

【目的】 定量的光音響トモグラフィは、光音響波の初期圧力から光吸収係数を分離・算出し、定量イメージングを目指す技術である。定量的光音響トモグラフィによる甲状腺がん検出が期待されているが、未だ実現されていない。理由として、「ヒト頸部において光や光音響波の圧力は複雑に伝播するため、光吸収係数を分離することが困難である」ことが考えられる。頸部は甲状腺、気管、筋肉などで構成される。光は気管以外の頸部内部器官によって強く前方に散乱される。一方で、甲状腺近傍に位置する気管は空洞領域であり、気管境界面において光は反射・屈折し、光音響波も反射する。甲状腺癌から発生した光音響波は気管周辺から発生した波と複雑に重なり、頸部表面で検出される。よって、定量的光音響トモグラフィによって甲状腺癌を検出するためには、頸部における光と光音響波の伝播を定量的に評価することが必要である。また、定量的光音響トモグラフィを確立するためには、光散乱が光音響波の初期圧力に及ぼす影響を詳細に明らかにすることが基礎研究として極めて重要である。本研究の目的は次の2つである。(1) 定量的光音響トモグラフィによる甲状腺癌検出システムの確立に向けて、ヒト頸部における光と光音響波の伝播を明らかにすることである。(2) 生体模擬試料として広く使用される、コロイド溶液に対して、光散乱が及ぼす初期圧力への影響を定量的に明らかにすることである。ヒト頸部のような生体は非常に複雑な媒体で個体差も大きいため、初期圧力の発生機構を明らかにするためには、再現性の高い生体模擬試料を用いた基礎研究が重要である。

【方法】 目的(1)の達成のため、光伝播を記述する輻射(ふくしゃ)輸送論と圧力伝播を記述する光音響波動方程式より、2次元ヒト頸部モデルや3次元立方体の散乱媒体に対して計算した。特に、光伝播を厳密に記述するが計算負荷の高い輻射輸送方程式と、拡散近似より計算負荷の低い光拡散方程式の結果を比較した。目的(2)の達成のため、コロイド溶液の光散乱特性、熱弾性特性、光伝播をマルチスケールの観点より、電磁波理論、輻射輸送論、統計物理学を融合させることによりモデル化した(下図左)。コロイド粒子の体積分率を変化させ、初期圧力への影響を数値解析した。

【結果】 目的(1)については、ヒト頸部モデルや立方体媒体において、輻射輸送方程式と光拡散方程式の計算結果を比較した。媒体内部における空洞領域や境界面で生じる光の反射・屈折による光伝播の影響は限定的であり、両光伝播モデルにおける圧力伝播の差異は小さいことを明らかにした。目的(2)について、熱弾性特性以外の特性に対して、コロイド粒子群の相互作用が強く影響を及ぼしていることを明らかにした。下図右に、シリカ溶液内部にある吸収体から発生する初期圧力の体積分率依存性を示す。熱弾性による寄与 Γ と光散乱・光伝播による寄与 Φ を区別している。この図より、初期圧力において、熱弾性特性による影響は限定的であり、初期圧力の90%以上が、光散乱・光伝播による寄与であることを明らかにした。この結果より、熱弾性のモデル化に比べて、光散乱のモデル化が重要であることが示唆された。

光音響の初期圧力モデリングと光散乱・熱弾性による寄与の解析

