

作業強度と作業時間を考慮した作業による疲労度の評価

Evaluation of fatigue due to physical work considering exercise intensity and time.

正会員 ○栗原 浩平 (釧路工業高等専門学校) 技術フェロー 濱田 靖弘 (北海道大学)

特別会員 窪田 英樹 (北海道大学)

Kouhei KUWABARA*¹ Yasuhiro HAMADA*² Hideki KUBOTA*²

*¹ National Institute of Technology, Kushiro College *² Hokkaido University

In order to evaluate a fatigue during physical work, Ratings of Physiological Exertion due to exercise Intensity (RPE*(I)) and due to fatigue (RPE*(F)) was proposed. These RPE* is calculated separately at any time, and higher value between these two was defined as physiological strain due to physical work at the time. The RPE* calculated from exercise intensity and working time was compared with that calculated from measured heart rate of a worker at construction site.

はじめに

作業に伴う身体負担には「疲労」と筋力が関わる「作業強度」の二つの側面がある。すなわち、(1)作業強度：作業に必要とする筋力強度、(2)疲労：作業継続に伴うエネルギー消費量・代謝副産物の増加、発汗・脱水、中枢神経疲労など、である。作業の身体負担度評価はこの両面を考慮して為される必要がある。代表的な評価指標としては既に Borg スケール RPE (Ratings of Perceived Exertion) が広く知られている¹⁾。RPE は心拍数(HR)と身体負担知覚量(「Light(弱い)」「Hard(強い)」等)とを対応させた指標であり、作業者の身体負担度をHRから判定する。ここで、疲労が軽微である作業初期段階のRPEは「作業強度」が勝った身体負担度で、作業継続に伴い「疲労」が勝った身体負担度に移行するものと考えることができる。

作業強度の表示法の一つとして、相対最大酸素消費量(%VO_{2max})があり、比較的短時間の作業におけるHR(または相対心拍数%HRR)は%VO_{2max}の関数で表されることは既に知られている²⁾³⁾。従って、作業初期のRPEは作業強度%VO_{2max}の関数として与えられる。作業者のHR(または%HRR)から逆に%VO_{2max}を知ることができる。一方、作業の継続に伴う疲労の蓄積によってHRは増加する⁴⁾が、BorgのRPEには、「疲労」と「作業強度」の何れが主体のRPEであるかを評価する方法は提示されていない。

疲労に関しては、作業に伴う生理的な変化(筋肉含有グリコーゲン量の減少、神経の疲労など)に関する知見がある⁵⁾。しかしながら、これらの生理量の変化を適用して作業の継続時間との関連で身体負担度を評価する方法は知られていないように思われる。すなわち、作業の継続時間に伴い蓄積する疲労とHRとの関係を定量的に関係づけて作業の身体負担度を適切に評価することが課題として残されている。

本研究では、「作業強度」による身体負担と作業継続時

間に伴う「疲労」を評価するために、心拍数を用いた評価手法を検討することを目的とする。

1. 方法

1.1 考え方

本論文において筆者らが提案する身体負担度指標RPE*は、健康な成人を対象としたBorgの身体負担度指標RPEを基礎にして、下のように新たに定義する：①RPEを相対心拍数%HRR(以下%HRR)の関数として整理し、②20 or 10の知覚量スケールを五段階の尺度、RPE*=1(軽い)、=2(中)、=3(強い)、=4(非常に強い)、=5(極端に強い)で評価する。すなわち、五段階の尺度のRPE*を%HRRの関数として定義する。作業の身体負担度には上のように「作業強度」と「疲労度」の二つの側面があるが、本論文では二つの側面を考慮した指標RPE*(Ratings of Physiological Exertion due to exercise Intensity/Fatigue)を提案する。ここで、「作業強度」起因の身体負担度をRPE*(I)(Ratings of Physiological Exertion due to exercise Intensity)、「疲労」起因の身体負担度をRPE*(F)(Ratings of Physiological Exertion due to Fatigue)と表して、それぞれ分離して評価して任意の時点におけるいずれか大きい方をその時点の身体負担度と定義する。即ち、RPE*=max(RPE*(I), RPE*(F))。

疲労の影響を無視し得る作業初期における%VO_{2max}と%HRRとの関係が知られているので、この関係を利用してRPE*(I)を%VO_{2max}の関数として定義できる。一方、疲労度RPE*(F)を体育科学センターが推奨する運動カルテ⁶⁾における運動強度を基にして評価する。この運動カルテでは運動強度、すなわち身体への影響度を「軽」、「中」、「強」で表し、%VO_{2max}と継続時間の組み合わせで定義している。本論文ではこの運動強度を疲労度RPE*(F)と読み替えて、%VO_{2max}と運動継続時間の関数として評価する。

1.2 作業の身体負担度 RPE^* と心拍数 $HR, \%HRR$ との関係

筆者らが提案する RPE^* は、表 1 のように RPE を参考にして 5 段階尺度で表したものである。同表に次節 1.3 で述べる作業初期（非疲労時）の $\%HRR$ に対応する $\%VO_{2max}$ も示す。 RPE はその数値を 10 倍するとほぼ心拍数になるので心拍数は 60~200 bpm に対応していて、20 代の心拍数にほぼ相当する。これを最大心拍数 $HR_{max} = 200$ [bpm], 安静時心拍数 $HR_{rest} = 70$ とした相対心拍数 $\%HRR$ で表し RPE^* との関係を示したのが図 1 である。範囲 ($RPE^* < 1, 1 \leq RPE^* \leq 5.5$) に応じて次式で表される。

$$RPE^* = 0.065 \times \%HRR - 1.0 \quad (1 \leq RPE^* \leq 5.5) \quad (1)$$

$$= 0.0325 \times \%HRR \quad (RPE^* < 1) \quad (2)$$

$$\text{ここで、} \%HRR = \frac{HR - HR_{rest}}{HR_{max} - HR_{rest}} \times 100 \quad (3)$$

HR : 心拍数[bpm], HR_{max} : 最大心拍数(Borg の RPE では 200) [bpm], HR_{rest} : 椅座安静時心拍数(同 70 とする) [bpm]

本論文では、式(1)と(2)は $RPE^*(I)$ と $RPE^*(F)$ のいずれに対しても成立すると仮定する。作業者の HR ($\%HRR$) から式(1)と(2)を用いて RPE^* が分かる。逆に、労働管理の観点から特定の RPE^* 値を設定する場合、対応する HR ($\%HRR$) がわかる。作業開始後初期（非疲労時）の HR は「作業強度」 $RPE^*(I)$ に起因し、作業継続に伴い HR は「疲労」 $RPE^*(F)$ が勝った状態に移行し上昇する。

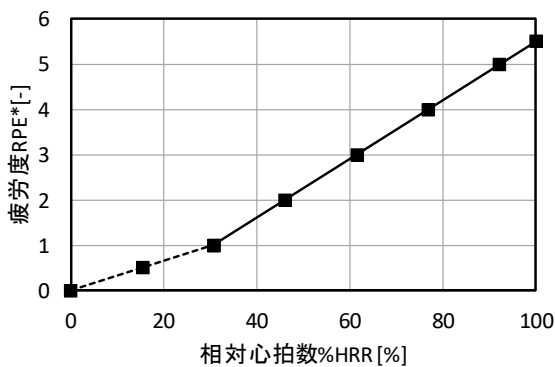


図 1 $\%HRR$ と RPE^* の関係

1.3 作業強度 $\%VO_{2max}$ と心拍数 $HR, \%HRR$ の関係 ($RPE^*(I) > RPE^*(F)$)

作業強度は通常酸素消費量 $\%VO_{2max}$ で表され、疲労や脱水の影響を無視できる作業初期の心拍数 HR と近似的に以下の関係がある。この関係式は筆者らが既往のデータ²⁾ から導いた。

$$HR = a \times \%VO_{2max} + b \quad (4)$$

ここで、 $a = -0.0107age + 1.624$, $b = 0.17age + 52.15$, age : 年齢
この式から $\%VO_{2max} = 100$ において HR_{max} が得られる。

$$HR_{max} = 215 - 0.90age \quad (5)$$

これを $\%HRR$ で表せば年齢に関わらず近似的に下記の関

係が得られる。

$$\%HRR = 1.11(\%VO_{2max} - 10) \quad (6)$$

ただし、 $\%HRR = 0$ のとき $\%VO_{2max} = 10$ と仮定した。

式(6)から、作業初期（非疲労時）の HR ($\%HRR$) が判れば作業強度が得られる。

$$\%VO_{2max} = 0.90\%HRR + 10 \quad (7)$$

表 1 RPE, RPE^* と $\%HRR, \%VO_{2max}$ の関係

RPE	Classification	RPE^*	$\%HRR$	$\%VO_{2max}^{\dagger}$
7	Extremely Light ^{††)}	(0)	0	10
9	Very Light	(0.5)	15.4	23.9
11	Light	1	30.8	37.7
13	Somewhat Hard	2	46.2	51.5
15	Hard	3	61.5	65.4
17	Very Hard	4	76.9	79.2
19	Extremely Hard	5	92.3	93.1
20	Maximal Exertion	5.5	100	100

†) 作業初期（非脱水影響&非疲労時）に対応する値

††) 筆者らは Borg スケールの $RPE = 7$ (椅座相当) を No Exertion とする。

1.4 作業強度 $\%VO_{2max}$ と $RPE^*(I)$ の関係

作業強度 $\%VO_{2max}$ 起因の身体負担感 $RPE^*(I)$ は従って、疲労の影響を無視できる作業初期の式(6)を式(1)に入れて $\%VO_{2max}$ の関数として導かれる。

$$RPE^*(I) = 0.072 \times (\%VO_{2max} - 10) - 1.0 \quad (1 \leq RPE^* \leq 5.5) \quad (8)$$

$$= 0.03608(\%VO_{2max} - 10) \quad (RPE^* < 1) \quad (9)$$

1.5 作業強度 $\%VO_{2max}$ と $RPE^*(F)$ の関係

体育科学センターが提唱している運動カルテ⁶⁾ は全身耐久性の向上を対象としたものである。余暇の時間に一回 5~60 分間一定強度の運動を数ヶ月間実行させる。全身耐久性向上の効果が認められる作業強度と継続時間の組み合わせを、運動強度「軽」「中」「強」別に提示している。筆者らはこの運動強度を疲労度 $RPE^*(F)$ と読み替えて評価に適用する。すなわち、身体負担度の観点から運動カルテにおける運動強度「軽」「中」「強」を Borg の「Light」, 「Somewhat Hard」, 「Hard」とそれぞれ等価と見なす。

運動カルテは余暇の運動を想定しているので提示されている継続時間は 1 時間以内であるが、1 時間以上の作業に関しても外挿して評価に利用する。

さて、運動カルテでは運動強度「軽」は全身耐久性向上への効果が認められる下限とされる。一方、このことは人

体生理に有意に影響を与える下限を示唆して、疲労度評価における安全性の観点からは「軽」以上が要警戒領域と考えることができる。さらに「強」が人体へのマイナスの影響が予想される下限とされている。疲労度評価においては作業中止の判断に関わる上限と見なすことができる。

このように「運動カルテ」において全身耐久性向上への効果の観点から設定された運動強度を疲労度と見なして $RPE^*(F)$ と表す。さらに「運動カルテ」における運動強度「軽」、「中」、「強」に Borg スケールの身体負担度「非常に強い (Very Hard)」「極端に強い (Extremely Hard)」を加えて、表 2 のように数値化する。

表 2 運動強度と疲労度 $RPE^*(F)$ の関係

運動強度	Classification	$RPE^*(F)$
軽	Light	1
中	Somewhat Hard	2
強	Hard	3
非常に強い	Very Hard	4
極端に強い	Extremely Hard	5

運動カルテでは身体負担度 (運動強度) 「軽」「中」「強」に対応する作業強度 $\%VO_{2max}$ と継続時間の組み合わせが図 2 である。

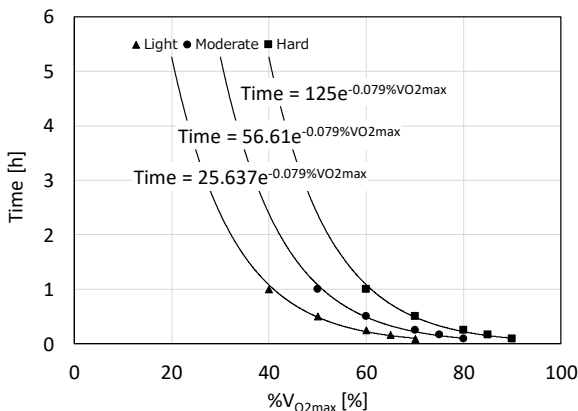


図 2 任意の運動強度における作業強度 $\%VO_{2max}$ と継続時間の関係

これらの関係は近似的に次式で表される。

$$\text{軽(Light: } RPE^*(F)=1): t=25.6\exp(-0.079\%VO_{2max}) \quad (10)$$

$$\text{中(Moderate: } RPE^*(F)=2): t=56.6\exp(-0.079\%VO_{2max}) \quad (11)$$

$$\text{強(Hard: } RPE^*(F)=3): t=125.0\exp(-0.079\%VO_{2max}) \quad (12)$$

ここで、 t : 作業継続時間[h]

これを $t=a \times \exp(-0.079\%VO_{2max})$ のように表すと、係数 a が $RPE^*(F)$ の関数となる。

$$a=11.6 \times \exp(0.792 \times RPE^*(F)) \quad (13)$$

従って作業強度 $\%VO_{2max}$ の作業において任意の $RPE^*(F)$ に至る継続時間は次式で表される。

$$t=11.6 \times \exp(0.79 \times RPE^*(F) - 0.079\%VO_{2max}) \quad [h] \quad (14)$$

従って上式より作業強度 $\%VO_{2max}$ の作業における作業継続 t 時間後の $RPE^*(F)$ は次式で表される：

$$RPE^*(F)=1.27 \ln(0.0862t)+0.10\%VO_{2max} \quad (15)$$

この疲労感 $RPE^*(F)$ が $RPE^*(F) > RPE^*(I)$ の時、 $RPE^*=RPE^*(F)$ である。

1.5 $RPE^*(F)$ と心拍数 $\%HRR$ の関係

$RPE^*(F)$ に対応する $\%HRR$ は式(1),(2)と式(15)から知ることができる。すなわち、

$$\begin{aligned} RPE^*(F) &= 0.065\%HRR - 1.0 & (1 \leq RPE^* \leq 5.5) \\ &= 1.27 \ln(0.0862t) + 0.10\%VO_{2max} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \therefore \%HRR &= 15.4(RPE^*(F) + 1.0) \\ &= 15.4\{1.27 \ln(0.0862t) + 0.10\%VO_{2max} + 1.0\} \end{aligned} \quad (17)$$

また、 $RPE^* < 1$ の領域に関しては、

$$\begin{aligned} RPE^*(F) &= 0.0325\%HRR & (RPE^* < 1) \\ &= 1.27 \ln(0.0862t) + 0.10\%VO_{2max} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \therefore \%HRR &= 30.77RPE^*(F) \\ &= 30.77\{1.27 \ln(0.0862t) + 0.10\%VO_{2max}\} \end{aligned} \quad (19)$$

上式から、作業強度 $\%VO_{2max}$ の作業に従事する場合の心拍数が作業継続時間の関数として与えられる。

2. 結果と考察

2.1 任意の $\%VO_{2max}$ における $\%HRR$, $RPE^*(I)$, $RPE^*(F)$ の経時変化

作業強度が $\%VO_{2max}=37.7$ (軽: $RPE^*(I)=1$), 51.5 (中: 2), 65.4 (強: 3), 79.2 (非常に強い: 4) にそれぞれ対応する作業を継続した場合の $\%HRR$ の変化を示したのが図 3 である。たとえば同図の作業強度 $37.7\%VO_{2max}$ (軽: $RPE^*(I)=1$) に対応する結果は、 $\%VO_{2max}$ が一定 (=37.7) であるので作業強度起因の心拍数 HR は一定である。一方、疲労起因 $RPE^*(F)$ の心拍数は時間と共に増加して 70 分経過すると作業強度起因の心拍数を上回り、さらに上昇し続ける。すなわち、作業開始後 70 分までは心拍数は一定 ($\%HRR=30.8$) で、それ以後は次第に上昇する。この結果を作業管理の観点から考察すると、 $RPE^*(I)=1$ は、運動カルテを参考にすると、生理的影響がみられる下限であり、仕事における継続作業の許容上限と考えるレベルである。作業初期の $\%HRR=30.8$ を具体的な心拍数に換算すると、例えば $HR_{max}=200$ (20 歳代) の場合は $HR=110$ に相当する。この HR は、 $RPE^*(F)$ の増加によって 70 分以降上昇し始める。作業管理の観点からはこの時点で休憩をとる必要があると解釈することができる。休憩を取らずに作業を継続すると 2 時間 20 分後には $RPE^*=2$ (Somewhat Hard) に相当する $\%HRR=46$ (同 $HR=130$) に達することになる。休憩なしに作業をさらに継続すると 5 時間後には $RPE^*=3$ (Hard) ($HR=155$) に達することがわかる。同様に、 $51.5\%VO_{2max}$ の作業 ($RPE^*(I)=2$ で作業初期 $\%HRR=46.2$ に対応) は、 $HR_{max}=200$ とすると $HR=130$ 。この HR がほぼ 55 分間継続し、1 時間 50 分後には $HR=155$

(同 $RPE^*=3$) に達することがわかる。

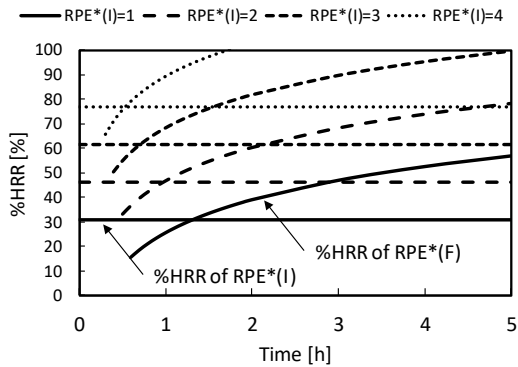


図3 $RPE^*(I)=1-4$ に相当する作業における%HRRと作業時間との関係

2.2 建設現場における実測値と RPE^* 予測値の対応

夏季の建設現場における被験者実験結果⁷⁾を利用し、59歳の建設作業員の RPE^* を推定した結果を図4に示す。作業開始10~70分間のHR平均値(HR=100)から式(7)を用いて $\%VO_{2max}$ を推定した結果、 $35.5\%VO_{2max}$ が得られた。 $RPE^*(I)=1.14$ の軽作業であることがわかる。式(5)から最高心拍数 $HR_{max}=162$ 、安静時心拍数は70とした。この $\%VO_{2max}$ と作業時間から式(15)を用いて $RPE^*(F)$ を計算し、図4に太い実線で示した。但し、休憩時間で疲労は回復すると仮定している。比較として作業中の実測%HRRから式(1),(2)を用いて計算した RPE^* を白抜き丸印(以下、実測値)で示す。午前と午後の前半の実測値は、実線で示す予測値(休憩で疲労は回復すると仮定)に概ね近い値を示しており、本データでは昼の休憩で疲労が回復するとみなしてよいと考えられる。しかし、午前休憩後の実測値はやや高い値を示しており、前の作業の疲労が残留している可能性を示唆している。破線は、30分の休憩中に休憩直前の状態から30分前の状態まで RPE^* が回復したと仮定した場合の予測値である。実測値は破線と実線の間位置しており、今後さらなるデータを蓄積し、休憩時間の疲労軽減効果の定量的評価につなげたい。

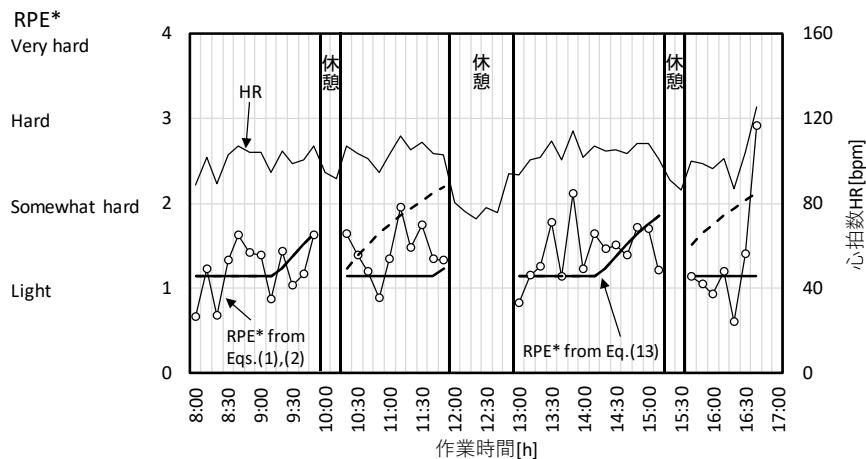


図4 建設作業員の RPE^* 推定値 (夏季屋内建設現場)⁷⁾

おわりに

本論文では作業継続に伴う疲労度を評価するために、 RPE^* (Ratings of Physiological Exertion due to exercise Intensity/Fatigue)を提案した。「作業強度」起因の身体負担度を $RPE^*(I)$ (Ratings of Physiological Exertion due to exercise Intensity)、「疲労」起因の身体負担度を $RPE^*(F)$ (Ratings of Physiological Exertion due to Fatigue)と表して、それぞれ分離して評価して任意の時点におけるいずれか大きい方をその時点の身体負担度と定義した。体育科学センターの運動カルテと Borg のスケールを参考に、 $RPE^*=1$ (軽), 2 (中), 3 (強), 4 (非常に強い), 5 (極端に強い) と定義し、以下の式を導いた。

$$RPE^*(I) = 0.072 \times (\%VO_{2max} - 10) - 1.0 \quad (1 \leq RPE^* \leq 5.5) \quad (7)$$

$$= 0.03608 (\%VO_{2max} - 10) \quad (RPE^* < 1) \quad (8)$$

$$RPE^*(F) = 1.27 \ln(0.0862t) + 0.10 \%VO_{2max} \quad (13)$$

$$RPE^* = \max(RPE^*(I), RPE^*(F))$$

建設現場作業者の実測値と比較し、作業疲労度の定量的評価への当指標の有効性を示した。今後、暑熱環境起因の疲労成分を追加加算すること等が課題である。

参考文献

- 1) Borg, G. A. V. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377-381
- 2) 山地啓司, 1985, 運動処方のための心拍数の科学, 大修館書店
- 3) 山地啓司, 2001, 改訂最大酸素摂取量の科学, 杏林書院
- 4) Coyle, E. F., & Gonzalez-Alonso, J. (2001). Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives. *Exercise and sport sciences reviews*, 29(2), 88-92.
- 5) 下田光一, 八田秀雄, 2018, 運動と疲労の科学, 大修館書店
- 6) 体育科学センター編, 1983, スポーツによる健康づくり運動カルテ—体育科学センター方式, 講談社
- 7) 栗原, 山崎ほか, 2019, ファン付き作業服を用いた暑熱ストレス低減化に関する研究 (第9報) 建設現場における実測と疲労率による評価, 空気調和・衛生工学会大会, 169-172