

Title	宇宙機器開発へ工業デザイナー参画を支援するシナリオベースド学習システムの設計と評価
Sub Title	Design and evaluation of a scenario-based learning system to support industrial designer involvement in space equipment development.
Author	山下, 紘生(Yamashita, Kosei) 神武, 直彦(Kohtake, Naohiko)
Publisher	慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
Publication year	2024
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2024年度システムエンジニアリング学 第380号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002024-0061

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文

2024 年度

宇宙機器開発へ工業デザイナー参画を支援する
シナリオベースド学習システムの設計と評価

山下 紘生

(学籍番号 : 82333577)

指導教員 神武 直彦

2025 年 3 月

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科
システムデザイン・マネジメント専攻

Design and Evaluation of
a Scenario-Based Learning System
to Support Industrial Designer Involvement
in Space Equipment Development.

Kosei Yamashita
(Student ID Number : 82333577)

Supervisor Naohiko Kohtake

March 2025

Graduate School of System Design and Management,
Keio University
Major in System Design and Management

論 文 要 旨

学籍番号	82333577	氏 名	山下 紘生
論 文 題 目：宇宙機器開発へ工業デザイナー参画を支援するシナリオベースド学習システムの設計と評価			
本研究は、「どのようにすれば工業デザイナーが宇宙機器開発に参加し、ユーザビリティの高い製品開発に貢献できるのか？」という問いから「工業デザイナーが宇宙機器開発に参画する際に直面する課題を解消するための具体的な支援方法を明らかにすること」を目的とし、学習システムを設計、プロトタイプを作成し、実験と評価を行った。 近年、宇宙旅行や民間ステーションの運営拡大に伴い、利用者の多様化やオペレーションの効率化が進む中で、宇宙機器のユーザビリティ向上が重要な課題となっている。従来の宇宙機器は訓練を受けた宇宙飛行士を前提に設計されており、直感的な操作性が不足している点が懸念される。一方、地上産業では工業デザイナーがユーザビリティ向上に大きく貢献してきたため、彼らの知見を宇宙開発に活かすことが期待される。しかし、宇宙特有の物理環境、厳格な開発プロセス、および膨大な技術文書が参画の障壁となっている。これらの課題を解決するため、本研究では異業種の工業デザイナーが宇宙開発に関する基礎知識を迅速に習得し、必要な専門情報へ容易にアクセスできる学習システムを提案する。参画障壁として「宇宙特有の技術情報の網羅的な学習」と「先行事例がない状況での暗黙知の習得」が主な課題となり、システムの設計においてはこれらを解決するように設計を行った。アクセスしにくい専門技術情報の集約、具体的なシナリオに基づいた学習、膨大な技術情報を心理的負荷なく伝える GUI の構築の 3 要素を軸とした。本システムの主な特徴としては、GUI サブシステムとアプリケーションサブシステムのインタラクションとして、「膨大な技術情報を心理的負荷なく伝える GUI」が備えられている点と、シナリオ学習データの設計として、「形式知を暗黙知的に学べるよう編纂されたシナリオ」が提供される点である。システムは、学習に必要な基本学習データ、シナリオ学習データ、文献データを内部に保持しており、アプリケーションサブシステムがそれを参照する。ユーザーは GUI を介してアプリケーションの操作を行い、学習を進める。本システムでは、まず「基本情報」として宇宙環境や設計基準の基礎を学び、その後、シナリオを用いたロールプレイを通じて設計プロセスを体験的に理解する。このプロセスにより、理論と実践を結びつけ、技術文書に記載された形式知を業務でどう活用するかという暗黙知の学習を可能にする。また、学習項目ごとに関連する技術文書へ直接アクセスできる機能を備えており、より深い理解を促す。システムの評価実験として、地上産業で工業デザイン業務に従事する有識者 5 名を対象に、参加者の専門性・従事年数の取得、宇宙機器開発の基礎知識の習得度を比較 (WEB 検索 vs. 学習システム)、技術文書のみを読む場合と、シナリオ学習を併用した場合の理解度比較、システム使用後の所感アンケートと、4つの検証を実施した。結果として、本システムの有用性は、学習結果とレビュー結果の両面から確認された。学習結果では、すべての検証で正答率の向上と回答時間の短縮が見られ、レビュー結果では定量・定性評価ともに高評価を得た。これにより、「宇宙特有の技術情報の網羅的な学習」と「暗黙知の習得」の課題に対して有効であることが示された。以上から、本システムは異業種の工業デザイナーに必要な知識を効率的に提供する上で、有用性があることが示された。一方で、知識の増加による誤謬率の上昇や、産業背景による学習成果のばらつきが課題として浮上した。 今後の課題として、UI デザインの改善、適切な情報量の設定、検索機能の強化が挙げられる。さらに、実務を想定した具体的なシナリオに基づく評価を拡充し、システムの実用性を多角的に検証する必要がある。本システムは、工業デザイナーの宇宙開発分野への適応性向上に寄与する有効なツールとなる可能性を示している。			
キーワード (5 語) 暗黙知、宇宙機器開発、工業デザイン、シナリオベースド学習、UI デザイン			

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	82333577	Name	Kosei Yamashita
Title: Design and Evaluation of a Scenario-Based Learning System to Support Industrial Designer Involvement in Space Equipment Development.			
Abstract This study addresses the question: "How can industrial designers participate in space equipment development and contribute to usability improvements?" The goal is to identify concrete support methods for overcoming participation barriers. To this end, a learning system was designed, prototyped, and evaluated. With the expansion of space tourism and private space stations, improving usability has become crucial. Traditional space equipment is designed for trained astronauts, often lacking intuitive operability. While industrial designers have significantly contributed to usability in terrestrial industries, their involvement in space development is hindered by unique physical constraints, strict processes, and extensive technical documentation. To resolve these issues, this study proposes a learning system that enables industrial designers to quickly acquire space development knowledge and access necessary technical information. The system emphasizes comprehensive learning of space-specific knowledge and tacit knowledge acquisition in the absence of prior examples. It is structured around three core elements: aggregation of specialized technical information, scenario-based learning, and a GUI that minimizes cognitive load. Users first learn fundamental concepts such as the space environment and design standards, followed by scenario-based role-playing to bridge theory and practice. Direct links to relevant technical documents enhance deeper understanding. The system's key features are an intuitive GUI for learning complex information and scenario-based learning to facilitate tacit knowledge acquisition. An evaluation with five industrial design experts included: background data collection, a comparison of learning effectiveness between web searches and the system, comprehension tests with and without scenario-based learning, and a user feedback survey. Results showed that using the system increased test scores from 2.0 to 4.4 out of 6, reduced response time slightly, and led to positive qualitative feedback. The system effectively provided structured learning and improved accessibility to technical knowledge. Challenges remain, including a slight increase in error rates, learning outcome variations by industry background, and resistance to technical documentation among some participants. Future improvements should focus on UI design, optimizing information volume, and enhancing search functionality. Expanding practical scenario evaluations will further validate its applicability. This study demonstrates the system's potential to support industrial designers in adapting to space development.			
Keywords (5 words) Tacit knowledge, space equipment development, industrial design, scenario-based learning, UI design			

目次

第 1 章 緒言	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 宇宙開発の民間移行とコスト	1
1.1.2 有人宇宙飛行の多様化と QOL.....	2
1.1.3 宇宙機器のユーザビリティレベル.....	3
1.1.4 産業機器のユーザビリティ向上に有効なデザインシンキング	5
1.1.5 産業の成熟と商品性向上へのデザイナーの貢献.....	7
第 2 章 課題分析	9
2.1 デザイナーの宇宙機器開発参画における課題	9
2.1.1 宇宙と地上における環境条件の違いを理解することが難しい	10
2.1.2 開発プロセスの違いへの対応が難しい	10
2.1.3 技術文書とそのアクセシビリティが低い	11
2.1.4 前例が乏しく暗黙知として継承されるデザイン知見がない課題	12
2.2 課題のまとめ.....	13
2.3 研究目的.....	14
第 3 章 関連研究	15
3.1 調査分析の結果	15
3.2 複雑な開発プロセスへのデザイナー参画に関する研究.....	16
3.3 デザインの学習と暗黙知に関する研究	18
3.4 関連研究のまとめ	19
第 4 章 提案	21
4.1 提案するシステムの目的	21
4.1.1 アクセシビリティの悪い専門技術情報の集約.....	22
4.1.2 専門情報を基にデザイン作業を具体的なシナリオで学習	22
4.1.3 膨大な技術情報を心理的負荷なく伝える GUI	23
4.2 提案するシステムのシナリオ	24

4.2.1 システムがない場合のケース.....	24
4.2.2 システムがある場合のケース.....	26
第5章 設計.....	28
5.1 システムの構成	28
5.2 外部システムの構成	32
5.3 システムの使用フローから見る本学習システムの特徴.....	34
5.3.1 基本的な学習のフローと構成	34
5.4 システム構成要素の設計.....	41
5.4.1 GUI の設計	41
5.4.2 アプリケーションの設計	43
5.4.3 基本学習データの設計	45
5.4.4 シナリオ学習データの設計.....	49
(1) 要求仕様の確認	51
(7) 技術審査を受ける	57
5.4.5 文献データの設計	58
第6章 評価.....	60
6.1 プロトタイプによる実験.....	62
6.1.1 実験の概要	62
6.1.2 実験計画	62
6.1.3 マニュアルの提示	64
6.1.4 アンケートフォームの設計	65
6.2 システムの検証結果.....	72
6.2.1 基本情報収集	73
6.2.2 シナリオ学習.....	74
6.2.3 システムのレビュー.....	75
第7章 考察.....	77
7.1 考察の観点	77
7.2 本システムの有用性.....	78

7.3 検証のその他気づき	81
7.4 今後の展望	82
第8章 まとめ.....	83
謝辞	84
参考文献	86

図目次

図 1 2030年を境に変化する宇宙開発の状況(参考文献[1] [2] [3] [4]を基に筆者作成)	2
図 2 Lavazza 社の地上用コーヒーマシンはシンプルで視覚的にわかりやすいインターフェースを備える。[10]	4
図 3 Lavazza 社の宇宙ステーション用コーヒーマシンは、一見しただけでは操作方法がわかりづらい。[11]。	4
図 4 SUICA のタッチ式読み取り機のプロトタイプたち。「手前に少し傾いている光るアンテナ面」が人の動作を誘発することを発見した。[15]。	6
図 5 黎明期の携帯電話はトランシーバーのような産業機器としての外観とユーザビリティで、万人のライフスタイルに合うデバイスではなかった。[17]	8
図 6 市場と技術の成熟で、機能やユーザーが多様化し、ユーザビリティと外観が進化した。[17]	8
図 7 課題の内容と解決の方針 筆者作成	13
図 8 コネクテッドヘルスアプリのUXを考慮した開発に対する 3 段階のアプローチ [27]。	17
図 9 宇宙産業に他産業からシフトする際、関連研究の関係	20
図 10 課題を解決するシステムの内容とコンセプト	21
図 11 本システムが存在しない場合のシナリオ	25
図 12 本システムを利用した場合のシナリオ	27
図 13 本学習システムのシステム構成図	29
図 14 タブレット端末に表示された本システムの GUI	33
図 15 学習の全コンテンツとそのフロー	35
図 16 階層化された学習コンテンツ	36
図 17 基礎情報の学習とシナリオ学習の項目の対応	37
図 18 各コースの任意の箇所から、技術文書へアクセス可能なフロー	38
図 19 技術文書の解説、関連項目、オリジナルの参照フロー	40
図 20 本システムの GUI の例、ホーム画面	42

図 21 本システムのアプリケーション構成全体像	44
図 22 基本学習のうち「1-1 宇宙環境の特徴」の一部	48
図 23 シナリオの学習開始ページに示された 7 つのステップ	50
図 24 要求仕様書のうちシステム特性の関するページの解説	51
図 25 デザインアウトプットの例を示したページ	52
図 26 デザイン案を具体化する上で、関連文書のどこを読むかを示したページ	53
図 27 NASA で過去作成したモックアップの解説	54
図 28 地上での検証を説明しているページの例	55
図 29 技術審査に向けた準備の内容の解説	56
図 30 文書解説のページ(左)と、そこから各文書の必要項のみを参照する Highlighted ページ(右)	59
図 31 検証プロセスの全体像	61
図 32 実験時に提示したマニュアル	64
図 33 PC を利用した検証の様子、画面全体録画	72
図 34 学習に関する検証、A と B の結果のまとめと考察	78
図 35 定性評価の注目すべき項目のまとめと考察	79
図 36 課題と結果からみる考察のまとめ	80

表目次

表 1 データとして引用した文書の一覧	46
表 2 参照した文書一覧	58
表 3 実験における被験者の 4 ステップ	63
表 4 参加者属性インタビューの質問項目	66
表 5 基礎知見リサーチにて使用された確認テストの設問	68
表 6 プロセス学習にて使用された確認テストの設問	70
表 7 所感アンケートの質問項目	71
表 8 検証 A の結果サマリー	73
表 9 検証 B の結果サマリー	74
表 10 システムのレビュー結果サマリー	75

第1章 緒言

1.1 研究の背景

1.1.1 宇宙開発の民間移行とコスト

人類が宇宙に進出してから数十年が経過し、現在新たな時代の転換点を迎えている。従来国家主導で行われてきた宇宙開発が、民間企業の参入により商業化へと大きくシフトしつつあり、その象徴的な出来事として、国際宇宙ステーション (International Space Station 以下 ISS) の 2030 年退役が決定している点が挙げられる。ISS の退役後には、民間企業が運営する宇宙ステーションが、地球低軌道 (Lower Earth Orbit 以下 LEO) の利用の主役を担うとされている。この変化は、宇宙開発がこれまでの国家的プロジェクトから、ビジネスとしての持続可能性を模索する新たな局面に移行していることを示している [1]。

宇宙開発ならびに宇宙で稼働するシステムの運用コストは膨大であり、アメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration 以下 NASA) の年間予算の約 5% に相当する 13 億ドルが ISS の運用に投入されている [2]。ISS の退役に伴い導入される民間事業者が開発および運用を行う次世代の宇宙ステーションは、コスト削減などの採算性向上施策を増やさなければ、事業としての持続可能性を担保できないだろう。これには、優れた商業サービスの提供による収益向上や、運用効率向上、人員管理の効率化が重要となるだろう。

現在、高度に訓練された宇宙飛行士 1 人当たりの運用コストは時間当たり約 13 万ドルとして開示されている [3]。この金額は、宇宙飛行士の選抜、長期間の訓練、宇宙滞在中のサポート体制など、すべてのプロセスによるものだが、高度な信頼性を保証するためには必須とはいえども、莫大なコストとなっている。民間企業が運営する宇宙ステーションでは、この状況を改善するために、作業工程を削減し、訓練の効率化を図ることなどが求められるだろう。たとえば、より直感的で使いやすい機器の設計や、地上からの支援を最小限に抑えた運用方法の確立などが予

想され、これにより、訓練や運用を簡素化することで、宇宙飛行士のコスト削減を実現することが期待できる [4]。

このように宇宙開発は図1のような民間移行の変化に際して多くの課題が生まれてきている。



図 1 2030年を境に変化する宇宙開発の状況(参考文献[1] [2] [3] [4]を基に筆者作成)

1.1.2 有人宇宙飛行の多様化と QOL

近年、宇宙旅行サービスの登場により、多くの人々が宇宙へ行く時代が到来している。現在、Virgin Galactic、Blue Origin などの企業が地球低軌道への旅行を提供しており、これらのサービスを利用することで、一般の人々も宇宙を体験できるようになった。その内訳として、宇宙空間に到達した旅行者の年齢は 18 歳から 90 歳までと、多様な年齢層の人々が宇宙へ行く時代となっている。[5] [6] 現在の宇宙旅行サービスは、弾道飛行による短時間の日帰りが主流だが、今後、宇宙サービスが高度化することで、民間宇宙ステーションに併設されるホテルなどの滞在も増え、特殊な訓練を受けていない旅行者が一定期間生活することも考えられる [7]。

このような背景から、宇宙空間での生活の質 (Quality Of Life 以下 QOL) 向上は差し迫った課題となりつつある。JAXA などの機関では、Think Space Life (以下 TSL) という社会連携型の研究開発が行われており、宇宙での生活環境の改善に取り組んでいる。上記 TSL の活動によればこれらの QOL の課題は現在活動している宇宙飛行士たちにも有効であり、負担の軽減や作業効率向上など、さまざまなベネフィットが期待されている [8]。

1.1.3 宇宙機器のユーザビリティレベル

QOL とは生活の質や快適性のことを示す言葉であり、自身の生活を取り巻く機器の使い勝手、すなわちユーザビリティが高いことは QOL の向上に資するといえよう。しかし現行の宇宙ステーションにおける機器は、ユーザビリティが高いとは言えない状況にある。それは高度に訓練された宇宙飛行士が操作することを前提としたユーザビリティ要求がされており、また、宇宙機器特有の安全基準や微小重力環境に起因する制約により、地上で使用する機器に比べインターフェースが複雑であり、詳細なマニュアルや地上からの支援が必要とされている [9]。例えば、Lavazza 社が開発したコーヒーマシンの地上モデルと宇宙ステーション用モデルを比較すると、現行の宇宙機器と地上機器のインターフェースデザインの違いを明確に把握することができる。地上モデルのインターフェースデザインはシンプルで直感的に操作可能となるよう設計されており、ボタンの数は最小限に抑えられ、色やアイコンを使用して操作手順が視覚的に分かりやすく示されている。そのため、特別な訓練や説明書がなくても、ユーザーはすぐに使い方を理解でき、万人向けのユーザビリティ要求を満たしている。このデザインにより、ユーザーは快適に利用でき、ユーザーエクスペリエンスの向上にも貢献している [10]。一方、図3の宇宙ステーション向けモデルは、微小重力環境での安全性を最優先に設計されており、多くの操作手順や確認プロセスが求められる。そのため、インターフェースデザインが複雑化し、使用時に詳細な説明や訓練が必要となる。これらの機器は、ユーザビリティ要求が高度に訓練された国家の宇宙飛行士を想定しているため、その運用に支障はないが、一般消費者の観点から見ると、機器が何のためのものか、どこを操作すればよいかを判断するのは困難である [11]。将来的には、宇宙旅行者が滞在中に生活家電などの機器を操作する必要がある可能性があり、また、今後の産業の民間移行に伴って主役となるであろう民間雇用の宇宙飛行士に対する作業効率化やコスト削減といった観点から、ユーザビリティ要求の向上とインターフェースデザインの改善は、今後の重要な課題となると予想される [12]。



図 2 Lavazza 社の地上用コーヒーマシンはシンプルで視覚的にわかりやすいインターフェースを備える。[10]

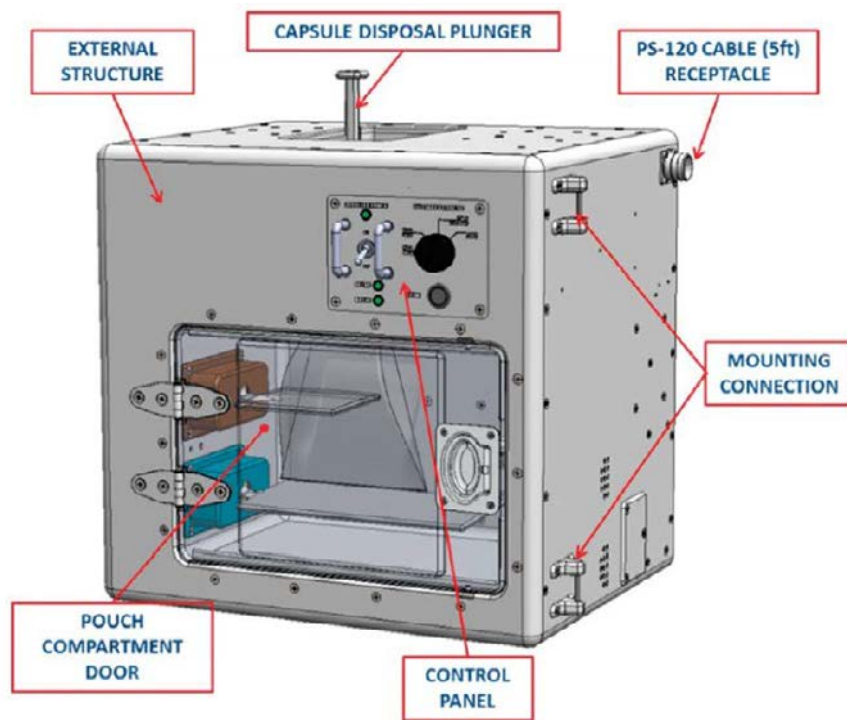


図 3 Lavazza 社の宇宙ステーション用コーヒーマシンは、一見ただけでは操作方法がわかりづらい。[11]。

1.1.4 産業機器のユーザビリティ向上に有効なデザインシンキング

工業デザイナーは、複雑な操作プロセスを簡素化し、直感的で使いやすいインターフェースを提供することで、ユーザーの課題を解決し、製品の革新性を高める役割を担うが、過去には特殊な産業機器が抱えるユーザビリティ課題のブレイクスルーに貢献してきた [13]。例えば IDEO 社のデザイナーによる小児用 MRI ルームのデザイン事例はデザインシンキングの成功例として有名である。従来、小児患者の約 8 割が MRI 検査時に鎮静剤を必要としていたが、これは MRI 装置や部屋の環境が与える恐怖感が原因であった。IDEO のデザイナーはこの問題に着目し、MRI ルームを冒険物語の舞台のようにデザインすることで、子どもたちが楽しく検査を受けられる環境を提供した。その結果、鎮静剤を必要とする患者はほとんどいなくなり、医療現場の効率と患者の満足度が大幅に向上した [14]。また、日本の非接触 IC カード「SUICA」の成功事例も工業デザインの重要性を示している。これまでは磁気券をゲートに挿入する操作が一般的であったが、新しい IC カードという技術の導入によって、ゲートにカードをタッチするという新しい操作が登場した。しかし試作段階ではこのタッチ操作を自然に誘発できず、被験者のエラー率は約 50%に達していた。工業デザイナー山中俊治氏は、利用者の行動を詳細に観察し、図4のようなタッチ部分のデザイン提案とプロトタイピングを実施した。その結果「手前に少し傾いている光るアンテナ面」が自然に人のタッチ操作を誘発できることを突き止め、この変更により、エラー率は 1%以下まで低減し、この新しい方式の社会実装が実現した [15]。これらの事例は、ユーザビリティ向上のためのデザインの役割を示すとともに、工業デザイナーがユーザー行動の分析や課題解決において少なくない貢献が可能であることを示している。同様のアプローチを宇宙機器の開発にも適用することで、宇宙環境に適応したユーザビリティの高い機器を実現し、利用者の多様化対応に貢献する可能性がある。



図 4 SUICA のタッチ式読み取り機のプロトタイプたち。「手前に少し傾いている光るアンテナ面」が人の動作を誘発することを発見した。[15]。

1.1.5 産業の成熟と商品性向上へのデザイナーの貢献

産業の黎明期において、製品開発は主に技術的課題の解決に焦点が当てられ、設計は機能性を最大限に満たすことが優先される [16]。この段階では、製品は通常、特定の専門家や限られた顧客層に向けて作られ、ユーザーエクスペリエンスやデザインの洗練は二の次とされることが多い。しかし、産業が成熟し、技術の標準化や市場の拡大が進むにつれ、競争要因が「機能性の確保」から「使いやすさ」や「商品性の向上」へとシフトしていく。この変化に伴い、デザイナーが製品開発に参画する意義が大きくなる。以下にその例を示す。

携帯電話産業を例にとると、その初期段階では、通話機能の実現や通信インフラの整備が最優先課題であった。このため、図5のように初期の携帯電話は通信用産業機器といった趣で、大きく持ち運びにも不便で、操作性も技術知識を必要とする場合が多かった。しかし、通信技術の進歩と市場の拡大により、製品の小型化、軽量化が進むと同時に、図 6 のようなインターフェースの使いやすさやライフスタイルに合わせた個性ある外観デザインが重要な競争要因となっていた [17]。Apple 社の iPhone は、タッチスクリーンを採用し、直感的なユーザインターフェースを提供することで、従来の携帯電話とは一線を画する製品を市場に投入した。この成功は、技術の進歩にデザインの力が加わり、より多くの人々に親しまれる製品を生み出した例としてしばしば引用される [18]。同様に、自動車産業も初期には信頼性や機能性が重視された。フォード社が 1908 年に発売した T 型フォードは、大量生産技術を用いて自動車を手頃な価格で提供し、普及に大きく貢献した。しかし、車両の基本性能が標準化されるにつれ、消費者の関心は性能だけでなく、運転の快適さやデザインに移っていった。特に 20 世紀後半からは、ピニンファリーナやイタルデザインといった有名なデザインスタジオが自動車デザインに関与し、車両の形状や内装、ユーザインターフェースの美しさや使いやすさを重視する傾向が強まった。こうしたデザイナーの手掛けた自動車は、現在においては美術工芸品に近い価値を持っており、自動車をただの移動の道具から文化的価値のある存在へ昇華させた [19]。

このように産業の進化によってニーズや要求の多様化を支え、大きな価値を生み出してきたのも工業デザイナーのひとつの特徴といえるだろう。



図 5 黎明期の携帯電話はトランシーバーのような産業機器としての外観とユーザビリティで、万人のライフスタイルに合うデバイスではなかった。[17]



図 6 市場と技術の成熟で、機能やユーザーが多様化し、ユーザビリティと外観が進化した。[17]

第2章 課題分析

2.1 デザイナーの宇宙機器開発参画における課題

背景では、宇宙産業の黎明期には技術の実用化が主たる目的だったが、時代の変化に伴い民間利用が進むにつれ、ユーザビリティの向上の重要度が高まる可能性があると言った。

また、機器のユーザビリティの課題解決や高度化には工業デザイナーの関与が大きな役割を果たしてきたため、宇宙産業においても同様の活躍が期待できると述べた。しかしながら、これまで工業デザイナーが宇宙機器開発に参加した例はほとんどなく、その具体的な関わり方は明確ではない。したがって本研究の問いを「どのようにすれば工業デザイナーが宇宙機器開発に参加し、ユーザビリティの高い製品開発に貢献できるのか。」とした。デザイナーは通常、地上環境における製品やインターフェース設計に熟練しており、その知見は人間中心設計や直感的な操作性の実現に寄与してきた。しかし、宇宙機器開発のプロジェクトに参画する場合、宇宙開発特有の技術的知識の不足が大きな課題となり、この課題を解決するためには、宇宙開発の特性やプロセスへの深い理解が求められるだろう。実際に筆者は地上で使用する輸送機器のデザインとエンジニアリングに長らくかかわった後に、宇宙産業へ転向を試みたが、その際に様々な違いに直面した。以下に課題となるであろう項目を述べる。

2.1.1 宇宙と地上における環境条件の違いを理解することが難しい

宇宙と地上を比較したときに最も大きな違いとなるものは環境条件であり、主なものとして「微小重力」「高真空」「宇宙放射線」といったものが挙げられる。

微小重力環境では重力の影響が限りなく少ないため、物体は浮遊し、空気の対流は発生せず、液体は球状となる。高真空な環境では気圧がほとんどなく、呼吸に必要な酸素もないため、人間は与圧された密閉空間の中でしか生きられない。絶えず飛来する宇宙放射線は機器や物質にダメージを与えるため、特別な考慮が必要である。上記の三要素は人間に対しても様々な影響を与える。例えば人が何かを操作することに着目しても、浮遊する身体を保持しながら行う必要があり、ボタンやノブを操作する際は、入力した力と同じだけの反作用が体に返ってきてしまう。また、体液の分布が変わることで視神経への影響が報告されており、視力の低下や、視覚と手の協調動作能力が低下するため、精密動作に影響が出る [20]。つまり地球の近傍を飛行する宇宙ステーションの内部環境で使用する機器には、これらに対して対応する設計が求められる。これまで工業デザイナーが関わってきた地上で使う製品は、すべて地球上での環境に適合する条件で開発されてきたため、この差異を理解し、新たな要件に適応したアイデアを考える必要があるだろう。

2.1.2 開発プロセスの違いへの対応が難しい

宇宙機器開発は、過酷な宇宙環境での高い信頼性と安全性を求められるため、地上機器とは異なる独自かつ厳密な開発プロセスを採用する。システムズエンジニアリングに基づき、概念設計、基本設計、詳細設計、製作試験と順を追って進め、各段階で設計の妥当性や安全性を審査する。また、この各プロセスのトレーサビリティを確保するため、膨大な文書作成を伴う。これにより、設計意図や仕様変更を追跡可能とし、確実な機能と安全運用を実現している [21]。もし

デザイナーが参画する際には、プロセスを理解し適応することも大切であるとともに、要求に対してトレーサビリティを持たせるデザイン案の作成、そして各審査に対する文書作成などに対してデザイナーが対応する必要があるであろう。一方、地上で使用される機器、例えば家電製品の開発プロセスは、宇宙機器とは異なる要求とプロセスに基づいて進められる。家電開発においても高い品質や安全性が求められるが、利用環境が比較的安定していることと、修理などの対応が可能であること、また大量生産であることから、宇宙機器ほど厳密な審査、環境試験、安全対策は必要とされない。地上機器の開発では、ユーザビリティやコスト効率が重視されることが多く、製品の設計は市場ニーズに応じた迅速な開発サイクルを重視している [22]。もちろん要求定義からスタートし、審査を経て開発を進めるというウォーターフォール開発に準じた基本プロセスは同一だが、各プロセスで設定されているクライテリアの厳しさと、そして審査の目的などが異なる。

2.1.3 技術文書とそのアクセシビリティが低い

宇宙機器開発においては、膨大かつ多岐にわたる技術文書が存在し、設計、製造、試験、運用の各段階で、それらに準拠しながら開発を進める必要がある。これらの文書は、宇宙という極限環境での安全性と信頼性を確保し、ミッションの成功を保証するために不可欠である。

技術文書には、まず国際的な基準やガイドラインが含まれる。例えば、NASAやESA(欧州宇宙機関)が定める技術基準、またはJAXAが使用する国内外の規格が挙げられる。これらの基準は、システムの設計や試験において最低限満たすべき要件を規定し、宇宙機器が適切に機能し、耐久性を備えるための基盤となる [23] [24]。さらに、これらの文書は専門用語や業界特有の記述が多いため、情報にアクセスするだけでなく、内容を正確に理解することも難しいだろう。結果として、必要な情報を収集し、効果的にデザインに反映するには多大な労力がかかる可能性が高い。

2.1.4 前例が乏しく暗黙知として継承されるデザイン知見がない課題

工業デザインや工芸の分野では、知識や技術が体系化されたプロセスに従うのではなく、先人からの直接的な指導や経験を通じて伝承される「暗黙知」の形で受け継がれることが多い。この暗黙知は、文書化やマニュアル化が難しいため、直接的な体験や観察を通じてのみ習得可能な知識であり、初学者などにはOJTといった形で共有される。しかし企業内や企業間で協業を行う場合、合意形成の際問題になることがある [25]。形式知化の取り組みは多々あれど、例えばプロジェクトマネジメントのようにベストプラクティスを形式知として体系化することは非常に難しい。そのため宇宙機器の工業デザインのように、先行例がほぼない新しい領域については、実際のタスクやデザインを考慮する上での重要な事項などを把握、自分事としてイメージできるような特定のシナリオやケーススタディを用意する必要があると考える。

2.2 課題のまとめ

宇宙機器開発におけるデザイナーの参画には、いくつかの課題が存在することを述べた。

まず、宇宙環境では微小重力、高真空、宇宙放射線といった地上とは異なる物理条件により、機器設計に特殊な配慮が求められる。特に微小重力下では物体が浮遊し、操作時に反作用が生じるなど、人間工学の観点からも新たな挑戦が生じる。次に、宇宙機器開発のプロセスは、システムズエンジニアリングに基づいた厳密な段階的アプローチを採用しているため、このプロセスへの適応が課題となる。また、各段階で設計や安全性の審査が行われ、トレーサビリティを確保するために膨大な技術文書が作成され、多くの技術文書に準拠していることを証明する必要がある。こうした文書へのアクセスや内容の把握は、工学的なバックグラウンドを持たない他分野からの工業デザイナーらにとっては高い障壁となる。さらに、デザインや工芸の世界では、技術やノウハウが暗黙知として伝承されることが多い。この暗黙知は直接的な指導や経験を通じてのみ習得可能であり、他業界からの転向を難しくしている。

以上のことから特有の技術情報を網羅的に学ぶ必要があることと、先人が居ない例に対して、暗黙知的に学ぶ必要があると考えられる。これらをまとめると図7のようになる。

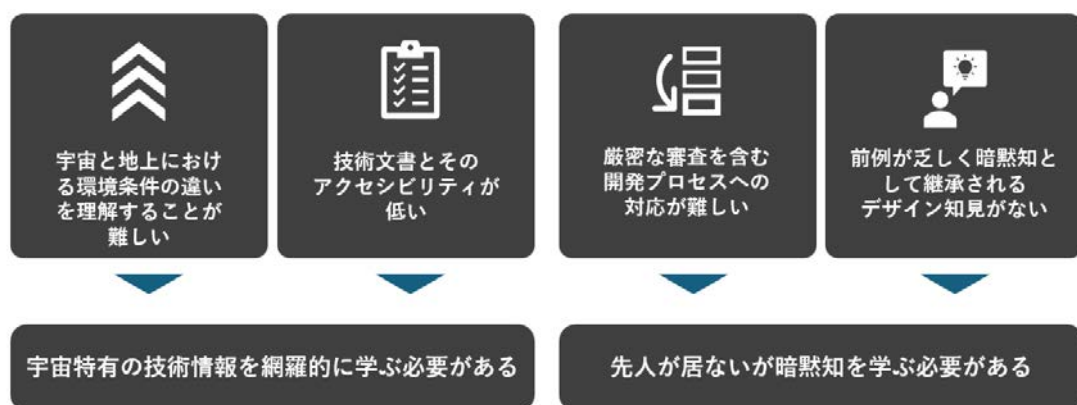


図 7 課題の内容と解決の方針 筆者作成

2.3 研究目的

本研究の目的は、工業デザイナーが宇宙機器開発に参画する際に直面する課題を解消するための具体的な支援方法を明らかにすることである。これにより、デザイナーの専門性を宇宙機器の効率性、使い勝手、安全性の向上に活用し、次世代の宇宙開発の課題解決、効率化や生活のQOL向上に貢献を実現する。

第3章 関連研究

第 3 章では本研究の目的と課題を踏まえて行なった先行研究調査から関連研究について論じる。先行研究で明らかになっていることと課題について述べ、本研究が取り組むべきことを明確にする。

3.1 調査分析の結果

本研究の目的は「工業デザイナーが宇宙機器開発に参画する際に直面する課題を解消するための具体的な支援方法を明らかにすること」である。そこで、以下2つの観点で関連研究の調査を行なった。次項に詳細を述べる。

1. 複雑な開発プロセスへのデザイナー参画に関する研究
2. デザインの学習と暗黙知に関する研究

3.2 複雑な開発プロセスへのデザイナー参画に関する研究

医療分野では、医師や看護師が扱う医療用産業機器のユーザビリティ向上にユーザーエクスペリエンス(User Experience 以下 UX)デザインの観点を取り入れはじめている。Tobiasらは医療機器開発業界においては、これまで古典的な認知心理学のセオリーに基づいて、安全性と効率に集中しインターフェースを開発していたため、UX という観点はあまりなかった。しかし UX デザインに注力することで、装置の安全性と効率をより高めることができるのではとしている。

Olga らは、医療機器、特にクリティカルな手術装置などのデバイスにおいて UX デザインは患者の命を救うための重要な要因であると述べ、また UX の関与が医療機器の設計において必要であるとしている。[26]Harte らは、医療機器を開発し、販売するためにはアメリカ食品医薬品局(Food and Drug Administration 以下 FDA)から承認を得る必要があり、その審査には開発プロセスの各種証跡やエンドユーザーを含むユーザビリティテストの証拠の提出が求められると説明した。そのうえで遠隔医療デバイスの操作性を向上させるため、UX デザイン手法を組み込んだ、証跡を残せる開発プロセスを提案し、実際の遠隔医療開発に適応させることで有効性を実証している。具体的にはコネクテッドヘルス端末の開発において、開発サイクルの速さと UX という利便性を向上させる新しい要素と、従来の審査を伴う HCD を軸とする開発プロセスに適合させる図8のような 3 段階の方法論を示した。[27]。

このことから、医療機器開発は厳密なトレーサビリティを求められること、UX デザインが効率化に有効であるとされていること、またテーラーメイドされた開発プロセスに従って、デザイナーの参画が果たされていることが述べられている。

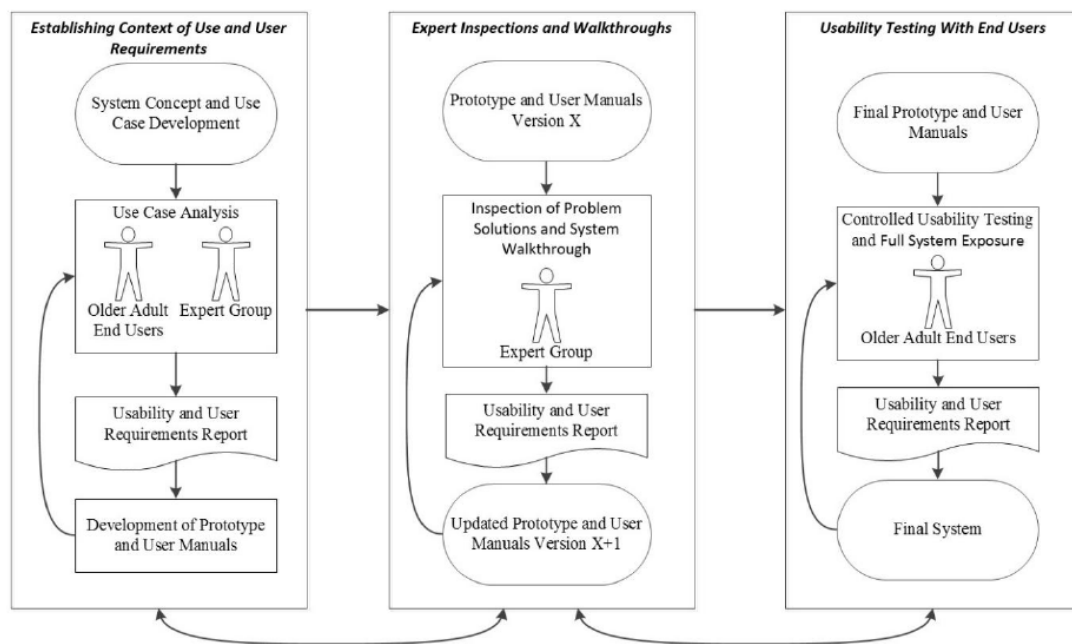


図 8 コネクテッドヘルスアプリのUXを考慮した開発に対する 3 段階のアプローチ [27]。

3.3 デザインの学習と暗黙知に関する研究

デザインに関する学習については、暗黙知が非常に重要なようを占める。

久保田らはデザインの教育をテーマに、暗黙知と形式知について、以下のように述べている。表現技法や設計技能は「技能」として暗黙知に分類される。暗黙知とは、個人の経験に基づく知識や感情、状況との関連の中で同時期的に存在する知識を指す。デザインでは技能としての暗黙知だけでなく、体系化されたセオリーとも呼べる理論が存在する。グラフィックデザインを例にすれば「色彩」「余白の取り方」「文字組み」などが挙げられるが、これらの理論体系をどのように用いることで表現成果に作用するのかは経験の中から学生自身が獲得していく必要がある。そのためデザインの教育では先駆者たる教員や講師が表現技術・思考法の形式知を示し、時に技術の実演を行うことで模倣を通じて「形式知の作用」を伝える方式が多く取られる。基礎は体系的に学べるが、応用は実務で学ぶ。[28] 以上のことから形式知をベースにしつつも、暗黙知を先駆者から学ぶことで深めていくことを示している。また、Aruna らは、以下のように述べている。暗黙知とは専門家の協業によって得られた共通の経験の結果である。感性、傾向、嗜好といったものは、その集団が持つ共通の社会的・文化的条件によって左右される。デザインの専門知識の一形態である直感は、その共通性を持つ場においてのみ機能するものである。[29] 以上のことから、暗黙知と呼ばれるものや、経験によって生まれる勘というものも、同一のコミュニティやインダストリーの中でしか通用、共有できないものであることを示している。

以上のことから、デザイナーのスキルや知見は、基礎的な形式知を学んだあとは、先人たちや実践を以てのみ伸ばすことが出来、その暗黙知は共通のコミュニティやインダストリーにのみ通用するものであると言える。

3.4 関連研究のまとめ

3.2 は複雑な手続きと審査プロセスを要する産業機器開発への、デザイナー参画の方法と有効性を示しており、これはデザイナーに対しては仕組みや教育を施せば、宇宙開発などの類似の開発プロセスへ対応ができる可能性があることを示唆している。3.3 は、形式知として得られるデザインの基礎的なスキルは転用可能であるが、専門性を深めていき、高度化するにあたっては暗黙知が重要となることと、その領域の中でのみ通用することを述べている。つまり新しい領域への対応は、何かしらの暗黙知的教育が必要であり、デザイナーが宇宙開発に参画する際は、宇宙の知見を暗黙知的に学習する必要がある可能性を示唆している。例えば自動車産業に従事するデザイナーを例にとって、関連研究から示される、デザイナーの未経験領域への対応の方法をあてはめると、図 9 のように整理ができる。これらの研究が明らかにした対象方法ではなしていない、宇宙開発に新しく参画するデザイナーにとって必要な方法を明らかにすることで、課題解決の方法論が明らかになるであろう。

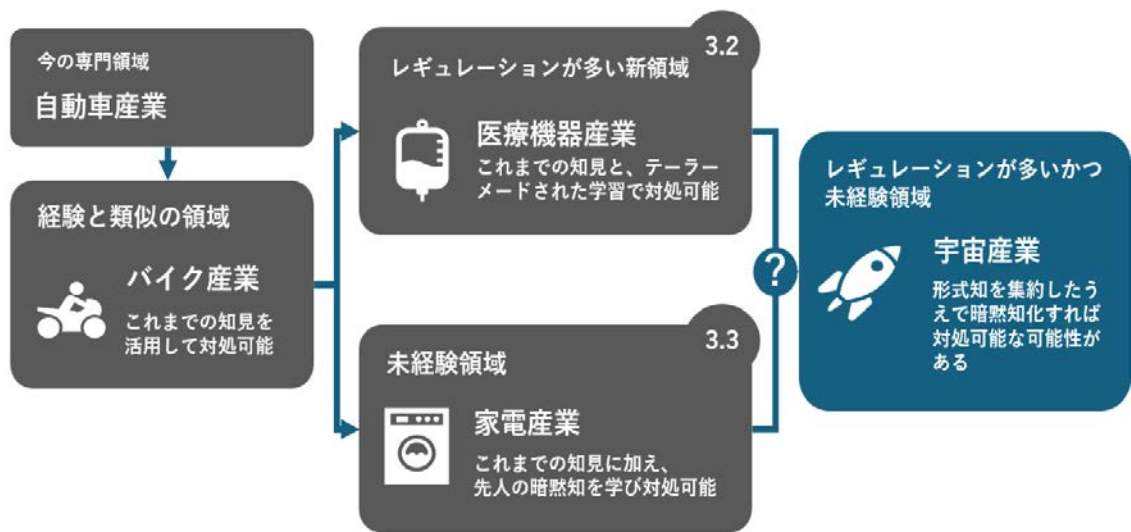


図 9 宇宙産業に他産業からシフトする際、関連研究の関係

第4章 提案

4.1 提案するシステムの目的

本研究で提案するシステムの目的は、研究の目的である、「工業デザイナーが宇宙機器開発に参画する際に直面する課題を解消するための具体的な支援方法を明らかにすること」の手段として提案するものである。宇宙開発に関する基礎的な知識を効率的に学べる教育を提供し、初学者である異業種の工業デザイナーが重要かつ最低限必要な情報に迅速にアクセスできる仕組みを構築する。これにより、専門情報を適切な粒度で提供し、実践的な学びを可能にすることで、デザイナーの宇宙開発分野への円滑な参画を支援することを目指す。

本システムは、以下の「アクセシビリティの悪い専門技術情報の集約」「専門情報を基にデザイン作業を具体的なシナリオで学習」「膨大な技術情報を心理的負荷なく伝える GUI」という 3 つの要素を軸として構築される。図 10 が示すようにこれらは課題解決の2つのアプローチである「宇宙特有の技術情報を網羅的に学ぶ必要がある」および「先人が居ないが暗黙知を学ぶ必要がある」に対応するための方法であり、本提案の強みと特徴を示すものである。

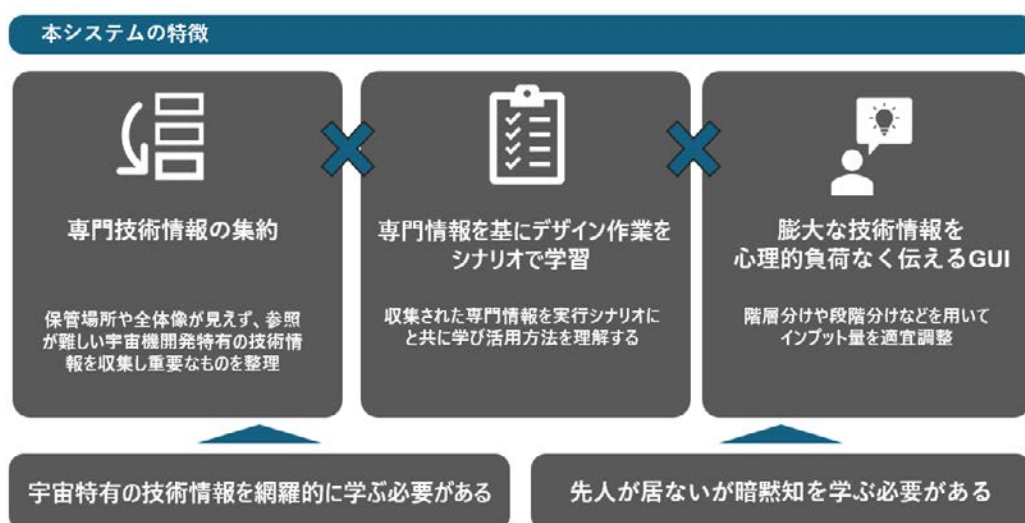


図 10 課題を解決するシステムの内容とコンセプト

4.1.1 アクセシビリティの悪い専門技術情報の集約

宇宙機器開発を進めるうえで参照する必要がある様々な重要文書、参考文書は、例えば、NASA や ESA (欧州宇宙機関) が定める技術基準、または JAXA が使用する国内外の規格などが存在するが、これらは各機関のリポジトリなどに保管されている。[23] またすべての文書を参照する必要はないが、その要否などは、文書の参照に精通しなければ判断ができない。これらを工業デザインという職種において必要となる、有人宇宙飛行かつハードウェア設計に類する部分のみを中心に厳選・整理することで、簡単かつ網羅的に参照が可能としたものである [30]。これにより、初学者が煩雑かつ困難な検索作業を経ずに、必要な情報へ迅速かつ正確にアクセスできる。さらに、専門情報を適切な粒度に分解し、工業デザイナーが理解しやすい形式で提供することで、学習の効率化を図る。

4.1.2 専門情報を基にデザイン作業を具体的なシナリオで学習

専門的な技術情報や方法の学習においては、文献を通じた受動的な学びよりも、シナリオを用いたアクティブラーニングが効果的であることが指摘されている。シナリオベースの学習は、具体的な状況や課題を通じて実践的に理解を深める手法であり、学習者が自ら問題解決に取り組むプロセスを促進するため、記憶の定着率や理解度が向上するという研究結果が報告されている [31]。実際、National Training Laboratories の学習ピラミッドによれば、アクティブラーニングを通じた学びの定着率は最大 90% に達するとされ、単なる読書や講義 (10~20%) と比較して圧倒的に効果的である [32]。そこで本システムでは、架空の装置を題材にしたシナリオを基に、要求文書の受領から技術審査のクリアに至るまでの、実際に工業デザイナーが経験するであろうプロセスを学ぶことができる。このシナリオには、宇宙特有の検証 (例: 微小重力環境での試験やユーザビリティテスト) やトレーサビリティ確保のための技術審査対応なども組み込まれている。

4.1.3 膨大な技術情報を心理的負荷なく伝える GUI

学習アプリケーションが直感的かつインタラクティブなグラフィックユーザインターフェースを備えることは、初学者が心理的負担を感じることなく専門情報に取り組むうえで重要である。Mayer、Dowらは、インタラクティブな教材を受け取ると、非インタラクティブな教材と比較して問題解決タスクのパフォーマンスが向上することを発見し、ナビゲーションとペースを制御することで学習者が指導内容をよりよく理解できるようになると主張した。[33] Shneidermanらは、直感的なGUIがユーザーの効率を大幅に向上させ、特に複雑なシステムにおいても短時間でタスクを達成するために重要であると指摘している [34]。さらに、インタラクティブなUIは、学習時の効率性を高めるだけでなく、実際の作業環境でも重要な役割を果たす。特に、片手での操作が可能な設計は、宇宙開発のような正確性が要求される場面において迅速な情報参照を可能にする。効率的な情報提示と操作性が実務上のパフォーマンスを向上させる [35]。

以上のように、本システムは心理的ハードルを下げ、学習と実務の双方で有用性を発揮する設計によって、初学者が専門的な知識を習得しやすくする環境を提供する。

4.2 提案するシステムのシナリオ

本システムの利用シナリオを想定して作成したものを以下に示す。

民間企業が民間ステーションの建設を予定しており、短期滞在の旅行客向けクルークウォーター（宇宙ステーション用の個室）を企画している。この機器の開発を担当する重工業企業は、要求仕様に「宿泊体験のサービス品質確保」や「デザイン性の高さ」が含まれているため、自社の工業デザイン室に協力を依頼することとなった。重工業企業は、これまでに JAXA 向けの機器を開発した実績は多くあるものの、民間企業からの受託は初めてであり、意匠性や高いユーザビリティを求められた経験もなかった。そのため、自社にデザイン室があっても宇宙機器の開発に参画したことはなく、未知の課題に直面することとなった。

4.2.1 システムがない場合のケース

以下本システムが無い場合の想定シナリオであり、課題がどのように作用するのかを示している。

プロジェクトのキックオフにデザイナーが招待され、要求仕様書が手渡される。しかし、宇宙開発の経験がないため、デザイナーは右も左もわからない状態で作業を始めることになる。最初に思いつく限りのデスクトップリサーチを行い、情報を収集した後、なんとか要求文書に記載されている文章を読み解き、「高品質さ」を意識し要求を満たせるであろうデザインスケッチなどをアウトプットし、それを基に CAD データを作成した。モックアップを作成し、被験者を招聘して操作検証と完成評価を実施。地上品の経験からすれば、良い評価が得られる案が形になった。しかし、基本設計審査(PDR)において大きな課題が発覚する。要求仕様とデザインの整合性が問われるものの、それを証明する準備が整っておらず、NASA のクルー安全基準に適合しない箇所も見つかる。また、微小重力環境での操作性が不十分な点も指摘されてしまう。デザインのトレーサビリティを担保する方法と問われても手段が分からず、設計チームにも対応できる人材がいない。NASA のクルー安全基準文書についてもレビューで指摘を受けた後に、設計チーム経由で入手するが、400ページ弱の英語文書から参照箇所が特定できず混乱が生じる。このように、プロジェクト全体で多くのエラーが発生し、後手に回る対応が続く結果となる。

図 11 はこの想定シナリオを図であらわしたものである。

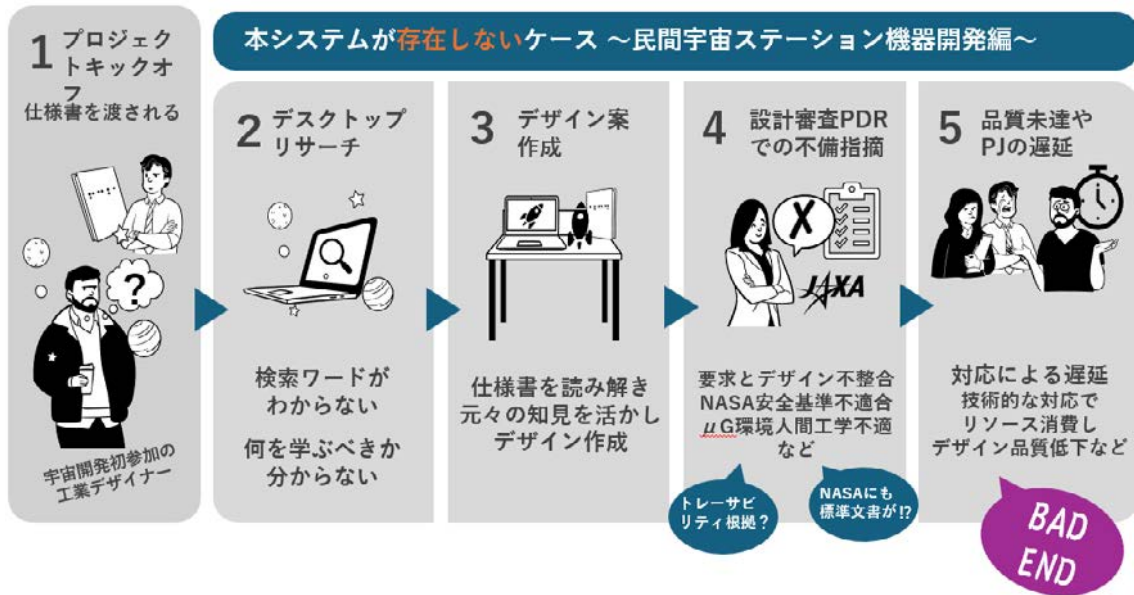


図 11 本システムが存在しない場合のシナリオ

4.2.2 システムがある場合のケース

以下本システムがある場合の想定シナリオであり、課題がどのように解決するのかを示している。

プロジェクトのキックオフにデザイナーが招待され、要求仕様書が手渡される。この際、本アプリケーションを活用して宇宙機器開発と地上機器開発の違いを学習することで、プロジェクトの前提となる知識を習得する。これにより、宇宙開発に特有の課題を意識しながらデザイン案をスケッチで作成することが可能となる。その後、アプリケーションで提示されるプロセスに従い、必要な検証や記録の作成を進める。この段階で、NASA のクルー安全基準を適切に参照し、設計に反映させる。モックアップを作成し操作検証を行うが、この際には地上と宇宙の条件の差異をきちんと把握し、また微小重力環境で人間が自然ととり、中立姿勢を治具で再現したうえで検証を行った。基本設計審査(PDR)では、記録を基に要求仕様とデザインの整合性を証明することができ、NASA のクルー安全基準にも適合した設計が実現している。また、微小重力環境を考慮したインターフェースデザインが盛り込まれており、実際に使いやすく、これまでになく快適性と高品質なサービスを提供する機器が実現出来そうだ。プロジェクトの進行中に不明点が生じた場合でも、まずアプリケーションを参照することで迅速かつ効率的に対応することが可能となる。仮に解決が困難な技術的課題が発生した場合でも、基礎知識を習得しているので、プロジェクトチームで協議して適切な決定を下すことができる。結果として、要求を満たした実験装置が完成し、プロジェクトが円滑に進行する。このように、本システムは、デザインの効率化と品質向上を実現し、デザイナーが直面する技術的・プロセス的な課題を解決するために、非常に効果的なツールとなる。

図 12 はこの想定シナリオを図であらわしたものである。

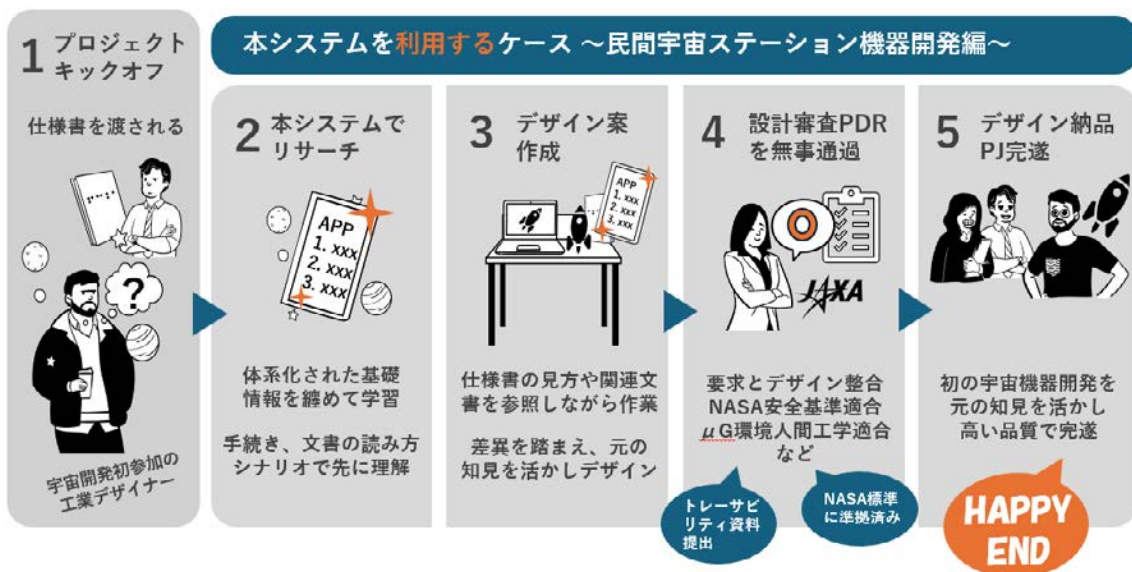


図 12 本システムを利用した場合のシナリオ

第5章 設計

5.1 システムの構成

本システムの構成を以下の図 13 に示す。

システムは学習に必要なデータとして、基本学習データ、シナリオ学習データ、文献データを内部に持ち、それをアプリケーションサブシステムは参照する。アプリケーションサブシステムはグラフィックユーザインターフェース(Graphic User Interface 以下 GUI)サブシステムを介してこれを出力することで、ユーザーに提供を行う。ユーザーはこの GUI サブシステムグラフィックユーザインターフェース、操作を行うが、このタブレット端末はバウンダリーの外である。システムの大きな特徴として、図 13 に示したように、二つの点が挙げられる。一つ目は GUI サブシステムとアプリケーションサブシステムのインタラクションとして「膨大な技術情報を心理的負荷なく伝える GUI」を備えていること、またシナリオ学習データの設計として「形式知を暗黙知的に学べるよう編纂されたシナリオ」が挙げられる。これらはフローの項目及び、各項目の設計の箇所で詳細に解説する。

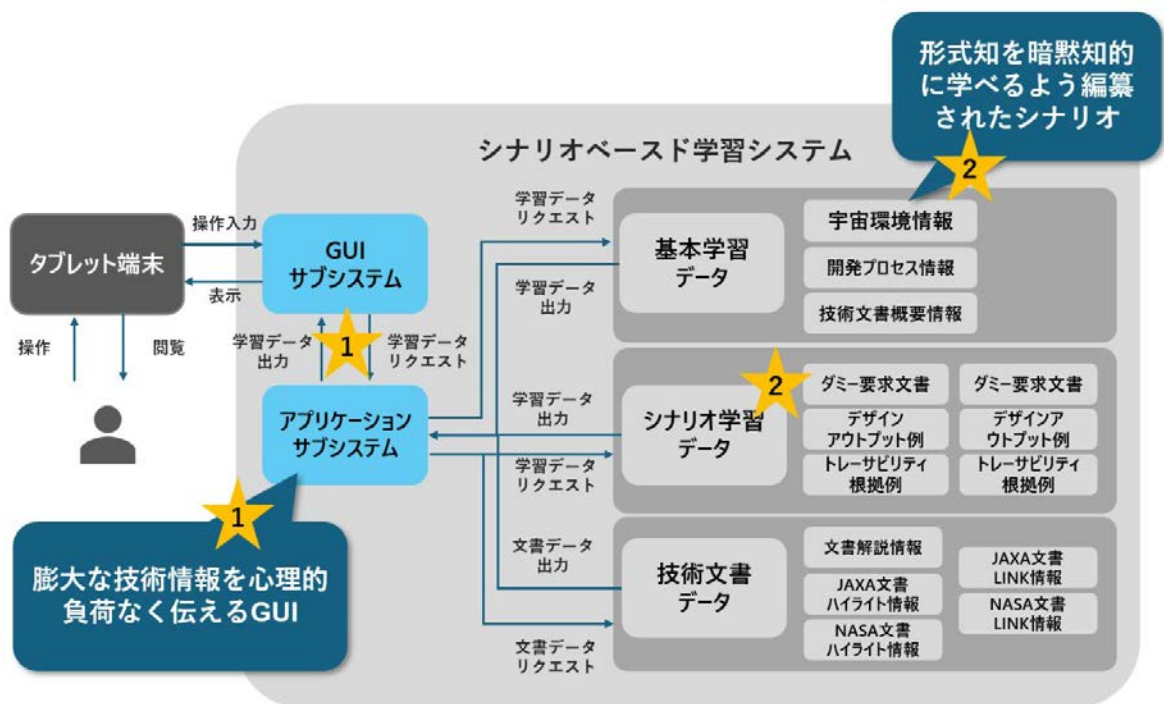


図 13 本学習システムのシステム構成図

(1) GUI サブシステム

本 GUI サブシステムは、情報を効果的に表示するためのインターフェースである。視認性と操作性の向上を重視した設計であり、特にユーザーが直感的に操作できるデザインが求められる。システムは Figma 上で稼働するデータとして設計され、タブレット端末のオペレーションシステム上で動作する仕様となっている。本サブシステムの動作は、Figma アプリを介して実現される。操作者がタブレット端末を使用して物理的な入力を行うと、その入力がアプリケーション側に送信される仕組みである。アプリケーション側で処理された結果として生成される出力は、再びタブレット端末に送信され、画面上で表示される。このようにして、操作者がリアルタイムで結果を確認しながら操作を進めることが可能となる。本システムは、タブレット端末の特性を活かした設計となっており、持ち運びやすさと操作性を考慮している。また、Figma アプリケーションを介した設計により、デザインの変更や更新が柔軟に行える点も特徴である。このような構成により、直感的で効率的な情報の管理と操作が可能となるよう設計されている。

(2) アプリケーションサブシステム

アプリケーションサブシステムは、Figma, Inc.社が提供するデザインツールアプリケーション「Figma」を使用して構築されている [36]。このアプリケーション上で、システム全体のフレームワークおよび GUI サブシステムを設計し、構築している。さらに、基本学習データおよびシナリオ学習データも、本アプリケーション内で一元的に保管・管理している。本サブシステムはプロトタイプとして作成されているが、必要に応じて独立したアプリケーションとしてリリース可能な設計がなされている。これにより、プロトタイプ段階からの改良や、ユーザーのフィードバックに基づく最適化が容易となる。また、Figma の高度なデザイン機能を活用することで、ユーザインターフェースや操作性を迅速かつ効率的に改善することができる。

(3) 基本学習データ

参照される学習データ群は、NASA や JAXA が提供する公式文書、同機関の WEB 上で公開されているアウトリーチ用学習コンテンツ、およびこれらから抽出したデータを体系的にまとめたものである。このデータ群は、宇宙機器開発における基準やプロセス、設計に関連する基本的な情報で構成されており、学習システム内で活用される。データの種類としては、主にテキストデータと JPG 形式の画像データが含まれている。テキストデータは技術的な仕様、運用手順、ガイドラインなどの詳細な内容を提供しており、具体的な知識の習得をサポートする。また、JPG 画像は設計図や実機写真、作業手順を視覚的に補足する役割を果たしている。これら基本学習データは、次項のシナリオ学習データが扱う基本的な内容を網羅しており、形式知的な情報として基礎学習を提供するものである。

(4) シナリオ学習データ

シナリオ学習データ群は、システムの学習目的に合わせて作成されたシナリオに基づき、NASA や JAXA が提供する公式文書およびこれらから抽出したデータを時系列的に整理したものである。このデータ群は、宇宙機器開発プロセスにおける具体的な作業や手順を理解するための基礎を提供する。データ群には、シナリオに関連付けて作成された要求文書、各ステップにおける作業写真、そして最終的なアウトプットのイメージなどが含まれている。これらは、宇宙環境における設計・開発の実践的な流れを具体的に示し、学習者が理解を深めやすいよう工夫されている。データの種類は多岐にわたり、テキスト、画像 (JPG や PNG 形式)、および PDF ファイルなどが含まれている。

このシナリオ全体は、前項の基本学習の内容をどう活用するか具体化しているものでもあり、内容はすべて対応している。

5.2 外部システムの構成

(1) タブレット端末

操作者が学習データを参照し、必要な入力を行うためのデバイスとして、タブレット端末を使用する。この選定は、インタラクティブな操作が可能であり、表示サイズが適切であるという特性を考慮したものである。タブレット端末の採用により、学習者は直感的かつ効率的に情報を操作することが可能となる。さらに、実際のデザイン作業において、機器の取り回しが容易であることも考慮している。タブレット端末は軽量かつ携行性に優れており、作業現場や会議室など、さまざまな環境での使用が想定されている。本システムの初期コンフィギュレーションでは、Apple 社製の iPad Pro 11 インチモデルを標準機種として想定している。この端末は高い処理能力と正確なタッチ操作を提供し、学習体験をより快適かつ効果的なものにする [37]。また、Figma アプリケーションとの親和性が高く、アプリ上でのデザイン操作や学習データの閲覧がスムーズに行える点も、このデバイスを選定した理由の一つである。タブレット端末の利用により、学習者は場所を問わず学習を進めることができ、柔軟な学習環境が提供される。

図 14 のようにタブレット端末に本システムを表示し操作することが可能である。



図 14 タブレット端末に表示された本システムの GUI

5.3 システムの使用フローから見る本学習システムの特徴

本システムの使用フローから、全体構成の特徴を説明する。

5.3.1 基本的な学習のフローと構成

図 15 に示したこの図は、システムが内包する全体的なコンテンツの構成とフローを表しており、システムを初めて利用する初学者が、基礎的な知識やスキルを体系的に学ぶ場面に倣った順をオレンジ色のアローで示す。。利用者は、まず宇宙環境や設計基準に関する基礎知識を学習するための基礎ステップに取り組む。続いて、シナリオに基づいた実践的なロールプレイを通じて、設計プロセスの全体像を体験的に理解する。このフローは、学習者が段階的に知識を深め、実際の開発作業に対応できるスキルを身につけることを目指している。これらのフローは必要に応じてどの箇所からでもスタートすることが可能であるため、特定の箇所を再参照したい場合などは、シナリオや文書などのパートから開始することが可能である。

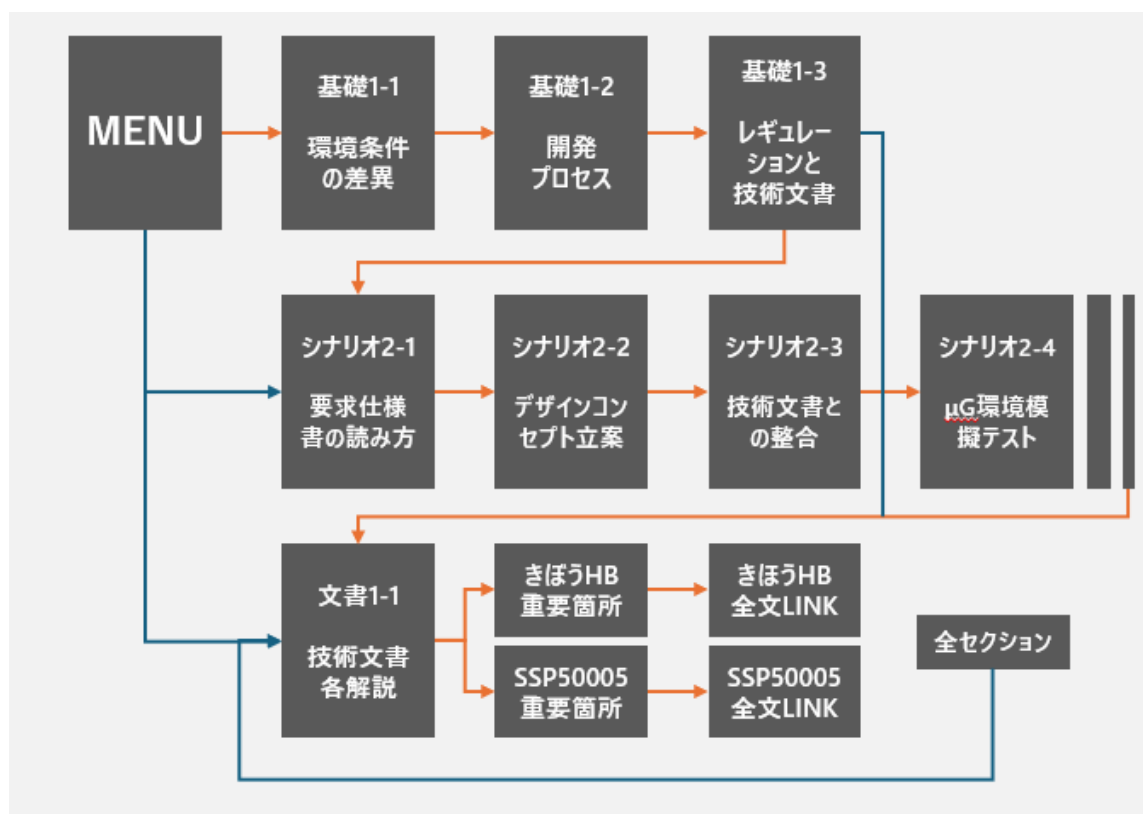


図 15 学習の全コンテンツとそのフロー

(1) 情報の階層分け

本学習システムは、階層構造とナビゲーション機能を活用し、効率的な学習プロセスを提供するよう設計されている。ユーザーは段階的に知識を習得しながら、必要に応じて技術文書へシフトすることが可能である。基本的な情報やシナリオ化された内容は、もともと技術文書に膨大に含まれている。しかし、これらの情報を一度に提示すると学習負荷が高くなるため、本システムではインプット量の調整と階層化によって学習効率を向上させている。まず、「環境の差異」「開発プロセス」「技術文書」という大項目ごとに基礎的な知識を学習し、全体の概要を理解する。その後、これらの知識をどのように活用するかをシナリオを通じて学ぶことで、実践的な理解を深める。さらに、学習内容の定着を図るため、詳細な技術文書を参照しながら再確認を行う。これにより、ユーザーは単に知識を習得するだけでなく、実際の開発プロセスの中でどのように活用するかを理解し、実践的な応用力を身につけることができる。図 16 は全体の構成と階層を示している。

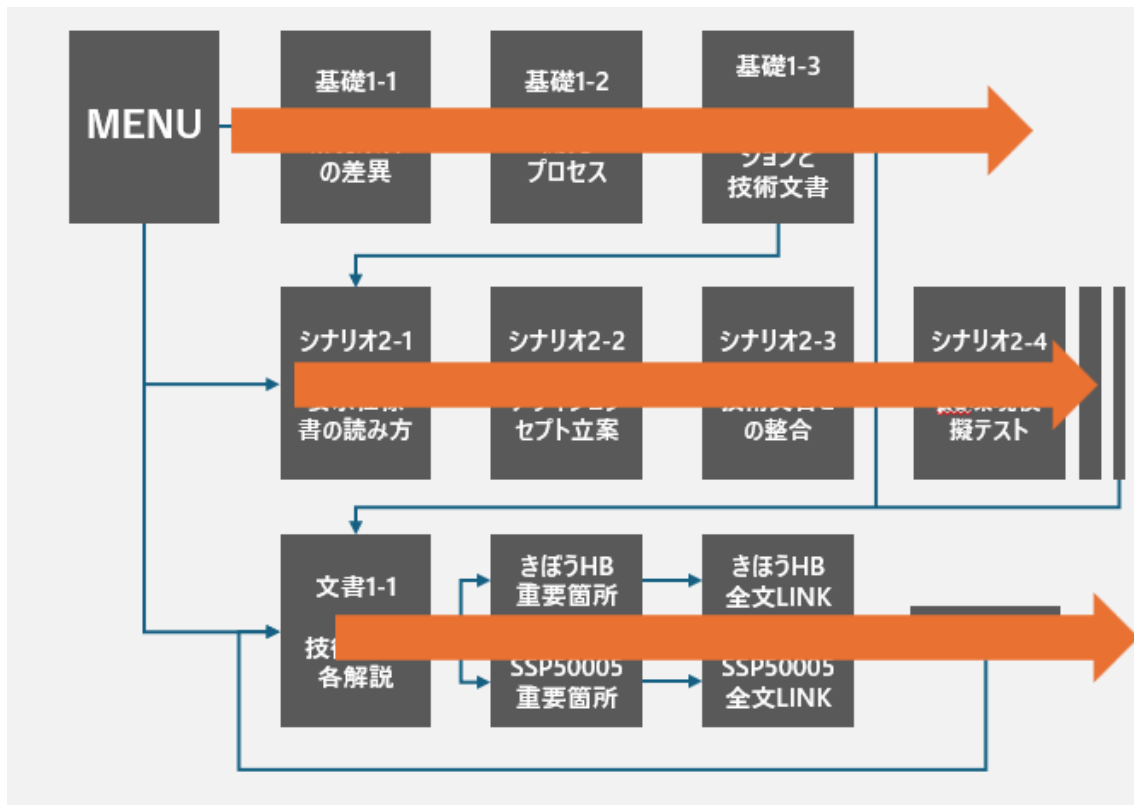


図 16 階層化された学習コンテンツ

(2) 基本情報を学び、それを活用するシナリオを学習する

前項で述べたように基礎情報の学習によって全体の枠組みを理解し、その後、シナリオを通じて実践的な知識の運用方法を学ぶ設計となっている。この基礎情報とシナリオは相互に対応しており、理論と実践の橋渡しをする役割を果たしている。例えば、図 17 で示すように、基礎情報では技術審査の概要やその重要性を学ぶが、シナリオでは実際の開発プロセスにおいて、どのような文書を作成し、どのように準備を進めるべきかを具体的に示す。このように、基礎情報を学んだ後に、それがどのように実務で活用されるのかをシナリオを通じて学ぶことで、単なる知識の蓄積にとどまらず、実践的な応用力を養うことができる。このように、本システムは、従来は技術文書の形式知として整理されていた情報を、実務の中で経験者が後進に指導するような形で暗黙知として学習できる点に特徴がある。これにより、開発現場に先人として実務経験者がほばいない工業デザイナーでも、具体的な業務の流れを理解し、実践的なスキルを効率的に習得できるよう設計されている。



図 17 基礎情報の学習とシナリオ学習の項目の対応

(3) 任意のタイミングで文書参照が可能

本学習システムは、技術文書を基盤とし、その内容をもとに基礎情報やシナリオを学習する構造となっている。したがって、学習の中心にあるのは技術文書であり、システム内で提供される情報は、あくまで技術文書の要点を整理し、学習しやすい形に再構成したものである。この設計方針に基づき、学習システムではダイジェスト的に扱われる情報から、図 18 のように、技術文書の原文へいつでもアクセスできるような構造を採用している。具体的には、各学習項目やシナリオの中で関連する技術文書の該当部分に直接移動できるナビゲーションを設け、ユーザーが必要に応じて詳細な情報を確認できる仕組みとなっている。この構造により、学習者は要点を効率的に把握しながらも、必要に応じてオリジナルの技術文書を参照し、より深い理解を得ることが可能となる。単なる概要学習にとどまらず、技術文書を活用した本格的な学習を促進する設計となっている点も、本システムの特徴である。

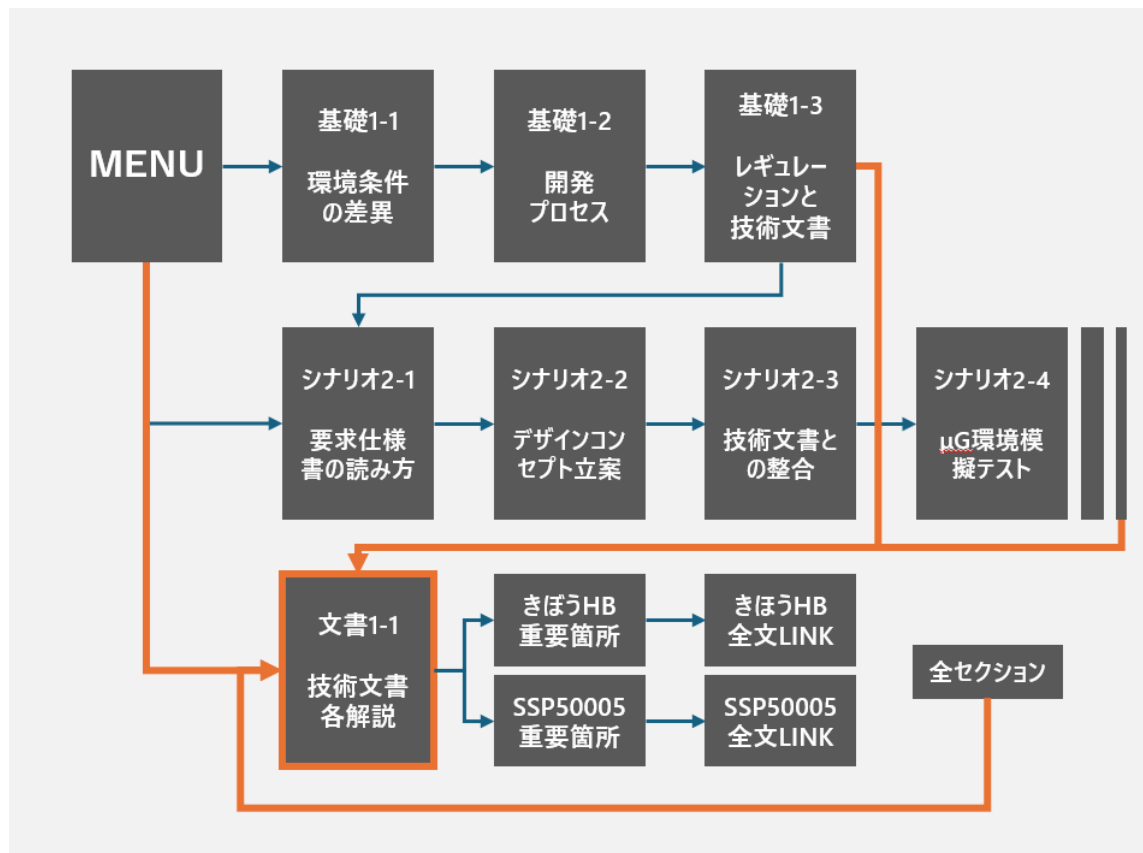


図 18 各コースの任意の箇所から、技術文書へアクセス可能なフロー

(4) 技術文書参照の構成とハイライトの仕組み

本学習システムでは、工業デザイナーが参照すべき技術文書を網羅的に整理し、効率的にアクセスできる仕組みを提供している。宇宙機器の開発に関する技術文書は JAXA や NASA をはじめとするさまざまな機関によって定義されており、その範囲は広大である。本システムでは、これらの文書を体系的に整理し、学習者が必要な情報に迅速にアクセスできるよう設計されている。

まず、システム内では、どのような技術文書が存在するのかを網羅的に示し、それぞれの文書の概要を解説する機能を提供する。これにより、学習者は関連する文書の全体像を把握し、どの文書が自身の業務に関係するかを判断しやすくなる。次に、各文書の中から工業デザイン業務に関連する項目のみを抽出し、ハイライトとして提示する機能を備えている。これにより、400 ページを超える膨大な技術文書の中から、工業デザイナーにとって重要な情報に直接アクセスすることが可能となる。無関係な情報を取捨選択する手間を削減し、必要な知識を効率的に学習できるようになっている。さらに、ハイライトされた情報にとどまらず、オリジナルの技術文書へ直接アクセスできるリンクも提供している。これにより、詳細な情報を確認する必要がある場合でも、迅速に文書全体を参照することができる。本システムでは、最終的にオリジナルの技術文書を直接参照することを推奨しており、その過程を支援するためのナビゲーション機能も整備している。図 19 では具体的なページの例とフローを示している。このように、本学習システムは、工業デザイナーが必要とする技術文書の情報を整理し、効率的にアクセスできる仕組みを提供することで、宇宙機器開発における学習負担を軽減し、実務への応用を容易にすることを目的としている。

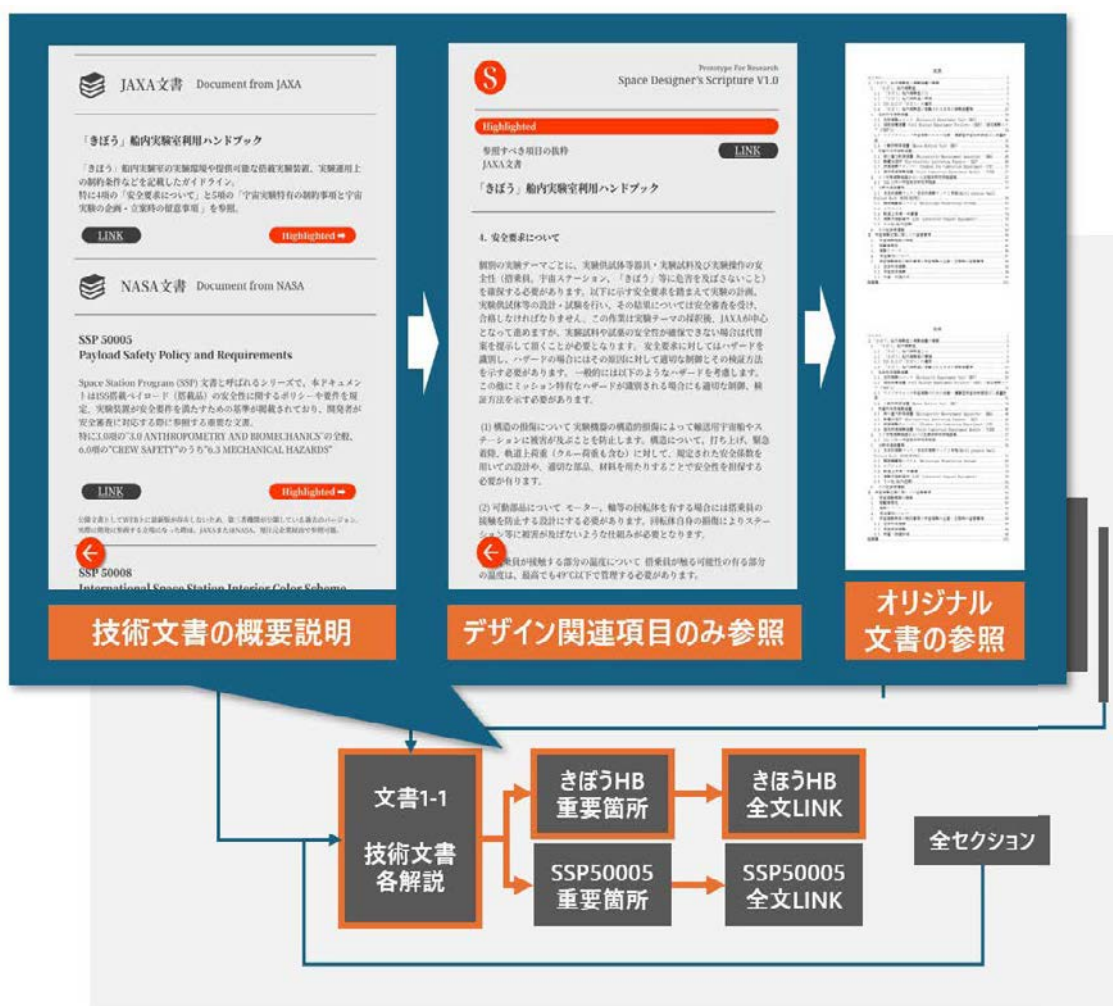


図 19 技術文書の解説、関連項目、オリジナルの参照フロー

5.4 システム構成要素の設計

各サブシステム並びにシステム構成要素の設計について詳細に述べる。

5.4.1 GUI の設計

本システムはアプリケーション形式で提供されるため、ユーザーインターフェース(GUI)のデザインと構成は非常に重要である。タブレットでの視認性と操作性を重視し、タイル形式を主体とした構成を採用している。また、レスポンシブデザインにより、スマートフォンにも対応できるよう設計されている。画面上に表示される情報が多くなることを考慮し、できるだけ画面の要素を少なくし、重要な部分にのみアクセントカラーを使用して、操作の効率化と視覚的な整理を図っている。

文書や辞書、教科書的な印象を与えるために、書体にはセリフ体を選び、フォントは Noto Sans を採用している。Noto Sans はオープンフォントであり、環境に依存しないため、さまざまなプラットフォームで一貫した表示が可能である。アプリケーションのアイデンティティカラーとして、ライトグレー(カラーコード: #EBEBEB)と蛍光レッド(カラーコード: #FF3700)を採用しており、これらは NASA のアイデンティティカラーからインスピレーションを受けている。これにより、システムが宇宙関連であることをユーザーに自然に伝え、視覚的な一貫性を持たせている。さらに、トピックごとにアイコンと画像を適切に配置し、視覚的に見やすく、内容を判別しやすいデザインを実現している。

以下図20に本 GUI の例として、最初のトップページを示す。



図 20 本システムの GUI の例、ホーム画面

5.4.2 アプリケーションの設計

本システムは、Figma を使用して実装されており、プロトタイプの作成から最終的なリリースまでのプロセスが容易に行えるよう設計されている。複雑かつ多岐にわたる情報をわかりやすく参照できるようにするため、システムは多層構造を採用しており、ユーザーはステップに従って順番に進んでいく形式になっている。各ステップの位置は数字を使用してナビゲートされ、これが GUI 上のアクセントとなり、ユーザーの操作をスムーズにサポートする。一度に表示する情報量を最小限に絞ることで、ユーザーが情報に圧倒されることなく、快適に学習を進められるよう配慮されている。システム構成上、各学習コースのフローは可逆的に設定されており、ユーザーはいつでもトップページに戻ることができる。また、各コースの終了後には、次のコースに進むオプションも提供されており、学習の進行がスムーズである。膨大なページ数を持つ文書が必要な場合、PDF ドキュメントをページ内でスクロールする形式で埋め込んで参照できるようにしている。これにより、大量の情報を一度に提示することなく、全体の情報量を確保しつつ、ユーザーに必要な情報を効率よく提供している。以下図 18 に本アプリケーションの全体像を示す。横軸が学習コースのフローに相当し、かなりの階層があることが見て取れる。

アプリケーション内部のコンテンツ構成

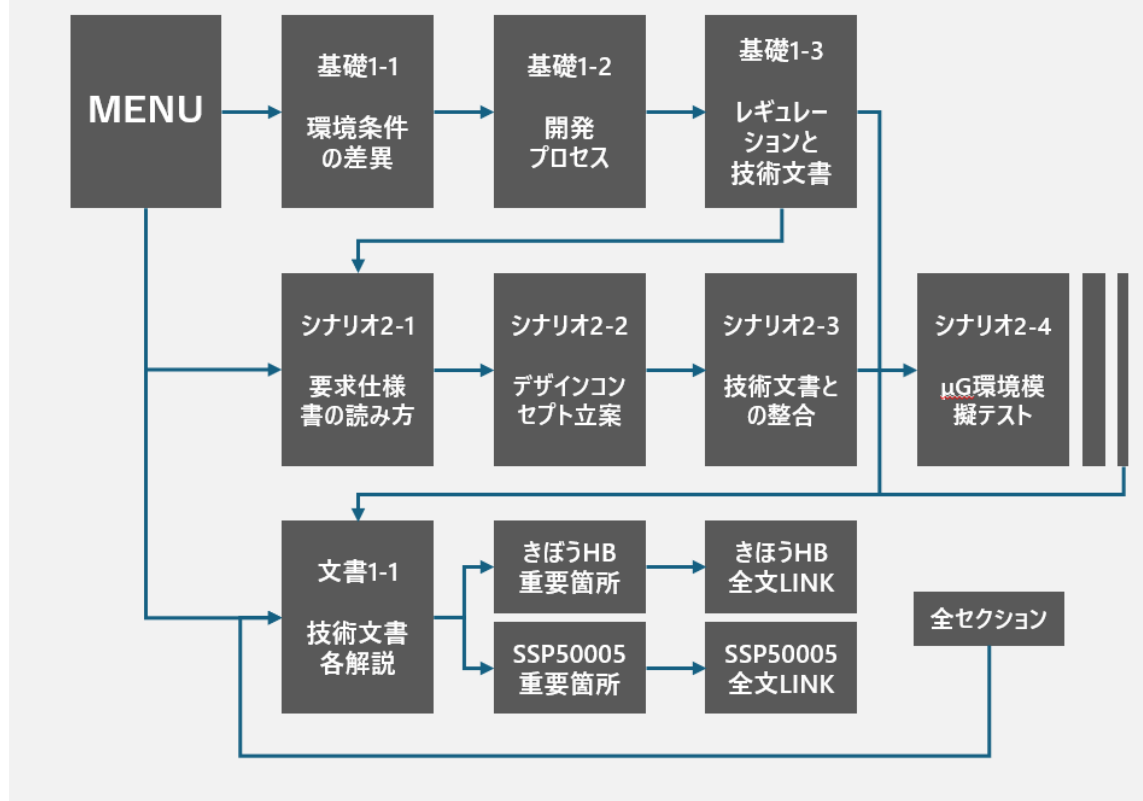


図 21 本システムのアプリケーション構成全体像

5.4.3 基本学習データの設計

本システムにおける基本学習データは、JAXA や NASA の装置開発に関連する技術文書から抽出された情報を基に設計されている。これらの文書から、システムで扱う主要な課題である「環境」「プロセス」「レギュレーション」に関連する情報を整理し、学習用のデータとして再構成している。具体的には、宇宙環境やそれに関連する要素、開発の各プロセス、宇宙機器の設計における規制や標準に関する内容が含まれている。抽出作業においては、以下の観点を重視した。第一に、異なる文書で共通して登場する基礎的な情報や概念を選定し、ユーザーが複数の資料を参照することなく、全体像を理解できるようにすることを目的としている。第二に、各機関が公式サイトや教育コンテンツで公開している情報を参考にし、一般向けに紹介されている内容を基本ラインとして抽出している。第三には、工業デザインとして開発に取り組むうえで必要となる、ハードウェアや人間工学的な要求が含まれているかどうかを識別し選定している。このようなアプローチにより、文書内で表現が異なったり、専門的な内容に偏りがちである情報を整理し、学習データとして扱いやすい形式に変換している。以下の表1は参照した文書の一覧である。

表 1 データとして引用した文書の一覧

出版組織	文書名	出所
宇宙航空研究開発機構	システム設計標準 JERG-2-100	[38]
	宇宙機設計標準 JERG-2-000B	[39]
	システム安全標準 JMR-001C	[40]
	システムズエンジニアリングの基本的な考え方 BDB-06007	[41]
	システムズエンジニアリングマネジメント計画書 (SEMP) 作成ガイドライン BDB-17011	[42]
	「きぼう」 船内実験室利用ハンドブック	[43]
NASA	SSP 50005E, INTERNATIONAL SPACE STATION FLIGHT CREW INTEGRATION STANDARD	[44]
	SSP 50008 International Space Station Interior Color Scheme	[45]

学習データには、宇宙機器開発における基本的な環境知識（例えば、微小重力環境、宇宙放射線、真空状態など）や、それらがデザインに与える影響に関する情報が含まれている。また、宇宙開発におけるプロセス（設計、試験、製造、運用）の各段階、さらにその中で求められるドキュメントや承認プロセス、各ステップにおける安全基準、法規制や国際的な標準も重要な学習要素として取り上げている。さらに、データは学習者が効率よく理解できるように、文書ごとの大まかな要約と共に、より詳細な情報へと進むためのナビゲーションを設けている。これにより、初学者でも段階的に知識を積み重ねながら学習を進めることが可能となる。また、これらの基本データは、ユーザーが自分のペースで進められるように設計されており、必要に応じて技術文書を直接参照することもできる仕組みになっている。以下図 22 は実際にシステム上で表示されるコンテンツの一例である。具体的には、「1-1 宇宙環境の特徴」の項目の一部を示している。このように、各項目は関連する内容ごとに適切にまとめられ、情報量は最小限に抑えられている。この設計により、初学者や宇宙工学に詳しくないユーザーにも理解しやすく、学習しやすい構成を実現している。特に、情報が過度に詰め込まれず、要点を絞って表示されることで、学習者は必要な知識を段階的に習得できるよう配慮されている。例えば、「宇宙環境の特徴」では、宇宙空間における重力、放射線、真空などの基本的な物理特性について簡潔に説明され、これらが宇宙機器の設計にどのように影響するかに焦点を当てている。また、「宇宙機器の開発プロセス」では、設計から運用までの各ステップを簡潔に示し、専門的な用語や複雑な説明は避け、初心者でも理解しやすいように工夫されている。

1-1 Characteristics of the space environment 宇宙環境の特徴

宇宙環境は、私たちが地球上で暮らしている環境とは全く異なる、極めて過酷な条件が揃っている。宇宙で活動する人工衛星や探査機は、これらの厳しい環境に耐えるよう、特別な設計が施されている。



微小重力 Micro Gravity

宇宙空間では、地球の重力がほとんど働かないため、無重力ではなく「微小重力」の状態にある。国際宇宙ステーション（ISS）での実測では、地球の約1/1,000,000の重力しかなく、 μG （マイクログラビティ）と表記されることもある。この環境下では、液体が球状になり、物体が浮遊する。つまり、重さは感じられないが、質量自体は存在するのだ。地球上では、温かい空気は上昇し、冷たい空気は下降する。しかし、微小重力下では、重力による影響が小さいため、このような熱対流は起こりにくい。



高真空 High Vacuum

宇宙空間は、大気がほとんど存在しない高真空状態であり、空気による摩擦や音の伝わり方は皆無である。熱の伝わり方も地上とは大きく異なる。完全な真空ではなく、宇宙ステーションなどは地球の大気成分が残っている低い軌道を飛行するため、原子状の酸素などと衝突し続ける。この衝突は、まるで空気抵抗のように、速度を減速させる要因となる。さらに、これらの原子は高活性で反応性が高く、材料を侵食する原因となる。宇宙環境では、放射線、熱サイクル、原子状酸素などの影響により、プラスチックをはじめとする有機材料が劣化しやすいため、素材の選定と加工方法の検討が不可欠である。



宇宙放射線 High Vacuum

宇宙放射線とは、宇宙空間に存在する高エネルギー放射線の総称であり、絶えず様々な宇宙放射線が飛び交っている。主に、太陽風や銀河宇宙線などが挙げられる。これらの放射線は、陽子、中性子などの素粒子から構成され、高いエネルギーを持つため、物質を透過したり、原子核を破壊したりする。

この宇宙放射線は、電子機器の誤動作や太陽電池の劣化、さらには宇宙船の材料劣化を引き起こす。そのため、鉛などの高密度な材料で対象物を覆い、放射線を遮蔽する対策が一般的である。

図 22 基本学習のうち「1-1 宇宙環境の特徴」の一部

5.4.4 シナリオ学習データの設計

基本情報で学んだ知識が実際の開発でどのように活用されるかを学ぶための設計がされている。この学習は、架空のシステム開発のシナリオに従い、ユーザーが実際の開発フローを体験できるように構成されている。今回は民間宇宙旅行サービスを提供する事業者から、ISS 内に設置する旅客用の折り畳み個室を設計開発するような架空の発注をシナリオとして作成、とりあげている。シナリオでは、まず上記に基づいた開発シチュエーションを説明し、その中で提示される要求をもとに、JAXA のフローに基づいて工業デザイナーがどのように行動するかが示される。このシナリオは以下の 7 ステップで構成される。「要求仕様を確認する」「デザインの仮説を立案する」「技術文書を確認する」「デザインのプロトタイプを作成する」「宇宙環境を模擬したテストを実施する」「デザインの設計文書を作成する」「技術審査を受ける」である。図 23 は実際のアプリ上における学習開始ページであり、フローに従うだけでなく、後に各項目のみ参照するような時にも任意にアクセスが可能となっている。

2 Design Process デザインプロセスを学習

前項では、宇宙開発が地上における開発とは異なり、特殊な環境要求や制約条件などを考慮する必要があることを学んだ。以下では、これらの特殊性を考慮した上で、具体的なシナリオに基づき、宇宙開発の進め方について説明する。

2-1 要求仕様を確認する



2-2 デザインの仮説立案



2-3 文書の確認



2-4 デザインのプロトタイプ



2-5 宇宙環境を模擬したテスト



2-6 デザインの設計文書作成



2-7 技術審査を受ける



図 23 シナリオの学習開始ページに示された 7 つのステップ

(1) 要求仕様の確認

最初に本シナリオ用に用意した、架空のシステムの要求文書を参照し、どのような装置であるかを理解する。要求文書というものに実際に触れ、全体のうちデザイン開発に関連する項目をスクリーニングし、システムに必要な機能や要件を確認するにはどう読むのかを解説しながら読み進める。図 24 はシステム特性の部分に対する解説をしているページを例として示している。このステップでは、要求仕様を理解する力と関連する文書の存在の理解などを学ぶことができる。

各機能の特性とその背景が記述されている。ここを読み解くことでほとんどの姿かたちがイメージできる。

3.4 システム特性

3.4.1 バス機能部特性

3.4.1.1 構造

- (1) バス機能部は JEM 内に設置できること
- (2) 成人男性が内部に入る寸法であること
- (3) JEM 内部と調和し外部に威圧感のない外観であること
- (4) 非運用時は折り畳み収納することが可能であること
- (5) 3.5.3(c)に示す環境条件に耐えられること

JEM内への設置のサイズ、成人男性の定義、環境条件などは別項目や、書類内で示している別の文書を参照する必要がある。

3.4.1.2 ドア機能

- (1) 開閉が可能であり、成人男性が通過可能であること
- (2) プライバシー保護のため内部から施錠可能であること
- (3) 開閉ノブは説明書等無くても操作可能な判別性をもつこと
- (4) 操作に関しては ISS 内部の上下設定軸に従う事

3.4.1.3 電力供給機能

- (1) JEM から供給される電力をシステム構成品に分配できること

3.4.1.4 SOS 発報機能

- (1) 緊急時に内部から SOS を発報し通知できること

3.4.2 ミッション機能部特性

3.4.2.1 防音機能

- (1) 快適性とプライバシーのため、内外の音は適宜遮音されること

3.4.2.2 寝具機能

- (1) 成人男性から子供までが就寝可能であること
- (2) 体の固定と保温が可能な寝具を備えること

3.4.2.3 換気機能

- (1) 本システムとの内外気を換気すること 1 名が 12 時間内部に滞在するとして、快適に過ごせるレベルとする

3.4.2.4 照明機能

- (1) 照明機能はミッション部内の照度を制御する機能を有すること。照度の上限の目安は、使用者が快適に居住できるレベルとする

3.4.2.5 収納機能

- (1) 滞在者が携行品を収納できること。また微小重力環境に対応し浮遊しないこと。

図 24 要求仕様書のうちシステム特性の関するページの解説

(2) デザインの仮説立案

次に、宇宙環境やその他の条件を考慮しながら、要求仕様を基にデザインコンセプトを立案するプロセスを示す。ここでは、ユーザー体験や操作性、視認性に優れたデザイン案を複数作成する。この段階では、無重力下での使用や限られたスペースでの操作性など、宇宙特有の要因を加味しながらスケッチやアウトプットを行う内容を、具体例を見ながら理解できる。図 25 は要求を基に行うデザインアウトプットの例である。

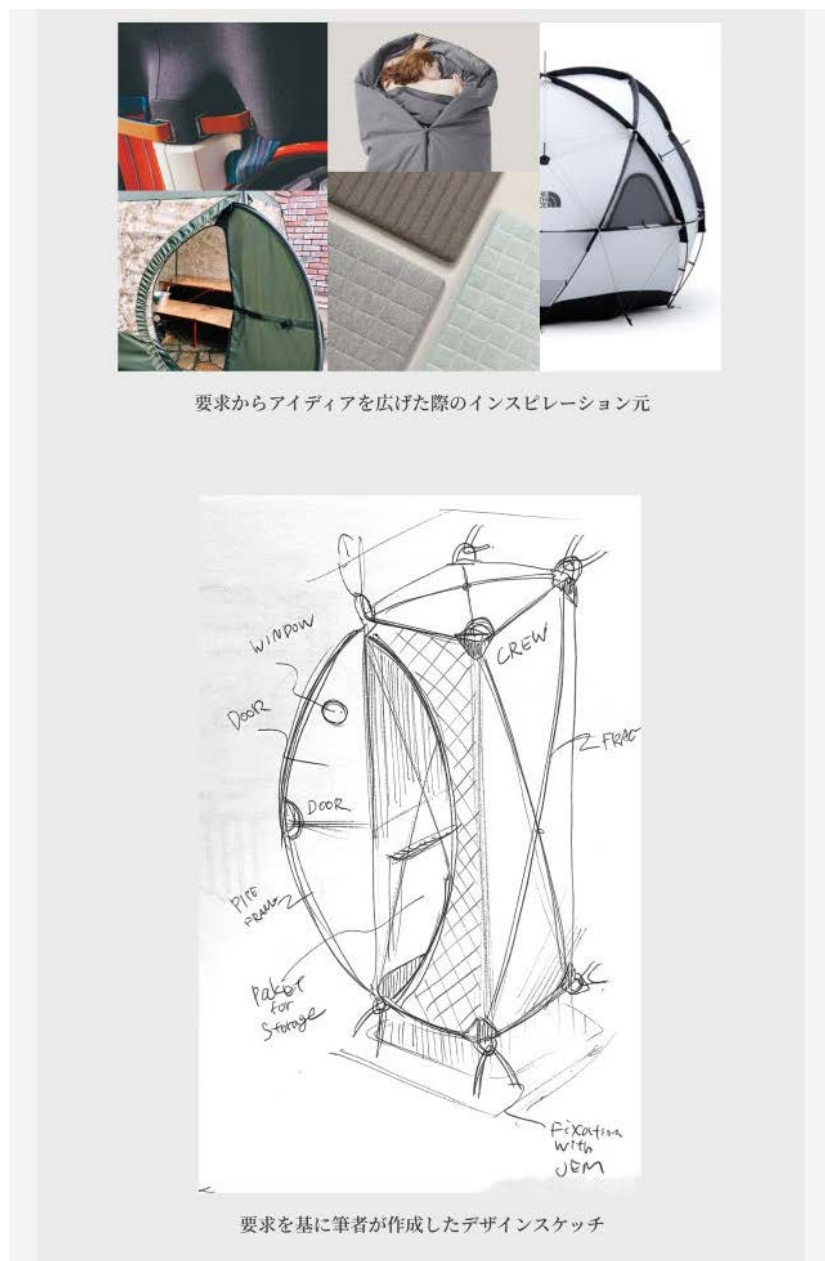


図 25 デザインアウトプットの例を示したページ

(3) 技術文書の確認

仮説に基づいた初期デザイン案を、要求文書で指定された関連文書やレギュレーションと照らし合わせる。このプロセスでは、技術的要件や安全基準を満たしているかを確認する。図 26 のようにデザイン案と技術文書との整合性をチェックすることができ、開発の進行において重要な要素を学ぶことができる。



進めていくと、色と仕上げについての指示がSSP50008がある。モデル内の付属品になるため、RACK HARDWAREを参照。パネルはWhite、仕上げはSemiglossとなっている。デザインのフィニッシュはこの要件に準拠する必要があるようだ。

3.2.7 U.S. RACK HARDWARE

The colors and finishes used in U.S. Rack Hardware shall be as specified in Figure 3.2.7-1.

Hardware Description	Color	Finish	Specification Number
Equipment Rack Utility Panel Recess	White	Semigloss	27925 (1)
Equipment Rack Utility Panel Text Characters	Black	Lusterless	37038 (1)
ISPR Utility Panel Recess	White	Semigloss	27925 (1)
ISPR Utility Panel Recess Text Characters	Black	Lusterless	37038 (1)
Functional Unit Utility Panel Recess (as applicable)	White	Semigloss	27925 (1)
Functional Unit Utility Panel Recess Text Characters	Black	Lusterless	37038 (1)
Rack Front Aisle Extensions	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Overhead Rack Face Plates	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Port Rack Face Plates	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Starboard Rack Face Plates	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Deck Rack Face Plates	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Overhead Rack Utility Panel Closeouts	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Port Rack Utility Panel Closeouts	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Starboard Rack Utility Panel Closeouts	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Deck Rack Utility Panel Closeouts	Off-White	Semigloss	27722 (1)
Stowage Trays	Off-White	Semigloss	27722 (1)

FIGURE 3.2.7-1 U.S. RACK HARDWARE COLORS AND FINISHES
(PAGE 1 OF 2)

SSP50005にはシャープエッジ要件が存在する。25mm以上の構造には角に13mmのRを付ける必要があるようだ。

図 26 デザイン案を具体化する上で、関連文書のどこを読むかを示したページ

(4) デザインのプロトタイプ作成

デザイン案を具体化し、物理的またはデジタルのプロトタイプを作成する。宇宙機器のプロトタイプでは、実物大のモックアップや VR 技術を使用してユーザインターフェースや操作性を検証することが一般的であるが、その過去のやり方を見せながら実施検証計画にむけてどのようなプロトタイプを作成する必要があるかを学ぶ。このプロセスを通じて、宇宙機器開発におけるプロトタイプ作成の重要性と実際の検証方法を学ぶ。図 27 は実際のモックアップを例に解説しているページである。

検証目的に応じてモックなどを作成する。NASAやJAXAでも実寸のモデルを作成し、宇宙飛行士などのエンドユーザーに操作テストを行う。同様の方法で検証を行うことで、妥当性を確認する。



クルークウォーターのモックアップ ©NASA

検証の必要性とその方法に関しては、要求文書の中で検証マトリクスとして定義されている。デザイン検討上必要があるかどうかという観点もあるが、基本的にはシステムとして検証計画がどうなっているかに従い、どのようなプロトタイピングをする必要があるかが決定される。

図 27 NASA で過去作成したモックアップの解説

(5) 宇宙環境を模擬したテスト実施

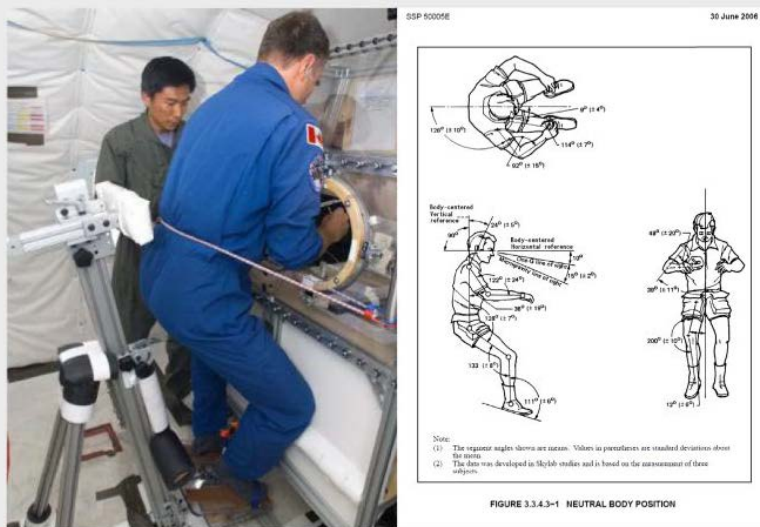
プロトタイプを用いて、宇宙環境を模擬したテストを実施する。このテストでは、デザインの適合性、耐久性、操作性を検証するためのデータを収集する。微小重力環境でのテストは難しいが、過去の知見から地上の 1G 環境を活用した実証手法が成立しており、NASA や JAXA の事例を参照しながらテストを行う方法を学ぶ。このプロセスにより、テスト結果の反映とデザイン検証の重要性を把握し、妥当性検証について学ぶことが出来る。図 28 はその検証例を示しているページである。

微小重力を再現しない試験方法

微小重力環境下で人間が自然に取る姿勢は「Neutral Body Position（中立姿勢）」と呼ばれ、この状態はSSP50005の人間工学に関する項目でも定義されている。

ユーザビリティテストの中でも大きな動きを伴わない操作性評価においては、治具などを用いて地上で中立姿勢を再現し、テストを実施することが一般的である。この方法は、実際の微小重力環境下での結果と比較した場合に誤差の範囲内であることが実証されており、信頼性の高い検証手法として有用である。

一方で、検証項目によっては、中立姿勢の再現を省略したテストが行われる場合もある。これは、テスト対象に対する微小重力の影響が限定的であり、その重要性が低いと判断される場合に適用される。

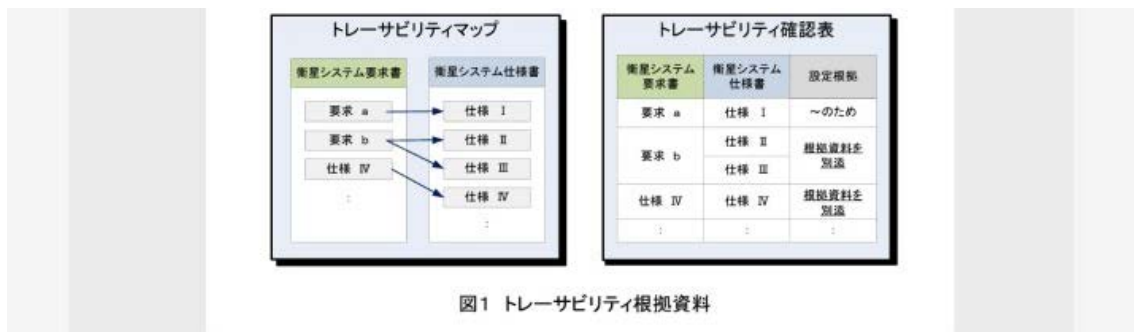


中立姿勢を用いた地上試験の様子 ©NASA

図 28 地上での検証を説明しているページの例

(6) 設計文書作成

テスト結果を反映させた最終的なデザインの仕様書や設計文書を作成する。この段階では、アイデアや検討内容を資料にまとめ、要求にどのように応えたのか、基準を守っているかを明文化する。設計書の作成を通じて、文書化の重要性とプロジェクトの正式な進行手順を理解する。図 29 で示しているように、本シナリオであればどのような思料を作成する必要があるかを具体例でしめしている。



デザインスケッチやCGなどはプレゼンテーション資料に、項目を作って盛り込む。特定の書式などはないため、PJに合わせて作成するとよいだろう。当然ここでも要求のシステム特性に対して、どういう設計解になっているのかを説明できるように記述する。

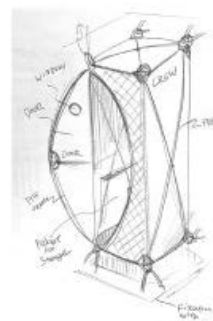
3. 設計結果 -デザイン系-

■ システム特性 3.4.1.2 ドア機能

- (1) 開閉が可能であり、個人男性が通過可能であること
- (2) プライバシー保護のため内部から遮断可能であること
- (3) 開閉ノブは説明書等無くても操作可能な利便性をもつこと
- (4) 操作に関しては ISS 内部の上下設定軸に合う事



First assembly check seems OK.



Alumite processing is done.)

プレゼンテーション資料の例

図 29 技術審査に向けた準備の内容の解説

(7) 技術審査を受ける

最後に、完成したデザインと設計文書を基に、技術審査を受ける。この審査は、プロジェクトの最終段階で、設計がミッション要求や安全基準を満たしているかどうかを確認するために行われる。審査を通過することで、デザインは正式に採用される。このプロセスでは、審査の意義とデザイン承認の流れを学ぶことができる。このシナリオ学習を通じて、ユーザーは宇宙開発における実際のワークフローをリアルに再現し、具体的な作業を想像することができる。要求があるだけでは抽象的に感じるが、シナリオを通じて実際の作業の流れや、デザインプロセスにおける具体的な作業がどのように進んでいくかを学べる点が重要である。

5.4.5 文献データの設計

本システムでは、ハードウェア設計においてデザイナーが実際に参照する主要な文献を抽出し、JAXA スタッフへのヒアリングを通じて選定した代表的なものを提供する。これらの文献は、実際の開発プロジェクトで使用されることが予想されるため、特にデザインに関連する情報の取り扱い方や参照方法が重要となる。システムでは、文献をクイックに参照できるよう図 30 のように「Highlited」というモードを用意しており、デザイナーが効率的に必要な情報を素早く探し出すことができるように設計されている。このモードは、重要な箇所を強調表示し、素早くアクセスできるようにしているため、業務における即時の参照が可能となっている。

以下は参照した文書の一覧である。

表 2 参照した文書一覧

出版組織	文書名	出所
宇宙航空研究開発機構	システム設計標準 JERG-2-100	[38]
	宇宙機設計標準 JERG-2-000B	[39]
	システム安全標準 JMR-001C	[40]
	システムズエンジニアリングの基本的な考え方 BDB-06007	[41]
	システムズエンジニアリングマネジメント計画書 (SEMP) 作成ガイドライン BDB-17011	[42]
	「きぼう」船内実験室利用ハンドブック	[43]
NASA	SSP 50005E, INTERNATIONAL SPACE STATION FLIGHT CREW INTEGRATION STANDARD	[44]
	SSP 50008 International Space Station Interior Color Scheme	[45]



図 30 文書解説のページ(左)と、そこから各文書の必要項のみを参照する Highlighted ページ(右)

第6章 評価

本研究では、提案システムの目的として「工業デザイナーが宇宙機器開発に参画する際に直面する課題を解消するための支援」を掲げている。具体的な課題として、「宇宙特有の技術情報を網羅的に学ぶこと」および「先人がいない環境下で暗黙知を学ぶこと」の2点を設定している。これらの課題を満たすことができれば、「宇宙開発に関する基礎的な知識を効率的に学べる教育を提供し、初学者である異業種の工業デザイナーが重要かつ最低限必要な情報に迅速にアクセスできる仕組みを構築する」という本システムの目的を達成できたと評価できる。評価の実施にあたり、異業種の工業デザイナーを被験者とし、学習システムを用いた後に「宇宙特有の技術情報を網羅的に学ぶことができたか」および「先人がいない状況でも暗黙知を習得できたか」を検証した。評価は人間を対象とするため、定量的および定性的な手法を組み合わせ、分析を行った。定量的評価としては、学習後の正答率の向上や回答時間の短縮を測定し、学習効果を数値化した。定性的評価では、被験者へのヒアリングを通じてシステムの有用性や改善点を抽出した。図 31 に示すように、評価プロセスは複数のステップから構成されており、システムの実際の運用を想定した形で検証を実施した。本評価を通じて、提案システムが設定した目的をどの程度達成できたのかを明らかにする。

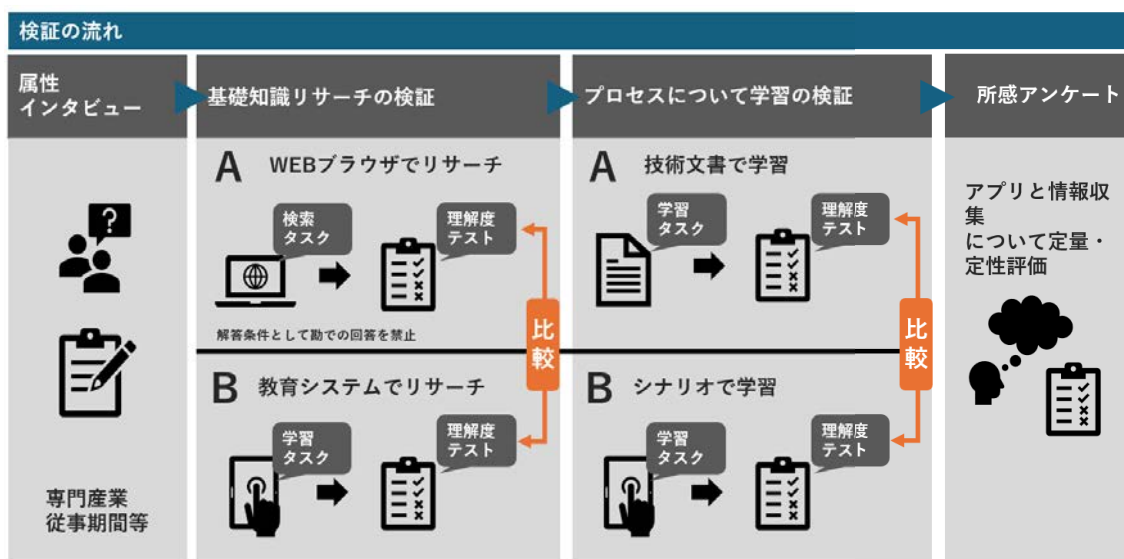


図 31 検証プロセスの全体像

6.1 プロトタイプによる実験

6.1.1 実験の概要

研究実施者が設計、実装した学習システムの妥当性を評価するため、地上産業で工業デザイン業務に従事する専門的な知見を有する有識者に対して、学習システムを利用しない場合とする場合とを比較する検証（以下利用検証）および理解度テスト、またアンケートの取得を zoom や Google Form 等のツールを使用しながらオンラインで実施する。また本検証を通じて取得したデータを分析する。

6.1.2 実験計画

表 3 に実験における利用検証の 4 ステップを示す。取得するデータは、1) 被験者の基本属性（専門とするインダストリー・専門業務への従事期間など）、2) 利用検証の結果を比較するために被験者へ出題するテスト結果、3) 被験者が取り組む各プロセスの所要時間、4) 検証作業の最後に実施する所感のアンケート、5) 全検証プロセスの画面録画である。

1) については、口頭質問を通して取得し、2) については、本検証用に作成する Google Form により取得する。3) については研究実施者が手元のタイマーで取得する。4) については、本検証用に作成する Google Form により取得する。5) については、zoom の録画機能を利用して取得する。各回の検証は 60 分程度で 4 ステップを終了する。

表 3 実験における被験者の4ステップ

	内容	方法	アウトプット
ステップ1	被験者の基本属性に関するインタビュー	口頭質問	被験者の基本属性データ
ステップ2	工業デザイナーが宇宙機器開発に取り組むうえで必要な、宇宙機器開発基礎知見の researched についての検証	1.WEB ブラウザを使用したリサーチの実施 2.WEB ブラウザでのリサーチ結果を確認するテスト (Google Form) 3.学習システムを使用したリサーチの実施 4.学習システムでのリサーチ結果を確認するテスト (Google Form)	1.WEB ブラウザでのリサーチ結果を確認するテストの回答データ 2.学習システムでのリサーチ結果を確認するテストの回答データ
ステップ3	工業デザイナーが宇宙機器開発に取り組むうえで必要な、宇宙機器開発プロセス知見の学習についての検証	1.図表を使用した、開発プロセス学習の実施 2. 図表を使用した、学習結果を確認するテスト (Google Form) 3.学習システムで提供されるシナリオを通じた開発プロセス学習の実施 4. 学習システムで提供されるシナリオを通じた開発プロセス学習結果を確認するテスト (Google Form)	1. 図表を使用した、学習結果を確認するテストの回答データ 2. 学習システムで提供されるシナリオを通じた開発プロセス学習結果を確認するテストの回答データ
ステップ4	本検証を通じて得られた所感のアンケート	所感のアンケートフォーム (Google Form)	アンケート回答データ

実施場所: ZoomもしくはTeamsなどによるオンライン被験者:地上産業で工業デザイン業務に従事する専門的な知見を有する有識者約5名

6.1.3 マニュアルの提示

本実験では、被験者にマニュアルを提供し、それに従って各自で進行できるように設計した。マニュアルにはステップごとの目的やアクティビティが記載されており、それぞれの手段にアクセスするためのリンクも示している。このマニュアルによって、オンライン上で複数のタスクをこなす必要のある検証が、スムーズに進行できた。以下の図32はマニュアルの一部ページを示す。

実験の方法				
本日の実験には、4つのステップがあります。ステップ1では、実験参加者に関する基本的な事柄(ご専門とされるインダストリー・専門業務への従事期間など)について伺います。ステップ2では、工業デザイナーが宇宙機器開発に取り組むうえで必要な、宇宙機器開発基礎知見のリサーチについての検証として、WEBブラウザと教育アプリを使用したりリサーチを実施していただき、理解度確認テストにご回答いただきます。ステップ3では、工業デザイナーが宇宙機器開発に取り組むうえで必要な、宇宙機器開発プロセス知見の学習についての検証として、図表と教育アプリで提供されるシナリオを通じた開発プロセス学習を実施していただき、理解度確認テストにご回答いただきます。ステップ4では、本検証を通じて得られた所感のアンケートにご回答いただきます。				
1	参加者属性インタビュー	1.1.実験参加者に関する基本的な事柄のインタビュー	ZOOMに参加	5分
2	宇宙機器開発に必要な基礎知識リサーチの検証	2.1.実験A: WEBブラウザを使用するリサーチ	テスト01を開く	10分
		2.2.実験A: 01理解度テスト		
		2.3.実験B: 教育アプリを使用するリサーチ	テスト02を開く	10分
		2.4.実験B: 02理解度テスト		
3	宇宙機器開発プロセス学習の検証	3.1.実験A: 図表を使用するリサーチ	テスト03を開く	10分
		3.2.実験A: 03理解度テスト		
		3.3.実験B: 教育アプリを使用するリサーチ	テスト04を開く	10分
		3.4.実験B: 04理解度テスト		
4	所感のアンケート	4.1.アンケートフォーム解答	フォームを開く	10分

 慶應義塾
Keio University

図 32 実験時に提示したマニュアル

6.1.4 アンケートフォームの設計

本実験では、アプリを使用する場合と使用しない場合の比較対照実験を行うことを目的としている。そのため、設計段階で設定したすべての問題とタスクが対象となるよう、実験内容を構築した。また、システムの設計段階で特に重要と判断した宇宙に関する基本情報については、網羅的に問いの中に組み込んでいる。設問数が多くなると、タスクに要する時間が長くなる一方で、重要な情報にいかに関率的にたどり着けるかが本実験の検証ポイントの一つである。このため、設問は必要最低限の数に絞りながらも、内容を工夫し、設問をよく読まなければ答えがわからないような形式を採用した。これにより、実験対象者が情報を収集し理解する過程をより正確に測定できるように設計されている。さらに、設問やタスクの構成においては、被験者の注意力や思考プロセスを引き出すことを重視した。これにより、アプリの有無が情報探索の効率や正確性に与える影響を具体的に明確に評価することを目指している。

(1) 参加者属性インタビュー

実験の冒頭では、参加者の基本属性を取得するプロセスを設けている。これは、実験結果に対する参加者の背景の影響を分析し、データ解釈の精度を向上させるためである。具体的には、以下の5つの項目を質問として設けた。表4はその一覧である。

まず、専門領域を取得することで、参加者が従事している分野や知識の範囲を把握する。この情報により、参加者の専門性が回答やタスク遂行にどのような影響を与えるかを検証できる。また、経験年数についても質問し、各参加者が業務にどの程度従事してきたかを測定することで、知識やスキルの深さを推測する。

さらに、宇宙開発に関する経験について調査することで、参加者が宇宙開発プロジェクトに関与した具体的な経験の有無を明らかにする。これにより、宇宙関連知識の有無がどのように影響するかを確認することが可能である。最後に、宇宙開発への関心度と実際に関わってみたいかを尋ね、参加者のモチベーションや意識を把握する。この項目は、個々の興味関心がタスクの遂行に影響を与える可能性がある。

これらの基本属性の情報は、参加者間の属性を把握するとともに、アプリの有用性や効果の分析において、背景要因を考慮するための基礎データとして活用される。たとえば、宇宙開発に関する経験が豊富な参加者と未経験の参加者とは、アプリがもたらす学習支援効果に差が生じる可能性があるなど、参加者の属性を事前に取得することは、データの多角的な分析を可能にし、実験結果の解釈を深める上で重要な役割を果たす。

表 4 参加者属性インタビューの質問項目

ID	質問内容	回答方式
Q0-1	経験している産業、プロダクトは何でしょうか（複数回答可）	自由記述
Q0-2	経験年数をお答えください	自由記述
Q0-3	宇宙開発に従事した経験はありますか	はい・いいえ
Q0-4	宇宙開発に対する関心はどれくらいありますか	5段階
Q0-5	将来的に宇宙開発に関わってみたいと思いますか	5段階

(2) 宇宙機器開発に必要な基礎知識リサーチの検証

本検証の1つ目は「基礎知識のリサーチに関する検証」である。この検証では、初学者が宇宙開発に関する情報について WEB を用いてどの程度リサーチできるか、また学習アプリを使用した場合にリサーチ効率がどのように変化するかを比較・評価することを目的としている。設問内容は、宇宙機器開発において重要とされる基礎知識を網羅的にカバーするよう設計されている。具体的には、参加者に以下のシチュエーションを想定してもらい、実験を進める。

「あなたは宇宙ステーションで使用する機器の開発を打診されました。これは初めての取り組みとなるため、まずは情報収集を行ってください。(Gemini などの AI ツールは使用しないでください)」という設定で、情報収集後に宇宙開発に関連した簡単なクイズに回答してもらう形式である。

検証の手順は以下の通りである。まず、参加者は自身の WEB ブラウザを立ち上げ、自由に「宇宙開発」に関する情報をリサーチする。その後、事前に用意された「確認テスト 01」に回答し、WEB リサーチで収集した情報を基に自身の理解度を測定する。この段階では、参加者がどの程度正確に、効率よく情報を取得できるかを評価する。次に、参加者は学習アプリを立ち上げ、アプリ内の「宇宙開発の基本的な情報」セクションを利用して学習を行う。その後、アプリを用いた学習内容を基に「確認テスト 02」に回答する。

本検証の目的は、初学者が WEB リサーチを通じて必要な情報をどれだけ効率的に収集できるかを確認するとともに、学習アプリを使用することで情報収集の効率や正確性がどのように向上するかを明らかにすることである。アプリ使用前後のテスト結果を比較することで、アプリの有効性を測定し、基礎知識の学習支援ツールとしての価値を評価する。この手法により、初学者が直面する WEB リサーチの課題や、アプリがそれをどの程度補完できるかが具体的に検証されることになる。

双方共通で使用された確認テストの項目を表 5 に示す。

評価指標として正答率と誤謬率、回答時間を取得する。

表 5 基礎知見リサーチにて使用された確認テストの設問

設問	ID	質問内容（正答は太字）	回答方式
宇宙環境の特徴として正しく述べているものをすべて選べ	Q1-1	無重力状態であり、物体の重さはなくなるため浮遊する	選択式
	Q1-2	宇宙飛行士は体が軽くなるため、より精密な作業が出来るようになる。	選択式
	Q1-3	高真空環境であり、高活性な酸素が存在する	選択式
	Q1-4	微小重力環境では、質量は依然として存在する。	選択式
宇宙機器開発のプロセスとして正しく述べているものをすべて選べ	Q1-5	安全性や設計の妥当性を評価する審査技術をシステムズエンジニアリングと呼ぶ	選択式
	Q1-6	要求や仕様書が設計・製造・試験の基盤である	選択式
	Q1-7	設計フェーズが定義されており、概念設計→基本設計→詳細設計の順で進める	選択式
	Q1-8	すべての設計や試験の記録し、追跡可能な状態にすることをトレーサビリティという	選択式
開発におけるレギュレーションについて正しく述べているものをすべて選べ	Q1-9	宇宙機器は国際宇宙基準法を順守し開発される	選択式
	Q1-10	ISS のインテリアの配色は心理的要因を考慮しプロジェクトごとに決定する	選択式
	Q1-11	JAXA の文書「きぼう 船内実験室利用ハンドブック」の注視すべき項目は 1 章の「システム機器」についてである。	選択式
	Q1-12	NASA が発行する ISS に関する技術文書の中で最も重要なものは SSP50005	選択式

(3)宇宙機器開発プロセス学習の検証

本検証の二つ目の目的は、宇宙機器の開発プロセスにおける理解度を比較することである。具体的には、技術文書を用いた学習と、学習アプリを使用した学習の効果を検証し、どちらがより効率的かつ深い理解を促進するかを明らかにすることを目指す。本検証では、宇宙機器開発における特徴的なプロセスやステップについて、初学者がどの程度把握できるかを評価するために設問を設計した。参加者には以下のシチュエーションを想定してもらい、検証に臨んでもらう「あなたは宇宙ステーションで使用する機器の開発を発注されました。手元には技術文書と要求仕様書が渡され、それを基に開発プロセスを進める必要があります。この情報を用いて、次に行うべき具体的なアクティビティを理解し、計画を立ててください。検証の手順は以下の通りである。まずは、提供された参考文献を使用して宇宙機器の開発プロセスに関する知識を学んでもらう。この段階では、文献のみを基にどの程度情報を取得できるかが評価の対象となる。文献を用いた学習後に、事前用意された「確認テスト 03」に回答してもらい、このテストでは、宇宙機器開発における基本的なプロセスや次のステップをどれだけ理解しているかを測定した。

次に、学習アプリを立ち上げてもらい、「2.デザインプロセス」というセクションを使用して同様の学習を進めてもらい、アプリは、視覚的かつ体系的に情報を提供し、学習効率を高めることを目的としている。アプリを使用した学習後、別のテスト「確認テスト 04」に回答してもらい、このテストでは、アプリを利用した場合にどの程度理解が深まったかを測定した。双方共通で使用された確認テストの項目を表 6 に示す。

これらの手順により、技術文書を利用した従来型の学習と、学習アプリを用いた新しい手法の学習効果を比較し、それぞれの利点や課題を明らかにできる。

評価指標として正答率と誤謬率、回答時間を取得した。

表 6 プロセス学習にて使用された確認テストの設問

設問	ID	質問内容（正答は太字）	回答方式
システム要求書について 正しく述べているものをすべて選べ	Q2-1	システムの具体的な設計内容が記述されている	選択式
	Q2-2	ミッション、並びにシステムの目的と制約条件が記述されている	選択式
	Q2-3	デザイナーは要求項すべてに目を通す必要がある	選択式
NASA の SSP 文書で指定されているものをすべて選べ	Q2-4	ISS のインテリアやコンポーネントの色味と仕上げ	選択式
	Q2-5	装置本体の角の丸さ	選択式
	Q2-6	人工衛星をロケット打ち上げ時に固定するインターフェースの仕様	選択式
	Q2-7	地球低軌道の平和利用ガイドライン	選択式
技術審査と書類について正しく述べているものをすべて選べ	Q2-8	審査を経てプロジェクトへの最終投資判断が行われる	選択式
	Q2-9	トレーサビリティ根拠資料を提出する	選択式
	Q2-10	デザインは良し悪しの数値化化が難しいため、定量技術審査の対象外である	選択式

(4) 所感のアンケート

本検証の最終段階では、学習アプリ自体の評価を実施した。評価は定量的および定性的な二つの観点から行い、参加者にアンケートを通じてフィードバックを収集した。表 7 で示すようにアンケートには、設問ごとに 5 段階で評価を行う形式と、その評価理由を自由記述で記入する項目が含まれており、定量的評価と定性的評価の両方を得ることができた。定量的な評価では、アプリの使いやすさ、学習の有効性、情報の網羅性、視覚的デザインなどに関する参加者の満足度が数値で示され、これにより、アプリの各機能に対する客観的な評価が得られた。さらに、定性的な評価では、参加者がどのような点を特に評価し、どのような点を改善すべきと感じたのかを自由に記述してもらい、回答の根拠などの意見を収集した。これらのデータに基づいて、各段階での正答率や誤謬率、回答時間の差分を分析する。

表 7 所感アンケートの質問項目

ID	質問内容	回答方式
Q3-1	事前情報なしで宇宙開発に必要な情報のリサーチは困難であった	5 段階/自由記述
Q3-2	宇宙機器開発のプロセスと地上機器開発のプロセスには違いがあると感じた	5 段階/自由記述
Q3-3	技術文書などへのアクセスは WEB 経由では難しいと感じた	5 段階/自由記述
Q3-4	技術文書などへのアクセスはアプリに纏まっていると簡単だと感じた	5 段階/自由記述
Q3-5	本アプリで得られた情報で宇宙機器開発に参画する上での概要情報は得られたと感じた	5 段階/自由記述
Q3-6	デザイン作業を実際に実行している際、アプリになっている方が参照しやすいと思う	5 段階/自由記述
Q3-7	本アプリで得られた基礎知識を基に、詳細な情報は WEB で検索できると感じた（キーワードを把握できた）	5 段階/自由記述

6.2 システムの検証結果

本システムの検証結果について論じる。実験計画どおり、図 33 のようにオンライン経由で 5 名の専門家から検証に協力いただいた。想定と検証準備の試行では 1 時間の所要時間であったが、実際にはほぼ毎回 1 時間半を要した。

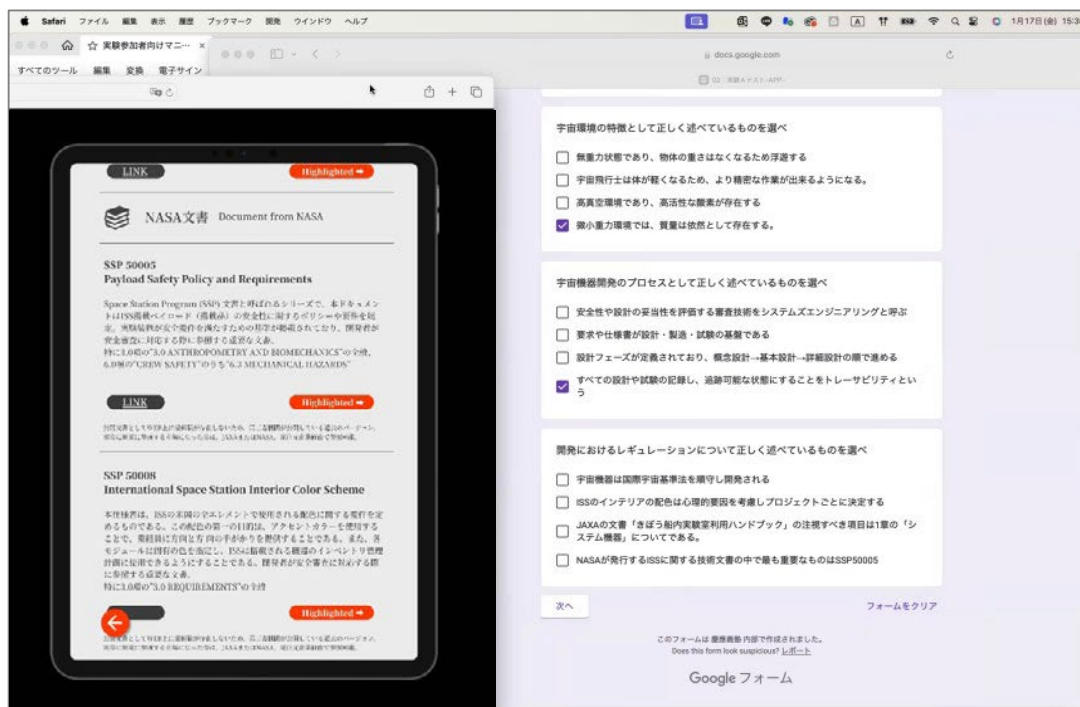


図 33 PC を利用した検証の様子、画面全体録画

6.2.1 基本情報収集

検証として 1 つ目に実施した「基礎知識の研究に関する検証」についての結果を報告する。この検証では、初学者が宇宙開発に関する情報について WEB を用いてどの程度リサーチできるか、また学習アプリを使用した場合にリサーチ効率がどのように変化するかを比較・評価することを目的としている。設問内容は、宇宙機器開発において重要とされる基礎知識を網羅的にカバーするように設計されている。

WEB 使用時に比べてアプリを使用した場合、正答率は平均して 6 点中 2 点から 4.4 と大きく上昇した。回答時間については平均して 3 分 20 秒から、3 分 12 秒とこちらも減少している。しかし誤謬率、に関しては 6 点中 1 点から 1.2 点と上昇がみられた。正答率と回答時間は期待したとおり、仮説の裏付けとなる結果だが、誤謬率も上昇しており、こちらは想定外の結果といえる。以下表 8 は結果のサマリーである。

表 8 検証 A の結果サマリー

検証 A 基本情報収集 (青=良い結果、赤=悪い結果)		
平均点数	テスト 01 : WEB	2 / 6
	テスト 02 : アプリ	4.4 / 6
平均時間	テスト 01 : WEB	3 分 20 秒
	テスト 02 : アプリ	3 分 12 秒
平均誤答数	テスト 01 : WEB	1 / 6
	テスト 02 : アプリ	1.2 / 6

6.2.2 シナリオ学習

本検証の二つ目に実施した、「宇宙機器の開発プロセスにおける理解度の比較」についての結果を報告する。具体的には、技術文書を用いた学習と、学習アプリを使用した学習の効果を検証し、どちらがより効率的かつ深い理解を促進するかを比較、評価している。

WEB 使用時に比べてアプリを使用した場合、正答率は平均して 5 点中 2.4 点から 4.4 と大きく上昇した。回答時間については平均して 4 分 00 秒から、3 分 30 秒とこちらも減少している。しかし誤謬率、に関しては 5 点中 1 点から 1.6 点と上昇がみられた。正答率と回答時間は期待したとおり、仮説の裏付けとなる結果だが、誤謬率も上昇しており、こちらは想定外の結果といえる。以下表9は結果のサマリーである。

表 9 検証 B の結果サマリー

検証 B シナリオ学習 (青＝良い結果、赤＝悪い結果)		
平均点数	テスト 01：書類	2.4 / 5
	テスト 02：アプリ	4.4 / 5
平均時間	テスト 01：書類	4 分 00 秒
	テスト 02：アプリ	3 分 30 秒
平均誤答数	テスト 01：WEB	1 / 6
	テスト 02：アプリ	1.6 / 6

6.2.3 システムのレビュー

本検証の最終段階では、学習アプリ自体の評価を実施した。評価は定量的および定性的な二つの観点から行い、参加者にアンケートを通じてフィードバックを収集した。5 点満点中、最小で 3.8 点、最大で 4.6 点と全体を通しておおむね好意的な評点を得ていると言えよう。平均点数が高いものは回答のばらつきが少なく、各参加者のインダストリーや経験問わず同じ傾向が出ていると言える。一方点の低いものはばらつきが多く、定性コメントにも正反対の趣旨のコメントが見られた。点数と主なコメントを以下の表 10 に記す。

表 10 システムのレビュー結果サマリー

6.2.3 システムのレビュー		
設問	平均点数	コメント抜粋
事前情報なしで宇宙開発に必要な情報のリサーチは困難であった	4.6 / 5	宇宙に対しての基礎知識がないため何から調べて良いのか不明。知りたいことの概要や呼び名などが不明なのでウェブ検索で情報に辿り着くのが困難。
宇宙機器開発のプロセスと地上機器開発のプロセスには違いがあると感じた	3.8 / 5	開発プロセスなどは地上機器と大きな違いは無いが、宇宙機器はよりリスク管理と要件のロバスト性などがシリアスである点は異なる。システム要求やトレーサビリティなどトップダウンな要素が多い。
技術文書などへのアクセスは WEB 経由では難しいと感じた	3.8 / 5	情報量が多く、専門用語も多い。必要情報がどこにあるのかわからない。WEB 検索では信憑性のあるサイトを探せるとは限らない。
技術文書等へのアクセスはアプリに纏まっていると簡単だと感じた	4.6 / 5	工業デザインという軸で、必要な情報にダイレクトにアクセスできるため。アプリは、優先順位が高い情報を適度な文字数で項目にグルーピングされているため情報を構造化しやすいと感じたため

本アプリで得られた情報で宇宙機器開発に参画する上での概要情報は得られたと感じた	4 / 5	わかりやすくまとまっているため、概要情報は得られたと思う。基本的な知識の解説や実際の文書のリンクなどがあったので、困った時に戻って来やすいと思った。
デザイン作業を実際に実行している際、アプリになっている方が参照しやすいと思う	4.2 / 5	必要情報にすぐアクセスでき、見返すことも容易であるため。実際に作業する場合は必要な項目などを紙に印刷したりするかもしれないと思った。
本アプリで得られた基礎知識を基に、詳細な情報はWEBで検索できると感じた（キーワードを把握できた）	3.8 / 5	主要な情報源の把握ができたため。（それまではどの情報を参照すれば良いのか不明だった。） キーワードは把握できたが、Webの情報の何が正しいのかの判断が自力のみだと難しい気がする

第7章 考察

7.1 考察の観点

本研究では、提案システムの目的として「宇宙開発に関する基礎的な知識を効率的に学べる教育を提供し、初学者である異業種の工業デザイナーが重要かつ最低限必要な情報に迅速にアクセスできる仕組みを構築する」ことを掲げた。本考察では、この目的が実際に達成されているかを検証する。具体的には、学習システムを使用した後に、「宇宙特有の技術情報を網羅的に学ぶことができたか」、「先人がいない状況でも暗黙知を習得できたか」という 2 つの課題を解決できているかを評価の軸とした。評価対象は異業種の工業デザイナーとし、彼らに対して専門情報を適切な粒度で提供し、実践的な学びが得られる仕組みとなっているかを検証した。この学習プロセスが実際の開発現場において有用であるかが、システムの有効性を判断する重要な尺度となる。

7.2 本システムの有用性

(1) 学習結果から見るシステムの有用性

検証 A リサーチタスクでは正答率が WEB 使用時に平均 6 点中 2 点だったところから、本システムの利用で平均 4.4 点に上昇した。回答時間は平均 3:20 から 3:12 に短縮した。検証 B である開発シナリオ学習タスクでは、文書での学習時に平均 5 点中 2.4 点だったところから、本システムの利用で平均 4.4 点に上昇した。回答時間は平均 4:00 から 3:30 に短縮した。A と B どちらの検証においても本システムを利用することで参加者の正答率が上昇し、回答時間が短縮された。これらの結果は、本システムが効率的な情報収集と学習を可能にすることを示している。図 34 は結果のサマリーである。



図 34 学習に関する検証、A と B の結果のまとめと考察

(2) システムのレビュー結果から見るシステムの有用性

システムのレビュー結果においては、どの項目も 5 点満点中、平均 4 点を上回る評価を得た。また定性評価の結果からは、参加者が本システムの必要性和有用性を感じており、特に技術文書や基礎情報がアプリ内で一元的に整理されている点を高く評価していることがうかがえた。

また、参加者がアプリを利用して学習した結果、基礎知識を得た後であれば、詳細な情報を WEB で効率的に検索できるという傾向も確認され、キーワードの提示だけでも検索能力向上に寄与する可能性が示唆された。図 35 はレビュー結果の主要項目サマリーである。

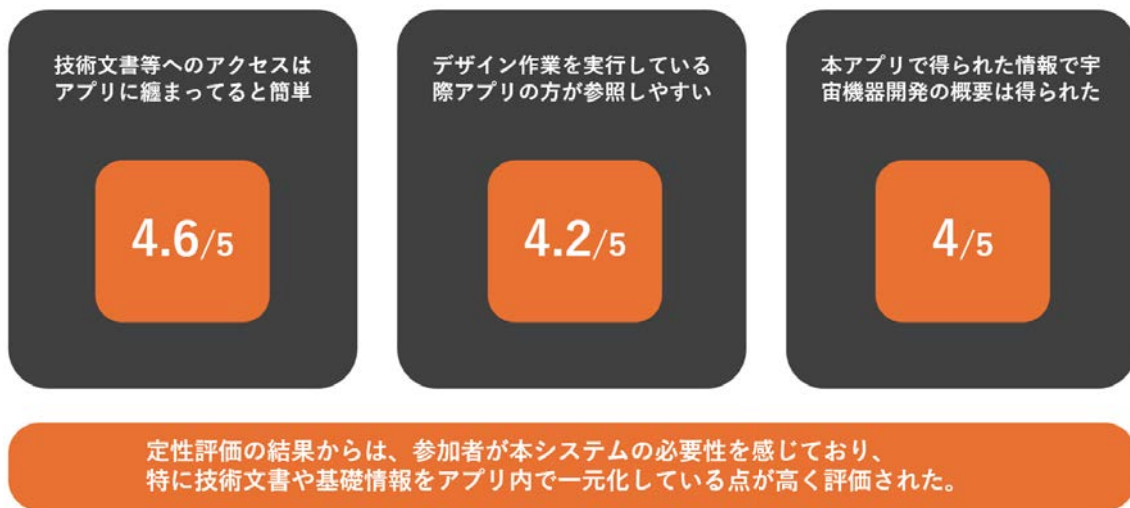


図 35 定性評価の注目すべき項目のまとめと考察

(3) 課題をシステムが解決したか

(1) 学習結果から見るシステムの有用性の項では、すべての検証でシステムを利用することで正答率上昇し、回答時間は短縮したことを述べた。また、(2) システムのレビュー結果から見るシステムの有用性の項で述べたように、定量では 5 点中平均 4 点以上の評価を得て、定性コメントでも好意的な回答が中心であったことを述べた。これらは課題として設定した、「宇宙特有の技術情報を網羅的に学ぶことができたか」、「先人がいない状況でも暗黙知を習得できたか」に対し、有効な結果であると言える。以上のことから、提案システムの目的である「宇宙開発に関する基礎的な知識を効率的に学べる教育を提供し、初学者である異業種の工業デザイナーが重要かつ最低限必要な情報に迅速にアクセスできる仕組みを構築する」は果たされていると言える。よって本システムは課題を解決しており、有用といえるだろう。図 36 は学習結果の結果及びシステムのレビュー結果と課題の関係をまとめたものである。

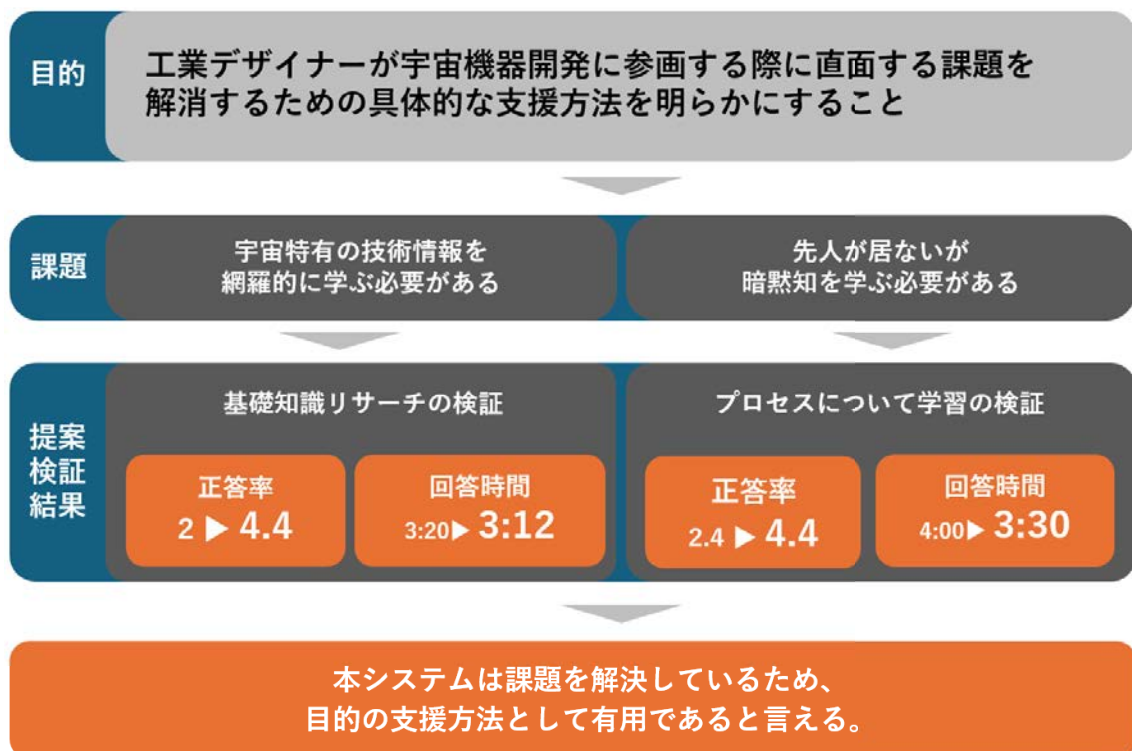


図 36 課題と結果からみる考察のまとめ

7.3 検証のその他気づき

一方で、回答の誤謬率に関しては、検証 A で平均 1→1.2、検証 B で平均 1→1.6 とわずかながらどちらも上昇傾向がみられた。しかし、正答率を見ると、検証 A で平均 2→4.4、検証 B で平均 2.4→4.4 とどちらも倍以上上昇していることから、回答が促されている結果誤謬率も上昇しているといえるだろう。つまり全く分からない状況から、回答はできるが、純粋な誤答やケアレスミスが生じた結果、誤謬率が増えていると考察する。この結果は現在のシステムが回答の正確性を担保することはできていないことを示しており、教育コンテンツという観点で見れば設計の限界が露呈したことになる。

また今回は実験の設計上全く違うインダストリーでの経験を持つデザイナーに依頼をすることで、参加者の多様性を確保している。実際に産業ごとのばらつきは見られ、アカデミックな領域でデザイナーを行っている参加者4については、そもそものリサーチ能力が高く、基本点数が高い傾向がみられた。またハードウェア開発に特に精通する参加者5は、システムの開発フローに、既存産業と宇宙産業の関連性と差異を見出しており「開発プロセスなどは地上機器開発と大きな違いはなかった。しかし、宇宙機器の方がよりリスク管理と要件のロバスト性などがシリアスである点は異なる」と述べていたことから、本システムの一つのコンセプトである「差異を認識させる」ことに成功している。

一方、アートディレクションなどを中心に取り組んでいる参加者3は、技術文書などに対する忌避感が強く、本システムと検証を通じ、デザイナーが能力を正しく発揮するためには、専門領域をきちんと分けることが大切で、本システムのような教育ではなく、翻訳者のような新たな中間人材を付ける必要があるのではと述べている。以上のことは、宇宙開発に対して親和性の高いインダストリーとそうでないインダストリーがある可能性を示しており、学習システムの設計の新たな要求になる可能性がある。

定性的なコメントとして印象だったのが、検証終了後にすべての参加者が「検証の参加が楽しかった、勉強になった」という旨のコメントをしており、これは宇宙機器開発の技術的情報がいかに関わられていなかということ、工業デザイナーに関わる人間の知的好奇心の高さを示している可能性がある。このことから、工業デザイナーの宇宙機器開発への適応性は高い可能性がある。

アプリのユーザーインターフェース(UI)の妥当性については、今回の実験では評価が十分に行えなかった。アプリになっている方が参照しやすいというアンケートは平均で 5 を示しているものの、操作性や視覚的なデザインが学習効率に与える影響について具体的なデータを取得できず、UI 改善の具体的な方向性を見出すには至らなかった。

7.4 今後の展望

本研究の今後の課題としては、いくつかの重要なポイントが挙げられる。まず、アプリのユーザーインターフェース(UI)に関する妥当性の評価が必要である。操作性や視覚的な要素が学習効率や理解度にどのような影響を与えるかを具体的に検証し、改善点を特定することが求められる。UI の設計は、ユーザーが学習内容を効率的に理解し活用するための重要な要素であり、さらなる研究が必要である。

次に、提供されている情報量の適切性を検証する必要がある。本システムで提供される情報が実務において十分であり、かつ有効であるかを明らかにするため、さらなるフィールドテストを行うことが重要である。特に、情報の過不足については、参加者からの幅広い意見を収集し、それに基づいて内容を最適化していくことが求められる。

また、検索能力における個人差を補完するための機能の導入も課題として挙げられる。使用者の経験してきたインダストリーごとのテーラリングや、理解度テストを経てからのコース選択などが考えられる。これにより、異なるバックグラウンドを持つユーザーが平等にシステムを活用できる設計を目指すことができる。

さらに、実務を想定した具体的なシナリオに基づく評価の拡充も必要である。宇宙機器開発において直面しうる実際の課題を想定し、それに基づいて本システムがどのように役立つかを多角的に評価することで、システムの有用性をより深く理解することが可能となる。

第8章 まとめ

本研究は、「どのようにすれば工業デザイナーが宇宙機器開発に参加し、ユーザビリティの高い製品開発に貢献できるのか？」という問いから「工業デザイナーが宇宙機器開発に参画する際に直面する課題を解消するための具体的な支援方法を明らかにすること」を目的とし、学習システムを設計、プロトタイプを作成し、実験と評価を行った。

近年、宇宙旅行や民間ステーションの運営など宇宙利用の拡大に伴い、利用者の多様化やオペレーションの効率化が進む中で、宇宙機器のユーザビリティ向上が重要な課題になりつつある。従来の宇宙機器は、訓練を受けた宇宙飛行士を前提に設計されており、直感的な操作性が不足している点が懸念される。これまで宇宙開発に関わってこなかった工業デザイナーは地上産業においてユーザビリティ向上に大きく貢献してきたため、活躍が期待されるが、宇宙特有の物理環境、厳格な開発プロセス、および膨大な技術文書が参画の障壁となっている点が課題である。これらの課題を解決するために提案した学習システムは、宇宙開発に関する基礎知識を効率的に学べる教育機能を提供し、異業種の工業デザイナーが最低限必要な重要情報に迅速にアクセスできる仕組みを提供した。検証の結果、全被験者において正答率の向上や回答時間の短縮が確認され、定性的なコメントでも概ね肯定的な評価を得たことから、当初の目的に対して一定の効果があることが示された。ただし、システムとしての UI や情報量の適切性、個人差への対応など、さらなる改善が必要であることも明らかになった。

このシステムが宇宙開発に関わる全てのステークホルダーにとって、よりよい有人宇宙の世界と未来を構築する第一歩となることを願いつつ、社会実装に向けて研究を進めていきたい。

謝辞

本研究の実施および論文の執筆にあたり、多くの方々からご支援を承りました。

まず慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科教授神武直彦先生には、主査として本論文の執筆に至るまで多大なるご指導とご鞭撻をいただき、心より感謝を申し上げます。アカデミックな経験や知見が無い、いわばゼロスタートからでしたが、研究とはどういうものなのか、またその難しさと面白さを懇切丁寧にご指導いただき、生涯にわたって活かしていけるような学びを得ることができました。

副査を担当していただいた猪熊浩子教授には、ご多忙中にも関わらず研究と論文の内容をフォローいただき、また審査会においても温かい支援とコメントを頂きました。心より感謝を申し上げます。

担当教員ではないにも関わらず、ご自宅にまでお招きいただき、幾度となく相談に乗っていただいた、田子學特任教授にも多大なる感謝を申し上げます。同じ工業デザイナーというバックグラウンドからのご意見、ご指導が、大変支えになりました。

主査と副査ではない専任教員の皆様にも、テーマ発表や中間発表などの機会において、様々なコメントや指摘を通じてご指導を賜り、大変勉強になりました。

神武研究室関係者の方々には、日ごろのゼミや個別ご指導で大変お世話になり有難うございました。小高暁特任准教授には研究相談や壁打ち、倫理審査のフォローなど、様々なご支援をいただき、また、西野瑛彦特任講師にも、研究相談から幾度となくご対応いただいた論文のレビュー、そして他愛もない悩み相談など、手取り足取りご指導をいただき、多大なるご支援を賜りました。

研究室のOBOG、博士課程の先輩方にも、お忙しい業務や研究の合間を縫って、ご支援を頂きました。ラボ活動でフィードバックを幾度となくいただいた大野友さん。研究の初期、テーマに迷っていたころ長時間研究相談に乗っていただいた大塚聡子さん。年末年始に論文のレビューや壁打ち、悩み相談と力強くサポートくださった、齋藤敦子さん、与那覇竜太さん、本当にありが

とうございました。

研究室の先輩後輩には日々のラボ活動や研究において、あらゆる面でお世話になりました。毎度の発表にコメントギフトを下さったり、応援していただいたり、また小川尚人さんには執筆作業のお手伝いも頂きました。素敵で優秀な皆様と切磋琢磨した日々は財産です。

そして通称“男塾”である、研究室同期メンバーとは本当に愉快的な日々を過ごさせていただきました、研究からプライベートに至るまでお互い支えあった日々は一生の思い出です。半年後に修了するメンバーと子ども心は一つです。ありがとうございました。

また、株式会社デジタルブラストの代表取締役CEO堀口慎吾さん並びに、マネージャー安養寺正之さん、他従業員の皆様には、この研究と学びの機会に対して多大なるご支援とご理解を頂きました。ご迷惑をおかけすることもあったかと思いますが、おかげさまで本研究の機会を得ることが出来ました。皆さまに心より感謝申し上げます。

宇宙航空研究開発機構JAXAの有人技術開発部門の皆様、またCE室の皆様には、ヒアリングや見学など、ご多忙の中ご対応をいただきました。大変貴重な機会とご意見を賜り感謝申し上げます。

株式会社スペースエントリーの皆様には、研究相談、またシステムのレビューなどでお力添え頂きました。ありがとうございます。

私の友人であり、大変優秀なデザイナーでもある実験参加者の皆様には、貴重なお時間と知見をいただき、本研究の評価に多大なるご支援をいただきました。ありがとうございます。

最後に、慶應義塾大学大学院SDM研究科23年春入学同期の皆さまといっしょに2年間を乗り越えられたことを誇りに思います。半年後に終了されるメンバーも含め、皆さまに心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] NASA, “The International Space Station Transition Plan,” 18 7 2024. [オンライン]. Available: <https://www.nasa.gov/faqs-the-international-space-station-transition-plan/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [2] 宙畑, “米政府が 2030 年まで ISS の運用継続を表明,” 3 1 2022. [オンライン]. Available: <https://sorabatake.jp/24806/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [3] NASA, “Commercial and Marketing Pricing Policy,” 29 4 2021. [オンライン]. Available: <https://www.nasa.gov/humans-in-space/commercial-and-marketing-pricing-policy/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [4] Deloitte, “The commercialization of low Earth orbit,” 2023. [オンライン]. Available: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/public-sector/us-the-commercialization-of-low-earth-orbit.pdf>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [5] Virgin Galactic, [オンライン]. Available: <https://www.virgingalactic.com/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [6] Blue Origin, [オンライン]. Available: <https://www.blueorigin.com/ja-JP/new-shepard/fly>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [7] “ Think Space Life, ” [オンライン]. Available: <https://aerospacebiz.jaxa.jp/solution/j-sparc/projects/think-space-life/conception/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [8] JAXA, “ Think Space Life, ” [オンライン]. Available: <https://aerospacebiz.jaxa.jp/solution/j-sparc/projects/think-space-life/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [9] NASA, *Human Systems Integration Handbook*, 2021.
- [10] LAVAZZA, [オンライン]. Available:

<https://www.lavazzabusinesssolutions.com.au/product/lavazza-blue-ebony-coffee-machine-milk-module/>. [アクセス日: 21 1 2025].

- [11] J. H. Valerio Di Tana, “Isspresso Development and Operations,” Journal of Space Safety Engineering, 2015.
- [12] NASA, “NASA, Axiom Space Change Assembly Order of Commercial Space Station, ” 19 12 2024. [オンライン]. Available: <https://www.nasa.gov/humans-in-space/nasa-axiom-space-change-assembly-order-of-commercial-space-station/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [13] “Gasparin, M. ”Role of designers in developing new products: an innovation turn in transformational economies”, Journal of Asian Business and Economic Studies, Vol. 25 No. 2, pp. 206-220,2018.,” [オンライン].
- [14] IDEO, “The Journey From Design Thinking to Creative Confidence,” [オンライン]. Available: <https://www.ideo.com/blogs/inspiration/from-design-thinking-to-creative-confidence>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [15] “山中 俊治 :”ICカード自動改札機の13.5° の傾き”自動車技術, Vol.65, No.10, pp. 50-55 (2011)”.
- [16] “Norman, D.A., The Design of Everyday Things, 2013”.
- [17] KDDI, “ケータイ図鑑 ,” [オンライン]. Available: <https://time-space.kddi.com/ketaizukan/index.html#topics-2022>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [18] Apple, [オンライン]. Available: <https://www.apple.com/jp/iphone/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [19] “ Erik Eckermann, World History of The Automobile, Society of Automotive Engineers, 2001”.
- [20] “山口 孝夫: 宇宙ステーション特有の設計(3) 人間工学設計, 日本航空宇宙学会誌,] 2003, 51 巻, 589 号, p. 51-59, 2019.”.

- [21] JAXA, “ JAXA 共 通 文 書 , ” [オ ン ラ イ ン]. Available: <https://sma.jaxa.jp/techdoc.html>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [22] “増井 慶次郎, キャサリン ローズ, 水原 清司, 石井 浩介, ライフサイクル戦略に基づいた製品設計のための QFD, 精密工学会誌, 2000, 66 巻, 4 号, p. 567-571, 公開日 2009/04/10, ”.
- [23] NTSS, “ NASA Technical Standards, ” [オ ン ラ イ ン]. Available: <https://standards.nasa.gov/NASA-Technical-Standards>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [24] JAXA, “ JAXA 共 通 技 術 文 書 , ” [オ ン ラ イ ン]. Available: <https://sma.jaxa.jp/techdoc.html>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [25] “清須美 匡洋, デザインの合意形成, 感性工学, 2013, 12 巻, 1 号, p. 289-292, 公開日 2023/05/31”.
- [26] “Olga Vl. Bitkina, Usability and user experience of medical devices: An overview of the current state, analysis methodologies, and future challenges, International Journal of Industrial Ergonomics, Volume 76, 2020.”.
- [27] “Harte R. A Human-Centered Design Methodology to Enhance the Usability, Human Factors, and User Experience of Connected Health Systems: A Three-Phase Methodology. JMIR Hum Factors. 2017”.
- [28] . 裕. 隼. 徹. 広. 智.-2. 巻. 号. 3.-5. 2. 久保田 拓朗.
- [29] D. H. M. Dr. Aruna Venkatesh, “Dr. Aruna Venkatesh, Dr. Henry Ma, Critical conversations as a tool for students’ tacit knowledge construction: An interpretive research in interior design studio interactions, International Journal of Educational Research Open, Volume 2, 2021,”.
- [30] JAXA, “ JAXA 共 通 技 術 , ” [オ ン ラ イ ン]. Available: <https://sma.jaxa.jp/techdoc.html>.

- [31] “Lave, J., & Wenger, E. (1991). Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation. Cambridge University Press.”.
- [32] “ The Learning Pyramid, ” [オンライン]. Available:
] https://uafs.edu/academics/academic-resources/academic-success-center/_documents/Learning%20Pyramid.pdf. [アクセス日: 21 1 2025].
- [33] D. G. M. S. M. l. i. a. i. s.-e. e. w. w. i. t. d. o. a.-b. m. J. o. E. P. 2. Mayer
] RE.
- [34] “Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., & Jacobs, S. (2016)”.
]
- [35] “Shneiderman, B., & Plaisant, C. (2004). Designing the User Interface.
] Pearson Addison-Wesley.”.
- [36] Figma, [オンライン]. Available: <https://www.figma.com/ja-jp/>. [アクセス日:
] 21 1 2025].
- [37] Apple, [オンライン]. Available: <https://www.apple.com/jp/ipad-pro/specs/>. [アクセス日: 21 1 2025].
- [38] JAXA, “ システム設計標準 , ” [オンライン]. Available:
] <https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-100.pdf>. [アクセス日:
21 1 2025].
- [39] JAXA, “宇宙機(人工衛星・探査機)設計標準,” 21 3 2020. [オンライン].
] Available: <https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JERG-2-000B.pdf>.
[アクセス日: 21 1 2025].
- [40] JAXA, “システム安全標準,” 20 8 2018. [オンライン]. Available:
] https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JMR-001C_N1.pdf. [アクセス日:
21 1 2025].
- [41] “システムズエンジニアリングの基本的な考え方 BDB-06007,” [オンライン].
- [42] JAXA, “システムエンジニアリングマネジメント計画(SEMP),” 12 11 2020. [オンライ
] ン]. Available: <https://ssl.tksc.jaxa.jp/isas-rev/koubo-support->

pages/kogata2022/document/BDB-17011A.pdf. [アクセス日: 21 1 2025].

[43 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, “「きぼう」船内実験室利用ハンドリング,” 4
] 2023. [オ ン ラ イ ン]. Available: https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/library/item/pm_handbook.pdf. [アクセス日: 21 1 2025].

[44 NASA, “International Space Station Flight Crew Integration Standard,”
] [オ ン ラ イ ン]. Available: https://spacecraft.ssl.umd.edu/design_lib/SSP50005rC.ISS_crew_integ.pdf. [アクセス日: 21 1 2025].

[45 NASA, “International Space Station Interior Color Scheme,” [オンライン].
] Available: <https://snebulos.mit.edu/projects/reference/International-Space-Station/SSP50008RC.pdf>. [アクセス日: 21 1 2025].

[46 “NASA HSI Handbook v2.0 NASA/SP-20210010952”.
]

[47 “山口 孝夫: 宇宙ステーション特有の設計(3) 人間工学設計, 日本航空宇宙学会誌,
] 2003, 51 巻, 589 号, p. 51-59, 2019.”.

[48 “International Space Station Flight Crew Integration Standard NASA-
] STD-3000/T SSP 50005 Revision E. NASA-Johnson Space Center, 2006.”.

[49 “Habitability and Human Factors Contributions to Human Space Flight”.
]

[50 “Lazar, J., Feng, J. H., & Hochheiser, H. (2017).”.
]

[51] “Norman, D. A. (2013). The Design of Everyday Things. Basic Books.”.