

# 航空安全のためのゲル化ジェット燃料(第二報)

岩間 彬・石田 博樹・今関 和夫\*

## はじめに

互いに相溶性のない二種の液体の混合物である水中油滴(O/W)型ゲル化燃料は、物性はもとより着火、伝火、燃焼にも特異な様相を呈する。ミクロ的にみれば不均一な組織が表面活性剤によって支えられているゲル構造は熱力学的にみるとかなり不安定であるだけに、せん断応力や熱に弱い。燃料供給系においては、燃料はバルブ、計量素子、コントローラ、インジェクタなど狭いギャップをいくつも通過して燃焼室へ到着するが、途中で排液現象を起こし一部が液体に戻ると、残りのゲルが次のギャップでつまり噴射はスムーズにゆかなくなり、最悪の場合は噴射ノズルを閉塞してしまう。そこで、供給パイプ系のある場所を境にして、それより前は100%ゲルの状態に保ち、そこで完全に液体燃料と水(または極性燃料)に分離した後に燃焼室へ送りこむようにするか、あるいはゲルをそのまま燃焼室へ噴霧するか、いずれかの道を選ぶより仕方がない。

ゲル化燃料を解離するには、熱を利用するのが一番簡単である。が、一方高い貯蔵安定性が要求される以上、ゲル化燃料は $-17^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ の範囲における数次温度サイクルに耐えなければならず、温度を上げればすぐ解離することを望むのはこれと矛盾する。そこで、加熱によってゲルを液体に戻すことは放棄することとし、熱安定性を強める方法について研究を行ない、新しい添加剤を見出した。また、ここでは触れないが能率的なゲルの解離法を開発した。

本報は供給途中においてゲルにかかるせん断応力をできるだけ抑え燃焼室へゲルのまま直接噴射することをねらいとするゲル安定剤の効果と、前報[1][2]に補追する意味でO/W型ゲル化燃料の伝火性と引火性について知見を述べる。

## 1. 高濃度 O/W 型ゲル化ケロシンの安定性強化

ここで高濃度ゲル化燃料というのは少なくとも97 vol%の燃料成分をもち、水の含有量は2 vol%以下のものを指すこととする。筆者らが新しく開発したゲル化燃料は、水分の少ない点が特長ではあるが、しかし水は連続相を形成するだけに、これが凝固するとたちまち排液してゲルが破壊される。航空機はいうまでもなく寒冷の地でも発着するし、高空を飛ぶので $-20^{\circ}\text{C}$ を下まわる低温になることがある。

不凍液として一般に用いられているのはエチレン・グリコールとジエチレン・グリコールであるが、これらはやや難燃性であり、そして高温安定性には何も役に立たないことが欠点として指摘される。高温と低温の双方における安定性増強に寄与する添加剤が強く望まれる

\* 東海大工学部

ゆえんである。

図 1 に示すのは、97 vol % ケロシンの標準燃料について安定性を  $-17^{\circ}\text{C}$  と  $+60^{\circ}\text{C}$  との

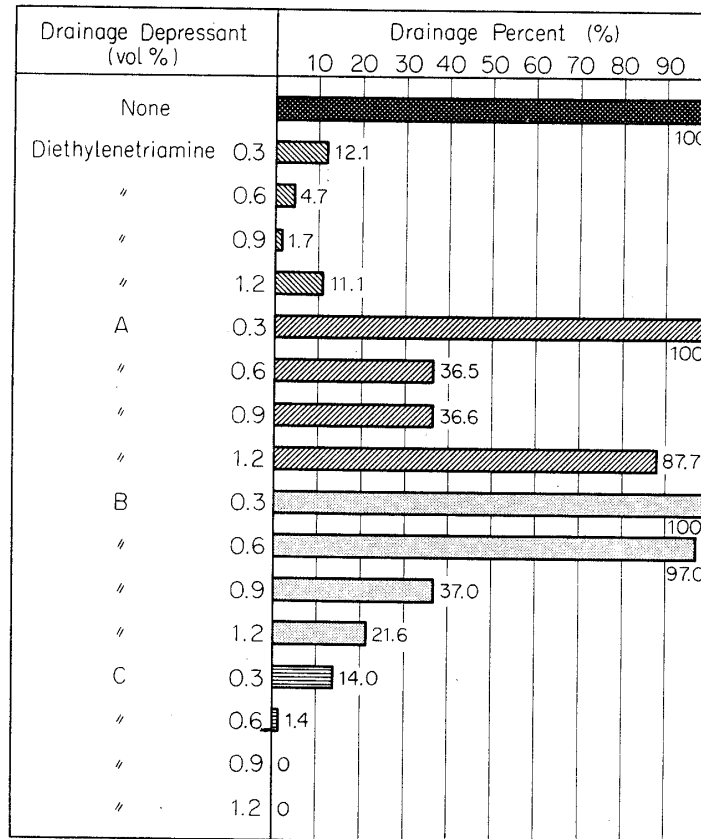


Fig. 1 Drainage Percent of E Type Gelled JP-4 (97 vol %) after Five Temperature Cycles between  $-17^{\circ}\text{C}$  and  $+60^{\circ}\text{C}$ . (A, B and C are proprietary materials.)

間を 5 回往復したときの排液率である。ジエチレントリアミンはじめいくつかの化合物が優秀なゲル化安定剤であることがこの成績からわかる。また、これら物質は燃料として十分通用し、エチレン・グリコールのように難燃性で煙霧の発生傾向が強いものを使わなくて済む。

O/W 型ゼリー燃料の常として、空気中にさらしておくとき水相が蒸発し排液が密封条件下より速く進行する。また、ガラスや金属容器が親水性であるためにその中に入れておくと安定性は劣化する。ところが、ジエチレントリアミンを水に対し 20 vol % つまり、ゲルについてはわずか 0.4~0.1 vol % 加えただけで、E 型活性剤による 97 vol % ゲル化 JP-4 は、大気中に開放しておいても 2~3 週間は排液が起きない。

## 2. 伝火速度

ゲル化 JP-4 は、クリーブランド・オープン・カップによる引火点計測値を数度上回ったところを境として、伝火速度は急激に低下する事実が見出された。図 2 に液温と伝火速度と

の関係が示されている。この実験には試料容器として長さ 1000 mm, 幅 100 mm, 深さ 10 mm の塩化ビニル製のものを用いている。それは、火炎伝ば速度が遅いので、容器の加熱によりゲルが破壊されて縁のところの火炎伝ば速度が全体をひきずってしまうのを防ぐためと、金属が親水性であって、多少なりともゲルが器壁で破壊するのを防ぐことが塩ビ容器にした理由である。

D型表面活性剤でゲル化した JP-4 は  $-3^{\circ}\text{C}\sim-5^{\circ}\text{C}$  に冷却すると、連続相が凍結し突然ゲルは解離を始める。それ以下の温度においては、水のなかに 20 vol % のエチレンジアミンを含むゲルについて計測した値がプロットされている。

非ゲル化 JP-4 の火炎伝ば速度は定常状態において約 100 cm/sec, しかも  $-17^{\circ}\text{C}\sim-23^{\circ}\text{C}$  の範囲にある引火点を反映して、その伝火速度は  $-15^{\circ}\text{C}\sim+30^{\circ}\text{C}$  においてほとんどこの値が変わらない。したがって、JP-4 を燃料とする航空機は parking, taxiing, landing, take-off および cruising いずれの場合でもいったん火が着けば炎上の危険にさらされる。これは引火点が  $38\sim48^{\circ}\text{C}$  にある JP-1 および JP-5 でも同じである。

もし、99 vol % ゲル化 JP-4 を搭載して飛んだとすると、たとえ離陸前に  $27^{\circ}\text{C}$  で伝火速度が液体 JP-4 と比べて  $1/6$  にしか落ちていなくても離陸後 45 分ほどたつと、燃料温度は  $10^{\circ}\text{C}$  ぐらいまで下がり、伝火速度は  $2\sim3$  cm/sec になる。ジエチレントリアミンを添加したゲル化 JP-4 は常温でも無添加のものより伝火速度が抑制されるが、燃料温度を  $15^{\circ}\text{C}$  以下とやや低めに保つことも有力な手段である。図3はゲル化 JP-4 の面に  $0.1\text{mm}\phi$  のアルメル/クロメル熱電対を接点が一一致するように、着火点から 15 cm のところに置いて火炎伝ばに伴う液(ゲル)面の温度測定を行なった結果を示している。  $20^{\circ}\text{C}$  におけるゲル面温度は注目すべき挙動をし、火炎の通過する間温度は単調に上昇し続けるのではなく、極大値を経ていったん温度は下がり再び上昇する。この場合、青炎が輝炎に先行して進むのが観察され、しかも引火点より  $5\sim10^{\circ}\text{C}$  下の温度における液体燃料の火炎伝ばの様相と同じくこの青炎は振動的に伝わってゆくことがわかった。面温度が極大点に昇って極小値に下がるまでの間は青炎領域であり、それ以後が輝炎領域に相当する。熱電対と同じ位置にある光トランジスタが受けた光量-時間曲線を見るとほぼ温度の極小値の位置に変曲点がある。

青炎すなわち予混火炎はゲルの温度を下げるにつれて明瞭には認められなくなり、それに

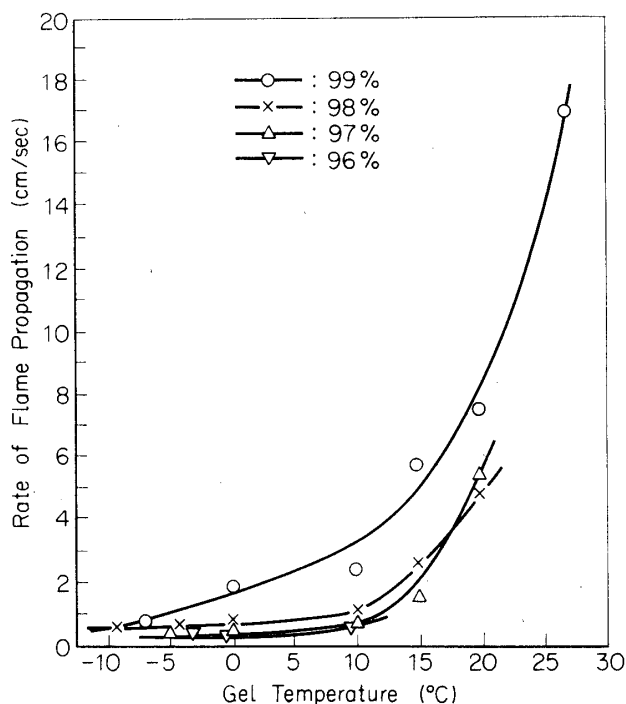


Fig. 2 Rate of Flame Propagation of Gelled JP-4 vs. Temperature

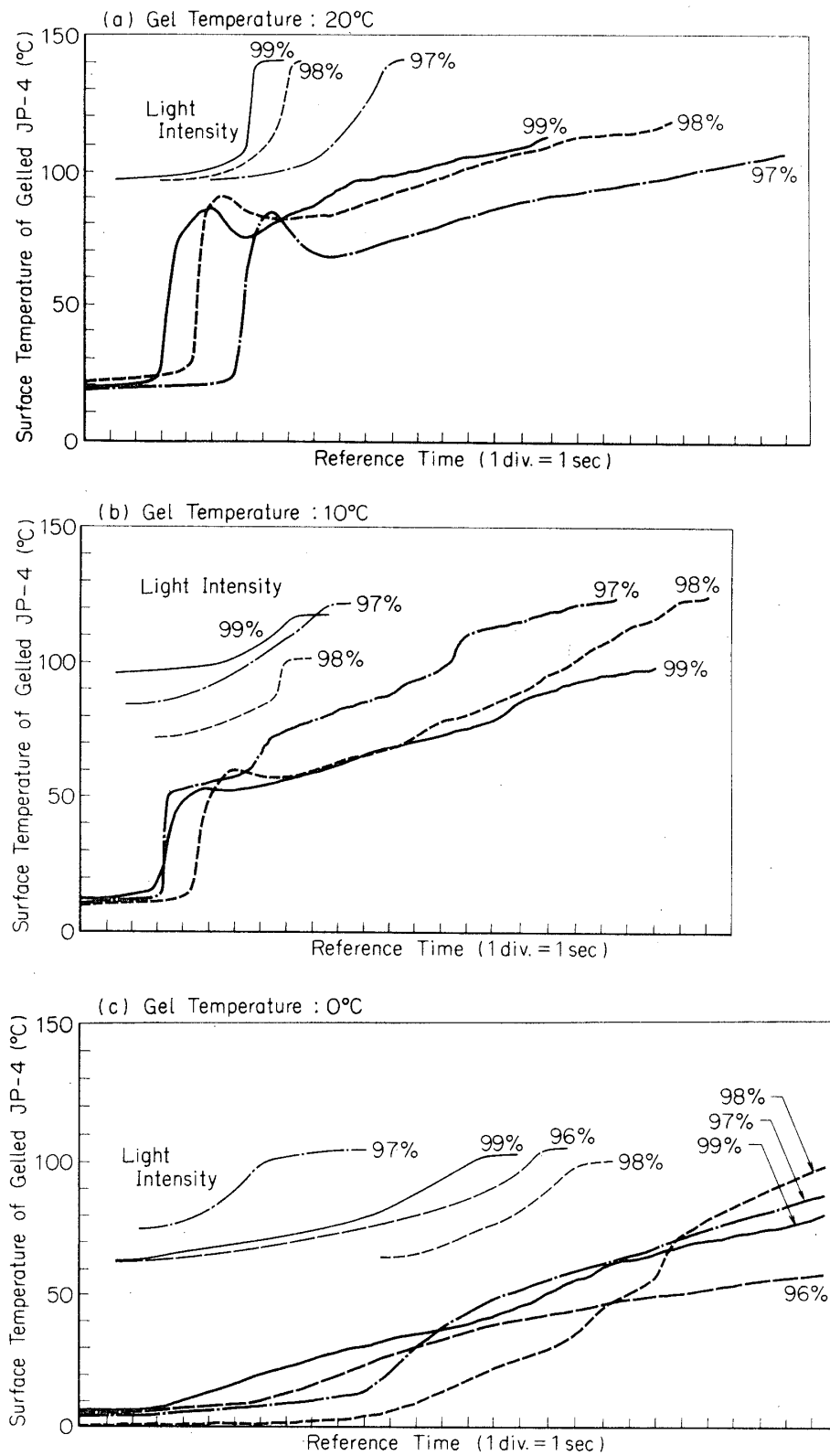


Fig. 3 Temperature Photo-Intensity Behavior in a Position of 15 cm from Ignition Point

つれて表面温度が極大になる現象も目立たなくなる。液温が0°Cになるともはや青炎は全く認められず、表面温度の極大値も存在しなくなる。なお、この表面温度の特異な変化は着火点から近いところで顕著であり、着火点から離れるにつれて、未燃部分への熱伝達に占めるふく射の影響が次第に強まり、この現象は顕著ではなくなる。すなわち、ゲル化 JP-4 は、温度が20°C の場合、着火後約2秒経った15 cm 点でもなお定常状態で火炎が伝ばしてないのである。

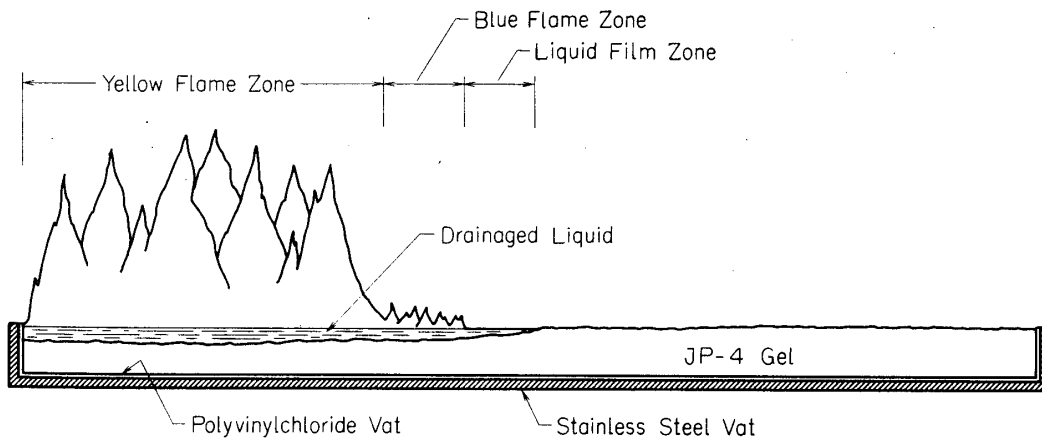


Fig. 4 Scheme of Flame Propagation on JP-4 Pool

図4は青炎が存在する火炎伝ばの概念図である。任意の一点に注目すると、ゲルが解離した液体、青炎および輝炎の順にそこを通り過ぎる。液面の幅は火炎の進行とともに、伝ば速度の絶対値が小さいので、ふく射の影響により徐々に広がっていく。これはゲルの表面に浸入していく流れであり(写真1)、それがどのような速さをもっているか、また液体燃料にみられる ripple を伴っているのかは、火炎伝ば機構の解明につながるものであり、興味ある課題であり、今後の研究をまちたい。

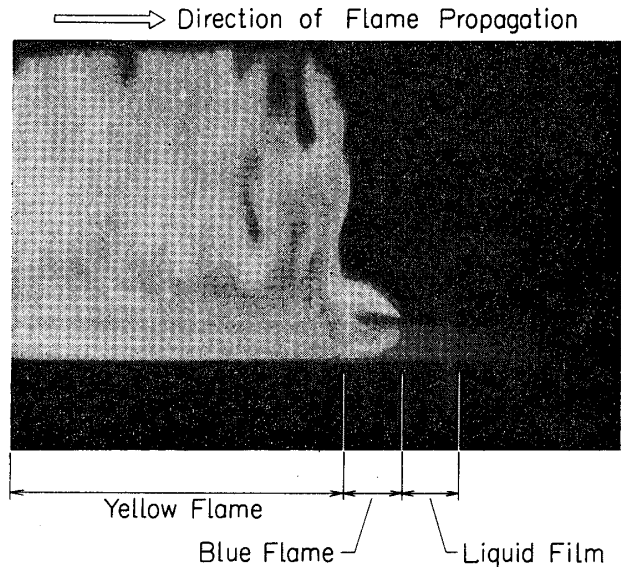


Photo 1. Aspect of Flame Propagation on Gelled JP-4 Pool

### 3. ゲル化燃料の引火点の評価法について

引火点は周知のごとく物理量ではなく、測定方法・測定条件によりでてくるデータはまちまちである。ゲル化燃料にはまだ引火点測定法は制定されていないが、その特性からみてク

リーブランド・オープン・カップ法が在来試験法のうちではもっとも適していると思われる。安全燃料としてのゲル化ジェット燃料の役割は、不幸にも墜落・不時着事故を発生した場合の炎上防止であり、給油時に燃料がこぼれたときの危険性の軽減であるからである。密閉式試験器のように、容器内空間ガスの引火性を調べるのは、ゲル化してもしなくてもあまり蒸気圧は変わらないので意味がない。[1]

開放式試験器でゲル化ケロシンの引火点を測定した結果が図5に示されている。これらの

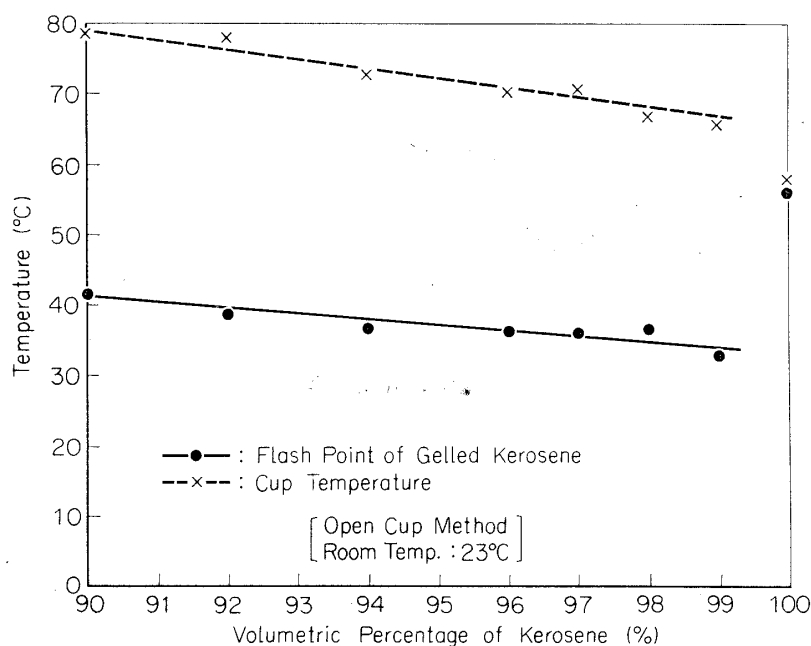


Fig. 5 Flash Point of Gelled Kerosene

データは全く予想に反し、非ゲル化ケロシンの方がゲル化ケロシンよりも引火点が高くなっている。このゲルには安定剤が含まれていないせいであるにしても、コロイド状の油滴がひとつひとつ薄い水膜で包まれているマトリックス構造から推量して、当然ゲルの引火点が液体のそれを上回らなければならないのに、逆の関係になっているのは納得できない。しかし、同時にサーミスタ温度計で引火の瞬間における試験容器(黄銅製)の温度を求めてみると図にプロットされているようにそれは試料温度、非ゲル化ケロシンの引火点よりも高い。

ゲルは内部対流が起こらないだけに、温度を一様にするためのかくはんをしなければ見掛けの引火点が低くなるのはむしろ当然で、かくはんはしないことになっているオープン・カップ法はゲル化燃料に適用する場合、この点は改善を要する。また金属器壁は多少親水性を帯びているので、ゲルは容器に触れている部分から解離する傾向がみられるし、空気との接触時間が長くなると水膜が蒸発しケロシンが遊離して蒸発するから表面の蒸気圧はゲルの温度のみでは定まらない。したがって、ゲルの引火点は引火が認められるゲルの温度とすることには大いに疑義がある。

ゲルの解離が始まる温度は容器温度と材質によって決まり、液体の場合、その引火点は容

器温度にほぼ一致する事実がある以上、準静的条件下におけるゲルの引火点は器壁温度に極めて近いとみるべきである。前報 [1] ではオープン・カップ法で測定したゲル化 JP-4 の計測値が記されているが、それより 3~5°C 高い容器温度を真の引火点と採るべきである。一般に非ゲル化燃料の引火点が排液温度より低ければ、見掛けのゲル化燃料の引火点は排液温度に等しく、逆に排液温度より高ければ液体のそれと変わらないであろう。

#### おわりに

(1) -17°C~+60°Cの温度サイクルに耐えるゲル化燃料の安定剤ジエチレントリアミンが見出された。この物質を連続相を構成する水に対し 20 vol % 加えただけで十分その効果を発揮する。

(2) ゲル化 JP-4 の伝火速度は 10°C 以下にゲルの温度を下げると液体 JP-4 と比べて 1/40 に抑えることができる。その火炎伝ば速度は引火点を境にして急激な変化をみせる。

(3) ゲル化燃料の引火点測定法としては現行法のなかではクリーブランド・オープン・カップ法が最も適しているけれども、引火点はそのときのゲルの温度ではなく容器温度とするべきである。

1972 年 3 月 30 日 材料部

#### 参考文献

- [1] 岩間 彬, 青柳鐘一郎, 相波哲朗, 本間幸吉, 木村元雄: 東大宇宙航研報告 7,2(B) pp 580-603(1971)
- [2] 岩間 彬, 青柳鐘一郎, 木村元雄, 井原博之: 燃料協会誌 51, 2 pp 79~94 (1972)