

航空安全のためのゲル化ジェット燃料

岩間 彬・青柳 鐘一郎・相波 哲朗*
本間 幸吉*・木村 元雄**

まえがき

絶対に落ちないという前提のもとに設計されている旅客機は、軍用機が装備している緊急脱出装置や落下傘をおいていない。では民間航空は全く安全であるかといえば、現実にはそうはゆかない。新聞やテレビで悲しい事故の報道に接するのはめったにないとはいえない。交通機関はどんな優秀なシステムでも100%信頼をおけるものはありません。確かに開業以来人身事故を起こしていない新幹線は細心の安全管理がなされているが、はたして万全といえるかどうかは疑問である。

一次元的な動きをする鉄道と比べて三次元的な運動をする航空機はパイロットがもつ高度の能力、判断に頼るところが多く、人間の属性に起因するミスを皆無にすることはできないという見地に立って安全対策を立てるべきであろう。

安全問題へのアプローチには二つのルートが考えられる。第一は災害や事故が発生しないような技術、システムの開発であり、第二はそれが不幸にして起こっても人命と財産の損失を軽減する方策を探究することである。後者は地震、津波、台風など自然災害対策が典型的な例であり、現在人類のもつ科学技術では防ぎようもないゆえに、これらに対する取組み方は第二の立場に立たざるを得ない。交通戦争が空にまで拡大している現状では航空安全についてもこれと同じことがいえるのではなからうか。

旅客機は電子・油圧機器など、通信・ハードウェア作動操縦機構に二重、三重に安全装置がつけられ、第一の問題について完全性を追究している。しかし、どうしても不時着せざるを得なくなったときの対策となるとせいぜい安全ベルトと非常口があるだけ、航空機は第二の課題については積極的な解決策は何ももっていない輸送手段であるといっただけではいい過ぎであろうか。自動車には近くエア・バッグの取付けなどの安全装備が義務づけられ、衝突、追突を起こしても乗車している人を守ることになっている。現代科学技術の粋を集めた航空機でもある確率（きわめて小さいが）で死傷を伴う不慮の事故が発生するのはまぬがれがたいとすれば、これと同じく万一の場合人命だけでも救助する手だてをもつことはぜひとも必要である。

1966年はわが国の民間航空史にとって悪夢のような年であった。この年、2月から3月にかけて東京周辺において大型ジェット機が3機続けざまに墜落、わずか1か月の間に321名

* 航空宇宙技術研究所

** 三菱石油株式会社

の命が失われ、ついで8月東京国際空港における日航機の炎上により5名、11月には全日空YS-11が松山沖に墜落し50名が死に、航空機に対する国民の強い不信感を買ひ、しばらくは旅客数が激減したことは、まだ多くの人の記憶にとどまっているであろう。これらのうち、3月4日カナダ太平洋航空DC-8が濃霧のなかを東京国際空港へ着陸しようとして機首を下げ過ぎ滑走路手前の誘導灯が並んでいる浅瀬に着水、そのまま激しく堤防にぶつかって炎上した事故と、8月に発生した日航乗員訓練機コンベア880（国内航空所属の飛行機を日航がチャータしていた）が離陸寸前に大きく傾き翼が滑走路と接触して壊れたとみるまに、もれた燃料に火がついたちまち燃え上った事件は、航空機火災の恐ろしさをまざまざとみせつけてくれ、本研究のきっかけとなった。

航空機の事故は比較的速度の低い離着陸直前・直後に起こることが一番多く、このような場合にはたとえジェット機でも安全ベルトさえ締めていれば物理的打撃・衝撃が、乗客・乗員を殺傷する直接原因になることはきわめて少なく、最も怖ろしいのは積載した大量の燃料に火がつき炎上することである。

1960年代における致命的事故の発生を統計で示したのが図1である。全死亡者のなかで火災発生による焼死、窒息死がはたしてどのくらいになるかは、正確な数字はわからないが、少なくとも15%を下ることはあるまい。航空機の墜落は全員が死亡し、機体・部品の破壊がはなはだしいため、原因不明のまま記録に残される例が多い。離着陸時の事故以外飛行中に雷撃、静電気による火災発生が墜落の原因となってもわからぬまま処理されたのもかなりあるかも知れない。この図をみると輸送量の加速度的増加にもかかわらず、死亡者総数は670～1,150人/年の間を増減しており、航空機の安全がいかに進歩しているかを物語っている。しかし、この二、三年死亡者と輸送量との比は横ばいの傾向がみられ、もし今後も航空機利用客の数が過去10年と同じように増加し続けるとすれば死亡者の数もそれにつれてふえる

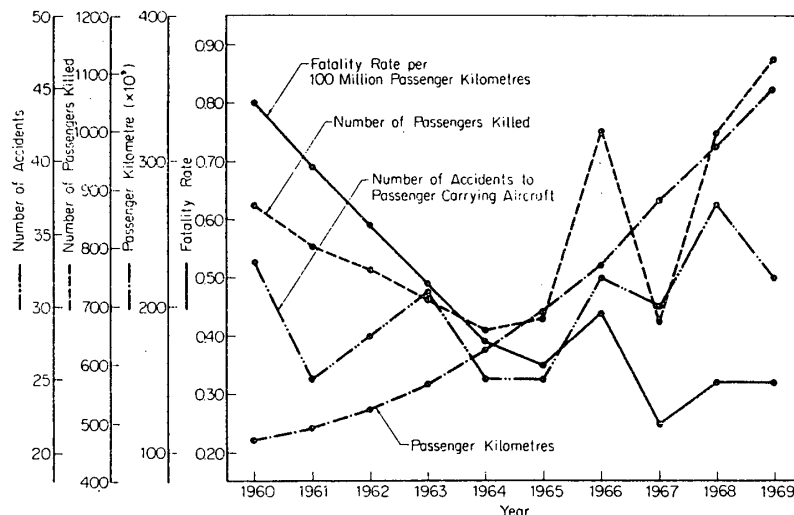


Fig. 1 Tendencies Passenger Killometers and Fatal Accidents
(From ICAO Bulletin May 1970)

という不気味な予言をこの図は含んでいる。特に、注目すべきは、致命的事故件数そのものは10年来あまり変わっていない点で、ジャンボ、エアバスと、大量輸送時代にはいった1970年代以降いったん事故を起こせば一度に被災する人数が多くなり、このような懸念がますます強まってきている。

たとえばジャンボジェット機 B-747 は全重量 332,000 kg の 41.3% にあたる 177,000 l, ドラム罐で 930 本分の燃料を満載時には積んでいる。主翼左右に 3 個ずつ、機体中央に 1 個タンクをもち、客室、貨物室、コックピットを除いたスペースの大部分は燃料で占められていると考えてよい。ジェット燃料としてガソリン、ケロシンを主体とする炭化水素を用いる限り、火がついたら一瞬のうちに火炎に包まれることは必定である。

今日の空の大量輸送時代を予想して米国では 1960 年代の後年から航空機火災の防止対策を真剣にとりあげ、ゲル化および乳化燃料を先頭に現行燃料の引火点を大幅に上昇させ火炎伝ば速度を抑えることを中心に研究を進めてきた [2], [6]~[22]。しかし、現行の燃料に今すぐとって代わるには多くの欠点が未解決のままになっている。本稿では筆者らの開発したゲル化燃料の一般的性質を述べるとともに、従来の安全燃料の問題点を指摘することにした。

1. 燃料システムの安全性向上についての諸提案

液体燃料をただ難燃化するだけならば、なにもむずかしい技術など必要ではない。電解性高分子、酸化珪素や酸化チタンなどの微粒子、可そ剤など難燃物質を添加すれば、粘度と表面張力が増し、タンクが破れた後の流出速度、液面が広がる速度は遅くなるに違いない。寒天溶液のような温度を上げると元の液態に戻る reversible な性質を油に与え、油中に scaffold 構造をつくって固めることができる物質は数多く存在する。たとえばポリイソブチレン、ポリイソブテンに代表される non-hardening ポリマ、ジブチルフタレート、ジオクチルフタレートのごとき可そ剤、ポリビニルアルコール、ナトリウムやアルミニウムなどの金属石けん、ある種の非イオン活性剤、多価アルコールとベンズアルデヒドとを反応させてつくった万能ゲル化剤もその例である。しかし、いずれもカーボン残渣が多く、金属酸化物が燃焼ガス中に存在してトラブルを起こしたり、十分粘度を高めるためには多量に混入しなければならないなどの難点があり、管輸送、噴霧がむずかしい。

第二は、燃料タンク全体を液体窒素で冷却し、引火点あるいは燃焼点以下に燃料の温度を下げる方法が提案されている。火災を防ぐためにはこれより確実な方法はないが、エンジンへ供給する途中に加熱装置を設けなければならないのは無論のこと、JP-4 は引火点が -23°C であるからきわめて高い冷却能が必要で、現用の技術水準では冷却系に大きなスペースをとっておかなければならず、その重量は著しく航続距離を短縮することは必然である。

第三は、多量の消火剤を搭載し火災が発生したとき、いっきに放出するという正攻法である。しかし、事故を想定している以上、火の元はどこになるかわからないから、タンクまわりはもとよりパイプ・ライン、エンジンにも消火剤を準備しなければならず、第二の方法と同じく推進に役に立たない荷物を搭載することになり、軽量化と逆コースの案といえる。

第四は、本稿で述べる燃料のゼリー化またはゲル化で、これがいわゆる scaffold 型ゲルと

異なるのは、油滴を薄い水その他燃焼不活性物質の膜で包み、引火、伝火性を抑制しようというアイデアに基づいている点にある。

炭化水素燃料のゲル化研究の歴史はかなり古い。1930年代に金属石けんでガソリンをゲル化する研究がなされた記録があり、第二次世界大戦のおり軍用機が燃料タンクに被弾、火が着くのを防ぐため、当時府中にあった陸軍燃料廠でガソリンへ1Nのアルカリ溶液に5%の配糖体サポニン類を溶かしたものを加え、振とうしてゲル化燃料をつくった渡辺[1]の研究がある。しかし、筆者らが追試した結果によると、このゲル化剤を用いたのでは、ガソリン90 vol %までしかゲル化できず、しかもガソリンより高い沸点をもつ燃料にはゲル化不能である。そのうえ、安定性もよくなく燃料として実用化のめどが立たないまま終戦を迎えたようである。

戦後おびたしい種類の界面活性剤が開発され、それらのなかには乳化剤としてすぐれたものが多くあり、ワックス、グリース、化粧品製造に、起泡剤、洗浄剤、湿潤剤、媒染剤、凝集剤などの工業製品に、農業乳葉やマーガリン、アイスクリームなど食品に至るまで広く利用されている。日本では皮革工業などで溶剤としてベンゼン、トルエン、ケロシンなどの乳化物が安全性を高め、同時に、水溶性物質を混ぜられるようにしたいという意図のもとに使われてきた実績があるが、燃料とするには濃度が低過ぎるものであった。

液体燃料の安全向上をめざし、研究が組織的かつ活発になされるようになったのは1960年代に入ってから後のことで、ベトナム戦争でジャングルの上を飛ぶヘリコプター、離着陸直前直後に輸送機が北ベトナム軍とベトコンによって撃たれ、火を吹いて墜落、多大の損害を出しているアメリカ軍当局と、ジャンボ、エアバスに代表される巨人機時代を迎え、安全運航の確保を以前にもまして切実な問題として取り上げている連邦航空局が熱心な推進者となっている。アメリカ陸軍がゲル化燃料に対し設定した最低目標は表1[2]に示すように、添加剤は3 vol %を越えないこと、60日間常温・常圧下で貯蔵し安定であること、そして水を加えるにしても微生物の発生は完全に抑える対策を講じておくことが骨子となっている。

もちろん、この関門を通り抜けただけではジェット燃料として採用するわけにはゆかない。筆者らは、JP-4 99.4 vol %, 水0.4 %, および界面活性剤0.2 %からなる安定なゲル化燃料をつくることに成功し、必要に応じ安定度をさらに高め、稠度を調節する方法を開発した[5]。

表1 アメリカ陸軍のゲル化燃料契約の目標

| 要 目 | 最 低 目 標 |
|--------|----------------------------|
| 燃 料 価 | JP-4 97 vol % 以上 |
| 安 定 性 | 30 日貯蔵可能 |
| 使用温度範囲 | -20~130°F (望ましくは-65~160°F) |
| 衝撃安定性 | 150 G/ms |
| 振動安定性 | 0~32 cps @ 0.4 G |
| 適 合 性 | 航空材料全部 |
| 微 生 物 | 発生しないこと |

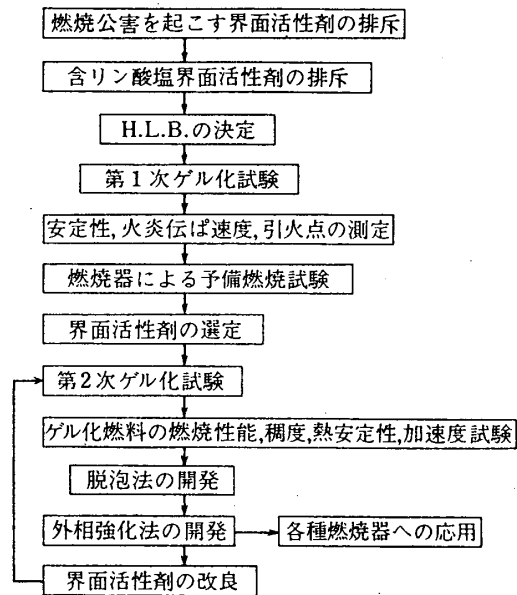
2. O/W系ゲル化燃料の製法、外観および一般的性質

乳化物の定義は、液体中に他の液体が分散した系となっており、連続液相のなかにもう一方の液体が微粒子として非連続的に存在するために、両液が平面的に接している場合と比べて界面の面積が極度に増加した状態を意味している。ゲルは広義の乳化物の一種で、見かけ粘度が非常に高く、流動性が著しく低いものをここでは指す。ASTM D 2507-66 T [3]によると、ゲルは連続マトリックスを形成し、一つの液相が完全に他の液相を包みこんでいるコロイド構造のネットワークを有する液体と定義されている。無機物特に粘土に多くあるスラリー物質、重合がある程度進んだポリマー、scaffold構造をもつ液体もゲルと呼ばれているが、ここに述べるゲル化燃料はいわゆるエマルジョン型である。

エマルジョンは液体中に他の液体がコロイド状に分散しているものである。両液の接している界面の延面積はもとの形状が球塊とするとその $10^5 \sim 10^6$ 倍に広げたことになり、もし表面における分子間力が釣合っていないければ、界面のもつ過剰自由エネルギーのため非常に不安定な状態になる。油滴を安定状態にすぎとめておくためには界面活性剤を用いて外相(水)の表面張力を下げ、表面エネルギーを減少させることをまず手がけなければならない。すなわち、ゲル化燃料の開発はすぐれた界面活性剤を見いだすことが主たる仕事であり、次に記したフローシートの順序に従って進めた。

界面活性剤は燃料添加物であるだけに、選択にあたってまずそれ自身が公害発生源になるもの、つまりアルキルベンゼンスルホン酸ソーダに代表される含イオウ化合物、第四級アンモニウムクロライド塩系の含塩素化合物、さらにビルダーとしてリン酸塩を配合した界面活性剤はたとえゲル化剤としてすぐれたものがあるにしても、候補から除外する原則を立てた。ゲル化燃料は水中油滴、すなわち O/W 構造をとらなければ安全化には役立たないはずであるから、おびただしい種類の界面活性剤のなかから O/W 乳化が可能な H. L. B. (Hydrophile Lipophile Balance) の値として 6~18 をもつものを集め、JP-4 により乳化テストを行ない 20~45 °C にて 97 vol % 以上の燃料成分をもつゲルができない界面活性剤をふるい落とす。

われわれが日常よく使用する乳化物は水分と油分との混合比が釣合いのとれているものが多く、極端に一方へ偏したものは少ない。それでも牛乳、農業乳業、クリーナのように多量の水のなかに、少量の微油滴を分散させることはさして困難ではない。が、ゲル化燃料には水を含めて添加量を最小限に抑え、燃料としての性能を落としてはならないという前提がある以上、ゲルの製造は圧倒的に量が多い無数の油滴をきわめて薄い水膜で包む操作をすることであり、かなりやっかいな問題である。かくはん機翼の形状、かくはん速度、乳化母液の組成、注油速度、温度、容器形状等の要素がからみ合っただけでなく、乳化の成否に関連し、乳化物の



安定性、レオロジー的性質にも影響を与えることに注意しなければならない。原則は O/W 系乳化物の調製法にほぼ同じ、乳化母液に、大量の燃料油を注げばゲルができる。

試作したゲルを、ガラス、プラスチックおよび不銹鋼製のせん付きびんに保存し、安定性、火災伝ば速度、引火点を計測した。この試験で、高濃度ゲル化はできるが、安定性に乏しく、火災伝ば速度と引火点が液体と比べてそう目立った改善が認められない界面活性剤 A, B とほぼ表 1 の要求を満たす C, D 4 種の界面活性剤が第一次選択に残った。

A, B を用いたゲルは、かなりはやく排液 (Drainage) が進むが、ゲルが 60 vol % 以上残っていればゆっくりかくはんすると再びゲルに戻る性質がある。この現象は Gibbs が泡沫膜の安定性を解釈するために導入した次式の膜の弾性概念から一応説明できる。

$$E = 2 \frac{d\sigma}{dS} S$$

ここに、 S = 外相液の表面積、 σ = 表面張力である。

水膜の厚さの一樣性を乱すような変形が起こると、ゲル化が促進され、生成したゲルはかくはんを続ける限りゲルは安定である。無限に遅い変形では弾性が消失し、排液が起こるのをこの式はうまく表現している。しかし、高濃度ゲルの場合強くかくはんすると膜厚が一部で薄くなり、膜が破壊され安定性を失う現象は説明できないようである。

多くの乳化物は分散相が 74 vol % を越えるとプラスチックの性質があらわれ、平らな面におとしたとき広がらなくなり、分散相形状は球形から tetrakaidecahedra に変わり、できるだけ内相液を多量にとりこもうとし、外相液のスペースを小さくする構造に近寄る。

このゲルを平面で切り、二次元的にみると理想構造は図 2 のようになり、境界は運河のように水膜が連続相をなして油滴を包みこむ正六角形とならなければならない。分散相はコロイド液のように球状の方が安定であるが、それでは水の量をそう極端には減らせないので、強力な界面活性剤により水の表面張力を減少させ、水膜と油滴を強固に結びつけ過剰の表面自由エネルギーに打勝ってゲルを安定に存在せしめることが肝要である。

内相液を増すとゼリーのように次第に stiffness を帯びてくる様子は、ゲル化燃料を黒い紙の上にのせて広がらないことを示す写真 1 から納得されよう。液体燃料をこのような状態にしておけば、容器を倒したとき液体のように非常な勢いで広がらないし、地面になかなかしみこんでゆかない。水の上にこぼしても固まっているから分散しがたいし、O/W 構造であ

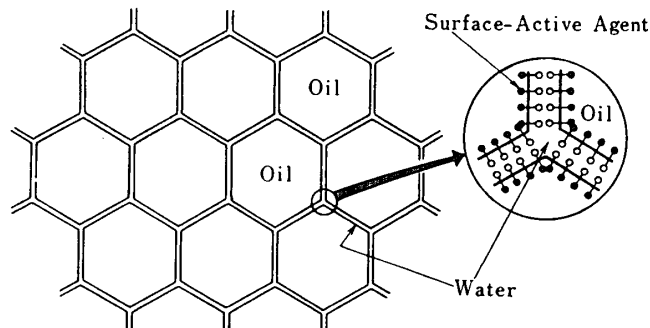


Fig. 2 Ideal Structure of Hydrocarbon-Fuel Gelled with Water and Surface-Active Agent

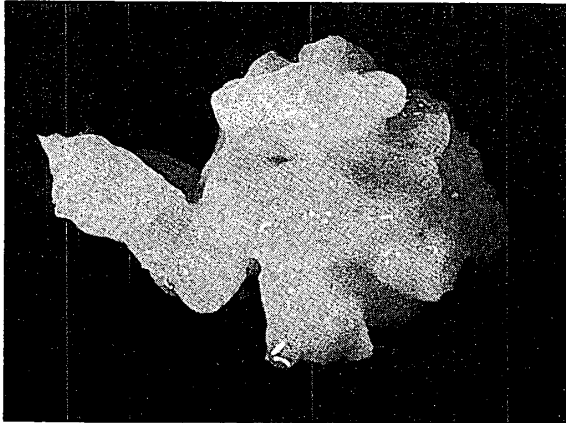


Photo 1 Photograph of Gelled JP-4 on Black Paper

うに安定性に乏しい。かくはんすれば元のゲルに戻るが、実際問題として貯蔵中絶えずかくはんするわけにはゆかないので、最終的には放棄することになった。しかし、これらによりゲル化した JP-4 について実機ジェットエンジン規模までの各種燃焼器に適用した燃焼試験とあわせて引火点測定、噴霧試験を行なった結果、ゲル化燃料の製造に使用できる活性剤を見いだすため次の指標を得た。

第一に、界面活性剤が多量成分である油に対し溶解度が高いと、添加量が余分にいるので

るから、外力を与えると急速に水の中に油滴が散り間違って海面へ流したときでも油膜となっておおようなことはない。

底のない円筒にゲルをつめて平面上に垂直に立て、上方に円筒を動かしたときゲルはあたかもホッパから流下する粉体と同じ挙動を示すことが、図 3 に示されている。94 vol % 付近で H/D が最小となるが、これは D 活性剤の稠度が最低になる濃度でもある。

界面活性剤 A, B は 97 vol % 以上のゲルをつくることはできるが、すでに述べたよ

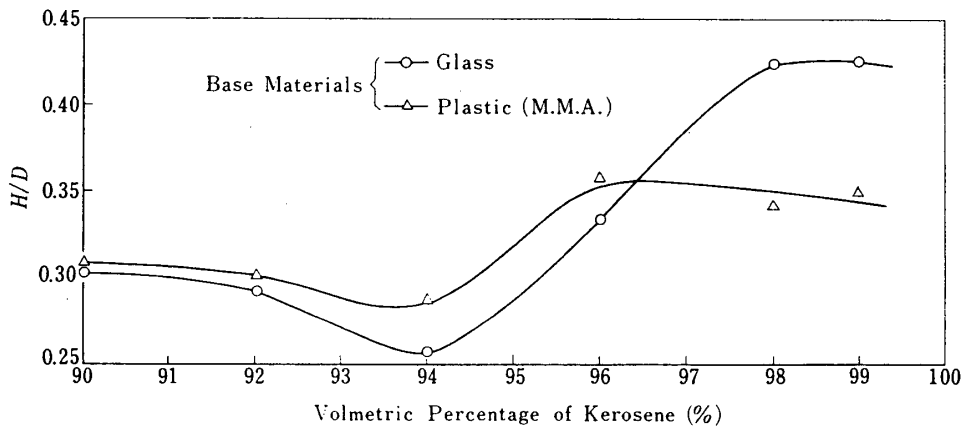
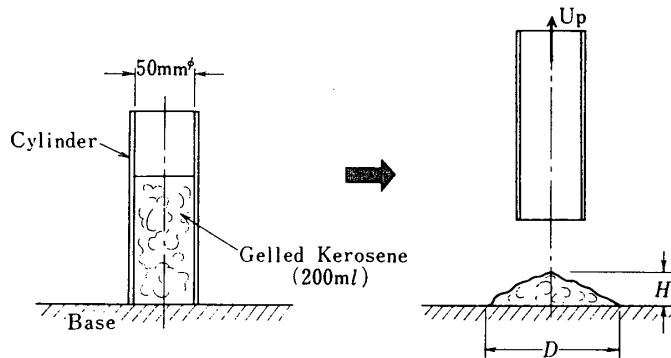


Fig. 3 A Vertical Cylinder Test for Measuring Angle of Repose

なるべく避けた方がよい。第二に、アルキル基が長く、分子量の大きい活性剤は燃焼ガス中にカーボン粒子が多量に発生する原因となり、排液した残りが粘稠なグリース状残渣となって噴射ノズルをつめ、極端な場合は管輸送の途中でつまってしまう。第三に、ゲルの稠度があまり高過ぎたり、あるいは低過ぎると噴射とポンプ油送が困難になることがある。圧送ガスや空気をまきこみやすくなったり、管抵抗が大きくなるからである。

以上述べた予備実験の結果、C活性剤はカーボン発生量が大きく、粘度も高過ぎるという理由で見捨てることになり、D活性剤のみが残った。実験室規模の5l容量から中間プラントの180lまでのゲル化燃料の試作がなされた。写真2は180lドラム罐で、らせん帯かくはん翼を備えたミキサにより300r.p.m.の回転速度で混合しているところのひとこまである。

このような機械的かくはんによってつくったゲルは当然多量の気泡を含み、計量誤差、キャビテーション、噴霧むらの発生、燃料流量制御機構やシャ断弁の誤動作の原因にもなりか

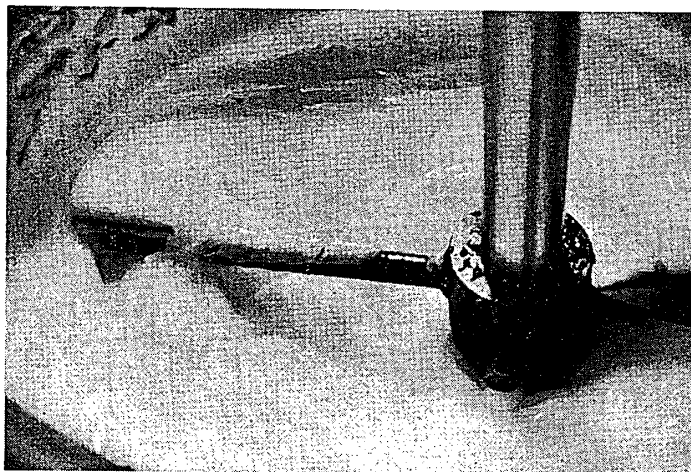


Photo 2 Production of Gelled Jet-Fuel Using 180l Mixer

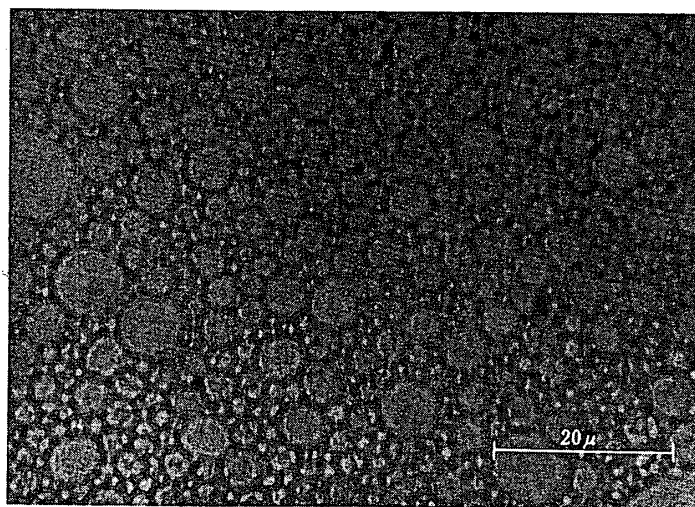


Photo 3 Microscope Photograph of Gelled JP-4

ねないので、ジェットエンジン燃料などの用途には次の工程で完全に脱泡処理をしておく必要がある。さらに、より安定性の高いゲル化燃料を望むならば、外相の強化をしなければならぬ。この目的のために原液のなかに強化剤を添加することを勧めたい。また、ゲルのなかの水が凍るのを防ぐためにエチレングリコールなどの不凍液成分を加えることが可能である。これらの添加剤のうちではゲルの安定性向上に寄与するものがある。

ゲル化 JP-4 を顕微鏡でのぞくと 95 vol % 位の濃度までは写真 3 に示すように径 1~数 μ の油滴が薄い水膜で包まれている様子が観察できる。しかし、さらに濃度を上げると水膜が薄くなるため写真では黒ずんでみえる油滴間の境界はさだかではなくなる。図 2 に示したように二次元的にみると油滴は正六角形、立体的には tetrakaidecahedra 形状に近くなっていることがわかる。

このような幾何形体をとるとゲルは寒天、ゼリーと同じく降伏点をもつようになる。一般にゲルの粘度を直接計測するのはチキソトロピー性があるためむずかしいので、代わりに稠度を尺度として C および D 活性剤でゲル化した灯油の流動性を示したのが図 4 および図 5 である。C 活性剤は濃度が増すにつれて稠度が単調に減少しているが、図 5 をみると D ゲルは 95 vol % を境として濃度を増すとかえって稠度が上昇している。この原因はまだ不明であるが、図 3 に示すようにゲルのバルク流動性にも相関があり興味ある性質である。

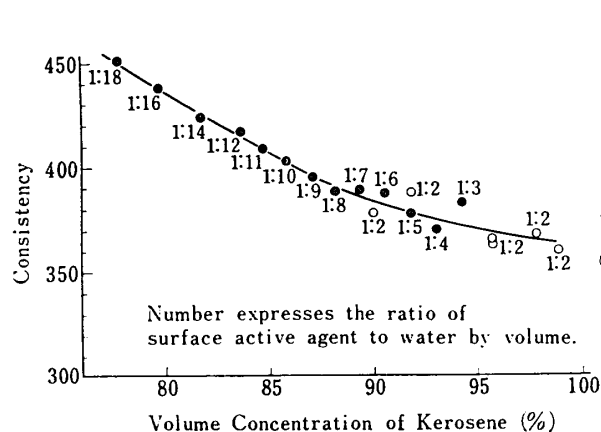


Fig. 4 Consistency of C-Type Gelled Kerosene

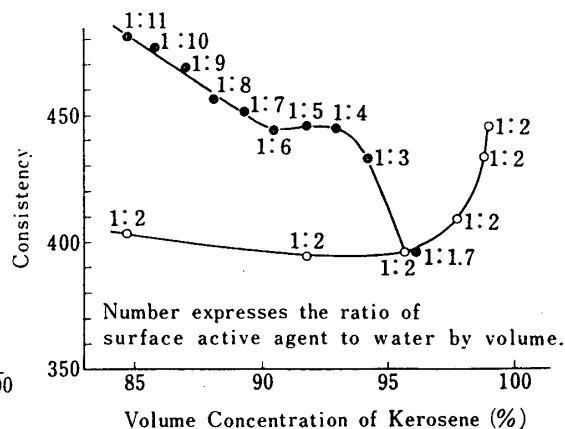


Fig. 5 Consistency of D-Type Gelled Kerosene

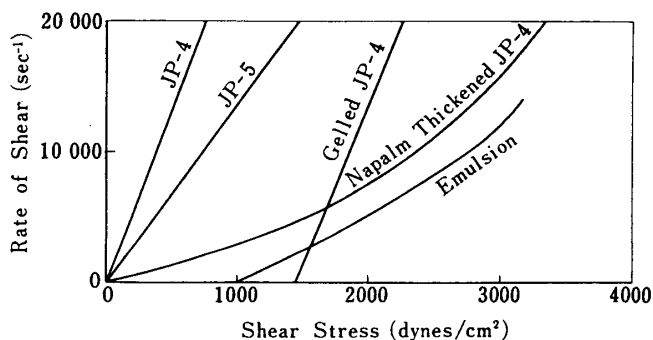


Fig. 6 Flow of Thickened Fuels

この燃料はゲルに共通するチキソトロピー性を有し、ある臨界値を越えた強い振動、かくはんあるいは加速度を与えると、液体と同じように自由流動性が現われてくる。図6に示すように稠度測定器(ペネトロメータ)を用い、貫入深さとコーンの重量から降伏点を求めることができる。ゲル化JP-4は2000 dyne/cm² ならずの降伏点をもち、しかもせん断速度とせん断応力との間に直線関係が成立つから、レオロジー物性は plastic とみなすことができる。これに対し、乳化燃料は pseudoplastic として取扱ってよい。ナパーム爆弾原料や高分子、可溶性を溶解した炭化水素油は降伏点をもたない粘弾性液体である。

ゲル化燃料に対してはふんい気と容器材料がその安定性に著しく影響を与えるとともに見掛けのレオロジー物性も変える。新鮮空气中にさらしておいたりゲルが空気泡を多く含んでいると、次第に単位油滴径が大きくなる。さらに放置すると、連続相(水)の蒸発と、界面活性剤の親油基が空気へ配向するために排液が進む。ガラスと金属容器は親水性材料で、ゲルは接触面で次第に壊れてゆく。したがって、これらの材料でつくった管の中にゲルを通す場合は、ポリエチレン、塩化ビニル、テフロンのごときプラスチック管で圧送するときと比べ、粘性抵抗にかなりの差が現われる。親水性パイプの内側はゲルの連続相を形成する水でぬれるために高い押し出し圧が必要であるのに対し、親油性の後者材料を用いた場合にはゲルの流れは自由ピストン流と同じふるまいをする。つまり、ゲル化燃料の貯蔵容器、送油管にはプラスチックに代表される親油性材料を使うことが、安定性を確保するうえで重要な条件の一つである。たとえばCおよびD活性剤でゲル化したJP-4 99 vol % は、ポリエチレン容器に入れ密せんして15~20°Cの温度で保存し、6カ月放置したが、排液現象は全くみられず、塩ビパイプにより普通のギャポンプでほとんど途中で排液を起こすことなく給油することができる。もちろん、途中でニードル・バルブ等の強い応力がゲルにかかるギャップがあれば排液は防ぐことはできない。一方、ステンレス容器に入れたゲルは1週間で0.05%程度の解離が起こる。

ゲル化燃料の特長の一つに、水による連続相の形成を反映して、電気伝導性がよくなることが挙げられる。その比抵抗は10⁶~10⁸ ohm-cm で非ゲル化燃料の10¹³ ohm-cm と比べ格段に低下している。この性質によって給油、輸送、洗浄の際の事故原因として、もっともおそれられている静電気着火、航空機においてはさらに落雷による燃料タンクの爆発が防止できよう。しかし、燃料タンクのなかに水が含まれているとバクテリアの発生によるタンク腐食の懸念がある。燃料に僅かなメチルセロソルブを添加することによって防食効果は十分あげることができるとはいえ、燃料に水が入っていることは好ましいことではないので、他の引火点の高い腐食、発錆を起こさない燃料——たとえばヒドラジン——を水の代わりに使うことが考えられている。このゲル化燃料は水の含有量を0.4~0.6 vol % と従来みられない低い値におさえているものの、石油ストーブなどキャピラリーで吸上げるタイプの燃焼器に用いるには、まだ水の含有量が多過ぎ改良が望まれる。

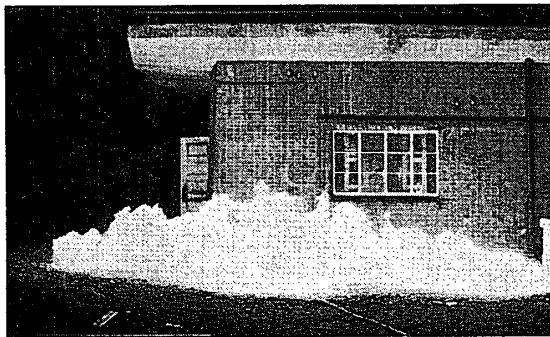
3. 落下炎上試験

航空機が墜落、不時着をすれば地面と接触したときのショック、摩擦で大なり小なり機体が壊されることは免れない。慣用旅客機は翼けたを支柱にして隙間をシーラントでうめた翼

タンク、ゴム製補助タンク、それにキャビンの下部空間の一部を燃料タンクとしており、B-727のごときリヤ・エンジンをもち航空機になると胴体部のしたに送油パイプをはわせ翼タンクから燃料を送っているの、胴体、翼が接地すれば、燃料がもれるのは覚悟しなくてはなるまい。少しずつもれるだけならば大したことはないが、おおかた燃料はどっと流れ出し、急速に空気との接触面積を拡大し、霧状に四散するであろう。

点火源にはこと欠かない。地面との摩擦で金属部品は高熱になり、粉となって散らばったジュラルミン粉が発火することさえある。ふだん、航空機が着陸するときでも、タイヤが接地した瞬間強い火花がでるのがみられる。回転しているエンジンにはまだ火が残っているであろう。それでも流出した燃料に火が着かなかつたとしたら奇蹟というほかはない。ゲル化航空燃料はたとえ不幸にして墜落しても燃料が散らばらないこと、そして火が着いても一瞬のうちにキャビンまでが炎上するのを防ぎ、乗客・乗務員が脱出するいとまがとれるところにその効用がある。他の燃料、燃焼器についても同様、たとえば石油ストーブを倒してしまった場合、気がつくのが遅れても大事に至ることはなくなるであろう。

19mの高さから4lのJP-4およびD活性剤でゲル化した99vol% JP-4をポリスチレン容器に入れて落とし、地面に接触した瞬間作動する着火装置をおき燃焼状況を撮影した写真4をみると、両者の炎上性の差は歴然としている。しかし、落差が大きくなればなるほど、燃料の散らばる範囲・状態はゲルと液体との間に次第に違いがなくなる。50mの高さから180lのB活性剤でゲル化した98.3vol% JP-4の炎上性は目でみたところでは大差がなかった。もちろん、B活性剤が安定なゲルをつくらないためでもあるが、半面ゲルが霧状

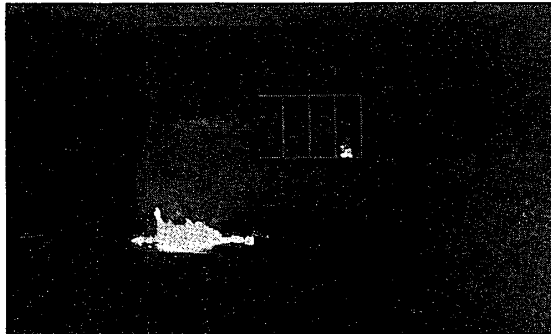


1 sec

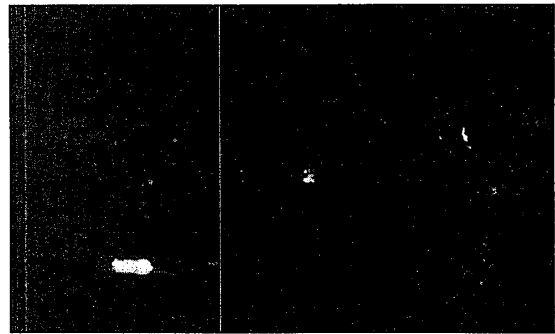


10 sec

Photo 4 (A) Drop-Burning Test of 4l JP-4 from a Height of 19m.



1 sec



3 min

Photo 4 (B) Drop-Burning Test of 4l D-Type Gelled JP-4 from a Height of 19m.

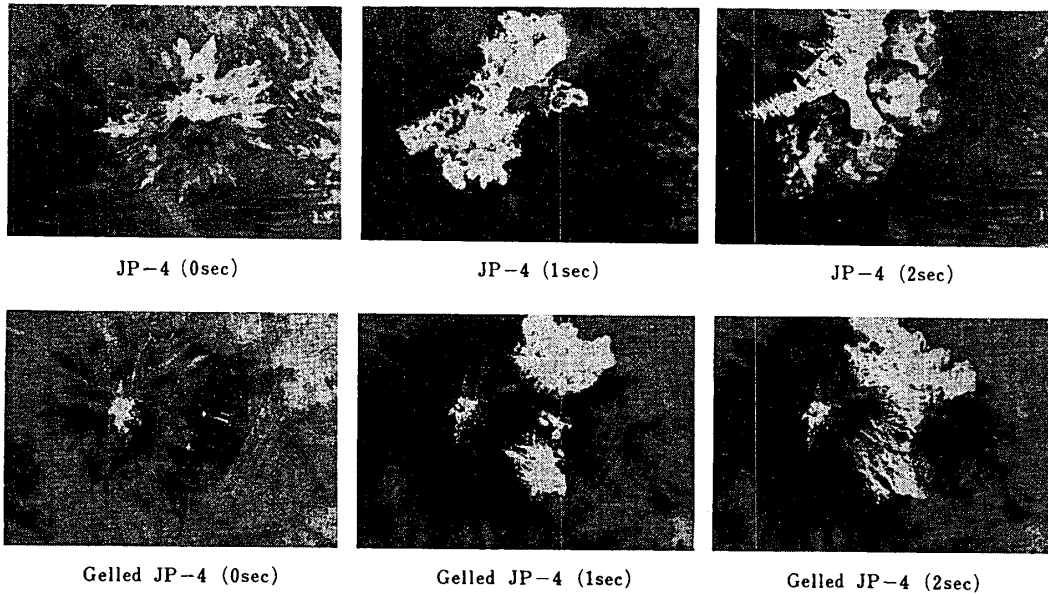


Photo 5 Drop-Burning Test of 180 l JP-4 from a height of 50m

になれば液体と炎上性については変わりが無いことを物語っている。写真5に示すように高度50mのヘリコプターから高速カメラで撮ったフィルムをみると霧化燃料中を火炎が伝ばする速度は絶対値ではかなり異なるけれども、とても人が逃げ出せる余裕が持てるほど十分低くはならない。しかし、ゲル化燃料はエンジン燃焼室へ噴霧したとき液体と燃焼性を異にしてはかえって困ることを考えれば、この性質は他の難燃化手段によっては得られぬ長所であるといえよう。ゲル化燃料が安全に寄与できる点は、あくまでも容器からどっと流れ出したときの炎上防止であることを忘れてはならない。

4. 噴霧および燃焼試験

図7に示す径2mmのノズルをもつ単式渦巻噴射弁を用い、噴霧試験を行なった結果では[4]、噴射圧が0.8~3 kg/cm² (gage)の範囲においては、噴霧コーンの広がり角はBゲル化JP-4のほうがやや狭いが、それより高圧になると両者の噴霧状態に差がないこと、99 vol %のD活性剤でゲル化したJP-4は低圧の場合でも液体と変わりが無い様子が観察され

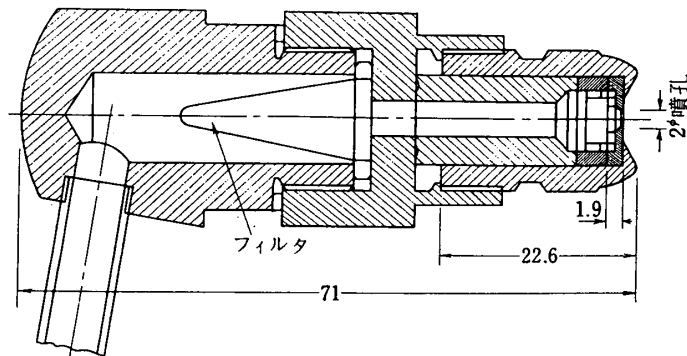


Fig. 7 Swirl Type Injection Valve

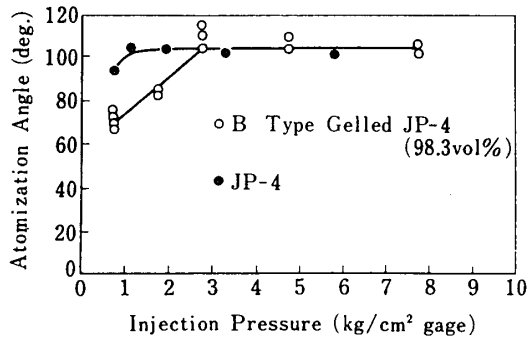


Fig. 8 Divergence Angle of Atomized Gelled JP-4 (98.3 vol %) and JP-4 Liquid

る (図8). いずれにしても, ジェットエンジン燃焼器への噴射は 5 kg/cm^2 を越える圧力差で行なわれるから, 低圧において, ゲル化 JP-4 の種類によっては噴霧化が完全にゆかないものがあるのは, 実用上気にすることはないと思われる. 噴射圧を上げ, 十分発達した液体と変わらぬ噴霧ができているところが写真6に示されている.

慣用ジェットエンジンの燃料噴射ノズルは $0.3 \sim 1 \text{ mm}\phi$, ゲル化燃料はここを通るとき強いせん断力をうけて一部ないし大部分液体に戻る. 写真7は $0.4 \text{ mm}\phi$ ストレートノズルに

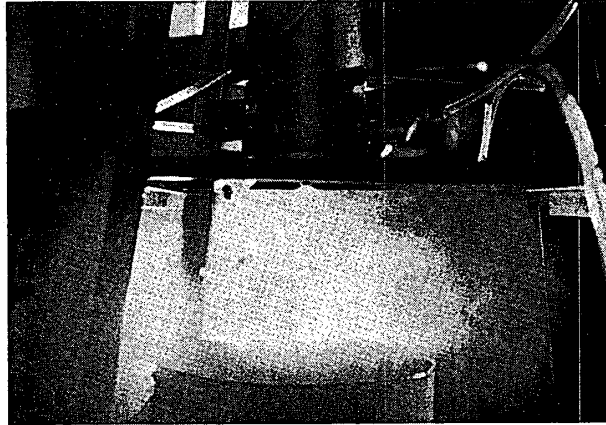
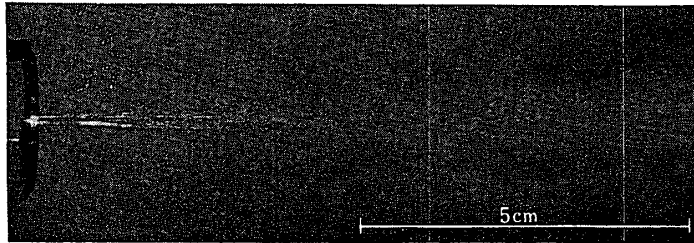
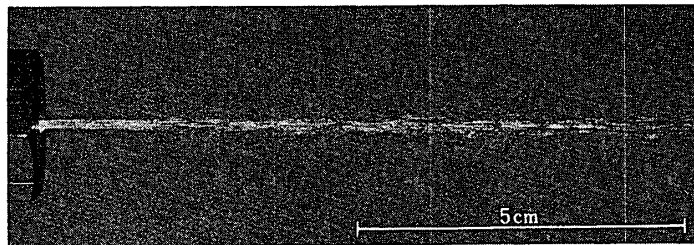


Photo 6 Injection Aspect of B-Type Gelled JP-4 (98.3 vol %) Atomized by Means of Swirl Type Injector



JP-4



Gelled JP-4

Photo 7 Aspects of JP-4 and Gelled JP-4 Atomized by Means of Straight Nozzle

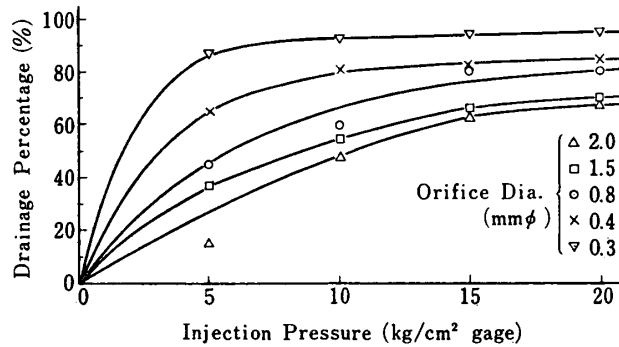


Fig. 9 Drainage Percent of a Gelled-Fuel Injected

よる噴霧状態を撮った写真の一例で液体と比べて、プラグ流（一次液体流）の長さがやや短いほかは違いがないことがわかる。図9にノズル径と噴射圧を変えて99 vol %のDゲル化JP-4を噴射した後の、液体とゲルとの比率、すなわち排液率のデータがプロットされている。この図をみると0.3~2.0mmφのノズルを使用する限り、ノズルを通る間に100%液体に戻して燃焼室へ送りこむためには20 kg/cm²をはるかに越えた噴射圧が必要になることがわかる。このような機械的方法ではゲルを完全に液体へ戻すことは困難であるけれども、市販のゲル破壊剤のなかにすぐれたものがあり、約0.3 vol % 加えただけで急速かつ完全に液体に戻すことができる。液体とゲルの混合物を細い供給パイプで送ると、途中でつまったり、噴射むらの原因となるが、排液した残りのゲルの性質がD活性剤でゲル化したJP-4のように、流動性に富むものであれば問題はない。AおよびB活性剤を用いると上記のトラブルを起こす。総体に界面活性剤はアルキル基の長いものほど、排液後のゲルが固くなる傾向がみられる。アメリカでは液体に戻さないで、ゲルのままエンジンで燃焼させる方針をとっているようであるが、このタイプのゲル化燃料は液体に戻すのはやさしい半面、100%ゲルのまま燃焼室へ送るのは不可能に近い。燃焼室へ到着する前に、燃料コントローラ、バルブなどせまいギャップを通ると、せん断応力でどうしてもゲルは破壊されるからである。しかし、ゲルと液体との混合物は異常燃焼、火炎の吹きとびをひき起こす原因にはならない。

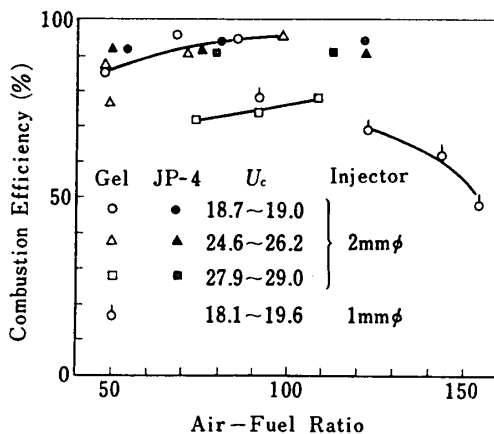
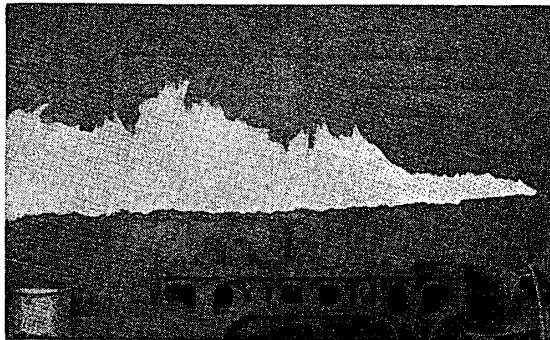
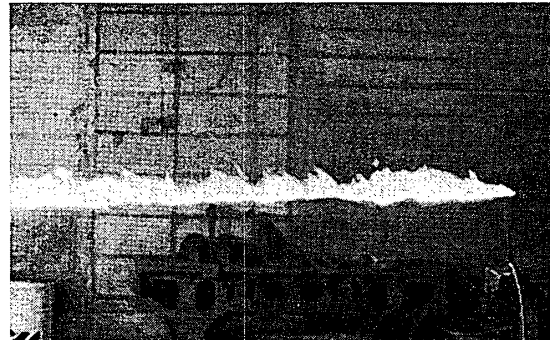


Fig. 10 A Comparison of Combustion Efficiency between 98.3 vol % B-Type Gelled JP-4 and JP-4

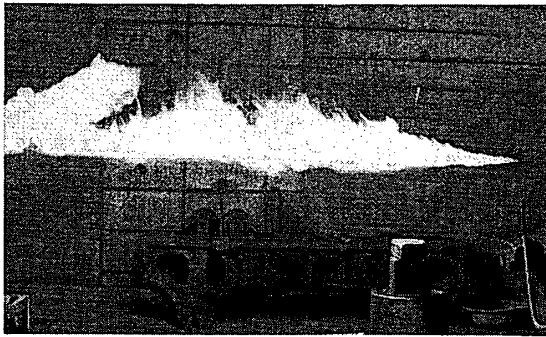
ノズル出口のさきにブンゼンバーナをおき噴霧状燃料の火炎を比較したのが写真8である。ノズル口径が0.4mmと小さい場合は火炎形状に液体燃料と異なる点は見出せないが、2.0mmφにもなると火炎フレアの広がりやゲル化JP-4のほうが狭く、点火用バーナを消すと火炎は吹きとび、落下点のところで静かに燃焼する。つまり、炎上試験のところでも述べたように、ゲル化燃料は細い孔から霧状に噴出させると、火炎形態は液体と同じであるが、ゲルにかかるせん断応力が小さく、排液率が少なくすむ大きなノズル径——燃料タンクが裂けた場合には、普通その裂口断面は燃料噴射ノズルと比べてずっと



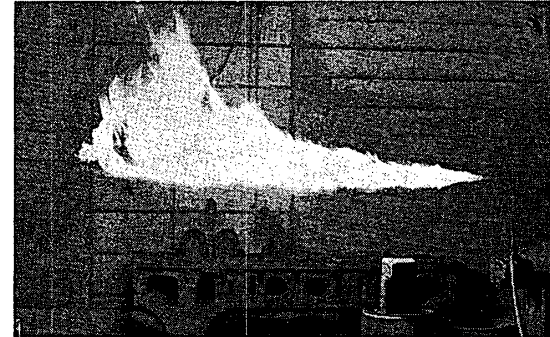
JP-4 Liquid



D-Type 99 vol % Gelled JP-4. The flame is out if a pilot burner is removed.

Photo 8 (A) Flame Photograph of Injected Fuels (Nozzle Dia. 2 mm, Injection Pressure 15 kg/cm² (gage))

JP-4 Liquid



D-Type 99 vol % Gelled JP-4. No flame-out occurs even if a pilot burner is removed.

Photo 8 (B) Flame Photograph of Injected Fuel (Nozzle Dia. 0.4 mm, Injection Pressure 15 kg/cm² (gage))

大きい——から燃料を放出すると火炎がそう高く上がらないことが、ここでも示されている。

B 活性剤でゲル化した 98.3 vol % JP-4 を単式渦巻噴射弁をもつ罐形燃焼器で連続燃焼させ、燃焼効率を求め最大断面風速 U_c をパラメータとして空燃比との関係で示したのが図 10 である。この図をみると、風速 19 m/sec 以下の低いところでは液体と差はないが、28 m/sec 以上になるとゲル化 JP-4 の燃焼効率は大幅に低下している。同じ燃焼器で高速気流中でも液体燃料の燃焼効率は落ちていないだけに、これはゲル化燃料の欠点とみられぬこともない。しかし、この原因はゲル化燃料滴の燃焼速度を overall にみると液体のそれより低下し、燃焼室の長さ不足をきたしていることに基づき、根本的には 1.7 vol % の添加物の存在がまだ多すぎることを意味している。筆者らはジェットエンジンなど高級な燃焼器には 99 vol % を下まわる濃度の燃料は適当ではないと考えている。Crawford は流量を補正すれば 97 vol % 程度の乳化燃料でも、液体との間に発生推力の有意差がないことを実機ジェットエンジンで確かめている [14]。

5. 引 火 点

ガソリン、ジェット燃料や灯油の見掛上の引火点をもしゲル化することによって高い温度に引き上げ、燃焼するときには本来の性状に戻すことができるならば油火災は急減するに

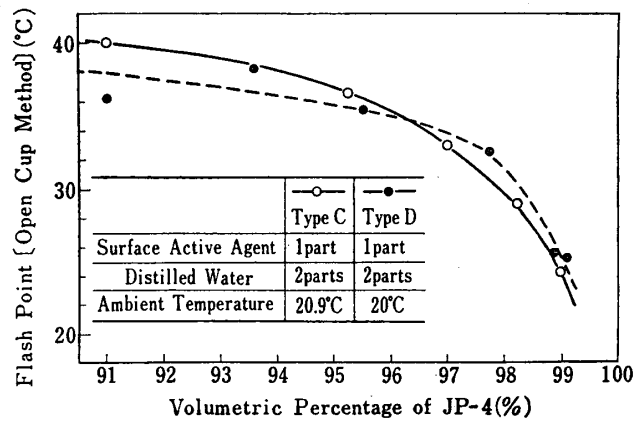


Fig. 11 Flash Point of Gelled JP-4

違くない。ではゲル化によって引火点はどのぐらい上昇するものであろうか。しかし、もともと引火点は厳密な意味の物理量ではなく計測器、計測方法ででてくるデータはまちまちである。ゲル化燃料の特質からいって、在来試験法では正確なデータを求めることはむずかしく、試験法自体引火点測定に適していない点があることを指摘したい。

なぜならば、現在の方法では試料容器を外から定められた昇温速度で加熱するが、ゲルはマトリックスが固定していて内部対流が起こらず、かくはんしない限り液体のように試料全体が、一様温度にならないからである。ゲルは加熱面すなわち器壁と接触しているところから排液を始め、試料表面が液体でおおわれる。こうなれば引火点は液体と変わらぬ値がでてくるか、そうでなくてもゲル化燃料本来の引火点をかなり下まわるデータが得られるのは当然である。容器が金属製と指定されているのも、金属材料は親水性が強いから加熱中に排液が促進される一因となる。図11は試料をかくはんすることなしにクリーブランド・オープン・カップ試験器でゲル化 JP-4 の引火点を計測した結果である。もし、かくはんをして試料温度を一定に保ち、容器をプラスチックに代えるならば見掛けの引火点の値はこれより2～3°C は高くなる。

ここにジェット燃料について制定されている6つの規格のうちどれが一番安全か10年来の議論がある。密閉引火点試験器による計測では、低沸点留分を多く含む JP-4 は、ガソリンに近い着火性をもっていて、引火点は -23°C である。反面、この蒸気圧が高過ぎるのが都合よく、航空機タンクに貯蔵されている場合には温度が 16°C を越えていると燃料蒸気が過濃側にはずれるため、雷撃をうけたりタンク内に電気火花が飛ぶようなことがあっても火が着かないから、安全であるという意見があるが、ジェット機は高空を飛ぶため、燃料も次第に冷却され、離陸後45分を経ずして可燃範囲に入り、着陸するまでそこにとどまっているゆえ、このことだけで JP-4 は比較的安全であるとするのは早計である。一方、ケロシン (JP-1 および JP-5) を使用すれば燃料温度が 21°C 以上の燃料ガスと空気との混合気は可燃であるが、それも離陸後1時間と続かず不燃性となる。したがって、JP-4 はその引火点が低いこともさることながら、タンク内のガスはおおむね飛行中は可燃範囲にあることを認識しなければならない。

では、JP-4 の代わりに引火点が 38°C 以上の JP-1 か JP-5 のいずれかを採ればよいでは

ないか、わざわざゲル化する必要はあるまいとする考えをもつ人も多いであろう。しかし、ケロシン蒸気はガソリン75%、ケロシン25%からなるJP-4と違って燃料濃厚側における可燃範囲が狭いため逆火による火炎の吹きとびが起りやすいという欠点をもっている。離陸直後機首を上げ過ぎたり、特にB-727のようにリヤ・エンジンをもつジェット機にいえることであるが、グランドスポイラが飛行中に故障して持ち上がったりと火炎アウトをしやすいのである。したがって、まだ全部の航空会社がJP-1あるいはJP-5を採用してはいない。燃料が噴霧状に飛散すれば、ケロシンもJP-4も小火炎、火花によって容易に発火し、飛行機が上昇してふんい気圧が低くなったとき燃料に溶けている空気が泡となって出てゆくが、その泡の着火、燃焼性はかえってケロシンの方が高いし、さらに流れ出た燃料に火がつけば、火のまわる速度は両者の間にそう大きな違いはないので、ケロシンの採用によって著しく安全性が改善できるとはいえない。

非ゲル化JP-4の開放式試験器による引火点の値は -17°C 、タグ密閉式試験器では前述のごとく -23°C と得られるので、ゲル化によって引火点は大幅に上昇したかにみえる。しかし、密閉試験器により水に対し不凍液を3%含む99 vol %ゲル化JP-4の引火点を測定すると平均 -15°C 、常温をはるかに下まわり開放式試験器によるデータとひどい食い違いをみせる。これがもし事実とすれば安全向上には何も役立たないのではないかと、この疑問を抱かせる。しかもASTMおよびJIS規格によれば引火点 80°C 以下の燃料についてはタグ密閉試験器によるよう指定されている。

この問題に対するわれわれの考えは次のとおりである。密閉式試験器によるとデータに再現性が乏しく、ばらつきの下限をとると液体の引火点とそう変わらない値となってしまうのは、液体ならば加熱していく場合でも器内の空間を占める燃料ガスの蒸気圧はすぐ平衡に達するが、ゲルは油滴の一つ一つが水膜で包まれている構造になっているため、蒸気圧の平衡がくずれると蒸発が遅れ、再び平衡に達するまで分のオーダの待時間を必要とする。したがって、パイロット炎を密閉試験器の口蓋を開けてさし入れたとき、いったん引火しても、次にわずかの待時間をおいただけでは、再びパイロット炎を突っこんで引火しないのは当たり前のことではあるまいか。密閉試験法では試料の昇温速度は $1^{\circ}\text{C}/50\text{sec}$ と指定され、蒸気圧の平衡がこれに追い付かないのである。

Reid 蒸気圧の値はJP-4が2.3 psi、ゲル化JP-4は1.7~1.9 psiである。この値から判断すれば、密閉試験器により計測した引火点はJP-4の -23°C をせいぜい 10°C 上回る程度であろう。しかし、これら蒸気圧の値も平衡値であって、われわれが知りたいのは突発的な事故によってゲル化燃料が新鮮空気に触れた直後に蒸気圧がどのように変わっていくのか、引火性あるいは可燃性混合気ができにくいかどうかということである。準静的条件のもとに引火点、蒸気圧を求めても、直接ゲル化燃料の評価には役立たない。まわりのふんい気、環境の急変に対する応答が遅く、蒸発速度や温度の変化が定常になるまで長時間かかるというゲル化燃料の特質が活かされているからこそ、タンクが破れても散らばらず、引火しにくく、そして伝火速度も低いのである。

ゲル化燃料に対しては新しい角度から引火点の計測法を考えるべきであると思う。

6. 伝火性

液体燃料はゲル化によって安全性が高くなるという。その意味は伝火速度が低くなる点にあるといっても過言ではない。何も航空機の墜落・不時着のみならず、タンク・ローリ、タンカそれに車の衝突座礁は炎上事故につながる危険を秘めていることは、3年ほど前、トリー・キャニオン号が英国ドーバ海峡の両側に突き出た暗礁に乗り上げ炎上した事件を引き合いにだすまでもなく、先進諸国では最近この種の惨事がひん発している。しかし、仮りに火がついても火のまわりさえ遅ければ、貴重な人命を助け出せるのに、これら液体燃料を積んだ乗物・運搬具の炎上を防ぐ研究は従来あまり関心と呼んでいなかったように思われる。

長さ1000mm、幅100mm、深さ10mmのステンレス製バットにすりきりまで入れた試料により測定した、4種のゲル化JP-4の表面を伝わる火炎速度のデータが図12~15に示されている。火炎速度は93vol%以下の濃度ではきわめて再現性がよいが、いずれも95vol%を越えると火炎が一様な伝ば速度では進まず、データは大きくばらつく。これは実験温度が24°C~27°Cと引火点を越えているからで、火炎が速く進むときには予混火炎が走っているのと同じで、この場合青炎が先行し輝炎はそのあとを追いかける。これに対し、火炎がゆっくり進むときには輝炎のみが認められ青炎の存在は目視では認められず、伝ば速度は液体と比べ1/50~1/100のオーダーにまで落ちる。

青炎が先行する速い火炎伝ばがみられるケースでもたいてい火炎がいったん止まり輝炎伝ばに移行し、また青炎が走る現象を繰り返す。つまり火炎は振動的に伝ばする。

しかし、AおよびB活性剤でゲル化した高濃度JP-4は1000mmの長さを火炎がいきなり突つ走り、液体そのものより火炎伝ばが速いというデータが出ている。これらの活性剤でつくったゲルが不安定であり軽質分が早く蒸発するためか、ゲル化により蒸気圧を下げたことがかえって裏目に出て引火性混合気ができやすくなったためなのか二つの原因が考えられる

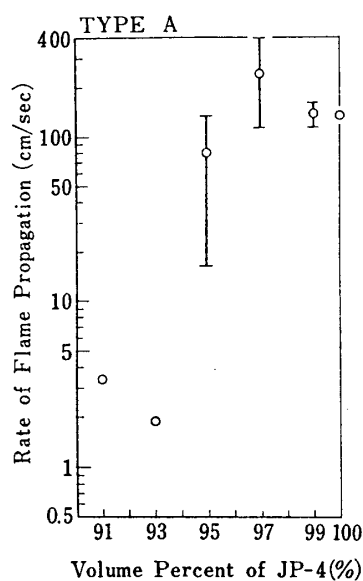


Fig. 12 Rate of Flame Propagation on Gelled JP-4 Pool (Type A)

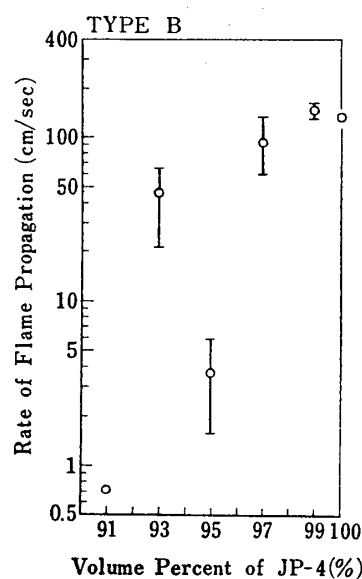


Fig. 13 Rate of Flame Propagation of Gelled JP-4 Pool (Type B)

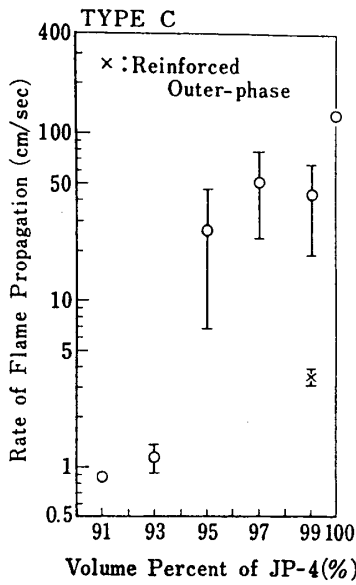


Fig. 14 Rate of Flame Propagation on Gelled JP-4 Pool (Type C)

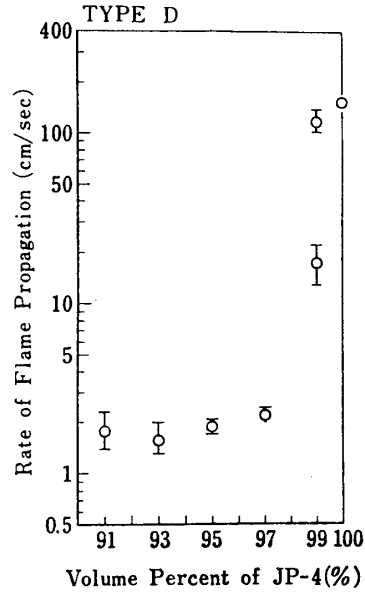


Fig. 15 Rate of Flame Propagation of Gelled JP-4 Pool (Type D)

が前者である可能性が強い。火炎伝ば速度は見掛けの引火点を境として非連続的に変化すること、輝炎を生じゆっくり伝ばしているとき、その速度を律しているのは火炎ふく射であること、そしてせっかくゲル化しても不安定なものしかつくれないとしたら徒労というよりはかはない——これがゲル化 JP-4 の火炎伝ば実験から得た知見である。

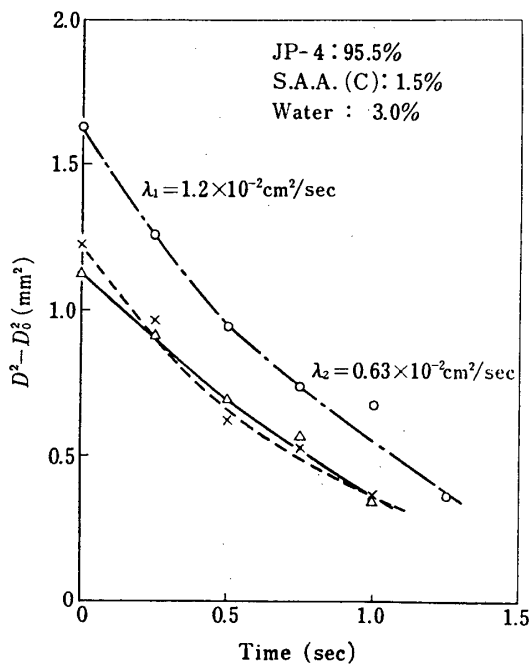


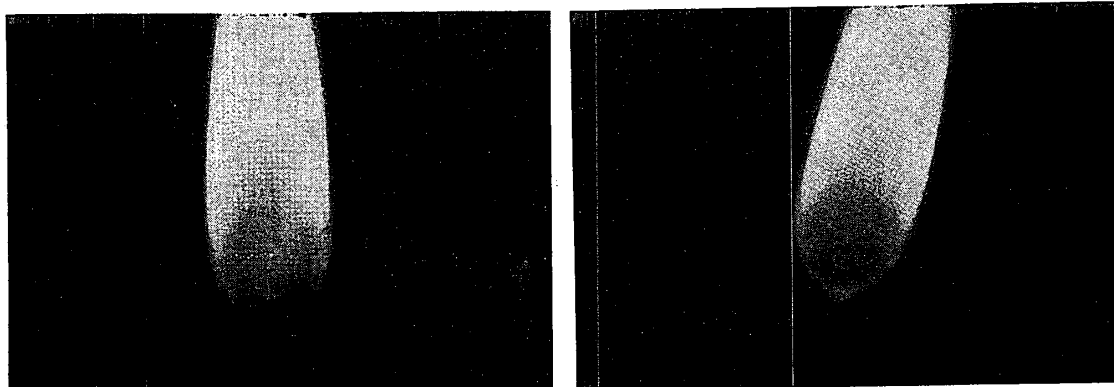
Fig. 16 Burning Rate Curves for Gelled JP-4

CおよびD活性剤でゲル化した JP-4 は、99 vol % でも液体燃料と比べ 1/2~1/20 に下がっている。もちろん、これでは満足できる値ではないが、図 14 に示すように連続相 (水) を強化したゲルは安定性を高め、伝火速度をさらに大幅に下げることができる。

7. 燃 焼 速 度

ゲル化燃料をそのまま従来の液体燃料燃焼器に応用することができないのは、キャピラリで吸上げるタイプの燃焼器や噴霧燃焼器であろう。蒸発型燃焼器には別段問題なくゲル化燃料が適用できようが、他の燃焼形式については基本的な燃焼特性の詳細な検討を経なければ、燃焼器の設計すらできない。それらのうち、最も重要な情報は燃焼速度である。

約 0.2mmφ のシリカ・ファイバに 1.5mmφ 前後のゲル化 JP-4 を吊し、大気中における燃



Normal Combustion

Puffing

Photo 9 Droplet Combustion of Gelled JP-4

料滴径の減少速度を求めた。周知のごとく、一般液体燃料においては液滴径 (D) と燃焼時間 t との間に $-dD^2/dt = \lambda = \text{const.}$ が成立つ。ゲル化燃料滴の燃焼の場合には、図 16 に示すように燃焼前期においては $\lambda = 1.2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ とほぼ液体と同速度で燃焼するが、後期では $\lambda = 0.63 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と燃速が下がり、火炎からの熱伝達によりゲルの排液が起こり、遊離した水が燃焼を遅滞させている。

写真 9 は 95.5 vol % のゲル化 JP-4 の油滴燃焼を撮影したもので、その一枚は微水滴のとび出しによる火炎外包のゆがみをとらえている。ただし、この例は添加剤の影響を強調するため濃度を低くしており、燃料として実用にはならない組成についての実験であり、99 vol % を越えるようになると燃焼後期における不均一性の強い燃焼はみられない。燃焼試験の項で述べたことであるが、98.3 vol % のゲル化 JP-4 が液体の特性値に基づいて設計した噴霧型燃焼器で燃焼効率が落ちるのは、燃焼速度の低下によるものである。

おわりに

ゲル化はガソリンから重油、原油まで可能である。将来は航空燃料もさることながら、他の用途への期待が大きいのでいくつか例をあげておこう。

第一は大型タンカの安全に役立てたいという要望がある。タンカが衝突したとき不幸にして油火災が起これば火炎のすごさと汚染の範囲は想像を絶している。そこで、原油タンクの空間へボイラ廃ガスを導入して不活性化し爆発事故を防ぐ対策が講じられているが、これでは衝突したときの火災防止には役に立つまい。もし、原油をゲル化しておけば、油面に静電気がたまるおそれはかなり薄らぐから、不活性ガスのタンクへの導入と併用することにより、タンク内の水洗はそう心配せずに行けると思われる。

石油産地において原油を積みこむ際に、連続ゲル化装置を用い原油をゲル化してから日本へ運ぶようにすれば保険代わりになる。添加薬品は原油に対して 0.2~0.3 vol % にあたる界面活性剤、あとは 0.7 vol % の水だけである。タンカ衝突事故がいったん発生すれば、1 トンの流出原油を処理するのに 1 トンの界面活性剤が必要だといわれているのだから、経費がそう高過ぎるということはあるまい。

第二は重油の燃焼脱硫に利用する可能性があるのではないかということである。重油は 5

%もイオウを含むものがある、それを全部除去しようとするれば濃厚なアルカリ溶液を多量に投入しなくてはならぬ。強アルカリのもとでも乳化力の強い界面活性剤を見いだすことが先決であるが、もしそれができれば燃焼生成物のなかに含まれる硫酸塩、亜硫酸塩の形でイオウを回収することにより、公害防止に寄与するであろう。

第三は一般燃焼器への応用である。火災発生件数がいっこうに減るきざしがみえない日本においては、家庭暖房器具を始め産業用燃焼器の安全向上は焦眉の急の問題である。最近の火災による犠牲者は、焼死よりも煙にまかれて死ぬケースが多いという。新建材が発生する煙とガスが、窒息死の数がここ二、三年来火傷死を追い越すようになった原因といわれているが、これには石油火災が多くなったことも付け加えるべきである。

石油を使用する燃焼器が炎上すれば猛烈な勢いでまわりの酸素が奪われ、一酸化炭素を発生する。火の手が上がるのを遅くすることが、痛ましい犠牲者を減らす道である。ゲル化燃料はこの問題解決の一つの指針になるのではあるまいか。

第四はロケット燃料への応用である。アポロ計画の主役を演じているサターン・ロケットの第一段エンジンを始め、数多くの大型ロケットにブースタ推進剤として、米ソともケロシンと液体酸素の組合わせを採用している。液体ロケットは全重量の80%を越える燃料を積んでいて、文字どおり燃料タンクが飛んでいるようなものである。それだけに、燃料自身の流体力学的、レオロジ的性質がロケットの飛しょう安定性に密接な関連をもっている。洗面器に水をたっぷり入れて運ぼうとすると、液面が揺れて手の方がそれにつられて動き、思わず水をこぼしてしまうことがある。液体ロケットでもタンクのなかで同様の現象が発生すると、ロケット全体が揺さぶられる。これを sloshing という。また、燃料がタンクから大流量、高流速で出てゆくとき、タンク出口のところで swirling と呼ばれる強い渦が発生しロケットに意図しない回転を与え、誘導と姿勢制御の妨げになる。ゲル化燃料はある程度の stiffness をもっているの、このようなトラブルを起こさないとされる。

では、このような期待にこたえるだけの、欠陥が少ないゲル化燃料が現在できているのだろうか。アメリカでは添加剤量を 3 vol % まで緩和すれば安定なゲル化燃料ができると報ぜられているけれども添加剤自身が燃焼ガス中に含む炭素発生量を増加させる、排液した残りのゲルがゴム状物質になる、燃焼安定性を劣化させるなどのトラブルが発生し、エンジン故障を起こすおそれがまだ多分にあるため、いま一步のところにとどまっている。これに対し、われわれが開発したゲル化燃料は 99 vol % 以上の濃度でも貯蔵法に注意すれば非常に安定であり、必要に応じ、さらに安定度を高め、稠度が調節できる特長を有し、実用にかなり近づいたと思われる。

ジェット・エンジンのような精密、せん細な燃焼器の燃料へ界面活性剤を添加するのは、ガソリンに砂糖をぶちこみレシプロ・エンジンに使うようなものだという人がある [24]。しかし、界面活性剤が燃料として通用し、沸点、蒸発性、燃焼性などが被ゲル化燃料に準じた化合物を選べば、今まで登場したゲル化炭化水素燃料の難点は九分どおり解決される。界面活性剤 D はまだ十分とはいえないが、前記要求にかなりこたえている。

もちろん、まだまだ問題点はいくつも残っている。次の七つをあげておきたい。

(1) H. L. B. 6~18 の範囲で乳化能がすぐれ、在来品と比べ分子量が画期的に小さい界

面活成剤の合成。

(2) ゲル化燃料が0.4~0.7%の水を含んでいるのは、メチルセロソルブを燃料に添加することによって微生物発生、腐食が抑制できるとはいえ、実用に二の足を踏む最大の欠点となっている。水の含有率をさらに1けたも2けたも減らす研究がなされねばならない。

(3) 排液を促進するという理由でガラス・金属容器を嫌うのもゲル化燃料の短所である。ゲル安定剤を含む水を用いることによって安定性は高くなり、親水性容器にも貯蔵できるようになるが、今度は燃料に対しわずか0.03%添加した安定剤そのものが、特に燃焼に悪影響をもたらす心配がある。

(4) ゲル化を能率よく進めるためにかくはんが必要であるが、機械的混合法によるとどうしても気泡が入り、安定性を悪くし、キャビテーション、大きな計量誤差を生ずる原因となる。超音波、振とうなどによる混合法は狭義の乳化燃料すなわちあまり濃度が低いゲルをつくるのに向いているが、97vol%を越えるとマトリックスが硬直化してくるから、振動を強く与えると連続相が揺さぶられゲルが破壊するはめに陥る。

現段階では、ゲルを調製した後に脱泡過程に移さなくてはならない。気泡の入らないゲル化製造法の確立が切望されている。もし、コンパクトで軽量の瞬間ゲル化機が開発されれば、航空機が事故を起こし、不時着するほかにどうしようもなくなったとき、装置を作動させてタンク内の燃料をゲル化しようというアイデアが実現できよう。

(5) 物理的手段によって大量のゲル化燃料を完全に液体へ戻すことははなはだ困難である。確かに、化学薬品によってゲルを破壊することはきわめて容易であるけれども、破壊速度を制御する技術はまだ開発されていない。

(6) 界面活性剤公害というものがある。たとえ、イオウ、塩素、燐酸などを含む界面活性剤は始めから除外されてはいるものの、起泡力、表面張力低下能の強い物質は河川を汚染し、川辺や海岸に住む鳥類、魚介類に危害を与える。また、プランクトンの異常発生、赤潮の原因になるという。界面活性剤はタンカ遭難の場合は別として燃料として燃やしてしまうので、洗剤のごとく下水に流されるわけではないが、当然のことながら自然界に悪影響をもたらさない無害物質でなければならない。

(7) サービス条件における給油法、洗浄管理、容器、計量法についての研究はまだほとんどなされていない。燃焼性についても細部にわたる究明が遅れている。

以上は筆者らが気付いた点であるが、まだまだ指摘すべき問題は多々あると思われる。ともあれ、燃料システムの安全向上は燃料による大気汚染、海や川の汚染による公害の防止とならんで最近大きくクローズ・アップされてきた。過密地帯、石油コンビナート地区における地震、交通対策を含めた広い意味の安全対策はなにも政治家、行政官、都市改造研究者だけにまかしておくわけにはいかない。土木、建築、機械などのハードウェア技術者だけでなく、石油技術者への大きな課題であるに違いない。安全問題は候補者が実行できそうもない青写真を選挙前に広げただけで済むことではない。とくに燃料安全技術の開発は着実かつ急速な展開を今ほど切に望まれている時代はない。

終わりに、本研究を熱心に御指導、協力して頂いた当研究所航空安全委員会委員長河村龍馬教授、科学技術庁航空宇宙技研の大木原動機部長、鈴木(邦)燃焼研究室長、三菱石油研

究部の上司に心から御礼申し上げます。

1971年6月15日 材料部

参考文献

- [1] 渡辺貞 私信1970年9月
- [2] A. Beerbower, J. Nixon and T. J. Wallace; AIAA 3rd Propulsion Joint Special Conference No. 67-503. Washington D. C./July 17-21 (1967).
- [3] ASTM Standards, Parts 17 and 18, Jan., 1967.
- [4] 相波哲朗, 本間幸吉; 「第11回航空原動機に関する講演会」前刷 pp. 33-36 東京2月, 1971.
- [5] 岩間彬, 苅込時夫, 細田 貴, 木村元雄; 第8回燃焼シンポジウム前刷 pp. 51-54 大阪 1970年12月.
- [6] K. J. Lissant; Jour, Coll. & Interf. Sci. **22**, 462-468 (1966).

Papers from AIRCRAFT FLUIDS FIRE HAZARD SYMPOSIUM, 1966 Proceedings.

- [7] A. Beerbower and W. Philippoff; "History of Gelled Fuels—Their Chemistry and Rheology", pp. 86-109.
- [8] W. E. Brown; "Safety Fuels—From Theory to Practice", pp. 110-138.
- [9] R. Chute; "Feasibility Investigation for Burning Gelled and Emulsified Fuels in a Gas Turbine" pp. 139-164.
- [10] K. J. Lissant; "Emulsified Fuel Studies", pp. 165-176.
- [11] T. G. Horeff; "The FAA Fluids Fire Hazard Research and Development Program", pp. 17-20
- [12] F. P. McCourt; "US Army Fire Hazard R & D Activities", pp. 56-61.

Papers from NATIONAL AERONAUTICAL MEETING, Society of Automotive Engineers, April 27, 1967, New York.

- [13] A. Beerbower, J. Nixon, W. Philippoff and T. J. Wallace; "Thickened Fuels for Aircraft Safety", # 670364.
 - [14] W. J. Crawford; "Operation of the GE T 64 on Emulsified Fuel", # 670369.
 - [15] J. C. Harris and E. A. Steinmetz; "Emulsified Jet Engine Fuel", # 670365.
 - [16] J. R. Lucas; "A Preliminary Evaluation of an Emulsified Fuel in a Model T 63 Turbine Engine", # 670368.
 - [17] J. Monarch; "Environmental Testing of a Gas Turbine Engine with Emulsified JP-4 Fuel", # 670367.
 - [18] G. Opdyke Jr.; "Initial Experience with Emulsified Fuels at Avco-Lycoming", # 670366.
-
- [19] Anonyms; "P&W Tests Thickened Fuel in Turbojet" Aviation Week & Space Technology.
 - [20] V. J. Siminski & J. Nixon; ASME Preprint 69-WA/GT-2, 1969.
 - [21] T. R. Koblish & L. E. Bell Jr.; ASME Preprint 69-WA/GT-3, 1969.
 - [22] A. T. Peacock & L. D. Christensen; SAE Paper 700251, 1970.

- [23] D. A. Pattison; Chemical Engineering, Aug. 14 (1967).
- [24] R. J. Serling; "LOUD AND CLEAR—The Full Answer to Aviation's Vital Question". Are the Jets Really Safe? Doubleday & Company, Inc. New York 1967.