いずれにしても今後、低価格の C/C の開発とも相まって、ますますの発展が期待される。

参 考 文 献

- 1) W.L. Lachman, *et al.* : ICCM-II (1978), pp. 1302-1319.
- 2) E. Fitzer, *et al.* : *Carbon*, 18 (1980), 291-295.
- 3) R. Naslain, *et al.* : *Rev. Chim. Minér.*, 18 (1981), 544-564.
- 4) A. Marchand, *et al.* : Ext. Abstr., Int. Symp., Carbon, Toyohashi (1982), pp. 88-91.
- 5) 木村脩七, ほか : 日本化学会誌, 9 (1981), 1474-1480.
- 6) 木村脩七, ほか : 日本複合材料学会誌, 9 (1983), 2-7.
- 7) S. Kimura, *et al.* : Ext. Abstr., Int. Symp., Carbon, Toyohashi (1982), pp. 410-413.
- 8) W. Fritz, *et al.* : ICMC., Symp. Nonmet. Mater. Compos. (1979), pp. 245-266.
- 9) D. Cummings, *et al.* : Ext. Abstr., Int. Symp., Carbon, Toyohashi (1982), pp. 439-443.
- 10) 川村和郎, ほか : 炭素, No. 109 (1982), 46-52.
- 11) 日経メカニカル, 11月21日号 (1983), 61.
- 12) E. Fitzer, *et al.* : *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 14 (1981), 347-371.
- 13) J.S. Evangelides : Conf. on Carbon, 13th (1977), pp. 351-352.
- 14) S. Kimura, *et al.* : ICCM-IV (1982).
- 15) S. Kimura, *et al.* : *High Temp.-High Pressures*, 13 (1981), 193-199.
- 16) E. Fitzer, *et al.* : Conf. on Carbon, 15th (1981), pp. 280-281.
- 17) J.X. Zhao, *et al.* : Conf. on Carbon, 15th (1981), pp. 274-275.
- 18) C.T. Robinson, *et al.* : *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 723 (1981), 85-100.
- 19) E. Fitzer, *et al.* : Conf. on Carbon, 13th (1977), pp. 128-129.
- 20) C.G. Goetzel : *High Temp.-High Pressures*, 12 (1980), 11-22.
- 21) 木村脩七, ほか : 潤滑, 28 (1983), 185-191.
- 22) *Aviation Week*, Feb., 13 (1984), 16-23.
- 23) C.G. Goetzel : *High Temp.-High Pressures*, 12 (1980), 11.
- 24) 斉藤紀男, ほか : 第 26 回宇宙科学技術連合講演会 (1983), pp. 220-221.
- 25) L.J. Korb, *et al.* : *Ceram. Bull.*, 60 (1981), 1183.
- 26) P.R. Becker : *ibid.*, 60 (1981), 1210.
- 27) B. Broquere : 4th Int. Conf. SAMPE, Oct. (1983), pp. 253-260.
- 28) J. Thebault, *et al.* : ICCM-IV, Tokyo (1982), pp. 1185-1193.

解 説

プルトルージョンによる FRP 風力発熱用 ブレードについて

酒 巻 誠*, 桑 島 行 正**

1. はじめに

小松製作所の開発したシステムは風力発熱システムであり、そのシステムの風車の翼をプルトルージョン法により、FRP 翼を製作したもので、翼の製作の経過ならびに技術上の背景はすべて風力発熱システムに基づくもので、風力発熱システム概要を述べ、そのシステム要素中の翼の位置づけ、翼設計の概要、それに基づくプルトルージョン法にいたるまでの各種 FRP 翼の実験経過、ならびにプルトルージョン法にて製作した FRP 翼の結果を述べる。

2. 風力発熱システム

小松製作所の開発した WH-151 型風力発熱システムは図1に示す構成よりなる、すなわち三枚翼の FRP 製プロペラ型風車に渦電流式発熱機を搭載した風力発熱機、システム制御と監視を司る計測制御装置、および貯湯タンク、水ポンプ、放熱器等からなる水循環系統から成り立っている。ポンプで揚水された作動水は発熱装置で温められて貯湯タンクに戻ってくるが、循環を繰り返すうちに利用に適した温度まで上昇させ、利用施設に送り出すことができる。風車は翼直径 15 m の三枚翼ダウンウインド型プロペラ式風車である。出力は風速 8 m/s のとき定格 25 kW, 20 m/s のとき最大 70 kW に達す

* Makoto SAKAMAKI, ** Yukimasa KUWAJIMA :
小松化成機開発室 (153 東京都目黒区大橋 1-6-3)

図 1 風力発熱システム構成図

る。発熱装置はロータが磁場を横切るとき発生する渦電流による発熱を利用する渦電流式発熱装置であり、励磁電流を制御することにより容易に回転数の制御ができる。翼回転数は 2~6 m/s までほぼ風速に比例して増加し、6~20 m/s までほぼ一定の回転数定格 56 rpm に保たれるよう制御されている。風速 20 m/s 以上では、ブ

レーキによって停止する。このような風車の回転制御や制動制御はマイコンによって自動的に行なう。発熱機の過熱、翼の過回転、回転計の異常、地震等による塔の振動等をマイコンが監視して異常を検知し、適切な処置をとるので、システムの安全が確保されている。風力発熱機、その他、おもな仕様は表 1 に示す。

表 1 おもな仕様

風力発熱機		発熱装置	
風 車		タイプ	過電流式
タイプ	ダウンウインド・プロペラ式	定格速度	2,000 rpm
翼直径	15 m	定格出力	25 kW (8 m/s)
翼枚数	3	最大出力	70 kW (20 m/s)
定格回転数	56 rpm	回転制御	可変容量発熱機による
翼		ブレーキ	電磁式ディスク・ブレーキ
スパン	6,850 mm	風 速	
コード	600 mm 直線型	起 動	4 m/s
翼 型	NACA 44XX	定 格	8 m/s
材 料	FRP	停 止	20 m/s
ピッチ角	7°	設計最大	60 m/s
コーニング角	12°		
タワー		その他	
構 造	鋼管 4 脚	貯湯タンク	2 m ³ 1 基
高 さ	15 m		4 m ³ 1 基
増速機		計測制御装置	1 台
タイプ	遊星歯車式	浴 槽	5 m ³
増速比	1 : 36

図 4 NACA 44XX FRP 翼図

表 2 FRP 翼の使用材料特性

翼 No.	材料構成	強化材 (%)	厚 さ (mm)	曲げ強さ (kg/mm ²)	曲げ弾性率 (kg/mm ²)	翼重量 (kg)
1, 2	C+C+M+C	38.5	1.2	13	1,300	3.96, 4.1
3	C+M+RC	54.0	1.2	17	1,500	4.55
4	6343+M+6343	33.0	1.8	24	3,300	4.68
5	5304B+M+5304B	46.0	1.1	22	2,230	4.95
6	木製モノコック	—	—	—	1,100	5.90

マトリックス：不飽和ポリエステル樹脂

強化材；C：ガラスクロス，M：ガラスマット，R：ガラスロービング，6343：カーボン繊維平織，5304B：タテ糸カーボン繊維/ヨコ糸ガラス繊維平織

図 5 荷重-たわみ図

図 6 ねじれ角-モーメント図

は構造上の差によるものであり、FRP 翼はシェル構造であり、木製翼はムク材の削り出しであり、このため木製翼の断面特性は大きくなり、共振周波数は高くなっている。弾性率と曲げ剛性の関係を図7、弾性率とねじり剛性の関係を図8、弾性率と共振周波数の関係を図9に

表 3 FRP 翼の振動特性

翼 No.	共振周波数 (Hz)			
	1 次	2 次	3 次	4 次
1	5.97	23.1	—	62.9
2	5.43	21.1	22.6	64.2
3	6.87	25.7	33.7	70.2
4	8.92	29.1	37.9	94.5
5	8.43	29.8	35.1	94.5
6	10	46	108	193

図 7 弾性率と曲げ剛性

図 8 弾性率とねじり剛性

図 9 弾性率と共振周波数

示す。翼の弾性率と翼の剛性、翼の共振周波数との間に比例関係がみられる。

6. プルトレーション法による FRP 翼

プルトレーション法による 4 m FRP 翼形状は NACA 44XX であり、図 10 に翼断面構造を示す。プルトレーション成形の概要は図 11 に示す。この場合マトリックス、強化繊維の代表的構成表は表 4 に示す。プルトレーション法における技術として FRP 翼の強化繊維の構成の設計と、複雑な強化繊維層とマトリックスを一体化した形状にて引き抜く技術が、金型、機械を含めて重要であり、4 m 翼の成形において大型化のための成形技術確立した。4 m 翼プルトレーション FRP 翼のシェル部の曲げ強度、曲げ弾性率を表 5 に示す。

大型 15 m FRP 翼の成形については、翼型は NACA 44XX を用い図 12 に翼構造を示す。強化繊維の代表的構成表を表 6 に示す。成形された 15 m FRP 翼について、翼強度試験（破壊応力測定、破壊モード測定、疲労強度試験）、翼固有振動測定試験を行なった。15 m プルトレーション翼は 60 m/s 以上の風圧に耐え、最終的には座屈破壊する。図 13 はフラップ方向の疲労強度を示

図 10 4 m FRP 翼構造 (プルトレーション法)

図 11 ブルトルージュン成形の概要

表 4 4 m ブルトルージュン FRP 翼材料構成

翼 No.	材 料 構 成	
	シェル部	スパー部
A	F+YR+R+R +YR+F	F+RC+R+GC+GC +R+RC+F
B	F+GC+R+R +GC+R	F+RC+R+GC+GC +R+RC+F

F: ポリエステル不織布, YR: ユニットロービング (ヨコスダレ), R: ロービング, RC: ロービングクロス, GC: ガラスクロス, マトリックス: 不飽和ポリエステル樹脂

表 5 4 m ブルトルージュン FRP 翼の物性

翼 No.		曲げ強さ (kg/mm ²)	曲げ弾性率 (kg/mm ²)
		シェル部	シェル部
A	縦方向	49.7	880
	横方向	29.4	1,380
B	縦方向	60.0	1,180
	横方向	20.2	990

ブルトルージュン法により製作した翼よりテストピースを切り出し, JIS K 6911 試験方法にて測定

図 12 15 m ブルトルージュン FRP 翼構造図

翼特性: NACA 4418, ピッチ角 7°, コーニング角 12°

表 6 15 m ブルトルージュン FRP 翼材料構成

翼 No.	材 料 構 成	
	シェル部	スパー部
I-6	F+M+R+RC +RC+R+M+F	F+C+R+Ccr+F+M +R+M+Ccr+R+C+F
I-7	F+M+R+RC +RC+R+M+F	F+M+R+RC+F+M+R +M+RC+R+M+F

マトリックス: 不飽和ポリエステル樹脂, F: ポリエステル不織布, M: ガラスマット, R: ロービング, RC: ロービングクロス, C: カーボン繊維, Ccr: カーボンクロス

図 13 翼 assay 疲労強度 (フラップ方向)

表 7 15 m ブルトルージュン FRP 翼振動特性

翼 No.	共振周波数 (Hz)				
	1 次	2 次	3 次	4 次	5 次
I-6	2.9	5.7	17.9	21.3	26.1
I-7	2.7	5.5	16.2	21.0	26.3

表 8 15 m プルトルージョン FRP 翼の物性

翼 No.	曲げ強さ (kg/mm ²)				曲げ弾性率 (kg/mm ²)			
	シェル部 (3 mm)		スパー部 (5 mm)		シェル部 (3 mm)		スパー部 (5 mm)	
I-6	縦方向	44.4	"	45.4	"	1,530	"	4,030
	横方向	17.9	"	18.1	"	740	"	1,430
I-7	縦方向	39.1	"	52.6	1,490		1,910	
	横方向	17.4	"	19.0	810		960	

プルトルージョン法にて製作した翼よりテストピースを切り出し、JIS K 6911 試験方法にて測定した

表 9 FRP 翼特性比較

翼特性	プルトル ージョン	ハンドレイアップ法	
		GFRP	CFRP
コスト	100	150	300
重量 (kg)	71	160	140
生産性	7 日/1 枚	20 日/1 枚	20 日/1 枚
製品ばらつき	小	大	大
翼コード			
先 端	500 mm	400 mm	400 mm
翼 根	500 mm	700 mm	700 mm
翼厚さ			
先 端	90 mm	60 mm	60 mm
翼 根	90 mm	130 mm	130 mm

す。表7は、固有振動数を表わしている。15 m プルトルージョン成形材料の曲げ強さ (シェル部, スパー部),

曲げ弾性率 (シェル部, スパー部) の試験結果を表8に示す。また昭和57年末より上記 15 m 翼によるシステム運転試験を実施しており、期待効果を得ている。

7. 結 語

プルトルージョン法による FRP 翼を試作、成形し大型風車翼として、実用化に対する技術の確立ができた。プルトルージョン法による FRP 翼は FW 法、ハンドレイアップ法に比して生産性が優れコスト上も優位にあり、製品のばらつきも少なく、風力利用するシステムに広く使用できるものである (表 9)。

おわりに、本稿作成に当たり、ご指導いただいた、小松製作所技術研究所奥谷順一氏、阿部博氏に厚くお礼申しあげます。