

## 原著論文

## 木質ペレット暖房機とガス燃焼式温風暖房機のハイブリッド運転における低温期の熱供給特性

安 東赫・岩崎 泰永・東出 忠桐・中野 明正

(平成29年9月28日受理)

## Heat Supply Characteristics of a Hybrid Operation of Combined Wood Pellet and Gas Heaters in a Greenhouse

Dong-Hyuk Ahn, Yasunaga Iwasaki, Tadahisa Higashide, and Akimasa Nakano

## I 緒言

低温期の施設栽培では化石エネルギーに依存した暖房が実施されている。一時的な価格の上下に左右されず、長期的な視点に立てば、枯渇する資源への依存からの脱却が求められている。そのひとつの方策として、地域資源を活用した再生可能エネルギーの利活用が求められており、バイオマス燃料とした暖房システムの施設園芸への適用が必要とされている。しかし、実際生産現場では燃料の供給体制の不備や価格に加えて、制御や利用方法などに不明な点が多いため、実用事例が少ない(山口, 2009a, b)。

近年、次世代施設園芸導入加速化支援事業が全国の10拠点において実施されており、数ヘクタール規模の法人経営のモデル実証が農林水産省の主導で進められている。その一環として木質バイオマスや地熱等、化石燃料使用量削減と共に地域資源エネルギーを活用することが重要視されている(農林水産省, 2014)。

施設栽培における省エネルギーに関する研究では、保温性の向上(川嶋ら, 2013)や地中熱の利用(奥島ら, 2010・2012;古野ら, 2012),蓄熱利用(岩崎ら, 2015),局所加温の利用(河崎ら, 2011;森山・奥, 2012;壇, 2010)など、実用化に向けた技術開発が数多く存在する。一方、一般的な木質バイオマス暖房シ

テムの導入および運用に関する情報(林野庁, 2012)はあるが、木質ペレットを用いた施設での暖房に関する研究事例は少ない(國武ら, 2010;松崎, 2014)。さらに、バイオマス暖房機の場合、即時に着火と消火を繰り返すことができず、単独運転では温度制御が難しいため、暖房に必要な熱量の一定部分はバイオマス暖房機によって供給し、足りない部分は制御が容易である化石燃料の燃焼式暖房機で補う方法(ハイブリッド運転)が現実的であると考えられる。しかし、施設でのバイオマス暖房機のハイブリッド運転に関する報告や制御方法に関する報告はない。そこで本研究では、木質ペレットおよびガス燃焼式温風暖房機(以下、ガス暖房機)のハイブリッド運転とガス暖房機のみ運転を比較し、低温期の施設栽培における木質ペレット暖房機による化石エネルギーの代替効果を定量的に評価した。本研究の一部は「農林水産省委託プロジェクト、地域資源を活用した再生可能エネルギー等の利活用技術の開発(2014~2016)」の助成を受けて実施した。

## II 材料および方法

実験は農研機構つくば拠点内に設置された同じ規格の実証用ハウス(間口7.2m×奥行16.2m×軒高2.5m, 表面積:260㎡, 容積:400㎡, 被覆資材:農POフィ

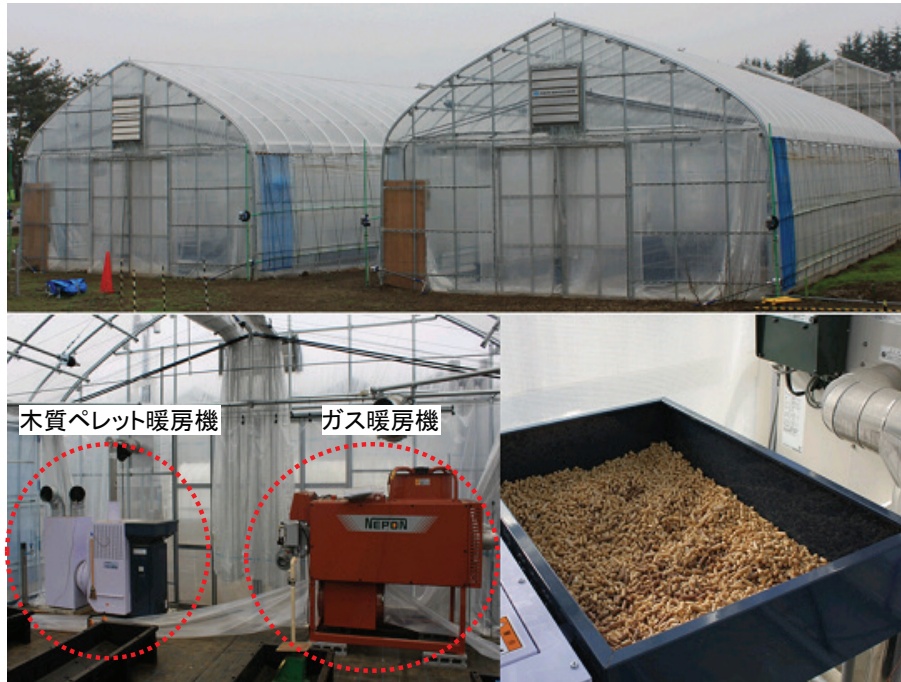


図-1 実験に用いたパイプハウス(上),暖房機(下左)および木質ペレット(下右)

ルム(厚さ:0.15mm),図-1上)2棟において暖房試験を行った。1棟はハイブリッド運転ハウスとし,木質ペレット暖房機(PWH-1500, 榎山本製作所;熱出力:15.5 kW)およびガス暖房機(HK2027, ネポン株;熱出力:58.1 kW)を併用して暖房を行った(図-1下左)。もう1棟は慣行ハウスとし,ガス暖房機(燃料:都市ガス13A)のみを設置して暖房を行った。

いずれのハウスもガス暖房機は室内気温が13℃以下になると,稼働するように設定した。ハウス内には内張りの保温カーテン(SLS30 ハーモニー, 榎誠和)を設置し,暖房時には閉めるようにした。また,試験はハウス内に作物がなく,地面には防草シートが敷かれた状態で行った。

木質ペレット暖房機はタイマー制御で1:00~6:00に稼働するようにした。運転を開始すると,燃料送りモータによって着火に必要な量の木質ペレットが燃焼炉に供給され,点火ヒータによって着火される。着火後は設定された速度で燃料送りモータが稼働すると同時に送風ファンが稼働し,運転終了時まで一定量のペレットが燃焼を続ける仕組みである。燃料であるペレットは,木部や樹皮を除いたホワイトペレット(木質ペレット, イワクラ株;含水率:約10%,直径:約6.2mm,長さ:約17mm,図1下右)を用いた。すべての暖房機の吸込み口および吹出し口には熱電対を設置し,温度の推移を1分間隔でモニタリングした。また,熱線式風速風量計

(DT-8880, CEM)を用い,吹出し口の風速を測定した。風量は吹出し口断面の9か所の風速を測定し,その平均値と吹出し口の断面積との積として算出した。木質ペレットならびにガス暖房機における燃焼によるハウスへの供給熱量(以下,燃焼熱量)はモニタリングした吸込み口と吹出し口の温度差と吹出し口の平均風量から算出した。屋外とハウス中央の地面から1.5 m高さに設置した通風式温度計を用いて1分間隔で計測し,測定値をそれぞれ屋外気温と室内気温とした。ガス暖房機はこの室内気温に基づいて制御を行った。室内の温度むらを少なくするために,ハウスの両端の地面から2mの高さに循環扇2台を対角の位置に設置し,24時間稼働した。暖房試験は,表1に示したように,2015年11月21日から12月20日まで行った。供試した木質ペレット暖房機は,ON-OFFタイマーおよび木質ペレットの供給速度の手動変更機能を有し,供給速度をP1(遅い)~P4(速い)の4段階に切り替えることで出力を制御できるようになっている。そこで,それぞれの段階における木質ペレットの消費量と燃焼熱量を計算するために,段階ごとに測定日を変えながらペレット暖房機を運転して暖房試験を行い,データを収集した。

暖房熱量の計算には,式1(三原ら,1978)に示したように,ハウスの内外の気温差にハウスの表面積と暖房負荷係数をかけて計算したが,煙突からの排気による熱の損失分は含まれてない。

表一 木質ペレット暖房機の試験日および燃焼モード

燃焼実験日	ペレット暖房機燃焼時間		燃焼モード
	開始	終了	
11/21, 11/23 ~ 27, 11/30, 12/2	1:00	6:00	P1
12/8 ~ 12/12	1:00	6:00	P2
12/13 ~ 12/16	1:00	6:00	P3
12/17 ~ 12/20	1:00	6:00	P4

\* 燃焼モードは、燃焼時における木質ペレットの供給速度を調節する機能であり、供試機材ではP1 ~ P4の4段階で調節する。P1が最も遅く（出力が小さく）、P4が最も早い（出力が大きい）。

### III 結果

$$Q = A_g U(\theta_{in} - \theta_{out}) \quad \text{式1}$$

Q：暖房熱量 (MJ h<sup>-1</sup>), U：暖房負荷係数 (MJ m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>)  
 A<sub>g</sub>：ハウス表面積 (m<sup>2</sup>), θ<sub>in</sub>：室内気温 (°C),  
 θ<sub>out</sub>：屋外気温 (°C)

実験に用いたハウスの暖房負荷係数は、図-2に示したように、慣行ハウスにおいて暖房試験が行われた20日分のデータを用いた。暖房デGREEアワーとハウス表面積との積を横軸とし、縦軸を燃料であった都市ガスの使用量から計算した熱量(1m<sup>3</sup>当たり約45MJとして計算)としたグラフから直線回帰式を求め、その傾きの0.0141 MJ m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>を暖房負荷係数とし、以降の解析に用いた。本実験では、θ<sub>in</sub>を設定値である13°Cとして暖房負荷を計算した。

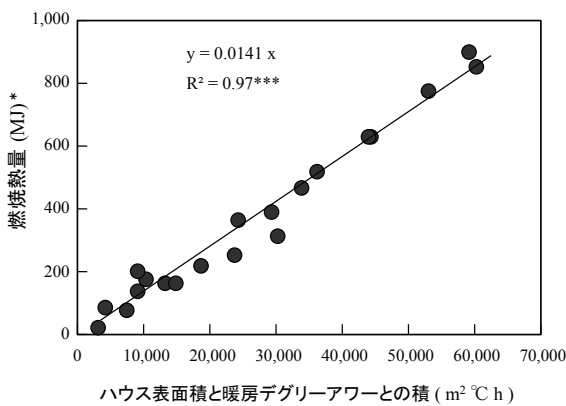


図-2 実験に用いたハウスの暖房負荷係数  
 \* 燃焼熱量は、暖房機の燃料(都市ガス)の消費量から算出(1m<sup>3</sup>当たり約45MJとして計算)  
 データは、慣行ハウスにおいて暖房を行った表1に示す20日分のものを使用

木質ペレット暖房機の燃焼モードごとに燃焼時のペレット消費量および燃焼熱量を計測した結果、P1, P2, P3, P4の燃焼熱量は、それぞれ18.8, 28.7, 40.4, 47.4 MJ h<sup>-1</sup>であった(図-3)。ペレット燃焼時、それぞれの消費量から、本実験で使用したペレットの燃焼熱量は、1kg当たり16.7MJであった。

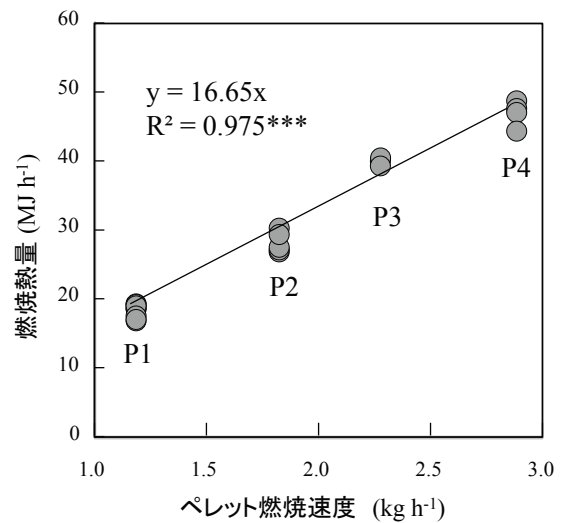


図-3 木質ペレットの燃焼速度と燃焼熱量との関係  
 図中の\*\*\*は0.1%水準で有意

図-4にはハイブリッド運転を行ったハウスの室内気温と木質ペレット暖房由来の燃焼熱量の推移を示した。本実験で用いた木質ペレット暖房機は、着火後送風ファンが稼働するまで一定時間を要する仕組みであったため、1時15分ごろに木質ペレット暖房機からの燃焼熱量が急増し、その後、安定して推移した。室内気温の変動を見ると、ペレット燃焼前に比べて燃焼後の気温の変動は小さくなり、13°C~15°Cで推移した。

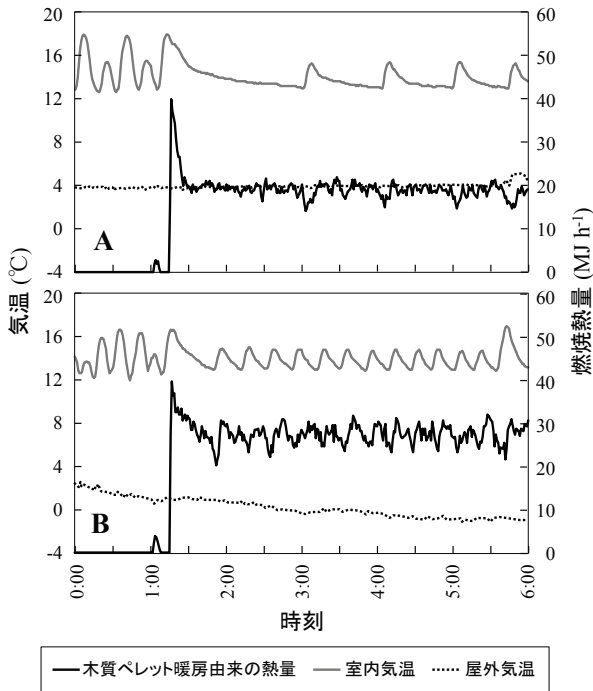


図-4 ハイブリッド運転時の気温および木質ペレット暖房由来の燃焼熱量の推移

A: 木質ペレット暖房機の燃焼モードはP1, 測定日は11月26日  
 B: 木質ペレット暖房機の燃焼モードはP2, 測定日は12月9日

図-5には暖房試験を行った日の中で外気温が比較的高く推移した日を選び、ハイブリッド運転ハウスと慣行ハウスでの気温の推移を示した。ハイブリッド運転ハウスでは、いずれも木質ペレット暖房開始時から慣行ハウスに比べて大幅な気温上昇が見られた。

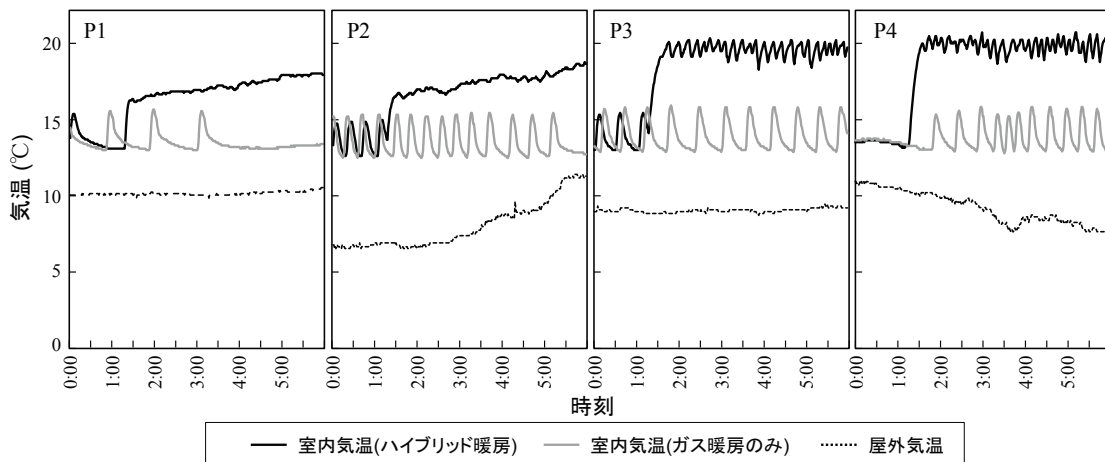
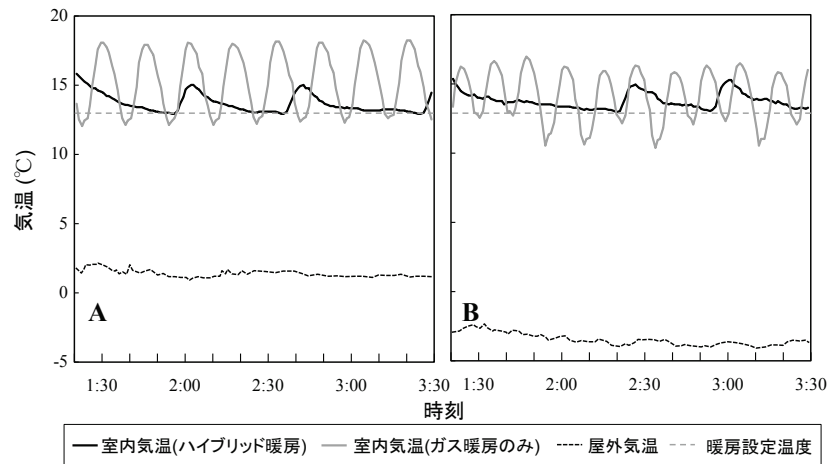


図-5 燃焼速度および暖房方法の違いが暖房負荷の少ない日における室内気温の変動  
 P1-P4は燃焼モードを示しており、それぞれの測定日は、11月24日、12月11日、12月14日、12月17日である

1:20~3:30の屋外平均気温が1.3℃だった12月8日(A)と-3.5℃だった12月20日(B)の室内気温の推移を見ると(図-6)、慣行ハウスでは11℃~18℃で推移し、設定温度である13℃との差が大きくなっていたが、ハイブリッド運転ハウスでは、13℃~15℃で推移し、室内気温の変動幅が小さくなり、設定値を下回することは少なかった。この時間帯において慣行ハウスでは、室内平均気温はAとBの時期で、それぞれ15.3と14.1℃だったのに対し、ハイブリッド運転ハウスでは、いずれも13.8℃であり、ハイブリッド運転ハウスが低かった。図-6と同じ時間帯において、燃焼熱量を比較すると、慣行ハウスでは、熱量の変動幅が大きく、ガスが燃焼する毎に設定温度を維持するための暖房負荷を大きく上回った(図-7)。しかし、ハイブリッド運転ハウスでは、ガス暖房由来の熱量が暖房負荷を大きく上回る頻度は少なかった。

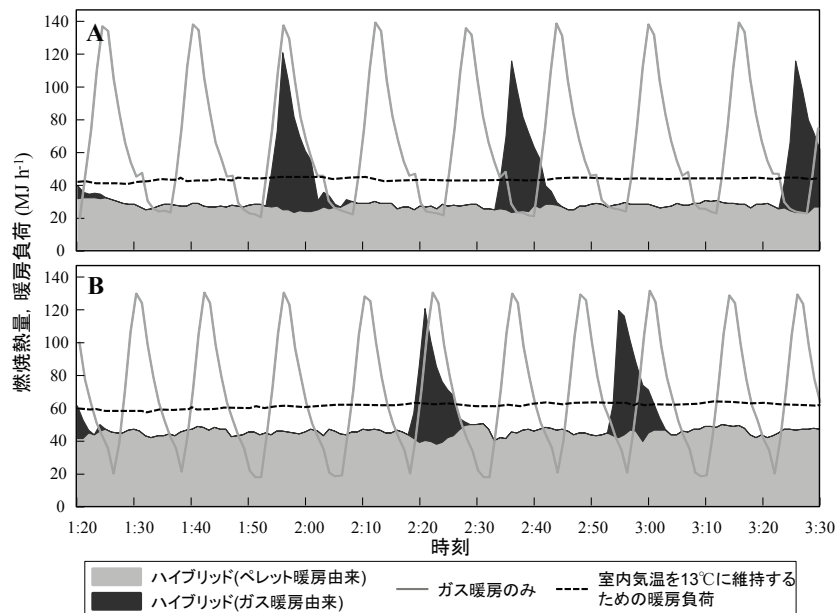
慣行ハウスにおける平均燃焼熱量はAとBの時期で、それぞれ64.3と68.9 MJ h<sup>-1</sup>に対し、ハイブリッド運転ハウスでは、木質ペレット暖房とガス暖房を合わせてA時期が36.5 MJ h<sup>-1</sup>(慣行ハウスの約57%)、B時期が51.6 MJ h<sup>-1</sup>(慣行ハウスの約75%)となった。

慣行ハウスの場合、暖房負荷が異なるAとBの時期間の燃焼熱量の推移(図-7)は同様であったが、室内気温の推移(図-6)には違いが見られ、暖房負荷が大きかった日には設定温度である13℃を大きく下回る頻度が多かった。



図－6 暖房方法が室内気温の推移に及ぼす影響

A：木質ペレット暖房機の燃焼モードはP2，測定日は12月8日  
 B：木質ペレット暖房機の燃焼モードはP4，測定日は12月20日



図－7 暖房方法が燃焼熱量の推移に及ぼす影響

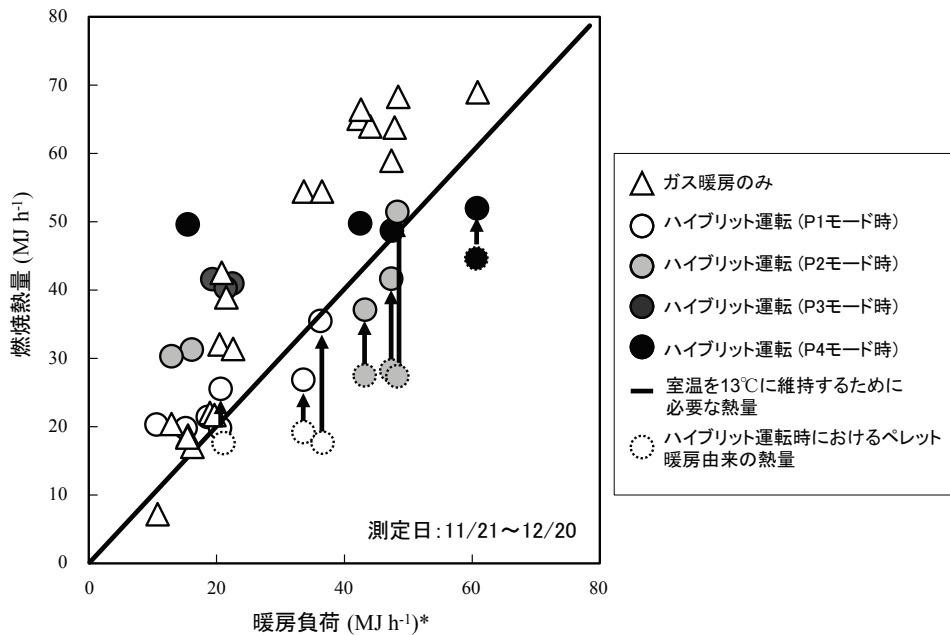
A：木質ペレット暖房機の燃焼モードはP2，測定日は12月8日  
 B：木質ペレット暖房機の燃焼モードはP4，測定日は12月20日

#### IV 考察

暖房試験の結果，本実験で用いた木質ペレットの燃焼熱量は，約  $16.7 \text{ MJ kg}^{-1}$  であったが，この値は山口 (2009a) の報告で示した  $15.5 \sim 17.0 \text{ MJ kg}^{-1}$  の範囲内であり，実験で供試した木質ペレットの材質や暖房機の燃焼状況は妥当であったと考えられる。

暖房機の燃焼と室内気温の変動には時間的なずれが生じるため，暖房運転時には気温が上下する。温風暖房機的能力やハウスの規模，暖房負荷にもよるが，一般的に

は，低温期の施設において温風暖房機が稼動する場合，室内気温の変動幅は  $2^\circ\text{C}$  程度である。本実験では，ガス暖房機の単独運転時に気温の変動幅が  $6^\circ\text{C}$  近くなることがあった。これは実験で用いたガス暖房機は熱出力が約  $200 \text{ MJ h}^{-1}$  のもので，ハウスの規模に対して出力が大きかったことが原因であると考えられる。しかしながら，ハイブリッド運転時において木質ペレット暖房開始後，気温の変動幅が小さくなったことや，慣行ハウスに比べてハイブリッド運転ハウスでの気温の変動幅が小さかったことから，ハイブリッド運転によってガス暖房機から



図一 異なる暖房方法が暖房負荷と燃焼熱量の関係に及ぼす影響

\*室内を13℃に維持する場合の暖房負荷

図中の矢印始点の点線○印はハイブリッド運転におけるガス暖房機由来の燃焼熱量を示し、矢印の長さが木質ペレット暖房機の燃焼熱量に相当する

の燃焼熱量の変動を小さくできると考えられる。ガス暖房機は設定温度以下になると着火し、目標温度に達すると消火する作動を繰り返すが、木質ペレット暖房機は燃焼開始後の燃焼熱量が一定である。そのため、安定した熱量が加わることによって、屋外気温とハウスの設定温度間差が小さくなり、ハイブリッド運転時のガス暖房機は少ない燃焼熱量で目標温度に達することができたと考えられる。また、木質ペレット暖房によってガス暖房機が負担する熱量が軽減され、室内気温の低下が緩やかになり、ガス暖房機の着火後、目標値までの気温上昇に時間がかからなかったことも原因の一つと考えられる。

一方で、木質ペレット暖房機では、着火後、一定の燃焼を続けるため、暖房負荷が少ない日においては暖房負荷以上の熱を発生した。これは、設定した燃焼モードの熱量が暖房負荷を上回ったためである。実際に、木質ペレット暖房機だけを用いて冬季の施設暖房を行っている生産団体に問い合わせしたところ、使用する暖房機には燃焼モードが設けられているが、制御は手動によるものであるため、暖房負荷に合わせた熱供給の自動調節ができない。その結果、低温期であっても必要以上の燃焼による損失が多く、暖房開始時期の決定が困難な状況が生じていた。また、燃料損失を減らすために暖房開始時期を遅らせた結果、低温によるものと見られる生産性低下の事例もあった。このことから、木質バイオマス暖房機

の場合、燃焼速度の自動調整機能導入の必要性が示唆された。制御の面を考慮すれば、燃焼時の熱を水タンクに蓄熱し、温水による暖房が効率的ではあるが、大きな設備を要するため、現状では大規模の施設に限られる。

外気温が低下し暖房負荷が増えると、設定温度を維持するための熱量は増加するが、ガス暖房機のみで運転した場合と木質ペレット暖房機を併用した場合とでは燃焼熱量が異なった。図一 8には本実験で行った各暖房方法による燃焼熱量とその時の暖房負荷との関係をまとめた。室温を13℃に維持するために必要な熱量(実線)と誤差が少なかった暖房方法は、暖房負荷より少ない燃焼モードを選び、不足分の熱量をガス暖房機によって補ったハイブリッド運転時であった。すなわち、ハイブリッド運転において、ハウス内の気温と暖房設定温度との差を少なくし、燃料消費を最小限に抑えるためには、木質ペレット暖房機の燃焼熱量を暖房負荷以下に維持する制御が重要であることを示唆している。

一方、化石エネルギーからの脱却や森林資源の有効活用、二酸化炭素排出の軽減を考慮すると、施設内暖房のすべてを木質ペレット暖房機で補うことが望ましいが、暖房負荷の変動に対応した燃焼制御が確立されていない現状では、ハイブリッド運転を活用し、木質ペレット暖房機の使用割合を向上させることが有効であると考えられる。

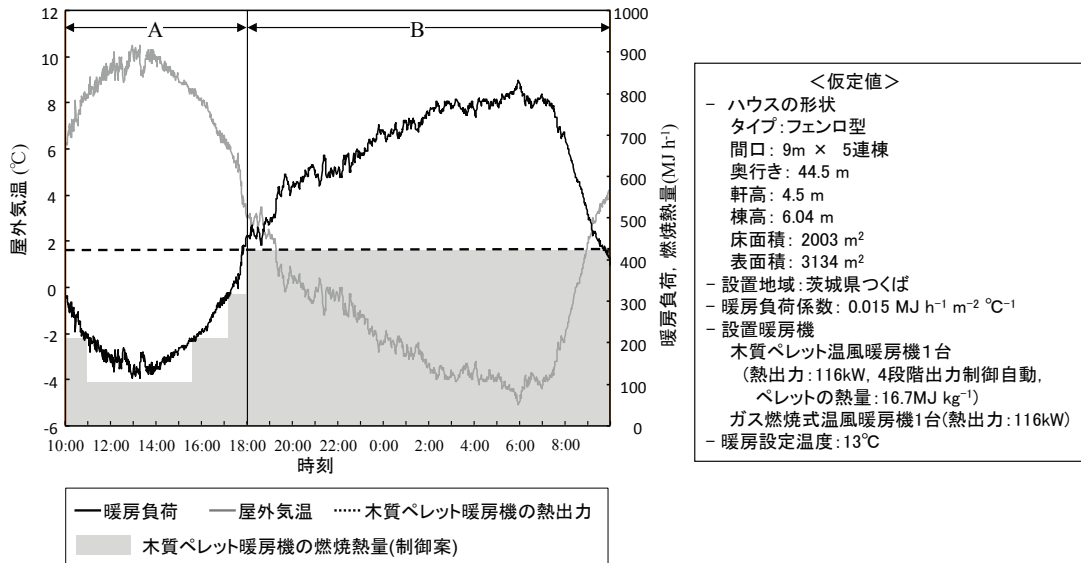


図-9 ハイブリッド運転を仮定したハウスにおける木質ペレット暖房機の運転方法  
A: 燃焼調整域, B: 最大燃焼域

図-9には、約20a規模のハウスにおいてガス暖房機と木質ペレット暖房機によるハイブリッド運転を行ったと仮定した場合の暖房負荷と燃焼熱量の推移を示した。屋外気温が図-9に示したように推移した日であれば、暖房負荷は約100 MJ h<sup>-1</sup>から800 MJ h<sup>-1</sup>まで変動することになる。木質ペレット暖房機においてペレットの供給速度を制御できない場合は、暖房負荷が木質ペレット暖房機の定格出力になるまでは、燃焼制御が容易であるガス暖房機を使用した方が望ましいと考えられる。すなわち、ハウスの暖房負荷が木質ペレット暖房機の定格出力に相当する420 MJ h<sup>-1</sup>を超える時点が木質ペレット暖房機の燃焼開始のタイミングであると考えられる。この状況において暖房機制御としては、室内気温が13°C以下でガス暖房機を稼働させるが、屋外気温が4°C以下になると、木質ペレット暖房機の燃焼を開始することが適切であると考えられる。さらに、木質ペレット暖房機の出力やペレットの熱量、施設の暖房負荷係数が把握された上で、外気温と連動して熱量調整が可能であれば、図-9のA(燃焼調整域)である暖房負荷が420 MJ h<sup>-1</sup>になるまでは、暖房負荷によって火力を調整しながら木質ペレット暖房機を稼働させ、不足分をガス暖房機で補う方法が適切であると考えられる。このような制御によって、化石エネルギーの代替率は著しく向上すると同時に、省エネルギー化も期待できる。

ハイブリッド運転を実施する場合の木質ペレット暖房機的能力選定については、化石エネルギーのバイオマスへの代替率や燃焼自動調節の有無によって異なる。図-

9に示した例を基にバイオマスへの代替率を計算してみると、熱量調整ができない場合、すなわち、図-9のB時間帯のみ木質ペレット暖房機を使用すると、全体の燃焼熱量の約54.1%を補うことになる。さらに、図-9のA時間帯の熱量調整が可能になると、全体の燃焼熱量の約64.4%まで増加する計算になる。このように、同じ能力の暖房機を組み合わせるとハイブリッド運転を行っても、熱量の自動調整が可能であれば、バイオマスへの代替率の増加が期待できる。特に、暖房負荷がバイオマス暖房機の最大出力より少なく時間帯が長い時期には、バイオマスへの代替率は極めて大きくなると考えられる。しかし、前述したように、木質ペレットを利用する温風暖房機には熱量の自動調整機能が備えられたものが無いため、図-9に示したように、木質ペレット暖房機と化石燃料の暖房機の熱供給能力がいずれも冬季の最大暖房負荷の50%程度の暖房機を選び、着火開始タイミングを適切に制御することが望ましいと判断した。

## V 摘要

低温期の施設栽培においてバイオマス暖房機の導入を促進するため、木質ペレットとガス暖房機を併用したハイブリッド運転とガス暖房機だけの運転時のハウス内の気温や燃焼熱量を比較した。

ハイブリッド運転では、木質ペレット暖房機からの熱供給量は安定しており、ガス暖房機からの熱供給の変動幅が小さくなった。ハイブリッド運転はガス暖房機のみ

の運転に比べて、室内気温の変動幅が小さく、設定温度に近い制御ができ、暖房によって供給された燃焼熱量と暖房負荷との差も小さくなった。このような、ハイブリッド制御によって、化石エネルギーの代替率は著しく向上すると同時に、省エネルギー化も期待できる。

### 引用文献

- 1) 壇和弘 (2010)：周年生産をめざすイチゴの最先端技術 (2) イチゴのクラウン温度制御技術. 農耕と園芸, **65**(12), 40-43.
- 2) 古野伸典・菅原敬・高杉真司・桂木聖彦・奥島里美・佐瀬勘紀 (2012)：寒冷地域の施設園芸における地中熱源ヒートポンプシステムと空気熱源ヒートポンプシステムの暖房時運転特性の比較. 農業施設, **43**, 131-137.
- 3) 岩崎泰永・鈴木真実・梅田大樹・松尾誠治・安東赫・高市益行 (2015)：施設園芸用ハウスの換気抑制を目的とした冷房における空気熱源ヒートポンプ, 家庭用ヒートポンプおよび蓄熱槽利用型ヒートポンプの運転特性比較. 野菜研報, **14**, 65-74.
- 4) 河崎靖・鈴木克己・安場健一郎・高市益行 (2011)：温風ダクト吊り下げによるトマトの生長点-開花花房付近の局部加温が垂直温度分布, 収量および燃料消費量に及ぼす影響. 園芸学研究, **10**(3), 395-400.
- 5) 川嶋浩樹・古市崇雄・宮内樹代史・林真紀夫・直木武之介・長崎裕司 (2013)：多層保温被覆資材と水蓄熱体の利用がパイプハウスの暖房負荷に及ぼす影響. 農業施設, **44**(2), 73-82.
- 6) 國武みどり・井手治・龍勝利・小熊光輝・奥幸一郎 (2010)：木質ペレット暖房機の暖房特性. 福岡県農業総合試験場研究報告, **29**, 37-39.
- 7) 松崎朝浩 (2014)：木質ペレット温風暖房機の暖房特性. 香川県農研報, **64**, 67-69.
- 8) 三原義秋・内藤文男・高倉直・古在豊樹・岡田益己・林真紀夫・鎌仲 龍介 (1978)：大型ビニールハウスにおける暖房負荷の実態調査. 農業気象, **33**(4), 189-193.
- 9) 森山友幸・奥幸一郎 (2012)：促成ナス栽培におけるトンネルと枝ダクトを組み合わせた株元加温システムの開発. 園芸学研究, **11**(4), 531-536.
- 10) 農林水産省 (2014)：次世代施設園芸の全国展開. [www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/NextGenerationHorticulture/pdf/siryoku4.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/NextGenerationHorticulture/pdf/siryoku4.pdf)
- 11) 奥島里美・Mears D.R.・佐瀬勘紀・古野伸典・森山英樹・石井雅久 (2012)：ヒートポンプを利用した温室暖房システムの日本における発揮性能. 農業施設, **43**(3), 30-38.
- 12) 奥島里美・吉田弘明・森山英樹・石田聡 (2010)：水熱源ヒートポンプによる農村地域の地中熱エネルギーの利用. 農業農村工学会誌, **78**, 11-14.
- 13) 林野庁 (2012)：木質バイオマスボイラー導入・運用にかかわる実務テキスト. [http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/con\\_4.html](http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/con_4.html)
- 14) 山口智治 (2009a)：石油代替エネルギー利用技術の将来—木質ペレット利用によるハウス暖房とその評価. 施設と園芸, **146**, p10-15
- 15) 山口智治 (2009b)：省エネ対策—木質バイオマス. 最新農業技術花卉 vol.1, p27-34, 農文協



# Heat Supply Characteristics of a Hybrid Operation of Combined Wood Pellet and Gas Heaters in a Greenhouse

Dong-Hyuk Ahn, Yasunaga Iwasaki, Tadahisa Higashide and Akimasa Nakano

## Summary

To study the application of biomass heaters in greenhouses during the cooler season, we compared the temperature and combustion heat in a greenhouse while using a) a hybrid heating operation of combined wood pellet and gas heaters and b) only a gas heater.

With hybrid heating, the amount of heat from the wood pellet heater remained steady and the fluctuation of heat supplied by the gas heater was reduced. As a result of the hybrid operation, compared to operation of only the gas heater, the inside temperature fluctuated less, and it was possible to maintain the temperature close to the set level. The difference between the combustion heat supplied by the heating and the heating load was also small. Through use of the hybrid operation proposed in this experiment, the substitution rate of fossil energy can be decreased remarkably and energy conservation can be expected.

---

Accepted; September 28, 2017

Division of Vegetable Production System

3-1-1 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8519 Japan