

炎のプレートでおいしくクッキング！

チーム名：神戸高専熱研動力研究チーム

チーム代表者:廣澤謙弥 メンバー:長澤直樹 親川暢 梅井純平 藤田克伸

所属:神戸市立工業高等専門学校 機械工学科

1. はじめに

物体を高温に加熱するための熱源として、火炎が用いられている。その使用範囲は陶器の焼成炉や、金属材料の焼き入れ焼き戻しといった工業用途から、ガスコンロやバーベキューセットといった調理器具まで多岐にわたる。この際、被加熱物は一定の温度分布で加熱されることが望ましい場合がほとんどである。しかしながら、火炎の温度分布は、火炎面付近で最高温度点を持つため、均一な加熱が難しい。このため、高温で均一な温度分布を必要とする場(黒体炉の熱源など)には不向きである。そこで、本実験では、プレート状に平面的な火炎面を形成できる、平面火炎バーナーを利用し、加熱炉を製作する。その加熱炉の温度特性を測定し、またさまざまな物体を加熱して、通常の拡散火炎で加熱した場合との違いを調査する。

2. 平面火炎の燃焼特性

図1に通常の拡散火炎を図2に拡散火炎の温度分布を示す。

図3に平面火炎バーナーの概略図を示す。アルミケース内のチャンバーにメタン予混合ガスを流入させる。チャンバー内に設置した、繊維によって燃料を拡散し、上部に設置した焼結金属から燃料を噴出させる。焼結金属は多孔質であるため、焼結金属全体から噴出した燃料により、図4に示すような平面的な火炎が形成される。またこの火炎は同図内からわかるように、燃料の噴出方向を傾けたり、反転させても、平面形状を保つことがわかる。また、この時のノズル中心からの各高さ断面における、火炎内温度分布を図5に示す。平坦な温度分布を持っていることがわかる。このことから平面火炎を用いて均一な温度場の炉を作ることができると考えられる。また、焼結金属の代わりに、金属メッシュを用いても、網目が多孔質の役割を果たすため容易に大型の平面火炎を形成できる。



図1 拡散火炎

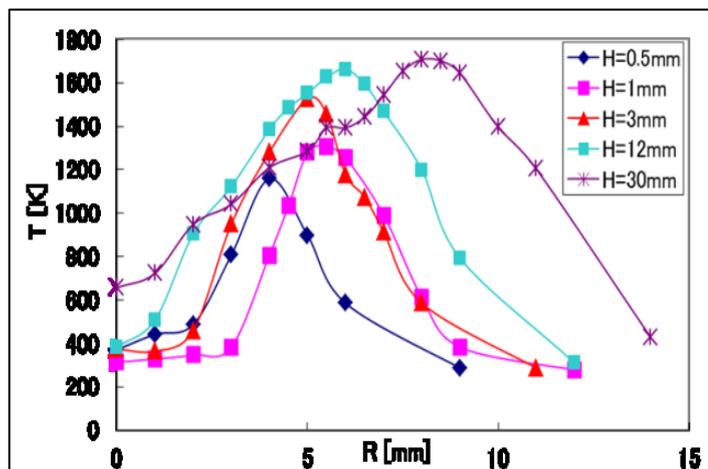


図2 拡散火炎における各高さ断面でのノズル中心からの温度分布

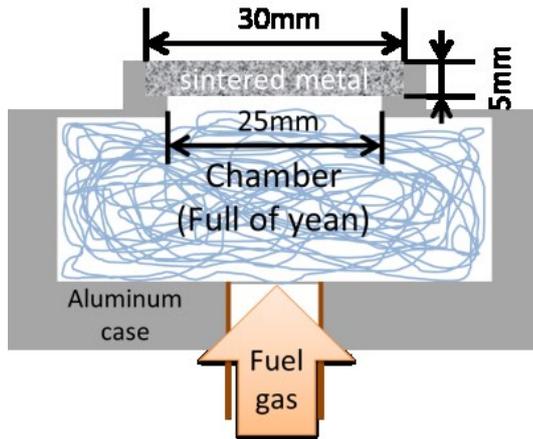


図3 平面火炎バーナー

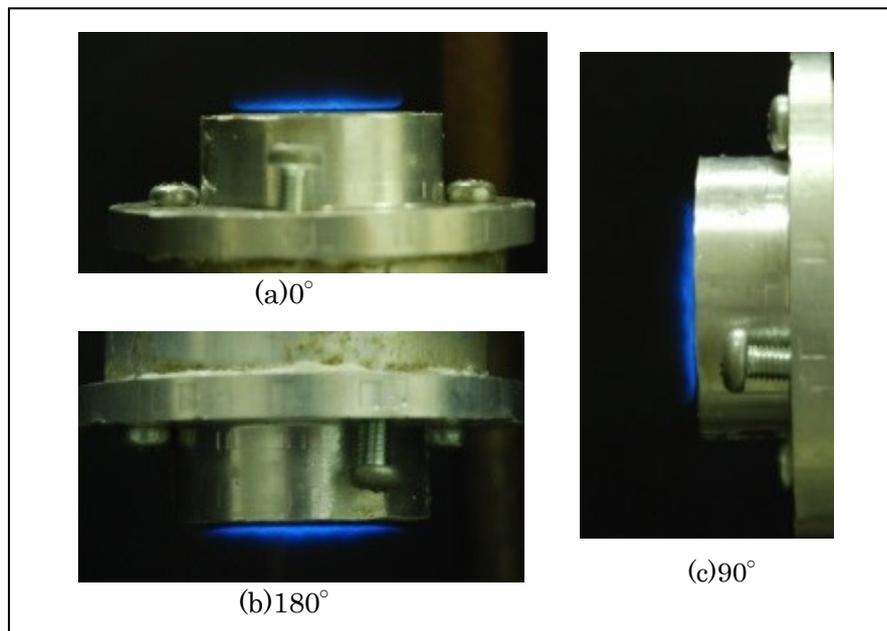


図4 平面火炎の火炎形状

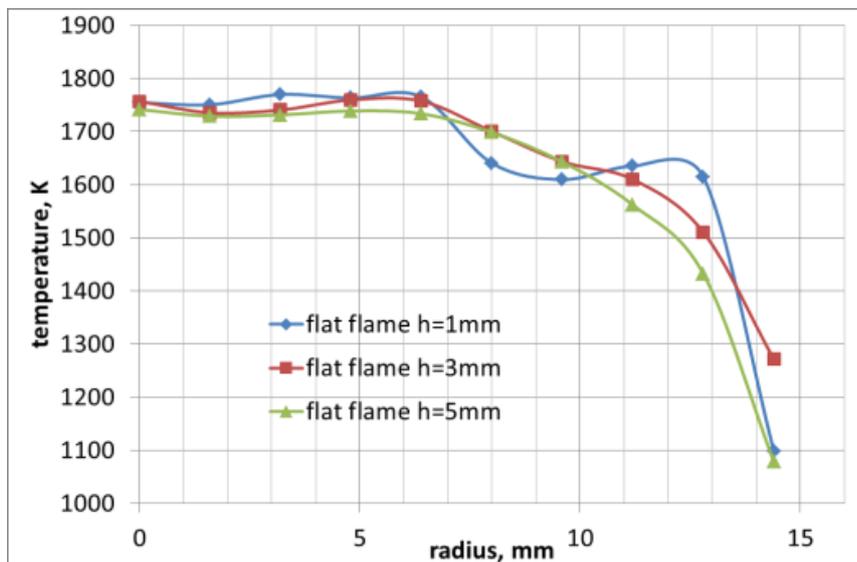


図5 平面火炎の温度分布

3. 実験装置

(1)初代実験炉

図 6、図 7 に初代実験炉を、図 8 に初代実験炉火炎形状を示す。これは均質加熱を目指して制作した炉である。

縦×横×深さ：50mm×50mm×50mm の大きさのフレームをアルミで製作し、金属メッシュで壁面を作った。これを、アルミ製のボックスに入れガスを分散させるために、隙間にパーライトを詰め、アルミ板を底面のガス噴出口と焼結金属の間に設置した。

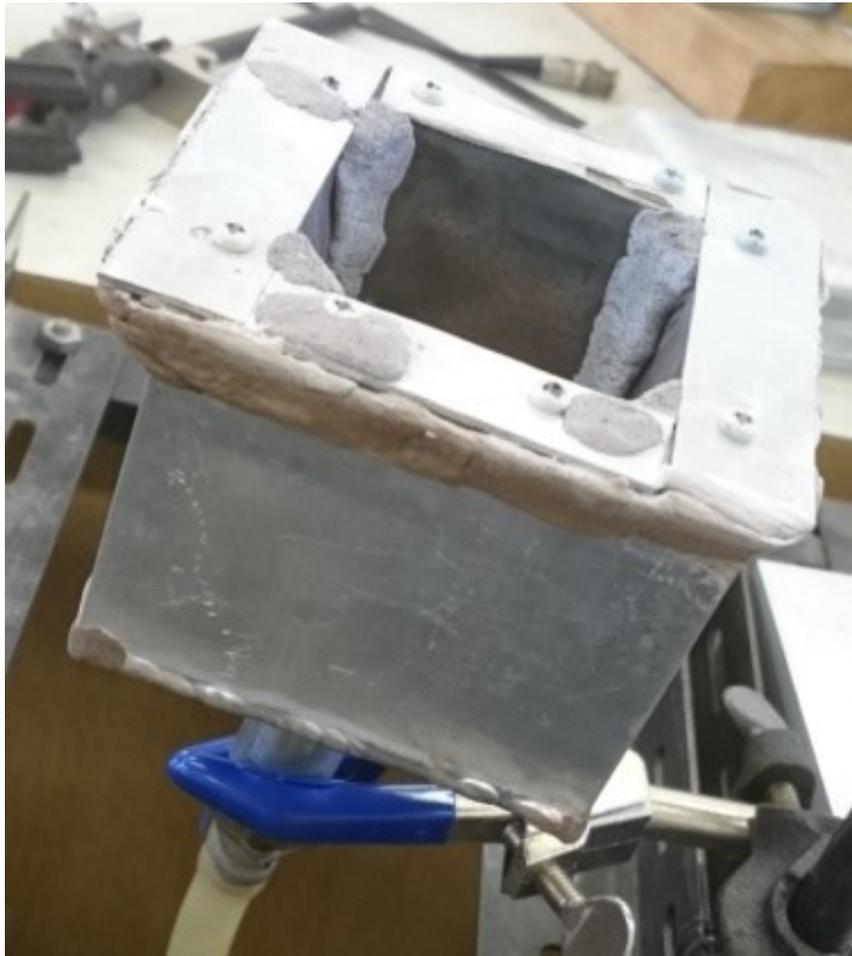


図 6 初代実験炉

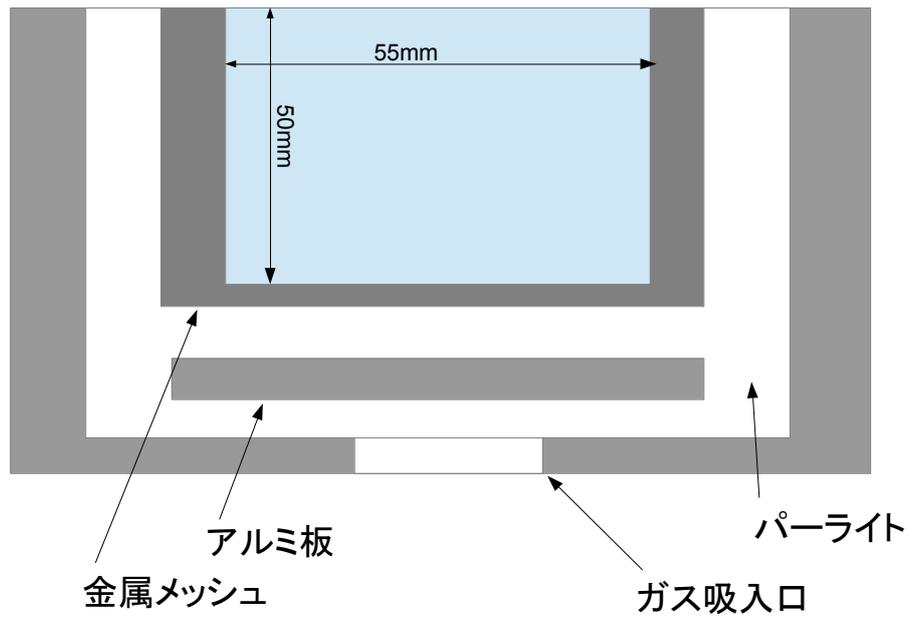


図7 初代実験炉断面

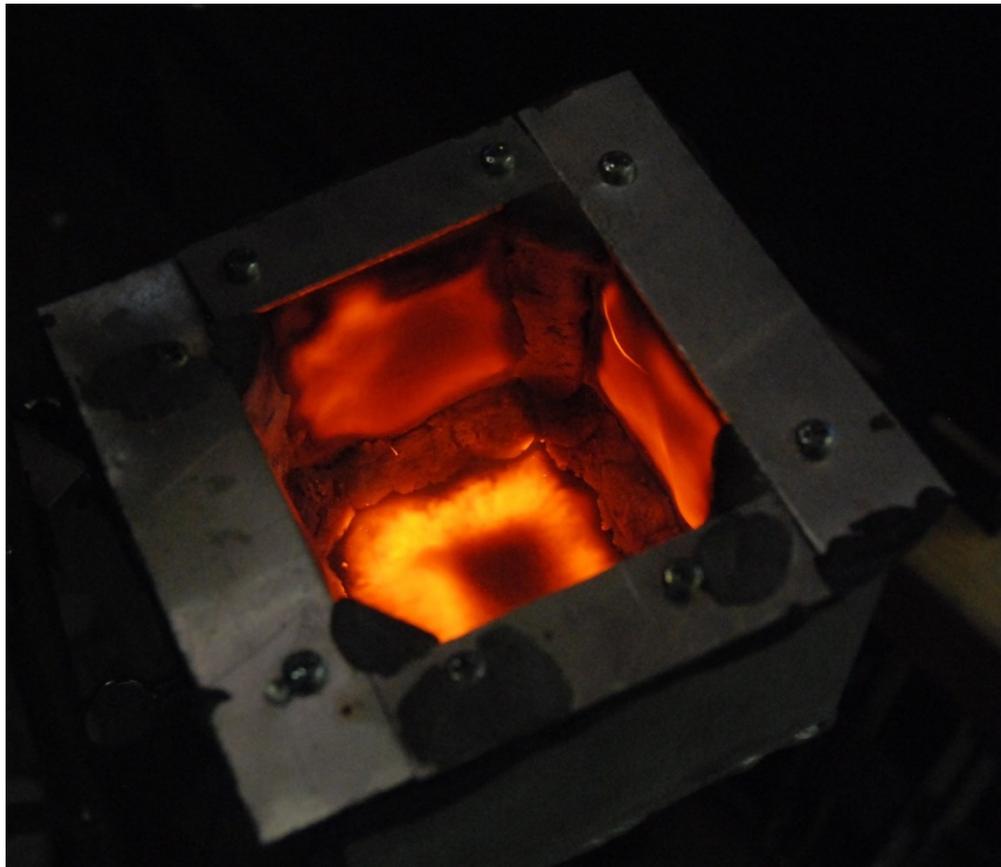


図8 初代実験炉火炎形状

(2)水冷機

図 9, 図 10 に水冷機を示す。これは炉の開口部からの熱量を測定するために作成した。水が効率良く熱を受け取るために、約 15mm ごとにアルミ板で壁を作り流路を形成した。



図 9 水冷機

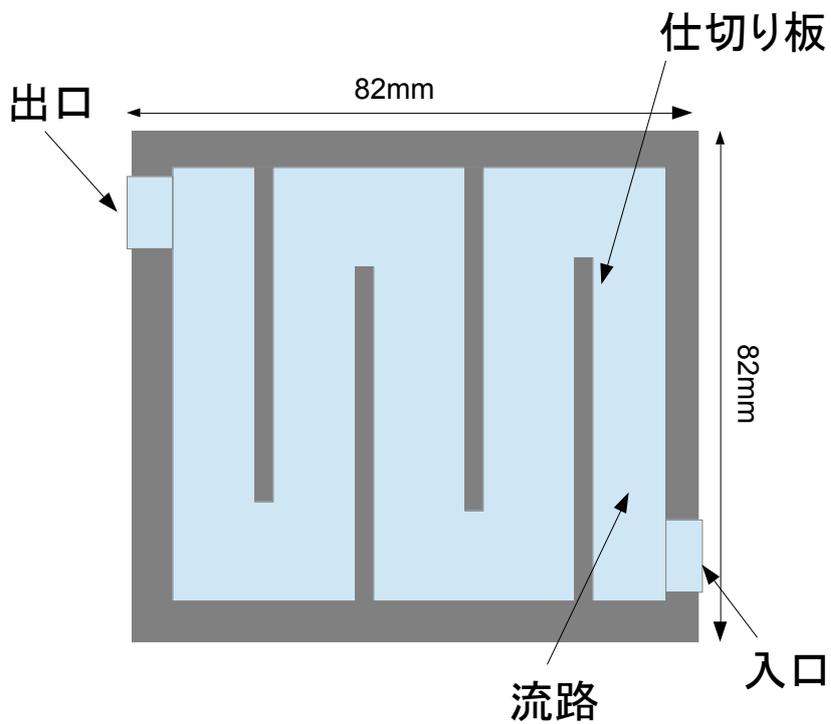


図 10 水冷機内部構造

(3)2 代目実験炉

図 11、図 12 に 2 代目実験炉を、図 13 に 2 代目実験炉火炎形状を示す。これは初代実験炉が熱に耐え切れなかったため、金属メッシュから焼結金属へ材料を変更したものである。

縦×横：50mm×50mm の大きさの焼結金属板をロウ付けし、箱を作った。これを、アルミ製のボックスに入れガスを分散させるために、隙間にパーライトを詰め、アルミ板を底面のガス噴出口と焼結金属の間に設置した。

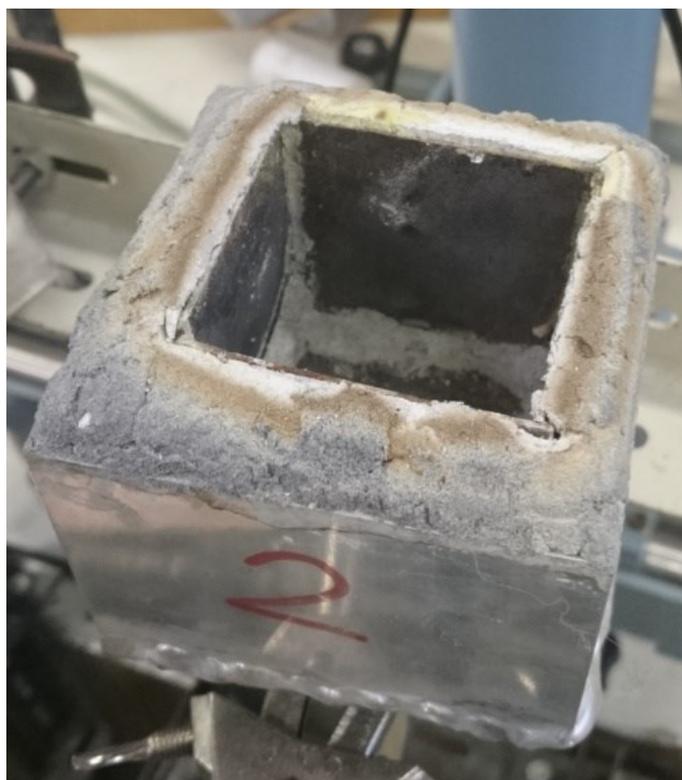


図 11 2 代目実験炉

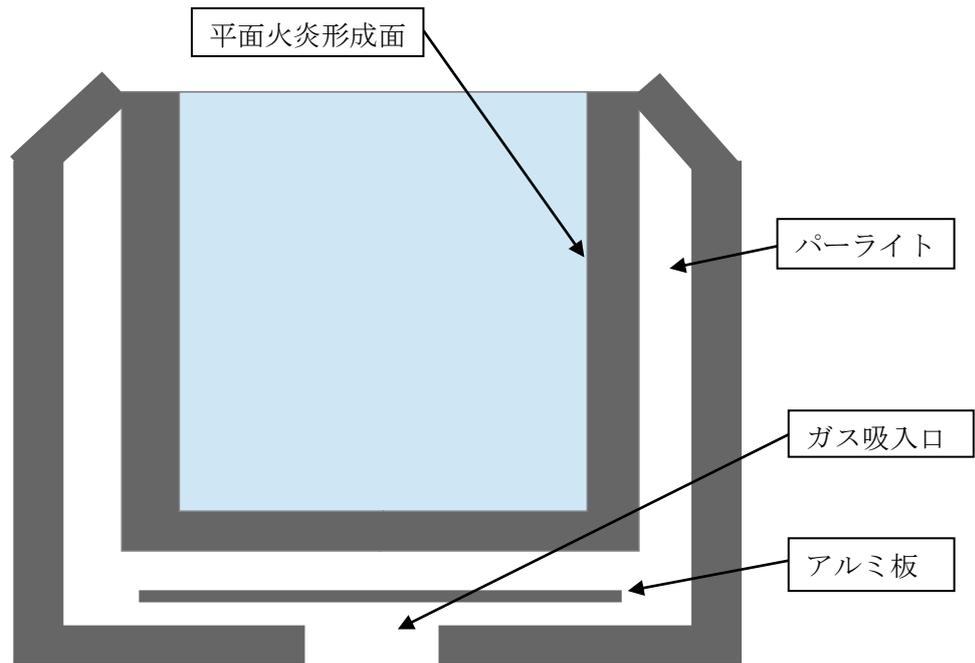


図 12 2 代目実験炉断面図



図 13 2 代目実験炉火炎形状

(4) 平面火炎形成バーナー

図 14 に平面火炎形成バーナーを、図 15 に平面火炎形成バーナー火炎形状を示す。これは、金属メッシュで火炎形成面が作成されており、縦×横：130mm×130mm の火炎面が形成できる。

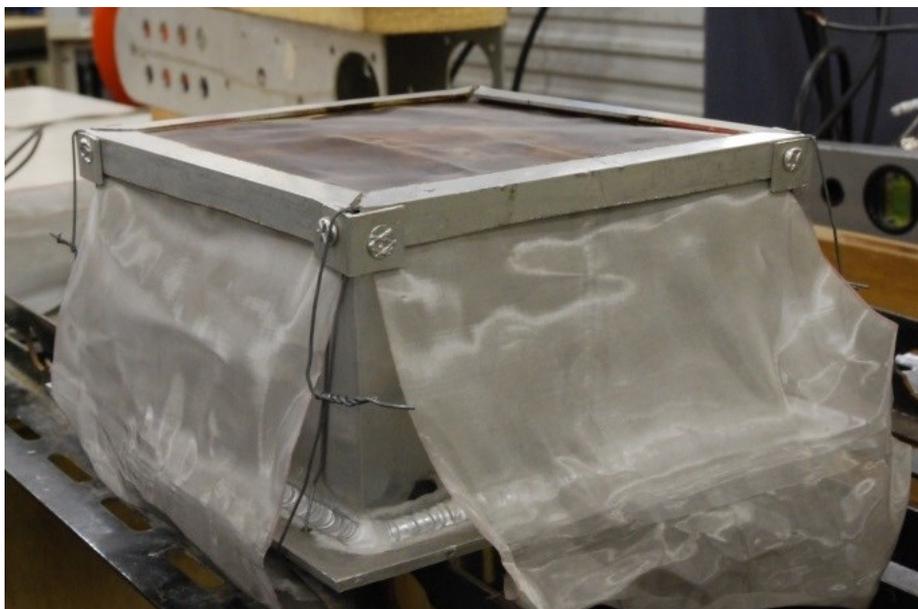


図 14 平面火炎形成バーナー

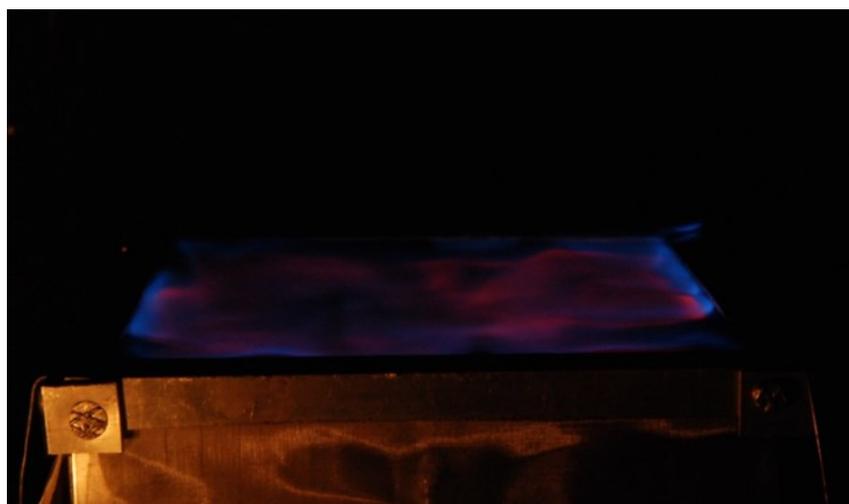


図 15 平面火炎形成バーナー火炎形状

(5) ロケットストーブ

図 16 にロケットストーブを図 17 にロケットストーブ概略図を示す。これは、暖気の上昇気流を利用して、外気を吸い込み効率的な燃焼を目指したものである。



図 16 ロケットストーブ

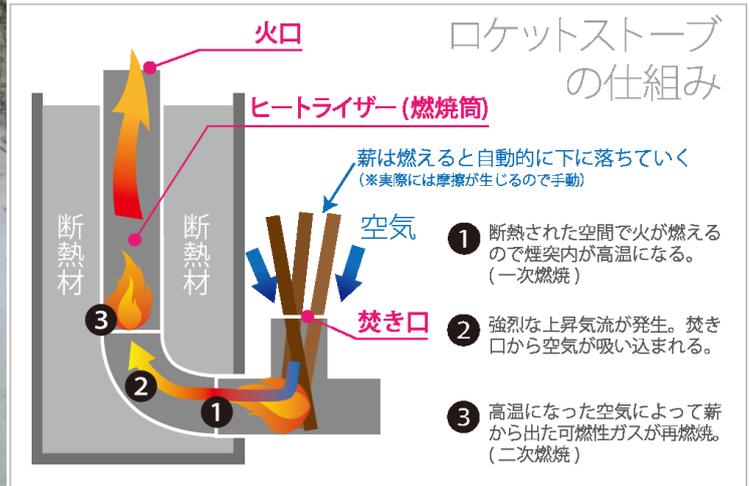


図 17 ロケットストーブ概略図^[1]

4. 実験方法

(1) 実験炉の熱量計測

初代実験炉にメタン 1.4L/min、空気 15L/min を予混合で流し込み着火する。この時、初代実験炉の上面に水冷機を設置し水冷機の水の流量を測定したあと、入口温度と出口温度を測定する。

これらより、水冷機によって持ち去られる熱量を計算し下記の放射熱量算出式(1)^[2]より水冷機の底面温度を導き出す。

$$\dot{Q}_i = \varepsilon E_{bi} A_i - \sum_{j \neq i}^n \varepsilon E_{bj} A_j F_{ji} \quad (n=1, 2, \dots) \quad \dots (1)$$

$$E_b = \sigma T^4 \quad \dots (2)$$

ε :放射率=1 (開口部に水冷機を置くため黒体放射とする)

σ :ステファン・ボルツマン定数=5.67×10⁻⁸ w/(m²・K⁴)

T:壁面温度=K A:面積=m² F:5面の形態係数=0.2

形態係数は以下のように求められる。まず向かい合った二つの正方形の各面は図 18 による。実験炉

の形状を立方体とみなすと各辺の長さが等しいため、 $a/b=1$ 、 $b/c=1$ となる。この交点を結ぶと形態係数は 0.2 となる。次に直角に接する各面は図 19 より、同様に求めると形態係数は 0.2 となる。

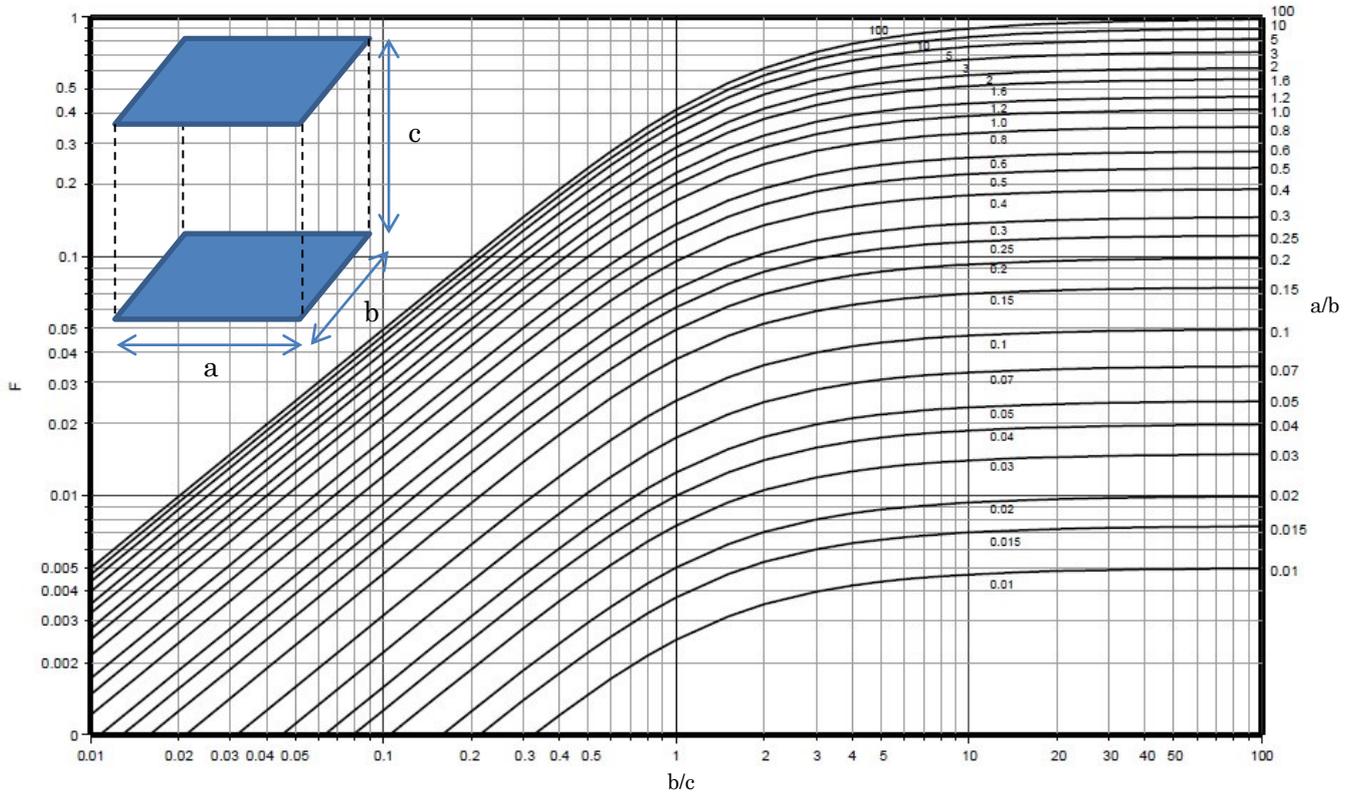


図 18 向かい合う二つの長方形の形態係数^[3]

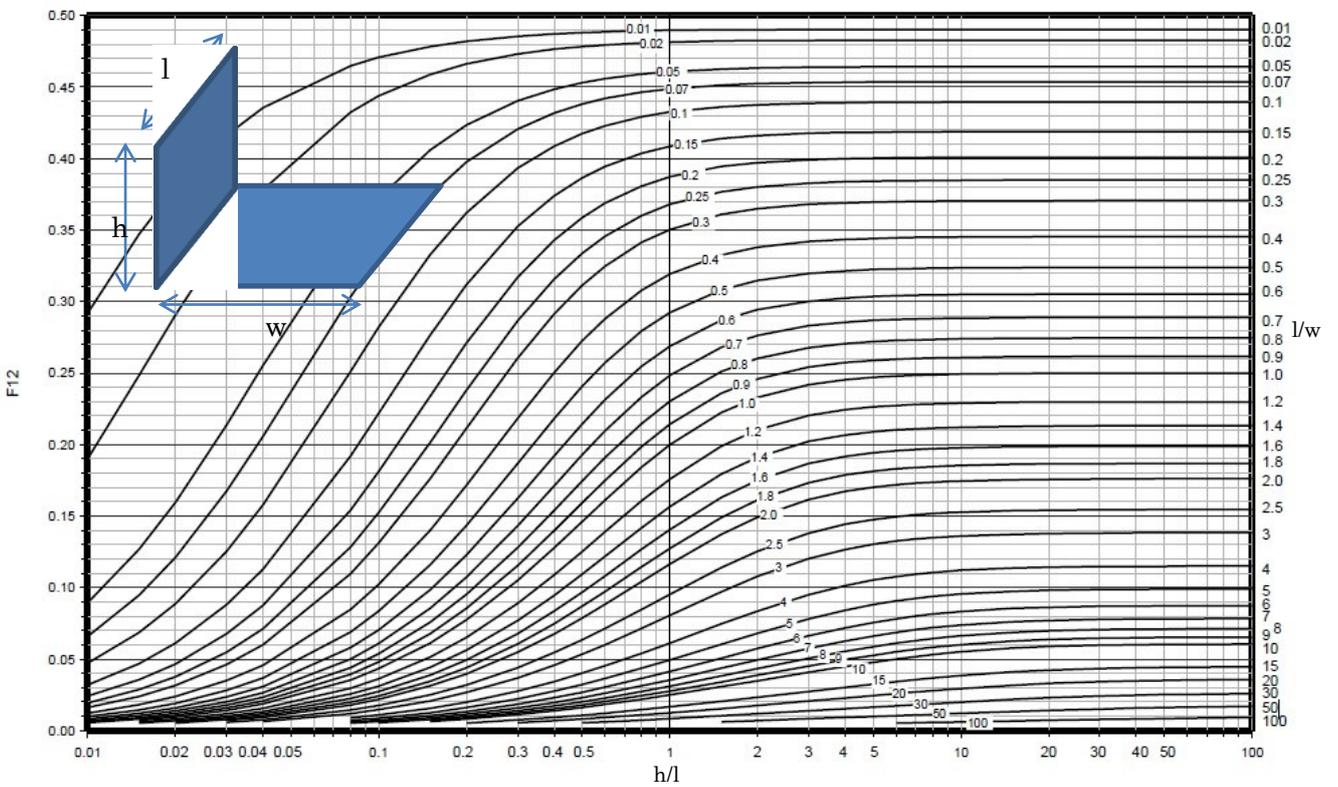


図 19 直角に面する二つの長方形の形態係数^[3]

(2)平面火炎形成バーナーの温度効果

[1]空間温度測定

一番、温度が高くなる点を火炎面とし、少しずつ距離を離して熱電対で温度を測定した。50mm までは5mm 刻みで計測し、50mm からは20mm 刻みで250mm まで計測する。

[2]セラミック温度測定

平面火炎形成バーナーの枠を基準として、セラミック板を枠から15mm の地点より10mm ずつ離して35mm の地点までの温度を熱電対で計測する。

(3)実験炉内の温度分布の測定

2代目実験炉と熱電対を用いて壁面から約1cm、熱電対を離して図20に示すように炉面をそれぞれ1面、2面、3面、4面とし各面の中央と隅、そして炉の中央部分を上部、中部、下部にわけ、計27箇所温度を測定する。この時のガス流量はメタン1.7L/min、空気19L/minとし、予混合で燃焼する。

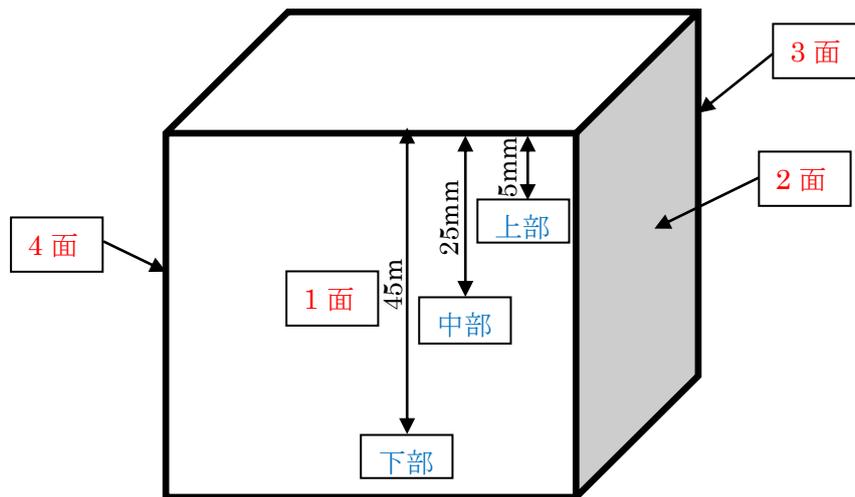


図20 炉内模式図

(4)実験炉内の受熱効果の測定

2代目実験炉を使用し、さつま芋を焼く。この時のガス流量はメタン1.7L/min、空気19L/minとし、10分間、加熱する。また、平面火炎形成バーナー、ロケットストーブを用いて同様に、さつま芋を焼き、焼け具合の比較を行う。平面火炎形成バーナーのガス流量はメタン3.7L/min、空気27L/minの予混合で行う。

(5)火炎温度コントロール

平面火炎形成バーナーを使用して、メタンと窒素の混合ガス3.7L/min、空気27L/minを予混合で燃焼する。そして、メタンの流量が3.7L/minの時をメタン100%として窒素を徐々に混入していき、窒素が0%、10%、20%の時の火炎面の温度を計測する。(この時の火炎面とは火炎内で温度の一番高い点とする。)

また、2代目実験炉を使用して、メタンと窒素の混合ガス1.7L/min、空気19L/minを予混合で燃焼す

る。そして、メタンの流量が 1.7L/min の時をメタン 100%として窒素を徐々に混入していき、窒素が 0%、10%、20%の時の図 20 で示した中央部分の中部の温度を計測する。

5.実験結果

(1) 実験炉の熱量計測結果

水冷機の結果を下記に記す。

水量 3.523g/sec 入口温度 28.7°C

熱量 0.3141kJ/sec 出口温度 50.0°C

これらより、水冷機の壁面温度を入口温度と出口温度の平均：312.35K とし、炉の壁面温度を平面火炎面の実測温度：1312K として(1)式の T に代入したとき熱量 Q は 0.2657kJ/sec となる。

$$\dot{Q}_{out} = \sigma T_{out}^4 A_{out} - \sigma \left(\sum_{j \neq i}^n T_j^4 A_j F_{ji} \right)$$

$$= 5.67 \times 10^{-8} \times 312.35^4 \times 3.025 \times 10^{-3} - (5.67 \times 10^{-8} \times 1312^4 \times 1.591 \times 10^{-3} \times 0.2) \times 5$$

$$= 265.7 [W]$$

$$= 0.2657 [kJ/sec]$$

実測値の方が 18.2%ほど大きくなっているのは、熱電対の輻射による温度補正を行っていないため、火炎面の実測温度が低くなっているためだと考えられる。これより、この実験炉は黒体輻射に近い加熱が行われていることが確認できた。

また、6面からの加熱と仮定した場合、(1)式は Q=0 となり熱平衡状態が保たれると考えられる。

(2) 平面火炎形成バーナーの温度効果

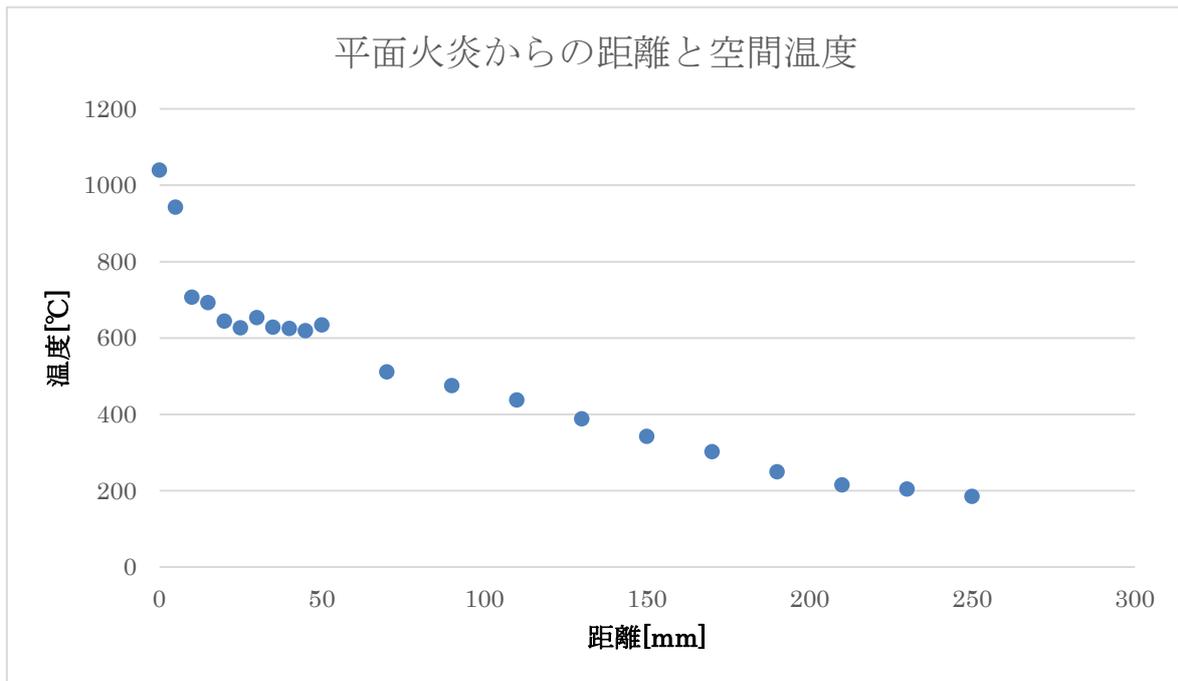


図 21 平面火炎からの距離と空間温度

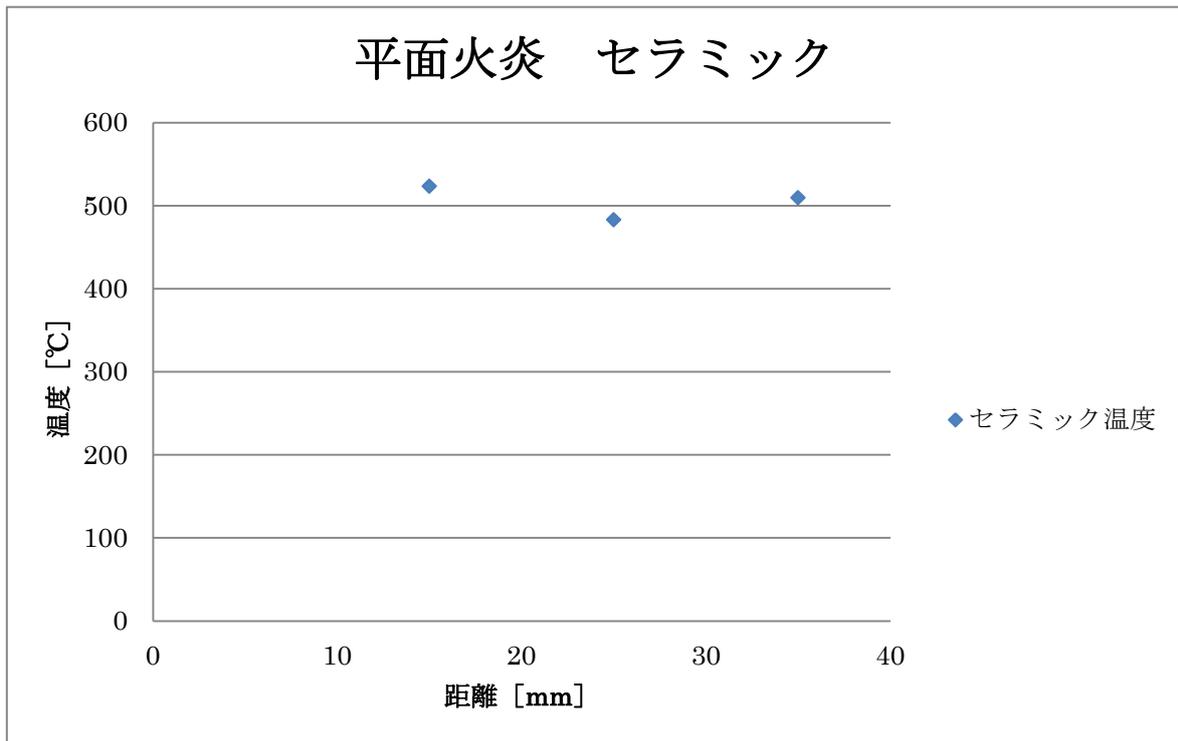


図 22 平面火炎からの距離とセラミック温度

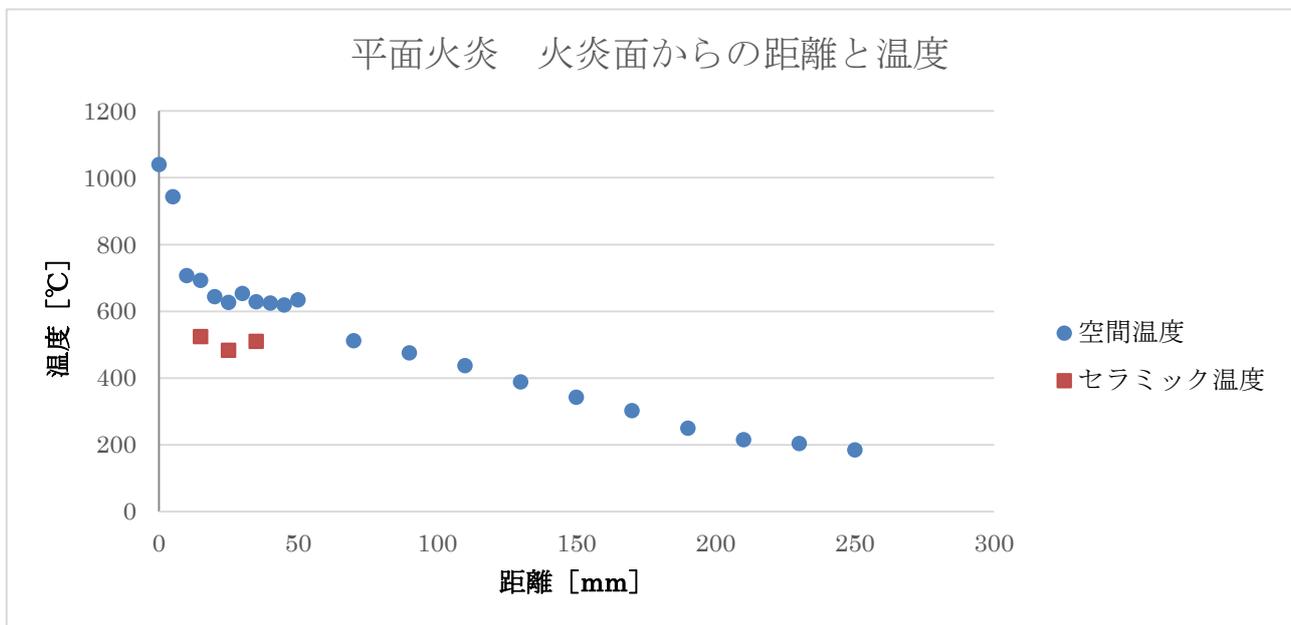


図 23 平面火炎からの距離と温度

平面火炎からの距離と空間温度を図 21 に、平面火炎からの距離とセラミック温度を図 22 に、空間温度とセラミック温度の比較を図 23 に示す。

図 21 を見ると火炎面の 10mm から 50mm の距離では、ほぼ一定になっている。これは、輻射により熱伝達が行われているためだと考えられる。また、0mm から 5mm は火炎面の影響で温度が高くなっていると考えられる。50mm より下流では空気の流入による温度低下が考えられる。

図 22 は、距離を離してもセラミックがほぼ一定の温度になっていることがわかる。

図 23 を見ると、セラミック温度と空間温度ではセラミック温度が 100℃ほどさがることが分かる。

(3)実験炉内の温度分布の測定結果

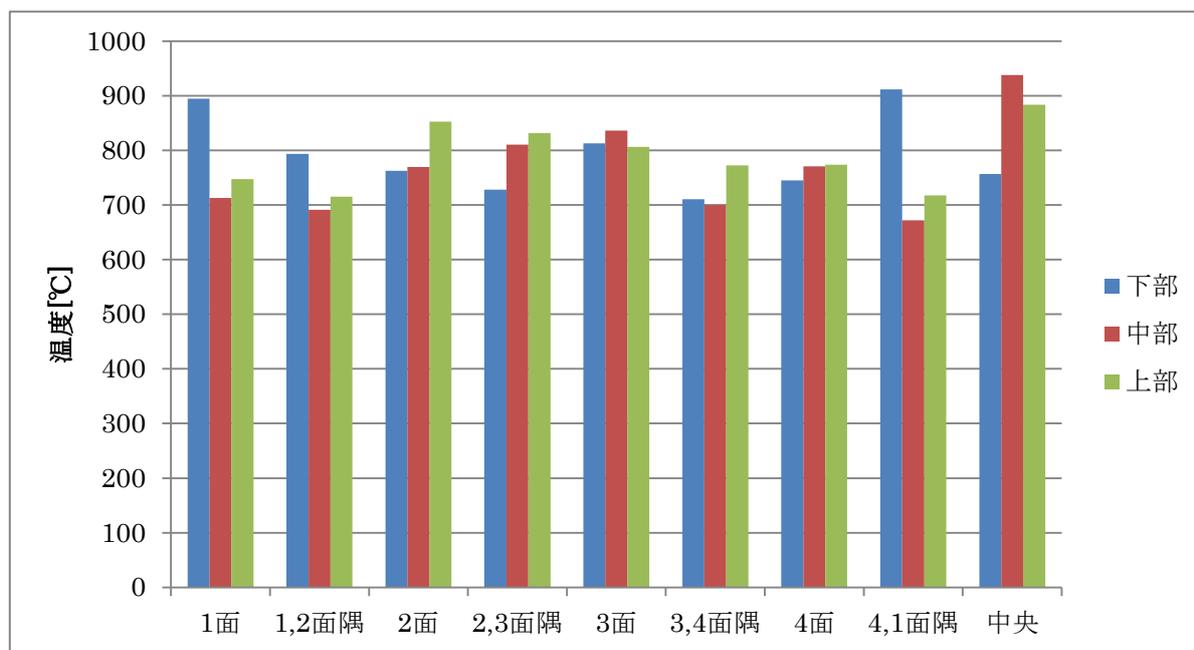


図 24 炉内温度分布

炉内の温度分布を図 24 に示す。

図 24 から分かるように炉内はおおよそ 700~900℃で保たれており、炉内の温度分布は均一と言っても良いだろう。これより、実験炉は均質加熱ができることが分かった。

(3) 受熱効果の測定結果

1. 平面火炎形成バーナー



図 25 さつま芋加熱中 1



図 26 加熱後外観 1



図 27 加熱後断面 1

図 25 にさつま芋も加熱中の写真を、図 26 に加熱後の外観を、図 27 に断面図を示す。図 27 の芋の断面の直径は約 35mm である。

図 25 を見ると分かるように芋の上面のコゲが薄いことが分かる。しかし、上面以外の部分は少しばらつきがあるが、コゲの厚さが一定なことが分かる。これは、図 21 を見ても分かるように芋の直径程度の高さ 35mm までは高温が維持されているためだと考えられる。

2. 実験炉



図 28 さつま芋加熱中 2



図 29 加熱後外観 2



図 30 加熱後断面 2

図 28 にさつま芋も加熱中の写真を、図 29 に加熱後の外観を、図 30 に断面図を示す。

図 30 を見ると、コゲの厚さがほとんど一定になっていることが分かる。このことから、さつま芋は炉内で均等に加熱されたことが分かる。

3. ロケットストーブ



図 31 加熱後外観 3



図 32 加熱後断面 3

図 31 に加熱後の外観を、図 32 に断面図を示す。

図 32 を見ると下面しかコゲができてないことが分かる。これは、燃焼ガスによる加熱のため上面にガスが当たっていないためだと考えられる。

(4) 火炎温度コントロール

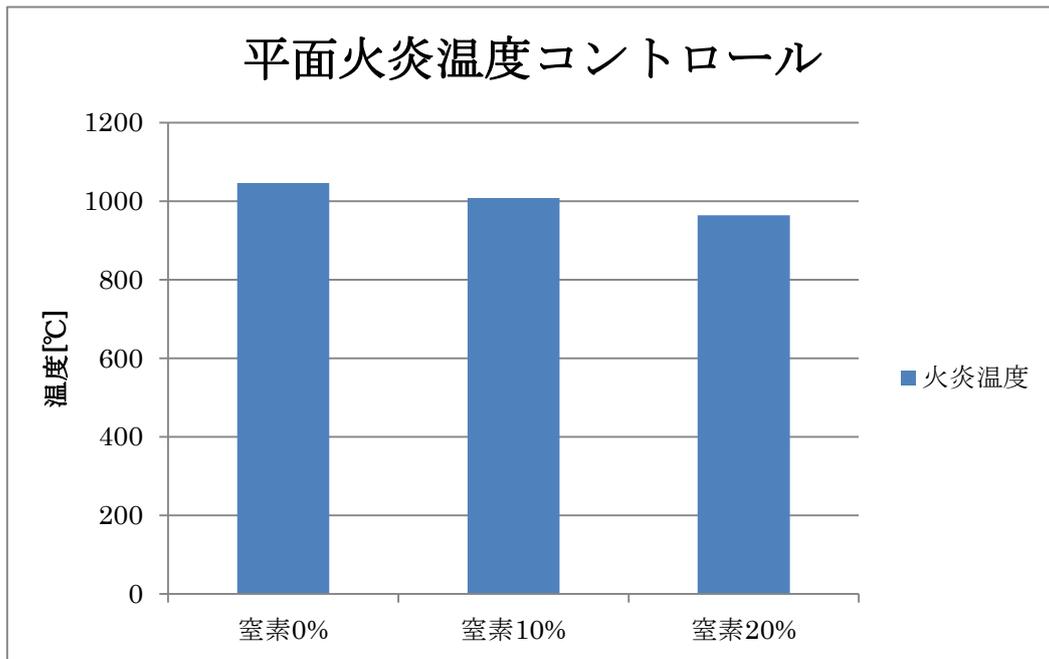


図 33 平面火炎温度コントロール

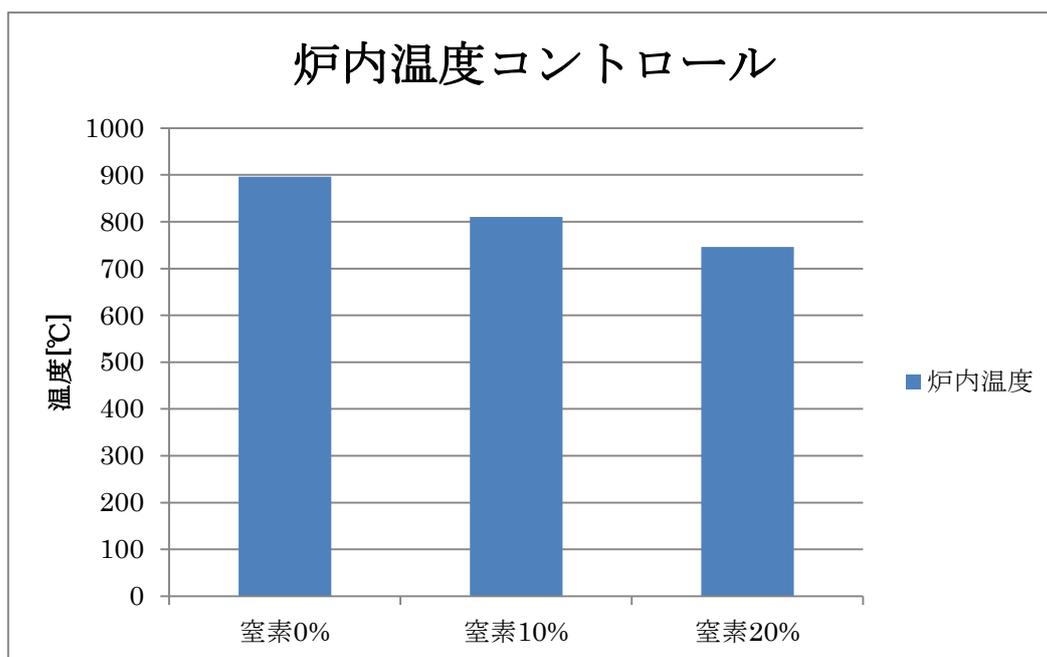


図 34 炉内温度コントロール

図 33 に窒素を混ぜた割合ごとの火炎温度を、図 34 に窒素を混ぜた割合ごとの炉内温度を示す。

図 33 を見ると窒素を混ぜると少しずつ火炎温度が低くなっていることが分かる。これより、窒素を混ぜることで火炎の温度がコントロールできることが分かった。

また、図 34 を見ると分かるように窒素を混ぜてやることで炉内の温度が下がっていることが分かる。これより、炉の温度調整ができることが確認された。

6.まとめ

- (1)今までの実験で平面火炎による均質加熱炉の実現の見通しがたった。
- (2)均質な加熱を必要とした金属の焼入れ等を電気炉ではなく、よりエネルギー効率の高い燃焼炉である平面火炎による加熱炉でも代替できるようになると考えられる。
- (3)家庭では全面から均質に加熱できるうえ、窒素をまぜることで温度コントロールも簡単にできるため次世代のオープンとしておいしい料理を作ることができるようにになると考えられる。

謝辞

本験は株式会社八光電機様より実験費の助成を受け賜りましたまた熱の実験コンテストという貴重な場を設けて頂き深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] <http://flowscha.blogspot.jp/2014/11/blog-post.html>
- [2] 「伝熱工資料」、日本機械学会編、2003 年
- [3] JSME テキストシリーズ出版分科会、「伝熱工学」、日本機械学会編、2007 年