

新東技報

Sinto Technical Report

2007
NO.25

プラズマを用いた未踏プロセス技術・装置の開発

豊橋技術科学大学
滝川 浩 史

1. はじめに

地球に、人類に、無尽蔵で豊富な恵みをもたらす太陽の表面はプラズマ状態にある。プラズマとは電離状態にある気体のことである。プラズマは、通常的生活空間では見られない特殊な環境を発生させることができる。それは、高温場であったり、発光源であったり、電子・イオン・ラジカルなどの活性粒子を含んだ場であったりする。研究室では、電気エネルギー技術の発展的利用と応用の立場から、『プラズマ』をキーワードとして、様々な分野で利用可能な未踏技術を確認することによって社会へ貢献できる成果を目指し、「ものづくり」研究を推進している。

図1に研究の概要を図示する。大別すると、天然プラズマである太陽をエネルギー源として電力や熱を有効に得る「太陽エネルギー変換工学」、電気エネルギーを用いて放電プラズマを発生

させ、その放電プラズマを利用した機器の開発をはじめ機能性ナノ材料や薄膜の創製や個体表面の処理などを行う「プラズマ応用工学」、プラズマを用いて創製した材料を利用して、次世代のエネルギーサプライシステムである燃料電池やスーパーキャパシタを構築する「クリーンエネルギーデバイス工学」の三つの領域にわたった研究である。以下、これらの取り組みを紹介し、研究成果について概説する。

2. 太陽エネルギー変換工学領域

太陽エネルギーは豊富で無尽蔵であるという利点に対し、自然現象であるがゆえにエネルギー取得が不安定であるという欠点がある。つまり、曇っていたら太陽光発電量は少なく、風が吹かなければ風力発電はできない。また、人間生活において消費する側から見ても、日夜の変化の



図1 研究内容とその関連図

ほか、気温や季節によってエネルギー需要が変化する。このような取得エネルギーの変化および需要エネルギーの変化に対応し、太陽エネルギーを有効に利用するためには、エネルギー変換機器自体の高効率化も必要であるが、システム全体の構成や運転制御も重要である。この領域では、これまで長年にわたり独自に計測を継続してきた気象観測データの分析をもとに、独自開発した経験的気象予測法と取得エネルギー予測法を確立することによって、エネルギーの有効利用のためのシステム構成および運転方法を決定できるシミュレータソフトウェアの開発を進めている。その成果の一部は2007年1月末までにWEB(<http://www.renewal.tut.ac.jp/>)公開する予定である。

また、太陽光発電システムのコスト削減を目指し、新しいシステムの開発を進めている。現行の太陽光発電システムでは、太陽電池そのもののコストが約50%を占め、これがコスト高の原因となっている。そこで、ミラー型集光装置を用いた太陽光発電システムを考案し、太陽電池の使用量を低減することでコスト削減を図った。現在、図2に示すようなプロトタイプを試作し、フィールドテストを行っている。

3. プラズマ応用工学領域

3.1. 真空アーク蒸着と薄膜合成

真空アーク放電プラズマは、電力保護機器の

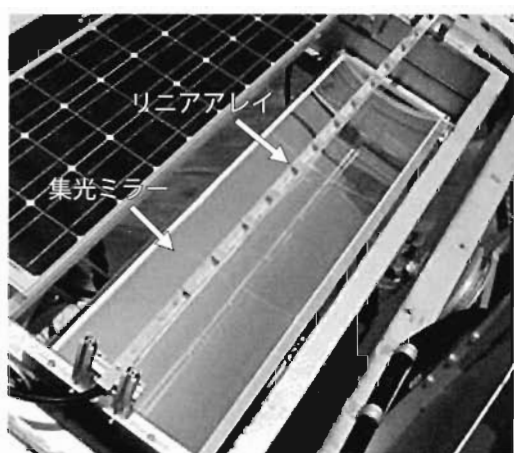


図2 太陽電池セル直線状配置のミラー集光型低コスト太陽光発電システム(LAPS)の試作機

一つである真空遮断機で発生するプラズマである。これを薄膜形成プロセスに応用展開したものが真空アーク蒸着(国内では、商品名としてアークイオンプレーティング(AIP)、マルチアークなどと呼ばれている)である。一般の蒸着法とは異なり、プラズマ中に含まれるイオンのエネルギーが極めて高いという特徴を持つ。従来、同手法を用い、ドリルやエンドミルなど切削工具の保護膜(窒化チタンや窒化クロム)形成が産業的に行われている。

真空アーク蒸着の魅力の一つは、水素フリーで sp^3 (テトラヘドラル)構造を多く含むダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜を形成できることにある。DLCと言っても図3に示すように様々な状態があり、それぞれ透明性・導電性・硬さ・摺動性などの特性が異なる。水素フリー・テトラヘドラルDLC(ta-C)は、真空アーク蒸着法が唯一の形成手法であり、特にアルミのドライ切削用工具に対して最適な保護膜であると考えられている。

しかしながら、真空アーク蒸着法は、プラズマ発生源である真空アーク陰極からその材料の微粒子(ドロップレット)を大量に放出し、ドロップレットが生成膜に付着すると膜質の著しい低下を招くという欠点を有している。ドロップレットの膜への付着を抑制するため、プラズマを磁氣的に屈曲させてドロップレットをプラズマから分離除去するというフィルタードアーク法がある。報告者らは、これまでにT字状フィルタードアーク蒸着装置(T-FAD)、X字状フィルタードアーク蒸着装置(X-FAD)、Y字状フィルタードアーク蒸着装置(Y-FAD)の3機種を独

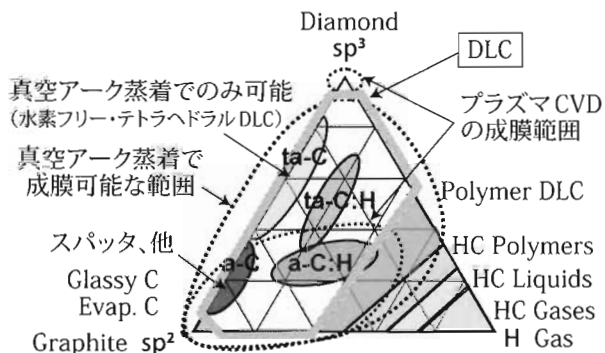
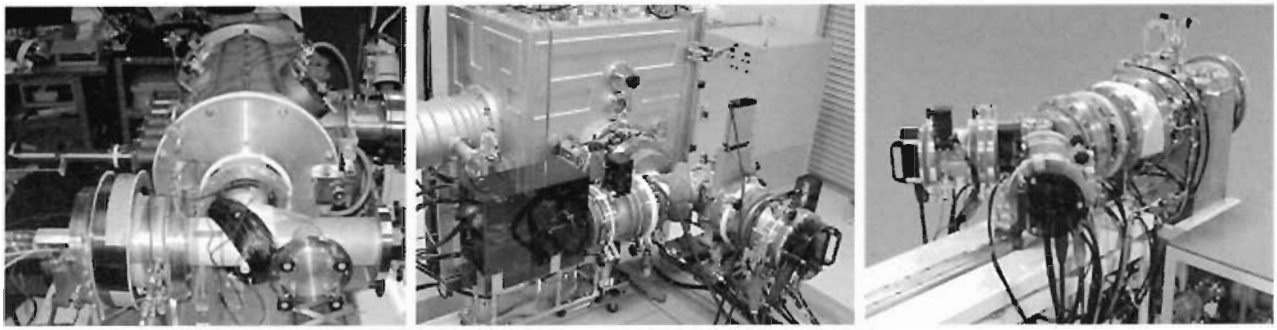


図3 DLCの分類

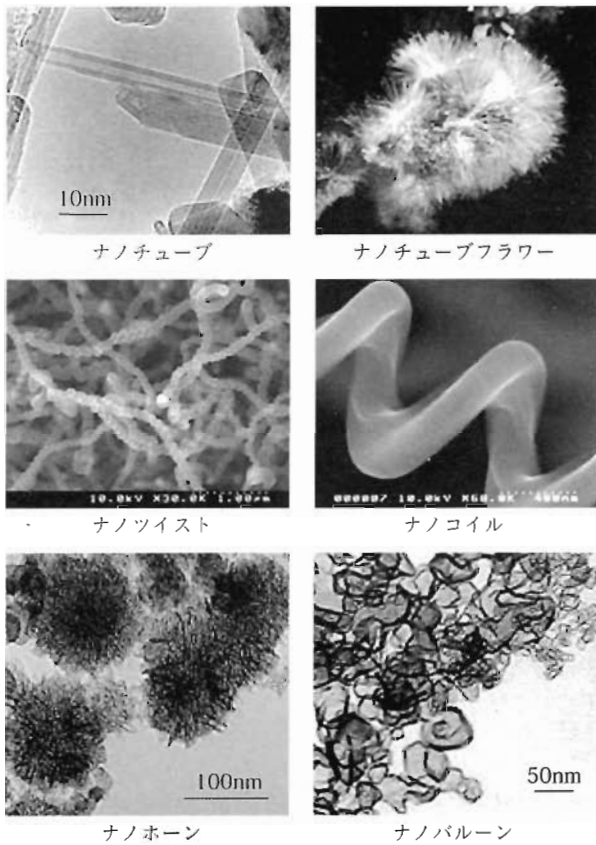


(a) T-FAD

(b) X-FAD

(c) Y-FAD

図4 開発したフィルタードアーク蒸着装置(FAD)



ナノチューブ

ナノチューブフラワー

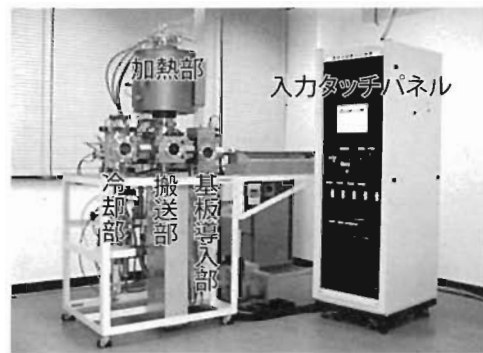
ナノツイスト

ナノコイル

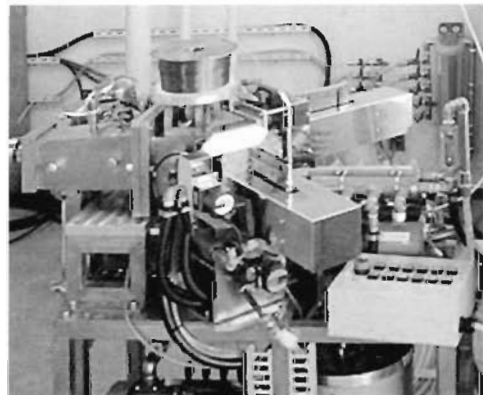
ナノホーン

ナノバルーン

図5 各種ナノカーボン



(a) 連続基板CVD装置



(b) アーク放電式合成装置

図6 ナノカーボン合成装置

自開発した。それらを図4に示す。T-FADおよびX-FADは、水素フリー・テトラヘドラルDLC膜コーティング用生産設備として民間メーカーへ一部導入し、さらに追加導入が決定している。また、Y-FADは金属・非金属多元素薄膜形成のR&D用設備として開発し、現在1,000°C耐熱保護膜の開発を進めている。

3.2. カーボンナノ材料創製

大気圧近傍の大電流アーク放電熱プラズマお

よび触媒CVD(気相化学成長)法を用い、フラーレンやナノチューブに代表されるナノカーボン素材の開発および量産技術・装置の開発を進めている。図5に報告者らが合成した様々なナノカーボンを示す。中でも、カーボンナノコイル・ナノツイスト・ナノバルーンは報告者ら独自のものである。図6には、カーボンナノコイル・ナノツイストの量産装置として開発した自動連続基板CVD装置、および燃料電池電極用ナノカーボン合成用に開発したアーク装置を示す。カー



図7 カーボンナノチューブディスプレイ

ボンナノコイル・ナノツイストは、電界電子放出素子としての応用の他、電磁波吸収フィルターなどへの応用を目指し開発を継続している。図7に、カーボンナノチューブを電子源として試作したディスプレイを示す。ガラス2枚の両方向から発光表示の視認が可能な世界初の透明表示管である。

3.3. 大気圧メゾプラズマ装置とその応用の開発

大気圧プラズマを用いたプロセスは、従来の真空プロセスや湿式プロセスから脱却できる可能性を秘めたプロセスとして近年注目が集まっている。大気圧プラズマの応用可能性をまとめ

たものを図8に示す。大気圧プラズマは、印刷産業、電子・半導体産業、自動車産業、医療、環境などの分野において徐々に導入が進みつつある。また、現在、特に未踏技術である次世代プロセスとして、成膜、膜特性改質、粉体合成、低温焼結などへの応用・利用に大きな期待が寄せられている。

大気圧プラズマの発生方法は様々なものがあるが、中でも高出力が得られる方法として、パルスアーク式がある。この方法で得られるプラズマは、従来の熱プラズマと低温プラズマとの間の温度領域のプラズマを発生させることができ、かつ、活性種を大量に含むという特徴がある。この特徴から、同種のプラズマを大気圧メゾプラズマと呼んでいる。

大気圧メゾプラズマの特徴は、プラズマサイズが比較的微小であるということである。これは、局所の処理には好適であるが大面積処理には向かない。従って、プラズマを同時にかつ多数発生させる必要がある。この理由から、大気圧プラズマ装置の実用化に向けては、電源の開発とプラズマ発生装置の開発とが必要である。そこで電源については、1台の電源で複数のメ

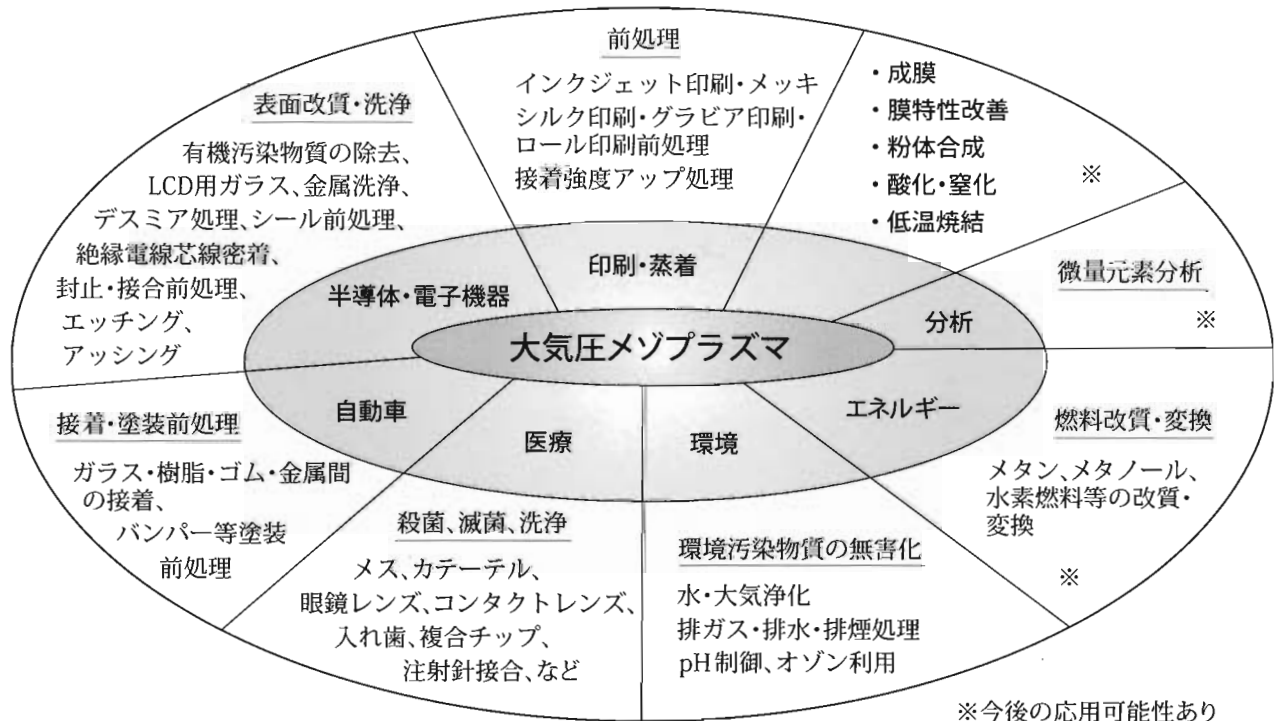
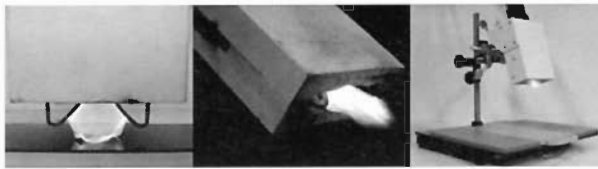
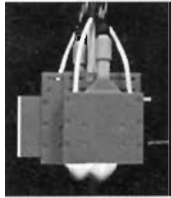


図8 大気圧プラズマ(特に大気圧メゾプラズマ)の応用例



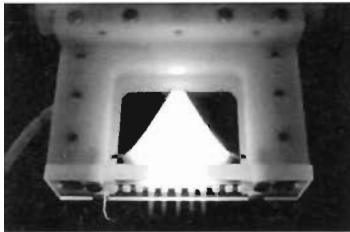
通常単発型(スタンダード型)



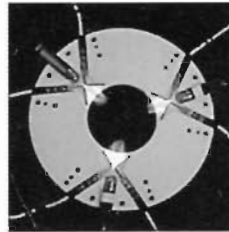
2連型



表裏24連型

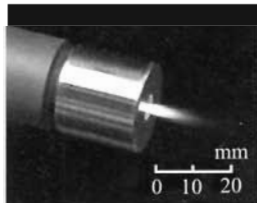


スプリット型

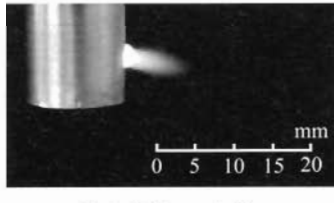


内向型

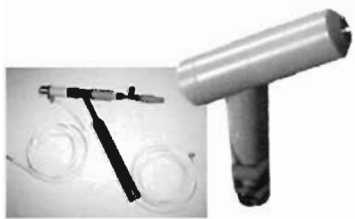
(a) グライディングアーク型



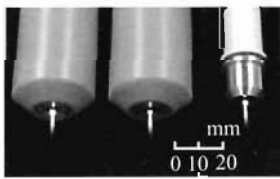
スタンダード型



サイドジェット型



水冷型



3連同時放電型



ハイパワー 4-in-one型

(b) ペンジェット型

図9 開発した大気圧メゾプラズマ装置の一例

ゾプラズマを同時発生させることができる多出力電源を開発した。開発したメゾプラズマ装置



図10 大気圧メゾプラズマ発生用電源

の一例を図9に、電源の一例を図10に示す。開発中の大気圧メゾプラズマとしては、グライディングアーク型と、ペンジェット型とに大別できる。グライディングアーク型は古くから知られており、擬似的な平面プラズマジェットである。平面(一列配置)や立体物体の外表面処理(ロボットアーム取り付け)に向いている。ペンジェット型は報告者考案のメゾプラズマ装置であり、室温から最高800°Cの温度を発生させることができる。局所処理や円筒内面処理などに向いている。これらのメゾプラズマの基礎特性を追究するとともに、実用的な応用機能の評価を行ってきている。例えば、樹脂同士の接着前に樹脂表面にメゾプラズマを照射することによって接着強度が2割以上増加することを見出している。現在、他の応用として、内部応力レス薄膜・厚膜形成、樹脂・金属の接着性改善、粉体球状化処理、難処理樹脂の処理などを検討するとともに、それらを実現するための専用メゾプラズマ発生装置の開発研究を推進している。

4. クリーンエネルギーデバイス工学領域

太陽光発電システムや風力発電システムでは、不安定な自然現象からのエネルギー取得の対策として、電力供給を安定化するため、燃料電池やキャパシタをバッファとして組み込むシステムが検討されている。一方、燃料電池やスーパーキャパシタは、未来の自動車・電車・船舶などの交通システムやモバイル用電子機器などの分野でも将来のクリーンエネルギー供給デバイスとして大きく期待されている。現在、直接

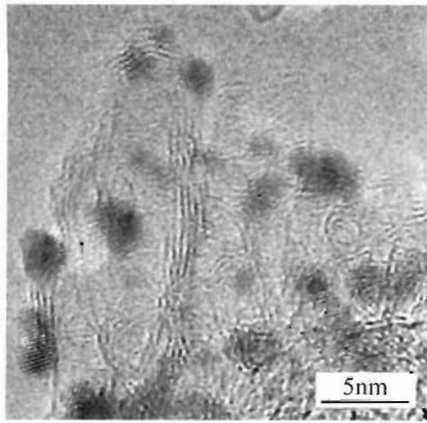


図11 燃料電池用の白金ナノ粒子を担持したナノカーボン

メタノール型燃料電池(DMFC)と、電気二重層とレドックス反応とを併用したスーパーキャパシタの開発研究を進めている。これらのデバイスへ前述の報告者自開発のナノカーボンを利用することを検討し、DMFCにおいては、従来の市販の炭素材よりも優れた性能を発揮することを明らかにしている。DMFCやスーパーキャパシタの電極には、金属ナノ触媒を担持した炭素材が必要である。これまでに、平均約2nmの白金ナノ粒子をナノカーボンに高密度で担持する技術を構築してきた。アーク放電で合成したナノカーボンに白金ナノ粒子を担持した例を図11に示す。図中で黒く写っているのが白金ナノ粒子である。

5. おわりに

『プラズマ』を主軸テーマとした研究開発を推進し、電力工学領域のみならず、表面加工学、物質工学、電気化学など幅広い領域の技術を駆使し、革新的未踏プロセスおよび装置の開発や素材開発、ならびにそれらの応用に関する研究を進めている。特に、放電プラズマを用いたフィルタードアーク蒸着システムや大気圧メゾプラズマシステムは高く評価あるいは期待されている。今後、それらの放電プラズマ特性と機能性とを基礎的観点から学術的に追究するとともに、産業的実用化へ向けての研究開発に更に邁進したい。