

住宅における天窗の採光特性と熱特性の測定

田中辰明 安倍 隆

Measurements of Daylight Factors and Heat Losses Through a Skylight in a Residential Building

Tatsuaki Tanaka Takashi Abe

Abstract

Overall evaluations of performances in utilization of natural daylight through a skylight and heat losses through the glass as measured in a residential building with a skylight are described in this paper. The skylight at the north side with double panes provides a good lighting environment with daylight factors between 6% and 8%. The measured heat conductance of the skylight was 2.01 kcal/m²h°C in average which was the result calculated with data of surface temperatures, heat fluxes and net radiations. After transparent plastic panels were attached under the skylight in order to decrease the heat losses in winter, the heat conductance was measured. As the heat conductance was improved to become 1.41 kcal/m²h°C and the decrease of daylight factor was approximately 20%, means of insulation of this kind may be effective for existing skylights.

概 要

本報告は、天窗による昼光利用を行なっている実際の住宅において、天窗の採光特性と熱特性を測定して、光と熱の両面から天窗の性能をとらえようとしたものである。天窗は建物屋根の北側斜面を利用した二重ガラスで、これによる室内昼光率は6～8%程度と、良好な光環境が得られている。また、ガラス面の内外表面温度と熱流、外気温、屋上の放射収支量などを測定して、二重ガラスの熱貫流率を求めたところ、平均2.01 kcal/m²h°Cとなった。冬季貫流熱損失を軽減するための断熱改修の一例として、天窗の下側に光を透過する断熱板を設置した場合についても測定を行なったが、この場合の二重ガラスと断熱板を含めた熱貫流率は1.41 kcal/m²h°Cであった。またこの場合の昼光率の減少は20%程度であり、このような改修の有効性が確認された。その他、夏季と冬季の室温垂直分布などの測定結果について報告する。

1. はじめに

建築における省エネルギー手法の一つとして、昼光利用による照明用電力の軽減がさかんに行なわれるようになってきている。昼光利用による利点としては照明用電力の軽減のほかにも、明るさ感、解放感といった心理的な側面も見逃せない。しかし、窓は建築外皮の中で熱的に最も弱い部位であることは良く知られており、夏季日射による温室効果と冷房負荷の増大、冬季貫流熱損失による暖房負荷の増大や冷ふく射、さらに結露やグレアなど多くの問題をかかえている。従って昼光利用をはかる場合には、採光窓を光と熱の両面からとらえた検討を行なわなければならない。今回、天窗による採光を利用している都内某住宅において、昭和56年7月(夏季)と12

月(冬季)に、室内昼光率分布、室内垂直温度分布、窓ガラスの内外表面温度と熱流、屋上の放射収支量などを測定した。本報告はこれにより採光窓の特性を光と熱の両面からとらえようとするものである。

2. 住宅概要

図-1に今回実測した住宅の概要を示す。この住宅は半地下居室を持つ2階建てRC造で、昼光利用のほかにも外断熱、自然換気、太陽熱利用など、いくつかの省エネルギー手法を採用している。昼光利用では建物屋上に三角形の屋根を設け、北側に二重ガラスの天窗を設けてホールの照明にあてている。北側採光とすることにより直射日光の影響を極力おさえ、また三角屋根の頂部に換気口を設けて、階段室から換気口までの吹抜空間による

自然換気を行なっている。二重ガラスとしたのは冬季熱損失の軽減と、結露防止をねらったものである。

3. 測定項目と測定方法

3.1. 採光特性の測定

建物の屋上で、周囲の障害物の影響を受けにくい場所に照度計を設置し、全天空照度を測定する。同時に室内床面にも照度計を設置して、室内昼光照度を測定する。同時刻の各々の測定値から、次式により昼光率を求める。

$$\text{昼光率} = \frac{\text{室内昼光照度 [lx]}}{\text{全天空照度 [lx]}} \times 100 [\%] \dots\dots\dots(1)$$

測定は夏季と冬季2回行なったが、冬季の測定では、後述するポリカーボネート複層シートを設置した状態で行なった。また冬季は晴天の日が多く屋外の全天空照度を測定する際に直射日光の影響を除去するために、写真-1のような北1/4天空照度を測定するためのしゃへい装置を用い、これによる測定結果を4倍したものを全天空照度として扱うこととした。図-2に昼光率測定点を示す。

3.2. 熱特性の測定

図-3に示す各点に銅-コンスタンタン熱電対および熱流板を取り付けて各表面温度、熱流、および室温を測定した。各測定点とも、ふく射の影響を除去するために、ふく射よけのアルミはくを取り付けた。外気温は夏季においては二重ガラスの外側近傍に熱電対を取り付けて測定したが、ふく射の影響を受けて結果が過大となっていたため、冬季は建物西側の地上6mの地点の温度をとることとした。各測定値は多点式データロガーにより3分おきに計測し、さらにパーソナルコンピュータにより、1時間毎に平均して処理した。測定期間は夏季は昭和56年7月16日より31日まで、冬季は12月2日より25日までであるが、冬季の後半における実測(12/22~12/

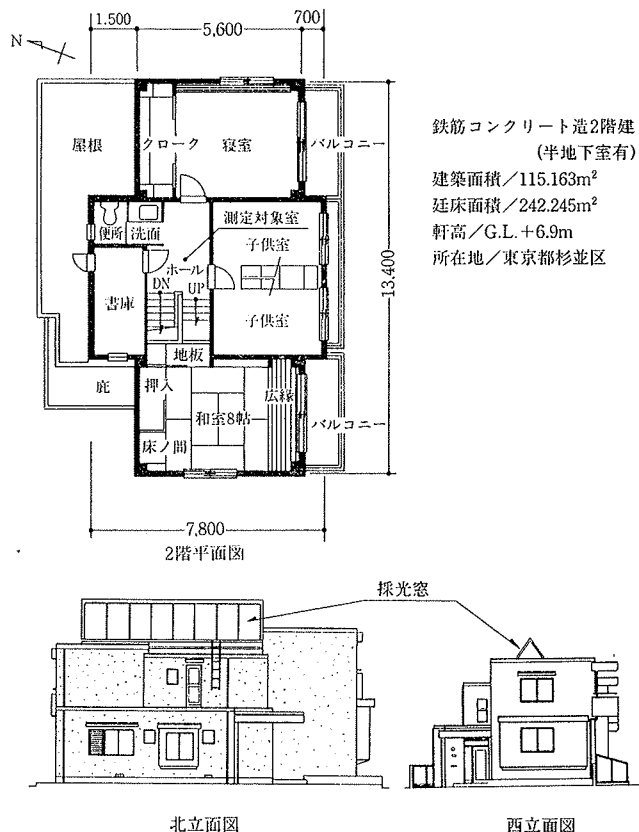


図-1 住宅概要

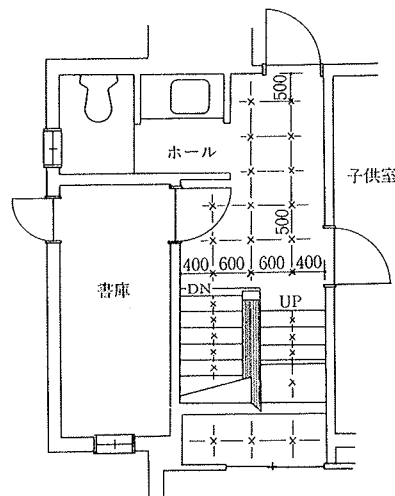


図-2 昼光率測定点

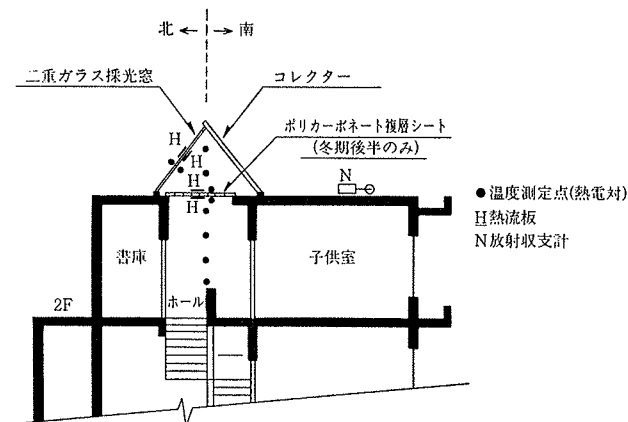


図-3 熱特性の測定項目と測定点

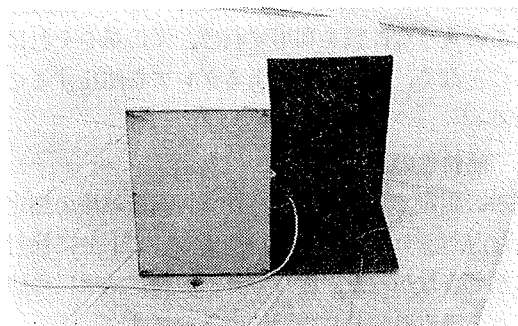


写真-1 北1/4天空測定用しゃへい装置

25) では、図-3 に示す位置に図-4 のようなポリカーボネート複層シート（以下断熱板と略す）を設置した状態で測定した。写真-2 と 3 にこれらの状況を示す。

4. 測定結果

4.1. 採光特性の測定結果

図-5 に夏季と冬季のホール室内昼光率分布の測定結果を示す。図中の上段は夏季、下段は冬季断熱板を設置した場合の測定結果である。この図によれば夏季、冬季とも室内に十分な昼光が入射している。ホールにおいて夏季で7%前後、断熱板を設置した状態で6%前後であり、普通のくもりの日（全天空照度 15,000ルクス程度）で900~1,100ルクス、かなり暗い日（全天空照度 5,000ルクス程度）でも300~400ルクス程度の昼光照度が得られ、年間を通じて昼間は照明器具を点灯する必要はほとんどないと言える。小宮の報告¹⁾によれば、東京都において昼間の時間帯に全天空照度が5,000ルクスを越える確率は95%にも達する。

また、図-5 によれば断熱板を設置した場合の昼光率の値は、夏季に比べて平均20%程度減少している。この差は、

- (1) 測定日の天空状態の違いによるもの
- (2) 測定方法の違いによるもの
- (3) 断熱板による光の透過損失
- (4) 測定誤差

などが考えられる。測定日による違いは主として太陽位置と天候の相違による天空輝度分布の差によるものであるが、直射日光のない完全曇天空であれば天空輝度は一様と考えて差し支えない。（夏季の測定はこの状態であった）また直射日光のある場合でも屋外の照度計および室内に直射日光が入射しなければ良く、冬季の測定では直射日光があったが、比較的空中輝度分布が安定している北1/4天空のみを測定しているので、夏季との誤差は最小限におさえられていると考えられる。従って測定誤差を無視すれば、夏季と冬季の昼光率の差は主として断熱板による光の透過損失によるものである。また写真-3 にみられるように、この断熱板には光の拡散効果があり、このような性質を利用すれば、光の量をそれほど損なうことなく、直射日光によるグレアを防止することもできる。

4.2. 熱特性の測定結果

夏季の測定では、外気温とガラス表面熱流の測定に不十分な点があり、天窓の熱特性について十分に検討することができなかった。従って夏季の測定結果についてはホールの垂直温度分布を示すにとどめる。

図-6 と 7 に夏季と冬季の3日間にわたるホールの室

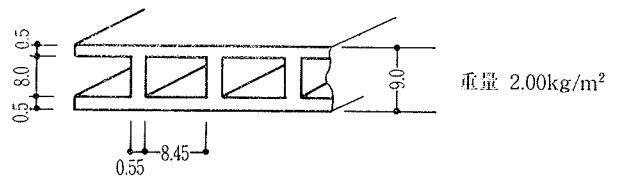


図-4 ポリカーボネート複層シート



写真-2 天窓の状況
(断熱板設置前)

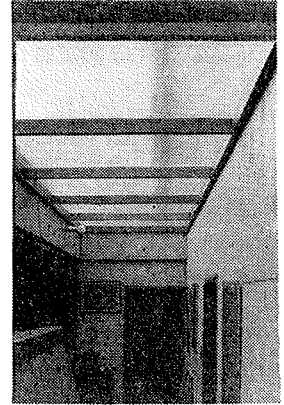
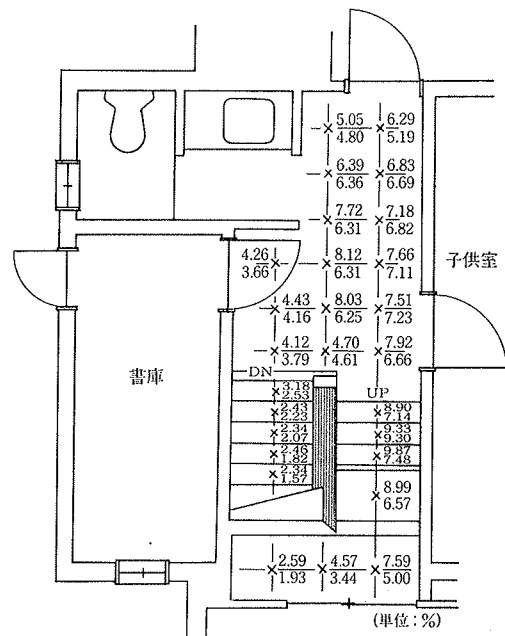


写真-3 天窓の状況
(断熱板設置後)



上段：夏季、測定日時 昭和56年7月24日
11:10~11:40
天候 くもり
下段：冬季、測定日時 昭和56年12月22日
13:55~14:05
天候 晴れ
北1/4天空照度測定用しゃへい装置使用
断熱板設置。

図-5 昼光率分布測定結果

内垂直温度分布を示す。両者とも断熱板を設置していない状態である。また図-8 に断熱板を設置した場合について示す。夏季晴天日においてはホール上部で日中40℃

以上にも達するが、生活空間(図-6の+, Δ)では30℃前後で推移している。冬季においては最大20℃前後、生活空間で10~15℃である。夏季においては太陽高度が高く日射がガラスにあたることもあり、そのための温室効果が現われている。図-8では断熱板の効果により、生活空間の温度が昼夜一定に保たれており、特に夜間の熱損失が大幅に減少している。

次に二重ガラスの熱貫流率, 断熱板の熱伝導率, 二重ガラスと断熱板を含めた熱貫流率の測定結果について述べる。熱貫流率は、日射の影響を取り除くために夜間

(18:00~5:00)のデータを用い、次のように計算した。

北二重ガラス面での熱平衡式は、日射のない夜間において、地物とガラス外表面の温度を同じと仮定すれば、次式で表わされる。

$$q_a = q_e + q_r + q_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 q_a : ガラス外表面で吸収される大気ふく射量, q_e : ガラス外気表面より外気への対流熱伝達量, q_r : 同様にふく射熱量, q_0 : ガラス外表面より室内へ向かう熱流。建物屋上面で測定した放射収支量と、各部温度を用いて(2)式を書き改めれば、

$$\varphi R_n = \alpha_0(\theta_{G0} - \theta_0) + q_0 \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 φ : 北ガラス面に対する形態係数, R_n : 夜間の水平面における放射収支量 (kcal/m²h), α_0 : 北ガラス外表面熱伝達率 (kcal/m²h°C), θ_{G0} : 北ガラス外表面温度(°C), θ_0 : 外気温 (°C), q_0 : 北ガラス内外表面熱流の平均値 (kcal/m²h)。

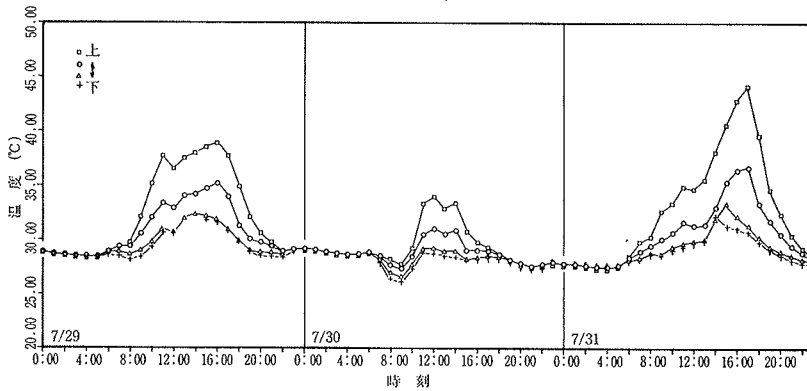


図-6 夏季におけるホール室内垂直温度分布

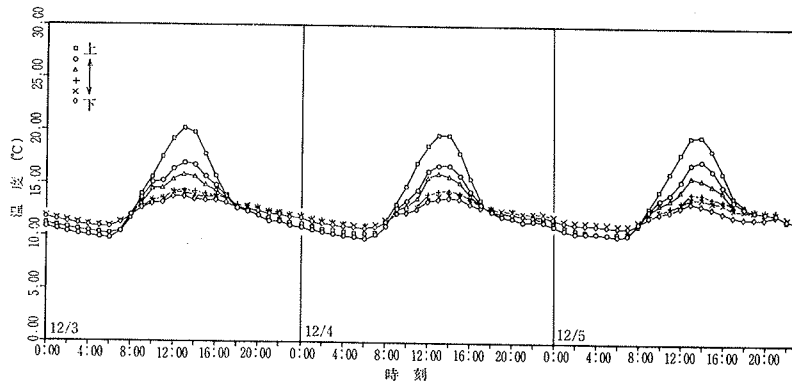


図-7 冬季におけるホール室内垂直温度分布

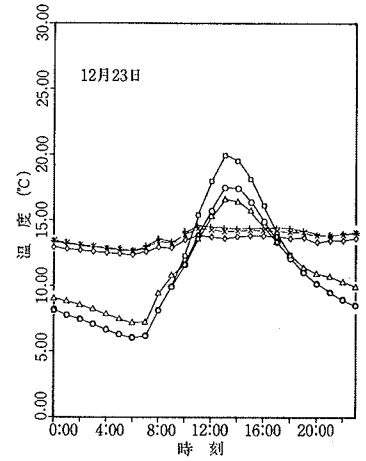


図-8 冬季断熱板取付時のホール室内垂直温度分布

日 時	放射収支量 (kcal/m ² h)	外気温 (°C)	外表面温度 (°C)	外表面熱流 (kcal/m ² h)	内表面熱流 (kcal/m ² h)	外表面 熱伝達率 (kcal/m ² h°C)	相当外気 温度 (°C)	室内温度 (°C)	内表面 温度 (°C)	内表面 熱伝達率 (kcal/m ² h°C)	熱貫流率 (kcal/m ² h°C)
12/3 0:00	-79.4	0.31	-1.25	-30.65	-26.57	19.90	-2.69	10.83	7.27	8.03	2.12
1:00	-77.4	0.48	-1.17	-28.01	-26.92	18.59	-2.65	10.58	6.97	7.61	2.08
2:00	-76.6	-0.36	-1.90	-29.97	-27.15	18.70	-3.43	10.36	6.70	7.81	2.07
3:00	-75.8	-0.89	-2.41	-30.36	-27.85	18.31	-4.00	10.19	6.45	7.78	2.05
4:00	-73.8	-1.26	-2.95	-30.77	-28.96	15.08	-4.93	10.04	6.20	7.79	1.99
5:00	-72.2	-1.51	-3.21	-34.50	-28.39	13.35	-5.57	9.86	6.05	8.25	2.04
18:00	-82.4	5.10	2.95	-24.18	-21.13	18.25	1.71	12.70	9.65	7.43	2.06
19:00	-78.8	4.26	2.23	-24.75	-24.46	17.04	0.79	12.36	9.52	8.66	2.13
20:00	-75.6	3.36	1.60	-27.20	-23.56	17.79	0.17	12.05	9.23	9.00	2.14
21:00	-73.4	2.69	0.57	-27.64	-24.42	13.75	-1.32	11.55	8.44	8.36	2.02
22:00	-71.4	2.22	-0.35	-29.63	-25.69	10.09	-3.09	11.46	8.28	8.71	1.90
23:00	-69.0	1.07	-1.16	-29.65	-26.78	10.55	-3.83	11.13	7.75	8.35	1.89
(平均)						15.95				8.14	2.04
12/4 0:00	-65.8	0.69	-1.54	-29.81	-26.72	9.48	-4.52	10.88	7.35	8.01	1.84
1:00	-63.6	0.32	-2.00	-29.71	-27.30	8.26	-5.45	10.59	6.98	7.91	1.78
2:00	-61.6	-0.29	-2.18	-29.58	-27.26	9.41	-5.20	10.38	6.77	7.87	1.82
3:00	-61.0	-0.33	-2.09	-28.69	-27.36	10.10	-4.86	10.22	6.61	7.76	1.86
4:00	-57.6	-0.79	-1.94	-28.26	-27.04	13.52	-3.99	10.08	6.58	7.90	1.97
5:00	-57.8	-1.51	-2.59	-30.42	-26.95	13.58	-4.70	9.97	6.42	8.08	1.96
18:00	-70.4	5.27	3.35	-23.80	-19.33	16.18	2.01	12.48	9.99	8.68	2.06
19:00	-67.4	4.57	2.19	-25.01	-22.12	11.29	0.10	12.02	9.56	9.56	1.98
20:00	-63.4	3.49	1.69	-23.96	-22.47	13.52	-0.02	11.87	9.19	8.65	1.95
21:00	-63.4	2.88	1.27	-25.04	-21.79	15.03	-0.29	11.49	8.62	8.16	1.99
22:00	-64.0	2.44	1.02	-25.30	-25.02	15.97	-0.56	11.58	8.90	9.41	2.07
23:00	-52.4	1.97	0.89	-24.42	-22.93	14.54	-0.74	11.48	8.60	8.21	1.94
(平均)						12.57				8.35	1.94

*内表面熱伝達率 α_i は次式により計算 $\alpha_i = q_0 / (\theta_i - \theta_{G0})$ ただし θ_{G0} : 北ガラス内表面温度, 他の記号は(2)~(4)式と同様

表-1 天窗二重ガラスの各測定値と熱貫流率など

測定日	外表面熱伝達率 (kcal/m ² h°C)	内表面熱伝達率 (kcal/m ² h°C)	熱貫流率 (kcal/m ² h°C)
12/ 2	24.29	7.85	2.15
3	15.95	8.14	2.04
4	12.57	8.35	1.94
5	17.38	8.04	2.03
6	14.90	7.76	1.98
7	15.76	7.87	1.99
8	19.45	7.66	2.05
9	16.07	7.90	1.99
10	17.76	8.26	2.08
11	16.23	8.01	2.22
12	15.88	8.31	1.99
13	18.93	7.70	2.05
14	19.76	7.82	2.07
15	15.55	7.84	2.00
16	12.78	7.64	1.89
17	15.86	7.54	1.99
18	13.80	7.57	1.92
19	12.84	7.44	1.95
20	18.96	7.67	2.04
21	14.18	7.27	1.96
22	12.25	7.72	1.87
23	10.39	7.87	1.82
24	19.12	8.21	2.12
25	15.37	8.31	2.00
(平均)	16.08	7.86	2.01

表-2 天窗の熱特性値

また熱貫流率を $K(\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C})$ とおくと、

$$q_0 = K(\theta_{\text{sat}} - \theta_i) \dots\dots\dots(4)$$

ただし θ_{sat} : 相当外気温度 (3)式により α_0 を求めて、
 $\theta_{\text{sat}} = \theta_0 + \varphi R_n / \alpha_0$, θ_i : 室温。

表一に12月3日と4日の夜間の各測定値と、(4)式より求めた熱貫流率などを示す。熱貫流率の値は各時刻毎にかなり安定しており、今回の測定の妥当性がうかがえる。表二に測定期間中の各計算値を示す。

表三は断熱板の内外表面温度と熱流より求めた熱伝導率と、(2)~(4)式と同様の手順で求めた断熱板と二重ガラスを含む総合熱貫流率の値を、測定期間中の各時刻毎に示したものである。測定結果はかなり安定しており、熱伝導率 $0.06 \text{ kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$ 、総合熱貫流率 $1.41 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (いずれも期間平均値) を得た。断熱板により、熱貫流率は約30%程度減少している。断熱板の効果は図一8にも表われているが、天窗二重ガラスおよび断熱板の室内側表面温度の比較を、外気温との差で表わしたものを図一9に示す。夜間においては断熱板の室内側表面温度の方がかなり高くなっており、冷ふく射が大幅に軽減されている。10:00~15:00の間では逆に断熱板のない場合の二重ガラスの室内側表面温度が高くなっているが、これは図一6、7に見られるように昼間においてはホール上部の温度がかなり高くなるためである。

また、結露に関しては、冬季において二重ガラスの室内側表面には結露は全く見られず、二重ガラスの有効性が確認された。

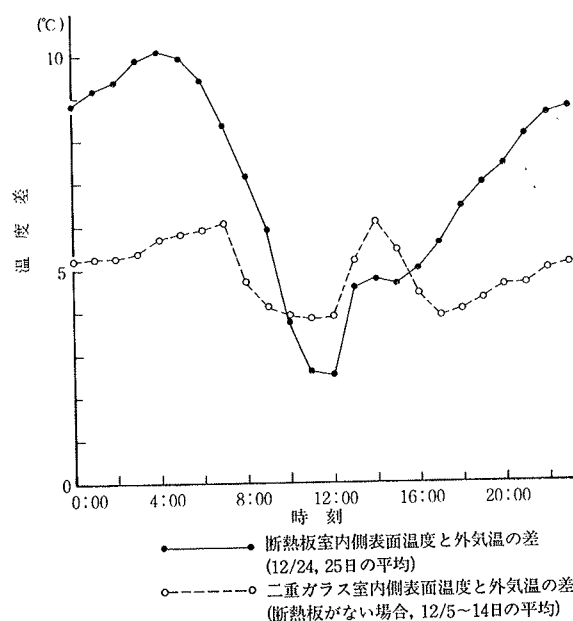
5. まとめ

北側天窗による昼光利用を行なっている一般住宅において、その採光特性と熱特性について実測したところ、次のような結果が得られた。

- (1) 北側二重ガラスによる採光により、年間を通じて良好な光環境が得られる。
- (2) 夏季においては、直射日光が入射する時間帯もあり、室温がかなり上昇するため、適切な日射対策が必要である。
- (3) 冬季貫流熱損失は、二重ガラスによりかなりおさえられているが、適切な断熱板を設置することにより、採光をあまり犠牲にせずにさらに大きな断熱効果を得ることが可能である。

日 時	熱伝導率 (kcal/mh ² °C)	総合熱貫流率 (kcal/m ² h ² °C)	日 時	熱伝導率 (kcal/mh ² °C)	総合熱貫流率 (kcal/m ² h ² °C)
12/22 18:00	0.06	1.28	12/24 0:00	0.06	1.33
19:00		1.33	1:00		1.38
20:00		1.42	2:00		1.37
21:00		1.38	3:00		1.36
22:00		1.38	4:00		1.37
23:00		1.44	5:00		1.38
12/23 0:00		1.40	18:00		1.45
1:00		1.40	19:00		1.41
2:00		1.50	20:00		1.44
3:00		1.41	21:00		1.08
4:00		1.38	22:00		1.49
5:00		1.43	23:00		1.51
18:00		1.24	12/25 0:00		1.51
19:00		1.28	1:00	0.07	3.53
20:00		1.35	2:00	0.06	1.48
21:00		1.36	3:00	0.06	1.47
22:00		1.36	4:00	0.13	1.53
23:00		1.36	5:00	0.06	2.30
(平均)				0.06	1.41

表一 断熱板の熱伝導率と総合熱貫流率



図一9 二重ガラスと断熱板の室内側表面温度と外気温の差の比較

なお、この実測は東京電力(株)省エネルギーセンターによる委託研究「既存建物の省エネルギー化手法の研究(住宅)」の一環として行なわれたものであることを付記するとともに、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 小宮英孝: 光熱環境の総合研究, 大林組技術研究所報, No. 21, (1980), pp.135~139
- 2) 板硝子協会: 住宅の省エネルギーと開口部, (昭和53. 10)