

時間管理に関する将来の航空交通システムのアーキテクチャ作成

航空交通管理領域 ※岡 恵，中村 陽一，虎谷 大地，蔭山 康太
交流研究員 永野 隆文

1 まえがき

航空需要の増加や環境負荷軽減の必要性の高まりにより，安全で効率的な軌道ベース運用（TBO：Trajectory Based Operation）が求められている。TBO 実現に向けた検討や様々な変革が世界中で続けられているが，具体的な実現方法は未だ確立されていない。TBO においては，航空交通管理は，飛行中のすべての段階における軌道を考慮し，利用者が希望する軌道からの逸脱を最小限に抑えつつ，最高の便益を達成することを目的としている[1,2]。しかし，TBO を実現する航空交通システムは，広範囲のステークホルダーが関わり，多数のシステムが連携する必要があることから，大規模かつ複雑なシステムになることが考えられる。このようなシステムを，求める便益が確実に得られるように作成することは，非常に難しいことである。

本研究では，大規模システムの開発に適しているシステム思考と，その一実践であるシステムズアプローチを用い，TBO の重要な要素である時間管理について必要となる機能を検討し，システムアーキテクチャを作成した[3-5]。本稿では，システムズアプローチについて概説し，システムアーキテクチャの作成について順を追って説明する。

2 システム思考とシステムズアプローチ

システム思考とは，「システム」を，いわゆる計算機システムのような狭義のシステムではなく，様々な要素とそれらの関係の集合と定義し，システムの振る舞いやパフォーマンスを理解する考え方である[6]。システム思考に基づいてシステムの在り方を検討する方法論をシステムズアプローチと呼び，主に宇宙開発の分野において発展してきた[7]。大規模で複雑なシステムの検討に有効な手法であり，特に製作数が限られた（大量生産ではなく後の改良が困難）システム作りに適している。過去の様々な実例

をもとに開発された手法が体系化されたものである。

システムズアプローチはニーズ志向のアプローチであり，ニーズの本質を明らかにし，開発段階で一貫してそのニーズを目標とするため，大規模で複雑なシステムを作る際でも求めるシステムを実現しやすい特徴を有している。

3 アーキテクチャの作成

システムズアプローチを用いて，本研究では図1に示す順序でアーキテクチャの作成を行った。最初にステークホルダーの分析を行い，時間管理に求められるニーズを特定する。システムズアプローチでは，まずニーズを特定し，そのニーズを満たすことを目指して議論が進められる。また，アーキテクチャ作成のおおまかな流れは図1の通りだが，実際の手順では必要に応じて前のステップに戻り，修正を加えながら進める。そうすることで，全体の整合性を担保しながらアーキテクチャを作成することが可能となる。

各ステップでは，議論の範囲やニーズ，目標，意図，制約，便益，達成の基準など，様々な項目を設定・記録して作成が進められる。

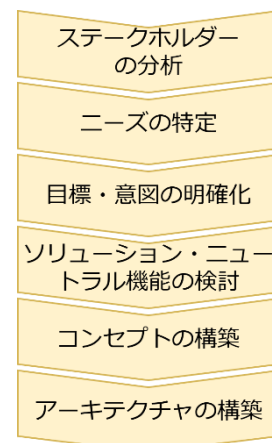


図1 本研究におけるアーキテクチャ構築の手順

検討の際には「当たり前」と感じられる項目でも、しっかりと明示しておくことで、議論の発散や目標の見失いを阻止することにつながる。また、各項目が明文化されていることで、複数の分野に渡るステークホルダー間でも理解を共有する助けになり、議論から時間が経過した際にも、議論した時の考えや目標が一貫して受け継がれることにつながる。これらの利点を生むためには、できるだけ多くの言葉や文章で広く意見を交わすことも重要である。

3.1 ステークホルダーの分析

最初のステークホルダーの分析では、時間管理を想定した際に、管理する機関・管理を受ける機関だけではなく、影響を受けると考えられるすべての対象を挙げる。対象の洗い出しが終わったら、それぞれの関係を明示し、対象に優先順位を付け、検討の中で考慮する範囲を決定する。

対象を矩形で表し、関係性を矢印で繋いだ図をステークホルダーバリューネットワーク（SVN：Stakeholder Value Network）と呼ぶ。本研究で作成した SVN を図 2 に示す。SVN を作成し、検討のスコップを定めることで、必要な視点の見落としを防ぎ、異なる立場の意見や

ニーズを適切に取り込むことが可能となる。関係性は分析によって異なるが、今回は、新たな施策による運用方法変更や、ルールによる規制を行う“政策／規制”，金銭の授受に関する“お金”，飛行に関する情報等の共有・通報に関する“知識／情報”，各種サービスやシステムの提供を行う“物品／サービス”の4種類で関係性を定義した。分析の結果、本研究では、政策立案グループ、管制運用グループ、空域利用者を主要ステークホルダーと定義した。

3.2 ニーズの特定

分析によって定義された主要ステークホルダー（政策立案グループ、管制運用グループ、空域利用者）に対し、時間管理へのニーズについてヒアリングを行った。また、その結果を集計し特に期待されるニーズを特定した。

3.2.1 ヒアリングの方法

ヒアリングに先立ち、時間管理へのニーズとして想定される項目をリストアップした。その中で重要と考えられた 11 の項目について、実際にヒアリングを行った（図 3）。その他のニーズについて、ヒアリングの際に確認したが追加のニーズは無かった。

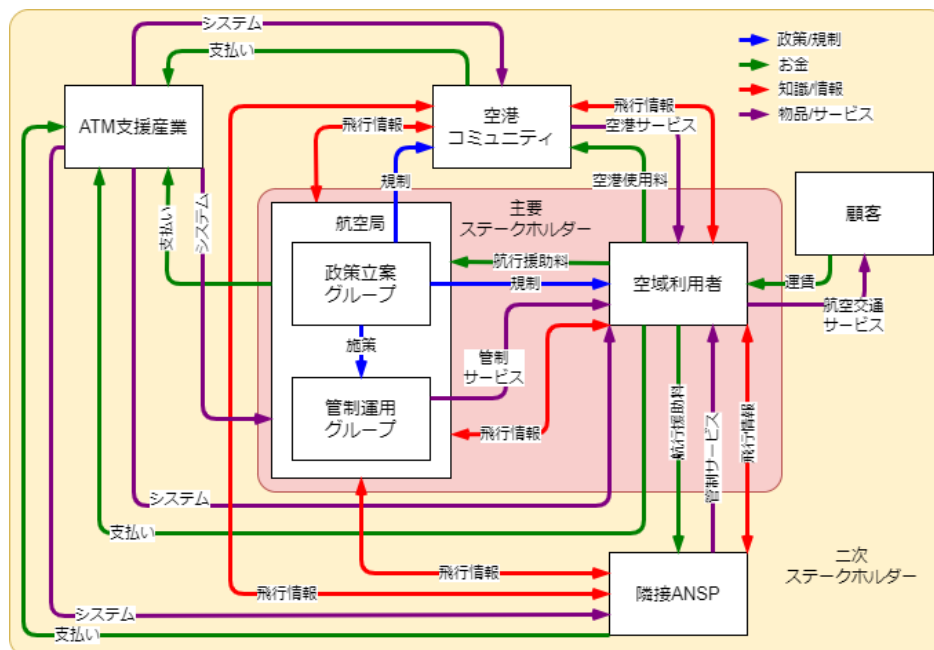


図2 本研究で作成した時間管理に関する SVN（関係機関と関係性に関する図）

ヒアリングでは品質管理の分野で使用されている狩野モデル[8]を活用した。狩野モデルでは、ニーズが満たされた場合の満足感を聞くだけでなく、ニーズが満たされなかった場合の満足感も聞くことが特徴である。ニーズが満たされた時の満足度合に注目されがちであるが、ニーズが満たされなかった場合の不満度合いによって、二元的にニーズを認識し、図4に示すような品質分類を行う。充足されれば満足、不充足であれば不満を感じるものは「一元的」（テレビで例えれば、映像の美しさなど）、充足されれば満足だが不充足でも不満ではないものは「魅力的」（録画機能など）、不充足なら不満だが充足されても満足は感じないものは「当

- (a) 空地で共有される時間精度が向上する
- (b) 管制処理容量が増加する
- (c) 定時性が向上する
- (d) 燃料消費量・温室効果ガス排出が減少する
- (e) 空域利用者（主にエアライン）の選択の柔軟性が向上する
- (f) 空域利用者間の公平性が向上する
- (g) 管制官のワークロード(WL)が低減する
- (h) パイロットのワークロード(WL)が低減する
- (i) 国際的な相互運用性（インターオペラビリティ）が向上する
- (j) 現在の管制運用・航空機運航との連続性を保つ
- (k) 現在または導入予定の管制システムとの整合性を保つ

図3 ヒアリングで設定した時間管理に関する11項目のニーズ

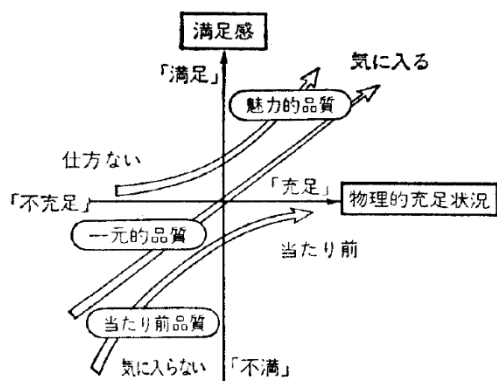


図4 狩野モデルの二元的な認識方法[8]

たり前」（音量調節機能など）に分類される。ヒアリングの回答が図5に示すエリアのどの位置にプロットされるかによって、各項目を“当たり前品質要素”，“一元的品質要素”，“魅力的品質要素”，“無関心品質要素”に分類する。“逆品質要素”，“懐疑的回答”は通常の質問であれば、発生しない項目となる。

各要素のうち、ニーズとして達成すべき最も優先順位が高い項目は、当たり前品質要素である。次いで一元的、魅力的、無関心の順となる。

3.2.2 ヒアリング結果

ヒアリングの結果を表1に示す。当たり前品質要素と評価されたニーズ項目は一つも無かった。これは、時間管理がまだ実現されたもので

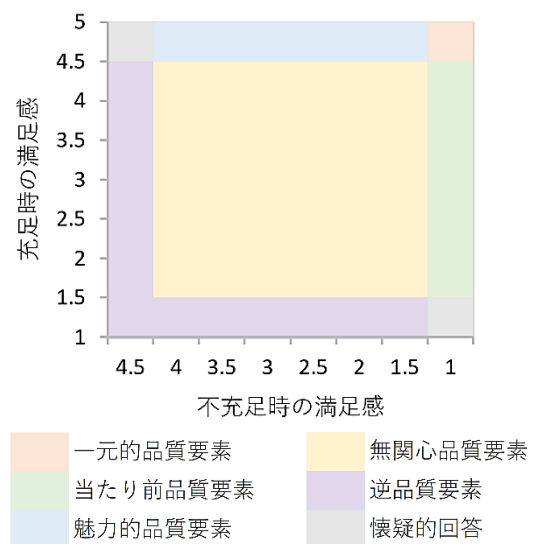


図5 狩野モデルによる評価

表1 各項目のヒアリング結果

(a)	時間精度	一元的
(b)	管制処理容量	無関心
(c)	定時性	魅力的
(d)	燃料消費量	一元的
(e)	柔軟性	無関心
(f)	公平性	一元的
(g)	管制官 WL	魅力的
(h)	パイロット WL	魅力的
(i)	相互運用性	魅力的
(j)	連続性	無関心
(k)	整合性	無関心

はないため、各ニーズが充足されることが当たり前とは認識されなかったのではないかと考えられる。

次に優先順位が高い一元的品質要素と評価されたのは(a)時間精度、(d)燃料消費量、(f)公平性だった。魅力的品質要素は(c)定時性、(g)管制官ワークロード、(h)パイロットワークロード、(i)相互運用性であった。(b)管制処理容量、(e)柔軟性、(j)連続性、(k)整合性は無関心品質要素と評価された。立場が異なることにより、ステークホルダーごとに若干の優先順位の違いが見られた。各ステークホルダーのグループごとの結果を付録に示す。

3.3 目標・意図の明確化とソリューションニュートラル機能の検討

ヒアリングの実施により主要ステークホルダーから期待される時間管理のニーズの優先順位が確定された。次に目標の明確化のため、SPS（System Problem Statement）を設定した。SPSは「システムが価値を提供するために何を実現するかといった意思を主張する単一の文であり、本当の成功を象徴するものである」[6]とされており、システムの目標・意図を簡潔に表すことにより本来の意図を明確化するものである。

SPSの検討では、システムの持つ“機能”とシステムの実体（計算機のようなモノだけではなく、データや関係する人も含む）である“フォーム”を分けて、機能の部分のみを考える。それにより、既存のシステムや方法にとらわれずに、本当に必要な機能について精査することが可能となる。特定のフォームに依存しない機能は「ソリューションニュートラル機能」と呼ばれる。

本研究では、To-By-Using フレームワークを用いてSPSを設定した。これは、To：～を行うために、By：～によって、Using：～を用いて、という形式でSPSを設定する方法である。主に混雑空港への到着を想定した時間管理について検討するため、時間管理、空港を対象とした航空交通流管理、メタリング、AMAN（Arrival Manager）のSPSを設定した。設定したSPSの一例として、時間管理のSPSを以下に示す。

< 時間管理の SPS >

To:容量管理や順序・間隔づけの支援を

できるだけ全飛行フェーズで行うために

By:特定地点における通過時刻を直接、または間接的に指示することによって

Using:時間を含む軌道情報を用いて

また、検討した時間管理のソリューションニュートラル機能を以下に示す。

< ソリューションニュートラル機能 >

- (1) 航空機の情報取得
- (2) 特定地点の通過予測時刻の計算
- (3) 時間管理によって割当てられる
特定地点を通過すべき時刻の計算
- (4) 管制官へ提供する情報の計算
- (5) 管制官への情報提供

3.4 コンセプトの構築とアーキテクチャの構築

ここまでは、機能とフォームを分けて、実現すべき機能を検討したが、ここで初めて、求める機能を実現するためのフォームについて検討する。システムズアプローチでは、コンセプトとは、機能とフォームを結び付けるビジョンやアイデアと定義されている[6]。

前節で示した、各ソリューションニュートラル機能について、実現するフォームの洗い出しを行い、フォームの組合せ（例えば、(1)の機能はフォームA、(2)の機能はフォームC…の組合せをコンセプトIとする、など）によるコンセプト案を作成する。どのフォームを選択すべきか考えるために、他の要素との関係や制約、トレードオフについても議論を行う。

最後に、設計構造マトリクスやモーフオロジカルマトリクスなどを使用し、いくつかの有望なコンセプトを選択し、アーキテクチャとしてまとめた。コンセプトもアーキテクチャも機能とフォームを結び付けるという意味では同じだが、コンセプトがビジョンであるのに対し、アーキテクチャは、より詳細で具体的な記述となる。各コンセプトについて文章や図で具体的なアーキテクチャを記述し、それらの特徴や実

現方法を整理した。最後に、これらの検討の過程および作成したアーキテクチャをまとめた文書を作成した。

4 むすび

本研究では、TBO の重要な一要素である時間管理について、大規模で複雑なシステムを検討する際に効果的なシステムズアプローチに基づいてアーキテクチャの構築を行った。

構築の手順は、まず、主要ステークホルダーを定義し、時間管理に求められるニーズを特定した。次に、ニーズの優先順位に基づき、時間管理の目標・意図を明確化し、実現手段に依らない必要な機能のみに絞ったソリューションニュートラル機能を検討した。その後、各機能に対し実現方法の選択肢となるフォームを洗い出し、その組み合わせによりコンセプト案を作成した。最後に、案の中から複数の有望な候補についてアーキテクチャを作成し、各アーキテクチャの特徴や具体的な実現方法についてまとめた。

本研究の実施により、体系的な方法に基づいた初めての時間管理アーキテクチャを作成することができた。一般に、アーキテクチャは一度作成すれば完成するものではなく、議論や検証を通じて継続的に改良することで最適なアーキテクチャに近付けることが可能となる。本研究で作成したアーキテクチャをそのまま実装することで、すぐに時間管理が実現されるわけではないが、最適なアーキテクチャのための、土台となる文書の作成ができたと考えている。本研究が、安全で効率的な航空交通システム構築の一助になれば幸いである。

謝辞

ヒアリングに御協力頂きました航空局各位、航空会社各位に感謝申し上げます。また、作成したアーキテクチャに対し、様々な助言を頂きました航空局各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Global Air Traffic Management Operational Concept, ICAO Doc. 9854, 1st Edition, 2005.
- [2] International Civil Aviation Organization, “Global TBO Concept,” Version 0.11, 2018.
- [3] 虎谷大地, 中村陽一, 岡恵, “システムズアプローチに基づく時間管理に対するニーズ特定,” 日本航空宇宙学会年会講演会, 2024.
- [4] D. Toratani, Y. Nakamura, and M. Oka, “Needs Analysis for Time-based Management in Next Generation Air Traffic Management System,” International Conference on Transdisciplinary Engineering, 2024.
- [5] 虎谷大地, 中村陽一, 岡恵, “システムズアプローチに基づく時間管理のニーズ志向アーキテクチャ検討,” 日本航空宇宙学会飛行機シンポジウム, 2024.
- [6] E. Crawley, B. Cameron, D. Selva 著 稗方和夫訳, “システム・アーキテクチャ 複雑システムの構想から実現まで”, 丸善出版, 東京, 2020.
- [7] Hirshorn, Steven R., Linda D. Voss, and Linda K. Bromley. Nasa systems engineering handbook. No. HQ-E-DAA-TN38707. 2017.
- [8] 狩野紀昭, 瀬楽信彦, 高橋文夫, 辻新一, “魅力的品質と当り前品質,” 品質, 14 巻, 2 号, pp. 147-156, 1984.

付録-1

各ステークホルダーのヒアリング結果

政策（2機関）、管制（4機関）、エアライン（2機関）の合計8機関にヒアリングを行った。以下のグラフは各グループの平均した結果をプロットしている。

