

B13 電氣的筋収縮制御を利用した骨の力学刺激法に関する研究

Mechanical Stimulation of Bone by Electrically-Controlled Muscle Contraction

○ 岡田 敬史 (金沢大) 近藤香菜子 (金沢大)
 正 山越 憲一 (金沢大) 正 田中 志信 (金沢大)
 正 野川 雅道 (金沢大) 正 田中 茂雄 (金沢大)

Takashi OKADA, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa
 Kanako KONDO, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa
 Ken-ichi YAMAKOSHI, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa
 Shinobu TANAKA, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa
 Masamichi NOGAWA, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa
 Shigeo TANAKA, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa

A purpose of this study is to measure bone strain induced electrically-controlled muscle contraction and compare with that recorded during walking exercise using an animal model. A strain gage technique was used to measure strain on a rat femur when a rectus femoris muscle is stimulated electrically in a sinusoidal waveform at a peak voltage of 0, 1, 3, or 6 V, and during walking exercise (4 m/min) by a treadmill. Bone strain recorded in 6 V-muscle stimulation was 65% larger than that in treadmill exercise. This result suggests that electrically-controlled muscle contraction could be useful as a new mechanical stimulation method to elicit osteogenesis response.

Key Words: Electrically stimulation, Muscle contraction, Bone strain, Mechanical stimulation, Bone formation

1. 緒言

骨粗鬆症による骨量減少は高齢社会の現代において解決すべき重要課題の一つである。骨量維持、骨量増加には運動による力学刺激、カルシウムの摂取、日光浴が推奨されている。骨への力学刺激と骨形成に関する研究は広く行われており、骨形成を促進するさまざまな力学刺激法が提案されている。例えば、骨への力学刺激法の一つとしては超音波の利用があげられる¹⁾。しかしながら、骨への最適な力学刺激法については更なる検討が必要である。我々は新たな力学刺激法として電氣的筋収縮制御により骨形成を刺激することを提案する。本方法では筋肉の電気刺激により筋収縮を起こし、骨ひずみを生じさせる。これにより実際の運動で促進される骨形成反応²⁾と同等の反応が得られるのではないかと考えた。また運動が困難である高齢者、安静患者などにおいても本刺激法を用いることにより骨への力学刺激は可能であると考えられる。

本研究では電氣的筋収縮制御によりラット大腿骨上に生じる骨ひずみを計測し、歩行時に発生する骨ひずみ値との比較を行った。得られた結果より本法の有用性について検討した。

2. 実験方法

実験には雌のSDラット7匹(週齢18~22, 体重257~312g)を使用した。骨ひずみはラット左足大腿骨骨幹中央

部の前方と後方側に貼り付けられた2枚の箔ひずみゲージ(gage length 0.2 mm, KFG-02-120-C1, KYOWA)によって検出した(図1)。検出したひずみ信号はひずみアンプを介してコンピュータへ転送し、記録した。

2-1 筋肉の電気刺激時における骨ひずみ計測

筋肉の電気刺激時に生じる骨ひずみの計測方法³⁾を図2(a)に示す。コンピュータから出力した電気信号をネンプタール麻酔下のラット左足大腿直筋に負荷し、その際、検出される骨ひずみ信号をひずみアンプ(CDV-700A, KYOWA)を介して0.865 msのサンプリング周期でコンピュータに収集した。電極にはステンレス製26ゲージ針を用い、大腿直筋に10 mm間隔で刺針した(図3)。筋肉刺激用の電気信号は0.865 ms間隔のパルスで構成されており(図4a)、波形はピーク電圧が0, 1, 3, または6 Vの2 Hzの正弦波信号とした(図4b)。大腿直筋は骨盤から膝蓋骨を結び大腿骨前方側に広がる筋肉である⁴⁾。電気刺激により、大腿直筋が収縮し、大腿骨に前方向の曲げが生じ、これにより骨ひずみが発生すると考えられる。

2-2 歩行時における骨ひずみ計測

歩行時における骨ひずみ計測方法を図2(b)に示す。ラットを回転式トレッドミル(MK-770, MUROMACHI)を用い4 m/minの速度で強制歩行させ、その際ひずみゲージで

検出される大腿骨上のひずみ信号をひずみアンプ (NR-ST04, KEYENCE) を介して 0.5 ms のサンプリング周期でコンピュータに収集した。

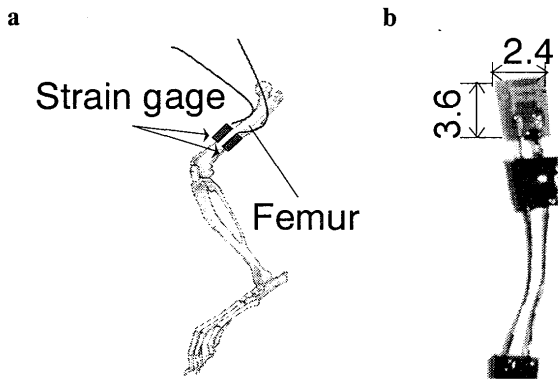


Figure 1 (a) Position of strain gages on a rat femur. (b) Foil strain gage pasted on the femur.

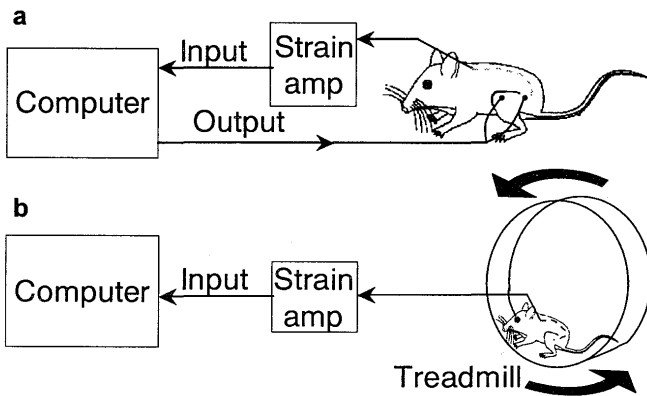


Figure 2 Experiment system. (a) Measurement of bone strain induced by electrically-controlled muscle contraction. (b) Bone strain measurement during treadmill exercise.

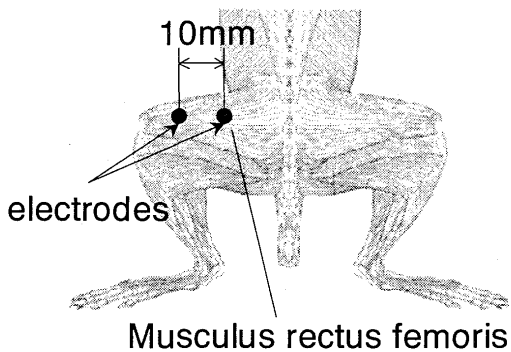


Figure 3 Position of electrodes inserted into the musculus rectus femoris.

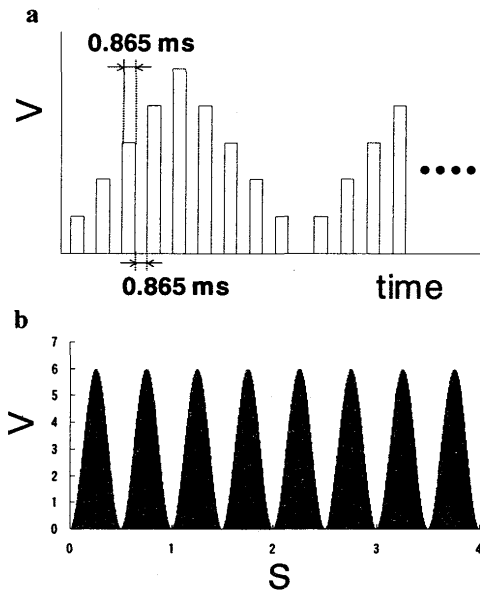


Figure 4 Waveform of electrical signal for muscle stimulation. (a) The waveform consists of a series of pulses with a duration of 0.865 ms. (b) The magnitude of each pulse is modulated following a sinusoidal waveform with a different peak voltage (0, 1, 3, or 6 V) at 2 Hz.

3. 実験結果及び考察

3-1 骨ひずみ波形

筋肉の電気刺激時における骨ひずみ計測結果を図5に示す。正值は引張ひずみを、負値は圧縮ひずみを表す。大腿直筋への電気刺激により大腿骨前方表面には圧縮ひずみのみが、大腿骨後方表面には引張ひずみのみが生じていた。これは、電気刺激を与えた大腿直筋の収縮により、大腿骨に前方向の曲げが生じたためと考えられる。両表面ともに負荷電圧が増大するにつれて骨ひずみのピーク値も増大した。なお骨ひずみ波形は、大腿直筋への電気刺激波形と同期していた。

歩行時における骨ひずみ計測結果を図6に示す。歩行時における大腿骨ひずみでは前後両表面ともに圧縮及び引張両方のひずみが検出された。これは歩行時には、大腿骨に前後両方向の繰り返し曲げが作用していることを表している。

3-2 骨ひずみのピーク値

各負荷電圧ごとにおけるピークひずみの平均を図7に示す。1 V 負荷時では大腿骨前方で約 25 μ strain の圧縮ひずみ、後方で約 10 μ strain の引張ひずみと微小な骨ひずみを生じさせる程度であったが、3 V 負荷時においては大腿骨前方で約 60 μ strain の圧縮ひずみ、後方で約 70 μ strain の引張ひずみが検出された。さらに 6 V 負荷時では大腿骨前方で約 140 μ strain の圧縮ひずみ、後方で約 190 μ strain の引張ひずみが検出された。図8に歩行時におけるピーク骨ひずみを示す。大腿骨前方で約 110 μ strain の引張ひずみと約 55 μ strain の圧縮ひずみ、後方で約 105 μ strain の引張ひずみと約 140 μ strain の圧縮ひずみが検出された。

筋肉の電気刺激から得られた骨ひずみデータのばらつきの原因は実験中の筋肉疲労、電極の配置、刺針深さのズレが考えられる。歩行時に得られた骨ひずみデータのばらつきについては、歩行パターンの個体差が主な原因と考えられる。

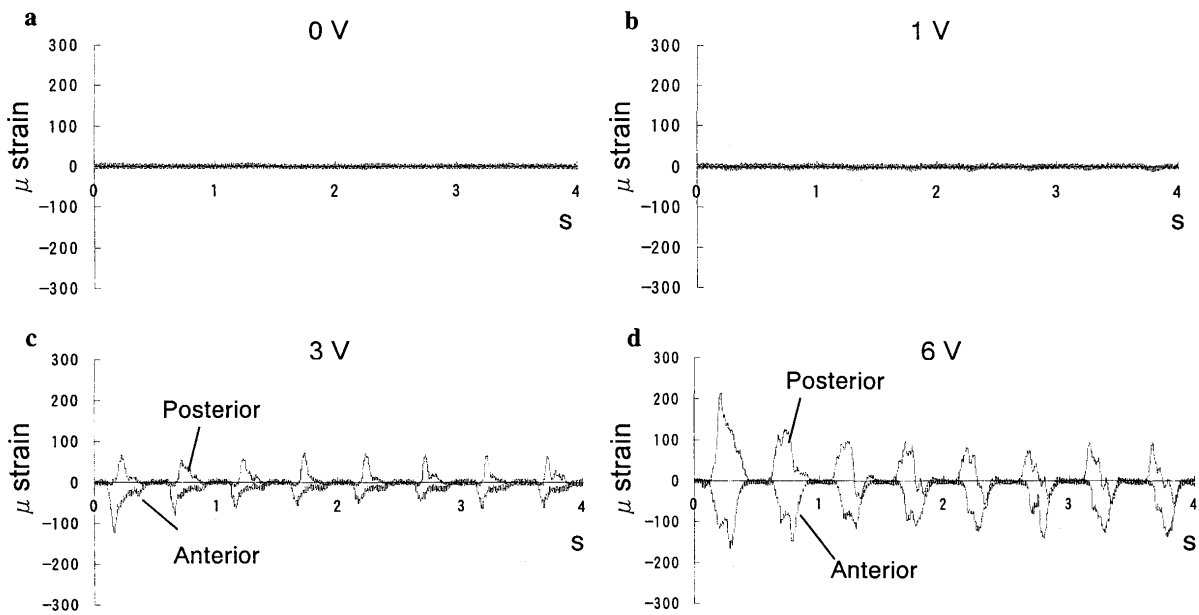


Figure 5 Bone strain waveform induced by electrically-controlled muscle contraction. Peak voltage of electrical stimulation waveform : (a) 0 V; (b) 1 V; (c) 3 V; (d) 6 V.

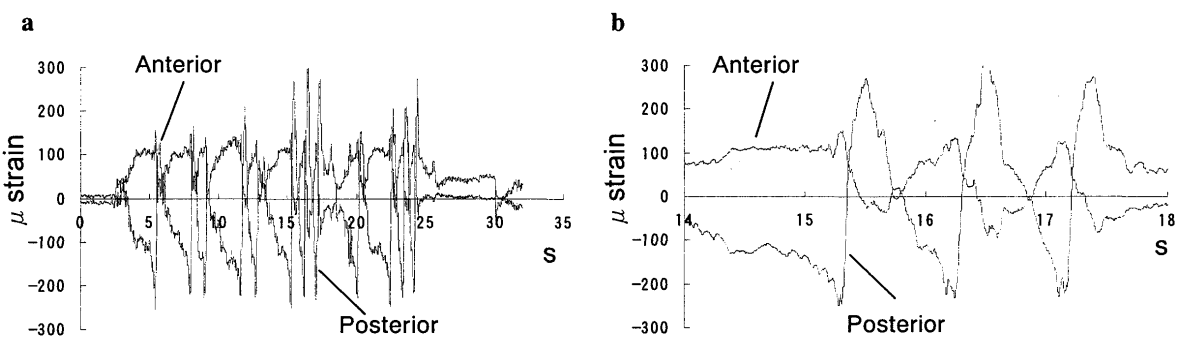


Figure 6 (a) Bone strain waveform recorded during treadmill exercise. (b) Waveform expanded in a time period from 14 to 18 s.

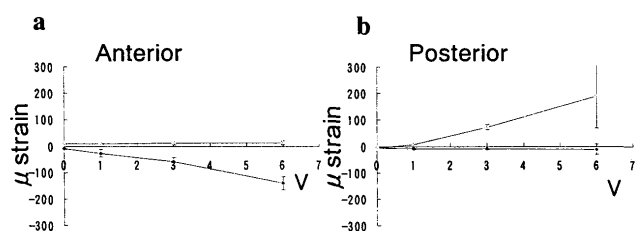


Figure 7 Change in peak bone strains with increasing peak voltage. (a) Anterior surface. (b) Posterior surface.

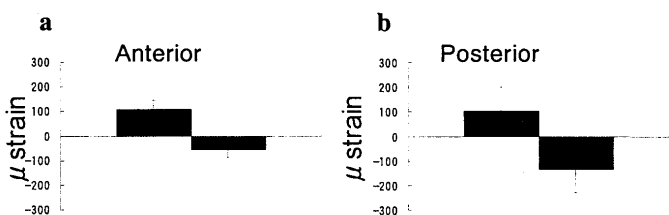


Figure 8 Peak bone strains observed during treadmill exercise. (a) Anterior surface. (b) Posterior surface.

4. まとめ

大腿直筋の電気刺激時および歩行時における大腿骨ひずみ計測を行い、ピークひずみ値の比較を行った。その結果、6 Vの電気刺激において、歩行時に生じる大腿骨ひずみより約 65% 大きなひずみが観察された。この結果から電氣的筋収縮制御は骨への新たな力学刺激法として有用であると考えられた。

参考文献

- (1) Sakurakichi K, Tsuchiya H, Uehara K, Yamashiro T, Tomita K, Azuma Y. : Effects of timing of low-intensity pulsed ultrasound on distraction osteogenesis, journal of orthopaedic reseach Orthop Res.Mar;22(2), 395-403, 2004.
- (2) Palombaro KM : Effects of walking-only interventions on bone mineral density at various skeletal sites:a meta-analysis, journal of geriatric physical therapy, 28(3), 102-107, 2005.
- (3) Susannah P. Fritton, Kenneth J. McLeod, Clinton T. Rubin : Quantifying the strain history of bone: spatial uniformity and self-similarity of low-magnitude strains, journal of Biomechanics 33, 317-325, 2000.
- (4) 広島大学生物学会 : 日本動物解剖図説, 森北出版, 1971.