

## F/W FRP の力学特性と測定法について (II)

—F/W 円筒の ISAS リング・テストおよびバースト・  
テストによる円周方向強度の評価—

河 田 幸 三・福 井 伸 二  
小 林 昭・橋 本 彰 三

Studies on the mechanical properties of filament-wound  
materials and their measuring methods (II)

—The evaluation of hoop strength of filament-wound cylinder  
by ISAS ring test newly proposed and burst test.—

By

Kozo KAWATA, Shinji FUKUI,  
Akira KOBAYASHI and Shozo HASHIMOTO

**Abstract :** ISAS ring test, a new method for rapid evaluation of hoop strength of filament-wound cylindrical specimens, is proposed. The method can be applied to filament-wound cylinder of any winding angle. The effect of ineffective width existing in cylindrical specimen of finite length is discussed. The theoretical relation of  $\sigma$  (hoop strength) and  $w$  (specimen width) derived basing upon the consideration is in good agreement with experimental ones. The ISAS test value agrees approximately with burst hoop strength. By this method, strong interaction between hoop strength and winding pattern is found. For example, hoop strength is higher for the winding pattern of 2 hoop windings and 1 longitudinal, than that of 54.75 deg. helical winding which is recommended by a simple netting analysis. At present, hoop strength reaches up to the order of 76 kg/mm<sup>2</sup>.

### 摘 要

任意の winding pattern で巻いた F/W 円筒の円周方向強度を迅速に評価するため、ISAS リング・テストを新しく提案し、その値の試片幅  $w$  による変化の様相を明かにした。この方法で評価した値は、円周方向強度で破断するときのバースト・テストの値とほぼ一致する。ISAS リング・テストで実際の F/W 円筒の評価を行ない、50 kg/mm<sup>2</sup> 以上、70 kg/mm<sup>2</sup> 台に及ぶ値の得られること、winding pattern が強度に著しく影響すること、特に周方向 2、軸方向 1 の winding pattern が netting analysis でよいといわれる 54.75° 巻きより約 22% 高い値を与えていること、ガラス繊維処理の強度への影響の大きいことなどを明かにした。

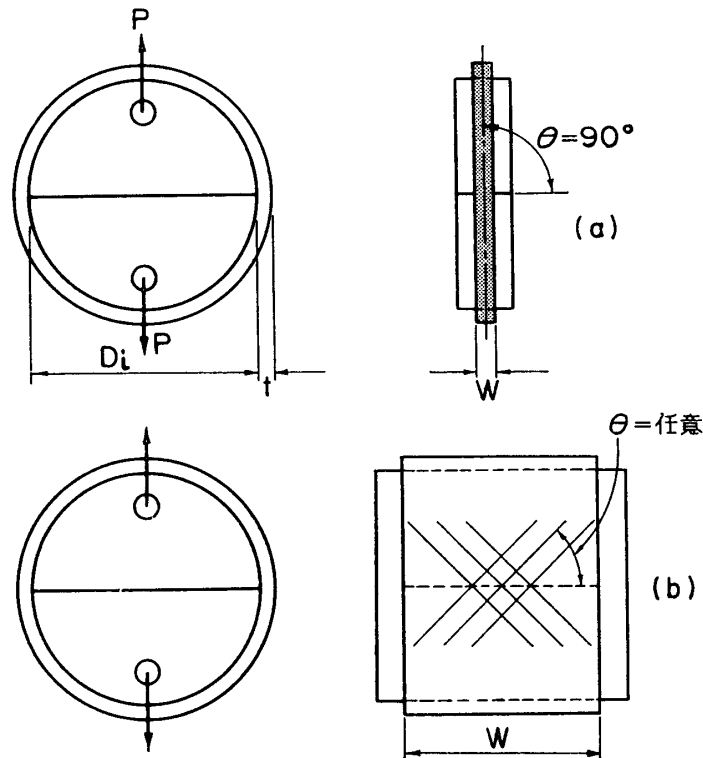
## 1. ま え が き

内圧をうける円筒での最も重要な値の一つである内圧バースト（円周方向）強度 [burst (hoop) strength] を迅速に評価する新しい方法として、ISAS リング・テスト (ISAS ring test) [1]~[3] を提案し、その特性を調べ、数種の実際の F/W 円筒の評価に適用した。このリング・テストは従来の NOL リング・テストが繊維とポリマーの組合せについて、繊維方向の強度を評価するのに限定されているのに対し、任意の pattern で巻かれた円筒の円周方向強度を評価できる点に意味がある。

その結果、F/W 円筒の winding pattern, 繊維の処理法とその円周方向強度との間に著しい関係のあること、F/W 円筒で十分 200 kg/mm<sup>2</sup> 超高張力鋼に匹敵、またはこれ以上の比強度の得られ得ることが示された。

## 2. ISAS リング・テスト

二つ割りした円板または円筒によるリング・テストとして、NOL リング・テスト (NOL ring test) [4] があるが、これは一方向巻き材の繊維方向強度の評価のみを目的としている。我々は任意の巻き角度 (helical angle)  $\theta$  の円筒截片に対し、二つ割り円筒を用いて周方向



第1図 NOL ring test と ISAS ring test

強さを測定する ISAS リング・テストを提案する。

$$\sigma = \frac{P}{2wt} \quad (1)$$

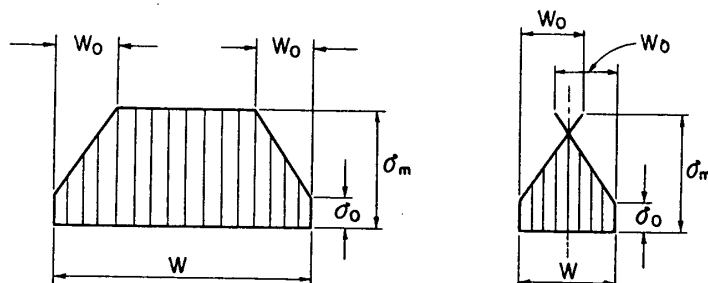
第 1 表 ISAS および NOL リング・テストの比較

	ISAS	NOL		
試片の繊維巻き角度 $\theta$ (deg)	0~90	90		
試片の寸度	$t, Di$ は任意で $w$ を変化させる.	$Di$ (in)	$w$ (in)	$t$ (in)
		$5\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$
		9	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8} \sim \frac{3}{8}$
		6	1	種々

両リング・テストの定数値を比較すれば、第 1 表の通りである。ISAS リング・テストは任意の巻き角度の円筒試片を対象としている関係上、一般に円筒の端で繊維が切断されているため、端部に無効幅の存在が予測される。ISAS リング・テストではこれを考慮に入れる。

### 3. 無効幅の存在と幅 $w$ の効果の理論式 [1]

一般に FRP で力学特性の測定の際、有限寸度の試片を取るわけであるが、繊維が端部で切断されることによる効果が従来考慮されていなかったように思われる。今、ISAS リング・テスト試片について、端部に若干の無効幅があるものとして、試片幅  $w$  が見掛けの強さ  $\sigma$  に及ぼす効果を考察してみる。第 2 図に示すように、ISAS リングの端の影響を受けない部



第 2 図 試片端部の無効幅

分の強度を  $\sigma_m$ 、端では  $\sigma_0$  に下っており、かつ端から  $w_0$  の幅の間で強度が直線的に変化するものと仮定すると、(1) 式で得られる見掛けの強度  $\sigma$  は次のように導かれる。

(1)  $w \geq 2w_0$  のとき:

$$\begin{aligned} \sigma &= \left\{ w_0 \frac{(\sigma_m + \sigma_0)}{2} \times 2 + \sigma_m (w - 2w_0) \right\} / w \\ &= \sigma_m \left\{ \left( 1 - \frac{2w_0}{w} \right) + \frac{\sigma_0}{\sigma_m} \cdot \frac{w_0}{w} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

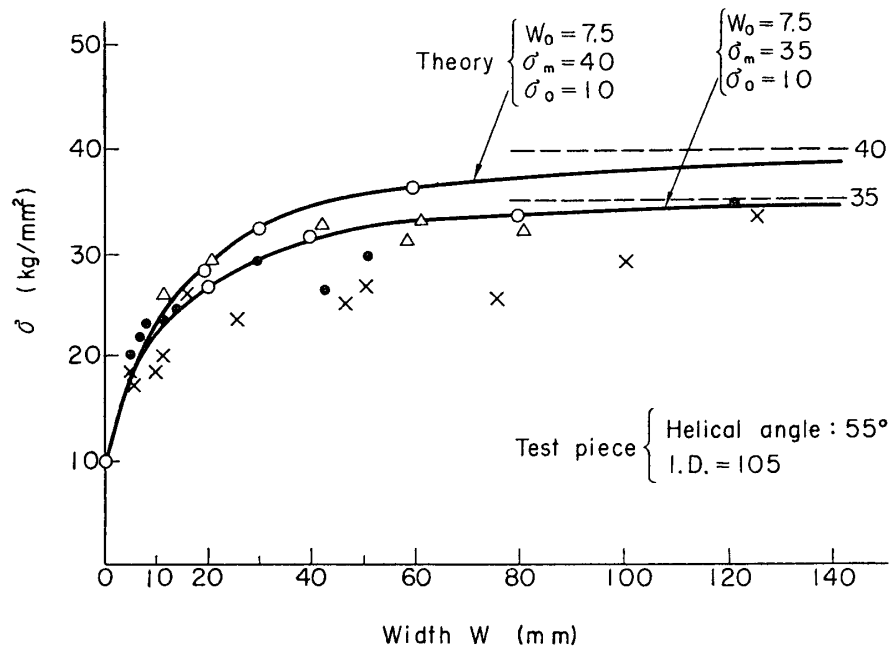
無効幅を  $w_i$  とすると、

$$\begin{aligned} \sigma_w &= \sigma_m (w - 2w_i) \\ w_i &= \frac{1}{2} w_0 \left( 1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_m} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

(2)  $w \leq 2w_0$  のとき:

$$\sigma = \sigma_m \left\{ \frac{w}{4w_0} + \left( 1 - \frac{w}{4w_0} \right) \frac{\sigma_0}{\sigma_m} \right\} \quad (4)$$

(2), (4) 式から知られるように, 3個の定数:  $\sigma_m, \sigma_0, w_0$  を定めれば,  $\sigma \sim w$  関係の理論式を求め得る. 逆に, 実測した  $\sigma \sim w$  関係からこれら三定数を決定し得る. 理論計算例および実測値との比較を第3図に示す. 理論式は実測結果とかなりよく一致し, 上述の考え方が支持されることを示していると見てよからう.



第3図  $\sigma \sim w$  関係の理論値および実測値の例  
(—○— 理論値, ●△× 実測値)

#### 4. F/W 円筒の ISAS リング・テストおよびバースト・テストによる評価

以上述べたところにより, ISAS リング・テストの特性が明かとなったので, 系統的にパラメーターを変化させた F/W 円筒の評価を ISAS リング・テストにより行ない, あわせてバースト・テストの結果と比較することを試みた. 試料 F/W 円筒としては国内各社で製作されたものを用いているが, ここではまずその一部についての実験結果を述べる. 試料の詳細を第2表に示す. この試料円筒の寸度は No. 1 から 5 まですべて同一であるが, 構成は 5 種類ともすべて変えてある. ロービングの R-123-888 は R:ロービング, 12: 12 エンド, 3: シラン処理, 888: 一般ポリエステル用 (旭ファイバー・ガラス製) を示す. 801: エポキシ用 (OCF 製品) を示す. 樹脂はすべて同一のエポキシ系で curing の条件も同一にしてある. winding pattern は No. 1 と 2 は巻き角  $\theta = 55^\circ$  で, 軸方向 ( $\theta = 0^\circ$ ) のロービングはない. つまり, netting analysis で円周方向 2, 軸方向 1 の主応力配分に丁度適合するとされる  $\theta = 54.75^\circ$  にきわめて近い角である. これに対し, No. 3~5 は  $\theta = 86^\circ$  のロービング 2

第2表 F/W 円筒の諸パラメーターと強度

試料円筒* No.	1	2	3	4	5
ガラス・テープ	なし	ATE-111002	〃	〃	〃
ロービング (円周方向および軸方向)	R-123-888	R-123-888	R-123-888	R-153-801	R-123-801
巻き角 $\theta$ (deg)	55	55	86	86	86
ガラス含量					
軸方向ロービング ヘリカル・ロービング	$\frac{0}{1}$	$\frac{0}{1}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
平均 (%)	74	74	74	74	74
樹脂	Epon 828 815 AGE K 61-B	〃	〃	〃	〃
ISAS リングテスト値** (kg/mm <sup>2</sup> )	16.1 ↓ 49.4	13.2 ↓ 52.0	41.9 ↓ 63.3	51.1 ↓ 64.0	61.9 ↓ 76.2
バースト (円周方向) 強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	50				

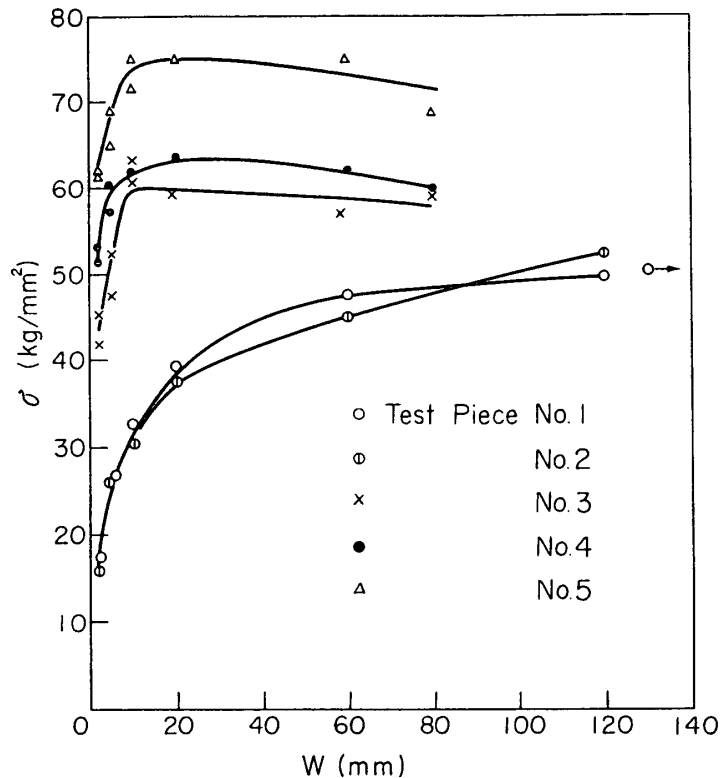
\* 円筒内径  $D_i=105$  mm, 肉厚  $t=2.5$  mm\*\* ISAS リング幅  $w=2\sim 120$  mm

第4図 ISAS リング・テスト後の試片

に対し,  $\theta=0^\circ$  のロービング1の割合で巻いたものである. ロービングは No. 1~3 では同じもので, No. 4, 5 は処理が変えてある.

以上の試料円筒から, 幅  $w=2\sim 120$  mm のリングを切出し, ISAS リング・テストを行った. 試片破断後の状況を第4図に示す. この結果を第5図に示す.  $\sigma\sim w$  関係はかなり顕著に winding pattern に依存する. 試料 No. 1, 2 では  $\sigma$  は  $w$  が小さいとききわめて小さく (最小幅  $w=2$  mm で  $\sigma$  最小),  $w$  の増大とともに増大する. これに対し, 試料 No. 3~5 では  $w=2$  mm という小さい値でも  $\sigma$  の水準は高く,  $w=10\sim 20$  mm 辺, すなわち, No. 3 で  $w=9.4$  mm, No. 4 で  $w=19.8$  mm, No. 5 で  $w=19.9$  mm に最大が存し, さらに  $w$  が増大すると  $\sigma$  はわずかに低下する.

すなわち,  $\theta=0^\circ$  および  $86^\circ$  の巻き角 (No. 3~5) の方が,  $\theta=55^\circ$  のみの場合 (No. 1, 2)



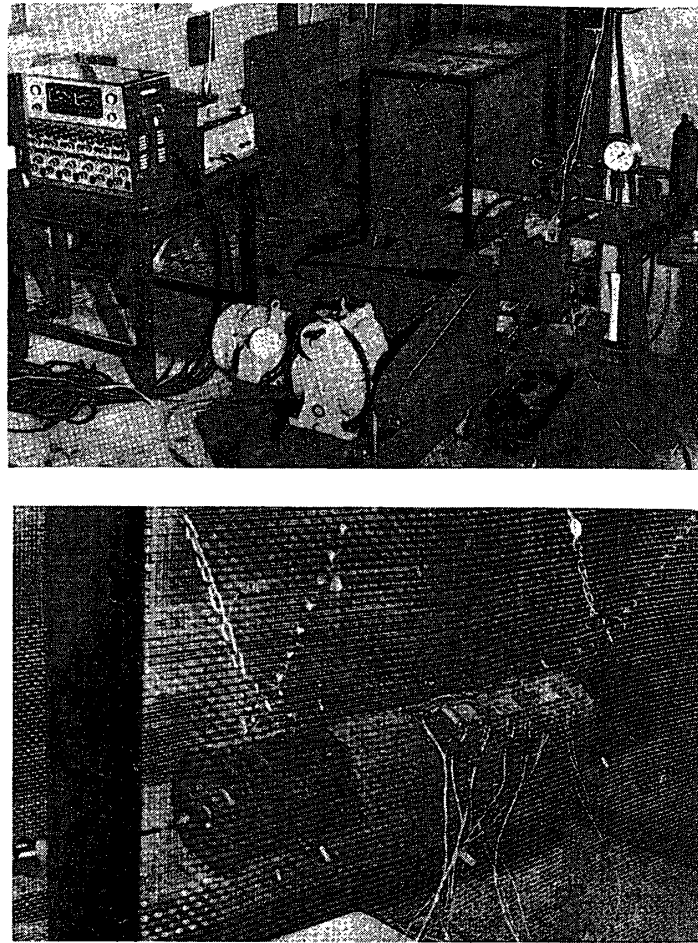
第5図 F/W 円筒の円周方向強度の ISAS リング・テスト、バースト・テストによる評価

と比べ、他の条件は全く同一であるにもかかわらず、かなり高い値を低  $w$  の中から保ち、 $w \rightarrow$ 大 で収束する値も前者の方がかなり高い。たとえば、No. 3 を No. 2 と比べると、約 22% 高い値を示す。No. 5 と No. 4 の比較は、12 エンドの場合の方が 15 エンドよりも強度の高いこと、また No. 5 と No. 3 の比較は、ガラス繊維表面がエポキシ用処理である場合の方がポリエステル用処理の場合より高い強度を与えることを示す。

一方、これと平行してバースト・テストを行なった。圧力ポンプとしては、三連プランジャー・ポンプ (3 HP, 1000 atm. まで、理研機器製)、圧力流体としては高粘度油 [たとえば、ダフニ Hydraulic oil #65 (常温にて 110.7 Centistokes)] を用いた。この模様を第6図に示す。

第5図の No. 1 での  $w \rightarrow \infty$  の値と、バースト (円周方向) 強度  $\leftrightarrow$  とはほとんど一致する。バースト・テストで軸方向応力で破断する場合や内圧負荷用流体が F/W 円筒の編目から滲出する場合には、ISAS リング・テスト値とバースト・テスト値とは必ずしも一致しない。

F/W 材がロケット・チャンバー材料として有用であるかどうかの目安の一つとして、200 kg/mm<sup>2</sup> 超高張力鋼との比強度  $\sigma/\rho$  ( $\sigma$ : 強度,  $\rho$ : 比重または密度) の比較がある。本報に述べた程度のガラス含量の F/W 材の  $\rho \cong 1.9 \sim 2.0$  で鋼の  $\rho = 7.8$  の約 1/4 だから、F/W 材の  $\sigma = 50$  kg/mm<sup>2</sup> が一応の目標となる。上記 ISAS テスト値で、十分この目標を越え得るものが得られるであろうことが知られる。



第6図 バースト・テストの様相

## 5. 結 論

(1) 任意の巻き角  $\theta$  の F/W 円筒の円周方向強度を求める ISAS リング・テストが提案され、その特性が調べられた。ISAS リング・テスト値  $\sigma$  は試片の幅  $w$  とともに変り、無効幅の理論にもとづく計算値とよく合う。

(2)  $\sigma \sim w$  関係は F/W 円筒の巻き角  $\theta$  によって著しく変る。  $\theta = 55^\circ$  のみのときには、  $w$  小のとき  $\sigma$  は著しく低下し接着剤の強度に近づくが、  $\theta = 86^\circ$  および  $0^\circ$  では  $w$  の影響は小さい。最大値を示す  $w$  も異なる。

(3) winding pattern やロービング処理を変えて作った F/W 円筒の円周方向強度を ISAS テストで評価した。他の条件を同一にし  $\theta$  を変えて巻いた場合、ここに示した例では、  $\theta = 55^\circ$  のみに比し、  $\theta = 86^\circ$  2巻き対  $0^\circ$  1巻きの比率の winding pattern の方が 22% 高い値が得られている。これから、単純な netting analysis は概算にのみ役立つと考えられる。

(4) ロービングの処理の強度へ影響はかなり著しい。

(5) ISAS テスト値からバースト (円周方向) 強度がほぼ推測されるようである。ただし、バースト・テストで軸方向強度で破断する場合や編目からリークの起る場合はこの限り

ではない。

(6) ISAS リング・テストは F/W 円筒のバースト (円周方向) 強度を迅速に評価し得る簡便な方法といってよい。

(7) 比強度  $\sigma/\rho$  についていえば, 十分  $200 \text{ kg/mm}^2$  超高張力鋼をしのぐ値が F/W 円筒の円周方向強度で得られ得ることが知られた。

実験に当り熱心に援助された高田信宏, 大谷信男, 本堂 明の諸君に深甚の謝意を表す。また F/W 円筒試料の製作に協力された大日本硝子工業 K. K., 旭ファイバーガラス K. K. に深甚の謝意を表す。本研究は V/STOL 総合研究の分担研究費および機関研究「FRP の宇宙工学および航空工学への応用」の分担研究費の支持のもとに行なわれた。ここに記し謝意を表す。

1966年4月19日 材料部

#### 参 考 文 献

- [1] 河田幸三, 小林 昭, 橋本彰三, 本堂 明: CAS 第102回講演前刷 (1965-6-19).
- [2] S. Fukui, K. Kawata, A. Kobayashi, N. Takata, S. Hashimoto, N. Otani, and A. Hondo: Preprint for 6th International Symposium on Space Technology and Science Tokyo, 1965 (Dec. 4).
- [3] 河田幸三, 福井伸二, 小林 昭, 橋本彰三: 第9回宇宙技術講演会講演集 (1966-1), 121.
- [4] cf. Symposium on Standards for Filament Wound Reinforced Plastics, ASTM Spec. Tech. Publication No. 327 (1963), 13.