

4 ICT を用いた運動・身体活動の測定方法と健康増進への活用

大河原一憲（電気通信大学大学院情報理工学研究科／国立健康・栄養研究所基礎栄養研究部）

笹井浩行（筑波大学医学医療系／日本学術振興会）

身体活動と疾病に関する研究の始まりは、ロンドン2階建てバスの運転手と車掌を対象に、虚血性心疾患の発症率を比較した Morris ら（1953 年）によるものだといわれている。イギリスでは、その当時から身体活動の不足が多くの人々の健康障害を招く時代が来ることを予測していたのかもしれない。以降、生活習慣病の予防・改善に必要な身体活動量・活動様式についてさまざまな研究が行われてきたが、それは同時に身体活動・運動を正確に評価するための測定法を開発する歴史でもあった。日常生活下の身体活動量を評価する方法として、長年、主に質問紙法が使われてきたが、測定技術の目覚ましい進歩に伴って、近年では加速度計法や心拍数法を採用する研究が増えている。さらに、これらのいわゆる“活動量計”は、安価に購入できるようになったことから、専門家のみならず、一般にも広く認識されるよ

うになった。しかしながら、各製造会社は何をどこまでどのように推定できるのかという情報を公開せず、売れる商品の開発に注力し、また使用側もそれらを十分理解しないまま利用しているという現状がある。そこで、本稿では活動量計の測定原理と限界、および活用の可能性について解説する。

身体活動・運動とは

健康づくりのための身体活動基準 2013（厚生労働省）によると、身体活動（physical activity）とは、安静にしている状態よりも多くのエネルギーを消費するすべての動作を指し、日常生活における労働、家事、通勤・通学等の「生活活動」と、体力の維持・向上を目的とし、計画的・継続的に実施される「運動」の2つに分けることができる（図-1-

概念 A）。そのほか、余暇身体活動（leisure-time physical activity）や仕事による身体活動（occupational physical activity）などに分類することができるが、これらの区分（ドメイン：domain）は生活様式に基づく定義である。そのため、「運動」ドメインのウォーキングと「生活活動」ドメインの歩行は同じ運動様式であっても、異なるドメインとなる。この概念は、疫学研究などで用いられる質問紙調査によって身体活動を評価する場合にはフィットするものの、物理的・生体

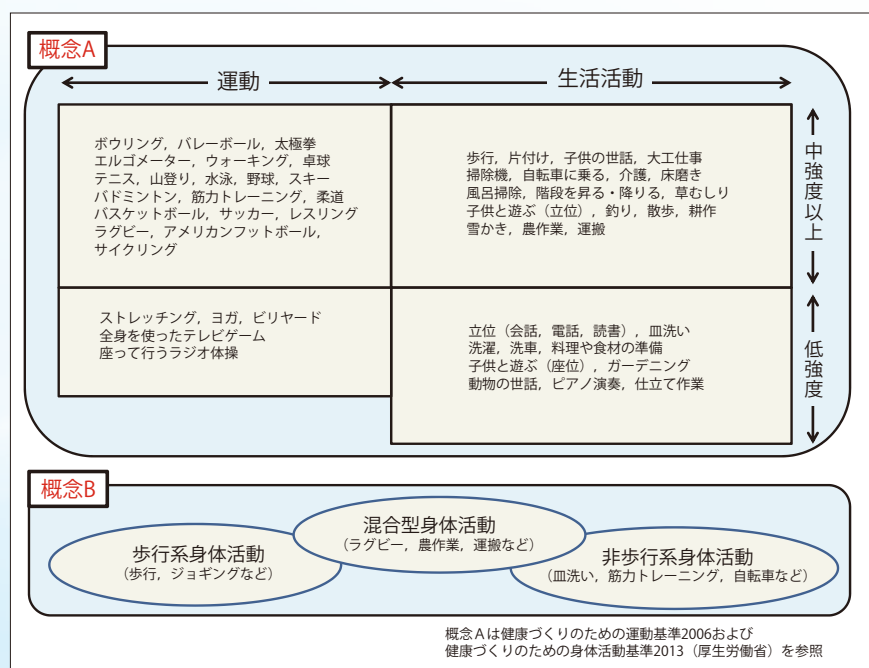


図-1 身体活動の区分

的指標から身体活動関連指標を推定する場合の直接的な適用は難しい。そこで、物理的・生体的データから各身体活動指標を推定する場合には、運動様式の違いに基づく概念をあてはめると理解しやすい(図-1-概念B)。

1日のエネルギー消費量の構成と身体活動関連指標との関係

1日の総エネルギー消費量は大きく3つで構成されている(図-2-A)。基礎代謝量とは人が生きていくうえで必要な最小限のエネルギー量をいう。一般人が日本人の食事摂取基準2015における「ふつう」の身体活動レベルで過ごした場合、基礎代謝量は総エネルギー消費量の約60%程度を占める。また、食事をとった際に食物を消化、吸収、運搬する過程で熱産生が生じるが、これを食事誘発性熱産生といい、総エネルギー消費量の10%程度を占める。残りの構成要素が身体活動に由来するものであり、この中にはあらゆる身体活動によるエネルギー消費が含まれる。この構成要素は人によってばらつきが大きく、特に非運動性身体活動によるエネルギー消費の大小が1日の身体活動レベルに大きく影響するといわれている¹⁾。

活動量計で測定できる身体活動関連指標には、エネルギー消費量、強度、行動パターン、歩数、走行距離・速度などがある(図-2-C)。身体活動強度の指標には、メッツ(metabolic equivalents: METs)が国内外においてよく用いられている。メッツとは、身体活動におけるエネルギー消費量を座位安静時代謝量(1メツ

ツに相当)で除したものである。身体活動量(エネルギー消費量)の算出は、ある身体活動の強度(たとえば、4メッツの強度など)が分かり、それに実施した時間に乗じることである。そのため、1)それぞれの身体活動の強度と、2)座位安静時代謝量(≈基礎代謝量*厳密には異なる)がうまく推定できれば、1日の総エネルギー消費量および身体活動量を高い精度で推定することが可能である。図-2-Bに日常生活下におけるエネルギー消費量の経時的変化の模式図を示したが、これを見ると上述した2つの指標の推定がいかに重要であるかが理解できる。また、一般人においては、身体活動全体のうちの運動によるエネルギー消費はそれほど大きくないため、非運動性身体活動(≈生

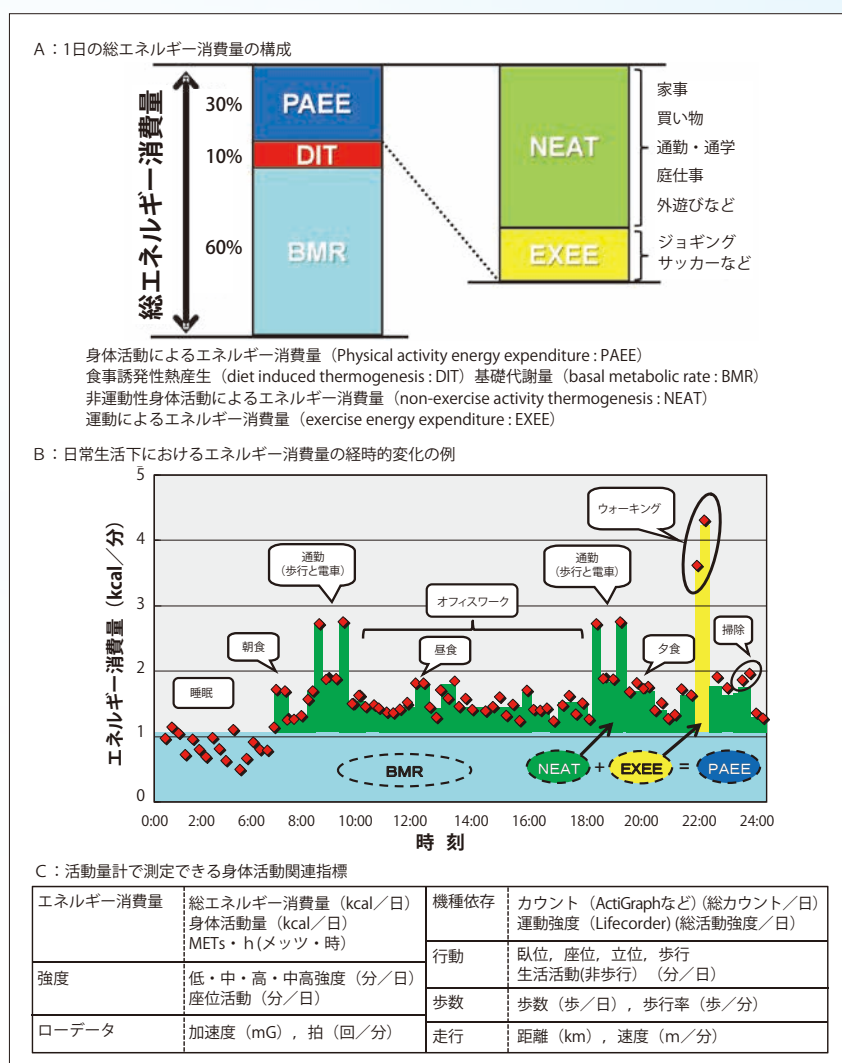


図-2 1日のエネルギー消費量の構成と活動量計で測定できる身体活動関連指標との関係

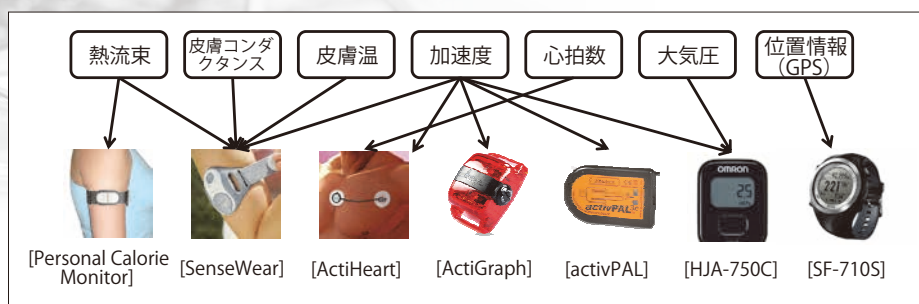


図-3 日常生活下における運動・身体活動の測定法

活活動) を正確に評価する意義は大きい。

運動・身体活動量の測定方法

人のエネルギー消費量を高い精度で測定する方法として、呼気ガス分析に基づくダグラスバッグ法、ミキシングチャンバー法、ヒューマンカロリメーターなどがあるが、日常生活下での長時間測定はほぼ不可能である。一方、トレーサーを用いる二重標識水法が日常生活下でのエネルギー消費量を測定するゴールドスタンダードとして用いられているが、1～2週間の平均エネルギー消費量を算出できることに限定されており、1日単位、数時間単位での評価はできない。また、疫学調査で多く利用される質問紙法は、得られる情報量が少ないことや、非客観的な測定法であるなどの理由により、推定誤差が大きい。そこで、日常生活下での運動・身体活動量を経時的、客観的に追従し、かつ高精度で評価する方法として、加速度、角速度、傾斜角、心拍数、大気圧、位置情報 (GPS)、皮膚温、熱流束、皮膚コンダクタンスなどの物理的・生体的計測値を測定する活動量計が開発されている²⁾ (図-3)。現在発売されている活動量計のほとんどは、加速度センサが内蔵されているものであり、それにそのほかの計測センサを組み合わせることで精度を改善しようとする試みがなされている。しかしながら、1日のエネルギー消費量や身体活動量を推定することにおいて、加速度値に心拍数や熱流束値などの指標を追加しても、ほとんど精度は改善できていないというのが現状である³⁾。他方、気圧計を搭載することで階段昇りや山

登りにおける推定精度の改善や、GPSを用いることで走行距離や走行速度を正確に測定できることなど、部分的な改善は報告されており、今後さらなる発展が期待できる。

妥当性が検証されている加速度計

加速度計法は、人が動いたときに生じる加速度と活動強度やエネルギー消費量との間に正の相関があることを利用して、それらの身体活動指標を推定する方法である (図-4-B)。加速度計には加速度センサに加え、時計、A/D変換器、プロセッサ、メモリおよび電池などが内蔵されている。計測本体である加速度センサには、圧電素子 (piezoelectric) 型、ピエゾ抵抗 (piezoresistive) 型、静電容量 (capacitive) 型などいくつかの種類がある。

+ 海外で利用されている代表的な加速度計

海外の主な加速度計とその特徴を表-1にまとめた。近年の加速度計の技術開発はめざましく、小型化、軽量化、多軸化、記憶領域の大容量化がなされ、より詳細かつ長期間にわたり、身体活動を捉えられるようになってきている。実際、米国における標準的な加速度計 ActiGraph (ActiGraph 社) では、過去20年間で64KBから512MBへと記憶容量が飛躍的に増加した。数年前までは、一軸加速度センサを内蔵した機種が主流であったが、最近では三軸加速度センサを内蔵した機種が主流となっている。装着部位は腰部が主流であるが、activPAL (PAL Technologies 社) のように大腿前面に装着する機種や、

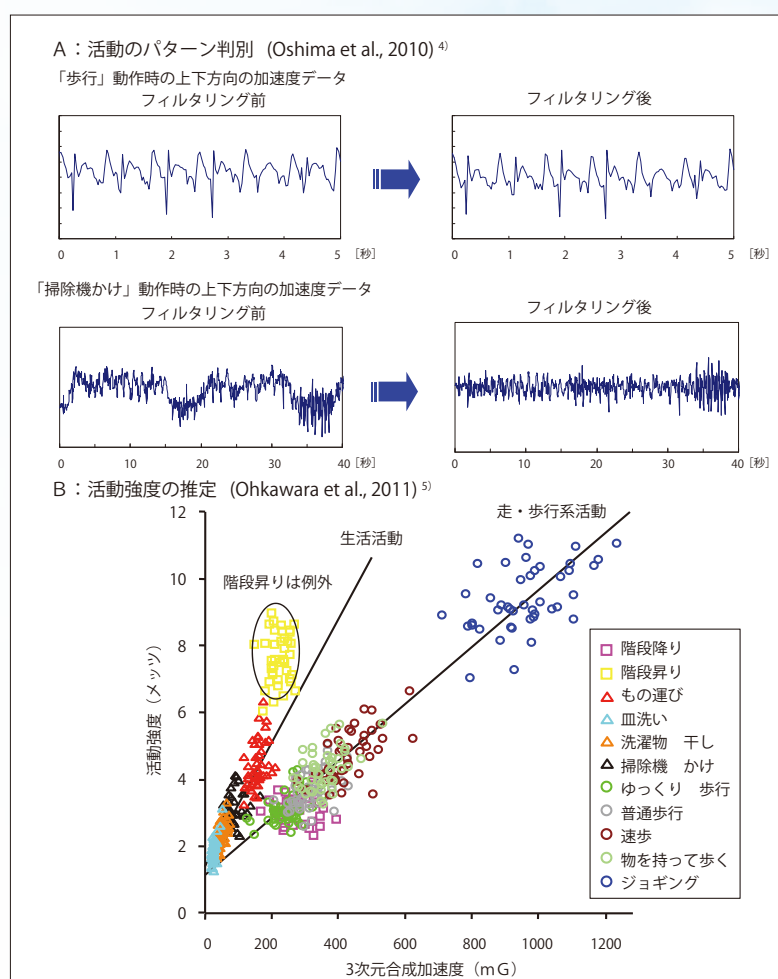


図-4 加速度計を用いた身体活動のパターン判別および強度推定の例

ActiGraph や GENEActiv (Activinsights 社) のように、腰部に加え手首や足首に装着できる機種もある。任意の装着部位における出力と目的とする身体活動変数との関係が妥当性研究によって構築されていれば、結局のところどこに装着しても構わない。activPAL は、近年疾患のリスク因子として注目されている座位行動 (sedentary behavior) を測定する機器として評価が高い。activPAL は立位、座位／臥位、歩行を妥当性高く (正判別率 95%) 判別できることが報告されている。activPAL は自由生活下における座位行動測定の準基準法としての評価を得つつあり、今後疫学調査等で広く利用されることが予想される。

健康に関する米国の代表的な調査である National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) では、2003 年から加速度計 (ActiGraph

7164) を腰部に装着して身体活動を測定しており、2006 年まで同じ手法で調査された。現在データ収集中の 2011 ～ 2014 年プロトコルでは、加速度計 (ActiGraph GT3X+) の装着部位が腰部から手首へと変更された。手首に装着する利点は、対象者の負担軽減と測定コンプライアンスの向上 (日本に比べ、米国における腰部に装着する加速度計へのコンプライアンスは低い)、24 時間測定の実現に伴う睡眠測定が可能となることである。NHANES は米国民を代表する標本調査であり、必然的に注目度も高い。

+ 国内で開発された加速度計

国内においては、1980 年代後半より加速度計の開発が行われ始め、初めてスズケン社製のカロリーカウンターが市販されて以降、これまでさまざまな加速度計が開発されてきた。表-2 に妥当性の検証が報告されている代表的な加速度計を示したが、国内におい

て妥当性の検証が報告されている加速度計の数は非常に限られている。健康スポーツ科学分野では、スズケン社製の加速度計であるカロリーカウンターや Lifecorder EX が国内で最も普及してきた。これらの機器は、1 軸の加速度センサを内蔵しており、32Hz で検出した加速度信号の大きさと、単位時間あたりの歩行ピッチから 4 秒ごとに独自の運動強度 (Ka) を算出することが可能で、それに体重を乗じて運動量 (kcal) を求める。ただし、Lifecorder は歩行や走行時の上下振動に伴う加速度を検出することを想定して開発されており、体幹の左右への捻りや揺れなどに伴う動作には適さないことが報告されている。また、歩行・走行の評価に優れているとはいえ、加速度の測定範囲が 0.06 ～ 1.94G までであるため、およそ時速 8 km (8.3 メッツ) 以上の歩行・走行では速度変化を追従できないと考えられる。

国内で販売されている身体活動量の評価を目的とした 3 軸加速度計には、Active style Pro HJ-350（オムロンヘルスケア社製）、ActivTracer AC-210（GMS 社）、Actimarker EW4800（松下電工社 ※ 2014

年 4 月時点で発売中止）などがある。ActivTracer は、50 Hz で加速度を検出しており、4 秒ごとに平均化された 3 軸の加速度の生値を得ることができる。Active style Pro はサンプリング周波数が 32

Hz で加速度を検出しており、10 秒ごとの平均合成加速度から運動強度（メッツ）を推定することが可能である。走・歩行活動と日常生活活動を別々の推定式で求める ActivTracer と、それらを 1 つの推定式から求める Actimarker の測定精度を比較した研究では、日常生活活動（洗濯物干し、皿洗い、荷物の持ち運び、掃除機かけ）時のダグラスバッグ法による基準値と各加速度計による推定値との差異が、Actimarker で平均 -8.7%、ActivTracer で平均 -0.4% であったと報告している。ActivTracer の方が確度が優れていた理由に、2 本の推定式を用いている点を挙げているが、それでも活動によっては 11% 前後の過小

	ActiGraph GT1M	ActiGraph GT3X+	activPAL
写真			
製造会社	ActiGraph	ActiGraph	PAL Technologies
大きさ	38.0 × 37.0 × 18.0 mm	46.0 × 33.0 × 15.0 mm	35.0 × 53.0 × 7.0 mm
重量	27 g	19 g	15 g
装着部位	腰部	腰部、手首	大腿前面
測定範囲	0.05 ~ 2.00 G	± 6 G	± 2 G
最小分解能	50 mG	3 mG	16 mG
測定軸	X 軸	X, Y, Z 軸	X, Y, Z 軸
記録周波数	30 Hz	30 ~ 100 Hz	20 Hz
エポック長	1 分	生値, 1 秒 ~ 5 分	15 秒
特徴	フィルタ処理後の積分値を用いて独自指標を算出。エネルギー消費量の推定は研究者が作成した推定式を用いる。2005 ~ 2006 年の米国国民健康栄養調査にて使用。	処理は GT1M と同様。2011 ~ 2014 年の米国国民健康栄養調査にて手首に装着されている。測定コンプライアンスを高め、かつ睡眠の情報を得ている。	大腿前面に装着し、主に立位、座位・臥位、歩行の判別に優れている。

表-1 妥当性が検証された海外の主な加速度計

	Lifecorder	Active style Pro	Actimarker	ActivTracer
写真				
製造会社	スズケン	オムロンヘルスケア	パナソニック電工	GMS
大きさ	72.5 × 41.5 × 27.5mm	74.0 × 34.0 × 46.0 mm	60.0 × 13.0 × 35.0 mm	52.0 × 80.0 × 17.0 mm
重量	60 g	60 g	24 g	72 g
装着部位	腰部	腰部	腰部	腰部
測定範囲	0.06-1.94 G	± 6 G	± 2 G	± 4 G
最小分解能	60 mG	3 mG	4 mG	2 mG
測定軸	X 軸	X, Y, Z 軸	X, Y, Z 軸	X, Y, Z 軸
記録周波数	32 Hz	32Hz	20 Hz	50 Hz
エポック長	4 秒か 2 分	10 秒か 60 秒	12 秒か 60 秒	15 秒
特徴	ピッチと加速度から運動強度を決定。歩数測定の妥当性が高い。	歩行・走行活動と生活活動を判別するアルゴリズムを内蔵している。両者に別々の推定式を適用し、エネルギー消費量を推定。	合成加速度と酸素摂取量の関係を示す 1 つの推定式から活動強度 (METs) を推定。現在、発売中止。	歩行・走行活動と生活活動を判別するアルゴリズムを内蔵。心拍数および RR 間隔の同時測定可能。

表-2 妥当性が検証された国内の主な加速度計

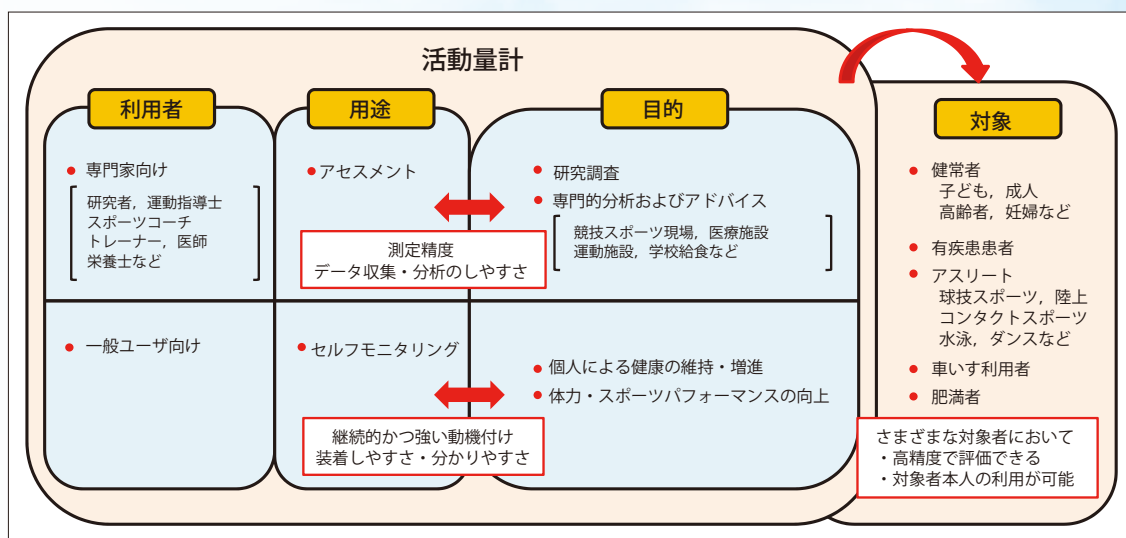


図-5 健康管理・スポーツ現場で有用な活動量計を提案するために考慮すべきポイント

または過大評価がみられている。

Active style Pro の特徴は、歩行・走行活動と日常生活活動を別々の推定式から求めることに加え、座位、仰臥位での活動についても、別の推定式を用いて評価している点である。Ohkawara ら⁵⁾によると、日常生活活動（洗濯物干し、皿洗い、荷物の持ち運び、掃除機かけ）時における実測した運動強度と比較して、Active style Pro は活動によって -3.5% ~ 6.2% 程度の誤差が認められている。このように、開発プロセス、センサのスペック、取得したデータの処理方法などで推定誤差に違いが生じる。どの機種が最も優れているかという判断は難しいが、こういった身体活動をどの程度の精度で評価したいのかで、利用する加速度計の選択肢が変わってくる。研究調査で利用する場合には、精度が確保されていることに加えて、推定式を含むアルゴリズムをどこまで開示しているのかも重要なポイントである。

+ 行動パターンの判別

エネルギー消費量関連指標の推定のみならず、加速度値を用いて行動パターンの判別も行われている。たとえば、Active Style Pro や ActiGraph の Crouter らの式においては、重力加速度の影響（図-4-A）や加速度の変動係数を利用し、歩行活動とそれ以外の生活活動に判別している。そのほかにも、一定

epoch 内における加速度生値から数々の時間領域変数（変動係数、ゼロ交差数、ピーク間隔など）や周波数領域変数（有意周波数、エントロピーなど）を抽出し、人工ニューラルネットワーク、サポートベクタマシン、判別分析、決定木、隠れマルコフモデル（Hidden Markov model）を用いる方法などが報告されている。

健康増進現場での活用と今後の課題

現在、歩数計、活動量計などを含むライフログといった人の活動を記録するモニタを誰でも入手できるようになった。家電量販店では、安価なものから高額なものまでさまざまなタイプが販売されており、どれを選んでよいのか分からないほどである。また、ほとんどのスマートフォンに加速度センサが内蔵されており、新たに活動量計を購入しなくても、活動量を測定する機能を利用することができる。つまり、誰もが何らかの方法で身体活動関連指標にふれられる時代である。

活動量計の利用方法は2つに大別される（図-5）。1つは専門家が研究調査、患者や競技選手への食事・運動指導などのために対象者の活動量をアセスメントする場合で、推定精度が高く、ローデータが得られ、取得した大容量データの分析がしやすいことな

どが求められる。もう一方は、一般ユーザが自己管理（セルフモニタリング）を目的とするものであり、継続的で強い動機付けが得られ、装着しやすく、結果の解釈が分かりやすいとよいだろう。現在市販されている活動量計のほとんどは、一般ユーザがセルフモニタリングするために作られており、装着のしやすさ、形状の小ささ、バッテリーの持続時間などが重視されている。一方で、それらの活動量計のアルゴリズムや開発プロセスについてはほとんど開示されていないため、測定精度がどの程度保持されているのか判断できるものは限られている⁶⁾。

活動量計は、今後ますます小型化、大容量化、複数の物理的・生理的指標の測定が可能となり、コンピュータネットワークとの組合せでより使いやすい環境が作られていくことに疑う余地はない。そして、多くの人が健康管理ツールの1つとして、重要な役割を果たすであろうと期待している。しかしながら、活動量計を提供することで健康を維持・改善したという介入研究の成果がそれほど多く報告されているわけではない。使い始めは活動量計に興味を持って意欲的に取り組んだとしても、そのうちに飽きてやめてしまう人がいることは容易に想像できる。そこで、健康のために身体活動量を増やさなくてはならないという動機だけでなく、身体を動かすこと、運動することが楽しいというような内発的動機を強く継続的に得られるためにはどうしたらよいのかという視点を持って、ICTを用いた新たな健康・身体活

動促進ツールおよびシステムの開発に取り組む必要があると考えている。

参考文献

- 1) Ohkawara, K., Hikiyama, Y., Matsuo, T., Melanson, E. L. and Hibi, M.: Variable Factors of Total Daily Energy Expenditure in Humans. The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine, 1(3), pp.389-399 (2012).
- 2) Chen, K. Y., Janz, K. F., Zhu, W. and Brychta, R. J.: Redefining the Roles of Sensors in Objective Physical Activity Monitoring. Med Sci Sports Exerc, 44(1 Suppl 1), S13-23 (2012).
- 3) Remoortel, H. V., Giavedoni, S., Raste, Y., Burtin, C., Louvaris, Z., Gimeno-Santos, E., Langer, D., Glendenning, A., Hopkinson, N. S., Vogiatzis, I., Peterson, B. T., Wilson, F., Mann, B., Rabinovich, R., Puhon, M. A. and Troosters, T.: PROactive Consortium, Validity of Activity Monitors in Health and Chronic Disease, A Systematic Review. Int J Behav Nutr Phys Act. 9, e84 (2012).
- 4) Oshima, Y., Kawaguchi, K., Tanaka, S., Ohkawara, K., Hikiyama, Y., Ishikawa-Takata, K. and Tabata, I.: Classifying Household and Locomotive Activities Using a Triaxial Accelerometer, Gait and Posture, 31(3), pp.370-374 (2010).
- 5) Ohkawara, K., Oshima, Y., Hikiyama, Y., Ishikawa-Takata, K., Tabata, I. and Tanaka, S.: Real-time Estimation of Daily Physical Activity Intensity by Triaxial Accelerometer and a Gravity-removal Classification Algorithm, British Journal of Nutrition, 105, pp.1681-1691 (2011).
- 6) Lee, J. M., Kim, Y. and Welk, G. J.: Validity of Consumer-based Physical Activity Monitors, Med Sci Sports Exerc, 46(9), 1840-8 (2014).

(2014年11月17日受付)

大河原一憲 || ohkawara_kazunori@e-one.uec.ac.jp

筑波大学大学院人間総合科学研究科スポーツ医学専攻博士課程修了（博士（スポーツ医学）取得）。国立健康・栄養研究所研究員，日本学術振興会特別研究員を経て，現在，電気通信大学大学院情報理工学研究科（総合情報学専攻）。

笹井浩行 || sasai@md.tsukuba.ac.jp

筑波大学大学院博士課程人間総合科学研究科スポーツ医学専攻修了（博士（スポーツ医学）取得）。アメリカ国立衛生研究所研究員，日本学術振興会海外特別研究員を経て，現在，筑波大学医学医療系。