

MMRC
DISCUSSION PAPER SERIES

No. 237

板ガラス成形技術の変遷
—フロート法の台頭と技術の棲み分け—

東京大学大学院経済学研究科 博士課程
大神正道

2008年10月



東京大学ものづくり経営研究センター

Manufacturing Management Research Center (MMRC)

ディスカッション・ペーパー・シリーズは未定稿を議論を目的として公開しているものである。引用・複写の際には著者の了解を得られたい。

<http://merc.e.u-tokyo.ac.jp/mmrc/dp/index.html>

Transition of glass forming technologies
-Emergence of Float process and compartmentalization of technologies-

Masamichi OGAMI

Abstract:

This paper, focusing on glass forming method, reviews the seven manufacturing processes for sheet glass and plate glass in between early 1900s and 1981. The purpose of the review is, by classifying the processes into four types, to explore how they evolve, compete, segregate or vanish. Furthermore, this paper discusses why the float process had been segregated as a state-of-the-art method by 1981 and what factors cause to compartmentalization.

Keywords:

float process, glass forming, compartmentalization

板ガラス成形技術の変遷

—フロート法の台頭と技術の棲み分け—

大神正道

東京大学大学院経済学研究科 博士課程

E-mail: ogamix9@ybb.ne.jp

要約：本稿は、板ガラス成形技術に焦点を当て、1900年初頭から1981年までに登場する7つの成形法を概説する。次にそれらを4つの系統に分け、1900年初頭から1981年にかけてそれぞれの技術がどのように台頭し、そして競合し、棲み分け、あるいは駆逐されたかを明らかにする。最後に技術の棲み分けが生じる要因に関してディスカッションを行う。

キーワード：板ガラス 成形技術 フロート法 棲み分け

1. はじめに

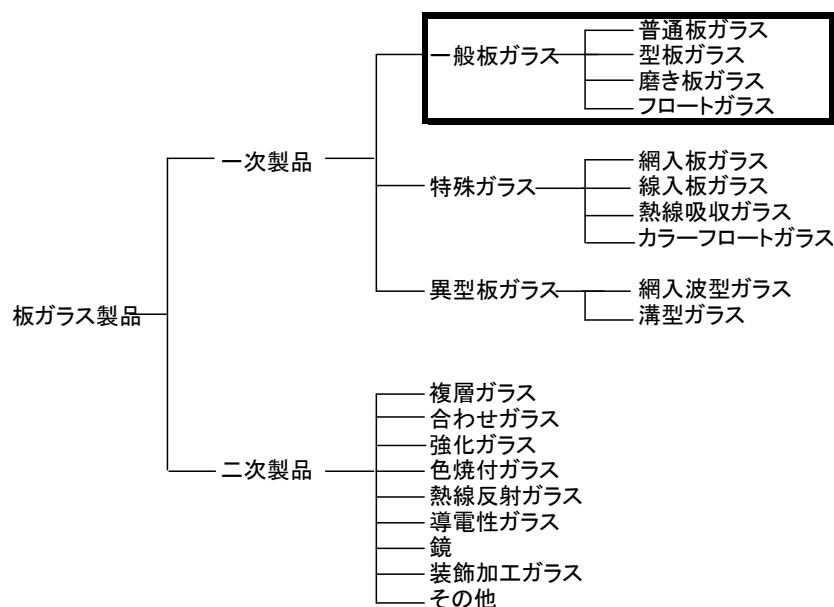
本稿は1900年初頭から1981年までの板ガラス成形技術の変遷に関して論じる。板ガラス製品の種類はさまざまあるが、本稿では、普通板ガラス¹、型板ガラス、磨き板ガラス、フロートガラスなどの一次製品に分類される板ガラス成形技術に焦点を当て、1900年初頭のラバース式機械吹円筒法からフロート法が台頭し、技術の棲み分けが生じるまでの変遷を論じる。

普通板ガラスや型板ガラス、磨き板ガラス、フロートガラスなどは板ガラス製品の中でも一次製品とよばれ、主に建築用ガラスとして用いられる。また、同じ建築用ガラスの一種でも組み立てが必要な複層ガラスや、自動車用ガラスである強化ガラスや合わせガラスの素板ガラスとしても用いられる。このように一次製品を組み立て、強化などの加工処理をしたものは二次製品として分類される。板ガラス製品のさまざまな種類に関しては図1に示す通り

¹ 並板ガラスともよばれる。現在の日本では普通板ガラスは存在していない。フロート法が登場した当初は図表のような製品分類であったが、1970年代後半以降、フロートガラスが全盛となってから普通板ガラスは徐々に市場から駆逐されることとなる。

である²。

図 1. 板ガラス製品の種類 (1975 年)



作花他 (1975) p.21を参照して作成

にあるガラス製品を成形する技術が本稿の対象

磨き板ガラスの素板ガラスを成形するための技術は
網入板ガラスと線入板ガラスの成形にも用いられる

板ガラスの製造における原料から製品に至るまでの変化は物理科学的にきわめて複雑である。しかし、実際の製造工程そのものの概念は単純である。

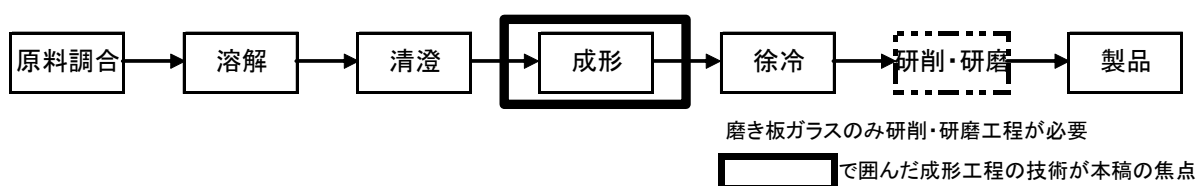
目標のガラス組成に相応する原料調合比が決定されれば、原料を粉末または粒状で混合し、ある一定の割合でカレット (cullet)³とよばれる屑ガラスを配合して溶解する。さらに温度

² 板ガラスは、その組成上、ソーダ石灰系ガラスとして分類される。ガラス製品のなかでは最も一般的なものである。

³ ガラスが製品となるまでの製造過程で、破損、変形したものや、不用部分として切りとられたもの等が屑ガラスとして出る。これをカレットとよぶ。工場ではカレットを必ず一定の割合で原料に混合して、再び熔融工程に戻して使用する。ガラス屑を再利用するという経済的理由だけではなく、技術的理由からもカレットの利用が必要となる。原料調合物が熔融窯に投入される際、一時的に多量に発生するガスの噴出に伴って原料粉末が飛散する。カレットを加えた原料では、この時すでに軟化して粘着性をもったカレットが原料粉末を捕らえて、この原料の飛散を防止する。また新しい耐火物の内壁を熔融カレットであらかじめ濡らしておく、その浸食を抑制する効果がある。さらにカレット添加によって、ガラスの熔融温度は低められ、熔融速度は早くなり均質度もよび機械強度も高くなる。このような効果を期待して、カレットは通常 30~40%程度の添加が行われる。工場内だけで生ずるカレットが、この所要量に達しない場合には外部からカレットを購入して補充される。購入カレットはできる限り同じ品種のカレットを選んで購入し、混入している異物、特に鉄屑を厳格に選別除去し適

を上げて原料の溶解を完全にするとともに、気泡を放出させ均質化させる。これは清澄工程とよばれ、ガラス内部に気泡が残ったまま製品化されると不良品になるので必要となる。続いて、成形作業に適した粘度にするために、作業温度まで冷却する過程を経て成形作業にかかる。成形したガラスに熱的歪が残らないように徐冷操作にかける。板ガラスの場合、溶けたガラスを板状にすることが成形作業であり、徐冷後、一定のサイズに切断し、検査した後、製品として出荷する（図 2）。ただし、フロート法以外で磨き板ガラスを製造するためには研削・研磨工程が必要となる。

図 2. 板ガラスの製造工程



次節では、板ガラス成形工程の技術に焦点を当て、大量生産方式のはじまりと言われるラバース式、自動平板引上法、フロート法、ロールアウト成形法を概説し、4つの系統に分類する。

2. 板ガラス成形技術の概説と系統化

本節では 1900 年初頭から 1981 年までの板ガラス成形技術に関して概説し、それらを 4 つの系統に分類する。

概説する技術は、板ガラス大量生産方式のはじまりと言われるラバース式機械吹円筒法、自動平板引上法であるフルコール平板引上法やコルバーン式平板法、ピッツバーグ式平板引上法、アサヒ式平板引上法、そして、磨き板素ガラスの素板ガラスや網入板ガラスなどを製造するためのロールアウト成形法、そして現在主流となっているフロート法の 7 つである⁴。それぞれの技術が登場した時期は表 1 の通りである。その表に登場する順にしたがってそれぞれの技術を概説した後、板ガラス成形技術の系統化を行う。

当な大きさに破碎した後、原料に混合しなければならない。(成瀬, 1958)

⁴ 本稿は板ガラス成形技術の変遷に焦点を当てている。そのため熔融窯や耐火物に関する変遷を含む網羅的な説明は森 (2007)を参照されたい。また、技術経営の視点からは Utterback (1994)を参照されたい。

表 1. 年表

1900年代はじめ	ラバース式機械吹円筒法
1910年代	フルコール式平板引上法
1916年	コルバーン式平板法
1920年代はじめ	ロールアウト成形法
1925年	ピッツバーグ式平板引上法
1959年	フロート法の工業化
1971年	アサヒ式平板引上法

2.1. ラバース式機械吹円筒法 (Cylinder Drawn Process)

ラバース式機械吹円筒法 (以下、ラバース式) とは、板ガラス製造において初めての大量生産方式と言われるもので、1900 年初頭⁵にアメリカ人のラバース (Lubbers) と American Window Glass Co.が完成させた技術である。

ラバース式では、まず、ガラス素地をガラスタンク窯から大型るつぼに移す。次に、この大型るつぼの中に吹口金具を押し込み、圧搾空気を吹き込みながら吹口を機械的に徐々に引き上げることで円筒状のガラスを作る。そして、円筒状のガラスの長手方向と短手方向の両端を切断し、円筒にする。それから、その円筒を縦に割り、再加熱することで板状にする。最後に、在庫寸法の窓ガラスに切断され、板ガラスは完成となる。

この方法では最大 10 メートルを超える長さで 75 センチを上回る径の円筒ができる⁶。既存技術の一つであるベルギー式手吹き円筒法の場合、その名の通り、人が吹く⁷ため最大長さ 150 センチ、直径 30 センチの円筒しか作れなかった。このように、ラバース式は既存の方法よりも作業員の手吹作業の負担を減らし、長さ約 7 倍、直径約 2 倍の円筒を作ることができた。この事実より、板ガラスを大量生産するための最初の技術と言われることになった。

このようにラバース式は大規模な生産に寄与したが、間欠的方式で能率が悪く品質も良くなかった。自動平板引上法であるフルコール式平板引上法やコルバーン式平板引上法などが開発され、普及するにあたって駆逐されることになる。

日本では旭硝子株式会社 (以下、旭硝子) が 1914 年に牧山工場 (現・北九州工場) にこの方式を導入し創成期の基盤を作ることになったが、フルコール式平板引上法の導入によって 1933 年に生産が終了した。

⁵ 1902 年にラバースが完成させたという記述 (森, 2007) や 1903 年にラバースと American Window Glass Co.が開発したという記述 (作花他, 1975)、1903 年に American Window Glass Co が開発したという記述 (Pilkington, 1969)がある。

⁶ 最大長さ 44 フィート (約 13 メートル)、直径 3 フィート (約 1 メートル) までの円筒が作られたという記述もある (作花他, 1975)。

⁷ より正確には、吹きながら、左右に振ることで円筒状のガラスを作った。

2.2. フルコール式平板引上法 (Foulcault process)

フルコール式平板引上法 (以下、フルコール法) は、ベルギー人のフルコール (E. Fourcault) が発明し、1910 年代に開発が進められた垂直式の自動引上平板法である⁸。溶解窯から直接、しかも連続的に板状のガラスを引き上げる方法で、一度円筒ガラスを作ってから板ガラスを製造する既存のラバース式よりも生産性が高く、品質も優れていた。

具体的には熔融窯の前端の引き上げ室にスリット (細長い切り込み) を入れたデビトーズ (debiteuse) とよばれる四角い棒状の耐火煉瓦をガラス面に少し押し込み、スリットから盛り上がってくるガラスを鉛直に引き上げることで板ガラスを成形する方法である。ガラスリボンはずぐ水冷器によって両面から冷却され、引き上げ塔を上がっていく。塔は高さ約 6 メートルの鉄製角筒で、板ガラスリボンは 20 対ばかりのアスベスト被覆ローラーによって引き上げられ、塔の上部で切断される。このように鉛直に引き上げて成形するため垂直式の自動引上平板法とみなされる。

この方式で製造できる板ガラスの厚みは 1~8 ミリ (通常 2~6 ミリ)、幅 1.5~2.5 メートル程度である。引き上げ速度を上げるほどガラスの厚みは薄くなるので、厚みの変更はローラーの引き上げ速度の増減によって行われる。このフルコール法は 3 ミリ以下の板ガラス生産に適していたとされる。

この方式では一つの熔融窯に 3~11 機という多数の引き上げ機が設置でき、需要に応じた厚みや面積の製品を同時に生産できる特徴がある。また、デビトーズを用いるため、成形が比較的容易で、かつ均一な厚み分布の板ガラスリボンが得られる特徴もある。

上述のような長所もあったが、問題点もあった。熔融ガラスとデビトーズが接する縁の部分にガラスが結晶化した失透とよばれるものが発生してしまう。発生当初は数ミクロンであるが時間の経過とともに成長し、10 日前後で数ミリの大きさになる。この失透は引き上げられるガラスリボンに細い筋を刻印する。刷毛でなでたような筋を残すことから刷毛筋とよばれたり、フルコールラインとよばれたりする。この刷毛筋による品質低下が目立ってくると、引き上げ製造は中止される。そして、再加熱により失透を溶かし、デビトーズの表面を清掃した後、再び引き上げが開始される。引き上げから中止までの期間をマシンライフ (machine life) とよぶが、そのマシンライフが通常 1~2 週間しかもたないのがこの成形技術の大きな問題であった。

⁸ フルコール法の原理は 1901 年にエミール・ゴップによって考案された。同年、エミール・フルコールはゴップからこのアイデアを譲り受け、それをベースに特許を出願した。エミール・ゴップは旭硝子尼崎工場 (現・関西工場) の手吹円筒法ガラス製造窯の設計を行った人物でもある。

その他にも再加熱によりデビトーズのスリット内面と熔融ガラスとの界面に気泡を生じ、引き上げ開始直後の板ガラスリボンに表面泡（open bubble）が生じるという問題もあった。また、デビトーズは冷却加熱が繰返されるとスリット面に亀裂が入り、ガラスによる浸食が進んで、通常2ヵ月くらいで更新する必要があるがあった。更新後には熔融ガラスと新しいデビトーズとの界面に発生する表面泡は異常に多い。

以上のような問題点がさまざまな角度から検討され、改善された結果、フルコール法はフロート法誕生以前に世界で最も普及した板ガラス成形技術となった。

日本企業では旭硝子が1920年8月にこの方法の特許実施権の契約に調印し、1928年にフルコール式工場を建設、稼働させた。1931年には製造原価がラバース式よりも2割以上低減させることに成功している。また、旭硝子は1971年にフルコール式の欠点を改良し、アサヒ式平板引上法を開発することとなる。

2.3. コルバーン式平板法（Colburn process）

コルバーン式平板法（以下、コルバーン法）は、アメリカ人のコルバーン（I. W. Colburn）によって発明され、1916年にリビーオーエンス社（Libbey Owens Co.）で完成された水平式の自動平板引上法である。したがって、リビーオーエンス法ともよばれる。

具体的には、熔融窯前端に続く浅い引き上げ室のガラスの自由表面からガラスリボンが引き上げられ、ガラス面に近い両端で、ナールロール（knurl roll）とよばれる溝の刻まれた一対の水冷ロールによってガラスリボンの立上がり部を固定する。ナールロールは絶えず適当な速度で回転していて、板の両端部のガラスを常に一様に冷却するので、この部分のガラスだけが硬くなり、表面張力による板幅の縮小が防止される。また、ガラスが立上がり線に向かって流れる間に冷却器で一様に冷却されることで、一定の厚みが保たれたリボン状で粘度の高いガラスが引き上げられることとなる。ガラス面から約60センチ鉛直に引き上げられたところで、ガスバーナーで加熱された後、ベンディングロール（bending roll）によって水平方向に曲げられる。その後は除冷窯内のレヤーロール（lehr roll）およびコンベヤロールの回転によって引っ張られて、徐冷窯に送られる。このようにガラスが鉛直に引き上げられた後、水平方向に曲げられて成形されることから水平式の自動平板引上法とみなされる。

コルバーン法では、ベンディングロールの表面の滑らかさが最も重要となる。ガラスリボンのロール接触面にロール跡が残ると、ガラスの品質が低下する。これはコルバーン法に特徴的な品質欠点である。

この方法では、通常1つの窯に引上機を2つ設置している。ガラスリボンの厚みは1～8ミリ、幅2.5～4メートルである。

日本では日米板ガラス（現・日本板硝子）が1918年にコルバーン法を導入し、1920年から生産を開始した。旭硝子がフルコール法で生産開始したのは1928年であるので、日米板ガラスが日本で最初に自動平板引上法を用いて板ガラスを製造した会社となる。

2.4. ロールアウト成形法

図1で示した一般板ガラスの中でも型板ガラス、磨き板ガラスの素板ガラスなどはロールアウト成形法によって作られる。また、一次製品の特殊ガラスに分類される網入板ガラスや線入板ガラスもこの成形法によって作られる。

ロールアウト成形法には単ロール法（鋳込法）と複ロール法がある。単ロール法は17世紀末に試みられた方法である。水平な鋳込鉄盤上にガラスを注ぎ、鉄製ローラーがガラスの塊の上を通過してガラスを四角な板に押し広げる。厚さは鉄盤の端に固定したレールの高さで決められる。出来上がった板ガラスは徐冷窯に押し込まれ、冷却される。型板ガラスは型模様を鉄盤あるいは鉄製ローラーにつけることで製造される。

1920年代はじめに単ロール法から複ロール法に移行した。複ロール法には1918年の第一次世界大戦直後に発表されたビシェロー（Bicheroux）法で代表される鋳込法を機械化した半連続式鋳込法と、1922年にアメリカのフォードがピルキントン・ブラザーズ社（以下、ピルキントン社）の協力を得て開発した水平連続圧延法とに分けられるが、以下では主流となった水平連続圧延法に関して概説する。

水平連続圧延法は、溶融窯の前端に接続する堰から溶融ガラスを連続的に供給し、その溶融ガラスが冷えないうちに上下一対の水冷ロールの間に通すことで成形する。型板ガラスの場合、通常下ロールに刻んだ型模様をガラスに転写する。現在のロールアウト成形法はこの水平連続圧延法に由来している。

ガラスの厚みはロール間のギャップで決まり、ガラスの引き出し量はロールの回転速度で決まる。製造される厚みは2～10ミリ、幅1.5～2.5メートル程度である。

このようなロールアウト成形法では型板ガラスは成形できるが、磨き板ガラスそのものを成形することはできず、できるのは磨き板ガラスの素板ガラスである。表面が平滑に研磨されたロールを使用しても、ガラスの表面は平滑にならない。この素板ガラスを磨くことで表面が平滑で、ゆがみのない磨き板ガラスとなる。

素板ガラスを磨くための研磨方法は、現在、大別して片面磨きの不連続法と連続両面磨き法の2つがある。不連続法はロールアウト成形された素板ガラスを所定の寸法に切断後、鉄製の台の上に石膏などで張りつけ、けい砂あるいはその他の研磨剤で研削し、紅柄やセリアで研磨して仕上げ、反対側の面も同様に仕上げる方法である。連続両面磨き法はデュープレ

ックス法 (duplex process) とよばれ、ガラスリボンを連続的に研削、研磨するもので、片磨きの不連続法に比べ装置は複雑であるが、片面磨き比べはるかに効率的である⁹。

フロート法の発明によってフロートガラスが磨き板ガラス相当の品質確保が可能となったことから、磨き板ガラスは市場から姿を消した。しかし、フロート法では網入板ガラスを製造できないため、ロールアウト成形法は現在も残っている。

ロールアウト成形法での網入板ガラスの製造は上下一対の水冷ロールの間に網を入れるのが一般的で、下部挿入法、上部挿入法があり、この他に2セットの対ロールの途中で網を入れるサンドイッチ法 (ダブルフロー法) がある。また、ロールアウト成形法で作られるのは網入板ガラスの素板ガラスで、上述の磨き板ガラス同様に磨き工程が必要となる。

2.5. ピッツバーグ式平板引上法 (Pittsburgh Process)

ピッツバーグ式平板引上法 (以下、ピッツバーグ法)¹⁰は 1925 年にアメリカのピッツバーグ・プレート・グラス社 (以下、PPG社) が開発した垂直式の自動平板引上法である。フルコール法と同様に鉛直引き上げ法である。フルコール法では、デビトーズという耐火物をガラス面に少し押し込み、そのスリットから盛り上がってくるガラスを鉛直に引き上げた。ピッツバーグ法は、デビトーズ代わりに、ドローバー (draw bar) とよばれる細長い耐火物をガラス面から 5~10 cm 下に沈め、その直上のガラス自由表面からガラスを引き上げる方法である。したがって、フルコール法と同じ垂直式の自動平板引上法とみなされる。

デビトーズの代わりにドローバーを採用することでフルコール法のデビトーズに起因して発生する板ガラス面の刷毛筋や泡などの欠点が解消され、引き上げ板幅が広く、より良質の製品が得られるとともに、連続引き上げ期間もフルコール法の数倍に延びた。引き上げ速度に関しても厚板ガラスの場合 50% 近く速くなった。

ガラスリボンの厚みは通常 3~8 ミリ、幅 2~3.2 メートルである。1 つの窯に接続される引き上げ機の数 は 2~9 機程度である。この方式は 3 ミリ以上の中厚板の生産に適していたとされる。

この方式は引き上げ室内の熔融ガラスの温度がフルコール法より約 100°C 高く、失透の問題は少ないが、自由表面から引き上げることで、熔融ガラスの化学的不均質があると厚みの不均一を生じやすい問題があった。

日本企業では旭硝子とセントラル硝子が技術導入した。旭硝子は PPG 社より 1930 年 7 月

⁹ 現在、世界で唯一稼働中のデュプレックス法はセントラル硝子株式会社 (以下、セントラル硝子) にある。

¹⁰ ピッツバーグペンバーノン法 (Pittsburgh Penvernon process) とも呼ばれる。

に特許実施権を取得し、同年 11 月、鶴見工場のラバース式工場の操業を停止してピッツバーグ式へと改造する工事に着手し、1931 年 4 月 15 日に操業を開始した。しかし、日中戦争のため生産制限を受け、ピッツバーグ法での生産は長期休止となり 1938 年に火止めとなった¹¹。また、1943 年に企業整備令を受け、ピッツバーグ法の設備を廃棄している。その後、1960 年代に厚板ガラスの需要の高まりがみられたとき、それに対応するために 1966 年に再びピッツバーグ法を導入している¹²。セントラル硝子は PPG 社より技術導入し、1964 年より生産を開始し、1966 年には 2 基目をスタートさせた。

2.6. フロート法 (Float process)

フロート法はイギリスのピルキントン社 (Pilkington Brothers Ltd.) のアラステア・ピルキントン (A. Pilkington) によって発明され、工業化された。このプロセスによって製造されたガラスは優れた平行、平滑面と火造りの光沢をもち、品質はもちろんのこと生産性もこれまでの自動平板引上法よりも格段に優れていた。そのためフロート法で成形されたガラスは普通板ガラスではなく、フロートガラスとよばれ、区別される (表 1)。

このフロート法に類似した完全平面ガラス板の製法は実は以前から提案されていた。1902 年にアメリカの E. Heal、J. H. Forrest および H. Hitchcock が現在のフロート法に類似した 2 つの特許を出願している。その当時に利用できるガラスの連続熔融成形技術や周辺技術がなかったためにこれはアイデアの段階で終わっている。

それから約 50 年後の 1952 年にピルキントン社のアラステア・ピルキントンがフロート法を発明し、開発がはじまり、1959 年にその成功が世界に発表した。工業化までの 7 年の間に約 400 万ポンドに上る巨額な研究費が費やされた¹³。

フロート法とは、ガラスより重く、ガラスに濡れない (混ざらない) 熔融金属である熔融錫の上に熔融ガラスを流し込むことによって火造り面 (fire finished, fire polished) で上下面が完全に平行で平滑な板ガラスを生産する方法である。熔融錫上に流し込まれた熔融ガラスは円形に広がりはじめ、厚さは次第に薄くなるが、ガラス、熔融金属である熔融錫、雰囲気

¹¹ フルコール法の生産は続行された。

¹² 1966 年の技術導入は PPG 社ではなく、ベルギーのグラバーベル社より行っている。PPG 社の発明以来、ピッツバーグ法は導入した企業各社による独自の発展を遂げていた。当時のそのような中でも世界一の品質という評判を誇っていたのがグラバーベル社である。グラバーベル社はもともと技術輸出を行わないポリシーを持っている会社であった。しかし、フロート法の台頭に機に、その方針を転換したようである。その意図は、グラバーベル社方式のピッツバーグ法延命にあったと推測されている。

¹³ Pilkington (1969)によれば磨き板ガラスを代替するという目的を達成するまでに総額 700 万ポンドかかっている。

の間の界面張力と重力が平衡に達するとガラスの広がりや厚さは停止する。このときのガラスの厚さは平衡厚み (equilibrium thickness) とよばれる約 6.8 ミリになる。その平衡厚みよりも薄い 5 ミリ以下のものは薄板ガラス、厚い 8 ミリ以上の厚さのものは厚板ガラスとよばれる¹⁴。

フロート法における幅と厚みは、主に熔融バスへの流入量と徐冷炉の搬送ロールによるリボン牽引速度によって調節される。開発当初、磨き板ガラス市場の 50% は 6 ミリという厚さであった。フロート法での平衡厚みは約 6.8 ミリだったため、徐冷炉の搬送ロールの速度を少し上げるとことでこの 6 ミリという厚さは実現できた。このことは幸運だったと開発者のアラステア・ピルキントン自身が述懐している (Pilkington, 1969)。

平衡厚みよりも薄いガラスの製造方法は、その薄さ次第でリボン牽引速度を上げるだけでは難しくなる。まず、厚さ 5 ミリのフロートガラスは、厚さ 6 ミリのガラスを製造する場合よりも搬送ロールの少し速度を上げることで製造可能である。さらに、5 ミリ未満の薄板ガラスを製造する場合も、徐冷炉の搬送ロールのスピードをさらに上げることで達成されるが、そのままでは厚みが薄くなる比率以上にガラスリボンの幅が狭くなり、実際の需要に合う広幅の薄いガラスの生産は困難になる。このような薄板の生産には、補助ロールとよばれる斜めに設置された溝付き回転ロール (top roll) と呼ばれるものを用いる。熔融錫上で平衡厚みになったガラスリボンの両端を補助ロールにより上から押さえてガラスリボン幅の縮小を防ぐ。このロールは引き伸ばしを大きくした場合にリボン幅が狭くなるのに逆らって突っ張る作用をするので、板幅の縮小が防止され、厚さのみ薄くなる。高温でしかも温度も均一な状態でガラスを引き伸ばすので、まったくガラス表面のゆがみを生じない。

平衡厚みより厚いガラスの製造方法は、薄いガラスをつくるプロセスよりやや単純である。フロート法における厚板ガラスは、カーボンフェンダーとよばれるガラスに濡れないガイドが熔融錫で満たされたフロートバスの端部にセットされ、ガラスの横方向への広がりが抑えられることで製造される。その結果、ガラスリボンの厚みは熔融ガラスの流量とスピードに規定される。カーボンフェンダーはガラスが自重で広がらない温度まで下がるところまで十分に長いものが取り付けられている。このような方法で厚み 19 ミリないしそれ以上の板ガラスが生産される¹⁵。このようなフロート法で製造可能な板幅は約 2.5~4 メートルで、長さは必要なだけ長くとることができる。

¹⁴ 6 ミリと 7 ミリの厚さは平衡厚みとして考えられる。また、液晶ディスプレイ用基板ガラスとして用いられる 1.1 ミリ以下の厚さのものは超薄板ガラスとよばれる。近年では 0.3 ミリまで製造可能である。さらに、自動平板引上法によって成形される普通板ガラスでは 2 ミリ未満のガラスが薄板ガラスとよばれるため、成形法によってその意味する厚みが異なることを注意されたい。

¹⁵ 19 ミリを超える厚みのガラスは大型のガラスの開口部を補強するリブガラスとして使われるので、本稿では 19 ミリまでを対象とする。

フロート法で製造可能な厚みは 2~19 ミリで、板幅は約 2.5~4 メートルである。このように幅広い厚みを高い生産性と品質で作ることのできるフロート法は現在の板ガラス製造法の主流となった。すなわち、その品質および生産性から、まず磨き板ガラスがとって代わられ、ついで普通板ガラスも徐々に代替された。現在、普通板ガラスを成形するための自動平板引上法はほとんど姿を消し、資本が不足し、市場が限られている発展途上国の一部で採用されているに過ぎない。

ピルキントン社はこの技術を 1962 年から世界各国の板ガラスメーカーにライセンスしはじめた。1963 年の 3 基から、1985 年で 100 基、1995 年で 150 基に達しようとしている。日本は 1964 年 8 月に旭硝子と日本板硝子の両社が同時に日本政府からフロート法の技術導入の認可を受け、1965 年に日本板硝子、1966 年に旭硝子がフロートラインをスタートさせている。

2.7. アサヒ式平板引上法

アサヒ式平板引上法（以下、アサヒ式）は 1971 年に旭硝子がフルコール法の問題点を改善し、開発した成形技術である。上述したように、フルコール法では熔融ガラスとデビトーズが接する縁の部分にガラスが結晶化した失透とよばれるものが発生してしまうという問題があった。この失透が成長すると引き上げられるガラスリボンに細い筋を刻印し、ガラスの品質劣化が生じるので、これが目立ってくると引き上げが一度中止された。そして、再加熱により失透を溶かし、デビトーズの表面を清掃した後、再び引き上げが開始された。このように引き上げから中止までのマシンライフが 1~2 週間程度ということが生産性の低さにつながっていた。

この問題点を解消するために旭硝子に開発された方法がアサヒ式である。これは、失透が成長する前にアサヒブロック (Asahi Block) とよばれる円筒状の耐火物を少しだけ回転させ、失透のできる箇所を移動させて刷毛筋の発生を防止しながらガラスを引き上げる方法である。

具体的には、ガラスタンク窯の前端の引き上げ室に、アサヒブロックとよばれる一對の鼓型の長袖回転体の耐火物を並べ、二つの鼓の間のスリット面から板ガラスを引き上げる。板ガラス引き上げ作業を続ける中で、失透が成長し、刷毛筋が目立ってきたときに、鼓型の回転体が互いに反対方向に内から外へきわめてゆっくりと 3~5 mm 回転させ、ガラスと耐火物界面のなごさ（ガラスを立ち上がる）部分を新しくして、ガラスリボンへの筋の刻印を防止し、良好な火造りの表面状態の板ガラスを製造する。こうした操作を 10 回ぐらい繰り返す。この方式で製造できる板ガラスは厚み 1~8 ミリ（通常 2~6 ミリ）、幅 1.5~2.5 メートルで

ある。

このアサヒ式のマシンライフは2~4ヵ月で、フルコール法の問題点が根本的に解決されたものとなった。また自由表面から板ガラスを引き上げるピッツバーグ法に比べて、板ガラスの幅方向の厚みの不均一を少なくできるという長所もあった。

この方法はフロート法の誕生と導入や1966年のピッツバーグ法の導入により触発された旭硝子のフルコール法担当の管理者や技術者が必死にアイデアを結集して開発したものである。

開発当時、世界の板ガラス業界は徐々にフロート法の採用を採用する方向に進みつつあったが、フルコール法は依然として主流を占め、多くのフルコール式窯が操業していた。そのためこのフルコール法の問題点を解決し、長所を残したアサヒ式は世界各国のメーカーにとって魅力的であった。フルコール法から安価な設備投資で、品質および生産性を格段に向上させる技術方式への転換のメリットは大きく、アジア、ヨーロッパ、アメリカ、中南米など、結果として世界の17ヵ国のガラスメーカーに技術輸出されることになった。

そして、それぞれの国において、変化する時代の要求に沿いながら、アサヒ式窯の操業が続けられた。旭硝子の場合、アサヒ式の得意品種であった1.1ミリ、0.7ミリを含め、フロート法により厚板から超薄板までの全品種の生産技術が確立された時点で、最後のアサヒ式窯が1982年に停止した。アサヒ式の完成から約11年間であった。

2.8. 板ガラス成形技術の四系統

以上、概説した1900年初頭から1981年に至るまでに誕生、進化あるいは駆逐された板ガラス成形技術は図3のように大きく4つの系統に分類できるだろう。

第一は、はじめに円筒状のガラス作り、それから板ガラスを成形する円筒法の系統である。1902年にアメリカで誕生したラバース式は20世紀以前の技術である手吹き円筒法の手吹き作業を機械化することで実現した。ラバース式は大量生産の端緒となったが、間欠的方式で品質も十分ではなかった。そのため新たな成形技術の誕生とともにその役割を縮小し、終えることとなる。

第二は溶融窯からガラスを直接引き上げることで連続的に板ガラスを成形する自動平板引上法の系統である。この成形法には溶融窯から鉛直に引き上げる垂直式とはじめは鉛直に引き上げるが、途中で水平方向に曲げて徐冷する水平式の二つがある。1910年代にベルギーで垂直式のフルコール法が開発され、続いて1916年に水平式のアメリカでコルバーン法が誕生する。それから1925年にアメリカで垂直式のピッツバーグ法が開発される。これらは既存の成形技術であるラバース式を駆逐した。これら3つの技術の中でもフルコール法が

フロート法登場以前の 세계에서最も普及した技術となった。また、1971年には旭硝子がフルコール法の問題点を改善し、アサヒ式へと進化させている。これらの技術は競合するが、一長一短あり、どれかひとつが支配的な技術になることはなかった。

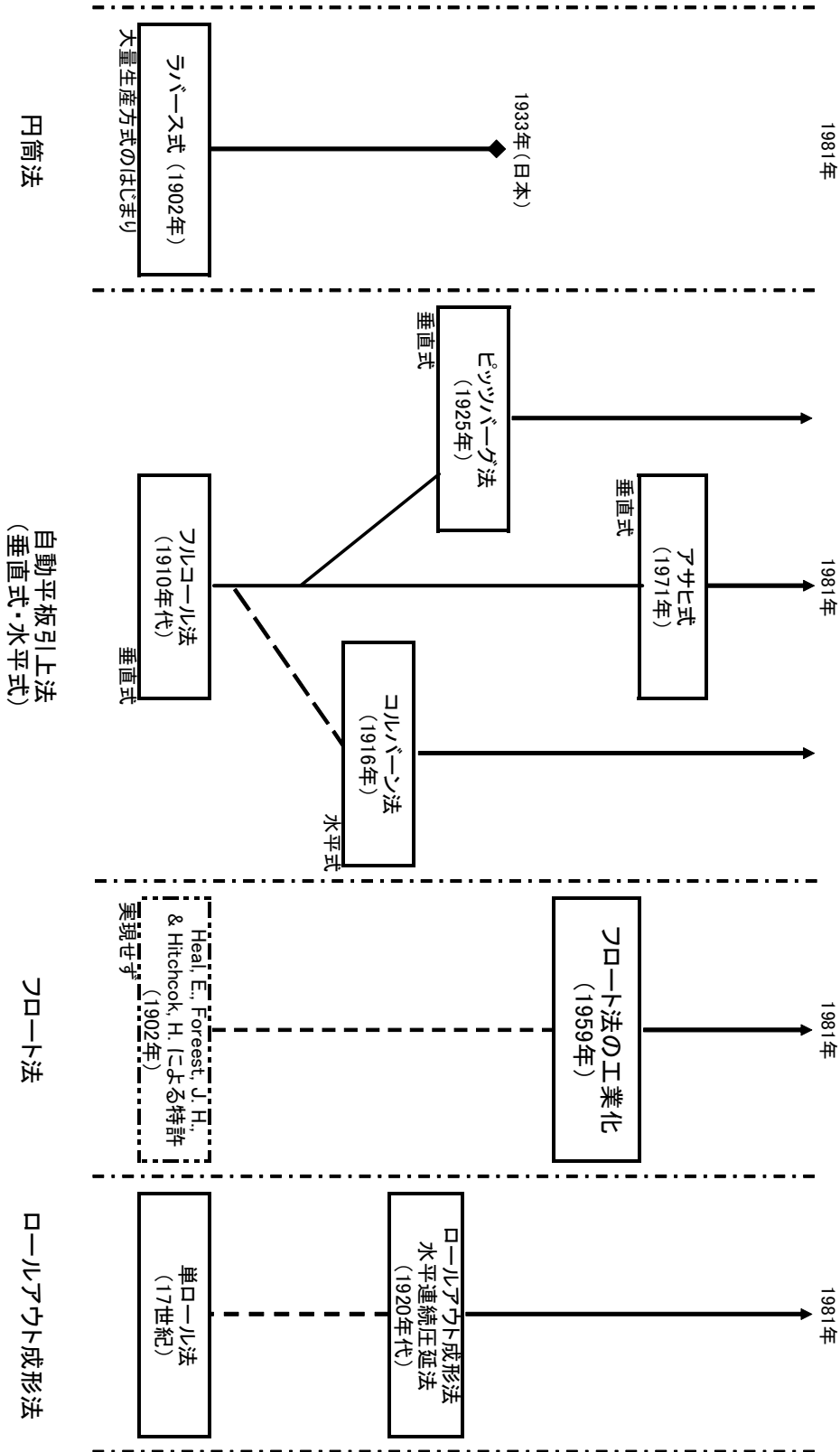
第三は、1952年に発明され、1959年に工業化されたフロート法の系統である。フロート法は溶融金属上に溶融ガラスを流し込むことでガラスの上下面が完全に平行で平滑な板ガラスを成形する方法である。1952年以前に類似した原理は多数提案され、1902年にはアメリカで特許が取得されているが、それらは工業化されていない。フロート法の開発に成功したピルキントン社も工業化まで発明から7年の歳月と莫大な費用をかけている。フロート法開発当初の目標は研削・研磨工程なしで磨き板ガラスと同等の板ガラスであるフロートガラスを製造することであった。その開発の成功によって、フロートガラスはロールアウト成形法と磨き法によって製造される磨き板ガラス市場を駆逐、代替することになる。同時に自動平板引上法によって成形される普通板ガラス市場も浸食することになる。

Perry (1984)は基本的なガラス成形法には「引く (drawing)」あるいは「铸る (molding)」の2つがあり、フロート法は物理学の文脈において、「引く (drawing)」成形法なので既存の成形法 (自動平板引上法) を拡張したものであると述べている¹⁶。しかし、フロート法は自然の理にかなった水平引き出し法であり、溶融ガラスを溶融窯から引き上げるそれまでの方法とは異なる。したがって、本稿では自動平板引上法と異なるものであるとみなした。

第四は、型板ガラス、磨き板ガラスの素板ガラスをロールで成形するロールアウト成形法である。この成形技術は一次製品の中でも特殊ガラスに分類される網入板ガラスや線入板ガラスも成形できる。もともとの技術である単ロール法は17世紀まで遡ることができるが、上下一対の水冷ロールの間に溶融ガラスを通して板状に成形するという発想は20世紀に入ってからのものである。この成形法によって素板ガラス成形され、磨き板ガラスは、自動車用ガラスの素板ガラスとして用いられていたが、フロートガラスによって代替され、その市場そのものが駆逐されることとなった。しかし、ロールアウト成形法そのものは、フロート法で成形不可能な網入板ガラスや型板ガラスの成形が可能であるため、フロート法と棲み分けることになる。

¹⁶ Perry (1984)は商業的成功という観点からは既存技術と異なるという見解も持っている。技術を評価するとき、商業的成功という観点も物理科学的観点と一緒に見る必要があるだろう。

図3. 板ガラス成形技術の四系統



3. 板ガラス成形技術の盛衰と棲み分け

本節は 1900 年初頭から 1981 年までに上述した板ガラス成形技術がどのように進化、競合し、棲み分けあるいは駆逐されたかを明らかにする。

はじめに、自動平板引上法が円筒法を駆逐し、自動平板引上法に分類される 3 つの技術が競合することになる。それら 3 つは、一長一短があり、どれも支配的な技術にならない。次に、磨き板ガラスの基板ガラスを成形するロールアウト成形法がフロート法の台頭によって駆逐されることとなる。最後に、フロート法が 1981 年までどのように進化し、自動平板引上法にどのような影響を与えたか論じる。

3.1. 円筒法と自動平板引上法

まず、最初の板ガラス大量生産方式として位置づけられるラバース式が 1902 年に誕生した。このラバース式は 20 世紀以前からの生産方式である手吹円筒法の流れを引き継ぐものである。この製法はガラス素地をガラスタンク窯から大型るつぼに移す作業が必要であり、機械的に圧搾空気を吹き込みながら円筒状のガラスを作った後は、手吹円筒法と同じように人手で板状にするという間欠的な生産方式であった。さらに、その品質も十分ではなかった。そこで溶融窯から直接、しかも連続的に板状のガラスを引き上げる自動平板引上法が台頭することになる。その結果、円筒法はラバース式を最後に駆逐されることとなった。日本では旭硝子が 1914 年にラバース式を導入したが、1928 年にフルコール法を導入することで 1933 年にその生産をやめている。

自動平板引上法としてはじめに登場したのは 1910 年代に開発されたフルコール法である。この成形法は、間欠的な生産方式のラバース式と異なり、溶融窯からガラスを鉛直に引き上げることで連続的に板ガラスを成形する方法である。さらに、一つの溶融窯に 3～11 つの引上機を設置できた。以上より、ラバース式よりも生産性も高く、品質も優れていた。この方式で製造できる板ガラスの幅は 1.5～2.5 メートルで、その厚みは 1～8 ミリであった。

続いて 1916 年にコルバーン法が誕生した。フルコール法と同じ自動平板引上法のひとつではあるが、引き上げたガラスを途中で水平方向に曲げて徐冷する。そのため水平式の自動平板引上法と考えられている。一つの窯に 1～2 つの引上機の設置が可能で、製造できる板ガラスの幅は 2.5～4 メートルである。製造可能な厚みはフルコール法と同じく 1～8 ミリである。

さらに、1925 年にはピッツバーグ法が開発された。フルコール法と同じ垂直式の自動平板引上法だが、その違いは自由表面からガラスを引き上げることにあった。一つの窯に 2～

9つの引上機の設置が可能で、製造できる板ガラスの幅は2~3.2メートル、厚みは3~8ミリであった。

1971年にフルコール法の問題が根本的に解決されたアサヒ式が登場した。フルコール法の問題は、デビトーズに失透ができ、ガラスの品質を低下させるということと、その失透を取り除くためにマシンライフが1~2週間しか持たないということであった。アサヒ式ではデビトーズの代わりに回転するアサヒブロックという耐火物を設置することでこの問題を解消した。その結果、アサヒ式のマシンライフは2~4ヵ月となった。アサヒ式は安価な設備投資でフルコール法からの転換が可能だったため、フルコール法に取って代わることになる。アサヒ式の製造可能な板幅と厚みはフルコール法と変わらず、1.5~2.5メートルと1~8ミリである。

アサヒ式は1.1ミリや0.7ミリといった薄板の製造に強みを持ち、ピッツバーグ法に比べ厚みの不均一を少なくできるという長所があった。一方、ピッツバーグ法は厚板の製造に強みがあり、厚板製造の場合、フルコール法よりも50%近く速く引き上げられた。その結果、たとえば、両方の技術を導入していた企業である旭硝子では、普通板ガラスの薄板ガラスはアサヒ式で成形し、中厚板ガラスはピッツバーグ法で成形するという棲み分けが生まれることになった。

コルバーン法は垂直式の2つに比べ、成形できる板幅が広く、引上機1台当たりの生産性が高かった。ただし、設置できる引上機の台数が少ないため同時に複数の厚みを生産できないというデメリットがあったと考えられる。

表2にアサヒ式（フルコール法）、コルバーン法、ピッツバーグ法が製造可能な板幅そして厚み、設置可能な引上機の数をもとめる。どの自動平板引上法も円筒法よりも、生産性が高く、上質な板ガラスを作れた。しかし、上述したようにアサヒ式、コルバーン法、ピッツバーグ法はそれぞれ一長一短があり、他の成形法より抜きんでて、支配的な技術になることはなかった。

表2. 自動平板引上法の特徴

	製造可能な板幅 (メートル)	製造可能な厚み (ミリ)	設置可能な引上機の数 (機)
アサヒ式(フルコール法)	1.5~2.5	1~8	3~11
コルバーン法	2.5~4	1~8	1~2
ピッツバーグ法	2~3.2	3~8	2~9

森(2007)を基に作成

3.2. ロールアウト成形法とフロート法

1922年に水平連続圧延法が開発された。現在のロールアウト成形法はこの水平連続圧延法に由来する。この成形法で磨き板ガラスの基板ガラスが作られる。

水平連続圧延法は、溶融窯の前端に接続する堰から溶融ガラスを連続的に供給し、その溶融ガラスが冷えないうちに上下一対の水冷ロールの間に通すことで成形する。ガラスの厚みはロール間のギャップで決まり、ガラスの引き出し量はロールの回転速度で決まる。製造される厚みは2～10ミリ、幅1.5～2.5メートル程度である。このロールアウト成形法によって作られた素板ガラスは研削、研磨工程で磨かれることで表面が平滑で、ゆがみのない磨き板ガラスとなる。

磨き板ガラスは、フロート法とフロートガラスの誕生によって駆逐されることとなる。フロート法とは、上述したように、溶融錫の上に溶融ガラスを流し込むことによって火造り面で上下面が完全に平行で平滑な板ガラスを生産する方法である。その品質は磨き工程なしで磨き板ガラス相当の品質であった。また、ロールアウト成形法よりも生産性が高く、フロート法では磨き板ガラスにはなかった大寸法ものも生産できるので、市場でも歓迎され、磨き板ガラスは市場から姿を消すことになった（表3）。

表3. フロート法とロールアウト成形法の特徴

	製造可能な板幅 (メートル)	製造可能な厚み (ミリ)
フロート法	2～4	2～19
ロールアウト成形法	1.5～2.5	2～10

森(2007)を基に作成

しかし、フロート法では型板ガラスや網入板ガラスを製造できないため、ロールアウト成形法は現在も残っている。

3.3. フロート法の台頭と進化と自動平板引上法

上述したように、フロート法によって成形されるフロートガラスは磨き板ガラスを代替することになったが、自動平板引上法で成形される普通板ガラスにも大きな影響を与えることになった。

1958年のフロート法開発当初、製造可能だった厚みは6ミリあるいは7ミリであった。その2年後の1960年には3ミリの厚みが製造可能となった。それからさらに2年後の1962年にピルキントン社は他社へのライセンスを開始することになる。

1962年7月にPPG社が世界で初めてフロート法の技術導入を行い、同年11月にフランスのブツワ社、さらに1963年4月にはフランスのサンゴバン社、ベルギーのサンロッシュ社、アメリカのリビー社の3社が相次いで導入している。それから1964年に日本板硝子と旭硝子が技術導入を行う。このように世界の主な板ガラスメーカーがフロート法を導入し、改善し、生産を開始することで磨き板ガラスはフロートガラスに取って代わられることになる。

1962年以降、ピルキントン社はライセンサー各社と協力して厚板のフロートガラスを製造するための開発を行うこととなった。それは日本板硝子による8ミリ以上の厚板ガラス製造方法の開発につながる。8、10、12、15ミリの厚みのフロートガラスの製造に成功し、1966年8月発売を開始した。その後、1971年に19ミリの厚みも生産可能となった。Pilkington (1969)によれば1960年代当時の市販の厚みは3~15ミリだったので、フロート法は1966年までの市販されている全ての厚みをカバーしたことになる。

また、薄板ガラスに関しても自動車業界の軽量化への取り組みもあり、1970年には2ミリの厚みが成形可能となった。

ここで、自動平板引上法、ロールアウト成形法、フロート法が製造可能な板幅、厚みを表2と表3で確認し、フロート法が開発されてから製造可能な厚みが時間とともに広がり、他の成形法との棲み分け領域が確定していく様子を図4に表す。

図4. フロート法による製造可能な厚みの進歩とその他成形法との棲み分け
(1959~1981年)

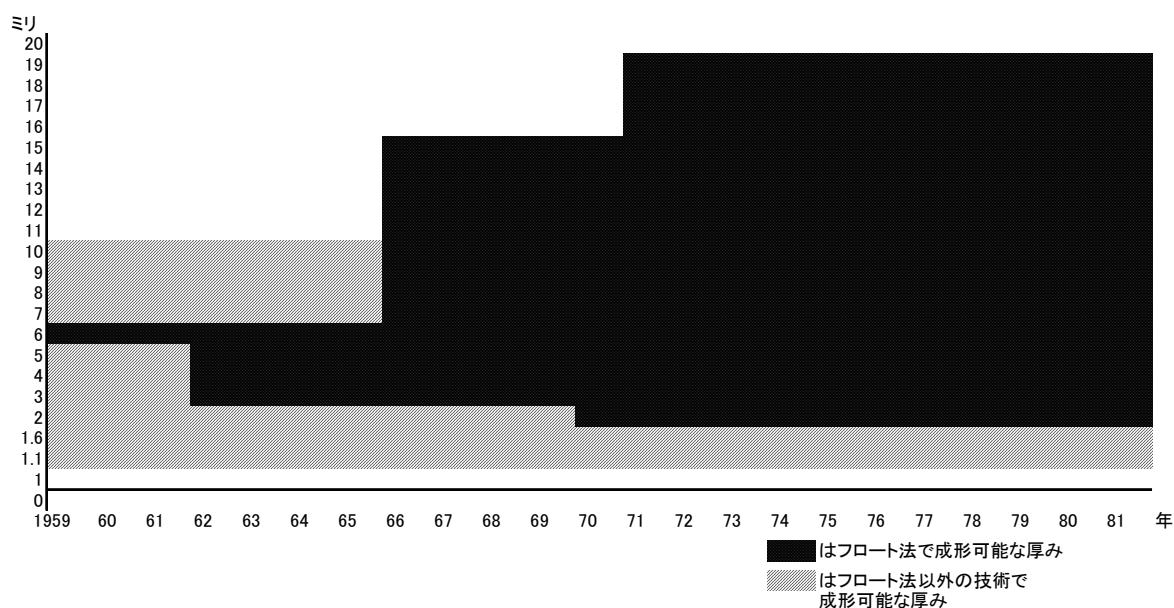
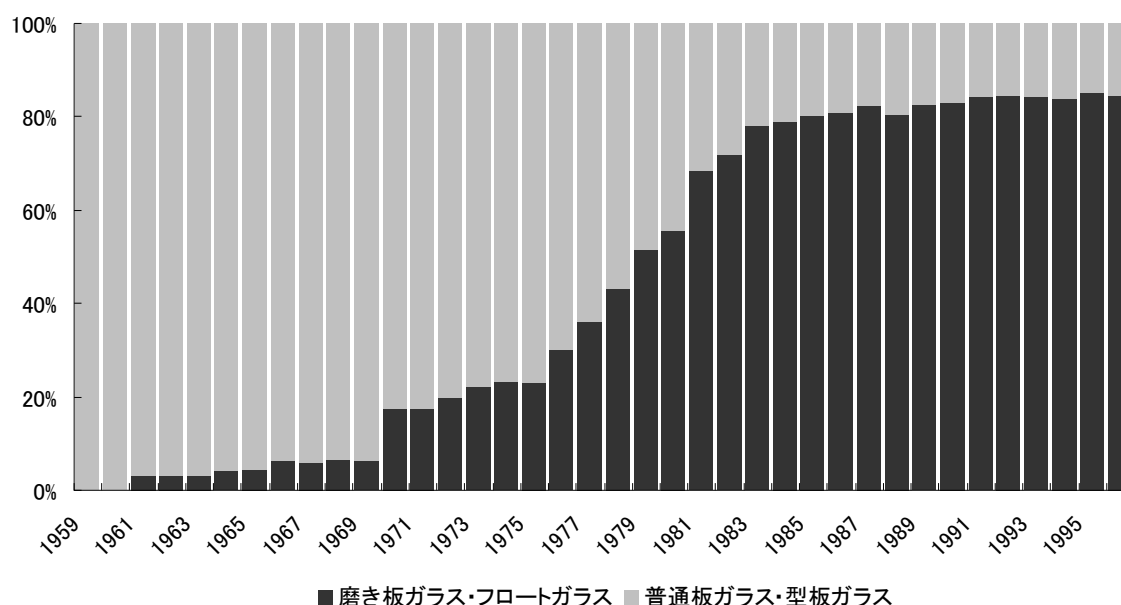


図4のようにフロート法の製造可能な厚みが広がるにつれ、磨き板ガラスだけでなく、普通板ガラスもフロートガラスが代替することになった。日本市場におけるフロートガラスの台頭は図5に示す¹⁷。

図5. 板ガラス生産に占める磨き板ガラス・フロートガラスと普通板ガラス・型板ガラスの割合



また、アメリカにおいてもフロート法、フロートガラスの台頭が見られる。Perry (1984)によれば、フロート法がアメリカに導入された1963年におけるアメリカ国内生産能力の約51%が普通板ガラス向け（自動平板引上法）で、残りの約49%が磨き板ガラス向け（ロールアウト成形法）であった。そして導入から10年後の1973年におけるアメリカ国内生産能力の約59%がフロート法になり、普通板ガラス向け（自動平板引上法）は32%、残りの約9%が磨き板ガラス向け（ロールアウト成形法）であった。

このように1981年までにフロート法は製造可能な厚みが広がるにつれ、磨き板ガラス市場だけではなく、普通板ガラス市場も浸食した。ただし、フロート法では製造できない厚みである2ミリ未満の市場のガラスは自動平板引上法によって引き続き生産されることでフロート法との棲み分けが生じた。また、網入板ガラスや線入板ガラスが製造できないフロート法はそれらを製造できるロールアウト成形法とも棲み分けることとなった。

¹⁷ 統計上、1960年まで磨き板ガラスは普通板ガラス・型板ガラスに含まれている。

4. おわりに

最後に、これまでの簡単なまとめと技術の棲み分けに関するディスカッションを行う。本稿は板ガラス成形技術に焦点を当て、1900年初頭から1981年までに登場した7つの成形法を概説した。次に、それらの技術が分類される4つの系統に提示した。そして、1900年初頭から1981年にかけてそれぞれの技術がどのように進化、競合し、棲み分け、あるいは駆逐されたかを明らかにした。

1981年までにフロート法はロールアウト成形法と自動平板引上法と技術的な棲み分けをすることになったが、このような技術の棲み分けはどのような要因によって生じるのであろうか。フロート法とロールアウト成形法の技術的な棲み分けは、フロート法では網入板ガラスや線入板ガラスが物理的に製造できないことから生じている。しかし、フロート法で2ミリ以上のガラスを成形し、自動平板引上法で2ミリ未満のガラスを成形するという技術的な棲み分けには、ロールアウト成形法との棲み分けのように物理的な要因が働いているとは考えがたい。実際、1982年にはフロート法で2ミリ未満の板ガラス成形に成功している。それ以降、フロート法は自動平板引上法を駆逐している。このことから技術的な棲み分けは物理的に製造可能か不可能かという要因で生じることと技術的限界に関する合意形成によるものがあると考えられるだろう。

具体的な技術的限界に関する合意は、フロート法では2ミリ未満のガラスを成形できないという1981年までの常識のことである。実際、フロート法で2ミリ未満のガラス成形に挑戦する企業はなかった。その代わりに、2ミリ未満は自動平板引上法で成形するという合意形成があったので、各社、自動平板引上法の改善に取り組んでいる。それは旭硝子によるアサヒ式の開発や日本板硝子によるコルバーン法に関する技術開発への取り組みに認めることができる。

では、どのように技術的限界に関する合意形成がなされるのだろうか。この点は今後の課題としたい。

参考文献

- 旭硝子株式会社臨時社史編纂室 編 (1967) 『社史』 旭硝子.
- 旭硝子株式会社臨時社史編纂室 編 (2007) 『旭硝子 100年の歩み』 旭硝子.
- 成瀬省 (1958) 『ガラス工学』 共立出版株式会社.
- 『日本板硝子株式会社五十年史』 (1968) 日本板硝子.
- 森谷太郎・成瀬省・功刀雅長・田代仁 (1963) 『ガラス工学ハンドブック』 朝倉書店.

森 哲 (2007) 「板ガラス製造技術の系統化調査」 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第 9 集
pp.121-164.

作花済夫・境野照雄・高橋克明 (1975) 『ガラスハンドブック』 朝倉書店.

Pilkington, A. (1969). The float glass process. *Proceedings of Royal Society of London Series A*, 314, 1-25.

Perry, R. C. (1984). The float glass process: A new method or an extension of previous ones? *Glass Industry*,
17-19, 31.

Utterback, J. (1994). *Mastering the dynamics of innovation*. Boston: Harvard Business School Press. 邦訳, J.

M. アッターバック (1998) 『イノベーションダイナミクス』 大津正和, 小川進 監訳. 有斐閣.

Wierzynski, G. H. (1968). The eccentric lords of float glass. *Fortune*, (July)

山根正之・安井至・和田正道・国分可紀・寺井良平・近藤敬・小川晋永 (1999) 『ガラス工学ハンド
ブック』 朝倉書店.