

自動化・自律化したエアモビリティの 合流経路モデルの評価

慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科

辰己 智之

目次

- 緒言
- 目的と価値
- 背景と先行研究
- 研究の特徴と手法
- 合流モデルに必要な要素、条件
- 合流モデル Hub and Spoke型 / T型 (試行モデル)
- 合流モデル 提案モデル Y型
- 合流モデル 改良モデル Modified - Y型
- 結論
- 参考文献

低高度の空間を安全に飛行する鍵は、飛行経路の設計と交通管理にある

自動化・自律化したエアモビリティで短距離を移動する運用コンセプトを基に、S4 Simulation Systemの空間に合流モデルを定義して、エージェントの振る舞いを定性的に、エージェントの相互作用の結果を定量的に評価した。

既存のルールにあう合流経路モデル Modified-Y(MOD-Y)型を導いた。

シミュレーションの結果：

- ① Hub & Spoke形状やY型の合流経路は、必ずしも右側優先にできない。

航空法施行規則第181条

- ② 正対するT型の合流経路は、条件次第で右ではなく左へ衝突を回避する。

航空法施行規則第182条

- ③ 鋭角で緩やかなMOD-Y合流形状は、条件の下で秩序ある経路となる。

航空法施行規則「進路権」「間隔の維持」

航空管制のない空域で自動化・自律化したエアモビリティが合流する経路の提案

「空港から離れた中山間地域」・「操縦する必要のないエアモビリティ」という制約下で、交通弱者が自宅近くから目的地へ空を移動する場合の課題を扱う。

エアモビリティは、一定の速度で同じルート上を同じ方向に飛ぶ。また、飛び立つ前に間隔の調整が整っている場合、ルートに乗ってからの接近は考えにくい。

飛行には、気象の変化、モビリティや地上施設の故障、仕様の異なる航空機や無人航空機の予期しない接近といった不確定要素について考慮されるべきだが、ルートの要素に着目すると、危険は 合流ポイント にある。

エアモビリティが、衝突の回避はもとより、衝突が極めて起こりにくい安全な飛行を実現できるようにする鍵のひとつが、「合流箇所における安全の確保」にある。

本研究は、合流のあり方に焦点をあて、秩序ある安全な飛び方を検討する。

安全な移動手段の提供にするにあたり未解決問題がある。

人々の生活を豊かにすることを目的として、空という共有資源をひとの移動や物の輸送に利用しようとする活動や研究が米国を中心に進んでいる。

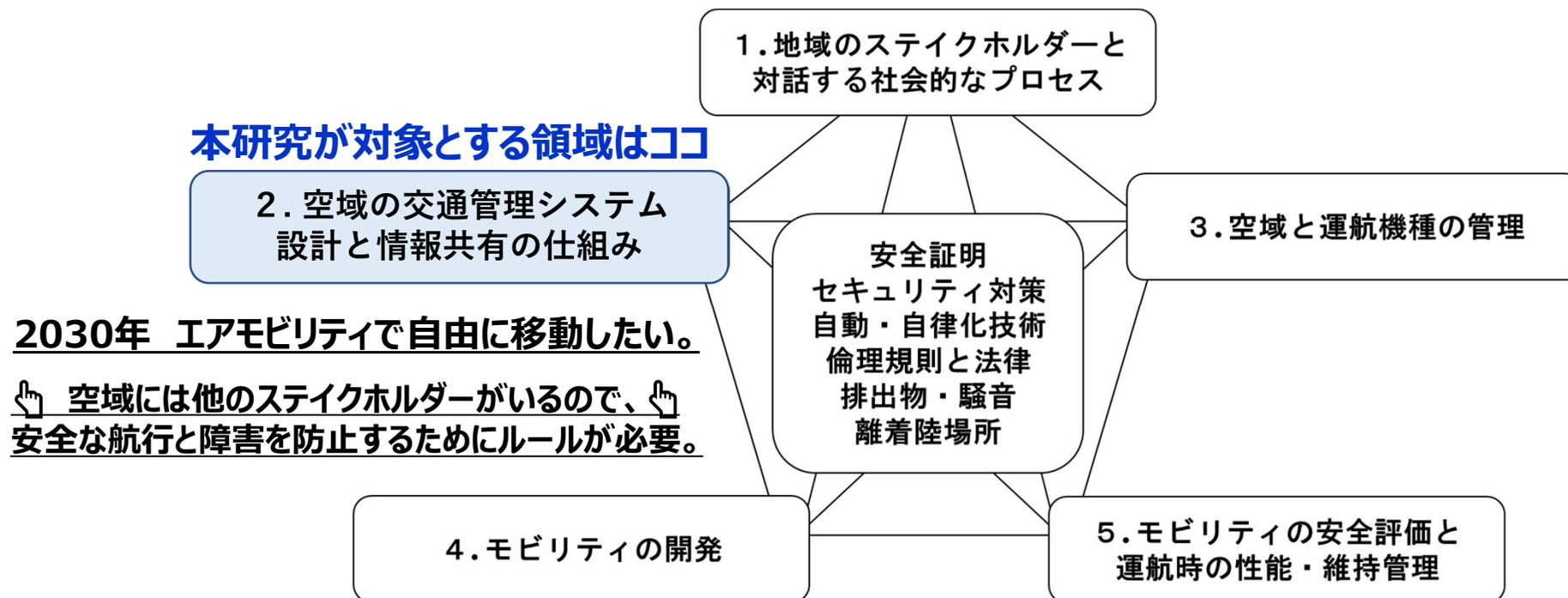


図1 NASAが提示する課題に倫理規則や排出物を共通課題に追加した全体像

安全な移動手段の提供にすにあたり未解決問題がある。

人々の生活を豊かにすることを目的として、空という共有資源をひとの移動や物の輸送に利用しようとする活動や研究が米国を中心に進んでいる。

- **都市部の自動車渋滞を回避する空の移動、Ecoな都市間の物資輸送サービスのコンセプト** (NASA: UAM ConOps UML4 Ver.1, 2020)
- **主要空港を空の移動の結節点として、旅客機との間で安全に空を利用するための方法を提案** (Vishwanath B., et al.: AIAA Aviation Forum, 2017, 2019)
- **仮想空間でシミュレートした2地点間の飛行（ドローンを想定）より計画段階の衝突防止方法の必要性を提案** (Florence Ho, et al.: IEEE Access vol.7, 2019)
- **仮想空間で飛行開始後の不確実性をシミュレートして飛行中の衝突防止方法を提案** (久保大輔, 原田賢哉: 第57回飛行機シンポジウム, 2019.)

**地方都市に住む交通弱者が、基幹病院へ通院するユースケースを対象。
合流の形状を地域の環境（構造物・電線・起伏）を考慮して設計する。**

シナリオ：

経路を一定の速度で飛行し、ほかと間隔を調整しながら合流する。

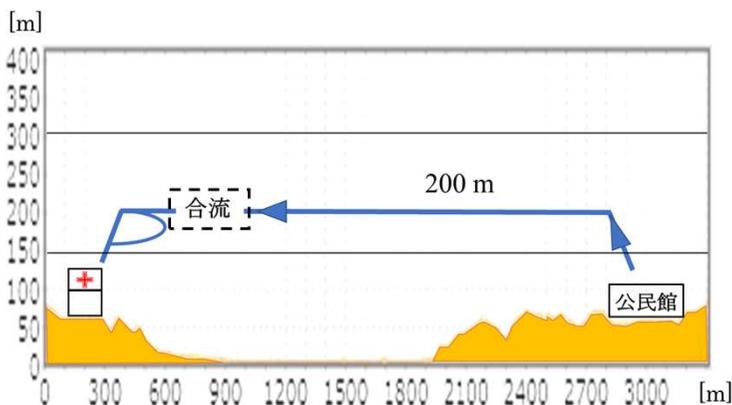


図2 運用コンセプト

- ・ **非管制区にある岩手県大船渡市を舞台**
- ・ **まちにある構造物と最低安全高度を意識**
- ・ **人口密集地を回避**
- ・ **大気の流れは考慮しない**

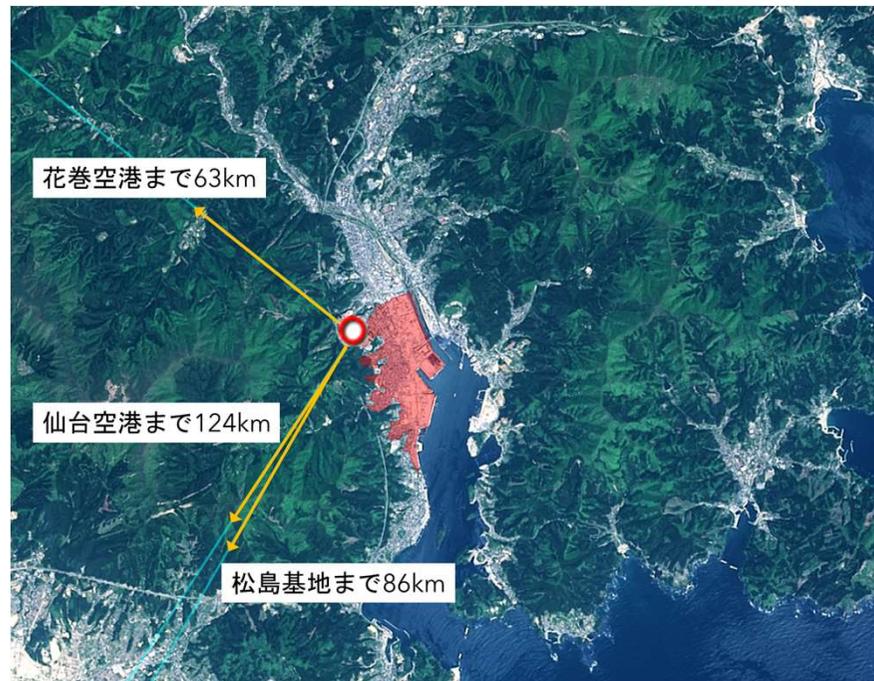


図3 国土地理院撮影の空中写真（2019年撮影）に岩手県立大船渡病院の場所ならびに近隣空港の方向および距離を追記して掲載

NTTデータ数理システム S4 SIM v6.1 ソーシャルフォースモデル 質量を持つエージェントが他より作用を受けながら、目的地へ移動する力学モデル

SIM実行時間は、病院の受付時間参考に20,000秒を1サイクルと定義

SIM空間と経路の定義：

- ・ 佐野橋を中心に3000m四方を30°右に回転

SIM行動モデルの定義：

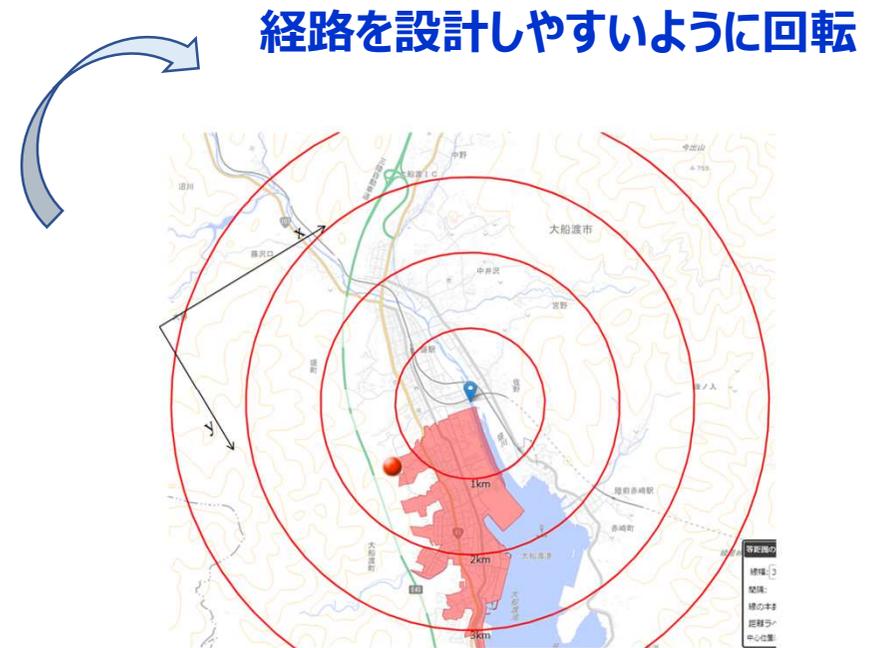


図4a SIM構成要素類の定義（空間・経路・行動）

NTTデータ数理システム S4 SIM v6.1 ソーシャルフォースモデル 質量を持つエージェントが他より作用を受けながら、目的地へ移動する力学モデル

SIM実行時間は、病院の受付時間参考に20,000秒を1サイクルと定義

SIM空間と経路の定義：

- ・ 佐野橋を中心に3000m四方を30°右に回転
- ・ 標高200m以上の山麓から50mは進入禁止
- ・ 密集地域を避けて、河川・海・道路上空に経路配置
- ・ スタートは、公民館から少し離れたところに6つ配置
- ・ ゴールは、県立病院の北北西の離れたところに1つ配置

SIM行動モデルの定義：

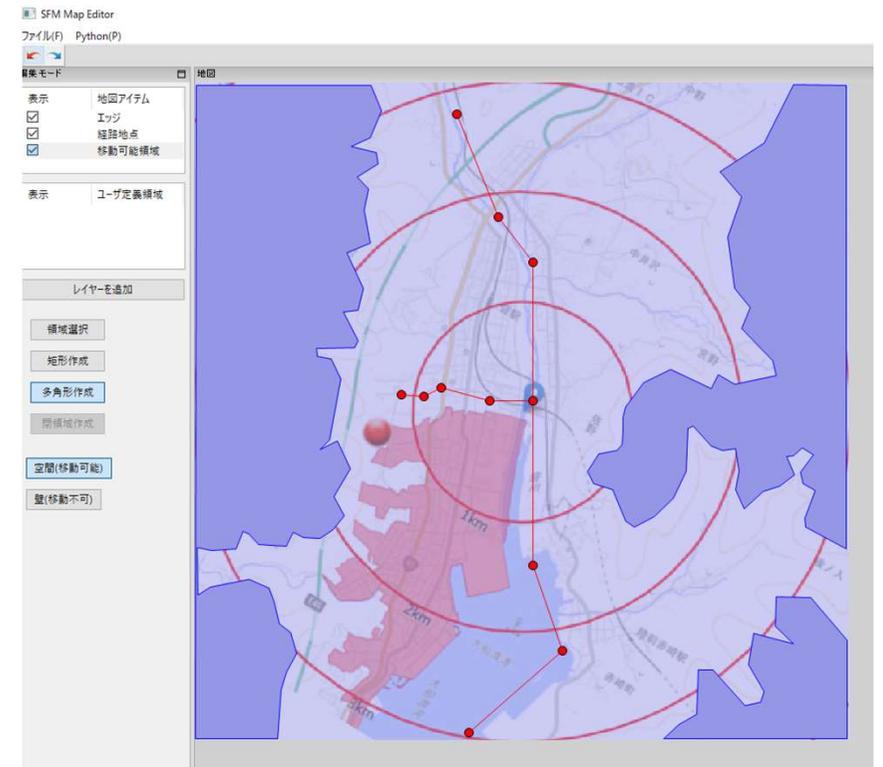


図4b SIM構成要素類の定義（空間・経路・行動）

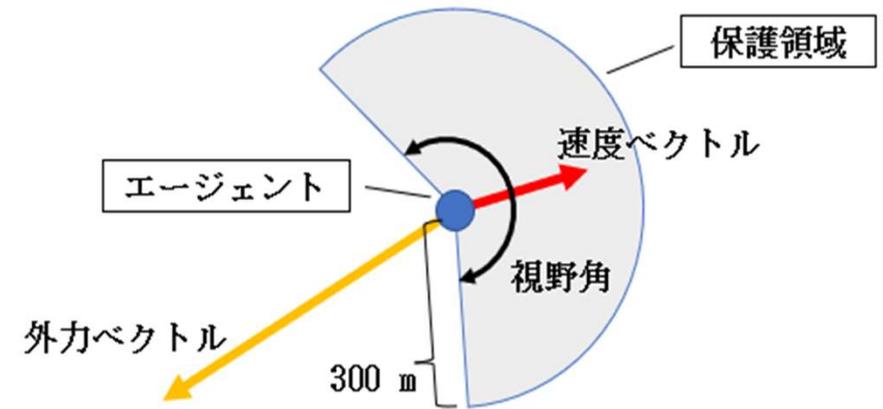
NTTデータ数理システム S4 SIM v6.1 ソーシャルフォースモデル 質量を持つエージェントが他より作用を受けながら、目的地へ移動する力学モデル

SIM実行時間は、病院の受付時間参考に20,000秒を1サイクルと定義

SIM空間と経路の定義：

- ・ 佐野橋を中心に3000m四方を30°右に回転
- ・ 標高200m以上の山麓から50mは進入禁止
- ・ 密集地域を避けて、河川・海・道路上空に経路配置
- ・ スタートは、公民館から少し離れたところに6つ配置
- ・ ゴールは、県立病院の北北西の離れたところに1つ配置

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0 \vec{e}_i(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_w \vec{f}_{iw}$$



SIM行動モデルの定義：

- ・ 仕様：r=4m、W=2t、V=11m/s、Vmax=20m/s
- ・ 保護領域：半径300m 見かけ上の視野：220°
- ・ 平均70の指数分布に従って200~300を出現（高齢者率・免許返納数・来院者数より）

図4c SIM構成要素類の定義（空間・経路・行動）

試行モデル（Hub & Spoke・T）は、現行ルールへの適合性に課題が多い。

Hub & Spoke 合流形状

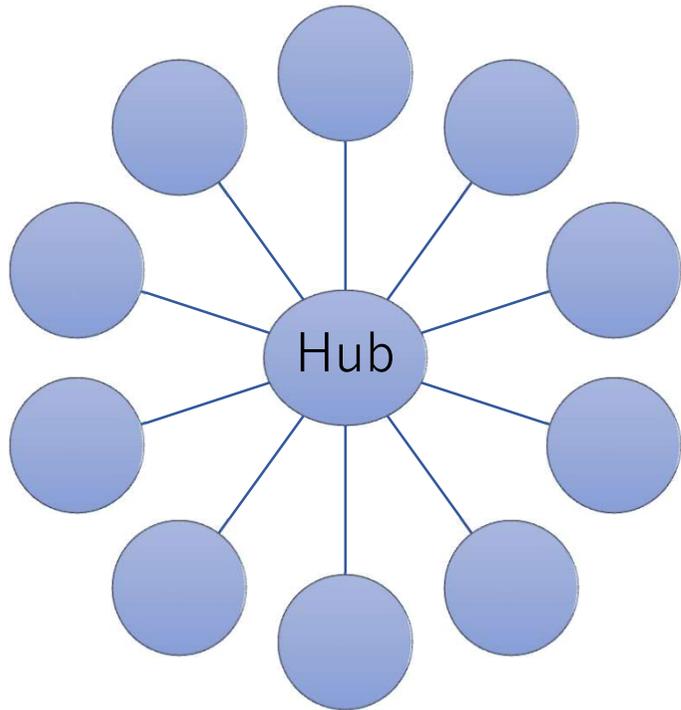


図5a 試行モデル（Hub & Spoke）のイメージ

T型 合流形状

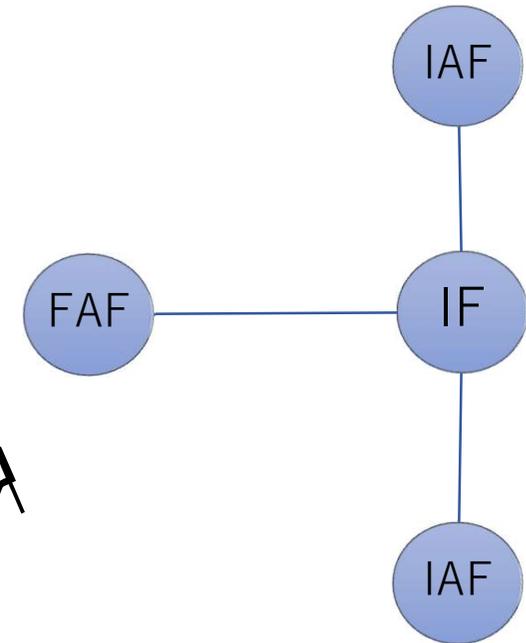


図5b 試行モデル（Basic-T）のイメージ

表1 関連規則とSIM実行結果

航空法施行規則	H&S	T
181条：右側に進路を譲った	9	-
181条：右側に譲らなかった	6	-
182条：進路を右に変えた	-	11
182条：進路を左に変えた	-	3
187条：間隔の維持不足	3	12
出現数	319	278

H&SとT型は、自動化・自律化が進んだ環境下ではルールに適合しない経路となる。

試行モデル（Hub & Spoke・T）は、現行ルールへの適合性に課題が多い。

Hub & Spoke 合流形状

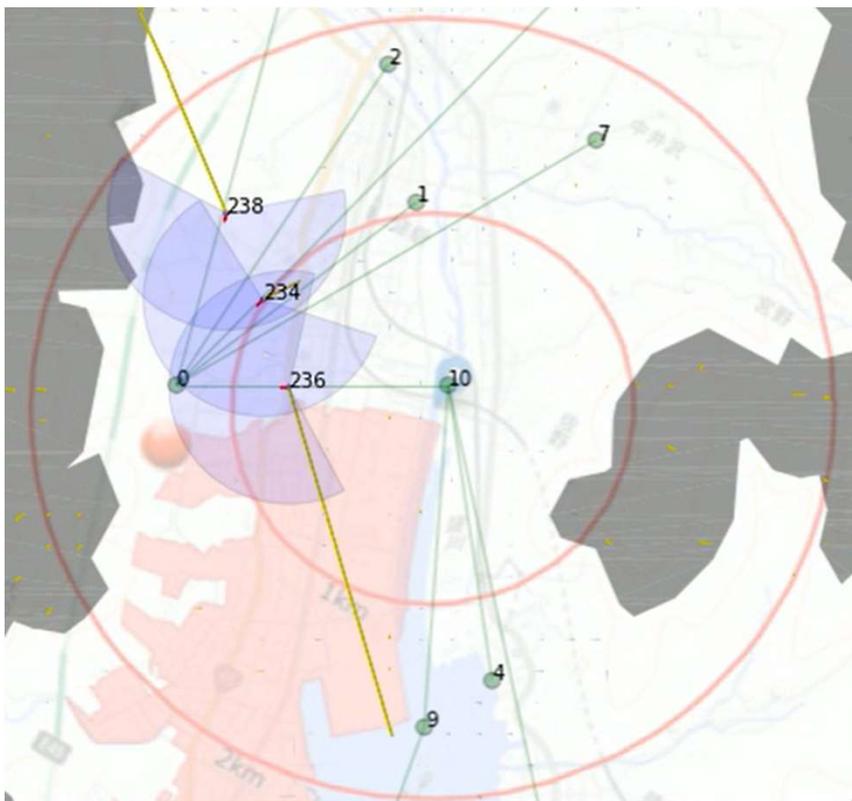


図6a 試行モデル（Hub & Spoke）の実行画面キャプチャ

T型 合流形状

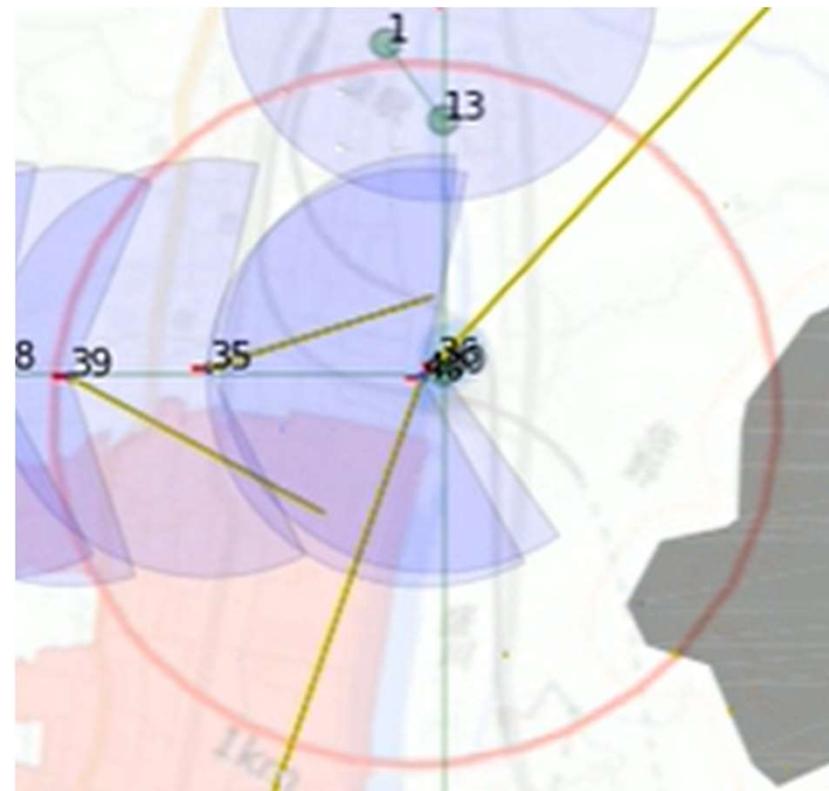


図6b 試行モデル（Basic-T）の実行画面キャプチャ

H&S型は、右に見るエージェントが多数あり調整が複雑。T型は、合流点で混雑。

合流モデル Y型は、相互の協調行動のみで現行ルールへ適合することは難しい。

Y型 経路設計

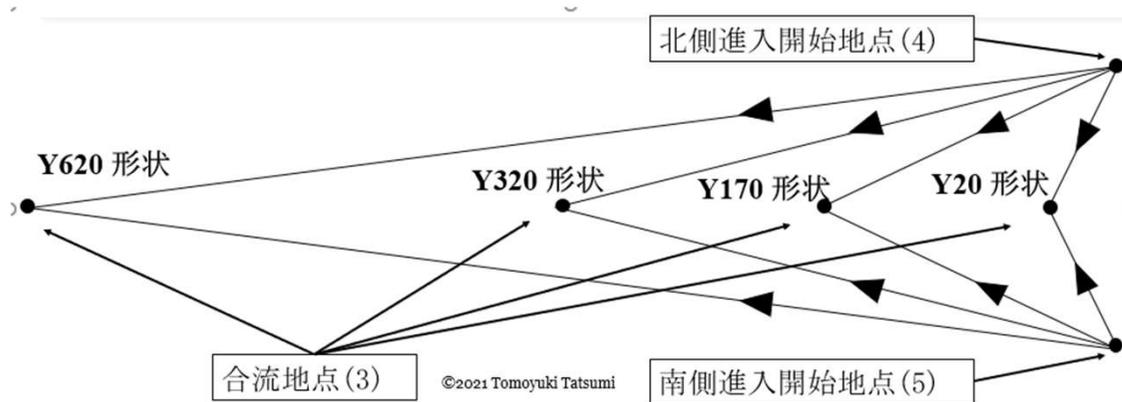


図7 Y型 経路設計

表2 Y型 経路座標

合流形状	ゴール地点	スタート地点	合流点	経由地点
Y620			P4(920, 1440)	
Y320	P1(860, 1440)	P2(1540, 820), P3(1540, 2100)	P4(1220, 1440)	P5(1540, 1360), P6(1540, 1520)
Y170			P4(1370, 1440)	
Y20			P4(1520, 1440)	

Y型 合流形状

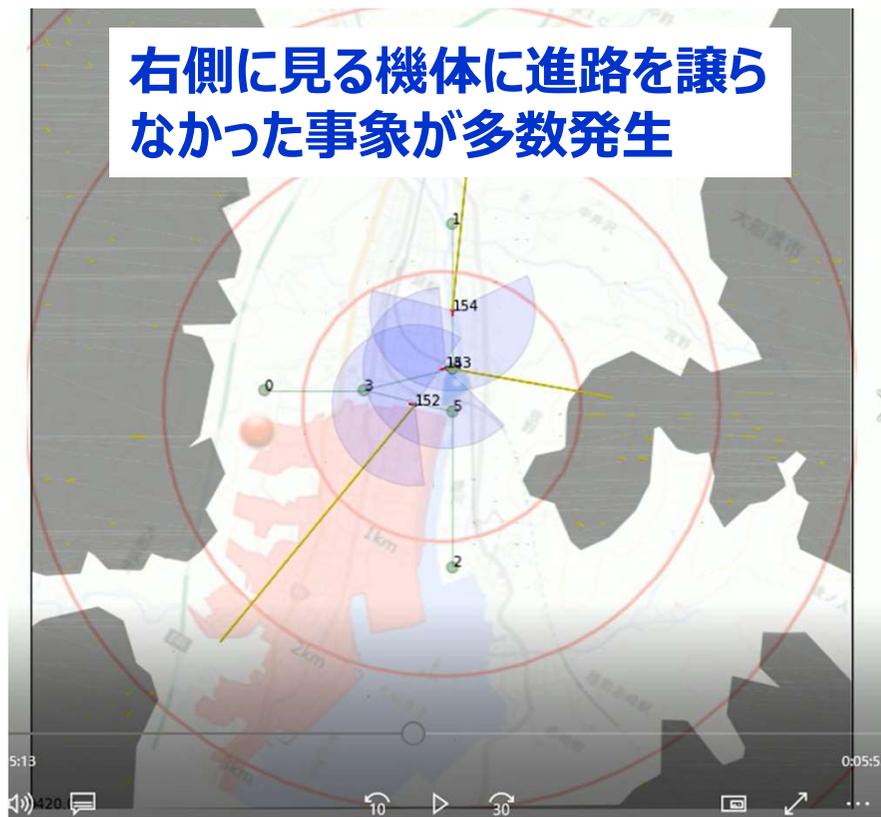
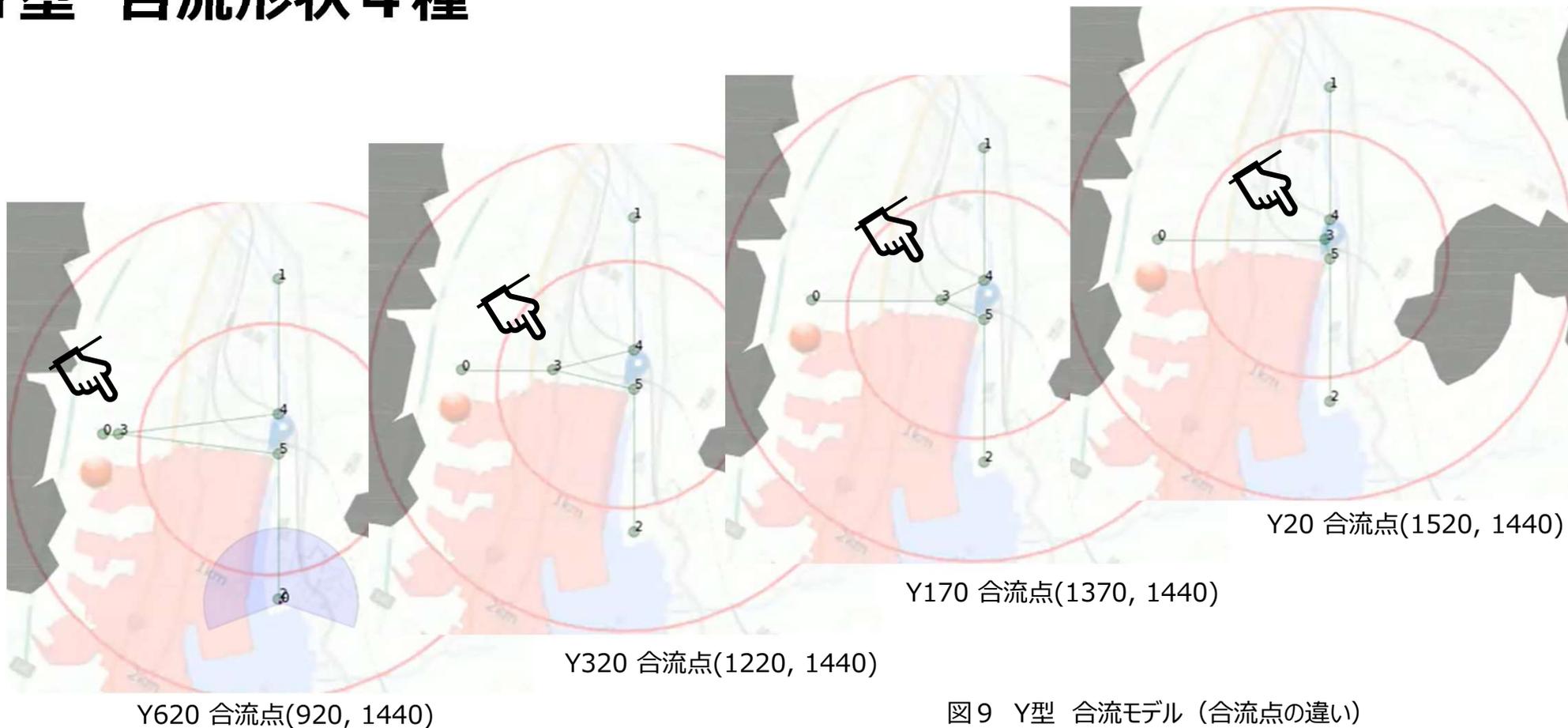


図8 Y320モデルの実行画面キャプチャ

合流モデルの変数を合流点だけに絞り、検証しやすくした。

合流モデル Y型は、相互の協調行動のみで現行ルールへ適合することは難しい。

Y型 合流形状 4種



合流モデルの変数を合流点だけに絞り、検証しやすくした。

合流モデル 長いMOD-Y型は、予めの調整と協調行動の組み合わせでルールにあう。

Modified-Y型 経路設計

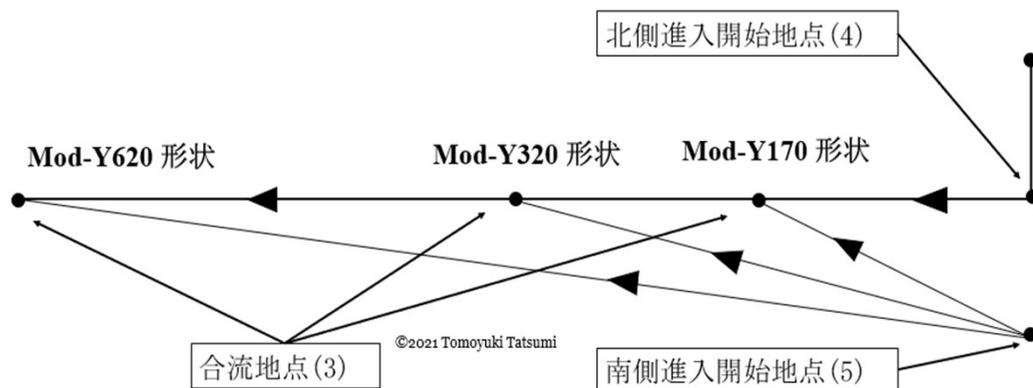


図 1 0 MOD-Y型 経路設計

表 3 MOD-Y型 経路座標

合流形状	ゴール地点	スタート地点	合流点	経由地点
Mod-Y620			P4(920, 1440)	
Mod-Y320	P1(860, 1440)	P2(1540, 820), P3(1540, 2100)	P4(1220, 1440)	P5(1540, 1440), P6(1540, 1520)
Mod-Y170			P4(1370, 1440)	

Modified-Y型 合流形状

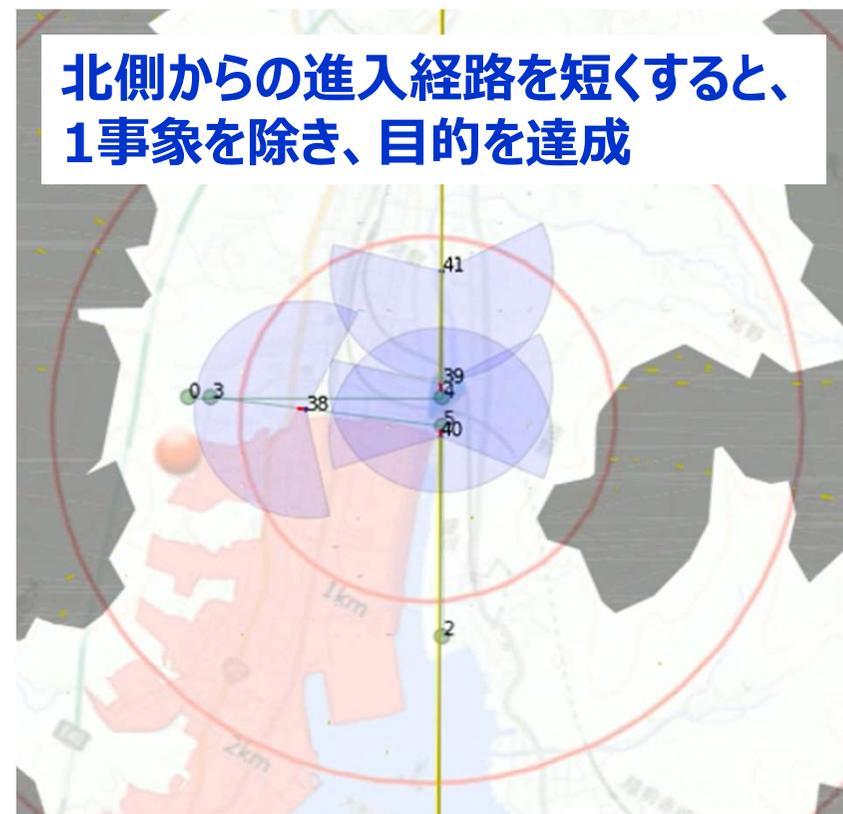


図 1 1 MOD-Y620モデルの実行画面キャプチャ

合流モデルの変数を合流点だけに絞り、検証しやすくした。

合流モデル 長いMOD-Y型は、予めの調整と協調行動の組み合わせでルールにあう。

Modified-Y型 合流形状3種

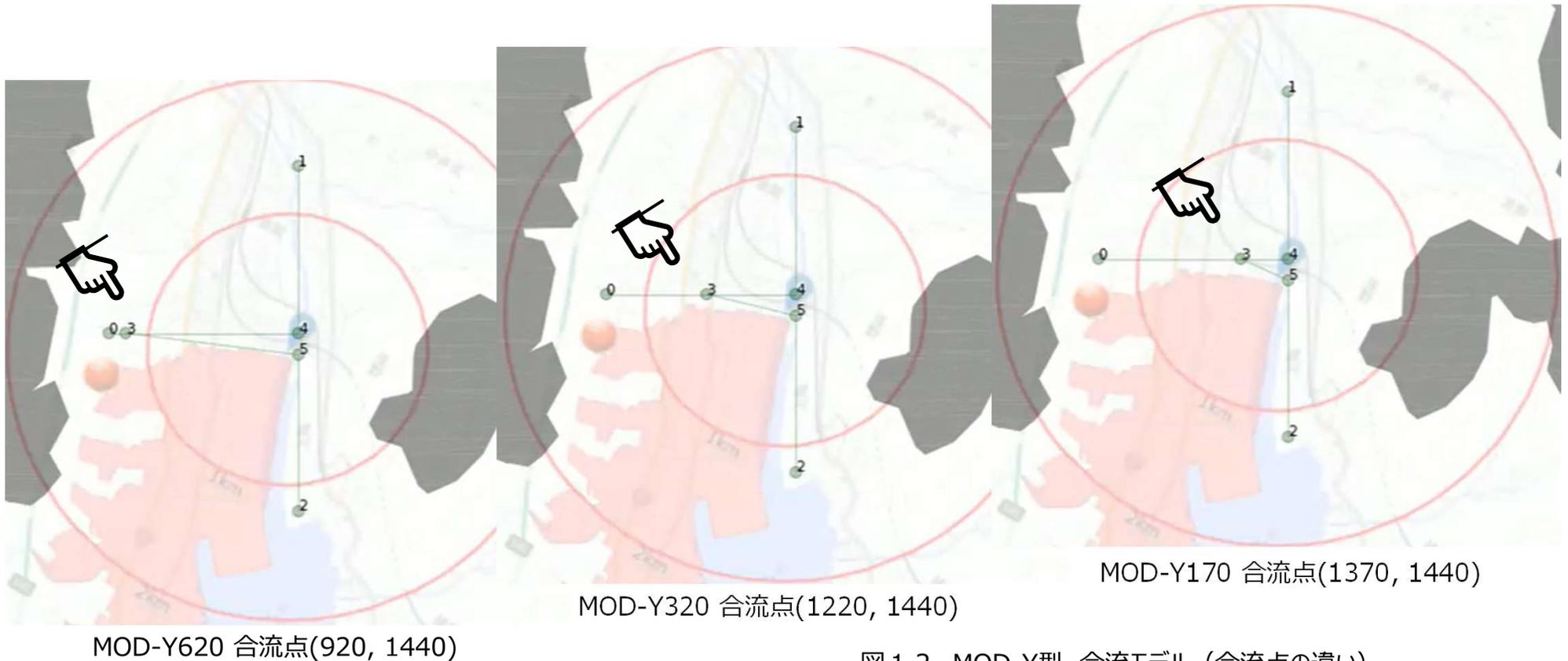


図 1 2 MOD-Y型 合流モデル (合流点の違い)

合流モデルの変数を合流点だけに絞り、検証しやすくした。

狭い “低高度の空間を安全に飛行する鍵は、飛行経路の設計と交通管理にある”

仮想空間に環境やエージェントの仕様を定義して合流モデルを実行したところ、相互作用するエージェントが安全に合流するには、鋭角で緩やかなModified-Y合流形状が秩序ある交通流になることを定性的・定量的に検証した。

表4 航空法施行規則に関連する発生数（接近は80m以下）

現象と関係する航空法施行規則の見出し	HaS	T	Y620	Y320	Y170	Y20	M-Y620	M-Y320	M-Y170
規則181条 右側に進路を譲った数（進路権）	9	-	3	5	5	9	3	5	6
右側に進路を譲らなかった数（進路権）	6	-	7	5	6	13	1	2	3
規則182条 正対接近時、右へ進路変更数（進路権）	-	11	-	-	-	-	-	-	-
正対接近時、左へ進路変更数（進路権）	-	3	-	-	-	-	-	-	-
規則183, 186,187条 合流点以外の接近数（進路権・間隔維持）	3	12	12	13	22	22	13	10	23
（参考：モビリティ発生数）	319	278	278	312	257	308	268	268	276

航空法施行規則第181条に定める進路権を守れなかった事象に対する考察：
 南側から進入した#40に対して、僅かに遅れて北側から進入した#39が短い右経路で前に出ると推測。
 しかし、後方の#41の作用で下方向へ力が働き、#39は#40と#41の板挟みで速度11m/sに戻らず。
 #40が先に速度を回復して先行したことを動画とデータで確認。（次ページにデータを添付）
 本事例は、予め間隔を確保していれば防げていたと考える。

進路権を守れなかった事象 (MOD-Y620合流)

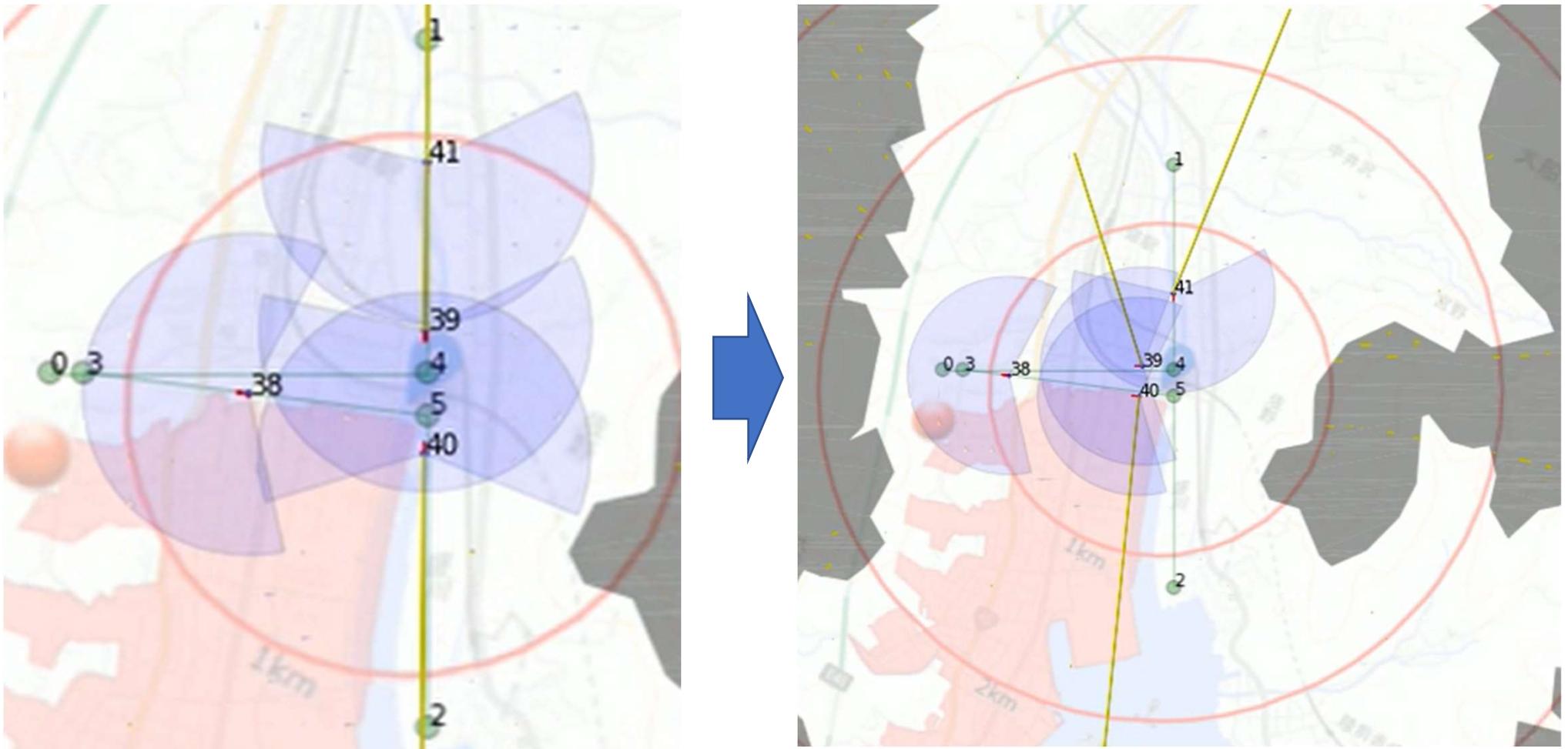


図 1 3 MOD-Y620モデルの実行画面キャプチャ 2 8 6 0 秒から2 9 2 9 秒

狭い “低高度の空間を安全に飛行する鍵は、飛行経路の設計と交通管理にある”

鋭角で緩やかなMOD-Y合流形状は、条件の下で秩序ある経路となることを導いたが、次の点について課題がある。

- ① 経路を移動するエージェントの量が増えた場合、相互作用の回数が増え、不確実さが高まる。進路を含む交通管理のあり方について、仮想の信号機や高さを与えることで解決できるか検証が必要である。
- ② 衝突回避の方法として、ルールに定められている右への回避行動だけでなく、減速や停止といった方法が有効であるか検証が必要である。
- ③ 自動・自律化したモビリティを社会実装するために必要なルールを提言する。

自動化・自律化したエアモビリティの合流経路モデルの評価 「参考文献」

1. Eric R. Mueller, et al.: Enabling Airspace Integration for High-Density On-Demand Mobility Operations, AIAA Aviation Technology, Integration, and Operation Conference 2017, Denver, CO.
2. David P. Thippavong, et al.: Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations, AIAA Aviation Forum, 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, GA.
3. NASA: UAM Vision Concept of Operations UAM Maturity Level 4 Version 1.0, 2020. <https://aam-cms.marqui.tech/uploads/aam-portal-cms/originals/4db079ec-555e-402c-b80f-9b768f72bbff.pdf> (2021/9/10 アクセス)
4. AIS JAPAN ENR 1.4: ATS空域の分離. <https://aisjapan.mlit.go.jp/html/AIP/html/20210909/frame/index-en-JP.html#efct=20210909> (2021/9/10 アクセス)
5. 中村裕子, 鈴木真二: 解説“自動化”“自律化”の実現に向けた世界の取り組み, 日本航空宇宙学会誌, 第68巻第1号 (2020) , pp. 8–14.
6. 航空法 昭和二十七年法律第二百三十一号
7. 航空法施行規則 昭和二十七年運輸省令第五十六号
8. FAA AIM Chapter 5: Air Traffic Procedures. https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap5_section_4.html (2021/9/10 アクセス)
9. AIS JAPAN ENR 1.6: ATS監視業務および方式. <https://aisjapan.mlit.go.jp/html/AIP/html/20210909/frame/index-en-JP.html#efct=20210909> (2021/9/10 アクセス)
10. 藤石金彌: カラー図解でわかる航空管制「超」入門・安全で正確な運航の舞台裏に迫る, SBクリエイティブ株式会社, 2014, p.47
11. Vishwanath Bulusu, et al.: Analysis of Interactions Between Urban Air Mobility (UAM) Operations and Conventional Traffic in Urban Areas: Traffic Alert and Collision Avoidance (TCAS) Study for UAM Operations, AIAA Aviation Forum 2017, Dallas, TX.
12. F. Ho, R. Gerald, A. Goncalves, B. Rigault, A. Oosedo, M. Cavazza, and H. Prendinger: Pre-Flight Conflict Detection and Resolution for UAV Integration in Shared Airspace: Sendai 2030 Model Case, IEEE Access, vol. 7 (2019) , pp. 170226-170237.
13. 原田賢哉: 運航管理コンセプト及びシステムアーキテクチャ, 第1回UTMシンポジウム, 東京, 2019.
14. AIS JAPAN ENR 2.1: FIR, UIR, TMA. <https://aisjapan.mlit.go.jp/html/AIP/html/20210909/frame/index-en-JP.html#efct=20210909> (2021/9/10 アクセス)
15. 藤目節夫: アメリカにおける航空規制緩和と結節地域構造の変化, 人文地理学会誌, 第39巻第5号 (1987) , pp. 16–33.
16. ICAO: A Unified Framework for Collision Risk Modeling in Support of the Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima (Doc 9689), Cir319 AN/181, 2009. <https://www.icao.int/safety/SafetyManagement/Pages/ICAOReferences.aspx> (2021/9/10 アクセス)
17. EUROCONTROL: ACAS Guide Airborne Collision Avoidance, December 2017. <https://www.eurocontrol.int/system/acas> (2021/9/10 アクセス)
18. 小木しのぶ: 手軽に始めてみよう！エージェントシミュレーション～S4 Simulation Systemのご紹介～, 日本計算機統計学会 第33回大会, 仙台, 2019
19. 鈴木真二, 藤巻吉博: 米国における「空飛ぶクルマ (Urban Air Mobility) 」の実現に向けた取り組み, 一般財団法人運輸総合研究所, 第140回運輸政策コロキウム・ワシントンレポートVIII, オンライン, 2021
20. 経済産業省: 審議会・研究会, 第7回 空の移動革命に向けた官民協議会, オンライン, 2021, pp.31-32.