

フィラメント・ワインディング材料の 低サイクル疲労

小林 昭・大谷信男・河田幸三

Low Cycle Fatigue of Filament-Wound Composites

By

Akira KOBAYASHI, Nobuo OTANI and Kozo KAWATA

Abstract: As is widely known, the filament-wound materials are quite useful in view-point of weight saving in case they are used for the aerospace vehicles. Among those applications, the filament-wound rocket motor chamber is also attractive. However, in advance of actual mission flight, the very chamber is to be proof-tested up to rather high internal pressure, close to the burst pressure. Therefore, so-called low-cycle fatigue phenomenon is expected. In the present report, the experimental verification concerning the low-cycle fatigue will be described.

概 要

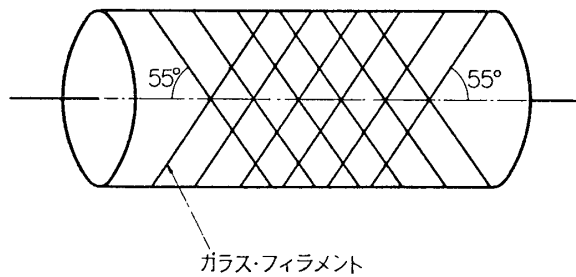
フィラメント・ワインディング材料は、特に高比強度ゆえに宇宙航空材料としてメリットがあり、なかんずくロケット・モータ・ケースのような圧力容器に適用されて有意義である。ロケット・モータ・ケースに用いられる場合には、実用以前に保証試験があり、かなりの高応力まで予荷を行なってその実用性を確かめるので、ここにこの保証試験による高応力低サイクルの疲労、すなわち、低サイクル疲労が生じることは十分予想されるのである。本研究は、フィラメント・ワインディング材料のこのような低サイクル疲労の実験的確認について行なった予備的調査である。結果は、実験した範囲では90%予荷の低サイクル疲労においてかなりはっきりとした影響が現われることを示している。

序 論

フィラメント・ワインディング(Filament Winding)材料は、FRP(Fiber Reinforced Plastics)材料のなかでも特に比強度が高く、金属材料で高い比強度を示すマルエイジング鋼(Maraging Steel)と優に匹敵しており(第1表)、重量軽減が性能向上につながる宇宙航空材料において広く利用されつつある。このフィラメント・ワインディング材料のいろいろな用途のなかに、内圧を受けるロケット・モータ・ケースとしての用途があり、このような圧力容器において最もよくフィラメント・ワインディング材料のメリット(Merit)が活かされるのである。すなわち、フィラメント・ワインディング材料の円筒のガラス・フィラメントの巻き角度(Winding Angle)を約55度にするか(第1図)、または軸方向と円周方向のフィラメントの巻き数を1対2と円周方向を2倍に強化することにより、内圧に対して各部分が同時に破

第1表 各種材料の比強度の比較

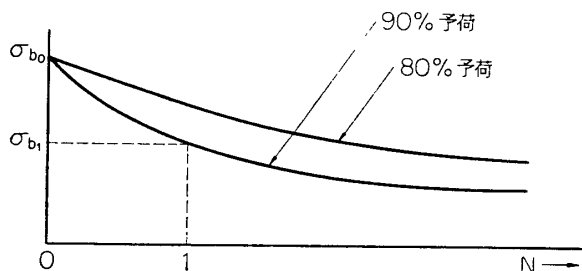
	強度 σ_B (kg/mm ²)	密度 ρ (g/cm ³)	比強度 σ_B/ρ (cm)
F.R.P.(エポキシ+ガラス布)	38~41	1.80	2.1~2.3×10 ⁶
F.R.P.(ポリエステル+ガラス布)	25	1.60	1.55
F.R.P.(F.W.)	46~58	2.00	2.3~2.9
マルエージング鋼	200以上	7.85	2.56
60 kg/mm ² 高張力鋼	60	7.85	0.77
100 kg/mm ² 高張力鋼	100	7.85	1.28
ステンレス鋼	150	7.90	1.90
7075T-6 Al 合金	64	2.80	2.28
2024T-4	45	2.80	1.61
7% Mn-Ti 合金	101	4.50	2.24
槽	5	0.46	1.09



第1図 55°斜交まきフィラメント・ワインディング円筒

すなわち、バースト (Burst) 圧力にかなり近い値まで加圧されるので、製作された直後の、まったく与圧されていない、いわゆる Virgin State の状態に保有する強度が低下することは十分考えられることであり、繰り返して保証試験のための保証荷重を加えることにより高応力低サイクルの疲労、すなわち低サイクル疲労 (Low Cycle Fatigue) の現象が現われてくると思われ、そのすみやかな解明が必要になってくる。

低サイクル疲労は、大きい荷重を何回か、繰り返してかけることによって材料の Virgin の



第2図 低サイクル疲労の効果

損するようにでき、いわば極限設計が可能になって重量軽減に寄与するからである。

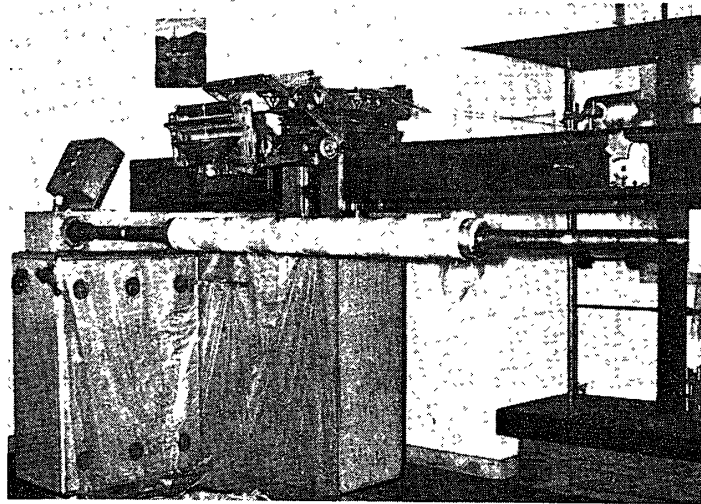
実用にあたっては、前もって保証試験 (Proof Test) を行なって、これらフィラメント・ワインディング製の圧力容器が設計内圧に耐えることを確かめなければならない。この際、通常設計のめやすとして採用する、内圧による破損圧力、す

な状態の強度が徐々にそこなわれていく現象であるから、第2図のように、仮に初期の Virgin 強度 σ_{b0} の 90% を繰り返し回数 $N=1$ だけ試験片に予荷 (Preloading) したのち、破損まで負荷すれば σ_{b0} より低い値の σ_{bi} が得られるはずである。 N が増せば当然破損強度 σ_{bi} は低下するし、また明らかに 80% 予荷の方が 90%

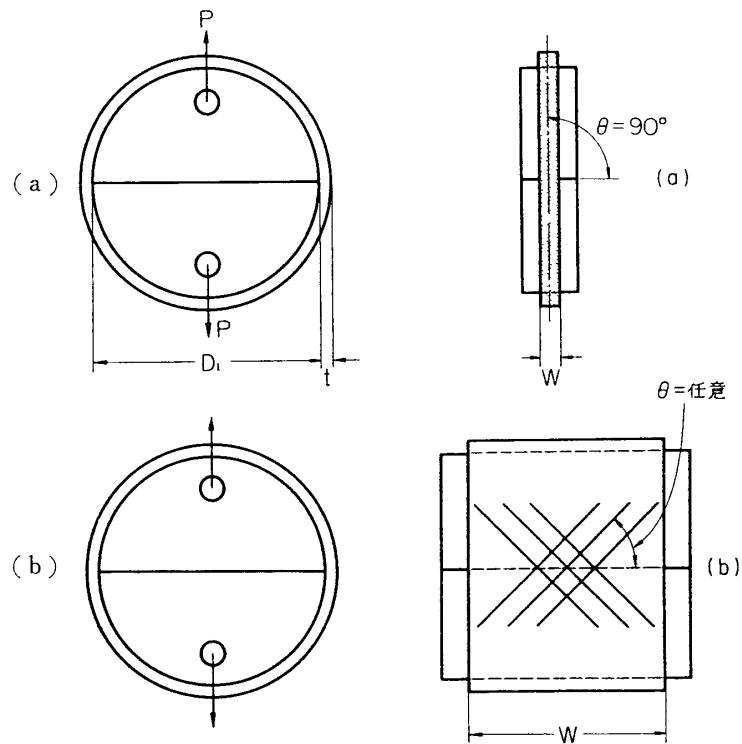
予荷の場合よりも σ_{bi} は高くなることが予想される。これまで金属材料については低サイクル疲労の研究がなされてきているが、フィラメント・ワインディング材料のような直交異方性の非金属材料については皆無であるので、ここではその予備的調査として実験による低サイクル疲労現象の確証を試みた。

2. 実験手法

フィラメント・ワインディング材料の内圧による低サイクル疲労を対象として考えるの

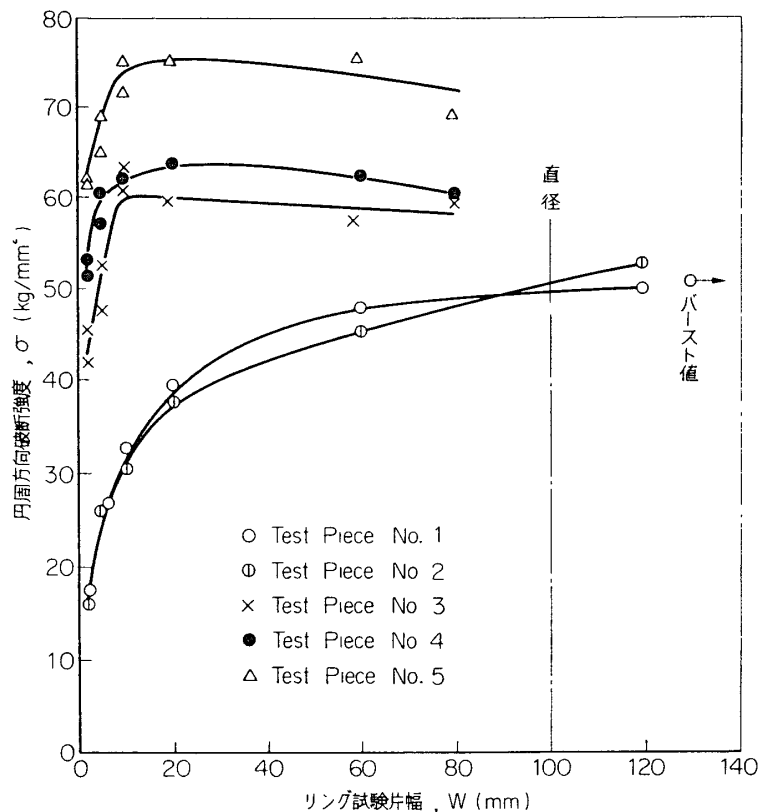


第 3 図 フィラメント・ワインディング機械



第 4 図 NOL リング試験 (a) と ISAS リング試験 (b)

で、試験片は円筒状のものを当研究室備付けの米国マクリーン・アンダーソン社 (McClelland-Anderson) 製のフィラメント・ワインディング機械 W-1 型によってエポキシ樹脂および E ガラスを用いて製作した。もちろん、低サイクル疲労による強度低下の評価も内圧負荷によることが望ましいが、試験片材料が大量に要る、時間・手間がかかる、内圧試験に用いる円筒試験片両端部の補強が困難である、などの理由から先に著者らが提案した ISAS リング試験法 [1] によって代用した。ISAS リング試験は第 4 図のようにリング状の試験片内の二つ割りした中実円筒治具を介して引張り、円周方向強度を求めるもので NOL (Naval Ordnance Laboratory) リング試験 [2] との相違は、(1) 任意の巻き角度の試験片に対し適用できること (NOL リング試験法は円周方向巻きに対してのみ)、(2) 使用されるリング試験片の長さ、直径、肉厚についての制限がないこと、などであり、実際用いられているフィラメント・ワインディング円筒が円周方向以外の任意の巻き角度 (通常 55° が多い) であることから、実用性のある試験法と考えられよう。この ISAS リング試験において、リング状試験片の幅を徐々に増しながら円周方向の破断強度との関係を求めたものが第 5 図であるが [1]、内圧によるバースト圧力値が、リング試験片の幅がほぼ直径と Comparable になるあたりから漸近的に推定できるので、本実験ではこの傾向を利用して、内圧試験によらずに ISAS リング試験によるリング試験片の円周方向の破断強度によって、低サイクル疲労による強度低下の評



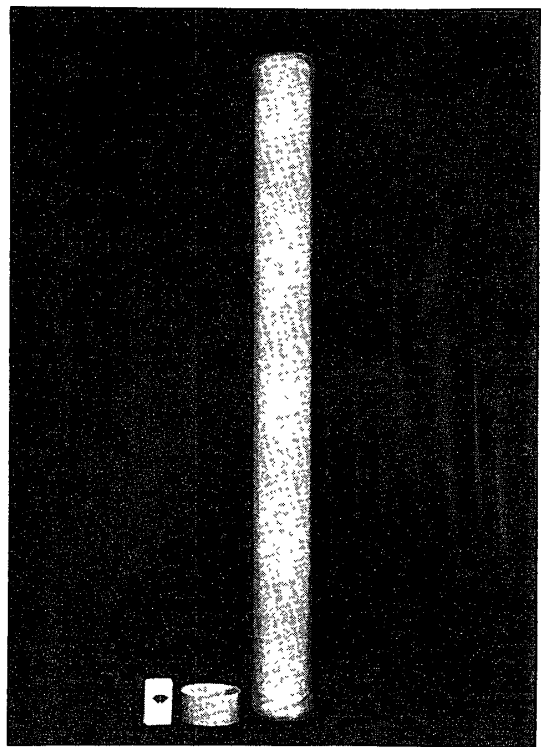
第 5 図 F/W 円筒の円周方向強度の ISAS リング試験、バースト試験による評価

第 2 表 試 験 片

成 分				
E ガ ラ ス	O. C. F. R-153-801	× 2		30 Ends
エ ポ キ シ 樹 脂	Araldite LY 556	重量比	100	
硬 化 剤	HT 907		85	
促 進 剤	DY 063		4	
重 量 百 分 率				
Glass: 67%		Resin: 33%		
硬 化 条 件				
Cure:	120°C × 2 時間 (1 回転/秒)			
Post Cure:	150°C × 3.5 時間			
リ ン グ 試 験 片 寸 法				
幅:	50 ± 0.01 mm			
内 径:	100 mm			
厚 さ:	2.8 ± 0.1 mm			

価を行なった。試験片の寸法、形状、製造条件、組成などを第2表にかかげる。Eガラス繊維の巻き角度は軸方向に対し55°の斜交角度をなしている。なおフィラメント・ワインディング機械によって製造されるこのフィラメント・ワインディング円筒は、1ロット(Lot)の長さが約800mmなので、第2表の寸法のリング試験片に旋盤を利用して切断するのである。寸法の測定は、幅についてはノギスを、厚さについてはマイクロ・メータを用いた。幅方向が機械加工によって精度よくそろえられるのに反し、厚さ方向は巻き数のみで規定されているので、できあがりには凸凹があって精度が出にくいものであるが、硬化時に炉内でマンドレルごと回転させることでかなりなめらかに仕上げられている。

前述のように内圧による保証試験が、ISASリング試験で代用されるので、バースト圧力はリング試験片の円周方向破断強度となり、したがって予荷重(Preloading)はこの破断強度に対して何割というようにとられることになる。予荷重の割合を実際のロケット・モータ・ケース内の燃焼について検討すると、バースト圧力が70 kg/cm²としてこのフィラメント・ワインディング製モータ・ケースを設



第 6 図 フィラメント・ワインディング円筒(1ロット)とリング試験片

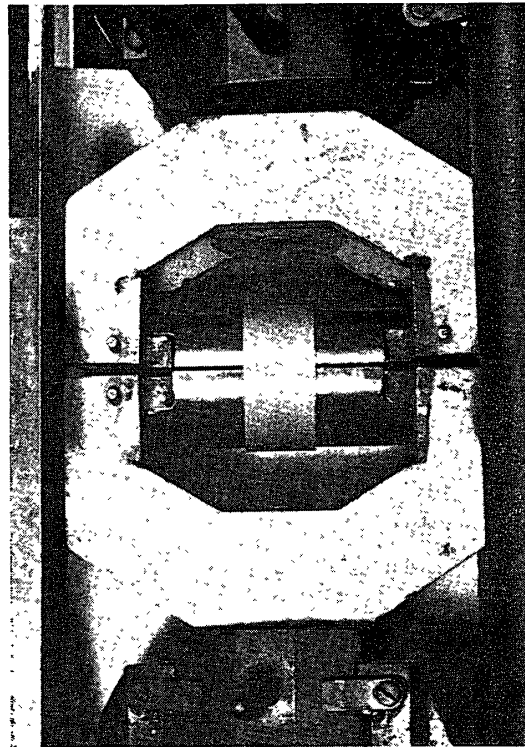
計するとき、燃焼による内圧は 50 kg/cm^2 に達するので、保証試験では燃焼圧力の変動などを見込んで $50 \text{ kg/cm}^2 \times 1.1 = 55 \text{ kg/cm}^2$ を保証圧力として負荷して実用性を調べるが、予荷比率 (Preloading Ratio) は $100\% \times (55 \text{ kg/cm}^2 / 70 \text{ kg/cm}^2) = 78.6\%$ になる。バースト圧力が 60 kg/cm^2 になると、この比率は $100\% \times (55 \text{ kg/cm}^2 / 60 \text{ kg/cm}^2) = 91.6\%$ に上昇する。本研究では Preloading Ratio を 80% および 90% にとった。引張りは通常の引張り試験機 (能力 35 ton) によっている。引張り速度は 1 mm/分 である。

3. 実験結果と検討

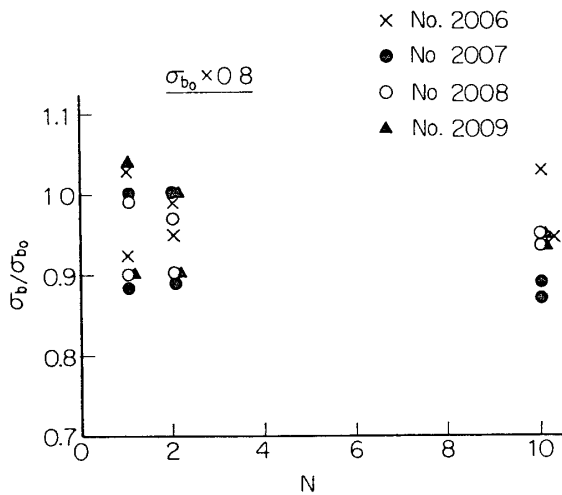
第8図、第9図に得られた実験結果をかかげる。

なお、この試験においては、リング幅は直径 100 mm の半分の 50 mm であるから、まだリング試験片の円周方向引張り破断強度がバースト圧力値にまで漸近していないが、低サイクル疲労の影響を調べることに関しては大過ないと考えられる。このことはリング試験片の数量をできる限り多くとりたいことや、引張り試験機の能力の点などから、リング幅を大きくとりにくい事情によるものである。

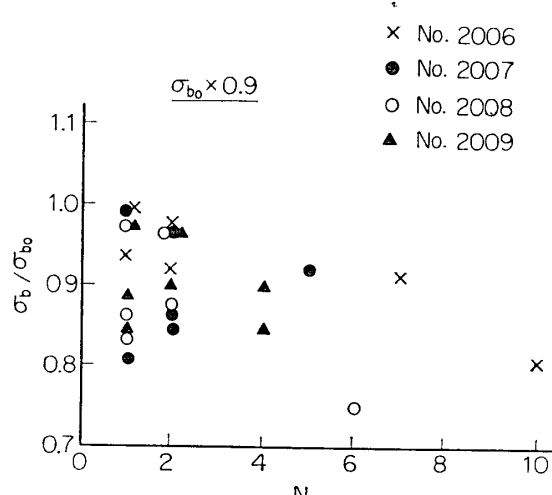
ここに得られた結果について検討してみると、第8図は 80% 予荷であるが、 σ_b / σ_{b0} の比はバラツキにもかかわらず $N=1$ および $N=2$ については 0.9 以上を示しており、 $N=10$ になっても 0.85 付近で概して横ばいの傾向をあらわしている。しかし、第9図の 90% 予荷の場



第7図 ISAS リング試験中の試験片



第8図



第9図

合には σ_b/σ_{b_0} の比は $N=1$ でも 0.8 にまで低下しており、少なからぬ試験片が $N=5$ または $N=10$ を目指して試験されたにもかかわらず、 $N=1$ あるいは $N=2$ で破断している。以上より、実験が行なわれた範囲では 90% 予荷の場合には低サイクル疲労の影響が見受けられるといえよう。Virgin State の強度 σ_{b_0} の値は、各ロットについてほとんど一定で 45.5 ± 1.5 kg/mm² であるが、得られた結果（第8図および第9図）では、 $N=1$ になると、もはやバラツキ幅が大となっている。このことは、元来、組織敏感性（Structure Sensitive Property）である破壊強度が、荷重サイクルの繰り返しによる疲労現象によってますます助長される傾向にあることを意味しているものと思われる。

4. 結 論

フィラメント・ワインディング材料中、特に圧力容器にそのメリットを見出しているフィラメント・ワインディング円筒を対象として考え、実験的確認によって 90% 予荷では低サイクル疲労の影響を認めた。今後さらにデータの蓄積をはかって研究を推進する予定である。

謝 辞

東大宇宙航空研究所福井伸二教授の絶えざるご鞭撻に深甚なる謝意を表するものである。

1967年8月30日 材料部

参 考 文 献

- [1] 河田幸三, 福井伸二, 小林 昭, 橋本彰三: F/W FRP の力学特性と測定法について(II). 東京大学宇宙航空研究所報告, 第2巻第2号(A), 1966年4月.
- [2] N. Fried: "Survey of Methods of Test for Parallel Filament Reinforced Plastics," ASTM Special Technical Publication No. 327, pp. 13-39.