

ワイプレンの振動対策について

Preventive Measures against Self-Excited Vibration of the WIPRENE



(化)技術部 設計第2課
平井 等
Hitoshi Hirai

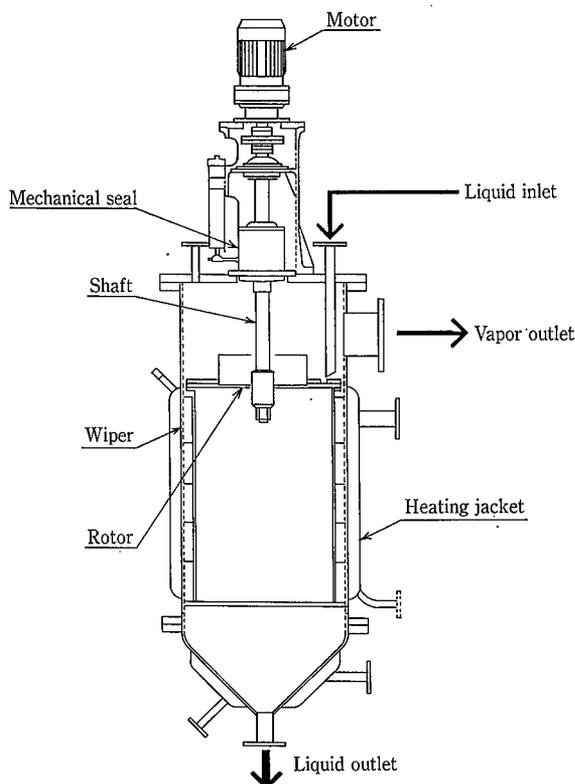
The thin-film evaporator WIPRENE has been designed to evaporate a liquid substance by forming a thin film under vacuum condition. A case was recently reported in which a vibration occurred in the WIPRENE with a spring type wiper during high-viscosity liquid treatment. The vibration was proved, by actually measuring the vibration during WIPRENE operation, to be a self-excited vibration. This paper describes an outline of the self-excited vibration and offers preventive measures against it.

まえがき

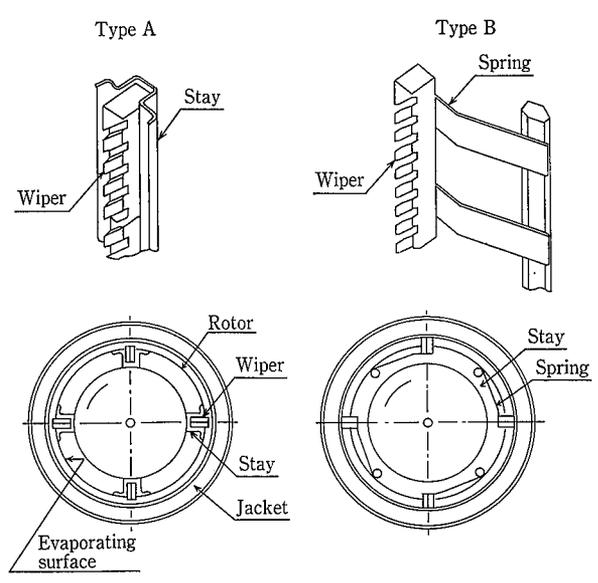
薄膜蒸留装置ワイプレン（第1図）は蒸発濃縮，蒸留精製，脱揮脱臭等の用途に1000基を越える納入実績がある。処理液に機械的攪拌を与え，薄膜を形成させるワイパ部の形状は遠心式のA型とバネ式のB型の2種類（第2図）の

形式があり，液の性状によって使い分けている。たとえばB型ワイパは缶壁との接触面圧を調整出来るという利点から液の粘度が大きいときや付着性のある液性状のとき，または接触面圧が大きいと発色する液性状のときにもちいる。

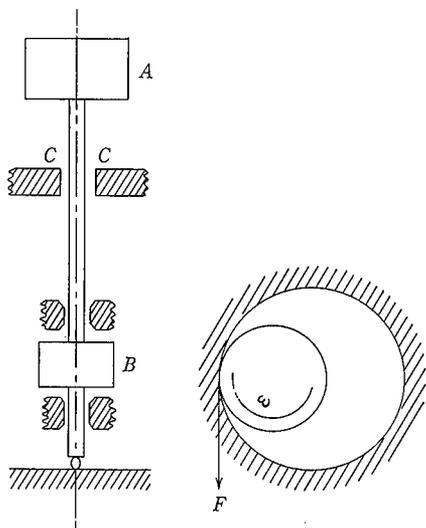
最近の十数年間はB型ワイパを装着したワイプレンの納入台数が増加しているが，粘度の比較的大きい液を処理する場合にワイプレンに振動の発生する事例があった。振動の実地調査を試みたところ，振動の形態はB型ワイパの自励振動である可能性が有力であり，この視点で振動対策を検討した。その結果有効な対策効果が確認され，ワイプレンの運転条件を大きな振動の起こる危険な状態から出来る



第1図 ワイプレン
Fig. 1 Wiprene.



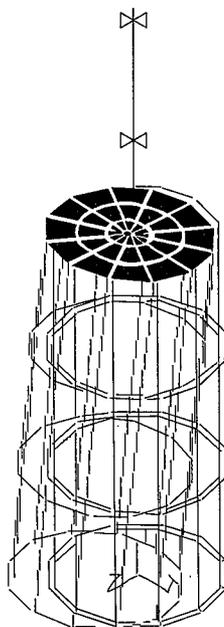
第2図 ワイパの種類
Fig. 2 Types of wiper.



第3図 自励振動モデル
Fig. 3 Model of self-excited vibration.

- A Rotating object
- B Motor
- C Guide
- ω Angular velocity
- F Frictional force

ANSYS 4. 3A2
FEB 22 1992
17:30:23
DISPL.
STEP = 1
ITER = 1
FREQ = 4.275
DMX = 6.518
XV = 1
YV = 1
ZV = 1
DIST = 2 712
YF = 2 183



第4図 固有振動数計算値
Fig. 4 Calculated natural frequency.

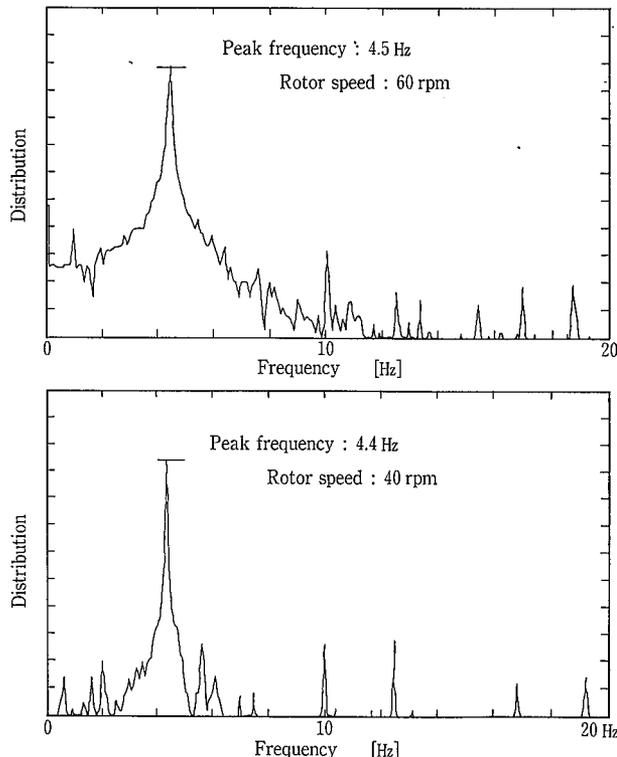
だけ遠ざけるような設計指針を得た。

ここではワイブレンの自励振動についての理論的考察と振動対策を紹介する。

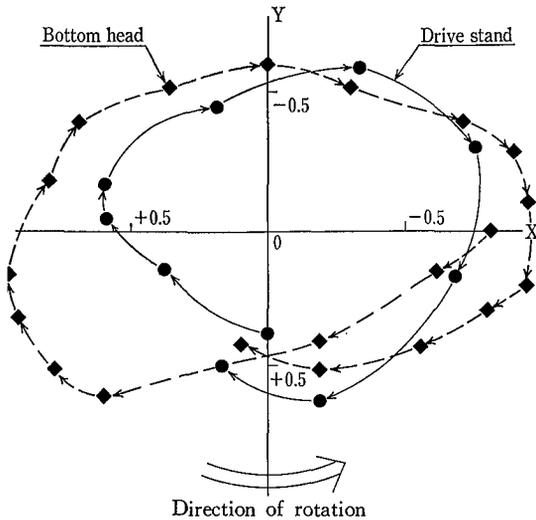
1. ワイブレンの自励振動

回転物体の振動は大きく分類すると強制振動と自励振動に分けることが出来る。強制振動は回転体の不釣り合いや支持部の剛性の違いによって、回転による遠心力により振幅は増大し、特定回転数で振動振幅は急激に増大する共振状態となる。この強制振動は不釣り合い量、固有振動数、減衰の値で振動の大きさが一元的に求めることができ、振動対策も比較的容易である。一方自励振動の場合は不釣り合いによる強制力以外に何らかの外乱により、回転数とは無関係に固有振動数で大きく振動を起こし、予知することが難しく危険な振動であり、負の減衰が作用する場合に起きる。

自励振動の代表的な例を第3図により概説する¹⁾。電動機Bで駆動された質量Aのついた縦型機械について考える。軸と案内Cとの間にある程度の隙間があり、また軸は下端が固定され上端は荷重のある片持梁であると考え。軸の横振動の自然振動数(軸の危険速度)は普通の方法で計算され、軸の回転速度は通常この危険速度を避けて、すなわち共振を避けて運転する。経験によれば軸が真直で案内Cに接触しない間は機械は滑らかに回転するが何らかの理由で軸が案内Cに接触すると激しい振れ廻りが起こって、それが持続する。この種の振れ廻りはいかなる速度においても発生し、その旋回速度は上述の軸危険速度と同じ横振動数の振動となる。第3図に示すような案内Cの断面で軸が案内に接すると固体摩擦力Fが軸に作用して軸を動かそうとし、軸の回転とは逆方向に振れ廻りを始める。



第5図 周波数分析
Fig. 5 Frequency analysis.



第6図 ワイブレン本体とドライブ架台の振れ廻り
Fig. 6 Whirling of WIPRENE body and drive stand.

摩擦力を生じるためには面圧が必要であるが、これは質量Aの遠心力が軸から案内に伝達されることによる。

ワイブレンにおける自励振動は前述の代表例に模して考えることが出来る。すなわちワイブレンの缶壁が案内Cでありワイバ部分が軸とみなせる。ワイバが常に缶壁と接触している点異なるが、処理液の粘度が比較的小さい場合(1000 mPa.s以下)には、経験により振動は発生せずに静かに回転している。液性状と運転条件がワイバと缶壁との間の摩擦係数になんらかの変化を与えた場合に振動が発生すると予想され、その振動の形態は自励振動の特性を帯びると予想される。

自励振動の特徴をまとめると次の3点である。

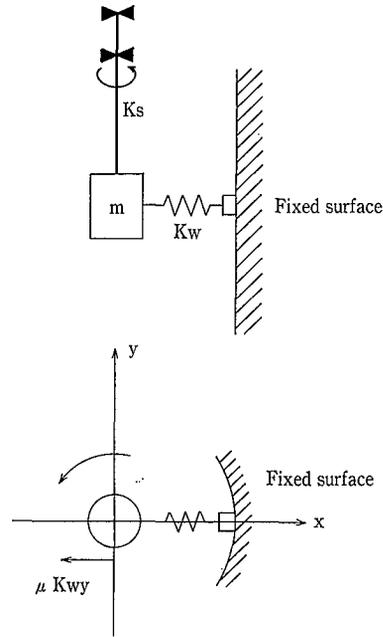
- ① 振動数は回転体の固有振動数である。
- ② 振動は回転数に依存しない。
- ③ 振れ廻り方向は回転体と逆方向である。

比較的粘度の大きい液を処理した場合にワイブレンに振動が発生した事例を紹介する。

ワイブレン形式：48-100型(内径φ1200/伝面10m²)
 処理液密度：900 kg/m³
 処理液粘度：3000~5000 mPa.s
 処理量：1000~1500 kg/H
 回転数：40~60 R/M
 真空度：0.07~0.27 kPa
 加熱温度：250~300 °C

このワイブレンの処理目的は製品中に含まれる軽沸点成分の除去であり、除去率は10~15%である。ロータの固有振動数は計算上4.3 HZ.であり第4図に示した。振動発生時に振動計によりワイブレン各部の振幅を実測し、周波数解析を行った結果を第5図に示した。振動中のワイブレンの卓越周波数はロータが60 R/Mの時に4.5 HZ.であり、0 R/Mの時に4.4 HZ.である。第6図には振動するワイブレンの振れ廻り方向を示した。これらの測定結果はいずれも自励振動の特徴を満たしている。

従って、このワイブレンの振動形態は自励振動である可能性が極めて大きいと判断した。



第7図 Ks と Kw のモデル
Fig. 7 Model of Ks and Kw.

2. 自励振動の方程式

第7図でロータの質量を m 、軸のバネ定数を k_s 、ワイバのバネ定数を k_w 、ワイバと缶壁(流体を含む)との摩擦係数を μ 、軸の減衰係数を c とすると \dot{x} 、 \dot{y} 方向の力のつりあいより次式が成り立つ。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + (k_s + k_w)x + \mu k_w y = 0 \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + (k_s + k_w)y - \mu k_w x = 0 \quad (2)$$

$k_s \gg k_w$ とし $k_s + k_w = k_s$ 、 $\mu k_w = Q$ とおく。さらに

$$P = \sqrt{k_s/m} \quad (\text{固有角振動数})$$

$$h = c/2\sqrt{mk_s} \quad (\text{減衰比})$$

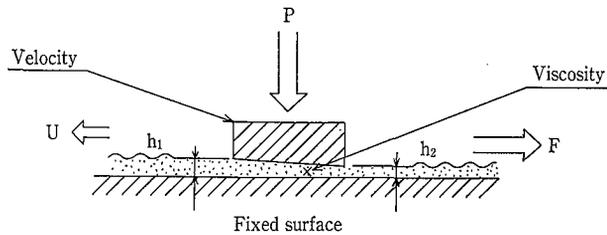
とおくと(1)(2)式は次式に変形される。

$$\ddot{x}/P^2 + 2h\dot{x}/P + x + (Q/k_s)y = 0 \quad (3)$$

$$\ddot{y}/P^2 + 2h\dot{y}/P + y - (Q/k_s)x = 0 \quad (4)$$

(3)(4)式で表される運動は $x = X e^{st}$ 、 $y = Y e^{st}$ (s は複素数) と書ける。 s の虚数部は振れ廻りの振動数を、実数部は減衰または発散のパラメータを表す。自励振動が発生する限界では s は純虚数となるので $s = i\Omega$ とおき、(3)(4)式に代入すると次式に変形される。

$$(-\Omega^2/P^2 + 2hi\Omega/P + 1)X + (Q/k_s)Y = 0 \quad (5)$$



第8図 滑り軸受内の流れのモデル
Fig. 8 Model of flow in a slide bearing.

$$(-\Omega^2/P^2 + 2hi\Omega/P + 1)Y - (Q/k_s)X = 0 \quad (6)$$

ここで振れ廻りの振動数 Ω は不減衰固有振動数 P に等しいと考えて $\Omega = P$ と近似する。さらに無次元の横バネ常数 Q^* を $Q^* = Q/k_s$ として (5)(6) 式を整理すると次式を得る。

$$2hiX + Q^*Y = 0 \quad (7)$$

$$-Q^*X + 2hiY = 0 \quad (8)$$

(7)(8)式が有意な解を持つ条件が自励振動が発生する限界と考えることができ、その条件は次のとおりとなる。

$$-(2h)^2 + Q^{*2} = 0 \quad \text{つまり} \quad Q^* = 2h \quad (9)$$

即ち、無次元の横バネ常数 $Q^* = \mu(k_w/k_s)$ が減衰比 $h = c/2(mk_s)^{1/2}$ の2倍を越えると自励振動が発生する。従って自励振動を発生させない条件は次式で与えられる。

$$\mu(k_w/k_s) < 2c/2\sqrt{mk_s} \quad (10)$$

3. ワイパ接触部の摩擦係数 μ

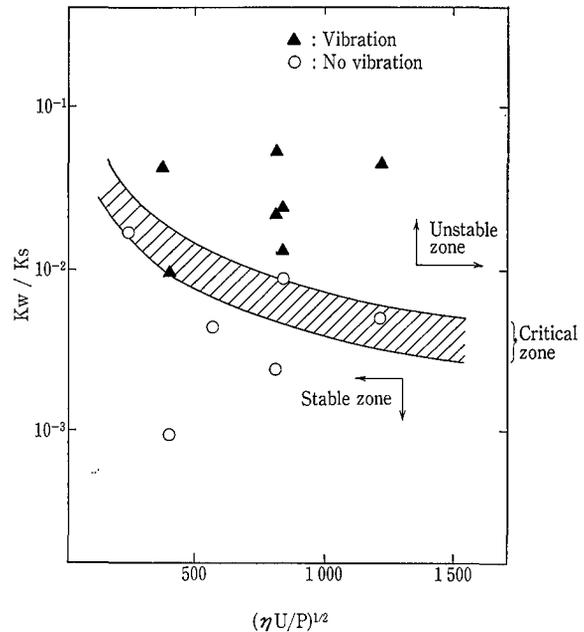
ワイパ接触部は固体壁面での摺動ではあるが、ワイパと缶壁との間には流体が介在している。液粘度の増加に伴う振動について検討する必要があるため、摩擦係数 μ に関して処理液の粘度 η 、ワイパの壁面での速度 U 及びワイパの壁面への押しつけ力 P 等の影響を考える。

第8図に示すようにワイパが初期力（遠心力、バネ力） P で缶壁に押しつけられ、すきま h_1, h_2 で運転されているものとする。簡単のため摺動面は平面で紙面垂直方向に単位幅あたりの一様な流れを考える。

すきま部の流れを粘性支配と考える滑り軸受内の流れの理論²⁾ から、結果のみを記述すれば荷重 P と壁面に作用する抵抗力 F はそれぞれ次式で与えられる。

$$P = \frac{6\eta VL^2}{(K-1)^2 h_2^2} \left(\ln K - 2 \frac{K-1}{K+1} \right) \quad (11)$$

$$F = \frac{2\eta VL^2}{(K-1)h_2} \left(2 \ln K - 3 \frac{K-1}{K+1} \right) \quad (12)$$



第9図 振動発生領域判定図
Fig. 9 Design criteria for self-excited vibration of WIPRENE.

ここで $K = h_1/h_2$ である。

ワイパ部の摩擦係数 μ は $\mu = F/P$ で定義されるから(11)(12)式から μ は次式で表すことが出来る。

$$\mu = F/P = \sqrt{\frac{2\eta V}{3P}} \left\{ \frac{2 \ln K - 3 \frac{K-1}{K+1}}{\sqrt{\ln K - 2 \frac{K-1}{K+1}}} \right\} \quad (13)$$

4. 自励振動回避判別式

(10)式と(13)式からワイプレンの操作因子を含む判別式が得られる。

$$\sqrt{\frac{\eta V}{P}} (k_w/k_s) < K \sqrt{\frac{C}{m k_s}} \quad (K \text{ は定数}) \quad (14)$$

(14)式は処理液の粘度 η が増加すれば振動が発生しやすいことやワイプレンのロータに下部軸受を設置した場合（即ち k_s を増大させる場合）に振動が発生していないことの経験に合致している。またワイパのバネ常数 k_w については検証のため2.で述べた振動事例のワイプレんでその値を1/10に減じたワイパを設置し運転したところ、振動は発生しなかった。従って k_w を小さくすることも振動対策に有効であることが判明した。

一方 U, P に関してはワイプレンの標準設計値としておよそ $U = 4 \text{ m/sec}$, $P = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ のほぼ一定の値を与えているため、過去の経験からは(14)式の妥当性は判断出来ない。

(14)式の検証のデータを得るために当社技術研究所にある伝熱面積 0.4 m^2 のパイロット蒸留装置をもちいてテストした。およそ $30,000 \text{ mP.s}$ の高粘度流体をパイロット装

に供給し、 k_w/k_s 及び U の値を変化させて振動の発生を調査した。これらの結果と前述の48-100型ワイブレンの振動及び振動回避事例を第9図に示した。第9図は横軸に $(U/P)^{1/2}$ 、縦軸に k_w/k_s をとった振動発生判定線図であり、(14)式の右辺の減衰比を一定とした曲線の右上方向に振動発生領域があり、左下方向に振動の発生しない領域があることがわかる。この領域を分ける曲線はある程度の幅を持つが、(14)式は実用上使用出来ると判断した。

以上の考察から処理液の比較的大きい場合に発生するワイブレンの振動は自励振動であり、その理論的考察とパイロット設備のテスト結果から(14)式の判別式が有効であることがわかった。ワイブレンの U/P がほぼ一定であることが考慮に入れるとB型ワイバの振動回避判別式は次式で表すことが出来る。

$$k_w/k_s < (0.5 \sim 1.0) \sqrt{\eta} \quad (15)$$

ただし η は mPa.s の単位を使用する。

(15)式はワイブレンで処理する流体の粘度が与えられたならば、その値に応じてワイブレンのワイバと軸のバネ常数比を小さく設計する必要があることを表している。たとえば3-50型ワイブレンでは標準の k_w/k_s は約0.01であるので内容積粘度はおおよそ 2500~10000 mPa.s となる。従って自励振動を避けるためには次の対策をたてねばならない。

- ① 軸径を大きくする。(k_s の増大)
- ② 下部軸受を設置する。(k_s の増大)
- ③ ワイババネ板厚を薄くする。(k_w の減少)
- ④ ワイババネ長さを長くする。(k_w の減少)

す び

処理液の粘度が比較的大きい場合に発生する振動は自励

振動である。振動回避の考え方を理論的に考察し、最近発生した振動事例とパイロットテスト装置のテスト結果より、自励振動回避の判別式を得、その対策を示すことが出来た。

供給される処理液がワイブレンの内部で、その流れが慣性支配から粘性支配になると自励振動が起り易いことも本検討から予測出来る。ただし本検討で用いた滑り軸受内の流れの理論のモデルと現実のワイブレン内のワイバ部薄膜流れとは異なっていることは容易に想像出来る。粘性支配の薄膜流れはワイバによる強制流動領域がせまくなり缶壁周方向に液膜厚みの不均一が生じ、これが摩擦係数に影響を与えていることも考えられる。ワイブレン内の流れを考慮に入れた摩擦係数の影響は今後の課題としたい。

処理液の粘度が数千~数万 mPa.s の場合はワイブレンで処理可能である。さらに高粘度液の処理には当社高粘度用薄膜蒸留装置エクセバの採用を検討いただきたい。ワイブレンとエクセバの液粘度による使い分けはおおよそ 10000 mPa.s 以下でワイブレン、50000 mPa.s 以上でエクセバとし、その中間にある場合は当社技術研究所にあるテスト機で確認後、判断している。

日本の化学業界が少量多品種、高付加価値製品の製造へ移行してゆくなかで、今後薄膜蒸発機の処理液も多様化することが予想される。ここで紹介したワイブレンの振動対策が顧客の薄膜蒸発機計画の一助となることを期待する。

最後に自励振動に関する理論的助言は芦屋大学教授藤川猛先生に頂いたものであり、ここに感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) チモシェンコ 工業振動学 東京図書
- 2) 生井, 井上 粘性流体の力学 理工学社