

直流電車線路の点検を想定した無人航空機飛行可能エリアの提案

森田 岳* 樋口 靖展** 笹川 卓***

A Method of Estimating Flight Area for Unmanned Aircrafts Used for Inspection of DC Overhead Contact Line System

Gaku MORITA Kiyonobu HIGUCHI Takashi SASAKAWA

This paper proposes a method of estimating safety flight area for unmanned aircrafts aimed at inspection of DC overhead contact line system. In a DC electrified railway environment, DC magnetic field emitted from traction currents and magnetization of iron structures may affect an operation of flight control system of an unmanned aircraft. The method proposed in this paper is provided on the basis of a case study in some unmanned aircraft applications, an immunity test of two type unmanned aircrafts, an experimental study and a development of a new simulation technique.

キーワード：無人航空機（ドローン）、イミュニティ、着磁、電車線路の点検、飛行可能エリア

1. はじめに

無人航空機（以下、ドローン）は、空の産業革命として、新たな産業・サービスの創出や国民生活の利便性や質の向上に資することが期待されている¹⁾。ドローンの具体的な活用方法として、物流、災害対応、インフラ維持管理、測量、農林水産業等が挙げられている²⁾。

鉄道業界においても、東日本旅客鉄道株式会社による鉄道設備の調査効率化を目的とした導入事例（日刊工業新聞、2020.2.14）や近畿日本鉄道株式会社他による災害時の線路・送電設備の情報収集に関する実証実験（交通新聞、2017.12.5）など活用の幅を広げている。

電力業界においては、配電線の腕金の錆による強度不足を確認する作業にドローンを用いることで、高所作業車を不要とした事例が報告されている³⁾。一方で、電力設備や鉄道設備では電流が発生する磁界などによりドローンの姿勢制御や飛行制御に影響を与える懸念がある。

そこで本研究では、電車線路の点検にドローンを利用する場合を想定し、ドローンに許容される直流磁界レベル（すなわちイミュニティ）の調査、直流電車線路近傍の磁界レベルの実測とシミュレーションによる検討を通じて、鉄道設備固有の磁界の観点からドローンの飛行可能エリアを提案することとした。

2. ドローンの飛行制御方法

広く流通している既存のドローンには全球測位衛星シ

ステム（GNSS）や磁気コンパス、ジャイロセンサ、速度センサ、加速度センサ、気圧センサなど、さまざまなセンサが組み込まれており⁴⁾、これらのセンサからの情報とフライトコントローラと呼ばれるソフトウェアを組み合わせて姿勢制御と飛行制御を実現させている⁵⁾。

自律飛行に対応したドローンは、磁北極を方位基準としGNSS情報と組み合わせて自身の姿勢検出や現在地の測位を行うものがある。そのため、磁気コンパスに地磁気以外の磁界による擾乱を受けると特に姿勢検出に異常をきたし、目的地と異なった地点に向かって飛行する等の飛行制御への悪影響を与える恐れがある。

この問題を解決するためにSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）を実装したドローンが開発されている。これには機体に搭載されたレーザー測位センサから得られる情報を利用して、三次元地図をマッピングして自律飛行を行うもの、レーザー測位センサに加えて測位精度向上と障害物検知のため超音波センサ、赤外線センサ、カメラ等を用いるものなどが存在している⁶⁾。

3. ドローンのイミュニティ基準の検討

3.1 他業種の事例

3.1.1 送電線点検

経済産業省の「送電線点検等におけるドローン等技術活用研究会」により、送電線の保守点検等の高度化、効率化に関する報告書が公表されている⁷⁾。この中で技術的論点の一つとして磁界の影響が挙げられている。具体的には、送電線を検査対象としてドローンを遠隔（目視範囲外）で手動操縦する場合と自動飛行する場合の磁気コンパスエラーによる飛行制御への影響が課題とされている。

現状の課題を踏まえ、同報告書の参考資料「送電線点検等への活用に向けたドローン等への共通要件」におい

* 電力技術研究部 き電研究室
** 電力技術研究部 き電研究室（現 西日本旅客鉄道株式会社）
*** 浮上式鉄道技術研究部（現 独立行政法人自動車技術総合機構）

て、磁気コンパスが不使用方法になった場合の安全確保、耐磁界性能、送電線から隔離を保った飛行機能を含めた要件や機能が提示されている。

3.1.2 船舶

一般財団法人日本海事協会から、船舶検査におけるドローン使用に係るガイドラインが発行されている⁸⁾。この中で、船舶の貨物倉内やバラスタック等の船内は磁性体で囲まれた閉空間であり、GNSS 測位や磁気コンパスが正常に動作しない可能性があることが指摘されている。4種類のドローンを用いて貨物タンクを想定した環境で飛行試験を実施し、ドローンオペレータのスキルが十分で、かつ磁性体に対する冗長性の高いドローンであれば、安全に飛行することが確認できたとしている。

3.2 国土交通省のガイドライン

国土交通省航空局より「無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン」（以下、ガイドライン）が発行されており⁹⁾、以下が示されている。

- (1) 第三者や第三者の建物、車両などの物件との間に距離（30m）を保って飛行すること。
- (2) 新幹線の上空及び周辺で飛行させないこと。
- (3) 鉄道車両の走行速度を考慮したうえで常に必要な距離（30m）を保てるよう飛行させること。
- (4) 高圧線、変電所、電波塔及び無線施設等の施設の付近ならびに多数の人がWi-Fiなどの電波を発する電子機器を同時に利用する場所では、電波障害等により操縦不能になることが懸念される。

なお、自社の設備を点検する場合は自社の物件との距離を30m未満としても法規上の問題はないが、夜間飛行など飛行条件により国土交通省への申請が必要となる場合がある。

3.3 国際規格と国内規格の開発状況

3.3.1 ISO規格の開発状況

2018年11月に国際標準化機構（ISO）はドローンの飛行に関する国際標準規格の草案を公開した。この草案は一般仕様を定めたISO 21384-1、機体システムを定めたISO 21384-2、運用手順を定めたISO 21384-3、用語集としてISO 21384-4の4部から構成される。そのうち、ISO 21384-3とISO 21384-4は発行済みであり、ISO 21384-2は2021年9月現在において最終国際規格原案（FDIS）の投票段階となっているが、環境条件が含まれると想定されるISO 21384-1の規格開発は活動中断（2022年2月より再開予定）している¹⁰⁾。

3.3.2 JIS規格の開発

2021年4月に経済産業省によりドローンのシステム管理基準に関する日本産業規格JIS W 0711が制定されている¹¹⁾。本規格においても、外部からの電磁界により

ドローンの制御に悪影響を受ける可能性について言及されているものの、具体的なイミュニティ基準や評価方法については規定されていない。

以上述べた通り、ドローンのイミュニティを定量的に定めた国際規格あるいは日本国内規格は、2021年10月現在において未成立である。ドローンの製造者が独自のイミュニティ基準を定めている可能性は否定できないが、取扱説明書や製品仕様書に具体的な基準を記載したドローン製品は確認できなかった。

3.4 市販ドローンのイミュニティに関する調査

3.4.1 磁気コンパスへの影響調査

市販されている重量200g未満のドローン2種類（以下、製品Aと製品B）について、直流磁界ばく露に対するイミュニティの調査を実験により行った。

図1に示すように、中心部におおよそ一様な直流磁界を発生できるように、四方を簡易的なヘルムホルツコイルで囲った中に供試ドローンを静置し、前記コイルに直流電流を通電してコンパスエラーが発生する最小の直流磁束密度を調査した。直流磁束密度は3軸のフラックスゲート式磁界センサにより測定した。



図1 磁界ばく露試験の様子

表1 コンパスエラーが生じる最小の直流磁束密度（変動分）とそのばく露方向

磁界ばく露方向	製品A	製品B
水平（東→西）	10 μ T	11 μ T
水平（北→南）	24 μ T	22 μ T
鉛直	450 μ T	5 μ T

- ※ ドローンはカメラが北向きとなる向きで静置
- ※ ばく露開始前にコンパスキャリブレーションを実施
- ※ 製品Bのコンパスエラー：キャリブレーションの製品仕様から3分以内にエラーとなった場合にエラー発生と判定

各ドローンがコンパスエラーを出力した最小の直流磁束密度（地磁気などの環境磁界成分を除く変動分）とそのばく露方向を表1に示す。コンパスエラーを表示する磁束密度は、特に鉛直方向で製品間の大きな差が認められた。

同様の検討を行った先行研究¹²⁾によると、ドローンの状態に異常をきたす最小の直流磁束密度は水平方向で

14 μ T以上、垂直方向は地磁気との合計で55.8 μ T以上とある。また、文献4の商用周波磁界影響評価では水平方向に14.6 μ T以上でドローンの磁気コンパスに異常をきたしたと報告されている。これらの先行研究と今回の調査結果は概ね同じ傾向である。

3.4.2 飛行制御への影響調査

図1のヘルムホルツコイル内で製品Aと製品Bをホバリングさせ、直流磁界のばく露による飛行制御への影響を確認した。その結果を表2に示す。製品Aは磁界ばく露方向によらず10 μ T程度の磁界印加により、水平面上で回転を始め数秒後には制御困難となった。鉛直方向のばく露（表1参照）については、コンパスエラーに対しては高い耐性を示したが飛行制御への影響は水平方向と同程度に敏感であった。

一方、製品Bについてはコンパスエラーが表示されるものの、表2に示した程度の直流磁界ばく露に対しては飛行制御には全く支障が生じなかった。両製品でこのような違いが見られた理由としては、製品Bの取扱説明書によれば同製品にはカメラによるビジョンシステムと赤外線検知システムが搭載されていること、さらに手動操縦機能のみを有することから、磁気コンパスを飛行制御に用いていないためであると推定される。

製品Bに対しては、さらに過酷な条件として直線状電線によって生じる約5mTの直流磁界ばく露（電流7.6kA、離隔約0.3mの非一様磁界ばく露）を行ったが、飛行制御への影響はなく正常な飛行を継続した。よって、電車線路活線検査の想定において、製品Bには磁界イミュニティの観点での懸念はほぼ存在しないと推測される。

表2 直流磁界ばく露時における飛行制御への影響

磁界ばく露方向	ばく露磁界	製品A	製品B
—	無し	正常	正常
水平（東→西）	10 μ T	回転	正常
鉛直	5 μ T	正常	正常
	10 μ T	回転	正常

3.5 許容磁界レベルについて

前節までに述べたとおり、機種により許容磁界レベルは大きく異なり、また直流磁界ばく露への耐性や姿勢制御の方式に関する製品情報は通常非公表である。したがって、個々のドローンの機種を特定しない一般化されたイミュニティの基準値や製品選定の基準を示すことが困難である。

このため、自律飛行を行う場合の最悪条件を想定し、最も耐性が低い機種を基準として、直流や商用周波数といった低周波の磁界については、10 μ T程度を許容磁界レベルとすることが妥当と考えられる。

4. 飛行可能エリア設定における支配要因

4.1 活線検査

活線検査においては、電車線路に流れるき電電流が発生する直流磁界が飛行可能エリアを考える上での支配要因となる。図2に示すき電ちよう架式架線の電車線装柱をモデル（架線とレール中心間の離隔は5mと設定）とし、都市部の過密線区を想定して10kAの通電条件を想定し、既報¹³⁾の簡易評価式を用いて計算した。

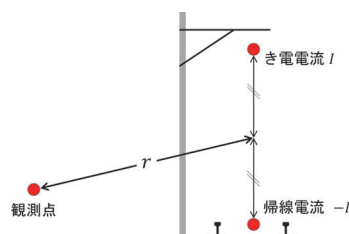


図2 き電ちよう架式架線の電車線装柱

その結果、磁束密度が10 μ T以下となる最小離隔 r （架線とレールの中心からの離隔）は約32mと見積もられる。この必要離隔は国土交通省航空局のガイドライン⁹⁾による30mとほぼ同じ値となっている。

電車線路の活線検査においてこの離隔で特に被写体を細かく確認する必要がある場合、ドローンのカメラには望遠レンズや高い解像度が求められる。経済産業省の報告書⁷⁾でも、送電線点検用のドローンについて30m離れた箇所から異常箇所の判別が可能だが、カメラの性能要件として挙げられている。

4.2 停電検査

電車線路を停電させた場合には、き電電流による磁界は発生しない。一方、電化柱やビームといった鋼製（強磁性体）の電車線支持物には、通電履歴や地磁気などの環境磁界に起因する着磁が想定される。これまでも電車線支持物の着磁に関する実測事例があり¹⁴⁾、ビームやレール周辺で数十 μ T程度の磁界レベルとなることが報告されている。この値は前記のドローンに対する許容磁界レベル10 μ Tと同程度のオーダーであり、ドローンの飛行可能エリアを考える上で無視できない。

4.3 交流磁界の影響

交流電車線路と配電線からは交流磁界が発生する。このうち、高圧配電線路に流れる電流は高々数十A程度であることが多い。一例として、無限長の直線電流に50Aを通電した場合を考えると、電流中心から1m以上の離隔があれば10 μ Tを下回るレベルとなる。ツイスト構造を持つトリプレックスケーブル（CVT）を高圧配

電線路に用いる場合、発生する交流磁界は無視できる程小さなレベルとなる¹³⁾。そのため、高圧配電線路が発生する交流磁界は、ドローン飛行に対して大きな支障とはならないとみなせる。

一方で、交流電気鉄道では最大 1kA 程度のき電電流が電車線路に流れる場合がある。この場合に必要最小離隔（磁束密度が 10 μ T 以下となる離隔）を図 2 と同様の電流分布において既報¹³⁾の簡易評価式で概算すれば、10m 程度と見積られる。直流電気鉄道においても、交流電気鉄道や送電線が近接する場合にはそれらからの影響を考慮する必要がある。

5. 電車線路周辺の磁界環境

5.1 電化柱の磁化特性

鋼管柱やコンクリート柱の鉄筋には強磁性体である普通鋼が使用されており、着磁レベルを検討する際には磁化特性の把握が必要である。強磁性体の磁化特性の測定は、試験対象から抽出した試験片に対するもの¹⁵⁾と材料単体に対するもの¹⁶⁾が一般的手法である。一般に電化柱のような完成品の磁化特性の直接測定は困難であるが、一方で加工（切削・曲げ・溶接等）に伴う磁化特性の変化が考えられるため、製品を非破壊で測定することが望ましい。

そこで電化柱の磁化特性を非破壊かつ建植状態のまま測定可能な手法を新たに提案した（図 3）。本手法は、電化柱を単板試験器¹⁶⁾内の一様な材料と見立てて JIS C 2556: 2015¹⁶⁾の附属書 JA が定める H コイル法に類似した手法で測定を行うものであるが、H コイルの代わりにフラックスゲートセンサを使用し、空隙補償を電化柱の設計寸法から計算で実施する。また、磁束分布の長手方向での非一様性や端部効果は無視する等の測定計算手順の簡略化や近似を行っている。そのため既存の精緻な手法に比べて精度低下が避けられないが、ドローン飛行範囲の検討に必要なオーダーでの議論に対しては十分と考えられる。

営業設備の鋼管柱（STK400）とコンクリート柱（外径 350mm、主鉄筋 ϕ 8mm \times 16 本）に対して、50Hz の正弦波電流で励磁した場合の磁化特性の測定結果を図 4 に示す。同図の凡例に示す値は励磁コイルで印加した起磁力である。鋼管柱は構成材料の大半が普通鋼であるため、強磁性体に特有の強いヒステリシス特性を示した（同図（a））。一方、主要材料がコンクリートであるコンクリート柱においては、空気（真空）とほぼ同様の線形に近い特性となった（同図（b））。

以上の結果から、コンクリート柱の着磁はほぼ無視できると言える。一方、鋼管柱の着磁は無視できないこと、かつ、飽和磁束密度（物性値）は少なくとも 300mT 程

度以上となるため、ドローンへの影響評価に必要な 10 μ T といったレベルの着磁評価には、過去の加工履歴や通電履歴など他の条件を考慮する必要がある。

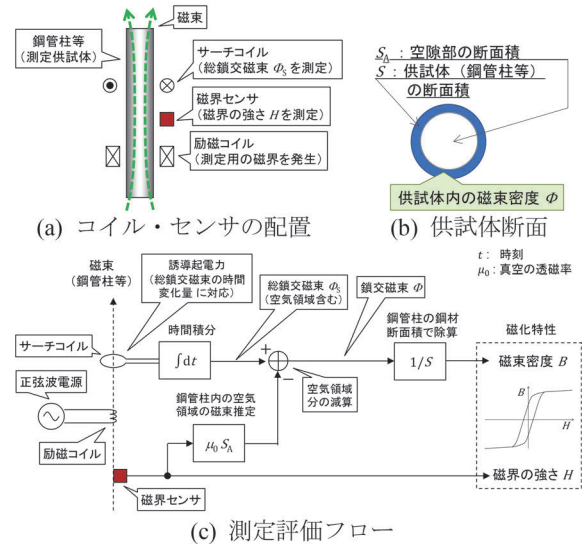


図 3 電化柱の磁化特性の非破壊測定手法の提案

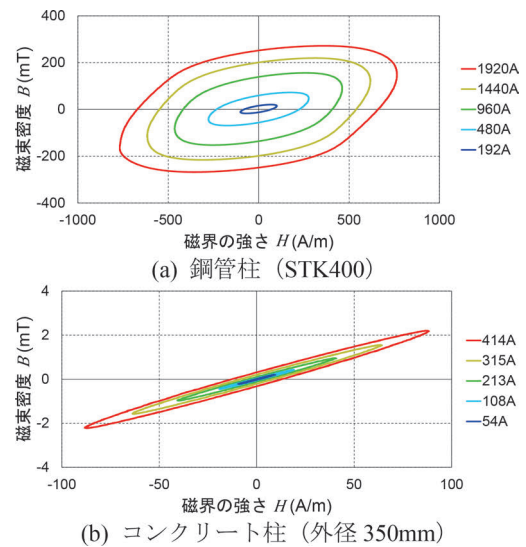


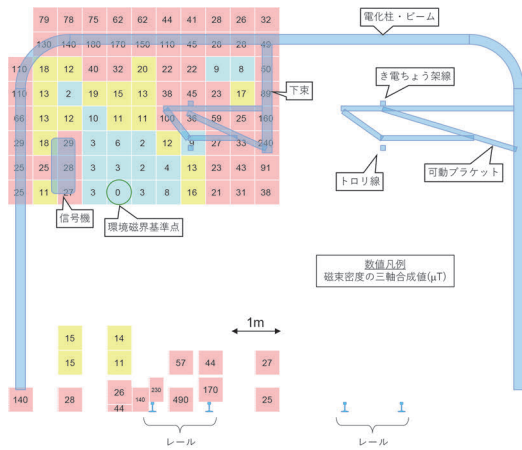
図 4 電化柱の磁化特性の測定結果（50Hz 正弦波）

5.2 停電時における実設備の直流磁界測定

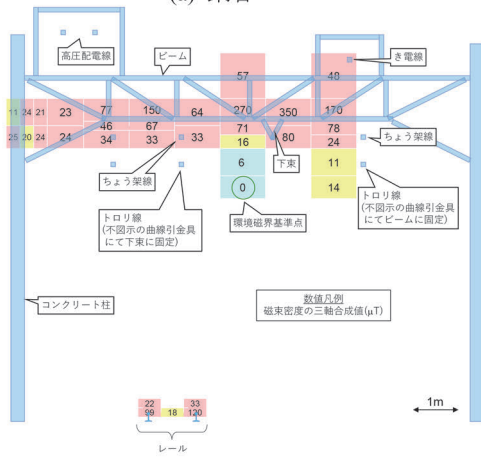
電車線支持物の着磁が近傍空間の直流磁界に与える影響について、直流電化区間において実測調査した。対象線区は、鋼管ビーム区間と、V トラスビーム（電化柱はコンクリート柱）区間であり、それぞれの形態の代表的な装柱の箇所を 1 か所ずつ選定した。

測定は、き電停止状態において、高所作業車（軌陸車）等を用いて、線路に直交する平面内の様々な位置における直流磁界をフラックスゲートセンサで測定した。ここで交流磁界や作業上のセンサの揺れの影響を除くため測

定値として10秒間の平均値を採用した。さらに後処理として、着磁の影響をほぼ受けていないと想定される位置での磁界測定値を環境磁界と仮定し、全ての測定値からこの環境磁界をベクトル的に減算することで、着磁による影響をもとめた。



(a) 鋼管ビーム



(b) Vトラスビーム

図5 電車線停電時における電車線支持物近傍の直流磁界測定結果（環境磁界からの差分の三軸合成値）

その結果を図5に示す。前記処理を施した後の各測定点における直流磁界（着磁影響成分）の三軸合成値を示している。鋼材の近傍では100 μ Tを超える着磁が認められるが、概ね1m以上の離隔があれば着磁による影響が10 μ T以下となることが分かった。ただし、下束下部や鋼管柱のフランジ接続箇所などの強磁性体の端部では、端部効果により着磁の影響範囲が広がる（同図(a)中央部）。この影響範囲を、永久磁石等の磁界解析で用いられるチャージモデルを用いて理論的に見積もった所、影響が10 μ T以下となる最小離隔の推定値として端部から約2mとの結果が得られた。

なお、今回の試験では参考のために軌道に近い位置でも測定を行っており、高架橋構造物やレールの着磁の影

響が認められたが、これらについては今回の検討の対象外とする。

5.3 シミュレーション検討

電車線支持物近傍の直流磁界を計算する電磁界解析手法を新たに開発した¹⁷⁾。本手法ではヒステリシスのモデル化に用いられるプレイモデルを用いて強磁性体の磁化特性を模擬し、一次元（直線状）、二次元（平面状）、三次元の磁性体をモデル化し、磁気スカラーポテンシャル法を用いた有限要素解析を行う手法を採用した。これにより支持物等の着磁により空間中に発生する直流磁界の解析が可能となった。

鋼管ビームが3kAのき電電流通電履歴により着磁した条件における解析結果の例を図6に示す。本モデルにより通電電流履歴を3kA～12kAと変化させた場合の比較も行った。いずれの場合でも鋼管柱から1m程度以上の離隔があれば磁界レベルは10 μ T以下となった¹⁷⁾。この結果は前述の実測結果と良く一致している。

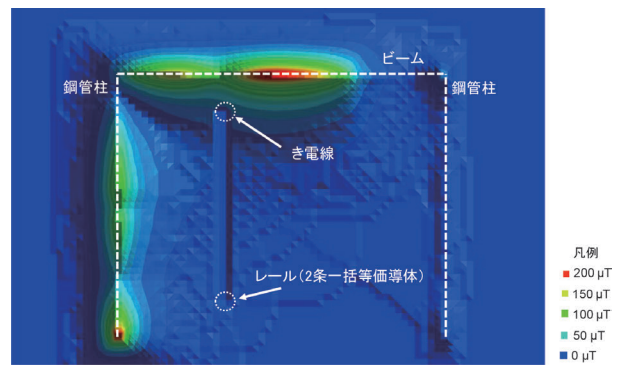
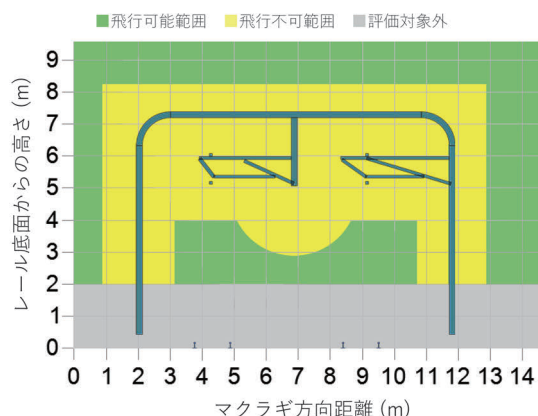


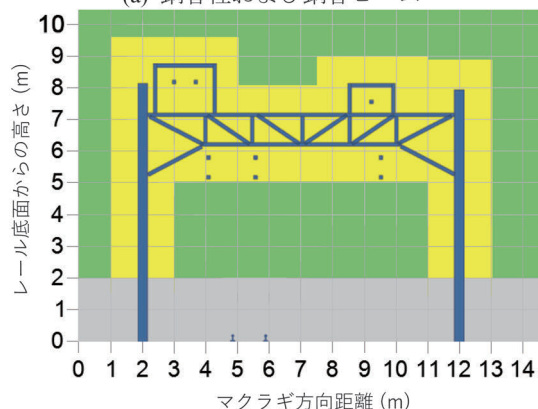
図6 鋼管ビームにおける着磁解析結果の例

6. 飛行可能エリアの提案

- (1) 活線作業時は、き電電流が発生する磁界の影響により、電車線路から直流電化区間では約30m（4.1参照）、交流電化区間では約10m（4.3参照）の離隔確保が安全な飛行のために必要である。ただし、飛行制御を磁気コンパスに依存しないドローンであれば、さらに接近しての飛行が可能であると想定される（3.4.2参照）。
- (2) 停電作業時は、5.2節、5.3節で示した離隔（1mないし2m）を基にして、飛行可能エリアが設定できる。例として、代表的な装柱（鋼管柱および鋼管ビーム、コンクリート柱とVトラスビーム）におけるドローンの飛行可能エリアの案を図7に示す。



(a) 鋼管柱および鋼管ビーム



注：コンクリート柱周辺の飛行不能範囲(離隔 1m)は操縦上安全離隔
 (b) コンクリート柱およびVトラスビーム

図7 代表的な装柱でのドローンの飛行可能エリア

7. まとめ

ドローンを用いて直流電車線路の点検を行う場合における、飛行可能エリアについて磁界の影響の観点から検討を行った。その結果を以下に要約する。

- (1) ドローンの直流磁界ばく露耐性（イミュニティ）について文献調査および実験検討を行った結果、安全側運用基準として、 $10\mu\text{T}$ 程度を許容レベルとすることが妥当と考えられる。
- (2) 活線時ではき電電流、停電時では支持物等の着磁が、飛行可能エリアの設定における支配要因である。
- (3) 電化柱の磁化特性の測定結果から、飛行可能エリア設定においてコンクリート柱の着磁はほぼ無視できるのに対し、鋼管柱等では無視できないことが分かった。
- (4) 代表的な装柱について、営業設備の電車線支持物近傍の残留磁界を実測で検討した。その結果、電柱やビーム等の鋼材から 1m、下東端部などの磁性体端部からは 2m 程度以上の離隔において、概ね $10\mu\text{T}$ 以下となることが分かった。
- (5) 着磁現象を考慮した有限要素法による電磁界解析技

術を開発した。その解析結果は前記実測結果と良く一致した。

- (6) ドローンの飛行可能エリアの設定手法を提案し、代表的な装柱での事例を示した。

謝 辞

本件研究開発において多大なるご協力を賜った東日本旅客鉄道株式会社、西日本旅客鉄道株式会社の関係各位に御礼申し上げます。

文 献

- 1) 小型無人機に関する関係府省庁連絡会議 小型無人機に関する安全・安心な運航の確保等に向けたルールの骨子：<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/pdf/shiryuu2.pdf> (参照日：2020年12月10日)
- 2) 小型無人機に関する関係府省庁連絡会議 空の産業革命に向けたロードマップ：<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/kogatamujinki/pdf/siryuu7.pdf> (参照日：2020年12月10日)
- 3) スマートファシリティ技術委員会：需要設備における電力品質向上を目指したメンテナンスのスマート化動向，電気学会技術報告，第1470号，pp.16-18，2019
- 4) 宮島清富他：架空送電線近傍電磁界の無人航空機に及ぼす影響の基礎検討，電力中央研究所報告，H17010，p.11，2018
- 5) TDK 遠隔地医療に革命を起こすドローンの実力とは：https://www.jp.tdk.com/ja/featured_stories/entry_001.html (参照日：2020年12月10日)
- 6) 野波健蔵：ドローン技術の現状と課題およびビジネス最前線，情報管理，vol.59，no.11，pp.755-763，2017
- 7) みずほ情報総研 平成30年度新エネルギー等の保安規制高度化事業報告書：https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/files/310322-1.pdf (参照日：2020年12月10日)
- 8) 一般社団法人日本海事協会：船舶検査におけるドローン使用に係るガイドライン，2018
- 9) 国土交通省航空局 無人航空機（ドローン，ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン：<https://www.mlit.go.jp/common/001303818.pdf> (参照日：2020年12月10日)
- 10) 日本航空宇宙工業会：ISO/TC20/SC16（無人航空機システム）第11回国際Web会議報告：<https://www.sjac.or.jp/common/pdf/std/sc16/20210903.pdf> (参照日：2021年10月15日)
- 11) JIS W 0711，無人航空機システム設計管理基準，2021
- 12) 宮島清富他：直流送電線近傍電磁界の無人航空機に及ぼす影響の基礎検討，電気学会研究会資料，EMC-20-014，p14，2020
- 13) 森田岳他：電鉄用変電所が発生する電磁界の解析と低減対策，鉄道総研報告，Vol.22，No.12，pp35-40，2008
- 14) 上原勇希他：無人航空機が磁化された直流電気鉄道設備から発生する静磁界より受ける影響評価，令和2年電気学会全国大会，5-179，pp.290-291，2020
- 15) 穴見源八他：浮上式鉄道のガイドウェイ鋼材のヒステリシス損と磁気抗力，鉄道総研報告，Vol.6，No.5，pp21-29，1992
- 16) JIS C 2556，単板試験器による電磁鋼帯の磁気特性の測定方法，2015
- 17) 樋口靖展他：鉄道環境下における磁性体の地磁気への外乱の影響の検討，電気学会研究会，MAG-21-082，2021