

実世界事象を対象とする多次元データ分析システムの構想

八木 哲^{1,a)}

概要: 人の活動にかかわる実世界事象には、地理的事象のみならず工的事象がある。例えば、人と施設・設備を運用する場合であれば、地理的事象としての事故や災害に起因する障害の影響を、工的事象として依存関係のある施設・設備を含めて特定し、再び地理的事象として地域への影響を評価したうえで、対応の検討が必要な局面がある。また、工的事象としての人的要因・機械的要因に問題が検出された場合には、要因の影響を、依存関係のある施設・設備を含めて特定し、地理的事象として地域への影響を評価したうえで、対応の検討が必要な局面もある。本稿では、このような局面の支援を目的として実世界事象を分析するために、OLAP[1][2][3]の枠組を拡張する。本枠組では、実世界事象を体現するデータを、時間次元・空間次元を拡張した主題ごとの多次元キューブに写像し、それらを個別に分析するとともに、共通する次元を利用して多面的に関連付けて分析する。また、本枠組の実効性を、例題に照らして検証する。

A concept of a multidimensional data analysis system for real-world phenomena

YAGI SATORU^{1,a)}

1. はじめに

人の活動にかかわる実世界事象には、地理的事象のみならず工的事象がある。例えば、人と施設・設備を運用する場合であれば、地理的事象としての事故や災害に起因する障害の影響（緊急措置すべき対象）を、工的事象として依存関係のある施設・設備を含めて特定し、再び地理的事象として地域への影響を評価したうえで、施設・設備への対応の検討が必要な局面がある。また、工的事象としての人的要因（手順書・実施主体など）・機械的要因（構成品・使用状況など）に問題が検出された場合には、要因の影響（是正／予防措置すべき対象）を、依存関係のある施設・設備を含めて特定し、地理的事象として地域への影響を評価したうえで、要因と施設・設備への対応の検討が必要な局面もある。このような局面の支援を目的として実世界事象を分析するには、生成消滅・状態遷移により時間的・空間的に変化する地理的事象・工的事象を多面的（様々な観点から）に関連付けて分析する必要がある。

このような実世界事象の分析のために、地図をユーザインタフェースとして多様な情報を統合する機能 [4][5] や施設・設備のネットワーク構造を解析する機能 [6] を持つ GIS、空間情報に時間情報を付加して時間拡張した GIS[7][8] がある。しかし、地理的事象・工的事象を関連付けて分析する機能は主にオーバーレイ解析 [9] に基づいており、多面的ではなかった（空間の観点に特化している）。また、GISの分析能力の拡張を目的として、主に空間次元においてOLAPの枠組を拡張したSpatial OLAP[10][11][12]がある。しかし、主な分析対象は土地利用などに関する地理的事象であり、工的事象は分析対象ではなかった（施設・設備の構造などの情報を持たない）。

これらを踏まえて、平時に十分機能し、事故・災害時に真価を発揮することを念頭に、多次元データを探索的に分析できるOLAPの枠組を拡張する。本枠組では、生成消滅・状態遷移により時間的・空間的に変化する地理的事象・工的事象を体現するデータを、時間次元・空間次元を拡張した主題ごとの多次元キューブに写像する。それらを個別に分析するとともに、共通する次元を利用して多面的に関連付けて分析する。

¹ NTT アクセスサービスシステム研究所
NTT Access Network Service Systems Laboratories

^{a)} satoru.yagi.zb@hco.ntt.co.jp

本稿では、まず、本枠組について多次元キューブ (2 章) と多次元キューブに対する操作 (3 章) を示す。次に、本枠組の実効性を、例題に照らして検証する (4 章)。最後に、本稿の内容をまとめ、今後の課題を示す (5 章)。

2. 多次元キューブ

2.1 実世界事象を体現するデータ

まず、データの相互利用を目的としているために、データの共通認識として利用できる国土地理院の地理情報標準 (JSGI)[13] に準じて、実世界事象を以下のように整理する。

- 実世界事象：JSGI における広義の地物。「実世界の現象の抽象概念 (An abstraction of real-world phenomena).」「地物は地球上の位置と直接的・間接的に関連付けられたものである。現実世界に実在する物・現象・環境又は実在はしないが適用業務上仮想的に存在させる物など、GIS で空間的に個別に存在するすべてのものは地物とみなすことができる。」
- 地理的事象：地球上の位置と直接的に関連付けられる広義の地物。複数の地物から構成される地物 (複合地物)。生成消滅により時間的・空間的に変化する地物の外観に着目する。以下に例示する。
 - － 固定・可動オブジェクトの本体。
 - － 事故、災害、自然現象、催事の本体。
 - － 上記に対する作業・障害・対処の履歴。
- 工的事象：地球上の位置と間接的に関連付けられる広義の地物。複合地物を構成する地物 (構成地物)。状態遷移により時間的・空間的に変化する地物の内実に着目する。以下に例示する。
 - － 固定・可動オブジェクトの構成要素としての部品・仕様書・設計書・手順書。
 - － 事故・災害・自然現象・催事の構成要素としての建築・土木・環境面における個々の影響。
 - － 上記に対する作業・障害・対処の履歴。

次に、JSGI の地物スキーマに準じて、実世界事象を体現するデータ種別を整理する。JSGI の地物スキーマの主なデータ種別は空間属性 (形状・位置・トポロジなど)、時間属性 (絶対的・相対的な時点・期間など)、主題属性 (文字・数値・マルチメディアデータなど) であり、生成消滅・状態遷移により時間的・空間的に変化する地理的事象・工的事象を体現するデータ種別として妥当である。このような種別のデータを、シンプルな枠組で分析するために、分析単位は同種の事象の任意の主題のデータであるという前提のもと [3]、時間次元・空間次元を拡張した主題ごとの多次元キューブに写像する。それらを個別に分析するとともに、共通する次元を利用して多面的に関連付けて分析する。図 1 参照。

なお、特にファクトはマルチメディアデータ (集計しないが参照する) を含む多様な種別のデータを想定するため

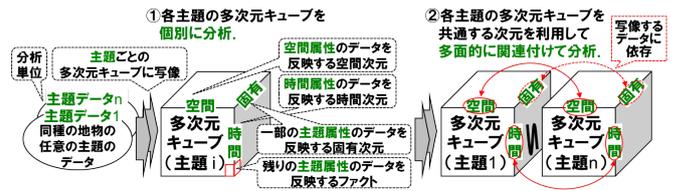


図 1 多次元キューブの構成

Fig. 1 The configuration of multidimensional cubes.



図 2 多次元キューブのスキーマの概要

Fig. 2 The schema of a multidimensional cube.

に、データレイク [14] に近いマルチデータベース [15] に格納することを想定している。種別、特性、用途に応じて複数の異種データベースにデータを分散格納し、データのカテゴリを用いて管理することにより、モノリシックな多次元データベースとして機能させる。データを分散格納すると処理性能が懸念されるが、分散格納したデータをジョインするような操作は想定されず、多次元キューブの関連付けに用いる共通する次元のデータを単一のデータベースに格納すれば、深刻な問題にはならないと想定している。

2.2 データを格納するスキーマ

図 2 にスタースキーマ形式 [3] を用いて概要を示す。実世界事象を体現するデータを保持するために、以下の特徴を持つ。各次元は、緩やかに変化する次元 [3] である。

- (1) 生成消滅・状態遷移による時間的・空間的な変化を体現するために、時間次元・空間次元に、副次元を設定。
- (2) データが体現する事象を識別するために、データに、データの情報源である事象の識別子を付与。

時間次元について、図 3 にモデルを示し、表 1 に ABNF [16] を用いてスキーマを示す。時間次元は、副次元として、生成消滅による時間的な変化を体現する外観時間と、状態遷移による時間的な変化を体現する内実時間を持つ。外観時間は、全事象に共通の時点と原点とする絶対的な時間系を基準として、事象の存在期間を表す。GIS において地物の生成から消滅を表す時間情報と同等である。内実時間は、ある事象の外観時間の開始時点と原点とする相対的な時間系を基準として、その事象の各状態の状態維持期間を表す。GIS において移動体を表す時間情報に類似する。

空間次元について、図 4 にモデルを示し、表 2 に ABNF を用いてスキーマを示す。空間次元は、副次元として、生成消滅による空間的な変化を体現する地理学的空間と、状態遷移による空間的な変化を体現する工学的空間を持つ。

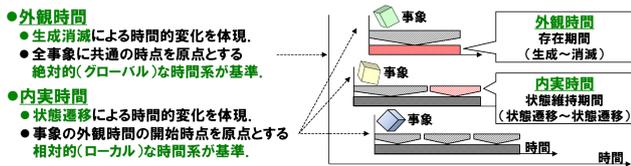


図 3 時間次元のモデル

Fig. 3 The model of temporal dimension.

表 1 時間次元のスキーマ

Table 1 The schema of temporal dimension.

時間次元	=	* (事象 ID 外観時間 * 内実時間)
外観時間	=	外観時間 ID 開始時刻 終了時刻
内実時間	=	内実時間 ID 開始時刻 終了時刻
開始時刻	=	時刻
終了時刻	=	時刻 / ”継続”

地理学的空間は、全事象に共通の絶対的な座標系を基準として、事象の形状と位置を表す。GIS や Spatial OLAP の空間情報と同等である。工学的空間は、事象が属する事象集合に閉じた相対的な座標系を基準として、事象の形状と位置、および構造（ナビゲーションのためのリンク）を表す。建築物を 3D オブジェクトからなる構造体として設計・管理する BIM(Building Information Modeling) や、その土木版である CIM(Construction Information Modeling/Management) の空間情報に類似する。

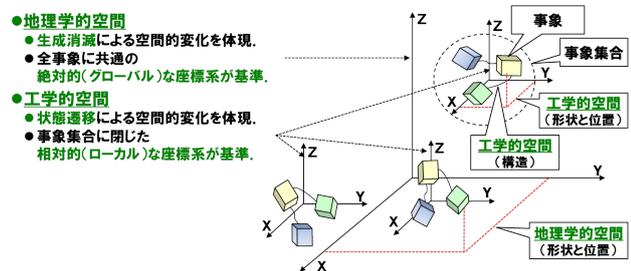


図 4 空間次元のモデル

Fig. 4 The model of spatial dimension.

表 2 空間次元のスキーマ

Table 2 The schema of spatial dimension.

空間次元	=	* (事象 ID 外観時間 ID 内実時間 ID 空間)
空間	=	[幾何形状] ((地理学的空間 工学的空間) / 地理学的空間 / 工学的空間)
幾何形状	=	点 / 線 / 面 / ポリゴン / 住所構造 [17]
地理学的空間	=	幾何形状の重心位置
工学的空間	=	[幾何形状の重心位置] * 構造
構造	=	(dependence / has-a / part-of / is-a) 事象 ID

- dependence: 依存関係のある事象へのリンク。
- has-a: 包含・階層関係にある下位事象へのリンク。
- part-of: 包含・階層関係にある上位事象へのリンク。
- is-a: 共通的な属性を表す事象などとのリンク。例えば、仕様書・設計書・手順書とのリンク。

表 3 固有次元とファクトのスキーマ

Table 3 The schema of unique dimensions and facts.

固有次元	=	* (固有次元 ID * (事象 ID 外観時間 ID 内実時間 ID 属性値))
ファクト	=	* (ファクト ID * (事象 ID * 固有次元 ID 外観時間 ID 内実時間 ID 属性値))
属性値	=	値 / 異種データベースの参照方法

固有次元とファクトは従来の多次元キューブと同様である。表 3 に ABNF を用いてスキーマを示す。

3. 多次元キューブに対する操作

3.1 操作を構成する演算処理

まず、各主題の多次元キューブを個別に分析する操作 (OLAP 操作) について、これを多次元キューブから統計表相当のデータを切り出す操作と捉えれば、絞り込み処理、分類処理、集計処理として考えることができる。

- ダイシング: 統計表の行 (表側) と列 (表頭) に相当する分析次元として用いる次元を設定する。
- スライシング: 切り出すデータを、分析次元以外次元に対して指定した条件により「絞り込む」。
- ドリリング: まず、切り出すデータを、分析次元に対して指定した条件により「絞り込む」。次に、絞り込んだデータを、分析次元に対して指定した条件により「分類」し、統計表相当のセルに対応付ける。最後に、セルごとにデータを「集計」する。あるいはデータ本体を参照するためのリンクとして保持する。

次に、各主題の多次元キューブを、共通する次元を利用して多面的に関連付けて分析する操作 (複合 OLAP 操作) について、これを OLAP 操作を連携させた操作と捉えれば、OLAP 操作の入出力を接続して OLAP 操作を連携させる処理 (連携処理) として考えることができる。

以降では、2.2 節で示したスキーマの特徴 (1)(2) に対応する絞り込み処理、分類処理、集計処理、連携処理を示す。

3.2 絞り込み処理

絞り込み処理は、非演算子 (多次元キューブのデータ) と、一組の非演算子 (絞り込み条件) と演算子とで構成される。複数の非演算子 (絞り込み条件) と演算子とを一組とする場合は、論理演算子で結合する。特徴 (1) に対して、時間次元では、演算子の「基準時間系」により、生成消滅・状態遷移による時間的変化を分析する。

- 非演算子: 多次元キューブの時間次元 (外観時間・内実時間の開始時刻~終了時刻に相当する期間)。
- 非演算子: 絞り込み条件 (時点あるいは期間)。
- 演算子: 時間の関係 (包含, 交差, 近接) と基準時間系。
 - 基準時間系が「絶対時間系」の場合、全事象に共通の絶対的な時間系を基準として、事象の外観時

間あるいは内実時間（絶対的な時間系に変換）に対して演算する。すなわち、「ある時点を基準にして…」という条件を全事象に一律に適用し、生成消滅による時間的変化（存在の有無）を分析する。

- 基準時間系が「相対時間系」の場合、各事象の相対的な時間系を基準として、各事象の内実時間に対して演算する。すなわち、「生成時点を基準にして…」という条件を全事象に一律に適用し、状態遷移による時間的変化（変化の程度）を分析する。

空間次元では、演算子の「基準座標系」により、生成消滅・状態遷移による空間的変化を分析する。

- 非演算子：多次元キューブの空間次元（地理学的空間・工学的空間の幾何形状・重心位置）。
- 非演算子：絞り込み条件（幾何形状・重心位置）。
- 演算子：幾何形状・重心位置の関係（包含、交差、近接：OpenGIS仕様を想定）と基準座標系。
 - 基準座標系が「絶対座標系」の場合、全事象に共通の絶対的な座標系を基準として、事象の地理学的空間あるいは工学的空間（絶対的な座標系に変換）の幾何形状・重心位置に対して演算する。すなわち、「ある地点を基準にして…」という条件を全事象に一律に適用し、生成消滅による空間的変化（存在の有無）を分析する。
 - 基準座標系が「相対座標系」の場合、各事象集合の相対的な座標系を基準として、各事象集合ごとに事象の工学的空間の幾何形状・重心位置に対して演算する。すなわち、「初期位置を基準にして…」という条件を全事象に一律に適用し、状態遷移による空間的変化（変化の程度）を分析する。

特徴(2)に対して、事象の識別子に対する集合演算により、データが体現する事象の関係を分析する。

- 非演算子：多次元キューブの事象 ID。
- 非演算子：絞り込み条件（事象 ID の集合）。
- 演算子：集合演算子（和、差、共通）。

3.3 分類処理

分類処理は、非演算子（多次元キューブのデータ）と、N 組の非演算子（絞り込み条件）と演算子とで構成される。すなわち、分類処理は絞り込み処理の集合である。各絞り込み処理は、統計表相当の行と列の各項目に対応し、統計表相当のセルに対応付くようにデータを分類する。特徴(1)に対しては、絞り込み処理と同様である。特徴(2)に対しては、演算子に追加した「分類単位」により、データが体現する事象に着目して分析する。

- 非演算子：多次元キューブの時間次元／空間次元。
- 非演算子：絞り込み条件。
- 演算子：非演算子の関係と基準時間系／基準座標系と分類単位。

- 分類単位が「全体」の場合、データ全体を分類する。すなわち、事象全体に着目して分析する。
- 分類単位が「個別」の場合、情報源である事象ごとにデータをグループ分けしてから、グループごとに分類する。すなわち、個々の事象に着目して分析する。

3.4 集計処理

集計処理は、分類処理によって統計表相当のセルに対応付けられたデータを、セルごとに集計・計数する。事前に対象を絞り込んだり、事後に結果を絞り込む場合もある。これらは、従来の OLAP と同様である。さらに、統計表を跨ってデータを処理 [12] することも考えられる。

3.5 連携処理

連携処理は、ある多次元キューブに対する OLAP 操作の入力（絞り込み条件）あるいは出力（事象 ID / 次元のデータ）を、他の多次元キューブに対する OLAP 操作の入力（絞り込み条件）に接続することで、OLAP 操作（絞り込み処理／分類処理）を連携させる。以下の意味がある。

- 焦点同調：入力を入力に接続し、多次元キューブのデータの範囲を擦り合わせ、分析の焦点を合わせる。複数の多次元キューブに対して同種のクエリを発行する点では、複数の多次元キューブに跨ってデータを追跡（抽出して結合）する OLAP 操作（ドリルアクロス）[3] に類似するが、目的が異なる。
- 対象同調：出力（事象 ID）を入力に接続し、多次元キューブのデータの情報源である事象の範囲を擦り合わせ、分析の対象を合わせる。すなわち、ある事象集合について、複数の主題のデータをそろえる。
- 関係識別：出力（次元のデータ）を入力に接続し^{*1}、次元のデータの重畳から、データが体現する事象の連関・因果関係を識別する。時間次元・空間次元のデータが基本になると想定するが、これは空間統計における地理学の第一法則 [18] の考え方に類似する。

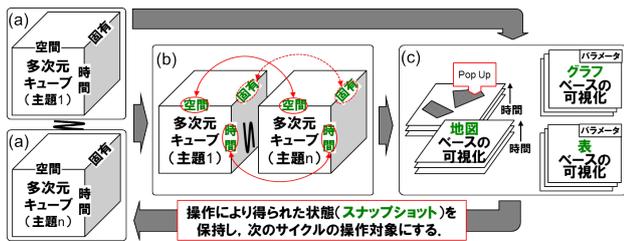
4. 実効性の検証

4.1 検証方法

本枠組では、実世界事象を図 5 のサイクルで分析することを想定している。このサイクルは、本枠組で分析可能なクラスを規定する。このサイクルの実効性を、関連事例 [6][19] を参考に設定した例題に照らして、以下の観点から検証し、ブラッシュアップした。

- 多次元キューブによる実世界事象の体現可否。
- 多次元キューブに対する操作による分析可否。

^{*1} 入力に接続した次元のデータも、分類処理の分類単位が「個別」である場合は、グループ分けの対象である。



- (a) OLAP 操作 (ダイシング・スライシング・ドリリング) により, 多次元キューブのデータが体现する事象の着目点を設定。
 (b) 複合 OLAP 操作により, 多次元キューブのデータや, データの情報源である事象の範囲を擦り合わせ (焦点同調, 対象同調), データが体现する事象の連関・因果関係を識別 (関係識別)。
 (c) 可視化により, 多次元キューブのデータが体现する事象を評価。

図 5 分析作業のサイクル

Fig. 5 A cycle of analysis work.

検証に用いた例題の概要を以下に示す。

- 例題 1: 事故・災害時の緊急措置
 - (1) 地理的事象としての事故や災害に起因する障害の影響 (緊急措置すべき対象) を, (2) 工的事象として依存関係のある施設・設備を含めて特定し, (3) 再び地理的事象として地域への影響を評価したうえで, (4) 施設・設備への対応を検討する。
- 例題 2: 平時の是正措置
 - (1) 地理的事象としての障害の分布傾向から要因の仮説を立て, (2) 工的事象としての人的要因 (障害対応・保守作業など)・機械的要因 (構成品・使用状況など) を検証し, 要因の影響 (是正措置すべき対象) を, (3) 依存関係のある施設・設備を含めて特定し, (4) 再び地理的事象として地域への影響を評価したうえで, (5) 要因と施設・設備への対応を検討する。
- 例題 3: 平時の是正/予防措置
 - (1) 工的事象としての人的要因 (手順書・実施主体など)・機械的要因 (構成品・使用状況など) に問題が検出された場合に, 要因の影響 (是正/予防措置すべき対象) を, (2) 依存関係のある施設・設備を含めて特定し, (3) 地理的事象として地域への影響を評価したうえで, (4) 要因と施設・設備への対応を検討する。
- 例題 4: 平時の予防措置
 - (1) 工的事象としての障害の統計的傾向から要因の仮説を立て, 人的要因 (作業内容・作業状況など)・機械的要因 (構成品・使用状況など) を検証し, 要因の影響 (予防措置すべき対象) を, (2) 依存関係のある施設・設備を含めて特定し, (3) 地理的事象として地域への影響を評価したうえで, (4) 要因と施設・設備への対応を検討する。

4.2 検証内容

例題 1 を取り上げ, 工程 (1)~(4) の分析作業で使用される多次元キューブと多次元キューブに対する操作を示す。

工程 (1) では, 発生した事故・災害の着目点を設定する。図 5 の (a) の作業である。

- キューブ 1-1 (事故・災害の情報): 情報源はオープンデータ, 遠隔・現地調査など。
 - 事象単位: 影響が確認された一つの領域。
 - 空間次元: 地理学的空間に領域の場所。
 - 時間次元: 外観時間に事象の発生から復旧。内実時間に情報の更新から次の更新 (情報の有効期間)。
 - ファクト: 事故・災害の種別・強度など。
 - (a) ダイシング: 分析次元と分析対象を設定。
 - 分析次元として, 空間次元と時間次元を設定。
 - ファクトを絞り込み, 事故・災害の着目点を設定。
 - (a) ドリリング: 絞り込み処理により, 事故・災害の空間的・時間的な着目点を設定。
 - 空間次元: 非演算子 (地理学的空間), 非演算子 (幾何形状と重心位置), 演算子 (包含, 絶対座標系)。
 - 時間次元: 非演算子 (内実時間), 非演算子 (期間), 演算子 (包含, 絶対時間系)。
- 工程 (2) では, 工程 (1) で設定した事故・災害の着目点からの影響有とする施設・設備を選別する。図 5 の (a)(b) の作業である。
- キューブ 1-2 (施設・設備の情報): 情報源は施設・設備の建設・運用・廃止作業の資料など。
 - 事象単位: 一つの施設・設備 (施設は設備の集合を代表する設備)。
 - 空間次元: 地理学的空間に施設の場所。工学的空間に施設・設備の場所と構造 (施設の場所が両空間に属するため設備の場所を地理学的空間に変換可能)。
 - 時間次元: 外観時間に設置から廃止。内実時間に工事から次の工事 (施設・設備の状態維持期間)。
 - ファクト: 施設・設備の種別, 使用状況・収容状況, 別事象にしていない構成品の型番・版数など。
 - (a) ダイシング: 分析次元と分析対象を設定。
 - 分析次元として, 空間次元と時間次元を設定。
 - ファクトを絞り込み, 施設・設備の着目点を設定。
 - (b) 関係識別: 工程 (1) の出力を絞り込み処理の入力に接続し, 空間次元・時間次元のデータの重畳から, 直接的に影響有とする施設・設備を選別。
 - 空間次元: 非演算子 (地理学的空間・工学的空間), 非演算子 (幾何形状と重心位置), 演算子 (包含・交差, 絶対座標系)。
 ※工程 (1) の複数の出力 (地理学的空間の幾何形状と重心位置) を入力 (幾何形状と重心位置) とし, or 条件で結合する。
 - 時間次元: 非演算子 (内実時間), 非演算子 (期間), 演算子 (包含・交差, 絶対時間系)。
 ※工程 (1) の複数の出力 (内実時間) を入力 (期間) とし, or 条件で結合する。

- (a) ドリリング：施設・設備の構造をたどる（ナビゲーション）ときの着目時点を設定。
 - － 時間次元：非演算子（内実時間），非演算子（着目時点），演算子（交差，絶対時間系）。
- (a) ナビゲーション：構造をたどり，間接的に影響有とする施設・設備を「スナップショット」に取り込む。
 - － 工学的空間において，直接的に影響有とした施設・設備から構造（dependence / has-a / part-of）をたどり，依存関係のある施設・設備を取り込む。
 - － 施設・設備が冗長化されている場合は，影響有とした施設・設備が減少する場合もある。

工程 (3) では，工程 (2) で選別した施設・設備による地域への影響を評価する。図 5 の (a)(b)(c) の作業である。

- キューブ 1-3（国勢調査などの統計情報）：情報源はオープンデータなど。
 - － 事象単位：一つの調査地域。
 - － 空間次元：地理学的空間に調査地域の場所。
 - － 時間次元：外観時間に調査制度の運用期間。内実時間に調査年次（調査の有効期間）。
 - － ファクト：人口，事業者・施設の数・種別など。
- (a) ダイシング：分析次元と分析対象を設定。
 - － 分析次元として，時間次元を設定。
 - － ファクトを絞り込み，統計情報の着目点を設定。
- (b) 焦点同調：工程 (2) の入力を絞り込み処理の入力に接続し，工程 (2) の着目時点の統計情報を選別。
 - － 時間次元：非演算子（内実時間），非演算子（着目時点），演算子（交差，絶対時間系）。
 - ※工程 (2) の (a) ドリリングの入力（着目時点）を入力（着目時点）とする。

- (c) 評価：キューブ 1-2・1-3 の分析対象（ファクト）の値を地図上で可視化し，地域への影響を評価。
 - － キューブ 1-2：使用状況・収容状況など。
 - － キューブ 1-3：人口，事業者・施設の数・種別など。

工程 (4) では，工程 (2) で選別した施設・設備を増減させて工程 (3) で評価する作業を繰り返し，施設・設備への対応を検討する。以下の観点からのシミュレーションである。

- 影響有とする施設・設備の程度（最悪～最良の状況設定）や確度（予測・更新・新規情報の反映）の調節。
- 復旧させた場合の効果の程度の確認。

5. おわりに

本稿では，人の活動にかかわる実世界事象を分析するために，OLAP の枠組を拡張した。本枠組では，実世界事象を体現するデータを，時間次元・空間次元を拡張した主題ごとの多次元キューブに写像し，それらを個別に分析するとともに，共通する次元を利用して多面的に関連付けて分析する。また，本枠組の実効性を例題に照らして検証し，想定水準まで実世界事象を分析できることを確認した。

今後は，プロトタイプ実装により，可視化手法を含めて本枠組みを精査し，処理方式を検討する。また，分析作業の記録・部品化を基にして，分析作業の巻き戻しと再試行（トライ&エラー），比較・評価，再利用などによる分析作業の支援や，分析作業の自動実行による CPS(Cyber-Physical System)[20] のような利用形態についても検討する。

参考文献

- [1] Pedersen,T.B. and Jensen,C.S. : Multidimensional Database Technology, *IEEE Computer*, Vol.34, No.12, pp.40-46 (2001).
- [2] Codd,E.F., Codd,S.B. and Salley,C.T. : *Providing OLAP (On-Line Analytical Processing) to User-Analysts:An IT Mandate*, Codd and Associates (1993).
- [3] Kimball,R. (著), 藤本, 岡田, 下平, 伊藤, 小畑 (訳) : データウェアハウス・ツールキット, pp.35-39, pp.97-100, pp.114-118, pp.279-281, 日経 BP 社 (1998).
- [4] NEC ネットエスアイ : マルチデータ統合 MAP, 入手先 <<https://www.nesic.co.jp/solution/bosai/multidatouougoumap.html>> (参照 2019-07-01).
- [5] 鈴木, 松井, 宮原, 渡辺 : D-NET 対応「災害時情報共有システム」の開発, *MSS 技法*, Vol.28 (2018).
- [6] ESRI : ユーティリティネットワーク, 入手先 <<https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/help/data/utility-network/what-is-a-utility-network-.htm>> (参照 2019-07-01).
- [7] 畑山, 松野, 角本, 亀田 : 時空間地理情報システム DiMSIS の開発, *GIS-理論と応用*, Vol.7, No.2, pp.25-33 (1999).
- [8] 根岸, 青木, 笠原, 郭, 川崎, 大沢 : 時空間管理のための地理情報システム STIMS, *情報処理学会研究報告*, 2003-DBS-131, Vol.2003, No.71, pp.195-202 (2003).
- [9] ESRI : オーバーレイ解析, 入手先 <<https://www.esri.com/gis-guide/spatial/spatial-overlay/>> (参照 2019-07-01).
- [10] Han,J., Koperski,K. and Stefanovic,N. : GeoMiner : a system prototype for spatial data mining, *Proc. SIGMOD'97*, pp.553-556, ACM (1997).
- [11] Rivest,S., Bédard,Y. and Marchand,P. : Toward better support for spatial decision making : Defining the characteristics of spatial on-line analytical processing (SO-LAP), *Geomatica*, Vol.55, No.4, pp.539-555 (2001).
- [12] Gómez,L.I., Gómez,S.A. and Vaisman,A.A. : A generic data model and query language for spatiotemporal OLAP cube analysis, *Proc.EDBT'12*, pp.300-311, ACM (2012).
- [13] 国土地理院 : 地理情報標準第 2 版 (JSGI 2.0), 入手先 <<http://www.gsi.go.jp/GIS/stdind/jsgi2.html>> (参照 2019-07-01).
- [14] Woods,D. : Big data requires a big, new architecture, *Forbes(online)*, available from <<https://www.forbes.com/sites/ciocentral/2011/07/21/big-data-requires-a-big-new-architecture>> (accessed 2019-07-01).
- [15] Bright,M.W., Hurson,A.R. and Pakzad,S.H. : A taxonomy and current issues in multidatabase systems, *IEEE Computer*, Vol.25, No.3, pp.50-60 (1992).
- [16] Crocker,D.,Ed. and Overell,P. : *Augmented BNF for Syntax Specifications: ABNF, RFC5234* (2008).
- [17] PASCO : 11 桁コードとは?, 入手先 <<https://www.pasco.co.jp/recommend/word/word060/>> (参照 2019-07-01).
- [18] 瀬谷, 堤 : 空間統計学, pp.10-12, 朝倉書店 (2014).
- [19] 藤野, 今村, 菅野 : 多次元データ分析システムによる保守業務分析支援の検討, *DEIM Forum 2014 D9-4* (2014).
- [20] 国立情報学研究所 : NII Today 第 73 号「CPS 実社会 x IT がもたらす未来」, 国立情報学研究所 (2016).