空気熱源式ヒートポンプと燃焼式温風暖房機 とのハイブリッド運転によるバラ栽培の暖房費削減効果

佐藤展之^{1*}・守谷栄樹²・安井清登³・野々下知泰⁴

¹ 静岡県農林技術研究所 438-0803 磐田市富丘 678-1

² 中部電力株式会社 459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1

³ 三菱重工空調システム株式会社 452-8561 清須市西枇杷島町旭 3-1

⁴ ネボン株式会社 150-0002 東京都渋谷区渋谷 1-4-2

Saving Energy with a Hybrid Heating System using an Air-to-air Heat Pump and Oil Heater in a Rose Greenhouse

Nobuyuki SATO¹, Hideki MORIYA², Kiyoto YASUI³ and Tomoyasu NONOSHITA⁴

¹Shizuoka Prefectural Institute of Agriculture and Forestry, 678-1 Tomigaoka, Iwata, Shizuoka, Japan

²Chubu Electric Power Co., Inc., 20-1 Kitasekiyama, Ohdaka-cho, Midori-ku, Nagoya, Japan

³Mitsubishi Heavy Industries Air-Conditioning & Thermal Systems Corporation,

3-1 Asahi, Nishibiwajima-cho, Kiyosu, Aichi, Japan

⁴NEPON Inc., 1-4-2, Shibuya, Shibuya-ku, Tokyo, Japan

Abstract

We compared the total cost of greenhouse heating between a conventional oil-fired air heater and a hybrid system comprising an electric heat pump (rated at 49.2 W m^{-2}) and an oil-fired air heater (rated at 199.4 W m^{-2}) in identical rose greenhouses in Iwata city, Shizuoka, Japan. The greenhouses had a heat load coefficient of $3.7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. The average nighttime temperature in the hybrid-system greenhouse during August and September was 2.2°C lower than that in the oil-heater greenhouse owing to nighttime cooling by the heat pump. To maintain a minimum temperature of 18°C required an annual consumption of heavy oil for heating of 12.61 L m^{-2} by the hybrid system and 33.49 L m^{-2} by the oil heater. The annual consumption of electricity was 14.91 MJ m^{-2} by the hybrid system and 1.13 MJ m^{-2} by the oil heater. The total energy input for heating was 43.77 MJ m^{-2} for the hybrid system and 81.62 MJ m^{-2} for the oil heater. Using 3.79 as the coefficient of performance of the heat pump gave an estimated energy use of 78.19 MJ m^{-2} for heating by the hybrid system, lower than the calculated value of 81.62 MJ m^{-2} ; that is, the rated COP was exceeded. At an oil price of 65.8 yen L^{-1} , the annual running cost was 1645 yen m^{-2} in the hybrid-system greenhouse and 2162 yen m^{-2} in the oil-heater greenhouse. The annual cut rose production was 712.7 g per plant in the hybrid-system greenhouse and 643.2 g per plant in the oil-heater greenhouse. In particular, production in the hybrid system was 53% higher in August and September, when nighttime cooling was operated.

2012 年 5 月 9 日受付

2012 年 9 月 24 日受理

Corresponding author: Nobuyuki Sato

(nobuyuki3_sato@pref.shizuoka.

lg.jp)

*現在: 静岡県経済産業部農林業局みかん園芸課

Overall, the hybrid system resulted in savings of 46% of input energy and about 24% of energy costs.

Keywords: cut flowers, greenhouse, heating system, heat pump, rose

緒 言

切花生産のためのバラの栽培適温は、日中が $23 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 、夜間は $16 \sim 17^{\circ}\text{C}$ であり¹⁾、冬期には暖房が必要であり、一般的に重油または灯油の燃焼式の温風暖房機が使用されている。しかし、石油価格は変動が大きく、2002 年に 35 円 L^{-1} 程度であった A 重油価格は、2008 年 8 月に 121 円 L^{-1} にまで上昇し（経済産業省資源エネルギー庁、石油製品価格調査、<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/sekiyukakaku/sekiyukakaku3.htm>, 2012 年 8 月 16 日参照）、施設園芸の経営を大きく圧迫した。石油に頼らない電気による温室の暖房方法として、小国²⁾は 1982 年にヒートポンプによる環境調節について報告した。林ら³⁾は温室におけるヒートポンプの効率を高めるために、蓄熱層を用いた暖房システムを提案した。1986 年当時は施設園芸用には地下水を熱源として利用した水－水型または水－空気型ヒートポンプが主力であった⁴⁾。1989 年に佐々木⁵⁾は、空気－空気型ヒートポンプによる温室暖房で、重油料金が $65 \sim 85 \text{ 円 L}^{-1}$ で運転経費が石油と同等になると報告している。2008 年に川嶋ら⁶⁾は、ヒートポンプは初期投資が大きくなること、低温期の室外機による除霜運転開始時に暖房を中止することから、空気熱源式ヒートポンプは従来の重油式温風暖房機と併用して使用するハイブリッド方式の有効性を報告し、ヒートポンプの初期投資は、重油価格が $55 \sim 68 \text{ 円 L}^{-1}$ 以上で投資額の回収が可能であると試算した。

これらの報告にある重油価格 $65 \sim 85 \text{ 円 L}^{-1}$ を超えた 2008 年の重油高騰時以降、空気熱源式ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用するハイブリッド暖房方式が、バラ栽培を中心に導入され始め、農林水産省の「園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査」によると（加温設備の種類別設置実面積の推移、<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001074417>, 2012 年 8 月 16 日参照）、2009 年には国内の花き栽培施設で 97.2 ha、野菜栽培施設園芸で約 35.7 ha、果樹栽培施設で 15.5 ha の計 148.4 ha の園芸施設でヒートポンプが導入され、2007 年における 13 ha と比較すると飛躍的に増加した。

ヒートポンプは、暖房だけでなく夏季の夜間冷房や除湿にも利用できるメリットがある^{2,7)}。森口ら⁸⁾は、バラ栽培で夏季高温期における夜間冷房と根圏冷却の効果を検討し、夜間冷

房により切花本数が増加すると報告している。

しかし、従来のヒートポンプの温室利用への有効性に関する研究報告は、短期間の暖房コストや環境条件の比較が多く^{6,8)}、同一規模の温室において作物を栽培した条件で、年間を通して重油式温風暖房機による暖房費と、空気熱源式ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用したハイブリッド方式による暖房費を比較した報告はないため、バラ栽培条件下で、重油使用料、電気使用量を測定し、暖房費の比較を行なった。合わせて、夏季の夜間冷房を含めた空気熱源式ヒートポンプを利用した年間のランニングコストのシミュレーションと、バラの収量について比較検討した。

材料および方法

1) 試験区の設置方法、試験期間

ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用する「ハイブリッド区」と、重油式温風暖房機のための「対照区」を、静岡県農林技術研究所内のフェンロー温室の中央部を、ガラス戸で分割することで設定した (Fig. 1)。各処理区には循環扇を設置し、常時運転した。ここでは、冷暖房機器が稼動する 18 時から翌日の 8 時までを夜間とし、8 時から 18 時までを日中とした。冷暖房機器の作動していない日中は、中央部のガラス戸を開放し、冷暖房装置の稼動する夜間の時間帯のみ、中央部のガラス戸で仕切った。なお、日中の時間帯でも、天候等の影響により暖房機が稼動するときには、中央部のガラス戸を

Fig. 1 Glasshouse layout. The glass doors were opened during the daytime (8:00–18:00) and closed at night (18:00–8:00).

閉鎖した。床面積は、ハイブリッド区、対照区ともに、259.2 m² (間口 9.6 m × 奥行 27 m)、軒高 4.8 m で同一である。暖房時には両区とも暖房を行っているため、熱の移動は無いものと仮定し、対照区と中央部の仕切りの表面積は含めず、ハイブリッド区の表面積は 504.4 m² として評価した。夏季高温期における対照区は、夜間も窓を開放した状態となる。ハイブリッド区の夜間冷房時における表面積は、処理区中央部の仕切り部分の面積を加えた 634.0 m² を用いて評価した。

ハイブリッド区の空気熱源式ヒートポンプ (FDUP1402HM 改, 三菱重工 (株)) は、電気駆動で定格暖房能力 14 kW のものを使用した。ヒートポンプの暖房能力を、床面積 1000 m² のフェンロー型温室 (温室表面積 1770.9 m²) に表面積換算すると、49.2 W m⁻² 相当となる。ハイブリッド区の重油式温風暖房機 (HK-2027, ネボン (株)) は、暖房能力 56.8 kW (熱出力 64.6 kW, 効率 88.0%) のものを用いた。同様に床面積 1000 m² のフェンロー型温室に換算すると、暖房能力は 199.4 W m⁻² 相当となる。

ヒートポンプの定格冷房能力は 12.5 kW であり、床面積 1000 m² のフェンロー型温室へ表面積換算すると、34.9 W m⁻² 相当となる。

対照区の暖房には、重油式温風暖房機 (HK-1522, ネボン (株)) を使用した (暖房能力 38.0 kW, 熱出力 44.2 kW, 効率 86.0%)。床面積 1000 m² のフェンロー型温室へ表面積換算すると、暖房能力 133.4 W m⁻² 相当となる。

試験期間は、2009 年 6 月 1 日から 2010 年 5 月 31 日までとした。

温室の暖房温度設定は、ハイブリッド制御盤 (NT-600, ネボン (株)) を用いて行った。設定温度は、時間帯別に 18 ~ 22 時は 22℃, 22 ~ 6 時は 18℃, 6 ~ 18 時は 20℃とした。ヒートポンプによる夜間冷房は、2009 年 8 月 1 日 ~ 9 月 15 日に行った。夜間冷房の設定温度は、21 ~ 0 時が 22℃, 0 ~ 7 時を 20℃とした。夜間暖房時は、ハイブリッド区、対照区とも温室上部を 2 層カーテン (上部: アルミカーテン PH-66, 下部: 不織布カーテン LS-10S, ともに (株) 誠和), 温室側面を 1 層カーテン (不織布) で被覆し、夜間冷房時は、ハイブリッド区のみ温室上部 2 層, 側面 1 層カーテンで覆った。夜間冷房時の対照区は、20℃に設定した天窓, 側窓の閉鎖のみで温度制御した。暖房時における対照区の暖房設定温度は、ハイブリッド区と同様の設定とした。

2) 暖房負荷, 温湿度の計測

ハイブリッド区と対照区の暖房費を比較するために、両区の温室の暖房負荷を計測した。暖房負荷は、冬期に重油式温風暖房機のみを用いて夜間暖房し、重油使用量, 内外気温差から下記の Eq. (1), (2) を用いて算出した。重油消費量は、油量計 (RE1-LE, 日東精工 (株)) とパルスロガ

ー (RVR-52, ティアンドデイ (株)) で、温湿度はカードロガー (MR6662, (株) チノー) を用い、10 分間隔で測定した。センサー部は、風速約 3 m s⁻¹ で常時通風している筒状容器内に設置した。測定は、2009 年 12 月の夜間に行った。

$$U = \frac{Qh \times 10^6}{(T_{in} - T_{out}) \times A \times t \times 3600} \quad (1)$$

$$Qh = Qh_A \times \eta \times V \quad (2)$$

U : 暖房負荷係数 (W m⁻² K⁻¹), Qh : 発生熱量 (MJ), T_{in} : 室内気温 (℃), T_{out} : 外気温 (℃), A : 温室表面積 504.4 (m²), t : 暖房時間 (h), Qh_A : A 重油発生熱量⁹⁾ 36.7 (MJ L⁻¹), η : 重油式温風暖房機効率 (ハイブリッド区 0.88, 対照区 0.86 は、排ガス損失法 (JIS A 4003) で測定した値), V : A 重油消費量 (L), 3600: 3600 (sec)

3) 消費電力量, 重油使用量の計測

使用重油量および消費電力から換算した冷暖房費は、温室面積 1000 m², 温室表面積 1770.9 m² のフェンロー型温室に表面積の比率で換算した後、温室面積 1 m² 当たりのシミュレーションの値として使用した。ヒートポンプおよび重油式温風暖房機の消費電力は、個々に交流電力モニタ (富士電機システムズ (株), PPMCFBR2-M) で測定した。電気料金は中部電力 (株) の、低圧季節別時間帯別電力料金 (2010 年: 夏季日中 (7 ~ 23 時, 7 ~ 9 月) 12.95 円 kW⁻¹ h⁻¹, その他の季節 11.77 円 kW⁻¹ h⁻¹, 夜間 (23 ~ 7 時) 9.33 円 kW⁻¹ h⁻¹, 基本料金は月額 1037.4 円 kW⁻¹) で試算した。

年間の暖房費の試算のための A 重油価格には、2009 年 6 月から 2010 年 5 月の小型ローリー A 重油全国平均価格 (経済産業省資源エネルギー庁, 石油製品価格調査, <http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/sekiyukakaku/sekiyukakaku3.htm>, 2012 年 8 月 16 日参照) の平均値 65.8 円 L⁻¹ を使用した。

4) 暖房時期の温室内部温度差の補正方法

ハイブリッド区と対照区の暖房時の温度管理は同一になるように設定したが⁸⁾, 温室内の温度測定により処理区で温度差が発生した場合は、温度低下を重油式温風暖房により補うと仮定し温度差を補正した。温度補正のための油量の算出には、以下の式 Eq.(3) を用いた。

$$V_f = \frac{(Thi - Tlo) \times H \times 3600 \times D \times U \times A}{Qh_A \times 10^6 \times \eta} \quad (3)$$

V_f : 補正 A 重油量 (L), Thi : 高温区夜間平均温度 (℃: 18 時 ~ 8 時), Tlo : 低温区夜間平均温度 (℃: 18 時 ~ 8 時), H : 暖房時間 (14 h day⁻¹: 18 時 ~ 8 時), D : 日数 (days), U : 暖房負荷係数 (W m⁻² K⁻¹), A : 温室表面積

(m^2), Qh_A : A 重油発生熱量 $36.7 \text{ (MJ L}^{-1}\text{)}$, η : 暖房システム利用率.

5) CO_2 発生量の算出

電力の消費による CO_2 発生量の算出は、環境省が公表している (平成 21 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について, <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13319>, 2012 年 8 月 16 日参照), 中部電力の調整後排出係数 $115.8 \times 10^{-6} \text{ g J}^{-1}$ を用いた. A 重油から CO_2 発生量の算出は、環境省が作成している「事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン」から, 単位発熱量 39.1 MJ L^{-1} と排出係数 $0.0693 \text{ kg CO}_2 \text{ MJ}^{-1}$ (事業者からの温室効果ガス排出量, 算定方法ガイドライン, http://www.env.go.jp/earth/ondanka/santeiho/guide/pdf1_6/mat_01.pdf, 2012 年 8 月 16 日参照) を乗じた値の, $2.71 \text{ kg CO}_2 \text{ L}^{-1}$ を用いた.

6) バラの栽培概要

2005 年 4 月 20 日に 5.692 株 m^{-2} の密度で, バラ品種 'ローテローゼ' (*Rosa hybrida* L. 'Asami Red') を定植した. 栽培方式は, ポリフェノール培地による養液栽培で, 仕立て法はアーチング方式とした. 収穫期間は, 2009 年 6 月から 2010 年 5 月まで連続で行った. 培養液処方, $\text{NO}_3\text{-N}: 11.6$, $\text{P}: 3.5$, $\text{K}: 5.7$, $\text{Ca}: 6.6$, $\text{Mg}: 2.0 \text{ (me L}^{-1}\text{)}$, 微量元素は $\text{Fe}: 3$, $\text{Mn}: 0.5$, $\text{B}: 0.3$, $\text{Cu}: 0.04$, $\text{Zn}: 0.1$, $\text{Mo}: 0.02 \text{ (ppm)}$ を用いた.

ハイブリッド区と, 対照区におけるバラの切花重量, 切り花本数の調査を 1 区 10 株 3 反復で行った.

結 果

1) 温室の暖房負荷係数

2009 年 12 月 14 ~ 17 日までに計測した暖房負荷係数は, 測定日により変動したが, $3.4 \sim 3.9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ と変動幅は小さかった. 3 回の測定による平均値は, ハイブリッド区が $3.66 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, 対照区が $3.70 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ でほぼ同様の値であり, 両区は同一の保温条件であった (Table 1).

2) ハイブリッド区と対照区の温湿度環境

試験温室内の 1 年間の平均気温は, ハイブリッド区で 22.7°C , 対照区は 22.7°C と同様であった. 日中の時間帯の年平均気温は, ハイブリッド区で 25.6°C , 対照区は 25.6°C で, 年平均の日中気温もほぼ同一の温度であった (Fig. 2). 各処理区の月別平均値を比較すると, 8 月のハイブリッド区の夜間平均気温は, ヒートポンプによる夜間冷房の効果で約 2.2°C 低下した (Fig. 2, Table 2). 対照区の 7 ~ 9 月の気温は, 外気温と同一温度であった. 冬期 (12 ~ 2 月) の対照区の夜温は, 暖房能力がやや低かったためハイブリッド区よりも低く, 最も差があった 1 月では, 夜間の平均気温がハイブリッド区よりも 1.6°C 低かった.

温室内の夜間の相対湿度は, 年間を通してハイブリッド区で低く推移した (Fig. 3). 特に 8 月のハイブリッド区の温室内部湿度は夜間冷房の影響で 83% と, 対照区の 90% と比較して低かった. ハイブリッド区の年間平均の相対湿度は 72.9% で, 対照区の年間平均相対湿度 76.1% に比較して低い傾向であった. 12 ~ 2 月までは, 月平均湿度もハイブリッド区の相対湿度が低い傾向であった. 冬季の夜間の相対湿度の低下は, ハイブリッド区の気温が高かったことも要因として考えられる.

Table 1 Calculation of heating load coefficients in hybrid system greenhouse and oil-heated greenhouse^z.

Treatments	Dates in Dec 2009	Heating period		Oil consumption	Heat value ^y	Average outside temperature	Average inside temperature ^x	Degree hour ^w	Heating load coefficient ^v	Outside wind speed
		time	h	L	MJ	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	deg h	$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	m s^{-1}
Hybrid system	14-15	16:50-8:00	15.2	40.5	1308	6.7	19.7	198	3.65	0.8
	15-16	16:40-8:00	15.3	44.0	1423	5.9	19.7	211	3.71	1.0
	16-17	16:40-8:10	15.5	51.7	1672	3.5	19.9	254	3.62	0.9
	Average		15.3	45.4	1468	5.4	19.8	221	3.66	0.9
Oil-fired heater	14-15	16:50-8:00	15.2	34.7	1091	6.7	18.4	178	3.38	0.8
	15-16	16:40-8:00	15.3	40.9	1288	5.9	18.0	185	3.83	1.0
	16-17	16:40-8:10	15.5	48.5	1525	3.5	17.4	215	3.90	0.9
	Average		15.3	41.4	1301	5.4	17.9	193	3.70	0.9

^z These data were measured in the greenhouses (floor area 259.2 m^2 , surface area 504.4 m^2) heated only by oil-fired heater.

^y Heat value = fuel oil A lower heating value (36.7 MJ L^{-1}) $\times$ oil consumption (L) $\times$ heating system efficiency (hybrid 0.88, oil-heated 0.86).

^x Average temperature of 9 points at 1.5-m height in the greenhouse.

^w Degree hour = (inside temperature [$^\circ\text{C}$] - outside temperature [$^\circ\text{C}$]) $\times$ heating time (h).

^v Heating load coefficient = calorific value (J)/(degree hour $\times 3600 \times$ surface area of greenhouse (m^2)).

Fig. 2 Monthly average day (8:00-18:00) and night (18:00-8:00) temperatures in hybrid-system-heated and oil-heated greenhouses and outside (Jun 2009 to May 2010).

3) 年間消費電力量, 重油使用量

ハイブリッド区と対照区の暖房時の温度管理は同一になるように設定したが, 温室内の温度測定の結果, 対照区の暖房能力がやや低かったため, 冬期の夜間温度は対照区で低く, 1月の平均夜間気温は 1.6°C 低かった (Fig. 2, Table 2).

式 (3) から算出した補正の重油量を, Table 2 に示した.

11 ~ 3月および5月は対照区の夜間温度が低く, 対照区の補正油量を加え, 6, 10月および4月はハイブリッド区の温度が低かったためハイブリッド区に補正油量を加えた. また, ヒートポンプで夜間冷房を行う8~9月および暖房機の作動しない7月は, 温度補正は行っていない.

ハイブリッド区と対照区において実測した消費電力量と重油使用量を, フェンロー型温室面積 1000 m^2 (温室表面積 1770.9 m^2) へ表面積換算した後, 温室面積 1 m^2 当たりとして Table 2 に示した. ヒートポンプに要した年間消費電力量は暖房用 12.34 MJ m^{-2} , 冷房用に 1.32 MJ m^{-2} で, 年間消費

Table 2 Electricity and oil consumption by hybrid system and oil-fired heater^z.

Item		Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Total
Hybrid system	Average nighttime temperature ($^{\circ}\text{C}$)	22.7	24.4	23.1	21.7	19.8	20.2	19.3	18.8	18.9	19.1	19.5	20.9	
	Electricity consumption of heat pump for heating (MJ m^{-2})	0.12	0.00	0.00	0.02	0.28	1.66	2.20	2.22	1.70	1.86	1.47	0.81	12.34
	Electricity consumption of heat pump for cooling (MJ m^{-2})	0.00	0.00	1.02	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32
	Electricity consumption of oil heater (MJ m^{-2})	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.21	0.34	0.23	0.19	0.15	0.05	1.25
	Oil consumption (L m^{-2})	0.02	0.00	0.00	0.00	0.11	0.84	2.77	3.97	2.70	1.70	0.26	0.01	12.38
	Corrected oil consumption ^y (L m^{-2})	0.11	—	—	—	0.08	—	—	—	—	—	0.04	—	0.23
	Total oil consumption (L m^{-2})	0.13	0.00	0.00	0.00	0.19	0.84	2.77	3.97	2.70	1.70	0.30	0.01	12.61
	Estimated heat energy by heat pump ^x (MJ m^{-2})	0.45	0.00	—	0.08	1.06	6.29	8.34	8.41	6.44	7.05	5.57	3.07	46.76
	Ratio (heat energy of heat pump/total energy) (%)	(58)				(69)	(75)	(55)	(46)	(49)	(62)	(88)	(99)	(60)
	Estimated heat energy by oil heater ^w (MJ m^{-2})	0.32	0.00	—	—	0.47	2.09	6.91	9.90	6.73	4.24	0.75	0.02	31.43
	Ratio (heat energy of oil heater/total energy) (%)	(42)				(31)	(25)	(45)	(54)	(51)	(38)	(12)	(1)	(40)
	Estimated total input heat energy (MJ m^{-2})	0.77	0.00	—	0.08	1.53	8.38	15.25	18.31	13.17	11.29	6.32	3.09	78.19
Oil-fired heater	Average nighttime temperature ($^{\circ}\text{C}$)	23.1	24.8	25.3	22.2	20.0	19.4	18.0	17.2	17.9	18.9	19.6	20.5	
	Electricity consumption of oil heater (MJ m^{-2})	0.01	0.00	0.00	0.00	0.11	0.12	0.27	0.25	0.14	0.09	0.11	0.03	1.13
	Oil consumption (L m^{-2})	0.45	0.00	0.00	0.06	1.33	2.76	5.36	6.80	5.00	4.30	2.80	2.93	31.79
	Corrected oil consumption (L m^{-2})	—	—	—	—	—	0.24	0.43	0.54	0.28	0.08	—	0.13	1.70
	Total oil consumption (L m^{-2})	0.45	0.00	—	0.06	1.33	3.00	5.79	7.34	5.28	4.38	2.80	3.06	33.49
	Estimated heat energy ^w (MJ m^{-2})	1.10	0.00	—	0.15	3.24	7.31	14.11	17.89	12.87	10.67	6.82	7.46	81.62

^z Heat pump had been operated as a night cooling system during 1 Aug to 15 Sep.

^y Corrected oil consumption = difference of nighttime temperature $\times$ heat load coefficient $\times$ greenhouse surface area $\times$ time / (fuel oil heating value $\times$ heating system efficiency)

^x Estimated heat energy of heat pump = Electricity consumption of heat pump (J) $\times$ coefficient of performance (3.79)

^w Estimated heat energy of oil heater = fuel oil lower heating value ($36.7 \times 10^6\text{ J L}^{-1}$) $\times$ system efficiency (hybrid system 0.88, oil-heated 0.86).

Fig. 3 Monthly average day (8:00-18:00) and night (18:00-8:00) relative humidity in hybrid-system-heated and oil-heated greenhouses (Jun 2009 to May 2010).

電力は合計 13.66 MJ m^{-2} で、ハイブリッド区の重油式温風暖房機による年間消費電力量 1.25 MJ m^{-2} を加えると、年間消費電力量は 14.91 MJ m^{-2} であった。対照区の重油式温風暖房機の年間消費電力量は 1.13 MJ m^{-2} であった。A 重油の年間消費量は、ハイブリッド区は 12.61 L m^{-2} であり、対照区 33.49 L m^{-2} の約 38% であった (Table 2)。

これらの値から夜間冷房用に使用した電力を除き、温室暖房に投入したエネルギー量を比較すると、対照区が 81.62 MJ m^{-2} であるのに対して、ハイブリッド区は、ヒートポンプ消費電力が 12.34 MJ m^{-2} と、温風暖房機による 31.43 MJ m^{-2} を加えた 43.77 MJ m^{-2} であり、投入エネルギーは対照区よりも 37.85 MJ m^{-2} 少なかった。重油式温風暖房機の消費電力は、熱エネルギーとして利用される値は小さいため除外した。また、循環扇や窓の開閉などの電力も加えていない。供試し

たヒートポンプの暖房定格条件下の COP (室外の乾球温度 7°C 、湿球温度 6°C 、室内の乾球温度 20°C) である 3.79 を用い、消費電力を熱エネルギーに変換して両区の比較をした (Table 2)。その結果、ハイブリッド区が 78.19 MJ m^{-2} と、対照区の 81.62 MJ m^{-2} よりも小さな値であり、今回の条件では、ヒートポンプは暖房定格条件下における能力以上の能力を発揮していると推測された。ハイブリッド区の熱エネルギーを、対照区と同一の 81.62 MJ m^{-2} にするヒートポンプの COP 値は 4.06 であった。

ハイブリッド区における、ヒートポンプの暖房負担割合は、外気温の低い 1 月で 46%、外気温が高い 4 月以降は 88% 以上であった (Table 2)。2009 年 6 月、夜間の平均気温が対照区で高かったために、補正重油使用量が多くなり、ヒートポンプの暖房負担割合は 58% と低かった。

4) 年間冷暖房経費

Table 2 により求めた、バラ温室における年間冷暖房用電力・A 重油使用量から、実勢価格として 2009 年 6 月～2010 年 5 月までの試験期間中における、小型ローリー A 重油全国平均価格 65.8 円 L^{-1} を用い、冷暖房コストを比較した (Table 3)。

年間の冷暖房費は対照区の 2162 円 m^{-2} に比較して、ハイブリッド区は 1645 円 m^{-2} で、約 24% (517 円 m^{-2}) の暖房費が削減された。

夏季の夜間冷房を行った期間は、8 月 1 日から 9 月 15 日までであり、9 月 15 日以降のヒートポンプは暖房用として使用した。夜間冷房を行った 8 月の午後 6 時から午前 8 時までの平均気温は、ヒートポンプ区で 23.1°C で、対照区の 25.3°C と比較すると 2.2°C 低下した (Table 2)。9 月の暖房用に使用したヒートポンプの電力は、9 月の消費電力の 6% とわずかであった。8、9 月の 2 ヶ月におけるヒートポンプの電気料金は、84

Table 3 Costs of heating and cooling in hybrid-system-heated and oil-heated greenhouses in Iwata City from Jun 2009 to May 2010^z.

	Item	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Total
Hybrid system	Electricity price (yen m^{-2})	28.5	17.4	54.9	29.1	32.0	86.6	119.8	114.1	95.6	100.0	83.2	52.8	814
	Oil price ^y (yen m^{-2})	8.5	0.0	0.0	0.0	12.9	55.3	261.0	182.5	177.9	111.9	20.1	0.7	831
	Total cost (yen m^{-2})	37.0	17.4	54.9	29.1	44.9	141.8	380.8	296.6	273.5	211.8	103.3	53.4	1645
Oil-fired heater	Electricity price (yen m^{-2})	4.6	4.1	4.1	4.1	8.1	11.6	16.3	17.9	16.0	15.2	12.3	12.3	127
	Oil price (yen m^{-2})	28.5	0.0	0.0	4.0	85.1	176.4	343.2	435.5	319.9	275.6	179.5	187.7	2035
	Total cost (yen m^{-2})	33.1	4.1	4.1	8.1	93.2	188.0	359.5	453.4	335.9	290.8	191.8	200.1	2162

^z Setting value of room temperature was 18°C in heating period.

Nighttime cooling setting temperature was 20°C only in hybrid system greenhouse from 1 Aug to 15 Sep.

Average temperature in nighttime (18:00 to 8:00) are shown in Table 2. Difference of room temperature were corrected by oil consumption.

^y Oil price was 65.8 yen L^{-1}

Fig. 4 Total CO₂ emissions from hybrid system and oil-fired heater (Jun 2009 to May 2010).

円 m⁻² であり、ハイブリッドシステムの年間冷暖房費の 5% 程度と少なかった。

5) CO₂ 発生量の比較

ヒートポンプによるハイブリッドシステムを導入する上で、もう 1 つのメリットは、同一の暖房条件でも CO₂ 発生量が削減できることである。Table 2 に示した年間の消費電力量、消費重油量から CO₂ の発生量を算出した結果、対照区の年間 CO₂ 排出量が、92.5 kg m⁻² であるのに対して、ハイブリッド区は 56.6 kg m⁻² で、年間の CO₂ 排出量は約 39% 削減できた (Fig. 4)。

6) バラの年間収量

ハイブリッド区と対照区のバラの年間収量は、切花総重量ではハイブリッド区が 1 株あたり 712.7 g であり、対照区の 1 株あたり 643.2 g よりも多く有意な差であった (Table 4)。夜間冷房を実施した 8、9 月の切花総重量は、対照区と比較して

Table 4 Production of cut roses (*Rosa hybrida* L. 'Asami Red') under different heating systems.

	Treatment	Night cooling period ^z (Aug-Sep)	Heating period (Oct-Jly)	total
Total cut rose weight g per plant	Hybrid system	139.2	573.5	712.7
	Oil-fired heater	91.0	552.2	643.2
	ANOVA ^y	*	n.s.	*
Total cut rose production number per plant	Hybrid system	4.4	14.8	19.2
	Oil-fired heater	3.4	15.0	18.3
	ANOVA	n.s.	n.s.	n.s.

^z Hybrid system was operated for nighttime cooling from 1 Aug to 15 September..

^y *P < 0.05, n.s., not significant.

有意な差で 35% 増加したが、8、9 月を除いた期間の切花総重量は、両区の間には有意差は見られず、夏季の夜間冷房が年間の収量増加に影響を与えていた。年間の切花本数は、両区の間には有意差は認められなかった。夏季の夜間冷房期間である 8、9 月も対照区が 1 株あたり 3.4 本、ハイブリッド区が 1 株あたり 4.4 本で、有意差は認められなかった。

考 察

1) 冷暖房比較の条件について

温室の暖房負荷係数は、ハイブリッド区が 3.66 W m⁻² K⁻¹、対照区が 3.70 W m⁻² K⁻¹ とほぼ同一の値であり、同一の保温性能を持つ温室の冷暖房コストの比較であると言える。

床面積 259.2 m² と一般農家のバラ栽培温室と比較してやや小さな規模のため、温室の表面積と床面積の比率は 1.95 で、1000 m² 規模のフェンロー型温室の表面積床面積の比率 1.77 (間口 38.4 m、奥行 27.0 m、軒高 4.8 m) と比較するとやや大きな値であるが、より大きな実用規模の温室で評価する場合に、冷暖房の削減率が過大評価する可能性は低い。

両処理区は、日中は中央のガラス戸 (仕切り) を開放するため、年間を通してほぼ同様の温度で推移したが、夜間温度は制御システム・暖房能力などが異なるため、11 月から翌年の 3 月にかけて対照区の夜間温度が低かった。最も温度差が大きかった 1 月の夜間の平均気温は、対照区で 1.6℃ 低かった。対照区との重油消費量を同一温度で比較するために、月単位で温室の温度差、暖房負荷係数を用いて、温度が低かった処理区を A 重油で暖房すると仮定し補正した。両区の暖房使用エネルギーの比較は、同一温度条件下での比較と判断した。

2) ハイブリッドシステムによる投入エネルギーの比較

ヒートポンプの暖房定格条件下における COP である 3.79 を用い、消費電力を熱エネルギーに変換し、重油式温風暖房機による A 重油の発熱量と合わせて、両区で使用した熱エネルギーの比較をした結果、ハイブリッド区は 78.19 MJ m⁻²、対照区は 81.62 MJ m⁻² とややハイブリッド区で少なく、本試験条件下では、ヒートポンプは定格能力以上の暖房能力を発揮したと推測した。ハイブリッド区と対照区を同一熱エネルギーにするヒートポンプの COP は 4.06 であった。暖房定格時の COP は、JIS 規格による室外乾球温度 7℃、室外湿球温度 6℃、室内乾球温度 20℃ の一定条件下の値であるが、8、9 月を除く 1 年間の長期間にわたる栽培期間においても COP は 4.06 と推測され、1 月の夜間の外気平均気温が 4.5℃ (Fig. 2) である静岡県のような、暖地におけるヒートポンプ

の利用の有効性を示している。

暖房のために温室へ投入したエネルギーは、ヒートポンプを併用したハイブリッド区は 43.77 MJ m^{-2} で、対照区の 81.62 MJ m^{-2} と比較して 46%削減でき、温室暖房の投入エネルギーを大幅に削減できることが明らかとなった。

また、ヒートポンプによる 8、9 月の夜間冷房のエネルギーを加えた場合でも、ハイブリッド区の年間の投入エネルギー量は 45.09 MJ m^{-2} で、対照区の 81.62 MJ m^{-2} と比較して大幅に少ない。

夏季の夜間冷房は、バラの収量増加に効果があり (Table 4)、使用するヒートポンプの電気エネルギーは 1.32 MJ m^{-2} と、暖房時の 12.34 MJ m^{-2} の 11%程度である。また、 2°C 低下する夜間冷房であれば、電気料金は月 55 円 m^{-2} 程度であるため (Table 3)、バラ栽培においては夏季夜間冷房の使用が効果的である。

COP4.06 の値は、1989 年に佐々木⁵⁾が報告している COP の 2.4 ~ 3.2 の値と比較しても大きな値になっており、ヒートポンプの効率も明らかに向上している。2008 年の川嶋ら⁶⁾の報告では、本試験と同様のヒートポンプを使用しており、短時間で測定した COP の値は 3.58 であるが、外気温が $5 \sim 9^{\circ}\text{C}$ 程度低温条件のため、やや低い値となったと思われる。

ヒートポンプと重油式温風暖房機を併用して使用するハイブリッド方式は、複数の暖房機器を同時に使用するためその制御方法が重要となる。ランニングコストが安いヒートポンプを主体として使用し、暖房熱量が不足し始めたら重油式温風暖房機を使用するのが効果的な利用方法である。本試験で使用したハイブリッド制御盤は、暖房時にはヒートポンプを優先的に稼働させ、暖房設定温度よりも 2°C 以下になると自動的に重油式温風暖房機が稼働し併用運転となる。川嶋ら⁶⁾も同様の制御で、ほぼ設定どおりになると報告しており、温風暖房機とヒートポンプを有利に使用するためには、温風暖房機が稼働してもヒートポンプが能力を落とさずに運転できることや、ヒートポンプを優先的に使用するなどの機能を持った専用の制御機器の利用が望ましい。

今回用いたヒートポンプの暖房能力は、床面積 1000 m^2 のフェンロー型温室 (温室表面積 1770.9 m^2) に表面積換算すると、 49.2 W m^{-2} 相当となる。このヒートポンプでは、最も外気温が低下した 1 月において、46%の暖房負担割合であった。外気温が高くなる 4 月以降には、88%以上の負担をしていた。ヒートポンプの過剰な設置は、電気料金の基本料金の負担増加となるため、磐田市における冬季の暖房設定温度 18°C のバラ栽培においては、ヒートポンプの暖房能力 49.2 W m^{-2} 程度が適正な規模と判断した。

3) ハイブリッドシステムによる年間冷暖房費の比較

温度補正を含めたハイブリッド区の年間の A 重油使用量

は、対照区よりも 62%削減でき、A 重油の価格変動による影響が小さくなる。但し消費電力量は対照区の 13 倍になるので (Table 2)、電気料金の変動による影響を受けやすくなる。

試験実施期間における A 重油の実勢価格 65.8 円 L^{-1} で冷暖房費を比較すると、ハイブリッド区において年間の冷暖房費が約 24%削減できる (Table 3)。A 重油価格は、原油の市場価格に大きく左右され変動する。一方電気料金は、急激な変動は比較的少ない。そこで、電気料金を同一と仮定し、A 重油価格を変動した場合に、年間の冷暖房費がどのように変化するかを検討した (Fig. 5)。A 重油価格が高くなると、ハイブリッド区も対照区も、年間冷暖房費は増加するが、ハイブリッド区は、その増加割合が少なくなる。

A 重油価格変動時の年間暖房費削減率を算出すると、ヒートポンプや重油式温風暖房機の導入経費を含まない場合の比較では、A 重油価格が 37 円 L^{-1} 以上で、ハイブリッド区における暖房費が対照区と比較して少なくなり、経費削減となることが明らかとなった (Fig. 6)。

上記の結果は、電気料金を固定した場合の試算である。電気料金が改定され価格が高くなれば試算結果も大幅に変わる。電気料金 (基本料金+従量料金) が、現行の 2 倍と仮定した場合では、重油価格が 78 円 L^{-1} 以上でハイブリッド区が价格的に有利になる (Fig. 6)。

温室面積 1000 m^2 へのヒートポンプ導入経費を、2500000 円と仮定し、A 重油の価格変動に伴う経済性を検討した。電気料金を同一と仮定し、A 重油価格を変動させ、下記の式 Eq.(4) によりヒートポンプ導入金額から 10%の残存価格を減じた値を、ハイブリッドシステムによる暖房費の削減額で除して償却年数を試算した。ここでは、ヒートポンプの電気使用量の増加に伴う、受電設備等の増加は考慮していない。

$$X = \frac{(P - P/10)}{D} \quad (4)$$

X: ヒートポンプ償却年数, P: 導入価格 (2500 円 m^{-2}), D: ヒートポンプによる年間暖房費削減額

A 重油価格 50 円 L^{-1} では、 2500 円 m^{-2} で導入したヒートポンプを償却するのに 8.9 年必要であった。ヒートポンプの法定耐用年数である 7 年を基準とすると、A 重油価格が 54 円 L^{-1} 以上で年間の冷暖房費の削減額から、7 年での償却が可能となる (Fig. 7)。

4) バラの収量について

森口ら⁸⁾は、夏季高温期における夜間冷房により、切花本数が増加すると報告している。今回の試験においては、ハイブリッド区と、対照区のバラの収量比較では、夏季の夜間冷房により夏季と年間の切花総重量が統計的に有意な差で増加した。夏季を除いた切花総重量は、ハイブリッド区で値がや

Fig. 5 Annual total running costs of hybrid system and oil-fired heater at different fuel oil prices.

Fig. 6 Rate of reduction of total running costs of hybrid system against oil-fired heater as prices of fuel oil and electricity change.

Fig. 7 Time required to recoup the cost of the heat pump system as fuel oil price changes. The price of heat pumps was 2500 yen for a 1 m² greenhouse.

や大きかったが、統計的に有意な差ではなく、夏季における切花総重量の増加が、年間の切花総重量の増加に影響を与えているものと思われた。

今回の試験では、11月から3月の対照区において、夜間の気温が低い傾向が見られたが、暖房期間中の切花総重量に差が見られないことから、冬季の夜間暖房温度低下の影響は少ないものと思われた。

以上の結果から、バラ栽培温室において、慣行の重油式温風暖房機に加え、 49.2 W m^{-2} の暖房能力を持つヒートポンプを設置したハイブリッドシステムで、冬期の夜間暖房設定温度 18°C (10～4月の18～8時までの温室内気温平均値は 19.6°C)、夏季の夜間冷房設定温度 20°C (8, 9月の18～8時までの温室内気温平均値は 22.4°C) で使用した場合、ヒートポンプや重油式温風暖房機の導入経費を含まず、電気料金を固定した場合の比較では、A重油価格が 37 円 L^{-1} 以上で、ハイブリッド区における暖房費が少なくなった。仮に 2500 円 m^{-2} でヒートポンプを導入した場合は、A重油価格が 54 円 L^{-1} 以上で法定耐用年数である7年以内での減価償却が可能となることが明らかとなった。

また、投入エネルギーは、ヒートポンプを併用したハイブリッド区は、対照区と比較して46%削減でき、2009～2010年時の重油価格、電気料金の比較では、ヒートポンプによる夏季夜間冷房を加えても、冷暖房費が約24%削減できた。年間 CO_2 排出量もハイブリッド区は、対照区と比較して39%削減できるので、今後の施設園芸用の暖房装置としての普及が期待できることが明らかとなった。

謝 辞

本報を作成するに当たりご指導いただいた、明治大学池田敬准教授に深く感謝いたします。

摘 要

温室の暖房費削減の目的で、暖房能力 49.2 W m^{-2} のヒートポンプと、暖房能力 199.4 W m^{-2} の重油式温風暖房機を併用したハイブリッドシステムと、慣行の重油燃焼式温風暖房機による年間の冷暖房コストについて、静岡県磐田市の1つの温室を、2つの同面積に分けた区画において実測比較した。その結果、ハイブリッドシステム区と対照区の暖房負荷係数は $3.7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ で、ほぼ同様の値であった。8, 9月は夜間冷房を行ったため夜間の平均気温は約 2.2°C 低下し、夜間相対湿度も約7%低下した。暖房の最低夜温は 18°C で設定し、暖房時における温度補正をした後のA重油使用量は、ハイブリッド区は 12.61 L m^{-2} であり、対照区 33.49 L m^{-2} の

約38%であった。ハイブリッド区の年間消費電力量は 14.91 MJ m^{-2} で、対照区の重油式温風暖房機の年間消費電力量は 1.13 MJ m^{-2} であった。温室の暖房用に投入したエネルギー量の比較では、対照区の投入エネルギー量が 81.62 MJ m^{-2} であるのに対して、ハイブリッド区の年間投入エネルギーは 43.77 MJ m^{-2} であった。ヒートポンプ消費電力を、暖房定格条件下のCOP 3.79を用いて熱エネルギーに変換して比較すると、ハイブリッド区が 78.19 MJ m^{-2} であり、対照区の 81.62 MJ m^{-2} と比較して少なく、ヒートポンプは定格以上の能力を発揮していた。バラ温室における年間冷暖房用電力・A重油実勢価格 65.8 円 L^{-1} で冷暖房コストを比較した結果から、夏季の夜間冷房を行うことにより冷房経費は増加するが、年間の冷暖房費は対照区の 2162 円 m^{-2} に比較して、ハイブリッド区は約24%の 517 円 m^{-2} の暖房費が削減でき 1645 円 m^{-2} であった。バラの年間収量は、切花総重量ではハイブリッド区が 712.7 g 株^{-1} であり、対照区の 643.2 g 株^{-1} よりも多く、特に夜間冷房を実施した8, 9月の切花総重量は、対照区よりも53%多かった。ハイブリッドシステムは、慣行の重油式暖房機と比較すると、投入エネルギーは約46%削減でき、2009～2010年時の重油価格、電気料金の比較では、ヒートポンプによる夏季夜間冷房を加えても、冷暖房費が約24%削減できた。

引用文献

- 1) 林 勇. 栽培の基礎. 林 勇編著, 切り花栽培の新技术改訂バラ上巻, 誠文堂新光社, 東京, 86-98. 1998
- 2) 小国研作. 温室用ヒートポンプに関する研究. 農業気象. 37(4): 317-322. 1982
- 3) 林 真紀夫, 古在豊樹, 中村 潤, 渡部一郎. 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): 379-378. 1983
- 4) 古在豊樹, 林 真紀夫. 園芸環境工学における最近の話題 (5) ヒートポンプ (2) システムの構成と特徴. 農業及び園芸. 61(6): 779-787. 1986
- 5) 佐々木皓二. 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. 1989
- 6) 川嶋浩樹, 高市益行, 馬場 勝, 安井清登, 中野有加. 空気熱源式ヒートポンプを利用したハイブリッド暖房方式による投入エネルギーおよび CO_2 排出量の削減効果. 野菜茶業研究所研究報告. 7: 27-36. 2008
- 7) 林 真紀夫, 古在豊樹, 中村 潤, 渡部一郎. 温室におけるヒートポンプ利用 (1) 夏期夜間冷房. 農業気象. 39(3): 181-189. 1983
- 8) 森口幸宣, 上島良純, 広部 純, 神藤 宏. 夜冷及び根圏冷却がバラの生育, 収量に及ぼす影響. 和歌山県農試研報. 12: 51-58. 1990
- 9) 林 真紀夫. 暖房. 日本施設園芸協会編. 施設園芸ハンドブック. 園芸情報センター, 東京. 127-130. 2003