

航空宇宙産業製造工程における  
ヒューマンエラーマネジメントの研究

~品質マネジメントシステムを補完するベテラン作業者暗黙知活用の実践と検証~

2022年7月

山下 茂司

## 目次

<b>第 1 章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 背景と目的 .....	1
1.2 論文の構成 .....	3
<b>第 2 章 品質マネジメントシステム</b> .....	<b>5</b>
2.1 はじめに .....	5
2.2 航空・宇宙・防衛産業の品質マネジメントシステム（JIS Q 9100） .....	7
2.3 JIS Q 9100 規格の変遷 .....	11
2.4 現行のヒューマンエラーリスクへの対応と課題、今後の方針 .....	17
<b>第 3 章 ヒューマンエラー事象の実状と改善方針の考察</b> .....	<b>21</b>
3.1 はじめに .....	21
3.2 ヒューマンエラーとヒューマンファクタ（Human Factors） .....	24
3.3 ヒューマンエラー事象の実状 .....	30
3.4 レジリエンス効果による改善促進の考察.....	33
3.5 まとめ.....	36
<b>第 4 章 ベテラン作業者暗黙知の蓄積</b> .....	<b>37</b>
4.1 ベテラン作業者の行動と暗黙知.....	37
4.2 人間工学チェックシート .....	41
4.3 宇宙機器組立作業での検証.....	42
4.4 評価 .....	48
4.5 まとめ.....	50
<b>第 5 章 暗黙知の形式知化と活用</b> .....	<b>51</b>
5.1 工程 FMEA への SHEL モデル適用 .....	51

5.2 失敗学を取り入れた戦訓集の活用 .....	60
5.3 まとめ .....	69
<b>第6章 品質意識を優先する最適教育計画の考察 .....</b>	<b>70</b>
6.1 はじめに .....	70
6.2 状況認識と意思決定 .....	73
6.3 意識のモニタリング .....	79
6.4 最適教育計画 .....	83
6.5 まとめ .....	97
<b>第7章 結論 .....</b>	<b>99</b>
<b>謝辞 .....</b>	<b>101</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>102</b>
<b>研究業績 .....</b>	<b>108</b>
<b>APPENDIX：“戦訓：成功へのヒント集” .....</b>	<b>110</b>

# 第1章 序論

## 1.1 背景と目的

国内航空宇宙産業（含む防衛産業）は戦後、防衛需要を基軸に着実な発展を遂げ、近年では民間機分野で国際共同開発にも積極的に参画している。宇宙分野も輸送系、衛星系双方の開発利用を進め、産業規模も拡大しつつある[1]。戦後一時期、GHQにより航空機の研究生産活動が禁止され、航空宇宙工業は欧米先進国に立ち遅れていたが、防衛機のライセンス生産を手掛かりに、次第に国内の開発・生産体制を整えてきた。防衛機の開発・生産は日本の航空機産業の基盤であり、その中心的な産業地域である愛知県で筆者は航空宇宙メーカーの品質保証業務を担当している。航空宇宙産業は最新の技術を高い信頼性を得るまで地道に研究・検証し、製品実現につなげ、それら製品機能がもたらすメリットによって、社会は大きく発展し、身近な生活も便利になってきた。

ただし、自動車や家電製品といった大量生産品と異なり、特に日本の航空宇宙産業は多品種少量生産のモノづくりが主体である。前者が人の介入を局限する自動化された工程や、期間工でもアウトプットのばらつきを抑えるライン生産方式を採用できるのに対し、航空宇宙製品の製造は職人の技量に頼ったモノづくりを行っているのが現状である。例えば、インコネル等の特殊耐熱合金を用いた複雑形状部品をミクロンオーダーの寸法で仕上げる機械加工、燃焼器等高圧容器の接合に用いられる溶接、製品表面や内部の欠陥を検出するための非破壊検査（浸透探傷検査、放射線透過検査、超音波探傷検査、渦流探傷検査等）などは、人の技量に頼っている。組立・整備作業や機能試験、燃焼試験、飛行試験等各種試験作業も、人の技量や経験に基づく判断に頼った領域があり、知識があっても未経験者が作業することはできない。もちろん機械が行う作業もあるが、NC加工機、自動溶接機等の設備も、ワーク（製品）のセットアップ、個々の補正入力等々、人の手が介入しないと作業は出来ず、完全自動の作業はほぼ無いと言える。人に頼っている以上、ヒューマンエラーによる作業の失敗は必ず発生する。その失敗によって、製品の性質が要求仕様を満足できないといった影響が発生することで、製品を作り直したり、修理したりといった追加の作業が発生する。

日本の航空宇宙産業規模は拡大してきているが、欧米主要国と比べて、まだまだ規模は小さい。2020年初頭から発生した新型コロナウイルスの影響により、工業生産額は2019年に2兆1974億円であったものが、2020年は27.9%減の1兆5850億円となり更に規模が縮小している。特に需要減の影響を受けている民間航空機は未だ国際線を中心とした航空機需要減により生産回復が見込めておらず、航空機生産は全体として厳しい状況が続くと想定されている。また防衛航空機の分野では輸入・FMS（Foreign Military Sales, 米国の

対外有償軍事援助)の費用が半分を占めており(2020年度防衛航空機の調達額4,761億円のうち、2506億円が輸入・FMS支出)、国内メーカー向けの調達実績額は減少している[1][2]。国内の航空宇宙メーカーは航空宇宙の生業だけでは会社を維持できないのが現状であり、特に中小企業は深刻な影響を受けている。航空宇宙産業基盤の維持という課題に対し官民一体となって今後の展望を模索している[3]。

そのような状況下、先述した製造工程上のヒューマンエラーによる失敗事象への対応として費用と時間を損失し、その損失が航空宇宙産業規模の小さい企業の余力を奪っている。また、その失敗事象が製造工程ではなく、運用フェーズで顕在化する場合、人命への影響や社会的な信用失墜につながる事態も想定され、国内航空宇宙産業メーカーにおいて、航空宇宙製品に対するヒューマンエラーによる失敗事象は重大リスクといっても過言ではない。航空宇宙製品の品質は製造作業者の人の手(技量)に頼っており、今後もその特徴は変わらないものと思われる。

一方、日本の航空宇宙・防衛産業向けにJIS Q 9100品質マネジメントシステム(以下、QMSと称す)が制定されており、同じく航空宇宙・防衛産業向けの米国AS9100、欧州EN9100規格と相互認証されている[4]。これはISO国際標準化機構ISO9000シリーズの一般製品・サービス向け品質保証規格に加えて、航空宇宙固有の要求を追加した規格である。航空宇宙製品は一般製品と比べて、要求仕様が厳しい。使用環境は地上から高空、宇宙までの領域におよび、温度、湿度、大気圧が大きく変化するなか、一定の機能、性能を発揮する必要がある。例えば、空を飛ぶ航空機は自重を軽くするために機械的強度等に対する安全率をぎりぎりまで低く設計し、その分品質管理を細かく規定することで、製品の品質バラつきを抑制し、設計想定内で運用されるよう配慮している。このように、これまでの航空宇宙開発の変遷で培ったノウハウから要求事項として規定できる事項をJIS Q 9100は盛り込んでいる。このJIS Q 9100:2016版では、“ヒューマンエラーの防止”、“人的要因(Human Factors)の明確化”という要求が追加されている。JIS Q 9100はIAQG(国際航空宇宙品質グループ)によって作成された9100規格を基に、技術的内容及び構成を変更することなく作成された日本工業規格である。先のヒューマンエラーに関わる要求追記については、日本からの提案によりIAQGにて各国委員間での協議を重ねて、9100規格に盛り込まれている。日本の航空宇宙産業がヒューマンエラーによる失敗事象を重大なリスクと捉えていることを裏付けるとともに、そのリスクへの対処を規格に加えることによって、欧米主要航空宇宙産業と一緒に取り組んでいく展望を描いたものと推察できる。しかし現状の9100規格にはそれを実行する上で具体的な補足・解説はなく、各メーカー独自の取り組みに委ねられている。

本論文ではJIS Q 9100のQMSを適用する航空宇宙産業メーカー向けに、製造現場のヒューマンエラー抑制を目的とした一連の手法を立案・検証し、それら手法をQMSのマネジメントへ体系的に盛り込む考え方を提案する。この内容をベストプラクティスとして国内航空宇宙産業メーカーが取り組む品質保証活動のベンチマークとして活用頂くことで、ヒュー

マンエラーによる失敗事象を抑制し、失敗が顕在化してもその損失を局限させる効果を期待する。それによって国内航空宇宙産業メーカの収益悪化を少しでも防ぎ、社会的な信頼も持続することで、日本の航空宇宙産業基盤の維持に貢献できると幸いである。

## 1.2 論文の構成

はじめに、第2章で JIS Q 9100 QMS をベースとした品質保証の取り組みを論じる。その取り組みにおいて製造上のヒューマンエラー抑制に対する考察より、マネジメントの視点で後述の改善手法を体系化し、QMS に取り入れて運営していく提案事項をまとめる。

次に第3章で筆者の航空宇宙産業実務経験より、製造工程上のヒューマンエラーによる失敗事象の実状を述べる。他産業との比較や人間信頼性工学における仕事要素毎の不信頼度データから、実際は顕在化した失敗事象の原因となるヒューマンエラーより、はるかに多くのヒューマンエラーが発生していることが分かる。つまり、マクロな視点で見ると航空宇宙産業は QMS によってヒューマンエラーによる失敗事象を抑制できていることが分かった。これは、E.hollnagel, D.D.Woods らが提唱するレジリエンスエンジニアリング[5]の働きによる効果によるものと考えた。人とシステムの間連において、様々な変動に対応するのはシステムではなく、人であり、人間の弾力性がシステムを守っている可能性がある。つまりヒューマンエラーを起こすのは人であるが、それによる損失を防ぐ（または局限する）のも人であるという考え方である。このレジリエンスの効果をより高める観点として、ノンテクニカルスキルの働き[15]に着目し、ベテラン作業者の知識、経験いわゆる暗黙知を形式知化して活用する手法を取り入れることで目的とするヒューマンエラー抑制の効果につなげる取り組みと、作業に対する意識の程度によって人間の行動に影響を与える観点から意識を一定に保つことでヒューマンエラーの抑制につなげる考察を論じる。

第4章では、ベテラン作業者の暗黙知を形式知化する上で、客観的に作業上のリスクに気づかせるために安全衛生管理の危険予知で用いられる人間工学データを基準とした作業チェック手法とその検証について論じる。標準的な人間の能力の領域を逸脱する範囲の作業を客観的に識別し、そこから作業者が暗黙知として有している作業リスクとノウハウを抽出することで暗黙知を形式知化し蓄積する。

第5章では形式知化した情報をプロセスで活用するために二つの手法を提案する。“工程 FMEA への SHELL モデル活用”、“失敗学を取り入れた戦訓集の活用”それぞれ、実践・検証によって、その有効性を論じる。

第6章では人のパフォーマンスに大きな影響を与える状況認識と意思決定、それらに影響する意識の位置づけを M.R.Endsley の状況認識プロセスを通して考察し、意識を高める上で必要な最適教育計画をシステム保全の確率モデルをベースとして論じる。

最後に第7章でこれらの実践研究や検証結果を踏まえて、持続的にレジリエンス効果を高められるよう QMS の中で各手法を運用することを考察する。今後も航空宇宙産業はベテラン作業者に頼ったものづくりが続くが、IT 技術の発達により管理面はシステム化が進ん

でいく。本研究によって蓄積するベテラン作業者の暗黙知から人のエラーリスクを除外するシステム要件定義へつなげていくことを、今後の研究課題としてまとめる。



防衛航空機（左上 F-15 戦闘機、左下 F-2 戦闘機）と宇宙ロケット（右 H-2A ロケット）

引用元：MHI ホームページ(<https://www.mhi.com>)

## 第2章 品質マネジメントシステム

### 2.1 はじめに

日本の航空宇宙産業は JIS Q 9100 規格要求に適合する品質マネジメントシステム (QMS) を構築し、顧客に対し製品・サービスの品質を保証するために、顧客および適用される法令・規制要求事項を満たす安全性と信頼性のある製品・サービスを提供し持続的な改善に努めている。この QMS は製品・サービスに関する要求事項 (製品図面、仕様書等) を補完する位置づけとして、関わる組織の活動を標準化し、下記を目的として運用される[6]。

- 品質・納期パフォーマンスの向上 (顧客満足度向上、Quality/Cost/Delivery 指標の改善)
- サプライチェーン・マネジメントの向上 (供給者管理体制強化)
- 事故・インシデント (事故などが発生する恐れのある事態) 発生時の迅速な対応

上記目的を阻害する要因の一つとして“ヒューマンエラー”による不適合/不適切事象がある。たとえば、製造現場で作業者が図面要求と異なる部品を取り付けた場合、それを原因として後工程で組立ができなかったり、機能試験で規定を逸脱するといった不適合事象が発生すると、正しい部品を取り付けるために作業をやり直すことで、その分費用と時間がかかり、Cost 指標と Delivery 指標を悪化させる。また異部品取り付けによって製品を損傷させる等の被害が発生すると、さらに多くの費用と時間を要することはもちろん重大な不適合は顧客へ報告する義務があるため顧客からの信用失墜につながるリスクがある。もし、後工程で異部品に取り付けに気づけず、運用において異部品が原因で製品機能、性能、寿命が所定の要求を満足できない場合、事故として顕在化し、航空機や宇宙ロケット/衛星という製品の特性上、最悪人命や社会問題となる事態も想像できる。実際、商用航空機の事故率 図 2.1[7]のトレンドグラフを見ると、1960 年代以降、技術の進歩による機体、エンジンの信頼性向上や気象レーダー等の装備品の性能向上によって“人知を超えた”事象に遭遇する事故が激減しているが、事故率は下げ止まりし一定の頻度で事故が発生している状況がわかる。これは機体整備員、搭乗員、空港管制員の人的要因 (ヒューマンファクタ) に起因する事故がなくならないためと指摘されている[8]。

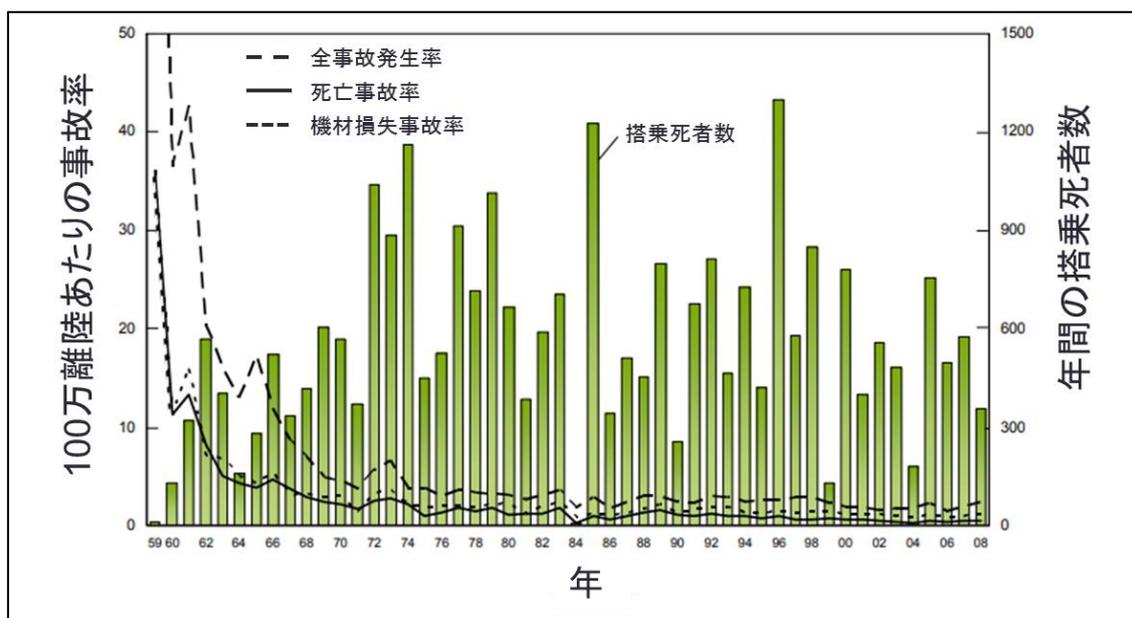


図 2.1 商用航空機の事故数の推移 ([7]より作成)

筆者が国産ロケットエンジンの品質保証担当スタッフとして従事していたときも工場でのヒューマンエラーによる失敗事象が発生するたびに、すでに完成・出荷し種子島宇宙センターで発射整備作業中のエンジンに対する遡及評価（工場で顕在化したヒューマンエラー起因の品質問題が出荷済み製品にも潜在していないかを評価し、リスクを排除できない場合、追加点検や部品交換作業を行う一連の作業）を行った。万が一ロケットの運用に影響が出ると、数百億の損害となり、日本の宇宙開発に影響を与えるとの思いで関係者必死に取り組んでいた。

このように航空宇宙産業において製造（含む整備）上のヒューマンエラーは重大な事態を招くリスクを有していることもあり、JIS Q 9100 規格では 2016 年改正版に“ヒューマンエラーを防止するための処置を実施する”、“人的要因（Human Factors）に関する原因を明確化する”といった要求が追加された。しかし、その要求を実行する手段は JIS Q 9100 認証企業に委ねられ、具体的な指針は示されず、各企業は独自の取り組みを展開している。ヒューマンエラー自体の排除は不可能であることから、今後も持続的に対処していかなければならない。

本論文では航空宇宙産業の製造上のヒューマンエラーリスクを低減させ、もしヒューマンエラーが発生しても影響を局限するための管理・手法を考察、立案、検証し、それらを QMS の中で体系的かつ持続的に運用・改善する考えを提案する。本章では JIS Q 9100 規格の QMS 概要と現行 QMS におけるヒューマンエラーリスクへの対処における課題を示し、本論文で後述する管理・手法（4 章、5 章、6 章）を QMS の枠組みのなかで活用する観点を論じる。

## 2.2 航空・宇宙・防衛産業の品質マネジメントシステム（JIS Q 9100）

品質マネジメントシステム（以下、QMS と称す）は下記を基本概念として示されている[9]。組織が自らの目標を特定する活動、並びに組織が望む結果を達成するために必要なプロセス及び資源を定める活動から成る。密接に関連する利害関係者に価値を提供し、かつ、結果を実現するために必要な、相互に作用するプロセス及び資源をマネジメントする。トップマネジメントは、自らの決定の長期的及び短期的な結果を考慮しながら、資源の利用を最適化することができる。製品及びサービスの提供において、意図した結果及び意図しない結果に取り組むための処置を特定する手段を提供する。上記の意図は、QMS の狙いである“顧客要求事項及び法令、規制要求事項を満たした製品・サービスの提供”、“顧客満足の上昇”を実現させる上で、個々の契約工事の特色や各部門の役割に応じた狭義かつ局所最適な業務ではなく、経営層から組織内の各部門が一丸となって品質確保と顧客満足向上を常に業務推進する指針を示している。QMS は、まず組織が目指すべき品質方針を掲げて、各活動へフローダウンし、各部門のパフォーマンスをモニタリングし、異常があれば経営層からのアウトプットによって必要な取り組みを実行するといった一連のマネジメントを示している。

この QMS の機能構造を図 2.2 より補足する。

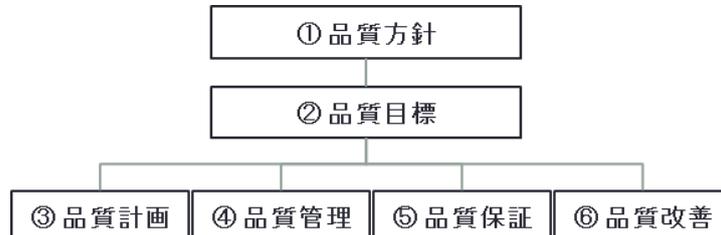


図2.2 品質マネジメントの機能構造

### ① 品質方針

組織の最高責任者が下記の要件を満たす品質方針を自ら設定し、維持することを求めており、品質マネジメントをこの品質方針に基づき運営していく。

- 組織の目的及び状況に対して適切であり、組織の戦略的な方向性を支援する。  
これは経営理念、経営方針に加えて、外部及び内部の課題に対しての適切さを求めており、事業環境の変化に合わせて品質方針も変更していくことを意図している。
- 品質目標設定のための枠組みを与える。品質方針が各部門の品質目標の設定に具体的な指針を与えるものであることを意図している。

- 適用される要求事項を満たすことへのコミットメントを含む。顧客要求事項、法令、規制上の要求事項に適合させることに深く関与する内容であることを意図する。
- 品質マネジメントシステムの継続的改善へのコミットメントを含む。組織が構築した QMS の確実な運用とその継続的改善に深く関与することを意図している。

## ② 品質目標

組織は QMS に必要な関連する機能、階層及びプロセスにおいて品質目標を設定することを求めている。機能は設計、購買、製造など、階層は部、課、係、あるいはグループ、チームであり、プロセスとは QMS の機能を各部門が実行するために必要な要件（インプット、アウトプット情報、人やインフラストラクチャ等の資源、プロセスの有効性を監視する指標、作業標準等）を明確化した単位を示している。品質目標は測定可能な指標であること、製品・サービスの品質保証及び顧客満足度向上に関連していること、進捗状況を監視すること、必要に応じて更新し、維持されるよう文書化されていなければならない。

## ③ 品質計画

品質目標をどのように達成するか、具体的な実行計画の策定を求めている。実施事項、必要な資源、責任者、完了時期、評価方法などを明確化する。

## ④ 品質管理

顧客要求を満足させ、製品・サービスの品質を効率的に達成させるための管理技術手段の体系である[10]。品質に影響を与える因子を明確化し、そのばらつきを管理値内に収めるよう、QC7つ道具やIE（インダストリアルエンジニアリング）といった手法を活用する。

## ⑤ 品質保証

顧客にとっては、製品の出来栄だけでは要求事項を全て満足しているかは分からない。そのために QMS は顧客が購入製品の品質を確実なものにするための要求事項として定められている。QMS は全てのプロセスで行うべき活動を標準化（③品質計画）し、その結果が要求に合致していることを客観的に担保する一連の活動を制定している。すなわち、客先要求仕様を満足させるために作成された図面、製品仕様、設計審査要領・議事録といった技術文書、技術要求を製品実現するプロセスである、

購入仕様、購入品の合格証/成績書、作業手順書、作業記録、従事する作業者の技量（力量）が必要なレベルにあることを示す力量管理表、教育計画・記録、使用する設備、工具、計量器類が必要な能力を有しているかを確認できる仕様書、検査等確認記録、またその能力が維持されているかを確認できる点検要領、点検記録、工程内で異常が発生した場合、製品品質に影響がないことを確認できる一連のトラブル処置記録、また二次下請け、三次下請け先の外注先も同じく製品実現に関わる必要な情報を記録する必要がある。このように全てのプロセスが定められたルール（標準）に基づき、適切に処置されたことを客観的に証明できる文書、データ類を記録、保管、維持し、必要に応じて顧客や、第3者機関に開示できるよう管理することが品質保証である。

⑥ 品質改善

品質方針に基づき、品質目標を達成するために、計画、進捗、各指標を監視、評価し、PDCA（Plan-Do-Check-Act）サイクルを繰り返し、持続的に改善することを求めている。

QMS の運営モデルを図 2.3 に示し補足する。

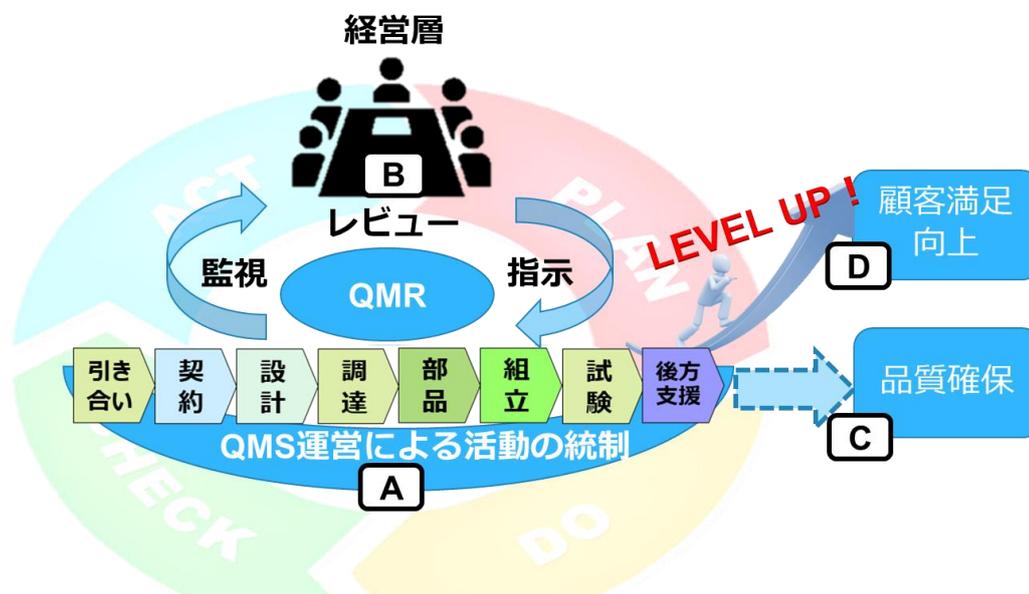


図 2.3 QMS 運営モデル

## A) QMS 運営による活動の統制

“引き合い”から“後方支援（サービス）”すべてのプロセスにおいて、上述する③～⑥の活動を持続的に取り組むよう、関わる全ての部門の業務を統制し、外部環境や内部環境の変化に柔軟に対応する。

## B) 経営層によるレビューと持続的な改善

経営方針、品質方針および経営・財務目標（KGI: Key Goal Indicator）を各プロセスへフローダウンし、KPI（Key Performance Indicators）を設定、KPI をモニタリングし、定期的なマネジメントレビュー（QMR: Quality Management Review）によって、分析・評価された品質状況（A、C、D の働き含む）を共有し、経営層からのアウトプット（改善指針、QMS の見直し、リソースの適正化、リスクの特定）を各プロセス、各部門へフィードバックすることで持続的に QMS の改善と組織の成長を促す。

## C) 適切性を客観的に担保することで品質を確保

顧客要求事項及び法令、規制要求事項に満足していることを、各プロセスで客観的に担保するよう、独立した検査・検証部門による働きおよび定期的かつ網羅的な内部監査によって全ての要求事項に対する適切性を確認することで製品・サービスの品質を確保し、顧客へ提供する。

## D) 持続的な改善（PDCA）による品質の向上

9100 規格では QMS の適切性、妥当性及び有効性を持続的に改善することを求めている。適切性（suitability）は目的に合っているかどうか、妥当性（adequacy）は目的に対して十分であるかどうか、有効性（effectiveness）は計画した活動が実行され、計画した結果が達成された程度を示す[11]。すなわち、QMS が組織の持続可能な発展に必要な顧客満足度の向上を図るといった目的に対して、合ったものであり、十分なものであり、計画された活動の成果が得られるよう PDCA サイクルを繰り返して活動していく。軸となるのは経営層も参加するマネジメントレビュー（B）であり、経営層の真摯な姿勢も必要である。

これら JIS Q 9100 規格に基づく QMS の働きによって、モノづくりに関わる一人ひとりのパフォーマンスを高め、ばらつきを抑制し、高品質、高信頼性を必要とする航空宇宙産業の製品・サービスの品質確保と顧客満足向上につなげている。

### 2.3 JIS Q 9100 規格の変遷

国内の航空宇宙産業は JIS Q 9100 規格に準じた QMS を構築し、航空宇宙製品のモノづくりを行っている。民間航空機であれば海外顧客（Boeing のような機体メーカ、GE-Aviation、Pratt&Whitney、Rolls-Royce といったエンジンメーカ等）、防衛航空機であれば防衛省、宇宙製品であれば JAXA（宇宙航空研究開発機構）といった主な顧客の品質要求も 9100 規格を基本要求とした上で固有要求を追加するといった形態となっており、国内主要航空宇宙産業企業はみな JIS Q 9100 認証を所有しているであろう。日本工業規格である JIS Q 9100 は米国 A S 9100、欧州 E N 9100 規格と相互認証されており[4]、これらは I S O 国際標準化機構の ISO 9000 シリーズの一般製品・サービス向け品質保証規格に加えて、航空宇宙固有の要求を追加した規格である。本論文では航空宇宙産業の製造工程におけるヒューマンエラーマネジメントを研究し、品質マネジメントシステムを補完する提案を論ずるが、この 9100 規格の意図を本章で補足し後述する現行のヒューマンエラーリスクへの対応と課題、今後の対応方針（2.4 章）への考察を深めていきたい。

JIS Q 9100 が ISO 9001 をベースとして制定されていることは事実であるが、その原点は 1950 年に米軍で制定された MIL Q 5923 であると門間は解説している[12]。第二次世界大戦において米軍は必要な装備品の大部分を民間企業より調達していたが、当時品質責任は買手にあるという考え方が一般であり、受け入れ後に不適合が発見されても売手側（製造者）に責任はなかった。そのため米軍が品質を確保する手段として検査官による全数検査を行っていたが、多くの調達品に対応するため検査部門の人員は終戦直前には 5 万人もいたと言われている。それでも品質低下は防げないため、統計手法を取り入れた抜き取り検査方式や製造業者の社内検査と受入検査の二重検査方式を採用するなど試行錯誤していた。戦後、品質保証された装備品を確保するために品質管理を契約相手方に要求するように見直された。その結果が MIL Q 5923 「航空機及び関連機器の品質管理（空軍）」であり、その後、開発段階の装備品に対する要求事項と、量産段階の装備品に対する要求事項を区分して、1953 年に MIL Q 5923B 「品質管理一般要求事項」、更に 1956 年に MIL Q 5923C（表 2.1）へ改正され品質要求仕様の見直しとともに装備品の品質確保も成果を出してきた。

表 2.1 MIL Q 5923C Quality Control Requirements の項目

3. 要求事項
3.1 品質管理システム
3.2 品質管理手順
3.3 検査、測定及び試験装置
3.4 下請負業者、ベンダーからの購入品
3.5 購入部品、コンポーネント、組立品の検査
3.6 材料（素材）の管理
3.7 抜取検査
3.8 検査手順書
3.9 工程検査
3.10 検査記録
3.11 特殊工程
3.12 図面及び変更管理
3.13 技術試験、政府の承認を必要とする品目
3.14 再審（不適合製品の管理）
3.15 部品、コンポーネント、組立品への検査状態の表示
3.16 政府支給品

その後、陸、海、空三軍それぞれ独自の要求仕様を 1959 年に MIL Q 9858 「品質プログラム要求事項」として制定された。ところが MIL Q 5923C が品質管理に関して具体的に記述していたのに対し、MIL Q 9858 は多くの製品に適用できる内容にしたため、表現が抽象的になってしまったことと、製品によっては過大要求となることが問題となり、1960 年に比較的簡単な製品に適用する MIL I 45208 「検査システム要求事項」が制定された。その後、1963 年に MIL Q 9858A, MIL I 45208A に改定され、この 9858A（表 2.2）は航空機の品質管理要求事項の基本となった。

表 2.2 MIL Q 9858A Quality Program Requirements の項目

3. 要求事項
3.1 組織
3.2 初期品質計画
3.3 作業指示書
3.4 記録
3.5 是正処置
3.6 品質コスト
4. 設備と標準
4.1 図面文書及び変更
4.2 測定及び試験装置
4.3 検査用として用いる生産用治具
4.4 契約相手方の検査用装置の政府検査員の使用
4.5 最先端の測定
5. 購買品の管理
5.1 責任
5.2 購買データ
6. 製造管理
6.1 資材の管理
6.2 生産工程と設備
6.3 完成品の検査及び試験
6.4 取扱い保管及び納入
6.5 不適合品
7. 政府と契約相手方との調整事項
7.1 契約相手方及びベンダーにおける政府の検査
7.2 政府の所有物

この米軍の品質管理手法は欧州 NATO 軍に影響を与え、英国、西ドイツ等の各国軍は MIL 規格をベースとした品質管理要求事項を各航空機メーカーに要求した。その後 1970 年代、欧州各国は品質保証規格の開発を行い、ISO 国際標準化機構が 1978 年に英国 BS 5750 をベースとした ISO 9000 シリーズ規格 (ISO 9001, ISO 9002 及び ISO 9003) を制定した。なお、この ISO9000 シリーズは MIL Q 9858A, MIL Q 5923C, MIL I 45208A に対応しており、1983 年に防衛庁が制定した品質管理仕様書 DSP Z 9001, DSP Z 9002 及び DSP Z 9003 の番号とも対応している。

一方、日本では1945年敗戦とともに、連合軍司令部（GHQ）の命令によって航空機の開発生産は禁止されていたが、1952年朝鮮戦争で損傷した米軍機体、エンジンの修理作業を国内各社が役務（サービス）請負契約にて受注し、航空機に関わる作業が再開された。これらの品質管理に対する顧客（米軍）の要求事項はMIL Q 5923であった。1955年以降、日本の航空機メーカーは防衛庁との契約に基づき、米国メーカーとの技術提携によりF86、T33、T34、S55、F104Jの戦闘機、練習機、ヘリコプターを、また航空エンジンメーカーはこれら航空機に搭載するJ49、J79等の航空エンジンを生産した。これらに対する防衛庁からの品質管理要求は、米軍の品質管理要求事項であるMIL Q 5923Cをベースとしたものであった。これはメーカーに一定のやり方で品質管理を実施させ、その証拠を基に防衛庁検査官の領収を決定する方式で、単にできた製品を買うだけでなく、製品が作られる課程において、そのプロセスの管理、活動、それらのエビデンス（プロセス保証）も含めて買うという当時としては革新的かつ合理的な考え方であった。この考え方が広く航空機業界全体に適用されたことにより、日本の航空機産業の品質レベルが均一にそろい、その後の発展に寄与してきた。日本の各メーカーは品質管理体制についても技術提携先のやり方を積極的に導入し、その中にあった「品質管理部門の独立」によって、品質の要求を決めるのは設計部門、品質を作りこむのは工作部門、品質を判定するのは品質管理部門であることを明確に区分して三権分立にすることで、品質の判定を第三者的に公正に行う体制を構築してきた。ここで、各部門の人による業務のやり方にバラつきが生じ、それが原因となる不適合が顕在化するという品質問題が生じたことへの改善として業務標準（JIS Q 9100という品質マネジメントシステム文書）を整備し、その標準に基づいて作業することで品質保証体制の基盤が作られてきた。この観点は個々人の判断や行為のミスを防ぎ、正しいやり方に統一させるという意味でヒューマンエラーへの対応策とも理解できる。その後、1960年代はF4EJ、NIKE-J等の戦闘機、ミサイルのライセンス生産のほか、T2ジェットエンジン練習機、C1輸送機の国産開発があり、品質管理要求としてはMIL Q 9858Aをベースとした防衛庁自衛隊品質保証共通仕様書C&LPSY00004が適用された。これまでの“品質管理”から“品質プログラム”という要求に変化し、開発から量産まですべてを含めた品質保証活動が契約要求事項の対象となった。以降、防衛庁品質保証仕様書は陸、海、空の三幕僚監部によって異なっていたが、1983年に防衛庁仕様書DSP Z 9001、DSP Z 9002及びDSP Z 9003が制定された。2000年に至る間、F15J戦闘機、P3C対潜哨戒機、ペトリオットミサイル等のライセンス生産、F1、F2支援戦闘機の国産開発生産が行われてきたが、品質管理要求事項への対応は上記“品質プログラム（MIL Q 9858A）”要求の延長であり、ヒューマンエラーへの対応についても基本業務標準、作業手順書等による文書化による管理が主体とされてきた。

MIL Q 9858Aは米国政府方針（防衛予算削減）の一貫として、ISO 9001シリーズを同等の要求事項として採用することで、併用期間を経て1996年に廃止された。これに困惑したのが、米国、欧州航空宇宙産業のメーカーであり、ISO 9001は一般商品・サービスに適用することを対象にしており、航空宇宙製品という“空を安全に飛行する製品”に対しては、

不十分な要求事項と考えられていた。各社が独自の品質管理スペックを定めて供給者に要求すれば良いが、それは ISO の基となる国際標準化と逆行する考えであることから航空宇宙関係のセクター規格を制定する動きとなった。1995 年 Boeing、GE 等米国主要会社は AAQG (American Aerospace Quality Group) 設置し、ISO 9001 の要求事項をベースに航空宇宙固有の要求事項を追加した品質システム (AS 9000) をセクター規格として制定した。欧州でも EU 各国工業連合会で EAQG (European Association Aerospace Supplier Evaluation) を設置し、品質システム審査の共有化について活動が開始され、その後、米・英・仏・独・日本・中国・ブラジル・メキシコの 8 か国が参加して 1999 年国際統一航空宇宙品質システム規格の最終原案が合意された。1996 年には IAQG (International Aerospace Quality Group) が設立されており、2000 年に IAQS 9100 規格が作成されて、AS/EN/JIS Q 9100 へと展開された。

以上より、現在の国内航空宇宙産業に適用される JIS Q 9100:2016 (表 2.3) は、ISO9000 シリーズを基にした、JIS Q 9001 に航空宇宙固有要求事項を追加したものであるが、その追加要求の源流は MIL Q 9858A であり、国内の航空宇宙産業メーカーは戦後の航空機生産再開と共に、米軍及び防衛庁の要求が“品質管理”から“品質プログラム”へ変化していくなかで、ヒューマンエラーによる品質損失を防ぐ手段を標準化(文書化)を主体として取り組んできたと言える。

表 2.3 JIS Q 9100 : 2016 品質マネジメントシステムの項目

4. 組織の状況
4.1 組織及びその状況の理解
4.2 利害関係者のニーズ及び期待の理解
4.3 品質マネジメントシステムの適用範囲の決定
4.4 品質マネジメントシステム及びそのプロセス
5. リーダーシップ
5.1 リーダーシップ及びコミットメント
5.2 方針
5.3 組織の役割、責任及び権限
6. 計画
6.1 リスク及び機会への取組み
6.2 品質目標及びそれを達成するための計画策定
6.3 変更の計画
7. 支援
7.1 資源
7.2 力量
7.3 認識
7.4 コミュニケーション
7.5 文書化した情報
8. 運用
8.1 運用の計画及び管理
8.2 製品及びサービスに関する要求事項
8.3 製品及びサービスの設計・開発
8.4 外部から提供されるプロセス、製品及びサービスの管理
8.5 製造及びサービス提供
8.6 製品及びサービスのリリース
8.7 不適合なアウトプットの管理
9. パフォーマンス評価
9.1 監視、測定、分析及び評価
9.2 内部監査
9.3 マネジメントレビュー
10. 改善

## 2.4 現行のヒューマンエラーリスクへの対応と課題、今後の方針

QMSは2.2章で述べた通り、顧客満足度向上と製品・サービスの品質確保を目的とし、マクロな視点では組織の品質方針、目標に基づいて一連の管理項目を定めて、監視指標をモニタリングし、持続的に改善サイクルを回す運営であり、ミクロな視点では顧客要求仕様を個々の技術要求へ落とし込み、製品実現する上で作業手順の明確化や必要な設備、治工具、計量器の準備と維持、要求に対する妥当性検証項目をプロセス保証と製品保証に区分して設定し、作業や検査を通して確認し記録するといった管理がなされる。ヒューマンエラー防止の観点では、2.3章で述べた標準化（文書化）の手段に加えて、作業者の力量管理（作業に必要な力量を明確化し、その力量を維持するために必要な教育計画と教育の実行）や技能認定管理（特殊作業に対し必要な力量/技能を有している作業者だけを従事させるための一連の管理およびその力量が維持されていることを定期的に確認し記録を残す一連の管理）を行っている。これらはいずれもバラつき管理であり、人による判断、行動のバラつきを抑制することで、そのアウトプットが管理値を逸脱しないようにすることを狙いとしている。

航空宇宙産業の製造工程は自動車、家電製品といった民生品とは異なり、少量多品種のモノづくりであることから設備投資が困難で作業者の力量に依存した手作業が多い。作業者は技術要求文書から必要な情報を読み取り、作業手順書のステップに従って、必要な部品を準備し、必要な工具を準備し、部品等の状況に応じて、手入れ等の必要性を判断し、その判断に基づき必要な処置を行う。それから目的とする作業を行い、必要な作業記録を残す。このような作業の流れは多岐に渡り、一挙手一投足を全て文書化することは出来ない。標準は骨子となる管理要求事項を示し、図面や技術仕様書は製品の機能、性能、寿命を満足させるために必要な要求事項を示し、作業手順書はステップバイステップで作業の流れを示して、その行間を作業者の力量で補っているのが現状である。管理上は作業標準（文書）で定める領域と作業者の力量に委ねる領域のバランスを最適化していくこととなり、例えば作業者のアウトプットばらつきを力量管理で抑制するのが困難であれば、設備、工具、作業の段取り等の仕組みを整備し、そのルールを作業標準に落とし込むといったやり方や、逆に管理できない環境変動や技術、工法の制約から作業者の力量に頼らざるをえない作業は手厚く作業者の力量管理を行うこととなる。

JIS Q 9100 規格では2016年改正版にヒューマンエラー防止に関わる2つの要求が追加された。それぞれの要求と実行上の課題および本論文で後述する対応策を示す。

- 8.5.1 製造及びサービス提供の管理

本項では製造及びサービス提供を“管理された状態”で実行するよう要求している。その管理された状態に含めるべき事項として、図面、スペック等の技術文書、作業指示書、検査手順書等の製造文書が維持管理され使用できること、製品特性の要求精度に見合った検査・計測機器及び試験装置が使用できること、管理

基準・合否判定基準を満たしていることを検証するために適切な段階で検査・試験を実施すること、製造に必要な設備・治工具が維持管理されていること、従事者の力量管理がされていること、特殊工程は妥当性確認及び定期的な妥当性の再確認を実施すること、キー特性を含むクリティカルアイテムを管理・監視すること、工程中に異物が混入しないよう管理すること、作業に必要な供給物（工場エアの清浄度、電圧・電流変動等）が管理・監視されていること、製品が要求を満足していることを識別しトレースできること、といった一連の製造工程における管理要求を示している。

この要求事項に“ヒューマンエラーを防止するための処置を実施する”という文言が追加された。本要求は JIS Q 9001 : 2015 にも追加されており、その解説では“力量を備えた人の任命に加え、うっかり忘れてたり、間違えたりするなどのヒューマンエラー防止の取組み”と補足されている。これは製造上必要な管理項目にヒューマンエラーを防止する処置を含めることと言い換えられるが、具体的には作業指示や使用する工具等にヒューマンエラー防止の処置や配慮をすることと解釈できる。ただし、具体的に何をすれば良いのかは各メーカーの管理によるところであり、その有効性評価が難しい。製造プランニング（製品実現するための具体的な計画）においては IE（インダストリアルエンジニアリング）等の手法を活用するが、その目的はスループット向上（生産性向上）にあり、作業リスクの抽出と改善や作業者の負担軽減には直接寄与しない。工程 FMEA で作業上の故障モード（含むヒューマンエラー）のリスクを抽出・評価し改善を行うが、ヒューマンエラーの発生度を適切に評価することが難しく、ヒューマンエラーの発生を抑制できていない（5.1 章）。これらの課題に対し、本論文ではベテラン作業者の暗黙知を形式知化することを基本とした取組み（4 章、5 章）と品質意識を維持するための教育計画の考察（6 章）を示して、本要求を具体的に実行する指針を提案する。

## ● 10.2 不適合及び是正処置

本項では苦情を含む不適合発生時の対応と再発防止を確実にするための是正処置に関して実施すべき事項を求めている。まず、不適合自体の修正やそれによる結果への対処、再発や同じような不適合が発生しないよう是正を行うための処置事項を示している。

この要求事項に“該当する場合には、必ず、人的要因（Human Factors）に関する原因を含む、その不適合の原因を明確にする”という文言が追加された。これは 8.5.1 項“ヒューマンエラーを防止するための処置を実施する”と連携させ再発防止策をとることが解説に補足されている。実際に顕在化したヒューマンエラー事象の原因を明確にすることで、その対策がヒューマンエラー防止の具

体的な処置になる。

ここで課題となるのがヒューマンエラーに対する関係者の理解と姿勢によって原因の追究に影響がでてしまうことである。作業に必要な情報が文書に記載されており、必要な工具もあり、これまで作業できていた実績がある工程でヒューマンエラー事象が発生すると、当事者の責任を追及する調査やヒアリングをしてしまいがちである。すると、実際にヒューマンエラーしてしまった当事者も言い訳出来ず（本人もなぜエラーを起こしたのかわからないケースが多い）、「急いでいた」、「不注意だった」という原因に留まり、改善すべき要因（**Human Factors**）を導けない。具体的な対策も取れず、「注意喚起した」とか、「作業手順書に注意するよう追記した」といったような効果の無い対策に留まる。

ヒューマンエラーとは何なのか、それはなぜ起こるのかという正しい理解とヒューマンエラー事象を調査する手順を明確化することが望ましい。前者は教育マテリアルを整備し、社員教育シラバスに組み込むことで継続的に取り組んでいける。後者もマニュアル化することで、ヒューマンエラーの背後にある要因（**Human Factors**）を炙り出すことが出来る。本論文においては、上記課題に対応するヒューマンエラー教育の内容と、ヒューマンエラー事象の原因調査手法及びそのマニュアル化の実績については割愛するが、ヒューマンエラーの解説（3章）と、当事者の言い訳から動機的原因を抽出し上位概念化することで、その知見を失敗未然防止へ活用する“失敗学”の観点を取り入れた戦訓の活用（5.2章）について後述する。

以上より、**JIS Q 9100 : 2016**においてヒューマンエラー防止の要求事項は製造工程管理にはヒューマンエラー防止処置を含めること、その具体的な処置には顕在化したヒューマンエラー事象の要因（**Human Factors**）を追求し是正させることという意図がある。

**JIS Q 9100 : 2016**で追加されたヒューマンエラー防止の要求事項は製造工程管理にはヒューマンエラー防止処置を含めること、その具体的な処置は顕在化したヒューマンエラー事象の要因（**Human Factors**）を追求し、その要因を是正・改善させることとの意図があると読み取れる。顕在化した事象からヒューマンエラー要因を分析し打ち手をとる方針は有効であるが、筆者は、9100 要求 7.1.6 項 “組織の知識”にも着目した。これはプロセスの運用と、製品・サービスの適合を達成するために必要な知識を指しており、その知識源として外部（行政機関、各種学会等）及び内部（経験から得た知識、失敗から学んだ教訓等）の知識を活用できるように管理することという意図がある。本論文でベテラン作業者の暗黙知を形式知化し共有し活用することで、製造上のヒューマンエラーリスクを低減させ、もしヒューマンエラーが発生しても影響を局限するための管理・手法を提案するが、“組織の知識”の活用はレジリエンスエンジニアリングの観点（3.4章）からも有効と考える。また本論文で提案する管理手法を **QMS** 要求箇条と体系的に関連付けることによって、持続的に改善サ

イクルを回していくことが出来る (図 2.4)。

最後に 9100 要求 10.3 項 “継続的改善” では注記として “継続的改善の機会の中には、教訓 (lessons learned)、問題解決事例及び最善の慣行のベンチマーキングを含み得る。” と記載されている。本論文の提案事項が国内航空宇宙産業メーカーのヒューマンエラーマネジメントの一資となれば本望である。

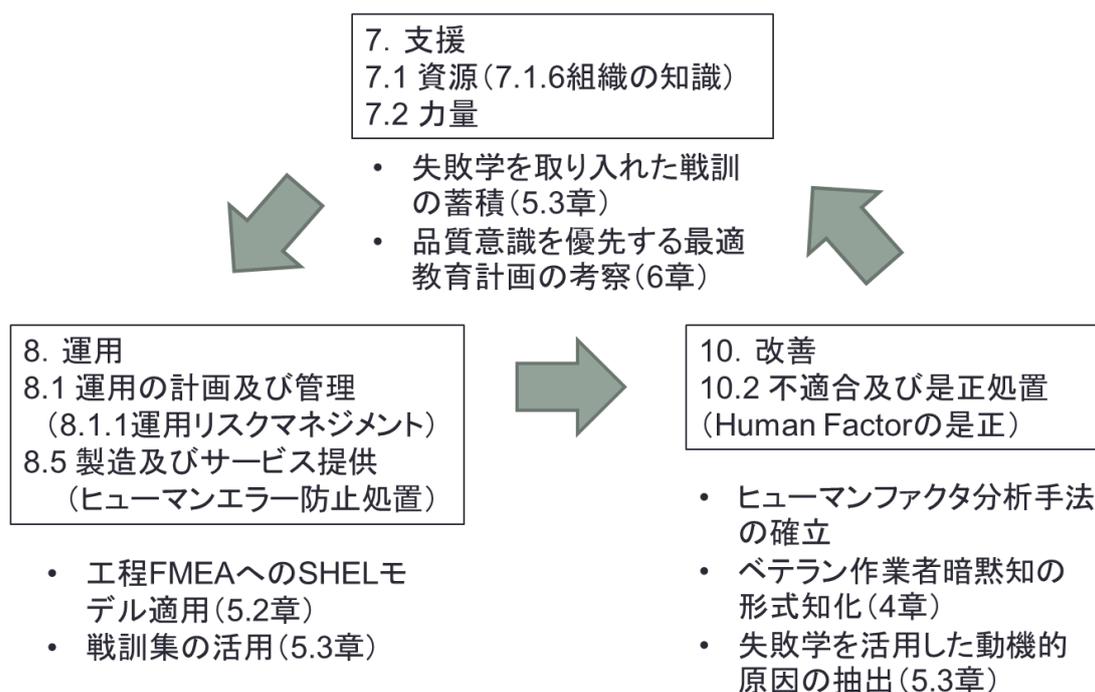


図 2.4 JIS Q 9100 要求箇条と本論文提案事項の関係

# 第3章 ヒューマンエラー事象の 実状と改善方針の考察

## 3.1 はじめに

本論文目的は製造工程のヒューマンエラーを未然防止することおよびヒューマンエラーによる不適合事象が顕在化してもその影響を局限するよう事前に打ち手をとることである。一方、航空宇宙産業は2章で述べた品質マネジメントシステム(QMS)によって、QCD指標を常にモニタリングし、管理値内に収まるよう持続的に改善をしている。

### 【QCD指標 代表例】

- Quality 指標：顧客クレーム件数、工程内不適合件数 等
- Cost 指標：クレーム費用（クレーム対応に関わる費用）、仕損費（工程内不適合の対応費用） 等
- Delivery 指標：納期遵守率 等

各工程において、QCD指標に影響を与える品質ばらつき要素を把握し、そのばらつきを抑制する一連の管理を行うことで改善を図っている。例えば、製造にも配慮した作りやすい図面要求(DFM: Design for manufacturing)、現場作業者の意見を取り入れた作業指示、検査員によるダブルチェック等を行うことによって、結果的にはヒューマンエラーも抑制できているとも考えられる。この考察は他産業との比較および人間信頼性工学の観点で後述(3.3章)する。航空宇宙産業は他産業よりもQMSによってヒューマンエラーを抑制することができていると考えられる。その要因として、筆者はレジリエンス効果が働いているのではないかと考えた。レジリエンスエンジニアリングについての考察を後述(3.4章)するが、航空宇宙産業の製造工程が多品種少量生産かつ作業者の力量に依存している以上、人がすべての工程に介入し、人の判断や行為によって製品が実現される。ヒューマンエラーを起こすのは人であるが、ヒューマンエラーを防ぎ、ヒューマンエラーが発生しても事象の影響を局限している働きも人が備えていると言える。レジリエンスは弾力性、復元力、回復力の優れた状態を指す概念であるが、人が周囲の変動要素に柔軟に対応する働きによってトラブルを未然防止することも、このレジリエンスという概念に置き換えて、レジリエンスエンジニアリングという学術が示されつつある。このレジリエンスエンジニアリングでは、4つの能力が重要であると示される[13][14]。一つ目は臨機応変に対処できる(responding)こと、二つ目は周囲の状況を能動的に監視できる(monitoring)こと、三つ目はその先の時

間領域を予見できる (anticipating) こと、四つ目は常に変化、変動する事態へ対応するために学習できる (Learning) ことである。これらの能力は個人ではなくチームの活動として発揮されるのが理想であり、そのためには航空宇宙の製造に必要なテクニカルスキル (知識、技量) だけではなく、状況認識、意思決定、コミュニケーションといったノンテクニカルスキルの必要性が示されている[15]。筆者は航空宇宙の製造工程が他産業と比べてヒューマンエラーを抑制できているのは、レジリエンスの効果であり、作業者のノンテクニカルスキルが良い影響を与えているものと考えた。このノンテクニカルスキルを伸ばしていくことがレジリエンスの効果も高めて、よりヒューマンエラーへの耐性が強い組織になると考えられる。

一方、ヒューマンエラーによる品質問題は発生し続けており、2.1章で先述した通り、航空宇宙製品は品質問題が顕在化した場合の影響が大きい。日本の航空宇宙産業基盤を維持、発展させていくためにヒューマンエラーリスクの低減は必須課題である。

顕在化したヒューマンエラーに対しては要因を分析し是正をとるが、結果であるヒューマンエラー事象に対して意図せずとも責任追及視点の原因調査を未だに行っている風潮は否定できない。本来はヒューマンエラーを起こした当人の責だけを追求するのではなく、客観的にその時の周囲の状況との兼ね合いでエラーを引き起こした要因をあぶり出し、是正につなげるべきである。ただし、初めての作業でもなく、これまで問題なく作業していた工程でヒューマンエラーを発生させると、当人が自身の不注意を咎め、周囲の要因に気を配れない。当人から有効な情報を得られないので第3者では要因が何なのかが分からない。つまり、何の教訓にもならない“不注意であった”という原因が記録されことになる。上述のレジリエンスエンジニアリングの観点でいうと、ノンテクニカルスキルに関わる働き等に何かしら要因があったためにヒューマンエラーが発生したものと考えるが、その何かを分析することができていない。

ここで筆者が着目するのはベテラン作業者の暗黙知である。QMSでは作業に必要な力量 (知識、技量) を明確化し、それら力量に対して従事者のレベルがどこにあるのか、力量が足りなければ教育計画を立てて、必要な力量を有するまで単独で作業しないよう管理される。つまり初心者や経験不足者によるヒューマンエラーを防ぐ管理が機能している。よって、製造工程で発生する品質トラブルは力量を有する作業者のヒューマンエラーといえる。これら作業者をベテラン作業者と言い換えるが、知識、経験を有するベテラン作業者は基本的に安定した作業を行う。ヒューマンエラーによるヒヤリハットを発生させたとしても、それに対処し品質損失を防ぐことも多いと考える。普段品質損失を発生させずに作業しているが、突然ヒューマンエラーによって品質損失を発生させると、管理・監督者はその原因である作業者のヒューマンエラーだけを言及し、エラーの発生要因に目が向けられないことも多い。このような見方はヒューマンエラーの古い見方と呼ばれる[16]。個人の原因のみを追及をすることで、本質的なエラー要因を改善できず、また人を疑う疑心暗鬼な雰囲気が職場のコミュニケーション、チームワークも阻害する悪循環となる。このような問題にはヒュー

マンエラーを正しく理解するための基礎教育、顕在化したヒューマンエラー事象に対する分析手法の確立といった取り組みが必要とされる。筆者の勤務先ではヒューマンファクターズ教育（航空分野ではEASA：欧州航空安全機関等よりヒューマンファクターズ教育の要求もある）およびトラブル事象の分析手法を標準化（時系列分析/VTA、m-SHEL分析を活用）しているが、この点については本論文より割愛する。

作業の知識・経験を有するベテラン作業者は、自身の力量でも作業のアウトプットがばらつく作業（やり難い作業⇨リスク）とそのような作業への打ち手（ノウハウ）を有していると考える。これら暗黙知を形式知化することによって作業改善（技術要求適正化含む）のみならず、他作業者とのコミュニケーションやお互いの気配り（チームワーク）といった現場力を促進する効果が期待できる。これがレジリエンスの働きであり、組織のヒューマンエラーへの耐性を強くすることができる。

ベテラン作業者の暗黙知を形式知化する観点として人間工学データを活用した作業チェックリストの運用を検証した（4.2章）。この取り組みでベテラン作業者の暗黙知である、作業上のリスク（いつも気にしていること、ひょっとしたらやっしまいそうなこと、過去のヒヤリハット等）と、それらリスクに対しどのように行動するかといった知見（ノウハウ）を抽出することができる。これら蓄積した形式知をプロセスで活用するために二つの手法を提案し、実践・検証した。

- 工程 FMEA への SHEL モデル活用（5.2章）
- 失敗学を取り入れた戦訓集の活用（5.3章）

一方、人間である以上、ヒューマンエラーをゼロにすることは出来ないが、特に重要な作業はお互いの配慮、チームワークによって、さらにヒューマンエラーを抑制させ、エラーに気づく感度を上げて影響を局限にするレジリエンスが期待できる。そのような働きは意識によって左右されると考える。念のため、確認しよう、声かけしよう、見守ろうという行動は、作業安全、品質確保を最優先に考える意識があった上での行動と言える。少しでも他の意識を優先すると、大丈夫だろうという思いまたは自分の仕事ではないという判断で行動には移れない。このような行動のもとになる意識を一定のレベルに保つ上で、リマインド教育が必要と考える。企業における社員教育の枠組みのなかで、品質意識を一定に維持するために必要な最適教育計画をシステムの故障とその保全のために構築した確立モデル（Imperfect Preventive Maintenance Model）を用いた考察を下記項で後述する。

- 最適教育計画（6.4章）

### 3.2 ヒューマンエラーとヒューマンファクタ (Human Factors)

本論文では航空宇宙産業の製造工程において発生する不適合事象の原因となる作業者のヒューマンエラーを未然に防止することを目的とした取り組みとヒューマンエラーを発生させても、それが不適合事象にならないよう影響を局限させることを目的とした取り組みを論じる。本章でそのヒューマンエラーの定義やヒューマンファクタについて整理することで、取り組み内容への考察を深める。

まず、ヒューマンエラーの定義として、人間工学的な文献によると、人間の行動も機能の一部として設計するシステムにおいて、人間のパフォーマンスのバラつきがそのシステムの許容範囲を超えることによって生じる結果といった内容が多い。Swain & Guttmann[17]は“一連の行為における、ある許容限界を超える行為、すなわち、システムによって規定された許容範囲を逸脱する行為”と示し、Miller & Swain[18]は“許容可能な範囲を超えた人間行動の集合の任意の一要素であり、その許容限界はシステムによって定義される。”と示し、Sanders & McCormick[19]は“効率や安全性やシステム・パフォーマンスを阻害する、あるいは阻害する可能性がある、不適切または好ましくない人間の決定や行動”と示している。一方、心理学的な文献によると、本人の意図に対して本人の要因によって結果が達成できなかったという内容が多い。Reason[20]は“計画された心的または身体的な一連の活動課程が意図した結果を達成できず、その失敗が他の作用の介入によるものではないとき、それら全ての活動過程を包括する包括的な用語としてエラーが使われる”と示し、芳賀[21]は“人間の決定または行動のうち、本人の意図に反して人、動物、物、システム、環境の、機能、安全、効率、快適性、利益、意図、感情を傷つけたり壊したり妨げたものであり、かつ、本人には通常はその能力があるにもかかわらず、システム・組織・社会などが期待するパフォーマンス水準を満たさなかったもの”と示している。工学的な定義も心理学的な定義も、ある期待された領域・範囲を逸脱した場合をヒューマンエラーとしており、その主語が工学的な見方では「システム」という表現であり、心理学的な見方では「人」という表現となる。各々が領域・範囲を決めていることになるが、製造工程では標準や仕組みによって作業者に期待する領域・範囲を決めているとも言えるし、目的に対しその手段や段取りを作業者の力量に委ねている、つまり作業者本人が領域・範囲を意図しているとも言える。松尾[22]は“期待した範囲の逸脱としてヒューマンエラーを考えようとしたときに、その「期待」となる対象は2つあり、ひとつは人間が行った行為に対する期待、もうひとつは結果に対する期待である。”と述べている。前者は当人も自覚できるヒューマンエラーであり、後者は行為の時点で本人は自覚しないが、時間軸上、経過の差があった上でその行為による結果から期待の範囲を逸脱したことが分かるヒューマンエラーである。製造工程のモノづくりの場面でその考え方をあてはめると、更に区分して整理することができる(表3.1)。

表3.1 製造工程上のヒューマンエラー

作業者の意図と行為の結果が異なり、作業者自身が自覚できるヒューマンエラー	設計要求、作業要求、適用法令等の要求を逸脱する行為の結果		①
	与えられた仕事の目的に対し、作業者の力量に委ねられる領域のなかで、自身が段取りする作業（意図）を逸脱する行為の結果		②
結果が期待の範囲を逸脱することで、その原因として明らかにされる作業者のヒューマンエラー	作業完了時点では関連要求を逸脱しない、または分からない	顧客または後工程からのクレームで判明した事象の原因が作業ばらつきによって生じた結果	③
		経営指標（コスト、納期）に影響を与える事象の原因が作業ばらつきによる結果	④

- ① QMSは、JIS Q 9100 8.5.1項 製造及びサービス提供の管理の要求に基づき、“管理された状態”で製造できるよう品質計画される。設計要求、作業要求が文書化され、作業に必要な要件を明確化し、その要件に適合するよう作業が管理される。作業者自身もその要求を理解したうえで作業を行い、作業の結果が要求を逸脱していれば、その時点で自身のヒューマンエラーを自覚できる。この場合、QMSでは不適合処置を行うこととなり、現品の識別・保留（正規品への混入防止）、修正または廃却処置といった現品処置と、原因調査、是正処置（含む水平展開）を行う。
- ヒューマンエラー事象を明確に判別することが可能であり、以降の処置もQMSでルール化されていることから、製造工程上のヒューマンエラーとして一番分かりやすい区分である。
- ② 特に航空宇宙産業の製造工程は作業者の力量に委ねられる領域も多く、QMSの品質計画では全ての作業に必要な要件を明確化することは出来ない。その領域は作業者本人の判断でやるべきことが計画され、実行される。例えば機械加工であれば図面要求上に最終仕上げ寸法要求が示されるが、その寸法を実現するために素材寸法からどのくらい加工量を追い込み、仕上げていくか。素材の状態、工具の状態、加工することによるその状態の変化といったパラメータを作業者が見極めて作業を段取りし実行する。ここで加工量を追い込みすぎて切削抵抗が大きくなり、工具がその負荷で振れ、折損した場合、ワーク（製品）側へ影響（キズ等）が発生する。これは作業者が意図しない結果であるヒューマンエラー事象である。

ただしこの場合、そのヒューマンエラー事象の取り扱いに更に二つの見方ができる。ひとつはその結果が要求逸脱する場合（図面要求の仕上がり寸法を満足できない大きなキズが残った等）、①と同じくQMSに基づき不適合処置となる。もうひとつはその結果が要求に抵触しない場合（キズが発生しても加工で取りきる余肉範囲にあり、最終仕上がり寸法には影響しない等）、QMS上は処置不要となり原因調査や是正処置は行われぬ。作業員本人にとっては意図しない結果を生じたヒューマンエラーであるが、管理上は言及しない。このようなヒューマンエラー事象はヒヤリハット（安全管理では危ないことが起こったが、幸い災害には至らなかった事象）と言われるが、多くは作業員本人の経験に留まり、その経験を活用できていない。このような暗黙知はとても重要であり形式知化して組織の知識として共有・活用していくことが必要であり、ヒヤリハット情報の活用は労働安全衛生、航空、原子力といった分野の安全マネジメントの一環として取り組みがされているが、小松原[28]は“ヒヤリハット報告（インシデント報告）を現場に求めている事業所も多いが、ヒヤリハットが出てこないという悩みを訴える事業所も多い”と述べている。このヒヤリハットの経験とその知見であるノウハウは作業員の暗黙知であり、その活用について4章で論ずる。

- ③ 作業要求内、もしくは要求がない領域・範囲で、作業ばらつきによって生じた結果が後工程や顧客の期待を逸脱するヒューマンエラー事象である。これは作業員本人に責任があるのではなく、設計者や生産技術者（工程設計者）が顧客のニーズや後工程の要件を作業要求に盛り込んでいなかったことが原因であるが、これまで問題なく作業していたにも関わらず、作業のバラつきによる結果が影響を与えることによって、作業員のヒューマンエラーとして見られてしまうことがある。原因（責任）については分析をキチンと行うことで自ずと事実が明らかになり是正につながるが、筆者は責任追求に拘るのではなく、作業ばらつきが出てしまう工程を放置していた点を改善すべきと考える。量産フェーズで作業ばらつきが生じるということは何かしらの要因が作業員のパフォーマンスに影響を与えており、言い換えれば作業員に何かしらの負担がかかっているものと考えられる。しかし、それらは作業員にとって与えられた仕事を遂行する意識の高さ（プロフェッショナル意識）に埋もれるため見えにくい。工程内に潜在する身体的、精神的負担をかける作業リスクをあぶり出すという観点も作業員の暗黙知活用に含めて4章で論ずる。
- ④ このヒューマンエラーは期待する領域・範囲が作業員自身では想定できない場合が多く、その責任は管理者側にあるが、③と同じく量産フェーズに

において作業バラつきの結果がコスト、納期（スケジュール）に影響を与えるのであれば、工程内に潜在する作業ばらつき要因を改善する必要がある。

以上より、航空宇宙産業製造工程のヒューマンエラー事象を4つに定義した。QMSでは①への対処は行われるが、②～④に対しては改善の予知がある。ヒントは作業者の暗黙知にあり、その暗黙知を形式知化し共有することで改善につなげていくことを4章で論じる。

次に、JIS Q 9100 10.2項に追加された人的要因（Human Factors）について整理する。JAXAヒューマンファクタ分析ハンドブック[23]では、“機械やシステムを安全にしかも有効に機能させるために必要とされる、人間の能力や限界、特性などに関する知識の集合体である。”と示される。生理学、心理学、認知科学、医学、行動学、社会学等におけるあらゆる人間特性を指し、これらの分野の情報や知識がヒューマンファクタを考える上で重要である。学術的な観点でヒューマンエラーの要因を探ると人間のあらゆる特性を選択して扱うこととなるが、航空宇宙産業ではヒューマンファクタの説明モデルである「SHEL」モデルを用いることが一般的である。このSHELモデルはKLMオランダ航空のHawkins, F. H. [24]によって提案され、主に航空分野から他分野に発展したモデルであり、人間および人間を取り巻く環境のほとんどすべてが網羅され、分かり易く分類されている。ここでは、SHELモデルを組織・管理面「m」にも眼を向けて拡張させた「m-SHEL」モデル[25][46]を用いて説明する。

m-SHELモデルを図3.1に示す。m-SHELの文字通り「S」「H」「E」「L」と「m」から構成されており、「m」以外の各文字は凹凸で囲まれている。さらにはSHELの周囲を「m」が回っているという、単純なモデルである。各々の文字はそれぞれ図3.1に示す意味を持つ。ここで大事な点は、S・H・E・Lは波線の境界を持っていて、中心のLと必ずしも合わさっておらず、隙間が空いている事である。これは、各々が常に一定ではなく不安定で、必ずしも補い合うものでない事を意味してる。もし、中心のL（作業者本人）と周囲のS・H・E・Lとが合わないと、ヒューマンエラーが生じる可能性がある。そこでこれらを適切に管理するのが、周りを回っているmである。これは、中心のLが周囲のS・H・E・Lに合わせられるようにマネジメントし、周囲のS・H・E・Lが中心のLに合うようにマネジメントすることを意味している。（m：マネジメントによって、S・H・E・Lは影響を受けることを示している。）

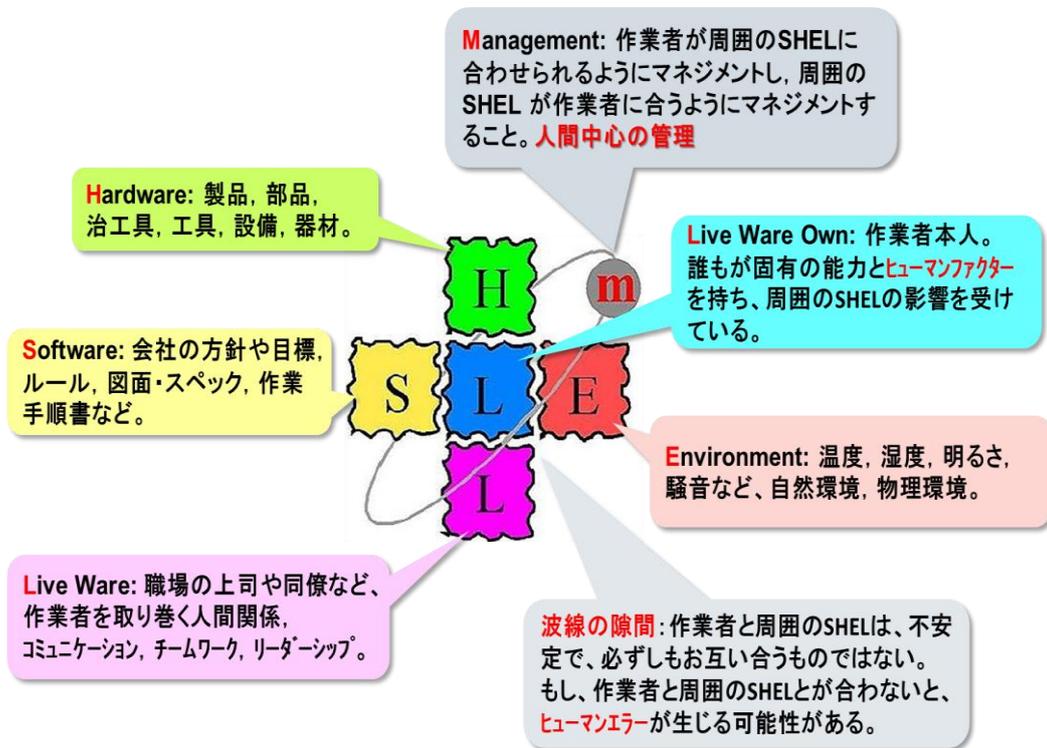


図 3.1 m-SHEL モデル ([46] より作成)

(1) ライブウェア (L)

モデルの中心は人間である。人間は体調や疲労で状態は容易に変わる。また、加齢により、徐々に、しかし大きく変化する。これはシステムのなかで最も柔軟な構成要素であると同時に最も大切なものである。従って、他の構成要素がこれに注意深く組み合わされる必要がある。航空宇宙産業の製造工程は作業者の力量に依存する工程が多い。このモデルにおける中心のLが周囲の要素に合うよう形を変えるのが作業者の力量に頼っているイメージを持てる。

(2) ライブウェアソフトウェア (L-S)

手順書やマニュアル、チェックシートの見誤り等の要因はこの検討課題である。作業内容や手順の改訂、作業要領書の様式変更のように変動することも多々ある要因も含まれる。

(3) ライブウェアハードウェア (L-H)

人間モノとの関係示し、人間の身体的特性をもとに最適な大きさや操作の方向性等の配慮を要する。道具は摩耗し、機械は故障等により状態が変化する。また機械入れ替えなども状態変化の要因となる。少量多品種の航空宇宙産業は設備投資し難い事業環境も多く、この観点についても作業者の力量に依存している点が多々ある。

## (4) ライブウェアー環境 (L-E)

人間を取り巻く環境の問題は範囲が広い。しかし人間の働く環境はパフォーマンスに大きな影響を与えるので十分な検討がなされることが重要である。温度・湿度・騒音等の物理的要因から、勤務時間帯、作業空間等のように身体的および心理的な領域、職場環境によるストレスといった精神的な領域への配慮も必要となる。

## (5) ライブウェアーライブウェア (L-L)

航空宇宙産業のような大規模・複雑システムでは、単独で仕事をするということはほとんどない。従って、同じ仕事や作業をするメンバーや、複数のメンバーにより構成されたチームの人間関係がパフォーマンスに及ぼす影響等がある。また、「元請けー下請け関係」「メーカーお客様関係」「作業の引継ぎ問題」「複数団体による共同プロジェクト」等におけるL-Lの関係もある。

## (6) マネジメント (m)

マネジメントはL-Lに近いが、L-H、L-S、L-Eにも大いに関連があるので、SHELを取り巻いているように表現されている。すべての要因にはマネジメントが影響していると考えられる。例えば、社長が代わると会社が変わる、校長が代わると学校も変わると言われるように、mの態度によって、LとSHELの状態は変わる。社長が「コストダウン」を叫び続ければ、働く人(LとL)は不調な機械(H)を騙しだまし使用して品質影響を隠そうとする。また、mが行き過ぎた管理を強行すると、現場の雰囲気が悪くなり、LとLのスキマが開いてしまう。つまり、コントロールする権限のある人が、各要素の変動にバランスとれるようこまめにマネジメントをとれば、スキマは生じないか、生じてもすぐにスキマは埋まる。

以上より、ヒューマンファクタはm-SHELモデルを使って説明ができる。ヒューマンエラーを起こそうと思って行動する人間はいない。それは作業者も同じであり良いものを作るために良い仕事をしようと思って行動しているはずである。意図しない結果がヒューマンエラー事象であるが、その事象を起こす要因としてヒューマンファクタに着目する必要がある。ヒューマンエラー事象は本人の不適切/不安全な行為とその時の不適切/不安全な状態の掛け合わせで発生する。m-SHELモデルよりヒューマンエラー事象は下記の組み合わせで発生したものであることを念頭に置くと要因を多角的に見ることができる。

## ➤ ヒューマンエラー事象＝

不適切/不安全な行為 (L) × 不適切/不安全な状態 (S, H, E, L)

### 3.3 ヒューマンエラー事象の実状

多くの産業において、事故の起因源の約80%がヒューマンエラーによるものといわれる[15]が、JIS Q 9100規格を適用する航空宇宙産業の製造工程におけるヒューマンエラー事象の実状について論ずる。

本論文が対象とするヒューマンエラーは3.2章で述べた通り、製造工程の作業者に起因するヒューマンエラーである。航空宇宙製品を取り扱う事業場において発生した不適合件数を調べた。なお、JIS Q 9100では図面等技術要求から逸脱する事象を不適合と表現し、QMSの仕組みでは顕在化した事象に応じて表3.2の区分で処置する。

表3.2 QMS上の不適合区分と処置概要

区分	説明	処置
不適合	図面要求から逸脱する事象	技術部門等の判定権限保有者の指示に基づき現品処置(顧客要求に抵触する場合は顧客の承認を得る)する。事象の原因を調査し、是正を取る。一連の処置は品質保証記録として保管する。
軽微な不適合	図面要求から逸脱する軽微な事象	技術部門等の追加指示無くとも、後工程の通常作業で図面要求内に収めることができるか、修理・補修が定常作業として設定されており、その範疇で解消できる事象。一連の処置は品質保証記録として保管する。
ヒヤリハット	図面要求には抵触しないが、放置するといつか図面要求を逸脱する事象を引き起こす行為	特に処置を定めておらず、品質保証記録としての取扱いも無いが、組織の固有知識としての活用を推奨している。

対象とした事業場は主に航空機用のエンジン組立・整備・試験、関連部品の製造及び宇宙ロケット用のエンジン組立、制御用バルブ組立、関連部品の製造を行っている。2012年度に製造部門責で処置された不適合件数は611件であり、そのうち作業者起因の不適合件数は281件、約46%であった。厳密には事故と製造上の不適合は事象が異なるが、人間の行動の結果が意図・期待する領域から逸脱した結果の事象であることを同等と考えて比較すると、航空宇宙製造工程のヒューマンエラー起因の事象は少ないのではないかと考える。これはQMSによって管理上作業のバラつきを抑えるモノづくりを行っていることが影響しているものと推察される。6.2章で自動車エンジン組立ラインの作業について述べるが、作

業者の力量に依存せず期間工でも作業のバラつきを抑制する仕組みの工程ではより作業者自身のヒューマンエラーに起因する不適合は少なく、機械設備等の要因によるものが多いことも推察できる。

一方、人間は必ずヒューマンエラーを起こす生き物であるが、不適合事象として顕在化せずとも、どのくらいのエラーが出ているのか推察した。人間のエラーデータ表 3.3[26]より、例えば“技術指示書を読む”といった行為は 8.2 回/1000 回の読み違いや誤認識といったヒューマンエラーが発生する確率がある。航空宇宙産業の製造工程で技術図書から必要な要求を読み解く行為は日常的に行われており、上記エラー率を用いるとヒューマンエラーも常に発生していることになる。不適合件数を調査した事業場では約 600 人の作業者がおり、平均 10 回/日は技術指示書若しくは作業指示書を読んでいる。下記よりその行為におけるヒューマンエラー回数は 10,824 回/年にも及ぶこととなる。

$$600 \text{ 人 (作業者)} \times 10 \text{ 回/日 (技術指示書を読む回数)} \times 220 \text{ 日 (年間勤務数)} \times 0.0082 \text{ 回 (技術指示書を読むエラー回数)} = 10,824 \text{ 回/年}$$

表 3.3 人間エラーデータ ([26]より作成)

No.	Task	不信頼度
1	技術指示書を読む	8.2回/1000回
2	電流計または流量計を読む	5.5回/1000回
3	ゆるんだボルトやクランプを調べる	4.5回/1000回
4	多位置電気スイッチの位置を決める	4.3回/1000回
5	さびと腐食を調べる	3.7回/1000回
6	読みを記録する	3.4回/1000回
7	スイッチの位置を確かめる	1.7回/1000回
8	手動バルブを閉める	1.7回/1000回
9	手動バルブを開ける	1.5回/1000回
10	2位置電気スイッチの位置を決める	1.5回/1000回
11	要素の取り付けまたは取り外しを確かめる	1.2回/1000回

その事業場のヒューマンエラー事象は年間 281 件であることから、技術指示書を読み違えたとしても、何かしらの働きによって、不適合事象が顕在化しなかったものと考えられる。この何かしらの働きについて考察する。

Reason[27]は、人間は誤りやすい存在であることを前提として、エラーは原因ではなく結果であることから、それを引き起こす作業環境や組織プロセスに目を向け、人間の条件を変えることはできないが人間が働く条件を変えることはできると述べ、エラーが存在しても、それを防御する仕組みがあれば事故は防ぐことが出来て、事故というものは防御をかいぐって通り抜けてしまったものだと考え、その様子を穴の開いたチーズに喩えスライスチーズモデル (図 3.2) として提唱している。

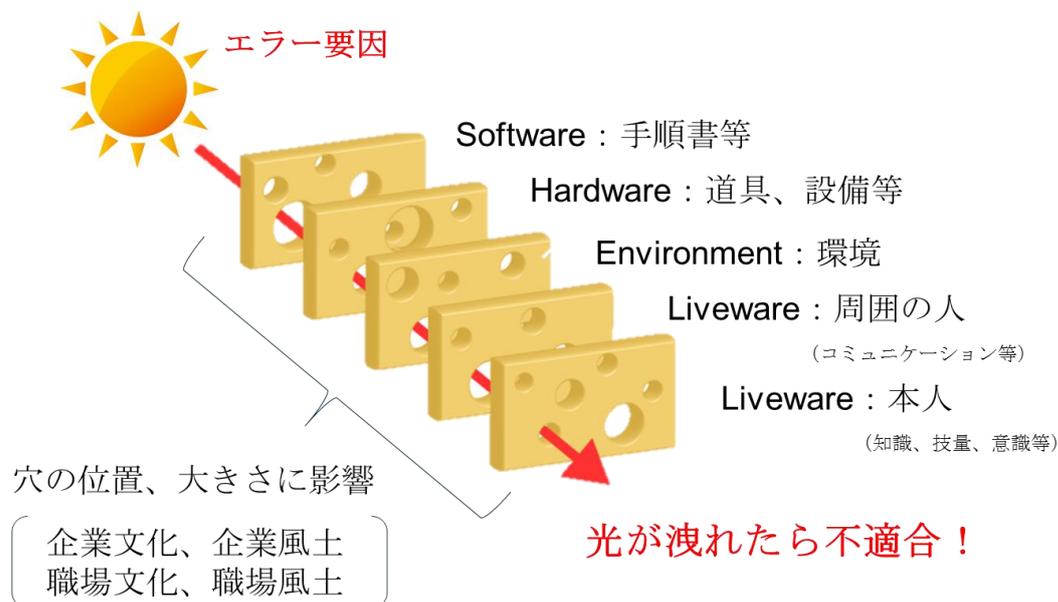


図 3.2 スイスチーズモデル ([28]より作成)

穴がたくさん開いているスイスチーズをスライスして並べる。ここでスライスチーズ1枚1枚を、一人ひとりの作業や設備、機器、環境条件に見立てる。スライスチーズの穴は、人の注意や覚醒水準、設備機器の使いにくさ、作業環境のまずさに相当し、抜けがあることを示す。その抜けの大きさは、体調や疲労などの状況により刻々と変化し、その位置もスライスチーズ上を動き回ると考える。設備機器や環境条件の穴も同じであり、機械の調子、自然環境も一定ではない。また、これら穴の大きさや、開き方は、その企業・職場風土により特定の傾向を持つ。このスライスチーズを並べて光にかざしたとき、穴が一直線に重ならなければ光は漏れないが、不幸にして穴が重なったときに光が漏れる。これは事故が生じたことを意味する

この Reason スイスチーズモデルの概念を踏まえると、航空宇宙産業の製造工程は作業者の力量に依存したモノづくりを行っており、ひとつひとつの行為（例えば技術指示書を読む）において、多くのヒューマンエラーを発生させている。しかし、QMSによって構築されたプロセスでは、手順等 (Software)、道具、設備等 (Hardware)、環境 (Environment)、周囲の人とのコミュニケーション等 (Liveware)、本人の力量 (Liveware) や、管理や風土といったマネジメントの効果によって、エラーに気づき、もしくはエラーに対処し、不適合事象の発生を防いでいると整理できる。

### 3.4 レジリエンス効果による改善促進の考察

レジリエンスという言葉は下記のような領域で以前から用いられている [46]。

- 生物生態学

生態系は、気象変動、ほかの動植物の侵入、汚染物資の流入など、つねに外乱にさらされている。弱い生物種であれば、多少の外乱でも絶滅してしまうし、絶滅しないまでも大きなダメージを受けて、もとの状態に戻るまでに長時間を要するだろう。しかし、強い生物種であれば、大きな外乱を受けても受けるダメージはさほど大きくはなく、またもとの状態に速やかに戻ることが出来るだろう、こうした生物の強さをレジリエンスと言っている。

- 精神医学/発達心理学

幼少期につらい生物をしたが、その後しなやかに立ち直ることや、ストレスに打たれ強く、回復の早いパーソナリティをレジリエンスと言っている。

- 組織経営

震災など組織に対する脅威に対して、ビジネスを中断させない、機能が低下しても早期に回復する組織力といった事業継続能力のこと。これをまとめたものが事業継続計画 (BCP: Business Continuity Plan) である。

E.Hollnagel は、“システムが想定された条件や想定外の条件の下で要求された動作を継続できるために、自分自身の機能を、条件変化や外乱の発生前、発生中、あるいは発生後において調整できる本質的な能力のこと”と定義している [29]。この学術は医療、航空機の運航、警察、消防、軍のように人の力量に頼ったシステムで環境の変動が早く、ヒューマンエラーによる影響が人命等にも及ぶ重要度の高い分野で研究が進められている。一方、航空宇宙産業の製造現場において、環境変動振れ幅や時間軸上のヒューマンエラーによる影響の広がりや規模の大きさは、先に述べた分野に比べて小さいが、それでも作業者の力量に頼った手作業のモノづくり現場はいつも同じ環境で作業しているわけではなく変動はある。これは m-SHEL モデルで説明ができる (3.2 章)。モデルの絵にある枠の波打ちは、状況の変動を表しているが、中心の L との間隙が空かないようにするためには、周囲の SHEL の状態に合わせて、L が積極的に対応 (調整) することの重要性を示している。状況が変動する中で人の行為を“エラー”、“エラーではない”という対立概念で捉えるのではなく、状況に合わせた人間の行為そのものに注目し、状況に適合した行為の遂行能力を伸ばしていくことが望ましいと言える。

フィリン [15] は“ヒューマンエラーを完全になくすことは不可能だと分かっている。しかし、業務要求とそこに潜むリスクに対応するための、適切なノンテクニカルスキル (NTS :

non-technical skill) を身につけることで、エラーの発生を最小限にとどめ、エラーを捕捉し、エラーによる被害を食い止める努力をすることは可能である。”と述べている。そのために作業者のテクニカルスキル（力量：知識、経験を踏まえた技量）をノンテクニカルスキルで補うことを推奨している。そのノンテクニカルスキルとは次の7つである。

① 状況認識（作業環境に対する注意）

周囲に存在する情報を選択し理解すること。

② 意思決定

得られた状況認識の情報を踏まえ目的に対し実行すべき選択肢を意思決定すること。

③ コミュニケーション

気づき（状況認識）、適切な判断（意思決定）を促し、個人の疲労やストレスによるパフォーマンス低下を予防するためお互いが気配りし能動的に行うべきこと。学び、発達、改善の効果が期待できる。

④ チームワーク

航空宇宙産業の製造工程のように大規模・複雑なシステムにおいて複数人が共通の目的で行動する場合、協調はチームの総合的パフォーマンスに不可欠。コミュニケーションとも深く関係し、個人のエラーを検出して矯正する冗長性、リソースの有効活用による効率化が期待できる。

⑤ リーダーシップ

チームメンバーの知識、スキル、態度を伸ばすことによりチームパフォーマンスを高める上でリーダーが果たすべき役割。

⑥ ストレスマネジメント

ストレスによる影響はエラーの増加、生産性の低下、不安感、さらには体調にも及びチームのパフォーマンス低下にもつながる。ストレス要因の明確化と改善によってストレスへの影響を最小限にとどめること。

⑦ 疲労への対応

疲労はパフォーマンスの有害な影響を及ぼす。疲労のレベルを減じるために必要な対応が必要。

ノンテクニカルスキルを体系的に教育し向上させていくことは定量評価もできないため難しい問題であるが、状況認識、意思決定、疲労、ストレスといった個人のパフォーマンスを低下させるリスクへの対応として、コミュニケーション、チームワークが必要であり、そのためにリーダーシップの観点で、ベテラン作業者の暗黙知を形式知化し共有することが現場組織を良い方向に成長させるポイントだと考える。組織のなかには権威勾配や同調といった、チームのパフォーマンスを低下させる要因がある。これは上司と部下といった上下関係や、力量の差によって生じるヒューマンエラー要因であるが、作業を熟知するベテラン作業者の意見は、能動的に仕事をしようとするメンバーに受け入れやすく、コミュニケーションとチームワークの促進が期待できる。

ベテラン作業者の暗黙知が有効である裏付けとして6章にて後述する状況認識リスクへの対応も期待ができる。パイロットのリスク認知の研究において、経験の浅い副操縦士と比較すると機長はリスク判断を行うのに異なる兆候を用いていることが分かっている。Thomson et al. (2004) は、軍のパイロットが行った状況リスク認知は、経験の多寡によって、その“正確さ”に違いがあることを示している[30]。ベテランになるに従ってより豊かなメンタルモデル(6.2.2章)を持ち、その結果、どの兆候が有用であるかが分かっている。ベテラン作業者の豊富な経験から判断に用いられる暗黙知を形式知化し共有することで、リスクアセスメントの助力になるといえる。

身近な例で補足すると、筆者は通勤時にいつも必要なアイテム(腕時計、社員証、ハンカチ、スマートフォン等)を身につける。その行為は難易度も低く、毎日の定例作業として自動化され、ほぼ無意識で行われる。ここで意識は勤務先での仕事の段取りや、当日の天候による通勤への影響といった変動要素への対応に集中している。よって、必要なアイテムを忘れないように、決められた場所に必要なものを並べておく習慣をとっている。しかし、ある日スマートフォンを忘れて出勤してしまった。理由はバッテリー充電するため“別の場所”に置いてあり、出勤時のパターン化された行為の中で決められた場所に置いてあるものだけを身につけて、スマートフォンを身につけることを失念してしまうというヒューマンエラーを起こしたからだ。このような失念は製造現場でも起こりうるヒューマンエラーであり、現場ではキット化と称し、作業に必要な部品を予め準備するための専用箱を整備している。その箱は一目瞭然で必要な部品が入っていることがわかるように仕切りや識別で工夫される。筆者も出勤に必要なアイテムを失念しないよう、キット化の対策を取ろうと考えていたが、他のことを優先し対策の実行を後送りにしていた。そんなある日、また充電しているスマートフォンに気づかないまま出勤しようとした、そんな矢先に娘から“スマホ充電してるから、また忘れないようにね”と一声かけられた。そこで気づくことが出来たが、声をかけられなかったら同じ失敗を繰り返していたであろう。普段、“いってらっしゃい”も言わない娘が声をかけてくれたことに感激しつつも、振り返って、この娘の一声は何をトリガーにして発動したのか出勤時に考えてみたところ、二つの要因が思いついた。一つはスマートフォンを忘れてしまったことを家族に話をして共有できていたこと、もう一つは娘にと

ってスマホは大事なアイテムであり（いつもスマホが片手にくっついている）、自身が経験したスマホがないことによるストレスを我が事のように捉えて意識高く監視してくれていたことである。

このような失敗の共有による声掛けはノンテクニカルスキルのコミュニケーションとチームワークの成果であり、まさにレジリエンスの効果であると実感出来た。ベテラン作業でもヒューマンエラーを起こすし、ベテラン作業者のノウハウ（失敗経験と教訓）もバラバラである。ベテラン作業者の暗黙知を形式知化して共有することで、コミュニケーションとチームワークを促し、レジリエンス効果を高めることが出来ると考える。

#### 3.5 まとめ

本章では航空宇宙産業の製造工程におけるヒューマンエラーの定義とその要因（Human Factors）について整理し、実態として製造工程で発生するヒューマンエラー事象（不適合事象）が世の中の産業と比較して少ない割合であること、その理由としてQMSによる管理で作業バラツキの抑制と、エラーを事象につなげないバリア効果（スイスチーズモデル）が機能していることを論じた。それでも航空宇宙産業の製造工程が作業者の力量に依存している以上、人間が柔軟に周囲の条件、システムに対応し（m-SHELモデルでいう中心のLが周囲のS, H, E, Lの形に合わせる）、エラーの発生と、エラーを防御する機能を更に高める上でレジリエンスエンジニアリングの観点があり、その効果を高めるために、ベテラン作業者の暗黙知を形式知化して共有及び活用する改善提案を論じた。

# 第4章 ベテラン作業者暗黙知の蓄積

ベテラン作業者の暗黙知を抽出する手法として、労働安全管理で用いられる人間工学データを基準とした作業チェック手法を活用する。標準的な人間の能力の領域を逸脱する範囲の作業を客観的に識別することによって、ベテラン作業者が改めて作業上のリスクを認識すると共に、それら作業に対するノウハウにも気づけることが出来る。そのリスクやノウハウをベテラン作業者の暗黙知として抽出し蓄積する。

## 4.1 ベテラン作業者の行動と暗黙知

ベテラン作業者の行動は Rasmussen の SRK モデル(図 4.1)[31]より “Skill ベースの行動” に分類することが出来る。作業の習熟度が増し、初心者と比べ作業時間が短縮され、作業ばらつきが抑制されることで作業品質が安定する。一方、慣れが生じることで行動が意識化されずに対処されることが多くなり、ポカミスやうっかりミスといったエラーを起こす。ベテラン作業者は知識、経験が十分あることから、与えられた業務上の課題に対し行動の筋道と結果を瞬時に見極めることができる。つまり自分の作業のペースを掴んでいる分、外乱によってそのペースが乱されるとフラストレーションが溜り、結果的に近道行為や思い込みの行動をとり状況認識不足による誤った行為のヒューマンエラーを起こす。このようなベテランのエラーはベテランであるがゆえの認知行動特質を基に、フラストレーション解消行動によるものと指摘されている[32]。また、ヒューマンエラーは肉体的な疲労や精神的なストレスが影響して発生している[33]との見方もある。疲労や単調といった生理的状态が意識の低下に繋がり、人間の信頼度に影響を与えることをフェーズ理論でも示している(表 4.1)[34]。

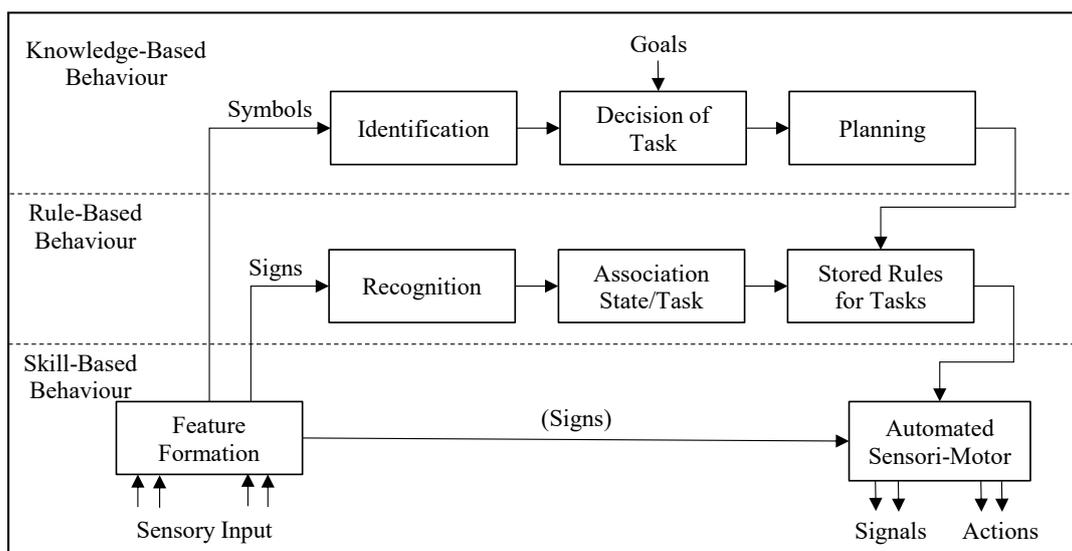


図 4.1 The Skills, rules, knowledge (srk) framework (Rasmussen) ([31]より作成)

- ・ **ナレッジベース**：初めての事象に遭遇したとき、意識上で内外の知識を参照し、考えて対処する。初心者はすべてナレッジベースの行動といえる。この認識プロセスは時間を要する。
- ・ **ルールベース**：日常よく経験する事象に関しては、対処方法があらかじめパターン化され、事象に対して適当な対処方法が当てはめられることにより対処される。マニュアル通りにすればよいともいえる。
- ・ **スキルベース**：繰り返し起こるようなことに関しては、行為が自動化され、無意識のうちに対処される。ベテランに多い行動といえる。

初心者はナレッジベースで行動するが、慣れるに従って、ルールベースからスキルベースに移行する。ベテランはスキルベースで行動することが多いが、それは行動が意識下されずに対処されるということとなる。意識がないと注意も怠る。ここにフラストレーション回避行動が加わることで、ベテランのうっかりミス、思い込みによるヒューマンエラーとなる。

表 4.1 フェーズ理論（覚醒水準）（[34]より作成）

	意識モード	注意作用	生理状態	人的信頼性
0	失神	ゼロ	睡眠 失神	0
I	subnormal	期待不可	疲労 単調 飲酒 薬物	0.9以下
II	normal relaxed	受動的	安静 休憩	0.99～ 0.99999
III	normal clear	能動的	前向き	0.999999以上
IV	hypernormal	一点集中	慌て	0.9以下

表 4.1 は意識フェーズとエラー発生率の関係を示す。フェーズⅢ いわゆる集中状態においてエラー発生率は極端に小さい。しかし、それ以外のフェーズになるとエラー発生率は極端に高くなる。意識を集中して最高の状態で臨めばエラーは起こらないが、この状態を長時間維持できないのが人間であると言われる。ベテラン作業者は無意識化においてフェーズⅡとフェーズⅢの意識を使い分けているものとする。重要な作業、難易度が高い作業は自身の力量を発揮させるためにフェーズⅢ能動的に取り組み、慣れた作業はフェーズⅡ受動的に取り組んでいるものとする。この意識の切り替えとそれに伴う判断、行動も暗黙知といえる。

理論的にはベテラン作業者がフラストレーションを溜めないよう疲労やストレス軽減を目的とした作業改善を実行すればエラーの発生率は低くなるのであろうが、現実的にはその未然防止策を取ることが難しい。ベテラン作業者であればこそプロフェッショナル意識が高く、与えられた環境、課せられた要求に対し、自身の力量で対処すべきと考える職人気質があり、ミスを自身の過ちとして処置し、反省を共有しない。つまり、ベテラン作業者自身の暗黙知となり、そのヒューマンエラーリスクとなり得る要因を事前に抽出することが出来ないため、未然防止策を取ることが出来ない。

QMS では要求仕様を逸脱する不適合事象が発生すると製品処置と並行し、発生事象の原因を究明し対策を取る。これを是正処置というが、現実には同じようなヒューマンエラー事象を繰り返し、もぐら叩きのような対策をとっていることが多い（図 4.2）。上述のように職人気質であるがゆえに自身の力量でカバーしようとするため、「不注意だった」の一言だけが原因とされ、対策も「注意喚起」「手順書に注意指示追記」位の内容となる（2.4 章）。

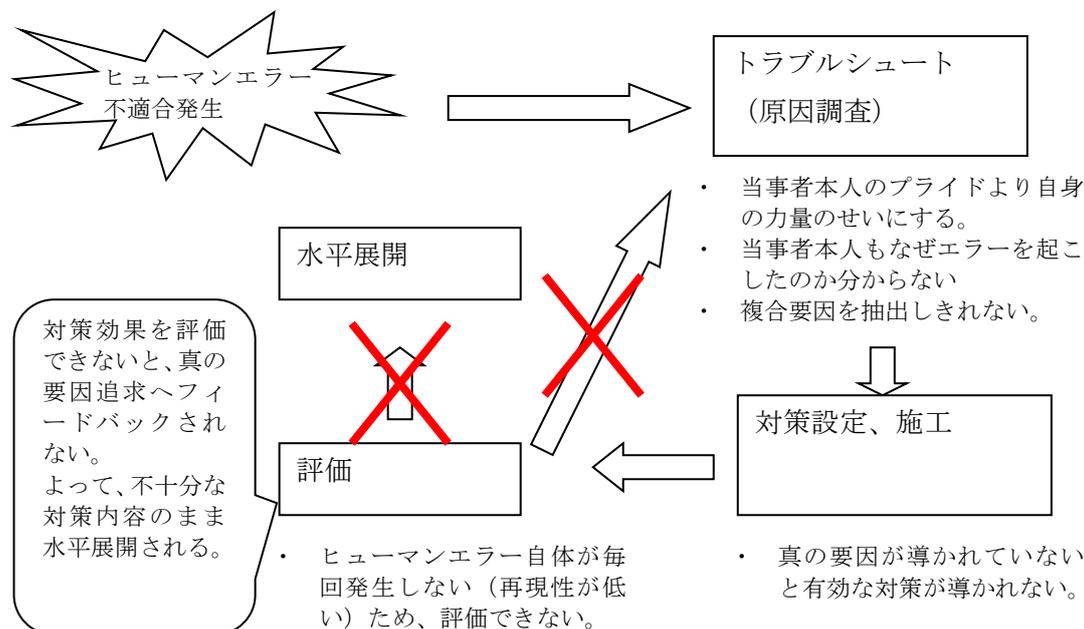


図 4.2 ヒューマンエラー不適合事象処置上の問題点

この状態はレジリエンスエンジニアリングの“コミュニケーション”、“チームワーク”、“リーダーシップ”の働きも阻害する。ベテラン作業員が過去に経験した失敗やヒヤリハット若しくは作業上のリスクに対応する知見、このような暗黙知を形式知化して職場、チームに共有することで大きなレジリエンス効果につながるものと期待する。

ベテラン作業員の暗黙知抽出の観点として安全衛生の取組みに着目した。安全衛生の取組みでは人間工学観点で危険予知を行いリスク抽出し未然防止策を取っている。防ぐべき事象は“安全・衛生上の災害”であるがその原因はヒューマンエラーであり、同じくヒューマンエラーによって起こされるモノ作り上の“不適合事象”も人間工学観点でリスクを抽出し、作業改善することで未然防止効果を得られるのではないかと考えた。ベテラン作業員に身体的、精神的な負担を感じる作業があることに気づかせ、そのような作業にどう対応しているのか暗黙知を抽出するための、“きっかけ”として人間工学を活用する。

本章では、一般的に職場の安全衛生改善を目的とした人間工学観点の取組みを活用し、ベテラン作業員の暗黙知を抽出することで、製品不適合を起こす作業リスクやヒューマンエラーを起こさないための知識や経験を抽出する手法を少量多品種で作業員に頼った製造工程である宇宙機器の組立作業で検証した結果を纏める。

## 4.2 人間工学チェックシート

国際労働事務局（ILO）は国際人間工学会（IEA）協力の基、職場の安全衛生改善を目的とした「人間工学チェックポイント」を発行している[35]。100項目以上のポイントが示され、利用者は各職場でチェックポイントに照らし合わせてチェックリストを作成し、活用できるように示されている。このチェックポイントの観点を活用し、今回はベテラン作業者の作業に対するフラストレーション回避行動に関わる暗黙知を抽出する。補足すると人間の基本的な特性・領域から外れる作業は作業者の力量によってカバーされる。つまり人にとって外部から負荷（作業遂行にあつて形態的、生理的、心理的に拘束される外的諸条件）が与えられ、それは作業負担（作業負荷が作業側面に引き起こす生理や心理、行動の変化）として現れる。そのような作業に対しベテラン作業者がどのような判断に基づき行動しているのかを明らかにする。ここにベテラン作業者の知識、経験に基づく暗黙知があると考え。チェック作業自体が作業者の負担とならないよう、内容はなるべく簡便且つ情報量を少なくして時間をかけさせないこと、さらに人間工学専門家でなくても意図が通じやすいチェック表現とすることを考慮した。人間工学観点としては産業医科大学神代教授の「職場改善チェックリスト」[36]を参考とさせて頂き、ここに過去のヒューマンエラー不適合の要因を整理し、不適合分析などにおいて不適合背後要因をデータベース化したPSF：作業の行動形成要因[23]から教訓的なチェック項目を加味した。最後にチェック対象工程の作業者に内容を確認してもらい、不要なチェック項目や不適切な表現を修正することで現場が使えるチェックシートとして完成度を向上させた。チェックシート概要を図4.3に示す。

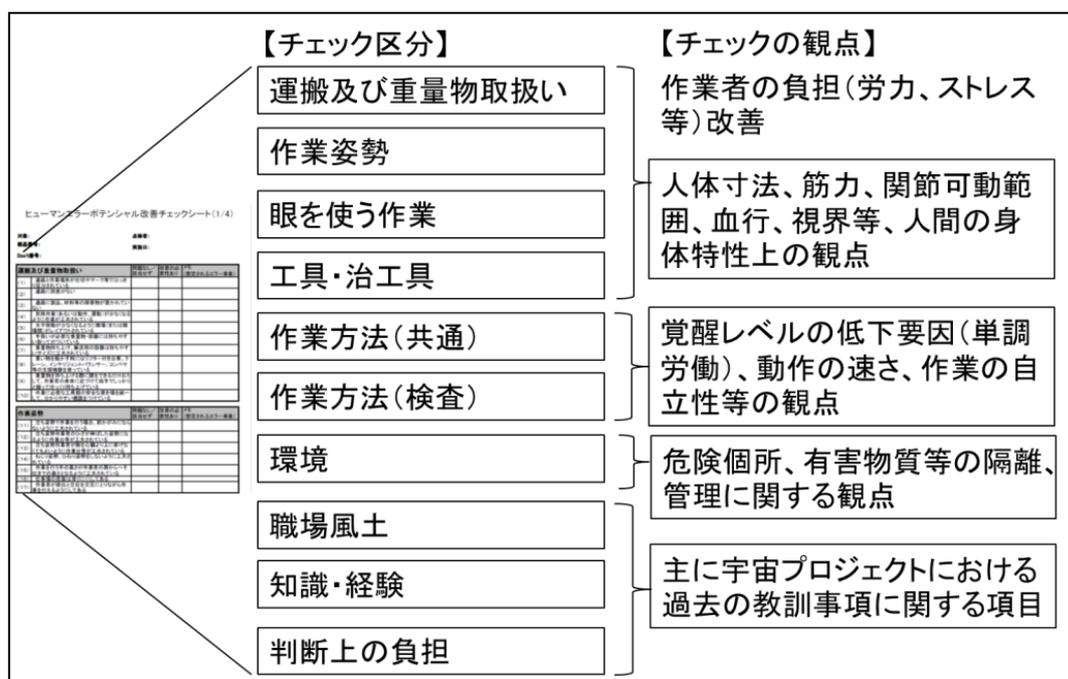


図 4.3 人間工学チェックシート概要

### 4.3 宇宙機器組立作業での検証

宇宙製品用ガス配管組立のオリフィス取付け作業に対しチェックシートを用いて暗黙知の抽出可否と結果の評価を行った。対象作業は構成品 40 品目を作業員 2～3 人、検査員 1 人のチームで延べ 4 時間程度かけて製品に取り付ける作業である。本作業では過去にオリフィスユニオン（流量を調整する部品）の向きを逆に取付ける不適合が発生している（図 4.4）。作業員の力量は十分であったことから、ベテラン作業員による不適合であった。当時のトラブルシュートでは、当該作業員へのインタビューと“なぜなぜ分析”を行い、下記の原因が導かれ、対策を取っている。

- ・ 直接原因：作業員は当該オリフィス装着後の方向性確認を怠った。  
※作業記録上はオリフィスの方向確認は実施済みであった
- ・ 背後要因：作業が計画より遅れていたため急いでいた。
- ・ 対策①：急いでいても基本動作を徹底するよう教育した。
- ・ 対策②：オリフィス方向確認の作業記録にサイン欄を追加した。



図 4.4 オリフィスの逆付け

ベテラン作業員は知識、技能があり、且つ同種作業はこれまでも問題無く実施してきた実績があることから、周囲の関係者はおろか本人もなぜミスをしたのか真の要因は分からない。よって上記のように急いでいたので、やるべきことをやらなかったという原因と対策は注意喚起を目的とした教育および作業記録や第三者チェックを追加することで作業ミスに気付かせるといった内容となる。急いでいたという要因は結果論であり、事前に作業上のリスクとして抽出し、改善を図ることは難しい。

ただし、ミスをしようとする作業員はいない。与えられた仕事を要求内に仕上げようとして作業しているはずである。結果的にオリフィスを逆付けしているということは、いつも慣れた作業（スキルベース）で受動的な意識（フェーズⅡ）の基、なにかの判断のもと近道行為をしたか、なにかほかのことに意識を集中しているなかで行動していたのではないかと考える。この“なにか”を明らかにすることが暗黙知の形式知化であり、作業の改

善（未然防止）や職場のレジリエンス効果の向上につながるべき情報だと考える。

このオリフィスユニオン取付け作業に対して、人間工学観点の作業チェックを行い、トラブルシュートで明確化出来なかった作業上の暗黙知抽出を行った

当該オリフィスユニオンの取付け作業は7つのタスクによって行う。（図 4.5）

- ① 作業員は作業手順書より、取付けるオリフィスの識別番号と締付けトルク値を確認する。
- ② 作業員は図面から取付けるオリフィスのサイズ（同じ識別番号でもエンジン毎に流路が指定される）とシールの識別番号を確認する。
- ③ 作業員は部品台からオリフィスとシールを取り出す。
- ④ 作業員は工具置場からスパナとトルクレンチを取り出す。
- ⑤ 作業員は作業機で台下作業（オリフィスねじ部の目視点検、潤滑剤塗布、シール取付け、フィットチェック）を行う。
- ⑥ 作業員は配管へオリフィスを取り付け指定トルクで締め付ける。
- ⑦ 作業員は取付け後の外観を確認する。
- ⑧

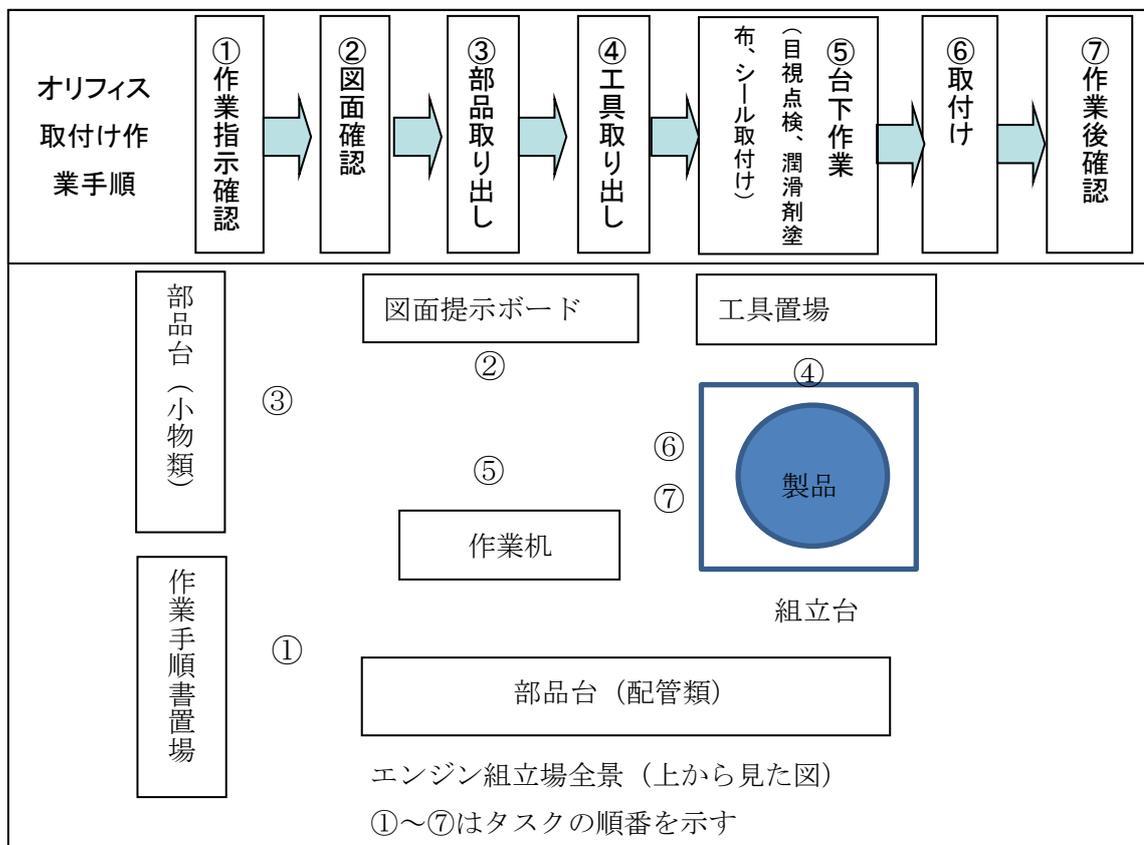


図 4.5 熱交換器系統 オリフィスユニオン取付け作業概要

表 4.2 チェックシートによる試行結果 (抜粋)

作業方法(共通)		問題なし/ 該当せず	改善の必 要性あり	メモ (想定されるエラー事象)
(20)	加工、組立の終わった品物を落とし込む装置等がある(終わりの動作が簡単になるように工夫されている)		レ	オリフィス取付け後、反対開放部の封止作業が必要となる
(24)	間違いを避けるために、容易に理解できる標識をつけたり、色を使用したりしている		レ	オリフィスの矢印マーキングが見難い
作業方法(検査)		問題なし/ 該当せず	改善の必 要性あり	メモ (想定されるエラー事象)
(26)	検査・試験あるいは監視行為の判定基準にあまりない点無く、明瞭明瞭である		レ	オリフィスに矢印はあるが、相手部品からは正しい向きが分からない PIRに補足図があるが、その真を探し難い
職場風土		問題なし/ 該当せず	改善の必 要性あり	メモ (想定されるエラー事象)
(34)	宇宙機器、製品に対する理解(清浄度確保、キズ防止、記録の徹底)は十分である		レ	PIRへの作業記録は都度ではなく後で実施している
眼を使う作業		問題なし/ 該当せず	改善の必 要性あり	メモ (想定されるエラー事象)
(46)	読み違いが起きないように文字・数字の大きさ、配色等が工夫されている		レ	オリフィスにP/N、矢印のマーキングがあるが、小さく見難い
(48)	作業者が首を動かさずことなく作業対象部を見る事ができるように者が置かれている(視野60°以内を目安にして下さい)		レ	作業者から見て取付け位置は配管の裏側となり視野は狭い(マーキング位相によっては手鏡必要)
判断上の負担		問題なし/ 該当せず	改善の必 要性あり	メモ (想定されるエラー事象)
(51)	遵守すべき規格や基準値は分かり易く指示、またはシンプルに整理されている		レ	現品矢印マーキングとPIR補足図に方向性指示はあるが見難い

(1)作業手順書

作業手順書が見難いという問題点(表 1 No,26,51)あり。当該作業手順書は全325頁あり、辞書のように分厚い。そのP91に当該オリフィスの取付け作業指示と作業記録欄がある。一方、オリフィスの方向指示は補足図としてP212に記載されている。P91にはP212の呼び出しがないため、方向性を確認するには手順書をパラパラ捲って探さなければならない(図 4.6)。(熱交換器系統の組立手順はP87~95に渡って記載されている。冒頭のP87に組立補足図である“図13を参照”という記述があるが、この図13はP212に図示されているものの、P87にはP212の呼び出しは無い。)

また、図5に示す通り作業手順書は①に置かれているが、1冊しかなく手順指示と記録を兼ねている。作業は2~3人で行われているため、同時に複数の作業が平行実施される場合、同じタイミングで作業者が作業手順書を確認することもある。誰かが確認していれば待つことになるが、上記の通り作業手順書が見難いため必要な情報を探すことに時間がかかる。それは個々の作業ペースを乱す要因となり、作業者のフラストレーションにつながる事が分かった。



図 4.6 作業手順書

(2)オリフィスユニオンの現品表示

オリフィスユニオンの方向性確認がし難いという問題点(表1 No.24、46、48、51)あり。オリフィスユニオンにはパイブロペンにより幅 3.8 mmのスペースに矢印がマーキングされている(図 4.7)。このマーキング自体が小さく見難い。また、取付け作業時はオリフィスが作業者から見て死角となり、マーキングを直視出来ない。作業後の確認では手鏡や電灯を用いて確認する必要がある。(図 4.8)

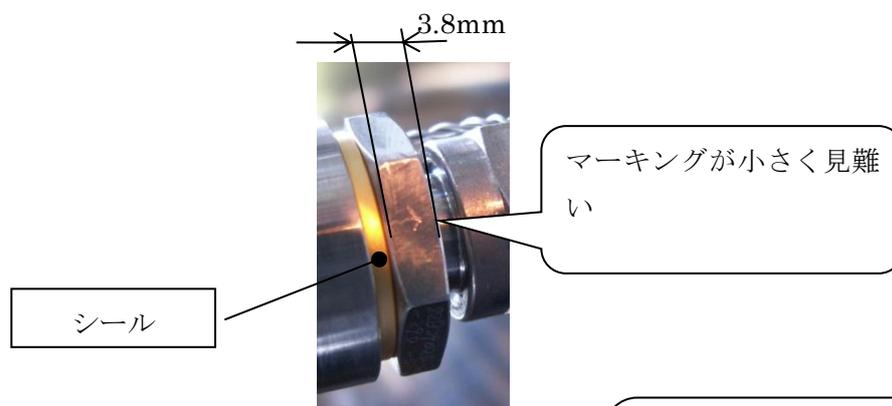


図 4.7 オリフィスマーキング

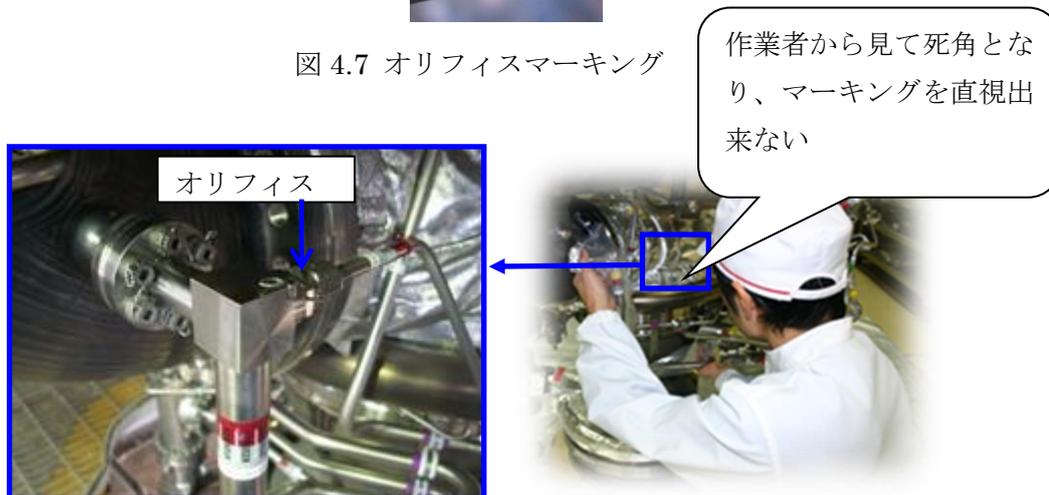


図 4.8 オリフィス取付け作業位置

上記作業上の負担(1)(2)が、一連のオリフィス取付け作業において、どのような影響をベテラン作業者に与えるのかをタスクに沿って考察した。(図 4.9)

①作業手順書にてオリフィス手順と補足図の取付け方向指示を確認する際、方向性確認の頁検索に手間がかかる。一方、オリフィス手順(識別、トルク値)を確認出来れば、オリフィスを取付ける作業は実施可能である。つまり、過去の作業記憶より思い込みで取付け方向(流体が流れる方向)を判断し、補足図の取付け方向指示を確認しない(その頁を見ない)まま、作業する(近道行為を行う)可能性が考えられる。更に②～④の作業間で移動や部品の取り出し動作を行うことで、①で確認し短期記憶として頭に格納した識別やトルク値等の情報を忘れる可能性がある。その度に①の“し難い”作業を繰り返すことになるため、ますます補足図(方向性指示)を見る手間を省く可能性が考えられる。

⑤台下作業時にオリフィスのマーキングは必ず見る。ただし、マーキング自体が小さく見難いので、誤認する可能性が考えられる。ここでオリフィスの入り口側にシールを装着するが、この時点で逆位置にシールを装着した場合、以降⑥、⑦の作業では見難い矢印ではなく、シール装着位置に判断基準を置き換えて取付け方向を判断している可能性が考えられる。

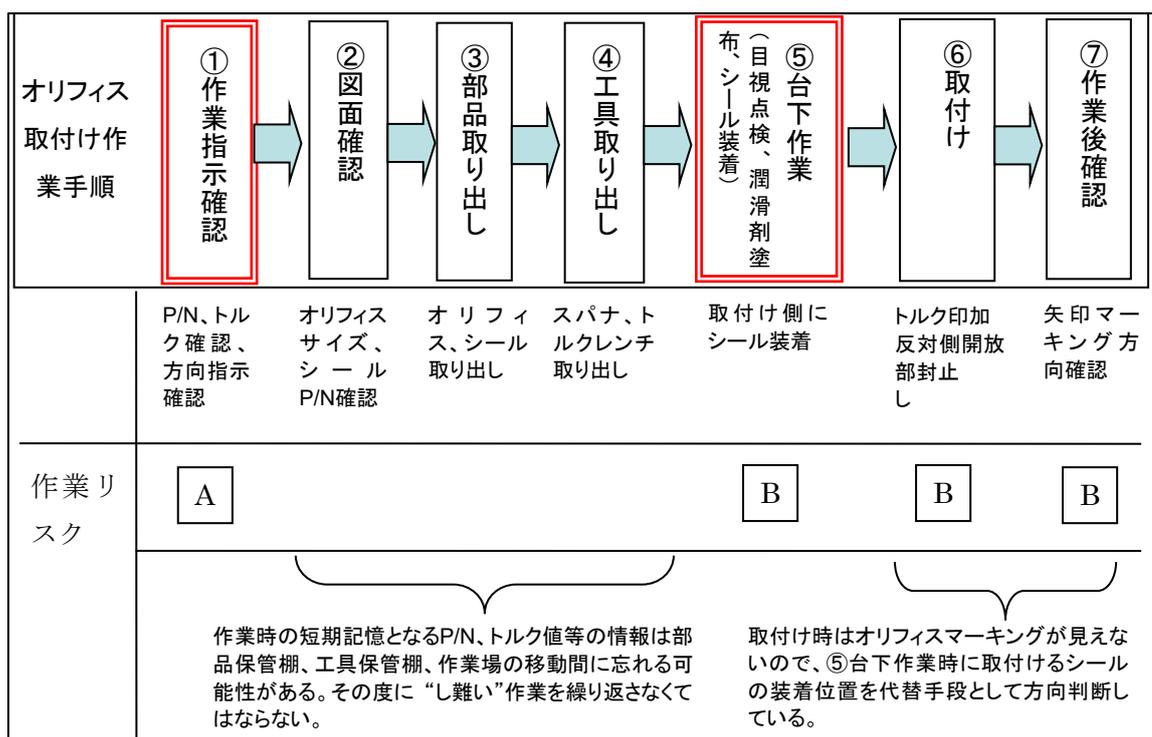


図 4.9 オリフィス取付け作業におけるベテラン作業者の暗黙知

以上を整理すると、作業進行上ベテラン作業者に与えるストレス(負担)と、そのストレスを回避するためのノウハウ及びヒューマンエラーリスクを暗黙知として識別出来た(表 4.3)。

表 4.3 ベテラン作業者暗黙知

	作業負荷	暗黙知	
		ノウハウ	リスク
A	作業手順書から作業に必要な情報を確認するのに手間がかかる	過去の作業実績等の記憶を基に確認を省き、作業時間の効率を図っている	確認を省くことで思い込みによるエラーがある
B	オリフィス装着状態から直接方向マーキングを確認するのが困難	マーキングではなく、シール(相手部品)装着位置で方向性を判断する	その後の動作でミスしても気づけない

上記作業リスクに対し、試行作業を行った作業リーダーより下記改善策の提案があった。

A：作業に必要な情報を1枚にまとめる

作業手順書本文(オリフィス識別番号と要求トルク値及び作業記録欄)と補足図(方向性指示)が分かれており、補足図の頁を探すのに手間がかかることが問題。探す行為自体を省き、必要な情報を1つの頁にまとめる。

B：オリフィス現品に方向を判別できる情報を追加する

矢印マーキングが小さく見難い、取付け作業時にオリフィスが死角位置となり直視出来ないことが問題。部品形状の制約上、矢印マーキングを大きくすることは出来ない。ので、下記2案を提案した。(図4.10)

- 形状変更(但し、機能、強度、寿命への影響がない軽微な変更)

目視で判断が困難であれば、手の感触で方向性を判断する。ナットチャンファー部の片側を立てることで台下作業や取付け作業時も指先で方向性が判断できる。

- 色による識別(但し、清浄度への影響が無いことが前提)

矢印の向きに頼らず、色識別で見た目容易に方向性を判断する。

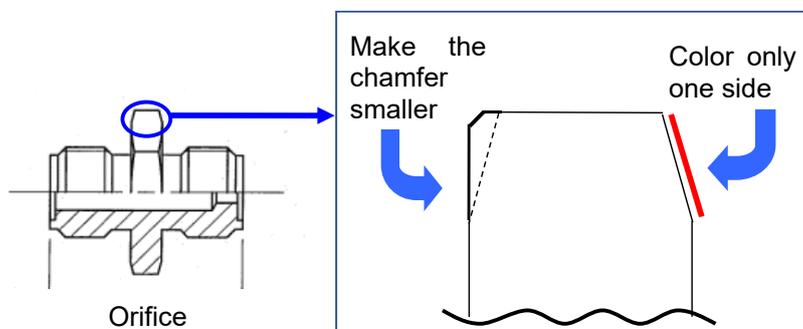


図 4.10 オリフィス方向確認改善案

その他、チェックシートでは下記の暗黙知も抽出出来た。

- ・ オリフィス取付け後の開口部封止作業

オリフィスは仮付け後に反対側開口部を清浄度保持のためキャップで封止する。宇宙機器において清浄度確保は基本動作であり、開口部封止は必須作業である。オリフィス取付け時にキャップも用意しておくことで、その場で取付け可能である（ノウハウ）が、もしキャップの用意を忘れた場合、取付け後、作業者は急いでキャップを取りに行く動作に入る。つまり、取付け後の方向性確認よりも封止の動作に意識が移る（方向確認の失念）といったリスクが考えられる。このリスクに対して、オリフィス取付け時は予め開口部の封止キャップを確実に準備するよう、作業手順の明確化、作業に必要な部品キットの整備といった改善が必要となる。

- ・ 作業手順書への記録作業

作業時は都度作業結果を記録することが望ましいが、作業状況によっては先に述べたように複数作業者が同時に作業を進めることも多い。手順の確認も、記録作業も同一作業手順書であり、他作業者が手順書を使っていると待ち時間（ストレス）が発生する。記録作業は後から纏めて実施する（ノウハウ）と短期記憶に頼った作業ミス（リスク）が考えられる。不随作業である作業記録の残し方を改善する必要がある。

#### 4.4 評価

宇宙製品用ガス配管組立のオリフィス取付け作業において、人間工学観点のチェック項目より人間の基本的な特性・領域から外れる作業、すなわち作業者にとってストレス（負担）がかかる作業を抽出した。本作業は過去にオリフィスユニオンを逆付けする不適合が発生しており、当時のトラブルシュートで抽出した原因と試行結果を比較評価した。

過去のトラブルシュートで抽出した原因は“緊急スケジュールであったため、オリフィス取付け後の確認を怠った。”である。この原因では“緊急スケジュール”という大きな問題点が指摘されたが、スケジュール遅れは前工程を含む複合要因が関係しており、現場レベルの打ち手では改善効果が期待できない。つまり内容が漠然としており、効果的な対策を導くことが難しい。

これは先に述べたように、トラブルシュートで“なぜなぜ分析”を用いたとしてもヒューマンエラーは当事者本人もなぜエラーを起こしたのか分からないことが多い（故意を除く）。よって、緊急スケジュール等の漠然とした要因に落ち着いてしまう。一方、今回の試行で抽出したヒューマンエラーリスクは下記の2点であり、従来の調査結果である“緊急スケジュールだった”という漠然とした表現ではない。

- “作業指示書に記載される手順と方向指示のページが離れており、確認に手間がかかる。指示を確認せずに思い込み（過去の実績経験）の判断で作業することで、エラーするリスクがある。”
- “オリフィスのマーキングが小さく見難い。また取付け作業時は死角となり直視

できない。現品表示ではなく、別の特徴（シール取り付け位置等）から方向性を判断することで、方向性を誤るリスクがある。”

人間工学観点のチェック結果を活用することで作業がベテラン作業者に与える負荷とその作業に対応するノウハウとリスクを抽出することができる。従来のヒアリングベースのトラブル調査や作業プランニングに対し、下記3点において有効であると考えられる。

➤ 具体的

問題点が明確化されるため改善策を検討し易い。また、問題点から具体的なヒューマンエラー作業を連想し易く、ベテラン作業者の暗黙知を吸い上げやすい。

➤ 客観的

従来は問題視され難い作業上の問題点を客観的に抽出できる。例えば、今回の不適合では作業指示書には必要な指示（情報）は全て記載されている。また、現品にも矢印の表示があるので方向性は明確化されている。作業者が確実に見ればエラーは発生しなかったものとして、それら状態の要因を問題視することは無かった。ただ、それは管理者目線の評価であり、作業員目線でない。

➤ 効率的

チェックシートを用いることで問題点を短時間に抽出することが出来る。今回の対象作業は作業員2～3人で延べ4Hr程度の作業量であるが、チェックは2人で20分程度であった。航空宇宙産業の製造工程は少量多品種であり作業員の作業は膨大であり、簡便な手法でベテラン作業員の暗黙知を抽出できる手法はあらゆる工程において汎用性が高く有効であり、このチェック結果の情報を蓄積することで暗黙知を形式知化し活用できる。

なお、問題点を抽出できても、効果的な改善の実行につなげることは困難であることも多い（例えば、設計変更を対策とする場合、変更や検証に関わる追加作業や客先報告等を要する場合もあり日数とコストが必要）。但し、ベテラン作業員が作業上のリスクを認識し、作業チーム員と共有するだけでも、各々の作業に対する確認意識と気づき力の向上に寄与し、リスクが不適合として顕在化することを未然防止する効果が期待できる。

つまり、作業の知識と経験が十分あるベテラン作業員のヒューマンエラーリスクを明確化することで新人はもちろんのこと、他のベテラン作業員もリスクを認識し、チームワークでリスクに対応する風土が醸成できる。レジリエンスエンジニアリングのノンテクニカルスキルである“コミュニケーション”、“チームワーク”、“リーダーシップ”の働きを促進させ、“状況認識”、“状況判断”、“ストレスマネジメント”、“疲労への対応”といったリスク

への対応が可能となる。この働きを促進させるために蓄積した暗黙知を汎用的な戦訓集として活用する手法を5.2章で論じる。

#### 4.5 まとめ

本章ではベテラン作業者の暗黙知抽出を目的として、ベテラン作業者の認知行動特質でありヒューマンエラー要因であるフラストレーション回避行動の基となる、肉体的疲労や精神的なストレスを与える作業[32][33]を、人間の基本的な特性・領域から逸脱する作業と位置づけ、そのような作業を人間工学観点[23][35][36]のチェックシートで識別することで、ベテラン作業者の暗黙知を吸い上げ形式知につなげる取り組みを宇宙機器の組立工程で過去にベテラン作業者による不適合が発生した作業を対象に試行し評価をまとめた。試行結果、従来の調査や作業に対するリスクアセスメントでは気づけなかった問題点や改善案を客観的に抽出することが出来た。また、チェックシート自体は汎用性が高く、今回試行した宇宙機器の作業工程に限らず、人に頼った様々な工程で活用可能であると考えられる。このような手法を持続的に活用することで、現場力向上にもつなげ、リスクに強い組織づくりにも活用していく発展性も示した。

IT技術や自動化のシステムが発展しているが、宇宙産業のような少量多品種なモノづくり現場では高品質な製品を作業者の力量に頼っている職場は多い。現場力向上のように人の“意識”、“行動”に頼った、未然防止の取り組みは引き続き必要である。その仕掛けとして今回のような人間工学観点のリスク抽出は有効であると考えられるが必要なのは抽出した問題点をデータとして蓄積し、今後プランニング段階からヒューマンエラーリスク排除、低減につなげる取り組み、仕組みの構築を行うことである。

## 第5章 暗黙知の形式知化と活用

ベテラン作業者の暗黙知を基に、ヒューマンエラーを未然防止に向けてプロセスで活用する二つの手法を提案する。ひとつはプランニング段階からヒューマンエラーリスクを改善させることを目的とした“工程FMEAへのSHELモデル活用”、工程FMEAはヒューマンエラーの発生リスク評価が困難であったが、SHELモデルより作業者と周囲の状況の兼ね合いからリスクを見積もる方式として、ベテラン作業者の暗黙知を基にSHEL観点の格付けテーブルを作成した。もうひとつはレジリエンスエンジニアリングにおけるノンテクニカルスキル向上を目的とした“失敗学を取り入れた戦訓集の活用”、暗黙知よりヒューマンエラーにつながるワナを導き、そのワナを戦訓化することで汎用的にリスクアセスメントできる。それぞれ、実践・検証によって、その有効性を論じる。

### 5.1 工程 FMEA への SHEL モデル活用

#### 5.1.1 はじめに

FMEA は、システムの性能（ハードウェア若しくはソフトウェアまたはプロセスの性能）に関する潜在的故障モード並びにそれらの原因及び影響を明確にすることを目的とした、システム解析のための系統的な手順である[37]。製造工程における作業及び管理のプロセス要素に着目する場合、工程 FMEA（PFMEA）として適用する[38]。工程 FMEA を適用することによって、製造工程における作業ばらつきを管理内に抑制し、品質トラブルを未然に防止することが期待される。これにより製品品質確保のみならず、計画的な生産と利益の確保を実現することで製造メーカの健全な経営を担保することが出来る。

国産ロケット用エンジンの製造工程に対しても工程 FMEA を適用し、リスク管理を行ってきた。しかし、実際はヒューマンエラーによる品質トラブル（製造不適合）が連続し、その対応に多くのコストと時間を要した。工程 FMEA 上の RPN（Risk Priority Number）が低いため、特に改善をとらなかったタスクで不適合が発生したことが分かっている。その原因として、ヒューマンエラーによる不適合の顕在化を予想できなかったと、すなわち故障モードに対する発生頻度の評価が不適切であった点が指摘できる。過去に同じ作業又は同種作業の実績がある場合、“作業は可能である”との判断からヒューマンエラーの発生率を低く評価することによって発生頻度の点数が低く設定された。また、大量生産工程では過去の不良率から発生頻度を導くことができるが、航空宇宙製品は少量多品種のため製造実績データを参照できず、分析者の主観で発生率を評価していることも要因である。よって、工程 FMEA では如何にヒューマンエラー事象の発生頻度を適切に評価できるかが重要である。

一方、ヒューマンエラーは複合要因によって発生するものであり、図 5.1 の SHEL モデル[40]によって説明できる。SHEL モデルは、「S」「H」「E」「L」から構成されており、中

心となる L (本人) とその周りにある要素を現した概念モデルである。周囲にもう一つある L は本人ではなく、周囲にいるメンバーを意味する。表 5.1 に SHEL モデルの各要素の意味を示す。

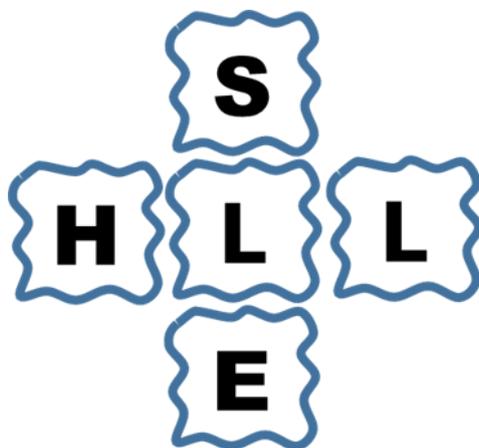


図 5.1 The SHEL model – components and interfaces ( [40] より作成)

表 5.1 SHEL モデルの各要素

要素	概要
L: Liveware (SHELモデルの中心にある 当事者)	身体的状態、心理的状态、精神的状态、能力(力量)等の要因
S: Software	作業手順、作業指示の内容、作業指示の仕方、 教育内容等の要因
H: Hardware	治工具、設備、材料、部品等の要因
E: Environment	照度、騒音、温度、湿度、作業スペースの広さ等 の作業環境
L: Liveware (当事者の周囲にいる人々)	関係する上位者、同僚または他部門の人間

SHEL モデルのポイントは二つあり、一つは中心に当事者となる人間 (L) を置き、関わる要素を周囲に配置していること、もう一つは、それぞれの要素の周辺が波線で表現されていることである。前者はヒューマンエラー要因は必ずしも一つではなく、人に関わる周囲の要素が複合的に関係することを意味している。よって、手順書 (S) を改善すればエラーは無くなると安心するのではなく、その他の要因も考慮にいたした改善が必要とされる。後者の波線はそれぞれの要素の特性や限界を現し、時間経過と共に変化することを意味している。中心の L とその周りの各要素の間に隙間がある場合、人間とその要素の特性がうまく噛み

合わないことを示し、その結果ヒューマンエラーが発生することを表現している。ヒューマンエラーを発生させないためには、それぞれの要素の波線をピッタリ合わせて隙間がなくなるようにする必要がある。そのためには中心の L (当事者) 側から機械 (H) や手順書 (S) の特性に合わせる方法 (既にあるシステムや手順書を教育や訓練で使いこなすよう力量を向上させる) と、機械が手順書側から人間に歩み寄る方法 (人間の特性を考慮した設備設計、分かりやすい手順書表記等) があり、その両者の視点で改善を図ることが効果的である。ヒューマンエラー対策は前者の教育、訓練等人間の力量向上を主体に考えがちであるが、「機械や手順書に人間のパフォーマンスを十分に発揮させない何らかの問題がある」と考え、設備や手順書でもヒューマンエラーを発生させない工夫が必要」という発想に立つことが重要となる。この発想は本章で述べる工程 FMEA を活用してヒューマンエラーリスクを低減させる管理・運用においても重要な視点である。

本章では SHEL モデルを工程 FMEA の故障モードに対する発生頻度の求め方に適用し、ヒューマンエラーリスクを適切に管理する方法を提案すると共に、新型国産ロケットエンジン開発[41]に新しい工程 FMEA を適用し試行した結果と評価を論じる。

### 5.1.2 SHEL モデルを用いて発生頻度を求める

これまでの工程 FMEA では、個々の故障モードに対し「発生頻度」×「影響度」×「検出度」によってリスクの度合い (RPN) を評価してきた。この「発生頻度」は過去の同種作業の不適合率を参考として格付けする。ただし、故障モードの原因をヒューマンエラーとする場合、ヒューマンエラーは起こらないという前提で「発生頻度」を低く評価してしまっていた。なぜならば、工程設計上、作業可能であれば作業者がその通り実行するだろうと考えるからである。しかし、人は機械ではなくエラーを起こす生き物であることから、「発生頻度」はヒューマンエラーの要因を考慮して検討する必要がある。そして、ヒューマンエラー要因はシステム全体から見て、人に影響を与える要因を考える。システムはもともと脆弱であり、それを人が補って行動しているという観点から、一つのタスクにおいても作業員へ様々な影響があることも念頭に置く必要がある[42]。

ヒューマンエラー自体は結果であり、そのメカニズムは SHEL モデルより下記の通り定義できる[8]。

ヒューマンエラー = L (行為) × S, H, E, L (状態)

当事者 (L) の行為とその時の周囲の状態 (S,H,E,L) の掛け合わせによってヒューマンエラーが起こる。つまり、状態の程度が良ければヒューマンエラーは起こり難く、状態の程度が悪ければヒューマンエラーは起こりやすい。この状態の程度が人間のパフォーマンスへ与える影響を図 5.2 の通り示すことが出来る。

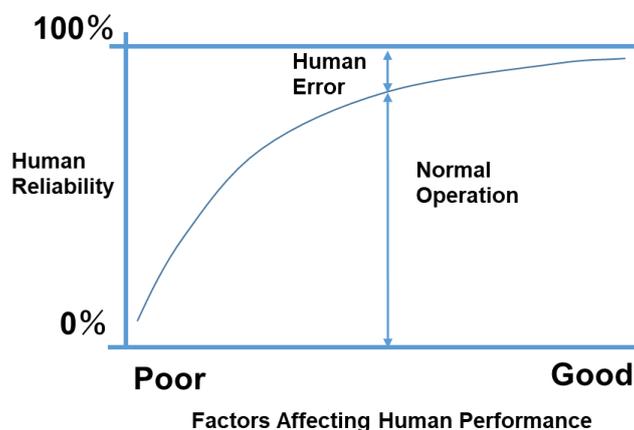


図 5.2 The Human Reliability Curve

工程 FMEA で想定する故障モードに対し、各々のタスクにおいて、作業員（L）と周囲の状態（S,H,E,L）の程度を評価できるよう格付けテーブルを設定し、発生頻度を求める上で下記の通り“SHEL ポイント”を算出する。

$$\text{SHEL ポイント} = L \times \text{Max} (S, H, E, L L^{\ast})$$

※LL は周囲の人（L）を意味する

S,H,E,L はそれぞれ格付けテーブルの評価で一番ポイントが高い（程度が悪い）ものを優先して SHEL ポイントを求める。

### 5.1.3 SHEL 格付けテーブル

SHEL 格付けテーブルは 4 章で蓄積したベテラン作業員暗黙知より“精密機械加工工程”および“手溶接工程”に関わる知見を基に、下記観点で設定した。

- L : Liveware (表 5.2)

作業員の力量に依存する程度でポイントを設定、ベテラン作業員暗黙知より作業員の力量に依存するタスクであるほどリスクが多いためポイントを高く設定した。

表 5.2 “L” 格付けテーブル

ポイント	基準
10	現物合わせの作業など、 作業者の経験と勘に依存する作業があるマニュアル作業 作業者の官能判断(音、視覚)に頼る作業
9	---
8	技能認定制度で作業ばらつきを管理している作業
7	---
6	---
5	作業者が、寸法などの数値を計測・算出し作業にフィードバックする必要がある作業
4	作業者が、寸法などの数値を計測し作業にフィードバックする必要がある作業
3	数値計測を必要としない作業
2	一部、人のマニュアル作業を含む自動運転作業 (マニュアル作業…マテハン作業など、装置操作は除く)
1	人が介入しない自動運転作業

● S : Software (表 5.3)

工法や手順の設定、指示内容の適切さでポイントを設定。ベテラン作業員暗黙知より作業員の記憶、判断、行動に頼る内容であるほどリスクが多いためポイントを高く設定した。

表 5.3 “S” 格付けテーブル

ポイント	基準
10	使用治工具の確認、段取り、作業方法を記載した書類が存在しない(SO,AOのみ)
9	---
8	---
7	使用治工具の確認、段取り、作業方法を記載した書類が存在する(簡単な工作表、分解書あり)
6	---
5	ポイント7の基準に加えて、段取り作業の詳細(製品芯出しポイント、規定値、計算方法など)が定型化されている(詳細な工作表、分解書あり)
4	---
3	ポイント7の基準に加えて、段取り作業の詳細(製品芯出しポイント、規定値、計算方法など)が設定され、記録として残すことが定型化されている。
2	ポイント3の基準に加えて、作業従事者のみのノウハウ作業が書類にて定型化されている。
1	ポイント3の基準に加えて、基準に加えて、人が介入せず自動で作業できる体制になっている(ロボット等による全自動化など) ポイント3の定型化された書類と合わせ、当該工程に必要な映像型マニュアルが整備されている

● H : Hardware (表 5.4)

作業に使われる設備、治工具などの整備、管理内容の適切さでポイント設定。ベテラン作業員暗黙知より設備等の信頼が低いと作業員側で配慮する領域が広くなる分、作業への意識が散漫になる等のリスクがあるためポイントを高く設定した。表 5.4 は代表で計量器の格付けテーブルを示す。タスクに必要なとされる設備、治工具の特性によって評価内容を見直す。

表 5.4 “H” 格付けテーブル

ポイント	基準
5	新規設計/構想、所内未経験、 精度維持管理項目が不明確・未実施な物
4	精度維持管理が不十分で、記録が残っていない
3	精度維持管理が不十分(実行困難)で、 全ての精度の保証ができない(記録有り)
2	精度維持管理が不十分で、 一部の設備精度の保証ができない(記録有り)
1	必要十分な時間間隔で定期的に精度、清浄度管理等をしており、常に精度維持管理 されている(記録有り)

- E : Environment (表 5.5)

作業環境の適切さでポイント設定。ベテラン作業員暗黙知より作業品質に影響を与える環境要因があると作業時に気を付けるべき点(リスク)が多いことからポイントを高く設定した。表 5.5 は代表で FOD 管理(清浄度管理)が必要な工程における格付けテーブルを示す。

表 5.5 “E” 格付けテーブル

ポイント	基準
5	屋外作業(温度、清浄度管理なし)
4	---
3	屋内で 空調、防塵(清浄度)管理がいずれも不十分 ※管理できない&管理しようとしていない
2	屋内で 空調、防塵(清浄度)管理がいずれか一つ不十分 ※稀にこれが起因で作業上支障がでる
1	屋内で 必要十分な、空調、防塵(清浄度)管理

- LL : Liveware - Liveware (表 5.6)

複数人作業(同時作業)、引継ぎ(作業中断含む)の観点でポイント設定。ベテラン作業員暗黙知よりフラストレーションの元となる、疲労やコミュニケーションエラー要因の観点で、作業時間が長く、複数人作業であるほどポイントを高く設定した。

表 5.6 “L-L” 格付けテーブル

ポイント	基準
5	二人以上作業、8h~(日またぎ、引き継ぎあり)
4	二人以上作業、~8h
3	一人作業、8h~(日またぎ、引き継ぎあり)
2	一人作業、2~8h(休憩あり)
1	一人作業、2h(休憩不要)

5.1.4 工程 FMEA の見直し

従来の工程 FMEA にある発生頻度を SHELL ポイントで評価するため、図 5.3 に示す通りフレームワークを見直した。ここで表 5.7 に示すように SHELL ポイントから発生頻度のレベルに置き換えて、影響度、検出度のレベルと整合を取り、RPN を算出するようにした。

No	部品番号	工程番号	故障モード	要因	SHELL要因					SHELL ポイント	発生度 (a)	影響度 (b)	検出度 (c)	RPN (a*b*c)
					L	S	H	E	LL					
1	A	1	モードA	要因1	5	10	5	4	3	50	7	8	5	280
2				要因2	10	9	3	2	4	90	10	10	5	500
3		2	モードB	要因1	8	5	4	4	4	40	7	7	7	343
4				要因2	4	7	2	3	3	28	6	5	5	150

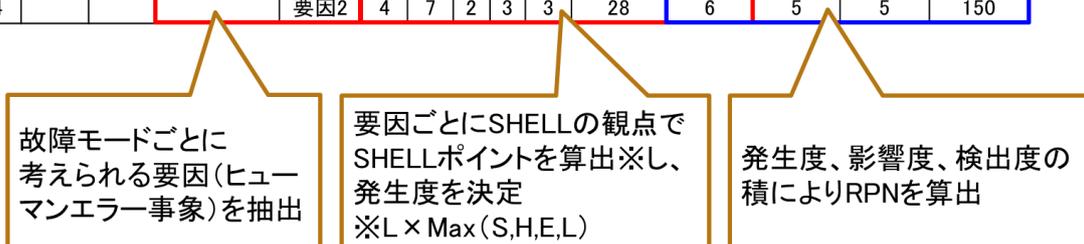


図 5.3 Improvements to the P-FMEA framework

表 5.7 SHELL point 変換表

SHELL Point	probability of occurrence
1 ~ 1	1
2 ~ 5	2
6 ~ 10	3
11 ~ 15	4
16 ~ 25	5
26 ~ 35	6
36 ~ 50	7
51 ~ 75	8
76 ~ 80	9
81 ~ 100	10

※図 5.3 No.2 の RPN 算出例

$$10 (L) \times 9 (\text{Max } S, H, E, LL) = 90$$

表 5.7 より、SHELL ポイント 90 は発生度 10 に変換

$$10 (\text{発生度}) \times 10 (\text{影響度}) \times 5 (\text{検出度}) \text{ より } RPN = 500$$

## 5.1.5 検証

国内次期基幹ロケット用のエンジンを2014年から開発中である[41]。このエンジン開発に本章で紹介する新しい工程 FMEA を適用し検証した。新型エンジンは現在開発終盤の認定フェーズにあるが、これまでの開発実績と、既存エンジンの開発実績の品質傾向を比較し、新しい工程 FMEA の有効性を評価した。

開発フェーズにおいては設計要求の実現に加えて、量産フェーズを見据えた生産工程の実現も含まれる。開発エンジンの製造を通して、個々のトラブルを解決していくことによって工程の信頼性も高めていく。今回は開発フェーズで製作するエンジンの製造不適合件数を評価対象とした。

図 5.4 は開発フェーズ前半と後半に区分して、開発エンジン代表コンポーネントの製造不適合件数（1台当たりの平均値）を既存エンジンと新型エンジンで比較したグラフである。

新しい工程 FMEA を適用した新型エンジンは前半、後半ともに既存エンジンよりも製造不適合件数が少ない且つ前半から後半にかけての減少率が大きいことが分かる。前半の不適合件数の低減は既存エンジン当時に比べて設計技術力、生産技術力等の高度化による影響が大きいと推定。後半の不適合件数は新型エンジンの方が低減効果が大きく、これは新しい工程 FMEA の効果によるものと評価する。

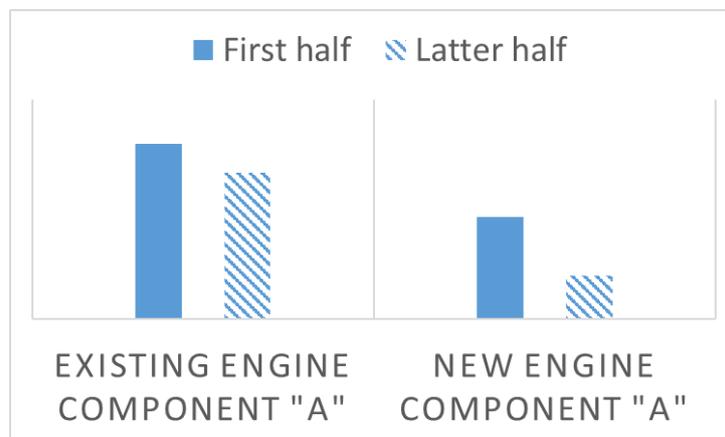


図 5.4 開発エンジン代表コンポーネントの不適合件数（平均値）

次に新しい工程 FMEA を適用した新型エンジンの RPN の推移に着目する。図 5.5 は基本設計審査（PDR）時と詳細設計審査（CDR）時、それぞれの RPN を示す。PDR 時に高 RPN の品目/工程に対して、CDR までに各種リスク低減策を実施した。コンポーネント“A”では実物大試作品の工作試験を行い得られた結果から適切な加工条件やマテリアルハンドリング上の注意事項等を作業指示書に記載、教育等することによって、作業者の負担を軽減させる対策を取った。これによって、PDR から CDR にかけて高 RPN を下げ、結果的に図 5.4 に示す製造不適合件数の減少に寄与できたものと評価する。

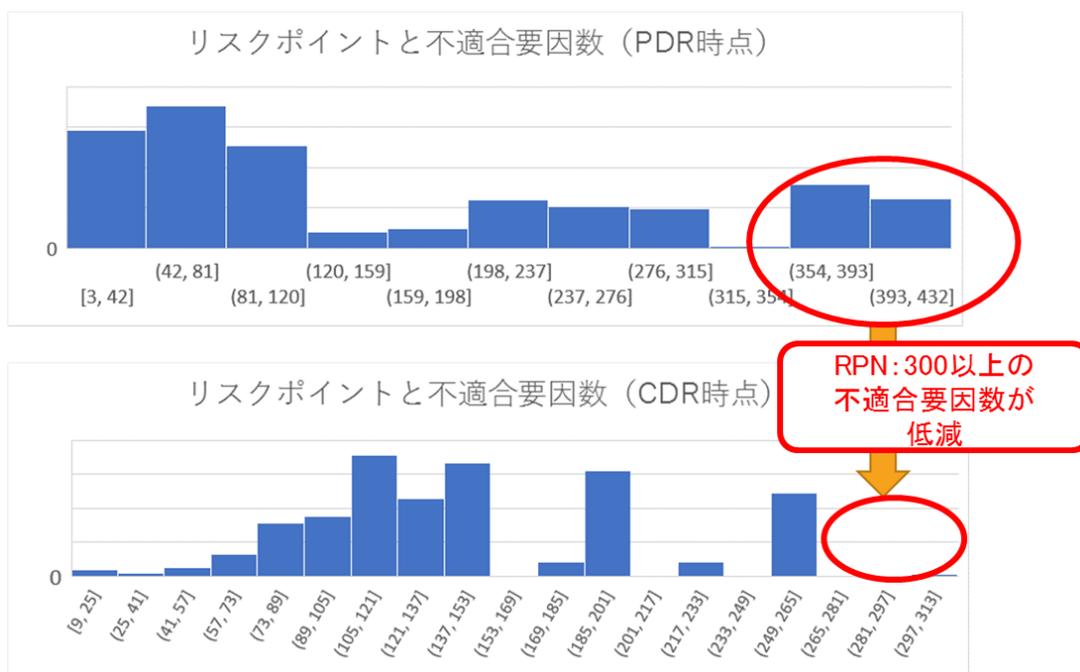


図 5.5 新型エンジン “コンポーネント A” RPN

### 5.1.6 結論

従来の工程 FMEA ではヒューマンエラーによる故障モード顕在化のリスク評価が不十分であり、製造不適合による品質損失を防ぐことが出来ていなかった。ヒューマンエラー要因を SHEL モデル観点で評価する手法を工程 FMEA に適用することで、個々のタスクにおけるヒューマンエラーの発生頻度をより適切に評価し、リスク低減策につなげることが出来る。本章では新型ロケットエンジン開発に新しい工程 FMEA を適用することによって、その効果を検証した。

新しい工程 FMEA の重要ポイントは SHEL 格付けテーブルにあり、ここにベテラン作業員暗黙知等有識者の知見を反映し形式知化することによって、世代交代等人の移り変わりに対しても、適切にリスクアセスメントが出来るようになり、またそのリスクアセスの議論、検討の中で図面や作業手順書に表現されない製造ノウハウを伝承することもできるため、組織の基盤強化にもつながるものと期待できる。今回は“精密機械加工工程”と“手溶接工程”の SHEL 格付けテーブルを整備したが、引き続き他の工程に対しても設定していく。また、新型ロケットエンジンは開発が完了し、量産フェーズに移行するが、開発フェーズで発生したヒューマンエラーによる製造不適合の要因を分析し、新たな知見が得られれば格付けテーブルへフィードバックする。量産フェーズに移行しても製造実績をモニタリングし、新しい工程 FMEA を維持していくことで、設計変更や部品枯渇等による製造工程の変更においても、作業上のリスクアセスメントを行っていくことができる。

## 5.2 失敗学を取り入れた戦訓集の活用

### 5.2.1 はじめに

ベテラン作業員から抽出した暗黙知の情報は言葉のゆらぎや細かな属性情報によって、応用し難いという課題がある。5.1章 PFMEA への活用では、“精密機械加工工程”、“手溶接工程”という区分で情報を整理・活用することが出来たが、本章において戦訓集として活用していく上で、今後も暗黙知を蓄積していくと処理しきない情報が増えていくリスクがある。この課題に対しては今後自然言語処理技術や AI (Artificial Intelligence : 人工知能) 技術の分野での活用を研究していくが、暫定的に各製造現場で活用できる形で戦訓集をまとめていくことを考えた。濱口[43][44]は失敗学のエッセンスとして“上位概念に登って知識化せよ”と述べている。失敗の原因はヒューマンエラーであるが、当事者はエラーをしようとして行動しているわけではなく、結果的にエラーになったのである。そこには、当事者が結果的にエラーした行動のワケ(理由)があるはずであり、そのワナに気づけずハマったものとする。図 5.6 はエラーの分岐点を示す。成功と失敗の分岐点に分かっていれば、その時点で十分考えて正しい道を選ぶことが出来る。一方、分岐点分からない場合、その道が失敗に向かっていても成功への分岐点に気づけない。失敗へと向かったワケ(理由)があり、当事者からしてみればワナにハマったとも言える。

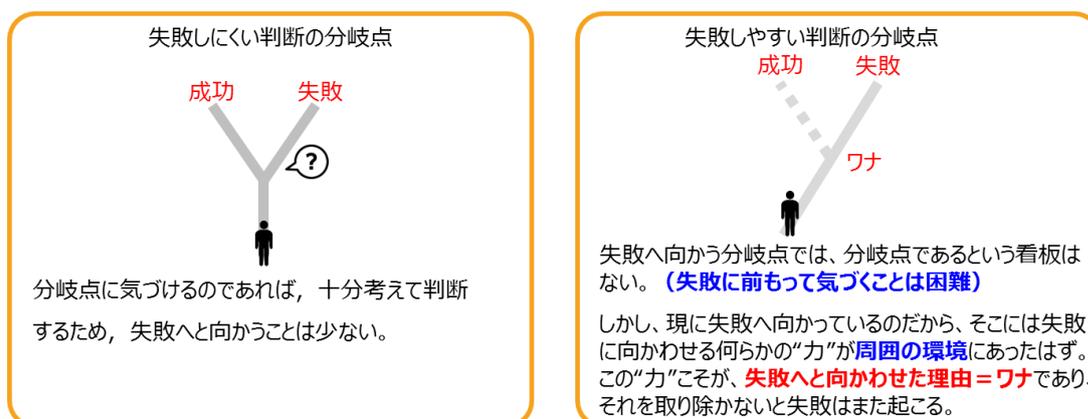


図 5.6 エラーの分岐点 ([44]より作成)

そのワナが真の原因であり、その真の原因を明らかにしないと失敗を活かすことができない。そのワナを明らかにするために当事者のインタビューにある言い訳が大事で、その言い訳が動機的原因であり、その動機的原因こそが学ぶべき教訓であると失敗学では提唱している。人間の情報処理モデル(6章,図 6.3)より、人は外界の情報を知覚、認知し、作業記憶、注意制御の情報も踏まえて意思決定し行動に移している。動機的原因にはこの情報処理のなかで図らずもワナにはまったヒントが含まれている。このワナを共有することで状態改善(手順、工具等)のアクションや、作業上のリスクに対する気づきを促し、組織のコミュニケーション、チームワーク、リーダーシップといった働きを促すことでレジリエンス効果の向上を図ることを狙いとする。

## 5.2.2 暗黙知の戦訓化

ベテラン作業者の暗黙知情報（4章）を戦訓化するにあたり、失敗学の観点を取り入れ戦訓情報の汎用化と理解度向上を図った（図5.7）。



図 5.7 戦訓化フロー

## (1) 暗黙知のカテゴリライズ（KJ法）

KJ法は川喜多[45]が発案したカテゴリライズ法であり、多くの情報をグループ毎にまとめて新たな発想を生み出すために用いられる。今回ベテラン作業者の暗黙知も作業の内容に応じて様々な属性がついた情報となっており、ある程度分類する作業を行った。

例えば、言葉の解釈を取り違えることによって発生するヒューマンエラー事象は多くの暗黙知として抽出されており、実際にベテラン作業者でもハマってしまうリスクや逆に過去のヒヤリハット等の経験から自主的に気を付けていることなど様々な情報が抽出された。これらは指示する側の意図と指示を受ける側の理解にギャップが出ることで誤解（ミステイク）につながるリスクおよびそのリスクへの対処法としてカテゴリライズした。

なお、カテゴリライズの考え方として、情報処理モデル（図5.8）を参考に、知覚から判断、そして運動のプロセスに沿ってリスクを整理した。

まず感覚器官を通して外部状況を知覚し認知するプロセス上のリスクとして、そもそもタスクの手順が不明確の場合、作業者は自身の知識と経験で行動目標を立て実行する。この場合、作業とアウトプットに作業毎および人によるばらつきが生じてエラーが発生することが考えられる。この観点では「やり方なし」、「やり方不備（ソフト、ハード、作業手順、作業環境の不備）」、「変更点不管理」の区分を設定した。

次に認知から判断のプロセスにおいて、判断の誤りによるエラーが考えられる。この判断に影響を与える要因として「知識（教育）共有不足」、「誤解（ミステイク）」、「外部からの圧力」、「不適切状態の放置」、「過信、手抜き、怠慢」の区分を設定した。

最後に運動（行動）を実行する際のエラーとして「技量不足」、「動作の失敗（スリップ）」、「ど忘れ（ラプス）」といった区分を設定した。

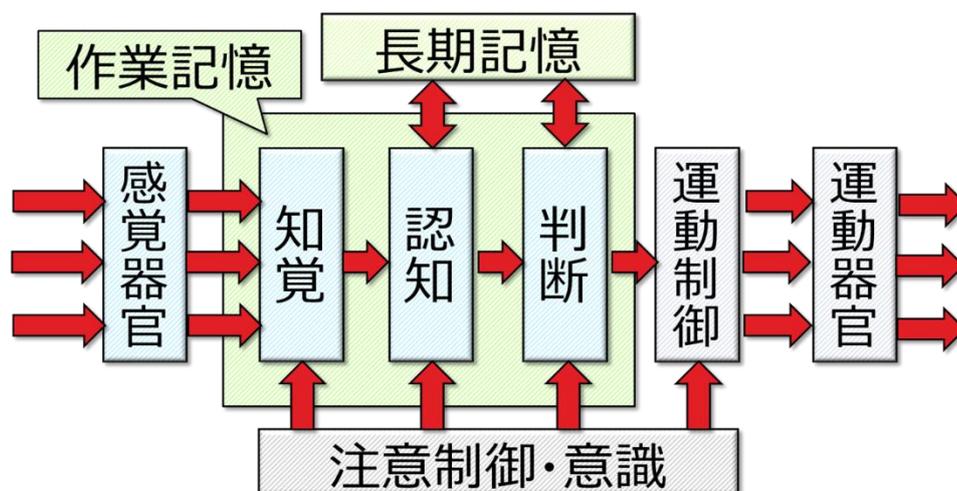


図 5.8 情報処理モデル ([46]より作成)

## (2) 上位概念化（失敗学）

カテゴライズした情報の上位概念化（属性排除と表現の一般化）を行った。例えば、「複数の意味があり前後の脈略がないとその意図を理解できない言葉」は指示側と受け側で理解にギャップが生じ誤解につながる」という表現を上位概念化すると、「曖昧ワード」は誤解を招く」といった表現にまとめられる。ここまで上位概念化できれば、あとは“曖昧ワード”を探して、改善するといったアクションにつなげることができる。

## (3) SHEL モデルによる属性付与

ただし、ここで戦訓活用する上で課題が生じた。失敗学では上位概念化した後、今度は属性を付与して下位概念を落とすことでリスク（未来の失敗）を創造し未然防止につなげることを提唱している。例えば、上位概念化した戦訓に「似て非なるものに騙された」といった表現があるとき、文章の意味は理解できるが、いざリスク（未来の失敗）を創造し未然防止策を取れといっても、なかなか難しい。そこである程度属性を付与することで、下位概念であるリスクを“創造”から“連想”できるような情報を見直すべく SHEL モデルを活用した。SHEL モデルは L（本人の行為）×S,H,E,L（周囲の状態）の掛け合わせでヒューマンエラーが発生することを示しており、上位概念化した表現を“行為”と“状態”に分けて属性付与することで、戦訓意図を分かりやすくすることが出来る（図 5.9）。上位概念化した戦訓（成功へのヒント集と命名）を SHEL モデル観点で属性付与した(表 5.8)（APPENDIX 参照）。

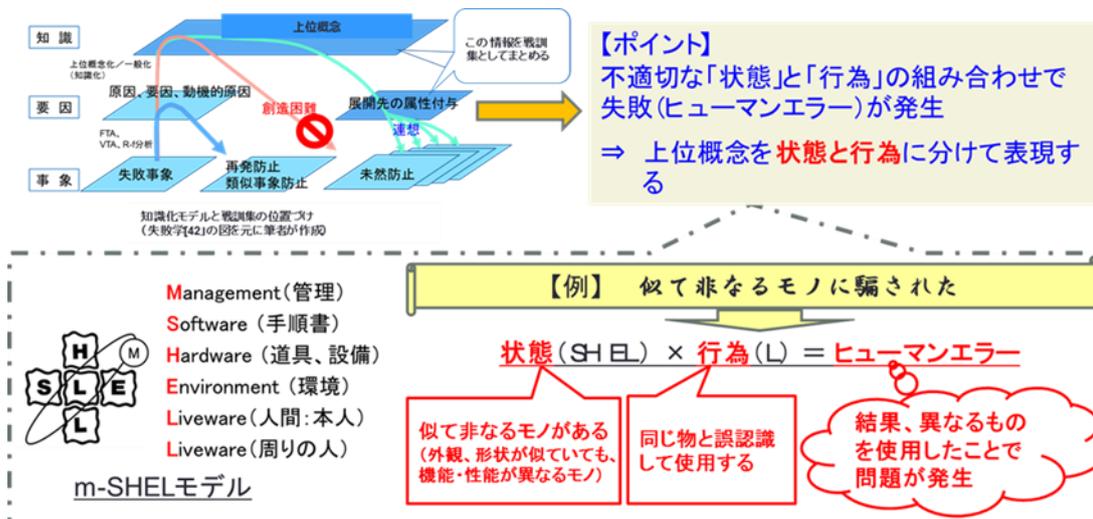


図 5.9 上位概念の情報分解

表 5.8 戦訓集 (成功へのヒント集) 抜粋

分類	上位概念		想定される結果 (失敗)		未然防止の考え方
	原文	SHEL Lモデルへの分解		SHEL × L = 失敗 (ヒューマンエラー)	
		不適切/不安全な状態 (SHEL)	不適切/不安全な行為 (L)		
6 誤解 (ミスタイク)	③『適切か』『問題ないか』は個人によって程度が異なる。	『適切か』『問題ないか』付きの指示がある	自身にとって、簡単な方を選択する	本来の指示と異なる作業を行い、失敗を招く	<ul style="list-style-type: none"> <li>・【管理面】標準、手順書では、『適切か』『問題ないか』の判断基準を使わない。</li> <li>・【個人面】『適切か』『問題ないか』の判断基準に相違がないか、指示側と受側で意見交換し、認識合わせする。また、文書指示へ反映する。</li> </ul>

(4) 試行と評価

表 5.8 に示す戦訓集から代表 2 事例を筆者が勤務する会社で試行した結果、図 5.11 に示すリスク抽出と改善（未然防止策）を行うことが出来た。

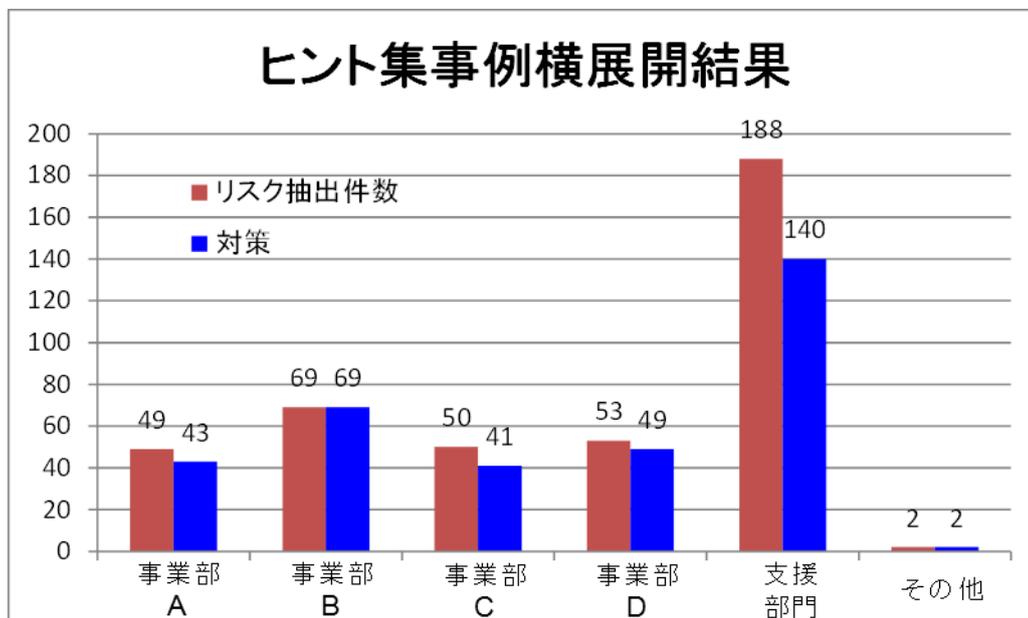


図 5.11 2017 年度 ヒント集事例横展開結果

また、アンケート調査（下記項目）によって戦訓集の効果を確認した。

- ① 上位概念化した戦訓表現を“状態”と“行為”（SHEL 観点）に分けることによって意図が通じ易く（分かり易く）なったか？
- ② 戦訓よりリスク抽出（改善立案）し易いか？

結果、図 5.12、図 5.13 に示す通り。

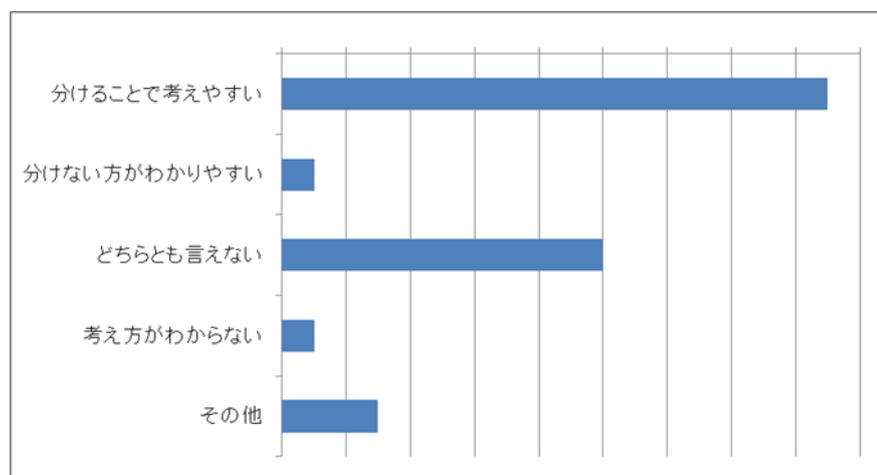


図 5.12 設問①のアンケート結果

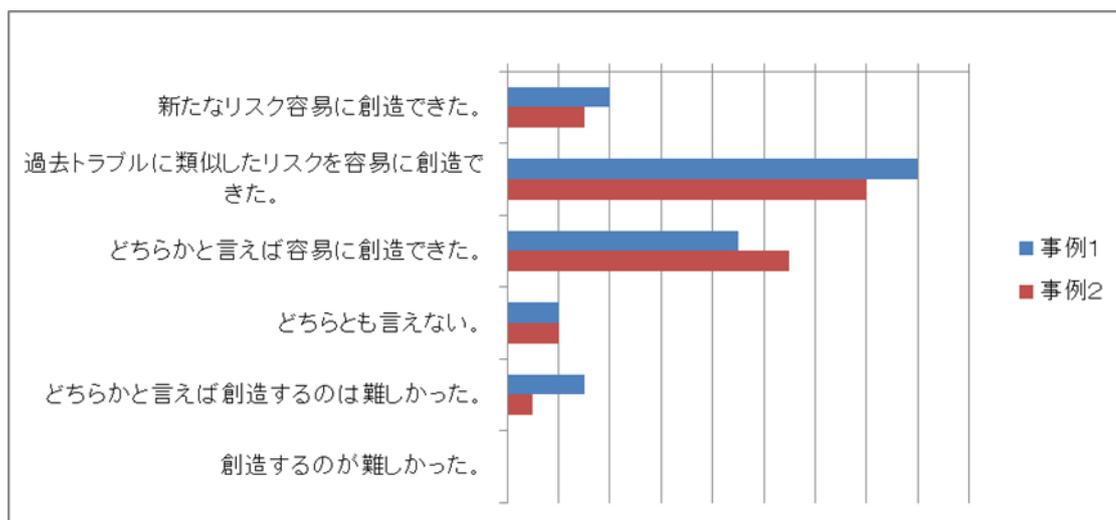


図 5.13 設問②のアンケート結果

アンケート結果より多くは“分かり易い”“リスク抽出し易い”との意見であり、この形式による戦訓集の活用は有効であると評価した。一方で“どちらとも言えない”“難しい”との回答もあり、意見として下記を収集することが出来た。

- リスク分析に慣れた社員でないと上手く検討できない
- SHEL モデルを持ち出して展開する利点分からない
- 表現を一般化しすぎており、事例が分かり難い
- 用語が少々難しい

戦訓集を汎用的に活用するために、上記意見を参考に内容を見直すこととした。

(5) イラスト化による理解度向上

SHEL モデル等の専門用語を無くし、文章、単語の意図を分かり易く表現すること等のポイント（下記）を意図して戦訓集をイラスト化させることで、理解度向上を図った（図 5.14）。

- イラストで状況を伝えやすくし文章を少なく
- 短時間で情報把握しやすい様、ワンページにまとめる
- 失敗事例は 4 コマ漫画で起承転結を意識したシナリオ
- 周囲のエラーリスクに気付きやすい様、SHEL モデルの状態リスクに着目
- リスクへの対応は考え方を示すに留まり、具体的な策は読み手が検討、決定できるように（各組織でルールが異なるため）

成功へのヒント集 “言葉のワナ”

- 『適切な』とか『問題ないように』といった、曖昧な表現で作業を指示すると、受け側は自分の解釈で作業を実行します
- 指示側と受け側での認識相違によって、ヒューマンエラー事象が発生します

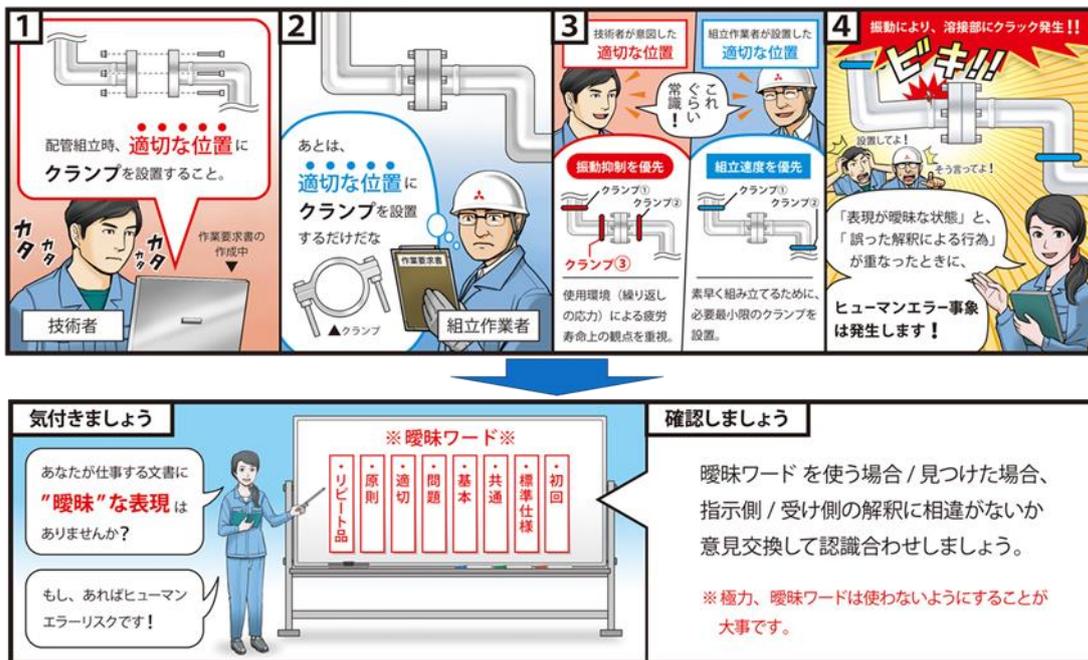


図 5.14 戦訓集イラスト化（成功へのヒント集）

## 5.2.3 評価

戦訓集（ヒント集）は筆者が勤務する会社において、試行・検証を行っている。2017年度は表形式の戦訓集（ヒント集）で、2018年度以降順次イラスト化した戦訓集（ヒント集）を整備してきたことで、リスク抽出件数を増やすこと出来ている（図5.11）。

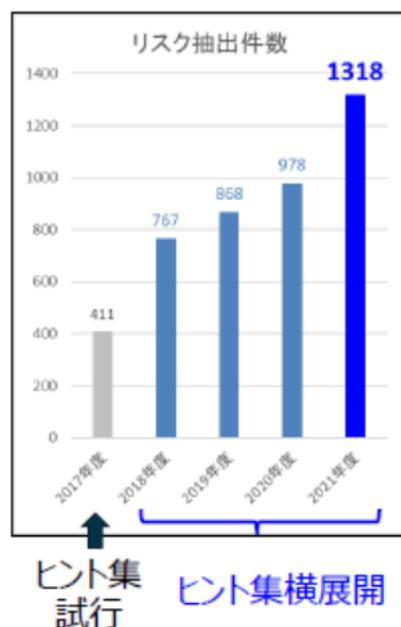


図 5.15 戦訓（ヒント集）活用によるリスク抽出件数

これは従来気づけないヒューマンエラーリスク（ワナ）を戦訓（ヒント集）活用によって抽出することが出来ており、まずは有効な手法と評価している。

また、レジリエンス効果を高める狙いとしても、戦訓（ヒント集）を活用し現場レベルのブリーフィングで危険予知することで、職場のコミュニケーション、チームワーク、リーダーシップの働き促進による現場力向上が期待できる。

そのため、この戦訓を多くの職場で活用してもらうために活用ガイドを作成した[図5.16]。個人が感じるリスクはその組織にとって必ずしもリスクではなく既にノウハウが存在している可能性がある。これは2.4章で述べたように、QMS上のヒューマンエラー防止の観点として標準化（文書化）と作業者の力量管理があるが、これらの管理対象にならないベテラン作業者の暗黙知として当事者だけの戦訓となっている知見がある。職場チーム内において戦訓（ヒント集）よりリスクを抽出したときに、まずはそのリスクを共有することが大事だと考える。リスクを共有することで職場の他の作業者にとってもリスクなのか、既にリスクに対応するノウハウが存在するのかが分かる。その情報共有の過程が職場のコミュニケーションを活発化させ、チームワークを促し、リーダーシップの働きを促進させる効果につながるものと考え。このレジリエンス効果の測定と評価は今後の課題として取り組んでいく。

## 成功へのヒント集 活用ガイド

『成功へのヒント集』は全部門の社員が自分たちの業務に潜んでいる  
トラブルリスクを見つけ出し、改善するためのヒントを示しています。

過去の失敗を  
会社の財産として  
未然防止に活かす…

それが、この  
『成功への  
ヒント集』です!!

成功へのヒント集 “営業のワナ”

POINT 1 失敗知識のサマリを冒頭で紹介

POINT 2 ありがちな失敗事例をイラストで紹介

POINT 3 トラブルリスクを明示

POINT 4 改善の考え方を補足

これを見て、  
自分でもやりそうだなって  
気付くことが大切なんです

その気づきをヒントに  
することで自部門の業務  
リスクを連想し易くなります

個人の  
気づきは、  
それが本当にリスクなのか、  
関係者でディスカッション  
することも重要です

これはリスクだ

リスクを抽出

組織でディス  
カッション

予防処置策

関係者全員がリスクと  
感じるのであれば、  
意識高く未然防止策の  
実行に繋げられる。

知見の共有

すでにリスク低減の  
知見があれば有識者  
から全員に共有出来る。

例えば、  
タスクブリーフィング、  
RKY、朝礼のような  
作業前のミーティング時に  
成功へのヒント集  
から1事例用いて  
みんなで作業上のリスクと  
未然防止策について意見交換  
すると良いかも知れませんね

図 5.16 戦訓（ヒント集）活用ガイド

### 5.3 まとめ

本章ではベテラン作業員暗黙知の形式知化として二つの手法を立案し有効性を評価した。

まず、作業員の暗黙知を工程 FMEA でヒューマンエラーリスクアセスメントを行うにあたり、SHEL モデル観点の格付けテーブルという形で暗黙知の情報を形式知化した。これにより客観的にヒューマンエラーリスクを見積もることが可能となり、リスク優先度に応じて改善策をとることでヒューマンエラー事象の抑制効果を新型ロケットエンジン開発の供試体製造で確認することが出来た。今回は“精密機械加工工程”と“手溶接工程”で検証したが、今後他の工程用にも格付けテーブルを整備していく。この格付けテーブルを用いた工程 FMEA によるリスクアセスメントは新型ロケットエンジンの開発が完了し量産フェーズに移行したあとも、設計変更や工程変更時の評価に活用することで、人の移り変わりによる評価レベルの低下を防ぐことも期待できる。

次に汎用的な戦訓として形式知化し現場レベルで活用可能な戦訓集（ヒント集）を失敗学の観点を取り込み作成し、従来気づけなかった、リスク抽出ができていたことを試行・検証を通して確認した。今後、ヒューマンエラー事象抑制効果や狙いとするレジリエンス効果との相関を検証していく。

# 第6章 品質意識を優先する最適 教育計画の考察

## 6.1 はじめに

航空宇宙産業製品の品質が作業者の力量に委ねられている以上、作業者の状況判断に基づく行為のアウトプットが品質に大きな影響を与える。3項、4項で述べた通り、人間の行動をSRKモデルで区分すると、力量を有する作業者はスキルベースの行動をとることが多い。作業に習熟しているからこそ、いつも通り、反射的に行動することで、状況の変化に気づけず行動してしまうことによってエラーを起こしたり、いつも問題ないから大丈夫だろうとの思いが先行し近道行為をすることでエラーを起こすことがある。

M.R.Endsleyによる状況認識モデル [47]では状況がダイナミックに変化する中で状況を的確に認識し、将来状態を予測し、将来よい状態になるように、現在できることを行うことが求められることを解説している。ここでまず重要となるのが状況認識である。行動を行う意思決定をする際に、どれだけ正確な情報を認識できているかが意思決定に大きな影響を与える。

例えば、航空エンジン用燃焼器の部品に放電加工で冷却用の穴を加工するとしよう。放電加工は電極と加工物（金属）間の放電によって電気エネルギーを熱にかえて金属を溶かす工法である。電極側も消耗（減肉）するため、必要な頻度で電極を交換する必要がある。穴加工の場合、棒状の電極を機械側で連続的に移動させることによって、電極消耗による加工への影響を回避する仕組みとなっている。穴の寸法精度は電極の外径で決まり、また棒状の電極を回転しながら連続的に移動する際に電極が触れて加工に影響を与えないよう、電極径に対応するガイド（工具）も用いることが一般的である（図6.1）。そのため図面要求寸法を実現させるために、作業指示書では用いる電極の“外径”とガイドの“内径”を指示する。これらはマッチドセットとして、必ずセットで用いる必要がある。作業者は放電加工のセットアップを行う際に、作業指示に基づき、電極とガイドを準備し、それぞれの寸法が作業指示通りであることを“確認”してから、機械にセットし加工を行う。あるとき、いつも通り作業者が放電加工に取り掛かろうとしたところ、すでにガイドが機械にセットしてあった。作業指示に従うのであればガイドの内径を確認する必要があるが、作業者は電極の外径だけ確認し、それをセットして加工した。このガイドは別の作業者が取り外し忘れていたものであり、さらにガイドの内径も大きい、別の穴加工用のものであった。結果、電極外径とガイド内径の隙間が大きくなり、加工時に電極が触れて製品の穴径が過大に加工されるといふ不適合事象が発生した。これは作業者が作業指示と異なるガイドを用いて加工してしまったヒューマンエラーによって起こった加工不良であるが、作業者はなぜこのようなヒュー

一マンエラーをしてしまったのだろうか。作業者は既に機械に取り付けてあったガイドが加工に必要なものであるという思い込みによって、ガイドの内径を確認する行為を怠った。なぜなら、“この機械ではいつも同じ部品を加工しており、いつも同じ電極とガイドを使用している”と考えていたため、外観上からは内径を判別できないガイドを見て“正しいもの”という思い込みにつながった。一方、別の作業者が別の製品の穴加工をこの機械で行っていたという事実（“状況変化”）に気づけなかったことも要因である。つまり、本来加工後は取り外されているべきガイドが機械にセットしてあったという、いつもと異なる状況変化があったにもかかわらず、それを異常と認識せずに、正しいものとの思い込みで、近道行為（ガイド内径の確認をしない）につながりヒューマンエラーになった。これは状況認識に問題があったことを起点とし以降の意思決定から行為の実行が間違った方向に向かった結果、ヒューマンエラー事象となった例である。

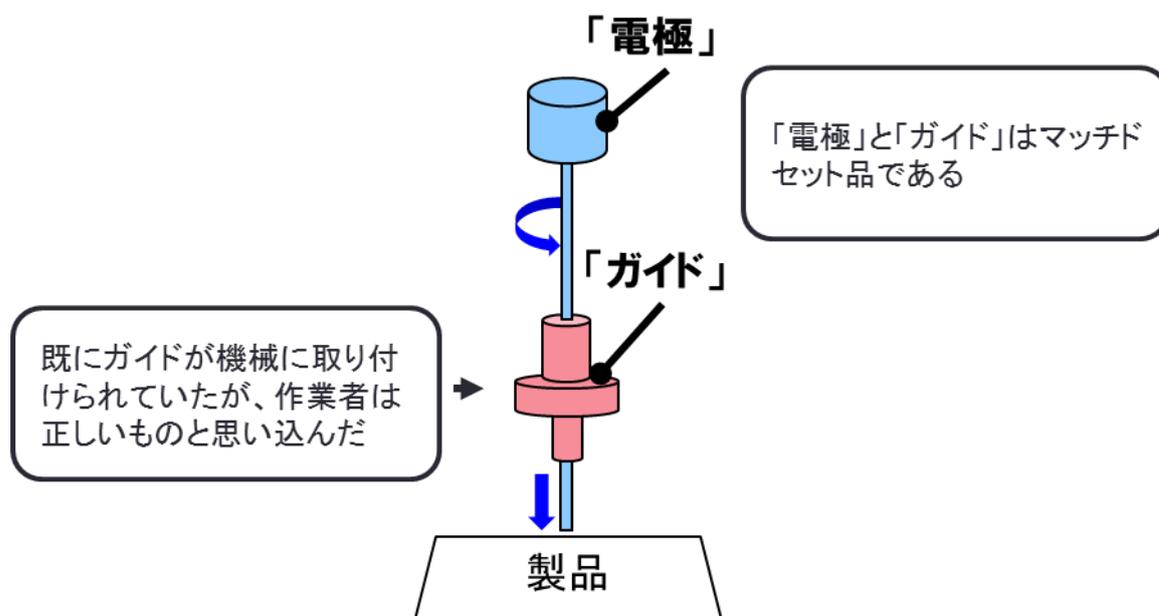


図 6.1 放電加工による穴加工形態

ここで重要なのは、異なるガイドであることに気づけるチャンスを逃した点にある。作業指示は“ガイドの内径を確認する”ことになっていたが、本人の思い込みによりその作業を怠った。内径を確認すれば、異なるガイドに気づけ、正しく作業を行い、加工不良も起きなかった。その判断ミス、つまり意思決定に問題がある。意思は状況認識に基づく情報と、知識経験を基にする情報から、当人のゴール、目的に対する予想や期待によって優先順位付けされ決定される。この例の場合、ガイド内径を確認する行為の優先度が低かったものと考えられるが、確認行為とは作業のアウトプット（この場合、被加工品の状態）に何ら影響を与えるものではない。つまり、確認をしてもしなくても状態は変化しない。すでに正しい状態

にあると思ひ込み、時間的ストレスや生理的ストレス（疲労等）といった他の要因への対応を優先すると、確認行為の優先度が低くなり、作業者は目的に向かって近道行動をとり、次のタスクへ移るだろう。

ただし、一つのヒューマンエラーが結果的に大きな問題につながるリスクがある。特に航空宇宙製品の機能は飛行であるが、飛行してから異常に気付いても対応すべき手段は限定される。航空宇宙産業では品質を第一に、地上（製造、整備作業）でやれるべきことをやるという意識を最優先に意思決定し行為を実行すべきである。このような意識づけを“飛行安全（または航空安全、製品安全）”という概念で、航空宇宙産業では関連法令、過去の戦訓等を定期的に社員へ教育する仕組みを QMS で設けている。

レジリエンスエンジニアリングでは実務者（作業員）の必要な要素に“テクニカルスキル”、“ノンテクニカルスキル”、“高い使命感・倫理観の向上”を示している[5]。QMS で行われる飛行安全・品質教育による意識向上を、上記“高い使命感・倫理観の向上”への対応と位置づけ、その教育のやり方を改善することで作業員の意識を高め、周囲への配慮、声掛け等の気づき、コミュニケーション、チームワークといったノンテクニカルスキルの働きを促進し、レジリエンス効果を高めることを狙いとする。

従来の意識レベルの調査では、意識を一定のレベルに維持することが難しいことが分かっている（図 6.2）。この図は毎月社員アンケートによって飛行安全・品質を意識して仕事しているか 5 段階評価で調査した結果を示す。毎年 11 月の全国品質月間に合わせて各種教育や講演会等の行事を行うため、12 月は意識向上の傾向を示すが、他の月はほぼ横ばいの傾向を示す。教育を行えば意識を高める効果があるといえるが、教育の範囲は広く、教育には時間とコストもかかるため、そのバランスを取った最適な教育を行うことで、作業員の品質意識を一定のレベルに維持し、組織全体の飛行安全文化を醸成させる効果が期待される。

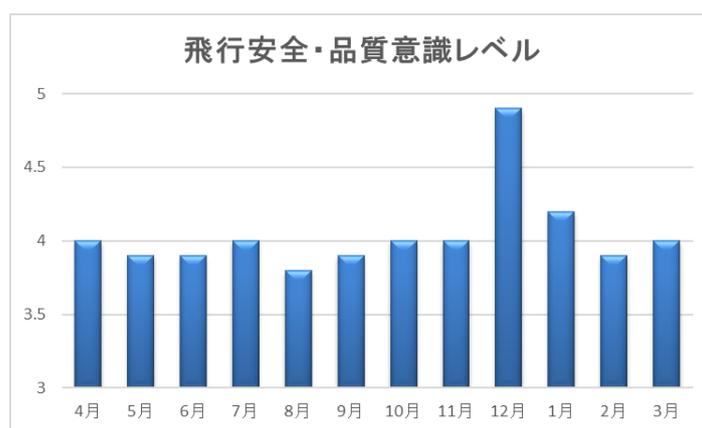


図 6.2 月毎の意識レベル（6.3 章 表 6.1 No.2 質問のアンケート回答）

本章では、人のパフォーマンスに大きな影響を与える状況認識と意思決定、それらに影響する意識の位置づけを M.R.Endsley の状況認識プロセスを通して考察し（6.2 章）、教育の

有効性を評価するためアンケート調査による飛行安全・品質意識の見える化とモニタリングの手法を確立し（6.3章）、作業者の意識を一定のレベルに維持するうえで、学習と忘却（時間経過による意識の低下）のプロセスをシステムの故障とその保全のために構築された確率モデルを用いて表現し、最適な教育計画を検討する（6.4章）。

## 6.2 状況認識と意思決定

航空宇宙産業の多くの製造工程は、自動車や家電製品の工程と異なり作業者の力量に依存する。一般産業のライン工程は期間工のような経験が浅い作業者でもバラつきなく、要求を満足するアウトプットを出せるよう作業工程がカラクリ化されている。

筆者が大手自動車メーカーのエンジン組立ラインを見学させてもらった際に非常に興味深いお話をご教授いただいた。まず、大衆車（大量生産）のエンジン組立ラインでは、作業者の手が届く範囲（横120mm×高さ800mm×奥行80mm）の空間に工具が設置され、ベルトコンベアや傾斜のついた棚から部品が視界の中に流れてくる。作業手順は目の前のディスプレイ表示によって紙芝居のようにステップバイステップで指示され、その作業順序に応じて、取り付け部品の台が光るように工夫されている。更にボルト締結作業では設定トルク毎に色分けされた電動トルクレンチがある。作業結果は自動的に電子情報で管理されるといったように、作業経験の無い作業者でも安定した作業ができるように仕組化されていた。一方、高級スポーツカー用のエンジン組立現場は全く逆の形態で、全てが作業者の力量に委ねられる手作業であった。一つのエンジンに一人の専任作業者が担当し、組立、試験、調整まで一貫して行う。作業者は“匠”と言われる社内資格を有し、知識、経験を有するもののみがその資格を有す。専用のユニフォーム（作業着）を着て、工場の中でも一目置かれた存在である。高性能エンジンであるがゆえ、個々の部品の仕上がり状態から組立・調整のバランスをとらなければいけない等、難易度が高い作業であるため、自動化できず、人の判断に頼らざるを得ない作業であることから、手作りでエンジンを製造しているとのことであった。実際に“匠”の資格を有する作業者の方からも意見を聞かせて頂くことが出来たが、自社の製品を愛し、何よりも車が大好きでモチベーション高く仕事に取り組む姿勢を感じることができた。この会社の高級スポーツカー用のエンジンは見学当時1200台ほどの生産実績があったが、不適合はゼロということであった。このように手作業の工程であっても知識、経験、さらに高い意識を持つ作業者であると品質を安定させることができていることが分かった。

航空宇宙産業の製造工程も、作業者の意識に頼るところが大きい。本章では、その意識と作業品質への影響について考察し、意識を一定に保させるための一つ的手段である社員教育の必要性を論じる。

上述した経験の浅い期間工でも安定した作業ができるようにカラクリ化されたライン工程とは異なり、作業者の力量、意識に依存する作業工程では、個々の部品の状態、仕上がり、機械の状態および各種表示類の状態、他作業者との連携等々といった状況がダイナミック

に変化する。例えば、耐熱合金の高難削材の機械加工において、作業者は機械の表示（回転数、送り量等）だけではなく、加工音、切り粉の状態などにも気を配り、作業の適切性を判断している。このように状況がダイナミックに変化する中で状況を的確に認識し、将来状態を予測し（先読みし）、将来よい状態になるように、現在できることを行うことが求められる。M.R.Endsley の提案する状況認識モデル（図 6.3）では次の三つの状況認識のステップがポイントとなる[48]。

レベル1：まず、現在の自分を取り巻く状況を知覚（percept）する。

レベル2：次に、気づいた状況がどのような意味をもつのかを理解（comprehend）する。

レベル3：そして、その状況が将来どのように展開するかを予測（project）する。

その後、予測された将来の状況に対して、現在どのような手を打つべきかを決め（decide）、決めたのであればあとは粛々と実行（act）する。すると、その実行により状況が変化するので、それを遅滞なく近く（percept）し、以下、上記のプロセスを繰り返していく。

6.1 章で紹介した放電加工のヒューマンエラー事象でいえば、ガイドが既に機械にセットされていることに気づき（レベル1）、それがこれから行う作業のガイドであるものと思いつき（レベル2）、電極外径だけ確認し取り付ければ要求寸法を満足する穴加工ができると予測する（レベル3）、その予測に基づき、やるべきことを決め（decide）、そして実行（act）した結果、予測に反して穴径が過大になったということであり、これはレベル1から3の状況認識の時点ですでにワナにはまっていたと言える。

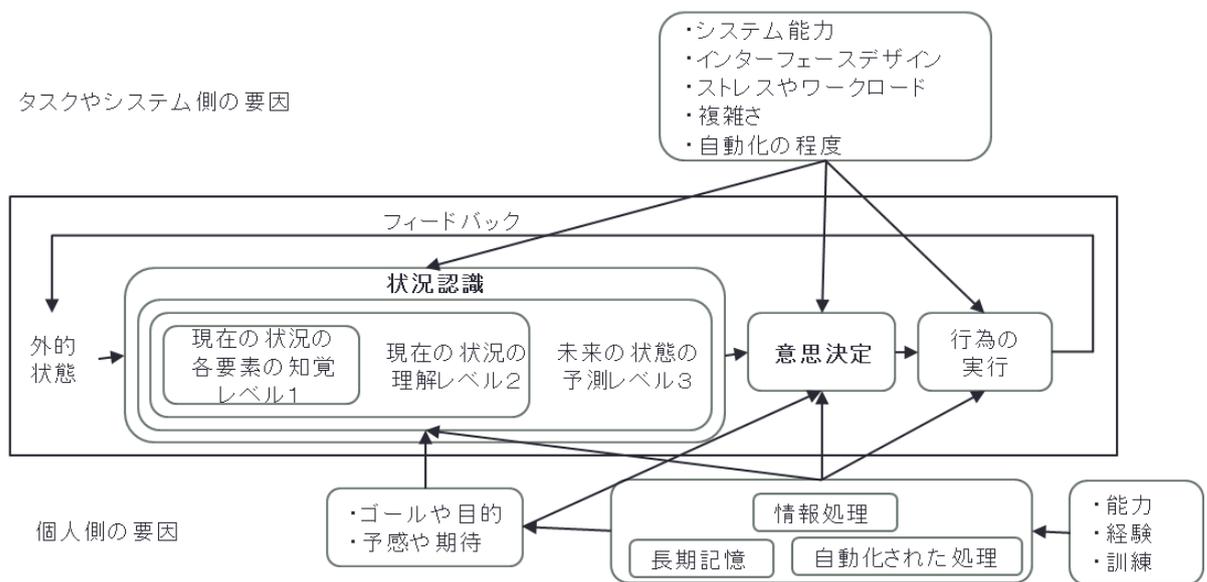


図 6.3 状況認識モデル (M.R.Endsley)

## 6.2.1 状況認識レベル1：情報の収集

Endsleyはこの最初の段階を「現在状況の要素の知覚」と呼んでいる。製造現場では、製品、装置、モニター画面、各種文書、製品・装置の状態、気象状態、同僚の行動といった視覚的情報や、警報、同僚からの会話、装置の音、背景雑音といった聴覚情報が相当する。作業者は基本動作として従事しているタスクにおいての作業環境の状態とタスクの進捗をモニターするために、自分を取り巻く世界から情報を集めている。この情報収集でヒューマンエラーを起こす理由として下記の問題が存在する。

- 情報を入手できない
- 情報を検出／知覚することが難しい
- 情報を探索または観察しない
- 情報を誤認する

これらの問題は、注意の意識（範囲）が狭くなることで発生する。ある状況において、1つのことに気を囚われてしまうと、他のことには注意が向かなくなってしまうことを意味する。心理学では人間の知覚と記憶システムの不完全さを解説する文書が多いが、動的に変化する環境においては変化に気づかないという現象がある。例えば、同じ映像が提示されている間、観察者は鍵となる要素が変化してもそれに気づくことができない。持続注意の盲点（sustained attentional blindness）についての研究では、観察者に対しバスケットボールの試合のビデオにおいて、白のユニフォームを着たチームと、対する黒のユニフォームを着たチームのゲーム中に白のチームが何回パスしたか数を数えることを要求すると、ゴリラの着ぐるみを着た第3者がコートの中を横切っても、観察者はボールの動きを見ることに没頭し、ゴリラに全く気付かない事例がある[49]。製造工程においても作業者が初めて組む同僚の手つきが気になる等、意識が目の前の作業以外のことに向くと、いつも通り作業しようとする目の前の状態が僅かに変化していても気づけずにヒューマンエラーにつながることもある。また、“心ここにあらずという”言葉は何かを気に取られていて目下の事案がおろそかになっている様子を示し、集中力を欠いた状態という意味でも使われる。これは心の漂流（mind wandering）と言われるが、自己モニタリングをしている状態を示していると研究されている。Smallwood and Schoolerは「注意の崩壊（zoning out）」と呼ばれる心の漂流について研究した。これは我々の心が、いま行っているタスクから「無関係な内なる考え、空想、感情とほかの物への思いに向かって」漂い流れていくときの典型例であり、一般的な体験でもある[50]。筆者も自転車運転時に考え事をしていていつのまにか景色が変わっておりワープしたような錯覚に陥ることがある。作業者も慣れた作業だと、他の仕事の段取りを考えたり、仕事とは全く関係のないプライベートのことを考えたり、心が漂流し、自己モニタリングの状態に入ると目の前の状態変化に気づけないだろ

う。このように状況認識レベル1：情報の収集のフェーズでは必要な情報を入手できないリスクがある。

### 6.2.2 状況認識レベル2：情報の解釈

ここで何が起ころうとしているのか、現在の状況に意味を与えるために、収集した情報と長期記憶に蓄えられた知識からパターンマッチングをして情報を解釈する。このプロセスは迅速かつほとんど意識なく処理され、ベテラン作業者は自動的になされるように感じられる。SRKモデルで言う、スキルベースの行動パターンである。しかし、この情報の解釈は、それ以前に受け取った情報、文脈、他の要因によって容易に歪められるものでもある[51]。実作業においてベテラン作業者は技術/作業指示書の要求事項を確認し、工具や部品を準備し、その状態を観察し、周囲の状況等から情報を入手し、その意味を理解する。この分類と理解のプロセスは、ある特定の手掛かりの組み合わせとその意味を表す知識構造である「メンタルモデル (mental model)」により促進される。初心者はメンタルモデルをほとんど持っていないため、システム的な分析とありうる解釈との比較プロセスにより兆候パターンを理解すべく、多くの時間と精神的なエネルギーを使う。ベテラン作業者も異常な事態に遭遇すれば同じである。このメンタルモデルは所定の状態の特徴に期待も含めて形成される。これは確実にその特徴を確認せずとも周囲の状況から、ほぼそうであろうという期待を意味する[52]。つまり、メンタルモデルは新しい情報の選択と解釈を方向付ける効率的なものであるが、間違っただけのモデルが活性化あるいは形成されると問題となりうる。この問題を「確認バイアス (confirmation bias)」とも言う。これは、現在の状況に対してモデルは実際には誤っているが、入ってくる情報はこのモデルに適合すると解釈される (モデルに適合するように「事実を曲げる」というものである。適合しない兆候は無視されるか、拒絶されるか、うまく取り繕われる[53]。情報の収集でいつもと違う状態に気付けたとしても、確認バイアスによって何かしら理由をつけて異常ではないと解釈してしまうことがある。筆者は仕事で初めて訪問する会社に自動車で移動した際に、同じ名前の別の会社に着いてしまったことがある。原因はカーナビの設定時に同じ名前でも間違っただけの会社を設定してしまったことによる。ただ、そのときは念のため正しい会社の周辺地図をプリントアウトして持っていた。現地近づいた際に、カーナビが示す地図と、手元の地図が合致しないことに気づいたが、筆者は自分が設定したナビを信じ込んでおり、後から思い返すと手元の地図を回転させ向きを変えながら必死にナビの地図に合わせこんでいたり、手元の地図に記載されるスーパーが目の前の景色とナビ画面に現れないことに対して、手元の地図が古く、スーパーは既に取り壊されているものと勝手な理由をつけて納得していたりと、正に確認バイアスによるヒューマンエラーを起こしており、人間の特性の恐ろしさを実感した。

### 6.2.3 状況認識レベル3：将来状態の予測

レベル2情報の解釈のあと、次に何が起こるのかを考える。状況を解釈し、それが何を意味するのかを理解し、過去の経験により蓄積された知識を用いることによって、今後、状況はどのように展開するかという、将来の予測が可能になる。Sarter and Woods (1991) はこれを「将来のシステム状況と、不意打ちを食らわないようにするための行動のメンタルシミュレーションである」と述べており、「一方で、結果として予測することによって気を配る範囲を限定することができ、知覚が容易になるかもしれない。つまり注意を適切に割り当てることができる。一方、予測で期待できないことを無視したり、誤解するリスクも含む」とも述べている。将来状態の予測は、如何に周囲の情報を正確に収集できるか、その情報が意味するところが如何に正確に解釈・理解できるかによって、予測の精度が大きくばらつくということの意味している。

### 6.2.4 意思決定

意思決定 (decision-making) は、状況から必要なことに合わせて、行動路線 (course of action) と通称される対応方針を、とりうる選択肢のなかから選ぶことと定義される [15]。作業を取り巻く環境を継続的に監視し、評価を繰り返して更新し続け、その評価に基づいて適切な行動をとるサイクルが回っている。意思決定を行うに際しては、時間的プレッシャー、実行すべきタスクの難易度等、当初の計画と現状からの見通し (将来状態の予測)、制約条件、当事者への後方支援およびコントロールできるリソースなど、多岐にわたる条件が存在する。意思決定に大きな影響をあたえる因子は時間 (余裕) だと考える。意思決定をするために十分な時間があれば、作業者は直感的な判断に留まらず、ルールを確認したり、状況を分析したり、その先の展開を創造し、より確実な意思決定を行うことが出来る。しかし現実には与えられたタスクの量と変動する周囲の状況、疲労やストレスを軽減するために効率化を優先した判断を行ってしまうことは否めない。このストレスの影響によるベテラン作業者のヒューマンエラーリスクへの対応については4章で述べた通りである。また、多くの作業はチームで行う。この場合、拙いコミュニケーション、基本動作・価値観のばらつき、不十分な状況評価、権威勾配や同調への圧力といった要因によって更に意思決定に良くない影響を与える。チームメンバーがお互いのパフォーマンスをモニターしあい、知識や情報を出し合い、意見や提案を交わし、互いにフィードバックを与え合うといったチームワークが必要となる。このような働きを促進させるためにもベテラン作業者の暗黙知を形式知化し共有し活用することを本論文では提案したい。なお、何を優先し意思決定すべきかを個人の意識に頼るべく、航空宇宙産業では飛行安全といった表現で品質意識の向上を図っている。飛行安全とは製品安全と同種の概念であるが文字通り航空機やロケットが安全に飛行し事故を防ぐことで搭乗者や周囲の安全を確保することである。そのために、一つひとつの作業を確実に実行すること、常にリスクを抽出し改善すること、異常を発見したら

作業を止めて状況を共有し対処することなどといった行動指針につなげて啓蒙している。これによって作業者が意思決定を行う際に最優先すべき事項を飛行安全の確保とすることで、ヒューマンエラーの未然防止を図っている。

#### 6.2.5 意識が与える影響と意識向上の取り組み

Endsley の状況認識モデル (図 6.3) より意思決定には状況認識に加えて、タスクやシステム側の因子や個人側の因子の影響も受ける。ここで状況認識を誤ったとしても、“念のための確認” 行為を行えば、状況認識を正確に行うことが出来て、正しい意思決定と行為の実行につなげることが出来る。このやらなくてもタスクの実行に直接影響ない、“念のための確認” のような慎重な意思決定の優先度を向上させるために品質意識を常に高く維持する必要がある。意識は能力、経験、訓練によって身につけた、自動化された処理と長期記憶の情報を処理して意思決定にインプットされる因子である。よって、品質意識を高めるには、本人の能力、経験に加えて積極的な訓練 (教育) によって意識を高めていくことも必要である。なお、品質意識向上の教育を行ったとしても、その効果を測定できなければ有効性評価ができない。そこで、筆者の勤務先においてアンケート調査による意識の見える化を実践した。

### 6.3 意識のモニタリング

これまで毎年11月の全国品質月間（日本科学技術連盟、日本規格協会、日本生産性本部、日本能率協会が主催機関となり、1960年から続く品質意識の高揚を目的とした活動）で、2013年から年に1回品質意識のアンケート調査をしてきたが、2020年から意識をモニタリングする上で、アンケート調査の頻度を月1回に設定した。筆者が勤務する事業所では約4800人の従業員が航空宇宙製品の製造・サービスに関わっており、毎月全員にアンケート調査を行うと、調査、集計作業の時間、費用がかかるため、月次アンケートはサンプリング調査とし、統計手法を用いて組織（部単位）ごとに意識の程度を表示する形とした（図6.4）。

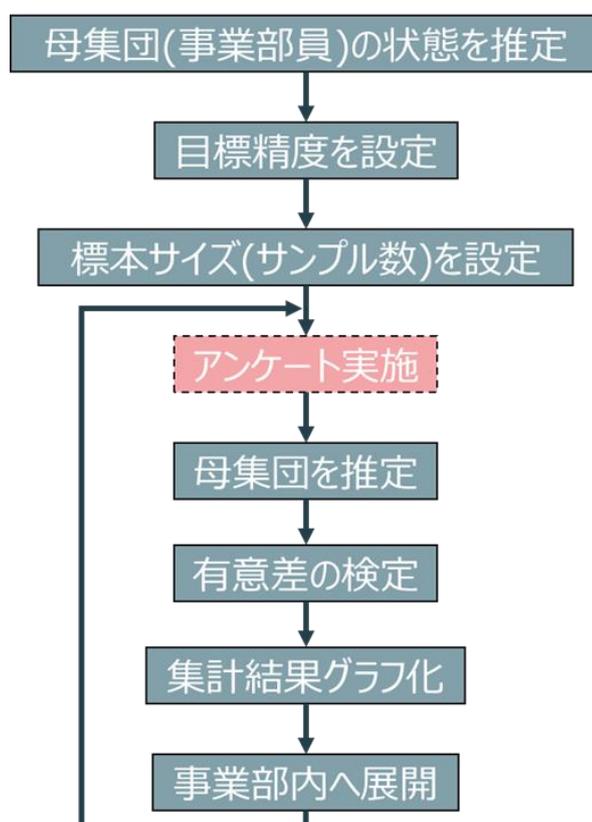


図 6.4 意識調査アンケートの実施フロー

調査内容は優先すべき飛行安全、品質の意味を理解しているか、日常の業務でその意識を持っているか、意識を行動に反映しているかといった内容で設定した（表 6.1）。

表 6.1 飛行安全・意識アンケート調査質問

No.	質問	選択肢
1	飛行安全、品質という言葉の意味を理解していますか？ (理解度)	1～5 (低→高)
2	飛行安全・品質の意識をどの程度持っていますか？ (意識度)	1～5 (無→強)
3	飛行安全・品質の意識をあなたの仕事に反映し 行動できていますか？ (行動度)	1～5 (無→強)
4	具体的にはどのような行動ですか？	自由記述

まず、母集団（従業員）の状態を推定する上で、2019年度品質月間時のアンケート結果を用いた。

- 従業員数 4800名（アンケート回答者数 424名）
- 意識度 1~5点、平均 4.82、ばらつき（分散）0.18

次に目標精度を設定する上で、信頼精度と調査の負担低減を両立させるため、部単位の目標精度として、標準誤差 0.1、信頼区間 90%と設定した。

次に目標精度をもとに、標本サイズ（サンプル数）を設定するが、各部で従業員数が大きくばらつく（製造部部門は千人単位であるのに対し、営業部門は数十人等）ので、回答回数は年間最大3回/人として部門ごとに月次サンプル数を設定した。達成精度（誤差）は0.03~0.19となるが、誤差が大きい契約、支援部門は、直接モノづくりに関与しないため、本論文対象である製造工程のヒューマンエラー評価には影響しないものと判断した（図 6.5）。

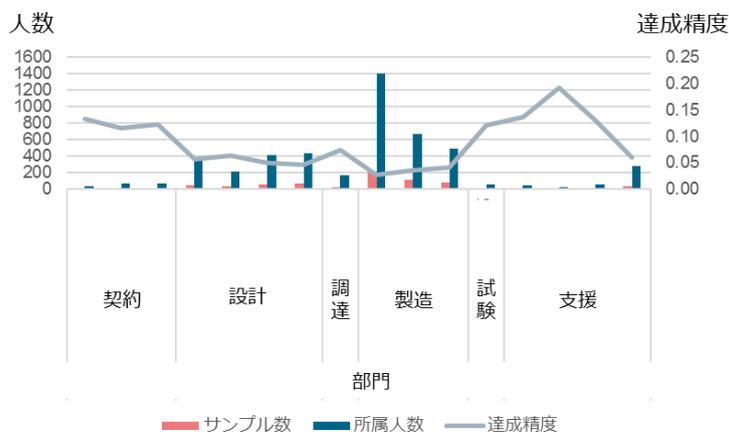


図 6.5 設定したサンプル数

収取したアンケート結果より、母分散  $\sigma^2$  を未知とし、95%信頼度の信頼区間を推定した。

$$\text{信頼区間} : \bar{x} - t(\emptyset, \alpha) \times \frac{\sqrt{V}}{\sqrt{n}} \leq x \leq \bar{x} + t(\emptyset, \alpha) \times \frac{\sqrt{V}}{\sqrt{n}}$$

$$t \text{ 分布による母平均 } \mu \text{ の信頼度 } 1-\alpha \text{ の信頼区間} : -t(\alpha) < t = \frac{\bar{x}-\mu}{\frac{\sqrt{V}}{\sqrt{n}}} < t(\alpha)$$

平均値の検定により、先月と調査月の有意差の有無を評価した (図 6.6)。

帰無仮説 : 有意差無し (傾向は同じ)

対立仮説 : 有意差あり ( $\bar{x} \neq \bar{x}_1$ )

$$\text{検定統計量} : t = \frac{\bar{x}-\bar{x}_1}{\frac{\sqrt{V}}{\sqrt{n}}}$$

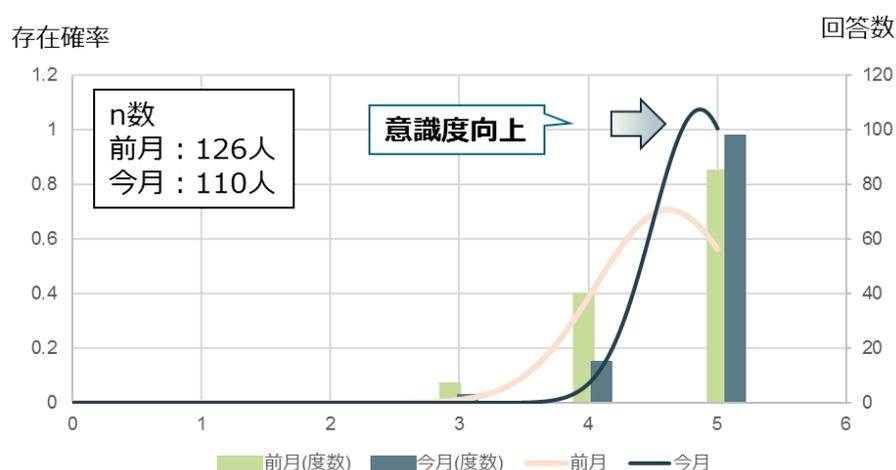


図 6.6 t 分布による母平均  $\mu$  の信頼度  $1-\alpha$  の信頼区間

最後にデータをマネジメントへフィードバックさせるべく、部門ごとに意識の状態と先月からの変化を分かりやすく表示するよう見える化を行った (図 6.7)

上述のようにアンケート調査によって意識が見えるようにすることで、意識向上の取り組みの有効性と QCD 監視指標との相関を評価することが出来るようになり、意識向上の教育によるヒューマンエラー事象抑制の取り組みを体系的にマネジメントすることが出来る (図 6.8)。

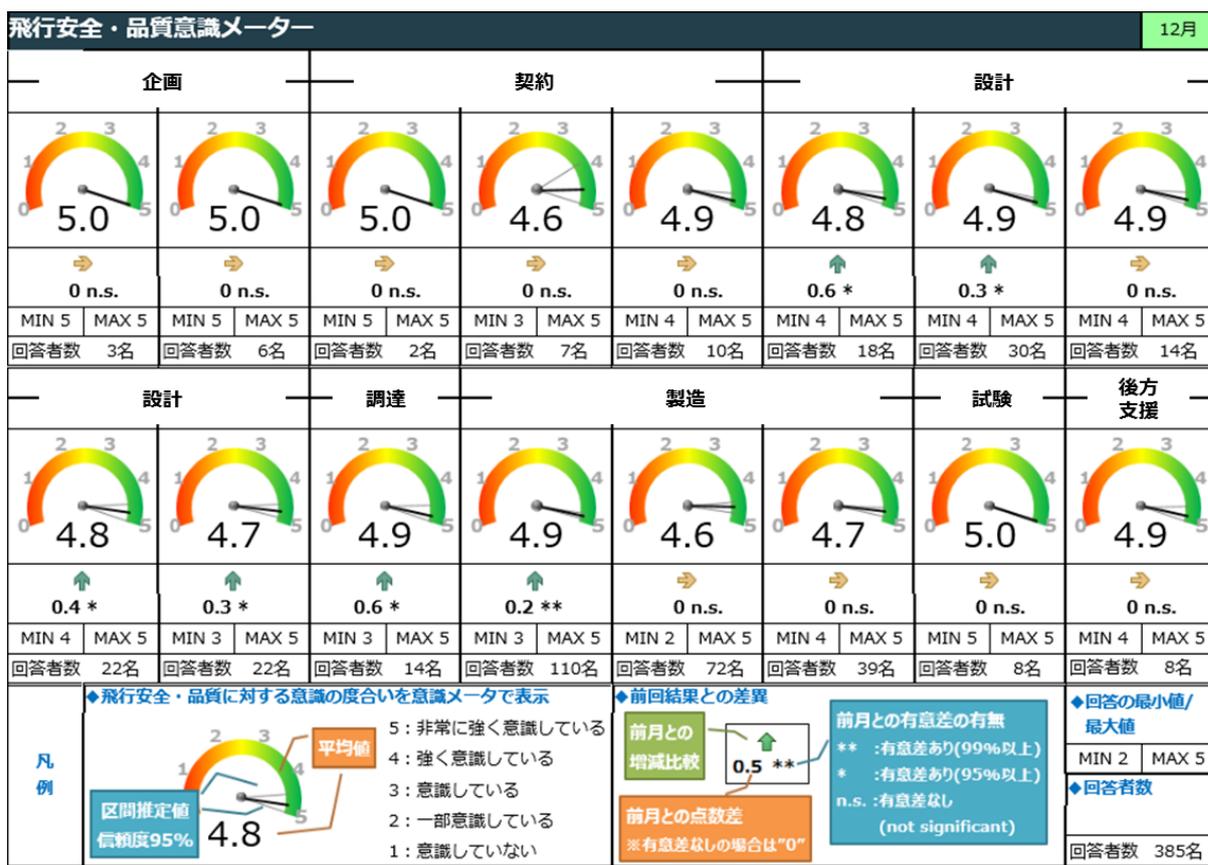


図 6.7 飛行安全・品質意識の表示

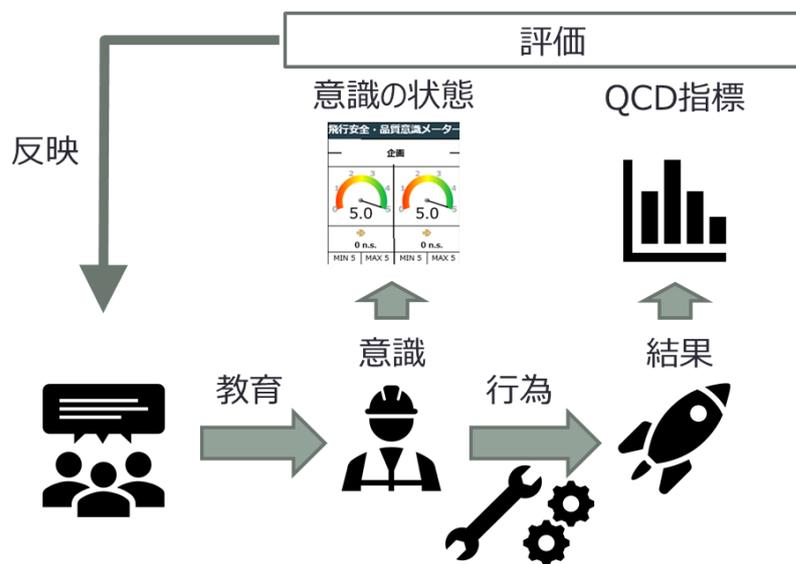


図 6.8 品質意識向上のマネジメントサイクル

## 6.4 最適教育計画

### 6.4.1 はじめに

飛行安全・品質意識を常に念頭に置くことで、状況認識、意思決定、行為の実行に至る一連の認知行動プロセスをSRKモデルのスキルベースからルールベースの行動へ変化させることが期待できる。ベテラン作業者はスキルベースで反射的に自動化された行動パターンを取る際に、ちょっとした状況変化に気づけず行動することでヒューマンエラーを招く（状況認識のエラー）、またいつもと同じといった思い込みによって確認を行わず近道行為を行うことでもヒューマンエラーを招く（意思決定のエラー）ことが多い。飛行安全・品質意識を優先すれば、状況を正確に認識する上で、念のための確認行為や、ルールで定められた項目を一つひとつ確実に行う意思決定を優先させ、それがルールベースの行動パターンとなる。

飛行安全・品質意識を向上させるために、航空機プロジェクトにおける関連法規の知識や、過去の事故や不適合の要因に個人レベルの不安全/不適切な行為（ヒューマンエラー）による影響と、そのような状況にさせない上でやるべきこと等の戦訓を教育マテリアルとして整備し教育する仕組みを多くの航空宇宙産業メーカーは有していると考えられる。教育投資と組織パフォーマンスの間には正の関係が存在することも示されている[54]。

社員教育には実務を通して指導員が教育する方法（On-JT, On the Job training）、実務ではなく研修センター等の専用設備で指導員が教育する方法（Off-JT, Off the Job training）、またその両者を複合させた職場における教材を用いた教育の3つの方法があり[62]、その一例がe-Learningである。

社員教育は、初度教育（IVET：Initial Vocational Education Training）とリマインド教育（CVOT：Continuous Vocation Education Training）の二つに分けられる[72][73]。初度教育は入社・移動時等その職場で初めて仕事をする際、または初めて専門的な仕事をする際に行われる教育であり、リマインド教育は初度教育の習得レベルを維持させること、及び教育内容の変更点を習得させることといった目的で行われる。三菱重工業、東芝といった国内大手製造メーカーは革新的な知識とスキルを要する機械、電子、ソフトウェアおよびプロジェクトエンジニアに対しこのような教育を実施してきている[57][70]。また、安全衛生やコンプライアンス管理においても労働災害や社会的なトラブルを防ぐために、このような教育を実施している。事故やトラブルは重大事象が発生する場合、その背後で中規模の事象が発生しており、さらに軽微またはヒヤリハットの事象も多く発生している。それらの規模（件数）より重大事象を頂にしたピラミッド状の比率を有することが示されている[56][61][75][76]。ここで言うヒヤリハットとは、軽微な事象で影響が小さい（被害が発生していない）事象を言うが、このヒヤリハット事象の教訓をリマインド教育で活かすことによって大規模、中規模の事象を少なくする効果が期待される[74]。ヒヤリハット事象は日常的に発生していると考えられ、それらを教育内容にフィードバックさせ維持していくことも必要となる。本論文においては4章ベテラン作業員暗黙知の蓄積と5.2章失敗学を取り入

れた戦訓集の活用がこの教育マテリアルの維持に相当する。

一般的に企業の従業員教育の投資は他のリソース、基盤維持等の投資と比較して相対的に低いと言われる。教育の定量的な評価が困難であり、費用対効果を示せないからである[60][67][55]。また、組織の従業員比率やタスク内容に応じて教育内容も変わるが、特に航空宇宙産業は生産工程を自動化出来ず、人の手に頼ったモノ作りであることから、人の力量に依存する領域が大きい分、教育量も多くなる。溶接、非破壊検査等の特殊工程では試験片の現物評価によって作業者の力量（教育成果）を担保できるが、飛行安全・品質意識教育のように基本動作に関わる教育は有効性評価が難しく、教育の内容、頻度等を明確に確立できていない。e-learningによるリマインド教育は教育準備の初度費用や維持費用が On-JT、Off-JT よりも安価であり、多くの知識を定期的に教育するには有効な方法である。

あるヒヤリハット事象のリマインド教育を行わないと、そのヒヤリハット事象に関連する品質トラブル（不適合事象等）が発生するが、リマインド教育を行わないと直ちに品質トラブルが発生するとは限らない。これは実際の品質トラブルは複数の要因が複合的、連鎖的に作用して発生することをスイスチーズモデルは示している[65]。リマインド教育と品質トラブルの間には確率的関係が存在し、リマインド教育量を増やすことで品質トラブル発生抑制が期待できる。疲労や回復などの身体的物理現象と学習や忘却などの心理的現象の両方を指数分布で表すことができる[59]。

教育受講から記憶への影響をモデル化し、実際の商用車運転データを解析することで、交通安全教育の効果とヒューマンエラーによる交通事故の定量的関係が明らかにされている[71]。交通事故の低減に影響を与える安全教育方法も報告されている[63][58]。毎月のビデオ教育と一対一の対面を含む安全運転教育方法が交通事故を有意に減らすことが出来た研究報告もある[69]。効果的な安全教育計画を開発するために、運転者の行動を把握するための質問票が開発され[64]、この質問票を用いた安全運転教育計画の有効性を構造方程式モデリング（SEM）より示されている[68]。これらの研究では実際に得られたデータを統計的に解析し、安全運転教育の有効性を明らかにしている。ただし、新しい教育計画を立案するためには教育間隔を決定する数学モデルが必要である。

本章では航空宇宙製造工程を対象とし限られたリソースの中で教育の投資と得られる効果の最適なバランスを見極めるために、経済的投資を最小化するメンテナンスモデル[77]を用いて、初度教育とリマインド教育の最適教育計画を論じる。

#### 6.4.2 Model 1

品質トラブルは初度教育を受けた直後は防止することが出来るが、その発生リスクは時間と共に増加し、一方初度教育で習得した知識は徐々に減少（忘却曲線）する。このような状況は信頼性モデルにおけるシステム故障の増加とよく似ている。よって、予防保全モデル[77]を用いて初度教育後の事故の増加をモデル化できる。

初度教育とリマインド教育（e-learning）の両方の効果を持つ基本モデルを Model 1 とし、

以下を仮定した。

- 1) 作業者を対象に初度教育及び初度教育レベルの定期教育を定期的実施する。教育で学んだ知識を忘れないように、e-learningの教育時間  $T$  ( $0 < T < \infty$ )の教育を毎日実施し、合計が  $NT$  ( $N = 1, 2, \dots$ ) になったら教育を修了する。一通りの知識の確認が完了するために  $T$  時間を要するものとし、 $NT$  で集合教育を行う。
- 2) 習得した知識を忘れることによる、不安全/不適切な行為によってヒューマンエラー事象が発生する。教育時間  $T$  が関数であるとき、その発生率  $h(t)$  は時間  $t$  とともに増加する。
- 3) 知識の忘却率は教育時間に比例する教育回数によって抑えることができる。教育時間  $T$  によって、知識忘却の時間経過が  $(1-a)t$  だけ若返るものとする。
- 4) ヒューマンエラー事象の対応費用： $c_1$ 、リマインド教育費用： $c_2$ 、 $NT$  の集合教育費用： $c_3$  ( $c_3 > c_2$ )

期待コスト率  $C_1(N, T; a)$  は Nakagawa, p178, 2005[77]より下式となる。

$$C_1(N, T; a) = \frac{1}{NT} \left[ c_1 \sum_{j=0}^{N-1} \int_{A_j T}^{(1+A_j)T} h(t) dt + (N-1)c_2 + c_3 \right]$$

$$= \frac{1}{NT} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} \left[ c_1 \int_0^T h(t + A_j T) dt + c_2 \right] + c_3 - c_2 \right\}, \quad (1)$$

where  $h(t) \equiv f(t)/\bar{F}(t)$ ,  $f(t) \equiv dF(t)/dt$ ,  $\bar{\Phi} \equiv 1 - \Phi$ , and  $A_j \equiv \sum_{i=1}^j a_i$  and  $A_0 \equiv 0$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) は毎日のe-learningの有効性を示す。 $A_j$ は信頼性モデルではメンテナンスの不完全率を表すが、この教育モデルではリマインド教育効果の不完全率を表す。 $A_j$  は実際の教育実績データを蓄積することによって算出できる。

#### 6.4.2.1 最適 Policy 1

$h(t)$  が  $t$  と共に厳密に増加するとき、固定  $T$  に対して  $C_1(N, T; a)$  を最小化する最適  $N_1^*$  を求める。不等式  $C_1(N+1, T; a) - C_1(N, T; a) \geq 0$  より

$$L_{11}(N) \geq \frac{c_3 - c_2}{c_1}, \quad (2)$$

ここで、

$$L_{11}(N) \equiv \sum_{j=0}^{N-1} \int_0^T [h(t + A_N T) - h(t + A_j T)] dt.$$

次の場合、

$$L_{11}(1) \equiv \int_0^T [h(t + A_1 T) - h(t)] dt,$$

そして、

$$L_{11}(N+1) - L_{11}(N) \equiv (N+1) \int_0^T [h(t + A_{N+1} T) - h(t + A_N T)] dt > 0.$$

これにより、 $L_{11}(N)$ は、 $N$ とともに $L_{11}(1)$ から $L_{11}(\infty) \equiv \lim_{N \rightarrow \infty} L_{11}(N)$ まで厳密に増加する。したがって、次の最適なポリシーが導ける。

- i)  $L_{11}(1) < (c_3 - c_2)/c_1$  および  $L_{11}(\infty) > (c_3 - c_2)/c_1$  の場合、(2) を満たす有限かつ一意の最小  $N_1^*$  ( $1 \leq N_1^* < \infty$ ) が存在する。  
 ii)  $L_{11}(\infty) \leq (c_3 - c_2)/c_1$  が  $N_1^* = \infty$  の場合、集合教育は行うべきではない。

#### 6.4.2.2 最適 Policy 2

(1) の固定  $N$  ( $1 \leq N < \infty$ ) に対して  $C_1(N, T; a)$  を最小化する最適  $T_1^*$  を求める。

$C_1(N, T; a)$  を  $T$  に対して微分して 0 にする。

$$L_{12}(T) = \frac{(N-1)c_2 + c_3}{c_1}, \quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} L_{12}(T) &\equiv \sum_{j=0}^{N-1} \left[ (1+A_j)Th((1+A_j)T) - A_jTh(A_jT) - \int_0^T h(t+A_jT)dt \right] \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \int_0^T (t+A_jT)dh(t+A_jT) = \sum_{j=0}^{N-1} \int_{A_jT}^{(1+A_j)T} t dh(t). \end{aligned}$$

$L_{12}(T)$  は  $T$  とともに厳密に  $L_{12}(0) = 0$  から  $L_{12}(\infty) = \infty$  に増加することが容易にわかる。したがって、次の最適なポリシーがあります。

- i)  $L_{12}(\infty) > ((N-1)c_2 + c_3)/c_1$  の場合、(3) を満たす有限かつ一意の最小  $T_1^*$  ( $0 < T_1^* < \infty$ ) が存在し、その結果のコスト率は次のようになります。

$$C_1(N, T_1^*; a) = \frac{c_1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ (1+A_j)h((1+A_j)T_1^*) - A_jh(A_jT_1^*) \right]. \quad (4)$$

- ii) もし  $L_{12}(\infty) \leq ((N-1)c_2 + c_3)/c_1$  より  $T_1^* = \infty$  の場合、集合教育は行うべきではな

い。

$$\lim_{T_1^* \rightarrow \infty} C_1(N, T_1^*; a) = \frac{c_1}{N} h(\infty). \quad (5)$$

#### 6.4.2.3 特定ケース

$h(t)$  が  $h(0) = 0$  から  $h(\infty) = \infty$  まで厳密に  $t$  と共に増加するとき、次の2つの  $A_j$  の場合を、ケース1に対して  $a_i = a$ 、ケース2に対して  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  と考えた。

なお、ケース2の  $A_j$  はケース1の  $A_j$  よりも小さく、ケース1の有効性はケース2の  $A_j$  よりも低い。ケース1の  $A_j$  は、問題解決演習のような e-learning の効果が教室での講義の効果よりも低い可能性があるため、問題解決演習に適用することができる[66]。

##### (1) ケース1: $a_i = a$

$a_i = a$  ( $0 < a < 1$ )、 $A_j = ja$  ( $j = 0, 1, \dots, N$ ) のとき、(2) は

$$\sum_{j=0}^{N-1} \int_0^T [h(t + NaT) - h(t + jaT)] dt \geq \frac{c_3 - c_2}{c_1}, \quad (6)$$

その左辺は厳密に  $N$  とともに  $\int_0^T [h(t + aT) - h(t)] dt$  から  $\infty$  に増加する。したがって、(6) を満たす有限かつ一意な最小値  $N_{11}^*$  ( $1 \leq N_{11}^* < \infty$ ) が存在する。

式(3)は

$$\sum_{j=0}^{N-1} \int_{jaT}^{(1+ja)T} t dh(t) = \frac{(N-1)c_2 + c_3}{c_1}, \quad (7)$$

その左辺は  $T$  とともに  $0$  から  $\infty$  まで厳密に増加する。したがって、(7) を満たす有限かつ一意な  $T_{11}^*$  ( $0 \leq T_{11}^* < \infty$ ) が存在し、その結果のコスト率は次のようになります。

$$C_1(N, T_{11}^*; a) = \frac{c_1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} [(1+ja)h((1+ja)T_{11}^*) - ja h(jaT_{11}^*)]. \quad (8)$$

##### (2) ケース2: $a_i = a^i$

$a_i = a^i$  ( $0 < a < 1$ )、 $A_j = \sum_{i=1}^j a^i = a(1 - a^j)/(1 - a)$  ( $j = 0, 1, \dots, N$ ) のとき、(2) は

$$\sum_{j=0}^{N-1} \int_0^T \left[ h\left(t + \frac{1 - a^N}{1 - a} aT\right) - h\left(t + \frac{1 - a^j}{1 - a} aT\right) \right] dt \geq \frac{c_3 - c_2}{c_1}, \quad (9)$$

その左辺は厳密に  $N$  とともに  $\int_0^T [h(t+aT) - h(t)]dt$  から  $\infty$  に増加する。したがって、(9) を満たす有限かつ一意な最小値  $N_{12}^*$  ( $1 \leq N_{12}^* < \infty$ ) が存在する。

式 (3) は

$$\sum_{j=0}^{N-1} \int_0^T \left( t + \frac{1-a^j}{1-a} aT \right) dh \left( t + \frac{1-a^j}{1-a} aT \right) = \frac{(N-1)c_2 - c_3}{c_1}, \quad (10)$$

その左辺は  $T$  とともに  $0$  から  $\infty$  まで厳密に増加する。したがって、(10) を満たす有限かつ一意な  $T_{12}^*$  ( $0 \leq T_{12}^* < \infty$ ) が存在し、その結果のコスト率は次のようになる。

$$C_1(N, T_{12}^*; a) = \frac{c_1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ \left( 1 + \frac{1-a^j}{1-a} a \right) h \left( \left( 1 + \frac{1-a^j}{1-a} a \right) T_{12}^* \right) - \frac{1-a^j}{1-a} a h \left( \frac{1-a^j}{1-a} a T_{12}^* \right) \right]. \quad (11)$$

### 6.4.3. Model 2

Model 2 は Model 1 の拡張モデルで、モデル 1 では集合教育は  $NT$  で実施されるとしたが、重大事故が発生した場合は直ちに実施される場合がある。モデル 1 の前提条件 1)、3)、4) およびモデル 1 の前提条件 2') は、モデル 1 の前提条件 2) から以下のように見直す。

2') リマインド教育期間中に知識不足のケーススタディに関連した事故が発生する。教育時間  $T$  が関数であるとき、その発生率は時間  $t$  における  $h(t)$  によって与えられ、それはいかなる事故によっても乱されず、時間  $t$  とともに厳密に増加する。事故は深刻なものと同様でないものに分けられる。重大事故は人命の損失や設備の喪失などが含まれるため、教育の内容を充実させ、重大事故が発生した場合は直ちに集合教育を実施する。重大事故の発生確率は  $q (\equiv 1-p)$  の  $0 < p < 1$  である。

集合教育から次の集合教育までの時間を 1 サイクルとすると、1 サイクルの平均時間は、

$$\sum_{j=1}^N jT p^{j-1} q + NT p^N = T \frac{1-p^N}{q}. \quad (12)$$

$A_j \equiv j$  の場合、1 サイクルの期待コストは、Nakagawa, p.179, 2005 [76] を参照すると、

$$\sum_{j=1}^N p^{j-1} q \left[ c_1 \int_0^{jT} h(t) dt + j c_2 \right] + p^N \left[ c_1 \int_0^{NT} h(t) dt + (N-1)c_2 + c_3 \right]$$

$$= \sum_{j=0}^{N-1} p^j \left[ c_1 \int_{jT}^{(j+1)T} h(t) dt + c_2 \right] + p^N (c_3 - c_2). \quad (13)$$

したがって、(13)を(12)で割ると、あるサイクルの期待コスト率は

$$C_2(N, T; p) = \frac{q}{T(1-p^N)} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} p^j \left[ c_1 \int_{jT}^{(j+1)T} h(t) dt + c_2 \right] + p^N (c_3 - c_2) \right\}, \quad (14)$$

教育効果 $A_j$ の有効性を考慮すると、(14)は

$$\begin{aligned} & C_2(N, T; p, a) \\ &= \frac{q}{T(1-p^N)} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} p^j \left[ c_1 \int_{A_j T}^{(1+A_j)T} h(t) dt + c_2 \right] + p^N (c_3 - c_2) \right\} \\ &= \frac{q}{T(1-p^N)} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} p^j \left[ c_1 \int_0^T h(t + A_j T) dt + c_2 \right] + p^N (c_3 - c_2) \right\}, \quad (15) \end{aligned}$$

$p = 1$ として、(1)と合致する。

#### 6.4.3.1 最適 Policy 1

固定 $T$ に対して $C_2(N, T; p, a)$ を最小化する最適 $N_2^*$ を求める。

不等式 $C_2(N+1, T; p, a) - C_2(N, T; p, a) \geq 0$ 、より

$$L_{21}(N) \geq \frac{c_3 - c_2}{c_1}, \quad (16)$$

ここで

$$L_{21}(N) = \sum_{j=0}^{N-1} p^j \int_0^T [h(t + A_N T) - h(t + A_j T)] dt.$$

次の場合

$$L_{21}(1) \equiv \int_0^T [h(t + A_1 T) - h(t)] dt,$$

そして

$$L_{21}(N+1) - L_{21}(N) = \sum_{j=0}^N p^j \int_0^T [h(t + A_{N+1} T) - h(t + A_N T)] dt > 0. \quad (17)$$

従って、 $L_{21}(N)$ は  $N$  と共に  $L_{21}(1)$  から  $L_{21}(\infty) \equiv \lim_{N \rightarrow \infty} L_{21}(N)$  まで厳密に増加するので、次の最適方策がある。

i)  $L_{21}(1) < (c_3 - c_2)/c_1$  および  $L_{21}(\infty) > (c_3 - c_2)/c_1$  の場合、(16) を満たす有限かつ一意の最小  $N_2^*$  が存在する。

ii)  $L_{21}(\infty) \leq (c_3 - c_2)/c_1$  で  $N_2^* = \infty$  の場合、集合教育は行うべきではない。  
なぜなら  $L_{21}(N) \leq L_{11}(N)$ ,  $N_2^* \geq N_1^*$  である。

### 6. 6. 3. 2 最適 Policy 2

固定された  $N$  に対して  $C_2(N, T; p, a)$  を最小化する最適な  $T_2^*$  を求める。 $T$  に関して  $C_2(N, T; p, a)$  を区別し、それを 0 に設定する。

$$L_{22}(T) = \frac{1}{c_1} \left[ c_2 \frac{1 - (1+q)p^N}{q} + c_3 p^N \right], \quad (18)$$

ここで

$$L_{22}(T) \equiv \sum_{j=0}^{N-1} p^j \int_0^T (t + A_j T) dh(t + A_j T) = \sum_{j=0}^{N-1} p^j \int_{A_j T}^{(1+A_j)T} t dh(t),$$

これは  $T$  において  $L_{22}(0) = 0$  から  $L_{22}(\infty) = \infty$  まで厳密に増加している。したがって、次の最適なポリシーがある。

i)  $L_{22}(\infty) > \{c_2[1 - (1+q)p^N]/q + c_3 p^N\}/c_1$  の場合、(18) を満たす有限かつ一意の最小  $T_2^*$  が存在する。コスト率は次のとおり。

$$C_2(N, T_2^*; p, a) = \frac{c_1 q}{1 - p^N} \sum_{j=0}^{N-1} p^j \left[ (1 + A_j) h((1 + A_j) T_2^*) - A_j h(A_j T_2^*) \right]. \quad (19)$$

ii)  $L_{22}(\infty) \leq \{c_2[1 - (1+q)p^N]/q + c_3 p^N\}/c_1$ 、 $T_2^* = \infty$  のときは集合教育を行うべきではない。

### 6. 4. 3. 3 特定ケース

次の 2 つの  $A_j$  の場合を、ケース 1 に対して  $a_i = a$  , ケース 2 に対して  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  と考えた。

(1) ケース 1 :  $a_i = a$

$a_i = a$  ( $0 < a < 1$ ),  $A_j = ja$  ( $j = 0, 1, \dots, N$ ) のとき、(16) は

$$\sum_{j=0}^{N-1} p^j \int_0^T [h(t + NaT) - h(t + jaT)] dt \geq \frac{c_3 - c_2}{c_1}, \quad (20)$$

その左辺は厳密に  $N$  とともに  $\int_0^T [h(t+aT) - h(t)]dt$  から  $\infty$  に増加する。したがって、(20) を満たす有限かつ一意な最小  $N_{21}^*$  ( $1 \leq N_{21}^* < \infty$ ) が存在する。(20) の左辺は (6) の左辺よりも小さいので、 $N_{21}^*$  は  $N_{11}^*$  よりも大きい。

式(18)は

$$\sum_{j=0}^{N-1} p^j \int_{jaT}^{(1+ja)T} t dh(t) = \frac{1}{c_1} \left[ c_2 \frac{1 - (1+q)p^N}{q} + c_3 p^N \right], \quad (21)$$

その左辺は  $T$  とともに  $0$  から  $\infty$  まで厳密に増加する。したがって、(21) を満たす有限かつ一意な  $T_{21}^*$  ( $0 \leq T_{21}^* < \infty$ ) が存在し、その結果のコスト率は次のようになる。

$$C_2(N, T_{21}^*; p, a) = \frac{c_1 q}{1 - p^N} \sum_{j=0}^{N-1} p^j [(1+ja)h((1+ja)T_{21}^*) - ja h(jaT_{21}^*)]. \quad (22)$$

(2) ケース 2 :  $a_i = a^i$

$a_i = a^i$  ( $0 < a < 1$ ),  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i = a(1 - a^j)/(1 - a)$  ( $j = 0, 1, \dots, N$ ) のとき、(16)は

$$\sum_{j=0}^{N-1} p^j \int_0^T \left[ h\left(t + \frac{1 - a^N}{1 - a} aT\right) - h\left(t + \frac{1 - a^j}{1 - a} aT\right) \right] dt \geq \frac{c_3 - c_2}{c_1}, \quad (23)$$

その左辺は厳密に  $N$  とともに  $\int_0^T [h(t+aT) - h(t)]dt$  から  $\infty$  に増加する。したがって、(23) を満たす有限かつ一意の最小値  $N_{22}^*$  ( $1 \leq N_{22}^* < \infty$ ) が存在する。(23) の左辺は (9) の左辺よりも小さいので、 $N_{22}^*$  は  $N_{12}^*$  よりも大きい。

式(18)は

$$\sum_{j=0}^{N-1} p^j \int_0^T \left( t + \frac{1 - a^j}{1 - a} aT \right) dh\left(t + \frac{1 - a^j}{1 - a} aT\right) = \frac{1}{c_1} \left[ c_2 \frac{1 - (1+q)p^N}{q} + c_3 p^N \right], \quad (24)$$

その左辺は  $T$  とともに  $0$  から  $\infty$  まで厳密に増加する。したがって、(24) を満たす有限かつ一意な  $T_{22}^*$  ( $0 \leq T_{22}^* < \infty$ ) が存在し、その結果のコスト率は次のようになる。

$$C_2(N, T_{22}^*; p, a) = \frac{c_1 q}{1 - p^N} \sum_{j=0}^{N-1} p^j \left[ \left( 1 + \frac{1 - a^j}{1 - a} a \right) h\left( \left( 1 + \frac{1 - a^j}{1 - a} a \right) T_{22}^* \right) - \frac{1 - a^j}{1 - a} a h\left( \frac{1 - a^j}{1 - a} a T_{22}^* \right) \right]. \quad (25)$$

6.4.4. 数値例

$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t^m)$  と  $h(t) = m\lambda t^{m-1}$  は、 $F(t)$  が  $t$  と共に厳密に増加する指数分布が過去の研究で広く用いられているので、 $F(t)$  と  $h(t)$  を仮定した。 $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 2$ ,  $c_3 = 10$ ,  $A_j = ja$  のときの最適  $T_{11}^*$ ,  $C_1(N, T_{11}^*; a)$  を表 1 に示す。 $\lambda$ ,  $n$ ,  $N$  が増加すると、 $T_{11}^*$  が減少し、 $C_1(N, T_{11}^*; a)$  が増加する。

表 1  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 2$ ,  $c_3 = 10$ , および  $A_j = ja$  の場合の最適  $T_{11}^*$  およびコストレート  $C_1(N, T_{11}^*; a)$

$\lambda$	$m$	$N$	$a$	$T_{11}^*$	$C_1(N, T_{11}^*; a)$
1	1.2	10	0.95	6.188	2.715
2	1.2	10	0.95	3.473	4.838
3	1.2	10	0.95	2.477	6.783
1	1.25	10	0.95	4.396	3.184
1	1.3	10	0.95	3.309	3.666
1	1.2	8	0.95	6.800	2.647
1	1.2	6	0.95	7.785	2.569
1	1.2	10	0.97	6.170	2.723
1	1.2	10	0.99	6.152	2.731

表 2 は、 $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 2$ ,  $c_3 = 10$ , および  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  の場合の最適  $T_{12}^*$  および  $C_1(N, T_{12}^*; a)$  を示す。 $\lambda$ ,  $n$ ,  $N$  が増加すると、 $T_{12}^*$  が減少し、 $C_1(N, T_{12}^*; a)$  が増加し、表 1 と同様である。表 2 の  $T_{12}^*$  および  $1/C_1(N, T_{12}^*; a)$  は表 1 のものより大きい。

表 2  $c_1 = 1$ ,  $c_2 = 2$ ,  $c_3 = 10$ , および  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  の場合の最適  $T_{12}^*$  および結果コストレート  $C_1(N, T_{12}^*; a)$

$\lambda$	$m$	$N$	$a$	$T_{12}^*$	$C_1(N, T_{12}^*; a)$
1	1.2	10	0.95	6.282	2.674
2	1.2	10	0.95	3.526	4.765
3	1.2	10	0.95	2.515	6.681
1	1.25	10	0.95	4.479	3.126
1	1.3	10	0.95	3.383	3.587
1	1.2	8	0.95	6.875	2.618

1	1.2	6	0.95	7.839	2.551
1	1.2	10	0.97	6.227	2.698
1	1.2	10	0.99	6.171	2.722

$c_1 = 1$ 、 $c_2 = 2$ 、 $c_3 = 10$ 、 $A_j = ja$ の場合の最適 $N_{11}^*$ 、 $C_1(N_{11}^*, T; a)$ を表3に示す。 $\lambda$ 及び $n$ が増加すると $N_{11}^*$ が減少して $C_1(N_{11}^*, T; a)$ が増加し、 $T$ が増加すると $N_{11}^*$ 及び $C_1(N_{11}^*, T; a)$ が減少する。この数値例において、 $a$ が増加すると、 $N_{11}^*$ は変化せず、 $C_1(N_{11}^*, T; a)$ が増加する。

表3  $c_1 = 1$ 、 $c_2 = 2$ 、 $c_3 = 10$ 、および $A_j = ja$ の場合の最適 $N_{11}^*$ およびコストレート  
 $C_1(N_{11}^*, T; a)$

$\lambda$	$m$	$T$	$a$	$N_{11}^*$	$C_1(N_{11}^*, T; a)$
1	1.2	2	0.95	11	3.203
2	1.2	2	0.95	6	4.929
3	1.2	2	0.95	4	6.517
1	1.25	2	0.95	8	3.480
1	1.3	2	0.95	6	3.750
1	1.2	4	0.95	6	2.707
1	1.2	6	0.95	4	2.543
1	1.2	2	0.97	11	3.210
1	1.2	2	0.99	11	3.216

表4は、 $c_1 = 1$ 、 $c_2 = 2$ 、 $c_3 = 10$ 、および $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$ の場合の最適 $N_{12}^*$ および $C_1(N_{12}^*, T; a)$ を示す。 $\lambda$ 及び $m$ が増加すると、 $N_{12}^*$ が減少して $C_1(N_{12}^*, T; a)$ が増加し、 $T$ が増加すると $N_{12}^*$ 及び $C_1(N_{12}^*, T; a)$ が減少し、表3と同様である。 $a$ が増加すると、 $N_{12}^*$ が減少し、 $C_1(N_{12}^*, T; a)$ が増加する。表4の $N_{12}^*$ および $1/C_1(N_{12}^*, T; a)$ は、表3より大きいか、または等しい。

表 4  $c_1 = 1, c_2 = 2, c_3 = 10$ 、および  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  の場合の最適  $N_{12}^*$  および結果コストレートの  $C_1(N_{12}^*, T; a)$

$\lambda$	$m$	$T$	$a$	$N_{12}^*$	$C_1(N_{12}^*, T; a)$
1	1.2	2	0.95	13	3.161
2	1.2	2	0.95	7	4.899
3	1.2	2	0.95	5	6.493
1	1.25	2	0.95	9	3.442
1	1.3	2	0.95	7	3.716
1	1.2	4	0.95	6	2.692
1	1.2	6	0.95	4	2.536
1	1.2	2	0.97	12	3.185
1	1.2	2	0.99	11	3.208

$c_1 = 1, c_2 = 2, c_3 = 10, A_j = ja$  の場合の最適  $T_{21}^*$ 、 $C_2(N, T_{21}^*; p, a)$  を表 5 に示す。 $\lambda, m, N$ 、および増加させると、 $T_{21}^*$  は表 1 と同様に減少して  $C_2(N, T_{21}^*; p, a)$  が増加し、 $p$  が増加すると  $T_{21}^*$  および  $C_2(N, T_{21}^*; p, a)$  が増加する。表 5 の  $T_{21}^*$  および  $C_2(N, T_{21}^*; p, a)$  は、表 1 の  $T_{11}^*$  および  $C_1(N, T_{11}^*; a)$  よりも小さい。

表 5  $c_1 = 1, c_2 = 2, c_3 = 10$ 、および  $A_j = ja$  の場合の最適  $T_{21}^*$  および結果コストレート  $C_2(N, T_{21}^*; p, a)$

$\lambda$	$m$	$N$	$a$	$p$	$T_{21}^*$	$C_2(N, T_{21}^*; p, a)$
1	1.2	10	0.95	0.90	5.724	2.545
2	1.2	10	0.95	0.90	3.212	4.535
3	1.2	10	0.95	0.90	2.291	6.359
1	1.25	10	0.95	0.90	4.116	2.950
1	1.3	10	0.95	0.90	3.132	3.360
1	1.2	8	0.95	0.90	6.242	2.504
1	1.2	6	0.95	0.90	7.111	2.453
1	1.2	10	0.97	0.90	5.708	2.552
1	1.2	10	0.99	0.90	5.693	2.559
1	1.2	10	0.95	0.85	5.585	2.464
1	1.2	10	0.95	0.80	5.508	2.388

表 6 は、 $c_1 = 1$ 、 $c_2 = 2$ 、 $c_3 = 10$ 、および  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  の場合の最適な  $T_{22}^*$  および  $C_2(N, T_{22}^*; p, a)$  を示す。 $\lambda$ 、 $m$ 、 $N$  が増加すると  $T_{22}^*$  が減少して  $C_2(N, T_{22}^*; p, a)$  が増加し、 $p$  が増加すると  $T_{22}^*$ 、 $C_2(N, T_{22}^*; p, a)$  が増加し、表 5 と同様である。表 6 の  $T_{22}^*$  および  $1/C_2(N, T_{22}^*; p, a)$  は表 5 のものより大きい。表 6 の  $T_{22}^*$  および  $C_2(N, T_{22}^*; p, a)$  は、表 2 の  $T_{12}^*$  および  $C_1(N, T_{12}^*; a)$  よりも小さい。

表 6  $c_1 = 1$ 、 $c_2 = 2$ 、 $c_3 = 10$ 、および  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  の場合の最適  $T_{22}^*$  およびコストレート  $C_2(N, T_{22}^*; p, a)$

$\lambda$	$m$	$N$	$a$	$p$	$T_{22}^*$	$C_2(N, T_{22}^*; p, a)$
1	1.2	10	0.95	0.90	5.794	2.515
2	1.2	10	0.95	0.90	3.252	4.481
3	1.2	10	0.95	0.90	2.319	6.282
1	1.25	10	0.95	0.90	4.178	2.906
1	1.3	10	0.95	0.90	3.188	3.301
1	1.2	8	0.95	0.90	6.299	2.481
1	1.2	6	0.95	0.90	7.153	2.439
1	1.2	10	0.97	0.90	5.750	2.534
1	1.2	10	0.99	0.90	5.707	2.553
1	1.2	10	0.95	0.85	5.645	2.439
1	1.2	10	0.95	0.80	5.558	2.367

$c_1=1$ 、 $c_2=2$ 、 $c_3=10$ 、 $A_j = ja$  の場合の最適  $N_{21}^*$ 、 $C_2(N_{21}^*, T; p, a)$  を表 7 に示す。 $\lambda$  及び  $m$  が増加すると、 $N_{21}^*$  が減少して  $C_2(N_{21}^*, T; p, a)$  が増加し、 $T$  が増加すると  $N_{21}^*$  及び  $C_2(N_{21}^*, T; p, a)$  が減少し、表 3 と同様である。 $a$  が表 3 と同様に増加する場合、 $N_{21}^*$  は変化せず、 $C_2(N_{21}^*, T; p, a)$  は増加する。 $q$  が増加すると、 $N_{21}^*$  が減少し、 $C_2(N_{21}^*, T; p, a)$  が増加する。表 7 の  $N_{21}^*$  および  $1/C_2(N_{21}^*, T; p, a)$  は、表 3 の  $N_{11}^*$  および  $1/C_1(N_{11}^*, T; a)$  より大きいのか、または等しい。

表 7  $c_1 = 1$ 、 $c_2 = 2$ 、 $c_3 = 10$ 、および  $A_j = ja$  の場合の最適  $N_{21}^*$  およびコストレート  $C_2(N_{21}^*, T; p, a)$

$\lambda$	$m$	$T$	$a$	$p$	$N_{21}^*$	$C_2(N_{21}^*, T; p, a)$
1	1.2	2	0.95	0.90	14	2.918
2	1.2	2	0.95	0.90	7	4.620
3	1.2	2	0.95	0.90	5	6.191
1	1.25	2	0.95	0.90	10	3.184
1	1.3	2	0.95	0.90	7	3.445
1	1.2	4	0.95	0.90	6	2.549
1	1.2	6	0.95	0.90	4	2.431
1	1.2	2	0.97	0.90	14	2.924
1	1.2	2	0.99	0.90	14	2.930
1	1.2	2	0.95	0.85	17	2.798
1	1.2	2	0.95	0.80	21	2.698

表 8 は、 $c_1 = 1$ 、 $c_2 = 2$ 、 $c_3 = 10$ 、および  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  の場合の最適  $N_{22}^*$  および  $C_2(N_{22}^*, T; p, a)$  を示す。 $\lambda$ 、 $m$ 、 $T$  が増加すると  $N_{22}^*$  が減少して  $C_2(N_{22}^*, T; p, a)$  が増加し、 $p$  が増加すると、表 7 と同様に  $N_{22}^*$  が減少し、 $C_2(N_{22}^*, T; p, a)$  が増加する。表 8 の  $N_{22}^*$  および  $1/C_2(N_{22}^*, T; p, a)$  は、表 4 の  $N_{12}^*$  および  $1/C_1(N_{12}^*, T; a)$  より大きい、または等しい。

表 8  $c_1 = 1$ 、 $c_2 = 2$ 、 $c_3 = 10$ 、および  $A_j = \sum_{i=1}^j a^i$  の場合の最適  $N_{22}^*$  および結果コストレート  $C_2(N_{22}^*, T; p, a)$

$\lambda$	$m$	$T$	$a$	$p$	$N_{22}^*$	$C_2(N_{22}^*, T; p, a)$
1	1.2	2	0.95	0.90	19	2.875
2	1.2	2	0.95	0.90	8	4.590
3	1.2	2	0.95	0.90	5	6.167
1	1.25	2	0.95	0.90	11	3.146
1	1.3	2	0.95	0.90	8	3.412
1	1.2	4	0.95	0.90	7	2.535
1	1.2	6	0.95	0.90	4	2.425

1	1.2	2	0.97	0.90	16	2.899
1	1.2	2	0.99	0.90	15	2.922
1	1.2	2	0.95	0.85	27	2.760
1	1.2	2	0.95	0.80	57	2.669

モデルの妥当性を、2つのモデルと直観的に予測される実際の現象が感度解析により一致することを確認することにより示した。実際の問題に適用するためには、実際のデータから  $F(t)$  を推定する必要がある。

#### 6.4.5. 結論

本章では、経済的投資を最小化する2つの最適社員教育モデルを考察した。モデル1, 2では、e-learningによるリマインド教育時間を  $T$  とし、 $NT$  で集合教育を実施する。モデル2の発生確率  $q$  で重大事故が発生した場合は、直ちに集合教育を実施する。期待コスト率を定義し、コスト率を最小にする最適  $N^*$  と  $T^*$  を論じ、数値計算した。

数値例から、リマインド教育の有効性が向上した場合、すなわちケース2の  $a$  が減少した場合、または  $A_j$  が使用された場合には、全体の e-learning によるリマインド教育時間  $T^*$  および集合教育時間  $N^*$  が大きくなる。これは全体の問題数が一定であるため、日常の e-learning リマインド教育の負担を低減することができ、集合教育期間を延長することができる。効果的な毎日の e-learning を実行することにより、経済的投資を低減できることを示した。

今後、 $A_j$  : リマインド教育効果の不完全率や、 $H$  : 教育が足りないことによるヒューマンエラーの発生率等の係数を実際の運用から導いてモデルに反映した上で教育計画を立て、教育を実行し有効性を評価していく。

### 6.5 まとめ

ベテラン作業者であってもヒューマンエラーは発生する。それはSRKモデルにおけるスキルベースの行動パターンの特性であり、状況認識のリスクと意思決定のリスクを踏まえて、その特性を補足することが出来る。これらヒューマンエラーは特別なものではなく身近に発生するものであり、日常の生活に置き換えると理解しやすい。例えば、朝起きて、朝食をとり、歯磨きし、身支度を整えて、出勤する。毎日パターン化された行動であり、さほど難易度も高くなく、ほぼ意識せずとも普通に行動できるが、ちょっとしたヒューマンエラーを起こすことがあるはずである。目覚ましのセットを失念した。朝食時のマグカップをどこかに置き忘れた。歯磨き粉と洗顔フォームを取り違えた。ハンカチを忘れた。電車のダイヤが変わっていたことを忘れて乗り遅れそうになった

等々、これらはちょっと気にかけていたら、若しくは家族がちょっとした配慮で一言かけてくれたら、意識して行動することで防げるヒューマンエラーでもある。ただ、これらのヒューマンエラーの影響はさほど重要でもないので、真面目に対策を考えることもないのであるが、同じヒューマンエラーを航空宇宙の製造工程で起こすと、その影響は大きい。人はヒューマンエラーを起こす生き物であるが、ヒューマンエラーをしても問題にならない場と問題になる場で対応と意識を分けなければならない。もちろん航空宇宙の製造工程は后者であり、意識に頼ったヒューマンエラー事象抑制の取り組みも必要である。レジリエンスエンジニアリングではコミュニケーションによる効果も期待されており、品質意識向上によって当事者の行動のみならず、周囲メンバー（同僚）間での声かけや配慮によって状況認識と意思決定のリスクを下げる事が出来ると思える。

本章ではアンケート調査による意識の見える化と意識向上教育の有効性評価を体系的にマネジメントする仕組みと、集合教育と e-learning の教育手段をコストと時間（回数）の因子を踏まえて最適な教育計画モデルを提案した。今後はこの教育モデルを実践し有効性評価を行うために下記の取り組みを行っていく。

- ✓ Q,C,D（結果指標）より、知識不足によるヒューマンエラー事象の発生頻度と影響度を評価し、維持すべき知識量の閾値を設定
- ✓ 意識レベルと知識量の相関を評価
- ✓ 評価結果より教育マテリアルをブラッシュアップ

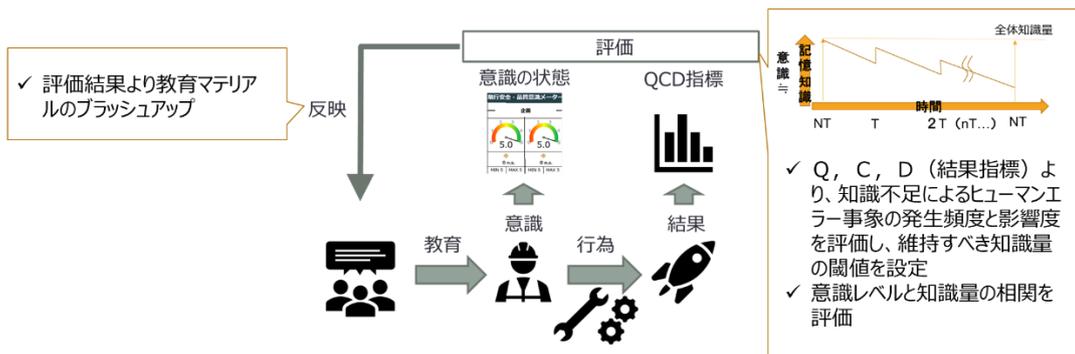


図 6.9 品質意識向上のマネジメントサイクル（今後の課題）

## 第7章 結論

国内航空宇宙産業（含む防衛産業）は戦後、防衛需要を基軸に着実な発展を遂げた。ただし欧米主要国と比べて、まだまだ規模は小さく、2020年初頭から発生した新型コロナウイルスによる航空産業の停滞は国内航空宇宙産業基盤に大きなダメージを与えた。更に防衛航空機では輸入・FMS（米国の対外有償軍事援助）に予算を取られ国内向けの調達額は減少している。限られた予算の中で国内航空宇宙産業メーカーはインフラの維持、人員の確保、技術・技能の伝承に苦勞している。そのような環境下、航空宇宙産業においてヒューマンエラーによる致命的な品質損失の発生は防がなければならない大きなリスクである。少量多品種の航空宇宙産業は設備投資する余裕がないため、その品質は作業者の力量に委ねられている。その状況は今後も当面続くものと思われる。

ただし、人とシステムの関連において、様々な変動に対応できるのはシステムではなく、人であり、人間の弾力性がシステムを守っているという見方もある。このような働きをレジリエンスと言い、E.Hollnagelらはanticipate（予見する）、monitor（監視する）、respond（対処する）、learn（学習する）、四つの能力要素が必要と提唱し、レジリエンス・エンジニアリングという学術が研究されている[5]。その一環としてノンテクニカルスキル[15]の必要性も示され、コミュニケーションやチームワークによって、レジリエンスの働きを向上させることができると期待されている。

本論文では航空宇宙産業の現場で製品実現するベテラン作業者の暗黙知に着目した。ベテラン作業者のヒューマンエラーによって顕在化する品質トラブルの影響は脅威であるが、一方でベテラン作業者の働きによって人の力量に頼らざるを得ない少量多品種の航空宇宙製造プロセス（システム）が成り立っている。ベテラン作業者の暗黙知にはヒューマンエラーリスクであるやり難い、面倒な作業や、それらリスクに対する作業上のノウハウがあると考える。普段は与えられた仕事を遂行する上でそれら暗黙知に基づく行動を当たり前と捉えているため、ヒアリング等で抽出するのは困難であるが、それら作業が人間が持つ基本特性の領域から外れて、作業者の意識と体力で補っている（身体面や精神面に負荷がかかる作業）場合、人間工学観点を基に客観的に抽出することは可能であり、改めてそれら作業に対しベテラン作業者とKY（危険予知）ディスカッションをすることで、暗黙知である作業リスクとそのリスクに対応するノウハウに気づくことも可能であることが分かった（4章）。

それら暗黙知を形式知化し活用するために、製造計画（プランニング）段階のリスク管理手法である工程FMEAに対しヒューマンエラーの発生度を適切に点数付けすることを目的としてSHELモデルの視点で評価する格付けテーブルを整備した。また情報を上位概念化し汎用的な戦訓集を整備することでリスク管理のみならず、組織のコミュニケーション向上に寄与する手法を検証し、その有効性を論じた（5.1章、5.2章）。さらに、それら手法を、

航空宇宙産業メーカーが適用する品質マネジメントシステム：JIS Q 9100 要求箇条に体系的に関連付けることで、QMSの働きである持続的な改善を促進し、レジリエンス効果を高めていくことが出来ると考える（2.4章）。

また、ベテラン作業者はベテランであるが故にスキルベースの行動を取ると言われる。仕事の行動パターンが自動化され意識せずとも行動できる。効率的にアウトプットが出せるが、状況変化に気づけずポカミスの類（slip、lapse、mistake）のヒューマンエラーを起こす。品質意識を優先することで、より正確、慎重に状況認識、意思決定、行為の実行を行い、ミスを起こさない、ミスに気づき対処する効果が期待される。品質意識を優先させるために、意識のモニタリング手法を確立し、適切な投資対効果となる教育計画を確立モデルから求めることを考察した（6章）。今後、作業結果であるQCD評価指標と意識指標の相関整理および教育計画へのフィードバックを行う。

本論文はJIS Q 9100：2016品質マネジメントシステムで要求されるヒューマンエラー防止処置への対応策として、レジリエンスエンジニアリングの視点より、航空宇宙産業ベテラン作業者の暗黙知を活用する手法を提案し、その有効性を論じた。ベテラン作業者のノウハウや作業に対するリスクを共有することでコミュニケーション、チームワーク、リーダーシップといったノンテクニカルスキルの働きも促進し、よりヒューマンエラーへの耐性が強い組織に成長させることも期待できる。そのために、QMSの枠組みの中で各手法のPDCAサイクルを持続的に回し、QCD結果指標への影響を評価していく必要がある。

今後、航空宇宙産業においてもデジタルトランスフォーメーションによる開発製造の技術革新が訪れる。まずは技術情報のデジタル化とデジタルスレッドによって、技術要求の精度とトレーサビリティが格段に進歩するであろう。そしてPLM（Product Lifecycle Management）で、開発から運用・サービスフェーズまで情報が一元管理され効率化が進みムダが排除されていくであろう。そして製造現場ではMES（Manufacturing Execution System）によって、人、モノ、設備の活動がリアルタイムに管理されスピーディなQCD改善が行われるようになるであろう。管理業務のデジタル化が進んでも、航空宇宙産業の製品実現には引き続きベテラン作業者の力量に依存する形態が続いていくものと思われる。

QMSでは人のパフォーマンスによるバラつきを抑制するために品質管理のもと、標準化を行って、人に頼る各プロセスにおいて、やるべき骨子を文書化している。この標準で決められる要件がPLMやMESのシステム要件として組み込まれることで、より一層人の判断や行為によるバラつきが抑制され、ヒューマンエラー防止が期待できる。更に本論文で取り上げたベテラン作業者の暗黙知を今後はシステムの要件として活用することが出来れば、その分作業者の負担をシステム側に移行できるので、更にヒューマンエラーの抑制につながるものと期待する。引き続き、ベテラン作業者の暗黙知の蓄積を進めつつ、ITを取り入れたヒューマンエラーマネジメントの研究を継続することで、今後の国内航空宇宙産業の基盤維持と発展へ貢献していきたい。

# 謝辞

社会人学生として本研究を遂行し学位論文を作成・発表するにあたり、鳥取大学大学院工学研究科 指導教員の伊藤 弘道教授より終始適切なご指導を賜りました。心から感謝致します。並びに、学位論文の作成にあたりご助言、ご指導頂きました、鳥取大学大学院工学研究科 山田 茂名誉教授／特任教授、太田 隆夫教授、小柳 淳二准教授に感謝し、厚くお礼申し上げます。

本研究を進めるに当たり、三菱重工（株）社員向けヒューマンファクターズ概論教材を監修頂き、製造工程のヒューマンエラー事象未然防止に向けレジリエンスエンジニアリングの概念をアドバイス頂いた早稲田大学理工学術院創造理工学部経営システム工学科 小松原 明哲教授、並びに三菱重工（株）への失敗学指導を通して、ヒューマンエラーへの知識を深めさせて頂いた元東京大学 特任教授（株）濱口企画代表取締役 濱口 哲也氏、また三菱重工（株）の製造現場で人間工学観点より作業者のヒューマンエラー事象防止の考え方をアドバイス頂いた元産業医科大学 神代 雅晴名誉教授に深謝の意を表します。

社会人学生としての業務との両立に理解を示し、見守っていただいた三菱重工工業株式会社 防衛宇宙セグメント 航空機・飛昇体事業部 副事業部長 直塚 洋一氏、品質保証部長 川上 義行氏、並びに本研究に協力いただいた同僚へ感謝いたします。

同じく三菱重工工業株式会社 真塩 健二氏からは同研究室の社会人学生として、人間中心設計プロセスを始めとする設計観点の HEM の知見を賜り、大学研究作業を促進することができ、心より感謝申し上げます。

これまで航空宇宙製品の製造に関わる業務においてヒューマンエラー事象の影響を防ぐために様々な取り組みを行ってきました。顧客である JAXA、防衛省関係者やパートナー会社の関係者等、多くの方々とヒューマンエラーの理解を深め、課題の解決について意見交換を重ね、行動してきました。これまでの知見を一つの論文としてまとめることが出来ましたが、まだ道半ばであり、今後も研究・実践・検証を繰り返し、課題の解決に取り組んでいきたいと考えます。

最後となりますが、本研究活動を温かく見守ってくれた家族と論文作成時に傍にいてくれた飼い猫のトラとランに感謝致します。

# 参考文献

- [1] 一般社団法人 日本航空宇宙工業会, はばたく日本の航空宇宙工業,  
[https://www.sjac.or.jp/common/pdf/sjac\\_gaiyo/info/habataku2021-22J.pdf](https://www.sjac.or.jp/common/pdf/sjac_gaiyo/info/habataku2021-22J.pdf), 2021.
- [2] 一般社団法人 日本航空宇宙工業会, 航空宇宙産業データベース, 2021.
- [3] 経済産業省 中部経済産業局, 航空機産業の他産業展開可能性調査, 2022.
- [4] 日本規格協会, JIS Q 9100 : 2016 品質マネジメントシステム-航空, 宇宙及び防衛分野の組織に対する要求事項, 2016.
- [5] E.Hollnagel, D.D.Woods, and N.Leveson, Eds., Resilience Engineering – Concepts and Precepts, Ashgate Publishing Ltd., Aldershot, England, 2006.  
(邦訳), 北村正晴 (監訳), レジリエンスエンジニアリング-概念と指針, 日科技連, 2012.
- [6] 岩波 好夫, JIS Q 9100 の完全理解 航空・宇宙・防衛産業の要求事項から APQP/PPAP まで, 日科技連, 2021.
- [7] Boeing, Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959 – 2008, Aviation Safety Boeing Commercial Airplanes,  
<https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2716.pdf>, 2009.
- [8] 小松原 明哲, ヒューマンエラー第2版, 丸善, 2008.
- [9] 日本規格協会, JIS Q 9000 : 2015 品質マネジメントシステム-基本及び用語, 2015.
- [10] 日本信頼性学会, 新版 信頼性ハンドブック, 日科技連, 第4章, 27-35, 2014.
- [11] 宇佐美 寛, 門間 清秀, JIS Q 9100 : 2016 航空・宇宙・防衛品質マネジメントシステムの解説, ティ・エフ・マネジメント, 2016.
- [12] 門間 清秀, Message for Aerospace Quality Engineers 航空宇宙技術者へのメッセージ, ティ・エフ・マネジメント, 2011.
- [13] E.Hollnagel, Resilience Engineering in Practice- A Guidebook, E.Hollnagel, J.Parries, D.D.Woods, and J.Wreathal, Eds., Epilogue, pp.275-296, 2011.

- [14] E.Hollnagel and D.D.Woods, Joint Cognitive System, CRC Press, 2005.
- [15] ローナ・フィリン, ポール・オコンナー, マーガレット・クリチトゥン (著), 小松原 明哲, 十亀 洋, 中西 美和 (訳), 現場安全の技術 ノンテクニカルスキル・ガイドブック, 海文堂, 2012.
- [16] シドニー・デッカー (著), 小松原 明哲, 十亀 洋 (訳), ヒューマンエラーを理解する 実務者のためのフィールドガイド, 海文堂, 2013.
- [17] Swain.A.D., Guttman.H.E., Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, USREG, Washington, DC., 1983.
- [18] Miller, D.P. & Swain A.D. : Human error and human reliability. In G. Salvendy(Ed.), Handbook of human factors. Wileys. Pp.219-250, 1987.
- [19] Sanders,M.S., McCormick,E.J., Human Factors in Engineering and Design, McGraw-Hill, New York, 1987.
- [20] Reason,J., Human Error, the Press Syndicate of the University of Cambridge, 1990.
- [21] 芳賀 繁, 失敗のメカニズム, 角川ソフィア文庫, 2003.
- [22] 松尾 太加志, ヒューマンエラー防止のための外的手がかり利用の動機づけモデル, 2011.
- [23] 宇宙航空研究開発機構, ヒューマンファクタ分析ハンドブック, JERG-0-018, 2004.
- [24] ホーキンス,F. (著)、黒田勲 (監訳) : 「ヒューマンファクタ 航空の分野を中心として」, 成山堂, 1992. (Hawkins,F.H.; “Human factor in Flight” , Gower Publishing Company, Brookfiled,1989)
- [25] 河野 龍太郎 : 「ヒューマンエラー低減技法の発想手順 : エラープルーフの考え方」, 日本プラント・ヒューマンファクタ学会誌、 Vol.4,No.2, p121~130, 1999.
- [26] 林 善男, 人間信頼性工学・人間エラーの防止技術 -, 海文堂, 1984.
- [27] Reason,J.T., Managing the Risks of Organizational Accidents, 1997, 塩見 弘, 佐相 邦英, 高野 研一 (訳), 組織事故 - 起こるべくして起こる事故からの脱出 -, 日科技連, 1999.

- [28] J.Reason, Human error, Cambridge University Press, 1990.
- [29] E.Hollnagel, J.Paries, D.D.Woods, J.Wreathall (著), 北村 正晴, 小松原 明哲 (訳), “実践レジリエンスエンジニアリング 社会・技術システムおよび重安全システムへの実装の手引き”, 日科技連, 2014.
- [30] Thomson.M, Onkal.D, Aveioglu.A, and Goodwin.P, Aviation risk perception : A comparison between experts and novices, Risk Analysis, 24, 1585-1595.
- [31] Rasmussen, J. , Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 13(3), 257-266, 1983.
- [32] 小松原 明哲, “認知人間工学からのベテラン作業者のヒューマンエラーの防止”,安全工学, Vol.38 No.6, 1999.
- [33] 狩野 広之, “ストレスとヒューマンエラーについて-ある論考”,労働科学,61 卷 第 1 号, 1985.
- [34] Hashimoto, K., Safety Ergonomics, Japan Industrial Safety & Health Association, 1984.
- [35] International Labor Office in collaboration with the International Ergonomics Association, Ergonomic checkpoints Second Edition, International Labour Office, Geneve, 2010.
- [36] [4.] 神代 雅晴, 職場改善-産業保健人間工学の知恵と妙技, 日科技連, pp.82-87, 2008.
- [37] IEC 60812, Analysis techniques for system reliability-Procedure for failure mode and effects analysis(FMEA), 2018.
- [38] JIS 8115, Glossary of terms used in dependability, 2000.
- [39] F.H. Hawkins, Human Factors in Flight-2nd Edition. England: Avebury Technical, 1993.
- [40] ICAO (International Civil Aviation Organization), Safety Management Manual-Third Edition, 2012.

- [41] T. Nara, Development Status of H3 Launch Vehicle. Mitsubishi Heavy Industries Technical Report, Vol.54 No.4.p30-37, 2017.
- [42] S. Dekker, The field Guide Understanding Human Error. Ashgate publishing Ltd, 2006.
- [43] 濱口 哲也, 失敗学と創造学 守りから攻めの品質保証へ, 日科技連, 2009.
- [44] 濱口 哲也、平山 貴之, 失敗学実践編 今までの原因分析と対策は間違っていた!, 日科技連, 2017.
- [45] 川喜多 二郎, 新・発想法 KJ 法の展開と応用, 中公新書, 2013.
- [46] 河野 龍太郎, 医療におけるヒューマンエラー 第2版, 医学書院, 2014.
- [47] M.R.Endsley, and D.J.Garland, Situation Awareness Analysis and Measurement, Routledge, 2000.
- [48] 小松原 明哲, 安全人間工学の理論と技術\_ヒューマンエラーの防止と現場力の向上, 丸善出版, 2016.
- [49] Simos.D, and Chabris.C, Gorillas in our midst: sustained inattentive blindness for dynamic events, perception, 28, 1059-1074, 1999.
- [50] Smallwood.J, and Schooler.J, The restless mind, psychological Bulletin, 132, 946-958, 2006.
- [51] Eysenck.M, and Keane.M, Cognitive Psychology : A student's handbook (5<sup>th</sup> ed.), Hove : Psychology Press, 2005.
- [52] M.R.Endsley, Situation Models: An Avenue to the Modeling of Mental Models, 14th Triennial Congress of the International Ergonomics Association and the 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, 2000.
- [53] 箱田 祐司, 都築 誉史, 川畑 秀明, 萩原 滋, 認知心理学, 有斐閣, 2010.
- [54] Aragon, M. I. B. & Valle, R. S. (2013). Does Training managers pay off?. The International Journal of Human Resource Management. 24(8), 1671-1684.
- [55] Arago'n-Sa'nchez, A., Barba-Arago'n I. & Sanz-Valle R. (2003). Effects of training on business results. The International Journal of Human Resource Management, 14(6), 956-980.

- [56] Gnoni, M. G. & Saleh, J. H. (2017) Near-miss management systems and observability-in-depth: Handling safety incidents and accident precursors in light of safety principles. *Safety Science*, 91, 154-167.
- [57] Harashima, S., Oikawa, D. & Nihira, H. (2006). Skill Enhancement Education for Software Engineers. *Toshiba review*, 61(1), 40-43.
- [58] Hickman, J.S. & Hanowski, R.J. (2011, May). Use of a video monitoring approach to reduce at-risk driving behaviors in commercial vehicle operations, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(3), 189-198.
- [59] Jaber, M.Y., Givi, Z.S. & Neumann, W.P. (2013). Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 7287-7299.
- [60] Kirkpatrick, D. (1996). Great ideas revisited. Techniques for evaluating training programs. Revisiting Kirkpatrick's Four-Level Model. *Training and Development*, 50(1), 54-59.
- [61] Manuele, F.A. (2011, October). Reviewing Heinrich: dislodging two myths from the practice of safety. *Professional Safety*, 56(10), 52-61.
- [62] Maršíková K. & Šlaichová, E. (2015). Perspectives of employee training and development: methods and approaches. *ACC Journal*, 21(3), 13-23.
- [63] McGehee, D.V., Raby, M., Carney, C., Lee, J.D. & Reyes, M.L. (2007). Extending parental mentoring using an event-triggered video intervention in rural teen drivers, *Journal of Safety Research*, 38(2), 215-227.
- [64] Reason, J., Manstead, A., Stradling, S., Baxter, J. & Campbell, K. (1990). Errors and violations on the roads: A real distinction?, *Ergonomics*, 33(10-11), 1315-1332.
- [65] Reason, J. (2000, March 18). Human error: models and management. *BMJ*, 320, 768-770.
- [66] Sadeghi, M. (2019). A Shift from Classroom to Distance Learning: Advantages and Limitations. *International Journal of Research in English Education*, 4(1), 80-88.

- 
- [67] Smidt, A., Balandin S., Sigafos J. & Reed V. A. (2009, September). The Kirkpatrick model: A useful tool for evaluating training outcomes. *Journal of Intellectual & Developmental Disability*, 34(3), 266-274.
- [68] Topolšek, D., Babić, D. & Fiolić, M. (March, 2019). The effect of road safety education on the relationship between Driver's errors, violations and accidents: Slovenian case study, *European Transport Research Review*, 11(18).
- [69] Wang, X., Xing, Y., Luo, L. & Yu, R. (2018). Evaluating the effectiveness of Behavior-Based Safety education methods for commercial vehicle drivers, *Accident Analysis and Prevention*, 117, 114–120.
- [70] Wani, M. (2007). Technical Education for Young Engineers at Mitsubishi Heavy Industries. *Journal of Japanese Society for Engineering Education*, 55(3), 17-20.
- [71] Shi, X., Wang, K. & Xia, T. (2010). Exploring Safety Education Effectiveness on Accident Risk Reduction for Freight Drivers Based on Behavioral Self-Evaluation. *International Conference of Logistics Engineering and Management (ICLEM)*, 1711-1717.
- [72] Cedefop (2008). *Validation of non-formal and informal learning in Europe: a snapshot 2007*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [73] Cedefop (2011). *The benefits of vocational education and training*. Luxembourg, Publications Office of the European Union.
- [74] Japan Industrial Safety & Health Association (JISHA) (2007, March 15). *General Guidebook on Industrial Safety*. ILO-CIS National Center in Japan.
- [75] Heinrich, H.W. (1931). *Industrial accident prevention: A scientific approach*. McGraw-Hill, New York.
- [76] Masimore, L. (2007). *Proving the Value of Safety: Justification and ROI of Safety Programs and Machine Safety Investments*. Rockwell Automation, USA.
- [77] Nakagawa, T. (2005). *Maintenance Theory of Reliability*. Springer Verlag, London.

# 研究業績

・学位論文に関する研究業績

	題目	雑誌名
第4章	Ergonomic Risk Reduction Method in Aerospace Manufacturing	Proc. of 4th International Conference on Mathematical Techniques in Engineering Applications (ICMTEA2020)
	Ergonomic Risk Reduction Method in Aerospace Manufacturing	International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, Volume 6, No. 6 , 1565~1577, 2021
第5章	Process FMEA considering human error risks in Aerospace Manufacturing	Proc. of 26th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Control, 2021
第6章	Optimal Education Plan of Employees	Proc. of 4th International Conference on Mathematical Techniques in Engineering Applications (ICMTEA2020)
	Optimal Education Plan of Employees Using Maintenance Model	International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences, Volume 6, No. 4 , 1009~1024, 2021

・その他、研究業績

- (1) Truong Dinh Anh Khoa, Shigeshi Yamashita, Kodo Ito, “Optimal Stochastic Compulsory Education Plan of Employees Using Random Maintenance Model”, 26th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Control, 2021.
- (2) Sho Kawakami, Shigeshi Yamashita, Truong Dinh Anh Khoa and Kodo Ito, “Study on Education Plan of Employees for Manufacturing Companies”, The Reliability and Maintenance Engineering Summit 2021.
- (3) 山下 茂司, “航空宇宙製造工程における人間工学観点のヒューマンエラーリスク抽出方法”, 日本 OR 学会 中国・四国支部定例シンポジウム, 2020.
- (4) 山下 茂司, “製造業における失敗知識情報の蓄積と活用”, 日本 OR 学会 中国・四国地区 SSOR, 2021.
- (5) 山下 茂司, “リスクマネジメント～VTA の有効性～”, 日本 OR 学会 中国・四国支部研究部会第 2 回講演会, 2022.
- (6) 山下 茂司, “AI を活用したトラブル検出ツールの開発”, 日本 OR 学会「信頼性と OR」研究部会第一回研究会, 2022.

# APPENDIX:戦訓集（成功へのヒント集）

5.2.2 章（3）で作成した戦訓集（成功へのヒント集）を掲載する。なお、本戦訓集を基に5.2.2 章（5）イラスト化版を作成した。

分類	上位概念			想定される結果（失敗）	未然防止の考え方
	原文	SHEL Lモデルへの分解			
		不適切/不安全な状態（SHEL）	不適切/不安全な行為（L）	SHEL×L＝失敗（ヒューマンエラー）	
1 やり方無し	① 仕組み・やり方が無いと、作業にばらつきが出る。	作業の仕組み・やり方が無い/決められていない	特に懸念事項を感じずに作業する（自分なりなやり方を正とする）（実績、経験で判断する）	人によって作業にばらつきが出る（ばらつきが大きいと失敗事象となる可能性あり）	【管理面】 作業のやり方を規定（文書化）する。  定期的な活動として、暗黙の基本動作を吸い上げ、文書化する ・品質確保に寄与するノウハウ ・作業効率化に寄与するノウハウ
2 ソフト/ハード/作業・職場環境不備（やり方不備）	① 非現実的、又は実態に合わない要求がある（無理な公差、アクセス出来ない箇所、取り外せない交換部品。適切に計測器がつかない位置、形状。）	非現実的、又は実態に合わない要求がある（無理な公差、アクセス出来ない箇所の検査、取り外せない交換部品、適切に計測器が使えない位置、形状。）（〇〇し難い作業）	・出来ることだけ作業する ・無理と諦め、作業をしない ・要求通り実施した記録だけ残す。	要求/規定通りの製品品質・作業結果にならない	【個人面】 日常業務のなかで、気づいたときに改善に繋げるようアクションを取る 【管理面】 「困難・無理作業申し出活動」のような現場作業吸い上げ活動を推進する
	② 似て非なる物の相違点の非表示は、同じものと間違える。	似て非なるものがある（外観、寸法は似ているが、機能、性能は異なるもの）	似て非なる物を同じ物と思い、作業する。	相違点（非なる点）によって、要求仕様と違う結果となる	似ていないものにする
	③ 曖昧な指示は誤った解釈を招く	標準、業務・作業指示等に”曖昧さ”がある	自分の解釈で作業をする	意図通りでない作業が行われ、失敗する	【個人面】 曖昧な部分を確認して明確にする。 【管理面】 不明確な指示・ルールを明確化するように見直す（文書改訂）
3 変更点不管理	① 現地改造工事は図面へ反映されないことがある。	・工事設計部署（図面作成）と現地作業部署が地理的に離れていて、コミュニケーションが悪い。 ・現合合わせ等、現地で作業しないと分からないことがある	現地作業を優先する。（図面反映を後回しにする）	指示（図面等）と実態（現地）に乖離が発生し、次の作業（追加工事・保守・点検作業など）に支障が出る	【個人面】 図面反映処置を確実に実施する。 【管理面】 ドキュメント形態管理の仕組みを構築する（現地からのアズビルト化情報による図面改訂の手順）

分類	上位概念		想定される結果（失敗）		未然防止の考え方
	原文	SHELLモデルへの分解			
		不適切/不安全な状態（SHELL）	不適切/不安全な行為（L）	SHELL×L=失敗（ヒューマンエラー）	
3 変更点不管理	②上流（下流）図書改訂の影響評価未実施で、下流（上流）図書改訂が欠落する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・図面体系（リスト）が無い</li> <li>・図面体系（リスト）が不明確（親図から子図の呼び出しはあるが、子図から親図の呼び出しが無い等）</li> </ul>	(関連図面への影響に気付けない)	望ましくない変更影響が発生する (改訂された図面と改訂されない図面の乖離が実作業に悪影響を与える)	<p>【個人面】 図面変更時は親図や子図への影響有無を、設計部門へ確認する</p> <p>【管理面】 形態管理の仕組みを構築する ・管理対象の明確化（図面等の技術指示文書、製造指示文書、専用設備・治工具など、製造品質に影響を与えるもの） ・変更評価は関連部門で影響評価する仕組み ※プロジェクトの特性に合った、形態管理の仕組み構築が必要</p>
	③変更履歴（変更履歴）の表示がないと、変更箇所がわからない。	図面や作業指示書等で変更箇所と変更前後を対比する情報が無い	(変更箇所に気付けない)	変更箇所に気付かず、変更前の情報で作業を行い、失敗を招く	<p>【管理面】 変更箇所と変更前後を対比する情報を示す（見え消し、新旧比較表添付等）</p>
	④工程（作業、設備、治工具、作業者、作業環境等）を考慮しない文書（標準、業務・作業指示等）改訂は、製品に反映されない。	文書改訂時、下記観点の評価をしない - 4M(Man/Machine/Material/Method)の変更 - 場所の変更 - プロセスの変更 等	(文書改訂担当者は評価できない)	改訂により関連部門に影響が発生し、作業できない、或いは作業結果に問題がでる	<p>【管理面】 変更は関連部門が内容確認・影響評価できるような仕組みを構築する</p>
	⑤引継ぎ時、文書化されていない情報は抜けていく	引継ぎ方法が明確化されていない	<ul style="list-style-type: none"> <li>口頭連絡のみとする</li> <li>曖昧ワードを使って伝達する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コミュニケーションエラーによる失敗を招く</li> <li>引継ぎ出来ず事故や不適合（失敗）に発展する</li> </ul>	<p>【個人面】 引継ぎ事項は文書化する。 (現品に状態を表示するなど必要) 当事者同士で面着可能な場合は口頭でも認識合わせする。</p> <p>【管理面】 引継ぎ事項を文書化する仕組みを構築する (ビデオ等の動画媒体をツールとして整備する)</p>

分類	上位概念			想定される結果（失敗）	未然防止の考え方
	原文	SHELLモデルへの分解			
		不適切/不安全な状態（SHELL）	不適切/不安全な行為（L）	SHELL×L＝失敗（ヒューマンエラー）	
3 変更点不管理	⑥設備、治工具の変更は使い方も変わることがある。	④に含まれるため、⑥⑦はヒント集からは外す			設備・治工具の更新後、使い方を明らかにする。
	⑦場所が違えば、使い方も変わる。				設備、治工具、計測器は環境に影響される。
	⑧顧客引き渡し後、製品形態は変化していく。	前回作業（新設時等）から時間が空いていると、出荷形態から状態が変化している （USER側が維持管理するなかで形態が変わっている等）	（特に懸念事項を感じずに作業する）	前回と同じ作業が出来ない/作業すると失敗する	【管理面】 工事または作業計画を行う際、現場の変化を事前に確認する
4 知識共有不足（教育不足）	①経歴・経験から知っていると思いき教育しなかった。	従来の担当者とは異なる人に作業してもらう場合+下記が当てはまる場合  ・部門は違うが、関連業務に十分な経験を有する人（ファンクション業務は経験無いが、プロジェクト業務の経験はある等） ・新人、若手、応募者など作業経験は少ないが、導入教育はクリアしている	特に懸念事項を感じずに、作業させる	知識不足のエラーを招く	【個人面】 初めての作業は作業上の懸念事項を洗い出し、有識者へ事前にリスクが無いか確認する  【管理面】 ・業務遂行に必要な力量を具体的（なるべく定量的）に設定する  ・有識者がチェックする
5 誤解（ミステイク）	①異なるルールが複数あると、解釈も複数出来る。	同様な作業に対して異なるルール/指示が複数ある （ダブルスタンダード）	自身が正しいと考えたルール/指示を選び作業する	本来の指示と異なる作業を行い、失敗を招く	【個人面】 日常業務のなかで、気づいたときに図面、指示書、標準、要領書・仕様書の不一致を改善していく。  もし、特定の作業について異なるやり方をしなければならない場合はそれがわかるように明示する。（注記等）  【管理面】 ルールの統一化を前提に、作業標準、要領を整備し、ルールを明確化する。

分類	上位概念		想定される結果（失敗）		未然防止の考え方
	原文	SHELLモデルへの分解			
		不適切/不安全な状態（SHELL）	不適切/不安全な行為（L）	SHELL×L＝失敗（ヒューマンエラー）	
5 誤解 （ミスタイク）	②『原則』なのに、実施しなくても良いと解釈する。	標準、業務・作業指示、仕様情報等に『原則』付きの指示がある ※指示に抜け道がある（複数の解釈ができる）	自身にとって、簡単な方を選択する	本来の指示・要求仕様と異なる作業・設計手配を行い、失敗を招く	【個人面】 日常業務のなかで、気づいたときに図面、指示書、標準、要領書・仕様書の不一致を改善していく。  もし、特定の作業について異なるやり方をしなければならぬ場合はそれがわかるように明示する。（注記等）  【管理面】 作業標準、要領を整備し、ルールを明確化する。
	③『適切か』『問題ないか』は個人によって程度が異なる。	『適切か』『問題ないか』付きの指示がある	自身にとって、簡単な方を選択する	本来の指示と異なる作業を行い、失敗を招く	・【管理面】 標準、手順書では、『適切か』『問題ないか』の判断基準を使わない。 ・【個人面】 『適切か』『問題ないか』の判断基準に相違がないか、指示側と受側で意見交換し、認識合わせする。また、文書指示へ反映する。
6 外部からの圧力	①上位者、関連部門、顧客の指示で、逸脱行為を行った。（権威購買）	職場の上位者から自身の意図と異なる圧力を受ける ・スケジュール優先 ・コスト（工数）優先 等	上位者の指示を優先する	ルールを逸脱した行為（記録の改ざん、作業省略等）を招き、それによる損失（製品問題や信用問題）が発生する	真摯な組織文化を創る 組織として、人として正しいと思うことを、あらゆる軋轢や障害を乗り越えて、一貫して本来の価値を目指す組織文化を創る 【個人面】 何が正しいか、自分で考え、判断し、正しい行動ができること。 【管理面】 社内通報制度、投書箱を設置するなどにより、当人のストレスを吸い上げやすい環境を整備し、改善につなげる管理を構築する  関連データ（生産スケジュール、出来高、作業者数、作業計上時間等）と不適合データの関連を分析し、背後に外部圧力による影響がないか評価する。

分類	上位概念			想定される結果（失敗）	未然防止の考え方
	原文	SHELLモデルへの分解		SHELL×L=失敗（ヒューマンエラー）	
		不適切/不安全な状態（SHELL）	不適切/不安全な行為（L）		
7 過信	①実績/経験で判断する。 （個人）	過去に経験した作業 ・と似ている作業（類似作業） ・から変更された作業 ・から期間が開いた、久しぶりの作業がある	自分の成功体験、経験に頼った判断をしてしまい、確認行為や検証行為を行わない	状態相違（類似の差、変更点、環境変化）に気付かず行動し、本来の作業目的と異なる結果（失敗）を招く	経験や勘で判断せず、事実及びデータで判断する。 統計学で洞察力（物事の本質を見抜く力）を高める。
	②有識者の意見を鵜呑みにして評価しない。 （他者）	自分（自部門）で知見のない事柄がある	<p style="color: red; text-align: center;">”過信”は全て、 近道行為につながるリスクがある</p> <p style="color: red; text-align: center;">①～③をセットで ヒント集に残す</p>	自分の意図と異なる結果（失敗）を招く	<p>【個人面】 経験や勘で判断せず、事実及びデータで判断する。 統計学で洞察力（物事の本質を見抜く力）を高める</p> <p>【管理面】 自部門の業務内容と人員の力量に乖離がないよう、力量項目明確化と計画的な教育を実施する</p>
	③外部評価/企業規模を鵜呑みにして評価しない。 （外部情報）	初めて取引するパートナーがある		外部評価/企業規模を鵜呑みにするして、自ら評価をしない。	自分の意図想定（外部評価等）と異なるパートナーのパフォーマンスで、結果（失敗）を招く

分類	上位概念			想定される結果（失敗）	未然防止の考え方
	原文	SHELモデルへの分解			
		不適切/不安全な状態（SHEL）	不適切/不安全な行為（L）	SHEL×L＝失敗（ヒューマンエラー）	
8 不適切状態放置	①自分が気づいた”誤り/曖昧さ”は、誰もが気づくと思ひ放置する。	標準、業務・作業指示等に”誤り/曖昧さ”がある	自分は気付いたが、下記理由で放置する ・問題ないと判断 ・是正依頼が手間	他の誰かが気づかず、失敗する	【個人面】 気付いたときに是正する。 （是正依頼のルールを確認し、ルールに従って処置する）  【管理面】 是正依頼が手間担当者の負担にならないか調査し、不必要な手間があればルールを見直す
	②ヒヤリハットを是正せずに終わる。	ヒヤリハット活動に特化しておりヒント集からは外す			
9 手抜き・怠慢	①曖昧な業務所掌は、溝を生む。	他部門や複数人で作業を進めるに当たり、役割、責任が曖昧な作業がある	相手がやるだろうと思ひ、自分では行動しない	作業漏れの失敗をする	【個人面】 相手に確認してから行動する （自分の思いと相手の思いは異なっていることを前提と心掛ける）  【管理面】 複数の組織で業務所掌が曖昧又は重複している場合、責任者（責任部門）を明確化する 責任者が要すればルールを明確化（見直す）する
	②自分しかわからない作業は、逸脱行為をしてもわからない。 以下のような作業（特殊作業等） ・容易に改ざんできる ・監視が行き届かない ・行動や、行為が記録されない。 ・専門性が高く、他者にはわからない	—	—	—	手抜き、怠慢は組織・システム（マニュアル、標準）の問題であり、報告（オープン）する文化を創る。
	③目的/根拠/背景が分からない作業は手順通りにやらなくても良いと思う。（手順飛ばし。検証の省略。）	目的/根拠/背景が分からないが、作業指示は明確化されている。 + ・手数が多作業 ・昔から続いている作業（前任者からのOJT)	作業時間の短縮となるのでやらなくても良いと思ひ、近道行動を行う（作業飛ばし、作業変更等）	ルール通りやらないため失敗する	【個人面】 ・面倒な作業は、その作業がどのような意図があるのか確認する （作業前に確認する）  ・作業ルールは変えない。変える場合はルールに基づき変更手続きを取る  【管理面】 作業ルールは指示のみならず、その意図も補足する

分類	上位概念			想定される結果（失敗）	未然防止の考え方
	原文	SHELLモデルへの分解			
		不適切/不安全な状態（SHELL）	不適切/不安全な行為（L）	SHELL×L=失敗（ヒューマンエラー）	
9 手抜き・怠	④得られる対価が大きい場合、逸脱行為をする。	—	—	—	手抜き、怠慢は組織・システム（マニュアル、標準）の問題であり、報告（オープン）する文化を創る。
10 技量不足	①経歴・経験だけで技量評価した。	—	—	—	組織の必要技量を明らかにし、技量取得の教育システムを創る。
	②補佐の仕事で技量を評価した。	—	—	—	
11 動作の失敗（スリップ）	①いつもの流れで意識せずに体が動いた。（年初は昨年の年を書く。）	属人的なタスクがある （人の技量に頼った作業がある）	いつもの流れで意識せずに体が動く	ちょっとした変化に気付かず、いつも通り作業して失敗する	<b>【個人面】</b> 危険予知を行い重要作業を識別し、重要作業は指差し呼称を行う等意識付けを行う  <b>【管理面】</b> 事例を交えたスリップ事象教育を定期的実施する
	②条件反射で体が動いた。（倒れそうだと重さを考えずに支える。）	—	—	—	
12 ど忘れ（ラプス）	①作業の中断により、やっていた作業を忘れる。	作業途中に中断がある  作業：締結作業（ボルト、ナット仮付け+トルク掛け）のように複数作業を完了さなければいけない作業+外観上は作業未了状態が分からない作業  再利用のワナ（書類データなどを流用する場合、全てデータが埋まっている状態のため、修正すべき箇所を中断で失念する  中断：休憩、電話、外来対応・・・等	中断前の状態を失念する	作業ミスする	事例を交えたスリップ事象教育

未然防止(気づき)が困難と思われるため、ヒント集からは外す