

運動習慣による高齢労働者の暑熱障害リスク低減効果の解明

The risk of heat-related injuries decreases in elderly workers who partake in daily exercise

大阪府立大学	飛田 国人
派遣期間	2017年9月1日～2018年8月31日
研究機関	Department of Automation, Biocybernetics and Robotics, Jožef Stefan Institute Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenia
研究指導者	Prof. Igor B. Mekjavić

The “workforce” average age is increasing and will continue to do so. The risk for occupational heat-related injuries is more pronounced in older workers. Further, climate change will add to the occupational thermal load particularly during heat waves. Manufacturing labourers are often exposed to increased heat stress. The aim of the present study was to simulate, using a bespoke thermal model, the potential for exercise to reduce the risk of heat injury in older workers (60yrs) within manufacturing plants, i.e. automotive lighting components. Our group identified maximal thermal conditions of 40°C in a Slovene manufacturing plant with predictions of 45°C in the future. Therefore, we applied our thermal model to these thermal stress loads (40 & 45°C). The model allows one to change the thresholds of sweating, vasodilatation and blood flow, which, are typical adaptations to exercise. The outcome measures were core and mean skin temperature. Our model indicates that, as expected, reducing the thresholds for sweating and vasodilatation causes notably decreases in core and mean skin temperatures. Secondly, increased blood flow and vasodilatation maintained core and skin temperature in hot environments. The thermoregulatory parameters that are improved by exercise are dependent on the specific exercise. Exercise tailored for the elderly would, ideally be designed to target the sweating and vasodilatation thresholds to reduce the risk of heat injuries in this working population.

研究目的

超高齢社会を迎える日本はもちろん、先進諸国では労働力の衰退や社会保障、福祉の維持が課題である。政府は高齢労働者の活躍を推進することで課題の解決を目指しているが、高齢者が働く際には生産性の低下や労働中の疾患が問題となる。60歳は40歳より生産性が平均20%低下し[Kenny et al., 2008]、職場の気温が25°Cから1°C上がるにつれて生産性は2%下がる。気候変動による将来的な気温上昇が予想される今、暑熱障害を防ぐことは高齢者が健康に活躍できる環境の構築につながり、人類の健康増進と社会、経済の安定に寄与する。

運動習慣は、心肺機能や筋力の衰えを抑制し、体温調節機能を維持すると考えられるため、暑熱障害

予防策の一つとして挙げられる。しかし、運動習慣による高齢労働者の暑熱障害リスク低減効果を検討した研究はない。そこで本研究では、運動習慣が、労働環境における高齢者の暑熱障害リスクを低減する効果を明らかにすることを目的とする。

研究経過

本研究では、自動車用テールランプの製造・開発を担うスロベニアの企業を研究対象として取り上げた。テールランプはプラスチックを溶かして成型するため、製造工場内の温度が高温になる。したがって、工場の従業員は暑熱障害リスクが高い環境で日常的に働いている。

工場付近の屋外1ヶ所と、工場内33ヶ所に設置し

た温湿度センサーの測定データから、2017年5～8月のデータを解析した。屋外気温が7～37℃で変動し、平均20℃であったのに対し、工場内気温は14.4～40.2℃で変動し、平均30.2℃であった。

暑熱障害リスクを評価するために体温調節モデルを構築し、工場内を想定した環境条件における体温変動をシミュレーションにより検証した。体温調節モデルには、人体モデルを6部位で構成したStolwijkモデルを用いた[Stolwijk, J. A. J., 1971]。本研究では、若年者モデルに対して高齢者モデルの代謝量、血流量、発汗制御係数、血管拡張制御係数を低く、発汗・血管拡張閾値を高く設定することで体温調節における加齢の影響を表現した。運動の効果として、年齢により低下した機能の1つもしくは複数、若年者と同程度まで向上すると想定した。

シミュレーションにおける環境条件は当初、スイス気象庁MeteoSwissから将来の気候予測データを取得する予定であったが、重度の暑熱ストレスを想定して評価する方が研究目的により合致するため、工場内の環境測定結果を基に設定した。具体的には、測定データの最高気温40℃の条件と、より重度の暑熱環境として45℃の条件を設けた。

気温45℃、湿度20%でのシミュレーションの結果、若年者よりも高齢者の方が頭部深部温で0.71℃、平均皮膚温で0.60℃高く、発汗量は54g少なかった。高齢者の体温調節機能が運動によって1要因のみ向上すると仮定してシミュレーションした結果、体温の低下は皮膚の発汗・血管拡張閾値、脳の発汗・血管拡張閾値、発汗制御係数を若年者と同値に設定した場合に認められた。一方で、高齢者の血流量または血管拡張係数を若年者と同値に設定した場合は、体温が約0.1℃上昇した。代謝量の向上による体温変動は-0.02℃と小さかった。脳の発汗・血管拡張閾値が最も体温低下効果が大きく、若年者と高齢者の体温差は0.13℃まで減少した。40℃条件においても、結果の全体的な傾向は同様であった。

暑熱ストレスが工場の生産性に及ぼす影響を検討した。まず、工場近辺の屋外気温データを1986～2015年の平年気温と比較し、ヒートウェーブが生じていた4期間を同定した。ヒートウェーブ前とヒートウェーブ期間の工場の生産性(量)に差は認められなかったが、ヒートウェーブが3～4日継続した場合は、ヒートウェーブ後に生産性の低下が認められた。継続日数が1～2日である場合には、ヒートウェーブ後に生産性の低下は生じなかった。

ヒートウェーブが3～4日継続した場合に生産性が低下したことから、原因は疲労の蓄積であると考え、労働者の疲労についての調査を実施した。工場労働者15名を対象とし、2018年4～8月に疲労と睡眠に関する質問紙に回答させた。疲労の調査結果では、ベースラインとヒートウェーブ期間中・後に有意な差は認められなかった。一方、睡眠の調査結果では、ヒートウェーブ期間中・後はベースラインよりも睡眠の持続性が低下していた。

生産性の低下を予防するために、労働者の身体状況インジケータとしてサーマルマネキン工場内に設置することを計画している。このサーマルマネキンは皮膚を模した素材で被覆した新型であり、まだ製作途中である。これまでに、皮膚素材の厚さ、温度センサーの実装方法などの検討が完了し、現在は全身の皮膚素材の納品を待っている。このサーマルマネキンを工場内の環境条件に設定した温湿度チャンバーに曝露し、労働者の体温変動に合致するように発熱量等のパラメータ調整を行う予定である。パラメータの調整では、前述の体温調節モデルにおけるシミュレーションの結果を参考にする。サーマルマネキンは完成後、テールランプ製造工場に実際に設置することが予定されている。

考察

外気温変動に比べて、工場内気温の変動は小さく、長期間に渡って暑熱環境が形成されていることが確認された。シミュレーションによる体温変動の値は、高齢者モデルの設定パラメータに依存するため、計算結果の数値ではなく各要因の影響の大小関係に着目した。加齢によって低下した体温調節機能は、運動習慣によって強化できる。しかし、本研究で示されたように、血流量や血管拡張制御係数の強化は体温を上昇させる、少なくとも体温低下は期待できないため、暑熱障害リスクを低減できない。暑熱障害リスク低減の点から考えれば体温をより低く維持することが望ましく、脳の発汗・血管拡張閾値を低くすることが最も大きな効果を示した。発汗・血管拡張閾値を低くするには、たとえば最大挙上重量の60～80%の負荷で8回2～3セットの筋トレを週3日、8週間継続することで実現できる[Okazaki et al., 2002]。また、気温35℃、最大酸素摂取量に対して50%の負荷でエルゴメーター運動を1時間、連続10

日継続することでも発汗・血管拡張閾値は低くできる[Roberts et al., 1977]。後者の運動プログラムは10日間という短期間であるため、時間に余裕がない労働者でも実施しやすいと考えられる。気温35°Cの環境で運動しなければならないことは設備上のデメリットであるが、工場の1室に強力なエアコンを設置すれば実現は可能であろう。また、本研究の調査結果で工場内の平均気温は30°Cであったため、工場の一隅で運動させるだけで済む可能性もある。

運動によって体温調節機能の強化は可能であるが、強化される機能は運動プログラムの内容によって異なる。暑熱障害リスクを効率よく低減するためには、発汗・血管拡張閾値を低くできるプログラムの実施が必要である。そのため、労働者でも実施しやすいように、短期間で、容易に効果が期待できる運動プログラムの開発が望まれる。また、運動プログラムによっては逆に体温上昇を促進してしまう可能性も本研究で示唆された。日常的に運動する習慣があるというだけでは、暑熱障害が予防できるわけではない点には注意しなければならない。

我々は既往研究を基に、工場の生産性低下はヒートウェーブ期間に生じると仮説を立てていたが、実際にはヒートウェーブ後に低下した。熱中症罹患者数は、日平均気温が最も高い日の2~3日後に最も多くなることが報告されており、本研究で確認された生産性低下は熱中症罹患者数と同様の傾向があった。工場労働者の睡眠持続性が、ヒートウェーブ期間中・後に低下していたことから、睡眠による疲労回復が不十分なために疲労が蓄積し、生産性が低下したのではないかと考えている。

本研究でのシミュレーション結果では、45°C環境であっても高齢労働者の体温は最高38°C程度であった。また、暑熱障害の罹患者でしばしば報告される39°Cや40°Cの体温は、発汗に関するパラメータを著しく低く設定して発汗がほぼ0にならなければ現れなかった。本研究では90分間の曝露しか想定していないため、数日間にわたる暑熱ストレスや疲労の蓄積は考慮できていない。発汗機能の異常が、疲労の蓄積や暑熱ストレスの継続によって引き起こされるようなアルゴリズムが構築できれば、暑熱障害リスク評価により寄与できると考えられる。

参考文献

1. Kenny G.P., Yardley J.E., Martineau L., Jay O. (2008). Physical work capacity in older adults: implications for the aging worker. *American Journal of Industrial Medicine*, 51(8):610-25.
2. Okazaki K., Kamijo Y., Takeno Y., Okumoto T., Masuki S., Nose H. (2002). Effects of exercise training on thermoregulatory responses and blood volume in older men. *Journal of Applied Physiology*, 93:1630-1637.
3. Roberts M.F., Wenger C.B., Stolwijk J.A., Nadel E.R. (1977). Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*, 43(1):133-7.
4. Stolwijk, J. A. J. (1971). A mathematical model of physiological temperature regulation in man. NASA-Langley, CR-1855.

研究の発表

口頭発表

1. Tobita K., Gliha M., Ciuha U., Kingma B., Mekjavic I.B. (2018). Prediction of thermal comfort based on the Mekjavic-Morrison neuronal model. *Proc. PPTR 2018, Split, Croatia*, p173.
2. Ciuha U., Tobita K., McDonnell A.C., Mekjavic I.B. (2018). Perception of thermal comfort during changes in the ambient temperature and humidity. *Proc. PPTR 2018, Split, Croatia*, p24.
3. Ciuha U., Tobita K., Sotiridis A., Eiken O., Mekjavic I.B. (2018). Enhancement of the cold-induced vasodilatation response following 10-day heat acclimation: an example of exaptation? *Proc. PPTR 2018, Split, Croatia*, p.196.
4. Gliha M., Ciuha U., Tobita K., Mekjavic I.B. (2018). Training a neural network model to predict heat stress in the manufacturing industry on the basis of weather forecasts. *Proc. PPTR 2018, Split, Croatia*, p.98.

誌上発表

なし