

軽量一体型「自由外出マスク」

～ロックダウン・外出自粛を不要化する「決め手」～

藤井雄作*, 田北啓洋, 橋本誠司

群馬大学

*<fuji@gunma-u.ac.jp>

要旨: ウイルス感染をコントロール下に置くことを可能とし、ロックダウンや外出自粛を不要化する「決め手」として、「自由外出マスク (Distancing-Free Mask)」一体型の試作4号機を開発し、それによる新しい社会基盤・生活様式について提言する。今回、開発した試作4号機は、「自由外出マスク」廉価普及版 (=2021年中に全国民に一人一個の配布を目指す基本機能版) のイメージにより近づくように、これまでのバックパック部、ウエストバック部に収納されていた制御部を小型軽量化し、ヘルメット部に一体化したことを最大の特長とする。「自由外出マスク」の特長である、①ウイルスの完全遮蔽、②軽量の本体、③楽な呼吸、④安価な製造コスト、の中で、試作4号機では、特に、②④を重視した。本マスクの装着者は、抗体保有者と同様に、自身がウイルスに感染することもなければ、他者にウイルスを感染させることもない。感染拡大時には、本マスクを全国民一斉装着すれば、簡単・確実に感染収束となる。現在、世界全体が、「新しい生活様式」と「ロックダウン (=外出自粛, 営業自粛を含む, 行動規制, 経済規制)」を併用した対策を取っているが、突然変異を繰り返すウイルスに対するワクチン、治療法の迅速な開発・普及の目途が立たない中、ロックダウン断続状態から脱却する目途は、全く、立っていない。「自由外出マスク」を各国民に一人一台ずつ配布することは、いつでも、簡単・確実に感染を収束させる「決め手」を持つことを意味する。最悪な感染拡大状況下でも、「自由外出マスク」を着用さえすれば、外出は自由にできるので、東京オリンピックを始めとするイベント主催者は、「状況により、自由外出マスク着用義務付けが有り得る」を想定し対策しておけば、イベントの中止や延期をする必要はなくなる。

1. 背景

新型コロナウイルスにより、世界中が、大変な状況に陥っている[1-3]。現在、ワクチンによる集団免疫獲得が、ほぼ唯一の解決策として、世界中で追及されている。しかしながら、突然変異を繰り返すウイルスに対して、速やかにワクチンを開発・供給する体制を確立し、ロックダウンのない世界に戻せるかは不明確である。なお、ここでは、感染拡大阻止のために、社会的距離などに代表される新しい生活様式に加えて、外出自粛要請、営業自粛要請を含む、行動規制、営業規制が掛けられる状態をロックダウンと定義する。

新型コロナウイルス感染症の感染経路として、①空気感染・飛沫感染、②接触感染・経口感染が挙げられる。②は、手洗いの徹底、食器等の衛生管理の徹底で、完全な防止ができると考えられる。①の防止策としては、マスク着用義務化や社会的距離に代表される新しい生活様式が有効とされ、推奨されている。それでも防ぎきれないときは、ロックダウンを行わざるを得ない状況に世界中が置かれている。空気感染・飛沫感染は、それぞれ、ウイルスが粒子径0.3-5 μ mのエアロゾル、粒子径5 μ m-5mmの飛沫として空气中を浮遊し、未感染者に吸い込まれ、感染させる感染経路を取る感染である[4]。従って、フィルタの仕様において、0.3 μ mまでの粒子の吸着率は、ウイルス遮蔽率と見なすことができる。

もしも、国民全員が、宇宙服(外気の侵入ゼロ、外界との直接の接触ゼロ)を一斉に着用すれば、新規感染者はゼロとなり、感染期間(2週間程度)が過ぎるころには、生活環境からウイルスがほぼ消え去ることになる。その後は、また、感染拡大が酷くなるまでは、これまで通りの生活に戻れることになる。現時点では、宇宙服のように、空气中に浮遊するウイルスの侵入を完全に遮蔽する呼吸空気清浄器(マスク)の開発・生産・普及はなされていない。しかしながら、ウイルス侵入をほぼ100%遮蔽できるフィルタは既に商品化され、医療用のN100マスクなどに使われているが、①きちんと装着すると息苦しいという問題点がある。また、②顔との間に隙間ができやすく、その場合は、生の外気がフィルタを通らず出入りしてしまうという問題点がある。電気モータ(ポンプ)による給気機能を備えた電動式マスクは市販されてきているが、顔との隙間からの外気侵入や、マスク内部の二酸化炭素濃度の評価など、詳細な検討がなされたものは見当たらない。

一方、筆者らは、ヘルメットタイプのマスクの開発を続けてきている[5-9]。今回、給気側ウイルス遮蔽率 $S_{r, in}=100.0\%$ 、排気側ウイルス遮蔽率 $S_{r, out}=90\%$ のヘルメット型の強制給排気マスクを開発し、装着テストを行った。開発したマスク（、または、それと同等な性能を有するマスク）を全国民に配布することにより、COVID-19を、何時でもシャットダウンすることができる社会システムが実現できる可能性を提案する。集団免疫の考え方を適用すると、かなり酷い感染状態（=実効再生産数 $R_t=5$ など）においても、必ずしも、全員が100%の対人接触において、マスクを着用する必要はなく、ある有限な装着率が守られれば、感染を収束させることができる可能性が示唆される。

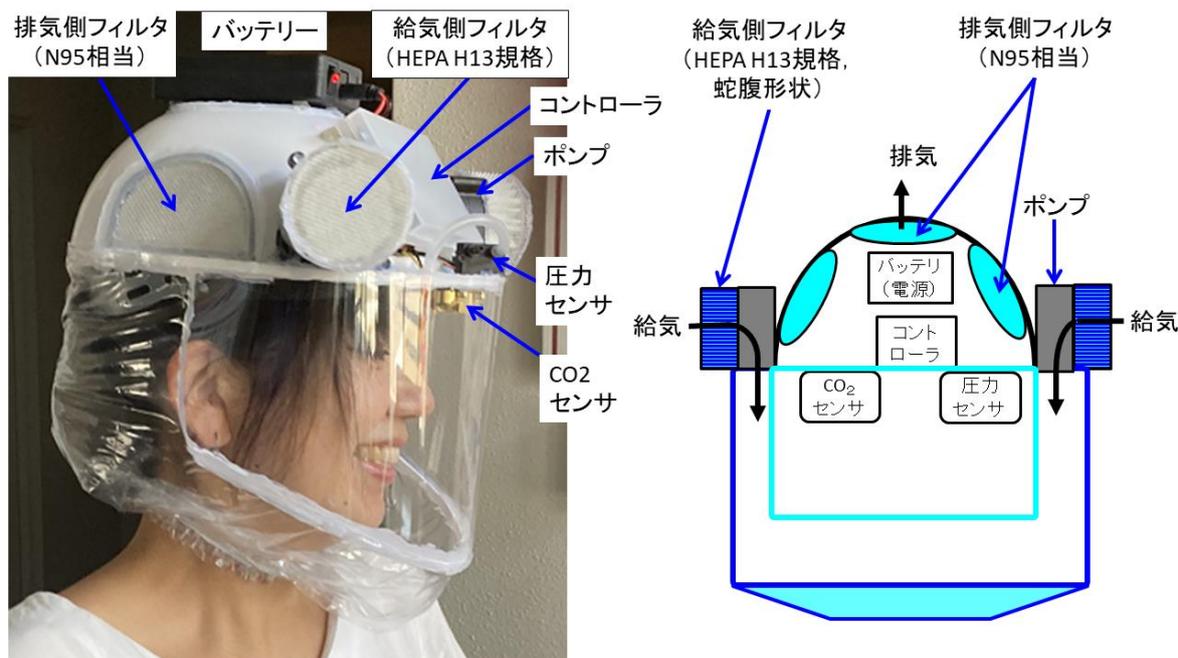


図1. 自由外出マスク（試作4号機）の外観と模式図

2. 「自由外出マスク」の仕様

ウイルスの侵入、漏洩をほぼ完全に遮蔽するマスクとして、「自由外出マスク」を提案する。「自由外出マスク」は、様々な形態が考えられるが、取り扱いやすさを重視した形態として、気密ヘルメット部と、清浄化された空気の給気、排気を行う機械部を一体化する形態を提案する。図1に開発した「自由外出マスク」試作4号機の外観写真と模式図を示す。試作機の特徴は、以下である

- [1] 気密ヘルメット内を、僅かな陽圧に制御することにより、首のシール部からの外気侵入を完全遮断でき、ウイルスの侵入は完全遮蔽できる。ウイルスの外部漏洩は、首シール部の気密程度に依存するが、高いレベルで抑止できる。
- [2] 一定流量に制御された吸気により、ヘルメット内に、常に新鮮な空気の流れを作る。これにより、肺へ余分な負荷を加えることなく、新鮮な空気を呼吸することができる。
- [3] ポンプによる強制給気により、流れ抵抗が非常に大きな高性能フィルタを挿入することができる。これにより、通常の不織布マスク着用時のような息苦しさが無い状態を作ることができる。

給気については、2台のポンプ(model: PABD16025BH, manufacturer: Wideworks Co. Ltd.)、それぞれに取り付けられた2つのフィルタユニットでろ過された外気が、ヘルメット内に給気される。フィルタユニットには、不織布フィルタが蛇腹状に折り畳んで組み込まれている。不織布フィルタは、 $0.3\mu\text{m}$ までの粒子を99.97%吸着するものである。内圧により、首シール部の隙間からの外気の侵入は全く無いものと見積もられる。

排気については、ヘルメット部側面、上面に張り付けられた不織布フィルタから、内外の圧力差により自然排気される仕組みとなっている。不織布フィルタは、 $0.1\mu\text{m}$ までの粒子を95%吸着するものであり、首シール部の隙間からの外気への漏れは5%程度以下と見積もられる。

以上より、新型コロナウイルスを含むバイオエアロゾル（粒子径 $0.3\mu\text{m}$ 以上）の遮蔽率は、吸気側遮蔽率 $S_{r,in}$ は約99.97%、排気側遮蔽率 $S_{r,out}$ は約90%と見積もられる。

ヘルメット内部の二酸化炭素濃度は、二酸化炭素濃度センサ（model: MH-Z14, manufacturer: Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. Ltd.）で測定する。ヘルメット内部の外部に対する圧力差は、圧力センサ（model: SDP810-500Pa, manufacturer: Sensirion Co. Ltd.）で測定する。流量は、ポンプ出力と圧力差の関数として、実験的に導出された校正式で計算される。

制御は、コントローラにより、以下の要領で行われる。

[1] 圧力が設定圧力になるように、ポンプ出力が制御される。

[2] 二酸化炭素濃度が、設定濃度（例：2,000ppm以下）の条件が満たされない場合、満たされるようになるまで、ポンプ出力を増大させる。

試作4号機は、機械部の小型軽量化により、従来のバックパック部やウエストパック部を排し、ヘルメット部と一体化となっている。ヘルメット部は、軽作業ヘルメットを流用し、そこに、透明塩ビフィルムのスクリーン、透明ビニールのスカート部を接着して、気密構造を作っている。ネックシール部は、透明ビニールスカート部に、ゴム紐を縫い付けることにより伸縮性を付与している。サイズは、約38cm（幅）×約26cm（奥行）×約29cm（高さ）であり、質量は約664g（約0.7kg、バッテリー約180gを含む）である。搭載バッテリーによる連続駆動時間は、約7時間である。

3. 「自由外出マスク」装着率制御による、COVID-19感染制御

以下の議論においては、②接触感染・経口感染は、手洗いの徹底、飲食物、食器等の衛生管理の徹底により十分に防止されており、①空気感染・飛沫感染が、主たる感染経路となっている状況を想定する。

実効再生産数 R_t は、感染症に感染した1人の感染者が、全感染期間に新たに直接感染させる人数の平均値である [10]。定義から、当該集団（社会）について $R_t = 1$ なら定常状態、 $R_t < 1$ なら収束、 $R_t > 1$ なら拡大、ということになる。 R_t は、ウイルスの性質だけでなく、当該集団の性質（人種的体質、状態、公衆衛生の状態、各人の健康状態、など）にも依存する。公衆衛生を向上させることにより、あらゆるウイルスに対して R_t を低減できる。

実効再生産数 R_t は、模式的に次式で表せる。

$$R_t = b \times k \times D$$

b ：一回の接触当たりの感染確率

k ：単位時間あたりに一人の感染者が集団内で未感染者とエアロゾル、飛沫を介して接触する平均回数

D ：平均感染期間

未感染者が W_r の割合で「自由外出マスク（給気遮蔽率 $S_{r,in} = 100.0\%$ ）」を装着すると、感染し難くなる未感染者の割合が W_r となり、感染し易いままの未感染者の割合は $(1 - W_r)$ となる。マスク装着した未感染者の感染確率は、マスク非着用の未感染者のその $(1 - S_{r,in})$ 倍になると考えられる。それにより、その集団におけるその時の実効再生産数 R_t が、修正実効再生産数 R_{tm} に、以下のように修正される。

$$R_{tm} = [(1 - W_r) + W_r(1 - S_{r,in})] R_t$$

$= (1 - W_r S_{r,in}) R_t$

上式を変形すると、

$$W_r = [1 - R_{tm}/R_t] / S_{r,in}$$

例： $R_t = 5$ のときに、 $R_{tm} = 0.5$ とするのに必要な「自由外出マスク（ $S_{r,in} = 1$ ）」着用者の割合は、 $W_r = 1 - 0.5/5 = 0.9$ （90%）となる。感染拡大が非常に酷い状況である $R_t = 5$ においても、全国民の90%が「自由外出マスク（ $S_{r,in} = 1$ ）」を対人接触の際に常時装着することにより、感染者数は感染期間（約2週間）毎に半減し、急速に、感染を収束させることができることを示している。

「全国民の全国民の90%が「自由外出マスク ($S_{r, in} = 1$)」を対人接触の際に常時装着する」ことの代わりに、「全国民の100%が「自由外出マスク ($S_{r, in} = 1$)」を対人接触の90%において装着する」ことで置き換えても良いと考えられる。

図2に、実効再生産数 R_t を修正実効再生産数 $R_{tm} = 0.5$ に修正するために必要な「自由外出マスク ($S_r = 1$)」着用者の割合 W_r を示す。

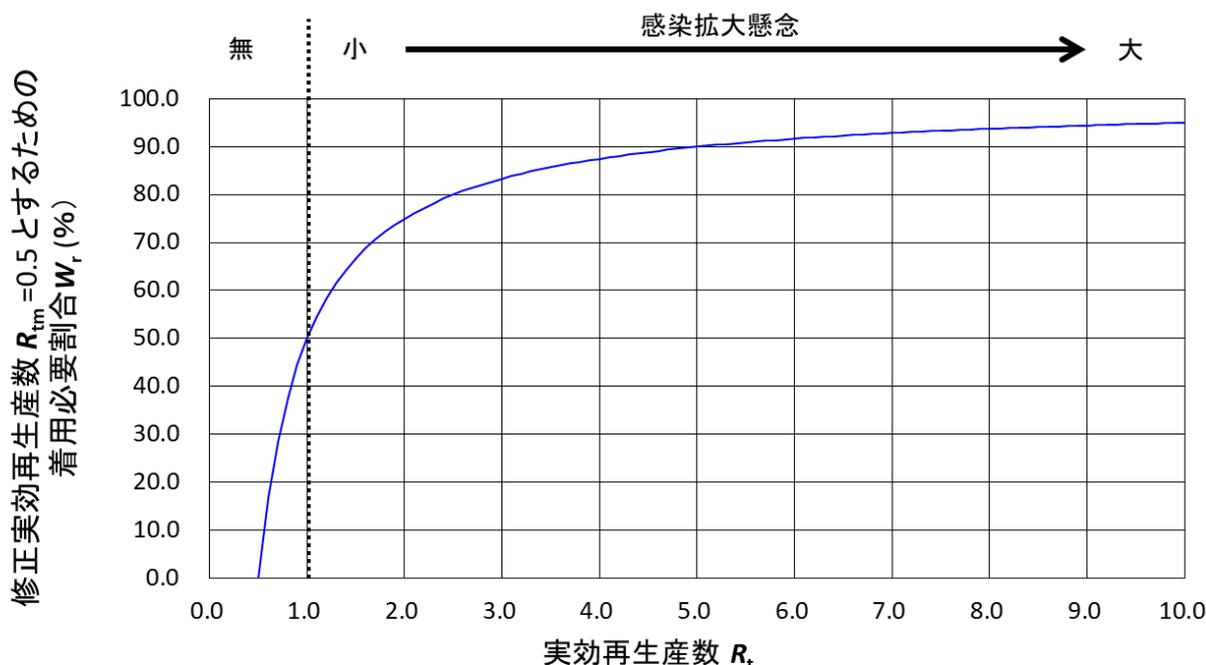


図2. 修正実効再生産数 $R_{tm} = 0.5$ とするために必要な自由外出マスク着用必要割合 W_r (%) とその時点での実効再生産数 R_t の関係

ここで、着目すべき点は、「自由外出マスクを全国民が保有する」は、「政府がロックダウンすることなく、感染拡大・収束を制御する手段を持つこと」を意味するという点である。現在のように、感染拡大に対して、必要以上に怯える必要は無くなるという点である。

4. COVID-19の制御能力を有する社会システムの提案

コロナ時代の社会システムとして、以下を提案する。

- [1] 全国民が一人一個の「自由外出マスク ($S_{r, in} = 1$)」，または，同等の性能を有する呼吸空気清浄器具を保有する。
- [2] 感染拡大の恐れが出た場合，政府は非常事態宣言を出し，外出時の「自由外出マスク」着用を義務付ける。
 - * 「自由外出マスク」さえ着用すれば，何の制約も無く，自由に外出できる。
 - * 政府は，その時の実効再生産数 R_t を推定し，図2に基づき，自由外出マスク着用必要割合 W_r (%) を算出し，公表する。各国民は，自身の接触数について，マスク有の接触数の割合が全接触数の W_r (%) 以上になるようにマスクを着用すれば良い。
 - * 自由外出マスク着用必要割合 W_r (%) の推定を誤り，感染拡大を招いたとしても，目標 W_r (%) を引き上げるにより，いつでも，迅速・確実・簡単に，感染を収束させることができる。

[3] ウイルス感染収束が確認された時点で、政府は非常事態宣言を解除し、外出時の「自由外出マスク」着用の義務は無くなる。

表 1. 提案する将来の社会システム

	平常時 & 流行時	流行時 感染拡大に対する懸念 小 → 大
現状	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <p>新しい生活様式 社会的距離・手洗い・ うがい、など</p> <p>&</p> <p>ワクチン接種による 集団免疫獲得</p> </div>	ロックダウンの必要強度 弱 → 強 ↓ ロックダウン不要化!
将来		要請・命令されるマスク着用必要割合 W_r 0% → 100%

表 1 に示すように、提案する「将来の社会システム」においては、感染拡大の懸念が増大した場合においても、政府は、「ロックダウン」をする必要はなく、「自由外出マスクの装着率の設定」をするだけで良くなる。平常時においても、現状と同様に、「新しい生活様式」の推奨+「ワクチンによる集団免疫獲得」の追求をする必要があることに変わりはないが、ロックダウンという膨大な社会的コスト・損失が伴う対策を一切、行う必要がなくなる。

「自由外出マスク」の展開例として、ヘルメット部を、オフィスのデスク回りを覆う個人用テント型、寝室・病室のベッドを覆うテント型、ベビーカーを覆うフード型、航空機・列車の座席を覆うフード型、など、様々な形態のテント・フードで置き換えることが考えられる [11]。内部を守る場合は内部を陽圧に、外部を守る場合は内部を陰圧にすることが一般的である。個人の利用において内部を陽圧として、内部を守ることが、現実的であると考えている。自由外出マスクは、外部環境の空気を浄化する効果があるので、個人が内部を守る行為が、外部の空気環境を浄化することにも繋がる。

上記の議論で示したように、かなり酷い感染拡大の局面においても、遮蔽率100%の「呼吸空気浄化器具」を常時（100%）装着しなくてはならない状況は、ほとんど有り得ない。多くの場合、社会全体として感染を収束させる上では、市民一人一人が、ある一定の装着率で「呼吸空気浄化器具」を装着すれば、それ以外の場面では、「呼吸空気浄化器具」を装着する必要性は無い。市民一人一人が、義務付けられる「呼吸空気浄化器具」の装着率の達成を知るためには、装着率の計測・記録が必要となる。著者らは、今後、自身、および/または、自身の周りの他者について、「呼吸空気浄化器具」の装着状態を記録するシステムを開発する [12]。装着率を計算するパラメータとしては、様々なものが考えられる。一番、単純なものとして、外出時間に対するマスク装着時間の割合がある。また、濃厚接触（1 m以内で15秒以上の会話、など）における、全体の回数に対するマスク装着時の回数の割合も考えられる。また、周辺環境のウイルス濃度を推定し、その時間積分を求め、全体の積分数値に対するマスク装着時の積分数値の割合も考えられる。また、装着率に替えて、周辺環境のウイルス濃度を推定し、マスク非装着時の時間積分を基準とすることも考えられる。

原始人と異なり、現代人は、「川や水溜まりの水」でなく「浄化された水」を飲む。一方、「空気」は、ウイルス、PM2.5、花粉、ホコリを始めとする様々な汚染物質を含んでいるが、現代人は、原始人と同様に、周りに存在する「自然の空気」を呼吸している。「自由外出マスク」の登場により、空気も「自然の空気」ではなく、「浄化された空気」を呼吸したいという強力な需要が顕在化してくることが予想される。すなわち、ウイルスの感染拡大の有無に拘わらず、また、政府による着用要請の有無に拘わらずに、多くの国民が外出時に、「自由外出マスク」を着用するようになることも予想される。そのような社会は、あらゆる感染症に対して、基本再生産数 R_0 がゼロに近くなり、あらゆる感染症に対して極めて強靱な社会となる。

5. まとめ

現在、ワクチン接種による集団免疫獲得が、ほぼ唯一の解決策として期待されている。しかしながら、突然変異を繰り返す新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) に対して、十分に有効なワクチンを速やかに開発・大量生産する体制を作る目は立っていない。一方、「自由外出マスク」を国民一人一人に行き渡らせることは、空気感染・飛沫感染を主たる感染経路とする、あらゆる感染症の感染拡大をいつでもストップする手段を持つこと意味する。また、「自由外出マスク」を開発すること、そして、それを大量生産し普及させることは、人類が新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) に対して、確実に、今すぐに、主導権を取れる唯一の方法であると考えている。

参考文献

- 1) WHO coronavirus disease (COVID-19) dashboard: <https://covid19.who.int/>
- 2) COVID-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University (JHU): <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6>
- 3) WHO Coronavirus disease (COVID-19) “Herd immunity, lockdowns and COVID-19” : <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/herd-immunity-lockdowns-and-covid-19>
- 4) J. Wang and G. Du, “COVID-19 may transmit through aerosol”, *Ir J Med Sci*, Vol.189, pp.1143-1144, 2020. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11845-020-02218-2>
- 5) Y. Fujii, A. Takita and S. Hashimoto, “A Helmet Type Mask “Distancing-Free Mask” : An Engineering Solution that Eliminates the Lockdown”, *Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System*, Vol. 3, No. 3, pp.1-7, 2020. http://jmeis.e-jikei.org/issue/archives/vol03_no03/F001/Camera_ready_manuscript_JMEIS_F001_535362_final.pdf
- 6) 藤井雄作, “新型コロナウイルスとの共存に向けて”, *社会安全とプライバシー*, Vol.4, No.1, pp.1-5, 2020. http://jjssp.e-jikei.org/ARCHIVES/vol04no01/JpnJSSP_vol04_no01_p01.pdf
- 7) 藤井雄作, 田北啓洋, 橋本誠司, “ウイルスをほぼ完全に遮蔽できるマスクの開発, および, ロックダウンを不要化する社会基盤の提案”, *社会安全とプライバシー*, Vol. 4, No. 1, pp.6-10, 2020. http://jjssp.e-jikei.org/ARCHIVES/vol04no01/JpnJSSP_vol04_no01_p06.pdf
- 8) S. Xu, Y. Cao, S. Hashimoto, Y. Fujii, A. Takita and W. Jiang, “Control design applicable to a helmet type full-face mask”, *Journal of Technology and Social Science*, Vol.4, No.3, pp.24-30, 2020. http://jtss.e-jikei.org/issue/archives/vol04-no03/4-A108/JTSS_A108.pdf
- 9) Y. Fujii, A. Takita and S. Hashimoto, “An engineering approach for fighting COVID-19; Pseudo herd immunity through the complete spread of the helmet-type masks”, *Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System*, Vol.4, No.1, pp.1-5, 2021. http://jmeis.e-jikei.org/ARCHIVES/v04n01/JMEIS_v04n01a001.pdf
- 10) A. Das, “An approximation-based approach for periodic estimation of effective reproduction number: a tool for decision-making in the context of coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak”, *Public Health*, Vol.185, pp.199-201, 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0033350620302857>
- 11) 特願2020-113097, 強制吸排気機能付きヘルメット型マスク (出願人: NPO法人e自警ネットワーク研究会).

- 12) 特願2020-177304, マスク装着状況・他者との接触状況の管理方法, 管理システム (出願人: NPO法人e自警ネットワーク研究会).



藤井雄作 FUJII, Yusaku
群馬大学大学院理工学府

1989年3月東京大学工学部船舶工学科卒業, 1991年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了. 2001年東京大学より博士(工学)の学位修得. 1991年4月川崎製鉄株式会社入社, 工業技術院計量研究所, 産業技術総合研究所 を経て, 現在群馬大学理工学府教授. 2004年よりNPO法人e自警ネットワーク研究会理事長. 社会安全工学, 防犯カメラシステム, 精密計測, 光波干渉計などが専門.



田北啓洋 TAKITA, Akihiro
群馬大学大学院理工学府

2006年3月徳島大学大学院機能システム工学専攻博士後期課程修了. 徳島大学および宇都宮大学の研究員を経て, 現在は群馬大学理工学府において助教に就任. 主な研究分野は防犯カメラシステム, フェムト秒レーザー加工, 干渉計測, 精密計測. 博士(工学).



橋本誠司 HASHIMOTO Seiji
群馬大学大学院理工学府

1999年3月宇都宮大学大学院工学研究科博士課程修了. 1996年~1999年日本学術振興会特別研究員. 2000年より小山工業高等専門学校機械工学科助手, 2002年より群馬大学工学部助手, 2005年に同助教授, 2016年に教授, 現在に至る. 博士(工学). 主にシステム同定・制御理論の産業分野への応用に関する研究に従事. 2001年, 2003年IEEE IES Best Presentation Award 受賞. 2012年IEEE IMCS Best Application Paper Award 受賞. 計測自動制御学会, IEEE 会員.