図 11 APR シート施行状況

以上のように、先端複合材料が土木・建築分野で非常に多くに使用実績を上げつつあることはこの分野で仕事をしているものにとっては喜ばしいことである。今後、

強化繊維の種類も各種出てくるであろうし、樹脂も安価で非常によい性能を有したものも開発されてくるであろう。このような背景から、今後更に多くの製品が開発され、市場に出てくることが予想される。これらの商品が、既存の土木・建材に代わって使用されていく時代が21世紀に入って加速されるのは確実であろう。

最後に、東燃株式会社がフォルカ炭素繊維シートで1997年度の複合材料学会技術賞をいただいたが、1998年末を持って日鉄コンポジット株式会社に全ての業務が移管された。また、販売会社としてフォルカエンジニアリング株式会社が1998年に設立され、今後は、この両社で土木・建築分野でのフォルカトウシートを始めとした市場展開と、新規製品の市場開発を進めていくこととなったことを付け加えさせていただきたい。

バーナディフューザ用複合セラミックスの開発

米澤 孝夫*, 斎藤 信一**, 松田 敏紹**, 風間 公一***, 杉田 雄二****

1. 結 言

石油火力発電所ボイラで用いられるバーナディフューザ(BD)は、ボイラの燃焼を左右する重要な部品である。図1に模式的に示すように、BDの中心にはバーナガンが取り付けられ、その先端のノズルから燃料が噴霧される。BDの翼部が空気の流れの向きを変え、翼の周囲に負圧ゾーンを形成する事で炎を安定化させている。通常のBDは、コバルト合金やニッケル・クロム合金などの耐熱金属で作られているが、火炎の輻射熱によって熱応力・高温酸化・高温腐食等を受け焼損し易い。ボイラの保守点検期間を延長する事は、電力コストの低減に繋がるのだが、今まではBDを始めとする部品寿命が短くて

達成されていない。この問題を解決するため、我々は新しいセラミックス製のBDを共同開発した¹⁻⁴⁾。

用いた素材は、日本重化学工業により開発された複合セラミックス(KRYPTONITE™)で、窒化珪素マトリックス中に炭化珪素ウィスカーが分散されている⁵⁻¹⁰⁾。この複合セラミックスは優れた耐熱性・耐熱衝撃性・耐酸化性を持っている。

試作したセラミックス製BDについて、実際のボイラを想定した種々のラボテストとそれに続く実機での実証テストを行っている。実証テストは最も長いもので5年半に達しており、現在16ボイラで並行して進められている。

2. 炭化珪素ウィスカー複合窒化珪素

セラミックスの脆さを改善するため、繊維で補強する事が提案されている。これは日本家屋の土壁にわらを加えた祖先の知恵に通ずる手法である。しかし、セラミックスの中に繊維を加えると、焼結過程での物質移動を阻害するため、緻密な複合材を得る事が難しかった。そのため炭化珪素ウィスカー複合窒化珪素の研究も、多くはホットプレス(HP)を用いて行われていた。HPでは、

Takao YONEZAWA,* Shin-ichi SAITOH,** Toshitugu MATSUDA,** Koh-ichi KAZAMA*** and Yuji SUGITA****: *日重ニューマテリアル(株)酒田セラミックスセンター (998-0064 酒田市大浜1-4-63), **日重ニューマテリアル(株) (103-0016 東京都中央区日本橋小網町8-4), ***(株)テクノ中部技研センター (459-8001 名古屋市緑区大高町字北関山20番地の1), ****中部電力(株)技術開発本部電力技術研究所 (459-8001 名古屋市緑区大高町字北関山20番地の1)

図1 バーナディフューザの模式図

Ceramic blade Metal holder

図2 開発した複合セラミックス製 BD の外観

表1 複合セラミックスの特性値 (代表例)

Bulk density (g/cm ³)	3.2
Apparent porosity (%)	<0.1
Vickers hardness (load : 10 kg)	1,520
Bending strength (MPa)	940
Tensile strength (MPa)	680
Fracture toughness (MPa·m ^{1/2})	7.5
Young modulus (GPa)	320
Thermal conductivity (W/m·K)	29.6
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶)	4
Critical thermal shock resistance (°C)	>1,000

焼結過程で圧力を加えるため緻密化が達成されるが、コストが高く製造出来る形状にも制約が多い、HPで焼結した厚いブロックから今回のBDの形状を加工することは、テストでは可能でも現実には経済的に不可能であると考えた。

一方、今回BDの素材として採用したクリプトナイトは、常圧焼結法で緻密化が可能な複合セラミックスである。成形をスリップキャスト法で行うが、この際にウィスカーを二次元的に配向させる事に特徴があり⁵⁻¹⁰⁾、具体的には次のように製造されている。

窒化珪素粉、炭化珪素ウィスカーと焼結助剤をイオン交換水と共にアルミナボールミルで46時間混合する。固形分濃度70%以上で粘度0.05 Pa s以下に調整されたスリップを石膏型に流し込み、脱型後乾燥、10気圧の窒素加圧下1,825°Cで焼成される。焼成後の加工は、高さ合せのために鑄込み口周辺部の研削だけが行われている。ニアネットシェイプに製造し焼成後の加工を最小限に抑える事で、複合セラミックスの製造コストを大幅に低減する事ができた。

得られた複合セラミックスの機械的特性を表1に示す。代表的なセラミックスであるアルミナや炭化珪素、またウィスカーの複合されていない窒化珪素に比べて、強度・靱性・耐熱衝撃性が大幅に改善されている。

3. ラボテスト

試作したBDの様子を図2に示す。金属製ホルダーとセラミックス翼部の熱膨張差を逃げるため、セラミックス翼部を外径194mmのものは4分割、それ以上の径(300mm, 324mm)では8分割とした。ホルダーにはセラミックスピースを固定するために台形の溝を切り、無機系の接着材を隙間に充填して固定した。

このようにして作成したBDを用い、実際のボイラを想定した種々のラボテスト(1,200°C、500時間の酸化テスト、1,200°Cに加熱後0.68MPaの飽和水蒸気を当てて急冷する熱衝撃テスト、15Hz振幅8mmでの振動テスト)を実施したが、全てのテストで良好な結果が得られた⁴⁾。

4. 実証テスト

1993年5月から中部電力渥美火力発電所の1号ボイラ(出力50万kW)で実証テストを開始した。セラミックス製BDは、高温に晒される4段目と5段目(最上段)にセットした。翼部表面の温度は約1,080°Cと予想される。渥美火力では、主な燃料として原油(S:0.1%, Na:1ppm, V:1ppm)が使用されている。4段目と5段目のバーナは出力調整のため夜間消される事があり、消火と点火の際に熱衝撃を受ける。実証テスト開始後17ヵ月と34ヵ月で各段から1ピースずつを取り外して新しいピースと交換し、取り外したセラミックスピースの表

表 2 渥美火力 No. 1 ボイラでの実証テスト結果

Test period	17 months	34 months
Crack	not detected	not detected
Thickness of oxide layer	max. 20 μm	max. 30 μm
Composition of oxide layer	Si, O, Fe, Ca, Na, V	
Depth of pits	max. 100 μm	

表 3 実証テストが行われているボイラの一覧

Demonstration site	Size	Starting date
Chubu E.P.Co., Atsumi No. 1	D194 mm	May, 1993
A plant No. 4	D300 mm	Feb., 1996
B plant No. 2	D194 mm	Sep., 1996
A plant No. 3	D194 mm	Dec., 1996
C plant No. 5	D300 mm	Jan., 1997
D plant No. 2	D194 mm	Mar., 1997
E E.P.Co., F plant No. 2	D300 mm	Jan., 1996
G plant No. 4	D324 mm	Jan., 1997
H E.P.Co., J plant No. 1	D300 mm	May, 1996
K E.P.Co., L plant No. 1	D300 mm	Jun., 1998
M Co., N private plant No. 7	D194 mm	Oct., 1995
O private plant No. 11	D194 mm	May, 1996
N private plant No. 10	D194 mm	Oct., 1997
P Co., Q private plant No. 2	D194 mm	Sep., 1996
R private plant No. 1	D194 mm	Apr., 1997
S Co., T private plant No. 5	D194 mm	Dec., 1996

図 3 17カ月経過後の複合セラミックス製 BD の様子

面並びに断面を SEM/EPMA を用いて観察した。残りのピースは現在もテストが続けられており、5年以上経過している。17カ月目の様子を図3に示したが、焼損や

割れは見られなかった。

34カ月までのテスト結果を表2に示す。数十 μm の酸化膜と深さ0.1 mmのピットが生じており、ピット周辺には Na, V が観察された。これら元素と窒化珪素が酸化した SiO_2 とがガラスを形成し、ピットが生じたと考えている。今回の結果より、セラミックス製 BD の寿命は8年以上と予想された。

5. 結 論

我々が開発したセラミックス製 BD は、通常使用されている金属製に比べて4~6倍の耐久性があり、渥美火力でのテスト結果からは8年以上の連続使用に耐える事がわかった。

実証テストの良好な結果を踏まえ、現在では表3のように16のボイラで実証テストが行われており、今後さらに多くのボイラで使用されるものと考えている。

参 考 文 献

- 1) 杉田雄二, 風間公一, 米澤孝夫, 斎藤信一, 松田敏紹: 日本特許公報 2609053.
- 2) 斎藤信一, 米澤孝夫, 松田敏紹, 風間公一, 杉田雄二: 日本セラミックス協会第8回秋季シンポジウム(1995), p. 407.
- 3) 風間公一, 杉田雄二, 斎藤信一, 米澤孝夫, 松田敏紹: 日本セラミックス協会第8回秋季シンポジウム(1995), p. 408.
- 4) 風間公一, 杉田雄二, 伊藤博之, 米澤孝夫, 斎藤信一: 火力原子力発電中部, **277・278** (1997), 42-46.
- 5) 松田敏紹, 斎藤信一, 米澤孝夫, 坂井長治: 日本特許公報 2798701; T. Matsuda, S. Saitoh, T. Yonezawa, C. Sakai & K. Abe: United States Patent No. 5227344 and European Patent Publication No. 0377317.
- 6) 斎藤信一, 南澤正敏, 松田敏紹, 坂井長治: 第27回セラミックス基礎科学討論会(1989), p. 208.
- 7) 斎藤信一, 南澤正敏, 米澤孝夫, 松田敏紹: 日本セラミックス協会第2回秋季シンポジウム(1989), pp. 508-509.
- 8) T. Yonezawa, S. Saitoh, M. Minamizawa & T. Matsuda: Proc. 1st SAMPE Symp. & Exhi., 28 Nov.-1 Dec. 1989, Nikkan Kogyo Shimbun, Tokyo (1989), pp. 1131-1136.
- 9) 米澤孝夫: 資源・素材関係学協会合同秋季大会(1993), pp. 11-14.
- 10) T. Yonezawa, S. Saitoh, M. Minamizawa & T. Matsuda: *Composites Sci. Tech.*, **51** (1994), 265-269.

宇宙向け炭素繊維三軸織物とその複合材料の開発

渡 邊 秋 人

1. 結 言

人工衛星等の宇宙構造材料は, ロケットによる打ち上げ時の衝撃や振動に耐えられること, またその軌道となる宇宙空間においては, 熱的寸法安定性及び高放熱性が重要となる。さらに, 搭載能力の制限により, 高い比剛性が要求される。したがって, 人工衛星には複合材料が多用されているのが現状である。しかし, 繊維強化基材として一方向材や通常の二軸織物では, 強度や剛性, 熱膨張率に異方性が生ずるため, 等方積層する必要がある。そこで, 三軸織物の基本特性に着目し, 人工衛星の構造材料, 特にアンテナリフレクター用として最適な炭素繊維三軸織物の開発を行った。

2. 衛星用アンテナリフレクターへの応用

ロケット打ち上げ時の衝撃や振動に関しては, 三軸織物のベーシック組織に見られる六角形の開孔部が音響振動を緩和し, 単層材のホルダビリティが衝撃や振動に対して有効に作用する¹⁾。宇宙空間における熱的寸法安定性については, 各種炭素繊維から最適な種類を選択す

れば, 単層で熱膨張率をほぼ0に設計することができる。軽量, 高剛性の要求特性に関しては, 三軸織物は単層で疑似等方性を有し, 等方積層の必要がないため, 軽量化がはかれる。また, 高弾性率炭素繊維を用いることにより比剛性の高い複合材料が得られる。この様に, 炭素繊維と三軸織物の特徴を最大限に活用し, 要求特性のバランスを取ることができれば, 従来のアンテナリフレクターの設計を大幅に革新することができる。

3. 製織技術の開発

高い比剛性の三軸織物を得るには, 高弾性率の強化繊維を使い製織する必要がある。しかし, 普通織機と異なり, 使用する繊維に対して損傷を与えやすく, 非常に過酷な製織条件となる従来の三軸織機では, 脆い炭素繊維の製織は事実上不可能であった。そこで, 出来るだけ繊維への損傷を防ぐため, 高精度の繊維張力制御, ガイド類の材質や形状の見直し, 繊維曲率や糸道経路の変更を行った。この様に, 事実上新しく生まれ変わった独自の三軸織機を用い, さらに繊維のサイジング剤の調製や付着率についても最適化を行うことにより, 目標とする高弾性率炭素繊維の製織に世界で初めて成功した。図1に三軸織物を示す。

Akihito WATANABE: サカセ・アドテック(株) (910-0363 福井県坂井郡丸岡町下安田14-10)