

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500651

研究課題名(和文)固有振動数を利用した骨の強さ指標と筋力の負荷関係評価法の開発

研究課題名(英文)Development of strength index of human bones by using natural frequencies of bones and evaluation of muscle forces

研究代表者

矢野 澄雄 (YANO, SUMIO)

神戸大学・人間発達環境学研究所・教授

研究者番号：20115306

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの骨の質や強さを評価するため、前腕のCT画像解析から筋と骨の各断面積を用いて、筋力の影響を含む力学的指標を提案しその加齢特性を調べた。総骨密度や固有振動数を利用したヤング率相当の骨強度指標と比較した。提案した曲げと圧縮に関する指標は総骨密度や骨強度指標と同様な加齢的低下傾向を示すことがわかった。骨に負荷となる筋力との関係や力を計測するために薄いセンサフィルムの曲げと圧縮特性を検討し、力センサとして利用できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the quality and strength of human bones, cross sectional areas of bones and muscles of forearm were calculated from computed tomography (CT) image analysis. Then mechanical indexes involving the effect of muscle forces were proposed and the aging property was investigated. For comparison the bone mineral density and the strength index by using natural frequency of forearm bone corresponding to Young's modulus were calculated. The proposed indexes with respect to bending and compression showed the tendency to decrease with aging similarly to the bone mineral density and the strength index. Bending and compression properties of thin films of sensors were investigated for revealing the loading relationship between bones and muscle force and measuring those forces, and then the usage as a force sensor was ascertained.

研究分野：機械力学・バイオメカニクス

科研費の分科・細目：人間医工学、リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：健康・福祉工学 生体特性

1. 研究開始当初の背景

骨粗鬆症や骨の健康状態は骨密度の値で診断や評価されてきたが、骨折しやすいかどうかは力と強度の問題である。「骨密度」と「骨強度」が違うという認識や本質的に「強さ」で評価する必要性が日本骨粗鬆症学会などにおいても指摘されるようになった。加齢に伴い、骨密度の低下以上に骨の強さは急激に低下しているのではというイメージはあっても、具体的に比較した結果はみられない。骨組織のミクロな構造・応力解析も進められているが、マクロな強さという視点から、骨の強さを簡易評価する指標を考案することも重要なことである。

また DXA 法など多くの検査機では、面積当たりの骨密度が得られて診断に用いているが、力や強度で評価するには物理で使うような体積当たりの密度が必要である。ドイツでは H. Schiessl などが pQCT(peripheral Quantitative Computed Tomography) 法による体積当たりの骨密度を用いており、骨の強さと筋力の関係へと研究展開していた。pQCT 法での骨と筋肉の荷重関係については、発達段階の子どもを対象にして、E. Schoenau らのグループによる研究もみられた。そこで pQCT 法による体積当たりの骨密度を用いることにし、骨と筋力との関係などの測定・評価を進めることにした。しかし非常に高価な検査機器はあっても、この目的に合うような力の計測器はないので、製作しながら研究に当たる必要がある。

以前に行ったアンケート調査では、中学時代・高校時代からその当時・中年期までの定期的運動状況について、運動種目によっては筋力が高くても骨密度にはあまり反映されない場合もみられた。骨に対する負荷という観点および力学的強さの指標を作成し評価する必要性を感じていた。指標をもとに、運動・生活動作を生体力学的知見と合わせて検討することにより、骨の健康と中高年期の運動指導や生活動作の改善へと発展させていくことは、意義のあることと考えられる。

2. 研究の目的

(1) 本研究は転倒予防や骨粗鬆症に関連して、ヒトの骨の質や強さを、筋力を考慮した指標や骨の固有振動数を利用した力学的な指標で評価する方法を検討し提案するものである。骨の強さと負荷となる筋力との関係を力学的に調べることで、それを検証するための力・負荷に関する測定機器の開発もめざすことが目的である。

(2) 筋力を考慮した指標作成では、体重がかかる下肢(下腿骨)で Rittweger, J.ら(Bone, 2000)の体重とトルクに対する圧縮や曲げの指標などを参考に、これを体重がかからない骨である前腕での指標に発展させる。荷重骨と非荷重骨の相違という点も考察しながら、等価な力

学的モデルによる力の計算などから指標の生体力学的妥当性を検討する。それらを実験的に確かめるため、筋力特性を評価する計測方法の考案、生体のような曲面でも測定しやすいフィルムセンサの利点を生かした計測器の開発をも最終的にめざしている。そのため、力計測に使用するセンサの力学的特性を検討すること、関連して必要になってくる専用の測定用具や電気回路の製作も合わせて行うことが特色である。

(3) 測定を通して得られる生体力学的知見をもとに、中高年期の運動指導・生活動作の改善への展開もめざす。またデータを蓄積していけば、「骨健康モニター」なる機器とか骨筋系の健康意識の啓発活動に用いる簡易機器としての使用が予想される。

3. 研究の方法

(1) ヤング率相当の骨強度指標 $(fL)^2$ を算出するために、前腕骨の固有振動数 f [Hz]と前腕の長さ L の測定が必要である。は骨密度検査で得られる前腕骨の手首側から 4% の断面での総骨密度を用いる。体積当たりの骨密度が得られる pQCT 法では海綿骨密度や皮質骨密度も求められるが、本研究では総骨密度を用いた。なお積 (fL) は材料内の伝播速度 [m/s] に対応するもので、硬い材料では速く伝わる。固有振動数 f は、振動工学で用いられる方法を応用して、前腕を専用台に載せて肘頭を下からインパクト加振し、尺骨遠位端部(手首側)で加速度センサの応答から求めた。非利き手側の測定値を用いた。

(2) 筋肉を考慮した骨の強さ指標は、等価な力学的モデルでの検討しながら、曲げおよび圧縮に関してそれぞれ考案した。前腕骨の手首側から骨長の 4% 断面ではほとんど筋肉はないため、20% 断面での CT 画像をもとに、骨断面積と筋肉断面積を解析し、指標の算出に用いた。骨断面積は橈骨と尺骨の合計とし、非利き手側とした。そして上記のヤング率相当の骨強度指標および総骨密度に対し加齢的推移について比較した。骨は二断面(4%と 20%)での評価になる。

(3) 骨と筋肉の負荷関係を検証し計測するために、上記(2)の指標に対応して、計測に使用するセンサの曲げ変形と圧縮力に対して特性を把握して、力学的に妥当な測定ができるのかを調べることにした。立位姿勢保持時の足底荷重や筋力の変動、下肢筋の最大筋力の測定を通して、日常生活動作と力学に関する知見を蓄積していきながら、指標作成や計測・評価方法に取り組んだ。

(4) 計測については、力学が専門の研究代表者と電気機器工学が専門の研究分担者とが連携して、専用の機器はないため測定補助用具や電気回路の製作をしながら進めた。力センサとしては、高分子厚膜フィルムの FSR や半晶性ポリマーの PVDF(ポリフッ化ビニリデ

ン樹脂)の使用も考えられるが、予備実験による検討を経て、ニッタ社のFlexi-Forceで調べることにした。フィルム状のセンサは感圧面に加わる荷重に反比例して抵抗値が変化するので、抵抗 電圧変換回路を製作して、電圧に変換し出力した。

フィルムセンサは0.2mmと薄いため、力の校正やデジタルフォースゲージの負荷方法を工夫して行った。特に重要な特性として、薄いセンサ感圧面の荷重分布状態により出力が変化する可能性で、これを確認したデータはないため詳細に検証した。

(5) センサと曲げについて： 身体計測を想定して、無負荷でもセンサ感圧面が曲がるとセンサ出力に影響があるのかを調べるため、円弧状に切り込みを入れた木材の板を製作した。円弧は曲率(曲率半径の逆数)に換算して20~100[m⁻¹]である。感圧面側から切り込みに挿入して、曲率と抵抗の逆数(コンダクタンス)の関係を調べた。コンダクタンスの値が大きいと荷重が大きいことを意味する。なお感圧面から回路へと接続する導線部のフィルムの曲げの影響はない。

(6) センサと圧縮力について： センサ感圧面の荷重分布を均等にするために、感圧面より小さく平らな円盤(パック)を上貼り付けた。パックは、加工が容易なPET樹脂(厚さ0.5mm)、金属のアルミニウムとステンレス鋼(直径9mm)の3種類とした。デジタルフォースゲージで円形断面のアタッチメントにより静的に負荷し、3種類での圧縮特性を調べた。感圧面の荷重が等分布とはならない状態を想定し、円錐型のアタッチメントによる点負荷の場合の分布不均一さについて検討した。図1に示すように感圧面(直径9.5mm)の中心から水平・垂直方向に1mmごとに4mm離れた17点に対して負荷し、荷重と中心からの距離との関係を調べた。

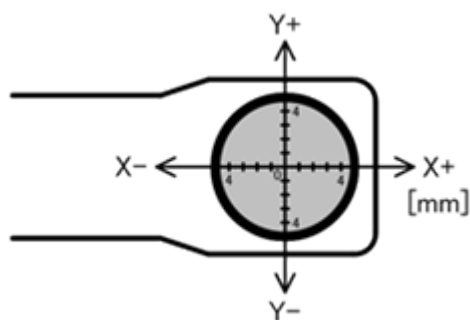


図1 センサ感圧面の座標と測定点

4. 研究成果

(1) 橈骨遠位端から前腕骨長の4%部位での骨の評価として、総骨密度と固有振動数を利用したヤング率相当の骨強度指標を図2に示す。50歳~82歳までの女性96名を、年代別に三つのグループに分けて、平均値と標準偏差を図示している。50歳代と70歳代の間、60歳代と70歳代の間との低下に0.5%水準で統計的有意差がみられた。総骨密度の平

均値と標準偏差は図3に示す。ヤング率相当の指標の方が総骨密度よりも低下傾向は大きかった。

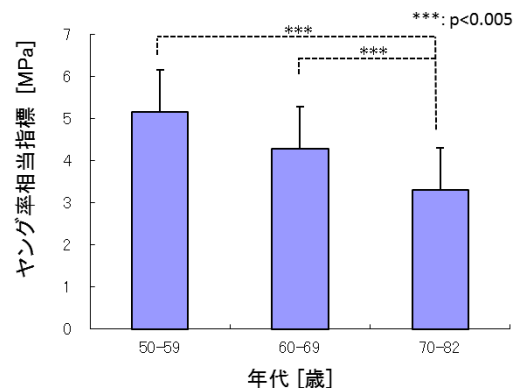


図2 ヤング率相当の指標の加齢的推移

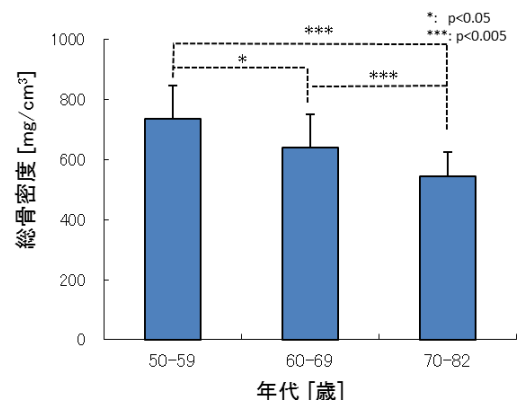


図3 総骨密度の加齢的推移

(2) 骨に負荷となる筋の曲げモーメント相当の指標として、筋断面積と前腕長の積で評価した。圧縮力相当の指標として、骨断面積÷筋断面積で評価した。橈骨遠位端から前腕骨長の20%部位での断面積をベースとしている。曲げモーメント相当の指標では、図4に示すように、50歳代と70歳代との間の低下、60歳代と70歳代との低下には統計的有意差がみられた。圧縮力相当の指標も、図5に示すように、50歳代と70歳代との間の低

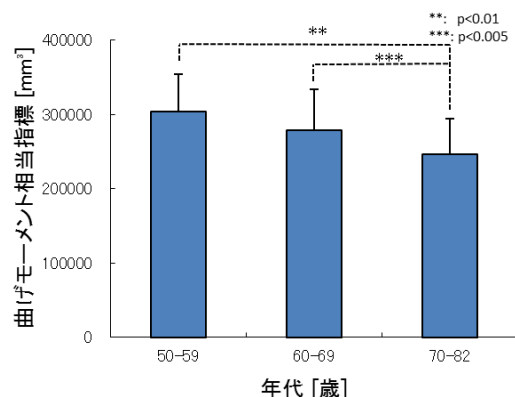


図4 曲げモーメント相当の指標の加齢的推移

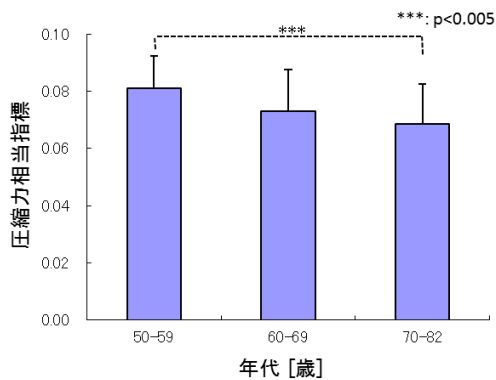


図5 圧縮力相当の指標と加齢的推移

下には0.5%水準の有意差がみられた。筋肉の影響を考慮した指標は、4%部位の総骨密度や強度指標と同様な加齢的低下傾向がみられるが、ヤング率相当の指標よりも50歳代から60歳代にかけての加齢的低下は緩やかなようである。今後の特性の評価をする上で価値ある傾向が把握できた。

(3) センサの曲げ変形について： センサ感圧面が、ある曲率範囲を超えると出力は急激に増加し、曲げ変形の影響がみられた。図6のセンサの場合、コンダクタンス（抵抗の逆数、単位ジーメンズS）の値は、曲率50 [m⁻¹]以下の範囲では小さくほぼ一定出力であった。60 [m⁻¹]を超えると増加し始め、さらに曲率つまり曲がり具合が大きくなると急激に増加する特性が把握できた。曲率100 [m⁻¹]で0.4N程度の力に相当するが、実際の身体の力測定において、センサ感圧面が大きな曲率となるような使用には注意が必要であることがわかった。

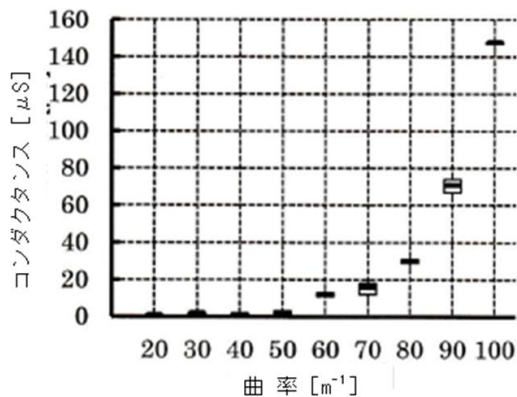


図6 センサの曲げ変形特性

(4) センサと圧縮力について： デジタルフォースゲージによる円形面負荷の場合、力とコンダクタンスはほぼ比例関係にあり、3種類のパックの圧縮荷重特性の差は図7に示すように小さい。どれを使っても負荷されると、センサ感圧面では等分布な荷重になると考えられる。なお図7のSUSはステンレス鋼である。

円錐型点負荷の場合、PET樹脂のパックでは、感圧面の中心(図1参照)から離れるとすぐコンダクタンスの値つまり荷重は増加し

た。これに対し金属のアルミニウムやステンレス鋼では、中心から3mm以上離れると増加し始めて、方向によって異なる偏分布状態になった。中心から2mmの範囲内ではあまり変化しなかったため、この範囲内では点負荷でも上記の金属のパックを用いれば等分布状態になると考えられる。

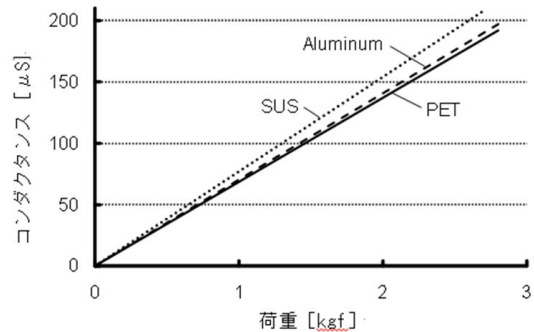


図7 面負荷でのセンサの圧縮特性と3種類のパック材質の比較

(5) 身体の力計測への利用という点で、薄いフィルムセンサ受圧面をフラットに保つ工夫が原理的に重要であることや力の負荷方法についての知見を得た。曲げ変形の影響が無視できるような曲率の範囲で使用するか、感圧面が曲がらないように、アルミやステンレス鋼のように硬質の材料のパックを貼り付ければ、等分布化という点で効果あることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Kazushige OSHITA, Sumio YANO, Low-frequency force steadiness practice in plantar flexor muscle reduces postural sway during quiet standing, J. Physiological Anthropology, 査読有, Vol.30, No.6, 2011, pp.233-239. DOI: 10.2114/jpa2.30.233

〔学会発表〕(計10件)

Kazushige OSHITA and Sumio YANO, Lightly touching to the cane reduces postural sway during single-leg standing, The 6th Asia-Pacific Conference on Exercise and Sports Science (APCESS 2013), 2013年11月3日, Sports Center, Chinese Culture University, Taipei, 台湾 Taiwan
葉山浩樹・福田博也、異なる歩調および履物における床反力推定インソールの性能評価、生体医工学シンポジウム 2013、2013年9月21日、九州大学伊都キャンパス(福岡市)

K. Oshita and S. Yano, Effects of light

finger touch to the upper legs on postural sway and muscle activity during quiet standing, 35th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2013)、2013年7月3日、大阪国際会議場(大阪市)

大下和茂、矢野澄雄、準静的立位状態における一過的な手部感覚情報はその後の姿勢制御能力を高める、第67回日本体力医学学会大会 2012年9月16日、(14-16)長良川国際会議場・岐阜都ホテル(岐阜市)

池田諒、福田博也、汎用ピエゾ抵抗フォースセンサを用いた簡易歩行計測システムの考案、生体工学シンポジウム 2012、2012年9月8日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

池田諒、福田博也、歩行分析のための鉛直床反力と3軸加速度の無線計測システムの構築、第51回生体医工学会大会、2012年5月10日、福岡国際会議場(福岡市)

大下和茂、矢野澄雄、足関節低屈筋における力調節能力と立位時における重心位置動揺との関係、日本生理人類学会第65回大会、2011年11月26日、関西大学(大阪府吹田市)

池田諒、福田博也、靴内挿入型の荷重計測デバイスを用いた床反力の推定、第32回バイオメカニズム学術講演会、2011年11月26日、大阪科学技術センター(大阪府)

池田諒、福田博也、薄型フォースセンサを用いたウェアラブルな足底荷重計測デバイスの評価、スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011、2011年11月2日、京都大学百周年時計台記念館(京都市)

池田諒、福田博也、薄型フォースセンサを用いた歩行時の鉛直床反力の推定、生体医工学シンポジウム、2011年9月17日、ビッグハット・長野市若里市民文化ホール(長野市)

〔図書〕(計1件)

Ganesh R. NAIK 編, Kazushige OSHITA, Sumio YANO, INTECH, Applied Biological Engineering -Principles and Practice-, (担当 Chapter 11: Functional Significance of Force Fluctuation During Voluntary Muscle Contraction), 2012, pp.261-282(総662)

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢野 澄雄 (YANO SUMIO)

神戸大学・大学院人間発達環境学研究所・教授

研究者番号：20115306

(2) 研究分担者

福田 博也 (FUKUDA HIROYA)

神戸大学・大学院人間発達環境学研究所・准教授

研究者番号：90294256