

# プラズマ滅菌測定を支援する周波数コム

物質の部分イオン化状態—プラズマが特定の細菌の殺滅と表面の消毒に有用であることはかなり前から知られている。しかし、どのプラズマ源と菌種混合物が滅菌処理工程で最も高効率であるかを決定するには、プラズマ排出物中に存在する過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )、オゾン ( $\text{O}_3$ )、亜酸化窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ )、二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ ) などの分子ガスの濃度を測定しなければならない。

標準のフーリエ変換赤外 (FTIR) 分光計は、分子スペクトルを高い信号対雑音比で測定するのに長時間を要する。そこで、JILA (コロラド大学と国立標準技術研究所 [NIST] の共同研究機関)、コロラド大学、および米スーパー・パルス社の研究チームは、代わりに周波数コムを使って超高速かつリアルタイムでのガス測定を実施し、これらの広帯域光源の利用をさらに生物医学光学とバイオフィotonicsの領域へと拡大した<sup>(1)</sup>。

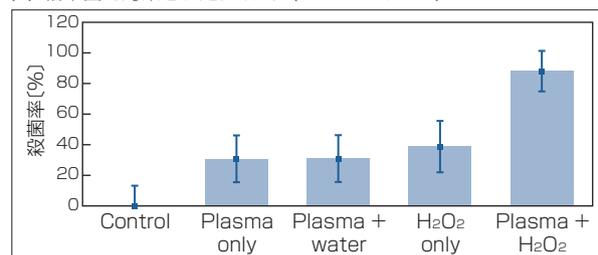
## プラズマ発生

間接 (遠隔) または直接 (処理領域が近接) の両プラズマ生成法を抗菌用途において試験した。研究チームは、 $\text{H}_2\text{O}_2$  添加物による誘電体障壁放電 (DBD) を使って、プラズマ誘起排出物を生成した。プラズマによって生成されたフリーラジカルや活性酸素種が含まれるので、閉ループのフローシステムを使った。排出物の流量は118リットル/分であった。最大滅菌作用を得るために50% $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液バブラーをDBDとともに能動的に使用した。

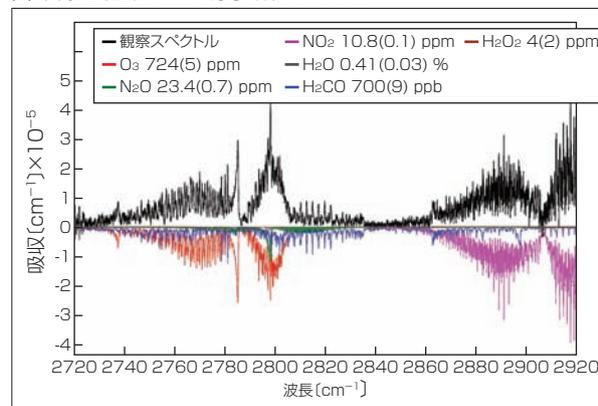
## 周波数コム測定

直接周波数コム吸収分光法を使って、

(a) 枯草菌で汚染されたディスク ( $10^6$  CFU, n=6)



(b) 観察と最良あてはめ分子吸収スペクトル



対象試料の細菌の「不活化」パーセンテージを最大化するプラズマ生成ガス濃度を測定した (図1)。この実験で使用した光源は、2.8~4.6 $\mu\text{m}$  の範囲で連続的に波長可変な150nmの広帯域スペクトルを発生する、1064nmの高出力フェムト秒イッテルビウム (Yb) ファイバレーザで励起された中間IR光パラメトリック発振器である。プラズマ排出物は、光ビームとガス試料間の相互作用長が18mの流路中のマルチパスヘリオット型セル内を流れる。マルチパスセルを出射する光を高速走査フーリエ変換干渉計で分析した。

ガス濃度はHITRAN分子データベースから得た既知の分子スペクトルの和をあてはめることによって決定し、測定は約1秒間実施した。

図1 過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) バブラーと組み合わせたプラズマ排出操作は、プラズマのみ、プラズマと水、あるいはバブラーのみに比べて、枯草菌の孢子の約90%を不活性化することができた(a; 資料提供: スーパー・パルス社)。表面の消毒に最適な排出濃度と混合物を決定するために、直接周波数コム吸収分光法を使って吸収スペクトルを測定した(b; 黒色曲線と反転させ着色した個々の分子スペクトル: JILA提供)。この場合、広い波長範囲(150nm)にわたり高感度で $\text{O}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ などの排出物中の各種ガスの濃度を決定するために約3.6 $\mu\text{m}$ を中心とする吸収スペクトルを生成した。

現在、スウェーデン、ウメオ大学のアレクサンドラ・フォルティノビッチ准教授は、「直接周波数コム分光法は、ガス試料がセル内を流れる間に、多数の分子種の濃度を同時に実時間で測定することを可能にする」と語っている。「中間IR周波数コム光源は、強い基本的分子遷移が位置する、いわゆる分子指紋領域へのアクセスを提供し、多種多様な化学種の高感度検出を可能にする。この技術は、呼気分析または大気研究などの高速かつ非侵襲での多化学種検出が必要な応用に大きな影響を持つであろう」と付け加えた。

このコールドプラズマ技術は歯科用ハンドピース滅菌と感染創治療用としてスーパー・パルス社から商用化されている。(Gail Overton)

## 参考文献

(1) M. Golkowski et al, IEEE Transact. on Plasma Sci., 40, 8, 19841991 (August 2012).