ドライエリアを付設した半地下居室の熱環境性能

数値計算による分析と自然室温状態での長期実測

THERMAL PERFORMANCE OF A SEMI-UNDERGROUND
ROOM HAVING AREAWAYComputer analysis and long-term measurement for the test house
without auxiliary heating

松本真一*, 吉野 博**, 長友宗重***, 坂西 勉****, 野瀬光生****

Shin-ichi MATSUMOTO, Hiroshi YOSHINO, Muneshige NAGATOMO,

Tsutomu SAKANISHI and Mitsuo NOSE

In order to obtain fundamental information on thermal performance of a semi-underground room with areaway, long-term measurement for a twin-type test house on the campus of Tohoku University was made under the situation without auxiliary heating during 18 months from Dec., 1990 to May, 1992. This paper reports the measurement results and discusses thermal effect of the areaway by comparison with results conducted from previous measurement for the test house without the areaway. Results of computer simulations using a two-dimensional finite element program are also discussed.

Main findings obtained by the measurement and the simulations are summarized as follows:

- 1) From viewpoints of stability of room air temperature and energy conservation for heating and cooling, the thermal performance of a semi-underground room with south-facing large window and areaway is not so regardful because of greater heat gain and loss through it.
- 2) However, if the areaway is covered with glass during heating season, it is estimated that the performance becomes better.

Keywords : areaway, semi-underground room, natural room air temperature, heating and cooling load,
long-term measurement, computer simulation

ドライエリア, 半地下室, 自然室温, 暖冷房負荷, 長期実測, 数値シミュレーション

1. 序

半地下居室の熱環境計画に関わる基礎資料を得ることを目的として、筆者らは従来より、東北大学構内に建設した実大試験家屋を用いた長期実測を行ってきた。既に、①窓からの日射の透過を雨戸によって阻止し、暖冷房を行わない条件(実験1)¹⁾における結果、②暖冷房を行わず、透過日射がある条件(実験2)²⁾における結果、③暖冷房を行い、透過日射のある条件(実験3)³⁾における結果を報告した。また、実験3に続いて行った④間欠暖房状態での実測(実験4)⁴⁾については別途報告する予定である。

これまで筆者らは、南に面した地上部分の壁に開口を持つ半地下居室の自然室温の安定性や暖冷房に係る省エネルギー性を研究の対象としてきたが、通風、採光、心理的開放感などの観点からは、南面全面が開口となるドライエリア付きの半地下居室も今後普及していくものと思われる。しかし、ドライエリアを設けて開口面積を大きくすると、透過日射量が増える反面、冬期の熱損失も

大きくなることが予想され、室温の安定性や省エネルギー性がどの程度期待できるのか疑問である。従来、この点を検討した研究例も少ない⁵⁾。

そこで、次の段階の実測(「実験5」と呼ぶ)では、ドライエリアを持つ半地下居室の自然室温の安定性などの熱環境性能を明らかにすることを目的として、既設の半地下試験家屋¹⁾の一方の試験室にドライエリアを付設して長期実測を行い、以前に行った実測(実験2)との比較により、ドライエリアが室温変動などに及ぼす影響を調べることにした。また実測に先立ち、数値シミュレーションを行い、試験室に付設するドライエリアの設計や予測される実験結果に関する知見を得ることにした。

本報では、第一に長期実測に先立って行った数値計算の結果について述べ、第二にドライエリアを付設した試験家屋における実験5の実測結果を示し、実験2との比較に基づき、ドライエリアの影響を分析した結果について報告する^{注1)}。

* 東北大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

** 東北大学工学部建築学科 教授・工博

*** 鹿島建設 専務・工博

**** 鹿島建設 修士(工学)

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

Senior Managing Director, Kajima Corp., Dr. Eng.

Kajima Corp., M. Eng.

2. 二次元有限要素法による自然室温と熱負荷の計算

2.1 計算の目的

試験家屋に付設するドライエリアの設計に際し、次のような疑問点があった。すなわち、①室の床スラブとドライエリアの接合部は熱橋になり易く、室内の熱環境に大きな影響を及ぼすことが予想されるため、断熱材を施して縁を切りたいが、どのような断熱形状が適当か^{注2)}、②敷地の制約上ドライエリアの奥行きを約1.5m以内に抑える必要があるが、これが十分とれる場合と比べて、自然室温や熱負荷にどの程度の差が生じるかという点である。また、後に述べる実験5や、さらに先の段階として予定している実験(ドライエリアをガラスで覆い温室にする)の結果に対する大まかな予測を得ることに意義がある。そこで、設計と実験計画を支援する知見を得るため、二次元有限要素法を用いた自然室温の年間変動と年積算熱負荷に関する非定常数値シミュレーションを、試験室を想定した計算モデルを対象に行うことにした。

目的に対応した検討項目を、①ドライエリアの有無の影響、②床スラブとドライエリアの接合部の断熱方法の影響、③ドライエリアの奥行き(透過日射の多少)、④ドライエリアをガラスで覆って温室とした場合の効果の4点に整理した。

2.2 計算方法

2.2.1 計算モデル

試験家屋¹⁾の試験室と同様の規模と壁体構成の単室に奥行き1.4m(内法)のドライエリアが付設された状態を、

図1 計算対象の建物モデル

表1 計算に用いる熱物性値

材料及び部位	熱伝導率 [kcal/mh℃]	熱容量 [kcal/m³℃]
コンクリート	1.4	467.0
断熱材	0.03	6.0
土壌	1.0	400.0
家屋の地上部分	要素分割せず定常扱い	
熱伝達率 [kcal/m²h℃]	外気に接する境界: $\alpha_o = 20.0$ 室空気に接する境界: $\alpha_i = 8.0$	

表2 計算に用いる設定条件

統一する計算条件				計算モード
透過日射量 [kcal/h]	雨戸は施さない。日射の入射角特性を考慮して算出し、暖房量と見なす	気象データと計算時間	仙台市の標準気象データを用い、1時間刻みの年間計算を5年間繰返す。	・自然室温モード
換気量[m³/h]	0.0 (換気による熱移動を無視する。)	各節点の初期温度分布	仙台の標準気象データより算出される相当外気温の年平均値を、全節点に与えるものとする	・暖冷房モードⅠ* (室温20℃一定)
室内発熱 [kcal/h]	0.0 (人体・照明その他からの発熱はこれを無視する。)			・暖冷房モードⅡ** (室温18~26℃)

*) 室温を年中20℃に維持するように暖冷房を行う。**) 自然室温が18℃未満になる場合暖房して18℃に保つ。また、自然室温が26℃を越える場合には冷房により26℃に維持する。

図1のように想定し建物モデルとする。図2に計算対象の建物モデルから作成した二次元有限要素モデルを示す。計算領域は、ドライエリアの擁壁および半地下室の壁から10m離れた左右の鉛直線(断熱境界)と床下10mの固定

図3 地中断熱方法ならびに各種建物形状のモデル

図2 計算対象建物(図1)に対する有限要素モデル

温度境界(年平均相当外気温を設定)で囲まれた範囲とし、3角形1次要素を用いて分割する。一方、地上部分の壁体については要素分割せず、熱容量を無視して定常的に扱うものとする^{注3)}。この部分と有限要素で分割した部分との接合部は、断熱境界とする。地表面およびドライエリアの表面に相当する境界には、相当外気温を設定する^{注4)}。室内への透過日射量は、ドライエリアが窓に落とす影を3次元的に考慮した上で算出し、これを室空気への供給熱量と見なして簡便に扱う^{注5)}。計算の時間刻みは1時間とし、時間行進スキームにはWilsonらの陰解法¹³⁾を用いる。詳しくは文献1)の注2に記してあるので、参照されたい。

2.2.2 計算条件と計算種類

表1にモデル各部の熱物性の設定値を示す^{注6)}。また、そのほかの計算条件を整理して表2に示す。外乱には仙台の標準気象データを用い、自然室温と2つのモード(暖冷房モードI, 暖冷房モードII)の熱負荷を算出する。計算の目的(②~④)の検討項目)に対応させて、図3(a)に示したModel D1~D5およびModel D5Sの6種類、および図3(b)のModel Gの計算モデルを設定する。Model D5Sは、ドライエリアの奥行きが十分大きいと想定して影の影響を無視し、純粋な南鉛直面が受ける日射が窓ガラスに当たるものと設定したモデルで、Model D5と幾何的な形状の違いはない。検討項目の①に関する比較のため、図3(c)~(e)の通り、従来までに行った各種の建物モデルに対する計算結果⁹⁾を引用する。

2.3 計算結果

自然室温の年間計算結果を年平均値と年較差(最高月平均室温と最低月平均室温の差)に着目して整理し、図4に示す。また図5(a),(b)に、それぞれモードI、モードIIにおける年積算負荷の計算結果を示す。図中の破線は、冬期(11月~4月)の日中に、窓からの透過日射によって生じると計算された冷房負荷を外気導入による冷房でまかなうと想定した場合の負荷を表わす。但し、計算結果は、断面に平行な地中部分の壁体からの伝熱を無視した2次元モデルを用いて得られたものであるため、定量的な値そのものを議論することは危険である。そこで以下では、他のモデルとの相互比較を通して、定性的な傾向を考察するに留める。

2.3.1 ドライエリアの有無の影響

(1) 自然室温に及ぼす影響

図4において、Model S(床接地型), Model 1(半地下型), Model D1(ドライエリア付き半地下型)を比較すると、半地下室にドライエリアを付設すると自然室温の年較差が大きくなり、床接地型をも上回ることが判る。床接地型よりも冬期間の透過日射量が少ないことが主な原因と推察される。ドライエリア付き半地下型の年平均室温は半地下型よりも1.5°C高い程度である。

(2) 暖冷房負荷に及ぼす影響

図5(a)のモードIにおいて、Model SとModel D1を比較すると、ドライエリア付き半地下型の暖冷房負荷は総量としても、暖房・冷房の比率としても床接地型のそれに近いことが判る。図5(b)のモードIIにおけるドライエリア付き半地下型の場合、暖房負荷は床接地型とほぼ等しく、冷房負荷は床接地型の約半分である。

2.3.2 ドライエリア周りの断熱方法の影響

(1) 自然室温に及ぼす影響

図4においてModel D1~D4を比較すると、ドライエリア周りの断熱材の形状は年平均室温にはほとんど影響せず、室温の年較差に影響することが判る。しかしながら、Model D1とD4の差は、高々0.5°Cである。

(2) 暖冷房負荷に及ぼす影響

図5より、暖冷房モードによらずドライエリア周りに断熱材を施すと負荷が低減することが判る。しかしながら、自然室温の場合と同様、Model D1~D4における負荷

図4 自然室温の年較差と年平均値の比較

図5 単位床面積あたりの暖冷房負荷の比較

の差もわずかである。

ドライエリア周りの断熱材の形状が自然室温や負荷に及ぼす影響は、上屋(窓を含む地上部分)の壁体の断熱性能が及ぼす影響に比べて小さいことが推察される。

表3に、モードIの場合の1月における部位別の熱損失の計算結果を整理して示す。地下部分(地下壁や床スラブ)からの熱損失は、上屋の壁体の熱損失の14%~24%程度であり、推察通りである。しかしながら表によれば、床スラブからの熱損失は断熱材を施すことにより最大で60%程度に低減することも読み取れ、地上部分、特に窓の断熱性能が向上すれば、ドライエリア周りの断熱材が熱負荷や自然室温に及ぼす影響は相対的に大きくなるものと予想される。

但し、今回行った2次元の計算から部位別の熱損失を論じるには限界があり、今後、3次元モデルを用いた計算により、ドライエリア周りの断熱材の影響を定量的に検討する必要がある。

表3 1月における部位別熱損失量の比較(Model D1~D5)

ドライエリア付 半地下型 Model No.	地下壁からの熱損失 [Mcal/month]	床スラブからの熱損失 [Mcal/month]
Model D1	13.7 (100%)	19.1 (100%)
Model D2	13.7 (100%)	15.5 (81%)
Model D3	13.7 (100%)	12.6 (66%)
Model D4	13.7 (100%)	12.6 (66%)
Model D5	7.7 (56%)	11.8 (62%)

上屋からの熱損失: 138.9 [Mcal/month]

2.3.3 ドライエリアの奥行き(透過日射の多少)の影響

(1)自然室温に及ぼす影響

図4においてModel D5とModel D5Sを比較すると、後者、すなわち透過日射量が十分得られる場合の自然室温は、年平均値が床接地型と同程度まで高くなり、年較差は半地下型と同程度にまで縮小することが判る。

(2)暖冷房負荷に及ぼす影響

図5(a),(b)におけるModel D5とModel D5Sの比較より、ドライエリアの奥行きに違いがあっても暖冷房負荷の総量には大差がないが、これが大きく、透過日射量が多い場合、特に冬期の冷房負荷(白抜きの棒グラフの破線より上の部分)が全体に占める割合が大きくなることが判る。冬期においても日中の日射遮蔽が必要となる可能性がある。

2.3.4 ドライエリアをガラスで覆った場合の効果

(1)自然室温に及ぼす影響

図4より、温室付き半地下型(Model G)の自然室温は、ほかのモデルに比べて全体的に高温で、年較差も大きいといえる。これは温室を一年中閉じたままにし、夏期においても温室と外気との換気を考慮しない計算条件としたのが原因である。夏期に温室を開放すれば、室温は床

接地型のプロットの方に近づくことと推察される。

(2)暖冷房負荷に及ぼす影響

図5(a),(b)より、Model Gの暖房負荷はそのほかのモデルに比べて小さいことがわかる。冬期の日中の冷房負荷を外気冷房でまかない、夏期には温室を開放することにより冷房負荷を小さく抑えれば、温室付き半地下型の冷房負荷はModel D1の冷房負荷と同じくらいとなることが予想され、負荷の総量は▼印程度まで低減する可能性があると思われる。

3. ドライエリアを付設した試験家屋における

自然室温状態での長期実測(実験5)

3.1 実験の目的

1章(序)で論じた通り、本研究で注目している自然室温の安定性などの熱環境性能の観点から、ドライエリアがどのような影響を及ぼすかを実験的に明らかにすることが課題である。そこで、既設の2室系試験家屋の一方の試験室にドライエリアを付設した上で長期実測(実験5)を行い、その結果をドライエリア付設以前に自然室温状態で行った実験²⁾と、①自然室温の年較差と年平均値の相違、②重回帰分析に基づく、自然室温に及ぼす外気温と透過日射量の寄与の相違、③平均ふく射温度の推定値の相違の3つの観点から比較することにした。

3.2 ドライエリアを付設した試験家屋の概要

3.2.1 ドライエリアの設計概要

東北大学構内にある半地下居室の2室系実大試験家屋の西側の試験室(C室)²⁾南側に、1990年7月にドライエリアを建設した。ドライエリアを付設した試験家屋の平面図、東西方向ならびに南北方向の断面図をそれぞれ図6、図7、図8に示す。試験室の壁体構成など、試験家屋の詳細については文献1)を参照されたい。

ドライエリアの平面形状は東西に長い2.8m×1.6mの矩形であり、深さは約1.4mである。ドライエリアの壁がC室の地下壁と接する部分には100mm厚の発泡ポリスチレン断熱材を挟み込み、熱的な縁を絶つようにした。C室の南壁面は全面が開口であり、面積は5.8m²である。この開口部には、そのほかの部分の窓と同様に複層ガラス(透明ガラス3mm+空気層5mm+透明ガラス3mm)の引き違い窓が設けられている。床スラブとドライエリアのスラブとの接合部には厚さ100mm厚の発泡ポリスチレン断熱材をL字型に施した。この断熱材形状は、先に示した数値計算のModel D4に対応する。計算結果より、窓における熱損失・熱取得が相対的に大きいため、この部分の断熱にはさほど効果がないことが予測されたが、今後、断熱材入りの雨戸を冬期の夜間に施した状態での実測などを行う可能性を見越して設置した。そのような場合に効果が期待できることは、計算から予測できたところ

図6 試験家屋の平面図

図7 試験家屋東西方向の断面図(A-A'断面)

(2.3.2項)である。それ以外の地中断熱の仕様は、ドライエリア付設以前と同様である。すなわち、D室の地下壁周囲には、地表より0.3mの深さに幅1.35m、厚さ100mmの「水平断熱材」と呼ぶ断熱材が施されており、ドライエリアを付設したC室には、地下壁と地表が接する部分のみ、幅0.5m、厚さ100mmの断熱材が施されている。

3.2.2 総括熱貫流率および気密性能

設計図書より算出した、ドライエリアを付設したC室のドライエリアに面した窓を含む地上部分の総括熱貫流率は、25.3kcal/hKである。この値はドライエリア付設以前の値(C室、D室とも15.6kcal/hK)の約1.6倍である。

従来までの実測と同様、換気による熱授受の影響を最小限に抑えるため、ドライエリア竣工後、実測を開始する前に、サッシ部分やドア周りの目につく隙間をシールし、加圧法により気密性能を測定した。その結果、単位床面積あたりの相当開口面積は、ドライエリアを付設したC室側1.38cm²/m²、D室側1.31cm²/m²であった。両試験室ともほぼ同等に気密であるといえる。

3.3 実測方法ならびに実測期間

測定項目、測定装置、測定箇所ならびにデータ収録方法は実験2とほぼ同様であるので、文献2)を参照された。但し、図8に示す測定箇所、ドライエリア下の地

図8 試験家屋の南北方向の断面図(B-B'断面)

中温度やドライエリアのスラブ各部の温度を0.3mmφのCC熱電対により測定することにした。3ヶ所の地中温度は、1本の塩化ビニル管(内径26mmφ、肉厚2mm)の所定の位置に熱電対を釣り下げ、隙間を現場発泡ウレタン材で充填して作成したプローブで測定する。

ドライエリアを付設したC室南窓面の内側の影にならない位置に日射計を南鉛直面に沿って設置する。C室への透過日射量は、ドライエリアにより生じる影の形状を計算によって求めた上で、南窓の日のあたる部分にはこの日射計による測定値を、また、影になる部分および北窓については、別途測定した水平天空日射量にガラスの透過率と形態係数を勘案して算出する。

長期実測(実験5)は、暖冷房を行わない自然室温の状態、1990年12月6日から1992年5月22日までの534日間にわたって行った。

3.4 長期実測結果

図9および図10に実測期間中の各部の日平均温度、日積算透過日射量の長期変動を示す。以下に述べる温度の測定点は、図7、図8に●印で記した。

3.4.1 透過日射量

1991年5月から1992年4月までの年積算透過日射量は、C室側が1721Mcal/year、D室側が567Mcal/yearであり、前者は後者の約3倍である。ちなみに、ドライエリア付設に伴い、南窓の面積は付設前の3.4倍となっている。

3.4.2 室温

測定期間中の最高温度はドライエリアのあるC室が1991年8月2日の26.0℃、D室が9月6日の23.2℃であった。最低温度は両室とも1992年2月1日に記録し、C室が7.8℃、D室が9.4℃であった。実測期間後半の1991年5月から1992年4月までの年平均室温は、C室が16.6℃、D室が15.6℃であり、ドライエリアを持つC室の方が1.0℃高い。年較差は、外気温が28.9℃、C室が18.2℃、D室が13.8℃で、ドライエリアを持つC室の方が、D室に比べて4.4℃大きい。両室温の変動は外気温に比べて小さいが、

図9 各部の日平均温度・日積算透過日射量の長期変動(1990年12月6日~1992年5月22日)

図10 ドライエリア床表面および床下の日平均温度の長期変動(1990年12月6日~1992年5月22日)

D室に比べ、ドライエリアを付設したC室の方が大きく、外気の影響をより強く受けていると考えられる。

両室の温度差を見ると、実測開始後から1991年2月中旬までと1991年11月中旬から翌年2月初旬までは、D室の方が最大で2.1°C高い。また、1991年2月中旬から11月中旬までは、C室の方が最大で3.4°C高くなる。C室南面の窓面積が増大したために熱貫流量が増え、外気温の変動を受け易くなった影響が顕著に現れている。

3.4.3 試験室周りの地中温度

地表から1.0mの深さの地下壁脇の年平均温度は、C室側14.6°C、D室側14.5°Cであった。年較差はD室側が10.7°C、C室側はその約1.4倍の14.2°Cである。

これらの温度の高低関係を両室間で比較すると、冬期(測定開始~1991年4月初旬, 1991年11月~翌年4月中旬)にはC室側の方が低温であり、1991年4月中旬から10月まではC室側の方が高温である。C室側とD室側には約20日間に相当する位相のずれがある。床下3.14mの温度は、両室間でほとんど差がなく、変動幅も小さい。測定期間中の平均は両室側とも15.2°Cで、およそ13~18°Cの間を変動している。

3.4.4 ドライエリア下の地中温度

ドライエリア下の地中温度の長期変動を図10に示す。各温度の測定位置は、図8を参照されたい。1991年4月から8月、1992年4月以降は、外気温よりもドライエリア床表面温およびL字型断熱材上の温度の方が高温になっており、それ以外の期間では外気温とほぼ等しい。これは、夏期に近付くにつれて太陽高度が徐々に高くなり、ドライエリアの床部分にあたる日射量が増え、ドライエリア床スラブに吸収されるためと推察される。

一方、L字型断熱材下では、変動の振幅も外気に比べて小さくなり、外気温、日射の影響が緩和されている。この傾向は深さが増すほど強くなり、深さ1.14mでは、数日周期の変動がほとんどなくなっている。

ドライエリア下3.14mの地中温度は、測定期間中の平均値が14.5°Cである。1991年5月に最低13.3°C、11月に最高16.1°Cを記録した。ドライエリア下3.14mとC室床下3.14mとを比較すると、平均温度でドライエリア下の方が0.7°C低く、期間変動はC室床下の方が大きい。

3.5 冬期・夏期における室温の日変動

3.5.1 冬期における日変動

図11 冬期における各部温度の日変動
(1991年2月18日~2月20日)

実測期間中に最低外気温を記録した1991年2月20日を含む3日間の両試験室の温度と試験室周りの地中温度の変動を図11に示す。両試験室の温度は、曇りの2月19日には一日中D室の方が高いが、晴れの2月18日と20日には、C室の方が日中に高温、夜間に低温となっている。2月20日における室温の日変動幅は、C室が10.0°C、D室が5.4°Cであり、前者は後者の約1.9倍である。ドライエリアに面した全面窓を持つC室では、日中にD室側よりも多くの日射熱取得がある反面、夜間の熱損失も相対的に大きいため、日変動が相対的に大きくなるものと推察される。

床下3.14mの地中温度は両室間で差がなく、約15°Cでほとんど安定している。地下壁脇の地中温度もほとんど一定であるが、ドライエリアを持ち、地中に水平断熱材のないC室側の方が2.5°C程度低温である。

3.5.2 夏期における日変動

図12に、実測期間中に最高外気温を記録した1991年8月22日を含む3日間の両試験室の温度と試験室周りの地中温度の変動を示す。室温はこの期間常に、ドライエリアを持つC室の方が高く、D室との差は3日間平均で2.2°Cである。但し、両室の温度差は夜間に比べて、透過日射のある日中の方が顕著で、8月22日の日中には4.9°Cに達している。この日の室温の日変動幅は、C室が6.5°C、D室が3.1°Cであり、ドライエリアを付設したC室はD室の変動幅の約2.1倍となっている。

床下3.14mの地中温度は両室側とも約15°Cでほとんど一定である。地下壁脇の地中温度もこの期間ほとんど一定であるが、ドライエリアを持ち、地中に水平断熱材のないC室側の方が2°C程度高くなっている。この温度の高低関係は図11に示した冬期の場合と逆であり、C室周りの土壌の方が外気温変動の影響を受けやすいことが推察される。

3.6 ドライエリアが室温と平均ふく射温度に及ぼす影響に関する分析

図12 夏期における各部温度の日変動
(1991年8月22日~8月24日)

3.6.1 実験2における室温の年周期変動性状との比較

(1)比較の目的と方法

本報で長期変動を図示したドライエリアを付設したC室(実験5)における室温の年較差と年平均値と、付設以前に同じ条件で実測を行った際のC室(実験2)²⁾におけるそれらと比較することにより、ドライエリアの有無が自然室温の年周期変動性状に及ぼす影響を調べる。但し、実験2と実験5では、期間中の外気温や日射量が異なるため、それぞれの実験時のD室温の年較差と年平均値で基準化して比較する。

(2)比較の結果

図13にD室温で基準化した室温年較差と年平均値の関係を示す。横軸にはC室の年平均温度からD室の年平均温度を引いた値、縦軸にはC室温の年較差をD室温のそれと割った値をとっている。実験2におけるC室温の年較差はD室温年較差の約1.1倍、ドライエリア付設後の実験5におけるC室温の年較差はD室側の1.24倍である。実験2における年較差の比と実験5におけるそれを比較することにより、ドライエリアの付設によりC室の室温年較差は、付設以前の約1.1倍になったことが判る。また、ド

図13 実験2と実験5における自然室温変動性状の比較

ライエリアの付設によりC室温の年平均値が1.3℃高くなっている。ドライエリアの影響は自然室温の年較差と年平均値に明確に現れているといえる。

3.6.2 室温と外気温および透過日射量の関係に関する重回帰分析

(1) 分析の目的と方法

図9によれば、両試験室の日平均温度の変動は、外気温に数日周期で現れる鋸歯状の変動に追従していることが判る。その傾向はドライエリアのあるC室の場合により顕著である。ドライエリアの有無により、日平均室温に及ぼす外気温と透過日射の影響の度合に違いが生じることが推察される。この点を明らかにするため、実験2と実験5について、外気温と透過日射を説明変数として重回帰分析を行う。外気温と透過日射の影響の度合(寄与度)は、平均が0で分散が1となるように基準化した説明変数に対する偏回帰係数、すなわち標準偏回帰係数の差となって現れることが予想される。当然のことながら、実験2と実験5では、外気温、透過日射量などの外界気象条件が異なるから、このような統計的手法を用いることは比較を行う上で都合がよい。そこで、C室の日平均室温を前日および当日の日平均外気温と日積算透過日射量で説明するものとして、それぞれの実験から得た1年分のデータ(実験2:1987年1月~12月, 実験5:1991年1月~12月)を用いた分析を行う^{注7)}。

(2) 分析の結果

実験2と実験5について分析を行ったところ、重回帰係数がそれぞれ、0.922, 0.969の重回帰式が得られた。表4にそれぞれの説明変数の標準偏回帰係数を示す。これによると、両実験とも、透過日射よりも外気温の方が相対的に強く室温に影響しているといえる。次に、標準偏回帰係数を両実験の間で比較すると、当日の外気温と透過日射に対する係数が、実験5の場合に大きいことが判る。また、前日の外気温に対する標準偏回帰係数は、わずかに実験2の方が大きい。これは、実験2におけるC室の方が土壌に接している部分が多く、外気温変動の影響が時間遅れを伴って現れる度合いが強いことを反映しているものと推察される。

表4 重回帰分析の結果(C室側)

説明変数	標準偏回帰係数	
	上段: 実験2	下段: 実験5
X_1 : 当日の平均外気温	0.425**	0.573**
X_2 : 前日の平均外気温	0.554**	0.524**
X_3 : 当日の積算透過日射量	0.121*	0.243**
X_4 : 前日の積算透過日射量	0.738 × 10 ⁻³	0.032**

*: 有意水準 5 %

**: 有意水準 1 %

これらのことから、ドライエリアに面して大きな開口を持つ半地下室は、地上部分のみに窓を持つ半地下室に比べて、外気温や日射の影響を直ちに受けて室温が変動し易いといえる。

3.6.3 平均ふく射温度の比較

(1) 分析の目的と方法

ドライエリアに面して大きな開口部を持つ場合と地上部分にのみ開口を持つ場合とでは、平均ふく射温度(MRT)も違った傾向を示すはずである。それぞれの試験室に対して平等に14点、室内表面温度を測定しているので、それぞれの測定点の分担面積を仮定した上で、面積加重平均により平均ふく射温度を求め、実験2と実験5の間で比較することにした。データには、それぞれの実験から得られた月平均の表面温度を18ヶ月分用いる。

(2) 分析の結果

図14と図15にそれぞれ、実験2と実験5における月平均の両試験室の温度、外気温、室温との差で表わした平均ふく射温度を示す。図14の実験2の場合、両室の平均ふく射温度にほとんど差はなく、期間中、室温の方が高い値を示している。図15の実験5についてみると、ドライエリアのあるC室では夏期に、平均ふく射温度が室温よりわずかに高く、冬期には逆に室温の方が高くなっている。これに対して、窓面積が小さいD室の平均ふく射温

図14 実験2における月平均MRTの推移

図15 実験5における月平均MRTの推移

度は期間中、室温にはほぼ等しい。これは、南側窓面積がドライエリアのあるC室側の方が大きく、その表面温度が外気温に大きく影響されるためと考えられる。

4. 自然室温の年変動性状に関する計算値と実測値の比較

4.1 比較の目的と方法

本報における数値計算は、試験家屋に対するドライエリアの付設に際して、その設計計画の支援と実験計画の支援を目的として、自然室温や熱負荷の概略を多数の2次元モデルの計算結果の比較に基づいて相対的に検討したものであり、実験結果や計算結果の検証を目的としたものではない。しかしながら、長期実測から得られた結果と計算結果を対照させることは、2章に示した計算結果がどの程度に評価でき、どこまで知見としてとらえて問題がないかを確認する上で必要である。そこで図13と同様の方法で、D試験室の温度で基準化したC試験室の温度の年較差と年平均値(ドライエリア付設前の実験2および付設後の実験5)と、D室に対応する計算モデル(Model 4)の室温で基準化したModel 1, D4の室温年較差と年平均値の計算結果との関係を比較する。Model 1はドライエリア付設前のC室に対応し、Model D4はドライエリア付設後のC室に対応する計算モデルである。

4.2 比較の結果

図16に結果を示す。ドライエリアを持つ実験5のC室とModel D4を比較すると、年平均室温は 0.5°C 計算値の方が高く、Model 4で基準化したModel D4の室温年較差は、D室(実験5)で基準化したC室(ドライエリア付設時、実験5)の室温年較差よりも0.01大きいことが判った。値そのものに違いはあるものの、ほかの種類の計算結果との相対的な関係は、実測結果とよく対応しているといえる。従って、ほかのモデルとの比較から物をいう限りにおいて、自然室温の年変動性状に関する計算結果の解釈は妥当と考えられる。

図16 自然室温の実測値と計算値の比較

5. まとめ

ドライエリアを持つ半地下居室の自然室温変動や熱負荷などの熱環境性能を明らかにすることを目的として、東北大学構内にある半地下居室の実大試験家屋の一方の試験室の南側にドライエリアを付設し、それに面する全面窓を設けた状態で自然室温や地中温度などを約18ヶ月間にわたり長期実測した。その結果、

- (1) ドライエリア付設以前に実測した地上部分のみに開口部を持つ試験室における自然室温に比べ、年較差は1.1倍、年平均室温は 1.3°C 高くなる。
- (2) また、ドライエリアを持つ試験室における室温の日変動幅は、ドライエリアを持たず地中に水平断熱材を施した試験室の約2倍である。
- (3) ドライエリアに面した全面窓から、より多くの透過日射が得られる一方で、外気温変動の影響を強く受けるのが(1)と(2)の原因である。
- (4) 同様の理由により、ドライエリアを付設した試験室の平均ふく射温度は、夏期には室温より高くなり、冬期には室温より低くなる。

ことなどが知見として得られた。

また、上記の長期実測の計画段階で、ドライエリアの設計と実験計画の支援を目的として、2次元有限要素法に基づく年間自然室温変動と熱負荷に関する数値シミュレーションを行った。その結果、

- (5) (1)に述べた自然室温の年間変動に関する実測結果と同様の性状を示す計算結果が得られた。
- (6) 但し、ドライエリアの奥行きを十分とり、さらなる日射熱取得がある場合には、室温の年較差が縮小し、地上部分のみに窓を持つ型とさほど変わらない状態になる可能性がある。
- (7) ドライエリアを持つ半地下室の熱負荷は、これのない場合の負荷よりも大きくなることが予想される。
- (8) (3)に示した知見は、部位別熱損失量の計算結果からも推察できた。窓部分など地上の壁体を介しての熱授受が比較的大きい場合、例えば、熱橋になり易いドライエリアと床スラブとの接合部の断熱は、自然室温の年較差や熱負荷にさほど影響しないものと推察される。
- (9) 冬期にはドライエリアをガラスで覆い温室とし、夏期には温室を開放すれば、負荷を地上部分のみに窓を持つ半地下型と同程度か、それ以下に低減できる可能性がある。

ことなどが判った。これらは、簡単な2次元モデルを用いて得られたものであるため、特に(6)~(9)に示した予測・推察結果については、試験家屋における実験や詳細な3次元計算モデルを用いた数値計算などにより、定量的に確認する必要がある、今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、平成3年度文部省科学研究補助金奨励研究(A)「ドライエリア付き半地下居室の熱環境性能に関する研究(課題番号03750487, 研究代表者: 松本真一)」および4年度「半地下居室用付設温室の最適設計に関する基礎的研究(課題番号04750561, 研究代表者: 松本真一)」によるものである。また一部は、東京住宅技術研究所からの委託研究「数値実験による半地下住宅の熱的性能に関する研究」によるものである。なお、数値計算によるドライエリアと床スラブの接合部に対する断熱方法の検討に関しては、ミネソタ大学Underground Space Center, R. L. Sterling 博士との議論が参考になった。ここに記して感謝の意を表します。

注

- 1) 本報は、日本建築学会東北支部研究発表会に発表した内容^{7),9)}および日本建築学会大会学術講演梗概集に発表した内容⁸⁾、空気調和・衛生工学会講演会講演論文集に発表した内容^{10),11)}、を修正・加筆したものである。
- 2) 筆者らは従来、半地下室の地下壁が地盤面と接する部分に対する断熱材の形状が自然室温の安定性及熱負荷に影響を及ぼすことを、試験家屋を用いた長期実測¹⁾⁻³⁾と数値シミュレーション⁶⁾の両面から明らかにし、最適な地中断熱方法について検討してきた経緯がある。①の疑問点は、これまで研究結果を踏まえて提起したものである。
- 3) 図1のドライエリア付き試験室を想定した建物モデル地上部分(窓、側壁、天井)に対する単位床面積当たりの総括熱貫流率は、 $1.803\text{kcal/m}^2\text{hK}$ である。2次元有限要素モデルの床面積は 5.4m^2 (奥行きは単位長さ1m)である。そこで、両者を掛けて 9.74kcal/hK をモデル地上部分の壁体に対する総括熱貫流率とした。モデル地上部分の壁体の外気側には、試験家屋の壁体構成と同様に、外気に通じた通気層、小屋裏があるものと想定し、これらの部分の空気を外気と見なし、日射は当たらないものと設定している。
- 4) 夜間ふく射量をBruniの修正式¹²⁾より求めて相当外気温に含めた。但し、雲高は中層(3km)で年中一定、また地表面の吸収率は、長波長・短波長ともに0.9とした。
- 5) 各時刻ごと毎に算出した建物モデルの窓を通過する日射量を建物の室容積で割り、単位時間・単位室容積あたりの供給熱量と見なす。2次元モデルの室容積 12.96m^3 に供給熱量に置き換えた透過日射量を掛けて、モデルの室空気への供給熱量とした。温室付き半地下モデルの場合も、温室と居室に透過する日射量をそれぞれ3次元で計算した上で、2次元モデルの室空気への供給熱量に換算した。
- 6) 土壌の熱物性値は、試験家屋の敷地に近い東北大学工学部運動グラウンドにおいて測定された値¹⁴⁾であり、試験家屋の敷地のそれとは異なる¹⁵⁾。しかしながら、本報の数値計算を行った当時、後者の値はまだ得られていなかった。

- 7) 当初、数日周期の外気温変動に対する室温の位相遅れを考慮して、外気温、透過日射とも5日前のものまで説明変数に含めた分析を行ったが、前日以前の説明変数は有意ではなかった。

参考文献

- 1) 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, pp.33-43, 1987.4.
- 2) 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の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, pp.23-32, 1988.5.
- 3) 長谷川房雄, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一, 坂西 勉: 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, pp.1-10, 1992.5.
- 4) Yoshino, H., Matsumoto, S., Nagatomo, M. and Sakanishi, T.: Five-year Measurements of Thermal Performance for a Seim-underground Test House, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.7, No.4, Pergamon Press, pp.339-346, 1992.10.
- 5) 松尾 陽, 井上 隆, 永田明寛, 赤司泰義: ドライエリア付き地下居室の室温及び結露に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.705-708, 1990.10.
- 6) 長谷川房雄, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一: 半地下居室の自然室温・負荷に及ぼす地中断熱方法の影響に関する数値実験, 日本建築学会計画系論文報告集, 第386号, pp.18-27, 1988.4.
- 7) 松本真一, 長友宗重, 吉野 博, 坂西 勉: 半地下居室の熱的性能に関する研究 その16 試験家屋に付設したドライエリアの概要と数値計算, 日本建築学会東北支部研究報告集, 第54号, pp.145-150, 1991.6.
- 8) 松本真一, 長友宗重, 吉野 博, 坂西 勉: ドライエリアまたは温室付き半地下室の自然室温と負荷に関する数値計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D環境工学), pp.939-940, 1991.9.
- 9) 坂西 勉, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一, 野瀬光生: 半地下居室の熱的性能に関する研究 その17 ドライエリアを持つ試験家屋における自然室温状態での長期実測, 日本建築学会東北支部研究報告集, 第55号, pp.113-116, 1992.6.
- 10) 坂西 勉, 長友宗重, 吉野 博, 松本真一: ドライエリア付き半地下居室の熱的性能—自然室温状態での長期実測—, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.421-424, 1991.11.
- 11) 吉野 博, 長友宗重, 松本真一, 坂西 勉, 野瀬光生: ドライエリア付き半地下居室の熱的性能—自然室温状態での長期実測(続報)—, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.469-472, 1992.10.
- 12) 例えば、斎藤平蔵: 建築気候, 共立出版, pp.149-150, 1974.5など。
- 13) E.L.Wilson and R.E.Nickell: Application of the Finite Element Method to Heat Conduction Analysis, Nuclear Engineering and Design 4, 1966.
- 14) 水口広隆: 地中埋設管の熱損失と温度分布に関する研究, 東北大学大学院工学研究科修士論文, 東北大学大学院, 1977.2.
- 15) 松本真一, 長友宗重, 吉野 博: 半地下試験家屋周りの土壌に対する熱物性値の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(D環境工学), pp.775-776, 1992.8.

(1993年7月10日原稿受理, 1994年4月20日採用決定)