

第25回 チタンばね

日本発条(株) 丹下 彰

1. まえがき

近年の地球環境保全の厳しい要請から、自動車業界では2010年には95年比の20%もの燃費改善が検討されている。燃費改善には軽量化の効果が大きく、車体重量の1%軽量化は0.7%の燃費改善をもたらす。このような背景からチタン材料の自動車部品への適用が活発化してきた。エンジン部品では1989年GALLATのリテーナにTi-22V-4Al合金、1990年NSXのコンロッドにTi-3Al-2.5V+S+REM合金、1998年ALTEZZAのエンジンバルブに吸気用Ti-6Al-4V/TB排気用Ti-Al-Zr-Sn-Nb-Mo-Si/TiB、2000年CIMAのエンジンバルブ吸気用Ti-6Al-4V排気用Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-Siが採用された。また、排気管やマフラーでは、1998年から大型二輪ZX-9X, CBR900RR, YZF-R1, GSX-R1000用のマフラーにチタンの採用が進んでいる。一方、ばねにおいては、2001年にフォルクスワーゲンのLupo FSIにTi-4.5Fe-6.8Mo-1.5Alを用いたチタン合金ばねがサスペンションばねとしての実用化の第1号となった。しかし、チタンばねは市場実績という点では、未だ研究レベルにあり、材料、設計、製造の面で不明な点が多い。また、ばね用チタン材料に関する情報も決して十分ではない。そこで本稿では、筆者が乏しい経験の中から得た、チタンばねに関する情報になることをお許し願いたい。

2. 材料選定

コイルばねの重量は次の(1)式で与えられる。

$$W = \frac{2G\rho}{\tau^2} \frac{P^2}{R} \quad (1)$$

ここで、 G は横弾性係数、 ρ は比重、 P は荷重、 R はばね定数そして τ は応力である。ばねとして P と R とは要求項目であり固定されることから、重量 W を下げるためには G と ρ とが小さな材料を選定することになるが、 W は τ の2乗にも逆比例することから、同時に疲労強度を高めることが重要なことがわかる。

ばねとして必要な特性は疲労強度のほかにへたり性が優れることが必要となる。一般にへたり性は材料強度が高いほどよい。したがって、チタン材料のうち高強度が得られる β 合金がばね用材料として対象となる。

β 型チタン合金の種類は多いが比較的入手が容易な材料を列挙すると表1となる。表中の到達強度はカタログ値である。ただし、以下の理由により実際に得られる強度は線径によってことなる。 β 型合金の強化機構は β トランス付近での溶体化と急冷によって結晶構造を冷間成形能に優れたB.C.Cとし、例えばばね成形後時効処理によって β 相中に微細な α 相を分散させる分散強化である。このため、線材圧延時のリダクションや温度が α 相の析出サイトに影響を与えることとなる。したがって、圧延温度が低ければ線径の小さい材料ほど高強度化できることとなる。線径が $\phi 10$ 程度であれば実用上の強度は1400~1600MPa程度と予想される。また、表中にはばねの疲労強度を参考として示したがいずれもショットピーニングを施してある。現在ではデ

ータが少なく、いずれの合金が疲労強度に優れるかについては不明であり、参考値である。

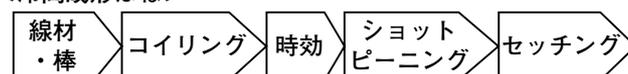
表1 チタン合金の種類

合金の種類	到達強度	ヤング率	ばね疲労強度
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	1600MPa	101~109GPa	—
Ti-15V-5Zr-3Al	1900MPa	90~105GPa	500±400MPa $\phi 4$ 10 ⁷ 回の疲労強度 500±300MPa $\phi 10.2$ 10 ⁶ 回の疲労強度
Ti-13V-11Cr-3Al	1900MPa	98~105GPa	500±400MPa $\phi 4$ 10 ⁷ 回の疲労強度
Ti-22V-3Al	1600MPa		500±400MPa $\phi 4$ 10 ⁷ 回の疲労強度
Ti-15V-6Cr-4Al	1700MPa	110GPa	
Ti-3V-2Fe-2Mo-4.5Al	1500MPa		500±300MPa $\phi 18$ 10 ⁶ 回の疲労強度
Ti-1.5Al-6.8Mo-4.5Fe	1400MPa		
Ti-6Al-4V	1070MPa		

3. ばねの製造工程

チタンばねは冷間成形ばね、熱間成形ばね、のいずれもが製造可能である。製造工程は鋼のばねのそれと基本的にことならないが、いくつかの留意点がある。図1としてフローを示す。

<冷間成形ばね>



<熱間成形ばね>



図1 チタンばねの製造工程

ここでは冷間成形ばねについてのみ記す。

(a) コイリング

素材は溶体化状態の材料を用いる。コイリングにおいて、芯金巻きは問題がないが、コイリングマシンを用いる場合、ツールとの焼きつきが課題となる。裸のチタン線ではコイリングピンやワイヤガイドと焼きつきを起こしチタンにむしれが生じる。現在知られている最も確実な対策は線材へのNiめっきであるが、コストアップ要因になる。コイリングローラを用いる場合にはローラとの焼きつきは生じない。マシンによるコイリングはチタンばねでの主要な開発課題である。

(b) 時効処理

現在、ばね用としてチタン合金の最適引張強さに決まりはない。そこで、目的に応じてばね屋が決めなければならない

ない。図2は平均応力を490MPaとし応力振幅を343MPaと392MPaとした場合のTi-13V-11Cr-3Alでの引張強さと寿命の関係を示している。同図からチタンは鋼とことなり引張強さが低いほど疲労強度が大きいという特異な結果となっている。同様な結果はTi-22V-3Al合金についても確認されている。したがって、チタンばねでは引張強さの選定には注意を要する。一方、へたりに関しては図3に示すように引張強さが大きいほど小さくなる。同図中には引張強さ2059MPaのSWOSCのへたりのレベルも示してあるが、チタンは引張強さ1500MPa以上であればSWOSCのへたりレベル以下であることがわかる。すなわち、チタンは鋼よりもへたり性の優れた材料であることがわかる。この場合、図2から引張強さ1500MPaであれば 490 ± 392 MPaの応力条件で 10^7 回をほぼクリアすることから、引張強さは1500MPaでもよいと判断される。時効処理の問題として形状の変化がある。チタンのコイル径・ピッチ変化は大きく、バルブスプリングサイズのばねでコイル径は0.1mm、自由高さで0.3mm程度の増加を示す、鋼のばねが時効後ではコイル径・自由高さ共に小さくなることと逆の傾向を示す。

(c) ショットピーニング

ショットピーニングの疲労強度向上効果は鋼と同様にチタンでも期待される。加工条件に関する情報は乏しいが、鋼と同様な条件が目安になる。ショットピーニングにおいて懸念されることは粉塵爆発である。通常は生じないが工業的に大量に処理される場合には留意されるべき課題である。ショットピーニングの管理のために圧縮残留応力の測定が重要になる。X線応力測定の場合、特性X線としてV-K α を使用することで、比較的S/N比の良い β 相からの回折プロファイルが得られる。 2θ は 146° である。

(d) 耐摩耗性向上

チタンは非常に活性な金属で、耐摩耗性が悪くさらに鋼に比べ簡便な表面処理法がない。これらの性質はチタンが第4周期の第4属の元素であり金属結合のみならずイオン結合性も強いことからきていると考えられる。すなわち他の元素との結合性に富んでいる。チタンの優れた耐食性や表面処理の困難さはその表面に極めてすばやくまた安定に形成される酸化チタンのためである。また耐摩耗性が劣るのはチタンが他の元素と反応し易く熱伝導性が小さいためと考えられる。耐摩耗性向上のために多くの表面処理の提案があるが、先の理由のために密着性の良い表面処理そのものが容易ではない。ここでは、図4として各種表面処理の耐摩耗性向上の比較結果を示す。同図の結果ではNi-PとNi-P+Au-Niめっきのみが耐摩耗性を向上させている。

4. チタンばねの軽量化効果

チタン合金ばねを、現行の鋼(SWOSC)ばねとばね定数、コイル外径および最大たわみ量を同一にして設計した場合の設計例を表2に示す。この設計例では鋼のばねに対しチタン合金のばねは自由高さで13%減、重量で57%減ものコンパクトで軽量なばねが期待される。

表2 圧縮コイルばねの設計例

Materials	Dia of wire (mm)	Spring rate (N/mm)	Outside dia. of coil (mm)	Maximum Deflection (mm)	Free height (mm)	Weight (gr)
SWOSC	4.2	7.6	43.0	66	103	118
13-11-3	4.3	7.6	43.0	66	90	51
Effect	-	-	-	-	13%down	57%down

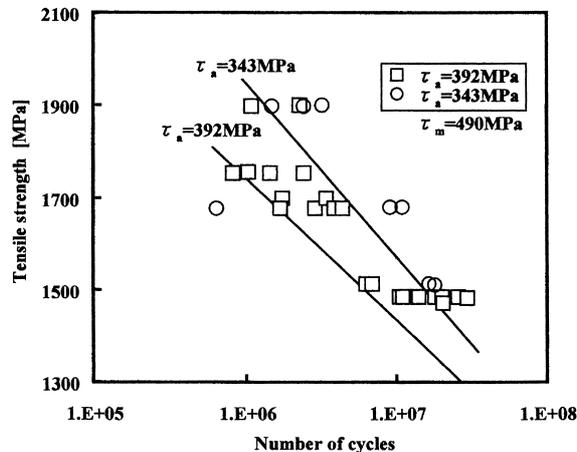


図2 引張強さと疲労強度の関係 Ti-13V-11Cr-3Al

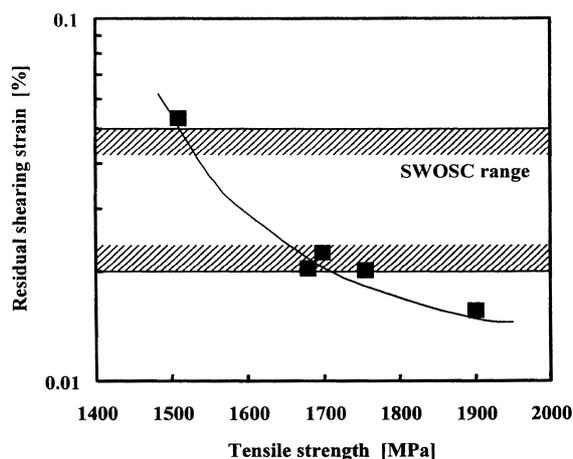


図3 引張強さと残留せん断歪(へたり)の関係 Ti-13V-11Cr-3Al

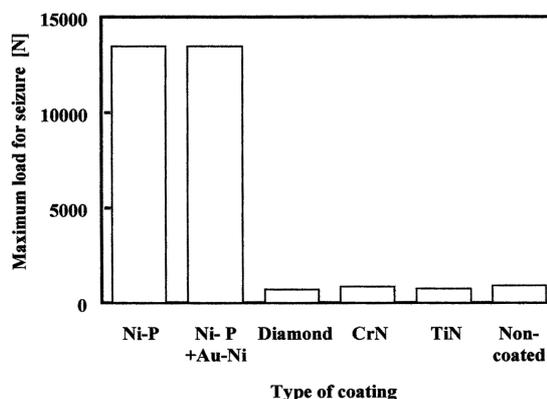


図4 ピン/ブロック式摩擦摩耗試験による各種対摩耗膜の比較