

羽田空港のマルチラレーションデータに基づく航空機の走行速度が誘導路の舗装の劣化に及ぼす影響の考察

山田 泉¹・青山 久枝²・伊豆 太³

¹ 非会員 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 7-42-23)

E-mail: i-yamada@e.mpat.go.jp (Corresponding Author)

² 非会員 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 7-42-23)

E-mail: aoyama@e.mpat.go.jp

³ 非会員 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: izu-h92y2@p.mpat.go.jp

空港舗装の維持管理の効率性と計画性の向上のためには、空港面における航空機の日常的な交通状況の把握が有益と期待される。本稿では、空港面において航空機の位置の把握に用いられるマルチラレーションにより得られる航空機位置情報から算出した航空機の地上走行速度の情報を用いて、羽田空港における 5 年分の交通量データと舗装の補修工事の記録をもとに、誘導路の交通量と舗装の劣化の関連性について走行速度の影響を分析し、空港舗装の維持管理の計画性向上のための分析結果の活用の可能性について考察した。

Key Words: *airport pavement, distress, aircraft movement, multilateration surveillance system, correlation analysis,*

1. はじめに

空港舗装は、アスファルト舗装とコンクリート舗装に大別される。一般に、補修における長時間の閉鎖が困難な滑走路や誘導路では、補修の容易さを考慮し、短時間で施工できるアスファルト舗装が採用されることが多い。また、エプロンでは、航空機の駐機および給油を考慮して、静止荷重に強く、耐油性に優れたコンクリート舗装が採用されることが多い¹⁾。アスファルトは粘弾性体であるため、航空機の走行における荷重速度により変形係数が異なる。

航空機の地上走行に伴う荷重作用による舗装の劣化や破損に関しては、誘導路の日常的な交通量を知ることが有用と考えられるが、従来は、交通量を把握する手段は主として目視に限られ、また、東京国際空港（以下、羽田空港と称する）においては、多くの誘導路の存在や風向きの変化による航空機動線の変更などのため、その交通動態は複雑であり、詳細に把握することは困難であった。

一方、羽田空港の管制運用では、空港面の航空機監視能力の向上のためマルチラレーションが導入されている²⁾。羽田空港に導入されているマルチラレーションは、欧州の性能要件³⁾を踏まえて制定された国土交通省航空局の性能要件に適合する位置精度および検出率を有する監視システムであり、位置情報の更新頻度は毎秒 1 回（平均）、滑走路および誘導路における位置精度は 7.5m 以内である。マルチラレーションによる毎秒の位置情報は、基本的にすべての航空機について得られるため、誘導路の交通量を高い精度で把握することができる。また、マルチラレーションにより得られる各航空機の航跡を十分に平滑化することにより、地上走行速度の把握が可能である。

マルチラレーションによる航空機の位置情報を活用することにより、今後の空港計画、設計、管理に有益な情報が得られると期待される。海外では、ニューヨーク・ジョン・F・ケネディ空港およびアトランタ・ハーツフィールド空港において舗装管理システムの入力データとしてマルチラレーションデータの活用が報告され

ている⁴⁵⁾。また、筆者らの先行研究では、羽田空港のアスファルト舗装の誘導路を対象として、マルチラレーションによる交通量、および、舗装の劣化の指標として舗装の補修件数を計測する計測点を設定し、誘導路の交通量と補修件数の相関を分析した。その結果、交通量と補修件数にはある程度の相関が見られたが、バラツキが大きかったため、交通量以外の地上走行および誘導路の特徴により誘導路を分類する層別分析の必要性が課題となった⁴⁷⁾。

そこで本稿では、空港舗装の点検・補修等維持管理の計画的な実施に資することを目的として、羽田空港の誘導路を対象に、計測点における航空機の地上走行速度の平均により誘導路を分類し、交通量と補修件数の関連性の分析を試みた。検討対象は、国が直接管理している A, B, C 滑走路周辺およびエプロン周辺の誘導路とした。

2. 交通量データと補修件数データの作成

(1) 交通量データの作成

マルチラレーションデータをもとにした交通量の把握については、筆者らの先行研究⁴⁷⁾と同じ手法を用いて交通量データを作成した。すなわち、誘導路の交差点の周囲、および、長い直線区間の中央に計測点を配置して、計測点の近傍 15m 以内を航跡が通過した際に通過 1 回として計上し、計測点における交通量を計測した。設定した計測点は、誘導路のアスファルト舗装の箇所全体で 198 点であった。

交通量データは、計測点を航空機が 1 回通過する毎に作成されるレコードの群から構成される。通過日時、計測点の名称に加え、航跡と飛行計画情報の紐付けから得られた国内線/国際線の別、航空機の型式、出発便/到着便の別をレコード項目とした。加えて、本稿では、航跡が計測点の近傍を通過した際の走行速度をレコード項目とした。

交通量の計測に用いたマルチラレーションデータについては、国土交通省航空局より 2 ヶ月あたり 1 週間分のデータの提供を受けている。本稿では、2013 年 5 月から 2018 年 3 月までの 5 年分、計 210 日間のデータを用いた。

(2) 計測点周辺の補修件数データの作成

各計測点における交通量と、計測点周辺における舗装補修件数との相関について検討するために、補修工事の範囲が、どの計測点の属する誘導路に何箇所あったかを整理し、計測点周辺の補修件数データとして作成した。作成は筆者らの先行研究⁴⁷⁾と同じ要領で行った。すなわち、舗装の劣化の状況を示すデータとして、羽田空港の舗装の維持管理を行っている国土交通省東京航空局東京

空港事務所施設部から提供を受けた空港舗装の補修工事の履歴の図面を用いた。補修工事の図面の抜粋を図-1 に示す。赤、青、紫で示された部分が補修工事の行われた箇所である。

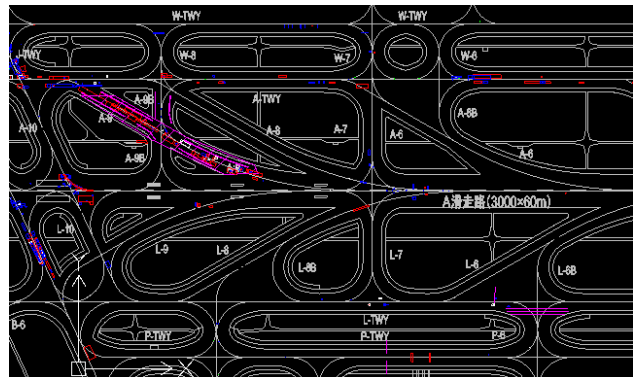


図-1 補修工事の図面 (抜粋)

工事範囲の面積は 1m² 未満から数百 m² まで多岐にわたっているが、複数の計測点にまたがるほど大きな場合が僅かであることから、工事範囲が位置する誘導路の交通量を代表すると考えられる計測点に補修件数として計上した。

補修件数については、計測点の属する誘導路の長さが数十 m から数百 m と様々であり、計上される補修件数に誘導路の長さが影響する可能性がある。そこで本稿では、計測点ごとに計上した補修件数について、計測点の属する誘導路の長さ (m) で割って 100 を掛け、誘導路 100m あたりに換算した補修件数を分析に用いることとした。

なお、補修工事のデータについては、2013 年 4 月から 2018 年 3 月までの 5 年分の補修工事の図面データを用いた。

3. 舗装の劣化への走行速度の影響の分析

(1) データ全体の傾向

まず、アスファルト舗装の計測点 198 点について、交通量、誘導路 100m あたりに換算した補修件数、平均走行速度の要約統計量を表-1 に、それぞれのヒストグラムを図-2 から図-4 に示す。表-1 および図-2 から図-4 により、交通量および誘導路 100m あたりに換算した補修件数はゼロの近くにピークがあり裾の長い分布であることがわかる。また、平均走行速度は最小値から最大値にわたって幅広く分布し、22km/h 付近と 32km/h 付近にピークを持つ双峰分布であることがわかる。

表-1 交通量，誘導路 100mあたりの補修件数，平均走行速度の要約統計量

| | 交通量 | 100mあたりの補修件数 | 平均走行速度(km/h) |
|--------|--------|--------------|--------------|
| 最小値 | 2 | 0 | 11.6 |
| 第一四分位数 | 370 | 0 | 22.0 |
| 中央値 | 6245 | 0.6782 | 27.8 |
| 平均値 | 9741.3 | 2.962 | 28.0 |
| 第三四分位数 | 17556 | 3.3333 | 32.9 |
| 最大値 | 39048 | 38.6667 | 51.1 |

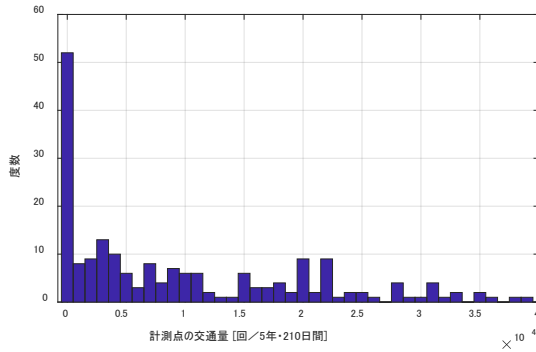


図-2 計測点の交通量のヒストグラム

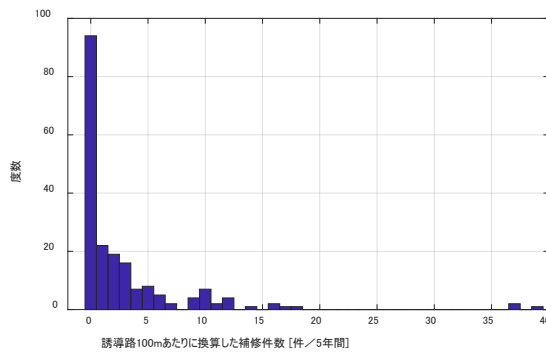


図-3 誘導路 100mあたりに換算した補修件数のヒストグラム

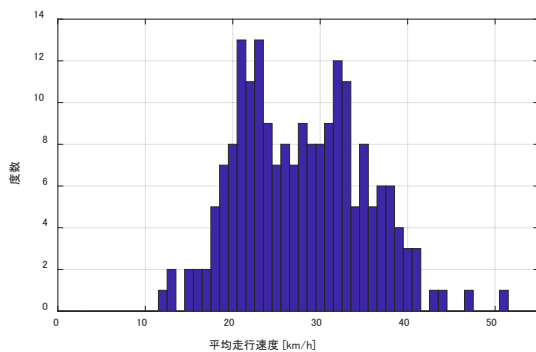


図-4 平均走行速度のヒストグラム

次に，計測点における平均走行速度を横軸，誘導路

100mあたりに換算した補修件数を横軸，計測点の交通量をマーカーの大きさとした散布図を図-5に示す。図-5から，速度15km/hから25km/h程度の範囲では，少ない交通量に対して補修件数が多い傾向となることが観察された。また，速度30km/hから40km/h程度の範囲では，交通量が多いにもかかわらず，補修件数が少ない傾向となることが示された。

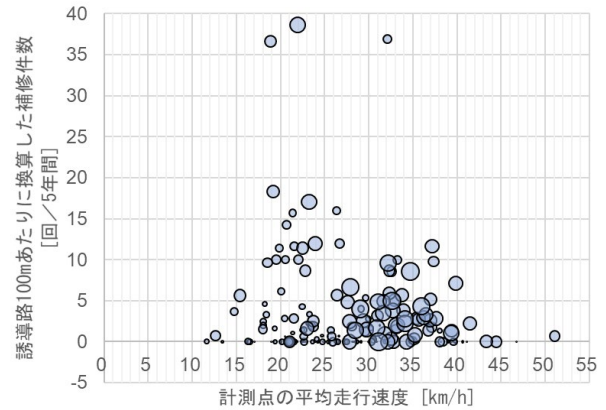


図-5 平均走行速度と誘導路 100mあたりに換算した補修件数の散布図（マーカーの大きさは交通量に対応）

平均走行速度および交通量と補修件数の関連性をより詳細に見るために，平均走行速度 5km/h ごとに平均走行速度を区分してデータを分け，箱ひげ図によって補修件数および交通量の傾向を調べた。

平均走行速度 5km/h ごとの補修件数の箱ひげ図を図-6に示す。箱ひげ図では，箱の下端が第一四分位数，上端が第三四分位数，箱の中ほどに描かれる横線（赤線）が中央値を表す。ひげは，第一，第三四分位数によって定まる，外れ値と見なされない下限および上限を表し，ひげの外側にあるマーカーは外れ値を表す。

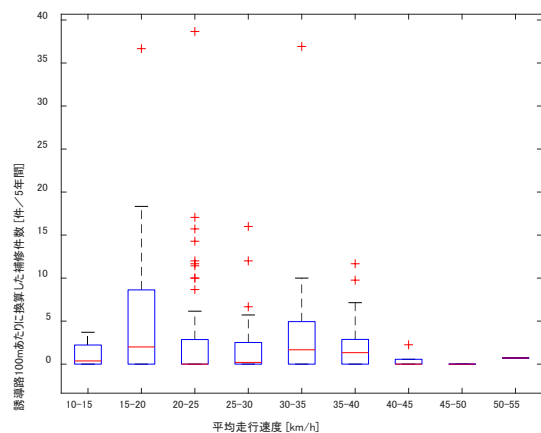


図-6 平均走行速度 5km/h ごとの補修件数の箱ひげ図

図-6 から，誘導路 100mあたりに換算した補修件数に

については、平均走行速度 15km/h 以上 20km/h 未満の範囲において最も幅広く分布し、次に、平均走行速度 30km/h 以上 35km/h 未満の範囲において幅広く分布することが示された。

平均走行速度 5km/h ごとの交通量の箱ひげ図を図-7 に示す。図-7 から、平均走行速度 30km/h 未満の範囲では概ね交通量が少なく、30km/h 以上の範囲では交通量が多いことが示された。

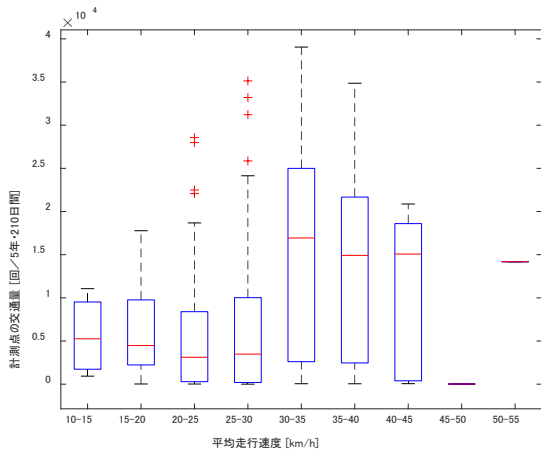


図-7 平均走行速度 5km/h ごとの交通量の箱ひげ図

図-6 と図-7 の対照から、平均走行速度 15km/h 以上 20km/h 未満の範囲では、交通量が少ないにもかかわらず補修件数が多く、30km/h 以上 35km/h 未満の範囲では、交通量が多く、また補修件数も多いことが見てとれる。

(2) 走行速度が交通量と補修件数の関連性に及ぼす影響

次に、多くのデータが得られている平均走行速度 15km/h 以上 40km/h 未満の範囲を対象として、5km/h おきにデータを分け、交通量と誘導路 100m あたりに換算した補修件数の相関を分析した。

図-8 から図-12 に、走行速度 5km/h ごとに分けたデータにおける計測点の交通量と誘導路 100m あたりに換算した補修件数の散布図を示し、回帰直線（いずれも切片が有意とならなかったことから、切片なし回帰）を付した。

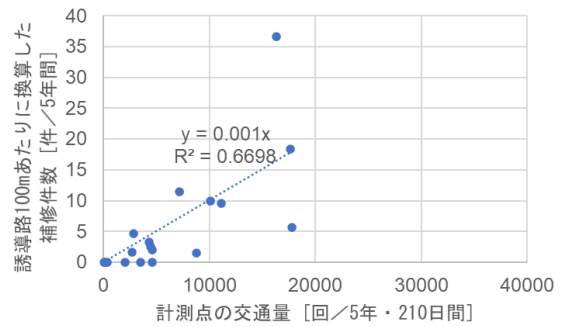


図-8 交通量と補修件数の相関：15km/h 以上 20km/h 未満の計測点

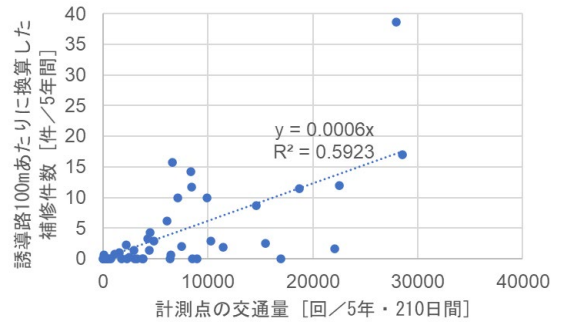


図-9 交通量と補修件数の相関：20km/h 以上 25km/h 未満の計測点

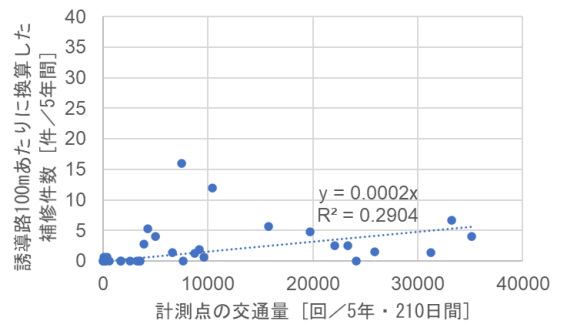


図-10 交通量と補修件数の相関：25km/h 以上 30km/h 未満の計測点

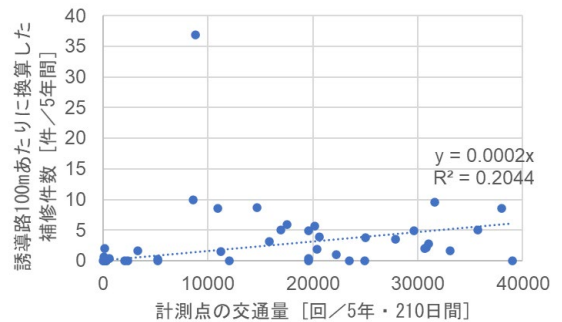


図-11 交通量と補修件数の相関：30km/h 以上 35km/h 未満の計測点

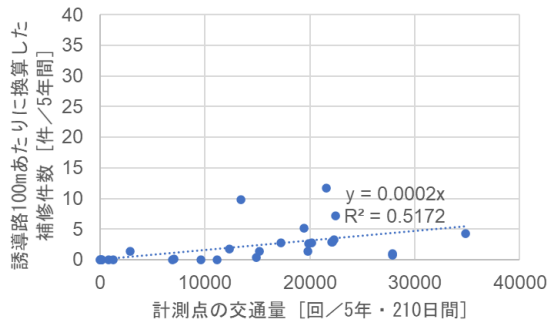


図-12 交通量と補修件数の相関：35km/h以上40km/h未満の計測点

図-8 から図-12 を比較すると、平均走行速度が遅くなるにつれ、回帰直線の傾きが大きくなることが示された。また、平均走行速度 25km/h 以上の範囲では、交通量が多いにもかかわらず、誘導路 100m あたりに換算した補修件数がゼロ件または少数となる場合があることが示された。

(3) 低速走行となる箇所の特徴

図-8 から図-12 において傾向の分かれ目となった 25km/h を境とし、25km/h 未満を低速、25km/h 以上を高速として、低速走行および高速走行の計測点を空港平面図上にプロットした。計測点の交通量を円グラフの大きさとしてプロットした結果を図-13 に、誘導路 100m あたりの補修件数を円グラフの大きさとしてプロットした結果を図-14 に示す。

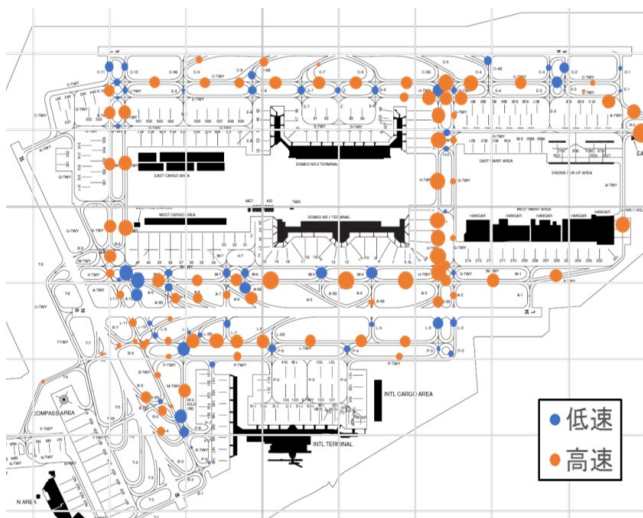


図-13 計測点の交通量の円グラフ表示と平均走行速度による色分け

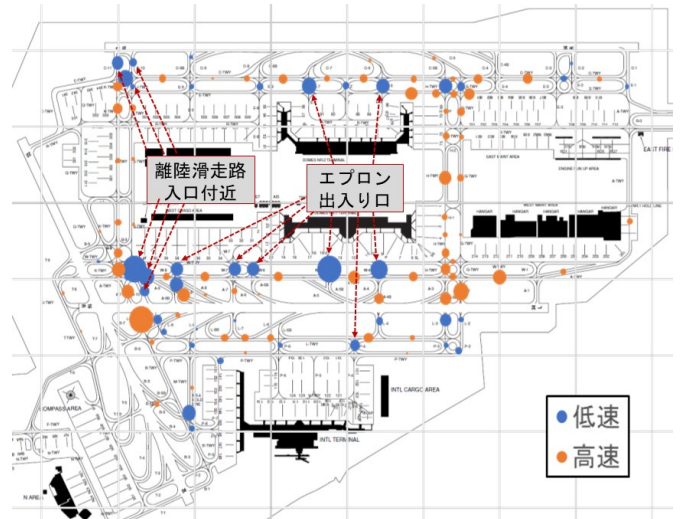


図-14 誘導路 100m あたりに換算した補修件数の円グラフ表示と平均走行速度による色分け

図-13, 14 から、低速走行は主に下記の 2 種類の誘導路において行われ、図-13 と図-14 の対照から、これらの箇所においては、少ない交通量に対して補修件数が多くなっていることが観察された。

- ① エプロン出入り口
- ② 離陸滑走路の入り口付近

4. 考察

(1) 空港舗装の維持管理・更新計画への活用について

空港アスファルト舗装では、緩速走行荷重が集中する箇所においてわだち掘れ等の永久変形が生じやすいことが知られている¹⁾⁸⁾。交通量と補修件数の関係への走行速度の影響について図-8 から図-12 から示された傾向は、この知見に対応するものである。また、3.(3)から、羽田空港の誘導路において、平均走行速度が低速となり、補修件数の多い箇所が具体的に明らかとなった。

今後、誘導路の点検・補修および更新をより計画的・効果的に進めていくために、本稿で見出された補修の多い箇所およびその走行速度による特徴に関する情報が有益となることが期待される。

(2) マルチラレーションから得られる諸情報の活用の可能性

本稿では、マルチラレーションから得られる走行速度の情報を用いて、交通量と舗装の劣化の関連性について平均走行速度の影響を検討した。このように、マルチラレーションで得られる毎秒の航空機位置情報からは、計測点の通過の検出に限らないさまざまな情報が得られる。

本稿で行った平均走行速度による検討では、走行速度が低速になるほど、少ない交通量で舗装が劣化する

傾向が示された。よって、それぞれの計測点について、ある速度未満で航跡が計測点を通過した回数と補修件数の関連性を調べることにより、3.(3)に示した 2 種類の誘導路に留まらず、低速の走行が舗装の劣化に及ぼす影響を検討できると期待される。このような閾値となる速度を求めることが今後の課題である。

また、走行速度のほかにも得られる情報として加速度が挙げられる。図-14 における低速走行の誘導路のうち、エプロン出入り口と離陸滑走路の入り口付近では、航空機の地上走行において旋回が行われる。このため、旋回によるねじりの力が舗装の劣化に影響している可能性がある。また、離陸滑走路の入口付近では、離陸待ちの行列における断続的な加減速による力が舗装の劣化に影響している可能性がある。このような可能性を検討するためには、走行速度の大きさだけでなく方向を考慮した上で、航空機の進行方向および横方向の加速度についても、補修件数との関連性を検討することが有効になると期待される。

5. 結論

本稿では、羽田空港のマルチラレーションデータから得られる走行速度の情報を含んだ誘導路の計測点の交通量データを用いて、誘導路の交通量とアスファルト舗装の劣化の指標となる補修件数との関連性について、平均走行速度の影響を検討した。

アスファルト舗装の誘導路の計測点 198 点における平均走行速度は 11.6km/h から 51.1km/h までの範囲にわたっており、5km/h ごとにデータを分けて計測点の交通量と誘導路 100m あたりに換算した補修件数の相関を調べたところ、平均走行速度が遅くなるにつれ、交通量と補修件数の散布図における回帰直線の傾きが大きくなる傾向が観察された。また、低速走行により補修件数が多くなった箇所として、エプロン出入り口、離陸滑走路の入口付近の誘導路が挙げられることがわかった。これは、低速走行荷重が集中しやすい箇所においてわだち掘れ等の永久変形が生じやすいという既存の知見を交通量データによって裏付けるものである。

このように、マルチラレーションをもとに作成した誘導路の交通量データは、航空機による荷重の繰り返しおよび走行速度による空港アスファルト舗装の劣化の傾向を把握し、予測につなげていくために有効な手段になりうると考えられる。マルチラレーションを用いた交通量データにより、劣化の進行の予測ができるようにな

れば、空港舗装の維持管理の計画性の向上につながることを期待される。

今後は、マルチラレーションから得られる航空機の地上走行における加速度の情報等の導入によりデータの拡充を図り、空港舗装の点検・補修および更新の時期の判断を支援するために有益な情報を得るための分析を進めることとしたい。

謝辞：マルチラレーションデータの取得にご協力くださいました国土交通省航空局交通管制部交通管制企画課の関係各位、および、補修工事の図面の取得にご協力くださいました国土交通省東京航空局東京空港事務所施設部の関係各位に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省航空局：空港土木施設設計要領（舗装設計編），2021.
- 2) 国土交通省航空局：航空路誌，AD-1.1.6.11，2022.
- 3) EUROCAE：Minimum Operational Performance Specification for Mode S Multilateration Systems for Use in A-SMGCS，EUROCAE ED-117，2003.
- 4) Nassim Sabahfar and Scott Murrell：John F. Kennedy International Airport Pavement Classification Number Determination：A Case Study，Proceedings of International Conference on Transportation and Development 2020，pp. 178-186，2020.
- 5) Richard L. Boudreau and Quintin B. Watkins：Pavement Management Using Real Time Traffic Data，Proceedings of Airfield and Highway Pavement 2013，pp. 714-721，2013.
- 6) 青山 久枝，山田 泉，伊豆 太：マルチラレーションによる航空機位置情報の新たな活用を目指した取り組み，電子情報通信学会論文誌 B，Jan. 2022. DOI:10.14923/transcomj.2021BLL0006
- 7) 山田 泉，青山 久枝，伊豆 太：羽田空港におけるマルチラレーションデータをもとにした航空機の交通量データの作成と空港舗装維持管理への活用可能性に関する考察，土木計画学論文集 F4（建設マネジメント）．投稿中
- 8) 国土交通省航空局：空港舗装等維持管理マニュアル（案），2021.
Retrieved from
https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk9_000019.html

(Received ?)
(Accepted ?)

AN ANALYSIS OF THE EFFECT OF TAXIING SPEED OF AIRCRAFT ON DISTRESSES OF AIRPORT TAXIWAY PAVEMENTS BASED ON

MULTILATERATION SURVEILLANCE DATA AT TOKYO INTERNATIONAL AIRPORT

Izumi YAMADA, Hisae AOYAMA and Futoshi IZU

The information of traffic situation of aircraft in daily operations at airport surface may be useful to improve the efficiency and timeliness of maintenance of airport pavements. In this paper, we use the information on position and taxiing speed of aircraft, obtained from the aircraft position information per second by multilateration surveillance system at Tokyo International Airport. Based on the record of pavement repairs, we analyzed the effect of taxiing speed on the relationship between the traffic volume of taxiways and the number of repairs, and considered the possibility of utilizing the analysis results to improve the planning of maintenance of airport pavement.