地下空間シンポジウム論文・報告集，第2巻，土木学会【審査付論文】
Proceedings of the Symposium on Underground Space, Vol. 2, JSCE

地下住環境に関する研究
－地下都市デリンクユの事例－
A STUDY ON THE ENVIRONMENT OF AN UNDERGROUND CITY
-A CASE STUDY OF DERINKUYU-

辻本　誠*・アイダン オメル**・久野正博***・阿部浩紀****
Makoto Tsujimoto, Ömer Aydan, Masahiro Kuno and Hiroki Abe,

In this report we took up Derinkuyu Underground City in Turkey as an example of historical use of underground settlement. Derinkuyu Underground City, which is unique in the world, is descending toward eighth stories (about 40 meter) beneath , linked to the ground surface through only vertical routes, and was used for over a thousand years. We surveyed the Underground City in November, 1994 and in September, 1995, and investigated about the shape of space and ventilation system in the Underground City.

1. はじめに

現在、都市における人口の集中化、機能の集積により、その地下空間をより有効に利用しようとする気運が高まってきている。しかしながら、特に住空間として地下を利用しようとする場合、利用の経験的蓄積が乏しいことからくる心理面での不安、防災面での設計基準の欠落が地下空間利用の足枷となっている。そこで、人と地下空間の関わりについて、特に地下住居という形態に着目し、海外にその事例を求めた。

本報は地下住空間の歴史的利用の事例として，地下8層(約 40m)にわたって開発され垂直方向の経路だけで地表とつながる点、地下空間に新鮮な空気をとり込むための換気シャフトを有する点で世界に類を見ない、トルコ共和国のカッパドキア地方の地下都市デリンクユをとりあげ，文献調査および現地調査を行いその背景とそこに蓄積された技術を明らかにすることを目的としている。

筆者らは地下都市デリンクユを対象に1994年11月中旬に冬期の温度、風向の測定(1日間)、1995年9月20日～24日の5日間に空間形態の把握、温度、湿度、風向、風速の測定(温度、湿度、風向、風速については1日間)を行った。

また、このデリンクユをはじめとするカッパドキアの地下都市、特に出入り口から垂直方向にしか生活空間がないものについて、環境面からの本格的な調査・研究が行われていないのが現状である。

2. カッパドキアとその地下都市

カッパドキアには大小様々な洞窟修道院や洞窟住居、地下住居が存在しているが、地下住居はその規模大きさ、寝室、キッチン、教会、学校、家畜小屋、ワイン倉といった機能を備えていることから「地下都市」と呼ばれている。

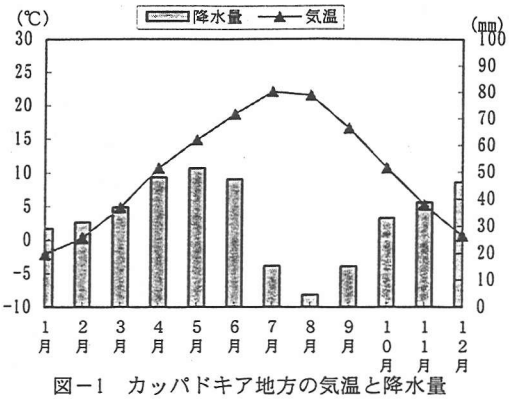
地下都市は少なくともペルシア時代にはその原型は存在していて[1]カッパドキアにキリスト教が広まった後にはキリスト教徒が異民族、異教徒による迫害から身を守るために使用したものである。

またカッパドキアは乾燥帯のステップ気候に属しており(図－1)建材となるような樹木は近隣にはほとんど見られない。さらにその地盤は掘削しやすい凝灰岩[2]によるものであり、巨大な地下都市成立の要因となっている。

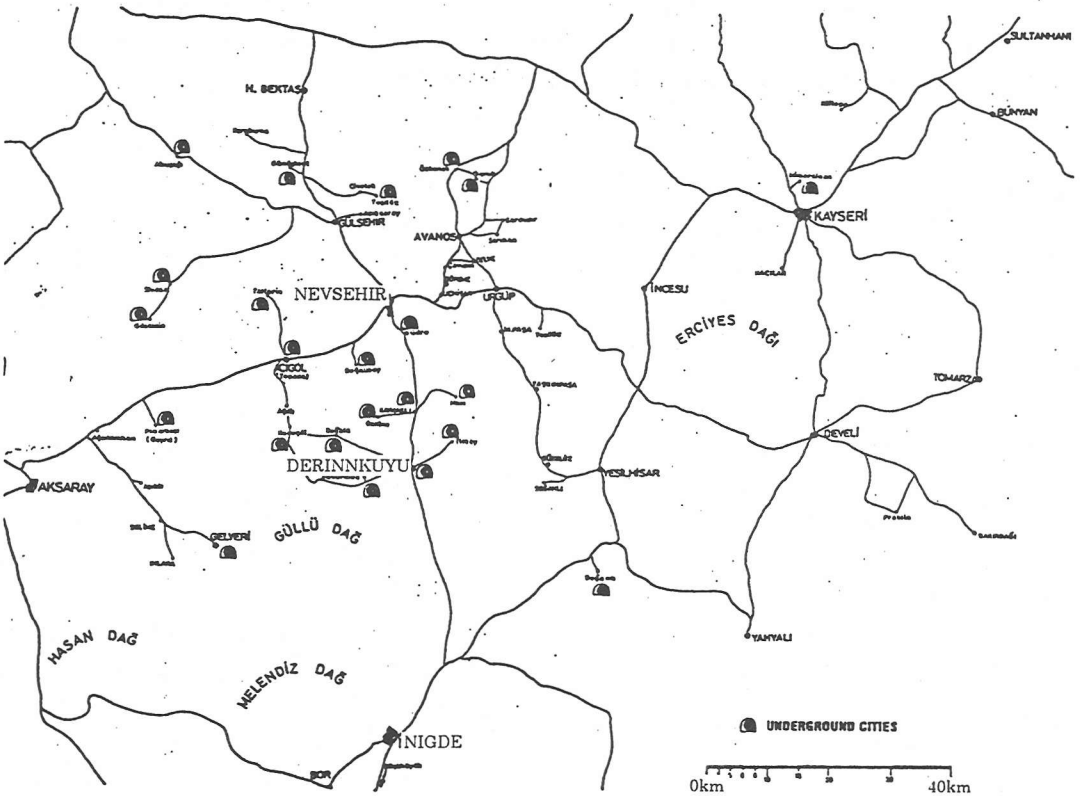
*　正会員　工博　名古屋大学教授　工学研究科地圏環境工学専攻
**　正会員　工博　東海大学助教授　海洋学部海洋土木工学科
***　工修　(株)竹中工務店
****　名古屋大学大学院生　工学研究科地圏環境工学専攻

地下都市は現在 36 箇所確認されていて、一般に公開されているのはその一部である。カッパドキアには全体で 400～500 もの地下都市があったと考えられている[3]。

主な地下都市の位置は(図－2)に示され、筆者らが調査した地下都市デリンクユ(Derinkuyu)はネビシェヒール(Nevsehir)からニーデ(Nigde)に向かう街道沿い、29km の位置にある。カッパドキア地方の岩窟住居には洞窟修道院と地下都市に大別されるが、多くの洞窟修道院が村から離れた場所に位置しているのに対して，主な地下都市は村の地下部分につくられていて，民家が地下都市を擬装していたとも考えられる。そのことから，洞窟修道院は修道士が俗性を捨てて神の声を聞くための修行の場としたのに対して，地下都市は一般の市民が身を隠すものであったと考えられる。



図－1　カッパドキア地方の気温と降水量

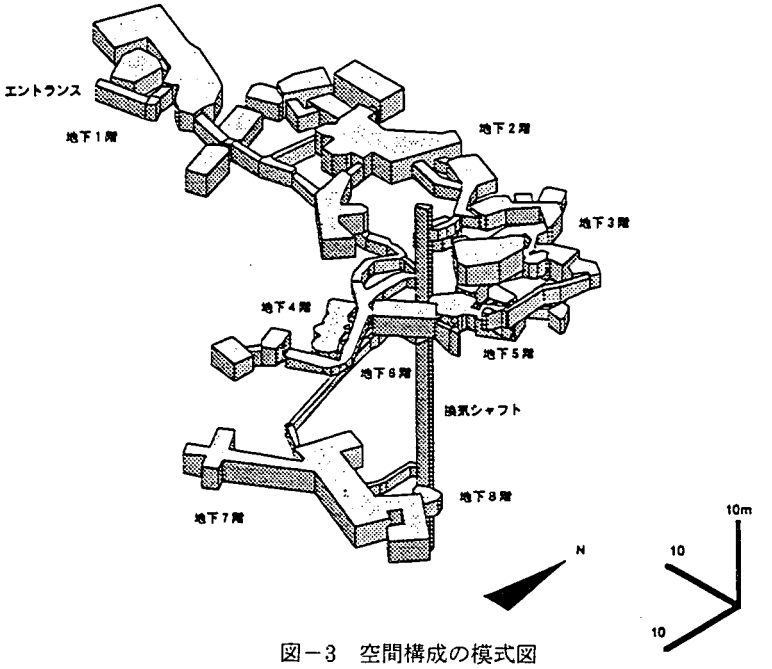


図－2　主な地下都市の位置
(「UNDERGROUND CITIES OF CAPPADOCIA」から引用)

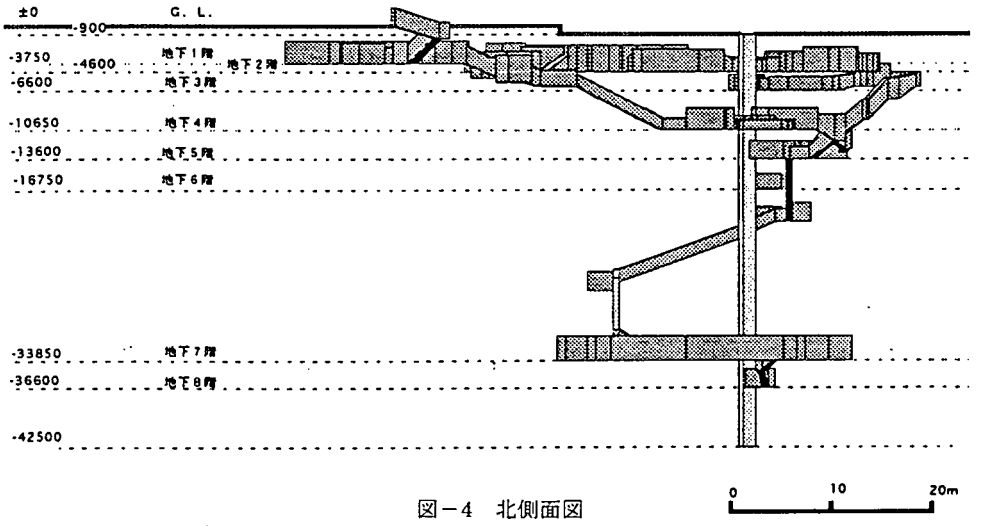
3. 地下都市デリンクユ

図－3、図－4は地下都市デリンクユ(観光用に公開される部分）の全体構成を示すもので，実測により得た平面及び天井高を簡略化して，地下都市内部を可視化したものである。過去には地下都市デリンクユはより広大な範囲におよんでいたと考えられるが現在は通路が塞がれており、図以外のところに立ち入ることはできなかった。

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を中心に地下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て，その各階層と外界を人が一人どうにか通ることのできる程の通路（階段）が結んでいる。



図－3　空間構成の模式図



図－4　北側面図

3·1　各階層の空間用途

地下１階には家畜小屋があり、その壁には飼料もしくは水を受けるのに適した形の壁龕が掘り込まれている(a)。また天井を見上げると竪穴をふさいだ跡が３個所見られ、その中で一番大きなものはおよそ長径 120cm×短径 100cm の楕円形に近い形をしており主に飼料を搬入するのに使用されたと考えられる。

地下１階から地下４階への通路(b)は人間一人がどうにか通れる程の広さである。

地下２階(c)にはキッチン、ワイン倉、家畜小屋、貯蔵庫がある。キッチンには床に炉の跡があり、その上部には竪穴をふさいだ跡がある。これは排煙のために設けられたものと考えられる。

地下３階(d)は地下２階とは吹き抜けでつながっており、換気シャフトに直接つながる室がある。

地下４階(e)には通路にそって比較的小さな部屋たくさんあるが、これらは寝室あるいは貯蔵庫であったとされている。

地下５階(f)には換気シャフトに面している室があり、そこは地下３階、地下４階、地下６階へそれぞれつながる通路の交わるところである。

地下６階(g)は、地下５階と地下７階を結ぶ通路に作られた数個の室のうち地下５階に近い２つの部屋である。この長い通路の途中には石の扉を備えた部屋が２個所ある。

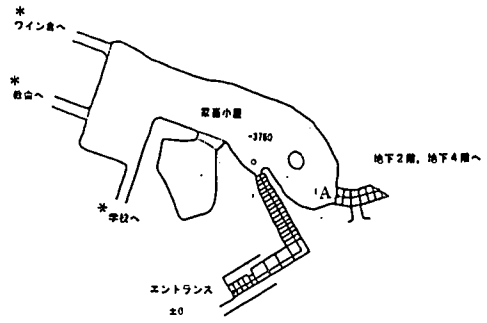
地下７階(h)には３本の柱が立つ矩形の室に十字の平面を持った教会と告解室が軸の方位を違えて付加されている。

そして他の階の天井面が粗削りであるのに対して、精巧とは言えないまでも矩形の室、教会、告解室及びこれらをつなぐ空間の天井面はヴォールト* に仕上げられている。その他には墓地につながる通路、この階から掘り降ろされた井戸、換気シャフトにつながると考えられる横穴が見られる。

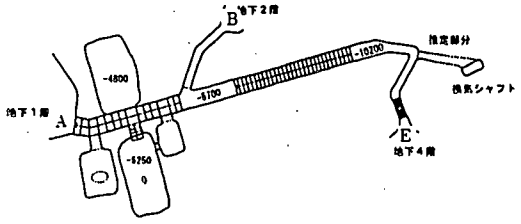
地下８階は換気シャフトに面した小さい室となっている。

---

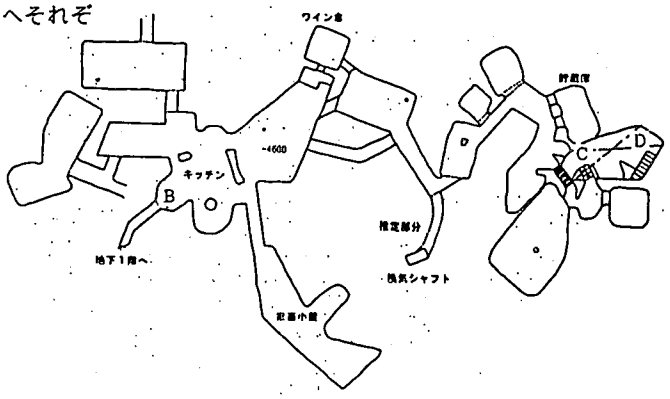
* アーチをもととした石造や煉瓦またはコンクート造の曲面天井の総称(彰国社　建築大辞典 1993)



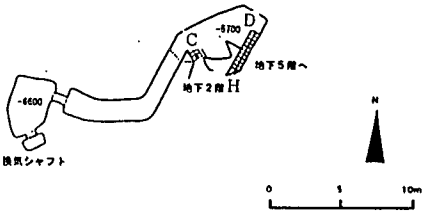
(a)　地下１階平面図
(＊については、現在塞がっているため分析対象外)



(b)　地下１階から地下４階への通路の平面図



(c)　地下２階平面図



(d)　地下３階平面図

図－5(a)～(h)　各階平面図
(図中の記号(A～I)は同じ地点を示す。)

換気シャフトは，その地表開口がエントランスのレベルより 90cm 低い位置にあり，約 150cm×70cm の長方形の断面形状でほぼ鉛直に掘り下ろされている。現在は地下 42.5m の所で埋まっているが，デリンクユにあったとされる 52 本の換気シャフトは地下 70～85m の地下水脈にまで到達し，換気シャフトとしての役割のほか，井戸としても利用されていたとされている[3]。

3·2 空間の分析

図 4 からわかるように地下 1 階～6 階（家畜小屋，キッチン，ワイン倉，寝室など[4]）と地下 7 階（教会），8 階との間のレベル差が大きい。このことから上層の階層は普段の生活に使用され，下層の階層は非常用として使用されたと考えられる。

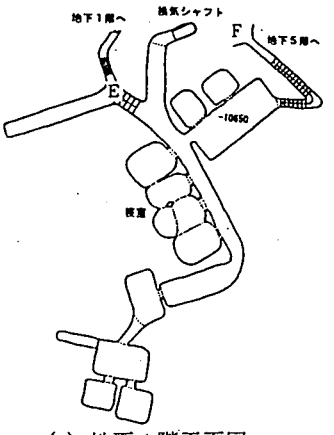
図－3 で見られるように換気シャフトは地下 3 階、4 階、5 階、8 階に大きな開口で直接つながっているが、部屋と換気シャフトをつないでいると考えられる小さな横穴も換気口のはたらきがあると推測される。

注目されるのは、換気シャフトが直接地下のフロアにつながる場合でも人々が主に活動したとされる場からある程度の距離をとっている点である。

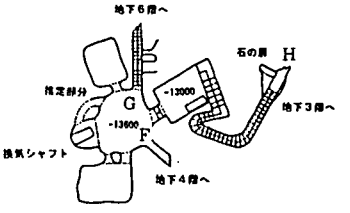
また現在，地下の住空間と外気との接点はエントランスと換気シャフトのみであるが，地下 1 階の家畜小屋，地下 2 階のキッチンの上部には竪穴を塞いだ跡があることから、過去には地上につながっていたと推測される。

これらの竪穴は飼料の運搬や、排煙、外部とコミュニケーションをとるために掘られていたと考えられるが、それによりある程度の採光が採られていたということ、また地下都市の換気システムに影響を持っていたということが推測される。

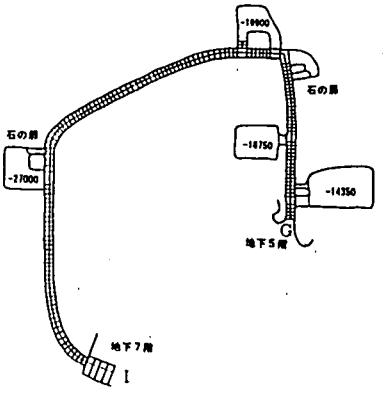
地下都市内の水平距離 5m 以上の階段、スロープの寸法(表－1),勾配(図－6)を示す。階段については観光施設を一般に公開する際にスロープを整備した可能性がある。勾配は 30° を大きく超えることはなく、傾向としては浅い階が緩やかで、深い階ではきつくなる。



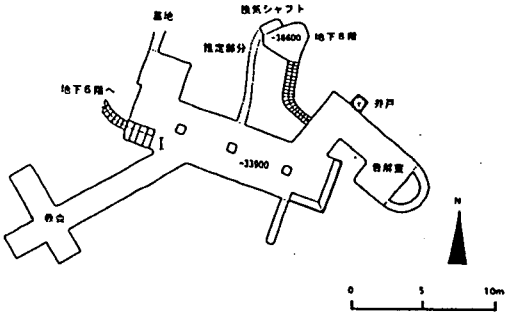
(e) 地下 4 階平面図



(f) 地下 5 階平面図



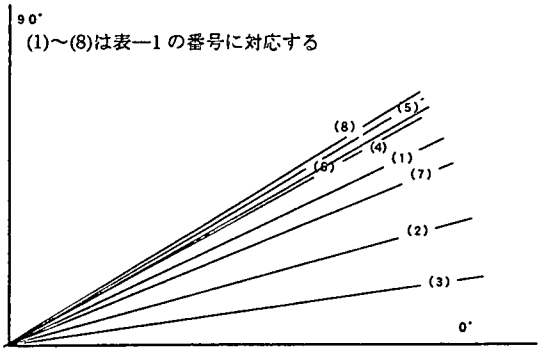
(g) 地下 6 階平面図



(h) 地下 7 階平面図

表－1　階段、スロープの勾配

位置	水平距離(mm)	レベル差(mm)	勾配(°)	蹴上げ(mm)	踏み面(mm)	階段数	幅(mm)	天井高(mm)
(1) 地上から地下1階	5200	2400	25	133	289	18	1100	1850
(2) 地下1階から分岐点	7500	1950	15	130	500	15	1100	1800
(3) 分岐点から地下2階	7900	1100	8			0	600	1700
(4) 分岐点から地下4階	8500	4500	28	150	283	30	1100	1300
(5) 地下3階から地下5階	12000	6850	30	167	293	41	700	1400～3200
(6) 地下4階から地下5階	5400	2950	29	148	270	20	600	1300～2800
(7) 地下5階から地下7階	46000	19300	23	154	388	125	600	1300
(8) 地下7階から地下8階	4500	2700	31	150	250	18	700	1200



図－6　階段、スロープの勾配

4.　測定結果

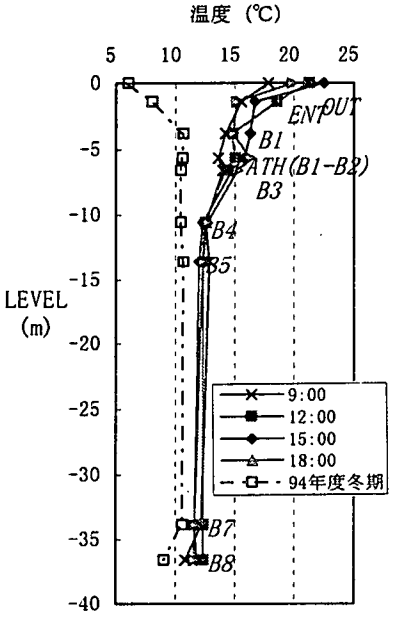
4·1　温熱環境

筆者らは1994年11月中旬に温度、1995年9月下旬に温度、湿度の測定を行ったが、1995年の調査に関しては9月22日、9時から18時まで3時間毎に、デジタル温湿度計により、温度·相対湿度を地下都市内の20地点と地上、合計21地点で測定した。また、内部発熱要素として照明器具の個数とそのワット数を確認した。

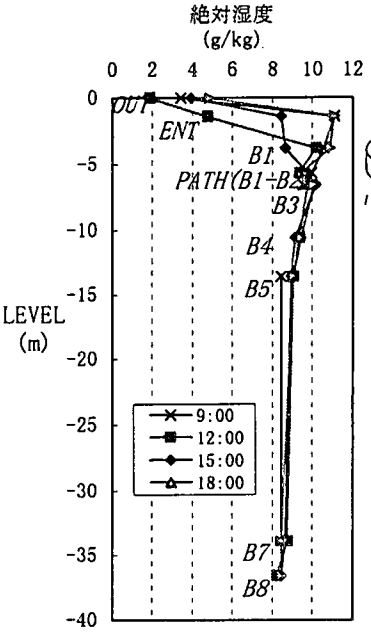
21地点のうち、代表9地点の温度·絶対湿度を(図－7)、(図－8)に示す。地下10m以深では外気温の影響をほとんど受けずほぼ恒温状態であることが確認できる。相対湿度は地下都市内では概ね90%以上であった。

4·2　空気の流れ

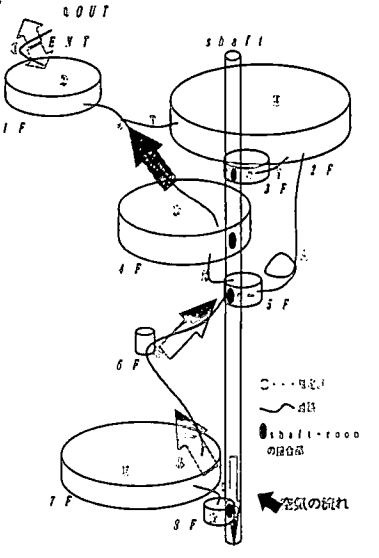
温湿度測定と同時に目測により、発煙管で発生させた煙の流れを、開口部(通路、シャフトと部屋の接合部)において観測した。時間により多少の変化はあるもののおおむね図－9(図は地下都市を模式的に表したもの)のような空気の流れとなった。



図－7 温度の垂直分布
(但し1994年は測定位値が異なる)



図－8 絶対湿度の垂直分布



図－9 空気の流れ
＊地上開口部の囲いのために測定できず

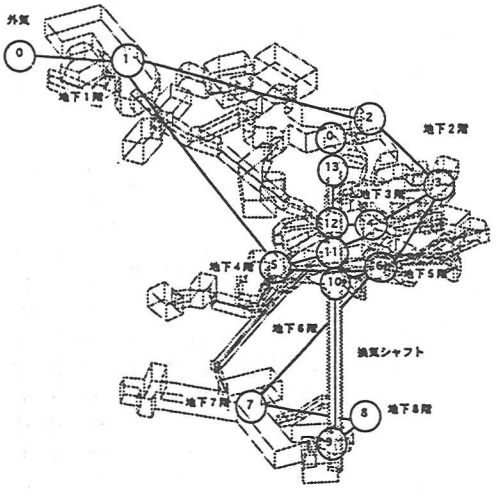
5. 換気網シミュレーション

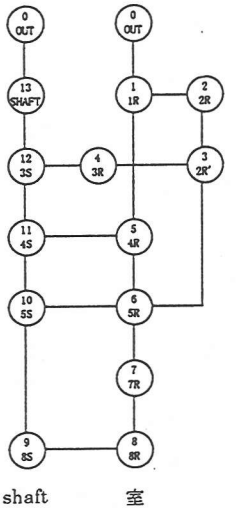
デリンクユ地下都市内の換気状況を再現し、当時の地下都市内の長期の環境を分析するために換気網シミュレーションを行った。測定した気温と、空気の流れのデーターから測定時の地下都市内環境が再現できるよう境界条件を定め、代表的な一日の温度変化を用いた周期定常計算で各季節の外気温変動による地下都市内の気温の変化と空気の流れを求めた。

計算プログラムには「流量仮定法による一層煙流動計算プログラム」[5]を利用した。このプログラムは開口でつながれた各室(室内は等温一様)の重力換気量を流量仮定法により計算するものである。

5・1 地下都市のモデル化

計算プログラムに即して複雑な地下空間を単純化するために、各フロアをひとつの空間とし垂直換気シャフトも地下都市のフロアとつながっている部分ごとに一つの空間とみなし、モデル化した(図―10)。そのとき①～⑬までの空間は図のような関係で開口で結ばれている。(空間⓪は外気)なお通路部分の抵抗の影響は開口面積に反映されている(表－2)。





図－10 空間構成のモデル化

表－2 抵抗の算出(合計抵抗に合うように空間間の開口面積を調整した。)

＜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 λ=0.03 (コンクリート)

＜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
ζin ：入口形状抵抗係数
ζout ：出口 〃
ζbend ：曲り 〃
ζ合分流 ：合分流 〃

▒▒▒ ：採用した合計抵抗係数
備考は曲りの角度と分合流の面積比・流量比

開口 No.	開口 節点	幅 W(m)	高さ H(m)	断面積 A	等価管径 d	長さ L(m)	摩擦抵抗 λ・L/d	形状抵抗 ζin	ζout	ζbend	ζ分流	ζ合流	ζ計		合計抵抗係数 λ・L/d+ζ	
		部屋-部屋														
1	OUT-1R	1.00	1.90	1.90	1.31	12.11	0.28	0.20	1.00	1.25			2.45		2.73	
2	1R-4R	1.10	1.80	1.98	1.37	31.25	0.69	0.20	1.00	0.13	-0.06	0.00	1.27	1.33	1.96	2.02
12	1R-2R	0.60	1.70	1.02	0.89	15.70	0.53	0.20	1.00	0.23	0.70	-0.50	2.13	0.93	2.66	1.46
13	2R-2'R	1.50	2.00	3.00	1.71	0	0	0	1.00	0			1.00		1.00	
14	2'R-3R	0.60	1.20	0.72	0.80	1.00	0.04	0.20	1.00	0			1.20		1.24	
15	2'R-5R	0.60	2.30	1.38	0.95	17.92	0.56	0.20	1.00	8.00			9.20		9.76	
3	4R-5R	0.80	1.60	1.28	1.07	0	0	0.20	1.00	0			1.20		1.20	
4	5R-7R	0.60	1.80	1.08	0.90	51.20	1.71	0.20	1.00	1.10			2.30		4.01	
5	7R-8R	0.60	1.30	0.78	0.82	6.13	0.22	0.20	1.00	0.50			1.70		1.92	
		部屋-シャフト														
18	3S-3R	0.60	0.90	0.54	0.72	0	0	0.20	1.00		1.50	-0.20	2.70	1.00	2.70	1.00
17	4S-4R	1.30	1.30	1.69	1.30	0	0	0.20	1.00		1.00	-0.20	2.20	1.00	2.20	1.00
16	5S-5R	1.80	1.70	3.06	1.75	0	0	0.20	1.00		0.80	-0.40	2.00	0.80	2.00	0.80
6	8S-8R	1.30	1.00	1.30	1.13	0	0	0.20	1.00		2.50	1.60	3.70	2.80	3.70	2.80
		シャフト-シャフト														
10	3S-SHAFT	1.50	1.40	2.10	1.45	6.60	0.14	0.60	1.00		-0.06	0.00	1.54	1.60	1.68	1.74
9	4S-3S	1.50	1.40	2.10	1.45	4.00	0.08		1.00		-0.06	0.10	0.94	1.10	1.02	1.18
8	5S-4S	1.50	1.40	2.10	1.45	3.00	0.06		1.00		-0.05	0.30	0.95	1.30	1.01	1.36
7	8S-5S	1.50	1.40	2.10	1.45	23.00	0.48		1.00		0.22	0.40	1.22	1.40	1.70	1.88

分流 合流

5·2　非定常計算

計算の基本となる空間と各開口の大きさ及び以下の境界条件の妥当性を測定結果との比較から確認する作業を行った。

(a)周壁との熱収支

オリジナル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が、本報のシミュレーションにおいては温度の高いガスは発生せず放射熱伝達の影響はほとんど無視できるので周壁との熱収支の設定は対流熱伝達のみとした。壁面温度については壁体を半無限体と近似して壁体表面温度変化を計算する。測定結果から室温は深度につれて収束するので 1994 年 11 月中旬と 1995 年 9 月下旬の調査の地下 7 階の温度測定値の平均、11.2℃を初期壁面温度とした。壁体(凝灰岩)の各熱定数のうちデータのない熱伝導率は比重量(1480kg/m³)との関係[6]より 0.26(kcal/m·h·℃)、比熱は岩石・コンクリートの値[7]を参考に 0.21(kcal/kg·℃)に推定した。

(b)内部発熱

発熱は定常と設定した。調査時の地下都市内の照明器具と観光客の人体の発熱から計算される値をもとに発熱量を設定した。発熱源の配置について、照明器具(7.20Kw)の位置は調査時に点灯されていたものの位置(地下都市内にほぼ均等に分散している)に応じて、観光客は床面積に比例して(0.12 人/m²、地下内 70 人)分散させた。

(c)外気温

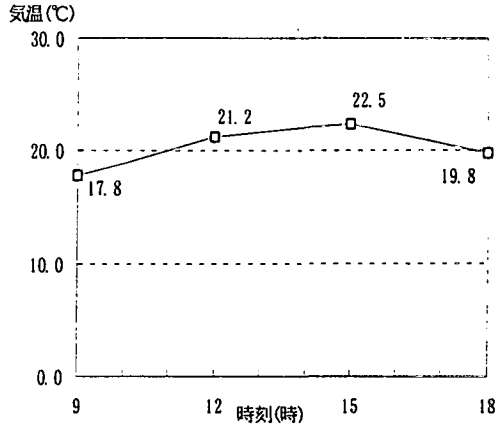
1995 年 9 月に測定したデータをもとに外気温の測定値を直線的に変動させた(図—11)。

(d)水分の移動

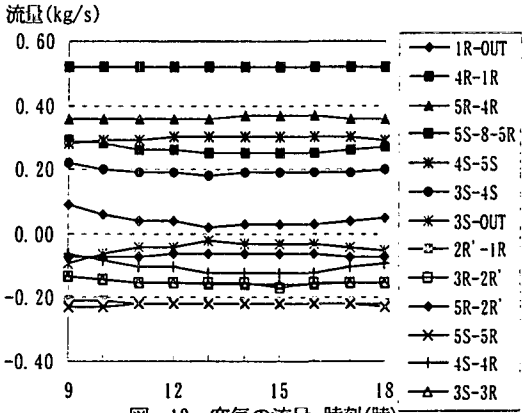
岩盤の吸放湿、6·2 で行う内部発熱に伴う放湿は考慮していない。

5·3　計算結果

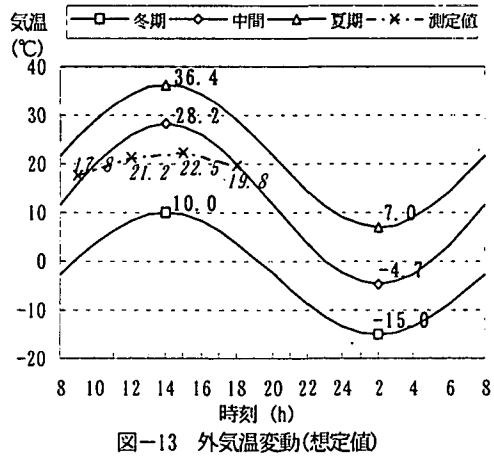
以上の条件の下で非定常計算を行い、調査時の換気状況(図—15)と比較した。空気の流れを図－12に示す。空気の流れは下層部で、4 階シャフト→5 階シャフト→8 階→5 階室→4 階室→4 階シャフトという一つの流れがあり、外気のシャフトからの流入はわずかである。5 階の室－シャフト間では両方向の空気の流れがあった。風向については観測データとほぼ一致した。



図—11　外気温変動(測定値)



図—12　空気の流量　時刻(時)
(流量の正負は正の場合、上表のA—BでA→Bへの流れを意味する)



図—13　外気温変動(想定値)

6. 想定条件によるシミュレーション

6·1 外気温の季節変動による比較

月別日最高、最低気温[8]から夏期、冬期、中間期の外気変動を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、正弦波で近似し(図—13)各季節の一日で周期非定常の換気シミュレーションを行なった。季節を問わず外気温が高いとき(20～36℃)には図—14のように、低いとき(-15～20℃)には図—15のように流れた(矢印の大きさが風量)。外気の地下都市への流入が一定以上ある時、各部屋に外気が流入したが、外気温が高く外気の地下都市への流入量が少ない時には空気は地下都市内だけで循環した。外気流入量の変化(図－16)を詳しく見ると、冬期に比べると夏期の流入量は非常に少なくほとんど流入しない時間も長い。また、流入方向が逆転するのは外気温26℃付近であるが、エントランスから流入する場合には流入量はごく少ない。シャフトからの流入量が大きく増加するのは、外気温が11.5℃付近から下降する場合で、シミュレーションを行なう上で設定した壁面温度(11.2℃)とほぼ一致した。

この結果は、壁体を深部で一定温の半無限体としたためと考えられ、岩盤温の季節変動を配慮するためにはより複雑な熱移動の解析が必要である。

6·2 内部発熱

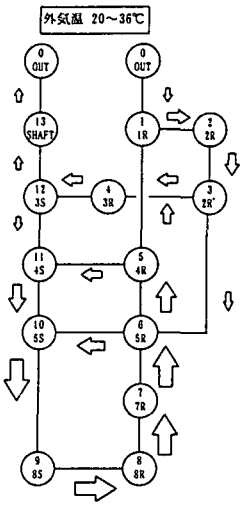
内部発熱に関して地下都市内の換気への影響を分析するために、内部発熱無し、発熱量2倍のモデルを、また地下4階までに居住空間がありそれより下層は非常用であったと考えられることからその状況を再現するために発熱量は同じで発熱源の位置が上層集中(地下1－2階)、下層集中(地下7階)のモデルを中間期の外気温の変動で周期定常計算した。

発熱量が2倍になっても外気の流入量はほとんど変化はなく外気温が高い時刻では、外気の流入量は少ない(図—17)。

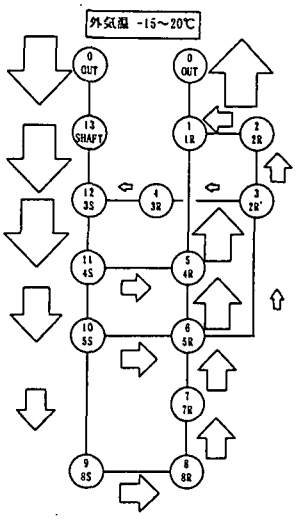
また発熱源が上層集中、下層集中としても空気の流れにほとんど変化はなかった。

6·3 環境評価

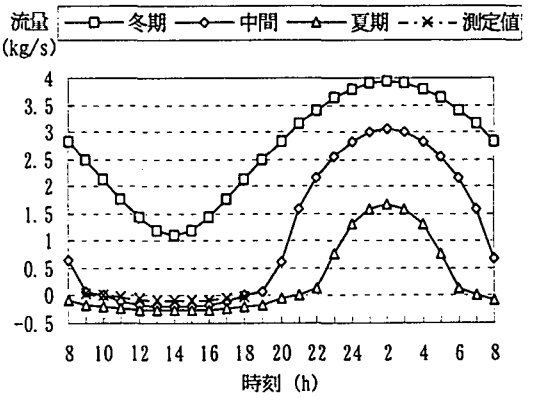
内部の発熱に関わらず、外気温が一定(およそ16℃)以下のとき外気流入があり、地下都市内の各室に供給されることがわかった。



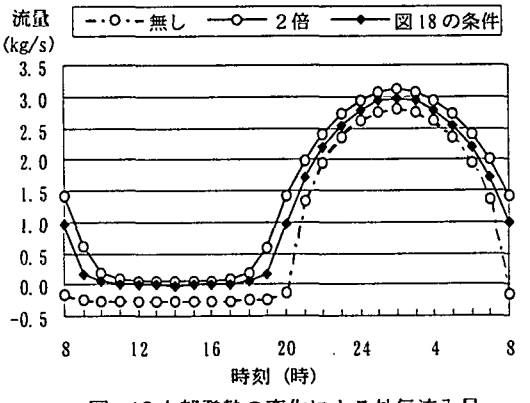
図－14 空気の流れ (外気温高)



図－15 空気の流れ (外気温低)



図－16 外気温変動による外気流入量



図－17 内部発熱の変化による外気流入量

発熱が地下で分散しているとき(図—18の条件)、外気流入量は 0.8kg/s(外気温 14℃)～3.0kg/s(外気温-5℃)であり、建築基準法のいう一人当たりの必要換気量を20m³/hで計算しても120～450人の換気量となる。このことからこの地下空間は数百人のオーダーで利用することができたと推測できる。

今回のシミュレーションで冬期は地下で生活するための十分な換気量があるが、中間期の昼間、夏期の終日においては、十分な換気量があるとはいえず、その時期にどのようにして地下空間で暮らしていたのかをさらに分析する必要がある。

7. おわりに

本報では地下住居の一例として地下都市デリンクユを例にとり、空間形態と換気システムの分析を行った。

換気システムについては外気温がおよそ 16℃以下で機能し、地下の各室に新鮮な空気が供給され、数百人の人々が地下都市内で生活できることが分かった。

文献

1) ファティヒ　ジモク著(原田武子訳)：カッパドキア、A Turizm Yayiniari Ltd., p.65、1988

2) Erguvanli, A. K. and. Yuzer, A. E.: PAST AND PRESENT USE ÖF UNDERGRÖUND ÖPENINGS EXCAVATED IN VÖLCANIC TUFFS AT CAPPADÖCIA AREA, 1977

3) オメル　デミル:カッパドキア, Ajans-Turk, p.68, 1988

4) GULYAZ, Murat E.: UNDERGRÖUND CITIES ÖF CAPPADÖCIA, Dunya,, P.67, 出版年不明

5 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、新洋社、pp.77-186

6) 斎藤平蔵：建築気候、共立出版、p.5、1974

7) 小島武男・中村洋：現代建築環境計画、オーム社、p.122、1983

8) 気象庁：世界地上気象付き集計リスト 1994年度、1994