

令和元年度 宮城大学大学院

博士論文

移動体支援のための空間情報基盤に関する研究

事業構想学研究科博士後期課程

地域・社会システム領域

21755003

富井 建

博士論文要旨

|  |                       |      |       |
|--|-----------------------|------|-------|
| 研究科  | 事業構想学研究科              |      |       |
| 専門領域   | 地域・社会システム領域           | 指導教員 | 蒔苗 耕司 |
| 学籍番号   | 21755003              | 氏名   | 富井 建  |
| 研究題目   | 移動体支援のための空間情報基盤に関する研究 |      |       |
| <p>近年、CPS (Cyber-Physical System) と呼ばれるサイバー空間とフィジカル空間の融合によるスマート社会の実現に向けた取り組みが国際的に進んでいる。スマート社会における高度な交通システムは、移動体や交通サービス、インフラ、そしてそれぞれに関係するステークホルダーが密接に関係しあう複雑なシステムであり、その実現には、構成要素やプロセスを包含するシステムアーキテクチャの構築が必要である。本論文は、移動体支援のための CPS を実現するために、システム基盤である空間情報基盤のアーキテクチャを構築し、有効性を検証することを目的とする。</p> <p>本論文ではまず、空間情報基盤に関する現在の取り組みについて整理を行い、要素の複雑な関係性と、横断的な統合ができていない課題があることを示した。これらの課題に対し、空間情報基盤の本来あるべき姿を明らかにするため、移動体と移動空間の観点から移動体支援を行う 2 つのシステムを構築し、それらを参考事例として、空間情報基盤を構成する要素をフィジカル空間とサイバー空間の分類で整理し、空間情報基盤システムの全体像と要素間の関係を示した。</p> <p>次にシステムを構成する要素と実現化のプロセス、責任主体を明確化するために、木構造のシステム構成と V モデルのライフサイクルを同一の階層構造で組み合わせたシステムアーキテクチャモデルを提案し、空間情報基盤システムに適用した。システム構成は、空間情報基盤の中で移動に対するフィードバックループを行う CPS から、移動体と交通、共通資源の要素に分類し、モデル化を行った。また、一般的な社会インフラにおける建設プロジェクトを対象として、ライフサイクルを V モデルで表し、階層構造を社会、事業、構造物の 3 階層で定義した。そして、定義したシステム構成とライフサイクルに基づくシステムアーキテクチャを道路交通の建設プロジェクトに当てはめ、適用の妥当性を示すとともに、階層ごとの責任主体を明確化できることを示した。システムアーキテクチャモデルの応用として、各プロセスで適用可能な情報技術とその範囲を明確化することが可能であることを示すとともに、階層の追加や分解によりモデルの拡張や詳細化が可能であることを示した。</p> <p>以上の通り、本論文では、移動体支援のための CPS を実現するために、システムの基盤である空間情報基盤のシステム構成とライフサイクルを検討し、要素とプロセスの責任主体を明確化することで、空間情報基盤のアーキテクチャモデルを構築した。さらに、提案モデルを道路交通の建設プロジェクトに適用することで、実際のシステムへ適用可能であることを示した。</p> |                       |      |       |

# 目次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 序論.....                  | 1  |
| 1.1 背景.....                  | 1  |
| 1.2 目的.....                  | 2  |
| 1.3 本論文の構成.....              | 3  |
| 第2章 空間情報基盤の現状と課題.....        | 5  |
| 2.1 本章の内容.....               | 5  |
| 2.2 移動体に関する取り組み.....         | 5  |
| 2.3 移動空間に関する取り組み.....        | 13 |
| 2.4 現状の課題.....               | 17 |
| 第3章 移動体支援のための空間情報基盤のあり方..... | 18 |
| 3.1 本章の内容.....               | 18 |
| 3.2 移動体と空間情報基盤.....          | 18 |
| 3.3 移動空間と空間情報基盤.....         | 25 |
| 3.4 空間情報基盤を構成するシステム.....     | 43 |
| 第4章 空間情報基盤のシステムアーキテクチャ.....  | 46 |
| 4.1 本章の内容.....               | 46 |
| 4.2 標準的なシステムアーキテクチャモデル.....  | 46 |
| 4.3 提案するシステムアーキテクチャモデル.....  | 54 |
| 4.4 他のモデルとの比較.....           | 57 |
| 第5章 空間情報基盤の構築.....           | 62 |
| 5.1 本章の内容.....               | 62 |
| 5.2 CPS としての空間情報基盤.....      | 62 |
| 5.3 システムアーキテクチャモデルの検証.....   | 68 |
| 5.4 まとめ.....                 | 74 |
| 第6章 結論.....                  | 75 |
| 6.1 各章のまとめ.....              | 75 |
| 6.2 今後の展望.....               | 76 |
| 謝辞.....                      | 78 |
| 文献.....                      | 79 |

## 図表目次

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 図 1-1  | 交通関連要素の関係                                   | 2  |
| 図 1-2  | 本論文の構成                                      | 4  |
| 表 2-1  | 運転自動化の段階                                    | 6  |
| 表 2-2  | 『官民 ITS 構想・ロードマップ 2019』における自動運転システムの市場化期待時期 | 7  |
| 表 2-4  | 全国相互利用を行っている IC カード乗車券                      | 11 |
| 表 2-5  | IC カード乗車券で支払可能な交通事業者の例                      | 12 |
| 図 2-1  | データ取引市場のイメージ                                | 14 |
| 表 2-6  | ダイナミックマップの構成                                | 14 |
| 図 2-2  | エッジコンピューティングのイメージ                           | 16 |
| 図 3-1  | プローブ情報システムの構成図                              | 20 |
| 表 3-1  | 利用するセンサとプローブデータ                             | 21 |
| 図 3-2  | クライアント・アプリケーションにおける縦断線形の描画                  | 21 |
| 表 3-2  | 制御情報生成に用いたパラメータ                             | 24 |
| 図 3-3  | 可視グラフの例                                     | 27 |
| 図 3-4  | 3次元空間での可視グラフによる最短経路                         | 27 |
| 図 3-5  | 正確セル分解の例                                    | 28 |
| 図 3-6  | 近似セル分解の例                                    | 28 |
| 図 3-7  | グリッドグラフの例                                   | 30 |
| 図 3-8  | 標高値を設定したグリッドグラフ                             | 31 |
| 図 3-9  | 障害物を配置したグリッドグラフの例                           | 32 |
| 図 3-10 | グリッドグラフの最短経路 (a) (b) と可視グラフの最短経路(x)の比較      | 33 |
| 図 3-11 | 経路の平滑化                                      | 34 |
| 図 3-12 | グリッドグラフと可視グラフの距離の差異                         | 35 |
| 図 3-13 | 検証のための領域設定                                  | 37 |
| 表 3-3  | 各領域における移動コスト                                | 37 |
| 図 3-14 | ハイブリッドモデルにおける経路探索                           | 38 |
| 図 3-15 | 各ケースで算出された経路                                | 39 |
| 表 3-4  | 各ケースの最小コスト及び最小コスト経路を他ケースでたどった場合のコストの比較      | 40 |
| 図 3-16 | 単一モデルとハイブリッドモデルの導出経路の比較                     | 41 |
| 表 3-5  | 単一モデルとハイブリッドモデルとのコストの比較                     | 41 |
| 図 3-17 | 空間情報基盤を構成するシステム要素                           | 44 |
| 図 4-1  | 交通システムのシステム構成例                              | 46 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 図 4-2  | システム要素の階層構造.....                             | 47 |
| 図 4-3  | ウォーターフォールモデルの例.....                          | 48 |
| 図 4-4  | 段階的モデルの例.....                                | 49 |
| 図 4-5  | 進化的モデルの例.....                                | 50 |
| 図 4-6  | ライフサイクルにおける実現・分解と検証・結合の段階.....               | 51 |
| 図 4-7  | Vモデルの例.....                                  | 52 |
| 図 4-8  | プロセスの階層構造と Plan-Do-Check 関係及びプロセスの実施主体者..... | 53 |
| 図 4-9  | 提案するシステムアーキテクチャモデル.....                      | 54 |
| 図 4-10 | システムアーキテクチャモデルの分解.....                       | 55 |
| 図 4-11 | プロセスの実行フロー.....                              | 56 |
| 図 4-12 | 立体モデル.....                                   | 57 |
| 図 4-13 | 二元 V モデル.....                                | 58 |
| 図 4-14 | 線形モデル.....                                   | 59 |
| 図 4-15 | 円形モデル.....                                   | 60 |
| 図 5-1  | 複数の CPS から構成される CPS.....                     | 62 |
| 図 5-2  | 移動体のフィードバックループ.....                          | 63 |
| 図 5-3  | 外部情報を利用した移動体のフィードバックループ.....                 | 64 |
| 図 5-4  | インフラ情報を用いたフィードバックループ.....                    | 65 |
| 図 5-5  | インフラによる移動体の制御を行うフィードバックループ.....              | 66 |
| 図 5-6  | 空間情報基盤を構成する 3つの観点.....                       | 66 |
| 図 5-7  | 空間情報基盤のシステム構成.....                           | 67 |
| 図 5-8  | 社会インフラの生産プロセス.....                           | 68 |
| 図 5-9  | Vモデルによる建設プロジェクトのライフサイクル.....                 | 69 |
| 図 5-10 | 道路交通における建設プロジェクトのシステムアーキテクチャモデル.....         | 70 |
| 図 5-11 | プロセスを支援する情報技術.....                           | 72 |
| 図 5-12 | システムアーキテクチャモデルの拡張例.....                      | 73 |

## 第1章 序論

### 1.1 背景

近年、高度なデジタル化、機械化による製造業の革新を図る動きが国際的にみられる。例えば、アメリカにおける先進製造パートナーシップ（Advanced Manufacturing Partnership; AMP）、ドイツにおけるインダストリー4.0、イギリスにおけるハイ・バリュー・マニファクチャリング、中国における中国製造 2025（Made in China 2025）といった取り組みである。

インダストリー4.0は、CPS（Cyber-Physical Systems）と呼ばれるデジタル空間（サイバー空間）と実世界（フィジカル空間）を統合する考え方を取り入れている [1]。CPSとは、フィジカル空間とサイバー空間とのフィードバックループを持つシステムであり、実世界で生じた物理的現象をコンピュータに送信し、そのデータを処理した結果をまた物体へと返し、物理的現象を引き起こさせる仕組みを指す [2]。CPSは、自動車や空調設備における制御システムのような限定された環境における組み込みシステムを基礎としているが、あらゆる「もの」がインターネットにつながる IoT（Internet of Things）の考え方と組み合わせることで、多種多様な物理的要素とコンピュータがインターネットを通して統合されるシステムへと拡大している。人や「もの」と接続されたコンピュータが、フィジカル空間のデータを自動的に処理しフィードバックすることで、よりリアルタイムな制御が可能となり、生産性や資源利用効率の向上や、適切な意思決定への貢献が期待されている。日本では、2016年に閣議決定された第5期科学技術基本計画により、CPSを取り入れた「超スマート社会」の実現を掲げ、Society 5.0として実現に向けた取り組みを推進している [3]。

建設業では、BIM/CIM（Building and Construction Information Modeling/Management）と呼ばれるデジタルと実世界を統合管理する取り組みが進められている。BIM/CIMにより、建設における一連のプロセスの中で発生しうるコミュニケーションロスやミス・手戻りといったムダを削減し、生産性を向上することができる [4]。さらには、BIM/CIMを基盤に、IoTやCPSの考え方を取り入れたスマート建設生産システムの取り組みも進められている [5]。

ここで、スマート社会における高度な交通システムを考えた場合、移動体は他の様々な移動体やインフラと通信を行い、それらの情報を総合的に分析することで生成した制御情報を、移動体自身へフィードバックするCPSであると考えることができる。

例えば、人の移動は、徒歩や自転車、自動車、鉄道、フェリー、旅客機など、様々な交通手段を組み合わせたものであり、その組合せや出発地、目的地は人ごとに異なる。また、交通事業者は、自身が管理する交通サービスを効率的に運用するために、経路や時間の最適化を行う必要がある。交通手段の利用者と交通事業者双方の要求に応じるには、複数の利用者や様々な交通手段を含めた総合的な分析を行う必要がある。さらに、道路交通における車両の自動化や交通制御の効率化を考えた場合、車両と路側機との通信による信号機の制御や、車両への信号情報配信など、移動体とインフラとの協調が必要になる。

移動体や交通サービス、インフラなど、多様な要素が統合されることにより構成されるスマート社会は、物理的要素と情報処理機能が密接に関係しあう複雑なシステムとなる。このようなシステムを実現するには、システムを構成する要素と、要素を実現化するためのプロセス、そしてプロセスを実行する責任主体を明らかにする必要がある。

## 1.2 目的

図 1-1 は交通に関する要素をフィジカル空間とサイバー空間の面から分類し、各要素とステークホルダーの関係性を表した例である。フィジカル空間の要素には、道路や信号機といったインフラに関係するものから、自動車や歩行者などの移動体、各公共交通が存在する。サイバー空間の要素には、物理空間の情報を表すインフラ情報や交通情報、地形情報から、都市計画や移動計画といった各情報を総合的に取り扱う要素が存在する。関係するステークホルダーは、道路管理者や交通管理者、行政機関から、バスや鉄道などの交通事業者、そして交通手段の利用者まで広く存在する。これらの要素やステークホルダーは複雑に関連しあう。

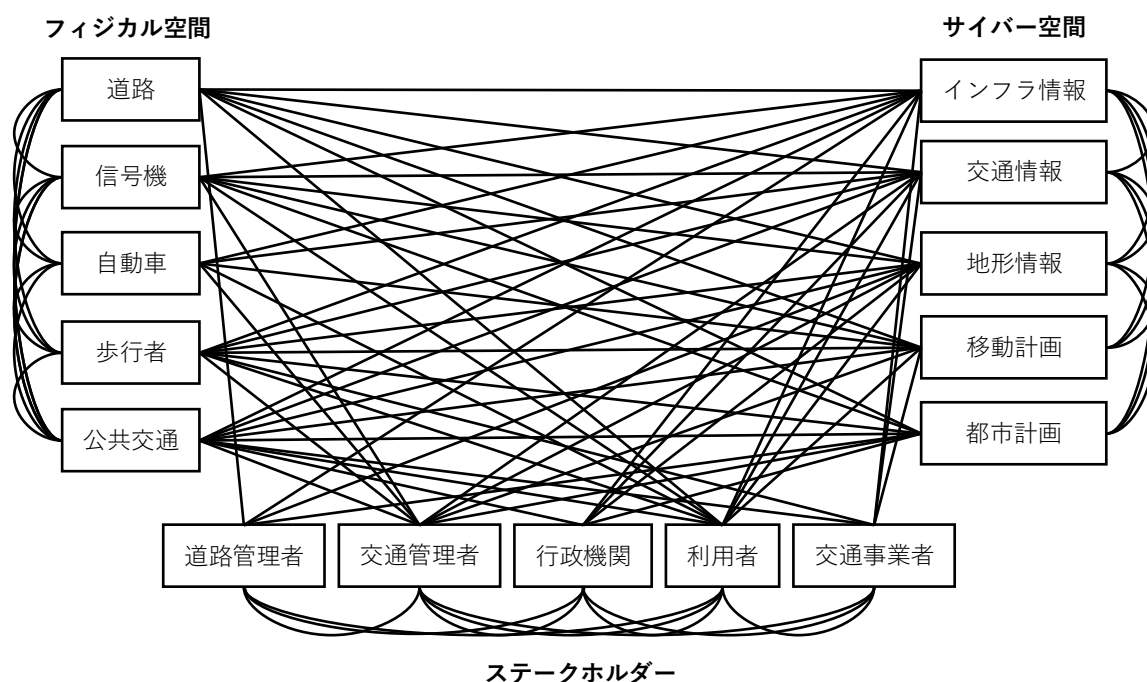


図 1-1 交通関連要素の関係

各要素を効率的に活用するには、全体を1つのシステムとして考える必要があるが、複雑な関係性の下に統合することは困難であるため、すべての要素を包含し、整理できる基盤的なアーキテクチャの構築が必要である。

本論文は、移動体や社会インフラ、交通などの移動に関する要素から構成される CPS を

実現するために、移動体支援のためのシステム基盤（空間情報基盤）のあり方と、構成要素やプロセスを包含できるシステムアーキテクチャモデルを検討する。そして、空間情報基盤のシステムアーキテクチャを構築し、有効性を検証することを目的とする。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1-2 に示す。第 1 章では本研究の背景と目的について述べる。第 2 章では、本研究が対象とする空間情報基盤に関する現在の取り組みを挙げ、その課題について示す。第 3 章では本研究で実現化を目指す移動体支援のための空間情報基盤のあるべき姿を検討する。第 4 章では、複雑な要素間の関係を持つ空間情報基盤を統合して実現化するためのシステムアーキテクチャモデルを提案する。第 5 章では、第 3 章で示した空間情報基盤のあるべき姿に対し、第 4 章で検討したアーキテクチャモデルを社会インフラに適用し、空間情報基盤のシステム構築を行う。それにより、システムアーキテクチャモデルの妥当性や有効性を検証する。第 6 章では、本研究で行った内容についてまとめ、今後の展望について述べる。



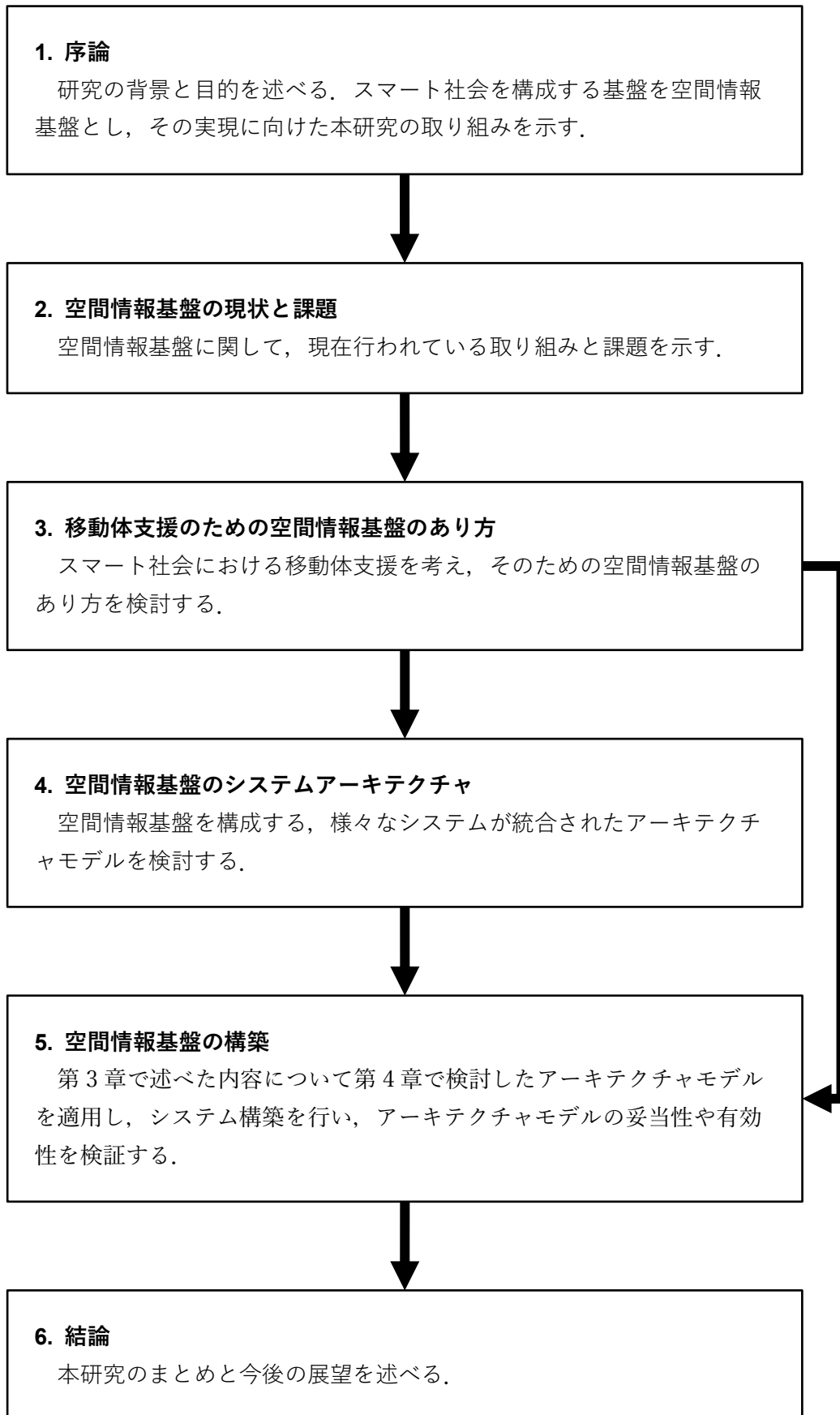


図 1-2 本論文の構成

## 第2章 空間情報基盤の現状と課題

### 2.1 本章の内容

空間情報基盤を構成する大きな要素として、移動の活動主体である移動体と、移動が行われる移動空間の2つが考えられる。本章では、移動体と移動空間に関する観点から、空間情報基盤の現在の取り組みについて述べる。

移動体については、近年、実用化が進められている自動運転に関する取り組みと、様々な移動手段を統合した新しい移動サービスについて述べる。

移動空間については、空間情報に関するデータ流通についての取り組みと、通信や情報処理、交通制御といったインフラに関する取り組みについて述べる。

そして、これらの取り組みから空間情報基盤の課題について述べる。

### 2.2 移動体に関する取り組み

#### 2.2.1 自動運転に関する取り組み

移動体に関する取り組みの中で、近年、活発に行われているものが自動運転の実用化である。内閣府に設置された総合科学技術・イノベーション会議は、戦略的イノベーション創造プログラム（Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program; SIP）により、2014年から2018年まで「自動走行システム」に関する研究開発を行った [6]。SIPによる自動運転に関する取り組みは、SIP-adus（SIP- Automated Driving for Universal Services）として進められており [7]、2018年以降もSIP第2期「自動運転（システムとサービスの拡張）」として継続している。

内閣府に設置された高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部（IT総合戦略本部）は、交通に関する取り組みと方針について「官民ITS構想・ロードマップ」としてまとめ、定期的に発行・改定を続けている。「官民ITS構想・ロードマップ2019」では、2020年までに世界一安全な道路交通社会を構築するとともに、2030年までに世界一安全で円滑な道路交通社会を構築する方向性を示している [8]。

モビリティ産業に関する標準化を行っている団体である SAE International は、運転の自動化の段階を、レベル0から5までの6段階に分類している [9]. 表 2-1 はその日本語訳から抜粋したものである [10].

表 2-1 運転自動化の段階

| レベル | 名称       | 動的運転タスク        |               | 動的運転タスクが困難な場合への対応          | 限定領域 |
|-----|----------|----------------|---------------|----------------------------|------|
|     |          | 持続的な横・縦の車両運動制御 | 対象物・事象の検知及び応答 |                            |      |
| 0   | 運転自動化なし  | 運転者            | 運転者           | 運転者                        | 適用外  |
| 1   | 運転支援     | 運転者とシステム       | 運転者           | 運転者                        | 限定的  |
| 2   | 部分運転自動化  | システム           | 運転者           | 運転者                        | 限定的  |
| 3   | 条件付運転自動化 | システム           | システム          | 作動継続が困難な場合への応答準備ができていない利用者 | 限定的  |
| 4   | 高度運転自動化  | システム           | システム          | システム                       | 限定的  |
| 5   | 完全運転自動化  | システム           | システム          | システム                       | 限定なし |

※自動車技術会『自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義』より抜粋 [10].

レベル0は、すべての運転制御を運転者により行う。レベル1は、道路上を走行するための基本的な運転制御を運転者とシステムの自動化により行う。レベル2は、基本的な運転制御を自動で行うが、運転者の常時監督が必要であり、場合によって運転者が介入する。レベル3は、すべての運転タスクが自動化されるが、システム故障などの場合に利用者による介入を必要とする。レベル4は、すべてをシステムにより自動化するが、自動運転専用道路のみに限定されるなど領域が限定される。レベル5は、領域の限定なしにすべての制御が自動化される。

IT総合戦略本部は、「官民 ITS 構想・ロードマップ 2019」の中で、SAE International の分類を用い、自家用車、物流サービス、移動サービスの自動化レベルと市場化期待時期を示している（表 2-2）。自家用車では、2020 年までに一般道での部分運転自動化（レベル 2）及び高速道路での条件付運転自動化（レベル 3）を、そして 2025 年を目標に高速道路での完全自動運転を目指している。物流サービスでは、2021 年までに高速道路における後続車有人隊列走行を、そして 2022 年には無人隊列走行（レベル 2 以上）を目指している。移動サービスでは 2020 年までにレベル 4 の無人自動運転サービスを、2022 年までに高速道路でのレベル 2 以上の自動運転バスの実現を目指している。

表 2-2 『官民 ITS 構想・ロードマップ 2019』における自動運転システムの市場化期待時期

|        | レベル  | 実現が見込まれる技術           | 市場化等期待時期 |
|--------|------|----------------------|----------|
| 自家用    | 2    | 準自動パイロット             | 2020 年まで |
|        | 3    | 自動パイロット              | 2020 年目途 |
|        | 4    | 高速道路での完全自動運転         | 2025 年目途 |
| 物流サービス | 2 以上 | 高速道路でのトラックの後続車有人隊列走行 | 2021 年まで |
|        |      | 高速道路でのトラックの後続車無人隊列走行 | 2022 年まで |
|        | 4    | 高速道路でのトラックの完全自動運転    | 2025 年以降 |
| 移動サービス | 4    | 限定地域での無人自動運転移動サービス   | 2020 年まで |
|        | 2 以上 | 高速道路でのバスの自動運転        | 2022 年以降 |

すべての運転タスクが自動化されるレベル 3 以上の自動運転車は既に販売されており、フランスの NAVYA が販売する EV バスは [11]、福島第一原子力発電所など特定の施設内で運用されている [12]。他にも、フランスの EasyMile SAS からマイクロバスが販売されている [13]。

自動運転は、ヒューマンエラーを原因とする事故を削減するが、ソフトウェアの不具合による死亡事故の発生も報告されており [14,15]、安全性の面で課題がある。また、隊列走行は車車間協調により実現することが考えられるが、外部との通信による制御が可能である場合、悪意のある攻撃を受けないよう情報セキュリティの観点からも安全確保が必要である [16]。

制度の面では、IT 総合戦略本部による「自動運転に係る制度整備大綱」や、国土交通省自動車局による「自動運転車の安全技術ガイドライン」が策定されており [17,18]、安全確保のための方向性を示している。国内法では、道路交通法及び道路運送車両法に自動運行装置

を定義し、その利用に関する義務等を規定する法律が2019年に成立している [8].

ただし、法制度と現実とのずれがすべて解消されているわけではなく、引き続き検討が必要な状態である。例えば、高速道路の本線車道へ安全に合流するには本線車道と同等の速度で入る必要があるが、道路交通法ではそれより低い速度が規定されており、法定速度で合流した場合、追突する危険性があることが指摘されている [19,20].

国際的な取り組みとして、国際連合欧州経済委員会における自動車基準調和世界フォーラム (WP29) は、自動運転に関する分科会を設け、車両に関する規則の整備を進めている [21]. また、道路交通に関する条約に、1949年にジュネーブで作成された道路交通に関する条約 (ジュネーブ条約) と、1968年にウィーンで作成された道路交通に関する条約 (ウィーン条約) があるが、これらも自動運転の実用化に向けた更新が必要である。ウィーン条約は改正案が既に発効されているが、日本が加入するジュネーブ条約は改正されていないため [20], 改正に向けた取り組み必要がある。

## 2.2.2 移動サービスに関する取り組み

### (1) 移動サービス事業

現在の日本は、地方部における自家用車以外の交通が不便である移動弱者の問題や、物流サービスにおける人手不足、都市部での深刻な渋滞といった、移動に関する様々な課題を抱えている。MaaS (Mobility as a Service) と呼ばれる新しい形態の移動サービスは、これら課題を解消する手段として期待されている。MaaS は、おおむね自家用車以外の様々な交通手段を組み合わせて、移動の全体最適化を図るものである。

Sochor らは [24], MaaS 事業について5階層の段階に分け、その統合レベルを分析している (表 2-3).

表 2-3 Sochor らによる MaaS の統合レベル

|   |           |
|---|-----------|
| 0 | 統合なし      |
| 1 | 情報の統合     |
| 2 | 予約と支払の統合  |
| 3 | サービス提供の統合 |
| 4 | 社会目標の統合   |

レベル 0 は、交通事業者が自身の管理する交通手段についてのみ提供する単独のサービス形態である。

レベル 1 は、複数の交通機関にわたる移動計画や料金を提示するサービスである。日本国内でも多く提供されている乗換え案内サービスもレベル 1 に含まれる。

レベル 2 は、単一の移動について、検索、予約、支払をワンストップで行えるサービスで

ある。ただし、サービス事業者の役割は利用者と交通事業者との仲介であり、契約や責任関係は利用者と交通事業者間で発生する。

レベル3は、複数の交通手段をパッケージングして提供するサービスである。レベル2と異なる点は、サービス事業者が、利用者と交通事業者双方に対し責任を負う。利用者は毎月定額か利用するごとにサービス事業者の定めた金額で支払を行い、交通事業者へはサービス事業者から支払われる。したがって、利用者は移動手段ごとの金額を意識することがない。

レベル4は、国や地域などの社会目標に基づく統合である。このレベルでは、政策等の社会的目標がサービスに反映され、インフラや公共空間、公共交通機関といった都市の機能と統合される。

フィンランドの MaaS Global Oy が提供している Whim は、公共交通やタクシー、レンタカー、シェアバイク、シェアカーなど、様々な交通手段を用いて目的地までの移動を提供するサービスである。利用者は、目的地までの移動方法をアプリケーション上で計画することでサービスを受けることができ、利用料は毎月定額か利用するごとに支払を行う [22]。また、スウェーデンの UbiGo Innovation AB も同様のマルチモーダルサービスを提供している [23]。

日本では、様々な交通手段をパッケージングして提供するサービスに対し、旅行業法が適用される可能性が指摘されている [25]。該当するサービス事業者は、旅行業務取扱管理者の選任や、営業保証金の供託、取引条件の説明等を行う義務があるため、移動サービスの事業化を推進していくには事業者に向けた法制度の周知や、あり方について検討が必要である。

### (2) データ基盤

社会的目標のための移動サービスを実現するには、国や地域が方向性を示す必要がある。

欧州連合は、2008年にアクションプランを作成し、「道路交通の分野における ITS の展開及び交通他モードとのインターフェースのための枠組みに関する指令 (Directive 2010/40/EU)」(ITS 指令)及び「ITS 指令を補完する委員会委任規則 (2015/962, 2017/1926)」を策定した [26,27,28,29,30]。これらの規則により、EU加盟国はナショナルアクセスポイント (NAP) を設置し、交通機関データ (travel データ) や交通データ (traffic データ) を一般公開しなければならなくなった。

ドイツは、この ITS 指令に対して ITS 法を制定し、連邦道路研究機構が運営する Mobility Data Marketplace (MDM) に traffic データの NAP を設置した [31]。travel データについても、MDM 若しくはオープンデータプラットフォームである mCLOUD による公開が検討されている [32]。また、電子ダイヤ情報の統合システムである DELFI を様々な交通手段に拡張し、システム連携を図ることが検討されている [26,33]。

イギリスは、公共交通の中で多く利用されているバス交通について、2017年にバスサービス法を制定し [34]。経路、停留所、時刻表、運賃などの情報を無料で公開することを義務

付けた。これらのデータは、バス事業者や地方自治体、などのパートナーシップにより設置された Traveline により提供されている [35]。

日本では、日本道路交通情報センター (Japan Road Traffic Information Center; JARTIC) により道路交通情報の一元的な収集・提供が行われており、車両向けには 1995 年に設立された道路交通情報通信システムセンター (VICS センター) が情報配信サービスを行っている。JARTIC は、1970 年に設立された道路及び道路交通に関する情報の収集及び提供を行う組織であり、交通管理者や道路管理者からの情報を集約し、オンライン若しくは記録メディアによりユーザやサービス事業者へ情報を提供している。VICS センターは、JARTIC の情報に加え、気象業務支援センター、河川情報センターからの情報をあわせたデータを、FM 多重放送や電波ビーコン、光ビーコンによって車載器へ配信するサービスを展開している [36]。

交通事業者に対する取り組みとして、国土交通省は、2017 年に静的なバス情報のデータ交換形式である「標準的なバス情報フォーマット (GTFS-JP)」について定め [37,38]、交通機関のデータ公開を推進している。GTFS-JP は、一般的な交通機関のデータフォーマットである GTFS (General Transit Feed Specification) との互換性を保ちながら、日本の状況を踏まえて拡張したものである [39,40]。2019 年の改訂では、静的な情報だけでなく動的な運行情報 (GTFS リアルタイム) についても規定し、データの整備方法や提供方法についてのガイドラインも作成した [41]。ガイドラインでは、各交通事業者のデータ公開と、乗換案内サービス事業者への提供方法について説明している。

データの提供先のひとつである公共交通オープンデータ協議会は、交通事業者を主な会員とする産官学連携組織である。公共交通オープンデータ協議会は、2019 年に公共交通オープンデータセンターを開設し [42]。バスだけでなく、鉄道や航空など様々な交通機関のデータを一元的に配信している。

SIP-adus は、公共交通の自動運転に関連して、総合的な交通システムである次世代都市交通 (Advanced Rapid Transit; ART) システムの研究も行っており、バスの運行情報や混雑情報、乗り継ぎ案内などの情報基盤である ART 情報センター機能の開発を進めている [43]。

## (3) 料金決済

東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）は、2001年に Suica を発売し、IC カード乗車券による料金支払を開始した。その後、様々な交通事業者から交通系 IC カードの発売が始まった [44]。2013年には10種類の IC カードの相互利用が可能となり（表 2-4）、10種類のうち1枚の IC カードがあれば、他の9種類の IC カードが対象とする交通手段を利用できるようになった。

表 2-4 全国相互利用を行っている IC カード乗車券

| 事業者               | IC カード |
|-------------------|--------|
| JR 北海道            | Kitaca |
| JR 東日本            | Suica  |
| パスモ               | PASMO  |
| JR 東海             | TOICA  |
| 名古屋交通開発機構, エムアイシー | manaca |
| JR 西日本            | ICOCA  |
| スルッと KANSAI       | PiTaPa |
| JR 九州             | SUGOCA |
| 福岡市交通局            | はやかけん  |
| 西日本鉄道             | nimoca |

全国相互利用サービスに含まれない事業者も、これら10カードを利用できるようにすることで、IC カード利用の幅が広がっている。例えば、仙台市交通局が発行する icsca は主に宮城県内の地下鉄やバス、電車でのみ利用可能であり、他のエリアでは利用できないが、全国相互利用サービスを行っている10カードはこれら icsca が対象とする交通機関で利用することができる [45]。



ICカードによる料金決済は、交通機関ごとの切符の購入や運賃支払の煩雑さをなくし、交通事業者にとっても切符の販売や確認作業を削減できる。ICカードは電子マネーとしても機能するため、タクシーやレンタカー、シェアバイク、フェリー、駐車場など、様々な交通サービスの支払に利用できる（表 2-5）。

表 2-5 ICカード乗車券で支払可能な交通事業者の例

| 交通手段          | 事業者  | 対応する IC カード                |
|---------------|--|----------------------------|
| タクシー          | 東京無線協同組合 [46]  | 全国相互利用 IC カード (PiTaPa を除く) |
|               | チェッカーキャブ無線協同組合 [47]                                  | 全国相互利用 IC カード (PiTaPa を除く) |
| フェリー          | 佐渡汽船 [48]  | 全国相互利用 IC カード (PiTaPa を除く) |
|               | JR 西日本宮島フェリー [49]                                    | 全国相互利用 IC カード, PASPY       |
| シェアバイク        | サイクル (ジェイアール東日本企画, 中央復建コンサルタ<br>ンツ, IHI エスキューブ) [50] | 全国相互利用 IC カード (PiTaPa を除く) |
| レンタカー         | オリックス自動車 [51]  | 全国相互利用 IC カード (PiTaPa を除く) |
| 自家用車<br>(駐車場) | タイムズ 2 4 [52]  | 全国相互利用 IC カード, Sapica      |

全国的に IC カードの普及が進む中、青森県や秋田県、徳島県といった地域では未だに導入されていない状況にあるが、理由の一つに導入費用の高さがあると考えられる。過去の事例では、バス 354 台に対し全国相互利用可能な 10 カードの導入を行った事例で 3.13 億円、熊本県ではバス約 1000 台及び私鉄へ 10 カードと地域独自カードの導入を行った事例で約 8 億円の費用がかかっている。JR 東日本は、IC カードの普及を促すために、通常の Suica のサービスと合わせて、定期券や各種割引等の地域独自サービスを提供できる地域連携 IC カードの開発を発表している [53]。

## 2.3 移動空間に関する取り組み

### 2.3.1 データに関する取り組み

#### (1) データ流通基盤

日本では、阪神・淡路大震災を契機として2007年に地理空間情報活用推進基本法が策定され [54]、政府の主導のもと多くの地理空間情報が整備・公開されるようになった。国土地理院が整備する基盤地図情報は、地理空間情報の位置の基準となる情報であり、インターネットで無償提供されている [55,56]。また、国土交通省は、土地利用や公共施設、交通などのデータを配信する国土数値情報ダウンロードサービスや [57]、街区単位の地名に一座標を付与した位置参照情報のダウンロードサービスなどを提供している [58]。

これらのデータは、主に国が地方公共団体等から収集し整備を行うものであるが、2011年に発生した東日本大震災や、国際的なオープンガバメントの取り組みによる影響を受け、地方公共団体は2010年代から自身の持つ様々な公共データの公開を推進するようになった [59]。

国土交通省は、地理空間情報活用推進基本法を根拠とする地理空間情報活用推進基本計画及び地理空間情報の活用推進に関する行動計画（G空間行動プラン）に基づき [60,61]、地理空間情報を流通するためのデータプラットフォームの検討を行い、社会基盤情報流通推進協議会への委託事業として2016年にG空間情報センターの運用を開始した。G空間情報センターは、産学官の統合的なデータ流通プラットフォームとして、様々な地理空間情報の配信を行うとともに、データ利活用のための取り組みも行っている [62,63,64]。

さらに、国土交通省は、自身の持つ様々なデータと、民間等のデータを連携するための国土交通データプラットフォームの整備計画を2019年に策定している [65]。国土交通データプラットフォームは、国土交通省の持つ基盤地図情報や国土数値情報、社会インフラの維持管理情報、道路交通情報、気象データ等に加え、地方自治体や民間企業等の持つ国土、経済活動、自然現象に関する各種情報を連携させることを目的としている。

地理空間情報には、プローブ情報のような個人の行動に関するパーソナルデータが含まれる。欧州議会は、2016年にEU一般データ保護規則（General Data Protection Regulation; GDPR）を採択し、パーソナルデータの管理について罰則規定を含む利用制限を課すようになった。対象は、EU域内を拠点とする個人の情報であるが、日本の事業者がインターネット上で国際的に提供するサービスにも適用される。

しかしながら、個人にとってより利便性の高いサービスを提供するには、このようなパーソナルデータの活用も必要になる。日本では、2016年にパーソナルデータを含む情報の効果的な活用を推進するための官民データ活用推進基本法が施行された。本法は、国や地方公共団体はデータ活用の施策の策定及び実施の責務を課し、民間事業者もその施策に協力するよう努めることを定めている。

このような取り組みの中でも個人情報保護は必要であり、適切な管理が求められる。

2015年の個人情報保護法改正に伴い、個人情報に対する定義の明確化と保護の強化が行われるとともに、個人を識別できないよう加工した匿名加工情報の利活用が認められるようになった。この改正により、個人からデータを預かり代わりに運用する情報銀行や[66,67,68]、データを直接保持せず流通の仲介をするデータ取引市場といった事業が現れるようになった(図2-1)[69]。情報の蓄積・運用と流通に機能が分化されるように、データ流通プラットフォームとして一元的に行われてきたサービスの形態も変化してきている。

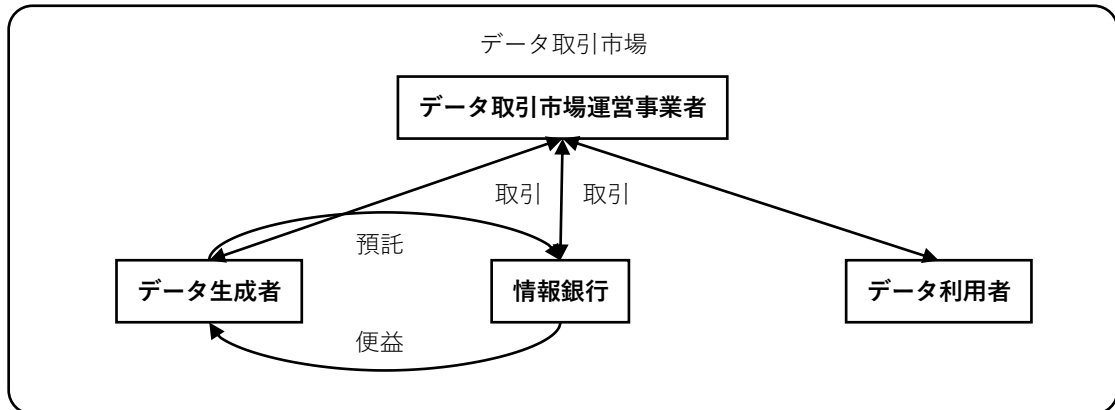


図 2-1 データ取引市場のイメージ

(2) ダイナミックマップ

地理空間情報の流通・活用の取り組みと並行し、自動運転の実現のためのデータ整備の取り組みも行われている。自動運転では、ダイナミックマップと呼ばれる静的な地図にリアルタイムな情報を重畳させた情報が用いられる。ダイナミックマップは、レーザー点群やカメラ画像、ベクトルデータから生成した基盤的地図(高精度3次元地図情報)に、交通規制や道路工事などの準静的情報、事故や渋滞などの準動的情報、信号や歩行者などの動的情報を組み合わせて構成される(表2-6)[70,71]。

表 2-6 ダイナミックマップの構成

| 階層    | 対象とする情報の例                  | 更新頻度  |
|-------|----------------------------|-------|
| 動的情報  | 信号, 歩行者, 周辺車両              | 1秒以内  |
| 準動的情報 | 事故, 渋滞, 狭域気象               | 1時間以内 |
| 準静的情報 | 交通規制, 道路工事, 広域気象予報         | 1日以内  |
| 静的情報  | 高精度3次元地図(車線, 路面, 3次元構造物など) | 1か月以内 |

2016年に設立されたダイナミックマップ基盤株式会社は、これらデータのうち基盤的地図の整備を行っており、2019年3月末より全国高速道路・自動車専用道のデータを有償で

提供している [72].

SIP-adus は、ダイナミックマップの収集、生成、更新と車両への提供の仕組みを持つセンター機能の実現に向けた取り組みを行っており [73], 他の分野でも利活用できるようなサービスプラットフォームの実現に向けた検討も行っている [74].

### 2.3.2 インフラに関する取り組み

#### (1) 通信インフラ

移動中の車両は、渋滞や事故などの時々刻々と変化する交通情報を、外部との無線通信により取得する。VICS センターは、電波ビーコンや FM 多重放送により交通情報配信を行っているが、2011 年に、より詳細な情報を配信できる ETC2.0 サービスを開始した [75]. ETC2.0 は ITS スポットと呼ばれる DSRC (Dedicated Short Range Communications) 路側無線装置と車載器との通信により高速大容量な通信を実現する。ITS スポットは双方向で通信を行えるため、センターからの情報配信だけでなく、センターへの車両プローブ情報収集にも利用できる [76].

走行中は、路側機のようなインフラだけでなく、隊列走行中の他の車両や歩行者など、様々な対象と通信を行うことが考えられる。このような車両と他との通信 (Vehicle-to-Everything; V2X) について、移動通信に関する標準化を行う 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) はセルラー方式を用いた仕様を策定している [77]. 実用化が進められている第5世代移動通信システム (5G) を用いることで、より高速大容量で低遅延な V2X の実現が期待されている [8].

(2) 情報処理環境

周辺の複数車両と協調した走行を実現したい場合、車両間で接続したネットワークを構成するのではなく、複数車両の情報を管理する方法が考えられる。車両の管理は、クラウド上のサーバで集中的に行うことが考えられるが、多数の車両との接続によりトラフィックが大量に発生することや、ネットワーク上の物理的な距離により応答の遅延が発生するなど、リアルタイムな処理が行えない可能性がある。車両の制御に関する情報の場合、安全性の面で大きな問題となりうる。

リアルタイムな処理を実現するために、エッジコンピューティングと呼ばれる技術が注目されている。エッジコンピューティングは、端末内若しくは端末と物理的に近い場所に処理機能を置くことで、高度で複雑な情報処理を低遅延、低電力で行うための技術である（図2-2） [78,79].

日本では、SIP「フィジカル空間デジタルデータ処理基盤」や [80], 内閣府の官民研究開発投資拡大プログラム（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion Program; PRISM）により関連技術の研究が進められている [81].

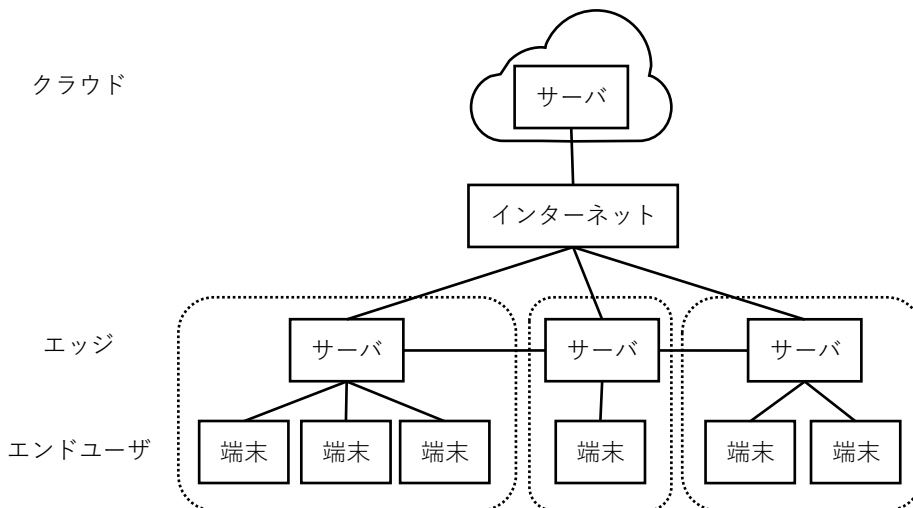


図 2-2 エッジコンピューティングのイメージ

(3) 交通制御

自動運転に用いる信号情報は、車載カメラで取得した画像情報から識別することが考えられるが、識別の精度は太陽光や看板など周囲の環境によって低下する可能性がある。他の取得方法として、車両へ信号情報そのものを配信することが考えられる。SIP-adus は、インフラ側に ITS 無線路側機を設置し路車間通信により提供を行う方法 [82]と、交通管制センターなどに設置した信号情報センターから情報配信を行う方法 [83]について研究開発を行っている。

また、バスなどの公共車両の移動に併せて信号制御を行う公共車両優先システム（Public Transportation Priority Systems; PTPS）は既に全国で導入が進められているが [84], 現在のシ

システムの高度化を図ることにより効率化を図る取り組みが行われている [43].

### 2.4 現状の課題

空間情報基盤に関する取り組みは、様々な分野から多くの技術を用いて行われており、分野・技術間の関係性は非常に複雑である。

取り組みの中で、情報の整備・流通が促進されてきているが、分野や組織ごとに異なるデータ流通プラットフォームが立ち上げられている状況にある。経済産業省と総務省、IoT推進コンソーシアムは、2017年に「データ流通プラットフォーム間の連携を実現するための基本的事項」として、データカタログで提供すべきメタデータや、API (Application Programming Interface) のあり方について取りまとめたが [85]、統合的なデータ流通の場はまだ実現化されておらず、分野ごとに類似した取り組みが行われている。

これらの課題について、第3章では具体的なシステムの実装から空間情報基盤の全体像を把握し、あるべき姿について検討を行う。

## 第3章 移動体支援のための空間情報基盤のあり方

### 3.1 本章の内容

本章では移動体及び移動空間の観点から、それぞれ具体的なシステムについて検討、検証を行う。その結果から空間情報基盤を構成するシステム要素を明らかにする。また、それらシステム要素間の関係を整理し、空間情報基盤システムのあり方を示す。

### 3.2 移動体と空間情報基盤

#### 3.2.1 移動体のシステム

人間の移動がどのように行われるかを考えた場合、視覚などの感覚受容器により外界の環境情報を取得しながら、現在位置や速度といった自身の情報を組合せ、次の行動を決定するものと考えられる。この仕組みでは、自身が認識できる範囲に情報が限定されるが、地図を用いることで直接認識できない空間に対しても移動の計画を立てることができる。

自動車の運転も同様に、運転者が認識する外部の環境や車両の計器類、GNSS (Global Navigation Satellite System) とカーナビゲーションによる経路案内など、自他の情報を総合して運転者が車両を制御する。自動運転車であれば、人間の知覚のかわりにレーザレンジファインダやミリ波レーダ、カメラ等を用いて外界の環境を認識し [86]、あらかじめ用意された正確な地図データと合わせて走行経路を決定する [87,88]。

あらかじめ用意された詳細な地図は移動計画に有用であるが、より最適化された計画を行うには、工事情報や路面の情報などの動的な現況情報も必要である。人間の移動は、感覚受容器から障害物等の情報を取得しながら移動に反映するものであるが、認識できる空間に限定される。

認識できない空間については、特定の場所に設置されたセンサなどで取得した情報を利用する方法が考えられるが、広い環境を対象とするには遍在的にセンサを設置する必要がある。別の方法としては、移動体そのものにセンサを取付け、その移動実績を移動体同士で共有し、利用することも考えられる。

本節では、移動体が取得するプローブ情報から道路縦断線形を生成し、そのデータを共有し移動支援に用いるシステムについて検討する [89]。

#### 3.2.2 プローブ情報データベースを用いた移動支援

道路における渋滞発生の原因のひとつとして、縦断線形における凹部であるサグにおける運転者挙動特性が挙げられる。運転者が認知しづらい勾配の変化では、十分なアクセル制御が行われず速度低下が引き起こされる。そして、車両追従挙動により減速波として後方車両へ増幅しながら伝播する [90,91,92]。

このような渋滞対策として、速度低下を起こすボトルネック地点でのインフラ側からの交通制御が考えられるが [93,94], ボトルネック箇所の特定には多くの区間で交通流を観測し、起こりうる箇所すべてに制御機器を設置する必要がある。

もうひとつの方法としては、車両が事前に道路勾配を把握しておき、サグを通過する際に自らアクセル制御できるようなシステムが考えられる。走行車両があらかじめサグを検知するには、位置情報と関連した道路の縦断線形情報を事前に取得しておく必要がある。国土交通省はデータ交換標準に係わる電子納品運用ガイドラインにより、縦断線形情報のための道路中心線形データの記録について規定している [95]。

このように、データベースが整備されれば縦断線形データの取得も容易になるが、現存の道路すべてについて縦断線形情報を得るのは難しい。そこで不足する勾配情報の事前取得の手段として車両の移動実績を取得可能なプローブ情報システムの導入を考える。

プローブ情報システムは、車両に搭載したセンサにより収集した情報から道路交通情報を生成し、それらの情報を管理するシステムである。

既往の研究にはインターネット技術を導入したプローブ情報システムがあるが [96], このようなシステムは、インターネットにアクセスできる環境であれば誰もがリアルタイムに情報を取得、送信することができるため、複数のユーザによるデータベースの更新を行うことができる。したがって、サグにおける渋滞対策システムにインターネット上のプローブ情報システムを組み込むことで、複数の移動体により縦断線形データベースの更新を行うことができる。

このプローブ情報データベースは、あらかじめ整備されたデータベースでは不足する未整備地域や動的なデータの情報を補完しながら有効に活用できることが考えられる。



3.2.3 プローブ情報データベースの構成

図 3-1 にシステムの構成図を示す。本システムは、個々の車両にセンサを取り付けたプローブカーを設定し、取得したセンサ情報をインターネット上のサーバに送信することにより縦断線形情報を蓄積し、縦断線形データベースを構築する。蓄積したデータは適宜サーバから取得することができ、取得したデータはプローブ側の地図閲覧用ウィンドウに描画される。また、蓄積したデータからアクセル制御のタイミングを生成することで走行支援を図る。

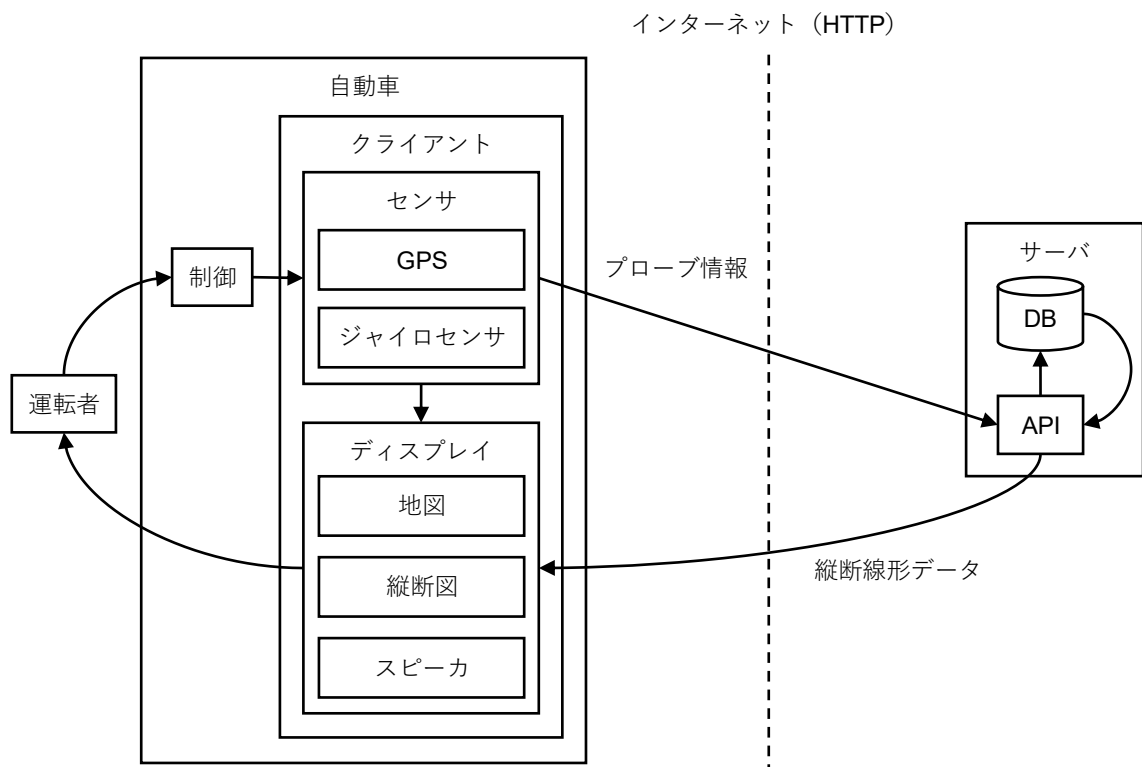


図 3-1 プローブ情報システムの構成図

本システムは、ブラウザでグラフィカルに表示するウェブマッピングシステムとして開発する。その構成は大きくサーバ・アプリケーションとクライアント・アプリケーションによって構成され、双方の通信は HTTP により行う。サーバ・アプリケーションはプローブ情報データベースへの API (Application Programming Interface) を提供する。クライアント・アプリケーションはその API を用い、プローブデータを送信し、データベースへ保存する。データの利用時は、API から縦断線形データを取得し、ユーザへ情報を提示する。

プローブデータの取得には GPS (Global Positioning System) とジャイロセンサを用い、それらをタブレット PC に接続して収集する (表 3-1)。各センサは車両フロント部分に固定し、タブレット PC 上のクライアント・アプリケーションで動作させる。プローブデータは、GPS の出力周期に合わせ GPS、ジャイロセンサともに 1 秒間隔で取得し、無線型データ通信によりサーバへ送信する。

表 3-1 利用するセンサとプローブデータ

| センサ     | データ       |
|---------|-----------|
| GPS     | 走行ルートの座標  |
|         | 高度        |
| ジャイロセンサ | 角度 (車両姿勢) |

クライアント・アプリケーションは、これらのデータを用いて制御情報を生成するが、本システムでは車両を自動で制御せず、ディスプレイにより運転者へ制御情報を提示する。ただし、運転者が視覚ディスプレイを注視しながら運転をすることは危険なため、制御情報は聴覚ディスプレイと併せて通知する。

視覚ディスプレイには、走行ルートをプロットする地図と、その走行ルートの縦断線形を描画する (図 3-2)。縦断線形に用いるデータに GPS の高度データを用いるとノイズが多くなるため、ジャイロセンサから得られる角度データを用い、角度データが取得できなかった地点では GPS の高度データを用いる。

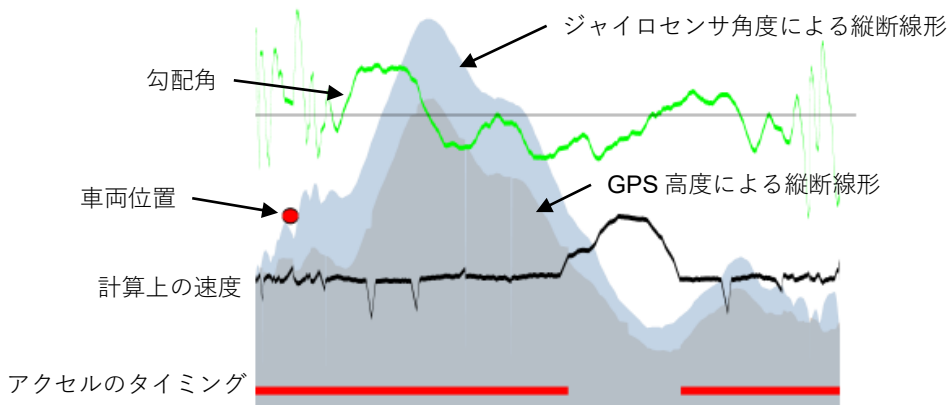


図 3-2 クライアント・アプリケーションにおける縦断線形の描画

サーバ・アプリケーションである縦断線形データベースは、GIS (Geographic Information System) 機能を持つリレーショナルデータベースシステムにより構築し、GPS から取得した緯度、経度、高度と、ジャイロセンサから取得した 3 軸方向の角度を保持する。両センサの

データ取得間隔は同期しているため、それぞれのデータは取得時間により関連付けることができる。

### 3.2.4 プローブ情報データベースによる車両制御情報の生成

本システムは、車両が一定以上減速しないよう縦断線形データから制御情報を生成し、それを運転者に通知することで運転制御を支援する。生成する制御情報は、物理法則により加減速する車両の速度をもとに決定する。基準速度より減速した場合は、アクセル制御により一定量加速し、逆に下り勾配の加速区間では、基準速度を満たす限り制御をしない。以上のような操作を行うことで、車両は不要な制御を行わない、効率のよい加減速ができると考えられる。

ある地点における車両の速度と時間は次のステップにより算出される。まず、走行開始地点からの距離 $D\{d_0, \dots, d_n\}$ 並びにその地点における高度 $H\{h_0, \dots, h_n\}$ について、ある地点 $n-1$ から $n$ 区間の距離、標高差をそれぞれ $\Delta d_n$ 、 $\Delta h_n$ とすると、その区間における勾配角 $\theta_n$ は式(1)から求めることができる。

$$\theta_n = \tan^{-1} \frac{\Delta d_n}{\Delta h_n} \quad (1)$$

$W$ を車体重量、 $g$ を重力加速度とすると、 $\theta_n$ におけるアクセル制御を伴わない推進力 $F_n$ は式(2)により求められる。

$$F_n = W \cdot g \cdot \sin \theta_n \quad (2)$$

ただし、実際の推進力は、転がり抵抗や空気抵抗により減損する。転がり抵抗係数を $\mu_r$ とすると転がり抵抗 $F_r$ は式(3)により求められる。

$$F_r = W \cdot g \cdot \mu_r \quad (3)$$

空気抵抗係数を $C_x$ 、空気密度を $\varphi$ 、車体前面面積を $F$ 、空気との相対速度を $V_a$ とすると、空気抵抗 $R_e$ は式(4)により得られる [97,98].

$$R_e = \frac{C_x \cdot \varphi \cdot F \cdot V_a^2}{2} \quad (4)$$

以上の式から実際の車両の推進力 $F'_n$ は式(5)により求めることができる。

$$\begin{aligned}
 F'_n &= F_n - F_r - R_e \\
 &= W \cdot g \cdot \sin \theta_n - W \cdot g \cdot \mu_r - R_e \\
 &= W \left\{ g(\sin \theta_n - \mu_r) - \frac{R_e}{W} \right\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

推進力 $F'_n$ と車体重量 $W$ により，加速度 $a_n$ を求めることができる。

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{F'_n}{W} \\
 &= g(\sin \theta_n - \mu_r) - \frac{R_e}{W}
 \end{aligned} \tag{6}$$

さらに加速度 $a_n$ から，時間 $T_n$ と速度 $V_n$ を求めることができる。

$$\begin{aligned}
 T_n &= \frac{\sqrt{V_{n-1}^2 + 2 \cdot a_n \cdot \Delta d_n} \pm V_{n-1}}{a_n} \\
 V_n &= V_{n-1} + a_n \cdot T_n
 \end{aligned} \tag{7}$$

$V_{n-1}$ はひとつ前の区間で生成した速度である。  $n$ が走行開始地点の場合， $V_{n-1}$ にはパラメータとして与えられた数値を用いる。以上の計算式よりある時点における速度を求め，これが基準速度よりも低くなる区間をアクセルのタイミングとする。

## 3.2.5 制御情報の利用

本研究では、生成し制御情報による支援を受けながら運転を行い、その効果の検証を行った。プローブデータの取得は、東北自動車道の仙台宮城 IC から仙台泉 IC 区間で行った。取得したプローブデータから、表 3-2 に示すパラメータを用いてアクセルのタイミングを生成する。

表 3-2 制御情報生成に用いたパラメータ

|  |       |
|--|-------|
| 基準速度[km/h]                               | 80    |
| 転がり摩擦係数                                  | 0.015 |
| 空気抵抗係数                                   | 0.5   |
| 空気密度[kg・s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ] | 0.125 |
| 車両前面面積[m <sup>2</sup> ]                  | 2.52  |
| アクセルによる加速度[km/h <sup>2</sup> ]           | 5     |
| 車両重量[kg]                                 | 1000  |
| アクセル位置からの有効範囲[m]                         | 10    |

生成したアクセルのタイミングを用い、再び同じ経路を走行する。走行中の現在位置がアクセル位置である場合、聴覚ディスプレイによる連続的なトーン音により、運転者へアクセル制御を通知する。

検証の結果、サグの位置とアクセルの指示はある程度適合し、サグに差し掛かるところで運転者に制御情報の通知をすることができた。

一方で、指示どおりのアクセル制御では期待通りに速度が回復しないといった課題も得られた。ジャイロセンサにより得られる角度には、アクセルやブレーキによる車体の傾きも含まれるため、それらがノイズとして求められる縦断線形の勾配に含まれる。そのため、計算した値と異なる結果となったと考えられる。また、GPS による高度も正しく取得できないことが多く、実際の走行で用いるには大きな影響があった。各種センサのデータを総合的に用いることや、複数回走行し精度を高めるなど、データの補正方法について検討を行うとともに、そのデータ精度に対する信頼性といった面でも検討が必要である。

また、計算した速度変化と実際の速度変化が大きく異なったが、想定した抵抗よりも実際の抵抗のほうが大きかったことや、アクセルの加速量が想定する加速量より小さかったことが原因と考えられるため、より精緻なパラメータになるよう検証を繰り返す必要がある。また、パラメータだけではなく、アクセル指示の通知と実際にアクセル制御したタイミングがずれたことも影響したと考えられる。本システムでは、運転者が聴覚によりアクセルのタイミングを取得し制御を行ったが、通知を受けてから 1 秒ほど遅れてのアクセル制御とな

っていた。自動制御システムであれば、アクセル制御の指示から実行までのタイムラグが少なくなると考えられるが、人間に対する指示システムの場合、通知を受けてから制御するまでのタイムラグを考慮し、サグを通過する前に余裕を持って通知を行わなければならない。

現在、自動運転のための高精度地図データや BIM/CIM による 3 次元データ管理といった高精度な道路データの整備が進められているが、それらのデータを利用することにより、より精度の高い縦断線形を生成することができると考えられる。そのような場合でも、他の移動体が取得するリアルタイムなプローブ情報の共有は、動的に変化する環境に対し、移動体自身が観測できない範囲を含めた移動を計画するために有効な手段である。ただし、プローブ情報は精度や信用性が一定ではないことから、データの補正方法や、要求される品質を検討した上で用いる必要がある。

## 3.3 移動空間と空間情報基盤

### 3.3.1 移動空間のシステム

移動体は、自身の情報と外界の情報を組合せ移動の計画・制御を行うが、移動空間の側から移動体へ制御を働きかけることも考えられる。例えば、交通信号機は直接に移動体を制御するものではないが、その移動空間を制御することにより移動を制御する。

カーナビゲーションシステムなどの一般的なナビゲーションシステムでは、移動領域を線として抽象化したネットワークモデルをもとに経路探索を行う。歩行者ナビゲーションシステムでも同様に、移動できる経路をあらかじめ線により表現したモデルが用いられる。ここで定義される経路は舗装された道路や領域の中心線から構築されることが多いが [99]、実際の歩行者の移動可能領域は面的であり、道路上や領域の中心線には限定されない。また移動経路は段差や水たまり、地形の起伏など様々な要因に影響され、必ずしも最短経路とは合致しない。したがって歩行者に適した経路探索を行うためには、その移動領域を面的にとらえ、その領域上で移動に影響を与える様々な要素を評価して最適な経路を導出可能な空間モデルが必要である。

本節では、移動空間の側からの移動計画・制御に着目し、移動空間上の様々な移動要因を評価できるネットワークモデルの構築を行い、空間情報基盤のあり方を検討する。そのためのアプローチとして、様々なグラフ構築手法の中から領域の特性に合った適切なモデルを選択し、それらのモデルを接続したハイブリッドモデルとすることで、総合的に最適な経路を導出できるネットワークを提案する。さらにハイブリッドモデルを実装した経路探索アプリケーションを構築し、複数ケースでの導出結果を比較することで提案手法の有効性を評価する [100,101]。

### 3.3.2 移動計画のための移動空間表現

ある移動領域における目的地までの経路を導く問題は移動計画問題としてよく知られて

おり [102], その解法として, 移動可能な空間に障害物の集合を定義して, 空間内の移動経路を求める方法が用いられる.

代表的な方法として, 移動空間を線的なグラフへと変換するロードマップ法があり, その方法のひとつとして移動可能な面の中間軸 (スケルトン) を生成し, グラフを構成する縮小法がある. スケルトンを生成する手法には, ボロノイ図あるいはドロネー三角形分割によって求める手法や, straight skeleton 手法など様々な方法がある [103,104,105]. また, ラスタ画像から移動可能な領域を定義し, モルフォロジ演算により移動可能領域を収縮させて行くことでスケルトンを得る方法も考案されている [106].

縮小法は, 一般的なネットワークモデルを用いた経路探索手法と同様に領域の中心線を得るという手法を用いており, 実際の最短経路は保証されないものの, 空間に対して抽象化したグラフを生成できるため, 探索空間は少なくて済む. また自動走行ロボットに適用した場合, なるべく障害物から離れた経路を移動することは, 障害物に衝突せずに安定して目標点に到達できる点で有効である.

ロードマップ法のうち、2次元平面上で最短経路を求める手法としては、可視グラフが挙げられる [102,107]. 可視グラフは、障害物の頂点間でその直線上に障害物のない経路を結んで構築される (図 3-3). 可視グラフを歩行者ナビゲーションへ用いたものとして、屋内ナビゲーションシステムへの応用例が挙げられる [108].

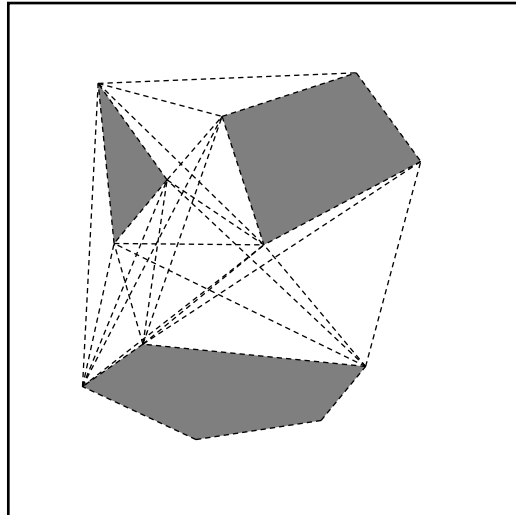


図 3-3 可視グラフの例

可視グラフは、2次元平面上では有効な方法であるが、3次元空間での最短経路探索問題は効率よく最適解を導くことが難しいこと (NP 困難) が知られている [109]. 例えば図 3-4 に示すように、可視グラフを3次元空間に適用した場合、最短経路における屈折点は障害物の頂点とは限らず、最短距離が保証されない. この問題に対し、近似解を求めるアルゴリズムがいくつか提示されている [110]. 距離あたりの移動コストが均一で、総コストが距離に比例するような空間については2次元空間として扱い、可視グラフを適用することで最短経路を求めることができる.

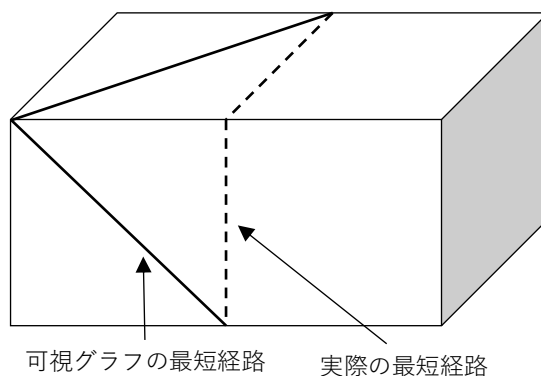


図 3-4 3次元空間での可視グラフによる最短経路



複数のロードマップ法を組合せ、新しいモデルを構築する手法も提案されている。Weinら [111]は可視グラフとボロノイ図を組み合わせた可視-ボロノイ複体 (Visibility-Voronoi Complex) を提案している。可視-ボロノイ複体を用いることで、短く滑らかな、自然に見える経路を導出することができる。

これらのロードマップ法と別の手法に、領域をセルに分解し、セル間を結ぶことで目標点までの経路を生成するセル分解法がある [112]。セル分解法には、自由領域の形状に合わせて分解する正確セル分解 (exact cell decomposition) と (図 3-5)、一定の形状で分割し同一セル内に自由領域と障害物が混在することを許す近似セル分解 (approximate cell decomposition) がある (図 3-6)。近似セル分解は4分木などを用いて階層的にセルを分解することで、障害物の形状になるべくあわせながら効率的にセルを管理することができる [113]。

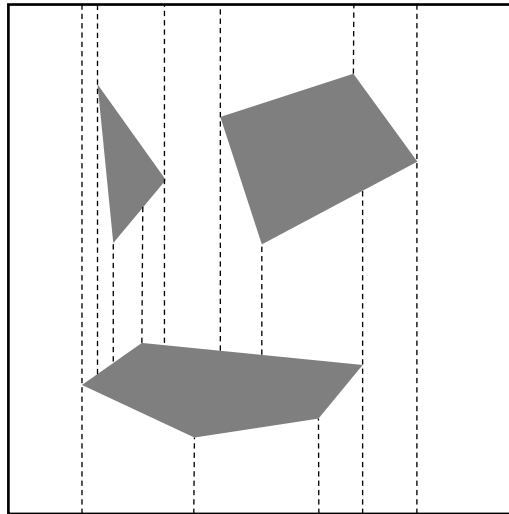


図 3-5 正確セル分解の例

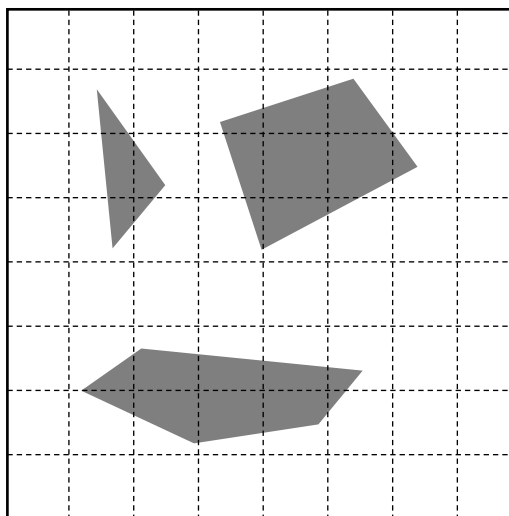


図 3-6 近似セル分解の例

近似セル分解の手法を用い領域上を均一格子に分解したグリッドグラフでは、それぞれのセルに対し異なるコストを設定することができる。これにより、障害物上を通過する場合でも、メッシュ状に分割して異なるコストを設定して表現することができる。例えば、舗装された歩道、砂利道、芝生といった路面上の性質や、自動車交通量による移動領域の危険性なども移動に影響を与える要因と考えることができる。歩行者向けナビゲーションにおける適切な経路を考えると、移動距離だけではなく、これらの移動しやすさといった指標を含めたコスト評価も必要であり、そのようなコストを考慮できるグリッドグラフは有効である。

以上の手法は自由領域からグラフを生成するものであるが、より実践的なアプローチとしてポテンシャル場法が挙げられる [114]。ポテンシャル場法では、目標点からの引き付ける力と、障害物から反発する力によりポテンシャル場を定義する。移動体はその力により指示された方向に進むことで目標点までの経路を導出する。本手法は、ポテンシャル場が与えられれば、移動方向の計算と実行を同じ段階で実行することができる。ただし、ポテンシャルの局所最小値にとらわれると、その地点から移動できず、目標地点まで到達できない場合がある。

本研究で目的とする歩行者の移動に即した面的な領域での経路探索を可能にするためには、可視グラフやグリッドグラフなどの従来手法を適用可能であるが、それぞれの手法は上述したように長所・短所を有している。例えば可視グラフを適用した場合には移動経路が最短距離になるが、一方で移動に影響を与える様々な要素の評価には向かないなどの欠点がある。本研究では、これら手法を組み合わせることで、それぞれの利点を生かしたグラフモデルを検討する。

次に、2次元空間で最短経路を導出できる可視グラフと、セルごとにコストを設定することで柔軟な障害物定義ができるグリッドグラフについて特徴を述べるとともに、歩行者向けのネットワークモデルへの適用を検討する。

### 3.3.3 歩行者向けネットワークモデルの構築

#### (1) 可視グラフ

可視グラフは始点、終点、及び、障害物の頂点をノードとし、各頂点間に障害物がない場合にリンクを作成して構築される。可視グラフは、一様に舗装された平坦面や屋内施設の平面床などのように、どこを通過しても移動コストがほぼ距離に比例するような領域に用いる。したがって移動コストは、対象領域のグラフに存するリンクすべてに対して一意の値を与える。あるリンク $l$ のユークリッド距離を $L(l)$ 、リンクの属するグラフ全体のコスト係数を $b$ としたとき、リンク $l$ における移動コスト $COST_v(l)$ は式(8)により表すことができる。

$$COST_v(l) = L(l) * b \quad (8)$$

#### (2) グリッドグラフ

グリッドグラフは、領域を正三角形、正方形、正六角形のいずれかの形状で均一に分割し、隣接セルと接続することでグラフを構築するモデルである。本研究で用いるグリッドグラフは均一な正方形に分割し、隣接セルとの接続は、接点となるノードから上下左右4方向と斜め4方向をあわせた8方向に接続する。ただし、そのリンク上に通過できない障害物が存在する場合はリンクを生成しない(図3-7)。

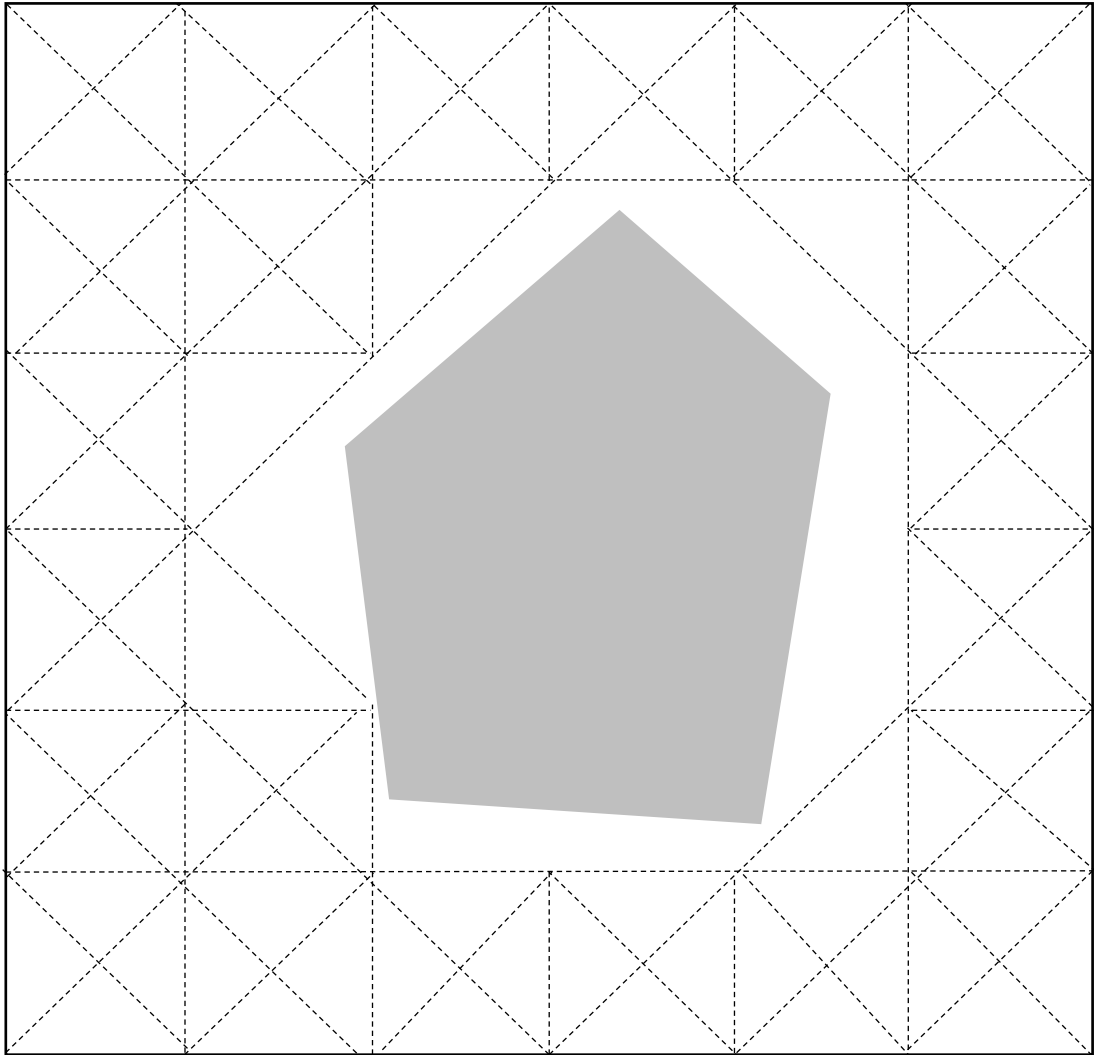
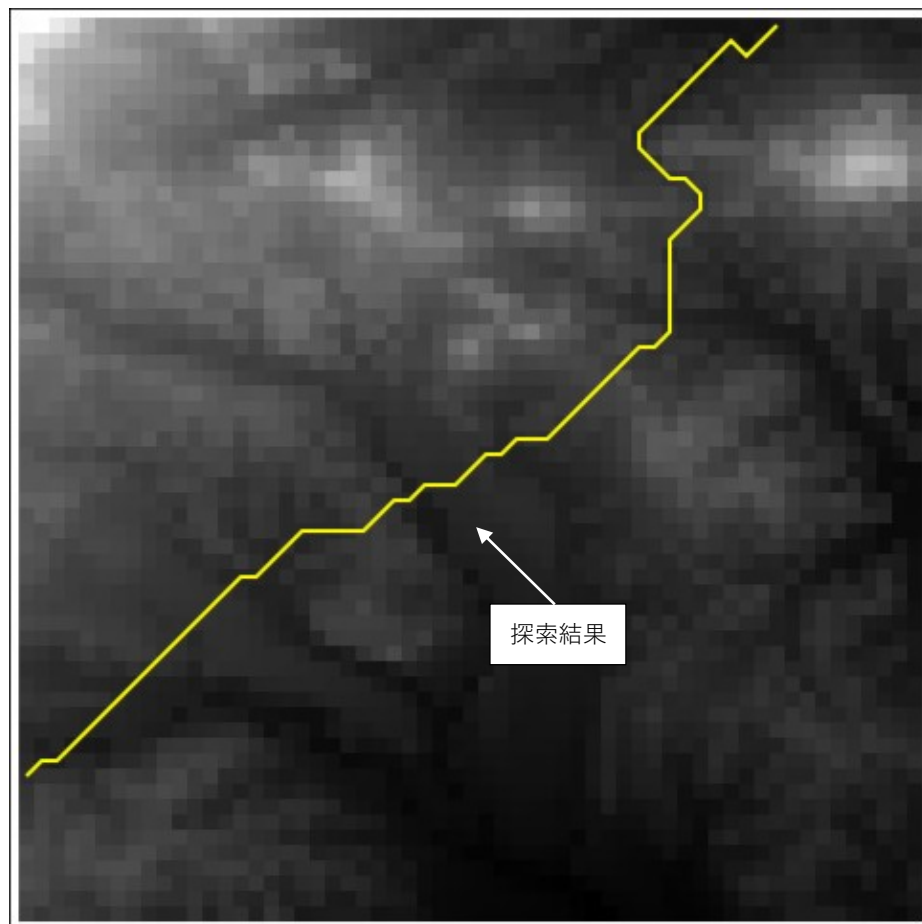


図 3-7 グリッドグラフの例

あるリンク $l$ について $x$ 方向の直線距離を $L_x$ 、 $y$ 方向の直線距離を $L_y$ とすると、グリッドグラフ上におけるリンク $l$ の距離 $L(l)$ は式(9)より求めることができる。

$$L(l) = |L_x - L_y| + \sqrt{2} * \min(L_x, L_y) \quad (9)$$

地形の起伏や路面状況による移動しやすさに影響する通過可能な障害物については、障害物と交差するリンクに対して、それぞれの状況に応じた移動コストを適用する。例えば図3-8は標高値を各セルに与えたときに、その勾配をリンクのコストとして与えたグラフから導かれた最適経路である。このグラフでは登りのコストを高く設定しているが、その結果、なるべく標高差の少ない平坦なリンクを選択した経路を導出している。このようにグリッドグラフを適用した場合には、3次元的な地形特性についても、勾配をコストとして用いることで評価できる。



※ 国土地理院の数値標高モデルを利用。グレースケールの濃淡は標高を表す。

図 3-8 標高値を設定したグリッドグラフ

実際には勾配に加えて、路面状況などのコストに影響を与える要素が加わる場合もあり得る。複数要素によるコストを考慮する場合、式(10)によりコスト $COST_g(l)$ を算出する。ただし、リンク上の障害物を $n$ 、コスト係数を $a(l,n)$ グラフ全体のコスト係数を $b$ とする。

$$COST_g(l) = L(l) * b * \prod_{k=m}^n a(l,k) \quad (10)$$

図 3-9 はグリッドグラフ上に通過不可能な障害物 (o) と、通過可能な障害物 (p), (q) を重なるように配置したネットワークである。ここで、 $b$  は 1 を、(p) 上のコスト  $a(l_p, p)$  は 1.1 を、 $a(l_q, q)$  は 1.2 を指定した場合、障害物(p), (q) が重なる領域 (pq) の移動コスト  $COST_g(l_{pq})$  は式(11)で表せる。

$$COST_g(l_{pq}) = L(l_{pq}) * 1 * (1.1 * 1.2) \quad (11)$$

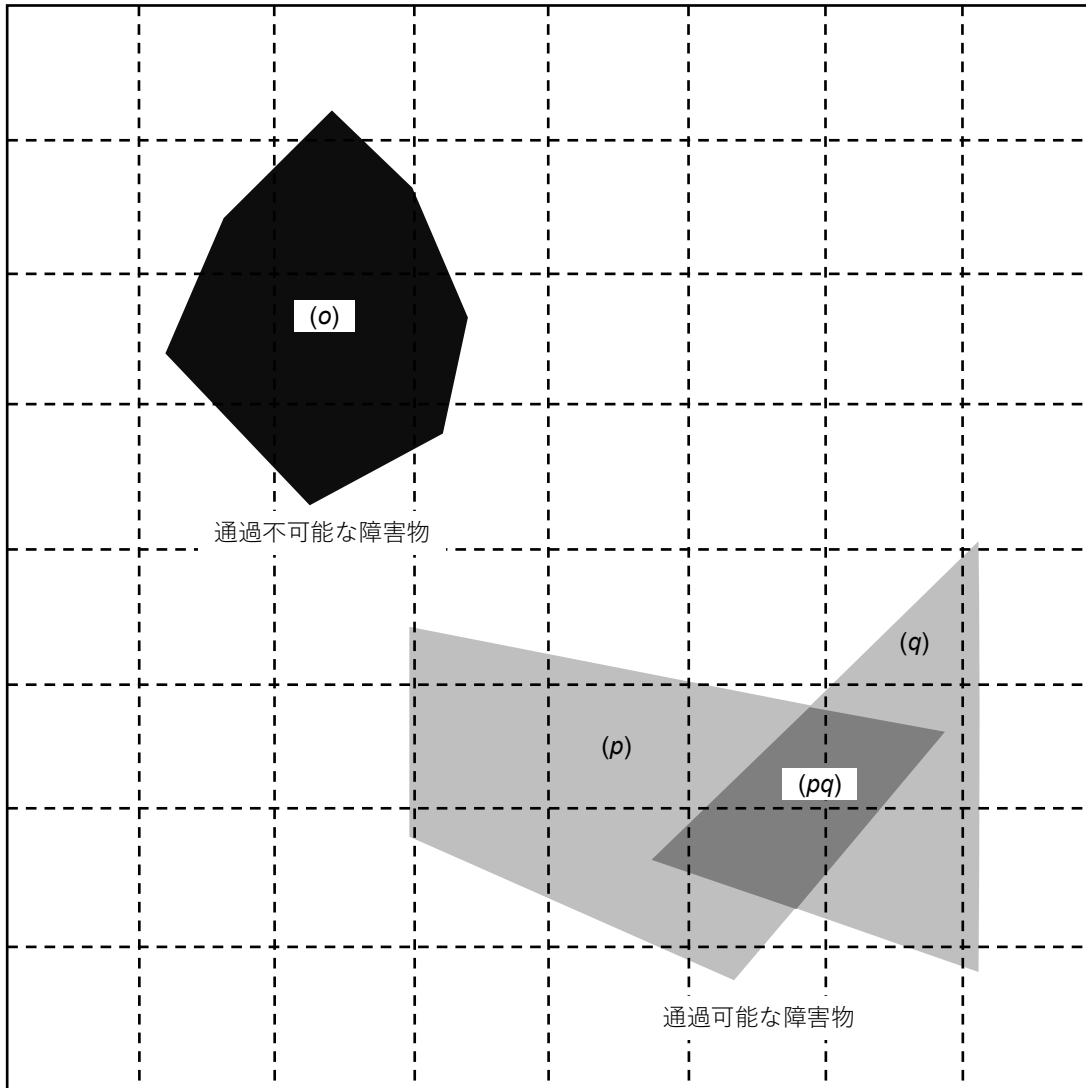


図 3-9 障害物を配置したグリッドグラフの例

(3) 各モデルの比較

図 3-10 は同一の領域上に障害物を配置した地図を設定し、グリッドグラフ、可視グラフそれぞれのモデルに基づいて経路探索を行った例である。コスト評価には距離のみを適用している。ここで、障害物の頂点 $p$ はリンク上の中間に位置する。

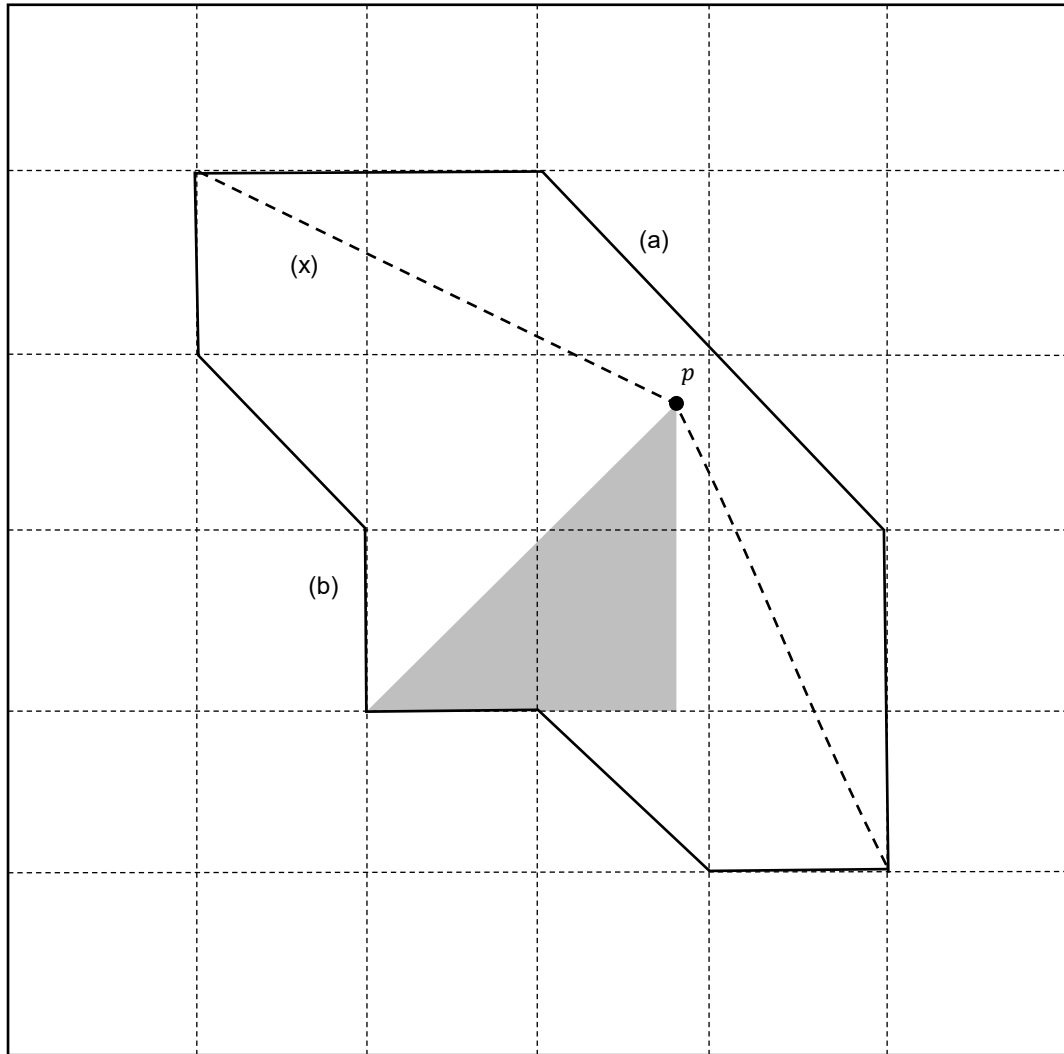


図 3-10 グリッドグラフの最短経路 (a) (b) と可視グラフの最短経路(x)の比較

経路で比較した場合、このグラフでは可視グラフの最短経路が (x)のみであるのに対し、グリッドグラフでは (a) や (b) のような多くの経路が最短となる。実装する最短経路探索アルゴリズムが1つの経路のみ導出する場合、どの経路を解とするかは探索順に依存する。したがって実際の最短経路に近い経路が (a)であったとしても、同じ距離の経路(b)を解として導出してしまう場合があり得る。

距離で比較した場合、グリッドグラフは格子に基づいた経路しか選択できないため、実際に比べて距離の無駄が多い経路を導出する。ただし、自由領域上のコストが一定である場合にはコストは距離に比例するため、中間点をスキップして経路を平滑化することで実際の最短経路に近い経路を導出することができる [106]。図 3-10 の経路 (a)、(b) を平滑化した経路を図 3-11 (a')、(b') に示す。

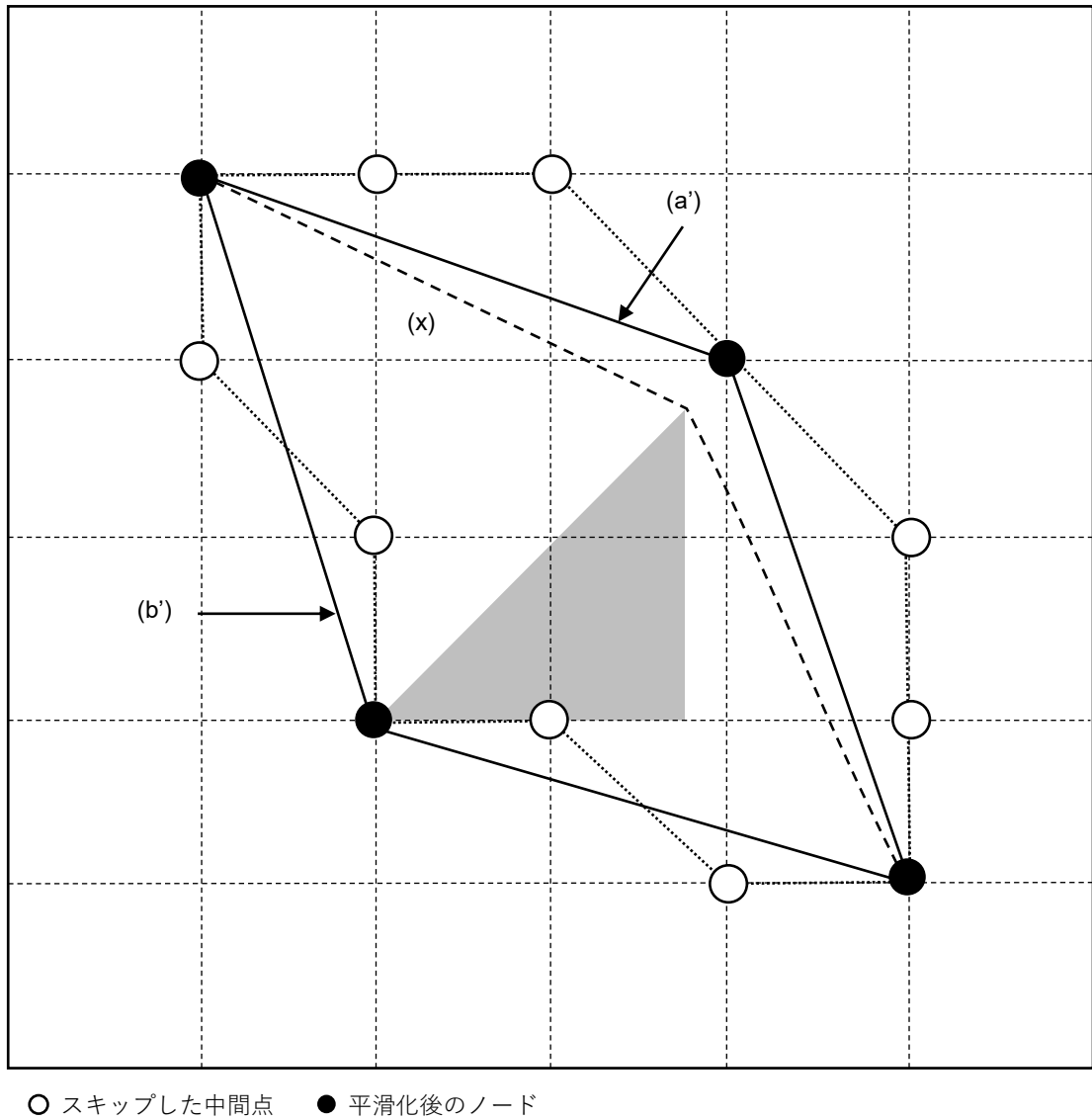


図 3-11 経路の平滑化

ここで、平滑化したグリッドグラフの経路と、可視グラフの経路を比較する。図 3-12 に示すように、可視グラフの経路 $SP_x$ とグリッドグラフの経路 $SP_1$ の差は、 $S$ から障害物までの距離 $n$ が近いほど大きくなり、 $P_x$ が $P_1$ から $P_2$ に近づくにつれて大きくなる。したがって2経路の差が最大になるのは、 $S$ が障害物の边上 $S'$ にあり、 $P_x$ が $P_2$ に限りなく近づいた場合である。格子間隔を $w$ とすると、 $S'P_1$ と $S'P_2$ の差 $d$ は式(12)となる。

$$d < \sqrt{2}w \quad (12)$$

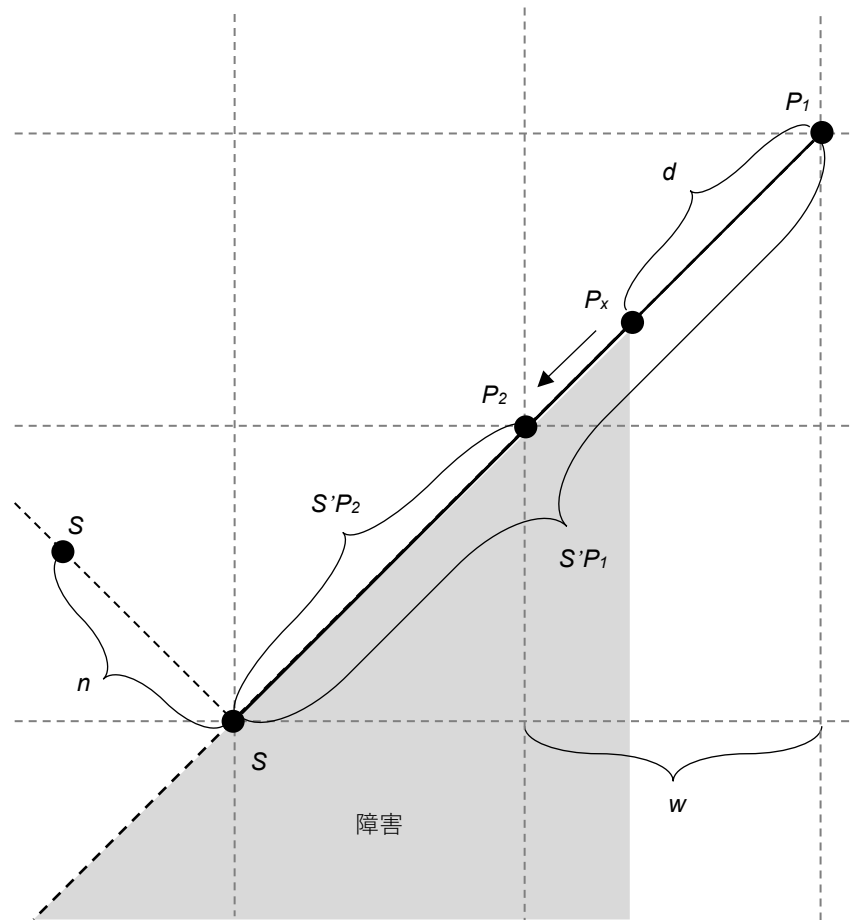


図 3-12 グリッドグラフと可視グラフの距離の差異

この差は平滑化した経路の各辺両端で発生することがあるため、算出した経路の辺の数を $c$ とすると、2経路の差 $D(c)$ は式(13)で表せる。

$$D(c) = 2cd$$

$$D(c) < 2\sqrt{2}cw \quad (13)$$

以上のように、グリッドグラフでは最短経路とは全く異なる経路を算出する場合があります。



実際の最短経路も保証されない。差 $d$ に示すとおり、実際の最短経路との差は格子間隔が小さくなるほど少なくなるが、そのかわりに探索空間が大きくなり、計算時間の増加に影響する。

ただしこれは距離のみで比較した場合であり、 $COST_v(l)$ と $COST_g(l)$ の比較からわかるとおり、グリッドグラフは可視グラフに比べてより柔軟にコストを設定できる。

これらの性質を踏まえて、本研究では可視グラフとグリッドグラフを、それぞれの特性に合った領域に用いることで、より適切な経路を算出することを図る。コストが一定で最短距離を求めることが妥当な空間では可視グラフを、領域上の様々な障害物を通過しながら移動するような空間ではグリッドグラフを用いる。また、これら2つのグラフモデルを接続したハイブリッドモデルを用いることで、歩行者向けのネットワークとして総合的に最適な経路探索ができるモデルを構築する。

#### 3.3.4 ネットワークモデルの実装と検証

##### (1) ネットワークモデルの実装

本章では、歩行者向けのネットワークモデルとして、可視グラフとグリッドグラフを接続したハイブリッドモデルを実装し、経路探索の検証を行った。実装にあたり、経路探索アルゴリズムにはA\*アルゴリズムを用い、ヒューリスティック関数には目標点までのユークリッド距離を用いた。これにより、探索空間を減らすとともに、グリッドグラフをもとに導かれる複数の最短経路の中から、実際の最短経路に近い経路の優先的な探索を図る。

検証に用いたグラフを図 3-13 に示す。ある領域 F の内部に、梯子状の移動領域 G を包含するグラフであり、領域 F, G に異なるネットワークモデルを適用できる。領域 F には通過可能な障害物 O を設定できるが、可視グラフではこのような障害物の定義が困難であり、グリッドグラフのみが適用可能である。領域 G には、左右 4 箇所ずつ、合計 8 箇所領域 G とのリンクを設定しており、グラフ間の移動が可能である。

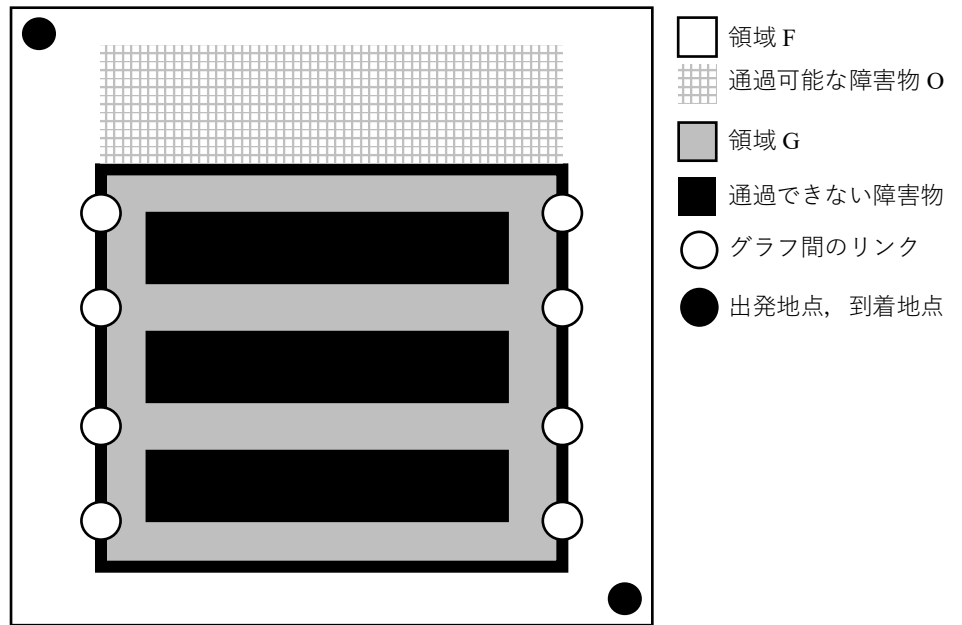


図 3-13 検証のための領域設定

このグラフに表 3-3 に示す 4 ケースのコストを設定したネットワークを定義した。コスト変化に応じたハイブリッドモデルでの探索結果を比較することでその特徴を明らかにするとともに、単一モデルとの比較を行うことでハイブリッドモデルの優位性を検証する。

表 3-3 各領域における移動コスト

|         | コスト係数 |      |
|---------|-------|------|
|         | 障害物 O | 領域 G |
| ケース (a) | 1.0   | 1.0  |
| ケース (b) | 1.0   | 1.2  |
| ケース (c) | 1.1   | 1.2  |
| ケース (d) | 1.3   | 1.2  |

図 3-14 は領域 F にグリッドグラフを, 領域 G に可視グラフを適用したネットワークの算出結果である.

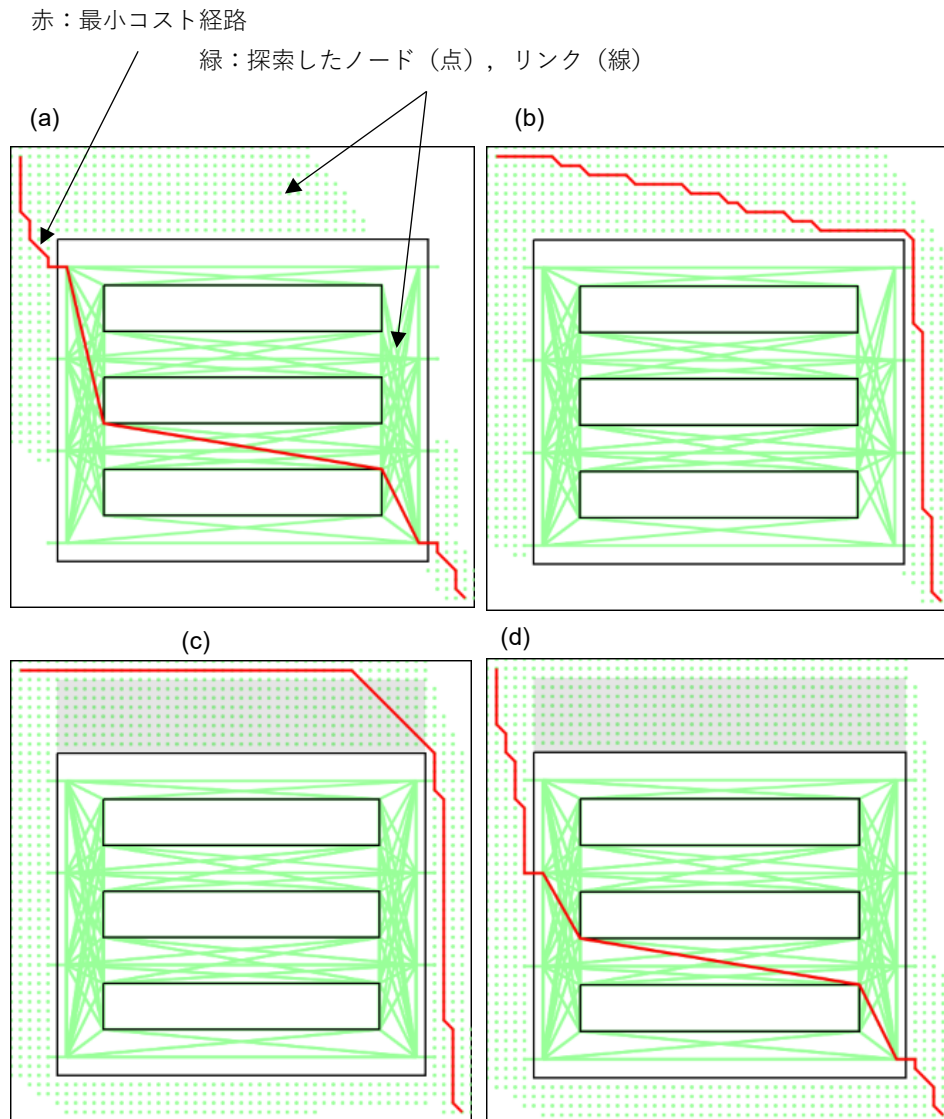


図 3-14 ハイブリッドモデルにおける経路探索

ケース(a)は距離以外のコストを考慮しない場合における本ネットワーク上の最短経路である。

ケース(b)は可視グラフの領域のコスト係数を 1.2 としたネットワークである。可視グラフのコスト増加に伴い、その領域経由せずグリッドグラフのみで移動したほうが低いコストであることを示している。

ケース(c)はケース(b)の条件とともに、グリッドグラフ上にコスト係数が 1.1 の障害物 O を配置したネットワークである。グリッドグラフで通過する経路上のコストが高くなっているが、ケース(b)と同様の可視グラフを経由しない経路を算出している。

ケース(d)はケース(c)で配置した障害物 O のコスト係数を 1.1 から 1.3 に増やしたネット

ワークである。グリッドグラフの障害物のコストが高いため、可視グラフの経路を選択していることがわかる。

図 3-15 はこれら算出した各経路について1つの図上に重ねたものである。ここで、ケース(a)からケース(d)で算出された経路をそれぞれ経路 A, B, C, D とする。

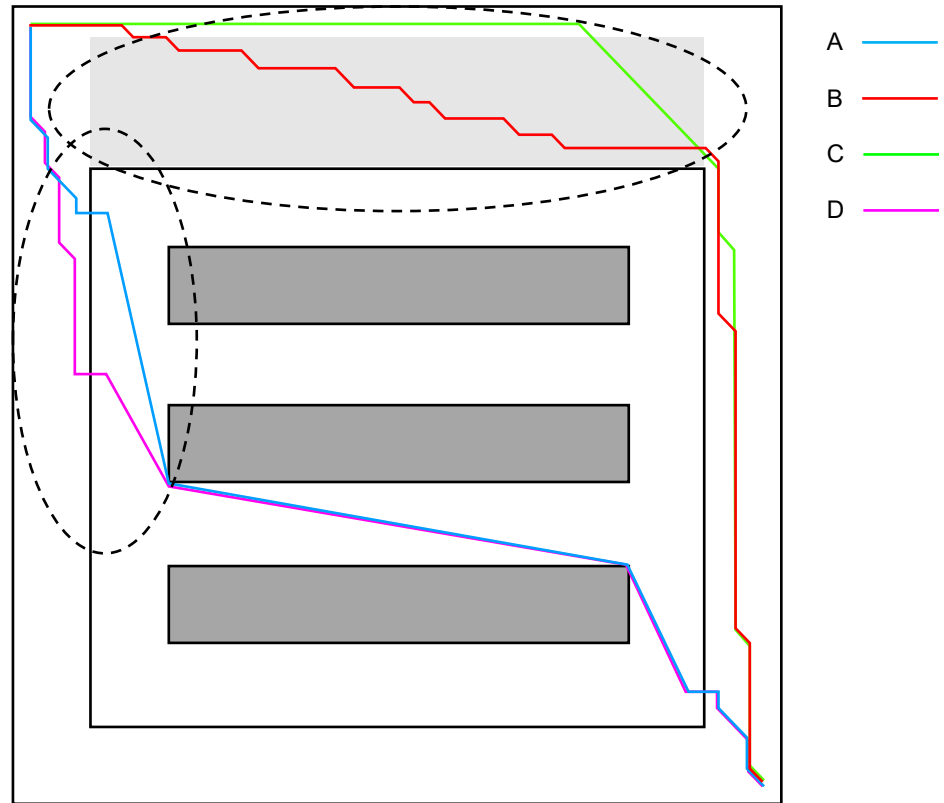


図 3-15 各ケースで算出された経路

各経路について比較すると、経路 A と経路 D では似たような経路を算出しているが、破線楕円内で示す箇所異なるリンクから可視グラフの領域へ侵入している。ケース(d)の可視グラフはケース(a)の可視グラフよりもコストが高いため、なるべく可視グラフの領域を通過しないよう経路を選択していることがわかる。

同じように最適経路の近似した経路 B と経路 C のグラフについて比較すると、破線楕円内の経路では、経路 B ではヒューリスティック関数に従い、目標点までの直線距離が短いノードを優先的にたどっているが、経路 C のネットワークは障害物 O をなるべく経由しないような経路を選択していることがわかる。

導出した経路をナビゲーションに用いた場合、ユーザは近似している経路同士をコストが近いものにとらえる可能性がある。そこで、各ケースで導出された経路について、その経路の近似性とコストとの関係について検討する。表 3-4 はケース (a) から (d) で算出した最小コストと、経路 A から D を他のケースでたどった場合のコストの一覧である。表と算出経路より、各経路の近似性とそのコストの比較を行う。

表 3-4 各ケースの最小コスト及び最小コスト経路を他ケースでたどった場合のコストの比較

|           | ケース (a) | ケース (b) | ケース (c) | ケース (d) |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 最小コスト経路   | 81.34   | 88.97   | 90.24   | 91.82   |
| 経路 A      |         |         |         |         |
| コスト       | -       | 93.11   | 93.11   | 93.11   |
| 最小コストとの比較 | -       | +4.65%  | +3.17%  | +1.40%  |
| 経路 B      |         |         |         |         |
| コスト       | 88.97   | -       | 93.24   | 101.79  |
| 最小コストとの比較 | +9.39%  | -       | +3.32%  | +10.86% |
| 経路 C      |         |         |         |         |
| コスト       | 88.97   | 88.97   | -       | 92.79   |
| 最小コストとの比較 | +9.39%  | 0.00%   | -       | +1.06%  |
| 経路 D      |         |         |         |         |
| コスト       | 81.93   | 91.82   | 91.82   | -       |
| 最小コストとの比較 | +0.73%  | +3.20%  | +1.75%  | -       |

ケース (a) では、最適経路 A に近似した経路 D がコストの面でも他の経路よりも近いことを示している。ケース (b) についても同様に、近似する経路 C とコストが一致している。一方でケース (c) では、最適経路 C と近似した経路 B が最もコストの差が大きく、乖離した経路 D との差が最小となっている。ケース (d) については、大きな差ではないものの近似した経路 A より乖離した経路 C のほうがコストの差が小さい。これらのことから、近似した経路であってもコストに大小の差が生じており、経路の近似性とコストは必ずしも関係しないということを示している。

(2) 単一モデルとハイブリッドモデルの比較

グラフを構成する領域 F, G の 2 つの領域について, 可視グラフのみを適用した場合, グリッドグラフのみを適用した場合の 2 つの単一モデルによるネットワークを実装し, ハイブリッドモデルとの比較を行った. 可視グラフ, グリッドグラフの単一モデルとハイブリッドモデルそれぞれの算出経路を重ねた結果を図 3-16 に示す. また, それぞれの経路のコストを比較した表を表 3-5 に示す.

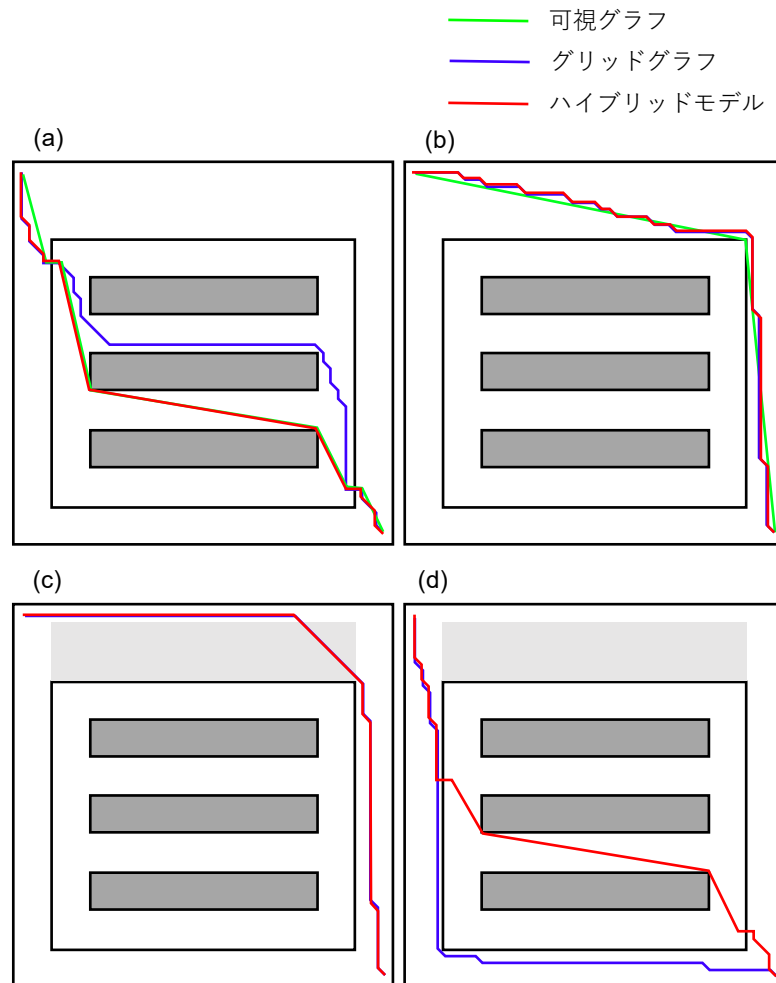


図 3-16 単一モデルとハイブリッドモデルの導出経路の比較

表 3-5 単一モデルとハイブリッドモデルとのコストの比較

|         | ケース (a) | ケース (b) | ケース (c) | ケース (d) |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 可視グラフ   | 79.93   | 84.13   | -       | -       |
| グリッドグラフ | 86.04   | 88.97   | 90.24   | 91.90   |
| ハイブリッド  | 81.34   | 88.97   | 90.24   | 91.82   |

可視グラフは障害物の頂点間にリンクを生成するグラフであるため、障害物のエッジの途中から障害物内を通過する経路を生成できない。したがってケース (c), (d) について、可視グラフのみで適切なコスト評価を行える実装は困難である。障害物 O のないケース (a), (b) における比較では、ともに可視グラフのほうがハイブリッドモデルより少ないコストを算出しているが、経路そのものは近似の結果を算出している。

グリッドグラフのみを適用した場合との比較では、ケース (b), (c) で同じ結果を算出したが、ケース (a), (d) では異なる結果を算出した。ケース (a) については領域 G 内で異なる障害物間を経由しているが、グリッドグラフでの最小コストはどちらの経路でも同じであり、経路探索アルゴリズムで先に算出された経路を導き出しているものと考えられる。ケース (d) について、グリッドグラフのみで構成したネットワークでは領域 F のみを移動する経路を算出したが、ハイブリッドモデルでは領域 G を経由することで、より少ないコストの経路を算出した。

#### (3) 考察

単一モデルと比較すると、ハイブリッドモデルでは可視グラフで実装が困難である通過可能な障害物の定義をグリッドグラフで行うことができ、通過可能な障害物のない領域には可視グラフを用いることで、グリッドグラフのみの場合より少ないコストの経路を算出することができた。したがって、ハイブリッドモデルは柔軟な障害物定義とより短い距離の両方を考慮した経路探索が可能であると考えられる。例えば、距離とコストが比例するような屋内には可視グラフを、場所によって路面状況が異なるような屋外にはグリッドグラフを適用するといったように、各領域の性質を考慮した経路探索を行うことが可能である。

また、4 ケースのコスト設定における経路探索とコスト比較により、それぞれのコスト設定に応じた経路探索が可能であることを検証できた。屋外の天候状況や屋内の混雑具合といった移動コストが変化する場合、そのときどきの状況に応じた最適な経路を動的に導出するのに有効であると考えられる。その一方で、ハイブリッドモデルで算出された 4 経路の比較から、近似した経路であっても必ずしもコストも近似するとはいえないことがわかった。ユーザが近似した経路であればコストも近似すると考えた場合、本ネットワークにより算出した経路のみが提示されたナビゲーションは直感的に信用しない可能性が考えられる。最適経路だけでなく、算出結果の妥当性を示すために、具体的にどのような障害物を避ける必要があるかを示すとともに、探索された複数の経路の候補を挙げて、それらのコスト比較結果をユーザに提示する必要がある。

#### 3.3.5 ハイブリッドモデルの応用

本モデルは可視グラフとグリッドグラフ双方の利点を生かせるよう、領域の特性に合わせてモデルを適用し、それらをリンクすることで、単一のモデルを用いた場合より適した経路の算出を可能とする。例として、考察でも挙げたような屋内に可視グラフを、屋外にグリ

ッドグラフを用いるような場合を想定できる。広い公園のような敷地内で、園内に存する屋内施設の特定の場所に到達するような経路探索を行う場合、屋外の舗装状況など移動に影響を及ぼすものをグリッドグラフの通過可能な障害物として設定し、屋内施設の移動経路を可視グラフで構築することで、よりコストが少ない経路を導出できる。

障害物は動的に設定できることから、天候状況や草地の茂り具合など、時間変化に応じてコストを変化させることで、より現実的な経路を算出することができる。地形のような3次元的な要素についても、勾配をグリッドグラフのコストとして定義することで評価することができる。

本研究では可視グラフとグリッドグラフの2種類のグラフモデルを用いたが、これらのモデルは、グラフ理論に基づく他モデルとの接続も可能である。例えば、鉄道や道路ネットワークのような一般的に用いられている代表線のグラフとも接続できる。これらのネットワークと接続することで、乗換えも意識した、より実用性の高い歩行者ナビゲーションに応用できると考えられる。

本節では領域と障害物からグラフを導く移動計画の手法を用いたが、この手法を利用するためには移動可能領域・コストが明確に示されている必要がある。地理情報システムなどで用いられている既存の空間データからは、移動可能領域やコストが直接的に得ることができない場合が考えられる。その場合、利用可能な地図データに基づいて、自由領域と障害物の意味づけを自動的に行う仕組みが必要である。

今回の検証では、簡易なネットワークに基づいた検証に留まったが、今後はより複雑な現実の空間情報を適用したネットワークでの検証・評価が必要である。ここで懸念されることは、探索空間が大きくなることによる計算量の増大であり、この問題に対して障害物や移動体の大きさを念頭に置いた、格子密度の適切な設定方法が必要と考えられる。

また、現実のサービスへの適用を念頭に置いた場合、移動に影響を与える障害物の定義や観測手法も検討が必要となる。気象や路面状況、横断歩道の信号などは時間により動的に変化するため、それら動的な情報をリアルタイムに反映するための手法の開発とシステムへの実装が必要と考えられる。

#### 3.4 空間情報基盤を構成するシステム

本章では移動体と移動空間に焦点を当て、空間情報基盤の検討を行った。移動体に対しては、自身の情報と外界の情報を用いて移動制御を行うシステムを検討した。移動空間については、移動空間を面的にとらえ、決められた路線ではなく領域上の障害物を避けて移動できるようなネットワークモデルを検討した。ここで、空間情報基盤を構成する移動空間及び移動体のシステム要素間の関連を整理する。



図 3-17 は、移動体と移動空間、フィジカル空間とサイバー空間の2軸で分け、4領域に分類したものである。

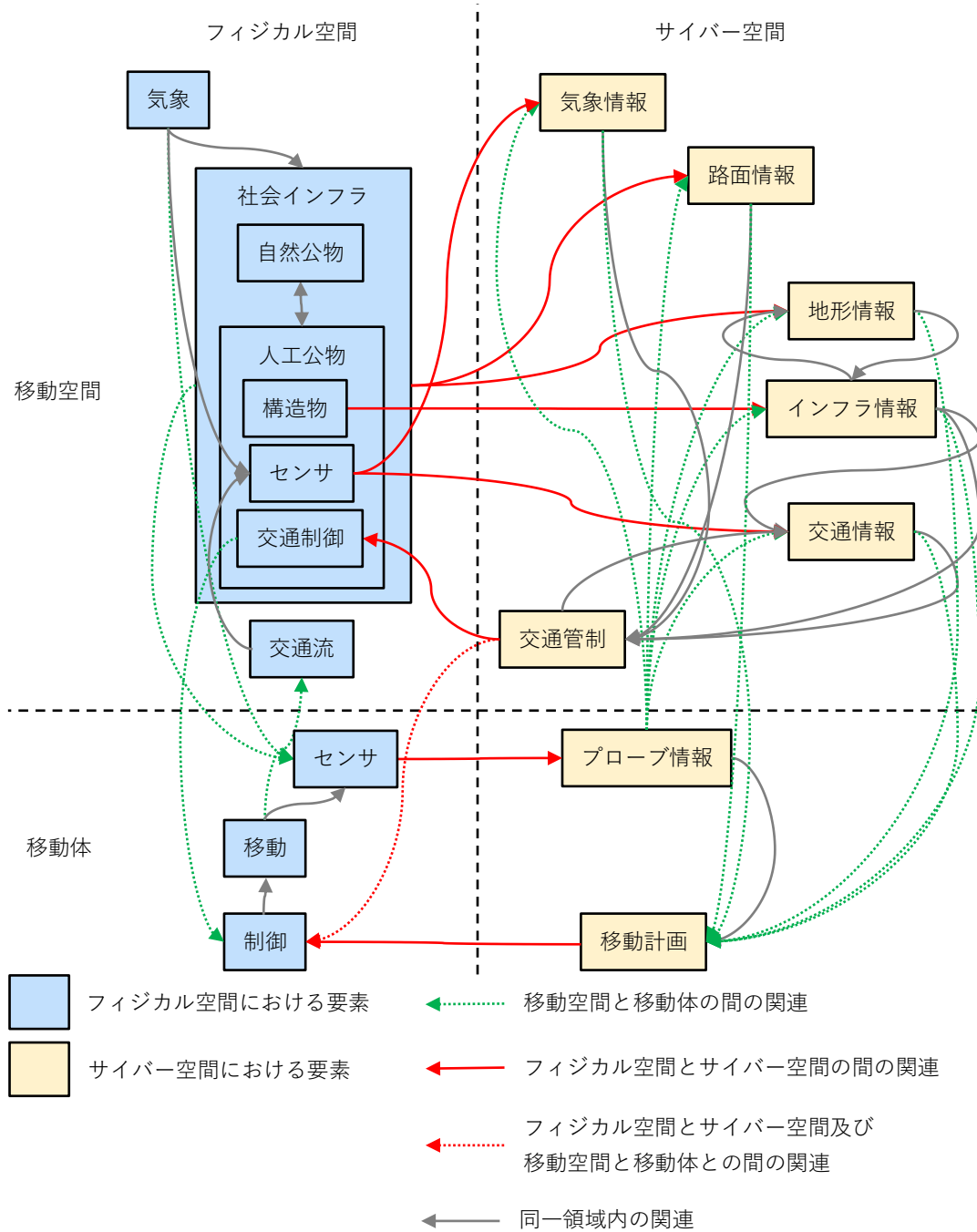


図 3-17 空間情報基盤を構成するシステム要素

様々な交通手段における移動体は、センサ等により必要な情報を収集し、その情報から移動計画を作成し、物理的な制御により移動を行う。ただし、移動体自身が観測できない領域については、外部のデータベースからより広範囲の情報を取得し移動計画に用いる。

地形情報やインフラ情報、路面情報等の物理的な空間情報は、移動可能な領域を判断する

ために必要な情報である。一般的なナビゲーションシステムは、移動空間の情報と外部の交通情報を組合せ、現在位置から目的地までの経路探索を行う。

気象現象もまた移動に影響を与える要素である。降雨や降雪は路面の性質を変化させ、移動体を選択する経路や手段に影響を与える。地上交通だけでなく、船舶や航空機の運航も同様に、気象現象の影響を受ける。

気象情報は、移動体だけでなく、交通管制でも用いられる。例えば、強雨や強風、濃霧、降雪、路面凍結といった状況で、安全な移動に支障がある場合、通行止めや速度規制のような交通制限が行われる。

複数の移動体が集合することにより発生する交通流は、その交通量が過密になると渋滞を引起し移動に影響を与える。交通管制は、その交通流を円滑化するため交通制御を行う。例えば、道路交通管制センターは、道路に車両感知器のようなセンサにより交通情報を取得することで現況の交通流を把握し、信号機などのインフラ側の設備を制御することにより移動体の動きを規制する [115]。航空管制においても、航空機の状況を管制官が監視し、操縦者へ指示を送ることにより、移動体の制御へ働きかける [116]。

以上のように、空間情報基盤を構成するシステムと要素システム間の関係を示したが、システム全体を俯瞰してそれぞれの関係性は複雑に関係しあう。システムの実現には、特定の目的や役割ごとにシステムを分解し要素を整理するとともに、実現化のプロセスを定義する必要がある。

第4章ではこれらシステムを実現するためのアーキテクチャモデルについて述べる。また、第5章では、本章で述べたシステム要素とその関係について、第4章で述べるシステムアーキテクチャモデルを適用し、空間情報基盤のシステムアーキテクチャを構築する。

第4章 空間情報基盤のシステムアーキテクチャ

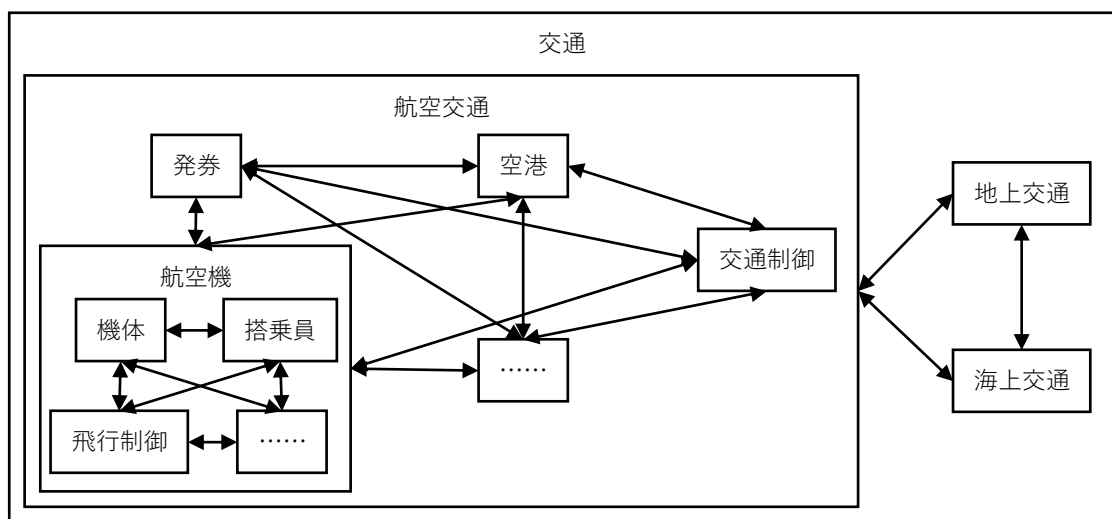
4.1 本章の内容

第3章では、空間情報基盤を構成する要素とそれらの関係性から、空間情報基盤が様々な要素が関係しあう複雑なシステムであることを示した。システムの実現には、その構成を整理するとともに、ライフサイクルの検討が必要である。本章では標準的なシステムアーキテクチャモデルをもとに、システム構成とライフサイクルモデルを考慮した、システムアーキテクチャモデルを提案する [117,118].

4.2 標準的なシステムアーキテクチャモデル

4.2.1 システム構成

ISO/IEC/IEEE 15288 では、システムの定義を、1つ又は複数の目的を達成するために構成された相互作用する要素の組合せとしている [119]. ISO/IEC/IEEE 24748-1 における航空交通の例では、航空機のシステムを、飛行制御や機体、搭乗員など、ソフトウェアだけではなく、ハードウェアや人など様々なシステムにより構成している。また、航空機自体も航空交通制御や空港、搭乗管理などから構成される航空交通システムの一部として示している。さらに、航空交通システムも地上交通や海上交通を含めた交通システム全体の一部であると考えることができる (図 4-1).



ISO/IEC/IEEE 24748-1:2018 を参考に作成

図 4-1 交通システムのシステム構成例

つまり、システムは様々なシステム要素から構成され、さらにシステム自体が他のシステムを構成するシステム要素のひとつになりうる。これらシステムの包含関係から、システムの構成は図 4-2 のような木構造で示すことができる。

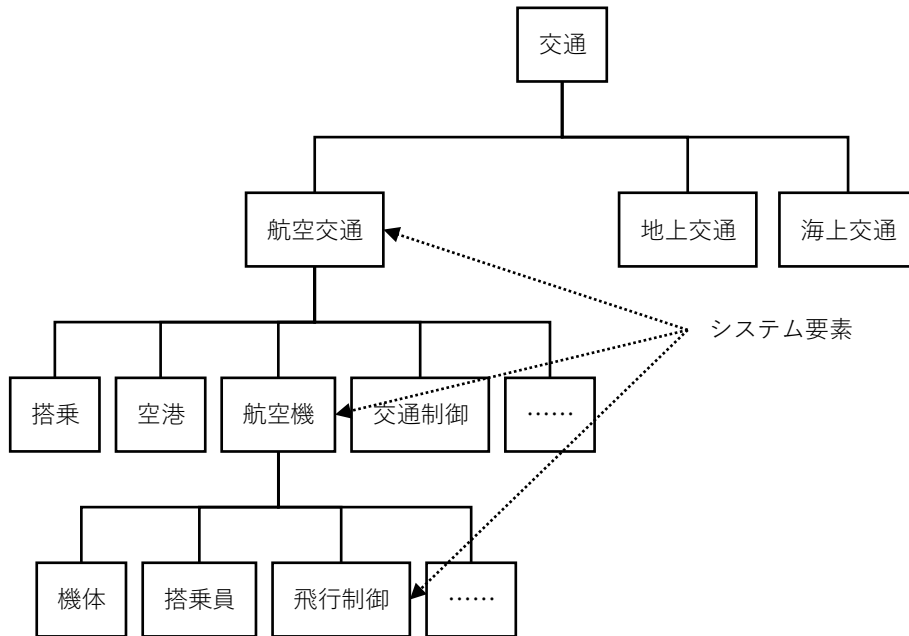


図 4-2 システム要素の階層構造

ただし、これらのシステム構成は、ある観点からの側面に過ぎず、ステークホルダーの関心により変わりうることを考慮する必要がある。例示した図においても、構成するシステム要素が省略されているが、複雑なシステムほど構成する要素を挙げるのが困難となる。

また、システムの包含関係も観点により変わりうる。例えば、利用者にとって最適な移動を考えた場合、様々な交通機関が協調しあい、総合的な交通計画を行う必要がある。この場合、航空交通、地上交通、海上交通の各交通制御システムが統合されたシステムも考えることができる。

システムの実現には、システム構成だけでなく、システムのライフサイクルを考え、実現のためのプロセスを構成する必要がある。次項では、システム開発におけるライフサイクルモデルについて述べる。

#### 4.2.2 ライフサイクルモデル

##### (1) 標準的なライフサイクルモデル

国際標準化機構 (International Organization for Standardization; ISO) は ISO/IEC/IEEE 15288 によりライフサイクルプロセスを規定しており、日本ではその翻訳である JIS X 0170 が発行されている [120]。これらの規定によれば、ライフサイクルモデルは、ライフサイクルにおけるプロセスの流れ (入出力) をモデル化したものと説明できる。ISO/IEC/IEEE 24748-1

では、ライフサイクルプロセスの適用ガイドラインを提示しており、いくつかのライフサイクルモデルが提示されている [119].

ライフサイクルモデルのひとつであるウォーターフォールモデルは、一連のプロセスを1回のライフサイクルで逐次進めていくモデルである(図4-3). 要件が安定していれば効率的に開発を進めることができるが、上流工程の内容に変更が必要となった場合、それが上流であるほど影響が大きくなるため、要件への十分な理解が必要である。また、変更に対する柔軟性に欠けるため、プロジェクトが長期化した場合、外部環境が変化し、それが要件の変更につながる可能性がある。

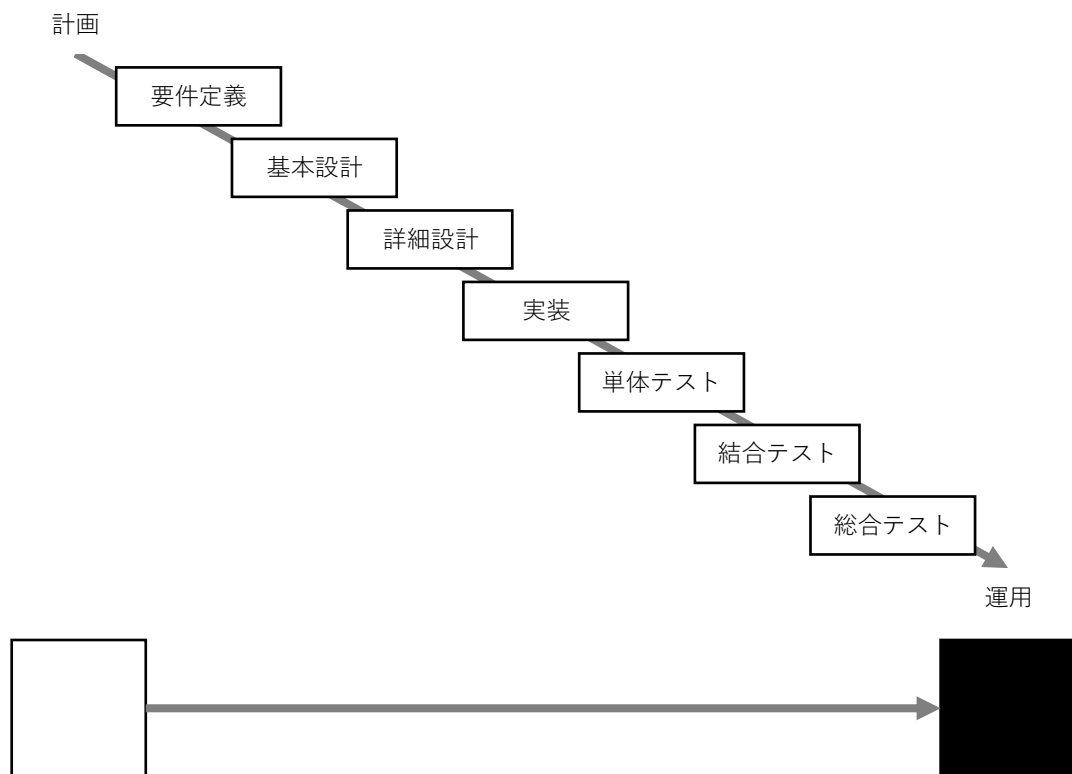


図 4-3 ウォーターフォールモデルの例

段階的モデルは最初の要件からライフサイクルを複数に分割し、段階的に開発を進めていく方法である（図 4-4）。最初は部分的な機能をリリースし、バージョンアップを重ねることでシステム全体を完成させる。

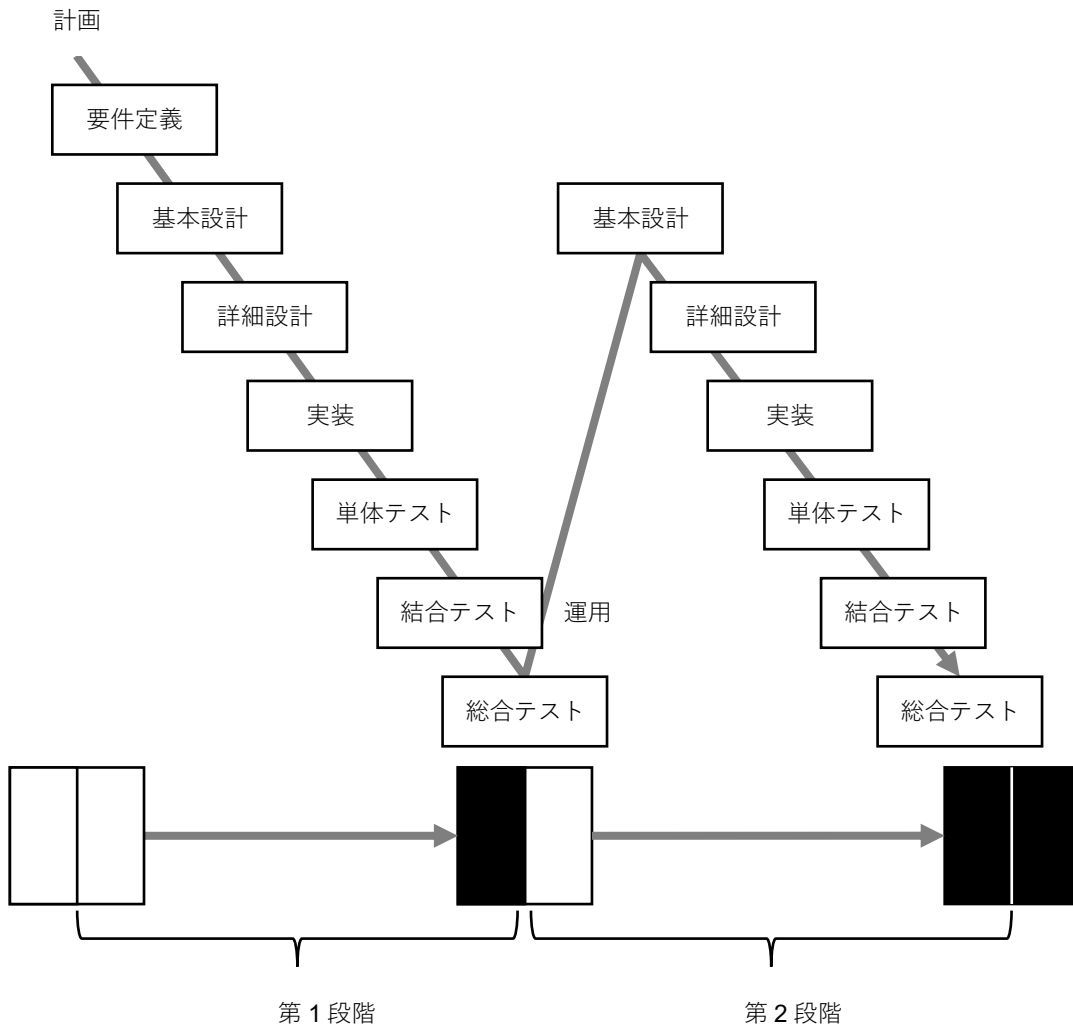


図 4-4 段階的モデルの例

最初のリリース時点では開発量が少なく、早いリリースが可能であるが、部分的な機能でも利用できるようにする必要がある。また、開発を進める中で要件が変わった場合、最初の計画の変更を検討する必要がある。

進化的モデルは、ライフサイクルを何度も繰り返しながら開発を進めるモデルである（図4-5）。

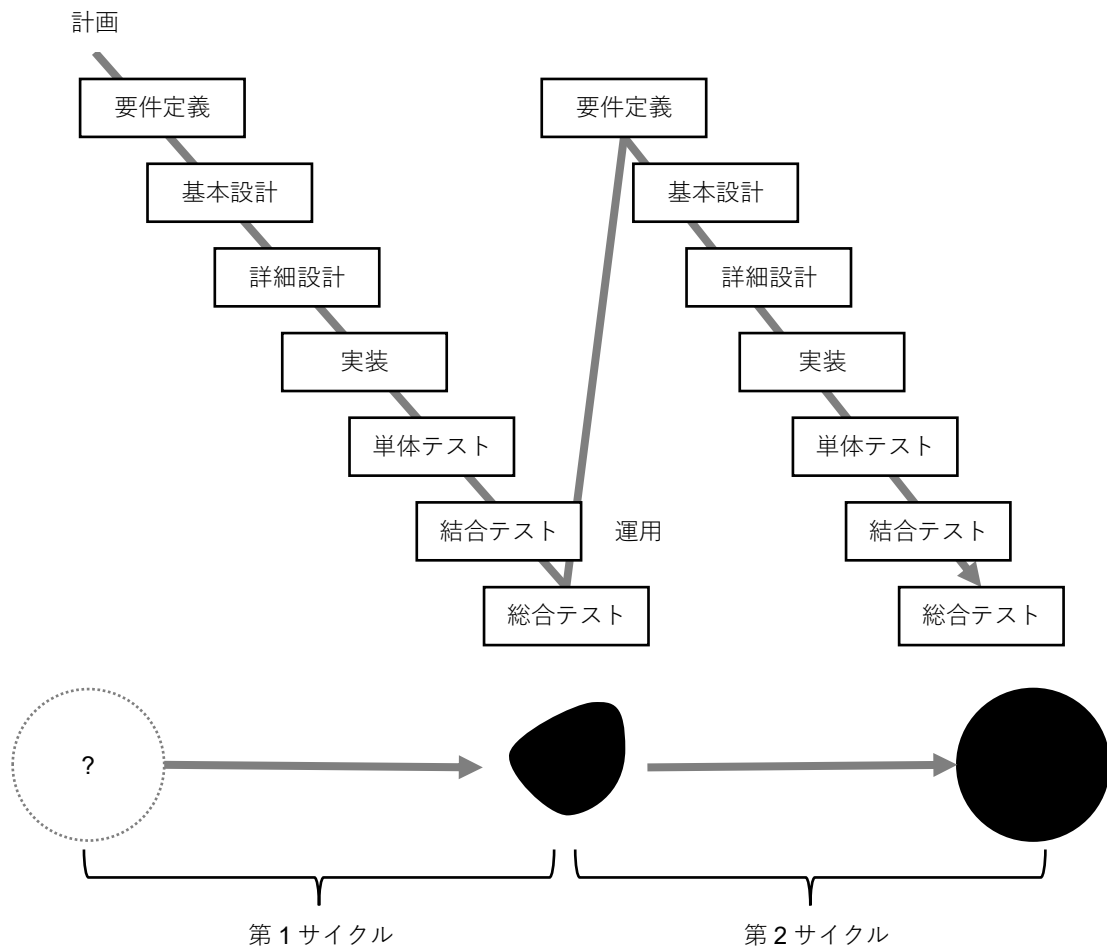


図 4-5 進化的モデルの例

段階的モデルと同様にリリースを繰り返しながら開発を進める方法であるが、開始時点ですべての要件がわからない点に違いがある。部分的な要件定義から始め、その開発結果から改めて要件定義を行い、バージョンアップを重ねることでシステムを完成させる。したがって、リリースとユーザからのフィードバックを頻繁に行いながら開発を進める必要がある。

(2) Vモデル

ライフサイクルモデルの中で最も単純なウォーターフォールモデルの各プロセスを見ると、計画から実装へと全体から詳細な部分へ要素を分解しながら実現していく段階と、部分的な要素から全体へと結合しながら検証していく段階の2つに分類できる。例えば図4-6のようなライフサイクルでは、要件定義から実装までのプロセスで、全体の抽象的な内容から分解しながら詳細化し、システムを実現していく。最も詳細な単位で実装された各要素は、それぞれ単体で検証された後、結合されながら検証され、最後にはシステム全体へと結合され、総合的に検証される。

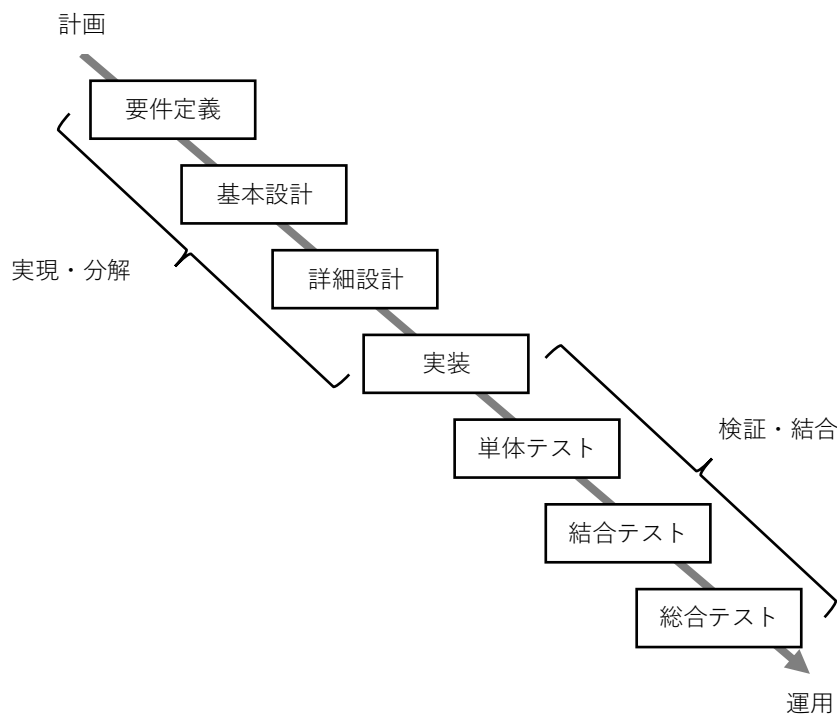


図 4-6 ライフサイクルにおける実現・分解と検証・結合の段階

この分解と結合のプロセスは、科学的な問題解決の方法に類似する。デカルトは方法序説において明瞭性の規則、分析の規則、総合の規則、枚挙の規則の、4つの規則を示し [121]、論証のプロセスを、対象の分解により問題を単純化し、単純なものから徐々に複雑なものへと導いていき、最後に完全な枚挙と全体の見直しを行うことと説明している。



この実現・分解の段階と、検証・結合の段階を折り返してV字型に表現したものがVモデルである(図4-7) [122]。Vモデルは、要件定義と総合テスト、基本設計と結合テストといったように、左右のプロセスで対応関係を示すことができる。要件定義や基本設計といった実現化の段階から、それらの成果に対する検証内容を明確化することができるため、各プロセスでの不備を早期に発見し、品質と生産性を高めることができる。

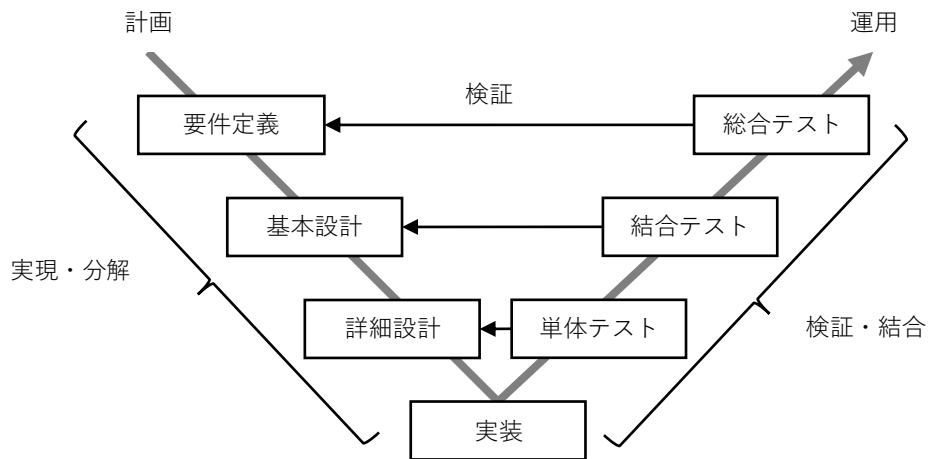


図 4-7 Vモデルの例

Vモデルは、情報処理推進機構の標準フレームや、ドイツのV-Modell XTといった、システム開発プロジェクトの規格に用いられており [123,124]、他にもITS (Intelligent Transportation Systems) や宇宙船におけるソフトウェア開発ガイドラインに用いられている [125,126]。

V字の左側がシステムの分解を、右側が結合の段階を表すことから、上位のプロセスほど抽象的で包括的な要素を、下位のプロセスほど具体的で詳細な要素を対象にしていると考えることができる。

左右プロセスの対応関係により V モデルを階層化すると、分解度に応じた階層構造を示すことができる。図 4-8 の例では、上層から下層へ行くに従い、システムはサブシステムへ分解され、モデル上の最小単位であるコンポーネントへと分解されていく。

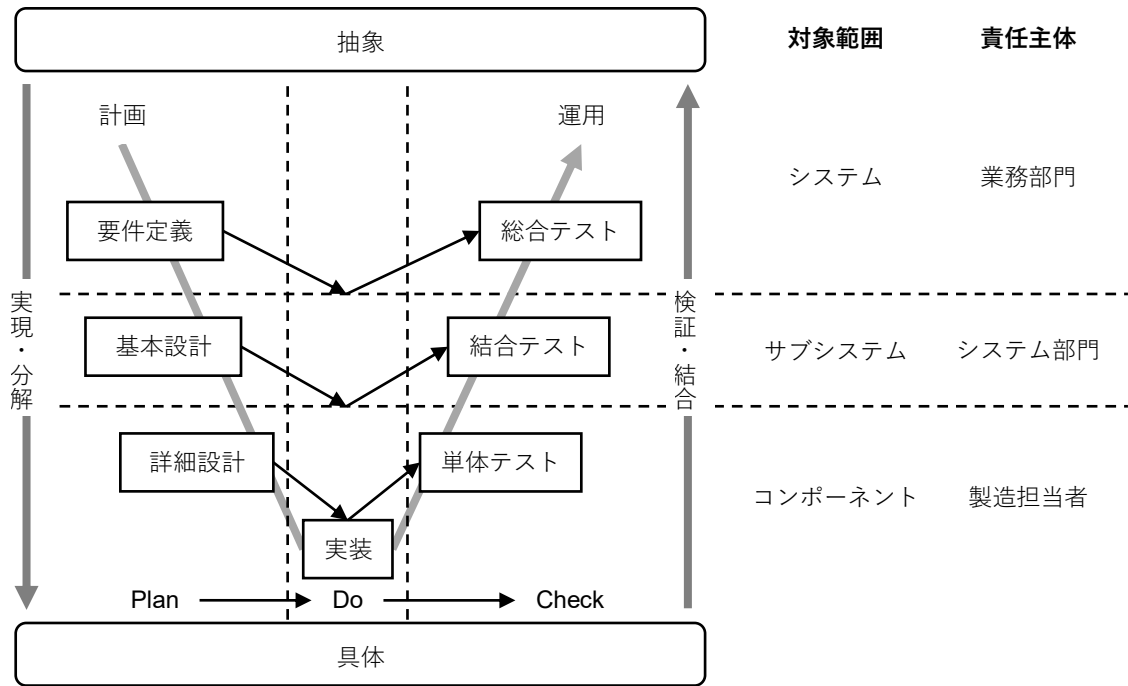


図 4-8 プロセスの階層構造と Plan-Do-Check 関係及びプロセスの実施主体者

また、プロセスの上下関係に着目すると、上層の成果を入力として左側のプロセスで将来の計画を行い、下位のプロセスでその計画を実行し、右側のプロセスで実行結果を検証する、階層ごとの Plan-Do-Check 関係を持つことが分かる。

この対象範囲から、階層ごとプロセスを実行する責任主体を考えることができる。例えば、ある業務に関する情報システムを実現する場合、開発の計画や要件定義は、対象業務の担当部門が行う必要がある。

その要件定義を元に行う基本設計は、専門知識を持つシステム部門が、サブシステムに分解しながら行い、最も詳細な設計、実装は、それぞれの製造担当者により行われる。実現段階における各プロセスの成果は、実施した主体者がその対象範囲内の責任で検証を行い、評価されるべきである。

実装されたコンポーネントは、製造担当者が自身の担当するコンポーネントごと検証を行う。各コンポーネントを結合し構築されるサブシステムは、システム部門が基本設計と照らし合わせながら検証を行う。さらに、各サブシステムは統合され、システム全体が構築さ

れる。システムが業務で利用するのに問題ないかは、業務部門が計画や要件定義と照らし合わせながら検証・評価を行う。

### 4.3 提案するシステムアーキテクチャモデル

Vモデルと木構造で表したシステム構成は、システム要素の分解度に応じた階層構造を持つことから、これらを組み合わせて1つのモデルで表現することができる。本節では、木構造のシステム構成とVモデルの各階層を一致させて表現したシステムアーキテクチャモデルを提案する(図4-9)。本モデルでは、同一階層のシステム要素とプロセスを対応づけることで、各プロセスが対象とするシステム要素を明確化する。

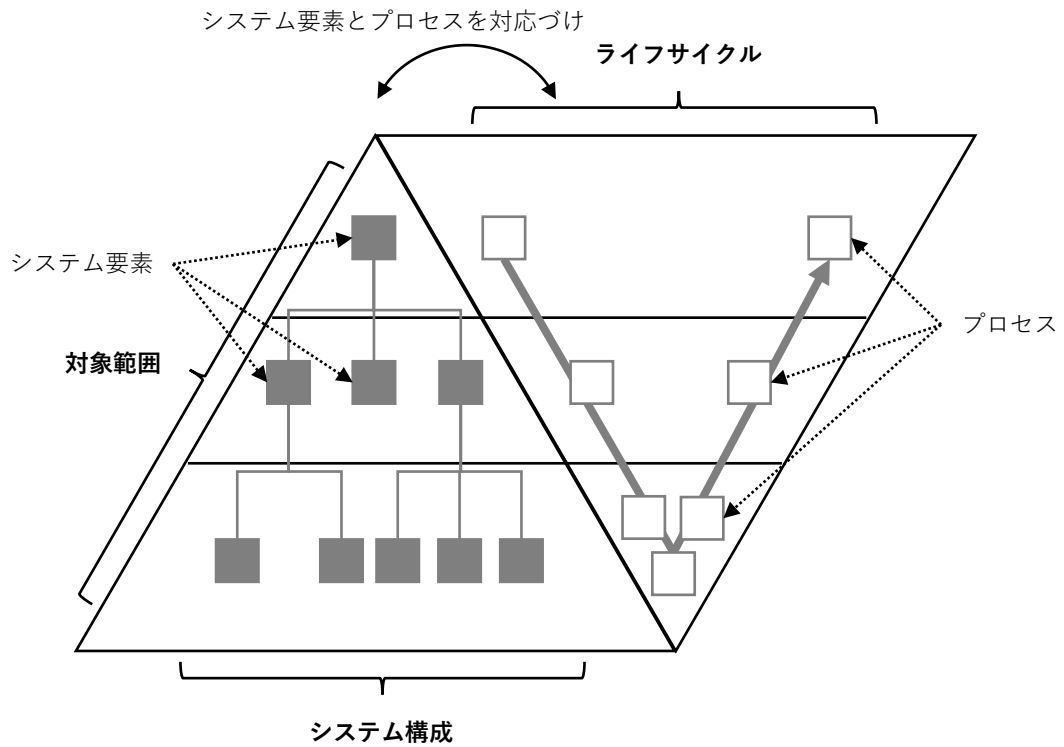


図 4-9 提案するシステムアーキテクチャモデル

例えば、システムが2つのサブシステムで構成される場合、図4-10に示すように、階層に従ってアーキテクチャモデルを分解して表現することができる。分解したモデルは、対象範囲が限定されることにより単純化され、詳細化が可能になる。ライフサイクルの流れは、要素の分解に合わせて分離し、サブシステムごとに並列で実行され、要素の結合とともに合流する。サブシステムごとのライフサイクルは、それぞれが定めたプロセスにより進めることができるが、品質管理の面から Plan-Do-Check のセットで構成される必要がある。分解された各要素の実行主体が異なる場合でも、階層ごとの Plan-Do-Check 関係を意識することで、対象要素の開発で責任を負うプロセスが明確になる。また、下位層はプロセスの流れにより上位層を根拠とするため、上位層との整合性を失わないよう、その成果を強く意識する必要がある。

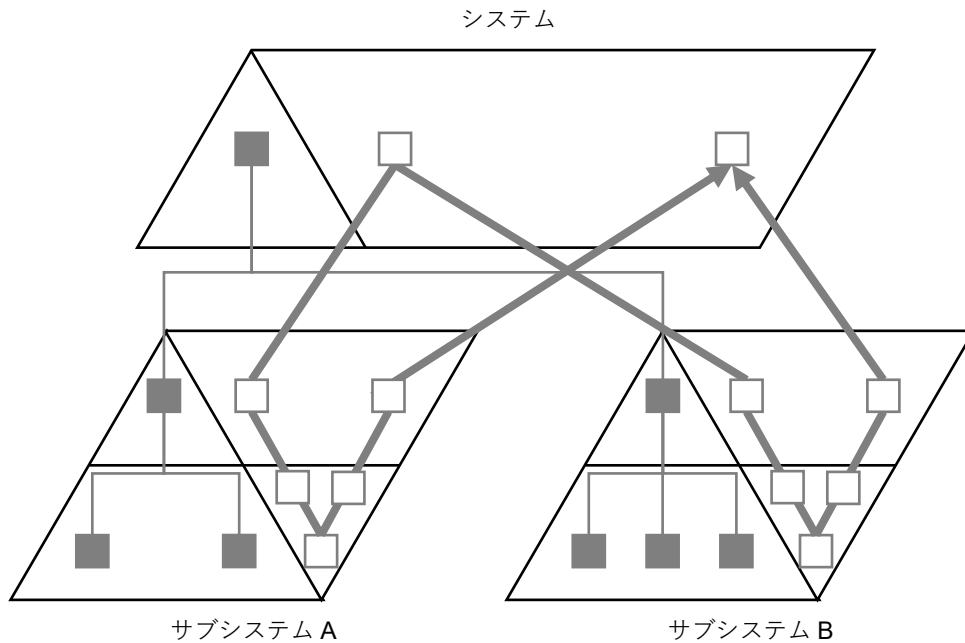


図 4-10 システムアーキテクチャモデルの分解

各要素の開発では、それぞれ同じ階層に属するプロセスを並列的に実行することができる。図4-11は本モデルにおけるプロセスの実行フローの例である。システムは3つのサブシステムA、B、Cで構成されており、サブシステムAは2つのコンポーネントA-1、A-2で、サブシステムCは2つのコンポーネントC-1、C-2で構成される。

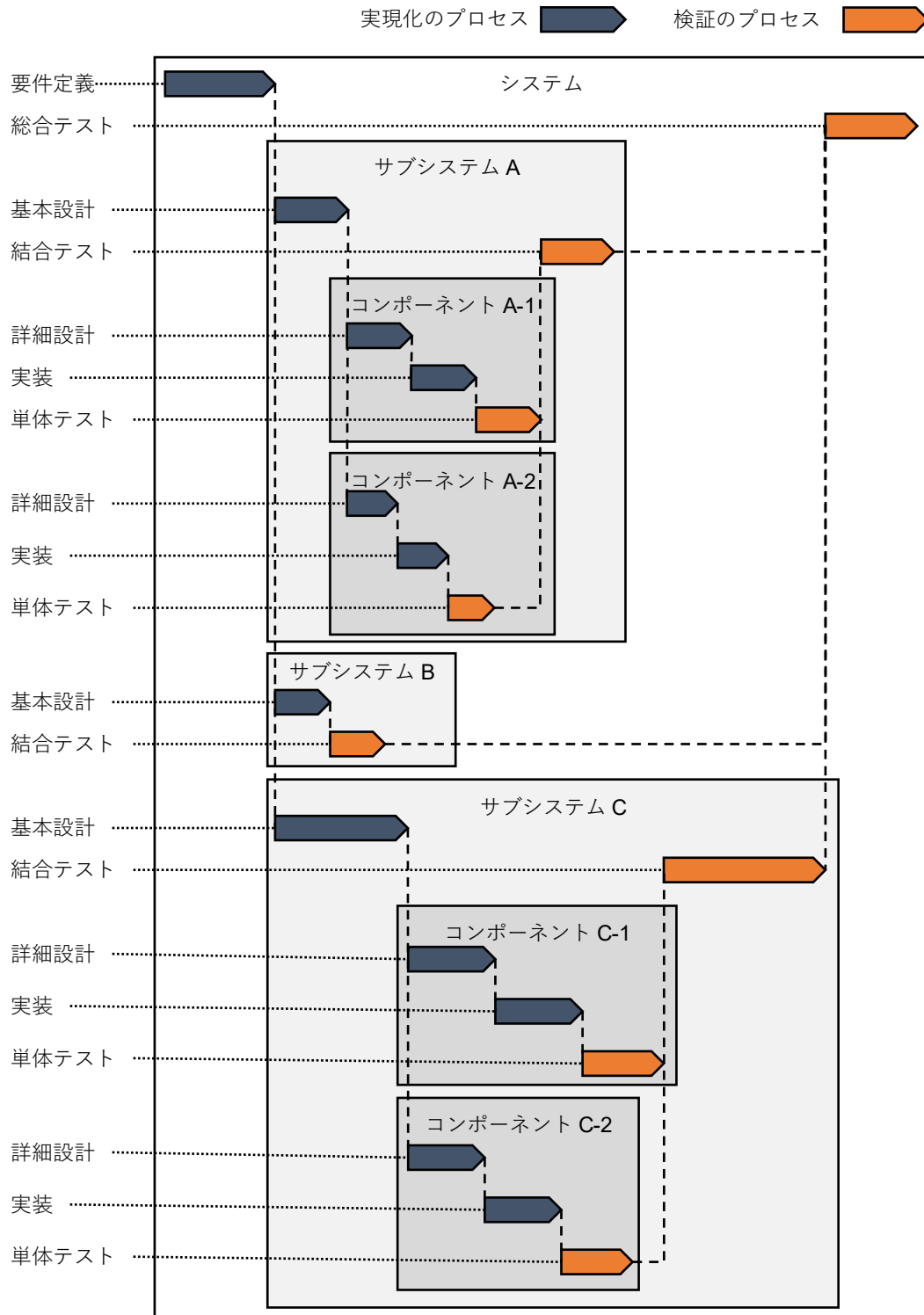


図 4-11 プロセスの実行フロー

システム構成に合わせてプロセスをまとめると、システム要素で階層化された V 字のフローで表される。コンポーネントへと具体化が進むにつれ各プロセスは細分化されるが、検証のフェーズではコンポーネントからサブシステム、システムへとシステム要素が結合されながら 1 つのプロセスへ統合されていく。要素ごとのプロセスは各階層の単位で並行して実行可能であり、規模の小さい要素は早く実現可能であるが、検証フェーズでは統合する他の要素のプロセス完了を待つ必要がある。

以上のように、本研究で用いるシステムアーキテクチャモデルの提案と説明を行ったが、他の手法でもシステム構成とライフサイクルを組み合わせたシステムアーキテクチャモデルの表現は可能である。次節では、他のモデル化手法との比較を行う。

#### 4.4 他のモデルとの比較

##### 4.4.1 立体モデル

SGAM (Smart Grid Reference Architecture Model) や RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industry 4.0), IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) などのアーキテクチャモデルでは、3つの観点を3軸で表した立体的なモデルで表現される(図 4-12) [1,127,128]。この立体モデルは、ライフサイクルを含めた各軸により分割された1つのセルがシステム要素であり、それらの集合によりシステム構成を表現する。

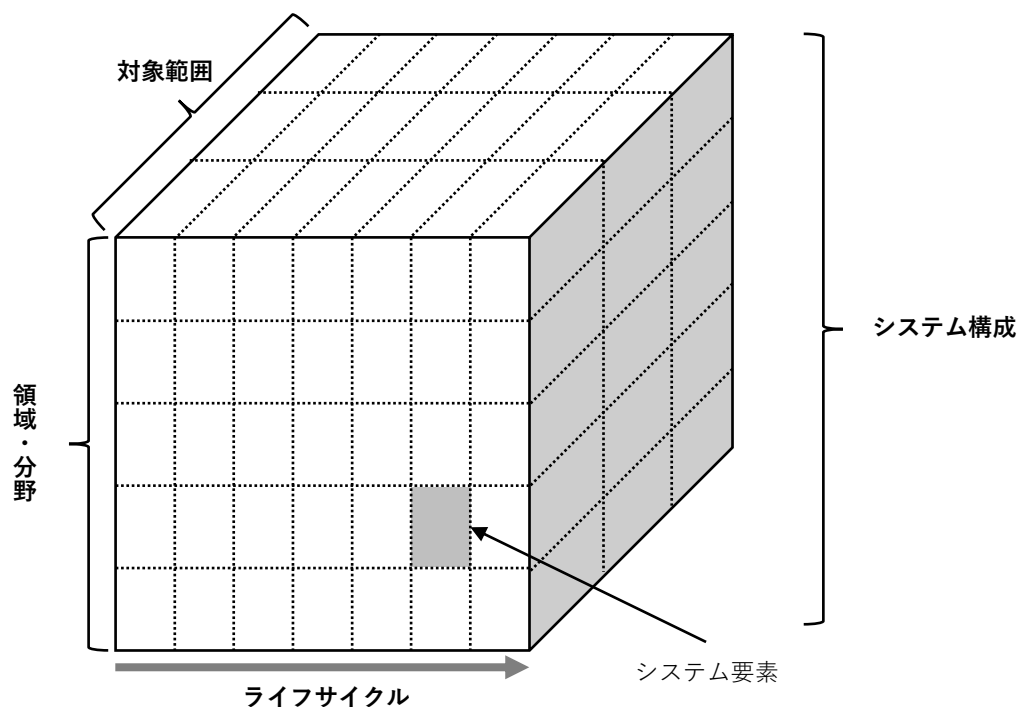


図 4-12 立体モデル

このモデルは要素と各観点との関係性を把握しやすく、3次元的に表現するため、2次元表現よりも多くの情報を示しやすい。例えば、ライフサイクルと対象範囲に加え、システム要素の領域や分野といった観点からも表現することが可能である。

しかしながら、ライフサイクルが直線で表現されるため、実現化のプロセスと検証のプロセスとの対応関係はVモデルと比べ把握しづらい。また、システム構成の内部を確認するためには、断面図による表現や3Dユーザインタフェースなどによる操作が必要である。

#### 4.4.2 二元Vモデル

二元Vモデルは、アーキテクチャVとエンティティVの2つのVモデルから表したモデルである [129]。アーキテクチャVはシステム全体のライフサイクルを表しており、システム全体から最も詳細なエンティティまで、システム要素が分解されていく階層構造を示している。また、エンティティVは各階層におけるシステム要素のライフサイクルを示している (図 4-13)。

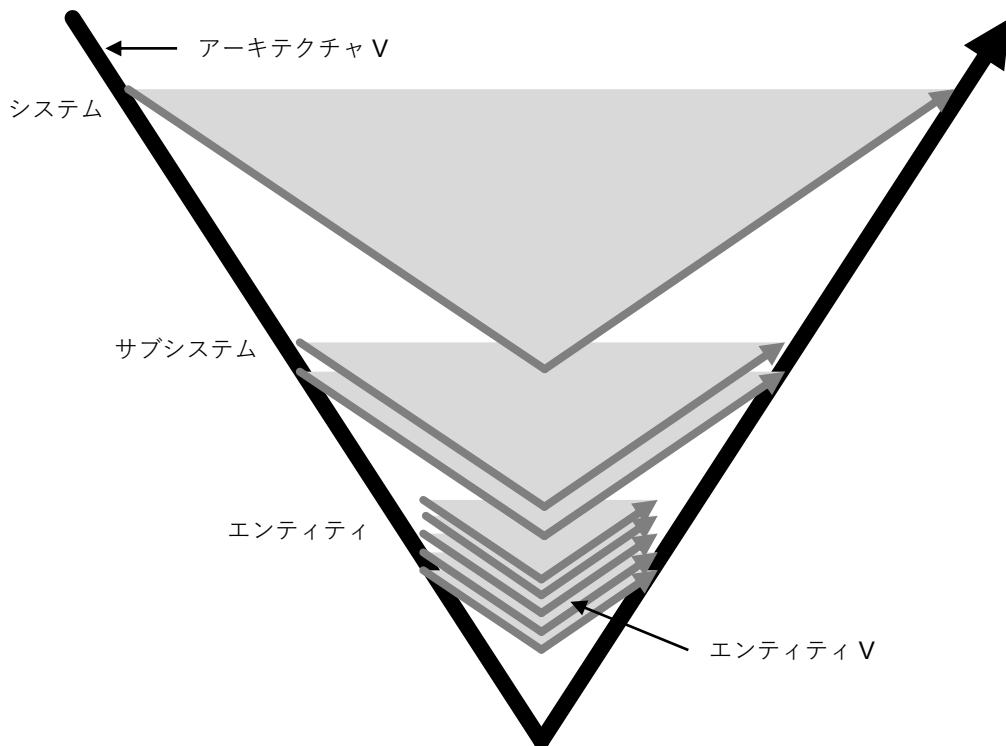


図 4-13 二元Vモデル

2種類のライフサイクルにより構成される二元Vモデルは、本論文で提案するアーキテクチャモデルと同様の階層構造を示しており、システム全体のライフサイクルを示すとともに、システム要素ごとの平行したライフサイクルを明瞭に表現する。しかしながら、二元Vモデルではシステム構成が示されないため、システムがどのように分解され構成されるか、別に示す必要がある。これに対して本論文で提案するモデルは、システム構成を示すと

ともに、各システム要素の担当者が行うべきプロセスや対象範囲を理解しやすくしている。

#### 4.4.3 線形モデル

ウォーターフォールモデルのような直線的なライフサイクルとシステム構成を組み合わせると、図 4-14 のようにモデルを表現できる。このモデルでは、システム構成を入れ子構造で表現することでプロセスとシステム要素の対応関係を示すことができる。

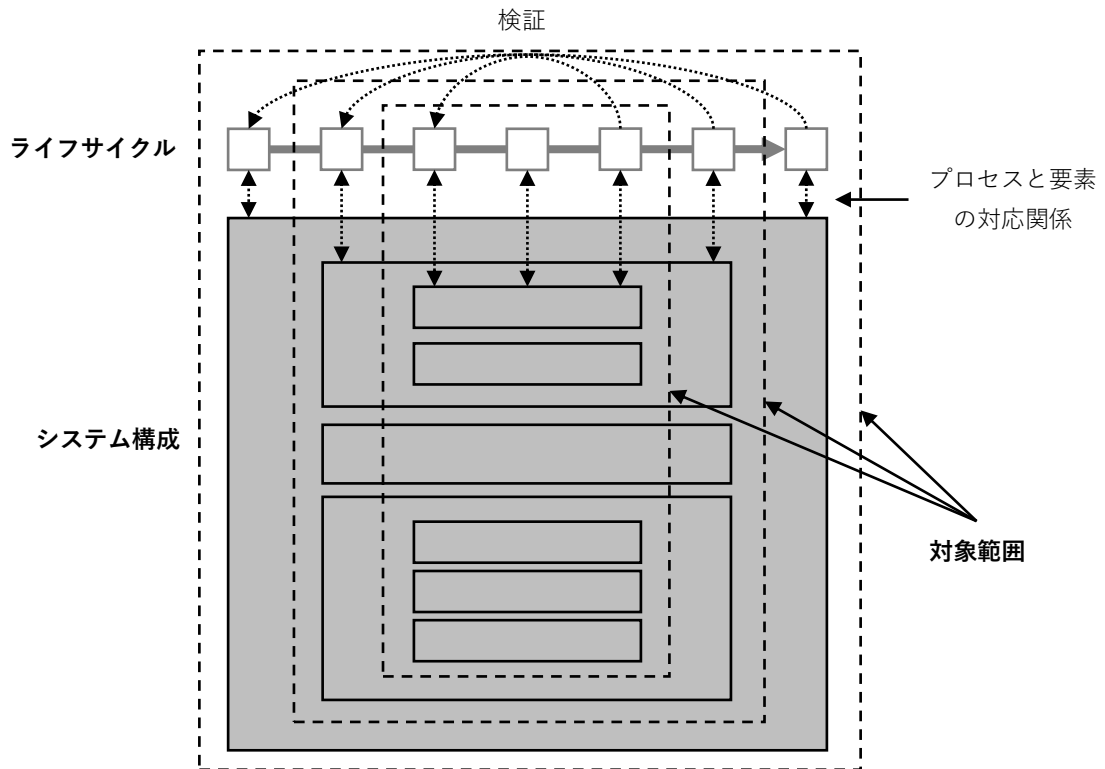


図 4-14 線形モデル

このモデルは、線形のライフサイクルをそのまま時間軸と見なすことができ、どのシステム要素をどのプロセスで開発するかを把握しやすい。しかしながら、実現化のプロセスと検証のプロセスの対応関係が把握しづらい。実施主体者が Plan-Do-Check に基づいたプロセスの実施を意識するには、Vモデルの表現がより適切である。



## 4.4.4 円形モデル

反復的な開発では、ライフサイクルを円若しくは渦状に表すことがあるが、円形のライフサイクルとシステム構成を組み合わせると、図 4-15 のような表現ができる。システム構成は木構造の表現で対応づけることができ、本研究で提案する V モデルを用いたモデルに類似したプロセスとシステム要素の階層構造を示すことが可能である。

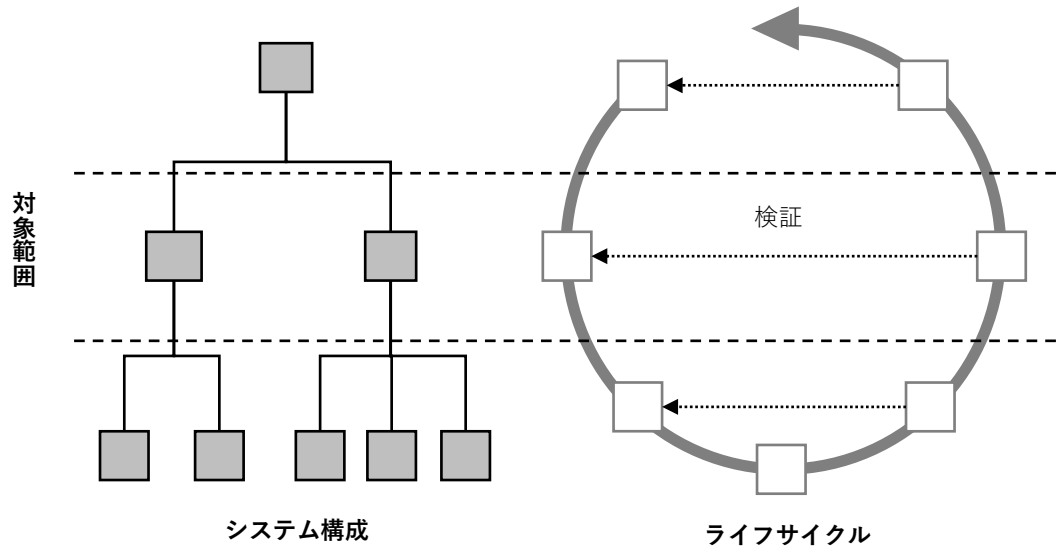


図 4-15 円形モデル

進化的モデルのようなライフサイクルが繰り返されるモデルの表現に適しているが、時間軸が戻るため、ガントチャートのような直線的にプロセスを表現するツールで用いることができない。

## 4.4.5 提案モデルの考察

本研究で提案するシステムアーキテクチャモデルは、V モデルを用いることにより、線形モデルや立体モデルのような直線的なライフサイクル表現で示すことが難しいプロセス間の関係性を表現する。また、円形モデルと異なりライフサイクルの時間軸は一方向に進むため、ガントチャートのような実際の時間軸に合わせた工程管理と整合した表現が可能である。

立体モデルでは、ライフサイクルと対象範囲の2軸に加え、領域・分野といった情報も追加し、より多くの観点からシステム構成を表すことができるが、提案するモデルではシステム構成の木構造で分類することにより、領域・分野のような要素を示すことができる。

二元 V モデルでは、システム要素のライフサイクルを重ね合わせることで、並行的なライフサイクルを表現できるものの、システム構成を把握できない。提案するモデルでは、シ

システム要素とプロセスを同一の階層で対照させることで、システム構成とライフサイクルとの整合を図ることができる。

第5章では、このシステムアーキテクチャモデルを空間情報基盤へ適用しシステム構築を行う。システムの検証として、一般的な道路建設プロジェクトへの適用を行い、道路交通システムの空間情報基盤モデルを構築することで適用性を検証する。さらに、本モデルを応用し、システム分析やモデルの拡張・分解を行うことで有用性を示す。

## 第5章 空間情報基盤の構築

## 5.1 本章の内容

本章では、第4章で提案するシステムアーキテクチャモデルを空間情報基盤に適用し、システムアーキテクチャモデルの妥当性を検証する。また、応用として、モデルを用いた情報技術の分析やシステムの拡張・分解を行い、モデルの有用性を示す。

## 5.2 CPS としての空間情報基盤

本論文が対象とする空間情報基盤システムは、フィジカル空間とサイバー空間とが融合する CPS である。CPS とは、物理要素とサイバー要素との間のフィードバックループであり、最小の CPS は物理要素とサイバー要素が1つずつで構成されるシステムとして表現できる。この小さな CPS が他のシステム要素や他の CPS と関連しあうことで、複雑で大きな CPS が構成される（図 5-1） [130]。このシステム間の関連がシステム全体の複雑さの要因となるが、フィードバックループの単位でシステムのまとまりを考えることで、システム構成を考えることができる。

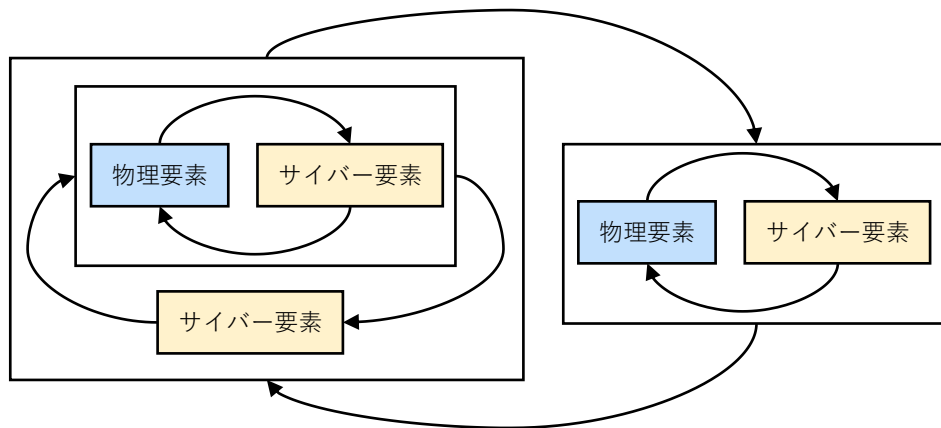


図 5-1 複数の CPS から構成される CPS

以下に第3章で示した空間情報基盤を構成するシステム要素について（図 3-17）、移動へのフィードバックループを形成する要素を抽出し、空間情報基盤のシステム構成を検討する。

最も単純なフィードバックループは、図 5-2 に示す移動体内のフィードバックループである。センサにより取得したプローブ情報を用い、サイバー空間で移動計画を行い、物理空間の制御を行うことで移動へと反映させる。この場合、取得できる情報は移動体自身が観測できるものに限られる。

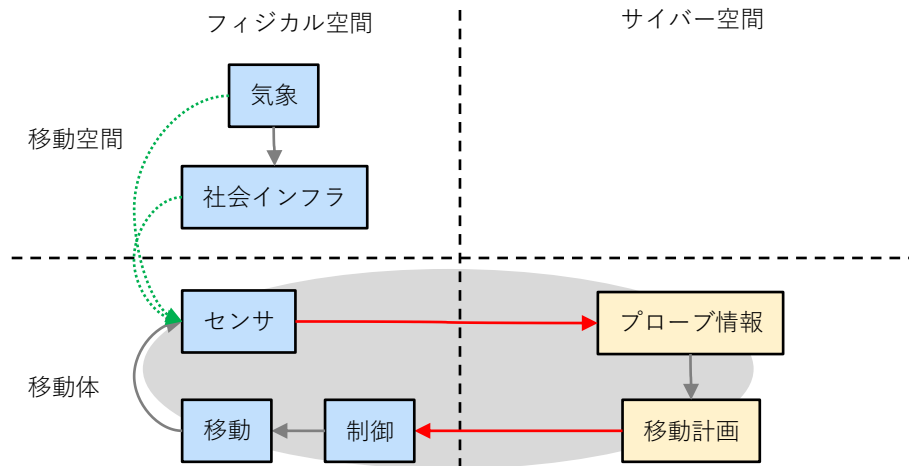


図 5-2 移動体のフィードバックループ

外部の情報を用い、移動体だけでは観測できない広い範囲の情報を用いたフィードバックループが図 5-3 である。外部情報は、あらかじめデータとして整備されたものや、移動体からのプローブ情報も利用することができる。この場合、移動空間のサイバー空間も含めたフィードバックループを形成する。

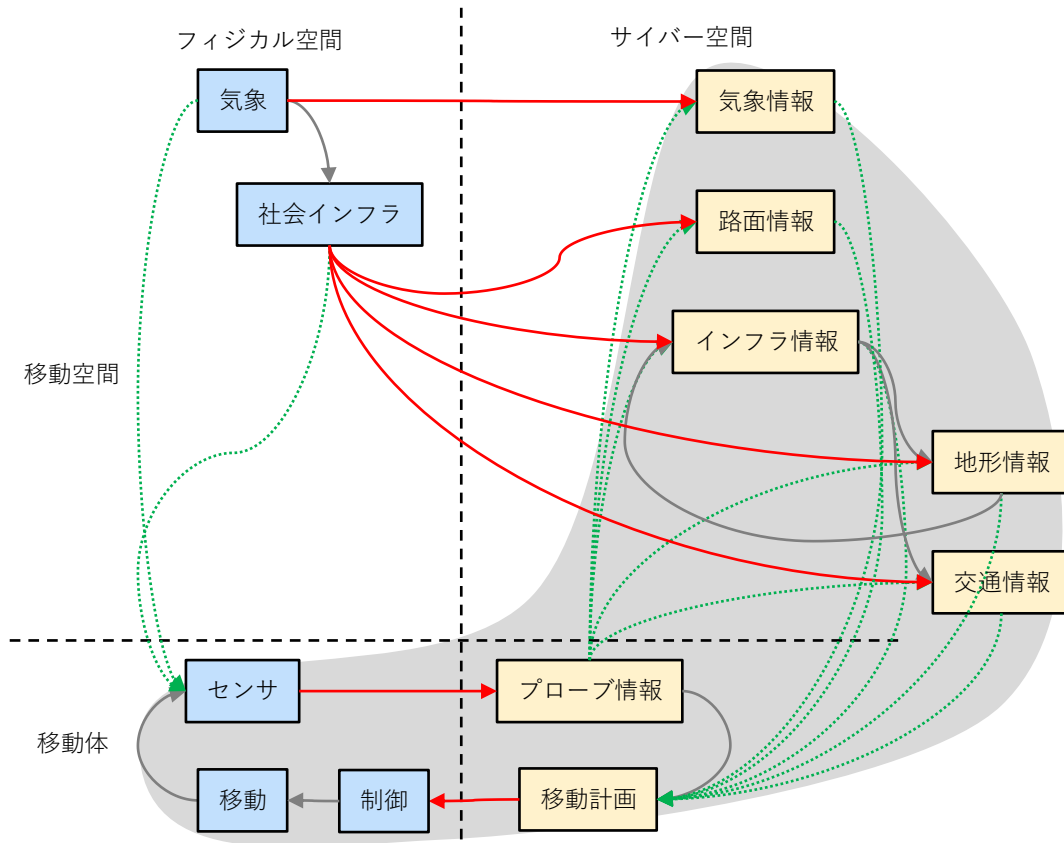


図 5-3 外部情報を利用した移動体のフィードバックループ

図 5-4 はインフラ側センサで取得した情報によるフィードバックループである。このフィードバックループは、複数の移動体の流れからなる交通流をインフラに備え付けたセンサにより取得し、その交通情報を移動体へフィードバックすることにより移動計画を行い、移動への反映させるものである。実際の移動計画には、交通情報と移動体との位置のマッチングが必要であるため、インフラ情報などの地図と移動体自身の位置であるプローブ情報を用いて、移動体が影響を受ける交通情報の位置を把握する必要がある。

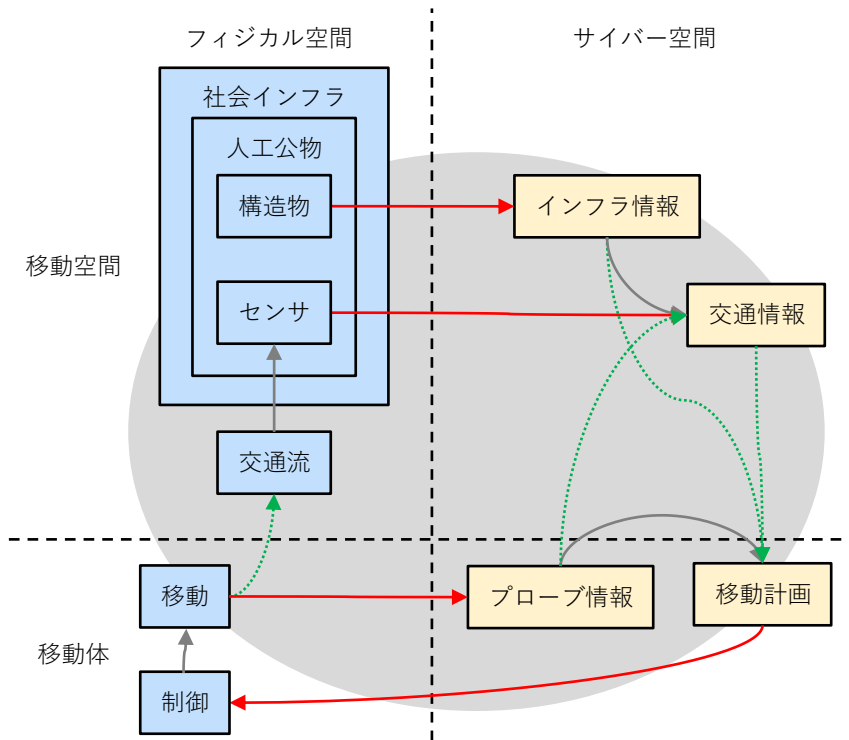


図 5-4 インフラ情報を用いたフィードバックループ

図 5-5 はインフラによる移動体の制御を行うフィードバックループである。鉄道や航空機など移動体が制限され管理可能な場合、移動空間側から移動体へ直接制御可能である。道路交通のような移動空間が不特定の移動体に供用される場合、交通信号機のようなインフラに備えられた交通制御機能により移動体を制御する。

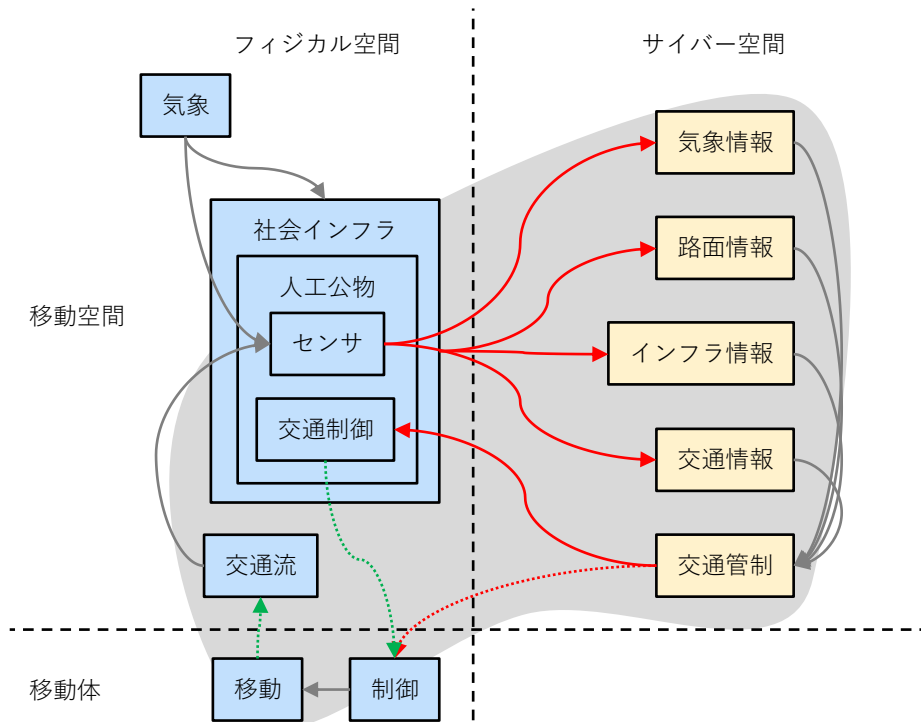


図 5-5 インフラによる移動体の制御を行うフィードバックループ

本論文では、これらのフィードバックループを、図 5-6 に示すように、移動体、交通、共通資源の3点から捉え、そのシステム構成を検討する。移動体は移動を行う主体であり、空間情報基盤におけるユーザとしても考えることができる。交通は、サービスとして移動手段を提供するものであり、安全性や効率性のために移動の規制も行う。共通資源は、この移動体と交通の両方で共用される実空間とその情報を提供する。

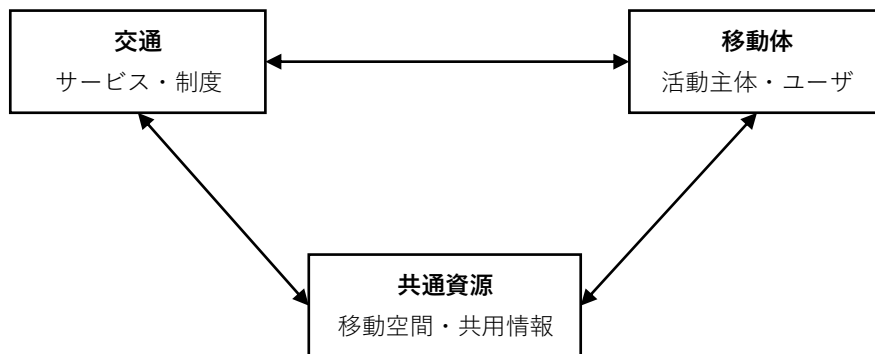


図 5-6 空間情報基盤を構成する3つの観点

移動体, 交通, 共通資源の3点から空間情報基盤のシステム構成を構築したものが図 5-7 である。

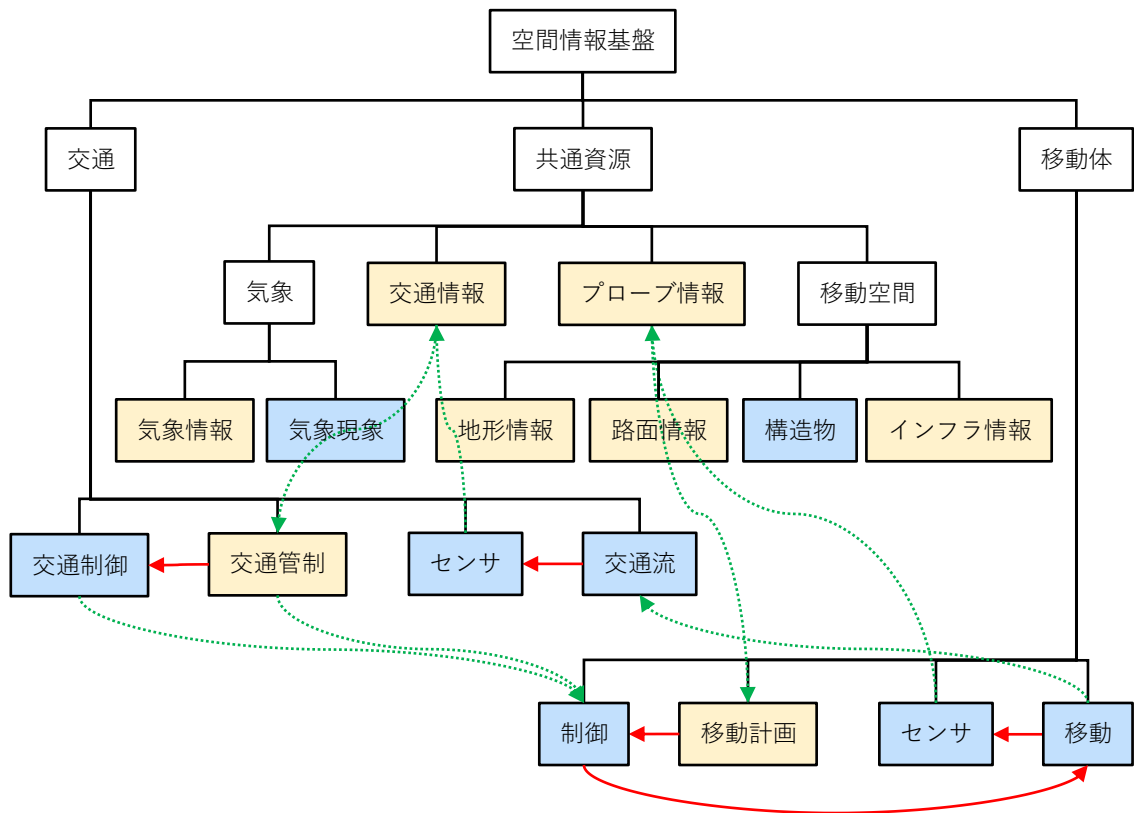


図 5-7 空間情報基盤のシステム構成

移動体は, 単独で物理現象と情報処理のフィードバックループを行う完結した CPS である。

交通も物理的な交通流を情報処理し交通制御を行うフィードバックループを有するが, 対象とする交通現象の直接的な発生源は移動体によるものであることから, 移動体のシステムに働きかける CPS であると考えることができる。

共通資源は, 移動体と交通とで共用されるシステム要素である。共通資源の要素だけでは移動に関連する CPS となりえないが, 移動空間や空間情報は移動に必要な不可欠な要素である。

次節では, この空間情報基盤から社会インフラの面からの実現を考え, そのシステムアーキテクチャモデルを検討する。



### 5.3 システムアーキテクチャモデルの検証

#### 5.3.1 検証方法

第4章で提案したシステムアーキテクチャモデルの検証として、社会インフラの建設プロジェクトへの適用を行う。まず、建設プロジェクトにおけるプロセスを整理し社会インフラの階層構造を定義する。この階層構造に従い、前項で挙げた空間情報基盤のシステム構成をもとに道路交通のシステムアーキテクチャモデルの構築を行い、その適用性について検証を行う。また、本モデルの応用例をいくつか示し、その有用性を示す [117,118,131]。

#### 5.3.2 社会インフラの階層構造

初めに、一般的な社会インフラの建設プロセスをVモデルで示し、その階層構造を定義する。

社会インフラは、構想段階から調査・計画、設計、施工、完成検査の生産プロセスを経た後、供用され、維持管理段階に入る（図5-8） [132,133]。通常は、これら建設生産プロセスの前に、事業実施のための事業計画が行われる。その事業計画は、その組織の方針に基づいて策定される。公共事業であれば、基本方針やマスタープラン、法律のような政策がそれにあたる [134]。適切なPDCAサイクルに基づけば、これら事業計画や政策に対し、実施結果の評価が行われる。事業対しては実施後の事後評価が事業評価として行われ、政策に対しては、政策チェックアップや政策レビュー、政策アセスメントの事後検証などの政策評価が行われる。

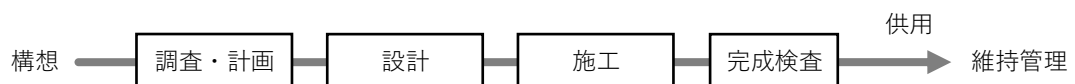


図 5-8 社会インフラの生産プロセス

これら一連のプロセスをVモデルで表したモデルを図5-9に示す。ここで、各プロセスの対象範囲から、社会インフラの階層構造を社会・事業・構造物の3階層により定義することができる。

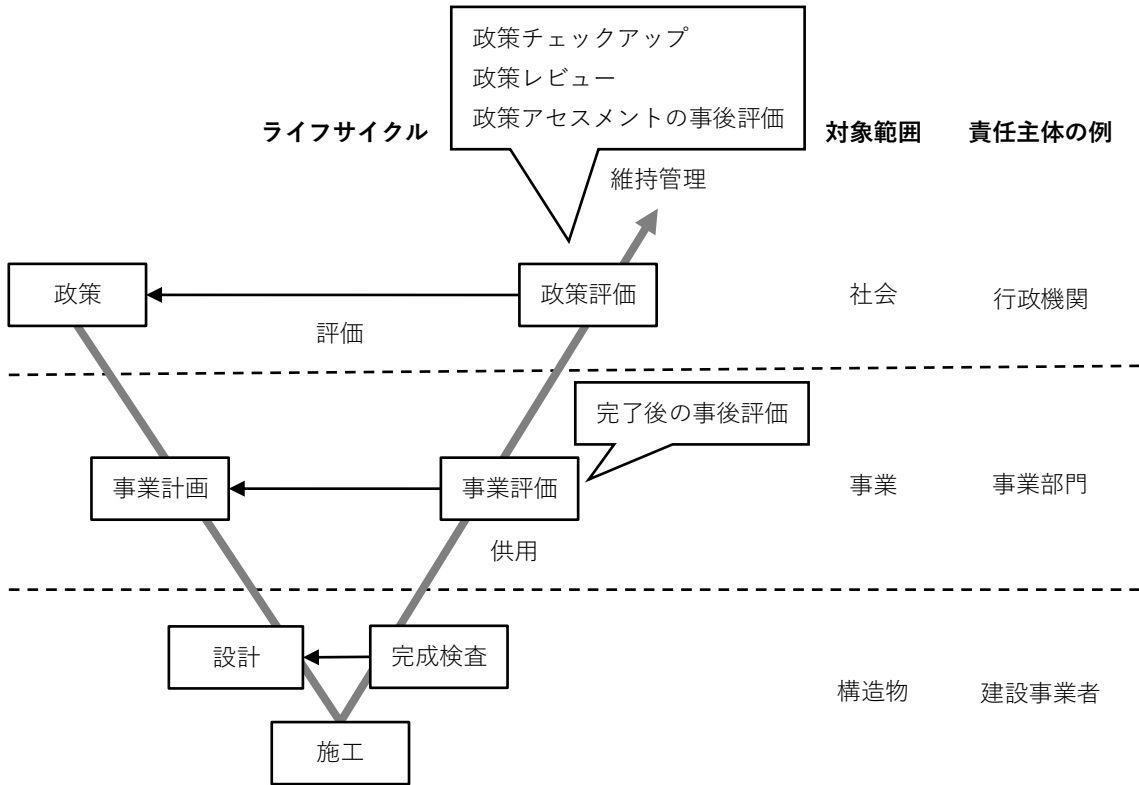


図 5-9 Vモデルによる建設プロジェクトのライフサイクル

階層ごとの責任主体を考えると、政策や政策評価といった社会層のプロセスについては行政機関が責任を負う。

事業層では、特定の業務を担当する部門やプロジェクトチームのような事業組織が、事業の実現と成果について責任を負う。この階層では、ある政策に基づく複数の事業が実施される場合があるため、事業ごとに責任主体が分かれることがある。

構造物層では、建設業者が実際の構造物の生産に対して責任を負う。大規模工事では多くの業種の専門的な技術が必要になるため、様々な企業からなる共同企業体が組織されることがある。

5.3.3 システムアーキテクチャモデルの適用性

(1) 建設プロジェクトのシステムアーキテクチャモデル

次に、建設プロジェクトの階層構造をもとに、システムアーキテクチャモデルを建設プロジェクトへ適用し検証を行う。図 5-10 は、一般的な道路交通における建設プロジェクトに適用した例である。前節で示した観点に基づき、本モデルでは共通資源と交通にシステム要素を分類している。

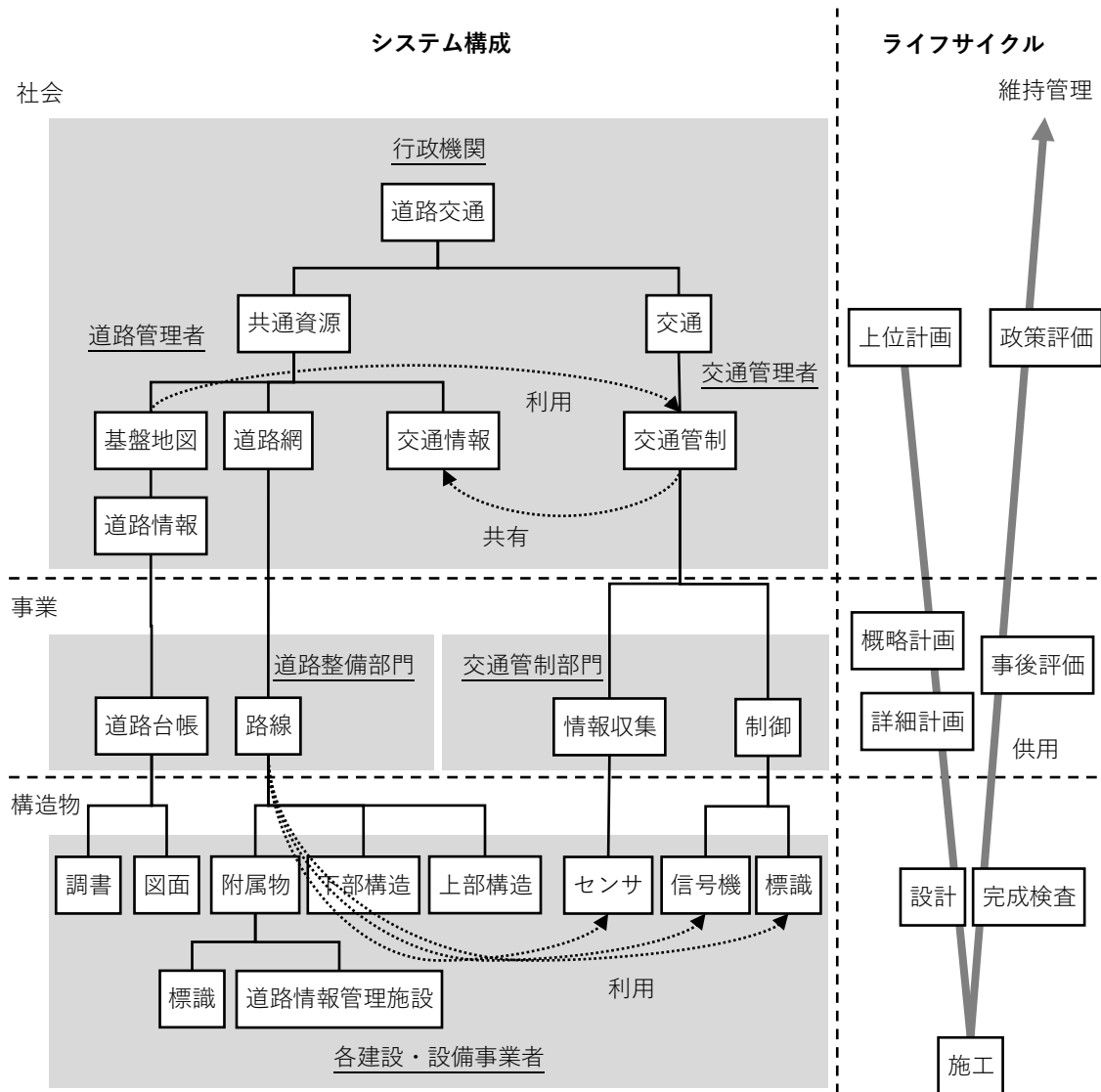


図 5-10 道路交通における建設プロジェクトのシステムアーキテクチャモデル

(2) 社会層

社会の階層におけるプロセスは、様々な政策により全体的な方針が策定される。国土形成計画、国土利用計画、社会資本整備重点計画といった国土に関する計画や、交通安全基本計画、交通政策基本計画、地域公共交通網形成計画といった交通政策が定められる。これら政策の検証として政策評価が行われる [135,136,137,138,139,140,141]。

社会層のプロセスが対象とする公共資源には、国土地理院の整備する基盤地図情報が含まれ、その中で全国的な道路網の情報も管理される [55]。また、日本デジタル道路地図協会が整備するデジタル道路地図も同様に、全国的な公共資源としての役割を持つ [142]。

社会層における交通の要素には、交通の管理・制御を行う交通管制が挙げられる。広域の交通管制は、各地の交通情報を集約し、その情報を分析し、各地の交通制御へフィードバックする。これら交通に関する要素は、都道府県公安委員会（警察）によって管理されることが道路交通法により定められている（道路交通法第四条）。

交通管制により集約される交通情報は車両の運転手に提供しなければならないため（道路交通法第九十九条の二）、交通情報は公共資源の一部として考えることができる。全国的な交通情報の集約と配信は、日本道路交通情報センターがその役割を担っており [143]、電波を使った車両への配信は、VICS センターにより行われている [36]。

### (3) 事業層

事業の階層では、社会層における様々な政策に基づき、実際の道路建設のための事業が実施される。概略計画で複数の経路案が作成され、合意形成の後、経路が決定すると、詳細計画により具体的な経路と道路構造の検討が行われる。供用後には、事後評価によりその事業の効果や影響等の実績を評価する。

事業層のプロセスが対象とする要素は、道路網を構成する各路線である。それら路線の情報は道路台帳として整備され、国や都道府県などの道路管理者により管理されることが法律により定められている（道路法第十八条、第二十八条）。

また、事業層のプロセスでは、対象路線に対してどのように交通管制を行うか、道路管理者と交通管理者との間で協議が行われる [144]。交通情報の収集や交通制御を行うための施設は道路に設置されるため、道路管理者との協議の中で、情報収集と制御の方法を検討する必要がある。

この階層の責任主体は、道路管理組織における道路整備部門と、交通管理組織における交通管制部門に分かれる。

### (4) 構造物層

構造物の階層では、道路の構造物について設計、施工が行われ、完成検査の後、供用される。これらのプロセスでは、路線を構成する上部構造や下部構造、附属物などの様々な構造物が対象となる。

路線の図面や調書といった情報は、道路台帳を構成する要素として作成される（道路法施行規則第四条の二）。調書は、道路の種類や路線名、起終点や経由地、延長等の情報により構成される。図面は、道路の平面図や縦横断面図などにより構成される。

構造物層における交通の要素は、事業層での検討結果に基づき、情報収集のためのセンサや、交通制御のための信号機、標識が対象となる。これらの要素は、路線の空間を物理的に

利用し設置される。

この階層では、実際の道路構造物を施工する建設事業者や、交通安全施設を設置する設備事業者など、道路の生産に関する様々な事業者が責任主体となる。

### 5.3.4 システムアーキテクチャモデルの有用性

#### (1) 情報技術分析への応用

本モデルのシステム要素は、下層に行くに従い分解・詳細化されるが、各層が対象とする情報の範囲もまた、広く抽象的な情報から、詳細化された情報へと分解されていく。したがって、各階層のプロセスでは情報の詳細度に適した情報技術を用いる必要がある。

図 5-11 は各階層が対象とする情報の詳細度をもとに、いくつかの情報技術を位置づけた例である [132]。

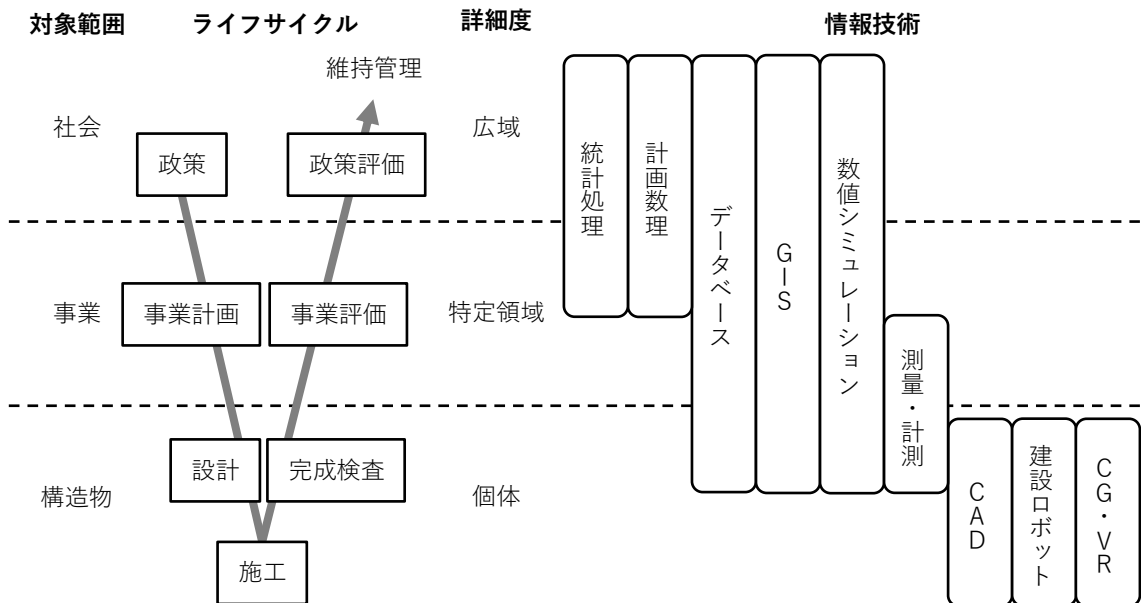


図 5-11 プロセスを支援する情報技術

社会の階層では、その構成要素が道路網であるように、広域の要素が対象となるため、広い観点で計画・評価を行う必要がある。例えば、統計処理や、計画数理、GIS (Geographic Information System)、データベース、数値シミュレーションのような広範囲の情報を扱える情報技術が用いられる。

事業の階層では、路線のような、より限定的な範囲を対象とした計画・評価が行われる。ここでも社会の階層で用いた情報技術を特定の領域に限定して用いるが、地形や気象、その他環境情報のような、より具体的な情報を取得するための測量・計測技術が用いられる。

構造物の階層では上部構造や、下部構造など、個々の構造物が対象となる。ここでは CAD (Computer-Aided Design) により実物に近い対象物の設計を行い、施工では建設ロボットな

どが用いられ、完成状態の仮想的な表現に CG (Computer Graphics) や VR (Virtual Reality) が用いられる。

以上のように、本モデルの階層は、プロセスが対象とする情報の詳細度と見なすことができ、各プロセスで適用可能な情報技術とその適用範囲を明確化することができる。

これらの情報技術は、複数の階層で共通した情報を利用する場合がある。例えば、実空間における地理空間情報は、広域の空間解析から個々の構造物の位置情報まで、共通的に用いられる情報である。この場合、どのプロセスでも同じ情報を利用することが考えられるが、そこで用いる情報技術では、常に同じデータが最適であるとは限らない。例えば、構造物の階層では3次元モデルが利用されるが、社会の階層では面的なデータがよく用いられる。ライフサイクル全体で共有されるデータは、利用しやすいデータ形式に変換されたり、情報が追加されたりしながら、必要な情報が失われないよう管理されなければならない。

(2) システムアーキテクチャモデルの拡張

社会インフラのシステムアーキテクチャモデルでは、社会、事業、構造物の3階層でモデル化を行ったが、階層は必要に応じて追加することが可能である (図 5-12)。

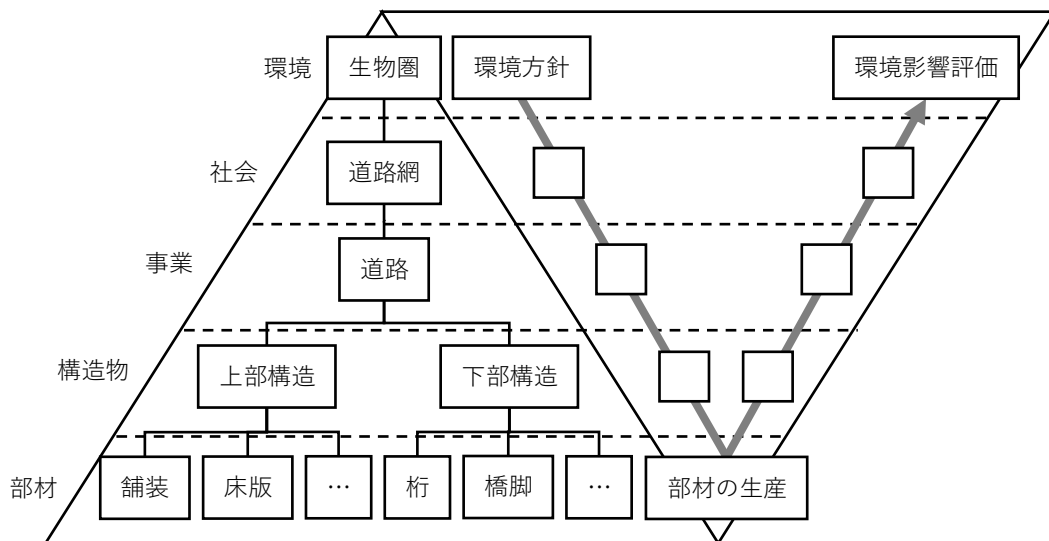


図 5-12 システムアーキテクチャモデルの拡張例

例えば、橋梁の上部構造は舗装や床版など、下部構造は桁や橋脚など、様々な部材から構成される。それらの部材と、その生産プロセスを構造物の下層に位置づけることができる。

逆に、社会よりも広い範囲を最上位に位置づけることも可能である。持続可能な社会を構成する社会インフラを考えた場合、その持続可能性は環境・社会・経済の観点からとらえることができるが、社会、経済の持続可能性は環境を基盤として成り立つと考えられる [145]。Stockholm Resilience Centre は、国連の持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals; SDGs) を経済、社会、生物圏に分類し、生物圏が社会を、社会が経済を包含する階層構造

でモデル化している [146]。したがって、環境を最上位の階層に追加し、最も広い範囲を対象とするモデルを構築することができる。

本モデルはより広い範囲から狭い範囲まで階層を拡張することができ、幅広いシステム全体像を俯瞰することができる。また、第4章で述べたとおり、本モデルは分解可能であることから、システム全体から特定の対象を切り出すことで、部分を詳細化したモデルを構築することも可能である。

### 5.4 まとめ

本章では、移動に働きかけるフィードバックループに着目し、空間情報基盤のシステム構成を、空間情報基盤の構成を移動体、交通、共通資源の3つの観点から分類しモデル化を行った。

空間情報基盤の実現化として、第4章で提案したシステムアーキテクチャモデルを、一般的な道路交通の建設プロジェクトへ適用し、検証を行った。適用したモデルは、プロセスとシステム要素、責任主体の対応関係を明確化することができ、その責任主体は3つの観点による分類と適合した。

また、システムアーキテクチャモデルの階層構造を応用することで、各プロセスで利用するのに適した情報技術を示した。さらに、その階層構造は層の追加やモデルの分解に用いることができ、より大きなシステムや、詳細なシステムのモデル化にも用いることができる。

以上のことから、空間情報基盤の実現に対し、提案したシステムアーキテクチャモデルは適用可能であり、その応用からモデルの有用性や拡張性を示すことができた。

## 第6章 結論

### 6.1 各章のまとめ

本論文では、CPSにより複雑化するスマート社会において、移動体支援のためのフィジカル空間とサイバー空間が融合する基盤を空間情報基盤とし、そのシステムについてモデル化を行った。モデル化にはシステム構成とライフサイクルモデルを組み合わせた独自のシステムアーキテクチャモデルを提案し、適用を行った。

第1章では、CPSの考え方を取り入れた国際的なデジタル化の動きを背景に、本論文の目的と構成について示した。CPSによるスマート社会には、様々な要素が関係しあう複雑さがあり、実現にはシステムとしてのモデル化が必要である。本論文では、基盤となる空間情報基盤のあり方を明らかにするとともに、空間情報基盤の構成要素やプロセスを包含するシステムアーキテクチャモデルを構築し、その有効性を検証することを目的とした。

第2章では、移動体と移動空間の2つの観点から、それぞれ現在の取り組みと課題について述べた。移動体については、自動運転及びMaaSなどの移動サービスの点から現在の取り組みをまとめた。また、移動空間については、空間情報などのデータに関する取り組みと、インフラに関する取り組みについてまとめた。空間情報基盤に関する様々な分野や技術からの取り組みは、システム全体の複雑さを示している。各分野で様々な情報を扱うためのデータ流通プラットフォームを構築する動きがみられるが、それぞれ独立して行われており、横断的な統合が実現できていない状況にあることを明らかにした。

第3章では空間情報基盤のあり方について移動体と移動空間の観点から検討を行った。プローブ情報による移動制御を行うシステムの実装例から、移動体は、自身が取得する情報と他の観測情報を用いて移動計画を行い、その結果から移動制御を行うシステムであることを示した。また、多様な障害物を評価しながら最短経路探索を行うシステムの実装例から、移動空間は、障害物により移動へ影響を与えるシステムであることを示すとともに、障害物の定義と観測が必要であることを示した。移動体と移動空間のシステムから、それらを構成する要素をフィジカル空間とサイバー空間の分類で整理し、空間情報基盤の全体像と要素間の関係性を示した。

第4章では、空間情報基盤のシステムを実現するためのシステムアーキテクチャモデルについて検討を行った。システム構成は、要素の包含関係から、全体から詳細な要素に細分化されていく木構造で表すことができる。また、ライフサイクルはVモデルで表現することにより、プロセスの対象を階層的に詳細化した構造で表すことができる。本論文では、システム構成とライフサイクルの階層構造を一致させ、組み合わせたシステムアーキテクチャモデルを提案した。提案モデルが表すプロセスのPlan-Do-Check関係と、そのプロセスが対象とするシステム要素から、実施主体が責任を負うプロセスとシステム要素の範囲を明確化できることを示した。



第5章では、第4章に示したシステムアーキテクチャモデルを空間情報基盤システムに適用し、有効性を検証した。空間情報基盤システムは、CPSにおける物理要素とサイバー要素間のフィードバックループ単位のサブシステムで構成されている。そこで、空間基盤システムの中で移動に働きかけるフィードバックループを抽出するとともに、システム構成を移動体と交通、共通資源の要素に分類し、それに基づくモデル化を行った。次に、一般的な社会インフラにおける建設プロジェクトを対象として、そのライフサイクルをVモデルで表し、階層構造を社会、事業、構造物の3階層で定義した。さらに、定義したシステム構成とライフサイクルに基づくシステムアーキテクチャを道路交通の建設プロジェクトに当てはめ、適用の妥当性を示すとともに、階層ごとの責任主体を明確化できることを示した。またシステムアーキテクチャモデルの応用として、各プロセスで適用可能な情報技術とその適用範囲を明確化することが可能であることを示すとともに、階層構造の追加や分解によりモデルの拡張や詳細化が可能であることを示した。

以上の通り、本論文では、移動体支援のためのCPSを実現するために、システムの基盤である空間情報基盤のシステム構成とライフサイクルを検討し、要素とプロセスの責任主体を明確化することで、空間情報基盤のアーキテクチャモデルを構築した。さらに、提案モデルを道路交通の建設プロジェクトに適用することで、実際のシステムへ適用可能であることを示した。

## 6.2 今後の展望

本論文では、システムアーキテクチャモデルの提案と一般的な建設プロジェクトへの適用を行ったが、今後の展望としては、実際のプロジェクトへの適用が考えられる。本論文で示した社会インフラのシステムアーキテクチャモデルは、社会、事業、構造物と関係するすべての要素を対象とするが、階層ごとに責任主体が移り変わることから、通常の業務ではモデルの一部が対象となると考えられる。その場合も、本アーキテクチャモデルは、対象業務が階層上どこに位置づけられるかを明白にし、円滑なプロジェクト推進に用いることができる。

また提案したシステムアーキテクチャモデルでは、社会インフラの建設の開始から実現結果の検証までの流れをモデル化したが、供用後の運用・維持管理も重要な課題である[147]。品質マネジメントシステムでは、PDCAサイクルを用いた持続的な品質改善を示しており[148]、アセットマネジメントシステムにおいても同様のPDCAサイクルにより一連のプロセスを構成する[149]。運用・維持管理を含めたライフサイクルの構造は、日常業務における現場レベルのPDCAサイクルと、それらの活動を包含する組織的なPDCAサイクルにより構成される階層的なものとして表される[150,151]。提案するシステムアーキテクチャモデルも同様の階層構造を有していることから、運用・維持管理段階への適用も可能であると考えられる。

本論文で用いた V モデルなどの手法は、ソフトウェア開発でよく用いられるものであるが、本論文で示したとおり、システムモデリング手法のひとつとして様々な分野で応用の余地がある。社会インフラのような多くの要素が複雑に関係するシステムにおいて、これらのシステム分析手法は、課題解決や全体最適のために重要な要素であると考えられる。本論文で提案した手法をさらに発展させ、新しい社会の実現に活用していきたい。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々から指導と助言をいただいた。特に指導教員である蒔苗耕司教授、審査委員会主査の風見正三教授、副査の富樫敦教授からは多くの指導をいただいた。本研究は、蒔苗教授による指導のもと、博士前期課程からの研究成果を含むものである。研究の主題も、蒔苗教授の土木情報学に関する体系的な研究から大きな影響を受けている。共通資源や持続可能性に関する内容は、風見教授の授業や研究から着想を得たものである。システムアーキテクチャモデルの妥当性に関しては、富樫教授から多くの助言をいただいた。また、本論文の中核である第4章、第5章について、Liverpool John Moores UniversityのRaj Kapur Shah准教授から、対象の明確化や検証方法などの重要な助言をいただいた。他にも、研究発表会や学術誌投稿でいただいた意見など、多くの助言により本研究は成り立っている。指導、助言いただいた先生方に感謝の意を表す。

本研究は、国際航業株式会社からの支援を受けたものである。坂路和也氏、水科良浩氏からは、通学に関する支援や、研究しやすい環境を用意していただいた。坂路氏からは、プラットフォームに関する情報提供など、本研究に関係する様々な支援をいただいた。また、研究と並行して行っていたプロジェクトのリーダーである長谷川浩志氏や、白井甚司氏、岡勇樹氏をはじめとする同僚達には大変な迷惑をかけたことと思う。多くの支援と学ぶ機会をくださった各位に感謝の意を表したい。

2020年2月

富井 建

## 文献

- [1] プラットフォーム・インダストリー4.0(日本貿易振興機構訳). (2015) インダストリー4.0 実現戦略. [Online]. <https://www.jetro.go.jp/world/reports/2015/01/c982b4b54247ac1b.html>
- [2] Lee, E. A., "Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate?," *Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap*, vol. 2, pp. 1-9, 2006.
- [3] 内閣府. (2016) 科学技術基本計画. [Online]. <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>
- [4] 国土交通省 CIM 導入推進委員会. (2017) CIM 導入ガイドライン (案) 第 1 編 共通編. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/tec/it/pdf/guide01.pdf>
- [5] 産業競争力懇談会. (2016) IoT、CPS を活用したスマート建設生産システム. [Online]. <http://www.cocn.jp/report/thema85-L.pdf>
- [6] 内閣府. 自動走行システム推進委員会・WG - 科学技術政策 - 内閣府. [Online]. <https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai/jidousoukou>
- [7] SIP-adus. 自動走行システム SIP-adus Automated Driving for Universal Service. [Online]. <http://www.sip-adus.go.jp/>
- [8] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部. (2019) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部 (IT 総合戦略本部) . [Online]. <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20190607/siryou9.pdf>
- [9] SAE International, "Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation," J3016 JUN2018, 2018.
- [10] 自動車技術会, "自動車用運転自動化システムのレベル分類及び定義," JASO TP 18004:2018, 2018.
- [11] NAVYA. NAVYA - Vehicles 100 % autonomous and electric. [Online]. <https://navya.tech/en/>
- [12] Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (2018, Apr.) Discover AUTONOM SHUTTLE. [Online]. [https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/handouts\\_180406\\_01-e.pdf](https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/handouts_180406_01-e.pdf)
- [13] EasyMile. Delivering Driverless Mobility Solutions - EasyMile. [Online]. <https://easymile.com/>
- [14] 谷口綾子, Enoch, M., Ieromonachou, P., 王子霖, Paschek, F., 森川高行, "世界初の自動運転システム歩行者死亡事故が英国市民の社会的受容に与えた影響," 第 5 8 回土木計画学研究発表会・講演集, 2018, ROMBUNNO.187.

- [15] 小林正啓, "ロボット法のこれから 事故の責任, 予想される法規制等," *日本ロボット学会誌*, vol. 36, no. 4, pp. 262-265, 2018.
- [16] 倉地亮, "自動車を取り巻く IoT セキュリティーとその課題," *情報管理*, vol. 60, no. 10, pp. 690-700, 2018.
- [17] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部. (2018) 自動運転に係る制度整備大綱. [Online]. [http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180413/auto\\_drive.pdf](http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20180413/auto_drive.pdf)
- [18] 国土交通省自動車局. (2018) 自動運転車の安全技術ガイドライン. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/001253665.pdf>
- [19] 小林正啓, "自動運転車の実現に向けた法制度上の課題," *情報管理*, vol. 60, no. 4, pp. 240-250, 2017.
- [20] 内匠舞, "自動運転をめぐる道路交通法上の課題," 2018.
- [21] UNECE. WP.29 - Introduction - Transport - UNECE. [Online]. <https://www.unece.org/trans/main/wp29/introduction.html>
- [22] MaaS Global. Whim. [Online]. <https://helpcenter.whimapp.com/hc/en-us>
- [23] UbiGo Innovation AB. UbiGo. [Online]. <https://www.ubigo.me/en/home>
- [24] Sochor, J., Arby, H., Karlsson, M., and Sarasini, S., "A topological approach to Mobility as a Service: A proposed tool for understanding requirements and effects, and for aiding the integration of societal goals," in *The 1st International Conference on Mobility as a Service*, Tampere, 2017.
- [25] 国土交通省. (2019) 都市と地方の新たなモビリティサービス懇談会 中間とりまとめ. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/001279833.pdf>
- [26] 国土交通省国土交通政策研究所, "モビリティクラウドを活用したシームレスな移動サービスの動向・効果等に関する調査研究," no. 151, 2019.
- [27] Directorate-General for Mobility and Transportation. European Commission, official website. [Online]. [https://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action\\_plan\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/its/road/action_plan_en)
- [28] The European Parliament and of the Council. (2010, July) EUR-Lex. [Online]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/40/oj>
- [29] The European Parliament and of the Council. (2017, May) EUR-Lex. [Online]. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_del/2017/1926/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2017/1926/oj)
- [30] The European Parliament and of the Council. (2015, Dec.) Commission Delegated Regulation (EU) 2015/962 of 18 December 2014 supplementing Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the provision of EU-wide real-time traffic information services (Text with EEA relevance). [Online].

- [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_del/2015/962/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2015/962/oj)
- [31] MDM Portal. (2019, Oct.) MDM – Platform for Traffic Data - MDM Portal. [Online]. <https://www.mdm-portal.de/?lang=en>
- [32] Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. mCLOUD. [Online]. <https://www.mcloud.de/>
- [33] DELFI. DELFI. [Online]. <https://www.delfi.de/>
- [34] Department for Transport. (2019, Mar.) GOV.UK. [Online]. <https://www.gov.uk/government/consultations/bus-services-act-2017-bus-open-data>
- [35] Traveline Information Limited. Traveline data homepage | Traveline data. [Online]. <https://www.travelinedata.org.uk/>
- [36] 道路交通情報通信システムセンター. VICS | 一般財団法人 道路交通情報通信システムセンター. [Online]. <https://www.vics.or.jp/know/about/center.html>
- [37] 国土交通省. (2017) 国土交通省. [Online]. [http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo12\\_hh\\_000109.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo12_hh_000109.html)
- [38] 国土交通省. (2019) 公共交通政策：経路検索の充実とバスロケータの利活用 ～標準的なバス情報フォーマットの拡充～ - 国土交通省. [Online]. [http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei\\_transport\\_tk\\_000067.html](http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000067.html)
- [39] Google. 静的な GTFS の概要 | Static Transit | Google Developers. [Online]. <https://developers.google.com/transit/gtfs/?hl=ja>
- [40] 国土交通省総合政策局公共交通政策部. (2019) 静的バス情報フォーマット (GTFS-JP) 仕様書 (第 2 版) . [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/001283244.pdf>
- [41] 国土交通省. (2019) 経路検索事業者等へのデータ提供の手引き. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/001283241.pdf>
- [42] 公共交通オープンデータ協議会. 公共交通オープンデータ協議会. [Online]. <https://www.odpt.org/overview/>
- [43] 日立製作所; パシフィックコンサルタンツ; 計量計画研究所. (2018) 平成 29 年度「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 自動走行システム／大規模実証実験／次世代都市交通／ART 運行関連情報のデータ集約・蓄積と ART 利用者等への情報提供の仕組み構築及び大規模実証実験の実施・管理」報告書. [Online]. [http://www.sip-adus.go.jp/file/152\\_s.zip](http://www.sip-adus.go.jp/file/152_s.zip)
- [44] 国土交通省. (2015) 交通系 IC カードの普及・利便性拡大に向けた検討会とりまとめ. [Online]. <https://www.mlit.go.jp/common/001097046.pdf>
- [45] 仙台市交通局. 仙台市交通局. [Online]. [https://www.kotsu.city.sendai.jp/icsca/icsca\\_soug](https://www.kotsu.city.sendai.jp/icsca/icsca_soug)

o.html

- [46] 東京無線協同組合. 東京無線タクシー. [Online]. <http://www.tokyomusen.or.jp/credit.html>
- [47] チェッカーキャブ無線協同組合. チェッカーキャブ無線協同組合. [Online]. <http://www.checker-cab.co.jp/rate/payments>
- [48] 佐渡汽船. (2013) 佐渡汽船株式会社のコーポレートサイト. [Online]. <https://corporate.sadokisen.co.jp/wp-content/uploads/2019/01/0fbad6c8ca158e447e20902eb01cc40c.pdf>
- [49] JR 西日本宮島フェリー. JR 西日本宮島フェリー. [Online]. [http://jr-miyajimaferry.co.jp/ic\\_card/](http://jr-miyajimaferry.co.jp/ic_card/)
- [50] 中央復建コンサルタンツ. Suicle (スイクル) 武蔵境駅・東小金井駅周辺 自転車・レンタサイクル. [Online]. [http://suicle-ccs.jp/support/before\\_01\\_qa12.html](http://suicle-ccs.jp/support/before_01_qa12.html)
- [51] オリックス自動車. レンタカー予約 オリックスレンタカー. [Online]. <https://car.orix.co.jp/userguide/iccards.html>
- [52] タイムズ24. タイムズ駐車場検索. [Online]. <https://times-info.net/feature/icmoney/use01.html>
- [53] 東日本旅客鉄道. (2018) JR 東日本：東日本旅客鉄道株式会社. [Online]. <https://www.jreast.co.jp/press/2018/20180920.pdf>
- [54] 国土地理院. 地理空間情報活用推進基本法・基本計画とは. [Online]. [https://www.gsi.go.jp/chirikukan/about\\_kihonhou.html](https://www.gsi.go.jp/chirikukan/about_kihonhou.html)
- [55] 国土地理院. 基盤地図情報とは. [Online]. <https://www.gsi.go.jp/kiban/towa.html>
- [56] 国土地理院. 基盤地図情報サイト. [Online]. <https://www.gsi.go.jp/kiban/>
- [57] 国土交通省国土政策局国土情報課. 国土数値情報ダウンロードサービス. [Online]. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- [58] 国土交通省国土政策局国土情報課. 位置参照情報ダウンロードサービス. [Online]. <http://nlftp.mlit.go.jp/isj/index.html>
- [59] 若林芳樹, 今井修, 瀬戸寿一, 西村雄一郎, *参加型GISの理論と応用*. 古今書院, 2017.
- [60] 地理空間情報活用推進会議. (2017) 地理空間情報活用推進基本計画. [Online]. [http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/290324/170324\\_masterplan.pdf](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/290324/170324_masterplan.pdf)
- [61] 地理空間情報活用推進会議. (2017) 地理空間情報の活用推進に関する行動計画（G空間行動プラン）. [Online]. <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/sokuitiri/290915/honbun.pdf>
- [62] 社会基盤情報流通推進協議会. G空間情報センター. [Online]. [https://www.geospatial.jp/gp\\_front/](https://www.geospatial.jp/gp_front/)
- [63] 国土交通省. (2016) 報道発表資料：G空間情報センターが運用開始！多様な地理空間情報が集約、ワンストップで検索・ダウンロードが可能に！. [Online]. <https://www.mlit.go.jp/press/2016/20160920.pdf>

it.go.jp/report/press/kokudoseisaku01\_hh\_000107.html

- [64] 社会基盤情報流通推進協議会. アーバンデータチャレンジ | 「アーバンデータチャレンジ」とは、地域課題の解決を目的とした地方自治体を中心とする公共データを活用した年間のイベント開催を伴う一般参加型コンテストです。 . [Online]. <https://urbandata-challenge.jp/>
- [65] 国土交通省. (2019) 報道発表資料：産学官連携によるイノベーションの創出を目指します ～「国土交通データプラットフォーム（仮称）整備計画」を策定しました～. [Online]. [https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08\\_hh\\_000592.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000592.html)
- [66] データ流通環境整備検討会. (2017.) AI、IoT 時代におけるデータ活用ワーキンググループ中間とりまとめ. [Online]. [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/senmon\\_bunka/data\\_ryutsuseibi/dai2/siryoku2.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/senmon_bunka/data_ryutsuseibi/dai2/siryoku2.pdf)
- [67] 情報銀行推進委員会. 制度案内. [Online]. <https://www.tpdms.jp/system/index.html>
- [68] 情報信託機能の認定スキームの在り方に関する検討会. (2019) 情報信託機能の認定に係る指針 ver2.0. [Online]. [http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000649152.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000649152.pdf)
- [69] データ流通推進協議会. (2018) データ取引市場運営事業者認定基準. [Online]. <https://data-trading.org/public-release/>
- [70] 高田広章, 佐藤健哉, "ダイナミックマップ：自動走行/協調運転支援のための情報プラットフォーム," システム／制御／情報, vol. 60, no. 11, pp. 457-462, 2016.
- [71] 小山浩, 柴田泰秀, "自動走行におけるダイナミックマップ整備," システム／制御／情報, vol. 60, no. 11, pp. 463-468, 2016.
- [72] ダイナミックマップ基盤株式会社. 提供サービス：現在の整備状況. [Online]. <https://www.dynamic-maps.co.jp/service/map.html>
- [73] ダイナミックマップ大規模実証実験コンソーシアム. (2018) ダイナミックマップの試作・整備及びセンター機能や更新手法等の確立及び大規模実証実験の実施・管理. [Online]. [http://www.sip-adus.go.jp/file/111\\_s.pdf](http://www.sip-adus.go.jp/file/111_s.pdf)
- [74] ダイナミックマップサービスプラットフォーム検討コンソーシアム. (2018) 自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討におけるダイナミックマップサービスプラットフォームの試作及び検証. [Online]. [http://www.sip-adus.go.jp/file/202\\_s.pdf](http://www.sip-adus.go.jp/file/202_s.pdf)
- [75] 国土交通省. (2014) 道路：ETC2.0. [Online]. <https://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/etc2/index.html>
- [76] ITS サービス高度化機構. ETC 総合情報ポータルサイト. [Online]. <https://www.go-etc.jp/etc2/>



- [77] 工藤理一, 安川真平, 丸小倫己, Wang, H., 永田聡, 中村武宏, "コネクテッドカーサービス実現に向けた LTE V2X 技術," *電子情報通信学会論文誌 B*, vol. J101-B, no. 6, pp. 417-433, June 2018.
- [78] 寺西裕一, 山中広明, 河合 栄治, "IoT エッジコンピューティング技術," *情報通信研究機構研究報告*, vol. 62, no. 2, pp. 103-110, Nov. 2018.
- [79] Bilal, K., Khalidb, O., Erbad, A., and Khan S. U., "Potentials, trends, and prospects in edge technologies: Fog, cloudlet, mobile edge, and micro data centers," *Computer Networks*, vol. 130, no. 15, pp. 94-120, Jan. 2018.
- [80] 内閣府. (2018) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) フィジカル空間デジタルデータ処理基盤 研究開発計画. [Online]. [https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/2\\_physical.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/2_physical.pdf)
- [81] 総務省. (2018) 平成 30 年度 情報通信技術の研究開発に係る提案の公募 ～内閣府事業 PRISM (官民研究開発投資拡大プログラム) 対象課題～. [Online]. [http://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01tsushin03\\_02000250.html](http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin03_02000250.html)
- [82] U T M S 協会, "平成 30 年度成果報告書 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期 / 自動運転 (システムとサービスの拡張) 自動運転の実現に向けた信号情報提供技術等の高度化に係る調査," 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 成果報告書 20190000000184, 2019.
- [83] U T M S 協会, "戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 2 期 / 自動運転 (システムとサービスの拡張) / ITS 無線路側機等の路車間通信以外の手法による信号情報の提供に係る調査," 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 成果報告書 20190000000185, 2019.
- [84] 国土交通省. 車両・交通システムの安全テクノロジー: 自動車総合安全情報. [Online]. <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01transit/ptps.html>
- [85] 経済産業省. (2017) 「データ流通プラットフォーム間の連携を実現するための基本的事項」を取りまとめました. [Online]. <https://www.meti.go.jp/press/2017/04/20170428002/20170428002.html>
- [86] 菅沼直樹, "市街地における自動運転のための外界環境認識," *計測と制御*, vol. 54, no. 11, pp. 816-819, 2015.
- [87] 蒔苗耕司, "自動走行支援のための経路情報モデルの構築," in *ITS シンポジウム 2003*, 2003, pp. 385-390.
- [88] 菅沼直樹, 米陀佳祐, "自動車の自動運転におけるデジタル地図の活用," *日本ロボット学会誌*, vol. 33, no. 10, pp. 760-765, 2015.
- [89] 富井建, 蒔苗耕司, "ウェブベース縦断線形データベースの構築とその応用," *第7回ITS*

シンポジウム, 2008.

- [90] 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和, "高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究," *土木学会論文集*, vol. 458/IV-18, pp. 65-71, 1993.
- [91] Xing, J. and 越正毅, "高速道路のサグにおける渋滞現象と車両追従挙動の研究," *土木学会論文集*, vol. 506/IV-26, pp. 45-55, 1995.
- [92] 大口敬, "高速道路サグにおける渋滞の発生と道路線形との関係," *土木学会論文集*, vol. 524/IV-29, pp. 69-78, 1995.
- [93] 大口敬, "交通渋滞の発生メカニズムと AHS 技術による対策," *第37回土木計画学シンポジウム論文集*, 2001, pp. 155-162.
- [94] 牧野浩志, 大内浩之, 平 隆之, 山田康右, "車線利用率適正化によるサグ部交通渋滞の削減," *土木技術資料*, vol. 47, no. 10, pp. 38-43, 2005.
- [95] 国土交通省. (2019) ガイドライン | 電子納品に関する要領・基準. [Online]. [http://www.cals-ed.go.jp/cr\\_guideline/](http://www.cals-ed.go.jp/cr_guideline/)
- [96] 砂原秀樹, 佐藤正明, 植原啓介, 青木邦友, 村井純, "IPCar: インターネットを利用した自動車プローブ情報システムの構築," *電子情報通信学会論文誌 B*, vol. J85-B, no. 4, pp. 431-437, 2002.
- [97] 交通工学研究会, *交通工学ハンドブック*. 技報堂出版, 1984.
- [98] 大川進, 本田昭, *自動車のモーションコントロール技術入門: よくわかる図解とシミュレーションで学ぶ*, トヨタテクニカルディベロップメント, デンソー技研センター, 山海堂, 2006.
- [99] 国土交通省. (2018) 歩行空間ネットワークデータ等整備仕様案. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/001177504.pdf>
- [100] Tomii, T. and Makanae, K., "DEVELOPMENT OF GRID-BASED NETWORK MODEL FOR PATH FINDING IN REAL DYNAMIC ENVIRONMENTS," in *12th International Conference on Construction Application of Virtual Reality*, Taipei, 2012, pp. 579-586.
- [101] 富井 建, 蒔苗 耕司, "歩行者経路選択のためのハイブリッドネットワークモデルの実装と評価," *土木学会論文集 F3(土木情報学)*, vol. 73, no. 2, pp. I\_356-I\_364, Mar. 2018.
- [102] de Berg, M., Cheong, O., van Kreveld, M, and Overmars M, *コンピュータ・ジオメトリ 計算機科学: アルゴリズムと応用 第3版*. 近代科学社, 2010.
- [103] O'Dunlaing, C. and Yap, K., "A "Retraction" Method for Planning the Motion of a Disc," *Journal of Algorithms*, vol. 6, no. 1, pp. 104-111, 1985.
- [104] Chithambaram R, Beard K, and Barrera R, "Skeletonizing polygons for map generalization," *Technical Papers, ACSM-ASPRS Convention, Cartography and GIS/LIS*, vol. 2, pp. 44-55,

- 1991.
- [105] Aichholzer, O., Alberts, D., Aurenhammer, F., and Gartner, B., "A Novel Type of Skeleton for Polygons," *Journal of Universal Computer Science*, vol. 1, no. 12, pp. 752-761, 1995.
- [106] Walter, V., Kada, M., and Chen, H., "Shortest path analyses in raster maps for pedestrian navigation in location based systems," *International Symposium on "Geospatial Databases for Sustainable Development"*, 2006.
- [107] Nilsson, N. J., "A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques," *Proc. IJCAI*, pp. 509-520, 1969.
- [108] 岩名地良太, 新田知之, 石川和明, 柳澤政生, 戸川望, "歩行者の視点情報に基づく屋内経路案内," *マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集*, pp. 1748-1756, 2016.
- [109] Canny, J. and Reif, J., "New lower bound techniques for robot motion planning problems," *Proceedings of the 28th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 49-60, 1987.
- [110] Bose, P., Maheshwari, A., Shu, C., and Wuhler, S., "A survey of geodesic paths on 3D surfaces," *Computational Geometry*, vol. 44, no. 9, pp. 486-498, 2011.
- [111] Wein, R., van den Berg, J. P., and Halperin, D., "The Visibility-Voronoi Complex and Its Application," *Computational Geometry, Theory and Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 66-87, 2007.
- [112] Lozano-Perez, T. and Wesley, M. A., "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles," *Communications of the ACM*, vol. 22, no. 10, pp. 560-570, 1979.
- [113] Kambhampati, S. and Davis, L., "Multiresolution path planning for mobile robots," *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 2, no. 3, pp. 135-145, 1986.
- [114] Khatib, O., "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, 1986.
- [115] 織田俊彦, "交通管制システムと ITS の活用による今後の展望," *計測と制御*, vol. 40, no. 3, pp. 226-231, 2001.
- [116] 長岡栄, "航空交通管理(ATM) の動向," *日本航空宇宙学会誌*, vol. 56, no. 649, pp. 35-39, 2008.
- [117] 富井建, 蒔苗耕司, "建設プロジェクトへのシステムアーキテクチャモデルの適用," *第44回土木情報学シンポジウム*, 2019, pp. 281-284.
- [118] Tomii, T., Makanae, K., and Shah, R. K., "APPLICATION AND ANALYSIS OF SYSTEM ARCHITECTURE MODEL FOR CONSTRUCTION PROJECT," in *4th International*

- Conference on Civil and Building Engineering Informatics*, Sendai, 2019, pp. 411-417.
- [119] ISO, "Systems and software engineering - Life cycle management - Part 1: Guidelines for life cycle management," Geneva, ISO/IEC/IEEE 24748-1:2018, 2018.
- [120] 日本規格協会, "JIS X 0170:2013 システムライフサイクルプロセス," 日本規格協会, JIS X 0170:2013, 2013.
- [121] Descartes, R., *方法序説*. 岩波書店, 1637 (2011).
- [122] Boehm B W, "Guidelines for Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications," in *Euro IFIP 79*, London, England, 1979, pp. 711-719.
- [123] 情報処理推進機構, *共通フレーム 2013*. 情報処理推進機構, 2013.
- [124] Biffi S, Winkler D, Hohn R, and Wetzel H, "Software process improvement in Europe: potential of the new V-modell XT and research issues," *Software Process: Improvement and Practice*, vol. 11, no. 3, pp. 229-238, 2006.
- [125] US Department of Transportation; California Department of Transportation. (2009) Systems Engineering Guidebook for Intelligent Transportation Systems Version 3.0. [Online]. <https://www.fhwa.dot.gov/cadiv/segb/files/segbversion3.pdf>
- [126] 宇宙航空研究開発機構. (2019) IV&V ガイドブック導入編. [Online]. <http://sma.jaxa.jp/Software/IVV/index.html>
- [127] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. (2012, Nov.) Smart Grid Reference Architecture. [Online]. <https://www.cencenelec.eu/standards/Sectorsold/SustainableEnergy/SmartGrids/Pages/default.aspx>
- [128] Industrial Internet Consortium. (2019, June) The Industrial Internet Reference Architecture v 1.9. [Online]. <https://www.iiconsortium.org/IIRA.htm>
- [129] Forsberg, K., Mooz, H., and Cotterman, H., *Visualizing Project Management (3rd ed.)*, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [130] 中島震, "CPS : そのビジョンとテクノロジー," *研究 技術 計画*, vol. 32, no. 3, pp. 235-336, 2017.
- [131] 富井建, 蒔苗耕司, "建設生産プロセスへのシステム開発モデルの適用と GIS の役割定義," *58 回土木計画学研究発表会・秋大会*, p. ROMBUNNO.120.
- [132] 土木学会, *土木情報学 基礎編*. 土木学会, 2017.
- [133] Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., and Teicholz, P., *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2018.
- [134] 原科幸彦, *環境計画・政策研究の展開*. 岩波書店, 2017.

- [135] 公共事業の構想段階における計画策定プロセス研究会. (2007) 上位計画等の策定プロセスについて. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/tec/kanri/process/pdf/shiryoku04.pdf>
- [136] 国土交通省道路局. (2013) 構想段階における道路計画策定プロセスガイドライン. [Online]. [http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/pdf/ps\\_guideline.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/pdf/ps_guideline.pdf)
- [137] 国土交通省. 政策評価. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/hyouka/>
- [138] 国土交通省. (2018) 国土交通省所管公共事業の事業評価実施要領の改定について. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/tec/hyouka/public/180330/180330.html>
- [139] 内閣府中央交通安全対策会議. (2016) 交通安全基本計画. [Online]. [https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku10/pdf/kihon\\_keikaku.pdf](https://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku10/pdf/kihon_keikaku.pdf)
- [140] 国土交通省. (2015) 交通政策基本計画. [Online]. <https://www.mlit.go.jp/common/001069503.pdf>
- [141] 国土交通省. 公共交通政策：地域公共交通の活性化及び再生に関する法律について. [Online]. [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei\\_transport\\_tk\\_000055.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000055.html)
- [142] 日本デジタル道路地図協会. 一般財団法人 日本デジタル道路地図協会. [Online]. <http://www.drm.jp/database/structure.html>
- [143] Ozaki, H., "Evolution of ITS in Japan in the Last and Next Decades," *Teletronikk*, vol. 99, no. 1, pp. 36-40, 2003.
- [144] 山梨県. (2019) 土木工事設計マニュアル道路編. [Online]. <https://www.pref.yamanashi.jp/douroseibi/sekkeimanyuaru.html>
- [145] 原科幸彦, 小泉秀樹, *都市・地域の持続可能性アセスメント*. 学芸出版社, 2015.
- [146] Stockholm Resilience Centre. How food connects all the SDGs. [Online]. <https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-how-food-connects-all-the-sdgs.html>
- [147] インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議. (2013.) インフラ長寿命化基本計画. [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/001040309.pdf>
- [148] 日本規格協会, "品質マネジメントシステム－要求事項," 日本規格協会, JISQ9001, 2015.
- [149] 日本規格協会, "アセットマネジメント－マネジメントシステム－要求事項," 日本規格協会, JIS Q 55001:2017(ISO 55001:2014), 2017.
- [150] 下水道分野における ISO55001 適用ユーザーズガイド検討委員会. (2015) 下水道分野における ISO55001 適用ユーザーズガイド(案). [Online]. <http://www.mlit.go.jp/common/001085776.pdf>
- [151] 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司, "実践的アセットマネジメントと第 2 世代研究への展

望," *土木技術者実践論文集*, vol. 1, pp. 67-82, 2010.