

≡ ≡ ≡ 総 説 ≡ ≡ ≡

安全・快適なモビリティ開発のための生理計測技術

Physiological Measurement Technology for Development of Safety and Amenity Mobility

横山 清子*

1. はじめに

2006年4月に経済産業省から発表された人間生活技術戦略¹⁾においては、少子高齢化の急激な進展、社会環境の変化、科学技術の進歩を見据えた上で、1) 安全・安心で快適に暮らす 2) 生きがいを持って健康に暮らす 3) 日本経済の競争力強化を目標としている。これは、団塊の世代が2030年まで元気で介護不要であり続ける、すなわち、健康寿命80歳の実現や、人に親和し五感で楽しめ納得できる機器、空間、システムの開発を目指すということである。このために、人間特性（身体寸法、形状、行動、五感（感性）、認知、判断）や、人の生活空間、環境を良く知り活用する技術である人間生活技術の活用を図ることの必要性が挙げられている。

人間生活技術戦略で策定された4つの将来ゴールは、1) 心身ともに健康な生活 2) 楽しく安らげる暮らし 3) 安全・快適なモビリティ 4) 安全・安心働きがいのある環境 である。ここでは、この中の「安全・快適なモビリティ」実現に向けての要素技術の概要と2030年までのロードマップを概説し、人間特性の把握や快適性評価のために不可欠な技術のひとつである生理計測技術の概説と、生理計測の応用例を述べ、安全・快適なモビリティ開発における生理計測技術の必要性を述べる。

2. 安全・快適なモビリティ実現に向けて

経済産業省が2006年4月に発表した人間生活技

術戦略の4つの将来ゴールのひとつとしている「安全・快適なモビリティの実現」の内容は、乗ると元気になるモビリティがあり、誰もが安全・快適かつ省エネで自由に移動することができる社会の実現ということである。そのために達成すべき技術として、1) 五感や生理に適した快適モビリティ 2) 安全・自由な移動を実現する技術 3) エコ&セーフティドライブ支援 が挙げられている。

五感や生理に適して乗ると元気になる、誰でも安全快適に自由に運転・移動できる技術を開発するためには、身体機能、身体の活動度、集中度、外界刺激に対する反応、疲労、快適感を計測、評価、応用する技術開発が必要となり、このための基盤技術のひとつとして生理計測技術が挙げられる。

人間生活技術戦略における安全・快適なモビリティ実現のゴール達成のために、2005年から2030年までの研究開発ロードマップに記載されている生理計測に関連する項目を以下に列挙する。1) 車椅子や乳母車のように高齢者にとって楽な姿勢・動作の研究 2) 運転時の生理（心拍・呼吸・視線など）変化の検知技術 3) 運転時の生理変化をアクセサリをつけるように手軽にモニタリングする技術 4) 加齢による身体機能・認知力低下の調査 5) 身体機能・認知力を維持させる製品・効果を評価する技術 6) 運転時（環境変化）における身体の活動度の計測・評価技術 7) 運転時に必要な身体機能・認知力の調査 8) 運転者の生理変化から集中力低下を計測する技術 9) 心拍・発汗・視線・脳波などの計測に

* Kiyoko Yokoyama 名古屋市立大学大学院 芸術工学研究科 准教授 工学博士

よる運転者の場面に応じた集中力変化の調査
10) 運転時の動作や姿勢に応じた疲労の計測・評価技術
11) 運転時の筋力・視力・聴力などの総合的な計測・評価技術。

これらの項目は、運転時の様々な身体的・精神的状態を生理計測により精度高く、詳細に分析し、かつ、運転者や同乗者にとって安全・快適なモビリティが提供されているかどうかの評価のための計測技術、分析方法開発の必要性を表している。

具体的には、運転時の身体的・精神的状態について、居眠り、疲労、注意集中低下は、事故を誘発する大きな原因のひとつとして、その防止策や自動検出のための技術開発が従来から行われてきている²⁾。居眠り、疲労、注意集中低下の検出方法として、無拘束かつ非接触で利用可能なビデオカメラなどによる運転者の動作や表情分析、視線や瞬きの分析など身体状態を測定するものが従来から研究されてきている。また、居眠り、疲労、注意力低下を防止するためには、身体に負担が少なく、快適な車室内環境を提供し、かつ、覚醒度低下や注意力低下が検出された場合には、覚醒度や注意力を高めるための刺激を与える機能の付加も必要となる。人の身体に負担が少ないか、人が快適に感じているかなどについては、姿勢・動作分析、筋電図、脳波、心電図、発汗などの生体信号の測定・分析により精度の高い評価方法の開発と評価の実施が必要となる。同様に覚醒度や注意集中を高める付加機能の有効性の評価においても、生体信号測定による生体反応評価や表情・視線等の検出分析が必要となる。

居眠り、疲労、注意力低下などの状態を運転中に実時間で推定するためには、特別な測定装置を装着する必要が無いことが望ましく、装着したとしてもアクセサリ感覚で簡便に利用できるものでなければいけない。そのための開発項目が、生理機能の手軽なモニタリング技術、生理変化による集中力低下の計測技術、運転者の場面に応じた集中力変化の調査、運転時の動作や姿勢に応じた疲労の計測・評価技術、運転時の筋力・視力・聴力などの総合的な計測・評価技術となる。

少子高齢化が進むことにより、人口に占める高齢者の割合は増大する。高齢者の運転や乗車において、負担の少ないモビリティの開発は必要不可欠である。高齢者にとって負担の少ないシート、操作性や視認性の優れたコンソールパネルなどの設計が必要となり、そのためには高齢者の姿勢や

動作特性、視覚特性を、運転動作時の動作分析、視線追跡、筋電図、眼球運動などから評価することとなる³⁾。さらに、運転に必要な身体機能や認知能力の測定と、加齢に伴う身体機能や認知能力を、トラッキング作業などの作業負荷に対する、作業成績や作業時の生体信号測定による生体反応測定により評価を行うことも必要となる⁴⁾。

さらに、快適なモビリティの実現に向けては、人が快適な状態であるかを評価するための評価手法の開発が必要となる。快適性を評価するために、主観的な評価として心理アンケートや、SD法などが行われてきているが、これらの測定はそれまで被測定者が置かれていた状況を中断、もしくは、その状況が終了した時点でそれまでの状況を振り返り評価を行うことになる。それと比して生理計測技術は、人が置かれた状況を中断することなく、その状況に対して実時間、かつ、連続的な評価を可能とする。生理計測技術を用いた快適性の評価の例は、疲労や生体負担度、注意集中低下などと比べると例はかなり少なくなるが、複数の研究報告がなされている⁵⁾。例えば、森林浴の快適性をコルチゾールなどのストレスホルモンの減少により評価する、音楽から得られる快適性を脳波により評価するなどである。その他、快適性評価に利用できる生体信号として、リラクゼーション評価に用いられる心電図拍動間隔時系列や脈波、皮膚電位水準なども候補としてあげることができる。快適性評価への生理計測技術の応用に関する研究については、今後の発展が期待できると考えている。

3. 生理計測技術の概要

生理計測とは、人の身体機能や身体状態を測定するものである。神経細胞の微弱な活動電位、血液の流れ、体表面や深部の温度、血管の圧力などをセンサーで測定する。日常生活場面や産業応用を意図する場合、センサーとしては動作を妨げることの無い非侵襲・無拘束測定が可能であることが条件となる。測定される信号の代表的なものとして、脳波、筋電図、心電図、皮膚電気活動、発汗量、呼吸、血圧、眼球運動、瞳孔反応、ストレスホルモン、深部体温、体表面温度分布などがある。これらを、自律神経活動動態、眠気、注意集中、生体負担度、疲労、ストレス評価などに応用してきている。さらに、リラクゼーション度合い、快適性評価などへの応用も研究されてきている。

以下に上記の代表的な生体信号についての簡単な解説を行う⁶⁾⁷⁾。

3-1. 脳波

頭皮上から測定した脳波は、多数の大脳皮質神経細胞の活動電位の総和を反映する。数十 μ ボルト程度の微弱な電位である。脳波は意識水準によりその波形形状が異なっており、覚醒水準が高く注意集中などの状態では、周波数帯域14~30Hzの β 波が主となる。リラックス状態では8~13Hzの α 波が、うとうとしている入眠期には4~7Hzの θ 波が主となる。図-1は脳波の1例である。リラックスした状態で測定したものであり、 α 波が顕著に見られる。

3-2. 筋電図

筋電図は、運動ニューロンが興奮し筋に収縮が起こることにより発生する活動電位を反映する。皮膚表面に電極を貼付し多数の筋細胞の集合体として活動電位を測定するものが表面筋電図であり、単一の筋細胞の活動電位を記録する場合は筋に針電極を刺入して測定する。筋力の絶対量を筋電図から推定することは難しく、通常あらかじめ測定しておいた最大筋力発揮時の筋電図の大きさ(筋電図の区間積分値)に対して、測定時の筋電図の大きさの比率を求めた%MVCという指標で筋肉の活動状態を評価する。図-2は筋電図の一例で、動作に伴い筋活動電位が生じた部分で振幅が大きくなっている。図中では6~8秒の部分で、他よりも大きな筋力が発揮されていることが推定できる。

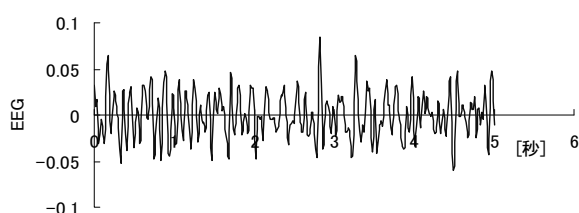


図-1 脳波の例

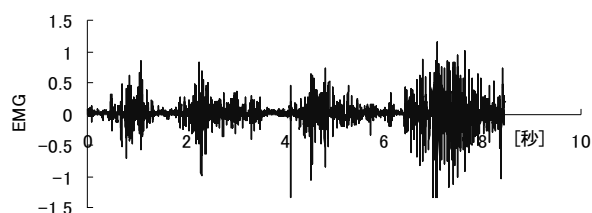


図-2 筋電図の例

3-3. 心電図

心筋の興奮により発生する活動電位を体表面から測定したものが心電図である。数mV程度の電位が観測される。図-3に心電図を示すが、図中に記したように波形の各部位にP、Q、Rなどの名前がつけられている。P波は心房の興奮、QRS群は心室の興奮、T波は心室の興奮の回復に対応する。心電図を用いて自律神経活動バランスを評価する場合、R波とR波の時間間隔であるR-R間隔時系列を利用する。図-4に同一被験者を対象とした前半安静状態、後半研究発表中の高い緊張状態の瞬時心拍時系列を示す。瞬時心拍とは、1分間をR-R間隔で除した値、すなわち、拍動間隔を心拍数相当の値で表したものである。瞬時心拍数、もしくは、R-R間隔は毎拍一定値となるのではなく、拍毎に変動していることがわかる。この変動を「ゆらぎ」と呼ぶ。安静状態と緊張状態を比較すると安静に比して緊張状態において心拍数が高くなっている。また、波形の変動パターンである「ゆらぎ」の様相も安静時と緊張状態では変化しており、緊張状態の方が「ゆらぎ」の振幅が小さいことが分かる。

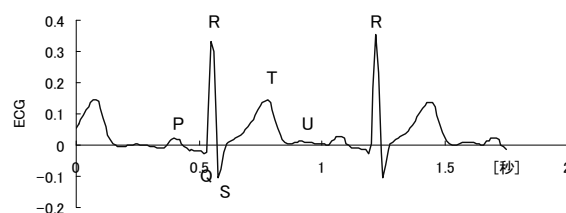


図-3 心電図の例

3-4. 皮膚電位水準

精神的な負荷や動揺による感情変化、情動反応が起こることにより皮膚の電気抵抗が低下する。これは、汗腺に現われる交感神経反射のひとつとされている。精神性発汗が起こる手掌、足底において、この電気抵抗の変化を測定するのが皮膚電位水準である。緩やかな変動であり、刺激に対する

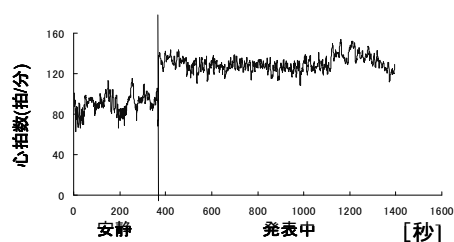


図-4 研究発表時の瞬時心拍時系列

る潜時も2秒程度、持続時間も数秒以上と長くなる場合も見られる。

3-5. 呼吸

呼吸については、呼吸数や呼吸の大きさの時間変化を呼吸曲線として測定する方法がある。これについては、胸囲の変化を電気抵抗の変化として記録するものと、鼻腔の呼気・吸気による温度変化をサーミスターで記録するものがある。呼吸量については、肺の容積すなわち呼吸量を記録する肺容量計による測定、あるいは、身体全体を密閉室に入れて、密閉室内の容積変化を記録する体幹プレチスモグラフによる測定などが行われる。

3-6. 眼球運動

眼球の動きには、視線を移す時の断続性眼球運動、動くものに視線を合わせる追随運動、頭部の動きに対して視野のぶれを防ぐ迷路性運動がある。アイカメラを用いて視線の動きを分析することにより、注意、興味などの状態が推定できる。

3-7. ストレスホルモン

ストレスとは、ストレスと呼ばれる生体内外からの刺激に対する生体の防御反応のことである。ストレスが加わることにより分泌されるホルモンとしてコルチゾールがある。唾液中や尿中に含まれるコルチゾールの量を分析することによりストレス度合いを評価することができる。

4. 生体計測の応用例

安全・快適なモビリティ実現のゴール達成のために、人間生活技術戦略の研究開発ロードマップに記載されている生理計測の項目に関連する内容の実験例を以下に述べる。内容として、1) 車室内コンソールパネルの設置位置・角度の変化に対する動作・筋電図の変化 2) 四輪車と二輪車の長時間高速道路走行時の心拍数変動による生体負担度評価 3) 情報提示画面のレイアウト変化に対する脳波変動 をとりあげる。

4-1. 室内コンソールパネルの設置位置・角度の変化に対する動作・筋電図の変化

コンソールパネルを模擬したPC用テンキーの設置位置を、車のシート座面と同位置(0cm)、座面から15cm、30cmの3種類とし、各々の設置位

置でパネルの角度を0度(水平)、30、60、90度の4種類で変化させた12ケースを比較した。光学式モーションキャプチャシステムにより全身33箇所の3次元位置座標を測定し、さらに左肩僧帽筋と左上腕筋の表面筋電図も同期測定した。被験者は4名の健常男性大学生で各4試行を行った。図-5には、1回のボタン押下動作に対する a) 左肩関節の移動距離と b) 僧帽筋の積分筋電図の4名×4試行の16例の平均値を12のパネル設置条件に対して求めたものである。積分筋電図については、値の個人差が大きいため、各例において12のパネル設置条件に対する平均がゼロ、標準偏差が1となる標準化を行った上で、16例のデータの平均を求めている。

この結果では、パネルの設置位置が高くなることにより肩関節の移動距離と、僧帽筋の筋電図の振幅(積分筋電図の値)が大きくなり、肩に対する負担が大きくなっていることが分かる。また、同じ設置高さであれば、設置角度が水平よりも垂直の方が僧帽筋に加わる筋負担は小さいことが分かる。

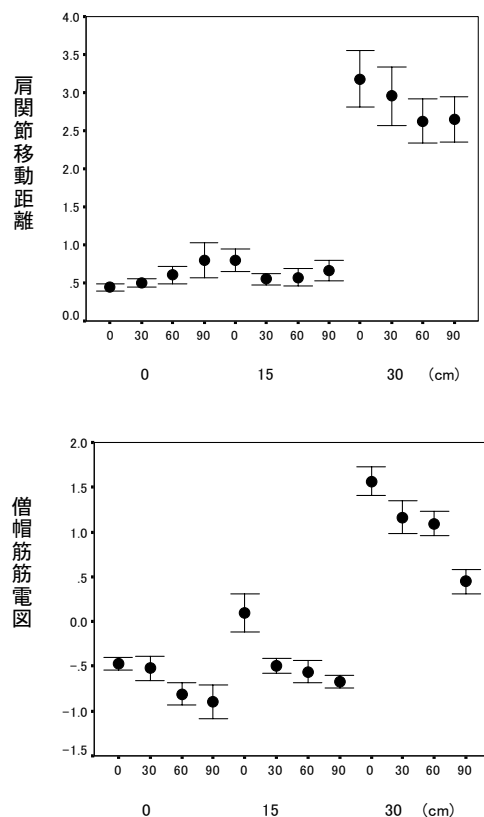


図-5 車室内コンソールパネルの設置条件に対する動作と積分筋電図の変化
肩関節移動距離(上図) 僧帽筋の筋電図(下図)

4-2. 四輪車と二輪車の長時間高速道路走行時の心拍数変動による生体負担度評価

実験では、四輪車健常成人20名、二輪車30名を対象として、ホルター心電計を用いて心電図を測定した。高速道路を主体として400kmの走行で、約1時間の走行に対して15分間の休憩、午前中3時間の走行後は昼食を含めた1時間の休憩を設定した。心電図からは、1拍毎の拍動間隔時系列を算出し、さらにその時系列の変動パターンを定量化するため、拍動間隔の平均値、変動係数（拍動間隔の標準偏差を平均値で除したもの）、LF（拍動間隔時系列の0.04~0.15Hz成分のパワー値）、HF（拍動間隔時系列の0.15~0.4Hz成分のパワー値）、LF/HF（LF成分のパワー値をHF成分のパワー値で除したもの）を算出した。HF、LF/HFについて、3. で述べたように、緊張や安静といった生体状態に応じては拍動間隔時系列の変動パターンが変化する。特に、人がリラックスし副交感神経活動が高まった状態では、時系列に呼吸（通常15~20回/分）に同期した変動成分が顕著となる。呼吸回数である15~20回/分は、0.15~0.3Hzに対応しており、この変動成分をHFと称している。交感神経活動度は、LF/HFの大きさに反映されるとされている⁸⁾。これらの指標に対して、主成分分析を行った。その結果、因子1として抽出されたものは、拍動間隔の平均値とHFの因子負荷量が正の大きい値となった。この因子は、自律神経活動バランスを評価すると考えられ、この因

子スコアが正で値が大きい場合、すなわち、拍動間隔が長く、HFパワーが大きい場合自律神経活動バランスは副交感神経側に傾き、因子スコアが負で値が大きい場合自律神経活動バランスは交感神経側と考えられる。図-6は、各々約1時間で設定した走行セッションに対する因子1の因子スコアの平均値の変化を示している。走行開始時、昼食後の第4、5セッションにおいて負の大きな値となり、この時点では自律神経活動バランスが交感神経側に傾き、精神的・肉体的な生体負担度が高くなっていることが読み取れる。

4-3. 情報提示画面のレイアウト変化に対する脳波変動

画面上部5分の4に映像を、下部5分の1に文字による情報を提示する情報提示画面について、情報の提示デザインの変化に対する脳波変動の測定実験を行った。被験者は健常大学生11名である。対象とした画面デザインを表-1に示す。各画面を90秒ずつ提示している。

図-7は、表-1に示すデザインの変化に対する(a)α波、(b)β波の含有率の変動を示す。番号ゼロは、何も提示しない安静座位を示している。各被験者で安静と9種類のデザインに対する測定値の平均値がゼロ、標準偏差が1となる標準化を行い、11名の被験者の平均値を算出したものをグラフに示している。ゼロで表す何も提示していない状態に対し、情報提示画面を注視している状態では、α波は減少し、β波は上昇しており、情報提示画面に対して注意が向けられていることが確認できる。デザインの比較では、4、5、7、8でα波の低下、β波の上昇の傾向が見られ、その他の画面デザインと比較して注意集中が得られやすいデザインであることが確認できる。4は

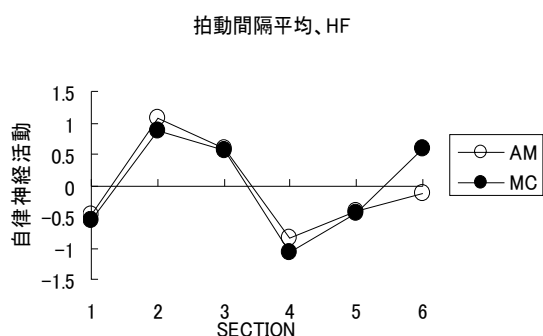
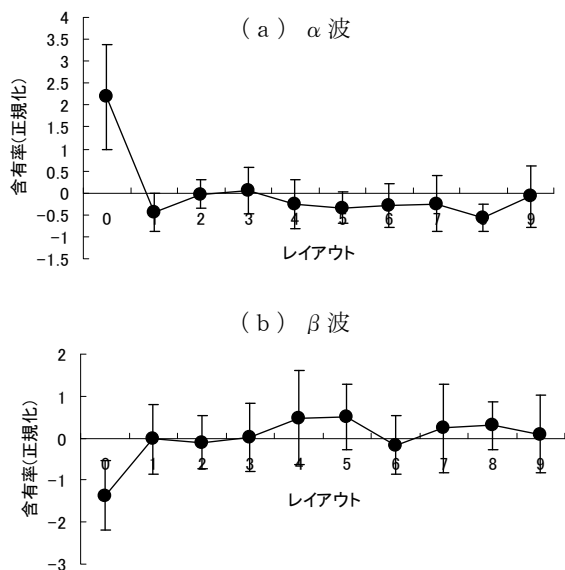


図-6 拍動間隔時系列による高速道路長時間走行の評価
AM: 四輪車 MC: 二輪車

表-1 実験に用いた情報提示画面のデザイン一覧

情報配置	文字種	文字点滅	背景色	映像枠
0 安静				
1 下中央	レギュラ	なし	グレー	
2 上右	レギュラ	なし	グレー	
3 下中央	レギュラ	なし	グレー	フルスクリーン
4 下中央	レギュラ	なし	ピンク	
5 下中央	レギュラ	なし	ブルー	
6 下中央	レギュラ	なし	ブルー	ドロップシャドウ
7 下中央	ボールド	なし	グレー	
8 下中央	ライト	なし	グレー	
9 下中央	レギュラ	有り	グレー	



図一七 画面デザインの変化に対する
(a) α 波, (b) β 波 の含有率の変動

情報提示部分の背景色がピンク，5はブルー，7は情報を表示している文字がボールド（太字），8はライト（細字）であり，いずれもデザインの詳細と考えた背景グレー，文字レギュラーからの変化が加えられたものであり，デザイン上の背景色や文字のウェイトの変化に対して注意集中の度合いを高めたと考えられる。

5. まとめ

2006年4月に経済産業省から発表された，人間生活技術戦略で策定された4つの将来ゴールのひとつに，安全・快適なモビリティの実現がある。ゴール達成のために，2005年から2030年までの研究開発ロードマップに記載されている生理計測に関連する項目は，運転時の身体活動，身体機能，認知力，注意集中低下，疲労，運転に伴う快適性について生理指標を簡便な方法で測定することにより実時間・連続的に評価するための技術開発，加齢に伴う身体機能や認知力の変化，高齢者にとって快適な運転環境を生理指標から評価するための技術開発，身体機能や認知力を維持，もしくは，向上させるようなモビリティ開発のための製品評価や付加機能への生理計測技術の応用などである。従って，今後，人の身体機能，生体状態，認知力などを簡便に測定する技術の開発，人にとって安全・快適が満足されているかどうかを生理計測に

より評価するための技術の開発が益々重要になると考えられる。

ここでは，生理計測の中でも，無拘束・無負担で測定できる生体信号の例を概説し，さらに生理計測による，車室内装備デザインの評価，長時間運転による疲労評価，情報提示画面デザインの評価の実験例を述べることにより，安全・快適なモビリティ実現に向けての生理計測技術の貢献の可能性とさらなる技術開発の必要性を述べた。

参考文献

- 1) 経済産業省：経済産業省技術戦略2006の概要
<http://www.meti.go.jp/press/20060131006/gijyutsusenryaku-kosshi-set.pdf>
- 2) 北島 洋樹：自動車運転時の眠気発生の特徴とその検出手法--居眠り運転の予防にむけて，ワークサイエンスレポート，通号1531・1532，pp. 1-23 (1998)
- 3) 中野倫明，樋口和則，山本 新：画像処理を用いた高齢者の視覚特性の擬似体験システム，テレビジョン学会誌，Vol.50, No.10，pp. 1489-1495 (1996)
- 4) 森若誠，村田厚生：高齢者の潜在記憶特性に関する基礎的研究，人間工学，Vol.42, No.2，pp. 144-149 (2006)
- 5) 石丸園子：心理状態と生理計測値との対応関係の検討，および触刺激が心理・生理反応に及ぼす影響に関する研究（特集 快適性・健康を考える），繊維製品消費科学，Vol.47, No.12，pp. 772-784 (2006)
- 6) 産業技術総合研究所人間福祉医工学研究部門編：生理計測，人間計測ハンドブック，pp.62-159，朝倉書店 (2003)
- 7) 山本隆：生理指標の分析・評価，人間工学ハンドブック，伊藤謙治，桑野園子，小松原明哲編，pp.356-364，朝倉書店 (2003)
- 8) Task force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology：Heart rate variability, standards of measurement, physiological interpretation and clinical use, Circulation, Vol.93, No.5, pp.1043-1065 (1996)