

論文内容の要旨

Finite Element Analysis of the Stress Changes That Associate with the Growth of Acne Keloids

アクネケロイドの成長に伴う応力変化の有限要素解析

日本医科大学 千葉北総病院 形成外科
助教 石井 暢明

Plastic & Reconstructive Surgery-Global Open. 12(12):e6365, December 2024
掲載

背景

ケロイドは病的な皮膚線維増殖性の癬痕であり、元の損傷部位の境界を越えて成長する。熱傷や手術、ざ瘡、毛包炎、虫刺されなどによって生じるが、炎症は遺伝的、全身的、局所的な要因によって引き起こされる。局所的な要因として、創傷や癬痕化した皮膚の縁にかかる力学的ストレスは大きな要因であり、メカノバイオロジーおよび観察研究から、力学的刺激は、血管内皮細胞や線維芽細胞などの局所の機械感受性細胞を活性化することによって炎症を引き起こす可能性が示唆されている。過去のケロイドに対する力学的ストレスの研究では有限要素解析(FEA)が用いられている。この方法は、研究対象の構造体のすべての点の力による変位を、線形システムの分解能で評価するものである。しかしながら、過去の研究において、小さいざ瘡からケロイドに成長する過程における応力の変化を検証したものはなかった。今回我々はそれを検証すべく、有限要素法を用いたシミュレーションを行い、その結果を実臨床患者におけるざ瘡ケロイドサイズの統計、および胸部ケロイドの電子顕微鏡と光学顕微鏡による病理学的検討と合わせ検証した。

方法

(1)有限要素法によるモデリングとシミュレーション

長軸方向の長さが5mmから50mmまで5mm刻みで変化する同一形状の楕円形ケロイド10個についてFEAを行った。ケロイドモデルを皮膚モデルに埋め込み牽引し、ケロイドとその周辺組織にかかる応力を測定した。ケロイドが大きくなるにつれてこれがどのように変化するかを観察した。

(2)実臨床患者のざ瘡ケロイドの測定とグラフ化

2023年6月から9月に当院外来を受診した、胸部、肩、背部に独立して赤く隆起した220個のざ瘡ケロイドを対象とした。長径と短径を測定し、それぞれ横軸と縦軸にとった2次元散布図を作成した。線形回帰分析も行った。また、散布図を等高線に変換し、各サイズの個体数を可視化した。

(3)病理学的検討

ケロイドの中心部、辺縁部、周辺組織の組織変化を調べるために、切除したざ瘡由来の胸部ケロイド検体の電子顕微鏡および光学顕微鏡検査を行った。

結果

FEAでは、ざ瘡ケロイドにおける牽引応力は成長するにつれてケロイドの中心部に集中した状態から一度均等に分布し、その後ケロイドの縁、特にその浅い真皮に集中するようになった。この

ことは、ケロイド周縁部の周辺組織におけるストレスの増大に関連していた。また FEA は、ケロイド伸長後のケロイド本体の中心部の応力は低く、ケロイド下の皮下組織の応力はむしろ低いことも示した。

実臨床患者のざ瘡ケロイドの測定によると、ざ瘡ケロイドは 3x3mm、4x4mm、5x5mm のサイズのものが多く、4-5mm までは円形のままであったが、その後急速に伸長する傾向にあった。

電子顕微鏡では、周囲の皮膚では表皮基底膜のすぐ下に角化細胞の断片、フィブリン、多数の細胞片が観察された。

考察

今回の FEA 研究では、同じ形状だが大きさが異なるケロイドに同じ牽引力を加えると、大きさによってケロイド上の応力分布が異なることが示された。丸いざ瘡ケロイドは、真皮組織を超えて増大した後に力学的ストレスに反応して伸び始めると考えられる。このことは、われわれが今回測定した実臨床のざ瘡ケロイドと一致していた。実臨床のざ瘡ケロイドは、直径が 4-5mm に達するまでは円形のままである傾向があり、その後は伸長性が増していることが示された。これらのことはざ瘡ケロイド治療は病変が小さいうちに始めるべきであるという考えを支持する。また、病理学的検討により、胸部ざ瘡ケロイドの皮膚辺縁表皮基底膜のすぐ下に角化細胞の断片、フィブリン、多数の細胞片が観察されたことは今回の FEA の結果と一致していた。このことは、ケロイドの成長はケロイド辺縁の浅い真皮における力学的ストレスの増加と関連し、力学的ストレスが炎症を誘発することを考えると、ステロイドテープによる早期治療が十分に有効であるといえた。

結論

我々の FEA、実臨床患者のざ瘡ケロイドの測定、および標本の病理学的検討から、ざ瘡ケロイドは直径 4~5mm に成長するまで円形のままであり、その後、牽引応力の方向に急速に伸長することが示された。さらに、牽引応力はケロイドの前縁の浅い真皮に集中する。これらの所見から、ケロイドが懸念されるざ瘡は、直径が 4~5mm に達した時点でステロイドテープなどのケロイド治療を行うべきであると考えられる。