

木質燃料による温水ボイラーの燃焼試験 (第2報)

貯湯型ボイラーによる燃焼試験

平田 利美⁽¹⁾・杉浦 銀治⁽²⁾Toshimi HIRATA and Ginji SUGIURA : Combustion Tests for
Hot-Water Boiler with Fuelwoods II
Combustion in hot water storage type boiler

要 旨：前報に続いて、木質燃料およびその小型燃焼器具の改良、開発に資することを目的として、幾種かの燃料の燃焼特性を求めた。

燃焼特性を試験するためには燃料として、前報で使われたスギ、コナラ、オガライト、灯油が用いられた。燃焼器具として、薪と灯油の混焼可能な市販の貯湯型温水ボイラーを使った。ボイラー燃焼炉へ空気を供給する灰出口の開口率を変えて、これらの燃料を燃焼させ、前報と同じ因子を測定して、その結果を比較した。

木質燃料の熱効率については、スギとコナラの値がほぼ等しく、オガライトのそれがこれより多少小さい。しかし、取得熱量については、コナラ<オガライト<スギの順に大きい値を与えた。オガライトの熱効率は発煙性に大きく影響されるのに対し、スギとコナラの熱効率は主に発炎性に支配される。給湯の開始時間などからみた初期加熱性能は、オガライト<コナラ<スギの順に大きい。貯湯型ボイラーは、加熱型ボイラーに比べて、この加熱性能の面では劣るが、熱効率の面ではすぐれている。

このボイラーでは、給湯開始を急ぐときにはスギを、給湯を継続させるにはオガライトを使用することが便利である。ただ、木質燃料用の燃焼コントロールシステムを開発するにあたっては、木質燃料の多様な燃焼性を考慮する必要がある。

また、燻薪処理したアカマツと無処理のアカマツ薪の比較を行ったが、燻薪処理によって、単位体積当たりの発熱量と取得熱量は高くなるが、発煙量は増加した。

はじめに

灯油やガスを使う燃焼器具に比べ、木質燃料用燃焼器具の開発、改良はあまり進んでいない。そこで、木質燃料用の小型燃焼器具の開発、改良に資するとともに、この燃焼器具における、燃焼特性を生かした木質燃料のよりよい使われ方を求めることを目的として、前報¹⁾では、加熱型温水ボイラーにおけるスギ、コナラおよびオガライトの燃焼特性を明らかにした。本報告では、前報の目的に加え、木質燃料の改良に資することをも目的として、燃焼器具として、加熱型ボイラーより大きい貯湯型温水ボイラーを用い、前報の燃料に加え、アカマツとその燻薪の燃焼特性を求め、前報の結果と比較検討した。本研究は、前報と同様に、特別研究調査費「木質系エネルギー利用開発促進調査」によるものであり、資料の一部は、日本住宅・木材技術センターで実施された木質系エネルギー活用促進調査事業²⁾へ提供された。また、供試機器については、木質系等固形燃料・代替エネルギー利用暖房装置の標準化調査事業³⁾を実施した日本暖房機器工業会の協力を得た。

1982年10月18日受理

(1) 木材利用部

(2) 林産化学部

木材利用-22 Wood Utilization-22
林産化学-30 For. Products Chemistry-30

実験方法

1. 燃料

前報¹⁾ で用いられたスギおよびコナラの薪，ならびに成形薪のオガライトのほか，アカマツとその燻薪が用いられた。また，比較のため，前報と同じく，灯油が使われた。本研究で新しく使われたアカマツ薪は，野外に放置されていた丸太を割って作ったブロックで，袋に充填されて，乾燥しないよう保存されていた。このアカマツのブロックを，その高含有水分の除去を目的として，ロータリーキルン（岩佐機械製）で加熱したものが燻薪である。加熱温度は200～250°C，加熱時間は約1時間である*。燻薪も袋に充填されて保存されていた。アカマツと燻薪を，使用前に同じ条件下で適当に乾燥し，含水率レベルを変えて実験した。

使用された燃料の形状，発熱量，含水率および比重などを Table 1 にまとめている。

2. 温水ボイラー

使われたのは貯湯型温水ボイラーと呼ばれるもので¹⁾，全高約187 cm，缶容量約153 lである。その正面および側面図を Fig. 1 に示す。水を取る缶の下側に築炉が接続している。炉内の燃焼から発生した

Table 1. 使用燃料
Used fuels

燃料 Fuels	使用時の形状 shape at the use	低発熱量*1 Low calorific value (kcal/kg)	乾量基準含水率 Moisture content based on oven-dry weight (%)	全乾比重 Specific gravity in oven dry
オガライト Ogalite	八角柱，約20×5.5 cmで中心に直径約2 cmの円筒の空洞有する。 Octagonal column, ca. 20×5.5 cm with empty hole 2 cm in the diameter at the center	4216	6.3	1.1～1.3 ⁶⁾
スギ Sugi	直方体，約30×3×3 cm Rectangular parallelepiped, ca. 30×3×3 cm	4063	12.3	0.30～0.33 ⁶⁾
コナラ Konora	丸太または割材で30×3 cm程度のものが多い。 Logs or split ones, ca. 30×3 cm	3674	13.2	0.62 ⁶⁾
アカマツ Akamatsu	不定形ブロック，8×3×2 cm程度のものが多い。 Blocks, ca. 8×3×2 cm	4092 4034 3422	11.6 13.0 30.2	0.37～0.44 ⁶⁾
燻薪（アカマツ） Half-carbonized wood (Akamatsu)	同上。 The same as the above	4160 4096 3609	10.0 11.5 24.4	
灯油 Kerosene	液体。 Liquid	10010		0.8

*1 算出法については文献を参照されたい。The calculation method was given in previous paper¹⁾.

* 燻薪は岸本定吉元東京教育大学教授および林業試験場木材炭化研究室によって開発された。詳しくは文献4を参照されたい。

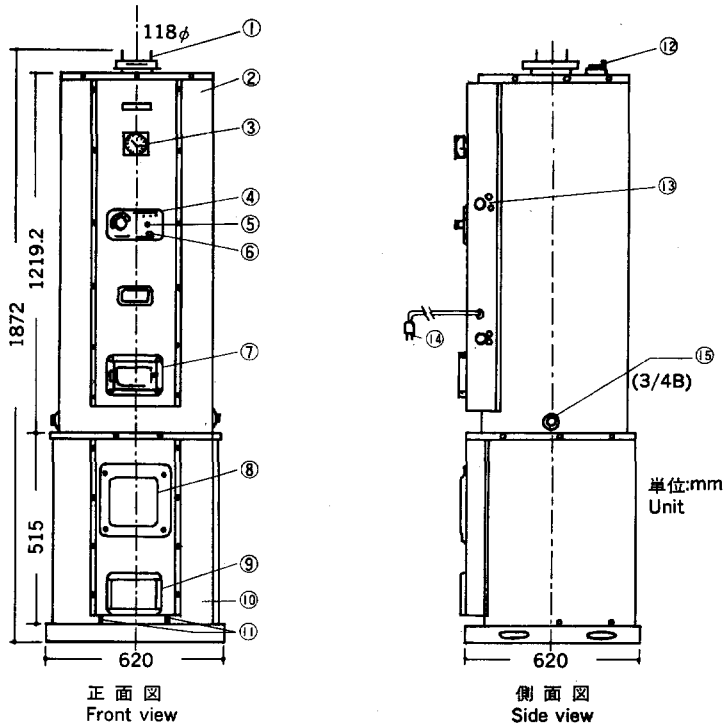


Fig. 1. 貯湯型温水ボイラー
Hot water storage type boiler

① 煙突受 Smokstack base, ② 本体 Body, ③ 温度計 Thermometer, ④ 表示ランプ Display lamps, ⑤ 切換スイッチ Switch, ⑥ 警報ブザー Alarm buzzer, ⑦ 掃除口 Cleaning door, ⑧ 焚口 Fire door, ⑨ 灰出口 Ash door, ⑩ 炉 Furnace, ⑪ 空気取入口 Supply inlet of air into furnace, ⑫ 給湯口 Hot water outlet, ⑬ 沸騰防止用電磁弁 Boil up prevention valve, ⑭ 電源プラグ Plug to electrical outlet, ⑮ 給水口 Supply inlet of water.

高温の排気または炎が煙管（熱交換器）を通過して、缶内の水に熱を伝える。

炉はロストルを有しない。通常、燃焼に必要な空気は、灰出口の真下の凹んだ壁面に左右向い合っている2個の取入口から入り、炉の外壁とボイラー外装壁に囲まれた狭い空間を経て、炉の上部から供給される。この空気の取入口は常時開いており、形状は、垂直方向約1cm、水平方向約2cmの長方形である。空気が炉の上方から、自然に供給される構造のため、炉内に積み込まれた薪は、上方から下方へと燃焼する。燃焼空気は炉外壁から伝わる熱によって多少加熱されてから炉に入る。空気は、また、灰出口からも供給できる。灰出口は約7.0×15.5cmの長方形で、扉は水平に移動する。本研究では、空気供給量を変えるため、前報¹⁾で定義した灰出口の開口率を変えて燃焼実験を行った。

なお、灯油を燃焼するときには、Fig. 1 に示している掃除口にガソタイプバーナーを附属した。

3. 燃焼手順および測定項目

前報¹⁾で述べた絶対熱効率と定常熱効率を本研究でも求めた。絶対熱効率を求めるための燃焼では、先ず、炉内に燃料を約6kg積み、その上に、灯油に浸漬した小割の薪をのせ、これにマッチで点火した。

燃料は、浸み込んだ灯油によって、スムーズに、しかも再現性よく着火した。灯油の吸収量は10~40gで、熱効率の算出にはこの量も使われた。灰出口の開口率は、燃焼中、一定に保たれた。各燃料とも、開口率 0, 1/4 および 1 の 3 水準で燃焼された。所定の燃焼時間後、あるいは缶内水温が所定値に到達後、炉内の燃料を素早く火消し壺に移して、残存燃料を秤量した。燃料の初期量とこの残存量との差を燃料消費量とした。

他方、定常熱効率を求めるための燃焼では、はじめに燃料を約 6 kg 供給し、後に必要に応じ、適宜、燃料を補給した。灰出口の開口率は、給湯開始前まで固定されたが、その後には、燃焼状況に合わせて変えられた。給湯開始時に炉内に残存している燃料の量は、開口率と燃焼時間を等しくして行った予備実験から推定された。なお、灯油は定常熱効率を求めるための燃焼実験に主に使われた。

前報¹⁾と同様な方法により、燃焼中の炉内温度およびボイラー上端より約 15 cm と 215 cm 離れた煙突内の排気温度を測定した。さらに前報と同様に、給水および温水の温度と量を測定した。また、前報で述べた方法にしたがって、発煙量、二酸化炭素と一酸化炭素の発生量、および酸素消費量を求めた。

給水および温水（給湯）の温度と量、燃料消費量から、前報の方法にしたがって、取得熱量、絶対熱効率、定常熱効率を算出した。

結果および考察

1. 木質燃料の燃焼特性

a) 開口率による絶対熱効率、取得熱量および発煙量の変化

Fig. 2 および 3 に灰出口の開口率による熱効率および取得熱量の変化を示す。本研究においても、前報¹⁾と同様に、これらの図に使用されている灰出口の開口率が大きくなるにつれて、一般に空気供給量が比例的に増加するとみなして、考察を進める。なお、本ボイラーは、すでに述べたように、灰出口の真下に一定な開口の空気取入口を有しているの、ここから一定量の空気が常時供給されているとみなす。Fig. 2 から、スギに関する熱効率が開口率にほとんど依存しないのに対して、コナラとオガライトの熱

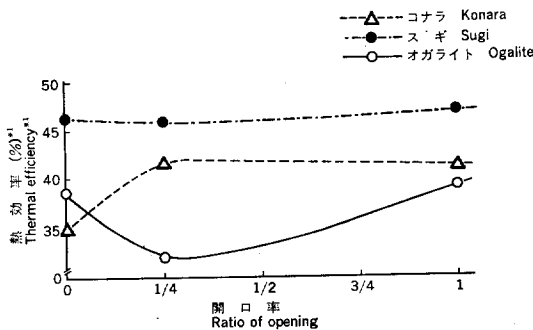


Fig. 2. 開口率による熱効率^{*1}の変化

Changes in thermal efficiency^{*1} with ratio of opening.

*1 炉の冷却および予熱状態で求められた 2 個の測定値である。本図以降の「開口率による各種性質の変化」の図においても同様の平均値が使われている。
The thermal efficiency is expressed by the means between the values obtained under pre-heated and cold states of the furnace before the runs. The same method is used in other figures on "Changes in other properties with ratio of opening".

Fig. 3. 開口率による取得熱量の変化
Changes in obtained heat with opening ratio.

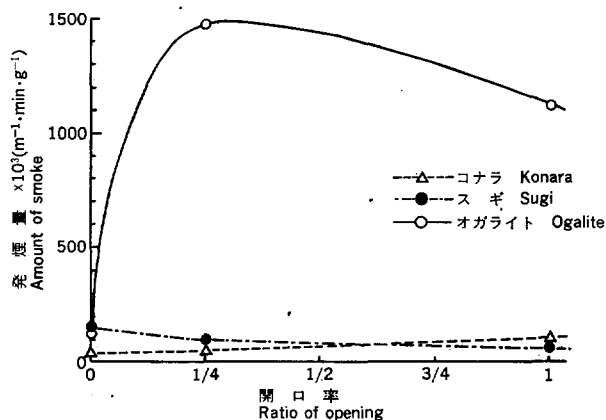
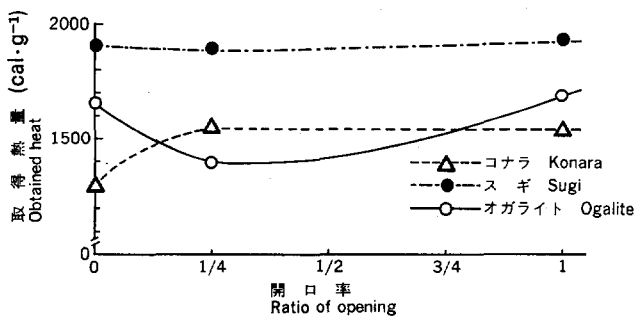


Fig. 4. 開口率による発煙量の変化
Changes in smoke emission with ratio of opening.

効率は開口率によってかなり大きく変化していることがわかる。Fig. 3 に示している単位燃料消費量当たりの温水として獲得された熱量，すなわち，取得熱量も類似の変化を示している。燃料のポテンシャルな力である発熱量に対する取得熱量の比が熱効率であるから，この類似は当然のことである。熱効率については，スギが最も大きな値を与えている。コナラの熱効率はオガライトのそれを上回っている領域が多い。取得熱量においても，スギが最も大きい値を出している。しかし，コナラの取得熱量は，熱効率とは逆に，オガライトのそれを下回る測定値が多くなっている。前報¹⁾においても，熱効率および取得熱量に関して，各燃料間に同様な関係が見出された。

コナラの熱効率が開口率 1/4 近辺に極大を有する変化を示しているのに対して，オガライトの熱効率は，その近辺で極小を示している。このような熱効率の変化を，主に二つの因子によって説明できる。一つは燃焼効率で，他の一つは熱交換器（煙管）による水への熱の伝達の程度である。まず，燃焼効率に関する考察を進めるため，開口率による発煙量の変化を求めたところ，Fig. 4 に示す結果が得られた。コナラとスギの発煙量が少く，ほとんど変化しないのに対して，オガライトの発煙量は，開口率 0 から 1/4 にかけて急激に増加し，開口率がさらに 1 へと増加すると，多少減少している。オガライトのこの変化は，Fig. 2 および 3 における熱効率と取得熱量の変化に対して，ほぼ正反対である。したがって，オガライトの熱効率は，発煙による燃料のロス，すなわち，燃焼効率に大きく依存していることがわかる。なお，加熱型ボイラーの試験²⁾において，コナラの発煙性が本研究の結果と類似しているが，スギの発煙性は開口率によって大きく変化しており，本研究の結果と異なる。

b) 熱効率におよぼす炉内温度および排気温度の影響

缶内の水への熱の伝達は、煙管内へ炎が伸びるとか、あるいは、高温の燃焼排気が多量に送り込まれることによって効率的になされる。そこで、熱効率がほとんど発煙性に影響されないスギとコナラについて、熱効率対最高排気温度あるいは最高炉内温度をプロットしたところ、Fig. 5 および 6 に示す結果が得られた。スギの場合には、両図において、プロット点が高温で、高熱効率の領域に集中する傾向を示している。前報¹⁾で明らかにしたように、比重の小さい木材ほど熱分解速度が大きく、したがって、発炎燃焼が盛んになると考えられる。Table 1 に示した比重の値から、スギの熱分解速度と発炎燃焼の程度が最も大きかったと推定される。このため、排気と炉内の最高温度が高く、熱交換が効率的になされたと推定される。このようなことが、Fig. 5 と 6 において、スギのプロット点を偏らせた原因であると思われる。コナラについては最高排気温度および最高炉内温度の上昇につれて熱効率が增加する傾向がうかがわれる。

前報¹⁾で、炉内温度および排気温度の上昇につれて熱効率が比例的に大きくなることを見出された。そこで、Fig. 5 と 6 における各樹種当たりのプロット点が少いので、樹種を区別せず、熱効率と最高排気温度、あるいは最高炉内温度について直線回帰分析を行った。その結果は Table 2 に示されている。また、得られた直線を Fig. 5 および 6 に示している。Table 2 に示している勾配の値から、熱効率の排気温度に対する依存性が、炉内温度に対する依存性より大きいことがわかる。

Fig. 7 に開口率による最高炉内温度の変化を示す。この図において、スギの最高炉内温度が Fig. 2 における熱効率と類似の変化を示している。これは、炉内温度の変化が熱効率に反映していると解される。

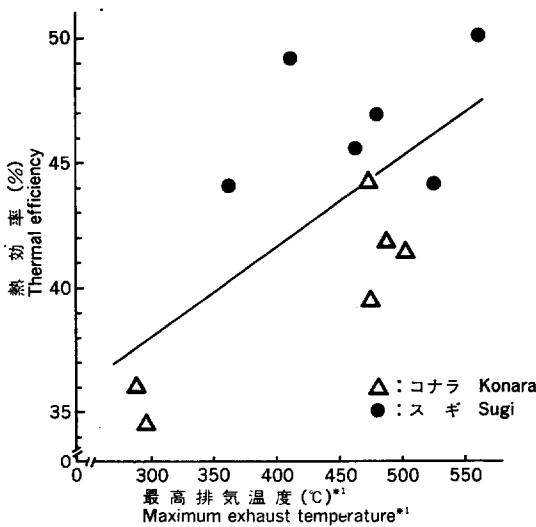


Fig. 5. 熱効率の排気温度依存性
Exhaust temperature dependency of thermal efficiency.

*1 ボイラー上端より 15cm の高さにおける煙突内温度
The temperature is measured within the smokestack at 15cm from the boiler top.

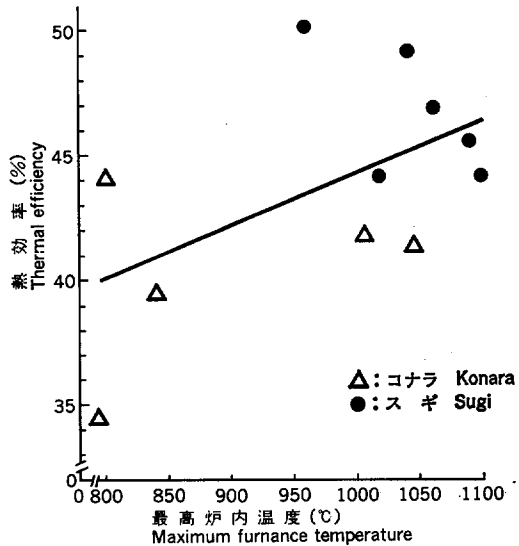


Fig. 6. 熱効率の炉内温度依存性
Furnace temperature dependency of thermal efficiency.

Table 2. 熱効率と最高炉内温度あるいは最高排気温度との関係
Dependences of thermal efficiency upon maximum temperatures of furnace and of exhaust

Y	$=$	a	x	$+$	b	r^{*1}
熱効率(%) Thermal efficiency		0.021	炉内温度(°C) Furnace temperature		23.6(%)	0.530
熱効率(%) Thermal efficiency		0.036	排気温度(°C) Exhaust temperature		27.4(%)	0.644*

1 r は相関係数である。なお、一般に有意水準 0.05 および 0.01 で有意の時には、それぞれ、 および ** をつけて表す。熱効率と炉内温度間の r は有意水準 0.1 で有意である。

The r is the correlation coefficient. Both the r s between thermal efficiency and maximum furnace temperature, and between thermal efficiency and maximum exhaust temperature are significant with the levels of 0.1 and 0.05, respectively.

オガライトについて、Fig. 4 に示している発煙量が、開口率 0 より 1 において相当多いにもかかわらず、Fig. 2 において、その熱効率が開口率 1 で最大値を示している。しかし、この疑問を Fig. 7 の最高炉内温度の変化から説明できる。すなわち、最高炉内温度が開口率 1 で最高になっているから、この開口率で発炎燃焼が最も盛んで、したがって、熱交換の程度も最も大きかったと推定される。熱効率を高めるこの熱交換の効果が、熱効率を減少させる発煙のマイナスの効果を上回ったため、開口率 1 の時の熱効率が、それより発煙量の少ない開口率 0 のときの熱効率より大きくなったと推定される。

以上のことから、熱効率および取得熱量は、発煙量という反対の量によって示してきた燃焼効率、および発煙燃焼に強く影響される熱交換によって、主に規定されることがわかる。

なお、前報⁹⁾において、炉内温度は開口率の増大につれて減少した。しかし、本研究の Fig. 7 には、このような供給空気の冷却効果が見出されない。これは炉の構造の相違によると考えられる。前報の加熱型ボイラーの炉では、燃焼空気はすべて灰出口から薪の下側へ供給され、燃焼は薪の下側から上方へと進む。このため、燃焼(熱分解)中の薪や炎が直接供給空気に冷却されることになる。これに対して、本研究のボイラーでは、すでに述べたように、燃焼は薪の上側から下方へ進むので、灰出口から入ってくる空気は、未燃の薪の間を通過して、燃焼中の薪や炎に達する。また、別に、炉の外壁であたためられた空気が常に薪の上方から供給されている。このため、供給空気の冷却効果が小さく、Fig. 7 に現れなかったと思われる。

c) ガス分析

開口率による一酸化炭素発生量の変化を Fig. 8 に示す。この図に示した各燃料の一酸化炭素発生量の変化は、Fig. 4 に示した発煙量の変化に似ている。すなわち、発煙量の場合と同様に、オガライトは開

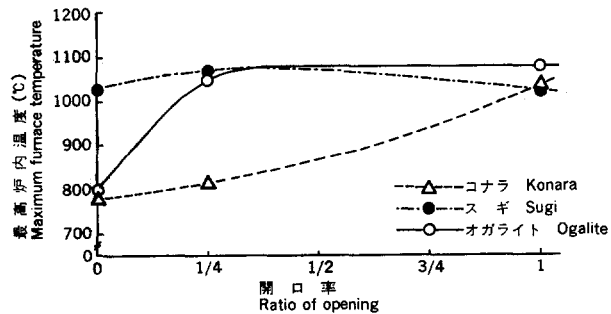


Fig. 7. 開口率による最高炉内温度の変化
Changes in maximum furnace temperature with ratio of opening.

口率 0 を除くと、とび抜けて大きい一酸化炭素発生量を示している。これに対して、コナラとスギについては、開口率による一酸化炭素発生量の変化が小さい。そこで、一酸化炭素の発生と発煙の関係を見るため、Fig. 9 に発煙量対一酸化炭素発生量のプロットを作った。各燃料ごとに異なった結果が示されている。スギについては、一定の傾向を見出すことは困難である。これに対して、コナラは、発煙量とともに一酸化炭素が大きい勾配でもって増加するという、スギよりも明白な傾向を示している。これら二つの燃料のプロット点は低発煙量の領域に集中している。プロット点が多くなれば、より明確な（それに加えて、あるいは異なった）傾向が見出せるかもしれない。オガライトについては、一酸化炭素発生量と発煙量の変化がともに大きく、この二つの量の間にも比例的な関係が存在していると言ひ得る。

薬剤処理された木材（レッドラワン）の表面燃焼性試験⁶⁾や本研究の第 1 報¹⁾でも、発煙量と一酸化炭素発生量がほぼ比例関係にあることが見出されている。本研究では、Fig. 9 に示しているように、燃料ごとのプロット点が少いので、燃料の種類を区別せず、全体として、この二つの量に関する直線回帰分析を行った。結果を Table 3 に示す。得られた直線は Fig. 9 に示されている。本研究で得られた直線の勾配は、前報¹⁾における勾配の値より小さい。また、相関係数が、同表に示しているように大きく、有意水準 0.001 で有意である。

一酸化炭素は、木炭の燃焼において二酸化炭素が木炭表面で還元されることによっても発生する。前報¹⁾の加熱型温水ボイラーにおいては、コナラとオガライトの燃焼から、この二酸化炭素の還元による一酸化炭素がかなり多く発生したと推定された。しかし、本研究の場合には、これと異なり、一酸化炭素は主に、発煙と直接関連した機構、あるいは、煙粒子そのものの変化によって生成したと推定される。オガ

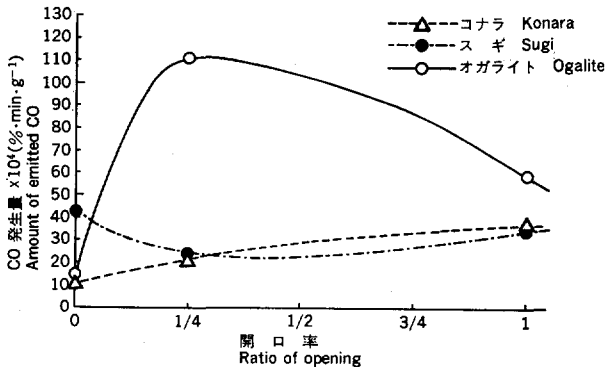
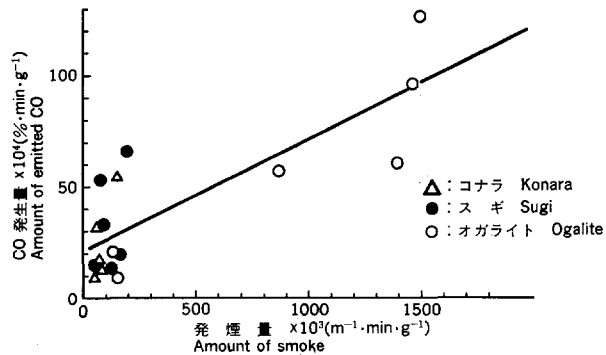


Fig. 8. 開口率による一酸化炭素発生量の変化
Changes in emission of carbon monoxide with ratio of opening.

Fig. 9. 一酸化炭素の発生と発煙の関係
Relationship between emissions of carbon monoxide and smoke.



ライトの発炎圏は、前報¹⁾で述べたように、他の燃料に比べかなり小さいと思われる。したがって、燃焼中、熱分解生成物がこの小さい発炎圏を通過して発炎燃焼することになる。開口率が大きくなって、空気の流速が増大すると、発炎圏を通過する熱分解生成物の速度も大きくなるから、熱分解生成物が十分酸化、燃焼することなしに煙粒子に変わって行く割合が増えると考えられる。熱分解生成物は酸素が豊富であっても酸化の反応時間が短かければ、当然、不十分な酸化状態の生成物である一酸化炭素の量が多くなると言ってよい。すなわち、熱分解生成物の酸化反応に与えられた時間の少いことが、発煙量と一酸化炭素発生量を多くする原因の一つと考えられる。

他方、煙粒子の内部では、「熱重合」→「酸化」→「熱分解による炭化」などの化学的な変化が時間の経過につれて発生すると考えられている²⁾。木材の熱分解生成物には、かなり多くの酸素が結合されている

Table 3. 酸素の消費と二酸化炭素の発生、および発煙と一酸化炭素の発生に関する直線回帰分析

Linear regression functions between oxygen consumption and emission of carbon dioxide, and between emission of smoke and carbon monoxide

Y	$=$	a	x	$+$	b	r
CO ₂ 発生量 (%・min・g ⁻¹) Amount of emitted CO ₂		0.153	O ₂ 消費量 (%・min・g ⁻¹) O ₂ consumption		0.015 (%・min・g ⁻¹)	0.673**
CO 発生量 (%・min・g ⁻¹) Amount of emitted CO		0.00501	発煙量 (m ⁻¹ ・min・g ⁻¹) Amount of smoke		0.00216 (%・min・g ⁻¹)	0.815**

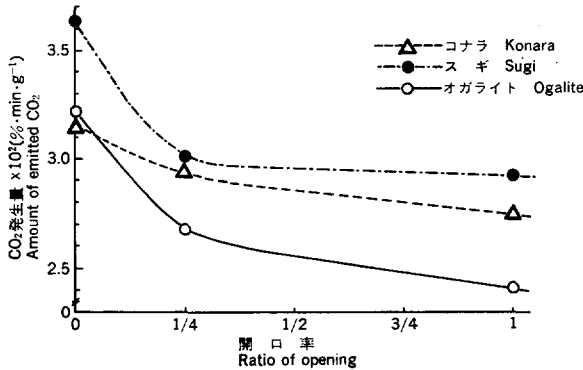
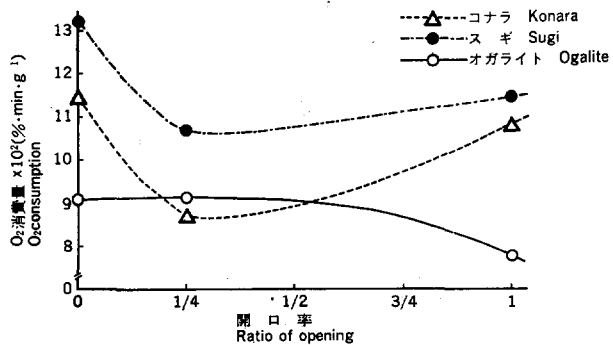


Fig. 10. 開口率による二酸化炭素発生量の変化
Changes in emission of carbon dioxide with ratio of opening.

Fig. 11. 開口率による酸素消費量の変化
Changes in oxygen consumption with ratio of opening.



から、木材の燃焼で発生した煙粒子が上述の化学反応過程を経ながら、一酸化炭素を生成する分解を起こすと考えられる。このように、発煙量に比例して一酸化炭素発生量が増加した原因として、上述の二つの機構が考えられる。

開口率による二酸化炭素発生量の変化および酸素消費量の変化を Fig. 10 および 11 に、それぞれ示す。コナラとスギについて、開口率が 0 から 1/4 に増加すると、二酸化炭素発生量と酸素消費量がともに急激に減少しているが、開口率が 1/4 から 1 に増加すると、二酸化炭素発生量が、わずかではあるが減少しているに対して、酸素消費量は逆に増加している。第 1 段階の酸素消費量の減少の一つの原因として、二酸化炭素発生量の減少が考えられる。他にこの原因として、空気供給量の増加によって、酸素の絶対量が増加し、したがって、相対的に酸素消費量が減少したことが上げられる。第 2 段階における酸素消費量の増加は、二酸化炭素の生成以外に、煙粒子の酸化や一酸化炭素の生成に酸素が消費されたためであると考えられる。

Fig. 11 に示されているオガライトの酸素消費量の変化は、二酸化炭素発生量だけでは説明できない。Fig. 10 から、オガライトの二酸化炭素発生量が開口率の増加にともなって減少することがわかる。しかし、その酸素消費量は、開口率 0 から 1/4 にかけてわずかではあるが、増加し、開口率 1/4 から 1 にかけて緩やかに減少している。はじめの酸素消費量の増加は、Fig. 4 および 8 から推定されるように、煙と一酸化炭素の発生量の増加に負っていると思われる。これら二つの量は、開口率 1/4 から 1 にかけて減少したため、酸素消費量も減少したと考えられる。

酸素分子 1 個の消費は、二酸化炭素分子 1 個または一酸化炭素分子 2 個の生成に相当する。Fig. 8, 10, および 11 から推定される一酸化炭素と二酸化炭素の生成量、および酸素消費量の収支関係は、これらの体積濃度で表わされている数値に単純に Avogadro の法則を仮定して解釈しても、化学量論的に成り立たないことがわかる。すなわち、酸素消費量に比べ、二酸化炭素と一酸化炭素の発生量がかなり少ない。その主な原因は、すでに述べたように、煙粒子の酸化にあると思われる。さらに、煙粒子に含まれない排

気中の炭化水素などの酸化もこれに寄与すると考えられる。この煙粒子などの酸化による酸素消費量がかなり大きいと思われる。

酸素が二酸化炭素の生成以外の他の反応にも消費されると推定されるが、前報¹⁾では、酸素消費量と二酸化炭素発生量の間密接な関係が見出された。そこで、本研究においても、これら二つの量間の関係をみとところ、Fig. 12 に示す結果が得られた。プロットされた点がかかなり散らばっている。これら二つの量に関して直線回帰分析を行った。得られた直線を同図に示している。また、Table 3 にその結果をまとめている。その相関係数 (0.673) は前報の対応する値 0.960 に比べるとかなり小さいが、有意水準 0.01 で有意である。

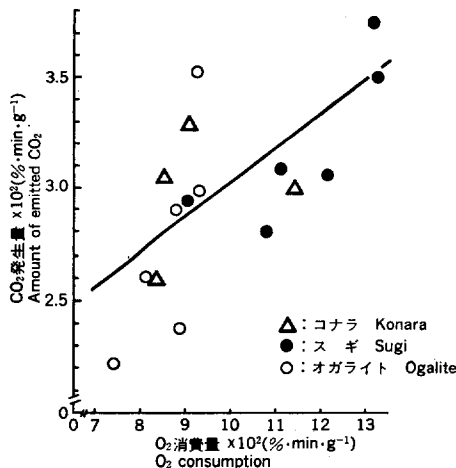


Fig. 12. 二酸化炭素の発生と酸素消費の関係
Relationship between emission of carbon dioxide and oxygen consumption.

2. 燻薪の燃焼性

木材の表面を炭化することによって、耐久性などを改良することは古くから行われてきた。同じような手法を生材の薪に応用して、含水率を低め、発熱量を高めるなど、燃料としての諸性質を改良することを目的として作られたのが燻薪である。現段階では、伐採現場近くなどで、簡単に、しかも効率的に生材を予備加熱して、上述の目的を達成する方法を模索中であると言ってよい。この燻薪法の効果を知るため、燻薪およびそのもとの木材のアカツ、ならびに灯油の絶対熱効率その他の燃焼特性を求めた。その結果は Table 4 にまとめられている。

同表では、乾燥条件の異なった3組の燻薪とアカツの燃焼特性を比較対照している。熱効率については、燻薪とアカツの間に本質的な差が存在しないように思われる。しかし、取得熱量については、燻薪がアカツより、多少大きい値を示していると言ってよい。発煙量および一酸化炭素発生量については、燻薪の値の方が大きい。これは、燻薪処理によって、木材中の不安定な成分や官能基などが除去されたり、安定化したため、燻薪の熱分解速度が小さくなり、したがって、発炎燃焼の度合いが弱くなったことによって生じたと考えられる。これに類似したことを、すでにオガライトの燃焼について推測した。灯油と木材を比較してみると、当然のことながら、灯油の熱効率と取得熱量が木材のそれを大幅に上回っている。また、発煙が観測されず、一酸化炭素発生量も木材のそれより少ない。灯油の二酸化炭素発生量と酸素消費量が大きいことから、燃焼効率が大きかったと推定される。また、最高炉内温度が低いにもかかわらず、最高排気温度が高いから、発炎がよく煙管方向に伸びていたと考えられる。灯油の発熱量が大きいから、取得熱量が木材のそれより大きいのは当然である。しかし、木材の熱効率については、発煙を抑え、発炎燃焼を盛んにすることによって、灯油の値を目標にして、向上する余地が残っている。

燻薪とアカツのペアの含水率レベルは、 $1 < 2 < 3$ の順に高いのにもかかわらず、その取得熱量は、 $3 < 1 < 2$ のペアの順に大きくなっている。熱効率についても、2のペアが最も大きな値を示している。最高排気温度から、この2のペアの発炎燃焼が他のペアより盛んだったことがわかる。一般に、含有水分が多いと、水の蒸発潜熱がそれだけ多くなるので、燃焼が抑えられると考えられる。しかし、本研究の結果は、含水率の差がわずかではあるが、ペア1と2の間で、この一般論に矛盾している。これに対する確実な答えはないが、その原因として次の三つが考えられる。まず、含水率の差が小さいことから、この二組の薪の燃焼の相違が、含有水分の差よりは、測定できない他の因子、実験誤差によって与えられた可能性を上げることができる。

次に、水の燃焼ラジカル化が考えられる。発炎燃焼の機構は $\dot{\text{O}}\text{H}$ や $\dot{\text{H}}$ のフリーラジカルで支えられている連鎖反応であることはよく知られている。これらのラジカルは木材自体の熱分解生成物から生成されると考えられる。しかし、積み込まれた下方の薪から蒸発して発炎圏に入ってくる水もその供給源になる可能性がある。したがって、木材中の水分は蒸発潜熱を奪うマイナス面だけでなく、ラジカルを供給して発炎を生長させるプラス面を有する可能性がある。さらに、ラジカルが木材中に発生すれば、木材のラジカル熱分解を促進し、結果的に燃焼速度が増大される可能性もある。このように、水蒸気のフリーラジカル化を可能の一つの原因として上げることができる。なお、一般に、これらのラジカルは、最終的に安定な生成物になって消滅して発炎圏を去るので、関連する反応の熱収支を考慮しなくてもよい。

最後の一つは水性ガス反応である。水蒸気が高温下で、炭素や一酸化炭素と反応して、水素、二酸化炭素、一酸化炭素を生成する水性ガス反応で生じたエンタルピー変化は、最終的に、これらの生成物が燃焼

して水と二酸化炭素に変われば、トータルの燃焼熱を増減することはない。しかし、水性ガス反応を経る燃焼によって発炎圏が大きくなり、熱交換の効率が高められる可能性がある。

上述したラジカルあるいは水性ガスのいずれの機構によっても、水の作用によって燃焼熱が増加するとは考えられない。経験的に、一旦燃え上った生木が強く炎を上げて盛んに燃焼することはよく知られている。これと似た現象が、2のペアの薪でより大きく発生し、1のペアの熱効率と取得熱量を上回る値を生ぜしめた可能性がある。これが事実ならば、蒸発潜熱というマイナスの効果と発炎促進というプラスの効果によって規定される最適含水率が存在することになる。当然、この最適条件は燃焼炉の構造などによって異なる。薪の含有水分の燃焼におよぼす影響は今後の研究にまっところが大い。

Table 4. 燻薪, アカマツ,
Combustion properties of half-carbonized

燃 料 Fuels		含 水 率 Moisture content (%)	最高炉内温度 Maximum furnace temperature (°C)	最高排気温度*1 Maximum exhaust temperature (°C)
	灯 油 Kerosene	—	737	513
1*2	燻薪 1 Half-carbonized Akamatsu 1	10.0	954	372
	アカマツ 1 Akamatsu 1	11.6	884	344
2*2	燻薪 2 Half-carbonized Akamatsu 2	11.5	936	410
	アカマツ 2 Akamatsu 2	13.0	979	419
3*2	燻薪 3 Half-carbonized Akamatsu 3	24.4	788	238
	アカマツ 3 Akamatsu 3	30.2	778	238

*1 Fig. 5 を参照。Refer to Fig. 5. *2 各ペアごとに異った乾燥条件下にあった。Three couples were kept

Table 5. 定常熱効率
Stationary thermal efficiency

燃 料 Fuels	給湯前の加熱時間 Pre-heating time (min)	給湯時間 Suppling time of hot water (min)	初期温水温度 Initial temperature of hot water (°C)	給湯速度 Suppling rate of hot water (liter/min)	熱効率 Thermal efficiency (%)
灯 油 Kerosene	11	93.4	43	10	69.1
灯 油 Kerosene	16.4	118.3	57	10	72.1
スギ Sugi	40	84.9	70	5 or 10	61.6
コナラ Konara	40	104.2	60	5 or 10	61.8
オガライト Ogalite	40	110.0	59	5 or 10	50.7

*1 ボイラー上端より 15 cm および 215 cm の高さの位置の煙突内の温度を、それぞれ上段および下段（かっこ内）に示す。

前項におけると同様に、Table 4 においても、発煙量が多ければ多いほど、一酸化炭素発生量が多くなり、また、酸素消費量が多ければ多いほど、二酸化炭素発生量が多くなるという二つの傾向を見出すことができる。

3. 定常熱効率

定常熱効率、およびこれを求めるために行った燃焼における給湯の条件、炉内と排気の最高温度、測定されたガスと煙の濃度の最高あるいは最低値を Table 5 に示す。なお、同表には、灯油について二組のデータが示されている。上段のデータは、比較的低い温度の温水を、下段のデータは、それより高い温度の温水を、それぞれ取得するために行った燃焼から得られた。

灯油の燃焼特性

akamatsu, Akamatsu, and Kerosene

発煙量 $\times 10^8$ Amount of emitted smoke $\times 10^8$ ($m^{-1}\cdot min\cdot g^{-1}$)	CO ₂ 発生量 $\times 10^2$ Amount of emitted CO ₂ $\times 10^2$ ($\% \cdot min\cdot g^{-1}$)	CO 発生量 $\times 10^4$ Amount of emitted CO $\times 10^4$ ($\% \cdot min\cdot g^{-1}$)	O ₂ 消費量 $\times 10^2$ O ₂ consumption $\times 10^2$ ($\% \cdot min\cdot g^{-1}$)	絶対熱効率 Absolute thermal efficiency (%)	取得熱量 Obtained heat (cal $\cdot g^{-1}$)
0	5.5	4.2	21.9	70.6	7081
143	2.8	10.5	10.2	33.7	1480
101	2.4	8.5	8.8	31.6	1347
621	2.9	56.5	9.9	36.4	1540
189	2.8	32.9	9.4	36.3	1499
54	2.9	21.8	9.1	30.7	1160
51	2.6	20.8	8.7	32.7	1165

under three different conditions of atmosphere, respectively.

および燃焼特性

and combustion properties

最高炉内温度 Maximum furnace temperature (°C)	最高排気温度*1 Maximum exhaust temperature (°C)	CO の最高濃度 Maximum CO concen- tration (%)	CO ₂ の最高濃度 Maximum CO ₂ concen- tration (%)	煙の最高濃度 Maximum smoke density (m^{-1})	O ₂ 濃度の 最大減少量 Maximum decrease in O ₂ concentration (%)
737	506 (355)	0.025	10.0	0.012	17.4
737	513 (360)	0.033	10.1	0.042	17.5
1220	541 (355)	6.967	16.7	12.48	18.9
861	527 (349)	2.583	16.9	6.37	20.0
1106	459 (325)	5.542	16.8	13.42	18.8

The temperatures measured within the smokestack at 15 and 215 cm from the boiler top are shown in upper and lower (in brackets) lines, respectively.

熱効率はオガライトの約51%から灯油の約70%の範囲におよんでいる。前報¹⁾で得られた加熱型温水ボイラーの定常熱効率の最高値が灯油の約50%であるから、貯湯型温水ボイラーの熱効率は、全体として加熱型ボイラーのそれより高いことがわかる。貯湯型ボイラーの熱効率が高い理由として、燃料の燃焼性に対する炉の適合性や熱交換器の性能以外に築炉の熱容量が考えられる。木質燃料を燃焼するため、築炉はある一定以上の大きさを必要とする。したがって、単位缶容量当たりの築炉の熱容量は缶容量の大きいボイラーほど小さくなると言ってよい。このことは、取得された温水の単位量当たりの築炉に奪われる燃焼熱の割合が、缶容量の大きいボイラーほど、すなわち、加熱型ボイラーより貯湯型ボイラーにおいてより小さいことを意味する。ボイラーの缶本体は外部に対してかなり断熱的であるのに比べ、築炉の断熱性はこれより劣る。したがって、築炉に奪われる無駄な熱とは、築炉での蓄熱だけでなく、築炉を経る外部への放熱をも意味する。なお、給湯開始後、すなわち、定常状態期に入ってからでも、築炉の外壁が次第に暖かくなって行くから、築炉の昇温にかなりの熱が消費されたと思われる。このように、取得熱量に比べ、築炉に消費される相対的な熱が小さかったことも、貯湯型ボイラーの熱効率を高めた理由の一つであると考えられる。

木質燃料の熱効率については、スギとコナラが約62%であるのに対して、オガライトは約51%でかなり小さい。Table 5からわかるように、オガライトの最高炉内温度が、スギのそれに次いで高いにもかかわらず、最高排気温度が他よりも低い。これはオガライトの発炎燃焼の程度が小さかったことを意味する。すなわち、この温度の値から、オガライトの場合には、熱交換器（煙管）内に伸びて行く炎の割合が少く、したがって、熱交換が他の燃料に比べ効率的に行われなかったと推定される。スギは、最高炉内温度および最高排気温度とも最も高い値を示しているため、その発炎圏が大きく、熱交換が最も効率的に行われたと考えられる。これにもかかわらず、その熱効率がコナラのそれとほぼ等しい結果になったのは、煙の最高濃度の大きいことから示唆されるように、燃焼効率がコナラのそれより小さかったためであると考えられる。なお、オガライトの燃焼効率も同様に小さかったと推定される。コナラは、最高排気温度および煙の最高濃度からみて、発炎がよく伸び、しかも燃焼効率も大きかったと思われる。このため、熱効率も大きくなったと言え得る。なお、灯油の場合には、燃料と空気の供給速度を適合させて、熱交換器の大きさに見合う炎を生ずるよう、燃焼を制御できるから、熱効率が最も大きいのは当然である。

Table 5における初期温水温度および給湯前の加熱時間を前報¹⁾の値と比較してみると、本ボイラーの給湯までに要する加熱時間が加熱型ボイラーより長いことがわかる。本ボイラーでは、缶容量に比べ、炉の容積が小さいため、このような結果になったと解される。これらのデータから、給湯前の加熱性能の大きい順に木質燃料を並べると、スギ>コナラ>オガライトとなる。これは、上述したように、発炎燃焼の盛んな順番になっている。

最高炉内温度は、スギの1220°Cが最も高く、灯油の737°Cが最も低い、炉の内壁に張られている耐火断熱材料、カウル（イソライト工業製）の最高使用可能温度は1260°C、常時使用可能温度は1100°Cであるから、スギの燃焼はカウルの使用限界に近いと考えられる。ボイラーの耐久性の面では、スギよりコナラやオガライトの方が望ましい燃料であると言ってよい。

二酸化炭素の最高濃度と酸素濃度の最大減少量を比較すると、木質燃料は、灯油より空気中の酸素を多く消費し、多量の二酸化炭素を生成する激しい燃焼をひき起こすことがわかる。この激しい燃焼の進行により、酸素不足の状態になり、灯油に比べ、はるかに高い濃度の一酸化炭素と煙を発生したと推定される。

市街地において、本ボイラーに木質燃料を用いる場合には、発煙など公害上の難点をひき起こす可能性のあることを忘れてはならない。

なお、Table 5 に示している最高排気温度が、ボイラー本体から 215 cm 離れた煙突内、いわば、実用的には煙突の出口近くにあたる点においても、すべての燃料において、300°C を越えている。このことから、防火上、煙突周囲の断熱などに留意しなければならないことがわかる。

結 論

1) 木質燃料の熱効率は、Table 5 に示されているように、スギとコナラのそれが等しく、オガライトのそれは小さい。しかし、取得熱量は、コナラ<オガライト<スギの順に大きい (Fig. 3)。温水取得までの初期加熱時間は、スギ<コナラ<オガライトの順に長い。また、Fig. 4 に示している発煙量は、オガライトにおいて、とび抜けて大きく、スギとコナラはほぼ一定で小さい。

2) 前報¹⁾における加熱型ボイラーと本研究の貯湯型ボイラーの比較から、取得熱量および熱効率の面では、築炉容積に比べ缶容量の大きいボイラーが有利であるが、初期加熱性能の面では、相対的な缶容量の小さいボイラーが有利であると言い得る。

3) 熱効率および取得熱量におよぼす因子を各燃料ごとに述べると、オガライトの熱効率（取得熱量）は発煙に大きく支配されるのに対し、スギとコナラのそれは、発炎の程度を示す排気温度に密接に関連している (Fig. 5 および Table 2) と要約できる。発煙量は燃焼効率と逆比例的な関係にある。発炎の程度が大きくなれば、煙管による熱交換がより効率的になされる。

4) 燃焼による酸素の消費は二酸化炭素の生成に比較的強く関係づけられ得るが、酸素はまた煙粒子の酸化や一酸化炭素の生成にも消費されると推定される。

5) 一酸化炭素の生成と発煙の間にかなり強い関係が見出される。煙と一酸化炭素は、酸素不足による不完全燃焼だけでなく、熱分解生成物が高温の発炎圏に滞在する時間、すなわち、燃焼あるいは酸化のために許容された時間が短くなれば多く発生すると考えられる。また、一酸化炭素は煙粒子の酸化分解によっても生成される可能性がある。

6) 生材時の水分を除くことを主目的として作られた燻薪は取得熱量の面で多少効果を示したが、発煙量は燻薪処理によって増加した (Table 4)。

7) 熱効率を高めるためには、発煙を抑え発炎燃焼を生長させなければならない。空气の供給量に対する燃焼特性の依存性は木質燃料の種類によって異なる。すなわち、熱効率については、空气の供給量によってコナラとオガライトは大きな変化を示したのに対して、スギはほとんど変化を示さなかった。一方、スギとコナラの発煙性はほとんど空气の供給量に依存しないのに対して、オガライトのそれは空气の供給量によって大きく変化した。したがって、将来、木質燃料の熱効率を高めるための燃焼コントロールシステムを開発するに当たって、このような木質燃料の多様性を考慮する必要がある。

8) 燃料として単位体積当たりの発熱量が高く、しかも燃焼熱を奪う水分を含まないことが望ましい。このような方向で木質燃料を簡単に改良する方法の一つとして、燻薪製造法を今後も追求する必要がある。

9) 熱効率および発煙量から判断して、本ボイラーにコナラを使用するときは、開口率を 1/4、オガライトでは開口率 0 が望ましい。スギはどの開口率で燃焼してもよいように見えるが、強いて言えば、開口率 1 が望ましい。スギ>コナラ>オガライトという燃焼速度の大きさから、給湯の開始を急ぐときにはス

キを、給湯を持続させるにはオガライトを使用することが便利である。

謝 辞

本研究に対して、ご指導およびご助力をいただいた、前林産化学部第二科々長 宮崎 信博士、群馬県林業試験場資源利用課 木暮光男技師、木材利用部難燃化研究室および林産化学部木材炭化研究室所属の諸氏に深謝の意を表します。

また、ロケットボイラ工業株式会社（土浦）およびイソライト住機株式会社（大阪）には、温水ボイラーや測定機器の使用に当たって、ご援助をいただいたことを附記して、感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 平田利美・杉浦銀治：林試研報，322，31～53，(1983)
- 2) 日本住宅・木材技術センター：林野庁委託調査報告書—木質系エネルギー活用促進調査，(1981)
- 3) 日本機械工業連合会，日本暖房機器工業会：木質系等固形燃料・代替エネルギー利用暖房装置の標準化調査事業報告書，日機連(標)No. 9，(1981)
- 4) 岸本定吉：森林エネルギーを考える，創文，85～86 (1981)
- 5) HIRATA T., Y. FUKUI, S. UESUGI, and H. ABE: Mokuzai Gakkaishi, 27, 419, (1981)
- 6) 半田 隆・鈴木弘昭・本間克典：火災学会論文集，18，21 (1968)

Combustion Test for Hot-Water Boiles with Fuelwoods II.

Combustion in hot-water storage type boiler

Toshimi HIRATA⁽¹⁾ and Ginji SUGIURA⁽²⁾

Summary

Thermal efficiency and combustion properties for several fuels were obtained in order to give basic data for improvements and developments of wood-based fuels and household appliances for their combustion.

The fuels used in this study are the woods of Sugi (*Chryptomeria japonica* D. DON) and of Konara (*Quercus serrata* THUNB.), Ogalite of wood briquette, kerosene, all of which were also used in the previous study, wood of Akamatsu (*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.), and half-carbonized wood of Akamatsu. A hot-water storage type boiler instead of a quick heating type boiler in the previous study was used as a combustion appliance. Emissions of smoke, carbon dioxide, and carbon monoxide, consumption of oxygen, temperatures of exhaust within the furnace, and amounts and temperatures of supplied water and of hot water were measured by changing the amount of air supplied to the furnace during the combustion of these fuels.

Received October 18, 1982

(1) Wood Technology Division

(2) Forest Products Chemistry Division

The thermal efficiencies and the obtained heat were calculated from these measurements, effects of some combustion factors on these thermal values were discussed, and the results were compared with those in the previous paper. Furthermore, relationships among the emissions and the consumption of the gases and the smoke, were found and discussed

Consequently, it was found that among the fuelwoods Sugi and Konara gave approximately equal values to the thermal efficiency, and Ogalite gave the smallest value, as shown in Table 5. However, the obtained heat from Sugi is the greatest, and that from Ogalite is greater than from Konara, as shown in Fig. 3. The thermal efficiency of Ogalite is considered to have been determined mostly by the smoke emission, while those of Sugi and konara seem to have been strongly affected by the flaming combustion. To the pre-heating for obtained hot water, Sugi gave the shortest time of the three woods, and Konara gave a shorter time than Ogalite. The hot-water storage type boiler is superior to the previously studied quick heating type boiler in the thermal efficiency and the obtained heat, but this boiler is inferior to the quick heating type boiler in regards to pre-heating time to obtain hot water. Oxygen in the supplied air is estimated for the most part to be consumed by the production of carbon dioxide, as shown in Fig. 12, but part of it is considered to be consumed by the production of carbon monoxide and the oxidation of smoke particles. The emission of carbon monoxide is increased with the smoke emission, as shown in Fig. 9. The half-carbonized wood of Akamatsu gave a larger obtained heat than Akamatsu which was not half-carbonized. The emissions of the smoke and carbon monoxide from the half-carbonized wood, however, are greater than those from the normal wood. This is probably due to the structure thermally stabilized by the pyrolysis and the carbonization in the heating, as shown in Table 4.

In conclusion, it should be emphasized that for the future combustion appliances for fuelwoods and wood-based fuels must be developed to match the variety of their combustion properties found in this study. Furthermore, processes of simple pre-treatments, such as the half-carbonization as shown in the present study should be developed in order to produce wood-based fuel with high heating value and low moisture content.