滑り軸受油膜の負圧に関する研究*
(第2報, 負圧の発生条件と負圧の大きさ)染 谷 常 雄^{*1}Negative Pressure in the Oil Film of Journal Bearing
(2nd Report, Conditions for the Development of Negative Pressure and its Value)Tsuneo SOMEYA^{*2}^{*2} Musashi Institute of Technology, Dept. of Mech. Eng.,
Tamazutsumi 1-28-1, Setagaya-ku, Tokyo, 158-8557 Japan

Taking into account the surface dilatational viscosity κ , influences of eccentricity ϵ and 8 parameters on the limit of development and on the value of negative pressure including tensile stress are studied: When κ is taken into account, negative pressure develops in a wider range of ϵ and parameters, and its maximum value tends to be larger. Whether κ is taken into account or not, the larger ϵ is, the greater is the number of parameters, which limit the negative pressure development and therefore the more hardly develops the negative pressure, but the larger is the developed negative pressure. The oil film ruptures then, when the force of κ and surface tension cannot suppress the bubble expansion. When ϵ , oil viscosity and initial vapor radius are small and κ is large, negative pressure in the oil film can increase with increasing rotational speed, because the effect of κ suppresses the bubble expansion, as long as the assumptions made in the bubble calculation hold.

Key Words: Tribology, Lubrication, Hydrodynamic Bearing, Oil Film Rupture, Negative Pressure, Tensile Stress, Bubble, Surface Dilatational Viscosity, Surface Tension

1. 緒 言

第1報⁽¹⁾では, 中央全周溝付真円軸受の油膜について, 油の表面粘性を考慮した気泡理論により, 負圧も含め圧力の分布を求めた. また負圧に影響を及ぼす因子として4個の気泡因子と4個の軸受因子を選び, これら因子の大きさが圧力分布に及ぼす影響を検討した.

本報では, 上記の軸受について, 同理論により油膜に負圧が発生する条件と, 発生した負圧の大きさについて検討する. すなわち, まず2章で計算結果を纏め, この結果に関して, 3章で表面粘性を無視した場合を, 4章でこれを考慮した場合を, 5章で因子の作用等を検討する. 次に, 考察の対象とした軸受を図1に, また使用した記号を以下に記す.

$\hat{B} = 2\sigma / (p_a R_a)$: 無次元表面張力

$\hat{D} = 4\kappa\omega / (p_a R_a)$: 無次元表面粘性

L : 負圧発生に関する因子の下限值

N : 軸の毎分回転数

p : 油膜圧力(ゲージ圧)

p_a : 大気圧(絶対圧)

$p_{\min}$: p の最低値(ゲージ圧)

p_s : 給油圧(ゲージ圧)

R : 気泡半径

R_a : 大気圧下の気泡半径

$\Delta r = D/2 - r$: 軸受の半径すきま

U : 負圧発生に関する因子の上限値

α_a : 大気圧下のボイド率

$b' = B'/D$: 軸受の有効幅径比

$\epsilon = e/\Delta r$: 軸心の偏心率

Fig. 1 Journal bearing with a circumferential oil groove and its coordinates

* 原稿受付 1999 年 12 月 22 日.

^{*1} 正員, 武蔵工業大学工学部(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1).

E-mail: someya@eng.me.musashi-tech.ac.jp

η_1 : 油の粘性係数

$\eta' = \eta_1/\psi^2$: 油の修正粘性係数

κ : 油の表面粘性係数

σ : 油の表面張力

$\tau = -p_{\min}$: 負圧の最大値

$\phi = \Delta r/r$: 軸受すきま比

$\omega = \pi N/30$: 軸の回転角速度

2. 油膜に負圧が発生する条件と負圧の大きさに関する計算結果

第1報⁽¹⁾の3・1節より明らかなように, 気泡の方程式とレイノルズ方程式の連立解は, 表面粘性を無視する($\kappa=0$)か, または考慮する($\kappa \neq 0$)かにより, ε のほかに表1に示す7個, または表2に示す8個の因子に依存する。そこで以下では, これらの因子のうち順次

Table 1

(a) Values of parameters at oil film rupture ($\kappa=0$)

Bubble Parameters					Bearing Parameters		
ε (—)	R_a (μm)	α_a (—)	σ (N/m)	β' (—)	p_s (MPa)	η' (Pas)	N (rpm)
U/L	U, —	L, —	L, —	U	L, —	U	U
0.2	—	—	—	1.37	—	43000	5950
0.4	—	—	—	0.69	—	13000	1830
0.6	0.101	0.083	0.25	0.35	0.45	3800	540
0.8	0.0112	0.19	2.2	0.138	5.25	720	94
Standard Value	1	0.01	0.0244	0.5	0.1	7103.9	1000

All parameters except each studied one have standard value.

U: Upper, L: Lower bound of parameter, —: No bound.

(b) Neg. pressure τ in MPa at oil film rupture ($\kappa=0$)

Bubble Parameters					Bearing Parameters		
ε (—)	R_a (μm)	α_a (—)	σ (N/m)	β' (—)	p_s (MPa)	η' (Pas)	N (rpm)
U/L	U, —	L, —	L, —	U	L, —	U	U
0.2	—	—	—	0.1118	—	0.1105	0.1101
0.4	—	—	—	0.1113	—	0.1111	0.1111
0.6	0.2703	0.1092	0.2733	0.1098	0.1116	0.1112	0.1114
0.8	1.7578	0.1103	1.7630	0.1116	0.1111	0.1020	0.1118
0.1116 at $\varepsilon=0.507(U)$ for 7 Parameters of standard values							

Table 2

(a) Values of parameters at oil film rupture ($\kappa \neq 0$)

Bubble Parameters				Bearing Parameters				
ε (—)	R_a (μm)	σ_a (—)	σ (N/m)	κ (Ns/m)	β' (—)	p_s (MPa)	η' (Pas)	N (rpm)
U/L	U	—	U, L, —	L	U, —	—	U	U, —
0.2	—	—	—	0.7×10^{-5}	—	—	4.98×10^6	—
0.4	—	—	—	0.8×10^{-5}	—	—	3.0×10^6	—
0.6	87	—	—	0.108×10^{-4}	—	—	1.3×10^6	—
0.8	34	—	U: 0.561 L: 1.64	0.27×10^{-4}	3.0	—	0.12×10^6	4060
Standard Value	1	0.01	0.0244	0.785×10^{-3}	0.5	0.1	7103.9	1000

All parameters except each studied one have standard value.

U: Upper, L: Lower bound of parameter, —: No bound.

(b) Neg. pressure τ in MPa at oil film rupture ($\kappa \neq 0$)

Bubble Parameters				Bearing Parameters				
ϵ (—)	R_a (μ m)	α_a (—)	σ (N/m)	κ (Ns/m)	β' (—)	p_s (MPa)	η' (Pas)	N (rpm)
U/L	U	—	$U, L, \text{—}$	L	$U, \text{—}$	—	U	$U, \text{—}$
0.2	—	—	—	0.001543	—	—	0.5650	—
0.4	—	—	—	0.05606	—	—	1.2145	—
0.6	0.1006	—	—	0.1129	—	—	2.0873	—
0.8	0.1015	—	$U: 0.8592$ $L: 1.5558$	0.1180	0.9557	—	2.3786	4.4542
2.395 at $\epsilon=0.92(U)$ for all 8 parameters of standard values								

1個に着目し, ほかのすべての因子の値を表1(a)と表2(a)の最下行に示す標準値(第1報の3・2節で定めた値)に固定した。その上で, 着目する1個の因子の値を変化させて負圧の大きさ τ の変化を調べた。ここで, 油膜に分布するゲージ圧 p の最低値を $p_{\min} < 0$ とすると, $\tau = -p_{\min}$ と置いた。このとき, 因子の値の変化範囲は, 因子の影響を明確に把握するため, 実用的範囲よりもできるだけ広く選んだ。なお, 3章以降の検討内容は, 選んだ因子の値の範囲においてのみ保証される。

計算結果を図2と3に示す。すなわち, 図2は $\kappa=0$ の場合の負圧曲線で, そのうち図2(a)は7個の因子を標準値とし, ε の値を変えたときの τ の変化を示す。また図2(b)~2(i)は, 7個の因子のうち, 各1個の値のみを変えた場合の τ の変化を, ε の4個の値(0.2, 0.4, 0.6および0.8)に対して示す。同様に図3は, $\kappa \neq 0$ の場合における τ の変化を示す。なおここで $\kappa \neq 0$ とは, κ の標準値を指すこととする。ただし図3(e)では, κ の値を変化させた。曲線表示の都合上, 一部の図は対数目盛とした。

Fig. 2 Negative pressure τ versus ε and 7 parameters ($\kappa=0$)

Fig. 3 Negative pressure τ versus ε and 8 parameters ($\kappa \neq 0$)

因子の値を変えて行くときに、ある値を越えると解が発散することがある。このときは、そこで油膜が破断したものとして、破断直前の因子の値を負圧発生の限界値とした。またそのときの τ の値を破断直前の負圧の大きさとした。破断後は、圧力分布は気泡を考慮しない従来の理論およびレイノルズ条件に従うと考え、破断部の圧力は零と置いた。気泡理論においては、すべての因子がそれぞれの限界値内にあるときに負圧が発生する。また ε および各因子の限界値の大きさは、互いに依存する。なお収束・発散の限界付近では、第1報の4・3節で述べたように計算時間が長引くため、因子の限界値および対応する負圧値 τ は概略値を求めるに止まった。

図2と3の負圧曲線には、油膜破断の箇所を縦長の矩形で示した。曲線の末端にこの記号がない場合は、単に計算範囲の終りを示す。表1(a)には図2における因子の上限値(U)と下限値(L)を、また表1(b)にはこれら限界値における τ の値を記載した。限界値がない場合には一を記した。表2(a)と(b)は、同様に図3を纏めたものである。また表1(b)と表2(b)の最下行は、図2(a)と図3(a)に対応する。すなわ

ち全因子を標準値に固定した場合の ε の上限値とそこの τ の値を示す。

3. 表面粘性を無視した場合の負圧に関する検討($\kappa=0$)

ここでは、 $\kappa=0$ の場合について、負圧の計算結果(図2と表1)に関して検討する。すなわち、まず3・1節で負圧の発生を許す因子の値の範囲について、また3・2節で負圧の大きさについて、諸因子の影響を検討する。

3・1 負圧の発生を許す因子の値の範囲

(1) ε が小さい場合(大よそ $\varepsilon \leq 0.4$) 図2より明らかなように、 ε が小さいと、 R_a , α_a , σ および p_s は、負圧発生の限界値をもたず、 β' , η' と N のみが限界値をもつ。なお $\kappa=0$ のときは、定義式 $\bar{D}=4\kappa\omega/(p_a R_a)$ により、 N すなわち ω の値によらず常に $\bar{D}=0$ である。それゆえ、 N を独立因子として扱う必要はなく、 $\eta_1\omega/\psi^2$ の形で取上げれば十分である。したがって、 ε が小さい場合の負圧発生の限界は、 ε のほかに二つの値 β' と $\eta_1\omega/\psi^2$ のみで与えられる。

(2) ε が大きい場合(大よそ $\varepsilon \geq 0.6$) 7個の因子すべてが負圧発生の限界値をもつ(図2)。

(3) ε の値と負圧の発生を許す因子の値の範囲 ε の増加とともに因子の上限値は減少し(R_a , β' , η' および N)、下限値は増加する(α_a , σ および p_s)。したがって、 ε が大きいほど負圧が発生する各因子の値の範囲は狭い。ただし p_s は広くなる。それは、 ε を大きくすると油膜破断下限の p_s は増加するが、一方 p_s を高めていくときに負圧が零になる p_s の値が ε とともにより大きく増加する結果、負圧が発生する p_s の範囲が広がるためである。

(4) 上限値か下限値か 因子が限界値をもつ場合は、上限値か下限値のいずれか一方である。すなわち、 R_a , β' , η' と N は上限値を、 α_a , σ と p_s は下限値をもつ。 ε は上限値をもつ。

3・2 油膜に発生した負圧の大きさ

(1) ε および各因子の影響 図2(a)より明らかなように、負圧の大きさ τ は、 ε が零からほぼ0.16までの間は零で、その後 ε の増加とともに増加する。 ε とともに τ が増加するこの傾向は、図2(b)~(i)のように7個の各因子の値を変化させた場合も同様である。また τ は、 R_a と σ にはほとんど依存しないが、 β' , η' および N の増加とともに増加する。 τ は、 p_s の増加とともに減少し、あるところから零になる。また τ は、 $\varepsilon=0.2$ におけるわずかな最大値を除けば、 α_a の増加とともに減少する。

(2) 油膜破断直前の負圧の大きさ 図2の各図より明らかなように、因子 R_a と σ を除くと、どの因子の大きさを変える場合も油膜が破断するのは、負圧が増加する途中で起こっている。したがって、 $\kappa=0$ の場合は負圧 τ は因子の限界値のところで最大値をとる。すなわち、負圧が過大となると油膜が破断する。この τ の最大値は R_a と σ の値のみに依存しており、 ε およびほかの5個の因子 $\alpha_a, \beta', p_s, \eta'$ および N の値にはよらない。このことは、第1報⁽¹⁾で気泡の方程式から求めた負圧の最大値 $\tau_{\max}$ を与える式(16)が $\bar{B}$ のみに、したがって σ と R_a の比のみに依存することと符合している。同式を再録すると：

$$\tau_{\max} = p_a \left(\frac{2\bar{B}}{3} \sqrt{\frac{\bar{B}}{3(1+\bar{B})}} + 1 \right) \dots\dots\dots (1)$$

事実、図2において R_a と σ の図を除くと油膜破断直前の負圧 $\tau_{\max}$ は、式(1)の σ と R_a にそれらの標準値を代入して得られる値 $\tau_{\max}=0.1120$ MPa(第1報の4・4節)とほぼ一致している。このことは、表1(b)の R_a と σ の列を除く τ の値からも明らかである。

R_a と σ の図、すなわち図2(b)と(d)においては、油膜破断が $\varepsilon=0.6$ と 0.8 で起こっているが、これらの破断点①～④においても、式(1)が成立っている。すなわち表3は、これらの4点について、気泡理論により求めた破断直前の τ の値(図2)と式(1)から求めた τ の値を比較したものであるが、両者はほぼ一致している。

式(1)の $\tau_{\max}$ は、 $\kappa=0$ の場合について気泡の方程式のみから求めた負圧の最大値である。しかし以上のように同式は、気泡の方程式とレイノルズ方程式の連立解としても成立ち、 $\kappa=0$ の場合における油膜破断時の負圧の大きさを与えることがわかる。

4. 表面粘性を考慮した場合の 負圧に関する検討($\kappa \neq 0$)

ここでは、 $\kappa \neq 0$ の場合の負圧の計算結果(図3と表2)に関して、4・1節で負圧の発生を許す因子の値の範囲について、また4・2節で負圧の大きさについて、諸因子の影響を検討する。

Table 3 Negative pressure τ at oil film rupture points ①～④ in Fig. 2(b) and (d)

Oil film rupture points	ε (-)	R_a (μ m)	σ (N/m)	$\bar{B}$ (-)	τ after Fig. 2 (MPa)	τ after Formula(1) (MPa)
Fig. 2(b)	①	0.6	0.101	0.0244	4.7685	0.2703
	②	0.8	0.0112	0.0244	43.0017	1.7578
Fig. 2(d)	③	0.6	1	0.25	4.9346	0.2733
	④	0.8	1	2.2	43.4246	1.7630

$R_a=1 \mu$ m and $\sigma=0.0244$ N/m are standard values,

$R_a=0.101, 0.0112 \mu$ m, $\sigma=0.25$ and 2.2 N/m are obtained by calculation.

4・1 負圧の発生を許す因子の値の範囲

(1) 限界値の有無 図3より明らかなように、 α_a と p_s は $\kappa=0$ のとき(図2)と異なり ε の値によらず負圧発生の限界値をもたず、常に負圧が発生する。一方 κ と η' は、 ε の値によらず常に限界値をもつ。また R_a, σ, β' と N は ε が大きいとき(0.6, 0.8 または 0.8)のみ限界値をもつ。 N は $\varepsilon=0.2 \sim 0.6$ のときは、 10^5 rpm まで計算したが限界値が現れなかった。したがってこの場合、計算の仮定が成立つ限り、 N の限界値はないと判断される。

(2) 上限値か下限値か 図3より明らかなように、 ε が大きいときにのみ R_a, β' と N は上限値を、 σ は上限値と下限値をもつ。また ε の値によらず κ は下限値を、 η' は上限値をもつ。 ε は上限値をもつ。

(3) ε の値と負圧の発生を許す因子の値の範囲 ε の増加とともに因子 R_a と η' の上限値は減少し、 κ の下限値は増加する。それゆえ、 ε の増加とともに負圧発生を許すこれら因子の値の範囲は狭くなる。また限界値をもつ因子は、 ε が小さいと κ および η' の2個であるが、 ε が大きいと R_a, σ, β' および N が加わり、6個となる。それゆえ、 ε が大きいほど油膜破断が生じやすく、負圧は発生しにくくなる。

(4) $\kappa=0$ の場合との比較 図2と3の(a)を比較すると、図3の方が負圧の発生する ε の範囲が広い。また図2と3の(b)～(i)について同一の ε ごとに比較すると、横軸が R_a, α_a, σ および p_s の図において ε が小さいときには両図とも負圧発生の範囲に限界がない。それ以外の因子と ε の値については、すべて図2と比べて図3の方が負圧発生を許す因子の値の範囲が広い。すなわち表面粘性は負圧発生を助長する。

4・2 油膜に発生した負圧の大きさ

(1) ε および各因子の影響 図3(a)より明らかなように、 τ は ε が零からほぼ0.16までの間は零で、その後 ε とともに増加する。 ε とともに τ が増加するこの傾向は、図3(b)～(i)のように8個の各因子の値を変化させた場合も同様である。また図3(b)～(e)より明らかなように、 ε が小さい間は、 R_a, α_a, σ と κ の影響は小さく、 τ の曲線はほぼ水平である。

次に、 ε が大きいときにこれら4因子が τ に及ぼす影響を調べる。 τ は R_a を零から増加すると、はじめ一定で推移した後減少し、その後一定値に落ち着き、限界に至る。 τ は α_a を零から増加すると減少し、 α_a が1より小さいところで零に達する。減少の度合は ε とともに増加する。 $\varepsilon=0.8$ のとき、 σ を零から増加すると τ は最小値をとった後増加し、一定値に漸近する

が, その前に負圧の発生が中断する. τ は κ をその下限値から増加すると, はじめ増加するが, 後に飽和する.

次に, 残り4個の因子 β' , p_s , η' および N の影響を図3(f)~(i)について調べる. τ は β' を零から増加すると, ほぼS字形に増加後, 飽和するが, ε が大きい場合(0.8)には, 油膜破断に至る. τ は p_s の増加とともに減少し, $\varepsilon=0.2\sim0.6$ ではあるところから零となる. したがって, ε を小さく, p_s を大きくすると油膜破断を経ずに負圧を零にすることができる. τ は η' を零から増加するとはじめ急昇するが, 徐々に減速し, 破断に至る. 上昇の割合は ε とともに大きくなる. τ は N とともにほぼ直線的に増加する. τ が N とともに増加する割合は ε とともに増加する.

(2) $\kappa=0$ の場合との比較 図2と3の(a)を比較すると, τ の最大値は図3の方が大きい. またその他の図(b)~(i)について, 同一の値の ε ごとに τ の最大値を比較すると, 横軸が R_a と σ の図については, 図2と3でほぼ等しい. また $\varepsilon=0.2$ と 0.4 の場合, 横軸が a_a の図において, 値は小さいが τ の最大値は図2の方が大きく, また p_s の図では両図でほぼ等しい. しかし, ほかの因子の図については, ε の値によらず τ の最大値は図3の方が大きい. したがって表面粘性は, 通常負圧の増大に寄与すると考えられる.

(3) 油膜破断直前の負圧の大きさ 3・2節の(2)で述べた $\kappa=0$ の場合と異なり, $\kappa \neq 0$ の場合は油膜破断直前で τ は必ずしも最大値とならない. すなわち, 図3の各図のうちで横軸が ε , η' および N の図では, τ は油膜破断直前に最大値を示すが, R_a と β' の図ではほぼ一定である. σ の図では, $\varepsilon=0.8$ のとき, τ は σ の上限値と下限値でそれぞれ最大値と最小値をとる. κ の図では, κ の下限で τ がほぼ最小または一定となる. これらの油膜破断を左右する因子の作用については, 5章で検討する.

(4) 負圧発生の抑制方法と促進方法 油膜に負圧が発生するのを防ぐには, (1)で述べたように, ε を小さくするか, またはそれと同時に p_s または a_a を大きくすればよい. また逆に, 油膜破断を起こせば負圧は零となる. それには, 図3より明らかなように, 例えば κ を小さくし, ε , R_a と η' を大きくすればよい. ただし, ε と η' を大きくすると油膜が破断するまでは, 負圧が大きくなる. また ε が小さい(0.2, 0.4)間は, R_a を大きくしても油膜破断は起こらない. 一方, 油膜にあえて大きな負圧を発生させるには, κ を大きくし, R_a , a_a および p_s を小さくし, また油膜破断

が起きない範囲で ε , β' , η' および N を大きくすればよい.

5. 油膜破断を左右する因子の作用等に関する検討

以上3と4章では, 負圧の発生を許す因子の範囲と, 発生した負圧の大きさに及ぼす各因子の影響について検討した. 次に負圧発生の限界, すなわち油膜破断を左右する因子の作用等について考察する.

(1) 油膜破断を左右する因子の作用について 軸受油膜の拡大部では, 軸の回転に伴って粘性力により負圧が生じる. それゆえ, 軸の回転とともに油膜内を流れる気泡はこの負圧域で膨張する. この粘性力は, したがって負圧は, ε , η' および N が大きいほど大きく, 気泡はより大きく膨張する. 気泡の内圧は, 気泡を膨張させるが, この膨張力は気泡の体積増加とともに減少する. 一方, 気泡の膨張時に, 表面張力と表面粘性力は気泡を収縮させる方向または膨張を抑制する方向に働く. この収縮力は, σ , κ および N が大きいほど, また R_a が小さいほど大きい. 気泡の膨張または収縮は, これら互いに逆向きの膨張力と収縮力の大小により決まる.

すなわち, 膨張力が収縮力より大きい間は気泡径は増加を続け, 油膜破断に至る. 途中で両者の力が等しくなれば膨張は止まり, 気泡径と負圧は最大となる. その後, 力の大きさが逆になると, 気泡径と負圧は減少する. したがって油膜破断は, これを促進する側の ε , η' および N と, これを抑制する側の σ , κ , N および $1/R_a$ の作用に左右される. N は両方向の作用を有する.

次に, 油膜破断に関する以上の考察をもとに, 一見意外に思える下記の2点について検討する.

(2) 負圧発生の中断について 図3(d)に示すように, $\varepsilon=0.8$ では σ のある区間で負圧の発生が中

Fig. 4 Negative pressure τ versus σ for $\varepsilon=0.8$ ($\kappa=\kappa_{STD}$ and $\kappa=2\kappa_{STD}$)

Fig. 5 Negative pressure τ versus N for $\varepsilon=0.6$

断している。そこで κ の値を標準値の2倍にしたところ、図4に示すように中断はなくなった。それゆえ、この中断は気泡の膨張を抑える表面粘性 κ の大きさが標準値では不足したために起こったと考えることができる。

(3) 「無限大」の負圧発生について 図3(i)に示すように、各因子が標準値の場合に $\varepsilon=0.2\sim0.6$ のとき、回転速度 N は限界値を示さない。これは、 ε , η' と R_a が比較的小さく、 κ が大きいときに生じる。例として図3(i)の $\varepsilon=0.6$ の曲線を図5の①に再録する。このとき、圧力分布は、最小油膜厚さ位置を中心とする対称分布に近い(第1報⁽¹⁾ 6・2節の(2))。これは、表面張力と表面粘性力が負圧と気泡内圧による気泡の膨張を、したがって油膜破断を妨げるためである。すなわち、回転速度 ω を高めると、油膜の拡大部では粘性力 $\eta\omega$ により負圧が ω に比例して増加する。このとき、気泡の膨張を妨げる表面粘性力 $\kappa\omega$ も ω に比例して増加するので、気泡の膨張が抑えられ、負圧が回転速度とともに増加する。ただし、これは本計算で気泡に関して設けた仮定が成り立つ限りのことである。すなわち、なかでも本計算では、気泡は軸の周速の1/2で周方向に流れると仮定している(第1報, 4・2節)が、実際は軸受内面付近の気泡は速度が零に近い。そのため、 κ による気泡膨張の抑止力が弱く、本計算結果よりも低い。すなわち有限の速度と負圧で油膜は破断すると考えられる。

一方、 ε を大きく(0.8)すると油膜厚さの拡大の割合が大きくなり、負圧による気泡の膨張力が増加するため、油膜破断が起こる。それゆえ、 κ の値を小さくすれば、 ε が0.8より小さいときでも油膜破断が生じるはずである。事実、ほかの因子は標準値のままで、 κ のみを標準値の1/10に減らしたところ、図5の曲線②が示すように、すでに $\varepsilon=0.6$ のときに $N=62\,000$ rpm を越えたところで油膜が破断している。

因子 η' を大きくすると、同じく負圧が増加するため油膜が破断しやすくなる。事実、 κ その他の因子は

標準値のままで、 η' のみを標準値の10倍にしたところ、図5の曲線③が示すように、 $\varepsilon=0.6$ のときに $N=62\,000$ rpm を越えたところで油膜破断が生じている。また R_a を大きくすると表面張力と表面粘性力の効果が減少し、油膜は破断しやすくなるはずである。そこで、 R_a のみを標準値の10倍にしたところ、図5の曲線④が示すように、 $\varepsilon=0.6$ で $N=53\,000$ rpm を越えたところで油膜破断が起こっている。このように、気泡に働く力のうち、負圧と気泡内圧による膨張力と表面張力および表面粘性力による収縮力の大小関係により油膜破断の発生を説明できる。

6. 結 論

中央全周溝付真円軸受の油膜について、油の表面粘性を考慮した気泡理論により、 ε と8個の影響因子が負圧の発生条件と負圧の大きさに及ぼす影響を調べた。

(1) 表面粘性を無視した場合(図2)、因子 R_a , α_a , σ および p_s の大きさを変えても、 ε が小さい(0.2, 0.4)時は油膜破断は起こらず、 ε が大きい(0.6, 0.8)時にのみ起こる。一方 β' , η' および N を大きくしていくと、 ε の値によらず油膜破断が起こる。

(2) 表面粘性を無視した場合、因子 R_a と σ の大きさを変えていくとき、 ε が大きいと油膜破断は負圧値 τ がほぼ一定のままで生じる。しかし、ほかの5因子 α_a , β' , p_s , η' および N の値を変えるときは、 τ が最大となるところで油膜破断が起こる(図2)。いずれの場合も破断時の負圧の大きさは、式(1)で与えられる。

(3) 表面粘性を考慮すると(図3)、無視した場合(図2)と比べて負圧の発生を許す ε および因子の値の範囲が広がり、また負圧の最大値が大きくなる傾向がある。したがって、表面粘性は負圧の発生を助長する。

(4) 表面粘性を考慮した場合(図3)、各因子の値を変えて行くときに油膜破断が発生する場合は、因子 η' と N については負圧 τ が最大値をとるところで破断する。しかし R_a と β' については、 τ がほぼ一定値のところ破断する。 σ については、 τ が最大値と最小値をとるところで、また κ については、ほぼ最小値または一定値のところ破断する。油膜破断は、負圧と気泡内圧による気泡の膨張を表面張力と表面粘性力が抑えきれなくなるところで起こる。

(5) 表面粘性の有無にかかわらず(図2, 3)、 ε が大きいほど、負圧発生の限界を与える因子の数が多い。また $\kappa=0$ の場合の p_s を除くと、 ε が大きいほど

負圧発生を許す因子の値の範囲が狭く、負圧が発生しにくい。しかし発生した負圧は大きい。

(6) ε, η' と R_a が小さく、 κ が大きい場合には、表面粘性により油膜破断が抑制され、負圧は気泡の計算で設けた仮定が成立つ限り、 N の増加とともに増加する [図3(i), 図5]。このとき圧力分布は、最小油膜厚さの位置を中心として、円周方向にほぼ点対称となる。

(7) 油膜に負圧が発生するのを防ぐには、 ε を小

さくし、 p_s または a_a を大きくすればよい。あるいは、例えば κ を小さくし、 ε, R_a および η' を大きくして、油膜破断を起こせば負圧は零になる (図3)。

文 献

- (1) 染谷常雄, すべり軸受油膜の負圧に関する研究—第1報: 負圧発生モデルと諸因子が圧力分布に及ぼす影響, 機論, **66**-650, C (2000), 3489-3496.