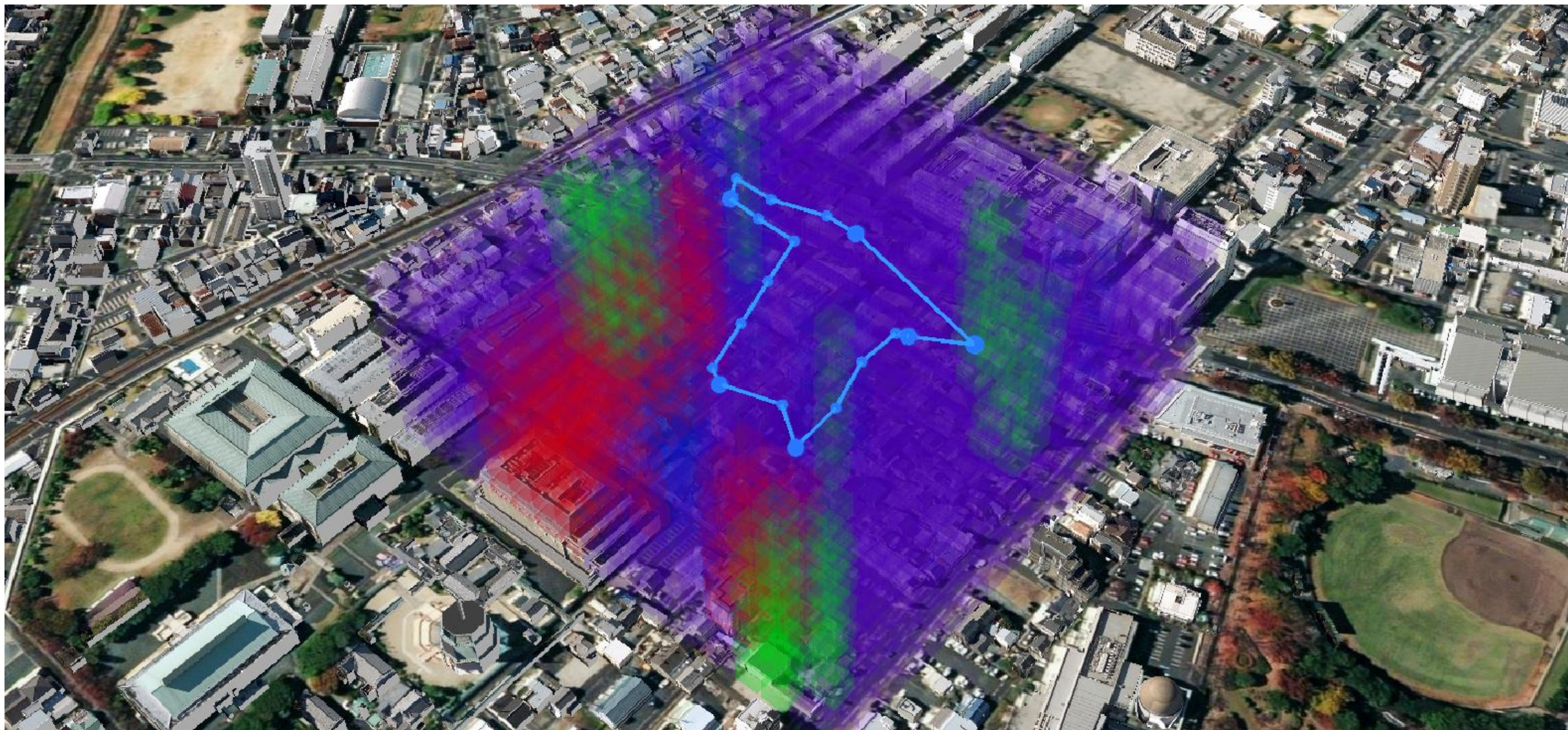


ドローン最適ルートシミュレーション 技術検証レポート

Technical Report for UAV Optimal Route Simulation System



PLATEAU
by MLIT



目次

I. 実証概要

1. 全体概要	3
2. 実施体制	5
3. 実証エリア	6
4. スケジュール	8

II. 実証技術の概要

1. 活用技術	10
2. TRJX	11
3. Altair Feko	13
4. Altair AcuSolve	14
5. FME Desktop	16
6. Cesium	17

III. 実証システム

1. 実証フロー	19
2. 想定事業機会	20
3. アーキテクチャ全体図	21
4. システム機能	23
5. アルゴリズム	30
6. データ	
① 活用データ	39
② データ処理	45
③ 出力データ	59
7. ユーザインタフェース	60
8. システムテスト結果	66

IV. 実証技術の検証

1. シミュレーション精度の検証	
① シミュレータ検証1	68
② リスクパラメータの評価	79
③ シミュレータ検証2	94
2. 実証システムの価値検証	
① 検証内容	101
② 検証結果	110

V. 成果と課題

1. 今年度の実証で得られた成果	
① 3D都市モデルによる技術面での優位性	113
② 3D都市モデルによるビジネス面での優位性	114
2. 今後の取り組みに向けた課題	115

用語集	116
-----	-----

I. 実証概要

II. 実証技術の概要

III. 実証システム

IV. 実証技術の検証

V. 成果と課題

I. 実証概要 > 1. 全体概要

全体概要 (1/2)

ユースケース名	ドローン最適ルートシミュレーション
実施場所	愛知県豊川市御油地区・諏訪町
目標・課題 ・創出価値	<ul style="list-style-type: none">市街地におけるドローンのレベル4飛行（有人地帯での補助者なし目視外飛行）において、最適なルートを選定するためのシミュレータの開発を目標とする市街地でのドローンのレベル4飛行には安全性の高いルートを設定する必要があるが、複雑な条件を考慮しなければならないことが課題<ul style="list-style-type: none">特に市街地では地上の用途が多様であり、グランドリスクの考慮要素が複雑となるビル等の影響による局地的な強い風、携帯電話基地局・Wi-Fiの影響による電波不良によるエアリスクが課題となる今回の実証実験では、3D都市モデルにおける建築物や土地利用に関するデータを活用し、空間上のリスク評価値を視覚化するシミュレータを開発することで、誰もが市街地でドローンを安全に飛行させることができる社会の実現を目指す<ul style="list-style-type: none">点検・警備・被害状況の把握など目視の代替ドローン物流による物流コストの低減エアモビリティなどの移動の自由化 等
ユースケース の概要	<ul style="list-style-type: none">3D都市モデルを活用してグラウンドリスク・風況・電波伝搬状況等の複合的なリスク要素を評価値として空間上にマッピングし、安全性の高いルートを生成するシミュレータを開発する<ul style="list-style-type: none">3D都市モデルの土地利用属性・建物利用属性からグラウンドリスクを数値化する3D都市モデルによる風況・電波伝搬シミュレーションから地域特性を踏まえたエアリスクを数値化するグラウンドリスク・エアリスクを考慮した安全な飛行ルートを設計することで、オペレーターの経験則に頼らない運航を実現するリスク値は地域・事業者・フライト特性等による変動が予想されるため、パラメーターの調整により変更を可能とする

I. 実証概要 > 1. 全体概要

全体概要 (2/2)

実証仮説	<ul style="list-style-type: none">ドローンの最適ルートシミュレーションを行うことで、リスクが低く安全性が高いルートの導出が可能か<ul style="list-style-type: none">これまでドローンの飛行ルートの安全性確保はオペレータの経験則によるルート設計に頼っていたが、3D都市モデルを使いグラウンドリスク及びエアリスクを考慮したドローンの最適ルートシミュレーションによる一般化・安全性の向上を狙うシミュレータによって導出されたルートに従った場合、ドローンの社会実装を進めるための安全な飛行が可能か
検証ポイント	<ul style="list-style-type: none">シミュレーション精度の検証<ul style="list-style-type: none">リスクが高いエリアを確実に回避されたルートが生成できているかリスク回避設定をした場合に最短ルートと比較しリスク値が低減されたルートが生成できているか実証システムの価値検証（実機飛行検証）<ul style="list-style-type: none">飛行中に風の影響で飛行ルートを逸脱している箇所がないか

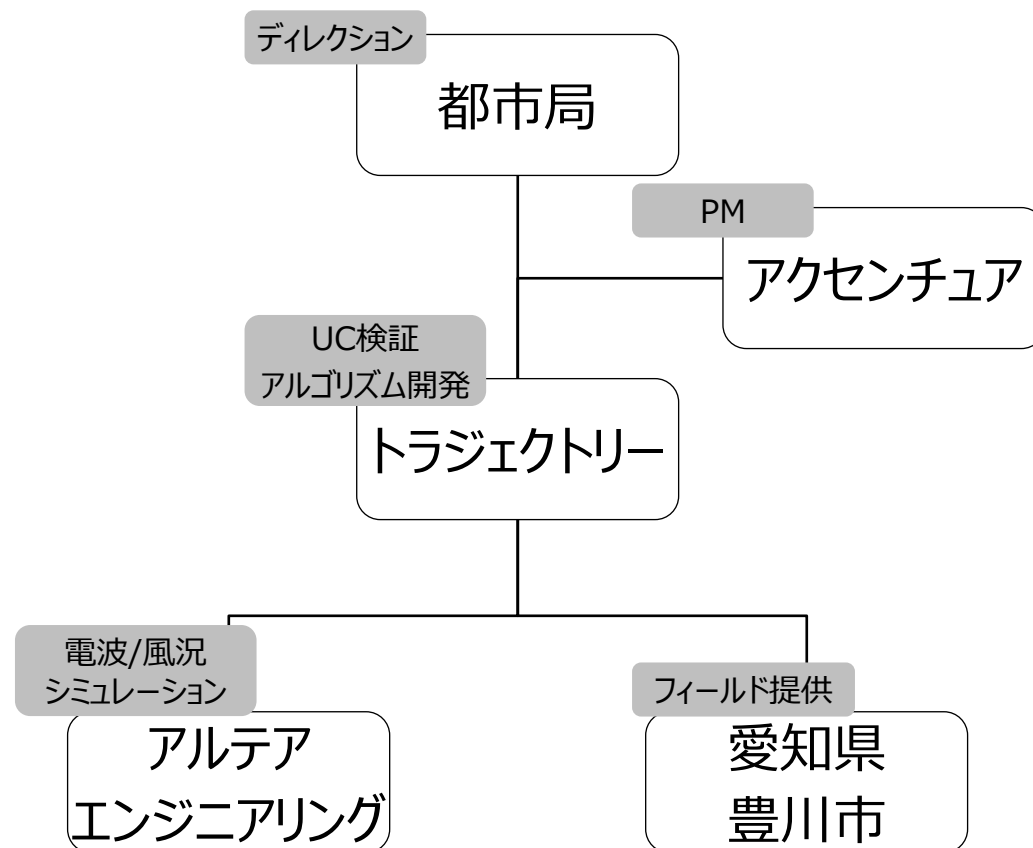
I. 実証概要 > 2. 実施体制

実施体制

各主体の役割

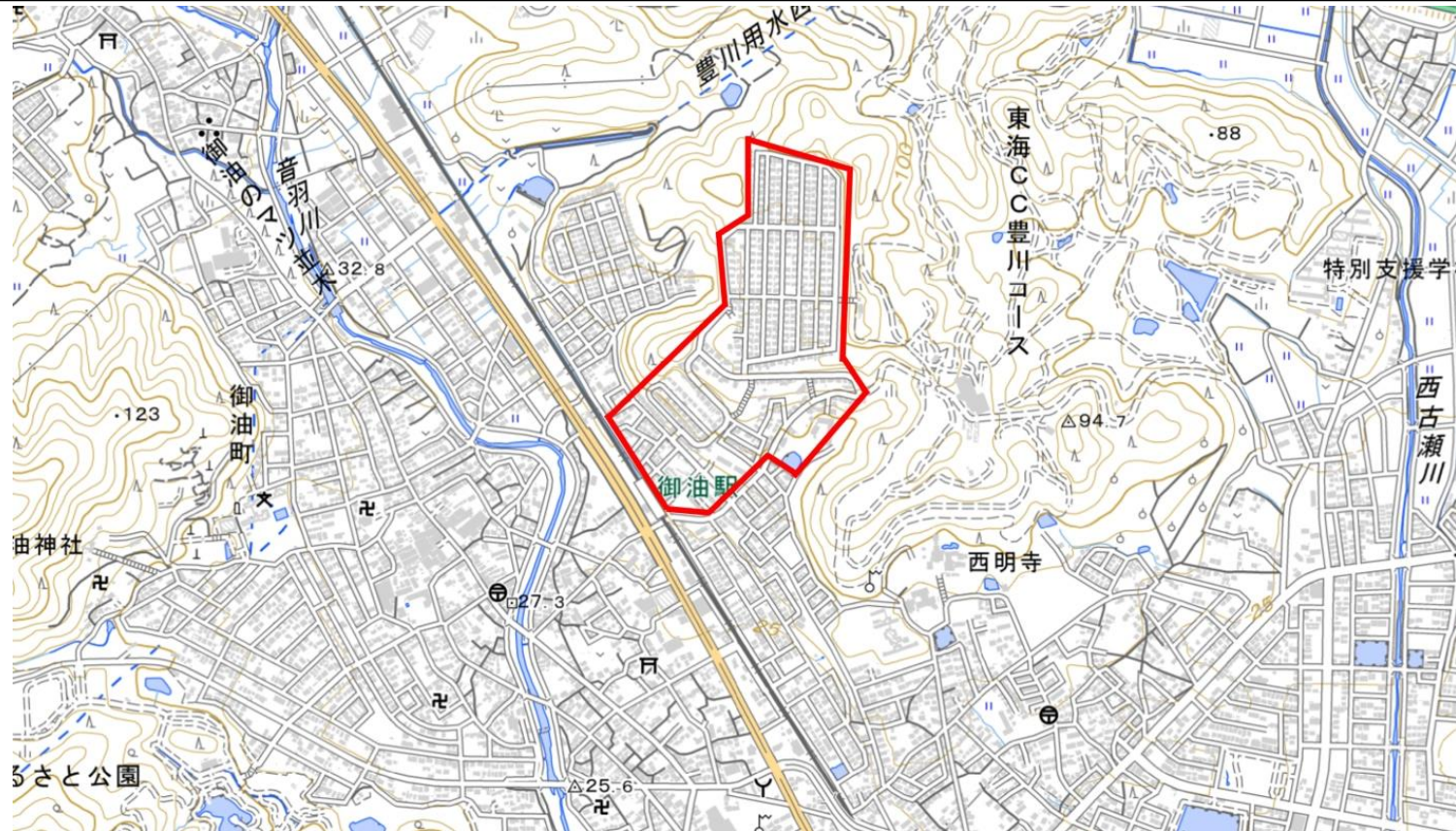
主体	役割
トラジェクトリー	<ul style="list-style-type: none"> ユースケース実証の実施 実証結果の確認・評価 リスク算出アルゴリズムの開発
アルテアエンジニアリング	<ul style="list-style-type: none"> 電波伝搬シミュレーションの実施 風況シミュレーションの実施
愛知県豊川市	<ul style="list-style-type: none"> 実証フィールドの提供 住民との調整
アクセンチュア	<ul style="list-style-type: none"> プロジェクトマネジメント

実施体制図



I. 実証概要 > 3. 実証エリア 実証エリア

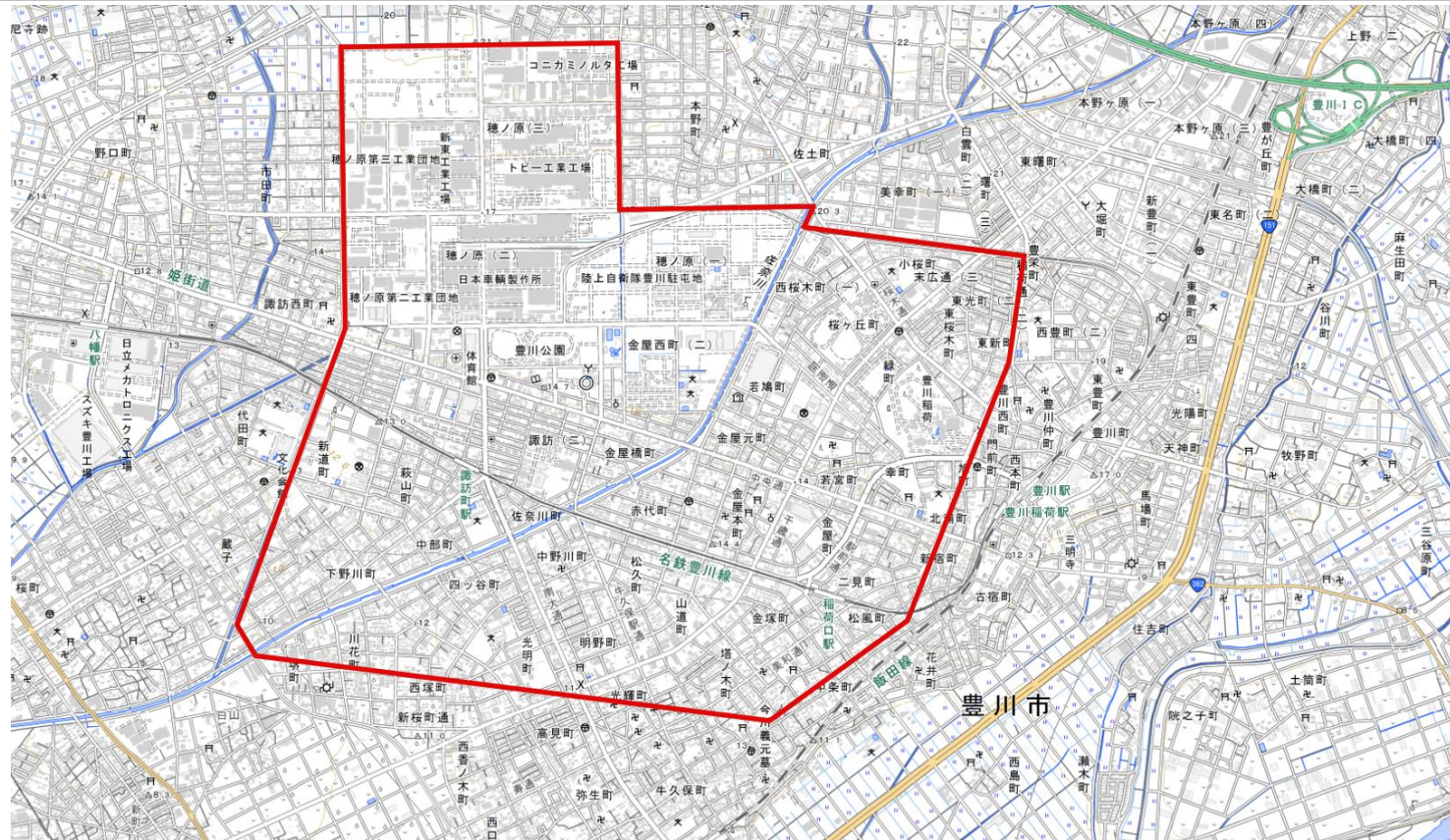
愛知県 豊川市 御油地域 0.22km²



I. 実証概要 > 3. 実証エリア

実証エリア

愛知県 豊川市 諏訪町 6.82km²



I. 実証概要

II. 実証技術の概要

III. 実証システム

IV. 実証技術の検証

V. 成果と課題

II. 実証技術の概要 > 1. 活用技術 活用技術

項目	内容
1. TRJX	<ul style="list-style-type: none">● 運航管理機能に加え、複数の無人航空機が同時に展開可能な安全な飛行ルートを自動生成可能なドローン運航管理システム
2. Altair Feko	<ul style="list-style-type: none">● 電磁波解析及び電波伝搬のシミュレーションが可能なソフトウェアパッケージで、様々なシナリオや多くの無線システムに対応し、あらゆる電磁波・電波の解析が可能
3. Altair AcuSolve	<ul style="list-style-type: none">● 大規模な計算の取扱いを含めたあらゆる流体解析が可能な流体解析ツールで、広範な物理モデルに対応可能
4. FME Desktop	<ul style="list-style-type: none">● データの変換や統合などの処理機能を持つソフトウェアであり XML、GIS、CADなどで使われる、様々な空間データのフォーマットに対応
5. Cesium	<ul style="list-style-type: none">● 3Dモデル化したデータや2D画像をクラウドサーバーにアップロードすることでWebブラウザ上で確認が可能

II. 実証技術の概要 > 2. TRJX

TRJXについて (1/2)

TRJXは、運航管理機能に加え、複数の無人航空機が同時に展開可能な安全な飛行ルートを自動生成可能なドローン運航管理システム

概要

TRJX 画面イメージ

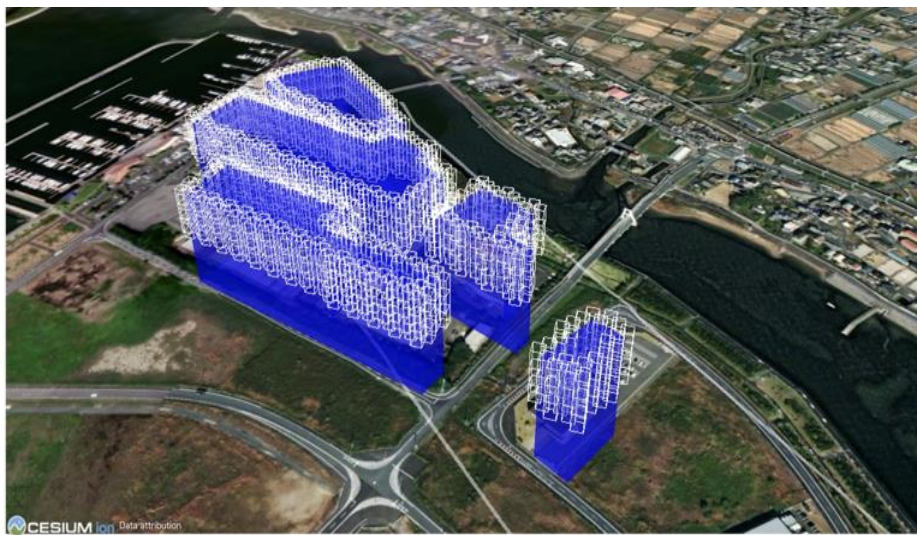
項目	詳細
名称	TRJX
概要	<ul style="list-style-type: none"> ● トラジェクトリー社が開発するドローンのAI管制システム
主な機能	<ul style="list-style-type: none"> ● 3Dマップによる管制機能 ● 航路設計機能 ● 3次元空間管理技術による機械学習による複数の無人航空機の安全な飛行可能ルートの自動生成機能 ● 飛行シミュレーション機能
本ユースケースで利用する機能	<ul style="list-style-type: none"> ● 上記全ての機能を利用



II. 実証技術の概要 > 2. TRJX TRJXについて (2/2)

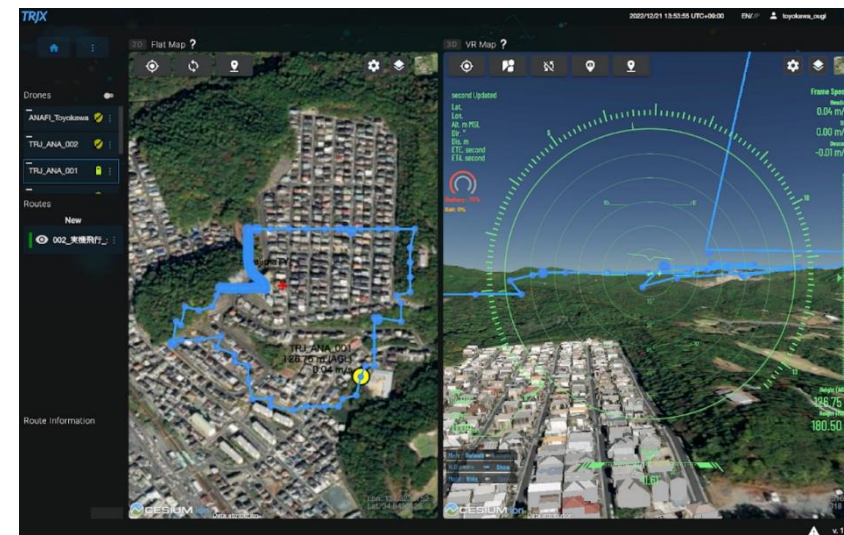
TRJXは3次元空間を管理する技術やドローン飛行シミュレーションにも対応

3次元空間管理技術



- 様々な無人航空機による広大な空間の効率的な利活用に向け、GIS情報（地理空間情報）を3次元空間に紐付けることでドローンの航路設計や管理に活用することが可能

ドローン飛行シミュレーション



- ドローンの機体に搭載されているフライトコントローラー（Pixhawk）と同一のプログラムによる飛行シミュレーターを具備し、実機と同等の動作確認をソフトウェア上で行うことが可能
- シミュレーターでは、飛行高度、飛行速度、上昇/下降率、バッテリーの減衰率、飛行時間、VR画面でのドローンのカメラ画角などを事前に確認することが可能

Ⅱ. 実証技術の概要 > 3. Altair Feko

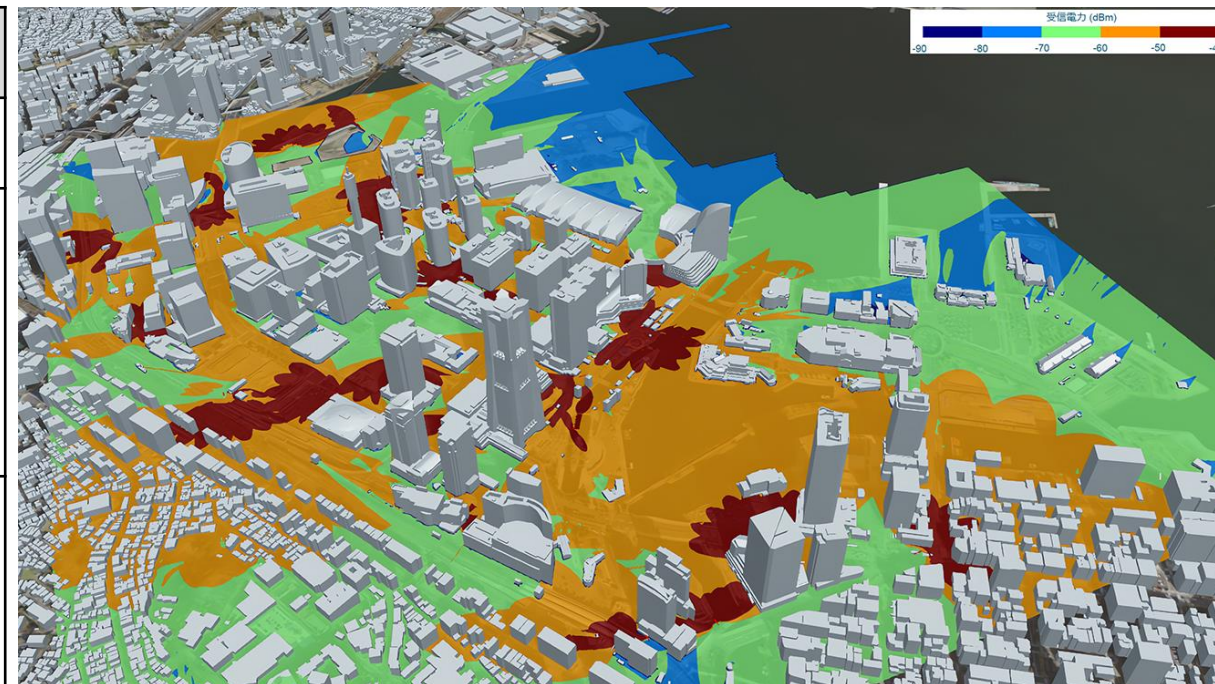
Altair Fekoについて

Altair Fekoは、電磁波解析及び電波伝搬のシミュレーションが可能なソフトウェアパッケージで、様々なシナリオや電波伝搬モデルを内包し、あらゆる電磁波・電波の解析が可能

概要

3D都市モデルによる基地局配置と電波伝搬のシミュレーション

項目	詳細
名称	Altair Feko
概要	<ul style="list-style-type: none"> 電磁波解析及び電波伝搬のシミュレーションが可能なソフトウェアパッケージ 放射・散乱問題、導波路問題、EMCなどを対象とする電磁波解析が可能
主な機能	<ul style="list-style-type: none"> 電波伝搬シミュレーション <ul style="list-style-type: none"> - 様々なシナリオと電波伝搬モデル 2D/3Dのデータ編集ツール
本ユースケースで利用する機能	<ul style="list-style-type: none"> 電波伝搬シミュレーション (LTE)



Ⅱ. 実証技術の概要 > 4. Altair AcuSolve Altair AcuSolveについて

Altair AcuSolveは、大規模な計算の取扱いを含めたあらゆる流体解析が可能な流体解析（CFD : Computational Fluid Dynamics）ツールで、広範な物理モデルに対応可能

概要

都市データを使った風況シミュレーションのイメージ

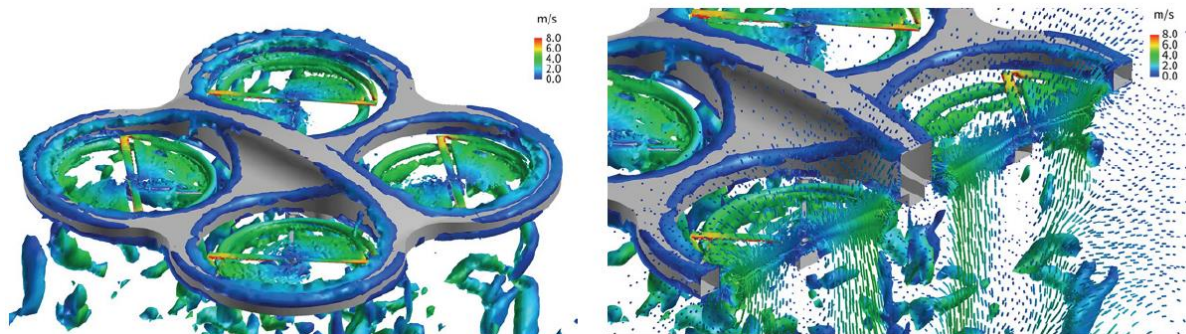
項目	詳細
名称	Altair AcuSolve
概要	<ul style="list-style-type: none"> 流れ、熱伝達、乱流、混相流を含む熱流体解析が可能な流体シミュレータ
主な機能	<ul style="list-style-type: none"> FEM（有限要素法）ベースの汎用熱流体解析ソルバー 各種乱流モデルを利用可能 領域分割法を駆使した高効率並列化計算機能
本ユースケースで利用する機能	<ul style="list-style-type: none"> 風況シミュレーション



Ⅱ. 実証技術の概要 > 4. Altair AcuSolve Altair AcuSolve活用事例

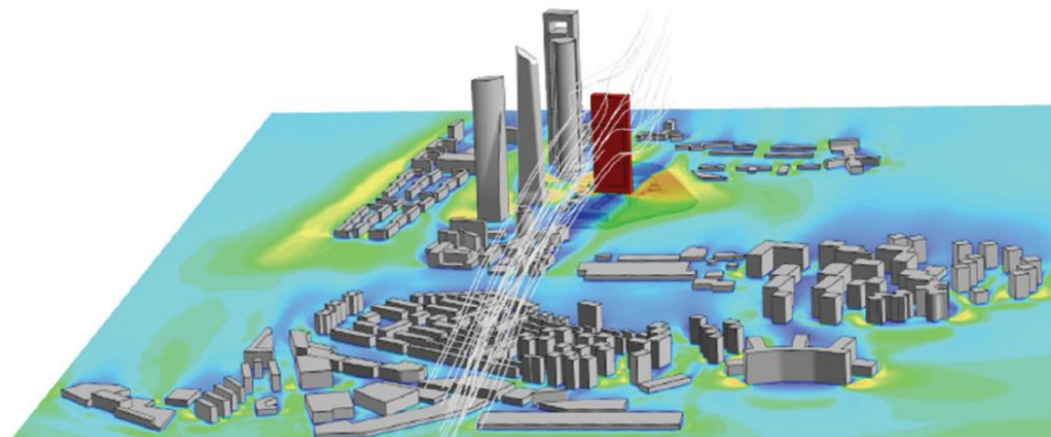
流体シミュレーションはドローン業界においても機体設計及び飛行航路設計への活用が可能

事例1：流体シミュレーションによるドローン周りの流れの分析



- ドローン周りの様々な流れを計算し、安定して飛行できるプロペラ形状やフレーム形状を検討可能

事例2：飛行航路の最適化



- 都市のデジタルツイン上で様々な風向による流体シミュレーションを実施することで、ドローンの挙動が安定し乱れの少ない飛行航路を検討可能

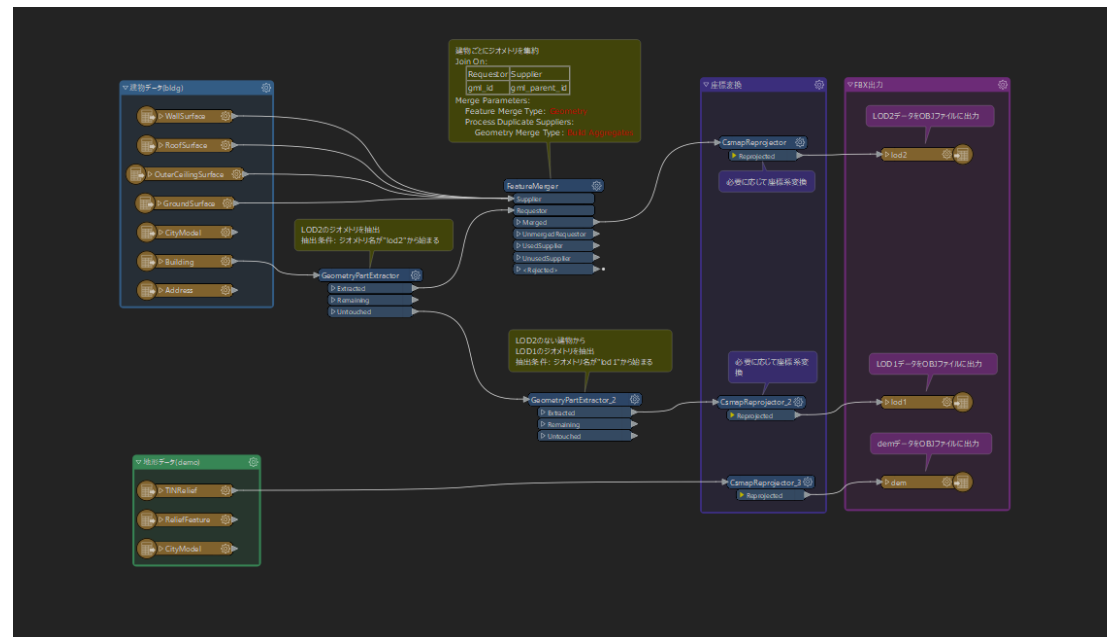
II. 実証技術の概要 > 5. FME Desktop FME Desktopについて

FME Desktopは、データの変換や統合などの処理機能を持つソフトウェアであり、XML、GIS、CADなどで使われる様々な空間データのフォーマットに対応

概要

項目	詳細
名称	FME Desktop
概要	<ul style="list-style-type: none"> データの変換や統合などの処理機能を持つ XML、GIS、CAD、CityGML等の形式のデータの加工が可能
主な機能	<ul style="list-style-type: none"> 幾何演算を実行する 種類の異なる複数のデータを統合する 空間情報（形状）とデータベース属性を結合する 様々な条件から属性情報を作成する 変換された図形の大きさや形状を調整する
本ユースケースで利用する機能	<ul style="list-style-type: none"> 3D Tiles化処理

3D都市モデルを3D Tiles形式に変換するイメージ



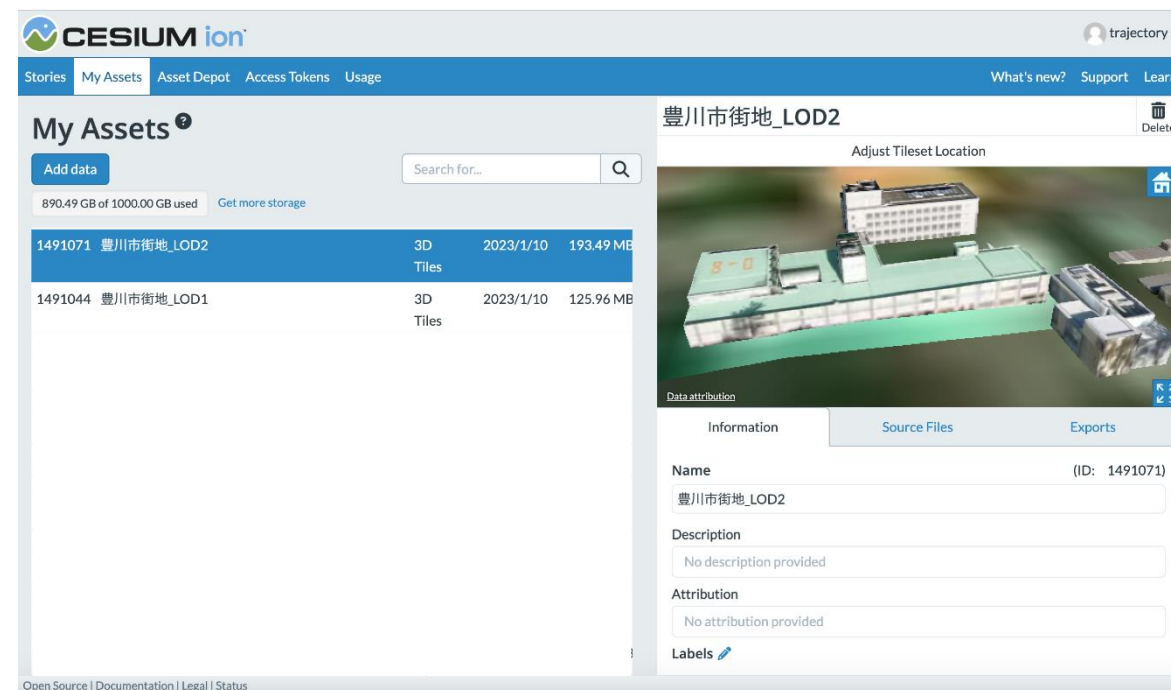
II. 実証技術の概要 > 6. Cesium Cesiumについて

CesiumはCesium GS, Inc.が提供する3D地図プラットフォームで、3Dモデル化したデータや2D画像をクラウドサーバーにアップロードすることでWebブラウザ上で確認が可能

概要

項目	詳細
名称	Cesium
概要	<ul style="list-style-type: none">3Dモデル化したデータや2D画像をクラウドサーバーにアップロードすることで、Webブラウザ上で確認が可能
主な機能	<ul style="list-style-type: none">3Dモデル/2D画像のクラウド保管3Dモデルの表示2D画像の表示
本ユースケースで利用する機能	<ul style="list-style-type: none">3D都市モデル表示

イメージ



I. 実証概要

II. 実証技術の概要

III. 実証システム

IV. 実証技術の検証

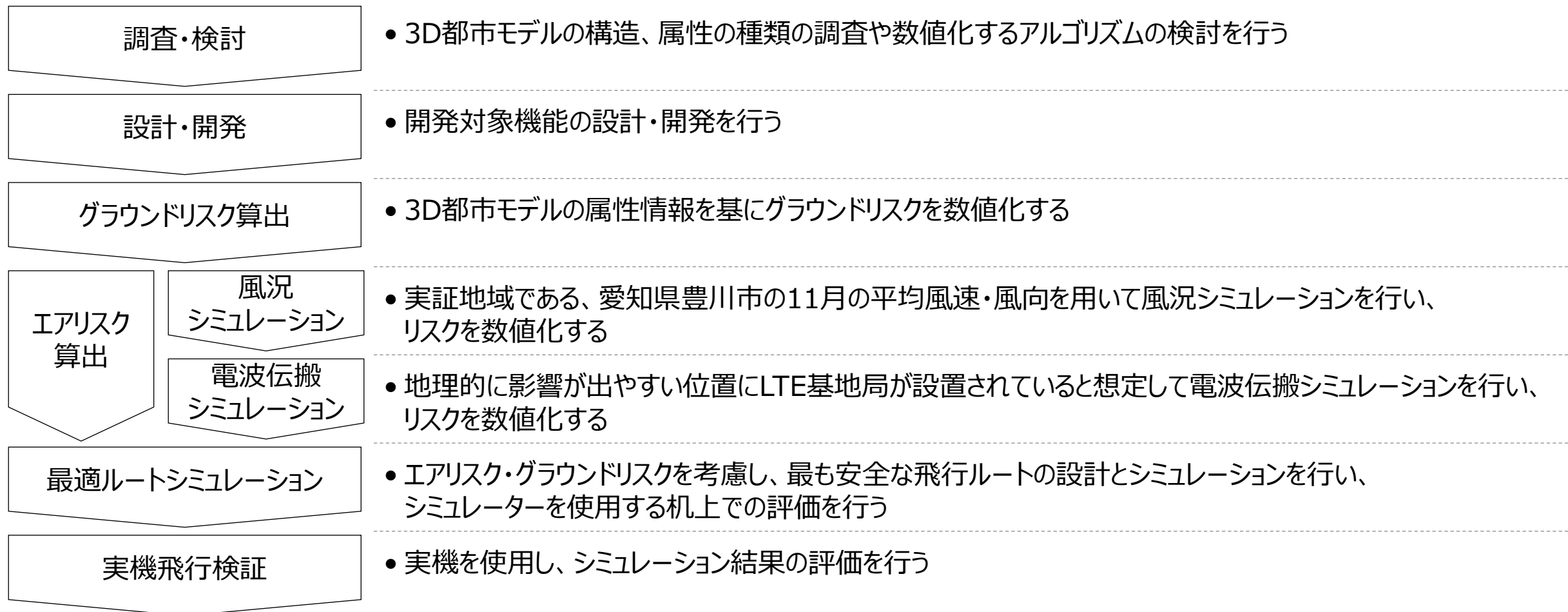
V. 成果と課題



Ⅲ. 実証システム > 1. 実証フロー

実証フロー

実証実験ではシミュレーションを行い、シミュレーターによる机上評価と実機を使用した評価の2つによって検証する



Ⅲ. 実証システム > 2. 想定事業機会

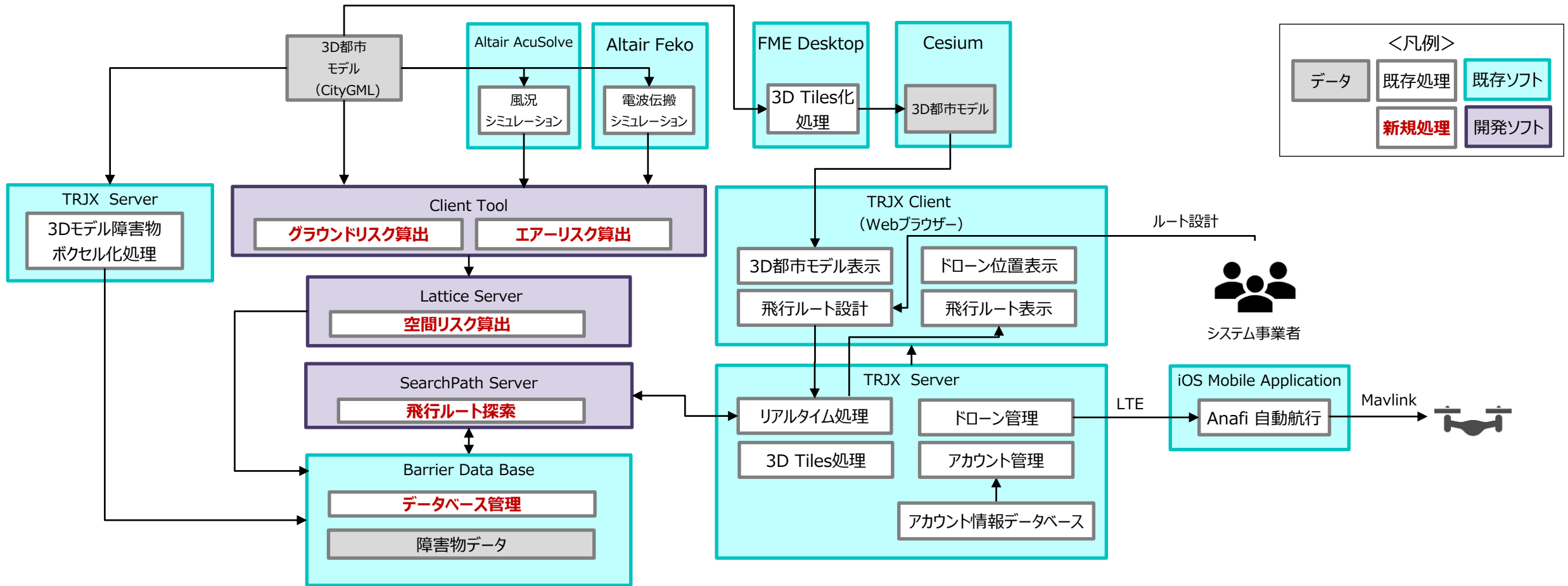
想定事業機会

国や自治体、インフラの点検・監視、測量、物流などの民間事業者が想定利用者となり、ドローン活用の際に最適飛行ルートを設計するサービスの提供が事業機会として見込まれる

項目	内容
利用事業者	<ul style="list-style-type: none">● 国、自治体● 民間事業者<ul style="list-style-type: none">- インフラの点検・監視、測量、物流等
提供価値	<ul style="list-style-type: none">● 容易なドローン飛行ルート決定を支援<ul style="list-style-type: none">- 経験が浅いドローンユーザーでも、飛行可否・飛行ルート決定判断を容易に可能とする● 多様なユースケースに対応した飛行ルート設計支援<ul style="list-style-type: none">- 用途や目的に応じたパラメータを設定することで、多様なユースケースに対応する飛行ルート設計を可能とする
サービス仮説	<ul style="list-style-type: none">● ドローンの最適飛行ルート設計サービス<ul style="list-style-type: none">- 電波伝搬・風況のシミュレーションにより数値化した空間のリスク（エアリスク）を提供する- 地図・建物情報を基に数値化したグラウンドリスクを提供する- エアリスク・グラウンドリスクを考慮した、最適なドローン飛行ルートの設計・シミュレーションを提供する

Ⅲ. 実証システム > 3. アーキテクチャ全体図

システムアーキテクチャ全体図



*オープンデータ化された後はCityGMLをダウンロードし3D Tiles処理を行って表示する

Ⅲ. 実証システム > 4. システム機能 システム機能一覧 (1/2)

<凡例> **赤太字**：新規開発要素

ソフトウェア名	機能名	説明
TRJX Client	3D都市モデル表示	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデルを表示する
	ドローン位置表示	<ul style="list-style-type: none"> ドローンの位置を表示する
	飛行ルート設計	<ul style="list-style-type: none"> マップ上でウェイポイントを入力し飛行ルートの設計を行う
	飛行ルート表示	<ul style="list-style-type: none"> システムが自動的に生成した飛行ルートを表示する
TRJX Server	3D Tiles処理	<ul style="list-style-type: none"> 3D Tiles形式の3D都市モデルをCesiumJSを使い、TRJX Clientに3Dマップを提供する
	ドローン管理	<ul style="list-style-type: none"> 飛行ルートをMAVLINKでドローンへ伝える、ドローンからの位置情報を受信する
	リアルタイム処理	<ul style="list-style-type: none"> ユーザーが設定したウェイポイント（経由点）を受け取り、ルートの設計のリクエストや処理の振り分け、飛行制御を行う
	アカウント管理	<ul style="list-style-type: none"> ユーザーのアカウント管理を行う
	3Dモデル障害物ボクセル化処理	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデルから構造物が存在し、飛行ルート探索時に障害物となるボクセルを抽出する
Client Tool	エアリスク算出	<ul style="list-style-type: none"> 風況や電波強度のデータを独自バイナリ形式のボクセル毎のエアリスク値に変換する
	グラウンドリスク算出	<ul style="list-style-type: none"> CityGMLファイルの構文を解析し、タグに応じた独自バイナリ形式のボクセル毎のグラウンドリスク値に変換する

Ⅲ. 実証システム > 4. システム機能 システム機能一覧 (2/2)

<凡例> 赤太字：新規開発要素

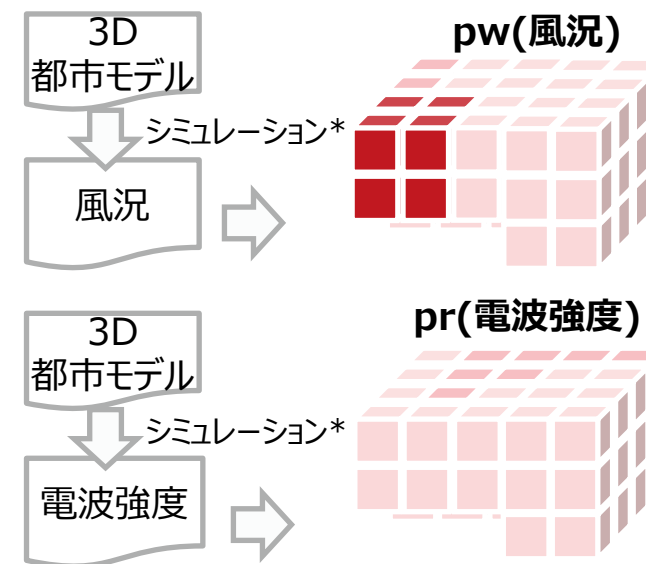
ソフトウェア名	機能名	説明
Lattice Server	空間リスク算出	<ul style="list-style-type: none">ボクセル毎のグラウンドリスク値とエアリスク値を合わせて独自バイナリ形式の空間リスク値に変換する
SearchPath Server	飛行ルート探索	<ul style="list-style-type: none">空間リスク情報を考慮したルート探索を行う
Alteir AcuSolve	風況シミュレーション	<ul style="list-style-type: none">風況の影響によるリスク値を算出する
Alteir Feko	電波伝搬シミュレーション	<ul style="list-style-type: none">電波伝搬状況の影響によるリスク値を算出する
Barrier Data Base	データベース管理	<ul style="list-style-type: none">空間リスク情報の管理を行う
FME Desktop	3D Tiles化処理	<ul style="list-style-type: none">CityGML形式の3D都市モデルを3D Tiles形式に変換する
TRJX Transponder modeA	Anafi 自動航行	<ul style="list-style-type: none">ドローンへの飛行ルートの送信、自動航行の開始を行う

Ⅲ. 実証システム > 4. システム機能 エアリスク算出

機能仕様

項目	詳細
機能名	<ul style="list-style-type: none"> エアリスク値算出機能
機能概要	<ul style="list-style-type: none"> 風況や電波強度のデータを独自バイナリ形式のボクセル毎のエアリスク値に変換する
入力データ仕様	<ul style="list-style-type: none"> 風況データファイル 電波強度データファイル
出力データ仕様	<ul style="list-style-type: none"> 以下の情報を含む独自バイナリ形式 <ul style="list-style-type: none"> - ボクセル毎のエアリスク情報
利用するアルゴリズム	<ul style="list-style-type: none"> エアリスクに対する重みづけ計算

機能イメージ



* シミュレーション手法・条件は「6-②データ処理」にて記載

Ⅲ. 実証システム > 4. システム機能 グランドリスク算出

機能仕様

機能イメージ

項目	詳細
機能名	<ul style="list-style-type: none">グラウンドリスク算出機能
機能概要	<ul style="list-style-type: none">CityGMLファイルの構文を解析し、タグに応じた独自バイナリ形式のボクセル毎のグラウンドリスクに変換するタグ毎の数値はconfigとして定義する
入力データ仕様	<ul style="list-style-type: none">3D都市モデル (CityGML)CityGMLタグ-リスク値マップ
出力データ仕様	<ul style="list-style-type: none">以下の情報を含む独自バイナリ形式<ul style="list-style-type: none">- ボクセル毎のグラウンドリスク情報
利用するアルゴリズム	<ul style="list-style-type: none">グラウンドリスクに対する重みづけ計算

Bldg:Buildingタグ配下のbldg:lodRoofEdgeに対してリスク値100（設定値）を設定する等の条件を与えて、タグに応じたリスク値に変換する

```
<core:cityObjectMember>
<bldg:Building gml:id="bldg_14a54675-b63e-4002-a549-82d97e2e78b0">
  <core:creationDate>2023-03-22</core:creationDate>
  <bldg:measuredHeight uom="m">6.8</bldg:measuredHeight>
  <bldg:lod0RoofEdge>
    <gml:MultiSurface>
      <gml:surfaceMember>
        <gml:Polygon>
          <gml:exterior>
            <gml:LinearRing>
              <gml:posList>34.84355491484103 137.3146983221986 34.935
                34.84348580650913 137.3147424836921 (省略)
```

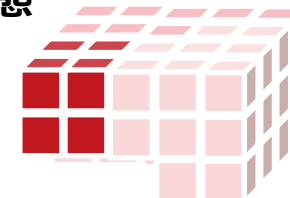
Ⅲ. 実証システム > 4. システム機能 空間リスク算出

機能仕様

機能イメージ

項目	詳細
機能名	<ul style="list-style-type: none"> 空間リスク算出機能
機能概要	<ul style="list-style-type: none"> ボクセル毎のグラウンドリスク情報とエアリスク情報を合わせて独自バイナリ形式の空間リスク値に変換する 出力した空間リスク情報をデータベースに登録する
入力データ仕様	<ul style="list-style-type: none"> ボクセル毎のグラウンドリスク情報 ボクセル毎のエアリスク情報
出力データ仕様	<ul style="list-style-type: none"> 以下の情報を含む独自バイナリ形式 <ul style="list-style-type: none"> 空間リスク情報（出力先：データベース）
利用するアルゴリズム	<ul style="list-style-type: none"> グラウンドリスクに対する重みづけ計算

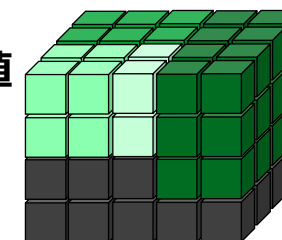
空間状態



建造物情報



空間
リスク値

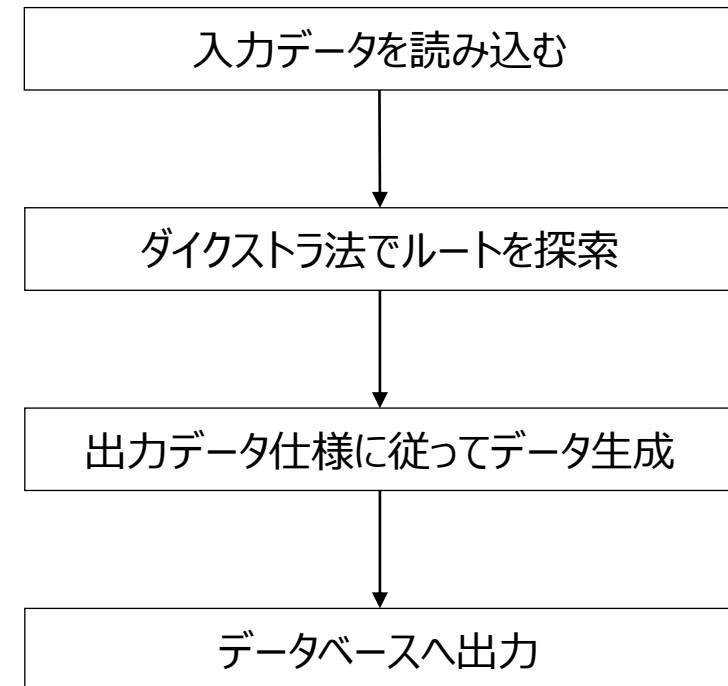


Ⅲ. 実証システム > 4. システム機能 飛行ルート探索

機能仕様

項目	詳細
機能名	<ul style="list-style-type: none">飛行ルート探索機能
機能概要	<ul style="list-style-type: none">空間リスク情報をデータベースに蓄積するTRJX Clientから入力されたウェイポイント、空間リスク情報、障害物を考慮しルート探索を行う出力した飛行ルートをデータベースに登録する
入力データ仕様	<ul style="list-style-type: none">空間リスク情報（独自バイナリ形式）障害物データ経由位置
出力データ仕様	<ul style="list-style-type: none">飛行ルート情報（出力先：データベース）
利用するアルゴリズム	<ul style="list-style-type: none">リスクコスト率の計算

機能イメージ



Ⅲ. 実証システム > 4. システム機能 データベース管理

機能仕様

項目	詳細
機能名	<ul style="list-style-type: none"> データベース管理機能
機能概要	<ul style="list-style-type: none"> 空間リスク情報を格納する
データ仕様	<ul style="list-style-type: none"> 以下の情報を含む独自バイナリ形式 <ul style="list-style-type: none"> 空間リスク情報 (出力先：データベース)

データベースのイメージ

cell_tables						
quadkey	altkey	status	cells	edges	create_at	
133002001310333022330	100000	1	¥x0a4908c8bf...	¥x	2022-12-02 09:56:05.260196+00	
133002001310120310203	100001	1	¥x0a4608b0c6...	¥x	2022-12-17 01:25:28.806728+00	
133002001132322031333	11110	1	¥x0af10108b0...	¥x	2022-12-15 17:53:32.676092+00	
133002001310321130232	100010	1	¥x0a4608b0c6...	¥x	2022-12-16 12:50:17.960501+00	
133002001132322122100	11110	1	¥x0af10108b0...	¥x	2022-12-15 17:53:32.525317+00	
model_id_tables						
model_id	quadkey	altkey	status	x	y	z
1670808404773086000	133002001310333102210	100101	1	1842658	821708	1061
1670808404773086000	133002001310333031113	100101	1	1842655	821713	1061
1670808404773086000	133002001310333120101	100101	1	1842661	821712	1061
1670808404773086000	133002001310333102321	100101	1	1842661	821710	1061
1670808404773086000	133002001310333120013	100101	1	1842659	821713	1061
1670808404773086000	133002001310333102030	100101	1	1842658	821706	1061
1670808404773086000	133002001310333102231	100101	1	1842659	821710	1061
1670808404773086000	133002001310333102202	100101	1	1842656	821709	1061
1670808404773086000	133002001310333102032	100101	1	1842658	821707	1061
1670808404773086000	133002001310333102302	100101	1	1842660	821709	1061



Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム

アルゴリズムの概要

距離・グラウンドリスク・エアリスクをコストとしたダイクストラ法を3次元に拡張したアルゴリズムによって、空間リスク値に最適化したルートシミュレーションを行う

開発するルート探索アルゴリズムの特徴

- **開発するアルゴリズム**
 - ダイクストラ法を改良しボクセルのリスク値と移動コストを加算し、低コストのルート探索を行う
- **アルゴリズムの特徴**
 - 隣接するボクセル（≒ノード）のリスク値、ルートの距離、障害物に衝突しないか等の判定を行いながら目的地までのルートを算出
 - 全てのルートパターンの網羅は行わないが、限りなく全てに近いルートパターンの結果から最適値に近い値が得られる
 - グラウンドリスク、エアリスクのリスク値パラメータ（重みづけ）によるカスタマイズ
 - 民間事業、災害救助といった特定の用途に有益な飛行ルートや、機体や事業者の特性を踏まえた仕様への拡張が可能
- **本実証での利用方法**
 - 多くのユースケースでリスクの低い飛行ルート1本を出力

ダイクストラ法の概要

- **ダイクストラ法とは各ノードへの最小コストの経路を、始点の周辺から1個所ずつ確定し、徐々に範囲を広げていく方法：**
 1. 始点のコストを0とおく *最短経路を求めるケースでは、コスト＝距離
 2. 各地点までのコストを未確定とし、無限大とおく
 3. 未確定の地点の中から、コストが最も小さい地点を選び、その距離を「その地点までの最小コスト」として確定する
 4. 上記で確定した地点から「直接つながっている」かつ「未確定である」地点に対して、上記で確定した場所を経由した場合のコストを計算し、今までのコストよりも小さければアップデートを行う
 5. 上記3・4を全ての地点が確定するまで繰り返し実行する

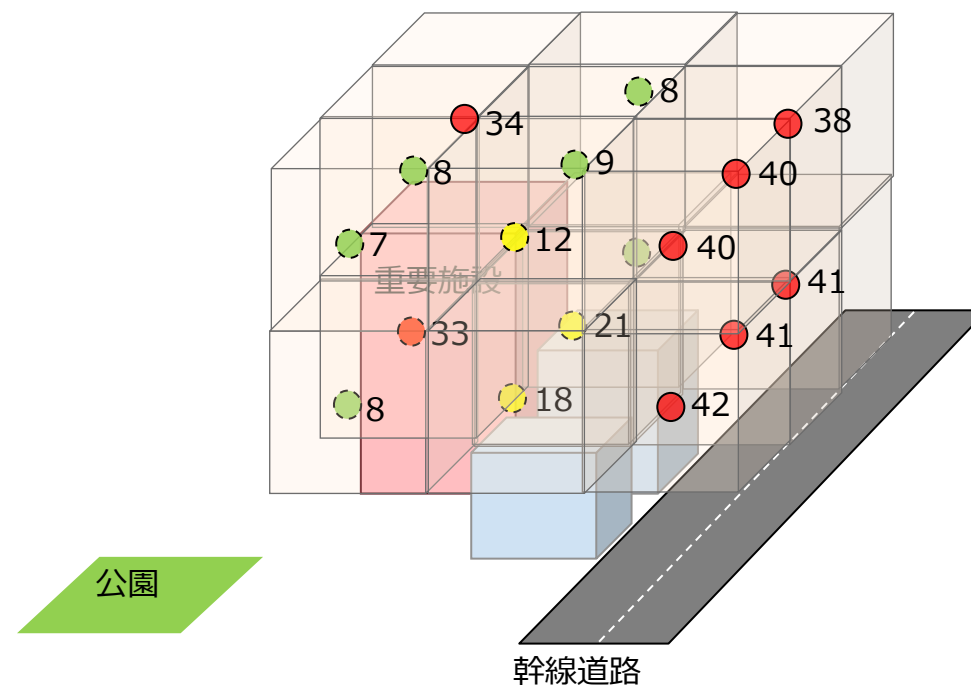
Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム ボクセル

ルート探索を行う際、距離コストだけでなくボクセルごとに設定されたリスク値も考慮し、最小コストのルートが選択される

ボクセルの仕様

- ボクセルの形状とサイズ
 - 1辺5mの立方体
 - 辺の長さは、対象エリアにおける飛行ルートの算出時間を1分程度で完了するために必要な設定
- ボクセルの仕様
 - 空間を埋め尽くし、それぞれにID、リスク値を持つ
 - ルートシミュレーションによって自動生成されるウェイポイントは立方体の中心のみ

ボクセルのイメージ



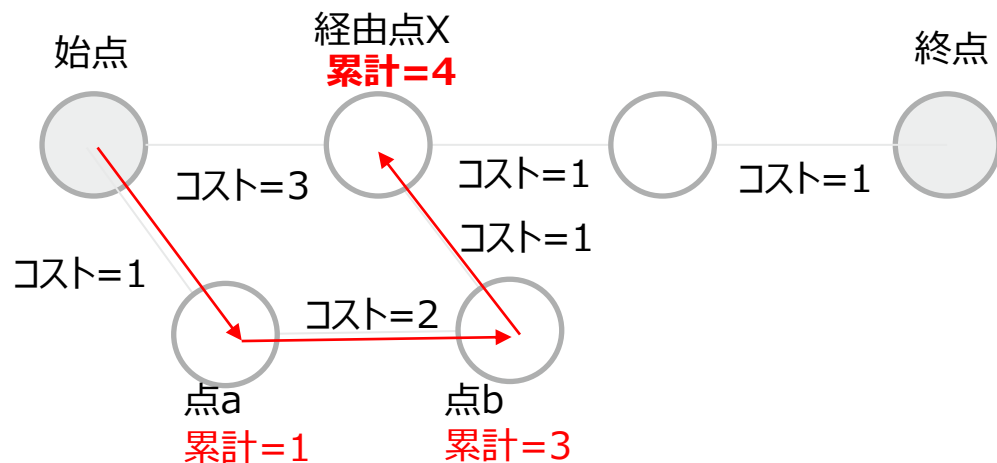
*数値はリスク値の記載例、色は資料上のイメージ

Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム

ダイクストラ法による経路選択イメージ

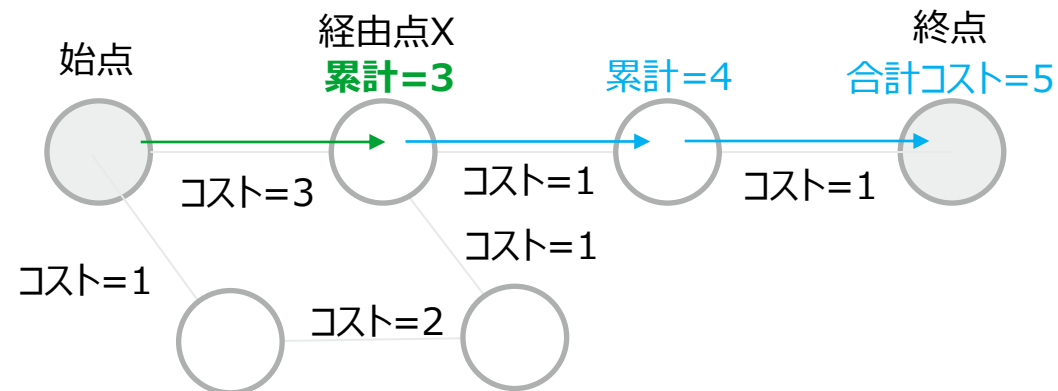
ダイクストラ法は、始点からあるノードまでのコストを算出し累積コストが低いルートを選択。それを繰り返すことで終点までのコストが最小値となるルートを導き出す

パターン①



- 始点からみてコストが低い点aのルートを探査
- 点aと直接つながる点bへ、点bと直接つながる経路点Xへと進む
- 経路点Xでの累積コストは4
- パターン②よりも経路点X時点でのコストが大きい
- したがって、**パターン①ルートは破棄**

パターン②



- 経路点Xでの累積コストは3
- パターン①よりも経路点X時点でのコストが小さい
- したがって、**パターン②のルート探索を続ける**

Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム

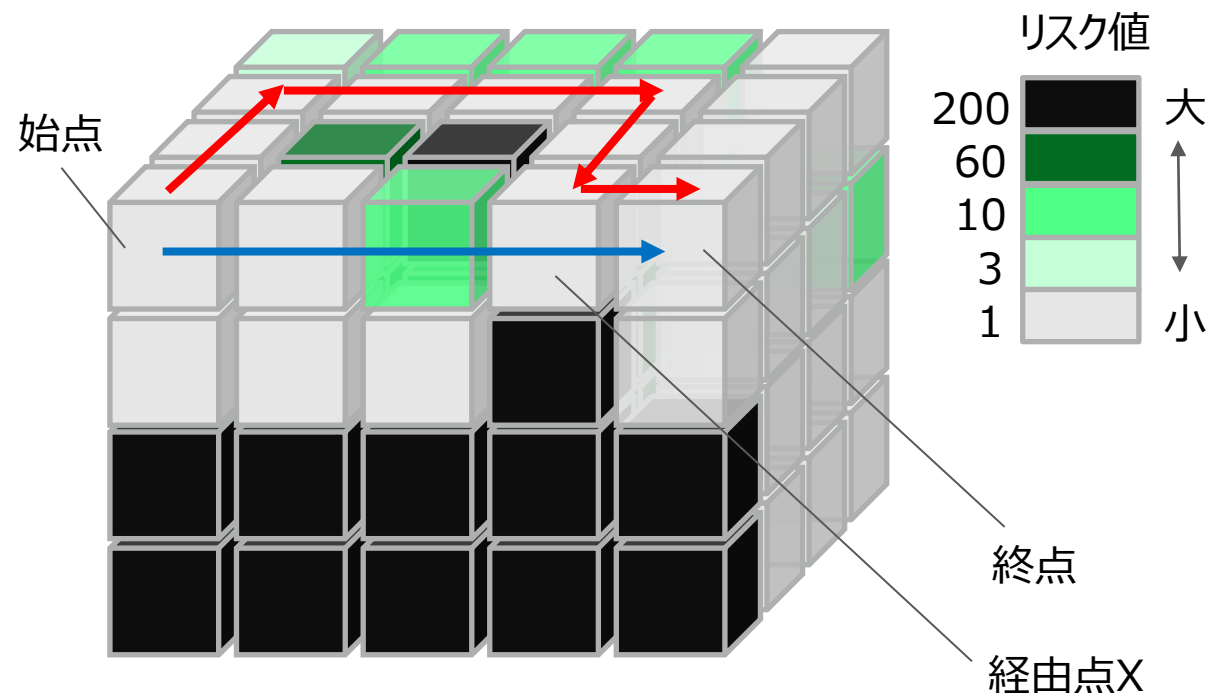
リスク値によるルート探索フロー

ルート探索を行う際、距離コストだけでなくボクセルごとに設定されたリスク値も考慮し、最小コストのルートが選択される

リスク値を使ったルート設計の例

- ルート設計の前提
 - 拡張したダイクストラ法により距離とリスク値によるコストが最小となるルートを選択
 - ボクセル間の距離は1とする
- ルート設計の流れ
 - → は途中にリスク値=10のボクセルを経由するため、コストが → よりも高い
 - → のリスク値の累計=14、距離の累計=4、コスト=18
 - → のリスク値の累計=9、距離の累計=8、コスト=17
 - コストはボクセルごとに逐次評価されるため、経路点Xにおいて、コストの多少により探索は打ち切られ、探索されたルートに順位付けは行われない
 - → のリスク値の累計=13、距離の累計=3、コスト=6
 - → のリスク値の累計=8、距離の累計=7、コスト=15

ルート設計イメージ



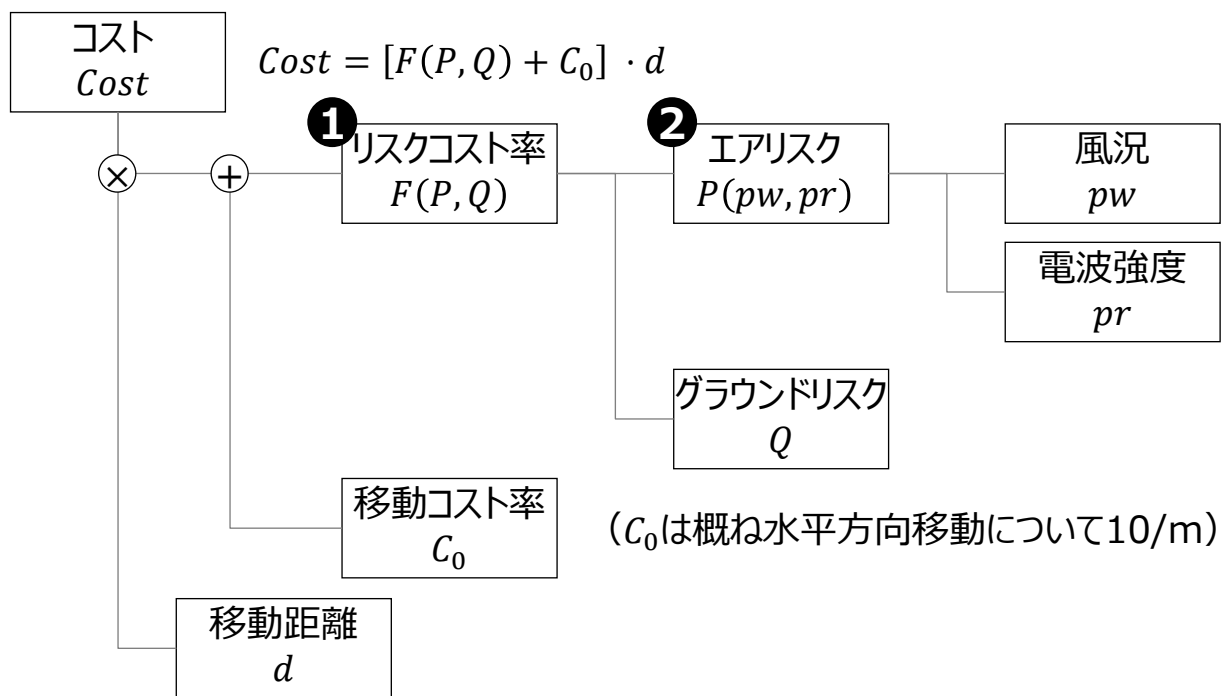
Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム リスク値によるルート探索フローの詳細 (1/2)

エアリスク（風況・電波強度）・グラウンドリスクに対する重みづけのパラメータが、最適ルートに対してどのような影響を与えるか検証を行う

ルート探索アルゴリズムに投入するコストの算出関数

本実証で検証するパラメータ

3次元に拡張したダイクストラ法により、下記「コスト」の累計の最小値の探索を実施



$$F = \alpha_p \beta_w \cdot pw + \alpha_p \beta_r \cdot pr + \alpha_q \cdot Q$$

①
リスクコスト率
 $F(P, Q)$

$$F = \alpha_p \cdot P + \alpha_q \cdot Q$$

α_p : エアリスクの重みづけ

α_q : グラウンドリスクの重みづけ

②
エアリスク
 $P(pw, pr)$

$$P = \beta_w \cdot pw + \beta_r \cdot pr$$

β_w : 風況の重みづけ

β_r : 電波強度の重みづけ

Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム

リスク値によるルート探索フローの詳細 (2/2)

ボクセル毎のリスクコスト率算出の例

パラメータの設定例

リスクコスト率
 $F(P, Q)$

$$F = \alpha_p \cdot P + \alpha_q \cdot Q$$

$$\alpha_p = 1, \alpha_q = 1$$

α_p : エアリスクの重みづけ

α_q : グラウンドリスクの重みづけ

エアリスク
 $P(pw, pr)$

$$P = \beta_w \cdot pw + \beta_r \cdot pr$$

$$\beta_w = 10, \beta_r = 100$$

β_w : 風況の重みづけ

β_r : 電波強度の重みづけ

リスクコスト率の計算例

	属性	リスク値	重みづけ
グラウンドリスク	共同住宅	20	1
風況	—	8	10
電波強度	—	2	100

$$P = 10 \cdot 8 + 100 \cdot 2$$

$$P = 280$$

$$F = 1 \cdot 280 + 1 \cdot 20$$

$$F = 300$$

Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム

各リスクの設定 | 空間リスク値の設定

ボクセルごとの空間リスク値は、エアリスクとグラウンドリスクにそれぞれ重みづけパラメータをかけたエアリスク値とグラウンドリスク値の合計で算出される

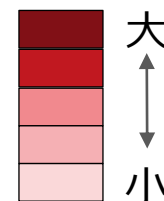
空間リスクの設定詳細

空間リスクの設定イメージ

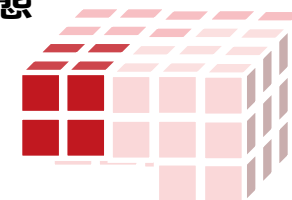
エアリスクを
リスク値に変換

- ボクセル単位で算出されたエアリスクにパラメータ α_p を乗じることでエアリスク値を算出する

エアリスク値



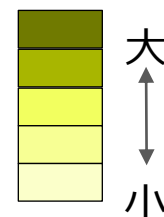
空間状態



グラウンドリスクを
リスク値に変換

- ボクセル単位で算出されたグラウンドリスクにパラメータ α_q を乗じることでグラウンドリスク値を算出する

グラウンドリスク値



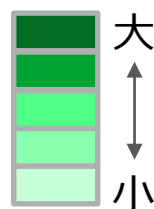
建造物情報



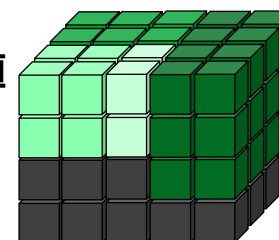
空間リスク値を算出

- ボクセル単位で、エアリスク値をグラウンドリスク値から空間リスク値（リスクコスト率）を算出する

リスク値



空間
リスク値



Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム 各リスクの設定 | グラウンドリスク

3D都市モデルの属性データからグラウンドリスク値を設定し、各地物の上空に一律に適用する

グラウンドリスクの設定詳細

- 3D都市モデルの地物ごとに含まれる属性情報（土地利用概況、建物用途等）を取得
- 属性情報をグラウンドリスク値に変換して、3Dの地物形状にグラウンドリスク値を設定

3D都市モデルの属性データをグラウンドリスク値に変換

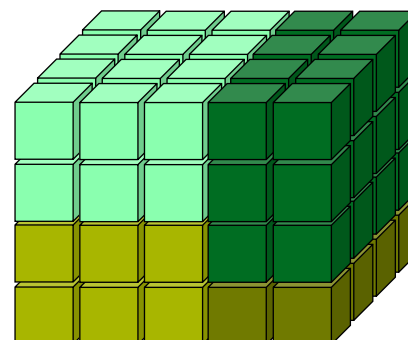
グラウンドリスクを真上の空間に設定

- グラウンドリスク値を与えられた地物が含まれる空間ボクセル単位でグラウンドリスクを付与する
- 地物とボクセルは必ずしも1:1ではないため、ボクセル内に含まれる最も高いリスク値を採用する
- 地物の真上のボクセルについても一律で同じリスク値を設定する
(対象地物の上空を通過することにリスクがあるという想定)

グラウンドリスクの設定イメージ



地物の属性に基づき、地物へリスク値を設定



上空にグラウンドリスク値を適用

Ⅲ. 実証システム > 5. アルゴリズム 各リスクの設定 | エアリスク

風況データと電波強度データからエアリスクを算出する

空間リスクの設定詳細

空間リスクの設定イメージ

風況リスクの算出

- 風況データ（渦度）から風況リスクpwを算出
 - 渦度は風ベクトル（風向と風速）から算出される渦度ベクトルの大きさ（ベクトルの絶対値）で表現される数値

$$\text{渦度ベクトル } \Omega = \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z}, \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}, \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$$

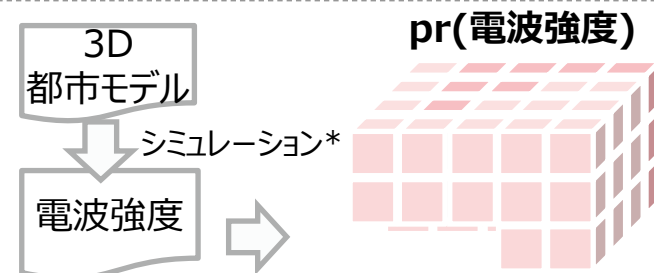
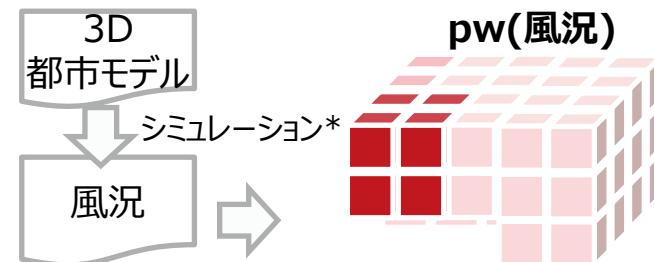
電波伝搬リスクの算出

- 電波伝搬リスクprは電波強度データをmW単位で与える
 - シミュレーションで得られる電波強度データpはdBm単位のため、以下の式でmW単位に換算

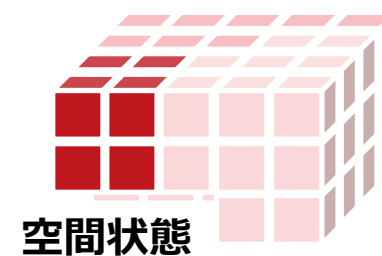
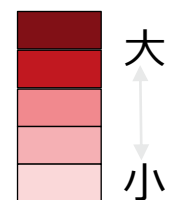
$$\text{電波伝搬リスク } p_r[mW] = 10^{p/10}$$

エアリスクの算出

- 風況リスクに β_w を電波伝搬リスクに β_r をそれぞれ感度パラメータとしてかけた上で、足し合わせることでエアリスクを算出する



エアリスク値



* シミュレーション手法・条件は「6-②データ処理」にて記載

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ①活用データ 活用データ一覧：3D都市モデル

地物	地物型	属性区分	属性名	内容
建築物LOD2	bldg:Building	空間属性	bldg:lod2Solid	建築物のLOD2の立体
		主題属性	bldg:usage	用途
			bldg:class	分類
			gen:stringAttribute	汎用属性（文字列）
	uro:districtsAndZonesType	地域地区		
	bldg:GroundSurface	空間属性	bldg:lod2MultiSurface	接地面のLOD2の立体
土地利用LOD1	luse:LandUse	空間属性	luse:lod1MultiSurface	土地利用のLOD1の立体
		主題属性	luse:class	土地利用区分
道路LOD1	tran:Railway	空間属性	tran:lod1MultiSurface	鉄道のLOD1の立体
	tran:Road	空間属性	tran:lod1MultiSurface	一般道路のLOD1の立体
	tran:Square	空間属性	tran:lod1MultiSurface	広場のLOD1の立体
	tran:Track	空間属性	tran:lod1MultiSurface	通路のLOD1の立体
地形LOD1	dem:TINRelief	空間属性	dem:tin	起伏を表現する三角網

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ①活用データ 3D都市モデル | グラウンドリスクの設定に利用する属性 (1/4)



属性 (大)	属性 (小)	コード
地物	建築物 (bldg:Building)	-
	鉄道 (tran:Railway)	-
	道路 (tran:Road)	-
	広場 (tran:Square)	-
	通路 (tran:Track)	-
地域地区の区分 uro:districtsAndZonesType	歴史的風土特別保存地区	31
	第1種歴史的風土保存地区	32
	病院第2種歴史的風土保存地区	33
	伝統的建造物群保存地区	39
	航空機騒音障害防止地区	40
	航空機騒音障害防止特別地区	42
	その他	- (値なし)

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ①活用データ

3D都市モデル | グラウンドリスクの設定に利用する属性 (2/4)



PLATEAU
by MLIT

属性 (大)	属性 (小)	コード
土地利用用途 luse:LandUse/luse:class	住宅用地	211
	商業用地	212
	工業用地	213
	農林漁業施設用地	219
	公益施設用地	214
	道路用地	215
	交通施設用地	216
	公共空地	217
	太陽光発電のシステムを直接整備している土地	221
	平面駐車場	222
	建物跡地、資材置場、改変工事中の土地、法面	223
	道路・鉄軌道敷	262

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ①活用データ 3D都市モデル | グラウンドリスクの設定に利用する属性 (3/4)

属性 (大)	属性 (小)	コード
建築物を示す面 bldg:GroundSurface	建築物の立体形状の底面	-
建築物の形態 bldg:class	普通無壁舎	3003
建築物の主な使い道 bldg:usage	業務施設	401
	商業施設	402
	宿泊施設	403
	商業系複合施設	404
	住宅	411
	共同住宅	412
	店舗等併用住宅	413
	店舗等併用共同住宅	414
	作業所併用住宅	415

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ①活用データ

3D都市モデル | グラウンドリスクの設定に利用する属性 (4/4)



PLATEAU
by MLIT

属性 (大)	属性 (小)	コード
建築物の主な使い道 bldg:usage	官公庁施設	421
	文教厚生施設	422
	運輸倉庫施設	431
	工場	441
	農林漁業用施設	451
	供給処理施設	452
	その他	461

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ①活用データ その他の活用データ一覧

活用データ	内容	データ形式	出所
風況 【風向・風速】	<ul style="list-style-type: none">豊川市の過去の風向・風速データを活用<ul style="list-style-type: none">豊川市内の消防署における計測値実証実験と同じ時期である11月の平均値	テキスト	豊川市

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 データ処理一覧 (1/2)

システムに入力するデータ (データ形式)	用途	処理内容	データ処理ソフトウェア	活用データ (データ形式)
風況シミュレーション 【xyz形式】	<ul style="list-style-type: none"> エアリスクの算出 	<ul style="list-style-type: none"> 流体解析を用いた風況のシミュレーション 	Alteir AcuSolve	<ul style="list-style-type: none"> 風況 (テキスト) 3D都市モデル (CityGML形式)
電波伝搬シミュレーション 【xyz形式】	<ul style="list-style-type: none"> エアリスクの算出 	<ul style="list-style-type: none"> 電磁波解析及び電波伝搬のシミュレーション 	Alteir Feko	<ul style="list-style-type: none"> 電波基地局 (テキスト) 3D都市モデル (CityGML形式)
グラウンドリスク 【ボクセル形式】	<ul style="list-style-type: none"> 空間リスクの算出 	<ul style="list-style-type: none"> CityGMLファイルの構文を解析し、タグに応じた独自バイナリ形式のボクセル毎のグラウンドリスクに変換する 	本システム 「グラウンドリスク 算出」機能	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデル (CityGML形式)
エアリスク 【ボクセル形式】	<ul style="list-style-type: none"> 空間リスクの算出 	<ul style="list-style-type: none"> 風況や電波強度のデータを独自バイナリ形式のボクセル毎のエアリスク値に変換する 	本システム「エアリス ク算出」機能	<ul style="list-style-type: none"> 風況シミュレーション (xyz形式) 電波伝搬シミュレーション (xyz形式)

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 データ処理一覧 (2/2)

システムに入力するデータ (データ形式)	用途	処理内容	データ処理ソフトウェア	活用データ (データ形式)
空間リスク 【ボクセル形式】	<ul style="list-style-type: none"> 飛行ルート設計 	<ul style="list-style-type: none"> ボクセル毎のグラウンドリスク情報とエアリスク情報を合わせて独自バイナリ形式の空間リスク値に変換する 	本システム「空間リスク算出」機能	<ul style="list-style-type: none"> グラウンドリスク (ボクセル形式) エアリスク (ボクセル形式)
飛行ルート 【緯度経度高度】	<ul style="list-style-type: none"> Anafi 自動航行 	<ul style="list-style-type: none"> TRJX Clientから入力されたウェイポイント、空間リスク情報、障害物を考慮しルート探索を行う 	本システム「ルート探索」機能	<ul style="list-style-type: none"> 空間リスク (ボクセル毎の数値) 障害物データ (ボクセル形式)
3D都市モデル 【3D Tiles形式】	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデル表示 飛行ルート設計 	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデルを3D Tiles形式に変換する 	FME Desktop	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデル (CityGML形式)
障害物データ 【ボクセル形式】	<ul style="list-style-type: none"> 飛行ルート設計 	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデルから、障害物となる構造物を抽出する 	TRJX Server	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデル (CityGML形式) 3D都市モデルのDEM (CityGML形式)

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理

風況データ | 風況シミュレーションによる生成

エアリスク算出に使用する風況データの生成のため、風況シミュレーションを実施

風況データの取得方法

- 最適ルートシミュレーションに必要なエアリスクの算出のため、空間ボクセルに対応した風況データが必要である
- 現状では、空間ボクセルごとの風況データは提供されていないため、本実証実験及び直近の実用化に向けて風況シミュレーションにより算出する
- 本実証実験と実運用時のシミュレーションパラメータの相違点は以下のとおり：

ケース	風況（風速・風向）
本実証実験	<ul style="list-style-type: none"> • 実証実験の実施地域である豊川市の過去の風向・風速データを活用 <ul style="list-style-type: none"> - 豊川市内の消防署における計測値 - 実証実験と同じ時期である11月の平均値
実運用（想定）	<ul style="list-style-type: none"> • 過去の観測情報を踏まえて条件を設定 • ドップラーライダー等の観測装置等により入手した気象情報

風況シミュレーションにおける風速の設定値

項目	平均風速	風光	最大瞬間風速
平均値	2.4m/s	西北西	-
最高値	-	-	18.8m/s
起時	11/27 12:49	-	11/8 12:53

出典：豊川市内消防署において計測された2021年11月の風速データ*を利用し作成

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理

風況データ | 風況シミュレーションの設定条件

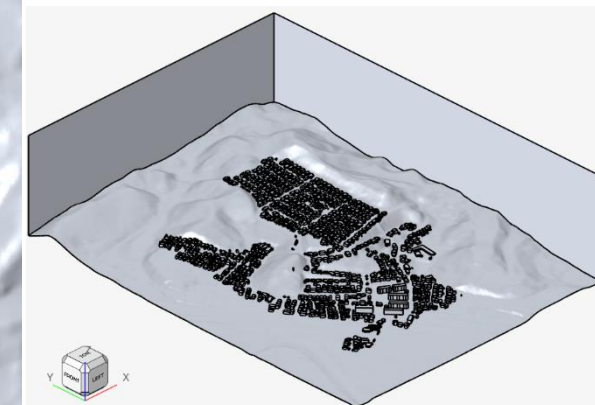
シミュレーションの条件として、実機検証と同時期の平均風速（実績値）を利用。風向は8方向でそれぞれシミュレーションを行い、実機検証時の風向に合わせて利用する結果データを選択できるようにした

風況シミュレーション

- 熱流体解析ソルバーAltair AcuSolve 2021.2を使用して流体解析を実施
- シミュレーションの条件設定は以下のとおり

項目	シミュレーションの条件設定
3Dモデル	<ul style="list-style-type: none"> • 3D都市モデルの建物LOD1、地形LOD1を利用
解析の原点	<ul style="list-style-type: none"> • 34.84508956°、137.3205238°、13m（標高）
結果グリッド	<ul style="list-style-type: none"> • XYZタイルのzoomlevel=25で分割 <ul style="list-style-type: none"> - x方向（東）0.94681m間隔 <ul style="list-style-type: none"> • （0~529.2642mを559分割） - y方向（北）0.99169m間隔 <ul style="list-style-type: none"> • （0~839.9582mを847分割） - z方向 1m間隔
解析領域	原点を基準とする座標系における下記の領域 <ul style="list-style-type: none"> • x方向（東）に0~529.2642m • y方向（北）に0~839.9582m
風向	東・西・南・北・北東・南東・北西・南西の8方向
風速	2.4m/sec
流体物性	空気（AcuSolveの標準物性:Air）

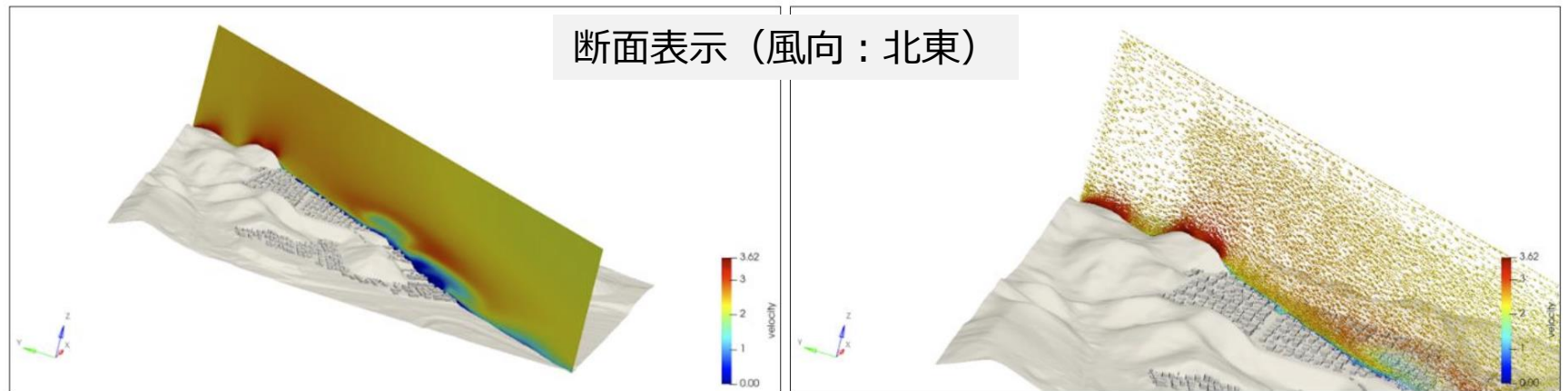
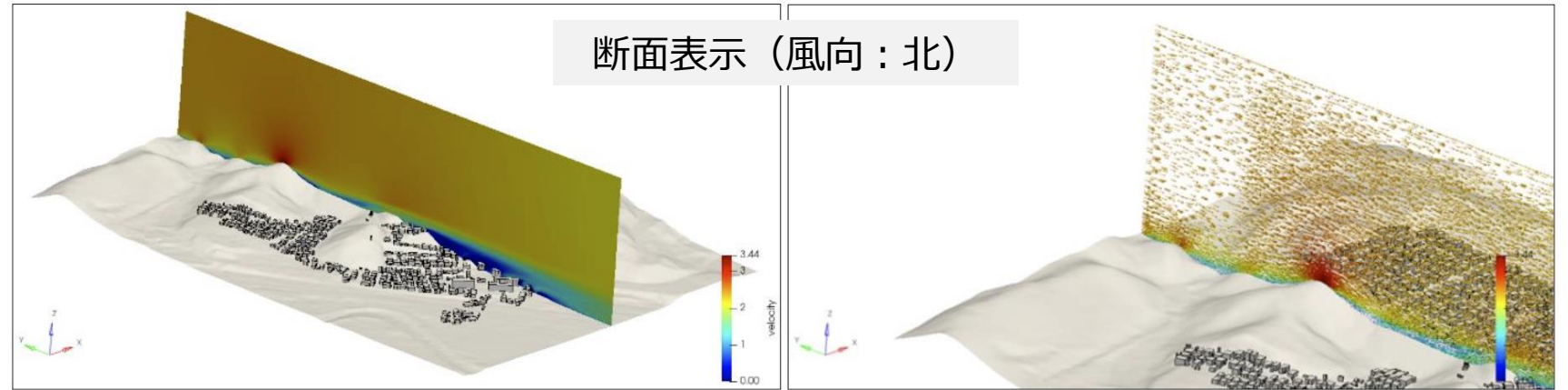
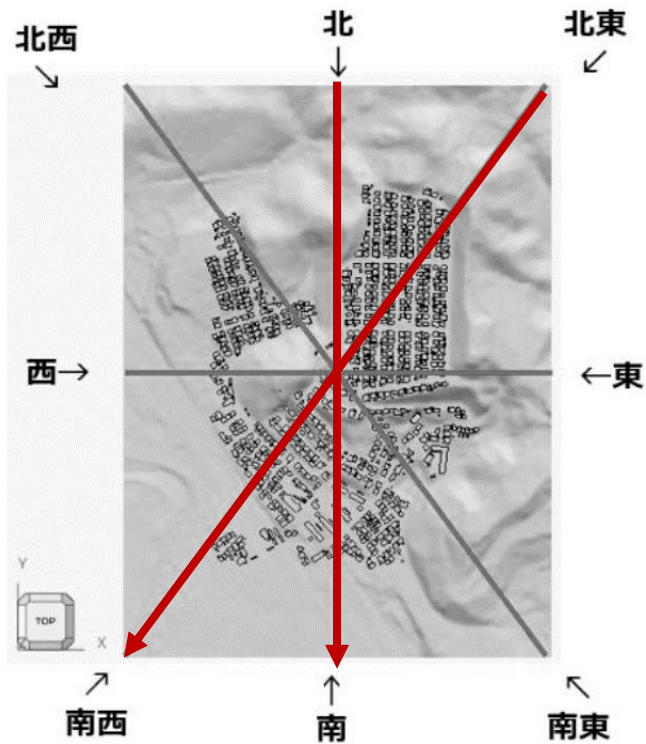
解析モデル



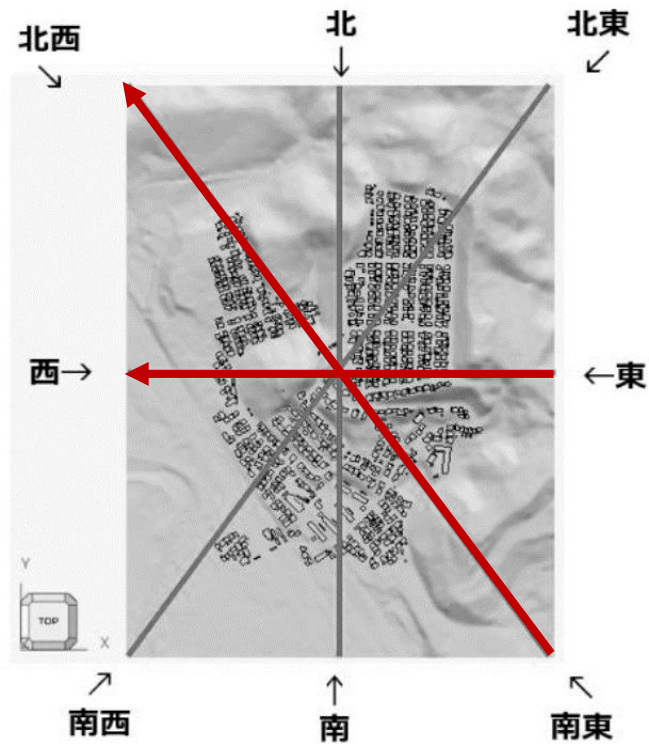
鳥瞰表示

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 風況データ | 風況シミュレーションによる生成結果 (1/4)

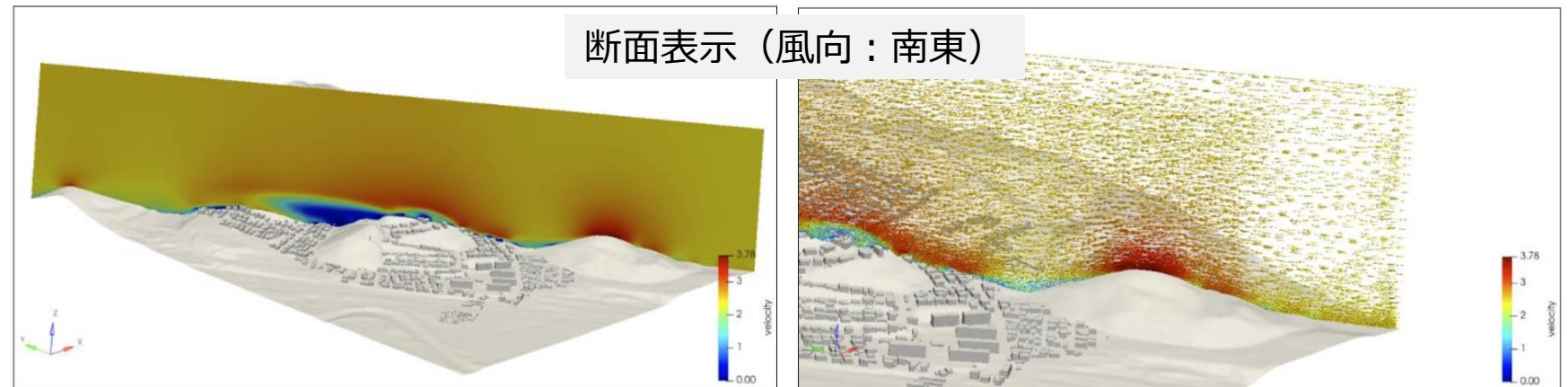
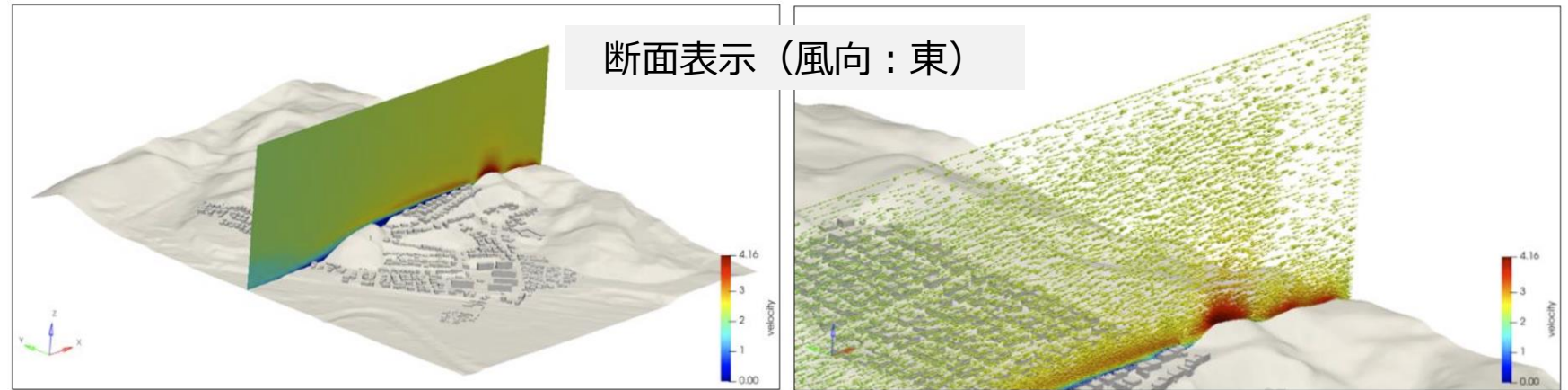
*右図は透過表示



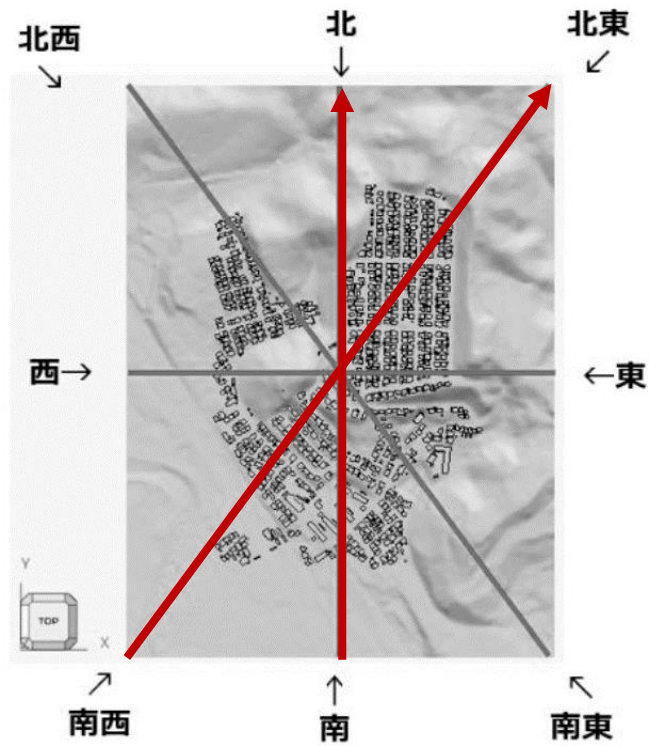
Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 風況データ | 風況シミュレーションによる生成結果 (2/4)



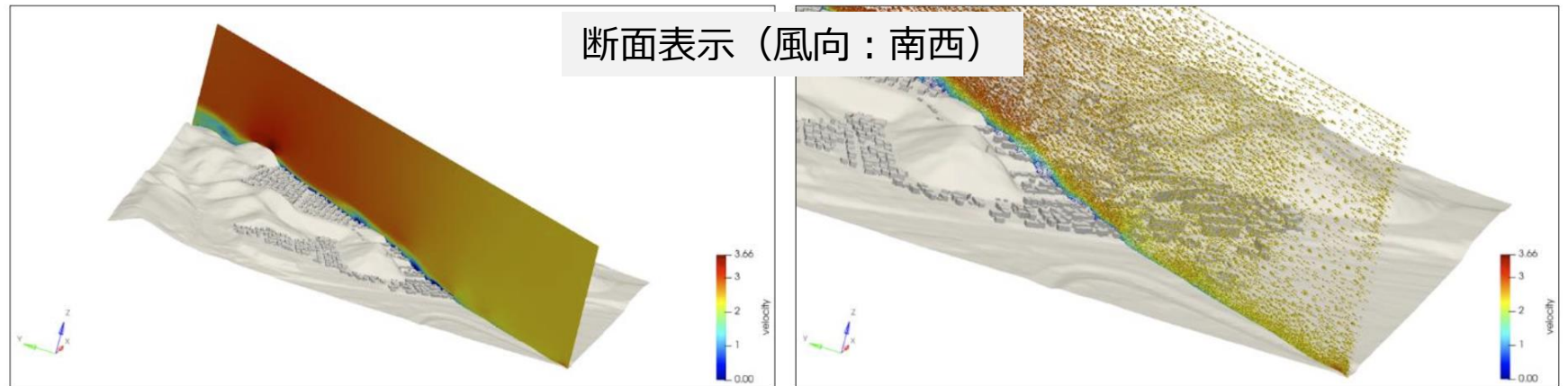
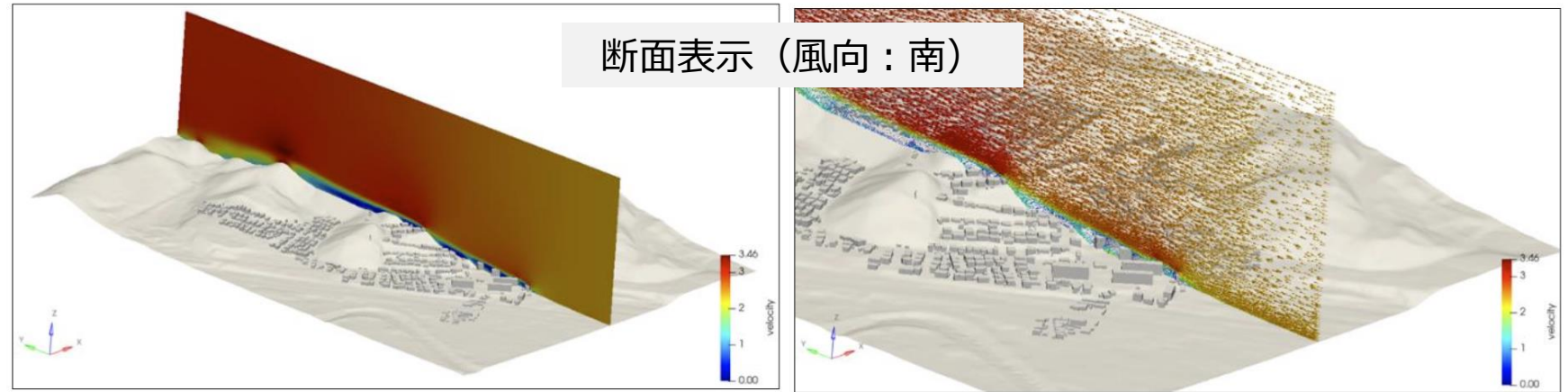
*右図は透過表示



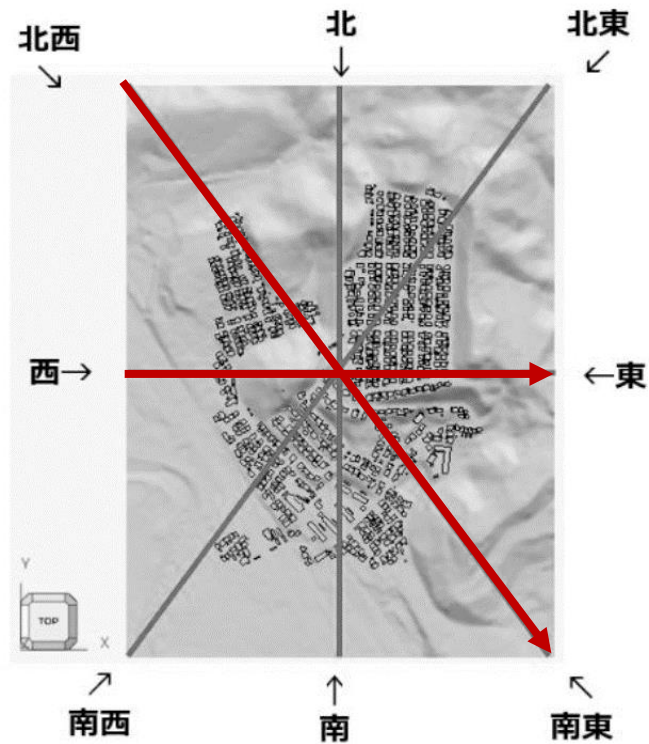
Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 風況データ | 風況シミュレーションによる生成結果 (3/4)



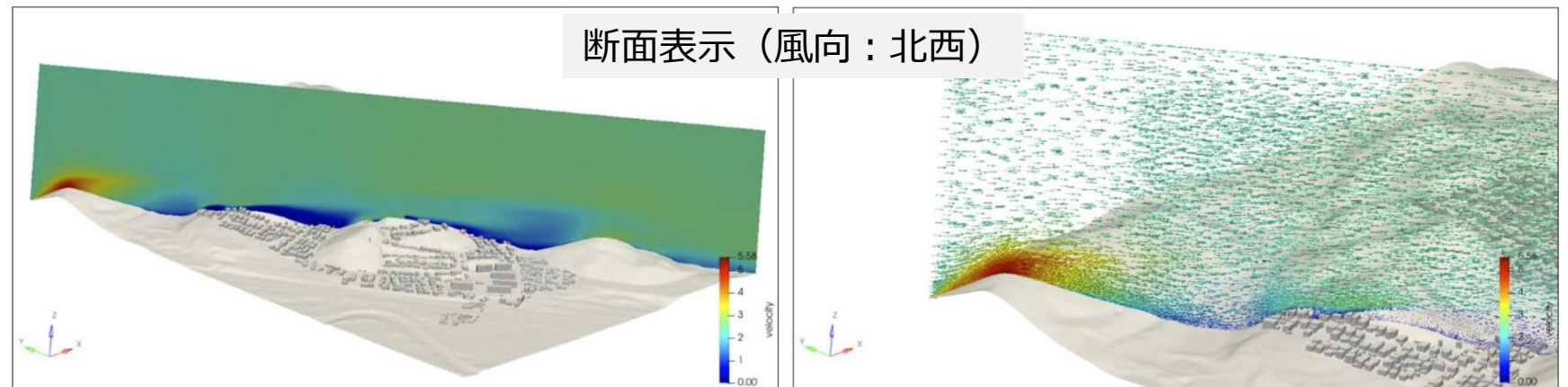
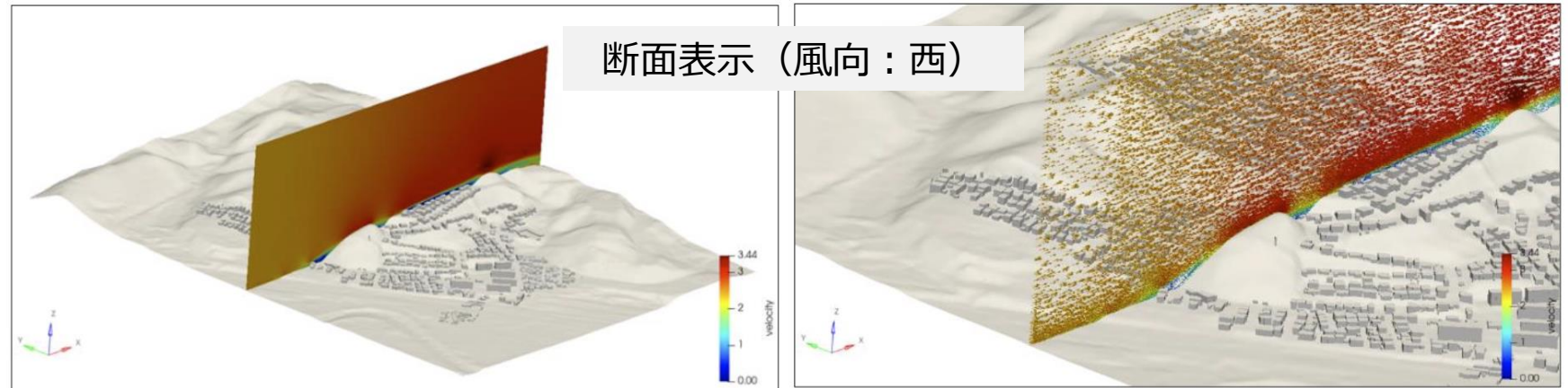
*右図は透過表示



Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 風況データ | 風況シミュレーションによる生成結果 (4/4)



*右図は透過表示



Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理

電波強度データ | 電波伝搬シミュレーションによる生成

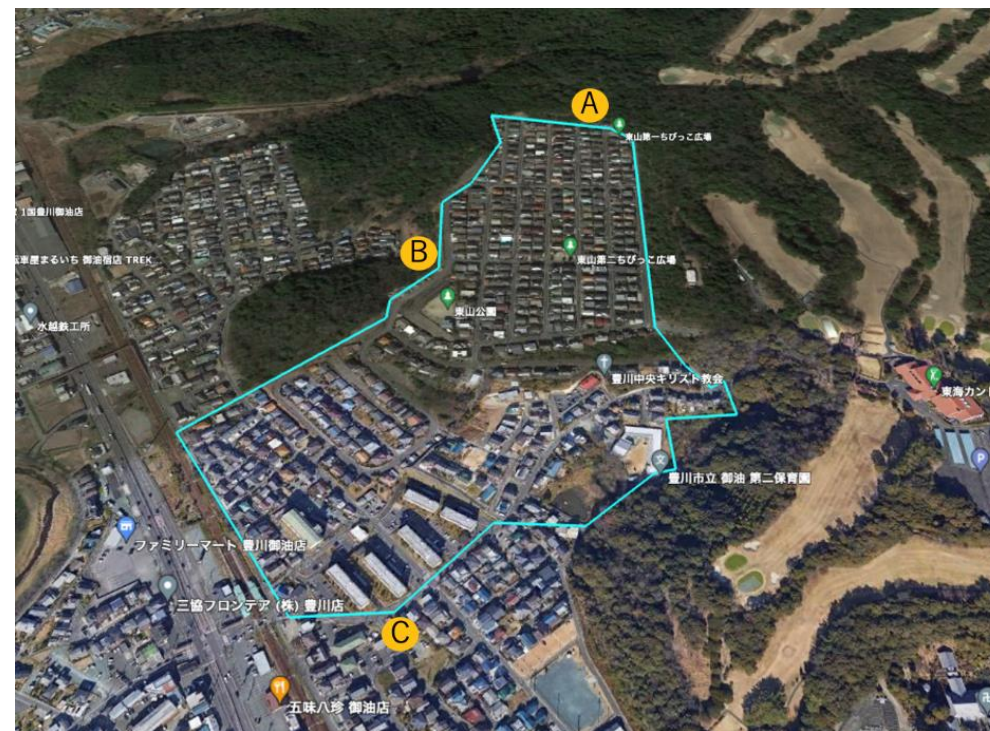
ドローンの航行中、2.4G帯域を使用したテレメトリーや映像の伝送を妨害する携帯電話の基地局が発する高強度の電波によるエアリスクの算出に使用する電波強度データの生成のため、電波伝搬シミュレーションを実施

電波強度データの取得方法

- 最適ルートシミュレーションに必要なエアリスクの算出のため、空間ボクセルに対応した電波強度データが必要である
- 現状では、空間ボクセルごとの電波強度データは提供されていないため、本実証実験及び実用化に向けて電波伝搬シミュレーションにより算出する
- 本実証実験と実運用時のシミュレーションパラメータの相違点は以下のとおり

ケース	基地局の位置	基地局の出力
本実証実験	<ul style="list-style-type: none"> ● ドローンの飛行に対して影響の差が出やすい位置に仮想の基地局を設置 	<ul style="list-style-type: none"> ● 4G/5G基地局を想定した出力を設定 ● 設置環境に応じて、出力を調整
実運用 (想定)	<ul style="list-style-type: none"> ● 通信事業者から実際の基地局の位置を取得 ● 有志による基地局の位置情報提供を活用 	<ul style="list-style-type: none"> ● 通信事業者から実際の基地局の出力を取得

本実証実験における基地局の設置位置マップ



- A : 山手の高い位置に基地局がある場合
- B : 住宅地を望む尾根の裏側（山陰）に基地局がある場合
- C : ふもとの平地に基地局がある場合

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理

電波強度データ | 電波伝搬シミュレーションの設定条件

電波伝搬シミュレーションの条件として、エリアの特性を踏まえて基地局を3つを設定

基地局名	緯度 (°)	経度 (°)	標高 (m)	高さ (m)	周波数 (GHz)	基地局の種別 (想定)	出力 (W)	アンテナ指向性	ダウンチルト (deg)
A	34.852189	137.325331	105	15	1.7	マクロセル	10	無指向 (ダイポール相当)	10
B	34.849650	137.322950	70			ピコセル	1		0
C	34.845505	137.323258	39						

パラメータの選定理由：

- パラメータ選定の前提となる想定基地局
 - 市街地で多く使われている電波を想定し、各キャリアの携帯電話で使用される4G/5G基地局として各パラメータを選定する
- 基地局の種別について
 - 市街地はスモールセル（建物等の壁面、電柱、屋内等に設置する小型の基地局）、郊外や山間部はマクロセル・マイクロセル（電波塔型の大型の基地局）が主流であることを踏まえ、以下を想定したシミュレーションを実施した*
 - 市街地、住宅地：スモールセルの一種であるピコセル（出力1W）
 - 山頂：マクロセル（出力10W）

*各キャリアの整備方針により、スモールセルとマクロセル・マイクロセルの割合や設置場所の方針には差異があり得る
- 周波数について
 - 本実証実験では、大手キャリアが利用し、基地局数が多いと想定される1.7GHz帯（1,805MHz超、1,845MHz以下）を用いる
- アンテナチルトについて
 - 山頂のアンテナは市街地に向け多くの場合傾きが設定されているため、本実証実験でもチルト角を設定する

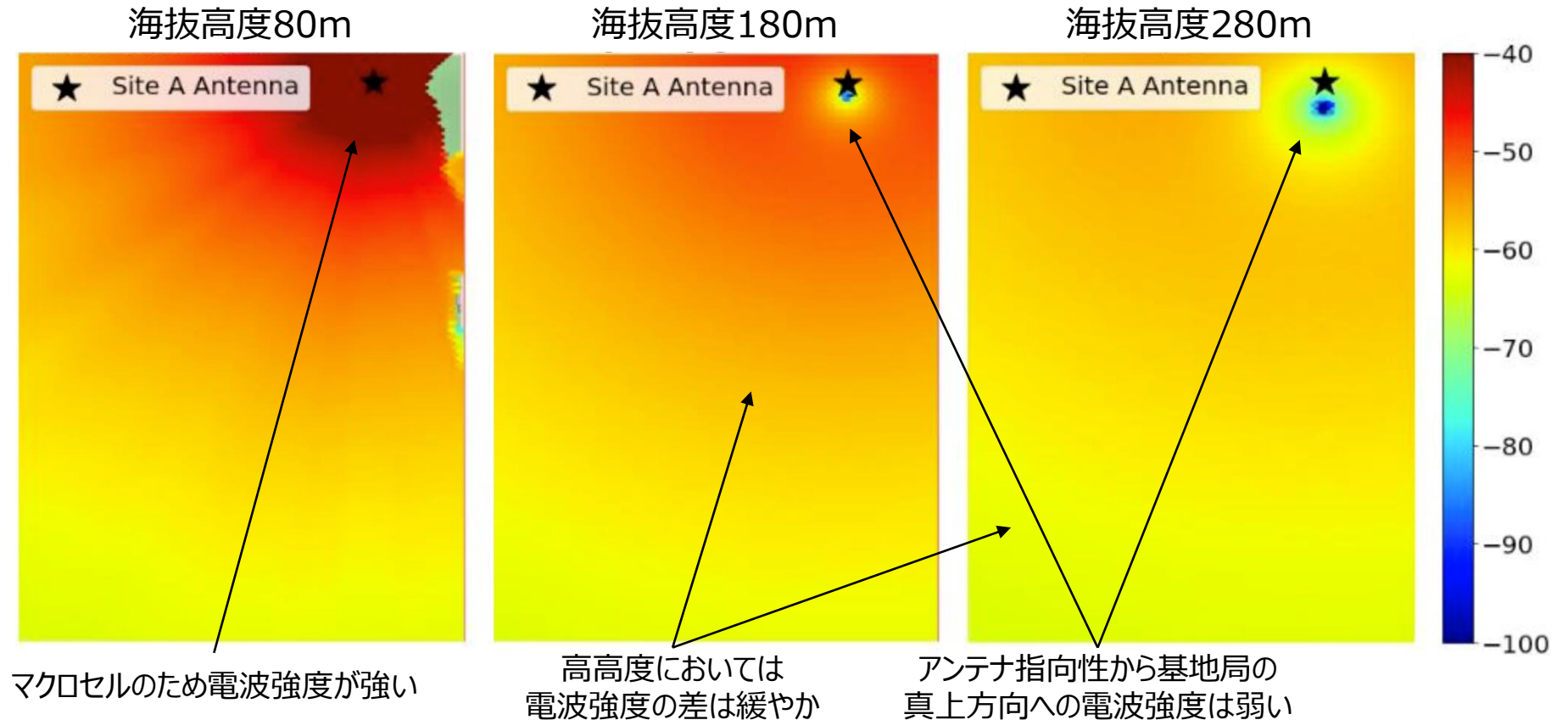
Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 電波強度データ | 電波伝搬シミュレーションによる生成結果 (1/3)

マクロセルである仮想基地局Aの電波強度の分布は以下の通り

仮想基地局Aの位置



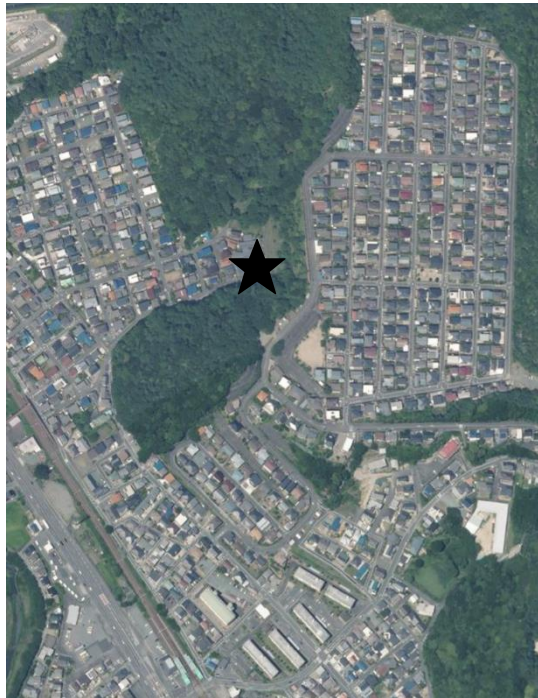
仮想基地局Aの電波強度データ



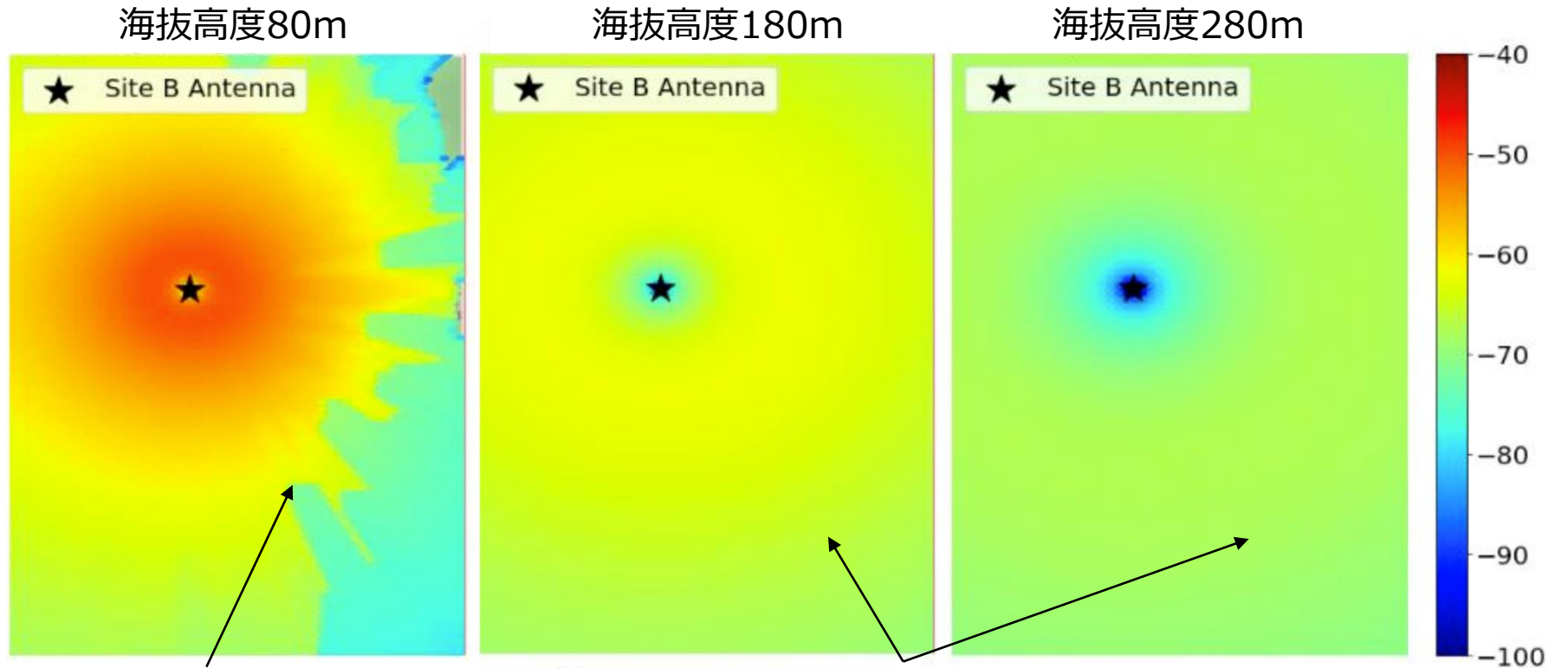
Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 電波強度データ | 電波伝搬シミュレーションによる生成結果 (2/3)

ピコセルである仮想基地局Bの電波強度の分布は以下の通り

仮想基地局Bの位置



仮想基地局Bの電波強度データ (一例)



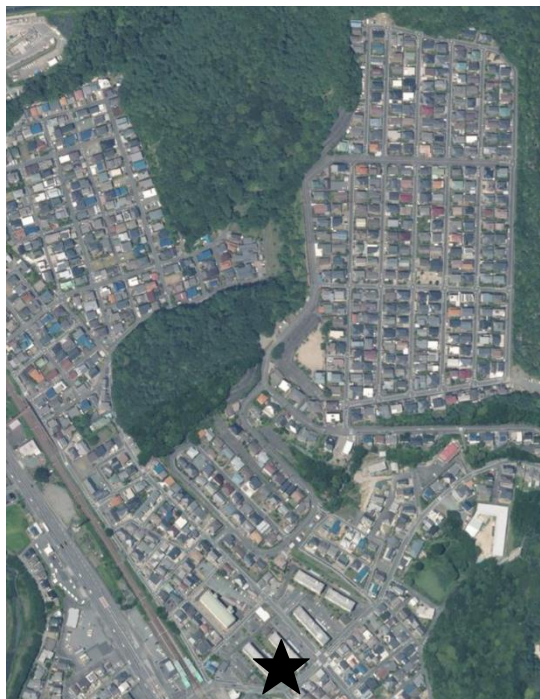
建物、地形の影響を受けて部分的に電波強度が低下

高高度においては
電波強度の差は緩やか

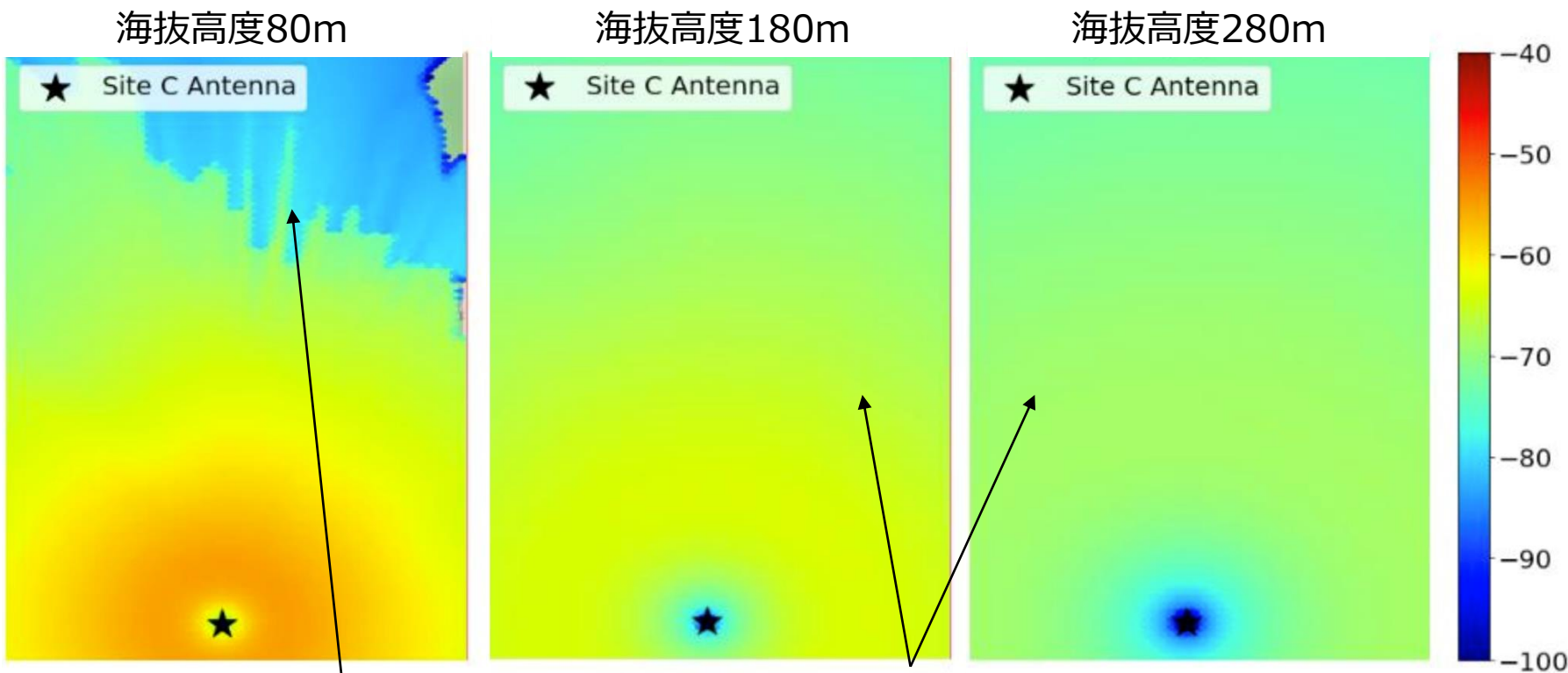
Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 電波強度データ | 電波伝搬シミュレーションによる生成結果 (3/3)

ピコセルである仮想基地局Cの電波強度の分布は以下の通り

仮想基地局Cの位置



仮想基地局Cの電波強度データ (一例)



建物、地形の影響を受けて部分的に電波強度が低下

高高度においては
電波強度の差は緩やか

Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ②データ処理 障害物データ

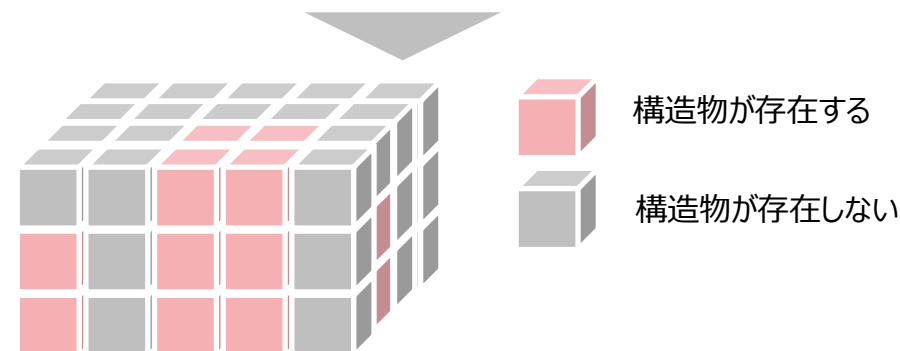
データ仕様

項目	詳細
データ名	<ul style="list-style-type: none">障害物データ
概要	<ul style="list-style-type: none">3D都市モデル（CityGML）から構造物が存在する物理的な空間（緯度、経度、高度）を算出し、ボクセルにマッピングする
データ仕様	<ul style="list-style-type: none">以下の情報を含む独自バイナリ形式<ul style="list-style-type: none">- 障害物情報（出力先：データベース）

データのイメージ

CityGML情報

```
<gml:Envelope srsName="http://www.opengis.net/def/crs/EPSSG/0/6697" srsDimension="3">  
  <gml:lowerCorner>34.78475411493974 137.3050268505443  
3.040000000000007</gml:lowerCorner>  
  <gml:upperCorner>34.788982159719396 137.3123854762917  
57.73999999999999</gml:upperCorner>  
</gml:Envelope>  
</gml:boundedBy>  
<core:cityObjectMember>
```



Ⅲ. 実証システム > 6. データ > ③出力データ 出力データ一覧

出力データ	内容	データ形式
なし	—	—

Ⅲ. 実証システム > 7. ユーザインタフェース 操作手順（全体フロー）

①TRJXへの ログイン

- ログイン画面でID/パスワードを入力し、TRJXにログインする
- ホーム画面で飛行エリア（飛行する地域）の名前により飛行エリアを選択する

②3Dマップ画面

- 飛行エリアの選択後、飛行エリアの3Dマップが表示される

③ウェイポイント 設定

- 始点（離陸場所）、終点（着陸場所）及び中間点（ウェイポイント）を設定する
- ウェイポイントの設定は地図画面上の任意の点をクリックすることで行う

④ルートシミュ レーション実施

- 設定したウェイポイントを基にリスク値を考慮した飛行ルートの自動生成を行う
- 生成されたルートとウェイポイントを結ぶ最短経路が同時に表示される

⑤飛行シミュ レーション実施

- シミュレーションで生成されたルートを、TRJX内の仮想機体に読み込ませる
- 仮想機体により飛行シミュレーションを行い、実機飛行前のルート確認を行う

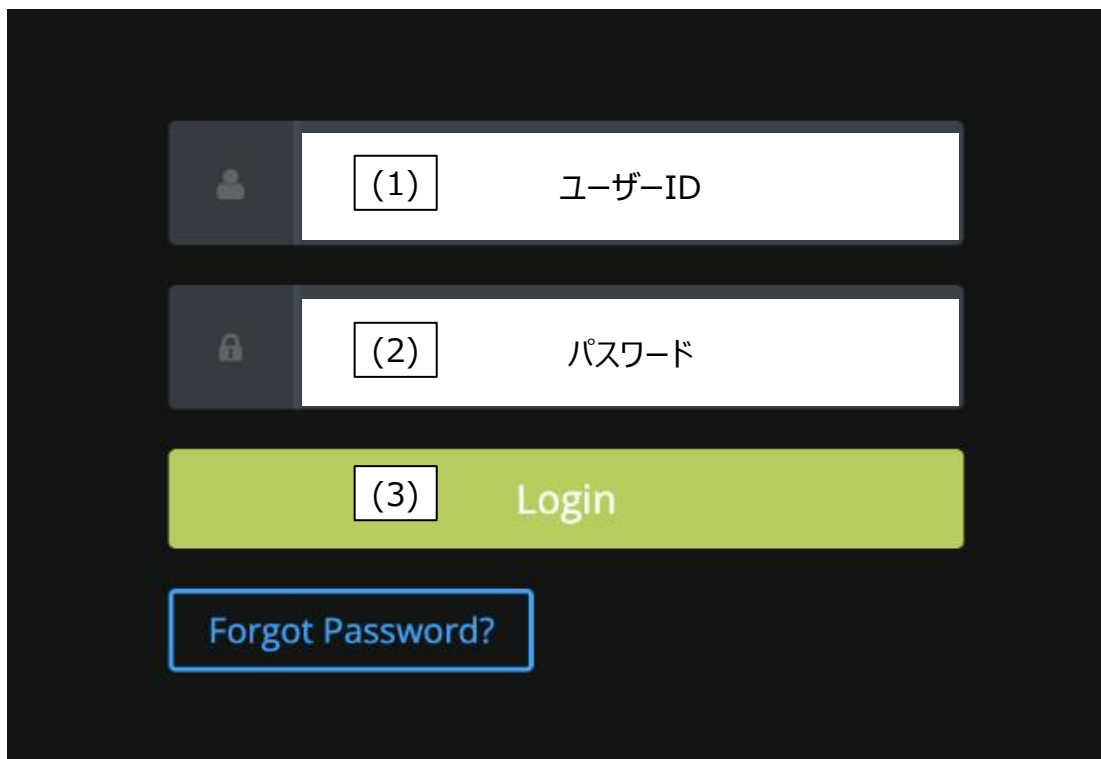
Ⅲ. 実証システム > 7. ユーザインタフェース

① TRJXへのログイン

ログイン画面でID/パスワードを入力したのち、ホーム画面で飛行エリア（飛行する地域）と飛行時間帯を選択

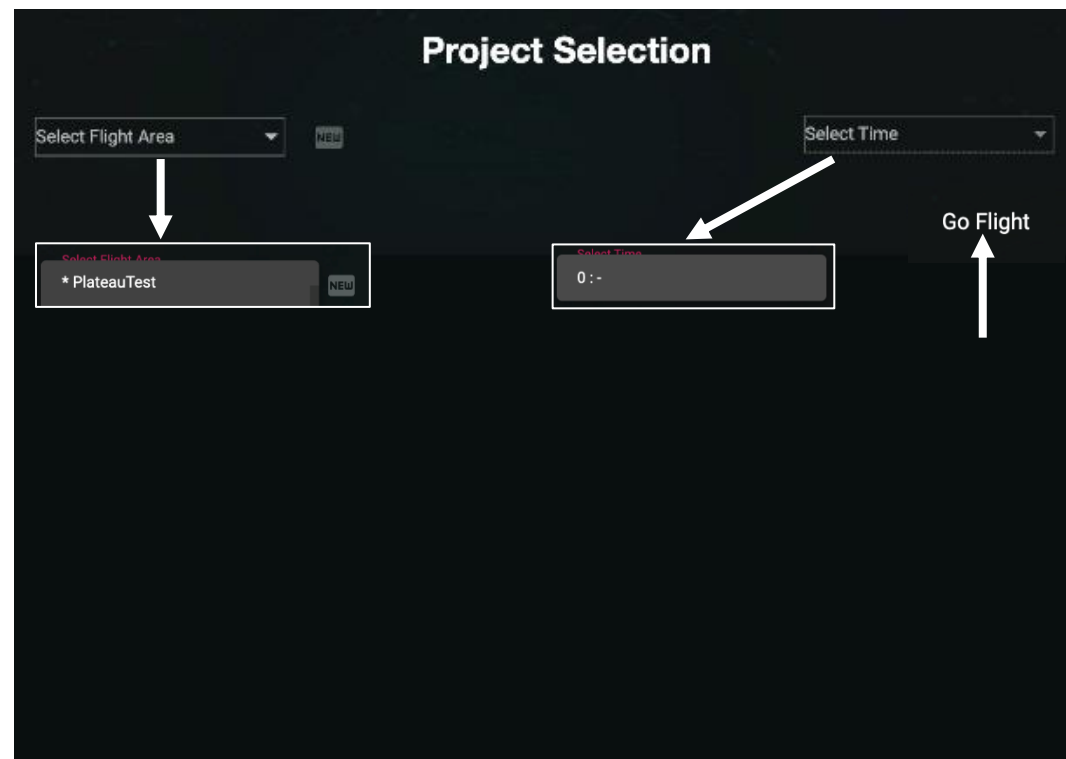
① ログイン画面

1. ID/パスワードを入力する
2. その後ログインボタンを押下することにより飛行エリア選択に移動する



② ホーム画面

1. 飛行エリア（飛行する地域）の名前を選択する
2. 飛行時間帯を選択する



Ⅲ. 実証システム > 7. ユーザインタフェース

② 3Dマップ画面

飛行エリア選択後、以下の画面において飛行エリアの3Dマップを確認



#	各部名称	説明
1	ホームボタン	ホーム画面へ戻る
2	表示選択	3D表示、2D表示等の表示を選択する
3	機体リスト	組織で所有しているドローンの一覧を表示する
4	ルートリスト	登録済みの飛行ルート一覧を表示する
5	ルート情報	飛行ルートのウェイポイントの緯度経度や高度の情報を表示する
6	VR地図	3D都市モデル等の3Dモデルを表示する
7	初期位置ボタン	飛行エリアの中心位置を表示する
8	ROI設定ボタン	ROI (Region of Interest) を設定する
9	地図設定	表示する地図を設定する
10	背景地図変更	背景となる地図の明るさ等を変更する
11	地図選択	背景となる地図の種類を変更する
12	言語切替	UIの言語 (日本語/英語) を選択する
13	ユーザー選択	TRJXを利用するユーザーを選択/変更する
14	終了ボタン	TRJXを終了する

Ⅲ. 実証システム > 7. ユーザインタフェース

③ウェイポイントの設定

始点・終点・中間点（ウェイポイント）を地図画面上の任意の点をクリックして設定



始点・終点・中間点（ウェイポイント）の設定

- ウェイポイントは地図画面上の任意の点をクリックし設置する
 - 始点：離陸場所
 - 終点：着陸場所
 - 中間点：始点～終点間の経由ポイント
- ウェイポイント設定画面では、2Dマップと3Dマップの双方が表示される

Ⅲ. 実証システム > 7. ユーザインタフェース

④ ルートシミュレーション実施

設定したウェイポイントからリスク値を考慮した飛行ルートを自動生成



- 最短距離ルート (リスク値の考慮なし)
- 最適経路 (シミュレーション結果のルート)

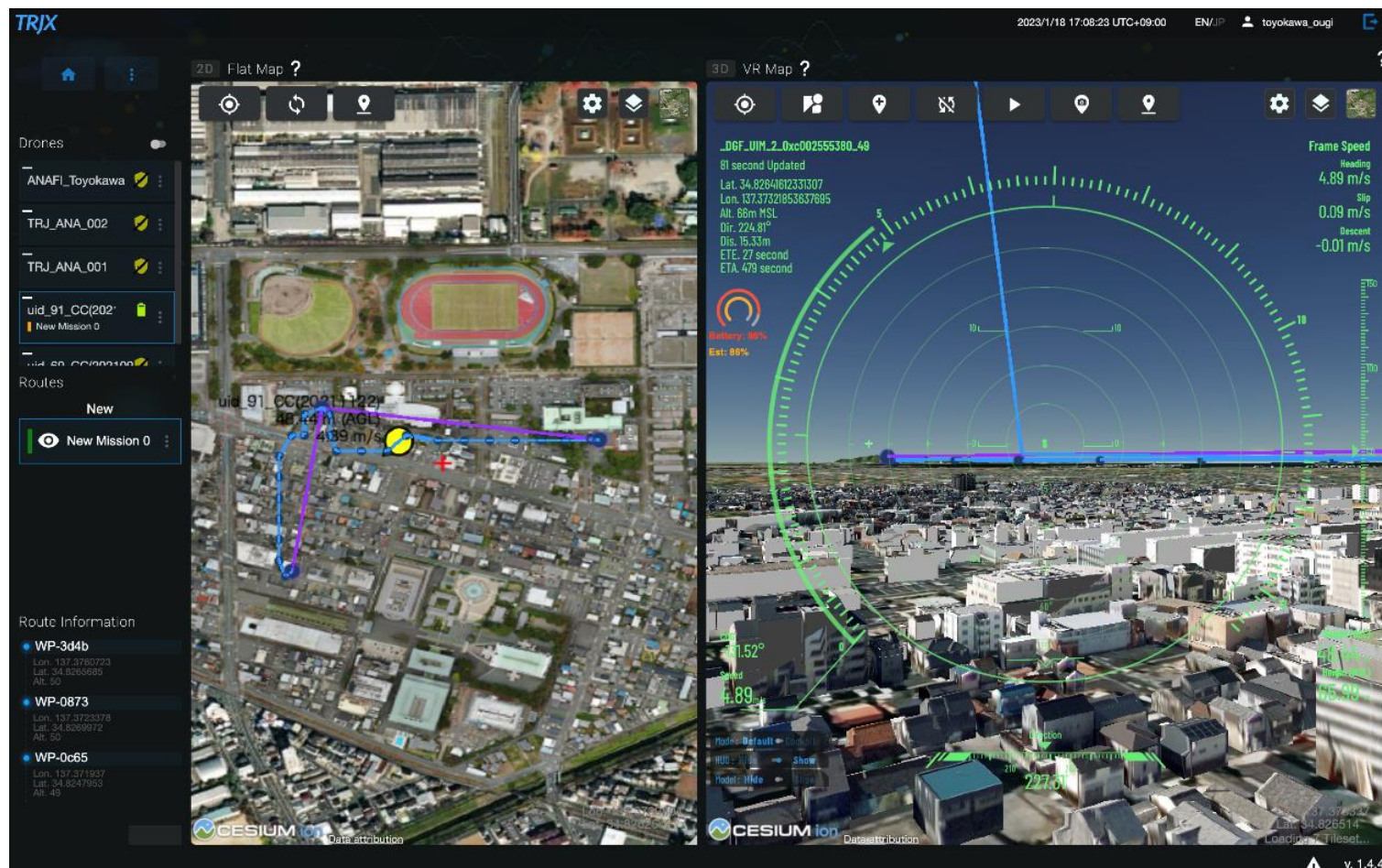
ルートシミュレーションの実施

- 設定したウェイポイントからリスク値を考慮した飛行ルートの自動生成を行う
- 生成されたルートとウェイポイントを結ぶ最短経路が同時に表示される

Ⅲ. 実証システム > 7. ユーザインタフェース

⑤ 飛行シミュレーション実施

生成されたルートを実証システム内の仮想機体に読み込み、3Dマップの中で飛行シミュレーションを行い、実機飛行前に飛行ルートを確認



飛行シミュレーションの実施

- シミュレーションで生成されたルートを実証システム内の仮想機体に読み込み
- 3Dマップの中で飛行シミュレーションを行い、実機飛行前のルート確認を行う

Ⅲ. 実証システム > 8. システムテスト結果

システムテスト結果

試験項目	確認内容	結果
3D Tilesの表示	豊川市の3D都市モデルが3Dマップ画面に表示されるか	合格
飛行ルート表示	自動生成された飛行ルートが表示されるか	合格
風況データ処理	風況のシミュレーション結果がリスク値に変換されるか	合格
電波データ処理	電波伝搬のシミュレーション結果がリスク値に変換されるか	合格
地上データ処理	グラウンドリスクのシミュレーション結果がリスク値に変換されるか	合格
リスク設定	エアリスク（風況、電波）、グラウンドリスクを総合的に考慮したリスク値がボクセルごとに設定されるか	合格
リスク変更	設定したリスク値を変更した場合に正しく反映されるか	合格
飛行ルート設計	リスク値が最小となる飛行ルートが設計されるか	合格
	豊川市御油地区の範囲の飛行ルート（飛行距離1km程度）が1分以内で設計されるか	合格
飛行ルート設定	設計された飛行ルートがドローンのフライトコントローラーに設定可能であるか	合格

I. 実証概要

II. 実証技術の概要

III. 実証システム

IV. 実証技術の検証

V. 成果と課題

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証概要

開発した最適ルートシミュレータによりリスク値を踏まえたシミュレーション結果が得られるかを確認する

検証の概要

目的

- 最適ルートシミュレータによって、リスク値を反映したルートが生成されることを確認する

検証方法

- 以下の3パターンで最適ルートシミュレーションを行い、ルート形状がどのように変化するのかを確認する
 - リスク値の設定がない場合（最短経路）
 - グラウンドリスクのみを設定した場合
 - グラウンドリスクとエアリスクを設定した場合

シミュレーター検証のルートイメージ



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1

検証内容 | 検証シナリオ

シミュレーター検証1では、リスク設定がないシナリオ、グラウンドリスクのみ設定したシナリオ、グラウンドリスク・エアリスクの両方を設定したシナリオの3つを実施した

シミュレーター検証1のシナリオ

	グラウンドリスクの設定	エアリスクの設定
シナリオ1		
シナリオ2	○	
シナリオ3	○	○

シミュレーター検証におけるリスクパラメータの設定値（初期的）

リスクコスト率
 $F(P, Q)$

$$F = \alpha_p \cdot P + \alpha_q \cdot Q$$

$$\alpha_p = 1, \alpha_q = 1$$

α_p : エアリスクの重みづけ

α_q : グラウンドリスクの重みづけ

エアリスク
 $P(pw, pr)$

$$P = \beta_w \cdot pw + \beta_r \cdot pr$$

$$\beta_w = 100, \beta_r = 1$$

β_w : 風況の重みづけ

β_r : 電波強度の重みづけ



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証内容 | グラウンドリスクの設定値

初期的なグラウンドリスクの設定値として、差の出やすい10のべき乗を設定した1/10/100/1,000の4段階のリスク値を設定

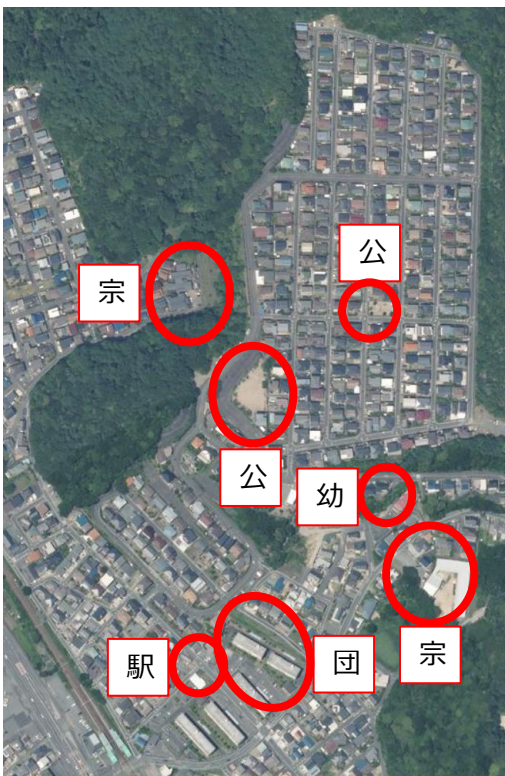
属性（大）	属性（小）	リスク値
地物	建築物	1
	鉄道	1,000
	道路	10
	広場	10
	通路	10
地域地区の区分	歴史的風土特別保存地区	10
	第1種歴史的風土保存地区	10
	病院第2種歴史的風土保存地区	10
	伝統的建造物群保存地区	10
	航空機騒音障害防止地区	100
	航空機騒音障害防止特別地区	100
	その他	1
土地利用用途	住宅用地	1
	商業用地	1
	工業用地	1

属性（大）	属性（小）	リスク値
土地利用用途	農林漁業施設用地	1
	公益施設用地	1
	道路用地	10
	交通施設用地	10
	公共空地	10
	太陽光発電のシステムを直接整備している土地	10
	平面駐車場	1
	建物跡地、資材置場、改変工事中の土地、法面	1
	道路・鉄軌道敷	10
建築物を示す面	建築物の立体形状の底面	10
建築物の形態	普通無壁舎	10
建築物の主な使い道	官公庁施設	10

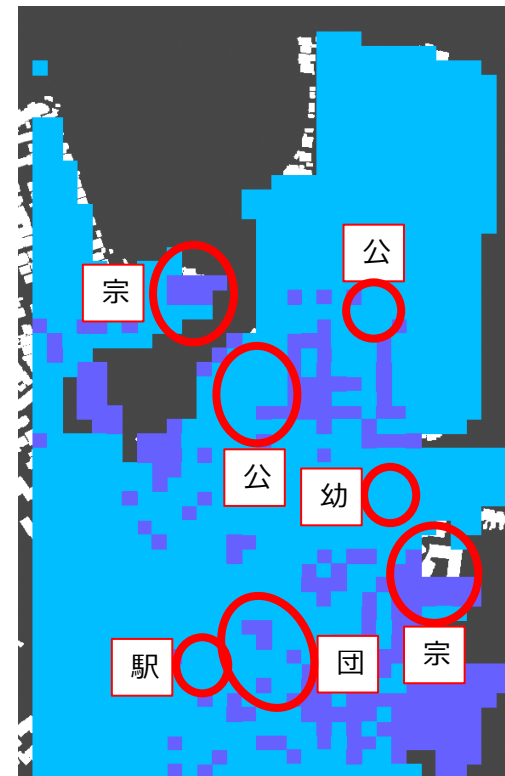
IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証内容 | グラウンドリスクの可視化

対象となる御油地区にグラウンドリスクが設定されていることを確認

御油地区



グラウンドリスク*



リスク高

リスク低

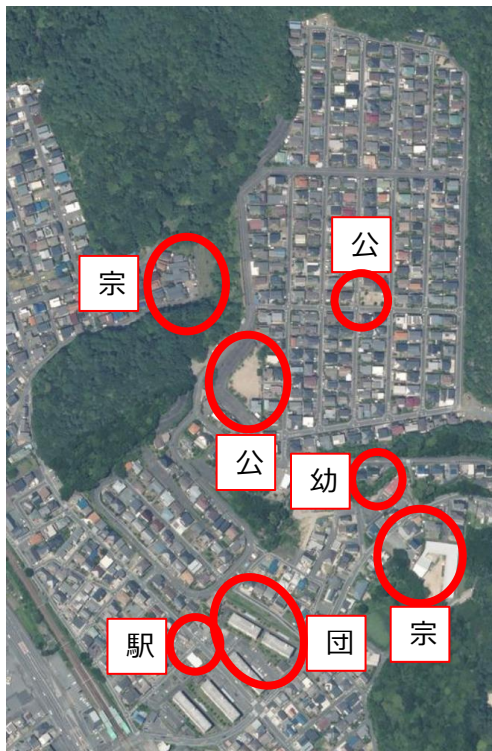
<凡例> 幼 : 幼稚園 宗 : 宗教施設 駅 : 駅 団 : 団地 公 : 公園

* 線路の3D都市モデルが存在しないため、グラウンドリスクとしての線路は加味されていない

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証内容 | エアリスクの可視化

御油地区のエアリスクは以下の通り

御油地区

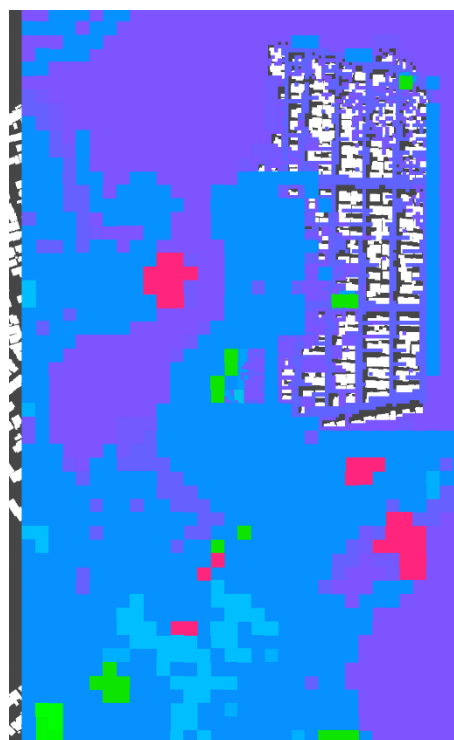


エアリスク

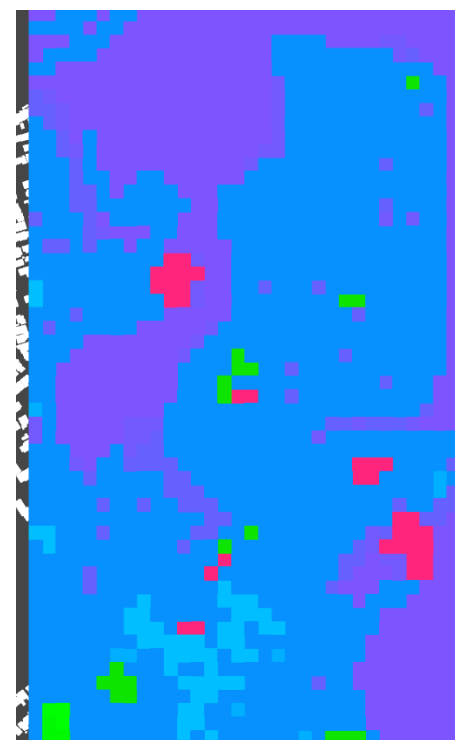
海拔高度 53m



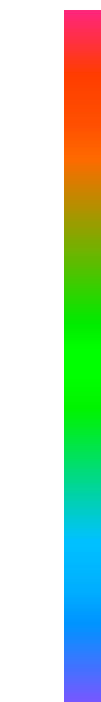
海拔高度 93m



海拔高度 133m



リスク高



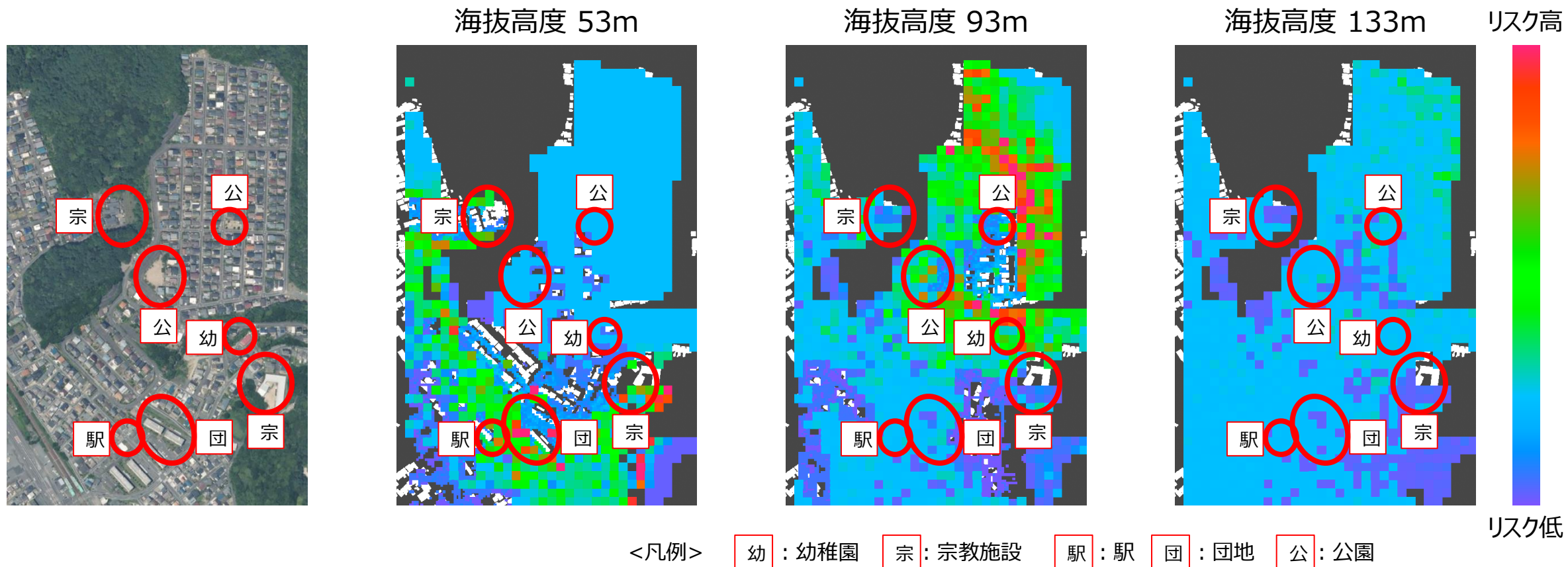
リスク低

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証内容 | リスク値の可視化

グラウンドリスクとエアリスクを踏まえた御油地区のリスク値は以下の通り

御油地区

設定されたリスク値の可視化（一例）



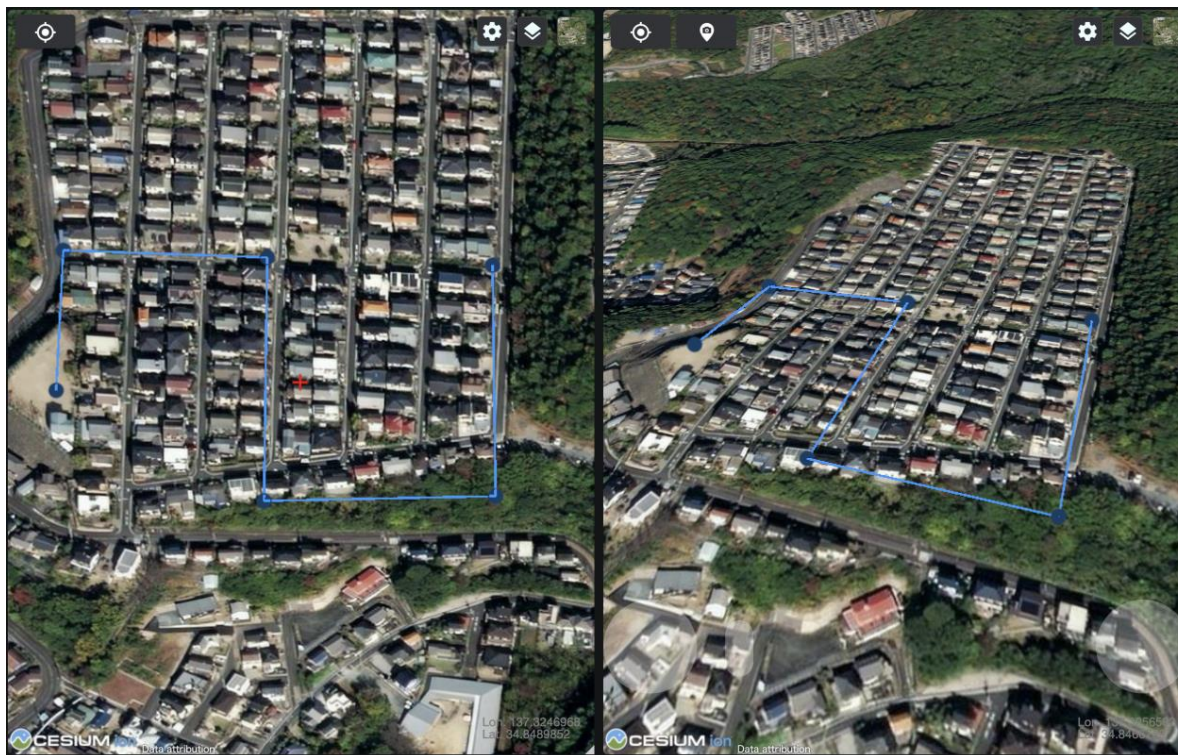
IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証内容 | シミュレーション対象ルート

ウェイポイントによって検証を行う飛行ルートを指定した

シミュレーション設定

項目		シミュレーション設定
ルート		ルート1
最大高度	海拔	100m
	対地	10m
飛行速度		5m/s
ルート全長		約600m
予測飛行時間		約4分
離陸地点からの最遠距離		約200m

シミュレーションイメージ



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証結果 | 生成されたリスク値を考慮しないルート

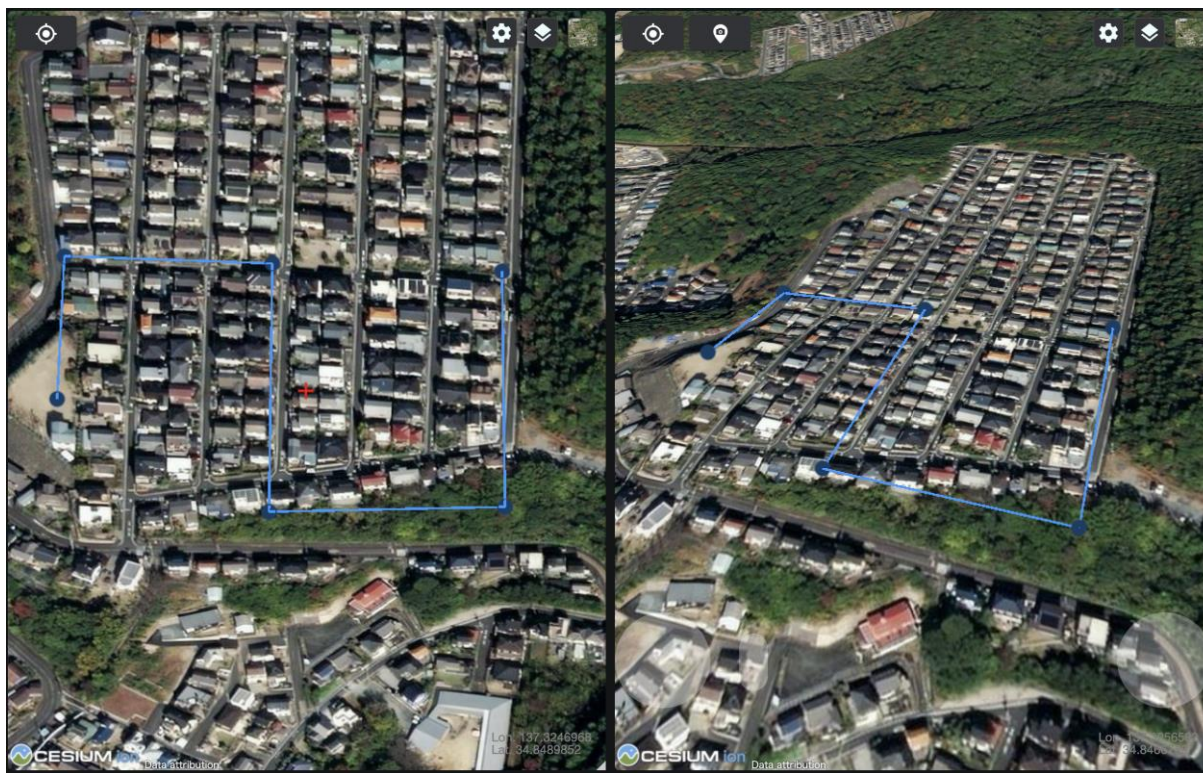
リスク値を考慮しない場合、ウェイポイント間を最短経路で結ぶため、手動で設定したルートから変化なし

シミュレーション設定

項目		シミュレーション設定
ルート		ルート1
最大高度	海拔	100m
	対地	10m
飛行速度		5m/s
ルート全長		約600m
予測飛行時間		約4分
離陸地点からの最遠距離		約200m

*手動設定した飛行ルートから変化なし

シミュレーションイメージ



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証結果 | 生成されたグラウンドリスクのみを考慮したルート

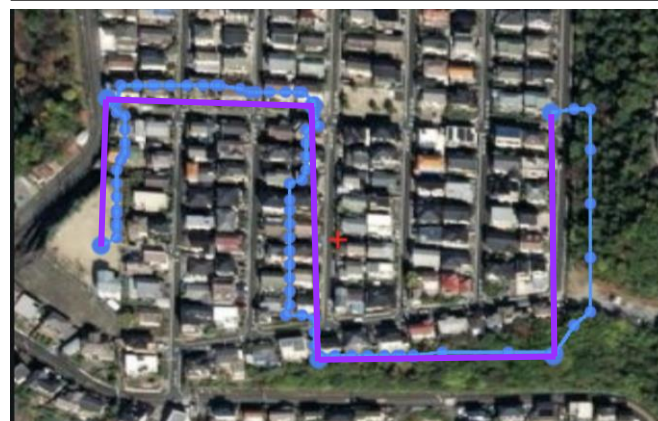
高いグラウンドリスクを回避したルートが生成されることが分かった

シミュレーション設定

項目		シミュレーション設定
ルート		ルート1
最大高度	海拔	100m
	対地	10m
飛行速度		5m/s
ルート全長		約700m
予測飛行時間		約6分
離陸地点からの最遠距離		約300m

*高いグラウンドリスクを回避した飛行ルートが生成された

生成されたルートとリスク値のマップ



a,b. 道路上よりもグラウンドリスク値を低く設定した住宅上を通過することでグラウンドリスクを回避

c. リスク値0の山林部のため、ルート変化なし

d. リスク値0の山林部を通過することでグラウンドリスクを回避

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証結果 | 生成されたグラウンドリスク・エアリスクを考慮したルート

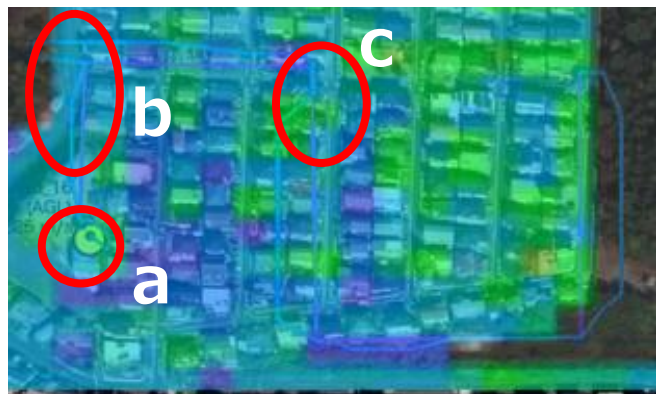
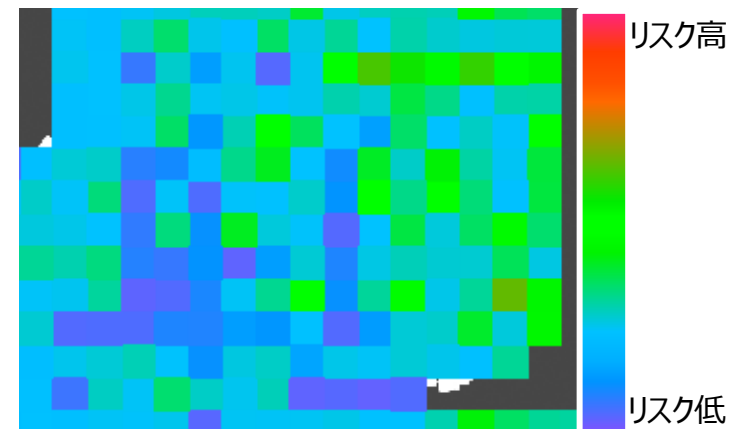
グラウンドリスクに加えてエアリスクを考慮することで、電波伝搬・風況シミュレーション結果を踏まえたルートが生成されたものの、一部リスクを回避しきれていないなどの課題も見つかった

シミュレーション設定

項目		シミュレーション設定
ルート		ルート1
最大高度	海拔	100m
	対地	10m
飛行速度		5m/s
ルート全長		約700m
予測飛行時間		約6分
離陸地点からの最遠距離		約200m

*高いグラウンドリスク・エアリスクを回避した飛行ルートが生成された

生成されたルートとリスク値のマップ



エアリスクを追加したことで発生したハイリスク空域（黄緑）を避けるルートを生成
 a. 公園の右側の建造物の横が、風況リスクが高い空域となり、ルートの変化が発生
 b. 枠内のエアリスクを避けルートの変化が発生
 c. 枠内のエアリスクを避けルートの変化が発生しているものの、十分に回避できていない

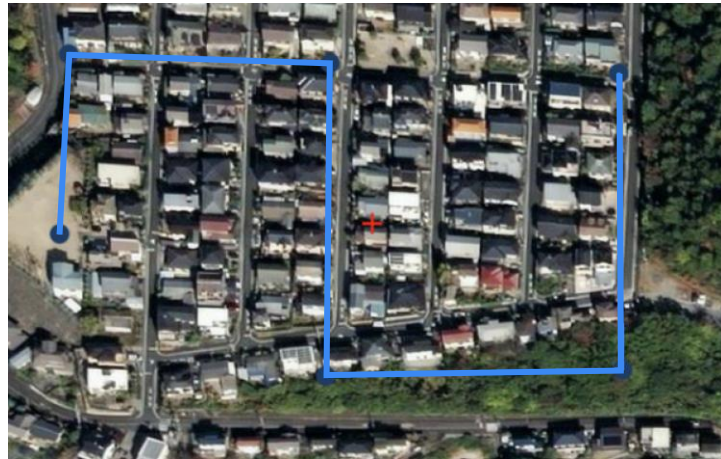
IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ①シミュレーター検証1 検証結果 | 結果サマリ



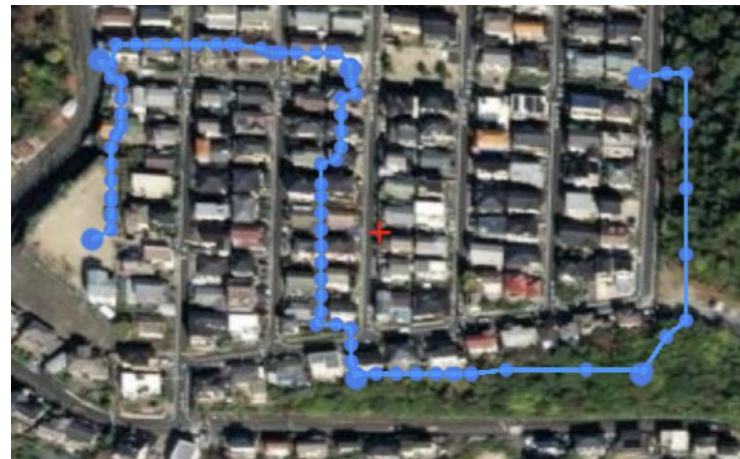
PLATEAU
by MLIT

グラウンドリスク・エアリスクによってルートが変化することが分かったが、リスクを重みづけするパラメータには改善の余地があるため、最適化を行う必要あり

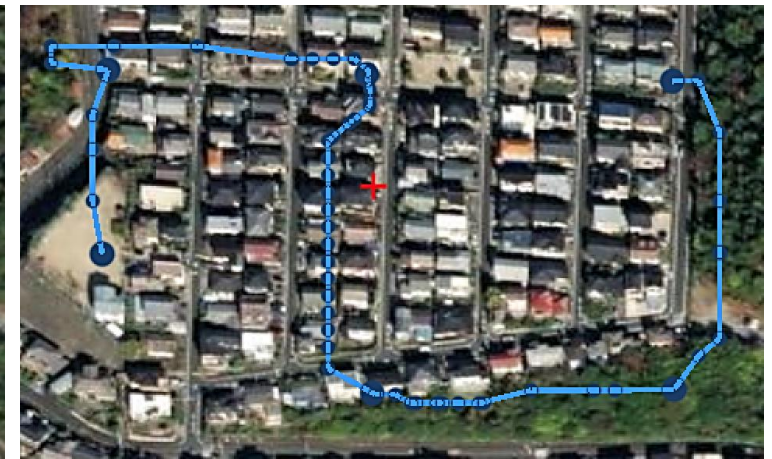
リスク設定によるシミュレーションルートの変化結果サマリ



リスク設定なし



グラウンドリスク



グラウンドリスク+エアリスク

- グラウンドリスク・エアリスクをそれぞれ考慮することで、ルートに変化が発生しアルゴリズムが機能していることが分かった
- 一方で各リスクを避けるルート（迂回路）の設定については、十分にリスクを回避できていないものもあり、リスクの評価パラメータは改善の余地あり

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価

②リスクパラメータの評価

シミュレーター実証1でリスク値の考慮によるルート変更が確認できた一方で、リスクを十分回避できていないケースもあったことから、リスク評価を行うパラメータ（重みづけ）と迂回ルートの関係性を評価する

リスクパラメータと迂回アルゴリズム

$$Cost = [F(P, Q) + C_0] \cdot d$$

$$F = \alpha_p \beta_w \cdot pw + \alpha_p \beta_r \cdot pr + \alpha_q \cdot Q$$

リスクコスト率：F(P,Q) (1/m)
 移動コスト率：C₀ (1/m)
 移動距離：d (m)
 風況リスクパラメータ：α_pβ_w
 電波伝搬リスクパラメータ：α_pβ_r
 グラウンドリスクパラメータ：α_q
 風況（渦度）：pw
 電波強度（dBm）：pr
 グラウンドリスク：Q

- 以下の条件で迂回ルートが選択される
 Cost（最短距離） > Cost（迂回ルート）

各パラメータとパラメータ評価の手法

α_q グラウンドリスク パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデルの属性データから設定したグラウンドリスク値を使い、住宅街におけるグラウンドリスクの変化に対して回避ルートが十分に回避できているかを確認し、回避パラメータを特定
$\alpha_p \beta_w$ 風況リスク パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> 風況シミュレーション結果から求められる渦度に着目し、渦の発生しやすい団地等の建物の近傍及び山沿いのエリアについて、回避すべきリスクと移動コストを踏まえて回避パラメータを特定
$\alpha_p \beta_r$ 電波伝搬リスク パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> 電波伝搬シミュレーション結果に含まれる3つの仮想基地局のそれぞれの影響から、回避すべきリスクと移動コストを踏まえて回避パラメータを特定

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 グラウンドリスクパラメータ検証内容 | 検証の概要

グラウンドリスクパラメータ以外のパラメータを0にした上で、グラウンドリスクパラメータを変化させた場合のルート設計への影響を基にパラメータとルートの関係を探る

検証内容

最適化検証における風況リスクパラメータの設定

目的

- グラウンドリスクパラメータのルート生成への影響の確認

$$F = \alpha_p \beta_w \cdot p_w + \alpha_p \beta_r \cdot p_r + \alpha_q \cdot Q$$

検証方法

- グラウンドリスクのみを設定した状態でパラメータを変更し、飛行ルート生成への影響を確認する
 - パラメータを変化させて迂回ルートを導出し、その迂回ルートが生成される境界値をパラメータとすることで影響を確認する
 - グラウンドリスクの設定値はシミュレータ検証1と同じものを利用する

最適化対象のパラメータ

α_q

グラウンドリスクパラメータの設定を変えてルートの変化を確認し、値を調整する

他のパラメータの設定値

$\alpha_p \beta_w = 0$

風況リスクのリスク値への影響を無効化

$\alpha_p \beta_r = 0$

電波伝搬リスクのリスク値への影響を無効化

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 グラウンドリスクパラメータ検証結果 | パラメータによるルートの変化

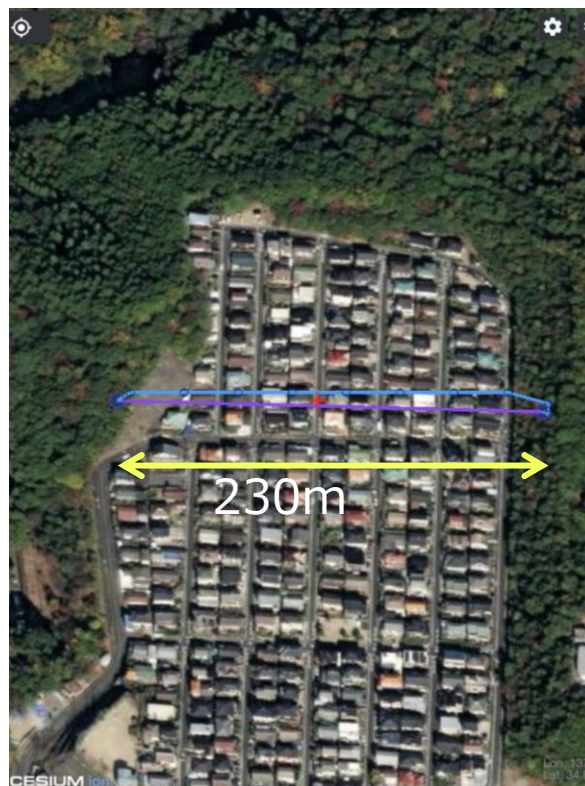
α_q が10のケースにおいて、直線ルートでのグラウンドリスクのコストのほうが迂回ルートによる追加の移動コストよりも高くなり、ルートに変化が生じた

— 最短距離ルート (リスク値の考慮なし)
 — シミュレーションルート

地上高90m (海拔高度180m)



$\alpha_q = 0.1$
 迂回なし:コスト=3,060



$\alpha_q = 1.0$
 迂回なし:コスト=5,530

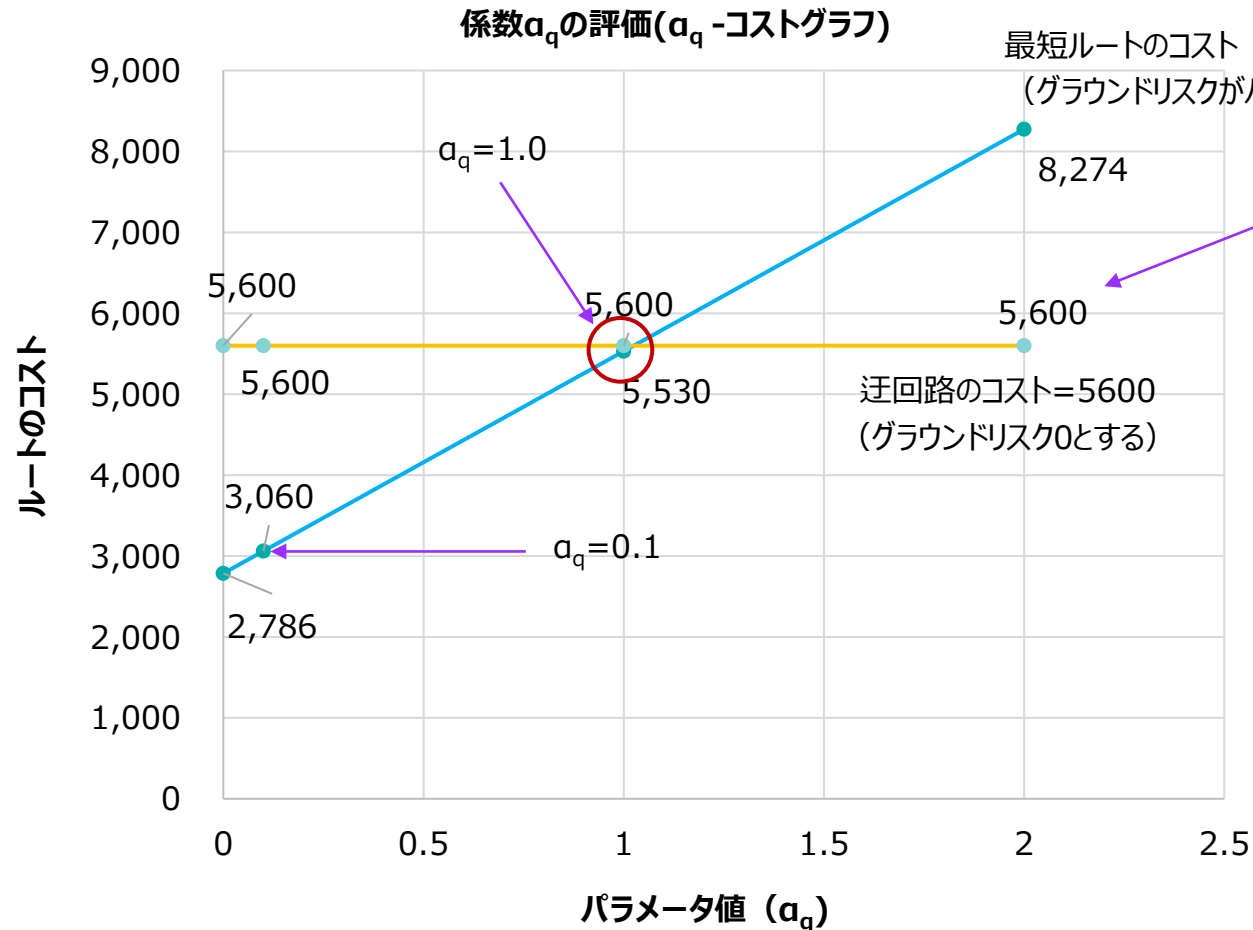


$\alpha_q = 10.0$
 迂回あり (300m) :コスト=5,608
 *迂回をしない場合のコストは30,226

迂回なしのルートにおいても、ボクセルの中心を通過する必要があることから、厳密には最短距離ではなくわずかな遠回りが発生する

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 グラウンドリスクパラメータ検証結果 | 迂回距離とグラウンドリスク

迂回路のコストとグラウンドリスクが交差するポイントを設定することで、リスクを回避しつつ過剰に迂回ルートを利用しないパラメータを設定することができる



移動コスト5,600 (グラウンドリスク=0)
 迂回距離300m (地図概算実測)

前頁より、以下が得られていることから、 $\alpha_q = 1.0$ が、本ケースにおいて無駄のない迂回ルート生成に適したパラメータであると考えられる。

- ① 迂回路のコストが約5,600
- ② およそ $\alpha_q = 1.0$ における最短ルートの迂回路のコストが5,600近く

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 グラウンドリスクパラメータ検証結果 | パラメータの評価結果

御油地区のマップを使った検証においてはパラメータ $a_q = 1$ と設定することで、適切な迂回路が生成されるとの結果が得られた

検証結果

- パラメータ $a_q = 1.0$ と設定することで、本ケースにおいて無駄なく迂回できることが確認できた
 - 経路1ではグラウンドリスクを許容し、ウェイポイント間を直線で結ぶルートが生成されている
 - 迂回ルートのコストを下げるため、経路を10だけリスクのない（リスク値0の）山林側に寄せたところ、狙い通りの迂回ルートが生成されることが分かった

グラウンドリスクパラメータ $a_q = 1.0$ によるルートの一例



地上高90m（海拔高度180m）



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 風況リスクパラメータ検証内容 | 検証の概要

風況リスクパラメータ以外のパラメータを0にした上で、風況リスクパラメータを変化させた場合のルート設計への影響を探る

検証内容

最適化検証における風況リスクパラメータの設定

目的

- 風況パラメータのルート生成への影響の確認

$$F = \alpha_p \beta_w \cdot p_w + \alpha_p \beta_r \cdot p_r + \alpha_q \cdot Q$$

検証方法

- 風況リスクのみを設定した状態でパラメータを変更し、飛行ルート生成への影響を確認する
- 渦が発生しやすい構造物（団地）と山をそれぞれ含むルートで検証を行う

最適化対象のパラメータ

$$\alpha_p \beta_w$$

風況リスクパラメータの設定を変えてルートの変化を確認し、値を調整する

他のパラメータの設定値

$$\alpha_p \beta_r = 0$$

電波伝搬リスクのリスク値への影響を無効化

$$\alpha_q = 0$$

グラウンドリスクのリスク値への影響を無効化

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 風況リスクパラメータ検証結果 | 構造物によって生じる渦流 (1/2)

$a_p\beta_w = 1,000$ で風況リスクの効果が現れ、集合住宅上空へ回避するルートが生成された。
建築物によって生じる渦流を避けるルートが生成されることを確認した

係数 $a_p\beta_w$ 評価 (迂回なし)

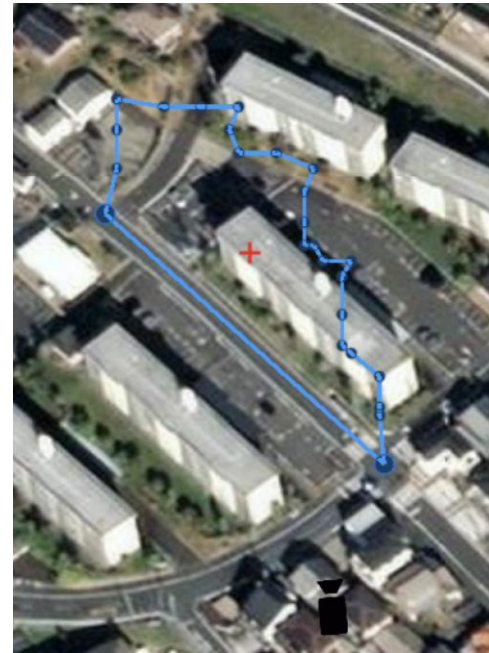
係数 $a_p\beta_w$ 評価 (迂回あり)



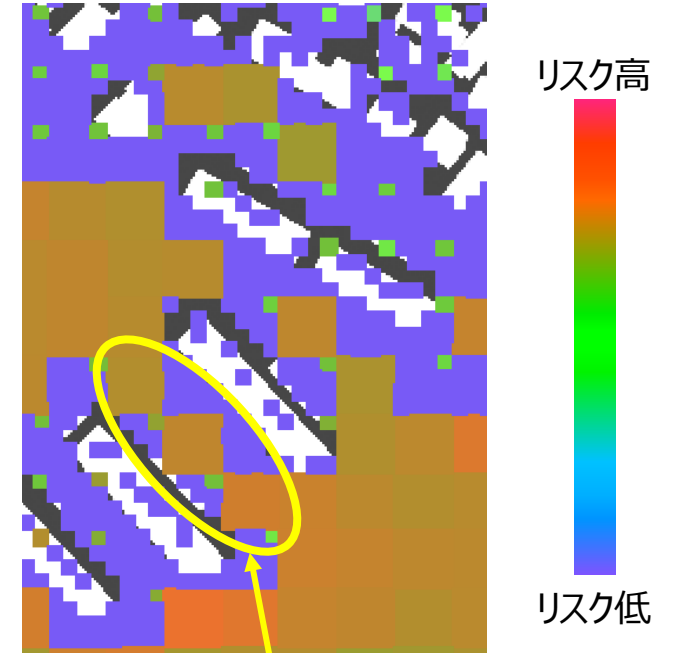
$a_p\beta_w = 10$
コスト=1,356
迂回なし



$a_p\beta_w = 100$
コスト=2,573
迂回なし



$a_p\beta_w = 1,000$
コスト=7,662
迂回あり



リスク値が高いエリアを回避している

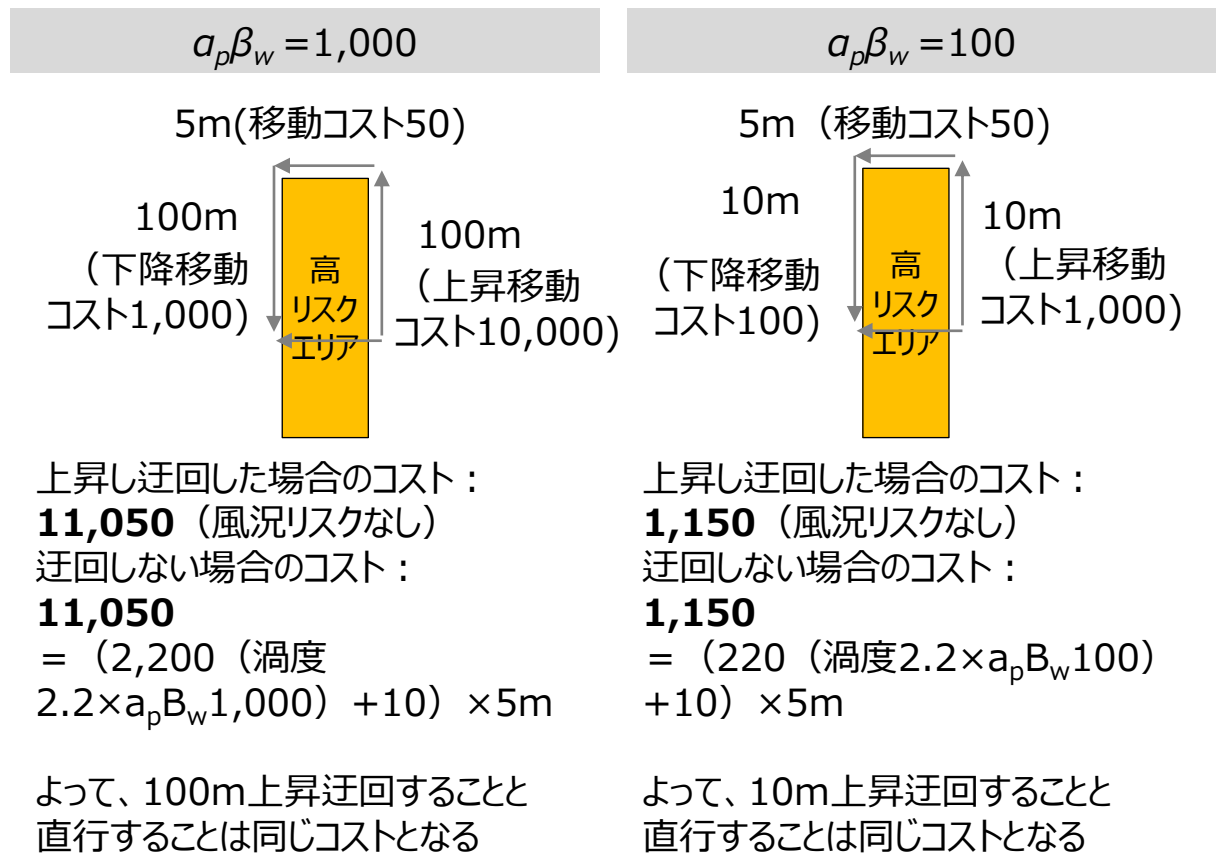
IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 風況リスクパラメータ検証結果 | 構造物によって生じる渦流 (2/2)

$a_p\beta_w = 1,000$ で生成されたルートが、渦度2.2の影響を前提とした場合に最適なルートであることが分かった

結果

- 渦度2.2のエリアを回避させる条件で考察すると、 $a_p\beta_w = 1,000$ では10m以上の上昇ルートでの回避は行われないことから、結果は妥当であるといえる
 - 前頁のエリアのシミュレーション結果から求められる渦度は2.2
 - 渦度1は1秒間に1radの回転 (= 角速度57度/s) を表す
 - 運用における $a_p\beta_w$ 値については、風速及び回避すべき渦度を選定した上で、100~1,000の範囲で設定されると考えられる

上昇ルートで回避する考え方

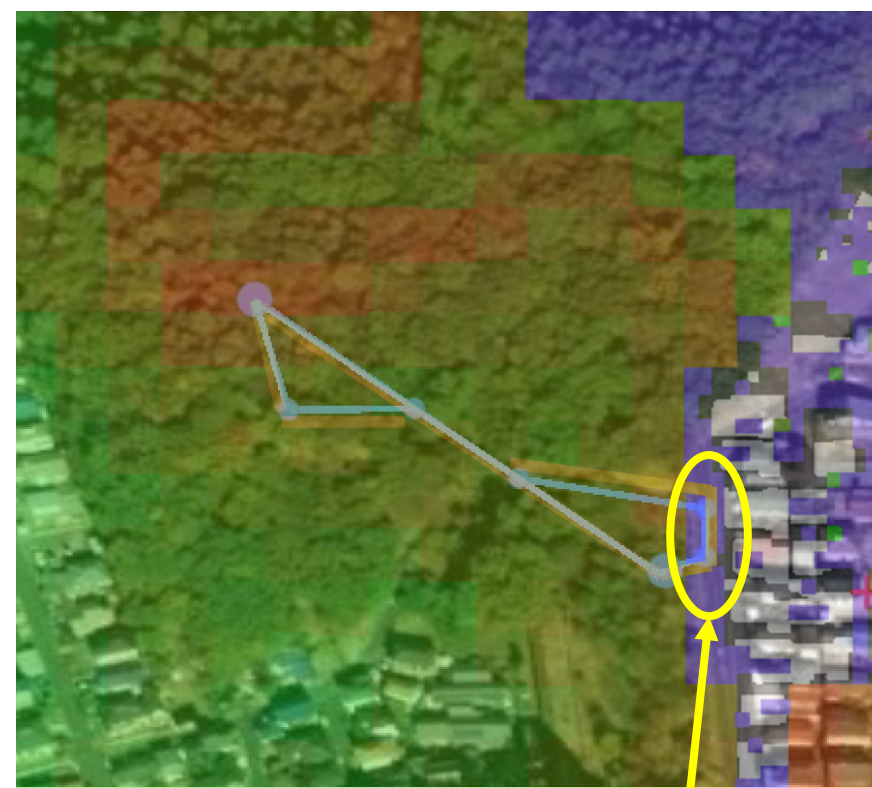
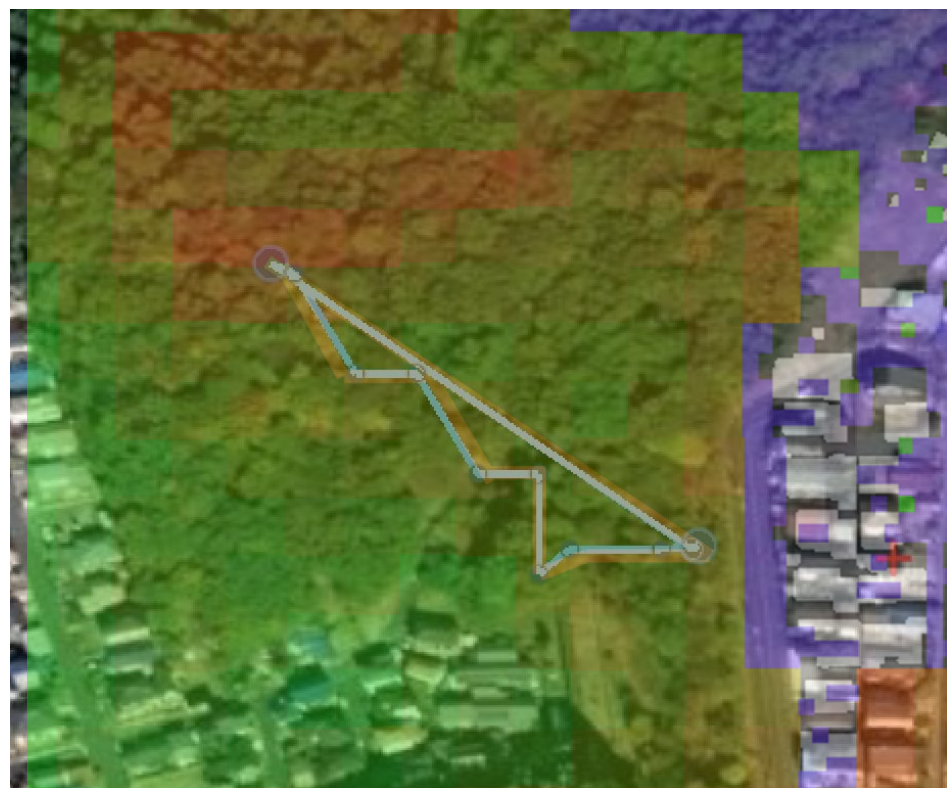


IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ② リスクパラメータの評価 風況リスクパラメータ検証結果 | 山によって生じる渦流

風況リスク影響が大きい迂回するケースにおいては、リスク値が低い領域を経由して目的地点に接近するコースを選択しており、期待通りの結果が得られている

$\alpha_p \beta_w = 100$ での生成ルート（十分に迂回できていない）

$\alpha_p \beta_w = 1,000$ での生成ルート（風況リスク低のエリアまで大きく迂回）



リスク高



リスク低

リスク値が低い領域を選択している

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 電波伝搬リスクパラメータ検証内容 | 検証の概要

電波伝搬リスクパラメータ以外のパラメータを0にした上で、電波伝搬リスクパラメータを変化させた場合のルート設計への影響を基に最適値を探る

検証内容

最適化検証における電波伝搬リスクパラメータの設定

目的

- 電波伝搬リスクパラメータのルート生成への影響の確認

$$F = \alpha_p \beta_w \cdot pw + \alpha_p \beta_r \cdot pr + \alpha_q \cdot Q$$

検証方法

- 電波伝搬リスクのみを設定した状態でパラメータを変更し、飛行ルート生成への影響を確認する
- シミュレーターで設置した3つの仮想基地局近傍*の飛行ルートで検証を行う
 - 仮想基地局A 出力10W、マイクロセル
 - 仮想基地局B 出力1W、ピコセル
 - 仮想基地局C 出力1W、ピコセル

*電波強度は距離の二乗に反比例して大きく減衰するため、電波塔から離れた地点においてルート設計に与える影響は少ないことから近傍のみを探索

最適化対象のパラメータ

$$\alpha_p \beta_r$$

このパラメータの設定を変えてルートの変化を確認し、値を調整する

他のパラメータの設定値

$$\alpha_p \beta_w = 0$$

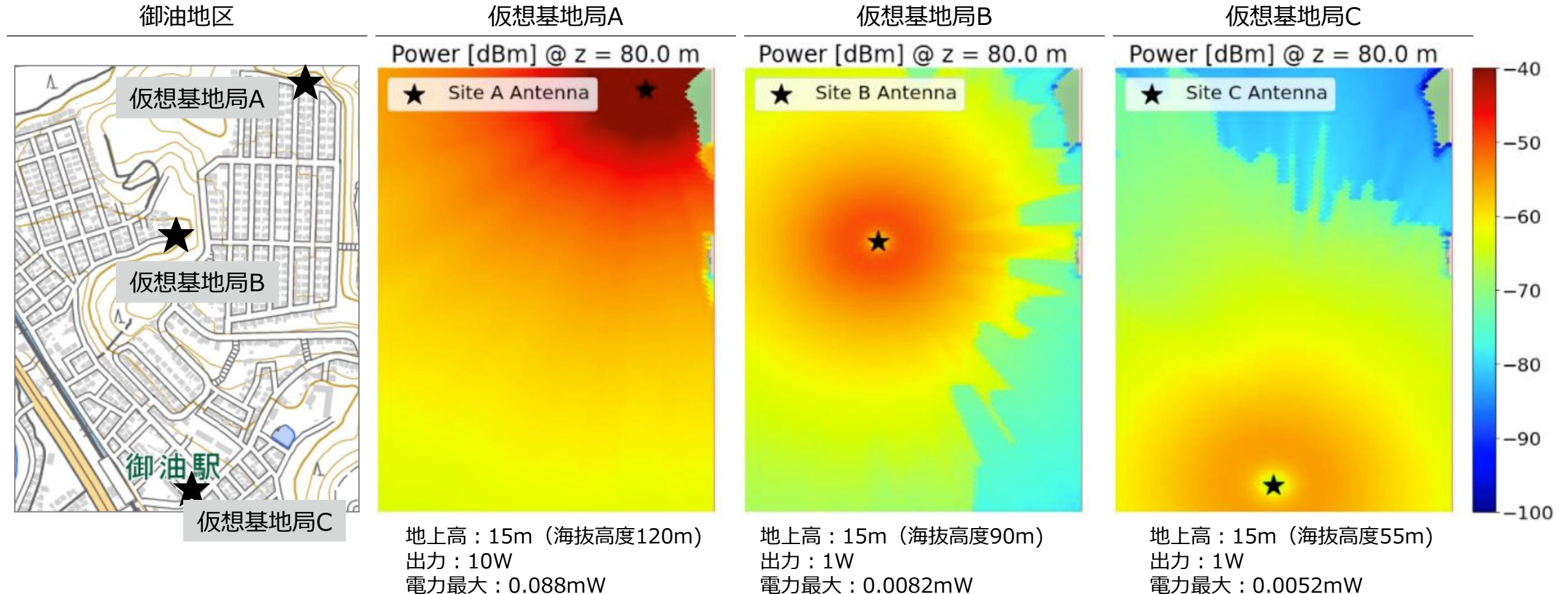
風況リスクのリスク値への影響を無効化

$$\alpha_q = 0$$

グラウンドリスクのリスク値への影響を無効化

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 電波伝搬リスクパラメータ検証内容 | 電波塔周辺の影響確認

3つの基地局の電波伝搬シミュレーション結果を利用して電波伝搬リスクパラメータの評価を行う



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価

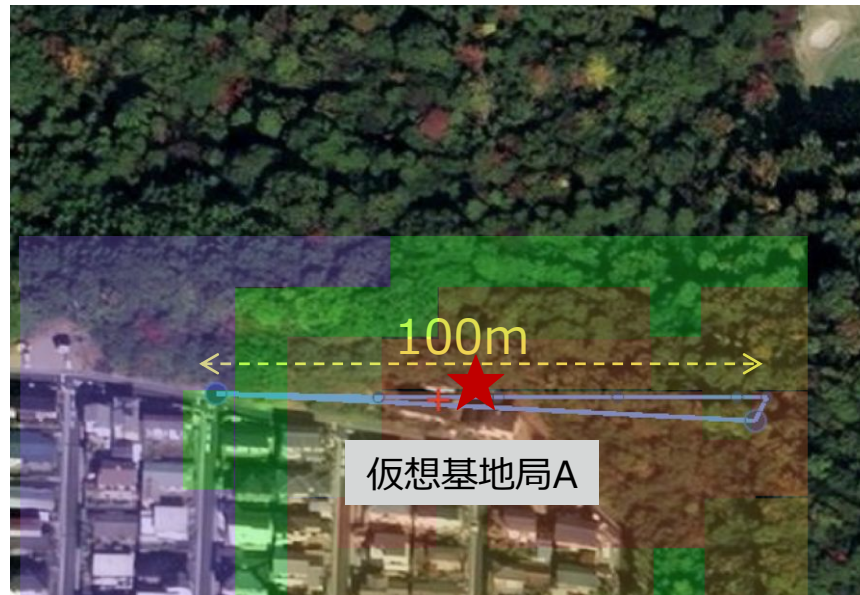
電波伝搬リスクパラメータ検証内容 | ルート生成への影響 基地局A

出力が10wである基地局Aの周辺では $a_p \beta_r = 1,000$ とすることで、数十mの迂回ルートが生成されることを確認した

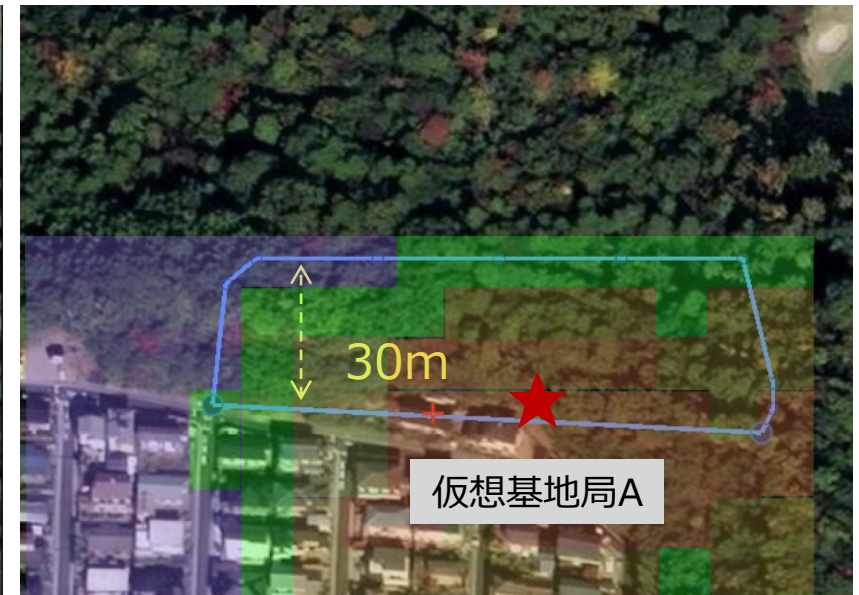
仮想基地局A (10w) 周辺での結果

- ルート設計高度：115m
- $a_p \beta_r = 1,000$ で電波発信位置から30m回避するルートが出力された
- 電波強度は距離の2乗に反比例して減衰することを考慮し、概算（桁レベル）で $a_p \beta_r$ は次のように定めることが適切と考えられる
- $a_p \beta_r = \text{係数} / \text{アンテナ電力} \times \text{回避距離}^2$ (係数=100)

$a_p \beta_r$ の変化に生成ルートへの影響



$a_p \beta_r = 100$
コスト=1,552



$a_p \beta_r = 1,000$
コスト=2,787

リスク高

リスク低

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 電波伝搬リスクパラメータ検証内容 | ルート生成への影響 基地局B

出力が基地局Aの1/10の1wである基地局Bの周囲においては、 $a_p \beta_r = 10,000$ では迂回ルートを生成せず、 $a_p \beta_r = 100,000$ まで大きくすることで迂回ルートを生成することを確認した

仮想基地局B (1w) 周辺での結果

- ルート設計高度：85m
- $a_p \beta_r = 10,000$ では回避せず、 $a_p \beta_r = 100,000$ で回避が認められる
- 基地局Bの概算式
- $a_p \beta_r = 100 / \text{アンテナ電力} \times \text{回避距離}^2 = 100 / 1 \times 50 \times 50 = 250,000$

$a_p \beta_r$ の変化に生成ルートへの影響



$a_p \beta_r = 10,000$
コスト=4034



$a_p \beta_r = 100,000$
コスト=4334

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 電波伝搬リスクパラメータ検証内容 | ルート生成への影響 基地局C

出力が基地局Aの1/10の1wである基地局Cの周辺においては $a_p \beta_r = 10,000$ では迂回ルートを生成せず、 $a_p \beta_r = 200,000$ まで大きくすることで迂回ルートを生成することを確認した

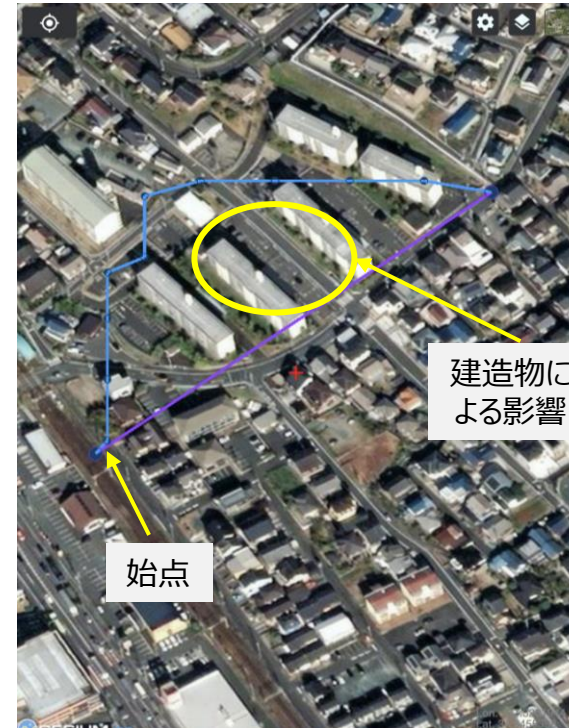
仮想基地局C (1w) 周辺での結果

- ルート設計高度：55m
- $a_p \beta_r = 10,000$ では回避せず、 $a_p \beta_r = 200,000$ で回避が認められる
 - 基地局Aの電力の1/10のため、 $a_p \beta_r$ に10倍の差がある
- (電波伝搬と関係なく) 始点周辺に高い建造物が存在するため、北方向を優先してルートが探索され、M字状の経路となった
- 右の迂回ルートでは、住宅の影響によって生じる電波強度の影のルートを選択し、電波の強い領域を回避している

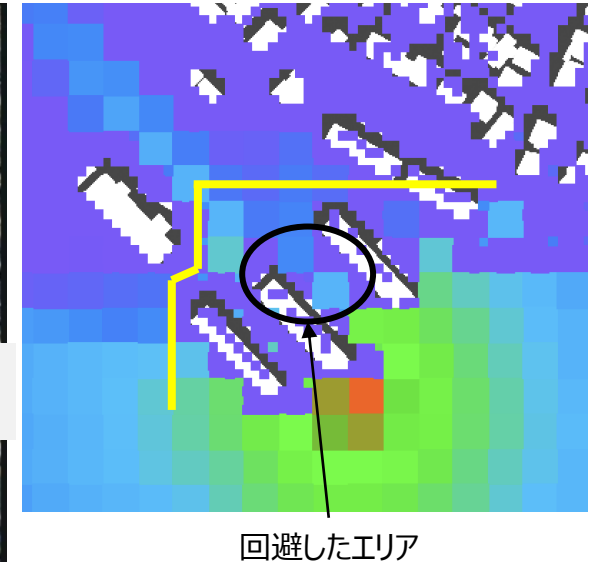
$a_p \beta_r$ の変化に生成ルートへの影響



$a_p \beta_r = 10,000$
コスト=4,618



$a_p \beta_r = 200,000$
コスト=5,119



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ②リスクパラメータの評価 検証結果

所望の条件で適切なルートが生成できるパラメータを得ることができた

評価から得られたパラメータ

評価から得られたパラメータによるルート生成の一例

$$\alpha_q = 1$$

グラウンドリスク
パラメータ

- グラウンドリスク10に対して、10m迂回するルートを生成する設定

$$\alpha_p \beta_w = 10$$

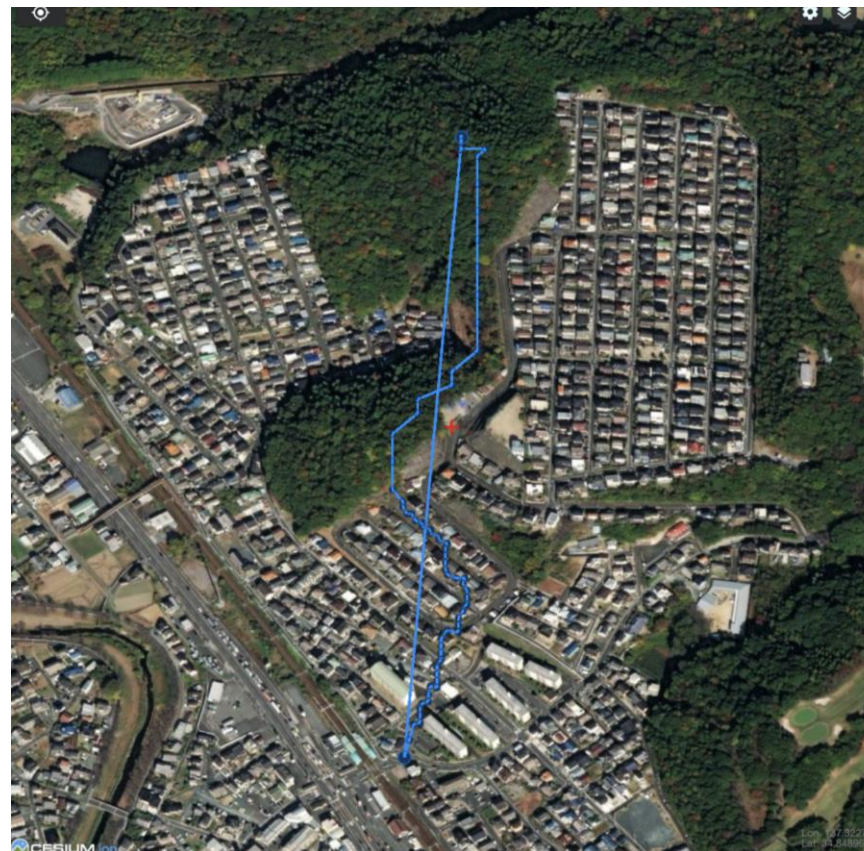
風況リスク
パラメータ

- 低レベルの渦（渦度2.2）のエリアを迂回するために1m上昇する設定

$$\alpha_p \beta_r = 1,000$$

電波伝搬リスク
パラメータ

- 10W出力局付近を50m程度迂回し、1W出力局付近を迂回しない設定



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ③シミュレータ検証2 検証内容



PLATEAU
by MLIT

理由付けがされたパラメータを利用した場合に、複雑なルートにおいても適切なルートシミュレーションができるかを確認する

検証内容

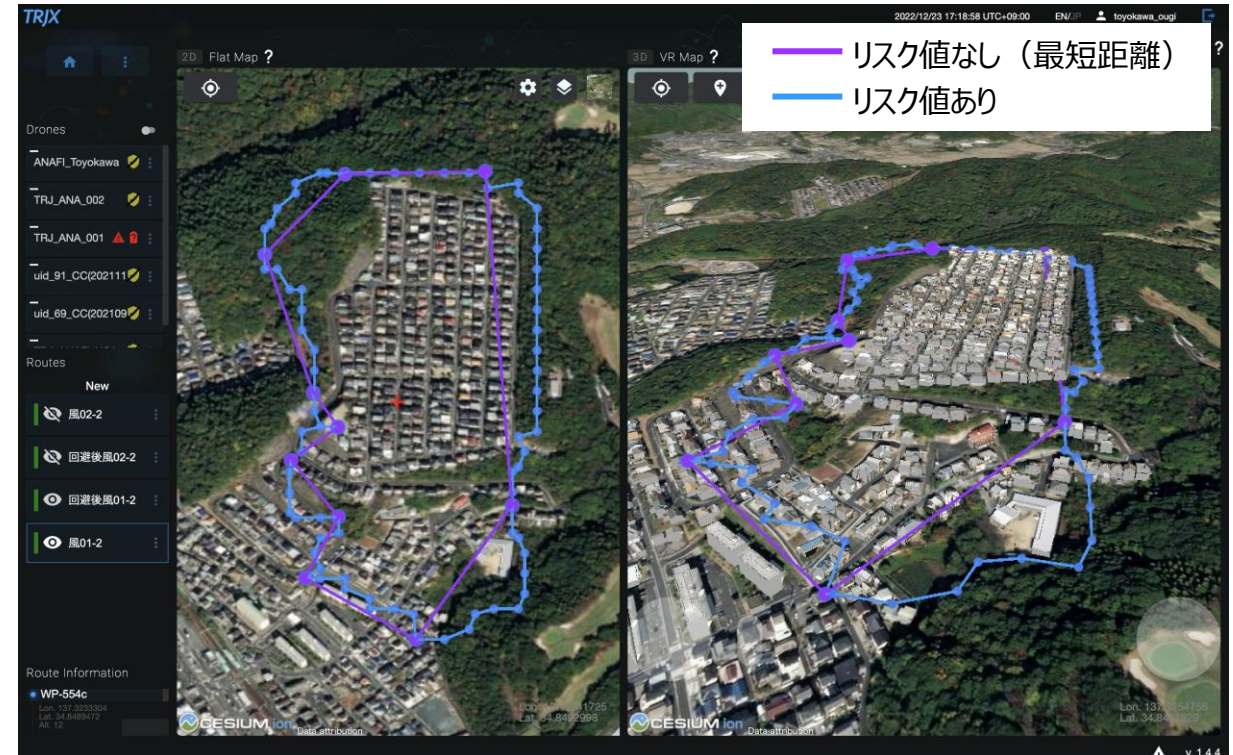
シミュレーション検証2のルートイメージ

目的

- シミュレーション検証1に以下の変更を加えた場合に、複雑なルートにおいて適切なルートシミュレーションができるかを確認する
 - 評価されたパラメータの利用

検証方法

- より広範なエリアを飛行するようにウェイポイントを設定し、高度帯を変えることで、グラウンドリスク・エアリスクを踏まえた適切なルートが生成されるかを確認する



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ③シミュレータ検証2 検証内容 | リスクパラメータの設定値

グラウンドリスクと風況の重みに対し電波強度の重みが小さく、ルート設計に電波強度の影響が反映されにくかったため、風況と電波強度の重み付けのパラメータを変更し、グラウンドリスク・エアリスクを評価

シミュレーター検証1におけるパラメータの設定値

パラメータの変更後の設定値

<p>リスクコスト率 $F(P, Q)$</p>	$F = \alpha_p \cdot P + \alpha_q \cdot Q$ <div style="border: 2px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">$\alpha_p = 1, \alpha_q = 1$</div>	<p>リスクコスト率 $F(P, Q)$</p>	$F = \alpha_p \cdot P + \alpha_q \cdot Q$ <div style="border: 2px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">$\alpha_p = 1, \alpha_q = 1$</div>
<p>エアリスク $P(pw, pr)$</p>	$P = \beta_w \cdot pw + \beta_r \cdot pr$ <div style="border: 2px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">$\beta_w = 100, \beta_r = 1$</div> <p>$\beta_w$: 風況の重みづけ</p> <p>β_r : 電波強度の重みづけ</p>	<p>エアリスク $P(pw, pr)$</p>	$P = \beta_w \cdot pw + \beta_r \cdot pr$ <div style="border: 2px solid red; padding: 2px; display: inline-block;">$\beta_w = 10, \beta_r = 1,000$</div> <p>$\beta_w$: 風況の重みづけ</p> <p>β_r : 電波強度の重みづけ</p>



IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ③シミュレータ検証2 検証内容 | グラウンドリスクの設定値

豊川市の3D都市モデルに組み込まれた、より細かな属性を使いリスク値を追加設定。これまでに設定したリスク値とパラメータ評価の結果を踏まえて数値を設定した

<凡例> **赤字**：追加・変更パラメータ
黒文字：変更なしパラメータ

属性（大）	属性（小）	リスク値
地物	建築物	1
	鉄道	1,000
	道路	10
	広場	10
	通路	10
地域地区の区分	歴史的風土特別保存地区	10
	第1種歴史的風土保存地区	10
	病院第2種歴史的風土保存地区	10
	伝統的建造物群保存地区	10
	航空機騒音障害防止地区	100
	航空機騒音障害防止特別地区	100
	その他	1
土地利用用途	住宅用地	1
	商業用地	1
	工業用地	1

属性（大）	属性（小）	リスク値
土地利用用途	農林漁業施設用地	1
	公益施設用地	1
	道路用地	10
	交通施設用地	10
	公共空地	10
	太陽光発電のシステムを直接整備している土地	10
	平面駐車場	1
	建物跡地、資材置場、改変工事 中の土地、法面	1
	道路・鉄軌道敷	10
	建築物を示す面	建築物の立体形状の底面
建築物の形態	普通無壁舎	10
建築物の主な 使い道	官公庁施設	80

属性（大）	属性（小）	リスク値
建築物の主な 使い道	宿泊施設	3
	商業系複合施設	7
	業務施設	1
	商業施設	5
	住宅	2
	共同住宅	20
	店舗等併用住宅	15
	店舗等併用共同住宅	45
	作業所併用住宅	30
	文教厚生施設	90
	運輸倉庫施設	50
	工場	40
	農林漁業用施設	60
	供給処理施設	70
その他	9	

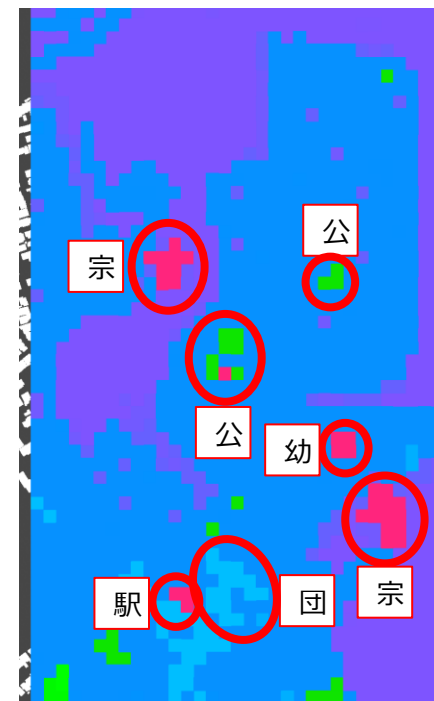
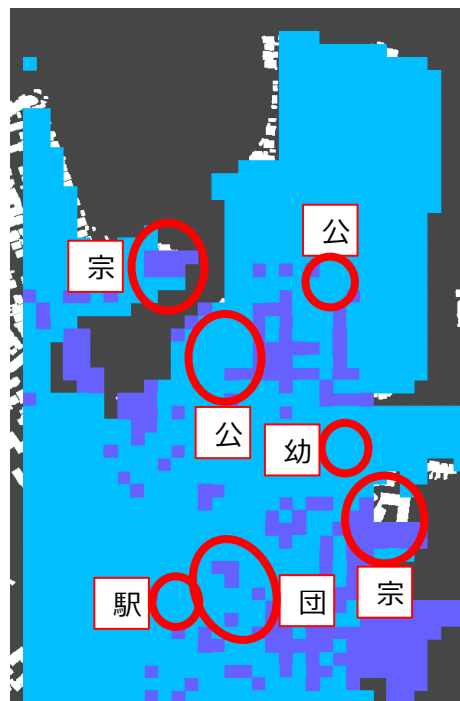
IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ③シミュレータ検証2 検証内容 | グラウンドリスクの可視化

汎用的な属性だけでなく、この地域の特性に合わせた属性にリスク値を割り当てることで、より具体的な地物に対するグラウンドリスクが設定された

御油地区

シミュレーション検証1でのグラウンドリスク

シミュレーション検証2でのグラウンドリスク



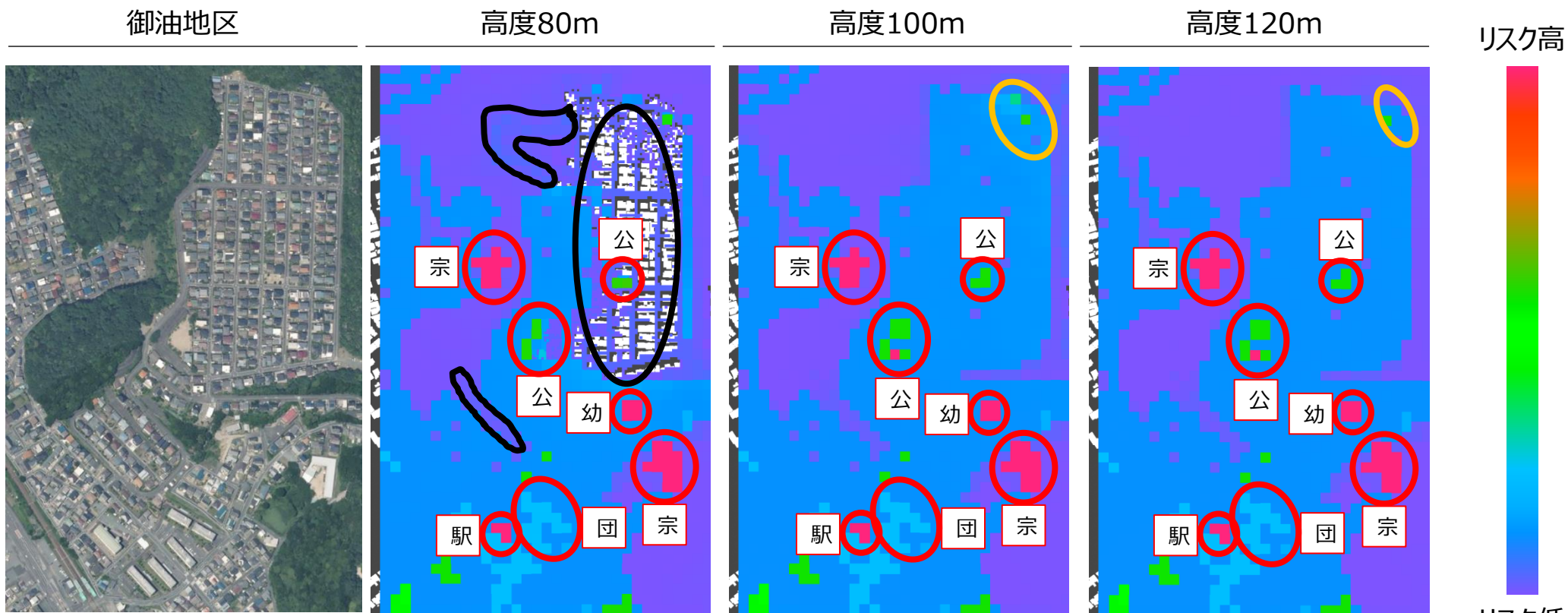
リスク高

リスク低








<凡例> 幼 : 幼稚園 宗 : 宗教施設 駅 : 駅 団 : 団地 公 : 公園

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ③シミュレータ検証2 検証内容 | リスク値の設定

新たなグラウンドリスクの設定とエアリスクを組み合わせることで、より精緻なリスク値の設定がされている



*図中の白い部分は建物内部 (リスク値算出対象外)

凡例	 : 風況リスク	 : 電波リスク	 : 幼稚園	 : 宗教施設	 : 駅	 : 団地	 : 公園
----	---	--	---	--	---	--	--

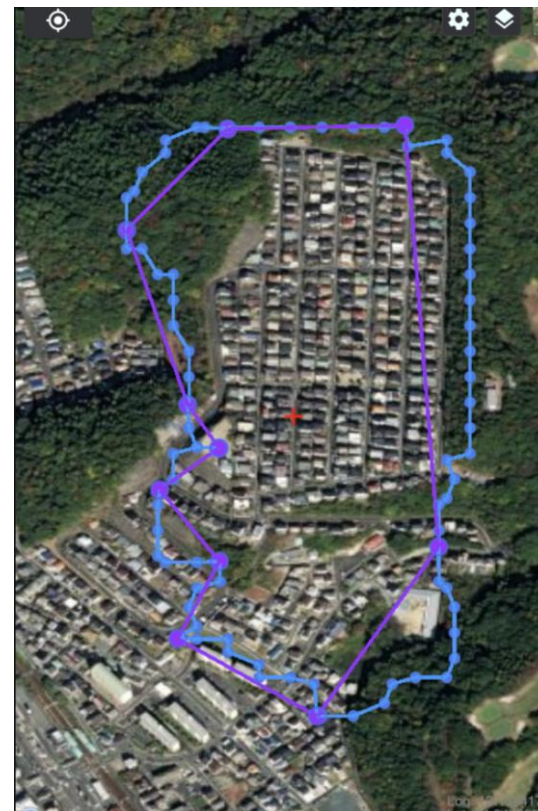
IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ③シミュレータ検証2 検証内容 | シミュレーションルートの詳細

ウェイポイントの高度帯を海拔100mと120mの2パターンに変化させ、エアリスクによるルートの変化を確認する

シミュレーション設定

項目		高度100m	高度120m
ルート		最適ルート	
最大高度	海拔	100m	120m
	対地	10m	30m
飛行速度		5m/s	5m/s
ルート全長		約2.2km	約2.2km
予測飛行時間		約7分	約7分
離陸地点からの最遠距離		約470m	約470m

シミュレーションイメージ



高度100mルート



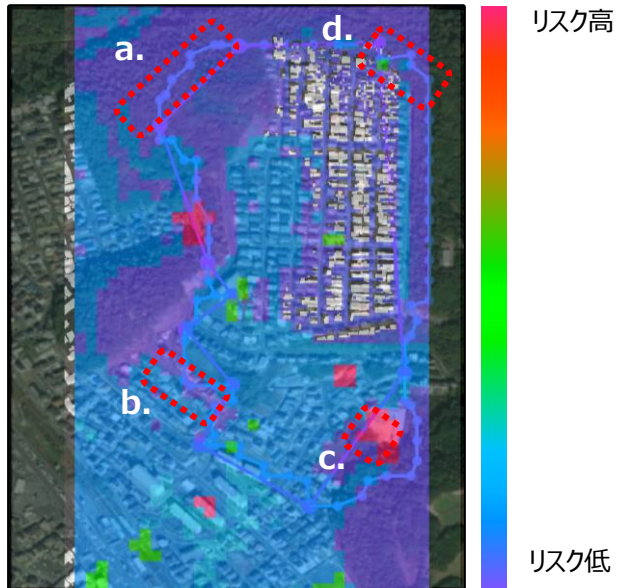
高度120mルート

IV. 実証技術の検証 > 1. シミュレーション精度の検証 > ③シミュレータ検証2 検証結果

ウェイポイントの高度帯のみを変えて比較することで、3次元空間のエアリスクを反映した最適なルートとして別ルートが生成されることがわかった

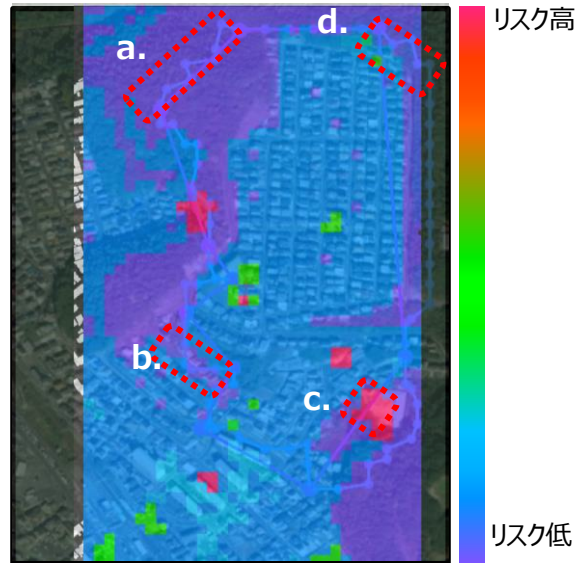
生成されたルートの確認 (①高度100mルート)

- a. 風況リスク値の高い部分を回避
- b. 紫セルのよりリスク値の低い部分を選択
- c. 赤セルのリスク値が高い部分を回避
- d. 公共空地のリスク値が高い部分を回避



生成されたルートの確認 (②高度120mルート)

- a. ①に比べ風況リスク値が低くなったため、最短経路を選択
- b. 紫セルのよりリスク値の低い部分を選択
- c. 赤セルのリスク値が高い部分を回避
- d. ①に比べ電波リスクが高い高度のため、よりリスク値が高い部分を回避



結果・考察

検証結果

- パラメータ変更により、グラウンドリスク・エアリスクを回避したルートが生成されていることが確認できた
 - グラウンドリスクを回避していることが確認された
 - 異なる高度帯のエアリスクが反映され、2つのルートに差が確認された

示唆

- 3D都市モデルを利用したグラウンドリスク・エアリスクの算出によって、リスク値に従った最適なルートシミュレーションができることが分かった

IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容

実機検証の全体像

豊川市の御油地区と市街地でそれぞれ実機検証を行い、御油地区では風況の影響を確認する。市街地では、パラメータ評価を行った御油地区以外でのルート生成であり、ルートシミュレータの汎用性を確認する

御油地区での検証内容

目的

- シミュレータで生成された飛行ルートを実機で飛行ができること、風況リスク値の高いエリアを迂回する事で風況の影響が軽減されることを確認する

検証方法

- 実機を飛行させ、飛行ログを確認する
 - 姿勢の勾配・傾斜（ピッチ）の揺れをリスク値の設定の有無で比較
- 検証を行ったシナリオは以下の2シナリオ

市街地での検証内容

目的

- パラメータ評価を行った御油地区以外でルート生成と実機飛行を行い、最適ルートシミュレータの汎用性を検証する

検証方法

- 実機を飛行させ、飛行ログからルート上を飛行したかを確認する
- 検証を行ったシナリオは以下の4シナリオ

ルート	周回ルート	
リスク値	設定なし	設定あり
対地高度100m	シナリオ#1	シナリオ#2

ルート	市街地 南周回ルート		市街地 北周回ルート	
リスク値	設定なし	設定あり	設定なし	設定あり
対地高度 80m	シナリオ#3	シナリオ#4	シナリオ#5	シナリオ#6

IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容 利用するドローン詳細

開発システムであるTRJXとの直接接続が可能であり、汎用型のドローンとして入手しやすいことからParrot Anafiを実機検証に利用した

スペック詳細

項目	内容
機種	Parrot Anafi
サイズ	縦175mm・横240mm・高さ65mm
重量	0.32kg
バッテリー	6cell Lipobattery 16,000mAh
通信	通信距離4km (コントローラー使用時) 操縦:2.4Ghz
映像	LTE:960*720 6p (3~5秒遅延) 内部収録:4k 30p (GoPro HERO5)
飛行時間	25分

ドローン画像



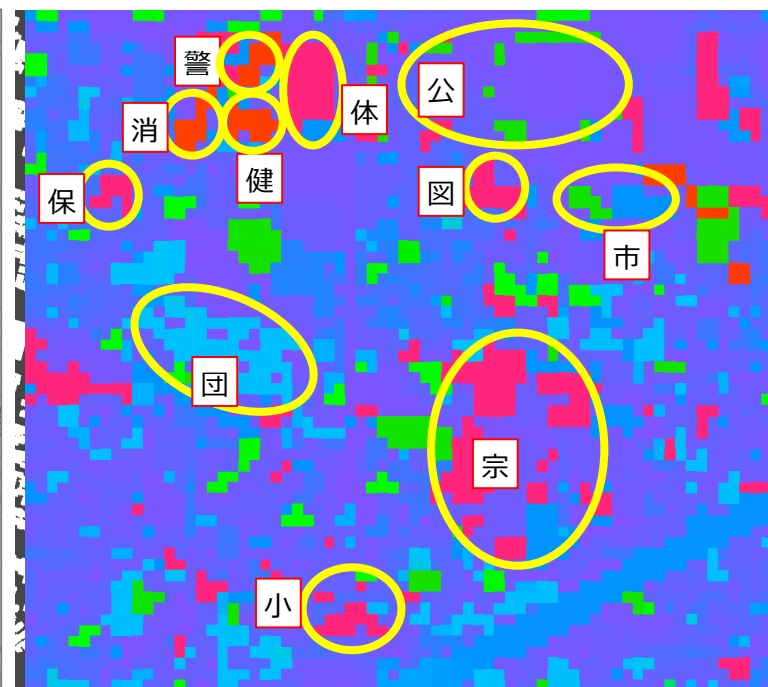
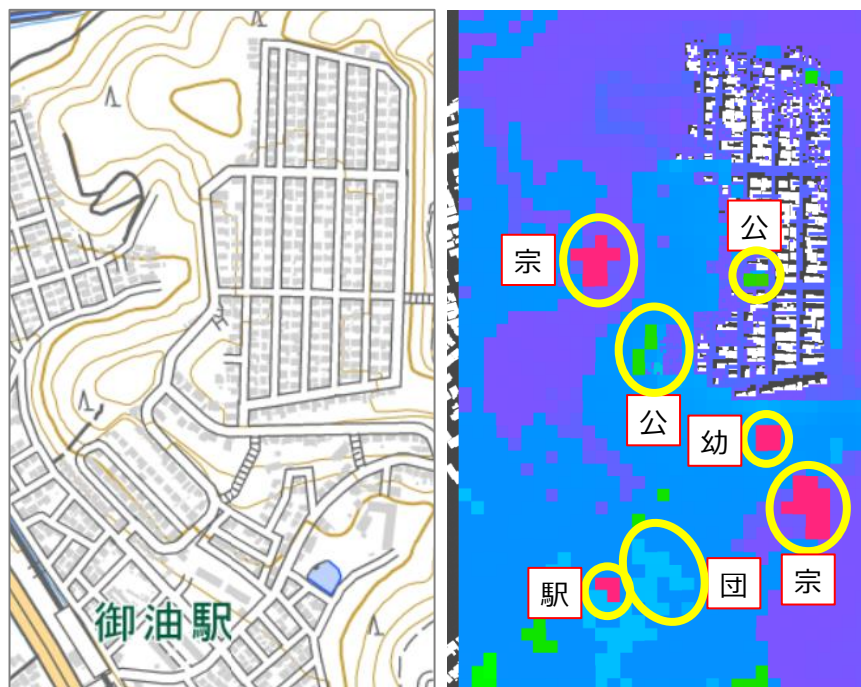
出典 : <https://kmttech.jp/drone/parrot-anafi-work>

IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容 対象エリアの主要地物とリスク値

御油地区と市街地の主要地物の位置関係とリスク値（対地高度80m）を示す

御油地区

市街地（諏訪町）



<凡例>

- 警 警察署
- 体 体育館
- 消 消防署
- 保 保育所
- 幼 幼稚園
- 健 保健所
- 図 図書館
- 市 市役所
- 小 小学校
- 宗 宗教施設
- 公 公園
- 団 団地
- 駅 駅

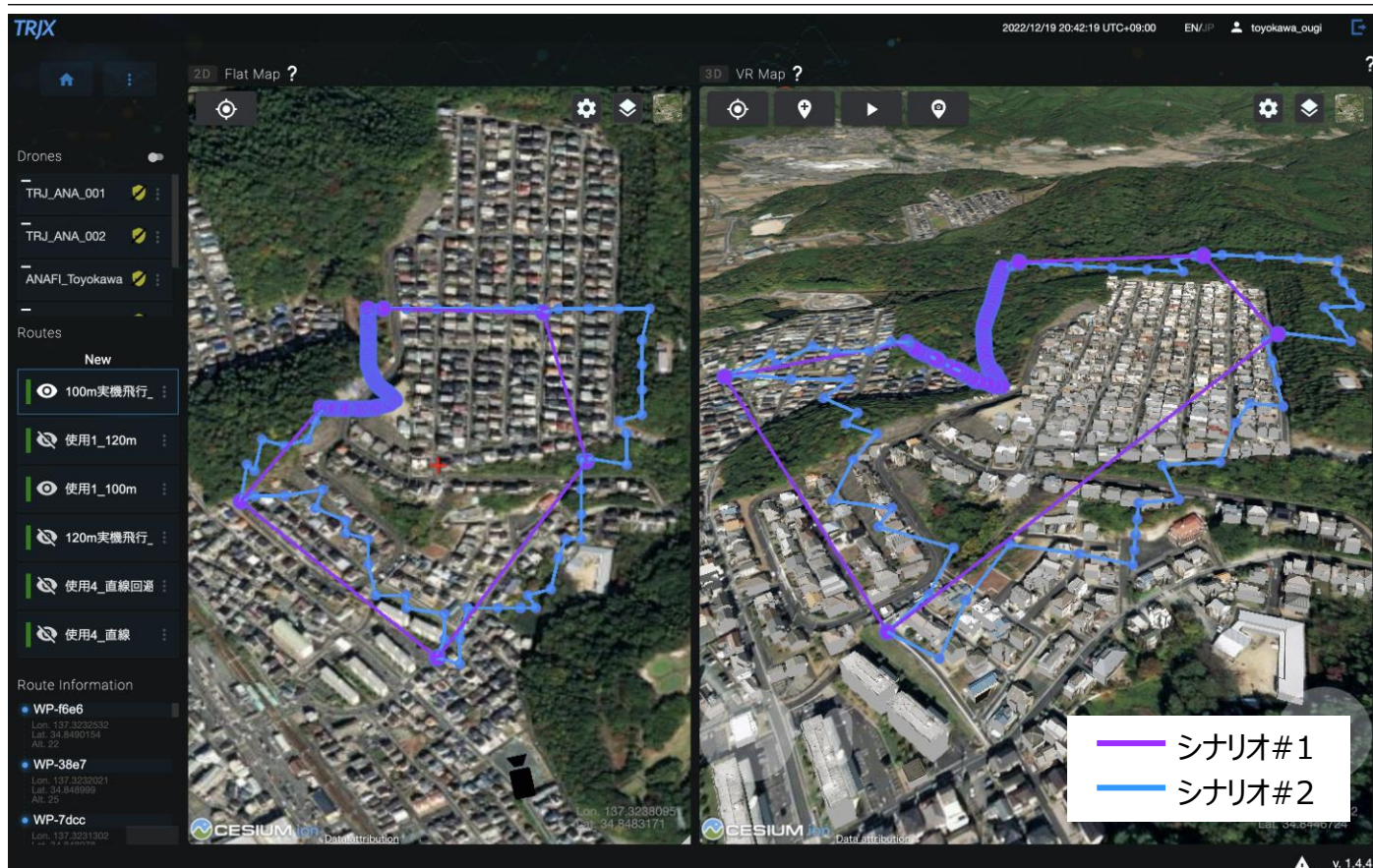
IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容

御油地区 | 周回ルート

シミュレーション設定

項目		シナリオ#1	シナリオ#2
ルート		実機飛行_周回ルート	
リスク値設定		なし	あり
最大高度	海拔	189m	185m
	対地	101m	101m
飛行速度		5m/s	
ルート全長		1,343m	1,854m
予測飛行時間		9分10秒	9分15秒
離陸地点からの最遠距離		312m	332m

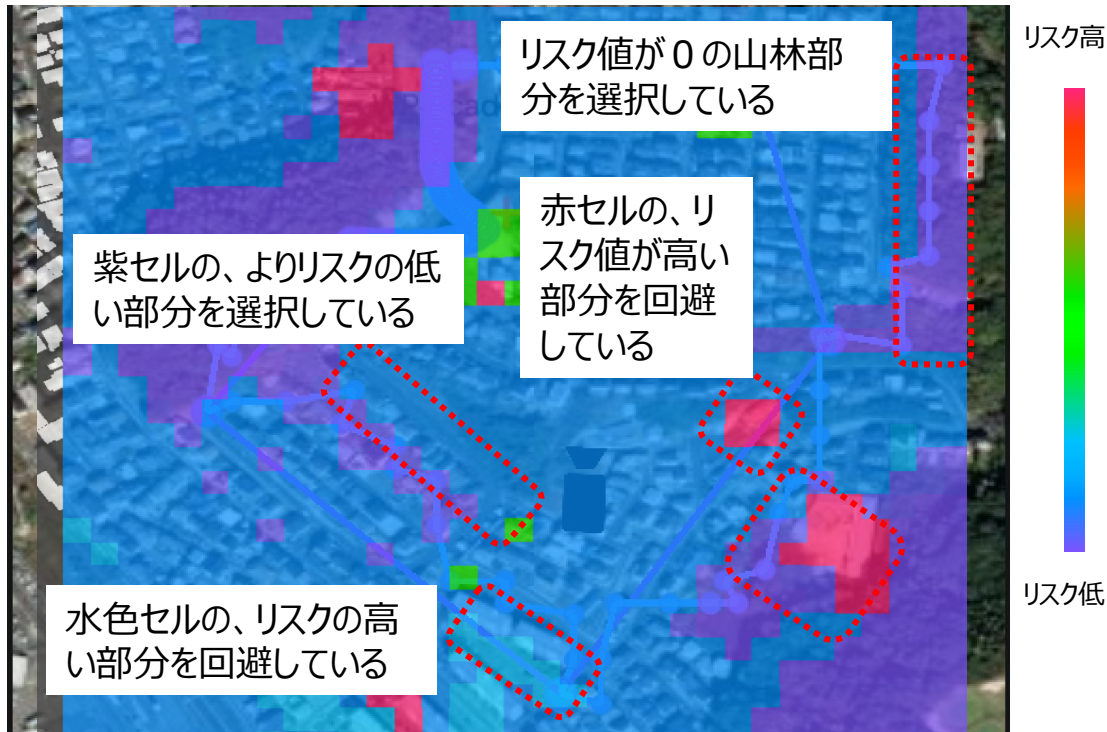
シナリオ#1・#2のルートイメージ



IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容 御油地区 | 周回ルートにおけるリスク値の状況

周回ルート (リスク値設定有り)

リスク値の低い場所が選択されたルートを生じた



リスク値重ね表示



マップ表示

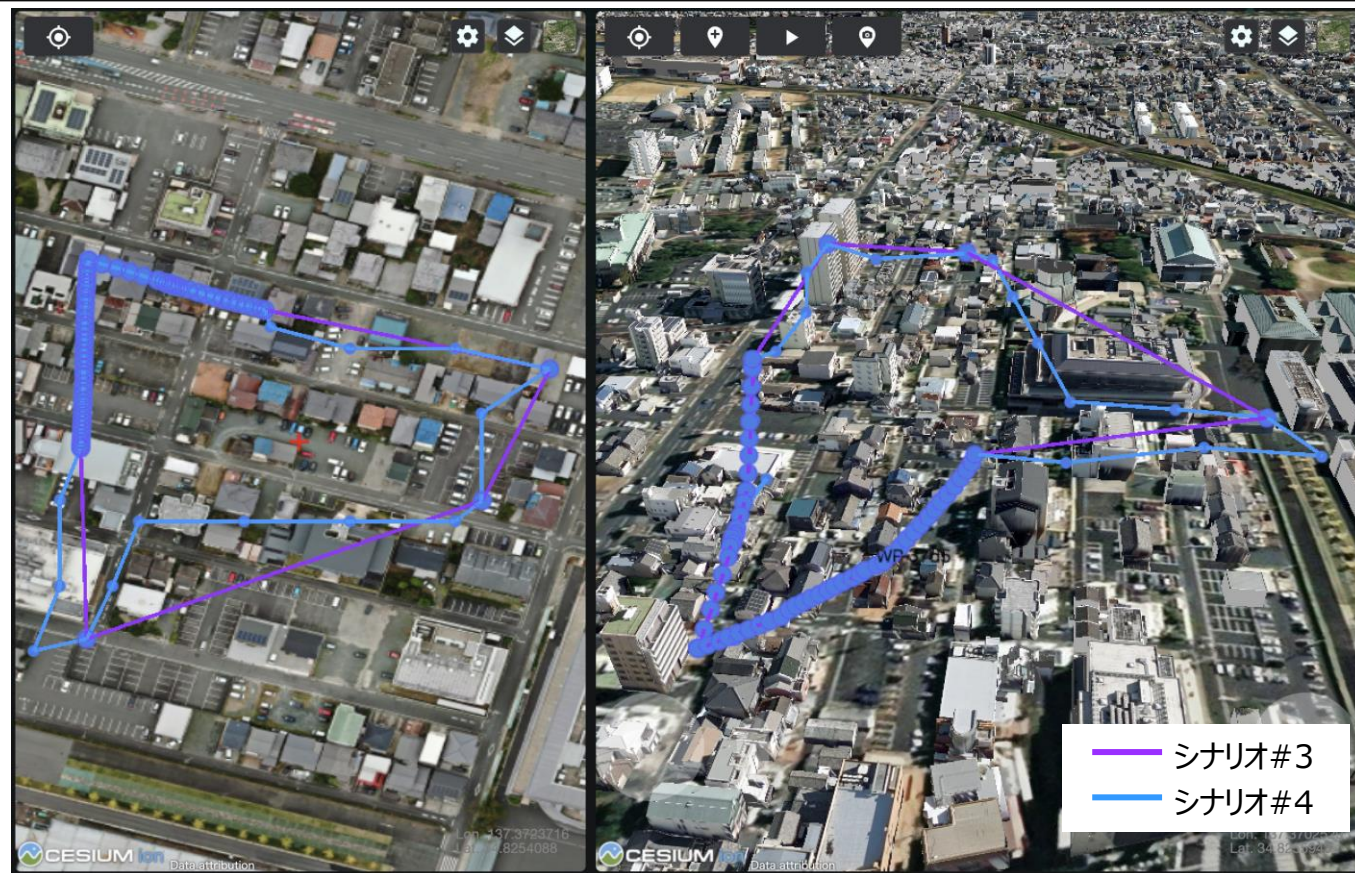
IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容

市街地 | 市街地南周回ルート

シミュレーション設定

項目		シナリオ#3	シナリオ#4
ルート		実機飛行_市街地南周回ルート	
リスク値設定		なし	あり
最大高度	海拔	99m	101m
	対地	78m	78m
飛行速度		5m/s	
ルート全長		503m	559m
予測飛行時間		4分5秒	4分15秒
離陸地点からの最遠距離		145m	146m

シナリオ#3・#4のルートイメージ



IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容 市街地 | 市街地南周回ルートにおけるリスク値の状況

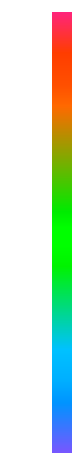
市街地南周回ルート (リスク値設定有り)

トータルリスク値が最低となるよう、リスク値の低い場所を選びながらルートを生成している

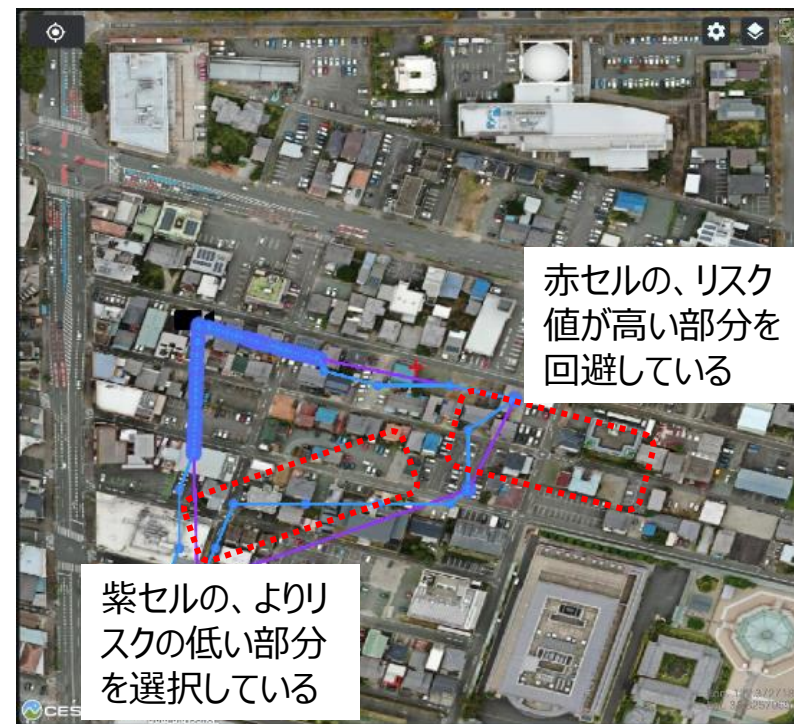


リスク値重ね表示

リスク高



リスク低



マップ表示

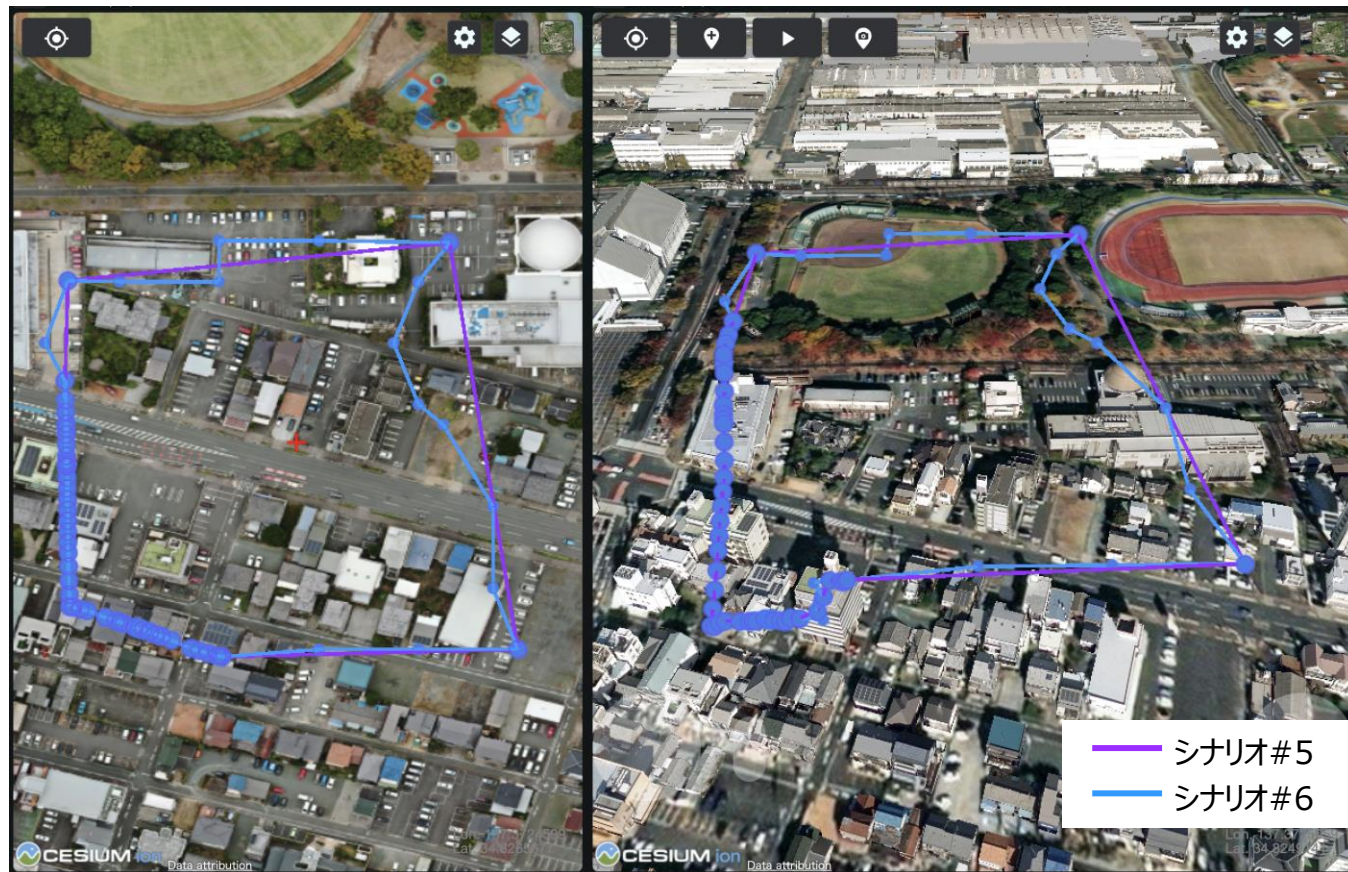
IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容

市街地 | 市街地北周回ルート

シミュレーション設定

項目		シナリオ#5	シナリオ#6
ルート		実機飛行_市街地北周回ルート	
リスク値設定		なし	あり
最大高度	海拔	100m	99m
	対地	81m	81m
飛行速度		5m/s	
ルート全長		586m	638m
予測飛行時間		4分20秒	5分5秒
離陸地点からの最遠距離		184m	182m

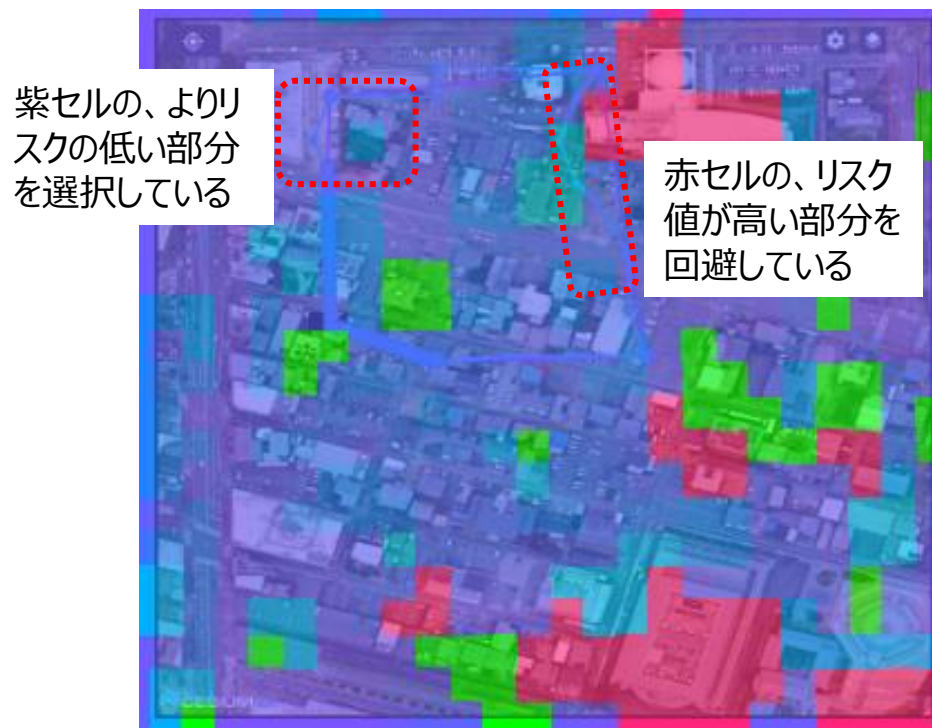
シナリオ#5・#6のルートイメージ



IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ① 検証内容 市街地 | 市街地北周回ルートにおけるリスク値の状況

市街地北周回ルート (リスク値設定有り)

トータルリスク値が最低となるよう、リスク値の低い場所を選びながらルートを生成している



リスク値重ね表示



マップ表示

IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ② 検証結果 御油地区・市街地での実機検証結果サマリ

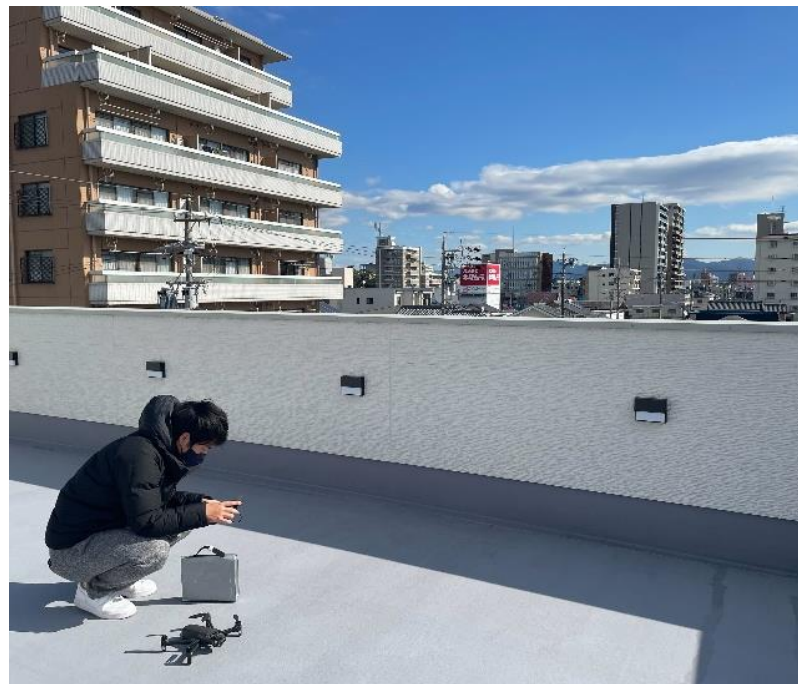
御油地区の検証結果

- 地上風速が0-5m未満（平均風速2.5m）というシミュレーションと同条件の下で飛行検証を行い、飛行ログより、ルート上を誤差なく、かつその他の問題もなく飛行できていることを確認した



市街地の検証結果

- 市街地においても飛行検証を行い、飛行ログからルート上を誤差なく、かつその他の問題もなく飛行できていることを確認した



IV. 実証技術の検証 > 2. 実証システムの価値検証 > ② 検証結果

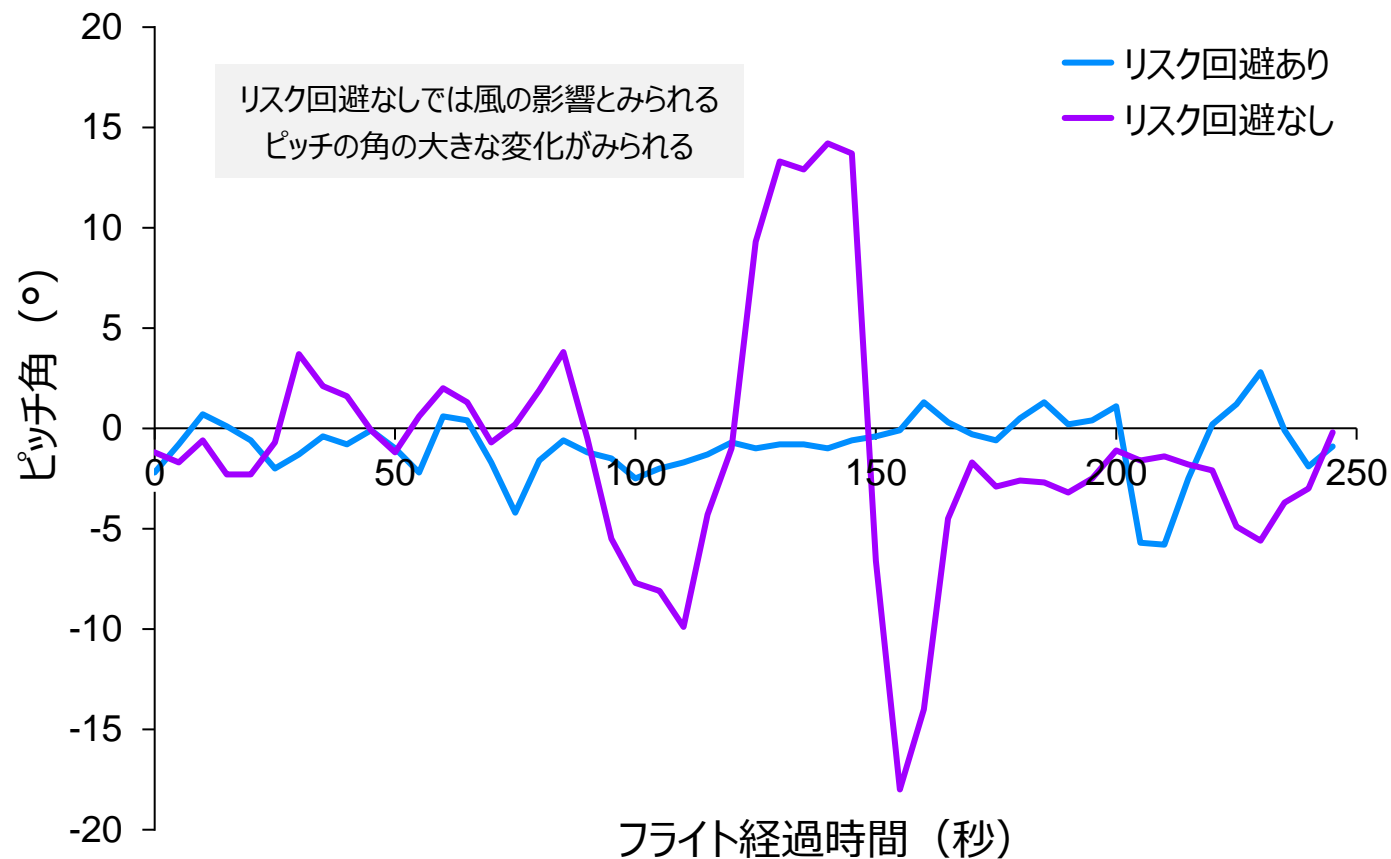
御油地区における風の影響の検証結果

シミュレーションで風の影響がみられた御油団地周辺上空の実機飛行では、目視確認上、リスクを考慮したルートの方が飛行姿勢が安定した様子が見られ、飛行ログ上も姿勢の勾配・傾斜（ピッチ）の揺れの幅も小さい結果

検証エリア（御油団地）



ピッチ（機体前後方向）の揺れ



I. 実証概要

II. 実証技術の概要

III. 実証システム

IV. 実証技術の検証

V. 成果と課題

V. 成果と課題 > 1. 今年度の実証で得られた成果

① 3D都市モデルによる技術面での優位性

項目	想定される技術面での優位性
グラウンドリスク値のルート設計評価	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデルのCityGMLは構成要素がタグで記述され、建物の構成物が種類ごとに表現されていることから、そのタグを用いて容易にリスク値に変換するという技術が適用可能である <ul style="list-style-type: none"> 従来の2次元地図や他の3次元地図では、情報量、データ量、情報の保有方法等の課題からリスク値の算出が困難であることから3D都市モデルによる技術面での優位性といえる
風況リスク値/電波伝搬リスク値のルート設計評価	<ul style="list-style-type: none"> 3D都市モデルにおいて都市の形状が高い精度で再現されていることから、風況及び電波伝搬のシミュレーションを行い、個別具体の情報に基づいて予測された空間全体のリスク値の分布を得ることが可能となる

V. 成果と課題 > 1. 今年度の実証で得られた成果

② 3D都市モデルによるビジネス面での優位性

項目	想定される3D都市モデルによるビジネス面での優位性
ドローンの飛行ルートでの3Dシミュレーション導入のコスト削減	<ul style="list-style-type: none"> ● 3D都市モデルを既に整備している自治体であれば、グラウンドリスクに関する最適ルートシミュレーションの即時の導入が可能であり、飛行までの準備に係るコストや、自治体・事業者の地図の整備コストが削減される <ul style="list-style-type: none"> - 従来、ドローンの飛行ルート生成には、サービスに合わせて作成した高精度な3Dモデルを利用するか、郊外・山間部・海上といった地域では3Dモデルは作成せずに既存の2D地図を利用し操縦者の勘と経験からルートの高さ方向の移動経路を選んでいた
空間リスクマネジメントのコスト削減	<ul style="list-style-type: none"> ● 事業者が建造物の多い市街地等でドローンによるサービスを新たに導入する場合、当該事業における法令の遵守や自治体や地域住民への安全性の担保といった観点から空間のリスクマネジメントを実施する必要 ● 自動的にハイリスク地域を回避する飛行ルートを生成することで、事業者の事前準備コストや自治体等の負担の削減が可能になる <ul style="list-style-type: none"> - 従来、病院・教育施設、等のハイリスク地域について、2次元地図の照会や自治体等の管理者へ詳細を確認することでリスクマネジメントを行っていた

V. 成果と課題 > 2. 今後の取り組みに向けた課題

今後の取り組みに向けた課題

項目	活用にあたっての課題
気象データの充足	<ul style="list-style-type: none"> ● 定点観測した風況データを基に風況リスクのシミュレーションを実施したが、実運用では飛行予定日、飛行予定時刻に合わせたリアルタイム性の高い気象情報を入手することが望ましい <ul style="list-style-type: none"> - 現状では、ドローンが飛行する高度帯の気象データについて、ドローンの運行に必要な情報を集約して提供するサービスを開始したが有料ということもあり、全てのドローンユーザーが使用するに至っていない - 航空管制等で使用する大気解析は、最低高度がドローンの飛行高度よりも高く使用が難しい
電波データの充足	<ul style="list-style-type: none"> ● 仮想の電波基地局を設定した電波伝搬リスクのシミュレーションを実施したが、実運用では実際の基地局の位置又は電波強度の情報を入手することが望ましい <ul style="list-style-type: none"> - 現状では、基地局についてはその所有機関が管理していることから、それらの情報は公開がされておらず、機種や無線通信に与えるノイズの影響などを事前に取得することは難しい
地上データの充足	<ul style="list-style-type: none"> ● 森林地帯では、地表面からの木の高さを考慮して安全な飛行ルートを設計する必要があるが、街中に存在する小規模な森林地帯であっても、現状では精度の高い情報の入手が難しい
自治体の情報公開	<ul style="list-style-type: none"> ● グラウンドリスクに使用している土地や建物の属性値は、PLATEAUでの公開が必須ではないため、自治体により情報量に差がある
係数の調整	<ul style="list-style-type: none"> ● 利用者の目的に沿った評価を行った上でリスク係数を設定する必要があり、リスク値を適切に評価するためのリスク係数の最適化検証とチューニング作業に数日から1週間程度の時間を要する



用語集 (1/5)

用語	内容
ア行	
ROI	<ul style="list-style-type: none">Region of Interestの略ドローンの飛行中にカメラが注視するように設定されるポイント
AcuSolve	<ul style="list-style-type: none">アルテア社が提供する汎用の熱流体解析 (CFD) ツール
アジャイル	<ul style="list-style-type: none">人間・迅速さ・顧客・適応性に価値を置くソフトウェア開発手法
アンテナ指向性	<ul style="list-style-type: none">電波や音などの強さが方向によって異なること
ウェイポイント	<ul style="list-style-type: none">経路上の地点情報自動運航を行う際に、現在地から次のポイント (座標) を設定したポイント複数設定することで、ゴールまでの運航ルートを繋ぐこととなる
迂回距離	<ul style="list-style-type: none">直接経路と迂回経路の差の距離
渦度	<ul style="list-style-type: none">運動している流体の局所的な回転運動を表すベクトル
エアモビリティ	<ul style="list-style-type: none">空からの宅配や空飛ぶクルマなど空を移動する無人航空機
エアリスク	<ul style="list-style-type: none">ドローン航行における空中のリスク要素 (風況リスク、電波リスク等)
AWS	<ul style="list-style-type: none">Amazon Web Servicesの略Amazon社が事業者向けに提供しているクラウドサービス企業などが情報システムの運用やオンラインサービスの運営のために必要とするITインフラや様々な個別の情報処理機能を、インターネットを通じてサービスとして販売している
FEM	<ul style="list-style-type: none">解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法



用語集 (2/5)

用語		内容
ア行	LTE	<ul style="list-style-type: none">• Long Term Evolution (ロングタームエボリューション) の略• 携帯電話の通信規格
	オペレーター	<ul style="list-style-type: none">• ドローンの飛行を行うパイロット
カ行	グラウンドリスク	<ul style="list-style-type: none">• 地上のリスク要素
サ行	3次元空間ID	<ul style="list-style-type: none">• ボクセル (3次元の格子の単位、2次元のピクセルに相当) に対して付加されるID情報
	GPS	<ul style="list-style-type: none">• Global Positioning Systemの略• 全地球測位システムとも言う• 人工衛星を利用して位置を測定する仕組み
	自律飛行型ドローン	<ul style="list-style-type: none">• 手動操作を必要とせず自動で飛行することが可能なドローン
	Cesium	<ul style="list-style-type: none">• アメリカのCesium GS, Inc.が提供する3D地図プラットフォーム

用語集 (3/5)

用語	内容	
タ行	ダイクストラ法	<ul style="list-style-type: none"> • グラフ上のある地点を始点とする最短経路を求める（単一始点最短経路問題を解く）ためのアルゴリズム
	汎用熱流体解析ソルバー	<ul style="list-style-type: none"> • ユーザーが入力した形状、材料、境界条件に基づいて方程式を組み立てて解き、結果値を計算するモジュール
	ダウンチルト	<ul style="list-style-type: none"> • アンテナ直下の範囲をカバーするために用いられるアンテナの設計方法
	WGS 84	<ul style="list-style-type: none"> • 地図作成、測地学、及びGPSを含む衛星ナビゲーションで使用される標準のうち、地球中心の地球固定座標系と測地基準系を定義し、関連する地球重力モデル（EGM）と世界磁気モデル（WMM）についても説明されたもの
	電波伝搬シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> • 様々な種類の帯域・ユースケースに対応した電波のシミュレーション
	統計モデル	<ul style="list-style-type: none"> • 収集したデータを統計の観点から抽象化し、データの背景にある事象を説明するためのもの
	ドップラーライダー	<ul style="list-style-type: none"> • ドップラー効果による周波数の変移を観測することで、観測対象の相対的な移動速度と変位を観測する事のできるLiDARの一種
	トラジェクトリー	<ul style="list-style-type: none"> • 航空機やドローンの航路・軌跡



用語集 (4/5)

用語	内容	
八行	b3dm	<ul style="list-style-type: none">• Batched 3D Modelの略• 条件によって色を変更するなどのバッチ処理が可能な3次元モデル
	非構造メッシュ	<ul style="list-style-type: none">• ユークリッド平面またはユークリッド空間の一部を、三角形や四角形などの単純な形状で不規則なパターンでより細かいポリゴンへ分割したもの• 特に四面体の非構造メッシュをテトラメッシュと呼ぶ
	Pixhawk	<ul style="list-style-type: none">• 自律型航空機向けのオープンソースの自動操縦システム（フライトコントローラーのこと）
	ピッチ	<ul style="list-style-type: none">• ドローンの飛行ログ上の姿勢の勾配・傾斜
	風況シミュレーション	<ul style="list-style-type: none">• 任意の風向、風速、地域の地形や構造物を考慮した風のシミュレーション
	ボクセル	<ul style="list-style-type: none">• 空間を一定の立方体の形状で区切り、一意のIDで管理したもの
マ行	マッピング	<ul style="list-style-type: none">• ある項目に対して、別の項目を位置づけたり、割り当てたりすること• 本実証では、解析結果データを図面上に貼り付けること
	MAVLINK	<ul style="list-style-type: none">• ドローンと地上ステーションの間に通信用データの送信と受信する機能、チェックサム機能のプロトコル
	目視外	<ul style="list-style-type: none">• ドローンを飛行させる際に、オペレーターからドローンが視認できない状態



用語集 (5/5)

用語		内容
ヤ行	UTM	<ul style="list-style-type: none">• UAS Traffic Managementの略• ドローンの運航者が複数いる空域でも、目視外環境下での安全かつ効率的な運航を実現するための概念、またはそのための管理システム• UASはUnmanned Aircraft System の略称で、ドローンを制御するシステムの総称。ドローン自体を指すこともある
ラ行	Lipobattery	<ul style="list-style-type: none">• リチウムイオンポリマーバッテリーの略• リチウムイオンバッテリーの一種
	レイトレーシング	<ul style="list-style-type: none">• 光源から出ている光の量や方向を把握し、水面や物体の表面などで起こる光の屈折や反射など現実世界で発生しうる様々な影響をコンピューターで計算し、より現実に近い映像を作り出す技術
	レベル4飛行	<ul style="list-style-type: none">• ドローンの有人地帯における補助者なし目視外飛行

ドローン最適ルートシミュレーション 技術検証レポート

令和5年3月 発行

委託者：国土交通省 都市局 都市政策課

受託者：株式会社トラジェクトリー

本報告書は、株式会社トラジェクトリーが国土交通省との間で締結した業務委託契約書に基づき作成したものです。受託者の作業は、本報告書に記載された特定の手続や分析に限定されており、令和5年3月までに入手した情報にのみ基づいて実施しております。従って、令和5年4月以降に環境や状況の変化があったとしても、本報告書に記載されている内容には反映されておりません。