

交互循環による地中加温法に関する研究

第1報 土壌中における熱拡散と加温効率*

沖 森当・吉田隆徳・長谷川繁樹・道下数一**

要 約

沖 森当・吉田隆徳・長谷川繁樹・道下数一** (1976): 交互循環による地中加温法に関する研究。第1報 土壌中における熱拡散と加温効率。広島農試報告37: 31~44

温水循環による地中加温時の土壌中での熱拡散の状態を調査した。

温水による地中加温の場合、循環初期の放熱量が最も大きく、時間の経過と共に放熱量は減少することが明らかになった。この原因は放熱パイプの周囲2~3cmの狭域土壌がリング状に高温になり、放熱を阻害しているためと推定される。放熱効率向上のためには、ある一定時間循環を中止してパイプ周囲の高温土壌域の熱拡散をはかり、循環水と土壌間に温度差をつけて再び循環をはじめる断続循環法が効果的であることを明らかにした。さらに温水循環を中止するとき、他のベットの循環させる交互循環法をとれば暖房機の稼働率の向上、2倍の面積の加温により単位灯油消費量は30~51%節減でき熱効率が向上した。

I 緒 言

果菜類の促成栽培において気温はもとより、地温の確保は重要な問題である。不足する地温確保の手段として、マルチングによる方法と醸熟物の踏み込みや電熱利用による積極的な地温確保は早くから実用化⁴⁾されているが、大規模栽培に利用するとなると作業能率や経費の面から制約がある。比較的安価に行われる方法として灯油や重油燃焼により水を加温し、この温湯を循環する地中加温法が岡山農試の秋田^{2,3)}により試みられた。

その後、神奈川園試の板木^{13,14)}によって加温装置の改良、加温特性についての試験が実施された結果、大規模栽培に実用化できることが確かめられ、順次普及されてきた。従来、灯油や重油燃焼による温水循環地中加温法は電熱に比べて熱量当たりの単価が安い²³⁾ことから普及されてきたが、しかし、中東戦争に端を発した石油価格の高騰は、加温栽培にとって大きな経費負担となり、燃料節減対策が今後の施設栽培にとって重要な研究課題とされている。

近年、急速に発展した施設栽培は石油をはじめとする諸資材の高騰から収益性が低下して、施設栽培の見直しが行われつつある。その一つは施設効率が悪いために必要以上のエネルギーを消費している場面が多く見受けられる。とくに施設内は温度条件だけをみても非常に複雑

で、熱収支にいたっては一層その解明が困難な場合が多い。そのため実証が多くもちいられ、試験結果の集積により定義づけの手法がとられている。そこで実証に際しては、植物生理とともに物理的分野に属する問題の解明が必要で、適確な手法によって結果の判定を行うことが重要である。

筆者らは温水循環における温水パイプから地中への熱拡散がどのように伝達するかを適確に把握するため、ヒートポンプを用いてその実態を調査した。その結果、土壌中での熱拡散は極めて悪く、温水パイプからの放熱量は時間の経過にともなって著しく低下することが明らかになった。そこで熱効率向上対策として交互循環システムを考案し、実験により熱効率が向上することを確かめた。さらにこの方法はボイラー方式の地中加温法にも応用できることから、ボイラー2台による実証試験も併せ行った。その結果、単位地中温度上昇当たりの燃料は著しく節約できることが明らかとなり実用化のための資料を得たので、ここにその概要を報告する。

II 温水循環による土壌中の熱拡散

温水循環時の地中での熱拡散については板木^{13,15)}の試験成績がある。これによると循環当初は急激に地温上昇するが、その後の地温上昇は極めて僅かなことが報告されている。筆者らも地中熱拡散調査により板木らの試験結果と類似した結果を得た。すなわち、土壌中での

* 本研究の一部は昭和50年度園芸学会中四国支部会に発表

** 中国電力技術研究所研究員

熱拡散は悪く、温水パイプからの放熱量は時間の経過とともに低下することを確かめたので、この原因究明のため、つぎのような実験を行った。

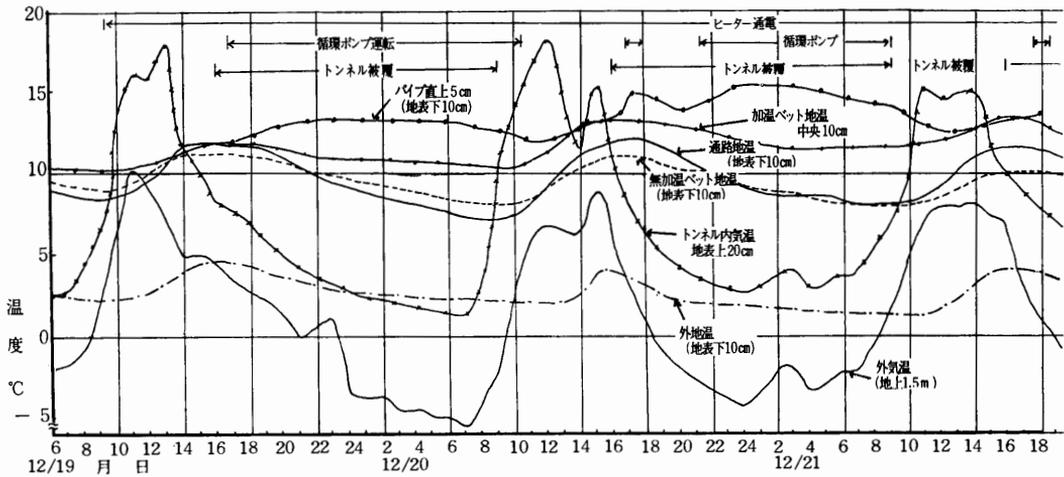
1. 試験方法

試験には鉄骨ファイロンハウス (150m²) をもちいた。規模は間口 5.4m、奥行27.7m、この中に巾1m、長さ24mの栽培床を3うね作り、各うねに内径20mmのユカロンパイプ (以下パイプとする。) を深さ15cmに2本配管し、流量計測によりそれぞれ循環水量が調節できるように施設した。

加温施設はヒートポンプ空冷式 (GE製) をウォータークーラーに改造したもので、ヒートポンプユニット 1.3kw、予備ヒーター2.6kw と循環ポンプ2台 (タン

ク循環 0.25kw、地中循環 0.4kw)、および保温した蓄熱水槽 (1m³) が主なもので、湯温はサーモスタットで一定温度に加温できる施設を準備した。

実験はヒートポンプで行う計画であったが、外気温低下時の熱量不足が予測されたので、予備ヒーターをもちいて温水をつくり、この温水を栽培床に配管したパイプに循環し、地温の変化を調査するとともに、蓄熱水槽の温度変化を測温した。計測はサーミスター記録計 (12点式) 3台をもちい各部の温度を詳細に記録した。また、土壌の熱容量をできるだけ正確に把握するため、3相測定 (気相・固相・液相) を行い熱収支の解析を行った。一方、循環水量の測定や温水出入口の温度測定および熱拡散についての調査も併行して行った。



第1図 ハウス内外の日温度変化 (1972)

2. 試験結果

1) ハウス内各部の日温度変化

ハウス内外の気温および地温の日変化をみると、第1図に示すとおりである。この調査結果によると、加温時の地温 (地表下10cm) は無加温区に比較して2~3°Cの温度上昇を示した。また温水循環パイプから10cm以上はなれると、地温上昇は非常に緩慢となり、土壌中の熱拡散は徐々に行われることがわかった。一方、従来からいわれているように、マルチングや夜間ビニールトンネル被覆の保温効果も認められ、とくに無加温のマルチベットと通路の地温変化でわかるように、日中の太陽熱による昇温と夜間の放熱状態に差が生じた。すなわち、土壌面には着色ポリフィルム (緑) の被覆を行ったため、日射透過率が悪く、日中の地温上昇は無マルチ区より1~2°Cと低くなっている。逆に夜間はフィルムの保温効果により約1°C高くなっているが、その差はハウス内の気

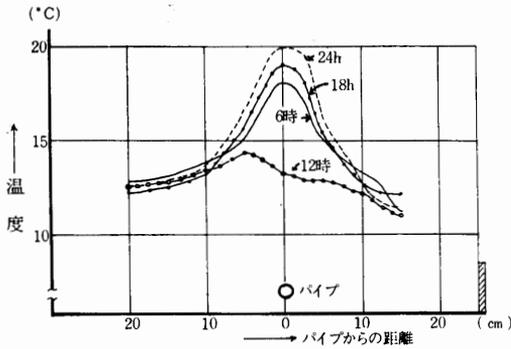
温差によって相違がある。

2) 地中加温による地温の水平・垂直温度分布

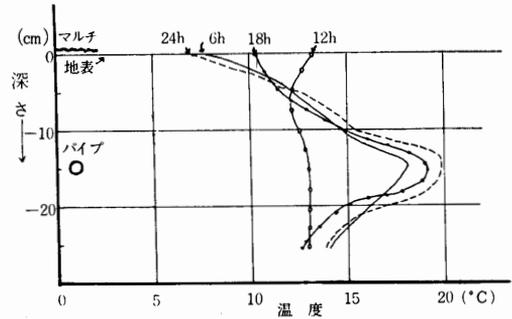
パイプの埋設の深さ15cmの地中加温域を測定し、第2・3図を得た。これによると循環パイプを中心とした上下、横方向に10cm以上離れると、地温上昇は僅かとなる。地温上昇はパイプの上下に比較して、横方向が悪く平均2°C程度であった。とくに著しい現象はパイプから2~3cm以内で循環水温に最も接近し、リング状の高温域ができることである。パイプの上方向は気中放熱が起るため低くなるが、下方向は地中熱拡散が緩慢であるため、地温上昇が大きいのが特徴である。この点を第3図で見ると、循環パイプの上下10cmの位置における温度差は約2°C下部が高温で、その差は積算すると気中放熱量はかなりの熱量となる。

3) 温水循環パイプから土壌への熱拡散

地温の上昇、蓄熱水槽内の水温変化を経時的に測定して第4・5図を得た。前項でも指摘したとおりパイプ



第2図 地中加温と水平温度分布



第3図 地中加温と垂直温度分布
(パイプ埋設 15cm)
(1972. 12. 20~21)

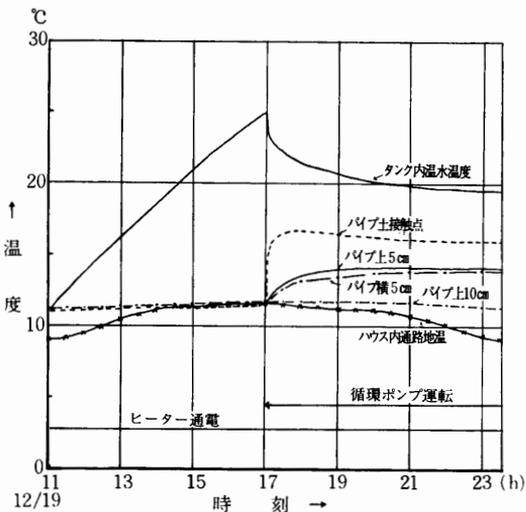
とこれに近接する土壤域が高温になることが明らかになった。第4・5図をみるとおり、パイプと土壤接点の温度上昇は温水循環後、急激に昇温し約30分後には横ばい状態になる。この状態は湯温の高低には関係なく、大体一致した現象であった。パイプから5cm以上離れた位置は徐々に上昇して連続循環しても4時間経過するとほとんど温度変化は認められなくなる。

一方、湯温の変化をみると、循環開始後2~3時間で放熱により急速に湯温の低下が起こる。25°Cの場合は約6時間後、35°Cの場合は8時間後には湯温の変化はほとんどなくなり、横ばい状態になることがわかった。

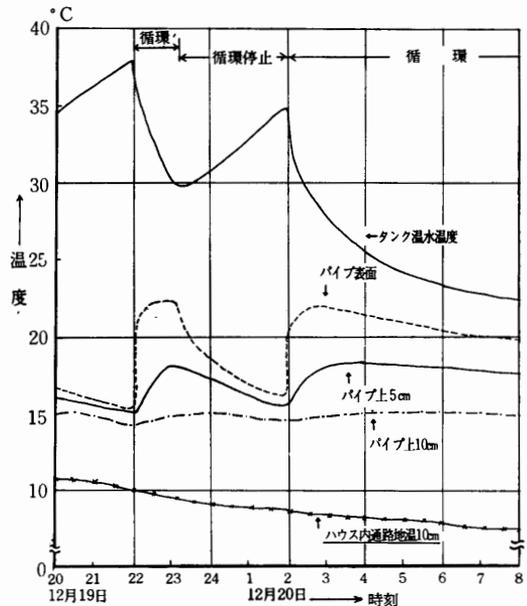
そこで、蓄熱水槽内の水温と第6図のパイプ出入口の湯温の差から求めた給熱量、さらにはヒーター電力使用量および蓄熱水槽の湯温熱量などから検討して、循環開始から経過時間におけるパイプ放熱量を求め第1表・第7図をえた。パイプ（内径20mm）の平均単位放熱量は、

湯温25°Cの場合、初期（0~3時間の平均）16.2Kcal/m.h（パイプ1m当たり1時間の放熱量）に対して、後期（3~8時間の平均）は9.7Kcal/m.h、35°Cの場合は初期20.0Kcal/m.h、後期11.0Kcal/m.hとなり、いずれも後期の放熱量が約50%に低下することがわかった。

温水循環パイプによる地温上昇をはかる場合、従来、連続循環法が一般に行われているが、パイプから10cm以上離れると、地温上昇は非常に緩慢となり、土壤中の熱拡散も徐々に行われ、効率的な方法でないことも判明した。本実験において初期放熱量は後期に比較して1.7~1.8倍になることが認められ、この原因はパイプに近接した土壤温度に基因していると推定した。すなわち、放熱量は物体間の温度差に比例して増減するが、空気比



第4図 温水循環による床土温日変化（温水25°C）



第5図 温水循環による床土温の日変化（温水35°C）

較して熱拡散の悪い土壌では、温水循環を連続的に行うことにより、温度差が小さくなり、そのことにより放熱量が減少するものと考えた。

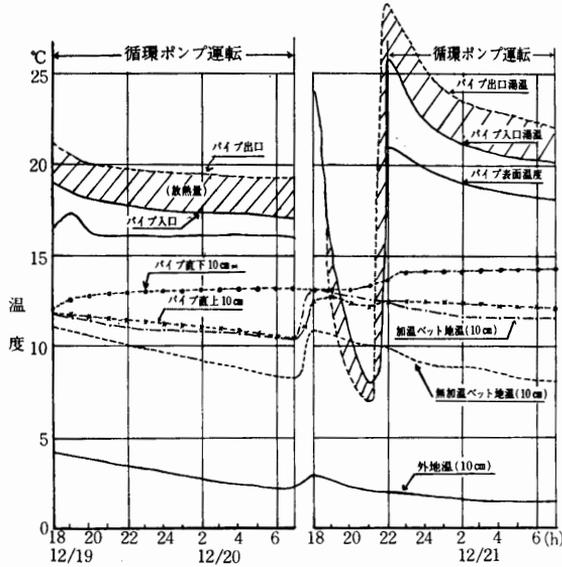


表6図 パイプ埋設15cm区の地温日変化 (2本配管) 1972. 12. 19~22

この現象を基礎に放熱効率向上のための対策として、温水循環を一時停止し、パイプ近接土壌域の熱拡散をはかり、再び循環を繰返す断続循環法が放熱を促進するものと考えられ。さらに循環中止の時間は他のベットの循環する交互循環システムにすることにより、暖房機の熱効率をも高めることが可能ではないかと考えた。

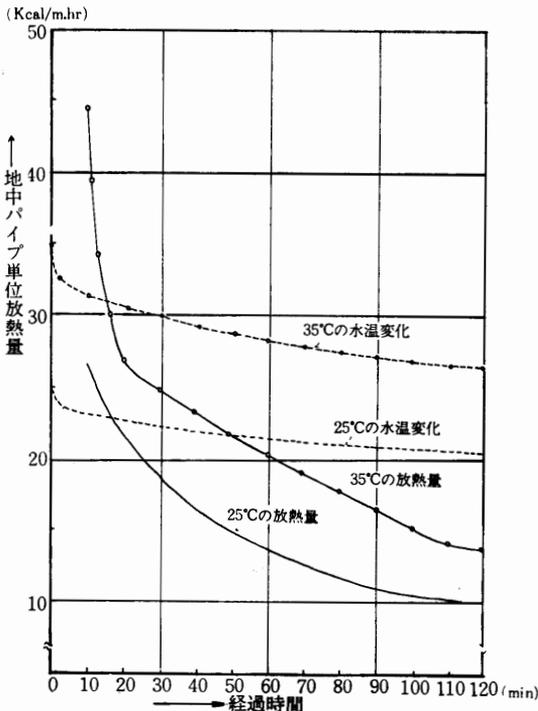
III 交互循環による地中加温法の改善試験

温水循環による地中加温の場合、加温パイプに近接した狭い土壌域だけがリング状の高温になる。その熱拡散をよくする対策として、断続循環法を、さらに暖房機効率を高める交互循環法システムが効果的であると推論した。この交互循環法の熱効率を的確に把握するため、同一機種2台の地中暖房機をもちいて、従来の連続循環法との比較実験を行った。

1. 試験方法

試験は面積 990m² の大型単棟ハウス内で行った。暖房機は灯油式(熱出力 2,200Kcal/h, 循環ポンプ0.2kw)の同一機種2台を使用した。各暖房機には 120ℓ入りの蓄熱水槽を連結し、流量が一定になるように流量計で調節した。湯温サーモスタットを25°Cにセットした場合の性能調査を行い第2表をえた。

この結果によると、B暖房機は、A暖房機に比較して湯温サーモスタットが鋭敏なため、点滅回数が多くなり点火直後の燃焼効率の低下から灯油消費量が多くなった



第7図 循環温水から求めたパイプ放熱量 (1973)

第1表 タンク湯温低下と放熱量

| 項目 | タンク水温 | | |
|------------|------------------|---------------|---------------|
| | 25°C | 35°C | |
| 温水循環後の湯温低下 | 初期 ¹⁾ | 1.7°C/h | 2.6°C/h |
| | 後期 ²⁾ | 0.14°C/h | 0.44°C/h |
| 循環水量 | 1,049 ℓ/h | | |
| 温水放熱量 | 初期 | 1,783 Kcal/h | 2,727 Kcal/h |
| | 後期 | 147 " | 462 " |
| タンク給熱量 | 2,300 Kcal/h | | |
| 合計放熱量 | 初期 | 4,083 Kcal/h | 5,027 Kcal/h |
| | 後期 | 2,447 " | 2,762 " |
| 平均単位放熱量 | 初期 | 16.2 Kcal/m.h | 20.0 Kcal/m.h |
| | 後期 | 9.7 " | 11.0 " |

注) 初期¹⁾ 0~3時間, 後期²⁾ 3~8時間

この数値は暖房機差として、試験時の熱効率比較のとき、灯油使用量を修正する値として使用した。

第2表 試験暖房機の性能比較

| 項 目 | 湯温25°C | | 湯温35°C | |
|-----------------|--------|-------|--------|-------|
| | 暖房機A | 暖房機B | 暖房機A | 暖房機B |
| 最高平均温度 (°C) | 25.0 | 25.2 | 35.2 | 34.6 |
| 最低平均温度 (°C) | 23.4 | 24.0 | 33.6 | 33.4 |
| 平均温度 (°C) | 24.2 | 24.6 | 34.4 | 34.0 |
| 高低差 (°C) | 1.6 | 1.2 | 1.6 | 1.2 |
| 運転時間 (hr) | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 灯油使用量 (cc) | 925 | 1,025 | 2,440 | 2,480 |
| 作動回数 (回) | 10 | 12 | 25 | 31 |
| 循環水量 (ℓ/min) | 23.3 | 23.4 | 24.6 | 22.7 |
| 1作動の灯油量 (cc/回) | 92.5 | 85.4 | 97.6 | 80.0 |
| 単位水温の灯油量(cc/°C) | 38.2 | 41.7 | 70.9 | 72.9 |
| 指 数 | 1.00 | 1.09 | 1.00 | 1.03 |

注) 使用暖房機はN社の熱出力 22,000Kcal/h、灯油暖房機燃料消費量3.5ℓ/h

性能の判明した2台の暖房機は、面積990m²のハウス内を第8図に示すようにベット（1ベット 41.3m²）を4区分し、3ベットを連続循環で加温するようにB暖房機、つぎの6ベットを2区分して交互循環法で加温するようにA暖房機をそれぞれ施設した。残り3ベットは無加温区とした。

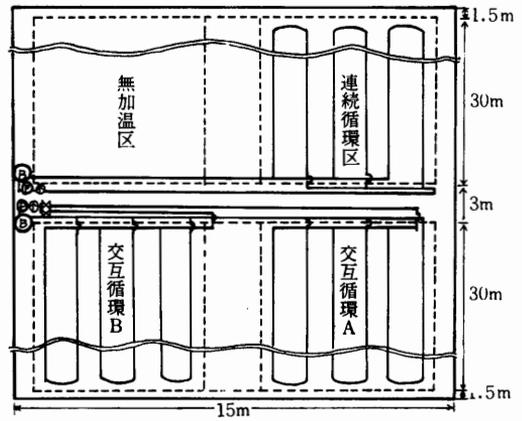
試験は循環湯温を25°Cと35°Cに調節し、各温度の交互循環法は15分と30分の循環間隔とし、日没後18時から翌朝8時までそれぞれ温水を循環した。試験の組合せが4項目であるため4日間にわたったが、適正を期するため1台の暖房機を交互、連続循環法のどちらにも使用するように配慮した。測温は地中放熱量の解析に必要な地温変化を主体に行い、ハウス内外の気温も測定した。

2. 試験結果

1) 循環方法と床土温

大型単棟ハウスは天井被覆のみで、サイドビニールなしの状態を実施した。時期が秋期（1974年10月23日～27日）であったので、ハウス内外の温度差が少なく、湯温と循環間隔についての相互比較としては多少問題はあるが、およその傾向は明らかになることができた。

地温低下を比較してみると第3表のとおりで、湯温25°Cのとき、外気温の最低が12°Cに低下した場合、交互循環15分間隔で無加温区は18時の地温21.3°Cから17.6°Cと3.7°C低下したのに対して、交互循環区は18.6°Cで2.7°C



第8図 試験区の配置
(B; 加温機, P; 循環ポンプ, X; 電磁弁, ↑; 流量計)

の低下、連続循環区は 18.3°Cで3.0°C低下した。外気温の最低が8°Cまで低下したとき、無加温区は18時の地温19.9°Cから16.2°Cと3.7°C低下したのに対して、交互循環30分間隔で17.4°Cで2.5°C、連続循環区は16.2°Cで無加温と差がなかった。湯温35°Cのとき、無加温区は18時の地温19.8°Cから14.9°Cと4.9°C低下しているが、交互循環区では18.3°Cで1.5°C低下、連続循環区は18.4°Cで1.4°C低下した。30分間隔の場合、外気温の最低4.5°Cのとき、無加温区は18時の地温20.1°Cから15.3°Cと4.8°C低下したのに対して、交互循環区では18.6°Cで1.5°C、連続循環区は17.4°Cで2.7°C低下している。

第9図および第10図の垂直、温度分布図によれば、試験Iと同様な結果がえられた。すなわち連続循環の場合パイプ付近の地温は高温になっているが、パイプの上5cmの地温比較をみると、連続、交互の循環方法別による地温の差は余り認められなかった。

循環方法と地温の日変化でみても湯温25°Cのとき、連続、交互循環ともパイプの横10cmの位置の地温変化にはほとんど差が認められない。湯温35°Cの場合、地温の日変化は連続循環区が交互循環区よりやや高目に経過している。垂直温度分布をみると、連続循環区の方がパイプ付近は約5°Cの差があるが、5cm以上離れると2°C程度となっている。また交互循環の温水循環間隔15分と30分の地温変化は湯温25°Cでは差がなく、35°C湯温の場合はパイプ付近の温度が15分間隔では、やや高目に経過することが認められた。

第3表 循環方法与地温の変化(地下10cm)

| 試験区 | | 無 加 温 | | | 連 続 循 環 | | | 交 互 循 環 | | |
|------|-----|-------|------|------|---------|------|---------|---------|------|---------|
| | | 18時地温 | 7時地温 | 低下温度 | 温水温度 | 7時地温 | 無加温区との差 | 温水温度 | 7時地温 | 無加温区との差 |
| 25°C | 15分 | 21.3 | 17.6 | -3.7 | 24.5 | 18.3 | +0.7 | 24.5 | 18.6 | +1.0 |
| | 30分 | 19.9 | 16.2 | -3.7 | 24.5 | 16.2 | 0 | 24.5 | 17.4 | +1.2 |
| 35°C | 15分 | 19.8 | 14.9 | -4.9 | 34.0 | 18.4 | +3.5 | 33.0 | 18.3 | +3.4 |
| | 30分 | 20.1 | 15.3 | -4.8 | 34.5 | 17.4 | +2.1 | 34.5 | 18.6 | +3.3 |

2) 交互循環法の熱効率

循環法による地温変化と灯油使用量から求めた熱効率を第4表に示した。交互循環はA, B区の面積を加温したので、両区の地温変化を測温してその加算値をもとに表示した。循環開始から停止までの地温変化をもとに必要な熱量を求めてみると、第4表にみるように交互循環法は熱効率が向上することが明らかとなった。

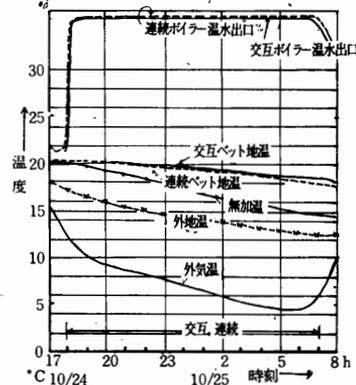
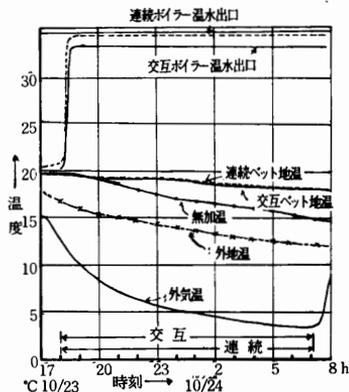
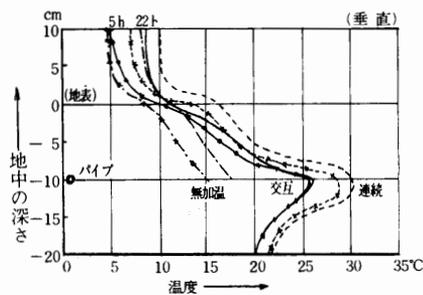
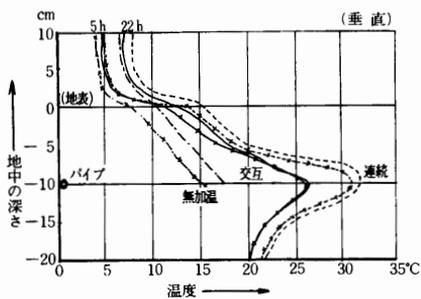
すなわち湯温が25°Cの場合、15分間隔の交互循環が連続循環の61%、30分の交互循環では連続循環の70%、湯温35°Cの場合は15分の交互循環が連続循環の63%、30分の交互循環が連続循環の49%と、それぞれ少ない燃料で

ほぼ同一地温上昇ができることが明らかになった。

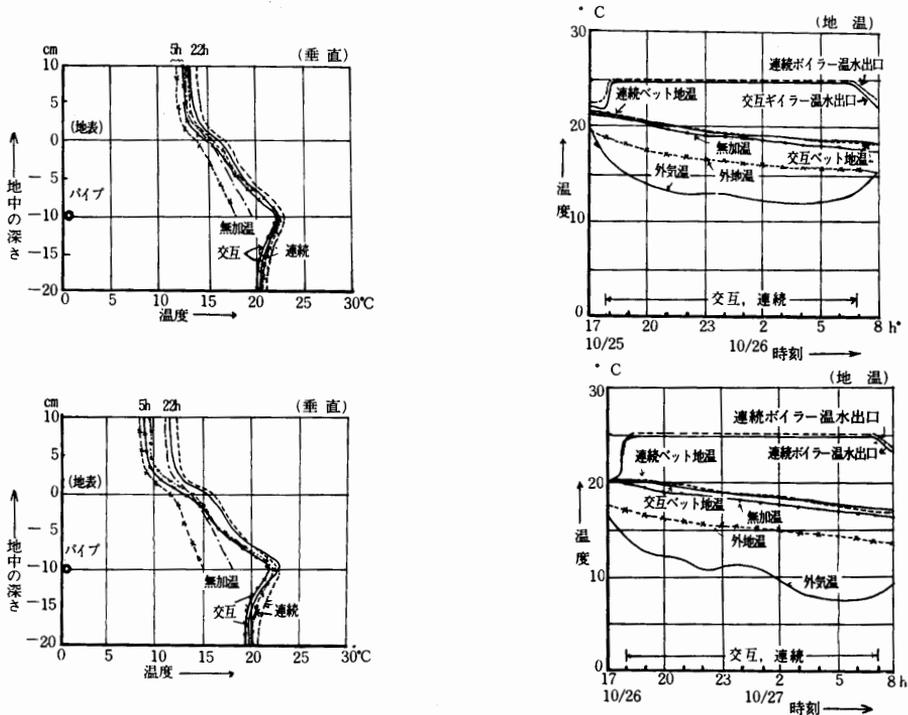
IV 施設イチゴに対する交互循環の現地実証試験

交互循環システムの普及をはかるため、山県郡千代田町で現地実証試験を行った。試験は総面積2,178m²(4戸共同施設)のハウスを2区分して交互循環法とし、別に対照ハウス(連続循環法)は面積862m²のハウスを選定した。

1. 試験方法



第9図 循環方法の違いと垂直温度分布および地温の日変化 (上: 30°C-15分間隔) (下: 30°C-30分間隔)



第10図 循環方法の違いと垂直温度分布および地温の日変化（上；25°C—15分間隔）
（下；25°C—30分間隔）

ハウスは間口 4.8mのパイプハウスで、暖房機はいずれもN社製の熱出力 30,000Kcal/h（灯油消費量4.7ℓ/h）である。循環ポンプ0.55kwで 直径50mmの主管パイプを経て各ベットに配管（うね幅 100cmに2本配管）した直径20mmのパイプに接続して循環する。試験ハウスの配置図は第11～12図に示すとおりである。加温パイプの埋設は交互循環ハウスでは地表下 5cm，連続循環ハウスは地表面に配管し，いずれもポリマルチ（黒0.03mm）が行われている。

交互循環ハウスは第13～14図に示すように，従来2台の暖房機で加温していたものを常時1台にして，時計制御式で30分間隔に温水循環させた。なお，交互循環ハウスの暖房機を1台にするため，あらかじめパイプ内水量，流量測定から地中放熱量を試算して第5～6表を作成した。これによると予想放熱量を平均 15Kcal/m.hとした場合，暖房機能力は充分であるが，25Kcal/m.hとした場合は熱量不足が予測された。とくに配管内の水量が多いこともあって，点火後から設定湯温（40°C）になる時間が地中放熱量を平均 15Kcal/m.hとみても1時間以上も要することが予想されたので，点火時間を従来より少

ししめ，外気温が最低時に地温の不足を起こさないような対策をたてて実施した。

2. 試験結果

1) ハウス位置と日射量

交互循環ハウスと対照ハウスの位置が多少異なるため，各ハウスの日射量を測定し，日射利用度の相異について調べた。その結果を第15図に示した。これからわかるように晴天時には対照ハウスが6～7%多く，曇天時には逆に5%少ない結果となっている。これは近くに高い山があり，この影響と推察されるが両ハウスの日射量には大差ないことが明らかとなった。

2) ハウス内の気温・地温

測温は昭和49年12月10日から翌年4月3日まで行った。外気温の低かった2月1日から40日間の最高・最低地温を第16図，外気温が-10.8°Cと大きく低下した2月1日前後の日変化を第17図に示した。

測温結果からみると交互循環ハウスと対照ハウスとの間には大きな温度差は認められなかった。ただ地中温度についてみると，対照ハウスの放熱パイプは地表に配管

第4表 循環法と燃料消費量ならびに熱効率

| 項 目 | 25°C | | | | 35°C | | | | |
|-----------------------|-----------------|------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| | 交互循環 | 連続循環 | 交互循環 | 連続循環 | 交互循環 | 連続循環 | 交互循環 | 連続循環 | |
| | 15分 | — | 30分 | — | 15分 | — | 30分 | — | |
| 運 転 時 間 (h) | 13 | 13 | 13 | 13 | 14 | 14 | 10 | 10 | |
| 循 環 水 量 (ℓ/min) | 45.9 | 45.2 | 45.9 | 45.1 | 32.6 | 42.5 | 44.5 | 45.4 | |
| 燃 料 | 灯油使用量 (cc) | 6,530 | 4,295 | 7,500 | 5,060 | 20,510 | 17,130 | 14,270 | 9,400 |
| | 機器補正 25°C(1.09) | | 3,940 | | 4,642 | | | | |
| | 35°C(1.03) | | | | | 19,912 | | 13,854 | |
| 3.5ℓ/hによる作動時間(min) | 112 ※※(14%) | 74 (9%) | 128 (16%) | 87 (11%) | 352 (42%) | 293 (35%) | 245 (40%) | 162 (27%) | |
| 電 力 | バーナー容量 (実測値) | 108 | 100 | 108 | 100 | 100 | 108 | 100 | 108 |
| | 作 動 時 間 (min) | 122 | 72 | 145 | 90 | 384 | 300 | 270 | 120 |
| 地 温 | 地温変化 (17~7時°C)※ | 2.0 | 0.7 | 2.4 | 0 | 6.8 | 3.5 | 6.6 | 2.1 |
| | 土壤熱容量補正 (1.05) | 1.9 | | 2.3 | | 6.5 | | 6.3 | |
| 単 位 灯 油 使 用 量 (cc/°C) | 3,437 | 5,628 | 3,261 | 4,642 | 3,063 | 4,894 | 2,199 | 4,476 | |
| 比 率 | 61 | 100 | 70 | 100 | 63 | 100 | 49 | 100 | |

注) ※交互循環は連続循環の2倍の面積を加温したので温度を2倍とした。
 ※※()の数字は運転時間に対する 暖房機の稼働率

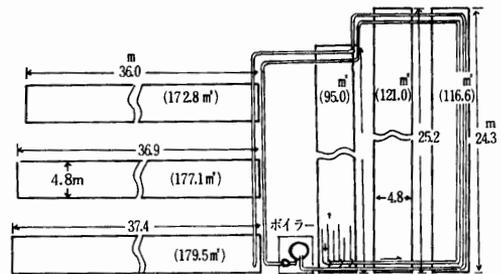
されていることと、交互循環ハウスでは地表下5cmに埋設してあるため、地表下10cmの位置を測温したこともあってセンサーと放熱パイプとの距離が近い交互循環がやや高温となった。

3) 燃料消費量の差異

本試験では、あらかじめ暖房機の熱量不足を予測していたため、低温時に2台運転した日が期間中に約10日間あるので、正確に両区の比較はできない。しかし、第7表にみるように、従来の連続循環法に比較して交互循環法は約63%の灯油使用量で加温することができた。これは基礎試験でえた結果とほぼ一致する値である。

4) 循環法と収量

供試した施設イチゴは12月上旬から保温、暖房をはじめ、12月中旬から電照する電照半促成栽培型で、交互循環ハウスと対照ハウスは所有者が異なったため、イチゴの育苗、肥培管理の違いがあり、直接の比較はできないが、あえて交互循環ハウスと対照ハウスのイチゴについて収量を比較したのが第8表である。すなわち、2~4月の第1期収量はほとんど差がなかった。第2期収量は5月の収量が交互循環ハウスは対照ハウスより29%少

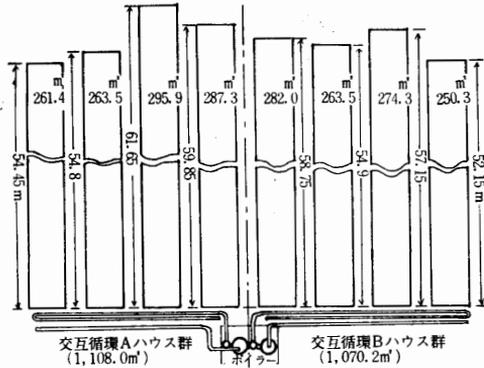


第11図 現地実証試験におけるハウス配置図 (連続循環Cハウス 862m²)

なかった。これが影響して総収量では約10%交互循環ハウスが減収であった。

V 考 察

交互循環と熱効率：試験Iで明らかにしたように連続循環を行うと循環パイプの周辺土壤が高温となり、放熱が悪くなる。これは測定により初期放熱量は後期に比較



第12図 現地実証試験におけるハウス配置図
(交互循環ハウス 2,178.2m²)

第5表 交互循環ハウスの地中放熱試算値

| 項目 | Aハウス | Bハウス |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| 10°Cの水を40°Cに昇温する熱量 | 20,640 Kcal/h | 20,190 Kcal/h |
| 水昇温のみの時間 | 41分 | 40分 |
| 土中予測放熱量※ | 20,595 Kcal/h | 19,890 Kcal/h |
| 初期熱量(水温+放熱) (15Kcal/m.h) | 41,235 Kcal/h | 40,080 Kcal/h |
| 点火後安定する時間 | 83分 | 80分 |
| 30分断続の予測放熱量 (25Kcal/m.h) | 17,163 Kcal/h | 16,575 Kcal/h |
| 30分断続の予測放熱量 (30Kcal/m.h) | 20,595 Kcal/h | 19,890 Kcal/h |
| | | 40,485 Kcal/h |

※土中予測放熱量は平均 15Kcal/m.h.で計算

第6表 試験ハウスのパイプ内水量

| 項目 | Aハウス | Bハウス |
|--------------|-----------|-----------|
| パイプ長 | | |
| ユカロンパイプ20% | 1,373m | 1,326m |
| メインパイプ50% | 97.6m | 97.6m |
| 水 | | |
| ユカロンパイプ内 | 431 ℓ | 416 ℓ |
| メインパイプ内 | 192 ℓ | 192 ℓ |
| ボイラー内 | 65 ℓ | 65 ℓ |
| 合計 | 688 ℓ | 673 ℓ |
| 測定流量 | 130 ℓ/min | 140 ℓ/min |
| 流入替時間 | 5分20秒 | 4分50秒 |
| 流量 | 0.56m/sec | 0.62m/sec |
| 0.8 m/sec 流量 | 180 ℓ/min | 180 ℓ/min |

よるパイプ放熱量と湯温低下から求めた放熱量を比較すると第9表のようになる。

$$Q_p = \frac{2\pi \cdot r_2 \cdot L \cdot \theta t}{\frac{1}{\alpha_1} \left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2} + 2.303 \frac{r_2}{\lambda} \text{Log} \frac{r_2}{r_1}} \quad [\text{Kcal/h}]$$

ただし、 Q_p :パイプの放熱量

r_1 :パイプ内半径 (m)

r_2 :パイプ外半径 (m)

L :パイプの長さ (m)

θt :内外の温度差 (°C)

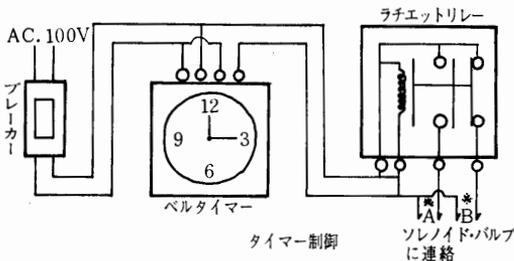
α_1 :水流面の熱伝達率 (Kcal/m².h.°C)

α_2 :パイプ外面の熱伝達率

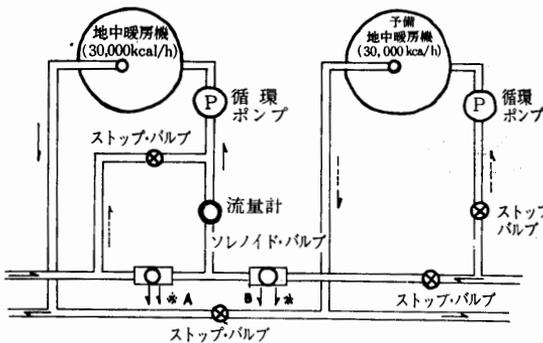
(Kcal/m².h.°C)

λ :パイプの熱伝導率 (Kcal/m.h.°C)

これで明らかのように、パイプ近接土壌温度をもとに求めた理論値と湯温から求めた放熱量は、ほぼ近似値と



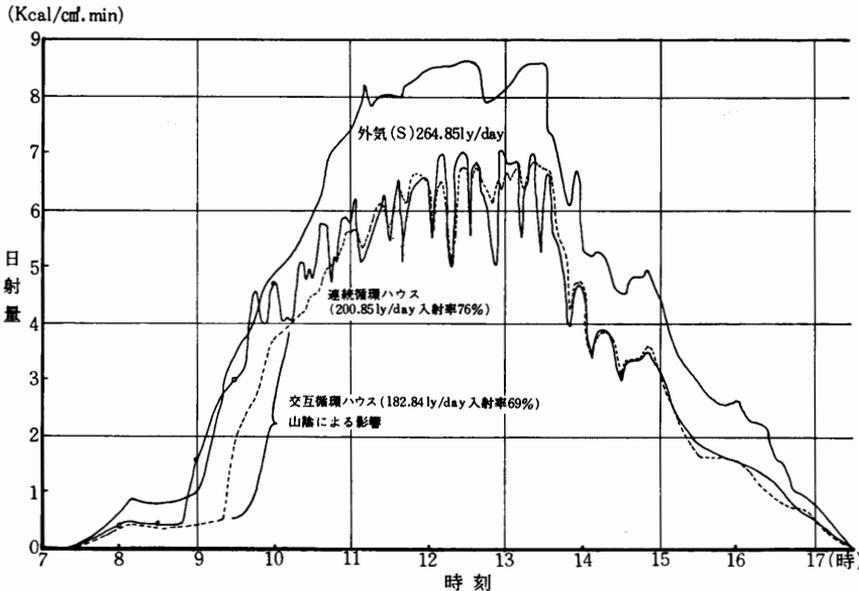
第13図 交互循環システムの概要



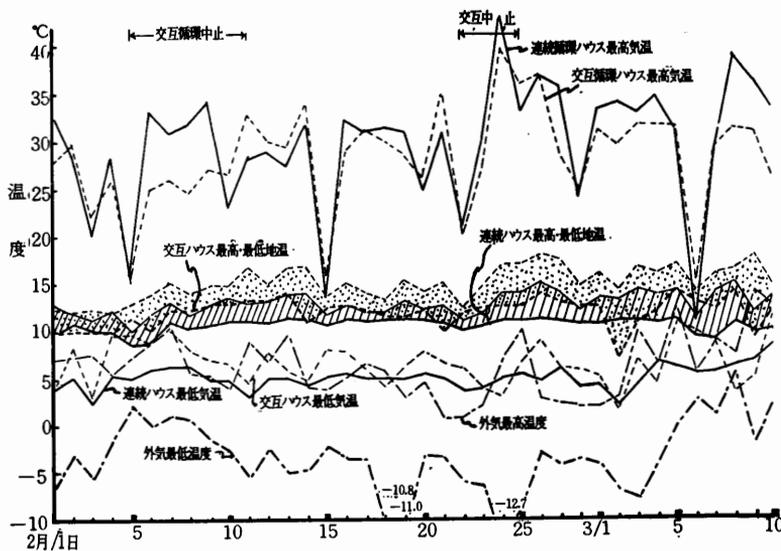
第14図 温水循環機構

して1.7~1.8倍になることはすでに述べた。これは第18図に放熱模式図で示すように、温水循環により循環パイプから放熱が起こり2~3cmの土壌域が急速に循環湯温に近づいたためと推定した。もとより放熱量は物体間の温度差に比例して増減するため、熱拡散の悪い(空気に対して)土壌では、温水循環の経過時間とともに温度差が小さくなり、放熱量が減少するものと考えられる。

試験Iで求めた第7図および第18図をもとに、次式に



第15図 試験ハウスの日射の変化



第16図 連続循環と交互循環ハウス内外の温度変化

第7表 循環法と灯油使用量 (千代田農協調査)

| 項目 | ハウス面積 m ² | 灯油使用量 l | 10a当り灯油使用量 l | 比率 |
|---------|-------------------------|------------|-----------------|-----|
| 連続循環ハウス | 862 | 4,086 | 4,740 | 100 |
| 交互循環ハウス | 2,178 | 6,504 | 2,986 | 63 |

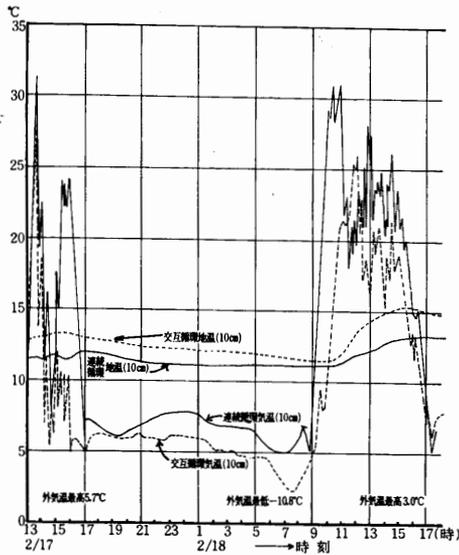
なった。これらのことから放熱効率向上対策として断続循環法が必要であると推定した。しかし、断続循環法は暖房機の稼働率が低下することになり、この現象を解消するために、交互循環法が有効であることが推論でき、ひいては省燃料になることを明らかにした。この要因は放熱の効率を向上するための断続循環、さらに暖房機の稼働率を向上させるために異なる面積に交互に循環して、面積拡大(放熱面積)ができるという二つの要因により、省燃料となる結果が生まれたものである。

試験Ⅱは放熱パイプが暖房機の能力に比較して短いため、稼働率は湯温25°Cの場合、15分交互循環の14%に対して、連続循環9%、30分交互循環の16%に対して、連続循環の11%であった。湯温35°Cになると、15分交互循環は42%、連続循環35%、30分交互循環になると40%、連続循環27%

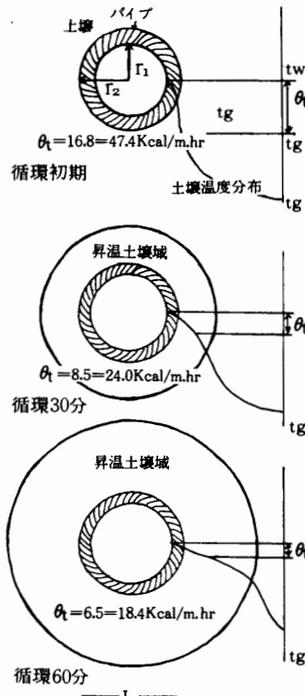
%となっている。このことはもち論、外気温度の違いもあるが、25°Cのように無加温区の地温と余り差のないときには、パイプとこれに接する土壌面との温度差が余り

第8表 温湯循環法とイチゴの収量 (10a当りkg)

| ハウス別 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 合計 |
|------|------|-------|---------|-------|-------|---------|
| 連続循環 | 13.8 | 801.6 | 2,010.9 | 350.7 | 781.8 | 3,958.8 |
| 交互循環 | 19.2 | 783.3 | 2,008.5 | 120.6 | 649.5 | 3,580.5 |



第17図 試験ハウスの地・気温の日変化



第18図 温水循環パイプからの放熱模式図

凡例 $\theta t = tw - tg'$
 ただし、 θt ：湯温と土壌温度差
 tw ：温水温度
 tg' ：昇温域の平均地温
 tg ：昇温前の土壌温度
 L ：昇温土壌域

ないためである。35°Cの場合は温度差が大きいため熱拡散が大きく、したがって、燃焼時間が長くなり、暖房機の稼働率は向上する。

また外気の温度差にもよるが、地温1°C上昇させるための単位灯油使用量をみても、交互循環法で高湯温(35°C)循環の灯油量は減少した。この原因は暖房機の稼働率に関係があるものと推察され、第2表の暖房機の性能テスト結果をみても明らかに、A、B 2台の暖房機の稼働回数の違いにより、1作動当たりの消費灯油量は作

第9表 パイプ放熱量の理論値と測定値

| 経過時間 | 湯温 °C | 昇温 地温 °C | θt °C | 理論放熱量 (Kcal/m.h) | 温水から求めた放熱量 (Kcal/m.h) |
|-------|----------|----------------|------------------|---------------------|--------------------------|
| 0~10分 | 32 | 15.2 | 16.8 | 47.4 | 44.0 |
| 30 | 30 | 21.5 | 8.5 | 24.0(51%) | 24.6(56%) |
| 60 | 28.2 | 21.7 | 6.5 | 18.4(39%) | 20.3(46%) |

注) ()の%は循環初期を基準にした減少率

動回数の頻繁な暖房機が多くなった。このような作動回数に基因して燃料消費が増大していると考えられる施設が多く見られる。

すなわち、従来、暖房機の適用面積を決定する場合、パイプの単位放熱量が明確でないことから、経験的な暖房機選定となり、ときとして過大施設となったものが多くみられる。さらに湯温サーモスタットが鋭敏な上に、湯温設定温度が高過ぎる場合が多い。これらの条件はすべて暖房機の燃料消費量が增大する原因となっている。そこで熱効率を高める適確な暖房機能力の選定やパイプ配管を行うためには、地中パイプの単位放熱量の明確化が必要であるが、きめてになるものがない。

坂木ら¹⁵⁾は実用的な所要熱量を施設面積330m²当たり3,000Kcal/hとしているので、パイプ延長約160mから試算すると、およそ18Kcal/m.hの単位放熱量となった。筆者らの試験から求めた単位放熱量は、湯温25°Cのとき、循環初期の平均は16.2Kcal/m.h、後期9.7Kcal/m.h、35°Cの場合、20Kcal/m.hと11Kcal/m.hとなった。このように試験結果から試算して求めた値を目安として利用することができるが、施設設計にもちいるためには、さらに試験を重ねる必要がある。

交互循環と地温：果菜類の根の生育適温は門田¹⁷⁾によると28~32°Cで、根毛の発生に必要な最低温度は8~14°Cといわれる。堀ら^{8,9)}はトマト、キュウリ、接木キュウリ、その他で気温、培地温と生育、養分吸収について検討し、20~25°Cの地温がそれ以下の地温より生育がよく、13°C前後が最低限界地温であるとしている。藤井ら^{5,6)}はトマト、キュウリをもちい地温と気温を組合せて試験を行い、育苗中は地温20~23°C、定植後は10~16°Cの範囲内では高いほど生育がよいことを認めている。このほか地温と生育、収量についての試験などを総合して考えてみると、現在ビニールハウスの温度条件は厳寒期に地温9~10°C程度で、果菜類の促成、半促成栽培では地温不足が予測され、不足する地温上昇手段として地中配管による暖房が実用化されている。本研究の主題である交互循環法は地温上昇に不安が持たれたが、

実験の結果、問題のないことが明らかとなり、果菜類にも広く適用されることが判明した。すなわち湯温25°Cと35°Cの比較試験の結果、いずれもパイプより10cm離れた位置が16.2~18.6°Cに保持されていることから、実用上の問題はないものと思われる。やや低温性の作物の場合は、湯温25°Cの15分交互循環でも、充分地温確保が可能である。高湯温の場合はむしろパイプ表面の高温による直接的な根の障害が起こる危険もあると思われる。しかし、地中加温により気温上昇を期待する場合は、35°Cのような高湯温の方が適当である。このことは秋田³⁾、板木¹⁴⁾の試験のように配管位置を浅くすることにより、効果が期待できるので、あくまでもイチゴの根の発育適温¹⁷⁾を考慮に入れた湯温の循環が望ましいものと考えられる。

交互循環の間隔については、栽培時期と必要地温、栽培作物により多少異なるものと思われる。すなわち低温期は短間隔(15分)がよく、比較的外気温の高い場合は長間隔(30分)がよい。これはパイプ付近の高温域土壌が熱拡散する遅速により、当然かえるべきもので、今後の研究課題である。

基本的には土壤放熱量を基礎として、暖房機の性能を決定し、それにもとづいてパイプの長さを決定することが望ましい。さらに熱損失を防ぐためには、パイプ内水量を考慮に入れて配管設計する必要がある。配管方法によっては主管パイプ延長が増大し、この水量が放熱パイプ内の水量と同一か、逆に多くなる施設では配管全体の水量が多くなり、不必要な水を加温することになるので水温上昇に長時間を要したり、厳寒時には設定湯温まで上昇せず、地温不足から寒害発生の恐れもある。やむをえない場合は水温上昇分の時間だけ早目に暖房機の稼働を開始し加温する方法もあるが、省エネルギー対策からは望ましいものではない。

施設イチゴに対する現地実証：この試験では2,178 m²のハウスを3万Kcal/hの暖房機1台で、交互循環による加温を行った。30分交互循環予測放熱量を25Kcal/m.hとしたとき3,738Kcal/hの不足(第5表参照)となり、30Kcal/m.hとみると10,485Kcal/hの不足となることを予測していた。このとき交互循環ハウスの地温(パイプ横10cm, 地表下10cmの地点)は10~17°Cの推移を示した。

一方、対照ハウスは3万Kcal/m.hの暖房機で862m²を連続循環加温したとき、地温(パイプ横10cm, 地表下10cm)は10~15°Cで、交互循環ハウスよりやや低目の推移であった。これは放熱パイプから測温点までの距離が対照ハウスは地表面の配管であり、交互循環が地表下5

cmの配管となっていることから、地表配管の方は地中配管の約2倍の距離となっていることによる差と思われる。

水村¹⁸⁾はビニールハウスと小トンネルで二重保温したハウスでは、イチゴの初期生育時の地温は18~22°C果実肥大期以降は14~18°Cに管理するのがよいとしている。赤木¹⁾も半促成株冷蔵栽培で中期以降は気温13°C(夜)~23°C(昼)のとき、地温13~18°Cがよかったとしており、交互、対照ハウスとも最低地温が3~4°C不足したことを示しているが、測定位置の問題もあり、今後外気温との関連で更に比較検討する必要がある。

小トンネル内の最低気温は交互循環ハウス、対照ハウスとも5°C前後で推移したが、交互循環が対照ハウスよりやや高目であった。しかし、外気温が急激に低下し10°Cに低下したとき、トンネル内の最低気温は対照ハウスの5°Cに対し、交互循環ハウスは2.3°Cと逆に低くなった。これは加温面積に対し暖房機の能力が不足したことを示している。

イチゴの生育は地温の測温地点では3~4°C低目でもパイプ近接域ではもっと高い温度域があり、おおむね順調な生育を示した。イチゴの収量は苗質、肥培管理が同一でなく、正確な比較はできなかったが、循環法による収量差は小さいものと思われた。

燃料消費については基礎試験でえた値とはほぼ一致する37%の燃料節減になり、交互循環法が有効であることが確認された。交互循環法を実用化するには、土壤の違い、地温差、左右の面積の異なる交互循環の供給熱量の算定など、残された問題が多く、今後さらに研究を進める計画である。

VI 摘 要

温水循環による地中加温を行う場合、土壌中における熱拡散状況を調査し、効率的な地中加温法について試験を行った。

1) 温水循環による地中加温は地中への熱拡散が極めて悪く、時間の経過とともに温水パイプの周囲2~3cmの土壌温度が循環水温に接近して、リング状の高温域が形成され、パイプからの放熱量が低下する。

2) 循環パイプ(内径20mmのエカロンパイプ)の単位放熱量は、湯温25°Cのとき循環初期(0~3時間)の平均は16.2Kcal/m.h, 後期(3~8時間)には9.7Kcal/m.hとなった。

3) 放熱効率向上対策として、一定時間温水循環を停止し、パイプ周囲の熱拡散をはかり、再び温水循環する

断続循環法が効果的であることを認めた。

4) 断続間隔は土壌の種類、土壌水分などにより異なると思われるが、地温の低い場合は短間隔(15分)、地温の高い場合は長間隔(30分)がよい。

5) 熱効率向上対策として交互循環システムにすることにより、加温機の稼働率向上と地中放熱量が多くなり熱効率が向上することが明らかとなった。交互循環法は連続循環法に比べて30~51%の燃料節減となった。

6) 電照半促成イチゴの現地実証試験において、約22aの栽培は場で35%の燃料節減となることを実証した。

謝 辞

本試験を実施するにあたって、終始適切な助言と指導をいただいた中国電力㈱広島支店・沢田泰二氏、土壌の三相測定その他について土壌肥料部・後俊孝研究員、ならびに現地試験に協力いただいた千代田農業改良普及所・井上滄主任技師、千代田農業協同組合・岩崎課長、溝下・沖石技師に深く謝意を表する所である。

引用文献

- 1) 赤木博・堀裕：1970. 人工気象室におけるイチゴの生育と結実に及ぼす気・地温の影響。栃木農試報 14：81~88.
- 2) 秋田史郎・秋山昌弘：1967. 温湯による地温上昇に関する研究(予報)。昭和42年秋季園芸学会発表要旨182
- 3) 秋田史郎・秋山昌弘：1967. 温湯による地中加温に関する試験。温湯パイプ埋設法。土壌水分およびマルチングと二重トンネル内の気温との関係。そ菜試験成績概要(関西)：100.
- 4) 藤井健雄・小坂椰子郎：1958. ビニールトンネル栽培における電熱利用に関する実験。農及園 33(3)：455~448.
- 5) ———・伊藤正・椎名不二男・湊莞爾：1962. 果菜栽培温度に関する研究。(1)トマト、キュウリの育苗における気温・地温の影響について。千葉大学園芸学部学術報告 10：59~70.
- 6) ———・—————：1962. 果菜栽培温度に関する研究。(2)ビニールハウス定植時の気温・地温がトマト、キュウリの発育に及ぼす影響。千葉大学園芸学部学術報告 10：71~79.
- 7) ———・岡田脩：1969. ビニールハウスにおける温風暖房および地中温湯暖房の熱量配分に関する試験。昭和44年度園芸学会秋季発表要旨.
- 8) 堀裕・細谷毅・新井和夫：1967. 培地温とそ菜の生育ならびに養分吸収に関する研究。昭和41 園試そ菜花

き年報：38~46.

- 9) ———・土岐知久・—————：1968. 気温培地温の組合せと接木キュウリの生育に関する試験。昭和42 園試そ菜花き年報：72~75.
- 10) ———・新井和夫・細谷毅・小山田光夫：1968. 培地温と気温の組合せがそ菜の生育ならびに養分吸収に及ぼす影響。園芸試験場報告 A7：187~212.
- 11) ———・—————・土岐知久：1970. 培地温と気温の組合せがそ菜の生育ならびに養分吸収に及ぼす影響。園芸試験場報告 A9：189~219.
- 12) 板木利隆・金目武男：1968. 温湯利用によるビニールハウスの地中加温に関する研究。神奈川園芸試験場研究報告 No.16：57~64.
- 13) ———・—————：1970. 温湯利用によるビニールハウスの地中加温に関する試験(続報)。神奈川園芸試験場研究報告 18：124~130.
- 14) ———：1971. 施設園芸の環境と土壌。位田藤久太郎編 誠文堂：149~171.
- 15) 位田藤久太郎：1968. 野菜の栄養生理と施肥技術。杉山直儀編 誠文堂：30~44.
- 16) 門田寅太郎：1959. 蔬菜の幼根の生長に対する主要温度の研究。高知大学術研究報告 8(9)：1~95.
- 17) 水村裕恒・大内良美：1971. ハウス栽培イチゴの地温管理に関する研究。埼玉園試研報 2：12~20.
- 18) 道下数一・沢田泰二：1975. 施設園芸におけるヒートポンプ利用に関する研究(第1報)。技研時報 No.47：159~164.
- 19) ———・—————・沖森当・吉田隆徳：1975. 施設園芸におけるヒートポンプ利用に関する研究。電気学会 11：1~8.
- 20) 大塚千之助・稲山光男：1970. 地中加温がハウス内地温に及ぼす影響。ハウス内外気象環境条件とそ菜の生産性向上に関する試験成績書。埼玉園試：56~64.
- 21) 沖森当・吉田隆徳・長谷川繁樹：1975. 地中加温における加温効率向上試験(第2報)。交互循環による地中加温法の改善。昭和50年度園芸学会中四国支部会発表要旨.
- 22) ———・道下数一・吉田隆徳・長谷川繁樹：1975. 大規模ハウスにおける交互循環による地中加温法の改善農及園 50(10)：1283~1284.
- 23) 社団法人農業電化協会中国支部：1973. 農電ガイド.

Studies on the System of Hot water Pipe Heating
of the Soil by the Intermittent Circulation

1. On the heat diffusion and the heat efficiency

Atáru OKIMORI, Takanori YOSHIDA, Shigeki HASEGAWA
and Kazuichi MICHISHITA

Summary

This studies were carried out in order to investigate the heat diffusion of heating of soil by hot water circulation in pipe and improve the heating system of soil.

The results obtained were summarized as follows;

1) The heat diffusion of heating of soil by hot water circulation was extremely bad and as the time proceeded the soil temperature at 2~3 cm zone around the pipe was nearly equal to temperature of circulating hot water. The high temperature zone was formed into a ring, so that the quantity of released heat from pipe was decreased.

2) The unit quantity of released heat of the pipe which was 20 mm in diameter and made of Ukaron resin was 16.2 Kcal/m.h in average in the early period of circulation (0—3 hours of circulation period) at 25 °c water temperature and was 9.7 Kcal/m.h. in the latter period (3—8 hours of circulation period). Also at 35 °c water temperature it was 20 Kcal/m.h. in the early period and was 11 Kcal/m.h. in the latter period.

3) The intermittent circulation was very effected to promote the heat diffusion. Namely, the circulating hot water in the pipe was stopped at a regular intervals in order to promote the heat diffusion to around the pipe and again hot water was circulated at a regular intervals.

4) The intermittent intervals were seemed to differ from kinds of soil and soil moisture. But, the intervals at lower temperature of soil was shorter (15 minute intervals) than the intervals (30 minute intervals) at higher temperature of soil.

5) This system of intermittent circulation improved the thermal efficiency because of the improvement of the working efficiency of the boiler and the increase of the quantity of released heat to soil. Further this system reduced fuel by 30~51% in comparison with the continuous circulation.

6) This method proved that 35% of fuel was reduced by the field experiments being about 22 ares in area on lightening semi-forcing culture of strawberry.