

ガラスの歴史と SDGs への貢献

History of Glass and Its Contribution to the SDGs
Key-words : Property, Function, Application

山崎 博樹

Hiroki YAMAZAKI (Nippon Electric Glass Co., Ltd.)

1. 有史以前のガラスから汎用ガラス

ガラスは人工的に作られた材料の中では最も古い部類の材料の一つとされており、ガラスが作られ始めたのは紀元前 2～3000 年頃のメソポタミアやエジプトなどの地域と言われている。製法発明のきっかけには諸説あり、海岸で焚火をした際にその熱でアルカリとシリカが反応してできたという説、陶器の焼成時に釉薬が溶け落ちて固まったという説¹⁾、青銅の精錬の際に耐火物などの反応でできたという説などがある。当時の人々は、ガラス表面の光沢や硬さ、長期に渡って色や表面状態が変化しない特長に着目し、ガラスを貴重な装飾品として用いはじめた。事実、数々の遺跡などから発掘されたガラス物品は割れてさえいなければ、数千年前の当時の状態をほぼそのまま維持している。さらに液体や食べ物と接しても表面が変化せず、内容物の汚染もなく、表面が平滑で汚れが綺麗に落とせるなどの点も重宝され、食器や容器としての盃や壺が作られるようになった。

一方で、ガラスの製造には高温を必要とし、ガラスが製造され始めた当初は現在ほど高い温度で溶融することが難しかった。当時のガラスはナトリウム、カルシウム、ケイ素を主成分とするソーダ石灰ガラスや鉛とケイ素を主成分とする鉛ガラスが一般的であったが、当時の溶融温度では泡や不均質を十分に除去できるまで粘度を下げるのが難しく、現在のように透明なガラスを得ることはできなかったようである。また、ガラスが軟化している状態では高い浸食性を示すことから、初期の成形方法は粘土や砂など耐火性の材料を芯や型として利用し、溶融したガラスを耐火物の表面で固めた後に耐火物を取り除き、必要に応じて耐火物と反応した面を磨いて作る方法が用いられた(図 1)²⁾。これらの製法は手間や時間がかかるために当時のガラス製品は大変貴重なものであった。

紀元前 1 世紀頃になって古代シリアで吹きガラスの

技法が確立されるとガラス容器の大量生産が可能となり、ガラスは一般にも広く普及していった³⁾。吹きガラスの技法とは“吹き竿”と呼ばれる金属パイプの先端に溶けたガラスを巻き付け、息を吹き込んで膨らませ、その内圧とガラスの表面張力、重力、遠心力などとのつり合いを利用して形状を整える成形方法である。

その後、年月を重ねるとともに徐々に高い温度が得られるようになり、溶融時に泡や脈理などの欠陥を低減させることによって徐々に透明なガラスを作ることができるようになっていった。透明なガラス容器は中身の量、色などの状態が容易に観察できる点が重宝された。陶磁器の釉薬もガラスであることを考えると、味や風味が重視される食べ物のかかなりの割合は表面がガラスの食器で配膳されると言っても過言ではなく、50 年物のワインが安心して美味しく飲めるのもガラス瓶で保管されているからだと言える。

透明なガラスを見て人々はガラスを建物の窓に用いることを考えた。ガラス窓の利用によって雨や風を遮断しながら光を部屋の中に取り入れることができるようになり、人々の暮らしの質は大きく向上することになる。しかし、当時主流であった吹きガラスの技法は球形や円筒に近い形状を作ることには適しているが、平らで厚みが均一であり、できるだけ大きな面積を持つガラス板を得ることは難しかった。7 世紀頃、シリアで生み出されたクラウン法は遠心力を用いて平らなガラス板を得る成形法であり⁴⁾、現在でもベネチアのサンマルコ寺院などで見ることができ、現在のよう窓の外の景色をゆがみなく眺めることは難しい。18 世紀頃にイギリスで開発された円筒法はクラウン法よりも薄く、平らで大きな板ガラスを作ることが可能にした(図 2)⁴⁾。円筒法で製造された窓ガラスは現在でも古い寺院などに使われているものを見つけることができる。1950 年代の末頃にイギリスで開発されたフロート法は溶けた金属スズ上にガラスを広げて成形する画期的な製法で現在の主流となっている⁵⁾。



図 1 有脚杯 エジプト 紀元前 1350 年頃²⁾

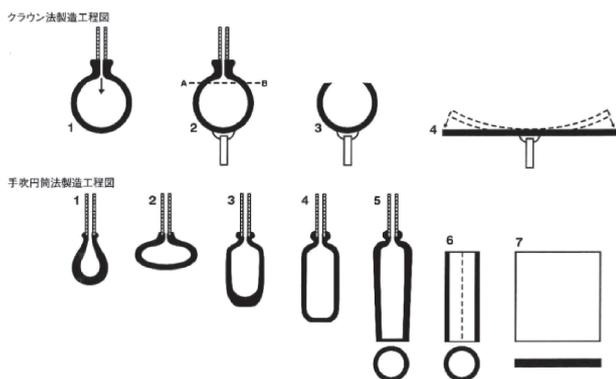


図2 クラウン法と円筒法⁴⁾



図3 医薬用管ガラスと成形品

2. 機能材料としてのガラス

2.1 光学ガラス

「透明」な材料となる理由をなるべくシンプルに述べると、「光の反射，吸収，散乱が十分に小さく，材料内を光が直進できること」となる⁶⁾。特に，一般的なガラスの主成分である二酸化ケイ素の光の吸収域が人間の可視波長域になかったことが人類にとって極めて幸運であった。実際，波長 150 nm 以下の紫外域や波長 5 μm 以上の赤外域では一般的なガラスは透明ではない。ガラスの密度は空気よりも高く，光がガラス中を進む速さは空気よりも遅くなる。これにより光が屈折し，その屈折を利用して発明されたのがレンズである。

ガラスのレンズは紀元前三世紀頃にはインドやバビロニア，エジプト，ローマ，中国などで作られており，凸レンズを用いて太陽の光を集めて火をおこすために用いられていたといわれている。13世紀後半になって，当時世界で最も透明度の高いガラスを作ることでできたイタリアのベネチアでガラスのレンズを用いた眼鏡が発明された。その後 16 世紀から 17 世紀にかけて，各種のレンズを用いた望遠鏡や顕微鏡が発明され，天文学や生物学に大きな進展をもたらした。レンズの機能を左右する屈折率や分散などの光学特性を各種の用途に適合させるため，ホウ素や鉛などの成分を用いてさまざまな組成のガラスが作られるようになった。

一方，ガラスの組成を変化させたり，特定の元素を添加したりすることで，特定の波長の光を透過させたり，吸収させたりすることができる。紫外線を吸収することで内容物の変質することを抑制するビール瓶などのアンバー色の容器，人が感知できない赤外線をカットし，撮像素子の感度補正を行うデジタルカメラ用の光学フィルターなど，枚挙にいとまがない。また，酸化鉛は 80 wt% 程度までガラス中に含有させることが

でき，可視光を透過するが，人体に有害な X 線やガンマ線を吸収するため，レントゲン室や原子力発電所の観察窓などに用いられている⁷⁾。

2.2 医薬，理化学用ガラス

ケイ素と並んでガラスの重要な成分であるホウ素はガラスの用途をさらに広げることに重要な役割を担った。13世紀前半のアラビアでホウ砂を用いたガラスの記録があり，17世紀にはホウ砂を用いたガラスが人工宝石に用いられた。さらに，19世紀後半からは特殊な光学特性によりレンズにも用いられている。

酸化ホウ素はガラス中で酸化ケイ素と同様にガラスの網目構造を形成する一方で，融点が 480 $^{\circ}\text{C}$ と二酸化ケイ素の 1710 $^{\circ}\text{C}$ と比較して低いことから，二酸化ケイ素を主成分とするガラスに酸化ホウ素を添加したホウケイ酸ガラスは量産可能な粘度で高い化学的耐久性と低い熱膨張係数を持つ。熱膨張係数の低下により急激な温度変化による破壊を生じにくくなり，ナトリウムなどのアルカリ金属元素を伴って網目構造を形成する組成範囲では水溶液に対する化学的耐久性が大きく向上する。これらの特性を利用して，20世紀の初頭からホウケイ酸ガラスが医薬品の容器や理化学用機器に用いられるようになった(図3)⁸⁾。これにより，非常に繊細で特性の変化しやすい医薬品を長期に安心して保管できるようになり，反応性の高い薬品を用いた処理，分析，測定が正確に行えるようになった。さらにホウケイ酸ガラスは家庭用としても高い耐熱衝撃性により調理器具や哺乳瓶としても広く使われている。特に現在世界中で需要がひっ迫しているコロナウイルスワクチンなど極低温で保管する必要のある薬剤にはガラスの容器が必須とされている。

2.3 電子，電気機器用ガラス

ガラスは同じく透明な特長を持つ樹脂と比較して極めて高い気密性を持ち，ガラス中の気体の拡散係数は樹脂よりも数桁以上小さい。また，ガラスは常温では

塑性変形をほとんど生じず、圧縮応力に対して高い強度を有することから高い真空度を維持することができる。さらにガラスは常温では高い電気絶縁性を持つ。ガラスの構造は主に共有結合からなり、原子間での電子対の共有をとまなう強い化学結合が網目状の骨格を形成しており、電子、イオン、分子などの移動度が極めて低い。これらの長を併せ持つガラスは電気、電子を利用した数々の発明を可能にし、科学技術の進化にはなくてはならないものになっていった。

1857年にガイスラーが発明したガイスラー管は減圧したガラス管に電極を設け、高い電圧をかけることにより放電させるもので、電子やX線の発見につながり、後にネオン管や蛍光灯の基となった。1870年代の後半には英国のスワンや米国のエジソンが相次いで白熱電球の開発に成功した。ガラスは高温のフィラメントが発する光を透過し、高温でも燃え尽きないよう、真空に近い環境を長期間維持する役割を担った。エジソンの白熱電球が基となり1904年にフレミングが2極真空管を、1906年にフォレストが3極真空管を発明した。電子流の制御により増幅、検波、整流、発振などが可能となり電子回路の発展に大きく寄与した。また、真空管の発明により数々の無線機、ラジオ、オーディオアンプなどが開発されていった。並行して、1897年にはブラウンが陰極線管を発明、1927年には高柳健次郎がブラウン管を使った受像装置の開発に成功し、ブラウン管は2000年頃までの長きに亘りテレビ画面の主流を占めた⁹⁾。

これら各種の用途に合わせて、さまざまな種類のガラスが開発されていった。鉛ガラスは比較的低温で熱加工できるにもかかわらず高い電気絶縁性を持つことから電極部に用いられた。アルミノシリケートガラスは粘度が高く高温に耐えることから、高輝度を得るための電球バルブに用いられた。バリウムストロンチウムガラスはX線を遮へいし、電子線が照射されても長期間画面の着色を生じないことからブラウン管のパネルガラスに用いられた。

その後、ディスプレイの主流となるカラー液晶や有機ELディスプレイの基板には各画素のスイッチとなるシリコンTFT (Thin Film Transistor) 素子の特性を損なわないようにアルカリ金属を含まないアルミノシリケートガラスが用いられた。基板ガラスにはディスプレイパネルの高精細化やコストダウンのために高い寸法精度や大きなサイズ、軽量化のために薄さが求められ、その製造には極めて高い技術が必要とされた。その成形にはフロート法とほぼ同時期に米国で開発されたオーバーフローダウンドローフュージョン法が

用いられた。その後フロート法による液晶ディスプレイ基板の成形も行われるようになったが、フロート法では研磨が必要とされるのに対し、オーバーフローダウンドローフュージョン法では製品となる面が空気以外に触れず、自由表面で形成されるため極めて滑らかな表面を持ち¹⁰⁾、無研磨で用いることができる。ガラスを平坦な形状に成形することを阻害していた表面張力が、最終的に極めて平滑な面を得るために重要な役割を担った点は極めて興味深い。

電子、電気機器で気密な空間を得るために、特に重要となるのが金属導線とガラスの封止技術である。ガラスはガラス転移点以上の温度で徐々に粘度が低下し、酸化物に対して高い反応性を持つ。金属とガラスを封止するには金属表面に酸化膜を形成させ、粘度の低下したガラスと接触した界面で元素の相互拡散を生じさせる。その後温度が低下するとガラスは再び固化し、接触した酸化層と強固に接合した状態が得られる。電球に用いるガラスバルブではガラスの局所を加熱、軟化させて電極材料と強固に接合させ、気密状態を得る。

一方、粉末ガラスはガラスを粉砕して粒径を調整したもので、有機材料中に分散させることでスラリーやペースト状にして形状に自由度を与え、被接合物に塗布する(図4)。熱処理により有機物の除去とガラスの軟化流動を生じさせて封着、被覆、結合などに用いる。ガラスと金属の接着は紀元前から行われていた。11世紀ころからイタリアやフランスで七宝工芸として装飾品が作られ、19世紀の初めころに鉄の表面をガラスで被覆する珐瑯加工が行われるようになった。珐瑯はガラスの化学的耐久性、表面平滑性、熱的安定性、電気絶縁性と金属の機械的強度、放熱性を併せ持つ材料として現在も鍋、浴槽、台所などに使われている¹¹⁾。また、浸食性の高い薬品を供給する化学プラントの金属パイプの内面のライニングにもガラスの被覆が利用されている。

粉末ガラスによる封着は気密性に優れ、高い信頼性



図4 さまざまな粉末ガラス

を必要とするさまざまな機器に用いられている。電子材料として用いる場合にはガラスの粘度を低下させても、できるだけ高い化学的耐久性や電気絶縁性を維持するため、ガラスの成分として亜鉛、ホウ素、鉛などが用いられてきた。鉛が環境負荷物質であることから、削減への取り組みが進められ、ビスマス、リン、バナジウム、スズ、テルル、銀などを用いたガラスが開発されている。

一般的に粘度の低いガラスほど熱膨張係数が高くなる傾向があり、シリカガラスの歪点が約 1100 °C、熱膨張係数が約 $5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 、なのに対し、ソーダ石灰ガラスの歪点は約 500 °C、熱膨張係数は約 $90 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 、約 400 °C で封着に用いられる鉛ガラスの歪点は約 200 °C、熱膨張係数は約 $140 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ である。このように、幅広い粘度や熱膨張係数を持つ材料が設計できる点もガラスの大きな特徴である。

低い粘度を持つガラスの高い熱膨張係数を下げるために、コーディエライトやユークリプタイトなどの低膨張セラミックスを粉末にして混合することで被接合物と熱膨張係数を整合させた、複合粉末ガラス材料が多く用いられている。このように用途に応じてデザインされたガラス材料は半導体の p-n 接合部の保護、IC セラミックスパッケージの気密封止、コンプレッサーに電気を供給する気密端子の封着などに用いられている。また、粉末ガラスをセラミックス粉末と混合し、スラリー状にしてシート成形した材料は低温焼成多層基板 (Low Temperature Cofired Ceramics: LTCC) として電子回路の小型化に大きく寄与し、携帯電話などには欠かせない材料となっている¹²⁾。

このように電子、電気機器の安定した性能と高い信頼性を過酷な環境下で長期に維持するためにさまざまなガラスがあらゆる用途に広く用いられており、さらには素粒子ニュートリノを観測するためのスーパーカミオカンデに用いられる光電子増倍管などの最先端の研究にいたるまで、ガラスの優れた特性が重要な役割を担っている。

2.4 ガラス繊維

ガラスを繊維に成形する技術は紀元前からあったが、長らく置物、玩具、装飾などに用いられる程度であった。ガラス繊維が工業的に生産されるようになったのは 20 世紀に入ってからで、1917 年にドイツで断熱用の石綿の代替品として用いられたのが最初とされている。1930 年頃から米国を始めとして各国で工業的な生産が本格的に始まり、日本でも 1930 年代の後半に生産が開始された。1940 年代に入ってからガラス繊維と樹脂を複合化した材料が開発され始めた。ガラス

繊維の初期は断熱材や絶縁材料の用途が主であったが、直径数 μm から数十 μm の直径を持つガラスの糸を連続的に成形したガラス長繊維は成形直後に表面を集束剤により被覆され、樹脂と複合化させることで樹脂の弾性、耐熱性、強度を大幅に向上させる材料としてさまざまな用途に用いられるようになった。このガラス繊維で強化された樹脂材料は、GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) と呼ばれる。

ガラス繊維の形態もさまざまに工夫され、糸で作った織物 (クロス) や不織布に樹脂を含浸させた材料は成形性に優れ、プリント配線基板、浴槽、浄化槽などのタンクや船舶のボディなどに用いられる。また、長繊維を数 mm の長さに切断し、熱可塑性樹脂に混合して射出成型した部品は樹脂単体の部品と比較して大幅に高い強度や耐熱性を持つ。これらを金属部品の代替として用いることで自動車の軽量化が可能となり、燃費向上に大きく寄与している¹³⁾。これらのガラス繊維には高い化学的耐久性が要求されるため、アルカリ金属酸化物の含有率を 1% 未満に抑えたアルミノシリケートガラスが用いられている。

一方、1973 年頃には英国でガラス繊維を用いてコンクリートを強化する技術が開発された。一般的なガラスはコンクリートのアルカリで浸食されるため、この用途には酸化ジルコニウムを 16 wt% 以上含有させた耐アルカリ性ガラス繊維が用いられる。鉄筋を用いる場合と比較して錆による汚れや割れの懸念がなく、複雑な形状でデザイン性を重視した建造物に用いられる。また、軽量で施工が容易であるため、トンネル天井の崩落を防ぐ用途などにも用いられている¹⁴⁾。

2.5 強化ガラス

強化ガラスの発見は 1660 年頃にさかのぼり、「ルパート王子の雫」や「オランダの涙」の名で知られている¹⁵⁾。当時は強化のメカニズムが理解されておらず、土産物として扱われていたようである。1874 年にフランスのフランソワ・バステイが高温のガラスを油の加熱浴で急冷することによってガラスを強化する方法を最初に開発した。1877 年にはドイツのフリードリヒ・ジーメンスがガラスを冷たい型でプレスすることによりバステイよりも高強度な強化ガラスを製造した。1935 年にはルドルフ・セイデンにより最初の強化ガラスのプロセス特許が出願された。

強化ガラスの原理はガラスの表面にあらかじめ圧縮応力層を形成することで表面の傷先端にかかる引張応力を相殺し、圧縮応力を上回る引張応力が生じないと破壊を生じないようにするものである。

バステイらにより発明された強化ガラスは物理強化

ガラスと呼ばれる。ガラスを軟化点近くの温度まで上げ、その後表面を均一に内部よりも早く冷やすことにより表面が固まった後に内部が冷却され、内部の体積収縮により表面に圧縮応力層を形成させる¹⁶⁾。この強化ガラスは比較的サイズや厚みの大きなガラスに適用され、建物や自動車の窓に用いられている。

一方、リチウムやナトリウムなどのアルカリ金属イオンを含むガラスをガラス転移点以下の温度で硝酸カリウムなどの熔融塩中で熱処理しガラス中のアルカリ金属イオンを熔融塩中のイオン半径の大きなアルカリイオンで置き換えることで表面に圧縮応力層を形成させる方法を化学強化という¹⁷⁾。比較的サイズや厚みの小さなガラスに適用され、腕時計の風防ガラスなどに用いられてきた。現在、ほとんどのスマートフォンのカバーガラスに化学強化ガラスが用いられている。

2.6 結晶化ガラス

フランスのレオミュールは18世紀にガラス瓶を砂に埋め熱処理することでガラス表面から結晶が配向して析出し陶磁器調のガラスが得られることを見出した。この材料は結晶のへき開により強度が低下し実用化には至らなかったが、この研究は後の結晶化ガラスの開発のきっかけとなった。結晶化ガラスとはガラス中に所望の種類、量、大きさの結晶を均一に析出させたもので、析出させる結晶の設計によりガラスの強度、熱膨張係数、耐熱性、外観などを大きく変化させることができる材料である。

1950年に米国のStookeyは貴金属を結晶核とすることによりガラス中に均一な結晶を析出させることに成功した。その後、Stookeyは1956年に酸化チタンを結晶核として用い、 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ や $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 結晶を析出させることにより、耐熱衝撃性や強度を大幅に向上させた材料を発明し、これらの結晶化ガラスはミサイルのノーズコーンや耐熱食器として製品化された。その後、相次いでリチウムアルミノシリケート系ガラスを用いたゼロ膨張結晶化ガラスが開発され、調理器具や大型天体望遠鏡の反射鏡などの製品が開発されていった。現在ではストーブの前面窓、電磁調理器のトッププレート、防火窓、超精密測定器の支持ベースなどに用いられている¹⁸⁾。

また、紫外線照射により選択的に結晶化させて、エッチングにより複雑な形状を加工する感光性結晶化ガラス、雲母を析出させて機械加工を可能にした快削性結晶化ガラスなどガラスでは成しえないユニークな特性を持つ結晶化ガラスが開発されている。

一方、日本では1974年に核形成剤を用いずにガラスの表面を結晶核として結晶化する「集積法」が開発

された。集積法とは溶けたガラスを水碎し、1~5 mmに分級したザラメ状のガラスを耐火物の枠中で熱処理する方法である。ガラス粒同士が融着した界面から内部に向かって結晶が成長することで、マクロには結晶がランダムに析出し、高い強度と独特の外観が得られる。集積法では型枠とガラス量を調整することにより、厚みやサイズの自由度が高い板を得ることができる。この材料は天然石材の2倍以上の強度や高い耐候性を持つことから、ビルや地下鉄の駅の壁材として用いられている¹⁹⁾。1991年には小久保正らにより集積法を応用して、粉末状のガラス中に水酸アパタイトとウォラストナイトを析出させ、生体親和性と高強度を併せ持つ人工骨材料が開発された²⁰⁾。この材料は2000年までに6万人の患者の手術に用いられている。また、封着時に結晶を析出させることで耐熱性を向上させることのできる結晶性粉末ガラスは高い耐熱性と信頼性が必要とされる燃料電池のシール材などに用いられている。

2.7 シリカガラス

シリカガラスは最もシンプルな組成の実用ガラスで、 SiO_2 のみからなる。熔融には2000℃以上の高温を必要とし、1800年代前半に酸水素炎の研究開発によりシリカガラスを溶かせる温度が得られるようになった。1800年代後半から1900年代初頭にかけて、アーク放電や抵抗加熱などの電気的熱源も利用されるようになり、徐々に純度の高いシリカガラスが得られるようになっていった。シリカガラスはその高い歪点と低い熱膨張係数から耐熱性、耐熱衝撃性の高い材料として重宝され、炉心管、治具、耐熱基板として用いられる。特に半導体用Si単結晶作製の熔融用つまみにはシリカガラスが必須とされている。その後、室温では液体で蒸留ができる四塩化ケイ素(SiCl_4)の気体から化学気相蒸着(CVD: Chemical Vapor Deposition)による製造方法が開発されたことによりシリカガラス中の不純物量が大きく低減し、均質性も向上したことから紫外線域や近赤外線域の透過特性に優れた材料が得られるようになり、レンズやプリズムなどの光学部品用材料として、また、半導体や液晶製造用フォトマスクとしても使われるようになった。さらに、光ファイバ用の材料として高い透過率と低い損失を目指して、より不純物量や欠陥の少ない製法の開発競争が盛んに行われるようになる。

光ファイバ通信の研究は17世紀のスネルによる屈折の研究を端緒とし、フレネル、バビネ、ベル、デバイなど名だたる科学者の研究による要素技術が蓄積され、1958年にナリンドー・シン・カパニーによるコ

アとクラッドによって構造される石英ガラスファイバの考案により光通信の基礎が確立された。1966年のチャールズ・カオの論文は光ファイバの実用化に大きく貢献したとしてノーベル賞の受賞につながった。しかし、1964年に西澤潤一により申請された自己収束型光ファイバの特許がカオに先行して光ファイバの概念を示していたことは日本の関係者にとって非常に残念な事実として語り継がれている。その後も材料、製造方法、伝送方法などの研究、開発、テストなどが精力的に進められ、1980年代後半から普及し始めた光通信は、いまや世界中の大容量通信を支えている。

3. ガラスと SDGs

ここまでガラス製品開発の歴史について機能、用途、製法に着目して駆け足で述べてきた。ガラスは他の材料では得られない優れた特性や機能により『産業と技術革新の基盤を作る』うえでなくてはならない材料である。ガラスが今後も人類にとって必要不可欠な材料であり続けるためには『持続可能な開発目標 (SDGs)』についても強く認識してゆく必要がある。

世界で最も多く作られているソーダ石灰ガラスの原料は地表から最も潤沢に得ることのできる上位8位以内の成分から構成されている。また、ガラスはリユース、リサイクルの実績も豊富で、ビール瓶や一升瓶は50年以上前からリユースの仕組みがある。また、同一の材料であれば、それを無限にリサイクル原料として使用することができ、品種にもよるが最大90%のリサイクル率で生産されている。また、ガラスは環境親和性が高く、万が一環境に放出されても環境汚染や生態系への影響が極めて小さい環境対応型材料である。

一方でガラスの溶融、成形には高温を必要とし、多くのエネルギーを消費することから、製品の製造に必要なエネルギーや温室効果ガス排出量の削減が課題とされてきた。ガラスメーカー各社はこれらの課題に対して、数々のプロセス技術の開発によりエネルギー効率の改善を進め、エネルギー消費量を大きく削減することに加え、エネルギー源を石炭、重油から天然ガス、電気などに転換することによりCO₂の排出量削減を進めている。また、ガラス自体の軽量化も進められており、例えば液晶ディスプレイ用の基板ガラスの厚みは1.1 mmからスタートしたが、徐々に薄板化を進め、現在では0.4~0.5 mmになっている。さらに、将来のフレキシブルディスプレイやロール・ツー・ロールプロセスに対応するために厚みが0.2 mm以下の超薄板ガラスの製造にも成功している。現在、0.05~0.1 mmの超薄板ガラスを用いたデバイスの開発が進められて

おり(図5)²¹⁾、容器に対しても破損解析や傷防止コーティングなどの対策などにより、積極的な軽量化が進められている。

電子、電気機器のエネルギー消費削減の観点からは、白熱電球や蛍光灯に代わるLED照明において、自動車のヘッドライトや屋外照明など高輝度を必要とする用途でハイパワー青色LED光の波長を変換し、自由な色調を得られるガラスを用いた波長変換材料²²⁾が使われている。住宅やオフィスでは窓ガラスを通過する熱量が冷暖房効率低下の大きな原因の一つとされてきたが、可視光を透過する窓の機能を維持したまま、熱線反射コーティング (Low-E: Low Emissivity)、複層ガラス、真空ペアガラスなどの技術を用いることにより、放射や伝導による熱の移動を大きく低減させ、冷暖房エネルギーの削減に貢献している。

発電分野では日本でも重要な課題となっている原子力発電所から出る高レベル放射性廃棄物の処理においても、ガラスの高い化学的耐久性を利用し、廃棄物をガラス化して固化させることにより長期間安定して貯蔵する検討が進められている。化石燃料に代わる再生可能エネルギーの創出にもガラスは重要な役割を担っており、太陽電池のカバーガラスを始めとして、風力発電ブレードの強度向上に用いられるガラス繊維、太陽熱発電用の集光ミラーや熱媒体を通すための管ガラスなどにも用いられている。

現在開発中の創エネ技術としては、バイオマスリアクターとしての藻類の繁殖容器、また、図6に示すよ



図5 超薄板ガラス



図6 オール酸化物 Na 全固体二次電池

うなエネルギー貯蔵のための全固体 Na 二次電池の電極として機能する結晶化ガラス²³⁾や水素の貯蔵や運搬のためのガラスビーズの開発なども進められている。また、世界の人口増加に伴い安全で清浄な水の確保は大きな課題となりつつあり、ガラスの化学的安定性と成形の自由度を利用して、ガラスの発泡体や多孔体を用いたフィルターや触媒担持用材料として高効率で安定した反応を維持するための材料が開発されている。

我々の生活をより豊かで安全なものにするために、新規の医療技術を可能にする機能性ガラス材料、世界中に瞬時に大量の情報を伝達し、保管するための光通信デバイスやストレージ用ガラス、仮想現実や複合現実を可能にする数々の高品質なレンズやプリズム用ガラス、よりハイパワーなレーザー技術を可能とするレーザー増幅用ガラスや磁力により光の偏光状態を回転させることのできる光アイソレーター用ガラス²⁴⁾、動物や人間の体温が発する赤外線透過するガラスをレンズとして用いることにより暗くても道路上の人や動物が見えるようにするためのガラスレンズ²⁵⁾など、さまざまな新規のガラスが開発されている。ガラスの材料設計者は、まだ明らかになっていないガラスの無限の可能性を見出し、実用化につなげることで『持続可能な開発目標』の達成を目指して現在も精力的に開発を続けている。

ガラスは太古の昔から人々の暮らしの中で大切な役割を担い、人々の暮らしを豊かにしてきた。人類は何よりもガラスそのものの美しさとその変幻自在な形の自由度に魅了され、現在も数多くのガラス造形や工芸作家が匠の技で我々の生活に潤いを与え続けている。ガラスはこれからも人類に趣とともに進化や発展をもたらす役割を担い続けることを確信している。

文 献

- 1) 作花済夫, とことんやさしいガラスの本, 日刊工業新聞社 (2004) pp.10-13.
- 2) 友部 直, ガラス大百科, ぎょうせい (1993) p.22.
- 3) 島田 守, 古代吹きガラスの実験考古学的研究, 文化財学報, 26, 29-62 (2008-03).

- 4) 日本の板ガラス, 板硝子協会 (2014) pp.8-12.
- 5) A. Pilkington, The float glass process, *Proceedings of Royal Society of London Series A*, 314, 1-25 (1969).
- 6) HOYA 編, ガラスあれこれ, 東洋経済新報社 (1986) p.2.
- 7) 松井 篤, 放射線遮蔽用鉛ガラス. マテリアルステージ, 11[7], 51-55 (2011-10).
- 8) 山根正之ほか, ガラス工学ハンドブック 第2版, (1999).
- 9) 山崎映一, ブラウン管開発 110 年の歴史, 映像情報メディア学会誌, 62[10], 1560-1564 (2008).
- 10) S. M. Dockerty, USP 3, Sheet forming apparatus, (1967) p.338 p.696.
- 11) ほうろう技術ガイドブック, (1996) pp.160-170.
- 12) 馬屋原芳夫, LTCC に使用されるガラス材料, セラミックス, 45[5], 363-366 (2010-05-01A).
- 13) 石野光洋, エンジニアプラスチック用ガラス繊維, 繊維と工業, 64[10], 2008.
- 14) 五十嵐心一, ガラス繊維補強コンクリートの微視的構造と耐久性, 土木学会論文報告集, 451, 215-224 (1992).
- 15) 大谷悦久, オランダの涙について, 筑波大学附属駒場中・高等学校研究報告第 34 集, (1995), pp.275-279
- 16) 高津 学, 熱強化ガラス内の残留応力について, 窯業協会誌, 80[6], 246-250 (1972).
- 17) 矢野哲司, ガラスのイオン交換 - 最近の研究報告から -, NEW GLASS, 30[114], 11-16 (2015).
- 18) 二宮正幸, 低膨張結晶化ガラスの新局面への展開, NEW GLASS, 20[3], 22-28 (2005).
- 19) 二宮正幸, 結晶化ガラスによるガラス物性の革新 (II) 「建材医用結晶化ガラス」, NEW GLASS, 11[1], 40-46 (1996).
- 20) T. Kokubo et al., *Inter. J. Appl., Glass Sci.*, 1-10, (2006).
- 21) 藤原克利, 超薄板ガラス, NEW GLASS, 24[2], 90-93 (2009).
- 22) 新藤和義, 特許第 5257854. 発光色変換部材, (2013).
- 23) H. Yamauchi et al., Enhanced rate capabilities in a glass-ceramic-derived sodium all-solid-state battery, *Scientific Reports*, 10, Article number: 9453, (2020).
- 24) 佐藤史雄, 磁気光学ガラスを用いた光アイソレーターの開発, NEW GLASS, 34[127], 40-42 (2019).
- 25) 佐藤史雄, 赤外線透過ガラスの開発, 日本セラミックス協会 2019 年年会 講演予稿集

筆者紹介

山崎 博樹 (やまざき ひろき)

1984 年東北大学工学部化学工学科卒業, 日本電気硝子(株)入社, ガラス, 結晶化ガラスの組成開発に従事. 2016-18 技術本部長, 現 取締役常務執行役員, 2014- 同志社大学理工学部嘱託講師, 2020-21 セラ協ガラス部会長, 2021- 電気硝子工業会副会長

[連絡先] 〒520-8639 大津市晴嵐二丁目 7-1 日本電気硝子株式会社

E-mail: hyamazaki@neg.co.jp

