

【目的】 LIPUS (low-intensity pulsed ultrasound) は保険治療として整形外科領域で利用されるが、MHz 域の超音波による応力刺激が、細胞に検知されるメカニズムは不明である。一方で電磁気的手法による骨折治療も報告されていることから、超音波と電磁気的特性をつなぐ骨の圧電性に着目して、より効果的な超音波照射法を検討する。まずは有限差分時間領域 (FDTD) 法に媒質の圧電効果 (Piezoelectricity) を組込んだ PE-FDTD 法によるシミュレーション技術を確立し、ヒト橈骨モデルの解析から、特に圧電に寄与する超音波の伝搬モードを検討する。その結果をもとに、実際に超音波照射実験を行うための、プロトタイプ超音波照射システムの構築を行う。

【方法】 弾性 FDTD に圧電効果と逆圧電効果を導入した PE-FDTD 法のシミュレーションプログラムを自作した。シミュレーションでは、骨を一軸異方性の弾性体とし、弾性定数は超音波計測の文献値、圧電定数は低周波域の文献値を用いた。音波が骨中を伝搬する際の音波減衰は、文献から骨軸 (体荷重) 方向の縦波減衰を 2.1 dB/cm/MHz、円周・半径方向の縦波減衰を 3.1 dB/cm/MHz とした。せん断波の減衰は縦波平均減衰の 2 倍と仮定して 5.2 dB/cm/MHz とした。まずプレート状骨に発生する超音波誘導電位のシミュレーションと実測を行い、シミュレーションの妥当性を確認した。その後、66 歳女性の橈骨の高分解能末梢骨用 CT (HR-pQCT、Scanco Medical、Xtreme CT II) データを用いて 3 次元橈骨デジタルモデルを作成した。シミュレーションでは、この橈骨に入射角を変えてパルス超音波を照射し、骨内部に発生する誘導電位を算出した。

【結果】 図に超音波が橈骨側面に垂直に入射した場合の、直下の音波伝搬と電位発生を示す。音波が骨部分を回り込むように伝搬し、電位が発生した。せん断応力 T_{yz} や T_{zx} の影響が大きく、せん断波 (横波) 伝搬が誘導電位に大きく影響することを確認できた。つまり骨中に積極的に横波を伝搬させると、誘導電位も大きくなる。骨中の誘導電位の時間変化を検討したところ、超音波が縦波の臨界角より大きい入射角で入射した場合、横波が強く発生し、発生する電位も大きくなった。つまり、骨の圧電を考慮して超音波照射の効果を検討する際には、超音波は現状の LIPUS のように骨折部に垂直に照射するのではなく、横波を効率的に励起する照射手法が有効であると考えられる。これらの結果をもとに、骨中に横波を励起しやすい小動物用超音波照射システムのプロトタイプを構築した。

超音波照射後の (a) 音波伝搬 (骨内の応力分布) と (b) 誘導電位

