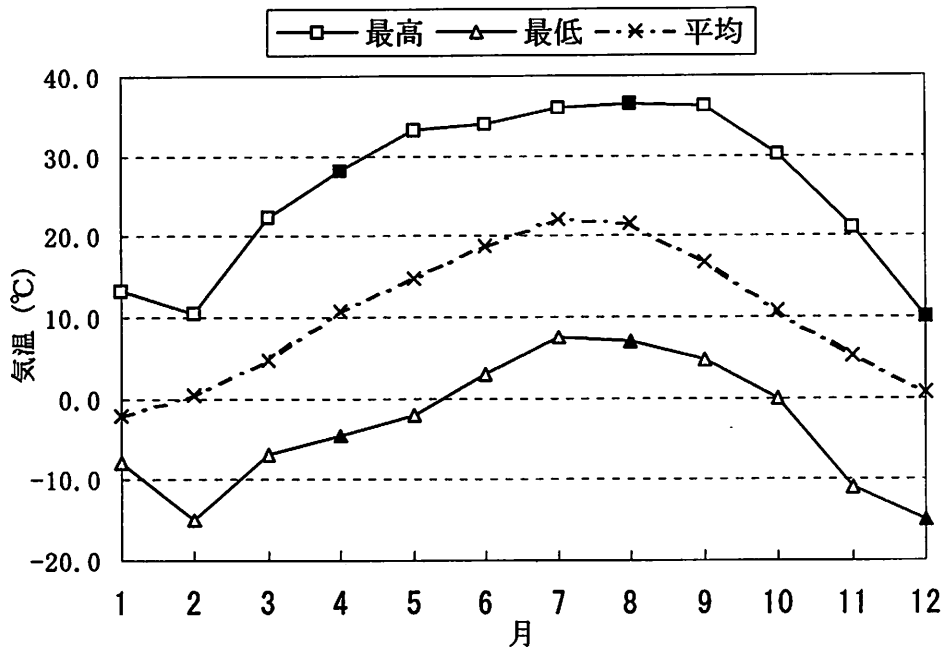


图 5-1 日最高·最低气温^[6]、月别平年气温^[7]

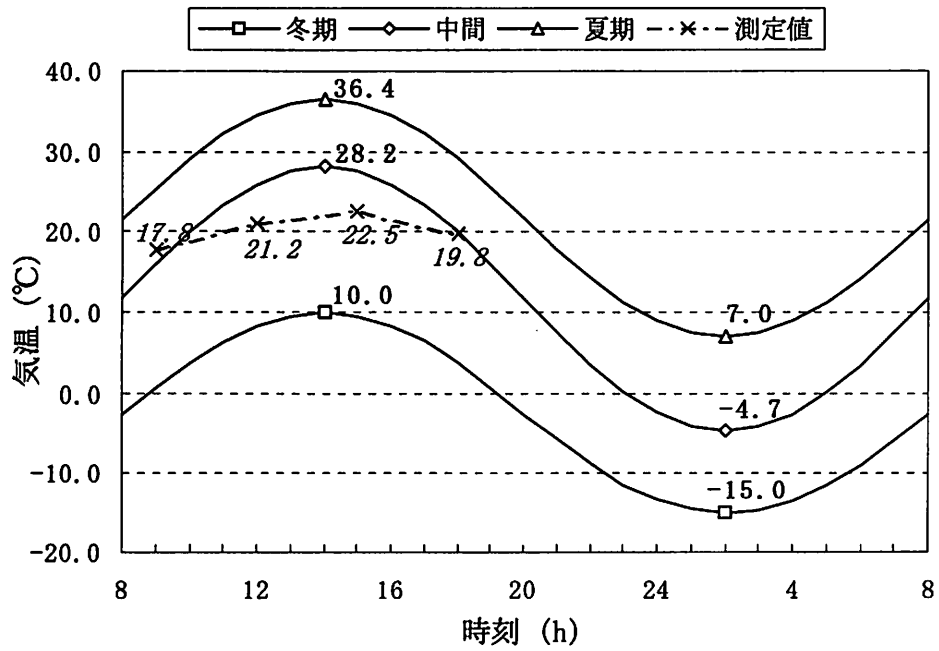


图 5-2 外气温变动

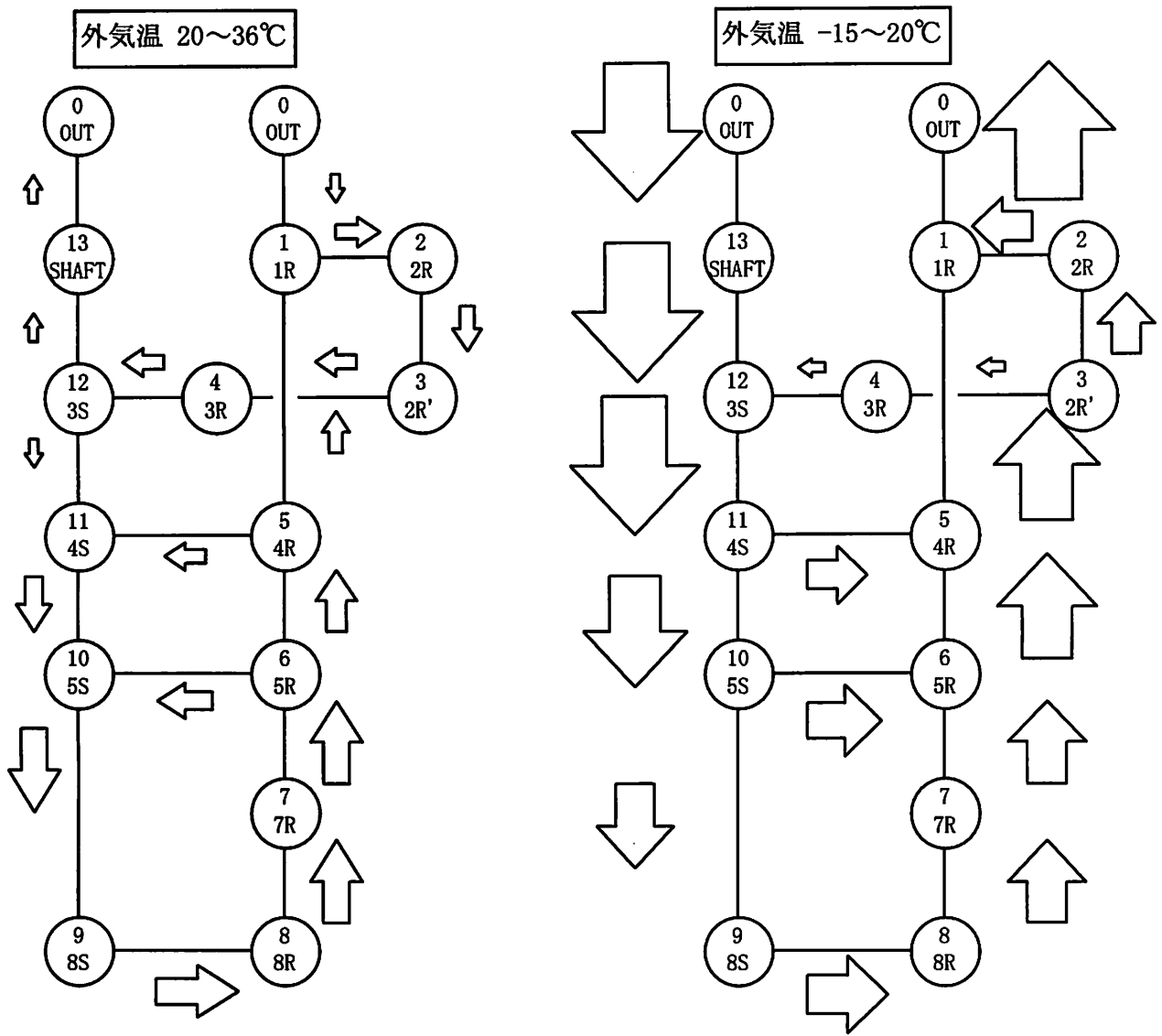
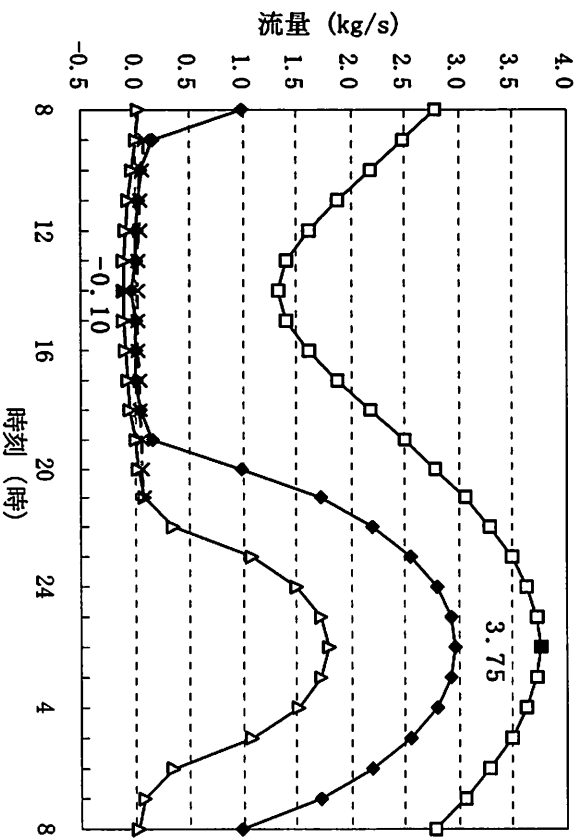


図 5-3 全体の流れ



<0.0kg/s付近拡大>

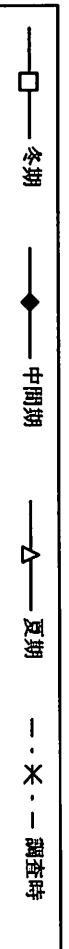
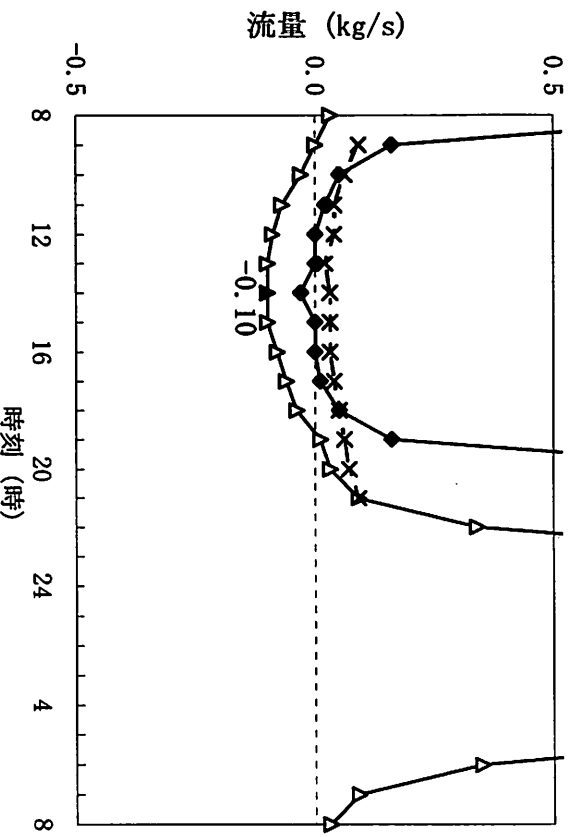


図 5.4 外気流入量変化 <季節変動による比較>

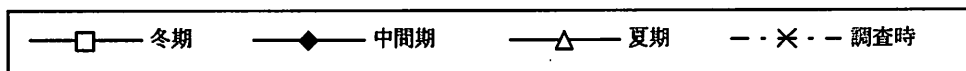
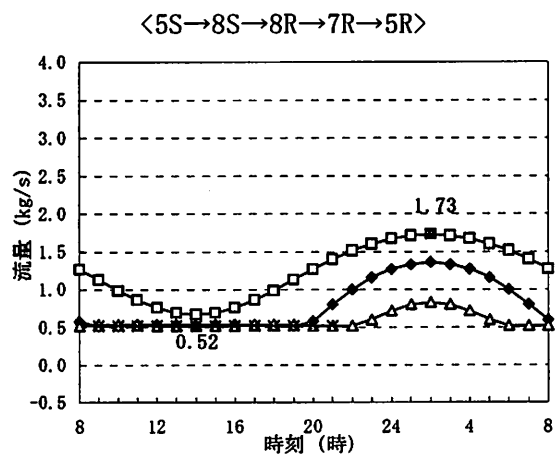
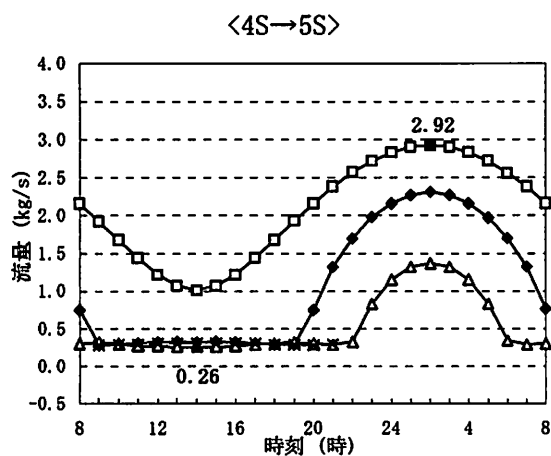
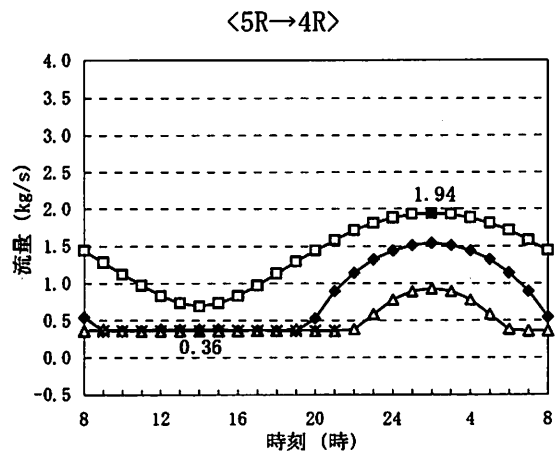
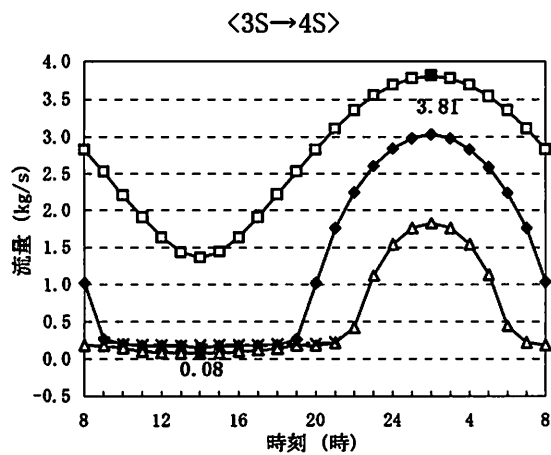
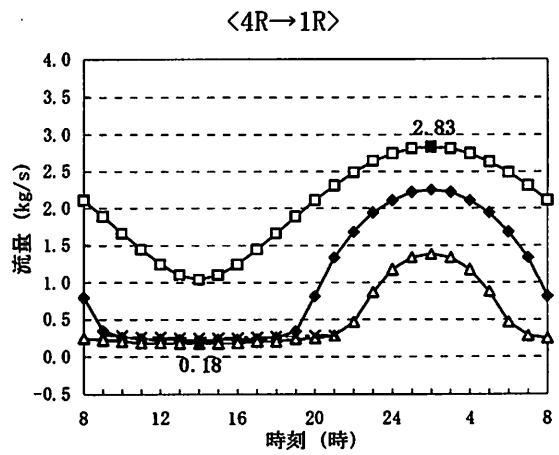
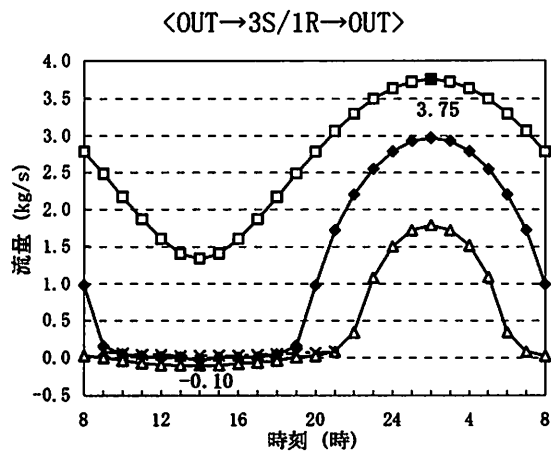
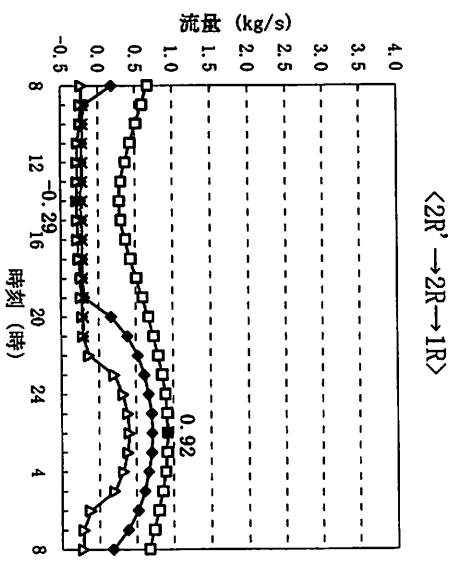
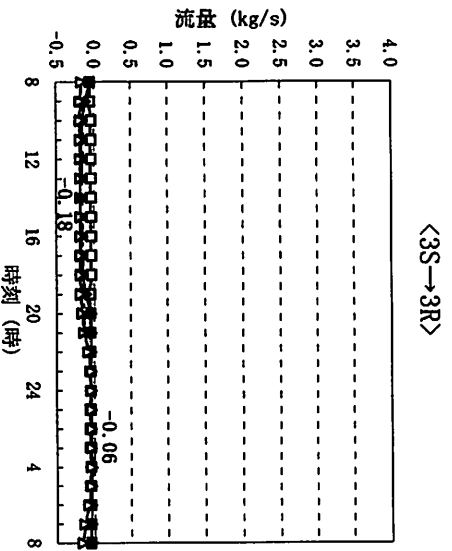
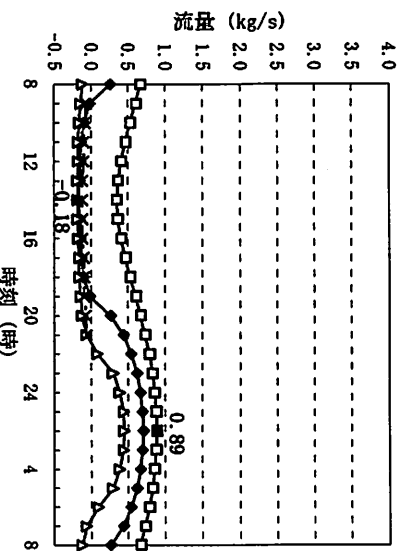


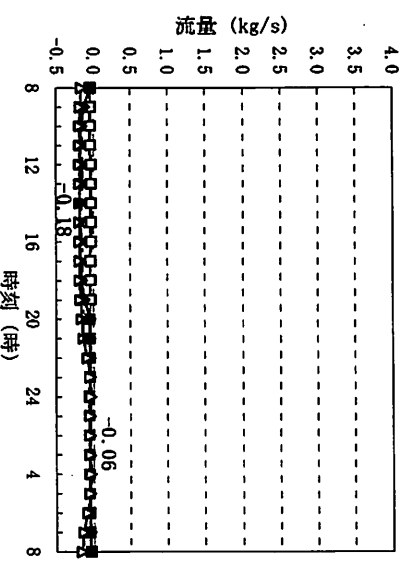
図 5-5 各開口の流量変化 1 <季節変動による比較>



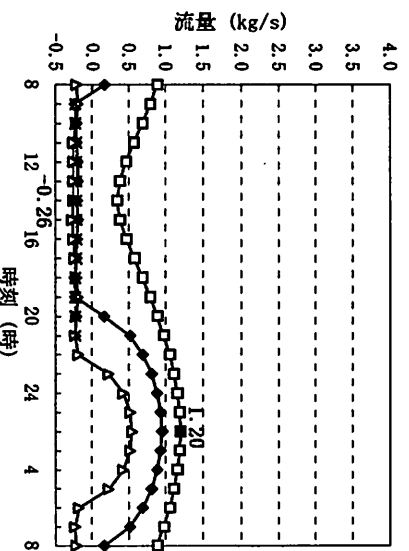
<4S→4R>



<3R→2R'>



<5S→5R>



<5R→2R'>

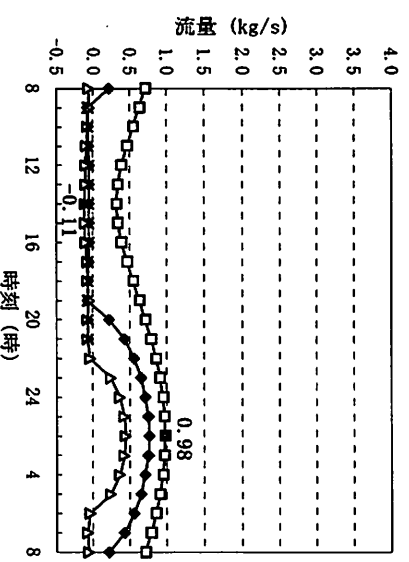


図 5-6 各開口の流量変化 2 <季節変動による比較>

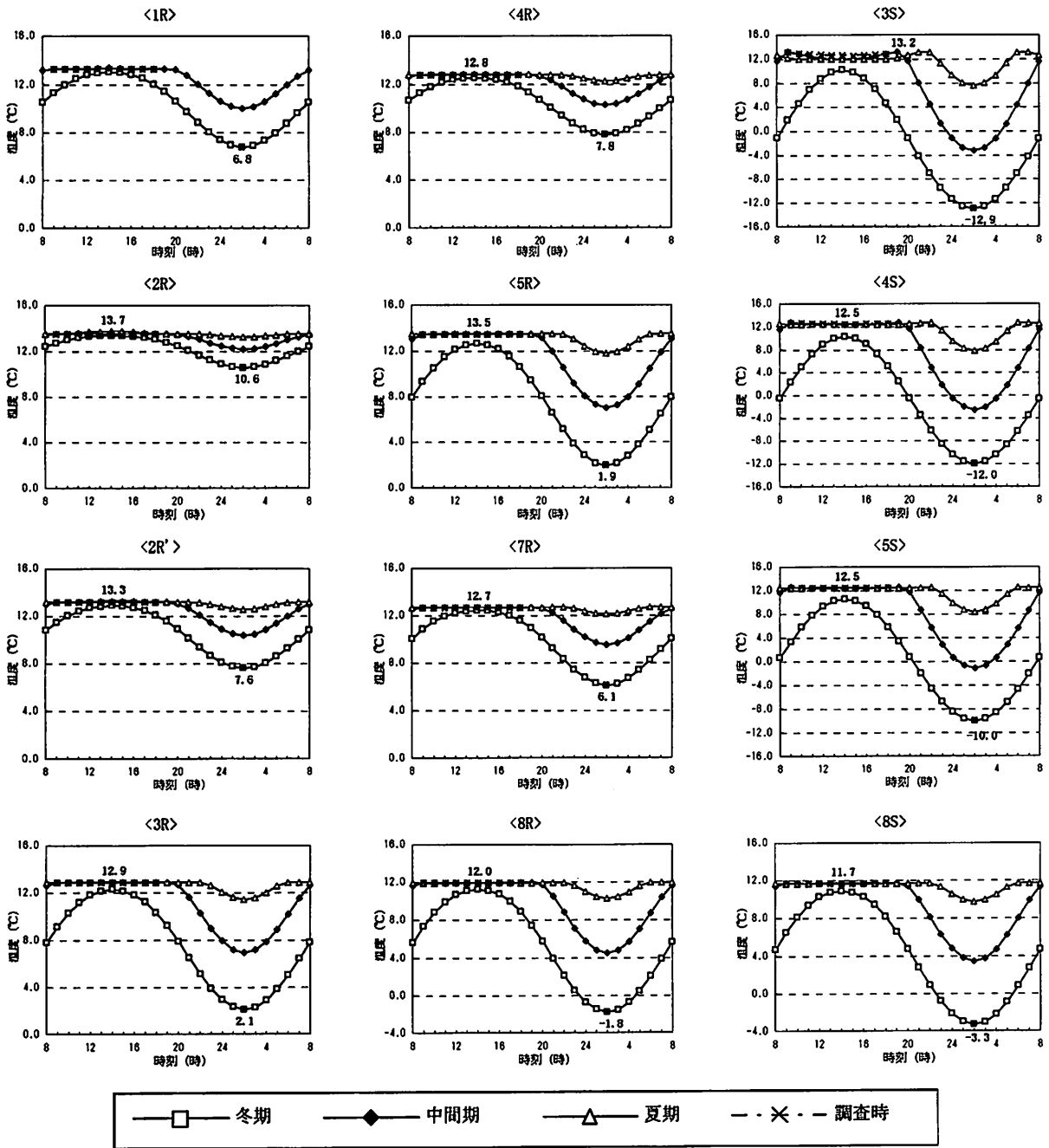


図 5-7 各節点の温度変化 <季節変動による比較>

5.3.2. 発熱分布による比較

各モデルの入力発熱量を表 5-1 に、上層・下層集中の発熱量の算出を表 5-2 に示す。
 外気流入量の変化を図 5-7 に、各開口の空気の流れ・流量を図 5-8, 9 に、各節点の温度変化を図 5-10 に示す。

NO.	節点 NAME	発熱(kw)				
		分散	なし	2倍	上層集中	下層集中
1	1R	3.25	0.00	6.50	7.06	0.00
2	2R	2.58	0.00	5.17	5.52	0.00
3	2'R	1.68	0.00	3.36	3.64	0.00
4	3R	0.54	0.00	1.08	0.00	0.00
5	4R	2.73	0.00	5.46	0.00	0.00
6	5R	1.79	0.00	3.58	0.00	0.00
7	7R	3.39	0.00	6.79	0.00	16.22
8	8R	0.26	0.00	0.51	0.00	0.00
9	8S	-	-	-	-	-
10	5S	-	-	-	-	-
11	4S	-	-	-	-	-
12	3S	-	-	-	-	-
13	SHAFT	-	-	-	-	-
0	OUT	-	-	-	-	-
	計	16.22	0.00	32.44	16.22	16.22

表 5-1 入力発熱量

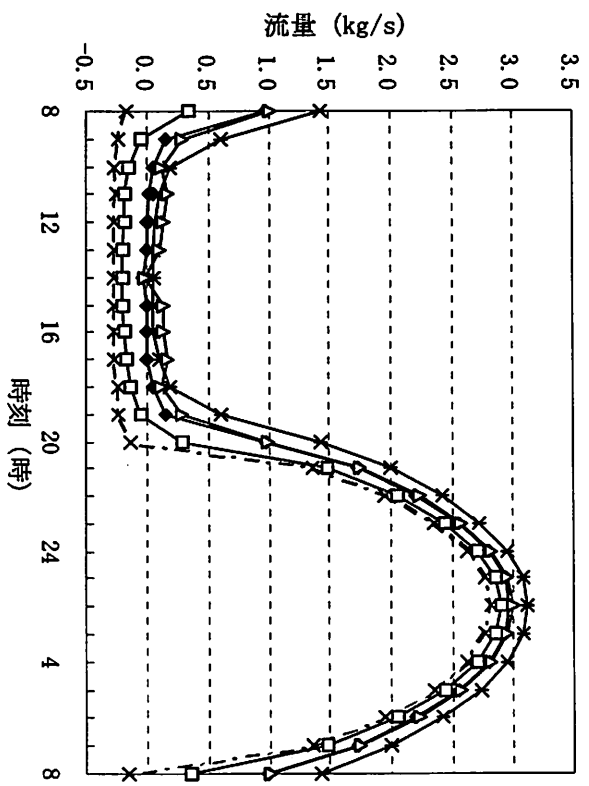
<上層集中>

節点	床面積	電球	0.06kw/コ	人	0.12kw/人	計	
NO.	NAME	S (m ²)	コ	発熱(kw)	0.28/m ²	発熱(kw)	発熱(kw)
1	1R	125.64	48	2.88	35	4.18	7.06
2	2R	79.37	48	2.88	22	2.64	5.52
3	2' R	66.51	24	1.44	18	2.20	3.64
4	3R	25.16	0	0.00	0	0.00	0.00
5	4R	150.29	0	0.00	0	0.00	0.00
6	5R	78.39	0	0.00	0	0.00	0.00
7	7R	160.69	0	0.00	0	0.00	0.00
8	8R	9.53	0	0.00	0	0.00	0.00
9	8S	2.10	-	-	-	-	-
10	5S	2.10	-	-	-	-	-
11	4S	2.10	-	-	-	-	-
12	3S	2.10	-	-	-	-	-
13	SHAFT	400.00	-	-	-	-	-
0	OUT	0.00	-	-	-	-	-
計		1103.98	120	7.20	75	9.02	16.22

<下層集中>

節点	床面積	電球	0.06kw/コ	人	0.12kw/人	計
NO.	NAME	S (m ²)	コ	発熱(kw)	0.47/m ²	発熱(kw)
1	1R	125.64	0	0.00	0	0.00
2	2R	79.37	0	0.00	0	0.00
3	2' R	66.51	0	0.00	0	0.00
4	3R	25.16	0	0.00	0	0.00
5	4R	150.29	0	0.00	0	0.00
6	5R	78.39	0	0.00	0	0.00
7	7R	160.69	120	7.20	75	9.02
8	8R	9.53	0	0.00	0	0.00
9	8S	2.10	-	-	-	-
10	5S	2.10	-	-	-	-
11	4S	2.10	-	-	-	-
12	3S	2.10	-	-	-	-
13	SHAFT	400.00	-	-	-	-
0	OUT	0.00	-	-	-	-
計		1103.98	120	7.20	75	9.02

表 5-2 発熱量の算出 <上層・下層集中>



<0.0kg/s付近拡大>

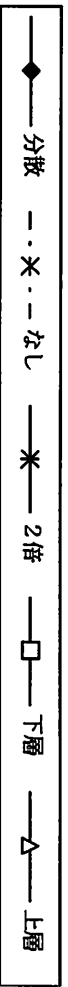
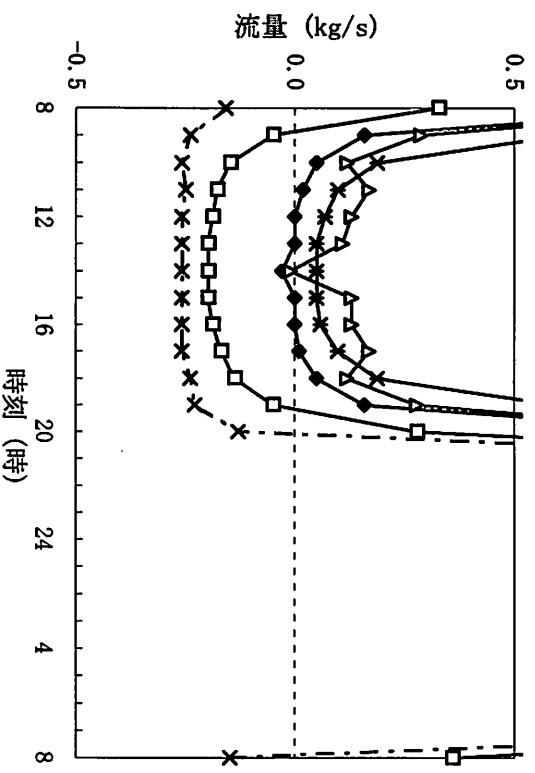


図 5-7 外気流入量変化 <蓄熱分布による比較>

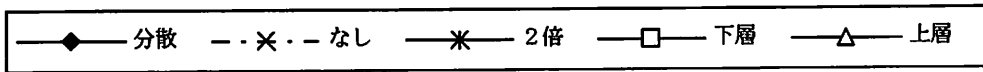
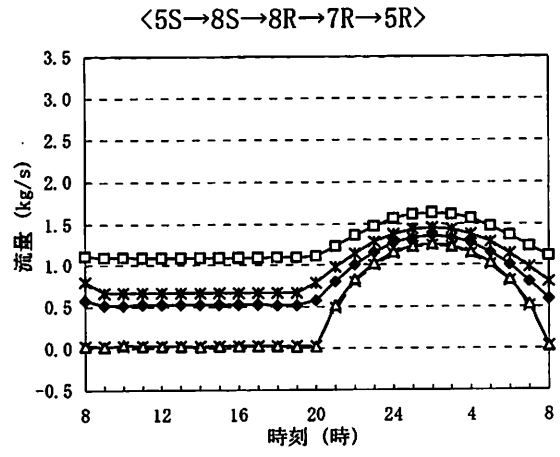
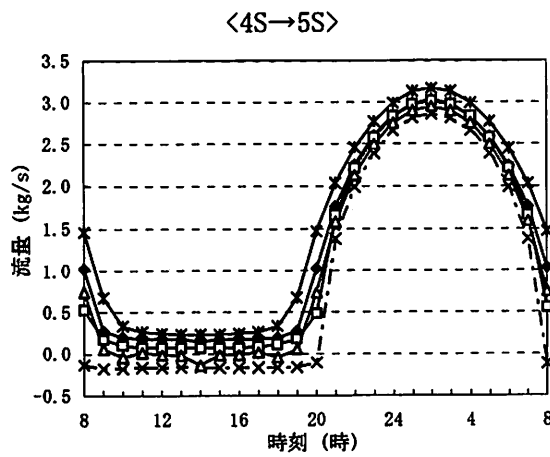
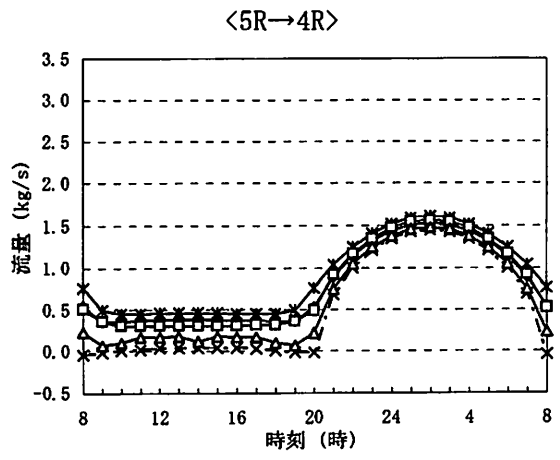
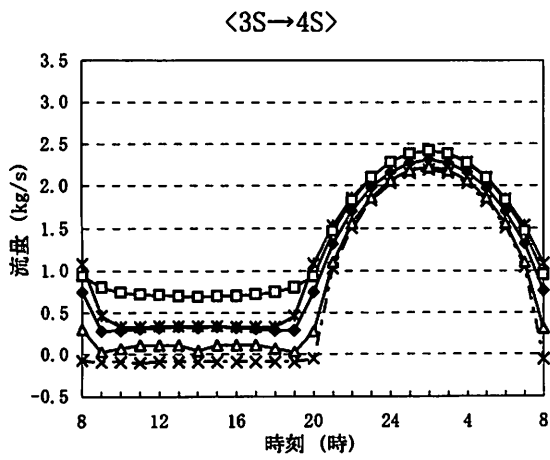
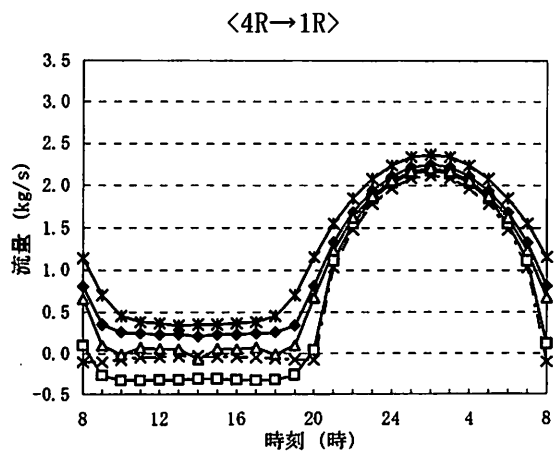
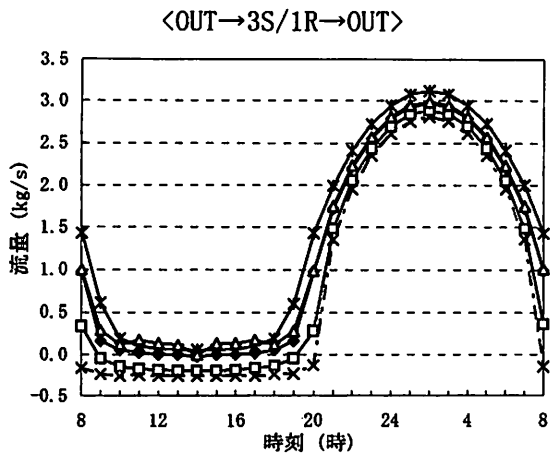


図 5-8 各開口の流量変化 1 <発熱分布による比較>

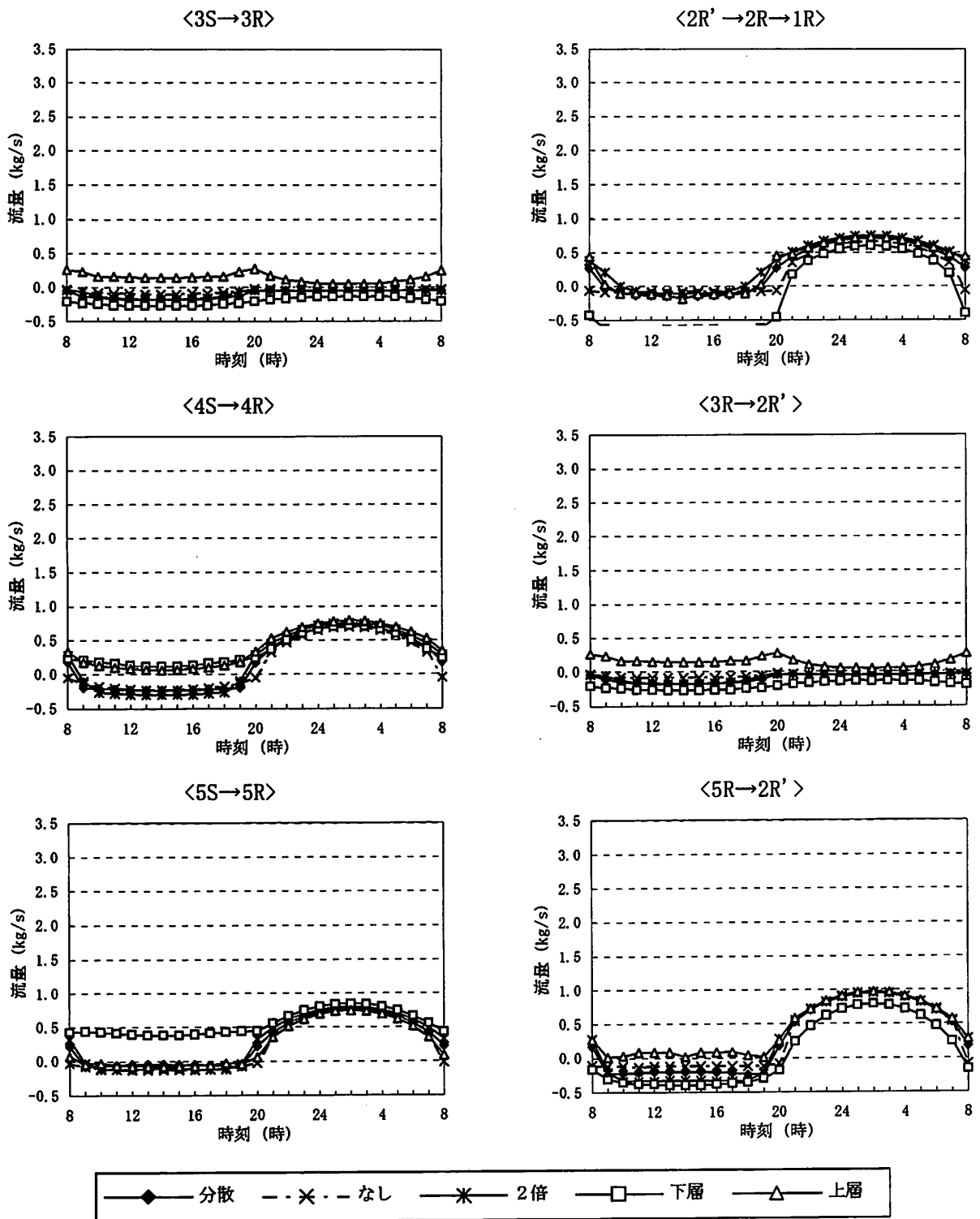


図 5-9 各開口の流量変化 2 <発熱分布による比較>

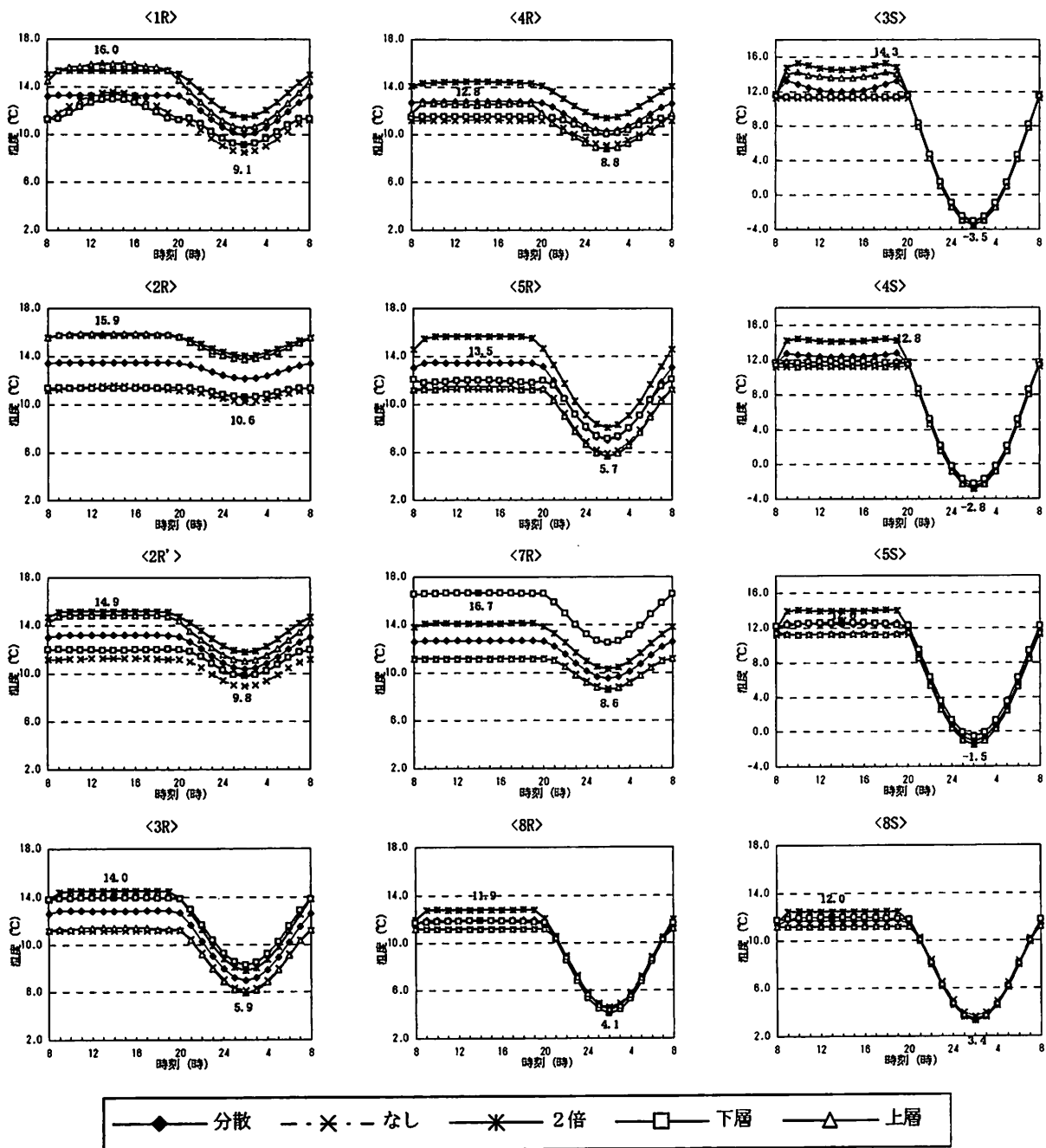


図 5-10 各節点の温度変化 <発熱分布による比較>

5.3.3. 開口条件の差による比較

上層階(1R, 2R, 2R')の開口条件の変更後の設定を表5-3に、モデルを図5-11に示す。
各開口の空気の流れ・流量を図5-12, 13に、各節点の温度変化を図5-14に示す。

NO.	開口			開口入力データ						
	上流節点	下流節点	ION	流量係数	幅(m)	上端(m)	下端(m)	レベル差(m)		
1	1	1R	0	OUT	1	0.61	1.00	1.90	0.00	-5.70
2	5	4R	1	1R	1	0.71	1.10	1.80	0.00	-4.90
3	6	5R	5	4R	1	0.91	0.80	1.60	0.00	-3.00
4	7	7R	6	5R	1	0.50	0.60	1.80	0.00	-20.30
5	8	8R	7	7R	0	0.72	0.60	1.30	0.00	-2.70
6	9	8S	8	8R	0	0.52	1.30	1.50	0.50	-5.90
7	10	5S	9	8S	1	0.77	1.50	1.40	0.00	28.90
8	11	4S	10	5S	1	0.99	1.50	1.40	0.00	3.00
9	12	3S	11	4S	1	0.99	1.50	1.40	0.00	4.00
10	13	SHAFT	12	3S	1	0.89	1.50	1.40	0.00	5.70
11	13	SHAFT	0	OUT	1	1.00	20.00	20.00	0.00	-0.90
12	2	2R	1	1R	0	0.61	0.60	1.70	0.00	1.10
13	3	2'R	2	2R	0	1.00	1.50	2.00	0.00	-1.10
14	4	3R	3	2'R	0	0.90	1.30	1.40	0.00	-0.90
15	6	5R	3	2'R	1	0.32	0.60	2.30	0.00	-7.90
16	10	5S	6	5R	0	0.71	1.80	1.90	0.20	0.00
17	11	4S	5	4R	0	0.67	1.30	1.30	0.00	0.00
18	12	3S	4	3R	0	0.61	0.60	0.90	0.00	0.00
19	1	1R	0	OUT	1	0.80	1.50	1.20	0.00	-5.70
20	2	2R	0	OUT	1	0.80	0.80	0.80	0.00	-4.60
21	3	2'R	0	OUT	1	0.80	0.20	0.30	0.00	-5.70

IONは開口の向き 0:水平方向の流れの開口 1:垂直方向の流れの開口
レベル差(m)は開口両端の節点の床レベルの差(下流節点-上流節点)
追加した開口

表5-3 開口の設定

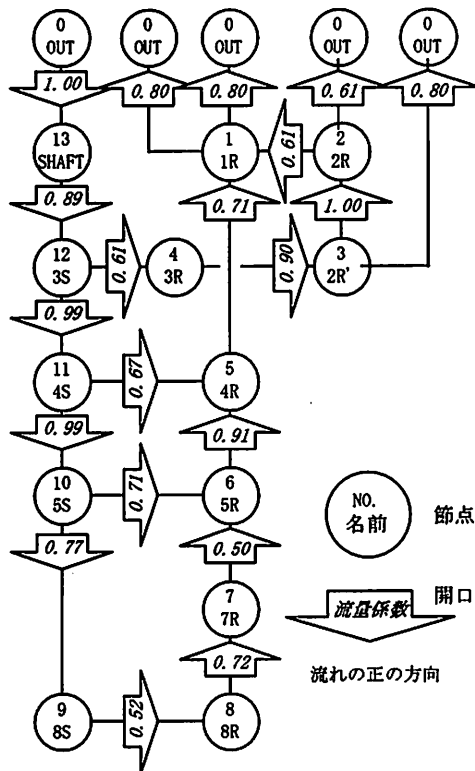


図5-11 モデル

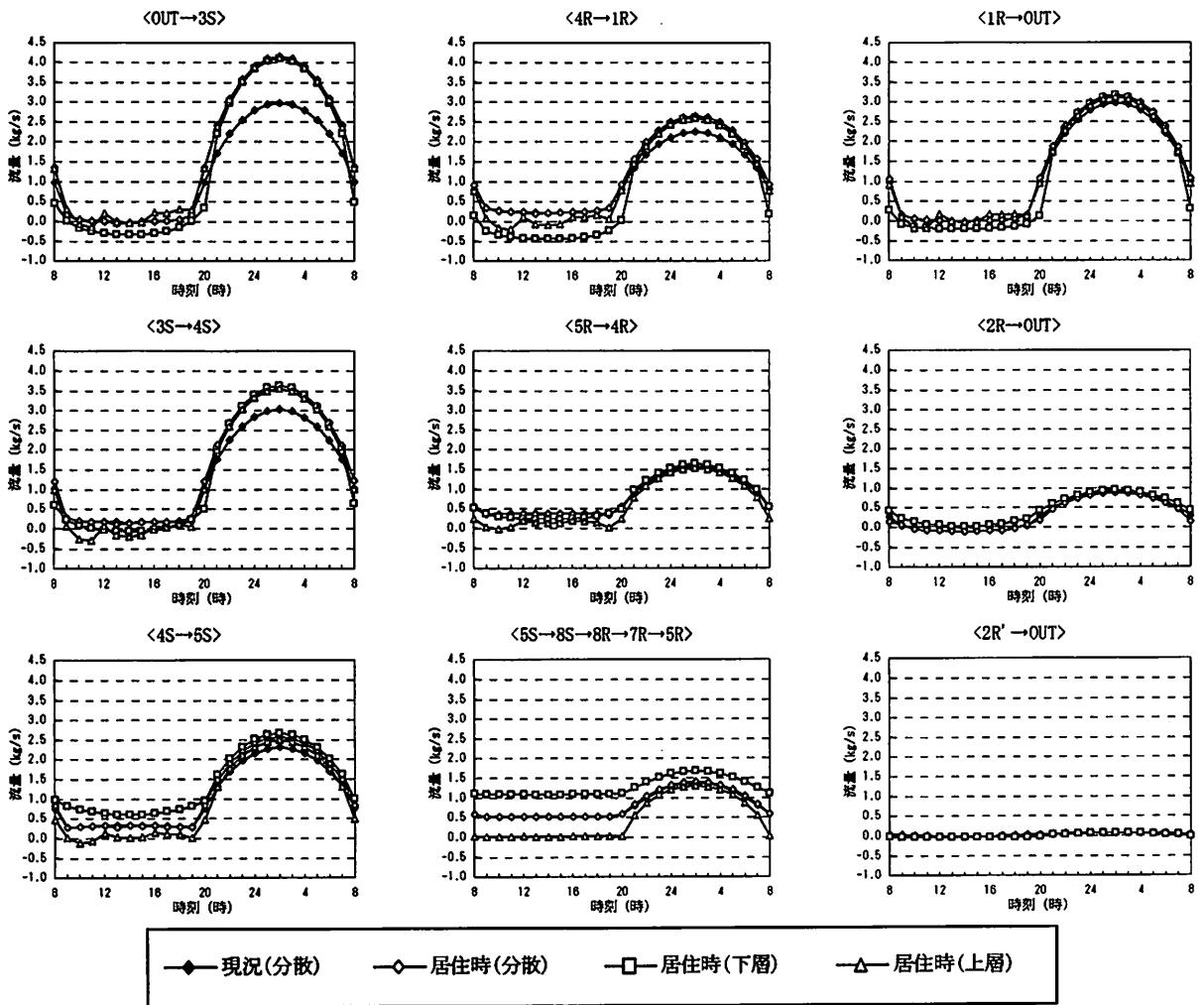
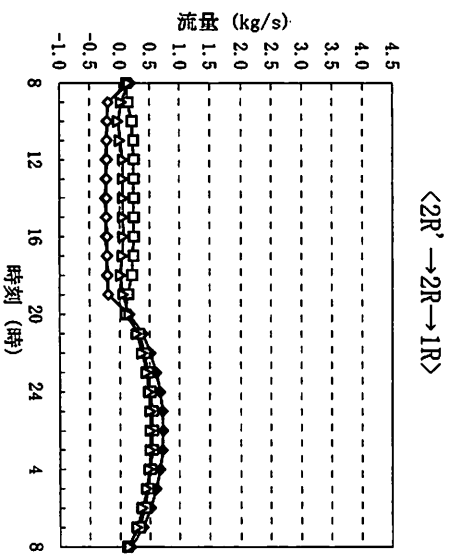
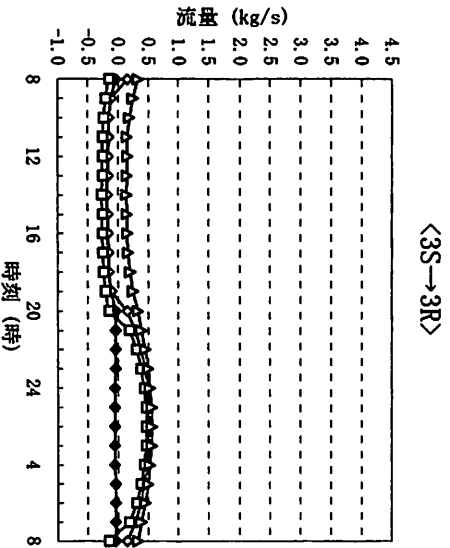
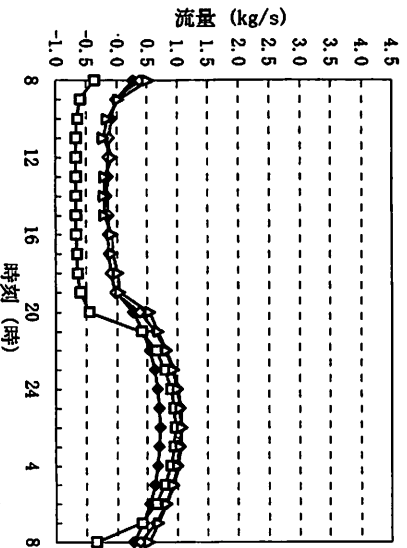


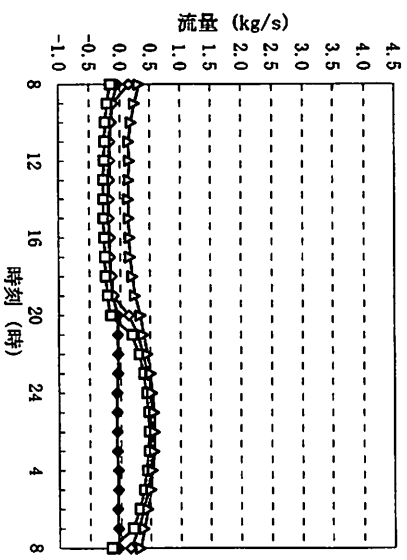
図 5-12 各開口の流量変化 1 <開口条件の差による比較>



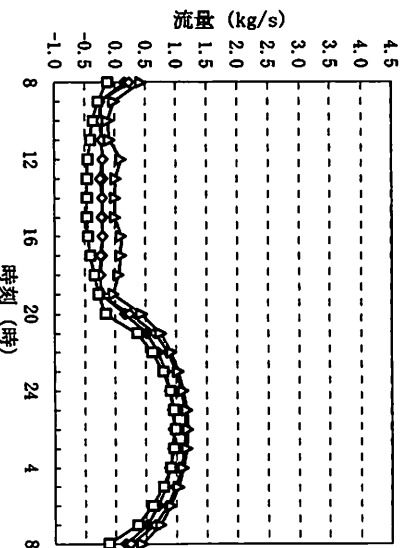
<4S→4R>



<3R→2R'>



<5S→5R>



<5R→2R'>

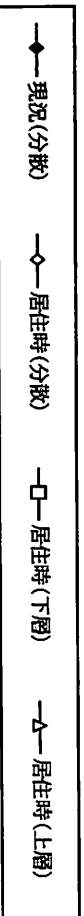
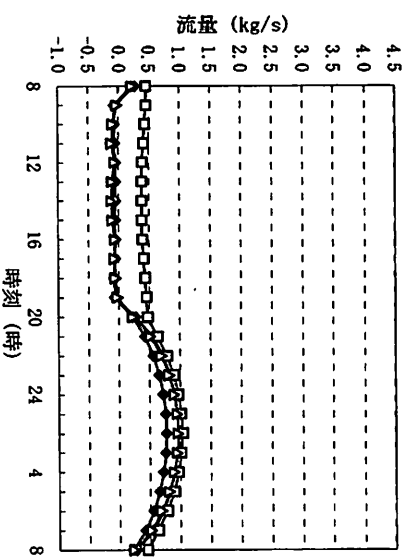


図 5-13 各開口の流量変化 2 <開口条件の差による比較>

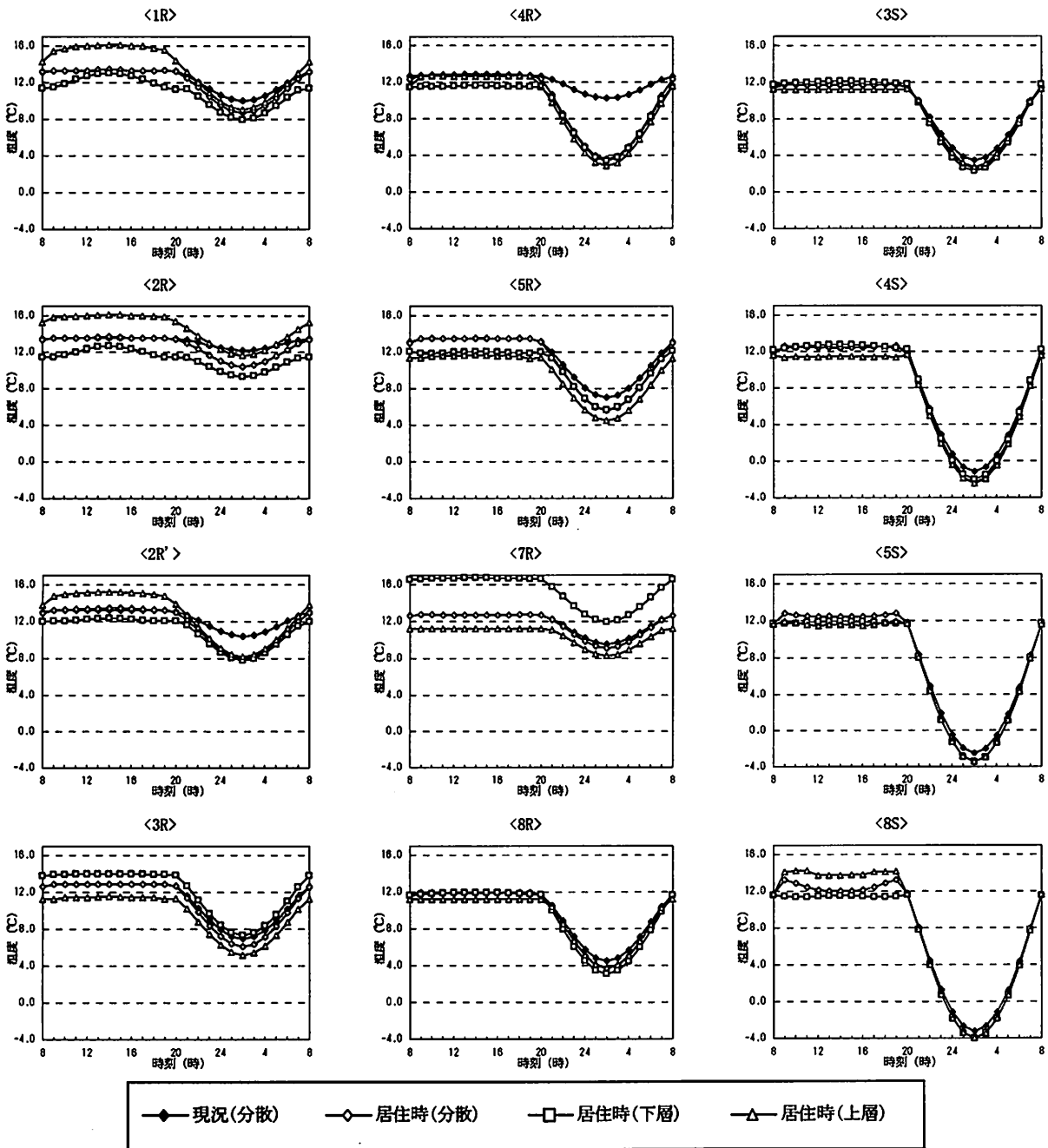


図 5-14 各節点の温度変化 <開口条件の差による比較>

参考文献

- ¹ Ömer Demir 『CAPPADOCIA』 English 版 日本語版 Ömer Demir 1988 <観光向> p69
- ² A.K.Erguvanli, A.E.Yüzer 「PAST AND PRESENT USE OF UNDERGROUND OPENINGS EXCAVATED IN VOLCANIC TUFF AT CAPPADOCIA AREA」
- ³ Murat E.GÜLYAZ, Halis YENIPINAR 『ROCK SETTLEMENTS AND UNDERGROUND CITIES OF CAPPADOCIA』 English 版 KITAP KIRTASIYE TURIZM TICARET 出版年不明 <観光向> p38
- ⁴ 前出 『ROCK SETTLEMENTS AND UNDERGROUND CITIES OF CAPPADOCIA』 p3
- ⁵ 前出 『ROCK SETTLEMENTS AND UNDERGROUND CITIES OF CAPPADOCIA』 p15
- ⁶ 前出 『ROCK SETTLEMENTS AND UNDERGROUND CITIES OF CAPPADOCIA』 p24, 25
- ⁷ 前出 『ROCK SETTLEMENTS AND UNDERGROUND CITIES OF CAPPADOCIA』 p58 に加筆
- ⁸ 和田 浩之 「カッパドキアの地下都市の住環境に関する研究」 平成 6 年度名古屋大学卒業論文
- ⁹ 石原正雄 『建築換気設計』 朝倉書店 1969 3.1 節の換気計算網の基本の説明は 4~7 章を参考
- ¹⁰ 日本建築センター 『煙流動及び避難性状予測のための実用計算プログラム解説書』 1990 1 2 章 流量仮定法による一層煙流動計算プログラム
- ¹¹ 前出 『建築換気設計』 4.3 節 資料 No. 6
- ¹² 斎藤 平蔵 『建築気候』 共立出版 1974. 5 p
- ¹³ 小島 武男、中村 洋 『現代 建築環境計画』 オーム社 1983 表 4.5 建築材料の熱定数
- ¹⁴ 前出 「PAST AND PRESENT USE OF UNDERGROUND OPENINGS EXCAVATED IN VOLCANIC TUFF AT CAPPADOCIA AREA」
- ¹⁵ 前出 『CAPPADOCIA』 p68
- ¹⁶ 日本気象協会 「太陽光開発利用システムの研究開発利用システムに関する研究」 1992
- ¹⁷ 気象庁 「世界地上気象付き集計リスト 1994 年度」 1994