

ソーラーヒートポンプシステムの性能評価 と経年変化

Evaluation of Performance on a Solar - Heat Pump System and its Change due to Yearly Aging

金山公夫^{*2}
Kimio KANAYAMA

馬場弘^{*2}
Hiromu BABA

遠藤登^{*2}
Noboru ENDOH

Abstract

From a viewpoint of energy balance, the performance of a residence in which solar heat pump system was introduced has been measured under the everyday living conditions and evaluated in terms of the system COP, and then its change due to yearly aging was discussed for the latest six years. It was made clear that the performance of this system was gradually reduced if no component or no part in the system could be exchanged by new one at all, and no maintenance or no well keeping for the main parts and materials could be carried out at all. Consequently, the system COP decreased to 3.53 and the rate of dependence on renewable energy attained 0.695 as the latest data in 1994 fiscal year.

Key Words : Solar - Heat Pump System, Performance Evaluation, System COP, Collector COP, Yearly Change

1. まえがき

1981年から北見工業大学自然エネルギー実験室において行われてきたソーラーヒートポンプシステムによる暖房給湯の実験結果^{(1)~(5)}を参考に、システムを小形化、単純化して一般住宅に導入し、1986年10月から居住実験^{(6)~(10)}が行われ、今年で10年目⁽¹¹⁾になる。

その間システムの性能維持のためコレクターの交換・増設、集熱ポンプのパワーアップ、配管系統の変更、制御方法の改良、熱交換器の洗浄、電気系統の部品交換・修理等を逐次行ってきた。また、システムの用途拡大のため「直接サイフォン井戸」^{(8), (9)}の採用、井水による冬期ロードヒーティングおよび夏期の冷房実験等多方面の活用を試みて今日にいたっている。

しかし、1994年以降はシステムに特段の手当ではしていない。

原稿受付 平成7年10月30日

*1 第5回環境工学総合シンポジウム'95で講演
*2 北見工業大学機械システム工学科
(〒090 北見市公園町165番地)

本研究は上記のような経過を経て、本ソーラーヒートポンプシステムの性能が年々変化する過程を最近6年間の実測によって得られた性能値により比較・検討し、考察を加えたものである。

2. 記号および性能値

Q_J	日射量	M J
Q_c	コレクター集熱量（熱量計の読み）	M J
Q_w	地下水汲み上げ熱量 (流量と温度差から)	M J
Q_E	ヒートポンプ電力の熱当量 (水中ポンプ電力を含む)	M J
Q_{EC}	コレクター集熱ポンプ電力	M J
Q_B	ボイラ熱量 (燃料消費量とボイラ効率から)	M J
Q'_{TL}	全供給熱量($=Q_c + Q_w + Q_E + Q_B$)	M J
η_c	集熱効率 ($=Q_c/Q_J$)	
F_c	太陽依存率 ($=Q_c/Q'_{TL}$)	
F_w	地下水依存率 ($=Q_w/Q'_{TL}$)	
F_E	ヒートポンプ依存率 ($=Q_E/Q'_{TL}$)	
F_B	ボイラ依存率 ($=Q_B/Q'_{TL}$)	

F_{NE}	自然エネルギー依存率 [$= (Q_c + Q_w) / Q'_{\tau_L}$]
COP_{CL}	コレクター成績係数 [$= Q_c / Q_{EC}$]
COP_{HP}	ヒートポンプ成績係数 [$= (Q_w + Q_E) / Q_E$]
COP_{SY}	システム成績係数 [$= (Q_c + Q_w + Q_E) / Q_E$]
COP_{SYB}	ボイラ熱量を含むシステム成績係数 [$= (Q_c + Q_w + Q_E + Q_B) / (Q_E + Q_B)$]
COP_{SYP}	集熱ポンプ動力を含むシステム成績係数 [$= (Q_c + Q_w + Q_E) / (Q_E + Q_{EC})$]
COP_{CL}	コレクター成績係数 ($= Q_c / Q_{EC}$)

3. システム概要および実験経過

実験の対象となった建物(写真)は、床面積105.1 m²の断熱性のよい平屋建てで、一部中二階と地下室よりなる。屋上にソーラーコレクターを載せ、地下室にタンク類、ヒートポンプその他の機器・設備、制御・計測機器等が収められている。図1に建物平面図を示す。図において斜めチェックの部分が床暖房で、居間台所、洗面所および風呂場の合計15.47 m²に床暖パネルが敷かれている。さらに居間と書斎にはファンコイル式温風放熱器(F.C.)が、トイレには小形の自然対流放熱器があるが、床暖房による低温ふく射暖房が主体である。

昭和61年(1986)10月にシステムを設置して以

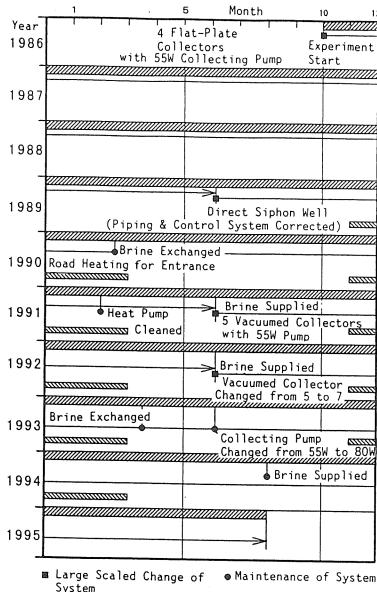


図2 ソーラーヒートポンプシステムの実験経過



写真 ソーラーヒートポンプ住宅の外観

来、今まで大人2人が普通の生活をしながら居住実験を継続し、その間性能の維持、向上のため部品の交換やシステムの改良および手直しなどを行ってきた。その経過を図2に示す。主なものを上げると、システムのうちソーラーコレクターは平成3年(1991)6月に平板型4枚(7.6 m²)から真空二重ガラス管型5枚(6.3 m²)に交換し、さらに平成4年(1992)6月に真空ガラ管型を7枚(8.82 m²)に増設した。平成5年(1993)6月に集熱ポンプを55 Wから80 Wに交換してパワーアップした。

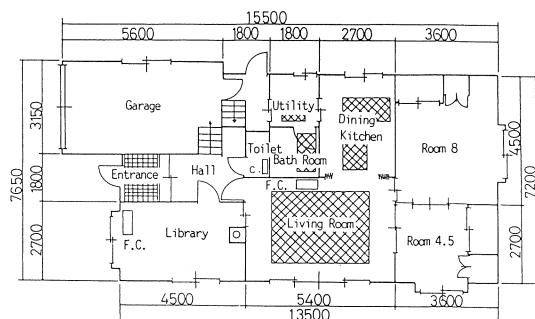


図1 実験対象の建物平面図

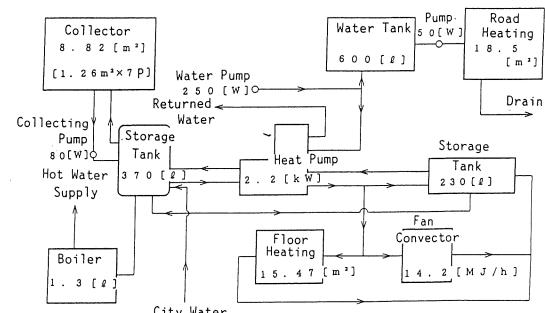


図3 システム主要部のブロック図

これにより、玄関とガレジを除く建物一階の約80%の暖房が行なわれ、真冬の平均外気温度が-8~-15°Cの厳寒期においても室内は日中21~24°C(日射が強いとさらに上昇)、夜間16~20°Cに保たれ、湿度も約50%で常に快適な室内環境が維持されている。

システム概要のブロックを図3に、詳細なフローシートを図4に示す。システムの作動は次のとおりである。コレクターで集熱された温水は給湯タンク(370L)に貯えられ、すべて給湯に用いられる。高温の湯が欲しいときは灯油だき給湯ボイラが作動して70°Cで追いだきすることができる。ヒートポンプ(2.2kW)は主に暖房に供せられON-OFF制御により43°Cの温水が暖房放熱器に送られ、放熱後40°Cで暖房タンク(230L)に回収される。ヒートポンプはソーラーによる集熱が不足するときに一部給湯加熱も行う。ヒートポンプの熱源には地下水(9.5~10°C)が使用されるが、その方法は屋外に掘られた深さ40mの井戸から井水を水中ポンプで揚水し、ヒートポンプで吸熱後再び同じ井戸の深部に戻すいわゆる「直接サイフォン井戸」(8)、(9)方式で行われる。その際、揚水の一部は給水タンクに受水され、散水用、ロードヒーティング用および冷房用に供せられる。ロードヒーティングは玄関アプローチ(18.5m²)の融雪を行なうが、平成6年(1994)から7年(1995)にかけての冬はこれを行わなかった。室内の冷房はファンコイル放熱器(F.C.)に井水を送り、冷風に変換して行うもので、猛暑の折に数回試みられる。

4. 平成6年度(1994)の測定結果

測定結果は、データを1日ごとの値で得ているが、これを集計して1月ごとの値にまとめて平成6年度(1994)1年間を整理してある。ただし卒業論文の提出時期の関係で年度の区切りは3月でなく1月早い2月になっている。

図5に各月ごとの日射量、集熱量および集熱効率を示す。日射量は真南を向けて傾斜角55°で設置された集熱器への入射日射量に相当する55°傾斜面日射量を示す。集熱器を55°に設置することにより入射日射量の季節変化が少なくなり、最小の12月の日射量は最大の5月の日射量の1/2に、また集熱量は最小の12月の値が最大の10月のそれの1/2に抑えられる。また上に積もった雪も落ちやすい。

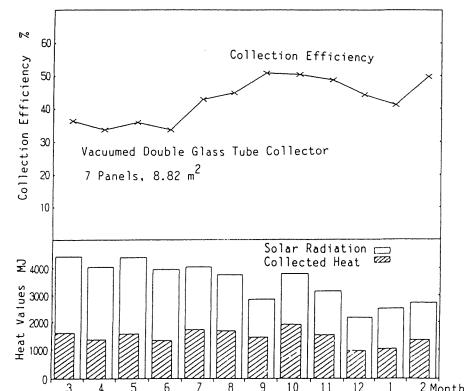


図5 各月の日射量、集熱量および集熱効率
(平成6年度、1994)

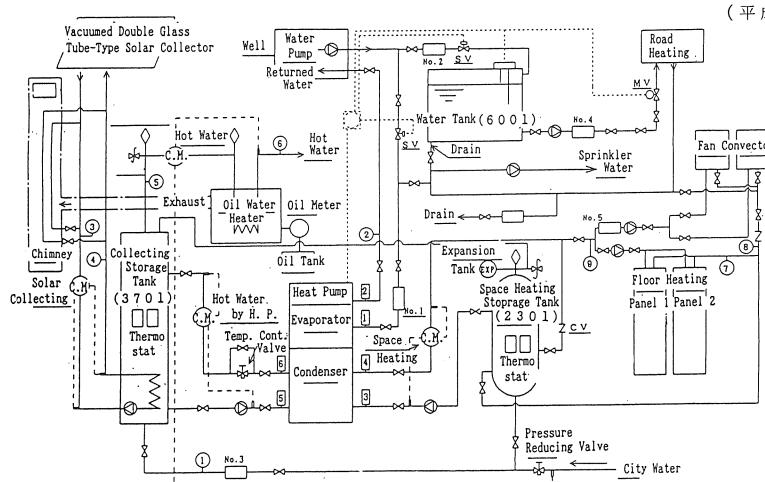


図4 詳細なシステムのフロー図

集熱効率は3～6月までは30%台の割合低い値であるが、8月に不凍液を補充したことによって次第に上昇し、9月には最高値の50.8%に達し、年間平均で41.9%の高い値が得られた。

図6に集熱量、地下水熱量、ヒートポンプ電力量およびボイラ熱量とそれらの依存率を示す。これら各熱量の合計は熱負荷への供給熱量に相当し、季節変化に追随してその値は冬に大きく、夏に小さい。また全供給熱量に対するそれぞれの割合、すなわち依存率のうち太陽依存率は夏に大きく、冬に小さく、それを補完する地下水熱量およびヒートポンプ電力への依存率は逆に夏小さく、冬に大きい。年間の太陽依存率は32.0%、地下水依存率と合わせた自然エネルギー依存率は69.5%と大きく、全体の7割に当たる。

ただし、システムの断熱不足および機器の制御不良等の原因で熱損失が生じ、この全供給熱量は全てが暖房および給湯の正味の熱量とはならない。しかし、吸房期にはこの損失熱量も有効となる。

図7に各種の成績係数(COP)を示す。コレクタ一成績係数(COP_{CL})は1.4以上で、不凍液補充後の9月以降は2.0以上の高い値を示し、年間平均で1.8.3であった。システム成績係数はコレクターによる集熱量で持ち上げられ、特に夏は集熱量が大きく、負荷が小さいので1.0程度に増加し、年間システム成績係数は3.5.3となった。ボイラ熱量を含むシステム成績係数は灯油使用分だけ減少するが、8月はこれが0であったためシステム成績係数と同じ値を示した

ここで、ヒートポンプの成績係数の算出には、一次側の水中ポンプの動力を含めてある。

5. 最近6年間の性能値の比較

最近6年間の性能値をシステムの改良、交換、手直しその他の維持を含めて実験経過を追って比較・検討を行う。

5.1 集熱効率

図8に過去6年間の集熱効率の比較を示す。集熱効率に及ぼす影響はコレクターの種類と面積、集熱ポンプ容量および不凍液の交換・補充等の要素が考えられる。平成3年(1991)6月に平板型コレクター(4枚、7.54m²)を真空ガラス管コレクター(5枚、6.3m²)に交換し、平成4年(1992)6月に真空ガラス管型コレクターを7枚に増設し、平成5年(1993)4月に集熱ポンプを55Wから80Wに容量をアップした。コレクター増設時には集熱ポンプの容量不足から集熱効率の増加

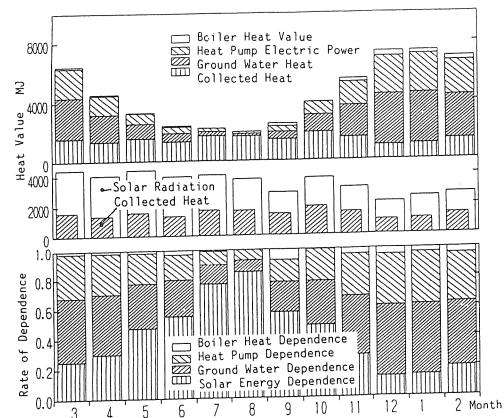


図6 各月の種々の依存率および熱量測定値
(平成6年度、1994)

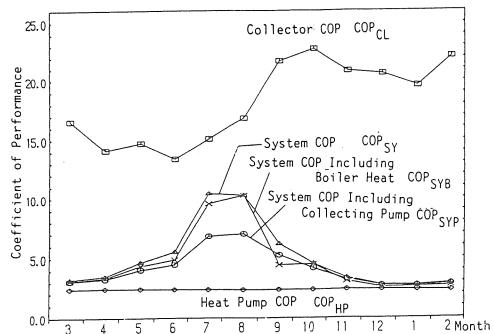


図7 各月の種々の成績係数の変化
(平成6年度、1994)

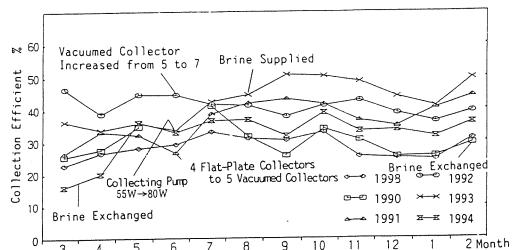


図8 最近6年間の集熱効率の変化と推移

は見られなかったが、それ以外のコレクター交換およびポンプ容量アップによって集熱効率は明らかに増大したことが伺える。これら機器の交換の際には同時に不凍液の交換および補充を行っている。不凍液の交換および補充のみのときも集熱効率によい効果を与えることが多い。

5.2 システム成績係数

図9に最近6年間のシステム成績係数を比較して示す。平成3年(1991)2月(平成2年度)にヒートポンプの蒸発器と凝縮器の洗浄を行った結果、平成3年(1991)3月(平成3年度)からシステム成績係数が急上昇していることが伺える。コレクター交換・増設(増設時に集熱ポンプの容量アップをしなければ)および不凍液の交換・補充等はシステム成績係数にそれほど関係がない。むしろ日射量の大小の方が大きな影響を及ぼし、平成5年度(1993)は天候不順による冷害の年で、システム成績係数は年間3.27の低い値にとどまった。

それに対して平成6年度(1994)は好天に恵まれた豊作の年でシステム成績係数は7~9月の夏に大きな値となり、年間3.53に回復した。

5.3 ヒートポンプ成績係数

図10にヒートポンプ成績係数を各年度毎に比較して示す。ヒートポンプの蒸発器および凝縮器のスケール付着等により平成元年度(1989)以来徐々に性能が劣化したので、平成3年(1991)2月(平成2年度)にこれら熱交換器の洗浄を行った。その結果平成3年(1991)3月には明らかな性能の向上が見られ、年間システム成績係数も前年度を上回った。しかし、その後特に手当をしていないこともあって、毎年成績係数は低下の一途をたどり、平成6年度(1994)は年間2.37にまで低下した。ゆえに平成7年(1995)10月にヒートポンプの洗浄、水中ポンプのスケール落とし等の修復およびメンテナンスを行った。

ただし、ヒートポンプの成績係数が低いのは自身の能力の低下もあるが、その算出に当たり一次側水中ポンプの動力を加算したことも影響している。

5.4 各測定値および性能値の年度毎比較

図11に平成元年度(1989)以降のヒートポンプ成績係数(COP_{HP})、システム成績係数(COP_{SY})およびボイラ熱量を含むシステム成績係数(COP_{SYB})の推移を示す。システム成績係数(COP_{SY} , COP_{SYB})はヒートポンプ成績係数に強く依存し、また日射量の影響も受ける。平成2年度(1990)にはヒートポンプを洗浄したため、平成3年度(1991)にはほぼ前年の平成元年度(1989)の値まで回復した。

しかし、その後は徐々に低下する一方である。 COP_{SY} と COP_{SYB} は平行して増減するが、前者は後者よ

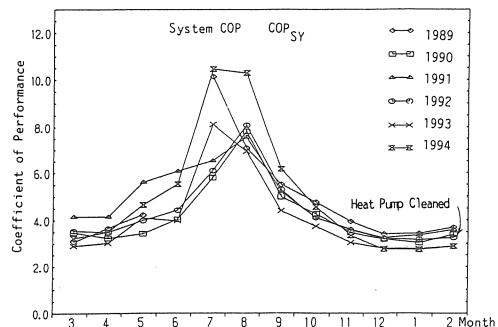


図9 最近6年間のシステムCOPの比較

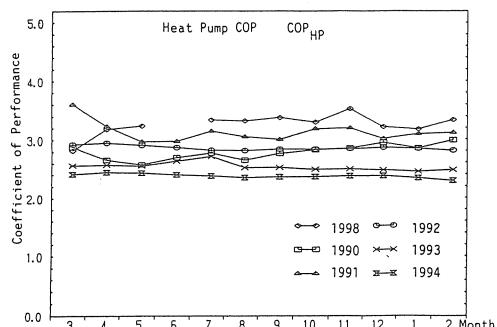


図10 最近6年間のヒートポンプCOPの比較

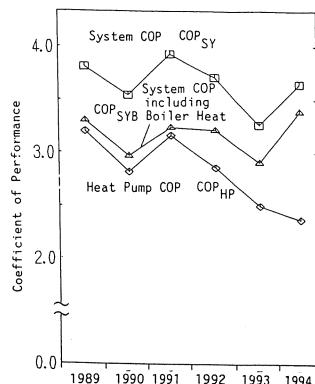


図11 最近6年間の種々のCOPの変化

り大きい。平成5年度(1993)は悪天候のため共に低下したが、平成6年度(1994)は好天のため COP_{HP} が減少したにもかかわらず、 COP_{SY} および COP_{SYB} が急増した。

表 1 平成元年度(1989)～平成6年度(1994)の測定値および性能値

YEAR		1989	1990	1991	1992	1993	1994	
Solar Radiation	Q _S MJ	32807.0	33465.9	30699.7	33362.2	38977.2	41832.4	
Collected Heat	Q _C MJ	10138.1	9559.3	10932.1	13826.5	12331.8	17541.2	
Ground Water Heat	Q _G MJ	36714.2	24129.4	30943.8	30312.5	24571.0	20524.8	
Heat Pump Electric Power	Q _E MJ	16660.0	13235.9	14287.0	16261.8	16291.7	15041.8	
Boiler Heat	Q _B MJ	3649.1	3842.4	4410.1	3645.7	2999.0	1677.1	
Total Heat Supplied	Q' τ _C MJ	67161.4	50767.0	60572.7	64046.5	56193.5	54785.2	
Collection Efficiency	η _C	0.308	0.286	0.356	0.414	0.316	0.419	
Solar Energy Dependence	F _C	0.151	0.188	0.180	0.216	0.219	0.320	
Ground Water Dependence	F _G	0.547	0.475	0.511	0.473	0.437	0.375	
Heat Pump Dependence	F _E	0.248	0.261	0.236	0.254	0.290	0.275	
Boiler Heat Dependence	F _B	0.054	0.076	0.073	0.057	0.053	0.031	
Renewable Energy Dependence	F _{RE}	0.698	0.664	0.691	0.689	0.657	0.695	
Heat Pump COP	COP _{H,P}	3.204	2.823	3.166	2.864	2.508	2.365	
System COP	COP _{S,V}	3.812	3.545	3.931	3.714	3.265	3.531	
System COP Includ. Boiler Heat	COP _{S,V,B}	3.307	2.973	3.240	3.217	2.913	3.277	
Heat Supplied for Space Heat. Q _{SS}	MJ/d	124.5	69.3	88.4	87.5	76.7	95.5	
	kcal/h	1238.7	689.9	880.1	870.3	763.3	950.4	
Heat Supplied for Hot Water	Q _{HW}	MJ/d	45.5	35.2	48.9	74.2	46.6	43.4
	kcal/h	453.0	350.5	486.8	470.1	461.7	431.9	

表1に各測定値、依存率およびその他の性能値の年度毎の比較を示す。平成元年度(1989)から6年度(1994)にかけての各性能値のうち依存率に注目すると、太陽依存率は集熱器の器種および枚数を変更したことにより0.151～0.320と変化し、地下水依存率はそれを補完するように0.547～0.375と変化する。しかし両者合わせた自然エネルギー依存率はこの期間中ほぼ一定の0.657～0.698で熱負荷全体の約7割が太陽熱と地下水熱で賄われた自然エネルギー依存型の住宅であることが分かる。との約3割が既存エネルギーで、その内訳は平均で2割5分が電力、5分がボイラ熱である。

6. むすび

昭和61年(1986)10月よりソーラーヒートポンプシステムを住宅に導入し、居住実験を行ってきた。測定値から求められるコレクター成績係数、ヒートポンプ成績係数およびシステム成績係数を用いて、本ソーラーヒートポンプシステムの性能評価を行った。コレクターを平板型から真空ガラス管型に交換して集熱効率が増大し、真空ガラス管コレクターを5枚から7枚に増設し、集熱ポンプの出力アップをしたことによつてさらに集熱量が増大した。

一方、ヒートポンプ、水中ポンプ、その他システムの手当がなされなければシステム成績係数は次第に低下するが、その間ソーラー集熱器にバックアップされて性能がそこそこ維持されてきた。天候の善し悪しにも左右されるが、現在のシステム性能はシステム成績係数で評価すると、平成元年度(1989)の3.81から平成6年度(1994)は3.53に低下した。

その主たる原因是ヒートポンプにあることが分かったので、平成7年(1995)10月に蒸発器を新品と交換して現在順調に稼働中である。

このようにシステム性能を高く維持するにはヒートポンプ、水中ポンプ、コレクター、集熱ポンプ、その他のシステム・部品および制御・配管系統等への不断の細かい気配りと手当が必要である。

しかし、さらに大幅な成績の向上を望むならば、ソーラー蓄熱タンクおよびヒートポンプ暖房タンクの一体化^{(10), (12)}など、システムの抜本的な改善を行なわなければならない。

謝辞：本研究は、昭和61年度(1986)より毎年順次以下の卒業生諸君の協力によって測定およびデータ整理がなされて遂行されたことを記して感謝する：加藤幹雄、中嶋宣昭、木村健、栗原憲二、山廣雅之、小林久洋、進藤宗平、橋本昌臣（敬称略）。

参考文献

- (1) 金山公夫、馬場弘、福田武幸、太陽エネルギー、Vol. 12, No. 5, (1986), pp. 13~20.
- (2) 金山公夫、馬場弘、福田武幸、太陽エネルギー、Vol. 13, No. 2, (1987), pp. 12~17.
- (3) 金山公夫、馬場弘、福田武幸、太陽エネルギー、Vol. 14, No. 6, (1988), pp. 35~40.
- (4) 金山公夫、馬場弘、山本政樹、機論、B, 52巻、484号(1986), pp. 4046~4052.
- (5) 金山公夫、馬場弘、山本政樹、機論、B, 54巻、499号, (1988), 728~733.
- (6) 金山公夫、馬場弘、木村健、日本太陽エネルギー/風力エネルギー講演論文集(1990), pp. 113~116.
- (7) 金山公夫、馬場弘、空気調和・衛生工学、64巻、11号, (1991), pp. 49~53.
- (8) 金山公夫、馬場弘、地下水学会、32巻、4号(1991), pp. 239~246.
- (9) 金山公夫、馬場弘、遠藤登、日本機械学会環境工学シンポジウム講演論文集(1992), pp. 353~357.
- (10) 金山公夫、馬場弘、遠藤登、進藤宗平、日本機械学会第72期全国大会講演論文集(1994), Vol. III, pp. 554~556.
- (11) 金山公夫、馬場弘、遠藤登、第5回環境工学総合シンポシウム'95'講演論文集、(1995), 364~367.
- (12) K. Kanayama, H. Baba and N. Endoh, Solar Engineering 1995 (Proc. ASME/JSME/JSES, Int. Solar Energy Conf.), Vol. 1, pp. 45~49.