

## マスク着用による生理学的負担

上野 哲

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所環境計測研究グループ

(2020年7月15日受付)

**要旨：**職場における新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) を防止のための基本対策の一つにマスクの着用が挙げられている。粉塵等の有害物質のばく露を受ける労働環境ではマスクの着用が義務づけられているように新型コロナウイルス感染症対策でも職場でマスクの着用を要求される可能性がある。熱中症が重大な労働衛生上の問題となる夏季において、マスクの着用により熱中症の危険性を高めるかどうか問題となっている。本稿では、最初に呼吸による放熱量をモデル計算で予測する。次に、吸気抵抗や運動強度の程度により防護用のマスクの着用が及ぼす生理学的な負担についての文献を紹介する。最後にサージカルマスクや N95 マスクのウイルスへの防御性能についての文献を紹介する。同種のマスクでも物理的な特性に違いがあるため、通気性が高くフィルター機能も優れたマスクを選択することの重要性を指摘する文献もあった。

(日職災医誌, 69:1-8, 2021)

### —キーワード—

マスク, 生理学的負担, COVID-19

### はじめに

2019 年末に中国武漢で発生した新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) は、数カ月で WHO がパンデミック (2020 年 3 月 11 日)<sup>1)</sup>と認める世界的な大流行となった。国内でも、新型コロナウイルス感染症の拡大を受け 4 月 7 日に政府から緊急事態宣言が発出され、その基本的対処方針 (2020 年 5 月 14 日)<sup>2)</sup>の中で「マスクの着用」「人と人の距離の確保」「手洗いなどの手指衛生」の 3 つの基本的な感染症対策が示された。感染者数の分析<sup>3)</sup>や数値シミュレーション<sup>4)</sup>により、公の場でのマスク着用が新型コロナウイルスの感染者数を抑える働きがあることを支持する報告がある。厚生労働省においては、「職場における新型コロナウイルス感染症への感染防止予防、健康管理の強化について」<sup>5)</sup>の中で、「外出時、屋内にいる時や会話するときは症状がなくてもマスク着用」が感染防止のための基本対策に挙げられている。国土交通省の工事現場等での感染予防対策<sup>6)</sup>の中でも、現場でのマスクの着用の励行が含まれている。

一方、近年の地球温暖化の影響により夏季は高温となるため、屋外作業が多い建設業等においては毎年熱中症が多数発生している。厚生労働省<sup>7)</sup>によると、職場における熱中症による死傷者数では過去 10 年間で 2018 年が最も多く 1,178 人で次に 2019 年が 829 人と 2 番目に多い。

2018 年は 7 と 8 月、2019 年は 8 月に日中の最高気温が高かったことが影響していると考えられる。2020 年の夏は熱中症対策に加えて新型コロナウイルス感染症対策が労働現場においても求められている。Cirrincione ら<sup>8)</sup>は、個人のできる職場での対策として手洗い、手袋、マスク及びゴーグルの着用を挙げている。

夏の屋外暑熱環境でのマスク着用は暑熱感や不快感を高める。新型コロナウイルス感染症対策でのマスク着用により熱中症の危険性が増すのかについて関心が高まっており、確かな情報が必要である。粉塵等の有害物質にばく露される労働現場ではマスクの着用が義務付けられてきたため、マスクの人体への生理学的な影響についての研究は以前からなされてきた。本稿では、労働現場で用いられてきたマスクをはじめ、N95 マスク、サージカルマスク等の知見を紹介する。最初に、呼吸による放熱量の大きさを示し、次にマスク着用時のマスクの呼吸抵抗や高負荷の作業が身体に及ぼす生理学的影響を紹介し、最後にマスクの防御機能を述べる。

### 呼吸による放熱量

体温変化は、常に変化する身体と環境間の熱収支式 (1) の左辺の蓄熱量から決定される。

$$S = \text{Met} - \text{Work} - K - C - R - E - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} \quad (1)$$

ここで、S：蓄熱量[W/m<sup>2</sup>]、Met：身体の代謝量[W/

表1 計算に用いた環境条件

	A	B	C	D	E
気温 (°C)	38	33	33	33	28
相対湿度 (%)	30	30	60	60	60
平均放射温度 (°C)	100	100	100	33	100
風速 (m/sec)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

$m^2$ ], Work: 環境への仕事量 [ $W/m^2$ ], K: 身体と環境間の熱伝導 [ $W/m^2$ ], C: 身体と環境間の対流熱伝導 [ $W/m^2$ ], R: 身体と環境間の輻射熱 [ $W/m^2$ ], E: 身体からの蒸発熱 [ $W/m^2$ ],  $E_{res}$ : 呼吸による蒸発熱 [ $W/m^2$ ],  $C_{res}$ : 呼吸による対流熱伝達 [ $W/m^2$ ] である。

呼吸による放熱量は一般に次の式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$\text{呼吸による放熱量} = E_{res} + C_{res} = \dot{V}_e i_e - \dot{V}_a i_a \quad (2)$$

ここで,  $\dot{V}_e$ : 単位時間呼気ガス量 [kg(乾燥重量)/h],  $i_e$ : 呼気ガスエンタルピー [kcal/kg(乾燥重量)],  $\dot{V}_a$ : 単位時間吸気ガス量 [kg(乾燥重量)/h],  $i_a$ : 吸気ガスエンタルピー [kcal/kg(乾燥重量)] である。

呼吸による放熱量は, 式(2)で示したように呼吸による蒸発熱及び対流熱伝達の合計であるが, それぞれ様々な近似式が提唱されている。世界的によく使われる暑熱負担予測モデルの Physiological Heat Strain (PHS) で使われている式を(3), (4)で示した。

$$E_{res} = 0.00127 \times Met \times (59.34 + 0.53 \times T_a - 11.63 \times P_a) \quad (3)$$

$$C_{res} = 0.001516 \times Met \times (28.56 - 0.885 \times T_a + 0.641 \times P_a) \quad (4)$$

ここで, Met: 代謝量 [ $W/m^2$ ],  $T_a$ : 気温 [°C],  $P_a$ : 蒸気圧 [kPa] である。PHSモデルは, Malchaireら<sup>10)</sup>によって労働者の暑熱負担を予測するために開発され, ISOにISO 7933<sup>11)</sup>として承認された。暑熱基準であるISO 7243<sup>12)</sup>やACGIH-TLV<sup>13)</sup>においても, より詳しく暑熱負担を分析するツールとして紹介されている。PHSでは, 1分毎の身体の熱収支(式(1))を計算することにより体温変化や発汗量を1分毎に予測することが出来る。Chenら<sup>14)</sup>は, このPHSを用いて呼気ガスによる放熱量を計算し, 台湾の鉄鋼業労働者の値と比較した。鉄鋼業労働者は気温及び放射熱が高い過酷な暑熱環境の下で高強度の作業を行っている。PHSモデルは, おもに欧米人を対象に作られているため亜熱帯の台湾に暮らす人に当てはまらない可能性もあったが, 呼吸における対流熱伝達( $C_{res}$ )に関してPHSモデルはよく合致しており, 呼吸による蒸発熱( $E_{res}$ )に関して11%大きく予想するだけであった。従って, 日本の夏季屋外労働でも $C_{res}$ や $E_{res}$ をPHSモデルがほぼ正確に予想することが期待できるため近年5年間の東京の屋外夏季気温<sup>15)</sup>と黒球温度<sup>16)</sup>を参考にA~Eの気象条件(表1)を定め, 60分間の作業後に予測される $C_{res}$ ,  $E_{res}$ を計算した(表2)。ここではAnnex E (ISO7243)<sup>12)</sup>の基準値に記載された3種類の代謝強度(高強度, 中強度, 低強度)を仮定した。暑熱環境での作業なので, 本計算では作業者が暑熱順化している

表2 呼吸による放熱の有無による対流・輻射・蒸発熱

	代謝量 ( $W/m^2$ )	呼吸対流 熱 ( $W/m^2$ )	呼吸蒸発 熱 ( $W/m^2$ )	呼吸放熱/ 代謝量 (%)
A	99.7 (低代謝)	-0.6	7.1	6.5
	166.2 (中代謝)	-1	11.9	6.6
	229.9 (高代謝)	-1.3	16.5	6.6
B	99.7 (低代謝)	0.0	7.5	7.5
	166.2 (中代謝)	0.1	12.5	7.6
	229.9 (高代謝)	0.1	17.3	7.6
C	99.7 (低代謝)	0.2	5.3	5.5
	166.2 (中代謝)	0.3	8.8	5.5
	229.9 (高代謝)	0.4	12.2	5.5
D	99.7 (低代謝)	0.2	5.3	5.5
	166.2 (中代謝)	0.3	8.8	5.5
	229.9 (高代謝)	0.4	12.2	5.5
E	99.7 (低代謝)	0.8	6.1	6.9
	166.2 (中代謝)	1.3	10.1	6.9
	229.9 (高代謝)	1.8	14.0	6.9

A~Eは, 表1の環境条件。正の値は身体から環境への放熱, 負の値は環境から身体への熱の流入。

状態を仮定した。夏季屋外の気象条件では呼吸による放熱はほとんどが $E_{res}$ であった(表2)。 $C_{res}$ と $E_{res}$ を合わせた呼吸による放熱は, 代謝量の6.6%(A), 7.6%(B), 5.5%(C), 5.5%(D), 6.9%(E)であり各環境においては, 代謝強度にはほとんど依存しなかった。Chenら<sup>14)</sup>の被験者実験の結果である5%に近かった。呼吸による放熱量は全身の代謝量の5~10%であるため, マスク着用により放熱量が減少したとしても影響は小さいと考えられる。

### 生体に影響するマスクの物理指標

マスクを通して空気を吸入するには, マスク内の気圧を外と比べて低く保つ必要がある。マスクの吸気抵抗が大きいと息を吸うときに働く筋肉群(横隔膜や肋間筋)に負担が生じる<sup>17)</sup>。また, マスクと顔の皮膚との間にデッドスペースがあればその体積は呼吸における人体内の解剖学的な気道等のデッドスペースに上乗せされるためより多量の空気を吸い込むことが必要となる<sup>17)</sup>。マスクをつけない時と同じ量の新鮮な空気を吸い込むためには一回換気量を増やすか呼吸数を増やすかであるため, 呼吸をするにはより多くの仕事量が必要となる。Doolyら<sup>18)</sup>の研究では, マスクの吸気抵抗やデッドスペースの増加のためにマスク着用により最大酸素摂取量の推定値は10%程度減少した。マスクの吸気抵抗が大きいと吸気にかかる時間が長くなるため呼吸全体の時間がかかり毎分の呼吸数が減少する。肺の中には吸った空気が長く存在することになり, 1回の呼吸での肺での酸素吸収率は高まる。若年者で筋力があれば息を吸う仕事量の増加は相対的に大きくないが, 高齢者で体力が低下している場合はマスク着用による負担が相対的に大きくなる可能性がある。

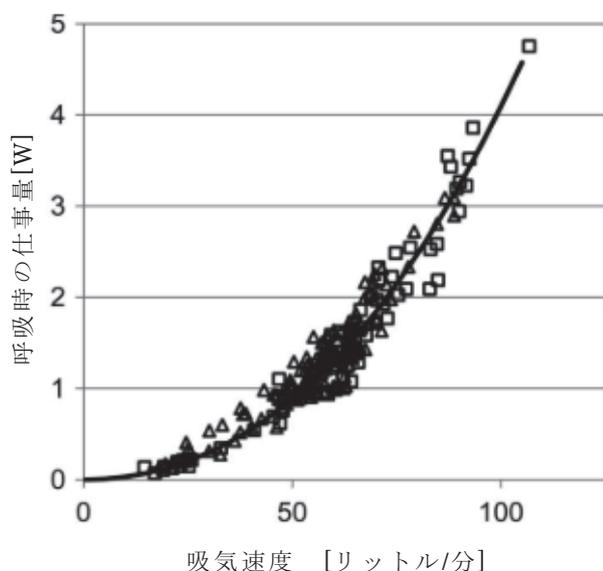


図1 吸気速度と呼吸時の平均仕事量との関係（参考文献<sup>20)</sup>のFigure 7より引用）  
 □：米軍兵士を対象とした傾斜を漸増するトレッドミルを用いた試験結果  
 △：米軍兵士を対象としたラダーミル（連続して梯子を登る機械）を用いた試験結果  
 黒の実線は、全データの漸近線

#### マスクの呼吸抵抗、運動強度、マスクの種類の影響

マスクの呼吸抵抗は、マスク着用時の身体負担に影響を与える要因となる。労働現場では、マスク着用時に高負荷の作業を長時間行うことを要求される場合があるため多くの研究がなされてきた。アメリカ労働安全衛生研究所(NIOSH)では<sup>19)</sup>、 $85 \pm 2$ L/分の定常状態の気流の下で、マスクの吸気抵抗の基準値は $35\text{mmH}_2\text{O}$ ( $343.2\text{Pa}$ )、排気抵抗の基準値は $25\text{mmH}_2\text{O}$ ( $245.1\text{Pa}$ )としている。ただし、休息中にマスクを通過する呼吸量は $6 \sim 7$ L/分位であるが運動中は $70 \sim 120$ L/分となるため呼吸量の違いによる基準が必要である。Shykoffら<sup>20)</sup>はマスクの吸気抵抗は吸気速度の2次関数で増加し、呼吸に使われる仕事量は吸気速度の3次関数で増えることを示した(図1)。

マスクの呼吸抵抗が高いときの身体への影響を報告した文献を次に紹介する。Carettaら<sup>21)</sup>は4種類の吸気抵抗の異なるマスク( $200, 290, 390, 490\text{Pa}$ )をつけてトレッドミルによる80%の最大酸素摂取量の負荷を9人の被験者に行った。マスク非着用時と4種類の異なる吸気抵抗のマスク着用時の換気量はそれぞれ、 $86.8, 84.7, 78.3, 73.9, 56.1$ L/分と吸気抵抗が高くなるにつれて減少し、酸素消費量に対する空気の換気等量が減少した。呼吸するときの抵抗が高くなることで、肺の中に空気が滞留する時間が長くなったからと考えられた。運動による酸素消費量に対して吸気量が追い付いていないことを示し、その結果運動継続可能時間が短くなった。吸気抵抗が高い

と、呼吸するのに多くのエネルギーが必要となることも要因と考えられる。

マスクの呼吸抵抗が小さい方の研究では、Robergeら<sup>22)</sup>が3種類の呼吸抵抗( $3, 6, 9\text{mmH}_2\text{O}$ )のマスクについてトレッドミルによる被験者実験を $5.6\text{km/時}$ の歩行速度で行った。その結果、心拍数、呼吸数、酸素飽和度、鼓膜温、毎分換気量、二酸化炭素産生量、一回換気量に有意差がなかった。熱的快適性や全体の呼吸快適性にも差はなかった。従って、 $9\text{mmH}_2\text{O}$ ( $88.2\text{Pa}$ )以下の呼吸抵抗のマスク着用では、マスク着用していない時との比較で生理指標及び主観感覚に差はなかった。

次に、運動負荷を増やした時のマスクの影響を調べた実験を紹介する。Qiuら<sup>23)</sup>は、8人の平均年齢 $20.3$ 歳の男性被験者に対し自転車エルゴメータによる負荷を $0\text{W}$ から4分毎に $25\text{W}$ 増やして心拍数が $180$ 回/分に達するまで続けた。二種類のフィルター(気流 $90\text{L/分}$ の時にタイプI(吸気抵抗: $356\text{Pa}$ 、排気抵抗: $83\text{Pa}$ )、タイプII(吸気抵抗 $31\text{Pa}$ 、排気抵抗: $35\text{Pa}$ ))をマスクにそれぞれ装着して実験中の生理指標を比較した。マスクは同型のものを使用しているため、デッドスペースは同じであった。エルゴメータの負荷が $125\text{W}$ 以上でタイプIの吸気抵抗があるマスクを装着した方がタイプIIのマスクの時よりも一分間の呼吸数や換気量が有意に高値となった。運動継続可能時間も低抵抗マスクで $31 \pm 2$ 分、高抵抗マスクで $29 \pm 3$ 分であり有意に低抵抗マスクで長かった。被験者の不快感は高抵抗マスクで有意に高く、運動量が大きくなるにつれて、呼吸抵抗の違いが生理指標に影響を及ぼした。

以上の研究成果は次のことを示唆した。(1)マスクの吸気抵抗が大きくなると、換気量が減少し、呼吸筋群に対する負荷からエネルギー消費量が増加して運動継続可能時間が短くなった。(2)マスクの吸気抵抗が小さいと、生理指標への影響はなかった。(3)マスク着用時運動強度が小さいと心拍数等に変化はないが、ある一定の運動強度を超えるとマスクを着用していない時と比較して有意に心拍数が上昇した。

実験で用いられたマスクは、呼吸抵抗が比較的大きいマスクであった。表3にスモッグ対策に用いられる一般の健康マスクの吸気抵抗と排気抵抗の値を示す<sup>24)</sup>。平面マスクが最も呼吸抵抗が低く、次がカップ型のマスクで、折りたたみ型のマスクは呼吸抵抗が高かった。素材では木綿が不織布より呼吸抵抗は低かった。バルブがあるマスクは排気抵抗が小さかった。いずれもNIOSHの基準の $1/3$ 程度であったが、新型コロナウイルス感染症対策に用いられるマスクは、さらに呼吸抵抗が低いと考えられる。

#### サージカルマスクやN95マスク着用時の低から中程度運動負荷による影響

Kimら<sup>25)</sup>は、4種類のN95マスクの影響評価を20人の

表3 代表的な健康マスクの特性

マスク番号	形	バルブ	素材	防護レベル	最大排気抵抗 (Pa)	最大吸気抵抗 (Pa)
1	折りたたみ型	有	不織布	≥ 90%	76.16	93.81
2	折りたたみ型	有	不織布	KN95	79.5	90.47
3	折りたたみ型	有	木綿	≥ 90%	72.92	88.17
4	折りたたみ型	有	不織布	KN95	56.26	86.73
5	折りたたみ型	無	木綿	≥ 90%	84.24	113.66
6	折りたたみ型	無	木綿	≥ 90%	92.2	106.86
7	折りたたみ型	無	不織布	≥ 90%	82.3	92.11
8	折りたたみ型	無	不織布	N95	93.89	103.24
9	カップ型	有	不織布	≥ 90%	60.16	92.48
10	カップ型	無	不織布	KN95	86.13	82.53
11	カップ型	無	不織布	N95	65.46	83.51
12	平面型	無	不織布	≥ 65%	54.67	77.54

いずれも中国でスモッグ対策に一般に用いられる健康マスク。12は通常のサージカルマスク。参考文献<sup>24)</sup>のTable 2とTable 3より引用

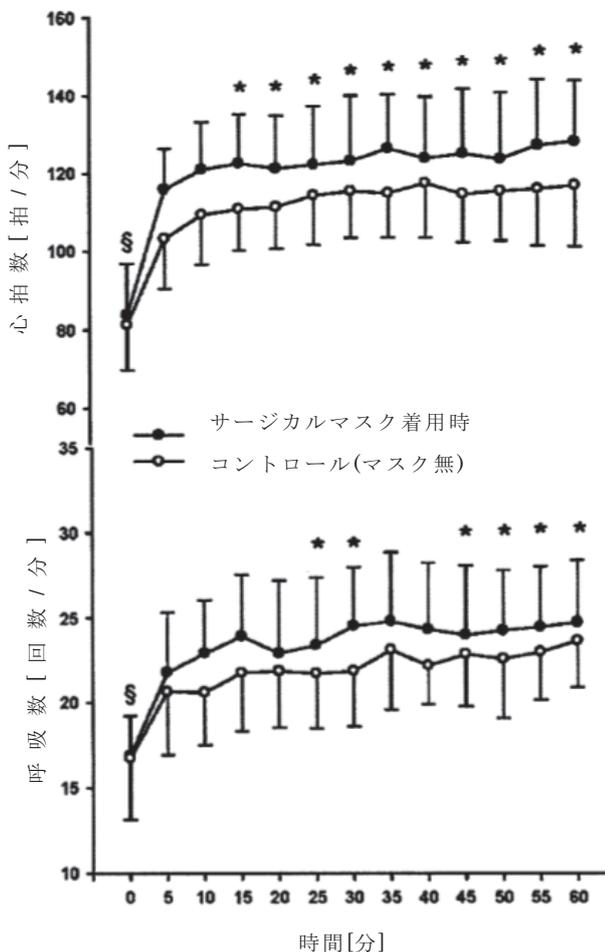


図2 時間毎の心拍数と呼吸数 (参考文献<sup>26)</sup>のFigure 1より引用)

★：サージカルマスク着用時とコントロール（マスク無）に有意差があり，§：実験開始時には有意差はなし。  
垂直の棒の長さは標準偏差。

若年者に対しトレッドミルによる5.6km/時の歩行速度での負荷を1時間加えることで行った。マスク着用時は非着用時よりも心拍数は5.7~10.6回/分、呼吸数は1.4~

2.4回/分、経皮二酸化炭素分圧は1.7~3.0mmHg有意に増加したが血中酸素飽和度には変化がなかった。マスクは呼吸するときの抵抗となるため、呼吸数や心拍数を増やして血液の酸素飽和度を維持していると考えられた。深部体温には有意差がなかった。Robergeら<sup>26)</sup>は、サージカルマスクの影響を調べるため20人の若年者に対して5.6km/時の歩行速度でのトレッドミルによる歩行実験を1時間行った。測定環境は気温25℃、相対湿度70%であった。サージカルマスク（呼吸抵抗3.9mmH<sub>2</sub>O）を装着した場合、深部体温は0.08℃しか変わらず有意差がなかったが、心拍数(110.8回/分から120.3回/分に上昇)、呼吸数(110.8回/分から120.3回/分に上昇)、経皮二酸化炭素分圧(39.31mmHgから41.48mmHgに上昇)には有意差があった(図2)。歩行実験直後のサージカルマスク内の気温は32.74℃、湿度は91.49%であったため、暑さを感じたマスク着用者の割合は52%となった。Liら<sup>27)</sup>は、サージカルマスクとN95マスクの影響をトレッドミルによる運動負荷試験で比較した。歩行速度は最初の20分が3.2km/時、10分休憩後次の10分間が4.8km/時、また10分間休憩して次の10分間6.4km/時であった。N95マスクを装着した人はサージカルマスクを装着した人よりも平均心拍数が高かった。マスクの抵抗が高いことで、酸素の摂取量が少なくなりそれが交感神経を刺激して心拍数が上昇すると考えられた。サージカルマスクでは、マスク内の湿度、気温はN95マスクよりも低かったが、マスク表面の温度、湿度ではN95マスクが高かった。サージカルマスクが呼吸の抵抗性や湿度、暑さの感覚及び全体的な不快感ではN95マスクよりも低かった。疲労感や全体的な不快感も酸素不足から生じると考察された。深部体温に変化なく、呼吸数、心拍数、経皮二酸化炭素分圧が有意に増加したことはKim<sup>25)</sup>やRoberge<sup>26)</sup>の結果と同じであった。Roberge<sup>28)</sup>らは、防護用マスクが人の体温調節に与える影響に関する総説で、防護用マスク着用により深部体温に与える影響は小さいだろうと述べ

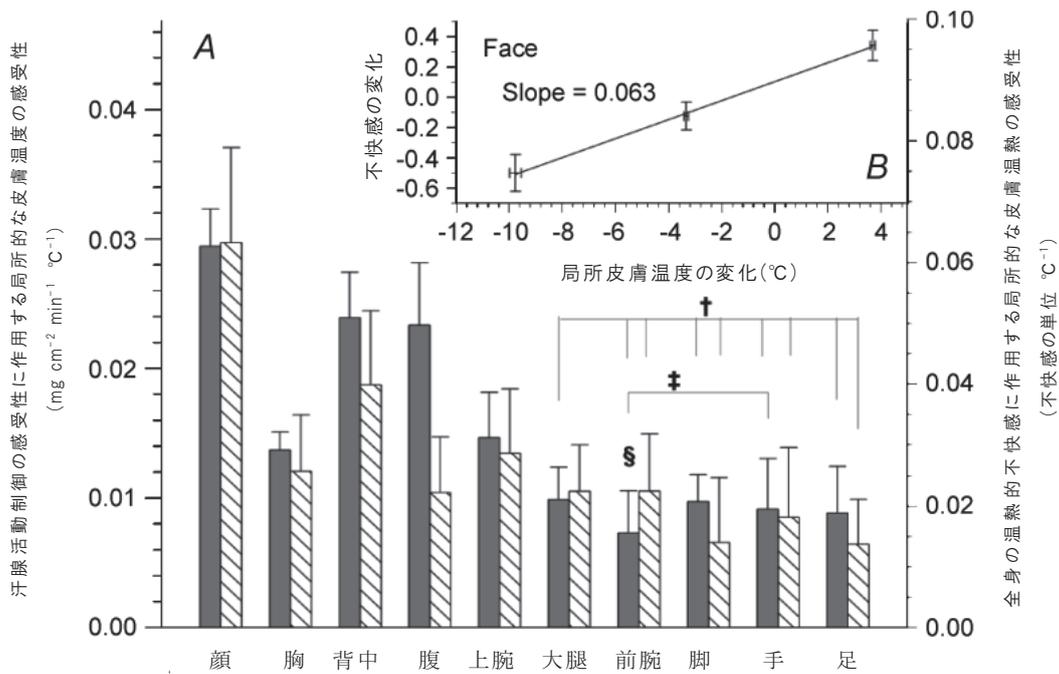


図3 汗腺運動制御や全身の温熱的不快感に対する局所的な皮膚の温度感受性 (参考文献<sup>29)</sup> の Figure 5 より引用)

3つの局所的な皮膚の温熱処理 (各部位の皮膚表面度を  $-11^{\circ}\text{C}$ ,  $-4^{\circ}\text{C}$ ,  $4^{\circ}\text{C}$  だけ変化) した時の平均汗腺活動の変化量 (例, 図 B の傾き) を灰色の棒グラフに示し, 局所皮膚温度の変化量に対して全身の熱的不快感の変化量 (図 B の傾き) を斜線の棒グラフに示した. † は顔の部分と該当する部分の皮膚の温度感受性が有意であることを示し, ‡ は腹部の皮膚と該当する部分の皮膚温度感受性が有意であり, § は背中中の皮膚と該当する部分の皮膚温度感受性が裕であることを示す. 垂直の棒の長さは標準偏差

ている.

以上の多くの実験結果では, 1時間ほどの低から中程度の運動負荷ではサージカルマスクと N95 マスクのいずれにおいてもマスク装着していない時と比較して深部体温は上昇しなかった. しかし, マスク内の気温やマスクに覆われた皮膚温度及び心拍数は上昇した.

### マスク内温度の影響

以上の文献では, 深部体温は上昇せず, N95 マスクやサージカルマスク内の皮膚温度が上昇し暑熱感や不快感につながることを示すものが多かった. 温熱に関する不快感の感受性は顔が体のほかの部位よりも大きい (図 3). これは顔において温熱受容体の密度が大きいからだと思われる<sup>29)</sup>. Nilsen ら<sup>30)</sup>の結果でも, 全身の温熱感覚は平均皮膚温度と上唇の表面温度に依存した. Laird<sup>31)</sup>らは, フェースマスク着用時には, マスクの内の唇の表面温度が上昇することを示した. 皮膚温度が  $34.5^{\circ}\text{C}$  を超えると不快感を訴える人が出てくるとされるが, 12人中6人で越えていた. マスクを外したとき皮膚温は低下し, 不快を感じる温度以下に下った. 顔の皮膚温度は深部体温よりも温熱感に関係していることは Kim<sup>32)</sup>らも示している. また, Hayashi ら<sup>33)</sup>は, マスクに排気孔があると呼吸による放熱が高まりマスク内の気温や湿度が減少してマスク内の皮膚温度が減少すると報告しており,

Roberge ら<sup>34)</sup>も同様の結果であった. マスクの不快感は, マスク内の高温以外にも, ゴムひもでの顔を圧迫, マスクの高い吸気抵抗等にも原因があるとされる<sup>17)</sup>. そのほかにも, 顔はほかの体の部位よりも表面温度上昇による発汗の感受性も高く<sup>29)</sup>, 汗を多量にかく. 汗はマスク内の不快感を増大させる要因の一つとなると考えられる.

### 長時間装着

Shenal ら<sup>35)</sup>の 27 人の医療従事者を対象とした 8 時間労働でのマスク着用の影響を調査した研究では, 不快感と作業疲労感は時間が経つごとに高まった. そのため長時間のマスク着用による仕事への影響が懸念された. ほんの少しでもマスクを外すことによりマスクへの不快感が減るという報告もある<sup>36)</sup>.

### マスクの防護性能

インフルエンザ感染症に対するマスクの有効性については, 実際のインフルエンザの患者を対象に行った実験がある. Johnson ら<sup>37)</sup>は, 9 人のインフルエンザの患者に対し, 口より 20cm 離れた直径 9cm のペトリ皿に向かって 5 回咳をしてもらいウイルスが検知されるか試した. それぞれの被験者に, 最初はマスク非着用, 2 回目と 3 回目はサージカルマスクと N95 マスクを交互に, 最後は再びマスク非着用で実験が行われた. 4 人がマスク非着

用の初めと終わりのどちらかでインフルエンザウイルスが検知され、5人はマスク非着用の初めと終わりの両方でインフルエンザウイルスが検知された。マスク非着用の最初と最後の両方でインフルエンザが検知されなかった人はいなかった。2回目と3回目のマスクをつけた場合は全被験者でどちらのマスクでもウイルスは検知されなかった。

ウイルスのマスク透過性を調べるため、Liら<sup>38)</sup>は、サージカルマスクとN95マスクの空気透過性(19.8と12.5 ml/(s・cm<sup>2</sup>)と蒸気透過性(8.1×10<sup>-2</sup>と5.8×10<sup>-2</sup>g/(24時間・cm<sup>2</sup>))を測定した。被験者がサージカルマスク又はN95マスクを装着した状態で、検者が蛍光色素-KCL溶液を被験者の1m先のところで10分ごとにスプレーすると、サージカルマスクで95%、N95マスクで97%以上マスク表面に付着した溶液をカットでき内部への浸透を防いだ。そのため、防御性能では大きな差はないとした。一方Leeら<sup>39)</sup>は、12人の被験者で4種類のN95マスク及び3種類のサージカルマスクに対して、NaCl粒子の空気動力学径毎に防護係数(マスク内と外の対象となる粒子の濃度比)を求めた。数十回の試行実験で、N95に対して米国労働安全衛生管理局(OSHA)が定めた防護係数の10を下回ったN95マスクの割合は、4種類それぞれに対し13.9、63.9、11.1、22.2%だった。N95マスクの防護係数はサージカルマスクの約9倍高かった。サージカルマスクはその形状によっても防護係数に大きな違いがあった。Heら<sup>40)</sup>も、粒子の大きさと吸気量及び呼吸数の違いによりN95マスクとサージカルマスクのフィルター透過性を比較した。Lee<sup>39)</sup>らと同様、N95マスクがサージカルマスクよりも10倍程度透過性が低く粒子を通さなかった。Liら<sup>38)</sup>は溶液の状態でもマスク表面に付いたものに対するマスク内面に到達した割合を計測したが、Lee<sup>39)</sup>やHe<sup>40)</sup>らはマスク外と内での固体の微粒子の濃度比を計測している。試験方法の違いが結果の違いとして現れたと思われる。

サージカルマスクとN95マスクについてウイルス予防の有効性に違いがあるか大規模疫学調査も行われている。米国7つの施設に従事する外来の医療従事者に対してのランダム化比較試験(RTC)<sup>41)</sup>の結果では、インフルエンザに感染した人はN95マスクでは2,512人中207人、サージカルマスクでは2,668人中193人と両マスク間にウイルス感染予防の有効性の点から有意差はなかった。Loeb<sup>42)</sup>らによるRTCによる試験でも、サージカルマスクを着用した看護師では225人中50人(23.6%)、N95マスクを着用した看護師では221人中48人(22.9%)がインフルエンザに感染し、マスク間に有意差は無かった。このように医療現場では、サージカルマスクでN95に匹敵した感染防御機能が示されている。また、3種類の異なるサージカルマスクに対して、バクテリアの透過をブロックするフィルターとしての有効性及びマスクの通気

性を比較した実験<sup>43)</sup>では、通気性とフィルター性能の二つを兼ね備えたサージカルマスクがあり、使用するサージカルマスクの選択は重要であることが示された。

### おわりに

夏季における労働現場におけるマスク着用が熱中症に及ぼす影響が懸念されている。マスクを着用していない時の呼吸による放熱量は、環境によっても異なるが体内で作られる代謝熱の5~10%程度なので、マスク着用で呼吸による放熱量が多少減少しても大きな影響はないと予測される。労働現場で使用される呼吸抵抗が高いマスクを使用する場合、高強度の作業を行うと酸素摂取量不足からマスク非着用時よりも作業継続可能時間が短縮することを示す報告があった。マスクの呼吸抵抗が低ければ、心拍数等の生理指標に影響を及ぼさないことを示す報告もあった。サージカルマスクを着用して、低から中程度の運動負荷を1時間程度行うと、マスク非着用時と比較して心拍数の上昇は認められたが、深部体温は上昇しないという報告もあった。また、マスク内の皮膚温度の上昇で不快感が増すという報告や、長時間のマスク着用で不快感は時間とともに増加するという報告もあった。防護の観点から装着するマスクは、通気性と防御性を兼ね備えたマスクの選択が重要であることも示されていた。

以上の結果は、従来の労働現場で使用されるマスクやサージカルマスク、N95マスクに関して得られた知見である。新型コロナウイルス感染症対策として販売されている通気性が高いマスクでは、マスクの影響はより小さいと推測されるが、高強度の運動や長時間着用で影響が出るかどうかは予測できないため新たな知見の集積が必要である。

[COI開示] 本論文に関して開示すべきCOI状態はない

### 文献

- 1) World Health Organization: WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19. <http://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19--11-march-2020>, (accessed 2020-7-14).
- 2) 内閣官房：東京：新型コロナウイルス感染症対策の基本的対処方針(令和2年3月28日(令和2年5月14日変更))。 [https://corona.go.jp/expert-meeting/pdf/kihon\\_h\\_0514.pdf](https://corona.go.jp/expert-meeting/pdf/kihon_h_0514.pdf), (参照 2020-7-14)。
- 3) Nianyi Z, Zewen Li, Sherrienne Ng, et al: Epidemiology reveals mask wearing by the public is crucial for COVID-19 control. *Medi Microecology* 4: 100015, 2020.
- 4) Eikenberry SE, Mancuso M, Iboi E, et al: To mask or not to mask: Modeling the potential for face mask use by the general public to curtail the COVID-19 pandemic. *Infect Dis Model* 5: 293-308, 2020.
- 5) 厚生労働省：“職場における新型コロナウイルス感染症への感染予防，健康管理の強化について”(令和2年5月14

- 日). <https://www.mhlw.go.jp/content/11302000/000630690.pdf>, (参照 2020-7-14).
- 6) 国土交通省：建設業における新型コロナウイルス感染予防対策ガイドライン (令和 2 年 5 月 14 日). <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001344175.pdf>, (参照 2020-7-14).
- 7) 厚生労働省：2019 年職場における熱中症による死傷災害の発生状況 (確定値). <https://www.mhlw.go.jp/content/11303000/000612135.pdf>, (参照 2020-8-26).
- 8) Cirrincione L, Plescia F, Ledda C, et al: COVID-19 pandemic: prevention and protection measures to be adopted at the workplace. *Sustainability* 12: 3603, 2020.
- 9) Yokoyama S, Ogino H: Theoretical and experimental studies on calculation formula of respiratory heat loss. *日本生気象学会誌* 20: 1—7, 1983.
- 10) Malchaire J, Piette A, Kampmann B, et al: Development and validation of the predicted heat strain model. *Ann Occup Hyg* 45: 123—135, 2001.
- 11) International Organization for Standardization (ISO): Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain. (Standard No. ISO 7933:2004). Geneva, ISO, 2004.
- 12) International Organization for Standardization (ISO): Ergonomics of the thermal environment - Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. (Standard No. ISO 7243:2017). Geneva, ISO, 2017.
- 13) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH): Heat Stress and Strain TLV<sup>®</sup>, in Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for Chemical Substances and Physical Agents. ACGIH, 2018.
- 14) Chen WY, Juang YJ, Hsieh JY, et al: Estimation of respiratory heat flows in prediction of heat strain among Taiwanese steel workers. *Int J Biometeorol* 61: 115—125, 2017.
- 15) 気象庁：過去の気象データ検索. <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>, (参照 2020-7-14).
- 16) 環境省：熱中症予防情報サイト. <https://www.wbgt.env.go.jp/>, (参照 2020-7-14).
- 17) Szeinuk J, Beckett WS, Clark N, Hailoo WL: Medical evaluation for respirator use. *Am J Ind Med* 37: 142—157, 2000.
- 18) Dooly CR, Johnson AT, Dotson CO, et al: Peak oxygen consumption and lactate threshold in full mask versus mouth mask conditions during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 73: 311—316, 1996.
- 19) National Institute of Occupational Safety and Health: Code of Federal Regulations (42 CFR 84.180). Airflow resistance tests. <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2007-title42-vol1/pdf/CFR-2007-title42-vol1-sec84-180.pdf>, (accessed 2020-7-14).
- 20) Shykoff BE, Warkander DE: Physiologically acceptable resistance of an air purifying respirator. *Ergonomics* 54: 1186—1196, 2011.
- 21) Caretti DM, Whitley JA: Exercise performance during inspiratory resistance breathing under exhaustive constant load work. *Ergonomics* 41: 501—511, 1998.
- 22) Roberge RJ, Kim JH, Powell JB, et al: Impact of low filter resistances on subjective and physiological responses to filtering facepiece respirators. *PLOS one* 8: e84901, 2013.
- 23) Qiu M, Wang S: Effect of respirator resistance on tolerant capacity during graded load exercise. *J Huazhong Univ Sci Technol* 32: 434—437, 2012.
- 24) Yao BG, Wang YX, Ye XY, et al: Impact of structural features on dynamic breathing resistance of healthcare face mask. *Sci Tot Environ* 689: 743—753, 2019.
- 25) Kim JH, Benson SM, Roberge RJ: Pulmonary and heart rate responses to wearing N95 filtering facepiece respirators. *Am J Infect Control* 41: 24—27, 2013.
- 26) Roberge RJ, Kim JH, Benson SM: Absence of consequential changes in physiological, thermal and subjective responses from wearing a surgical mask. *Res Physiol Neur* 181: 29—35, 2012.
- 27) Li Y, Tokura H, Guo YP, et al: Effects of wearing N95 and surgical facemasks on heart rate, thermal stress and subjective sensations. *Int Arch Occup Environ Health* 78: 501—509, 2005.
- 28) Roberge R, Kim JH, Coca A: Protective facemask impact on human thermoregulation: an overview. *Ann Occup Hyg* 56: 102—112, 2012.
- 29) Cotter JD, Taylor NAS: The distribution of cutaneous sudomotor and alliesthesial thermosensitivity in mildly heat-stressed humans: an open-loop approach. *J Physiol* 565: 335—345, 2005.
- 30) Nielsen R, Berglund LG, Gwosdow AR, Dubois AB: Thermal sensation of the body as influenced by the thermal microclimate in a face mask. *Ergonomics* 30: 1689—1703, 1987.
- 31) Laird IS, Goldsmith R, Pack RJ, Vitalis A: The Effect on Heart Rate and Facial Skin Temperature of Wearing Respiratory Protection at Work. *Ann Occup Hyg* 46: 143—148, 2002.
- 32) Kim JH, Seo Y, Quinn T, et al: Intersegmental differences in facial warmth sensitivity during rest, passive heat and exercise. *Int J Hypertherm* 36: 654—659, 2019.
- 33) Hayashi C, Tokura H: The effects of two kinds of mask (with or without exhaust valve) on clothing microclimates inside the mask in participants wearing protective clothing for spraying pesticides. *Int Arch Occup Environ Health* 77: 73—78, 2004.
- 34) Roberge RJ, Kim SH, Benson S: N95 filtering facepiece respirator deadspace temperature and humidity. *J Occup Environ Hyg* 9: 166—171, 2012.
- 35) Shenal BV, Radonovich LJ, Cheng J, et al: Discomfort and exertion associated with prolonged wear of respiratory protection in a health care setting. *J Occup Environ Hyg* 9: 59—64, 2012.
- 36) 3M Bulletin. Job health highlight 1: 10, 1983.
- 37) Johnson DF, Druce JD, Birch C, Grayson ML: A quantitative assessment of the efficacy of surgical and N95 masks to filter influenza virus in patients with acute influenza infection. *Clin Infect Dis* 49: 275—277, 2009.
- 38) Li Y, Wong T, Chung J, et al: In vivo protective performance of N95 respirator and surgical facemask. *Am J Ind Med* 49: 1056—1065, 2006.
- 39) Lee SA, Grinshpun SA, Reponen T: Respiratory performance offered by N95 respirators and surgical masks: Human subject evaluation with NaCl aerosol representing

- bacterial and viral particle size range. *Ann Occup Hyg* 52: 177–185, 2008.
- 40) He X, Reponen T, McKay RT, Grinshpun SA: Effect of particle size on the performance of an N95 filtering face-piece respirator and a surgical mask at various breathing conditions. *Aerosol Sci Tech* 47: 1180–1187, 2013.
- 41) Radonovich LJ, Simberkoff MS, Bessesen MT, et al: N95 Respirators vs Medical Masks for Preventing Influenza Among Health Care Personnel: A Randomized Clinical Trial. *JAMA* 322: 824–833, 2019.
- 42) Loeb M, Dafoe N, Mahony J, et al: Surgical Mask vs N95 Respirator for Preventing Influenza Among Health Care Workers: A Randomized Trial. *JAMA* 302: 1865–1871, 2009.
- 43) Liu Z, Yu D, Ge Y, et al: Understanding the factors involved in determining the bioburdens of surgical masks. *Ann Trans Med* 7: 754, 2019.

別刷請求先 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾6-21-1  
労働安全衛生総合研究所  
上野 哲

**Reprint request:**

Satoru Ueno  
National Institute of Occupational Safety and Health, Japan  
Organization of Occupational Health and Safety, 6-21-1, Nagao, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8585, Japan

### Physiological Burden by Wearing a Mask

Satoru Ueno

Work Environment Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health,  
Japan Organization of Occupational Health and Safety

Wearing a mask is listed as a basic measure to prevent COVID-19 in the workplace. Just as wearing a mask is obligatory in a work environment exposed to hazardous substances, it may be required to wear a mask at work to prevent COVID-19. During summer when occupational heat disorder is a critical issue, whether the risk of heat disorders is elevated by wearing a mask is an issue. Here, we first predict the heat release due to respiration by model calculation. Next for protective masks, we introduce the literature on the effect of wearing the mask on physiological burdens depending on the inspiratory resistance or the exercise intensity. Finally, we introduce the literature on the filtering efficiency against viruses of surgical masks and N95 masks. There is also a document that points out the importance of selecting a mask with high filtering efficiency and low airflow resistance, because even the same type of masks has different physical characteristics.

(JJOMT, 69: 1–8, 2021)

—Key words—

mask, physiological burden, COVID 19