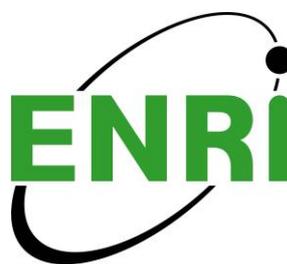


システムズアプローチによる時間管理の
システムアーキテクチャ検討

第 1.0 版 令和 7 年 6 月 12 日

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所



序文

近年、ICAO を中心に航空交通管制の近代化が提唱されており、その一環として TBO のコンセプトづくりが進められてきた。TBO は現在、コンセプトづくりの段階から FF-ICE の整備のような一部実装の段階に入っているが、全ての具体的な運用方法や実装方法が明確に示されている訳ではない。また、航空交通管制には国や地域ごとの差異や特性があることから、TBO の実装は、各国や各地域がそれらの差異や特性を考慮しつつ、各々に適したものを考える必要がある。

電子航法研究所では TBO の一要素である時間管理について、その将来のあるべき姿を検討するために、令和 3 年度から令和 6 年度にかけて「時間管理運用における機能間の連携に着目したアーキテクチャ作成に関する研究」というプロジェクトを実施した。特に、航空交通管制のような大規模・複雑なシステムを大幅に更新するためには、時間管理にかかるステークホルダーのニーズをよく理解し、システム全体を見渡した検討を行う必要がある。本研究プロジェクトの目標は、大規模・複雑システムの検討に適したニーズ志向アプローチであるシステムズアプローチを用いて、時間管理の具体的な構成や運用を表すシステムアーキテクチャを構築することである。本文書は当該研究プロジェクトの成果の一部をまとめたものであり、時間管理に関する研究成果を広くステークホルダーに共有することを目的とするものである。



時間管理運用における機能間の連携に着目した
アーキテクチャ作成に関する研究のイメージ図

文責：(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所
航空交通管理領域 虎谷大地，中村陽一，岡恵

目次

1. 背景と目的	4
1.1 航空交通管制システムの大規模化・複雑化	4
1.2 システムズアプローチとシステムアーキテクチャ	6
1.3 システムズアプローチと研究開発	7
1.4 本文書の位置づけ	8
1.5 第1章のまとめ	9
2. 時間管理に関する諸定義	10
2.1 時間管理	10
2.2 時刻に関する用語	11
2.3 第2章のまとめ	12
3. 現在の運用環境と議論の方向性	13
3.1 空域と交通流	13
3.2 交通管理	14
3.3 議論の方向性	16
3.4 第3章のまとめ	16
4. システムズアプローチによる時間管理の検討	17
4.1 ステークホルダー分析とニーズの特定	17
4.1.1 ステークホルダーバリューネットワークの作成	17
4.1.2 狩野モデルに基づくニーズの特定	19
4.2 時間管理の目標・意図の明確化と機能の検討	23
4.2.1 システムプロブレムステートメントの設定	23
4.2.2 ソリューションニュートラル機能の検討	25
4.3 コンセプトの検討	27
4.3.1 (i) 航空機の情報取得, (ii) ETO 計算	27
4.3.2 (iii) CTO 計算	35
4.3.3 (iv) 管制官へ提供する情報の計算, (v) 管制官への情報提供	38
4.3.4 メタリングの範囲	38
4.4 システムアーキテクチャの構築	41
4.4.1 設計構造マトリクスを用いたコンセプト要素の整理	41
4.4.2 モーフォロジカルマトリクスを用いたシステムアーキテクチャ作成	44
4.5 第4章まとめ	47

5. 時間管理のシステムアーキテクチャ	48
5.1 従来運用	48
5.2 従来運用踏襲型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 1)	50
5.3 ストラテジック軌道予測-TEPS 型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 4)	53
5.4 その他のアーキテクチャ	56
5.4.1 ATFM-メタリング-AMAN ルーズカップリング型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 2)	56
5.4.2 メタリング-AMAN タイトカップリング型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 3)	57
5.4.3 ストラテジック軌道予測-TAPS 型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 5)	58
5.4.4 ATFM-メタリングタイトカップリング型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 6)	59
5.4.5 ICAP 主導型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 7)	60
5.5 第5章のまとめ	61
6. まとめ	62
補遺 1. 参考文献	63
補遺 2. 略語・用語	65

1. 背景と目的

はじめに、なぜ時間管理の検討にあたりシステムズアプローチを採用したのかを、システムズアプローチやシステムアーキテクチャとは何かを説明しながら述べる。また、このような文書を執筆するモチベーションと、本文書の位置づけについても述べる。

1.1 航空交通管制システムの大規模化・複雑化

従来、航空交通管制は空を空域やセクタといったエリアに分割し、エリアごとの管理を基本としてきた。このようなスタイルは空域ベース運用やセクタベース運用等と呼ばれることがある。一方、軌道ベース運用（TBO）では、各航空機の出発から到着までを軌道として捉えて管理することを前提としている（図 1.1）。TBO は軌道を管理することで、例えば航空機同士のコンフリクトを早い段階（離陸前や、飛行中であってもコンフリクトの数十分～数時間前）から調整して解消することを可能にし、各フライトの効率向上を目指している。TBO のような運用を可能にするためには、空域ベース運用の時と比べて、各フェーズや各エリアにおける航空交通管制を支援するシステム¹が相互に接続、または一体化する必要がある。これにより航空交通管制システムは、その構成の大規模化・複雑化が進んでいるが、このような状況においてはステークホルダーが増加する一方、ステークホルダー全員で共通認識を持つことが困難になるとされている。その結果、完成したシステムがステークホルダーの望むものではない、またシステムと運用の間の整合性がとれていないといった問題が発生する懸念がある。実際、これらの問題は金融システムや企業向けの基幹システムといった他分野でも発生しており、中にはシステム開発の失敗により訴訟に至るケースも発生している。

¹ ここで「システム」とは、特定のコンピューターに実装されたモノのような狭義の意味だけではなく、仕組みや組織等を含む広義の意味で用いられている。

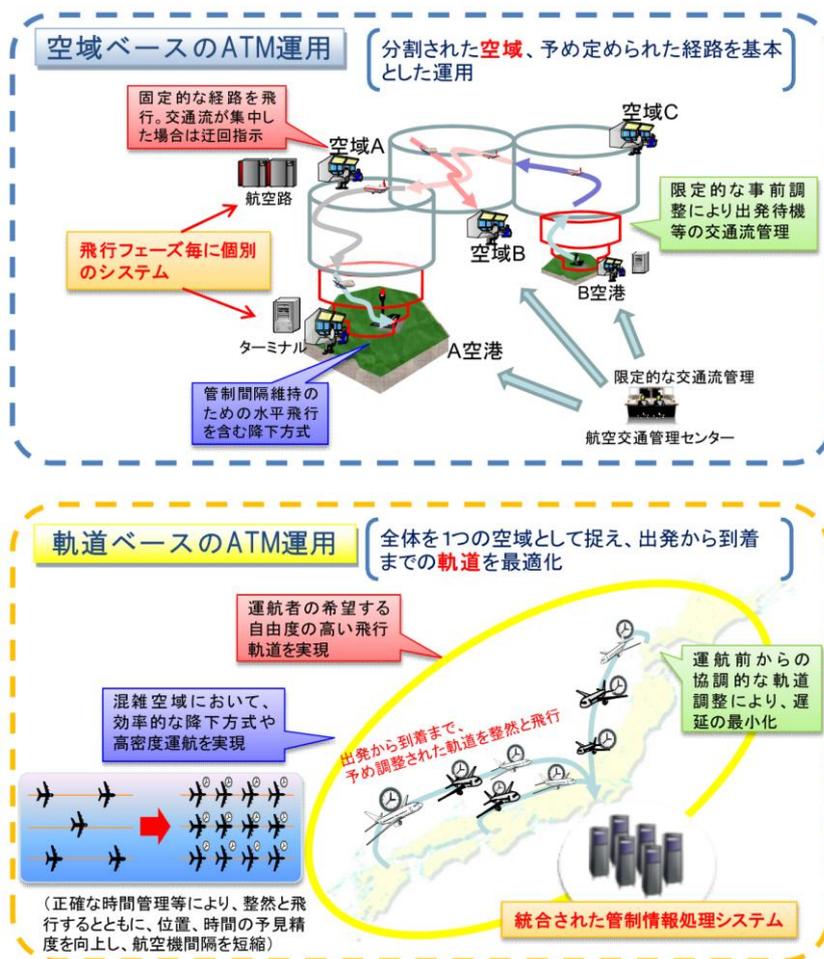


図 1.1 セクタベース運用と軌道ベース運用のイメージ図 (出展：参考文献 [1])

1.2 システムズアプローチとシステムアーキテクチャ

本文書では、システム思考の実践のひとつであるシステムズアプローチを用いた、TBOの一要素である時間管理のシステムアーキテクチャの検討結果を示す。システム思考とは、世の中のあらゆるモノやコトをシステムとして捉え、それらを分割した個々としてだけでなく、全体や関係性に重きをおいて理解する考え方である。システムズアプローチは様々な手法を含み、具体的にどのように検討を進めるかにはバリエーションがあるが、一例として図 1.2 のような手順で検討を進める。ただし、図 1.2 は一方通行で各ステップが進むように記載しているが、実際には各ステップを行き来することで、検討全体が整合するように議論を進めていくことに注意されたい。

システムズアプローチは、検討対象のステークホルダーやニーズから議論を始めるニーズ志向アプローチであるという特徴がある。ニーズ志向で検討を進めることで、真にステークホルダーの要望に沿った成果物を得ることが期待できる。また、コンセプトやシステムアーキテクチャを構築するための手法が体系化されており、システムや運用の各要素間で矛盾の無い構成を検討することができる。

システムアーキテクチャは狭義には、コンピュータシステム等の構成要素やその関係性を示す設計図、及び枠組みのことを指すが、システムズアプローチにおいてはコンセプトの具現化であると定義されている。システムの各要素の機能と実体の割り当てや、それらの要素間、及び周囲との関係を定義するものであるとされている^[2]。現時点において、時間管理はその運用やそれを支えるシステム（例えば、CFDT やメタリング）について、情報交換を行いつつも個別に議論されている状態であり、時間管理というハイレベルなコンセプトと実装の間にはまだ大きなギャップがあると考えられる。システムズアプローチに基づくシステムアーキテクチャの作成は、時間管理という漠然とした対象に対して既に進められている個別の議論を考慮しつつ、ハイレベルなコンセプトと実装のギャップを体系的・俯瞰的に埋めていくことに貢献すると期待される。

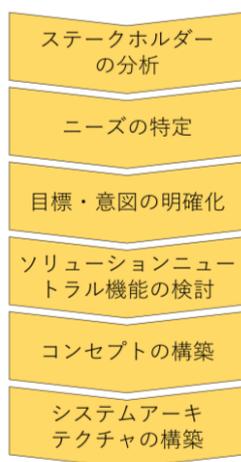


図 1.2 システムズアプローチによる検討手順の一例

1.3 システムズアプローチと研究開発

従来、航空交通管理における研究開発といえば、シミュレーションやアルゴリズムの開発がよく行われてきた。この従来型のアプローチは、検討対象や、そもそもどのような課題があるのかを正確に把握できていれば有効であるが、そうでない場合、現実的な課題と研究成果にギャップが生じてしまう（図 1.3）。例えば、新たな管制運用を提案しシミュレーションによってその有効性を示したとしても、そもそもシミュレーションの前提（元々の交通流や運用方法等）が間違っていると、シミュレーション結果は意味をなさなくなってしまう。このような現実的な課題（ニーズ）と研究（シーズ）のギャップは、管制システムの大規模化・複雑化に伴って生じやすくなっており、出てくる研究成果が実際に求められていたものと乖離していたため、それらを実際のシステムや運用に反映することができないケースがしばしばみられる。

一方、システムズアプローチはニーズ志向アプローチであるため、上記のギャップを埋めることが期待できる（図 1.4）。これは従来のシーズ志向の研究アプローチよりシステムズアプローチが優れているというのではなく、システムズアプローチがシーズ志向の研究を補完するということを意味している。本文書では時間管理のあるべき姿を検討するが、その検討プロセスや成果物は定性的なものになる。本文書ではいくつかのコンセプトの比較や、運用やシステムの構成によるトレードオフが議論されるが、それらの詳細な分析や実証のために、本文書の内容に基づいたシミュレーションやアルゴリズム開発が行われることが望ましい。このように、システムズアプローチが現実の課題と研究開発を橋渡しすることで、ニーズとシーズのギャップが埋まり、研究開発が現実世界における課題の解決に貢献することが期待される。

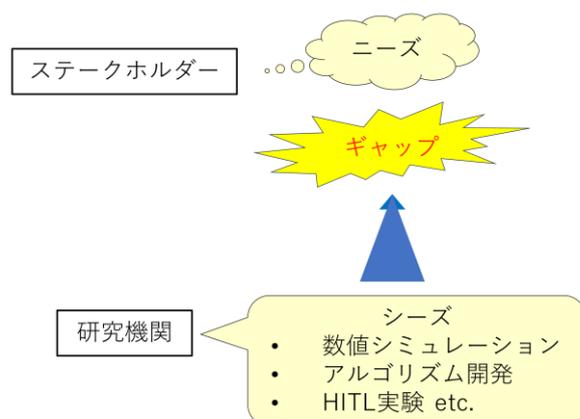


図 1.3 従来型アプローチ（シーズ志向アプローチ）

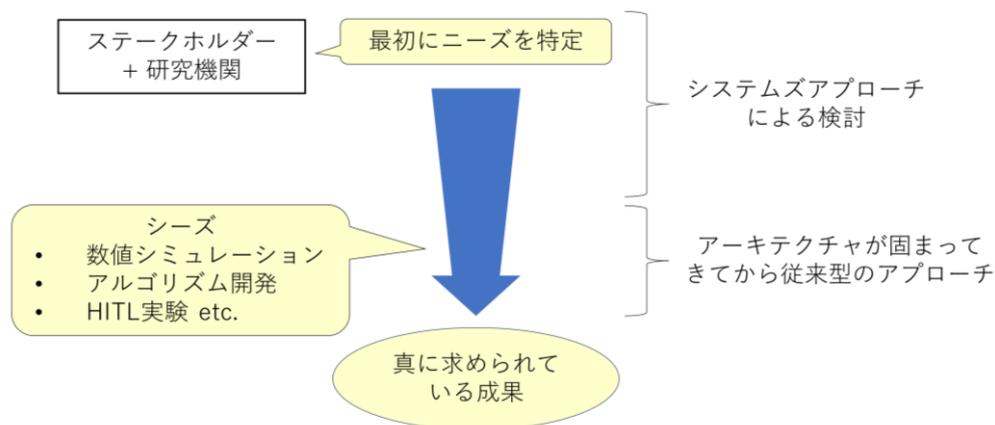


図 1.4 システムズアプローチ（ニーズ志向アプローチ）

1.4 本文書の位置づけ

日本における今後の TBO の発展については、CARATS でその全体像が示されている。その中では TBO 実現の一環として、従来の運用から時間管理への移行について触れられているが、時間管理の具体的な運用や実装までは述べられていない。そこで本文書では、CARATS で述べられている時間管理の具体的なイメージを提供することで、CARATS を補完することを目指す。

TBO、及び時間管理の運用や実装に関する議論は現在も進められており、今後も内容が更新されていくことが予想される。本文書は執筆時点における情報を基に書かれるため、今後の議論の発展によっては、その結果を取り込んで本文書を更新していくことを想定する。本文書をたたき台としつつ継続的に議論をすることで、徐々に時間管理のあるべき姿が明確になっていくことが期待される。

また本文書では、検討の成果物として時間管理を実現するためのシステムアーキテクチャを提示するが、弊所は時間管理に関する意思決定を行う組織ではないので、時間管理に関する唯一の解を示すわけではない。その代わりに、システムズアプローチに基づいて、妥当性の高い時間管理のシステムアーキテクチャのパターンを、できるだけ網羅的に提示する。それによって、ステークホルダーが共通認識の下、航空交通管制システム全体で整合性のとれたシステムアーキテクチャの中から、将来の時間管理のあるべき姿を議論可能な基盤を提供できると期待される。

1.5 第1章のまとめ

- TBOの一要素である時間管理を実現するシステムは大規模・複雑でありステークホルダーも多いため、整合性のとれたシステムを構築することが難しい。
- 大規模・複雑システムの検討に適したシステムズアプローチに基づいて、時間管理のシステムアーキテクチャの構築を行う。
- システムズアプローチはニーズ志向であるため、従来のシーズ志向な研究開発の課題であった、現実のニーズと研究開発のギャップを埋めることが期待される。

2. 時間管理に関する諸定義

時間管理の議論において、ステークホルダー間の齟齬をきたす要因のひとつに、関連する用語の曖昧さがある。そこで具体的な検討に進む前に、「時間管理」という用語といくつかの時刻について、本文書における定義を明確にする。

2.1 時間管理

本文書では時間管理を対象に議論を進めていくが、様々な文書で「時間管理」という用語が用いられている一方、その明確な定義は存在しない。そこで FAA による定義や CARATS における記述等を基に、本文書における時間管理の定義を図 2.1 と以下のように定める。また参考として、FAA による定義を図 2.2 に示す。

- 前提として、航空機の軌道情報を、時間を含む形（特定地点における通過時刻等）で扱い、空地を含めた空域全体で、過去と未来にわたる軌道情報を共有する。
- TBO を構成する一要素であり、PBN や Enterprise Enablers (SWIM 等の情報共有基盤) 以外のサブシステム (ATFM やメタリング等) で実現される。
- 地上の航空交通管制システムが持つ軌道情報に基づいて、特定地点における通過時刻を、航空管制官が直接、または間接的にパイロットに指示することで、容量管理や順序・間隔づけの支援を行う。
- 初期段階においては部分的な導入も考えられるが、最終的には可能な範囲で²、離陸前の飛行場面から着陸後の飛行場面まで含めた全飛行フェーズでシームレスに実施される。

なお、日本語では「時間管理」と「時間管理運用」が混在して用いられているが、FAA による記述 Time-Based Management (TBM) を参考に、本文書では「時間管理」と表記することとする。

² 福岡 FIR 外からの入域機のように、利用可能な情報に限りがある、またはそもそも管理できないフェーズについては除外する。

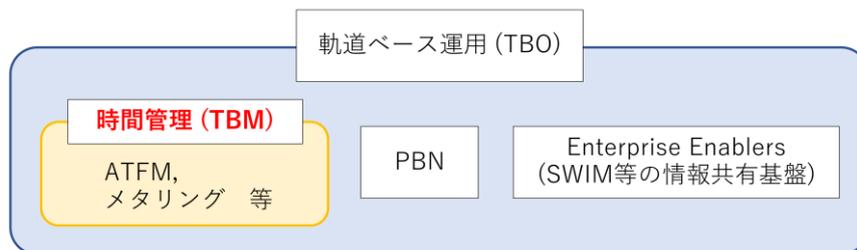


図 2.1 時間管理の定義

TBO is a collection of systems, capabilities, processes, and people working together to achieve operational objectives

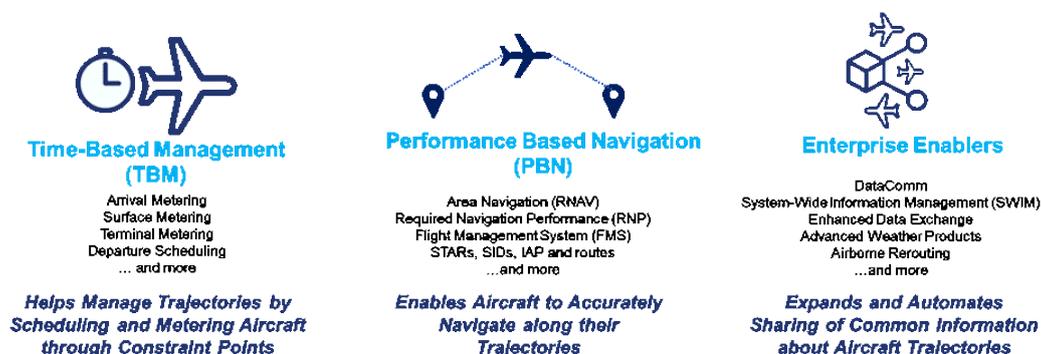


図 2.2 FAA による時間管理の位置づけ (出展：参考文献 [3])

2.2 時刻に関する用語

時刻に関する用語に関しては特に、到着予定時刻という意味合いで Estimated Time of Arrival (ETA) が頻繁に用いられるが、ETA は文脈によって曖昧さがみられる (例えば、目的空港 or 特定ウェイポイントへの到着予定時刻、管制指示がない場合 or 何らかの指示があった後の到着予定時刻)。ETA やそれに類する用語に関して、議論の整合性を保つために表 2.1 のように定義する。ここで、Estimated とは機上、または地上のシステムで予測される時刻を表す。Calculated とは、地上システムが算出する、航空機に離着陸や特定地点を通過してほしい時刻を表す。Actual とは、実際に航空機が離着陸や特定地点を通過した時刻を表す。例えば、地上システムが算出する ETO とは、ある航空機が特定地点を通過すると予測される時刻を表し、必ず、いつ予測した、どの地点における通過予測時刻かという情報が付属する。地上システムが再度予測計算を実施すると、ETO は更新される。

表 2.1 時刻に関する定義

	Estimated	Calculated	Actual
Off-Block Time	EOBT	TOBT ^{※1}	AOBT
Take Off Time	ETOT ^{※2}	EDCT ^{※3} /CTOT	ATOT
Time Over	ETO	CFDT ^{※4} /CTO	ATO
Landing Time	ELDT	CLDT	ALDT

※1 Off-block time に関しては既に、TSAT にて TOBT が広く用いられているので、calculated の off-block time とは表記が異なるが、本文書においても TOBT を用いて議論を行う。

※2 似ているが異なる定義として、planned take off time (PTOT) も使われることがある。

※3 定義としては CTOT の方が妥当であるが、EDCT は ATFM の文脈において広く使われており、また CTOT は国際 ATFM で実施されているものであるということを区別するため、ATFM の文脈では EDCT、国際 ATFM の文脈では CTOT を用いる。

※4 EDCT/CTOT と同様の理由で、ATFM の文脈では CFDT、国際 ATFM の文脈では CTO を用いる。

2.3 第 2 章のまとめ

- 「時間管理 (TBM)」とは TBO を構成する一要素であり、PBN や Enterprise Enablers 以外の、特定地点における通過時刻を指示することで順序・間隔づけの支援を行う機能群と定義する。
- 議論の齟齬を避けるため、本文書における時刻に関する用語を定義した。

3. 現在の運用環境と議論の方向性

時間管理の具体的な検討に入る前に、現在の運用環境と、時間管理に関連しうる、将来に向けて議論されているシステム等の確認を行う。ただし、議論のフォーカスを絞るため、羽田空港への到着交通流、特に西と南西からの交通流を中心に議論を進めるが、時間管理の導入先をそれらの交通流に限定するわけではない。また現在の運用環境を踏まえて、以降の議論の方向性についても述べる。

3.1 空域と交通流

図 3.1 に、2022 年のある日の羽田空港への到着交通流と、日本の空域構成を示す。西と南西からの交通流は各方面からの交通流が徐々に束ねられ、朱色で示される T24/T25/T09 または T14 のセクタに入域している。以降、この T24/T25/T09 と T14 のセクタを、本文書では到着セクタと表記する。到着セクタ入域まではダイレクト指示や多少のベクタリングはあるものの、概ね航空路に沿った飛行が行われている。一方、到着セクタに入域後は多くの便に対してベクタリングが行われている。現状、ターミナル空域入域時は、各経路に接続する赤星で示される入域地点（SPENS, SELNO 等）を経由し、その際に、同経路を飛行する前後機間に定められた距離間隔を設けることが決められている。この到着セクタでのベクタリングは基本的に、ターミナル空域入域に向けた順序・間隔づけのために実施されていると考えられる。

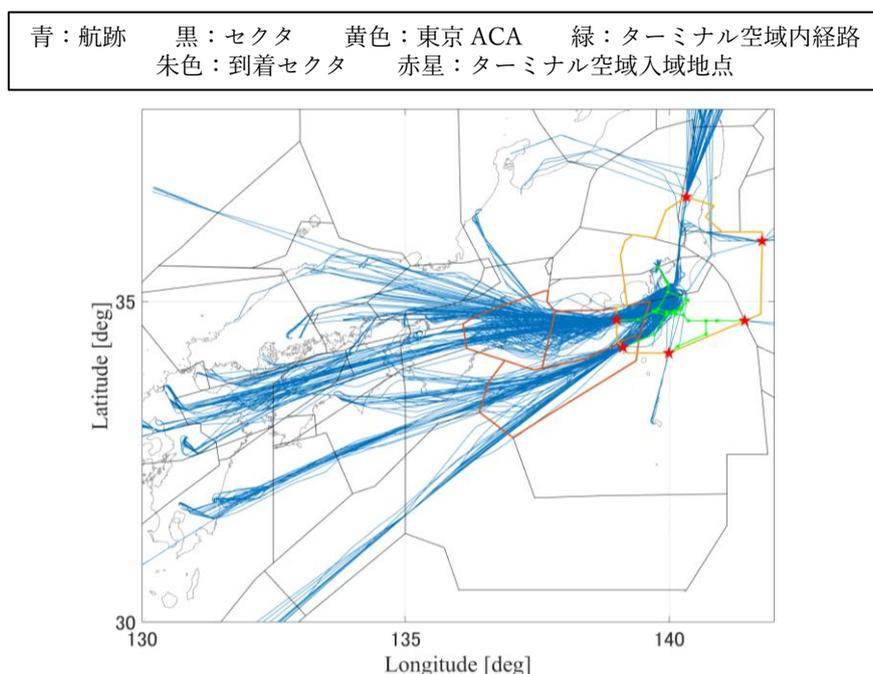


図 3.1 羽田空港への到着交通流と日本の空域構成

ターミナル空域内では、各入域地点から入域してきた航空機に対して、到着滑走路に向けて順序・間隔づけが行われる。時間帯によっては、PMS を用いて経路に沿った順序・間隔づけがされるが、PMS を用いないダイレクト指示やベクタリングによる順序・間隔づけも行われている。

3.2 交通管理

現状の航空交通管制システムには、既に時間管理を一部実現するような機能を持つものがあり、また近い将来の導入に向けて議論されているものもある。時間管理のシステムアーキテクチャを検討するためには、これらの既存システムや機能を踏まえて検討を進める方が合理的であるため、それらについて概観する。

現在、日本の空域においては ATFM によって交通需要と管制容量の不均衡の解消、すなわち容量管理が行われている。ATFM では空域か到着空港を対象として交通流の制御が行われるが、ここでは空港対象の ATFM に軸足を置いて議論を進める。空港対象の ATFM では、地上システムによって計算された需要（時間当たり何機の出発・到着便があるか）が、空港の処理容量を超過しないように制御を実施している。ATFM は様々な手段を用いるが、主な手段のひとつである EDCT は離陸時刻の指定であり、時間管理の一手段であるとみなすことができる。EDCT は国内からの出発便にしか適用することができないが、国際 ATFM では、特定の海外空港から出発する便に対して CTOT を適用することができ、また現在導入が議論されている CFDT は、主に海外から福岡 FIR へ飛行してきた巡航中の便に対して時間管理を行うことができる。このように、ATFM はできるだけ多くの便、飛行フェーズに対して時間管理ができるように対象の拡大が進められており、第 2.1 節で定義した時間管理の定義と合致している。

ただし、ATFM が実施している容量管理はストラテジック（戦略的）な交通管理³であり、ATFM の拡大だけで時間管理が実現できるわけではない。現在の ATFM はスペーシングタイムというパラメータを有しており、ATFM の対象となる空港へ到着する便の滞留⁴がスペーシングタイム以上になると予想されたときのみ、EDCT 等による制御を実施するという仕組みになっている（図 3.2）。そのため ATFM が適切に働いている場合においても、到着空港の手前では、交通流がベクタリング等によってある程度滞留することになる。このような ATFM の作用は、図 3.1 においても、到着セクタとターミナル空域において確認することができる。理想的には、スペーシングタイム無しで滞留の無い交通流を形成できるとよいが、仮にスペーシングタイム無しで制御を行ってしまうと、軌道予測誤差のような様々な不

³ 米国における悪天回避においては、2 時間から 8 時間前に制御を行うことをストラテジックな交通管理と呼び、2 時間以内の制御をタクティカルな交通管理としている^[4]。

⁴ 主に合流時の間隔維持のため、ベクタリング等によって最短経路で飛行するより長い距離・時間、航空機が飛行している状態を本文書では滞留と呼ぶ。空中遅延等とも呼ばれることがある。

確実性により、到着空港においてスループットロス⁵が発生してしまう可能性がある。ATFMは適切なスペーシングタイムを設定し、あえて到着空港の手前で適度に交通流を滞留させることで、スループットロスの無い円滑な交通流を形成しているといえる。

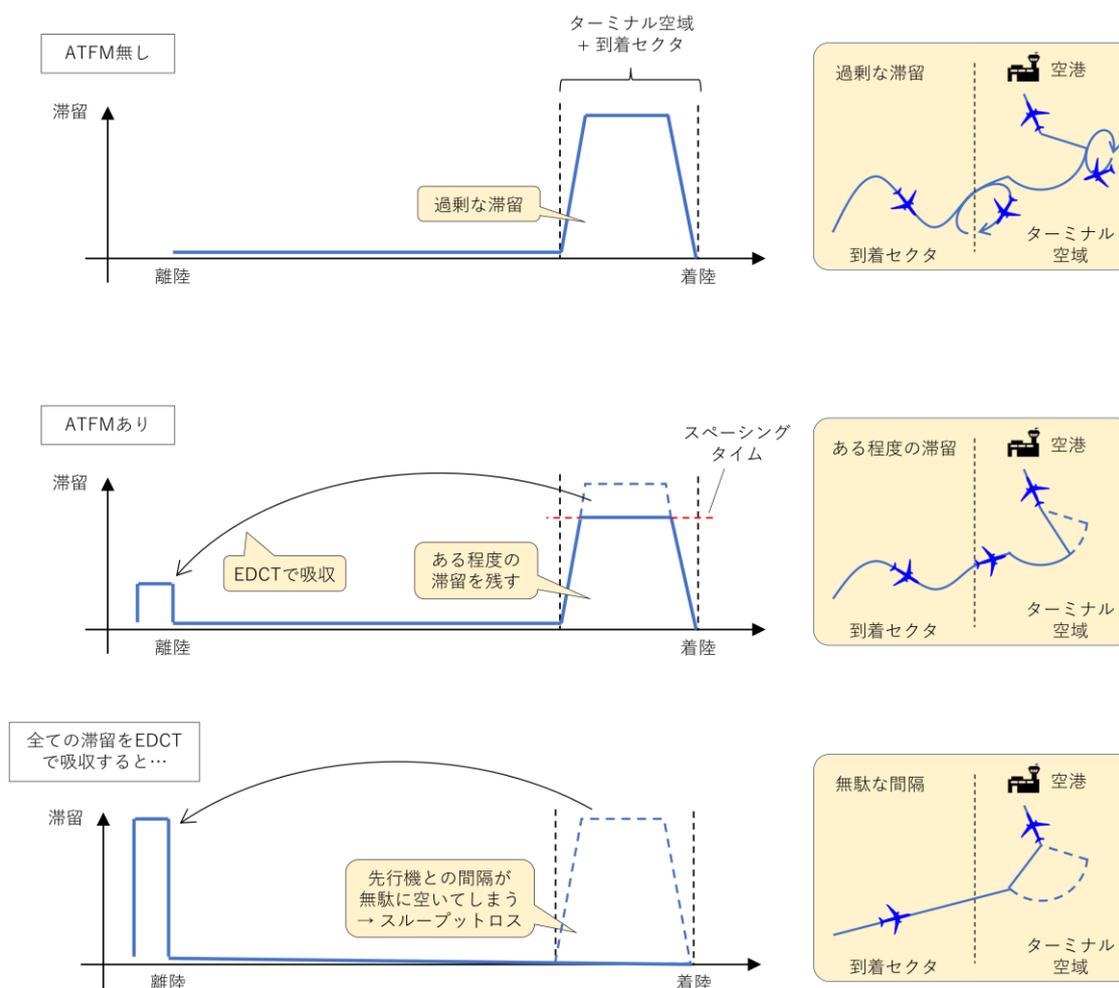


図 3.2 滞留とスペーシングタイム

一方、タクティカル（戦術的）なフェーズにおいては、管制官によるベクタリングや速度指示に基づく順序・間隔づけ等が行われている。ここでタクティカルとは、実施する交通管理のタイムウィンドウ⁶が数分から数十分程度であることを意味する。例えば、ターミナル空域に入域した航空機は通常、数十分程度で滑走路に着陸するので、ターミナル空域における順序・間隔づけはタクティカルな交通管理であるといえる。現状、タクティカルなフェー

⁵ 交通流の滞留があるにも関わらず、滑走路末端において適切な間隔以上の無駄な間隔が発生してしまう状態を、本文書ではスループットロスと呼ぶ。

⁶ 交通管理が対象とする時間軸における対象範囲を、本文書ではタイムウィンドウと呼ぶ。

ズにおいて既に実施されている時間管理として、特定の空港場面における TSAT が挙げられる。ATFM や TSAT 以外ではシステム化された時間管理は実装されていないが、エンルート空域ではメタリング、ターミナル空域では AMAN/SMAN/DMAN が、それぞれのエリアにおけるタクティカルな交通管理を担うシステムとして検討されている。

3.3 議論の方向性

メタリングや AMAN/SMAN/DMAN が、ATFM や TSAT だけでは時間管理を賄えない部分を補うことで、全飛行フェーズにおける時間管理の実現につながっていくと考えられる。図 3.3 に各サブシステムの位置づけと影響範囲のイメージを、横軸に空間的要素、縦軸に時間的要素（ストラテジックかタクティカルか）という形で示す。図で示されているように、ATFM とメタリング、AMAN/SMAN/DMAN（のうち、特に AMAN）は空間的・時間的に隣接するため、時間管理の検討においては、これらのサブシステムが矛盾なく連携し、全体として時間管理が実現されるように構成される必要がある。

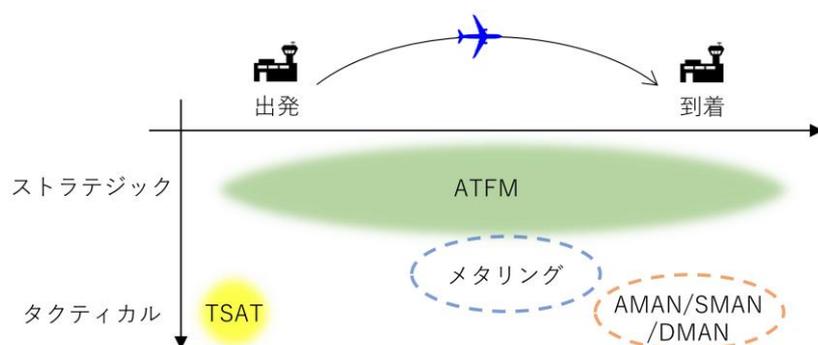


図 3.3 各サブシステムの位置づけと影響範囲⁷

3.4 第 3 章のまとめ

- 現在の空域と交通流、ATFM について確認し、交通流の滞留とスペーシングタイムや、ストラテジック・タクティカルな交通管理といった、時間管理の検討において重要な概念を整理した。
- 議論の方向性として、今後、ATFM や TSAT といった既存のシステムが、導入が予定されているメタリングや AMAN/SMAN/DMAN と矛盾なく連携し、全体として時間管理が実現されるべきであることを確認した。

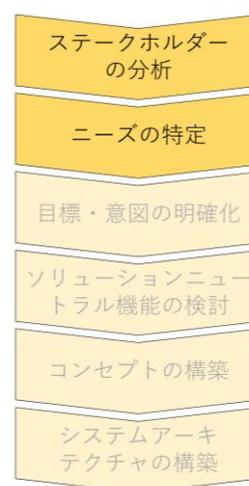
⁷ TSAT と SMAN はその目的が重複している可能性があり、今後、両者の位置づけを議論する必要があると考えられる。

4. システムズアプローチによる時間管理の検討

ここからは実際にシステムズアプローチに従って、時間管理のシステムアーキテクチャを検討する。はじめに、時間管理に関するステークホルダーの分析を行い、時間管理に対するニーズを特定する。特定したニーズを基に時間管理の目標・意図や実現のために求められる機能を検討し、その後、将来の時間管理のコンセプト・システムアーキテクチャを議論する。

4.1 ステークホルダー分析とニーズの特定

時間管理の導入によって航空交通管制システムがどのように変化するべきかを知るために、時間管理におけるステークホルダーの潜在的ニーズを特定する。システム開発においては通常、複数のステークホルダーが存在するが、各ステークホルダーはその立ち位置によって異なるニーズを有しており、場合によっては各ニーズが対立することもあり得る。そのような状況であっても開発するシステムが目指すべき方向性を明確にするために、ステークホルダーの分析とそれに基づくニーズの特定を行うことで、各ニーズの優先順位やトレードオフを理解する必要がある。



4.1.1 ステークホルダーバリューネットワークの作成

まず初めに、時間管理に関するステークホルダーの分析を行う。ステークホルダー分析にはいくつかの手法が存在するが、本文書ではステークホルダーバリューネットワーク (Stakeholder Value Network: SVN) と呼ばれる手法を用いる。SVN とは、ステークホルダー間における価値の流れを矢印で表したものである。価値とはコストに対する便益のことです。お金や物品、サービスの他に、知識や情報、政策や規制等も含まれる。SVN を作成するために、時間管理に対するステークホルダーを以下のようにリストアップした。

- 航空局：本文書では主に、ANSPとしての航空局を指す。
- 空域利用者：航空機を運航する組織、およびそのパイロットを指す。時間管理の文脈では、ほぼエアラインとそのパイロットとなる。
- 顧客：旅客と貨物機の荷主を指す。
- 空港コミュニティ：空港運営者とその支援組織のコミュニティを指す⁸。
- ATM支援産業：航空交通管制システムのメーカー等を指す。
- 隣接ANSP：福岡 FIR に隣接する空域を担当する、他国のANSPを指す。

上記のステークホルダーについて、図 4.1 のように SVN を作成した。本 SVN は検討の過程で、何度かの更新を行ったものである。その結果、図 4.1 では航空局を政策立案グループと管制運用グループに分割した。これは航空局の内部でも、時間管理の企画立案を行う政策立案グループと、実際に時間管理の実行を担う管制運用グループでは、時間管理に対して異なるニーズを持つ傾向がみられたからである。また本 SVN では、政策立案グループ、管制運用グループ、空域利用者（以降はエアラインと表記する。）を主要ステークホルダー、その他を二次ステークホルダーと定義した。主要ステークホルダーは時間管理の導入により、直接的な利害が発生するのに対し、二次ステークホルダーは時間管理の導入に関して、主要ステークホルダーとの関係から間接的に利害を受けるものと考えられる。

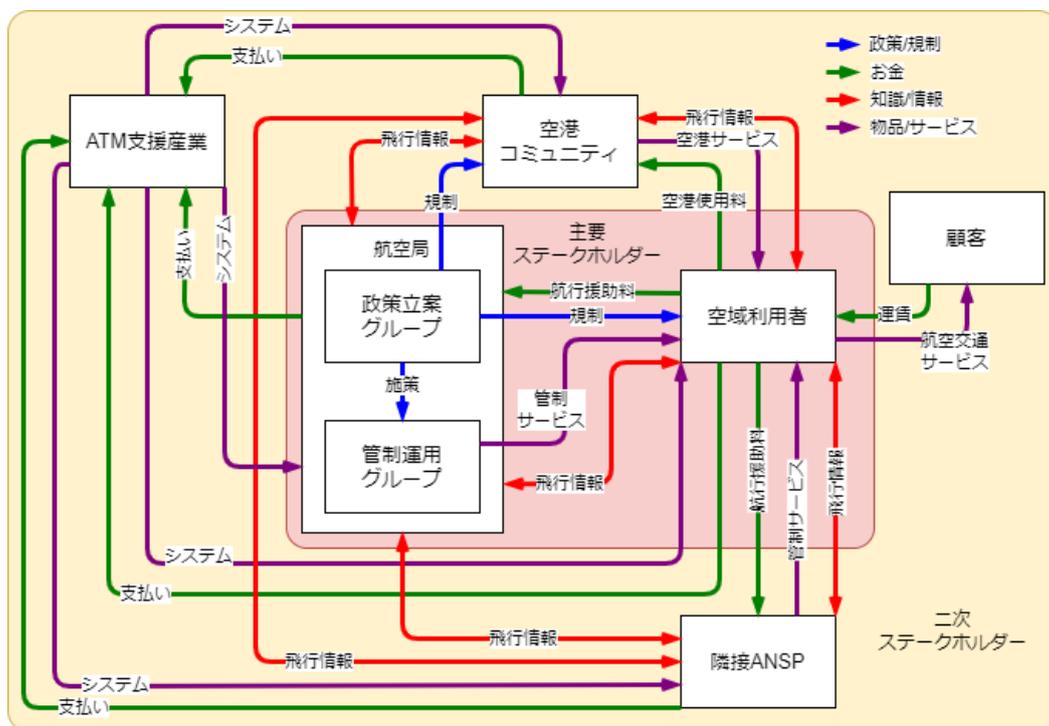


図 4.1 時間管理のステークホルダーに関する SVN

⁸ 空港によって、またサービスによって国が運営している場合と民間が運営している場合があるが、本文書ではそれらの区別はせずに議論を進める。

4.1.2 狩野モデルに基づくニーズの特定

ステークホルダー分析の結果を基に、主要ステークホルダーに対して時間管理におけるニーズ特定のためのヒアリングを実施した。各主要ステークホルダーにつき2または4組織に対してヒアリングを行ったので、計8ステークホルダーをヒアリング対象とした。

- 政策立案グループ（2部署）：航空局の中で政策立案にかかわる部署
- 管制運用グループ（4官署）：航空局の中で、時間管理に関わる可能性が高いと考えられる管制運用を担っている官署
- エアライン（2社）

ヒアリングの方法としては、時間管理の導入により変化すると考えられる以下の11項目を用意し、時間管理の導入によりどの項目がよくなることをステークホルダーが期待するか、すなわち時間管理に対する潜在的ニーズはどの項目であるかを特定していく。11項目のニーズ項目については、主要ステークホルダーとヒアリング前に議論し、過不足が無いことを確認した⁹。

潜在的ニーズ項目

- (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（主にエアライン）間の公平性が向上する
- (g) 管制官のワークロードが低減する
- (h) パイロットのワークロードが低減する
- (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

上記の11項目に関して、狩野モデルと呼ばれる製品開発等に広く用いられるモデルに基づくヒアリングを主要ステークホルダーに対して実施した。狩野モデルは消費者の視点か

⁹ 航空交通管制システムの開発においては11項目以外にも、安全性やコストといった項目が議論に挙げられることがある。しかしながら、ここで挙げられているニーズ項目は互いに対立が発生しトレードオフの関係となった場合、ニーズの優先度によっては一方をある程度諦めることがあるものになる。航空の分野において、安全性は他の項目とトレードオフ可能なものではなく、事前に定められた安全性を担保した上でニーズを最大化するという制約条件であるべきなので、11項目には含まれていない。またシステムズアプローチにおいて、コストは本質的にはニーズではないため、通常、ニーズ項目にはコストを含めない。コストについても安全性同様、決められた予算の中でニーズを最大化するという制約条件であるとみなすことができる。

ら製品の属性を、**当たり前品質**、**一元的品質**、**魅力的品質**、**無関心品質**、**逆品質**といったカテゴリに分類するモデルであり、狩野モデルを用いることで各ニーズ項目を特徴づけることができる^[5]。以下に各品質の概要を示す。

- **当たり前品質**:それが満たされれば当たり前と受け取られるが、満たされなければ不満を引き起こす品質要素。
- **一元的品質**:それが満たされれば満足を与えるが、満たされなければ不満を引き起こす品質要素。
- **魅力的品質**:それが満たされれば満足を与えるが、不充足であっても仕方ないとされる品質要素。
- **無関心品質**:それが満たされていてもいなくても、満足も不満も引き起こさない品質要素。
- **逆品質**:満たされているのに不満を引き起こしたり、満たされていないのに満足を与えたりする品質要素。

表 4.1 にニーズ分析の結果を示す。なお、各ニーズ項目と狩野モデルに基づく分析、ヒアリング結果の詳細については参考文献 [6] を参照されたい。

表 4.1 ニーズ分析の結果

	政策立案 グループ	管制運用 グループ	エアライン	主要ステークホルダー 全体
(a) 空地で共有される時間精度が向上する	一元的	一元的	当たり前	一元的
(b) 管制処理容量が増加する	一元的	無関心	当たり前	無関心
(c) 定時性が向上する	魅力的	魅力的	一元的	魅力的
(d) 燃料消費量・温室効果ガス排出が減少する	一元的	魅力的	一元的	一元的
(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	魅力的	無関心	一元的	無関心
(f) 空域利用者(主にエアライン)間の公平性が向上する	魅力的	一元的	一元的	一元的
(g) 管制官のワークロードが低減する	魅力的	一元的	無関心	魅力的
(h) パイロットのワークロードが低減する	魅力的	魅力的	一元的	魅力的
(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	魅力的	魅力的	一元的	魅力的
(j) 現在の管制運用・航空機運航との連続性を保つ	無関心	無関心	魅力的	無関心
(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	魅力的	無関心	魅力的	無関心

以下に主要ステークホルダー全体の結果を示す。

主要ステークホルダー全体の結果

- **当たり前品質**

該当無し

- **一元的品質**（優先度：高）

- (a) 空地で共有される時間精度が向上する
- (d) 燃料消費量・温室効果ガス排出が減少する
- (f) 空域利用者（主にエアライン）間の公平性が向上する

- **魅力的品質**（優先度：中）

- (c) 定時性が向上する
- (g) 管制官のワークロードが低減する
- (h) パイロットのワークロードが低減する
- (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

- **無関心品質**（優先度：低）

- (b) 管制処理容量が増加する
- (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
- (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

- **逆品質**

該当無し

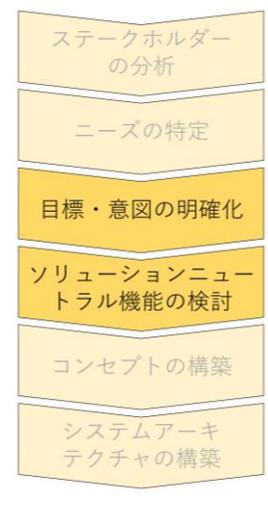
各カテゴリ間の関係は単純な優劣ではないが、一般的には「**当たり前品質** > **一元的品質** > **魅力的品質** > **無関心品質**」という順番で優先的に考えるべきとされている。そのため上記のニーズ分析結果では、**一元的品質**のニーズ項目は優先度：高、**魅力的品質**のニーズ項目は優先度：中、**無関心品質**のニーズ項目は優先度：低と表記している。今回の分析では、主要ステークホルダー全体においては、**当たり前品質**と**逆品質**は該当無しという結果だった。

狩野モデルに基づくヒアリングとその結果の分析より、項目 (a), (d), (f) については、時間管理の導入によりこれらの項目がよくなるほどよい（**一元的品質**）という結果となった。特に、**一元的品質**の中でも「(a) 空地で共有される時間精度が向上する」が最も優先度が高いという結果となったが、これは過去の CFDT の試行運用等において、機上と地上のシステムの軌道予測のずれが課題として挙げられていたため、ステークホルダー間にこの課題意識が共有されている結果であると考えられる。項目 (c), (g), (h), (i) については、時間管理の導入によりこれらの項目がよくなれば望ましいが、よくならなくても気にしない（**魅力的品質**）という結果となった。そのため、時間管理のシステムアーキテクチャを構築するにあたり、これらの項目をよくすることが求められるが、より優先度の高い項目 (a), (d), (f) 等とトレードオフが発生する等の場合は、項目 (c), (g), (h), (i) をある程度犠牲にすること

が許容されると考えられる。また、項目 (b), (e), (j), (k) については、ステークホルダーは時間管理の導入とは関係性が薄いと考えているという結果になった。

4.2 時間管理の目標・意図の明確化と機能の検討

具体的な時間管理の構成を検討する前に、時間管理の導入により達成したい目標・意図を明確化し、それを実現するために必要な機能を検討する。



4.2.1 システムプロブレムステートメントの設定

システムの検討においては、議論が進むにつれてステークホルダーが元々解決したいと考えていた課題を見失うことや、検討範囲が過剰に広がるのが頻繁に起こる¹⁰。これを防ぐためには、検討するシステムのハイレベルな目標・意図を簡潔に定義しておき、定期的に確認することが有効である。このような目標・意図の定義をシステムプロブレムステートメント (System Problem Statement: SPS) と呼ぶ。SPS を定義した後は、SPS を実現するように具体的なシステムの構成を検討していくが、このとき、具体的な選択肢である「フォーム¹¹」ではなく、SPS を達成するために必要な「機能」を考えていく。元々解決すべき課題を見失う主な原因のひとつが、検討が進むにつれて特定のフォームに固執してしまうことであると言われている。特定のフォームに固執してしまうと、ハイレベルな目標・意図の達成よりフォームの実現を優先してしまいがちになり、また、検討の範囲が狭まり他のよりよい選択肢を見落とし、可能性が高くなる。特定のフォームではなく機能に基づいて検討を進めることで、このような問題を回避することができる。特定のフォームによらない機能のことをソリューションニュートラル機能と呼ぶ。ここでは、時間管理の SPS を以下のように設定する。

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

具体的な SPS の記述には様々な形式が提案されているが、本文書では、To-By-Using と呼ばれる標準的なフレームワークを用いている。この SPS は、前述の時間管理の定義と合致するように記述されている。

SPS は検討対象のシステムだけでなく、対象システムのサブシステムや周辺システムについても同じ形式で記述することで、システムの要素間の整合性を確認する手助けとなる。

¹⁰ このような現象はスコープクリープと呼ばれている。

¹¹ システムズアプローチにおいて、システムを物理的あるいは情報的に具体化したものを「フォーム」と呼び、システムが行うことを「機能」と呼ぶ。

例として、時間管理のサブシステムである空港 ATFM の SPS を以下のように設定する。

空港 ATFM の SPS

- To: ストラテジックな容量管理の支援を行うために
- By: 空港への時間当たりの到着航空機数を制御することによって
- Using: EDCT や CTOT, CFDT を用いて

第 3.2, 3.3 節で議論したように、他にも考えるべきサブシステムはあるが、時間管理を実現するための大枠としては、ATFM とメタリングと AMAN をどのように構成するかがポイントになると考えられる。すなわち、メタリングと AMAN の SPS をどのように設定すると、システム全体で時間管理の SPS を実現することができるかを考える必要がある。実際には、SPS は以降の議論を踏まえて反復的に見直されるものであるが、現時点では両者の SPS を以下のように設定する。

メタリングの SPS

- To: エンルート空域におけるプリタクティカルな順序・間隔づけの支援を行うために
- 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: 速度指示やベクタリングを用いて

AMAN の SPS

- To: ターミナル空域においてタクティカルに滑走路のスルーputを最大化する支援を行うために
- By: 出発機を含む滑走路における航空機同士の間隔を、適切に保ちつつ最小化することによって
- Using: レーダー卓への支援情報を用いて

上記の SPS では、第 3.3 節の議論を踏まえて、3 つのサブシステムの目的が異なることを To で明示している。ATFM, メタリング, AMAN はいずれも時間管理を実現する要素であるとみなすことができるが、サブシステム単体としては異なる目的を持っていることを意識する必要がある。ATFM, メタリング, AMAN がよく連携するには、ストラテジックな ATFM とタクティカルな AMAN を、メタリングによって矛盾なく接続する必要があるが、メタリングの具体的な構成や、メタリングと ATFM や AMAN との境界部分には曖昧さが残る。そのため上記の SPS では、図 3.3 でメタリングがややストラテジック寄りに位置づけられていたことをふまえ、メタリングの To を「プリタクティカル」と記載している。そこで以降では、適宜 ATFM と AMAN についても言及しつつ、メタリングの具体的な構成に軸足を置いて議論を進めていく。

4.2.2 ソリューションニュートラル機能の検討

作成した時間管理の SPS を基に、それを達成するために必要なソリューションニュートラル機能を以下に書き下していく。また機能のフローチャートとイメージを図 4.2 に示す。ただしここでは便宜上、時刻に関しては ETO/CTO を用いるが、状況によっては ELDT/CLDT 等、異なる時刻が用いられる。

(i) 航空機の情報取得

予定飛行経路や、位置・速度といった航空機の情報を取得する。

(ii) ETO 計算

取得した情報を基に、各航空機の特定地点における ETO を計算する。

(iii) CTO 計算

計算された ETO 等を基に、各航空機に対する CTO を計算する。

(iv) 管制官へ提供する情報の計算

計算された CTO を達成するような指示（速度変更やベクタリング等）を計算する。管制官にそのまま CTO を提示するだけであれば計算は不要である。

(v) 管制官への情報提供

計算された情報を、管制卓等を通じて管制官へ提供する。

以上の機能が時間管理により実行された後、管制官からパイロットへ ETO を CTO へ近づけるような指示が出され、パイロットが航空機を操作することで、各航空機ができるだけ CTO に近い時刻で特定地点を通過する。

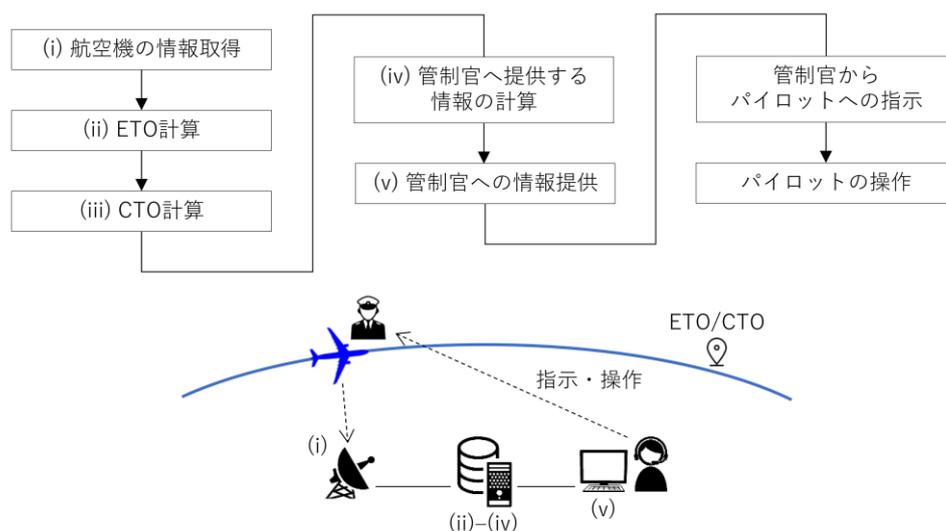
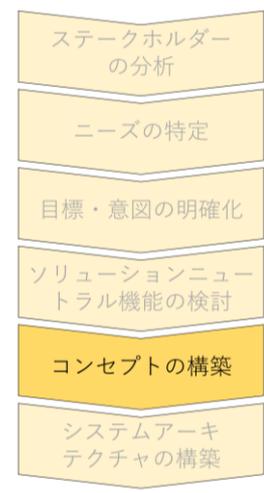


図 4.2 フローチャートとイメージ図

これらの機能は、図 4.2 のように基本的に前の機能のアウトプットをインプットとしているので、逐次処理されると考えられる。そのため、上流側の機能の性能が、下流側の機能の性能に直接的な影響を与える可能性が高い。すなわち、機能 (i), (ii) のような上流側の機能の性能が、時間管理全体の性能に大きく影響を与えることを示唆している。参考文献 [7] では、ターミナル空域における到着間隔づけ支援アルゴリズムに関して、軌道予測に用いられる航空機の世界モデルの精度が、支援情報の精度に大きな影響を与えることを示している。この点はニーズ分析の結果で、空地で共有される時間精度の向上（ニーズ項目 (a), 優先度：高）の重要度が最も高くなったこととも合致する。

4.3 コンセプトの検討

時間管理を実現するソリューションニュートラル機能を整理したので、それらの機能を実現するコンセプトを検討する。システムズアプローチにおいてコンセプトとは、フォームと機能を関連付けるビジョン、アイデア、考え、イメージであるとされている。そのためコンセプトの検討では、具体的には各ソリューションニュートラル機能を実現するフォームの洗い出しを行う。また、どのフォームを選択すべきかを考えるために、他の要素との依存関係による制約やトレードオフについても議論を行う。



4.3.1 (i) 航空機の情報取得, (ii) ETO 計算

ニーズ分析とソリューションニュートラル機能の検討より、時間管理の実現においてソリューションニュートラル機能の (i), (ii) は重要度が高いことが示唆されていた。そのため、どちらの機能もできるだけ性能が高くなるようにフォームを構成していくべきである。ただし、ある程度議論の範囲を絞るために、本機能に関する検討の前提を以下のように定める。

【機能 (i), (ii) の検討の前提】

● 航空機からの ETO ダウンリンク

航空機上では飛行に関する網羅的な情報を用いることができるため、航空機の FMS は ETO を精度よく（洋上において1時間の飛行あたり1分強の標準偏差）計算することができていると言われている^[8]。ADS-C のように航空機上で計算された ETO を地上にダウンリンクするシステムも存在するが、その仕組み上、エンルート空域で数多くの航空機が実施することは困難である。そのため、基本的には地上システムでできるだけ精度よく、ETO を計算する方法を考える。ただし、ADS-C が用いられている洋上空域においては、ダウンリンクされた ETO を使うことも考える。

● ETO の計算方法

ETO を計算するための方法には、1) 近似式を用いて直接 ETO を計算する、2) 航空機の軌道を予測計算して ETO を得る、3) 機械学習を用いて ETO を推定する等が考えられる。近似式を用いる方法 1) は軌道予測 2) より精度が劣り、機械学習 3) は一般的に、得られた結果の根拠を明確にすることが困難なので、基本的には物理モデルに従った軌道の予測計算 2) を行い、予測軌道から ETO を得ることを考える。ただし、最近では物理モデルベースの計算に部分的に機械学習を組合せる 2) + 3) ことで、軌道予測の精度を向上させている研究が行われており^[9]、将来的にはそのような手法が

実用可能になる可能性もある。

- 飛行フェーズによって異なる取得可能な情報

取得できる航空機の情報、航空機の離陸前後や、航空機がレーダー等のセンサの覆域に入る前後、上昇・巡航・降下といった飛行フェーズによって、その精度や性質が大きく異なる。例えば、センサ情報が無い時点においては、飛行計画や航空機モデルを主に使って軌道予測をしなければならないが、それらは常に実際の軌道を精度よく模擬できるとは限らない。一方、センサ情報を得られるようになった後では、そこから得られる情報を軌道予測に使うことができ、また予測軌道とセンサで取得された航空機位置等がずれた場合には、センサ情報を用いて予測軌道を修正することができるようになる。そのため、以降の議論では適宜、離陸前後、センサ情報の有無、飛行フェーズといったイベントの切り替わりを意識して議論を進める。

機能 (i), (ii) はできるだけ性能が高くなるように構成すべきであるが、上述の前提を踏まえると、その性能向上には限界があることも認識しておくべきである。加えて、一般的に予測したい地点までの距離が長い程、軌道予測誤差は大きくなるとされているが、誤差と距離の関係は単調ではないことにも注意が必要である。ここで例として、図 4.3 のように国内出発・国内到着の便の軌道予測について考える。

【各フェーズにおける航空機の情報取得・ETO 計算の特徴や留意点】

- 離陸前

この時点では上昇、巡航、降下フェーズのセンサ情報はないので、基本的にセンサ情報無しでの軌道予測になる。また EOBT, ETOT といった離陸までの時刻には、全飛行フェーズと比較して大きな誤差が発生する。この誤差は予測軌道全体に影響し、EOBT, ETOT が早くなればその後の ETO や ELDT も早くなり、逆もまた然りである。特に比較的距離の短い国内便にとって、これらの比較的大きな誤差が軌道予測全体に与える影響は大きい。

- 上昇フェーズ

離陸後は AOBT, ATOT は確定し、EOBT, ETOT に関する誤差は無くなる。またセンサ情報が得られるようになり軌道予測に利用可能となるが、基本的にそれらの情報は上昇・巡航・降下といったフェーズごとに必要であるため、センサ情報を用いた軌道予測は ToC までしか有効ではなく、巡航・降下フェーズに関してはセンサ情報無しでの軌道予測となる。上昇フェーズにおける誤差は、その後の巡航・降下フェーズにおける予測軌道の精度に影響を与える。

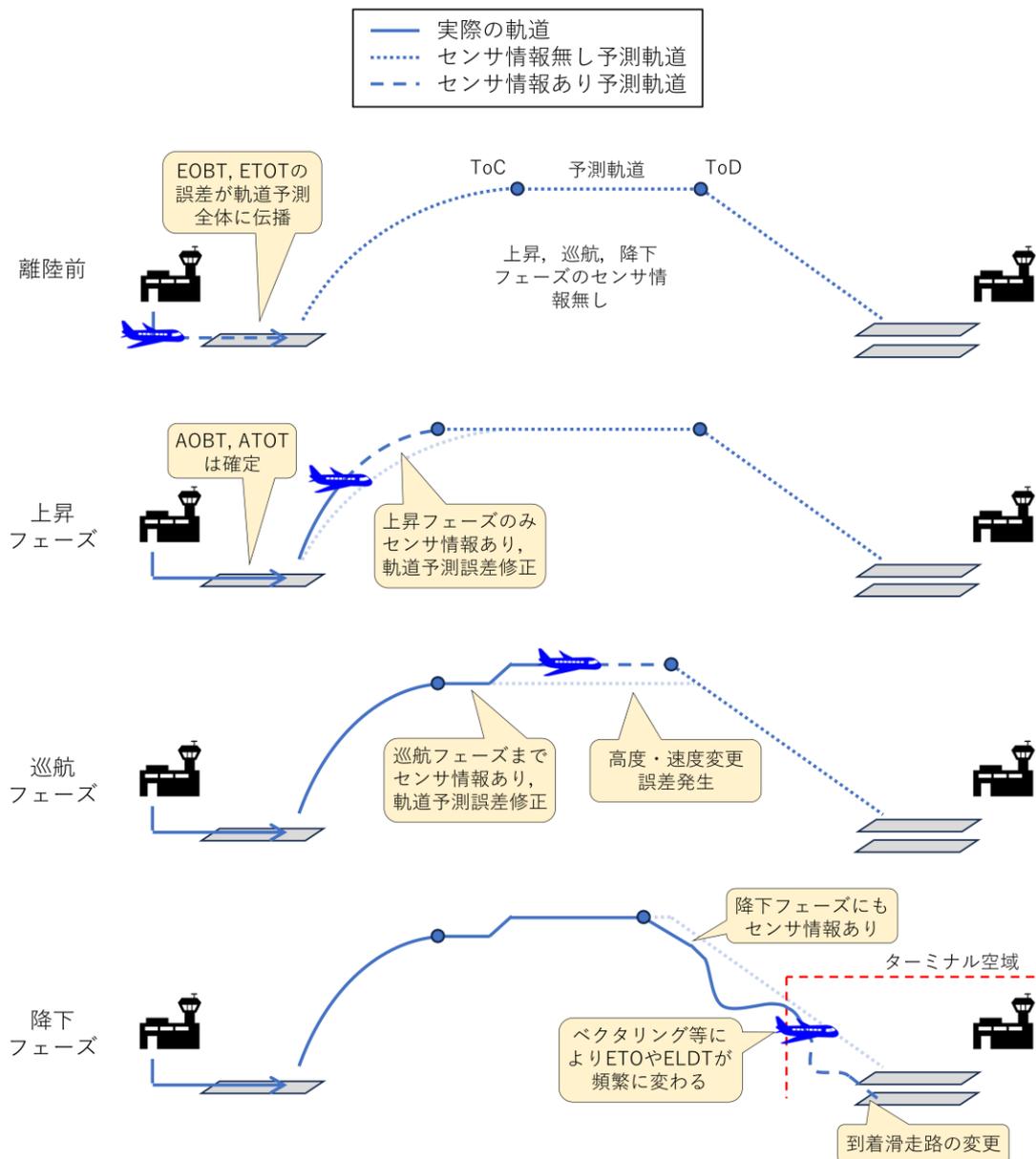


図 4.3 各フェーズにおける軌道予測について

● 巡航フェーズ

ToC 通過後は、ToC における ATO が確定する。巡航フェーズにおけるセンサ情報が得られるようになるので、ToD までの軌道予測に用いることができるが、巡航中に管制官の指示、またはパイロットからのリクエストにより高度や速度が変更されると、ToD までの間に誤差が発生する。また後述するが、ToD の位置はこの時点では未確定であり、ToD 以降はセンサ情報無し軌道予測となる。巡航フェーズにおける誤差は、その後の降下フェーズにおける予測軌道の精度に影響する。

- 降下フェーズ

ToD 通過後は、ToD における ATO が確定する。ただし、軌道予測の仕組み上、降下軌道については到着側から逆方向に計算し、降下軌道と巡航軌道が交差した地点が ToD となるため、ToD の位置自体が予測とずれる可能性が高い。降下開始後はセンサ情報を軌道予測に用いることができるが、航空機の挙動は 10,000 ft を境に異なるので、センサ情報の使い方に注意が必要である。到着段階の航空機は、STAR 等により航空機の高度や速度が指定されることが多いので、それらの情報を軌道予測に用いることができるが、高度や速度の指定と軌道の予測計算が矛盾しないように注意が必要である。

また、到着セクタやターミナル空域では、他方面からの到着機との合流や間隔づけのため、ベクタリングによる経路延伸等の管制指示が頻発するようになる。これらの指示をあらかじめ予測して軌道予測に組み込むことは不可能であるため、到着セクタやターミナル空域内では再度、ELDT と ALDT との間に誤差が発生する可能性が高くなる。

さらに、大きな不確実性として到着滑走路の問題がある。降下軌道は逆方向から計算をするため、到着滑走路を基点として予測軌道の計算が行われる。しかしながら、風向きの変化や滑走路閉鎖によって到着空港の滑走路運用が変わると、特に既に降下を開始している航空機の軌道予測の前提が大きく変わり、誤差が発生する。また、滑走路運用が変わらない場合であっても、運用効率化のために、到着滑走路を平行滑走路の左右で変更する場合があります、軌道予測誤差が発生する可能性がある。

以上より、図 4.3 の便の ELDT 誤差のイメージは図 4.4 のようになる。軌道予測誤差は、予測したい地点や時刻から離れる程大きくなることは知られているが、誤差は単調に変化するわけではなく、上昇・巡航・降下フェーズの切り替わりやセンサデータの使用可能状況に等によって大きく変化することがある。加えて、降下フェーズにおいては予測不可能な要素が多く、飛行中に ETO や ELDT が大きく変化する可能性がある点に注意が必要である。降下フェーズの軌道予測の難しさは、メタリングや AMAN/SMAN/DMAN の運用やアルゴリズムを設計する上で考慮すべき点である。

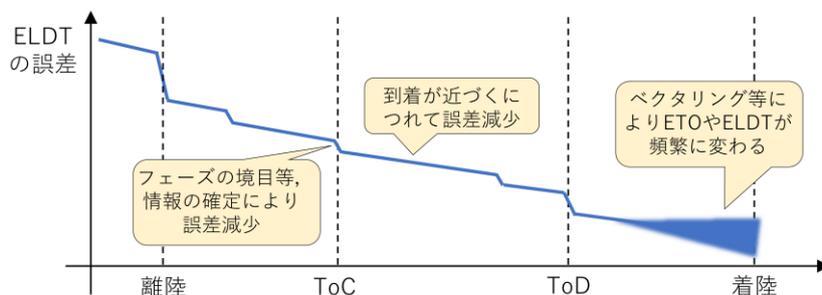


図 4.4 ELDT の誤差イメージ

ここからは、「(i) 航空機の情報取得」、「(ii) ETO 計算」を性能よく実現するためのフォームと、その選択肢について検討していく。

【機能 (i), (ii) のフォームの選択肢】

- 目的とフェーズに応じた軌道予測：メタリングにおける軌道予測のフォーム

第 3.2, 3.3 節で議論したように、時間管理を構成するサブシステムは対象とする交通管理のタイムウィンドウによって、ストラテジックかタクティカルかに分けることができる。軌道予測は時間管理の基盤的な要素であるため、軌道予測についても、対象の目的に応じてストラテジックとタクティカルを使い分ける必要がある（図 4.5）。

ストラテジックな交通管理は長いタイムウィンドウをもっているため、出発から到着までの全飛行フェーズの軌道予測を行うべきである。しかしながら、ATFM のスペーシングタイムに見られるように、ストラテジックな交通管理はタイムウィンドウが長い分、実施される制御の粒度は大きい。そのため、図 4.4 で示したように不確実性が高い降下フェーズ等を詳細に考慮する必要は無い。更新頻度についても、それほど頻繁に更新する必要は無く、例えば ToC 確定といった、特定のイベントが発生した際に更新されれば十分であると考えられる。ただし、軌道全体を通してその計算に不整合が出ないよう、単一のサブシステム内で計算されるべきである。フォームとしては、出発から到着までの軌道計算を担う ICAP が存在するので、ここでは、ICAP がストラテジックな軌道予測のフォームであると想定する¹²。例えば、ストラテジックな管理を担当している ATFM においては、ICAP で計算された予測軌道を用いて、制御の計算を行うことが考えられる¹³。ここで今後の議論のために、ICAP の SPS を以下のように設定しておく。

ICAP の SPS

- To: ストラテジックな予測軌道を提供するために
- By: 軌道の予測計算をすることによって
- Using: 様々な飛行情報を用いて

タクティカルな交通管理はタイムウィンドウが短いため、実施される制御の粒度が小さく、より詳細で更新頻度の高い軌道予測を必要とする。ただし、タイムウィンドウが短い分、対象とするタイムウィンドウだけに集中した軌道予測を行うことができる。例えば、ターミナル空域におけるタクティカルな交通管理である AMAN で使うための

¹² 現状の ICAP では、個別システム（TAPS, TEPS, TOPS 等）で計算された予測軌道を結合するという処理も行われており、単一のサブシステム内で軌道計算が完結しているわけではない。しかしながら、本文書では ICAP の当初の目的を鑑み、ストラテジックな軌道計算を一手に担うシステムであるとして議論を進める。

¹³ 現状の ATFM のフォームである TEAM においては、諸々の経緯により TEAM 内でストラテジックな軌道予測を実施し、その結果に基づいて制御の計算を行っている。

軌道予測であれば、ターミナル空域入域直前から滑走路到着までの範囲だけの軌道予測を、ベクタリングや到着滑走路、他方面からの到着機や出発機との間隔維持といった、詳細な情報を考慮して高頻度を実施すべきである。ターミナル空域のタクティカルな管理を担当するとされる AMAN の場合、フォームとしては TAPS がターミナル空域の支援システムとして存在するので、TAPS がターミナル空域におけるタクティカルな軌道予測のフォームであると想定する。

図 4.5 に、目的とフェーズに応じた軌道予測のイメージを示す。ここで、第 3.3 節で議論したように、メタリングはストラテジックとタクティカルの間に位置していたため、メタリングが実施する制御の計算を、ストラテジックな軌道予測に基づいて行うか、タクティカルな軌道予測に基づいて行うかという選択肢が生じる。より具体的には、ストラテジックであればメタリングの軌道予測フォームは ICAP となり、タクティカルであれば、エンルート空域の支援システムである TEPS（場合によっては TAPS も組み合わせて）となる。

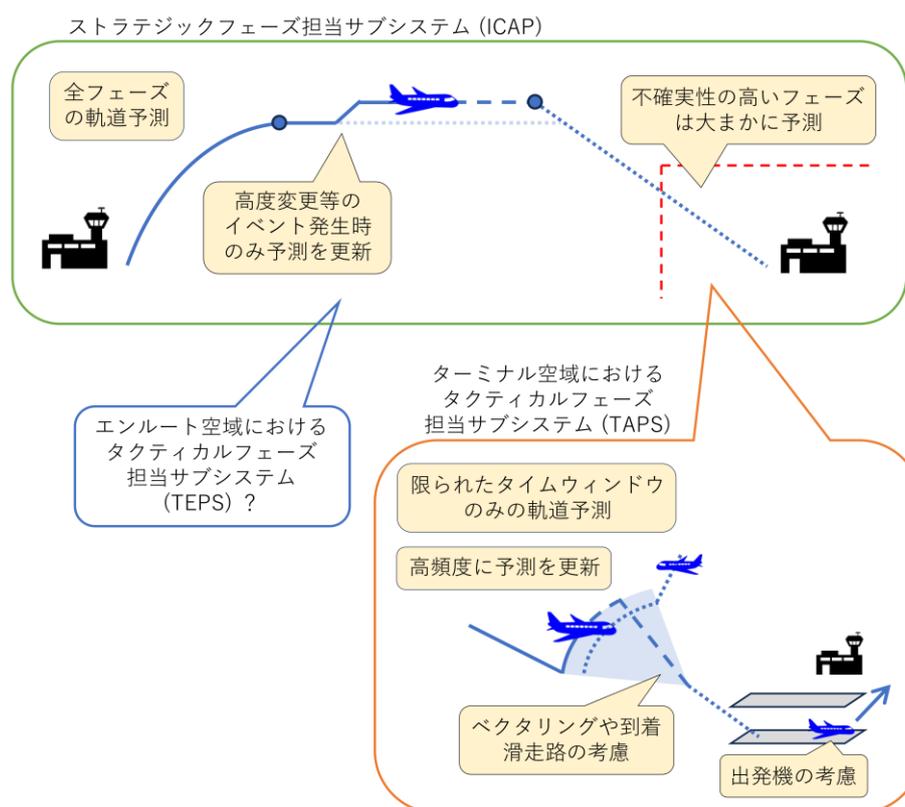


図 4.5 目的とフェーズに応じた軌道予測

- DAPs による機上情報の取得

軌道を計算する際には速度の積分を行うため、速度の精度は予測軌道の精度に直結する。センサ情報がある場合は、そこから速度を取得し、その速度を用いて軌道予測をするべきであるが、従来のセンサ、例えばレーダー等では直接速度を取得することはできないため、位置を微分して速度を推定する必要がある。しかしながら、微分で得られる速度はレーダーの位置誤差等による誤差を含んでいる。加えて、軌道予測に用いる TAS や CAS、マッハ数を得るためには、気象データ等様々な情報を用いて推定する必要があるが、その際にも誤差が発生する。そのため、位置から微分で得られる速度は大きな誤差を含み、これが軌道予測の大きな誤差原因のひとつとなる。図 4.6 に、巡航フェーズにおける ETO 計算の流れの一例と、主な誤差源を示す。

一方、現在 DAPs の導入が進められており、DAPs 取得データを用いて軌道予測精度を向上させる研究が報告されている^[10]。DAPs で取得できる速度情報を用いることで、図 4.6 における速度推定に係る誤差を大きく回避することができる。

以上より、センサ情報ありのときの軌道予測には DAPs 取得データを用いることで、ETO 計算の精度を向上することができると期待される。ただし DAPs は SSR の拡張機能であるため、最大でも SSR の覆域内でしか利用できないことに注意が必要である。

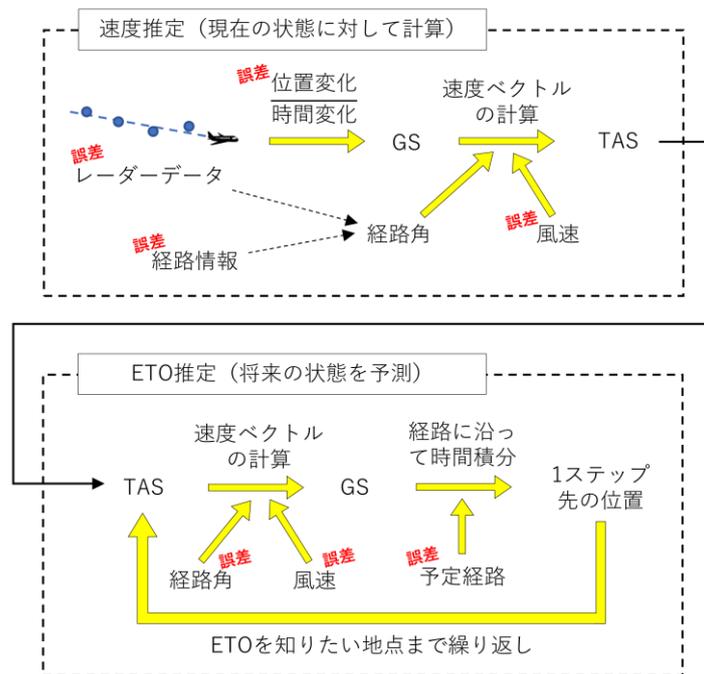


図 4.6 巡航フェーズにおける ETO 計算の一例と主な誤差源

- 管制指示による操縦意図の指定

軌道予測では、ある時点において利用可能な情報を用いて航空機の将来の位置や速度等を予測するが、基本的に、機上の操縦意図を地上システムが知ることはできないので、これが軌道予測誤差の一要因になる。例えば、巡航フェーズにおける予測軌道の計算は高度・速度を一定と仮定することが多いが、パイロットやFMSによる巡航中の高度・速度の変更、すなわち操縦意図による変更があると、当然予測軌道と実際の軌道にずれが生じる。将来の操縦意図を地上システムで取得することは困難であるが、操縦意図による誤差を減らす方法として、機上の操縦意図を地上システムに合わせるという方法が考えられる。例えば、他の航空機とのコンフリクト無く巡航している航空機に対しては、通常、無用な管制指示は出されないが、あえて早い段階で速度を一定に保つような管制指示を出すことで、操縦意図と軌道予測の仮定が一致し、地上システムで予測されるETOの精度が高くなることが期待される。

ただし、この方法は機上の操縦意図を地上システムの計算に合わせるため、各便の選択の柔軟性（ニーズ項目 (e)、優先度：低）が低下する可能性がある。加えて管制指示が増加し、管制官・パイロットともにワークロード（ニーズ項目 (g), (h)、ともに優先度：中）が増加する可能性がある。一方ニーズ分析の結果より、(e), (g), (h) はいずれも、空地で共有される時間精度を向上させる（ニーズ項目 (a)、優先度：高）ためには多少犠牲にしてもよいと考えられる。

上記は巡航フェーズを想定しているが、上昇フェーズや降下フェーズにおいても、航空機の高度や速度を、方式や管制指示で指定することで軌道予測精度を向上させることができる^[11, 12]。しかしながら前述したように、特に降下フェーズにおいては不確実性が高く、また制約を設定しても飛行の安全性の観点からその通りに飛行できない可能性もある。そのため巡航フェーズ以外では、操縦意図の指定による軌道予測精度の向上効果は限定的であると考えられる。

4.3.2 (iii) CTO 計算

CTO 計算では、計算された ETO 等の情報を用いて、各航空機が通過する特定の地点における CTO が計算される。

【機能 (iii) のアルゴリズム関連の選択肢】

● 到着順序決定アルゴリズム

CTO を計算するためには、航空機の到着順序を決定する必要がある。到着順序決定のアルゴリズムとしては、図 4.7 に示すような先着順 (first-come first-served: FCFS) が代表的である。FCFS では、CTO を計算する特定の地点 (以降、基準地点と呼ぶ。) における ETO に基づいて航空機の順序を決定し、基準地点における ETO の間隔が適切な間隔以下の場合、その間隔が適切な間隔になるように CTO を決定する。

単純な FCFS 以外にも、後方乱気流間隔を考慮した順序入れ替えありといったアルゴリズムも考えられる。しかしながら軌道予測誤差の課題がある中では、到着順序を細かく決定したとしても、ETO の誤差によりその到着順序通りに航空機を到着させられない可能性が高い。また、FCFS はある程度公平性が高いアルゴリズムと言われているが、他方の後方乱気流間隔に基づいて順序を入れ替える方法では、特定の後方乱気流カテゴリの航空機ばかり優先される可能性があり、空域利用者間の公平性 (ニーズ項目 (f)、優先度：高) が損なわれる可能性がある。そのため本文書では、到着順序決定は FCFS を想定するものとする。

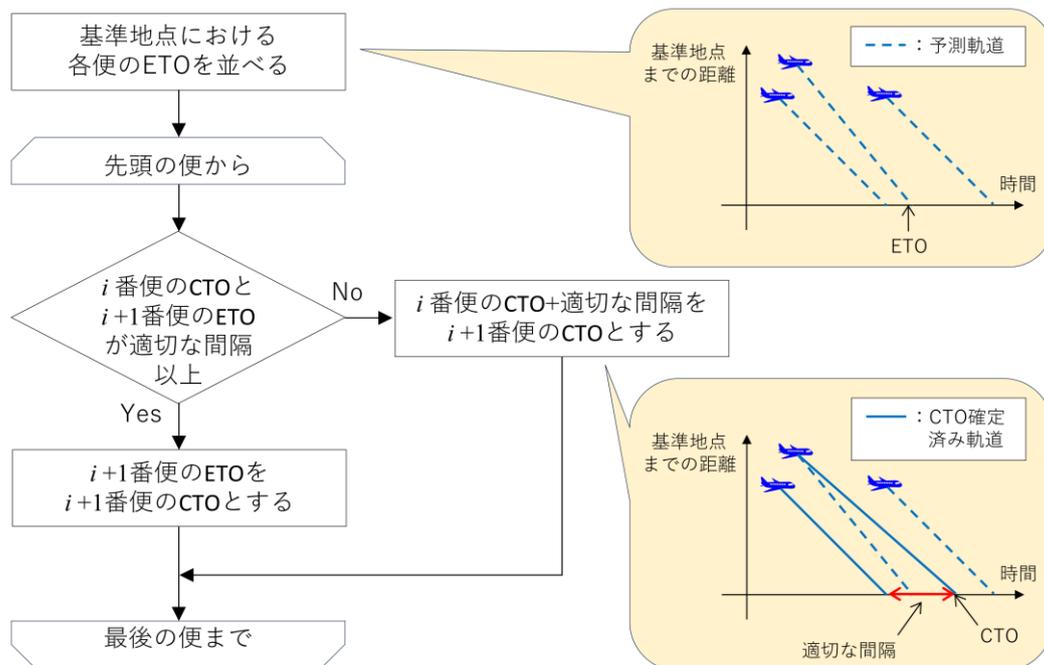


図 4.7 FCFS フローチャート

- 基準地点・間隔・バッファ

図 4.7 で示した通り，CTO を計算する際には，特定の地点を順序・間隔づけの基準地点として計算を行う．空港対象の ATFM は到着空港を基準地点とし，2 分のような一定の間隔を適用している．AMAN に関しては現時点では具体的な構成は明らかではないが，到着滑走路の滑走路末端を基準地点とし，後方乱気流間隔や滑走路占有時間といった，滑走路末端における間隔を用いるのが妥当であると考えられる．一方メタリングに関しては，基準地点や間隔の設定にいくつかの選択肢が考えられる．

従来，メタリングに相当する役割として，ターミナル空域入域前の間隔づけが管制官によって行われているが，この場合は基本的に，ターミナル入域地点において経験的に距離で定義された間隔をつけるように間隔づけが行われている．すなわち CTO 計算の観点では，ターミナル入域地点を基準地点とし，一律の距離で定義された間隔を設定しているということに相当する．時間管理においては時間を基本として制御を実施するため，この間隔を時間で定義されたものとするとも考えられる．さらに，これらの距離・時間の間隔を，例えば TAPS がターミナル空域の混雑具合に応じて「ターミナル空域へは時間あたり xx 機入域」のようなパラメータを渡し，それに応じて TEPS が間隔を調整するという方法も考えられる．

基準地点がターミナル入域地点の場合，異なる入域地点間で間隔の調整が行われていないと，各入域地点からの入域数が多いときにはターミナル空域内で過剰な滞留が発生する可能性があり，逆に少ない入域地点があるときには滑走路末端においてスループットロスが発生する可能性がある．異なる入域地点間の到着航空機を考慮するために，メタリングにおいても滑走路末端を基準地点とすることも考えられる（図 4.8）．メタリングの CTO 計算における基準地点を滑走路末端とする場合，考慮する間隔は ATFM のように一律の間隔とすることもありえるし，AMAN のように後方乱気流間隔と滑走路占有時間とすることもありえる．

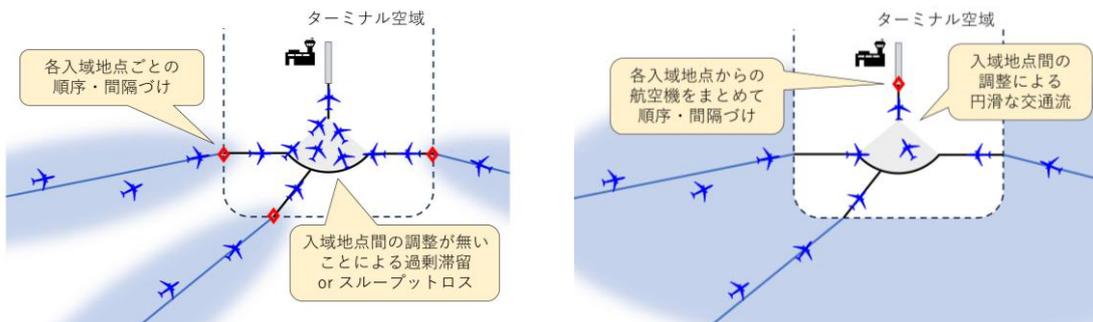


図 4.8 左図：基準地点がターミナル空域で入域地点間の調整が無い場合
右図：基準地点が滑走路末端で入域地点間の調整がある場合

また CTO 計算においては軌道予測等の不確実性を考慮して、計算された CTO をそのまま用いるのではなく、何らかのバッファを付加して制御を行うことが多い。例えば、ATFM においてはスペーシングタイムがバッファに相当し、AMAN であれば、航空機間の後方乱気流間隔と滑走路占有時間に、多少の距離や時間のバッファを付加して管制官支援情報を生成することがある。メタリングにおいても採用する基準地点や間隔に応じて、適切なバッファを設定することが考えられる。

● 滑走路振り分け

運用の効率化のために、平行滑走路の片方に到着する交通流に対して、特定の便をもう一方の滑走路（及びそれに付随する、ターミナル空域への別の入域地点）に振り分けることがある。滑走路振り分けは独立した機能として議論することもできるが、便を振り分けるかどうかによって、図 4.7 で示した FCFS アルゴリズムにおける、CTO 計算の到着航空機の列が変化する。そのため本文書では、滑走路振り分けは CTO 計算機能とあわせて考える。

滑走路振り分けにおける主要な選択肢としては、到着滑走路からどれくらいの距離で振り分けを実施するかという点があげられる。従来の運用においては、滑走路手前での振り分けや、到着滑走路の入れ替え等が行われており、エアラインごとの使用ターミナルビルを考慮した、場面での移動量の削減に寄与していたことが示されている^[13]。一方、このような振り分けをするのであれば、より遠方で滑走路振り分けをした方が、交通流の滞留削減等への効果もあると言われており、エンルート空域の段階で振り分けを行うことが考えられている。その場合、滑走路振り分けもメタリングで実施することとし、上記の CTO 計算のフォームが滑走路振り分けについても計算することになる。滞留や場面での移動量削減により、燃料消費量・温室効果ガス排出の削減（ニーズ項目（d）、優先度：高）が期待される。また、滑走路振り分けのタイミングや有無が明確になることにより、空地で共有される時間精度の向上（ニーズ項目（a）、優先度：高）にも寄与する可能性がある。

【(iii) CTO 計算のフォームの選択肢】

● メタリングにおける CTO 計算のフォーム

ATFM の場合、CTO の計算¹⁴は TEAM で実施されているので、TEAM が ATFM における CTO 計算のフォームであるとみなすことができる。AMAN のフォームはまだ明らかではないが、対象とするタイムウィンドウの関係から、TAPS が CTO の計算フォームになると考えられる。軌道予測同様、ストラテジックとタクティカルの間に位置するメタリングにおいては、どのフォームが CTO 計算を行うかは選択の余地がある。

メタリングは主にエンルート空域における時間管理を担うので、エンルート空域の支援を担っている TEPS で CTO 計算を行う、すなわち TEPS がメタリングにおける CTO 計算

¹⁴ ATFM では CTO を計算の出力としているわけではないが、TEAM で順序・間隔づけや EDCT 等の計算を行っているため、便宜上、TEAM を ATFM における CTO の計算フォームと表現する。

のフォームになることが考えられる。しかしながら例えば、TEAM では既に CTO を出力可能な計算を行っているので、この CTO をメタリングの CTO として使用し、TEAM がメタリングの CTO 計算のフォームになることも考えられる。他にも、AMAN においては TAPS が CTO 計算を行うと考えられるので、その CTO をメタリングでも使用してしまう、つまり TAPS をメタリングの CTO 計算のフォームにすることも考えられる。

4.3.3 (iv) 管制官へ提供する情報の計算、(v) 管制官への情報提供

計算された CTO 通りに航空機を飛行させるために、何らかの支援情報を管制官に提供する必要はある。最もシンプルな方法は、計算された CTO をそのまま管制官に提示し、その達成方法については管制官とパイロットに委ねるというものである。その場合、機能 (iv) は不要となる。

一方、燃料消費量や温室効果ガス排出量を削減する（ニーズ項目 (d)、優先度：高）という観点においては、ベクタリングより速度調整で CTO を達成する方がよいと言われている^[14]。加えて、どのように CTO を達成するかを管制官とパイロットに委ねることは、両者のワークロードを増加させる（ニーズ項目 (g)、(h)、優先度：ともに中）可能性がある。そのため航空機が CTO を達成できるような推奨速度を地上システムで計算し、その推奨速度を管制官へ提供するのがよいと考えられる。そのような計算を行うには、正確な航空機の巡航速度が必要となるが、第 4.3.1 項で挙げた DAPs 取得データの使用を採用するのであれば、比較的精度よく巡航速度を取得することができる。

ただし推奨速度の計算には、巡航速度に加えて、どの程度速度を変更できるかの情報が必要になるが、そのような情報を取得することは困難であり、この点には課題が残る。航空機の運航上の最低・最高速度をモデル化する、または運用上の工夫（管制官がパイロットに最低・最高速度を音声通信で聞く等）で対処する必要があると考えられるが、いずれにしても、管制官とパイロットのワークロードが過剰にならないような方法の開発が求められる。

4.3.4 メタリングの範囲

第 3.3 節で議論したように、メタリングは時間的な観点（ストラテジックかタクティカルか）において中間的な位置づけとなっている。そのためソリューションニュートラル機能ではないが、空間的な位置づけである、メタリングを実施する範囲（以降、メタリングエリアと表記する。）についても選択の余地がある。本文書ではターミナル空域については、AMAN/SMAN/DMAN がその交通管理を担うとしているので、到着空港側に関しては、ターミナル空域の手前までがメタリングエリアであるとする。一方、交通流の上流側に関しては、メタリングエリアをどこから開始するかが選択肢となりうる。

第 4.2.1 項の SPS より、時間管理はできるだけ全飛行フェーズで実施すべきものである

とされている。巡航フェーズにおいては、ATFMの一手段であるCFDTも時間管理を実現する一手段であるので、本項目はCFDTとメタリングエリアをどのように設定するか、という検討項目であるともいえる。第4.2.1項のATFMとメタリングのSPSより、メタリングはCFDTよりも粒度の小さい時間管理を行うことを目標としている。そのため、できるだけメタリングエリアを広くすることで、空地で共有される時間精度が向上（ニーズ項目(a)、優先度：高）する範囲を広くすることができると期待される。

また第4.3.3項で議論したように、燃料消費量・温室効果ガス排出量削減の観点から、CTO達成のための推奨速度を管制官に提供する（機能(iv),(v)）ことを考えると、メタリング範囲を広くすることで交通流の上流から減速を開始し、到着セクタにおけるベクタリング量を減らせる可能性がある。この変化は第3.2節の文脈で説明すると、到着セクタから上流への滞留の平準化であるといえる（図4.9）。管制官やパイロットのワークロードの観点では、到着セクタでのベクタリング量が減る代わりに上流側での速度変更が発生するため、ワークロードの総量が減るわけではないが、到着セクタへの集中が緩和され平準化されることが期待される（ニーズ項目(g),(h)、優先度：ともに中）。このワークロードの平準化効果についても、メタリングエリアをできるだけ広げた方が、効果が高くなると考えられる。

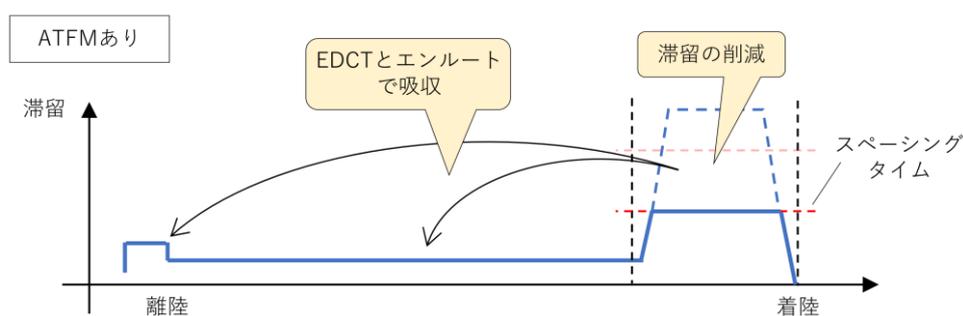


図 4.9 滞留の平準化

ただしメタリングエリアを広げる程、CTO計算の基準地点における軌道予測精度が悪化する可能性もある。エンルート空域においては、DAPs取得情報を用いることで軌道予測精度の向上が期待できるので、メタリングエリアを広げるためには、特に巡航フェーズにおいて軌道予測にDAPsを利用し、最大でもDAPsが利用可能なSSRの覆域内までとするのが妥当であると考えられる。

他にもメタリングエリアを広く設定する場合、メタリングの対象となる航空機が出発する国内空港もエリア内に入ってくるので、ETO取得（機能(ii)）のために、上昇フェーズも含めた予測軌道が必要になる可能性もある。その場合は、TEPSだけでは軌道予測を賄うことができないので、第4.3.1項で議論したメタリングにおける軌道予測フォームの選択において、ICAPを選択する必要があると考えられる。加えて、そのような巡航交通流に上昇

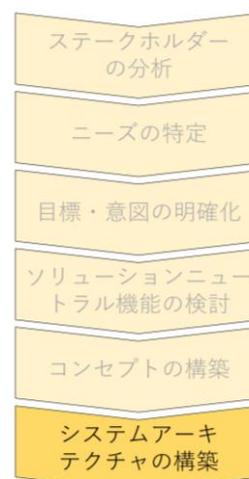
して合流する便はポップアップ機とも呼ばれるが、第 4.3.1 項で議論したように、離陸時刻の不確実性は軌道予測において比較的大きいため、ポップアップ機の軌道予測は他の便に比べて誤差が大きく、CTO 計算に悪影響を与える可能性がある。

離陸時刻の不確実性に関しては、TSAT や ATFM で用いられている TOBT や EDCT 等を利用することも考えられる。現在、TSAT や ATFM は特定の空港、特定の時間帯でしか実施されていないが、今後それらの実施が拡大していけば、出発時刻の推定に TOBT や EDCT 等を利用することで、出発便の軌道予測精度を向上することができる可能性がある。本文書では詳細な議論は行わないが、不確実性を考慮した TSAT や TOBT に関する先行研究として参考文献 [15, 16] を挙げておく。また、ポップアップ機の ETO に不確実性があるのはある程度避けられないので、ポップアップ機を巡航交通流に合流させるためのタクティカルな制御¹⁵も提案されている^[17]。

¹⁵ 具体的には、上昇フェーズにおける速度指示に加え、ポップアップ機の巡航高度を低く保つことで巡航交通流と高度差をとり、ターミナル空域入域地点までの時間調整の余地を確保するといった方法が提案されている。

4.4 システムアーキテクチャの構築

前節でコンセプト，すなわち機能とそれを実現するフォームの組み合わせを検討したが，それらは時間管理全体からみると断片的な要素でしかないので，それらを組み合わせて時間管理全体のシステムアーキテクチャを構築していく．以下では，断片的なコンセプトの要素をコンセプト要素と呼び，できるだけ多くのコンセプト要素の組み合わせをつくることで，時間管理のシステムアーキテクチャを網羅的に検討していく．



4.4.1 設計構造マトリクスを用いたコンセプト要素の整理

第 4.3 節にて，時間管理を実現するためのメタリング，及び周辺システムのコンセプト要素とその選択肢（どのソリューションニュートラル機能をどのフォームで実現するか）が議論された．以下に，各コンセプト要素と，その主要な選択肢を示す．

- (A) メタリングにおける軌道予測のフォーム：ICAP, TEPS (+ TAPS)
- (B) DAPs による機上情報を利用する：yes, no
- (C) メタリングにおける CTO 計算のフォーム：TEAM, TEPS, TAPS, ICAP
- (D) CTO 計算における基準地点：ターミナル空域入域地点，滑走路末端
- (E) CTO 計算における間隔：距離間隔，時間間隔，後方乱気流間隔+滑走路占有時間
- (F) CTO 計算におけるバッファ：距離バッファ，時間バッファ，スペーシングタイム
- (G) 滑走路振り分けをする：yes, no
- (H) 管制官への情報提供形式：特定地点における通過時刻，推奨速度
- (I) メタリングエリア：開始位置

上記の選択肢について，全ての組み合わせを作成することで，メタリングおよび時間管理の網羅的なシステムアーキテクチャを検討することができるが，その組み合わせは膨大になってしまう．そこで，設計構造マトリクス (Design Structure Matrix: DSM) という手法を用いてこれを整理する．

DSM は検討対象の各要素を N 行 N 列のマトリクスに列挙し，各要素の作用や依存関係を表したものである．DSM は各行・列を特定のルールに従って並べ替えることで，どの要素から決定していくべきか等を分析することができる．上記の (A) から (I) のコンセプト要素について作成した DSM を表 4.2 に示す．DSM は列の要素から行の要素へと作用や依存関係があることを示す．例えば，「(D) CTO 計算における基準地点」を決めると，「(E) CTO 計算における間隔」の選択肢は必然的に絞られる（例えば，基準地点がターミナル入

域地点であれば、間隔を後方乱気流間隔+滑走路占有時間とすることはない.)。そのため、表 4.2 の (D) の列と (E) の行の交点にはチェックマークが入っている (表 4.2 の矢印を参照)。表 4.3 は表 4.2 を、できるだけ下三角行列になるよう、また上三角側の成分が一か所に固まるように並べ替えたものである。DSM では、すべてのチェックマークが下三角側にあるとき、各要素について順番に意思決定していった方がいいが、上三角側にチェックマークがあるときは関連する要素に相互関係があり、同時に意思決定をする必要があるとされている。赤い二重線で囲んだ上三角側に成分がある部分は、ここに強い依存関係があることを意味している。すなわち、この部分に関連する以下の 3 つのコンセプト要素から意思決定を進めるべきであることが示されている。

- (A) メタリングにおける軌道予測のフォーム：ICAP, TEPS (+ TAPS)
- (C) メタリングにおける CTO 計算のフォーム：TEAM, TEPS, TAPS, ICAP
- (D) CTO 計算における基準地点：ターミナル空域入域地点、滑走路末端

表 4.2 時間管理の DSM

	(A) 軌道	(B) DAPs	(C) CTO	(D) 基準	(E) 間隔	(F) バッファ	(G) 振り分け	(H) 情報	(I) 範囲
(A) 軌道	X		✓						
(B) DAPs		X							
(C) CTO	✓		X	✓					
(D) 基準			✓	X					
(E) 間隔				✓	X				
(F) バッファ					✓	X			
(G) 振り分け			✓	✓			X		✓
(H) 情報		✓						X	
(I) 範囲	✓								X

表 4.3 並べ替え済みの時間管理の DSM

	(B) DAPs	(D) 基準	(C) CTO	(A) 軌道	(E) 間隔	(F) バッファ	(H) 情報	(I) 範囲	(G) 振り分け
(B) DAPs	X								
(D) 基準		X	✓						
(C) CTO		✓	X	✓					
(A) 軌道			✓	X					
(E) 間隔		✓			X				
(F) バッファ					✓	X			
(H) 情報	✓						X		
(I) 範囲				✓				X	
(G) 振り分け		✓	✓					✓	X

4.4.2 モーフォロジカルマトリクスを用いたシステムアーキテクチャ作成

DSM によって優先すべき 3 つのコンセプト要素が特定されたので、これらのコンセプト要素について、表 4.4 に示すように総当たりで組み合わせを検討していく。このように、意思決定が必要な選択肢を整理した表はモーフォロジカルマトリクスと呼ばれており、意思決定を整理するツールとして広く用いられている。

各列はコンセプト要素 (A), (C), (D) を表しており、行ごとに、各コンセプト要素の選択肢の組み合わせを示している。つまり、各行がそれぞれ 1 つの時間管理のアーキテクチャを表している。各アーキテクチャを識別するために、一番左の列にアーキテクチャ名をつけている。ここではコンセプト要素の網羅的な組み合わせを検討するが、組み合わせによってはあり得ないものや、あえて検討する必要のないものも発生するので (例えば、軌道予測のフォームが TEPS で、CTO 計算のフォームが TEAM という組み合わせは考えにくいため、除外している。)、そのようなアーキテクチャの行は灰色としている。表 4.4 より、時間管理の有望なアーキテクチャが 6 つ特定された。そこで、これら 6 つのアーキテクチャについて、残りの全てのコンセプト要素についても意思決定したモーフォロジカルマトリクスを表 4.5 に示す。本来であれば、6 つのアーキテクチャそれぞれにおいて再び残りのコンセプト要素を網羅的に示すべきところではあるが、紙面の都合上、各アーキテクチャに対して妥当性の高そうなコンセプト要素の組み合わせを記載している。

以上より、時間管理の実現に対して有望なアーキテクチャを 6 つ構築した。ただし、本章ではアーキテクチャを網羅的に検討するため、各アーキテクチャの詳細までは記述していないので、次章にて詳細について述べる。

表 4.4 主要コンセプト要素のモーフォロジカルマトリクス

アーキテクチャ名	コンセプト要素	(A) 軌道予測のフォーム	(C) CTO 計算のフォーム	(D) CTO 計算における基準地点	除外理由
	従来運用踏襲型	TEPS	TEPS	ターミナル空域入域地点	
	ATFM-メタリング-AMAN ルーズカップリング型	TEPS (+ TAPS)	TEPS	滑走路末端	
	×	TEPS (+ TAPS)	TAPS	ターミナル空域入域地点	(C) と (D) がコンフリクト
	メタリング-AMAN タイトカップリング型	TEPS (+ TAPS)	TAPS	滑走路末端	
	×	TEPS	TEAM	ターミナル空域入域地点	(A) と (C) がコンフリクト
	×	TEPS	TEAM	滑走路末端	(A) と (C) がコンフリクト
	×	TEPS	ICAP	ターミナル空域入域地点	(A) と (C) がコンフリクト
	×	TEPS	ICAP	滑走路末端	(A) と (C) がコンフリクト
	△	ICAP	TEPS	ターミナル空域入域地点	ストラテジック軌道予測-TEPS 型の方が妥当
	ストラテジック軌道予測-TEPS 型	ICAP	TEPS	滑走路末端	
	△	ICAP	TAPS	ターミナル空域入域地点	ストラテジック軌道予測-TAPS 型の方が妥当
	ストラテジック軌道予測-TAPS 型	ICAP	TAPS	滑走路末端	
	△	ICAP	TEAM	ターミナル空域入域地点	ATFM-メタリングタイトカップリング型の方が妥当
	ATFM-メタリングタイトカップリング型	ICAP	TEAM	滑走路末端	
	△	ICAP	ICAP	ターミナル空域入域地点	ICAP 主導型の方が妥当
	ICAP 主導型	ICAP	ICAP	滑走路末端	

表 4.5 有望なアーキテクチャの全要素のモーフォロジカルマトリクス

ID	コンセプト要素	(A) 軌道	(C) CTO	(D) 基準地点	(B) DAPs	(E) 間隔	(F) バッファ	(G) 振り分け	(H) 情報	(I) 範囲
	アーキテクチャ名									
1	従来運用踏襲型	TEPS	TEPS	ターミナル 空域入域地点	Y	距離/時間	距離/時間	Y	速度	小
2	ATFM-メタリング-AMAN ルーズカップリング型	TEPS (+ TAPS)	TEPS	滑走路末端	Y	時間	スペーシング タイム	Y	速度	小
3	メタリング-AMAN タイトカップリング型	TEPS (+ TAPS)	TAPS	滑走路末端	Y	後方乱気流間隔 + 滑走路占有時間	距離/時間	Y	速度 + ターミナル 空域内支援	小
4	ストラテジック 軌道予測-TEPS 型	ICAP	TEPS	滑走路末端	Y	時間	スペーシング タイム	Y	速度	大
5	ストラテジック 軌道予測-TAPS 型	ICAP	TAPS	滑走路末端	Y	時間	時間	Y	速度 + ターミナル 空域内支援	大
6	ATFM-メタリング タイトカップリング型	ICAP	TEAM	滑走路末端	Y	時間	スペーシング タイム	Y	速度	大
7	ICAP 主導型	ICAP	ICAP	滑走路末端	Y	時間	時間	Y	速度	大

4.5 第4章まとめ

- 時間管理のSVNを作成し、以下の3グループを主要なステークホルダーとして特定した。
 - 政策立案グループ
 - 管制運用グループ
 - エアライン
- 主要ステークホルダーグループに対して、時間管理に対するニーズに関してヒアリングを行った。ヒアリング結果は狩野モデルに基づいて分析され、各ニーズ項目の特徴や優先度を特定した。以下のニーズ項目が、特に優先度が高いニーズ項目であるという結果になった。
 - 空地で共有される時間精度が向上する
 - 燃料消費量・温室効果ガス排出が減少する
 - 空域利用者（主にエアライン）間の公平性が向上する
- 時間管理とそのサブシステムのハイレベルな目標・意図を明確化するため、各システムのSPSを定義した。定義したSPSに従って、時間管理のソリューションニュートラル機能を以下のように定義した。
 - (i) 航空機の情報取得
 - (ii) ETO 計算
 - (iii) CTO 計算
 - (iv) 管制官へ提供する情報の計算
 - (v) 管制官への情報提供
- コンセプトの検討として、各ソリューションニュートラル機能を実現するフォームの選択肢を洗い出し、各選択肢と他の要素との依存関係について議論した。
- 上記で整理したコンセプト要素から、妥当性の高いシステムアーキテクチャを構築した。検討対象を絞りつつ網羅的にアーキテクチャを作成するために、DSMを用いて優先的に意思決定すべきコンセプト要素を特定し、それらのコンセプト要素を中心に、時間管理システムアーキテクチャのモーフォロジカルマトリックスを作成した。妥当性の高いものとして、以下の7つのアーキテクチャを特定した。
 - 従来運用踏襲型
 - ATFM-メタリング-AMAN ルーズカップリング型
 - メタリング-AMAN タイトカップリング型
 - ストラテジック軌道予測-TEPS 型
 - ストラテジック軌道予測-TAPS 型
 - ATFM-メタリングタイトカップリング型
 - ICAP 主導型

5. 時間管理のシステムアーキテクチャ

第4章で妥当性の高い時間管理のシステムアーキテクチャを網羅的に構築したので、個別のアーキテクチャについてその詳細を述べる。ただし紙面の都合上、いくつかのアーキテクチャのみに絞って記載する。また第4.2.1項で議論したとおり、メタリングとはエンルート空域において、特定地点（ここではターミナル空域入域地点とする。）におけるCTOを満たすような指示を出すものであるとして議論を進める。メタリングのSPSを以下に再掲する。

メタリングのSPS

- To: エンルート空域におけるプリタクティカルな順序・間隔づけの支援を行うために
- 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: 速度指示やベクタリングを用いて

システムズアプローチにおいては、アーキテクチャ¹⁶を記述するためにOPMやSysMLといったモデリングツールが用いられるが、本文書では時間管理のステークホルダーがイメージしやすいよう、羽田空港への到着便を中心としたシナリオに沿って各アーキテクチャを説明していく。

5.1 従来運用

時間管理の導入によってどのように将来の運用が変化するかを示すため、初めに従来の運用について概観する（図5.1）。

国内空港からの出発便は、羽田空港への到着時に混雑が予想される場合、空港ATFMによって離陸前にEDCTを割り当てられることがある。このEDCTはATFMのフォームであるTEAMによって、ストラテジックな予測軌道に基づいて計算されたものである。ストラテジックな軌道予測では、福岡FIRを飛行するすべての航空機の（計算可能な範囲での）全フェーズの予測軌道が計算され、ある時間帯において到着機数が空港の処理容量を超えると予想された場合は、EDCT等を割り当てることで処理容量の超過を防いでいる。EDCTは国内からの出発便にしか割り当てることができないが、一部の海外空港の出発便に対しては国際ATFMがCTOTを割り当てることがもできる。また主に海外から入域してきた巡航機を対象に、CFDTを割り当てることが検討されており、初期的には到着セクタへの入域地点前後のウェイポイントにおける通過時刻の指定が検討されている。

到着セクタに差し掛かるまで航空機は概ね航空路に沿って飛行してくるが、到着セクタに入域後、比較的大きなベクタリングの指示を受けることがある。ATFMによって、到着空港の容量超過により到着直前でホールディングされることはないものの、混雑時にはタ

¹⁶ 第1章でも述べたが、システムズアプローチにおいて「システムアーキテクチャ」とはコンセプトの具現化であり、システムの各要素の機能とフォームの割り当てや、それらの要素間、及び周囲との関係を定義するものであるとされている。

ーミナル空域と到着セクタにおいて滞留が発生する。これはATFMが、スペーシングタイムを設定してスループットロスが出ないように交通流を制御しているためである。到着セクタにおいては、ターミナル空域への入域地点において経験的な距離ベース間隔が設定されている。各航空機はエンルート空域担当管制官からのベクタリング指示によって、設定された距離ベース間隔でターミナル空域に入域するよう到着順序・間隔づけが行われる。

ターミナル空域へ入域後、各入域地点からターミナル空域へ入ってきた航空機は合流しつつ到着滑走路に向かっていく。ターミナル空域担当管制官がPMSやベクタリングを用いて、各航空機が滑走路末端において、後方乱気流間隔や滑走路占有時間に基づく間隔を満たすように到着順序・間隔づけをしていく。各航空機はターミナル空域内でも、スループットロスを防ぐためにPMSやベクタリングによる経路延伸である程度の滞留をしながら到着滑走路に着陸していく。

羽田空港と成田空港においては現在、TSAT運用が行われている。TSATのフォームであるTAPSが、出発機のEOBTやTOBT、到着機のELDT等を基に滑走路処理容量の管理、及び滑走路における順序・間隔づけを行い、その結果に基づいて出発機に対してTSATが提供される。

結果的に、航空機は各段階でEDCTやベクタリングのような滞留をうけるが、ストラテジックなATFM、プリタクティカルな到着セクタにおける到着順序・間隔づけ、タクティカルなターミナル空域内における到着順序・間隔づけと、段階的に制御されることによって、ホールディング等の過度な滞留なく、また混雑空港においてスループットロスなく、円滑な交通流が形成されている。

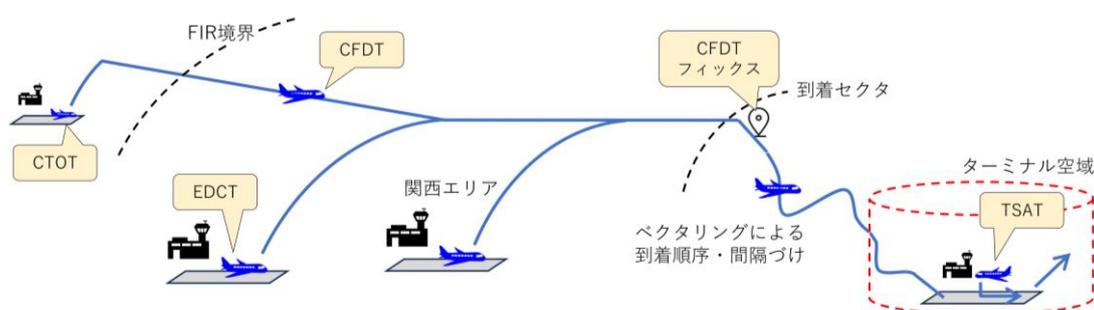


図 5.1 従来運用の全体イメージ

5.2 従来運用踏襲型アーキテクチャ（アーキテクチャ ID: 1）

表 4.5 で「従来運用踏襲型」と名付けたアーキテクチャで時間管理を導入した場合を考える。本アーキテクチャにおける各サブシステムの働きの概要を図 5.2 に、各機能のフォームへの割り当てを図 5.3 に示す。このアーキテクチャでは、TEPS がタクティカルな軌道予測を行い ETO を取得する。ターミナル空域入域地点を基準地点として、TEPS が CTO 計算も行う。ターミナル空域入域地点が CTO 計算の基準地点となり、間隔は経験的な距離か時間で定義される間隔となる。もしくは、TEAM や TAPS から、ATFM の時点での CTO やターミナル空域における混雑度合い等のパラメータを受け取り、それによって間隔を調整することも考えられる。このアーキテクチャは基本的に、従来の到着セクタにおける運用と似たものとなる。ただし、推奨される速度を提示するという点において、従来の運用を拡張したようなアーキテクチャとなっている。そのため本アーキテクチャを、「従来運用踏襲型」と呼ぶこととする。

メタリングエリアについては、第 4.3.4 項で議論したようにポップアップ機の課題があるため、最大でも関西エリアからの出発便が合流して以降、到着セクタよりやや広い範囲までになると考えられる。CTO 計算の関係上、到着滑走路の振り分けについても、メタリングエリア開始地点付近になる。

従来運用同様、国内空港からの出発便は、羽田空港への到着時に混雑が予想される場合、離陸前に EDCT を割り当てられることがある。CFDT に関してはメタリングとの重複を避けるため、メタリングエリアの境界線上に CFDT フィックス¹⁷を配置すると考えられる。

メタリングによって各便の ETO より遅い CTO が計算された場合、各航空機はメタリングエリア入域後、メタリングが算出する推奨速度に基づく速度指示を受けて減速を行う。ただし、速度変更だけで調整可能な時間量は限定的であり、かつ本アーキテクチャではメタリングエリアが関西エリアからの出発便が合流して以降とそれほど大きくないため、メタリングだけで到着セクタにおける滞留が全くなくなるわけではない¹⁸。しかしながら従来運用と比べると、メタリングによってベクタリング量が若干減ることが期待される。

ターミナル空域入域後は、TAPS がタクティカルな軌道予測を行う。到着滑走路を基準地点として CLDT 計算を行う。本文書では AMAN/SMAN/DMAN の具体的なアーキテクチャはフォーカス外とするが、図 5.4 のような機能を有するシステムを想定する。第 4.3.1 項で議論したように、ターミナル空域内は不確実性が高く予測軌道が頻繁に変化し、またこの段階では出発航空機の予測がある程度可能となる。到着交通流はターミナル空域に至るまでに、ATFM やメタリングによってある程度の交通流の計画立てが行われている（ストラテジックな交通管理）が、第 4.2.1 項の AMAN の SPS に関する議論を踏まえ、AMAN の段階に至ってはストラテジックな計画を守るよりも、時々刻々変化する状況を考慮して、そ

¹⁷ CFDT において航空機が通過すべき時刻を指定するウェイポイント。

¹⁸ 速度調整による通過時間の調整可能量は、福岡 FIR 入域から到着セクタ手前を CFDT フィックスとする CFDT で 1-3 分程度であると言われている^[17]。

の時々で滑走路のスループットを最大化するための制御を行うべきである（タクティカルな交通管理）と想定する。

本文書では、構築したシステムアーキテクチャ間の性能比較までは行わないが、その指針としてステークホルダーのニーズとの合致度合いを簡単に確認する。空地で共有される時間精度向上（ニーズ項目 (a), 優先度:高)と空域利用者間の公平性の向上（ニーズ項目 (f), 優先度:高)については、本アーキテクチャは従来運用を踏襲しているため、それほどの向上はみられないと考えられる。燃料消費量・温室効果ガス排出が削減（ニーズ項目 (d), 優先度:高)については、ベクタリングによる滞留の一部を速度調整によって吸収するため、若干の向上が期待される。また、管制官・パイロットのワークロードが低減（ニーズ項目 (g), (h), 優先度:中)については、滞留削減により到着セクタにおけるワークロードが若干減る可能性があるが、メタリングによってベクタリングがなくなる訳ではなく、速度調整のための指示を必要とするため、むしろワークロードが増加する懸念がある。

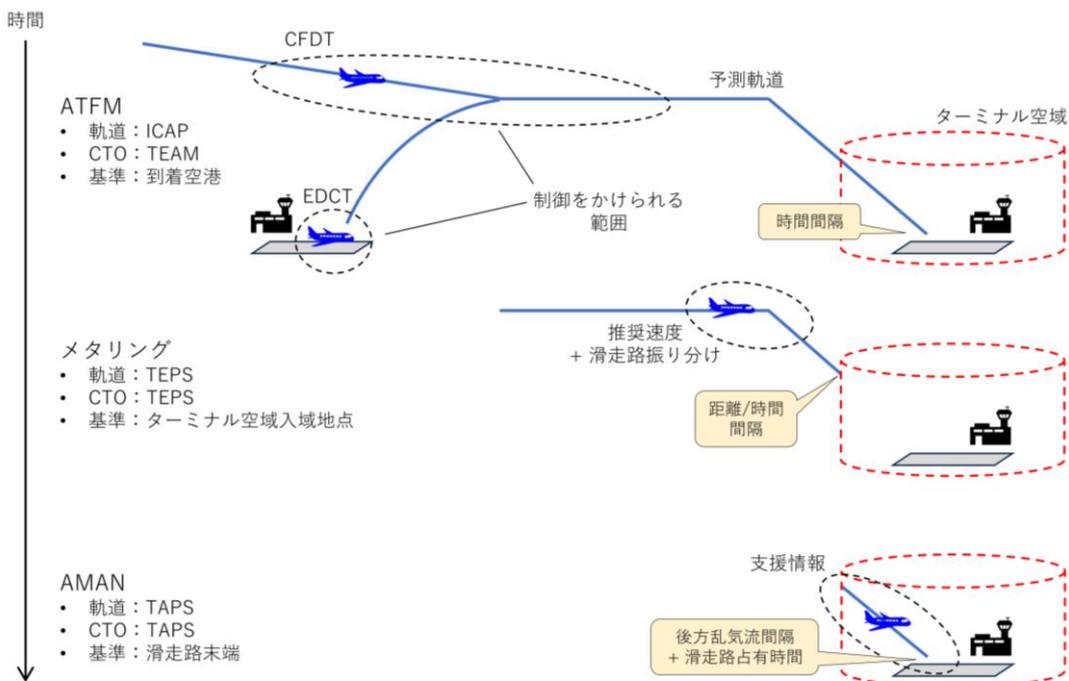


図 5.2 従来運用踏襲型アーキテクチャ（アーキテクチャ ID: 1）
における各システムの働き

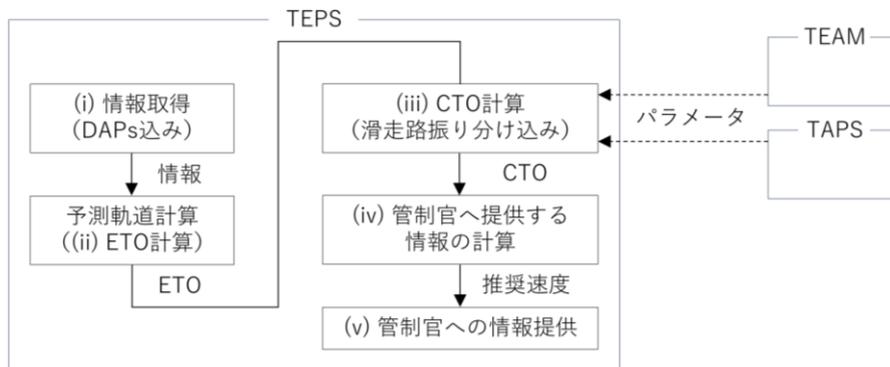


図 5.3 従来運用踏襲型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 1) における各機能のフォームへの割り当て

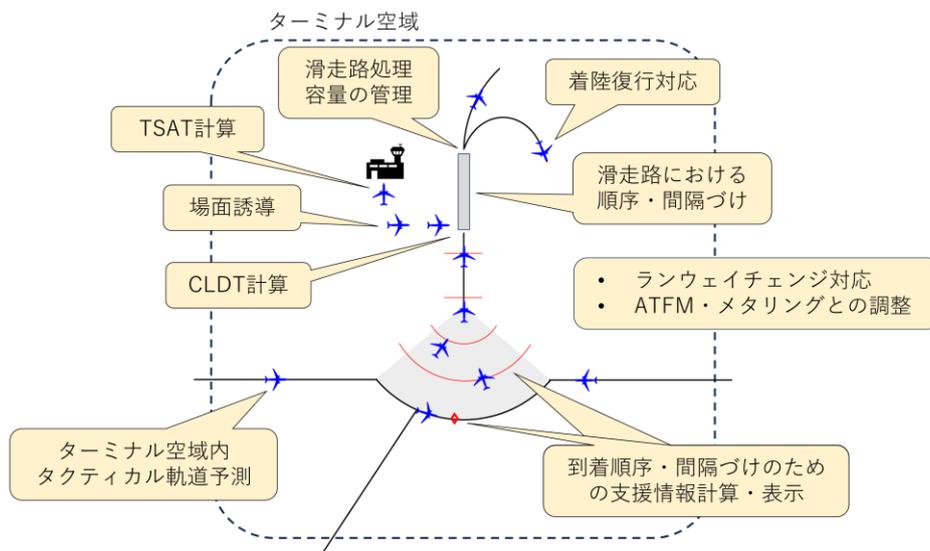


図 5.4 AMAN/SMAN/DMAN が持つ機能の想定

5.3 ストラテジック軌道予測-TEPS型アーキテクチャ(アーキテクチャID:4)

表 4.5 で「ストラテジック軌道予測-TEPS 型」と名付けたアーキテクチャで時間管理を導入した場合を考える。本アーキテクチャにおける各システムの働きの概要を図 5.5 に、各機能のフォームへの割り当てを図 5.6 に示す。このアーキテクチャでは、ICAP が計算するストラテジックな予測軌道から、TEPS へ ELDT が提供される。TEPS はその ELDT を基に、滑走路末端を基準地点として CLDT の計算を行う。

滑走路末端が CLDT 計算の基準地点となるが、第 4.3.1 項で議論したように、ストラテジックな軌道予測はタクティカル軌道予測と比べると、特にターミナル空域内においては粒度の粗い軌道計算を行う。加えて、ストラテジックな軌道予測段階では、到着空港における出発航空機の予測を精度よく行うことは困難である。そのため、間隔については後方乱気流間隔や滑走路処理容量のような詳細なものではなく、一律の時間間隔を想定する。ただし、この間隔は従来運用踏襲型アーキテクチャ同様、ATFM の時点での CTO やターミナル空域の混雑度合いに応じて調整する等の運用も考えられる。また、基準地点は滑走路末端であるが、メタリングが制御を行うエリアはターミナル空域入域までなので、管制官に提供される情報としては、ターミナル空域入域地点における CTO を満たすような推奨速度として計算される。

メタリングエリアについては、ストラテジックな軌道予測を用いることで全フェーズの予測軌道が利用可能になり、広い範囲を対象とすることができる。第 4.3.4 項で議論したように、推奨速度を提供するためには DAPs が利用可能である方が望ましいので、具体的なメタリングエリアとしては、最大で福岡 FIR 内の航空路レーダー覆域内になると考えられる。従来運用踏襲型で挙げたポップアップ機の不確実の課題はあるが、第 4.3.4 項で挙げた TOBT や EDCT を用いた出発時刻の精度向上、ポップアップ機に対するタクティカルな制御といった技術を導入することで、不確実性による影響を抑えることができる可能性がある。

国内空港からの出発便は、羽田空港への到着時に混雑が予想される場合、離陸前に EDCT を割り当てられることがある。CFDT に関してはメタリングとの重複を避けるため、メタリングエリアの境界線上に CFDT フィックスを配置する。メタリングエリアを最大範囲で設定した場合、福岡 FIR より航空路レーダー覆域が広いエリアについては FIR 境界上に CFDT フィックスが設定され¹⁹、逆の場合は洋上空域からレーダー覆域に入るあたりに CFDT フィックスが設定される。

メタリングによって各便の ETO より遅い CTO が計算された場合、各航空機はメタリングエリア入域後、速度指示を受けて減速を行う。本アーキテクチャはメタリングエリアを広くとることができるので、メタリングによってベクタリング量が減ることが期待される。これは、従来到着セクタで主に吸収していた滞留を、より上流側における速度調整で吸収する

¹⁹ この場合は CFDT ではなく国際 ATFM における CTO であり、制度上は異なるものであるが、ここでは巡航中の航空機に対する CTO の指定ということで同一のものとして議論を進める。

ことを意味しており、第 4.3.4 項で議論した滞留の平準化に相当する。

ターミナル空域入域後は、第 5.2 節同様、AMAN がタクティカルな交通管理を行う。

空地で共有される時間精度向上（ニーズ項目 (a), 優先度：高）については、広い範囲をメタリングエリアとし推奨速度に基づく速度調整を行うため、第 4.3.1 項で述べた操縦意図と軌道予測の想定のがずれが低減され、向上すると期待される。加えて、到着セクタにおける滞留が上流側へ平準化されることで、交通流のどこで滞留を持たせるかという滞留の計画が精緻化される。この滞留計画の精緻化も、空地で共有される時間精度向上に寄与すると期待される。燃料消費量・温室効果ガス排出が削減（ニーズ項目 (d), 優先度：高）についても、メタリングエリアを広くとることで、従来運用踏襲型アーキテクチャに比べて高い削減効果が期待される。空域利用者間の公平性の向上（ニーズ項目 (f), 優先度：高）については、向上するとは言えないが、広い範囲に対して推奨速度が指示されることで、これまで各々の航空機に委ねられていた巡航速度の選択がある程度均一化されるので、一定の公平性は担保されると考えられる。また、管制官・パイロットのワークロードが低減（ニーズ項目 (g), (h), 優先度：中）については、従来、到着セクタに集中しがちであったワークロードが上流側に平準化されるため、ワークロードの総量は変わらないが、ワークロードの集中が回避される可能性がある。

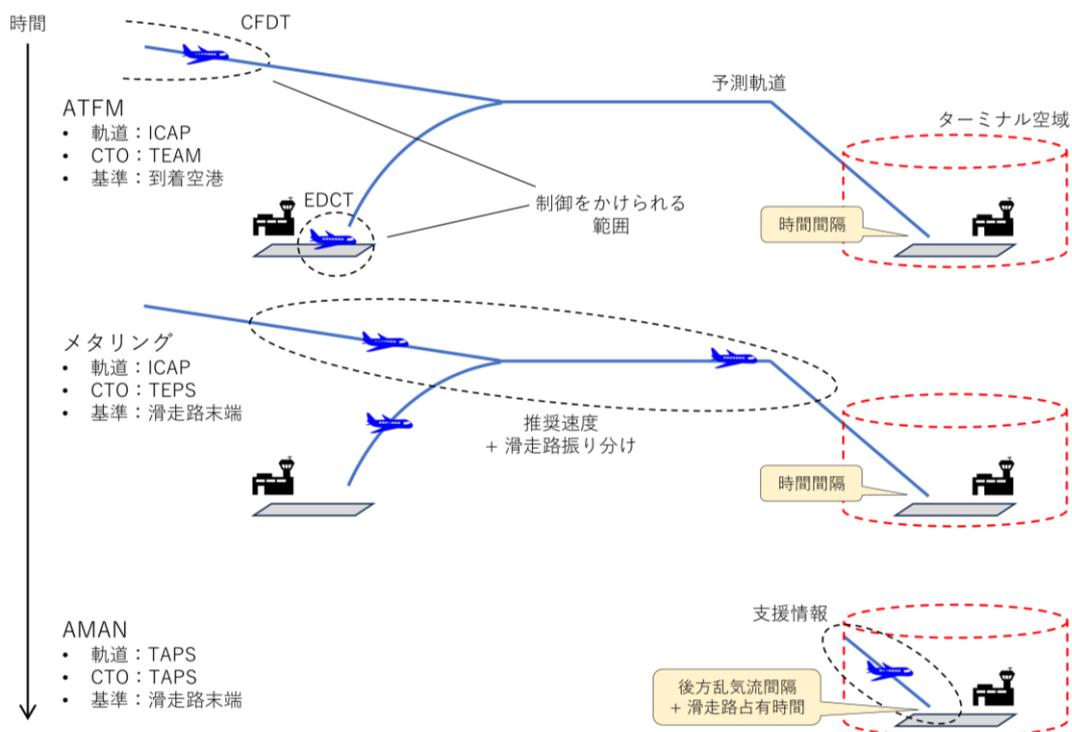


図 5.5 ストラテジック軌道予測-TEPS 型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 4) における各システムの働き

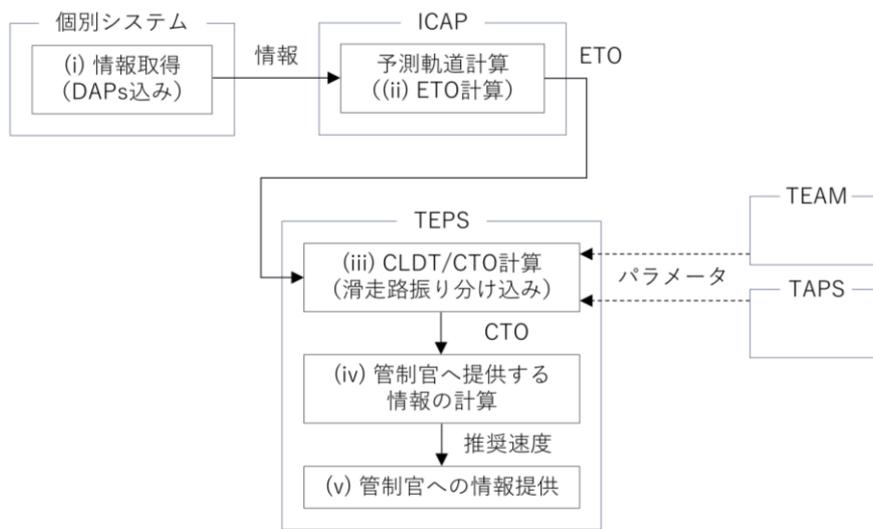


図 5.6 ストラテジック軌道予測-TEPS 型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 4) における各機能のフォームへの割り当て

5.4 その他のアーキテクチャ

紙面の都合上、本文書では他のアーキテクチャについては詳細な記述はしないが、今後の議論のために各アーキテクチャを表す図のみを示しておく。

5.4.1 ATFM-メタリング-AMAN ルーズカップリング型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 2)

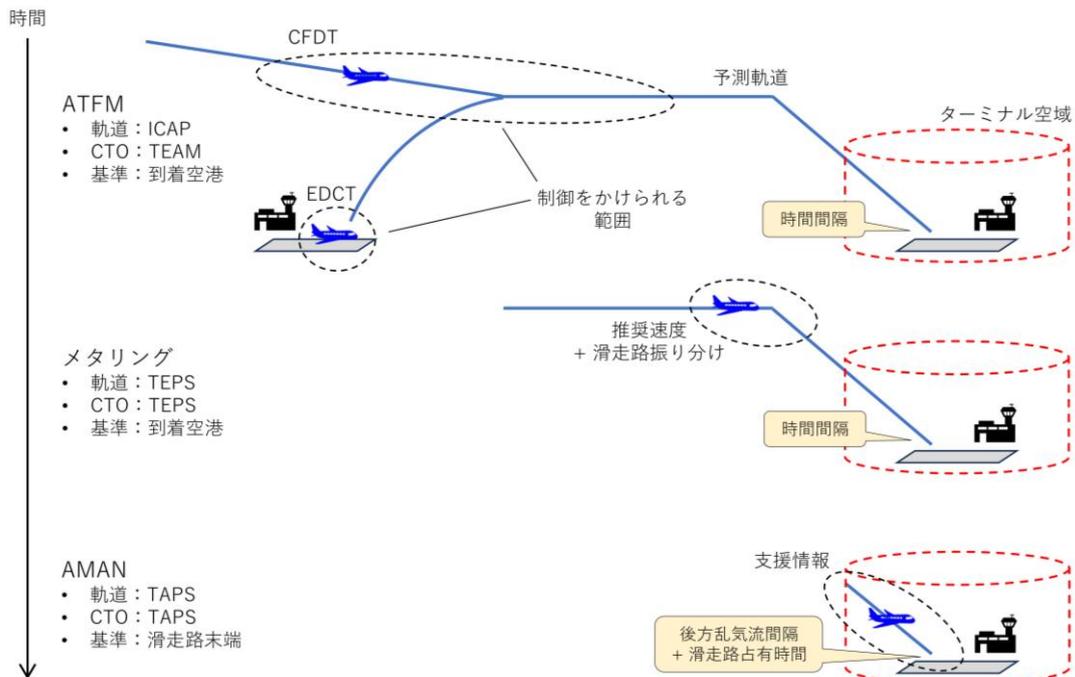


図 5.7 ATFM-メタリング-AMAN ルーズカップリング型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 2) における各システムの働き

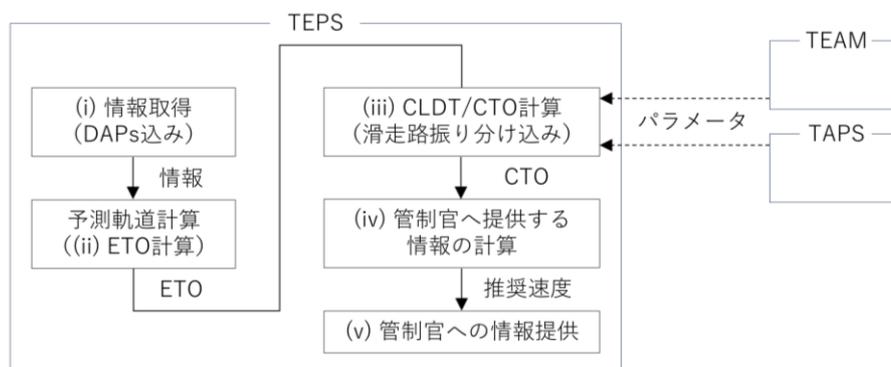


図 5.8 ATFM-メタリング-AMAN ルーズカップリング型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 2) における各機能のフォームへの割り当て

5.4.2 メタリング-AMAN タイトカップリング型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 3)

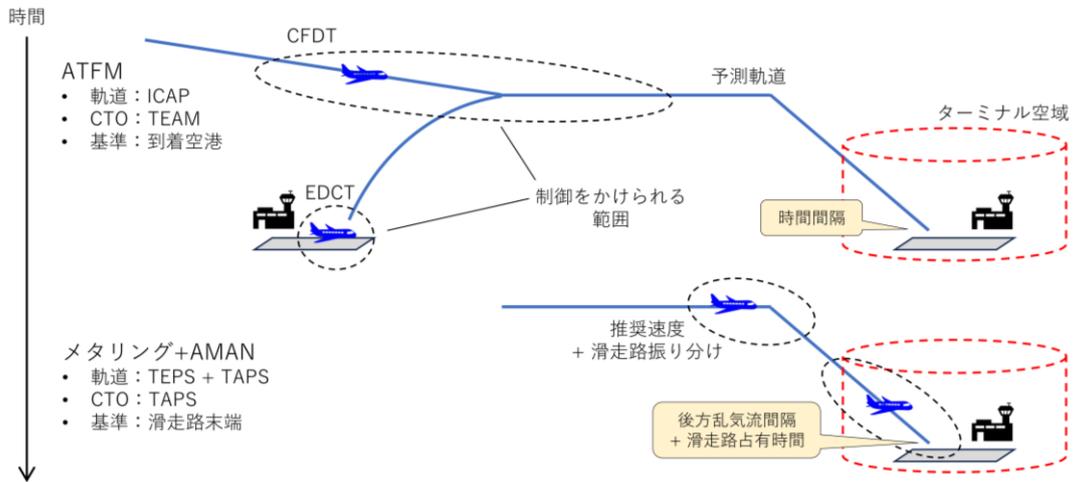


図 5.9 メタリング-AMAN タイトカップリング型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 3) における各システムの働き

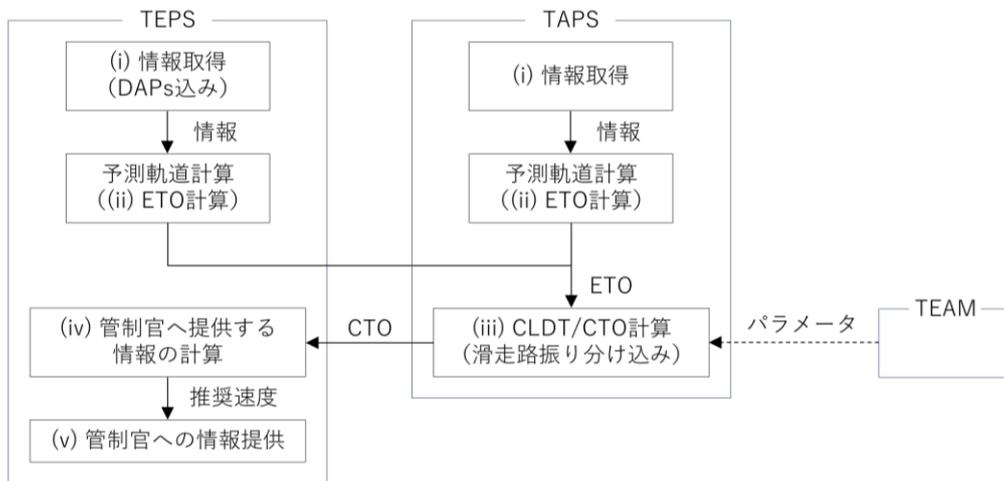


図 5.10 メタリング-AMAN タイトカップリング型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 3) における各機能のフォームへの割り当て

5.4.3 ストラテジック軌道予測-TAPS 型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 5)

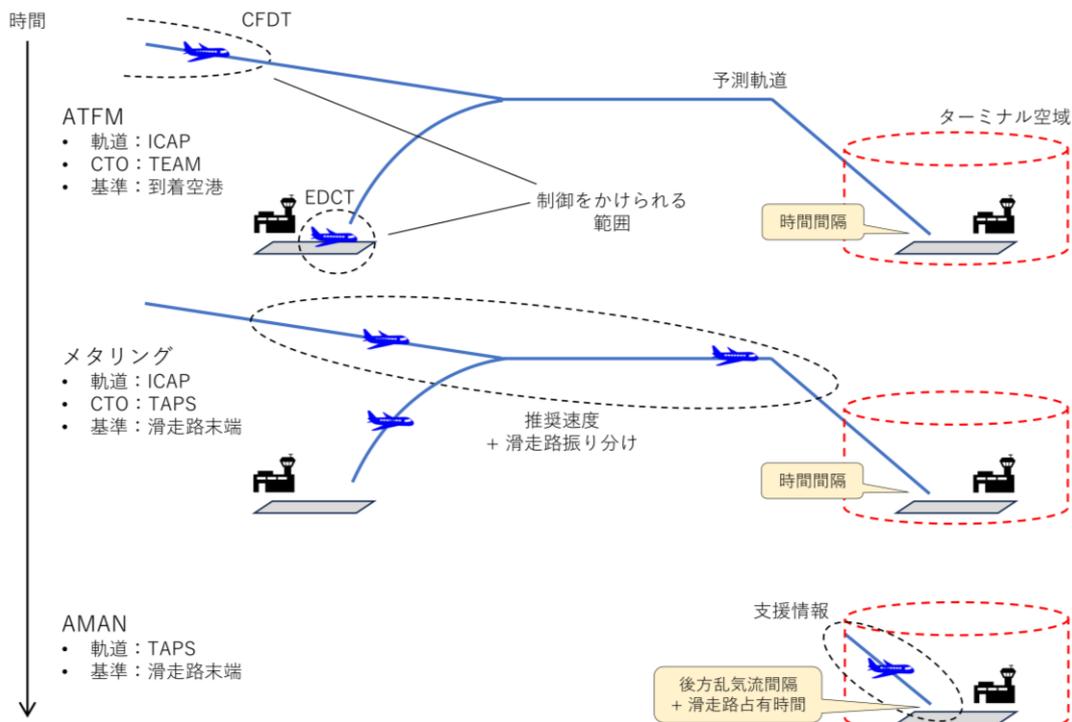


図 5.11 ストラテジック軌道予測-TAPS 型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 5) における各システムの働き

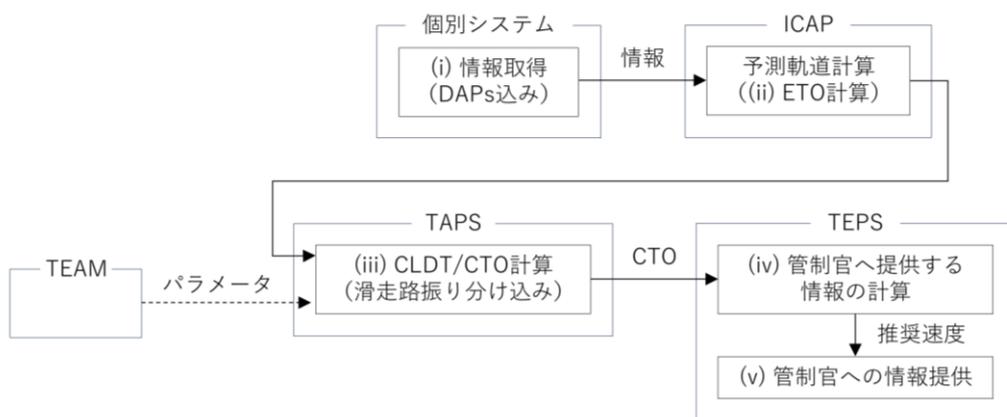


図 5.12 ストラテジック軌道予測-TAPS 型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 5) における各機能のフォームへの割り当て

5.4.4 ATFM-メタリングタイトカップリング型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 6)

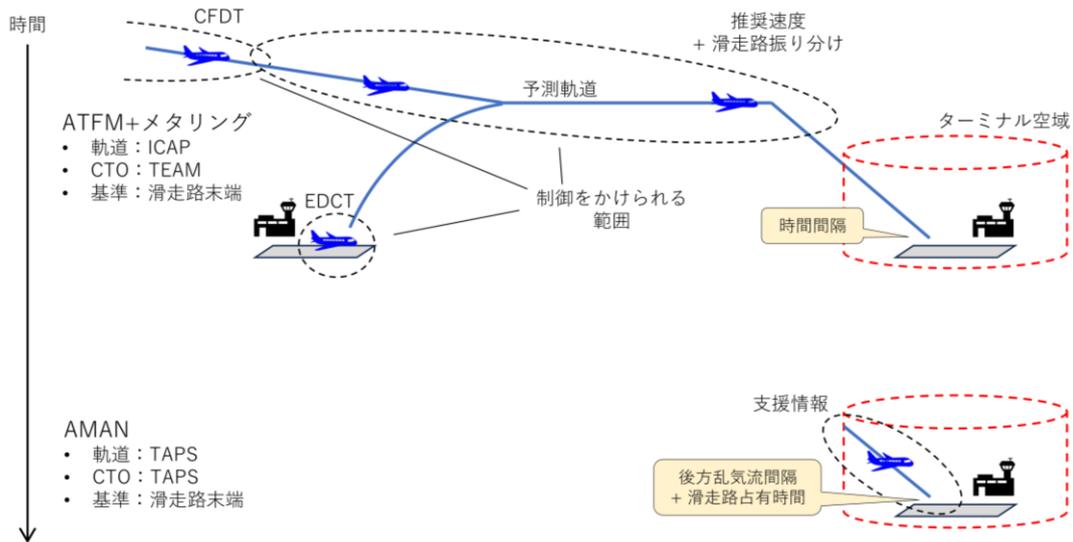


図 5.13 ATFM-メタリングタイトカップリング型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 6) における各システムの働き

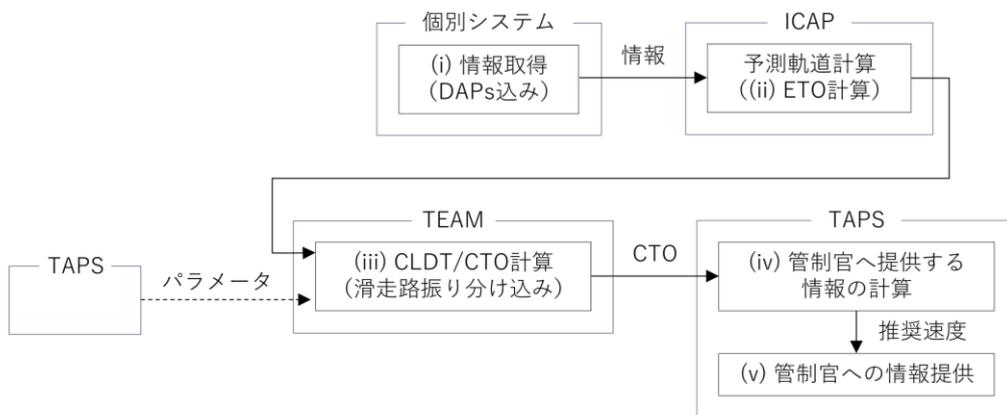


図 5.14 ATFM-メタリングタイトカップリング型アーキテクチャ
(アーキテクチャ ID: 6) における各機能のフォームへの割り当て

5.4.5 ICAP 主導型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 7)

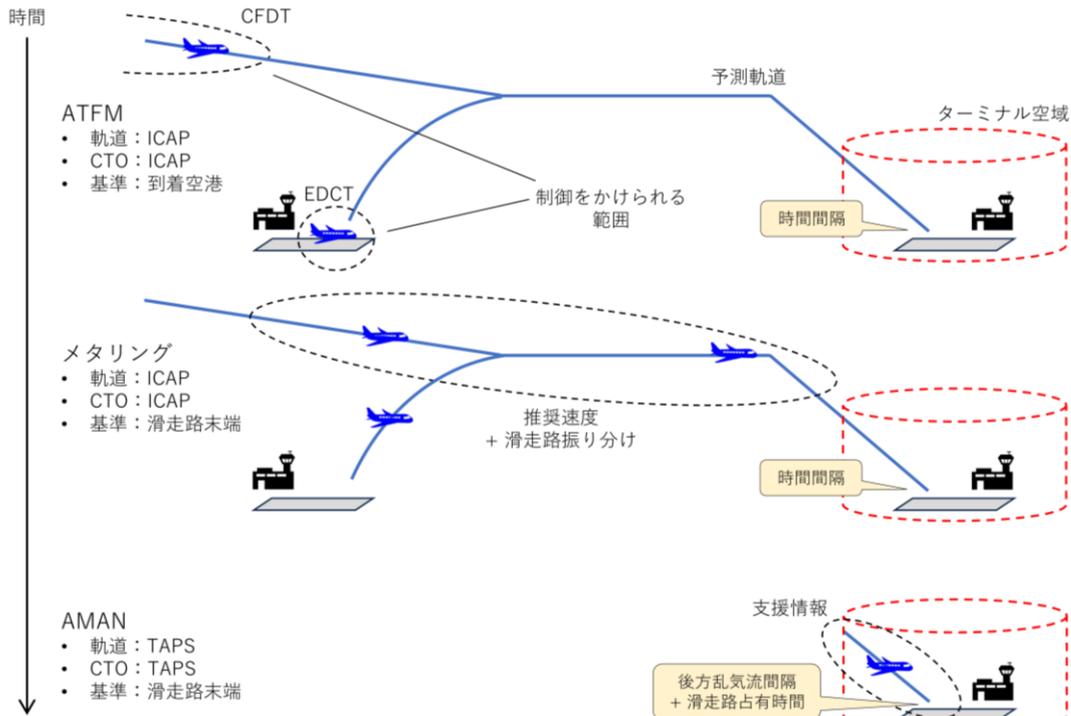


図 5.15 ICAP 主導型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 7) における各システムの働き²⁰

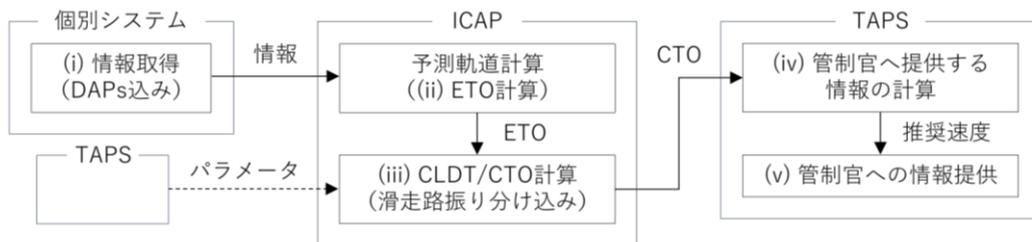


図 5.16 ICAP 主導型アーキテクチャ (アーキテクチャ ID: 7) における各機能のフォームへの割り当て

²⁰ ICAP 主導型では ATFM の CTO 計算も ICAP が担うものとしている。

5.5 第5章のまとめ

- 従来運用踏襲型アーキテクチャとストラテジック軌道予測-TEPS 型アーキテクチャについて、詳細なイメージを共有するため、簡単なシナリオに沿ってその特徴を説明した。また各アーキテクチャが、どの程度ニーズを満たすことができそうかについても議論した。
- その他のアーキテクチャについては、各サブシステムの働きと、各機能のフォームへの割り当てのみを示した。

6. 本文書のまとめ

本文書では、将来の時間管理のあるべき姿を模索するために、システムズアプローチを用いて時間管理のシステムアーキテクチャを検討した。大規模・複雑システムの検討に適しているシステムズアプローチを航空交通管制システムの検討に適用する方法論を示すとともに、実際に妥当性の高いアーキテクチャを網羅的に提示した。これらのアーキテクチャを利用することで、時間管理のステークホルダーが適切な共通認識を持ちつつ、ステークホルダーのニーズに合致したアーキテクチャを選択できるようになることを期待する。

紙面の都合上、時間管理や航空交通管制システム、システムズアプローチによる検討の詳細については、ある程度の簡略化をしつつ議論を展開した。しかしながら、本文章を通じて有望なアーキテクチャが絞り込まれた際には、簡略化した部分を含めたより詳細な議論が有効であると考えられる。

特に今回は SWIM や FF-ICE には言及しなかったが、図 2.1 が示すように、SWIM や FF-ICE は時間管理と共に TBO を構成する一要素であり、時間管理にとって重要な軌道に関わるものである。SWIM や FF-ICE 自体が、まだ具体的な実装が明確になっていない部分を含むが、サブシステム間の整合性がとれた TBO を構築するために、SWIM, FF-ICE とも連携した時間管理の議論が、今後必要であると考えられる。

補遺 1. 参考文献

- [1] 将来の航空交通システムに関する研究会, “将来の航空交通システムに関する長期ビジョン～戦略的な航空交通システムへの変革～,” 2010.
- [2] E. Crawley, B. Cameron, and D. Selva, “システムアーキテクチャ,” (稗方和夫訳), 丸善出版, 2020.
- [3] Federal Aviation Administration, “Trajectory Based Operations (TBO),” https://www.faa.gov/air_traffic/technology/tbo (accessed on May 2025)
- [4] Federal Aviation Administration, “Traffic Management Overview,” https://www.faa.gov/nextgen/programs/weather/tfm_support/overview (accessed on May 2024)
- [5] 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.
- [6] D. Toratani, Y. Nakamura, and M. Oka, “Needs Analysis for Time-Based Management in Next Generation Air Traffic Management System,” *Advances in Transdisciplinary Engineering*, vol. 60, pp. 937–946, 2024.
- [7] D. Toratani, T. Yoshihara, and A. Senoguchi, “Support Algorithm for Air Traffic Controllers’ Arrival Spacing: Improvement of Trajectory Estimation Using Gaussian Process Regression,” *Control Engineering Practice*, 128, 105343–105343, 2022.
- [8] 森亮太, “機上 FMS の算出する予測時刻の誤差について,” 第 6 回航空交通流時間管理検討 WG, 2019.
- [9] R. Alligier, D. Gianazza, and N. Durand, “Machine Learning and Mass Estimation Methods for Ground-Based Aircraft Climb Prediction,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, issue 6, pp. 3138–3149, 2015.
- [10] G. Enea, M. McPartland, and T. Bonin, “Improving Supporting Data for Trajectory Based Operations Automation,” *AIAA Aviation Forum*, 2021.
- [11] J.-P. Clarke, J. Brooks, G. Nagle, A. Scacchioli, W. White, and S. R. Liu, “Optimized Profile Descent Arrivals at Los Angeles International Airport,” *Journal of Aircraft*, vol. 50, no. 2, pp. 360–369, 2013.
- [12] D. Toratani, N. K. Wickramasinghe, J. Westphal, and T. Feuerle, “Feasibility Study on Applying Continuous Descent Operations in Congested Airspace with Speed Control Functionality: Fixed Flight-Path Angle Descent,” *Aerospace Science and Technology*, vol. 107, 106236, 2020.
- [13] Y. Miyazawa, D. Toratani, Y. Nakamura, and R. Mori, “Performance Analysis of Runway Allocation for Arrival Flow Using a Queuing Model,” *Transactions of JSASS*, vol. 67, no. 2, pp. 67–77, 2024.
- [14] Y. Xu, R. Dalmau, and X. Prats, “Maximizing Airborne Delay at No Extra Fuel Cost by Means of Linear Holding,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol.

81, pp. 137–152, 2017.

- [15] R. Mori, “Development of a Pushback Time Assignment Algorithm Considering Uncertainty,” *Journal of Air Transportation*, vol. 25, no. 2, pp. 51–60, 2017.
- [16] R. Mori, “Prediction of Off-Block Time Distribution for Departure Metering,” vol. 32, no. 3, pp. 122–129, 2024.
- [17] R. Sáez, D. Toratani, Y. Nakamura, and M. Oka, “Tactical Departure Scheduling for Pop-Up Flights in Kansai International Airport,” APISAT, 2024.

補遺 2. 略語・用語

ACA	Approach Control Area
ALDT	Actual landing time
AMAN	Arrival manager
ANSP	Air Navigation Service Provider
AOBT	Actual off-block time
ATFM	Air Traffic Flow Management (航空交通流管理)
ATO	Actual time over
ATOT	Actual take off time
CARATS	Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems (将来の航空交通システムに関する長期ビジョン)
CAS	Calibrated airspeed
CFDT	Calculated fix departure time
CLDT	Calculated landing time
CTO	Calculated time over
CTOT	Calculated take off time
DAPs	Downlink aircraft parameters
DMAN	Departure manager
EDCT	Estimated departure clearance time
ELDT	Estimated landing time
EOBT	Estimated off-block time
ETO	Estimated time over
ETOT	Estimated take off time
FAA	Federal Aviation Administration
FF-ICE	Flight and Flow Information for a Collaborative Environment
HITL	Human-in-the-loop
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICAP	Integrated Control Advice Processing System
OPM	Object-process Methodology
PBN	Performance-based Navigation
PMS	Point Merge System
SMAN	Surface manager
SPS	System Problem Statement
STAR	Standard Instrument Arrival (標準計器到着方式)

SVN	Stakeholder Value Network
SWIM	System Wide Information Management
SysML	Systems Modeling Language
TAPS	Trajectorized Airport Traffic Data Processing System
TAS	True airspeed
TBO	Trajectory-based Operations
TEAM	Trajectorized Enhanced Aviation Management System
TEPS	Trajectorized Enroute Traffic Data Processing System
TOBT	Target off-block time
TSAT	Target start-up approval time