

木質燃料による温水ボイラーの燃焼試験 (第1報)

加熱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 I
Combustion in quick heating type boiler

要旨：木質燃料を用いる家庭用の小型燃焼器具の開発および改良に役立てるとともに、この燃焼器具における木質燃料のより良い使われ方を求めるため、幾種かの燃料の熱効率や種々の燃焼特性を明らかにした。

使われた燃料は、スギ、コナラの木材、成形薪のオガライトおよび灯油である。燃焼器具として薪と灯油の混焼可能な市販の加熱型温水ボイラーを使った。ボイラー燃焼炉に供給する空気のと燃料の量を変えて、これらの燃料を燃焼し、煙、一酸化炭素、二酸化炭素および酸素などの濃度、炉内と排気の温度、給水および給湯の温度と量などを測定した。

木質燃料の熱効率については、スギ>コナラ>オガライトの順であったが、発煙量では、コナラがスギやオガライトより小さい値を示した。また、給湯開始に要する初期加熱期間については、スギやコナラに比べ、オガライトはかなり長かった。

熱効率を高めるため、本ボイラーにとっては、熱分解速度を規制あるいは表す因子である炉内温度や二酸化炭素濃度などに基づいて空気の供給を自動制御する機構の炉を開発することが望まれる。また、発炎圏の生長に応じて熱交換器の位置などが可変できる機構を開発する必要もある。さらに、本ボイラーに木質燃料を使用する場合には、住宅密集地域では発煙の少いコナラを、加熱の初期には発炎燃焼の盛んなスギやコナラを、給湯を長く持続させるときにはオガライトを使用するというような工夫が望まれる。

緒 言

木材は、石油や石炭などの化石燃料に比べ、一般に比重が1/2以下で、発熱量が1/2~1/3である。したがって、木材の単位体積当たりの可能燃焼熱は化石燃料の1/4~1/6に相当する。このことは、木材が固体であるという因子とともに、得られる単位エネルギー量当たりの輸送費や燃焼炉の大きさに不利な点をもたらしている。また、その形状のため、燃焼速度の制御が比較的困難である。発熱量の増加や燃焼速度の制御に役立つ方法として、古くから木材の炭化が行われてきた。最近では、熱分解を基礎とした木材のガス化や液化によって、木材の燃料としての上述の短所を克服しようという研究が盛んに行われている。

一方、近年、石油価格の急激な上昇によって、木材を直接燃焼させてエネルギーを取り出す装置が、家庭用ならびに工業用にかなり普及してきている。しかし、木材を燃料としてさらに有効に利用するため、よりすぐれた木材燃焼装置の開発と改善を必要とする。このため、木材の燃焼における諸因子とエネルギー化効率の関係を究明しなければならないにもかかわらず、この種の研究がほとんどなされていない。

多岐にわたる燃焼装置と多種多様な木質燃料との間に、一般に共通する関係を簡単には確立できない。

1982年10月18日受理

(1) 木材利用部
(2) 林産化学部

木材利用—21 Wood Utilization—21
林産化学—29 For. Products Chemistry—29

したがって、本研究では、まず、その糸口として、木質燃料用燃焼器具としては家庭などに最も普及している温水ボイラーをとり上げた。また、燃料としては、比重がそれぞれ異なり、燃料としての潜在供給力を有するコナラ、スギ、オガライトを用いた。これらの燃焼器具と燃料を用いて、熱効率と燃焼特性を明らかにし、熱効率向上の方向をさぐるとともに、燃料の利便性を論ずることを、本研究の直接の目的としている。

なお、本研究は特別研究調査費「木質系エネルギー利用開発促進調査」によるものであり、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¹⁾へ資料を一部提供した。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²⁾を実施した日本暖房機器工業会の協力を得た。

実験方法

1. 使用燃料

本研究にはスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) およびコナラ (*Quercus serrata* THUNB.) の薪、および成形薪のオガライトが使われた。スギについては、製材工場などにおける残廃材や構造用材になり得ない間伐材や除伐材、あるいは林地残材などから、恒常的に存在する燃料として利用可能な量が多量に多いと考えられる。コナラは古くからわが国で薪炭材として使われてきた典型的な樹種の一つである。加工成形薪は世界的には幾種類か生産されているが³⁾、わが国では生産、消費されている成形薪の大部分がオガライトである。これらの燃料は、温度約 19°C、関係湿度約 42% の恒温恒湿室で調湿された。

これらの木質燃料の他に、比較のため、灯油も使用された。使われた燃料の形状、低発熱量、含水率、および比重などを Table 1 に示す。なお、同表における低発熱量は次式によって算出された。

Table 1. 使用燃料
Fuels used for study

燃料 Fuels	使用時の形状 Shape at the use	低発熱量 Lower 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 20×5.5cm で、中心に約 2 cm 径の円筒の空洞を有する。 Octagonal column, ca. 20×5.5cm with empty hore of 2 cm diameter at the center	4216	6.3	1.1~1.3 ⁷⁾
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 ⁷⁾
コナラ Konara	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 ⁷⁾
灯油 Kerosene	液体。 Liquid.	10010	—	0.8

$$H_l = \frac{H_h - 600(9h + MC)}{1 + MC} \dots\dots\dots(1)$$

ここに H_l は低発熱量, H_h は無水時の高発熱量, h は無水の燃料の水素の組成比率, MC は乾量基準含水率である。この計算において, オガライトおよび灯油の H_h として, 島津ポンプ熱量計 CA-3 による実測値, 4892 および 10820 cal/g を用いた。また, 他の木材の H_h として, 里中⁴⁾ による値を用いた。木材および灯油の h は右田⁵⁾ および松田⁶⁾ のデータから, それぞれ, 6 および 15% であるとみなした。

2. 温水ボイラー

使われた温水ボイラーは加熱型と呼ばれる小型のボイラーである。加熱型温水ボイラーとは, JIS S 3021-1976 および同 S 3024-1979 に準拠して, 次式による値が 1 より小さいボイラーにつけられた名称である。

$$\frac{\text{缶容量 (l)} \times 1000}{\text{熱出力 (cal/h)}} \dots\dots\dots(2)$$

熱出力は燃料の使用量 × 発熱量 × 熱効率によって与えられる。(2) 式において使用するべき燃料は灯油である。なお, (2) 式において 1 より大きい値を与えるボイラーは貯湯型温水ボイラーと呼ばれる。

本研究に使われた加熱型ボイラーの缶容量は約 47 l で, 全高約 140 cm である。その正面および側面図を Fig. 1 に示す。ボイラーの給水口と給湯口がともに缶の上部に位置している。缶の下には築炉が接続し, ここで発生した燃焼排気あるいは炎が煙管を通して煙突へと伝わる。この築炉はロストルを有しているので, このロストルの上に薪を積むことになる。空気は灰出口からロストルを経て燃料に供給されるので, 積んだ薪の下側に着火しなければならない。着火をスムーズに, かつ, 再現性をもって行うため, 薪の小片をあらかじめ灯油に浸漬しておき, この小片を薪の下側に積み込んで, これに点火した。浸漬によ

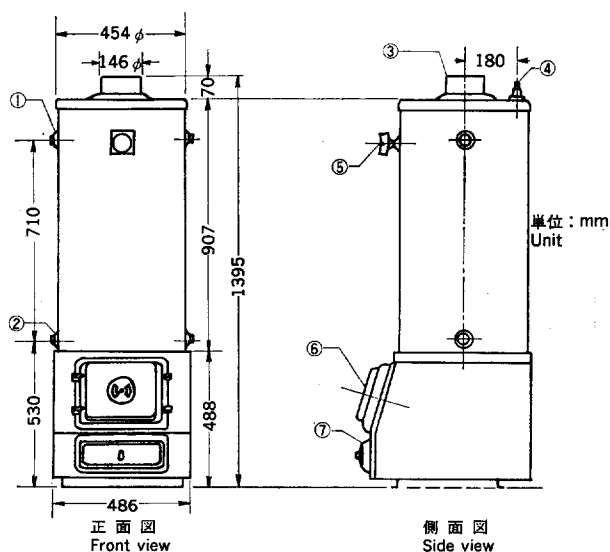


Fig. 1. 加熱型温水ボイラー
Quick heating type boiler.

- ① 給水口 Inlet of water, ② 排水口 Drain, ③ 煙突受 Smokestack base,
- ④ 給湯口 Hot-water outlet, ⑤ 温度計 Thermometer, ⑥ 焚口 Fire door,
- ⑦ 灰出口 Ash door.

って吸収された灯油の量は 15~25 g である。この点火用灯油も熱効率などの計算の対象にされた。

灯油だけを燃料とする場合には、炉の焚口にガンタイプバーナーを取りつけた。ガンタイプバーナーによる燃焼では、缶内水温の設定値にしたがって灯油の供給が自動的に行われる。

3. 測定項目

a) 炉内温度および排気温度

炉内温度は煙突から炉内へクロメルアルメル (CA) 熱電対を導入して測定された。排気温度はボイラー上端より高さ 15 および 215 cm の位置で CA 熱電対を煙突の中心に導入して測定された。

b) 煙濃度

煙濃度は種々の方法で測定され得るが、異なった方法で測定された値を相互に関係づけることが困難である⁹⁾。本研究では、JIS A 1321-1975 に準じて、光学密度として煙濃度を測定した。まず、ボイラー上端から約 14 cm 上方の煙突の中心から、燃焼排気を約 1 l/min の速度で、Fig. 2 に示している煙濃度測定装置に導入した。この装置による煙の光学密度 D は次のように表わされる。

$$D = \frac{1}{L} \log \frac{I_0}{I} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 L は光路長で、ここでは 25 cm である。 I_0 および I は、それぞれ、燃焼前および燃焼中の光の強さである。

c) ガス分析

上述の煙濃度測定装置を経た排気は、脱水のため過塩素酸マグネシウムを充填した U 字管を通して、同様の速度で島津赤外線ガス分析計 URA-2S へ送られ、さらに島津磁気式酸素分析計 MAGNOS-2 へ送られた後、大気中に放出された。前者の分析計では、特定波長の赤外線の吸収に基づいて、二酸化炭素および一酸化炭素の濃度が測定された。後者の分析計では、酸素の磁性を利用して、大気中と排気中との酸素の濃度差を求めた。

このようにして測定されたガスおよび煙の濃度または濃度差を、時間に関して、燃焼開始から終了まで積分した。これらの積分値を燃料消費量で除した値を、単位燃料消費量当りの二酸化炭素あるいは一酸化炭素の発生量とか、発煙量、酸素消費量などと呼ぶことにする。なお、薪の場合の燃料消費量は、所定燃

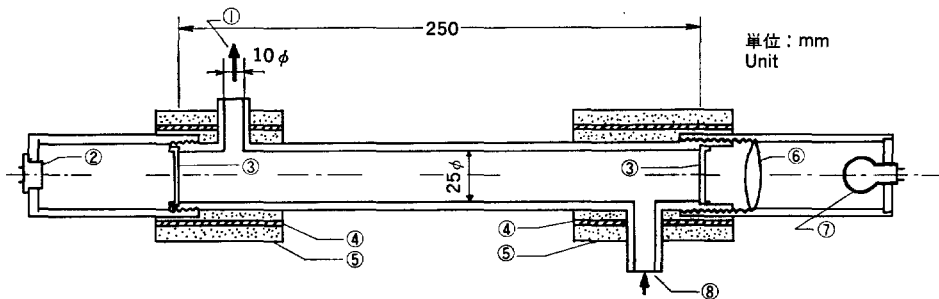


Fig. 2. 煙濃度測定装置

Photometer for measuring smoke density.

- ① 排気出口 Smoke outlet, ② 光電管 Phototube, ③ ガラス板 Glass plate, ④ 電熱線 Heating wire, ⑤ 絶縁用ガラス繊維 Glass fiber for insulation, ⑥ レンズ Lens, ⑦ 白色光源 Incandescent lamp, ⑧ 排気入口 Smoke inlet.

焼時間後、炉内に残存している燃料の量と供給量との差である。炉内に残っている燃料を素早く火消壺に移して秤量し、残存量を求めた。灯油の消費量は、燃料を入れたまま燃料タンクを秤量して求められた。

これらのガスおよび煙の濃度は、一定流速で導入した排気から求められたのに対し、実際に発生した排気の流速は、燃焼速度や灰出口の開口率によって変化すると考えられる。さらに、煙については、その粒子が煙突の壁や測定装置までの吸引管内に凝縮する。したがって、ガスおよび煙の実際の発生量または消費量と上述の測定値に基づく量との間に厳密な比例関係が存在しない可能性がある。本研究では、単にこれらの測定による値が大きければ大きいほど、一般に、ガスなどの実際の発生量または消費量も大きいとみなして考察を進めることにする。

d) 給水および温水の温度と流速

加熱によって得られた温水およびボイラーへの給水の温度と流速は、それぞれ、CA 熱電対およびオメガのフロート式流量計によって測定された。温水および給水の温度の測定位置は、それぞれ、ボイラーの給湯口および給水用水道蛇口付近である。温水は、大部分の場合に、10, 5, または 2.5 l/min の流速で供給された。

e) 熱効率および取得熱量

熱効率は消費燃料の発熱量に対する取得熱量の百分率として算出された。発熱量は単位質量の燃料が完全燃焼した時の燃焼熱で、すでに(1)式で示したように、定容熱量計による測定値(高発熱量)を燃焼で生成された水と含有水分の蒸発潜熱、および単位質量に占める含有水分量について補正した値が低発熱量である。この計算には低発熱量を用いた。

取得熱量は次のように求められた。まず、給水と温水との温度差と温水流速の積を時間に関して積分した。積分の下限は給湯の開始時間である。上限は熱効率の種類によって、上述の温度差が0または20°Cになる時間のいずれかである。次に、この積分値から、温水の比熱および密度を、それぞれ、 10^{-8} cal/kg \cdot °C および 10^{-8} kg/m 3 として、温水として得られた熱の総量を求めた。この熱の総量を燃料消費量で除した値を取得熱量とした。

熱効率を2種類算出した。一つは、取得熱量を求めるための積分の上限を給水と温水の温度差が0になる時間とした場合である。取得熱量の算出に消費燃料および温水の全量を用いた。この場合の熱効率を絶対熱効率と呼ぶことにする。絶対熱効率を求めるための燃焼実験では、燃料を初めに1回だけ供給し、木質燃料の燃焼特性を求めることを主目的とした。燃料供給量を約 2, 3, 4 kg の3水準として実験した。

他の一つは、ほぼ一定温度の温水を供給するため燃料を連続的に補給し、温水の生成と燃料の消費との間にほぼ定常な状態を成立させているときの熱効率である。これを定常熱効率と呼ぶことにする。この計算には、定常な状態が成立している期間に消費された燃料の量が必要である。ほぼ定常な状態の成立時、すなわち、給湯開始時に炉内に存在している燃料の量は、初期の燃料の量、燃焼時間、空気を供給する灰出口の開口率の条件を同一に行った予備実験から推定された。加熱の終期において、温水と給水の温度差が20°Cになったときを給湯の停止時点とした。大部分の燃焼はこの給湯の停止時点で停止されたが、これよりずれた場合には、燃料の残存量を該当実験の平均燃焼速度によって補正した。

結果および考察

1. 木質燃料の燃焼特性

燃焼特性および絶対熱効率を求めた実験では、空気を供給する灰出口の開口率を 4 または 5 段階に変えた。灰出口の開口は、高さ約 5 cm、横約 25 cm の長方形で、扉を水平に移動させて開口面積を変えた。開口率は、開口を全開したときの面積に対する各段階の開口面積の比として算出された。模型火災実験において、燃焼空気の供給量は $A\sqrt{H}$ に比例することが見出されている⁹⁾。ここに、 A は開口面積、 H は開口の高さである。本研究においては、 H は一定であるから、開口率は $A\sqrt{H}$ に比例する。炉の形状、炉内の燃料の量とその積み方などを吟味することなしに、この関係をボイラーの燃焼に適用することは危険かもしれない。しかし、本研究では、この関係を用いて定量的な結果を導くことを目的としないから上述の吟味を省略して、灰出口の開口率に空気供給量が比例するとみなして考察を進める。

a) 開口率による熱効率、取得熱量、および発煙量の変化

燃料のエネルギー源としての潜在能力を示している値、すなわち、発熱量の有効エネルギーへの転換率は、燃料評価の重要な因子の一つである。本節では、この値を絶対熱効率で表わす。Fig. 3 および 4 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、それぞれ示す。同一の性質を絶対量（取得熱量）と相対量（熱効率）で、それぞれ表わしているから、当然、各燃料はこれら二つの図で類似の変化を示している。スギとコナラは開口率 1/8 および 1 で高い熱効率および取得熱量を示し、開口率 1/2 でともに極小値を示している。反対に、オガライトは開口率 1/2 に極大値を有する変化を示している。各燃料が示した熱効率および取得熱量の最大値を比較すると、熱効率ではスギの値が最も大きく、次いで、コナラ、オガライトの順になる。しかし、取得熱量では、コナラとオガライトの順位が逆転し、スギ>オガライト>コナラの順になった。

熱効率は、主に二つの因子によって規定されると考えられる。一つは燃焼効率で、他の一つは熱交換の度合である。燃焼効率は二酸化炭素と水へ転換した燃料の割合であるが、これを算出することは困難である。そこで、逆に燃料損失の指数の一つである発煙量について考察する。Fig. 5 に開口率による単位燃料消費量当りの発煙量の変化を示す。この図からコナラの発煙量がきわめて少く、しかも、ほとんど一定なことがわかる。これに対して、スギとオガライトの発煙量は大きく、開口率によって大幅に変化している。スギの発煙量は開口率 1/2 に極大を、オガライトの発煙量は同じ開口率に極小を、それぞれ示している。Fig. 3 および 4 と Fig. 5 を比較すれば、スギとオガライトの発煙量が多くなると、熱効率が低下することがわかる。以上のことから、コナラの熱効率が燃焼効率に依存しないのに対して、スギとオガライトの熱効率は燃焼効率に依存すると結論づけられる。

b) 熱効率におよぼす炉内温度の影響

燃焼熱が効率的にボイラー缶内の水に伝わるためには、煙管を通る燃焼排気が高温かつ多量であるとか、発炎圏が煙管内に十分伸びているとかの条件が望ましい。発炎燃焼が成立するためには、熱分解によって木材から可燃性生成物が多量に発生しなければならない。木材の熱分解速度が大きければ大きいほど、発炎燃焼が盛大になるための必要条件が満たされる。この熱分解速度は炉内温度によって規定されると言ってよい。

炉内の発炎燃焼の程度を推定するため、炉内温度を測定した。Fig. 6 に、開口率による最高炉内温度

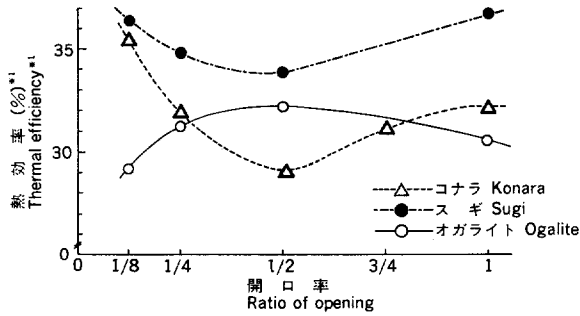


Fig. 3. 開口率による熱効率*1の変化

Changes in thermal efficiency*1 with ratio of opening.

- *1 初期燃料量, 約 2, 3, 4 kg の 3 水準について得られた値の平均値である。本図以降の「開口率による各性質の変化」に使われる各性質の値も同様の平均値である。
 The thermal efficiency is expressed by the values averaged for three levels of initial fuel amount, about 2, 3, and 4 kg. The same averaging method is used in other figures on "Changes in other properties with ratio of opening".

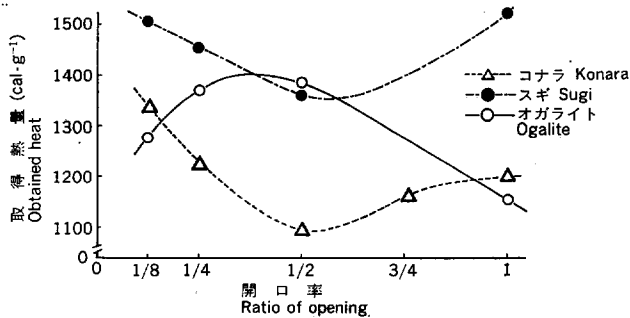
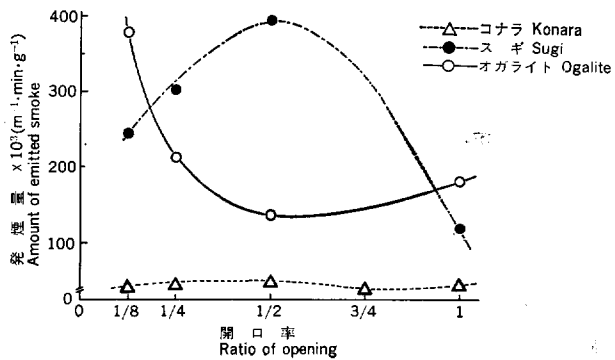


Fig. 4. 開口率による取得熱量の変化

Changes in obtained heat with ratio of opening.

Fig. 5. 開口率による発煙量の変化
 Changes in smoke emission with ratio of opening.



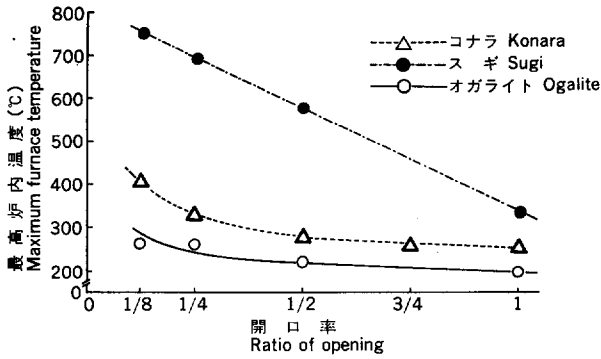


Fig. 6. 開口率による最高炉内温度の変化
Changes in maximum furnace temperature with ratio of opening.

Fig. 7. スギの燃焼における熱効率と最高炉内温度の関係
Relation between thermal efficiency and maximum furnace temperature for Sugi.

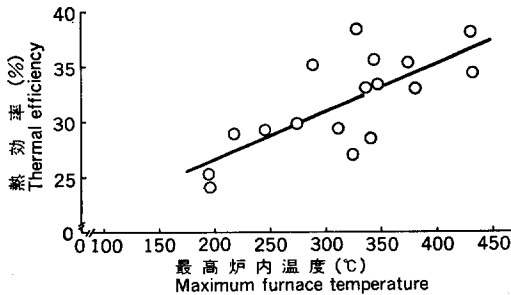
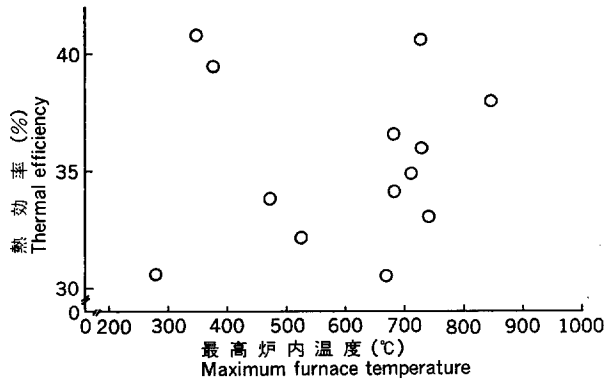


Fig. 8. コナラの燃焼における熱効率と最高炉内温度の関係
Relation between thermal efficiency and maximum furnace temperature for Konara.

の変化を示す。最高温度は個々の燃料の特微的な燃焼に関係ない瞬間的な変化によって与えられる可能性もあるが、この図から、明らかに一定の傾向を知ることができる。すなわち、3燃料とも開口率の増加にともなって最高炉内温度が低下している。これは供給空気の冷却効果によってもたらされたと考えられる。最高炉内温度の値は、スギ>コナラ>オガライトの順になっている。一般に、発火時間や発火温度その他で示される木材の発火性は比重が大きくなると低下する¹⁰⁾。これは、木材の発火に必要な可燃混合気層¹¹⁾を形成する熱分解の速度が、比重の大きい木材ほど小さいためである。Table 1 に示している比重は最高炉内温度の高い燃料ほど小さいから、熱分解し易い燃料ほど炉内温度を高めたと考えられる。

炉内温度の熱効率におよぼす効果を見るため、各燃料ごとに、熱効率対最高炉内温度のプロットを行っ

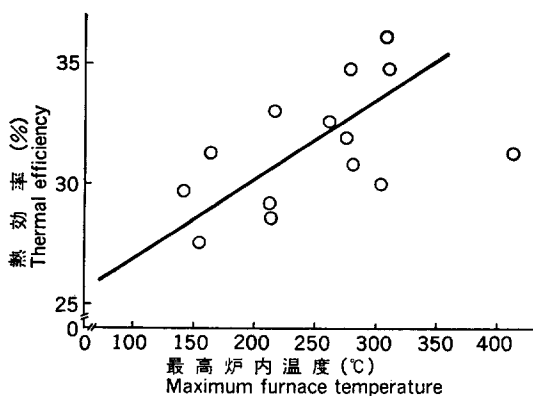


Fig. 9. オガライトの燃焼における熱効率と最高炉内温度の関係
Relation between thermal efficiency and maximum furnace temperature for Ogalite.

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

燃 料 Fuels	Y = a x + b			r*2	
コ ナ ラ Konara	熱 効 率(%) Thermal efficiency	0.043	炉内温度(°C) Furnace temperature	18.1(%)	0.731★★
オ ガ ラ イ ト Ogalite	"	0.033	"	23.6(%)	0.752★★
ス ギ Sugi	"	0.038	排気温度(°C) Exhaust temperature	21.7(%)	0.471★
ス ギ*1 Sugi	"	0.084	"	6.0(%)	0.744
コ ナ ラ*1 Konara	"	0.090	"	-0.3(%)	0.670★
オ ガ ラ イ ト Ogalite	"	0.048	"	21.5(%)	0.782★★

*1: 排気温度 410°C 以上を除く。 Determined in the temperature range lower than 410°C.

*2: r は相関係数である。相関係数が5%有意の時は★を、1%有意の時は★★で表わされている。

The r is the correlation coefficient. The values in the 1 and 5% levels of significance of the test of hypothesis are expressed with the marks★★ and★, respectively.

た。これらのプロットを Fig. 7~9 に示す。スギについては、この2量間に一定の関係を見出すことは困難であるが、コナラとオガライトについては、一般に、最高炉内温度の上昇につれて熱効率が増加することがわかる。Fig. 8 および 9 に示しているコナラとオガライトの熱効率と最高炉内温度について、直線回帰分析を行った。Table 2 にその結果を示す。また、対応する直線をそれぞれの図に示している。Table 2 に示している勾配の値を比較すると、コナラの熱効率の最高炉内温度依存性がオガライトのそれより高いことがわかる。相関係数の値はともに高く(0.01の水準で有意)、これら2燃料料について、熱効率と炉内温度の関係が深いことがわかる。

スギについては、熱効率の最高炉内温度に対する依存性が見出されなかった。Fig. 6 に示しているように、スギの最高炉内温度が他の燃料料に比べ、高い温度領域で変化している。このような高温領域では、

本ボイラーの炉内に盛大な発炎燃焼をひき起こすのに必要な熱分解速度が当時保たれていると考えられる。したがって、この場合には、大きい速度で生成された熱分解物が発炎燃焼するか、あるいは煙になるかは、空気の供給速度に支配されたと推定される。他方、コナラとオガライトについては、最高炉内温度が低い領域で変化しているから、発炎燃焼の熱分解速度に依存する程度が大きかったと考えられる。これらのことから、炉内温度がある高い領域にあるならば、一般に、その変化は熱効率に直接には影響をおよぼさないとはいえる。

c) 熱効率におよぼす排気温度

Fig. 10 に開口率による最高排気温度の変化を示す。排気の流速が一定であれば、煙管を通る排気温度の上昇につれて、あるいは、発炎圏の生長につれて熱交換がより効果的になされる。この図から、スギとコナラの排気温度が高いのに対して、オガライトのそれが極端に低いことがわかる。排気温度の低いことが、オガライトの熱効率が最も小さかった理由の一つであると考えられる。

熱効率におよぼす排気温度の効果を見出すため、Fig. 11~13 に示すような最高排気温度対熱効率のプロットを作った。これらの図から、一般に、排気温度の上昇につれて熱効率が增加することがわかる。しかし、Fig. 11 および 12 において鎖線で示したように、最高排気温度が約 410°C を越えると、熱効率が減少する傾向が存在するように見える。この減少は、コナラではわずかであるが、スギではかなり大幅である。プロットされたこれらの点は、特に Fig. 11 においては、かなり大きく散らばっているので、410°C 以上における点が偶然生じたという見方もできるかもしれない。しかし、ここでは、熱効率は 410°C 以上の領域では減少する傾向にあると見なして、410°C 以下の温度領域における最高排気温度と熱効率の関係を直線回帰分析した。その結果を Table 2 に示す。また、各図に対応する直線を示している。なお、スギについては、全温度領域に関する回帰分析の結果を同表に、また、対応する直線を一点鎖線として Fig. 11 に示している。なお、コナラとオガライトについて、相関係数と自由度から、有意水準 0.05 および 0.01 で、熱効率と排気温度間の相関係数が有意であると検定できる。また、勾配の値から、コナラの熱効率が排気温度に最も大きく依存して変化することがわかる。Fig. 5 に示しているように、コナラの熱効率は発煙量にほとんど影響されない。したがって、煙管による熱交換の程度に影響される割合が相対的に大きくなるはずである。これが排気温度に対する依存性の大きさと現われたと思われる。

最高排気温度が 410°C を越えると熱効率が低下する原因は二つ考えられる。開口率が增加すれば、供給空気の運搬作用の増加によって、発炎あるいは排気の上昇速度が増大するので、煙突の排気温度が上昇す

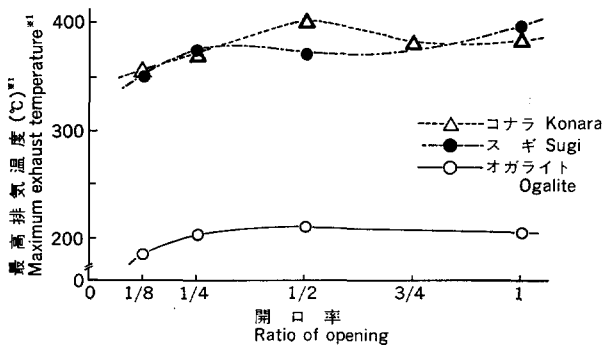


Fig. 10. 開口率による最高排気温度*1 の変化

Changes in maximum exhaust temperature*1 with opening ratio.

*1 ボイラー上端より 15 cm の位置の煙突内の温度
The temperature was measured within the smokestack at 15 cm from the boiler top.

Fig. 11. スギの燃焼における熱効率と最高排気温度*1の関係
Dependence of thermal efficiency upon maximum exhaust temperature*1 for Sugi.

*1 Fig. 10 参照。
Refer to Fig. 10.
*2 Table 2 参照。
Refer to Table 2.

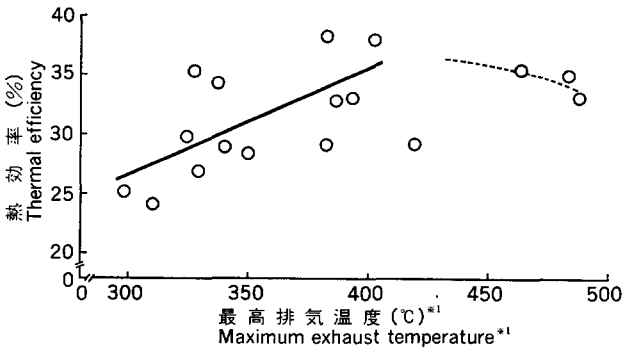
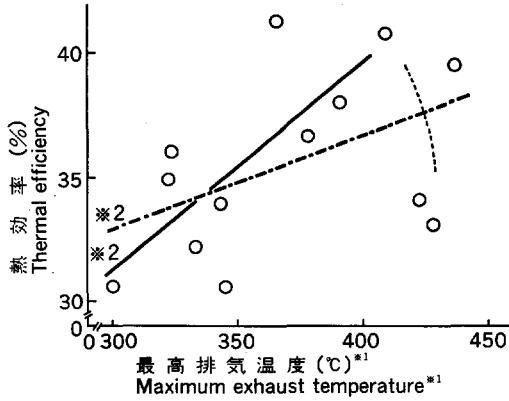
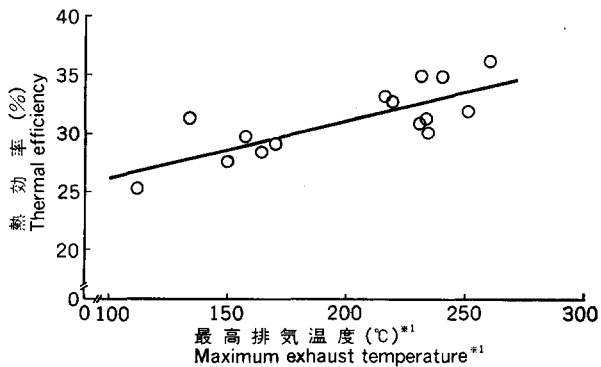


Fig. 12. コナラの燃焼における熱効率と最高排気温度*1の関係
Dependence of thermal efficiency upon maximum exhaust temperature*1 for Konara.

*1 Fig. 10 参照。
Refer to Fig. 10.

Fig. 13. オガライトの燃焼における熱効率と最高排気温度*1の関係
Dependence of thermal efficiency upon maximum exhaust temperature*1 for Ogalite.

*1 Fig. 10 参照。
Refer to Fig. 10.



る。この運搬作用が大きくなれば、発生した燃焼熱が十分交換されず、大気へのがれる割合が大きくなる。このため、熱効率が低下する。Fig. 3 に示すように、コナラの熱効率は開口率 1/2 で最小になっている。他方、その最高排気温度は、Fig. 10 でわかるように、同じ開口率で最高になっている。これは燃焼熱が効果的に熱交換されることなしに排出されたため起ったと解釈される。しかし、Fig. 12 に示すように、この排気温度の上昇による熱の損失の影響はあまり大きくない。

他の原因は燃焼効率の低下である。空気供給量が増加すれば、排気温度が上昇するだけでなく、熱分解生成物の発炎圏を通過する速度も増加する。したがって、熱分解生成物の燃焼に与えられた時間が短縮さ

れる。スギのように熱分解され易い燃料にあっては、開口率1/2程度でも炉内温度が高く、熱分解速度が大きいから、未燃の熱分解生成物が増加すると考えられる。最高排気温度が410°Cを越えると、スギの熱効率がかなり大幅に低下する傾向を示している。これは、熱の損失と発煙量の増加という、二つの原因が重なったためであると推定される。

d) 熱効率, 発煙量, および排気温度におよぼす燃料供給量の影響

発生した燃焼熱は、ボイラー缶内の水に伝わったり、排気によって外部に放出されたりする以外に、炉を含めたボイラー本体の昇温にも消費される。特に、熱容量の大きい耐火材で構成されている築炉には、かなりの熱が奪われると思われる。ボイラー全体が外部に対して断熱的な構造になっているから、炉を含めたボイラー本体の昇温に要する熱は、排気による損失の熱に比べ、一定であると思われる。したがって、発生した燃焼熱が多ければ多いほど、築炉などに奪われる熱の相対量が少なくなるはずである。そこで、燃料の初期量に対して取得熱量をプロットしたところ、Fig. 14のような結果が得られた。コナラとオガライトについては、予想したとおり、燃料の初期量の増加とともに取得熱量が増えている。しかし、スギについては、燃料の初期量2kgから3kgにかけて取得熱量が増加しているが、3kgから4kgにかけては減少している。この原因を明らかにするため、燃料の初期量による発煙量の変化を求めた。結果をFig. 15に示す。この図から、コナラとオガライトの発煙性がほとんど燃料の初期量に依存しないのに対して、スギの発煙量は燃料の量にほぼ比例して多くなることがわかる。したがって、Fig. 14に示したスギの取得熱量の変化は、発煙による燃焼効率の低下に影響されて生じたと考えられる。いずれにしても、これらのことから、家庭用の小型ボイラーであっても、一旦加熱したら、冷却せず連続して使用することがかなり効率的であることがわかる。

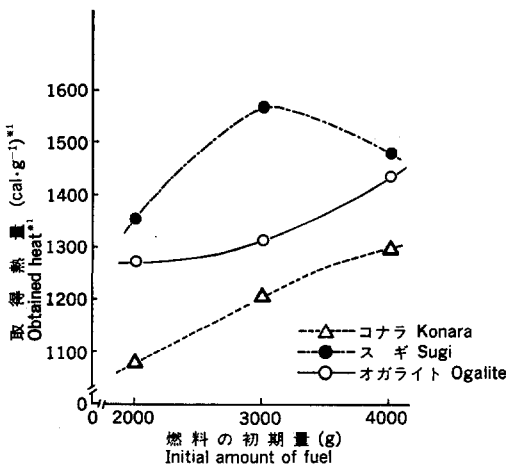


Fig. 14. 燃料の初期量による取得熱量*1の変化

Changes in obtained heat*1 as hot water with initial amount of fuels.

*1 開口率1/8~1について得られた値の平均値
The obtained heat was given by averaging values obtained at different ratios of opening 1/8 to 1.

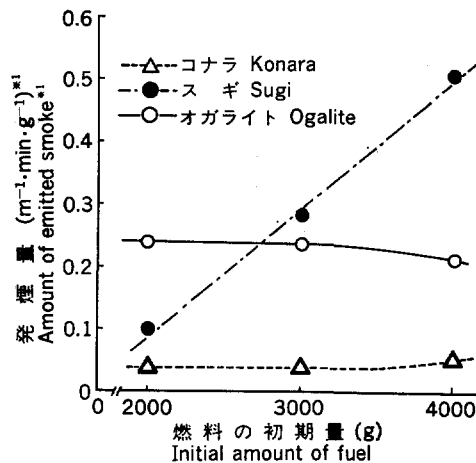


Fig. 15. 燃料の初期量による発煙量*1の変化

Changes in amount of emitted smoke*1 with initial amount of fuels.

*1 開口率1/8~1について得られた値の平均値
The amount of emitted smoke was given by averaging values obtained at different ratios of opening 1/8 to 1.

熱効率に大きな効果を有する排気温度と燃料の量の関係を Fig. 16 に示す。この図から、すべての燃料の最高排気温度が燃料の初期量の増加につれて上昇することがわかる。これは燃料の量の増加につれて燃焼速度あるいは発炎圏が大きくなったために生じたと考えられる。発炎圏の生長は熱交換上有利であるが、生長し過ぎると排気によって放出される熱の割合も大きくなる。Fig. 16 では、コナラとスギの最高排気温度が燃料の量 4 kg において 410°C を越えている。しかし、コナラの取得熱量は、すでに Fig. 14 に示したように、燃料の量が 4 kg の時に最大である。このことから、単に燃料の量が多いため最高排気温度が 410°C を越えても熱効率は低下しないが、開口率の増加によって排気の流速が増大し、その温度が上昇し過ぎると、熱効率が低下するようになると思われる。これに対して、Fig. 14~16 におけるスギ

の取得熱量、発煙量、ならびに最高排気温度をみれば、熱効率に対して排気によって運び去られる熱以上に発煙による燃料の損失の効果が大きいことがわかる。

e) 二酸化炭素、一酸化炭素、および煙の発生性、ならびに酸素の消費性

木材が理想的に燃焼すると、酸素を消費して、二酸化炭素と水を生成する。この完全燃焼を実現するためには、まず、空気と燃料の供給をバランスさせる必要がある。しかし、本ボイラーにおいては、空気と燃料の供給をバランスさせて、完全燃焼を実現することは不可能である。したがって、当然、煙や一酸化炭素が発生する。木材の燃焼から、煙や一酸化炭素以外に有害物として二酸化イオウや過酸化窒素が発生することが知られている。ここでは、二酸化炭素、一酸化炭素、煙などの発生、および酸素消費等の消長、ならびに相互の関連をみる。

Fig. 17 および 18 に、開口率による酸素の消費、および二酸化炭素の発生の変化を、それぞれ示す。両図から、各燃料の酸素消費量と二酸化炭素の発生量の変化が類似していることがわかる。全燃料とも、最小開口率 1/8 で最大の酸素消費量と最大の二酸化炭素発生量を示している。オガライトについては、この二つの量が開口率の増大につれて減少しているが、スギとコナラについては、2 量とも、1/2~3/4 の開口率で極小を示して変化している。このことから、消費された酸素の大部分が二酸化炭素になって放出されたと推定される。そこで、この関係をさらに詳しく明らかにするため、Fig. 19 に示す二酸化炭素発生量対酸素消費量のプロットを作った。この図から、二酸化炭素発生量と酸素消費量との間に 1 次関係が存在することがわかる。この二つの量について行った直線回帰分析の結果を Table 3 に示す。得られた直線を Fig. 19 に示している。その切片が 0 に近い。また、相関係数が非常に大きく、有意水準 0.001 で相関の有意を検定できる。これらのことから、二酸化炭素の発生と酸素の消費について行った上述の推

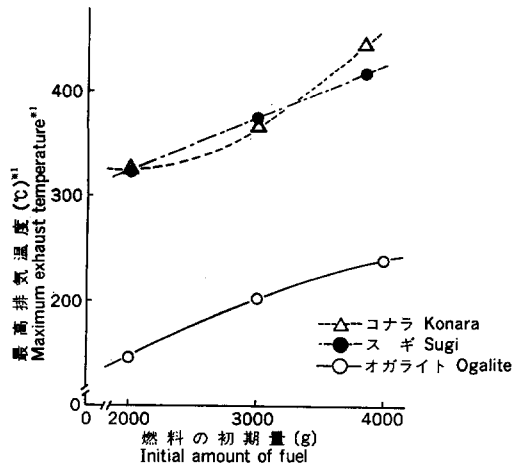


Fig. 16. 燃料の初期量による最高排気温度*1の変化

Changes in maximum exhaust temperature*1 with initial amount of fuels.

*1 開口率 1/8~1 について得られた値の平均値
The maximum exhaust temperature was given by averaging values obtained at different ratios of opening 1/8 to 1.

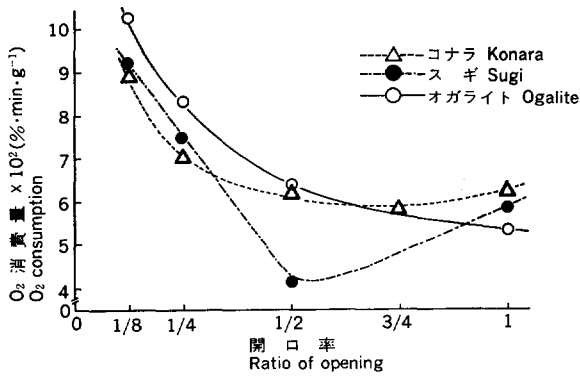


Fig. 17. 開口率による酸素消費量の変化
Changes in oxygen consumption with ratio of opening.

Fig. 18. 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.

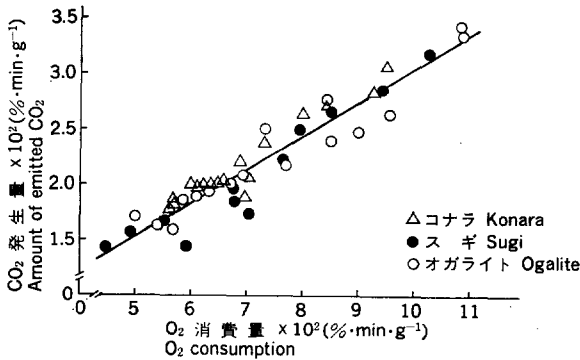
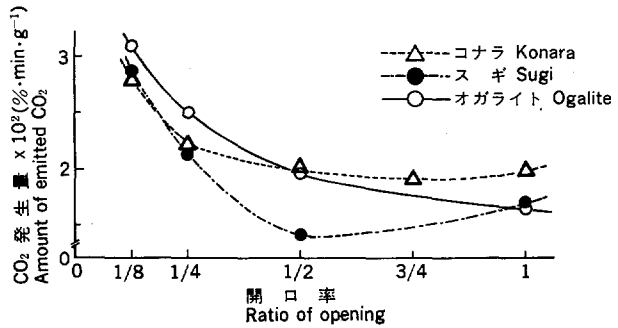


Fig. 19. 二酸化炭素の発生と酸素消費の関係
Relation between emission of carbon dioxide and oxygen consumption.

定が妥当であると言ひ得る。

Fig. 17 および 18 における酸素消費量と二酸化炭素発生量がともに開口率 1/8 で最大になっている。これは燃焼速度に比べ、空気供給速度と排気速度が小さかったためであると考えられる。すでに述べたように、ガス濃度は実際の排気速度に関係なく一定流速下で測定されたから、測定値が大きくても、排気速度が小さければ、実際に発生したガスあるいは消費された酸素の絶対量が必ずしも多いとは言ひ得ない。開口率が 1/2 から 1 に増加すると、スギの酸素消費量と二酸化炭素発生量が増加することが注目される。これは、Fig. 5 に示したように、この開口率の間で発煙量が減少しており、完全燃焼の程度が高まったために生じたと考えられる。

開口率による一酸化炭素の発生量の変化を Fig. 20 に示す。この図において、コナラの開口率 1/2 に

Table 3. 排気中の気体成分および煙の量の関係
Linear regression functions between amounts of gases and of smoke in exhaust

燃 料 Fuels	Y	$=$	a	x	$+$	b	r
全 燃 料 All fuels	(%・min・g ⁻¹) CO ₂ 発生量 Emitted CO ₂		0,299	(%・min・g ⁻¹) O ₂ 消費量 O ₂ consumption		(%・min・g ⁻¹) 0,0005	0,960★★
ス ギ Sugi	(%・min・g ⁻¹) CO 発生量 Emitted CO		0,104	"		(") -0,0011	0,671★
コ ナ ラ*1 Konara	"		0,091	"		(") -0,0043	0,821★
オ ガ ラ イ ト*1 Ogalite	"		0,060	"		(") -0,0022	0,698★
ス ギ*2 Sugi	"		0,023	(m ⁻¹ ・min・g ⁻¹) 発 煙 量 Emitted smoke		(") 0,0018	0,723★
オ ガ ラ イ ト Ogalite	"		0,007	"		(") 0,0013	0,618★

*1: O₂ 消費量 0.07%・min・g⁻¹ 以上の領域における関係。
Determined in the O₂ consumption range greater than 0.07 (%・min・g⁻¹).
*2: 発煙量 500×10⁻³m⁻¹・min・g⁻¹ 以下の領域における関係。
Determined in the range of the emitted smoke smaller than 500×10⁻³m⁻¹・min・g⁻¹.

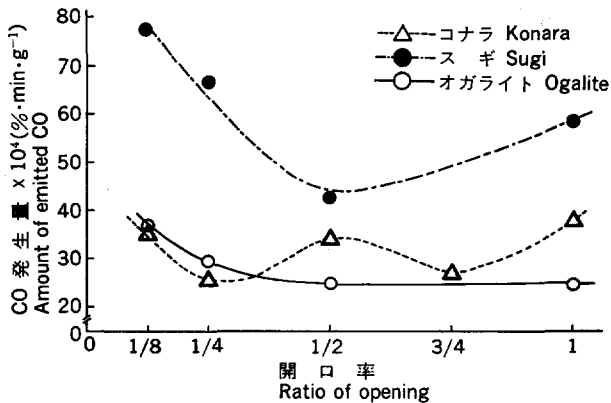


Fig. 20. 開口率による一酸化炭素発生性の変化
Changes in emission of carbon monoxide with ratio of opening.

おける点を除けば、3燃料とも、その変化が Fig. 17 と 18 に示した酸素消費量および二酸化炭素発生量の変化に似ている。そこで、燃料ごとに一酸化炭素発生量対酸素消費量をプロットしたところ、Fig. 21 ~23 に示す結果が得られた。プロットされた点が散らばっており、特に、コナラとオガライトについては、全体的な傾向を見出すことが困難である。しかし、この二つの燃料について、酸素消費量の大きい領域、すなわち、開口率の小さい領域で、酸素消費量の増加につれて一酸化炭素発生量が増加する傾向が見出される。スギの場合には、全域にわたって、酸素消費量の増加にともなって一酸化炭素発生量が増加する傾向が示されている。これらの傾向を直線回帰分析した。その結果を Table 3 に示す。3燃料とも、0.01 または 0.05 の有意水準で相関の有意が検定された。

酸素消費量が多いということは、逆な見方をすれば、空気の供給量が少いということである。したが

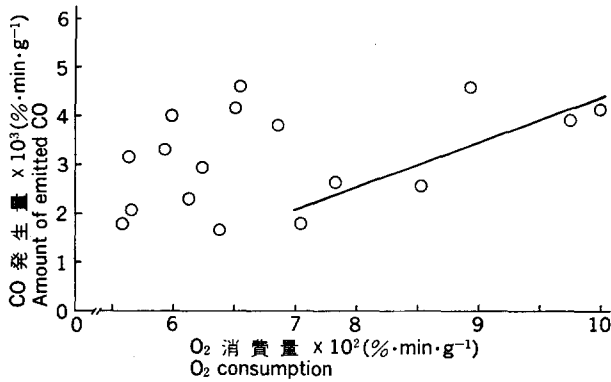


Fig. 21. コナラの燃焼における一酸化炭素の発生と酸素消費の関係
Relation between emission of carbon monoxide and oxygen consumption by combustion of Konara.

Fig. 22. オガライトの燃焼における一酸化炭素の発生と酸素消費の関係
Relation between emission of carbon monoxide and oxygen consumption by combustion of Ogalite.

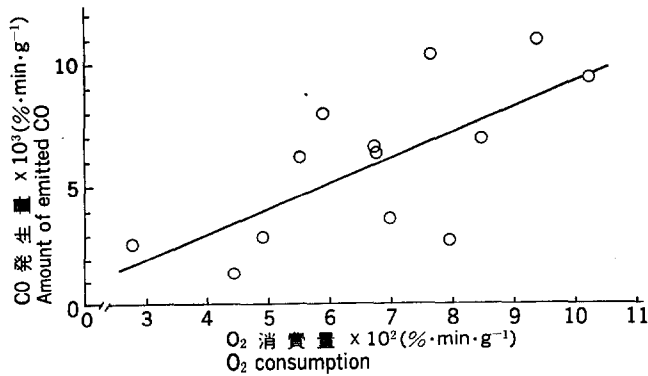
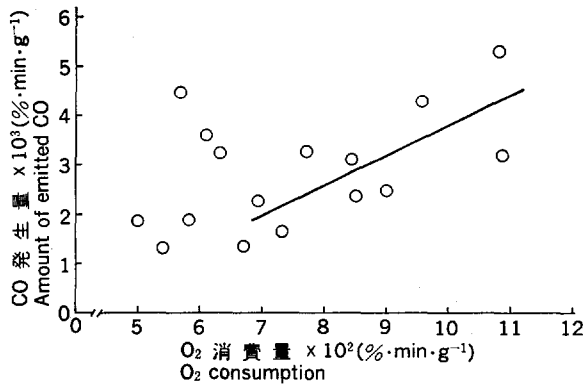


Fig. 23. スギの燃焼における一酸化炭素の発生と酸素消費の関係
Relation between emission of carbon monoxide and oxygen consumption by combustion of Sugi.

って、酸素不足によって不完全燃焼が発生し、多量の一酸化炭素が生成されたと考えられる。他方、コナラおよびオガライトの場合には、Fig. 21 と 22 に示されているように、酸素消費量の小さい領域、すなわち、開口率の大きい領域でも多量の一酸化炭素が発生することがある。コナラおよびオガライトの燃焼では、燃料供給量が多いと大量の木炭が生成され、おき燃焼（無炎燃焼）が発生する。空気の供給量が多いと、おき燃焼が盛大になる。木炭の燃焼が盛んになると、この燃焼で生成された二酸化炭素が木炭表面で還元され、一酸化炭素になる。Fig. 21 および 22 の低酸素消費領域において、プロット点が散らばっているのは、このおき燃焼に起因すると考えられる。なお、スギの燃焼で生成された木炭は少量であっ

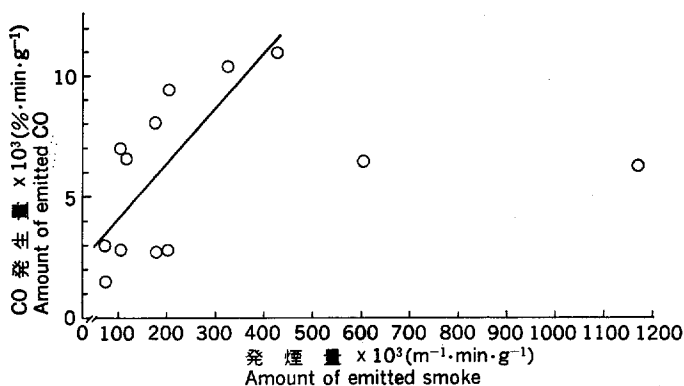


Fig. 24. スギの燃焼における一酸化炭素の発生と発煙の関係
Relation between emissions of carbon monoxide and of smoke from combustion of Sugi.

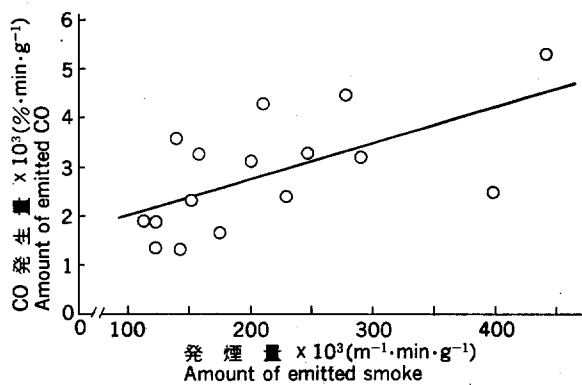


Fig. 26. オガライトの燃焼における一酸化炭素の発生と発煙の関係
Relation between emissions of carbon monoxide and of smoke from combustion of Ogalite.

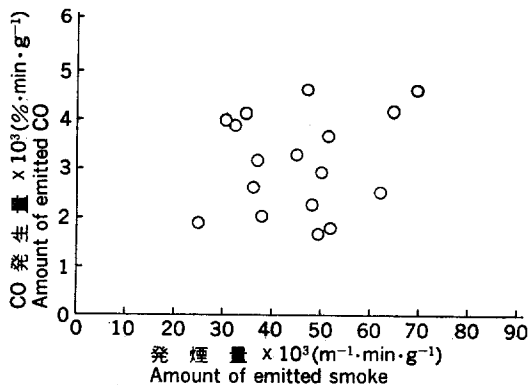


Fig. 26. コナラの燃焼における一酸化炭素の発生と発煙性の関係
Relation between emissions of carbon monoxide and of smoke from combustion of Konara.

た。

不完全燃焼に依存する一酸化炭素の発生をより明白にするため、発煙量と一酸化炭素発生量との関係を求めた。得られた結果を Fig. 24~26 に示す。スギおよびオガライトの燃焼では、Fig. 24 と 25 に示すように、発煙量が $500 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \cdot \text{min} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上になる領域を除き、発煙量の増加にともなって一酸化炭素発生量が増加する傾向が見出される。類似の傾向は木材の表面燃焼性試験においても見出されている¹²⁾。この二つの燃料の発煙量と一酸化炭素発生量に関する直線回帰分析の結果は Table 3 にまとめられている。両燃料とも、高い相関係数を示している。コナラについては、Fig. 26 に示すように、発煙量と一酸化炭素発生量の間に明白な関係が見出されない。わずかに、発煙量の増加につれて一酸化炭素の量が多くなるような傾向を呈しているが、その相関係数を算出したところ、0.188 という低い値であった。すでに、Fig. 5 で示したように、他の燃料に比べ、コナラの発煙量は小さく、ほぼ一定である。したがって、Fig. 26 でプロットされた点がある特定領域に集中する傾向を示しているのは当然のことであると
言い得る。

2. 定常熱効率

定常熱効率を求めるため行った燃焼は、このボイラーの実際の使用状態に近いと考えられる。得られた熱効率、およびその燃焼で測定された炉内温度、排気温度、煙濃度、ガス濃度などを Table 4 に示す。

同表において、熱効率は、灯油の 50.7% からオガライトの 38.2% にわたっている。熱効率は、すでに考察してきたように、発煙量や排気温度などに依存するし、また、排気の流速にも依存すると考えられる。発煙を抑え、適度な排気の温度と流速を得るためには、相応する発炎燃焼が必要である。灯油の場合には、ガンタイプバーナーによって、燃料と空気の供給速度がコントロールされ、理想的な発炎燃焼が得られたと考えられるから、当然、最も大きい熱効率になったと言ってよい。木材の場合には、熱効率上、理想的な開口率と燃料の供給量が燃料の種類によって異なる。定常熱効率を求めるための燃焼では、このような条件を無視して、ほぼ一定な温度の温水を長時間取得することを目的として、燃料を補給し、開口率を適宜変えた。さらに、灰出口の開口による空気供給のコントロールは、燃料補給時に焚口が全開されるから、無意味になるときがある。したがって、木材の場合には、Table 4 の数値は、実用的ではあるが、か

Table 4. 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 (l/min)	熱 効 率 Thermal efficiency (%)
灯 油 Kerosene	8	60.6	51	5	50.7
灯 油 Kerosene	14	64.4	63	5	49.2
ス ギ Sugi	20	86.4	51	5	49.8
コ ナ ラ Konara	20	72.4	57	5, 10	44.6
コ ナ ラ Konara	20	113.8	65	5	47.9
オ ガ ラ イ ト Ogalite	55	87.4	44	5	38.2

*1: ボイラー上端より 15 cm の位置の煙突内の温度

なりラフな燃焼試験の結果であると解すべきである。

このような事情にもかかわらず、スギとコナラの熱効率は灯油のそれに匹敵していることは注目に値する。オガライトの熱効率はスギやコナラに比べ小さい。これは、オガライトが燃料として本質的に劣っていることを意味するものではない。炉の構造がオガライトの燃焼に適合していないと解すべきである。一般に、一定流速の空気供給条件下では、発炎燃焼が盛んになればなるほど、排気温度が上昇し、酸素消費量と二酸化炭素の生成量が増大する。Table 4 において、二酸化炭素の最高濃度、酸素の最大減少濃度、および最高排気温度などで、オガライトが木質燃料中、最も小さい値を与えている。オガライトの燃焼に関してだけ、特別に大量の空気を供給する操作をしたわけではないから、これは、オガライトの発炎圏が小さかったことを示していると考えられる。すでに考察してきたように、オガライトの熱分解速度が小さいため、発炎燃焼の程度も小さかったと推定される。発炎圏の小さい燃料に適合した構造のボイラーにあっては、オガライトの熱効率はより大きくなると考えられる。

給湯前の加熱時間および初期温水温度から判断して、給湯前の加熱能力の最も大きい燃料は、当然のことではあるが、灯油である。木質燃料中では、コナラの能力が最も大きく、スギがこれに続いている。オガライトの場合には、給湯までかなり長く加熱しなければならないことがわかる。オガライトの熱分解速度が小さいため、発炎燃焼の生長が遅いということも、この原因の一つと考えられる。したがって、実用的には、木質燃料を使用して給湯の開始を急ぐ場合にはコナラやスギを使用し、給湯を長時間続ける場合にはオガライトを使用するというような燃料の使い分けが有効であると考えられる。

Table 4 において、煙の最高濃度の値は、スギで最も大きく、続いて、コナラ、オガライトの順になっている。一酸化炭素の最高濃度についても類似の傾向が見出される。これらの値は、すでに示したように、開口率と燃料の供給量によって変る。公害の面はもちろん、熱効率上も、これらの値が小さければ小さいほど望ましい。灯油に比べ、木質燃料はすべて、これらの値がかなり大きい。これらの値が灯油のそれに匹敵するようになれば、この混焼ボイラーにおける木質燃料の熱効率が灯油のそれより大きくなる場合もあると考えられる。

最高炉内温度については、スギが最大の値を、オガライトが最小の値を示している。最高排気温度につ

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 con- centration (%)	CO ₂ の最高濃度 Maximum CO ₂ con- centration (%)	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 concentra- tion (%)
706	424	0.053	9.0	0.02	14.4
747	431	0.108	10.0	0.02	15.7
757	457	2.067	16.0	11.72	19.8
721	537	2.042	16.3	1.44	20.8
586	452	0.758	12.6	0.61	15.8
472	432	0.271	9.2	0.43	11.9

The temperature was measured within the smokestack at 15 cm from the boiler top.

いては、木質燃料の中でコナラとオガライトが、それぞれ、最大と最小の値を示している。炉の内壁に張られた断熱材料（カウル、イソライト工業製）の常時使用可能な最高温度が1100°Cであるから、スギの最高炉内温度の値でも十分余裕のあることがわかる。しかし、炉内温度や排気温度が高ければ高いほど、煙管など、直接炎と接触する部分の耐久性をそこなう度合が大きくなる。温度面からみたボイラーの耐久性では、オガライトの燃焼が最も望ましいと言い得る。なお、Table 4 に示していないが、ボイラー上端より 215 cm の高さの煙突内の排気温度が、コナラおよびスギの燃焼において、350°C を越えることがあった。木材などの可燃性建築材料が周囲にあれば、このような高温の排気やその煙突によって加熱され、発炎することがある。以上のように木質燃料の燃焼排気に対しては、煙などによる公害だけでなく、防火の面においても考慮しなければならない。

結 論

1) Table 4 に示されている木質燃料の熱効率はスギ>コナラ>オガライトの順である。しかし、Fig. 4 に示されている取得熱量では、スギ>オガライト>コナラの順になった。木質燃料は灯油に比べ発煙量が多いので、住宅密集地域での使用に注意を要する。発煙量を少くできれば、灯油より大きい熱効率を得る可能性を秘めている。

2) 熱効率は、主に燃焼効率と煙管による熱交換の程度に支配される。そこで、この両面から、熱効率におよぼす木質 3 燃料の燃焼の特徴をまとめると次のようになる。

スギは熱分解速度が大きく、発炎燃焼が盛んであるため、Fig. 6 および 10 に示されているように、炉内温度と排気温度が高い。これに対して、その発煙量の変化が大きい。したがって、熱効率は熱交換の程度より燃焼効率に支配される度合が大きい。コナラの燃焼では、発煙量が少く、しかもその量は比較的一定である。これに対して、Fig. 12 に示されているように、その熱効率の最高排気温度に対する依存性が大きい。したがって、コナラの熱効率は、主に熱交換の程度に支配されると言い得る。なお、コナラの場合には、炉内温度に比べ排気温度が高い。したがって、炎がよく伸びていたと推察される。しかし、発炎圏が生長し過ぎると、排気によって外部に放出される熱が増え、熱効率が低下する傾向がある。オガライトの燃焼では、炉内温度や排気温度から推して発炎圏が小さいと考えられる。また、発煙量も多く、しかも大きく変化する。したがって、その熱効率は、燃焼効率と炎の伸び（熱交換）の両方に支配される。

なお、Fig. 14 の取得熱量の変化からわかるように、熱効率は、一般に、燃料の供給量とともに増加する。しかし、スギでは、供給量に比例して発煙量も増加するので、燃料が多すぎると熱効率が低下することがある。

3) 排気中に一酸化炭素が発生することは、発煙と同様に、熱効率と公害の両面において不利である。Fig. 21~23 から推定されるように、一酸化炭素は空気不足による不完全燃焼からも発生するし、空気の豊富な条件下では、燃焼で生成された木炭の燃焼による二酸化炭素の還元によっても生成される。しかし、一般に、一酸化炭素と煙の発生はともに不完全燃焼に起因することが多いから、Fig. 24 および 25 に示されているように、これら二つの量は密接な関係を有する。

他方、Fig. 19 に示されているように、酸素消費量と二酸化炭素発生量は、非常に密接な関係を有する。これら二つの量は、煙粒子の熱分解と酸化、あるいは排気中の炭化水素などの酸化などに影響される可能性を含むにもかかわらず、このような関係が得られたことは、二つの量の変化が、大部分、発炎燃焼

に起因すると解される。

4) 温水ボイラーに木質燃料を使用する場合に、個々の燃料の燃焼特性を生かす必要がある。たとえば、給湯の開始を急ぐときには、スギやコナラなどの燃焼速度の大きい燃料を用い、一旦、発炎が生じた後、給湯を持続しなければならないときには、燃焼速度の小さいオガライトを大量に供給するということが、一つの具体的なパターンとして考えられる。また、発煙が問題になる地域か、否かによって、コナラとスギを使い分けることも必要であろう。さらに、炉内空間に適合した発炎燃焼を得るため、燃料の熱分解速度と量を考慮しなければならない。熱分解速度が小さくて、発炎圏が生長しない場合には、燃料を小割にして、加熱の表面積を拡大するとか、その反対の場合には、大きなブロックのまま供給するとかの工夫が望まれる。

5) 発煙量は開口率と燃料の量に大きく依存する。したがって、発煙を抑えるため、空気と燃料の供給速度、あるいは燃焼（熱分解）速度を適度にバランスさせなければならない。このため、燃焼のコントロールシステムを開発する必要がある。排気中の二酸化炭素あるいは酸素の濃度、または炉内温度によって燃焼速度を推定できるから、その機構として、たとえば、二酸化炭素の濃度や炉内温度に基づいて、燃料と空気の供給量を制御する方法が考えられる。

木質燃料の場合には、発煙を抑える制御システムを開発したとしても、発炎圏の大きさを制御することは困難である。したがって、技術的に困難かもしれないが、発炎圏の大きさに対応して、熱交換器の大きさや位置を適宜変えることができる温水ボイラーを開発することも有力な一つの方向であると言い得る。

謝 辞

本研究を進めるにあたってご指導を賜わった、前林産化学部第二科々長 宮崎 信博士、および実験に終始ご助力をいただいた、群馬県林業試験場資源利用課 木暮光男技師、さらに、ご協力をいただいた、ロケットボイラ工業株式会社 (土浦)、イソライト住機株式会社 (大阪)、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。

引用文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 平田利美・阿部房子：木材工業, 36, 470, (1981)
- 4) 里中聖一：北大演習林研報, 22, 609, (1963)
- 5) 右田伸彦：木材化学, 上, 右田・米沢・近藤編, 共立, p. 65, (1968)
- 6) 松田誠一郎：燃料便覧, 燃料協会編, コロナ, 275~277, (1977)
- 7) 林業試験場監修：木材工業ハンドブック, 丸善, p. 62 および 908, (1982)
- 8) 斎藤文春：建築研究報告, No. 83, 6, (1978)
- 9) 斎藤文春：燃料協会誌, 49, 222, (1970)
- 10) 秋田一雄：消研報告, 9, No. 1~2, 81, (1959)
- 11) 秋田一雄：災害の研究, IV, 災害科学研究会編, 技報堂, 116, (1963)
- 12) HIRATA, T., Y. FUKUI, S. UESUGI, and H. ABE: Mokuzai Gakkaishi, 27, 419, (1981)

Combustion Tests for Hot-Water Boiler with Fuelwoods I

Combustion in quick heating type boiler

Toshimi HIRATA⁽¹⁾ and Ginji SUGIURA⁽²⁾

Summary

Developments of alternative energy resources have been necessitated through the oil crises. Plantations, harvestings, and processings for fuelwood as one of them have been studied for years. Household appliances appropriate to combustion of fuelwood, however, have not been developed yet, as compared with those for oil. Therefore, several combustion properties for some fuelwoods were obtained in order to aid the development and improvement of household appliances for the combustion and to present more efficient usage of fuelwoods.

The fuels used for this study are woods of Sugi (*Chiptomeria japonica* D. DON) and of Konara (*Quercus serrata* THUNB.), Ogalite of wood briquette produced in Japan, and kerosene. The lower calorific values, the specific gravity, and the moisture contents of the fuels are listed in Table 1. A quick heating type boiler shown in Fig. 1 was used as a household appliance for the combustion of the fuels. Different amounts of fuel, except for kerosene, were burnt. Air was supplied into the furnace at several levels according to the opening ratio of the ash door. The amount of smoke, carbon monoxide, carbon dioxide, consumed oxygen, furnace and exhaust temperatures, amounts and temperatures of supplied water and obtained hot water were measured in the combustions. Thermal efficiency and heat obtained in the hot water were calculated from these measurements. The effects of combustion factors on the thermal efficiency and the obtained heat were discussed in conjunction with the temperature of furnace and exhaust, and smoke emission. Furthermore, the development of carbon monoxide and of smoke which might cause air pollution were considered in relation to the carbon dioxide emission and the oxygen consumption.

In conclusion, the fuelwoods gave the smaller thermal efficiencies and the larger smoke emissions than kerosene, as shown in Table 4. However, the fuelwoods would give larger thermal efficiencies than kerosene if the smoke emissions of the fuelwoods decreased and approached the level of the kerosene. Concerning the thermal efficiency for the fuelwoods, Sugi and Ogalite yielded the largest and smallest values, respectively. The obtained heat of Konara is the smallest and that of Sugi is the greatest, as shown in Fig. 4. It was found from the consideration on Figs. 5 and 11~13 that the thermal efficiencies of Sugi and Ogalite were determined mainly by the smoke emissions and partially by the flaming combustion, and that of Konara was strongly affected by the flaming combustion. The more the flaming combustion grew, the greater the thermal efficiency. However, excessive increase of the flaming combustion lowered the thermal efficiency because of the loss of heat by the exhaust. In general, the obtained heat increased with the increase in the amounts of the fuel, as shown in Fig. 14. For Sugi the largest amount of the fuel caused a decrease in the obtained heat due to the large production of smoke.

Received October 18, 1982

(1) Wood Utilization Division

(2) Forest Products Chemistry Division

A close relation between the emission of carbon dioxide and the oxygen consumption was found, as shown in Fig. 19 and Table 3. This suggests that oxygen consumed by the flaming combustion was converted to oxygen in the carbon dioxide. The emission of carbon monoxide was found to increase with the elevation in oxygen consumption, as shown in Figs. 21~23, and with the increase in the smoke emission, as shown in Figs. 24 and 25, and Table 3. This means the emission of smoke and carbon monoxide can be attributed to the incomplete combustion of the fuels. Since the carbon dioxide emission and the oxygen consumption are closely related to the emission of smoke and of carbon monoxide, either of the two quantities can be used as an indicator of the combustion efficiency. A control system of the combustion of fuelwood may be developed on the desired basis of using either of them. This system will give the elevation in the thermal efficiency and will lower air pollution by the combustion of wood. Furthermore, it is desirable to develop a heat exchanger more suitable to the flaming combustion of various fuelwoods. For practical use, a combination and choice of fuelwood with different combustion properties are important in order to lower the smoke emission, to obtain hot water more quickly, to continue supplying hot water, etc.