

■ 技術報告 ■

高温加熱炉における最適火炎制御法

Flame Radiation Control in High Temperature Furnaces

森本 浩太郎*
Kotaro Morimoto

大谷 啓一**
Keiichi Otani

鈴木 富雄***
Tomio Suzuki

阿部 享****
Toru Abe

1 緒言

鉄鋼業の加熱炉は通常 1000～1300°C の高温炉が多く、そこには多くの省エネルギー技術が取入れられている。しかし、それらの技術を燃焼状態の制御という面からみると、必ずしも十分であるとはいえない。

すなわち、燃焼制御のために用いられている指標としては、炉内温度や排ガス酸素濃度が中心となっている。しかし、これらは燃焼状態を間接的に測定するものであり、燃焼状態そのものの判定はこれまでどうり熟練操炉者の目や勘にたよったままである。そのうえ、実炉では火炎観察窓もないことが多く、火炎の状態はまったく不明のままで、いわば、炉内はブラックボックスの状態にあることが多い。

このような状態を改善するために、高温加熱炉における最適火炎を放射面から調べ、また、その制御法の開発をも行なったので、以下に紹介する。

2 高温炉の火炎放射特性

高温炉においては、放射による伝熱量の割合は約90%近くにもなっている。したがって、高い放射量を得るための燃焼方法が非常に重要である。ここでは、C重油およびブタンガス燃料について高温炉での火炎放射特性を明らかにし、温度分布やNO_xの抑制面からも検討を加えた。

2.1 燃焼試験炉と燃焼条件

燃焼試験炉は内径1 m、長さ4 mの円筒横型・耐火壁構造のものを用いた。

燃焼状態を変化させる要因は種々あるが、実炉にて容易に取扱えるものとして、バーナチップ形状、空気比、バーナ位置およびアトマイズ量（燃料霧化量）を選定した。そして、これらを変化させて、緩慢から急速までの種々の燃焼状態をつくりだした。

表1に標準燃焼条件を示す。実験ではこの条件を基本とし、テストする要因のみを変えるようにした。

バーナ先端位置はバーナタイル前面を原点とした。これよりマイナス側はバーナをエアスロート側（炉内と反対方向）に引いたものとした。このマイナスの値が大きいく程、燃焼状態は急速となる。

バーナチップ形状を図-1に示す。コーン形およびストレート形は一般に使用されているチップであるが、偏心形（Eccentric）は当社が開発した緩慢燃焼形低NO_xバーナ用のチップである。燃焼状態はコーン→ストレート→偏心の順に緩慢になる¹⁾。

表1 標準燃焼条件

要 因	条 件	
バーナタイプ	ブタンガス	拡散燃焼形ガスバーナ
	C重油	内部混合形高圧気流バーナ
入 熱 量	400 × 10 ³ Kcal/h	
最 高 炉 温	1300°C	
燃 焼 用 空 気 温 度	320°C	
バーナ先端位置	ブタンガス - 370 mm, C重油 - 470 mm	
バーナチップ形状	コーン形	
空 気 比	1.17 (排ガスO ₂ で3%)	

* (株)神戸製鋼所機械研究所主任研究員

〒651 神戸市中央区協浜町1-3-18

** (株)神戸製鋼所機械研究所

*** "

**** "

2.2 バーナチップ形状と放射量の関係

図-2にバーナチップ形状の影響を示す。ここで、 ϵ_f は火炎放射率で(不輝ガスおよび輝炎放射を含んだトータルの放射率)、実測した総放射量から炉壁放射量を除去して火炎放射量 Q_f を求め、その時の平均火炎温度 T_f から次式にしたがって計算した。

$$Q_f = \epsilon_f \sigma T_f^4$$

ここで、 σ : ステファン・ボルツマン定数

また、図中の ϵ_g は不輝ガス放射率でShackの式、Hottelの補正図より求めた²⁾。

バーナ近傍では燃焼反応が初期段階のため ϵ_f / ϵ_g は小さいが、燃焼が進むにつれて大きくなっている。その最大値は炉内温度分布測定結果によると、ほぼ最高温度域にあることがわかった。それよりも下流では火炎が存在せず、不輝ガス放射のみであるので、 $\epsilon_f / \epsilon_g = 1$ となる。急速燃焼法(コーン形チップ)では火炎は完全不輝炎になるので ϵ_f / ϵ_g は1に近いが、緩慢燃焼法(偏心形チップ)では輝炎放射の割合が大きくなっている。

図-3はこのときの総放射量を示したものである。火炎存在域($L/D = 2.6$ まで)で、緩慢燃焼の方が高い値を示している。また、図-4はその炉内の温度分布を示したものである。緩慢燃焼の方が最高火炎温度が 80°C も低く、温度分布も均一である。また、 NO_x も約 $1/4$ に低減している。

これらの結果を総合すると、緩慢燃焼では火炎温度が低いにもかかわらず放射量が多いのは、火炎放射率が高いためである。これは火炎からの輝炎放射の寄与が大きいためと考えられ、このことは $L/D = 2.6$ よ

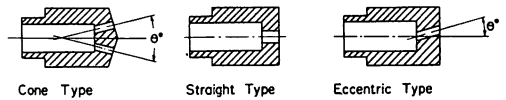


図-1 バーナチップ形状

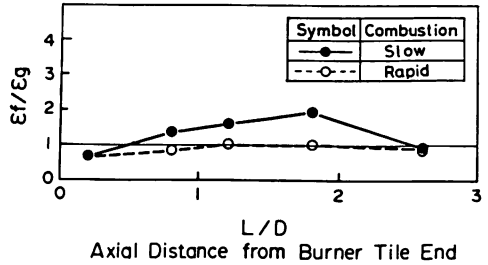


図-2 急速燃焼と緩慢燃焼の放射率 (バーナチップ形状の影響)

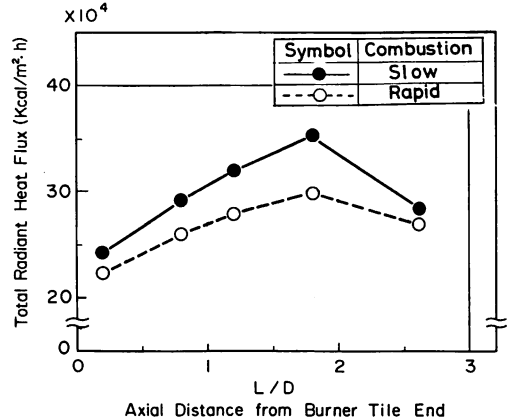


図-3 急速燃焼と緩慢燃焼の放射量

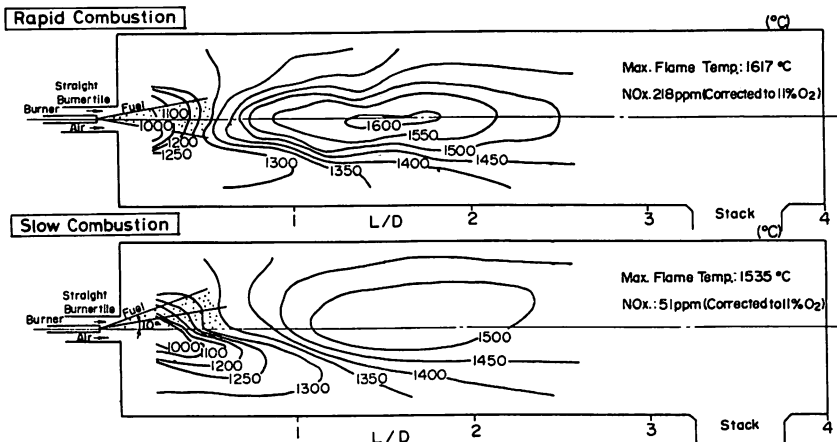


図-4 急速燃焼と緩慢燃焼の炉内温度分布

り下流の不輝ガス放射のみとなる燃焼完了域では、温度の高い急速燃焼の方が放射量が大きくなっていることから推察できる。

2.3 空気比（排ガス酸素量）と放射量の関係

図-5にC重油燃焼における空気比と放射量との関係を示す。空気比を小さくしてゆくと放射量は増加する。

この増加分は、火炎温度の上昇分とガス分圧から計算した不輝ガス放射の増加量よりも大きく、輝炎放射が寄与しているものと考えられる。このように、低空気比燃焼は排ガス熱損失を少なくすることに加えて、放射伝熱促進にも効果がある。

2.4 バーナ位置と放射量の関係

図-6にバーナ先端位置を変化させたときの影響を示す。一般にバーナ先端位置をエアスロート側へ引く程（マイナス側へ移動させる）、空気の流速が増加するため燃料と空気の混合が促進される。したがって、燃焼状態は急速となる。反対に炉内よりでは混合が緩慢になるため、燃焼帯ですが形成され、火炎からの放射量は増加している。

2.5 アトマイズ量と放射量の関係

図-7は重油燃料を微粒化するために使用するアトマイズ量の影響を調べたものである。アトマイズ量を減少させてゆくと、燃料粒径が増加して燃焼は緩慢になる。このため、スート生成量が多くなり、スート、コーク粒子による固体放射が増加して火炎放射量が増大する。ただし、極度にアトマイズ量を減少しすぎると（図中の■印）、多量のスモークが発生するため放射量も低下して好ましくない。

3 火炎の制御方法

以上のように放射量を種々測定した結果、高温加熱炉においては、緩慢燃焼を有効に利用することによって放射量を増加させ、かつ、低NO_x化もはかれることが明らかとなった。そして、燃焼状態を緩慢にするための燃焼方法（たとえば、アトマイズ量を減少させるなど）も把握した。しかしながら、燃焼状態は時時刻刻変化するものであり、燃焼条件が大幅に変化する実炉にて、火炎状態を一定に保持してゆくことはほとんど不可能であった。

そこで、この燃焼状態を判定し一定に保持する手段として、燃焼が開始されると、その安定、不安定にかかわらず必ず発生している炉内の微小圧力振動を利用することにした³⁾。

3.1 微圧振動測定装置

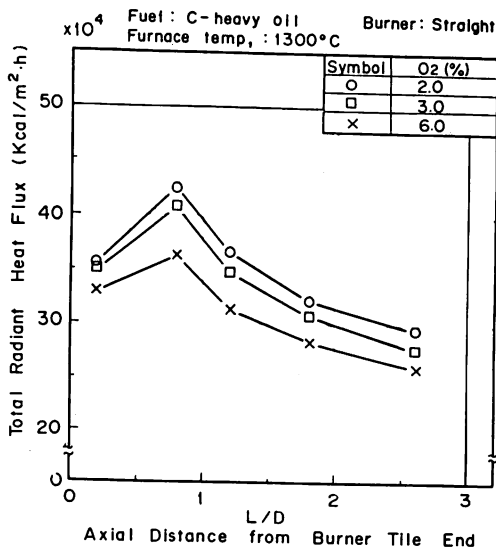


図-5 空気比（排ガス酸素濃度）と放射量

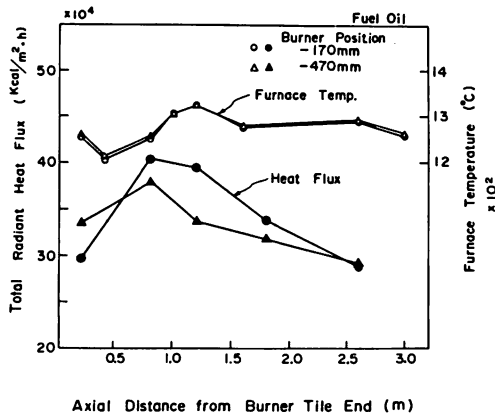


図-6 バーナ位置と放射量

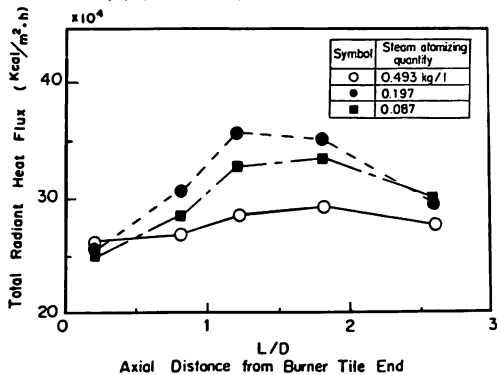


図-7 アトマイズ量と放射量

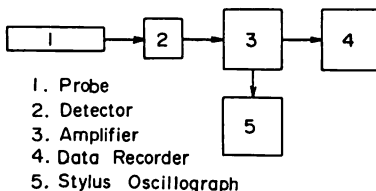


図-8 微圧振動測定フローシート

微圧振動の測定フローシートを図-8に示す。燃焼の状態が十分反映するように、微圧検出用プローブはバーナタイル前面から400mm炉内側の火炎近傍に取付けた。微圧変換器はひずみゲージをもちいた。解析用信号はデータレコーダに収録して、周波数解析機にかけて振動のパワースペクトルを求めた。

3.2 燃焼状態と微圧振動特性

ブタンガス燃料でコーン形チップを使用し、他の燃焼条件をすべて同一にして、バーナ先端位置のみを変化させた場合の測定結果を図-9に示す。

試験炉炉尻の観察窓からみた火炎の状態は、バーナ先端が炉内側に近い位置では大きく緩慢な燃焼となっているが、バーナ先端をエアスロート側(マイナス側)に引くほど激しい燃焼状態となり、やがて透明炎となって予混合炎に近い燃焼状態となっている。

微圧振動波形は緩慢な燃焼時では大きなゆるやかな波形がえられ、急激な燃焼に向うほど激しい振動へと変化している。これを周波数解析結果のパワースペクトルでみると、緩慢燃焼時では2~4Hzを主体とした振動であるが、燃焼性が急激な状態に向かうにしたがって10~20Hzの周波数成分が出始める。そして、やがて低い周波数成分が消滅して20~25Hzの高い周波数成分を主体とする振動へと変化し、燃焼状態と関連があることがわかる。

これは、燃料を重油に変えても同じ傾向であった。さらに、バーナチップ形状や空気比の影響についても

調べたが、この傾向は変わらなかった。

すなわち、緩慢燃焼や低空気比燃焼では低い周波数を主体とする振動が得られ、急速燃焼や高空気比燃焼では高い周波数成分が主体となる振動に移行する。したがって、主周波数成分に着目しておけば、燃焼状態の把握ができるわけである。

4 実炉への適用例

これまで説明してきた結果を分塊工場の均熱炉へ適用した例について述べる。

炉のおもな仕様はつぎのとうりである。

炉容：6600 l × 2800 w × 2875 h mm

バーナ：上部2本焚対向バーナ(蒸気アトマイズ)

燃料：ミナス重油

燃焼量：最大400 l/h

装入量：約84ton/charge

本均熱炉の設定炉温は通常1300°Cである。微圧振動の測定は試験炉の場合と同じ方式である。圧力検出はエアスロート内に挿入したプローブにより行なった。

通常操業時の1ヒートサイクルにわたる微圧振動の解析結果を図-10に示す。消火時には振動はほとんど検出されず、燃焼開始とともに100Hz以上の周波数成分を含む激しい振動がえられた。とくに燃料のターンダウン(燃料流量の減少時)で、高い周波数成分が多くなる特徴が認められた。この高い周波数成分の増加は、燃焼状態が急激な方向に変化していることを意味して

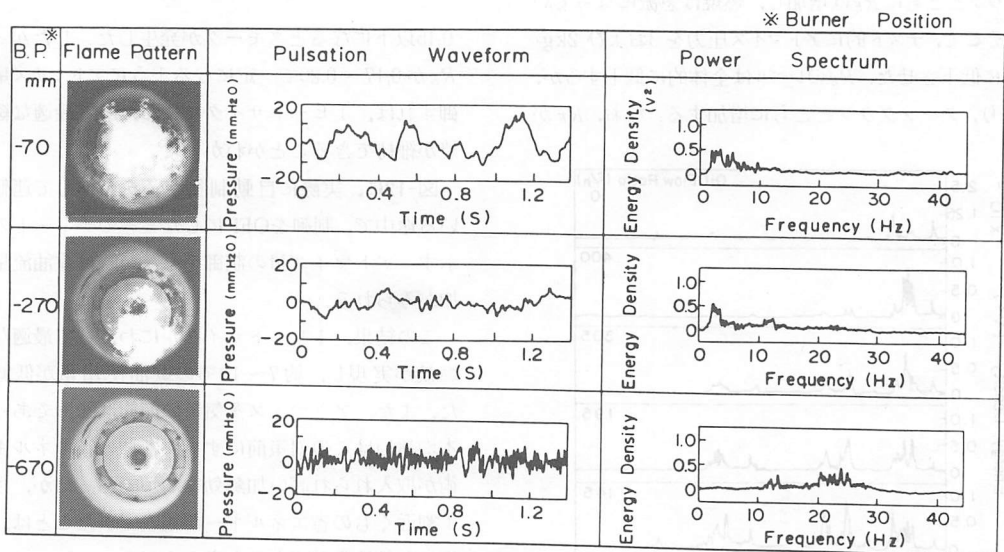


図-9 バーナ位置と微圧振動パターン(ブタンガス)

いる。

火炎の肉眼観察によると、最大燃焼時には緩慢な燃焼であったが、ターンダウンとともにシャープな短炎が形成されていった。これは、1 ヒートサイクル中、アトマイズ量を一定にしているため、ターンダウン時には燃料に対する相対的なアトマイズ量が増加し、燃料の微粒化が進んで急速な燃焼状態になったものと考えられた。

したがって、本均熱炉では主に相対アトマイズ量の影響で燃焼状態が大幅に変化し、それが微圧振動パターンに反映しているといえる。そこで、微圧振動パターンを指標にアトマイズ量を制御して、最適な燃焼状態が1 ヒートサイクルにわたって維持できる方法を検討した。基本的なものとして、振動パターンを燃焼状態の制御信号とするため、次式で示す振動エネルギー比 R_E を定義した。

$$R_E = \frac{\text{特定周波数帯域の振動エネルギーの積分値}}{\text{全振動エネルギーの積分値}}$$

ここで、特定周波数帯域とは、燃焼状態の変動によく追従して変化する周波数帯域のことである。今回は、全体の周波数帯域を 0~500Hz とし、特定周波数帯域を 100~500Hz とした。 R_E が大きくなることは 100Hz 以上の振動エネルギーが相対的に増加することであり、燃焼状態が急激になることを意味している。

R_E で整理した実炉の測定結果を図-11 に示す。通常操業時のアトマイズ圧力は 4~4.5kg/cm² であり、ターンダウンとともに R_E は増加し、燃焼は急激になっている。そこで、テスト的にアトマイズ圧力を 3 および 2kg/cm² に低下させた。 R_E のレベルは全体的に低下するが、やはり、ターンダウンとともに増加する。なお、 R_E が

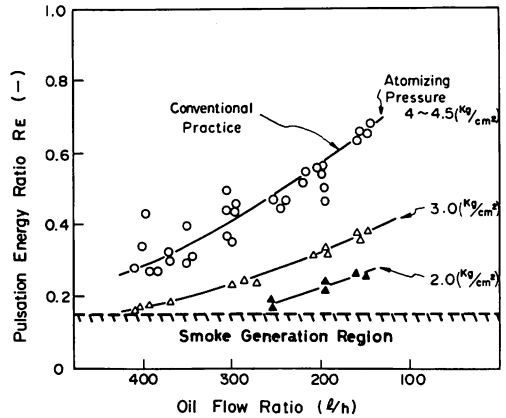


図-11 重油流量と振動エネルギー比

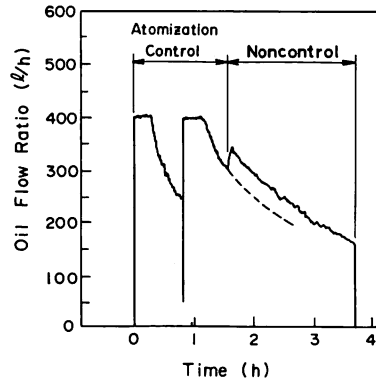


図-12 重油流量チャート例

0.15以下になるとスモークが発生した。したがって、 R_E が 0.17~0.20 で一定になるようにアトマイズ量を制御すれば、1 ヒートサイクルにわたって最適な緩慢燃焼が維持できることがわかった。

図-12に、実際に自動制御装置を製作して運転している途中で、制御をOFFにしたときのチャートの例を示す。アトマイズ量の制御をしない時は重油流量の増加がみられる。

この結果、1 ヒートサイクルにわたって最適な緩慢燃焼が実現し、約 7~10% の重油使用量が低減できた。また、アトマイズ蒸気量の節約は 20% であった。本均熱炉はこの対策前にすでに各種の省エネルギー技術が取入れられ高い加熱効率の炉であったが、さらに 1 割近くもの省エネルギーが達成できたことは、本技術の有効性を示すものと考えられる。

また、NO_x 値は平均 95ppm (11% O₂ 換算値) で、本炉の炉温が 1300℃ 近くで燃焼空気温度も 700℃ あ

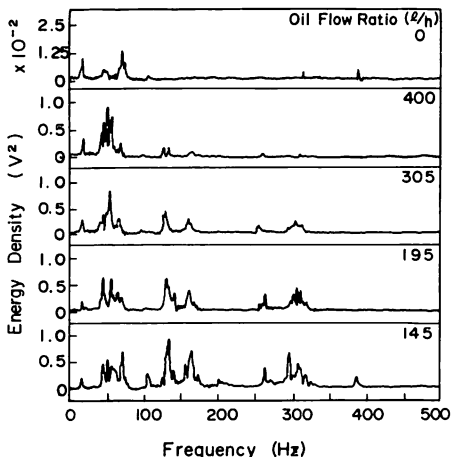


図-10 1 ヒートサイクルの微圧振動パワースペクトル

ることを考慮すると、非常に低い値といえる。

5 結 論

鉄鋼用の均熱炉，加熱炉のような高温炉を対象として，その火炎放射特性および火炎制御方法について，これまでの研究の一端を紹介した。この中では，特に緩慢燃焼化により輝炎放射を増加させて省エネルギーをはかった例を述べた。しかし，炉によっては急速燃

焼の方が好ましい例もあり，やはり，個々のケースにつき，設備にあった最適燃料，燃焼方法を開発してゆく必要があると考えている。

参 考 文 献

- 1) 小田原ほか：鉄と鋼 63 [11] (1977) 81
- 2) 国 友：機械学会論文集 37 [304] (1971) 2327
- 3) 大 谷ほか：R & D 神戸製鋼技報 30 [2] (1980) 44

話 の 泉

磁力線とエネルギー

電流と磁力線と力の三つの関係は，フレミングの右手および左手の法則としてよく知られており，モータ，発電機の基礎理論となっている。

この場合電流のエネルギーは磁力線の作用から運動エネルギーに変換する一方磁力線の場を導体が横切ればその機械的エネルギーは電気エネルギーに変換されることは更めて言う程のことではない。

最近新しく強力な保磁性の大きい永久磁石が次々と開発され，従来の常識としての鉄系合金からフェライト，アルミニウム/マンガン系，コバルト系に代って来ている。

小型モータでは従来の電流による磁化（電磁石）の代りにこれらの永久磁石が使用されるようになった。そのため電磁石に磁化するための電流は不要となり，それだけ節電されると思われる。この永久磁石は一旦磁化しておけば半永久的に電磁石に代ってモータ，発電機の中核となり，それぞれの電氣的エネルギー，機械的エネルギーに変換される。しかしそのエネルギーの変換において永久磁石のもつ磁力線の消耗はなく，半永久的に働き続けることになる。

このことは磁力線はそのまま他のエネルギーに変換しないで，電氣的または機械的エネルギーをそれぞれ機械的または電氣的エネルギーに変換する中介的作用換言すれば磁力線それ自体は何等消耗することなく電気エネルギー⇄機械エネルギーに変換する触媒的作用とみることができよう。

磁力線の作用については極めて理解し難い点が多いが，いろいろの作用機構が十分解明されないままに利用されている。例えばボイラーに使用する水は軟水が望ましいが，たとえ或程度の硬水でも磁力線で処理した水はスケール（湯垢）の付着を減少する。

燃料として使用する重油または燃焼用空気を磁力線で処理することによって重質油が軽質化し，その結果C重油がB重油に，またB重油がA重油に近付きそれだけ燃焼効率がよくなる。一方CO，NO_xも大幅に減少するという情報がみられる。

或種の乳化重合においては磁力線の作用によってポリマーの収率が増加し重合度が高まるという情報もみられる。

生物への作用としては最近流行のマグネットバンドとして磁石を多数貼付したバンドは，血液（電導性）の流れによって発生する微少な電流作用による健康効果を宣傳している。野菜類例えばトマトに磁力線を与えて置くことによって熟成が速く，かつ色も味もよいとか。

このようなことを考えて行けば，磁力線は，それ自体何等のエネルギーではなくエネルギー変換のための有効な触媒的作用と見做すべきで，絶えず受けている地磁気による何等かの作用が日常生活にどのような効果をもたらしているのだろうかを更めて考えてみることも興味ある問題であろう。

(F)