

連載

トライボロジーにとりつかれた男の遊油ぶらぶらトーク⑤

フィルタは油を劣化させる

(株)クリーンテック工業 佐々木 徹

1. はじめに

油中の汚染物は油圧システムにとって大敵であり、油圧システムを油の汚染物から護るためにフィルタを使うのが常識であった。ところが、「フィルタは油を劣化させる」という表題を見た人は「そんな馬鹿な！」と驚いたり、フィルタを採用された方からは反発があるだろうし、他方、やっぱりそうだったのかと納得される方も少なくないと思う。これは筆者が実験で確かめたことであり、科学的な根拠があることだから、いずれの立場の方も先入観を捨てて本文を読めば、納得いただけると思う。

簡単に要約すると、「フィルタを使うと油とフィルタエレメントが摩擦して静電気を発生させ、油が帯電するだけでなく、油とは反対の極性を持った静電気がフィルタ側に蓄積される。蓄積された静電気は火花放電を起こして電荷を失うが、すぐに電荷はいっぱいになる。このようにして火花放電が間欠的に発生する。油中で火花放電が起こると、油の分子がせん断され、いわゆる「クラッキング」(熱分解)が起こってフリーラジカル(遊離基)という反応性の高い不安定な中間体ができる。アルキル・ラジカルは油中の酸素と反応してパーオキシ・ラジカルができ、パーオキシ・ラジカルが基油と反応してアルキル・ラジカルをつくるという具合に油の自動酸化を進行させる。自動酸化が進行すると次第に高分子化し、スラッジができて油が劣化する」というわけである。

2. 油圧システムとフィルタの歴史

油を使用した油圧システムは1906年にアメリカ海軍

の船の大砲の操作に使われたのが最初で⁽¹⁾、それから今年で満90年になる。フィルタの歴史はもっと古く紀元前2000年で、1923年には機械の油の浄化に使用されたという⁽²⁾。このような歴史を振り返らなくても、フィルタはヨーロッパのワインやビールのろ過、日本の醤油、酒、豆腐のろ過など数百年も前から使用されていた。これらの液体は水溶液やアルコールのような電気をよく流すものであったため、静電気の帯電は問題にならなかった。ところが油圧システムでは、絶縁性の高い油が大きな圧力と大きな流速でフィルタを通過するため、油とフィルタエレメントの間で大きな摩擦が起こり、静電気が発生する。油はワンパスでフィルタエレメントから出てくるが、フィルタエレメント側には次々と油が流れてくるので、静電気が蓄積されて高電圧になり、放電を起こして電荷を失うが、フィルタエレメントはすぐに新しい電荷でいっぱいになり放電が起こる。このようにして火花放電が間欠的に発生する。火花放電でカーボンが発生するのを見た方も少なくないはずだ。カーボンが出るということは、油の分子がせん断されたからである。しかし油の分子がせん断されてフリーラジカルができたということは、ESRを使えばわかるが、油の外観を見ただけではわからない。フリーラジカルができて油の全酸価がすぐに高くなるわけではないので、この問題が見落とされてきたのではないかと推測する。

3. 油の帯電、熱分解、油の自動酸化に関する過去の研究

資料を調べているが、機械油の浄化にフィルタが使

用された当時、フィルタと油が摩擦すると静電気が発生するというこの重要な点に考慮が払われた証拠は今までのところ見当たらない。

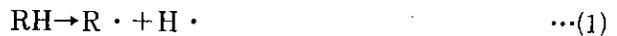
油の流動帯電が問題にされ出したのは、飛行機に給油しているときに火災が発生したり、ガソリンを運んでいたタンクローリーに火災が起こったからである。油の帯電による火災の研究は1960年代から行われ、絶縁物である油がホースと摩擦したり、タンクローリーの中で油同士が摩擦して静電気が発生し、そのスパーク放電によって火災が起ることがわかった⁽³⁾。その研究の過程で、フィルタの目のサイズに逆比例して油の帯電量が増加し、フィルタの目が一定なら流速の増大に比例して油の帯電量が増加することが確認された⁽⁴⁾。どれ位の電位になると放電が起こるのかも調べられたが、空気中では放電間隔が1mmあると、わずか2kVの電圧で肉眼で確認できるコロナ放電が生じることもわかった⁽⁵⁾。油の絶縁抵抗は大きいので、油の中では簡単に放電は起こらないが、JISで許容されている絶縁油の最低絶縁抵抗が2.5mmのギャップのときに30kVであることを考えると、油の添加剤にもよるが、空気に触れる油圧作動油の絶縁抵抗は絶縁油よりも低く、間隔が1mmならば数kVから十数kV程度でコロナ放電が起こる。この火花放電の色はほぼ青白色であり、数千度の高温と考えられる。我々に馴染み深い放電加工時のアーク放電火花の温度は1万度を超える高温であると言われている。このように放電火花の温度は高い。

ここで油分子のせん断を考えてみよう。油の分子は炭化水素化合物といわれ、C-C結合やC-H結合がある。前者の結合エネルギーは83kcal/mol、後者のそれは99kcal/molであるという⁽⁶⁾。油の中には約9%前後の空気が溶解しているので、油の中には酸素がある。しかし油の分子は安定しているので、そのままでは油分子は酸素と反応しない。油の分子が酸素と反応するには、まず油分子の結合が切られなければならない。そのためにはこの結合エネルギー以上のエネルギーを加える必要がある。

炭化水素化合物のせん断については、ライス等⁽⁷⁾が詳しく研究していて、油を数百℃に加熱すると分子の結合が切れ、フリーラジカルができることがわかっている。数千度の高温に晒された油分子は容易にクラッキング(熱分解)されてフリーラジカルができる。フ

リーラジカルは元の炭化水素化合物を攻撃して次のフリーラジカルをつくる⁽⁷⁾。油の中で酸素と反応してパーオキシ・ラジカルをつくり、油の自動酸化の連鎖反応を起す⁽⁸⁾。上記の説明と同じことが、下記の反応式で本や雑誌に書いてある。

油の酸化変質のメカニズム:



ただし、

RH : 油の分子

R · : アルキル・ラジカル (油分子のせん断によって生成されたフリーラジカル)

ROO · : パーオキシ・ラジカル

火花放電によって(1)の反応が起こり、R · ができる。R · は(2)のように油中の酸素分子と反応してROO · をつくり、(3)でROO · は基油 (RH) と反応してR · をつくり、(2)と(3)の反応を繰り返す。その間にも油が次からつぎへとフィルタを通過するので、フィルタでは静電気の蓄積と火花放電が繰り返し起こり、油分子をせん断してフリーラジカルをどんどん製造している。

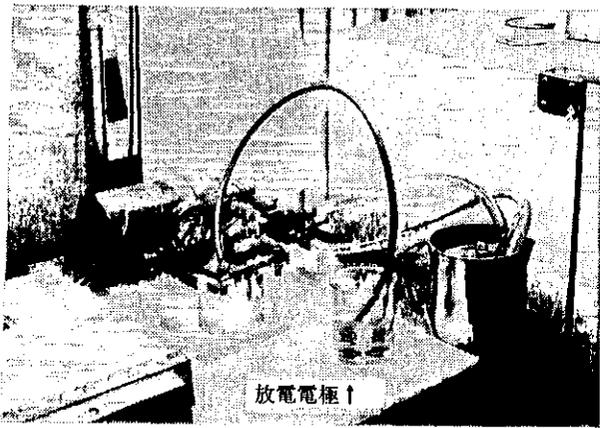
フィルタの専門家も油とフィルタの摩擦による油の帯電現象を知っていた⁽²⁾が、静電気がフィルタの性能に与える影響に関する研究の域を出ず、筆者が調べた限りでは、フィルタを使うと油が劣化するというところまでの研究は見当たらない。

過去の研究例を集めても、フィルタを使ったら油が酸化変質するという科学的に証明できる訳ではない。フィルタを使うと油が酸化変質すると主張するためには、実験によって証明しなければならない。

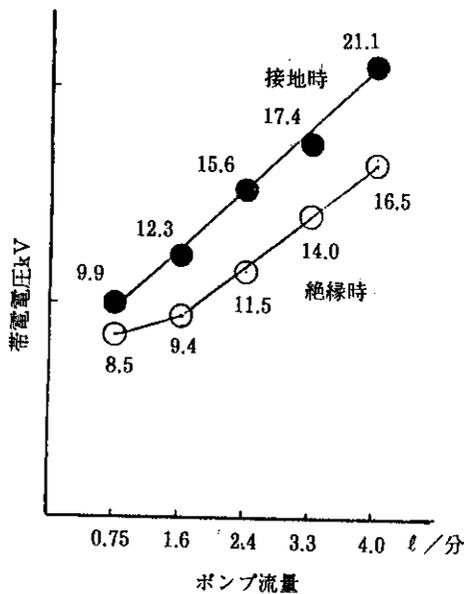
4. フィルタが油を酸化させることを実証するための実験

筆者は第1図に示すような装置をつくり、40℃での粘度が7cStの絶縁油と深層フィルタを使い、油の流量は0.75ℓ/分から4.0ℓ/分の間で実験した。

静電気の緩和時間(寿命)は数秒と短いので、油の採取と電位の測定は迅速に行わなければならない。外部ノイズ(電位)の影響を避けるために電位計が付いたファラデー・ケージを使用する。フィルタを出口から直接ファラデー・ケージの中にサンプル油を採り、電位計で測定すると油の帯電量をボルトとして読み取



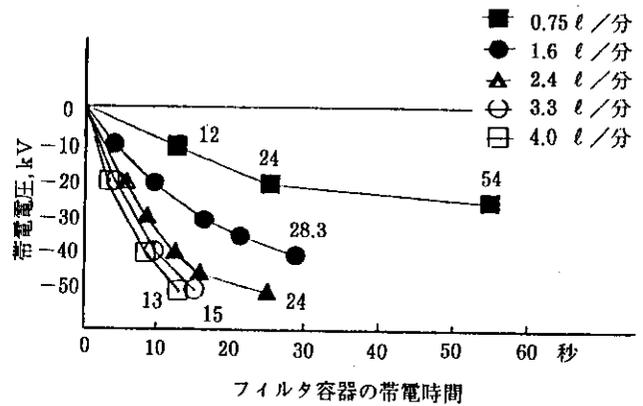
第1図 フィルタ摩擦帯電の実験装置全体図ガラスビーカー中の電極で火花放電を起こす



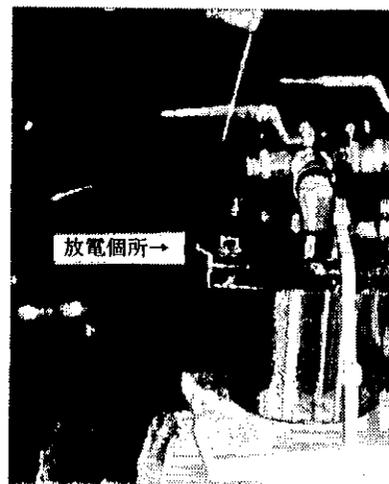
第2図 フィルタ容器を接地した場合と絶縁した場合の油の帯電電圧

ることができる。そのとき、フィルタを「絶縁したとき」と「接地したとき」で油の帯電電位は第2図のように異なる結果が得られた。面白いことに、フィルタを絶縁したときよりも、接地したときの方が油の帯電電圧が高い。4.0 l/分の流量で行った実験で、油の帯電電圧は20kVを超えていた。

わかり切ったことではあるが、油が正に帯電する場合、フィルタエレメントは負に帯電する。油の帯電は一過性であるが、フィルタ側には静電気が蓄積されて電圧は高くなる。フィルタエレメントに帯電した静電気の電圧を測定するためには、フィルタ容器を絶縁して誘導によってフィルタの金属容器が帯電する現象を利用する。第3図は金属容器が放電から飽和電圧に到



第3図 乾燥フィルタエレメントを使用した時のフィルタ容器の帯電電圧と飽和電圧までの到達時間



第4図 帯電したフィルタ容器に接地した金属棒を近づけた時の火花放電

達するまでの時間を示す。流量が0.75 l/分のときの飽和電圧は-25kVで、飽和電圧に達するのに平均54秒かかったが、流量が4.0 l/分のときには平均13秒で-50kVの飽和電圧に到達した。-50kVの飽和電圧に到達すると1秒前後の間隔でパチパチという音を立てて空中放電し、電位計の針も振れた。このフィルタ容器に接地した金属棒を約20mmまで近づけたところで、第4図のような放電が起こった。

フィルタエレメントの中の現象を外から見ることはできない。フィルタエレメントに蓄積された静電気が放電するとき、火花を発生させるかどうかを確認するためには、フィルタエレメントに蓄積された電気を取り出さなければならない。そのためにテフロン板に2個のステンレスの六角ボルトをねじ込み、それらのボルト頭の角の先端間の距離が1.0mmになるようにした

ものを作り、フィルタ容器に取り付けた高压電線の他端を一方の六角ボルトに、アース線を他の六角ボルトに取り付けて150ccの添加タービン油の中に入れた。第1図のピーカーの中の仕掛けがこれである。油が流れるとフィルタに静電気が蓄積され、電極間で1-2秒間隔で火花放電が起こった。この火花放電はビデオに撮ってあるので、何時でもお目にかけることができる。

実験中片時も目を離さずに観察を続けて、火花放電の回数を正確に数えることは不可能だから、別途、同電極セットを使い、10mAの電流が流れると電流が遮断される回路を組んで、電極間に15kVの高電圧をかけて放電回数を数えながら放電実験を行った。放電の度に油中に小さい気泡とわずかな黒煙が発生した。黒煙はカーボンであった。この油をガスクロマトグラフィで分析したところ、油の中に水素ガスや分子量の小さい炭化水素ガスが検出された。油が熱分解されると、フリーラジカルができると同時に、水素ガスや分子量の小さい炭化水素ガスができる⁽⁷⁾ことが知られており、分析の結果と一致した。これから油中の火花放電でフリーラジカルができていと推測できた。しかし弊社の実験室には高価なESRがないので、直接フリーラジカルを測定できない。ESRがなければ別の方法で調べればよい。通常の油には酸化防止剤が使われているので、暗室に室温で放置していても油は酸化変質しないが、一旦フリーラジカルができると、暗室に室温で放置していても油の酸化変質が進行することがわかっている⁽⁸⁾ので、時間をかけて確認することにした(第1表)。

放電実験直後の油の全酸価を調べたが、予想どおり全酸価に変化はなかった。放電させてない新油と油中で500回、2000回、3000回の放電を起した油を直射日光が当たらない場所(正確には機の引き出しの中)に6ヶ月間室温で保管した後、油の全酸価を測定したところ、第1表に示すように、新油の全酸価は6ヶ月後も、全く変化がなかったが、放電が2000回以上の油の全酸価は明らかに高くなって油が酸化されていた。

紙数が不足しているのでここでは示さないが、6ヶ月間放置後の油の赤外吸収スペクトルを調べたところ、放電500回以上の油には酸化を示す 1720cm^{-1} の吸収が見られた。これでフィルタが起す放電は間違いなく油を酸化変質させることが証明された。

第1表 油の全酸価

サンプル油	新油 放電0回	新油中放電 500回	新油中放電 2000回	新油中放電 3000回
放電直後の全酸価 (mgKOH/g)	0.08	0.08	0.08	0.08
放電6ヶ月後の全酸価 (mgKOH/g)	0.08	0.09	0.36	0.59

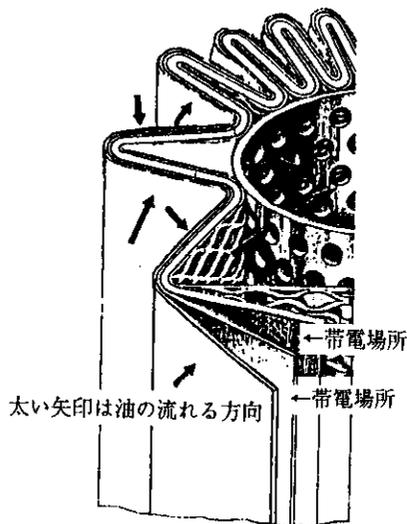
5. どんなフィルタにも帯電が起こるのか?

それではどのようなフィルタでも帯電が起こるのかという疑問に答えなければならない。その答はフィルタの構造を調べればすぐに分かる。

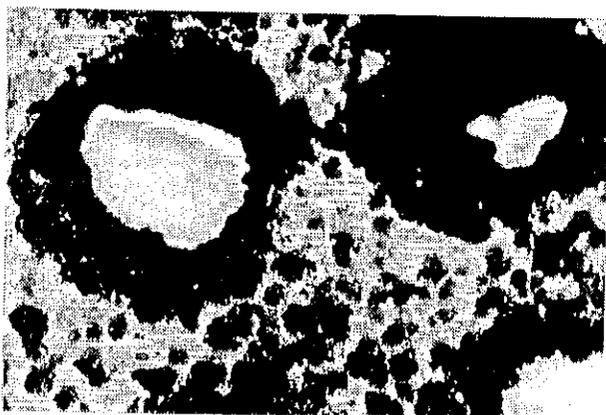
(1) プリーツ・フィルタ

油の流速を上げるためにフィルタの形状をプリーツ状にして表面積を大きくしたものがプリーツ・フィルタである。この種のフィルタには目の粗いものから絶対3ミクロンや5ミクロンといわれる精密なものまで多く使われている。筆者は絶対3ミクロンというフィルタユニットを使って、メーカーがカタログ上で表示している油の最大流量の1/10以下で実験した。その結果、油の帯電電圧はほぼ10kVであった。帯電電圧は油の流速に比例するので、メーカーが表示している流量では数十kVの電圧になると考えられる。

この種のフィルタでは外周に金網が使われていることがあるし、内側には必ず金網とパンチングメタルの中芯が使われている。そのため、フィルタエレメントは接地されており、フィルタエレメントに帯電しないのではないかと考える人が多い。そこでこの種のフィルタエレメントを調べてみると、確かにプリーツ・フィルタはプリーツの外側と内側の両方、または内側に金網で補強されているので、フィルタの頂部と底部の間は導通している。更に調べると、金属のプリーツ端のシール部から油がバイパスしないように、プリーツの両端のシール部はしっかりと樹脂で固めてある。テスターで調べると、外側の金網と両端のキャップの間で絶縁されているものが何個かあった。外側の金網と両端のキャップが導通しているからといって、フィルタが帯電しないと断言できない。何故なら、第5図のようにこの種の精密フィルタには絶縁性の化学繊維やグラスファイバー等が重ね合わせて使われているからそこに静電気は帯電する。重ね合わされている境界部に帯電が起ることは、重ね着をした化繊のシャツを脱ぎ、暗い部屋で重ね合わせたシャツを引き離そうとしたら



第5図 プリーツ・フィルタの構造例



第6図 フィルタに帯電した静電気がフィルタ中芯の開口穴に放電した跡

火花が見えることからわかる。

このようにして絶縁体のフィルタ材の積層部に帯電した静電気の電圧が高くなると、フィルタエレメントに近接する金網や中心部のパンチングメタルの部分で放電する。パンチング・メタルの穴の切り口はシャープになっているのでその部分に電荷が集中して放電を起こした証拠を第6図に示す。

(2) 深層フィルタ

深層フィルタのポンプ流速は一般に小さいが、深層フィルタの材料はセルロース、化繊、ガラス繊維等の絶縁物でできていることや油との摩擦部が大きいことから、本実験のように油はかなり帯電する。

(3) 金属フィルタ

サクシオン・ストレーナには金属性のフィルタがよく使われている。金属は導電性があるので、油の帯電

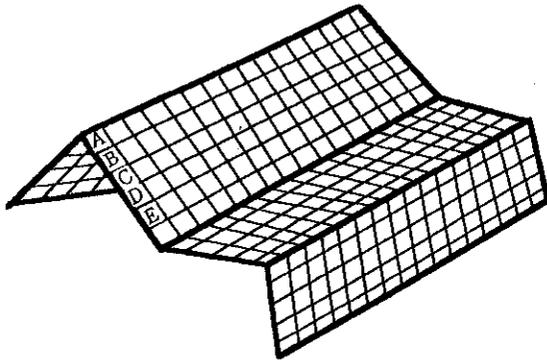


第7図 金網の上に捕集された繊維が帯電して油の酸化変質物を捕集した例

が起らないのではないかという疑問が出るはずだ。しかし導電体も絶縁されていると摩擦によって静電気が発生する。人間の身体は導電体であるが、絶縁性の靴を履いていると身体に帯電することは、じゅうたんが敷かれたホテルの廊下を歩いていて部屋の取っ手を触った時の火花や、自動車にキーを差し込もうとしたときに、パチと火花が出るのを誰でも経験している。

どのような場合に金属フィルタが絶縁されるのかを考えてみよう。いくつかの金網フィルタの底金と側面の金網の間の絶縁性を調べたところ、かなりの金網フィルタが絶縁されていた。それはプリーツ・フィルタのところでも述べたように、プリーツ状の金網の両端のキャップ部から油が漏れないようにキャップの中にエポキシ樹脂を詰めて固めてあり、エポキシ樹脂が金網を絶縁することがあるからだ。

金属フィルタにアースをとって、導通するように接続されていても安心できない。空気中には衣類から剥がれた繊維屑がたくさん浮遊しており、それらは絶縁物である。それらは油の中に入ってフィルタに捕集されてフィルタの目を詰める。そして油との摩擦で繊維は帯電して、他の汚染物を捕集しやすくなり、第7図のように油の酸化変質物のような微小な汚染物でも捕集する。捕集した絶縁性の汚染物の量が増大すると電荷も増大し、電圧が高くなると金網の金属との間で放電を起こし、油の酸化変質を促進させる。ところがこれだけでは終わらない。金網フィルタやストレーナを長期間使用していると、金網の表面に油の酸化変質物が付着して金網の表面を絶縁する。1年間使用したサクシオン・ストレーナの金網を切り取り、石油エーテルで洗浄した。ストレーナの外側の金網には当然たく



第8図 ストレーナの補強金網を石油エーテルで洗浄後
100Vを印加して絶縁テスターで測定した絶縁度

測定場所	測定値														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	∞	2	∞	2	∞	5	0	2	10	2	2	2	2	0	3
B	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	10	5	∞	∞	∞	∞	∞	∞
C	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	5	5	2	10	∞	∞	∞	∞
D	∞	5	∞	∞	∞	∞	0	∞	∞	10	∞	∞	∞	∞	20
E	∞	∞	∞	∞	∞	∞	5	∞	∞	3	0	∞	0	10	∞

さんの汚染物が付着しているので、付着物の少ない内側の目の粗い補強金網の絶縁度を調べた。

金網に1000Vをかけて金網の絶縁度を絶縁テスターで測定した。その結果を第8図に示す。この図の数字の0は完全な導通状態を示し、∞は絶縁状態であることを示している。絶縁測定のために金網のプリーツの先端部に当たるA列部を平らに押し広げたのでその絶縁被膜が破損して絶縁度が低くなっているが、その他の部分金網のほとんどの部分が絶縁されていた。このように導電性がある金網を使用しているからといって安心しておれないことがわかる。

以上に検討したように、フィルタは油を劣化させることが明らかとなった。油管理は油圧システムが設計通りの性能を発揮するように保護する手段にすぎないはずだ。ところが、現在は油の中のミクロンサイズの汚染物を除去することと曲解していて、フィルタで油を劣化させていることを見落としている。油圧システムが1906年に実用化されて今年で丁度90年になるが、汚染物に85%が起因すると言われている油圧トラブルがなくなる原因の1つは、この見落としにあるのではないかと考える。

6. まとめ

- (1) 油の汚染物は油圧システムの敵であり、油圧システムを汚染物から守らなければならない。
- (2) 従来、油圧システムを守るためにフィルタが使用されてきたが、フィルタと油の摩擦によって発生した静電気が火花放電を起こして油を酸化劣化させることがわかった。
- (3) 油圧システムを守るためには、油の汚染物を除

去するだけでなく、油を酸化劣化させない油管理が必要である。

<注釈>

何故フィルタが油を酸化変質させることが今まで分からなかったのか？

研究者にとって実験の再現性は非常に重要であり、再現性が乏しいと科学にはならない。汚染油は千差万別で再現性が悪いため、油の汚染問題は科学的な研究には馴染みにくい。更に油の汚染物は汚く、優秀な人は手を触れたがらない。このような悪い事情が重なって、汚染油の問題の研究は置き去りにされてきた。何故フィルタの研究者達は、フィルタが油を劣化させることに気が付かなかったのか？

フィルタの研究者達の名誉のために言うと、フィルタの専門家は一般に機械工学出身であることが多い。彼等もフィルタが静電気を発生させることは知っていた。ところが「フィルタの摩擦帯電で油が酸化変質するかどうか」という問題は、油圧フィルタという機械の問題、放電という電気の問題、油の酸化変質という化学の問題という3分野にまたがっている。きちんとした仕事をする研究者には分別があり、機械、電気、化学の3分野にまたがった問題に手を付けたりはしない。ところが筆者は今は油の酸化変質がつくる境界潤滑膜が機械の動きに及ぼす影響を研究テーマとしているが、元々文科系出身で定まった専門分野がなかったため、これが幸いした。

フィルタでろ過した油の帯電に気が付いたのは1979年頃だが、その当時油の帯電と油の酸化を結び付けることはできなかった。しかしそれ以来、資料を集めて研究してきた。この静電気の放電現象が油を酸化させることに気が付いたのは、たまたま筆者が油の酸化変質物が機械に与える影響を研究していたからである。

「知らぬが仏」で、何の心配もせずにフィルタを使っていた人達には、フィルタが油を劣化させると知るとショックだと思う。雪の研究で有名な物理学者の中谷宇吉郎先生が、昔から立春にしか立たないと考えられていた卵が、立春以外でも立つことを実験で証明された時のことを「立春の卵」という随筆に書かれた。この随筆の一部を引用すると、

「人間が何百年という長い間、すぐ目の前にある現象を見逃していた(中略)…卵が立たなかったのは、皆が立たないと思っていたからである(19)。」