

木質系燃料の施設園芸への利用に関する研究 (第2報)

— 燃 焼 装 置 の 性 能 —

岩尾俊男*・寺田俊郎**・吉野蕃人**・伊藤憲弘**
中尾清治***・塩田洋三****

Toshio IWAO, Toshiro TERADA, Shigeto YOSHINO,
Norihiro ITO, Seiji NAKAO and Yoza SHIOTA

Studies on Heating for a Horticultural Plant
using Woody Pellets as Fuel (II)
— Performance of a Woody Pellet Burner —

I 緒 言

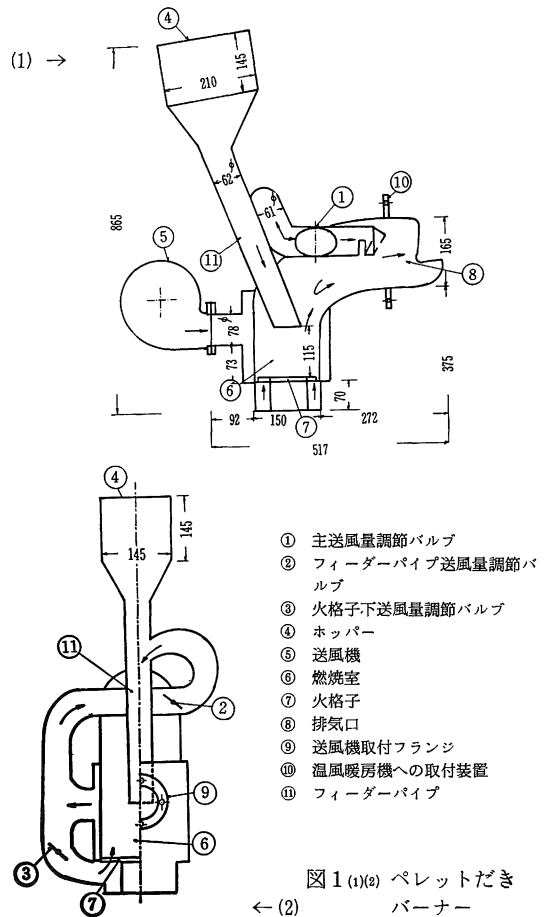
木質系燃料の燃焼機には、ストーブ、温風暖房機、ポイラー等がある。この中でストーブは、戦前より使用されているが、燃焼条件により、熱出力、熱効率に変化し、燃焼温度の自動調節、種火の長時間保存などに問題がある。一方、木質系燃料用の温風暖房機は、一度に多量の燃料を投入する形式であり、施設園芸用として必要とされる 70,000~150,000 Kcal/h 程度の出力を有する小、中形の温風暖房機で温度の自動調節が可能なのは、現在のところ見当らない。

ところで、わが国における、加温ハウス用の温風暖房機は、重油だき温風暖房機が大部分を占めているので、重油だきバーナーに代わるペレットだきバーナーの開発を行い、重油用のバーナー部とペレット用バーナー部との交換により、重油だきに劣らない性能を発揮させるペレットだき温風暖房機の開発が必要である。

したがって、施設園芸用として、ペレットだきバーナーの利用上具備すべき条件は、熱出力が 70,000~150,000 Kcal/h あり、広範囲な熱出力の調節、消火・点火の自動化および燃料の自動供給等が可能であることである。

これらの観点から、この研究は、ペレットだきバーナーの開発と、そのバーナーの燃焼特性および温風暖房機との結合上の燃焼特性に関する研究を行ったものである。

* 栽培管理制御工学
** 付属農場
*** 農業機械工学
**** 木材加工学



本研究に当り、ペレットの提供をいただいた日本製鋼所機械研究所および研究に援助をいただいた林製作所および財団法人農村エネルギーシステム研究会に謝意を表わす次第である。

II 実験方法

1. ペレットだきバーナー

図1(1)(2)は、ペレットだきバーナーの概略である。バーナーは、送風機(風量 $10\text{m}^3/\text{min}$, 静圧 80mm Aq , 3200rpm)、ホッパー、フィーダーパイプ、送風パイプ、火格子および燃焼室(内径 150mm)より構成する。

ホッパー④に供給されたペレットは、フィーダーパイプ⑩により燃焼室⑥に入る。一方、送風機⑤よりの送風は、燃焼室の外筒を通して、火格子およびフィーダーパイプと主送風パイプに分かれる。パイプの送風量の調節は、主送風①、フィーダーパイプ③および火格子下③の各バルブの開閉により行う。点火は、バーナーの側壁に設けた点火口($15\text{mm}\phi$)からプロパン用バーナーにより点火する。

図2は、バーナーの熱出力特性を調べるための実験装置の概略であり、バーナーに吸気筒、燃焼筒($170\phi \times 2000\text{mm}$)を付加した。

バーナーにおける風量の測定は、燃焼状態に近い状態の送風量でもって表わすことを目的に、ペレットが供給

された時の値である。また各バルブの角度は、閉鎖の状態を90度とした。

また、燃焼温度は、バッチ供給状態において、燃焼が定常状態に達した時の値である。この場合の熱出力は、排気筒の風速測定位置における熱量であり、計算に用いた風速は、便宜上供給時における風速を用いた。

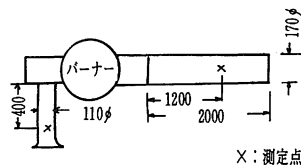
2. ペレットだき温風暖房機

図3(1)(2)は、ペレットだき温風暖房機の実験装置の概略である。実験装置は、バーナー、温風暖房機およびペレットタンクより構成される。

温風暖房機は、N社製HK304 T C形(送風機(静圧 20mm Aq , 0.9kW , 風量 $85\text{m}^3/\text{min}$)、燃焼筒($600\phi \times 1000\text{mm}$)、熱交換筒($60\phi \times 800$, 30本)、煙突($240\phi \times 3.5\text{m}$)、送風口2ヶ所、送風ダクト($580\phi \times 5000\text{mm}$)、灰取口($500 \times 300\text{mm}$))の上部吸込み側方吐出形である。

ペレットタンク容量は、約 180kg であり、バーナーへの供給は、二個のスクルーコンベヤ(横送り、ピッチ 50mm , 直径 70mm , 傾斜送りピッチ 70mm , 直径 70mm , 長さ 1500mm , 回転数 180rpm)により行う。ホッパー供給量の検出は、ホトセンサーにより行い、タイマーとの連動により間欠的な供給が行われる。

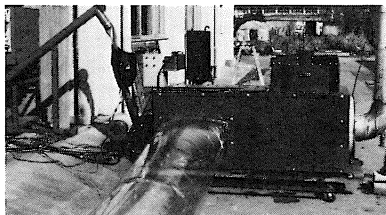
燃焼温度の調節は、バーナー上に設けた主バルブの開



X: 測定点

図2 バーナーの熱出力実験装置

(1)



(2)

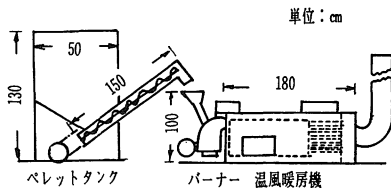


図3 (1)(2) ペレットだき温風暖房機の実験装置

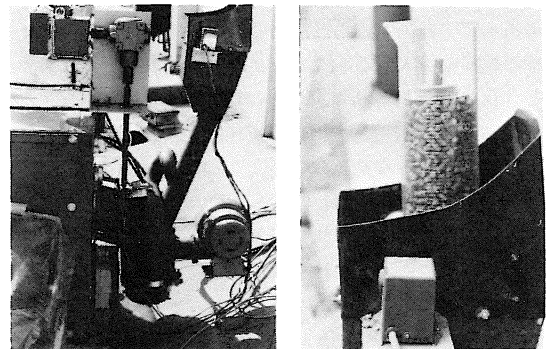


図4 燃焼温度調節装置

図5 燃料消費量測定装置

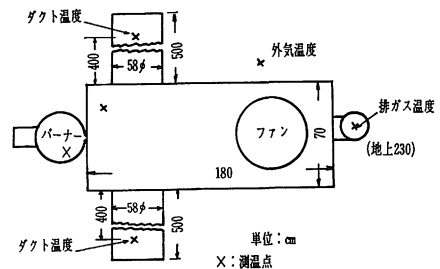


図6 温度測定位置

閉角度（図4参照）によって行われる。したがって、燃焼温度は、温度センサーにより検出された温度と設定温度との偏差に応じて、二位置制御用のモーターによりバルブ角度を 0° 、 45° に変え調節される。

燃料の消費量の測定については、バーナーがバッチ燃焼であるため、目盛り付きガラス円筒（図5参照）による場合と、燃焼後の燃料の残量から求めた場合の二つの方法を用いた。図6は温度の測定位置である。

排ガス分析では、JIS の規格の測定法に準じて、ダスト濃度、窒素酸化物、 CO_2 、 O_2 、 N_2 を測定した。

供試ペレットの種類は、オガコ・パーク、バカス、バルプスラッジ、稲わら、もみがらである。

III 実験結果および考察

1. ペレットだけバーナーの燃焼性能

バーナーの燃焼では、燃料の供給がバッチ方式を採用しているため、燃焼状態は供給量の変化により影響されない。しかし、燃料の消費量は、バーナー内の燃焼の状態により左右されるものであり、そしてその燃焼状態は、バーナー内への送風量すなわち、送風バルブ（主パイプ、フィーダーパイプ、火格子下パイプ）の開閉によって影響される。ここに用いた熱量の計算式は、次のとおりである。

$$Q = 3600 C_p \cdot V_m \cdot A \cdot (t - t_0)$$

ここに、 Q ：熱量 Kcal/h、 V_m ： $0.8 \times V_{\text{max}}$ （最大風速）m/s、 A ：排気筒断面積 m^2 、 C_p ：平均定圧容積比熱 Kcal/Nm $^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 、 t ：排気筒温度 $^\circ\text{C}$ 、 t_0 ：外気温度 $^\circ\text{C}$ 、

図7(1)~(4)は、火格子下バルブとフィーダーバルブの開度別における主バルブ角度と風量、温度および熱出力との関係である。

排気口における風量およびフィーダーパイプと主パイプの分岐点の風量は、主風量調節バルブを漸次閉じることによって減少の傾向となる。すなわち、排気口における風量は、主として主風量調節バルブの開閉によって影響される。排気口における風量は、 $0.5 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{min}$ の範囲であった。

排気口の温度は、おもに主風量調節バルブの角度により影響され、バルブ角度の増加と共に漸次増大し、ピーク値を経て減少の傾向となる。最大の排出温度を示す条件は、主バルブ角度が $45 \sim 50$ 度で、排気口の風量が $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 前後である。

フィーダーパイプ先端と燃焼室の排出口近くの温度

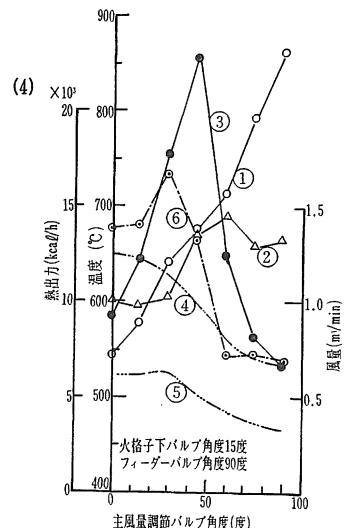
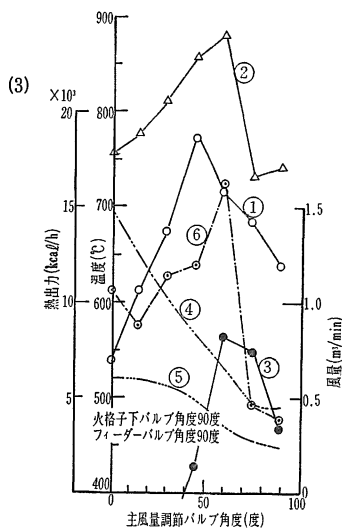
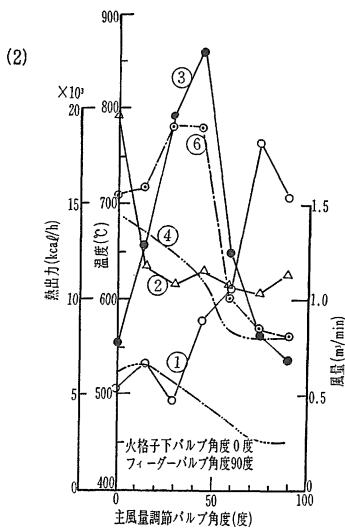
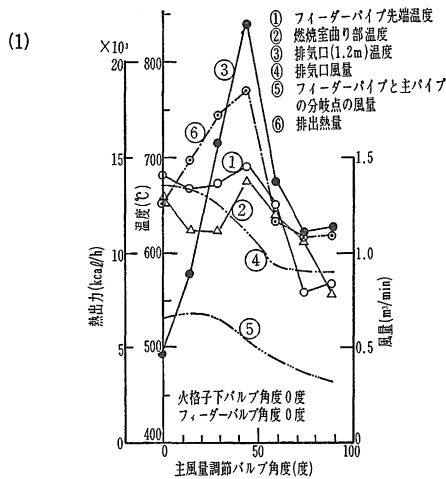


図7 (1)(2)(3)(4) 主バルブ角度と風量、温度および熱出力との関係

は、各バルブ角度により影響され、主バルブ角度の増加により、フィーダーパイプ先端における温度が著しく増加する傾向となる場合もあり、また火格子下バルブ、フィーダーバルブを閉じることにより、排気口の温度に比べ燃焼室の温度が著しく高くなる場合もある。

バーナーの燃焼効率においては、燃焼室内の温度を低くして排出する温度を高くすることが合理的であるから、火格子下バルブは全開の状態が適当であると考えられる。

排出熱量については、主バルブ角度の排出口温度に与える影響と同様に、排出熱量は主バルブ角度の増加によって増加し、ピークを経て減少の傾向となる。排出熱量の値が小さい点については、大部分の熱は排出管の加熱によって排出管の側壁から空気中に放出されたことによるものである。

このバーナーの燃焼方式は、ペレットを火格子上に置き、下より送風して燃焼させるものであり、すでに燃焼している燃料の上に、新しい燃料を順次供給して燃焼させるもので、上込み燃焼過程に属する。この方式では、火層の構成が図8に示すように、下より灰、酸化、還元、乾溜層となると考えられる。この場合、火層上から多量の可燃ガスが出るので、二次燃焼させる必要がある。ここでは、主バルブより導かれた空気により二次燃焼が行われているものと考えられる。しかし、火層厚さと可燃ガスの発生との関係については、今後において検討すべき問題である。

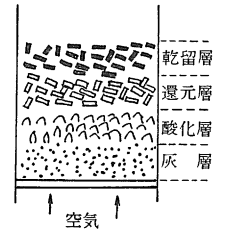


図8 燃焼の火層構成

2. ペレットだき温風暖房機の性能

重油だきバーナーに代ってペレットだきバーナーを用いたペレットだき温風暖房機の燃焼特性について調べた。熱効率は次式で表わした。

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_i} \times 100$$

ここに、 Q_i : 入熱 (Kcal/h) 低発熱量×ペレット消費量、 Q_0 : 有効熱 (Kcal/h)、ダクトより排出される熱量、低発熱量は、 $Q_L = Q_H \cdot (100 - \alpha) / 100$ 、 Q_L : 低発熱量 (Kcal/kg)、 Q_H : 高発熱量 (Kcal/kg)、 α : ペレット水分 (%)

供試ペレットは、主としてオガコ・パークである。これは他のものに比べ一般性があり、今後主たる材料となるものと考えられる。

1) 入熱、有効熱および熱効率

図9 (1)~(3)は、火格子下調節バルブ角度が0、45、90

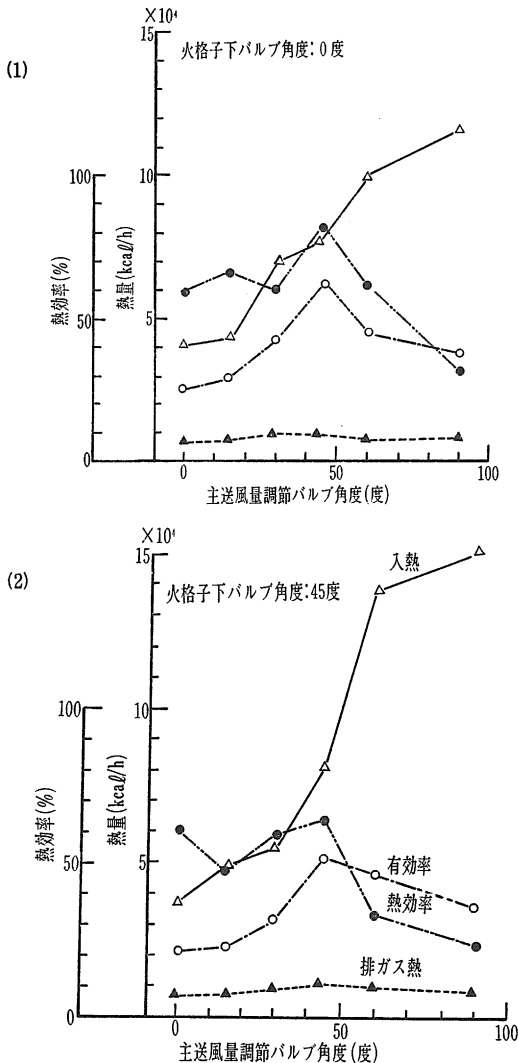


図9 (1)(2)(3) バルブ角度と入熱、有効熱、排ガス熱、熱効率との関係

度の場合における主送風調節バルブ角度と入熱，有効熱および熱効率との関係である。

入熱は主バルブ角度の増加によって増加する傾向がある。言い換えれば，ペレット消費量は，主バルブ角度の増加に従い著しく増加する傾向にある。これは，主バルブへの空気の流れが阻げられるため，火格子下への空気の流れが増加し，ペレットの燃焼を促進するためと考えられる。

一方，有効熱は主バルブ角度が約45°をピークに低下の傾向となる。これらのことは，燃焼の条件による入熱の増加は必ずしも有効熱の増加とはならないことを示している。すなわち，バッチ燃焼方式でペレットの消費量の増大は必ずしも熱量の増加とはならない場合もある。

また，熱効率は主バルブ角度の増大と共に大きくなりピーク値を経て減少の傾向となる。その値は20～80%の範囲にある。

熱の有効利用の観点からすれば，有効熱量が大で熱効率が大であることが必要であるから，以上のことから判断して，その条件は，火格子下調節バルブ角度0度，主バルブ角度が45度の場合である。その場合の入熱は，76,000 Kcal/h，有効熱は63,000 Kcal/hであり，熱効率は82%であった。これは，バーナーのバルブの調節によって得られる最適の条件である。

2) 排出温度の制御

これは，ペレットだき温風暖房機の排出温度制御特性，すなわち，設定温度に対するダクト内温度の制御応答性を調べることを目的としたものである。したがって，この場合，ダクト内温度の制御は，バーナーの燃焼温度の調節によって行われる。

図10(a)～(d)および表1は，設定温度が20, 25, 30, 34°Cのときのダクトと燃焼筒内の温度変動とその特性を表わす。

設定温度が20°Cの場合には，燃焼筒内の温度変動は

表1 ダクト部，燃焼筒内の温度変動

	設定温度(°C)				
	20	25	30	34	
ダクト温度	最大(°C)	20.5	28	33.5	35.5
	最小(°C)	19.8	22.8	27	29.5
	差(°C)	0.7	5.2	5.5	6.0
燃焼筒温度	最大(°C)	323	475	549	567
	最小(°C)	319	378	390	457
	差(°C)	4	97	159	60
ダクト温度1°C上昇に要する時間(sec)	—	25	30	60	
変動周期	ダクト温度(°C)	—	280~295	252~320	460
	燃焼筒(°C)	—	295~332	272~280	460

表2 各種ペレットの燃焼性

	オガコ・パーク	バガス	バルブスラッジ	稲わら	もみから
単位時間当たり燃料消費量(kg)	17.7	16	25	—	—
最大温度ダクト内(°C)	587	494	510	315	303
燃焼筒内(°C)	38	33	34	12	13

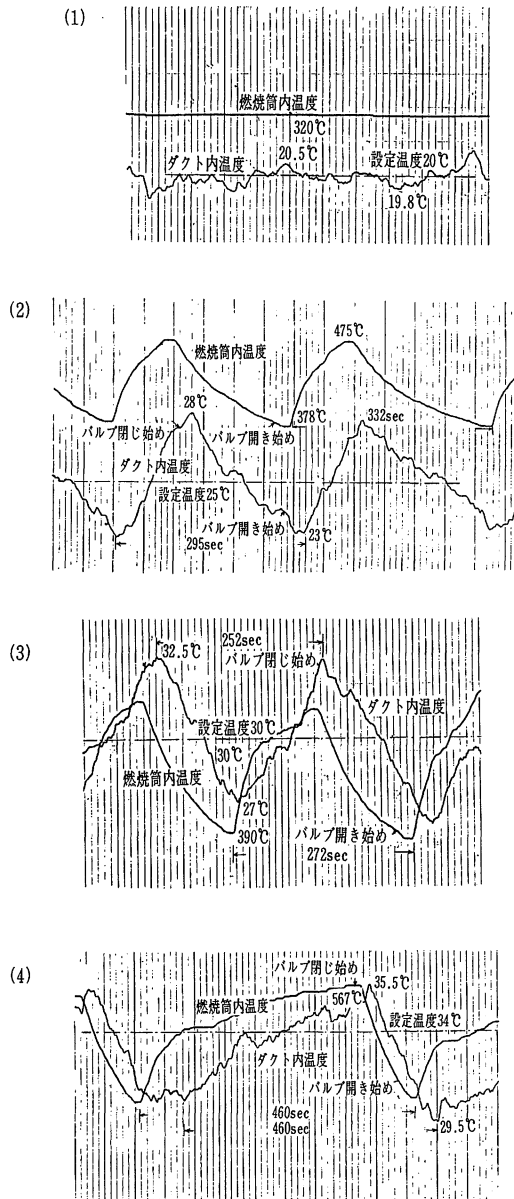


図10(1)(2)(3)(4) ダクトと燃焼筒内の温度変動

4°C以内であり、ダクト内の温度変動は0.7°Cであるが、設定温度の上昇に伴い燃焼筒内温度差が大となる。ダクト内温度差はほぼ一定の値であり、その場合の設定温度に対するオフセットは2〜3°Cであった。また、ダクト温度を1°C上昇させるに要する時間は、設定温度の上昇とともに増加の傾向となる。

ダクト、燃焼筒内温度の応答変動の周期は、両者ともほぼ同じ値を示し、設定温度の増大と共に増加の傾向となる。

以上のことから、ペレットだき温風暖房機は、十分な温度制御の機能を有することが明らかとなった。

3) 各種材料の燃焼性と排ガス分析

この実験の燃焼状態は、最適の燃焼条件（主バルブ角45°、火格子下バルブ角度0°）の場合である。

表2は、各種材料の燃料消費量とダクト、燃焼筒内の温度との関係である。

オガコ・パーク、バガス、パルプスラッジは、燃焼の継続が可能であるが、稲わら、もみがらは、完全燃焼され得ない燃え残り分が燃焼室内に堆積することから、長時間にわたって定常燃焼を持続することは不可能である。

これらは、材料に含有される揮発分が70〜80%であるが、オガコ・パーク、バガス、パルプスラッジの含有灰分が2.2〜3.7%であるのに比べ、もみがら、稲わらのそれは13.8〜15.3%であり、これら含有灰分の多少が、燃焼に大きく影響しているためと考えられる。これらのことから、もみがら、稲わらを完全燃焼させる方法としては、バーナーに補助燃焼装置を付加し、燃焼温度を上げることが考えられ、それによって、完全燃焼が可能であるだろう。稲わら、もみがらの不完全燃焼の状態は、排ガス分析のCO₂量からも明らかになる。

表3は、各種ペレットの排ガス分析の結果である。煙突よりの排ガスは、その含有成分の種類によって利用上において重要な問題となる。

ダスト濃度については、重油だきボイラーと焼却炉の規制値は、それぞれ0.3、0.7 g/m³Nである。ところで、ペレットだきのダスト濃度は0.041〜0.310g/m³N

であり、その中でオガコ・パークは高いダスト濃度を示す。これは、砕けの著しい材料を用いた関係で可成りの生だき分が排出され、それがダスト濃度に影響を及ぼしたもので、実際には規制値より可成り低い値となるだろう。また、ペレットだきは、構造上から重油だきボイラー、焼却炉に該当せず、さらにダスト濃度も小さいことから、ペレットだきにおけるダスト濃度は、規制の対象にならないものと考えられる。

窒素酸化物の評価については、重油だきボイラーと焼却炉の規制値はそれぞれ180、250 ppmである。ペレットだきは79〜160 ppmであり、これらの値は規制値より小さい値である。

オルザットガス分析においては、CO₂濃度が3.5〜9.4%であり、完全燃焼の評価が10%であることから、完全燃焼に近い状態で燃焼が行われているものは、バカスとパルプスラッジ、不完全燃焼に近いと評価されるものは、もみがらと稲わらである。

以上のことから、排ガス中には問題となる有害物質が排出されないことおよび本燃焼機を対象にすれば、オガコ・パーク、パルプスラッジ等は、完全燃焼が達成されるもので十分に利用できることが明らかにされた。

4) 灰の排出

直接燃焼方式により木質系燃料を燃焼させる場合には、灰の生成は不可避の問題となる。

この場合には、灰は、バーナー、燃焼筒、熱交換筒、

表4 灰とクリンカー量

	オガコ・パーク	稲わら	もみがら	バガス	パルプスラッジ
燃 焼 時 間 (分)	217	22	52	80	42
灰+クリンカー量 (g)	360	410	510	350	340
最大温度 燃焼筒内(°C)	516	315	303	494	510
ダクト内(%)	30	12	13	33	34

表3 排ガス分析

燃料名	項目 ダスト濃度 (g/m ³ N)	窒素酸化 物濃度 (ppm)	排ガス 温度 (°C)	流 速 (m/S)	排ガス流量 (m ³ N/h)	オルザットガス分析 (%)		
						CO ₂	O ₂	N ₂
バ ガ ス	0.059	160	181	2.0	160	9.4	10.6	80.0
オガコ・ パーク	0.310	79	149	2.0	180	6.5	13.5	80.0
も み が ら	0.041	90	129	1.9	180	3.5	15.5	81.0
パルプ スラッジ	0.023	87	128	1.9	180	9.5	10.3	80.2
稲 わ ら	0.226	105	95	1.8	180	4.0	15.0	81.0

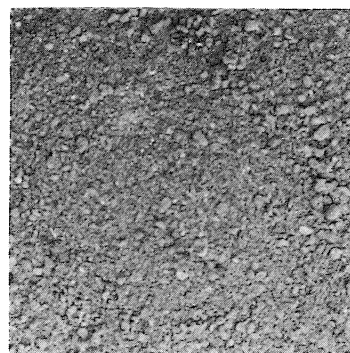


図11 灰 (オガコ・パーク)

煙突内に堆積されるが、燃焼時間が短時間の場合には、煙突内に堆積される灰は、他のものに比べ僅少であったので、ここでは、バーナー内は別として、燃焼筒と熱交換筒内に堆積される灰をもって表わした。

オガコ・バークを用いた場合の灰の生成率（排出灰重量/消費燃料重量×100）は、燃焼時間 217分でダクト内設定温度が30°C（外気温度8°C）の場合には0.9%であった。この値は、成分分析による灰の成分率の2.9%に比べ可成り小さい値であった。しかし、灰の中には灰がクリンカーとなり 4mm 程度の粒状になったものが認められた（図11参照）。第4表は、燃焼後にバーナー内に堆積されたクリンカー、灰の量である。

オガコ・バーク、バガスは、灰とクリンカーの量が 360g 程度であり、オガコ・バークの燃焼時間は、バガスに比べ多いにもかかわらず、堆積した灰とクリンカーの量の差は 10g 程度であった。これらのことから、オガコ・バークでは長時間の燃焼においてもこれ以上の灰とクリンカーは堆積されないだろう。なぜなら、バーナー内に堆積される灰とクリンカー量は、主として燃焼停止の際に生ずるものと考えられるからである。

一方、もみがらについては、燃焼時間が短時間であるにもかかわらず、灰とクリンカーの堆積量は他のものに比べ多い。この場合は、クリンカーはほとんど生じないが、燃え残りかすがその大部分であると見なされる（図12参照）。これはバーナー内の燃焼熱量の不足によるものだろう。稲わらについては、反対にクリンカー化した

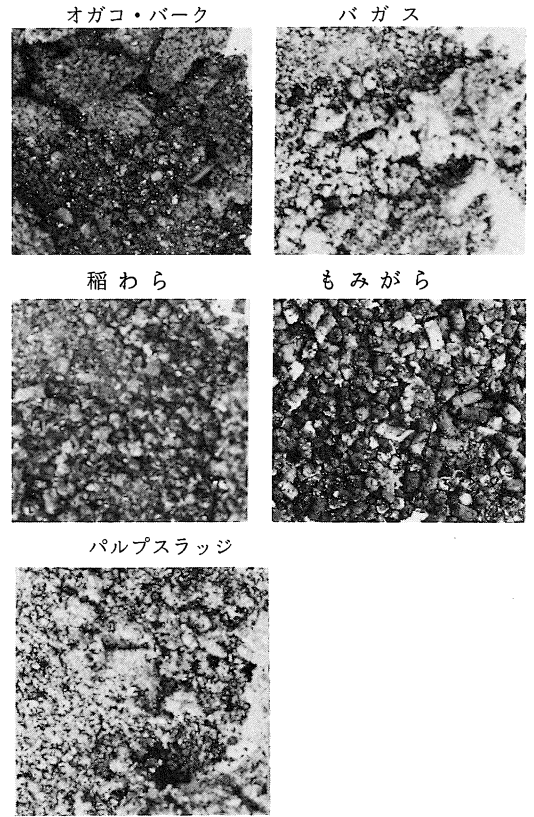


図12 バーナー内に堆積した灰とクリンカー

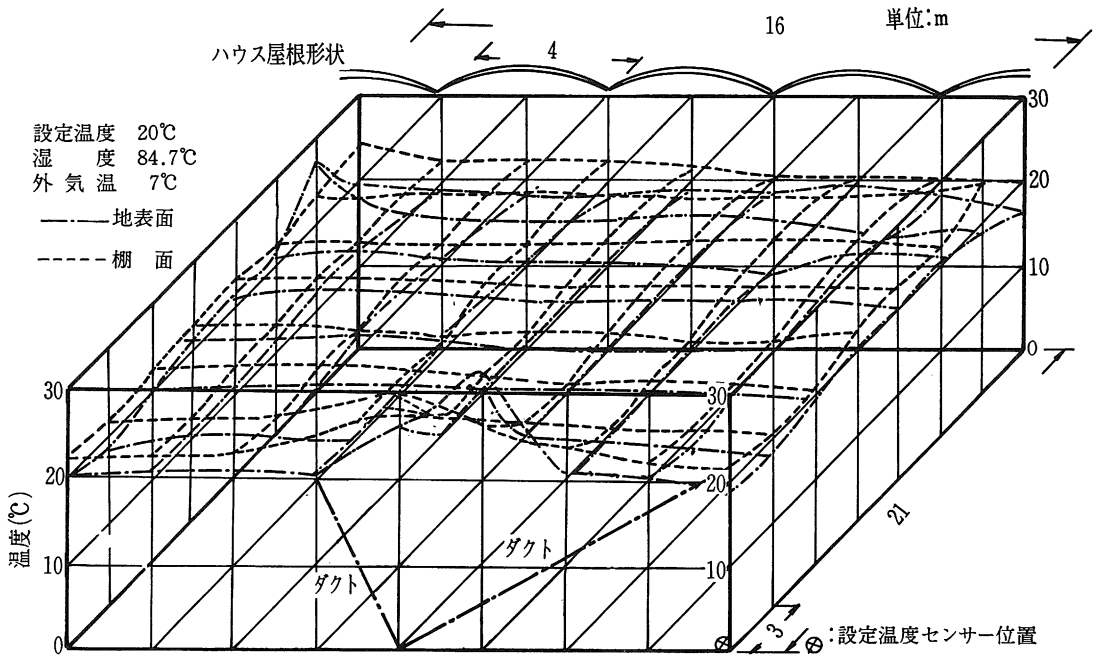


図 13 ハウス内温度分布

ものが多く認められた。これらの場合には、燃焼中にバーナー内に堆積される灰およびクリンカーによって燃焼の継続が不可能となる。

以上のことから、今後の課題として、燃焼停止時に生ずると考えられるクリンカーの発生防止の対策が検討されなければならない。

3. ペレットだき温風暖房機の実用試験

1) ハウス内の温度分布特性

島根県大社町の加温ブドウハウスにおいて、開発したペレットだき温風暖房機の実用化適応試験を行った。

加温ハウスは、二重屋根（屋根高さ 2.75m, 2.3m）、5棟（1棟の幅 4m）、面積 960m²（20×48m）である。送風ダクトは、直径 0.3m、長さ 12m の4本であり、温風暖房機はハウス中央に設置し、ダクトは対角線方向に延長した。また棚面（1.6m）が温度制御の基準高さとし、設定温度検出用センサーは棚面高さに設置した。

図13は、設定温度20°C、湿度84.7%、外気温度7°Cにおける地表面と棚面のハウス面積の1/2の温度分布である。

温度分布は、温風暖房機の周辺において多少高い値となるが、全面積にわたりほぼ均一と見なし得る。地表面における温度は、棚面の温度より多少低い値を示した。棚面における温度は、設定温度（目標値）に近い範囲で調節された。ここに、基礎性能試験における温度制御の妥当性が実用試験によって裏付けられた。

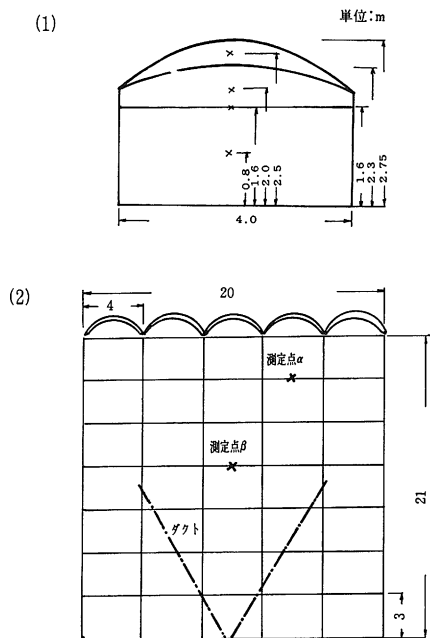


図14(1)(2) ハウス内温度測定位置

2) ハウス内の温度変動

図14(1)(2)は、高さおよび平面の温度測定位置である。図15(1)(2)は、測定位置 α , β 点における設定温度が13°Cの場合の高さ別の温度と経過時間との関係である。

二重屋根の中間点（2.5m）の温度は、外気温度の影響を著しく受ける。一方、地上高 0.8~2m の間の温度変動の周期は40分程度であり、その変動の振幅は3~6°Cの範囲にある。

これらのことから、熱出力と温度調節については、理想的な出力と調節が期待できるので、ペレットだき温風暖房機は、バーナーに関する問題点のみを改善することにより、実用化に十分適応できるものと考えられる。

したがって、今後は上記問題点を改善すると共に、木質系燃料の多目的利用に向けてバーナーの開発研究を進める必要がある。

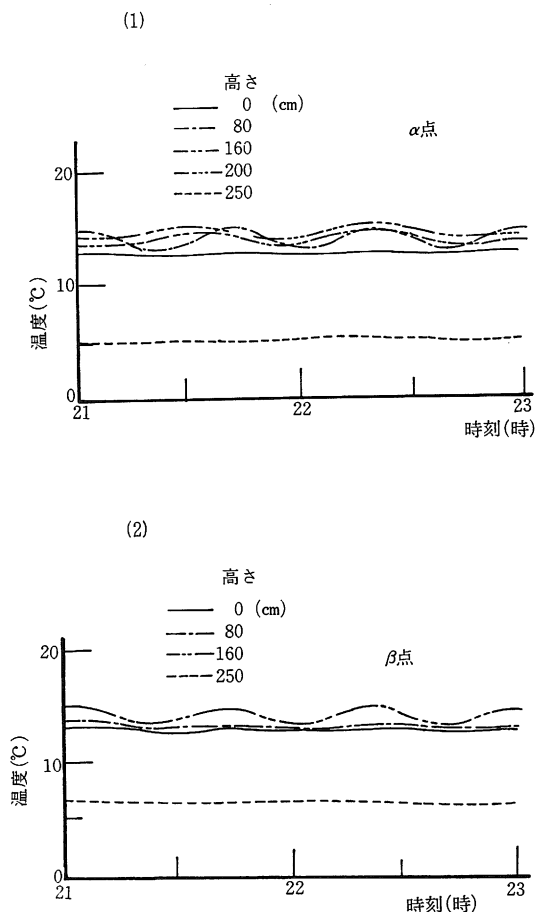


図15(1)(2) 経過時間と温度変動との関係

IV 摘 要

前報に続き、この研究は、ペレットだきバーナーの実用化を計るために、木質系燃料を用いたペレットだきバーナーの開発を行い、それを用いたペレットだき温風暖房機の燃焼特性について調べたものである。

主な結果は次のとおりである。

- (1) バーナー内の火層は、下より灰^{*}酸化、還元、乾留層を構成する。
- (2) バーナーの燃焼性は、燃焼層への上下からの送风量により影響される。
- (3) ペレットだき温風暖房機において、有効熱の最大値は約 63,000 Kcal/h であり、熱効率率は約82%であった。
- (4) 設定温度に対するオフセットは、2～3°C 程度であり、十分な温度制御が行われていることが明らかとなった。

(5) ペレットの燃焼性については、不完全燃焼のもの（もみがら、稲わら）と完全燃焼に近いもの（バガス、パルプスラッジ）があり、排ガス中には有害物質が含まれないことが明らかとなった。

(6) オガコ・パークの場合の灰の生成率は、約1%以下であった。またクリンカーの生成は、主として燃焼停止に時起ることが明らかとなった。

(7) 実用試験におけるハウス内の温度分布は、ほぼ均一と見なされる。したがって、ペレットだき温風暖房機は、性能の上で実用化に十分適応することが確認された。

引用文献

1. 日本規格協会：JIS ハンドブック 公害関係 日本規格協会 東京 1981, p.167-199
2. 燃料協会：燃料便覧 コロナ社 東京 1978, p.547-552

Summary

Succeeding to the previous report, this study dealt with the burning performance of a woody pellet burner, and of heating unit fitted with it in the horticulture plant. And the objective of this study was to put it to practical use.

The main results were as follows ;

- (1) The burning layer in a burner in turn was consisted of the layers of ash, oxidization, restoration and carbonization up to the upper layer.
- (2) The burning performance of the burner was influenced by the quantity of blast driven from top and bottom of the burning layer.
- (3) In the case of the heating unit with the woody pellet burner, the maximum value of available heat was about 63000 kcal/h, and the thermal efficiency was about 82 %.
- (4) The off-set of temperature in the duct ranged the value of 2~3°C.
- (5) In the combustion of woody pellets, chaffs and rice straws remained an incomplete combustion, and bagasses and pulp sludges attained to a complete combustion. There were no noxious objects in exhaust gases.
- (6) The rate of ash reduced by combustion of the woody pellet of mixed sawdusts and barks was not exceeding about 1 % for the burned quantity of the pellets. And it is clear that clinkers mainly occur after the combustion is stopped.
- (7) In the case of the practical use test with the heating unit fitted with the woody pellet burner, the temperature in the heating house were nearly uniformity.
- (8) It is clear from the above results that the heating unit fitted with the woody pellet burner shows great adaptability for the practical use.