

# 参照アーキテクチャーによる工学体系化と 衛星測位システムへの応用

浅里幸起<sup>1</sup>, 永島敬一郎<sup>2</sup>

Koki Asari, Kei ichiro Eishima

<sup>1</sup>宇宙システム開発利用推進機構, <sup>2</sup>東京海上火災日動保険株式会社

Japan Space Systems, Tokio Marine Fire Nichido Insurance

**Abstract** The modern technology systems and their applications are becoming increasingly complex, involving various fields of technology, and the difficulty of optimizing them has risen. One proposed solution to address this issue is the concept of "Reference Architecture." Reference Architecture aims to provide a common framework that transcends the boundaries of different technical fields at the top-level design of a system, ensuring interoperability between different technologies and intending to systematically construct more advanced systems without redundancy or excessive complexity. This paper examines the engineering systematization of Reference Architecture and its application to satellite positioning systems.

## 1. 概要

現代の工学システムとそのアプリケーションは、相互に異なる分野の技術を巻き込みながら、ますます複雑化しており、最適化するための難易度が高くなっている。この問題を解決すると期待されている方法に参照アーキテクチャーがある。

参照アーキテクチャーは、システムの最上位設計において、技術分野の垣根を越えて共通のフレームワークを提供することを目指しており、異なる技術間の相互運用性を確保し、より高度なシステムを、合理的に抜けや過剰がなく完全に構築することを意図したものである。

現在、参照アーキテクチャーは、情報システム、生産システム、電力システム、IoT その他の分野で国際標準が策定され、その活用が推進されている。人工知能の発達とともに、その有効性がますます認識され、国際標準規格の開発が進められている。

宇宙システム分野では、2000年代に米国のNASAジェット推進研究所(JPL)と日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)が中心となり、宇宙データシステム諮問委員会(CCSDS)と国際標準化機構(ISO) TC 20/SC 13委員会にて推進され、2010年に宇宙データシステムを用途としてISO 13573:2010 RASDSが発行された。

RASDSは、元々宇宙データシステムに関する仕様であったが、現在これを一般のシステムに拡張する「Space Reference Architecture」の研究開発が複数の作業部会において進んでいる。本研究は、参照アーキテクチャーを衛星測位システムに適用し、その活用を図るため、その構造や意味、メリット等を検討するものである。

## 2. 参照アーキテクチャー

システムを概念的に表現した仕様をオントロジーという。RASDSのオントロジーは、図1のように描かれており、トップレベル・ドメインを統一した視点(Viewpoint)で全体を

把握する。その視点は、エンタープライズ（Enterprise）、コネクティビティ（Connectivity）、機能（Function）、情報（Information）、通信（Communication）等をトップレベルとするものである。本図は、標準規格書の CCSDS 311.0-M-1 及び国際標準 ISO 13573:2010 に掲載されているものである[1,2]。

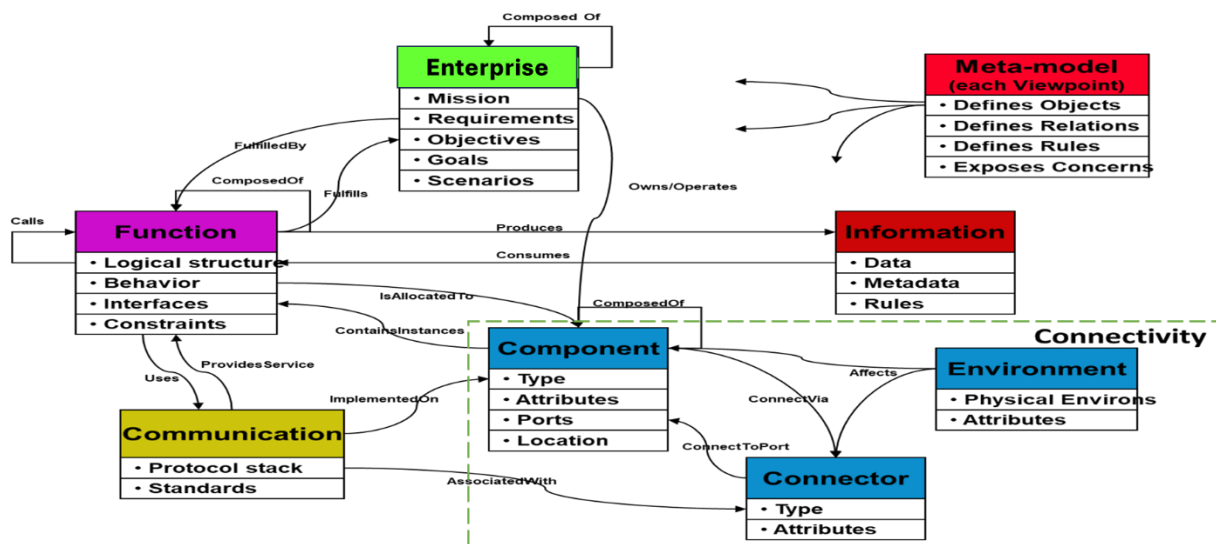


図1 参照アーキテクチャーのオントロジー

エンタープライズ視点は、ミッション、要求事項、目的、目標、シナリオ等からなる。コネクティビティ視点は、要素（Component）、接続子（Connector）、環境（Environment）からなり、これはネットワークで見た構成を表している。機能視点は、ロジカルな構造や挙動、インタフェース、制約条件等からなる。情報視点は、データ、メタデータ、ルール等からなる。通信視点は、プロトコルやスタンダードからなり、それぞれの視点は図1で示すように相互依存関係がある。

RASDSは、既に多くの分野で応用され利用されており、関連する標準規格が数多く制定・発行されている[3-12]。

また、これらの視点の時系列的な展開や空間的な広がりを見ると、図2のように全体像を表現することができる。視点の軸は、開発作業をブレークダウンした項目の構造、すなわちワーク・ブレークダウン・ストラクチャー（WBS）を構成したり、WBSの各アイテム項目の名称を共通化したり、その作成の役に立つ。更に、部品、製品、施設、都市、地域、全球（地球、月、火星等）、宇宙という広範な空間のスケールをカバーすることができる。

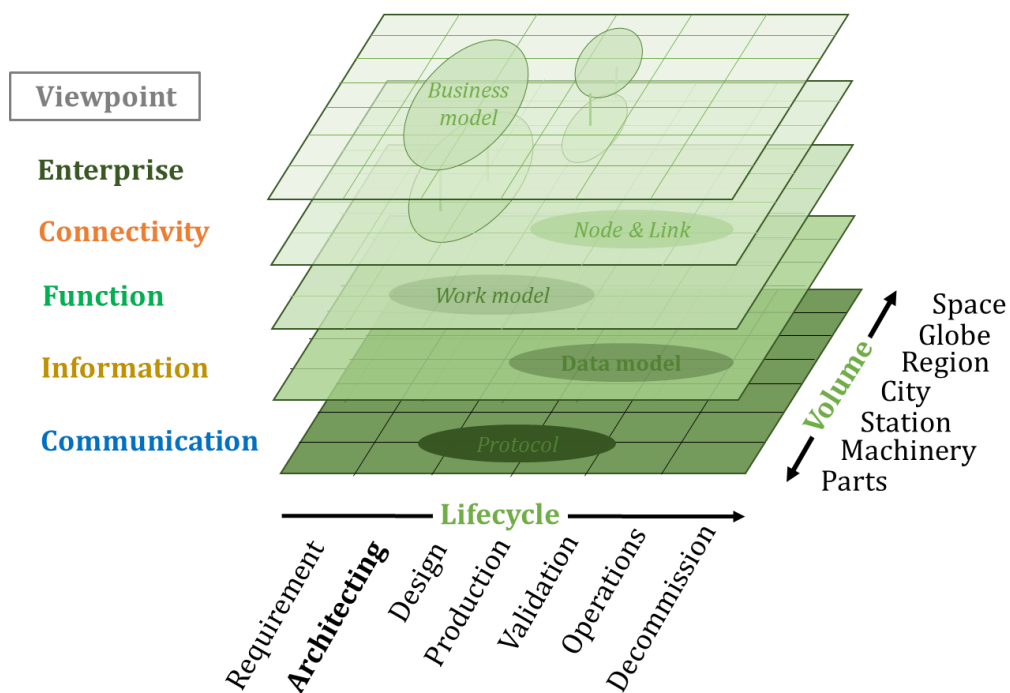


図2 参照アーキテクチャーの利用概念図

### 3. 衛星測位システム

本稿では、参照アーキテクチャーの衛星測位システムに応用することを検討するため、分かり易い単独測位をベースに記述する。ただし、一部は精密測位に関する内容を補足的に述べることとする。

#### 3.1 エンタープライズ視点

参照アーキテクチャーでは、まずエンタープライズの視点が求められる。この視点では、対象とする技術・システム・サービスについて、ミッション、要求事項、利用用途等の明記が必要とされる。この内容を表1にまとめる。

ここでいう「エンタープライズ」を正確に表現する和文単語を見出すのは難しい。「事業計画」「企画」などが近い用語であるが、更に一般化された上位概念であり、正鵠を射る単語がない。本稿ではカタカナ用語として記すことにする。

表1 エンタープライズ視点でみた衛星測位システム

| 項目    | 内容  |
|-------|---|
| ミッション | いつでもどこでも位置と時間を計ることができること。   |
| 要求事項  | 航法衛星からの測位信号を直接に無線で受信できること。  |
| 目標    | 陸上・海上・空中・近宇宙においてメートル級以上の精度によって測位ができること。   |
| 利用    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・宇宙機のナビゲーション</li> <li>・航空機のナビゲーション（無人航空機を含む）</li> <li>・海洋船舶分野のナビゲーション</li> <li>・陸上移動機のナビゲーション（鉄道，自動車，バス，タクシー等）</li> <li>・陸上作業機のナビゲーション（建機，農機，除雪車等）</li> <li>・歩行者のナビゲーション</li> <li>・陸上や海上の測量</li> <li>・現在時刻の計測及び同期</li> <li>・周波数の同期</li> <li>・そのほか測位航法及び調時に関する用途</li> </ul> |

### 3.2 コネクティビティ視点

衛星測位システムのコネクティビティは、図3のように表すことができる。この図は、ISO 13573 で規定された図の記法を用いており、それに加えて信号の伝達については、UML の記法を使っている。

例えば、Navigation satellite（航法衛星）から CORS（電子基準点）へ Radionavigation signal（航法信号）の伝達では、測距信号が  $4 \sim n_s$  機の航法衛星から  $1 \sim n_r$  基の電子基準点へ送信されることを表している。一方、航法衛星からユーザーの Radionavigation receiver（航法受信機）への伝達では、測距信号が  $4 \sim n_s$  機の航法衛星から  $1 \sim n_u$  機のユーザーの航法受信機へ送信されることを表している。

現在、各国が提供する航法衛星の総数は 100 機を超えており、増加を続けている。また、電子基準点は日本では約 1300 基あり、全世界では数万基が設置されていると言われている。更に、ユーザーの航法受信機は、約 30 億台が稼働しているとの欧州連合による産業統計が出版されている。

衛星測位システムの全体は、非常に複雑な系統であるが、この記法を採用することによって、非常に簡潔に表現することができる。なお、ここでいう「コネクティビティ」を正確に表現する和文単語を見出すのは難しい。「構成」「接続性」などが近い用語であるが、

更に一般化された上位概念であり，正鵠を射る単語がない．本稿ではカタカナ用語として記すことにする。

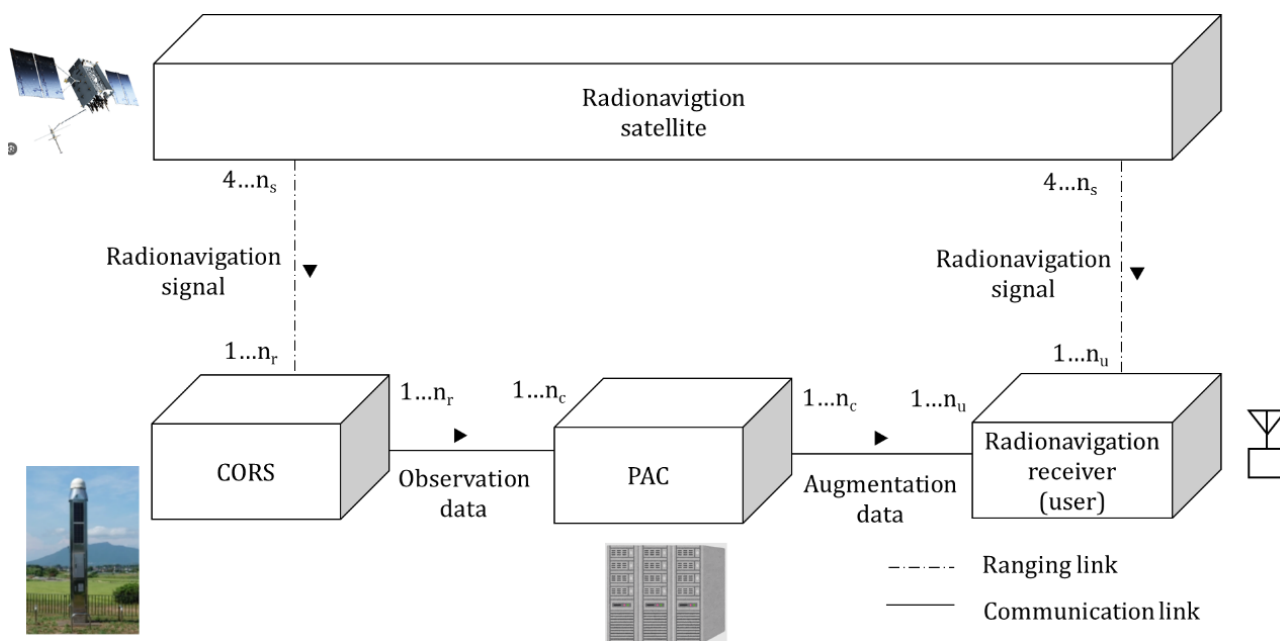


図3 衛星測位システムの接続性

また，接続性視点は，要素(Component)と接続子(Connector)のノード・リンク関係のネットワーク構造を表現するだけでなく，3つ目の属性として環境(Environment)を合わせて表現することになっており，電離層・対流圏など伝搬路の環境特性を規定する余地がある．また，遮蔽や多重反射など，いわば都市の建造物など人工的に作られる環境の影響を規定できる枠組みである．

### 3.3 ファンクション／機能視点

#### 3.3.1 衛星を用いた位置計測

衛星測位システムの機能は，以下のとおり数理モデルで適切に表現することができる．ここでは，代表的で簡潔な事例として単独測位を取り上げる．

図4の示すように，衛星の位置から，測定地点の位置までの距離を電波信号の伝搬時間を測ることで測定し，4つ以上の衛星までの距離を計る．

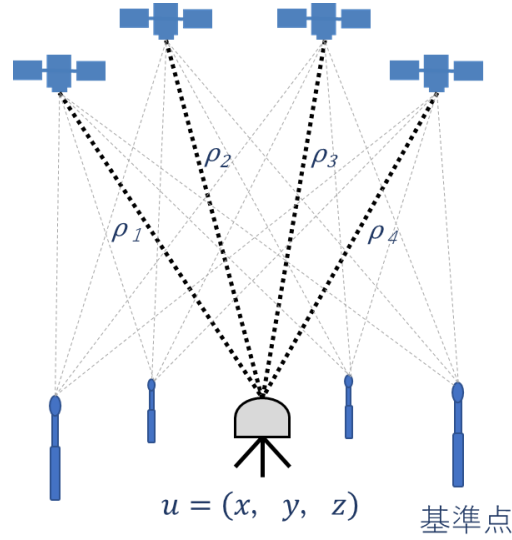


図4 衛星測位システムの構成

距離測定を数式で表現すると、

$$\begin{aligned}
 \rho_1 &= \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + c\Delta t \\
 \rho_2 &= \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + c\Delta t \\
 \rho_3 &= \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} + c\Delta t \\
 \rho_4 &= \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} + c\Delta t \\
 &\vdots
 \end{aligned} \tag{1}$$

この連立方程式を解いて、測位受信機の位置  $(x, y, z)$  と測位受信機のクロック誤差  $\Delta t$  を算出する。なお、光速は  $299\,729\,458$  [m/s] である。

まず、衛星  $p$  の位置  $s^p$ 、受信機の位置  $u$  を式(2)のようにおく。  $p=1, 2, \dots$  とする。

$$s^p \equiv [x^p, y^p, z^p]^T, \quad u \equiv [x_u, y_u, z_u]^T \tag{2}$$

衛星  $p$  と受信機  $u$  の間の幾何学的距離  $r_u^p$  は式(3)のように書ける。

$$r_u^p(t, t - \tau_u^p) = \|u(t) - s^p(t - \tau_u^p)\| = \sqrt{(x_u - x^p)^2 + (y_u - y^p)^2 + (z_u - z^p)^2} \tag{3}$$

ここで  $\tau_u^p$  は、衛星  $p$  から測位受信機  $u$  までの電波伝搬時間である。

時間  $t$  において受信機  $u$  で測定される衛星  $p$  からの疑似距離  $\rho_u^p(t)$  は、

$$\rho_u^p(t) = r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c\{\delta t_u(t) - \delta t^p(t)\} + e_u^p(t) \tag{4}$$

これを観測方程式という。ここで、

$\delta t_u(t)$ : 受信機  $u$  のクロック誤差

$\delta t^p(t)$ : 衛星  $p$  のクロック誤差

$e_u^p(t)$ : 衛星  $p$  と受信機  $u$  の間の距離観測誤差

$c$ : 光速 299 792 458 m/s

幾何学的距離  $r_u^p$  を受信機の概略位置  $\hat{u}$  のまわりでテイラー展開し 1 次項までとると,

$$\rho_u^p \cong \hat{r}_u^p + \hat{g}_u^p(u - \hat{u}) + c\{\delta t_u - \delta t^p\} + e_u^p \quad (5)$$

ここで,

$$\hat{r}_u^p \equiv \|\hat{u} - s^p\| \quad (6)$$

$$\hat{g}_u^p \equiv \left[ \frac{\partial r_u^p}{\partial u} \right]_{u=\hat{u}}^T = \left[ \frac{\hat{x}_u - x^p}{\hat{r}_u^p}, \frac{\hat{y}_u - y^p}{\hat{r}_u^p}, \frac{\hat{z}_u - z^p}{\hat{r}_u^p} \right] \quad (7)$$

従って, 観測方程式は線形化されて式(8)のようになる.

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_u^p &\equiv \rho_u^p - \hat{r}_u^p + \hat{g}_u^p \hat{u} + c\delta t^p \\ &= \hat{g}_u^p u + c\delta t_u + e_u^p \end{aligned} \quad (8)$$

$n$  個の衛星 ( $p=1, 2, \dots, n$ ) の観測ベクトル  $y_p(t)$ ,  $e_p(t)$  および  $H_p(t)$  は式(9)のように定義される.

$$\begin{aligned} y_p(t) &\equiv [\hat{\rho}_u^1(t), \dots, \hat{\rho}_u^n(t)]^T \\ e_p(t) &\equiv [e_u^1(t), \dots, e_u^n(t)]^T \end{aligned} \quad (9)$$

$$H_p(t) \equiv \begin{bmatrix} \hat{g}_u^1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \hat{g}_u^n & 1 \end{bmatrix}$$

$n$  個の衛星の観測方程式, 式(10)のようにまとめられる.

$$y_p(t) = H_p(t) \begin{bmatrix} u(t) \\ c\delta t_u(t) \end{bmatrix} + e_p(t) \quad (10)$$

従って, 受信機の位置  $u(t)$  は, 最小二乗法により, 式(11)で算出される.

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ c\delta t_u(t) \end{bmatrix} = \{H_p^T(t)H_p(t)\}^{-1} H_p^T(t) y_p(t) \quad (11)$$

ここで受信機のクロック誤差  $\delta t_u(t)$  も同時に算出される.

### 3.3.2 位置の基準

衛星測位システムの重要機能として, 座標系として位置の基準を与えることがある. 基準座標系はオーソリティ機関によって与えられている. 日本で使われる基準座標系には次のものがある.

① **ITRF2020** : International Terrestrial Reference Frame 2020

国際地球基準座標系 ITRS : ISO 19161-1:2020

<https://itrf.ign.fr/en/homepage> (フランス地理院が記述)

ITRF 系は国際的な基準座標系とされている。ISO 19161-1:2020 において, ITRS 座標系の第一実現 (Primary realization of ITRS) と規定されている。

② **WGS84** : World Geodetic System 1984

米国防総省が規定した基準座標系で, 実用的なトータルシステムである。

航空, 海事, 軍事・諜報等の分野で利用されている。

<https://earth-info.nga.mil/index.php?dir=wgs84&action=wgs84>

現在では ITRF 系とは無視できる誤差にて整合している。

日本の水路業務法 (海空交通等) は WGS84 で運用されている。ISO 19161-1:2020 で ITRS 座標系の第二実現 (Secondary realization of ITRS) と規定されている。

③ **JGD2011** : Japanese Geodetic Datum 2011

日本測地系 2011 (国家座標)

日本の地殻変動を反映して国土地理院が規定した世界測地系

<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/datum-main.html>

元期 (げんき) において ITRF 系と整合させている。

元期は西日本・北海道は 1997 年 1 月 1 日, 東日本・北陸 4 県は 2011 年 5 月 24 日。

ここで, 図 5 に示すように, 日本の国家座標 JGD2011 と海空交通の WGS84 にはズレがある。日本の水平座標は, WGS84 から, 仙台周辺では 150cm 以上, 西日本で 50~100cm, 首都圏で 20~40cm のズレがある。従って, 数十 cm 以下の測位をするには, 地殻変動補正が必要である。しかしながら, 衛星測位技術の体系に地殻変動補正が実用レベルで組み込まれている国はまだ少ない。



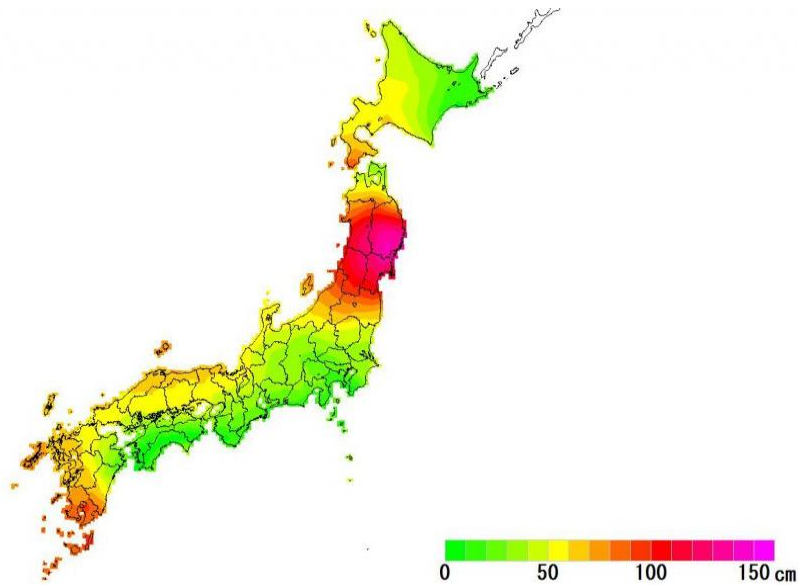


図5 JGD2011とWGS84の差<sup>[13]</sup>

### 3.4 インフォメーション／情報視点

衛星測位サービスで用いられる情報としては、GNSSの仕様書に規定される航法メッセージや、RTCMで規定されるRTKやPPPの補強情報やRINEXファイル情報などがある。

衛星測位システムの接続関係は、複数の航法衛星からの信号を得るため複雑であるが、UMLを用いると図6のように簡潔に記述することができる。この図は単独測位について記しているもので、現在地上ではGPS、Galileo、QZSS等を合わせて30機程度の航法衛星からの信号を受信している。

航法衛星からの信号には、測距情報だけでなく、航法メッセージが載っており、測位に必要な情報が放送によって与えられる。また、測位受信からは、測位結果に関する情報が出力される。これらは例えば、IEC 61162-1:2016 (NMEA 0183)、IEC 61162-2:1998 (NMEA 0183 high speed) 及びIEC 61162-3:2008 (NMEA 2000) 等で規定されている。また、他の分野において位置情報表現の規定が存在する。

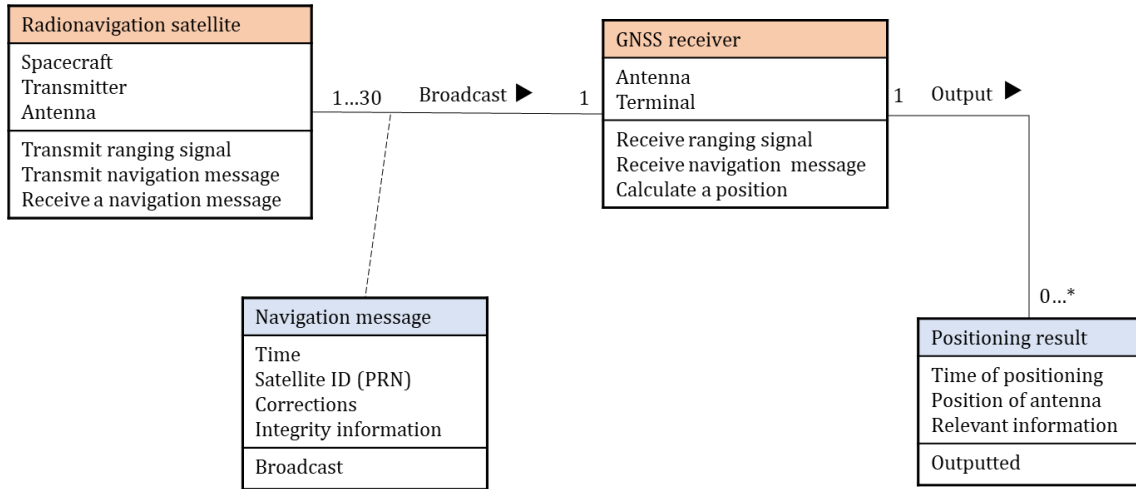


図6 航法衛星と測位受信機をめぐる情報

図7は、更に精密測位の要素も加えて、電子基準局（CORS）と測位補強センターを入れた情報と接続性の関係を UML で表現したものである。この図は、 $n_s$  機の航法衛星の数、 $n_c$  基の電子基準点、 $n_p$  カ所の測位補強センターの数、 $n_u$  台の測位受信機のネットワークを表している。航法衛星の信号を受信する CORS からの情報伝送を受けて、測位補強センター（PAC）で測位補強情報が生成されて、測位受信機に伝送される。

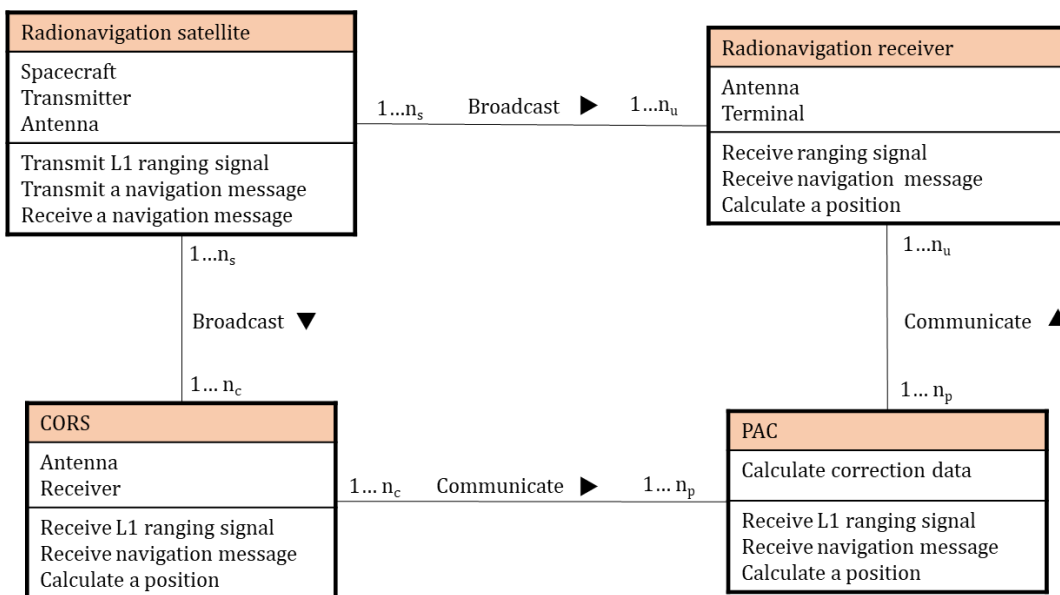


図7 航法衛星・CORS・測位補強センター・測位受信機をめぐる情報

### 3.5 コミュニケーション／通信視点

衛星測位システムを用いたサービスのコミュニケーション／通信視点としては、測距（レンジング）信号の仕様が当たると考えられる。測距信号は、航法衛星から放送されており、プロトコルはないが、スペクトル拡散を用いた特長ある変調方式を備えており、GNSS プロバイダの提供する仕様書に詳述され、公開されている。図8に代表的な GPS L1 信号に関する信号構造を図示する。

なお、コミュニケーションの視点は、より上位の概念を表すために、プロトコルの視点と呼ばれることがある。これは、電子情動的な通信ではなく、さらに上位の主体間の相互作用があることも想定して、拡張された考え方であるということができる。

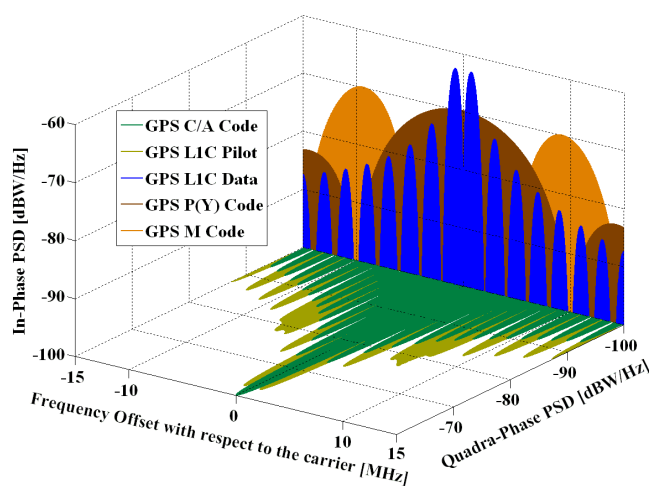


図8 GNSS 測距信号の構造<sup>[14]</sup>

### 3.5 オペレーション／運用視点

オペレーション／運用視点は、参照アーキテクチャーを宇宙データシステムだけではなく、一般の宇宙システムに拡張する研究において2023年に加えられた視点である。この視点には次のような項目が挙げられている。

- ・ Scenarios／運用シナリオ
- ・ Processes／運用プロセス
- ・ Activities／運用活動
- ・ Tasks／運用タスク
- ・ Modes・States／運用モード、運用状態

今後、この視点の利用事例を増やしていくこととする。

### 3.6 サービス／業務視点

サービス視点は、オペレーション視点と同じく、一般の宇宙システムへの拡張に伴って加えられた視点である。

- ・ Service Behavior／サービスの挙動
- ・ Interface Signal／インタフェース信号
- ・ Service Constraints／サービスの制約

今後、この視点の利用事例についても増加に努めることとする。

## 4. 圏論を用いた量の理論

参照アーキテクチャーと同様に、システムを統括的にとらえる試みとして、圏論に基づいて諸工学のホモロジー（構造的同型性）を明らかにする「量の理論」がある。これは、新しいシステム工学に役立つ可能性がある。そのなかで、Z線図は回路論的工学を統一的に表現した集大成であるといえる。

参照アーキテクチャーは、分野を越えて工学の上位設計を標準化しようとするものであるが、元来工学の諸分野には共通の同型構造があることが、高橋利衛<sup>[13,14]</sup>によって説明されている。電気回路を用いた工学体系のアナロジーはよく知られている。しかし、高橋は現代数学で使われる圏と関手の理論などを駆使して、それが単なるアナロジーには留まらず、構造的同型性（ホモロジー）であることを論じた。

カントールが19世紀に開発した集合論は数学に革命をもたらし、20世紀型の現代数学への道を拓いた。この集合論をベースにして、1940年代には Eilenberg と Maclane ら導入した圏論（Category Theory）は、一見関係のない論理構造に同型性（ホモロジー）が存在することを論理立てて説明できる理論であり、関係のなさそうな分野に横串を刺して共通的に論じることができるため、数学分野では急速に応用範囲が広がっていった。

圏（Category）とは、対象（Object）を射（Arrow）で結んだグラフをいう。対象は、考察の対象になるものならば何でもよい。射とは有向リンクのことである。対象をノードとし、これを有向リンクである射で結んだものが圏となる。つまり、構造をもった集合を表すことができる<sup>[15]</sup>。このように、ある工学分野に現われる量を対象として、量の変換を射とする圏を考えることができるので、その分野の量の構造を把握して、それぞれの工学分野を圏として捉えることができるようになる。

工学の諸分野にホモロジー（同型性）が存在することは、工学の体系化に大いに資する。それを端的に図示したものが、図9のZ線図<sup>[16,17]</sup>である。図中のZの形を成す量の関係性が特徴的だが、その部分の量が広い意味のインピーダンスZを意味するのでこの名称がつけられている。

図9の表しているものは、量の理論とも呼ばれており、力学系・回転力学系・電気系・

流体系・熱系の構造的同型性（ホモロジー）が示されている。この図は、キルヒホッフの第1・第2法則の双対（そうつい）性を基軸としているが、これらの法則が電気回路の基本法則であるだけでなく、流通する量（以下、「流通量」という。）および位置の差を表す量（以下、「位差量」という。）を拘束する要請だということが分かる。この図では、第1法則・第2法則をそれぞれ満足する変数の集合を  $K_1$  空間・ $K_2$  空間（以下、合わせて「量空間」という。）と名付け、その間の射として量の関係性を整理した。

Z線図では、たとえば電圧  $e$  と電流  $i$  の関係は、 $e=R(i)$  という  $K_1$  空間から  $K_2$  空間への写像と考えられる。この写像が線形であるとき、オームの法則  $e=Ri$  となる。Z線図は、工学の諸法則を体系化して表しているのだから、工学法則のヒエラルキーを理解することが役立つことができる。

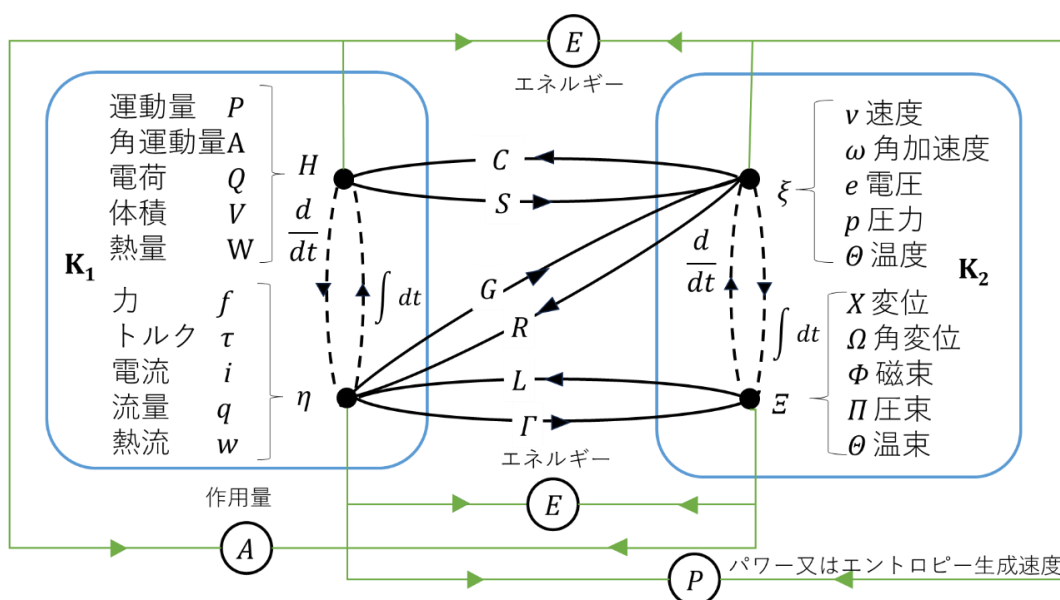


図9 工学的ホモロジー：Z線図<sup>[16,17]</sup>

具体的には、エネルギー保存則・エントロピー増大則・変分原理（最小作用の法則）などは、工学体系のなかで指導的な方向性を与える原理である。これが工学の基礎階層を与えている。この次に、キルヒホッフの第1・第2法則のように現象に無関係に、変数を拘束する階層がある。そして  $K_1$  あるいは  $K_2$  のなかで行われる写像がある。オームの法則やフックの法則はその例である。この写像は、場合により、ものにより、「効果」「装置」「変換器」などと呼ばれる。例えば、 $e \rightarrow \theta$  はペルチェ効果、 $\omega \rightarrow v$  はウォームギア、 $\omega \rightarrow e$  はタコジェネレータを含んでいる。

ここで、図9に記入された不変量すなわち作用量・エネルギー・パワーと量空間との関係を見ると、力学・回転力学・電気・流体・熱学の諸分野が圏をなし、その圏を合併によって、例えば熱力学や電気力学という新たな圏を生み出すことができる。このように圏論に基づく工学ホモロジーは、工学諸分野を横断的に理解することを可能にするため、今日

の複雑化が進み、多分野の複合・融合が待ったなしの時代には、非常に有用であると考えられる。圏論に基づく工学論は、人工知能の設計応用やモデルベース設計(MBSE)の発展と相まって、注目してよい理論であると考えられる。

特に衛星測位では、陸・海・空・宇宙のあらゆる分野において位置情報を扱い、測位・航法・調時のアプリケーションで利用される。従って、上記の諸工学を適用する機会が多く、IoT (Internet of Things) 技術の普及によって、あらゆる装置・機器が接続されて、新しいソリューションが生まれ出されつつある。そこでは、本稿で論じた参照アーキテクチャーや工学的ホモロジーを活用する余地は非常に大きいと考えられる。

衛星測位システムに圏論による量の理論を応用すると、機械工学や構造工学、通信工学を統合的に把握することができるため、システム全体の理解に大いに役立つといえる。衛星測位では、位置・速度・時間という力学的な観点、電磁波による測距を利用する通信工学的な観点、測位受信機を実現するための電子工学や情報工学の観点が必要とされるためである。この点については、今後の技術的かつ教育面における進歩を期待することにした。

## 5. 結論

参照アーキテクチャーによる工学体系化が、メジャーな技術分野で世界的に進んでいる。AI サービスやモデルベース設計ツールの充実化が追い風となっている。宇宙システム分野においても、国際標準化機関で検討が盛んになっており、情報システムから一般のシステムへの拡張が進められている。衛星測位システムなど宇宙利用サービス分野も相性がよく、異なる技術分野における相互運用性の向上に役立つと考えられる。

参照アーキテクチャーに関心を持つ技術者が増えて、衛星測位システム等への応用が進むとよいと考える。

## 謝辞

本研究について、NASA ジェット推進研究所(JPL)の Peter Shame 博士、Timothy T. Pham 氏、ISO/TC 20/SC 14 委員会の Frederic Slane 議長、同委員会における Advisory Group 3 (AG3) の Paulo Sakai 部会長、三菱電機株式会社の吉河章二博士より、貴重なご助言とご指導を受けました。ここに謝意を示します。

## 略語

|       |   |
|-------|---|
| CCSDS | Consultative Committee for Space Data Systems |
| CORS  | Continuously Operation Reference Station      |
| GNSS  | Global Navigation Satellite System            |
| GPS   | Global Positioning System                     |
| IEC   | International Electrotechnical Commission     |
| ITRF  | International Terrestrial Reference Frame     |
| ITRS  | International Terrestrial Reference System    |

|         |  |
|---------|--|
| ISO     | International Organization for Standardization   |
| JGD2011 | Japan Geodetic Datum 2011                        |
| MBSE    | Model Based System Engineering                   |
| NMEA    | National Marine Electronics Association          |
| PAC     | Positioning Augmentation Center                  |
| PPP     | Precise Point Positioning                        |
| QZSS    | Quasi-Zenith Satellite System                    |
| RTCM    | Radio Technical Commission for Maritime Services |
| RTK     | Real Time Kinematic                              |
| SC      | Sub-Committee                                    |
| TC      | Technical Committee                              |
| UML     | Unified Modeling Language                        |
| WBS     | Work Breakdown Structure                         |
| WGS84   | World Geodetic Systems 1984                      |

### 参考文献

- [1] ISO 13537:2010, Space data and information transfer systems — Reference architecture for space data systems
- [2] CCSDS 311.0-M-1, Reference Architecture for Space Data Systems
- [3] CCSDS 312.0-G-1, Reference Architecture for Space Information Management
- [4] CCSDS 351.0-M-1, Security Architecture for Space Data System
- [5] CCSDS 371.0-G-1, Application and Support Layer Architecture
- [6] CCSDS 520.1-M-1, Mission Operations Reference Model
- [7] CCSDS 650.0-M-2, Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS)
- [8] CCSDS 901.0-G-1, Space Communication Cross Support – Architecture Description Document
- [9] CCSDS 901.0-M-1, Space Communication Cross Support – Architecture Requirements Document
- [10] CCSDS 910.4-B-2, Cross Support Reference Model – Part 1: Space Link Extension Services
- [11] CCSDS 500.2-G-2, Navigation Data Messages Overview
- [12] CCSDS 500.0-G-4, Navigation Data Definitions and Conventions
- [13] アイサンテクノロジー, 日本の地殻変動変位, Geospatial Data Solution Center, 2020
- [14] Navipedia, GNSS signal, [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS\\_signal](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal)
- [15] Akihiko Koga, とりあえずの圏論の導入—圏・関手・自然変換—(前編)圏, YouTube, 2022
- [16] 高橋利衛, 基礎工学セミナー, p.431, 現代数学社, 1974
- [17] 高橋利衛, 工学の創造的学習法—工学の見方・考え方, p.270-271, オーム社, 1965