

(39) 3次元建設生産サイクルにおける ラージモデル導入に関する提案

福士 直子¹・井上 修²・酒井 拓也³・長谷川 充⁴・城古 雅典⁵・
有賀 貴志⁶

¹学生会員 国際航業株式会社 技術サービス本部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1)
E-mail:naoko_fukushi@kk-grp.jp

²正会員 オートデスク株式会社 技術営業本部 土木分野技術統括
(〒104-6024 東京都中央区晴海 1-8-10 晴海アイランド トリトンスクエア オフィスタワーX 24F)
E-mail: osamu.inoue@autodesk.com

³非会員 朝日航洋株式会社 技術企画部 (〒350-1165 埼玉県川越市南台 3-14-4)
E-mail: takuya-sakai@aeroasahi.co.jp

⁴正会員 有限会社水都環境 (〒355-0064 埼玉県東松山市毛塚 1073-1)
E-mail: hasegawa@mnt-kankyo.com

⁵正会員 国土基盤モデル研究会 (〒191-0011 東京都日野市日野本町3-8-3)
E-mail:jiyouko.m@jcity.maeda.co.jp / contact@inframodel.org

⁶正会員 国土基盤モデル研究会 (〒191-0011 東京都日野市日野本町3-8-3)
E-mail: t.aruga@conport.jp / contact@inframodel.org

3次元モデルの利活用によって干渉チェックや仮想施工といったフロントローディングが可能となり、工期短縮や手戻り削減、労働災害の低減などが期待されている。サイバー空間とフィジカル空間の差異が0に近ければ近いほど利活用の幅は広がり生産性も向上するが、設計は平らな平面上で行われる一方で現実の地球表面の形は不定型なジオイドで表現される。規模の大きい構造物の設計においては、ジオイドを考慮した設計が必要である。そこで本研究ではラージモデルとして設計情報を現実空間へ配置する簡便な手法を提案する。

Key Words: large model, 3 dimensional model, geoid, itr coordinate system

1. 研究の背景と目的

国土交通省が推進する CIM¹⁾や日本政府が未来の社会像として目指している Society5.0²⁾では、3次元情報の活用が前提とされている。建設業よりも3次元情報の活用が進んでいる製造業では、3D Annotated Model (以下、3DA)の標準化を行い、業務改善検討の一環として部品計測・評価の効率化への活用検討などが行われている³⁾。建設業ではフロントローディングやコンカレント・エンジニアリングなど、現場で行われていた試行錯誤を極力設計段階で行い、費用や工期などを削減する効果が期待されている⁴⁾。城古ら⁵⁾は製造業における3DA活用事例の調査を行い、公共事業における設計・施工の目指す将来像として4段階のコンセプトを提案している。その中で、

正確なデータ連携を前提とした3次元モデルによる仮想施工、および仮想施工によって検証済みの3次元モデルを用いた数値制御施工や自動化施工によって生産性の向上、労働力不足への対応、労働災害の低減が期待できるとしている。3次元モデルを建設生産サイクルで活用する研究は多く行われており、各プロセスやプロセス間での活用検討⁶⁾、属性情報や詳細度の検討⁷⁾などがある。

これらの研究では、平面上で作成した3次元モデルで表現したサイバー空間とフィジカル空間⁸⁾との差異が0またはほぼ0に近いことを前提として研究がなされている。両空間の差異は0に近ければ近いほど干渉チェックや仮想施工など利活用の幅は広がるが、長大トンネルや長大橋などの規模が大きい構造物では曲面である地球表面の形 (以下、ジオイド⁹⁾) を考慮する必要がある。有

富ら⁹⁾は平面直角座標系での距離と実測長との差異について指摘し、地球を球体の3次元多様体と仮定することで差異を0に近づける方法を提案している。しかし、道路線形設計への適用検討にとどまっており、汎用的な方法の提案には至っていない。

そこで本研究では、施工時に設計情報を地形へ配置する作業やその際に発生する現場合わせ等の作業負担軽減を目的として、ジオイドを現在の設計へ反映できる簡易な方法としてラージモデルという概念を提案し、ジオイドの影響について検討を行う。

2. GNSS 測位と座標系

(1) 現在の測位技術

紀元前2世紀頃には地球は球形であることが立証されていた。その後、座標軸の発明、地殻変動の観測技術の確立や重力観測精度の向上などによりジオイドをより正確に表現する方法が国際的に確立され、現行の測量法では3次元の地球中心直交座標系が採用されている。

日本列島は地殻変動が活発であるため、国土地理院は時間とともに変化する基準点の位置情報を反映した測量が可能となるように1997年（一部地域は2011年）を元期とするセミ・ダイナミック補正を導入している¹⁰⁾。準天頂衛星のみちびきはセンチメートル級測位補強情報を送信する予定となっており¹¹⁾、建設生産サイクルにおいて高精度な位置情報が活用できる環境が整いつつある。

(2) 日本で使われている座標系

ドローンやスマートフォンの位置情報取得にはGlobal Navigation Satellite System（全球測位衛星システム、以下、GNSS）測位技術が使用され、WGS84座標系の値（WGS84準拠楕円体の経緯度と楕円体高）が得られる。日本の地図と位置を合わせをするには、ソフトウェア等で測地成果2011へ変換を行う必要がある。

日本の地図で使用している座標系はGRS80準拠楕円体を採用し、楕円体中心を地球の重心と一致させたITRF座標系を採用している。ジオイドは重力ポテンシ

ヤル面とも言われ、世界の海面の平均位置に最も近い面である（図-1）⁹⁾。国土地理院は測地成果2011を提供しており、公共測量で使用する平面直角座標系は日本の国土を19の座標系に分割し、平面へ投影して地図が作成される。座標の単位はメートルで、距離や面積、勾配の算出に適しており、実測長と地図上の差異は1/10,000以下である¹²⁾。

ここで、GNSS測位および測地成果2000の経緯度を測地成果2011へ変換しないで平面直角座標系へ適用してしまった場合を考える。たとえば、千葉県野田市に原点のある平面直角座標系第IX系の原点の位置は、WGS84では南西に約84cm、測地成果2000では南東に約54cmの場所に配置されることになる。使用する経緯度の由来を明確にすることは非常に重要であることがわかる。

(3) 標準化団体における座標系の記述

既存の3次元の座標系に関する記述について、LandXML、bSJ（buildingSMART JAPAN）、OGC（Open Geospatial Consortium）、ISO（International Organization for Standardization）の4つの標準化団体を対象に調査を行った（表-1）。ジオイドを考慮した座標系に関する記述は見られなかったが、ISOの図示規定では3次元直交座標系の採用が明記されているのを確認した。

(4) ラージモデルとスモールモデル

3次元モデルの設計基準面としてジオイドを表現するには、パラメトリック曲面で表現する方法などが考えら

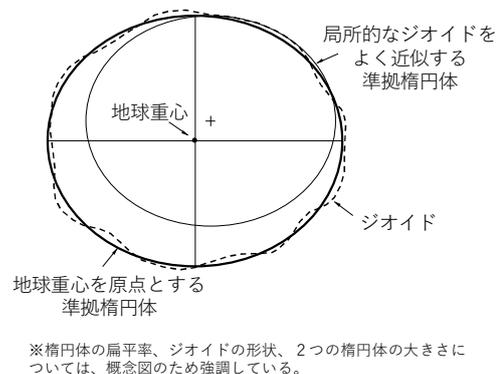


図-1 楕円体とジオイド

表-1 標準化団体の座標系に関する取り扱い

団体名	概要	座標に関する記述
LandXML	<ul style="list-style-type: none"> 土木分野で3次元の測量・設計・施工で使われる交換フォーマットとして世界で流通。 LandXML1.2が最新バージョン。 	<ul style="list-style-type: none"> 水平、垂直方向の座標を属性で実装できるが必須ではない。 実装する場合はEPSGコードやogc:WktCodeで記載することが多い。 3次元設計データ交換標準（案）では必須。
bSJ (buildingSMART JAPAN)	<ul style="list-style-type: none"> 建物を構成する全てのオブジェクト（例えばドア、窓、壁などのような要素）の表現方法の仕様（IFC(Industry Foundation Classes)）を定義。 インフラ分野ではIFC-Bridge, IFC-Roadなどの開発を行っている。 	<ul style="list-style-type: none"> WGS84に準拠している。具体的な記述について検討を行っている。
OGC (Open Geospatial Consortium)	<ul style="list-style-type: none"> 相互運用性を目的としてGISデータの標準規格を策定。 国際標準規格ISO TC211とは協力関係。 OGC StandardsはISOを超えている（KML, CityGML, Coordinate Transformationなど）。 	<ul style="list-style-type: none"> 国内で多く用いられているOGC Standardsにはモデルサイズや座標の取り決めに関する記載は見当たらない。 フォーマットは用意するが、使用については運用（発注者や使用者）にまかしている。
ISO (International Organization for Standardization)	<ul style="list-style-type: none"> 国際標準規格。 ISO 16792:2015は3D-CAD利用が前提の図示規格。 	<ul style="list-style-type: none"> 図示データ内に1つ以上の座標方式を記載すること、その図示方法についても規定している。

れたが、十分に狭い場合にはジオイドが平らと仮定できると考えた。そこで仮に、十分範囲が狭くジオイドが平らだと仮定した3次元モデルをスモールモデルとし、複数のスモールモデルで構成されて全体としてジオイドを考慮する必要のある3次元モデルをラージモデルとした。

このとき、ラージモデルはジオイドの凹凸すなわち一定でない重力方向や楕円体の曲面などを表現できなければならないので地球全体を記述できる ITRF 座標系とする。また、スモールモデルはこれまでの工事測量の流れの継続性を考慮して現場のローカル座標系とする。ただし、ラージモデルとスモールモデルの原点は ITRF 座標上に配置するための参照点 (Ground Control Point, 以下, GCP) の座標値を持ち、座標軸の方向を示すための基準ベクトルの鉛直方向はジオイド面の法線方向と同じとする (図-2)。これにより、スモールモデルである設計空間をジオイドを考慮したラージモデルに配置できると考える。

3. 3Dモデルによる検証

(1) 3次元直交座標系と地表面の座標

AutoCAD Civil 3D 2017でGRS80の楕円体面、ジオイド、地表面を3次元直交座標系上に作成することによりジオイド面の実距離への影響の検証を行うこととした。

地心直交座標系は地球の重心を原点とする互いに直交する3軸からなり、 x 軸はグリニッジ天文台の近くを通る経度0度の本初子午線と赤道の交点方向を正とし、 y 軸は東経90度の子午線と赤道の交点方向を正とし、 z 軸は北を正とする自転軸と一致する (図-3)。

楕円体の方程式は赤道半径を a 、極半径を b とすると、

$$\frac{x^2+y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

である。

楕円体上の点 P の3次元直交座標系での座標値 (x, y, z) は、点 P の地心緯度を ϕ 、地理緯度を ϕ' 、卯酉線曲率半径を N とすると (図-3.4) ,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos \phi' \cos \lambda \\ (N+h) \cos \phi' \sin \lambda \\ \{N(1-e^2) + h\} \sin \phi' \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$N = \sqrt{\frac{a^2}{1-e^2 \sin^2 \phi'}} \quad (3)$$

$$\tan \phi' = \frac{1}{1-e^2} \tan \phi \quad (4)$$

$$e^2 = f(2-f) \quad (5)$$

$$h = H + N_g \quad (6)$$

で得られる⁸⁾。

ただし、 a : 長半径 (赤道半径), f : 扁平率,

e : 第一離心率, h : 楕円体高,

H : 標高, N_g : ジオイド高, とする。

また、GRS80楕円体の原子である長半径 a と扁平率 f を表-2に示す¹²⁾。

(2) 3DFACE と 3次元モデルの作成

東京都の府中市と日野市付近の楕円体上の約100mメッシュ (緯度3秒, 経度4.5秒) の格子点について、国土地理院の「日本のジオイド2011」(Ver.2)と数値標高モデル10mメッシュ (標高) からジオイド高と標高を取得し (図-5), 式(2)-(6)から楕円体面, ジオイド, 地表面の3次元直交座標系のxyz座標値を算出した。そのxyz座標から三角形の3DFACE¹³⁾で構成する3次元サーフェスモデルを作成した (図-6)。図では地形の凹凸を表現する地表面サーフェスの奥にジオイドと楕円体のサーフェスが表示されていることが確認できる。

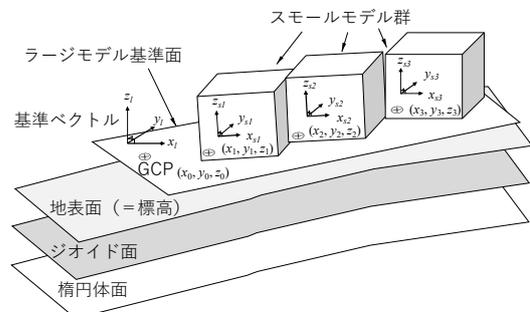


図-2 ラージモデルとスモールモデルの概念図

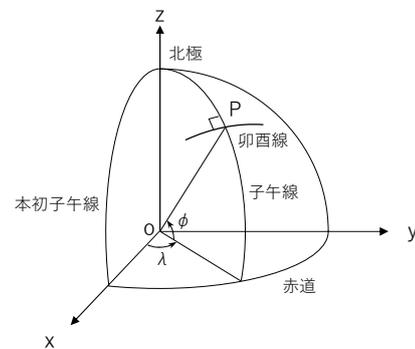


図-3 地心直交座標系と点Pの卯酉線

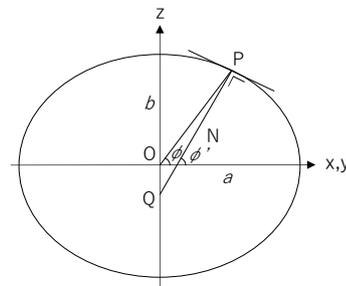


図-4 地理緯度 ϕ' と卯酉線曲率半径 N

表-2 GRS80楕円体の原子

長半径 a	6,378,137m
扁平率 f	1/298.257222101

(3) 鉛直方向の偏差の影響

作成したジオイドの3DFACEの法線を鉛直方向と見なし、図-5に示した範囲で一番南西の3DFACEとその他の3DFACEの中心点間の直線距離と鉛直方向の3次元直交座標系での偏差を算出した(図-7)。図では微少なばらつきはあるが距離に対して比例して偏差は増えることが確認できる。仮にスモールモデルの範囲を10kmとした場合、図-7では鉛直方向の偏差は約0.09度となる。図-8に示す水平偏差を考えると、標高100mで隣接するスモールモデル間では約15cmの偏差が生じる。これは、ある点の位置が標高100mでは標高0mで測るよりも約15cm差異が生じることを示している。

4. まとめと今後の課題

サイバー空間とフィジカル空間の差異の要因の1つであるジオイドの影響を考慮するため、ラージモデルという概念を提案した。ラージモデルに基づいてジオイドの鉛直偏差の影響について検討した結果、標高100mでは10km先で約15cm以上の差異が生じることが確認できた。今後の課題としては、出来形管理基準の規格値を考慮したスモールモデルの適切な範囲設定などがあげられる。

謝辞

本稿は土木情報学委員会建設3次元情報利用研究小委員会3D Annotated Model WGの成果の一部である。本稿をとりまとめるにあたり、議論にご協力いただいた小委員会ならびにWGメンバ各位にお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 国土交通省 CIM 導入推進委員会：CIM 導入ガイドライン(案)第1編 共通, 2018.
- 2) Society 5.0, http://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html (入手 2018.5.2) .
- 3) (一社)電子情報技術産業協会：3DA モデルを利用した測定ガイドライン, <https://home.jeita.or.jp/3d/pdf/s2016ver10.pdf> (入手 2018.3.16) .
- 4) 城古雅典, 森脇明夫, 有賀貴志, 石川和弘, 福土直子：公共土木工事への3次元情報技術の適用に対する提案, 土木学会論文集F4(建設マネジメント), Vol.72, No.4, pp.I_135-I_144, 2016.
- 5) 羽鳥文雄, 矢吹信喜, 小森絵未, 福田知弘：複数マーカを用いた拡張現実感技術の施工現場への応用, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.69, No.2, pp.I_24-I_33, 2013.
- 6) 杉浦伸哉, 後藤直美：紀勢線見草トンネル工事における施工 CIM から維持管理 CIM への取組み, 土木学会論文集F4(建設マネジメント), Vol.71, No.4, pp.I_227-I_233, 2015.
- 7) 宮武一郎, 田村利晶, 盛伸行, 岡井春樹, 高岸智紘：築堤事業に適用する3次元モデルにおける属性

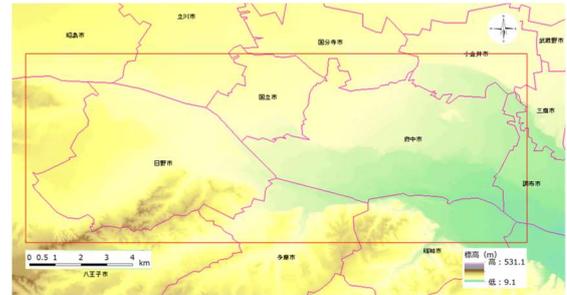


図-5 作成範囲

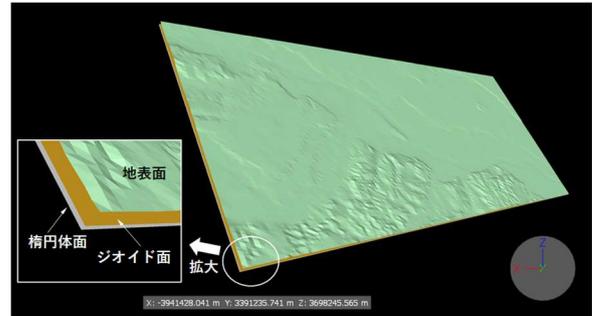


図-6 作成した3Dモデルをy軸方向から表示したビュー

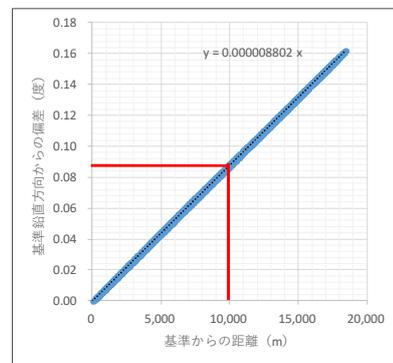


図-7 鉛直方向の偏差

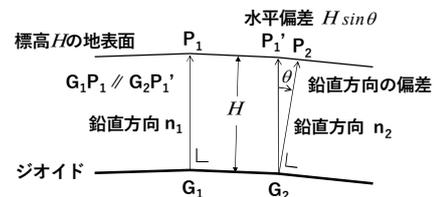


図-8 水平偏差

情報の付与と利活用に関する一考察, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.73, No.2, pp.I_65-I_73, 2017.

- 8) 大野重保：測地学の方法, 東洋書店, 1987.
- 9) 有富孝一, 上坂克巳, 柴崎亮介：地球を3次元多様体空間と仮定した設計モデルの土木構造物への応用, 土木学会論文集F, Vol.66, No.4, pp.623-634, 2010.
- 10) 国土地理院：セミ・ダイナミック補正, <http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun40046.html> (入手 2018.4.17) .
- 11) 内閣府：みちびき(準天頂衛星システム)センチメートル級測位補強サービス, http://qzss.go.jp/overview/services/sv06_clas.html (入手 2018.4.17) .
- 12) 国土地理院：日本の測地系, <http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/datum-main.html> (入手 2018.5.7) .
- 13) AutoCAD 3DFACE, <https://knowledge.autodesk.com/ja/support/autocad> (入手 2018.5.11) .