

令和7年度（第25回）

電子航法研究所研究発表会

講演概要

令和7年6月



国立研究開発法人
海上・港湾・航空技術研究所
電子航法研究所

目 次

※印は講演者

1. 国際交通流に関するフリールート空域概念と予測精度	航空交通管理領域	ブラウン マーク	1
		※ 村田 暁紀	
		平林 博子	
		ビ・クマシハ ナガ イナ	
		虎谷 大地	
		井無田 貴	
2. 時間管理に関する将来の航空交通システムのアーキテクチャ作成	航空交通管理領域	※ 岡 恵	7
		中村 陽一	
		虎谷 大地	
		蔭山 康太	
	交流研究員	永野 隆文	
3. 空港近傍における次世代航空モビリティの運用環境検討	航空交通管理領域	※ 虎谷 大地	13
		平林 博子	
		佐藤 岳	
	監視通信領域	古賀 禎	
		河村 暁子	
		齋藤 享	17
[特別講演] GBAS標準化と電子航法研究所の取り組み			
4. GNSS代替としてのマルチDME測位の国内適用性評価	航法システム領域	※ 毛塚 敦	19
		齊藤 真二	
		長谷川 努	
		高島 宗彦	
		尾関 友啓	
5. 次世代SBASの飛行実験による評価	航法システム領域	※ 北村 光教	23
		齋藤 享	
		坂井 丈泰	
6. 羽田空港での滑走路異物監視システムの評価進捗	監視通信領域	※ ニッ森 俊一	29
		森岡 和行	
		河村 暁子	
		米本 成人	
7. 空港面における協調監視システムの監視性能および測位結果の統合	監視通信領域	※ 本田 純一	33
		松永 圭左	
		角張 泰之	
	航空交通管理領域	大津山 卓哉	

国際交通流に関するフリールート空域概念と予測精度

航空交通管理領域 ブラウン マーク，※村田 暁紀，平林 博子，
ビクラマシンハ ナヴィンダ，虎谷 大地，井無田 貴

1 Introduction

The volume of air traffic in the Fukuoka Flight Information Region (FIR) is resuming the upward trend that existed prior to the SARS-CoV-2 pandemic. While domestic (intra-Japan) traffic will remain largely constant, international traffic (between Japan and overseas) and overflight traffic are expected to increase. Responding to this demand will require increasing airspace capacity, alleviating the effects of congestion by better management of delay through international air traffic flow management (ATFM), and increasing flight efficiency to offset the climate change impact.

In March 2025, we completed a four-year research project aimed at creating smoother and more efficient international air traffic flows. We explored using the Free Route Airspace (FRA) concept to increase the flexibility of flight planning and thereby flight efficiency. We also examined use of trajectory-based operations (TBO) concepts for international air traffic flow management (ATFM), and considered ways to improve their effectiveness.

In this paper, section 2 outlines a simulation-based study that demonstrates the potential to increase the efficiency of flights between North America and Asia by introducing the FRA concept into oceanic NOPAC airspace. In section 3, we introduce time-based management concepts for distributed international ATFM in the Asia-Pacific region, and present the results of a case study that applied machine learning to improve the accuracy of trajectory prediction. In section 4 we propose exploiting the increased trajectory predictability and information sharing gained from TBO by coordinating ATFM measures further ahead of time with operators using Collaborative Decision Making (CDM).

2 NOPAC Free Route Airspace Concept

Much of the air traffic between Asia and North America passes through the Fukuoka FIR, and the oceanic airspace known as NOPAC, over the Pacific Rim east of the Kurile Islands and Kamchatka that carries traffic between Japan and Alaska, is particularly highly demanded.

Wind conditions over the North Pacific are dominated by the westerly jet stream, which strengthens and moves to northerly latitudes in winter and weakens and moves to southerly latitudes in summer. The routes of eastbound flights are planned to exploit the strong tailwind in the jet stream core area, while westbound flights avoid the strong headwind area over the North Pacific, often by skirting the Pacific rim. Accordingly, traffic between Asia and North America across the North Pacific Ocean uses flexible tracks that are planned according to the winds aloft. The NOPAC area, however, is structured with a set of parallel fixed airways in order to handle the traffic demand. Although it is on the Pacific margin and flight planning through NOPAC is less affected by the jet stream, our studies showed that the currently ongoing NOPAC airspace restructuring that reduces the lateral spacing of the routes [1, 2] will allow more flights to benefit from flexible tracks and so increase efficiency [3].

These studies prompted us to explore the effect of removing the NOPAC fixed routes entirely; effectively, turning the NOPAC airspace into a free route area, while exploiting greater automation support for air traffic control (ATC) and improved communication, navigation and surveillance (CNS) performance to manage the expected increase in traffic complexity. We carried out simulation experiments to study this issue with two questions: (i) what would be the gain in flight efficiency from

free routing in the NOPAC relative to fixed airways, and (ii) how would a NOPAC FRA affect airspace capacity; that is, would the airspace be manageable. The study is reported in detail in ref. [4].

2.1 NOPAC FRA Design

NOPAC airspace is being restructured taking advantage of CNS improvements in oceanic airspace. As a further future step, we propose a free route airspace that removes the NOPAC fixed routes and increases the number and density of oceanic gateway points. The configuration studied is shown in figure 1. Air traffic passes between oceanic airspace and radar-controlled airspace via fixed gateway points. At present, the gateways on the Japan side of oceanic airspace are at intervals of approximately 60NM. As well as expanding the flexible track area to include the NOPAC region, we propose to reduce the interval between gateways to approximately 30NM to allow more flexible flight planning and dispersal of traffic concentrations.

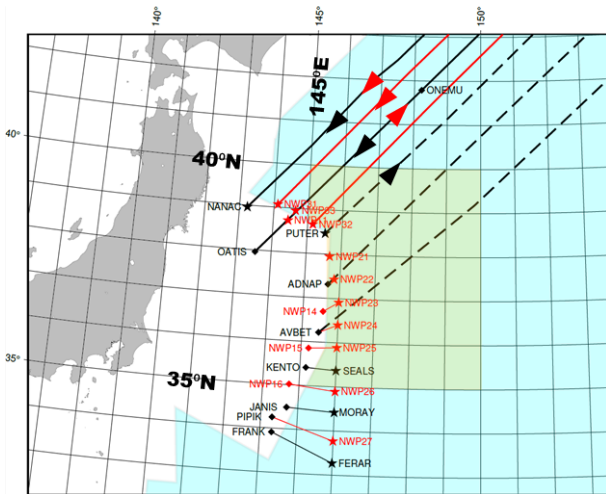


Figure 1. Proposed oceanic gateway points between Fukuoka FIR radar-controlled airspace and oceanic airspace (blue). Black lines indicate the current NOPAC airways. Arrows indicate the directions of one-way routes. In NOPAC redesign phase 3, the dashed line routes are removed and new red line routes are set. Gateways shown as red stars are newly added in this study.

2.2 Experiment

We compared the airspace configurations of the proposed NOPAC FRA and gateways (configuration M3) with the original NOPAC routes (M1)

and an intermediate NOPAC restructuring (M2) by fast-time simulation, looking at the effects on individual flight routes and performance, and on changes in air traffic complexity.

We created a traffic demand scenario based on a schedule of flights between existing city pairs in Asia and North America in 2019. Since flight routes vary depending on wind patterns that change over a year, the experiment used wind conditions on multiple days selected to represent seasonal trends [5, 6]. For each wind condition, wind-optimal (minimum flight time) routes for each flight were calculated using a tool developed for this research [7] extended to calculate optimal step-climb points [8]. The fuel burn and flight time of each flight were calculated given forecast wind and temperature conditions. Trajectories for each flight were generated by the AirTOP fast-time simulator and checked against each other for Potential Loss of Separation (PLOS). For each trajectory pair that came into conflict, the number of times that the distance between the aircraft became less than prescribed separation minima were tallied (PLOS count) and the durations of each loss of separation were summed as PLOS time.

Because separations between trajectories vary according to departure time, and step climb positions and aircraft performances vary with aircraft mass, simulations for each traffic demand schedule and wind condition were repeated with randomly perturbed weights and departure times, and the results were averaged.

2.3 Results

Figure 2 compares the original NOPAC airspace design with the intermediate NOPAC restructuring and the proposed NOPAC FRA (M1, M2 and M3 respectively) for eastbound flights (left graph) and westbound flights (right graph). The left bars in each graph (labelled 2D effect) show fuel benefit. Each step to improve the NOPAC airspace gives a reduction in fuel burn and flight distance. Increases in PLOS (omitted for brevity) could be offset by further reducing separation minima, for example by using near real-time surveillance (e.g. space-based

ADS-B [9]).

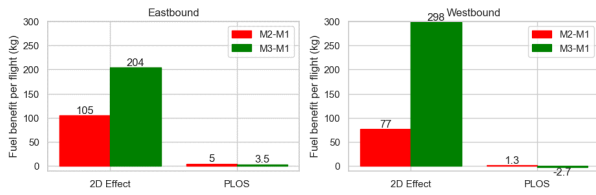


Figure 2. Fuel consumption benefit (“2D Effect”) and changes in fuel consumption due to PLOS resolution (PLOS) comparing airspace configurations M2 with M1, and M3 with M1.

The removal of the fixed routes through NOPAC had an effect on westbound traffic flow, shown in fig. 3. The optimal flight routes of westbound flights through the NOPAC area trend towards the western edge of the area, parallel to the boundary with Russian Federation airspace (green dotted line). However, flights are prohibited from crossing opposite-direction NOPAC routes (pink line), so flights that enter the NOPAC airspace through its eastern boundary are prevented from reaching the western boundary of the NOPAC area but must enter Fukuoka FIR radar-controlled airspace through a gateway that is further east than optimal (solid green line). Removing the NOPAC routes enables such flights to reach the western edge of the NOPAC and causes a higher concentration of traffic at the western-most gateway as well as increasing airspace complexity due to crossing traffic.



Figure 3. Route trends of westbound flights from North America to Japan and South Korea. Dashed green line indicates the ideal route that avoids jet stream core area (shaded) and is available in NOPAC FRA. With fixed NOPAC routes, flights cannot cross the NOPAC eastbound fixed airway (pink line) and hence must use the solid green line route.

We investigated the trade-off between the fuel

benefit of being able to plan more efficient routes and increased traffic complexity by assuming that each PLOS event could be resolved by one flight of a conflicting pair descending to a lower, less fuel-efficient altitude for the PLOS duration. The changes in fuel consumption due to PLOS resolution are shown in the right-hand bars in the graphs of fig. 2. It was found that even with this penalty, there was a net reduction in fuel burn from allowing flights to cross the NOPAC area as shown in fig. 3. Further analysis of whether this is manageable from ATC workload and operational perspectives is a future work.

3 ATFM and Trajectory Prediction

3.1 Distributed International ATFM

ATFM addresses imbalances that arise between the demand for airspace and airport resources and their capacities. When the demand is predicted to exceed capacity (which often occurs at congested airports at peak times), it must be reduced to within available capacity by either delaying or diverting flights. In Europe, ATFM is carried out across multiple FIRs by a centralised air traffic flow management unit. However, in the Asia-Pacific region, there is no centralised regional ATFM function and so international (cross-border) ATFM must be distributed between the FIRs.

We investigated international ATFM in the Asia-Pacific region in joint research with Korea Aerospace University, the Korea Aerospace Research Institute (KARI), and Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA) [10]. There are two distributed international ATFM mechanisms in the Asia region; APAC Cross-Border Multi-Nodal ATFM Collaboration (AMNAC, previously called Multi-Nodal ATFM) that operates between countries mainly in southeast Asia, and the North Asia Regional ATFM Harmonization Group (NARAHG) that operates between China, Korea and Japan. Both use time-based ATFM mechanisms that leverage TBO. With TBO, flights are managed using trajectory information that is shared between stakeholders involved in the flight. Trajectories

include not only lateral route and vertical profile, but also time at each point, and allow a more precise expression of a flight's path (planned, predicted, or flown) than a current ICAO flight plan.

Prior to TBO, there was limited cross-boundary information sharing and traffic flow was controlled using minutes-in-trail or miles-in-trail restrictions applied at the FIR boundary (e.g. 10-minute intervals between flights with destination ZBAA at AVAGO). TBO enables precisely targeted ATFM measures, allocating delay to individual flights by imposing a time constraint. With AMNAC, a congested airport may delay an inbound flight that has not yet departed by assigning a Calculated Take-Off Time (CTOT) from the departure airport. With NARAHG, an FIR with a capacity constraint may delay flights by assigning a Calculated Time Over (CTO) at the FIR boundary, and the departure FIR calculates a corresponding CTOT. A simulation case study by KARI demonstrated that CTO/CTOT is more effective than MIT/MINIT and can achieve a more equitable allocation of delay [10].

3.2 Improving Prediction Accuracy with Machine Learning

With time-based ATFM, flights are effectively assigned a target time slot. Flights that fail to meet their time slot reduce the effectiveness of the ATFM and create additional ATC and ATFM workloads, so a margin is required to ensure that the probability of a missed slot is reasonably low. Too large a time buffer, however, also reduces efficiency. The effectiveness and efficiency of ATFM therefore depend on the predictability of the trajectory.

One approach to flight trajectory prediction is physical modelling; each flight is modelled using a simplified physical aircraft model, typically a point mass model, and a set of performance and operating parameters, typically dependent on aircraft type and flight phase, for example the Base of Aircraft Data (BADA) model and database developed by EUROCONTROL [11]. Given a flight plan route and cruise altitude, and a set of initial conditions and forecast weather, it is possible to calculate when the aircraft will reach each point along its

planned route by essentially a fast-time simulation. However, apart from being time-consuming, this method does not address factors that may influence a flight but are difficult to incorporate into a physical model, including delays that might be expected due to traffic and weather. Moreover, not all of the performance parameters might be available, such as departure weight and the cost index (tradeoff between flight time and fuel consumption) used by the aircraft operator.

As an alternative, statistical modelling based on historical data has been receiving attention, particularly since the development of machine learning (ML) techniques that can automatically infer relationships between significant parameters (features) and quantities that we wish to predict. As a case study to explore the potential of ML for improving trajectory prediction, we evaluated a ML regression model of flight time from take-off to reaching a point on a standard instrument departure (SID) at Narita International Airport (RJAA), described in more detail in ref. [12]. We used historical data obtained from radar surveillance records to train a gradient-boosting histogram regression model specifying features including temperature and winds at the airport, aircraft type, estimated en-route time (as a surrogate for trip fuel), and aircraft operator. We compared predictions by the regression model with simple average flight times.

Using average flight time as the predicted value, the mean prediction error of a large number of predictions will be zero, but there may be a larger than acceptable variance. For the TETRA8.ENPAR departure, the average flight time of 12,225 samples was 11.4 min. with a standard deviation of 0.93 min. Assuming a normal distribution, this would result around 68% of predictions having an absolute error of 1 minute or less.

Figure 4 shows the distribution and cumulative probability of flight time prediction error using average flight time (left) and the regression model (right). The prediction accuracy of the average is consistent with a normal distribution; that is,

around 72% of predictions are within ± 1 min, while with the regression model the probability rises to around 88%. This demonstrates the potential of ML to improve trajectory prediction accuracy and contribute to more effective ATFM.

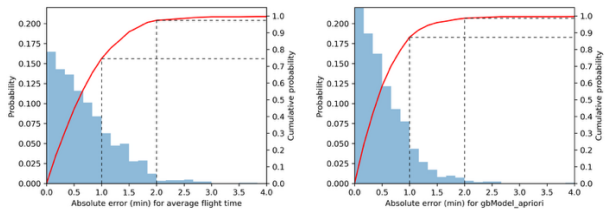


Figure 4. Distribution (bars) and cumulative probability (red line) of absolute error in flight time prediction of the TETRA8.ENPAR SID. Left graph shows the result using the average flight time value as the prediction, and right graph shows the result using prediction with a regression model. Dashed lines indicate probabilities of prediction accuracy within 1 and 2 minutes.

4 Trajectory-Based ATFM with CDM

Improved predictability from TBO will enable decisions about resource allocation to be made further ahead of time, rather than on a first-come first-served (FCFS) basis. This will give traffic managers flexibility to meet other objectives; for example, lowering greenhouse gas emissions across the ATM system as a whole, or achieving more equitable delay allocation. Making decisions ahead of time will also allow stakeholder preferences to be incorporated. However, this raises the question of how to balance the allocation of a limited resource between sometimes conflicting performance objectives and competing stakeholders.

This situation is similar to so-called Wicked Problems encountered in social planning and policy, in that there is no single “best” solution due to incomplete and conflicting requirements. Possible approaches to deal with such problems include Authoritative, where decision-making is entrusted to a small group, and Collaborative, which engages all stakeholders to find a mutually-acceptable “best” solution. In considering this, we drew on our previous research to proposed a concept for using ATFM incorporating CDM to allocate oceanic entry conditions between flights.

Our previous research studied tradeoffs of allocation of oceanic cruising level and oceanic airspace entry time to overflight traffic and departures from Japan, where the latter are disadvantaged under FCFS because overflights, which are already airborne, take precedence. For a set of traffic predicted to enter oceanic airspace within a given time period, we used a genetic algorithm to determine optimal conflict-free combinations of departure delay and flight level allocation at the gateways that could be used to give a more equitable distribution of delays and cruise altitudes [13]. We propose extending this work to allow collaborative selection of the set of Pareto-optimal oceanic airspace entry conditions through a CDM negotiation mechanism [14]. Challenges include the fact that prediction accuracy improves as the time forecast time decreases; the solutions presented must be robust against inaccurate prediction. We intend to elaborate the concept further in the future.

5 Conclusion

This paper has overviewed some of the main results from our research into improving international air traffic flows in Fukuoka FIR, in collaboration with other FIRs for ATFM and stakeholders via CDM. Our future research will continue some of these topics; in particular, the use of machine learning to improve ATFM, and our CDM concept for strategic resource allocation that gives flexibility to implement policy that balances performance objectives and stakeholder preferences.

Acknowledgements

The authors acknowledge the cooperation of the Japan Civil Aviation Bureau, including the provision of data.

References

- [1] Blackwell, T., “NOPAC Route System Re-design Project,” <https://ops.group/blog/wp-content/uploads/2023/05/NOPAC-ROUTE-SYSTEM-REDESIGN-PROJECT-final.pdf>

- (Retrieved May 2025).
- [2] Thornton, S., and Blackwell, T., System Impact Report NOPAC ATS Route Structure Changes. Federal Aviation Administration (FAA) Memorandum, 24 November 2021. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-01/NOPAC-Route-Changes_SIR.pdf (Retrieved May 2025).
 - [3] Brown, M., and Hirabayashi H., “A Simulation Study of Alternative Route Structures for NOPAC Airspace Reconfiguration”, 2019 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2019), Dec. 2019, Gold Coast, Australia.
 - [4] Hirabayashi, H., Brown, M., and Takeichi, N., “Airspace Design Proposal for Efficient Flight Operations in North Pacific Oceanic Airspace,” Fifteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2023), Savannah, USA, March 2023.
 - [5] Hirabayashi, H., Brown, M., and Takeichi, N., “Study of a Representative Wind Selection Method using Track Data to Evaluate Pacific Flight Operations,” Proc. 59th Aircraft Symposium, JSASS-2021-5041-1D04, 2021. (In Japanese.)
 - [6] Hirabayashi, H., Brown, M., and Takeichi, N., “Study of a representative wind selection method using track data to evaluate Pacific flight operations,” J. of Air Transport Management Vol. 119, Article 102639, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102639>
 - [7] Brown, M., Hirabayashi, H., and Wickramasinghe, N. K., “A Graph Search-Based Trajectory Optimiser for Practical Wind-Optimal Trajectories,” Proc. 2018 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2018), pp. 2201–2208, 2018. DOI: [org/10.1007/978-981-13-3305-7_177](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3305-7_177).
 - [8] Hirabayashi, H., Brown, M., Wickramasinghe, N. K., Suizu, H., and Takeichi, N., “Effect of step-climb operation on long-haul flight over the Pacific Ocean,” Proc. 2022 Asia Pacific International Symposium Aerospace Technology (APISAT2022), S22-3, 2022.
 - [9] Aireon, “Space-Based ADS-B via Low Earth Orbiting Satellites – Concept and benefits for use in oceanic and remote air traffic management environments,” ICAO SAT/21 WP09 presentation, June 2016.
 - [10] Brown, M., Kim, H., Wang, Y., Lee, K., Hirabayashi, H., Wickramasinghe, N. K., Murata, A., Jeon D., Eun Y., Oh, E., Lee, S., and Gray, N. H., “International Air Traffic Flow Management in North and East Asia,” 2022 Asia Pacific International Symposium Aerospace Technology (APISAT2022), Oct. 2022, Niigata, Japan.
 - [11] EUROCONTROL, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA)-Revision 3.6,” EEC Note No. 10/04, 2004.
 - [12] Brown, M., Murata, A., Hirabayashi, H., and Imuta, T., “Departure Flight Time Prediction at Narita International Airport using Machine Learning,” 2024 Asia Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2024), Oct. 2024, Adelaide, Australia.
 - [13] Murata, A., Takadama, K., Toratani, D., Hirabayashi H., and Brown, M., Benefit Balancing between Japan Departure Flights and Overflights in the North Pacific Route System. Trans. JSAS Aerospace Tech. Japan, Vol 20., pp.41–48, 2002. DOI:10.2322/tastj.20.41
 - [14] Brown, M., Murata, A., Hirabayashi H., and Imuta, T., “A Concept for Air Traffic Management Performance Balancing in Trajectory-Based Operations with Collaborative Decision Making,” 2024 International Workshop on ATM/CNS (IWAC2024), Tokyo, Japan.

時間管理に関する将来の航空交通システムのアーキテクチャ作成

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

1 まえがき

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

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

2 システム思考とシステムズアプローチ

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

をもとに開発された手法が体系化されたものである。

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

3 アーキテクチャの作成

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

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

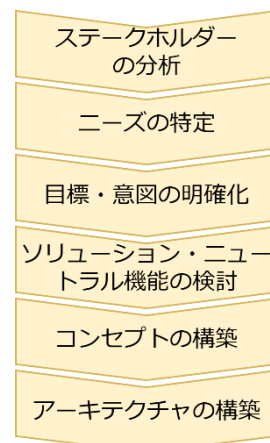


図1 本研究におけるアーキテクチャ構築の手順

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

3.1 ステークホルダーの分析

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

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

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

3.2 ニーズの特定

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

3.2.1 ヒアリングの方法

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

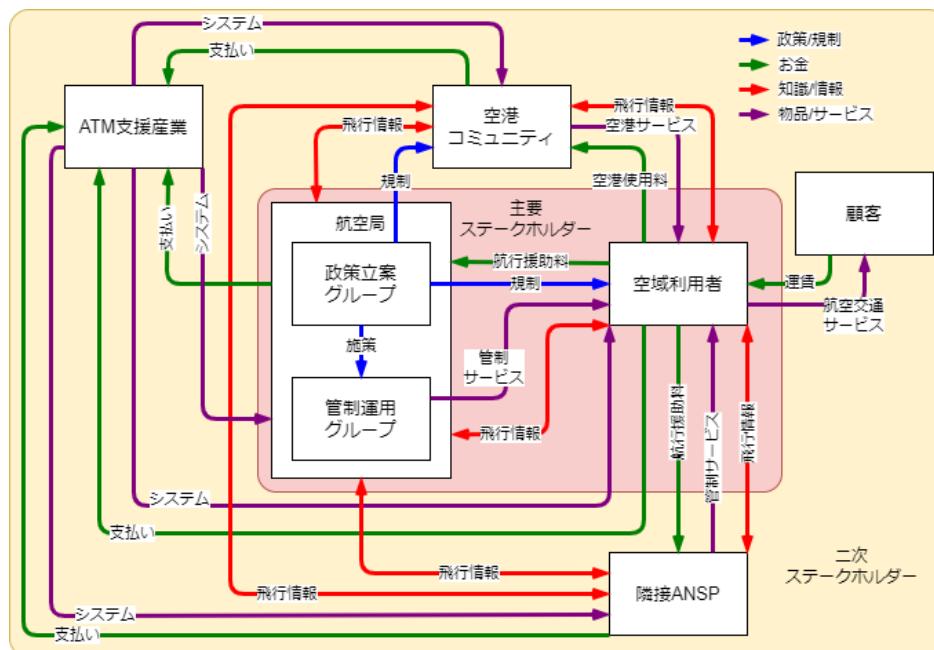


図 2 本研究で作成した時間管理に関する SVN（関係機関と関係性に関する図）

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

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

図3 ヒアリングで設定した時間管理に関する11項目のニーズ

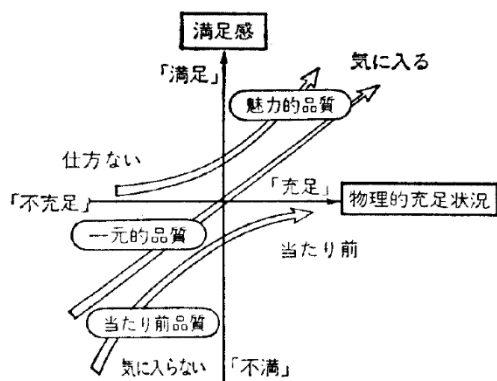


図4 狩野モデルの二元的な認識方法[8]

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

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

3.2.2 ヒアリング結果

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

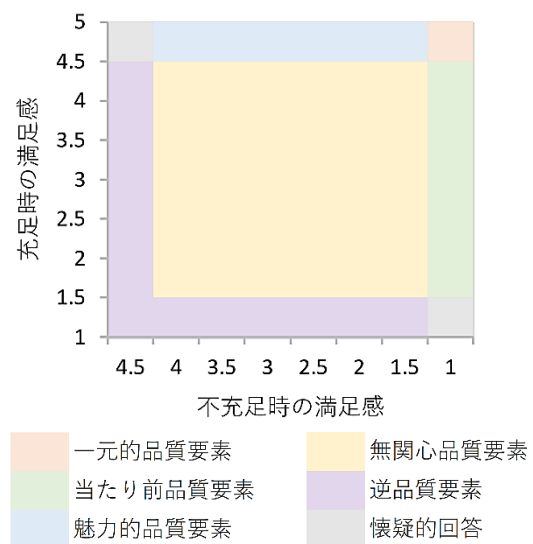


図5 狩野モデルによる評価

表1 各項目のヒアリング結果

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

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

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

3.3 目標・意図の明確化とソリューションニュートラル機能の検討

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

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

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

< 時間管理のSPS >

To:容量管理や順序・間隔づけの支援を

できるだけ全飛行フェーズで行うために

By:特定地点における通過時刻を直接、または間接的に指示することによって

Using:時間を含む軌道情報を用いて

また、検討した時間管理のソリューションニュートラル機能を以下に示す。

< ソリューションニュートラル機能 >

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

3.4 コンセプトの構築とアーキテクチャの構築

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

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

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

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

4 むすび

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

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

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

謝辞

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

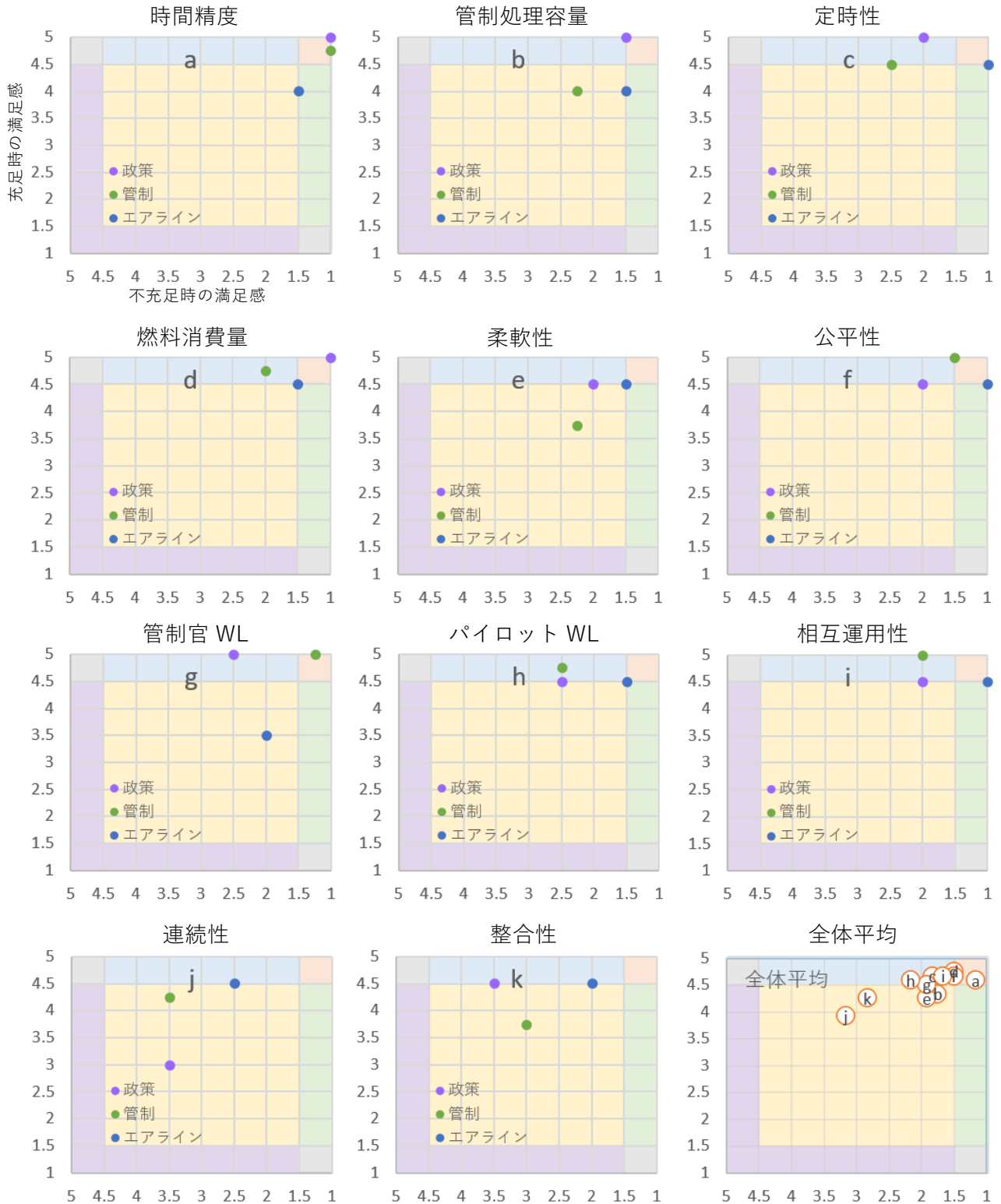
参考文献

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

付録-1

各ステークホルダーのヒアリング結果

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



空港近傍における次世代航空モビリティの運用環境検討

航空交通管理領域 ※虎谷 大地, 平林 博子, 佐藤 岳
監視通信領域 古賀 禎, 河村 暁子

1 はじめに

近年, ドローンや Advanced Air Mobility (AAM, 空飛ぶクルマとも呼ばれる。)といった次世代航空モビリティの研究開発が進められている。都市部での飛行が想定される AAM は Urban Air Mobility (UAM) と呼ばれ, 空港と都市部をつなぐ交通サービスとしての利用が期待されている。しかしながら, 特に大規模な空港には既に, 旅客機をはじめとした既存の航空機が離着陸しており, 新たに多数の UAM が離着陸するためには, 交通管理や通信・航法・監視の観点から何等かの工夫が必要となる。

UAM が飛行するとされている低高度においては, 従来, 有視界飛行方式 (Visual Flight Rules: VFR) による飛行が行われてきた。VFR は基本的に操縦者の目視に従って飛行するため, 今後の UAM の飛行数増加に向けて, 低高度における交通管理や通信・航法・監視といった, UAM の運用環境を整備していく必要がある。ただし, UAM は現時点において商業飛行可能な機体が存在しないので, それらの航空機がどのように飛行するかは不確実な部分が存在する。本稿では, 現時点において入手可能な情報を基に, 近い将来における混雑空港への UAM の離着陸方法, 及びその運用を支える低高度監視技術について提案する。

2 UAM の機体・飛行空域の想定

現在, UAM の商業飛行は行われていないが, 本稿では近い将来を想定し, 以下のような機体が飛行することを仮定する。

- 操縦者が搭乗して操縦する。
- 基本的に VFR で飛行するが, 一部 UAM のための特別なルールも使用される。
- 放送型自動従属監視 (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast, ADS-B) in/out を装備する。
- ヘリコプタと同程度の飛行性能を有する。

UAM の飛行に関しては, 三次元的に定義された専用経路である, UAM コリドーという概念も提案されている[1]。UAM はコリドー内を飛行し, 他の航空機はコリドーに進入しないことで, UAM と既存航空機が分離されることが期待されている。ただし, コリドーを設定しただけでは UAM がコリドーから逸脱しない保証は無く, UAM がコリドーに沿って飛行可能な仕組みを作るためには長期間の議論を要すると考えられる。本稿では近い将来の運用を考えるため, コリドー利用は想定しないものとする。

UAM の空港への離着陸を検討するために, 図1に示す仮想の空港と空域を用いる。この空

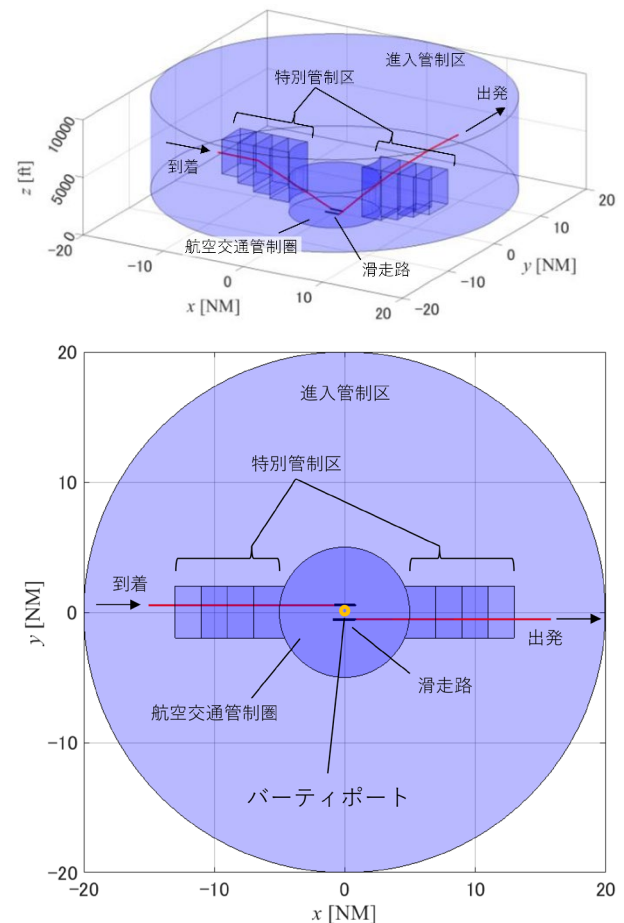


図1 仮想の空港, 滑走路と空域
(上段: 鳥瞰図, 下段: 平面図)

港は1組の平行滑走路を持ち、計器飛行方式（Instrument Flight Rules: IFR）で飛行する航空機が頻繁に離着陸している。空港近傍の空域は日本の混雑空港における典型的な空域構成を模擬している。平行滑走路を持つ空港においては、同時平行進入・出発が行われることもあるが、議論の焦点を絞るため、本稿では同時平行進入・出発は考えず、各滑走路が到着・出発専用として独立して運用されていると仮定する。

UAMが空港に離着陸するにあたり、その離着陸場であるバーティポートは旅客機等との接続性を考慮して、できるだけ空港ターミナルビル近傍に配置することが期待されている。平行滑走路を有する空港においては、滑走路の間にターミナルビルが配置されていることが多いので、本稿では図1において、原点の位置、すなわち平行滑走路の間にバーティポートを配置することを考える。このとき、滑走路にはIFRで飛行する航空機が連続的に離着陸するので、UAMはそれらの航空機と安全な間隔を保ちつつ離着陸しなければならない。

3 UAMの離着陸

図1で示した空港のバーティポートへUAMが離着陸する場合、UAMがIFR機と対向して飛行すると、相対速度が高くなり衝突のリスクが大きくなる。そこで、UAMの離着陸、特に到着の方向は、主に以下の2パターンが考えられる。なお、IFR機、UAMともに不測の事態を考慮する必要があるので、ともに着陸復行についても考慮している。

- 到着パターン1：滑走路に対して垂直
滑走路に対して垂直に到着することで、滑走路以外でUAMがIFR機と接近せずにバーティポートにアプローチすることができる（図2）。ただし、UAMが滑走路を横断するので、滑走路がクリアな状態でしかUAMが着陸することができず、UAMの着陸前に空中待機が発生する可能性がある。加えて、IFR機が高頻度で離着陸する空港においては、UAMの離着陸頻度が低くなる可能性がある。

- 到着パターン2：到着IFR機と平行

IFR機と平行に到着することで、パターン1とは異なり、IFR機が連続して着陸している状況であっても、UAMもバーティポートへアプローチすることができる可能性がある（図3）。このような運用は、Vermaらの先行研究においても想定されている[2]。IFRであれば同時並行進入のマニュアルが整備されているが[3]、UAMの着陸方式に関してはまだ検討の途上である。IFR機とUAMの到着経路の間隔が非常に近くなるので、両者の安全を確保する仕組みが必要である。

出発に関しては、主に以下のようなパターンが考えられる（図4）。

- 出発パターン1：滑走路に対して垂直
- 出発パターン2：出発IFR機の後ろを通過
- 出発パターン3：出発IFR機と平行

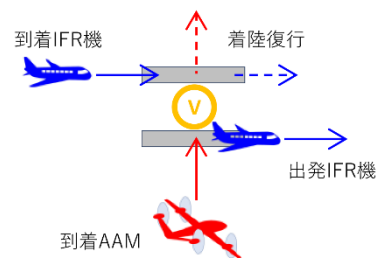


図2 到着パターン1

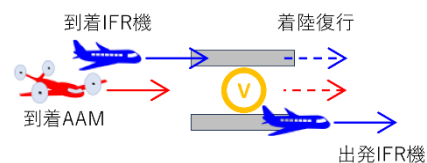


図3 到着パターン2

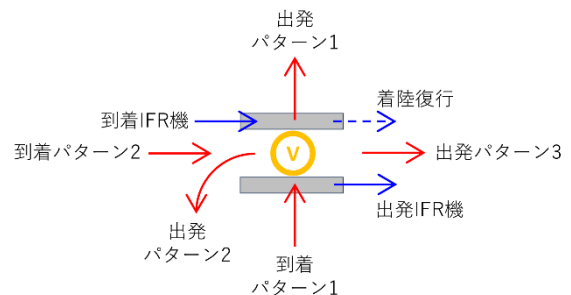


図4 出発パターン

出発と到着、ともに各パターンに利点と欠点があるが、現時点において実際の UAM の運用については不確実性が高く、また、具体的にどの空港に UAM を導入するかによって、空港特有の制約と、実現可能なパターンが変わる可能性がある。そのため、現時点においてはどのパターンが最もよいかを議論するのではなく、実現性の高いパターンを複数あげ、各パターンの利点・欠点を洗い出しておくべきであると考えられる。

ここまでで議論した到着・出発パターンを組み合わせた、空港近傍における UAM の運用イメージの一例を図 5 に示す。ここでは、到着パターン 2 と、出発パターン 2, 3 を用いている。また UAM が様々な方面へ行き来できるように、到着・出発経路を設定している。UAM の経路は IFR 機の経路と一部交差しているが、UAM は IFR 機に比べて低高度（1,000 ft 程度を想定）を飛行するため、基本的には IFR 機と高度分離が可能であると考えられる。しかしながら、滑走路とバーティポートの手前では、一部 IFR 機と UAM の水平・垂直距離が非常に近くなってしまう。この点に関しては、図 6 に示す、近接平行滑走路に対する平行進入における diagonal separation を援用して間隔を保つこと等で緩和できる可能性がある[3]。このとき、UAM は VFR で飛行しているため、基本的に操縦者は目視に基づいて間隔を保つことになるが、IFR 機と UAM は飛行高度・速度ともに異なるため、UAM のパイロットが IFR 機を視認することは困難である。そのため、UAM の操縦者は周囲の航空機の動態情報を取得し、目視による間隔

維持の支援に使用することが推奨される。動態情報を用いた目視間隔の支援としては、cockpit display of traffic information assisted visual separation といった方式が存在する[4]。

本稿では、空港近傍における IFR 機と UAM の競合を中心に議論を進めてきたが、IFR 機に加えて VFR で飛行する小型機等が数多く離着陸する空港も多い。VFR 機については空港ごとの運用の差が大きく、特に具体的な空港について考える際は、場周経路等、対象空港における運用を踏まえて、VFR 機と UAM の競合についても検討する必要がある。

4 低高度動態情報共有システム：TIS-B

UAM は ADS-B in/out を装備すると想定されるので、周囲を飛行する ADS-B out 搭載機の動態情報を機上で取得することができる。しかしながら、一部の IFR で飛行する旅客機や、多くの VFR で飛行する小型機等は ADS-B out を搭載していないため、UAM はこれらの航空機の動態情報を取得することができない。そこで本稿では、図 5 に示した UAM の運用の実現を支援するため、低高度の動態情報共有システムとして、Traffic Information Service-Broadcast (TIS-B) を提案する。

TIS-B とは、二次レーダーやマルチラテレーションシステムなどの地上監視システムで取得した動態情報を、1090 MHz 信号で放送するシステムである。ADS-B out 非搭載だがトランスポンダ搭載の航空機の動態情報を、ADS-B in 搭載機のターゲットディスプレイ上に表示することができる。英国では、低高度空域の近代化

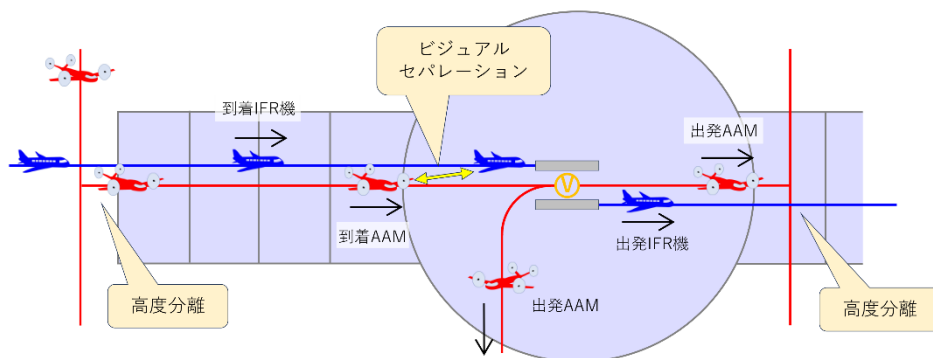


図5 空港近傍における UAM の運用イメージ

計画の一部として TIS-B の導入を掲げている[5]。

電子航法研究所では低高度における動態情報共有システムとして、仙台空港に設置されているマルチラレーション実験システムに TIS-B 機能を実装し、2024 年度から初期的な実験を開始している（図 7）。実験により得られた動態情報の一例を図 8 に示す。図 8 において、黄色で示されている ADS-B out 非搭載機は本来

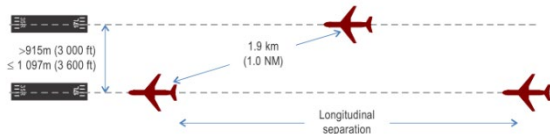


図 6 近接平行滑走路に対する平行進入における diagonal separation (文献 [3] より引用)

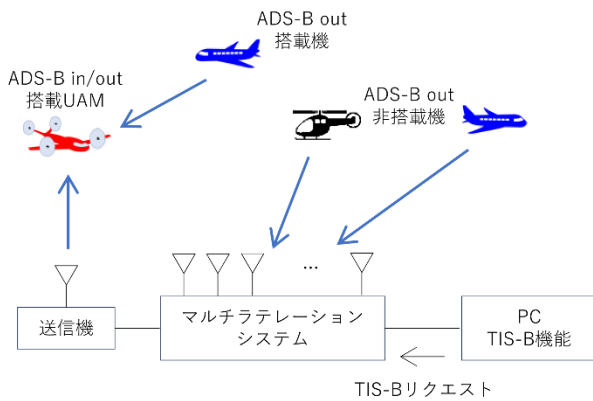


図 7 実験システムの概要



図 8 仙台空港で取得した動態情報の一例

ターゲットディスプレイ上には表示されないが、緑色で示されている ADS-B out 搭載機同様、表示されている。図 8 の TIS-B メッセージは地上の受信局で取得したものであるが、今後、航空機上の ADS-B in で TIS-B メッセージを受信する実験等を行い、TIS-B が低高度における動態情報共有に有効であることを確認していく。

このように TIS-B の導入によって、UAM の操縦者が機上でより多くの周辺航空機の動態情報を取得できるようになり、混雑空港における UAM の離着陸を含む空港近傍における運用の実現に貢献することが期待される。

5 まとめ

本稿では、近い将来における混雑空港近傍での UAM の運用を対象に、実現可能性がありそうな離着陸のパターンを議論した。またそのような運用を支える低高度動態情報共有システムとして TIS-B の実験システムを開発し、初期的な実験結果を示した。今後はより実験システムの評価を進めていくとともに、空港近傍における UAM の運用方法を精緻化させていく。

参考文献

- [1] Federal Aviation Administration, “Urban Air Mobility (UAM) Concept of Operations,” v2.0, 2023.
- [2] S. Verma, V. Dulchinos, R. D. Wood, A. Farrahi, R. Mogford, M. Shyr, and R. Ghatas, “Design and Analysis of Corridors for UAM Operations,” IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2022.
- [3] International Civil Aviation Organization, “Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR),” Doc. 9643, 2nd Ed., 2020.
- [4] International Civil Aviation Organization, “Manual on Airborne Surveillance Applications,” Doc. 9994, 2nd Ed., 2020.
- [5] Civil Aviation Authority, “Modernised Lower Airspace in the UK,” https://www.caa.co.uk/media/33jh005c/lower_airspace_caa.pdf (retrieved May 2025)

GBAS 標準化と電子航法研究所の取り組み

航法システム領域 ※齋藤 享

1 まえがき

GBAS (Ground-Based Augmentation System: 地上型衛星航法補強装置)とは、全球航法衛星システム(Global Navigation Satellite System: GNSS)を用いたディファレンシャル GNSS 技術に基づき、航空機の精密進入誘導を可能とする航法システムである。GBAS は、GNSS コア衛星系に加えて地上装置と機上装置からなる。GBAS はカテゴリーIII (CAT-III)進入着陸までをサポートすることができる。

これまでにカテゴリーI (CAT-I)進入をサポートする GBAS が GAST (GBAS Approach Service Type) C, カテゴリーII/III (CAT-II/III)侵入をサポートする GAST D の2種類が標準化されており、GAST C については、羽田空港を含め世界で導入が進められている。

電子航法研究所では1996年以来 GBAS に関する研究開発を行ってきた。

本発表では、GBAS の国際標準のこれまでの策定状況と、電子航法研究所において行ってきた対応する研究開発について紹介する。

2 GBAS 国際標準

GBAS の国際標準は、国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization: ICAO)によって策定されており、国際民間航空条約第10付属書(Annex 10)にその要件が定められている。国際標準の策定は、ICAO 航法システムパネル(Navigation Systems Panel: NSP)が担当している。

2.1 GAST C

GAST C は、コア衛星系として GPS (米国)、GLONASS (ロシア)の L1 周波数帯の信号を用い、CAT-I 精密進入を可能とする航法システムである。GAST C の国際標準は2001年に発効し、その後一部の修正を加えられながら現在に至っている。

GAST C の特徴は、GBAS 地上装置が航空機の測位誤差に関するインテグリティを全て担保

することであり、機上装置は得られた GBAS 補強情報を機上装置の規格に従って処理すればよい。

2.2 GAST D

GAST D は、コア衛星系として GPS (米国)、GLONASS (ロシア)の L1 周波数帯の信号を用い、CAT-II/III 精密進入を可能とする航法システムである。GAST D の国際標準は、GAST C の実用化において得られた経験に基づいた技術面での変更を経て策定され、2018年に発効し、その後一部の修正を加えられながら現在に至っている。

GAST D においては、GAST C において性能を制限する要因となっていた電離圏異常の対策を強化し、電離圏異常対策の機能の一部を機上システムが担うように変更が行われている。

2.3 GAST E

GAST E は、新たに使用可能となった Galileo (欧州)、BDS (中国)及び、GPS、GLONASS を含む4コア衛星系の新たな L5 帯の信号を用いる、2周波・複数衛星系(Dual-Frequency and Multi-Constellation: DFMC) GNSS を用い、CAT-II/III 精密進入を可能とする航法システムである。2周波信号を用いることにより、電離圏の影響を低減し、電離圏異常が激しい地域を含む全世界での GNSS を用いた CAT-II/III 精密進入を実現することができる。また、電波干渉、コア衛星系の故障にも強いシステムとなると期待されている。さらに、GAST E では着陸進入にとどまらないさまざまな運航フェーズにおいて安全性と精度の高い航法を提供することができる拡張性も用意されることとなっている。

GAST E の国際標準は、現在 ICAO NSP において策定が進められており、2030年までに検証済みの国際標準案を策定することを目標としている。

3 電子航法研究所の取り組み

電子航法研究所では、ICAO における国際標

準の策定と歩調を合わせ、日本の環境に適した GBAS を開発するための研究開発を行っている。

電子航法研究所では、1996 年に GBAS に関する研究を開始し、2001 年に仙台空港において最初の GBAS 実証実験を実施した。以降、ICAO における標準化にあわせ、GAST C、D 及び E に関する技術開発を継続して行っている。

3.1 GAST C

2008 年からは GAST C に対応した GBAS プロトタイプ地上装置の開発を開始し、2011 年にこれを関西空港に設置し、飛行実験を含む性能評価を行ってきた。

GAST C のプロトタイプ地上装置の開発においては、電離圏フィールドモニタ (Ionospheric Field Monitor: IFM) と呼ばれるインテグリティモニタ機構を考案し、強い電離圏異常が存在する日本を含む磁気低緯度地域の環境下においても十分な可用性を達成することができることを示した。

GAST C のプロトタイプ開発で得られた GBAS の安全性設計に関する知見は、羽田空港における実用 GBAS 装置の導入における安全性評価に活用されている。

また、開発した GAST C GBAS プロトタイプの技術は、可搬型 GBAS の開発に活用され、GBAS が設置されていない空港において、GBAS を用いた高度な運航の実証実験に用いるなどしている。

3.2 GAST D

2011 年からは GAST D の安全性評価を目的とした研究開発を開始し、2014 年に GAST D 実験用プロトタイプ地上装置を新石垣空港に設置し、合わせて開発した GAST D 機上実験用装置を用いた飛行実験などを行い、特に電離圏擾乱時の GAST D 性能の評価を行ってきた。

電離圏擾乱時を含む飛行実験の結果は GAST D 国際標準の検証において重要な成果として扱われた。また当所が開発した GAST D 地上・機上装置は欧州・米国の地上・機上装置との相互運用性試験を通して、GAST D 標準案の検証を行うことができた。

また、開発した GAST D 機上用実験装置の技術を活用し、GAST C 及び D に対応した GBAS の性能評価装置を開発し、GBAS の連続

的な性能評価に用いている。GBAS 性能評価装置は、2022 年にタイ・バンコクで実施された GBAS 実証実験において、GBAS の性能を独立して評価するために用いられるなど、活用されている。

3.3 GAST E

2015 年からは DFMC GBAS に関する研究開発を開始し、2019 年に DFMC GBAS テストベッドを新石垣空港に設置し、飛行実験を含むデータ収集と解析を行い、DFMC GBAS の国際標準のコンセプト立案、DFMC GBAS としての GAST E の規格の詳細基準の立案と検証を行ってきた。DFMC GBAS テストベッドは GAST D 実験用プロトタイプ地上装置のインフラを活用し、DFMC GBAS 機上実験装置は GAST D 機上実験装置を発展させてそれぞれ開発されている。

GAST E においては引き続き電離圏対策が重要な課題となっており、電離圏異常の発生頻度が高い新石垣空港の地上・機上観測データは、電子航法研究所だけでなく、研究協力を通して欧州等の研究機関によっても活用され、GAST E の標準化に大きく寄与している。

4 まとめ

ICAO においては、GNSS を用いた CAT-I/II/III 精密進入を実現する GBAS の国際標準策定を行ってきたおり、これまでに CAT-I に対応した GAST C、CAT-II/III に対応した GAST D の標準化が完了している。GAST C に対応した GBAS 地上サブシステムは、羽田空港を含む世界 100 以上の空港で運用されている。現在 ICAO においては、DFMC GNSS に対応した GAST E の標準化を、2030 年に完了することを目標として進められている。

電子航法研究所では、1996 年以来 GBAS に関する研究開発を行っており、GAST C 地上プロトタイプ装置の開発、GAST D 地上実験用プロトタイプ及び機上実験装置の開発を通して日本の環境に適した GBAS の開発と標準化を行ってきた。現在は DFMC GBAS の標準化に注力するとともに、GBAS の実用化のための支援にも積極的に取り組んでいる。

GNSS 代替としてのマルチ DME 測位の国内適用性評価

航法システム領域 ※毛塚 敦, 齊藤 真二, 長谷川 努, 高島 宗彦, 尾関 友啓

1 まえがき

GNSS (Global Navigation Satellite System) は航空機の RNAV 航法において利用されているが、近年、干渉[1]やスプーフィング[2]が多発しており、使用できない状況が発生している。APNT (Alternate Positioning, Navigation and Timing) は GNSS 障害時に測位、航法、時刻同期を提供するバックアップであり、その構築が ICAO での検討課題となっている。

バックアップシステムの候補の一つとして、航空用測距装置である DME (Distance Measuring Equipment) の性能改善により実現する方法が提案されており[3][4]、その中でマルチ DME 測位はエンルートと出発／到着経路 (SID／STAR) を複数の DME 局による測位で実現する方式である[5]-[7]。我が国は DME が数多く設置されているため、GNSS のバックアップとしてマルチ DME 測位は有力な候補であり、その適用性について詳細に評価する必要がある。本発表では、飛行実験によりマルチ DME 測位の適用性を評価したので報告する。

2 マルチ DME 測位

DME は機上装置 (インタロゲータ) と地上装置 (トランスポンダ) で構成され、機上装置から発出されたパルスを一定時間後に地上装置が返送する。航空機では、パルス発出から受信までの伝搬時間から航空機と地上装置間の距離を計算することができ、パイロットへ距離情報を提供する。

DME 2 局と IRU (慣性航法装置) を用いた DME/DME/IRU 測位方式は RNAV 航法において既に使用されているが、インテグリティ性能 (測位異常時にシステムを遮断する能力) を持たないため、自立航法の要件が必要な経路には使用できない。近年、我が国において整備が進められている RNP 経路はインテグリティ性能が必要であり、その性能を有する GNSS のみが航法装置として利用でき、DME/DME/IRU 測位

方式を GNSS バックアップとして適用することはできない。そこで、2 局ではなく、図 1 に示すように複数の地上 DME 局を利用する測位方式とすることでインテグリティ性能を付加する検討が欧州を中心に行われている。マルチ DME 測位では、図 1 に示すように測距誤差により測位解は一意に定まらないため、GNSS と同様に最小二乗法を用いて測位解を算出している。そして、複数局を使用することにより、異常が生じている地上 DME 局を検出し、排除することが可能となる[8]。本発表では、まずは測位精度に着目し、飛行実験により我が国での性能を評価した。

3 実験用機材

飛行実験評価で使用した電子航法研究所所有の実験用航空機および DME パルスアナライザ EDS300 を図 2 に示す。EDS300 はキャビン前方

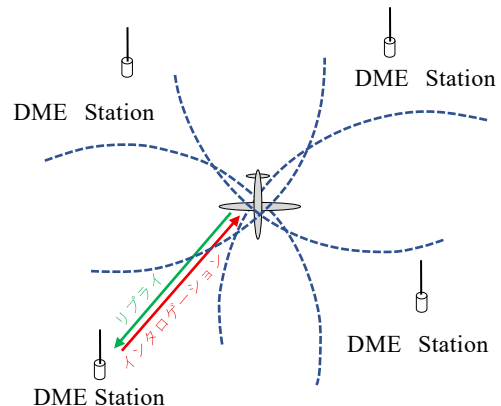


図 1 マルチ DME 測位の原理



図 2 実験用航空機と測定機材

のラックへ設置した。EDS300 は 10 局の地上 DME 局を同時に捕捉し、測距する機能を有する。機体下部に設置された L バンドアンテナを通じて、複数の地上 DME 局との測距を行った。GNSS は一般的に DME に比べて高精度であるため、別途機体に設置されている GNSS 受信機で得られる測位位置を真位置として記録し、測距誤差および測位誤差の評価で使用した。

4 飛行実験による評価結果

4.1 実験空域

飛行実験では、DME 局が豊富に存在し、山岳等による遮蔽が少ない条件の良いエリアとして成田空港ターミナル空域を選定した。また、山岳による遮蔽が想定される条件の悪いエリアとして仙台空港ターミナル空域を選定し、それぞれ出発経路にて評価を行った。

4.2 成田空港における評価結果

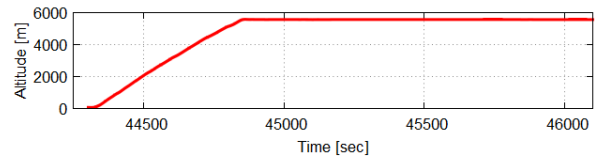
成田空港では、滑走路ローパスでの飛行後に出発経路である TETRAEIGHT DEPARTURE および KIMIN TRANSITION にて測位精度評価を行った。飛行経路を図 3 に示す。図 3 より、地上 DME 局数が周囲に豊富に存在し、また関東平野であるため、山岳による遮蔽が少なく、良い条件であると考えられる。



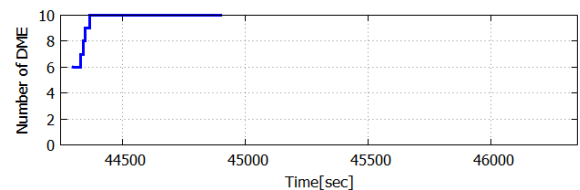
16L TETRAEIGHT DEP KIMIN TR

図 3 成田空港出発経路

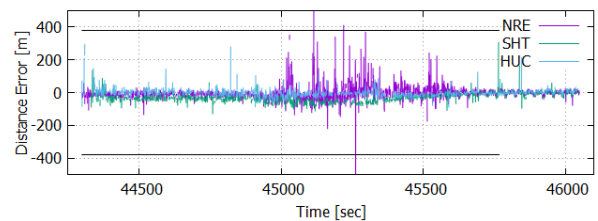
図 4(a)～(d)に飛行高度、捕捉 DME 数、測距誤差および測位誤差を示す。図 4(a)および図 4(b)より、滑走路上（ローパス時）から 6 局の DME を捕捉できていることが分かる。また、上昇とともに直ちに 10 局の DME が捕捉できていることが分かる。マルチ DME の一例として、図 4(c)は NRE（成田）、SHT（下総）、HUC（阿見）それぞれの地上局との測距誤差を示している。所々スパイク状の誤差が観測されているものの、全体として飛行検査合格基準（0.2NM、図中の黒線）と比べて誤差が小さいことが分かる。なお、45000～45500sec において NRE 局で発生した連続するスパイク誤差については、この時間の航空機の位置が NRE 局



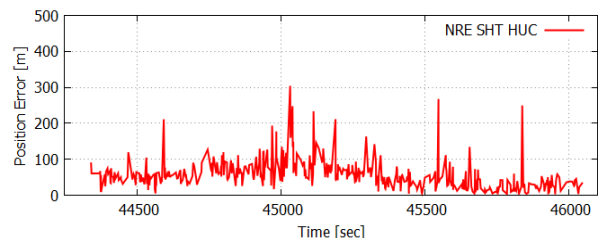
(a) 飛行高度



(b) DME 局数



(c) 測距誤差



(d) 測位誤差

16L TETRAEIGHT DEP KIMIN TR

図 4 成田空港に出発経路におけるマルチ DME 性能評価

直上であったために発生したものと考えられる。図4(d)に示すように、図4(c)の3局を用いた場合の測位誤差は100m程度に抑えられていることが分かった。以上より、成田空港周辺では低高度でも多くのDMEが利用でき、マルチDME測位が適用しやすい空域であることが分かった。

なお、解析において、DMEアナライザによるデータ取得時刻と真位置であるGNSS受信機の取得時刻と同時刻となるように補間しているが、実際にはそれら時刻の同期にわずかな差が発生しており、測距および測位結果に影響を与えている。本解析においては、その時刻同期誤差を1秒として補正した。

4.3 仙台空港における評価結果

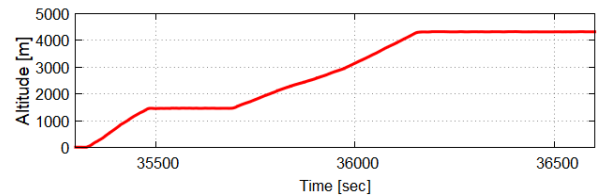
仙台空港では、STEEDFOUR DEPARTUREおよびRIKYU TRANSITIONにおいて評価を行った。飛行経路を図5に示す。図5より、DMEの数は成田空港より少なく、かつDMEを遮蔽する山岳が多く存在することが分かる。図6(a)～(d)に飛行高度、捕捉されたDME数、測距誤差および測位誤差を示す。図6(a)および図6(b)に示すように、滑走路（ローパス時）には2局のDMEのみが捕捉可能であった。これは、図6(c)の測距誤差の結果でも示している



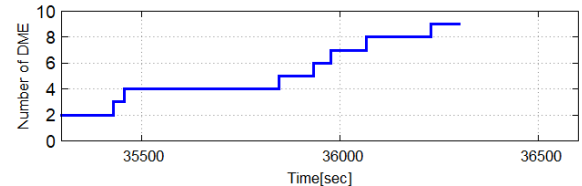
STEEDFOUR DEP RIKYU TR

図5 仙台空港出発経路

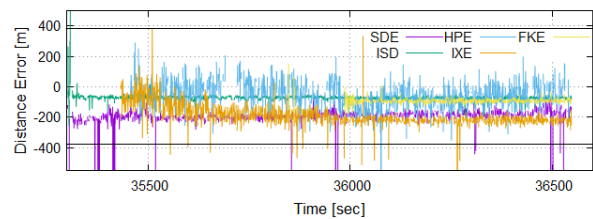
とおり、SDE（仙台局）とISD（ILS用T-DME）である。高度が1000m程度に達するとHPE（花巻）およびIXE（いわき）が捕捉可能となり、さらにFKE（福島）は高度が2000m程度になってから捕捉可能であったことが分かる。図6(d)の測位結果が示すとおり、FKE局との測距が開始される前の段階でSDE, ISD, HPEおよびIXEの4局でマルチDME測位を行った場合には、大きな測距誤差が生じていることが分かる。しかし、高度が上がりFKE局が捕捉可能となると、安定した測位解が得られることが分かる。この理由としては、図5に示すとおりSDE, ISD, HPE, IXEの4局は一直線状に配置されており、かつその直線に沿って出発経路が存在するためであると考えられる。測位の点においては、航



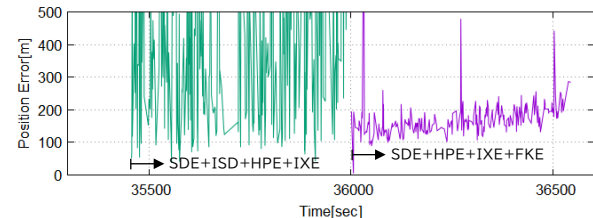
(a) 飛行高度



(b) DME 局数



(c) 測距誤差



(d) 測位誤差

STEEDFOUR DEP RIKYU TR

図6 仙台空港出発経路における
マルチDME性能評価

空路の周りに偏りなく DME 地上局が存在することが望ましいが、山岳遮蔽の影響により YTE や FKE が捕捉できず、偏った配置での測位となったために誤差が発生したのと考えられる。FKE はこの直線から外れているため、FKE を捕捉し、測位に使用できるようになると測位解が安定し、誤差が小さくなったものと考えられる。

我が国は、南北に長く、かつ中央部には山脈が存在する特徴的な国土を有する。これにより、太平洋側沿岸部を低高度で飛行する際、日本海側に設置されている DME はカバレッジ内であったとしても山岳による遮蔽で利用できなくなることが懸念される。同様に、日本海側を飛行する際には、山岳の影響により太平洋側に設置された DME は利用できない恐れがある。また DME は沿岸部付近に設置されている場合が多いため、利用できる DME 局の配置が一直線上に並ぶことが懸念される。このような状況はマルチ DME 測位にとっては悪条件とあり、測位精度の劣化につながる。これらは我が国特有の課題であり、GNSS 障害時のバックアップとしてマルチ DME 測位を導入する際の課題であると考えられる。

5 まとめ

近年増大する GNSS 障害に備え、バックアップ方式の候補の一つであるマルチ DME 測位について、国内適用性を飛行実験により評価した。その結果、平野部にある成田空港は山岳による遮蔽が少なく、かつ航空路に対して万遍なく多くの DME が存在するため、マルチ DME により高精度に測位可能であることが分かった。成田空港は交通量が多く、GNSS 障害時への対策が重要なため、マルチ DME 測位は GNSS バックアップの有力な手段になりうるものと考えられる。一方で、山岳部においては配置について課題があることを示した。我が国は DME が豊富に設置されている反面、特徴的な国土のために、現状の配置のままでは十分な測位性能が得られないこと懸念される。DME の RNP 利用の面から DME の再配置において考慮すべきであるものと考えられる。今後は山岳地域における上記課題をより詳細に調査する予定である。

参考文献

- [1] EUROCONTROL Think Paper #9 - Radio Frequency Interference to satellite navigation: An active threat for aviation? PUBLISHED 1 MARCH 2021
- [2] Z. Liu, S. Lo, J. Blanch, Y. Chen, T. Walter, "GNSS Spoofing and Jamming in Eastern Europe," InsideGNSS, March 26, 2024
- [3] Robert W. Lilley, Robert Erikson, "DME/DME for Alternative Position, Navigation, and Timing (APNT)", APNT White Paper, Mar. 1, 2012
- [4] Berz, G., Vitan, V., Skyrda, I., "Can Current DME Support PBN Operations with Integrity?," Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), Nashville, TN, September 2013, pp. 233-250.
- [5] SESAR2020 PJ14 Final Project Report, SESAR JU, 18 December 2019
- [6] Xiao Liang, Carl Milner, Christophe Macabiau and Philippe Estival, "Multi-DMEs for alternative position, navigation and timing (APNT)," The Journal of Navigation, Vol.75, Issue 3, pp.625-645, May 2022
- [7] Ivan OSTROUMOV, Karen MARAIS, Nataliia KUZMENKO, "AIRCRAFT POSITIONING USING MULTIPLE DISTANCE MEASUREMENTS AND SPLINE PREDICTION," VILNIUS TECH Journals, AVIATION, Vol.26, No.1, 2022
- [8] 毛塚 敦, 田嶋裕久, "成田空港飛行実験によるマルチ DME 測位と DME-RAIM の有効性に関する基礎検討," 電子情報通信学会技術報告 vol. 123, no. 92, SANE2023-16, pp. 7-10, 2023 年 6 月 30 日

謝辞

本実験を実施するにあたりご協力いただきました国土交通省航空局交通管制部管制課、東京航空局東京空港事務所、交通管制部管制技術課航行支援技術高度化企画室および関係各署に感謝いたします。

次世代 SBAS の飛行実験による評価

航法システム領域 ※北村 光教, 齋藤 享, 坂井 丈泰

1 はじめに

近年、衛星測位システム（Global Navigation Satellite System: GNSS）の利活用は航空分野において急速に拡大しており、安全性・信頼性の高い航法支援が求められている。特に、静止衛星を利用した衛星航法補強システム（Satellite-Based Augmentation System: SBAS）は、GNSS 単独では実現できない高精度かつ高信頼性の位置情報を航法システムに提供している。

現在運用中の SBAS には電離圏活動が活発な時期・地域における利用可能性の低下や、高緯度地域では信号受信が困難であるといった課題があり、次世代 SBAS の開発が求められている。このような背景のもと、本研究では、次世代 SBAS の性能を実環境下で評価するための飛行実験を実施し、その有効性と課題を検証した。

本報では、次世代 SBAS 及び飛行実験の概要、得られた測位精度や信頼性に関する評価結果を報告する。さらに、従来の SBAS と比較した性能向上の程度についても考察する。

2 衛星航法補強システム（SBAS）

2.1 現行 SBAS

衛星航法補強システム（Satellite-Based Augmentation System: SBAS）は、GNSS の測位精度・信頼性・完全性を向上させるための補強システムであり、主に航空機の安全な運航を支援する目的で開発・運用されている。SBAS は、地上のモニタリングステーション（監視局）が観測した GNSS の誤差情報および信頼性情報を解析し、静止衛星（GEO）を通じて航空機に提供する。

誤差情報としては、主に衛星軌道及び時計の放送暦に対する誤差を放送し、また、電離圏における測位信号の遅延量を補正するための電離圏遅延情報も放送している。これらにより航空機に搭載されている SBAS 受信機は測位精度を向上させることが可能である。

加えて、SBAS は上記の誤差情報に関する信頼性情報を放送しており、SBAS 受信機は測位誤差が生じうる測位精度の信頼限界を得ることができる。信頼限界が示す領域内に障害物や他の航空機が進入しないように運行することで、衝突等の事故を防止している。

2.2 次世代 SBAS

次世代 SBAS は、現行の SBAS をさらに高機能化したシステムであり、多周波・多 GNSS（Dual-Frequency, Multi-Constellation: DFMC）に対応することで、今後の航空運用におけるより厳しい要件（LPV-200 のような垂直誘導付き進入など）への対応や技術的進化を目的としている。

DFMC 対応は、L1 帯と L5 帯の 2 つの周波数の測位信号を利用することで、高精度な電離圏遅延量の補正が可能となり、現行 SBAS における電離圏活動に関する課題の改善が期待されている。また、GPS 以外の GNSS（GLONASS, Galileo, BeiDou）を利用可能とすることで、SBAS サービスの継続性向上が期待されている。

これらは次世代 SBAS の主たる性能向上機能であるため、次世代 SBAS は DFMC SBAS や L5 SBAS とも呼ばれる。

3 実験概要

本実験は現行 SBAS における課題である、電離圏活動が活発な地域及び時間帯における次世代 SBAS の性能評価を実施することを目的としている。そのため、電離圏擾乱が頻発する 2 月に南西諸島の石垣島で実施する。

3.1 実験用航空機

本飛行実験には、電子航法研究所（以下、当所という）が所有する実験用航空機「よつば（JA35EN）」を用いる。本機は BeechCraft B300（KingAir 350）という中型航空機を、実験実施用に改修した機体である。そのため、運

行用とは別に GNSS 受信機やその他実験用装備が搭載されており、当所が実施する飛行実験に用いられる。

本機の外観を図 1 に示す。本実験で用いられる GNSS 受信機のアンテナは、図中赤丸で示す位置（機体屋根上）に設置されている。



図 1 実験用航空機「よつば」

3.2 飛行経路

本実験は 2025 年 2 月 26 日の昼夜に、14:15~16:30 および 20:44~23:03 の時間帯でそれぞれ実施された（日本時間、地上待機時間を含む）。飛行経路は、新石垣空港を離陸した後、同空港でローパスアプローチを複数回実施し、最後に同空港へ着陸する。ローパスアプローチとは、滑走路進入時に着陸せずに滑走路を低高度で通過する飛行であり、本実験では昼間に 4 回、夜間に 5 回、滑走路面から 10m 強の高さを飛行した。進入時以外の飛行高度は、およそ 2,000m であった。本実験における飛行経路を図 2 に示す。

3.3 SBAS 性能評価

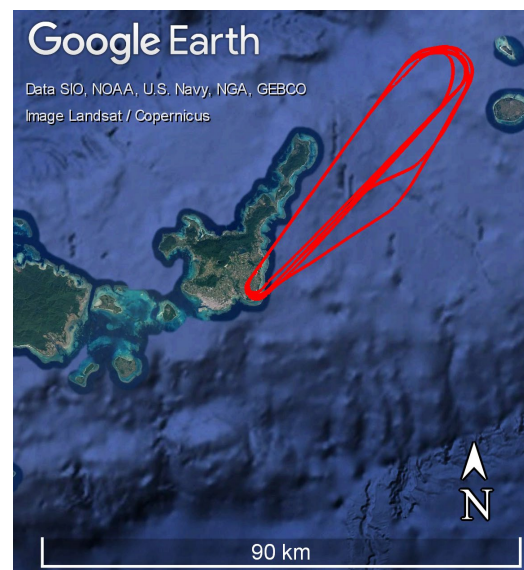
本性能評価においては、現行 SBAS 及び次世代 SBAS の測位方法として、当所が作成した測位処理装置を用い、後処理によって測位を実施する。

利用する補強情報としては、現行 SBAS では、日本の SBAS である MSAS（PRN: 137）が放送したものを利用する。次世代 SBAS では、当所が作成した次世代 SBAS 補強情報生成装置（プロトタイプ機）によって生成され、準天頂衛星システム 4 機（2, 3, 4, 1R 号機）から放送されたものを利用する。

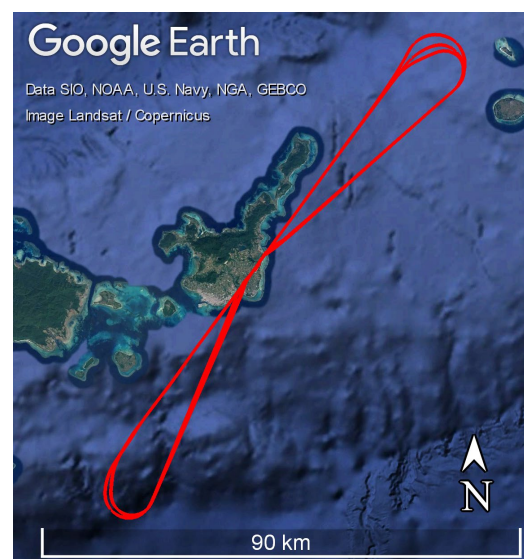
また、測位誤差の評価には、同機に搭載され

た実験用 GNSS 受信機（NetR9）を用いた RTK 測位を位置基準として用いる。RTK 測位の基準局には、新石垣空港内に設置された 5 台の同機種受信機を用いる。

本実験環境では、電離圏の影響を、特に低仰角の衛星で受けやすいため、適切な仰角マスクの設定が必要である。しかしながら、実験行程全体において最適な 1 つの仰角マスクを設定することは困難である。そこで、仰角マスクを 5 ~ 50 度の間で、5 度の間隔で設定しエポック毎に得られた Fix 解の中央値を用いることとした。



(a) 昼間経路



(b) 夜間経路

図 2 石垣島飛行実験における飛行経路

4 評価結果

4.1 飛行実験結果

現行 SBAS による時系列の水平及び垂直測位誤差を図 3 に示し、参考として測位時に用いられた測位衛星数も同図に合わせて示す。また、LPV-200 におけるインテグリティ性能評価のためにインテグリティチャートを図 4 に示す。

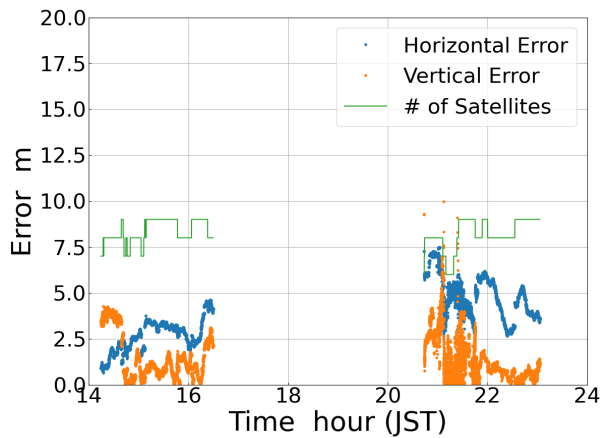


図 3 飛行実験における現行 SBAS 測位精度

次に、次世代 SBAS による時系列の水平及び垂直測位誤差を図 5 に示し、参考として測位時に用いられた測位衛星数を同図に合わせて示す。また、インテグリティ性能評価のためにインテグリティチャートを図 6 に示す。なお、LPV-200 における警報限界は HAL: 40m, VAL: 35m である。

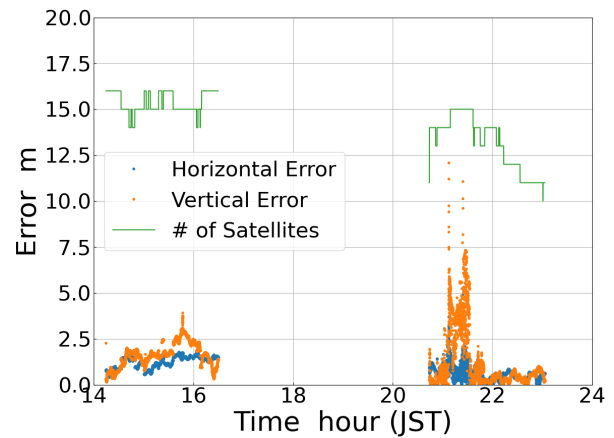


図 5 飛行実験における次世代 SBAS 測位精度

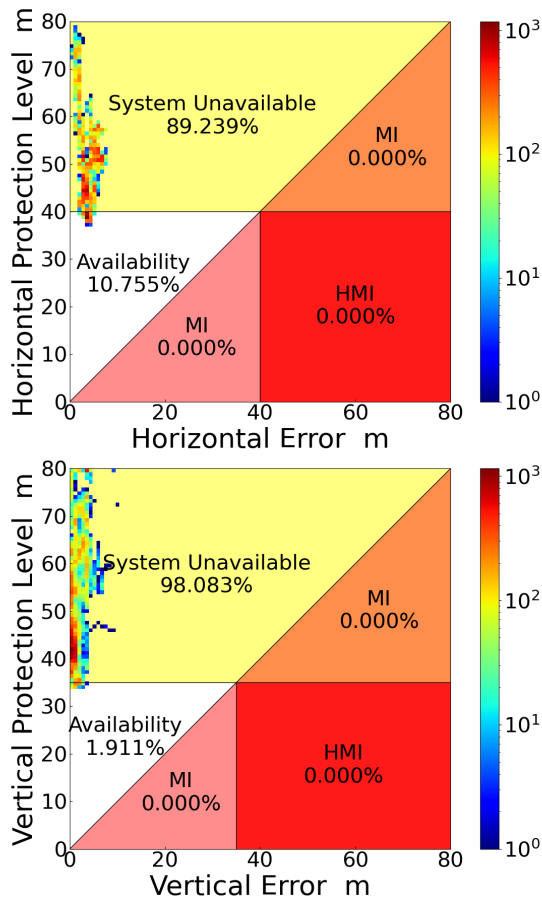


図 4 飛行実験における
現行 SBAS のインテグリティ性能

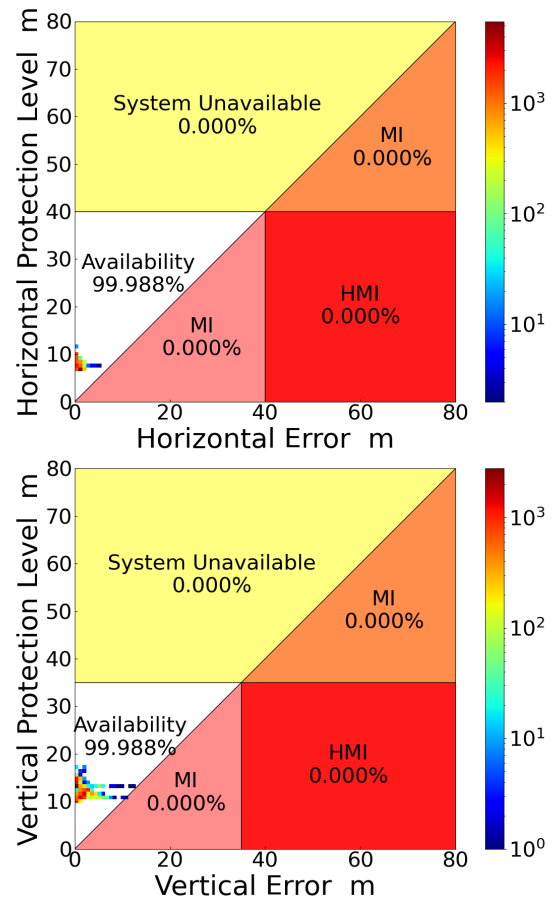


図 6 飛行実験における
次世代 SBAS のインテグリティ性能

4.2 電子基準点における性能評価

比較として、新石垣空港近隣の電子基準点（石垣1，960749）における性能評価結果を示す。図7には、石垣1における現行SBASの測位精度を、飛行実験と同様の時刻のみ示し、図8には24時間のインテグリティ性能を示す。

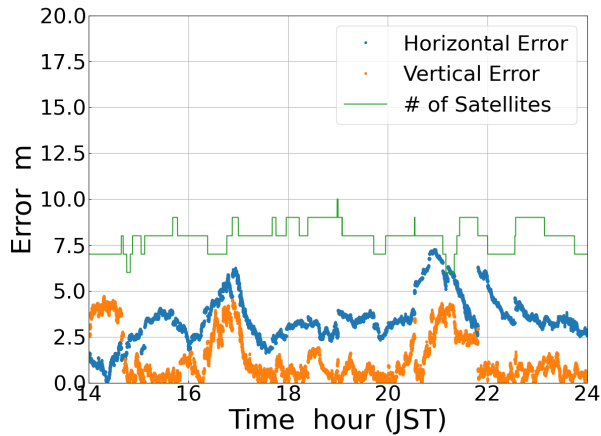


図7 石垣1における現行SBASの測位精度

図9には、石垣1における次世代SBASの測位精度を、飛行実験と同様の時刻のみ示し、図10には24時間のインテグリティ性能を示す。

本電子基準点における評価では、1HzのGNSS観測データを用いる。

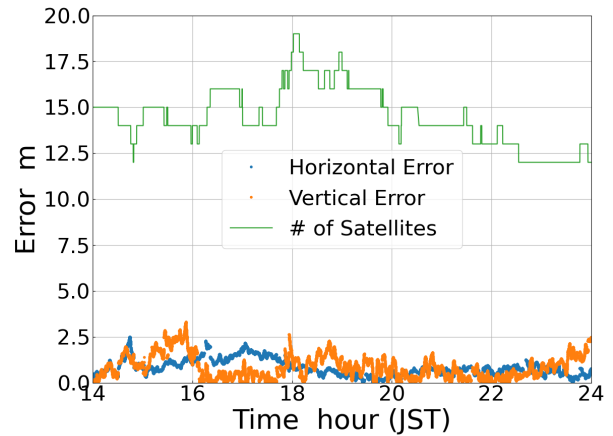


図9 石垣1における次世代SBASの測位精度

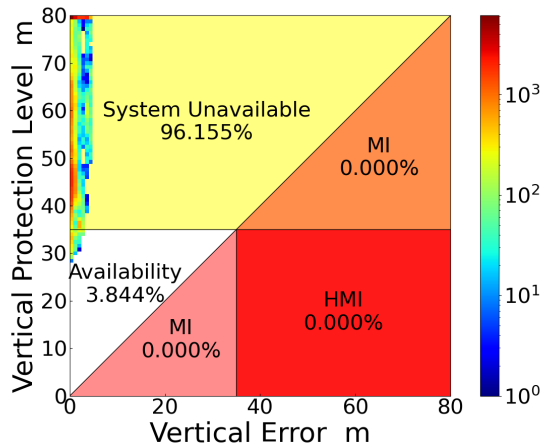
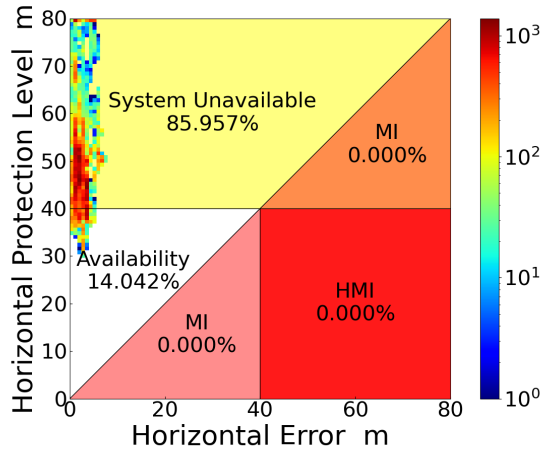


図8 石垣1における
現行SBASのインテグリティ性能

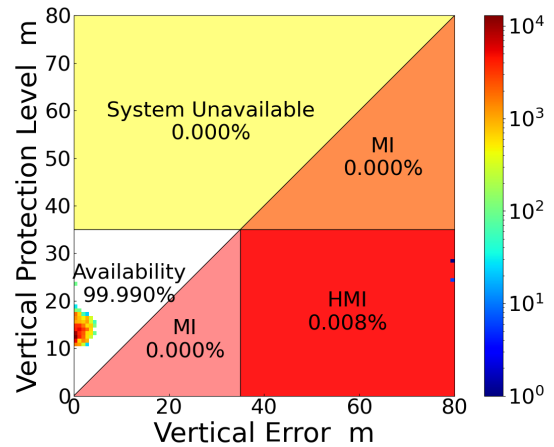
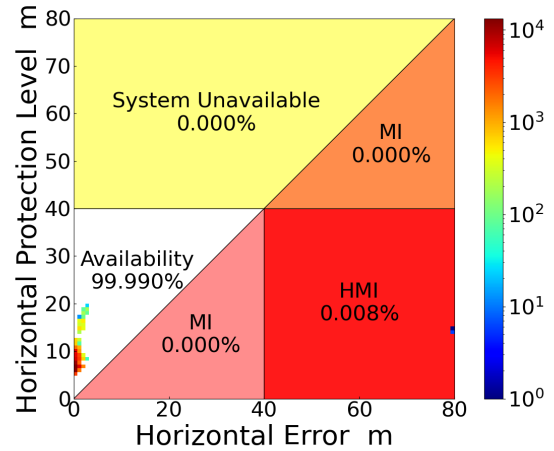


図10 石垣1における
次世代SBASのインテグリティ性能

5 考察

図5によると、次世代 SBAS 測位の測位誤差が、21 時～21.5 時にかけて特に垂直方向に大きな誤差を示している。これらは、1 周目の旋回途中からローパスアプローチ、次の旋回の途中にかけて発生している。

この誤差については、図9によると、近隣の電子基準点（石垣1）では同時刻に大きな測位誤差は生じておらず、またローパスアプローチで電子基準点近傍を実験機が通過した際にも変わらず誤差が大きかったこと、現行 SBAS、次世代 SBAS とともに同時刻に大きな測位誤差が生じていることから、基準位置として利用した RTK 測位がミス Fix を起こしている可能性があるが詳細な調査は未実施である。今後、基準位置の誤差増大以外の誤差要因があったのか、例えば L1 もしくは L5 帯信号にシンチレーションが発生し、サイクルスリップが発生していないか等、調査をする予定である。

その他の時刻においては、現行 SBAS は測位誤差も比較的大きく、LPV-200 のアベイラビリティもおおよそ 2%と低い。これは、電離圏活動により電離圏遅延補正が増大し、また信頼性が低下したことにより保護レベルも増大したことで、アベイラビリティが低下したものと思われ、現行 SBAS の課題の通りの結果であると思われる。

また、次世代 SBAS については、昼間の測位誤差が水平、垂直ともやや大きいため、確認が必要と思われるが、LPV-200 を実施するにあたって十分なアベイラビリティが得られるものと思われる。

6 さいごに

本報では、次世代 SBAS による補強性能を評価することを目的として、実験用航空機「よつば」を用いた飛行実験を実施し、その性能評価結果を報告した。

飛行実験は、2025 年 2 月に石垣島周辺で実施され、現行 SBAS の課題である電離圏の影響が大きく現れたが、次世代 SBAS においては大きく影響が現れないことが確認された。

現行 SBAS においては、残念ながら LPV-200 の実施は困難であるという結果が得られたが、

今後、MSAS の電離圏補正性能向上を含むバージョンアップ実施が予定されている。そのため、アベイラビリティが向上する可能性もあり、今後も現行 SBAS の評価は実施したい。

次世代 SBAS においては、LPV-200 を十分実施可能であるという結果が得られた。今後も当所の本プロトタイプ機の性能向上を図ることで、より安全性の高い航法の実現に貢献したい。

しかしながら、実験中に誤差が大きく増大する時間帯も見られ、今後原因の調査や実験方法の改善等の検討が必要であると考ええる。

文 献

- [1] ICAO, “International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation,” vol.I, 8th ed., Jul. 2023.

羽田空港での滑走路異物監視システムの評価進捗

監視通信領域 ※二ッ森 俊一，森岡 和行，河村 暁子，米本 成人

1 はじめに

滑走路異物（Foreign object debris, FOD）監視システムは、FOD を自動的に探知し、空港運用者に情報を提供するシステムであり、空港運用に係る安全性向上のために導入が進められている。FOD 監視システムの導入は、FOD に起因する事故を未然に防ぐだけではなく、滑走路を閉鎖して実施する滑走路点検の時間短縮を図ることが可能となる。これにより、滑走路利用効率の向上および空港滑走路閉鎖に伴う航空機の上空待機時間の低減が図れ、CO₂ 排出削減が期待できる。電子航法研究所らの研究グループでは、実用化に向けた FOD 監視システムの開発を実施し、センサ単体で国際技術基準を超える探知性能達成とレーダセンサ設置条件の明確化をした[1]。

本稿では、東京国際空港（以下、羽田空港）で 2023 年 3 月から実施している、FOD 監視システム評価装置[2]を用いた評価進捗について議論を行う。最初に羽田空港へ設置した FOD 監視システム評価装置の概要を述べる。次に、国際技術基準への適合性評価について議論を行う。評価システムを用い、誤検知、未検地、環境変動および信頼性確認等の複数評価項目を実施しているが、その中でも国際技術基準の探知率、探知時間、位置精度、複数対象物分離性能等の評価項目への適合性評価結果についてこれまでに得られた結果を示す。

2 羽田空港へ設置した FOD 監視システム評価装置の概要

提案している FOD 監視システムでは、まずミリ波レーダセンサを用いて異物を探知し、その後、レーダセンサで得られた位置情報に基づき、FOD のカメラ画像を取得する。また、FOD 監視システムでは、滑走路上の探知覆域を、複数の滑走路センサで分割して FOD 探知を行う。評価装置では、その中の 1 つの監視覆域を対象として、滑走路脇に設置した 1 局の滑

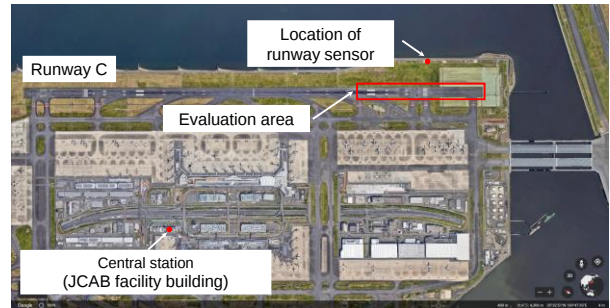


図1 東京国際空港における FOD 監視システム評価装置の設置位置

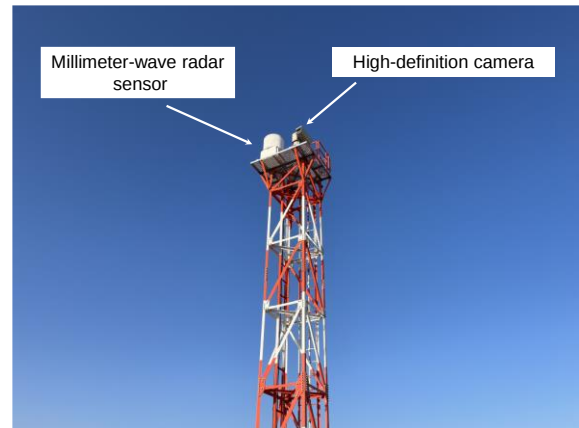


図2 FOD 監視システム評価装置 滑走路センサ鉄塔の概観

走路センサと東京空港事務所庁舎内に設置した中央局の構成である。図1に、滑走路センサの設置場所を示す。C 滑走路 34R 側の GS シェルタ付近に、各種センサを搭載した FOD 監視システム評価装置鉄塔を設置した。滑走路中心から鉄塔までの距離は、約 232 m であり、センサから 350 m の範囲を設計上の FOD 探知覆域としている。評価装置では、滑走路センサ 1 局の構成であるが、実用システムでは、監視覆域に応じて、必要な局数に設定することを想定している。滑走路センサと中央局間は光ファイバケーブルで接続し、機器制御および監視情報の伝送を行う。天候影響評価も実施するため、雨量、風速、温度、湿度等のデータを取得する気象計を設置している。図2および図3に、そ

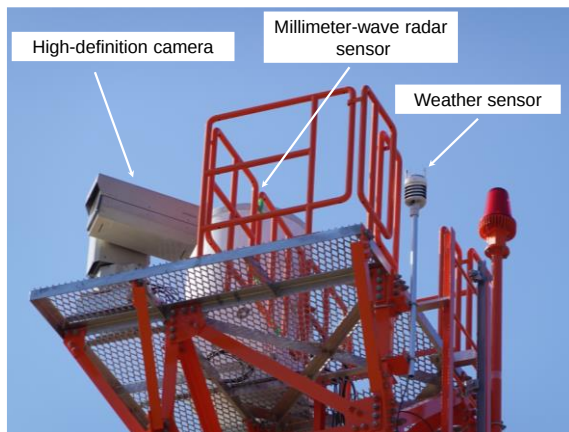


図3 FOD 監視システム評価装置
滑走路センサ鉄塔上部の概観

表1 FOD 探知用ミリ波レーダ仕様

周波数帯	92 GHz – 100 GHz
送信帯域幅	最大 8 GHz
送信電力	18 dBm
アンテナ利得	43 dBi

それぞれ滑走路異物監視システム評価装置滑走路センサ鉄塔および鉄塔上部の概観を示す。鉄塔の塔頂部踊り場の滑走路対面方向にミリ波レーダセンサおよび高精細カメラを設置している。反対側には気象センサを設置する。

表1に、これまでに開発し、評価システムに適用している、FOD 探知用ミリ波レーダ仕様を示す。90 GHz 帯を用いた広帯域ミリ波レーダであり、最大 8 GHz の送受信帯域幅を有する。90 GHz 帯ミリ波レーダを用いることで、ライダーや特定小電力ミリ波レーダ等を利用した他の FOD 探知センサと比較し、高い探知性能と悪天候への耐候性を両立することができる。また、最大 8 GHz の広信号帯域幅を活用し、高分解能かつ高い滑走路面クラッタ除去性能を確保している。

3 EUROCAE MASPS ED-235A 適合性評価

FOD 監視システムの最低性能要件として、欧州民間航空機器機構（European Organisation for Civil Aviation Equipment, EUROCAE）から発行された EUROCAE ED-235A [3]（2016 年 3 月発行）がある。ここでは、評価システムを用いて実施した、探知率、探知時間、位置精度、

表2 MASPS 適合性試験における評価項目

評価項目	要求性能
探知率	6 種の基準対象物を晴天時 95 % 以上の探知率で探知すること
探知時間	4 分以下
位置精度	5 m 以下
複数対象物分離性能	10 m 間隔で設置した 3 つの金属円柱を分離可能であること

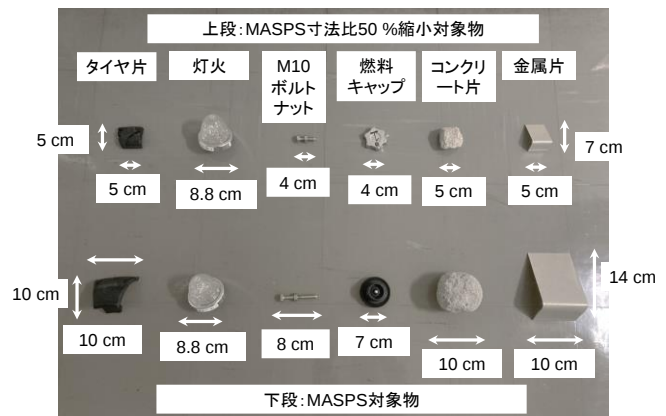


図4 EUROCAE ED-235A MASPS 探知率試験
における評価対象物

複数対象物分離性能の 4 つの評価項目について議論を行う。表2に評価項目と要求性能を示す。本試験は、主に 2024 年 2 月および 3 月の夜間滑走路閉鎖時間に実施した。

最初に、FOD の探知率評価について述べる。探知性能については、6 種類の基準対象物に対し、晴天時 95 %以上の探知率が要求されている。図4に、探知率試験における評価対象物を示す。EUROCAE ED-235A では、基準対象物として、タイヤ片（10 cm 以下）、灯火、M10 ナット・ボルト（8 cm 以下）、燃料キャップ（7 cm 以下）、コンクリート片（10 cm 以下）、歪んだ金属片等の 6 種が定められている。本試験では、上記 6 種の対象物について、ED-235A 対象物および寸法比 50%の対象物について評価を実施した。なお、各測定条件において測定数 100 回以上が求められているため、起伏の異なる滑走路上の複数地点 9 か所に同一対象物を設置し、30 度毎に 360 度回転させることで設置角度等についても様々な条件での評価を行う。

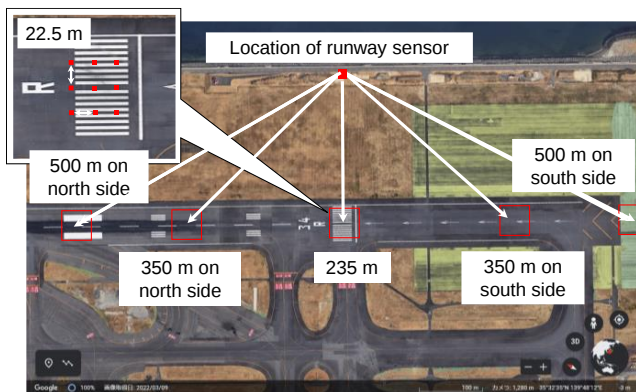


図5 探知率試験における評価対象物設置位置

図5に、探知率試験における評価対象物設置位置を示す。評価場所は滑走路内の5か所であり、最も滑走路センサに近い235 m地点、および北側350 m地点、南側350 m地点、北側500 m地点、南側500 m地点の5か所である。350 m地点は設計上の覆域端であり、500 m地点は覆域以上における探知率を評価するために試験を実施する。表3に、MASPS基準対象物の探知率を示す。350 m以内の場所においては、全ての対象物の探知率は95 %以上であり、灯火、燃料キャップおよびコンクリート片の探知率は100 %である。500 m地点ではM10ボルト・ナットの探知率低下が観測されているが、ボルト・ナットの低背構造と高い反射指向性に起因するものである。表4に、MASPS寸法比50 %対象物の探知率を示す。試験結果から350 m以内の範囲においては、全ての対象物について探知率95 %以上である。なお、南側500 m地点においては、時間の制約のために測定は未実施である。これらの結果から、構築した評価システムはMASPS基準を超える探知率を有することを確認した。

次に、探知時間と位置精度の評価結果について述べる。探知時間と位置精度はそれぞれ4分以下および5 m以内が求められている。図6に、探知時間評価および位置精度評価における金属円柱の設置位置および結果を示す。評価は探知率と同様に5か所で実施し、滑走路中心に、直径4 cm、高さ3 cmの金属円柱を設置する。探知時間は測定者が評価地点に金属円柱を設置してからFOD監視システムの表示画面に検出されるまでの時間を評価する。測定結果は全て

表3 MASPS 対象物の探知率

サンプル	北側 500 m	北側 350 m	235 m	南側 350 m	南側 500 m
タイヤ片	98.3	99.1	98.3	100	96.6
灯火	100	100	100	100	100
M10 ボルト ナット	68.4	97.4	98.3	95.7	43.6
燃料 キャップ	100	100	100	100	96.6
コンク リート片	100	100	100	100	100
金属片	98.3	98.3	100	100	89.8

表4 MASPS 寸法比 50 %対象物の探知率

サンプル	北側 500 m	北側 350 m	235 m	南側 350 m	南側 500 m
タイヤ片	95.7	100	99.1	99.2	-
灯火	100	100	100	100	-
M10 ボルト ナット	71.4	98.3	99.1	95.7	-
燃料 キャップ	99.1	100	100	97.4	-
コンク リート片	99.1	100	99.1	98.3	-
金属片	88.0	95.7	98.3	99.1	-

1分以下となっている。これは測定時のレーダ更新頻度が約1分となっているためである。また、位置精度については、金属円柱設置地点におけるキネマティックGPS受信機の測位結果とFOD監視システムの画面に表示された検出物体の座標の差分を評価する。差分は、0.46 mから2.40 mの間であった。また、滑走路センサの設計覆域である350 m以内では最大1.34 mの差分となった。

最後に、複数対象物探知性能評価について述べる。滑走路中心に、10 m間隔で設置した3つの金属円柱（直径4 cm、高さ3 cm）の金属円柱について、3つに分離して同時に画面表示されることが必要である。図7に、複数対象物探知試験における金属円柱の設置位置を示す。

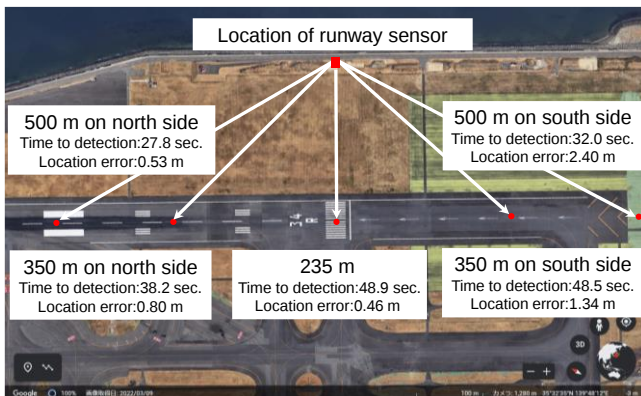


図6 探知時間評価および位置精度評価における金属円柱の設置位置および結果

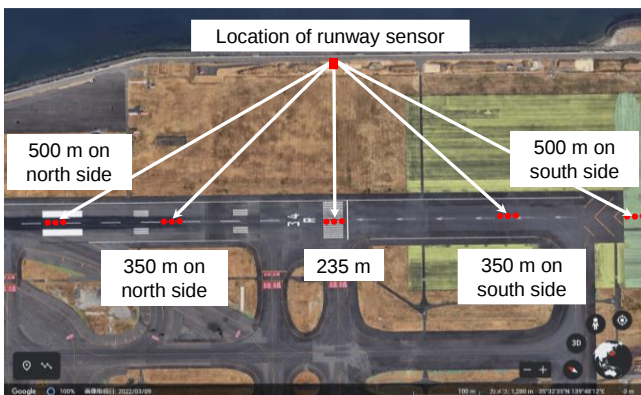


図7 複数対象物探知試験における金属円柱の設置位置

評価を実施した全ての位置において設置した金属円柱が3つに分離して同時に画面表示されることを確認した。

3 FOD 検知結果例

2023年3月に評価システムを設置後、C滑走路南側の評価エリア内におけるバードストライク、落鳥、FOD等の発生を探知している。図8に、評価エリア内で探知したFODの例を示す。バードストライク、落鳥、FOD等については2023年度に5件、2024年度に4件を探知し、探知エリア内で回収された事例全て探知していることを確認している。また、パイロットレポート等により通報された時刻よりも早く、発生後直ちに探知した事例が多くあることも確認している。

また、2024年10月には、航空機の離陸時に発生したエンジン破損により離陸中止した際には、事例発生直後から多数のFODを探知し、



図8 FODの検知結果例

深夜にFOD回収が完了するまで反応が継続することを確認した。

4 むすび

羽田空港の設置しているFOD監視システム評価装置の評価進捗について述べた。国際技術基準適合性評価やFOD検知結果例を中心に議論を行ったが、誤検知評価のためのセンサ反応分析も実施しており、今後結果を明らかにする。

謝辞

評価装置の設置および試験実施にご協力頂いている国土交通省航空局、東京航空局、東京空港事務所の方々を始めとした関係各所の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] S. Futatsumori et. al., "Performance evaluations of airport runway foreign object detection system using a 96 GHz millimeter-wave radar system based on international standard", Proc. of the 47th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, pp.1-2, Sept. 2022.
- [2] ニッ森 俊一, "96 GHz 帯ミリ波レーダを用いた滑走路異物探知システムの研究開発状況-東京国際空港に設置した滑走路異物監視システム評価装置の概要-", 信学技報, vol. 124, no. 320, SANE2024-50, pp. 45-49, 2024年12月.
- [3] European Organization for Civil Aviation Electronics, "Minimum Aviation System Performance Specification for Foreign Object Debris Detection System", ED-235A, Apr. 2024.

空港面における協調監視システムの監視性能および測位結果の統合

監視通信領域 ※本田 純一，松永 圭左，角張 泰之
航空交通管理領域 大津山 卓哉

1 まえがき

近年，国際民間航空機関（ICAO）の監視パネル（SP: Surveillance Panel）においても，通信や航法と同様に監視システムの性能要件に関する議論が始められている。本会議の目的は，各種運用形態に応じて必要な監視システムの要件を決定するというものであり，導入する監視システムは監視システムの要件を満足するように求められる。

現在，各種監視システムは表1のように利用されている。一次監視レーダ（PSR）と空港面探知レーダ（ASDE）はパルス信号を用いた非協調監視システムとして，移動体からの反射信号を検出することで移動体の位置を推定する。二次監視レーダ（SSR），マルチラテレーション（MLAT），広域マルチラテレーション（WAM）は，航空機に搭載されたトランスポンダから送信される ATCRBS もしくは Mode S の2つ信号を利用して航空機の位置を検出する協調監視システムである。管制システムとしては機体コードや高度等の情報を得ることができる SSR 系が主流の監視システムである。それぞれ方式が異なり，得意な監視エリアも異なる。そのため目的に応じて各種監視システムを組み合わせ利用される。電子航法研究所（以下，「当所」とする）では，これまで航空路を中心として監視システムの開発や性能評価を行ってきた。しかし，空港面は伝搬環境の複雑さも相まって不十分なところがある。監視システムとしての重要な点は，単に位置情報を提供するだけでなく，アベイラビリティやレイテンシといった要件をクリアする必要があると共に，安定した動作を保つためには使用する信号数の管理も重要である。これらは使用する監視システムや利用環境により複雑に変化する。そのため，監視要件を測るための評価方法や測位結果の提供方法について検討する必要がある。

本研究では，主に空港面への適用を念頭とし

た監視システムについて，性能評価手法を開発するとともに，当該エリアにおける監視システムの活用方法を検証することにある。本稿では，本研究でこれまでに実施した空港面に対する監視システムの性能評価結果及び測位結果のデータ統合について議論する。まず，空港面の監視システムに対する性能要件を紹介する。次に，空港面で既存システムに加えて ADS-B を導入した時の性能比較ならびにその特徴について紹介し，2つの協調監視システムから得られた測位結果を統合しどのように位置を決定するか，測位位置の統合方式について議論する。

表1 各種監視システムの導入状況

名称	導入先（空域）		
	空港面	空港	航空路
PSR		✓	
ASDE	✓		
SSR		✓	✓
MLAT	✓		
WAM		✓	✓

2 空港面における性能要件

空港面の監視で利用される既存の MLAT および将来利用が期待される ADS-B について，性能要件を整理する。

2.1 MLAT の性能要件

空港面で使用される MLAT の性能要件については，A-SMGCS と絡み欧州民間航空電子機関（EUROCAE）から発行されている ED-87C の MASPS 及び ED-117A の MOPS に記載されている。ED-117A に記載された技術要件は ED-87C と整合が取れるように記載されている。検出率や精度については表2の通りである。監視システムは管制卓に表示されるまでの時間等も考慮し，様々な項目をクリアする必要がある。位置精度の観点では滑走路等の移動エリアについて 95%信頼値で 12m 以内が要求される。以前の ED-117 では 7.5m と記載されていたこ

とから、国内では技術要件として 7.5m が参照されている。

表 2 MLAT の性能要件

項目	移動時	エプロン	スポット
検出率	≥95% (1 s)	≥70% (1 s)	≥90% (5 s)
位置誤差	≤12m(95%)	≤20m(95%)	≤25m(95%)
遅延	≤0.5s		

2.2 ADS-B の性能要件

空港面で ADS-B を使用する場合の要件について記載する。EUROCAE の ED-163 SPR によると、表 3 の通り ADS-B の性能指標である NIC (Navigation Integrity Category) と NACp (Navigation Accuracy Category - position) 及び SIL (Source Integrity Level) の 3 つが記載されている。航法誤差を示す NACp は、水平誤差に基づく HFORM から計算され、多くの場合で NACp = 8 (92m) or 9 (30m) を提供し、その実力値は 2~3m となる。なお、ADS-B の位置精度は GNSS に従うため、地上で ADS-B を使用する場合には常に使用エリアで GNSS をモニタすることを推奨している。

表 3 ADS-B の性能要件

項目	Ver. 0	Ver. 1	Ver. 2
NIC	> 6*	> 0	> 0
NACp	-	≥ 8	≥ 8
SIL	-	≥ 2	=3

* Ver. 0 は NUCp となる

3 仙台空港における性能検証

本節では、当所の実験用航空機を使った性能検証結果を示す。

3.1 実験環境

実験環境として仙台空港を選定した。なお、協調監視システムによる測位結果の取得には、当該空港に展開している光ファイバ接続型受動監視システム (OCTPASS) を活用した[1]。図 1 に実験環境を示す。仙台空港を取り囲むように 8 局の OCTPASS 受信局 (Rx4 は停止中) が設置されている。なお、Rx1 と Rx6 付近にターミナルビル等の大型構造物があり、Rx5 付近の空港南側に空港関連会社の格納庫等が林立

する。これらの構造物は、主に MLAT においては航空機からの信号の遮蔽やマルチパスによる信号歪による性能低下要因となる。

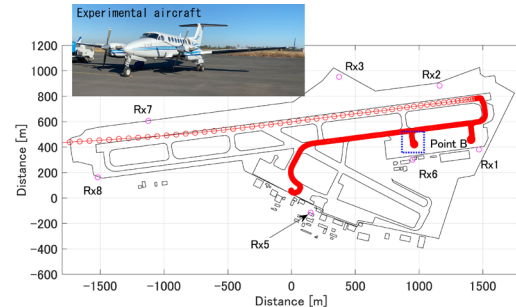


図 1 仙台空港の実験環境

3.2 解析手順

航空機の位置は、MLAT と ADS-B それぞれ別系統で計算されるものとする。MLAT は OCTPASS により受信局間の信号到達時間差 (TDOA: Time Difference of Arrival) に基づく双曲線測位によって計算される。しかし、MLAT で取得されるデータにはまれに大きな誤差が含まれる。そこで、性能向上の観点から複数のフィルタ処理を適用し、その効果についても検証を行った。本研究では試験的に α - β フィルタ、カルマンフィルタ、移動平均の 3 つのフィルタを適用した。よく知られているのはカルマンフィルタであるが、実際の利用ではリアルタイムであることを考慮し、レイテンシを満足するように適用しなければならない。

一方、ADS-B は当所の開発した ADS-B 解析ツールにより得られる[2]。受信したモード S メッセージから DF=17 のみを抽出し該当機の位置情報を計算する。位置情報だけでなく、空港面における ADS-B 自体の信頼性も同時に評価できる機能を備えており、各種運航情報を記録できる機能を備えている。本稿では最も受信感度の高い OCTPASS の Rx7 の信号を ADS-B の解析に利用した。

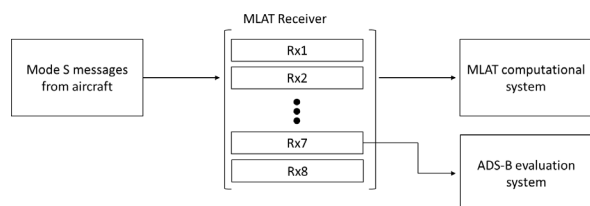


図 2 解析フロー

3.3 測定・解析結果

飛行実験を通して得られたデータ解析の結果を示す。2024年10月に実施した際の移動経路は図3の通りである。当所のエプロンを出発し、途中で2か所に停止し、その後離陸した。図中の航空機の移動経路は機上のGNSS受信機により1Hzで取得した結果である。

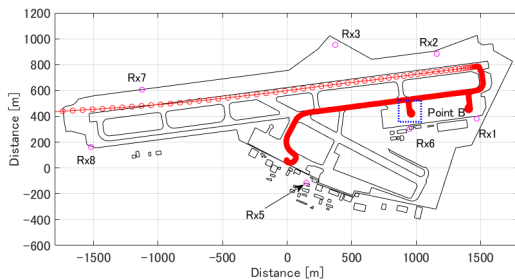


図3 移動経路

図4はMLATとADS-Bによる測位結果を比較したものである。MLATは測位結果そのものとカルマンフィルタを適用した場合の2つの結果を示す。更新頻度と測位位置がそれぞれ異なることが示されている。

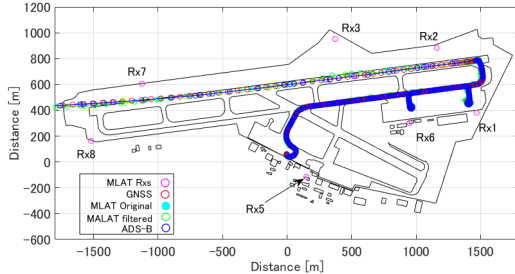
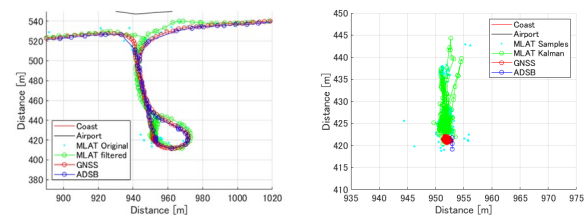


図4 MLATとADS-Bの測位結果の比較

次に図3で示したエプロン上のポイントBに注目した精度比較を行った。図5(a)はスポットイン・アウトを含む測位結果を示し、図5(b)はスポットで10分間駐機した時の結果を示す。機上のGNSS受信機とADS-Bの航跡はほぼ同じ軌跡となるが、MLATは若干ふらつきがあることがわかる。また駐機時については、フィルタを通したとしてもMLATは変動が大きいのが、ADS-Bの位置はほぼ変わらないことが分かる。分散という観点からは、ADS-Bの方が優位であった。

表4に解析結果の比較を示す。MLATについては、カルマンフィルタ以外を用いた場合の結果も含めている。機上のGNSS受信機をリ

ファレンスとするため、得られた測位結果の中央値を参照値とした。ADS-Bは1.57mとなり最も距離誤差が小さいことがわかる。なお、この誤差は機体のアンテナ位置の差と概ね同じ距離であることを述べておく。MLATについては、図4では誤差が大きいのに見えたが、95%信頼値で評価したところ、4m~5mの誤差となることが確認できた。フィルタの適用方法により誤差が1mほど異なるが、生データであっても5.57mとなり、監視要件として定義されている12mの誤差は十分クリアできていることがわかった。なお、広く知られているところではあるが、MLATは受信機の数や配置により性能を向上することができる。いくつかのポイントで性能評価を行ったところ3~4m前後の誤差となることが確認できた。



(a) スポットイン・アウト (b) 駐機時

図5 MLATとADS-Bの測位結果の比較

表4 スポットBにおける性能比較結果

Sensor	Error [m] *95% confidence	Remarks
Onboard GNSS	0.0	Reference position based on the median value
MLAT Original	5.57	
MLAT filtered(1)	4.27	Kalman filter
MLAT filtered(2)	5.21	A-B filter
MLAT filtered(3)	4.67	Moving average
ADS-B	1.57	

評価結果から次のことが分かった。MLATは、ADS-Bに比べて誤差成分は大きいものの、その値は性能要件を満たしており、また更新頻度が高いことが利点である。ADS-Bは、MLATに比べて更新頻度は低い、位置精度の高さ及び安定性は極めて高いという特徴を持つ。

4 測位結果の選択・統合

最後に複数の協調監視システムを利用した時の測位結果統合に関する検討結果を示す。測位

結果の統合というとは複数の測位結果を一つの点として合わせこむイメージがある。しかし、複数の航跡から最適な値を選択して出力すること、複数のセンサの結果を使用する観点からは統合と呼べる。誤解を減らすために本稿では便宜上、測位結果の選択・統合と呼ぶ。まず、統合方式については、得られた測位結果に重みづけをして出力する。重みは前節で示した駐機時の誤差の割合を設定した。選択方式については測位結果の安定性の観点から ADS-B の使用を優先度が高くなるように設定し、データがなければ MLAT の結果を採用するようにした。

図6と図7に選択・統合方式を適用した航跡を示す。更新頻度を1秒とし、表示時のデータは最新値を採用した。いずれもMLATの測位結果をそのまま使用した場合、複数個所で誤差が生じていることが分かる。図7は統合方式による航跡を示す。選択方式とほぼ変わらないものの、誤差とみなせる測位計算値がわずかに多いことが分かる。

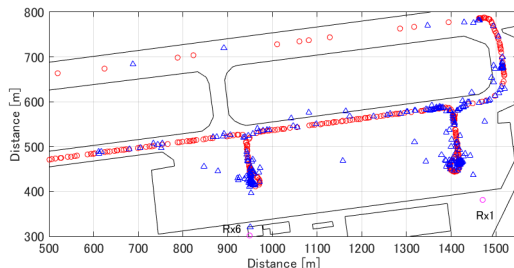


図6 選択方式による測位結果の統合

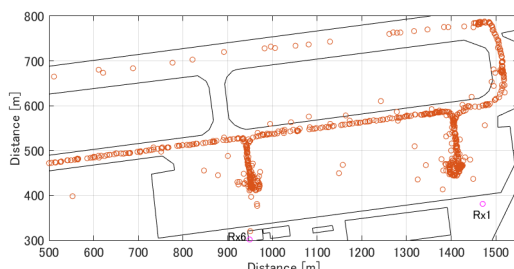


図7 統合方式による測位結果の統合

図8はフィルタを通した場合の選択方式による測位結果を示す。前の2つの図と比べて大きな誤差が取り除かれ、かなり滑らかな測位結果となることが分かる。

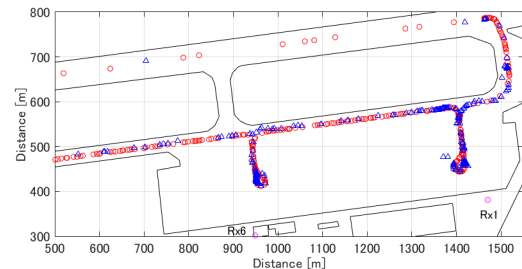


図8 選択方式による測位結果の統合
(フィルタ適用)

5 あとがき

本稿では、空港面における MLAT と ADS-B の2つの協調監視システムの性能評価結果ならびに測位結果の統合について議論した。2つの監視システムの位置精度の評価として、当所の実験用航空機を利用した仙台空港内での測定結果を示した。また、複数監視システムを用いた測位結果の選択・統合について、検討結果を示した。

今後は、PSR系を含めた測位結果の統合やマルチ監視時の性能評価手法について研究を進める予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり実験環境の提供にご協力いただきました仙台空港関係者に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 角張, 他, “空港面用航空機受動監視システムの高性能化,” 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), vol.132, no.7, pp.1088-1093, 2012.
- [2] K. Matsunaga, and J. Honda, “An Evaluation Process of ADS-B Message and Statistical Evaluation,” Proc. Int. Workshop on ATM/CNS (IWAC), T3-2-A, pp.39-45, Nov., 2024.

令和 7 年度 新規研究課題

重点	ミリ波レーダおよびカメラを用いた滑走路安全性向上技術に関する研究	38
重点	運航フェーズに応じた管制システムにおける時間管理に関する研究	38
重点	次世代GNSSを用いた安全性の高い航法システムの活用に関する研究	39
重点	円滑な交通流のための柔軟な空域運用に関する研究	39
重点	リモートデジタルタワー向け先進的業務支援機能の研究	40
指定	L帯のCNS周波数共用に関する研究	40
指定	小型波浪ブイを用いた洋上精密測位	41
萌芽	出発時刻の予測向上に関する要素技術の研究	41
調査	空港面の安全性向上に関わる調査	42

ミリ波レーダおよびカメラを用いた滑走路安全性向上技術に関する研究

監視通信領域 ニッ森 俊一，米本 成人，河村 暁子，森岡 和行

2024 年 1 月に羽田空港で発生した航空機事故により，滑走路等における航空機監視や誤進入対策への要求が高まっている。近年技術革新が進む新たなミリ波レーダおよびカメラ等の独立センサを活用することにより，従来よりも高精度な誤進入対策が実現できる可能性がある。また，滑走路異物（FOD）監視システムは，ミリ波レーダおよびカメラを利用し，FOD を自動的に探知し，空港運用者に情報を提供するシステムであり，空港運用に係る安全性向上のために導入が検討されている。FOD 監視システムの適用滑走路範囲拡大のため，狭隘な場所への設置するための研究開発や運用可能な悪天条件拡大も求められている。これらの課題に対し，航空機監視および誤進入対策の検知，FOD 検知等の複数対象物について全天候下で高精度に検知・判別する技術が期待されている。

本研究の目的は，ミリ波レーダおよびカメラ

の適用範囲を拡大し，滑走路誤進入検知および航空機精密検知を実現するため，複数目標物の種別・位置判定の悪天候・夜間対応および高精度化を行う。さらに，マルチスタティック化による設置・悪天候条件緩和を実現するための研究開発を行う。本研究は下記 4 つの項目を達成目標としている。

- (1) 滑走路誤進入検知および航空機精密検知等，先行研究である FOD 検知技術の適用範囲の拡大を実現する。
- (2) 航空機や車両，FOD などの複数目標物の種別・位置等の悪天候・夜間時における高精度判定を実現する。
- (3) 滑走路監視システムの設置可能条件・運用条件拡大に向けた技術提案を行う。
- (4) 上記成果により，これまでの技術基準を超えた監視システム性能要件を提案する。

運航フェーズに応じた管制システムにおける時間管理に関する研究

航空交通管理領域 ※岡 恵，蔭山 康太，山田 泉，中村 陽一，虎谷 大地
航法システム領域 吉原 貴之
交流研究員 永野 隆文

航空交通量の増加に伴い，空港周辺での到着機の滞留時間が増加することによる運航効率の低下や環境負荷の増大が問題となっている。このような滞留を緩和するために，出発から到着まで全体の軌道を管理し，効率の良い交通流を形成する時間管理の導入が検討されている。

時間管理は，正確な飛行軌道の予測が基盤となって初めて効果が得られる。しかし，現在の管制システムにおける軌道予測は時間管理の基盤とするための精度が不足しており，対策が必要となる。

高精度な軌道予測に関する研究は国内外で行われている。しかし，実際の運用では航空機の運航フェーズ（離陸前，上昇，巡航，降下など）により使用できる情報が異なり，到着時刻の不

確定性も変動することが，軌道予測を難しくしているにもかかわらず，運航フェーズを考慮した実用的な研究はあまり行われていない。また，時間管理を導入する際，課題把握や導入効果の検証に，運航効率を測る指標が必要であるが，我が国の航空交通状況に適した指標値は確立されていない。

そこで，本研究では時間管理のための航空機の運航フェーズを考慮した軌道予測方法および予測した軌道の精度に応じて効率良く時間管理を行うための方法を開発する。また，我が国の航空交通状況に適用可能な運航効率を測る指標の算出方法も開発する。

次世代 GNSS を用いた安全性の高い航法システムの活用に関する研究

航法システム領域 ※齋藤享，坂井丈泰，吉原貴之，毛塚敦，
長谷川努，北村光教，高橋透，尾関友啓

ICAO において、磁気低緯度地域を含む全世界で高カテゴリー精密進入を実現する DFMC GBAS の標準化が 2028～2030 年を目標に進行中であり、欧州 EDGAR 計画を始めとして標準化のための技術開発と検証が行われている。CARATS では衛星航法による精密進入の実現が検討されているが、日本を含む磁気低緯度地域では電離圏の影響が大きく、DFMC GNSS の活用が必要である。また、GBAS, SBAS の拡張性は用意されているが、具体的な要件は定まっておらず、測位手法、データリンクを含む技術

コンセプト及び運用コンセプトと合わせた技術開発が必要である。

DFMC GBAS は衛星航法を用いて全ての飛行フェーズの航法を全世界で実現する最終ピースであり、これを実現することは実用上極めて有益である。本研究では、磁気低緯度地域を含む全世界で利用可能な DFMC GNSS を用いた高カテゴリーGBAS の標準化と検証を行うとともに、DFMC GBAS 及びSBAS を幅広く利用する拡張機能と対応する安全性評価手法を開発し、これを用いた運用コンセプトを提案する。

円滑な交通流のための柔軟な空域運用に関する研究

航空交通管理領域 ※平林 博子，ブラウン マーク，瀬之口 敦，
ビクラマシンハ ナヴィンダ，村田 暁紀，水津 晴隆，井無田 貴

軌道ベース運用のための航空交通管理の要素技術として、空域容量に対する空域需要予測技術と、需要に応じた柔軟な空域運用方策が挙げられる。福岡飛行情報区では、交通状況に応じた柔軟な空域運用を目指し、航空路空域を上下に分離する運用が開始された。しかし、固定高度を境界とする現在の上下分離運用では、航空機の垂直方向の軌道の変化や巡航高度の季節性変化等へ対応した予測が困難である。

この課題を解決するため、本研究では航空情報データを使用し、空域容量値の予測技術や効

率性に関する研究開発を実施する。適切な容量管理により円滑な交通流を形成する柔軟な空域割り当てが可能となることから、予測交通情報を基にした適切な容量管理および飛行軌道の効率性向上に資する空域運用の検討を実施する。また、高高度空域における巡航機の一層の運航効率追求を目的とした、空域境界線上での軌道予測精度向上や時間の管理も含めた交通流管理の方策を提案し、協調的意思決定の促進を支援することも目指す。

リモートデジタルタワー向け先進的業務支援機能の研究

監視通信領域 ※井上 諭, 角張 泰之, 古賀 禎
航空交通管理領域 ブラウン マーク

世界的に研究開発が進むリモートデジタルタワー（以下、RDT）は、既存の管制塔の運用を置き換えるものであるが、一方、タワー管制業務は管制官の目視に大きく依存する業務であり、カメラ映像やセンサ情報等のデジタル技術を積極的に活用した支援機能の研究開発、大小様々な規模の空港においても活用ができることが期待されている。これらは、既存の肉眼での目視に頼る管制業務と比べ、業務に必要な情報を効率的かつ正確に提供することや、業務負荷軽減やパフォーマンス改善および安全性の向上、業務の効率化に寄与できると考えられている。

本研究では、最新の RDT システムとして、映像情報や監視センサ情報および、画像処理、AI 技術等を組み合わせ、積極的に飛行場管制業務を支援するための先進的な業務支援機

能を開発するとともに、有効性を示すことを目的とする。

機械学習を用いた画像認識、識別技術を用いたタワー管制システムのための機能の実用化には、学習の内容やモデル構築などを試行錯誤して理解する必要がある。飛行場環境での対象物の画像は、背景も含めて環境が様々で複雑である。このような技術の特性を詳細に理解し、適切なモデル構築やシステム構築を試行錯誤しながら行う必要がある。また、カメラ画像や監視センサ情報を様々な場所で組み合わせ情報を得ることで、状況認識や業務負荷低減、効率化に寄与する支援機能を構築することができると考えられ、それらの検討を実践的に行うことで、RDT のための最新の業務支援機能構築を目指す。

L 帯の CNS 周波数共用に関する研究

監視通信領域 ※森岡 和行, 米本 成人, 河村 暁子, 長縄 潤一
航空交通管理領域 大津山 卓哉
航法システム領域 毛塚 敦

今後想定される航空需要の増加や新たな空域利用により、航空用無線周波数の逼迫が懸念されており、効率的な周波数利用が重要な課題となっている。現在、逼迫する VHF 帯の通信をオフロードするため、L 帯を用いた次世代の空地航空無線システムである LDACS (L-band Digital Aeronautical Communications System)の標準化が進められている。しかし、航空用 L 帯は SSR (Secondary Surveillance Radar) や DME (Distance Measuring Equipment)等、すでに重要な監視・航法システムで使用されており、これらのシステムとの電磁干渉の低減による安全の確保が課題となっている。

ICAO (International Civil Aviation Organization) の LDACS の標準化においても、監視パネル、航法システムパネル、周波数スペクトラム管理

パネルをまたいだ検討会議(LDACS-IPTF: Inter Pannel Task Force)が立ち上げられ、航空用 L 帯の電磁干渉問題に関する議論や共用条件を明確化するための試験計画に関する議論が行われているところである。

本研究では、航空用 L 帯を効率的かつ安全に利用するための共用条件を明確化し、周波数を有効活用するための技術開発を実施する。具体的には、LDACS プロトタイプと SSR・DME 機上装置との間の電磁干渉試験の実施により、これらのシステム間の共用条件を明らかにし、国際標準化活動に貢献する。また、L 帯の航空用周波数をより効率的に利用するための電磁干渉低減及び回避技術の開発を行い、航空用 L 帯の有効活用をめざす。

小型波浪ブイを用いた洋上精密測位

航法システム領域 ※高橋 透，吉原 貴之，北村 光教，尾関 友啓

GPS（Global Positioning System）衛星に代表される GNSS（Global Navigation Satellite System）衛星の測位信号を使って位置を決定する衛星測位は広く利用されており，我々の生活になくてはならないものになっている。衛星測位は幅広い分野で応用されており，近年では，その精度を向上させる手法である精密測位を使って，測量やドローン制御などにも利用されつつある。洋上においても精密測位を行う試みが進められているが，陸上と同等の精度の精密測位は難しい。これは，洋上では波浪によって受信アンテナが傾くことや，陸上に比べて，海面で衛星信号が反射しやす

いことから，測位衛星の信号が遮断され易く，測位誤差が大きいことに起因する。

本研究では，小型波浪ブイを複数台用いたネットワーク型精密測位を提案し，従来の単一のアンテナと受信機のセットによる測位とは全く異なるアプローチの精密測位を確立する。これにより，洋上で安定的な精密測位を実現する。最終的には，津波検出システムを構築することや，観測データから電離圏のプラズマ密度及び対流圏の水蒸気量を抽出し，これまで観測の空白領域であった洋上における地球惑星・気象研究を実施する。

出発時刻の予測向上に関する要素技術の研究

航空交通管理領域 ※伊藤 恵理，大津山 卓哉

大規模空港において，駐機場にいる航空機の出発時刻や誘導路，各空域における航空機の情報を一元的に管理し，空港全体の混雑解消を図るためには，デジタル技術の導入が不可欠である。こうした背景のもと，先行研究（令和6年度終了重点研究課題「AMAN/DMAN/SMAN 統合運用に関する研究」）では，到着・出発・空港面（地上）の航空交通を統合的に管理する自動化システムの研究開発を進めてきた。

空港運用の効率化は，滑走路の有効活用や航空機の遅延時間・燃料消費量の削減などの観点から，航空輸送全体の環境負荷低減や経済的効率の向上といった公益にも資する。また，空港運用におけるデジタル技術の活用は，ICAO の世界航空航法計画（GANP）および我が国の航空ビジョンである CARATS にも明記されており，国際的にも求められている取り組みである。

このような背景を踏まえ，先行研究で開発した空港運用システムの実装を支援し，さらに発展させるためには，出発時刻の予測精度を一層高める要素技術の研究が必要である。特に，現実の運用に適用可能な高精度な予測モデルの構築が，次世代の空港運用効率化の実現において鍵を握っている。

本研究では，AMAN（到着機），DMAN（出発機），SMAN（地上運用）を統合した運用システムにおける出発時刻予測技術の精度向上を目的とし，デジタル技術を用いた要素技術の研究開発を行う。提案する技術の有効性については，空港における航空交通の混雑緩和効果などを定量的に評価する。さらに，国内空港のみならず ASEAN 地域を含む海外空港のシステム精度向上にも貢献する研究成果の創出を目指し，航空交通分野において実装に耐える AI 等のデジタル技術を研究開発する手法の体系化にも取り組む。

空港面の安全性向上に関わる調査

航空交通管理領域 ※蔭山 康太，中村 陽一，ビクラマシンハ ナヴィンダ，村田 暁紀
航法システム領域 齊藤 真二
監視通信領域 本田 純一，二ツ森 俊一

令和6年1月2日に発生した羽田空港航空機衝突事故については、羽田空港航空機衝突事故対策委員会や運輸安全委員会により事故要因の分析が進められているところである。同事故を契機として、滑走路誤進入防止のための安全性向上に係る技術や対策方法の重要性が改めて認識され、これらの技術や対策方法について調査や研究開発が求められている。

本研究では滑走路誤進入検知技術の向上、管制通信の齟齬の防止、飛行場面における交通流の円滑性等向上の各アプローチにより、空港面での安全性の向上のための調査及び対策技術の洗い出しを行う、以下の3つの技術を対象とする。

- 1) 滑走路誤進入を検知して低減する技術 … 所内研究で実施してきた各種空港面センサおよび空港面監視システムの運用データを

活用し、滑走路誤進入検知システムを支援する監視技術および既存検知システムの課題を調査する。

- 2) 音声認識技術を活用した管制通信の齟齬の防止技術 … 音声認識でテキスト化された音声データから意図を理解する手法を調査するとともに、交信時の齟齬の検出に利用可能なセンサ・情報および齟齬検出手法を調査する。
- 3) 経路生成技術を活用した空港面交通流の最適化・整序化技術 … 空港の地上走行を対象として実データを用いたデータモデリング、シミュレーションモデルの構築を行い、地上走行経路を支援する方法について調査する。

令和 7 年度（第 25 回）

電子航法研究所研究発表会 講演概要

令和 7 年 6 月 13 日 発行

編集兼発行人 国立研究開発法人
海上・港湾・航空技術研究所
電子航法研究所

発 行 所 国立研究開発法人
海上・港湾・航空技術研究所
電子航法研究所

〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7 丁目 42 番地 23

電 話 0422-41-3168

ホームページアドレス <https://www.enri.go.jp/>