室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

金属管を流れる石油の帯電

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 室蘭工業大学
	公開日: 2014-06-03
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 坂口, 威, 北村, 正一
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3258

金属管を流れる石油の帯電

坂口　威・北村正一

On the Electrification of Petroleum Flowing through Metallic Tubes

Takeshi Sakaguchi and Shoichi Kitamura

Abstract

On the mechanism of the electrification of petroleum flowing through metallic tubes, only a few approaches have been proposed, say, by Cooper, Bustin, Ernsberger and the Shell group, but they do not explain satisfactorily the effects of the tube length and the initial transient flow.

In this paper another approach is presented under a simple model, provided that

(a) the electric double layer, constructed by the dissociated ions of a very small amount of electrolyte in petroleum on the tube surface, may be seperated by the mechanical energy given by flowing, and therefore a new term "charge seperating velocity u_c" is introduced;

(b) if the rate of seperation of the double layer is proportional to the residue of the dissociated ion-pairs, the effect of the tube length to the streaming current may be shown by another new term "electrification time τ_e";

(c) the leakage of the seperated charges may, as already known, be shown by the relaxation time τ_r;

(d) at the initial transient flow u_c and τ_e may be altered.

From the above-mentioned model the streaming current i_s is presented as follows:

$$j_s = I\,u^2 \exp(-u_c/u)\,\{1-\exp(-L/\tau_e u)\}\,\exp(-L/\tau_r u)$$

where I=proportional constant, u=flowing velocity, and L=tube length.

1. まえがき

石油類が金属管を流れるときに帯電することは，かなり以前から知られていた。W. F. Cooper[1] は1937年頃までに，この帯電現象について研究してノモグラムを作った。第2次世界大戦後に至って，この問題が静電気災害の原因になっていることから急速に関心が高まって来ている。しかし金属管内の流動による石油の帯電（またはイオン化）に関する報告はわずかである。W. M. Bustin 等[2] は金属管を流れる石油の帯電傾向を流動電流で測定し，管の長さの影響を考慮に入れた式を提出した。この式はかなり良く測定値に合っているので，しばしば他の文献にも引用されているが，帯電現象の説明には役立たないと思われる。また Shell グループ[3] は流体学と電気2重層の考え方を組み合せて，一種の理論式を提出している。そして管の長さの影響については Bustin 等の式と同じものを用いている。

他方この流動電流の発生原因については，まだ定説はない。純粋の炭化水素では，流動電流を生じないが，イオン化性溶液を微量混入するとある濃度で流動電流の大きさが最大になることが知られていて[4]，この不純物が帯電の原因になっていることは一般に認められている。しかしこの不純物の帯電機構については明らかにされていない。ただ，帯電現象の発生する場所が，管壁と石油の接触部であることは一致している。帯電機構については2種類の仮説が提出されている。第1の仮説は，古くから知られている溶液の電気2重層説に基づくもので，Cooper が始めてこの分野に導入し[5]，Shell グループが乱流における電気2重層に検討を加えた[6]もので非常に有力な説とみられている[7]。これに対して第2の仮説は，F. M. Ernsberger によって提出されたものである[8]。彼によれば，第1の仮説はイオン論的で，彼のものは電子論的である。そしてイオン論では2重層構成分子が流体の流動によるせん断力で分離してイオン化されるが，彼の電子論では，吸着不純物分子の熱的に活性化されている分子に機械的エネルギーが加わって離脱されるときに電子を放出して正イオン化するものと，電子を過剰にもって負イオン化するものとが存在すると仮定されている。

筆者等は，第1の仮説をもとにして加えられた機械的エネルギーとの関係を熱電子放出の理論式と類似の式をここに提出する。この式は実験値と良く合う。そしてこの式から筆者等は 1) 石油に含まれている2重層構成分子の分離イオン化エネルギーが，その分子の種類で異ること，2) また帯電傾向が流速の1.75～2.0乗に比例するということを，その分離イオン化エネルギーの差から導かれることを示し，さらに 3) 短い管の流動電流にみられる流れ始めの影響についても説明を加える。

2. 帯 電 理 論

石油が金属表面上を流動するときの帯電機構モデルを次のように提案する。

1) 純粋の炭化水素はイオン化しない。これは実験的に確認されている[9]。

2) 微小混入している微小量電解質が電離して金属表面上で電気2重層を作る。

3) 電解質の種類によって，金属側に吸着される分子の電荷符号が異なる。

4) 流動によって，この電気2重層を作っている結合にせん断力が加わって，その機械的エネルギーが分離に必要な最小エネルギー（これを電気2重層の電荷分離エネルギーと呼ぶ）を越えるときに分離して，イオンが流体中を流れる。これと同時に，金属が接地されていると，吸着していた分子はその電荷を大地に流して中和する。

5) 乱流では電解質分子の中で電荷分離する数は流れ始めからの時間と共に増加して，その流速によって得られる機械的エネルギーよりも小さな電荷分離エネルギーを持つ分子はすべて電荷分離されるにいたる。

6) 電気2重層の電荷分離エネルギーは電解質の種類によって異なる。

以上の仮定に基づいて，次の仮説を組み立てる。

単位体積の石油中に含まれる電解質分子の数を m とし，その内，2重層の電荷分離による過剰イオンの数を n とする。連続の流動によって n が増加する割合は，まだ電荷分離していない電解質分子の数に比例するとして，次の微分方程式が得られる。

$$\frac{dn}{dt} = k\,(m-n) \tag{2-1}$$

k は比例定数である。$t=0$ で $n=0$ の初期条件で解くと

$$n = m\,\{1-\exp(-kt)\} \tag{2-2}$$

となる。ここで $k=1/\tau_e$ とおき τ_e を帯電時間と呼ぶ。τ_e を用いて (2-2) 式を書き直すと

$$n = m\,\{1-\exp(-t/\tau_e)\} \tag{2-3}$$

となる。τ_e の物理的意味は緩和時間と類似のもので，与えられた条件の下での電荷分離の進行速度を表わすものである。これは電解質の種類，乱流の程度，電解質と金属表面との吸着の条件および金属表面の濡れの程度等によって決まるものと考えられる。

次に単位体積当り電解質分子1個が単位時間毎に過剰イオン1個となって電流を形成するが，その電流の式は次の (2-4) 式で示されると仮定する。

$$i_0 = uq = bu^2\exp(-W_c/\alpha u) \qquad [\mathrm{A/m^2}] \tag{2-4}$$

ここで　u = 液体の平均流速　　[m/s]

q = 1個の分離イオンの電荷量　　[クーロン]

b = 係　数

W_c = 電気2重層の電荷分離エネルギー

α = 流速 u のときの機械エネルギー変換係数

$W_c/\alpha \equiv u_c$ = 流速と同じ元，これを電荷分離速度と呼ぶ

(2-3) 式と (2-4) 式から単位体積の液体中の電荷分離したイオンにより生ずる電流は

$$\begin{aligned} i_1 = ni_0 &= nb\,u^2\exp(-W_c/\alpha u)\,\{1-\exp(-t/\tau_e)\} \\ &= I\,u^2\exp(-W_c/\alpha u)\,\{1-\exp(-t/\tau_e)\} \end{aligned} \tag{2-5}$$

$$I = nb$$

$$i_1 = I\,u^2\exp(-u_c/u)\,\{1-\exp(-t/\tau_e)\} \tag{2-5'}$$

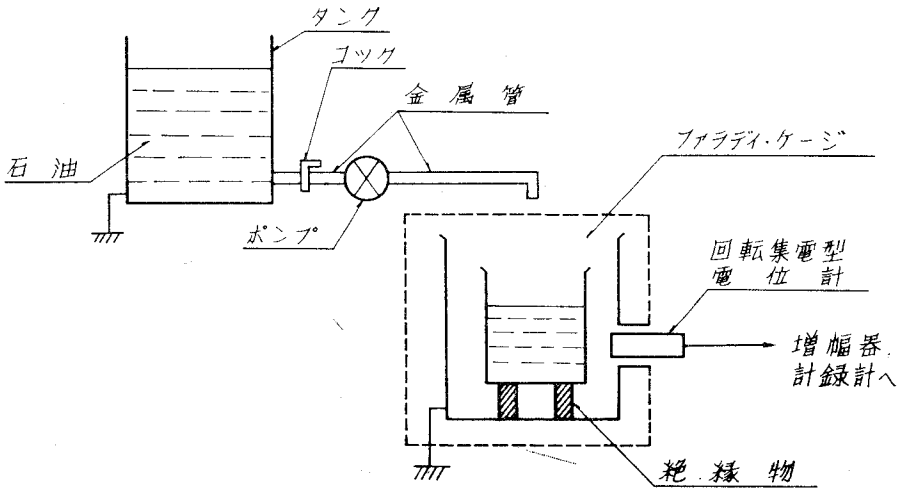
漏えいする電流の影響は緩和時間 τ_r を用いて $\exp(-t/\tau_r)$ で表わされるので，管の長さを L として $t=L/u$ を考慮すれば，

$$i_s = I\,u^2\exp(-u_c/u)\,\{1-\exp(-L/\tau_e u)\}\exp(-L/\tau_r u) \tag{2-6}$$

で与えられる。

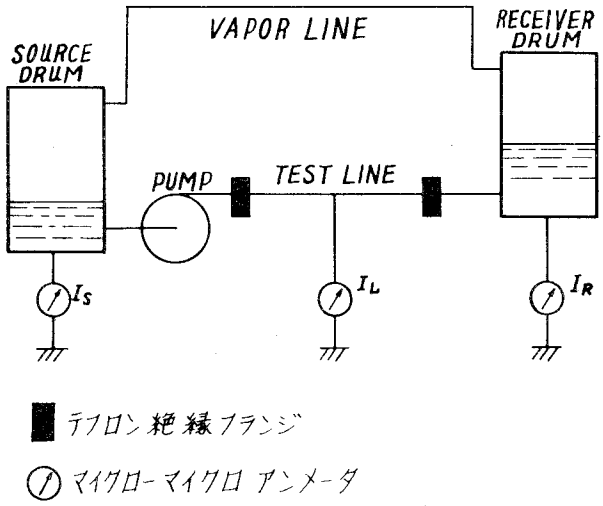
3. 流動電流の測定方法

流動電流の測定方法としては，図1に示すように，タンクから石油をポンプで駆動しファラディケージに受け，その電位の高まりから蓄積電荷量を求め，この時間微分として流動電流を求める方法を用いた。ファラディケージの静電容量は約 100 pF であり金属管は鋼である。Bustin 等が用いた方法は図2に示すように，テフロンの絶縁フランジでステンレス鋼を電気



図—1 測定装置概略図

Fig. 1. Sketch of apparatus for the measurement



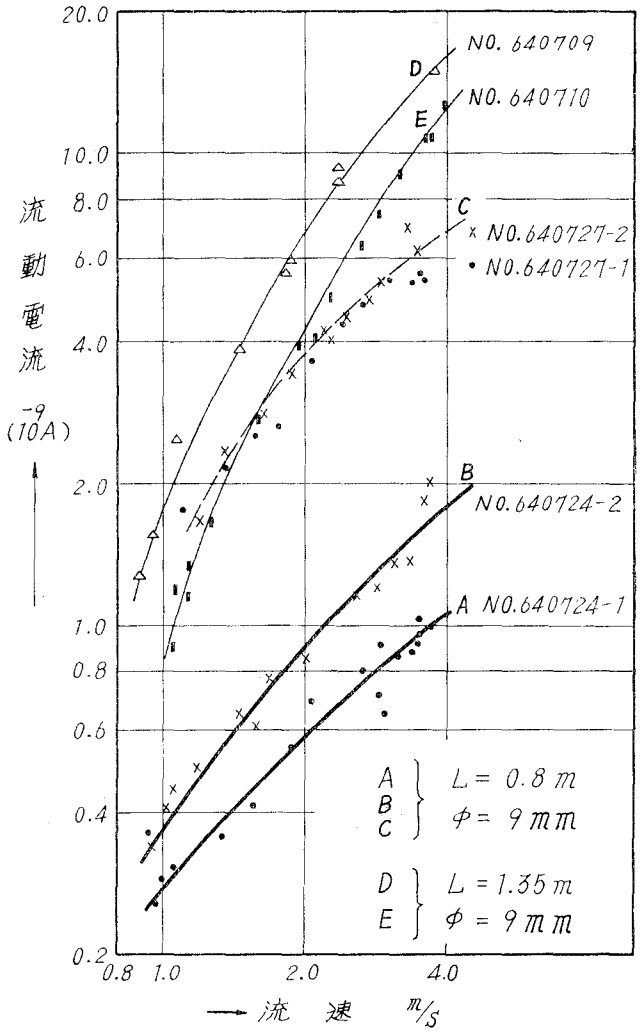
図—2 Bustin の測定装置概略図

Fig. 2. Sketch of apparatus for Bustin's measurement

的に絶縁し，Testline で生ずる流動電流をマイクロ-マイクロアンメーターで測定している。前者の方法においては，流動電流におよぼすポンプの影響が考えられるが，その影響を考える必要がないことを実験で確認している。従って両者の結果を比較するに際して，測定方法に違いがあるとは云え，金属管による流動電流を考えている点では違いがない。

4. 測定結果と検討

測定の結果を図3に示す。図でA, B, Cは内径9 mmで長さ0.8 mの鋼管の実験であって実験の行なわれた順序はA, B, Cの順である。日時を経ると石油中に含まれる電解質(特に



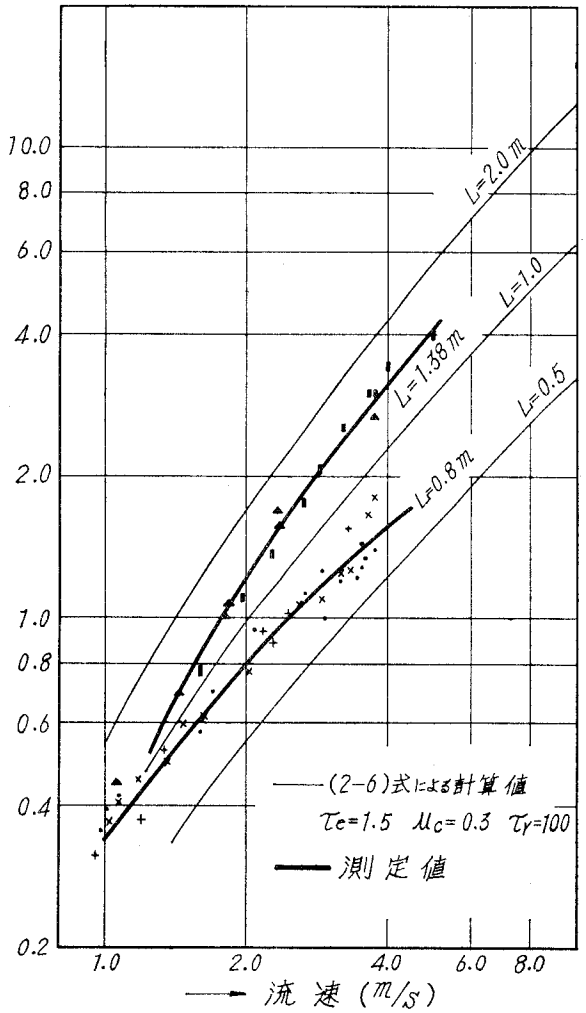
図—3 流動電流の流速による変化

Fig. 3. Tube current v_s. velocity

水分）が変るので，流動電流の値がかなり変化しているのだと考えられる。しかし流速による帯電の傾向はほとんど同じと云える。D. E. は同じ内径で長さが 1.35 m の同種鋼管の実験であり，D の実験が先に行なわれている。E の実験にうつる前に，同じ油内で金属の強制摩擦を行なっているので石油の条件はかなり変っていることが考えられ，そのため流動電流の値が異なっているのだと思われる。しかしこの場合も帯電の傾向はほぼ同じである。

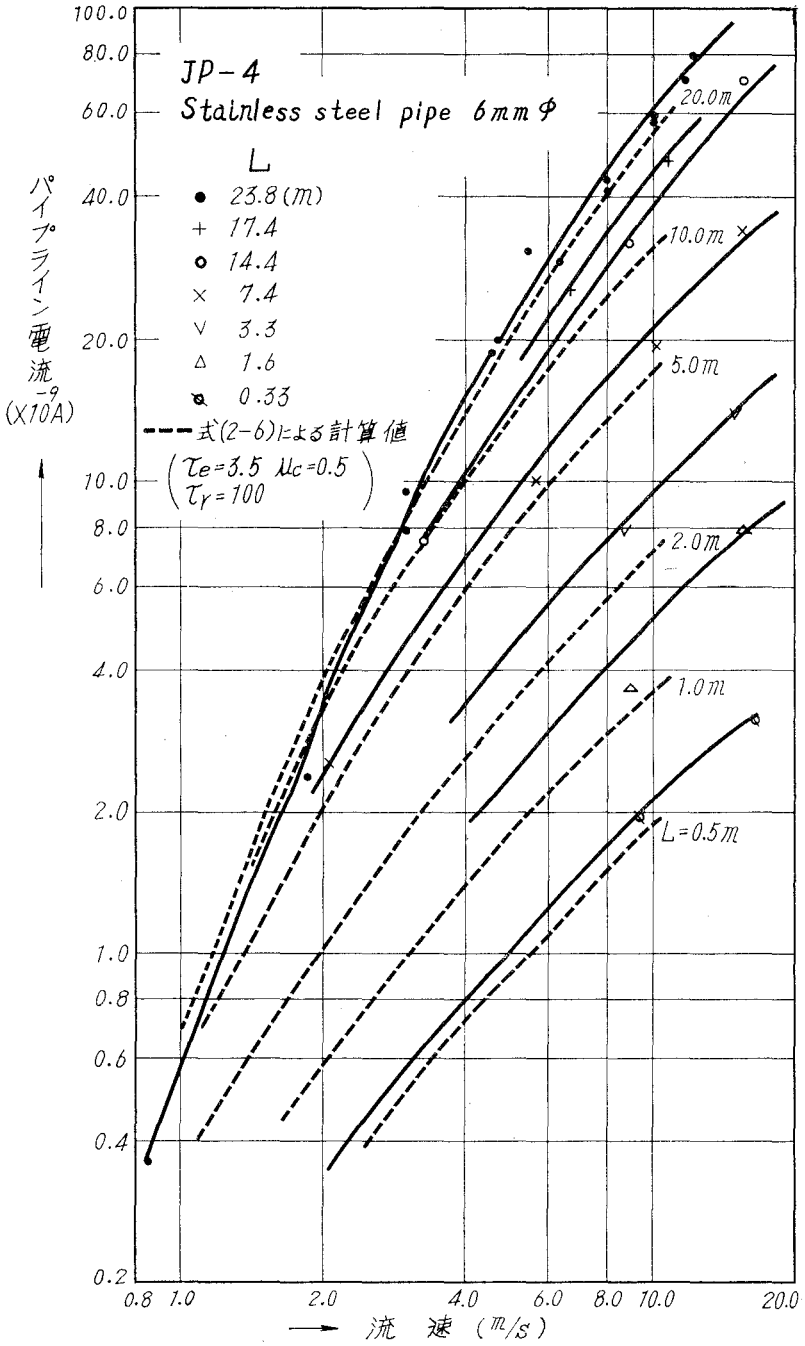
a) 帯電傾向

流動電流の値は，電解質の種類，管の寸法，管の内面の粗さ，油の種類等で大きく変るので，今絶対値は考えず，流速による帯電傾向のみを問題にすれば，図 4 に示すように式 (2–6)



図—4 帯電傾向

Fig. 4. Charging tendency



図—5 パイプライン電流の流速による変化

Fig. 5. Line current v_s. velocity

において，$\tau_e=1.5$ 秒，$u_c=0.3$ m/s とした場合の計算値が示す帯電傾向とほぼ一致する。τ_r は 100 秒位であり，τ_e, u_c の最適値は $\tau_r=100$ 秒として，τ_e, u_c, L を種々変えて数値計算を行い，その結果から得られた値である。従って流動電流は

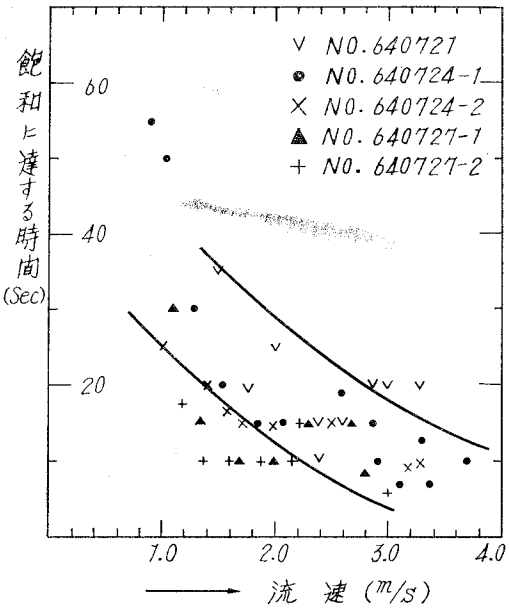
$$i_s = I\,u^2 \exp(-0.3/u)\,\{1-\exp(-t/1.5\}\,\exp(-L/100\,u)$$

で与えられ，I は比例定数で油の種類，電解質の種類，管の寸法等で変化する。

なお，Bustin 等は流動電流として $i=kTV^{1.75}\{1-\exp(-L/TV)\}$ なる式を与えている。ここで k は比例定数，T は緩和時間，V は流速，L は管の長さである。彼の実験結果も (2-6) 式を適用して，$\tau_e=3.5$ 秒，$u_c=0.5$ m/s とすれば図 5 に示すように，非常に短い金属管を除いてはほとんどよく一致する。それゆえ，流動電流が流速の 1.75 乗に比例するか，2.0 乗に比例するかはあまり問題ではなく，帯電時間，電荷分離速度が異なっているに過ぎないとみなせる。(2-6) 式は熱電子放出の場合と類似の式であるので，より一般的な式として提案したい。

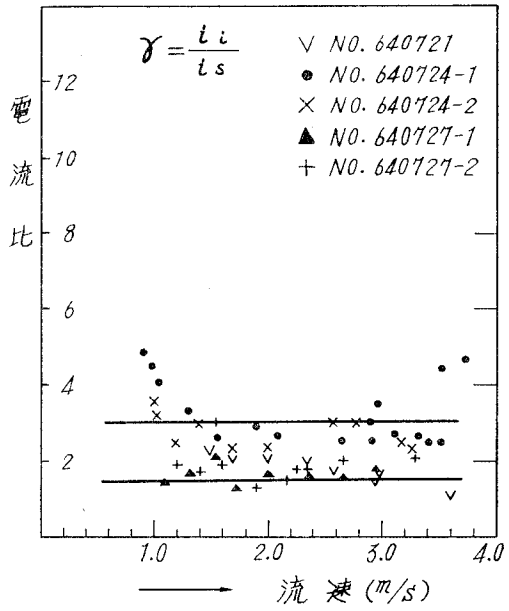
b)　流れ始めの影響

金属管に生ずる流動電流は，一般に流れ始めに大きな流動電流を生じ，ある時間経たのちほとんど一定の流動電流となる。この一定になるまでの時間を飽和時間と呼び τ_s であらわすと，図 6 に示すように流速が速い程 τ_s は短かくなる。また図 7 に示すように，流れ始めの電流 i_i を飽和した電流 i_s との比をとり，これを γ で示すと，γ は流速にあまり関係せず 1.5～3.0



図—6　飽和時間の流速による変化

Fig. 6. Saturation time v_s. velocity



図—7　電流比の流速による変化

Fig. 7. The ratio of the initial-current to stady current v_s. velocity

の範囲のほとんど一定な値をとる。しかし乾いている金属管に始めて石油を流す場合は i_0 が大きく γ が非常に大きな値をとり，管が濡れるにつれて γ は一定の値に落着く。i_0 の大きな理由ははっきりしないが，流れ始めは抵抗が大きく，また流れの乱れが大きくなって，見掛け上，u_c, τ_e が小さくなっているからではないかと思われる。この流れ始めの大きな流動電流については全く報告がなく，帯電機構を考える上に一つの手がかりを与えるものと考えられるので，このような現象のあることを報告しておきたい。なお Bustin 等の測定方法ではこの現象が測定され難いことも付加しておく。

5. 結　　び

流動電流は流速の 2.0 乗に比例すると考え (2-6) 式で示すと，1.75 乗に比例するとした結果も，帯電時間，電荷分離速度の違いとして説明でき，熱電子放出と類似の式であるのでより一般的なものとして提案されている。この式は，さらに進んだ実験と考察を行なう上に次の点で非常に有利であると考えられる。すなわち

a) これまでのように流動電流が流速の何乗に比例するかということに注目せずに，そのべき数の違いと，2 重層を作る微量電解質の種類との関係に新たに注目すべきであることが明らかにされた。

b) また，新しく導入された電荷分離速度 u_c と帯電時間 τ_e の値から，使用される石油と管との間の帯電機構をある程度定量的に測定する道が開かれた。

従って，石油に含有されている電解質の種類を測定すれば，上記の関係は一層明らかにされて帯電機構の理論が進むものと考えられる。

また，流れ始めの過渡的現象が流動電流に見られることから，帯電機構の解明に役立つと同時に，他方流体力学の問題にも役立つものと考えられる。

終りに，実験にさいして石油の提供をして下さいました日本石油精製株式会社室蘭製油所に感謝の意を表します。

また数値計算は「室蘭工業大学電子計算機室」で計算したものであることを付記致します。

(昭和 41 年 4 月 30 日受理)

文　　献

1) Cooper: Brit. J. Appl. Phys. Supl. No. 2, S11 (1953).
2) Bustin, Culbertson and Schlecker: Proc. A. P. I., **37** (**III**), 24 (1957).
3) Klinkenberg and J. L. Van Der Minne ed.: Electrostatic in the Petroleum Industry p. 45, (Elsevier Pub. Co. 1958).
4) Hampel & Luther: Naturwissenschaften, **42**, 252 (1955).
5) Cooper: Brit. J. Appl. Phys. Supl. No. 2, S11 (1953).

6) Klinkenberg and J. L. Van Der Minne ed.: Electrostatic in the Petroleum Industry p. 59, (Elsevier Pub. Co. 1958).
7) Loeb: Progr. Dielectrics. **4**, 249 (1962).
8) F. M. Ernsbergr: J. Appl. Phys., **27**, 418 (1956).
9) Hampel & Luther: Naturwissenschaften, **42**, 252 (1955).