

Short Report

## 低コスト地中熱ヒートポンプを用いた温室の実用性評価

小峰正史<sup>1,4</sup>, 矢作康<sup>1</sup>, 中村進一<sup>1,2</sup>, 高木理恵<sup>1,3</sup>, 原光二郎<sup>1</sup>, 野下浩二<sup>1</sup>, 曾根千晴<sup>1,4</sup>  
豊福恭子<sup>1,4</sup>, 鎌田貴浩<sup>1,4</sup>, 木村健<sup>1,4</sup>, 水野大子<sup>1</sup>, 石川陽子<sup>1</sup>, 小川敦史<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> 秋田県立大学生物資源科学部生物生産科学科

<sup>2</sup> 東京農業大学生命科学部バイオサイエンス学科

<sup>3</sup> 東北工業大学ライフデザイン学部安全安心生活デザイン学科

<sup>4</sup> JST Crest

秋田県において新たな農業生産体系を確立するための有効な手段のひとつとして、施設栽培による周年生産が考えられる。その実現のためにはコストの削減が必須であり、本研究では導入コスト、運転コストを低く抑えることができる浅層地中熱を熱源とするヒートポンプシステムの実用性を評価することを目的とした実証試験を行った。深さ約 2 m の土中を熱源とし、制御対象を水耕栽培の水耕養液温として熱負荷を抑えてコスト減を図り、養液冷却による冷涼野菜の夏期栽培の実現と、養液加温による冬期の促成栽培の可能性について検証した。試験の結果、ヒートポンプの成績係数の実測値は設計値よりも低くなり、各種制御設定値の最適化や動的制御の必要性が示された。また、リーフレタス、コマツナ、ホウレンソウを供試植物とした栽培試験では、夏期の養液冷却による効果は認められず、冬期の養液加温では成長抑制、根の障害が発生した。養液温度と地上部の温度差、および地上部温度の変動が原因と考えられ、温室内気温に追従した養液温制御などの改善点が明らかになった。

**キーワード：**ヒートポンプ、浅層地中熱、温室、周年栽培、養液栽培、温度制御

秋田県は農業のグローバル化及び自由競争時代を見据えて、稲作偏重の現在の農業生産体系を改革しようとしている。そのための施策として新しい栽培品種の開発、施設栽培による周年栽培などが試みられているが、施設栽培は冬期の低温、低日照、積雪などの気象的要因とコストの問題により、広く普及するには至っていない。

冬期の施設栽培におけるコストの大きな部分は暖房費であり、暖房に使用される化石燃料の価格変動が農家収入に大きく影響することが課題とされる。化石燃料による暖房の代替手段としてヒートポンプがあり、小国（1982）により温室用ヒートポンプによる環境調節について報告がなされた。ヒートポンプは加温だけではなく冷却を行うこともでき、それぞれより効率的に活用するための研究が行われてきた（林、古在、中村および渡部, 1983, 林、古在およ

び渡部, 1983)。また、佐々木（1989）により、空気を熱源とするヒートポンプによる温室暖房では、燃料価格が 65～85 円/L であれば運転コストが石油燃焼による暖房と同等となることが示されている。また農林水産省の調査（2014）によれば 2014 年におけるヒートポンプを用いた栽培施設の延べ面積は 401 ha で、2012 年と比較して約 2 倍に増えている。しかし、空気を熱源としたヒートポンプでは温度の勾配とは逆方向に熱を移動させるために電力消費が大きくなる。一方地中熱は、10 m 以上の深度であれば年間通して 15 °C 前後と安定しており、冬期の暖房だけでなく、夏期の冷房においても理想的な熱源であり、電力消費を低く抑えることができる。

地中熱ヒートポンプの課題は初期コストが大きいことである。一般的な地中熱ヒートポンプシステムでは、50～100 m の採熱井を複数掘削する必要がある。

り、設置場所の地下水位、温度制御対象の規模などにより異なるが、施工費用に 1,000 万円前後の費用を要し、農業用の設備としては高額である。また日本で広く利用される栽培施設であるビニールハウスは保温性が高くないため、冬期夜間の暖房は電力消費が増加してコスト増となり、より熱負荷の大きい夏期日中の冷房は現実的ではないとされる。

これらの課題を考慮し、本研究では施工費用、ランニングコストを低く抑えることができる地中熱ヒートポンプ利用温室を構築し、栽培試験によって性能評価を行い、その有効性を検証することを目的とした。

具体的には、ビニールハウスにおける水耕栽培を対象とし、深度 2 m 程度の浅い土層を熱源とする浅層地中熱利用ヒートポンプを用い、水耕養液温度を制御する局所温度制御によって熱負荷を低減することにより、施工費用・ランニングコストを抑えた温度制御システムを設計・構築した。次にこの施設を用い、リーフレタス、ホウレンソウなどの葉菜類の栽培を行い、運転時の成績係数からシステムの熱利用効率を調べ、また局所温度制御が植物生産に及ぼす効果を検証した。

## 材料および方法

### 材料

#### 浅層地中熱ヒートポンプシステム利用温室。

ヒートポンプシステムは、秋田県立大学秋田キャンパスに既設の間口 3.6 m、奥行 18 m、棟高 2.9 m、0.1 mm 厚 PO フィルムを外張り資材とした丸屋根式東西棟ビニールハウスに設置された。

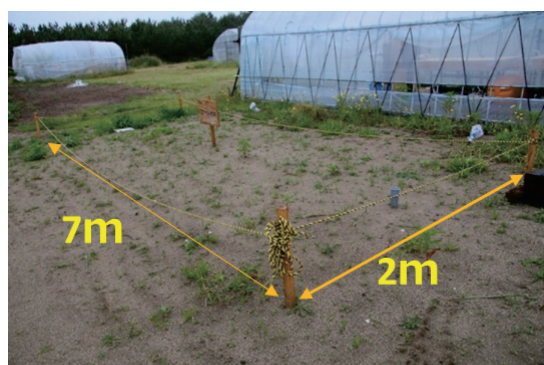


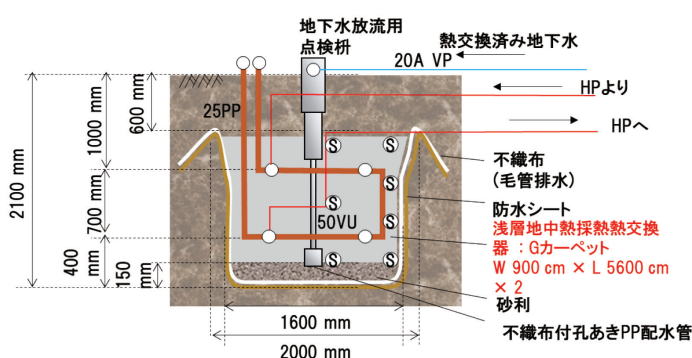
図1 浅層地中熱ヒートポンプシステムの熱源（地下ダム）の概要

使用した地中熱ヒートポンプ（GSHP-1001、サンポット社）は定格消費電力 3.06 kW（4Hp）、暖房時の設計 COP（Coefficient of Performance、成績係数）は 3.7、冷房時は 3.2 で、熱交換用不凍液にはエチレングリコールを使用した。熱源には図 1 に示すように温室脇の地面を幅 2 m、長さ 7 m、深さ 2.1 m に掘り下げ、幅 0.9 m、長さ 5.6 m のシート状の熱交換器（G カーペット、（株）ダイヤポリマー）を 1 m 及び 1.7 m の深さに 2 層になるように折り曲げて埋設したものをを用いた。試験対象地が砂質土壌であったため、採熱効率が低いことが予想されたので、雨水等を保水して熱容量の増加を図った。このために、掘り下げた地面の底及び側面を防水シートで 1.5 m の高さまで覆い、余剰水が生じた際の排水のため防水シート上にさらに不織布を敷いてから覆土した。以後、この熱源を地下ダムと称する。また秋田キャンパスでは地下水が容易に利用可能だったため、新しい試みとして不凍液が所定の温度に達したとき、地下水と熱交換を行うようにした。熱交換後の地下水は地下ダムに放水し、再度熱源として利用した。

試験に使用した水耕栽培装置は、幅 60 cm、長さ 174 cm、深さ 15 cm の DFT 式栽培ベッドを有し、養液タンクに熱交換パイプを設置して養液温の制御を行った。水耕養液量は全体で 160 L であり、マグネットポンプ（PMD-111B7B 三相電機（株））によって、4 L/min の水耕養液が循環した。この水耕栽培装置を 2 組設置し、1 組は温度制御を行う制御区、もう 1 組は無制御の対照区として使用した。

### 栽培試験における供試植物。

栽培試験にはリーフレタス（ノーチップ、横浜植



木（株））、ハウレンソウ（ディンブル、タキイ種苗（株）、強力オーライ、サカタのタネ）、コマツナ（よかつた菜、カネコ種苗（株））をそれぞれ用いた。リーフレタスは水耕栽培で多く栽培される作物として夏期および冬期の栽培試験に用いた。ハウレンソウ、コマツナは代表的な冷涼野菜として、夏期の養液冷却による栽培の可能性、冬期の養液加温による促成栽培の可能性を調べるために用いた。特にハウレンソウの強力オーライは熱耐性品種であるため、夏期栽培での有効性検証を目的に供試した。

### 水耕養液.

水耕養液には、おおくの植物に汎用的に使用できる大塚 B 処方液（OAT アグリオ株式会社）を標準組成で用いた。

### 方法

#### 温室内環境およびヒートポンプ各部の温度測定.

栽培試験時の温室内の日射量、温度、湿度をそれぞれ日射計(PY52243, Li-Cor 社)、温湿度計(1400-104 Relative humidity/air temperature sensor, Li-Cor 社)で測定し、30 分平均値をデータロガー (LI-1400, Li-Cor 社)で記録した。また、秋田県立大学秋田キャンパス実験圃場に設置された気象観測装置から得られた全天日射量、外気温度、外気湿度の 30 分平均値も使用した。

ヒートポンプの COP 計算に用いるため、ヒートポンプ 1 次側の配管各部での不凍液温度（3 ヶ所）、地下ダムのそれぞれ違う地点における 30 cm, 80 cm,

130 cm, 180 cm の 4 深度の地温および 80 cm, 130 cm, 180 cm の 3 深度の地温（合計 7 ヶ所）、地下水温（2 ヶ所）、2 次側の配管各部での不凍液温度（4 ヶ所）を Type-K 熱電対(OMRON 社)で測定した。さらに、2 つの水耕ベッド上の養液温度を Type-T 熱電対で測定し、1 次側、2 次側の不凍液流量、地下水流量を流量計 (ND20-PATAAA-RC, 愛知時計電機（株）)で、システム全体の消費電力量を電力量計 (M2LM-K5, 三菱電機（株）)で測定した。これらのデータはデータロガー (GL820, グラフテック社)により、温度については平均値、流量、消費電力は積算値を 5 分ごとに記録した。

### 栽培試験.

栽培試験は 2016 年から 2017 年の 2 ヶ年にわたり、夏期に 6 回、冬期に 3 回実施した。各試験の実施期間、試験区分名 (Sumr\_01, Witr\_01 など)、供試植物を表 1 に示す。

夏期試験では外気温 25℃ 以上で温室側窓が開放されるように設定し、冬期試験では側窓は常時閉鎖し、2016 年度は保温用の内張り資材（0.1mm 厚 PO フィルム）を展張し、2017 年度は外張り資材のみで栽培した。

養液温度は制御区においては 24 時間 20℃ 一定制御とし、対照区は無制御とした。ヒートポンプ 2 次側の不凍液温は、夏期の冷却時は 10℃、冬期の加温時は 40℃ に設定した。地下水による熱交換は、夏期は 1 次側不凍液温が 28℃ 以上になったときに熱交換を始めて 25℃ で終了、冬期は 3℃ 以下で熱交換を始め、8℃ で終了するものとした。なお、2017 年度の

表 1 各栽培試験の実施期間と試験区分名および供試植物

運転試験：区分名		実施期間		供試植物	
2016年度	夏季	1回目：Sumr_01	6/24 ～ 7/20(26日間)		リーフレタス ハウレンソウ (ディンブル、強力オーライ)
		2回目：Sumr_02	7/29 ～ 8/24(26日間)		
		3回目：Sumr_03	8/29 ～ 9/25(27日間)		
	冬季	1回目：Witr_01	11/24 ～ 1/11(48日間)		
2回目：Witr_02		1/27 ～ 3/14(46日間)			
2017年度	夏季	4回目：Sumr_04	6/29 ～ 7/21(22日間)		コマツナ ハウレンソウ (ディンブル、強力オーライ)
		5回目：Sumr_05	7/27 ～ 8/24(28日間)		
		6回目：Sumr_06	9/12 ～ 10/5 (23日間)		
	冬季	3回目：Witr_03	11/15 ～ 1/25(71日間)		
			リーフレタス		



試験 (Sumr\_04,05,06, Witr\_03)では地下水による熱交換は行わなかった。ヒートポンプならびに地下水による温度交換の制御はそれぞれ独立に、サーモスタットによる On/Off 制御で行われた。

温度制御による植物栽培への効果を調べるために、栽培試験終了時に供試植物 3 株の純光合成速度、蒸散速度を携帯型光合成速度測定装置 (LI-6400, Li-Cor 社) で測定し、葉温を熱画像カメラ (CPA-E60, (株)CHINO) で測定した。また、4~5 株をサンプリングし、生体重、葉面積、地上部乾物重、地下部乾物重などを測定した。

### 成績係数の計算.

成績係数 (COP) は、養液タンクへの熱供給量  $H$  (Wh), 消費電力  $W$  (Wh) により  $COP = H / W$  の式により、1 時間ごとに算出した。 $W$  には実測値を用い、 $H$  は  $H = [(T_1 - T_2) \times F \times C] / 0.86$  より算出した。 $T_1, T_2$  (°C) はそれぞれ 2 次側におけるヒートポンプから流出する不凍液温度とヒートポンプに戻る不凍液温度、 $F$  (L) は 1 時間あたりの不凍液流量、 $C$  (kcal°C<sup>-1</sup>L<sup>-1</sup>) は不凍液の熱容量である。 $T_1, T_2, F$  には実測値を用い、 $C$  は 1 kcal°C<sup>-1</sup>L<sup>-1</sup> と仮定して計算した。

## 結果

### ヒートポンプによる養液温度制御の結果

表 2 に各栽培試験における外気温、温室内気温の平均値、最高値、最低値と、制御区、対照区の養液温度の平均値を示す。Sumr\_04 区の温室内気温はデータロガーの故障でデータを記録できなかった。また、Witr\_03 では試験期間後半でヒートポンプの故障により、温度制御ができなくなったため、以降は考慮対象外とする。

夏期試験では 2016 年、2017 年ともに平均外気温は 21~26°C であり、温室内気温平均値は 21~26°C であった。制御区の養液温度は目標値の 20°C 付近で制御できており、2016 年度はやや高め、2017 年度はやや低めに制御されていた。無制御区との液温差は最大で約 5°C であった。冬期試験では、2016 年度の平均外気温は 2.1~2.9°C、2017 年度は 1.9°C と 2017

年の平均気温が低く、ビニールハウス内の平均気温も、内張り資材を展張しなかったことも含め、2017 年度は 2016 年度よりも 3°C 程度低い結果となった。養液温度の制御結果は、2016 年度は 20°C よりもやや高めではあるが一定に制御できていた。対照区との液温差は最大で約 10°C であった。

### ヒートポンプの運転状況と COP の比較

各試験期間におけるヒートポンプの運転状況と COP の計算結果を表 3 に示す。稼働時間率は試験期間全体に対してヒートポンプが稼働していた時間の割合を示し、平均熱交換量は 1 時間あたりに水耕養液タンクにおいて交換された熱量の平均値、平均消費電力は 1 時間あたりの消費電力の平均値である。また平均 COP は 1 時間ごとに算出した COP の平均値である。

COP は Sumr\_04 を除いて設計 COP を下回り、特に暖房時の COP は設計値より低くなった。

表 2 各試験期間における外気温、内気温と養液温度の比較

試験区分	外気温(°C)			温室内気温(°C)			水耕養液温度(°C) (mean ± SD)	
	平均	最高	最低	平均	最高	最低	対照区	制御区
Sumr_01	21.4	29.5	13.2	21.7	30.6	14.0	25.6 ± 1.9	21.1 ± 0.7
Sumr_02	26.3	35.5	17.1	26.1	37.4	17.5	30.2 ± 2.3	21.0 ± 0.8
Sumr_03	22.3	34.7	9.8	22.6	34.6	10.9	26.9 ± 3.1	21.3 ± 0.8
Sumr_04	24.0	33.2	17.3	----	----	----	25.6 ± 2.7	19.6 ± 0.9
Sumr_05	25.0	35.0	17.5	25.9	39.5	17.6	27.1 ± 2.0	19.8 ± 0.6
Sumr_06	20.3	27.1	12.6	20.5	29.4	12.6	22.3 ± 1.5	19.6 ± 0.7
Witr_01	2.9	14.8	-3.9	7.6	36.4	-1.0	12.2 ± 4.9	22.3 ± 3.1
Witr_02	2.1	9.3	-4.6	7.8	39.7	-1.9	13.2 ± 2.5	21.8 ± 1.2
Witr_03	1.9	13.6	-8.8	4.7	34.1	-6.9	7.8 ± 6.3	9.2 ± 2.8

\* 設定温度 10°C で制御

表 3 各試験期間におけるヒートポンプの運転状況と COP の比較

試験区分	稼働 時間率(%)	平均熱 交換量(kW)	平均消費 電力(kW)	平均COP	設計COP
Sumr_01	66	0.24	0.25	2.3	3.2(冷房)
Sumr_02	82	0.27	0.27	2.3	
Sumr_03	52	0.21	0.30	2.1	
Sumr_04	46	0.30	0.10	3.8	
Sumr_05	44	0.29	0.14	2.3	
Sumr_06	17	0.21	0.10	2.5	
Witr_01	60	0.38	0.97	2.1	3.7(暖房)
Witr_02	60	0.45	0.95	2.1	
Witr_03	75	0.45	0.75	1.7	

稼働時間は2016年度 (Sumr\_01~03, Witr\_01~02) は長く、2017年度 (Sumr\_04~06) は短くなった。平均消費電力は冬期が夏期の3~9倍ほど大きくなった。

### 栽培試験の結果

夏期試験では、供試したリーフレタス、コマツナのいずれについても生体重等の成長量および純光合成速度について制御区、対照区間に統計的に有意な差は認められなかった。ハウレンソウの強力オーライ、ディンプルでは、制御区、対照区ともに成長抑制傾向にあり、成長量等について両試験区間に有意差は認められなかった。

冬期試験では、リーフレタスおよびハウレンソウ

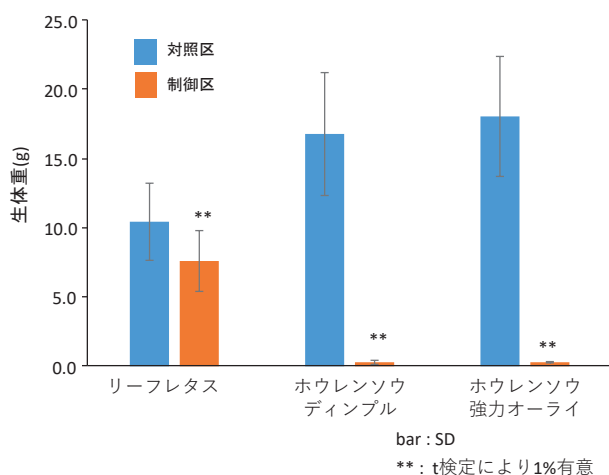


図2 冬期試験における各供試植物の生体重の比較

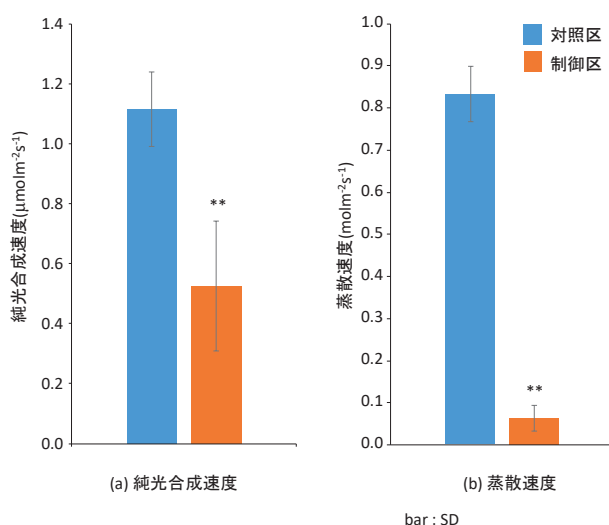
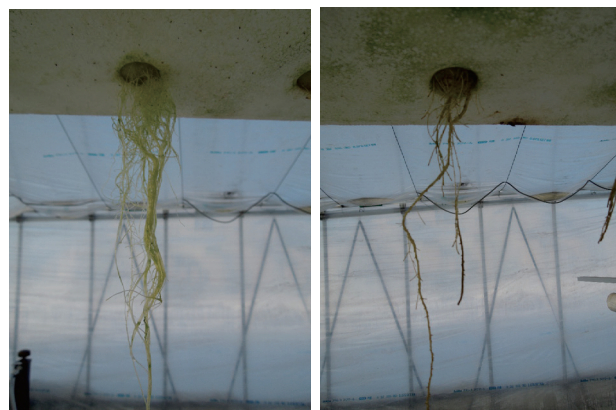


図3 冬期試験におけるリーフレタスの純光合成速度、蒸散速度の比較

2品種ともに生体重が制御区において有意に低下した (図2)。また、リーフレタスの純光合成速度、蒸散速度を測定した結果、いずれも制御区で有意に低下していた (図3)。この際、制御区では根の褐変と成長阻害が観察された (図4)。



(a) 対照区の根

(b) 制御区の根

図4 冬期試験におけるリーフレタスの根の比較

### 考察

#### 地中熱ヒートポンプの作動状況に関する考察

実証試験により、今回設定した条件によって、冷却、加温のいずれにおいても養液温度を安定的に一定制御することができた。しかし、実測された COP は設計値よりも低く、特に冬期の加温時に低くなる結果となった。原因のひとつとして、養液温度の設定値と温室内気温の温度差が考えられる。養液温度の制御目標値 20°C に対し、夏期の温室内平均気温は 21~26°C で温度差が最大で 6°C であったのに対し、冬期の温室内平均気温は 4.7~7.8°C で、制御目標値との温度差は最大で 15°C であった。このため、熱交換量が冬期で増大し、稼働時間と平均消費電力が増加して COP が低下したと考えられる。

また、今回用いたヒートポンプは、他の研究においてより広い面積の温度制御試験のために設置したものを流用したため、本試験の制御対象の規模に対して能力が過剰であった。このため、作動時間が長くなるほど消費電力が大きくなり、これも COP の低下の原因になったと考えられる。したがって、より規模の大きい水耕栽培装置を対象とすれば COP が高くなる可能性がある。

2016年夏期と2017年夏期では、2017年度で熱交

換量が大きく、消費電力が少ないために COP が高くなる傾向にあった。温室内気温のデータでは 2016 年度と 2017 年度で差はないが、積算日射量が 2016 年度に対し、2017 年度は 68% となっており、日射による熱負荷が減少したことが要因と考えられ、日射の影響が非常に大きいことが示された。

本研究では、新しい試みとして 1 次側の熱交換で不凍液温が所定の温度になったときに地下水を用いて熱交換を行い、熱利用効率を高めるシステムを導入した。2016 年度の運転状況を解析すると、地下水による熱交換は夏期、冬期ともにヒートポンプ稼働時にはほとんど行われていなかった。これは地下水との熱交換のために設定した不凍液温の範囲（夏期 25～28℃、冬期 3～8℃）が不適切であり、夏期の酷暑日と冬期の極寒日には設定作動温度を越えることがあったが、ほとんどの場合でヒートポンプ作動時の不凍液温は設定作動温度に達していなかったためであった。地下水との熱交換は、ヒートポンプが停止して不凍液が滞留した状態で、温度計が設置された配管付近の不凍液が周辺空気や日射の影響で昇温・降温した場合に多く行われていた。熱交換のトリガーとして選んだ位置の不凍液温は、長期的な季節変動はあるが、ヒートポンプ作動中の比較的短い時間では大きく変動することがなく、制御目標値が固定され、On/Off 制御する本システムでは、ほとんど作動しないか、必要以上に作動するかのいずれかになることがわかった。今回の地下水による熱交換はヒートポンプの作動とは独立して制御していたこともあり、ヒートポンプの熱交換効率の向上には寄与しなかった。地下水による熱交換をヒートポンプの作動に連動させ、PID 制御などの、制御対象の変動に追従しうる制御方法を導入することが有効と考えられる。

### 植物栽培と養液温制御の効果

本研究では熱負荷を軽減するために、制御対象を温室内気温ではなく、水耕養液の温度とし、これによって夏期における冷涼野菜の生産、品質向上と、冬期における成長促進による収量増加を目指した。

夏期、冬期ともに、温度制御を行わない対照区と、養液温度を 20℃ 一定に制御する制御区を設けて栽

培試験を行ったところ、夏期においてはリーフレタス、コマツナは両試験区間に差は認められず、養液冷却の効果は認められなかった。ハウレンソウ 2 種（ディンブル、強力オーライ）についても熱耐性品種である強力オーライはディンブルに比べて成長は良かったが、試験区間で差はなく、成長は全体的に抑制的で、個体間差が大きかった。

ハウレンソウについては、李、後藤、高倉及び蔵田（1998）により、水耕栽培で養液温を 20℃ で栽培する事により、根の高温障害を回避でき、正常に成長することが報告されているが、今回の試験では同様の結果は得られなかった。李ら（1998）の研究では地上部の気温を明期 33℃、暗期 28℃ に制御したグロースチャンバー内で試験を行っており、明期の気温は本研究における温室内気温の最高温度とほぼ同等であった。ただし、光強度は屋外施設で行った本研究では李ら（1998）の研究の約 5 倍となっており、日射の影響で葉温が上昇し、高温障害が発生していた可能性がある。

冬期試験では、リーフレタス、ハウレンソウ 2 種ともに制御区において成長が有意に抑制された。設定値 20℃ は供試植物の根に高温障害を生じさせる温度ではないが、温室内気温は平均で約 8℃、最低温度は約 -2℃ であったので、地上部と地下部の温度差が 12～22℃ に及んだことから、温度差に起因する障害が発生した可能性がある。また、この結果を踏まえて、気温を 5℃ 一定に制御した人工気象器内で養液温度を 20℃、10℃、無制御（5℃）としてリーフレタスを栽培する実験を行ったところ、20℃ において成長阻害や根の障害は認められなかった。この結果についてはより詳細に再試験する必要があるが、温度差に加えて地上部の温度変動も影響している可能性が示唆された。地上部との温度差が極端に大きくならないように、養液温度を気温に追従して変動制御することで、根の障害を抑えられる可能性がある。

結果として、本研究で供試した植物では冬期の養液加温によって成長は促進されず、むしろ阻害されることが明らかとなった。

## 結論

本研究では、設置コストが低減できる浅層地中熱ヒートポンプを用い、水耕液温度を制御対象とした局所温度制御で消費電力を抑える施設栽培用温度制御システムを構築し、その有用性を検証した。まず浅層地中熱ヒートポンプシステムの構築については、ヒートポンプ本体が 50 万円、地下ダム構築のための掘削工事が 15 万円、その他施工費が 240 万円で設置コストは 300 万円であった。従来型のヒートポンプシステムに比べると 3 分の 1 程度の施工費に抑えることができた。

運転試験の結果では、COP が設計値に及ばず、制御対象の規模とヒートポンプの力量のマッチングと運転制御に関連する各種設定値の最適化、単純な On/Off 制御ではなく、温室内環境の変動に追従した制御法が必要であることが示された。

また、水耕栽培での養液温度制御は、夏期に行った養液冷却は本研究で供試したリーフレタス、コマツナ、ホウレンソウにおいては効果がなく、冬期の養液加温は栽培に抑制的に作用することが明らかとなった。試験結果を考慮すると、特に冬期の栽培では温室内の気温条件に合わせた変温制御をすることで、根の障害を抑え、促成的な栽培を実現できる可能性があり、本システムの有効性についてはまだ検討の余地があると考えられる。

## 謝辞

本研究は重点プロジェクト研究(H27～29)「環境制御による高機能性野菜栽培法の確立と植物反応機構の解析」の研究費によって行われた。

## 文献

小国研作 (1982). 「温室用ヒートポンプに関する研究」『農業気象』 37 (4) , 317-322.  
佐々木浩二 (1989). 「空気-空気型ヒートポンプによる温室環境調節」『農業施設』 20 (1) , 121-127.  
農林水産省 (2014). 『園芸用施設の設置等の状況 ( H26 ) 』 <http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/>

[engei/sisetsu/ssisetu\\_siryoku\\_deta.html](http://engei/sisetsu/ssisetu_siryoku_deta.html)

林真紀夫・古在豊樹・中村潤・渡部一郎 (1983). 「温室におけるヒートポンプ利用 (1) 暖房システム」『農業気象』 38(4), 379-387.

林真紀夫・古在豊樹・渡部一郎 (1983). 「温室におけるヒートポンプ利用 (2) 夏期夜間冷房」『農業気象』 39(3), 181-189.

李盈徳・後藤英司・高倉直・蔵田憲次 (1998). 「高温環境下における養液温度がホウレンソウの根の成育に及ぼす影響」『植物工場学会誌』 10(4), 225-230.

〔平成 30 年 6 月 30 日受付〕  
〔平成 30 年 7 月 10 日受理〕



## Estimation of the practicality of a greenhouse installed with a low-cost geothermal heat pump system

Masashi Komine<sup>1,4</sup>, Koh Yahagi<sup>1</sup>, Shin-ichi Nakamura<sup>1,2</sup>, Rie Takagi<sup>1,3</sup>, Kojiro Hara<sup>1</sup>  
Kouji Noge<sup>1</sup>, Chiharu Sone<sup>1,4</sup>, Kyouko Toyofuku<sup>1,4</sup>, Takahiro Kamada<sup>1,4</sup>, Ken Kimura<sup>1,4</sup>  
Hiroko Mizuno<sup>1</sup>, Youko Ishikawa<sup>1</sup>, Atsushi Ogawa<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Department of Bioresource Sciences, Faculty of Biological Production, Akita Prefectural University

<sup>2</sup> Department of Bioscience, Faculty of Life Design, Tohoku Institute of Technology

<sup>3</sup> Department of Life Design for Safety and Amenity, Faculty of Life Sciences, Tokyo University of Agriculture

<sup>4</sup> JST Crest

The year-round cultivation of crops in greenhouses would be an effective means of establishing a new agricultural production system in Akita prefecture. In order to economically operate greenhouse cultivation, it is necessary to reduce heating costs. The shallow geothermal heat pump (GHP) system is an appropriate equipment for this purpose. This study evaluated the practicality of using GHP in greenhouses. Compared to estimations, the coefficient of performance (COP) of the installed GHP showed lower values than the designed one. The importance of the optimization of the control parameters and of introducing a dynamic operation of the GHP was suggested. The effects of cooling the nutrient solution were not observed on the growth of plants as a result of the cultivation experiments effected in summer. Moreover, the warming of the nutrient solution during the winter experiments resulted in the suppression of plant growth and caused root injuries. It was supposed that the remarkable difference between leaf and root temperatures and the dynamic fluctuation of air temperatures caused the repression and damage. It was thus posited that the GHP system required an active controlling ability that would enable it to modulate the solution temperature according to the fluctuation of air temperature in order to avoid excessive disparity between the temperatures of the leaf and the root.

**Keywords:** heat pump, shallow geothermal, protected culture, year-round culture, hydroponics, temperature control