AGC 株式会社
―板ガラスリサイクルの現状と課題―

Current Status and Issues of Flat Glass Recycling

Key-words：Circular economy, Climate change, Glass cullet, Contamination

塙　優
Yu HANAWA（AGC Inc.）

1. はじめに

ガラスは対象となる製品によって，そのリサイクル率（特に水平リサイクル*1 率）に大きな差がある．たとえばガラスびんは，1995 年の容器包装リサイクル法制定以降，積極的にリサイクルが推進され，水平リサイクル率は 57.6%（2021 年）に上っている[1]．一方，板ガラス（以下，本稿では建築用や自動車用のソーダライム板ガラスを示す）については，最終製品から回収されるガラスの水平リサイクルは，現状世界的にもほとんど行われておらず，リサイクルするためのインフラ構築を促進すべきとする意見もみられる[2]．なぜリサイクルが進んでいないのかについては後段で述べるが，2015 年に採択されたパリ協定や，同年の国連サミットにて掲げられた SDGs*2 を契機とし，直近の原燃料費の高騰もあいまって，リサイクルへの機運が急速に高まってきている．

本稿では，板ガラスリサイクルの価値や，現状と課題について整理し，リサイクルを加速するために，どのような観点で取り組むべきか考察する．また，本報は工藤の既報[3] を基に最新の情報を加えて再構成したものである．

2. 板ガラスリサイクルの価値

建築用や自動車用，ガラスびん，グラスウール等に使用されている最も一般的なソーダライムガラスは非常に環境にやさしい材料といえる．ソーダライムガラスの構成元素は，多少順序の違いはあるが，クラーク数*3 の上位 8 位と一致している．また，耐候性が高く，太陽光や雨水による劣化はほとんど起こらない．そのため，材料として見た時のガラスの寿命は，家や自動車，各種デバイス等の最終製品の寿命よりもはるかに長い．一方，工業製品として見た場合，ガラスの製品寿命の主要因となっているのは脆性に起因する割れで

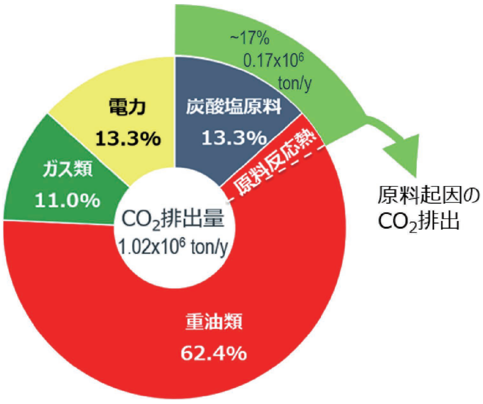


図 1　板ガラスの溶解工程で排出される CO_2（Scope1＋2）の発生源毎の比率（板硝子協会 2021 年度データより）

ある．しかし，ガラスは仮に割れたとしても，熱を加えて溶かすだけで，劣化することなく同等の性能が何度でも得られるため，非常にリサイクル性に優れている．ここで，リサイクルとリユースのどちらがより環境にやさしいか*4 という議論がなされることがあるが，評価の切り口や，国・地域の違いによっても変わりうることに注意が必要であり，一意に決めつけるのではなく，ライフサイクル全体を通じて，最も効果的な方法を模索することが肝要である．

次に，板ガラスリサイクルの価値について考える．リサイクルの価値は大きく分けて二点あり，一点目は GHG*5 排出削減である．**図 1** に，板ガラスの溶解工程で排出される CO_2（Scope1＋2）*6 を発生源毎の比率で表したデータを示す．その多くは，ガラスを溶解するための燃料起因であるが，ガラスの主要な原料であるドロマイトや石灰石，ソーダ灰といった炭酸塩がガラス化する際に発生する CO_2 も 10%以上を占めており，カレット比率*7 を増やすことで，炭酸塩由来の CO_2 と，原料がガラス化するために必要な熱量に相当する燃料由来の CO_2 を削減することが可能である．さらに，バージン原料の使用量削減により，Scope3（原料調達）の GHG 排出も削減可能である．現状，バージン原料の多くは海外から輸入しているため，輸送時の CO_2 排出量を大幅に削減可能である．また，ソーダ灰は製造方法によって CO_2 排出原単位に大きな差があり，国内では，塩を原料に製造されるソーダ灰は，天然鉱物から製造されるソーダ灰よりも 50 倍以上大きい*8．燃料由来の CO_2 排出削減に対しては，水素やアンモニアといった燃焼時に CO_2 を排出しないガスを用いた燃焼方法や，再生可能エネルギーの利用に関するさまざまな取り組みが行われている[4),5]．二点目は，資源循環および自然資本の保全である．カレット比率が増えれば，資源循環に直結するだけでなく，バー

© 日本セラミックス協会

ジン原料の使用量を減らすことができるため，天然資源の採掘を低減し，自然資本の保全につながる．

以上のことは以前から指摘されている[3]が，リサイクルが進まなかった背景には，経済的な課題が存在している．それは今もなお続いているが，気候変動への問題意識や循環型経済（サーキュラーエコノミー）といった近年の潮流によって，リサイクルそのものが大きな価値としての側面を有するようになりつつある．

3. 板ガラスリサイクルの現状と課題

図2に板ガラス製品のサプライチェーンの概略を示す．当社を含む板ガラスメーカーは，サプライヤから原料を調達し製造しているが，製造過程で発生した不良品や加工ロスは，ほとんどが回収され，水平リサイクルされている．製造された板ガラスは所定のサイズにカットされ，一次製品，二次製品へと加工された後，最終製品へと実装される．各工程で排出される不良品や加工ロスは，一部水平リサイクルされているものもあるが，サプライチェーンの下流に行くほど，回収・解体・選別の難易度が高くなるため，カスケードリサイクルや，埋立に回る割合が高くなる傾向にある．たとえば建築用途では，Low-Eコーティング[*9]や，複層ガラス化，サッシへの組み込み等が行われ，自動車用途では，セラミックプリント[*10]や防曇用熱線の焼き付け，合わせガラス化等が行われる．板ガラス製品は，このようにさまざまな付属品が周囲に付与されており，ガラスを回収しようとすると，これらの付属品や解体工程等に由来するさまざまな異物が混入してしまう．最終製品から板ガラスへと水平リサイクルが行われていない最大の理由は，これら異物の存在であり，ひとたび板ガラスの製造工程に入ると，製造上のトラブルにつながるリスクが非常に高くなる．現状，水平リサイクルできないカレットは，主にグラスウールや路盤材といった異物への許容量が比較的大きい用途にカスケードリサイクルされている．

異物が板ガラス製造に対して，どのような問題を引き起こすかを説明するために，最も主流の板ガラス製造法であるフロート法の概要（図3）について述べる．まず，ガラスの元となる原料が溶解槽へ投入，溶解された後，清澄槽をとおり，フロートバスにて板状へと成型される．フロートバスには溶融した金属スズが満たされており，スズの表層にガラス融液を流し出すことで，ガラスは水の上に浮いた油のような状態となる．これにより研磨なしで平滑性の高い板ガラスを得ることができる．異物の多くは，溶解槽に入った際にガラスと反応することでさまざまな欠点を発生させる．板硝子協会の定める回収カレットの受入れ品質規格と合わせてまとめたものを表1に示す．

<有機物>合わせガラスの中間膜や，複層ガラスの封止材等から混入する．これらは，窯の中で還元剤として作用するため，ガラスの酸化還元状態を変え，色味の変化をもたらす．またガラス中に含まれる硫黄成分を還元することで，アンバーと呼ばれるビール瓶のような茶色を呈することもある．

<セラミックス>砂利やセメント，陶磁器等は，主に建物の解体時やカレットの保管中に混入すると考えられる．セラミックスは，総じて溶解しづらいものが多く，大きな破片が混入すると，未融物や脈理[*11]の発生原因となる．

<鉄系金属>鉄筋等の建設資材や自動車のボディ等から混入する．有機物と同様に還元作用があり，同様の着色原因となるほか，鉄がガラス中に溶解することで，緑色や青色の着色を増大する原因となる．

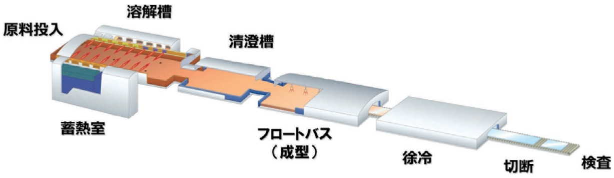


図3　フロート法の概略図

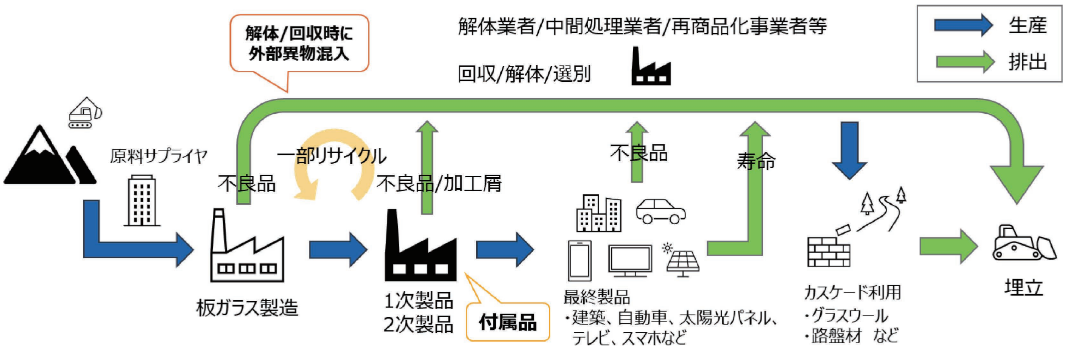


図2　板ガラス製品のサプライチェーン（概略）

表 1　異物の種類と製造上のリスク，および回収カレットの受け入れ品質規格（板硝子協会）

異物の種類	製造上のリスク	サイズと許容濃度	
有機物 — フィルム、紙、ゴム、木片など	・着色	10mm未満 20ppm未満	10mm以上 無いこと
セラミックス — 砂利、セメント、陶磁器など	・未融物 ・脈理	0.5mm未満 20ppm未満	0.5mm以上 無いこと
鉄系金属 — ステンレス除く	・着色	1mm未満 10ppm未満	1mm以上 無いこと
非鉄系金属 — アルミニウム, ステンレス, 銀, 銅など	・着色 ・シリコン系合金 ・硫化ニッケル ・炉材の損傷	無いこと	
組成の異なるガラス — 結晶化ガラス、耐熱ガラス、着色ガラス、セラミックスプリント（黒セラなど）、環境規制成分を含むガラスなど	・未融物 ・脈理 ・着色 ・環境、衛生上の懸念	原則、混入不可	

＜非鉄系金属＞さまざまな種類があり，ガラスへの作用も一律ではないが，いずれも最も忌避される物質であり，代表的なものについて説明する．アルミニウムはサッシや複層ガラスのスペーサー等から混入するが，高温でガラスと接触すると，強力な還元反応によってガラスの主成分である二酸化珪素を還元し，シリコン系の合金を生成し，それ自体が欠点となるだけでなく，徐冷工程での板割れ原因となる．ステンレスはさまざまな場所で使用されており，構造物や破砕工程等から混入する．ステンレスの多くはニッケルを含有し，溶解槽に入ると，硫化ニッケルという粒状欠点を生成することがある．これは風冷強化ガラスの自然破損の原因[6]となるため，製品歩留まりへの影響だけではなく，安全面でも非常にリスクが大きい．銀や銅は，防曇用の熱線や電気配線から混入する可能性がある．溶解槽で金属液滴のまま底に沈むと，メタルドリリングと呼ばれる特異的な炉材の浸食が生じる原因となる．

＜組成の異なるガラス＞非常に多種多様であるが，代表的なものについて説明する．耐火ガラスに用いられる結晶化ガラスや，耐熱容器等に用いられるホウ珪酸ガラスは，一般的なソーダライムガラスに比べて溶解温度における粘性が高く，セラミックスと類似のリスクがある．自動車ガラスの黒色のセラミックプリントや，着色ガラスには，コバルトやクロムなど少量でも強い着色を示す成分が含まれており，大量の混入は避けなければならない．その他，古いガラス製品には，清澄剤[*12]としてヒ素が含まれる場合や，クリスタルガラスやブラウン管ガラスには鉛が含まれる場合があり，環境や労働安全衛生上問題となる恐れがある．

以上のように，板ガラスを水平リサイクルするためには，いかに異物の少ない高品質なカレットを分別回収できるかが非常に重要なポイントとなる．

4. 板ガラスリサイクルを加速するには

板ガラスリサイクルを加速するためには，技術的な課題に加え，カレットを適切に回収するための仕組み作りが必要不可欠である．ガラスびんのように，容器包装リサイクル法を根拠とするシステムの確立ができればよいが，最終製品の分類によって適合するリサイクル法も異なり[*13]，現状はいずれの法規制についてもガラスは対象となっていない．しかし，使用済自動車に関しては，経産省，環境省主導の下，資源回収インセンティブ制度が現在検討されており，対象品目として，ガラスが加わっている[7]．これは近年では非常に大きな動きであり，板ガラスの水平リサイクル率向上に向けて大きな弾みとなることが期待できる．

次に，技術課題の解決策について三つの方向性から考える．一つ目は，異物が混入しないようにできるだけきれいに自動車や建築物等を解体した上で，それでも混入した異物や付着物等を選別・除去する方法である．解体技術については，開発余地は多く残されている．たとえば建築物の解体では，一つ一つガラスを外すにはコストがかかるため，建屋ごと破壊する場合が多く，ガラスが個別に回収できない状態となっている．また，自動車の解体では，フロントガラスは合わせガラスになっており，叩いて割ってもガラスの破片同士が粘着するため，効率的な解体技術が求められている．異物の選別・除去技術については，すでに磁選機や風力選別機，光学式選別機などが普及しているが，さらなる機器性能の向上が望まれる．また，化学的に結合している付着物については，切断やサンドブラスト等による物理的除去や，薬液を用いた化学的除去等，最も効率の良い手法の開発が必要である．二つ目は，操業条件や製造プロセスの革新により，異物の許容濃度を高めることである．これは個社の競争力に直結するため，情報が外に出ることはないと思われるが，各社

日々改善や開発に取り組まれていることであろう．三つ目は，製品設計そのものを，リサイクル前提のものに刷新することである．これは最終製品メーカーが中心となって行うことではあるが，材料の観点を取り入れ，製品共通の規格へと落とし込むことで，非常に大きな効果が期待できる．将来を見据えれば，今後このような取り組みが増えていくことは想像に難くない．

また，リサイクルを行う上では，物流の観点も非常に重要である．板ガラス製品は専用台車を用いてトラック輸送されるが，積載効率は単板ガラスで50〜80％，複層ガラスで15〜45％と低い[8]．異物の混入を避けるために，回収したガラスを破砕せず板のままで運んでしまうと，物流面での効率が低下してしまうため，物流方法を含め最適化の余地がある．

5. さいごに

これまで述べてきたように，板ガラスリサイクルを加速し，サーキュラーエコノミーを実現するには，非常に多くの課題がある．技術課題の解決とともに，行政を含む社内外のステークホルダーと連携して仕組みを構築していくことが不可欠である．本報では紙面の都合により詳しく述べていないが，ガラス製品の生産量と廃棄量は必ずしも一定ではなく，太陽光発電パネルやワインのびんのような海外からの輸入量が多い製品もある．そのようなガラスの利活用も含め，国や地域によって状況は大きく異なっている．そのため全体最適化が非常に重要であり，ライフサイクル全体を通じたマテリアルフローの最適化や環境影響評価を行いながら，経済合理性も加味した上で，最適な方法を模索していくことが必要であろう．

謝　辞　本研究を進めるにあたってお世話になった方々に深く感謝致します．

注

＊1　びん to びんのように同じ製品にリサイクルされることを水平リサイクル，それに対して品質の劣化（主としてエントロピーの増大）を伴うリサイクルをカスケードリサイクルと呼ぶ．

＊2　Sustainable Development Goals の略．持続可能な開発目標と訳される．

＊3　地球上の地表付近に存在する元素の割合を質量パーセント濃度で表したもの．

＊4　ガラスびん3R促進協議会の試算によれば，500 ml びんをリサイクルした場合，22％の GHG 排出量削減となるが，リユースを5回行うと65％の削減となる．しかし，リユースの場合は，洗浄工程で大量の水や薬品を使うことから GHG 排出以外の観点での環境影響も考慮すべきである．

＊5　Greenhouse Gas の略．温室効果ガスと訳され，代表的なものとして CO_2 や CH_4 などが挙げられる．本稿で登場する CO_2 排出量は，CO_2 以外の温室効果ガスを繰り入れた状態を意味し，GHG 排出量と同義として取扱うこととする．

＊6　事業活動における CO_2 排出量の算定に当たり，Scope1 は，事業者自らによる直接排出，Scope2 は，他社から供給された電気，熱・蒸気の使用に伴う間接排出，Scope3 は，Scope1，2 以外の間接排出（事業者の活動に関連する他社の排出）と定められており15カテゴリから構成される．

＊7　破砕した状態のガラス，特にリサイクル原料として使われるものをカレットと呼ぶ．また，バージン原料（ガラスの元となる珪砂やソーダ灰といった原料）とカレットを混ぜてガラスを溶解する際の全体に対するカレットの割合をカレット比率という．

＊8　LCI データベース IDEA Version 3.2
国立研究開発法人　産業技術総合研究所　安全科学研究部門 IDEA ラボを基に筆者試算．日本ソーダ工業会によれば，わが国のソーダ灰製造は，ほとんどが塩水の電気分解を用いた電解ソーダ灰であり，電力由来の CO_2 排出が大きいと考えられる．

＊9　ガラスの断熱性能を高める（放射伝熱を抑制する）ために，表面に銀などの金属膜を極薄くコーティングしたものを Low-E（Low Emissivity）ガラスを呼ぶ．

＊10　セラミックプリントは，自動車ガラスでは黒セラと呼ばれ，フロントガラスやリヤガラスの周囲に焼き付けられた黒色部のことであり，シール材の保護（太陽光による劣化を抑制）や，配線層の目隠し，防眩などの機能がある．

＊11　ガラス中に屈折率の異なる領域（主に組成の不均質に由来）が混じり合うことで，透視像が歪んで見える現象または領域．

＊12　ガラスの溶解工程で生成する泡を除去するために，泡を膨らませる作用を持つ添加剤のこと．古くはヒ素化合物が用いられたが，近年はより安全性の高い硫酸塩や塩化物等が用いられる．

＊13　建設リサイクル法，自動車リサイクル法，家電リサイクル法などが該当する．

文　献

1)　ガラスびん3R促進協議会，"びん to びん率・リサイクル率の推移（2021）"，https://www.glass-3r.jp/data/pdf/data_01c.pdf?20221118

2)　*Nature*, **599**, 7–8（2021）.

3)　工藤　透，"板ガラスのリサイクル"，*Reports Res. Asahi Glass Co., Ltd.*, **58**, 7–15（2008）.

4)　"AGC の参画するアンモニア燃焼技術開発プロジェクトが NEDO 委託事業へ採択"，AGC News Release,（2022），https://www.agc.com/news/pdf/20220113.pdf

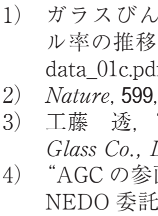
5)　"SAINT-GOBAIN ACHIEVES THE FIRST ZERO-CARBON PRODUCTION OF FLAT GLASS IN THE WORLD", SAINT-GOBAIN PRESS RELEASE,（2022），https://www.saint-gobain.com/sites/saint-gobain.com/files/media/document/20220516_First%20zero-carbon%20production%20of%20flat%20glass_VA.pdf

6)　酒井千尋，"風冷強化ガラスと自然破損"，*NEW GLASS*, **23**[3], 25–31（2008）.

7)　"使用済自動車に係る資源回収インセンティブガイドライン（中間取りまとめ）"，経済産業省，環境省，（令和4年）．https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/haikibutsu_recycle/jidosha_wg/pdf/057_s01_00.pdf

8)　"エコガラスの LCA 報告書"，板硝子協会，（平成26年）．

筆 者 紹 介



塙　優（はなわ　ゆう）
2009年大阪大学工学研究科マテリアル生産科学専攻博士前期課程修了，旭硝子(株)(現 AGC) 入社後．シリケート系ガラスの組成開発，プロセス開発，研究企画等に従事．2020年より，材料融合研究所　無機材料部　ガラス・セラミックス材料チーム．
［連絡先］　〒230-0045　神奈川県横浜市鶴見区末広町1-1　AGC 株式会社　横浜テクニカルセンター
E-mail：yu.hanawa@agc.com