

アシスト機能作動運動時の 筋酸素・血液動態の変化

Changes in muscle oxygenation and hemodynamics
during electric power-assisted cycling exercise

布施沙由理*¹, 木目良太郎*¹, 勝村俊仁*¹, 鈴木哲郎*²

キー・ワード : near-infrared spectroscopy, one-legged cycling exercise, four-wheel electric power-assisted personal mobility

近赤外分光法, 片脚漕ぎ運動, 4輪型電動アシスト式移動支援機器

【要旨】 アシスト機能作動運動は低体力の高齢者や片麻痺等の障害者への健康増進ならびに ADL の向上に貢献すると考えられるが, 骨格筋代謝についての研究は行われていない. 本研究はアシスト機能の有無による両脚および片脚漕ぎ自転車運動中の筋酸素動態の変化について検討した. 健康な男子大学生 14 名を被験者とし, 4 輪型電動アシスト式移動支援機器を用いてトレッドミル上で運動負荷を実施した. 外側広筋の筋酸素動態の変化を近赤外空間分解分光法にて観察した. 両脚および片脚漕ぎ自転車運動の両方において, アシスト機能非作動時と比べてアシスト機能作動時に筋酸素飽和度は有意に増加した. アシスト機能作動時は筋血流量が増加する可能性が示唆された.

はじめに

日常生活を送るためには必ず「移動」が伴う^{1,2)}. 高齢社会白書³⁾によると, 2012 年 10 月 1 日現在, 日本の高齢化率は 24.1% となり, 日本は約 4 人に 1 人が 65 歳以上の高齢者である超高齢社会を迎えた. 高齢化に伴い 65 歳以上の要介護者等認定者数も増加しており, 2010 年度末の 65 歳以上の要介護者等認定者数は 2001 年度末と比べて 203 万人増加した. すなわち, 自立した生活が送れず生活の質 (QOL) を維持することができない高齢者が増加している. さらに, 2060 年には高齢化率が 39.9% へ上昇し, 2.5 人に 1 人が 65 歳以上の高齢者であることが予想されており, 高齢者の QOL の維持が重要である. 高齢者の QOL を維持するためには単独での移動が大切な要素の一つである. 運動も移動手段の一つであり, 加齢による体力低下を予防するためには日常生活で継続的に運

動を行うことが必要である⁴⁾. また, 脳血管障害片麻痺患者の体力低下要因の一つに長期の安静臥床および日常生活における身体活動量の低下が挙げられており⁵⁾, 日常生活で継続的に運動を行うことで体力の維持および再発防止につながると考えられる⁶⁾. しかし, 彼らは下肢機能が低下していたり健康に問題をかかえていたりするため, 高強度の運動負荷を行うと関節痛や血圧上昇といった危険性を伴う⁷⁾. したがって, このように体力の低下が著しい高齢者や障害者が運動を行う際には, 安全性を考える必要がある.

そこで, 我々は高齢者の日常的な移動, 特に外出を支援する機器である 4 輪型電動アシスト式移動支援機器を開発した. この移動支援機器は 4 輪であること, 電動モーターでアシストすることおよび足でペダルを漕ぐことの 3 つの特徴がある. まず, 4 輪であるため 2 輪自転車で発生するような転倒のリスクがなく, 安全性に優れ, 段差および坂などのバリアも気にせず移動できる. また, Sperlich et al.⁸⁾ は電動アシスト作用の有無で自転車漕ぎ運動の効果を研究したところ, 電動アシ

*1 東京医科大学健康増進スポーツ医学分野

*2 東洋大学ライフデザイン学部健康スポーツ学科

トなしと比べてアシスト作動時の方が筋活動，呼吸，代謝および自覚的反応が低下し楽しさが向上するため，電動アシスト自転車は座りがちな人々を運動するよう促すアプローチであると報告している．本研究は自操用ハンドル型電動車いすと異なり，自分の脚でペダルを漕がないと移動しないので，下肢機能の維持増進につながる⁹⁾．また，麻痺領域の長期不活動と低循環は床ずれや深部静脈血栓症といった心臓血管関連の合併症の重大因子であるため，片麻痺患者の麻痺肢や脊髄損傷者の脚を動かし筋血流量の増加¹⁰⁾ および血管コンプライアンスの上昇¹¹⁾ を引き起こすことは，それらの問題を予防するために特に重要である¹²⁾．不活動の予防による末梢循環の維持向上はQOLの維持向上に大きく貢献すると考えられる．実際，片麻痺患者が健側でペダルを動かし麻痺側は受動的に動かされることで，動作させた麻痺側の代謝・循環亢進が生じる可能性も報告されている¹²⁾．したがって，4輪型電動アシスト式移動支援機器は近い将来高齢者および障害者に対して需要が高まると考えられる．しかしながら，4輪型電動アシスト式移動支援機器での運動に関する骨格筋代謝の研究は行われていない．

近年，局所の骨格筋代謝研究に近赤外分光法 (near infrared spectroscopy : NIRS) が広く使用されている．この装置は近赤外光を用いて組織内の酸素化および脱酸素化ヘモグロビン・ミオグロビンによる吸光度特性を利用し，骨格筋内の酸素動態を測定することが可能である¹³⁾．動的運動中の末梢循環動態を連続的かつ非侵襲的にモニタリングできる¹⁴⁾NIRSの使用，特に皮膚情報の影響を受けにくい近赤外空間分解分光法¹⁵⁾の利用は4輪型電動アシスト式移動支援機器による運動が筋組織の酸素動態に影響を与えるかどうかを研究するために必要であると考えられる．我々は，アシスト機能作動時および片脚漕ぎ運動時の受動運動脚で筋血流量が増加するという仮説を検証するために，電動アシスト機能の有無による両脚および片脚漕ぎ運動中の筋酸素動態の変化について検討した．

対象および方法

1. 対象

被験者は健康な男子大学生 14 名 (年齢 21.0 ± 0.2 歳，身長 174.1 ± 1.8 cm，体重 69.4 ± 3.7 kg，最大



図 1 A four-wheel electric power-assisted personal mobility

酸素摂取量 49.2 ± 1.4 ml/kg/min : 平均値 \pm SE) であった．測定に先立ち，彼らには研究の趣旨，内容および特に予測される危険性等について十分に説明し，彼らの同意を得た後，研究を開始した．本研究は東洋大学大学院福祉社会デザイン研究科研究等倫理委員会の審査により承認された．

2. 運動プロトコル

まず最初に各被験者の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$ max) を測定した．トレッドミル (WOODWAY SUPER TREADMIL : ELG2) の傾斜を 8.6% に設定し，走行にて速度を漸増することで運動負荷を行い，疲労困憊まで行った． $\dot{V}O_2$ max の判断は，①酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) がレベリングオフしていること，②呼吸商が 1.1 を超えること，③心拍数 (HR) が予測される最大値 ($220 - \text{年齢}$) にほぼ達していることを条件とした．

別の日に，4輪型電動アシスト式移動支援機器 (以下，4輪自転車；図 1) を用いてトレッドミル上で運動負荷を行った．この4輪自転車の前輪 2 輪は操舵輪として，後輪 2 輪は駆動輪としての機能を備えており，車輪径は 4 輪とも 12 インチであった．また，4 輪自転車の推進力はペダルを漕ぐことで後輪 2 輪を回転させる力になるため生じる．さらに，電動アシスト装置 (サンスター技研製 S02) を組み込んでおり，ペダルを漕ぐ力を電動モータ (ブラシレスタイプ : 出力 235W) でアシストするシステムを持っている²⁾．そのシステムは時速 10km 未満の低速度において，ペダルを踏む力と電動補助力の比 (アシスト比) が最大で 1 対 2 となり，時速 10~24km では走行速度が上がるほ

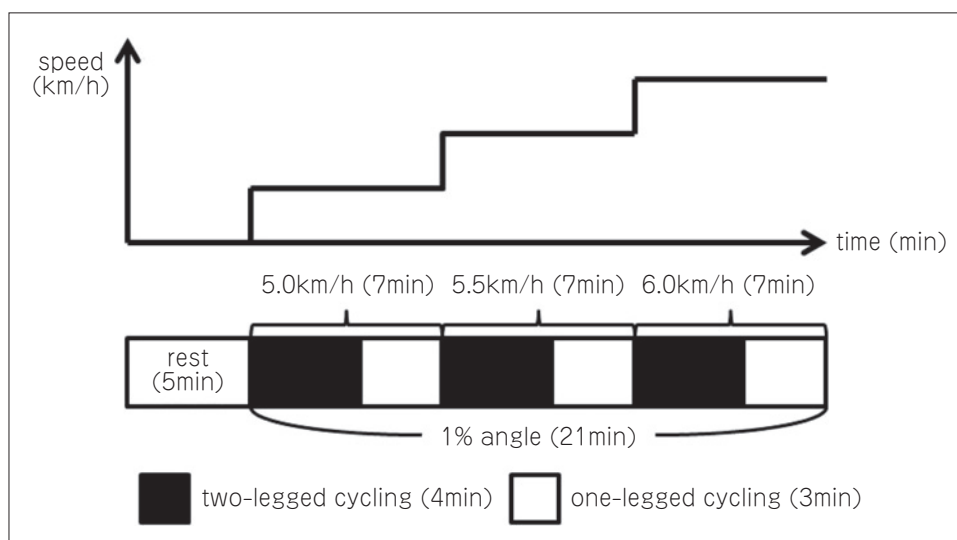


図2 The experimental protocol

ど電動補助力が徐々に減少し、時速24kmでは電動補助力がゼロになる¹⁶⁾。

4輪自転車を用いた実験は日を改めて2回に分けて行った。1回目は4輪自転車のアシストなし(以下、アシストOFF)、2回目はアシストあり(以下、アシストON)で行った。初めに、4輪自転車に座り約5分間安静状態を保った。その後、トレッドミルの傾斜を1%に設定し、漸増負荷を21分間行った。21分間のうち7分ごとにトレッドミルの速度を時速5.0km、5.5kmおよび6.0kmに漸増負荷した。また、7分間のうち前半4分間は両脚漕ぎ運動、後半3分間は片脚漕ぎ運動を行った(図2)。片脚漕ぎ運動の際、漕ぎ脚は各被験者に選択させ、もう一方の脚はペダルに乗せたまま受動的に動かされるようにした。

3. 測定項目

1) 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)

呼気ガス分析器(ミナト医科学社製 Aeromonitor600)を使用し、breath-by-breath法にて安静時から運動終了時までの $\dot{V}O_2$ を連続して測定した。その後、各運動条件終了前1分間の $\dot{V}O_2$ の平均値を算術平均し、それを各運動条件での $\dot{V}O_2$ とした。

さらに、各運動条件で平均した $\dot{V}O_2$ の値をあらかじめ測定した $\dot{V}O_{2max}$ で除し、各運動条件における $\dot{V}O_2$ の割合を求めた。

2) 心拍数 (HR)

心電計(日本光電工業社製 BSM-2401)を使用し、心電図の誘導にはCM5誘導を用いた。心拍数は15拍に要した時間から1分間値として算出し

た。安静時HRは運動開始1分前に記録し、運動中は1分ごとに記録した。

3) 筋酸素動態

近赤外空間分解分光法(astem社製Hb11)を用いて、両脚の外側広筋における酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-Hb)、総ヘモグロビン(total-Hb)、組織酸素飽和度(StO_2)を測定した。NIRSのセンサーヘッドは1つの光源(light emitting diode: LED, 発光ダイオード)と2つの受光器(フォトダイオード)から成り、光源から2つの波長の異なる近赤外光(770nmおよび830nm)を照射し、光源からそれぞれ2.0cmおよび3.0cm離れた受光器で光を検出した¹⁷⁾。この2ヶ所の受光器より検出された受光量の空間的傾きから StO_2 を算出した¹⁵⁾。両脚の外側広筋にセンサーヘッドを装着する前に、スキニャリパー(栄研式皮下脂肪厚測定器)を用いてそれぞれの脚の皮下脂肪厚を測定し、その測定値の半分の値をそれぞれの脚の皮下脂肪厚として、皮脂厚による筋組織での近赤外光の散乱係数の補正を行った¹⁷⁾。センサーヘッドを両脚の外側広筋の筋腹に装着した後、光遮断のために黒色の固定用サポータをセンサーヘッドの上に巻いて固定した。なお、外側広筋における皮下脂肪厚測定位置およびセンサーヘッド装着位置は被験者を椅子に座らせ、膝関節伸展位にて等尺性収縮を行わせることにより確認した。安静時から運動終了時までoxy-Hb、deoxy-Hb、total-Hbおよび StO_2 を5秒ごとに連続して測定した。安静時および運動時の平

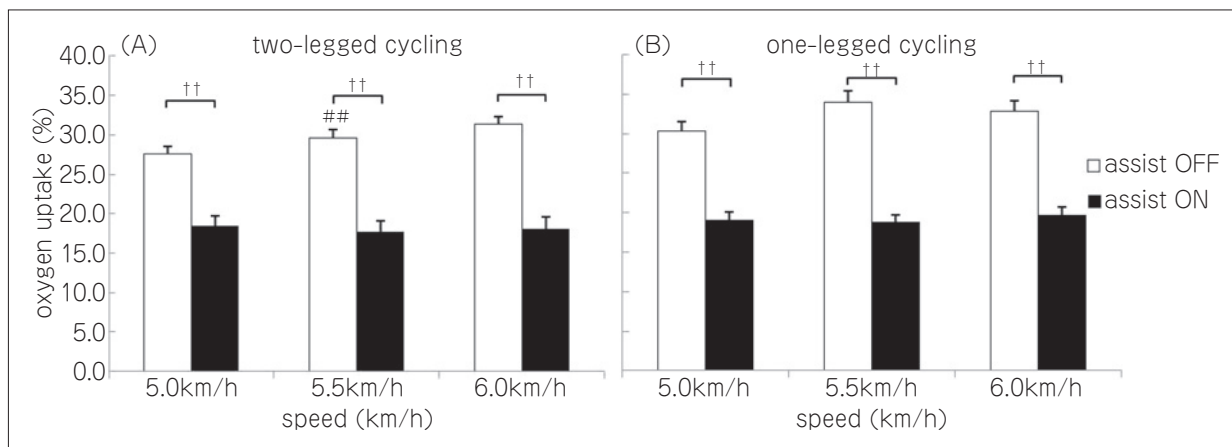


図3 Comparisons of oxygen uptake between assist OFF and assist ON during cycling exercise. (A) two-legged cycling, (B) one-legged cycling.

† Significant difference between the value of assist OFF and assist ON (†† $p < 0.01$).

Significant difference between the value obtained at prior speed (## $p < 0.01$).

均値は、運動開始前および各運動条件終了前1分間の値をそれぞれ算術平均して求めた。

4. 統計分析

測定値はすべて平均値±標準誤差 (SE) で示した。それぞれの運動条件における全ての指標について安静時との差を比較するために一元配置分散分析を用いた。さらに、アシスト機能の使用による差および片脚漕ぎ運動時の活動脚と受動運動脚の筋酸素動態の差を検定するために二元配置分散分析を用いた。なお、有意水準は5%未満とした。

結 果

1. 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$)

両脚および片脚漕ぎ運動中の各速度におけるアシスト OFF とアシスト ON の $\dot{V}O_2$ を比較した結果を図3に示した。両脚および片脚漕ぎ運動の両方で、どの速度でもアシスト OFF の $\dot{V}O_2$ がアシスト ON に比べて有意に高かった ($p < 0.01$)。アシスト OFF 時の両脚漕ぎ運動において、時速 5.0km に比べて時速 5.5km の $\dot{V}O_2$ が有意に増加し ($p < 0.01$)、時速 6.0km で最高値を示した ($31.4 \pm 0.9\%$)。アシスト ON ではどの速度でも $\dot{V}O_2$ に差がみられなかった。また、片脚漕ぎ運動ではアシスト OFF における最も高い $\dot{V}O_2$ は時速 5.5km であった ($33.9 \pm 1.5\%$)。アシスト ON では両脚漕ぎと同様にどの速度でも $\dot{V}O_2$ に差はなかった。

2. 心拍数 (HR)

両脚および片脚漕ぎ運動中の各速度における HR の変化をアシスト OFF とアシスト ON で比

較した結果を図4に示した。両脚および片脚漕ぎ運動の両方でアシスト OFF およびアシスト ON のどちらも全ての速度で HR は安静時より有意に増加した ($p < 0.01$)。アシスト OFF 時の両脚漕ぎ運動において、時速 5.0km に比べて時速 5.5km の HR が有意に増加した ($p < 0.01$)。しかし、アシスト ON では全ての速度で HR に有意な差はみられなかった。アシスト ON 時の片脚漕ぎ運動では、時速 5.5km に比べて時速 6.0km の HR が有意に増加した ($p < 0.05$)。アシスト機能による違いをみると、両脚および片脚漕ぎ運動のどちらも全ての速度でアシスト ON の HR がアシスト OFF より有意に低下した ($p < 0.01$)。

3. 筋酸素動態

両脚漕ぎ運動中のアシスト OFF とアシスト ON の筋酸素動態を図5に示した。安静時からの差で比較すると、アシスト OFF の $\Delta oxy-Hb$ および $\Delta total-Hb$ は時速 6.0km の運動時で有意に増加した ($p < 0.05$)。アシスト ON の ΔStO_2 は全ての速度で安静時に比べて有意に増加し (時速 5.0km : $p < 0.05$, 時速 5.5km および 6.0km : $p < 0.01$)、 $\Delta deoxy-Hb$ は時速 5.5km の運動時で有意に減少した ($p = 0.05$)。またアシスト OFF とアシスト ON を比較すると、アシスト OFF に比べてアシスト ON の ΔStO_2 は全ての速度で有意に高かった ($p < 0.01$)。アシスト OFF に比べてアシスト ON の $\Delta deoxy-Hb$ は時速 5.5km および 6.0km のとき有意に低下した ($p < 0.01$)。また、アシスト OFF に比べてアシスト ON の $\Delta total-Hb$ は有意に低下

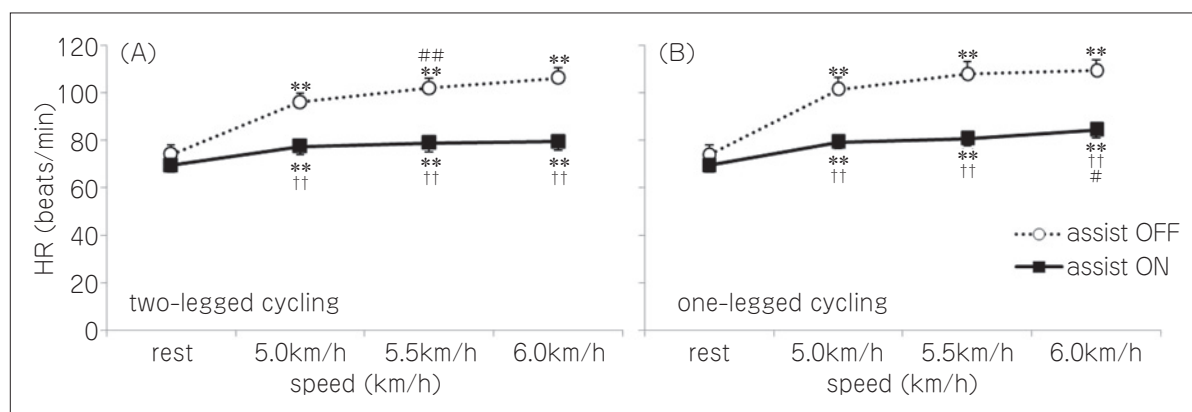


図4 Comparisons of heart rate between assist OFF and assist ON during cycling exercise. (A) two-legged cycling, (B) one-legged cycling.

*Significant difference from the value at rest ($**p<0.01$).

#Significant difference between the value obtained at prior speed ($\#p<0.05$, $##p<0.01$).

†Significant difference between the value of assist OFF and assist ON ($\dagger\dagger p<0.01$).

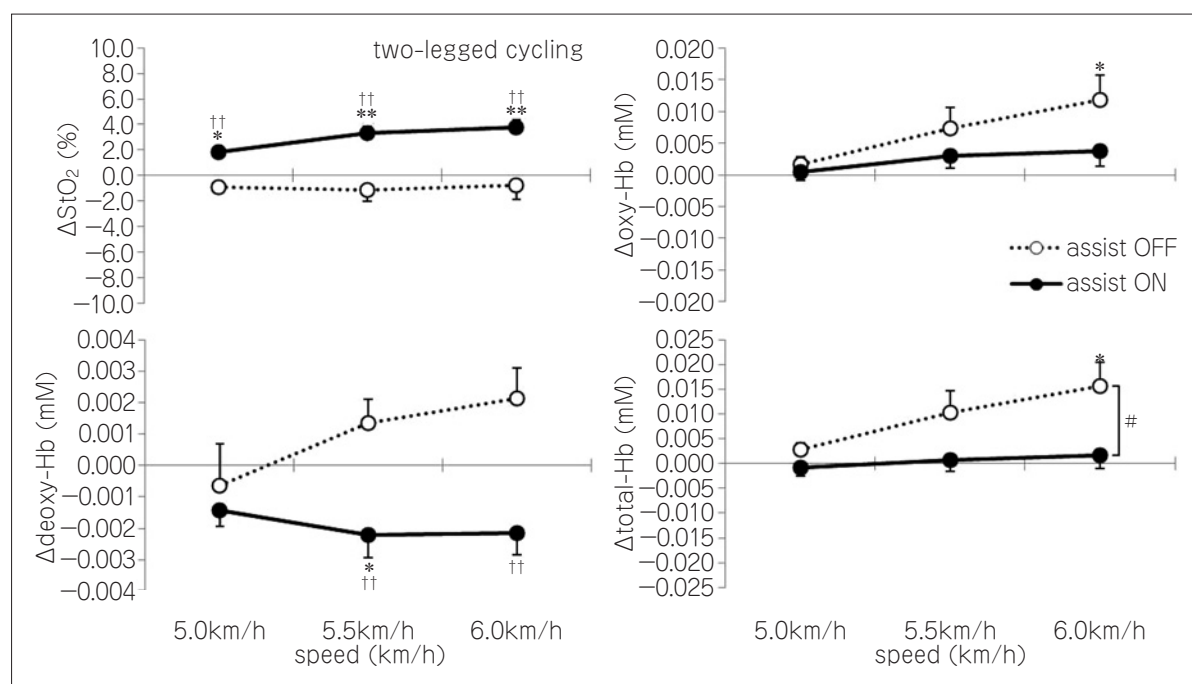


図5 Comparisons of StO_2 , oxy-Hb, deoxy-Hb and total-Hb between assist OFF and assist ON during two-legged cycling

*Significant difference from the value at rest ($*p<0.05$, $**p<0.01$).

†There were the significant interaction between assist OFF and assist ON ($\dagger\dagger p<0.01$).

#There were the significant main effect of assist factor ($\#p<0.05$).

した ($p<0.05$).

片脚漕ぎ運動におけるアシスト OFF とアシスト ON での漕ぎ脚の筋酸素動態を図6に示した。安静時からの差で比較すると、アシスト OFF の $\Delta deoxy-Hb$ および $\Delta total-Hb$ は時速 5.5km と 6.0 km の運動時に有意に増加した ($\Delta deoxy-Hb$: $p<0.01$, $\Delta total-Hb$: $p<0.05$)。また、安静時に比べ

てアシスト ON の ΔStO_2 は時速 6.0km の運動時に有意に増加した ($p<0.05$)。アシスト OFF とアシスト ON を比較すると、アシスト OFF に比べてアシスト ON の ΔStO_2 は有意に高かった ($p<0.05$)。アシスト OFF に比べてアシスト ON の $\Delta deoxy-Hb$ および $\Delta total-Hb$ は有意に低下した ($\Delta deoxy-Hb$: $p<0.01$, $\Delta total-Hb$: $p<0.05$)。

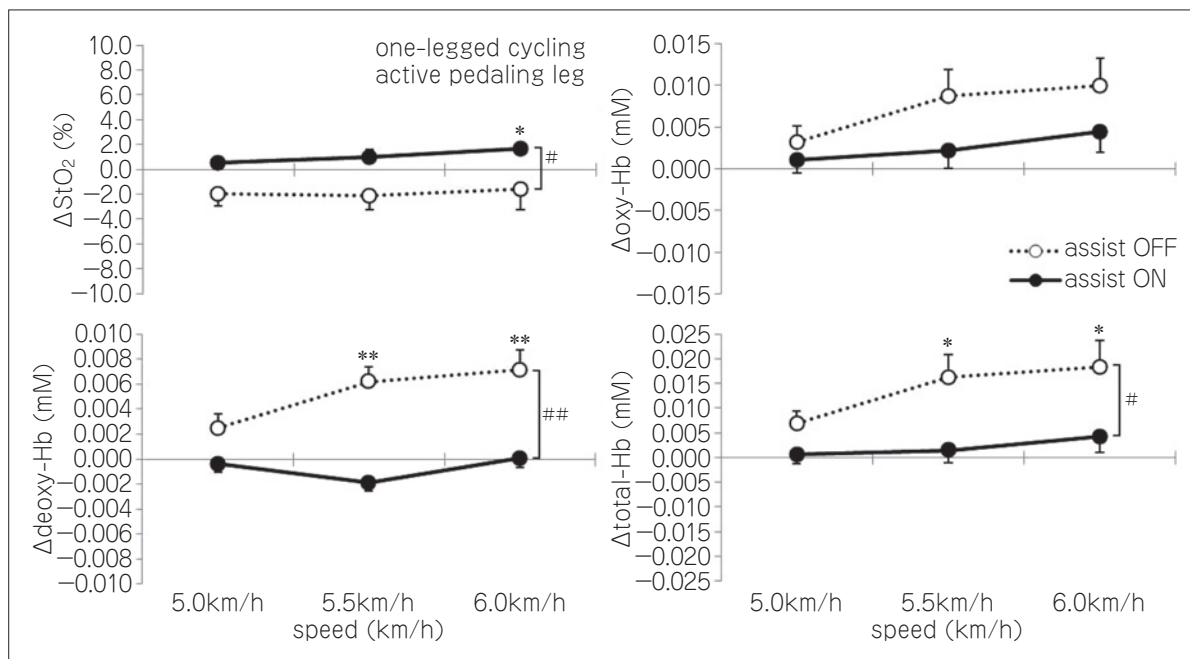


図6 Comparisons of StO₂, oxy-Hb, deoxy-Hb and total-Hb between assist OFF and assist ON during one-legged cycling

*Significant difference from the value at rest (*p<0.05, **p<0.01).

#There were the significant main effect of assist factor (#p<0.05, ##p<0.01).

また、片脚漕ぎ運動における漕ぎ脚と受動運動脚の筋酸素動態の結果をアシスト OFF は図7に、アシスト ON は図8にそれぞれ示した。アシスト OFF では、安静時に比べて受動運動脚のΔStO₂は時速6.0kmの運動時で有意に増加し(p<0.01)、漕ぎ脚に比べて有意に増加した(p<0.05)。漕ぎ脚に比べて受動運動脚のΔdeoxy-Hbは有意に低下した(p<0.01)。アシスト ON では、安静時に比べて受動運動脚のΔStO₂は時速5.5kmおよび6.0kmの運動時で有意に増加し(p<0.01)、同速度で漕ぎ脚のΔStO₂に比べて有意に増加した(p<0.01)。また、安静時に比べて受動運動脚のΔdeoxy-Hbは全ての速度で有意に減少し(p<0.01)、全ての速度で漕ぎ脚のΔdeoxy-Hbに比べて有意に減少した(p<0.01)。さらに、安静時に比べて受動運動脚のΔtotal-Hbは時速5.0kmで有意に減少した(p<0.05)。

考 察

1. 運動時アシスト機能による身体への影響

両脚および片脚漕ぎ運動のそれぞれでアシスト ON と OFF を比較すると、どちらもV̇O₂およびHRはアシスト ON がアシスト OFF より有意に低下した(p<0.01; 図3, 4)。アシスト機能と運

動強度との関係について、活動的な成人被験者が電動アシスト自転車のアシスト機能を作動させて運動すると、アシスト機能を作動させないときに比べてHRが有意に低下した¹⁸⁾。すなわち、アシスト機能の使用が運動強度の低下要因となることが考えられる。

運動中の骨格筋の血流量増加には代謝性血管拡張、流量依存の血管拡張および心拍出量が関与し、血流減少には神経性血管収縮および筋内圧の増加が関与する。さらに、それらが競合することで運動中の筋の血流調節が行われる¹⁹⁾。脚運動中の筋交感神経反応について、Saito et al.²⁰⁾は筋の交感神経活動は最大酸素摂取量の40%までは安静時より抑制されることを報告している。また、中等度以下の自転車運動であれば筋内圧の上昇や活動筋への血液制限を惹起させずに運動が可能である²¹⁾。本研究で行った運動のV̇O₂はアシスト OFF およびアシスト ON のどちらも最大酸素摂取量の40%以下であり、アシスト ON がアシスト OFF に比べて有意に低下した(図3)。また、Δtotal-Hbについて両脚および片脚漕ぎ運動のアシスト ON とアシスト OFF を比較すると、アシスト ON のΔtotal-Hbはアシスト OFF より有意に低下するが、安静時と比較して差はみられなかった(図5,

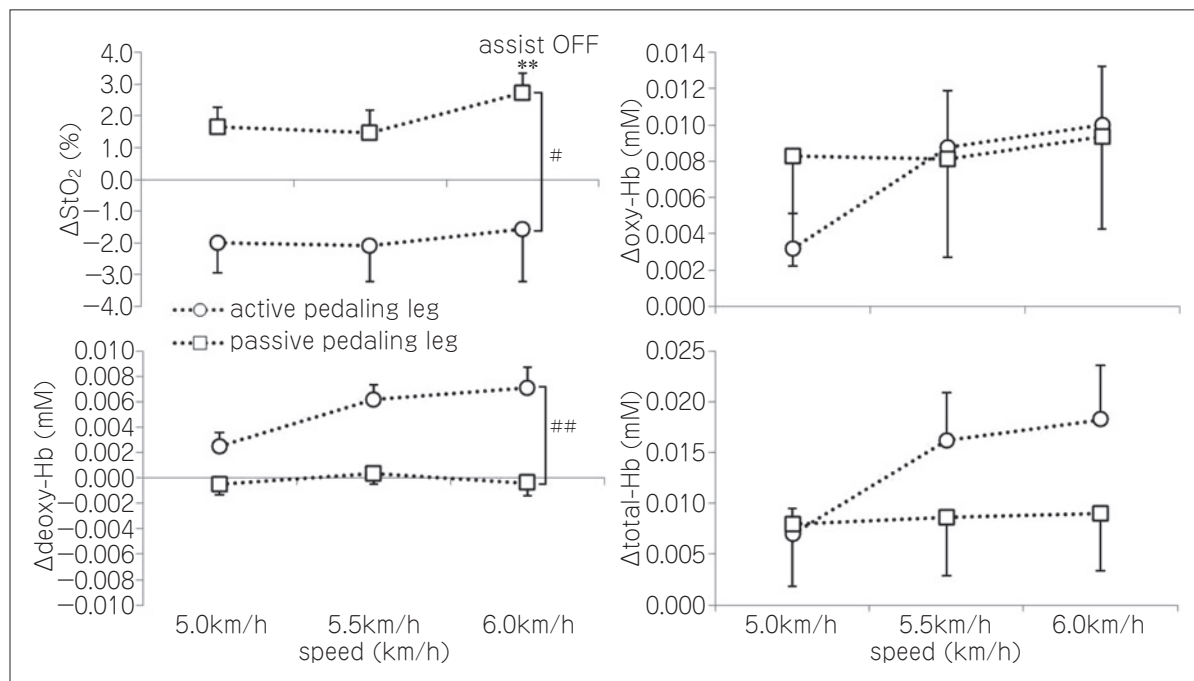


図7 Comparisons of StO₂, oxy-Hb, deoxy-Hb and total-Hb between active and passive pedaling leg on assist OFF during one-legged cycling

*Significant difference from the value at rest (**p<0.01).

#There were the significant main effect of leg factor (#p<0.05, ##p<0.01).

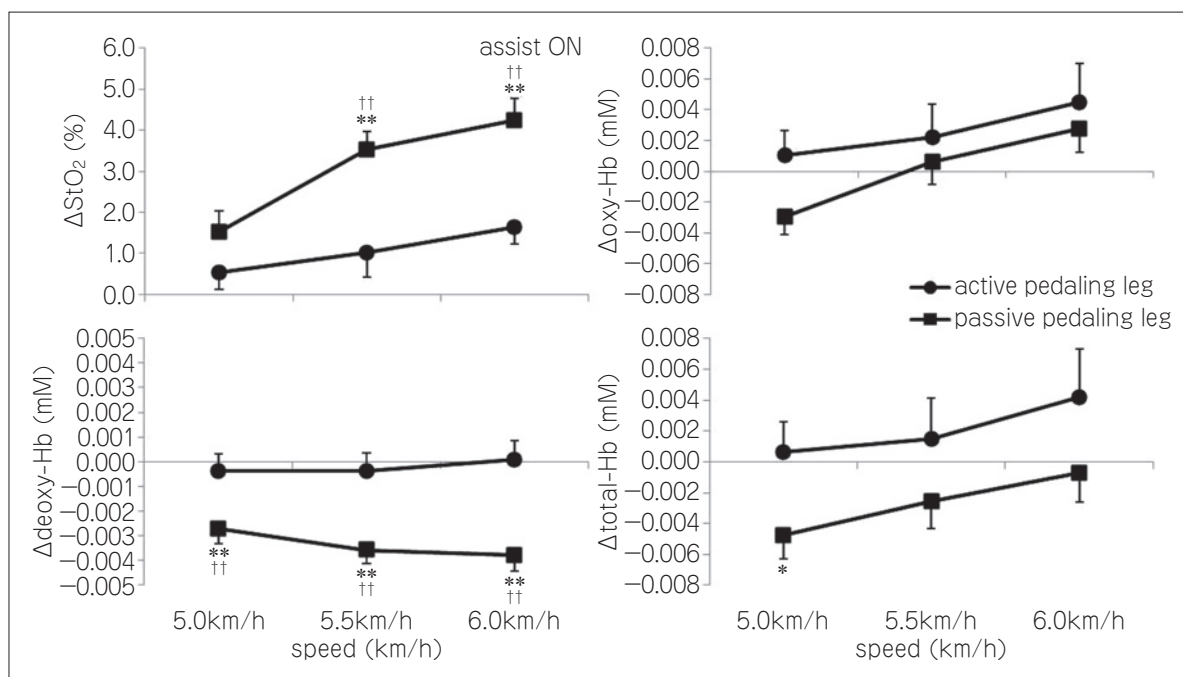


図8 Comparisons of StO₂, oxy-Hb, deoxy-Hb and total-Hb between active and passive pedaling leg on assist ON during one-legged cycling

*Significant difference from the value at rest (*p<0.05, **p<0.01).

†There were the significant interaction between assist OFF and assist ON (†p<0.01).

6). すなわち、血流減少要因である神経性血管収縮および筋内圧の上昇は抑制され、アシスト ON

の骨格筋血液量は維持されることが示唆される。さらに、アシスト ON はアシスト OFF と同様に、

両脚および片脚漕ぎ運動において、HRが安静時と比較して有意に増加した(図4)。すなわち、心拍出量の増加が示唆され、骨格筋への血流量が増加していることが考えられる。

したがって、アシスト機能を作動させることで低強度の運動が可能になること、骨格筋の血流減少要因が抑制されるため血流が維持されることが示唆された。

2. 両脚および片脚漕ぎ運動中の筋酸素動態

両脚漕ぎ運動において、アシストOFFでは $\Delta\text{oxy-Hb}$ および $\Delta\text{total-Hb}$ が時速6.0kmで安静時と比べて有意に増加した($p<0.05$; 図5)。低強度の固定負荷運動では総ヘモグロビン変化量($\Delta\text{total-Hb}$)が有意に増加し、運動中の筋組織の酸素濃度変化(Δoxy)と有意な正の相関関係が確認されたことから、運動中における $\Delta\text{total-Hb}$ の増加が末梢血管拡張に起因していた可能性が考えられる²²⁾。本研究のアシストOFFでも、 $\Delta\text{oxy-Hb}$ と $\Delta\text{total-Hb}$ に有意な正の相関が観察された。また、時速6.0kmでの酸素摂取量が $31.4\pm 0.9\%$ と比較的低強度の運動負荷であったことから、末梢血管が拡張し筋組織への酸素供給が増加したと考えられる。また、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ も速度の増加とともに増加する傾向が観察された。このことから、速度の増加に伴い筋組織の酸素消費量もまた増加したと推察される。 ΔStO_2 は安静時と有意な差がなかったことから、酸素の供給と消費のバランスが保たれていたと考えられる。アシストONは全ての速度で ΔStO_2 が安静時に比べて有意に増加した($p<0.05$; 図5)。 ΔStO_2 が増加したのは筋血流量の増加ならびに静脈還流量の増加による¹⁵⁾ことが示唆される。また、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ は減少傾向を示し、 $\Delta\text{total-Hb}$ はアシストOFFより有意に低下した。 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ の減少はアシスト機能を作動させることによって筋の活動量が減少し、酸素消費量が減少したためであると考えられる。したがって、アシストONの場合、筋への酸素供給はアシストOFFと変わらないが、アシスト機能の作動により筋への負荷が減少し、筋酸素消費量が減少したため $\Delta\text{total-Hb}$ はアシストOFFより低下したと考えられる。

Cooper and Angus²³⁾は片脚の有酸素運動中、活動脚の血流量は高いままであるが、運動開始1分後で筋の脱酸素化が始まり、運動が終わるまで脱酸素化したままであったと報告している。本研究

でも片脚漕ぎ運動のアシストOFFにおいて、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ および $\Delta\text{total-Hb}$ が時速5.5kmおよび6.0kmで安静時より有意に増加したため($p<0.05$; 図6)、漕ぎ脚の血液量は上昇するが筋組織は脱酸素化していることが示唆される。一方、アシストONの場合は ΔStO_2 が増加する傾向にあり、時速6.0kmで安静時に比べて有意に増加した($p<0.05$; 図6)。また、 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ は安静時と比較して差がみられず、 $\Delta\text{total-Hb}$ は速度の増加につれて安静時より増加する傾向であった。 ΔStO_2 と $\Delta\text{deoxy-Hb}$ の結果から、アシストONでは筋酸素消費量の増加が小さいため、酸素供給が消費を上回っていることが考えられる。

一方、片脚漕ぎ運動中の受動運動脚の ΔStO_2 は、アシストOFFでは時速6.0kmで安静時より有意に増加し($p<0.01$)、漕ぎ脚と比べて有意に増加した($p<0.05$; 図7)。アシストONでは時速5.5kmおよび6.0kmで ΔStO_2 が安静時に比べて有意に増加し($p<0.01$)、同速度で漕ぎ脚より有意に増加した($p<0.01$; 図8)。 $\Delta\text{deoxy-Hb}$ は、アシストOFFでは受動運動脚が漕ぎ脚に比べて有意に低下した($p<0.01$; 図7)。また、アシストONでは $\Delta\text{deoxy-Hb}$ が全ての速度で安静時および漕ぎ脚に比べて有意に低下した($p<0.01$; 図8)。アシストOFFおよびアシストONの受動運動脚は、どちらも受動的に脚が動かされているため筋酸素消費量の増加が小さいと考えられる。したがって、受動的に脚が動かされたことにより、受動運動脚では貯留していた静脈血の灌流が促進されたと考えられる。

3. 4輪自転車の日常生活への有用性

本研究の4輪自転車での運動は、両脚および片脚漕ぎ運動のどれも $\dot{V}\text{O}_2$ が最大酸素摂取量の40%以下であり、HRも120拍/分に届かない低強度の運動であった(図3, 4)。

石河⁴⁾は高齢者の体力低下を防ぐためには日常生活で定期的な運動を持続することが必要であると述べている。また、間嶋と上田⁵⁾は脳血管障害片麻痺患者の体力低下要因として、長期の安静臥床および日常生活における身体活動量の低下を挙げている。さらに、厚生労働省²⁴⁾(2013)は「健康づくりのための身体活動基準2013」の中で、65歳以上の高齢者の身体活動不足を予防するために、強度を問わず、身体活動を10メッツ・時/週、具体的には毎日40分行うことを推奨している。すなわ

ち、高齢者および障害者の体力低下を予防するためには日常生活での定期的な運動が重要になる。

本研究で使用した4輪自転車は、高齢者の日常的な移動、特に外出を支援するために開発された²⁾。高齢者の自転車使用に関する調査²⁾によると、67%の高齢者が日常生活で自転車を利用していった。しかし、自転車を利用する者のうち過去5年間で危険な目にあった経験がある者は半数以上を占め、その経験として「転倒」や「接触事故」が挙げられた。また、自転車を利用しない高齢者は33%であり、その理由として「加齢のため危険」という理由が42%を占めた。この調査結果から、高齢者が自転車を利用する際には、加齢によるバランス能力の低下が原因で転倒の危険性が伴うことが示唆される。したがって、高齢者の日常的な移動に安定性が確保された4輪自転車を使用することは、外出時における高齢者の移動の危険性を防ぐことができると考えられる。また、電動モータを搭載することで脚筋力が低下した高齢者および障害者の少ない力でも推進が可能になり、移動および日常の運動量が増加すると考えられる。そのため、高齢者および障害者のような低体力者は呼吸循環器機能を維持・増進することができる²⁵⁾。さらに、自らペダルを漕ぐことは下肢機能の維持につながる⁹⁾。したがって、4輪自転車を用いた低強度の運動は日常生活に取り入れやすいと考えられるため、4輪自転車は高齢者および障害者に対する健康増進のための有益な道具となることが示唆される。

本研究は健康な男子大学生を被験者としてトレッドミル上で実験を行った。今後は4輪自転車の使用対象者である高齢者および障害者を被験者とし、実際に彼らに4輪自転車を使用してもらうことで4輪自転車の有用性を考えていく必要がある。

まとめ

4輪型電動アシスト式移動支援機器を用いて、アシスト機能を作動させて運動を行うと、低強度の運動が可能である。また、両脚および片脚漕ぎ運動の漕ぎ脚、片脚漕ぎ運動の受動運動脚において筋血流量増加が示唆された。受動運動脚における筋血流量の増加は、麻痺領域の長期的な不活動と低循環による心臓血管関連の合併症を予防するために重要である^{10,12)}。したがって、4輪型電動ア

シスト式移動支援機器での運動は高齢者および障害者への健康増進に対する有益な道具となることが考えられる。

文 献

- 1) 加倉井周一：肢体不自由者用移動機器（車椅子・電動車椅子・障害者用自動車）の現状と問題点。障害者問題研究 28:26-34, 1982.
- 2) 米田郁夫ほか：歩行困難高齢者のための外出支援機器の開発。ライフデザイン学研究 7:311-330, 2011.
- 3) 内閣府：平成25年版高齢社会白書。ぎょうせい、東京、2-12, 2013.
- 4) 石河利寛：老人の体力。保健の科学 17(1):7-10, 1975.
- 5) 間嶋 満, 上田 敏：脳卒中片麻痺患者の体力に関する検討—40代および50代の脳卒中片麻痺患者について—。リハビリテーション医学 22(2):64-72, 1985.
- 6) 村上雅仁ほか：脳血管障害片麻痺患者の運動負荷時酸素摂取応答と運動効率に短下肢装具が与える影響。理学療法科学 20(1):33-36, 2005.
- 7) 加藤雄一郎ほか：高齢期における身体活動と健康長寿。体力科学 55:191-206, 2006.
- 8) Sperlich, B et al.: Biomechanical, cardiorespiratory, metabolic and perceived responses to electrically assisted cycling. Eur J Appl Physiol 112: 4015-4025, 2012.
- 9) 関矢貴秋ほか：歩行障害者に対する足漕ぎ車いすによる走行訓練実施前後の身体機能変化。生体医工学 47(5):411-416, 2009.
- 10) Nash, MS et al.: Effects of electrically-stimulated exercise and passive motion on echocardiographically-derived wall motion and cardiodynamic function in tetraplegic persons. Paraplegia 33: 80-89, 1995.
- 11) Zbogar, D et al.: The effects of functional electrical stimulation leg cycle ergometry training on arterial compliance in individuals with spinal cord injury. Spinal Cord 46: 722-726, 2008.
- 12) Kawashima, N et al.: Muscle oxygenation of the paralyzed lower limb in spinal cord-injured persons. Med. Sci. Sports Exerc. 37(6): 915-921, 2005.
- 13) 浜岡隆文：筋循環・代謝研究における近赤外線分光法の有用性と限界。脈管学 49: 159-162, 2009.
- 14) 木目良太郎ほか：運動時血管機能の非侵襲的計測。

- 脈管学 50: 455-460, 2010.
- 15) 木目良太郎ほか：自転車運動時における単一筋内酸素濃度の部位差について—多チャンネル型近赤外空間分解分光法を用いて—。脈管学 48: 383-388, 2008.
- 16) 高石鉄雄ほか：電動アシスト機能付き自転車による模擬的日常生活走行中の身体活動強度。日本生理人類学会誌 17(2): 73-81, 2012.
- 17) 庭山雅嗣ほか：空間分解 NIRS を用いた筋組織酸素濃度計測における誤差要因とその補正法。脈管学 47: 17-20, 2007.
- 18) Simons, M et al.: Electrically assisted cycling: a new mode for meeting physical activity Guidelines? Med. Sci. Sports Exerc. 41(11): 2097-2102, 2009.
- 19) 加賀谷淳子：運動時の筋血流量。体育学研究 46: 429-442, 2001.
- 20) Saito, M et al.: Muscle sympathetic nerve responses to graded leg cycling. J Appl Physiol 75: 663-667, 1993.
- 21) 汪立新ほか：回転数・トルク数の調節が活動筋内の酸素動態およびエネルギー代謝に及ぼす影響。体力科学 54: 229-236, 2005.
- 22) Kime, R et al.: Noninvasive determination of exercise-induced vasodilation during bicycle exercise using near infrared spectroscopy. Med Sci Monit 15(3): CR89-94, 2009.
- 23) Cooper, CE, Angus, C: Blood volume changes are controlled centrally not locally—a near-infrared spectroscopy study of one legged aerobic exercise. Oxygen Transport to Tissue XXIV. 627-635, 2003.
- 24) 健康局がん対策・健康増進課：“健康づくりのための身体活動基準 2013”。厚生労働省, 2013-03-18, <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple.html> (参照 2014-07-10).
- 25) 緒方道彦：“肥満は必然である”その行動生理学的考察。健康科学 10: 139-145, 1988.

(受付：2014年5月27日, 受理：2015年3月12日)

Changes in muscle oxygenation and hemodynamics during electric power-assisted cycling exercise

Fuse, S.^{*1}, Kime, R.^{*1}, Katsumura, T.^{*1}, Suzuki, T.^{*2}

^{*1} Department of Sports Medicine for Health Promotion, Tokyo Medical University

^{*2} Department of Health Care and Sports, Faculty of Human Life Design, Toyo University

Key words: near-infrared spectroscopy, one-legged cycling exercise, four-wheel electric power-assisted personal mobility

[Abstract] The purpose of this study was to examine the changes in muscle oxygen dynamics during two- and one-leg electric power-assisted cycling exercises.

Fourteen healthy male students participated in this study. They performed exercises on a treadmill using four-wheel electric power-assisted personal mobility. Changes in tissue oxygen saturation (StO₂), oxygenated hemoglobin (oxy-Hb), deoxygenated hemoglobin (deoxy-Hb) and total hemoglobin (total-Hb) were monitored continuously at the belly of the vastus lateralis muscle using near infrared spatial resolved spectroscopy from rest to the end of the exercise. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate (HR) were also measured during the exercise.

During both two- and one-leg cycling exercises involving an assist function, ΔStO_2 significantly increased and $\Delta\text{deoxy-Hb}$ significantly decreased compared to exercise without an assist function. $\dot{V}O_2$ and HR also significantly decreased during exercise with an assist function compared to without it.

These results suggest that muscle blood flow would increase more while operating an assist function than without it. The four-wheel electric power-assisted personal mobility may be useful for elderly and hemiplegic persons to promote their health and activities of daily living (ADL).