

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）
総括研究報告書

呼吸用保護具のフィットファクタと顔サイズ形状因子との相関および
簡易的チェック手法の検討

研究代表者 東 秀憲 産業医科大学 労働衛生工学 教授

研究要旨

研究目的：本研究では、呼吸用保護具の選択および適正使用のための簡便で日常的なチェック手法の確立を目的とし、①フィットファクタと保護具および顔サイズの相関、②フィットテストにおいて重要な操作等の検討および③簡便で日常的なチェック法の検討を実施する。具体的には、以下の項目を実施する。

- 1) 呼吸用保護具のサイズおよび着用者の顔の寸法の計測
- 2) 既存のシールチェックおよびフィットテスト
- 3) フィットファクタと保護具および顔サイズの相関解析
- 4) 簡便で日常的なチェック法と定量的評価法の検討

1～4)を総合的に検討することで、現場で日常的に持続可能な定量的チェックの方法及び評価基準等について提言するとともに、法改正により今後標準と思われる凝縮核計数法（CNC）に光散乱粒子計数法を組み合わせた短縮定量的フィットテストを簡便化した手法等についての提言をめざす。

研究方法：2年度は、初年度に引き続きフィットテスト1機種を加え、短縮定量的フィットテストを実施し、様々な呼吸用保護具の種類と作業者の顔の形状とフィットファクタとの関係を得ることにより、呼吸用保護具の選定の際の目安となる顔の形状に適した保護具の選定方法を検討した。検討手順は以下のとおりである。

- 1) 呼吸用保護具のサイズおよび着用者の顔の寸法の計測

使用する保護具を選定し、保護具のサイズとして面体の縦、横の幅と高さ（深さ）等を測定し、保護具のパラメータとした。一方、着用者の顔の寸法として、NIOSHで呼吸用保護具の選定に影響を与える因子とされている顔サイズなどの10個のパラメータに唇幅を加えた11個を顔サイズ形状因子として測定した。さらに、スケールとともに顔の正面写真撮影を実施するとともに、3Dカメラでの撮影も同時に行った。

- 2) 既存のシールチェックおよびフィットテスト

実験対象者に選定した保護具を適切な手順に従って着用してもらい、シールチェックにより漏れのないことを確認してもらった。その後、凝縮核計数法に光散乱粒子計数法を組み合わせたフィットテスト（PortaCount 8048, AccuFIT9000PRO, MT-11D および MNFT PRO）を用いて JIS T 8150 に示された手順に従い、短縮定量的フィットテストを実施してフィットファクタを測定した。

- 3) フィットファクタと保護具および顔サイズ形状因子との相関解析

各研究対象者に対して、装着した呼吸用保護具ごとに得られたフィットファクタを、各呼吸用保護具の粒子捕捉メカニズムやレベル、サイズのパラメータ（縦、横幅および高さなど）、研究対象者の顔サイズ形状因子との関係を解析ソフトにより解析することで、これらパラメータの関数として定式化した。一方、顔画像を用いた機械学習によるフィットファクタの推定も試みた。

研究結果：まず、顔サイズ形状因子のうちフィットファクタに大きな影響を与えるパラメータに関する情報を抽出した結果から呼吸用保護具のフィットテストの結果を推定し、実際のテスト結果と比較した。一方、正面画像による顔認証機械学習によるフィットファクタの推定についても検討し、作業者に適した呼吸用保護具の選定法について検討した。

フィットファクタおよびフィットテストの合否判定結果に強く相関している顔サイズ形状因子は呼吸用保護具によって異なる複数の因子があることが示された。一方、顔の正面写真による顔認識機械学習の結果、顔サイズ形状因子による機械学習と同精度程度で訓練データのフィットテストの判定結果を再現することが可能であり、既報では1割程度に留まっていた検証データの予想正答率も概ね6割以上再現可能となった。

結論：訓練データおよび支配因子の再検討により、サンプル数が増加しても顔サイズ形状因子による機械学習と顔画像認証による機械学習の両方で、フィットテスト結果の再現精度は向上した。また、最も不合格の多い保護具に対しても訓練データを含む検証データの正答率は60%程度を維持できた。さらに、検証データの誤判定の多くは合格であるテスト結果を不合格と安全側に推定したものであり、本方法の呼吸用保護具の選定法としての可能性が示された。一方、短縮定量的フィットテストの動作のうち、テスト結果に影響の大きなものとして、動作4が挙げられることを見出した。

研究分担者

大藪貴子

(産業医科大学 労働衛生工学 講師)

西田千夏

(産業医科大学 労働衛生工学 学内講師)

榎原 毅

(産業医科大学 人間工学 教授)

辻 真弓

(産業医科大学 衛生学 教授)

A. 研究目的

労働安全衛生規則等の一部を改正する省令等により、新たな化学物質管理が導入されたことに伴い、「防じんマスク、防毒マスク及び電動ファン付き呼吸用保護具の選択、使用等について」(基発 0525 第 3 号：令和 5 年 5 月 25 日)により、防じんマスク、防毒マスク等の呼吸用保護具を使用する労働者の健康障害を防止するため、その適切な選択、使用、保守管理等に当たって留意すべき事項が更新された。その中で、呼吸用保護具の適切な装着の項目に、フィットテストに関する記述があり、有効な呼吸用保護具を漏れのないように適切に装着することの重要性が記述されている。

呼吸用保護具を漏れの無いように適切に装着するには、顔に合った保護具を選定していることが必要不可欠であるが、選定にあたっては、顔の寸法に基づく National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)の PCA フィットパネル (NIOSH-PCA パネル) [1,2]が開発され、各メーカーの情報等を参考にすることが推奨されているが、国や地域毎にパネルが提案されている[3-7]。また、PCA パネルは顔の形状区分を示しているもので、このような顔サイズ形状因子あるいは顔画像等からフィットファクタを推定して保護具を選択できるような、より実用的な手法が期待されている。

本研究では、今後主流となると思われる呼吸用保護具の短縮定量的フィットテストを対象とし、呼吸用保護具のフィットファクタと顔サイズ形状因子との相関関係につ

いて検討し、作業者に適した呼吸用保護具の選定のための基礎データの蓄積と、日常的に使用可能なより簡便なフィットテスト手法の開発を目的とし、顔サイズパラメータより呼吸用保護具のフィットファクタを推定する手法について検討した。一方、フィットチェック手法の簡易化のための基礎データの蓄積として、短縮定量的フィットテストの 4 つの動作 (動作 1. 前屈→動作 2. その場で駆け足[半面形/全面形面体]あるいは発声[使い捨て式]→動作 3. 頭を左右に回す→動作 4. 頭を上下に動かす)のうち、テスト結果に影響の大きな動作について検討した。

B. 研究方法

初年度は、日常的に使用可能なより簡便なフィットテスト手法の開発を目的とし、呼吸用保護具のフィットファクタと顔サイズ形状因子との相関関係について、作業者に適した呼吸用保護具の選定のための基礎データを蓄積した。2年度は、引き続き様々なタイプの呼吸用保護具について、作業者の顔サイズ形状因子とフィットファクタとの関係を得ることにより、呼吸用保護具の選定の際の目安となる顔サイズや形状に適した保護具の選定方法を検討した。さらに、短縮定量的フィットテストの 4 つの動作のうち、テスト結果に影響を及ぼす動作について検討した。

大学倫理委員会の承認後 (ER23-002)、説明により同意の得られた成人男女対象者に対して複数の使い捨て式あるいは半面形面体型取替え式呼吸用保護具に関する短縮定量的フィットテストを実施した。本研究でテストに用いたフィットテストは、短縮定量的フィットテストが可能な機種であり昨年から使用している TSI PortaCount 8048、日本 KANOMAX AccuFIT9000Pro、柴田科学 MT-11D の 3 機種に重松製作所 MNFT PRO を加えた 4 機種であり、テストに用いた呼吸用保護具は Table 1 に示したものである。

対象者が呼吸用保護具を装着してシール

チェックをした後に短縮定量的フィットテストを行った。使い捨て式および半面形面体型呼吸用保護具のフィットテストの合格基準はフィットファクタが 100 以上である。

フィットファクタ ($FF=C_{out}/C_{in}$) は、呼吸用保護具外(テスト環境中)の粒子濃度 C_{out} [個数濃度]と呼吸用保護具内部の粒子濃度 C_{in} の比で定義され、総合的な FF は 4 つの動作からそれぞれ得られるフィットファクタ FF_n を用いて次式で与えられる。

$$\text{総合フィットファクタ (FF)} = \frac{4}{\frac{1}{FF_1} + \frac{1}{FF_2} + \frac{1}{FF_3} + \frac{1}{FF_4}}$$

ここで、静電フィルタを使用している呼吸用保護具については、装置に内蔵されている N95 コンパニオン機能を使うことで、フィルタを通過する粒子を無視できる状態で測定した。また、N95 コンパニオン機能を使用する場合の FF の上限値は 200 と設定されているが、機種により粒子数をカウントできている場合にはその値を採用した。ただし、顔画像認証による方法の場合には合格基準等を考慮し、すべての保護具に対して FF の上限値を 200 で統一して解析を実行した。さらに、テスト 4 機種で合格の異なる結果が得られた場合には、合格の最大値を採用した。

フィットテストの実施に合わせて、正面および横からの顔写真と顔面 3D 画像を撮影した。得られたフィットファクタと対象者の顔写真および 3D 画像より顔サイズ形状因子を測定して解析を実行した。具体的には、フィットテストで得られた呼吸用保護具のフィットファクタを、NIOSH-PCA フィットパネルに使用されている 10 カ所に唇幅を加えた顔サイズ形状因子をいくつか選定して、その組み合わせでフィットファクタに影響を及ぼす因子として解析した。

各保護具に対して 11 個の顔サイズ形状因子の中で特にフィットファクタに影響の大きなパラメータ半数程度に絞り込み、呼吸用保護具のフィットテストの結果を推定し、テスト結果と比較した。さらに、作業者によ

り適した(フィットファクタが大きいと予想される)呼吸用保護具を選定するための方法について検討するとともに、フィットテスト手法簡略化のための情報とした。

ここで、2022~2024 年にかけて労災疾病臨床研究事業にて実施された「ベリリウム等の低濃度管理物質に対する有効な曝露防止対策に関する研究」(代表:石田尾徹) [8] の中で行われたフィットテストの結果と本研究の対象者の中から、男女比、PCA パネルへの分布およびフィットテストの結果を参考に訓練データとする対象者 37 名(女性 24 名)を抽出して、フィットファクタの推定を試みた。

(倫理面への配慮)

産業医科大学倫理委員会の承認を得て行われている。

C. 研究結果

解析に用いた既往の研究[8, 9]を含めて、短縮定量的フィットテストの可否判定をまとめた結果を Table 2 に、訓練データとした対象者の顔サイズ形状因子より得られた情報の NIOSH-PCA パネルへの対象者の分布を Fig.1 に示す。

Fig.1 に示す NIOSH-PCA パネルへの対象者の分布は、縦横サイズの分布を示す左上の図から、訓練データ (Fig.1 右上)、検証データの対象者の結果 (Fig.1 下段) とともに、広範囲に渡っており特に NIOSH-PCA パネルの規程範囲よりも小さい対象者が多く存在している。

そこで、グラフの中心を既往の研究を含めた本研究の訓練および検証データの対象者全体の平均値で置き換えた次式で計算しなおしてプロットしたものを Fig.2 (上が検証データ全体、下が不合格対象者) に示す。

$$\begin{aligned} PC1 = & 0.343264 * (\text{minimum frontal breadth}) + \\ & 0.426498 * (\text{face width}) + 0.372717 * \\ & (\text{bigonial breadth}) + 0.329648 * (\text{face length}) + 0.363474 * (\text{interpupillary distance}) + 0.372241 * (\text{head breadth}) + \end{aligned}$$

0.113578* (nose protrusion) +0.301125*
(nose breadth) + 0.202311* (nasal root
breadth) +0.193650* (subnasale-sellion
length) – **252.9214639**(AV of PC1)

PC2 = -0.152951* (minimum frontal
breadth) -0.039087*(face width)
-0.093279* (bigonial breadth)+
0.359799* (face length) -0.173099*
(interpupillary distance) +0.013306*
(head breadth) +0.551842* (nose
protrusion) -0.210833* (nose breadth)
-0.341235* (nasal root breadth) +
0.584261* (subnasale-sellion length) –
20.6576413(AV of PC2)

本研究の対象者が日本人全体の平均的な顔サイズ形状の傾向を代表しているとは言いきれないが、訓練データの分布から少なくとも本研究の検証データの分布はカバーできていることが予想される。

一方、初年度の解析対象者が全部で40名程度であり、訓練データに既往の研究結果をそのまま採用した結果、訓練データがカバーしきれなかった分布の範囲にある対象者に対して、検証データの推定合否判定が大きく外れる結果となっていたが、カバーできている分布の範囲が広がったことで結果の改善の可能性があることが示された。

D. 考察

顔サイズ形状因子との相関解析の結果、フィットファクタおよびフィットテストの合否判定結果に強く相関している顔サイズ形状因子は呼吸用保護具によって異なる複数の因子があることが確認された。一方、顔の正面写真による顔認識機械学習の結果、顔サイズ形状因子による機械学習と同精度程度で訓練データのフィットテストの判定結果を再現することが可能であり、既報[2-1, 2-2]の段階では1割程度に留まっていた検証データのフィットテスト結果の予想正答率も概ね6割以上再現可能となった。訓

練データの相関結果の一例を Fig.3(a)に示す。この相関モデルを用いて検証データの対象者のフィットテスト結果を推定した詳細と実測との比較を Table 3 に、まとめを Table 5 に示す。

顔認識機械学習のイメージを Fig.3(b)に示す。この結果、顔サイズ形状因子による推定と同精度以上で検証データのフィットテストの判定結果を再現することが可能であり(推定結果の詳細と実測との比較を Table 4, まとめを Table 5 に示す)、検証データも平均で概ね6割程度再現可能であった。

訓練データの精査や学習法には改善の余地があり、さらなる検証データのフィットテスト判定結果の推定精度向上等が見込まれる。

さらに、総合判定で不合格となった215例の結果に関して、短縮定量的フィットテストの4つの動作それぞれにおける不合格の割合を確認した結果を Table 6 に示す。この結果、動作4(頭を上下に動かす)において、他の動作1(前屈)、動作2(発声あるいはその場駆け足)、3(頭を左右に動かす)に比べて不合格となる可能性が高かった。また、動作4を含む2つの動作の結果により合否判定を行った場合には、動作1あるいは動作2との組み合わせによる結果が、総合判定結果にほとんど影響がないことが確認された。今後、さらなる検討と合格対象者の方の検証を行う必要もあるが、短縮定量的フィットテストの動作について動作4を含む2つの動作に絞り、日常的に行うフィットテストの時間を1分程度に短縮できる可能性がある。

E. 結論

呼吸用保護具の短縮定量的フィットテストにより得られたフィットファクタと顔サイズ形状因子との相関関係について検討した。顔サイズ形状に関わるいくつかのパラメータから呼吸用保護具のフィットテストの結果を推定し、実際のテスト結果と比較した。さらに、顔サイズ形状因子のうちフィ

ットファクタに大きな影響を与えるパラメータに関する情報の絞り込みとともに、作業者に適した呼吸用保護具を選定するための方法について検討した。

初年度から、解析対象者を100名程度まで拡張させることができ、訓練データおよび支配因子の再検討により、対象者数が増加しても顔サイズ形状因子および顔画像認証による機械学習の両方で、これらの情報を用いたフィットテスト結果の予想精度は向上した。また、最も不合格判定の多い保護具に対しても、訓練データを含む検証データのテスト結果の予想正答率は60%程度を維持できている。さらに、検証データの誤判定の多くは合格であるテスト結果を不合格と安全側に推定したものが多く、本方法の呼吸用保護具の選定法としての可能性が示された。

一方、短縮定量的フィットテストの4つの動作のうち、テスト結果に影響を及ぼす動作として、動作4（頭を上下に動かす）の可能性があることが示唆された。

F. 参考文献

1. Zhuang Z, Bradmiller B. Head and face anthropometric survey of U.S. respirator users. (2005): J Occup Environ Hyg. 2: 567–576
2. Zhuang Z, Bradtmiller B and Shaffer RE. New respirator fit test panels representing the current U.S. civilian work force. (2007): J Occup Environ Hyg. 4(9): 647–659
3. Han DH. Fit testing for respirators and development of fit test panels for Koreans. (1999): Korean Ind Hyg Assoc J. 9:1–13 (in Korean)
4. Chen W, Zhuang Z, Benson S, Du L, Yu D, Landsittel D, Wang L, Viscusi D, Shaffer RE. New respirator fit test panels representing the current Chinese civilian workers. (2009): Ann Occup Hyg. 53:297–305
5. Haruta H, Yuasa H, Shimizu E, Koyama T,

Kimura K. Survey on face size of Japanese workers for evaluating respirator fit. (2016): J ISRP Japan Sec Resp Protec. 28(2):2–8 (in Japanese)

6. Lin Y, Chen C. Characterization of small-to-medium head-and-face dimensions for developing respirator fit test panels and evaluating fit of filtering facepiece respirators with different face seal design. (2017): PLoS ONE, 12.
7. Seo HK, Myong JP, Kang BK, Kwon YI. Necessity of the fit test panel for Korean respirator users: Application to Korean healthcare workers. (2021): J ISRP. 38(2): 1–11
8. 東 秀憲, 大藪貴子, 石田尾徹, 山本 忍, 保利 一. 低濃度管理物質の曝露防止対策に関する基礎的研究. (2024): 労災疾病臨床研究事業費補助金「ベリリウム等の低濃度管理物質に対する有効な曝露防止対策に関する研究」(211101-01) 令和5年度総括研究報告書. 1-10
9. 東 秀憲. 呼吸用保護具のフィットファクタと顔形状因子との相関に関する研究. (2024): 厚生労働科学研究補助金（労働安全衛生総合研究事業）「フィットファクタの支配因子探索による呼吸用保護具の適切な選択と使用のための簡易的チェック手法の検討」(23JA1007) 令和5年度総括研究報告書. 1-13

G. 健康危険情報

該当なし

H. 研究発表

1. 論文発表
該当なし
2. 学会発表・講演等
2-1. 東 秀憲, 大藪貴子, 西田千夏, 榎原 毅, 中山 彩, 檜室文里, 渋谷晃弘, 石田尾徹, 山本 忍, 保利 一: 呼吸用保護具のフィットテストおよび顔サイズ因子に

- よるフィットファクタの推定, 第 97 回
日本産業衛生学会, 2024 年 5 月
- 2-2. 東 秀憲, 大藪貴子, 西田千夏, 榎原
毅, 辻 真弓: 着用者の顔形状情報に基
づく呼吸用保護具選定のための Web ア
プリケーション, 日本労働科学学会第 5
回年次大会, 2024 年 5 月
- 2-3. 東 秀憲, 大藪貴子, 西田千夏, 榎原
毅, 辻 真弓: 顔サイズ因子による呼吸
用保護具のフィットファクタの推定,
第 41 回エアロゾル科学・技術研究討論
会, 2024 年 8 月
- 2-4. 東 秀憲, 大藪貴子, 西田千夏, 榎原
毅, 辻 真弓: 顔形状パラメータおよび
顔画像を用いた呼吸用保護具選定方法
の検討, 第 12 回日本放射線事故・災害
医学会, 2024 年 9 月
- 2-5. 東 秀憲, 大藪貴子, 西田千夏, 榎原
毅, 辻 真弓: 呼吸用保護具のフィット
テストと着用者に適した保護具選定方
法の検討, 第 63 回労働衛生工学会,
2024 年 10 月
- 2-6. Hidenori HIGASHI : Risk mitigation
methods to exposure, IEOH 2024, 2024 年
11 月
- 2-7. Hidenori HIGASHI, Takako OYABU,
Chinatsu NISHIDA, Takeshi EBARA,
Mayumi TSUJI : Fit test and Estimation of
Fit-Factors for Respiratory Protection
Equipment, UOEH International
Symposium 2024, 2024 年 11 月

I. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
該当無し
2. 実用新案登録
該当無し
3. その他
該当無し

Table 1 Respirator protective equipment. (* tested by N95 companion mode)

Disposable type			Replaceable type			P-PAPR
a. KOKEN ハイテック 350 *	b. 3M 8210 J-DS2 *	c. SHIGEMATSU DD11-S2-5 *	d. KOKEN 1015-02 *	e. KOKEN 1005RRX-05 *	f. SHIGEMATSU TW01SC	g. SHIGEMATSU Sy11V3A
						

Table 2 Results of Fit-test. (Number of Fail)

	Subjects (Female)	Disposable type			Replaceable type			P-PAPR
		a	b	c	d	e	f	g
Test (A) *	20(8)	0(0)	1(1)	1(1)	0(0)	2(2)	1(1)	1(1)
Test (B)	16(8)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
PortaCount (C)	74(36)	2(1)	42(24)	2(1)	1(1)	1(0)	11(10)	8(8)
AccuFIT (C)	74(36)	1(0)	35(22)	2(1)	0(0)	1(0)	11(10)	9(7)
MT-11D (C)	74(36)	5(2)	36(21)	5(4)	3(2)	2(1)	8(6)	9(7)
MNFIT PRO (C)	20(9)	0(0)	4(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
Test (C)	74(36)	1(0)	27(17)	1(1)	0(0)	0(0)	4(3)	3(3)
Total(A,B,C)	110(52)	1(0)	28(18)	2(2)	0(0)	2(2)	5(4)	4(4)
Training Data	37(24)	1(0)	15(12)	2(2)	0(0)	2(2)	5(4)	4(4)

* tested in 2022 and learning date of previous work.

(A)(B)厚生労働省労災疾病臨床研究補助金事業 (211101-01) にて実施

(C)厚生労働科学研究費補助金労働安全衛生総合研究事業 (23JA1007) にて実施

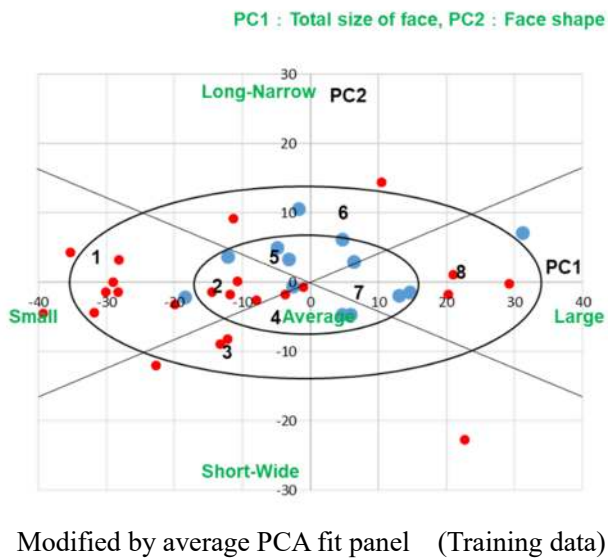
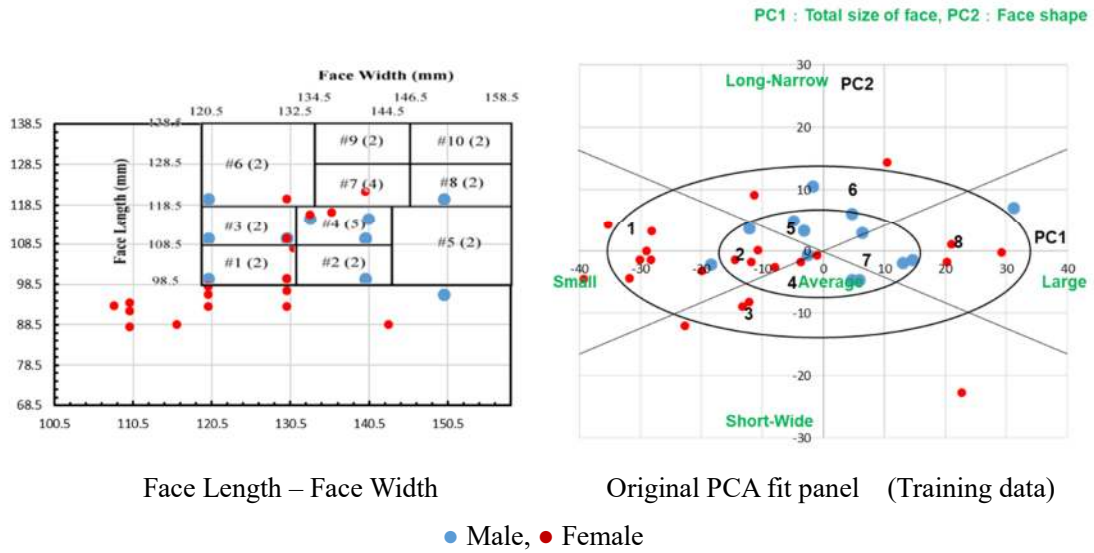


Fig.1 Distribution of subjects facial parameters on NIOSH PCA fit panel.

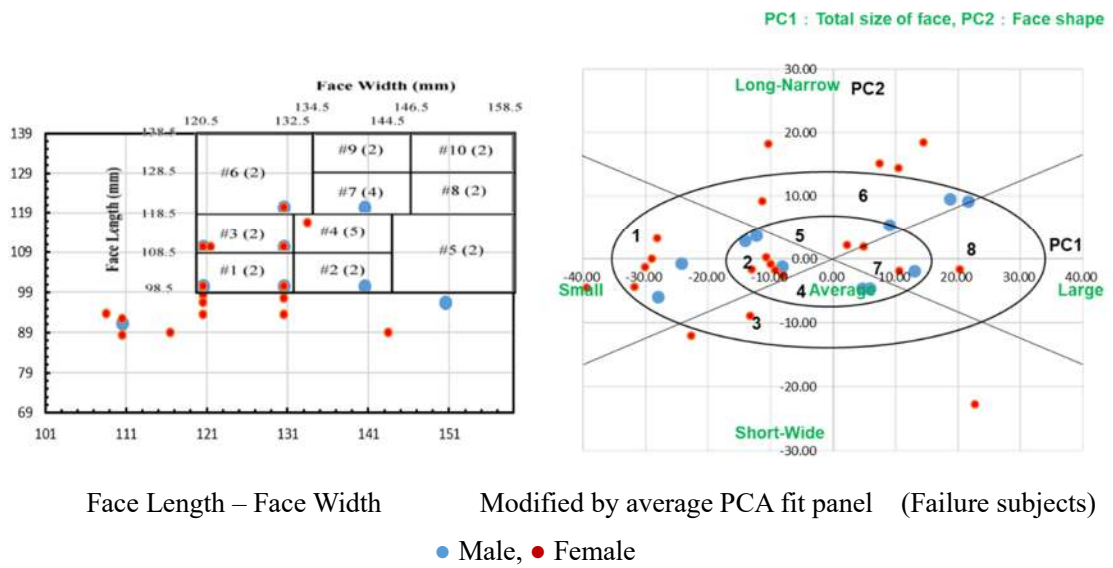
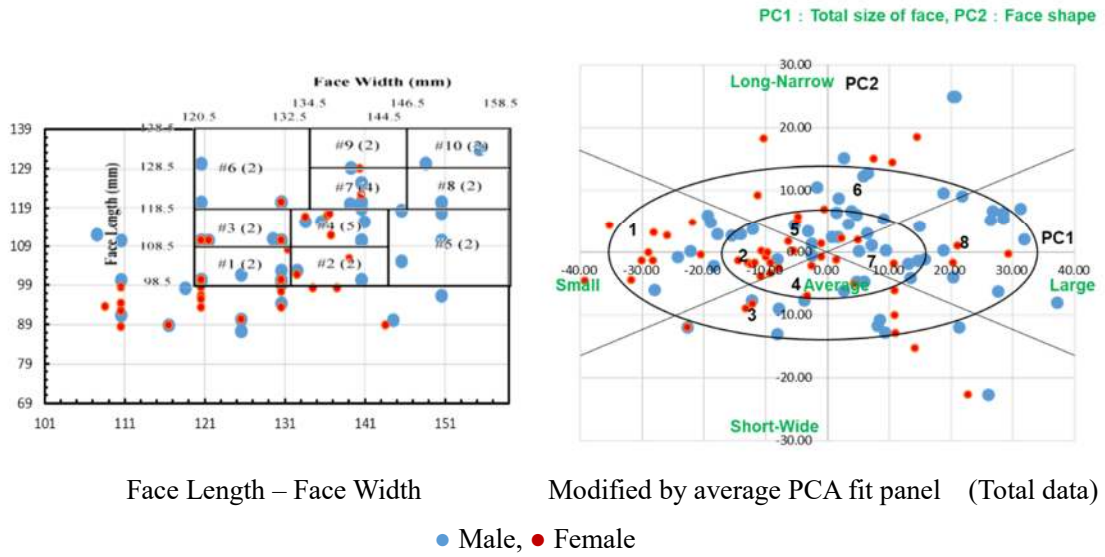
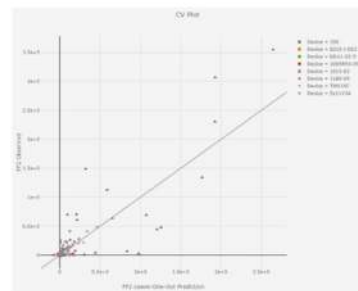
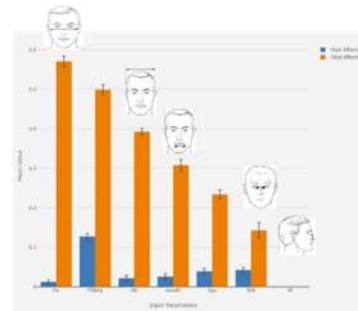
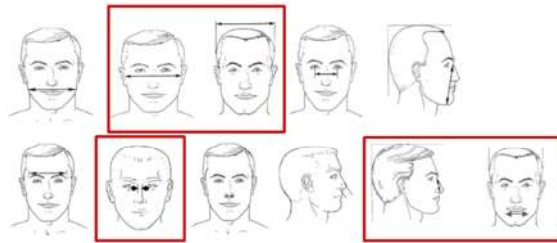


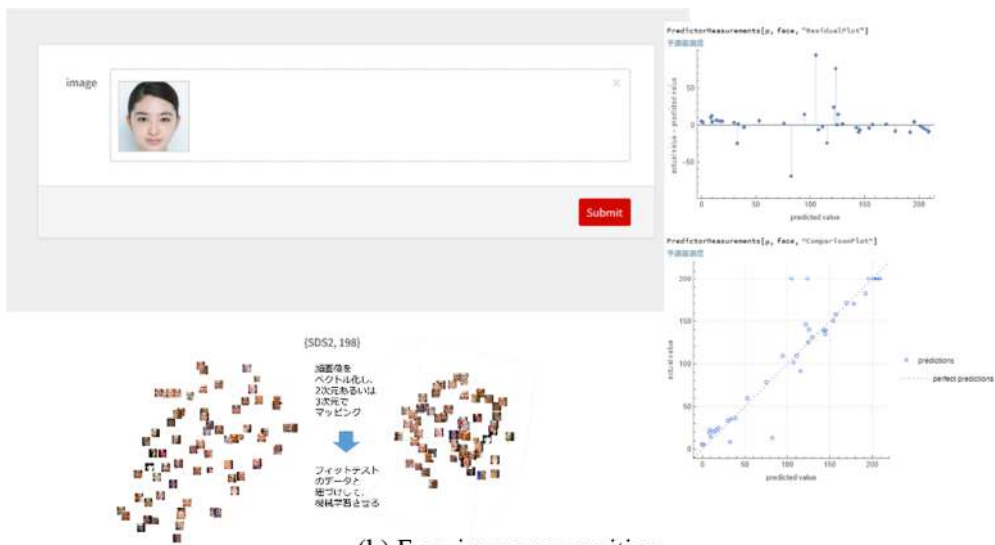
Fig.2 Distribution of subjects facial parameters on NIOSH PCA fit panel.

Smart UQ (Machine learning and quantitate of uncertainty)



Lip length, fitting, gender were set as additional parameters.

(a) Facial parameters regression



(b) Face image recognition

Fig.3 Image of parameter adjusting for (a) Facial parameters regression and (b) Face image recognition.

Table 3 Results of fit test and estimation by machine learning with facial parameters.
(Results of Fit-test)

(Training data)

	Disposal type						Reprisable type						PAPR	
	a	a	b	b	c	c	d	d	e	e	f	f	g	g
1	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
2	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
3	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
4	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail seal	fail seal	fail seal	fail seal
5	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
6	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
7	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
8	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
9	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
10	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
11	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
12	pass	pass	fail seal	fail seal	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
13	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
14	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
15	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
16	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
17	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass
18	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
19	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail seal	fail seal	fail	fail
20	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
21	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail seal	fail seal	fail seal	fail seal
22	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
23	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
24	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
25	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
26	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
27	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
28	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
29	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass
30	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
31	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail seal	fail seal
32	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
33	pass	pass	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass
34	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail seal	fail seal	pass	pass	pass	pass
35	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
36	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
37	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass

Table 4 Results of fit test and estimation by machine learning with face image.
(Results of Fit-test)

(Training data)

	Disposal type						Reprisable type						PAPR	
	a	a	b	b	c	c	d	d	e	e	f	f	g	g
1	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
2	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
3	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
4	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail	fail	fail	fail
5	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
6	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
7	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
8	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
9	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
10	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
11	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
12	pass	pass	fail	fail	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
13	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
14	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
15	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
16	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
17	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail	fail	pass	pass
18	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
19	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail	fail	fail	fail
20	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
21	pass	pass	fail	fail	pass	fail	pass	pass	pass	pass	fail	fail	fail	fail
22	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
23	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
24	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
25	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
26	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
27	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
28	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
29	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail	fail	pass	pass
30	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
31	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail	fail
32	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
33	pass	pass	pass	pass	fail	fail	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass
34	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	fail	fail	pass	pass	pass	pass
35	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
36	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass
37	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass	pass

Table 5 Estimated results of Fit-test. (Number of Fail and Accuracy Rate)

A. Facial parameters	Subjects(Female)	Disposable type			Replaceable type			P-PAPR
		a	b	c	d	e	f	
No. of Fail	37(24)	0(0)	15(12)	2(2)	0(0)	2(2)	5(4)	4(4)
Training Data	A.R., %	97	100	100	100	100	100	100
No. of Fail	36(16)	0(0)	11(3)	1(1)	0(0)	0(0)	9(3)	1(1)
Test (A, B)	A.R., %	100	<u>72</u>	100	100	<u>94</u>	<u>78</u>	100
No. of Fail	74(36)	0(0)	37(25)	5(4)	0(0)	0(0)	18(15)	6(6)
Test (C)	A.R., %	<u>99</u>	<u>57</u>	<u>95</u>	100	100	<u>81</u>	<u>96</u>
No. of Fail	110(52)	0(0)	48(28)	6(5)	0(0)	0(0)	27(18)	7(7)
Total Data	A.R., %	<u>99</u>	<u>62</u>	<u>96</u>	100	<u>98</u>	<u>80</u>	<u>97</u>
B. Face image	Subjects(Female)	a	b	c	d	e	f	g
No. of Fail	37(24)	1(0)	15(12)	3(3)	0(0)	2(2)	5(4)	4(4)
Training Data	A.R., %	100	100	97	100	100	100	100
No. of Fail	36(16)	0(0)	14(3)	2(1)	0(0)	3(2)	13(5)	11(6)
Test (A, B)	A.R., %	100	<u>58</u>	<u>97</u>	100	<u>97</u>	<u>67</u>	<u>72</u>
No. of Fail	74(36)	1(0)	41(20)	1(1)	0(0)	0(0)	24(11)	18(8)
Test (C)	A.R., %	100	<u>51</u>	100	100	100	<u>73</u>	<u>80</u>
No. of Fail	110(52)	1(0)	55(23)	3(2)	0(0)	3(2)	37(16)	29(14)
Total Data	A.R., %	100	<u>54</u>	<u>99</u>	100	<u>99</u>	<u>71</u>	<u>77</u>

Table 6 Fit-test results of failure subjects for each steps.
(Number of Fail, Ratio of fail, Fit-factor and *p*-value)

	Overall	Step1	Step2	Step3	Step4
No. of Fail	215	187	187	191	200
Ratio of fail [%]	-	87.0	87.0	88.8	93.0
<i>FF</i> (AV)	20	16	23	25	21
<i>p</i> -value	-	0.04	0.22	0.06	0.46
	Step1+Step4	Step2+Step4	Step3+Step4	Step1+Step3	Step2+Step3
No. of Fail	214	214	213	210	209
Ratio of fail [%]	99.5	99.5	99.1	97.7	97.2
<i>FF</i> (AV)	8.9	11	11	9.3	12
<i>p</i> -value	<<0.01	<<0.01	<<0.01	<<0.01	<<0.01