

火炎や燃焼過程に及ぼす強磁場の影響

近畿大学理工学部 水谷幸夫, 湊端 学, 松岡淑夫, 大倉義正, 内海将隆, 篠田修司

A. ブンゼン火炎の燃焼・排出特性

1. まえがき

火炎や燃焼過程が電場や磁場からどのような影響を受けるのかは興味深い問題で、いくつかの参考書や解説記事で取上げられている。中でも電場の影響については数多くの研究がなされており、解明が進んでいるが、磁場の影響については研究が少なく、不明の点も少なくない⁽¹⁾。火炎や燃焼過程に及ぶ磁場の作用は、(1) 燃焼反応に及ぶ直接的な効果、(2) 勾配磁場による体積力の間接的な効果、(3) 運動する荷電粒子に働くローレンツ力の間接的な効果、の三つに分けて考えるべきである⁽¹⁾。

(1) の直接的な効果については、阿部と林⁽²⁾が文献データを用いて検討しているが、連鎖反応の形で進行する燃焼反応の主要部分への磁気効果は、2T 程度の磁場では、エネルギー的に見て期待できないとしている。(2) の勾配磁場による体積力の効果については、Ueno と Harada⁽³⁾, Wakayama⁽⁴⁾, その他の研究者によって火炎の変形効果が、また Ueno と Iwasaka⁽⁵⁾によって磁場空洞内火炎に対する磁気カーテン効果が観察されているが、これはすべて、火炎内外の不均一な濃度を持つ酸素に及ぶ勾配磁場の体積力によるもので^(1,6)、数値解析も行われている⁽⁷⁾。(3)のローレンツ力に関しては、電場の効果は観察が容易で、よく調べられているが、磁場の効果は通常の火炎では、ほとんど確認されていない⁽¹⁾。

ここでは最大磁場強度 5T の超電導マグネットを用いて層流ブンゼン火炎の燃焼特性と排出特性、特に燃焼速度と窒素酸化物排出特性に及ぶ磁場の効果を調べた。

2. 実験装置および方法

使用した超電導マグネット（東芝製，TM-5VSP）の構造の概略図を図1に示す。超電導コイルの中心に、常温ボアと呼ばれる内径 60mm，長さ 500mm のステンレ

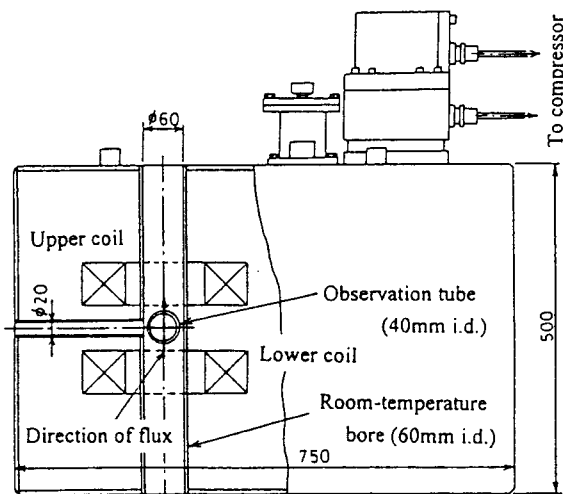
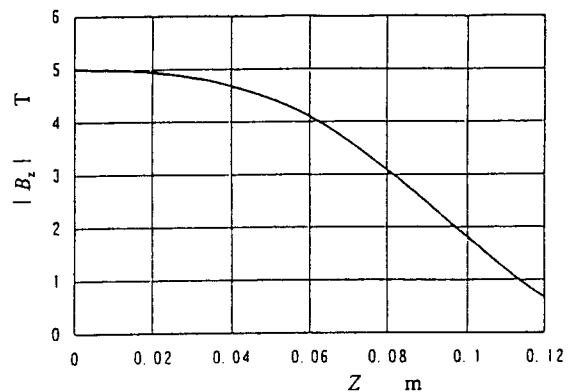
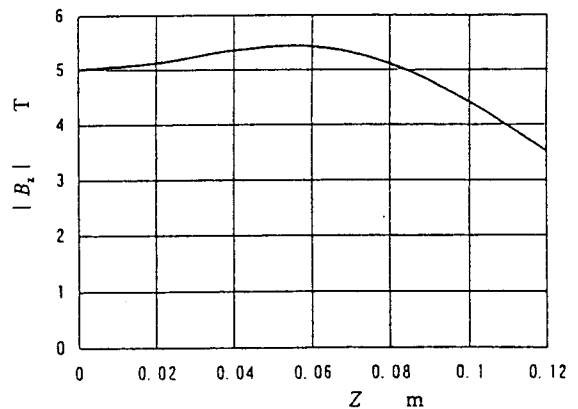


Fig.1 Structure of super-conducting magnet



(a) Radial pattern in the central cross section.



(b) Pattern along the central axis.

Fig.2 Distribution pattern of magnetic flux density, B_z

ス鋼管が鉛直に通され、その中央、長さ約 200mm の部分に、上向きにほぼ一様な磁場が形成される。磁場強度を上限の 5T に設定したときの磁束密度 B_z の分布を図 2 に示す。原点を常温ボアの中央、軸上にとり、半径方向に R 軸、上方に Z 軸をとっている。

常温ボアの中央部を横から観察するために、内径 40mm のステンレス鋼管（観測筒）が水平に貫通しているが、そのためにコイルは上下スプリットタイプとなっている。さらに両者に直交する内径 20mm のステンレス鋼管が取付けられている。常温ボアの表面温度は 100°C 以下に保たなければならないので、内径 51mm の黄銅管をスリーブとして挿入し、温度を監視した。バーナはスリーブ下端から上向きに挿入した。これは内/外径が 10/12mm、長さ 310mm の黄銅管で、 R - Z 方向トラバーサに載せられている。燃料にはプロパンを使用した。

火炎の形状と寸法の観測はシュリーレン光学系を用いて行った。画像をコンピュータに取込んで単色化・二値化した上で、火炎面形状とその外部の温度こう配部外縁の輪郭を決定した。火炎内外のガス温度の分布は、素線径 0.2mm の Pt/Pt-Rh 裸熱電対をスリーブ上端から挿入し、水平と上下方向に 3mm ずつトラバースして測定した。熱電対の出力は 20 秒間の最高値と最低値を測定した。放射と伝導に対する補正は行っていない。

火炎内外の窒素酸化物 (NO と NO_x) の濃度分布は内・外径 3mm と 5mm の無冷却石英管をトラバース装置に装着してスリーブの上端から挿入し、1 l/min の割合でサンプリングの上、化学発光式分析装置で分析した。測定はバーナポート上方 10, 50, 100mm の位置で、半径方向にプローブを 1mm ずつトラバースしながら行った。

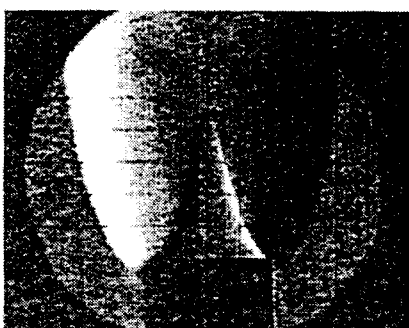
いずれの測定も、磁場を掛けない場合と 5T の磁場を掛けた場合について行った。

3. 火炎の形状と寸法に及ぼす磁場の影響

図 3 に火炎のシュリーレン写真の例を示す。このような一連の写真を単色化および二

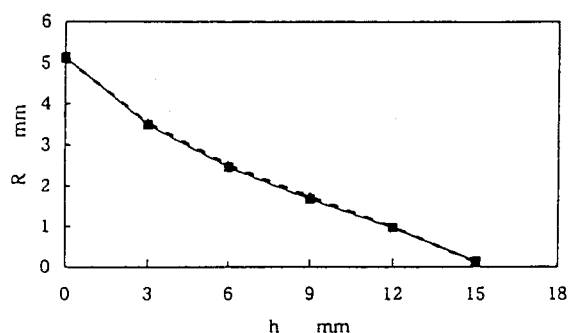


(a) In case of a magnetic field applied

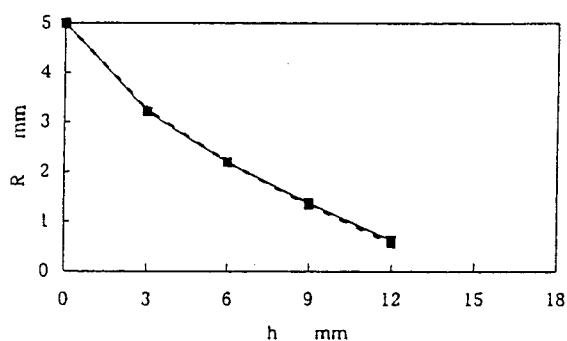


(b) In case of no magnetic field applied

Fig.3 Typical examples of schlieren photograph (Mixture flow rate: 5.0l/min, average velocity: 0.74m/s and equivalence ratio: 1.0)



(a) Equivalence ratio: 0.90.



(b) Equivalence ratio: 1.00.

Fig.4 Effect of magnetic field on the flame contours (Mixture flow rate: 5.0l/min and average velocity: 0.74m/s)

値化し、磁場を掛けた場合と掛けない場合の火炎面の輪郭を比較したものが図4である。磁場の有無は火炎面の輪郭に、ほとんど影響していない。混合気の体積流量を火炎面の面積で割った値が燃焼速度になるから⁽⁶⁾、混合気の流量を一定に保った火炎面の輪郭が変化しないということは、磁場の有無によって燃焼速度が変化しないことを意味する。そして、このことは、Abe と Hayashi の推論⁽²⁾が 5T の一様磁場にも当てはまることを示唆している。

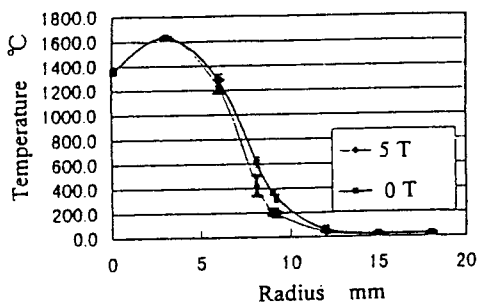
4. 火炎内外の温度分布に及ぶ磁場効果

図5に、磁場の有無によってガス温度分布が変化する様子を示す。図中、縦の線分は、温度の変動波形が安定した後 20s 間の変動範囲を示している。磁場を掛けても温度のピーク値は変化せず、ピークからの降下率が多少増加しているだけである。燃料と酸化剤の組合せが一定ならば、燃焼速度は火炎温度に支配されることが知られているので⁽⁸⁾、温度のピーク値、すなわち火炎面の温度が磁場の影響を受けないということは、燃焼速度が磁場の影響を受けないということと整合している。さらには、2T 以下の磁場強度では、高速燃焼反応が磁場の影響を受けないという Abe と Hayashi⁽²⁾の推論が 5T の一様磁場にも当てはまることも示唆している。

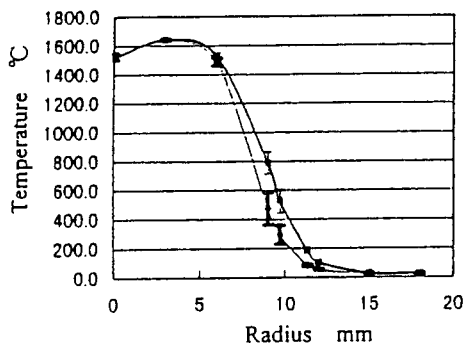
なお、磁場を掛けた場合に温度こう配がわずかに増加するのは、温度こう配に対応する酸素の濃度こう配が図2(a)の半径方向磁場こう配と干渉して、内向きの弱い二次流れが発生するためと考えられる。

5. 火炎内外の窒素酸化物の濃度分布に及ぶ磁場効果

層流ベンゼン火炎に 5T の磁場を掛けるこ

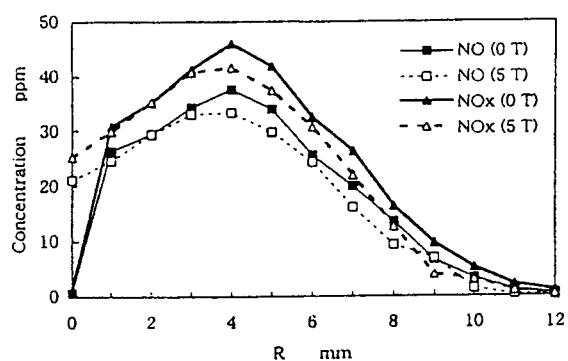


(a) Height: 3mm.

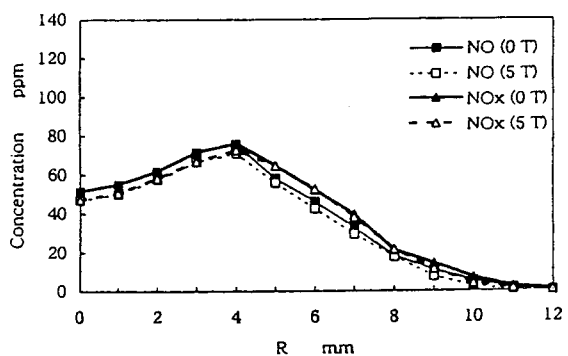


(b) Height: 9mm.

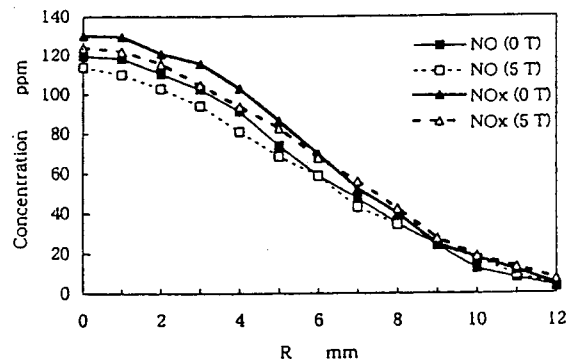
Fig.5 Effect of magnetic field on the gas temperature patterns (Mixture flow rate: 5.0l/min, average velocity: 0.74m/s, equivalence ratio: 1.0)



(a) Equivalence ratio: 0.90 and Height: 10mm.



(b) Equivalence ratio: 1.00 and Height: 10mm.



(c) Equivalence ratio: 1.00 and Height: 50mm.

Fig.6 Effect of magnetic field on the concentration pattern of nitrogen oxides (Mixture flow rate: 5.0l/min and average velocity: 0.74m/s)

とによって、火炎内外の窒素酸化物 (NO と NO_x) の濃度分布がどのように変化するかを調べた。その結果を混合気流量が 5.0l/min (平均流速 0.74m/s) の場合について、図 6 に示す。NO と NO_x の濃度差は、それぞれの絶対値に比べて十分に小さい。これは、生成される窒素酸化物の大部分は NO で、NO_x の割合は 18%以下であることを意味している。そこで、以後は NO_x のデータのみに注目して、議論を進めて行く。

まず当量比 0.9 に対する図 6(a)を、当量比 1.0 に対する図 6(b)と比較すると、全体的に後者が前者のほぼ 2 倍のレベルになっている。しかし、磁場の効果は小さく、10%以下にすぎない。図 6(a)において磁場を掛けると、火炎の外側で NO_x 濃度が僅かに低下しているが、温度こう配が変化したことと同様、内向きの二次流れによる可能性が高い。

つぎに、バーナポートから 10mm の高さで得られた図 6(b)を 50mm の高さで得られた図 6(c)と比較すると、全体的に後者の火炎軸近傍で NO_x 濃度が非常に高くなっており、火炎先端より下流で NO_x が生成されていることが分かる。この NO_x 生成は磁場を掛けることによって幾分抑制されているように見えるが、これも内向きの二次流れが火炎軸付近の流れを上向きに加速して、反応時間を短縮させた結果と見ることもできる。

6. 結 論

(1) 5T 程度の磁場を掛けても、火炎面の輪郭はほとんど変化しない。したがって、燃焼速度も磁場の影響を受けないと言える。

(2) 磁場を掛けても温度のピーク値 (火炎面温度) は変化せず、外周部に向けての温度の降下率が多少、増加するだけである。

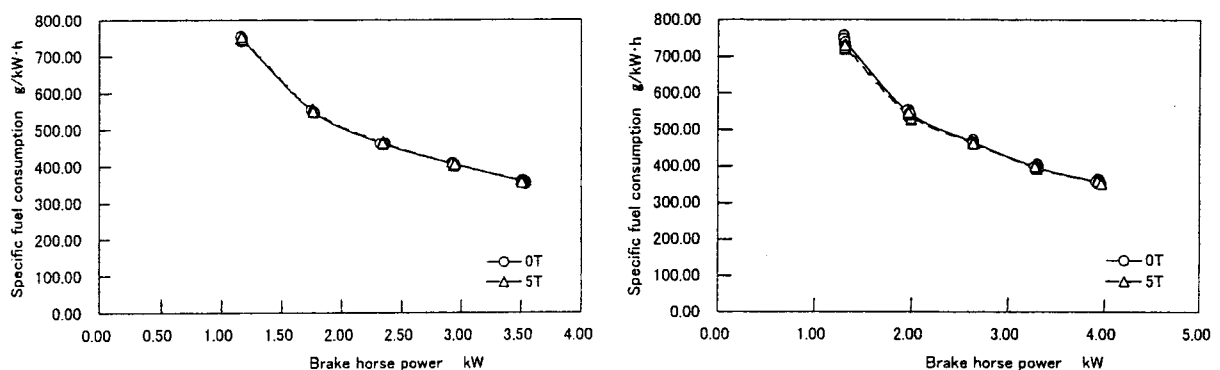
(3) 5T 程度の磁場は窒素酸化物の生成を僅かに抑制するように見える。しかし、二次流れが誘起されていることを考慮すると、幾分割り引いて考える必要がありそうである。

B. ガソリンエンジンの燃料消費率と排出特性

1. まえがき

ガソリンエンジンの燃料供給ラインに強力な永久磁石を装着し、燃料の磁化処理を行うと、営業運転中のタクシーの燃料消費率に顕著な改善効果が見られたとか、ある大学の研究室で汎用小型エンジンについて実験を行ったところ、有意な性能改善効果が見られたという報告があり⁹⁾、特許の出願例も多いようである。その真偽を確かめるべく、単シリンダー 4 サイクル農業用ガソリンエンジン (三菱重工製 GM182L, シリンダー内径 68mm, ピストン行程 50mm, 排気量 181cc, 定格出力 3.3kW at 1800rpm, 最大出力 4.4 kW, 最大トルク 23.14N·m at 1400rpm) の燃料供給系を図 1 の超電導マグネットの常温ボアに通して、燃料消費率と窒素酸化物排出濃度の変化を測定した。

2. 実験装置および方法



(a) Engine speed: $n = 1600$ rev/min

(b) Engine speed: $n = 1800$ rev/min

Fig.7 Effect of fuel magnetization on the specific fuel consumption

吸・排気系には純正品をそのまま用い、エアクリーナ吸入孔に層流流量計（司測研 LFE-270LM）を接続して吸気量を測定し、排気は排気ダクトを通して屋外に排出した。動力の設定と測定にはエンジンと共通のベッドに設置した水動力計（東京 PLANT PTB-60）を用い、超電導マグネットとエンジンの距離を自由に変更できるように配慮した。実験には教育実験用の卓上計測盤（東京 PLANT TP302A）を用いて、負荷や回転数を指示させ、制御した。

燃料にはレギュラーガソリンを用いたが、これは燃料タンクからガラス製玉形計量管を経て、内径 7mm のビニールホースでエンジンの燃料ポンプに供給される。ビニールホースは磁場内で距離を稼ぐために螺旋形に巻かれて超電導マグネットの常温ボアを貫通するが、ボア内の長さは 139cm、それから燃料ポンプまでの長さは 148cm である。常温ボアから燃料ポンプまで距離が最短になり、かつ燃料の淀みが生じないように配慮した。燃料供給率は 10cc の消費時間を 3 回計時して、平均した。

窒素酸化物の排出濃度はマフラー上流の排気管に挿入した内径 4mm の黄銅管でサンプリングした排気をシリコンチューブで化学発光式分析計（堀場製作所 ES-C510SS サンプリングユニット & CLS-510A 分析計）に送り込んで、NO_x について分析した。

実験はクランク軸回転数 1600, 1700, 1800rpm に対しては 1/3 負荷から過負荷まで 5 段階、過回転の 1900 rpm に対してはその約半分の負荷を 3 段階掛けて行った。

3. 燃料消費率に及ぼす燃料磁化の効果

超電導マグネットに磁場を発生させない場合と 5T の磁場を発生させた場合の、負荷（エンジン出力）と燃料消費率の関係を、回転数 1600rpm と 1800rpm について図 7 に示す。この結果から、磁場を発生させても、させなくても有意差なしと判定した。この事情は回転数 1700rpm と 1900rpm についても同様である。

4. 窒素酸化物排出濃度に及ぼす燃料磁化の効果

超電導マグネットに磁場を発生させない場合と 5T の磁場を発生させた場合の、負荷（エンジン出力）と窒素酸化物排出濃度の関係を、回転数 1600rpm と 1800rpm について図 8 に示す。この場合も、磁場を発生させても、させなくても有意差なしと判定できる。この事情は回転数 1700rpm と 1900rpm についても同様である。

5. 結 論

ガソリンエンジンへの供給燃料を、螺旋状に 5T の一様磁場を通過させたが、燃料消費率や窒素酸化物排出濃度に有意差は見られなかった。このことから、燃料は磁化されなかったか、磁化されたが燃焼への影響が無かったか、のいずれかと考えられる。

文 献 (1) 水谷幸夫：化学工業，48-10 (1997-10), pp.814-818.

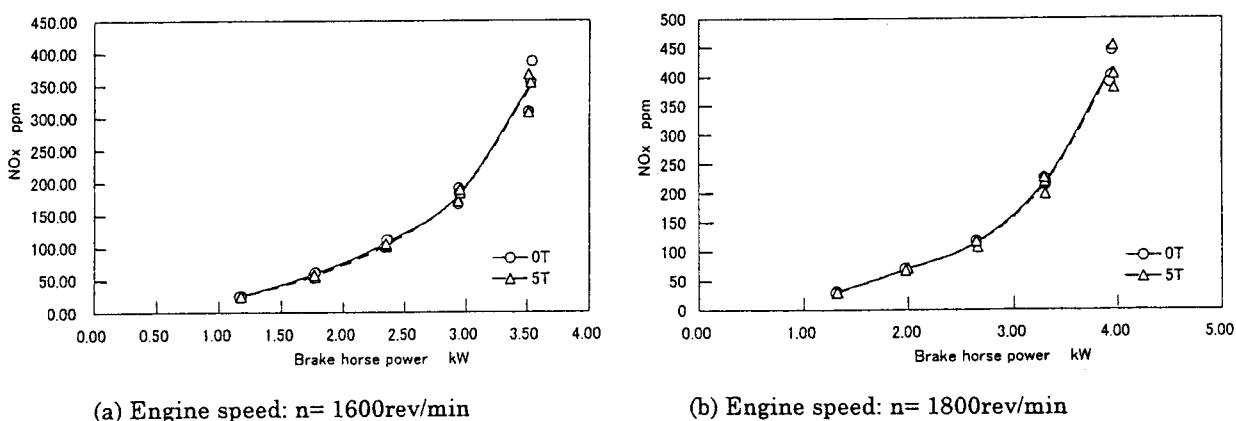


Fig.8 Effect of fuel magnetization on the NO_x concentration in the exhaust gas

- (2) Abe, H. and Hayashi, H.: Advanced Combustion Science (Ed. Someya, T.), Springer-Verlag, (1993), pp.294-300.
- (3) Ueno, S. and Harada, K.: IEEE Trans. Magnetics, MAG-18 (1982), p.1704.
- (4) Wakayama, N.I.: Combust. Flame, 93 (1993), pp.207-214.
- (5) Ueno, S. and Iwasaka, M.: J. Appl. Phys., 65 (1989), p.1243; 67 (1990), p.5901.
- (6) 若山信子：物質工学工業技術研究所報告, 3-5 (1995).
- (7) 木下進一・ほか3名：日本機械学会論文集, 64-628B (1998), 4256.
- (8) 水谷幸夫：燃焼工学・第2版, 森北出版, (1989), pp.77-87.
- (9) 飯本光男：磁気の効果と応用資料集, ベル教育システム (1988), pp.193-206.

[1996年～2000年の研究概要]

強さ 5T の、ほぼ一様な磁場を上向きに発生させる超電導マグネットの常温ボア中心部に、プロパン - 空気層流ブンゼン火炎を形成させた。そして、火炎の形状と寸法、燃焼速度、火炎内外のガス温度の分布と窒素酸化物の濃度分布などが、磁場を掛けることによって、どのように変化するかを観察した。その結果、以下のような事実を明らかにすることができた。

- (1) 強さ 5T 程度の一様磁場を掛けても、火炎面の形状や寸法はほとんど変化しない。このことから、燃焼速度もまた、磁場の影響を受けないと言える。
- (2) 強さ 5T 程度の一様磁場を掛けても、火炎温度のピーク値はほとんど変化しない。このことは、前項の燃焼速度が磁場の影響を受けないことと整合する。
- (3) 強さ 5T の磁場は、窒素酸化物の生成を、わずかに抑制するように見える。しかしながら、磁場の持つわずかな非一様性によって、弱い二次流れが誘起されることを考慮すると、この抑制効果は、いくぶん割引いて考える必要があるようである。
- (4) 以上の事実から、高速化学反応に支配される火炎伝ばのような現象は、強さ 5T 程度の磁場の影響をほとんど受けないが、低速化学反応に支配される窒素酸化物生成のような現象は、若干の影響を受ける可能性があると言える。

続いて、ガソリンエンジンの燃料消費率や窒素酸化物排出特性に及ぼす燃料磁化処理の影響を調べるために、単シリンダー4サイクル農業用ガソリンエンジンの燃料供給ラインを螺旋状に超電導マグネットの常温ボアに通して、燃料消費率と窒素酸化物排出濃度の変化を測定した。その結果は、磁場の有無で燃料消費率や窒素酸化物排出濃度に有意差は見られなかった。このことから、燃料は 5T 程度の磁場では十分に磁化されないか、たとえ磁化されても燃焼への影響が無いかのいずれかと考えられた。

[今後の展望]

火炎や燃焼過程に及ぼす直接的な磁場の効果は、5T 程度の一様磁場では存在しないか、かりに存在しても極めて僅かなものである。影響なしと判定するにせよ、僅かな影響を実証するにせよ、実験には極めて高い精度が要求される。ところが、現在の超電導マグネットは燃焼実験に全く不適な構造になっており、しかも磁束密度の均一性が不足しているために、磁場こう配が燃焼によって必然的に形成される酸素の濃度こう配と干渉して、二次的な影響の方がはるかに顕著に現れる。このことから、幸いこれまでは非常に有用な成果を上げることができたが、現在の装置と方法による限り、これ以上精密に燃焼に及ぼす磁気効果を解明できる見込みはない。

なお、現在進行中の研究は拡散火炎への一様磁場の効果であり、未着手のテーマはディーゼル燃料の磁化処理効果である。