

福井市でのナフサ満載するタンクローリの 火災事故について

藤 井 求 ・ 鳥 取 孝 太 郎

On the Fire Accident Starting from Tank Lorry Loaded with Naphtha

Motomu FUJII, Kotaro TOTTORI

A large fire occurred in a tank lorry loaded with naphtha in 1975 near Fukui Station, and its ignition source was considered to be an electric spark due to static electrification of splashing oil. An experiment was made to find out the cause of electrification and to measure the static charge produced in both oil mists and a metal damper to which the oil jet collided. Light oil was used for safety instead of naphtha. 60 seconds after the oil collision the damper isolated from earth acquired a potential as high as 3 kV, and the current flowing into the damper was 8 nA. It was considered from other evidence that in case of naphtha these values could be 5 times higher. Considering the results obtained it can be assumed that the damper having a high contact resistance ($>3 \times 10^{10} \Omega$) and a high static capacity ($>142 \text{ pF}$) could result in a spark.

1. ま え が き

油は一般的にその導電率が非常に小さい。油の運搬、流動等にはその取扱い上十分注意する必要がある、単純な操作ミスによって不慮の静電気発生に起因する重大な火災事故が発生することがある。^{1), 6)}例えば本県においても1975年1月ガス用ナフサ満載のタンクローリ（以下ローリと呼ぶ）の後方コック（3inφ）からナフサが流出して障壁に激突し、火災爆発を生ずるといふ事故が発生した。その着火源が静電気火花であるか否かについてその究明に関係し、ローリから流出したナフサが車両後部に激突した際強力な静電気が発生し、この種の帯電（以下油の激突帯電^{7), 8)}と呼ぶ）でも着火が生じうることを実験的に一応確かめたので報告する。

2. 事故の概要とその調査結果

1975年1月16日午後2時20分ごろ、福井市ガス事業所構内でナフサ10,000ℓを満載したローリが火災炎上した。図-1の写真はその初期消火活動を示しローリ後部周辺から強大な火災と煙が立ちのぼり、その周辺の地上にも拡がりゆく火災が点在しローリ自体はもちろんナフサ貯蔵タンクへも引火爆発防止のための放水が行なわれている。幸いにも積雪も少なく適切な消防活動によ

って約40分で消火し、損失はローリ焼失にとどまるという事故で終わった。

取扱い運転者は約90kmはなれた金沢市よりローリの後方コックを締め忘れたまま福井市ガス事業所に到着した。したがって底弁を開いてローリから事業所ナフサタンクに送油を開始すると、この後方コックからもナフサが流出したはずで、送油開始後約1分後にそのローリの出火に気づいたという。その間の取扱い者の行動はローリの底弁を開いてナフサタンクへの事業所側送油ポンプで流送運転を開始するまでの時間が約30秒、さらに納入伝票を同事業所に届けるまでの時間が約30秒であった。さて、火元はローリ後方コック周辺(図-2)とほぼ断定されたがナフサ流出状態を確認する必要がある。しかしナフサ自体は第四種危険物第一種石油類という危険物であるから一応水をその代替とし、同型のローリに同量の水を満載し上記した取扱い運転者の行動再現が試みられた。図-3は底弁を開いての最初の30秒間の流出状況で、その間の流出量は約100



図-1 タンクローリの火災と初期消火状況
Fig. 1 The scene of accident to the tank lorry and the ensuing fire showing the initial fire-fighting.

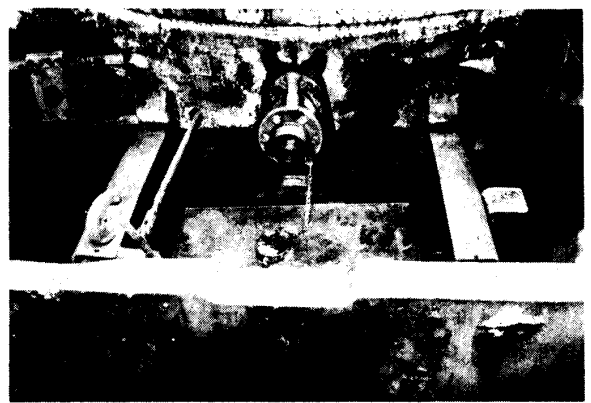


図-2 発火点と推定される後方コック(3 in ϕ)周辺の実態
Fig. 2 View of the back cock assumed to be the firing point (pipe diameter = 3in).

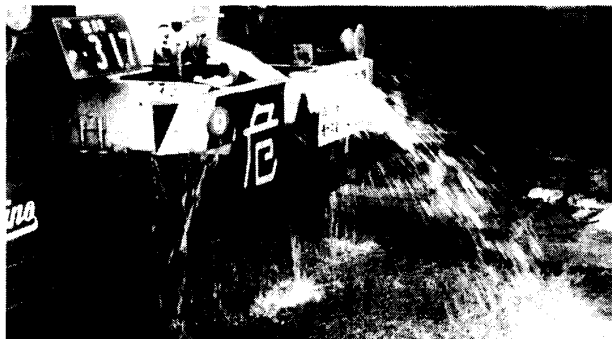


図-3 ローリの底弁を開いて最初の30秒間での流出実態
Fig. 3 Water colliding state for the first 30 sec. after opening the base valve.

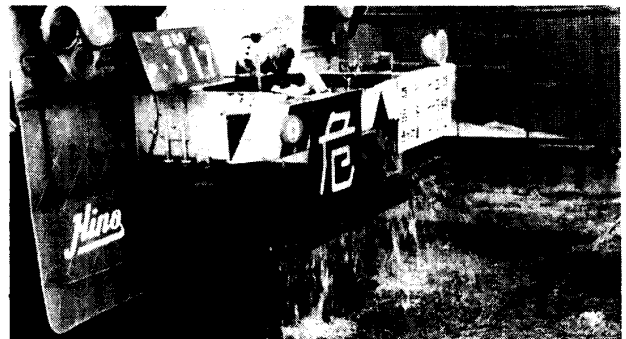


図-4 送油ポンプ運転開始して30秒間での流出実態
Fig. 4 Water colliding scene in the 30 sec. after operating the feeding pump.

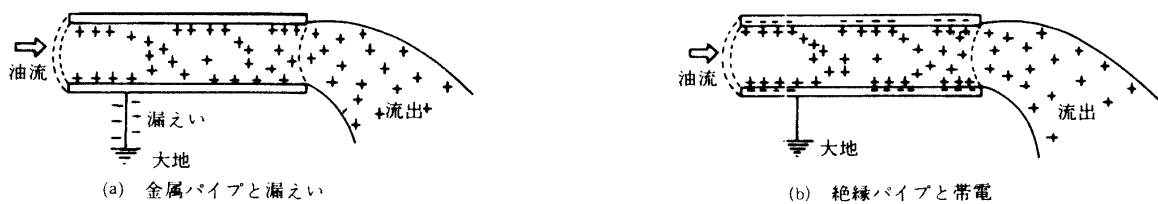
ℓであった。図－4は送油ポンプを運転開始してから30秒間の流出状況で、その間の流出量は約50ℓと流出量は半減している。

これらの写真を眺めると、流出する水は車両後部にある複雑な角形状のフレームおよびその下部にある角形油受皿（以下これら一群の金属部分をダンパと呼ぶ）にいったん激突し飛沫となって分散し、さらに地上に激突し浅い水だまりとなって流れ去る状態がうかがわれる。水よりも軽いナフサの場合は分散の規模も大きく、そのうえ油滴は微粒化し、顕著に可燃性ガスを発生するはずである。したがって、車両後部ダンパの周辺および地上とのあいだの空間には可燃性ガスとミスト雲が充満する状態になるものと予想される。

3 激突帯電としての測定

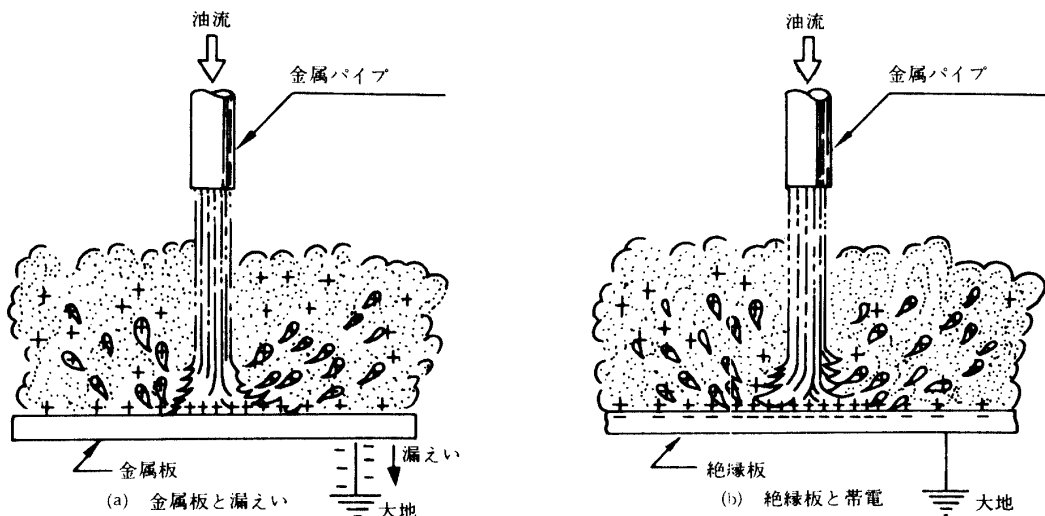
3.1 測定方法

前記2の調査結果から、もしローリの炎上原因が静電気による着火であるとすれば、静電気の発生箇所としては、まず第一に後方コック流出口までの油の流動するパイプ部分（図－5）が考えられる。この場合、ローリのパイプ長は5 m程度と短く、平均流速は0.64m/sであり、問題と



図－5 パイプ流出口の流動帯電

Fig. 5 Streaming current of outflow from pipe



図－6 油の激突帯電のパターン

Fig. 6 Impact electrification pattern of oil jet.

なる時間を60秒以内と限定すると、流出する油中の静電エネルギーは着火の原因としては無視しう
るほど小さいはずであり、後掲する測定結果からも明らかである。

次に第二の静電気発生箇所としては、油の激突するダンパ部分（図-6）が考えられる。この
部分では油の激突によって強力に帯電した油滴雲が生じ、さらにダンパが塗装、鍍付き、タイヤ
等で絶縁されていればこれにも電荷蓄積が行なわれるであろう。したがって、このダンパへの油
の激突帯電は事故原因につながる顕著な尺度となりうる。この予想を実証するには模擬再現実験
を行なうことが好ましい。この場合、油自体は空間に分散しその帯電測定が困難であるが、一方
ダンパ側には油が激突中油の持ち去る電荷と反対符号の電荷が残るから、その検出は比較的容易
である。すなわちダンパを絶縁すると電位の経時過程が測定され、接地すると漏れ電流の経時過
程が測定され、これらから静電エネルギーの経時過程も推定されるであろう。

3.2 模擬再現実験

以上の想定にもとづいて、火元をロー
リーのダンパ周辺とし、図-7の実験装置
で再現実験を行なった。ただし、試料油
として安全性の点から問題のナフサと類
似性があり、常温で可燃性ガスの発生
のない同一製油製軽油を使用した。元タン
クは200ℓかんとし軽油約190ℓを蓄え、
そのかんの底で床面上約1.7mの位置（ロ
ーリーの油面を考慮）になるよう支持して
ある。元タンクの下部に実験規模の關係
上、径1inφ、長さ1m（あとで帯電傾向
の比較上2inφを使用）の金属パイプを取り付けてあり、流出後60秒の流速がほぼ一定となるよう
にする。すなわち、

A_1 : 元タンク断面積

A_2 : 流出口断面積

h : 流出口から測定された油面の高さ

h_0 : h の初期値

α : 油の粘性係数

g : 重力の加速度

t : 時間

u : 流出速度

とすればベルヌーイの法則と流量収支より

$$u = \alpha \sqrt{2gh_0} - \alpha^2 \frac{A_2}{A_1} gt$$

となり上式は $t = 0 \sim \sqrt{h_0/2g}(2A_1/A_2)$ の範囲で成立する。この式による流速の計算値と実
測値とは油が流れ出してからはじめの60秒間では流速には大きな差違が認められない。このこ
とは後の4で述べる油種による流動帯電量の比較で重要な問題となる。このパイプ流出口から油
が自然流下する途中で、油が激突する金属角型ヘリ付ダンパ（50×50×10cm）を設けてある。こ

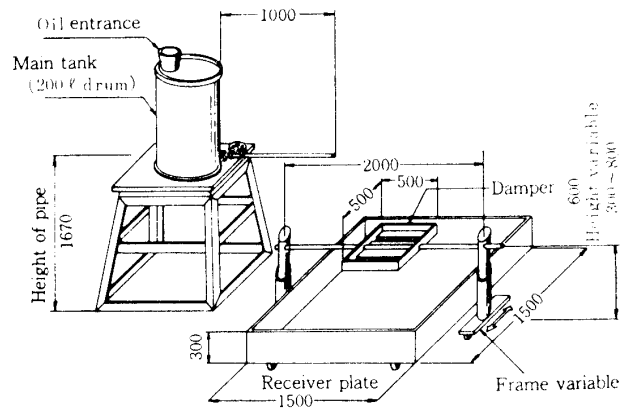


図-7 模擬再現方式による実験装置

Fig. 7 Experimental equipment utilizing the simulated method.

のダンパの高さおよび角度は可変とし、さらにダンパの下方床上に油がダンパに激突して生ずる飛沫、油滴とダンパから流れ落ちる油を捕集するための大型の金属角型へり付き受皿（ $1.5 \times 1.5 \times 0.3 \text{ m}$ ）を置いた。なお、実験の全景を図-8に、このような装置での電氣的測定系の概要を図-9に示す。主要な測定対象はダンパと平型受皿の2部分で、これらを絶縁した場合の電位を集電式電位計（春日電機製）⑦で測定する。④は微小電流計（東亜電波製）で、測定対象を接地した場合の漏れ電流を測定する。また絶縁状態での静電容量はダンパが約100pF、平型受皿が約185pFであった。

3.3 測定結果

図-6による模擬実験の結果について若干例示する。ただしダンパ位置の上下および角度変化（油の流下に対し $90^\circ \sim 45^\circ$ ）による静電気発生の大小にはあまり影響しなかったので一応ダンパ位置が床上0.6mの高さとし、角度が油の流下に対して垂直となる場合の結果を示す。

図-10の実験はダンパおよび受皿を絶縁し、元タンクから流出する油をダンパに激突させる際の両者の発生電位の経時過程（約3分間）を示す。またこれらの電位による静電エネルギーの計算も破線で示す。この結果からダンパは負に、受皿（試料油）は正に帯電し、静電エネルギーは前者が後者よりも2倍程度大きい。なおこの場合問題の60秒経過後のダンパ電位は約-1kV、エネルギーは0.04mJである。

ところで、本実験での静電気発生源にはダンパ部分と元タンク底の流出口のパイプ部分とがある。これらの部分の帯電傾向を明らかにするため実施した測定の結果を図-11に示す。同図はダンパおよび元タンクの流出口パイプを絶縁したときの電位の経時過程と、これらを接地したときの漏れ電流の経時過程とを併示した。また、これらの電位による静電エネルギーの計算値も示した。

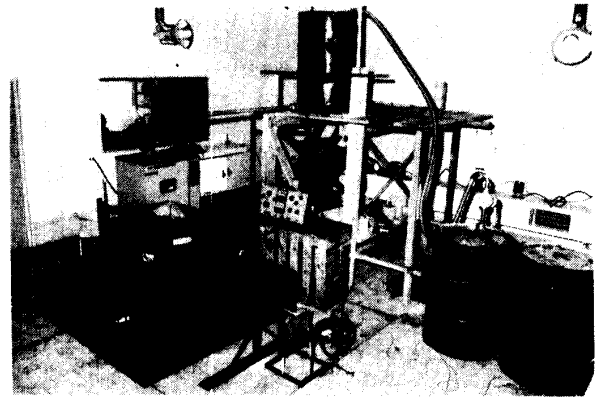


図-8 模擬再現実験の全景

Fig. 8 View of the reproductive simulation experiment impact electrification of oil.

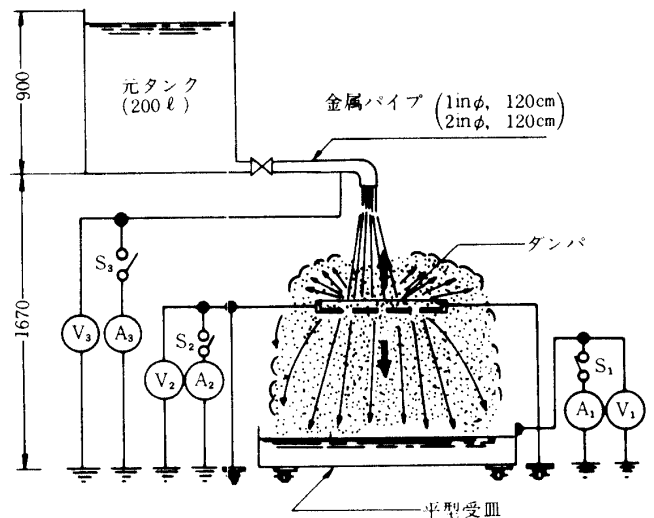


図-9 再現実験装置での電氣的測定方法

Fig. 9 Schema of the electrical measurement in the experimental set.

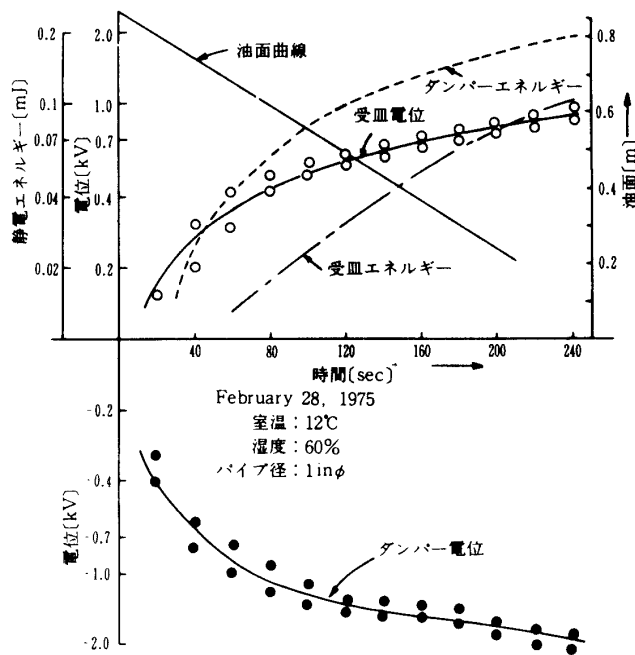


図-10 ダンパおよび受皿の電位について
同時測定による経時過程（普通の帯
電傾向）

Fig. 10 Potential curves of the damper
and the receiver plate. (average
charging rate)

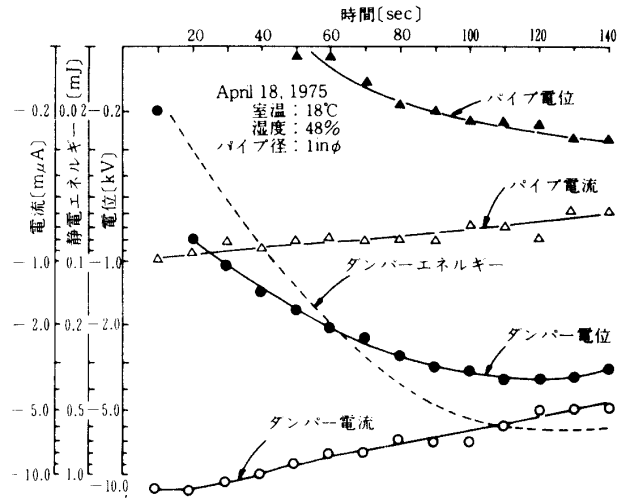


図-11

ダンパおよびパイプ（流出口）の電位お
よび漏れ電流について同時測定による経時
過程（最高の帯電傾向）

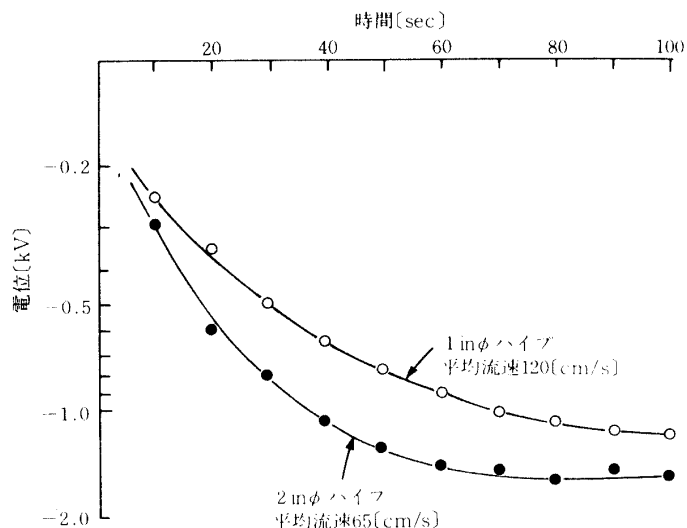
Fig. 11

Potential and earth current curves of
the damper and the outflowing pipe.
(max. charging rate)

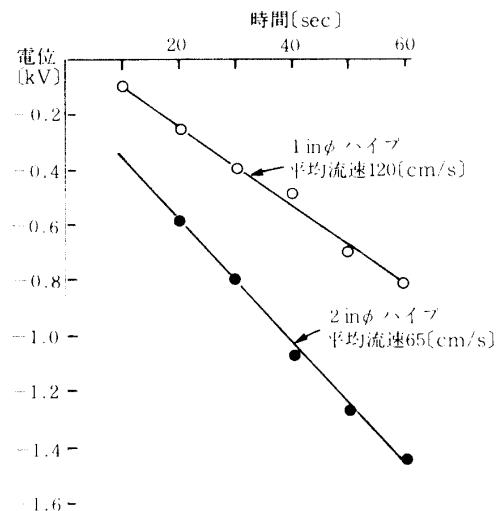
これらの測定値は最高の値を指示する日時の場合であり，問題の60秒経過後のダンパ電位は－2 kV，漏れ電流は－10nA，静電エネルギーは0.2mJに達した。しかしパイプでの帯電量はダンパに比べて無視するほど小さいことがわかる。

これら図-10～11の測定結果を眺めて，障壁に激突する油の静電気発生源はほとんどダンパ部分であることは明らかで，電荷の保存性の理により，前記したようにダンパ部分に発生した電荷と等量反対符号の電荷が激突飛散する油中に存在するはずである。なお，問題の3inφパイプでの測定は実験スケールの関係上困難であったので，一応パイプ口径は上記の1inφと2inφを用いて口径のダンパ電位に与える影響を調べた。その結果を図12(a)，(b)に示す。問題の60秒という短時間での過程を眺めると，ダンパ電位は同図(b)のように直線的に上昇し，2inφパイプでは1inφパイプの場合に比べて約2倍も大きい。

また，上記激突電帯による火花放電の有無を確かめるため，ダンパ電位とこれに並列に接続された針対平板間隙装置による火花放電の同時観測を試み，その結果を図-13(a)，(b)で示す。放電間隙1mmでは電位が2kV内外に達すると肉眼で確認できる火花を生じた。間隙が1.5mmでは小さい放電が数回発生したのち大きい火花放電が起こり，その後はコロナ放電が持続した。間隙が2mmとなると小さいコロナ放電が持続した。



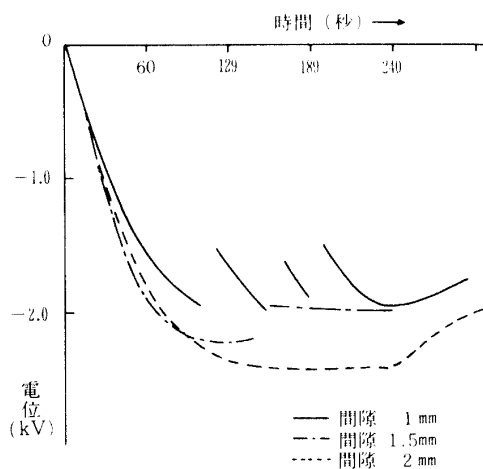
(a) 流出パイプの相異による帯電傾向



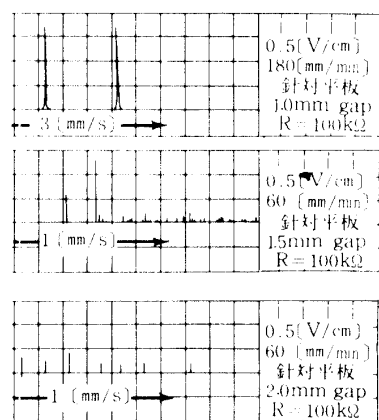
(b) 図(a)の60秒間の帯電傾向

図-12 流出口径（1 inと2 in）によるダンパ電位の比較

Fig. 12 Comparison of the damper potentials for oil flowing out from 1 in and 2 in of pipe diameter.



(a) ダンパ電位



(b) 針対平板間隙の放電電流

図-13 ダンパの発生電位と火花放電(1 inパイプ)

Fig. 13 Relation between damper potential and its spark discharge. (pipe diameter = 1 in)

4 試料油（軽油）とナフサの流動帯電の比較

元来、油の流動帯電に寄与するものはわずかの不純物イオンである。高度に精製した不純物イオンがほとんど含まれない $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ という高い抵抗率の油、抵抗率が $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度の原油に近い油では帯電傾向が認められないが、それらの中間製品であるわずかなイオン不純物を含む $10^{13} \Omega \cdot$

cm内外の油では帯電傾向が最大となる。軽油, ガソリン, ナフサ等は $10^{12} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ の抵抗率を有する油で帯電率のきわめて高い範囲にある。ただし同じ抵抗率でも帯電傾向には大きなばらつきがあるのが普通で測定の実現性はよくない, しかし同一製油所系統の製品であれば傾向的にはその測定結果についてある程度の信頼性はある⁵⁾。

前記したように引火の危険性を考慮して激突帯電実験には試料油として一応軽油を使用した, 問題のナフサとの帯電傾向の関連づけを行なうため, 流動電流による電位上昇を実測, 比較する必要がある。ここでは安全のため図-14に示すような小規模実験を行なった。床上約2.2mの高さに設置した試料油約36ℓを蓄えた50cmφ×50cmの金属製元タンクの下底に16mmφ×2mの金属パイプを取り付け, パイプ中を流下する試料油(流動電流)を絶縁された受タンク(18ℓ 方形金属かん)に流入せしめて, 受タンクの電位を集電式電位計で測定する。なお, 3.2の再現実験の場合と同様に, 流出しはじめてから60秒間は流速がほぼ一定となるよう(流出口の断面積)/(元タンクの断面積) ≈ 0.001 としてある。すなわちこの時間内での単位時間当りの発生電荷量はほぼ一定となる。

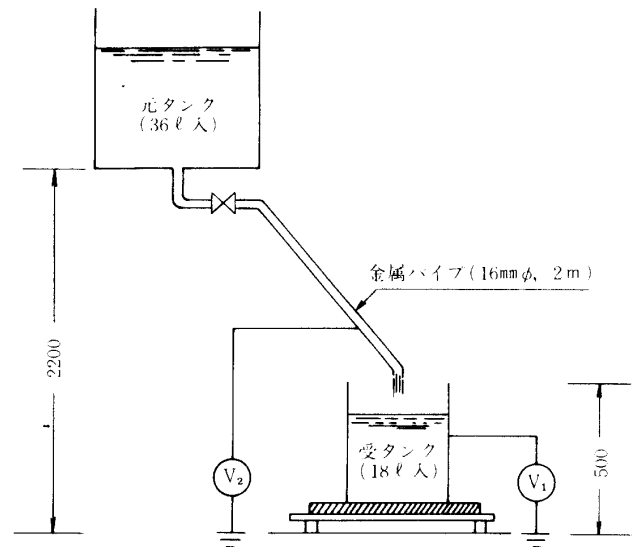


図-14 油の帯電傾向の比較実験装置

Fig. 14 Comparison testing set for charging rate.

試料油としては, ナフサ, 軽油のほかにガソリンおよび灯油を使用した。その測定結果の一例を図-15(a), (b)に示す。ナフサ

および軽油は正に, ガソリンおよび灯油は負に帯電するが, 電荷の絶対値の大きさはナフサ, ガソリン, 軽油, 灯油の順となった。流下しはじめて60秒間の電位は各油種とも直線の上昇傾向にあり, とくにナフサと軽油について比較すると, 帯電傾向は前者は後者よりも5倍程度も大きい。

5 ダンパ部分の電気的諸定数について

帯電したダンパの放電の可能性について, この部分での電気的諸定数(絶縁抵抗および静電容量)を一応測定する必要がある。

元来, ローリのダンパは金属製のリヤバンパ, ローバンパ, 受皿, チェーン, ボルト, ナットなどで組み立てられ, その下底に予備ゴムタイヤが取り付けられてあり, 不平等電界の生じやすい刃状, 突起状の箇所も多く, 塗装の剥脱, 錆付きも目立つ。

そこで, 類似の14台の現用ローリのダンパ部分について絶縁抵抗は図-16で示す6ヵ所の測定点で測定し, その値は最高で $3 \times 10^{10} \Omega$ 程度, 静電容量はリヤバンパで平均142pFという大きな値が見られた。

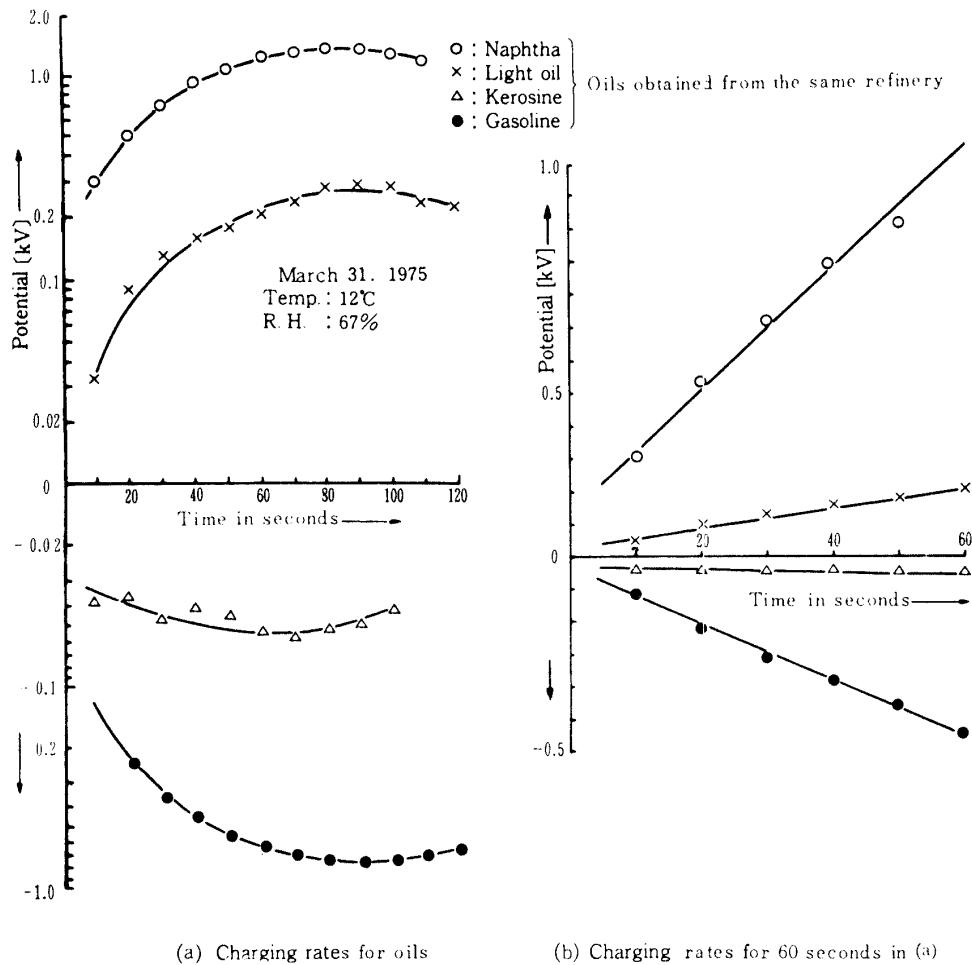


図-15 油種による帯電傾向

Fig. 15 Charging rates for different kinds of oil.

一般に静電荷は $10^8 \Omega$ 程度以下の絶縁抵抗では容易に移動することできるが、抵抗値が $10^{10} \Omega$ 程度以上になると急激な電荷蓄積が行なわれる。

ローリのボデーを規定通りに接地したとしても上記した錆などによって表1に示すような高抵抗を示すか所が測定され、ダンパは電荷蓄積により高電位となる部分が存在することが予想される。表-2は静電容量の測定値である。

図-11においてダンパ部分の漏れ電流は、最初の60秒間で10nAから8nAの変化程度で一種の定電流と考えうる。いまダンパに10nAの電流に相当する電荷蓄積が起こると、約300V程度程のダンパ電位が生ずるはずである。問題の流出パイプは実験に用いたパイプの約3倍の口径を有するので、図-12から類推する軽油の場合でも約1kV程度の電圧が発生するものと予想される。この値は大気中において近似的な平等電界では³⁾0.13mm程度の間隙で、不平等電界では0.5mm程度⁴⁾の針対平板間隙で十分放電破壊が生ずると推定される。

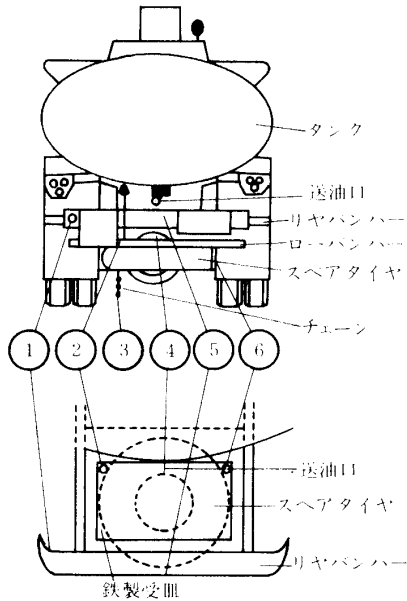


図-16 タンクローリ後部の測定位置
Fig. 16 Measuring points and parts at the rear of tank lorry.

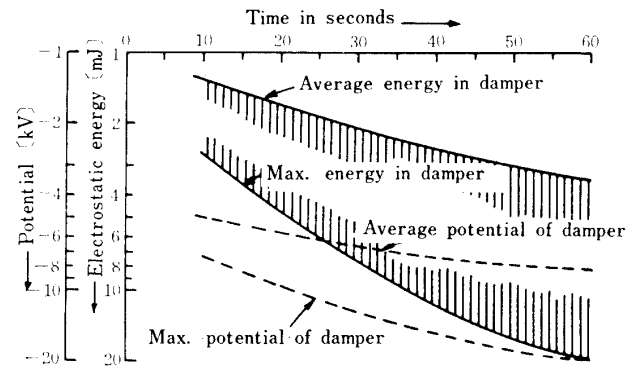


図-17 ナフサとして類推するダンパの電位と静電エネルギー（流出口2inφ）
Fig. 17 Extrapolation curves of the damper potentials and the electrostatic energies in the case of naphtha (pipe diameter = 2 in).

表-1 同型タンクローリ各部の絶縁抵抗値

Table 1 Insulation resistance values in the each part of tank lorry.

測定箇所 車両番号	1	2	3	4	5	6	備 考
福井88か...18 ふ そ う	1.9×10^9	10^9	7×10^9	10^7 以下	10^7 以下	6×10^8	受皿上のブラシ 1.6×10^{10}
福井8う 348 日 野	10^{10}	2.5×10^8	9×10^7			2×10^8	リヤバンパーのライト 10^7 以下 リヤバンパー内側 1.3×10^{10}
福井88か 246 ニッサンUD	10^9	1.5×10^{10}	1.5×10^{10}	2×10^{10}	10^7 以下	1.3×10^8	
福井88か 252 日 野	2×10^{10}	1.5×10^8	10^7 以下	3×10^{10}	10^7 以下	1.5×10^9	バルブ直下 9×10^8
福井88か 313 日 野	6×10^9	10^7 以下	4×10^7 (2.5×10^7)	10^7 以下		10^7 以下	バンパー上部右側 10^7 以下 タイヤ間(上下) 10^7 以下
福井88か 124 日 野	10^7 以下				1.3×10^7	3×10^8	バンパー支え右側 1.8×10^{10} バンパー支え左側 3×10^{10}
福井8う 278 ふ そ う	10^7 以下 (10^7 以下)	(5×10^9)	10^{10} (2.4×10^9)	3.6×10^7 (4×10^8)	10^7 以下	10^7 以下	受皿手前側 8×10^8
福井8う 302 い す ず	3×10^8	6×10^8	4×10^9	5×10^9		2.3×10^8	リヤバンパーのライト 10^7 以下
福井88か 243 ふ そ う	10^7 以下	10^7 以下	10^7 以下	3×10^9	10^7 以下	10^7 以下	
福井88か 227 い す ず	4×10^9	10^7 以下	2.7×10^9	5×10^9	10^7 以下	10^7 以下	排油ドレン止めリング 10^7 以下
福井88か...40	(10^7 以下)	(2×10^8)	(2×10^9)	(1.5×10^{10})	10^7 以下 (10^7 以下)	(2.5×10^8)	
福井88か 157 ニッサンUD	10^7 以下	1.8×10^{10}	10^{10}	10^{10}		2.3×10^8	タイヤ下部 10^8 ホイール 2.5×10^{10}
福井88か 301 日 野	7×10^9	4×10^8	10^7 以下	8×10^9		1.5×10^8	補助バンパー左側 7×10^9 リヤバンパーのライト 10^7 以下
福井88そ 551 ニッサンUD	8×10^9	4×10^9	5.5×10^9	2×10^{10}		10^7 以下	アース端子 10^7 以下

(注意) 1 測定単位はオーム [Ω]

2 測定値はバイプアースを使用した場合。但し()内は正常なアースをとった場合。

表-2 同型タンクローリ各部の静電容量
(各車種の平均)

Table 2 Static capacity values in the each part of tank lorry.

測定箇所	油 受 皿	リヤバンパー	チェー ン
測定値(pF)	117	142	68

6 試料油をナフサとしての激突帯電の類推考察

軽油を試料油とする前記3.2の模擬実験で、油のダンパへの激突によって強力な静電気の発生が確認され、さらに軽油とナフサとの帯電傾向を比較すると、少なくとも流動帯電に関する限り後者は前者の約5倍もの大きな帯電を生ずることが明らかとなった。

ごく大ざっぱではあるが軽油による実験結果から、一応問題のナフサで流出口パイプ直径が2 inφの場合の類推を試みたダンパの帯電傾向を図-17で示す。同図では流出口2 inφと1 inφの換算に図-12(b)を用い、軽油のナフサへの換算には図-15(b)を用いた。そして図-10および図-11のダンパ電位に着目し、図-7において帯電傾向の60秒間についてナフサで代替した2 inφパイプの場合のダンパの帯電電位を概算する。するとダンパを完全絶縁としての場合では、60秒後に-20kVもの高いダンパ電位となり、これに表1～2のローリーのダンパの電氣的諸条件(最高の絶縁抵抗および静電容量)を適用すれば、ダンパの電位は-3 kV、エネルギーは0.63 mJとなりうる場合もあると推定される。事故車における流出口のパイプ直径は3 inφであるから、ダンパ部分での油の激突帯電による発生電位および静電エネルギーは上記の値よりもさらに増加するはずである。なお、このダンパ部分の周辺は帯電ミスト雲および最低着火エネルギー0.26 mJというプロパン系空気混合ガスが充満しており、また、上記の静電エネルギーは実験条件下で模擬ダンパでの値であって、このような強力な静電気が発生している以上、ナフサの着火は十分に可能性があると考えられる。

具体的にはナフサの着火は

- (1) ダンパの一部が車体から絶縁状態にあり、これが油の激突により高い電位となり、車体と接合するダンパの接地部分で強力な火花放電を生じた。
- (2) 発生した強力な帯電ミスト雲の中で、空間電荷電界により分極したナフサまたは金属スラグ⁷⁾が接地した突起物の付近を通るとき、強力な火花放電が生じた⁷⁾、

の二つが考えられるがその実態については把握が不可能である。

7 あとがき

以上本県で発生したタンクローリーの火災事故について筆者らは激突帯電として模擬実験を行なった。その結果予想通り強力な静電気の発生が認められ、本件のように取扱い者の全く初歩的なミスによる不慮の激突帯電が重大な火災事故の引きがねとなる場合もありうる。

現在大型化する石油基地、石油系プラント施設での予期しえない不十分な設計および老朽化、ふくそうするタンカーまたはローリ相互間の衝突、地盤沈下、地震などの天変地異などが原因でタンクまたはパイプラインなどにき裂が生じ、そのき裂口より油が大量に流出し噴出帯電し、場合によっては上記のごとき激突帯電を生ずることは十分考慮しなければならない問題である。

おわりに、本研究に関し、福井県警本部鑑識課からは幅広くかつ綿密な実験検証結果が提供さ

れ、さらに再現実験については同課の布施田広義、山室亢、宇野格士の各技師から多大の協力を賜わったことを付記して深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 増田関一：最近の静電気工学 高圧ガス保安協会 (1974)
- 2) 鳥取孝太郎，藤井求：第20回静電気研究発表会講演要旨集，p.13，高分子学会 (1975)
- 3) 電気学会編：電気工学ハンドブック，p. 199，オーム社 (1975)
- 4) 電気学会編：電気工学ハンドブック，p. 543，電気学会 (1978)
- 5) 鳥取孝太郎：富山大学工学部紀要，12(1961)，19。
- 6) J. F. Hughes, A. W. Bright, B. Markin and J. F. Parker : J. Phys. D: Appl. Phys., 6(1973), 966.
- 7) K. Tottori: International Workshop on Electrical Charges in Dielectrics (Electrostatics-1), Kyoto (1978)
- 8) 鳥取孝太郎，藤井求：静電気学会誌 第3巻 第2号 (1979)