

## 第2章 文献研究

### 第1節 自覚的運動強度に関する研究

医療、スポーツ、教育などの現場でRPEなどの感覚尺度を応用する場合、知覚された運動強度をいかに適切に尺度化することができるかによって、本研究における検討課題の妥当性は大きく左右されるといえる。そこで本節では、これまでに作成されたいくつかの感覚尺度について概説した上で、従来までの研究成果を基にBorgの提案したRPEモデルの妥当性について言及することとした。

#### 1. 感覚尺度の作成過程とその応用例

##### (1) 感覚尺度の作成過程

Borg (1962) は、外部から与えられた身体への刺激に対するヒトの感覚反応を簡易に表現するための精神物理学的範囲モデル (psychophysical range model) (Figure 2.1.1) を提案し、このモデル (仮説) に基づいて、個人ごとに異なる感覚反応を一様に測定しうるカテゴリ尺度を作成しようと試みた。また、Borgはこの範囲モデルについて、運動中の相対的な代謝の変化量と負荷刺激に対する反応 (知覚) 量とが合致するためには、ある概念的枠組みの統一が必要であると述べている。その概念的枠組みを統一する一般原理とは次に示すものである。

(a) 運動中のあらゆる外部刺激 (例えば、安静時から最大運動時までの物理的強度) に対応した、同等の知覚反応の範囲が存在する。

(b) 医学的にみて正常な者では、運動による負荷刺激の下限値と上限値のいずれにおいても、末梢から送られてきた刺激信号とそれを受けた知覚の範囲は等しく対応する。

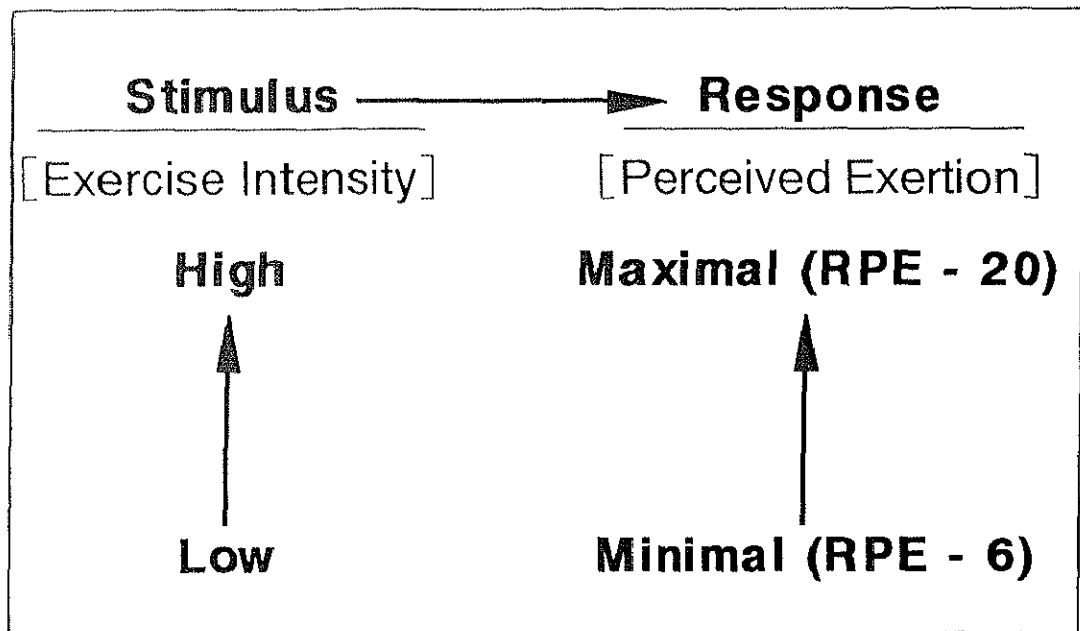


Figure 2.1.1  
Borg's psychophysical range model, depicting the equality between exercise stimulus and perceptual response continua.

このような仮説に基づくカテゴリ尺度では、物理的強度（外部刺激）がもつとも低いところから最大値まで増加する場合、知覚される強度は、“強度なし”から“最大強度”を示すことになる。このような理論的背景を応用すれば、仮に、 $\dot{V}O_{2max}$ の絶対値の異なる二人の被検者がいる場合、 $\dot{V}O_{2max}$ の優れる者が自覚的に50%の強度と感じる運動中の $\dot{V}O_2$ は、 $\dot{V}O_{2max}$ の劣る者より高くなるのは当然である。一方、知覚に基づいて50%に相当する強度を遂行できるという事実は、知覚を利用すれば、 $\dot{V}O_{2max}$ の異なる個人間においても相対的な運動強度の比較が可能となることを示唆するものといえる。すなわち、精神物理学的範囲モデルとは、感覚尺度における上限値および下限値に関する概念を説明したものと捉えることができる。この概念の中に刺激（物理的強度）と反応（知覚）の間にある正の相関関係を組み込むことで、ヒトへの適用を可能としている。個人の知覚の範囲は、外部刺激の範囲または物理的強度の上限値と下限値に規定され、連続体としての知覚反応の最高値、最低値の差と同値であるとみなされる。

つまり、個人の知覚は、外部からの刺激（強度）と同等の範囲を有するといえる。このような範囲モデルに基づいて作成されたカテゴリ尺度は、その概念や方法論に関して適切な指示や説明が与えられさえすれば、生理学的かつ心理学的にみて異なる属性に分類される集団を対象とした場合でも、相対的な知覚強度の範囲を両者間で対応させることが可能であるといえる。

Borgは1962年においてすでに、上述したカテゴリ尺度の概念を利用した精神物理学の範囲モデルの有用性を述べている。しかし、この範囲モデルが学会などで容易に認められることはなく、後に、彼の作成した21段階および15段階カテゴリ尺度の生理学的妥当性が証明されるに及んでようやく日の目をみるに至った。その後、Borgの範囲モデルを支持する多くの研究者たちによって数々のカテゴリ尺度が作成され、同時に生理学的側面からも理論的に強化されていった。

## （2）感覚尺度の応用例

現在では、医療場面、研究場面のいずれにおいても運動強度を評価する場合、カテゴリ尺度が頻繁に用いられている。精神物理学的な立場からみると、カテゴリ尺度とは、等間隔に分割された感覚反応の連続体から構成されるといえる。したがって、これらの尺度は有限個のカテゴリに分類されている。2、3通りに分類されたカテゴリ尺度から21通りの分類によるカテゴリ尺度まで数種類の尺度が存在するが、これらはすべて言語記述子（verbal descriptor）と呼ばれる形容詞に直接対応している。各カテゴリ間の距離は知覚反応の間隔と同程度になるように設定されている。

運動強度を評価するためのカテゴリ尺度として、従来より研究、医療、教育などの場面で頻繁に利用されてきたものは、次の（a）から（c）に示すようなものであろう。

（a）Borgの21段階尺度，1962年

（b）Borgの15段階尺度（いわゆる本博士論文におけるRPE尺度），1962年

(c) Pittsburgh (ピッツバーグ) 大学9段階尺度, 1969年

(d) Fleishmanの7段階尺度(職業従事度自覚指数), 1979年

(e) Borgのカテゴリ比例尺度(CR-10), 1980年

これら5つの中でも特に, RPE尺度, CR-10, ピッツバーグ尺度は‘perceived exertion’に関する研究でしばしば引用されている。これら3つの尺度の数値とそれぞれに対応する言語記述子をFigure 2.1.2に示した。

陸上での自転車運動やトレッドミル運動, さらには浸水時のクランキングおよびペダリング運動中のHRや $\dot{V}O_2$ と3つの尺度との間には有意な相関関係があることから, 3尺度の妥当性が証明されている。物理的強度を徐々に上げていく漸増負荷運動中およびランダム負荷運動中の両プロトコールで, 実験的にカテゴリ尺度の妥当性が確かめられている。再テスト法(test-retest)によって再現性(相関関係)を検討したところ, 短時間, 長時間, 間欠的運動のいずれでも有意な相関関係( $r = 0.56-0.94$ )が報告されている。また, 再現性をみるためのtest-retestによる信頼性係数は $r = 0.78-0.91$ であった。以上のことから, RPE尺度, ピッツバーグ尺度, CR-10は, 運動中に知覚される強度を評価する上で, 妥当かつ信頼性のある精神物理学的評価指標であることが示唆された(Borg, 1961; Borg, 1971; Borg, 1973; Borg, 1982; Robertson et al., 1996; Robertson et al., 1979; Skinner et al., 1973; Stamford et al., 1976)。

これまでに開発されたカテゴリ尺度は, 運動の種類, 測定内容, 目的などに応じて使い分ける必要がある。とくに, RPE尺度およびピッツバーグ尺度については, 自転車およびトレッドミル運動中の次のような条件設定での利用が推奨される。

(a) 負荷強度が徐々に増加すること

(b) 実験的に得られた心理的反応が物理的強度と直線的な対応関係にあること

(a) Fifteen category scale to rate perceptions of exertion (RPE)		(b) Category-ratio scale of perceived exertion (CR-10)	
6	No exertion at all	0	Nothing at all
7	Extremely light	0.5	Very, very weak (just noticeable)
8		1	Very weak
9	Very light	2	Weak (light)
10		3	Moderate
11	Light	4	Somewhat strong
12		5	Strong (heavy)
13	Somewhat hard	6	
14		7	Very strong
15	Hard (heavy)	8	
16		9	
17	Very hard	10	Very very strong (almost max)
18		●	Maximal
19	Extremely hard		
20	Maximal exertion		

(c) Pittsburgh perceived exertion scale	
1	
2	Not at all stressful
3	
4	
5	
6	
7	
8	Very, very stressful
9	

Figure 2.1.2  
Perceived exertion category scales: (a) fifteen-category Borg scale to rate perceptions of exertion (RPE); (b) category-ratio scale of perceived exertion; (c) nine-category Pittsburgh scale of perceived exertion.

(c) 運動耐用能の評価や運動強度の処方を目的とすること

また、CR-10については次のような場面で使用すべきとされている。

(a) 知覚反応と生理学的指標の関係が指数曲線上に乗っていること

(b) 負荷強度の増加に伴って指数関数的に変化する生理学的指標は、知覚反応とどのような関係にあるかを検討する研究場面。

## 2. 自覚的運動強度と生理学的指標との対応関係に関する研究

運動中、外部刺激に対する生理学的反応を各組織で知覚し、中枢で認識する場合、ヒトは即座に身体全体のRPEをイメージできるわけではない。最終的に身体全体のRPEをアウトプットするまでに、知覚信号を媒介する身体の部位として少なくとも、呼吸代謝系 (respiratory-metabolic mediator)、末端部分 (peripheral mediator) および特定できない身体内の部位 (nonspecific mediator) などが挙げられる (Robertson and Noble, 1997)。知覚強度の生理学的情報伝達部位を分類する場合、従来まで使われていた「局所 (local)」や「中枢 (central)」という用語は、最近では末端部 (peripheral)・呼吸代謝系 (respiratory-metabolic) という学術用語に置き換えられることも少なくない。ただし、本研究では、よりの確にその部位を表しうるとの判断から、呼吸代謝系は「胸部 (chest)」, 末端部は「脚部 (legs)」および「四肢」を併用して表記することで統一を図った。

### (1) 胸部に由来する知覚信号

胸部の知覚信号は、換気量 ( $\dot{V}E$ ) の亢進、酸素消費量 ( $\dot{V}O_2$ )、二酸化炭素排出量 ( $\dot{V}CO_2$ )、心拍数 (HR)、血圧などの変動によって引き起こされると言われている (Jones, 1984; Mihevic et al., 1981; Pandolf, 1983; Pandolf, 1984; Robertson et al., 1979)。以下に、各々に関する研究成果を記した。

(a) 換気量

$\dot{V}E$ や呼吸数 (respiratory frequency: Rf) に基づいて単回帰分析または重回帰分析を施すことで、運動中のRPEをある程度の精度で推定することが可能である。RPEと $\dot{V}E$ およびRfとの間の相関係数は  $r = 0.61-0.94$ の範囲にあるとの報告がなされている (Borg, 1976; Edwards et al., 1972; Kamon et al., 1974; Noble et al., 1973; Pandolf et al., 1972; Sargeant et al., 1973; Skinner et al., 1969; Smutok et al., 1980; Toner et al., 1986)。特に、軽い喘息症状を呈する女性にとって、息を切らすことはRPEを評価する上で重要な独立した推定因子であることが明らかにされている (Yorio et al., 1992)。常温または高温環境下において、トレッドミルもしくは自転車運動中のRPEを予測するためにステップワイズ法による重回帰モデルを仮定したとき、肺換気やRfは強い貢献度を有することが報告されている (Noble et al., 1973; Sargeant et al., 1973)。

$\dot{V}E$ の変化とともにRPEがどのように変動するかに関しては、これまでに数多くの実験室的研究がなされ、 $\dot{V}E$ は胸部に由来する知覚信号の強力な生理学的指標になりうるとのコンセンサスが得られつつある。RPEの変動を観察すれば、催眠状態 (Morgan et al., 1976)、低濃度酸素状態 (Mresh et al., 1993; Robertson, 1982)、高濃度酸素状態 (Pederson et al., 1977)、自転車の回転数 (Robertson et al., 1979)、運動様式 (Franklin et al., 1983) など様々な条件下で得られる換気応答の変容を推測することができる。すなわち、実験的に換気量を増減すれば、それに応じてRPEにも変動 (増減) が見られることを意味している。

Robertson et al. (1986) は、運動中に生じる代謝性アシドーシスに対する緩衝作用の結果として生じる換気ドライブを抑えるために、炭酸水素ナトリウムイオン ( $\text{NaHCO}_3^-$ ) を摂取させる実験をおこなった。この研究は、換気ドライブにより高められた知覚信号は、血液中のpHがアルカリ性へ移動することで弱められるであろうとの仮説に基づくものであった。 $\dot{V}O_{2peak}$ の80%に相当する運

動強度において対照条件下と比較した場合、 $\dot{V}E$ や胸部のRPEはアルカリ性下で有意に低下した。 $\dot{V}O_{2peak}$ の20~60%の比較的低い運動強度では、代謝性アシドーシスが緩衝されやすいことから、 $\dot{V}E$ や胸部のRPEに有意な変動はみられなかった。

自転車エルゴメータの回転数を変化させたり、血液中のpHを変えるなど実験的に外的条件を変動させる中で、Rfや一回換気量(TV)の変動を観察することで、物理的強度などの外部刺激の変化に応じた知覚信号を伝えるRfやTVの働きが明らかにされてきた。RPEはRfの増減にともなって直接変動するのに対し、TVは外的条件の変化にあまり影響を受けない(Robertson et al., 1979; Robertson et al., 1979)ことが報告されている。運動中にRfがRPEに対応して変動することは、Rfが胸部由来の知覚信号を媒介する生理学的指標の1つになりうることを示唆している(Robertson, 1982)。

#### (b) ガス交換

呼気ガス中に含まれる大部分の気体は、組織における代謝過程で必要とされる $\dot{V}O_2$ および組織より排出された二酸化炭素( $\dot{V}CO_2$ )である。肺においてこれら2種類のガス交換率を決定する因子は、胸部の知覚信号を媒介する重要な生理学的指標となりうるであろう。

腕と脚を使って間欠的運動または持続的運動をおこなった場合、 $\dot{V}O_2$ とRPEとの間の相関係数は $r = 0.76-0.97$ の範囲にあることが報告されている(Edwards et al., 1972; Goslin et al., 1986; Saegcant et al., 1973; Sargcant et al., 1977; Smutok et al., 1980; Toner et al., 1986)。しかし、胸部の知覚信号とより強い相関関係を有するのは、 $\dot{V}O_2$ の絶対値ではなく、むしろ相対値(percent  $\dot{V}O_{2max}$ ; % $\dot{V}O_{2max}$ )である(Berry et al., 1989; Pandolf et al., 1984; Robertson et al., 1986; Sargcant et al., 1973)。Robertson et al. (1986)は、一定の $\dot{V}O_2$ で固定された運動を実施した場合、低濃度酸素条件下に比べて標準的な濃度の酸素を吸っている時の方がRPE



は低かったことを報告している。一時的な低酸素濃度条件下では $\dot{V}O_{2max}$ は一般に低下することが知られている。ゆえに、一定の $\dot{V}O_2$ を比較した場合、低濃度酸素（高所）条件下よりも標準酸素濃度条件下における方が $\% \dot{V}O_{2max}$ は低くなるであろう。このようなことから、知覚反応は $\% \dot{V}O_{2max}$ によって規定されている可能性が示唆された。現在では、一定の $\% \dot{V}O_{2max}$ に対応するRPEは標準・低濃度酸素濃度条件のいずれにおいても同値であることが明らかにされている。

一方、いくつかの研究では、RPEと $\% \dot{V}O_{2max}$ の間には有意な相関関係が見いだされなかったとの報告もなされている。これらの研究の中で注目に値するのは、暑さや寒さによるストレスを与えた状態で知覚反応が測定されたことであろう（Pivarnik et al., 1986; Toner et al., 1986）。環境温度の変化に伴って体温が変化すれば、RPEと $\% \dot{V}O_{2max}$ の関係が歪んでしまう可能性のあることが初めて示唆されたといえる。

Cafarelli and Noble (1976) およびRobertson et al. (1986) は、運動中のRPEと $\dot{V}CO_2$ との間に有意な相関関係が存在することを報告した。これらの研究では、高い $\% \dot{V}O_{2max}$ に基づく運動では、 $\dot{V}CO_2$ の増加に伴って生じる換気の亢進が胸部のRPEスコアを決定すると結論づけている。

#### (c) 心臓および血管系反応

胸部の知覚信号を媒介するという観点から、HRの役割に関しては、研究者間でコンセンサスが得られているとは言い難い。HRはRPEを規定しようとの立場に立つ研究者が示す最大の証拠は、現在のところ、両者間に有意な相関関係が認められたという事実にはすぎない。RPEが開発された当初の研究において、漸増負荷法を用いた自転車エルゴメータ運動中のHRとRPEの間には強い相関係数  $r = 0.85$  が認められた。自転車エルゴメータのみに留まらず、他の運動様式を利用した場合でも、HRとRPEの相関係数は  $r = 0.42-0.94$  (Borg, 1973; Edwards et al., 1972; Eston et al., 1986; Gamberale, 1972; Goslin et al., 1986;

Lollgen et al., 1977; Sargeant et al., 1973; Skinner et al., 1973; Toner et al., 1986) であったことが報告されている。しかし、相関係数の値だけでは、HRがRPEを十分に説明しうるとの因果関係を示すものではないと考えられている。HRとRPEの対応関係に疑問を呈する研究者は、これまでに大量の実験的証拠を提出している。Robertson (1986) やPandolf (1983) は、彼らの著書のなかでこれらの反証的知見をさらに詳しく述べている。ゆえに現時点では、HRが胸部由来の感覚を媒介する主要な生理学的指標になるとする結論は早急であろう。

神経生理学的な経路は未だ解明されていないが、血管壁を支配する中枢神経系が胸部の知覚反応を媒介するかもしれないと報告されている (Pandolf, 1983)。この点に関して、RPEと血圧の間には有意な関係があるという研究者 (Juhani et al., 1986; Pandolf, 1986) と両者間に関係はみられないという研究者 (Perkins et al., 1991; Squires et al., 1982) に分かれ、現在のところ決着を見ていない。

## (2) 四肢, 胴, 上半身などに由来する知覚信号

身体の末端部分における活動筋から発せられた知覚信号は、四肢, 胴, 上半身などにおける生理学的指標と強い対応関係にあると考えられている。

### (a) 血液pH

血液の酸性化が活動筋のRPEを規定すると考える研究者がいる (Kostka et al., 1982; Roberson et al., 1986)。Robertson et al. (1986) は、腕クランキング運動と脚ペダリング運動を別々に実施し、それぞれの運動中に炭酸水素ナトリウムや炭酸カルシウム (対照薬も含む) を経口投与することで血液のpHを操作する実験をおこなった。80% $\dot{V}O_{2peak}$ の強度で腕クランキング運動をおこなった場合、酸性条件下よりアルカリ性条件下のほうが、腕のRPEは低かった。また、腕のRPEは、脚ペダリングによる運動中の血液pH変動には影響を受けないことが明らかとなった。脚ペダリング運動中のRPEも、アルカリ性条件下における

方が酸性下より低い値を示し、腕クランキングによる結果と大きな違いはみられなかった。このようなことから、 $80\% \dot{V}O_{2peak}$ のような高い強度における血液pHの酸性化状態は、活動筋部位から発せられた知覚反応と強い対応関係にあることがわかった。RPEの大小と血液pHの関係は、トレッドミルによる最大運動からの回復過程においても証明されている (Robertson et al., 1992)。

#### (b) 血中乳酸濃度

RPEが血中乳酸濃度の変化に対応して変化するか否かを検証するために、数多くの研究がなされてきた。現時点では、血中乳酸濃度の上昇に伴う代謝性アシドーシスの程度によって末端部分のRPEを規定できるという仮説を支持する研究者と、異議を唱える研究者の両方が見受けられる。精神物理学的側面からみた研究では、血中乳酸濃度はRPEと対応して変動しないことが証明されている (Allen et al. 1977; Allen et al., 1985; Bergh et al., 1986; Essig et al., 1980; Eston et al., 1986; Lollgen et al., 1980; Moffatt et al., 1978; Perderson et al., 1977; Robertson et al., 1992; Sargeant et al., 1973; Skrinar et al., 1983; Stamford et al., 1974; Young et al., 1992)。一方で、RPEを規定しうる生理学的指標として血中乳酸濃度を支持する実験的証拠もいくつか見受けられる (Borg et al., 1987; Borg et al., 1985; DeMello et al., 1987; Edwards et al., 1972; Ekblom et al., 1971; Gamberale, 1972; Horstman et al., 1979; Noble et al., 1983)。Noble et al. (1983) は、漸増負荷法を用いた自転車運動中の血中乳酸濃度と脚部のRPEとの関係が指数関数上に乗ることを見いだした。血中乳酸濃度と脚部のRPEの関係を示す2次関数方程式の累乗数を1.65から2.2の間に決めることで理論的に近似させることが可能であり、この2つの心理的および生理的変数の間には有意な相関関係の存在することが示唆された。血中乳酸濃度と脚部のRPEの関係は、Borg et al. (1985) によっても同様に報告されている。また、同一の血中乳酸濃度で比較した場合、腕運動と脚運動、自転車とトレッドミル、トレーニングの前と後、負荷漸増運動と負

荷一定運動の間でRPEに違いは観察されなかったとの報告もなされている (Ekblom et al., 1971; Stoudemire et al., 1996) .

以上をまとめると、否定的意見を無視することはできないものの、血中乳酸濃度は多段階漸増負荷法を用いたテスト中の物理的強度に対応しており、さらに末端部分のRPEとも強い対応関係にあることが明らかになった。すなわち、RPEと血中乳酸濃度は両者ともに相対的強度を反映する指標であり、精神生理学的反応の特異的なケースとして、運動強度を処方する上で普遍的に利用が可能と考えられる (Borg et al., 1987; Borg et al., 1985; Noble et al., 1983) .

#### (c) 筋中乳酸濃度

筋中乳酸濃度と四肢のRPEとの間に有意な関係を見いだした実証研究は限られており、コンセンサスも得られていない。Lollgen et al. (1980) は一定負荷での自転車運動中、ペダル回転数と筋中乳酸濃度は互いに独立したものであることを報告した。ところが、RPEはペダル回転数をx軸とした場合、2次曲線(放物線)様にプロットされる(RPEが最小値をとるのは60~80 rpmのとき)ことが知られている。Noble et al. (1983) は脚部のRPEと筋中乳酸濃度は、自転車による漸増負荷運動中、指数関数的に増加することを報告した。しかし、現在のところこれを支持する証拠は極めて限られているため、筋中乳酸濃度をRPEの指標とするには今後のさらなる検討が必要である。

#### (d) 四肢におけるさまざまな生理学的指標

四肢の感覚情報は、いくつかの特定の生理学的指標によって伝達されるとする意見がある。自転車運動をおこなう場合、大腿部の全筋繊維断面積に対して速筋線維面積の占める割合が大きいほどRPEは高くなる (Ljunggren et al., 1987; Noble et al., 1983) という報告や、変わらない (Lollgen et al., 1980) とする報告がある。また、等尺性や等張性の筋収縮が生じることで、エネルギー源を含んだ血流が遮断され、RPEは上昇するとも言われている (Cain et al., 1973; Stevens

et al., 1977) . 長時間運動中の中盤から後半にかけて血液内グルコース濃度が低下することで疲労が生起し、四肢の筋における疲労感覚を増強する (Burgess et al., 1991; Coggan et al., 1987; Coyle et al., 1986; Miyashita et al., 1986; Nieman et al., 1987; Robertson et al., 1990) との報告があるが、その一方で、長時間運動における脚部のRPEは血中グルコース濃度の変化と無関係であるとする報告もある (Felig et al., 1982; Foster et al., 1979; Ivy et al., 1979; Okano et al., 1988) . いずれにせよ、長時間運動中の血液に含まれる遊離脂肪酸やグリセロール濃度が疲労感覚を媒介する生理学的指標となりうるか否かに関して、その証拠となる決定的な成果はこれまでに一度も報告されていない (Casal et al., 1985; Costill et al., 1978; Ivy et al., 1979; Trice et al., 1995) .

### (3) 身体内の特定の部位に固定されることのない指標

RPEを規定する現象の中で、身体内の特定の部位に限定されない指標としてホルモン分泌機構、体温調節機構、痛みに対する反応過程などが考えられている。

#### (a) カテコラミンと $\beta$ -エンドルフィン

これまでにホルモンがRPEの知覚物質になりうると考えられており、特に血中カテコラミン (CAT) 濃度によってRPEを規定しようとの報告がなされている。しかし、研究者間で意見は一致していない。多段階漸増負荷法でのトレッドミル運動中、RPEはノルエピネフリン ( $r=0.63$ ) やエピネフリン ( $r=0.54$ ) と正の相関を有した (Skrinar et al., 1983) . さらに、RPEとvanillylmandelic (尿中のCAT含有指標) は5週間のトレーニングで一定の負荷に応答する量が低下した。これらの知見は、CAT含有量が血中乳酸濃度の急上昇点、すなわち $50-70\% \dot{V}O_{2max}$ を超えたあたりでRPEは厳密に規定されうることを示唆するものと捉えることができよう (Carton et al., 1985; Frankenhacuser et al., 1969) . 一方

で、炭水化物摂取 (Felig et al., 1982) , および運動様式の相違によってホルモンの分泌量が操作された場合 (Coast et al., 1986; Horstman et al., 1979) , CAT水準はRPEと独立な関係にあったとする報告もなされている。

高強度での運動中、 $\beta$ -エンドルフィンの分泌はモルヒネのような鎮痛効果をもたらすと考えられている。それゆえ、四肢の筋の痛みや不快感に基づく疲労感覚に影響を与える可能性が考えられる。Farrell et al. (1982) は、血中 $\beta$ -エンドルフィン濃度がもっとも高いとき、RPEはもっとも低いことを見いだしており、このことは二つの対応関係を示唆するものと述べている。対照的に、Droste et al. (1991) およびKraemer et al. (1993) は、全身の血管から採取した $\beta$ -エンドルフィン濃度は運動にともなって上昇するものの、RPEと相関はなかったとの報告をしている。

#### (b) 深部温と皮膚温

運動中の筋収縮に伴って代謝熱産生が進むと、深部温 ( $T_c$ ) とRPEは上昇する。しかし、 $T_c$ を規定する生理学的因子とRPEの間の因果関係を支持する証拠は、これまでの研究成果では見当たらない。 $T_c$ とRPEの間の相関係数は一貫して低く ( $r = 0.14-0.20$ ) , 統計的に有意ではないことが多い (Kamon et al., 1974; Toner et al., 1986) 。運動中に発生する熱 (Knuttgen et al., 1982; Pivarnik et al., 1986) , pHの中性状態 (Davies et al., 1979) , 寒冷環境 (Toner et al., 1986) , 腕と脚によるエルゴメトリ (Pivarnik et al., 1990; Toner et al., 1986) , 伸張性筋運動 (Knuttgen et al., 1982) , 熱順化 (Pivarnik et al., 1986) , 月経周期 (Stephenson et al., 1982) などのあらゆる場面において、 $T_c$ とRPEの対応関係は認められていない。寒暑環境への暴露におけるRPEと皮膚温 ( $T_s$ ) との関係を示す研究もなされているが、その数は限られており統一見解には至っていない。Noble et al. (1973) はステップワイズ法による重回帰分析を利用し、高温環境下では $T_s$ はRPEを説明しうる変数であることを報告した。逆に、Toner et al.

(1986) は冷水における腕と脚による運動中のTsとRPEの間に有意な相関は見いだせなかったと述べている。一般に、実験的に操作された環境温の中でなされた研究では、Tsが寒暑環境下におけるRPEの情報を媒介するものとして報告されていることが多い (Bergh et al., 1986; Knuttgen et al., 1982; Maw et al., 1993; Noble et al., 1973; Pivarnik et al., 1988; Pivarnik et al., 1986)。

熱に対する感覚は皮膚温 ( $r = 0.73$ ) や環境温 ( $r = 0.72$ ) と関連がみられるものの、代謝量、筋温、直腸温とは独立な関係にある (Gagge et al., 1969; Kamon et al., 1974; Pandolf et al., 1972; Toner et al., 1986)。高温環境下での運動中、Tsから発せられた感覚情報をRPEに変換する際に、熱に対する感覚は触媒のような働きをすることがある。一方、Toner et al. (1986) は、冷水中では、熱感覚とRPEの間に相関関係は見いだせなかったとしている。熱に対する快適性は、皮膚の汗 ( $r = 0.66$ )、伝導性 (例えば、血流など、 $r = 0.56$ ) との関係が報告されているが、代謝量、筋温、Ts、Tc、環境温とは独立の関係にあると言われている (Gagge et al., 1969; Kamon et al., 1974; Marcus et al., 1979)。汗の生成や皮膚血管拡張 (皮膚が赤みがかかる) の開始時期は、熱に対するストレスを測る上で不快感の指標となる。熱に対して快適または不快と感じる感覚の境界線は、このような指標を反映する可能性が示唆されている (Robertson et al., 1997)。

### (c) 痛みに対する反応

Borg et al. (1985) は、RPEと脚部における痛みの感覚は強い相関 ( $r = 0.91$ ) を有することを報告している。運動中に生じる痛みの生理学的原因は、局所筋内の虚血であると言われている (Coldwell et al., 1966)。一方で、Borg et al. (1985) は、痛みの原因物質は血中乳酸濃度の上昇であることを提唱してきたが、Ljunggren et al. (1987) によって否定されており、見解の分かれるところである。

### 3. 自覚的運動強度に影響を及ぼす要因に関する研究

医療・スポーツの両場面において、RPEに影響を及ぼす要因として環境条件や個人の性格・特性などが考えられている (Morgan, 1994; Robertson et al., 1997) .

#### (1) 環境的要因

一般に、運動時間が当初の予定よりも長くなることが予想されたり、期待していたほどのパフォーマンスが得られないと感じられると、疲労に基づく知覚信号は増強されやすくなる (Rejeski et al., 1980; Zohar et al., 1981) . 社会的に受け入れられたい、または聴衆に自己を表現したいなどの欲求は、競技中に感じ取られる疲労の知覚に対して相乗的に作用するといわれている (Hardy et al., 1986; Rejeski et al., 1984) . 高い自己効力感 (self-efficacy) を有する者は、他人に対して自己の存在を印象づけたいとする欲望が働き、自己効力感が低い者に比べて疲労の知覚量は一般に小さくなる傾向にある (Boutcher et al., 1988) . さらに、検者の性 (男女) によってもRPEは影響される。Boutcher et al. (1988) は、高い $\dot{V}O_{2max}$ での運動中、検者が女性であると、男性のRPEは大きくなることを報告している。このような社会心理学的影響は、低強度から中等度の強度においてもっとも顕著に現れる。さらに、高強度の運動では、心理的影響を上回る強い生理的反応が作用しているために、心理的影響力は縮小されると報告している。

運動中、身体内部に生じる心肺系の生理的変化 (ストレスの増大) に対して注意を向けずに外的環境へ注意を逸らしたり、または外的環境から何らかの (心理的・視覚的・聴覚的) 刺激が加えられたりした場合、疲労の知覚量は減弱させられる可能性があるとの報告がFilligin and Fine (1986) によってなされている。Johnson and Siegel (1987) やBoutcher and Trenske (1990) による研究で



も、外部状況へ注意をそらすことで、身体内部に生じる総合的な症状を減衰させることが可能であるとの仮説を支持している。一方、外部の環境的な要因によって、疲労の知覚量は減衰されるものではないとの意見も多く見受けられる。高いレベルでトレーニングされた被検者が研究者の前で運動するような場合（Sylva et al., 1990）、トレーニングしていない被検者が研究者の前で高強度の運動をする場合（Hardy et al., 1986）、さらに、身体内部感覚への注意の集中を逸らすためにスライド写真などが用いられた場合（Fillingin and Fine, 1986）などでも疲労の知覚量、すなわち、RPEは変化しないとの報告がなされている。一方、音楽をかけることでも最大下の同一強度におけるRPEは変化しなかった（Copeland et al., 1991; Johnson et al., 1987）が、最大運動時のRPEは低下したとの報告がなされている。このことは、音楽は運動実施者の感情面に影響を与えることで外部刺激から注意を逸らしたというより、むしろ疲労の知覚そのものに影響したことを示唆するものであろう（Boutcher et al., 1990）。

## （2）性格的要因

運動中の疲労の知覚に対して影響を及ぼすと考えられる性格的要因は、感覚の増強傾向または減弱傾向、統制の位置、性役割の類型、認知スタイル、自己効力感そしてType A 的性格である（Robertson et al., 1997）。

Robertson et al. (1977) は、運動感覚に関するテストによって、「感覚を増強させる傾向あり」と分類された者は、「感覚を減弱させる傾向あり」と分類された者より自転車運動中のRPEが高かったことを観察した。このような事実に対する妥当性の検証は、未だ曖昧な部分も残されているが、統制の位置が外部にある者は、内部にある者に比べてRPEは高くなると考えられている（Kohl et al., 1988）。例えば、女性的役割の強い女性や女性的役割の強い男性は、男性的役割または両性具有性の男女より、RPEは高くなる（Hochstetler et al., 1985; Robertson et al., 1997）。また、自己効力感が高ければ高い者ほど、短時間の自

転車運動中のRPEは低くなる傾向にある (McCauley et al., 1992) .

Morgan (1973) は、アイゼンクのパーソナリティ調査票 (personality inventory) に基づき大学生外向的性格内向的性格に分類したところ、外向的性格はRPEと密接な関係にあることを見いだした。外向的な性格の持ち主は、身体の痛みや不快感を抑圧し、例えば、外向性が強ければ強いほど、RPEは低下すると述べている。しかし、後にWilliams and Eston (1986) によってこの意見は否定されている。

Morgan and Pollock (1977) は、リクリエーションとしてジョギングをおこなうジョガーとエリートマラソンランナーとを識別するために有効な、2つの異なる認知的方略を明らかにした。マラソンランナーは、トレーニングや競技会の時、身体内部的感覚に注意を払う「連想方略 (association strategy)」がなされているのに対して、ジョガーでは、注意を外部にそらすことで身体内部から生じる疲労信号を減弱させるという「非連想方略」が作用していることが明らかにされた。この概念をさらに拡張したSchmer (1986) は、トレーニング期間中、多くの経験を有するマラソンランナーと経験の少ないマラソンランナーの間でRPEの比較がなされた。すると、連想方略とトレーニング中のRPEの間には強い正の相関関係が見られたとしている。

Type A 的行動傾向の強い者の特徴は、時間を重視し、運転が荒く、敵意をむき出しにすることが多い (Robertson et al., 1997) といわれている。Carver et al.

(1976) は、運動中の疲労度はType B 的性格の被検者よりType A 的性格の被検者の方が低いことを観察している。Type A 的性格とRPEとの関係についてはこの他に、3つの研究の中で言及されている (DeMeersman, 1988; Dishman et al., 1991; Rejeski et al., 1983) 。これらの結果からは、Type A 的性格とRPEを関連づけるものは見いだせなかったとしている。このような結論の違いは、用いられた運動プロトコール、A型性格の判定方法、あるいはRPEの測定方法の違い

いに起因するものであろう。

#### 4. 自覚的運動強度と無酸素性代謝閾値の関係に関する研究

これまで数多くの研究者によってRPEとAT (LT) の関係が検討されてきている。以下にその典型的な研究を示し、RPEとAT水準の関係を明らかにすることで運動処方におけるRPEの有用性を示すことが本稿の目的である。

##### (1) 無酸素性代謝閾値の生理学的意義

ランブ負荷または漸増負荷運動中の血中乳酸濃度や換気量の屈曲点は、生理的マーカーとして認められており、これらを利用することで、知覚に基づいた強度の処方が可能と考えられる (Haskvitz et al., 1992; Seip et al., 1991; Hetzler et al., 1991)。血中乳酸濃度の屈曲点 (lactate threshold: LT) は、血中乳酸濃度が全身運動中に安静時水準 (約1.0 mmol/L) を越えて急激に上昇し始める時点の $\dot{V}O_2$ または物理的強度で表される (Brooks and Fahey, 1985; Beaver et al., 1985)。換気量の屈曲点 (ventilatory threshold: VT) についても乳酸の場合とほぼ同様で、肺換気量と酸素摂取量の直線関係が崩れ始める時点の $\dot{V}O_2$ または物理的強度で表される (Wasserman et al., 1973)。乳酸濃度または換気量の屈曲点 (anaerobic threshold: AT; 以下、表記をATに統一する) は腕のみ、脚のみ、腕と脚の両方を使った運動のいずれの場合でも、一般にそれぞれの運動で観察される $\dot{V}O_{2max}$ の50~80%の運動強度で出現する。 $O_2$ 換気当量の非直線的な上昇は、乳酸の蓄積に伴って生じる代謝性アシドーシスの緩衝作用の指標となるという点に関して、この2つの屈曲点 (LTとVT) は生理学的に相通じるところがある。しかしながら、ATが筋における無酸素的な代謝の開始を表すものか否かについては、否定的な意見が多数あることを留めておくべきであろう。

反論はあるものの、現在ではATを高い精度で測定することが可能であり、末

梢組織のトレーニング効果を判定する指標としての需要の他に、ATは全身持久性体力の適切なトレーニング範囲や競技力を示すことができる有用な指標である (Tanaka et al., 1990) . それゆえ、生理学的基準ともいえるATに対応したRPEスコアを利用すれば、トレーニングのための適切な運動強度を処方することが可能となろう (Purvis and Cureton, 1981; DeMello et al., 1987) . ATにおけるRPEは腕のみ、脚のみ、腕と脚の両方を使った運動のいずれの場合でも、RPE (15段階) 尺度で12~14の範囲にある。ATにおけるRPEは固定的であり、あらゆる年齢の男女、トレーニング経験の有無に関わらずほぼ一定であり、トレーニングを繰り返してもほとんど変動することはない (DeMello et al., 1987; Hill et al., 1987; Gutin, Ang, and Torrey, 1988; Purvis and Cureton, 1981; Burke et al., 1986) . このような事実は、運動処方において、AT水準に対応するRPEスコアを利用することの信頼性や有用性に強く貢献しているといえよう。先にも述べたように、ATにおける相対的運動強度 ( $50 \sim 80\% \dot{V}O_{2max}$ ) は全身持久性トレーニングの適正範囲に収まっている。ゆえに、これらの運動強度に対応したRPEをもとにトレーニング強度を処方することは、効率的に全身持久性体力を向上させることが可能であり、生理学的にみても妥当な方法といえる。また、トレーニングに伴って体力が向上するにつれて屈曲点も上昇し、同様にATに対応する $\dot{V}O_2$ や物理的強度なども増加する。RPEを利用したトレーニングの利点は、このような生理学的指標の変動にも関わらず、ATにおけるRPEはほとんど変化しない (RPE12~14あたりで一定) ということである (Hill et al., 1987) . ATに対応したRPE (例えば12~14あたり) でトレーニングをおこなう場合、トレーニングが進むにつれて、より大きな物理的強度が出力されるようになる。しかし、RPEそのものはトレーニング期間を通じて、常に一定の値を維持していればよいのである。

RPEを利用した運動強度の処方は、次のような手順で実施することができる。

初めに，多段階漸増負荷運動（graded exercise test: GXT）中の乳酸および換気反応によって屈曲点（LTまたはVT，すなわち本稿ではAT）を決定する．GXT中に記録されたRPEは $\dot{V}O_2$ や物理的強度に対応する指標としてすべてプロットする．ATに対応した目標となるRPE（target RPE）がこのプロットから決定される．トレーニング中は，target RPEを維持するために物理的強度を調節する．ゆえに多くの場合，トレーニング中にみられる $\% \dot{V}O_{2max}$ は，GXT中に観察されたAT水準の $\% \dot{V}O_{2max}$ （AT $\% \dot{V}O_{2max}$ ）とほぼ等しくなる．しかし，場合によっては，GXT中に観察されたAT $\% \dot{V}O_{2max}$ より高くしたり低くしたりすべきこともある．例えば，競技ランナーではATの115%あたりに相当する強度でトレーニングをおこなうことが多いようである（Gutin et al., 1988）．ATの115%に対応する $\dot{V}O_2$ がわかれば，先に述べたRPE- $\dot{V}O_2$ プロットからtarget RPEを算出することが可能である．

## (2) RPEとATの関係を示した代表的な研究成果

DeMello et al. (1987) は，長距離ランナー男女10名ずつとトレーニングをおこなっていない一般男女10名ずつの合計40名を対象に，傾斜をつけたトレッドミル走による検討をおこなった．AT水準に対応するRPEは，それぞれ13.6，13.5，13.5，12.9となり，4つのグループ間に有意な差はみられなかったとしている．AT水準に対応するRPEは，トレーニングの程度や性の影響を受けないことが示唆されたといえる．

Hetzler et al. (1991) は，運動をおこなっていない29名の男性（平均年齢31.5歳）を対象に，自転車運動とトレッドミル運動を実施させた．ATおよび血中乳酸濃度2.0 mM，2.5 mM，4.0 mMに対応するRPEスコアは，自転車で10.2，13.1，14.1，15.9，トレッドミルで10.8，13.8，14.6，16.2となり，自転車とトレッドミルの間でRPEスコアに有意な差は認められなかった．このことから，

AT水準やある一定の血中乳酸濃度に対応するRPEは運動様式に影響を受けないとの見解を述べている。

Boutcher et al. (1989) は、トレーニングの程度および運動の種類がAT水準のRPEに与える影響を検討するために、対象者を自転車によるトレーニング群、ランニングによるトレーニング群およびコントロール群に分けて研究を実施した。10週間のトレーニング期間の後、RPEの変化を比較したところ、自転車、ランニングおよびコントロール群いずれもAT水準のRPEに顕著な変化は認められず、トレーニングの程度および運動の種類はAT水準のRPEに影響を与えないことが明らかになった。

Purvis et al. (1981) は、21～37歳の男性13名、女性17名を対象者に自転車エルゴメータによる運動負荷テストを実施した。AT水準に対応するRPEスコアは、男性 $13.1 \pm 0.9$ 、女性 $14.2 \pm 0.9$ 、男女合わせた値は $13.6 \pm 1.2$ であった。この結果より、男性、女性ともにAT水準のRPEは“ややきつい”に相当するものであり、男女間の差異はほとんど見出されなかったとしている。

Allen et al. (1985) は、よくトレーニングを積んだ50～66歳のランナー8名、10 kmのロードレースでほぼ同程度の記録を持つ20歳台の一般ランナー8名（平均年齢 $25 \pm 3$ 歳）および極めて高いレベルにあるランナー8名（平均年齢 $26 \pm 3$ 歳）を対象者として、トレッドミル走行による運動負荷テストを実施した。AT水準に対応するRPEスコアは、それぞれ $13.9 \pm 1.4$ 、 $14.6 \pm 1.7$ 、 $14.1 \pm 1.2$ となり、3グループ間で有意な差は認められなかった。Allen et al. は、AT水準に対応するRPEスコアは年齢や体力水準の影響を受けないと結論づけている。

Hill et al. (1987) は、トレーニングがRPEに及ぼす影響を明らかにするために、トレーニングをおこなうグループとおこなわないグループの2群に分けて検討した。トレーニング群は、自転車によるインターバルトレーニングと自転車あるいはランニングによる40分間の持久的トレーニングを6週間実施するも

のとした。トレーニング前後の測定は自転車エルゴメータを使用し、AT水準のRPEや呼吸循環系のパラメータを測定した。AT水準の $\dot{V}O_2$ 、物理的強度、 $\% \dot{V}O_{2max}$ などは有意に増加したにもかかわらず、RPEはトレーニング前後ともに13~15で顕著な変化が認められなかった。このことからHillらは、トレーニングの程度がRPEに影響を与えるものではないことを示唆している。

Haskvitz et al. (1992) は、トレーニングの強度がAT水準のRPEに与える影響を明らかにするために、一般成人女性25名を対象者として検討をおこなった。25名のうち7名をコントロール群とし、残りの18名を9名ずつの2群に分けて、1つはAT水準の強度でトレーニングをおこない (atAT群)、残りはAT水準と最大運動時の中間の強度でおこなうこととした (aboveAT群)。トレーニング前のAT水準のRPEスコアは、コントロール群は11.3、atAT群は12.6、aboveAT群は11.8であった。トレーニング後では、それぞれ11.3、12.4、12.9となり、前後で顕著な変化は認められなかった。Haskvitz et al. はこの結果から、トレーニングの程度や強度はRPEに影響を与えないことを示唆するものであると述べている。

以上に示した研究の成果より、ATに対応したRPEスコアは、ほとんどが12~14の“ややきつい”に相当することがわかる (DeMello et al., 1987; Hill et al., 1987; Purvis et al., 1981; Doressendorfer et al., 1981; Allen et al., 1985; Hurley et al., 1984)。そして、AT水準のRPEは、運動の種類 (Hetzler et al., 1991; Boucher et al., 1989)、性 (DeMello et al., 1987; Purvis et al., 1981)、年齢 (Allen et al., 1985) およびトレーニングの程度 (DeMello et al., 1987; Hill et al., 1987) または強度 (Haskvitz et al., 1992) の影響を受けないことが明らかにされたといえよう。

## 5. 異なる部位の自覚的運動強度に関する研究

運動中の感覚部位は、解剖学的にみて四肢や肩、胸部などに分けることがで

きる (Pandolf, 1982; Pandolf et al., 1984; Robertson et al., 1979) . 身体をいくつかの部位 (四肢や肩, 胸部など) に分けた上で, 各々の部分から生じる疲労の知覚信号を階層化して検討する場合, 方法論的に次のような2つの疑問が生じるといわれている (Robertson et al., 1997) .

- (a) 知覚された部位ごとの疲労を身体全体の疲労として一つに統合する場合, 各々の知覚信号はどのような基準に基づいて統合されているのか?
- (b) 運動中に認識された知覚信号を統合する過程の中で, もっとも大きい貢献度を示すのはいずれの部位において認識された知覚信号か?

運動中の疲労知覚過程をピラミッド型で表した場合, 各部位における知覚過程は, 最下位レベルに位置すると考えられる. 身体全体の疲労の知覚は最上位レベルにあたり, 知覚信号の最終的な統合形態を表している (Figure 2.1.3) .

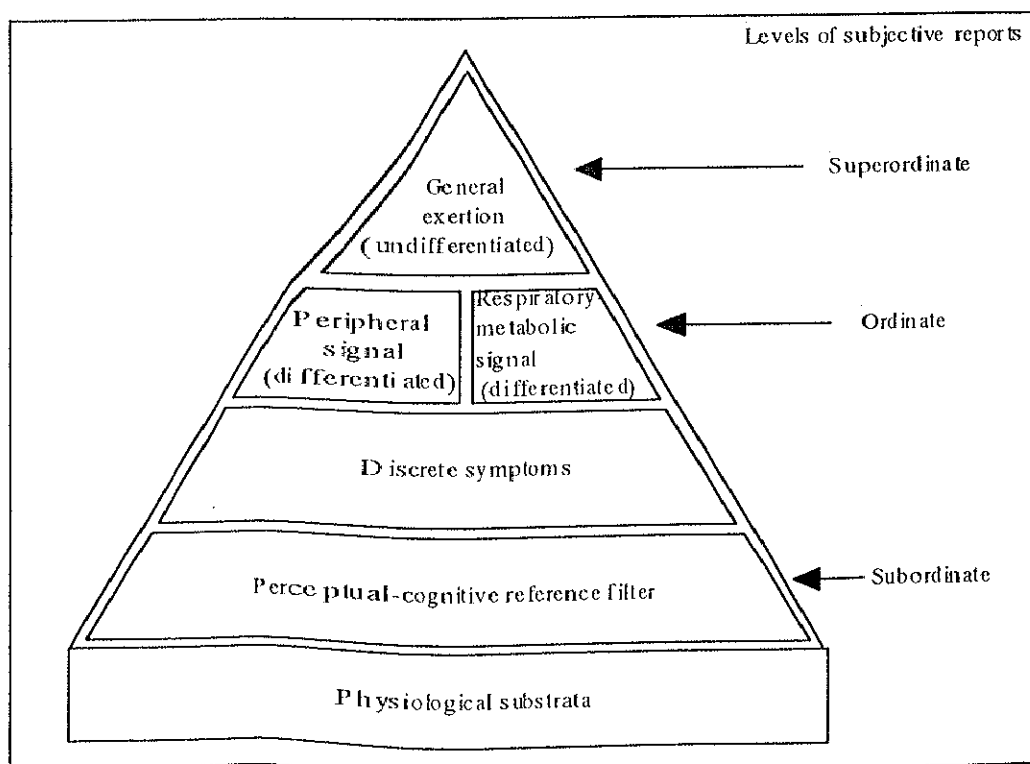


Figure 2.1.3 Revised model of sensory reporting with the perceptual-cognitive reference filter appearing at the subordinate level



Kinsman and Weiser (1976) は、このような知覚信号の流れを正確なモデルを用いて詳細に説明している。後に、Pandolf (1975) およびRobertson et al. (1997) はそのオリジナルモデルを改善して、第二、第三の知覚過程説明モデルを開発している。Robertson et al. (1997) は、身体の各部位から生じる疲労の知覚信号の統合様式は、次に示す項目に依存すると考えている。

- (a) 運動の種類
- (b) 解剖学的部位（腕，脚，肩，胸など）
- (c) 陸上または水中などの環境条件

知覚信号の統合過程または疲労知覚の貢献度の問題を検討する場合、これまでは、自転車エルゴメータによる研究が大部分を占めてきたといえる。自転車エルゴメータ運動中、脚部から発せられた知覚信号の貢献度は、胸部や身体全体から発せられた信号より大きい (Cafarelli et al., 1977; Ekblom et al., 1975; Gamberale, 1972; Pandolf et al., 1975; Robertson et al., 1979)。このことに関して Ekblom et al. (1971) は、運動中の身体全体のRPEは少なくとも2つの因子から構成されているとして、2因子モデル (two factors model) を提唱している。2因子とは、central factorとlocal factorであり、前者は主として呼吸循環器系（胸部）で感じるRPEを、後者は身体の末梢部分（四肢）で感じるRPEを示すものとされている。例えば、自転車運動における“息苦しさ”はcentral factor，“太もものはった感じ”はlocal factorを意味するものと考えられる。

さらに、Robertson et al. (1979) は、最大下の自転車運動中の身体全体のRPE、脚部のRPE、胸部のRPEを比較すると、身体全体のRPEは脚部のRPEより小さく、胸部のRPEより大きいという報告をしている。これはある運動強度に達してから、心血管系および換気系が定常状態になるまでに30~180秒の時間を要するため、胸部の知覚は、脚部の知覚を増強するための増幅器の役割をなすと

いう考え (Cafarelli et al., 1977) に基づくものである。このことから、自転車運動中の身体全体のRPEは胸部の感覚を反映する胸部のRPEではなく、脚部の感覚を反映する脚部のRPEに大いに影響を受けると述べている。Robertson et al. (1979) は、物理的強度を一定にして回転数 (1分間あたり40, 60, 80回転) に変化をつける方法を用いたところ、あらゆる回転数において、脚部の知覚が胸部の知覚より優先することが明らかになった。身体全体の知覚レベルは脚部と胸部の知覚レベルの中間にあった。これらの結果は、自転車運動中の脚部から生じる知覚信号は、知覚統合過程において重要な役割を担っていることを示唆するものであろう。

腕と脚の両方を使って手押し車を押しているような場合には、大きく分けて2カ所の部位から知覚信号が発せられていると考えられる。ところが、2部位 (腕と脚) の知覚より身体全体の疲労知覚の方が大きくなるという報告がなされている (Gamberale, 1972)。最大努力でトレッドミル走行をおこなっている場合、運動に動員される身体各部位の数とは無関係に、身体全体の疲労の知覚レベルがもっとも大きくなると言われている (Gamberale, 1972; Horstman et al., 1979)。

知覚の統合過程および知覚の貢献度を検討するために、自転車運動 (Kang et al., 1996)、腕クランキング運動 (Robertson et al., 1990)、腕クランキング+脚ペダリング運動 (Pandolf et al., 1984) などを $\dot{V}O_{2max}$ の60%から70%に相当する強度で長時間 (60~180分) 継続するといった研究がなされている。また、Noble et al. (1986) とUeda et al. (1993) は、重回帰分析を用いて知覚信号の統合形態を検討している。自転車運動という限られた運動様式では、常に脚部の知覚レベルは胸部の知覚レベルを上回り、ゆえに、知覚統合過程で大きな貢献度を有している。一方、腕だけ、もしくは腕と脚を組み合わせた運動では、腕に由来する知覚信号が大きな貢献度をもつことがわかった。身体全体のRPEは、以上

で示したいかなる研究においても、常に運動で主要に働く部位のRPEより低い値を示した。自転車エルゴメータ以外にも間欠的運動、水中運動、腕に重りをつけたベンチステップ運動などにおいても、身体各部位の知覚反応が検討されている。SwankとRobertsonは、高い強度（ $90\% \dot{V}O_{2max}$ ）で遂行される間欠的運動中の脚部のRPEは、胸部のRPEよりも高い値を示すことを明らかにした（Swank et al., 1989）。一方、間欠的運動中の胸部と身体全体のRPEは同様な値であった。Robertson et al. (1995) は、腕と脚を組み合わせた水中運動での身体各部位の知覚反応を観察したところ、腕部のRPEは、あらゆる物理的強度や回転数に拘らず、一貫して脚部のRPEより高かったことを見いだした。一方、身体全体のRPEは腕部と脚部の平均に相当するRPEであった。 $70\% \dot{V}O_{2max}$ に相当する強度でのベンチステップ運動中にも同様な知覚信号の統合過程および貢献度が観察された（Robertson et al., 1990）。

トレッドミルによる最大運動後のRPE減少過程を身体各部位の知覚信号の変化から検討した研究がある（Robertson et al., 1992）。Robertson et al. (1992) は、運動後に12分間以上仰向けの姿勢で休息をとった場合、脚部のRPEは胸部のRPEより高かったことを報告している。回復期における身体全体のRPEは脚部と胸部のRPEのほぼ平均に相当した。

Pandolf et al. (1975) やPimental and Pandolf (1979) は、物理的強度がゆっくり適度に負荷されると、脚部や胸部で感じるRPEに差はみられないことを明らかにした。一方、負荷される物理的強度が大きくなるにつれて、脚部に比べて胸部のRPEが高くなった。以上のようなことから、身体各部位のRPEは、知覚統合過程で貢献度が変化する閾値の存在することが示唆された。四肢や胸部のRPEが、身体全体のRPEと初めて異なるスコアを示した時点における歩行速度をもって分化閾値と定義している。分化閾値より速い速度で走行する場合、身体全体のRPEは胸部のRPEに強く影響を受けている。

一方、Robertson et al. (1982) は、速度を順次変えていく走行中にみられるRPEの分化閾値に関して、従来までの研究者とは異なる結論に達している。時速6.44 km以下の場合、被検者は体重の7.5%に相当する負荷を受けることになり、時速4.83 km以下では、体重の15%に相当する負荷を受けることになる。分化閾値におけるRPEは脚部、胸部、身体全体のいずれでも同様であった。分化閾値よりも遅い速度では、脚部の知覚レベルがもっとも高く、次いで身体全体、一番低かったのは胸部の知覚レベルであった。ところが、分化閾値レベルを越えると、知覚統合過程や知覚信号の貢献度は、負荷重量と速度の相互作用を受けたかたちで現れるようになるというものであった。

#### 6. 第1節のまとめ

これまで述べてきたように、RPEと生理的および心理的指標との対応関係に関する研究は数多くなされてきており、ATとRPE、および運動強度とRPEの対応関係は密接であることから、運動処方においてRPEを利用することの理論的背景は認められているといえる。また、身体の各部位ごとにRPEを評価することで、利用される運動様式に応じたより適切なRPEを見いだすことが可能と考えられる。ただし、環境条件、個人の性格や特性など、RPEに影響を及ぼす可能性のある要因については、今後のさらなる検討が必要といえよう。

## 第2節 全身持久性体力に関する疫学的調査研究

最近の疫学的調査研究から、身体活動水準の減少に伴う全身持久性体力の低下は、CHDやその他の疾病の主要な危険因子と考えられるようになってきている。そこで本節では、これまでに報告されてきた全身持久性体力に関する疫学的調査研究をレビューすることで、本博士論文において全身持久性体力を評価することの意義を明らかにすることとした。

### (1) これまでに報告された疫学的調査研究

Costill et al. (1980) は、規則的な運動、食事療法、インスリン投与などの治療がなされている糖尿病患者のランナーの $\dot{V}O_{2max}$ は、ほぼ同様の内容のトレーニングを実施している一般ランナーの $\dot{V}O_{2max}$ と比較して有意な差がなかったことを報告している。このことは、糖尿病患者でも適切な治療と運動が施されれば、 $\dot{V}O_{2max}$ は十分回復することを示唆している。

Morris et al. (1980) は、約1万8千名の中年男性について心筋梗塞の発症率と身体活動水準との関係を調査し、死亡群と非死亡群のいずれの群も身体活動水準の高い者は、身体活動水準の低い者より心筋梗塞率罹患率が低値であったことを報告している。また、高血圧症、家族歴、肥満症、喫煙などのCHDの危険因子や自覚症状のない狭心症を有していても、運動を継続的におこなっている限り、同様に危険因子を有しながらも運動をおこなっていない者に比べて長命であったことを報告している。

Sills et al. (1983) は、糖尿病患者の $\dot{V}O_{2max}$ が一般人と比較して有意に低いことを認めている。このことは、糖尿病患者が肥満や運動不足の者に多く発生することと無関係ではないと思われる。

Paffenbarger et al. (1986) は、1万7千人のハーバード大学卒業生を対象として運動や生活習慣と寿命との関係について分析し、運動の有用性を述べている。週に30~35マイルの歩行に相当する運動(3000~3500 kcal/週)をおこなっている者の死亡率がもっとも低く、運動量が減少するにしたがって死亡率が上昇し、運動をほとんどおこなっていない者(500 kcal/週以下)の死亡率がもっとも高かったことを報告している。また、身体活動度の高い者で死亡率が低いおもな理由として、CHDによる死亡率の低いことを挙げている。CHDの予防には、週あたり500 kcal以上の身体活動が必要であることを示唆している。

Powell et al. (1987) の過去30年間の身体活動度とCHDに関する疫学的調査研究によると、身体活動水準の低下は高血圧症、喫煙、高コレステロール血症の3大危険因子と同程度の影響力を有するものであり、他の危険因子とは独立したものであるという。以前までの疫学的調査研究では労働の種類によって身体活動度を分類しているが、現代のような労働の自動化時代においては労働の強度や時間にとどまらず、余暇におこなう運動の強度や時間を身体活動度の分類に用いることを提唱している。

Fleg et al. (1988) は、加齢に伴う $\dot{V}O_{2max}$ の低下をもたらす要因として筋肉量の減少に焦点を当て、年齢、 $\dot{V}O_{2max}$ 、筋肉量の比較をおこなった。筋肉量の評価は、24時間で尿中に排泄されたクレアチニン量を測定することで推定された。クレアチニン量と $\dot{V}O_{2max}$ の間には、男女ともに正の相関関係がみられた。一方で、年齢と $\dot{V}O_{2max}$ の間には、強い負の相関関係が見られたことから、加齢に伴う筋肉量の減少が $\dot{V}O_{2max}$ の低下に強く影響している可能性が示唆されたと述べている。

Hagberg et al. (1987) は、加齢にともない $\dot{V}O_{2max}$ の低下をもたらす要因として、加齢そのもの以外に、1) 体脂肪と体重の増加、2) 日常生活における身体活動の減少、3) 疾患の3つを挙げている。このように身体活動水準を高く保つこと、

つまり運動を習慣化することと呼吸循環器系機能の維持・向上が密接に関係していることを考慮すると、これまでの疫学的調査研究から、体力要素のなかでも疾患や健康と強い関連性を有しているのが全身持久性体力であるといえる。

Blair et al. (1989) がクーパークリニックのデータに基づいて、トレッドミル運動時間から全身持久性体力水準と総死亡率との関係を検討したところ、全身持久性体力と総死亡率の間には負の相関が認められ、体力水準と身体活動の両面から死因のリスクを検討する必要があることを示唆した。血圧または血清コレステロールが高値であっても身体活動水準を高く維持すれば、血圧またはコレステロールの低い運動不足群に比べて死亡率が低くなることを示した。さらに高コレステロールで体力水準の高い群の死亡率(0.27%/年)は、低コレステロール群全体に比べて2倍であったが、低コレステロールで体力水準の低い群(0.68%/年)に比べて4割弱であったことなどを報告している。

Jackson et al. (1996) は、年齢、自己報告による身体活動量および身体組成が、女性の横断的または縦断的な $\dot{V}O_{2max}$ にどのような影響を及ぼすかについて検討をおこなった。横断的検討からは、年齢( $r = -0.633$ )や身体活動量( $r = 0.626$ )より体脂肪率( $r = -0.742$ )の方が $\dot{V}O_{2max}$ と強い相関関係を有することが明らかとなった。一方、縦断的検討からは、 $\dot{V}O_{2max}$ の変化は身体活動量や体脂肪率の変化と強い対応関係を有することが明らかにされた。

国内では村上ら(1988a)が、推定された $\dot{V}O_{2max}$ とCHDの危険因子とされる体脂肪率(%Fat)、TG、HDL-C、収縮期および拡張期血圧との関係を示している。その結果、いずれにおいても推定された $\dot{V}O_{2max}$ との間に有意な相関が認められたと述べている。さらに、女性についても、同様の結果がみられたことを報告している(村上ら, 1988b)。

厚生省(1989)は、運動不足症を発症させないための必要最小限の運動を習慣化することを目的とした「健康のための運動所要量」を発表している。これ

は、 $\dot{V}O_{2max}$ がある水準以下になると成人病危険因子の数が増加することに着目し、 $\dot{V}O_{2max}$ の境界値、すなわち男性37 ml/kg/min、女性31 ml/kg/minを60歳台の維持目標と定め、各年齢ごとに $\dot{V}O_{2max}$ の維持目標値とそれに応じた運動所要量を提示したものである。

## (2) 第2節のまとめ

従来より、加齢に伴って $\dot{V}O_{2max}$ に低下が認められることは知られていたが、近年になって、 $\dot{V}O_{2max}$ に直接影響を与える要因は何であるかが次第に明らかにされつつある。以上に挙げた研究成果をまとめると、身体活動量と $\dot{V}O_{2max}$ （全身持久性体力）の関係がもっとも重要であるといえる。身体活動量の低下はCHDやその他の疾病の主要な危険因子を悪化させる方向に働くと考えられることから、危険因子の保有状態、すなわち健康状態を占う上でも全身持久性体力の評価は有意義なことであるといえよう。



### 第3節 全身持久性体力の推定に関する研究

本節では、これまでに開発されてきた数々の全身持久性体力推定法を概説し、各法の特徴、長所、短所などを検討することで、今後、必要とされる理想的な推定法の姿を明らかにすることがねらいである。今日では、 $\dot{V}O_{2max}$ が全身持久性体力をもっともよく表す指標として認められている。一方、トレーニング効果を評価するといった視点からは、 $\dot{V}O_{2AT}$ が重要な指標と考えられるため、本節では $\dot{V}O_{2max}$ と $\dot{V}O_{2AT}$ の両指標に関する推定法を述べることにした。また、 $\dot{V}O_{2max}$ や $\dot{V}O_{2AT}$ ではなく、パフォーマンステストの成績に基づいて全身持久性体力を推定する研究も多数見受けられることから、これらについては表題を「パフォーマンステストによる全身持久性体力の推定法」として言及することにした。

#### 1. パフォーマンステストによる全身持久性体力の推定法

##### (1) ステップテスト

Brouha et al. (1943) は、激しい運動に対する体力を知るには、激しい運動に対する生理的反応を知る必要があるという見地から、一つのステップテスト (Harvard Step Test) を提案した。このテストは20インチのプラットフォームに毎分30回の割合で5分間昇降運動を実施し、運動後1～1分30秒、2～2分30秒、3～3分30秒の30秒間に3回HRを測定し、体力を次の指数によって表すものである。

$$\text{指数} = \text{運動時間 (秒)} \cdot 100 / 5.6\text{HR}$$

さらにこの指数から、次の評価を与えている。

55未満：poor physical condition

55 - 64：low average

65 - 79 : high average

80 - 89 : good

90以上 : excellent

ハーバード大学の学生2200人に対して、このテストを実施した結果、平均スコア75（15～120）で、良好な状態にある競技者は90以上を示した。このように、Harvard Step Testが全身持久性体力のテストとして広く用いられるようになり、このテストの変法も作成されるようになった。

Harvard Step Testにおいて、運動後1～1分30秒のHRを測定し、次の指数を用いることを提案した。

指数 =  $100 \cdot \text{運動時間 (秒)} / 5.6\text{HR}$

50未満 : poor

50以上80未満 : average

80以上 : good

女子用として台高18インチ、毎分30回ステップ、持続時間4分間でステップテストを実施し、Harvard Step Testと同じ計算方法と評価基準を適用する方法を示した。

日本においては、文部省で12～29歳を対象とした“スポーツテスト”（1963）および10～11歳を対象とした“小学校スポーツテスト”（1965）を作成しているが、このテスト項目の一つに踏台昇降運動と称したステップテストが採用されている。これは毎分30回のステップ、持続時間3分間の運動を実施し、Harvard Step Testに準じて指数を算出している。台高については性、年齢によって次のように決められている。

12～29歳，男子 : 40 cm

10～11歳，男子 : 35 cm

10～29歳，女子 : 35 cm

このテストは台高を低くし、持続時間を短縮することによって、一般男女の集団テストに適用するようにHarvard Step Testを改変したものである。

これ以降も内外でのステップテストの測定法および評価法についての検討、例えば踏み台の高さや運動時間あるいは1分間のステップの回数などの検討や評価基準の作成などがなされ、種々のステップテストが開発されてきた。

### (2) 12分間走テスト

全身持久性体力の指標として $\dot{V}O_{2max}$ の有用性が広まるにつれて、従来からおこなわれてきたパフォーマンステストと $\dot{V}O_{2max}$ との関連性が論議されるようになってきた。その先駆的な研究として一躍有名になったのがCooper (1968)の12分間走である。彼らは空軍に在籍する115名(17~52歳)を対象として $\dot{V}O_{2max}$ と12分間走の走行距離との間に $r=0.90$ と密接な関係があることを見いだした。その後多くの研究者によってその事実が容認されている。しかし、その見解は必ずしも一致していない。

### (3) Physical Work Capacity (PWC) テスト

Sjostrand (1947)とWahlund (1948)は、身体が受ける一定の負荷強度であるHR170 beats/minの時になされる物理的強度、すなわちPWC (physical work capacity) 170テストが全身持久性体力を評価する妥当な方法であると報告した。その後PWC150テスト、PWC130テスト、PWC75%HR<sub>reserve</sub>テストなどが提案された。

宮下ら (1984)は、余裕をもったHR反応でどの程度の仕事が遂行できるかという観点から、全身持久性体力を評価するPWC75%HR<sub>reserve</sub>の妥当性について検討した。 $\dot{V}O_{2max}$ とPWC75%HR<sub>reserve</sub>の間には有意な相関関係が認められ、PWC75%HR<sub>reserve</sub>は全身持久性体力の有効な指標となりうることを示唆した。

田中ら (1986)は、光電脈波方式を利用し、全身持久性体力の評価指標としてのPWC75%HR<sub>reserve</sub>の有用性について検討した結果、PWC75%HR<sub>reserve</sub>と $\dot{V}O_{2max}$

の関係は男性群、女性群のいずれについても有意な相関関係がみられ、また、 $\dot{V}O_{2LT}$ に対しても有意な相関関係が認められたことを報告している。

#### (4) シャトルランテスト

金子ら(1986)は、屋内で多人数の測定が短時間に容易にできる全身持久性体力評価のテストとしてシャトルスタミナ(SST)を提案した。この方法は、屋内10 m区間を3分間全力で往復させたときの到達距離をもって全身持久性体力を評価するものである。SST、5分間走、踏台昇降の各テスト成績と $\dot{V}O_{2max}$ との相関関係を検討した結果、SSTの成績は $r = 0.592$  ( $P < 0.01$ )の有意な相関を示し、5分間走テストの成績は、SSTよりさらに高い $r = 0.846$  ( $P < 0.001$ )の相関を示した。しかし、踏台昇降テストの成績は $r = 0.335$  ( $P > 0.05$ )となり、 $\dot{V}O_{2max}$ の間には有意な相関を示さなかった。これらの結果から、全身持久性体力を推定する上で、SSTは精度の面で5分間走に劣るものの、踏台昇降テストよりは優れていると指摘した。また、金子ら(1988, 1989)は、SSTを7~18歳の青少年に適用して、SSTからみた全身持久性体力の発育発達過程を分析するとともに、青少年のSST評価基準を作成した。さらに、田地ら(1992)は中年層を含む成人男性にSSTを適用し、SSTからみた全身持久性体力の加齢にともなう退行過程を分析するとともに、20~50歳台男性のための評価基準を作成した。

#### (5) 心拍数変動フィードバック管理負荷制御方式

田中ら(1989)は、運動中の心拍数変動フィードバック管理により運動負荷を個人ごとに制御するシステムを開発し、同システムによって評価される aerobic score (AS) が全身持久性を評価する指標として妥当であるか否かを検討した。ASは予測 $HR_{max}$ の70%または75%に相当する12分間の自転車運動をおこない次式より評価されるもので、ASと $\dot{V}O_{2max}$ および $\dot{V}O_{2LT}$ の間には有意な相関関係が認められ、これら全身持久性の基準変数に対して比較的高い妥当性を

有するとしている。

$$AS = k (WR/Wt) /HR$$

Wt：体重，WR：1分間あたりの仕事率，HR：心拍数，k：比例定数

## 2. 最大酸素摂取量の推定に関する研究

### (1) 間接法

Astrand and Ryhming (1954) は、最大下運動中のHRや仕事量 (PWC; kgm/min) が $\dot{V}O_2$ と対応してほぼ直線的に増加すること、同一年齢の最高心拍数 ( $HR_{max}$ ) は一定であるという仮説に基づいて、最大下運動中のHRと $\dot{V}O_2$ あるいはHRとPWCとの関係から $\dot{V}O_{2max}$ を推定するノモグラムを作成した。この方法は、最大下運動中のHRが男性で128～154 beats/min、女性で138～164 beats/minとなる負荷を設定し、6分間の運動における最後の1分間のHRと $\dot{V}O_2$ あるいはHRとPWCからノモグラムを用いて $\dot{V}O_{2max}$ を推定するものである。ここで適用できる運動様式はトレッドミル走、自転車運動および踏台昇降運動のいずれかである。このノモグラムを用いて推定した $\dot{V}O_{2max}$ は、直接測定した $\dot{V}O_{2max}$ と比較して、推定の標準誤差 (SEE) が男性で5.5～10.4 %、女性で9.4～14.4 %であったと報告している。

Astrand and Ryhming法の作成にあたって収集されたデータが大学生のものであったことから、その後この点を考慮し、実際の推定にあたっては補正値を乗じて $\dot{V}O_{2max}$ を推定することを提案した (Astrand et al., 1960)。

Rowell et al. (1964) は、Astrand and Ryhming法がどのような集団に対して妥当に適用できるかを検討している。座業労働者に2.5～3カ月のトレーニングを課し、トレーニング前後でのSEEを調べた結果、トレーニング前では $27.0 \pm 7.0$  %、トレーニング後では $14.0 \pm 7.0$  %であったことを報告した。また、持久的競技者のような全身持久性体力の優れる者においては $5.6 \pm 4.0$  %を示したとし、

Astrand and Ryhming法は全身持久性体力の優れる者を推定するのに妥当な間接法であると述べた。

Glassford et al. (1965) は, Astrand and Ryhming法と3種類の $\dot{V}O_{2max}$ の直接測定法, つまりトレッドミルによる定速法と速度漸増法, およびAstrand法(自転車エルゴメータによる)との比較をおこなった結果, Astrand法に比べて他の2つのトレッドミル法とAstrand and Ryhming法で得られた $\dot{V}O_{2max}$ は有意に高い値を示した。また, Astrand and Ryhming法と他の2つのトレッドミル法との間に有意な相関を認めた。以上のことから, Astrand and Ryhming法は自転車運動に不慣れな者に対して適した方法であることを示唆した。

Davies et al. (1968) は, Astrand and Ryhmingのノモグラムの推定精度をより高めるために, 次式を作成した。

$$\dot{V}O_{2max} \text{ (ml/min)} = 0.828 \cdot \text{推定値} + 932$$

Siconolfi et al. (1982) は, Astrand and Ryhmingのノモグラムに年齢的な修正を加えることによって, 推定精度を高める次の式を作成した。

$$\text{男性: } \dot{V}O_{2max} \text{ (l/min)} = 0.348 \cdot \text{推定値} - 0.035 \cdot \text{年齢} + 3.011$$

$$(r=0.86, \text{SEE}=0.359 \text{ l/min})$$

$$\text{女性: } \dot{V}O_{2max} \text{ (l/min)} = 0.302 \cdot \text{推定値} - 0.019 \cdot \text{年齢} + 1.593$$

$$(r=0.97, \text{SEE}=0.199 \text{ l/min})$$

このほか, これまでに多くの研究者によってAstrand and Ryhming法の信頼性について検討がおこなわれてきた。

Maritz et al. (1961) は, HRと $\dot{V}O_2$ の関係について中程度の運動では両者は極めて一義的な関係を示すが, 運動強度が高まるにつれてHRの増加率は $\dot{V}O_2$ の増加率に比べて減少するというWyndham et al. (1959)の報告に着目し, HRと $\dot{V}O_2$ がどこまでも直線関係にあるという仮説に基づくAstrand and Ryhming法に対して, 最大に近い運動を含む4つの運動強度での $\dot{V}O_2$ とHRとの関係を最小自

乗法で求めることによって $\dot{V}O_{2max}$ を推定する方法を考案した。この方法は、相関関係でみる限りAstrand and Ryhming法に比べて推定精度の高いことが認められた。さらに、Maritz et al.の方法はAstrand and Ryhming法に比べてSEEが小さく (Shephard et al., 1967) , テストの再現性は高いこと (Haisman et al., 1971) が報告された。

Issekutz et al. (1962) は、仕事量 (kpm/min) と $\dot{V}O_2$ との間に正比例の関係が、また、この両者と呼吸交換比 (RQ) が指数関数的関係を示すことに着目し、自転車運動中のRQから $\dot{V}O_{2max}$ を推定する次式を作成した。

$$\text{男性: } \dot{V}O_{2max} \text{ (l/min)} = F \cdot W_{\text{test}}/1000 + 0.32$$

$$\text{女性: } \dot{V}O_{2max} \text{ (l/min)} = F \cdot W_{\text{test}}/1000 + 0.25$$

$$W_{\text{test}} = \text{仕事量 (kpm/min)} ,$$

$$F = 2 (\log 0.4 - \log 0.08) / (\log RQ - \log 0.08)$$

この式によるSEEはわずか $0.002 \pm 0.016$  l/minであったとしている。

Shephard (1962) は、Astrand and Ryhming法、Maritz et al.の方法およびIssekutz et al.の方法を比較検討し、3つの方法のなかでIssekutz et al.の方法がもっとも推定精度が高いことを示唆した。しかし、deVries and Klafs (1965) は、RQと $\dot{V}O_{2max}$ の間の相関が低かったこと ( $r = 0.499$ ) を報告している。また、Rowell et al. (1964) は非鍛練者を除き競技者ではRQと $\dot{V}O_{2max}$ に有意な相関が認められなかったことを報告している。

このほかにもRQを用いた方法が提案されている。Mastropaolo (1970) は、RQを用いた以下の推定式を作成した。

$$\dot{V}O_{2max} \text{ (l/min)} = 11.158 - 0.007WR - 4.517RQ$$

$$WR = \text{物理的強度 (kpm/min)}$$

この式による推定値と実測値との間には $r = 0.92$  (SEE = 0.156 l/min) の高い相関関係が認められた。

Metz et al. (1971) は、 $\dot{V}O_{2max}$  とHR、 $\dot{V}O_2$  およびRQとの関係を検討し、 $\dot{V}O_{2max}$  の推定式を作成した。この結果、最大下の運動においてHRと $\dot{V}O_{2max}$  との間には有意な相関が認められ、運動中のHR、 $\dot{V}O_2$ 、RQの反応から $\dot{V}O_{2max}$  を推定する重回帰式を利用するとさらに推定精度が高くなることを報告している。

Hermiston et al. (1971) は、活動群および非活動群の男性について $\dot{V}O_{2max}$  の推定式作成のための独立変数に関する検討をおこなった。その結果、活動群の場合は年齢、体脂肪率、最大下運動中のHR、換気量およびRQによって、より高い精度で $\dot{V}O_{2max}$  が推定できるとしている。一方、非活動群の場合は年齢、体脂肪率、RQ、換気量からの推定が可能であるとしている。これらの推定式から得られる $\dot{V}O_{2max}$  と直接法から得られる $\dot{V}O_{2max}$  との間には有意な相関が認められたことを報告している。

Margaria et al. (1965) は、Astrand and Ryhming法の単一運動中の生理的反応に基づくものとは異なり、さらに信頼性のある値を得るために台高40 cmの踏台昇降運動を1分間に15回と25回のリズムでおこなわせたとき、つまり2つの強度から得られたHRと $\dot{V}O_2$  から、 $\dot{V}O_{2max}$  を推定する方法を考案した。

$$\dot{V}O_{2max} \text{ (l/min)} = HR_{max} \{ (V''O_2 - V'O_2) + HR'' \cdot V'O_2 - HR' \cdot V''O_2 \} / HR'' - HR'$$

HR' : 第1負荷での心拍数

HR'' : 第2負荷での心拍数

HR<sub>max</sub> : 最高心拍数

V'O<sub>2</sub> : 第1負荷での酸素摂取量

V''O<sub>2</sub> : 第2負荷での酸素摂取量

この推定式利用のための運動様式として、踏台昇降運動を薦めている。その理由としては、踏台による方法は自転車などによる方法と違い、1) どこでもできる、2) 安い、3) 校正の必要がない、4) 特別な技術を要せず誰にでも使用できる、5) 体重1kgあたりの $\dot{V}O_2$ は性、年齢、体格などに関係なく一定であ



り、多くの人々に適用できることを挙げている。そして、テストに用いる2つの運動強度は、心拍数が100～150 b/minの範囲になるように選択することが望ましいとしている。なお、子供や老人では踏台の高さを30 cm、頻度を27回および15回として推定することを提案している。さらに、この式を用いた計算の手間を省くためにノモグラムを作成した。このノモグラムによるSEEは7%であった。

Dobelin et al. (1967) は、最大下運動中のHRと $\dot{V}O_2$ の間に直線関係が保たれるが、それはHRが125～170 b/minの範囲であり、その後は指数関数的関係になることに着目し、次の推定式を導きだした。この式の作成にあたり用いた対象は30～70歳の84名の建築労働者であった。

$$\dot{V}O_{2max} \text{ (l/min)} = 1.29\sqrt{\{L/(\text{HR}-60)\}} e^{-0.00884T}$$

L=仕事量 (kpm/min) , T=年齢, HR=Lでの6分間の運動中の5分目から6分目のHR

この式から得られた推定の標準誤差の平均値は0.17 l/min, SEE=12.7%であった。

これまでの方法では2つ以上の運動強度に対するHRが必要であったり、推定誤差を小さくする意味からHRがある一定の範囲の値を示すように運動強度を選択する必要があった (Fox et al., 1973) 。この点を改善するために、大学生男子を対象に自転車エルゴメータを一定負荷 (回転数60 rpmで150 watts) でこいだときのHR (5分間おこなったときの4分から5分) と $\dot{V}O_{2max}$ との関係を検討し、次の推定式を導き出した。

$$\dot{V}O_{2max} \text{ (l/kg/min)} = 6300 - 19.26\text{HR}$$

この式から得られた推定値と実測値の間には $r=0.76$  (SEE=2.64 ml/kg/min; 7%) と強い相関関係が認められた。

Legge et al. (1986) は、まず、0 kpの負荷で5分間、90 rpmの自転車運動をお

こない，その時のHRを0と仮定する．その後，90 rpm，50 watts以上でしかも年齢から推定される $\dot{V}O_{2max}$ の80%以下の負荷での作業中の仕事量(W)か，あるいは作業中の $\dot{V}O_2$ を求め，HRとを結ぶ $\dot{V}O_{2max}$ 軸との交点から $\dot{V}O_{2max}$ を推定する方法を考案した．この方法による推定精度は $r = 0.98$ ， $SEE = 0.17$ とAstrand and Ryhming法に比べて正確であることを報告している．

Kline et al. (1987) は，343名の一般健常者(30~69名)を対象として最大努力での1-mile歩行テスト(Rockport Fitness Walking Test: RFWT)から， $\dot{V}O_{2max}$ を推定する次式を作成した．

$$\dot{V}O_{2max} = 6.9652 + 0.0091Wt - 0.0257Age + 0.5955Sex - 0.2240T1 - 0.0115HR1-4$$

( $r = 0.92$ 、 $SEE = 0.325$  l/min)

Wt : 体重 (lb) , Age : 年齢, Sex : 1=男 2=女, T1 : 歩行時間, HR1-4 : 歩行直後の心拍数 (15秒間の心拍数を4倍)

また，169名を対象として交差妥当性の検討をおこなった結果，実測値と推定値の間に $r = 0.92$  ( $SEE = 0.355$  l/min) の有意な相関関係が認められた．

Fenstermarker et al. (1992) は，RFWTが65歳以上の高齢女性に対しても適用できる妥当性の高い全身持久性体力評価のテストであることを報告した．また，Kittredge et al. (1994) は，精神遅滞者について検討した結果， $\dot{V}O_{2max}$ の実測値と推定値には有意な相関関係が認められるものの，過大評価する危険性があることを示唆した．Warren et al. (1993) は，日常トレーニングとして歩行をおこなっている者とそうでない者について，推定精度に相違が現れるかどうかについて検討した．その結果，習慣的に歩行運動をおこなっている者に比べて歩行をおこなっていない者は11%ほど過小評価されることが明らかになった．Widrick et al. (1991) は，トレッドミルでの1-mile歩行テストからKlineらの式を用いて $\dot{V}O_{2max}$ を推定したときの推定値と実測値との間には $r = 0.91$  ( $SEE = 5.26$  ml/kg/min) の有意な相関関係が認められ，トレッドミル歩行を用いた場合にお

いてもKline et al. (1987)の方法は、 $\dot{V}O_{2max}$ を妥当に推定できることを示唆した。

Oja et al. (1991)は、159名の一般健常者(20~65歳)を対象として、1.0, 1.5, 2.0 kmの歩行を、半数の対象に $\dot{V}O_{2max}$ の測定および2 km歩行テストを実施した。3種類の歩行テストの中で2 km歩行が $\dot{V}O_{2max}$ をもっともよく反映し、対象者にも好まれていたことから、2 km歩行テストの歩行時間、年齢、歩行終了時のHRおよび形態的特性を独立変数とした $\dot{V}O_{2max}$ の推定式を作成した。この式によって66~76%が説明され、SEEは9~15%であった。交差妥当性の検討では、肥満傾向の者からある程度体力水準の高い者までに適用できるものの、競技者のように非常に体力水準の高い者については、適用範囲が及ばないことが報告された。さらに、Laukkanen et al. (1992, 1993)の報告からも同様な結果が得られた。

竹島ら(1992)は、高齢者の全身持久性体力の評価における間接法の妥当性について検討したところ、高齢者にとっては、Astrand and Ryhming法やSconolf法またはYMCA法に比べて12分間自由ペース歩行がもっとも $\dot{V}O_{2max}$ や $\dot{V}O_{2,T}$ と相関が強く、妥当性の高い評価法であることを報告した。

中川ら(1995)は、12分間歩行テストによる全身持久性体力評価の妥当性および信頼性を検討するために、年齢が30~60歳の健康な一般成人男子10名に対して $\dot{V}O_{2max}$ 測定のためのトレッドミル走テストと2回の最大努力による12分間歩行テストをおこなった。この結果、12分間歩行テストは12分間走に匹敵する高いテストの妥当性と信頼性が、比較的低い生理的負担のもとで得られ、12分間歩行テストが安全性の面からも優れたフィールドパフォーマンステストであることを示唆した。

Leger and Lamber (1982)は、体育館などで実施できる簡便なフィールドテストとして20 mシャトルランテストを考案した。この方法は、20 mの感覚で引かれた2本の白線間の往復走である。最初、ペースメーカーに従って20 mのシャ

トルランを8 km/hの速さで走り、2分ごとにスピードを0.5 km/hずつ漸増する。ペースメーカーについていけなくなったスピードをその個人の最高スピード(X)とし、次式に代入して $\dot{V}O_{2max}$ を推定する。

$$\dot{V}O_{2max} \text{ (ml/kg/min)} = 0.857X - 19.458$$

(r = 0.84, SEE = 5.4 ml)

また、Rorham et al. (1990) は20 mのシャトルランテストのラップと $\dot{V}O_{2max}$ の間に、次の式が成り立つことを明かにした。

$$\dot{V}O_{2max} = 18.9 + 0.439X$$

(r = 0.87)

## (2) 質問紙による方法

Heil et al. (1995) は、20から79歳の一般健常者439名(男性210名, 女性229名)を対象として、運動をおこなわずに $\dot{V}O_{2peak}$ を予測する質問紙を作成した。質問の項目として性、年齢、年齢の2乗、体脂肪率および身体活動量を採用した。作成された予測式に交差妥当性の検討を施したところ、男女をあわせた予測式( $R^2 = 0.77$ , SEE = 4.90 ml/jg/min, %SEE = 12.7%)に比べて男女別の予測式(男性:  $R^2 = 0.72$ , SEE = 5.02 ml/jg/min; 女性:  $R^2 = 0.72$ , SEE = 4.64 ml/jg/min)の方が精度が高いことがわかった。

田中ら(1995)は、医療機関などで運動負荷試験を実施する場合、問診の一部としてあらかじめ各患者がどの程度の全身持久性体力を有しているかを把握(スクリーニング)することが大切であることを考慮し、メディカルチェックの目的にも合致するもっとも簡易なテストとして質問紙法を提案した。その妥当性の検討をおこなった結果、一般健常者(女性)および有疾患者(女性)について、質問紙による $\dot{V}O_{2peak}$ の推定値と実測値の相関は $r = 0.78 \sim 0.60$ であったことを報告した。

### 3. 無酸素性代謝閾値に相当する酸素摂取量の推定に関する研究

#### (1) 間接法

田中ら(1989)は、運動中の心拍数変動フィードバック管理により運動負荷を個人ごとに制御するシステムを開発し、同システムによって評価される aerobic score (AS) が全身持久性を評価する指標として妥当であるか否かを検討した。ASは予測 $HR_{max}$ の70%または75%に相当する12分間の自転車運動をおこなない次式より評価されるもので、ASと $\dot{V}O_{2LT}$ の間には有意な相関関係が認められ、これら全身持久性の基準変量に対して比較的高い妥当性を有している。

$$AS = k (WR/Wt) /HR$$

Wt：体重，WR：1分間あたりの仕事率，HR：心拍数，k：比例定数

漸増運動中の頻呼吸の開始は、代謝性アシドーシスの生起に伴うATの出現と極めて強い対応関係にあるとの報告に基づいて、James et al. (1989)は、呼吸数の変化からATの推定が可能との報告をしている。しかし、この研究では、被検者として定期的に自転車エルゴメータ運動をおこなっている者しか選ばれておらず、他の運動経験を持つ者や運動経験を有さない者にまでこの方法が広く応用できるかについては触れられていない(島名ら, 1994)。また、呼吸運動は、随意的に調節が可能であり、ペダリング回転数に呼吸が同期する可能性も見逃せないことから、島名ら(1994)は、同期が起こりにくい条件下によるAT推定法の精度を検討している。その結果、同期の起こりにくい条件下では、そうでない条件下に比べて推定精度は多少向上したものの、実用レベルには達しないとの示唆を得ている。

田中(1995)は、成人男性21名と女性41名を対象として、RPE11“楽である”，RPE13“ややきつい”，個人が“健康の維持・増進のために理想と感じる強さ(optimal)”の3つの強度で12分間トレッドミル上を歩行した場合の歩行距離

と $\dot{V}O_{2,T}$ との相関をみている。歩行距離と $\dot{V}O_{2,T}$ との相関係数は、RPE11で $r = 0.62 \sim 0.76$ 、RPE13で $r = 0.77 \sim 0.82$ 、optimalで $r = 0.82 \sim 0.85$ で有意な関係がみられたことを報告している。この成果を利用して、中垣内ら（1996）や熊谷ら（1997）は、12分間歩行・走行テストから得た歩行・走行距離を主要な独立変数とする、 $\dot{V}O_{2,T}$ 推定式の作成を試みている。その結果、作成された推定式は簡便で正確な有用性の高い推定法であると述べている。

## (2) 質問紙による方法

田中ら（1995）は、医療機関などで運動負荷試験を実施する場合、問診の一部としてあらかじめ各患者がどの程度の全身持久性体力を有しているかを把握（スクリーニング）することが大切であることを考慮し、メディカルチェックの目的にも合致するもっとも簡易なテストとして質問紙法を提案した。その妥当性の検討をおこなった結果、一般健常者（女性）および有疾患者（女性）について、質問紙による $\dot{V}O_{2AT}$ の推定値と実測値の間には有意な相関関係があったことを報告した。

## 4. 第3節のまとめ

従来までの報告では、HRと $\dot{V}O_2$ の間に存在する直線関係を利用することで $\dot{V}O_{2max}$ を推定する方法が大半を占めている。しかし、HRは環境条件によって大きく左右されやすいこと、予測最高心拍数は個人間でばらつきが大きいことなどが考えられ、妥当性において疑問視する研究者も少なくない。また、RERを利用する方法ではその測定手順が簡便とは言い難い。パフォーマンステストは、簡便性や一度に大人数を評価できるなどの利点を有するが、精度の点で劣るといふ指摘もある。質問紙法では、全身持久性体力のスクリーニングとしての利用に位置づけるべきものであり、高い精度で推定するには更なる検討が必要といえる。

ATに関してはその概念自体に疑問をもつ研究者も少なくないことから、以前から、ATの是非について活発な論議がなされてきている。一方で、運動処方  
の立場からトレーニング効果の評価や強度設定についてATを捉えると、ATの  
重要性は見逃すわけにはいかないであろう。それにもかかわらず、これまで述  
べてきたようにATを簡便かつ正確に推定できる方法は十分検討されていると  
は言い難く、実用性の高いAT推定法の早急な開発が望まれるといえよう。