

熱プラズマによる革新的ガラス溶融プロセス

東京工業大学

渡辺 隆行

Innovative Process Technology for Glass Melting by Thermal Plasmas

Takayuki Watanabe

Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

NEDO 先導研究および NEDO 革新ガラス溶融プロセス技術開発プロジェクトで進められているインフライト溶融によるガラス製造技術は、工業的な意味だけでなく学術的な観点からも非常に興味深いものである。表面被覆処理に使用されているプラズマ溶射もインフライト溶融の範疇であるが、粒子を単に熱プラズマ中で加熱、溶融することが主であり、ガラス反応のように複雑な反応をプラズマ中の数ミリ秒の滞留時間で完結させるような研究はほとんど行われていない。

従来のプラズマ溶射などのプロセッシングでは、通常は直流放電プラズマが用いられているが、インフライト溶融技術はガラス溶融に必要なエネルギーを削減することを目的としているため、他の熱プラズマよりエネルギー効率の優れた多相交流アークに着目している。この多相交流アークは、放電特性などがまだわからない

ことが多く、放電現象を物理的に解明することが必要である。

また、インフライト溶融では、高温中に原料を投入することから、特定の原料成分の揮発量が増加する可能性があるために、揮発を防止する対策が必要となる。つまり、革新的ガラス製造技術の開発においては、インフライトの状態の溶融粒子を計測して、その状態を知ることが重要である。

本稿では、熱プラズマによる革新的ガラス溶融プロセスにおいて重要と考えられる2つのテーマ、多相交流アークの放電現象とインフライト溶融粒子の温度計測に関する最近研究成果を紹介する。

2. 多相交流アークの放電現象

多相交流アークとは、6本または12本の電極を放射状に配置し、各々の電極に位相の異なる交流電圧を印加することで、電極間にプラズマを発生させるものである。プラズマ体積が大きく、ガス流速が遅いという特長があることから、粉体の高温処理に優れていることが報告されている¹⁾。特にガラス原料のインフライト溶融に関する研究が重点的に行われ、その有用性

〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G 1-22

TEL 045-924-5414

FAX 045-924-5414

E-mail: watanabe@chemenv.titech.ac.jp

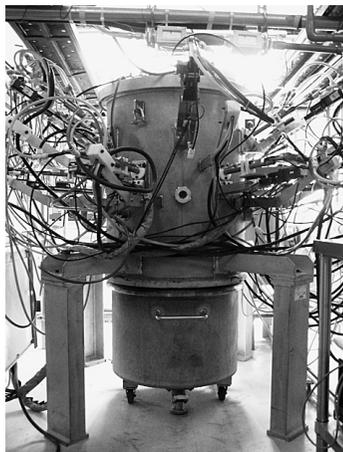


図1 多相交流アークによるガラスのインフライト溶融炉

が多数報告されている²⁻⁴⁾。

多相交流アークを用いたインフライトガラス溶融炉を図1に示す。12本の電極を放射状に配置しており、上段6本、下段6本と二段に分かれている。対極間の電極間距離を100 mm程度とし、大気圧下で各電極への印加電圧50 V、電流100 A程度でアークを発生する。

溶融炉の上部に配置した高速度ビデオカメラ(Photon, FASTCAM SA-WTI)により多相交流アークを観察しており、オシロスコープを用いて各電極に印加されている電圧波形を高速度カメラ画像と同期計測している。電圧波形と同期撮影された、高速度カメラのアーク全体のスナップショットを図2に示す。放射状に配置された12本の電極間に、強く発光しているアークが撮影されており、複数の電極からアークが発生していることが確認できる。

インフライトガラス溶融などの粉体処理においては、放電アークの上方から原料を投入することが多いため、上方から観察した際のアークの占有面積およびその時間変動は、粉体処理効率などに重要な影響を及ぼすことが予想される。そこで、計測された高速度カメラ画像を適切なしきい値で二値化することで、アークの発光面積の解析が行われている。多相交流アークの特性として、相数を増加することによって空

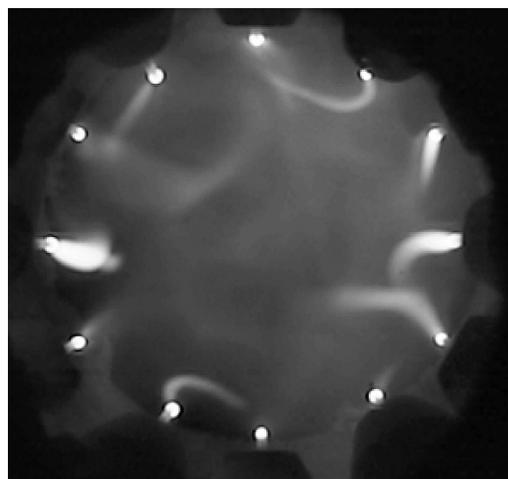


図2 多相交流アークの高速度カメラ画像

間的に広い高温領域が得られることに加え、時間的にもより均一な粉体加熱処理が可能となることが示されている。

3. インフライト溶融粒子の温度計測

インフライト中の個々の溶融粒子の温度を計測することは、効率的なガラス溶融には必要であるが、熱プラズマ中の溶融粒子の温度を計測することは簡単ではない。幸いなことに、プラズマ溶射用に二色放射測温法に基づく溶融粒子の温度計測システムが開発されており、そのシステムをガラスのインフライト溶融粒子の温度計測にも適用できる。しかし、二色放射測温法による溶融粒子の温度計測においては、溶融粒子からの放射光以外の発光も入射してしまうので、実際の粒子温度と異なる温度が計測されてしまう問題が指摘されている⁵⁾。

ガラスのインフライト溶融粒子の計測は、Tecnar社のDPV-2000を用いて行われている。溶融粒子からの発光をレンズで集光し、スプリッターで光路を分岐させた後、バンドパスフィルターを経て光検出部へと導入する。787 ± 25 nm, 995 ± 25 nmの二波長における発光強度を計測し、その強度比から溶融粒子の温度を計測している。また、この計測装置は、ファイバー手前に入射スリットを二つ設けており、

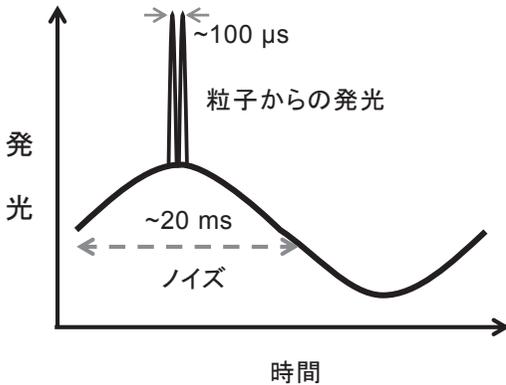


図3 DPV-2000における発光強度の時間変動の模式図

飛翔時間より粒子速度も同時に計測している。DPV-2000においては、2つの波長において被計測物質の放射率が等しいと仮定することで、二色放射測温法より温度を求めることができる。

DPV-2000で得られる発光強度の経時変化の模式図を図3に示す。発光体がDPV-2000の測定範囲を通過する際、二つの入射スリットに対応した二つのピークが得られる。プラズマ由来、断熱材由来のそれぞれの発光の場合、温度計測において重要となるのがその時間変動の周期である。この周期が粒子由来の二本の発光ピークより充分長い時間であれば、直接入射光

を分離して考えることができる。多相交流アークの場合、プラズマからの発光の周期は、多相交流アークの交流成分由来の20ms程度であると考えられ、粒子が測定領域内を通過する時間（この場合約0.1ms）と比較して充分長い。また、断熱材由来の直接光は大きな時間変動があるとは考えにくい。したがって、今回の系では直接入射光は影響を与えないと判断することができる。

粒子によるプラズマの反射光は粒子と同じタイミングで検出器に入射してしまうため、慎重に取り扱う必要がある。断熱材由来の粒子での反射光の影響を調べるために、アーク発生直後から断熱材表面温度が上昇し定常温度となるまでの間、粒子計測が行われている。その結果、断熱材温度が上昇しており、熔融粒子による断熱材由来の反射光が増加しているにも関わらず、粒子からの発光強度に目立った経時変化は見られなかった。すなわち、断熱材由来の粒子での反射光の影響は無視できると結論付けられる。

ここまで述べてきた種々の発光に対する検討より、最終的に検出器に入射する発光は、被計測物質の放射光とプラズマ由来の熔融粒子による反射光のみに絞ることができる。よって、粒子の温度計測には、この熔融粒子によるプラズ

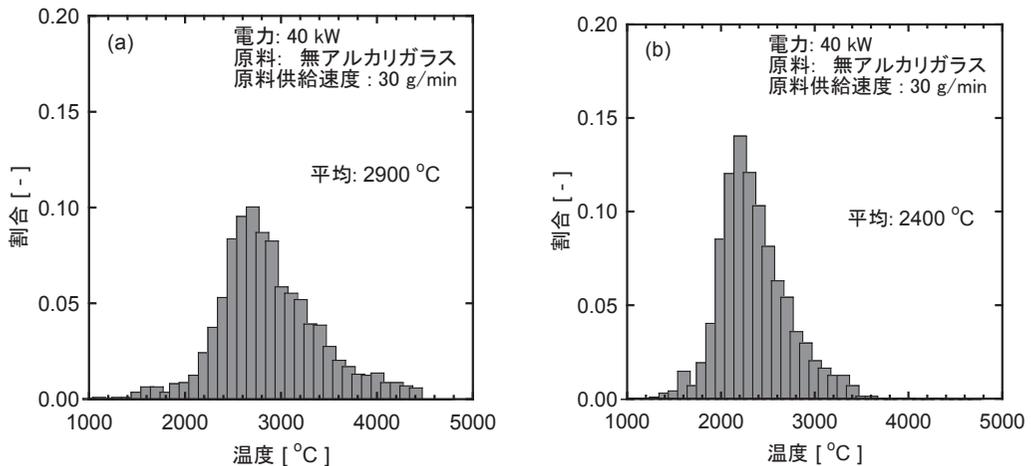


図4 (a)補正前のインフライト熔融ガラス粒子の温度分布および(b)同補正後

マ由来の反射光の影響を正確に評価することが重要となる。このためには、分光計測が重要な役割を担う。補正係数をあらかじめ分光的に計測し、その値を用いて発光強度の補正を行うことによって、溶融粒子の真の温度を求めることができる。

多相交流アークによるガラス原料のインフライト溶融プロセスにおける粒子計測結果を図4に示す⁶⁾。図4 (a) は補正前、図4 (b) は補正後の溶融中のガラス粒子の温度分布である。補正前の温度分布では、4000℃以上の高温の粒子が無視できないほど計測されており、溶融粒子の温度の計測結果としては現実的ではない。それに対し、補正後の温度は現実的な温度の範囲内に分布している。平均温度は補正前が約2900℃であるのに対し、補正後は2400℃程度となっており、反射光の影響で温度を過大評価していたことがわかる。

4. おわりに

本稿では、多相交流アークの放電現象と、適切な粒子計測を行うための試みに関して紹介した。DPV-2000を用いたプラズマ溶射の溶融粒

子に関する研究が多数行われているが、二色放射测温法に基づく計測システムの本質的な欠陥に気づかず、計測値をそのまま粒子の温度計測結果として発表している例がある。溶融粒子からの発光を検出する高温計測の場合、その実験系に存在する他の発光源や反射の問題を明確にし、適切な処方で計測することの重要性を具体例とともに示した。

プロセス全体の物理現象を把握して計測を行うことは、現象の真の理解につながるため、プラズマを用いたプロセッシングの高効率化や、さらには新たなプロセッシングの開発に発展していくことが期待される。

引用文献

1. M. Tanaka, *et al.*, *Current Appl. Phys.*, 11, p. S35(2011).
2. T. Watanabe, *et al.*, *Pure Appl. Chem.*, 82, p. 1337(2010).
3. Y. Yao, *et al.*, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 29, p. 333 (2009).
4. Y. Liu, *et al.*, *Thin Solid Films*, 519, p. 7005 (2011).
5. M. Tanaka, *et al.*, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 18, 112010 (2011).
6. Y. Liu, *et al.*, *Proc. 20th Inter. Symp. Plasma Chem.*, THE04 (2011).