

■ 報 文 ■

# サーモサイフォンによる温室暖房効果について

## Effects of Thermosiphons on Greenhouse Heating

忽那 泰章\*・赤川 浩爾\*\*・水野 進\*\*\*・松井 範義\*\*\*\*  
 Hiroaki Kutsuna Koji Akagawa Susumu Mizuno Noriyoshi Matsui  
 伊藤 清\*\*\*\*\*・加藤 鉄弘\*\*\*\*\*・半谷 尹良\*\*\*\*\*  
 Kiyoshi Ito Tetsuhiro Kato Makoto Hangai

### 1. 緒 言

夏季から秋季にかけての太陽エネルギーを地中に長期蓄熱し、これを冬季に利用して、農業用の温室あるいは住宅の暖房を行う方法は、一日周期で蓄熱・放熱をくり返す方法に比較して安定した熱供給を確保できる点に大きな特長がある。著者らはこの方法によるシステムを開発し、これまでその性能を調べてきた<sup>1)~3)</sup>。その結果、地中長期蓄熱とヒートパイプの併用により、冬季のビニールハウス内で夏型園芸作物(トマト)の栽培環境を得ることができた<sup>2),3)</sup>。本報では、ヒートパイプに加えて、より構造の簡単なサーモサイフォン<sup>4)~6)</sup>を用いた場合の性能を検討する。すなわち、地中蓄熱装置をもつ温室を南北に分割し、南側には1981年度のヒートパイプを埋設したままとし、北側にはほぼ同数のサーモサイフォンを埋設して、冬季のこれらの熱輸送特性と、温室暖房効果について調べた結果を示す。

### 2. 試験装置および試験方法

本システムは神戸大学農学部付属農場に設置されており、その概要を表1に示す<sup>2)</sup>。蓄熱装置のある試験棟をA棟、蓄熱装置のない試験棟をB棟とする。両棟は4m隔てて南北方向に並んで建てられ、東棟がA棟、西棟がB棟である。1981年度<sup>2)</sup>と異なる点は、サーモサイフォンを1982年12月1日にA棟北側に埋設したこ

表1 システムの概要

場 所	神戸大学農学部付属農場 兵庫県加西市 東径 134° 49' 北緯 34° 56'
ビニールハウス	A棟 試験棟 B棟 対照棟
集 熱 器	集熱板有効面積 16㎡ 架台 南向き 30°傾斜 蓄熱槽 0.73㎡
地下配管	銅管 外径 20mm 内径 17mm 総延長 112 m
ヒートパイプ	銅管 外径 45mm 長さ 1500mm フィン形状 {高さ 25mm 長さ 200mm 枚数 24枚 埋設個数 31本 作動液 蒸溜水
サーモサイフォン	外管(鋼) 外径 101.6mm 長さ 1375mm 内径 95.2mm *内管a(鋼) 外径 60.5mm 長さ 1500mm 内径 55.9mm *内管b(塩ビ) 外径 60.0mm 長さ 1500mm 内径 51.0mm 埋設個数 28本

\*は所定の時期に比較試験した。

とである。A棟南側には1981年12月11日に埋設した二相サーモサイフォン式のヒートパイプ<sup>7)</sup>を残したままとした。ヒートパイプおよびサーモサイフォンの埋設位置を図-1に、埋設状況を図-2に示す。サーモサイフォンNo.1およびNo.2を試験用とした。No.1の内管およ

\* 神戸商船大学商船学部助教授  
〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1

\*\* 神戸大学教授大学院自然科学研究科長

\*\*\* 神戸大学教授

\*\*\*\* 神戸大学講師

\*\*\*\*\* (株) 新井組 機械部特機開発課長

\*\*\*\*\* (株) 新井組 機械部係員

\*\*\*\*\* (株) 新井組 機械部係員

(註) 本研究会第2回研究発表会(58/4/25)で講演  
原稿受付日 (58/9/19)

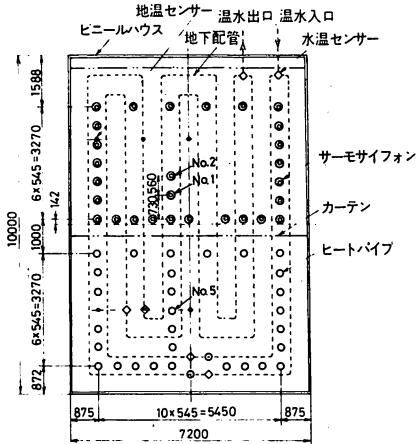


図-1 ヒートパイプおよびサーモサイフォンの埋設位置

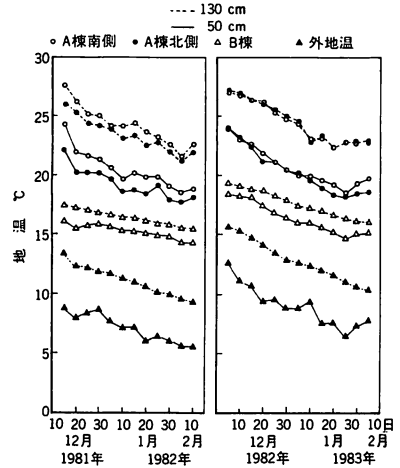


図-3 冬季の地温変化

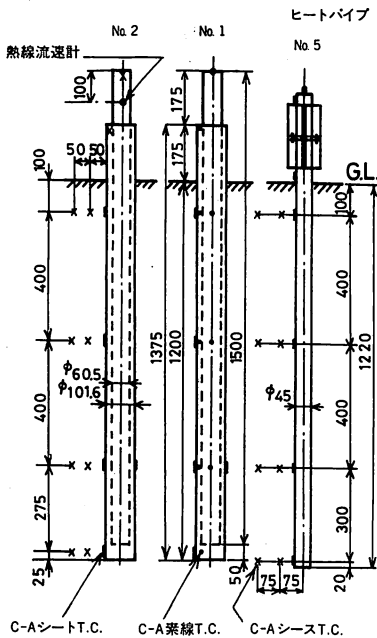


図-2 ヒートパイプおよびサーモサイフォンの埋設状況

び外管の空気流路に沿って空気温度測定用のC-A素線熱電対が9個設置されており、No.2の外表面には5個のC-Aシート熱電対が貼り付けられ、外表面から50mmと100mmの位置にはC-Aシース熱電対が埋設されている。ヒートパイプの熱輸送量は1981年度と同様なダクトを用いて測定され<sup>3)</sup>、サーモサイフォンの熱輸送量は、内管・外管の上端部に取り付けられたC-Aシース熱電対で得られる空気温度差と内管の上端から100mmの位置に固定された熱線流速計で得られる空気流速から見積られる。1982年度の研究においても1981

年度と同様に、A棟南側、北側およびB棟を各試験区とし、11月9日にトマトを定植して、その生育状況を調べた。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 冬季の地温変化

集熱量、蓄熱量などについては1981年度<sup>2)</sup>と同様な結果が得られたので、ここでは省略する。図-3には深さ50cmと130cmにおける冬季の午前6時の地温変化を示す。同図にはA棟南側、北側、B棟および外地の地温を1981年度と1982年度の比較で示している。これより、1982年度は1981年度に比べて暖冬であったために、地温のレベルはやや高くなっていることがわかる。しかしながら、各試験区とも深さ130cmと50cmにおける温度差がほぼ等しいことから、地中を熱伝導で上向きに流れる熱量は各年度ともほぼ等しいとみなしうる。

#### 3.2 サーモサイフォンの特性

密閉型のサーモサイフォン<sup>3)</sup>では、ヒートパイプをはじめとして多くの応用例があるが、開放型のサーモサイフォンの場合には、積極的に応用した例<sup>4)</sup>は少ない。著者らは開放型のサーモサイフォンを1981年度に試験的に用いた結果、その有用性が期待できたので<sup>2)</sup>、1982年度にはヒートパイプと比較してより詳細に検討した。

図-4には、サーモサイフォンの埋設直後の特性を示す。設置した1982年12月1日から2日にかけての夜間には、外管上端部の空気温度が内管上端部のそれより高く、図中に示した正流時の方向の空気流れが生じていたが、12月2日から3日の夜間にはそれが逆流し、

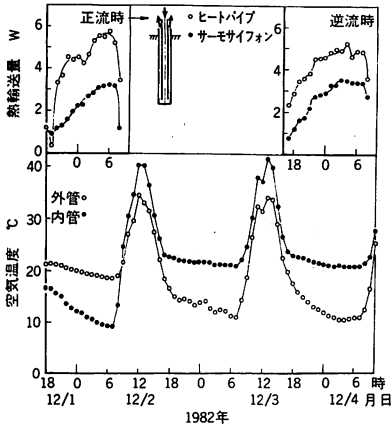


図-4 サーモサイフォンの熱輸送状況

暖められた空気は内管から温室内に放出されていることがわかる。その際のサーモサイフォンの熱輸送量を比較した結果が上図の曲線である。正流から逆流に変化しても、熱輸送量に顕著な変化はみられていない。また同図には、ヒートパイプの熱輸送量も比較して示

している。サーモサイフォンの場合がヒートパイプに比べて低いのはこの時期の気温が高かったためであると思われる。逆流の生じる原因は明らかではないが、次の二点が考えられる。すなわち、内管がより高い位置にあって日中の日射で暖められた内管内の空気温度が外管内の空気温度に比べて高くなり、これが夕刻になっても低下しにくく、いったん逆方向の流れが始まるとこれが維持されること、および地温は深さ方向に高くなる分布をもっている、これが浮力による流動を妨げることである。

サーモサイフォンの内管上端から100 mm 下方における空気流速と、出入口の温度差の変化例を図-5に示す。空気流速は33cm/sにも達しているが、レイノルズ数 $Re = U D_i / \nu$  (ここで、U: 空気流速,  $D_i$ : 内管内径,  $\nu$ : 空気の動粘性係数) は約1,000であるから層流範囲である。温度差と流速の変化は同じ傾向を示しており、自然対流による流動・伝熱を証明している<sup>9)</sup>。

図-6には、サーモサイフォン内の空気温度の経時変化を示す。深さが深いほど空気温度変化が少なくて、晴天時(12月18日)には内管の空気温度は外管の

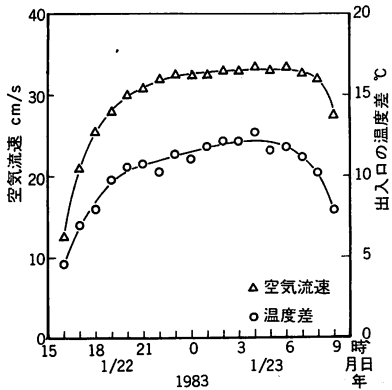


図-5 サーモサイフォンの特性

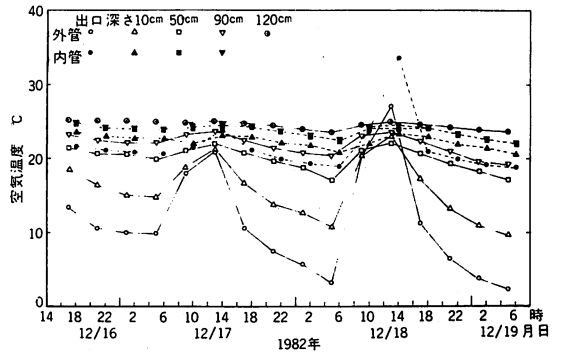
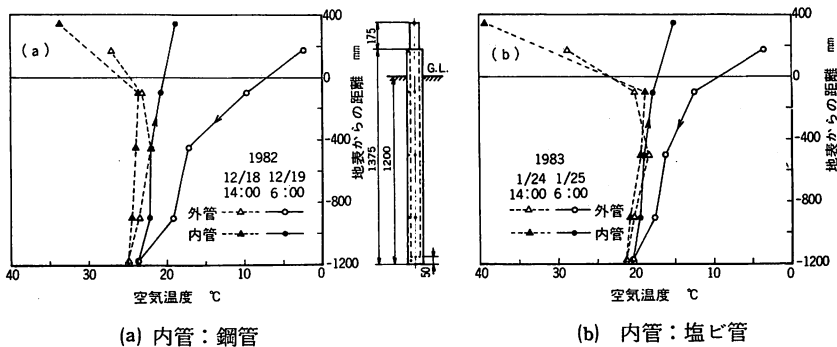


図-6 サーモサイフォン内の空気温度の経時変化



(a) 内管：鋼管

(b) 内管：塩ビ管

図-7 サーモサイフォン内の空気温度分布

表2 内管材質の影響 (午前6時)

実験日 1983年	場所 No.1—南 No.2—北	内管材質 (外径mm)	放熱量 W	比率
1月26日	No.1 No.2	鋼(60.5) 鋼(60.5)	5.42 6.72	0.807 1
2月5日	No.1 No.2	塩ビ(60) 鋼(60.5)	6.34 7.51	0.844 1

それより高くなり、夕刻になっても外管より低くならないことがわかる。夜間にもこの影響で前述した逆流が生じるものと推察される。

昼間(14:00)および早朝(6:00)の流れ方向の空気温度分布を図-7(a), (b)に示す。(a)は内管に鋼管を用いた場合、(b)は塩ビ管を用いた場合の結果である。鋼管の場合には、内管を上昇する空気と外管を下降する空気との間で熱交換を生じ、これによる循環駆動力の減少が予想されたので、断熱性のよい塩ビ管としてみた。表2は、図-1に示されたNo.1の位置において、内管に鋼あるいは塩ビ製の管を用いたときの午前6時における放熱量の比較を示している。いずれも逆流時のデータである。No.1とNo.2の場所的な影響は1月26日の同一内管においてもみられるが、No.2の放熱量を1としたときのNo.1の比率には大きな相違はみられていない。結果的には、内管の材質による影響は顕著ではなく、サーモサイフオンの性能には、内管および外管の形状・寸法が顕著な影響を及ぼすと考えられる<sup>6)</sup>。

昼間の晴天時には温室内の空気温度が管内のそれよりも高いため、図-7の14:00における空気温度分布からわかるように、流動は生じていない。曇天や雨天時には弱い対流の生じる場合が熱線流速計によって認められた。早朝(6:00)には、両者とも地表近傍と底部において空気温度の上昇が著しいことがわかる。

### 3.3 サーモサイフオンとヒートパイプの熱輸送量

暖かい日と寒い日を選び、また1981年度と1982年度を比較して、ヒートパイプ(No.5)の熱輸送量の経時的变化を図-8に示す。1982年度にはサーモサイフオン(No.2)の結果も示している。これによると、1982年度のヒートパイプからの熱輸送量は1981年度よりやや大きく目であり、ヒートパイプの経年変化はみられない。また、サーモサイフオンは暖かい日に比べて寒い日ほど熱輸送量が大きくなり、ヒートパイプと同程度の値をもつことがわかる。このことから、ヒートパイプより安価なサーモサイフオンを用いても、ヒートパイプ並みの温室暖房効果が期待できることがわかる。

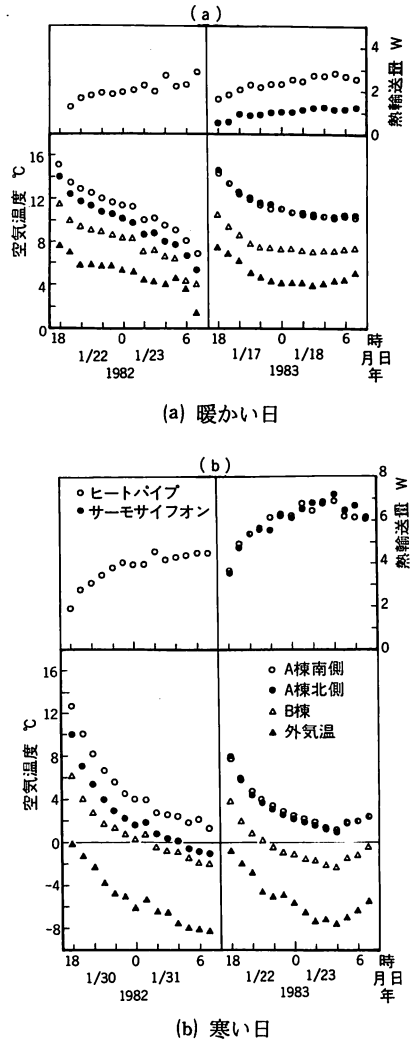


図-8 熱輸送量および空気温度の経時的变化

### 3.4 室温の日変化

図-8の下部には、A棟南側、北側、B棟および外気の空気温度の経時的变化を示している。A棟北側は1981年度には地中蓄熱のみによる暖房であり、室温は南側とB棟の中間値をとっていた。1982年度にはサーモサイフオンの埋設により、南側の室温と同程度に上昇していることがわかる。いずれの室温変化も気温変化と同じパターンを示している。これは、温室空気熱容量が小さく、ヒートパイプやサーモサイフオンからの熱供給により室温が上昇すると、それに応じて温室から外気への放熱量も増加するためであると考えられる。しかしながら、ヒートパイプやサーモサイフオンの効果は室温レベルの上昇として現われている。

図-9(a), (b)には、1981年度と1982年度のほぼ同時期

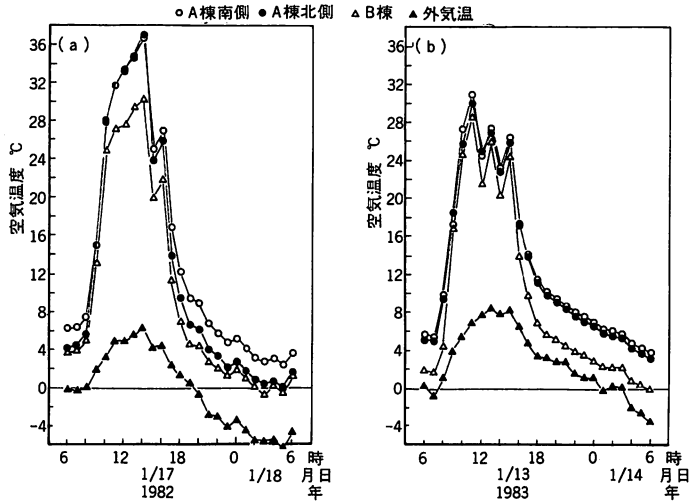


図-9 室温および外気温の日変化

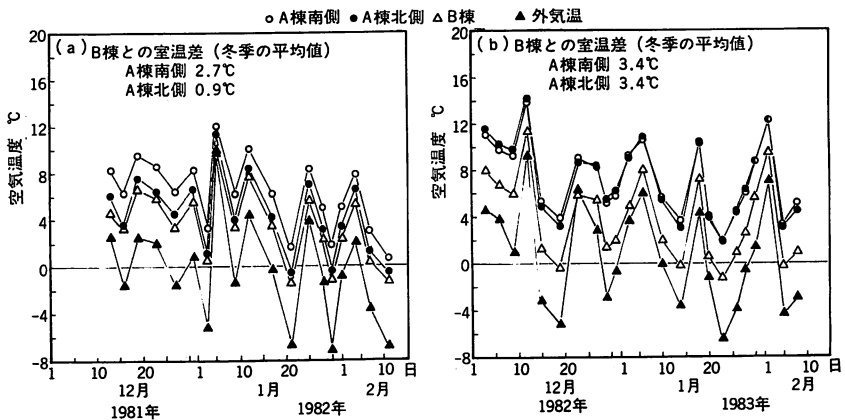


図-10 冬季における室温の変化（午前6時の値）

の1日にわたっての各室温の変化を外気温とともに示す。1981年度にはB棟の室温により近い値をとっていたA棟北側の室温は1982年度にはA棟南側の室温とほぼ等しくなっていることがわかる。(b)図にみられるようなA棟の夕刻から夜にかけてのゆっくりした温度低下は、植物の養分の転流にとっては好条件であることが知られている<sup>3),10)</sup>。

### 3.5 室温の时期的変化

図-10(a), (b)には、A棟南側、北側およびB棟の冬季における午前6時の室温の変化を外気温の変化とともに示す。1981年度にはA棟北側の室温は地中蓄熱の効果により常にB棟より高温に保たれていたが、A棟南側の室温よりも低い目であった。しかしながら、1982年度にはサーモサイフンの効果により、A棟北側の室温は南側の室温とほとんど一致していることがわか

る。図-10中には、A棟南側および北側の室温とB棟の室温との差の平均値（冬季の午前6時の値）を示している。A棟北側の室温差は地中蓄熱のみの場合には、0.9°C（変動範囲0.4~1.4°C）であったが、サーモサイフンの効果により、3.4°C（変動範囲2.7~4.2°C）まで増加した。ヒートパイプの暖房によるA棟南側では両年度とも同程度の効果があり、ヒートパイプの伝熱性能における経年変化はみられないことがわかる。

なお、温室の出入口を北側に設けたため、ここからの冷たい風の吹き込みを完全に防止することができず日によっては北側の室温が南側よりやや低いこともあった。しかし、冬季を通じて南側と同程度の室温が維持されているのは、サーモサイフンがその簡単な構造にもかかわらず良好な伝熱性能を有しているためであると考えられる。いずれの図においても、外気温が

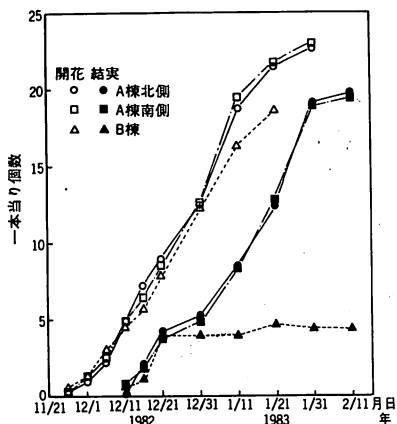


図-11 トマトの開花・結実状況

低いときほど室温と外気温との差は大きく、逆に外気温が高いほどその差は小さくなっている。これはヒートパイプやサーモサイフォンへの熱の供給源となっている地下約1mの地温は外気温の影響をほとんど受けないため、地温と室温の温度差が大きくなるほどこれらによる熱輸送量が増加する傾向をもっていることによる。したがって、ヒートパイプやサーモサイフォンは外気温の変化による温室内空気温度の変化を緩和する効果をもっているといえる。

### 3.6 トマトの生育状況

1982年度のトマト1本当たりの開花・結実状況を図-11に示す。図にみられるように、A棟南側と北側の開花数ならびに結実数はほとんど同程度であり、2月中旬で1本あたり19個の結実を得た。これに対し対照区(B棟)はA棟に比べて開花においては1月以降減少がみられ、結実においては12月末より増加が認められなかった。対照区では1月23日の寒波により植物体上部が枯死した。なお、1981年度ではA棟南側、次いで北側B棟の順で生育・結実とも減少していた<sup>3)</sup>。

以上の生育状況からも、A棟北側ではサーモサイフォンの埋設により、A棟南側と同程度の暖房効果が得られたことが明らかである。

## 4. 結言

構造の簡単な二重円筒型サーモサイフォンの性能は既に用いたヒートパイプと同程度であり、これらによって普通のビニールハウスに比べて冬季に3~4℃程度の室温上昇(地中蓄熱のみでは1℃前後)が得られた。太陽熱の地中長期蓄熱システムとサーモサイフォンの組み合わせにより、冬季の低温時においても石油

暖房なしに、夏型園芸作物(トマト)の生育環境が維持できることが明らかになった。

終わりに、資材の提供を受けた畑タクマ、畑住友軽金属工業の両社に対し謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 水野進, 赤川浩爾, 忽那泰章, 松井範義, 伊藤清, 加藤鉄弘, 半谷尹良; 太陽熱の地中長期蓄熱とビニールハウスへの応用, 冷凍, 57巻, 654号(1982), 349~357.
- 2) 水野進, 松井範義, 赤川浩爾, 忽那泰章, 伊藤清, 加藤鉄弘, 半谷尹良; 太陽熱の地中長期蓄熱とヒートパイプによる放熱促進システム, エネルギー・資源研究会第1回研究発表会講演論文集(1982), 19~24.
- 3) 松井範義, 水野進, 赤川浩爾, 忽那泰章, 伊藤清, 加藤鉄弘, 半谷尹良; 太陽熱の地中長期蓄熱による温室暖房に関する研究, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, 1号-B(1983), 1~15.
- 4) Reid, R. L., Tennant, J. S., Childs, K. W.; The Modeling of a Thermosyphon Type Permafrost Protection Device, ASME Paper, No74-HT-46(1974), 1~9.
- 5) Japikse, D.; Advances in Thermosyphon Technology, Advances in Heat Transfer Vol. 9(1973), Academic Press.
- 6) 忽那泰章, 赤川浩爾, 藤井照重; 地熱利用に対するサーモサイフォンの解析, 第20回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1983), 535~537.
- 7) 松井範義, 水野進, 赤川浩爾, 忽那泰章, 伊藤清, 加藤鉄弘, 半谷尹良; 温室暖房用熱サイフォン式ヒートパイプの性能, 神戸大学農学部研究報告, 15巻, 2号(1983), 291~299.
- 8) 日本機械学会; 伝熱工学資料(1966), 33.
- 9) 一色尚次; 伝熱工学(1967), コロナ社, 94.
- 10) 農山漁村協会; 農業技術大系(1972), 32.

