

PSF の観点に立った VR 訓練の特徴化に関する研究
—宇宙飛行士訓練を対象として—

A study of characterizing VR training based on PSF

- About training for astronauts -

鈴木大輔(慶應義塾大学大学院)、平澤弘光(宇宙航空研究開発機構)、高波功(IHI エスキューブ)

Daisuke SUZUKI (Keio University), Hiromitsu HIRASAWA (Japan Aerospace Exploration Agency), Isao TAKANAMI (IHI Scube Co.,Ltd)

Abstract

In Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), trainings for astronauts have been conducted in order to prevent human error and execute missions properly in the space, which are virtual reality (VR) training as well as mock-up training and manual training. However effects measurements based on scientific data have been hardly performed. Then in this study, we attempted to evaluate the effects on human error by VR training through comparing with mock-up training and manual training.

As for missions of astronauts, it is difficult to reproduce task environment in the space by training condition in a training center on the earth. Then we focused on not only human error that happens during training actually but also human reliability including possibility of human error, which is called human error potential.

In this study, therefore, conducting an experiment whose object is training for astronauts, we evaluated the effects of VR training from viewpoint of human error potential. It can be thought that human error is caused by performance shaping factors (PSF). Then, we also clarified characteristics of VR training through analysis based on both PSF and human error potential. From the results, we could show matters that require attention when conducting VR training and points of improving present VR training for decreasing human error potential.

1. はじめに

現在、宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、宇宙空間での作業を正確に行うために、宇宙飛行士のスキルアップを目的とした訓練が実施されている。一般に、作業の訓練方法としては図1のような分類が考えられる。実際に作業を体験し操作や手順を習得する訓練（作業体験型）と手順書等を用いて作業に関する知識を得るもの（知識教育型）に大別できる。具体的には、実機を用いて作業を体験する訓練（実機訓練）、実機のモックアップ（模型）を用いて作業を体験する訓練（モックアップ訓練）、バーチャルリアリティ（Virtual Reality: VR）による映像を用いて作業を体験する訓練（VR訓練[作業体験型]）、VRによる映像を用いて作業手順を学習する訓練（VR訓練[知識教育型]）、手順書のみで作業手順を学習する訓練（手順書訓練）がある。

JAXAにおいては、モックアップ訓練や手順書訓練に加えて、VR訓練[知識教育型]が導入され始めている。本研究ではこのVR訓練[知識教育型]を対象とし、以下、これをVR訓練と呼ぶ。VRを訓練に用いるメリットとしては、モックアップを利用した訓練と比較して維持・運用や改修のコストを大幅に削減できる点が挙げられる。また手順書での訓練に比べ、三次元映像を利用することにより宇宙空間における作業の理解度が深まると宇宙飛行士から評価されている。しかしながら、訓練の効果に関しては意見聴取しか行っておらずデータにもとづいた評価は実施されていない。そこで、本研究では宇宙飛行士訓練を対象に、VR訓練と他の訓練の比較を行った。

宇宙空間での作業の特徴としては、作業自体はさほど困難ではないがエラー（望ましく

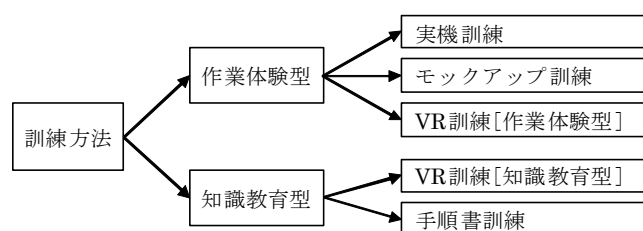


図1 訓練方法の分類

ない行動) が決して許されない状況であることが挙げられる。また、無重力等の環境要因や精神的なプレッシャーの影響で、地上の訓練では容易な作業が宇宙空間では円滑に進行しないこともある。このような要因は地上の訓練では再現が困難なため、訓練中には発生しなかったエラーが宇宙空間では顕在化しやすくなることも考えられる。このことから、宇宙空間での作業のための訓練を考えた場合には、訓練中に発生したエラーの評価に加えて、潜在的なエラーの起こりやすさ(以下、エラーポテンシャルと呼ぶ)の観点に立った訓練効果の測定も重要である。そこで本研究では、訓練中に発生したエラーのみでなく、エラーポテンシャルを含めた人的信頼性に着目した。

訓練方法や訓練効果に関しては数多くの研究が報告されている。VR等の映像を用いた訓練方法に関する研究としては、原子力プラントにおける体験型教育システムの開発に関する研究^{(1)~(3)}やシミュレータ上で発生するエラーに関する研究^{(4),(5)}、組立作業において作業手順を効率的に覚えるための情報提示方法に関する研究^{(6),(7)}等がある。また、訓練効果に関しては、作業時間のばらつきから作業者の習熟度合いを定量的に評価するための研究^{(8),(9)}等がある。このように顕在化したエラーの分析や作業手順を効率的に覚えるための訓練方法に関する研究は行われているが、訓練の効果を潜在的なエラーも含めて評価する研究はあまり見られない。

そこで本研究では、モックアップ訓練および手順書訓練との比較を通してVR訓練の効果についてエラーポテンシャルの観点から評価を行った。また、各訓練方法の特徴を詳細に理解し、エラーポテンシャル低減のための訓練を実施する際の注意点や訓練方法を効果的に改善するための指針を提案するために、人間の行動に影響を与える要因(Performance Shaping Factors: PSF)とエラーポテンシャルによる検討も行った。

2. 実験方法

対象作業は「ポンプパッケージの取り付け」とした。これはねじ締めやコードをつなぐ等の簡単な組み立て作業で、9つの作業ステップ(S1~S9)からなる(図2)。被験者はこの種の作業の経験がない健常な20代~40代の男女18名(宇宙飛行士ではない)とし、図3に示す3つの訓練グループに分けた。各訓練の概要を以下に示す。

- ・ VR訓練は、実際の装置を模擬したVR映像を見ながら、インストラクターが手順に沿って作業内容を説明する。被験者はインストラクターの説明を聞き、手順書とVR映像を見

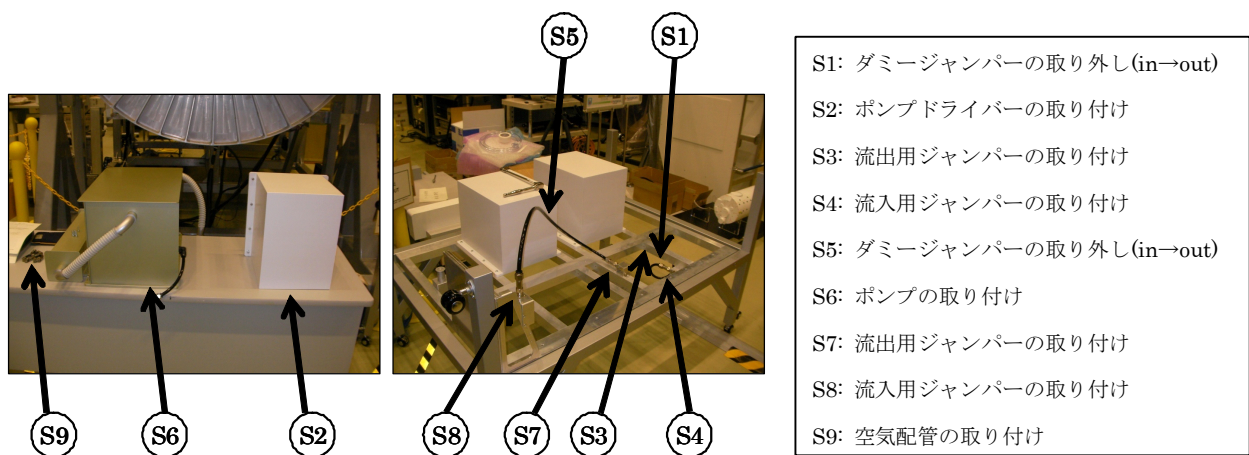


図2 実験器具(モックアップ)と作業内容

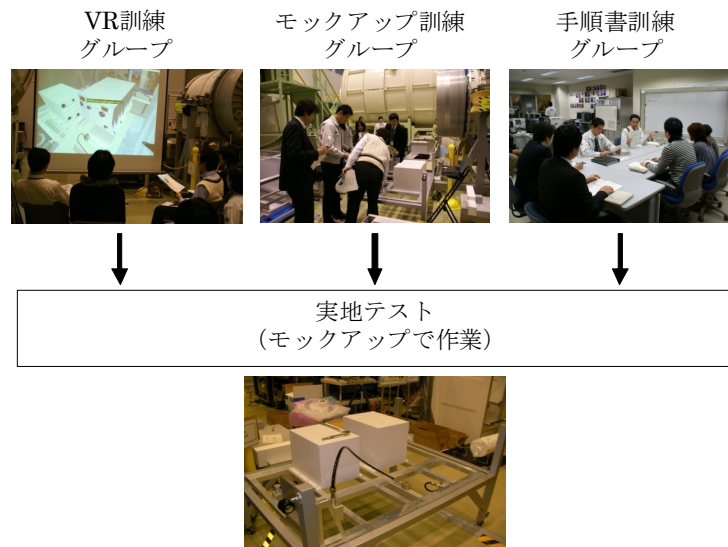


図3 実験手順

て作業内容を学習する。

- ・モックアップ訓練は、モックアップを使いながら、インストラクターが手順に沿って作業内容を説明する。作業ステップごとに2人の被験者が実際に作業を行い、作業を体験して、あるいは体験している被験者を見て作業内容を学習する。
- ・手順書訓練は、机上で手順書を用いて、インストラクターが手順に沿って作業内容を説明する。被験者はインストラクターの説明を聞き、手順書を見て作業内容を学習する。

各グループの被験者はそれぞれVR訓練、モックアップ訓練、手順書訓練を実施後、実地テスト（モックアップで作業）を行った。訓練後の実地テストにより訓練効果を評価した。

さて、本作業を宇宙空間で実施する場合には、通常2人で作業にあたり、手順書を用いて一つの作業ステップで手順や作業方法を確認しながら行う。また、時間圧を感じる制限時間は設定せず、正確に作業を遂行することが重視される。これらは、無重力等の環境要因の影響で、次の手順がすぐにはわからない等の場合でも、エラーを起こさずに作業を完了させるためである。しかしながら、無重力等の環境要因を訓練で再現することは困難であり、地上において同一の条件で行った場合にはエラーは顕在化しにくい。そこで、作業の難易度を宇宙空間での作業に近づけて潜在的なエラーを顕在化させるために、実地テストでは1人で作業を行い、作業中に手順書を見てはいけないこととした。また、予備実験を通して適度に時間圧がかかる時間を調査し、制限時間を10分とした。10分を過ぎても作業が完了していない場合には作業を続けさせ、15分で強制的に終了させた。さらに、作業の実施に関して以下の規定を設けた。

- ・作業は手順書通りの順番で行う。
- ・ねじは指定された順序で締める。
- ・工具は指定された場所に置く。
- ・所定の方向以外からモックアップに手を入れてはいけない。

被験者には以上の規定を守った上でできるだけ早く作業を完了するように指示し、守れなかった場合をエラーとした。そのエラーの数を評価指標とした。また、この条件でも顕在化しなかったエラーに関しては、作業がスムーズに実施されない等の潜在的なエラーが影響を与えると思われる作業時間により評価した。

3. 実験結果・考察

3-1 エラー数による比較（顕在化したエラー）

実験では以下のエラーが観察された。「所定の方向以外からモックアップに手を入れた」、「作業の順番を間違えた」、「ポンプドライバーの向きを逆に取り付けた」、「ねじを数本締め忘れた」、「ねじを締める順番を間違えた」である。特に回数の多かった「所定の方向以外からモックアップに手を入れた」と「作業を手順書通りの順番で行わなかった」をそれぞれ「手」、「順番」とし、その他のエラーを「その他」とした。これらを訓練方法ごとにまとめたエラー数の平均を図4に示す。VR訓練と手順書訓練でエラーが多く観察され、モックアップ訓練との差が見られた。

エラーの要因を考えると、「順番」については細部の実施手順に関する理解不足が挙げられる。VRや手順書を用いた訓練では作業の全体的な流れを学習しても、実地テストにおいて「S5：ダミージャンパーの取り外し(in→out)」のような細部の順序を覚えきれていなかった。また「ポンプドライバーの向きを逆に取り付けた」や「ねじを締め忘れた」に関しては、思い込みによる行動やその結果に対する気付きにくさが考えられる。VR訓練や手順書訓練では、正しい取り付け向きは理解できるが、向きが逆の状態を想像するのは難しい。「手」のエラーは作業全体にわたる余裕のなさを表していると考えられる。

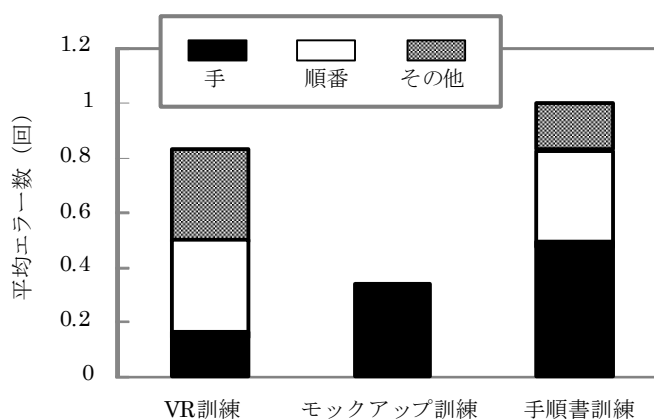


図4 エラー数の比較

3-2 作業時間による比較（潜在的なエラー）

次の手順をすぐに思い出せなかったことや手順がわかってもスムーズに実行できていなかった等の行為はエラーとは判断できないが望ましくない行動といえる。このような望ましくない行動が発生した場合には作業に時間がかかる。そこで、作業時間の比較を通して潜在的なエラーを推測することとした。

まず各作業ステップにおける全被験者中の最短時間を抽出し、それらを組み合わせたものを理想タイムとした。次に各被験者の各作業ステップに要した時間の偏差値をDとし、式(1)により算出した。

$$D = 50 + \frac{(t - \bar{t})}{\sigma} \times 10 \quad (1)$$

t：作業ステップにかかった時間

\bar{t} ：作業ステップにかかった時間の全被験者の平均

σ ：作業ステップにかかった時間の全被験者の標準偏差

さらに各作業ステップにおける各被験者の偏差値と理想タイムの偏差値との差を時間評価値 E_{time} とし、(2)式により算出した。

$$E_{\text{time}} = D - \hat{D} \quad (2)$$

\hat{D} ：理想タイムの偏差値

完了しなかった作業ステップに関しては他の被験者の E_{time} の最大値で代用した。 E_{time} を訓練方法ごとにまとめた累積を図 5 に示す。 E_{time} が大きいほど理想タイムとの差が大きく、次の手順をすぐに思い出せなかったことや手順がわかってもスムーズに実行できていなかった等のエラーではないが望ましくない行動があったと考えられる。

このような潜在的なエラーを示す作業時間による比較では、VR 訓練とモックアップ訓練には差は見られなかった。一方で、手順書訓練では他の訓練と比べて大幅に時間がかかっており、潜在的なエラーが発生していたと考えられる。

3-3 エラー数と作業時間を考慮した比較 (総合的なエラーポテンシャル)

総合的なエラーポテンシャルを比較するために、各被験者の作業時間から算出した時間評価値 E_{time} に対して各被験者のエラーを考慮し、エラー数と作業時間の両方を踏まえた評価を行った。

ただし、エラー数と作業時間では単位が異なるので、以下の方法でエラーを時間に換算した。各エラーについて、エラーが発生した作業をもう一度行う場合を想定し、その作業の平均時間と標準偏差からエラーを考慮した修正点 (エラー修正点: E_x) を定めた。エラー修正点 (E_x) を表 1 に示す。例えば「ポンプドライバーの向きを逆に取り付けた」というエラーに関しては、ポンプドライバーを取り付ける作業の平均時間は 363 秒、標準偏差は 124 秒であった。そこで、作業にかかる平均時間が標準偏差の約 3 倍なので、エラー修正点は 30 とした。他のエラーに関しても同様にエラー修正点を決定した。なお、「所定の方向以外から手を入れた」と「ねじを締める順番を間違えた」に関しては、作業をもう一度やり直す必要のない規則違反である。そこで、他のエラーに対するエラー修正点を参考に 10 とした。

時間評価値 E_{time} にエラー修正点 E_x を加えたものをエラーポテンシャル $E_{revision}$ とし、(3)式により求めた。

$$E_{revision} = E_{time} + E_x \quad (3)$$

エラーポテンシャル $E_{revision}$ の累積を図 6 に示す。このような総合的な評価においても手順書訓練が著しく劣っているといえる。

以上の結果からエラーポテンシャルに対する各訓練方法の効果を測定することができた。さら

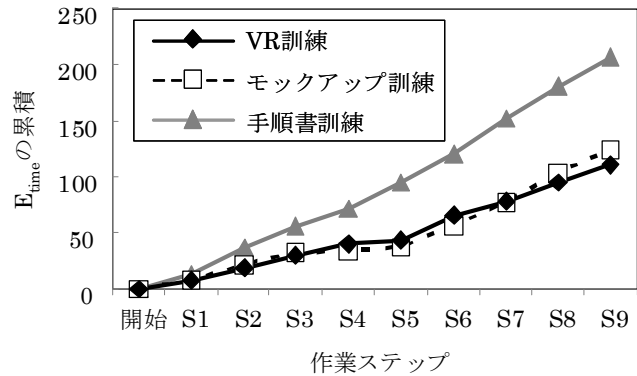


図 5 時間評価値 E_{time} の比較

表 1 エラー修正点 (E_x)

エラーの種類	エラーが発生した作業ステップ	平均時間 (秒)	標準偏差 (秒)	エラー修正点
ポンプドライバーの向きを逆に取り付けた	S2	363	124	30
ねじを数本締め忘れた	S6	114	57	20
作業の順番を間違えた	S3 S4	48 50	36 82	20
所定の方向以外から手を入れた	—	—	—	10
ねじを締める順番を間違えた	—	—	—	10

にこれらの結果から、各訓練方法を実施するうえでの注意点や効果的な改善案を提案するために、人間の行動に影響を与える要因（PSF）を用いてエラーポテンシャル E_{revision} の推定を行った。

4. PSFの観点に立った分析・評価

エラーポテンシャル E_{revision} の推定方法の概要を図7に示す。各訓練方法が各PSFの状態を決定し、各PSFが各作業ステップのエラーポテンシャルに影響を与えると考えた。まず本作業に影響を与えそうで、かつ各訓練方法による影響を受けそうなPSFを実験結果の考察と各作業の特徴を参考に選定する。次に、各訓練方法を実施した場合の各PSFの状態 (P_a) と各PSFが各作業ステップに与える影響の大きさ (W_{ab}) を数値化し、 E_{revision} を推定する。そして、これらPSFに関する数値をもとに各訓練方法の特徴や改善指針について検討する。

4-1 PSFの選定

PSFの選定にあたっては、行待・永田らによって提唱されているGAPW型PSFリファレンス・リスト^{(8)~(11)}を用いた(表2)。このPSF 98項目から、実験結果の考察と本実験における作業内容を参考に、エラーポテンシャル E_{revision} に影響を与えたと思われるPSF 6項目を選定した(表3)。

まず、実験結果の考察から、手順書通りに作業を遂行できなかったエラーのPSFとして「手順の経験判断」とした。また、ポンプドライバーの向きを逆に取り付けたエラーやねじを締め忘れたエラーのPSFとして「思い込み」、そのリカバリーができなかったPSFとして「異常同定」とした。

次に、本実験における作業内容は、ジャンパーの取り付け・取り外しとねじによる器具の取り付けである。注意点として、ジャンパーの取り付け・取り外しに関しては、作業ステップによっては視認しにくい箇所での作業となることが挙げられる。そこで、視認しにくい箇所での作業を考慮し「劣予測性」、また

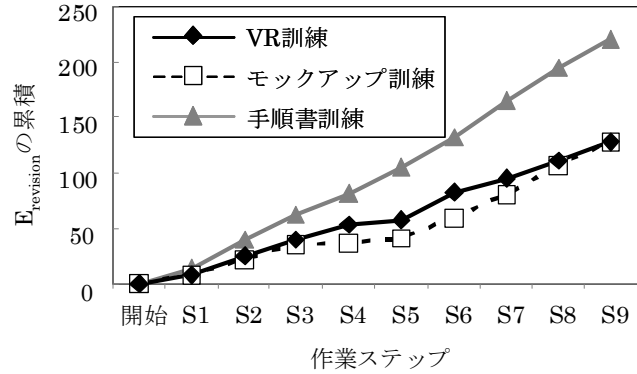


図6 エラーポテンシャル E_{revision} の比較

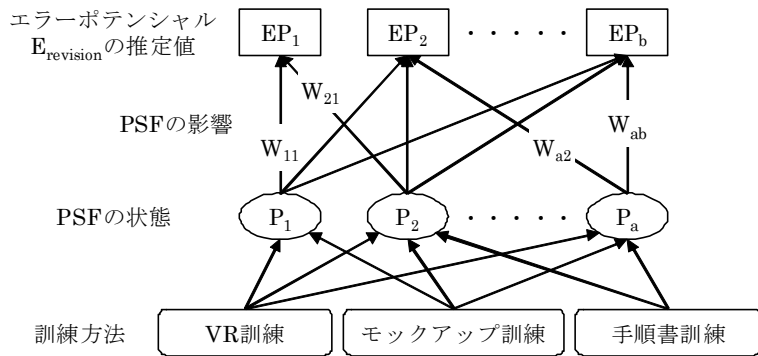


図7 エラーポテンシャルの推定方法の概要

表2 GAPW型PSF (98項目)

Gestalt	Affordance	Preview	Workload
過去への過信	MMI	時間圧	認知的負荷
組織構成	劣識別性	予定外作業	失敗の怖れ
経験不足	劣接近性	劣予測性	作業計画不備
知識不足	確認不十分	慣れ不足	悪環境
教育不足	表示の紛れ	申し送り不備	劣作業性
作業の高度性	意図把握性	伝達不適切	要操数手順書
不定形性	孤立作業	共有の事前確認	注意散逸
資料不足・不備	記録管理不備	準備不足	移動距離大
管理・流用不適切	異常の発生	元請下請間連絡	形状設計
変則作業	仕上がり判定	評価項目不十分	安全性設計
同種反復	文書不明確	補修計画楽観的	規格基準煩雑
規範の弛緩	寸法限界の規定	情報提供不足	対象機器の形状
的確な経験判断	設計変更不明確	他系統との連携	危険作業
精度要求	判断基準具体性	計画工程切迫	狭隘(あい)部作業
思い込み	劣フィードバック	作業の進行状況	身体的負担
手順・方法不適切	続った取付	作業上意思疎通	混入・接触
経験からの読み	劣確認性	部品・材料不具合	合否識別困難
手順の経験判断	検査基準不透明	予防措置不備	記憶的困難
部門間誤解釈	管理事項欠如	検査基準の変更	機器等改良余地
熟練の腕や芽え	情報散逸性	試験の準備・確認	多くの付帯作業
検査の個人依存	詳細な読み取り	時定数大	単純な観察
検査不十分	過程の劣監視性	手順の優先順位	情報選択性
異常同定		他作業の介入	
操作複雑性		結果の照合	
自動化の範囲		潜在危険の判断	
操作の慣れ		警報・連絡の遅れ	
稀事象の対応			
操作の訂正・中断			

取り付けの際にはジャンパーの角度を正確に合わせる必要があるので「精度要求」とした。さらに、ねじによる器具の取り付けには工具を用いるので PSF としては「操作の慣れ」とした。

以上、エラーポテンシャル $E_{revision}$ に影響を与えたと思われる PSF と作業ステップの関係性について代表的な例を挙げたが、各 PSF は一つの作業ステップにのみ影響を与えるわけではなく、複数の作業ステップに影響する。また、各作業ステップも一つの PSF のみから影響を受けるのではなく、複数の PSF から影響を受けると考えられる。そこで、表 4 に各 PSF の説明、各 PSF により引き起こされると考えられるエラー、各 PSF に対して考えられる各訓練方法の効果を示す。

4-2 PSF の状態と影響を数値化

各訓練を実施した場合の各 PSF の状態 (P_a) と各 PSF が各作業ステップに与える影響の度合い (W_{ab}) の数値化を行った。PSF の状態に関しては、訓練のインストラクターへのアンケート

表 3 選定された PSF 6 項目

Gestalt	Preview
手順の経験判断	劣予測性
操作の慣れ	
精度要求	
思い込み	
異常同定	

表 4 PSF と訓練方法の影響

PSF	リファレンス例文	エラー	モックアップ訓練	VR訓練	手順書訓練
手順の経験判断	細部の実施手順や方法について、知識・経験による判断が必要な作業	・順序	実際の物を用いて手順や作業箇所を確認し、理解を深める。	実際に経験することはできないが、映像を用いて実施手順について知識を得る。	作業箇所の名称は教えられるが、実物の位置関係などはわからない。
操作の慣れ	実施方法や工具使用に対して慣れが必要な作業	・遅延	訓練時に実施する、又は実施している人を観察することができる。	実際の物を使用することはできないが、映像によりイメージを高める。	文章による理解であるため、作業イメージは形成されにくい。
劣予測性	予測性・見通しが悪い作業	・手 ・遅延	見通しの悪い箇所を確認し、作業時の注意点を把握する。	予測性・見通しが悪いことは確認できるが、適切な行動はわからない。	見通しの悪さを事前に知ることができない。
精度要求	精度が厳しく、定められた方法でないと実施しにくい作業	・手 ・遅延	精度の厳しさを理解し、実施するための定められた方法を体験する。	定められた方法を映像で理解するが、実施上の注意点などは体験できない。	定められ方法を正確に理解することは難しい。
思い込み	思い込みによる行動をしやすい作業	・取付向き ・ネジ締め忘れ	思い込みによって行動した場合のエラーを想定した訓練ができる。	思い込みに陥りやすい箇所は教示できるが、その結果は示しにくい。	自らの行動が思い込みであるかを判断するための訓練は難しい。
異常同定	異常を同定しにくい作業	・取付向き	異常を同定するためのポイントを詳細に解説できる。	異常を同定するためのポイントは解説できるが、その方法を教えるのは困難。	異常を同定するためのポイントを理解することは難しい。

により値を決定した。各訓練方法を実施後の各 PSF の状態を、モックアップ訓練を基準 (1.0 点) として、点数付けしてもらった (表 5)。表 5 中の数値が大きいほど望ましくない状態であることを示す。

PSF の影響については、本作業を熟知しており、各 PSF の特徴を理解したヒューマンファクターの専門家に 0.0~1.0 点で点数付けしてもらった (表 6)。点数付けの過程としては、例えば「S1: ダミージャンパーの取り外し (in→out)」に関しては、「手順の経験判断」と「操作の慣れ」が影響を与えると思われる、それほど熟練を要する作業ではないので手順 (in→out の順序) を間違えないことが重要である。そこで「手順の経験判断」は「0.8」、「操作の慣れ」は「0.3」となった。他の作業についても同様に点数付けが行われた。なお、表 6 における空欄は「0.0」を意味する。

表 5 PSF の状態 (P_a)

	モックアップ訓練	VR訓練	手順書訓練
手順の経験判断	1.0	1.3	1.7
操作の慣れ	1.0	2.0	3.3
劣予測性	1.0	1.4	3.3
精度要求	1.0	2.0	3.3
思い込み	1.0	1.4	2.5
異常同定	1.0	1.3	2.5

表 6 PSF の影響 (W_{ab})

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
手順の経験判断	0.8				0.5		0.5	0.5	
操作の慣れ	0.3	1.0			0.3	1.0			0.5
劣予測性			0.7	0.7					
精度要求			0.7	0.3			0.9	0.9	0.3
思い込み		0.3				0.5			
異常同定		0.3							

4-3 エラーポテンシャル E_{revision} の推定とその妥当性の検証

b 番目の作業ステップにおけるエラーポテンシャル E_{revision} の推定値を EP_b とし、(4)式に示す PSF の状態 (P_a) と影響 (W_{ab}) の積和で算出した。

$$EP_b = \sum_{a=1}^6 P_a \cdot W_{ab} \quad (4)$$

算出された EP_b の妥当性を検証するために、各作業ステップにおける E_{revision} の平均との比較を行った (図 8)。ただし、完了していない作業ステップに関しては最大値で代用したが、完了していない作業には PSF が影響したとはいえない。そこで、完了した被験者がいた作業ステップのみで EP_b と E_{revision} の平均を比較した。なお、手順書訓練における作業ステップ S7 は完了した被験者が一人しかいなかったのを除外した。両者の相関係数 (R) は 0.77 であり、このことから図 7 に示した構造により算出された E_{revision} の推定値 EP_b の妥当性が確認された。

そこで、表 5、表 6 の PSF に関する数値をもとに VR 訓練の改善案の一例を考える。まず、VR 訓練とモックアップ訓練における PSF の状態 (P_a) の差と PSF の影響 (W_{ab}) の積を VR 訓練改善ポイントとした。作業ステップ b における PSF_a の VR 訓練改善ポイントを F_{ab} とし、(5)式により導いた。

$$F_{ab} = (P_{a_VR} - P_{a_モックアップ}) \cdot W_{ab} \quad (5)$$

P_{a_VR} : VR 訓練における PSF_a の状態

P_{a_モックアップ} : モックアップ

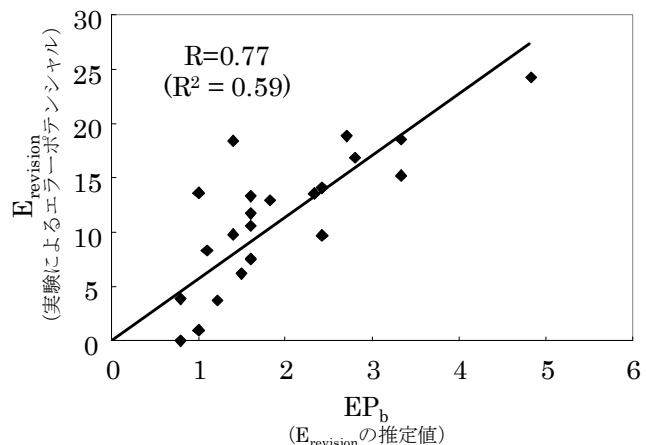


図 8 EP_b と E_{revision} の比較

訓練における PSF_a の状態

VR 訓練改善ポイント (F_{ab}) を表 7 に示す。F_{ab} の値が大きいほど改善の効果が期待できることを意味する。表 7 から、作業ステップ S2、S6 で「操作の慣れ」を、また作業ステップ S7、S8 で「精度要求」を改善することが効果的であることがわかる。S2、S6 はねじで器具を固定する作業、S7、S8 はジャンパーを取り付ける作業であるが、これらの作業ステップを説明する VR 映像に使用する道具や作業者の身体、作業姿勢等を組み込むことで、「操作の慣れ」や「精度要求」をある程度改善することが可能だと考えられる。また、その改善は他の作業ステップや他の PSF に行うより高い効果が期待できる。

このように、各訓練方法と各作業ステップを PSF を用いて表現することにより、各作業ステップにおいて改善すべき PSF が把握しやすくなった。このことにより訓練方法の効率的な改善につながると期待できる。

5. まとめ

本研究では宇宙飛行士の訓練を対象に、VR 訓練、モックアップ訓練、手順書訓練の効果測定を行った。地上の訓練では再現できない環境要因等が宇宙空間でのエラーを引き起こすことも考

表 7 VR 訓練改善ポイント (F_{ab})

作業ステップ PSF	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
手順の経験判断	0.24				0.15		0.15	0.15	
操作の慣れ	0.30	1.00			0.30	1.00			0.50
劣予測性			0.28	0.28					
精度要求			0.30	0.30			0.90	0.90	0.30
思い込み		0.12				0.20			
異常同定		0.09							

	0.6 ~
	0.4 ~ 0.6
	0.2 ~ 0.4
	0.0 ~ 0.2

えられるので、発生したエラーのみでなく潜在的なエラーの起こりやすさ (エラーポテンシャル) に着目した。そこで制限時間や作業方法に規定を設け、潜在的なエラーを顕在化させることを試みた。そして、顕在化したエラーの数と潜在的なエラーが影響を与えると思われる作業時間により訓練効果を評価した。エラー数と作業時間の両方を考慮した総合的なエラーポテンシャルの比較から、VR 訓練とモックアップ訓練には大きな差は見られず、手順書訓練が著しく劣っていることがわかった。

また、人間の行動に影響を与える要因 (PSF) を用いた分析を通して各訓練方法の特徴化を図った。実験結果の考察や作業内容を参考に、各訓練方法の影響を受け、かつ各作業ステップに影響を与えるとも思われる PSF を選定し、その状態と影響の数値化を図った。これら PSF に関する数値をもとに訓練方法の改善案について検討した。その結果、各訓練方法と各作業ステップの関係を PSF を用いて表現し数値化することで、改善案の立案が支援される可能性を示すことができた。

一般に作業を習得するためには、その作業を体験することが重要である。しかしながら、本研究における VR 訓練は知識教育型の訓練であるにもかかわらず、モックアップ訓練とほぼ同等の訓練効果が得られた。VR 訓練において経験に関わる PSF が影響する作業を、ヘッドマウントデ

ディスプレイやデータグローブ等を用いて作業体験型の訓練にした場合には、モックアップ訓練よりも高い効果が得られる可能性も十分に考えられる。また、モックアップの作成には多くの費用がかかり、コストの関係で実機を忠実に再現できないこともある。本研究において提案した PSF の観点に立ったヒューマンファクター的分析を通して、現状の VR 訓練の弱点を明確にし、それを効率的に改善していくことで、今後、VR 訓練がヒューマンエラー対策の有効な一手法になると期待する。

参考文献

- (1)下田宏ほか：プラント運転・保守の教育訓練への Virtual Reality 適用研究の展望，ヒューマンインタフェース学会論文誌，1 (4)，35～42，1999
- (2)石井裕剛ほか：人口現実感技術を用いた原子力プラント運転の体験型教育システムの開発，ヒューマンインタフェース学会論文誌，2 (4)，57～66，2000
- (3)長松隆ほか：仮想環境を用いた連携作業システムのユーザ指向設計と評価に関する実験研究，ヒューマンインタフェース学会論文誌，3 (4)，93～104，2001
- (4)深沢伸幸ほか：列車運転シミュレータ上で発生するヒューマンエラー，鉄道総研報告，17 (1)，15～18，2003
- (5)深沢伸幸ほか：列車運転シミュレータ上での速度コントロール技能の獲得過程，鉄道総研報告，18 (2)，35～40，2004
- (6)志田敬介ほか：組立作業におけるパソコンによる作業指示のための提示情報に関する基礎研究—文字情報と静止画情報の比較—，人間工学，39 (5)，219～231，2002
- (7)志田敬介：組立作業における作業指示のための動画情報に関する研究，人間工学，41 (1)，1～10，2005
- (8)福田康明，大久保堯夫：達成度手法による作業習熟の研究，人間工学，29 (4)，215～222，1993
- (9)福田康明ほか：作業難易と習熟に関する研究，人間工学，37 (2)，67～73，2001
- (10)永田学，行待武生，長谷川利夫：Gestalt, Affordance, そして Preview から見た保全作業の PSF—過誤事例への適用を通じたスキルタイプの特性化の研究—，日本プラント・ヒューマンファクター学会誌，6 (2)，96～111，2001
- (11)永田学，行待武生：プラント運転に関わる PSF と GAP-W 概念の研究，ヒューマンファクターズ，9 (1)，7～14，2004
- (12)行待武生，永田学：GAP-W 型 PSF によるリファレンス・リストと一事例研究，ヒューマンファクターズ，9 (1)，46～62，2004
- (13)行待武生監修：ヒューマンエラー防止のヒューマンファクターズ，テクノシステム，2004
- (14)R. Bowen Loftin, Patrick J. Kenney: Training the Hubble Space Telescope Flight Team, IEEE Computer Graphics and Applications, 31-37, 1995