



高強度 グラスファイバー

目次

・ 著者について	2
・ 要約	2
・ 紹介	2
・ グラスファイバーの化学組成	2
・ グラスファイバーの性質	3
－ 物理的性質	3
－ 化学品抵抗性	3
－ 電氣的諸性質	3
－ 熱的性質	4
－ 光学的性質	5
－ 放射線に対する性質	5
・ グラスファイバーのサイズ処理	5
・ ファイバー複合材の有用性	5
－ 複合材の性質	5
－ 環境に対する耐久性	5
・ 謝辞	6
・ References	6
・ Table 1 グラスファイバーの組成範囲	7
・ Table 2 グラスファイバーの性質	7
・ Table 3 グラスファイバーの性質	8
・ Table 4 グラスファイバーサイズ剤化学品の要約	9
・ Table 5 9 μ m集合ロービングによる単一方向S-2グラスファイバーエポキシ複合材の性質	9
・ Figure 1 連続式グラスファイバー製造プロセス	10
・ Figure 2 温度とファイバー強度	10
・ Figure 3 PH環境下のファイバー重量保持	10
・ Figure 4 PH値とファイバー強度の関係	11
・ Figure 5 温度とガラス粘度の関係	11
・ Figure 6 エポキシ中の体積と熱膨張の関係	11
・ Figure 7 エポキシ中のファイバー体積と誘電率の関係	11
・ Figure 8 エポキシ中の環境ストレス破断	11
・ Figure 9 エポキシ中の環境ストレス破断	11

高強度ガラス ファイバー

著者について

本技術資料は、1996年当時オーエンス・コーニング社の社員であったDavid Hartman氏、Mark E. Greenwood氏及びDavid M. Miller氏の協力の下に書かれたものです。Hartman氏は、David Lipscomb大学より化学の学位を又Georgia工科大学より繊維並びにプラスチックエンジニアリングの研究による化学のM.S.の学位を受けております。

Greenwood氏は、Purdue大学より構造設計の研究による土木工学のB.S.及びM.S.の学位を受けております。Miller氏はOhio State大学よりセラミック・エンジニアリングの分野において、B.S.、M.S.及びPH.D.の学位を受けております。

要約

1935年に Newark Ohio で考案され製造された連続ガラスファイバーは補強用複合材料の分野に革命をもたらし、2000年までに世界のガラスファイバーの年間消費量を260万トンまで押し上げています。1942年には、ガラスファイバーで補強された複合材が初めて宇宙航空用構造部品として使用されました。1960年代の初めには高強度ガラスファイバーであるS-2ガラスがオーエンス・コーニング・テキスタイル・プロダクツ社と米国空軍との共同事業で初めて使用されました。その後になり、1968年にはS-2ガラスファイバーは各種の商業向けに使用される材料として発展し始めました。高強度のガラスファイバーは、きわめて妥当なコスト・ウエイト性能を持ち、高温下での耐久性・安定性・透明性及び弾力性が組み合わさっております。高強度ガラスファイバー複合材の有用性は、物理的、機械的、電氣的、熱的、音響的、光学的及び放射能上の諸性質ごとに比較されております。

キーワード：S-2ガラス®、Cガラス、ARガラス、Dガラス、ECRガラス®、

Rガラス、Eガラス、ファイバーガラス、ガラス補強材。

1. 紹介

古代エジプト人は、熱で軟らかくしたガラスから引出したきめの粗いファイバーで容器を作っていました。フランスの科学者Reaumur氏は、18世紀の頃からガラス織物用の細いガラスファイバーを作る可能性について考えていました。連続ガラスファイバーは、オーエンス・コーニング・テキスタイル・プロダクツ社によって、1930年代に初めてかなりの量が高温で使われる電気品用として製造されました。引続く技術の革新と進化によって、連続ガラスファイバーの製造方法は改良されて、図1に示すようになっていきます。シリケート、ソーダ、粘土、ライムストーン、ホウ酸、蛍石や各種の金属酸化物のような粗原料は混ぜ合わせてガラス原料となり、更に炉の中で溶融され、横方向に流れる間に精製され前方の炉へと送られます。この溶融したガラスはプラチナ/ロジウム合金のブッシングに送られ、それから個々のブッシングチップと0.76から2.03m/m (0.030から0.080インチ)に設定されたオリフィスの間を通り、そして急速に冷却され空中で(結晶化を防ぐために)3から35 μ mの細いファイバーに成形されます。機械式巻取り機は、このファイバーにその後の処理や最終製品の性能を助長するのに適切な化学サイズ剤をコーティングするアプリケーションを通じて、このファイバーを61m/sの線速度で引出します。

S-2ガラスのような高強度ガラスファイバーは5~24 μ mまでの範囲の細いファイバーに高温下で仕上げられたアルミノシリケートの組成を持っています。いくつかの他のタイプのシリケートガラスファイバーも、織物や複合材産業用として製造されています。ASTM C 162から下に記載されている各種のガラス・化学品複合材は特定の最終使用目的を達成する為にファイバーの諸性能の組み合わせが提供できるように開発されたものです。

Aガラス—ソーダライムシリケートガラスでEガラスの強度、耐久性、及び良好な電気抵抗性を必要としないところに使用される。

ADVANTEX®—ECRガラスの利点を大部分備えたものをEガラス並みの値段で提供するために導入されたカルシウムアルミノシリケートガラス。ボロンフリーの組成のため低公害品。

Cガラス—カルシウムボロシリケート(ほう珪酸塩)ガラス腐蝕性のある酸性環境下でその化学的安定性の故に使用されている。

Dガラス—ボロシリケートガラスで電機品向けの低誘電率のもの。

Eガラス—アルミニウムカルシウムボロシリケートガラスで最大アルカリ含有量が重量比2%で強度と高い電気抵抗性を必要とするところに使用されている。

ECRガラス®—カルシウムアルミノシリケートで最大アルカリ含有量が重量比2%で強度と高い電気抵抗性と酸の腐蝕に対する耐久性が望ましいところに使用される。

ARガラス—耐アルカリ性ガラスでアルカリジルコニウムシリケートの組成を持ち、セメント支持層やコンクリート用に使用される。

Rガラス—カルシウムアルミノシリケートガラスで強度追加や耐酸性を必要とするところの補強用として使用される。

S-2ガラス®—マグネシウムアルミノシリケートガラスで極端な温度条件や腐蝕性のある環境下で高強度、高弾性及び安定性が要求される織物の支持層や複合構造材用として使用される。

2. ガラスファイバーの化学組成

ガラスタイプ中の化学組成の変動は製造のために使用するバッチ中の粗原料や溶融/成型プロセスの差異によって生じたり、又は製造場所の異なる環境上の制約によって生ずるものです。これらの組成の変動はガラスタイプの物理的並びに化学的諸性質をそれほど重大には変えさせるものではありません。一貫したガラス組成が得られるように設定された

製造設備では、生産能力と効率を達成すべく極めて厳密なコントロールが維持されています。表-1に8種類の商業ガラスファイバー中の酸化物の成分とその重量範囲について説明してあります。

3. グラスファイバーの性質

引張り強度、ヤング弾性率、及び化学品に対する耐久性のようなガラスファイバーの諸性質は、ファイバーから直接に計測されます。他の諸性質、即ち誘電係数、消失ファクター、絶縁耐力、容積/表面低効率及び熱膨張についてはバルクのサンプルに成形され、そして成形時のストレスを取除くための焼鈍を行ったガラスで計測されます。また密度や屈折率はファイバーとバルクサンプルの双方について焼鈍したもの或いは焼鈍しないもので計測されます。表-2と表-3に記載されている諸性質は表-1の中の成分範囲のもの代表的なもので以下に述べるガラスファイバーの諸性質の全体像に相当するものです。

3.1 物理的性質

ガラスファイバーの密度は、成形品またはバルクの焼鈍したもののいずれかで計測され報告されています。ASTM C 693が密度決定のために用いられる一つのテスト法です[7]。ファイバー密度[表-3の中にある]は、バルクの焼鈍したものの値より室温でおおよそ0.04 g/cc小さくなります。複合材の中で用いられるガラスファイバーの密度は、おおよそDガラスで2.11 g/ccからECRガラスの補強材で2.72 g/ccの範囲です。

ガラスファイバーの引張り強度は、通常空気中の室温で計測される新鮮なシングルフィラメントまたは、マルチフィラメントストランドの値として報告されます。それぞれのストランドの強度は通常表-2に報告されている値よりも20-30%低くなります。それはストランド形成プロセスの間に起こる表面のキズによるものです。水分はガラスの新鮮なときの強度に対して好ましくない影響を及ぼします。こ

のことは新鮮なシングルフィラメントの強度を水分による影響が、ミニマムとなる液体窒素の温度で計測することによって非常に良く説明されます。このようなテストの結果は、相対湿度50%の室温のエアール中の測定値よりも50%から100%も強度の増加を示します。S-2ガラスの液体窒素の温度の下で計測された最大強度は、12.7m/mゲージ長10 μm径のファイバーで11.6GPaとなります。外部の負荷の下に水分にさらされているガラス強度のロス静的疲労として知られています[4.8]。

ガラスファイバーの新鮮なときの強度はファイバーが温度上昇にさらされるのに従って減少します。Eガラス並びにS-2ガラスのファイバーは、538°C(1000°F)においてその新鮮時、室温下での強度のおおよそ50%の強度を保持すること、並びに図-2にあるような有機補強材に匹敵するものであることが分かっています。

焼鈍していないシリケートガラスファイバーのヤング弾性率はおおよそ52 GPaから87GPaの範囲にあります。ファイバーが熱せられるのに従って弾性率は次第に増加します。その原子構造を固めるように焼鈍されたEガラスファイバーでは、その弾性率が72 GPaから84.7GPaにまで増加します[4]。大部分のシリケートガラスにおいては、ポアソン比が0.15から0.28の間にあります[9]。Eガラスのポアソン比は、0.22±0.02であり、また510°Cまでの温度で計測された結果ではこの値に変化は無いと報告されています[10]。

焼鈍した高強度S-2ガラスファイバーの20°Cで計測された諸性質は下記の通りです。

ヤング弾性率	93.8 GPa
剪断係数	38.1 GPa
ポアソン比	0.23
バルク密度	2.488 g/cc

3.2 化学品抵抗性

腐蝕や浸出作用のある酸、塩基並びに水に対するガラスファイバーの化学品抵抗性は重量減少のパーセントで表されます。

この値が低いほどこのガラスはこれら

の腐蝕性のある溶液に対し抵抗性が大きいこととなります。テストは所定の重さの10ミクロン径のバインダーやサイズ剤無しのガラスファイバーを用い、96°Cに保たれた指定された量の腐蝕性の溶液に対して行います。ファイバーはその溶液の中に要求された時間の間、保持されそして取出され洗われ、乾燥されて重量が計測され、重量減が決定されます。24時間(1日間)及び168時間(1週間)の保持時間についての結果が報告されます。表-3に示されているように、ガラスファイバーの化学品に対する抵抗性は、そのファイバーの組成と腐蝕性溶液並びに保持時間によって決まるものです。

酸性の環境下に於けるガラスの腐蝕は、初めに早い腐蝕率を示す複雑なプロセスであることに注目すべきです。(表-3にあるサンプルの1日と1週間の酸処理後の重量損失が同じ程度であることに注意してください)時間の経過により浸出作用を受けたガラスが、ガラスの表面に効果的な壁を形成し浸出された層を通る化合物の拡散によって、残りの浸出作用を受けていない層がコントロールされて腐蝕が遅らせられています。そのあとでは腐蝕の割合はファイバー中の非シリカ系の化合物が減少するに従って、ほとんどゼロとなります。所定のガラス組成に対しては、腐蝕のレートは酸の濃度[図-3]温度、ファイバー径そして溶液の量とガラス量との比によって左右されるでしょう。アルカリ環境下においては、アルカリが組織に影響を与え金属酸化物を再沈殿させるため、重量減少を計測することがより重要となります。溶液にさらした後の引張り強度は96°Cで24時間の間、溶液にさらした結果を示す図-4の通りガラスファイバーに残っている諸性質をより良く示す指標です。

3.3 電氣的諸性質

表-3の電氣的性質は[11-13]に記載されたテスト手順に基づいて焼鈍したバルクのガラスサンプルについて計測したものです。誘電率や比誘電

率とは、誘電体としての試験片を持ったシステムの静電容量と誘電体の無い試験片を持ったシステムの静電容量との比です。静電容量とは、ある電荷を貯蔵することができる物質の能力です。誘電率の値は、テストの周波数、温度、電圧、相対湿度、水の浸入や気候条件によって左右されます。

誘電体の消散係数は平行リアクタンスと平行レジスタンスの比、または通常ロスタンジェント値と呼ばれるロスアングルのタンジェント値です。それはまた品質ファクターと相反関係にあるもので、その値が小さいときはロスアングルのタンジェント値はパワーファクターまたはロスアングルのサイン値と本質的に同じです。パワーファクターは誘電体中の消散するパワーのワット値と有効なボルト・アンペア値の比です。消散係数はディメンジョンレスのもので、ほとんど全ての電気の使用場所では小さな消散係数が望ましいとされています。これによって物質の内部加熱が少なくなり、信号のひずみを低く抑えることとなります。この消散係数は通常、誘電率の計測と同時に計測され、周波数、湿度、温度、及び水の浸入によって左右されています。

ロスファクターは、時としてロスインディックスと呼ばれますが、消散係数またはロスタンジェントと混同されることがあります。ロスファクターとは単なる消散係数と誘電率によって生じたものであり誘電体の中に於けるエネルギーロスに比例するものです。

誘電体絶縁破壊ボルテージとは、2つの電極間に設定された電気絶縁物質の中で前もって決められたテスト条件下で電氣的不具合が起こるボルテージです。これらの電極間の絶縁物質の厚さが正確に計測できるときは、この誘電体絶縁破壊ボルテージと、この試料片の厚さの比が絶縁耐力kv/cmとして表現することができます。絶縁破壊ボルテージは電極の外形、試料片の厚さ(絶縁耐力は、おおよそ厚さの平方根の逆数として変化するため)や温度、電圧を掛け

る時間、電圧の波形、周波数、周辺にある媒体、相対湿度、水の浸入及びラミネートされたり、不均一となったプラスチックの方向性によって左右されます。

3.4 熱的性質

ガラスの粘度は温度の上昇と共に減少します。図-5はEガラス及びS-2ガラスファイバーの温度、粘度変化を示します。注目すべきはS-2ガラスファイバーが粘性を示す温度はEガラスよりも150°C~260°C高いということです。このためにS-2ガラスがEガラスよりも高い温度での使用が多くなります。

幾つかの参考とすべき粘度のポイントが表-2に示されているように、ガラス業界によって規定されています。軟化点とは均一な径のガラスファイバーがASTM C 388 [14]による計測で自分自身の重さにより、ある特定の割合で伸長するときの温度です。軟化点とは、その温度でガラスが自分自身の重さで変形する温度と定義されています。それは、粘度がおおよそ $10^{6.6}$ Pas [10^{7.6}]のときに起こります。焼鈍点とはASTM C 336 [15]による計測でガラスファイバーのある特定の伸長率を示すとき、或いはASTM C 598 [16]による計測でガラスビームのある特定のたわみ中間点に相当する温度と定義されています。ガラスの焼鈍点では、内部ストレスはおおよそ数分間でかなり緩和されます。焼鈍点に於けるガラスの粘度は、おおよそ 10^{12} Pa.s [10¹³ P]です。ひずみ点は、上記の焼鈍点について記述されているようにASTM C 336又は、C598に従って計測されます。ひずみ点のガラスにおいては内部のストレスは、おおよそ数時間でかなり緩和されます。ひずみ点におけるガラスの粘度は、おおよそ $10^{13.5}$ Pa.s [10^{14.5} P]です。

温度範囲-30°Cから250°Cに於ける平均熱膨張係数は表-3に記載されています。膨張の計測は焼鈍したバーでASTM D 696 [17]を用いて行います。高強度ガラスの熱膨張係数が低いほど極限温度に於ける寸法の

高い安定性が保たれます。

表-3の比熱のデータは高温度差異スキニングカロリーメトリー技術を用いて決定されます。一般的に言って平均の比熱値は下記のように表されています。200°Cで0.94 kJ/kg·K、転位点のすぐ下で1.12 kJ/kg·kそして転位点の上の液状のとき1.40 kJ/kg·K。これらの値は誤差±5%で正確なものです。転位点の上では比熱が更に増加することは無いことが観察されています。転位点温度はバルクガラスの燃焼点温度とほぼ同じです。ガラスの熱伝導特性は、結晶体に見られるそれらの性質とはかなり異なります。ガラスの場合は、対応する結晶体のそれよりも伝導度が低くなっています。また、ガラスの伝導度は温度と共に緩やかに低下し、絶対零度近くでは非常に小さな値になります。結晶体の場合は温度が低下するに従って、非常に低温度に達するまで伝導度は上昇を続けます[18]。熱伝導度のデータは通常物質の場合同じであるのに、ガラスでは調査者によって異なっています[19]。一般的に言って熔融したシリカガラス、及びアルカリ、及びアルカリ土類シリケートガラスは室温では比較的同じような熱伝導性を持っていますが、ボロシリケート及び鉛やバリウムを含むガラスは、より低い値を持っています。室温に近い温度では、ガラスの熱伝導度の範囲は、鉛シリケート(80%鉛酸化物、20%シリコン二酸化物)で0.55 W/m·Kから熔融シリカガラスで1.4 W/m·Kです[20]。E. H. Ratcliffe氏はガラスを構成する酸化物成分の重量比から熱伝導性を予測するための特性係数を考案しています。この計算方法を使って室温に近いところではCガラスのおおよその熱伝導度は1.1W/m·Kであると、またEガラスでは1.3 W/m·k、またS-2ガラスファイバーでは1.45 W/m·Kであることが分かっています。

3.5 光学的性質

屈折率は焼鈍しないものまたは、焼鈍したもののガラスファイバーの何れかについて計測されています。これは25°Cの温度で、単色性ナトリウムD光線による標準的オイル浸漬技術が用いられています。一般的には焼鈍されたガラスは表-2に示す通り、それが成形されているときの屈折率よりもおおよそ0.003~0.006の範囲で高い値を示します。

3.6 放射線に対する性質

E-ガラス及びS-2ガラスは、全てのタイプの原子核からの放射線に対し優れた抵抗性を持っています。アルファ線及びベータ線はほとんど影響を及ぼしませんが、ガンマ線とニュートロンによる衝撃は引張り強度に5%~10%の減少と1%以下の密度の減少及びファイバーのわずかな変色を生じさせています。このデータは1020NVTニュートロンまたは105J/gまでのガンマ線放射に対する事実通りのものです。ガラスファイバーは、ガラスが非晶質であり、放射線が原子配列をひずませることはしないため放射線に対する抵抗性があるのです。ガラスは又外部からの物質を数パーセント吸収してある程度までは同じ性質を維持することができます。また、ファイバーの一本一本は細い直径のため原子のひずみによる熱は容易に表面へと送られ拡散されます。

E-ガラス及びCガラスはボロン含有量が多いため、原子力反応器の内側に使用することはお奨めできません。ボロンはニュートロンを吸収しアルファ粒子を造り出します。S-2ガラスファイバーは原子力反応器の内側に使用するのに適切なものです。かなり広く多様性のある有機製品が様々な放射線環境下で使用されており、その大部分の製品について有機物質が大丈夫かどうかを決定するため、シミュレーション(模擬試験)条件下で試用してみることが必要です。

4. ガラスファイバーのサイズ処理

ガラスファイバーの表面化学処理に

よって製品の必要とする機能が生み出されています。でん粉またはポリビニールアルコールフィルム形成による織物の化学サイズがウィービング、ブレードイングまたはニットプロセスにおいて有効です。典型的なものとして当時の織り手は、ガラス織物をもみ洗いしたり熱できれいにしたりして、最終製品と親和性のある仕上げを施しています。不織サイズ化学品には、しばしばウェットフォームドマット用の白濁水化学品と親和性のある分散剤やドライフォームドマット用のドライまたはウェット結合剤化学品と親和性のある添加物が含まれています。補強用材のサイズ用化学品は多くの処理工程並びに最終使用クライテリアでの性能のある複合材料との親和性を持っていなければなりません。インジェクションモールドイングのような工程では、熱可塑性化合物に対し親和性のあるチップドストランドが必要です。フィラメントワインディングやパルトルーションでは熱軟化性及び熱可塑性化合物に使うことのできる連続ファイバーが必要です。典型的な三種類の基礎的化合物が高強度ガラスサイズ剤用化学品として使われています。即ち、フィルム形成剤、潤滑剤及び結合剤です。表-4にガラスファイバサイズ剤化学品の各成分の役割別の発展的研究の概要を説明してあります。

5. ファイバー複合材の有用性

5.1 複合材の性質

ガラスファイバー複合材料を適用するに際しては、目標とする機械的、電氣的、熱的、及びその他の諸性質の適切なマトリックスに対し、正しいガラス組成、サイズ剤用化学品、ファイバーの方向、ファイバーの量を用いることが必要です。表-5に一方方向性ファイバーの高強度S-2ガラスファイバー・エポキシの典型的な機械的諸性質が記載されています。弾性係数及び緊張許容度は、設計の入力を行うときに用いられます。ガラス組成とエポキシ中のファイバー量の影響は熱膨張係数として図-6に、

また誘電率として図-7に示されています。S-2ガラスファイバーは誘電率を低下させます。そのためにより良いレーダー透過性が得られるようになります。

5.2 環境に対する耐久性

ガラスファイバー複合材料の耐久性は客先をひきつける特徴の一つです。複合材は金属のように腐蝕せず、従ってメンテナンス費用が安く済みます。しかし、特定の使用例の中で、耐久性や信頼性はしばしば設計を入力するときの条件として要求されます。荷重を受ける構造物においては、材料の長期間にわたる挙動がその構造の設計を完成するために必要です。即ち、その構造がどれだけの荷重を保持できるか、そしてある一定の時間、それに耐え続けることができるかどうかということです。もしそうでないときは、その与えられた時間の間その荷重に耐えるにはその部品の厚さをどれ程にすべきかなどです。

これらの諸問題は、通常テストを数多く行うことにより経験を基にして対処されます。例えばASTM D2992及びASTM D3681は、しばしば複合材のパイプを評価し設計する手順に組み込まれる方法です。これらの方法においては、実際の試作品が作られてシミュレートされた環境下で、その製品に予定されている荷重が掛けられます。テストを促進するために比較的短時間の間に破損することも含む運転条件よりもかなり大きな荷重が掛けられています。この短時間のデータから製品の予想寿命を推定することによって、エンジニアが設計目的に合致した安全運転荷重(ストレス)を予測することができます。この手順は、複合材業界において効果的に30年余りにわたり役立っています。

このプロセスを説明するために、幾つかの一連のテスト結果が報告されています。テストは、ガラスファイバーと熱硬化性樹脂で作ったパルトルードッドロッドを用いて行われました。これらのテストは負荷条件が純粋な

張力であること、また一定の負荷であること以外はASTMに参考として述べられているのと同様のものです。図-8は、エポキシ中のS-2グラスファイバーのPH値13の水酸化カルシウム溶液による有害環境下と、そうでない環境下でのストレスによる破断テストの要約です。参考までですが、複合材の当初の引張り強度は2070MPaでした。S-2グラスファイバー／エポキシのロッドのストレスによる破断時の挙動は、当初の引張り強度の65%を長時間にわたり維持していることを示しています。予想した通り複合材料のストレス破断時の挙動は、周辺環境により影響を受けます。高いPH値の環境下での本材料の長時間ストレスへの対応能力は、おおよそ当初の引張り強度の50%です。2回目のテストシリーズはエポキシ樹脂中のEガラスとS-2ファイバーガラス補強材を高PH環境下にさらしたときのストレス破断能力を比較したものです。図-9にこのデータの要約を示します。

S-2グラスファイバーで補強された複合材のロッドの方が、Eガラスで補強された複合材のロッドよりも高い当初の引張り強度を維持していました。ストレスと環境とが重なったことによる影響は2種類の材料について同様でした。

謝辞

著者はCathy Holton氏の本原稿へのご協力に感謝しております。

References

- [1] D. M. Miller. "Glass Fibers, Engineered Materials Handbook," Vol. 1 – Composites, ASM International. 1987, pp. 45-48.
- [2] G. J. Mohr, and W. P. Rowe, "Fiber Glass," Van Nostrand Reinhold Co., (1978), pp. 207.
- [3] K. L. Lowenstein, "The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers." Elsevier (1973), pp. 28-30.
- [4] R. D. Lowrie, Glass Fibers for High-Strength Composites, in "Modern Composite Materials," Addison-Wesley Publishing Co., (1967), pp. 270-323.
- [5] W. W. Wolf. "The Glass Fiber Industry – The Reason for the Use of Certain Chemical Compositions," Seminar at University of Illinois, Urbana, IL, (Oct. 1982).
- [6] J. C. Watson, and N. Raghupathi, "Glass Fibers, Engineered Materials Handbook. Vol. 1 – Composite," ASM International, (1987). pp. 107-111.
- [7] "Standard Test Method for Density of Glass by Buoyancy, C693, Annual Book of ASTM Standards," American Society for Testing Materials.
- [8] P. K. Gupta, "Examination of the Textile Strength of E-Glass Fiber in the Context of Slow Crack Growth, Fracture Mechanics of Ceramics." Vol. 5, (1983), pp. 291.
- [9] J. R. Hutchins, III and R. W. Harrington, Glass in "Encyclopedia of Chemical Technology," Vol. 10. 2nd Ed., pp. 533-604.
- [10] R. T. Brannan, "Am. Ceram. Soc.," Vol. 36, (1953). pp. 230-231.
- [11] "Standard Test Methods for A-C Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulating Materials," D. 150, "Annual Book of ASTM Standards." American Society for Testing and Materials.
- [12] "Standard Test Methods for D-C Resistance or Conductance of Insulating Materials." D. 257, "Annual Book of ASTM Standards," American Society for Testing and Materials.
- [13] "Standard Test Methods for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies." D. 149, "Annual Book of ASTM Standards," American Society for Testing and Materials.
- [14] "Standard Test Methods for Softening Point of Glass," C. 338, "Annual Book of ASTM Standards," American Society for Testing and Materials.
- [15] "Standard Test Methods for Annealing Point and Strain Point of Glass Fiber Elongation," C. 336, "Annual Book of ASTM Standards," American Society for Testing and Materials.
- [16] "Standard Test Methods for Annealing Point and Strain Point of Glass by Beam Bending," C. 598, "Annual Book of ASTM Standards," American Society for Testing and Materials.
- [17] "Standard Test Methods for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics," D. 696, "Annual Book of ASTM Standards," American Society for Testing and Materials.
- [18] C. Kittel, Phys. Rev., Vol. 75, (1949), pp. 972.
- [19] C. L. Babcock, Symposium on Heat Transfer Phenomena in Glass. J. Am. Ceram. Soc., Vol. 44 (No. 7), (July 1961).
- [20] E. H. Ratcliffe, "Thermal Conductivities of Glass Between -150C and 100C, Glass Technology," Vol. 4 (No. 4), (August 1963).

Table 1 グラスファイバーの組成範囲

	A GLASS	C GLASS	D GLASS	E GLASS ^s	ADVANTEK [®]	ECRGLAS [®]	AR GLASS	R GLASS	S-2 GLASS [®]
Oxide	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	63-72	64-68	72-75	52-56	59-62	54-62	55-75	56-60	64-66
Al ₂ O ₃	0-6	3-5	0-1	12-16	12-15	9-15	0-5	23-26	24-26
B ₂ O ₃	0-6	4-6	21-24	5-10	<0.2		0-8	0-0.3	<0.05
CaO	6-10	11-15	0-1	16-25	20-24	17-25	1-10	8-15	0-0.2
MgO	0-4	2-4		0-5	1-4	0-4		4-7	9.5-10.3
ZnO						2-5			
BaO		0-1						0-0.1	
Li ₂ O							0-1.5		
Na ₂ O + K ₂ O	14-16	7-10	0-4	0-2		0-2	11-21	0-1	<0.3
TiO ₂	0-0.6			0-0.8		0-4	0-12	0-0.25	
ZrO ₂							1-18		
Fe ₂ O ₃	0-0.5	0-0.8	0-0.3	0-0.4		0-0.8	0-5	0-0.5	0-0.1
F ₂	0-0.4			0-1				0-0.1	

§ E-glassは、ASTM D578-99で宇宙船航空用及びpcb用または MIL-G-55636、IPC-EG-14Qとして定められたもの

Table 2 グラスファイバーの性質

物理的性質									
	A GLASS	C GLASS	D GLASS	E GLASS	ADVANTEK [®]	ECRGLAS [®]	AR GLASS	R GLASS	S-2 GLASS [®]
密度 g/cc	2.44	2.52	2.11-2.14	2.55-2.62	2.62	2.68-2.72	2.70	2.54	2.46-2.49
屈折率	1.538	1.533	1.465	1.558	1.561	1.576	1.562	1.546	1.521
軟化点 °C (°F)	705 (1300)	750 (1382)	771 (1420)	846 (1555)	916 (1680)	882 (1619)	773 (1424)	952 (1745)	1056 (1932)
焼鈍点 °C (°F)		588 (1090)	521 (970)	657 (1215)	736 (1010)				816 (1500)
ひずみ点 °C (°F)		522 (1025)	477 (890)	615 (1140)	691 (1276)			736 (1010)	766 (1410)
引張り強度 MPa									
-196°C		5380		5310		5310			8275
23°C	3310	3310	2415	3445		3445	3241	4135	4890
371°C				2620		2165		2930	4445
538°C				1725		1725		2140	2415
ヤング弾性率 GPa									
23°C	68.9	68.9	51.7	72.3	76.6	80.3	73.1	85.5	86.9
538°C				81.3	84.3	81.3			88.9
伸長率 %	4.8	4.8	4.6	4.8	4.6	4.8	4.4	4.8	5.7
比張力 x 10 ₃ m		145	125	145		140		180	220
比引張り弾性率 x 10 ₆ m		3.0	2.7	3.1		3.25		3.7	3.9

Table 3 グラスファイバーの性質

	A GLASS	C GLASS	D GLASS	E GLASS	ADVANTEK [®]	ECRglas [®]	AR GLASS	R GLASS	S-2 GLASS [®]
耐久性 (重量損失%)	CHEMICAL PROPERTIES								
H ₂ O: 24 hr	1.8	1.1	0.7	0.7		0.6	0.7	0.4	0.5
168 hr	4.7	2.9	5.7	0.9		0.7	1.4	0.6	0.7
10% HCl: 24 hr	1.4	4.1	21.6	42	7.2	5.4	2.5	9.5	3.8
168 hr		7.5	21.8	43	11.0	7.7	3.0	10.2	5.1
10% H ₂ SO ₄ : 24 hr	0.4	2.2	18.6	39		6.2	1.3	9.9	4.1
168 hr	2.3	4.9	19.5	42		10.4	5.4	10.9	5.7
10% Na ₂ CO ₃ :24 hr		24	13.6	2.1			1.3	3.0	2.0
168 hr		31	36.3	2.1		1.8	1.5		2.1
	ELECTRICAL PROPERTIES								
誘電率 1MHz	6.2	6.9	3.8	6.6	7.2	6.9	8.1	6.4	5.3
10 GHz			4.0	6.1		7.0			5.2
消失ファクター 1MHz		0.0085	0.0005	0.0025		0.0028		0.0034	0.0020
10 GHz			0.0026	0.0038		0.0031		0.0051	0.0068
体積抵抗率 (Ohm-cm)	1.0E+10			4.02 E+14		3.84 E+14		2.03 E+14	9.05 E+12
表面抵抗率 (Ohms)				4.20 E+15		1.16 E+16		6.74 E+13	8.86 E+12
絶縁耐力 kV/mm (Volts/mil)				10.3-10.6 (262-268)	10.1 (257)	9.84 (250)		10.8 (274)	13 (330)
	THERMAL PROPERTIES								
比熱 J/g°C (BTU/lb°F)									
23°C	0.796 (0.19)	0.787 (0.188)	0.733 (0.176)	0.81 (0.193)				0.732 (0.174)	0.737 (0.176)
200°C		0.90 (0.215)		1.03 (0.247)		0.97 (0.232)		0.983 (0.235)	0.821 (0.196)
熱膨張係数 x 10 ⁻⁷	°C (°F)	°C (°F)	°C (°F)	°C (°F)	°C (°F)	°C (°F)	°C (°F)	°C (°F)	°C (°F)
-30°C ~ 250°C	73 (41)	63 (35)	25 (14)	54 (30)	58 (32.2)	59 (33)	65 (36)	33 (18)	16 (8.9)
熱伝導度 W/m.K			0.8	1.0				1.0	

Table 4 グラスファイバーのサイズ剤化学品の要約

名称	代表的化学品	役割	進化による技術
フィルム形成剤	エポキシ、ポリエステル、PVAC、EVAc、ポリオレフィン、ポリウレタン等	ファイバー保護、きれいなストランド形成、ウェットで溶け込みやすくなる	熱安定性向上、低表面活性、溶解性のコントロール
潤滑剤	イミダソリン、テトラエチレンアミド、鉱物油／アミドエステル、酸アミド、ポリエチレングリコール等	きれいなストランド形成、表面摩擦、ファイバー形成改善	ノンマイグレーション潤滑剤、機能的潤滑剤
エマルジョン形成剤	ポリオキシエチレン ノニルフェニル エーテル、EO/PO コンデンゼート ポリオキシエチレン オクチルフェニル グリコール エーテル等	フィルム形成剤や潤滑油に水との親和性を良くする	一時的なエマルジョン形成剤機能的なエマルジョン形成剤
結合剤	シラン、チタネート、ジルコネート	樹脂とガラスの結合	熱安定性の改良 新しいマトリックスとの接着
その他の添加剤			
・静電気防止剤	金属ハロゲン化合物、QUATアンモニア等	伝導度を良くする	低吸湿性のもの
・PHのコントロール剤	有機酸／塩基	PHをコントロールする	結合安定性の改良
・凝集剤	パテント文献参照	表面凝集	トランスクリスタリティの促進

Table 5 9 μm集合ロービングによる単一方向S-2グラスファイバーエポキシ複合材の性質

		<i>Msi</i>	<i>GPa</i>
弾性率			
縦方向弾性率 E_L	D3039	7.7 - 8.5	53 - 59
横方向弾性率 E_T	D3039	2.3 - 2.9	16 - 20
軸剪断弾性率 E_{LT}	D3518	0.9 - 1.3	6 - 9
ポアソン比 U_{LT}	D3039	0.26 - 0.28	0.26 - 0.28
強度に関する性質		<i>ksi</i>	<i>MPa</i>
縦方向引張り	D3039	230 - 319	1540 - 2200
縦方向圧縮	D3410	100 - 232	690 - 1600
横方向引張り	D3039	6 - 12	41 - 82
横方向圧縮	D3410	16 - 12	110 - 200
表面剪断	D3518	9 - 24	62 - 165
積層間剪断	D2344	8 - 15	55 - 103
縦方向たわみ	D790	180 - 250	1240 - 1720
縦方向ベアリング	D953	68 - 80	469 - 552
究極的ひずみ			
縦方向引張り	D3039	2.7 - 3.8 %	
縦方向圧縮	D3410	1.1 - 1.8 %	
横方向引張り	D3039	0.25 - 0.50 %	
横方向圧縮	D3410	1.1 - 2.0 %	
平面剪断	D3518	1.6 - 2.5 %	
物理的性質			
ファイバー／体積(%)	D2734	57 - 63 %	57 - 63 %
密度	D792	lb/in^3 0.071 - 0.73	g/cm^3 1.96 - 2.02

Figure 1 連続式グラスファイバー製造プロセス

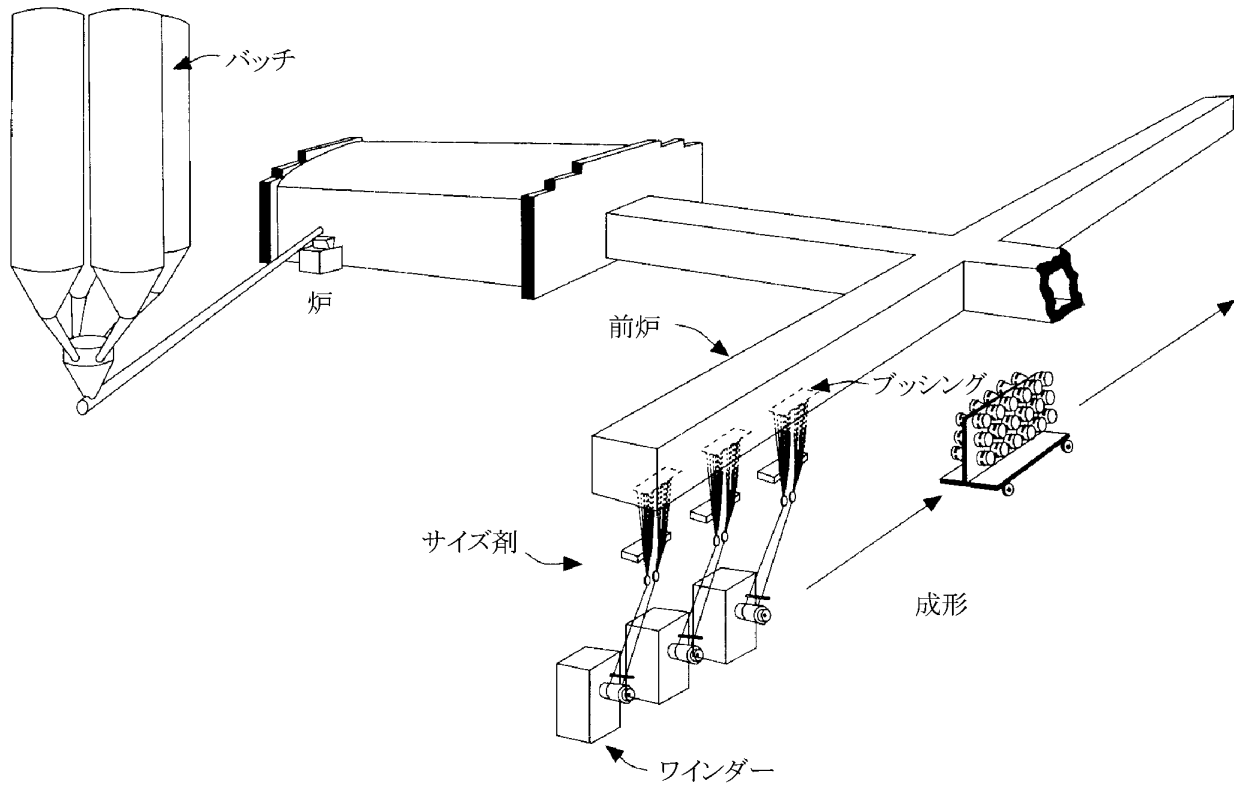


Figure 2 温度とファイバー強度

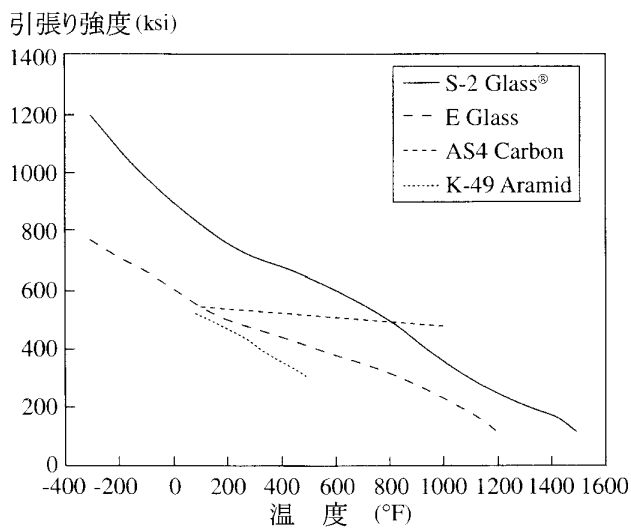


Figure 3 PH環境下のファイバー重量保持

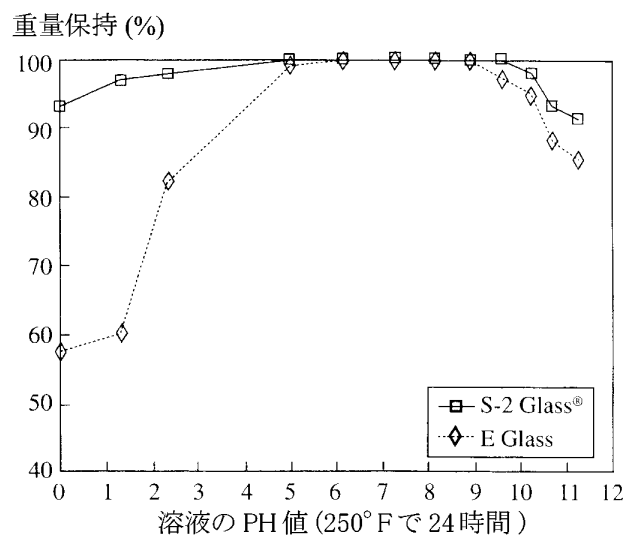


Figure 4 PH値とファイバー強度の関係

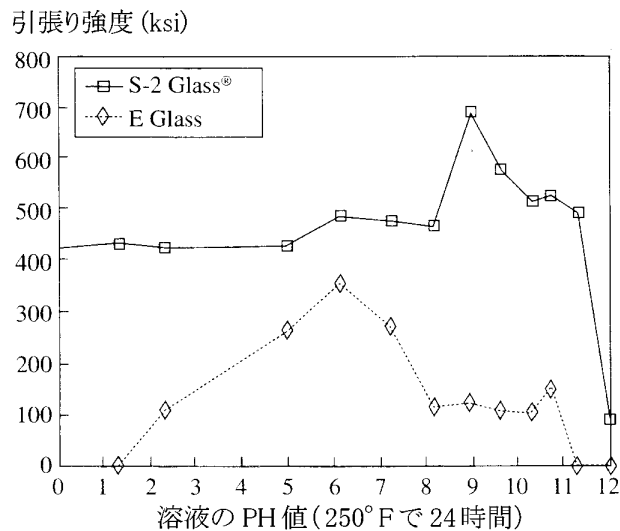


Figure 6 エポキシ中の体積と熱膨張の関係

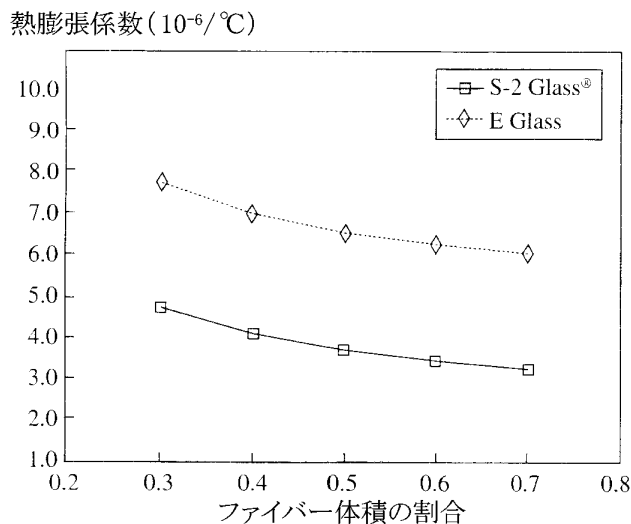


Figure 8 エポキシ中の環境ストレス破断

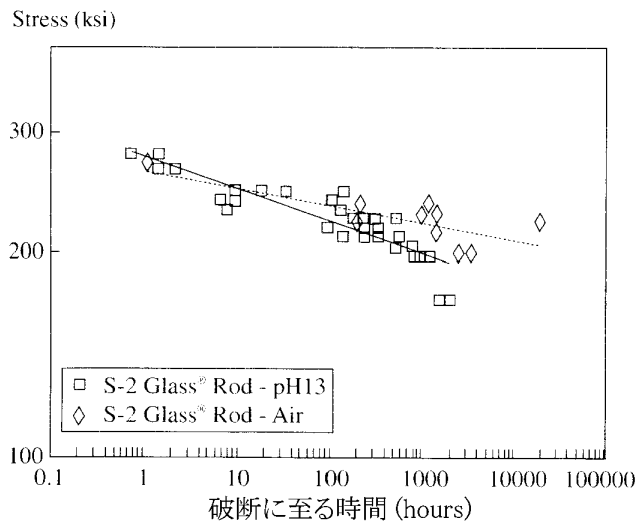


Figure 5 温度とガラス粘度の関係

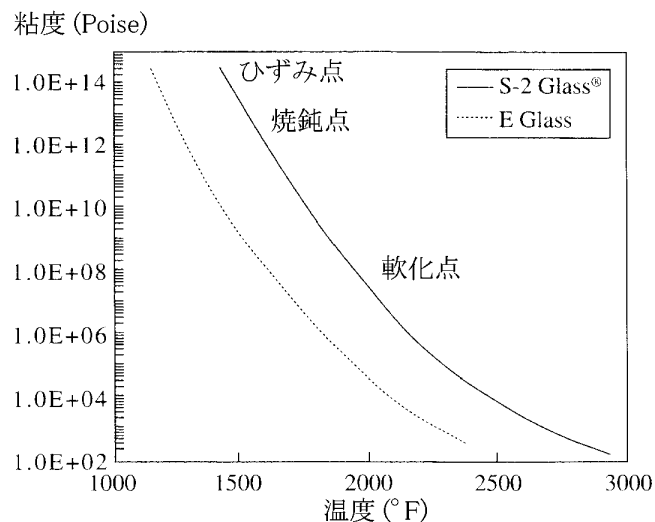


Figure 7 エポキシ中のファイバー体積と誘電率の関係

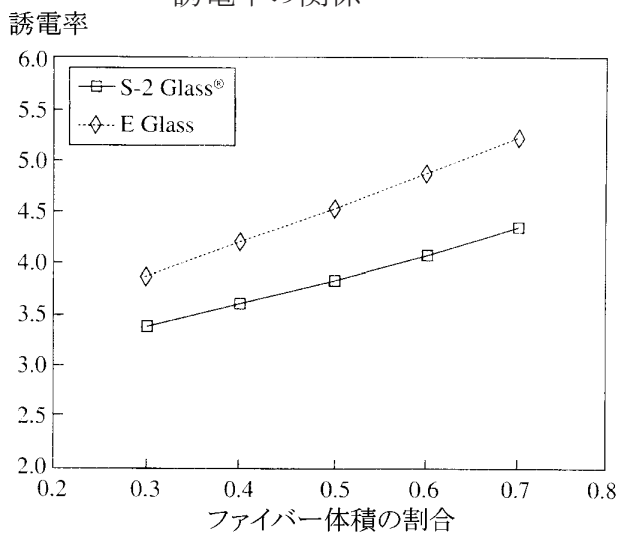
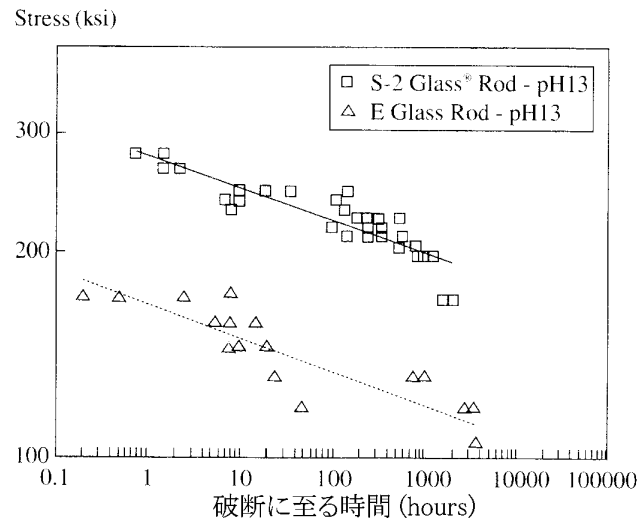


Figure 9 エポキシ中の環境ストレス破断



WORLD HEADQUARTERS/AMERICAS

AGY

2558 WAGENER ROAD

AIKEN, SOUTH CAROLINA, USA 29801

PHONE: 888.434.0945 (toll free)

803.643.1501

FAX: 803.643.1180

EUROPEAN OFFICE

AGY – EUROPE

163 BOULEVARD DES ETATS UNIS

69008 LYON, FRANCE

PHONE: +33.4.72.78.1777

FAX: +33.4.72.78.1780

責任負担義務の否認

本データは補強材選定の為のガイドとして提供するものです。本カタログに含まれる情報は実際の研究室データ及びフィールドテストの体験に基づくものです。私共はこの情報が信頼出来るものであると考えていますが、これがユーザーでのプロセスに適合できると保証するものではなく、又その使用或いは、実施により生ずる責任負担義務を引受けるものではありません。ユーザーの方は此処に説明されている製品の受入れに当って、採用を決める前に、この製品の適合性を決定する為の、テストを行う責任がある立場にあることに同意するものとします。ユーザーは、この材料又は、他のどの様な補強材を使う場合でも、自分自身の商業用コンパウンドの性質を決定することが肝要です。

結果に影響を及ぼす数多くの要素がある為、我々は明示したものにせよ、暗示したものにせよ、この材料に市場性があるとか、或る特定の目的に適しているとかも含めて、いかなる形にせよ保証を与えるものではありません。このデータシート上の記述内容は事実の陳述又は保証又はいかなるパテントの侵害又はいかなる法律、安全基準又は保険法規の違背への誘因として解釈されるべきではありません。

注:この日本語ホームページに記載の内容は顧客様からAGY社の英語版カタログの良きご理解が得られることを願って作成したものです。製品の性能等に関する記述は英語版が原本です。

For more information, visit our Web site at www.agy.com

S-2 Glass® is a registered trademark of AGY.

ECRGlas® and Advantex® are registered trademarks of Owens Corning.

Pub. No. LIT-2001-011 R2 (03/03) Printed in USA, March 2003 Copyright © 2003 AGY