

筋活動を指標とした免荷歩行様式の検討

森川重幸¹⁾、永山智貴¹⁾、小西倫太郎¹⁾、神田佳明¹⁾、西村佳小里¹⁾、
堀田直樹¹⁾、富田健一^{1) 2)}、木村篤史^{1) 2)}、松本和久^{1) 2)}

¹⁾ 明治国際医療大学附属病院 総合リハビリテーションセンター

²⁾ 明治国際医療大学 医学教育研究センター リハビリテーション科学教室

要旨：

健康男性12名を対象として、①左下肢を挙上する（挙上）、②右下肢を10cm補高し左下肢を下垂する（下垂）、③②の状態では左下肢に2Kgの重錘を付けて下垂する（重錘下垂）の3種類の免荷方法で、①静止立位、②右下肢による左下肢の振り子運動（動的立位）、③松葉杖歩行の3つの運動課題を行い、その際の左下肢の大腿筋膜張筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭、前脛骨筋の%MVCを比較した。

その結果、大腿直筋の%MVCは、静止立位で下垂は挙上に比べて有意に低値を示していた（ $p<0.01$ ）。大腿二頭筋長頭の%MVCは、静止立位・動的立位で下垂および重錘下垂は挙上に比べて有意に低値を示していた。また、松葉杖歩行の重錘下垂は、挙上と下垂に比べて有意に低値を示していた（ $p<0.01$ ）。前脛骨筋の%MVCは、松葉杖歩行で重錘下垂は挙上に比べて有意に低値を示していた（ $p<0.01$ ）。

以上のことから、免荷様式において重錘下垂は挙上よりも筋活動が少なく、骨の力学的機能障害に影響を与えにくいことから、免荷歩行は重錘下垂による様式が適していると考えられ、経験則ではなく科学的根拠に基づく免荷歩行様式に改良していく必要があると考えられた。

I. はじめに

骨折は、骨折線の走行によって、横骨折、斜骨折、螺旋骨折、粉碎骨折に分類され、それぞれの骨折片相互の位置関係（転位方向）により、側方転位、長軸転位（短縮・離解）、屈曲転位、回転転位、嵌合に分類される¹⁾。骨折治療の基本原則は、四肢の機能障害を残さず、標準的な期間内に良好な形態で骨を癒合させることが目標となり、そのための治療の3原則は、①整復、②固定、③リハビリテーションである¹⁾。したがって、転位のある骨折は可能な限り解剖学的な整復位をえることが望ましく、固定により整復した状態を保つことが重要である。また、1960年以降の宇宙医学の発展により無重力状態や不活動による身体の影響が問題となり、筋骨格系・心血管系・呼吸器系・代謝系などに悪影響（以下、廃用症候群）を与える事が認識され始め²⁾、可及的早期に離床し立位・歩行を行い、日常生活動作（Activities of Daily Living: ADL）の自立を促す事により、廃用性筋萎縮や関節拘縮を予防できることから、固定直後からのリハビリテーションは重要である。

一方、骨の力学的機能は、荷重を支え、関節運

動を可能にすることであり、荷重や関節運動に伴う筋収縮は、骨の力学的機能を失った骨折部に対しては固定性を損ない、骨折片の転位の誘因となる。そのため下肢の骨折においては、荷重状態（非荷重（免荷）・爪先荷重・部分荷重・可能な限りの荷重・全荷重）や個々の機能障害に応じた歩行補助具を用いた歩行が施行される³⁾。例えば下肢への荷重を0～20%減少したいのであれば杖を使用し、バランス障害や運動コントロールの悪い症例では歩行器を使用することで³⁾、荷重による骨折片の転位を防いでいる。

これに対し、関節運動に伴う筋収縮の骨折部への影響はどのように考慮されているだろうか。step-to歩行やstep-through歩行、あるいは2点、3点、4点歩行など、歩行パターンについての考慮はなされているが³⁾、免荷下肢の状態、すなわち股関節・膝関節・足関節の関節運動については、免荷が完全に実施されていれば何の条件も与えられていない。つまり股関節や膝関節、および足関節の関節運動は、患者次第となっているのが現状である。中島らは運動療法中に股関節に加わる負荷について、背臥位でのStraight Leg Rising

(SLR) では体重の1.0~1.4倍, 側臥位での股関節外転では体重の1.3~1.8倍, 端座位での膝関節伸展では体重の0.2~0.25倍の負荷が股関節に掛かると述べている⁴⁾. 同様に金井らは, 運動療法中の股関節に加わる負荷を検討しており, 背臥位でのSLRでは体重の2.3~3.8倍, 側臥位での股関節外転では体重の1.2~3.4倍の負荷が股関節に掛かると述べている⁵⁾. このことは, 足部を地面に接地しない免荷状態であっても, 下肢の関節運動に伴う筋収縮によって体重以上の応力が生じていることを示している. このことから, 免荷状態であっても, 患側下肢の挙上という下肢の関節運動により骨折部に応力が掛かり, 骨折部の固定が阻害される可能性が考えられる.

そこで本研究の目的は, 3つの運動課題 (①静止立位, ②動的立位, ③松葉杖歩行) において, ①免荷状態を維持するために免荷下肢の関節運動 (下肢の挙上) に伴う筋活動, ②免荷状態の維持のために反対側に補高し, 免荷下肢の関節運動を伴わない状態の筋活動, および③免荷下肢のリラクセーションを図るために②の条件に加えて免荷下肢を重錘により牽引した状態の筋活動をそれぞれ計測し比較することにより, 適切な免荷歩行の様式を検討することである.

II. 対象と方法

1. 対 象

対象は四肢・体幹に整形外科的, 神経学的疾患の既往のない健康男性12名で平均年齢 23.4 ± 2.1 歳 (平均 $\pm$ 標準偏差), 平均身長は 173.3 ± 2.1 cm, 平均体重は 66.9 ± 8.0 kg, 平均BMI: 22.2 ± 1.9 であった.

本研究は, ヘルシンキ宣言に基づいた倫理的配慮のもとに実施した.

2. 方 法

両上肢支持下に3つの方法で左下肢を完全免荷とし, 各免荷方法で3つの運動課題を実施した.

1) 左下肢の免荷方法

- (1) 右下肢を支持脚として, 左下肢を挙上する方法 (以下, 挙上, 図1-a). 左下肢の挙上方法は定めない.
- (2) 右下肢を10cm補高し, 左下肢を脱力した状態で下垂する方法 (以下, 下垂, 図1-b).
- (3) 下垂の状態, 左下肢に2Kgの重錘を付けて下垂する方法 (以下, 重錘下垂, 図1-c).

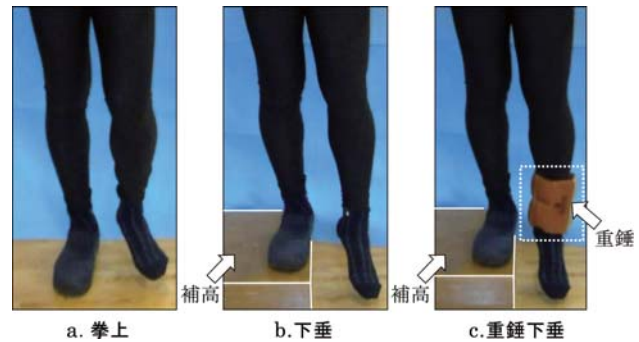


図 1. 免荷方法

- a. 挙上: 右下肢を支持脚として, 左下肢を挙上する.
- b. 下垂: 右下肢を10cm補高し, 左下肢を脱力した状態で下垂する.
- c. 重錘下垂: b. の状態で, 左下肢に2Kgの重錘を付けて下垂する.

10cmの補高については, 完全免荷をするための予備実験で, 脚長差を骨盤代償で補える3cm, 足部の脱力に伴う足関節底屈時の足長分2cm, フットクリアランス (foot clearance: 床と足部の間隔) を得るための距離の5cmを合計して算出した. また2kgの重錘は, 下肢の重量を体重の18.5%⁶⁾として, その約15%として設定した.

2) 各免荷方法での運動課題

(1) 挙上による免荷方法での運動課題

- ① 平行棒の高さを大転子の位置に設定し, 両上肢は平行棒を支持した状態で, 顔を前方に向けた直立静止立位を60秒間保持する (以下, 静止立位).
- ② 静止立位の状態から, 軸足である右下肢の股関節を屈伸することによる左下肢の前後の振り子運動を30秒間実施する (以下, 動的立位).
- ③ 両側松葉杖での3点歩行を自由速度で5m実施する (以下, 松葉杖歩行). 松葉杖の長さは立位で杖先を両脚小趾の前外側15cmの位置に置き, グリップを握った時に両肘関節が 30° 屈曲位となるように設定した.

(2) 下垂及び重錘下垂による免荷方法での運動課題

- ① 静止立位: 右下肢を10cm補高した状態で, (1) -①と同様に直立静止立位を60秒間保持する (図2-a).
- ② 動的立位: 上記の静止立位の状態で, 軸足である右下肢の股関節を屈伸することによ

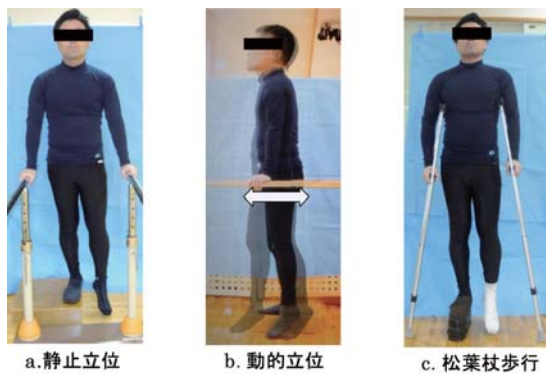


図2. 運動課題

- a. 静止立位：平行棒内で右下肢に10cmの補高をした静止立位をとる。
 b. 動的立位：a. の状態から、右下肢の股関節を屈伸することにより、左下肢の前後の振り子運動を実施する。
 c. 松葉杖歩行：右下肢に10cmの補高をした状態で、両側松葉杖での3点歩行を自由速度で実施する。

る左下肢の前後の振り子運動を30秒間実施する（図2-b）。

- ③ 松葉杖歩行：右下肢に10cmの補高をした状態で、両側松葉杖での3点歩行を自由速度で5m実施する（図2-c）。

3. 筋電図の測定と解析

筋電図の測定には、Mega社製表面筋電計ME6000を用いた。サンプリング周波数1000Hzとして筋活動の導出は表面電極（銀塩化銀電極）を用いた双極法で、電極間距離は30mmとした。電極付着部の電気抵抗を減らすため、十分に皮膚処理をした後、筋線維の走行に対して平行に貼付した。

測定筋は左下肢の大腿筋膜張筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭、前脛骨筋の4筋とした。

表1：表面電極の貼付部位

筋	貼付部位
大腿筋膜張筋	大転子より2横指前方
大腿直筋	大腿前面で膝蓋骨上縁と上前腸骨棘を結んだ中点
大腿二頭筋長頭	腓骨頭と坐骨結節を結んだ線分の中点
前脛骨筋	脛骨粗面より4横指遠位部で脛骨稜より1横指外側

表2：各筋のMVCの測定方法

筋	測定方法
大腿筋膜張筋	右側臥位で左股関節45°屈曲した状態で股関節を最大外転する。
大腿直筋	端座位で左膝関節を最大伸展する。
大腿二頭筋長頭	腹臥位で左膝関節を伸展したままで左股関節を最大伸展する。
前脛骨筋	端座位で左足関節を最大背屈する。

測定筋の選択は、下肢の挙上の際に最も活動すると考えられる筋の中で、モーメントアームが長く軽度の筋収縮で損傷部位に影響を及ぼす可能性が高い筋群とした。

表面電極は、Edward F. Delagiらの方法⁷⁾に準じて、表1のように貼付した。

筋活動の測定は、以下の方法で実施し、整流後、積分値（以下、Integrated Electro Myography: IEMG）を求め、IEMGから1秒あたりの平均積分値（以下、Average Rectified Value: ARV）を算出した。

- 1) 静止立位：60秒間測定した筋活動の中央20秒を抽出した。
- 2) 動的立位：30秒間測定した中央の10秒を抽出した。
- 3) 松葉杖歩行：5m歩行するのに掛かった時間の中央1/3の時間を抽出した。

また、運動課題中の筋活動を正規化するため、各筋における随意最大等尺性収縮（Maximum Voluntary Contraction: 以下、MVC）を測定した。MVCは、Danielsらの徒手筋力テストを参考に、各運動の最終可動域にて最大収縮を行い測定した（表2）。MVCの測定は1つの筋に対して1回に5秒間測定し、30秒間の休憩を設け、3セット実施した。3セット中、最も高振幅を示した5秒間を選択し、その前後の振幅2.5秒間を抽出し、MVCにおける1秒間あたりのARVを求め、運動課題中のARVを除する事で%MVCを算出した。得られた%MVCを用いて、各運動課題における免荷方法による筋活動の違いを比較した。

4. 統計学的処理

統計学的処理は、SPSS 11.0 J for Windowsを用いて一元配置分散分析及び、Dunnett検定により、各免荷方法での筋活動の結果を比較し、有意水準は5%とした。

Ⅲ. 結果

大腿筋膜張筋の%MVCは、静止立位で挙上 $2.36 \pm 1.92\%$ 、下垂 $1.19 \pm 0.86\%$ 、重錘下 $1.29 \pm 1.18\%$ 、動的立位は挙上 $3.09 \pm 2.75\%$ 、下垂 $1.65 \pm 1.5\%$ 、重錘下垂 $1.53 \pm 1.5\%$ 、松葉杖歩行は挙上 $3.47 \pm 2.28\%$ 、下垂 $2.56 \pm 1.6\%$ 、重錘下垂 $3.14 \pm 2.82\%$ であり、それぞれの間に有意差は認められなかった（図3）。

大腿直筋の%MVCは、静止立位で挙上 $1.49 \pm 0.38\%$ 、下垂 $0.73 \pm 0.38\%$ 、重錘下垂 $0.97 \pm 0.6\%$ 、

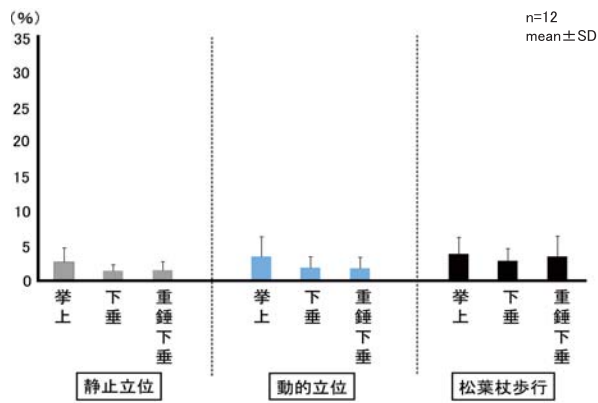


図3. 大腿筋膜張筋の%MVC

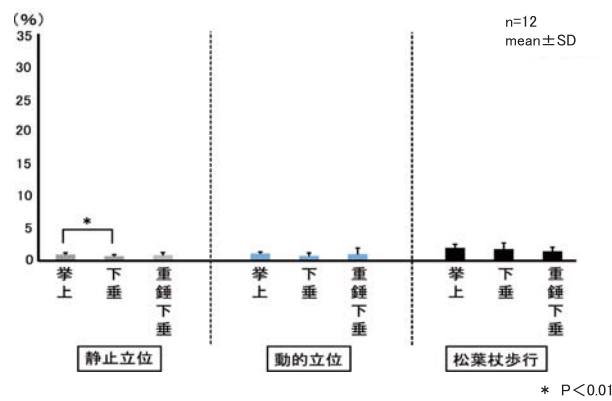


図4. 大腿直筋の%MVC

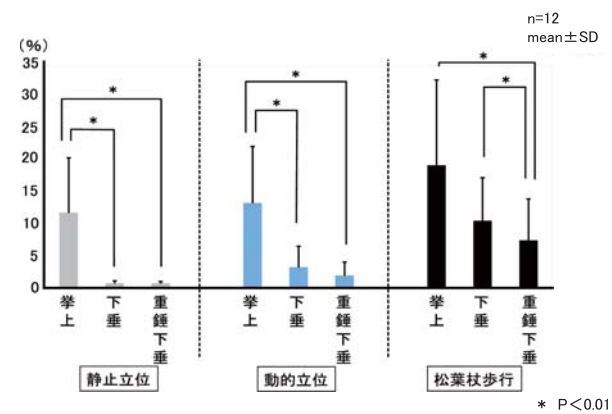


図5. 大腿二頭筋長頭の%MVC

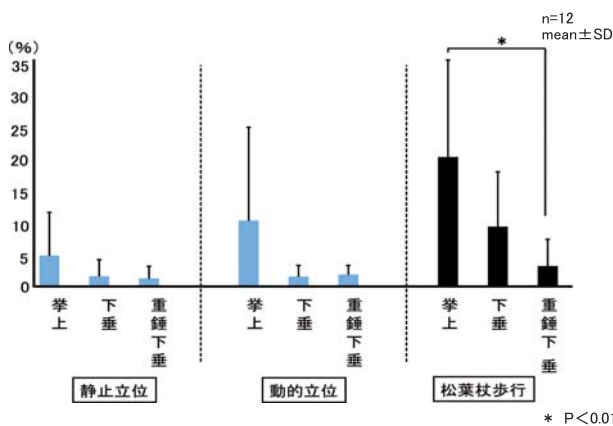


図6. 前脛骨筋の%MVC

動的立位は挙上 $1.69 \pm 0.38\%$, 下垂 $1.14 \pm 0.7\%$, 重錘下垂 $1.56 \pm 1.41\%$, 松葉杖歩行は挙上 $3.03 \pm 0.83\%$, 下垂 $2.76 \pm 1.41\%$, 重錘下垂 $2.22 \pm 0.95\%$ であり, 静止立位において, 下垂の筋活動は, 挙上の筋活動に比べて, 有意に低値を示していた ($p < 0.01$) (図4).

大腿二頭筋長頭の%MVCは, 静止立位で挙上 $11.77 \pm 8.63\%$, 下垂 $0.55 \pm 0.39\%$, 重錘下垂 $0.56 \pm 0.26\%$, 動的立位は挙上 $13.21 \pm 8.99\%$, 下垂 $3.09 \pm 3.35\%$, 重錘下垂 $1.77 \pm 2.14\%$, 松葉杖歩行は挙上 $19.22 \pm 13.53\%$, 下垂 $10.47 \pm 6.75\%$, 重錘下垂 $7.37 \pm 6.47\%$ であり, 静止立位・動的立位において, 下垂, および重錘下垂の筋活動は, 挙上の筋活動に比べて有意に低値を示していた ($p < 0.01$) (図5).

前脛骨筋の%MVCは, 静止立位で挙上 $4.47 \pm 6.34\%$, 下垂 $1.43 \pm 2.45\%$, 重錘下垂 $1.11 \pm 1.79\%$, 動的立位は挙上 $9.61 \pm 1.36\%$, 下垂 $1.38 \pm 1.64\%$, 重錘下垂 $1.67 \pm 1.35\%$, 松葉杖歩行は挙上 $18.85 \pm 14.24\%$, 下垂 $8.73 \pm 7.93\%$, 重錘下垂 $2.93 \pm 3.93\%$ であり, 松葉杖歩行において, 重錘下垂の筋活動は, 挙上の筋活動に比べて有意に低値を示していた ($p < 0.01$) (図6).

IV. 考察

骨折治療の3原則は, ①整復, ②固定, ③リハビリテーションであり¹⁾, そのうち固定が不十分であると, 骨折部血腫の血管増生を障害し, 初期の仮骨による架橋形成を妨げ, 骨内膜性の骨新生を障害するため, 骨癒合が遅延したり障害されたりする⁸⁾. 骨の力学的機能は, 荷重を支え, 関節運動を可能にすることであり, 荷重や関節運動に伴う筋収縮は, 骨の力学的機能を失った骨折部の固定性を損なう誘因となる. 今回の研究では, 骨折の固定性を失う誘因の一つである関節運動に伴う筋収縮に着目し, 挙上, 下垂, 重錘下垂の3つの免荷方法で, 静止立位, 動的立位, 松葉杖歩行の運動課題を行い, その際の免荷下肢の筋活動を比較した.

その結果, 大腿二頭筋長頭の筋活動は挙上において, 静止立位, 動的立位, 松葉杖歩行のいずれの方法でも, 下垂と重錘下垂よりも高値を示し, 静止立位では下垂よりも挙上, 重錘下垂よりも挙上で, 動的立位では同じく下垂よりも挙上, 重錘

下垂よりも拳上で、松葉杖歩行では重錘下垂よりも拳上、重錘下垂よりも下垂で、有意差を認めた。これは拳上ではフットクリアランスを獲得するための方策として膝関節の屈曲を用いるのに対し、下垂と重錘下垂はフットクリアランスを右下肢の補高で行うため膝関節を伸展位で脱力することが可能であることにより生じたものと考えられる。同様に前脛骨筋の筋活動は拳上において、静止立位、動的立位、松葉杖歩行のいずれの方法でも、下垂と重錘下垂よりも高値を示し、拳上と重錘下垂の間で有意差を認めた。これも拳上ではフットクリアランスを獲得するために、足関節を背屈しているのに対し、下垂と重錘下垂はフットクリアランスを右下肢の補高で行うため、足関節を脱力することが可能であることにより生じたものと考えられた。また、これらの筋活動は静止立位、動的立位、松葉杖歩行と重心の動揺が激しくなるほど増加していたが、これは下肢の動揺を制御するために働いたために生じたものと考えられた。

一方、大腿二頭筋長頭と前脛骨筋の筋活動が、重錘下垂において概ね最も低値を示していた。これは単に脱力して下垂するだけでなく、重錘により筋を伸長することでIb抑制が働くことにより^{9) 10)}、筋活動が低値を示したものと考えられる。したがって免荷歩行は、骨折治療の3原則である整復、固定、リハビリテーションのうち、固定とリハビリテーションに関わっており、それらを的確に遂行するためには、免荷だけでなく関節運動に伴う筋収縮を抑制する必要があることから、免荷歩行は患側下肢を拳上するよりも、健側に補高し患側下肢に下肢の重量の15%程度の重錘を装着した下垂状態の方が適していると考えられた。しかし、今回の研究では、足部の脱力により足関節が底屈位となり、その状態でフットクリアランスを得るためには10cmの補高が必要であった。10cmの補高での松葉杖歩行は安定した状態とは言えないことから、足関節を他動的に背屈位に保持するなどにより、補高を低くする必要があると考えられた。また下肢の骨折では、ギプス固定が行われる場合が想定され、ギプスの重量を重錘として利用することが可能か否かの検証が必要であると考えられた。

我が国では2003年から急性期の入院医療に対しても「Diagnosis Procedure Combination:DPC」という定額払いが導入され、入院期間を短縮しようという動きがあることから¹¹⁾、これまで入院加

療が必要とされていた固定性の不十分な骨折も在宅加療となる可能性がある。したがって、従来より経験的に行われていた免荷歩行様式も、より科学的根拠に基づいた免荷歩行様式に改良していく必要があると考えられた。

【参考・引用文献】

- 1) 石井清一, 平澤泰介 監修: 標準整形外科学. 第8版, 医学書院, 東京, pp593-615, 2002.
- 2) 米本恭三 他: 最新リハビリテーション医学. 医歯薬出版株式会社, 東京, pp74-85, 2011.
- 3) Stanley Hoppenfeld, Vasantha L.Murthy著, 江藤文夫, 中村利孝, 赤居正美ら監訳: 骨折の治療とリハビリテーション. 南江堂, 東京, pp23-40, 2012.
- 4) 中島義博 他: 運動療法中に股関節に関わる負荷について. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. 20: 97-100, 1999.
- 5) 金井章 他: SLR運動時の股関節接触応力の検討. 日本臨床バイオメカニクス学会誌. 21: 83-86, 2000.
- 6) 基準体重比. <http://www.nutri.co.jp/nutrition/keywords/ch1-6/keyword2/>(閲覧日:平成26年9月2日)
- 7) Edward F.Delagi, Aldo Perotto著, 田島達也監訳: 筋電図のための解剖ガイド. 西村書店, 新潟, pp158-189, 1985.
- 8) Ronald McRae, Max Esser著, 小野啓郎監訳: 図解骨折治療の進め方. 第3版, 医学書院, 東京, pp83-111, 2008.
- 9) Mark L, Latash著, 笠井達哉, 道免和久監訳: 運動神経生理学講義. 大修館書店, 東京, pp85-93, 2002.
- 10) Eric R.Kandel, James H.Schwartz, Thomas M.Jessellら著, 金澤一郎, 宮下保司監訳: カンデル神経科学. メディカルサイエンスインターナショナル, 東京, pp776-796, 2014.
- 11) 近藤暁子: わが国における大腿骨頸部骨折の術後入院期間と長期的アウトカムとの関係 文献検索より. 中部大学生命健康科学研究紀要, 3: 21-28, 2007.