

UVC LEDによる海洋生物付着の軽減

ハリ・ベヌゴパラン

250～280nmの範囲で発光する深紫外線LEDは、バイオフィームによる船舶への生物付着の検知および防止に役立つ。

毎年、生物付着によって船舶や海運といった世界規模の産業に数十億ドルもの費用が発生しているにもかかわらず、環境をめぐる他の問題の報道には余念がないメディアによって、この問題が取り上げられることはほとんどない。しかし、センサ業界は、生物付着の問題に大いに注目しているので安心してほしい。この業界では、生物付着の影響を計測して最小限に抑えたり、発生そのものを防止したりするのに役立つ、UVC (250～280nm) LEDに基づく一連の装置が開発されている。

生物付着は、水中の微生物が濡れた表面に付着することで発生する。最初に付着したこれらのバクテリアはその後増殖し始め、徐々に表面全体をバイオフィームで覆い尽くす。最終的にはそのバイオフィームに他の有機物が付着し、除去は困難(かつ高コスト)となる(図1)。

生物付着によって海運業界には、毎

年推定75億ドルもの費用が発生する。その費用のほとんどが、船体に蓄積した生物付着物によって船体抵抗や重量が増加するために、船舶で燃焼する燃料が40%多くなることに起因する。また、燃焼する燃料が増加すると、船舶による二酸化炭素や二酸化硫黄の排出量も増加する。

生物付着は、さまざまなセンサを利用して海洋や沿岸水域の環境状態を監視する、沿岸・海洋研究機関にも影響を及ぼす。確認せずに放置すると、一部のセンサは設置から1～2週間のうちに、バイオフィームの影響で動作不能になることが知られている。

解決策として、船体上に形成されるバイオフィームを初期の段階で検出し、バイオフィームの除去を容易にするためのUVC (紫外線C波) LEDに基づくデバイスが開発されている。そして現在では、LEDを海洋センサ内に配置す

ることによって、微生物のDNAを破壊し、バイオフィームがそもそも形成されないようにすることが行われている。

海運業界

早期に検出すれば、船体のバイオフィームを除去し、比較的長い期間にわたってその状態を維持することができる。付着してからの時間が長くなるほど除去は格段に難しくなり、腐食による損傷によって、遅きに失する可能性もある。

そのため海運会社は長い間、船舶の保守・洗浄スケジュールを最適化できるように、生物付着の経過を監視して予測する方法を模索してきた。適切なタイミングで実施されているとはいえ現在の船体洗浄には、年間約10億ドルの費用がかかっている。監視してより適切に予測できるようになれば、その費用を大幅に削減できると考えられている。

ドイツのヘルムホルツ海洋研究センター (Helmholtz Centre for Ocean Research) とクリスティアン・アルブレヒト大 (Christian-Albrechts-University) の物理化学研究所 (Institute of Physical Chemistry) の科学者らは、海運産業におけるバイオフィーム形成の検出と監視を現場で非破壊的に行えるように支援する、堅牢で信頼性の高い海洋環境センサを開発した⁽¹⁾。これまでに、その実験によって初めて、生息環境におけるバイオフィームの形成を継続的に監視する手段が提供されている。両機関が開発したUVC LEDを利用した分光装置のプロトタイプは、有機物と無機物を区別する能力を備え、数カ月間にわたって自律的に稼働するように設計さ

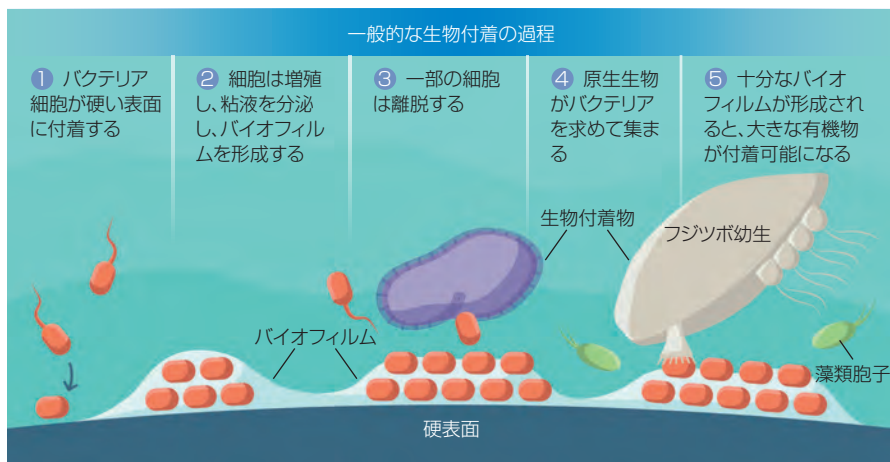


図1 海洋環境における表面への生物付着の過程。まずはバイオフィームが形成され、最終的にはより大きな有機物が付着していく(提供:クリスタルIS社)。

れており、(船体のような)広い面積にわたるバイオフィルムの初期形成を監視する実地試験が実施済みである。

その仕組みは次のとおりである。分析機関では長い間、さまざまな複合物の検出と分析に、吸収や蛍光を利用する光検出分析を採用してきた。しかし、従来の方法では複雑さ、サイズ、コストの問題から、現場で使用できる装置の開発に制約があった。LEDはフットプリントが小さく、コストが低く、光出力が安定していることからこの問題を解決すると思われたが、初期のサファイア基板をベースとする、波長範囲が250～280nmのLEDには、寿命、性能、信頼性の問題があった。

しかし、単結晶の窒化アルミニウム(AIN)基板上で作成された新しいLEDは格子が整合しており、このような問題が解決された。1cm²あたりの欠陥が約1万個少ないこれらのLEDは、光出力が高く、耐用年数が格段に長い。そのため、UVC LEDは現在、現場での使用や携帯が可能な診断装置の新世代への進化を促進する最大の要素となっている。

すべての微生物の細胞内にフルオロフォア(蛍光色素分子)があり、蛍光を利用する検出に好都合である。蛍光は、高い感度と選択性を備え、応答時間が速く、現場で広い面積に対して、実際のサンプルに触れることなく監視可能である。UV範囲の波長において、たんぱく質の自然蛍光は、チロシン、フェニルアラニン、トリプトファンという3つの芳香族アミノ酸に主に起因する。フェニルアラニンは量子収率が非常に低く、チロシンの発光には一般的なクエンチング(消光)の仕組みが伴うため、たんぱく質の自然蛍光は主にトリプトファンによって発せられる。トリプトファンは、波長280nmの光励起によって選択的に測定可能で、ピーク蛍光検

出の中心は約350nmとなる(図2)。

そのため、LEDに基づくバイオフィルム監視は、トリプトファンの自然蛍光を対象とする。トリプトファンの蛍光は、UVC LED光源を備え、数値的に最適化されたセンサヘッドによって励起され、光ファイババンドルによって集光される。UVC LEDの光は、数ミリ秒以内に瞬時にオン/オフ可能で、消費電力を最小限に抑えつつ、再現性の高い光強度を生成することができる。

科学者らは、トリプトファンと2つの特徴的な海洋細菌菌株に合わせてプロトタイプを校正し、線形の信号応答、十分なバックグラウンド抑制、広いダイナミックレンジ、そして最大で4×10³細胞/cm²の実験検出結果を達成した。続いて実施されたバルト海での21日間にわたる実地試験にも成功している。最初の細菌付着から、最終的にバイオフィルムが完全に形成されるまでに、バイオフィルムの形成には3つの特徴的な段階があることが計測によって明らかになった。まだ開発中ではあるものの、このセンサは、海運や深海調査に加え、さらに小型化が進めば、工業や生物医学の業界にも適用できる可能性がある。

海洋センサ

一方、UVC LEDに基づくデバイスを内蔵し、商用実績のある多数の海洋センサが既に稼働中で、実際に生物付着の防止に利用され、センサの生産性を大きく向上させている。

前述のとおり、沿岸や海洋に設置してから1週間も経たないうちに、センサ上にバイオフィルムが形成され始める。そのため、米沿岸技術同盟(ACT: Alliance for Coastal Technologies)は、以下のような、海洋の環境パラメータや工業パラメータを監視するため

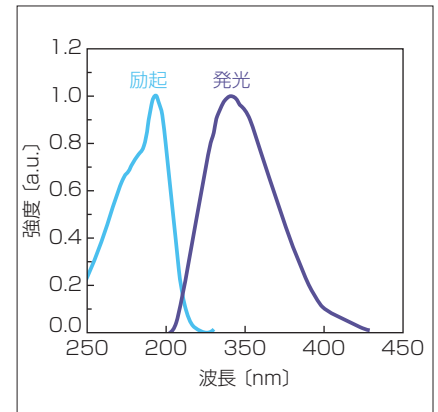


図2 UVC LEDからの光によって励起されて、アミノ酸の一種であるトリプトファンが近紫外領域で蛍光を発することで、バイオフィルムの存在が明らかになる。

のセンサやシステムを導入する企業の年間運用予算の50%が、生物付着の保守に費やされているとの見積もりを示している。

- ・水中画像処理用のセンサやカメラ
- ・光通信用の装置
- ・水質監視用の光学センサ(掘削プラットフォーム周辺の水中油分など)
- ・海洋塩分の導電率測定用センサ、海洋深度を測定する圧力センサ、温度センサ

・海流や海中生物を追跡する音響センサ
能動的な抑制手段は、機械的なワイパーやスクレイパーから、塩素や漂白剤の注入にいたるまで多岐にわたる。後者では、測定と測定の間装置を殺菌するためにチャンバーに化学薬品が注入される。受動的な手段としては、抗菌性塗膜やバイオサイドがある。こちらは、センサの周りに少量の化学薬品を使用することによって、細菌の成長を抑制する。

導電率、温度、深度を測定するCTDセンサは、塩分、密度、音速などの海洋パラメータを計算するためのものだが、これに生物が付着すると、ドリフト、感度の低下、応答時間のばらつきが生じる恐れがある。多くのCTD装

表1 従来の生物付着抑制手法の比較

技術	利点	制約
機械的なワイパー/シャッター	<ul style="list-style-type: none"> • 技術が確立されている • 環境に優しい 	<ul style="list-style-type: none"> • 故障率が高い • 消費電力が高い • 表面ごとにカスタマイズが必要 • 初期段階では有効だが、完全防止は不可能
トリブチルスズ(TBT)	<ul style="list-style-type: none"> • 技術が確立されている • 完全防止に有効 	<ul style="list-style-type: none"> • 有毒 • 規制によって禁じられている
銅塗料	<ul style="list-style-type: none"> • 海洋環境で利用可能 • 3カ月から1年間有効 	<ul style="list-style-type: none"> • 真水では効果が低下する • ガルバニック反応が生じる可能性あり
その他の非毒性塗膜	<ul style="list-style-type: none"> • 付着を防止する • 塗布範囲が大きければおそらく費用対効果が高い 	<ul style="list-style-type: none"> • ほとんどの塗膜が光を通さない

置にワイパーやスクレイパーが付いているが、それらは、消費電力が比較的高く、生物が付着しやすく、故障率も高い。銅製のシャッターや塩素を利用する方法もあるが、それらにも性能の制約がある(表1)。

代替策として、深紫外線UVCの照射を利用する企業もある。非接触型で化学薬品を使用しないこの方法は、さまざまな装置に適用可能である。UVC範囲の光照射は、バクテリアやウイルスなどの微生物中のDNAを破壊することによって、バイオフィルムの形成を防ぐ。バイオフィルムが形成されなければ、より大きな有機物が付着して装置が動作不能になることもない。

残念ながら、UV照射にも制約がある。水銀UVランプはサイズが大きく消費電力が高いこと、そして、ランプが壊れやすく水銀が有毒である(ランプが破損した場合は環境問題につながる恐れがある)ことから、多くの場合水中では使用できない。水銀ランプは、温度の低い水中環境での点灯が難しいという問題もある。

一方、UVC光を発するLEDは、消費電力が格段に低く、フットプリントが小さく、殺菌作用のある波長に必要な高強度の光を安定して供給できる。しかし、前述のとおり、サファイア基板をベースとする初期のUVC LEDは、性能と寿命の問題があり、頻繁に交換

しなければならない点が潜在的なメリットを相殺していた。

高性能な海洋学センサおよび計測装置の設計、製造、サポートを手掛けるイドロノート社(Idronaut)は最近、格子が整合した新しいUVC LEDを同社のCTDセンサに搭載し始めた。このLEDは、デバイスの周囲の少量の水を殺菌することによって生物付着を防ぎ、その経路に最初に微生物やバイオフィルムが成長するのを効果的に防止する。

UV量は、光強度と露光時間という2つの要素に基づく。イドロノート社は、すべてのCTDセンサに対するUV照射オン/オフのデューティサイクルを最適化するためのカスタム構成が可能なシステムを開発した。

デューティサイクルモードで動作させる場合、LEDはバクテリアのDNAを破壊するための点灯と、消費電力を最小限に抑え(LEDの耐用年数をさらに延長する)ための消灯を定期的に繰り返すようにプログラムされる。定着したバクテリアの細胞分裂と、付着した有機物の定着は、UV照射時に生じるため、サイクルを(環境に応じて)カスタム調整することによって、バイオフィルム

の形成を防止することができる。

バイオフィルムがそもそも形成されないようにすることで、イドロノート社の顧客らは、CTDセンサの現場導入範囲を拡大し、装置によるデータ収集を最適化して、保守費用を大幅に削減することに成功している。

急速な進歩はさらに続く

石油掘削や化学、食品、製薬など、多くの業界が、生物付着の問題に悩まされている。生物付着は、パイプライン、フィルタや薄膜、カテーテル、歯科用機器、コンタクトレンズ、発電所におけるボイラー内部品、薬物研究に用いられるバイオリアクタなどに悪影響を及ぼす。

従来の緩和対策にかかる高い費用を考えれば、格子が整合したUVC LEDデバイスは、より効果的で低コストの解決策を開発するための新しい画期的な手段である。そのため、LEDに基づく装置は、速いペースでますます進歩し続け、世界中の産業を数百年とまではいかないとしても数十年の間悩ませ続けてきた慢性的な問題を解決すると見込まれている。

参考文献

(1) M. Fischer, M. Wahl, and G. Friedrichs, Biosens. Bioelectron., 33, 1, 172-178(Mar. 25, 2012).

著者紹介

ハリ・ベヌゴパラン(Hari Venugopalan)は米クリスタルIS社(Crystal IS)のグローバル製品管理担当ダイレクター。e-mail: venugopalan@cisuv.com URL: www.cisuv.com