

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 21 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350659

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負荷を評価する測定器の開発

研究課題名(英文) Development of strength index of human bones by using natural frequencies of bones and measurement equipment for evaluating muscle load

研究代表者

矢野 澄雄 (YANO, SUMIO)

神戸大学・人間発達環境学研究科・教授

研究者番号：20115306

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの骨の質や強さを力学的に評価する指標として、前腕のCT断面画像から、曲げモーメントに対する皮質骨断面係数や筋肉などを解析し、50歳から82歳までの女性の加齢的推移を調べた。筋肉と皮質骨の断面積比、固有振動数を利用したヤング率相当の骨強度指標も算出し、これらの指標も骨密度と同様に加齢的低下傾向を示すことがわかった。骨に負荷となる筋肉の負荷関係や荷重の評価のために、センサの有効な配置や圧電フィルム自体の曲げ特性を検討し、力測定器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 make mechanical indexes for evaluating the quality and strength of human bones, sectional modulus of cortical bones against bending moment and muscle at forearm were analyzed through CT (computed tomography) images. The aging characteristics of women aged 50 to 82 were investigated. The ratio of cross section of muscle to bone and the strength index by using natural frequency of forearm bones corresponding to Young's modulus were calculated. These indexes showed the tendency to decrease with aging similarly to the bone mineral density. Effective arrangement of sensors and bending properties of thin piezoelectric films were investigated and then the usage as an equipment for measuring and revealing the load relationship between bones and muscle was ascertained.

研究分野：機械力学・バイオメカニクス

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

骨粗鬆症の診断や骨の健康状態は骨密度の値で評価されてきたが、その結果転倒などで骨折しやすいかどうかは力学的な強度の問題である。診断での骨密度と実際の「骨強度」との関係や相違、そして本質的に「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てきている。加齢に伴って、骨密度の低下以上に骨の強さは急激に低下するというイメージは潜在的にあっても、具体的にデータで検討し比較し報告はみられない。骨組織のミクロな構造・応力解析も進められているが、マクロな強さの観点から、骨の強さを理解し簡易評価でき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の値が得られて診断されているが、力や強度で評価するには物理学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 らや Rittweger, J. ら (Bone, 2000) の圧縮や曲げの報告などが pQCT (peripheral Quantitative Computed Tomography) 法検査機による体積当たりの骨密度を用いており、骨の強さと筋力と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る。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・評価も進めることにした。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、力学的検討と測定器を設計・製作を行いながら研究に当たる必要がある。

また筋力が高くても骨密度にはあまり反映されない運動の種目があり、骨に対する筋肉の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という必要性が感じられた。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、筋肉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肉との関係を力学的に調べること、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) 指標作成では、算出するデータの加齢的低下率や加齢的推移をみながら、力学モデルなどで生体力学的妥当性を検討する。そして体重がかかる下肢の骨と、体重がかからない骨である前腕を対象に、荷重骨と非荷重骨の相違という点

を考察していく。

それらを実験的に確かめるために、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・荷重の計測に使用するフィルムセンサの力学的特性を検討すること、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。高価で消耗してしまう圧力分布シートと特殊な装置ではなく、安価で繰り返し測定に使えるものを目指している。

(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) 前腕橈骨の pQCT 法で骨密度検査での手首側から骨長の 4% 断面に加えて 20% 断面と二つの断面での骨密度や CT 画像から解析できる特性値で評価する。対象は 50 歳から 82 歳までの女性人で、いずれも非利き手側とした。工学的観点からの強さ指標として、皮質骨の多い 20% 断面で CT 画像から、曲げモーメントに対する骨断面係数を解析し算出した。骨への負荷となる筋肉の断面積なども解析し、骨断面積との比の加齢的推移も調べた。なお 4% 断面での骨密度はやわらかい海綿骨も含んだ総骨密度ベースの評価、20% 断面は皮質骨密度ベースという相違がある。

(2) ヤング率相当の骨の強さ指標 $(fL)^2$ を算出するため、骨密度には上記(1)の 20% 断面で得られた(体積当たりの)皮質骨密度を用いた。50 歳代、60 歳代、70 歳代以上の三つの年齢層に分けて、加齢的推移を調べた。

に 4% 断面の海綿骨も含めた総骨密度を用いた強さ指標と比較した。

指標の算出には、前腕骨の固有振動数 f [Hz] と前腕の長さ L の測定も必要である。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。

(3) 骨と筋肉の負荷関係を検証し計測するために、計測に使用するフィルムセンサ自体の曲げ変形と圧縮力に対する特性を把握して、力学的に妥当な測定ができるのかを調べることにした。立位姿勢保持時や歩行時の足底の荷重や圧力分布、下肢筋の最大筋力の測定を通して、日常生活動作と生体力学に関する知見も蓄積していきながら進めた。点型圧電センサを足底のどこに配置するか、センサ間の関係をどう基準化するか、

個人差も含めて、力学的に検討した。
 (4) 力・荷重の計測法については、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が連携して行い、専用の装置作りを目指して測定補助用具や信号の取り出し方や電気回路の製作をしながら進めた。

4. 研究成果

(1) 図1には前腕橈骨遠位端から骨長20%断面での皮質骨の断面係数(Z_x, Z_y)の年代層別の平均値[mm^3]と標準偏差を示す。50歳代、60歳代、70-82歳と三つの年齢層に分けており、 Z_x, Z_y の値は加齢とともに低下し、50歳代に対する70-82歳の層の比は平均値で各々0.78と0.80まで減少し、0.5%水準で統計的に有意な差がみられた。骨の断面形状は真円ではなく、比 Z_x/Z_y で0.8程度の方向差がある。CT画像では Z_x の方が常に Z_y よりも小さい値をとり、同じ大きさの曲げモーメントに対して、 x 方向の方が y 方向より大きな応力を受け弱いことになる。 Z_x は50歳代と60歳代の間の低下に5%水準で統計的に有意な差がみられるが、 Z_y は60歳代と70歳代の間の低下に5%水準で有意差がみられるという違いがあった。なお総断面積で推移をみた場合、その平均値と標準偏差は、50歳代で $108.6 \pm 15.7 [\text{mm}^2]$ 、60歳代で $106.4 \pm 16.4 [\text{mm}^2]$ 、70-82歳で $109.0 \pm 17.2 [\text{mm}^2]$ と年齢層別の平均値は同程度であり、5%水準でも有意差はみられない。これより工学的な強度に関する骨断面係数を算出して加齢的推移を評価することには価値があると考えられる。

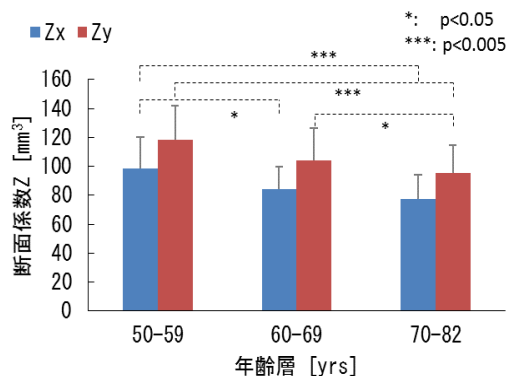


図1 皮質骨の断面係数 Z_x, Z_y の年齢層別推移(20%断面)

(2) 20%断面での皮質骨密度は、50歳代で $1129.0 \pm 43.3 [\text{mg}/\text{cm}^3]$ 、60歳代で $1071.9 \pm 56.3 [\text{mg}/\text{cm}^3]$ 、70-82歳で $1029.1 \pm 50.0 [\text{mg}/\text{cm}^3]$ であった。50歳代に対する70-82歳以上の層の平均値の比で見ると、0.911で低下率は10%弱と小さい。加齢の影響は皮質骨密度に現われるよりも、形状に関係する断面係数で評価する方が大きく現われることがわかった。

(3) 20%断面での皮質骨密度を用いて強さ指標 $(fL)^2$ を算出し、年齢層別の平均値

と標準偏差を図2に示す。ヤング率に相当する指標で、積(fL)は(固有振動数×尺骨長)である。50歳代と70-82歳の間であれば、0.5%水準で有意な差が認められ、平均値の低下率は20%である。しかし60歳代と70-82歳間には5%水準で有意差があるものの、各年齢層の間で加齢の影響が大きくは現れていない。これは硬い皮質骨の強さの低下は急激ではないか、60歳代の標準偏差が大きくこの時期は個人差が大きく現れるのかもかもしれない。

これに対し、遠位端から4%断面での海綿骨を含む総骨密度を用いた強さ指標 $(fL)^2$ で評価する場合、50歳代と70-82歳の間および60歳代と70-82歳の間にも0.5%水準で有意差がみられた。70-82歳の平均値は50歳代に対して40%と大きく低下した。二つの部位(4%および20%断面)での強さ指標を比べると、50歳代に対する70-82歳の平均値の低下率に2倍くらいの差があり、やわらかい海綿骨も含む総骨密度ベースの指標と固い皮質骨だけのベースの指標では加齢的傾向が異なっている。

また皮質骨ベースの指標の場合、上記(2)で述べたように皮質骨密度の低下率は10%程度と少ない。骨の固有振動数を測定して図2のヤング率相当の指標 $(fL)^2$ を算出なくとも、断面係数 Z_x, Z_y は約20%の低下をするため、断面係数自体を一つの指標としてもよさそうである。

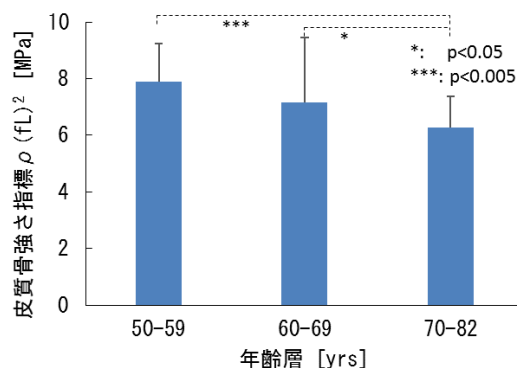


図2 20%断面の皮質骨強さ指標の年齢層別推移

(4) 骨への筋肉の負荷について、20%断面での筋肉の断面積の平均値は50歳代の $1302 [\text{mm}^2]$ が70-82歳の $1084 [\text{mm}^2]$ へと約17%低下し、0.5%水準で有意差が認められた。

この筋断面積を橈骨の皮質骨断面積で割った比の年齢別推移を図3に示す。50歳代の12.6に対し70-82歳の15.2は約20%の増加で、0.5%水準で有意差が認められた。加齢に伴って、筋肉と皮質骨の断面積が同様な比率で低下していくのではなく、筋肉よりも皮質骨の方が大きく低下することがわかった。この筋肉と骨の断面積比について、筋肉からの荷重を骨で受けとめると考えると、加齢とともに骨の負担が大きくなることを示唆している。

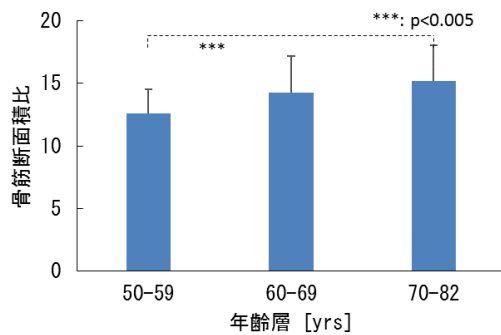


図3 筋断面積と骨断面積の比の年齢層別推移(20%断面)

(5) 下肢の荷重の測定器の開発と力学的な把握については、足底に点型の圧電フィルムセンサを用いた。薄い金属バックをセンサの上に置いて、荷重がセンサ感圧面に等分布に当たる力学原理に沿うように使用した。フィルムセンサ自体の曲げ変形と力学特性から、使用できる曲率範囲を確認した。測定器専用の電気回路を設計・製作し、データ取得可能であることを確認した。

次にセンサ感圧面をどこにどう配置すればよいかという課題に対しては、片足立位時の静的な足底の圧力分布および歩行(5歩)の単脚支持期の圧力分布の計測から決定した。できるだけ少ない個数で実現という観点から、高いピーク圧力が現れる領域を三つに分け、踵部、中足骨の4-5指部、拇指・拇指球部に各々、前後方向の同一線上に2個一対に少し離してセンサ感圧面を配置した。計6個で、鉛直方向の床反力特性で評価すると妥当な荷重が得られた。これに対し、足底を細かい領域に分けて各1個単独配置では、そのセンサ感圧面に当たらなければ床反力に誤差が生じやすいなど、個人差も含めて力学的意味を考察した。

(6) この研究の位置づけとしては、骨粗鬆症や骨の強さ・質を(面積当たりの)骨密度の数値で代用して診断やスクリーニングしていたのに対し、体積当たりの骨密度と工学的強度に基づく指標で評価できることに意義がある。中高年期の加齢特性についても力学ベースで比較でき、さらに力学原理に沿った力・荷重の計測方法で装置作りに取り組んだことである。

今後の装置の開発の課題として、動きとともに圧力中心位置とその軌跡を知るためには、鉛直方向の床反力以外の前後および左右方向の力も捉えることが重要になってくる。歩行の場合には、左右方向のせん断力も軌跡に影響する。左右方向用のセンサの追加と配置法に関して力学的検討し、より少ない個数で実現する。また体重から簡単にキャリブレーションできる機能も組み込む必要がある。

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5件)

OSHITA Kazushige, YANO Sumio, Effect and immediate after-effect of lightly gripping the cane on postural sway, *J. Physiological Anthropology*, 査読有, Vol.35, 2016, pp.14/1-8, DOI: 10.1186/s40101-016-0096-4

大下 和茂、矢野 澄雄、上肢姿勢保持時における布の接触による触覚入力が生理的振戦に及ぼす影響、*生体医工学*、査読有、54巻、4号、2016、pp.177-183 DOI: 10.11239/jsmbe.54.177

葉山 浩樹、福田 博也、インソール型フォースセンサによる足圧中心軌跡の推定、*生体医工学*、査読有、54巻、1号、2016、pp.15-21 DOI: 10.11239/jsmbe.54.15

Oshita K, YANO S, The Effect of Lightly Gripping a Cane on the Dynamic Balance Control, *The Open Biomedical Engineering Journal*, 査読有, Vol.9, 2015, pp.146-150 DOI: 10.2174/1874120701509010146

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*、査読有、52巻、2号、2014、pp.108-112. DOI: 10.2114/jpa2.30.233

[学会発表](計12件)

福田 博也、インソール型フォースセンサによる床反力および足圧中心軌跡の推定、平成29年電気学会全国大会、2017.3.15、富山大学(富山県)

Kazushige OSHITA, Sumio YANO, A potential new use for clothing to enhance locomotive ability through haptic sensory input, 6th International Ergonomics Conference (ERGONOMICS 2016), 2016.6.16, Zadar (クロアチア)

大下 和茂、矢野 澄雄、布の着用による触覚情報入力が歩行能力に与える影響について、第40回人類動態学会西日本地方会、2015.12.26、九州共立大学(福岡県)

大下 和茂、矢野 澄雄、A potential new use for clothing to improve postural control through haptic sensory input, The 12th International Congress of Physiological Anthropology, 2015.10.30、東京ベイ幕張ホール(千葉県)

大下 和茂、矢野 澄雄、触覚情報を利用した姿勢制御向上に繋がる新たな杖の使用方法に関する検討、ヒューマンインターフェースシンポジウム 2015、2015.9.3、公立はこだて未来大学(北海

道)

鎌田 庸平、福田 博也、圧力センサを用いた姿勢・行動判別法、生体医工学シンポジウム 2015、2015.9.25、岡山国際交流センター(岡山県)

葉山 浩樹、福田 博也、インソール型フォースセンサによる足圧中心軌跡の推定、生体医工学シンポジウム 2015、2015.9.25、岡山国際交流センター(岡山県)

寺元 統人、福田 博也、歪みゲージを用いた柔軟な一軸剪断力センサに関する検討、生体医工学シンポジウム 2015、2015.9.25、岡山国際交流センター(岡山県)

大下 和茂、矢野 澄雄、布の着用による触覚情報の入力は動的姿勢制御能力を向上させる、第 16 回日本健康支援学会年次学術大会、2015.3.7、福岡市健康づくりセンターあいれふ(福岡県)

大下 和茂、矢野 澄雄、姿勢保持時における布を介した触覚入力は生理的振戦を低下させる、ヒューマンインターフェースシンポジウム 2014、2014.9.10、京都工芸繊維大学(京都府)

Kazushige OSHITA, Kyotaro Funatsu and Sumio YANO, Effect of lightly touching to a cane on postural sway during single-leg standing, 2014 International Society for Posture & Gait Research World Congress, 2014.7.1, Vancouver (カナダ)

葉山 浩樹、福田 博也、薄型フォースセンサと無線通信モジュールを用いた床反力計測システムの開発、第 53 回日本生体医工学会大会、2014.6.24、仙台国際センター(宮城県)

〔図書〕(計 1 件)

小寺 忠、矢野 澄雄、演習で学ぶ機械力学第 3 版、森北出版、2014、243 (54-96)

〔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科・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科・准教授

研究者番号：90294256