定常高温空気流中における燃料噴霧の着火*

(第2報, 物理的因子の影響)

小沼義昭**, 柴田耕嗣***
盛永規義***, 森川正治****

Spontaneous Ignition of Fuel Spray in Steady Hot Air Flow

(2nd Report, Effect of Physical Factors)

by Yoshiaki ONUMA, Koji SHIBATA,
Noriyoshi MORINAGA, and Masaharu MORIKAWA

Spontaneous ignition was studied on fuel sprays injected into a steady hot air flow by a hole-nozzle with a single hole. Usually, the ignition delay is the so-called Arrhenius type and makes a straight line in an Arrhenius plot. In the present study, the effect of physical factors on ignition was investigated, and special attention was paid as to how the gradient of the straight line is decided. Five kinds of experiments were carried out: Where pure fuels of iso-octane and n-heptane were used in the beginning, then the mixing condition was changed with a cylinder inserted into fuel jets or a wall facing a fuel nozzle, and the spray condition was changed with a change of fuel injection pressure or with a change of water content in n-propanol/water solution fuel or diesel-oil/water emulsion fuel. As a result, it was found that physical factors change ignition delay greatly, but have almost no effect on the gradient of the straight line in an Arrhenius plot. Then, the temperature dependency of the ignition delay is considered to be controlled almost completely by the chemical factor.

Key Words: Combustion, Spontaneous Ignition, Spray Combustion, Ignition Delay, Physical Factor

1. ま え が き

燃料噴霧の着火を支配する因子は通常物理的因子と化学的因子に分けられる。物理的因子の主要なものとしては噴霧油滴の蒸発および燃料と高温空気との混合があげられ、また化学的因子としては、燃料として炭化水素を考えた場合、燃料蒸気の熱分解および分解されてできた低級炭化水素と酸素が反応して伝ば可能な火炎核を形成する過程が考えられる。しかしながら、噴霧の着火機構についてはまだ不明な点が多く、これらの諸因子が着火現象にどのように関与しているかについては明らかでない。

燃料噴霧あるいは燃料ガスを高温酸化剤中に噴出した場合の着火遅れをアレニウスプロットすると、測定値は1本の直線上にある⁽¹⁾⁽²⁾。第1報⁽³⁾においては種々の混合燃料の着火特性についての実験結果を報告したが、この研究の過程で、上記のアレニウスプロットにおける直線のこう配は燃料の種類によってきまる化学的因子のみによって決定され、燃料滴の蒸発や燃

料と空気の混合のような物理的因子によっては影響されないという推測が得られた。

本研究においては、着火に対する物理的因子を変化させた数種の実験を行うことによって、物理的諸因子が着火現象に与える影響を検討するとともに、上記の推測に対する実験的確認を得ることを試みた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は第1報で使用したものと同一であるので詳しい説明は省略し、以下にその要点のみを述べる。燃焼器は96 mm×196 mmのく形断面で高さが200 mm、対向する2側面は耐熱ガラスでできている。電気炉で1043~1223 Kに加熱した空気を燃焼器中を下から上へ流し、燃焼器壁面に取付けられたノズルからアキュムレータに蓄圧された燃料を水平、空気流に直角に噴射する。燃料噴射は常に着火が起こった後に止められた。使用したノズルは噴口径0.2 mm、噴口数1のホールノズル(NP-DLOS 201 NP1)で、実験はすべて常圧、気流速度4 m/sで行った。特に断らない場合、使用燃料はJIS2号ディーゼル軽油、燃料噴射圧は10.8 MPaである。

着火遅れは、細い光線を噴射燃料が遮断する瞬間と着火による発光の瞬間を別個のフォトディテクタによ

* 昭和61年4月2日 第63期通常総会講演会において講演。
原稿受付 昭和60年11月5日。

** 正員、豊橋技術科学大学(〒440 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)。

*** 学生員、豊橋技術科学大学大学院。

**** 豊橋技術科学大学。

り検出し、その時間間隔を計測することによって求めた。以下に示す着火遅れ測定結果は30回の計測データを平均した値である。

3. 実験1: イソオクタンおよび正ヘプタンの着火遅れ

図1は燃料としてイソオクタンと正ヘプタンを用いた時の噴霧の着火遅れをアレニウスプロットしたものである。図1に示す直線から着火に対する見掛けの活性化エネルギーを求めると、イソオクタンは147 kJ/mol {35 kcal/mol}, 正ヘプタンは160 kJ/mol {38 kcal/mol} となる。

図1中に示されている太い一点鎖線はFreeman-Lefebvre⁽²⁾があらかじめ蒸発させた正ヘプタン蒸気の着火遅れを測定した結果を示す。Freeman-Lefebvreの着火遅れ測定法は、古くはMullins⁽¹⁾によって用いられた定在火炎を用いる方法を改良したもので、燃焼速度に比べて十分に速い高温高速空気流中に多数の小噴口から燃料ガスを噴出し、下流に形成される火炎前縁と燃料ノズル間の距離をガス流速で割ることによって着火遅れを求めている。図1の一点鎖線のこの配から求められる見掛けの活性化エネルギーは約167 kJ/mol {40 kcal/mol} であると報告されており、この一点鎖線と本実験において正ヘプタン噴霧の着火遅れから得られた結果を比較すると、燃料噴出形態が気体と噴霧というように異なるにもかかわらず、直線のこの配、したがって見掛けの活性化エネルギーはほぼ等しいことがわかる。

Freeman-Lefebvreの結果を本報での実験範囲まで外挿すると(細い一点鎖線)、Freeman-Lefebvreの測定値のほうが本報での噴霧に対する値より約45%小さい。これは燃料の噴出形態の違いに起因するものである。

一方、Jost-Teichmann⁽⁴⁾は急速圧縮装置を用い、

図1 イソオクタンおよび正ヘプタンの着火遅れ

イソオクタンおよび正ヘプタン蒸気と空気との予混合気の着火遅れを測定しているが、Jost-Teichmannがこの実験から求めた予混合気の着火に対する活性化エネルギーは、イソオクタンに対しては134 kJ/mol {32 kcal/mol}, 正ヘプタンに対しては167 kJ/mol {40 kcal/mol} であった。図1に示す噴霧の着火に対する見掛けの活性化エネルギーはこの結果ともほぼ一致している。Jost-Teichmannが求めた値は予混合気に対するもので、これは着火過程における化学反応から決定される本来の意味での活性化エネルギーであると考えられる。この予混合気の着火に対する活性化エネルギーに図1に示す燃料噴霧や燃料ガスの着火に対するそれがほぼ一致するという事は、拡散形の着火においても図1に示すようなアレニウス形の着火直線のこの配は化学的因子のみによって大部分決定されており、物理的因子の影響は非常に小さいことを意味しているものと思われる。

4. 実験2: 噴霧中への丸棒挿入

前述のごとく、噴霧の着火を支配する重要な物理的因子の一つとして燃料と高温空気の混合がある。この混合状態を変化させる方法として空気流速を変えることが考えられるが、前報で述べたように流速を2~5 m/sに変化させても着火遅れにはほとんど変化がなく、この程度の流速変化では影響がないことがわかる。そこで本実験においては、混合状態を極端に変化させるため噴霧中に丸棒を挿入し、噴霧流を二つに分割することにより混合を促進することを試みた。

使用した丸棒は直径が2 mm および 8 mm の2種で、水冷されている。丸棒の挿入は上下方向に行い、場所はノズル先端から25 mm および 100 mm の断面とした。図2および図3は各断面において丸棒を噴霧流に直角、水平方向に移動して着火遅れを測定した結果である。横座標のYは丸棒の挿入位置、Y=0は噴霧流中心を表し、パラメータは空気温度である。丸棒挿入位置が中心から遠く離れ、噴霧流の外側にある時は当然着火遅れは丸棒により影響されないが、噴霧の中に入れると着火遅れは短縮され、丸棒を挿入しない時の値に比べ短縮割合は最大35%にも達している。これより、物理的因子の一つである混合が着火遅れに大きな影響力をもっていることがわかる。

空気温度1223 Kで丸棒を100 mm断面に挿入した時には着火遅れにほとんど変化が見られないが、この理由としては、高速度写真観察の結果空気温度が高く着火遅れが短い時は着火位置が噴霧流上流側、ノズル近くへ移動することが認められ、1223 Kの時はノズ

ルから 30~40 mm の位置で着火することが確認されており, 100 mm 断面への丸棒挿入が効果を示さないのは当然のことと思われる。

また, 25 mm 断面に直径 8 mm の丸棒を挿入した時は, 中心に入れるよりもやや周辺部へ入れたほうが着火遅れが短くなり, 中心に入れるとかえって長くなる場合が見られるが, これに対して次の理由があげられる。常温空気流中での噴霧流を写真観測した結果, 噴霧角は 8.3° で 25 mm 断面での噴霧直径は 3.5 mm であった。このように細い噴霧流の中心に直径 8 mm もの太い丸棒を置いた場合, 丸棒によって噴霧流がせき止められむしろ混合が妨げられるものと思われる。この混合状態の悪化が着火遅れを増大させたものと考えられる。

図 2, 3 における各断面での最小着火遅れ時間をアレニウスプロットしたのが図 4 である。図 4 中の○印

図 2 丸棒挿入による混合促進と着火遅れ ($X=25$ mm)

図 3 丸棒挿入による混合促進と着火遅れ ($X=100$ mm)

は丸棒挿入のない場合の結果である。図 4 から, 丸棒の挿入は確かに着火遅れを大幅に短縮するが, その状態で温度を変化させると, 対温度依存性すなわち直線のこう配はやはり丸棒挿入のない場合の着火遅れのそれと一致することがわかる。つまり, 着火に対する有力な物理的因子の一つである混合はアレニウスプロットにおける着火遅れの直線を平行移動させる効果はもっているが, そのこう配を変化させる力はないことがわかる。なお, $x=100$ mm に丸棒を挿入した場合, 温度が高い時の結果が直線からそれているが, これは前述のごとく着火位置が $x=100$ mm より上流側にある確率が高いためである。

5. 実験 3: 燃焼器壁の影響

図 5 は軽油についての着火遅れをアレニウスプロットしたものである。図 5 のごとく空気温度を下げてゆくと着火遅れは長くなってゆくが, 1050 K 付近で階段状に遷移して大きな値を示すようになる。図 6 は一つの条件に対して 200 回の測定を行いその度数分布を示したものである。温度が高く着火遅れが短い時は図 6 (a) に示すようにピークが一つだけの度数分布が得られる。それに対し, 空気温度を 1063 K 以下に下げると着火遅れの長い領域にもう一つのピークが現れ, 二つのピークをもつ度数分布となり, 温度を下げるにつれて着火遅れの長いグループに属するデータ数が短いグループのそれに比べてしだいに多くなり, ついには長いグループのみになって度数分布は再び一つのピークだけをもつ形状となる。図 5 で温度が 1048~1063 K 間の測定データが 2 個プロットされているのは, それぞれ着火遅れの短いグループと長いグループの平均値を表している。図 5 から, 着火遅れはある温度で遷移して長くなるが, 遷移後の着火遅れもまたアレニウス形を示し, その直線のこう配は遅れ

図 4 着火遅れの対温度依存性

時間の短いグループの示す直線のこう配にほぼ等しくなっていることがわかる。

これらの現象の発生理由を知るため噴霧の着火状況を高速度写真で観察したが、その結果つぎのようなことがわかった。

(1) 着火は噴霧の周辺部で、かつ空気流についての下流側(噴霧流の上部)で発生する。

(2) 燃料噴射方向に関しては、空気温度が高く着火遅れが短い時は噴霧上流部、ノズルに近い所で着火が生ずるが、温度を下げ着火遅れが長くなると着火位置はしだいに下流へ移動し、対壁の近くで着火するようになる。

(3) 噴霧は噴射後約 3 ms で対壁に到達する。

図2において、直径 8 mm の太い丸棒を噴霧の中心に挿入した時せき止め効果によって着火遅れが長くなる現象が見られたが、この現象と上述の高速度写真観察結果とを合せて考えることによって、図5および図6に示された現象は燃焼器対壁のせき止め効果によって混合が阻害されたことによってもたらされたものと考えられる。なお、壁面温度は気流温度によって若干変化し、650~700 K であった。

以上、ここに示した現象もまた壁面という物理的因子が着火現象に大きな影響をもつ場合があることを示しており、かつこの場合も着火遅れの短いグループのデータと長いグループのデータとはアレニウスプロットにおいてほぼ等しいこう配をもった直線を示し、物理的因子が着火遅れの対温度依存性にはほとんど影響力をもたないことを示している。

6. 実験4: 噴射圧の影響

第4番めの実験として、噴霧の状態が着火に与える影響を調べるため、前述の二つの実験と同一のノズルを用い、噴射圧を 2.9 MPa から 19.6 MPa まで変え、

図5 着火遅れに対する燃焼器壁の影響

燃料流量および微粒化の状態を大きく変化させて着火遅れを測定した。図7は燃料流量についての実測結果で、横軸は噴射圧である。微粒化の状態を知るため図8にザウタ平均直径を示す。これは抜山・棚沢の式を用いた計算結果で、燃料噴出速度としては図7に示す値をノズル口面積で割った値を用いた。

図9は噴射圧の着火遅れに及ぼす影響を表す実験結果である。着火遅れは噴射圧を上げると短縮されるが、噴霧の状態が大きく変化しているわりには着火遅れの変化は小さい。

図10は同じ測定結果をアレニウスプロットしたものである。測定点は重なりを防ぐため横軸方向に少しずらして描いてある。噴射圧を変化させても着火遅れがあまり変化しないことから当然のこととも見られるが、図10から噴霧の状態が大きく変化しても着火遅

図6 着火遅れ時間の頻度分布

れの対温度依存性にはほとんど変化がなく、この場合もまた一定こう配の直線に乗ることがわかる。なお、噴射圧が19.6 MPaといちばん高く、空気温度が1063 Kと低い場合の着火遅れが直線からずれて大きな値を示しているが、これは実験3で述べた壁の影響が噴射速度が速く、着火遅れの長いこの場合だけに現れたものと考えられる。

7. 実験5: 燃料への水混合

図11は正プロパノール/水溶解混合燃料に対する着火遅れ測定結果である。図11中のパラメータは燃料の組成で、たとえばP40/W60は正プロパノール40% (重量)、水60%の混合燃料を表している。正プロパノールと水は沸点においては370 K、373 Kとほとんど等しく、気化潜熱においては787 kJ/kg、2257 kJ/kgと約3倍異なっている。図12は前報で報告した軽油/水エマルジョン燃料に対する測定結果である。図12中のDは軽油を示す。

図11, 12に見られるように、燃料中の水含有割合

が増すと着火遅れは長くなるが、アレニウスプロットにおける直線のこう配はほとんど変化しない。このように水含有割合を大きく変化させれば噴霧油滴の蒸発特性は変わるはずであり、それにもかかわらず直線のこう配が変化しないということは、やはりこの結果も物理的因子の一つである噴霧滴の蒸発はこの直線のこう配にはほとんど影響を与えず、直線を平行移動させ

図7 噴射圧と燃料噴射量

図8 噴射圧とザウタ平均粒径

図9 着火遅れに対する噴射圧の影響

図10 着火遅れの対温度依存性

図11 正プロパノール/水混合燃料の着火遅れ

図 12 軽油/水エマルジョン燃料の着火遅れ

る効果しかもっていないことを示している。

8. ま と め

前報に引き続いて、定常高温空気流中に単孔のホールノズルから燃料を噴射したさいの着火遅れについての実験を行った。今回は特に着火に対する物理的因子の影響に焦点を合せ、5種類の実験を行うことによって次のような結果を得た。

(1) まず最初に、イソオクタンおよび正ヘプタン噴霧の着火遅れを測定した。この実験結果から見掛けの活性化エネルギーを求め、イソオクタンおよび正ヘプタンに対しそれぞれ 147, 160 kJ/mol なる値を得たが、これらの値は他の研究者が求めている正ヘプタン蒸気噴流の着火遅れ、イソオクタンおよび正ヘプタン予混合気の着火遅れに対する活性化エネルギーとほぼ一致した。この事実より、噴霧滴の蒸発や燃料と高温空気の混合というような物理的因子は見掛けの活性化エネルギー、つまり着火遅れをアレニウスプロットした時に得られる直線のこう配にはほとんど影響を与えず、このこう配は燃料の種類によって決定される化学的因子のみによって支配されていることが推測された。

(2) ついで、噴霧流中に丸棒を挿入して燃料と高温空気の混合状態を変化させる実験を行い、この混合促進が最大 35 % もの着火遅れの短縮をもたらすことを知った。これは物理的因子が着火遅れに大きな影響をもっていることを示唆する。

(3) 丸棒挿入によって短縮された着火遅れをアレニウスプロットするとこの場合もやはり 1 本の直線が

得られ、そのこう配は丸棒を挿入しない場合のそれとほぼ等しくなった。これは、混合の促進は着火遅れを短縮はするが、着火遅れの対温度依存性にはほとんど影響力をもたないことを示している。

(4) 3 番めの実験において、空気温度を下げ着火遅れを長くしてゆくと、ある温度以下でそれまで得られていた遅れ時間の短い測定値のグループに長いグループのものが混じるようになり、さらに温度を下げると長いグループに属する測定値の数が増し、ついには長いグループのもののみになった。長い着火遅れのグループは噴霧に對面する壁のせき止め効果によって混合が阻害されたために生じたものと考えられる。

(5) 着火遅れの短いグループの測定結果は当然アレニウス形であるが、長いグループもまたアレニウス形を示し、その見掛けの活性化エネルギーは短いグループのそれと違いなかった。

(6) 4 番めの実験として、噴射圧を大きく変え、燃料流量および微粒化状態を変化させる実験を行った。その結果、噴霧状態の大きな違いにもかかわらず着火遅れの変化は小さく、またこの場合も着火遅れの対温度依存性は噴霧状態によってほとんど違いがないことがわかった。

(7) 5 番めの実験では、正プロパノールあるいは軽油と水の混合燃料を用いることによって、水混合割合の着火に与える影響を調べた。その結果、水含有量が増すと着火遅れは長くなるが、アレニウスプロットにおける直線のこう配は一定で変化せず、この実験結果もまた噴霧滴の蒸発特性という物理的因子が着火に対する見掛けの活性化エネルギーにはほとんど影響力をもたないことを示した。

(8) 以上五つの実験から、着火遅れをアレニウスプロットした時に得られる直線のこう配は化学的因子のみによって決定され、物理的因子にはこの直線を平行移動させる力しかないことがほぼ確認できた。

文 献

- (1) Penner, S. S. and Mullins, B. P., *Explosions, Detonations, Flammability and Ignition*, (1959), 192, Pergamon Press.
- (2) Freeman, G. and Lefebvre, A. H., *Combust. Flame*, 58-2 (1984), 153.
- (3) 小沼・ほか 2 名, 機論, 51-472, B (昭 60), 4327.
- (4) 熊谷, 燃焼, (昭 51), 85, 岩波書店.

討 論

〔質問〕 酒 井 忠 美〔法政大学工学部〕

(1) 噴霧流中に障害物を入れたことによって着火おくれが短縮される場合には、障害物のない場合にくらべて着火の位置はどのように変わるか。

(2) これらの実験で示されているように、物理的条件を変えてもアレニウスプロットが平行移動するだけで見かけの活性化エネルギーが等しくなることは、着火おくれ期間のうち主として物理的過程によって支配される時間が、温度によって指数関数的に変わることの意味していると考えられないか。

また、アレニウスプロットが平行移動することは、高温で着火おくれが短い場合ほど、おくれ期間内の物理的過程が着火おくれに対して相対的に重要な因子となることを示していると考えられるが、貴見をうかがいたい。

〔回答〕 (1) 本実験においては着火遅れが短いほど着火位置は噴霧の上流側、ノズルに近いほうに位置する傾向があるので、多分丸棒を入れることによって着火位置は上流側へ移動しているものと考えられる。しかし、この場合については高速度写真観察は行っていないので詳細についてはお答えできない。

(2) アレニウスプロットにおける着火遅れ直線のこう配が物理的過程できまるとは考えられない理由としては次の三つがあげられる。

(i) 実験結果を見ると空気温度を1043Kから1223Kへわずかに180K変化させることによって着火遅れ時間は10倍以上変化している。物理的過程によって支配された現象は通常これほど温度に敏感ではない。

(ii) 実験2、実験4および実験5においては着火を支配する主要な物理的因子である混合、噴霧形態、蒸発特性を大きく変化させた実験を行っているが、直線のこう配はこれら因子の変化によって影響されていない。

(iii) 実験1において予混合気の着火遅れから求めた活性化エネルギーと噴霧のそれとがほぼ等しいことを示したが、急速圧縮装置を用いて求めた予混合気の活性化エネルギーは化学的過程のみによって決定されていると考えられる。

第2の質問に対しては、着火遅れが物理的遅れ期間と化学的遅れ期間に分けて考えられるとするならば、温度が上昇するについて化学的遅れは急速に減少し、ある点より高温領域では着火遅れ期間のほとんどすべてが温度に対して鈍感な物理的遅れ期間になってしまう

うと考えられる。それにもかかわらず上記の着火遅れ直線のこう配が化学的因子のみによって決定されると考えるのは一見矛盾するように思われるが、この問題に関する簡単な理論解析は第3報(付1)で発表する予定であり、また高温領域での実験も現在計画中である。

〔質問〕 宮 内 敏 雄〔東京工業大学工学部〕

着火遅れをアレニウスプロットした時に得られる直線が物理的因子により平行に移動される機構をご説明願いたい。

〔回答〕 ご質問の件に関しては第3報(付1)において簡単な理論的検討を行っている。したがって以下には詳細は省略して要点のみを述べる。

今、着火の化学反応が、

で表せ、化学種Xの濃度がある値に達した時に着火が起こると仮定する。考えている場合は拡散反応場であり、着火核を形成するガス塊について物質A、Bなどの濃度や温度を定めることは困難であるが、なんらかの平均値をとったものとして、その値を[A], [B], αT (T: 空気温度, α : 係数) とすると着火遅れ時間 τ は、

$$\tau = C[A]^{-1}[B]^{-1} \exp(E/\alpha RT) \cdots \cdots (ii)$$

で表せ、両辺の対数をとると、

$$\ln \tau = (E/\alpha R) T^{-1} + \ln C[A]^{-1}[B]^{-1} \cdots \cdots (iii)$$

となる。上式において、[]: モル濃度, E: 活性化エネルギー, R: 一般ガス定数, C: 定数, である。式(iii)には燃料滴の蒸発のような物理的過程に要する時間は厳密には含まれていない。しかし、詳細は第3報に譲るが、本実験での測定範囲においては着火遅れはほぼ式(iii)で表すことができ、 α は1に近い値であることが実験結果から推測される。

式(iii)はアレニウス座標において $E/\alpha R$ (燃料の種類によってほぼ定まる) のこう配をもった直線を表し、右辺第2項はこのこう配一定の直線を上下に移動させる働きをもっている。そこで、物理的過程は式(iii)の右辺第2項を通して直線を平行移動させたと考えられる。また、 α は直線のこう配にはほとんど影響のない程度の微小変化によっても、第1項の値そのものについては相当な変化をもたらすので、着火核の平均ガス温度の微小変化もまた平行移動の要因としてあげられ

(付1) 小沼・柴田, 機論, 52-482, B (昭61), 掲載予定。

る。

〔質問〕 廣 安 博 之〔広島大学工学部〕

(1) 本研究の目的をもう一度うかがいたい。着火おくれが重要になるのはディーゼル機関などである。ここでは着火おくれ時間が約1msぐらいであるが、貴実験では2~50msと非常に長くなっている。このような長い着火おくれの実験の目的をうかがいたい。

(2) 貴実験では着火おくれに及ぼす物理因子を変化させたとある。しかし、実際のディーゼル燃焼の着火おくれと比べると、貴実験の着火おくれが長いのは物理要因のみの影響であると思うが、着火おくれがあまり変化していない貴実験では、物理因子を変化させていないのではないか。

〔回答〕 (1) 本研究が目差している主たる対象はディーゼル機関であるが、得られた実験値を直接ディーゼル燃焼に適用せんとしているわけではなく、燃

料噴霧の着火機構およびその基本的性質を詳細に調べることが本研究の目的である。ディーゼル機関での着火機構についてはまだほとんどわかっていないと言っても過言ではない現状を考えた場合、本実験におけるような単純な燃焼場での精度の良い情報がこのような目標を達成するためには必要であろうと考える。

(2) 本論文における物理的因子という表現がややあいまいで誤解を招いているように思う。本文で用いている物理的因子という語句は物理的過程と同義で、微粒化、蒸発、混合、燃焼器壁との衝突などをさしている。圧力、温度などの物理量は物理的過程にも、化学的過程にも関連する量であり、したがって本実験での着火遅れが実機のそれより長くなっている主たる要因である圧力の違いは、本論文における物理的因子には該当しない。本論文の種々の実験において物理的過程の変化は十分に大きいと考える。