



## 小特集 マテリアル工学およびエネルギー・環境工学を進展させる熱プラズマの生成と計測

### 3. 多相交流アークの生成と計測

#### 3. Generation and Diagnostics of Multiphase AC Arc

田中 学, 渡辺 隆行

TANAKA Manabu and WATANABE Takayuki

九州大学大学院工学研究院

(原稿受付: 2018年9月25日)

多相交流アークは、複数の電極に位相の異なる交流電圧を印加することで発生・維持する熱プラズマ発生手法の一つである。従来の熱プラズマと比較して高いエネルギー効率、広いプラズマ面積などの長を有するため、材料プロセッシングにおいて大きな期待が寄せられている。しかし、複雑な空間分布を有する熱プラズマがミリ秒オーダーで変動するため、プラズマ温度変動や電極における物理現象など、基礎現象の理解が充分でない点が問題であった。本章では、近年の計測技術の進歩によって明らかとなった多相交流アーク中の変動現象や電極現象の可視化・計測結果に基づき、多相交流アークの発生原理と特徴について解説する。さらに、近年開発された革新的な熱プラズマ発生手法である「ダイオード整流型」多相交流アークの発生についても解説する。

#### Keywords:

thermal plasma, multiphase AC arc, high-speed visualization, arc temperature, electrode phenomena, diode-rectification

#### 3.1 はじめに

熱プラズマの発生技術として、アーク放電を用いる手法が最も簡便であり広く用いられている。直流方式、交流方式があるが、現在は直流方式の方が多く採用されており、アーク溶接、切断、プラズマ溶射などの基盤技術に加え、ナノ材料合成[1]など、既に確立した技術として産業界で広く用いられている。また、4章で解説する水プラズマも直流方式で発生する手法を採用しており、廃棄物処理・エネルギー創造への実用化に期待がかかる。しかし、現在の送電設備は交流方式に基づいているため、直流電源を用いることは電源効率にデメリットがある。さらに、通常のアーク放電は、数mm～数cm程度の電極間距離で発生させることが多く、熱プラズマは局所的にしか生成しない。単純に直流アークを大容積化するには大電力が必要となり、電極消耗や電源効率の低下などの新たな問題が生じる。

交流方式で発生させる熱プラズマの用途は、現時点では広く産業界に普及している状況にはない。交流アーク溶接は既に産業界で用いられているが、その用途はアルミニウム溶接など、一部の用途に限られる。この主な要因として以下の二点がある。一点目は、交流方式であるため、電流値が0となる瞬間（ゼロクロスポイント）が存在し、交流周期毎のアーク消弧に起因した不安定性が生じるためである。また、電流値が時々刻々と変化するため、アーク自身が常に変動することも問題となる。二点目は、詳細は後述するが、交流方式では電極の消耗現象が直流と比較して大きいためである。しかし、電源効率の観点からは、交流方

式を採用するメリットは大きい。

以上の背景を基に、多相交流アーク (Multiphase AC Arc, MPA) を用いた熱プラズマ発生手法が開発されている。本章では、この多相交流アークの温度や電極の物理現象を、高速度カメラで可視化した計測結果を基に、多相交流アークの発生原理やその特徴について解説する。3.2節では、通常のアークについて解説し、3.3節では新規なダイオード整流型多相交流アーク (Diode-Rectified Multiphase AC Arc, DRMPA) についての解説を行い、3.4節で本章をまとめる。

#### 3.2 多相交流アーク (MPA)

##### 3.2.1 多相交流アークの発生

12相交流アークの電気回路の概略図を図1に示す。商用3相交流の入力から、R-S間、S-T間、T-R間、S-R間、T-S間、R-T間の電圧を用いることで6相交流を得る (図1上段の奇数番)。さらに、それらの6相交流を $\Delta$ -Y相変換トランスに入力することで、位相が30度ずれた6相交流出力 (R'-S', S'-T', T'-R', S'-R', T'-S', R'-T') を得る (図1下段の偶数番)。これら2種類の6相交流を合わせることで、位相が30度ずつ均一にずれた12相交流が得られる。この12相交流を用いて発生・維持させた12相交流アークの装置概略図および写真を図2に示す。

多相交流アーク発生システムでは、入力電力から熱プラズマへのエネルギー変換効率が高い。これは、12相交流電源が単相交流電源の組み合わせで構成されているため、電源効率が高いことが要因の一つである。さらに、従来の単

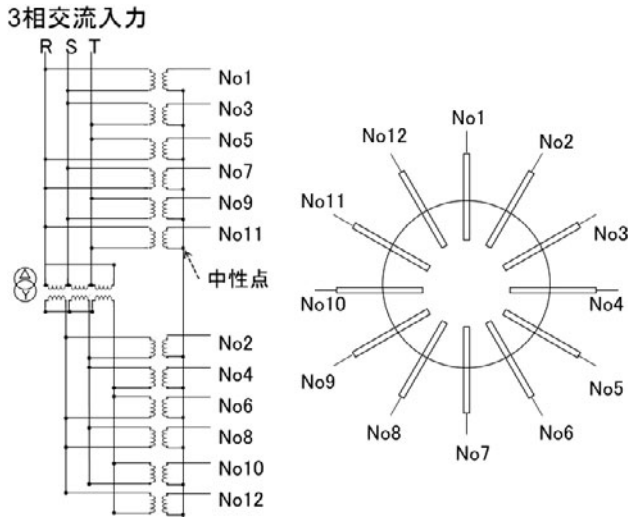


図1 12相交流アークの電気回路概略図。

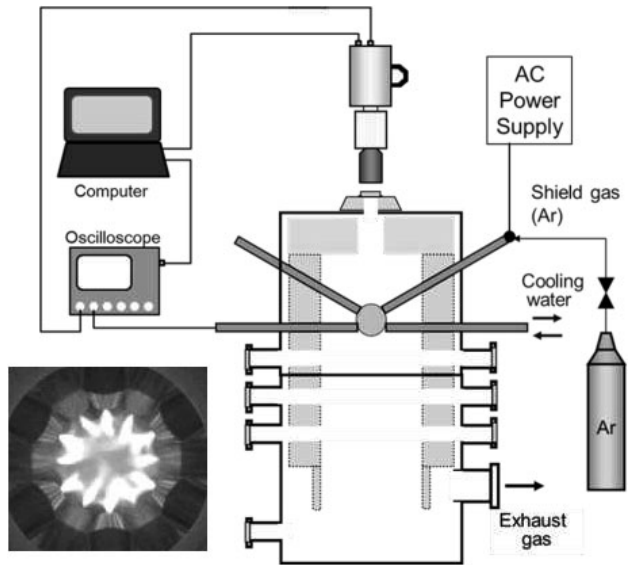


図2 多相交流アーク発生炉の概略図および12相交流アークの点弧写真の挿入図。

相交流アークの欠点であるアーク不安定性が改善されたことで、電源の力率が向上したことも要因である。なお、アーク安定性と力率向上については、過去の解説記事[2]を参照されたい。

上述の特長に加え、プラズマ体積が大きく、ガス流速が遅いことから、被処理物質への加熱効率が低い。さらに、出力の大きいシステムが実現可能であることから、様々なプロセスで用いることが期待されている。現在では、後述するインフライトガラス溶融のために構築された、空気雰囲気における多相交流アーク発生炉に加え、ナノ材料創成用に構築された雰囲気制御型多相交流アーク発生炉が開発されている。

3.2.2 多相交流アークのアーク温度計測

多相交流アークの温度場を明らかにすることは、多相交流アークを用いた各種プロセッシングの実現には不可欠である。熱プラズマの温度計測手法としては、プラズマ構成粒子からの線スペクトル発光強度を、分光器を用いて計測する手法が確立されている。しかし、ミリ秒オーダーで変

動し、かつ複雑な空間分布を有する多相交流アークの温度計測には、従来の発光分光法では時間および空間分解能が不足している。そこで、高速度カメラを用いた温度計測手法が極めて有用となる。

高速度カメラと特定波長のみを透過するバンドパスフィルタを組み合わせた計測システムを図3に示す。様々な発光を含み、その波長成分が多岐にわたる熱プラズマからの発光を、特定の二波長のみ成分に分離し、かつそれらの高速度画像を同期して得ることができる。本節では、プラズマ構成粒子であるアルゴン原子からの発光線スペクトルを用いた多相交流アークの二次元温度分布の可視化について解説する。

上述の二波長分光光学系を用いた高速度カメラ撮影は、その原理自体はシンプルであるが、実際の計測では注意すべき点が多い。最も重要な点は、適切なバンドパスフィルタの選定である。主たる選定基準として、(i)線スペクトルの独立性、(ii)二波長における異なる励起準位のエネルギー差が充分か、(iii)連続スペクトルの影響が充分に無視できるか、(iv)フィルタの透過波長範囲が適切か、(v)高速度カメラの検出感度は充分か、などが挙げられる。

高速度カメラを用いた可視化システムを構成する場合、三波長以上の同時撮影も原理上可能であるが、光学系での光のロスが大きくなるため、二波長が現実的である。また、多くの高速度カメラの検出分解能は8 bit または 12 bit (256 階調または4,096階調)であり、通常の発光分光器に属するCCD 検出器の16 bit (65,536階調)よりも大きく劣る。特に、二波長に対応する励起準位のエネルギー差が小さいと、それぞれの発光強度における小さな誤差が、強度比を算出する際の大きな誤差を生む。したがって、波長選定にはあらかじめ精密な分光器を用いた発光スペクトルを得ることが必要である。

図4に、多相交流アークの電極近傍における発光スペクトルの一例を示す。各電極の電流値は100 A とし、大気圧下の空気雰囲気中で多相交流アークを発生させた際の、電極近傍の発光スペクトルである。電極消耗抑制のため、電極周囲にはアルゴンガス (3 L/min) を流しているため、主にアルゴン原子からの線スペクトルが確認できる。ここで

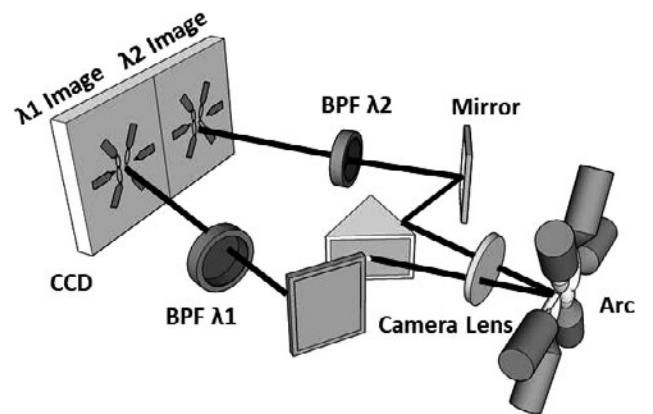


図3 高速度カメラとバンドパスフィルタを組み合わせた二波長分光可視化システム。

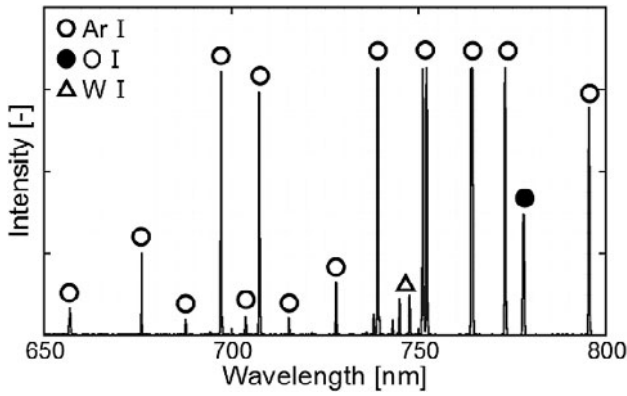


図4 多相交流アークの電極先端から5 mm の位置におけるアークからの発光スペクトルの一例。

は、上述の選定基準に基づき、794.8176 nm と 675.2834 nm のアルゴン原子からの線スペクトルを選定し、フィルタ波長域を  $794 \pm 5$  nm および  $675 \pm 5$  nm と決定した。

図5に、同様の条件で発生した多相交流アークの高速度カメラ画像を波長ごとに示す。電極から輝度の高いアークが生じている様子がわかる。これらの二波長の組み合わせの同期画像から、対応する場所ごとに発光強度比を算出する。これにより、複雑な空間分布と変動を有する多相交流アークの二次元の温度分布を可視化が可能となる。

図6に、交流60 Hz一周期中の多相交流アークの温度分布の一例を示す[3]。電極近傍のアークが最も高温であり、12,000 から 14,000 K 程度である。また、電極間の中心領域、すなわち多相交流アーク炉の中心に関しては、温度が7,000 K 程度である。この結果より、高融点材料の溶融、蒸発プロセスも可能な高温を十分に有していることがわかる。このように、高速度カメラと二波長分光光学系を組み合わせた計測システムを用いることで、多相交流アークの複雑な温度場の変動を可視化することが可能となる。

### 3.2.3 多相交流アークの電極現象

多相交流アークは、複数の電極を用いた交流方式のアークプラズマ発生手法であるため、電極消耗が原理的に生じる。電極からの不純物混入抑制や、電極の長寿命化を達成するためには、電極現象を理解し、消耗機構を明らかにすることが極めて重要となる。ここでは、先述のアーク温度場と同様の計測技術を用いて、多相交流アーク電極を可視化した計測結果に基づき、電極消耗機構を解説する。

多相交流アークは交流方式であるため、一本の電極に着目すると、常に陰極と陽極を周期的に繰り返す。陽極時は、

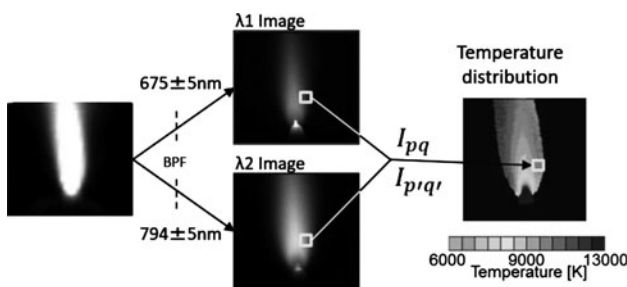


図5 多相交流アークの特定波長における高速度同期画像。

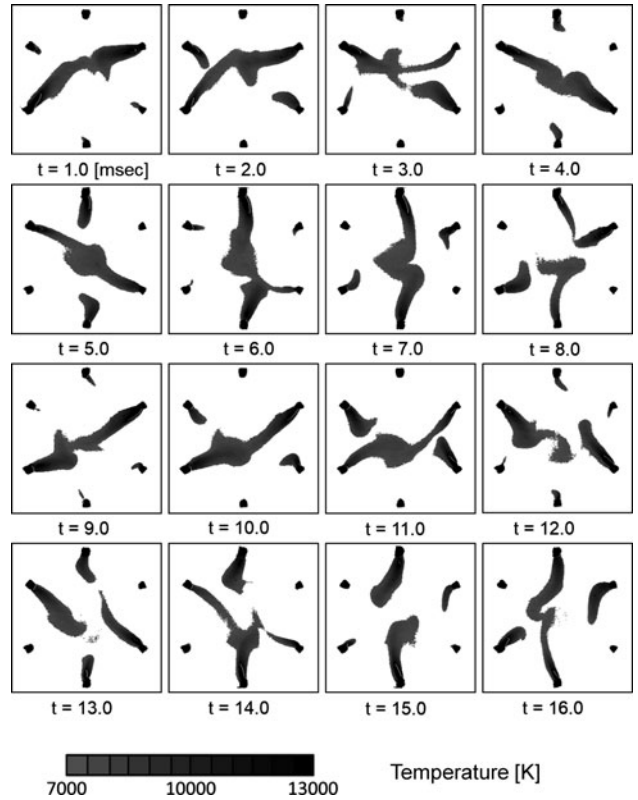


図6 交流60 Hzの一周期中の多相交流アークの二次元温度分布。(参考文献[3]の図5(a)を引用)。

電極は電子を受け取るため、仕事関数分の余剰エネルギーが電極を加熱する(発熱)。一方、熱電子を放出する陰極時は、仕事関数分のエネルギーにより電極は冷却される(吸熱)。このように陰極時と陽極時において、生じる基礎現象が異なるため、交流アークにおける電極消耗は陽極時と陰極時で分けて考える必要がある。

図7に、電極由来の金属蒸気とプラズマ中のアルゴン原子を可視化した高速度画像[4]を示す。用いたシステムは、先述のアーク温度計測システムと同様であり、バンドパスフィルタの波長のみが異なる。ここでは、電極由来のタングステン蒸気のみを可視化するため、393.5033 nm のタングステン線スペクトルを対象とし、透過波長域が  $393 \pm 1.5$  nm のフィルタを用いた。また、アルゴン原子の線スペクトル (738.3980 nm) に対応した  $738 \pm 2.5$  nm のフィルタも用いて、タングステン蒸気とアルゴン原子を同期観察することで、アーク中でのタングステン蒸気の挙動を明らかにした。陰極時では、タングステンの蒸発はあまり生じないのに対して、陽極時ではタングステンが激しく蒸発している様子が鮮明に確認できる。これは、陽極時において電極への熱的負荷が大きく、タングステン電極が溶融し、その融液からタングステンが蒸発したためである。これは、電極温度計測結果からも明らかであり、陽極時の方が電極温度が高くなる結果と対応している[5]。

これまでは可視化システムを用いてプラズマ構成粒子からの線スペクトルに対応したフィルタを用いることで、アーク温度や金属蒸気挙動の計測結果について解説してきた。ここからは、アーク光を除去し、電極表面からの熱放

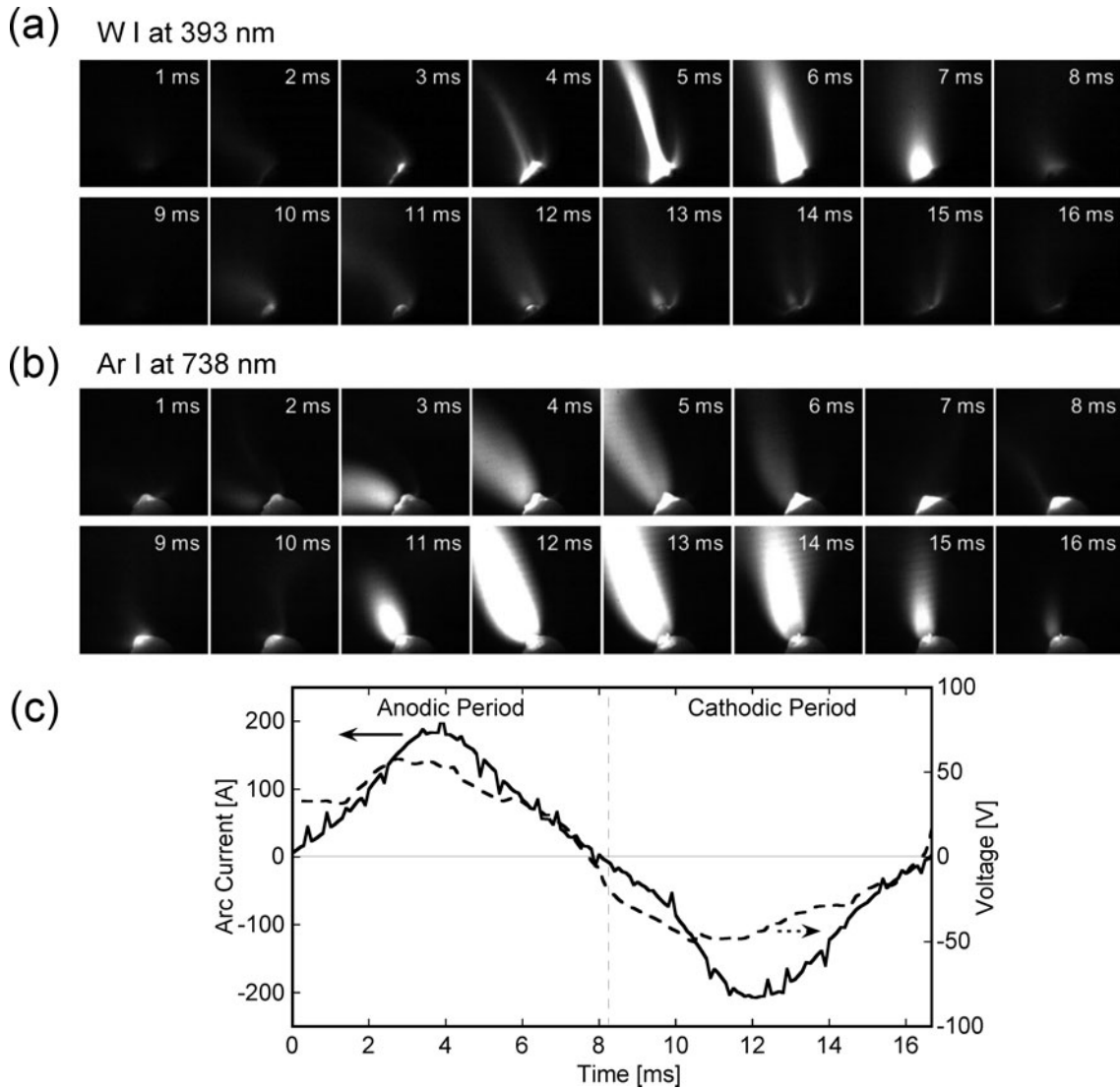


図7 多相交流アーク電極からのタングステン蒸発挙動。撮影速度:  $10^4$  fps, タングステン蒸気用フィルタ波長:  $393 \pm 1.5$  nm, アルゴン原子用フィルタ波長:  $738 \pm 2.5$  nm (参考文献[4]の図10を引用, Copyright (2016) The Japan Society of Applied Physics).

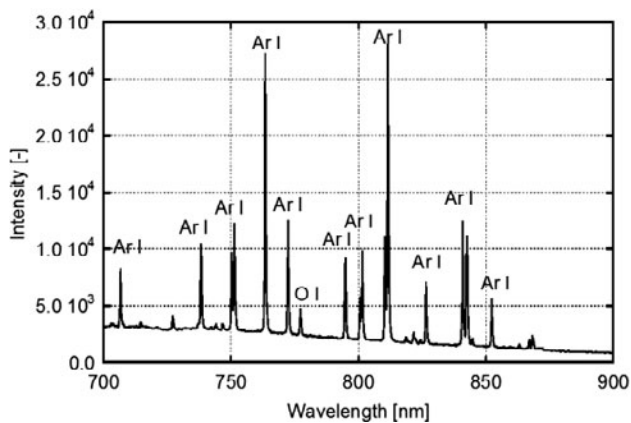


図8 多相交流アーク電極先端位置における発光スペクトル。

射のみを高速カメラで撮影することで、輝度の高いアーク中から電極のみを可視化した例について解説する。ここでも、波長選定が最も重要な点である。図8に、電極先端上における発光スペクトルの一例を示す。電極由来の連続光と、アーク由来の線スペクトルが確認できる。ここか

ら、 $785 \pm 2.5$  nm の透過域を持つフィルタが選定された。

図9に、アーク光を除去し、電極先端部のみを可視化した高速画像を示す[4]。陰極時における、熔融電極先端からの液滴飛散の様子を高速カメラで捉えることに成功している。熔融した電極先端からの液滴飛散は、主として陰極時に生じることがわかっている。これは、電極先端にかかる力のバランスが崩れることに起因している。詳細は[4,6]を参照されたいが、陰極時に主として生じる要因として、陰極時の方が電極先端における電流密度が大きく、それにより陰極先端を絞る力となるローレンツ力が大きいためである。

以上のように、特定波長のみを透過するバンドパスフィルタと高速カメラを組み合わせることで、複雑な電極現象も明らかになりつつある。

### 3.2.4 多相交流アークの応用

多相交流アークの特長を生かした、様々なプロセスへの産業応用が期待されている。ナノ材料合成プロセスへの応用や廃棄物処理など、多相交流アークの応用は多岐にわたって検討されている。それらの詳細は、[2]を参照され

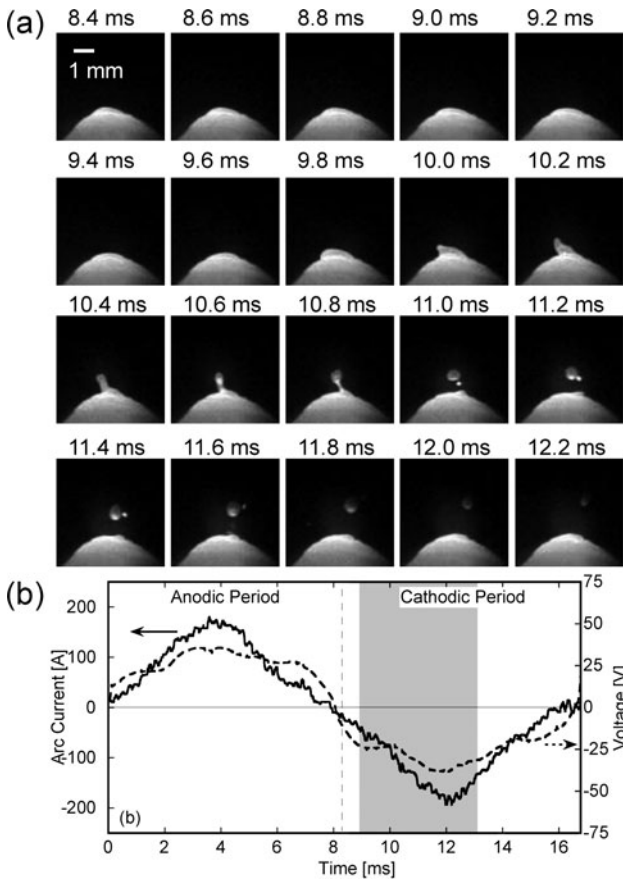


図9 陰極時における多相交流アーク電極からの液滴飛散挙動。撮影速度：10<sup>4</sup> fps、フィルタ波長：785±1.5 nm (参考文献[4]の図8を引用, Copyright (2016) The Japan Society of Applied Physics).

たい。本章では、特に重点的に検討が進められてきたガラス溶融に関する応用事例について少し詳しく解説する。

ガラス製造に使用されるエネルギーは、その大部分が原料を高温で溶融して製品に使用可能な品質の融液を得る過程、すなわち溶融過程で消費されている。これまでに様々な溶融技術が考案されている中で、インフライト溶融法が注目されている。これは、100 μm 程度に造粒したガラス微粉末原料を、熱プラズマなどの高温中で溶融することで、溶融工程を大幅に短時間化する方法である。このインフライト溶融法に用いる高温場として、熱プラズマの可能性が検討されている。多相交流アークは、熱プラズマの中でも大面積、大容積である点が新規であり、かつエネルギー効率が低いという特長を有するため、ガラス原料のインフライト溶融に適した高温場と言える。これまでに、ソーダ石灰ガラス[7,8]や無アルカリガラス[8]などの検討がなされており、有用性が明らかになっている。さらに、多相交流アークと酸素燃焼炎の組み合わせによる燃焼炎-多相交流アークハイブリッドプラズマ[9,10]が開発されており、今後の展望に期待がかかる。

本節3.2では、多相交流アークの発生原理、最新の計測技術に基づく基礎現象の現状の理解から、現在検討されている応用面について概説した。しかし、多相交流アークをさらに広い分野に応用展開していくには、電極消耗の低減化

が不可欠である。そこで次節では電極消耗を劇的に改善するための最新の方策について紹介する。

### 3.3 ダイオード整流型多相交流アーク (DRMPA)

#### 3.3.1 ダイオード整流型多相交流アークの発生

パワー半導体を用いた電極消耗の大幅低減化に関する事例を紹介する。前節で述べた通り、電極消耗の低減は多相交流アークの実現に向けて必要不可欠である。近年劇的に開発が進んでいるパワー半導体を用いて、100 A オーダーの電流を整流することで、電極消耗の抜本的解決を目指した研究が進んでいる[11]。

陰極および陽極の役割・求められる物性・代表的な材料を表1にまとめる。陰極時は、安定な熱電子放出のため低仕事関数かつ高融点材料が適する。そのため、仕事関数の小さいトリウム、ランタナ、セリアなどの金属酸化物を電子エミッターとして数 wt% 添加したタングステンが熱陰極として主に用いられる。陽極時では、電子凝縮による発熱を伴うためアークからの総伝熱量が大きくなるが、電極を高温に維持する必要性はない。したがって、高熱伝導材料が適しており、銅を直接水冷して用いるのが主流である。このように、陰極と陽極はそれぞれの異なる役割に起因して、求められる物性が異なる。

交流アーク電極は、陰極時・陽極時と交互に電子放出・電子凝縮の役割を担うため、陰極および陽極のどちらにも適した材料選定が必要となる。しかし、特に電流値が100 A 以上の大電流アークにおいては、陰極時・陽極時に適した特性を同時に有する電極材料は現存しない。したがって、交流アークにおいては電極消耗が問題となる[12]。現状では、安定な放電を維持するため、消去法的に酸化物添加タングステンを用いる方法が主流である。これは、多相交流アークも例外でなく、通常交流アークより電極消耗が大きいことも報告されている[13]。さらに多相交流アークは電極を多数用いた熱プラズマ発生手法であるため、電極消耗は特に重要な課題である。

以上の背景より、ダイオード整流を用いた新規な多相交流アーク発生手法が考案されている。従来型の多相交流回路とダイオード整流型の回路概略図を図10に示す。従来の多相交流回路は、図10(a)に示す通り、一本の電極が陰極と陽極を担う。そこで図10(b)に示す通り、ダイオード整流により半波整流し、一本の交流電極を一对の陰極と陽極の組み合わせとする。これにより、酸化物添加タングステンを陰極とし、水冷銅を陽極とすることが可能となり、適切

表1 代表的なアーク電極の役割、物性、材料。

	陰極	陽極
役割	電子放出	電子受取
要求される物性	低仕事関数	高電気伝導度
	高融点・沸点	高熱伝導度
	高電気伝導度	高融点・沸点
代表的な材料	酸化物添加タングステン	銅
	ハフニウム	銅

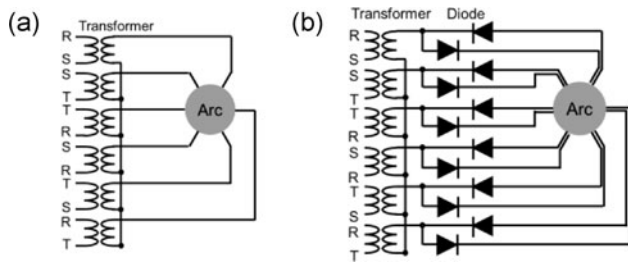


図10 多相交流アークの電気回路概略図, (a)従来型, (b)ダイオード整流型.

な電極材料が選定できる. 今回は,  $\phi 3.2$  mm のトリア添加タングステン棒と $\phi 20$  mm の水冷銅を図11に示すように放射状に6組配置したダイオード整流型6相交流アークについて紹介する.

### 3.3.2 ダイオード整流型多相交流アークの電極現象

ダイオード整流型多相交流アークと従来型の多相交流アークにおける電極消耗量の実験結果を図12に示す[11]. これは, 10分間の放電前後の質量減少分から算出されている. 従来型の多相交流アーク電極の消耗量は, 陰極時と陽極時での区別が困難なため, 合計した値が示されている. 結果, 従来型の電極消耗量と比較して, ダイオード整流型の陰極と陽極の消耗量の合計値が劇的に減少している. この一つの要因は, ダイオード整流による交流電極の分割により, 陽極時の消耗量を大幅に低減化できたためである. タングステンと比較して熱伝導度の高い銅を陽極に選定し, 十分な水冷を施すことで, 陽極消耗が大幅抑制されている.

一方, 同様の材料であるトリア添加タングステンにおける陰極時の電極現象を明らかにするため, 高速度カメラを用いた二色放射測温法に基づく電極温度計測が行われている. これまでと同様に, 図3に示した計測システムが用いられている. ただし, 3.2.3節で述べた飛散液滴挙動の可視化時と同様に, アークからの強い発光を除去して電極からの熱放射のみを捉えるが, それを二波長同時に行う必要がある. そこで, 図8に示されている発光スペクトルを基に, アークからの強い発光を除外し, 電極表面からの熱放射のみを捉えることのできる波長域を調査した結果,  $785 \pm 2.5$  nm と  $880 \pm 5$  nm の二種類の波長域のフィルタが選定された. それらの二波長の電極同期画像を用いて, 二色放射測温法の原理に基づき計測された電極表面温度分布を図13に示す[11]. 図13では, 交流一周期分のダイオード整流型と従来型の電極温度分布を, 同期測定した電流波形と合わせて示している. 交流周期中のいずれのタイミングにおいても, ダイオード整流型の電極の方が, 従来型の電極温度よりも低い. 陰極時の電流波形は従来型もダイオード整流時もほぼ等しく, 瞬時値として最大 230 A 程度の電流が流れている. つまり, 瞬間的に 230 A 程度の大電流が流れているタイミングにおいても, ダイオード整流型のタングステン電極の方が, 明らかに電極温度が低くなっている.

上記のような結果が得られた理由として, 現段階では以下のように推察されている. 測定結果より, ダイオード整流型の電極温度は約 3,500 K であり, タングステンの融点

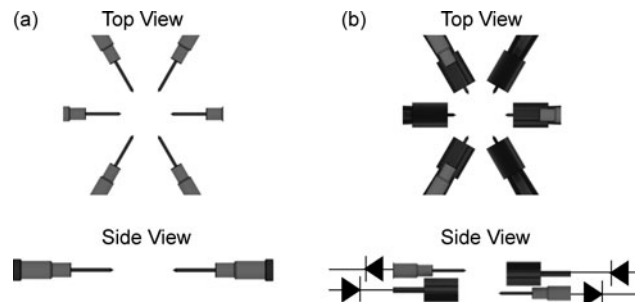


図11 多相交流アークの電極構造の模式図. (a)従来型, (b)ダイオード整流型.

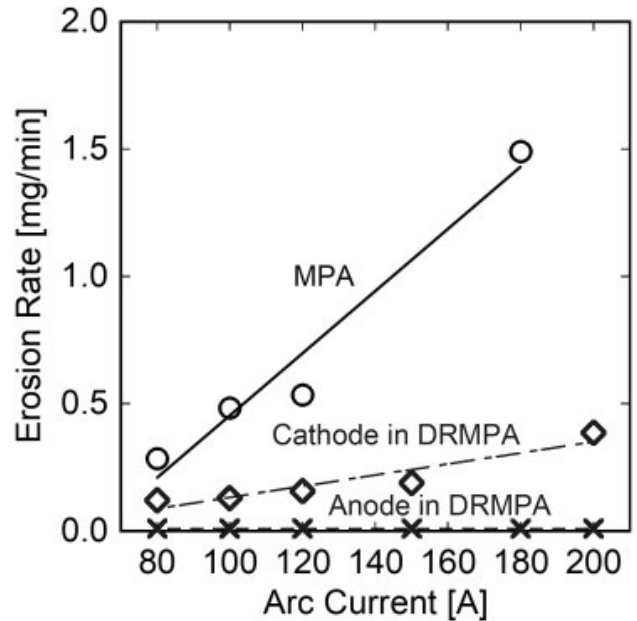


図12 ダイオード整流型多相交流アークおよび従来型多相交流アークの電極消耗量に及ぼすアーク電流値の影響(参考文献[11]の図9を引用).

(3,675 K) より低く, 添加物であるトリアの融点 (3,323 K) より高い. したがって, トリアの融液が電極表面を被覆し, トリアから熱電子が放出されている. 一方で, 従来型の多相交流アークの場合, 陽極時の熱負荷が大きいため, タングstenは完全に熔融状態になる. したがって, 数 wt%しか添加されていないトリアよりも, 主成分であるタングstenが熱電子放出の主体を担う. 陰極時に限れば, ダイオード整流の有無に依らず, 瞬間的に流れるアーク電流値が等しいにも関わらず, 電極温度および消耗量に大きな違いが現れた主要因は, 熱電子を放出する主物質が異なるためである. 従来型では仕事関数の大きいタングsten (4.5eV) が熱電子放出を担うが, ダイオード整流時はトリア (3.2eV) から熱電子が放出されるため, ダイオード整流型では電極温度が低くなり, その結果消耗の抑制につながったと考えられる.

以上, ダイオード整流型の多相交流アークを用いることで, これまでの課題であった電極消耗を大幅に低減化した. このように, 大電流の整流が可能なパワー半導体技術を活用することで, 従来にない革新的な熱プラズマ発生システムが構築できる.



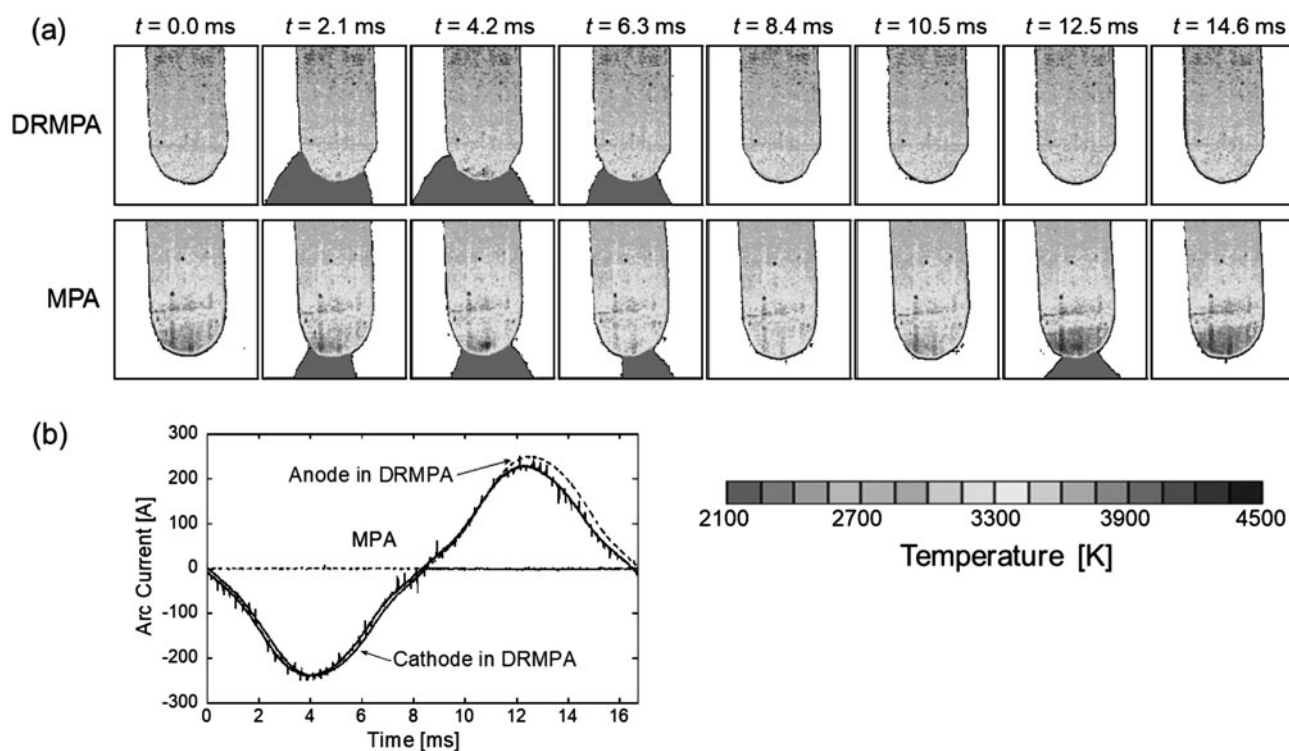


図13 電極温度分布の交流一周期中におけるスナップショット(a)および同期電流波形(b) (参考文献[11]の図10を引用)。

### 3.4 まとめ

本章では、多相交流アークの生成方法について記述するとともに、それらの計測結果の一部を紹介した。特に、パワー半導体技術の進歩により実現が可能となったダイオード整流型多相交流アークは、これまでの課題であった電極消耗を抜本的解決に導く可能性をもつ。このような、パワー半導体や、可視化・計測技術の進歩により、さらなる高効率、高制御性の革新的熱プラズマ発生技術が開発されることで、マテリアルおよびエネルギー環境工学への熱プラズマの貢献に期待がかかる。

### 参考文献

- [1] M. Shigeta and A.B. Murphy, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 174025 (2011).
- [2] 田中 学, 渡辺隆行: *化学工学* **78**, 213 (2014).
- [3] T. Okuma *et al.*, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **47**, 32 (2018).
- [4] M. Tanaka *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 07LC01 (2016).
- [5] M. Tanaka *et al.*, *J. Phys. Conf. Seri.* **441**, 012015 (2013).
- [6] T. Hashizume *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 056101 (2017).
- [7] Y. Yao *et al.*, *Plasma Chem. Plasma Process.* **29**, 333 (2009).
- [8] T. Watanabe *et al.*, *Pure Appl. Chem.* **82**, 1337 (2010).
- [9] Y. Liu *et al.*, *Thin Solid Films* **519**, 7005 (2011).
- [10] M. Tanaka *et al.*, *Thin Solid Films* **523**, 67 (2012).
- [11] M. Tanaka *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 4656044 (2017).
- [12] T. Hinata *et al.*, *L. Light Met. Weld.* **26**, 97 (1988).
- [13] M. Tanaka *et al.*, *J. Fluid Sci. Technol.* **8**, 160 (2013).