

神奈川工科大学

健康福祉支援開発センター

研究報告

第 17 号

2020 年度

目次

- ・脳血液循環と血圧の連続測定 –特に動作・運動時の変化に着目して–

臨床工学科 松尾 崇

臨床工学科 渡邊 紳一

臨床工学科 松田 康広

機械工学科 岩永 正裕

臨床工学科 渡邊 晃広

臨床工学科 西村 宗修

- ・ロコモ評価機器「健幸 ai ちゃん」を用いた地域および組織連携によるヘルスケアネットワーク創出の社会実証研究

ロボット・メカトロニクス学科 高橋 勝美

脳血液循環と血圧の連続測定 –特に動作・運動時の変化に着目して–

研究者名：

研究代表者	臨床工学科	松尾崇
研究分担者	臨床工学科	渡邊紳一
研究分担者	臨床工学科	松田康広
研究分担者	機械工学科	岩永正裕
研究分担者	臨床工学科	渡邊晃広
研究分担者	臨床工学科	西村宗修

1. 研究の目的

我々は日常さまざまな活動を行い、いろいろな環境変化の影響を受けて生活している。これらは、心臓血管系のはたらきに変化を起こし、脳血流にも影響すると考えられるが、姿勢変換や活動時における脳血流や血圧に関する知見は十分とは言えない。本研究では、いろいろな動作、運動負荷、さらに能動のおよび受動的な姿勢変換の条件下で、中大脳動脈(MCA)の血流速波形、脳組織血流および連続血圧の測定を行う。得られた血流および血圧波形は、周波数分析、変動度解析、抵抗指数算出(後述)などにより血行力学的に解析する。さらに血流波形-血圧波形の相関解析を行い、脳循環抵抗を算出し、活動時の脳血流調節機構を調べる。以下の項目について重点的に研究することにより、運動作業時における循環特性を明らかにし、脳血管病変発生の部位特異性との関連を明らかにすることが、本研究の目的である。

- (1) 運動、活動時においてヒトの脳血管内血流波形(血流速の時間的变化)を正確に計測する。
- (2) 脳血管内血流波形と血圧の連続測定を行い、両者の相関を調べる。
- (3) 血管の幾何学的形態の部位別特徴を血行力学的に解析する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

(2-1) 脳血管内血流波形の計測

超音波による脳血管内血流測定は臨床では広く行われているが、安静時や手術時のデータ取得に重点がおかれている。しかし、我々は脳の血流を変動させる要因(姿勢の変化、運動・作業、環境の変動など)を常に受けながら生活している。このような脳血流の変動を理解することなしには、脳循環の特性や血管病変の発生を理解できないと考えられるが、能動的動作時の脳血流測定は世界的にみても研究が少ない。

我々は本プロジェクトにおいて、超音波ドップラ検出器の取り付け法を改良した結果、運動や動作時においても中大脳動脈(MCA)での血流速を安定に測定することができた。さらに血流波形の流体力学的解析法(最低・最高・平均血流速の時間変化、流速の変動度、抵抗指数など)を適用し、血行力学的な特徴を明らかにしてきた。

(2-2) 脳血管の幾何学的形態の部位別特徴

脳は血液循環に関連する疾患(脳内出血、脳梗塞や循環障害性の脳病変など)が好発

する器官である。そして、それぞれの病変はある決まった部位に発生しやすいという部位特異性が知られている。脳血液循環の部位別特徴を明らかにする有力な方法の 1 つは、血管の幾何学的形態を血行力学的に解析することである。

このためには、脳血管の幾何学的量（各血管の直径、長さ、分岐角度など）を詳細にかつ正確に計測する必要がある。数ミリから数ミクロンの広範囲な径をもつ血管の計測は、従来より困難で労苦の多い測定であった。3次元の複雑な形態（直径、長さ、分岐角度）の計測については、近年のコンピュータの発達により、より短時間でかなり正確なデータが得られるようになった。

我々は重点配分の援助を受けて、顕微鏡的血管形態データを集め解析できる機器を整備してきた。また、血管の幾何学的形態を血行力学的に解析する新しい方法を提案した。今後、血管構築の血行力学的特徴と循環障害性病変の発生要因とを結びつける研究が必要である。

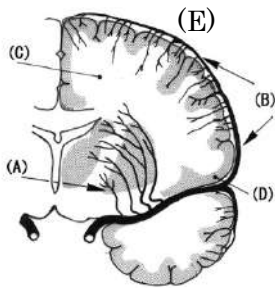
3. 期待される効果

(3-1) 脳血管障害との関連

脳には、安静時、全血液量の約 15%が心臓から送られている。この大量の血流は脳血管障害の原因の 1 つと考えられている。くも膜下出血の主要因である脳動脈瘤の発生については、脳底部動脈での血流特性と瘤発生要因の関連が指摘されている。よって、ヒトが活動している時（運動時やいろいろな作業時）の脳血流速度に関するデータは、生理学的に重要な知見をもたらすだけでなく、血管障害などの病因を考える上でも重要である。

(3-2) 脳血管病変発生の部位特異性

脳血管は大きく分けて、左図 (A) の領域に分布する穿通枝と、(B) の脳表面に分布する皮質枝に分けられる。穿通枝は脳底の大きな動脈から直接細い枝として脳実質にはいる。穿通枝の支配する部位には、高血圧性脳出血の好発部位（被殻、視床）がある。またその隣の淡蒼球は一酸化炭素中毒による循環障害性病変の好発部位である。皮質枝は、脳表面で順次 2 分岐をくり返し、次第に細い血管となっていく、その後脳実質に直角に入っていく。(C) の白質領域の血管は、皮質枝がさらに奥に延びた血管に支配される。この部位は、低血圧や低酸素などによる循環障害性脳病変が起きやすいとされる。同じ皮質枝でも、脳底に近い部分 (D) に血液を供給する血管と頭頂 (E) の血管では、肉眼的に走行の大きな違いが見られる。本研究では、このような脳病変好発部位の血行力学的特徴を定量的に評価し、部位別の違いを明らかにする。これにより脳病変好発との関連を明らかにすることができる。



4. 研究の経過及び結果・評価

2020 年度は、新型コロナウイルスの影響があり、ヒトを対象とする実験を自粛した。以前に測定した、姿勢変換、自転車エルゴメータによる運動負荷時、荷物移動の作業時などにおける脳血流波形を新しく解析し直した。

(4-1) 姿勢変換時の中大脳動脈(MCA)の血流波形

これまでの、臥位から立位への姿勢変換について報告してきた。今回、立位→座位座位→立位、立位→椅座位の変換について解析した結果を含めて報告する。

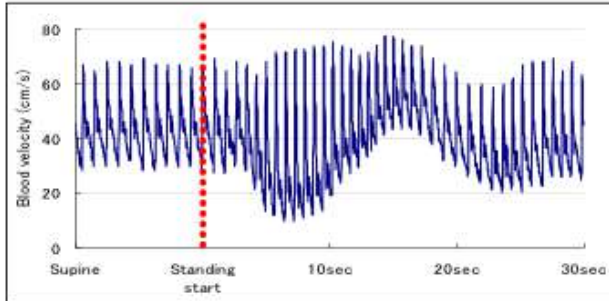


図 1 (A) : 中大脳動脈血流波形(仰臥位→立位)

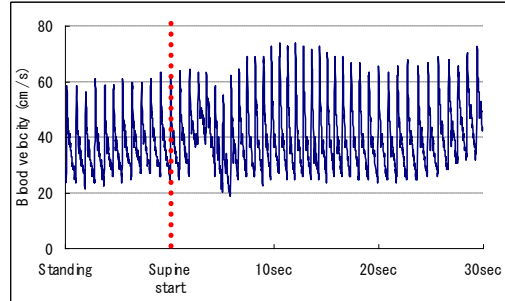


図 1 (B) : 中大脳動脈血流波形(立位→仰臥位)

図 1 (A) には「仰臥位→立位」変換時の中大脳動脈血流波形を、(B)には「立位→仰臥位」変換時の中大脳動脈血流波形を示してある。縦の赤線は体位変換時を示している。心臓の位置に関しては、同程度の位置変化を引き起こすが、血流波形は明確な違いが見られる。

立ち上がる場合は、最低血流速度が一度大きく低下し、次に大きく上昇し、再び下降するという傾向がある。立位から座る場合は、最低血流の変化は小さいことが分かる。最高血流速度は、変化の程度は小さいが周期的に変化していることが見て取れる。

図 2 にはこれらの姿勢変換時の血流波形から、最高血流速度、最低血流速度および平均血流速度を抽出した結果を示してある。

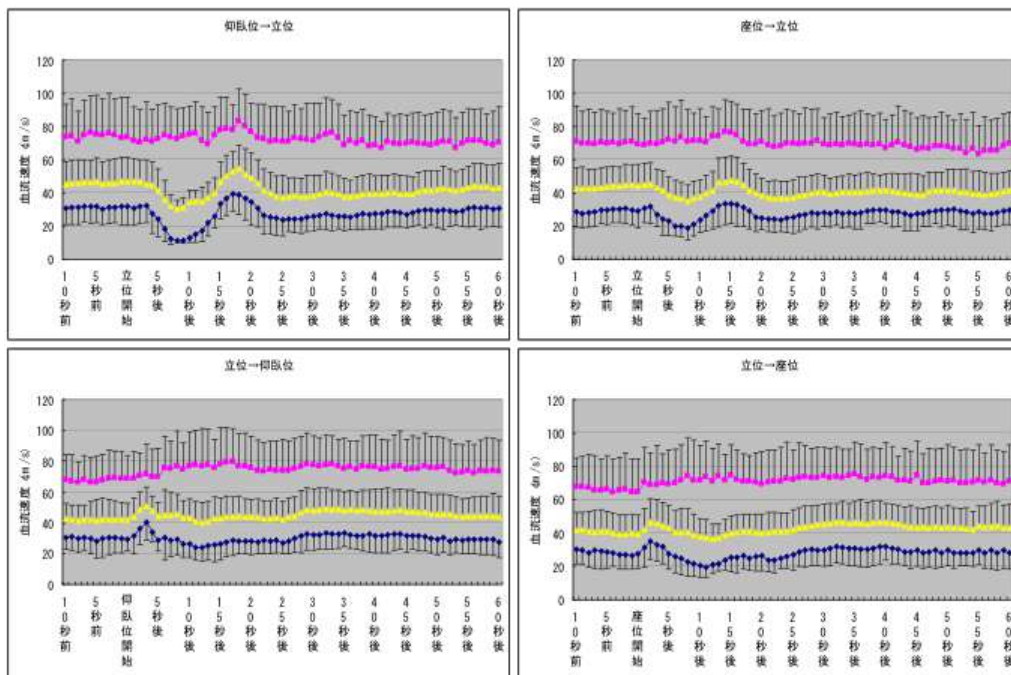


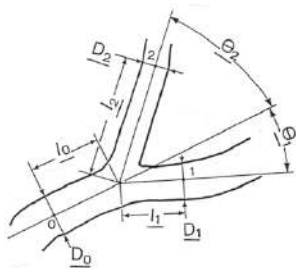
図 2 姿勢変換時の中大脳動脈血流速 (cm/s)

昨年度までに報告してきたように、血流速度の個人差は大きいですが、被験者7名の平均値をとると、変動の小さいデータが得られた。最高血流速度（赤）、平均血流速度（黄）、最低血流速度（青）の平均値は、各姿勢変換によって明らかに変動することがわかる。最も顕著に影響が現れるのは、最低血流速度であり、それにもない平均血流速度も変化する。最高血流速度の変化は、いずれの姿勢変換においても、最低血流速度、最低血流速度と比べて変化は小さかった。

「座位→立位」においては、「仰臥位→立位」の流速変化に比べて、その程度は小さかった。これは、体（重心）の移動（または心臓の移動の距離）が、前者の場合が後者に比べて小さいことによると考えられる。

次に「仰臥位→立位」と「立位→仰臥位」を比較してみる。これらは重力に関して、同程度の負荷であるが、逆方向の効果である。前者の、「仰臥位→立位」の場合の方が、血流の変化が大きいことが分かる。この理由としては、重力に対して逆方向の動作のため、脳血流が減少するという負荷がかかるためだと考えられる。この減少を補正して、脳血流をあげるために、心臓・血管の調節が行われるが、時間的遅れが生じるため、複雑な流速波形の変動が生じる。この変動は、姿勢変換後3分間くらい続くことが分かった。

（4-2）脳血管の鋳型標本（動物）の流体力学解析



血管分岐における直径指数の評価：

血管の径 D とそこを流れる血流 Q の間にはべき乗の関係があることが知られている。

$$Q \propto D^n \quad (1)。$$

この関係を左図の分岐点で当てはめると、

$$D_0^n = D_1^n + D_2^n \quad (2)。$$

という式が得られる。 D_1 は大きい分枝、 D_2 は小さい分枝。

n は直径指数と呼ばれ、各分岐点において直径を測ることで求めることができる。直径指数は、各分岐点で血流が2本の分枝にどのように分配されるかを表し、臓器循環を特徴づける量である。直径指数を求めるために、重点配分の援助により、デジタルマイクロスコープ（キーエンス社製）のコントローラおよびレンズを新しくして、被写界深度の深い血管形態計測ができるようになった(図3)。

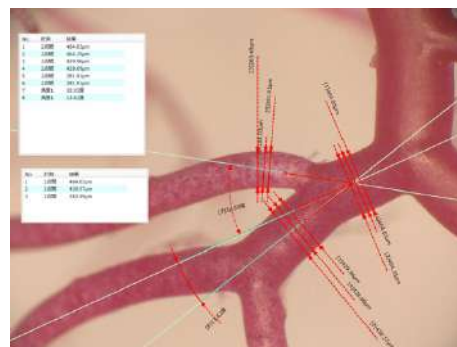


図3 脳血管キャストの幾何学的計測

目的の直径指数 n を求めるために (1), (2) 式を次のように変形した。

$$\left(\frac{D_1}{D_0}\right)^n = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^n}, \quad \left(\frac{D_2}{D_0}\right)^n = \frac{1}{1 + \frac{1}{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^n}} \quad (3)$$

直径比 (D_1/D_0) と (D_2/D_1) および (D_2/D_0) と (D_2/D_1) の関係をグラフにとり、最小二乗法で n を求めた結果を図 4 に示す。 n の値は D_1 に対して 2.62、 D_2 に対して 2.66 であった。

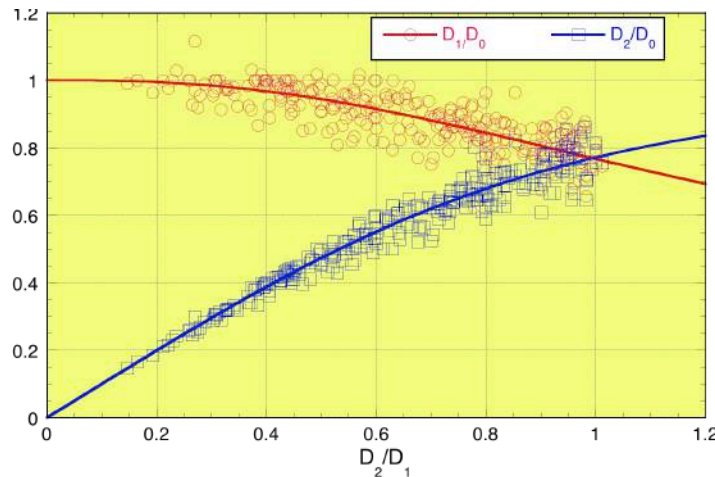


図 4 分岐における直径比より直径指数 n を求めた結果

今回の直径指数の結果は、Murray の法則の $n=3$ よりかなり小さい値となった。昨年度報告した値と異なるのは、測定点を大幅に増やして 386 点とし、 D_2/D_1 の範囲を広くとることができたためである。

血管径と流量の関係では上記 1) 式の関係が成り立つ場合、平均流速を v とすると、

$$Q = \left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 v \quad (4)$$

であるから、

$$v \propto D^{n-2} \quad (5)$$

が成立する。 n が 3 の場合は流速 v は直径 D に比例し、 n が 2 の場合流速は径によらず一定となる。今回、脳では流速は直径の 0.64 乗に比例することが明らかになった。

(4-3) 評価

これまでの研究で、姿勢変換や動作時に脳血流波形を測定する方法がほぼ確立できたと言える。今回、脳血管内血流と血圧の同時測定を行う予定であったが、手持ちの計測装置が古くなり、調整・修理ができなかった。また新しい計測装置の購入は、予算の範囲を大きく超えるので今回は導入できなかった。

2020 年度の研究で、脳血管の幾何学的形態（血管構築）の解析について、これまでの方

法よりあいまいさの小さい解析方法を提案し、新規の結果が得られた。この結果は、脳血管走行（大動脈から毛細血管まで）の血行力学的評価の重要な基礎となる。脳血管病変の部位特異性を明らかにする研究として進展があった。今後、計測数を増やしていく必要がある。

5. 今後の計画

今後、血管内血流と血圧、脳組織血流との相関を調べる研究へと発展させる予定である。これに加えて、宇宙環境での脳血流の研究へと領域を広げる可能性が出てきた。脳循環の変化は、宇宙飛行および宇宙滞在において極めて重要であり、本研究で得られている中大脳動脈血流波形は、循環系に対する重力の影響に関して新しい知見をもたらす可能性がある。

また超音波によって得られる血流波形は、血管内血流のモデル実験やコンピュータシミュレーションの参照データとして重要である。我々は、日常的な運動・動作によっても血流波形が大きく変化することを報告してきた。この点は、これまでの血管病変（動脈瘤、動脈硬化）発生や血管内治療の血流モデル実験で見過ごされてきた。生体内での血流波形を正確に模擬した脳血流のモデル研究は、今後取り組むべき課題の1つと考えられる。

今回の研究で、脳血管の幾何学的形態（血管構築）の解析について、これまでの方法よりあいまいさの小さい解析結果が得られた。今後、脳のいろいろな部位に適用し、脳血管構築の部位特異性を定量的に解明していく。また、いろいろな臓器の血管構築に本解析法を適用し、臓器ごとの血液循環の特徴と臓器の機能との関係を明らかにする。

6. 研究成果の発表

項目4-1の結果は、2020年5月（於：江別市）日本バイオレオロジー学会43回年会で発表予定であったが、COVID-19の影響により中止された。

項目4-2の結果は、2020年6月（於：小樽）形の科学シンポジウムで発表予定であったが、COVID-19の影響により中止された。

項目4-1, 4-2の結果は、The 2nd Joint Meeting of ESCHM-ISCH-ISB 2020（9月、福岡）にて発表予定であったが延期となった（期日未定）。（国際バイオレオロジー学会、国際臨床血液レオロジーと微小循環学会、ヨーロッパ臨床血液レオロジーと微小循環学会の合同学会）

「4-2」の結果は、2022年2月までに「形の科学シンポジウム」で発表する予定である。

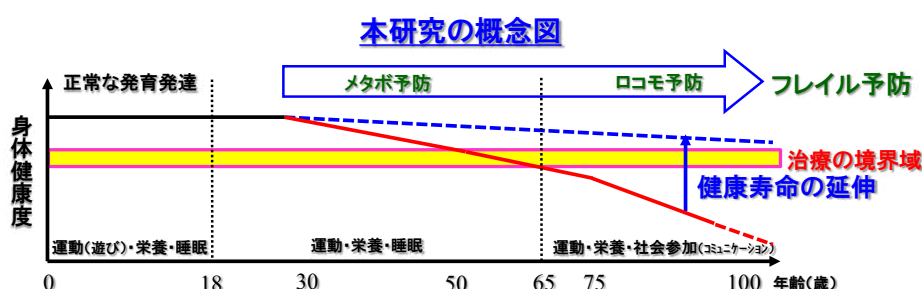
「4-1」の結果は論文として投稿する予定である（人間工学会または生理人類学会）。

ロコモ評価機器「健幸 ai ちゃん」を用いた地域および組織連携によるヘルスケアネットワーク創出の社会実証研究

ロボット・メカトロニクス学科 高橋 勝美

1. 研究の目的

本研究は、中高年気におけるメタボリックシンドロームやロコモティブシンドロームを予防することで、高齢症が進めるフレイル予防につながり、最終的には健康寿命の延伸につなげることができると考えている（下記概念図参照）。



そこで、本研究は、地域住民の健康を守る医療機関や行政機関、福祉法人が管理する地域包括支援センターなどと連携を図り、ロコモティブシンドローム予防に取り組むヘルスケアネットワークを構築する。そして、ロコモ機能の評価機器（健幸 ai ちゃん）を用いてロコモデータの見える化に取り組み、運動器の健康の重要性の啓発、高齢者の生活習慣と運動器の状態との関係性を明らかにすることで、エビデンスに基づく生活改善の助言ができる仕組みを構築する。このことによって、高齢者自らが健康増進や自立機能維持を目指す日常生活習慣を獲得し、最終的には医療費の削減、介護給付費の削減の一助になることを目的とする（内閣府、科学技術政策 Society 5.0，経済発展と社会的課題の解決の両立、「健康寿命延伸・社会コストの削減」）。

2. 研究の必要性及び従来の研究

2007 年に日本臨床整形外科学会は、介護が必要となる要因の一つに「運動器の障害」を挙げ、ロコモティブ・シンドローム（以下「ロコモ」）の対策が必要であるとしている。研究代表者は、2014 年以降、高齢者を対象に「ロコモ」に関わる運動器の機能測定を開始すると同時に認知機能結果との関係の分析を開始した。高齢社会における健康施策の第 1 は、**健康寿命の延伸であり、自立機能を維持することである**。現在では、「人生 100 年時代」ともいわれ、100 歳まで元気生きるためには、運動器の機能維持が必然である。また、2014 年、日本学術会議臨床医学委員会運動器分科会では、①運動器の健康の重要性に関する社会への啓発活動、②運動器学に関する学問の推進、③健康寿命延伸に向けた運動器学の総合的研

究支援体制の構築、④運動器の健康の指導を実践する人材の育成、⑤運動器検診に関するエビデンスの構築、⑥運動器障害者の身体活動低下に起因する健康障害の予防、というように、ロコモティブシンドロームの予防および研究の推進の重要性が提言されている。

これまでの研究は、高齢者の運動機能の測定や体操教室による運動機能変化、健康診断の分析等が行われているが、ロコモティブシンドローム予防に特化した研究はまだ数少ない。

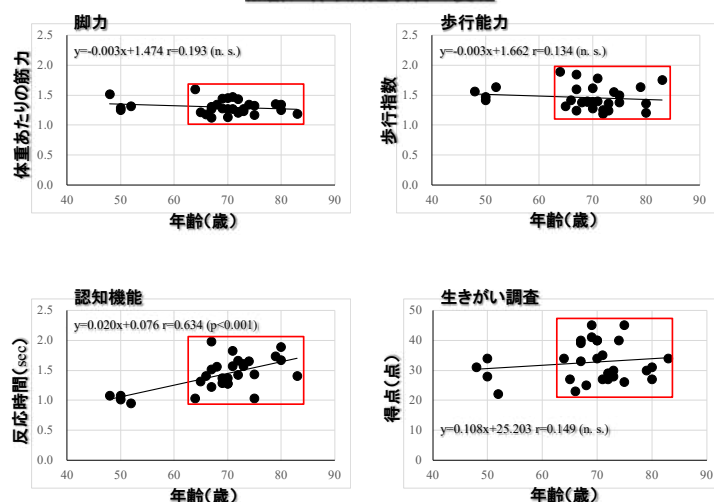
3. 期待される効果

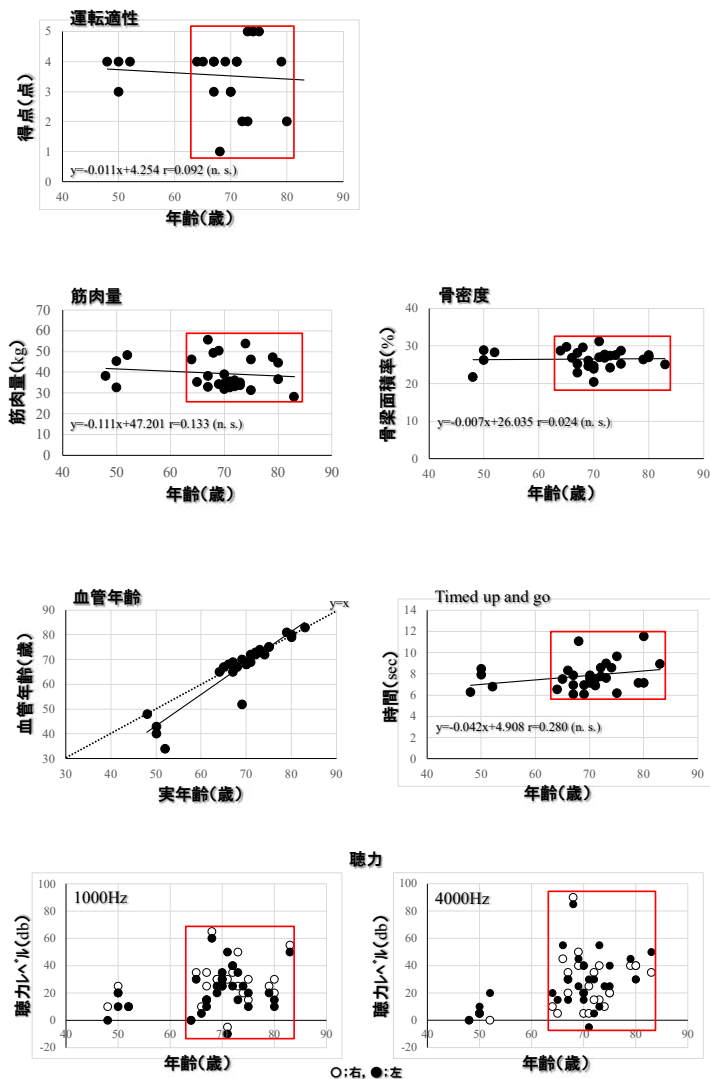
本研究で行う組織間連携によって行われる取り組みは、厚生労働省が進めている「地域包括ケアシステム」の構築の地域で取り組む生活支援・介護予防の領域で、エビデンスに基づく介護予防の推進に貢献できる。さらに、「高齢者の保険事業と介護予防の一体的な実施」における「介護予防の事業等」の「生活機能の改善」の領域でも同様の効果が期待できる。

4. 研究の経過及び結果・評価

先進技術研究所プロジェクトで開発したロコモ評価機器「健幸 ai ちゃん」を、IT エクステンションセンターロコモサポートステーション、地域サロン、鍼灸・整骨院、神奈川県スポーツセンター、青森大学、海老名市医師会、えびな脳神経外科に設置することで、ロコモ測定の地域・組織間連携を構築した。しかしながら、コロナ禍の中で測定すること自体が困難となったため、基幹施設である IT エクステンションセンターロコモサポートステーションでスポーツ施設のコロナガイドラインに沿って測定会を実施しロコモデータを得た（神奈川工科大学ヒト倫理審査 20200903-03）。得られたデータの加齢変化を以下に示す。

加齢に伴う測定項目の変化





これまでの先行研究と同様に、各測定項目において、加齢に伴う機能低下が確認された。また、高齢になるほど個人差が大きくなることが確認された。

5. 今後の計画

今後の新型コロナ感染の拡大状況が不明ではあるが、現在の連携先の担当者とスポーツ施設における新型コロナ感染ガイドラインに基づいて、十分に安全に配慮し得る限り測定を実施する。測定データは、基幹施設であるロコモサポートセンターで得られたデータを加えて、各データの相互関係性を分析し、運動器の低下の要因を探る。研究ブランディング事業の社会実装実験として、高齢者を対象に運動機能データや生きがい（生きる力強さ）データ、ロボットデータや生活環境から得られる生活データを測定し、それぞれのデータの因果関係を分析していくとともに、日常の生活習慣を改善するアドバイスを発信するシステムの開発を行う。

現在、厚生労働省の「高齢者の保険事業および介護予防事業の一体的実施」（下図参照）について、各市町村が実施体制を整えている。本研究は、地域連携・貢献センターと連携して、厚木市の上記の介護予防事業に協力することになっている。健幸 ai ちゃんの測定に加え、研究ブランディング事業で構築された各要素技術を用いた総合的な高齢者の生活習慣データ測定を実施し、生活習慣評価およびエビデンスによるアドバイスを作成する。

6. 研究成果の発表

1) 研究ブランディング事業シンポジウム 2020, 「地域連携による高齢者の健康支援」,
2020.11