

気象量実測値にもとづく 自然エネルギー実験室の熱特性の予測*

ESTIMATION OF THERMAL PERFORMANCE FOR RENEWABLE ENERGY LABORATORY
BASED ON METEOROLOGICAL DATA MEASURED BY OURSELVES

趙 春江*¹ 金山 公夫*² 馬場 弘*² 遠藤 登*²
Chun Jiang ZHAO Kimio KANAYAMA Hiromu BABA Noboru ENDOH

Abstract

Space heating load for Renewable Energy Laboratory of Kitami Institute of Technology, in which a solar heat pump PV system was equipped, was recalculated in detail based on meteorological data measured by ourselves, such as insolation, ambient temperature and underground temperature. As the result obtained here, the hourly heating loads on the middle of each of nine months through the year were calculated and the maximum load was about 33MJ/h at six or seven o'clock a.m. in January. These hourly space heating loads would be fundamental to investigate the system performance including the building which was reformed with new type apparatuses of solar collector and heat pump combining PV panel.

Key words : Solar energy, Equivalent ambient temperature, Solar heat pump system, Heat loss, Space heating

1. まえがき

北見工業大学自然エネルギー実験室は1号棟が昭和56年12月に、2号棟は昭和58年3月にそれぞれ建設された。この建物は自然エネルギーに依存した暖房給湯の実験施設で、ここで7年間の実験研究が鋭意行われ、貴重な研究成果が得られた。またそれによって関係者や地域住民に太陽エネルギー利用への関心を喚起させ、普及・啓蒙の役割も果たしてきたと思われる。建物内外にはソーラーシステムとヒートポンプからなるソーラーヒートポンプシステムが導入され、太陽熱と地下水熱が1号棟(96m²)および2号棟(150m²)へ暖房熱源として供給されるが、ここで得られた建物を含めたシステムの性能に関する研究の結果は学会誌等に詳細に発表されている^{(1)~(5)}。

今回これら機器システムを新型のものに交換し、さらに太陽光発電装置(PV)を設置して太陽熱・光と地下水熱の熱電併給によるソーラーヒートポンプPV

システムとして刷新し、次世代に向けての快適な住環境創製のためのモデル実験が新たに開始された。すなわち、ソーラーシステムは平板型から水集熱真空二重ガラス管型へ、ヒートポンプは往復動式・チューブ熱交換型から回転式・プレート熱交換型のものへ更新され、ヒートポンプ動力源はPV出力を当てることによって自然エネルギー依存率およびシステム成績係数を大幅に増進させ、高いエネルギー利得を得ようとするものである。

本研究は新規に導入された機器システムの性能および建物を含めたトータルシステムとしての性能を総合的に評価するために、まず暖房負荷となる建物の熱損失を正確に算出しておくことが重要であり、その際本学で長年行われている日射量、気温および地温等の気象量の実測値を採用して各月代表日の暖房負荷を時間当たりの値として綿密に計算したものである。ここに算出された建物性能値は、今後冬期に実測される性能値との比較検討の際の目安となるものである。

2. 記号及び単位

*原稿受付 平成9年5月19日

*1 会員 北見工業大学大学院

*2 会員 北見工業大学工学部(〒090 北見市公園町165)

K: 熱通過率

$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

- S : 熱伝達面積 m^2
 t_r : 室温 $^{\circ}C$
 t_o : 外気温度 $^{\circ}C$
 α_r : 室内壁の熱伝達率⁽⁶⁾ $kJ/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C)$
 壁 33 ; 天井 42 ; 床 25
 α_o : 室外壁の熱伝達率⁽⁶⁾ $kJ/(m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}C)$
 壁 84 ; 天井 42 ; 屋根 126 ; 床 25
 d : 材料の厚さ m
 λ : 材料の熱伝導率 $kJ/(m \cdot h \cdot ^{\circ}C)$
 a : 材料の吸収率
 屋根(暗色) 0.8 ; 壁(淡色) 0.5 ; ガラス 0
 $I_T(\theta)$: 傾斜面日射量 $kJ/(m^2 \cdot h)$
 I_{HT} : 水平面全天日射量 $kJ/(m^2 \cdot h)$
 I_D : 法線面直達日射量 $kJ/(m^2 \cdot h)$
 I_s : 散乱日射量 $kJ/(m^2 \cdot h)$
 i : 傾斜面への入射角 $^{\circ}$
 θ : 壁及び屋根の傾斜角 $^{\circ}$
 ρ : 地面の反射率 = 0.3, 0.7
 h : 太陽高度 $^{\circ}$
 A : 太陽方位角 $^{\circ}$
 β : 壁の方位角 $^{\circ}$
 $S : \beta = 0^{\circ}$ $E : \beta = -90^{\circ}$ $W : \beta = 90^{\circ}$
 ϕ : 緯度 $^{\circ}$
 δ : 太陽赤緯 rad
 t : 時角 rad
 ω : 地球の公転角度 rad
 W_o : 時差 h
 T : 時刻 h
 e : 均時差 h
 r : 空気密度 $1.2kg/m^3$
 C_{pa} : 空気の定圧比熱 $1.007kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$
 V : 換気量 m^3/h
 q : 熱量 kJ/h

3. 建物からの損失熱量

室内を快適な環境に保つには温度と湿度を制御し、生理的・感覚的に好ましい温熱環境となるように空気調和しなければならない。ここでは室内温度の維持に重点を置いて建物の損失熱量を算出し、湿度に関しては冬期室内が乾燥するとき適宜加湿するものとする。したがって熱計算において湿り空気の潜熱については考えない。

建物内部を適度な温度に設定するならば、夏期の7～9月以外は室内から室外へ向う熱損失があり、その状態を維持するためにはこれに見合った熱を供給しな

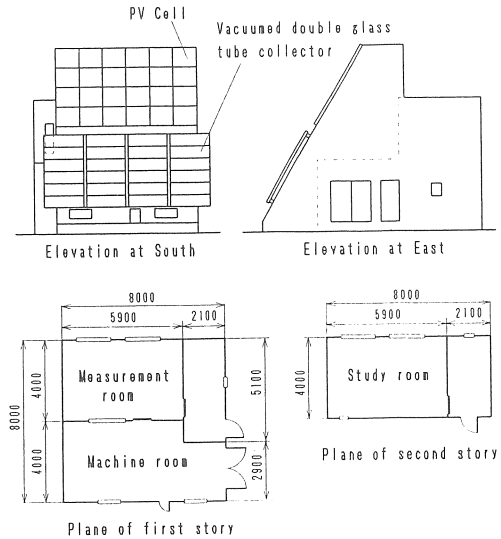


Fig.1(a) Plan and elevation of House No.1

ければならない(暖房負荷)。以下に自然エネルギー実験室の暖房負荷を日射量、外気温度、地中温度の長期観測結果を用いて精算する。

図1(a)～(c)は負荷計算の対象とする自然エネルギー実験室の平面、立面図および立体図を示す。ここでは本研究の暖房負荷計算に必要な部分のみを図示する。

図1(a)は1号棟平面・立面図、(b)は2号棟平面図および(c)は1、2号棟外観の立体図である。暖房区域は1号棟は1階の機械室(18 $^{\circ}C$)、計測室(20 $^{\circ}C$)、2階の研究室(20 $^{\circ}C$)の面積96 m^2 、2号棟は実験室I、II、III室(ともに20 $^{\circ}C$)の面積98.2 m^2 である。1、2号棟の渡り廊下、2号棟の玄関・廊下は別の潜熱蓄熱タンク付きソーラーヒートポンプシステムで暖房が行われ、常温(15 $^{\circ}C$ ～16 $^{\circ}C$)に維持されているので負荷計算の対象から除く。

3.1 伝熱損失

建物の伝熱損失は、建物の屋根(天井)、壁、窓、床、ドアなどから熱通過によって直接失われる熱量 q_1 である。これは式(1)によって計算される。

$$q_1 = K \cdot S (t_r - t_o) \quad (1)$$

ここでKは熱通過率で、式(2)で示される。

$$K = (1/\alpha_r + d_1/\lambda_1 + \dots + d_n/\lambda_n + 1/\alpha_o)^{-1} \quad (2)$$

3.1.1 熱通過率K

熱通過率Kはもちろん、式(1)の各項は建物の部所、

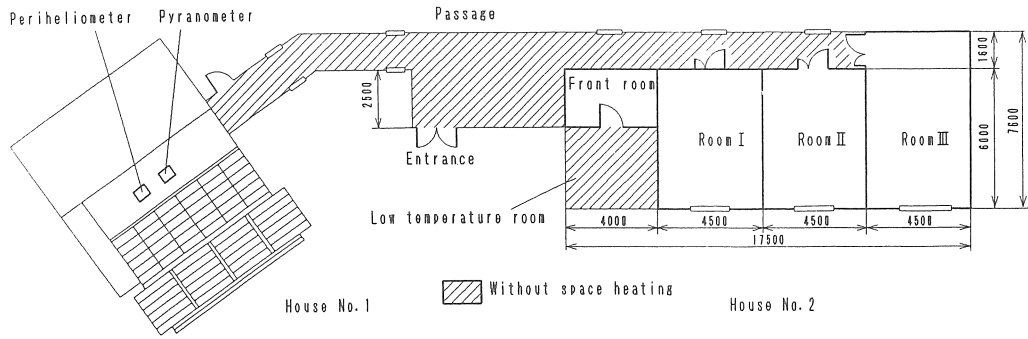


Fig.1(b) Plan of House No.2

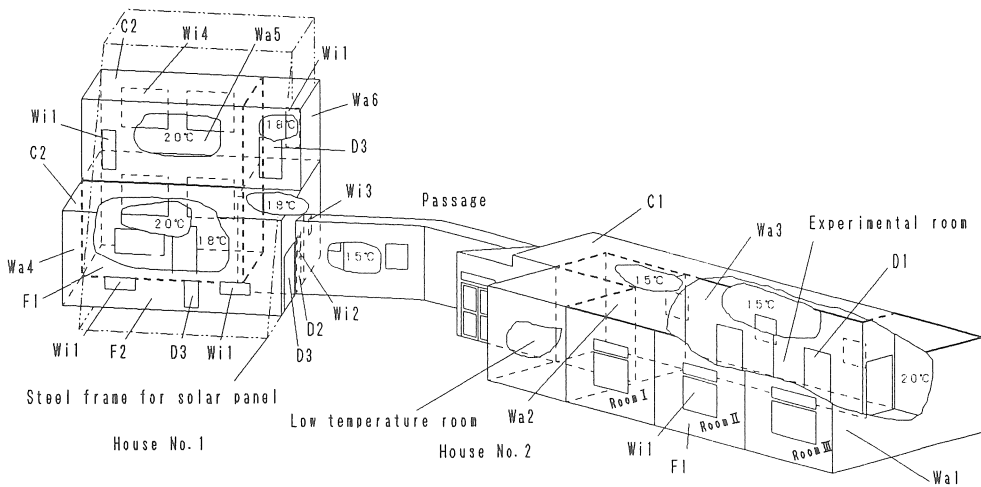


Fig.1(c) Bird's-eye view of Renewable Energy Laboratory

Table 1. λ of materials ^{(6)~(8)} (kJ/(m·h·°C))

Materials	λ	Materials	λ
Glass wool	0.151	Concrete	3.6
Foam polystyrene	0.155	Macadam	5
Mortal	5.02	Soil (sandy)	3.85
Plywood	0.586	Urethane	0.071
Plaster board	0.795	Air (20°C)	0.092
Single glass	2.7	Asbestos	0.216
Double glass(3·6·3)	0.335	Asbestos cement board	2.09
A.L.C	0.68	Polyethylene foam	0.174
Steel	180	Vinyl	1.06
Thermal resistance of curtain d/λ		0.0645 (m ² ·h·°C/kJ)	

Table 2. K of each composition (kJ/(m²·h·°C))

Parts	Composition	K
D1	Plywood4mm+Hollow32mm+Plywood4mm	2.37
D2	Steel1.6mm+Asbestos35mm+Steel1.6mm	4.49
D3	Steel1.6mm+Asbestos35mm+Steel1.6mm	4.90
Wi1	Double glass3·6·3	12.82
Wi2	Single glass4mm	16.11
Wi3	Double glass3·6·3	12.34
Wi4	Single glass3mm+Hollow40mm+Double glass3·6·3 +Hollow over20mm+Curain	1.26
Wi4'	Single glass3mm+Hollow40mm+Double glass3·6·3	1.95
F1	Vinyl floor tile2mm+Concrete150mm +Foam polystyrene30mm+Macadam150mm+Soil 1 m	1.65
F2	Concrete150mm+Foam polystyrene30mm +Macadam150mm+Soil 1 m	1.65
Wa1	Plaster board12mm+Glass wool100mm+Hollow80mm +ALC50mm	0.60
Wa2	Asbestos cement board5mm+Hollow50mm+ALC100mm +Plywood5.5mm+Glass wool200mm+Asbestos cement board6mm	0.48
Wa3	ALC12mm+Hollow65mm+ALC12mm	1.25
Wa4	ALC100mm+Glass wool150mm+Asbestos cement board5mm	1.91
Wa5	ALC100mm+Glass wool100mm+Plaster board9mm	1.16
Wa6	ALC100mm+Glass wool150mm+Plaster board9mm	1.88
Wa6'	ALC100mm+Glass wool150mm+Plaster board9mm	1.82
C1	Plaster board9mm+Glass wool100mm+Hollow630mm +Polyethylene foam4mm+Concrete100mm+Urethane5mm	0.13
C2	Plaster board9mm+Glass wool100mm+Hollow465mm +ALC100mm+Mortal20mm+Urethane4mm	0.17

部材によって異なるので、まず、それを構成する材料の熱伝導率および表面熱伝達率の基礎資料をもとに各構造体の熱通過率を算出する必要がある。表1に使用されている各種材料の熱伝導率を、表2に図1(c)に記号で示す各部の構造と算出されたKの値を表示する。

3.1.2 相当外気温度 t_{oe}

壁や屋根が日射を受けると、これを吸収して温度上昇となって現れる。このため、外気温度はこの温度上昇分を上乗せして設定しなければならない。この値が相当外気温度で、次の式(3)で表わされる。

$$t_{oe} = a \cdot I_T / \alpha_o + t_o \quad (3)$$

壁や屋根が受ける日射量 I_T は季節によって時々刻々変化するが、傾斜面日射量は時間当り日射量より次のように計算される。

$$I_{T(\theta)} = I_D \cdot \cos i(\theta) + I_s(1 + \cos \theta)/2 + \rho \cdot I_{HT}(1 - \cos \theta)/2 \quad (4)$$

本建物の屋根は陸屋根で、壁は垂直壁である。

ゆえに陸屋根の場合、

$$\theta = 0^\circ$$

よって

$$I_{T(0)} = I_{HT} \quad (5)$$

垂直壁の場合、

$$\theta = 90^\circ$$

$$I_{T(90)} = I_D \cdot \cos i(90) + I_s/2 + \rho I_{HT}/2$$

そして

$$\cos i(90) = \sinh \cos 90^\circ + \cosh \sin 90^\circ \cos(|A - \alpha|) = \cosh \cos(|A - \alpha|)$$

$$I_s = I_{HT} - I_D \cdot \sinh$$

の関係から

$$I_{T90} = I_D \cdot \cosh \cos(|A - \alpha|) + \{(1 + \rho) I_{HT} - I_D \cdot \sinh\} / 2 \quad (6)$$

となる。

太陽高度 h と太陽方位角 A はその地点の緯度 ϕ と経度 L および太陽赤緯 δ と時角 t によって以下の式で求められる。

$$\sinh = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t$$

$$\sin A = \cos \delta \sin t / \cosh$$

太陽赤緯 δ は次式によって求められる。

$$\delta = (0.5 + \cos \omega (-8.56 + 11.64 \cos \omega - 1.17 \cos^2 \omega) + \sin \omega (408.86 + 1.71 \cos \omega - 12.88 \cos^2 \omega)) \times 10^{-3}$$

Table 3. Astronomical data on middle day of month (15th)

Month	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May
ω	5.164	5.698	6.180	0.430	0.947
δ	-0.387	-0.221	-0.039	0.168	0.328
e	-0.155	-0.239	-0.152	0.002	0.060
Solar noon	11:33:40	11:38:42	11:33:25	11:24:14	11:20:48
Month	Jun.	Oct.	Nov.	Dec.	
ω	1.480	3.581	4.114	4.631	
δ	0.407	-0.150	-0.324	-0.406	
e	-0.006	0.241	0.253	0.075	
Solar noon	11:24:43	11:09:54	11:09:07	11:19:48	

ω は春分点を起点として測った地球の公転軌道上の角度で、1月1日からの日数 n により次式で計算される。

$$\omega = 2\pi(n - 80)/365 \quad (n \geq 80)$$

$$\omega = 2\pi(285 + n)/365 \quad (n < 80)$$

時角 t はその地点の太陽の南中時を0、1h当たりの角度を 15° として次式で表される。ただし午前中を-、午後を+とする。

$$t = \pi(T - 12 + W_o + e)/12$$

T はその地点の時刻、 W_o は経度による時差および e は地球の公転にもとづく均時差でそれぞれ以下の式で求められる。

$$W_o = (L - 135)/15$$

$$e = (6.94 + \cos \omega (-134.94 - 14.43 \cos \omega + 21.27 \cos^2 \omega) + \sin \omega (-30.87 + 330.6 \cos \omega + 2.47 \cos^2 \omega)) \times 10^{-3}$$

以上の式を用いて計算した北見市 ($43^\circ 49' N$, $143^\circ 55' E$) における各月15日の天文データを表3に示す。

相当外気温度を計算するのに必要な水平面全天日射量 I_{TH} と法線面直達日射量 I_D は以下に示す本学の測定値を使用するものとする。表3のデータにより計算した結果および実測値の I_{TH} と I_D を式(6)に代入して、各月15日の時間毎の方位角別垂直壁面および水平屋根の日射量分布が求められる。

3.1.3 日射量測定値

北見工業大学自然エネルギー実験室屋上における水平面全天日射量および法線面直達日射量の過去17年間(1978~1994)の測定値を整理して、月代表日の時刻毎の月平均値として図2と図3に示す。

3.1.4 環境温度

図4および図5にはそれぞれ北見工業大学寒地工学実験室で測定された過去9年間(1988~1996)の外気温度の時刻毎月平均値の変化および地下1mの月平均地温を示す⁽⁹⁾。

3.2 換気熱損失

ドア、窓、壁、天井、床などの開口部、またはすきまを通して換気により失われる換気熱損失 q_2 は次式により計算される。

$$q_2 = r \cdot C_{pa} \cdot V(t_r - t_o) \quad (7)$$

換気量 V は部屋の容積と換気回数との積となり、本モデルの場合は換気回数を高气密住宅の標準的な値をとって0.8回/hと仮定し、隙間からの漏れを含むこととする。部屋の容積は、1号棟は270m³、2号棟の実験室は265m³である。

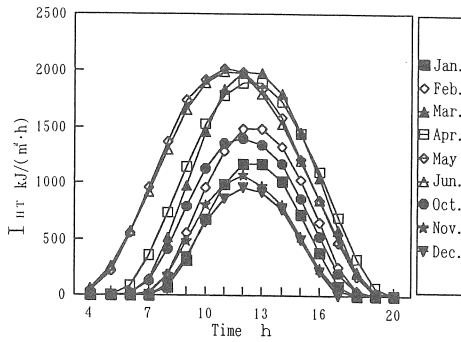


Fig.2 Monthly average of hourly global insolation

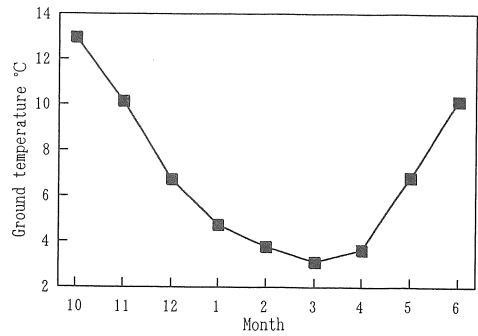


Fig.5 Monthly average temperature at 1m depth of ground

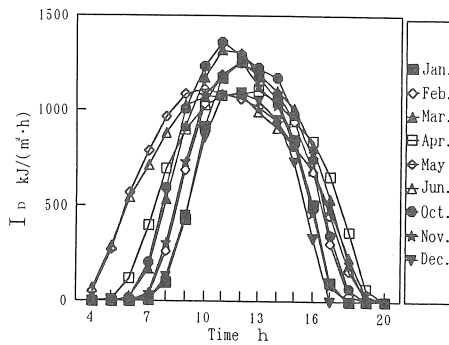


Fig.3 Monthly average of hourly direct insolation

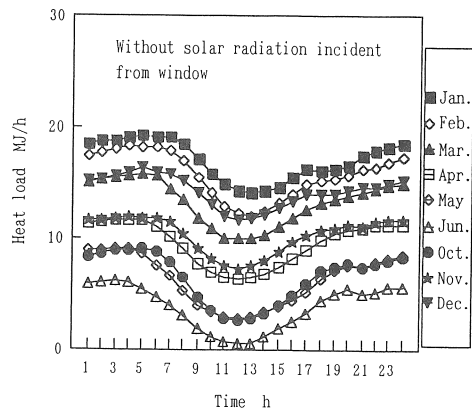


Fig.6 Hourly change of heat load in House No.1

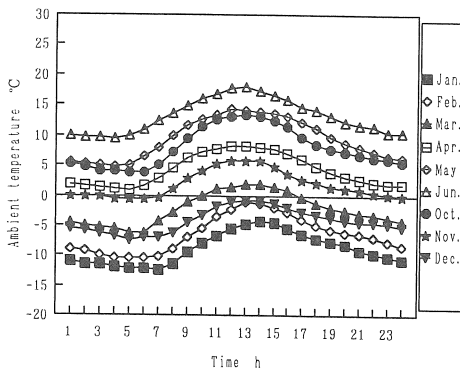


Fig.4 Hourly change of average ambient temperature on middle day of each month

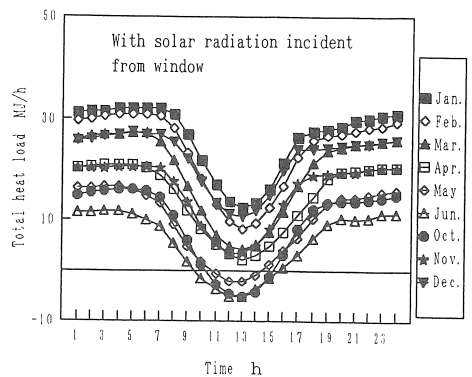


Fig.7 Hourly change of Total heat load in Houses No.1 and No.2

3.3 熱損失の計算結果

地温、外気温度または相当外気温度、設定した室温、各構造体のKとその面積を式(1)に代入して1号棟および2号棟実験室I、II、IIIの伝熱損失を算出した。

式(7)により換気熱損失を算出した。図6は実験室1号棟の日射入熱を考慮しない場合の暖房負荷を、図7は窓からの日射入熱を考慮した1号棟、2号棟の総

合暖房負荷を示す。また負荷計算の根拠になった延床面積当たりの熱損失係数を表4に示す。図6において1号棟は日射入熱がなければ日中においても常に暖房が必要なることがわかる。図7から1、2号棟の総合暖房負荷の最大値は1月の午前6～7時に発生し、その値は約33MJ/hであることがわかった。そして12月、1月、2月の厳冬期においても日中は日射入熱により暖房負荷は最大値の1/3程度まで減少し、5月、6月、10月には日中は日射入熱によりマイナスの暖房負荷を示し、全く暖房が不要なことが予測される。これらの計算において実験室に普段は人間が居住していないので給湯負荷は含まれていない。

算出された本実験室の床面積当たりの熱損失係数を表4に示す。表の値から本実験室はランクV⁽⁶⁾程度の寒地住宅であることがわかる。

Tab4. Coefficient of heat loss in each floor area (kJ/(m²·h·°C))

House name	House No.1	House No.2
Floor area	96m ²	98.2m ²
No. of ventilation	0.8 1/h	0.8 1/h
Floor, Wall, Ceiling	3.85	2.47
Window	0.49	1.19
Ventilation	2.62	2.61
Total K	6.96	6.27

4. むすび

自然エネルギー実験室の旧設備が一新され、ソーラーヒートポンプPVシステムとしてほぼ完成し、現在機器システムおよび建物を含むトータルシステムの性能測定および性能向上のための実験研究が行われている。その際に最も基礎となる建物の暖房負荷の季節ごとの時刻変化について、実測された気象量を用いて精度よく計算した。ここで表4に示す熱損失係数よりこの自然エネルギー実験室は高断熱高気密住宅に近い寒冷地省エネルギー住宅のランクV程度に相当するよい値であることがわかった。しかし本実験室は16年前に建設された建物のため、断熱効果の低下およびドアや窓など各種構造部のすきまの増加などにより実供給熱量に1～2割程度の増大が見込まれるが、この点に関しては1997～1998年の冬期の実験により明確になるものと思われる。それによって本計算結果に係数を掛けるなどして若干の修正を加えなければならないかも知れない。

謝辞：外気温度および地下1mの地温の実測値は本学寒地工学実験室で得られたデータを使用させていただいた。

本研究は平成8年度のNEDO提案公募型プロジェクト「独創的産業技術開発促進事業」で採択された『次世代住環境のための高利得ハイブリッドシステム及び要素技術の開発(ソーラーヒートポンプPVシステムの総合的研究)』(プロジェクトIDNo.8H代-176-1)の研究成果の一部である。

それぞれの関係各位に謝意を表する次第である。

文 献

- (1) 金山公夫、馬場弘、福田武幸、「北見工業大学自然エネルギーシステムの性能(I)」, 太陽エネルギー, Vol.12, No.5, (1986), p.13～20.
- (2) 金山公夫、馬場弘、山本政樹、「自然エネルギー実験室のシステムの性能の測定および解析」, 日本機械学会論文集, B, 52巻, 484号, (1986), p.4046～4052.
- (3) 金山公夫、馬場弘、福田武幸、「北見工業大学自然エネルギーシステムの性能(II)」, 太陽エネルギー, Vol.13, No.2, (1987), p.12～17.
- (4) 金山公夫、馬場弘、福田武幸、「北見工業大学自然エネルギーシステムの性能(III)」, 太陽エネルギー, Vol.14, No.6, (1988), p.35～40.
- (5) 金山公夫、馬場弘、山本政樹、「ソーラーヒートポンプシステムの性能予測に関する研究」, 日本機械学会論文集, B, 54巻, 499号, (1988), p.728～733.
- (6) 北海道住宅都市部、道立寒地建築研究所、「省エネルギー住宅の計画と設計」, (1980), p.41～54.
- (7) 国立天文台、「理科年表」, (1992), 丸善株式会社, p.477～480.
- (8) 日本規格協会、「日本工業規格土木建築編(材料及び部品)」, 日本規格協会発行, A5001～A6906.
- (9) 北見工業大学寒地工学実験室、「寒地気象観測月報及び日報」, 北見工業大学蔵書, 1988年1月～1996年12月.