

7. SWIM オントロジーの構築と応用に関する研究

監視通信領域 江上 周作, ※呂 曉東, 古賀 禎, 住谷 泰人, 森岡 和行, 北折 潤

1 まえがき

航空機の運航に係る飛行計画、空港、監視、航空気象、空域制限などの異種情報について、独立したシステムを連携させて Air Traffic Management (ATM) 関連データのシームレスな情報共有を可能にする System Wide Information Management (SWIM)[1]のコンセプトが、国際民間航空機関 (ICAO) によって推進されている。現在、SWIM 環境で共有される運航情報、航空情報、気象情報に対して3つの異なる情報交換モデルが開発されている。これらの情報交換モデルは異なる組織で開発されており、語彙、カバレッジ（網羅率）、粒度、設計における視点などが異なるため、システムの意味的な相互運用性（Semantic Interoperability）の面で課題がある。SWIM の意味的な相互運用性を確保することで、システム間で共通の状況認識が可能となり、航空機運航に関わる協調的意思決定が期待できる。異なるシステム間の意味的な相互運用性のためには、各情報ドメインの概念および概念間の関係を形式化するオントロジーの利用が適しており、これまで様々な研究がされてきた。我々は、オントロジーや知識グラフ（ナレッジグラフ）などのセマンティック Web 技術を応用して、SWIM 環境で交換される異種情報を統合し、航空機運航の協調的意思決定を支援する高度な情報共有基盤の実現を目指している。本稿ではその取り組みについて報告する。

2 関連技術および関連研究

2.1 SWIM と情報交換モデル

現在 ICAO が提示している SWIM のアーキテクチャレイヤは図1の通りであり、情報交換のために標準化されたデータモデルを用いる。具体的には、航空機の運航情報に関しては、Flight Information Exchange Model (FIXM)¹が使

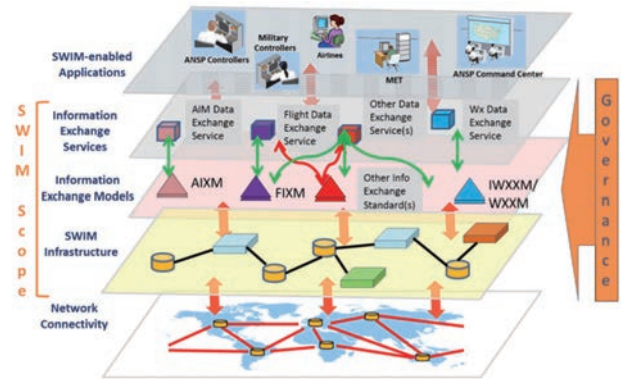


図 1. SWIM のアーキテクチャレイヤ [1]

用される。航空情報サービスにより配信される空港、制限空域、航空支援施設などを含む航空情報に関しては Aeronautical Information Exchange Model (AIXM)²が使用される。定時航空実況気象通報式 (METAR)、運航用飛行場予報気象通報式 (TAF) や特別気象情報 (SIGMET) などの気象情報に関しては、ICAO Meteorological Information Exchange Model (IWXXM)[2]が使用される。これらの情報交換モデルは Extensible Markup Language (XML) スキーマで定義されており、XML 形式のデータがサービス間で交換される。したがって、World Wide Web における Web サービスのように多種多量の情報をシステム間で共有して自動的に処理できるようになる。さらに、データの種類、出処、品質、時間などのメタデータとして、ATM Information Reference Model (AIRM)³が定義されている。AIRM は共通語彙の位置づけであり、それ以上のセマンティクスを持たない。一般的にメタデータや共通語彙の定義には、概念間の関係を明示的に記述する知識モデルであるオントロジーが利用される。

2.2 オントロジー

オントロジーは哲学用語「存在論」を元とし

¹ <https://www.fixm.aero/>

² <http://aixm.aero/>

³ <http://airm.aero/>

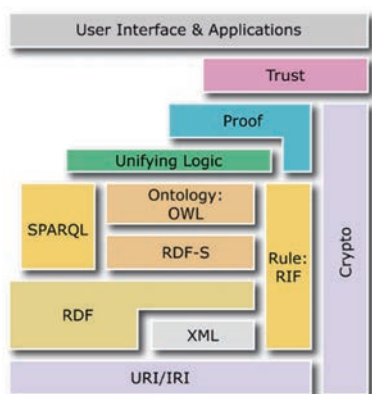


図 2. セマンティック Web スタック⁵

ており、人工知能の分野では、対象領域の概念および概念間の関係を形式化した表現、すなわち「概念化の明示的な規約[3]」と定義されている。オントロジーは、コンピュータが情報の意味（セマンティクス）を理解できるように、対象とする領域の事物に関する概念、概念間の上位-下位の階層関係（is-a 関係）、is-a 関係以外の関係、意味的な制約などを記述する知識表現の形態である。オントロジーの利用形態としては共通語彙、意味検索、インデックス、データスキーマ、知識共有の媒体、情報分析、情報抽出、知識モデルの規約、知識の体系化がある[4]。オントロジーの区分としては、対象領域の概念や関係を記述する領域（ドメイン）オントロジーや、複数ドメインを対象とした汎用オントロジー、世界全体を対象とする抽象度の高い上位オントロジーなどに分けられる。また、Web 標準化団体（W3C）により、オントロジーの標準フォーマットとして Web Ontology Language (OWL)⁴が勧告されており普及している。

2.3 セマンティック Web 技術と航空交通

セマンティック Web[5]とは、Web の発明者ティム・バーナーズ・リーにより 1999 年に提唱された概念であり、Web ページにメタデータを付与することで、コンピュータが Web 情報の意味を理解して自動処理できるようにすることが当初の目的であった。この機械処理可能な「データの Web」を実現するためのセマンティック Web スタック⁵（レイヤ）は図 2 のよ

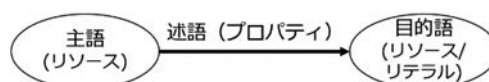


図 3. RDF の基本構造

うに定義されている。本研究でも扱う特に中心的技术は下記の通りである。

- Uniform Resource Identifier (URI) : リソースのグローバルな唯一識別子
- Resource Description Framework (RDF) : 全てのデータを図 3 のように「主語、述語、目的語」の三つ組みのラベル付き有向グラフで表現し、データ同士をつなげてナレッジグラフとする枠組み
- SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL) : RDF データの検索・操作が可能な問い合わせ（クエリ）言語。SPARQL は再帰的頭字語。
- OWL : オントロジーを記述し、Web 上で共有するための言語

現在では人工知能研究の一分野として Web に限らず様々な分野で応用が進んでおり、航空交通分野においても研究が進められている。

SWIM の情報交換モデルのレイヤ[1]においては、意味的な相互運用性も視野に入っており、実現のための標準技術候補として先に述べた RDF や OWL などが含まれている。Single European Sky ATM Research (SESAR) プロジェクトの一つである BEST プロジェクト⁶は、SWIM の効力を最大限に引き出すために、オントロジーや推論などのセマンティック Web 技術を活用した研究を行っている[6]。BEST プロジェクトでは AIXM, IWXXM の OWL 化、情報をコンテナ化してメタデータを付与する Semantic Container の定義、Semantic Container の推論実験などを行っており、SWIM におけるセマンティック技術の有効性を示している。FAA はセマンティック Web 技術を使用して開発された成果を公開するための語彙集として semantics.aero を提供している。これは SWIM 環境で使用される基本的な語彙やタクソノミーを記述したものである。また、FAA はサービス

⁴ <https://www.w3.org/OWL/>

⁵ <https://www.w3.org/2007/Talks/0130-sb->

W3CTechSemWeb/#(24)

⁶ <https://project-best.eu/>

指向アーキテクチャに基づく SWIM のサービス間連携に向けた、Web Service Description Ontological Model (WSDOM) を定義している⁷。WSDOM はサービスに関する主要な概念をカバーしており、セマンティック Web サービス記述オントロジーの OWL-S⁸ で記述されている [7]。NASA および FAA は ATM のためのオントロジーとして atmonto [8] を提案している。さらに、専門的な情報アクセスと分析のニーズがある ATM コミュニティ向けに、atmonto に基づいて大規模なナレッジグラフ ATMGRAPH を構築している [9]。このように、欧米を中心にセマンティック Web 技術の航空交通分野への応用検討が始まっている。

2.4. オントロジーマッピング

異なるドメインオントロジーの連携に向けて、オントロジー間の対応関係を記述するオントロジーマッピングの研究が行われている。オントロジーマッピングは、(1) グローバルなオントロジーとローカルなオントロジー間のマッピング、(2) ローカルなオントロジー間のマッピング、(3) オントロジーのマージとアラインメントに関するマッピングの 3 種類に分類できる [12]。SWIM 環境では、今後共有される情報の種類が増えることが予想されるため、その度に各ローカル（ドメイン）オントロジーとの対応関係を記述するのは時間的・労力的コストがかかる。したがって、より拡張性のあるグローバルな参照オントロジーにマッピングする (1) の方針が適していると考えられる。本研究では参照オントロジーとして「SWIMONTO」を設計し、各ドメインオントロジーから SWIMONTO へマッピングする。

3 SWIM オントロジーの構築

3.1 ドメインオントロジーの構築

まず、FIXM, AIXM, IWXXM の XML スキーマに基づいて OWL 形式のオントロジーを構築する。XML スキーマは OWL に比べて表現の自由度が高いため等価な変換は困難であり、様々な変換手法が提案されている [10]。本研究

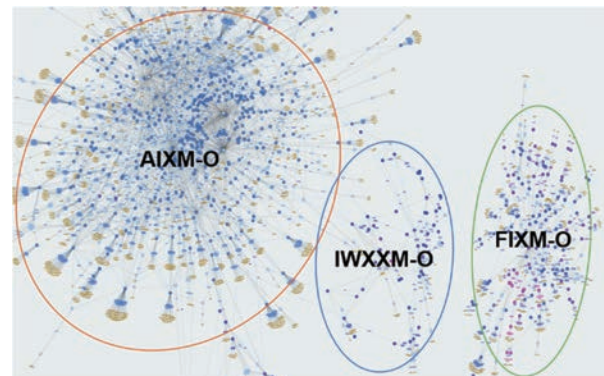


図 4. 情報交換モデルのオントロジー

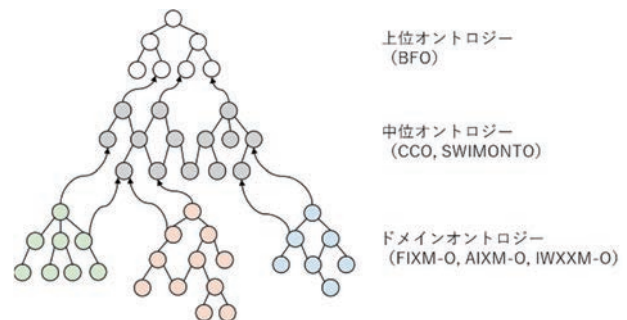


図 5. 本研究におけるオントロジーの全体像

では 40 個の変換パターンを用いて XML スキーマから OWL への変換を行う Janus [11] を参考にした変換プログラムを作成し、FIXM の OWL オントロジー (FIXM-O)、IWXXM の OWL オントロジー (IWXXM-O) を自動的に構築した。FIXM-O, AIXM-O, IWXXM-O は我々の Web サイト⁹で公開している。スキーマの詳細については Web サイトまたは文献 [17] を参照されたい。構築した OWL 形式のオントロジーを可視化した全体像を図 4 に示す。IWXXM では空域に関する記述に AIXM の AirspaceVolume クラスを使用しているため、IWXXM-O と AIXM-O は一部接続しているが、FIXM-O は独立して存在している。

3.2 参照オントロジーの構築

今後の ATM では、緯度、経度、高度の三次元位置情報に時間を加えた四次元軌道 (4D Trajectory: 4DT) で運航を管理する、軌道ベース運用 (Trajectory-Based Operation: TBO) へ移

⁷ https://www.faa.gov/air_traffic/technology/swim/governance/service_semantics/

⁸ <https://www.w3.org/Submission/OWL-S/>

⁹ <https://www.enri.go.jp/~s-egami/ontology/>

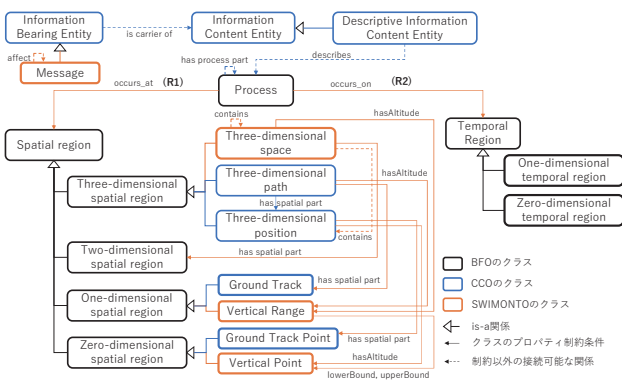


図 6. SWIMONTO のクラス関係図の一部

行することが計画されている[13]。そのため、SWIM 環境で交換される時間的情報（間隔，瞬間）と空間的情報（三次元，二次元，一次元，零次元）を区別してシステムが共通認識を持つことが必要であり，これらの概念記述の粒度を均一化するオントロジーが求められる。そこで，上位オントロジーとして ISO 標準になりつつあり，上述の概念を区別できる Basic Formal Ontology (BFO)[14]を参照し，さらに BFO 準拠の中位オントロジーである Common Core Ontologies (CCO)[15]を拡張する形で SWIMONTO を設計した。従って，本研究におけるオントロジーの全体像は図 5 のとおりである。構築した SWIMONTO の主なクラス関係を図 6 に示す。SWIMONTO も我々の Web サイトで公開しているため，スキーマの詳細についてはそちらを参照されたい。

4 SWIM におけるオントロジーの応用

本章では，構築したオントロジーを SWIM テストシステムに応用した例について述べる。

4.1 SWIM テストシステムの構築

これまでの研究で我々は SWIM テストシステムを構築し，シナリオベースの検証実験を行っている[16]。本研究では図 7 に示すシステム概要図の通りに SWIM テストシステムを拡張した。SWIM テストシステムでは，航空機の運航に係る情報を外部サービスまたは監視システムより取得し，各種情報交換モデルに基づいて変換する。変換されたデータを Messaging Infrastructure により各システムやユーザに配信する。Messaging Infrastructure は Advanced Message Queuing Protocol (AMQP)による Publish/Subscribe や

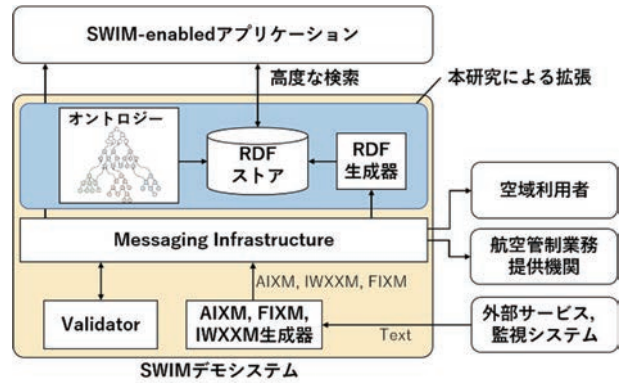


図 7. 拡張した SWIM テストシステム

Representational State Transfer (REST)による Request/Reply を利用して，システム間の情報交換を実現する。配信されたデータを RDF 生成器がオントロジーに基づいて RDF 化し，RDF トリプルストア（RDF データベース）に格納する。

本研究では 2019 年 5 月 29 日から 6 月 24 日の約一ヶ月間，国内における Notice To Airmen (NOTAM)と SIGMET のデータを収集し，20,075 トリプルの RDF を生成し RDF ストアに蓄積した。なお，NOTAM は緯度経度情報が取得できる制限空域に関するデータ（SAA）を対象とした。また，運航情報に関しては日本の国内線および国際線 9 便の模擬の FIXM シナリオデータを基に 5,972 トリプルの RDF を生成し，RDF トリプルストアに格納した。

4.2 運航関連情報の検索例

SPARQL を利用し，例えば「6 月 6 日 21 時 00 分仙台国際空港 (RJSS) 発，23 時 11 分仁川国際空港 (RKSI) 着の飛行計画 (図 8) に関して，四次元的に影響（衝突）する事象に関するメッセージ」を，次のクエリで検索可能である。

```
SELECT ?message1 ?message2 WHERE {
  ?message1 so:affect ?message2 .
  ?message2 ro:0010002 ?flight .
  ?flight fl:gufi "c94bdeb0-9c32-432a-a7d6-0555b69d080d" .}
```

飛行計画の指定には Globally Unique Flight Identifier (GUFID)という一意な識別子を使用している。結果として，図 8 に示した 1 件の悪天情報（激しい乱気流）が該当し，この飛行計画は再設計が必要であることが確認できた。検索実



図 8. フライトプランのシナリオ

行時間は 0.1 秒以内であった。さらに、クエリ内で条件を指定することで、「航空機通過時刻 1 時間前に飛行経路上のウェイポイントに影響を与える事象のメッセージ」のような検索も可能である。本研究では 1 件の悪天情報が該当した。検索実行時間は 0.8 秒であった。この悪天情報による飛行経路の緊急的な変更は生じないが、気象予報が変更されて当初の予報よりも悪天候が長引く場合には飛行経路の変更が求められる場合がある。このように、フライトプランに四次元的に影響のある情報だけでなく、時間や空間の条件を変更して柔軟な検索を行うことが可能である。

5. 評価

表 1 に、本研究で定めた SWIM テストシステムの検索内容と、各手法における実行可否、拡張性を記した評価結果を示す。ここで、提案手法 1 は本研究で構築したドメインオントロジー FIXM-O, AIXM-O, IWXXM-O のみ使用する手法であり、ドメイン間の接続は少ない。提案手法 2 は参照オントロジー SWIMONTO および SWIMONTO とマッピングした FIXM-O, AIXM-O, IWXXM-O を使用する手法とする。既存手法は BEST プロジェクトにより開発された AIXM-O, IWXXM-O を使用する手法とする。ただし FIXM に関しては OWL オントロジーが存在しないため、本研究で構築した FIXM-O を使用する。表 1 における拡張性とは、検索範囲となるデータの種類を増やしても、同一のクエリで対応可能であるかという性能を表す項目として設けた。全体の結果から、提案手法 1 により既存手法で不可能な検索を実現できたことと、提案手法 2 により SWIMONTO がシステムとしての拡張性を高め、さらに異種情報間の影響の

連鎖的な検索にも多く対応できるようになったことがわかる。特に、提案手法 2 では Q2~Q4 において少なくとも 2 種から 3 種へと異種情報への拡張性が高まっているが、これは、SWIMONTO により各情報の表現する時間的・空間的な次元を区別して異種情報間で共通概念を認識できることが寄与している。したがって、SWIMONTO により本研究で対象とした 3 種類の情報間において、概念レベルで意味的な相互運用性を高めることができたと言える。今後 SWIM で新たな種類の情報交換モデルが採用された場合に、SWIMONTO へのマッピングすることで意味的な相互運用性を維持できる可能性がある。Q5 において提案手法 1 は、SELECT 句のネスト回数や条件を増やさなければならず、手動での対応が必要である。一方で、提案手法 2 では SWIMONTO の affect プロパティにより、異種情報間の影響を連鎖的に検索可能である。

6. むすび

本研究では、SWIM 環境における航空交通情報共有の高度化に向けて、情報交換モデルに基づくドメインオントロジーと参照オントロジーを構築した。これにより、異種情報間の時空間的な影響を連鎖的に、かつ高い拡張性を持って検索可能になり、意味的な相互運用性の向上に寄与したことを確認した。今後、運航ルールおよび四次元飛行軌道を考慮したオントロジーの拡張と洗練、様々な応用についての検討が望まれる。また、収集対象のデータとフライトプランのシナリオを増加して、検索や推論性能を評価することが望ましい。

謝辞

本研究は重点研究「SWIM のコンセプトによるグローバルな情報共有基盤の構築と評価に関する研究」、JSPS 科研費 19K24375, 19H04168 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] ICAO (2015), “Manual on System Wide Information Management (SWIM) Concept,” ICAO Doc 10039, ICAO.
- [2] ICAO (2014), “Manual on the Digital

表 1. SWIM テストシステムにおける検索性能の評価

| ID | 検索要件 | 手法 | 実行可否 | 拡張性 |
|----|-----------------------------------|--------|--------|-----|
| Q1 | 同種情報内の検索 | 提案手法 1 | 可能 | - |
| | | 提案手法 2 | 可能 | - |
| | | 既存手法 | 可能 | - |
| Q2 | 異種情報間の四次元的な影響 | 提案手法 1 | 可能 | 低い |
| | | 提案手法 2 | 可能 | 高い |
| | | 既存手法 | 不可能 | - |
| Q3 | 異種情報に三次元的に影響し、かつ時間的に近接する情報の検索 | 提案手法 1 | 可能 | 低い |
| | | 提案手法 2 | 可能 | 高い |
| | | 既存手法 | 不可能 | - |
| Q4 | 異種情報に二次元的かつ時間的に影響し、かつ高度が近接する情報の検索 | 提案手法 1 | 可能 | 低い |
| | | 提案手法 2 | 可能 | 高い |
| | | 既存手法 | 不可能 | - |
| Q5 | 異種情報間の四次元的な影響の連鎖的な検索 | 提案手法 1 | 部分的に可能 | 低い |
| | | 提案手法 2 | 可能 | 高い |
| | | 既存手法 | 不可能 | - |

Exchange of Aeronautical Meteorological Information,” ICAO Doc 10003, ICAO.

[3] T.R. Gruber (1993) , “A Translation Approach to Portable Ontology Specifications,” Knowledge Acquisition, vol.5, no.2, pp.199-220, Academic Press.

[4] 古崎晃司 (2009) , “ドメインオンтоロジーの構築と利用,” 情報知識学会誌, vol.19, no.4, pp.296-305.

[5] T. Berners-Lee, and M. Fischetti (2001) , “Weaving the Web: The original design and ultimate destiny of the World Wide Web by its inventor,” DIANE Publishing Company.

[6] B. Neumayr, et al. (2017) , “Semantic data containers for realizing the full potential of system wide information management,” Proc. IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference, pp. 1–10.

[7] R.M. Keller (2016) , “Ontologies for aviation data management,” Proc. IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference, pp.1–9.

[8] R.M. Keller (2017) , “The NASA Air Traffic Management Ontology: Technical Documentation,” Technical Memo, NASA/TM-2017-219526, National Aeronautics and Space Administration.

[9] R.M. Keller (2019) , “Building a Knowledge Graph for the Air Traffic Management Community,”

Companion Proc. The 2019 World Wide Web Conference, pp.700–704.

[10] M. Hacherouf, et al. (2015) , “Transforming XML documents to OWL ontologies: A survey,” Information Science, vol.41, no.2, pp.242–259.

[11] I. Bedini, et al. (2011) , “Transforming XML schema to OWL using patterns,” Proc. IEEE Fifth International Conference on Semantic Computing, pp. 102–109.

[12] N. Choi, et al. (2006) , “A survey on ontology mapping,” ACM SIGMOD Record, vol.35, no.3, pp.34–41.

[13] ICAO (2005) , “Global Air Traffic Management Operational Concept,” ICAO Doc 9854, AN/458, ICAO.

[14] B. Smith, et al. (2005) , “Basic Formal Ontology for Bioinformatics,” IFOMIS Reports.

[15] R. Rudnicki (2017) , “An overview of the common core ontologies,” CUBRC, Inc.

[16] 呂曉東, ほか. (2018) , “FF-ICE 検証実験の報告と分析”, 平成30年度（第18回）電子航法研究所研究発表会, pp.71-78.

[17] S. Egami, et al. (2020) , “Ontology-Based Data Integration for Semantic Interoperability in Air Traffic Management,” Proc. IEEE 14th International Conference on Semantic Computing, pp.295-302