レーザ技術向上により実現する痛みのない美容治療

ジョン・ダリー、リック・スレイグル

脂肪除去などの美容治療において、レーザを熱源として使用すると皮膚に触れることなく脂肪組織内で均一な出力密度を得られるため、レーザの利点がさらに認められている。

レーザは何百もの医療分野で貴重なツールとなっている。1960年代に開発された最初のレーザであるルビーレーザは、登場してから1年も経たないうちに市販され、外科手術で使われた。無菌状態（非接触）で高出力を得ることができ、焼灼も組み合わせることができるため、医療分野へのレーザ応用は急速に発展した。

医療用レーザは、出力や波長、組織との相互作用や透過性などを考慮して、特定のものが選ばれる。CO_2レーザのような初期の機器は、互換性のある光ファイバを持っておらず、レーザビームの照射と操作のために複数のミラーを備えた多関節アームを使用する必要があった。現在は、ほとんどの医療用レーザ機器が、軽量で柔軟性があり、施術者が簡単に操作できる光ファイバケーブルに接続できるようになっている。このような使いやすさと、低リスクで非侵襲性であることにより、ほとんどの種類のレーザを外科医、皮膚科医、歯科医、獣医師が使っている。

患者は、外科手術ではなく、より低リスクで優れた結果が得られるレーザを使った新しい技術を望んでいる。形成外科や美容医療の分野では、非侵襲的で治療後の回復時間が不要な施術として「ボディスカルピング」という言葉が使われており、しわの除去、脂肪の減少、筋肉の引き締めなどに応用されている。

すべての生きている細胞は、分裂または成長と死の連続的なサイクルのもとにある。アポトーシスという正常な細胞死は常に起きており、自然に数週間かけて進行する。一方、ネクローシス（壊死）は細胞の突然死であり、瘢痕組織の形成など生体防御機構が生じる。適切な脂肪減少は、脂肪細胞へのアポトーシスに依存しており、低温または高温にさらされたときに起きる。無線周波数（RF）、超音波、レーザは、脂肪組織に42～52℃の熱を発生させ、アポトーシスを引き起こす。52℃を超えると、組織においてネクローシスや望まない副作用を伴うため、避けなければならない。

1064nmのダイオード励起レーザは、皮下脂肪組織への透過性が高いため、脂肪除去などに有効であることがわかっている（**図1**）。1000nm付近の波長は、

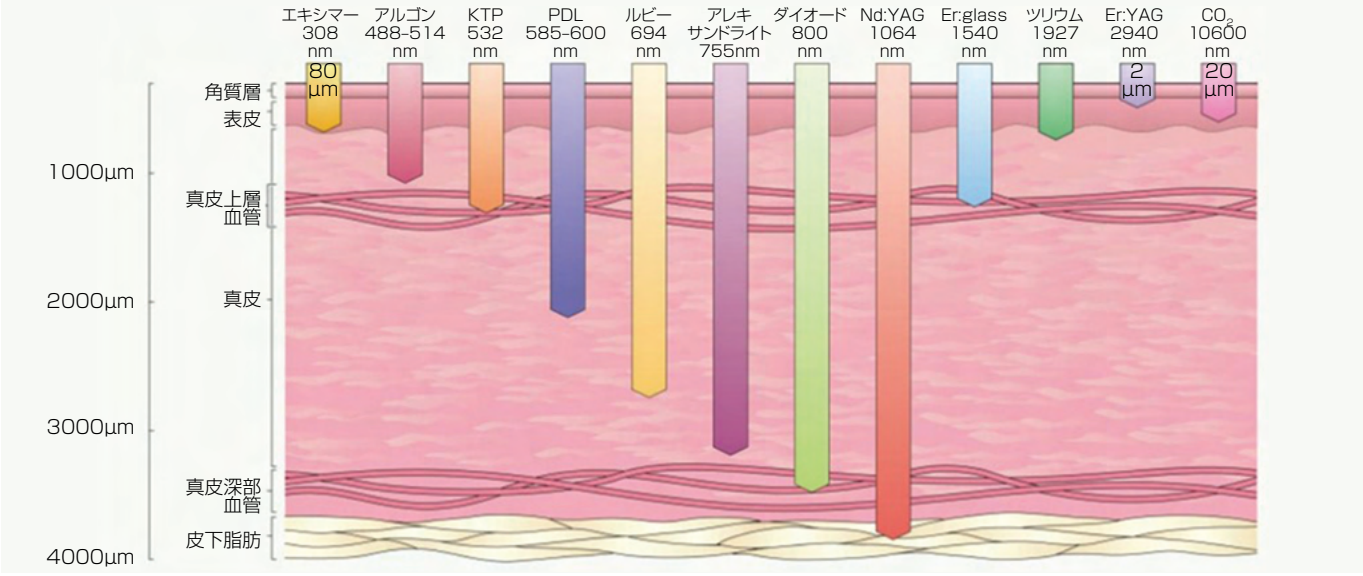

図1　さまざまな種類のレーザの組織透過性。

水、ヘモグロビン、メラニンによって特徴づけられる皮膚や真皮組織への透過性が比較的高く、脂肪組織での吸収率が高い。例えば、米ドミニオン美容テクノロジーズ社（Dominion Aesthetic Technologies）は、1064nmのNd:YAGダイオード励起レーザが、治療後の回復時間がゼロで痛みのないボディスカルピング美容治療に有効であることを発見している。

従来のNd:YAGレーザ機器はフラッシュランプで励起するため、循環水による冷却システムが必要だった。程よく機能して理想のレーザ特性があるものの、効率は5％以下であり、通常は循環水冷却とメンテナンスが必要である。フラッシュランプをダイオードレーザに置き換えることで効率は上がったが、水冷はまだ必要でコストも高くなってしまう。過去10年間で、産業用の固体レーザやCO_2レーザから、ウォールプラグ効率が40％に迫るファイバレーザに徐々に置き換わっている。ファイバレーザは励起源としてファイバ結合ダイオードレーザを使用するため、この技術も進歩している。ファイバ結合モジュールは幅広い波長に対応するため、多くの用途で旧来の産業用レーザと競合できることに、ダイオードレーザのサプライヤーは気づいている。

レーザダイオードバーは、低いDC電圧で動作する導電性冷却モジュールであり、簡単に50W以上の連続出力を得ることができる。複数のダイオードバーを光学的に組み合わせることで、1000Wを超える小型ファイバ結合レーザデバイスを作成できる。ウォールプラグ効率は50％と高く、導電性または基板冷却により300Wまで出力できる。ファイバ結合レーザダイオードモジュールは簡単に波長を調節でき、小さいサイズ、高い効率、ファイバ伝送、基板冷却の特徴があり、メンテナンスフリーで5万時間近い寿命がある。医療グレードの製品では、内部温度、レーザ出力モニタリング、ファイバセンシング、照準ビームの可視化、外部ブローバックウィンドウが一般的になっている。

図2　直接冷媒冷却システムの心臓部にある小型コンプレッサは、アスペン・システムズ社が開発したものである。

この技術は、ドミニオン社のEonなどのシステムに使われている。このシステムでは、レーザを基板冷却するため、熱を逃すための安定したヒートシンクが必要だった。大容量ファンを取り付ける強制対流冷却も、高出力では困難になる。ドミニオン社は、600W以上で20℃に冷却できる小型の直接冷媒冷却システム（DRC）を採用した。レーザを冷却プレート（蒸発器）とグラファイト製サーマルギャップパッドに固定することで、安全性と信頼性のある動作として推奨される25℃を維持できる。

米アスペン・システムズ社（Aspen Systems）が開発したDRC冷却装置の心臓部である小型コンプレッサを**図2**に示す。直接の冷媒冷却または膨張冷却では、コンプレッサによる循環を介して冷媒が冷却プレートを直接通過する。一般的な液体冷却装置を比べると、利点は多岐にわたる。まず、DRCには、液漏れや故障の原因となる液体循環ポンプや液体リザーバ、液体ライン、コネクタが必要ない。また、二次液体を冷却する際の損失がなく、ポンプを駆動するエネルギーが抑えられることで、効率が向上する。このようなシステムには、MTBFが10万時間以上という高い信頼性があり、冷却システム

図3　ここで示すドミニオン美容テクノロジーズ社のEonシステムでは、レーザ治療ヘッドはロボットアームと接続しており、広範囲にわたって完全に自動化した非接触プロトコルが可能となっている。

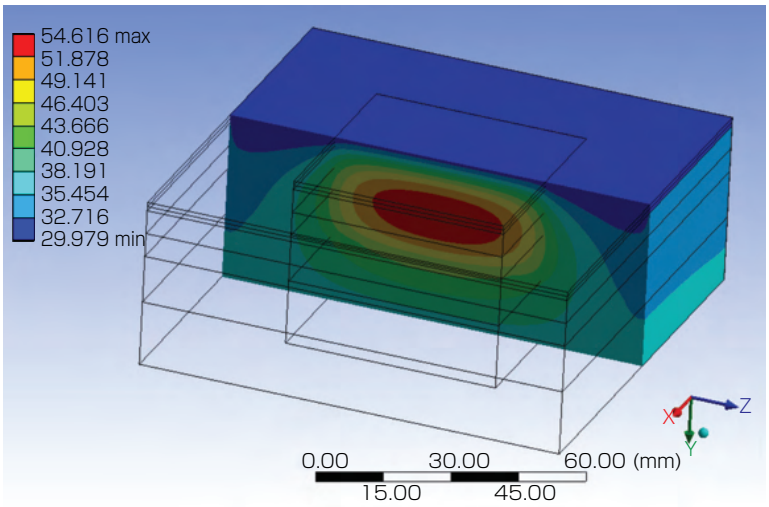

図4　有限要素法（FEA）シミュレーションに基づいた、レーザによる組織加熱と皮膚冷却の組織モデル。

のサイズ削減にもつながる。

レーザとその冷却システムを定義することで、適切なレーザ出力とビーム形状を作り出すことができる。光ファイバからのレーザ出力は、単純な平凸レンズでコリメートされる。組織内のホットスポットを避けるために、コリメートされたビームをトップハット型拡散板につなげる。マイクロレンズアレイ（MLA）の光学素子がビームを均一化し、発散する均一なスクエアパターンを形成する。例えばEonシステムでは、患者の皮膚上のビームサイズをMLAからの距離で制御し、目的の出力密度を実現した。開発段階では、組織の加熱はシングルエリアで試験されていた。脂肪組織で目的の温度に到達させて維持するために、レーザのデューティサイクルは比較的低くされた。この方法では、レーザが点灯したままより広い範囲で走査しても、目的の組織温度に到達できる。このレーザビームの走査方法は、ロボットアームをシステムに組み込むことで解決した。

ロボットアームにレーザ治療ヘッドを装着させると、広範囲にわたって完全に自動化した非接触プロトコルが可能になる（**図3**）。ロボット制御により、治療ヘッドは皮膚表面と適切なスタンドオフ距離を正確に維持したまま、患者の体の輪郭に沿って移動できる。セットアップ時、施術者が治療領域を正確に定めるため、可視光の照準レーザビームが赤いビームパターンを作る。ロボットヘッドとレーザビームは制御と安全のために複数のセンサを使ってパターンに従い、自動化プロトコルが20分間実行される。

脂肪組織内をターゲットである42～52℃に上げて維持するための適切なプロトコルの開発では、複数の機能を制御する必要がある。レーザ出力密度、走査範囲、走査レート、皮膚の冷却、治療時間とのバランスが求められる。システム構築に向けた研究の中で、ドミニオン社は有限要素法（FEA）シミュレーションに基づいた組織モデルを開発した（**図4**）。このモデルには、皮膚、表皮、真皮、脂肪、血液などすべての組織層の熱特性が含まれている。熱電対を埋め込んだ実際の組織試験データを用いてパラメータを改良し、レーザの組織熱相互作用と正確に予測した。ネクローシスを避けるため治療プロトコルを慎重に開発し、ターゲットとなる脂肪組織がネクローシスのしきい値である52℃に近く、だが、超えないような温度を維持できるようにした。アポトーシス効率は、温度によって指数関数的に増加する。そのため、脂肪組織の温度を一定以上にすることで、より多くの脂肪減少効果が得られる。

最適なレーザ加熱プロファイルの探索と並行して、不快感を避けるために患者の皮膚温度を下げる必要もある。安全性に関する医学的なコンセンサスでは、皮膚温度を42℃までに制限している。強制対流や、低温流体の蒸発など、異なる冷却技術が検討されている。通常の対流では熱除去が不十分であることがわかっており、極低温度では組織損傷という不要なリスクをもたらす。高出力レーザを照射しながら皮膚温度を40℃以下に保つため、例えばEonシステムでは独自の冷風ジェット冷却技術によって優れた熱除去を実現している。独自のチルド熱交換器を接続した大容量のエアポンプによって、10℃近い冷風をもたらす。この冷風はレーザビームを透過し、ロボットアームの治療ヘッドに簡単に組み込むことができる。

この組み合わせは、ファイバ結合ダイオードレーザの小型の直接冷媒冷却、トップハット型ビームプロファイル、自動化と相まって、レーザ美容におけるより高い効率とかつてない安全性のための新しい基準を先駆けるものである。

著者紹介
ジョン・ダリーはドミニオン美容テクノロジーズ社のCTO、リック・スレイグルは米テクニカルソリューションマーケティング社（Technical Solutions Marketing）のマネージングパートナー。
Email：info@dominionaesthetic.com　URL：https://dominionaesthetic.com
Email：rick@techsolmarketing.com　URL：https://www.techsolmarketing.com

LFWJ