

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⑪

# 油圧バルブのロックが起こるメカニズム

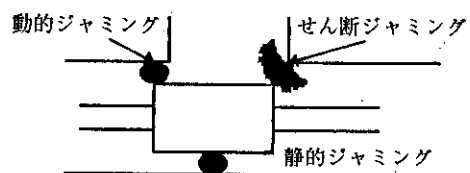
＝油圧システムの月曜病 その1＝

(株)クリーンテック工業 佐々木 徹

## 1. 油圧機械の月曜病

工場経験のある人ならすぐにわかることだが、休日明けの朝に油圧機械を起動させようとしてもすぐに動かない。欧米ではこれをマNDER・モーニング・シックネッス（月曜病）と呼んでいる（モーニング・シックネッスという用語は妊娠女性の症状になるので間違えたらお笑いになる）。機械の修理のために数日間停止した後にも同じような現象が起こる。どこかの講習会で油メーカーの人がこの現象は油の粘度が高いからだと言っていた。確かに油の粘度が高いことが原因と考えられることもある。しかし、これは冬に起こるだけでなく、夏でも起こる。筆者は十数年前からインドや東南アジアの工場を訪問しているが、これらの常夏の国でも、休日明けに同じような月曜病が起こっている。北欧の某社では、休日でもヒーターで油を加熱していて、月曜日の朝にすぐに機械が起動できるようにしているが、それでも時々月曜病が起こるといふ。そうすると、必ずしも油の粘度が高いことが原因だとは言えない。そこで月曜病と言われる現象のメカニズムについて考えてみることにする。

この月曜病と呼ばれる現象は、油圧バルブのロックと、暖機運転時間が長くなるといった機械の立ち上がりの悪さに大別できる。これらの現象を同時に説明すると、混乱が起こる可能性があるため、油圧バルブのロックの問題と油圧システムの立ち上がりの悪さの問題とに分け、今回は油圧バルブのロックが起こるメカニズムについて検討する。



第1図 粒子ジャミングの典型的3例<sup>(1)</sup>

## 2. 従来から言われている油圧バルブのロックが起こる原因

### 2-1 従来の説

油圧バルブのロックは第1図のようにスプールが硬い固形物を噛み込んだり<sup>(1)</sup>、油圧システムが長時間停止している間に、バルブのスプールとスリーブの間の隙間にシルトが堆積して摩擦を増大させたりして起こり、油の酸化変質物のような柔らかい汚染物は潤滑剤の役目を果たして、シビアなバルブロックの発生を緩和させると言われていた<sup>(2)~(4)</sup>。我々は日常生活で、襖や障子のある部屋で生活することが多く、襖や障子の敷居に硬い砂等が入るとすべらなくなる経験があるので、このような説には自然に納得してしまう。

### 2-2 襖の敷居での実験

実験して確かめないと納得できない筆者は、実際に襖の敷居のミゾに直径1.5mmの硬球を1個入れ、新聞を固く丸めた棒の側面を使って押し、襖の開閉実験をした。硬球を入れないときには、この新聞の棒で襖を容易に開閉できたが、硬球を入れたら襖のすべりが悪くなり、ついには動かなくなって、新聞紙の棒は折れてしまった。この実験過程を考えると、これは硬球を入れたことによって、(1)すべり面の動摩擦係数が増大したことを示している。襖を外して点検したところ、

硬球が襖のすべり面に食い込んでいて、敷居のすべり面には硬球のすべり跡がくっきりついていた。硬球をすべり面の真ん中に入れたときには、襖のすべり跡はほぼ真直ぐに近かったが、(2)硬球をすべり面の少し端に寄ったところに入れたときには、すべり跡は斜めに走り、端に寄っていた。この襖での実験は実験回数が少ないだけでなく、襖のすべり面は柔らかいので、剛体のバルブ・スプールのロックと同じレベルで論じることができないが、バルブのロックのメカニズムを考えるヒントは得られる。

2-3 宅配便で送られてきたロックした油圧バルブ  
さて本題に戻り、油圧バルブのロックを考えてみよう。本当にバルブのスリーブとスプールのすき間に硬いごみを噛み込んでロックが起こったり、バルブのスプールのスリーブの隙間に微小な汚染物のシルトが堆積して摩擦を増大させ、バルブがロックするのなら簡単にスプールの抜けははずだ。ところが宅配便で送られてきたロックしたバルブを丁寧に分解すると、バルブのスプールの底面が意外に簡単に抜けることや、ロックしたバルブをハンマーで叩くと、ロックが解消することを工場現場で仕事をした人なら経験で知っているはずである。残念ながら、今までの学術論文ではこのような現象を説明できない。それは何故だろうか？

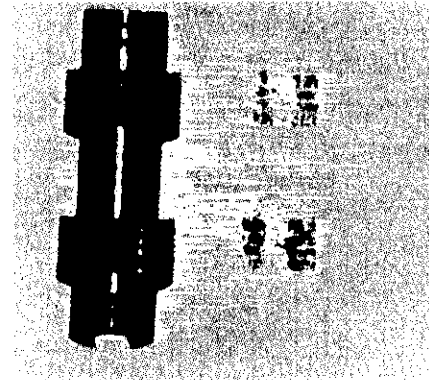
### 3. ロックを起こした油圧バルブを調べる

油圧バルブのスプールの調べると、スプールの表面に第2図に示すように茶色い付着物が付着していることがあるし、第3図や第4図の顕微鏡写真のような引っ掻き傷が見られることもある。これらを検討することによって、スプールのどのような条件で動いていたかがわかる。

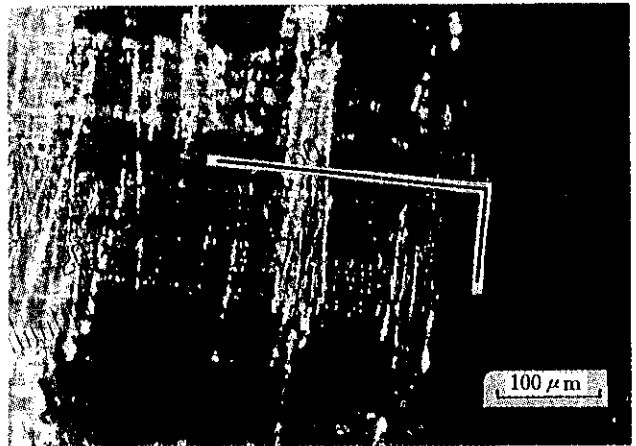
これらの観察結果をもとに、油圧バルブのロックが起こるメカニズムを考えてみることにする。

#### 3-1 第2図の付着物

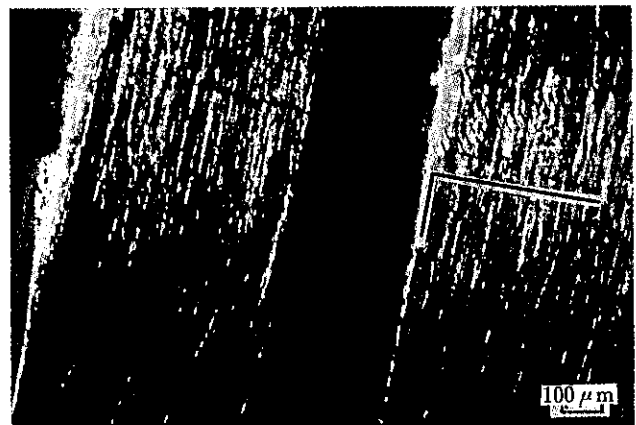
- (1) これらの付着物は高分子化した油の酸化変質物であることは知られている<sup>⑤⑥</sup>。昨年の本誌11月号から今年の1月号まで、実験結果を示して詳しく説明したように、油の酸化変質物は極性をもっていて金属表面に付着し、大きな付着力を作り出す。第2図のように肉眼でもわかるくらいに油の酸化変質物がスプールのスリーブ表面に厚く付着して、長時間バルブが停止して



第2図 スプールの表面に付着した油の酸化変質物



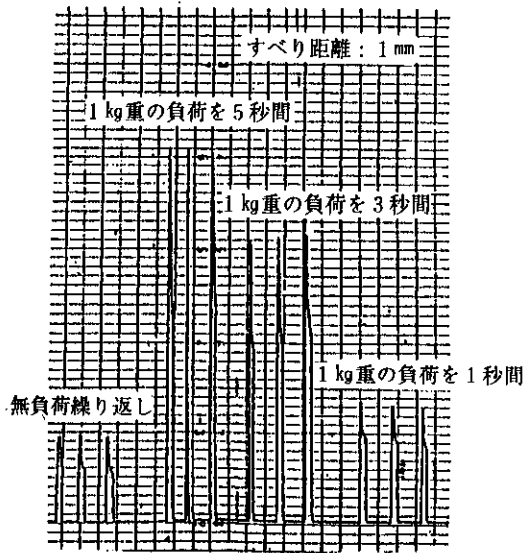
第3図 バルブスプールの底面について軸方向に平行なすり傷



第4図 バルブスプールの側面について軸方向と交差するすり傷

いるとスプールの沈降し、付着物同士が結合して、当然バルブスプールのスプールの内で固着する。

- (2) 付着物の層が薄くても、スプールの押し付け力が働くと、短時間で固着が起こる。第5図は、酸化油を塗布したバルブスプールの繰り返しすべ

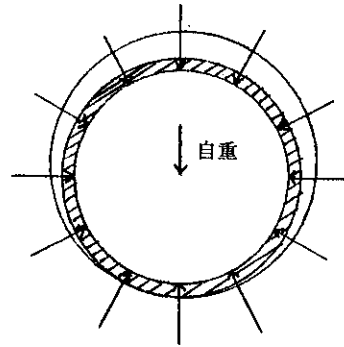


第5図 無負荷と1 kg重の負荷をかけたときの静摩擦係数

らせたときと、1から5秒という極く短時間1 kg重の負荷をかけたときの静摩擦係数である。このことから、バルブスプールやスリーブの表面に油の酸化変質物が吸着していると、極く短時間スプールに押し付け力が働いてもスプールは固着することがわかる。スプールにこのような押し付け力が働くのは、スプールのミゾに汚染物が詰まり、ミゾがなくなったときに起こる。

ついでにこのメカニズムを説明すると、第6図のように、スプールにミゾがあり、その中に自由に流動できる油があると、スプールに全方向から力がかかるので、バルブには自重だけしかかからない。そのときのスプールの静摩擦係数は第5図の繰り返して滑らせたときの静摩擦係数と同じである。しかし、スプールに第7図のような汚染物が詰まって、ミゾが埋まるとミゾがなかったのと同じことで、バルブが停止している間にスプールが沈降し、スプールはスリーブと大きな面で接触するので、油の酸化変質物が接合して油が自由に流動できなくなる。すなわち、第8図のように接触部には油膜がなくなる。そのようなスプールに油圧が働くと、スプールの自重に加えて、重力方向に押し付け力が働く。そのときのスプールの静摩擦係数は第5図のスプールに負荷を加えたときの静摩擦係数と同様に大きくなる<sup>(4)</sup>。

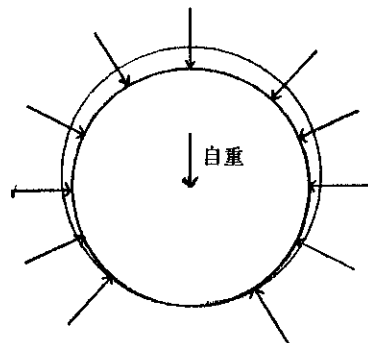
(3) 何度も説明したことであるが、RBOT試験機で



第6図 ミゾによってバルブスプールの全周方向から均等に力が働く



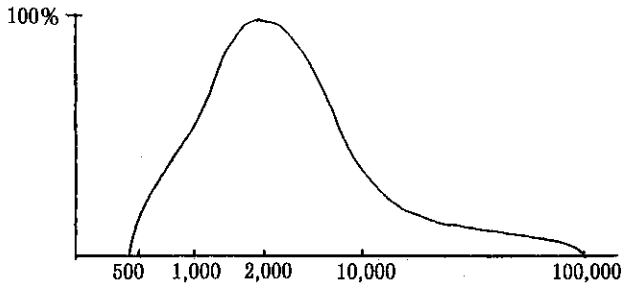
第7図 バルブスプールのミゾを埋めた汚染物の塊



第8図 ミゾがないスプールには重力方向に押し付け力が働く

わずか3時間酸化させただけで、油の数倍から十倍以上の高分子の油の酸化変質物ができていた。実際に使われている油の中の酸化変質物を調べると、第9図に示すように、分子量が1000以上10万に達するものまで分布している<sup>(4)</sup>。

(4) 分子量が広く分布しているということを考えると、分子の数の多い分子がスプールの表面に付着している確率が高く、数の少ない大きな分



第9図 長期間使用した油の中の酸化変質物の分子量分布

子量の分子が付着している確率は小さいと考えられる。すなわち、同じ割合で付着しているとすると、付着している分子量の大きな分子は、極く局部的である。油圧バルブが停止して、スプールが自重と重力との作用で沈降して、スプールとスリーブの表面に付着している油の酸化変質物同士が接近するとき、大きな分子量の酸化変質物は早く結合するが、小さい分子量の物質はまだ接合できていないかもしれない。結合できたとしても、分子量の大きい分子が結合した部分の結合力の方が、分子量の小さい分子が結合した部分より大きい。

- (5) このようなアンバランスな結合をしている部分をすべらせて切り離そうとすると、結合力の弱い部分が早くせん断されるが、結合力の強い部分のせん断は遅れる。そのため、せん断が遅れた方向にスプールは曲がって動く。これがバルブをロックさせる原因である。バルブを分解するとき、スプールを引き抜くときや復旧するとき、スプールを傾けるとロックするので容易に確かめることができる。手元にバルブがなくても、機械を修理するためにベアリングを抜こうとするとき、間違っ軸方向から少し傾いた方向に引っ張るとベアリングが抜けられないのも同じ現象である。これらの場合、硬い固形物を噛み込んでなくても起こる。バルブを分解しても、ゴミを噛み込んだ形跡がないのに起こるバルブのロックは、この現象の可能性が高い。従って、分子レベルで考えると、油の酸化変質物のような柔らかい汚染物は潤滑性を高め、バルブのロックを緩和させるという説には賛成しかねる。

### 3-2 第3図の接触傷の顕微鏡写真

スプールのミゾに平行な浅いすり傷はスプールの研

磨時の傷であり、ミゾに直交するスプールの軸方向に平行な浅いすり傷は、スプールがすべった痕跡である。一般に汚染物は粒子サイズが小さければ小さいほど、その数は多い。この写真は、スプールが面粗さの小さいスリーブの表面を繰り返すべったことを示している。その場合、スプールには自重以外の押し付け力がかからない。そのためすり傷の痕跡は浅く、すべる過程で特別に摩擦の大きな部分がなく、スプールが軸方向を保ってすべっていることを示している。

### 3-3 第4図の引っ掻き傷の顕微鏡写真

引っ掻き傷を調べると次のことが分かる。

- (1) スプールの側面にできた傷である
- (2) 幅が数ミクロンの1本の直線傷で、長さは約800ミクロンであり、この直線傷はスプールのミゾを越えて続いている
- (3) この直線傷はスプールの軸方向と交差するようにわずかにずれている

ことがわかる。これらの事実を考察すると、

- (1) 固形物は金属より硬く、サイズは数ミクロンである
- (2) スプールのミゾを真直ぐに越えていることから、固形物はスリーブに付着していた（付着しななければミゾに落ち込んだと考えられる）
- (3) 軸方向と交差する方向に直線傷は傾斜していることは、固形物によってスプールが軸方向から傾いてすべってロックした

ことを示している。すなわち、固形物を噛み込んですぐにスプールがロックしたのではなく、傾斜して約800ミクロンの距離をすべった後でロックが起こった。バルブのスプールとスリーブのクリアランスは決まっているとすると、スプールの軸方向と傷との傾斜角が大きければ、勿論すべり距離は短い。

## 4. まとめ

- (1) 油は一種の化学製品であり、油圧を使用することによって発生する熱によって油は化学的に変質し、酸化変質物を生成する。酸化変質物は粘性が強いので、油圧システムが長時間停止すると、沈降したスプールが固着し、バルブのロックを起こす。
- (2) スプールのミゾが汚染物で目詰まりすると、スプールに押し付け力がかかるようになるので、

油の酸化変質物の粘着力との相乗効果でロックが起こり易くなる。

- (3) 硬いゴミに限らず油の酸化変質物の分子量の違いによっても、スプールがすべるときに、すべり面の各点での摩擦力に差ができる。油の酸化変質物は静的な状態が長く続くと、固着力を増す。スプールは硬いゴミだけではなく、油の酸化変質物の固着によって、摩擦力が大きくなった方向に曲がって動く。すなわち、バルブのロックはゴミを噛み込んだことによって直接起こるのでなく、ゴミを噛み込んだことによって、スプールが軸方向と交差する方向に動いてロックすることがわかった。

<参考文献>

- (1) Fitch, E.C., "Fluid Contamination Control" F.E.S.Inc. Siltwater, OK (1988), p.208.

- (2) Ijengar, S.K.R., Fluid Power Research Conference, Okurahoma State Univ. Paper NoP76--7, (1976).  
(3) Surjaatmadja, J.B. & Tessmann, R.K., Fluid Power Research Conference, Okurahoma State Univ. Paper NoP76--6, (1979).  
(4) Surjaatmadja, J.B. & Fitch, E.C., Fluid Power Research Conference, Okurahoma State Univ. Paper NoP.78, (1976).  
(5) Watanabe, H. & Kobayashi, C., Lubrication Engineering, 34, 8, (1978), p.421.  
(6) 長尾 哲、昭和55年秋季油空圧講演会予稿集p.39  
(7) 佐々木徹、山本隆司、トライボロジー会議予稿集、名古屋1993-11、p.691  
(8) 佐々木徹、山本隆司、トライボロジー会議予稿集、名古屋1993-11、p.687

---

筆者連絡先

佐々木 徹

(株)クリーンテック工業 常務取締役

〒140 東京都品川区東大井2-7-7 品川テクノビル4F

TEL:(03)3740-4141 FAX:(03)3740-4966

---