

第2回 バルブスプリング

日本発条(株) 流石 一郎

バルブスプリングは内燃機関における吸排気バルブの一種のリターンスプリングである。図1にオーバーヘッドカムシャフト式の例として、ロッカーアーム式と直打式の2例を挙げる。どちらもバルブはカムで駆動され、バルブスプリングによってカムに押し付けられている。これにより、バルブはカムのリフト曲線に従って変位し、開閉する。

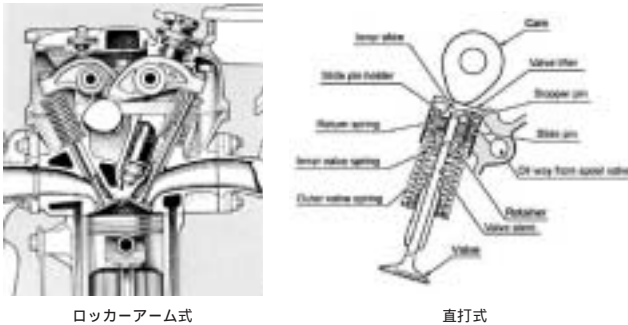


図1 動弁系とバルブスプリング

このバルブスプリングは、次のような特徴がある。

- (1) 最高150 程度の高温環境で使用されること。
- (2) 速い周期 即ち高回転 で繰り返し使用されること。
例えば、エンジン回転数600rpmでは5Hz、回転数が6000rpmでは50Hzになる。
- (3) その繰り返し数が多いこと。
例えば、自動車エンジン回転2000rpmだと、エンジンのカムシャフトの回転はエンジン回転数の半分であるから、1000回/分、1時間では6万回の繰り返しとなる。さらにエンジン回転数2000rpmで時速60km/hを出し10万km走るとすると1億回の繰り返しとなる。

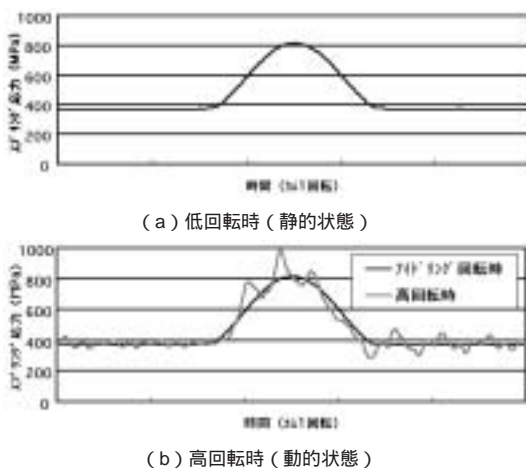


図2 エンジン回転数と応力状態

これらの特徴からさらに次のようなことがいえる。

1. 動応力

図2 (a) に示す例のように、低回転数域であれば、バルブスプリングはカムによるリフト曲線に

忠実にしたがって、静的な荷重試験時と同様に、有効巻部分が均一に変位していくので、応力も静的な応力が発生するのみである。これが高回転域になると図2(b)のように、ばねの有効巻部分が踊り余計な振動による応力が付加される。これを動応力という。これは、サージ波によるものと考えられる。サージ波とは、ばねに衝撃波が加わることで生じる素線を伝播する局所的なねじれの波のことである。このサージ波が有効巻部分の両端間を往復し、その所要時間が外力の加振周期と一致するとばねは共振状態となる。図より明らかなように、この動応力により高回転域におけるばねにかかる応力幅は、低回転域(静的状態)に比べ大きくなる。

2. 疲労破壊

高温での使用、高繰り返し数などから、バルブスプリングは疲労破壊を考慮しなければならず、さらに上記の動応力も設計時に考慮しなければならない。通常、設計時には取付高さ、最大ストローク時高さでの静的な荷重・応力で設計する。しかし、前述のように動的な応力を考慮せねばならず、その時には、図3に示すような静的応力状態での応力幅と動的状態での応力幅の比を指標とする。すなわち、動的応力幅/静的応力幅であり、これにより動的状態でのどの程度の割合で応力幅が広がるのかを知る。

当然、バルブスプリングとしては、この応力比が小さく1に近いほうがよい。従来この応力比は、実際のエンジンで実験的に求めて評価されてきたが、最近ではシミュレーションにより求めることもできるようになってきている。

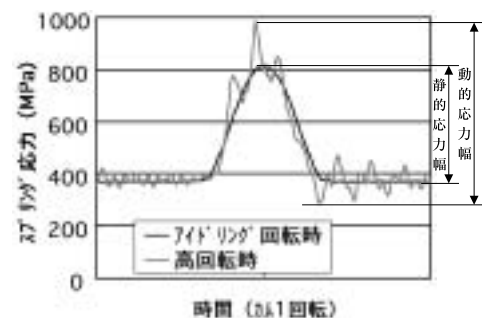


図3 静的/動的応力比

ばねの耐久性を確保あるいは向上させるには、「動的応力の抑制」「静的応力の低減」「ばねの強度アップ」と3つの対応が考えられる。

動的応力を抑えるために、ばねの形状面からは図4に示す不等二段ピッチばねなどの工夫がある。これは、有効巻き部に線間隙間の大きい粗巻き部と線間隙間の小さい密巻き部を設けるものである。このばねは、変位させて行くと、先に密巻き部の線間が接触し有効巻が減る。そしてその分ばね定数は高くなる。

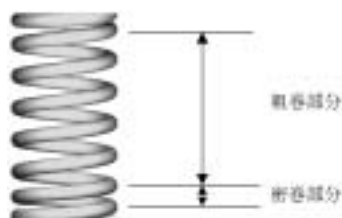


図4 不等二段ピッチばね

したがって、このばねの静的な荷重 - 変位特性は、変位の途中で折れ曲がった曲線状になる。図5に不等二段ピッチばねの静荷重特性の模式図を示す。

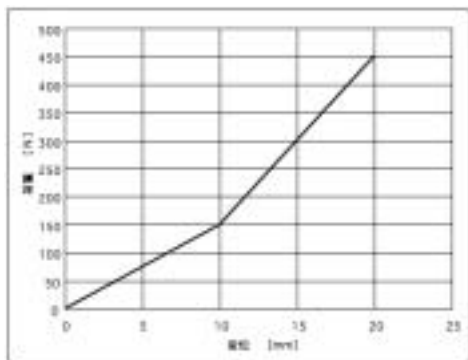


図5 不等二段ピッチばねの静荷重特性

不等二段ピッチばねは、動弁系に組み込んだ取付状態でちょうど密巻き部が接触するようになっている。これにより動的応力が低減するが、その原理として次の2点が考えられる。

1. 素線線間の接触離反により有効巻数が都度変化し、ばねの共振振動数も変化する。これにより、ばねの共振状態の継続を避けることができる。
2. 素線線間の接触離反により、エネルギーが消費されて振動が減衰する。

また、ばねの軽量化も動的応力の低減に有効である。その一方法として材料断面の異形化が挙げられる。図6にその一例を示す。



図6 異形断面ばねの例

通常、圧縮コイルばねは素線がねじられることでばね作用が生じている。素線が円断面で直線ならば素線の表面は均一なねじれによるせん断応力がかかる。しかし、圧縮コイルばねのように成形されていると、ワールの応力修正係数の考え方でも知られているよう

に、コイル内側の応力がコイル外側の応力よりも高くなる。そこで、素線断面の形状を、なるべく応力が材料表面で均一に分布するよう工夫し、ほぼ卵型の断面が生み出された。これにより、円断面よりは同一剛性、同一荷重でも最大応力を低くすることができるようになった。これは逆に、同じレベルの応力でよければ材料を細くできるということであり、これによりばね高さの低減、軽量化が可能となる。軽量化は慣性質量の低減になるので動的応力が低減される。

異形断面化は円断面に比べ、同一剛性、同一荷重でも最大応力を低くすることができるということは、静的な応力低減が可能、すなわち全体的に応力を低減できるということであり、この点でも耐久性確保に効果がある。

軽量化のもう一つの方法としては、ばね自体の強度の向上が考えられる。その一つは材料強度のアップであり、ばねメーカーと材料メーカーが協力してこれにあたっている。さらに、この材料の強度を十分に生かせるよう加工工程に工夫がなされる。すなわち、成形後やショットピーニング後の低温焼なまし処理条件や、ショットピーニング処理条件などの最適化や、低温浸炭窒化などによるばね表面強度の向上である。これらにより、高い応力でも十分な耐久性が得られれば、材料を細くし、軽量化することで動的応力を低減することができる。

次にバルブスプリングの荷重についてバルブの挙動と絡めて説明する。

エンジンが高回転となり、バルブが高速で閉まり方向に変位し、弁座に衝突した時、その反発にばね力が負けるとバルブは「バウンス」して、弁はまた開いてしまう。

また、バルブが最大ストロークに近づき減速する際、バルブの慣性がバルブをカムに押しつけているばね力を上回るとバルブはカムから浮きジャンプしてしまう。図7にこの現象を図示する。

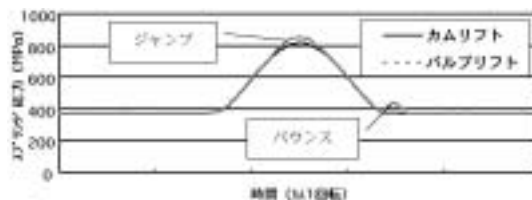


図7 バルブのジャンプとバウンス

このようにばねのバルブをカムに押し付ける力（ばね荷重）は重要である。したがって、ばねがへたってばね力が低下すると、ジャンプやバウンスが起きやすくなってしまいますので、ばねは耐久性だけでなく、耐へたり性も必要とされる。また、ばね力が強ければジャンプやバウンスは起きにくいですが、その分、カムシャフトを駆動するトルクが増加してしまいエンジンとしては燃費が悪化してしまう。ばね荷重はこれらを考慮しバランスのとれた設計がなされる。