肘関節屈曲時の時間経過に伴う筋疲労による主観的疲労感特性

○野沢 朱那（首都大学東京大学院 システムデザイン研究科）

茅原 崇徳, 瀬尾 明彦（首都大学東京 システムデザイン学部）

Perceived Fatigue Properties due to Muscle Fatigue of Elbow Flexion with Time

Ayana NOZAWA (Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University)

Takanori CHIHARA, Akihiko SEO (Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University)

1. はじめに

日常生活や生産現場では、長時間同じ作業を繰り返し行う場面が多く存在する。発揮力の低い作業であっても、時間経過とともに身体負担は変化していき、疲労が大きくなると考えられる。そこで、時間経過に伴う身体負担を評価し、長時間作業による疲労の軽減をすることが必要である。

筋疲労を定量的に評価している先行研究¹⁾では、筋電図の周波数スペクトルが筋疲労に伴い低下することが示されている。しかし、低負荷の場合、周波数の低下は顕著に表れにくく、筋疲労を評価することが難しい。そこで、製品や作業現場の設計において人間の感覚を考慮することは重要であると考え、主観評価に着目した。物理的負荷と主観評価には強い相関関係がある²⁾ことが示されているが、筋疲労に伴う主観的疲労感の推移に着目した研究は少ない。そこで、本稿では継続的な作業における身体負担の評価を可能にするため、最大関節モーメントに対する比である関節モーメント比を変化させた際の時間経過に伴う主観的疲労感の定式化を試みる。

2. 方法

2.1. 実験方法

被験者は、12名（男女各6名）の学生である。被験者の年齢、身長及び体重はそれぞれ 22.4 ± 1.1 歳、 1645.4 ± 79.8 mm、 58.64 ± 11.89 kg（平均±標準偏差）であった。

実験では、関節モーメント比を変化させた際の肘関節屈曲時の時間経過に伴う身体負担を計測した。肘関節角度は90度とし、前腕で荷物保持をさせて負荷を加えた。図1に実験概要図を示す。また、関節モーメント比を10%、20%、30%の3水準とし、計3条件で行った。荷物保持の時間は、関節モーメント比10%、20%、30%のとき、それぞれ7分間、4.5分間、3分間とした。なお、荷物の質量を変化させて関節モーメント比の大きさを調節した。実験は1日1条件で行った。

2.2. 計測項目

被験者に「肘関節を中心とした前腕から上腕の疲労感」を0から50までの51段階で回答させた。ただし、主観評価値が50を超えても構わないことを教示した。

疲労過程を荷物保持中、回復過程を荷物保持終了後とした。被験者に、疲労過程では負荷を加えた瞬間から30秒ごとに評価を行うよう指示した。回復過程でも主観評価を0（疲労感なし）になるまで計測を行った。

3. 結果・考察

図2に関節モーメント比10%条件における疲労過程と回復過程の主観的疲労感の結果を示す。ただし、AからLは被験者を示す。疲労過程における主観的疲労感は、時間経過に伴い単調増加しているのに対し、回復過程では、時間経過に伴い単調減少している。関節モーメント比20%と30%条件でも同様の傾向を示した。表1に疲労過程における保持開始時点と終了時点の主観評価の平均と標準偏差を示す。保持開始時点の主観的疲労感、関節モーメント比が大きくなるほど大きくなった。また、保持終了時点での主観的疲労感のばらつきは、関節モーメント比が小さくなるほど大きくなった。これは、関節モーメント比が小さくなるほど、主観的疲労感の要因として時間の影響が大きくなるためだと考えられる。表2に回復過程における主観評価の変化率の平均と標準偏差を示す。主観的疲労感の変化率は、関節モーメント比が大きくなるほど大きくなった。

図1.実験概要図

図2.疲労(左)・回復(右)過程における主観評価
(関節モーメント比10%)

表1.疲労過程の主観評価の平均[点]と標準偏差

関節モーメント比	保持開始時点	保持終了時点
10%	1.56±2.55	26.0±11.1
20%	4.31±3.64	34.0±8.97
30%	6.95±5.19	40.2±6.74

表2.回復過程の主観評価の変化率の
平均[点/min]と標準偏差

関節モーメント比	変化率
10%	-6.83±1.91
20%	-8.76±3.46
30%	-9.88±2.65

表3.疲労過程の絶対誤差の平均[点]と標準偏差

	保持開始時点	保持終了時点
疲労過程	3.02±2.31	7.29±5.95

表4.回復過程の絶対誤差の平均[点]と標準偏差

関節モーメント比	絶対誤差
10%	7.87±7.35
20%	6.75±5.54
30%	4.68±3.63

4. 評価関数の構築

疲労過程と回復過程ともに、まず時間における主観的疲労感の変化率の応答曲面を作成した。応答曲面は、変化率の自然対数をとることで線形補間を行い、指数関数モデルで表現した。そして、作成した変化率の式の両辺を積分することで、疲労過程と回復過程における主観的疲労感の評価関数をそれぞれ作成した。

疲労過程における主観的疲労感の評価関数 f_1 では、保持時間 t_1 と関節モーメント比 r_1 を説明変数とし、積分定数を保持時間 t_1 が0のときに f_1 が主観的疲労感の初期値 f_0 と一致するように定めた。 f_0 は、関節モーメント比 r_1 を説明変数とした一次多

項式で作成した。 f_0 と f_1 を次式に表す。

$$f_0 = 26.92 \times r_1 - 1.11 \quad (1)$$

$$f_1 = -9.23 \times \{\exp(-1.08 \times 10^{-1} \times t_1 + 3.40 \times r_1 + 1.39) - \exp(3.40 \times r_1 + 1.39)\} + f_0 \quad (2)$$

回復過程における主観的疲労感の評価関数 f_2 では、回復時間 t_2 と先に求めた疲労過程における主観的疲労感 f_1 を説明変数とし、積分定数を回復時間 t_2 が0のときに f_2 が f_1 と一致するように定めた。 f_2 を次式に表す。

$$f_2 = 4.53 \times \{\exp(-2.21 \times 10^{-1} \times t_2 + 1.65 \times 10^{-2} \times f_1 + 1.89) + \exp(1.65 \times 10^{-2} \times f_1 + 1.89)\} + f_1 \quad (3)$$

表3に疲労過程における絶対誤差の平均と標準偏差を示す。平均絶対誤差は、保持開始時点に対して保持終了時点の方が大きくなった。これは、関節モーメント比に関わらず、主観的疲労感のばらつきが、保持開始時点に対し終了時点の方が大きいと考えられる。表4に回復過程における絶対誤差の平均と標準偏差を関節モーメント比別に示す。平均絶対誤差は、関節モーメント比が小さくなるほど大きくなった。これは、回復開始時点の主観的疲労感が被験者間で異なるデータを用いて評価関数を作成したため、実測値のばらつきに応じて評価関数の平均絶対誤差も大きくなったと考えられる。従って、回復過程では回復開始時点のばらつきを考慮した評価関数を検討すべきである。

5. まとめ

本稿では、関節モーメント比を変化させた際の肘関節屈曲時の時間経過に伴う筋疲労を主観評価により計測した。実験結果を基に、疲労過程と回復過程における主観的疲労感の評価関数をそれぞれ指数関数モデルで構築した。本稿で作成した疲労過程の評価関数を用いることで、継続的な作業における身体負担の評価に寄与できると考えられる。

参考文献

- 1) 正門他：“表面筋電図周波数分析による筋疲労の検討”，1994.
- 2) Kee他：“Relationships between subjective and objective measures in assessing postural stresses”，2012.