

レーザーキャナーによる地下構造物の
プロダクトデータモデル構築とその設計・施
工・維持管理への適用に関する研究

室蘭工業大学大学院 工学研究科
教授 板倉 賢一

平成22年11月

Contents

1. 概論	
1.1 地下構造物施工におけるデータモデルの現状と本研究の目的	I - 1
1.2 レーザースキャナーデータ利用によるプロダクトデータモデルの概要	I - 2
(1)地下構造物における PDM の利用	I - 2
(2)レーザースキャナーによる地下構造物のデータモデル作成	I - 3
(3)開発するプロダクトデータモデルの用途	I - 3
(4)既往助成研究成果の適用について	I - 4
1.3 研究内容と本報告書の構成	I - 6
(1)既存の研究成果を利用した汎用的な PDM システムの構築と実装	I - 6
(2) レーザースキャナーデータによるプロダクトデータモデルの作成	I - 6
(3) 3次元デジタルステレオカメラによる3次元形状データのモデル化	I - 7
2. 既往開発システムのプロダクトデータモデル対応化	
2.1 概説	II - 1
2.2 建設分野におけるプロダクトデータモデル利用に関する既往の研究	II - 2
2.2.1 プロダクトデータモデルの技術的な背景	II - 2
2.2.2 プロダクトデータモデルの標準化の過程	II - 2
(1)STEP にみるプロダクトデータ概念	II - 2
(2)IAI の IFC	II - 3
(3)わが国における建設分野のデータプロダクトモデル利用の取り組み	II - 4
(4)LandXML の拡張	II - 6
2.3 GAIA_Brain の改良	II - 9
2.4 ロ補遺:既存開発システムの改良	II-13
(1)J2EE プラットフォーム上でのシステム開発	II-13
(2)ActiveX-OpenGL 融合による Plugin の開発	II-13
(3)並列計算化、および分散型システム化の推進	II-13
(4)時空間多次元データ向けインターフェースの開発	II-13
(5)J2EE と ActiveX-OpenGL 融合による開発 Plugin の概要	II-13

3. レーザースキャナーデータのプロダクトデータモデル化とその情報処理	
3.1 概説	III- 1
3.2 LSDPS におけるレーザースキャナーデータの PDM 化	III- 3
3.2.1 LSDPS におけるレーザースキャナーデータの PDM 化の概要	III- 5
3.2.2 3次元レーザースキャナーデータの座標変換	III- 8
(1)3次元レーザースキャナー測定データの偏心補正	III- 9
(2)球座標系から直交座標系への座標変換	III-10
(3)局所座標系から全体座標系への座標変換	III-10
(4)座標変換マトリックス成分の同定	III-11
(5)円筒座標系へのデータ変換	III-16
3.2.3 プロダクトデータモデルにおけるデータ再配列と欠損データの補間	III-16
3.2.4 プロダクトデータモデルにおける深度方向の整合性確保	III-21
3.2.5 データの間引きとデータ登録・保存	III-23
3.3 LSDPS におけるデータ・ロギングの実際	III-26
3.3.1 LSDPS における座標取得機能の基本構造	III-26
3.3.2 掘削体積計算と壁面凹凸画像作成	III-29
(1)掘削体積計算	III-29
(2)壁面凹凸画像の作成	III-32
3.3.3 12ビット受光強度データの正規化	III-34
3.3.4 不連続面の走向・傾斜計算機能の構造	III-36
3.4 まとめ	III-41
4. 一体型3次元ステレオカメラによる形状測量に関する検証	
4.1 概説	IV- 1
4.2 FinePix REAL 3D W1 による形状測量の概要	IV- 3
4.3 3D ステレオカメラを用いた PDM への適用とその手法	IV- 6
(1)3D ステレオカメラの建設分野での用途について	IV- 6
(2)ステレオカメラの石垣調査への適用	IV- 9
(3)石垣調査におけるレーザースキャナーと3D ステレオカメラの作業性評価	IV- 9
(4)石垣調査結果に基づく3D ステレオカメラ想定に関する考察	IV-15
4.4 地下構造物施工時における形状測量実験	IV-17
(1)地下構造物施工現場における形状測量実験の概要	IV-17
(2)フラッシュ撮影による撮影画像	IV-24
(3)座標計算結果と考察	IV-25
4.5 まとめ	IV-28

Appendix_A STEP の概要

Appendix_B IAI の IFC

Appendix_C 標準的な LandXML の要素構成と、その標準入出力ファイル形式

Appendix_D LSDCS のデータ変換・登録操作

Appendix_E LSDPS の機能と操作

Appendix_F クラウド・コンピューティングによるプロダクトデータモデルの処理

Appendix_G カメラによる3次元形状計測

1. 概論

1.1 地下構造物施工におけるデータモデルの現状と本研究の目的

近年、構造物には所要の機能や安全性だけでなく、その全期間に亘る利便性の最大化と必要コストの最小化を図るライフサイクルマネージメント(以下、LCM)の実施が求められつつあり、地下構造物についても早急にその対応が必要とされる。地下構造物のLCM戦略を立案するためには、設計・施工・維持補修の過程で発生する各種情報を統合的に管理し、これをフィードバックすることのできる柔軟な戦略構築体系が必要である。

地下構造物施工では、1980年代前半ごろより情報化施工の手法が導入され、設計・施工へフィードバックがいち早く行われてきた。しかしながら、そのデータ利用は施工管理にのみ限定され、LCM戦略への利用はほとんど図られていない。これは、情報化施工より得られた各種情報を、LCM戦略に展開する方法論が確立されていないためであると考えられる。

プロダクトデータモデル(以下、PDM)はこのような戦略立案に最も適する手法の一つと考えられる。これは、設計・施工・施設運営の過程で発生する各種情報から仮想の地下構造物をコンピュータ内部に実現することで、将来的な変状発生や構造劣化が懸念される箇所を予測したり、発生した変状の原因を特定したりすることを可能とするものである。

一方、地下構造物の主たる施工手段である掘削工は、その施工精度が地上構造物の施工手段に比べ、著しく低いため、その掘削形状は設計図面で指示された掘削線と大きく乖離する。その乖離を正しく把握することは施工精度の向上や施工の合理化に不可欠であるにもかかわらず、実際の掘削形状を定量的に測定することは行われていない。また、地下構造物では、対象とする地山の地質学的な特徴が、その安定性や長期耐久性に大きな影響を与えるが、断層や破砕帯等の地質弱部構造は原位置レベルで把握されていないという現状もある。

これらは、地下構造物や地質構造の形状測量が著しく困難なためである。言い換えれば、PDM作成に必要な幾何学モデルが作成されない、もしくは現実と大きく乖離したモデルしか作成できないことになる。近年、測量技術のICT化の中で普及しつつあるレーザースキャナー¹は、このような地下構造物施工における形状測量の問題を解決し、かつ地下構造物の設計・施工・維持管理に供することのできるPDMの幾何学モデルの作成に寄与するものと考えられる。

以上のように、地下構造物のLCM戦略を立案するためには、PDMの利用が不可欠であるにもかかわらずその具体的モデルは示されていない。また、実用的なPDMの幾何学データモデル作成にはレーザースキャナーを利用することが望ましいが、その方法論も今日まで示されていない。本研究では、このような現状を踏まえ、地下構造物を対象としたレーザースキャナーデータによるPDMの幾何学データモデルの構築方法、その情報を設計・施工・維持管理に展開し得るシステム的设计、およびコンピュータ上の実装を試みるものである。

¹ 3Dレーザースキャナー:レーザによる計測対象物とセンサーの間をレーザパルスが往復する時間を計測することで距離を計測し、同時にレーザビームを発射した方向を計測することで、計測対象点の3次元座標を取得する形状測定機。測定原理は、レーザが測定対象物で反射して帰ってくるまでの時間から距離を算出し、またレーザの移動方向角度から角度を算出し、この距離・角度情報から3次元位置情報を求める。

1. 2. レーザースキャナーデータ利用によるプロダクトデータモデルの概要

(1) 地下構造物における PDM の利用

建設分野における PDM の利用は端緒に付いたばかりであり、建築や鋼製橋梁の一部で実用化が進められているにすぎない。鋼製橋梁分野では、三次元 CAD を利用して作成した PDM により、部材の細部に渡る「取り合い」をコンピュータ上で確認することが可能となり、ヴァーチャルの世界での「仮組立て」が可能となった。さらに、コンピュータ上で「取り合い」が確認されたデータモデルに従う切断箇所や溶接箇所のデータをロボットに与えることにより、鋼材の自動裁断・自動溶接も可能となった。これは鋼橋の製作・施工の世界に驚くべき効率化をもたらし、PDM 作成費用を「仮組立て」と「自動溶接」だけで回収できるとされている¹⁾。

このような PDM の利用は、橋梁分野だけでなく造船、機械等の金属加工の分野で幅広く行われている。これは、金属加工機械が CAD 図面の要求品質を満たす加工精度を確保でき、その制御がデジタル化されていることから可能となるものである。

これに対し、地下構造物は、設計図面を基に人間が建設機械を操作することにより施工され、その精度は操作員の技量に大きく依存する。したがって、CAD データの PDM 化により施工の合理化やコスト低減を実現できる余地は相対的に小さいものと思われる。シールドマシン制御等は、三次元化路線図や地質構成図の PDM 化により、ある程度の自動制御は可能であり、他の掘削工事でも、設計データモデルを利用した簡単な施工シミュレーションも可能であろうと思われるが、PDM 化のコストを考慮すると、現時点では、金属加工の分野のように費用対効果の面で大きなメリットを享受できるものではないと考えられる。

地下構造物は、その対象となる地山の地質条件が施工地点により大きく異なり、今日の調査技術をもってしても、事前設計の段階でこれを的確に把握することはできない。このため、地下構造物の施工中に地山挙動の現場計測や地質観察等を実施することで、以降の施工にその情報をフィードバックする情報化施工の手法が最も早く導入された。しかしながら、今日でも、集積された膨大かつ多種多様な情報を体系的に整理・処理する手法が確立されていないため、個別に情報が保存・参照されているだけで、これを設計、施工、維持管理に有効にフィードバックされているとは言い難い。

地下構造物施工の観点における PDM は、このような問題の解決に適したデータモデルである必要があると考える。すなわち、地下構造物を施工するために必要な形状、機能、および時系列で発生する情報によって仮想の地下構造物世界をコンピュータ上に構築することで、施工や維持・管理上の問題点を事前に予測し、その合理的・効果的な解決策のシミュレーションならびに実施工へのフィードバックが可能となるためである。これは、JIS B 3401 の PDM の定義：‘製品を製造するために必要な形状、機能、およびその他のデータによってその製品をコンピュータ内部に実現したモデル’を地下構造物施工に適用したものに他ならない。

以上のような理由で、本研究では地下構造物の情報化施工の思想を LCM に拡張することを目的に、施工現場で発生する各種データを PDM 化し、これを設計・施工、ならびに維持管理へとフィードバックするシステムの設計とコンピュータ上の実装を実施した。

(2) レーザースキャナーによる地下構造物のデータモデル作成

既に触れたように、地下構造物の主たる施工手段である掘削工は、その施工精度が他の施工手段に比べ、著しく低いため、設計図面で指示された掘削線との乖離が大きい。この乖離を的確に評価することは地下構造物の施工管理、ならびに維持補修戦略を立案する上で重要となるが、今日、その掘削形状が測定されることは稀である。また、地下構造物施工中に現れる断層や破砕等の地質弱部の幾何学形状は、その性状とともに、地下構造物安定に大きな影響を及ぼすにもかかわらず、局所的にその走向・傾斜を測定することしか行われてこなかった。これは、地下構造物施工中に、短時間で掘削形状や地質弱部形状を3次的に測量するのが難しいためである。

地形測量や出来型測量等の形状測量は、土木設計・施工の情報化における基盤技術をなすが、形状そのものを面的・立体的に大領域を測量することが難しいため、土木測量では形状を代表するいくつかの点の座標を離散的に測量し、これを補間して形状を表すことが行われてきた。このような従来の形状測量方法では、掘削形状や地質弱部形状を PDM に必要な精度で測量することは望めない。

10年ほど前に開発されたレーザースキャナーは、比較的容易かつ短時間で形状の多点デジタル測量が可能であるため、非常に高価であるにもかかわらず広く普及しつつある。具体的には、対象形状を 0.06 度の間隔で測定することができるため、掘削形状や地質弱部形状を高精度で測定することができ、かつ測定時間も 10 分～20 分程度と地下構造物施工のサイクルを大きく乱すことがない。さらに、レーザースキャナーは、その測定結果がデジタルデータとして与えられるため、PDM の形状データモデルを比較的容易に作成することができるという利点も、併せ持つ。

上記を考慮し、本研究ではレーザースキャナーで測定されたから掘削形状や地質構造の機軸データモデルを作成する手法を設計・実装し、前述の PDM に供するとともに、これらを利用したデータマイニング手法をいくつか示す。

さらに、高価格であるがゆえに汎用的に施工現場へ導入することは難しいレーザースキャナーの代替案として、2009 年 8 月発売された3次元デジタルスチルカメラの有効性も検討した。同カメラは、3次元映像作成のため各ピクセルの相対座標データを取得することができるため、周辺システムを整備することで、レーザースキャナーと同様の機能を有することとなり、相対的に安価であるため土木工事へ汎用的に形状測量が普及する可能性が高いと判断したためである。この3次元デジタルスチルカメラで撮影されたデータを利用した幾何学モデル作成の可能性についても、併せて示す。

(3) 開発するプロダクトデータモデルの用途

本研究が志向するところは、単にレーザースキャナーで測定された形状データを PDM 化することのみではなく、その PDM を地下構造物の LCM 戦略立案に展開することのできる実用的なシステム体系の構築にある。

PDM を論じるとき、作成されたモデルを何に使用するのが重要となる。一般に、工業製品では意匠を評価したり、組み立て手順を評価したり、あるいはプレゼンテーションや構造解析のために PDM が用いられる。したがって、その用途によりモデルの表現方法は異なり、何にでも用いることのできる PDM は存在しない。したがって、PDM の構築に先立ち、その使用目的を明らかとせねばならない。

レーザースキャナーで測定された形状データの PDM を地下構造物の LCM 戦略立案に適用することを考えるとき、その主たる用途は以下のようなものが考えられる。

【設計・施工】

- ① 設計掘削線と実際の掘削形状との乖離を評価し、以降の発破方法、もしくは掘削方法の改善に供する。
- ② 断層や破碎帯等の地質弱部の構造を3次元的に把握することで、変状対策工設計の設計モデルに供する。
- ③ 実際の掘削形状から覆工コンクリート打設量を算定することで、材料ロスの低減を図る。

【維持・補修】

- ④ 長期的に変状を発生させる原因となり得る地質構造弱部等を PDM から抽出することで維持補修計画を立案する。
- ⑤ 上記補修・補強工設計の設計モデルに供する。

上記以外にも、ロックボルト打設数量と打設本数の管理、さらにはトンネル坑口法面対策工の設計モデル等、多様な用途が考えられるが、本研究では開発する PDM の使用目的として上記 5 項目を選定した。

(4) 既往助成研究成果の適用について

PDM は、‘製品を製造するために必要な形状、機能、およびその他のデータによってその製品をコンピュータ内部に実現したモデル (JIS B 3401)’として定義され、単に製品の形状だけでなく、そのライフサイクルで必要とされる多様な情報と結合したデータモデルと定義される。

しかしながら、PDM の概念は単にデータモデルの定義にとどまるものではない。例えば、自動車や飛行機のように数万点を越える部品から構成される工業製品では、部品の詳細形状で製品全体を表現すると検索や描画等に数時間を要することがあり、PDM の使用目的によって部品を省略したり、概略形状で置き換えることのできる機能が求められる。このように、PDM を実用的に運用するためには、単に製品情報の包括的なデータモデルを整備するだけでなく、これらのデータモデルを効率的に検索・描画し、データマイニングすることのできるシステムの開発も同時に必要となる。

筆者らは、平成19年度、平成20年度の建設情報総合センター助成研究^{2),3)}において、時間

軸を考慮した仮想の地下構造物空間をコンピュータ上に実現し、この仮想空間上で各種データへのアクセスと処理を可能とするシステムを開発した。これは、上記の PDM の運用システムに求められる機能を実現するものであるが、そのデータモデルは単独のプロジェクト(ここでは瑞浪超深地層研究所プロジェクト)を対象に筆者らが定義したものであり、各種地下構造物プロジェクトに汎用的に適用されるものではない。このため、これまでの研究成果を標準的な PDM に拡張することを試み、これをレーザースキャナーデータから作成されたデータモデルのプラットフォームとすることとした。

1.3 研究内容と本報告書の構成

(1) 既存の研究成果を利用した汎用的な PDM システムの構築と実装

PDM は、‘製品を製造するために必要な形状、機能、およびその他のデータによってその製品をコンピュータ内部に実現したモデル (JIS B 3401)’として定義され、単に製品の形状だけでなく、そのライフサイクル上で必要とされる多様な情報と結合したデータモデルとして定義される。

しかしながら、PDM の概念は単にデータモデルの定義にとどまるものではない。例えば、自動車や飛行機のように数万点を越える部品から構成される工業製品では、部品の詳細形状で製品全体を表現すると検索や描画等に数時間を要することがあり、PDM の使用目的によって部品を省略したり、概略形状で置き換えることのできる機能が求められる。このように、PDM を実用的に運用するためには、単に製品情報の包括的なデータモデルを整備するだけでなく、これらのデータモデルを効率的に検索・描画し、データマイニングすることのできるシステムの開発も同時に必要となる。

筆者らは、平成19年度、平成20年度の建設情報総合センター助成研究^{1),2)}において、時間軸を考慮した仮想の地下構造物空間をコンピュータ上に実現し、この仮想空間上で各種データへのアクセスと処理を可能とするシステムを開発した。これは、上記の PDM の運用システムに求められる機能を実現できるものであるが、そのデータモデルは、瑞浪超深地層研究所建設を含む超深地層研究所計画というプロジェクトで必要とされる多種多様なデータの管理方法を念頭において筆者らが定義したものであり、一般的な地下構造物プロジェクトに汎用的に適用されるものではない。このため、これまでの研究成果をスタンダードな PDM データに拡張することを試み、これをレーザースキャナーデータから作成されたデータモデルのプラットフォームとすることとした。

本報告書では、建設分野における PDM に関する既往の研究とその現状を2.2節において概観し、2.3節で既往システムの概要を述べるとともに、その操作性やデータ処理上の問題点とその解決方法を示す。さらに、2.4節において既往システムの PDM データへの拡張方法と修正・改良について述べる。さらに、2.5節では既往システムの PDM 化以外の改良について整理した。

(2) レーザースキャナーデータによるプロダクトデータモデルの作成

地形測量や出来型測量等の形状測量は、土木構造物のデータモデル化する上での基盤技術となる。特に、地下構造物施工では、掘削という施工手段が著しく管理精度に劣るため、設計の掘削形状と実形状の乖離が大きいと、出来型管理の合理化、および精度向上に不可欠な技術である。

ところが、一般的な工業部品などと異なり、土木構造物の測定対象領域が広大なため、3次元形状そのものを測量することが難しく、これまでは形状を代表するいくつかの点の座標を離散的に測量し、これを補間する形状測量が一般的に行われてきた。10年ほど前に開発された

レーザースキャナーは、比較的容易かつ短時間で形状の多点デジタル測量が可能であるため、非常に高価な測定器であるにもかかわらず広い分野で普及しつつある。しかしながら、その得られたデータの利用については以下のような問題点があるように思われる。

- 1) 測定データのデータフォーマットが未公開であるため、データ変換等の操作を付属ソフトに頼らざるを得ない。
- 2) 付属ソフトで変換された形状データはCAD形式に限定されるため、その利用方法が限定される。たとえば、CAD上での形状データ表示は点群表示のみで、TIN²等を張ることも難しい。
- 3) 精密な測量を行うほどデータ量が膨大となり、データの操作性が著しく損なわれる。また、データが膨大なため実務に供し得る領域は比較的小規模なものに限定される。
- 4) 測定された形状データを設計・施工・維持管理等へ利用する、あるいはフィードバックするシステムが整備されていない。

したがって、レーザースキャナーは土木設計・施工情報化のための有力な手段であるにもかかわらず実務への適用は限定されている現状にあるものと総括される。本研究では、地下構造物を対象として、レーザースキャナー測定により得られた形状データを利用した PDM の構築と、それを地下構造物の設計・施工・維持管理へと適用するための各種システムの整備を試みる。

本報告書では、3.2 節において測定されたレーザースキャナーデータを PDM 化するまでの一連の変換作業について示す。この過程で実施される変換作業は、①測定データ座標変換、②測定データ再配列、③測定対象区間以外のデータ切断、④データの圧縮(間引き・軽量化)、および⑤データベースへのデータ登録である。なお、この作業のために作成したシステム LSDC(Laser Scanner Data Converter)の概要を Appendix_D に示す。

3.3 節では、このようにして PDM 化されたレーザースキャナーデータの課しか、およびこれを基にしたデータ・ロギングに関する考察を行い、これに基づいて実行システムを設計・実装した。そのシステム LSDPS(Laser Scanner Data Processing System)の実際を Appendix_E に示す。

(3) 3次元デジタルステレオカメラによる3次元形状データのモデル化

近年、低廉化しつつあるもののレーザースキャナーの価格は 1 千万円近いため、中小施工現場に導入することはコスト的に難しい。一方、中小施工現場は、配置される技術者の絶対数が少ないため、施工管理業務の合理化を最も切実に必要とするのが実情である。このような、

² TIN: Triangulated Irregular Network)とは、地理情報システム(GIS)で利用するための、地表面を表現するデジタルデータ構造。不整三角形網とも呼ばれる。TIN は、地表面または海底面の物理的形状を表現し、X,Y,Z の3次元情報を持った点と線が、重複のない三角形の集まりとして配列されたものである。

ニーズとコスト負担が背反する現状を解決する一つ的手段として、3次元デジタルステレオカメラの導入を考えた。

2009年8月発売された3次元デジタルステレオカメラは3次元映像作成のため各ピクセルの相対座標データを取得することが可能である。したがって、周辺システムを整備することで、レーザースキャナーと同様の機能を有することとなり、土木工事へ汎用的に形状測量が普及することが期待される。

本研究では、中小現場施工現場へのPDMの普及を目的として3次元デジタルスチルカメラの形状測量への適用性を実験的に検証し、その検証結果を4章に示す。なお、3次元デジタルステレオ画像から、座標を同定するソフトは現在市販されておらず、ここで使用したソフトは富士フィルム株式会社のご好意により、開発中のソフトを実験用に貸与いただいた。

本研究にご指導、ご助力いただいた富士写真株式会社様に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 河内康:プロダクトモデルをめぐる情勢、<http://www.jacic.or.jp/kenkyu/7/kawanai.pdf>、2005.
- 2) 板倉賢一、佐藤稔紀、山地宏志:Web3DとRDBMを援用した大規模地下開発支援システムの開発、平成18年度(財)日本建設情報総合センター研究助成事業報告書 第2006-03号、2007
- 3) 板倉賢一、松井裕哉、早野明、山地宏志:柔軟な時間管理概念を導入した4次元GISによる大規模地下開発支援システムの構築、平成19年度(財)日本建設情報総合センター研究助成事業報告書 第2007-02号、2008.

2. 既往開発システムのプロダクトデータモデル対応化

2.1 概説

レーザースキャナーによる地下構造物の PDM 作成システムを構築するに先立ち、本章では作成された PDM を地下構造物の設計/施工/維持管理に適用するためのシステムの整備を行う。

筆者らは、平成18年度日本建設情報総合センター研究助成「Web3D と RDBM を援用した大規模地下開発支援システムの開発(第 2006-03 号)」¹⁾において、仮想の地下空間をコンピュータ上に構築し、この空間内をユーザーが自由に行動することで必要とされる設計/施工/計測データに自由にアクセスすることのできるシステムを構築した。このシステムは、ユーザーをデータベース管理の煩雑さから開放し、直感的に必要なデータにアクセスすることを可能とするものである。しかしながら、この段階ではシステムに時間概念を導入することがなかったために、時々刻々と蓄積するデータの変化に対応することが難しかった。

このため、平成19年度研究助成「柔軟な時間管理概念を導入した4次元 GIS による大規模地下開発支援システムの構築(第 2007-02 号)」²⁾では、上記システムに時間概念を導入するとともに、Fuzzy な時間検索手法を開発した。これは、個別情報に対するあいまいな記憶や漠然とした時間認識でアクセスを可能にすることを配慮したものであり、「いつ頃」や「～した頃」等の時間表現でデータ検索が可能となる。この機能は、設計・施工から長期間が経過した地下構造物の維持管理段階で特に有用であるものと考えらる。

以上のシステムは、1. 2節「レーザースキャナーデータ利用によるプロダクトデータモデルの概要」で定義した、地下構造物の設計/施工/維持管理における PDM の要求機能を全て実装するものであるが、そのデータ構造は PDM と異なる。したがって、PDM 作成システムを構築するに先立ち、そのデータモデルを PDM に変更する必要がある。しかしながら、既往システムのデータ変換は XML を利用したものであるため、その変換作業は煩雑なものとはならない。

本章では、次節 2. 2 において、建設分野における PDM の現状を概観し、既開発システムを PDM 化するための方策を示す。また、その方策に従い、2. 3 節において上記システムのデータ構造を PDM 化する設計を実施した。なお、以下では既開発システムを GAIA_Brain と仮称する。

2.2 建設分野におけるプロダクトデータモデル利用に関する既往の研究

2.2.1 プロダクトデータモデルの技術的な背景

土木構造物の長期に亘るライフサイクルにおいて、その維持補修を合理的・効率的に行うために PDM の必要性が認識されるようになった³⁾。PDM は、製品の設計、製造、使用、保守、ならびに廃棄に至るまでの過程で生じるさまざまな情報を統合的に記述したデータモデルとして定義される。PDM は、本来、製造業を中心としてその開発が進められてきたが、数十年以上の土木構造物のライフサイクル管理の必要性の高まりとともに、土木分野でもその必要性が認識されるようになった。

従来の情報管理・伝達が、図面や書類等のドキュメントベースであったのに対し、PDM ではデジタルデータによる管理・伝達を前提としている。これは、情報科学の発達、特に3次元コンピュータグラフィックス、RDBMS (Relational Data Base Management System)、およびオブジェクトデータモデリングの発達によって実現されたものである。

ここで、オブジェクトデータモデリングとは、実世界に存在するオブジェクト(もの)を抽象化し、その属性と振る舞いをひとつのまとまりとして定義する考え方である。この考え方では、予め定義したオブジェクト(例えば標準掘削断面やロックボルト等)を基に、形状がパラメトリックに定義される。すなわち、設計物はこのようなオブジェクトの組み合わせにより定義することができ、さらにそれぞれのオブジェクトに対しさまざまな属性情報を付加することができる¹⁾。

オブジェクトデータモデリングを利用した PDM を構築するためには、プロジェクトを構成する要素を全て部品(オブジェクト)として分類し、定義することが求められる。さらに、それぞれのオブジェクトがどのような情報を持つのかも定義しなければならない。この情報は、単に形状データだけではなく、材質や施工日時等の施工に係わる情報も含まれる。このように多様で膨大な情報を長期間にわたり管理し、必要に応じそれを活用することができるようにするためには、誰もがデータを登録でき必要な情報を技術の進歩に依存せずに取り出すことができるデータ登録やフォーマットの標準化、それらを一括して取り扱うことができデータ量の増加に柔軟に対応できるデータベースシステムと時系列的なデータも含むデータ検索機能の充実が非常に重要になると考えられる。

2.2.2 プロダクトデータモデルの標準化の過程

(1) STEP¹にみるプロダクトデータ概念

ISO (International Organization for Standardization) では、工業製品のライフサイクル全般に

¹ STEP: Standard for the exchange of product model data 設計・製造に関わる製品モデルデータの交換と共有化を規定する国際標準の通称で、コンピュータが解読可能な工業製品データの表現および交換の規格である。正式表題は Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange。この標準は、特定のシステムに依存しない形で製品に関するあらゆるデータを記述する仕組みを提供することを目的としている。このため、単にファイル交換に利用されるだけでなく、製品データベースの実装の基盤としても利用されている。STEP は CAD/CAM/CAE/PDM/EDM などのシステムでのデータ交換に使用される。STEP の製品データとしては、機械設計データ、電子設計データ、分析データ、製造データ、分野(自動車、航空、建築、造船、その他)特有のデータなどがある。

互る製品情報データと図面データの表現方法と、そのデータ交換・共有を実現するための手段を ISO-10303 で STEP (Standard for the Exchange of Product model data: Appendix A 参照) として規定している。STEP は単に CAD データの交換手段のためにだけあるのではなく、利用者が異なったアプリケーションシステムを統合的に運営し、技術革新に対するデータ資産の保障、システム開発コストの削減、プログラム言語とデータベース技術の選択等の恩恵を受益できるものではない点に注意が必要である。

現在のところ、STEP の土木分野におけるアプリケーションプロトコルの策定は、全く進んでいない状況にある。その主な理由は、以下の3点であると考ええる。

- ① 機械や他の産業に比べて、土木分野は公共事業に関連するものが多く、従来の民間主導のアプリケーションプロトコル開発では実現が困難である。
- ② 地勢や地理等、製品(構造物)のモデル化だけでは解決しない要素との関連がある。
- ③ 土木分野では用途、工種が広範におよび、アプリケーションプロトコル開発のためのモデル化領域の選択や共通資源の抽出などが困難である点である。

仮に簡単な構造物を表現することを考えてみても、構造物の形状の表現に Part 40 番台の幾何要素を用いることになるが、その際、図面情報のグループやレイヤーといった要素を表現することが困難な状況となっている。

(2) IAI の IFC

建築分野では、1990 年代半ばに、ISO の STEP の制定を待たずに業界標準を作成すべく、米国が中心となり関係各国と協調しながら、業界団体 IAI を設立した。IAI は、建設業界を中心とした国際的な非営利団体であり、ISO/STEP の建築サブグループと正式にリエゾン関係を結び、協力・協調を行っている。IAI では、建築構造物を主体としたプロダクトモデル IFC (Industry Foundation Classes) を構築し、本格的な実務への実用化に向けてモデルの仕様の開発等が進められている。

IFC は、主に建築分野での情報の共有化のための方法を提供するために、建設プロジェクトで最小限必要とされるデータ(例えば、梁、柱等)をクラスとして定義し、そのクラスからのオブジェクト(実体となるデータ)の生成、各オブジェクトへのアクセスや演算を行うためのクラスライブラリである。すなわち、IFC は建築構造物の要素ならびに設計・施工・維持管理等の情報をまとめたカスタマイズ可能な業界ベースのオブジェクトを提供している。よって、施主、建築家、構造技術者、設備業者、施工業者等の各プレーヤーがプロジェクト・モデルを共有することが可能となると考えられ、ライフサイクルを通じた各種業務の大幅な効率化が期待されている。

IFC は、2002 年 11 月に当時の最新バージョンであった IFC 2x の一部が、ISO 第 184 技術委員会/第4小委員会(TC184/SC4)の PAS (a Publicly Available Specification) として認定さ

れた経緯があることから、今後も段階的にSTEPの一部として認定を受け、最終的には建設業界の国際標準フォーマットとなることが予想されている。IFCでは、建設業界全体をモデル化の対象としているが、現段階では建築構造物の規定化が主体であり、土木構造物を対象としたモデル化は遅れている。

(3)わが国における建設分野のデータプロダクトモデル利用の取り組み

わが国においても、上記STEPやIFCをベースとした、建設分野への取り組みが多方面で展開されているが、先にも述べたように、鋼製橋梁の分野を除き、ほとんど実務に導入されていない状況にある。しかしながら、公共工事の分野でも、日本道路公団のようにJHDM²というPDMの仕様をほぼ完成させている企業者もある。JHDMは、フロー図で示される「業務機能モデル」、クラス図で定義される「道路構造モデル」の他、情報交換に用いる「XMLスキーマエンコーディング」の仕様書などで構成された高速道路のデータモデルである。しかしながら、これを実装したアプリケーションは開発途上の段階にある。

この最新の活動をレビューした“建設 IT の高度化に向けたCAD標準技術の開発(国土技術政策総合研究所)⁴⁾によれば、“建設分野のプロダクトモデルの構築は、対象領域が広いこと、およびプロダクトモデルを利用するサービスが多数に及ぶことから、プロセス・モデルやユースケースを策定してデータモデルを構築する STEP 方式の構築手法が適しているが、STEP 方式による厳格なモデル開発手法にこだわるのではなく、またSTEP等ですでに開発された既存のデータモデルの成果を利用して建設分野のプロダクトモデルを構築することがよい”とされる。

また、同報告書では既存ドメインモデルの利用に関し、以下のような知見を与えている。

①地形情報

土木設計データ(道路)および測量データに関して、現段階で最も汎用表現であると想定されること、SIMA-DM³等のデータ形式と差異も見られないこと、さらにXML形式で交換を行う仕様であることから、現段階の技術動向をふまえるとLandXML⁴の利用性が高い。ただし、わが国においても次世代DM仕様に関する検討が開始されていることから、今後は国内における汎用的な地形表現として最も適切なものを採用していくことに留意が必要である。

² JHDM: Japan Highway Data Model 高速道路事業に必要な情報の交換、共有を行うためのデータ仕様。設計から工事のプロセスで道路土工、橋梁を対象に検討。開発主体は旧日本道路公団。

³ SIMA-DM: DM(Digital Mapping:国土交通省公共測量作業規定に定められた、2D/3Dの地形図交換用フォーマットのこと。またはそのデータを指す)フォーマットから、図郭の概念を排除し、より簡素化した地形図や測量データを交換するためのデータフォーマット。日本測量機器工業会(SIMA)が制定したことから、「SIMA」の冠がつけられている。

⁴ LandXML: 建設土木・測量業界で利用可能な3次元のプロダクトデータ交換標準フォーマット。XMLをデータ交換標準に採用。270の組織が参加する LandXML.orgにより策定されたフォーマット。

②設計・積算情報

ユースケース「設計作業の省力化(土量算出)・データ連携」を実現するための道路設計・積算に関する日本の道路構造モデル(ただし、高規格道路、土工に着目)としては、**JHDM** が唯一の参照可能なモデルであり、これを参照することが妥当である。ただし、実装を考慮すれば道路専用 **CAD** のデータ構造をある程度意識しておく必要があることから、設計データを表現するために必要なパラメータとして、概略から詳細設計までの比較的広い用途で利用できる **CAD** の仕様より参照にすることがよい。また、道路平面線形については、地形情報との親和性を優先すると **LandXML** の利用可能性が高い。

③汎用表現の採用

汎用的な形状表現を実現する仕組みとしては、現状では**ISO10303-42 (STEP Part42)** が最も汎用的であると思われること、**IFC2X**でも採用されていることを理由として、これらの考え方を参照することとした。加えて、本プロダクトモデルは、3次元のみならず2次元による表現へも展開する必要があると考えた。これについては、**SXF level2⁵**との親和性を考慮し、**ISO10303-202 (STEP AP202)**を参照することとした。

④幾何形状とプロパティの分離

幾何形状は、形状そのものを保持する考え方と、属性(プロパティ)より形状を再現する考え方に大別される。現段階は、一概に各構造物の表現でどちらを採用すべきかが明確にすることはできないので、両者が併用できる仕様とするのが妥当と考えられる。

⑤道路構造物の分類

(道路)構造物の分類に関しては、**JHDM** が参照できると考えられる。ただし、今後は建設情報の分類体系との親和性を意識した体系付けが課題である。

⑥地物定義

本プロダクトモデルにより生成したデータは、**GIS** 等を利用する維持管理段階、さらに測量段階も展開することで、データのライフサイクルを実現する必要がある。地物の定

⁵**SXF: Scadec Exchange Format** 国土交通省が、STEP/AP202に準拠してCADデータ交換のために制定した規格。CALS/ECにおいて、2003年度から運用されている。ファイル形式に**PS21**(電子納品時の正式ファイルで、受発注に使用される。図面の再現には必要の無い情報も含まれる)、および**sfc (Scadec Feature Comment file: 図面の再現に必要な情報のみで構成され、ファイルサイズが小さく、施工現場等で使用される)**の2種類がある。また、そのレベルも**SXF level 1~4**が規定されているが、現時点では**SXF level 2**がきょうされている。なお、各レベルは以下のように定義されている。

レベル1 画面上で図面を正確に表示するために最低限必要なレベル

レベル2 2次元CAD製図データとして最低限必要なレベル

レベル3 STEP/AP202の製図機能(3次元)を全て満たすレベル

レベル4 STEP/AP202に加え、属性情報をも扱うレベルで、建設分野特有の属性情報も付加される

義として公共測量作業規程における大縮尺地形図図式コードの利用が考えられる。

上記を整理すると、①地形情報、および②設計・積算情報に関して LandXML 利用の可能性が高く示唆されている。LandXML は、その名称の通り、XML をデータ交換標準に採用した建設土木・測量分野での3次元のプロダクトデータ交換標準フォーマットであり、270 の組織が参加する LandXML.org により策定されたフォーマットである。

建設分野における、PDM の利用においては CAD とのデータ交換が重要となる。国土交通省では、STEP/AP202に準拠したCADデータ交換のために SXF を制定し、CALS/EC 上で 2003年度から運用しており、現在、SXF level 2 が公開されている。しかしながら、SXF が交換の対象とするデータは CAD データのみであり、また CAD 上で PDM を利用することのできる機能は図形情報の作成と表示に限定されている。このため、他のシステムとの間で種々のデータを交換する手段が望まれており、その手段として現在最も有望視されているのが LandXML であると考ええる。

(4) LandXML の拡張

国土交通省では、図形情報の標準化および、属性情報を図形情報に関連づけて一体として処理し、システムに依存することなく設計や維持管理に必要な情報を交換・業務に活用することを旨とした CALS の標準化が行われているが、現状は2次元情報を中心とした標準化にとどまっている。

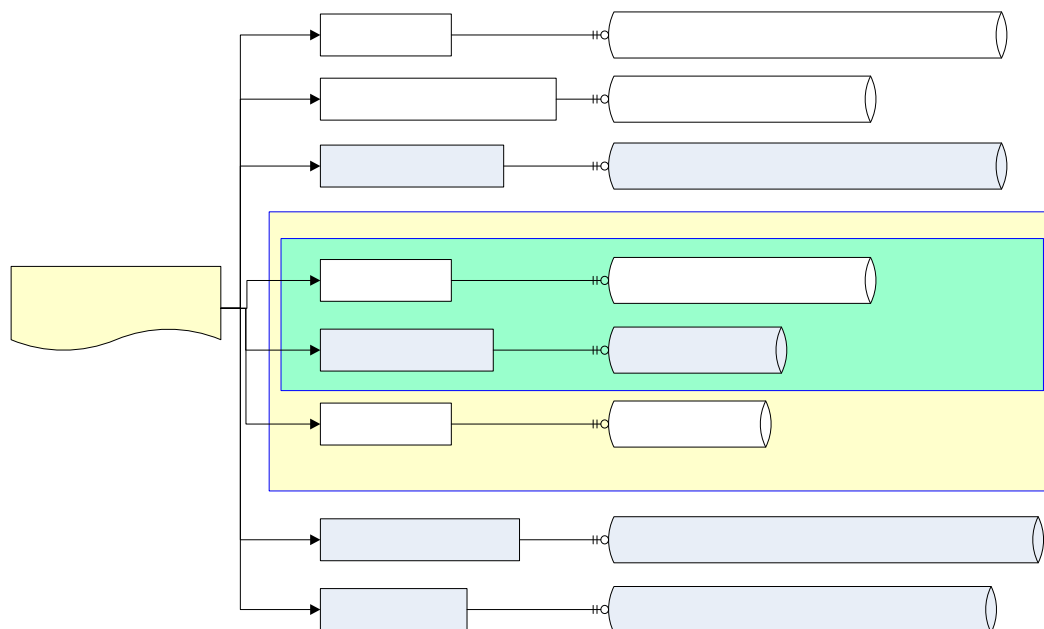


図-2.1 有富らによる LandXML の拡張概念⁵⁾

一方で、図形情報の3次元化に向けて SXF Lv4, JHDM, LandXML, IFC などオブジェクトデータの研究も進められている。しかし、いずれも発注、設計変更、および施工管理等で供するプロダクトモデルとしては十分でないといわれる。有富ら⁵⁾、①土木構造物の設計・施工管理にかかる業務効率の改善・ミスの低減・品質確保等の実現、②設計座標データの施工現場における有効活用、③複雑な設計情報の CAD と測量機器の間でデータ交換などを目的として、プロダクトモデルとして適用するに足る正確さと柔軟性を備えたコンパクトな基本設計情報モデルの提案を行っている。

その中では、施工効率の改善や施工管理に活用できる情報構造を定義するために、LandXML Ver.1.0 の構造体系を活用し、不足する情報項目の追加を図-1 のように行っている。図-1 に示すように、有富らはLandXMLの仕様に対応して作成した基本設計情報をSkeleton schema⁶⁾と呼び、この中で断面定義に準拠した横断定義要素<CrossSections>要素を追加した。<CrossSections>要素には、設計変更が容易な横断幅員パラメータ、勾配、高さ等が記述される。これに加えて、設計基準要素に対応した<Specifications>要素、施工管理情報に対応した<ConstructionInfos>要素、ならびに<Inspections>要素も追加している。ここで、「Specifications」要素は、道路構造令幾何構造基準値、出来形管理の規格値など制約となる基準値が、またを記述される「Inspections」要素は、出来形を計測した結果を記述する。このような有富らのLandXMLの拡張は、以下のような目的で行われた。

- ① パラメトリックな設計手法を前提とした基本的な設計情報の構造化
- ② 共通で交換すべき情報の定義
- ③ 設計寸法、座標値などの前提条件(設計基準、基本座標系)を一体化した情報交換
- ④ 分割発注、設計変更、完成図作成を容易に行うことができる情報項目の定義
- ⑤ データサイズの縮小・最適化

以上のように、有富らのLandXMLの拡張は、CALSS/ECとの情報交換性を確保しつつ、土木分野の設計・設計施工業務の効率化を果たしうるプロダクトデータモデルの雛形と捉えることができる。

また、有富ら^{6),7),8)}は、CADと測量機器の間でXMLを使った設計情報を交換し、丁張り設置や出来形管理に必要な設計情報を現地の測量機器に搭載して作業できるシステムも開発したが、横断面図を元にして作成された設計データでは、細かい複雑な多種類のデータを一体化して表現できない。汎用的な3次元データとして、TIN(不等三角網)を用いた3次元モデル

⁶⁾Skeleton Schema: 土木構造物の基本的な骨格を抽象化した概念スキーマであり、土木構造物のデータ交換時に前提となる基本的な土木知識の論理的概念構造を定義したものであり、①設計仕様(設計条件・制約条件)、②形状構造(平面線形、縦断線形、横断復員、法面形状)、③基本座標系(グローバル・ローカル)の3つの要素からなる。また、その種類には、基本スケルトン(共通項目定義集)と拡張スケルトン(設計・施工・維持管理)野2つが存在する。これらは、スケルトンにあったオブジェクトを定義して、データ形式を規定することで、情報項目レベルの互換性の維持を図ることを目的とするものである。

が普及しているが、TIN を用いて細かいデータを作成すると現状 CADソフトウェアではデータサイズが膨大になるといった問題がある。

以上より、本研究においては有富らの LandXML 拡張を導入することで、プロダクトデータモデルへの展開を志向するものとした。その際、現状 CADソフトウェアの不具合解決策も上記拡張にとりいれている。

2.3 GAIA_Brain の改良

(1) GAIA_Brain の PDM 化

土木学会設計情報小委員会は、平成 14 年、建設事業における PDM の概念を、以下のよう
に定義している⁹⁾。

- 1) 建設プロセスは、計画・設計・施工・維持管理に大分類される。
- 2) 建設プロセスの中で流れる情報は、設計情報と管理情報とに分けられる。
- 3) 設計情報には地形・地質、地物、構造物等に関する技術的な情報が含まれる。
- 4) 管理情報は建設事業を管理するための情報である。
- 5) PDM は、コンピュータ上に構築された仮想的な土木構造物の具体的モデルである。
- 6) PDM に基づき、設計物はコンピュータ上で3次元的に再現される。
- 7) PDM 仮想的な物体形状をコンピュータ上に定義する。
- 8) PDM は設計物の抽象化である。
- 9) PDM の形状情報は3次元の情報であり、必要に応じたビューを得ることができる。
- 10) PDM に基づき、解析・数量計算等に必要なデータを得ることができる。
- 11) PDM は一元的な情報であり、ビューには依存しない。
- 12) PDM の基本は形状モデルであり、属性情報はそれに付随する。
- 13) PDM は、管理情報とリンクすることができる。
- 14) PDM は部品化(オブジェクト化)されることが必要である。
- 15) PDM は極力、パラメトリック⁷⁾に定義されるべきである。
- 16) PDM の対象は、「建設事業」そのものである。
- 17) 計画・設計という段階を経るに従い、設計情報量は増加し、PDM のオブジェクト構造は多重構造となる。
- 18) 施工は PDM を現実の世界に投影する段階である。
- 19) 現実から得られた PDM の乖離は修正されなければならない。
- 20) PDM は、竣工後は維持管理情報のデータベースとしての利用が可能である。
- 21) 施工後、PDM と現実との乖離を見出す作業が維持管理の一つである。
- 22) 現実の物体は老朽化等により竣工時点との PDM との乖離を引き起こす。
- 23) PDM は時間の概念を有し、その老朽化を予測し、補修スケジュールの立案を実現する。

既に示したように、GAIA_Brain は、上記の概念を全て実現するものであり、RDBM を援用することによって、これまでの PDM システムでは機能しなかった 13),14),15),20) の概念を実務の

⁷⁾元々の設計に対して、個々の条件のうち、ある条件のみを変更した設計を「パラメトリック (設計)」と言う。CAD 等では、寸法などの数値情報や設計意図などの非数値情報を取り扱い、これを変更することにより多様な設計変更に答える技術を意味し、パラメトリック機能のない CAD では変更時に線を自分で引き直すしかないが、パラメトリック機能のある CAD では属性の変更によって自動的に図面が、変更される。

場に供することも可能となった¹⁾。さらに、柔軟な時間概念の導入によって17)で指摘された情報量の増加に伴うオブジェクト構造の多重化も簡便に取り扱うことができるようになった²⁾。したがって、GAIA_Brainの機能そのものを改変・改良する必要はないが、これまでのシステム開発ではCADデータとのデータ交換を考慮してこなかったために、既存のCADデータを取り扱うことができなかった。これは、GAIA_Brainが施工管理支援システムを念頭において開発されてきたためである。

しかしながら、地下構造物の設計・施工・維持管理を一貫して取り扱い、地下構造物のLCM戦略立案に供することのできるPDMの構築には、CADデータとのデータ交換が不可欠となる。これは、今日、土木構造物設計がCADデータを標準として作成されるためである。

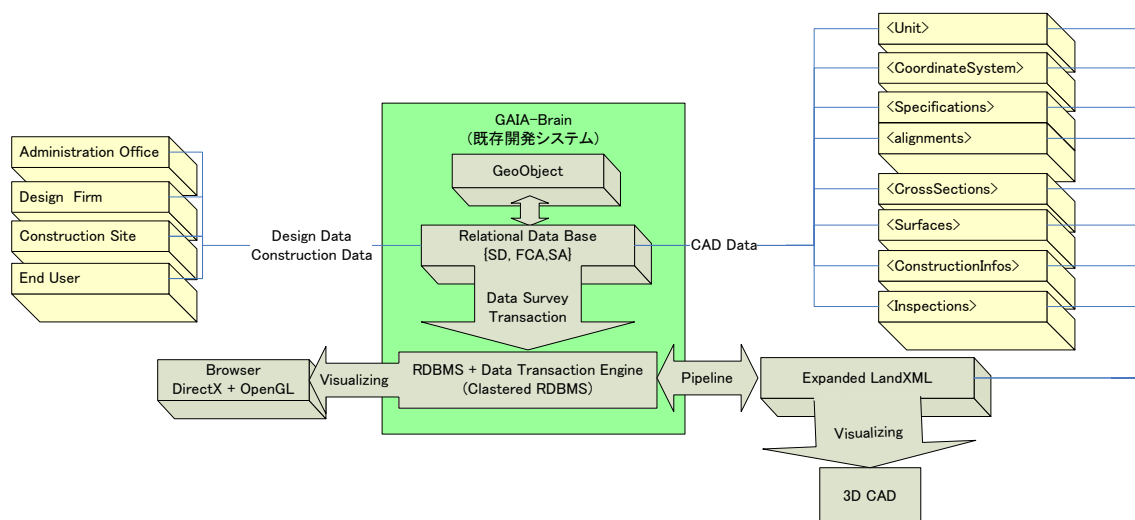


図-2.2 GAIA_Brainにおけるデータ構造とその相互関連

以上のような理由で、本研究ではGAIA_Brainにおけるデータ構造を図-2.2のように再構成した。図-2.2において、GeoObjectは仮想世界(GeoWorld)を構成する地物⁸⁾を意味し、あらゆる地物は図-2.3に示すように幾何学データSD(Spatial Data)、時間変化する特性FCA(Frequent Changed Attribute)、ならびに時間的に静的な特性SA(Static Attribute)の関係スキームによって記述される。また、これらの{SD,FCA,SA}はデータベース上に、図-2.3のように蓄積される。

この記述方法は、地学オブジェクトを静的情報と動的情報の一次結合としようとするものである。この方法に従えば、静的情報はデータベース上で動的情報と峻別して管理されることとなる。したがって、個別データの冗長性を大きく低減することが可能となる。

⁸⁾地物 ①地図の表示で、道路、建物、河川、植生等の総称で、等高線等であらわされる地形に対比して使われる。②天然・人工にかかわらず、地上にある全ての物の概念のこと。現実世界に実在する物・現象・環境や実在はしないが適用業務上に仮想的に存在させるものも地物という。：測量用語辞典

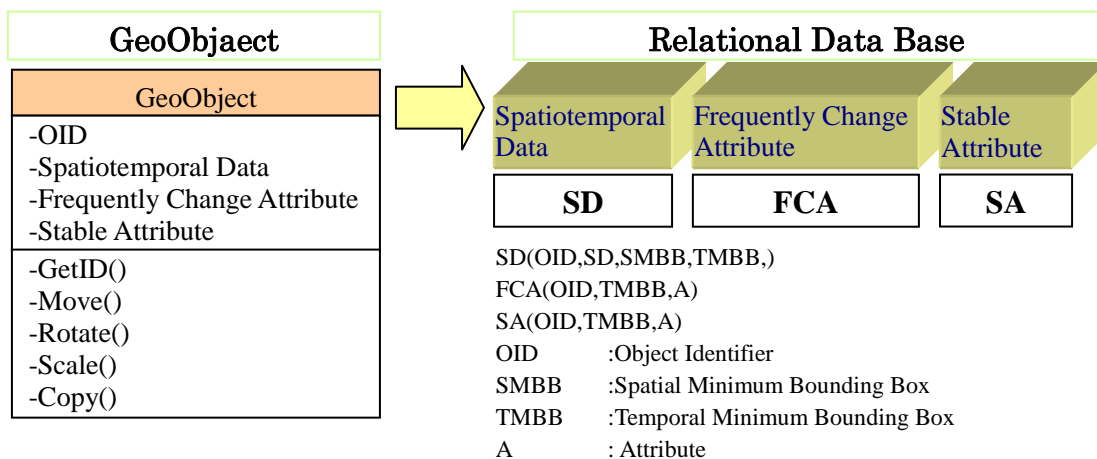


図-2.3 GAIA_Brain データモデルのデータ構造

さらに、このデータベース構造は仮想空間の構築を柔軟化することも可能とする。すなわち、仮想空間を構成する幾何学ユニットは幾何学データ SD、時間変化する特性 FCA、ならびに時間的に静的な特性 SA の一次結合として表すことができる。したがって、本研究で設計したデータベース構造を仮想空間構築に適用することが可能となる。この考えに従えば、ユーザーは必要な幾何学ユニットをデータベースから抽出し、それらを組み合わせることで所要の仮想空間を構築することが可能となる。

図-2.2 では、CAD データを GAIA_Brain データモデルを構成する要素の一つ SD として採用した。これにより、CAD の幾何学情報に各種の施工情報や素材データ等からなる FCA、SA をふかさせることが可能になる。

既存の GAIA_Brain ではデータ交換に XML を採用していることから、これを LandXML に移行することは比較的容易である。有富らは LandXML を拡張した Skeleton schema を市販の CAD で処理するために拡張ライブラリを開発したが、本研究では既存開発システムの RDBMS 機能を利用することで等価な機能を付加することとした。これは、既存開発モデルのデータ処理機能をプロダクトデータモデル処理に活用できること、ならびに図形情報の Browser として市販 CAD だけでなく ActiveX-OpenGL 融合の Java Plug-in も活用できるためである(次節において記述)。これにより、高稠密地形形状測定データ等を高速処理・描画することが可能となる。

一方、図面の修正・改変にはそのプラットフォームとして CAD システムを利用することが合理的であろう。GAIA_Brain のデータ構造は、地物を{SD,FCA,SA}の 3 種のデータ群の一次結合として構成する。このとき、図-2.1 に示した有富らが拡張した<Specifications>要素は時間的な変化の小さい SA データとして、また施工管理情報に対応する<Construction Infos>要素、ならびに<Inspections>要素は時間的な変化の大きい FCA データとして取り扱うことが可能である。したがって、GAIA_Brain に蓄積されたデータを CAD に供する際には、有富らが拡張した LandXML をデータ交換手段として採用することができる。このためには GAIA_Brain のデータ

構造を変更することなく、データ交換時のパイプラインを整備することだけよい。

2. 4プロダクトデータモデル利用に向けた既存開発システムの改良方策

前述の、GAIA_Brain のPDM化に加え、瑞浪超深地層研究所における試験運用から抽出された問題点を踏まえ、GAIA_Brain に以下のような改良を行った。その概要を示す。

(1) J2EE プラットフォーム上でのシステム開発

これまでのシステム開発は、コーディングが容易な Microsoft .NET Framework を上で実施してきた。しかしながら、Microsoft .NET Framework は高い計算能力を要求される時空間データ処理には適さない。このため、Java プログラム群を部品化し組み合わせることのできる J2EE を開発プラットフォームとして採用する。

(2) ActiveX-OpenGL 融合による Plugin の開発

既存システムの Web 可視化に採用した市販商用 VRML Plugin は時間軸概念がなく、また X3D や LandXML 等がサポートされていない。したがって、効率的な描画やクライアントのデータキャッシュを行うことが難しい。このため、Java 上で ActiveX と OpenGL を融合させた独自 Plugin Applet の開発し、実用的な速度での描画実行を目指した。

(3) 並列計算化、および分散型システム化の推進

データベース管理において、効率的な検索を実現するためには、統括的なインデックス手法をデータベース管理システム DBMS に組み込む必要がある。また、現在の DBMS は処理できる時間スパンが非常に短く、殆どのプログラミング言語と DBMS が 1970 年から 2038 年までの間の時間しか処理できない。この統括的インデックス手法を高速処理し、処理可能な時間領域を拡張するためシステムの並列計算化ならびに分散型処理化を推進する。

(4) 時空間多次元データ向けのインターフェースを開発

情報入力、検索、更新、時間軸に対する操作等のためのインターフェースが必要である。システム開発者以外の利用者が簡単に利用できないと実用性は大きな問題があると考えている。

(5) J2EE と ActiveX-OpenGL 融合による開発 Plugin の概要

J2EE(Java 2 Enterprise Edition)は、標準機能セットの Java 2 Standard Edition(J2SE)に、サーバ用の API や諸機能を付加した機能セットであり、その主たる機能には以下のようなものがある。

- | | |
|--------------------------|----------------------------------|
| ① Platform Specification | : API セットが統合されたもの |
| ② Blue Prints | : Sun の参照実装、互換性テストスイート、ガイドライン |
| ③ Enterprise JavaBeans | : Java プログラムを部品化し組み合わせる機能 |
| ④ Java Server Pages(JSP) | : Web ページに Java プログラムを埋め込み内容を動的に |

生成する機能

上記以外にも、XML を操作するための API 等も用意されるため、サーバ上で様々なソフトウェアを組み立てることが可能となる。J2EE の動作環境は Sun を含む各社のアプリケーションサーバ製品に実装されており、データベースシステムや Web サーバと組み合わせて使用することとなるが、上記のように多様な機能を包括的に実行する環境を提供するため Applet の起動と初期化に多大な時間を要するという欠点がある。

特に、Java3D Applet による三次元描画は、VRML 等による描画に比べ、その描画速度は大きく劣るため、実務的なシステム構築には適さないものと判断される。これは、クライアントに Java3D のランタイムソフトのインストールが必要であること、サーバーサイドにおいて高性能計算が困難であるなどの理由による。また、Java3D 自体も開発段階にあるため、まだ安定していないのも事実であろう。

この描画速度の問題を解決するため、本システムは既存の Java Plug-in を採用しつつ、ActiveX と OpenGL を融合した独自の Plugin を開発することとした。Netscape や Internet Explorer には最初から JAVA (JAVA VM) が組込まれているため、JAVA Applet をそのまま稼働させることができるが、両ブラウザの実装が必ずしも一致していないため一方でしか動かない、最新の JDK1.2 で開発したアプレットは動かない等の問題がある。一方、Java plug-in はサン・マイクロシステムが開発した技術で、上記の問題を解決するためブラウザに組み込まれた Java を使わず、別にプラグインとして組み込む技術である。Java plug-in を実行するためには、HTML で、従来<APPLET>タグでアプレットを指定している箇所を、プラグインで実行するように<OBJECT>や<EMBED>タグに書きかえる必要がある。

本システムでは、この方法によりシステムの立ち上がり、描画速度等が大幅に改善でき実務的に支障のないデータ操作が可能となった。図-2.4 は ActiveX-OpenGL 融合による Java Plug-in で瑞浪超新地層地研究所の俯瞰図を描画した例である。

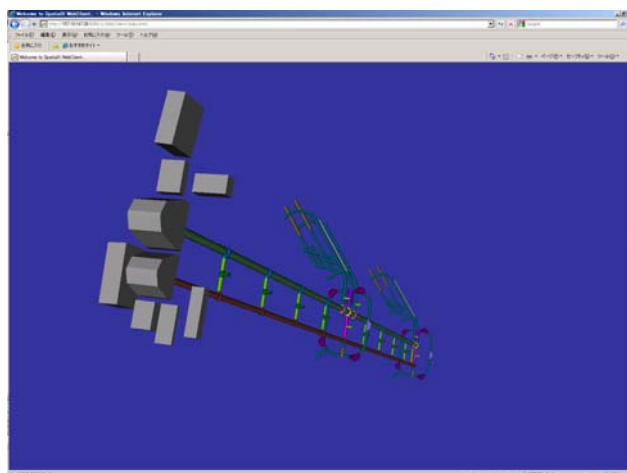


図-2.4 ActiveX-OpenGL 融合の Java Plug-in による瑞浪超新地層地研究所俯瞰図の描画例

さらに、J2EE 上で Java Applet を利用することの利点は、セキュリティ面と経済性にある。Java Applet はユーザのコンピュータに被害を与えることのないように、①ユーザのハードディスクの内容を読み書きする、②自分が呼び出された Web サーバ以外のコンピュータに接続する、③他のアプリケーションソフトを起動する等の機能が与えられていない。したがって、システム上のウィルス発生の可能性が非常に低い。

また、クライアントサーバシステムで Java Applet を利用すれば、これに接続するコンピュータには Web ブラウザを搭載するだけでシステムの利用が可能となり、アプリケーションソフトの配布や管理にかかるコストを節減することも可能となる。

参考文献

- 1) 板倉賢一、佐藤稔紀、山地宏志:Web3DとRDBMを援用した大規模地下開発支援システムの開発、平成18年度日本建設情報総合センター研究助成事業報告書 第2006-03号、2007.
- 2) 板倉賢一、松井裕哉、早野明、山地宏志:柔軟な時間管理概念を導入した4次元GISによる大規模地下開発支援システムの構築、平成19年度(財)日本建設情報総合センター研究助成事業報告書 第2007-02号、2008.
- 3) 社団法人土木学会情報利用技術委員会土木情報ガイドブック制作特別委員会編:土木情報ガイドブック:これだけは知っておきたい土木情報の標準化、建通新聞社、2005.
- 4) 国土技術政策総合研究所:建設ITの高度化に向けたCAD標準技術の開発、<http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h15giken/h14/pdf/12.pdf>
- 5) 有富孝一、松林豊、上坂克己、柴崎亮介:施工管理に活用できる道路構造物の基本設計情報の構造化、土木情報利用技術論文集、Vol.14, pp.219-230, 2007.
- 6) 有富孝一、松岡謙介、上坂克己、奥谷正:3次元設計情報を用いた出来形管理技術の提案、建設マネジメント研究論文集、(社)土木学会 建設マネジメント委員会、Vol.11, 81~90, 2004
- 7) 有富孝一:ITを活用した施工管理の業務改善、第21回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集、土木学会建設マネジメント委員会、pp.147-150, 2003
- 8) 高度情報化研究センター情報基盤研究室、共同研究者(株)大林組、(株)トプコン、(株)小松製作所:建設施工における空間情報の取得利用に関する研究、国土技術政策総合研究所共同研究成果報告書、2005
- 9) 蒔苗耕司、政木英一:設計情報小委員会活動報告、<http://committees.jsce.or.jp/cceips04/sites/committees.jsce.or.jp.cceips04/files/H14report.pdf>、2002.

3. レーザースキャナーデータのプロダクトデータモデル化とその情報処理

3.1 概説

3次元レーザースキャナーは遠隔からの高精度形状測定を可能とする測定機器で、建設分野のみならず、輸送機械産業、電子部品産業、精密加工産業、さらにはデザイン・意匠にわたる幅広い分野で利用されている。これは、パルス式レーザーを使用した高速スキャン方式の形状測定が、各分野で要求される測定精度を比較的容易に担保し得ること、さらに用途に応じた測定データの加工が容易なこと等の理由によるものと考えられる。しかしながら、その測定データの利用に関しては以下のような問題がある。

- 1) 測定データのデータフォーマットが未公開であるため、データ変換等の操作を付属ソフトに頼らざるを得ない。
- 2) 付属ソフトで変換された形状データはCAD形式に限定されるため、その利用方法が限定される。たとえば、CAD上での形状データ表示は点群表示のみで、TIN¹等を張ることも難しい。
- 3) 精密な測量を行うほどデータ量が膨大となり、データの操作性が著しく損なわれる。また、データが膨大なため実務に供し得る領域は比較的小規模なものに限定される。
- 4) 測定された形状データを設計・施工・維持管理等へ利用する、あるいはフィードバックするシステムが整備されていない。

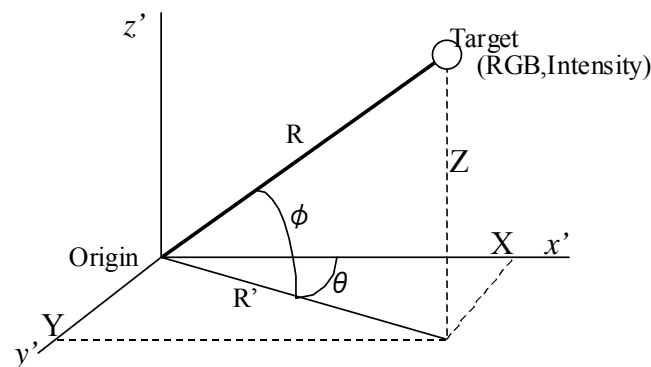


図-3.1 3次元レーザースキャナーで用いられる球座標系

また、3次元レーザースキャナー測定が与える測定データは図-3.1 に示す球座標系で定義される測点までの距離 R 、測点までの水平角度 θ 、測点までの鉛直角度 ϕ 、ならびに測点画像の RGB と受光強度の5項目、7データである。このデータ形式は、工学的な用途には適

¹ TIN: Triangulated Irregular Network)とは、地理情報システム(GIS)で利用するための、地表面を表現するデジタルデータ構造。不整三角形網とも呼ばれる。TINは、地表面または海底面の物理的形状を表現し、X,Y,Zの3次元情報を持った点と線が、重複のない三角形の集まりとして配列されたものである。

さないため、測定された形状データを使用目的に応じて座標変換する必要が生じる。本章では、1)～4)に示した問題を解決する技術開発の一環として、3次元レーザースキャナーにより測定された瑞浪超深地層研究所の壁面形状データの PDM 化を試行し、これに適したデータ変換手法とその保存形式について考察を行った。ここでいう PDM 化は単なる座標変換のみを指すのではなく、PDM の利用目的に即したデータ形式に変換することを意味するものであり、具体的には以下の5つの変換処理が必要となる。

- ① レーザースキャナーが測定した球座標系データを PDM としての処理が容易な円柱座標系、ならびに直交座標系へと変換する。
- ② レーザースキャナーは等角度測定(最高 0.06 度間隔)で測定を行うため、他の座標系では測定位置によって測定間隔にばらつきが生じる。これは、大容量のデータ処理を行うにあたり、演算処理に過大な付加を与える。このため、測定されたデータを円柱座標系上で等間隔の測定データに変換する。
- ③ 掘削壁面形状のような複雑な形状では、レーザーの影となって測定されない欠損箇所が発生する。これを PDM システム上で補間する処理は大きな負荷となるため、予め欠損箇所を補間した測定データを保存する。
- ④ 立坑壁面形状測定は掘削の進行状況に応じて実施されるため、複数の測定事象間での重複や欠損が生じない合理的なデータ区分を実施する。
- ⑤ 検索に適したデータの記録と保存

3. 2節では、上記3次元レーザースキャナーデータの PDM 化について具体的な処理手順と、各処理の具体的な流れについて記述する。本研究では、この処理を実行するシステムを LSDC(Laser Scanner Data Converter)と名付け GAIA_Brain のサブシステムとして設計し、その操作の概要を Appendix_D に示した。

一方、レーザースキャナーで測定された形状データを PDM 化する目的は、単にデータ表示やデータ検索に供することにあるのではなく、測定された形状データから設計/施工/維持管理に供することのできるデータを抽出することにある。本研究では、瑞浪超深地層研究所立坑工事におけるレーザースキャナーデータを利用して以下の用途を設定した(1. 2節(3))。

【設計・施工】

- ① 設計掘削線と実際の掘削形状との乖離を評価し、以降の発破方法、もしくは掘削方法の改善に供する。
- ② 断層や破碎帯等の地質弱部の構造を3次的に把握することで、変状対策工設計の設計モデルに供する。
- ③ 実際の掘削形状から覆工コンクリート打設量を算定することで、材料ロスの低減を図る。

【維持・補修】

- ④ 長期的に変状を発生させる原因となり得る地質構造弱部等を PDM から抽出することで維持補修計画を立案する。

この用途に供するため、PDM 化されたレーザースキャナーデータを利用して以下の3つの処理機構を設計した。その処理機構の概要を3.3節に示す。

①掘削壁面凹凸計算とその正規化

当該の処理は工学的利用を目的としたものであり、覆工コンクリート打設数量の算定や、スムーズブラस्टィングの効果検証等を目的として、以下の2つの演算処理を実施するものである。ひとつは、各ステップにおける掘削ボリュームを3次元レーザースキャナーデータから算定する演算であり、もうひとつは設計掘削半径からの離れをカラーマップとして表示するものである。その実際を3.3.2節に示す。

②受光強度データの正規化

レーザースキャナーデータの受光強度データは、12ビットの4,095階調(0~4,094)グレースケール画像として与えられる。ところが、瑞浪超深地層研究所主立坑工事で、これまで測定された受光強度データのほとんどは(960~1,440)の範囲にある。このため、グレースケール画像としてみたとき、画面全体が黒基調となり、岩種間の優位な差を画像から判断することが難しかった。このため、このデータ範囲を4,095階調で再正規化することで、データ間の差異を強調したグレースケール画像を作成し、これを8bitのBitmapデータとしてファイル保存することを考えた。その機構の実際を3.3.3節に示す。

③地層構造解析

瑞浪超深地層研究所立坑掘削過程で現れた、断層や破碎帯等の走向・傾斜をPDM上で同定し、地質構造解析するための機構を設計した。その機構の実際を3.3.3節に示す。

また、GAIA_Brainのサブシステムとして実装した(LSDPS: Laser Scanner Data Processing System)。このシステムを稼働させる上で、最も問題となったのがデータサイズの問題である。瑞浪超深地層研究所立坑工事で採取される立坑壁面形状のレーザースキャナーデータは、一測定事象(測定高さ2.6m)あたり600MB近くにも達し、最終到達深度1,000m到達時点では総データ容量が250GBを超えることが予想される。これをPC上でストレスなく描画し、解析することは現状のPCの処理能力を大きく超える。このため、本研究では解析対象区間に応じて、描画・解析に供するデータの精度を変化させる手法を導入した。広範囲な場合は疎な形状データを、狭小な場合には密なデータを(あるいは全データ)を供する手法である。これは、

Google Earth 等で描画領域に応じて画像の解像度を変化させる手法と同一であり、ここではストレスなくこれを実行するため、レーザースキャナーデータを PDM 化する過程で、予め一定の解像度を低下させたデータ(間引きデータ)を準備することとした。その実際を 3.2.1 節、3.2.5 節に示す。

この手法の問題点は、広域の地質構造解析を行い際にその精度が限定される点にある。すなわち、広域を対象とした解析には予め分解能を低下させたデータが供されるため、その解析精度もその分解能に支配されることとなる。この問題を解決するため、本研究ではクラウドコンピューティング²の手法を検討した。すなわち、インターネットを介した複数のコンピュータで大規模データを分散処理、ならびに図化处理し、その演算結果の表示を手元のPC上に描画する手法である。したがって、手元のPCは演算対象を指定し、描画する機能さえあればよい。本研究では、室蘭工業大学情報工学科にある 34 台のPCを利用してそのシステムを構築した。その概要をAppendix Fに示す。

なお、以下の記載では3次元レーザースキャナーで測定される座標系を測定座標系と呼び、瑞浪超深地層研究所主立坑中心を水平面の中心とし、立坑掘削開始深度を鉛直の原点とする座標系をモデル座標系と呼ぶものとする。なお、記述中で現れる全体座標系は世界測地系を指すものである。また、一般の球座標系が原点からの距離 R と x 軸(もしくは y 軸)と z 軸からの偏角によって3次元を定義するのに対し、3次元レーザースキャナーデータの球座標系は原点からの距離 R と水平面内の x 軸からの偏角 θ' 、および水平面からの z 方向仰角 ϕ によって球座標が定義されることに注意が必要である。

² インターネット上にグローバルに拡散したコンピューティングリソースを使って、ユーザーに情報サービスやアプリケーションサービスを提供するという、コンピュータ構成・利用に関するコンセプトのこと。

3.2 LSDPSにおけるレーザースキャナーデータのPDM化

3.2.1 LSDPSにおけるレーザースキャナーデータのPDM化の概要

本節では、測定されたレーザースキャナーデータをPDM化するまでの一連の変換作業について示す。本研究が対象とする瑞浪超深地層研究所主立坑工事では、1回に1.3mの立坑掘削が行われ、各掘削回をstepと呼ぶ。

立坑壁面形状測定は2stepごとに高さ2.6m区間を測定することを標準とするが、地山状況に応じて測定高さが異なる場合も存在する。表-3.1に、形状測定で対象とする測定区間長（プロジェクト区間）の例を示す。表-3.1中のプロジェクト区間は1回の立坑壁面形状測定が対象とするstepを示し、上限深度UDはそのプロジェクト区間において主たる測定の対象とした深度の上限を、また下限深度LDはその下限を示す。

3次元レーザースキャナーの測定原理は球状に空間を把握するものであるから、各プロジェクト区間での形状測定データは表-3.1中のUDとLDの範囲内だけでなく、その上下の区間の測定結果も含まれる。したがって、形状測定データ相互間の整合性を確保するために、当該形状測定が対象としない区間の余分な測定データを削除する処理も必要となる。

表-3.1 深度対応表の形式

プロジェクト区間	上限深度 UD	下限深度 LD
step43	GL.-51.600	GL. -52.900
step44	GL.-52.900	GL.-54.200
step45-46	GL.-54.200	GL. -56.800
step47-48	GL.-56.800	GL.-59.400
step49-50	GL.-59.400	GL. -62.000
.		
step134-135	GL.-167.400	GL. -167.400
step136-137	GL.-170.000	GL. -170.000

これを考慮して、3次元レーザースキャナーデータをPDM化する作業の流れを図-3.2に示す。図に示すように、3次元レーザースキャナーデータ変換作業は、以下に示す5つの処理過程から構成される。これらの詳細は、次節以降に述べる。

①測定データ座標変換

形状測定データの座標変換は 1)偏心補正、2)球座標系から直交座標系への座標変換、3)局所座標系から全体座標系への変換の3つの座標変換を実施する。その実際を3.2.2節に示す。

②測定データ再配列

測定データの再配列では、全体座標系に変換された形状測定データと、これに付随するRGBデータ、ならびに受光強度データを、正規化された一定間隔の格子状要素に割

り付ける。これは、各種解析処理や表示の高速化を目的としたものであり、RBG データについてはデータが欠落する要素の補間も行う。その実際を 3.2.3 節に示す。

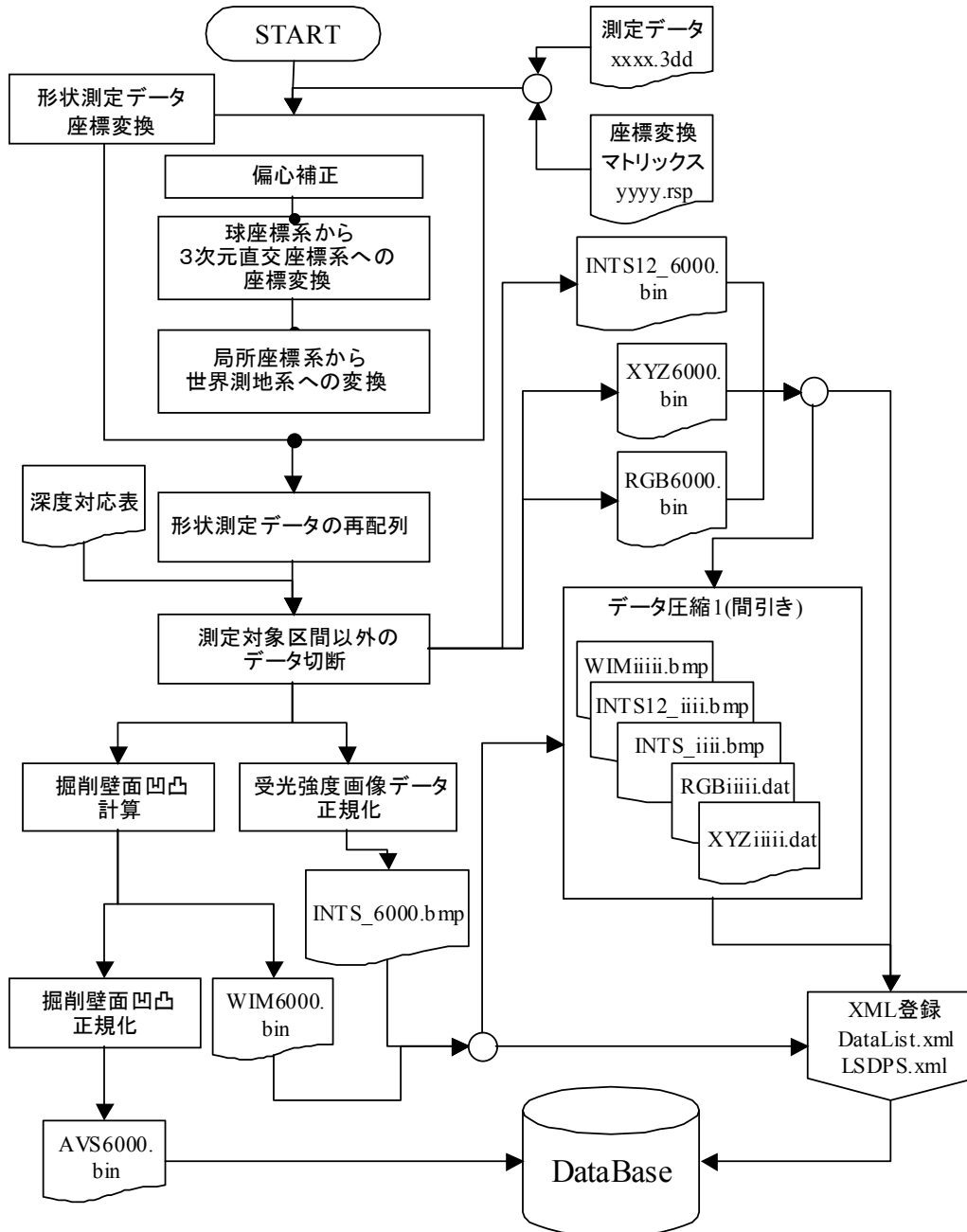
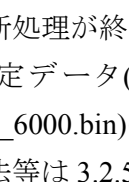


図-3.2 3次元レーザースキャナーデータ変換作業の流れ

③測定対象区間以外のデータ切断

各測定データにおいて測定対象外となる上下部のデータを、前述の深度対応表に従って切断する処理を行う。以下、この処理を深度切断と呼び、その具体的な処理方法等を 3.2.4 節に示す。

④データの圧縮(間引き・軽量化)

深度切断処理が終了した時点で、-3.2 に示すように解析や表示に供することのできる形状測定データ(XYZ6000.bin)、RGB データ(RBG6000.bmp)、受光強度データ(INTS12_6000.bin)のファイルが作成され、データベースへと登録される。その具体的な処理方法等は 3.2.5 節に示す。

なお、上記の各ファイル名に付された 6000 の意味は円周方向の格子要素数が 6,000 個あることを意味するものであり、測定されたデータすべて網羅するものである。これらのデータ・ファイルは、そのファイルサイズが数 10Mbite にも達するものがあり、高速描画や大域描画に適さないため、データを可能な限り測定データの特徴を生かして圧縮し、そのファイルサイズを軽量化する処理を行うものとした。

⑤データベースへのデータ登録

以上のように変換・処理されたデータ群を、高速アクセス・描画を可能とするように最適な配置でデータベース上に登録する。この登録方法は 2 章で述べた考え方に沿うものであり、その具体的な処理方法等を 3.2.5 節に示す。

3.2.3 3次元レーザースキャナーデータの座標変換

図-3.2 に示すように、本システムで必要となる座標変換は 1)偏心補正、2)球座標系から直交座標系への座標変換、3)測量座標系から世界測地系への変換の3段階である。

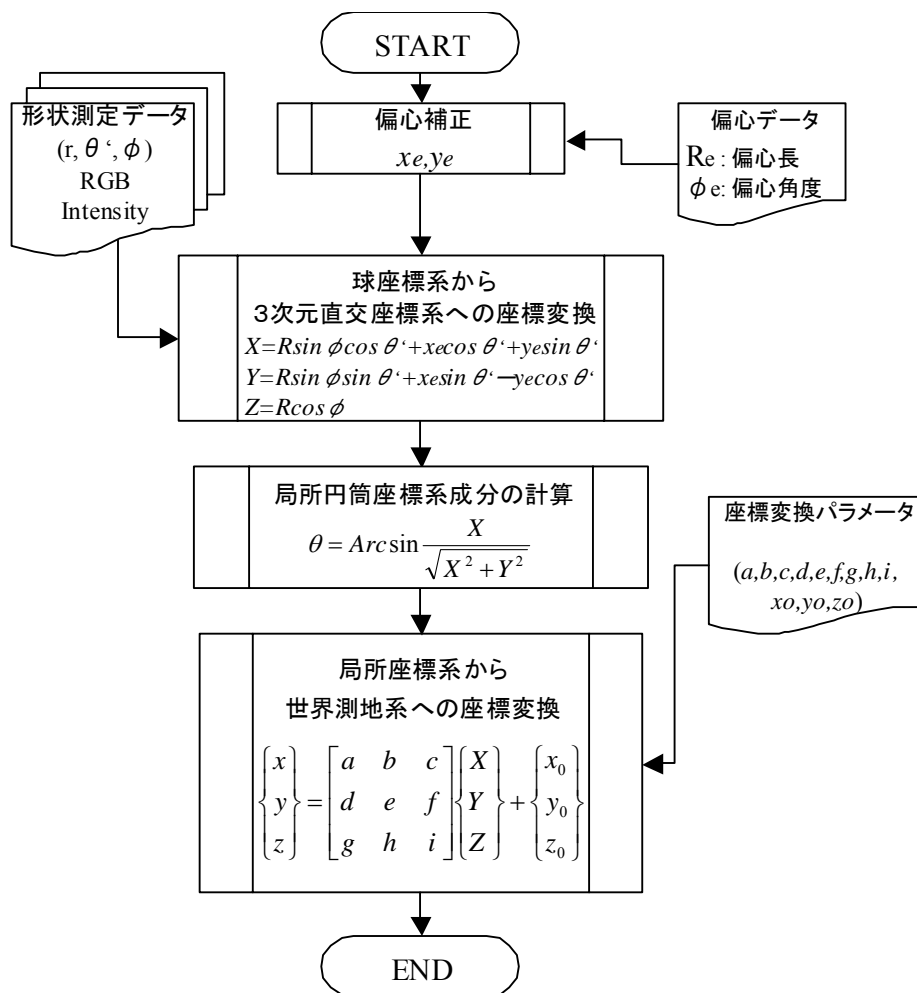


図-3.3 座標変換作業の流れ

図-3.3 は座標変換の流れと使用するデータ、ならびに各座標変換によって得られるデータを整理したものである。ここで、測定機械の偏心補正は測定機械特有の補正項であり、本来、座標変換とは異なる作業であるが、データ処理を一気通貫で行うため座標変換処理の一つとして取り扱った。

球座標系から直交座標系への座標変換は機械的な演算により可能であるが、3次元レーザースキャナー測定における球座標定義が、通常の球座標定義と異なることに注意が必要である。なお、この座標変化が施された時点での座標系は3次元レーザースキャナー中心を原点とする局所座標系であることにも注意せねばならない。

したがって、地質精査に関する種々の演算処理や画像表示を実施するためには局所座標

系に変換された形状測定データを、さらにモデル座標系、ないしは世界測地系へと変換する必要がある。ここではCGデータや地質調査データとの親和性を確保することを考え、世界測地系への変換を行う。以下、各座標変換の詳細を記述する。

(1) 3次元レーザースキャナー測定データの偏心補正

3次元レーザースキャナーのレーザー放出点と測定機械中心(測定中心)は必ずしも一致しておらず、若干、異なることが一般的である。これを測定機械偏心と呼ぶ。

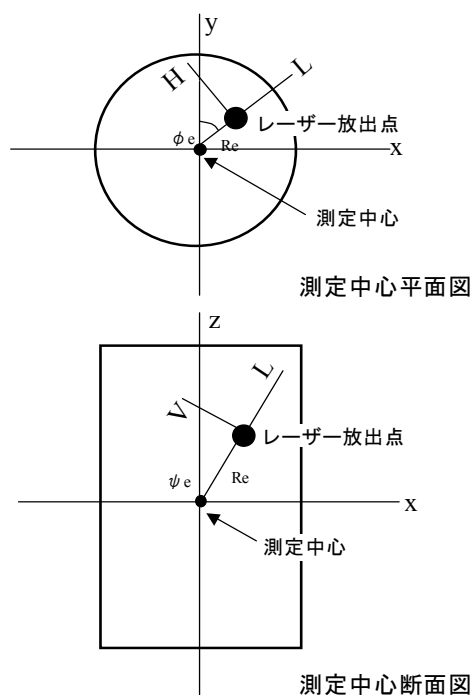


図-3.4 レーザー放出点と測定中心の関係

したがって、種々の座標変換を実施するに先立ちこれを補正する必要がある。すなわち、レーザー放出点に直交する球座標系に対して測定された座標データを、測定機中心の系に変換する必要がある。一般的な測定機械偏心を図-3.4に模式的に表す。

図-3.4に示すように、座標中心からの偏心は、水平面内における偏心と、鉛直方向の偏心成分があるが、瑞浪超深地層研究所主立坑工事で用いられている3次元レーザースキャナーの測定機械偏心は水平面内における偏心のみに限定されており、その偏心距離 R_e と水平面内偏心角 ϕ_e は、形状測定データのパラメータ・ヘッダー・ブロックにそれぞれ EccenterDist、EccenterAngle として記載されている。

偏心距離 R_e と水平面内偏心角 ϕ_e を用いると、水平面内の x,y -偏心成分 x_e, y_e は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}x_e &= R_e \cos \phi_e \\y_e &= R_e \sin \phi_e\end{aligned}\tag{3.2}$$

(2) 球座標系から直交座標系への座標変換

3次元レーザースキャナーで用いられる球座標系は図-3.1に示すものである。したがって、球座標系で測定された形状データ(R, ϕ, θ)を直交座標系(X, Y, Z)に変換するには、次式の変換を実施すればよい。

$$\begin{aligned}X &= R \sin \phi \cos \theta' \\Y &= R \sin \phi \sin \theta' \\Z &= R \cos \phi\end{aligned}\tag{3.3}$$

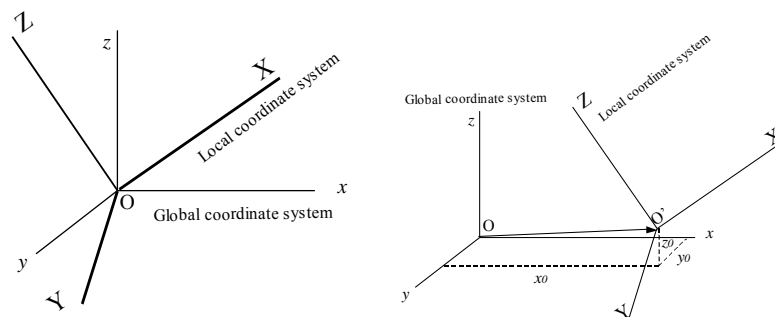
これに、式(3.2)で求めた測定機械偏心成分の補正を施すと、

$$\begin{aligned}X &= R \sin \phi \cos \theta' + x_e \cos \theta' + y_e \sin \theta' \\Y &= R \sin \phi \sin \theta' + x_e \sin \theta' - y_e \cos \theta' \\Z &= R \cos \phi\end{aligned}\tag{3.4}$$

を得る。この変換によって得られる測定座標は、測定器設置位置を原点とする局所座標系で与えられることに注意が必要である。

(3) 局所座標系から全体座標系への座標変換

図-3.5に示すように局所座標系から全体座標系への座標変換は、回転に対する座標変換と、平行移動に対する座標変換の二つの成分を有する。



(a)回転に対する座標変換 (b)平行移動に対する座標変換

図-3.5 局所座標系から全体座標系への座標変換の成分

回転に対する座標変換は、3次元レーザースキャナーの水平・鉛直設置精度の補正や、測定座北の修正等に使用される。なお、地球半径を考慮した巨視的測定ではジオイド³に起因する相対誤差が発生するが、この補正も回転に対する座標変換により行われる。一方、平行移動に対する座標変換は、局所座標原点を全体座標系に一致させる変換である。当該システムでは、全体座標系として世界測地系を採用する。この二つの座標変換は次式に示す *affin* 変換によって実施される。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix} = [T]\{X\} + \{x_0\} \quad (3.5)$$

ここで、

$\{x \ y \ z\}^T$: 全体座標系における壁面測量座標
 $[T]$: 回転座標変換マトリックス
 $\{X\}$: 局所座標系における壁面測量座標
 $\{x_0\}$: 局所-全体座標原点の相対距離補正項

式(3.5)中の回転座標変換マトリックス[T]成分や $\{x_0\}$ 成分等をどのように同定するかが、形状測定精度を大きく支配する。3次元レーザースキャナー測定では、これらの成分を形状測量データから逆に同定することが特徴の一つである。具体的には、壁面形状測定時に壁面近傍にモデル座標系における座標が明らかな目印(以下、ターゲットと呼ぶ)を複数個設置し、形状測定を行う。測定終了後、測定データの RGB 画像を参照して、このターゲットの測定座標を取得し、式(3.5)を基礎式とする逆問題を解くことでこれらの成分を求めるのである。したがって、測量座標系から世界座標系への座標変換は、3次元レーザースキャナーの水平・鉛直設置精度等よりも、ターゲットの設置精度ならびに設置方法に大きく依存する。

(4) 座標変換マトリックス成分の同定

回転座標変換マトリックスは、3次元レーザースキャナーの傾きを補正し、平行移動成分は局所座標系原点と全体座標系原点の相対的な距離補正を行うことは前節で述べた。回転座標変換マトリックスの成分は図-3.6 に示すように、複数個のターゲットを壁面形状測定時に設置し、これらターゲットの設置座標を目的値、測定から得られたターゲット座標を観測値とした逆問題を解くことで同定することができる。

³ ジオイドとは、地球物理学で用いる用語で、地球上にできる無数の鉛直線（重力方向）に直交する無数の水平面（重力の等ポテンシャル面）のうち高さ0に一致する面をいう。



図-3.6 壁面形状測定時の座標ターゲット設置状況

その算定方法は、測定に用いた3次元レーザースキャナーの測定機構や精度特性に依存するところが大きいため、実際の同定演算は3次元レーザースキャナー付属のソフトで行うこととするが、ここではその基本的な原理を簡単に説明する。

3次元レーザースキャナー座標系を (X,Y,Z) 、モデル座標系を (x^m,y^m,z^m) 、全体座標系を (x,y,z) とすると、図-3.7に示すように3レーザースキャナーの傾きは、 X 軸周りの回転角 ω 、 Y 軸周りの回転角 ϕ 、ならびに Z 軸周りの回転角 μ で表すことができる。

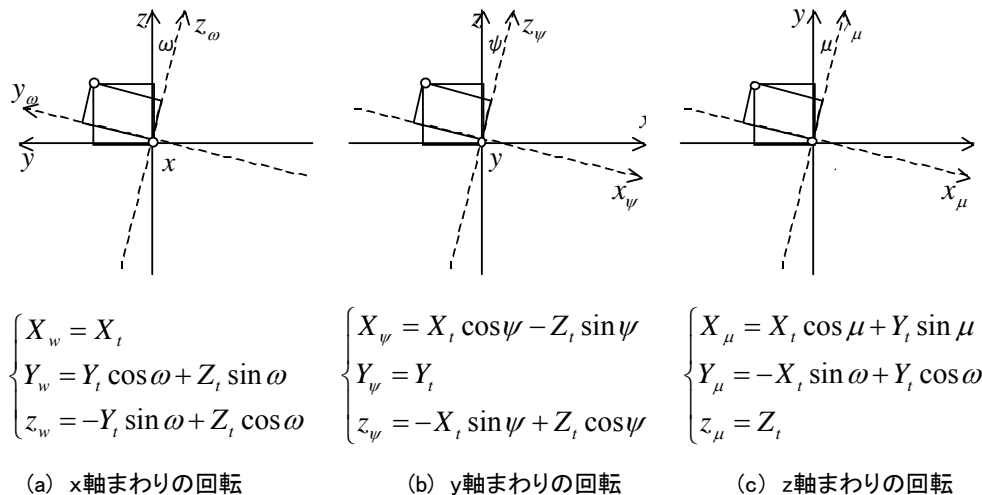


図-3.7 各平面内における回転変換

今、傾いていないレーザースキャナーで測定された壁面座標を (X_t, Y_t, Z_t) とし、 X, Y, Z 軸についてそれぞれ独立に ω, ϕ, μ だけ回転したときに得られる壁面座標を $(X_\omega, Y_\omega, Z_\omega), (X_\phi, Y_\phi, Z_\phi), (X_\mu, Y_\mu, Z_\mu)$

$(X_\omega, Y_\omega, Z_\omega)$, (X_μ, Y_μ, Z_μ) とすると、各平面内の回転変換は図-3.7のようなものであるから、以下のよ
うにマトリックス形式で表現することが可能である。

$$\begin{Bmatrix} X_\omega \\ Y_\omega \\ Z_\omega \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{Bmatrix} = R_\omega \begin{Bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{Bmatrix} X_\psi \\ Y_\psi \\ Z_\psi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{Bmatrix} = R_\psi \begin{Bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{Bmatrix} X_\mu \\ Y_\mu \\ Z_\mu \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \mu & \sin \mu & 0 \\ -\sin \mu & \cos \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = R_\mu \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

傾いているレーザースキャナーで測定された壁面座標 (X, Y, Z) を、傾きのないモデル座標系 (X_t, Y_t, Z_t) に変換するためには、式(3.6)~(3.8)で示される平面内回転の逆回転を z 軸、 y 軸、 x 軸の順に施してやればよい。すなわち、

$$\begin{Bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{Bmatrix} = R_\omega^{-1} R_\psi^{-1} R_\mu^{-1} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = R \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \quad (3.9)$$

ここで、

$$R = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix}$$

および、

$$R_\omega^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad R_\psi^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad R_\mu^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \mu & \sin \mu & 0 \\ -\sin \mu & \cos \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式(3.9)中の回転行列 R は直交行列だから、逆行列 R^{-1} は転置行列 R^t と等しい。すなわち、

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix}^{-1} = R^t = \begin{bmatrix} a_1 & a_4 & a_7 \\ a_2 & a_5 & a_8 \\ a_3 & a_6 & a_9 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

以上の関係は、前節で示した局所座標系からモデル座標系へ座標変換式(3.5)の右辺第1項を示すものであるから、式(4.5)は次のように書き換えることができる。すなわち、

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix} = [T]\{X\} + \{x_0\} \quad (3.5)'$$

式(3.5)'の座標変換成分を同定するためには、 $\{\omega, \phi, \mu, x_0, y_0, z_0\}$ の 6 成分を未知数として解く方法と、直交行列であることを利用して $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, x_0, y_0, z_0)$ の 9 成分(対称性を考慮して)を未知数とする方法とが考えられる。前者を未知数とする場合、式(4.6)～(4.9)に示すように式(3.11)が $\{\omega, \phi, \mu\}$ の implicit な式となるために非線形同定手法が必要となるとともに、ターゲットを適切に配置しなければ精度の良い座標変換成分の同定が難しい。

一方、後者を未知数とする場合、線形最小二乗法などの単純な線形同定手法を適用できる。この場合、式(3.5)'を以下のように変形することで問題を正規方程式化することができる。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & x_0 \\ a_4 & a_5 & a_6 & y_0 \\ a_7 & a_8 & a_9 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ c \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

式(3.11)によって問題が正規方程式化されると、座標変換マトリックスの正則性が担保されなくとも、特異値分解などの方法によって解を得ることが可能となる。数理的には座標変換マトリックスは正則性が担保されるが、測定データから与えられる状態方程式群は必ずしもこの限りではないため、測定状態を反映した座標変換マトリックス成分を求めるためには正則性の条件を緩和することが望ましい。

なお、正則性を緩和した場合、未知数は $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, x_0, y_0, z_0)$ の 12 成分となるため、形状測定時の作業負荷は増大するが少なくとも 12 点以上のターゲットを設置する必要があることとなる。なお、実際の測定時にターゲットに与えられる座標系は立坑中心を x-y 平面

の原点とし、z-座標原点を掘削開始深度とするモデル座標系である。このため、システムではモデル座標系原点をさらに世界測地系原点に変換する処理を行っている。

(5) 円筒座標系へのデータ変換

形状測定データを一定間隔の参照要素へ割り付けるために、世界測地系の直交座標系に変換された測定データを円筒座標系に変換する。ただし、円筒形座標データは、参照座標への割付、および壁面平面展開のみに使用されるものであるから、必要とする座標成分は円周角 θ のみである。すなわち、

$$\theta = \text{Arcsin} \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (3.12)$$

ここで注意しなければならない点は、式(4.12)で与えられる円周角 θ は3次元レーザースキャナーで測定された球座標系成分の円周角 θ' とは必ずしも一致しないことである。すなわち、3次元レーザースキャナーがわずかに傾いて設置された場合などの水平面走査軌跡は、世界測地系の水平面と一致しないからである。

3.2.3 プロダクトデータモデルにおけるデータ再配列と欠損データの補間

図-3.8 は3次元レーザースキャナーによる立坑壁面形状測定の基本精度特性を概念的に示したものである。図に示すように、3次元レーザースキャナー測定ではレーザー射出高さと同じ高さ付近では高密度なスキニングが実施されるのに対し、レーザー射出高さから離れるに従いスキニング密度が低下する。これは、形状測定間隔が大きくなることと同意である。

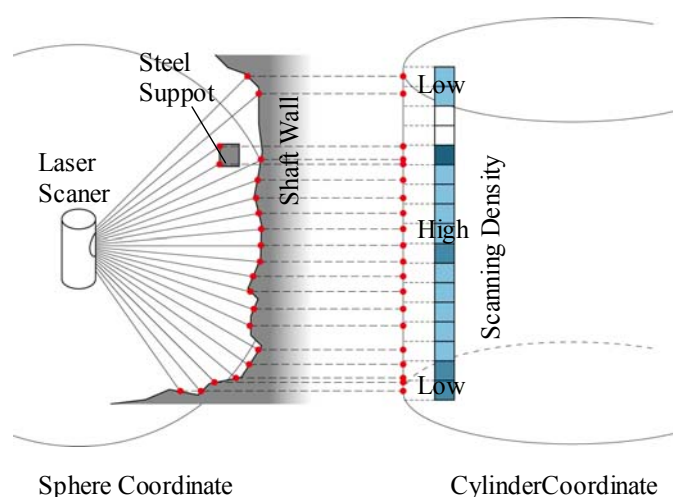


図-3.8 3次元レーザースキャナーの立坑壁面形状測定精度の概念図

3次元レーザースキャナーは一定の水平・鉛直角度間隔で形状測定を行うため、平滑な円柱面を測定したとしても鉛直方向に測定精度のばらつきが不可避免的に発生する。このことは、Point Cloud 法のような3次元形状描画を行う上では特に問題となることはないが、壁面展開図や3次元形状上に各種データを貼り付ける際に問題となる。また、直交座標系、もしくは円筒座標系において測定間隔が不揃いなデータをそのまま保存すると、データ保存形式が複雑となるため、データ読み込み、データ演算・処理を著しく遅延させる可能性が高い。このため、形状測定データを一定間隔の格子メッシュに割り付け、これを基礎データとして保存することを考えた。

瑞浪超深地層研究所主立坑工事における形状測定では、水平面内一周につき 6,000 点の形状データが採取されている。これは測定角度間隔 0.06° に相当し、瑞浪超深地層研究所主立坑の設計掘削壁面上での円周方向測定距離間隔 ΔL は以下ようになる。

$$\Delta L = \frac{D\pi}{6000} = \frac{7,300\pi}{6000} \cong 3.82\text{mm} \quad (3.13)$$

式(3.1)において $D=7,300\text{mm}$ は瑞浪超深地層研究所主立坑の設計掘削断面直径を示す

ものである。この測定距離間隔 ΔL は、当該測定で実現される最も精密な測定精度間隔 ΔL_{min} と考えてよい。なぜなら、設計覆工厚を確保するために、実際の立坑掘削断面は設計掘削断面径よりも大きく掘削されるためである。

このことから、**図-3.9** に示すような一辺の長さ ΔL_{min} の正方形参照要素(以下、ピクセルと呼ぶ)を考え、瑞浪超深地層研究所主立坑の設計掘削半径($R=3.65\text{m}$)で展開した立坑壁面領域をこのピクセル寸法で分割し、測定された (x,y,z) 座標、および RGB と反射強度値を対応するピクセルに再配列することを考えた。

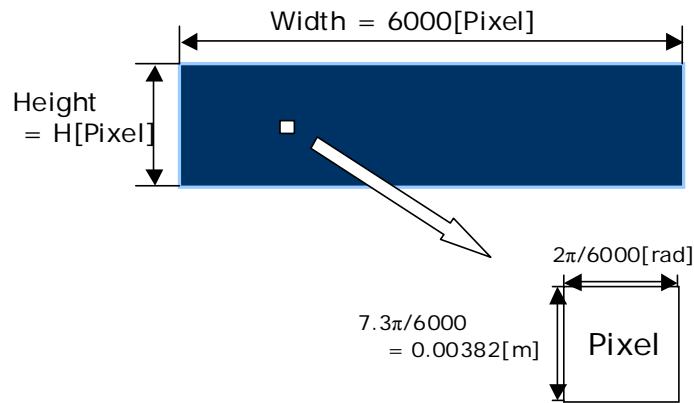
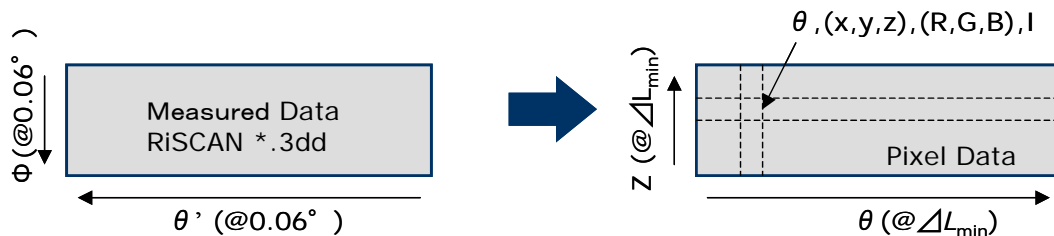


図-3.9 掘削半径で展開した立坑壁面への参照要素の割付

前述のように、3次元レーザースキャナーは水平面内につき測定角度間隔 0.06° で形状測定を行うから、平滑な立坑壁面(設計掘削断面)への投影を考えた場合、同一高さにおいてデータの抜けや重複は生じないが、鉛直方向に関してはこの限りでなく、測定領域の上部や下部ではデータの抜けが生じるピクセルが不可避免的に発生する。しかし、少なくとも当該測定で実現される最も精密な測定精度間隔 ΔL_{min} でピクセルを分割している以上、同一ピクセルに二つの測定データが重複することはない。いいかえれば、測定したデータをすべて順序良く、並び替えることが可能となる。これは、データの欠落ピクセルも含めたデータ保存を行うこととなるが、規則的にデータを扱えることで処理速度の向上を図ることが可能となり、コーディングも容易となる。



(1)レーザースキャナー測定データのデータ配列

(2)PDM におけるデータ配列

図-3.10 データ再配列の概念

また、このようなデータ再配列法は結果として保存すべきデータ容量を大きく低下させることにつながる。3次元レーザースキャナーで測定されたデータは、**図-3.10(1)**のように測定角 θ' 、 ϕ に準じて格納されているが、前述の再配列を行うことで**図-3.10(2)**のようにピクセルの水平展開角測定角 θ と参照要素の深度 Z に準じて各種データを格納することが可能となる。

これは円筒座標系にデータを置き換えて保存することと同義であり、この形式で保存されたデータを読み込むだけで、直ちに壁面展開図の表示が可能となる。いいかえれば、ピクセルの配列が設計壁面の円筒座標そのものであるため、壁面形状測定点の直交座標データと円周角 θ のみを保存すれば良いこととなる。ただし、測定角 θ' と再配列された円周角 θ は同一ではないことに注意が必要である。

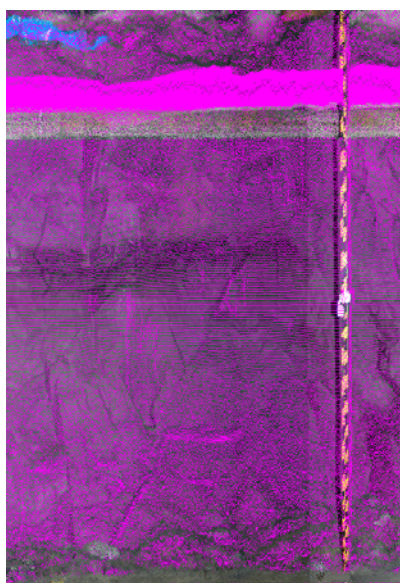


図-3.11 参照要素上に割り付けられた測定 RGB データの例

この方法で測定形状を参照要素に割り付けた場合、参照要素のデータが空(Null)となる要素が生じる。**図-3.11**は、測定されたRGBデータを参照要素に割り付けた例を示すものであり、測定データが欠落したピクセルをピンク色で表示している。**図-3.11**を見ると、測定の上下部でデータが欠落した参照要素の密度が大きくなっていることが理解できる。これは、**図-3.8**に模式的に示したデータ測定精度のばらつきが実際に発生していることを示すものである。なお、RGB データと座標データ(x,y,z)、および受光強度は同一測定点で測定されるから、データ測定密度は同一である。

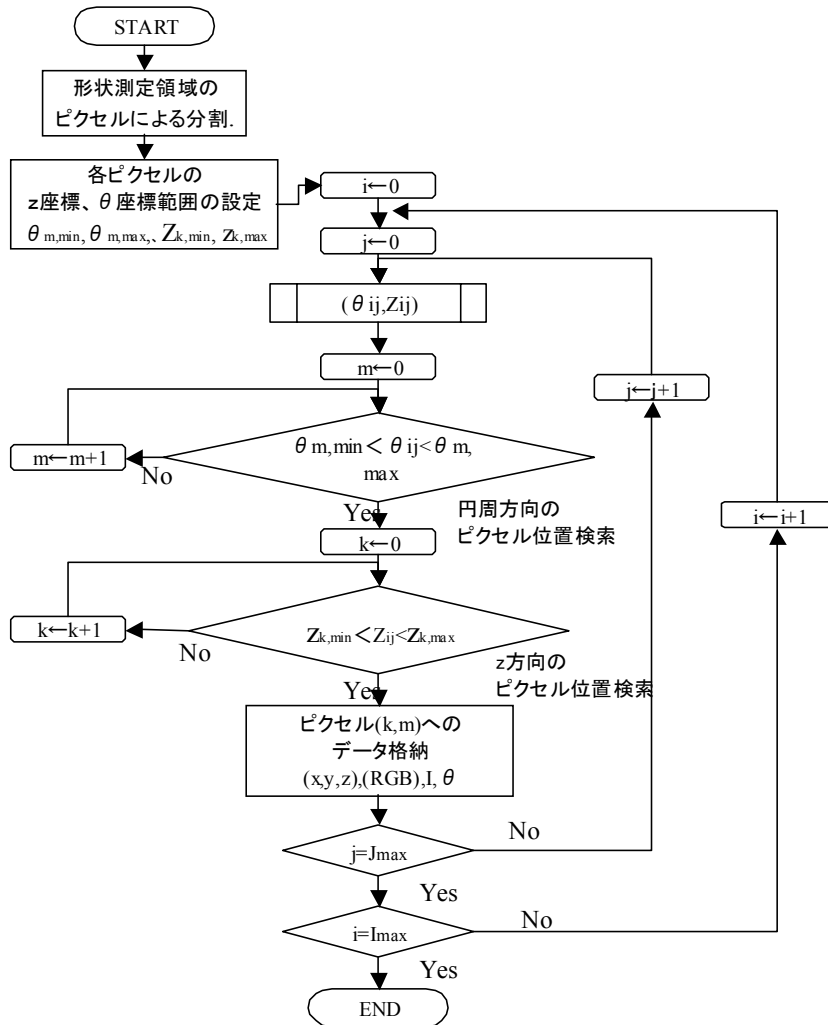


図-3.12 測定データ再配列の流れ

ここでは、座標データの補間や修正は必要最低限とすることとしたが、壁面画像 RGB データや受光強度データは種々の解析の参照画面に供せられるため、図-3.11 のように不鮮明な画像では解析を行う際に種々の不都合が生じるものと考えられた。このため、欠落データの補間も併せて実施することとした。データ再配列の流れは図-3.12 のようなものである。

まず、図に示すように当該測定範囲を一辺の長さ ΔL_{min} のピクセルで分割し、各ピクセルの z 座標、 θ 座標範囲を設定する。この段階では、3次元レーザースキャナー走査順にデータが並んでいるから、その順に個々のデータの (θ, z) 座標を取り出し、そのデータに対応するピクセル P_{km} を検索し、測定された壁面座標 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 、画像データ (R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}) 、反射強度 I_{ij} 、および θ_{ij} をこのピクセルに割り付ける。図-3.12 では、対応するピクセルの検索方法を逐次的に示しているが、実際のコーディングでは高速化のために選択的な検索手法を採用した。

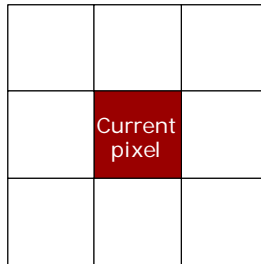
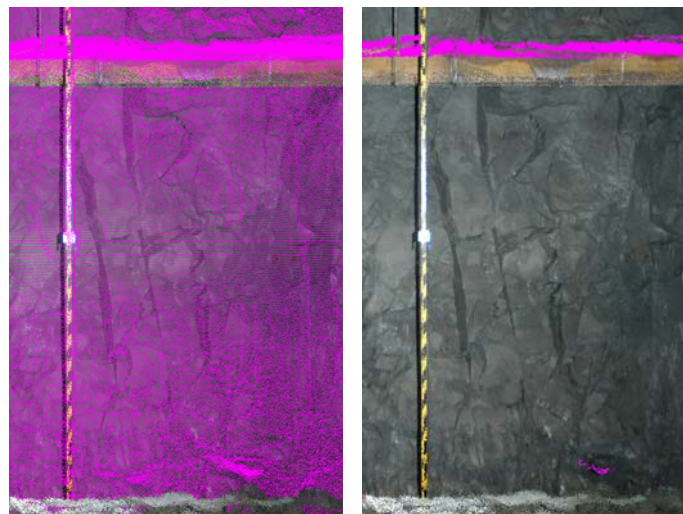


図-3.13 補間対象ピクセルとその隣接ピクセル

欠落データの補間方法は、種々の方法が提案されているが、本システムでは試行錯誤の結果、以下のような方法を採用することとした。図-3.12 に示すように、データ補間対象となるピクセル(測定データが欠落したピクセル)には必ず隣接する 8 個のピクセルが存在する。データの欠落は連続して発生することが多いが、周辺ピクセルに一つでも測定値を持つピクセル(有効ピクセル)が存在するならば、有効ピクセルが持つ値の算術平均をデータ補間対象ピクセルの値とする。この補間法は、ある場所での測定データの持つ意味を最大限尊重するとともに、補間データの信頼性をできる限り損なわないよう考えたものである。



(a)データ補間前の壁面画像 (b)データ補間後の壁面画像

図-3.14 データ補間前後の壁面画像の比較

この補間法の妥当性を検証するため、図-3.14 に補間前後の壁面画像データを比較して示す。同図より、補間により壁面画像は大幅に改善され、各種解析の参照画面に供するに足る情報が得られたと判断した。残念ながら、鋼製支保工上部全体と画面右下一部に、データ欠落集中部が存在するが、実用上特に問題ない程度の範囲である。なお、鋼製支保工上部全体でデータ欠落が生じるのは、図-3.8 に模式的に示したように、鋼製支保工が測定レーザーを反射・遮蔽するためであり、現状の形状測定法では避けられない。

3.2.4 プロダクトデータモデルにおける深度方向の整合性確保

瑞浪超深地層研究所立坑工事では、各測定深度区間が表-3.1 の形式で与えられる。なお、測定時の深度設定は、深度が既知のターゲットを測定区間内に配置することで行われる。したがって、各深度間の整合性はこのターゲットの設置精度に大きく依存する。

表-3.1 深度対応表の形式(再掲載)

プロジェクト区間	上限深度 UD	下限深度 LD
step43	GL.-51.600	GL. -52.900
step44	GL.-52.900	GL.-54.200
step45-46	GL.-54.200	GL. -56.800
step47-48	GL.-56.800	GL.-59.400
step49-50	GL.-59.400	GL. -62.000
step134-135	GL.-167.400	GL. -167.400
step136-137	GL.-170.000	GL. -170.000

いま、ターゲットの設置精度が十分信頼のおけるものであれば、表-3.1 の深度対応表に従い各ステップの測定データに含まれる測定区間外のデータを削除するだけで、各測定事象間で整合性を確保することのできるPDMデータ作成することが可能である。したがって、その処理はソフト上の自動処理に委ねることができる。

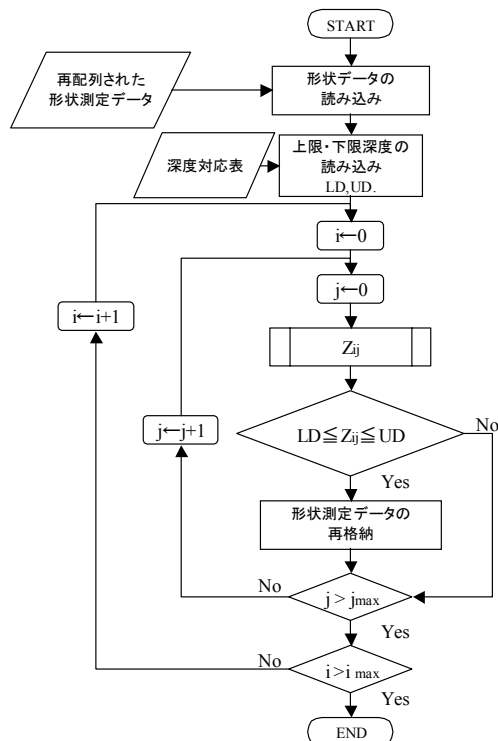


図-3.15 深度切断作業の流れ

一方、ターゲット設置精度に何らかの問題がある場合、合成された形状データは深度境界部でデータの重複や欠落などの問題が生じ、データの修正が必要となる。しかしながら、その不具合はソフト的な処理により解消できるものではなく、測定者の主観に委ねこれを修正するしかない。このため、深度切断前の形状データも測定事象毎に保存することとした。

図-3.15 に深度切断作業のフローを示す。当該作業は再配列された形状測定データを深度対応表に指定された深度で切断するだけであるため、作業の流れも、図に示すような単純なものである。

3.2.5 データの間引きとデータ登録・保存

地質情報の評価では、各深度で測定された壁面形状データを深度方向に連結・加工し、描画することが重要である。ユーザーが実施する作業を想定すると、壁面に現れる微細な地質構造を詳細に把握したい場合は測定精度限界に近い描画精度が求められるのに対し、断層・破砕帯等の巨視的構造の把握では、描画精度よりも複数の測定データ相互間の整合性、ならびに大容量データの高速度描画が求められると考えられる。すなわち、全く相反する要求性能を一つのシステムにおいて実現することが求められている。

高精細描画に関しては、前述したように測定全データの保存、RBG データ補間による壁面画像の高精細化を考えた。ここでは、広範囲の画像情報を高速描画するための測定データの間引き(圧縮)と、その登録・保存に関して記述する。

具体的には、本システムでは、**図-3.16** に示すように 4 段階に測定データを圧縮し、表示領域の寸法(表示倍率)に応じて最適な圧縮率で画像表示を行うことを考えた。これは、描画精度は描画モニターのドット数で支配されるため、精密な測定データをそのまま用いて広範囲の描画を実施したとしても、描画精度には反映されず、いたずらに描画処理時間を遅延させるためである。したがって、描画領域と描画モニターのドット数に応じた圧縮率で描画を実施することが描画効率上望ましく、また画像解析による地質精査作業の精度も保証される。

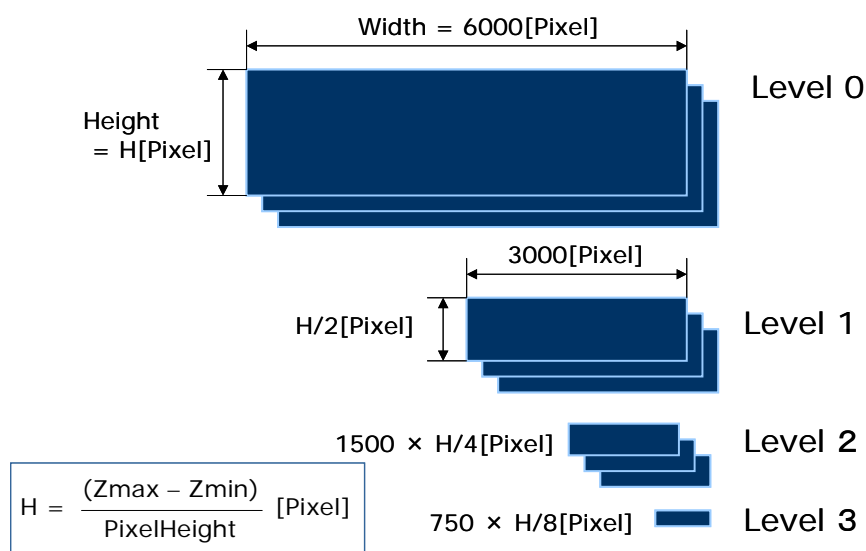


図-3.16 データの圧縮レベル

前述の処理方法において、データ圧縮作業をデータ読み込みのたびに行うと、全体の処理速度を向上させることが難しいため、データ変換作業時にあらかじめ圧縮したデータを作成し、これを保存することとした。すなわち、指定された描画領域(表示倍率)に対応する圧縮済のデータを直接読み込み、これを深度方向に連結することで全体的な描画の高速化を図ることとした。

実際のデータ圧縮は、図-3.16 に示すように圧縮率を Level 1 として 1/4、Level 2 として 1/16、さらに Level 3 として 1/64 までを考えた。例えば、Level 1 では左右 2 ピクセル、上下 2 ピクセルを一つのピクセルに統合し、これらのピクセルに格納された測定データの平均値を統合されたピクセルの代表値とする。ただし、測定データの欠落するピクセルは、RGB データを除いて、平均値算定の対象としない。また、すべてのピクセルで測定データが欠落している場合、統合ピクセルの代表値も Null とする。以下、同様の手続きで Level 1 のピクセルを統合し Level 2 を、Level 2 から Level 3 を作成することとした。

このように、圧縮したデータ群を一つの塊として、図-3.16 の形式で保存する。すなわち、変換された形状測定データは任意のフォルダー(図-3.16 では Root Folder)内にすべて保存され、そのフォルダーの直下には、全形状測定プロジェクトを管理する XML ファイル (ファイル名:LSDPS.xml)と、それぞれの形状測定プロジェクトの変換データ・ファイルを保存するフォルダーが存在する。変換データ・ファイルが保存されるフォルダー名は、図-3.17 に示されるように形状測定に関連する掘削ステップをフォルダー名とした。これは、形状測定プロジェクト名の命名法と同一で、STEPxxxxyy である。

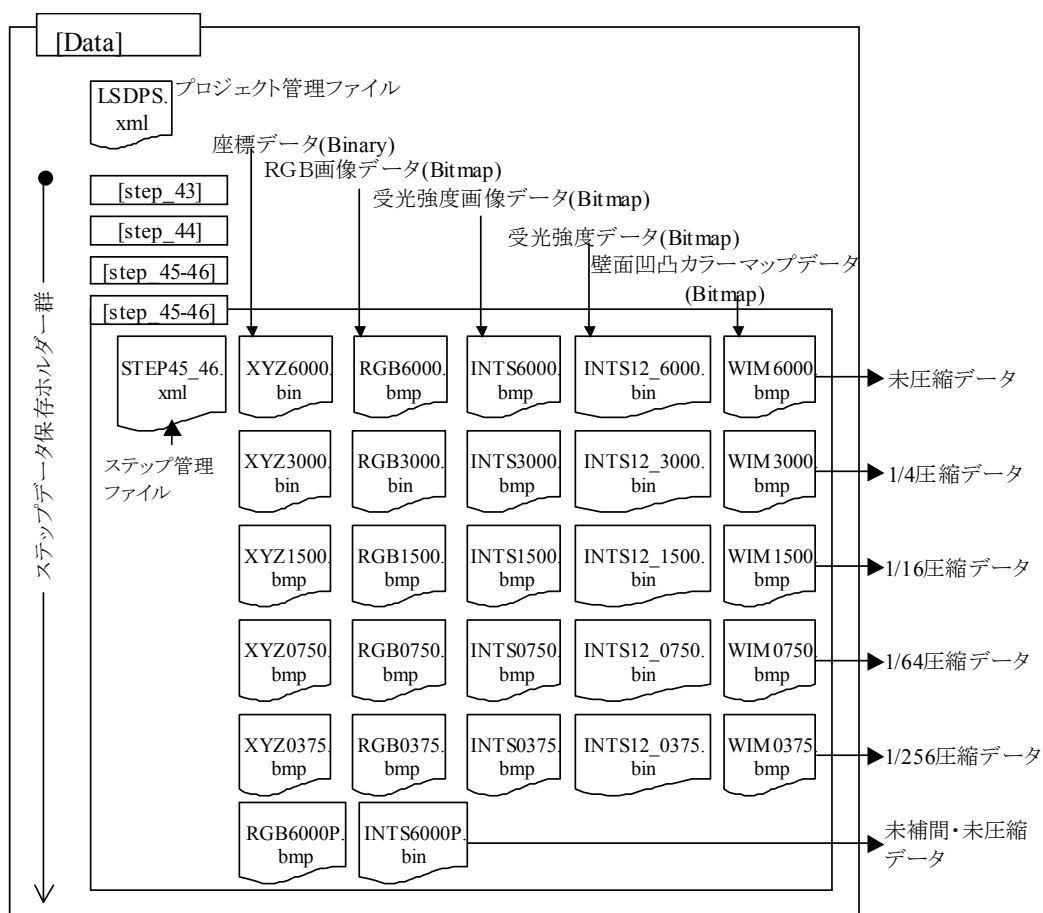


図-3.17 形状測定データ・圧縮データの保存形式

このプロジェクト・フォルダー内には、各形状測定プロジェクトの変換データを管理するための XML ファイルと変換された形状測定データが保存される。この XML ファイルを以下ではステップ管理ファイルと呼び、フォルダー名と同一のファイル名を与えるものとした。なお、そのセカンダリー・ネームは.xml である。

壁面形状座標データはバイナリー形式で保存され、そのファイル名はいずれのプロジェクト・フォルダー内でも XYZxxxx.bin データである。また、壁面 RGB データと受光強度データはいずれもビットマップ・フォーマットで保存され、それぞれ RGBxxxx.bpm、および INTNSxxxx.bpm のファイル名を持つ。

ここで、xxxx は圧縮率に対応した数字で未圧縮の場合(level 0)に 6000、level 1,2,3 に対してそれぞれ 3000,1500,0750 の値をとり、これらの数値は各圧縮率における円周方向ピクセル数を示すものである。なお、未補間の壁面 RGB データと受光強度データは、それぞれファイル名 RGB6000p.bpm、および INTNS6000p.bpm とし、末尾に p(primitive)の文字を付けた。なお、実際のデータ保存に当たっては、ファイル群をさらにタイル分割し、単位のファイルサイズを均等化した。これは、必要箇所だけを読み込むことでデータ入力、ならびに描画の高速化を図るためである。

3.3 LSDPS におけるデータ・ロギングの実際

レーザースキャナーで測定された形状データを PDM 化する目的は、単にデータ表示やデータ検索に供することにあるのではなく、測定された形状データから設計/施工/維持管理にも供することのできるデータを抽出することにある。本研究では、瑞浪超深地層研究所立坑工事におけるレーザースキャナーデータを利用して以下の用途を設定した(1.2節(3))。

【設計・施工】

- ⑤ 設計掘削線と実際の掘削形状との乖離を評価し、以降の発破方法、もしくは掘削方法の改善に供する。
- ⑥ 断層や破砕帯等の地質弱部の構造を3次元的に把握することで、変状対策工設計の設計モデルに供する。
- ⑦ 実際の掘削形状から覆工コンクリート打設量を算定することで、材料ロスの低減を図る。

【維持・補修】

- ⑧ 長期的に変状を発生させる原因となり得る地質構造弱部等を PDM から抽出することで維持補修計画を立案する。
- ⑨ 上記補修・補強工設計の設計モデルに供する。

本章では、上記の用途を実現する基本機能である PDM 画像上の任意点の座標取得機構の概要を示し、これを利用したその他の機能の設計とその実際を示す。

3.3.1 LSDPS における座標取得機能の基本構造

LSDPS では、画像からのデータ取得、受光強度取得、ならびに走向・傾斜計算を実装した。これらの解析機能は、前節で示したデータ構造を利用して設計するものである。

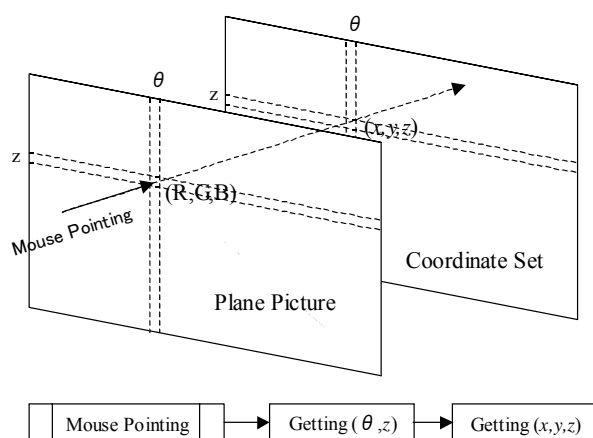


図-3.18 座標データ取得法の内容

本システムでは形状測定データを座標変換後、 $z-\theta$ の2次元配列に再配列する。この再配列配置は、形状座標データ(x, y, z)、画像データ(R, G, B)、受光強度データ I 、ならびに壁面凹凸カラーマップデータ WIM に共通したものである。

したがって、2次元平面展開された RGB 画像上の一点をマウス等のポインティング・デバイスで指定すると、その平面座標(P_z, P_θ)が直ちに取得される。この平面座標は、前節で定義したピクセル座標系として与えられるが、**図-3.18** に示すようにデータ登録時にそれぞれのピクセル座標系に対して形状座標データ(x, y, z)、画像データ(R, G, B)、受光強度データ I 、ならびに壁面凹凸カラーマップデータ WIM が割り付けられているため、当該点の各種データを直ちに取得することが可能である。

さらに、このデータ構造は、1対1対応であるため、作業画面が RGB 画像でなくても同様の操作を行うことが可能である。このように、データの再配列を行うことでデータ検索や描画の高速・効率化だけでなく、各種データ処理も簡素化することができる。なお、画像の圧縮率により同じ点の形状座標が、若干変化する点には注意が必要である。これは、圧縮時に形状座標の算術平均を行っているためである。測定値そのものを取得したい場合には、Level 0 の RGB 画像を用いればよい。

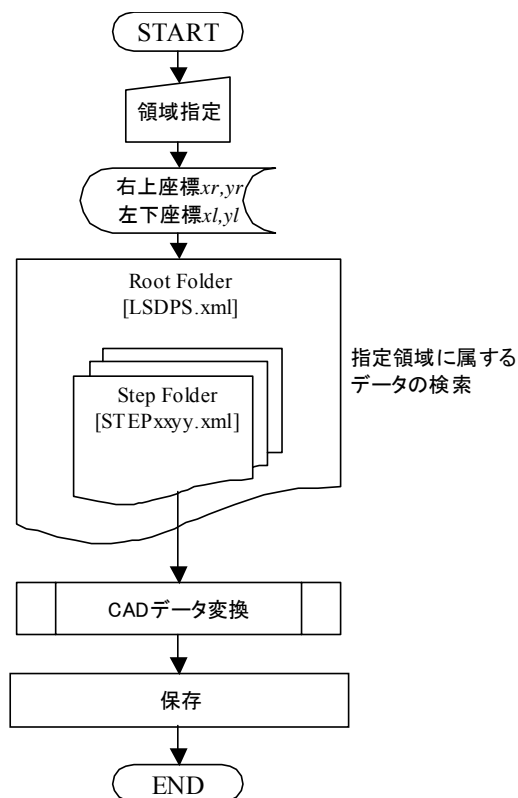


図-3.19 形状座標データの CAD 形式出力機能の流れ

一方、指定された任意領域の形状座標データ等を CAD 形式(ここでは dxf ファイル形式とした)や csv 形式で出力する機能は、①任意領域の指定機構、②任意領域に属するデータの検索機構、ならびに③ファイル形式の変換機構の3つから構成される。

このうち、③に関しては dxf や csv 形式へのデータ変換ドライバーが各種整備されており、ここではそれらの中から最適なドライバーを採用するものとした。また、①、および②はデータ処理プラットフォーム上で描画領域を指定する機構と全く同一のものである。

3.3.2 掘削体積計算と壁面凹凸画像作成

(1)掘削体積計算

瑞浪超深地層研究所主立坑における壁面形状測定の間隔が $\Delta\theta = 0.06$ 度と著しく密であることから、近似積分により掘削体積を求めることとした。すなわち、**図-3.20** に示すように各格子要素に分割された各高さごとに、測定された掘削変形 r_i からその高さの断面積を求め、これに格子の高さ Δz を掛けることで、その高さの体積 ΔV を求め、これを足し合わせることで測定対象区間の掘削体積 V を求めることとした。

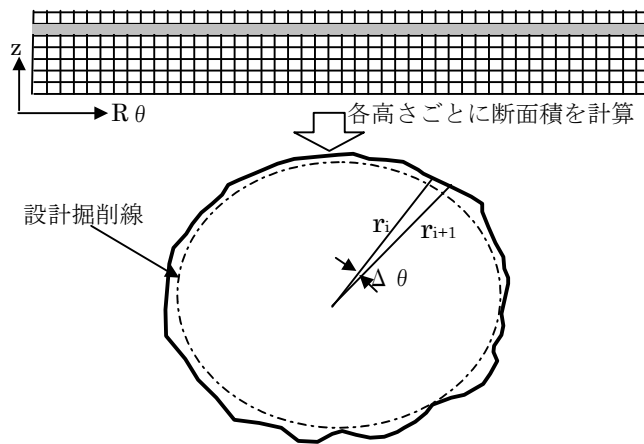


図-3.20 掘削体積計算の概念

各高さにおける断面積 A_k は次式に示す全身積分により求める。

$$A_k = \sum_i \frac{1}{2} r_i r_{i+1} \Delta\theta \quad (3.14)$$

また、次に示す関係から各高さにおける掘削体積 ΔV の高さ方向の重ね合わせは、平均の掘削面積 A_{avr} を求め、これに測定対象区間高さ H を掛けて求めるものとした。

$$V = \sum_{k=1}^{LawMax} A_k \Delta z = \left(\frac{\sum_{k=1}^{LawMax} A_k}{LawMax} \right) (H_{max} - H_{min}) = A_{avr} H \quad (3.15)$$

ここで、
 $LawMax$: 測定対象区間内の最大列数
 H_{max} : 測定区間の最小深度
 H_{min} : 測定区間の最大深度

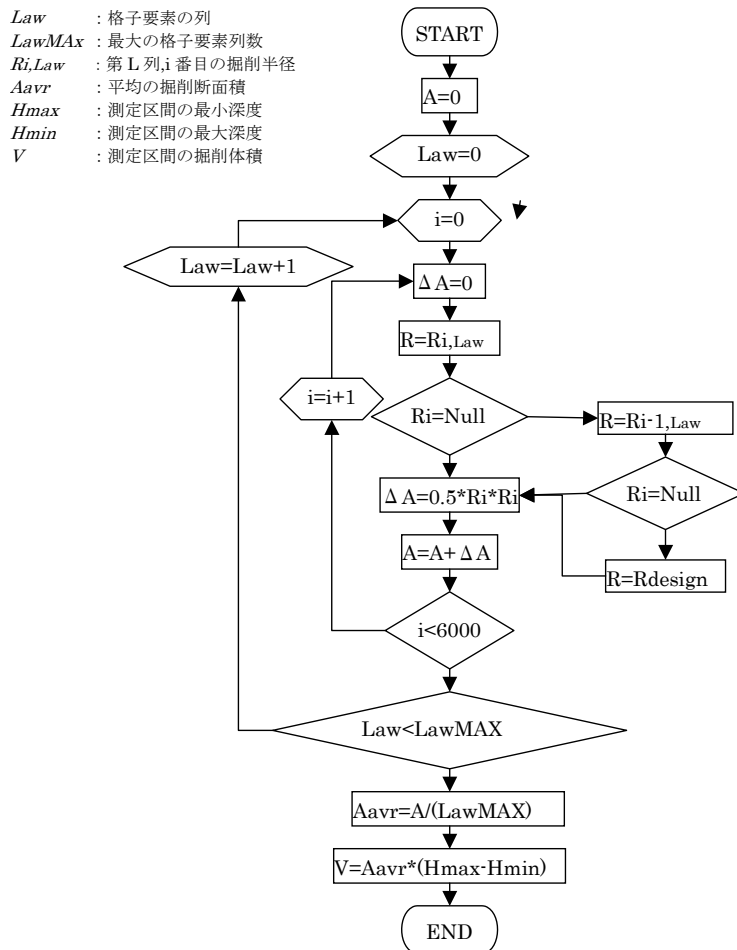


図-3.21 区間掘削体積算定のフロー図

一方、格子状に分割された任意の要素に必ず測定データが割り付けられるものではない。したがって、測定半径 r_i が存在しない格子要素が存在する。このような場合、隣接する要素の測定半径 r_{i-1} を用いて $r_i=r_{i-1}$ とするものとした。また、 r_{i-1} も存在しない場合は、設計掘削半径 r_{dsgn} を用いて $r_i=r_{dsgn}$ とする。図-3.21 に区間掘削体積算定のフロー図を示す。

このようにして、算定された区間体積は測定区間の対象深度、測定区間の総格子要素数、ならびに計算に用いた有効格子数とともにファイル `Volume.csv` に保存される。表-3.2 に深度 51.6m～200.2m 区間の算定結果を示す。

表-3.2 深度 51.6m～172.4m 区間の掘削体積算定結果一覧

測定イベント	測定対象区間		区間掘削体積(m ³)	有効要素数	区間総要素数
	最大深度(m)	最小深度(m)			
Step043	52.9	51.6	57.8236	1436653	2040000
Step044	54.2	52.9	63.8303	1531540	2046000
Step045-046	56.8	54.2	132.8132	2888325	4080000
Step047-048	59.4	56.8	124.4853	2844893	4080000
Step049-050	62.0	59.4	122.1319	2822972	4080000
Step051-052	64.6	62.0	120.6069	2897114	4080000
Step053-054	67.2	64.6	116.7391	2859783	4086000
Step055-056	69.8	67.2	117.3397	2810165	4080000
Step057-058	72.2	69.8	112.4375	2608168	3768000
Step059-060	74.7	72.2	110.8937	2761491	3924000
Step061-062	77.1	74.7	107.9574	2642636	3768000
Step063-064	79.7	77.1	118.3939	2828354	4080000
Step065-066	82.3	79.7	119.2230	2836170	4080000
Step067-068	84.7	82.3	112.1077	2681029	3768000
Step069-070	87.1	84.7	112.9010	2652151	3768000
Step071-072	89.5	87.1	113.3464	2633977	3768000
Step073-074	91.9	89.5	117.8348	2685630	3768000
Step075-076	94.5	91.9	121.4782	2866803	4080000
Step077-078	96.6	94.5	104.2167	2380460	3294000
Step079-080	98.8	96.6	159.9495	2413954	3456000
Step081	100.2	98.8	119.9776	1441198	2196000
Step082-083	102.6	100.2	121.4901	2630713	3768000
Step084-085	105.2	102.6	124.7590	2965424	4080000
Step086-087	107.8	105.2	119.9781	2869601	4086000
Step088-089	110.4	107.8	126.4930	2855391	4080000
Step090-091	113.0	110.4	120.1154	2936900	4080000
Step092-093	115.6	113.0	119.7907	2899236	4080000
Step094-095	118.2	115.6	122.0113	2940222	4086000
Step096-097	120.8	118.2	118.7858	2967654	4080000
Step098-099	123.4	120.8	120.4558	2941341	4080000
Step100-101	126.0	123.4	130.2354	2936977	4080000
Step102-103	128.6	126.0	124.1737	2933508	4080000
Step104-105	131.2	128.6	121.5069	2959362	4086000
Step106-107	133.8	131.2	121.5290	2908858	4080000
Step108-109	136.2	133.8	128.2911	2576732	3768000
Step110-111	138.8	136.2	136.6688	2691572	4080000
Step112-113	141.4	138.8	138.3299	2854177	4080000
Step114-115	144.0	141.4	134.3815	2818420	4080000
Step116-117	146.6	144.0	138.9312	2708102	4086000
Step118-119	149.2	146.6	134.0468	2618336	4080000
Step122-123	154.4	151.8	118.4104	2917066	4080000
Step126-127	159.6	157.0	131.6145	2798461	4080000
Step128-129	162.2	159.6	129.4898	2828707	4080000
Step130-131	164.8	162.2	124.0634	2715431	4080000
Step132-133	167.4	164.8	136.8488	2718949	4080000
Step134-135	170.0	167.4	123.7060	2826129	4086000
Step136-137	172.4	170.0	112.4662	2653116	3768000
Step138-139	174.8	172.4	102.0461	2610019	3762000
Step140-141	177.4	174.8	112.4934	2645855	4086000
Step142-143	180.0	177.4	108.4917	2663001	4080000
Step144-145	182.4	180.0	115.1594	2643665	3768000
Step146-147	184.8	182.4	117.4088	2625631	3768000
Step148-149	187.2	184.8	114.8008	2629845	3768000
Step150-151	189.6	187.2	109.5278	2720850	3768000
Step152-153	192.0	189.6	111.7225	2702048	3762000
Step154-155	194.4	192.0	110.3330	2783922	3768000
Step156-157	196.6	194.4	102.2577	2502329	3456000
Step158-159	198.4	196.6	105.1156	1990590	2826000
Step160-161	200.2	198.4	142.0337	1814619	2826000

(2)壁面凹凸画像の作成

壁面凹凸画像は、掘削壁面の設計掘削線からの離れをカラーマップで表した画像を意味するものである。ここでは、立坑中心から掘削壁面までの距離 r_i が設計半径 r_{dsgn} 以下の格子要素を R(赤)で、また設計掘削線 r_{dsgn} よりも 0.5m 以上離れた格子要素を青で表示し、その間の距離は RGB で按分した。すなわち、各格子要素の表示色 $cmcH$ は以下の式で決定される。

$$cmcH = \frac{r_i - r_{dsgn}}{crange} (cmcMAX - cmcMIN) + cmcMIN \quad (3.16)$$

ここで、
 $crang$: カラーマップ表示する設計掘削線からの離れ = 0.5m
 $cmcMIN$: 表示色の RGB 最小値 = 0(Red)
 $cmcMAX$: 表示色の RGB 最大値 = 239(Blue)

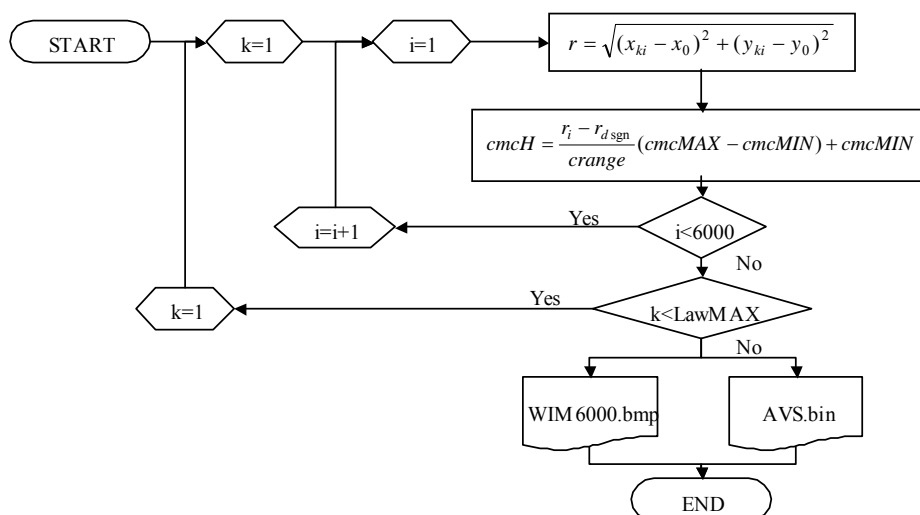


図-3.22 壁面凹凸画像作成のフロー

図-3.22 に、壁面凹凸画像作成のフローを示す。図に示すように、作成された壁面凹凸画像は WIM6000.bmp として保存されるが、これとは別に各種のデータ処理を市販の可視化ソフト等で処理することを目的にバイナリーファイル AVS.bin も作成する。このファイルの書式は binary float 4bite で、以下のデータが収められている。

$X, Y, Z, r, \Delta r, R, \theta$

ここで、 X, Y, Z : 全体座標系における立坑壁面の測定座標

- r : 立坑中心から壁面までの距離
- Δr : 設計半径からの離れ
- $R \theta$: 円周方向に展開した場合の南からの距離(設計半径上で)

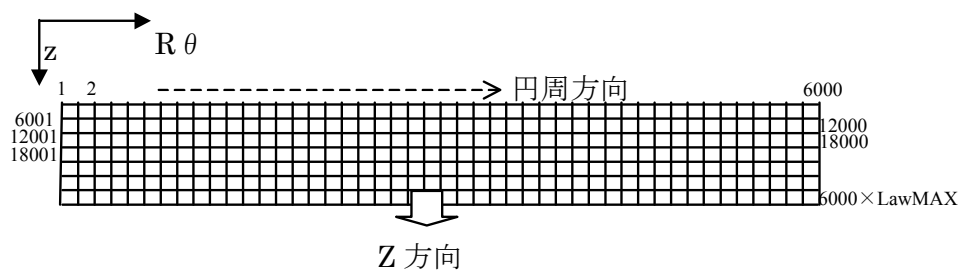


図-3.23 AVS.bin のデータ格納方向

なお、その格納順序は図-3.23に示すものであり、測定対象区間右上から円周方向に格納し、その後、順次、下部へと移行しつつデータの格納を行う。

3.3.3 12ビット受光強度データの正規化

レーザースキャナーで測定される受光強度データは、12ビットのグレースケールデータとして採取される。しかしながら、一般的なグレースケールデータは8ビットであるため、採取された受光強度データを、そのままパーソナルコンピュータ等で処理することができない。一方、瑞浪超深地層研究所立坑工事でこれまでに採取された受光強度データのほとんどは、12ビットグレースケール4096階調中の960～1440(8ビットグレースケール256階調中では60～90)の範囲にあるため、データ間の差異を画像から読み取ることが難しかった。このため、測定された12ビットデータをそのまま保存するとともに、表示の上下限値を任意に設定し、その範囲にあるデータを按分して表示できるように表示機能を付加するものとした。

まず、12ビットグレースケールデータを、24ビットBitmap画像データとして図-3.24に示すように保存する。すなわち、RGBをそれぞれ固有情報として生成することで擬似的に12ビットの格納を実現することを考えた。

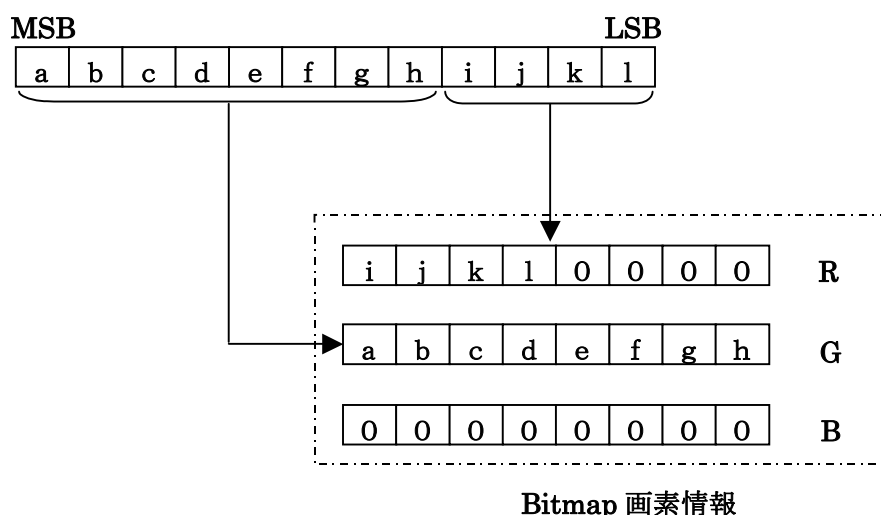


図-3.24 12ビットグレースケールデータの保存

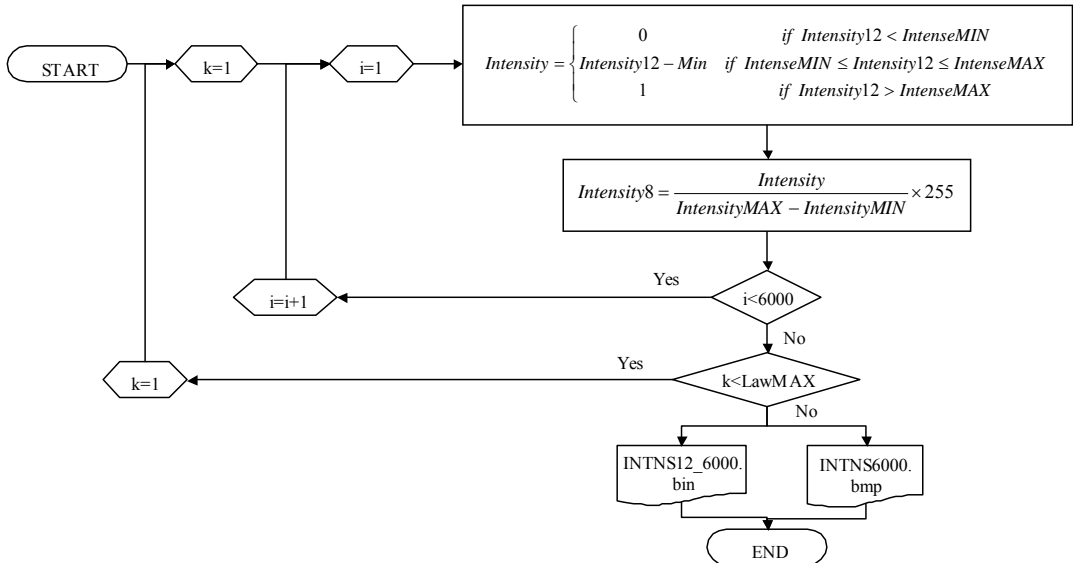
上記形式で格納された受光強度をシステム上で表示する場合には、ビット列を再構成して取り扱うものとする。すなわち、現在の描画システムは12ビットのグレースケールは表示できないため、12ビットの受光強度データ *Intensity12* を以下の手順で8ビットの受光強度データ *Intensity8* に変換することとした。

まず、指定された描画のための最大受光強度 *IntenseMAX* と最小受光強度 *Intense MIN* の範囲の中に、当該の格子要素の受光強度 *Intensity12* が按分される値 *Intensity* を求める。このとき、最大受光強度 *IntenseMAX* よりも大きな受光強度に対しては *Intensity =1* を、また最小受光強度 *IntenseMIN* よりも小さな受光強度に対しては *Intensity=0* を割り付けるものとする。すなわち、

$$Intensity = \begin{cases} 0 & \text{if } Intensity12 < IntenseMIN \\ Intensity12 - Min & \text{if } IntenseMIN \leq Intensity12 \leq IntenseMAX \\ 1 & \text{if } Intensity12 > IntenseMAX \end{cases} \quad (3.17)$$

そして、以下の式によって按分された 12 ビット受光強度 $Intensity12$ が 8 ビットグレースケールにおいていかなる値を取るかを算定する。

$$Intensity8 = \frac{Intensity}{IntensityMAX - IntensityMIN} \times 255 \quad (3.18)$$

なお、ユーザーが、適宜、最大値 $IntensityMAX$ および最小値 $IntensityMIN$ を変更し、その結果をリアルタイムで検証し得る機能を付加するが、データ変換の段階ではその初期画面となる Bitmap データを、別途、用意するものとした。すなわち、-3.25 に示すように初期画面としての INTENS6000.bmp と、各種解析用データとしての INTENS12_6000.bin を別途用意する。

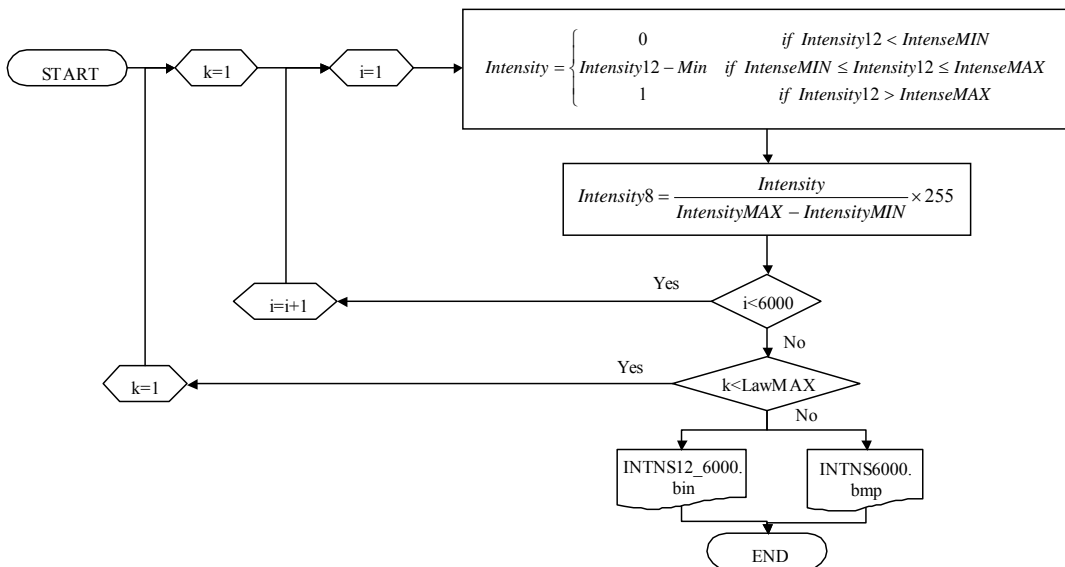


図-3.25 12 ビット受光強度データの 8 ビットへの正規化フロー

3.3.4 不連続面の走向・傾斜計算機能の構造

当機能は、壁面画像上で確認することのできる不連続面や地層面等の走向傾斜を、その面の任意の 3 点を指定することで算定する機能である。走向・傾斜計算は、指定座標を通る面の方程式、ならびにその法線ベクトルの算定と、法線ベクトルを用いた走向・傾斜の算定との二段階で行われる。

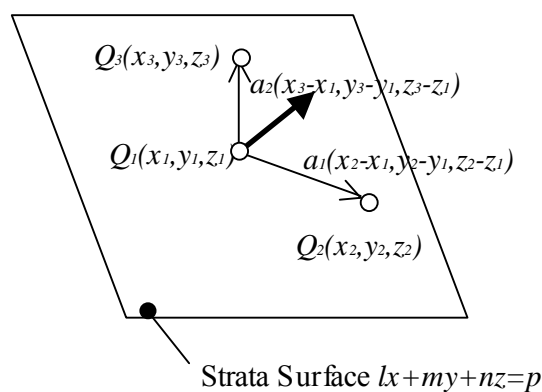


図-3.26 3点を通る地層面

図-3.26 で示される地層面の方程式は標準形で、

$$lx + my + nz = p \quad (3.19)$$

と示されるから、3 点 Q1, Q2, Q3 を通る地層面の式を求める問題は次の連立方程式を解くことに他ならない。

$$\begin{aligned} lx_1 + my_1 + nz_1 &= p \\ lx_2 + my_2 + nz_2 &= p \\ lx_3 + my_3 + nz_3 &= p \end{aligned} \quad (3.20)$$

これを解くと、

$$l = p \frac{e_x}{\Delta} \quad m = p \frac{e_y}{\Delta} \quad n = p \frac{e_z}{\Delta} \quad (3.21)$$

ここで、

$$\begin{aligned}
e_x &= \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1) \\
e_x &= \begin{vmatrix} z_2 - z_1 & x_2 - x_1 \\ z_3 - z_1 & x_3 - x_1 \end{vmatrix} = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (z_3 - z_1)(x_2 - x_1) \\
e_z &= \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) \\
\Delta &= \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}
\end{aligned}$$

一方、 $e=(l, m, n)$ は法線ベクトルであるから、次の関係が成り立つ。

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (3.22)$$

式(3.22)に式(3.21)を代入すると、

$$\left(\frac{p}{\Delta}\right)^2 (e_x^2 + e_y^2 + e_z^2) = 1 \quad (3.23)$$

したがって、

$$p = \frac{\pm \Delta}{\sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2}} \quad (3.24)$$

ここで、 \pm の記号は、地層の逆転がない場合、 $\{e\}$ の z 成分 n が正となるよう、また地層の逆転がある場合、 n が負となるよう選ばねばならないが、ここでは常に n が正となるよう選ぶものとする。したがって、

$$\{e\} = (l, m, n) = \left(\frac{\pm e_x}{\sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2}}, \frac{\pm e_y}{\sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2}}, \frac{\pm e_z}{\sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2}} \right) \quad (3.25)$$

を得る。

一方、水平東向きに x 軸、水平北向きに y 軸、鉛直北向きに z 軸を取るものとし、面の法線ベクトルを図-3.27 に示す方位角 ϕ と傾斜角 θ で示すと次式を得る。

$$\{e\} = (l, m, n) = (\sin \phi \sin \theta, \cos \phi \sin \theta, \cos \theta) \quad (3.26)$$

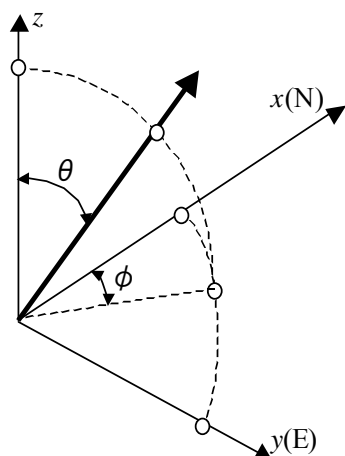


図-3.27 座標系と方位角 ϕ ・傾斜角 θ

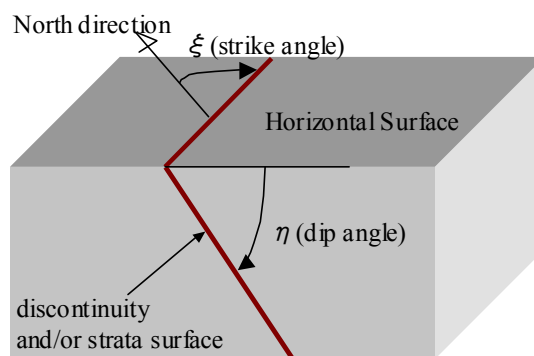


図-3.28 地層面の走向角 ξ と傾斜角 η

ここで、方位角 ϕ は y 軸(N)から時計回りに、また傾斜角 θ は z 軸上向きから取ることに注意が必要である。さらに、走向角 ξ と傾斜角 η を図-3.28 のように定義するものとする。すなわち、

走向角： 地平を水平に切り出したとして、地層面と水平の交線の方角を見たとき、右手方向にのびる交線の方位角を北から時計回りに測った角度を傾斜角(strike angle)と定義する。

傾斜角： 地層面と水平をなす角度を傾斜角(dip angle)と定義する。

今、図-3.27、図-3.28 を参考にすると、方位角 ϕ と走向角 ξ 、ならびに傾斜角 θ と傾斜角 η の間には次の関係がある。

$$\begin{aligned} \phi &= \xi + \frac{\pi}{2} \\ \theta &= \eta \end{aligned} \quad (3.27)$$

したがって、式(3.26)は傾斜角 θ と傾斜角 η を用いて、次のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} \{e\} &= (\sin(\xi + \frac{\pi}{2})\sin\eta, \cos(\xi + \frac{\pi}{2})\sin\eta, \cos\eta) \\ &= (\cos\xi\sin\eta, -\sin\xi\sin\eta, \cos\eta) \end{aligned} \quad (3.28)$$

いま、式(3.25)より地層面の法線ベクトルが与えられているならば、

$$\begin{aligned} \cos\eta &= n \\ \cos\xi &= \frac{l}{\sqrt{l^2 + m^2}} \quad \text{or} \quad \sin\xi = \frac{-m}{\sqrt{l^2 + m^2}} \end{aligned} \quad (3.29)$$

の関係より、

$$\begin{aligned} \eta &= \text{Arc cos}(n) \\ \xi &= \text{Arc cos}\left(\frac{l}{\sqrt{l^2 + m^2}}\right) \quad \text{or} \quad \xi = \text{Arc sin}\left(\frac{-m}{\sqrt{l^2 + m^2}}\right) \end{aligned} \quad (3.30)$$

を得る。走向傾斜表記において、傾斜角 η は 0° から 90° の範囲で表記するものとして、

$$\begin{aligned} \eta_{pr} &= \eta \quad (0 \leq \eta \leq 90) \\ \eta_{pr} &= 180 - \eta \quad (90 < \eta \leq 180) \end{aligned} \quad (3.31)$$

表-3.3 走向角と走向傾斜表記

走向角 ξ	表記走向角 ξ_{pr}	走向傾斜表記	例		
			ξ	η_{pr}	表記例
$\xi = 0^\circ$	—	NS・ η E	0°	30°	NS・30E
$0^\circ < \xi < 90^\circ$	ξ	N ξ E・ η S	60°		N60E・30S
$\xi = 90^\circ$	—	EW・ η S	90°		EW・30S
$90^\circ < \xi < 180^\circ$	$180 - \xi$	N($180 - \xi$)W・ η S	110°		N70W・30S
$\xi = 180^\circ$	—	NS・ η W	180°		NS° 30W
$180^\circ < \xi < 270^\circ$	$\xi - 180$	N($\xi - 180$)E・ η N	240°		N60E・30N
$\xi = 270^\circ$	—	EW・ η N	270°		EW・30N
$270^\circ < \xi < 360^\circ$	$360 - \xi$	N($360 - \xi$)W・ η N	310°		N50W・30N
$\xi = 360^\circ$	—	NS・ η E	360°		NS・30E

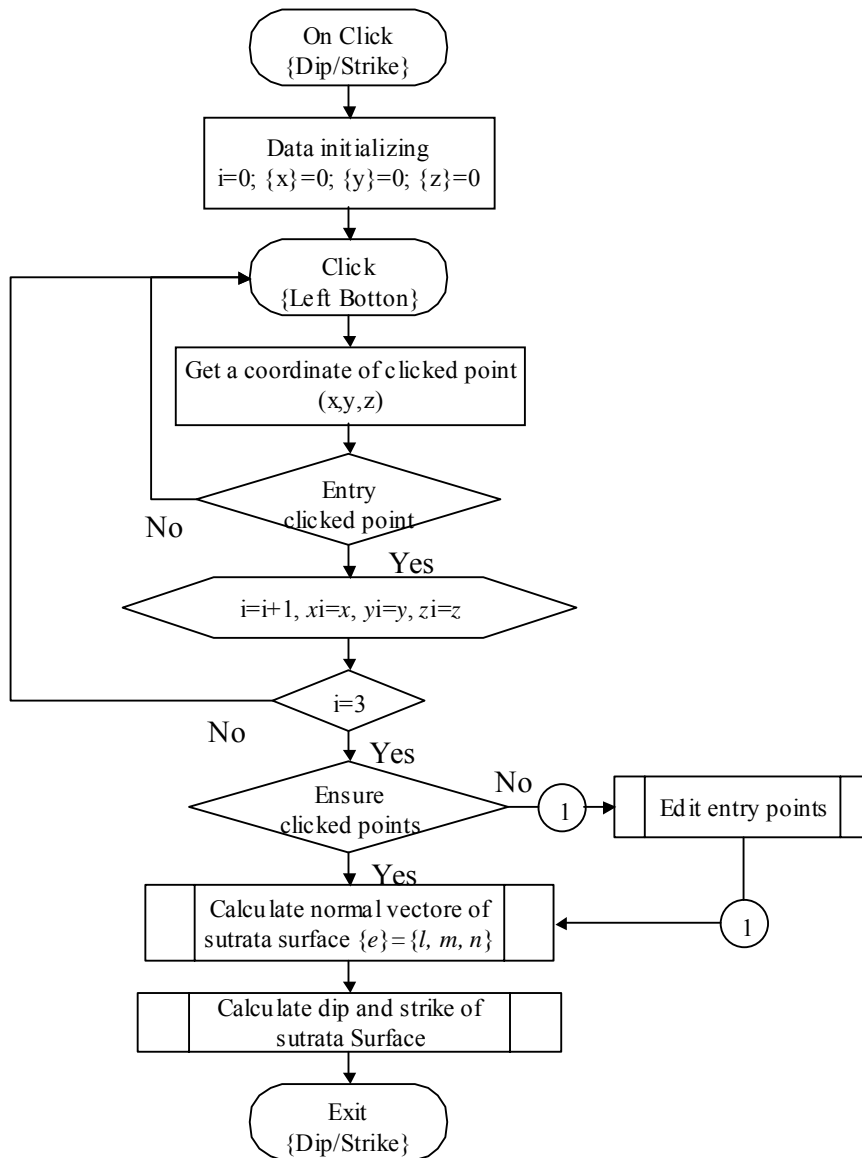


図-3.29 不連続面の走向・傾斜計算機能のフロー

とする。ここで、 ηpr は走向傾斜表記に用いる傾斜角を示す。一方、走向角の表記はさらに複雑であり、角度によって表-3.3 のように分類される。なお、表-3.3 は表記上の走向角の変化のみならず、走向方位、傾斜方位の変化も併せて示している。当機能の処理フローを図-3.29 に示す。

3.4 まとめ

本章では、3次元レーザースキャナーにより測定された瑞浪超深地層研究所立坑の壁面形状データを事例として PDM 化に必要となる技術を開発し、そのデータ変換手法とその保存形式について詳述した。

3.2節では、3次元レーザースキャナー測定から得られる測定データの構造を記すとともに、測定データ処理の目的とその基本的な考え方を述べた。まず、3.2.1 節において測定された形状データの構造について説明を加え、設計を行うシステムの要求性能として以下の諸元を定めた。

- ① 測定された壁面形状測定データから立坑掘削壁面形状、壁面画像、ならびに受光強度分布を PC 上に正確に再現する。
- ② 再現された壁面形状をもとに地質精査や各種の解析を行うための基本的な機能を整備する。

そして、これを実現するために必要なデータ変換作業として、以下の項目を抽出した。

- ① 測定された形状データの球座標系から3次元直交座標系、および円筒座標系への座標変換
- ② 迅速なデータ処理と座標取得が可能な形式への正確なデータ再配列
- ③ 重複や欠損が生じない深度方向データ合成のための、形状測定データ深度切断
- ④ 検索に適したデータの登録と記録

さらに、形状測定データの特性や問題点について整理し、上記の変換に関する細目を以下のように定めた。すなわち、

- ① 設計掘削断面径から決定される最も精密な測定精度間隔 ΔL_{min} で測定領域をピクセル分割し、このピクセルに対応する形状測定データを当てはめることで再配列を行う。
- ② 再配列後、計測データの欠落するピクセルに対し、壁面画像 RGB データや受光強度データの補間を行う。ただし、座標データの補間の補間を行わない。
- ③ 現時点では測定時のターゲット設置法に問題が多いと思われるため、深度切断は深度対応表に準じてのみ実施し、その修正を行わない。ただし、将来の修正を念頭に、深度切断前の形状データも深度ごとに保存する。

これらの考え方を基に、測定された形状データの変換方法を整理し、**図-3.2** に流れ図とし

て表すとともに、それぞれの変換処理の概要を示した。

このフローに従い、3.2.3 節では3次元レーザースキャナーデータの座標変換の実際を示した。LSDC で行う座標変換は、1)偏心補正、2)球座標系から直交座標系への座標変換、3)測量座標系から世界測地系への変換の 3 段階からなり、それぞれについてその基礎方程式と留意すべき諸元を整理した。

また、3.2.3 節ではデータ再配列のデータ補間の実際について示した。当該システムでは測定された形状データを格子型データ構造に置き換えることで、プログラム・コーディングの簡略化を図り、データ検索、ならびに画像描画の高速化を目指した。当該のデータ再配列は、形状測定データを格子型データ構造に変換する処理に当たり、当該処理のロジックの妥当性がシステムの作動効率を支配する。ここでは、測定された形状データを欠落することなく、格子型データ構造へ変換することを目標に最小測定間隔 ΔL_{\min} から格子寸法を定めた。これに伴い、データが欠落する格子が現れるが、2次元移動平均法によってこれを補間する手法も併せて示し、その補間精度を RGB 画像により検証した。

3.2.4 節では深度切断法の実際を示した。ここでは、再配列された形状測定データを深度対応表に指定された深度で切断するだけの深度切断を採用したが、すでに格子型データ構造にデータが再配列されているため、深度別データ間に不整合は生じない。また、4.3.4 節では、掘削体積計算と壁面凹凸画像の実際について示した。掘削体積計算は、形状測定データから数値積分によって各ステップの掘削体積を求める手順を示し、これまでに測定された形状データから得られた掘削体積の一覧を示した。また、壁面凹凸画像は、掘削壁面の設計掘削線からの離れをカラーマップで表した画像であり、ここでは立坑中心から掘削壁面までの距離 r_i が設計半径 r_{dsgn} 以下の格子要素を R(赤)で、また設計掘削線 r_{dsgn} よりも 0.5m 以上離れた格子要素を青で表示し、その間の距離は RGB で按分する方法を採用した。

レーザースキャナーで測定される受光強度データは、12ビットのグレースケールデータとして採取される。しかしながら、一般的なグレースケールデータは 8ビットであるため、採取された受光強度データを、そのままパーソナルコンピュータ等で処理することができない。このため、3.3.3 節では、12ビットグレースケールデータを、24ビット Bitmap 画像データとして保存する方法を示した。画像表示のため 12ビットグレースケールデータを 8ビットグレースケールデータに正規化する方法についても示した。

3.2.5 節では、描画対象に合わせて精密描画、ならびに高速描画が行えるよう各種データを間引きする方法と、そのデータ登録・保存方法について示した。ここでは、描画対象領域が広大な場合でも高速描画を可能とすることを目的として、4 段階に測定データを圧縮し、表示領域の寸法(表示倍率)に応じて最適な圧縮率で画像表示を行うことを考えた。また、データ圧縮作業をデータ読み込みのたびに行っているのは、全体の処理速度を向上させることが難しいため、あらかじめ圧縮したデータを作成・保存し、データベース化する手法についても示した。

4. 一体型3次元ステレオカメラによる形状測量に関する検証

4.1 概説

本研究の基礎データの取得に使用したレーザスキャナーは、急速に普及が進んでいるものの、未だ機器の購入価格が高価で、その取り扱いに相応の技量を要することから、施工現場で汎用的に普及するにはまだまだ時間が必要であると考えます。一方、土木施工現場における形状測量の潜在的ニーズは常に高いことも事実である。このような現状を踏まえ、本章では、レーザスキャナー装置の代替として一体型3次元ステレオカメラによる形状測量の可能性について検討した結果を述べる。

写真測量(Photogrammetry)は、航空写真測量等の分野で古くから実績のある測量手法であり、表-4.1 のような手法が既に実務に供されている¹⁾。土木分野では、受動型計測のステレオ法が最も汎用的な測量法であり、その測定原理は図-4.1 のように複数のカメラで1つの対象を異なる角度から撮影した場合、一定数以上の注目点がそれぞれのカメラに写ることで、その点の座標情報からカメラの位置関係を求めることができるというものである²⁾。

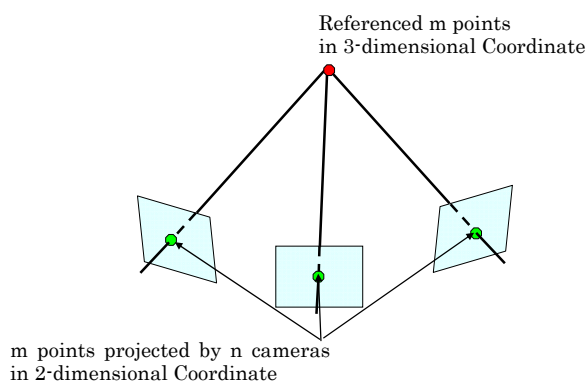


図-4.1 カメラ位置特定の模式図

表-4.1 3次元画像計測手法

受動型計測	レンズ焦点法	一眼レフのカメラでフォーカシングにより焦点を合わせるのと同様の原理で、物体の座標とカメラとの距離を計測する方法。ある地点でピントを合わせ、合ったところのダイヤル目盛りから距離を求める。焦点深度の非常に浅いレンズが必要となるため、距離のある測定には向いていない。
	ステレオ法	カメラ等を左右に2台並べ、三角測量の原理で計測を行う方法。カメラの配置方法によって、「両眼視」、「三眼視」、「カメラ移動型」などの方法がある。
能動型計測	光レーザー法	物体に光を当て、その光が戻ってくるまでの時間によって距離画像を得る方法。
	アクティブステレオ法	アクティブステレオ法ではカメラを2台使う代わりに、1台を光を発する装置に置換して計測を行う。投影光の種類によりスリット光投影法*など様々な手法に分類される。 *スリット光投影法:スリット光を物体に投影した状態で撮影を行い、その光の変化の度合いを取り出して計測を行う方法。
	照度差ステレオ法	対象の物体に対して複数の光源を用い、光源を切り替えながら写した複数の画像から面の方向を求める方法。光源に近い物体の面の面素が明るく写ることで光源方向に傾きを計測できるため、これを複数得ることで立体の計測を行うことができる。

ステレオ法の具体的な測量方法は、測量対象に座標が既知のターゲットを設け、これを2台のカメラで測量するというものであり、レーザースキャナーに比べ操作は非常に簡便である。しかし、そのデータ解析には相応の経験が必要なだけでなく、高性能なコンピュータが必要なため、大規模盛土等の形状測量等に一部適用されつつあるものの、汎用的に使用可能な状況にはない。

ところが昨年、富士写真株式会社より一体型3次元ステレオカメラ FinePix REAL 3D W1 が発売され、このハードに対応した形状測量解析に供するソフトの開発も進められている。本研究では、この FinePix REAL 3D W1 による形状測量を実施した結果と、現段階での実用性に関する考察を行う。4. 2節では、FinePix REAL 3D W1 による形状測量の概要を示し、4. 3節にその検証試験結果と考察を示す。

4. 2 FinePix REAL 3D W1 による形状測定の概要

FINEPIX REAL3D W1 の3D 静止画撮影における仕様を表-4.2 に示し、写真-4.1 にその外観を示す。

表-4.2 FINEPIX REAL3D W1 の3D 静止画撮影における仕様

型番	FINEPIX REAL3D W1	
有効画素数	1,000 万画素	
撮像素子	1/2.3 型 CCD ×2	
記録メディア	内蔵メモリー(約 42MB)/SD メモリカード/SDHC メモリーカード	
記録方式(静止画 3D)	マルチピクチャーフォーマット準拠「MPO + JPEG」/「MPO」	
記録画素数(ピクセル)	[L]<4:3>3648×2736/<3:2>3648×2432/[M]<4:3>2592×1944 [S]<4:3>2048×1536/[S]<16:9>1920×1080	
レンズ	名称	フジノン光学式 3 倍ズームレンズ ×2
	焦点距離	f=6.3mm~18.9mm(35mm フィルム換算:約 35mm~約 105mm 相当)
	開放 F 値	F3.7(W)~F4.2(T)
撮影画ズーム倍率	3D: 光学・デジタルズーム併用、最大約 3.8 倍 2D: 光学ズーム 3 倍、デジタルズーム最大約 5.7 倍、最大約 17.1 倍	
絞り	F3.7 / F5 / F8 (W)、F4.2/F5.6/F9 (T)	
撮影可能範囲 (レンズの先端から)	標準 : 約 60cm~∞ マクロ[2D] : [広角]約 8cm~約 80cm、[望遠]約 60cm~約 3m AF スピードアップ: [広角]約 1m~∞、[望遠]約 1m~∞	
3D 輻輳点までの距離	[広角]約 2m、[望遠]約 6.5m	
3D 撮影推奨距離範囲	オート視差調整 OFF: [広角]約 1.3m~∞(輻輳点までの距離 2m 時)、 [望遠]約 4.1m~∞(輻輳点までの距離 6.5m 時) オート視差調整 ON : [広角]約 1m~ [望遠]約 2m~(当社測定条件による)	
撮影感度	AUTO、ISO100/200/400/800/1600(標準出力感度)	
測光方式	TTL256 分割測光 マルチ/スポット/アベレージ	
露出制御	プログラム AE/絞り優先 AE/マニュアル	
露出補正	-2.0EV~+2.0EV 1/3EV ステップ(P モード、A モード時)	
シャッタースピード(*5)	P:1/4 秒~1/1000 秒、A:1/4 秒~1/1000 秒、M:1/2 秒~1/1000 秒	
フォーカス (3D)	モード	シングル AF
	AF 方式	TTL コントラスト AF
	AF フレーム選択	センター固定
ホワイトバランス	オート/プリセット(晴天/日陰/昼光色蛍光灯/昼白色蛍光灯/白色蛍光灯/電球/水中)	
フラッシュ	方式: CCD 調光によるオートフラッシュ 撮影可能範囲(感度 AUTO 時) 広角: 約 60cm~約 3.7m 望遠: 約 60cm~約 3.3m	
撮影時機能(3D)	オート視差調整、パフォーマンス、フレーミングガイド、コマ NO. メモリー	
その他の機能	PictBridge 対応、Exif Print 対応、PRINT Image Matching II 対応、言語設定(日/英)、世界時計(時差設定)、マナーモード	
入出力端子	ビデオ出力	NTSC/PAL 方式(モノラル音声付き)
	デジタル入出力	USB2.0 High-Speed
	DC 入力	専用 AC パワーアダプター AC-5VC(付属)
電源	充電式バッテリー NP-95(付属) 専用 AC パワーアダプター AC-5VC(付属)(充電時間: 約 4 時間(23°C において))	
寸法・質量	本体外形寸法	(幅) 123.6mm × (高さ) 68.0mm × (奥行き) 25.6mm (突起部含まず)
	本体質量	約 260g (付属バッテリー、メモリーカード含まず)
	撮影時質量	約 300g (付属バッテリー、メモリーカード含む)
動作環境	温度	0°C~40°C
	湿度	10%~80% 以下(結露しないこと)

*1: 「DCF」は電子情報技術産業協会(JEITA)の登録商標で規格「Design rule for Camera File system」の略称です。

*2: 「DPOF(Digital Print Order Format)」はデジタルカメラで撮影した画像の中からプリントしたいコマや枚数などの指定情報を記録メディアに記録するためのフォーマットです。



写真-4.1 3次元デジタルスチルカメラ(FinePix REAL 3D W1)

FinePix REAL 3D W1 は、2基のレンズと2基の CCD で構成される一種の3次元撮像システムである。左右のレンズの視点を高精度に位置合わせするため、剛性の高いアルミダイキャストフレームを採用し、2つのレンズユニットをフレームに直接マウントする構造に特徴がある。その画像処理プロセッサ Real Phot Engine D は、2基のレンズ、2基の CCD で取り込まれた撮影情報から、焦点・明るさ・色調などに基づき、左右均一な画像を取り込み、瞬時に画像解析をし、3D 合成することにより、3D オート撮影機能を可能とした。なお、2つの撮像システムを個別に制御すること、および左右のレンズで撮影条件の異なる画像を同時に撮影することも可能である。



写真-4.2 模擬立坑壁面形状測量実験状況

当該機器を用いた形状測定予備実験を平成 22 年 4 月 20 日に三井住友建設技術開発センターにおいて実施した。予備実験は、センター内にある模擬立坑内で実施し、模擬立坑壁面形状を測量することとした。写真-4.2 にその実験風景を、また写真-4.3 にその撮影された壁面形状の3次元化写真の例をそれぞれ示す。

写真-4.3 に示すように、測量撮影時には壁面形状と一緒にテープスタップを撮影し、その撮影画像からテープスタップの目盛間隔を解析したところ最大でも±1.2%程度の誤差に収まった。これは、測量精度として十分に実用に耐えるものであると判断する。しかし、写真-4.3 から分かるように、テープスタップのような形状を完全に3次元で撮影できるものではないため、その適用範囲を予め吟味する必要があるものと判断された。



写真-4.3 撮影された壁面形状の3次元化写真の例(視角を変化させた同一画像)

4.3 3Dステレオカメラを用いたPDMへの適用とその手法

(1) 3Dステレオカメラの建設分野での用途について

建設業では、以前から3次元写真計測や3次元レーザースキャナーを用いた計測が実施されている。その主な適用分野は、以下のようなものである。

- 1) 新設構造物の出来形計測
- 2) 既設構造物などの現況計測
- 3) 土工事における出来形計測(地形計測)

しかし、3次元レーザースキャナーや3次元写真計測の実施には、機器導入コストや測定者の熟練度などが課題となり、容易に展開できない現状があった。ここでは、FinePix REAL 3D W1を活用することで、上記計測作業を安価かつ容易に行うことができるか、またどのような用途に対しての適用が考えられるかについて検討を行った。

FinePix REAL 3D W1は、マッチングが可能であれば5～10m程度離れた計測対象の計測が可能とされる。この、計測距離から、地形計測など広範囲計測への適用は難しいものと判断される。しかし近距離の壁面や分割して計測することが可能な対象、3次元レーザースキャナーのような大掛かりな機材を使用できない案件などへの適用は十分可能であると考えられる。

また、3次元計測ツールとしてのステレオカメラは、3次元レーザースキャナーと比較した場合、以下のような利点と課題がある。

A. ステレオカメラの利点

- 1) 機器の価格が圧倒的に安価である。
- 2) カメラのハード的な条件が製品として固定されるため、簡単なトレーニングだけで3次元計測が可能である。
- 3) 相対的な形状把握だけであれば、手軽に計測することができる。
- 4) デジタル写真を基本としているため、エッジや輪郭などといった計測対象の細部を容易に把握することができる。
- 5) ズームが使用可能であれば目的に応じて細部をより詳細に撮影することができる。
- 6) ステレオ写真の状態ですり取りが可能であるため、ネットワークを介した運用やデータベース化が可能である(通信、記録の容量を軽量化できる)。

B. ステレオカメラの課題

- 1) 夜間や暗所の計測には不向きである。
- 2) 特徴がない計測対象を計測する場合には、テストパターンなどを間接的に投影する必要がある。
- 3) 長距離計測が行えないため、造成工事など広範囲の計測が必要な場合への適用が

難しい。

これらを踏まえると、具体的な用途として、以下のようなものが挙げられる。

1) 路面計測

交通量が多く交通規制が難しい幹線道路などにおいて歩道から白線やマンホールの位置、道路勾配などを計測する。

2) リフォーム分野における室内の現状確認

既存マンションなどにおいて家具がある状態で壁紙の面積やドアなどの取り合いの確認を行う。

3) 遺跡や石垣など遺構調査

遺跡や石垣などの遺構の現況を計測して平面図や立面図、断面図などの図化を行う。

4) トンネル切羽や崖面などの地層観察

撮影可能な地質状況を撮影して立面図などの作成を行う。

5) 建築工事などでの鉄筋検査(間隔や径など)

6) 既設構造物表面の調査

写真撮影可能なクラックや剥離の図化を行う。

これらのうち、路面計測やコンクリート面クラック調査への適用の形態は以下のように考えられる。

A. 路面計測への適用

道路やその周辺の工事では、事前に道路の状況を測定して現況を記録する。また、工事以外でも道路メンテナンスなどでも道路の状況を、適宜、測定する必要がある。現状では一般的な測量計測を用いて図化しているが、交通量が多い幹線道路などでは交通規制が困難であるため3次元レーザースキャナーを用いた測定が実施されている。

しかし一般的な測量測定や3次元レーザースキャナーを用いた計測では、大がかりな機材が必要となるため、歩道からの測定であっても一般歩行者などへの配慮が必要となる。そこでステレオカメラを用いて歩道から路面を撮影することで一般歩行者への妨げにならない測定が容易に行えると考えられる。以下に、その測定から図化への流れを示し、写真-4.4 に、FinePix REAL 3D W1 で撮影した路面画像から道路付帯物をトレースした例を示す。

① 路面をステレオカメラで撮影する。

② 撮影画像の 3D 解析を行う。

③ 解析データを2次元表示して白線、マンホール、縁石など道路付帯物をトレースす

る。

- ④トレース結果を2次元 CAD データとして出力する。
- ⑤解析データの位置情報をもとに道路勾配(断面図)の作成を行う。



写真-4.4 道路付帯物トレースの例

B.コンクリート面クラック調査への適用

地震などの災害時には損傷を受けた構造物の損傷状況を把握し、補修の必要性の判断を行う。損傷の状況によっては、合わせて補修方法の選定を行う。現状では目視によるスケッチや写真を用いて図化を行っているが、縮尺を合わせるための基準が必要となるため、計測範囲内に在来測量を用いて基準点の設置を行っている。ステレオカメラの場合、カメラ条件が固定されているためこのような基準点が必要となり作業性が向上すると思われる。以下に、その測定から図化への流れを示し、写真-4.5 に、FinePix REAL 3D W1 で撮影した画像からのひび割れトレース例を示す。

- ①橋やトンネル、建物など計測対象となるコンクリート面を撮影する。
- ②撮影画像の 3D 解析を行う。
- ③解析データを2次元表示してクラック(コンクリートに生じた亀裂)などをトレースする。
- ④トレースした結果を2次元または3次元 CAD データとして出力する。



写真-4.5 コンクリート面調査アプリケーションのイメージ

(2)ステレオカメラの石垣調査への適用

ここでは、3D ステレオカメラ FinePix REAL 3D W1 により実施視した3次元石垣調査の作業性やデータ処理効率などについて、3次元レーザースキャナーによる作業と比較し考察する。

A.3次元計測を用いた石垣調査の概要

石垣調査において3次元測定を実施する目的は、以下のようなものである。

- 1) 地震や豪雨などの災害による崩落防止を目的とした健全性の確認
- 2) 崩落した石垣を修復するために必要となる崩落前の形状等の記録
- 3) メンテナンス業務における経年変化の確認
- 4) 模型等を作成するためのコンテンツ収集

従来は、

- 1) トータルステーションによる石垣断面形状の測定
- 2) 2次元／3次元写真計測による石組状況の測定

を行うことで、上記の確認およびコンテンツ収集を行ってきた。近年、3次元レーザースキャナーが普及してきたことで石垣面の形状を面的に捉えることが可能となったため、石垣断面形状だけでなく面的な形状を把握してより詳細な状況を確認できるようになった。しかし、同装置は、高価であるため、機器導入コストや計測コストなどが掛かることが課題となっていた。

(3)石垣調査におけるレーザースキャナーと3D ステレオカメラの作業性評価

石垣調査の目的は、石垣崩落防止を目的として、健全性確認、および経年変化確認を行うことにある。そのための確認項目は以下のようなものである。

- 1) 石垣面の孕みやくぼみなどの状況確認
- 2) 任意箇所の断面形状の確認
- 3) 石組状況の確認

これらの作業より得られたデータは崩落後の修復やコンテンツ収集などの目的にも供される。

A.レーザースキャナーを用いた石垣調査

写真 4-6 にレーザースキャナーを用いた石垣調査を示す。その作業手順は以下のようなものである。

- ①3次元レーザースキャナーを計測対象全体が見通せる位置に設置する。
- ②計測対象が隠れないように5点以上の基準点を設置する。
- ③基準点は計測データ座標変換およびデータ接合を行うために必要となるため、現地座標系の値を実測によって求める。
- ④器械に計測範囲などのパラメータ設定を行い計測する。
- ⑤計測後、データ取得に問題がないかを確認してパソコンに計測データを保存する。



写真-4.6 3次元レーザースキャナーと基準点ターゲットの設置

このようにして測定された対象物のプロファイルデータは以下の手順で図化される。

- ①基準点の位置を RiScanPro (Riegl 社製解析ソフト)に取り込んで、個々の計測データの座標変換パラメータを写真-4.7 の画面上で算出する。

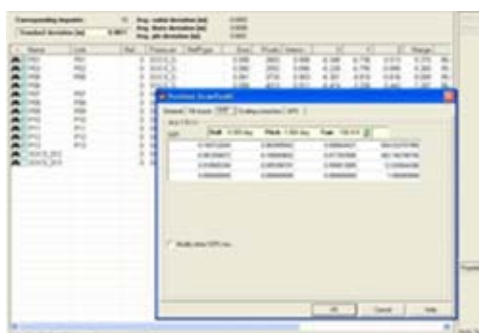


写真-4.7 座標変換パラメータ算出画面

- ②RiScanPro で生成されたプロジェクトファイルを、本研究で開発したデータ解析システムへ取り込む。
- ③写真-4.8 のように植生や障害物など解析に不要となる点群の除去を行う。

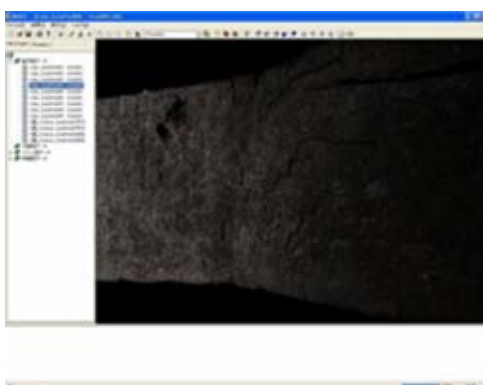


写真-4.8 不要な点群の除去画面

④断面図や断彩鳥瞰図など目的に応じた2次処理を行う。写真-4.9 および写真-4.10 は石垣の孕み状況をグラデーションによってカラー表示した例である。

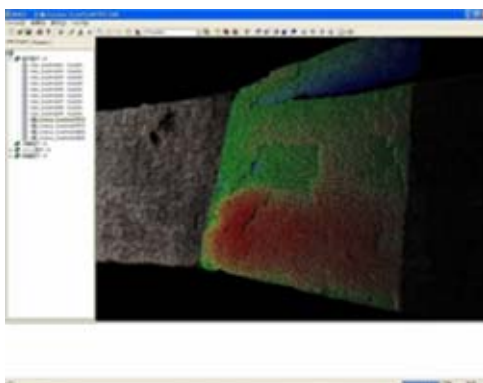


写真-4.9 二次処理画面

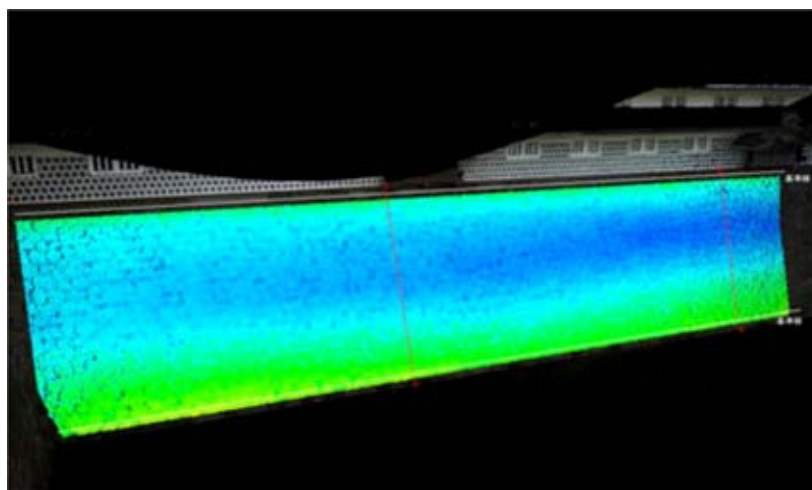


写真-4.10 断彩鳥瞰図

⑤2次処理を行ったデータを、CAD データなどに加工する。図-4.2 は断面データを CAD 断面図として体裁を整えた例である。

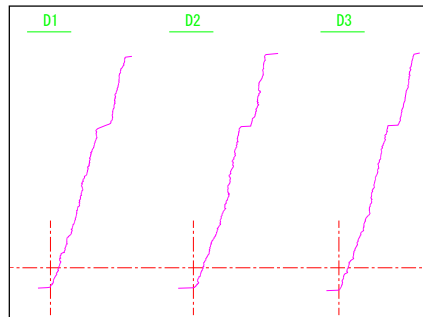


図-4.2 断面図(特定箇所の孕みやくぼみ状況の確認)

⑥石組の状況を把握するための立面図を作成するため、一般的なデジタル一眼レフを用いて撮影を行った画像に写真-4.11のように偏位修正を行うための基準点を設定し、画像偏位の補正を行う。



写真-4.11 偏位修正を行うための基準点の設定

⑦偏位修正を行った画像を本研究で開発したソフトで写真-4.12のように石垣境界をトレースする。

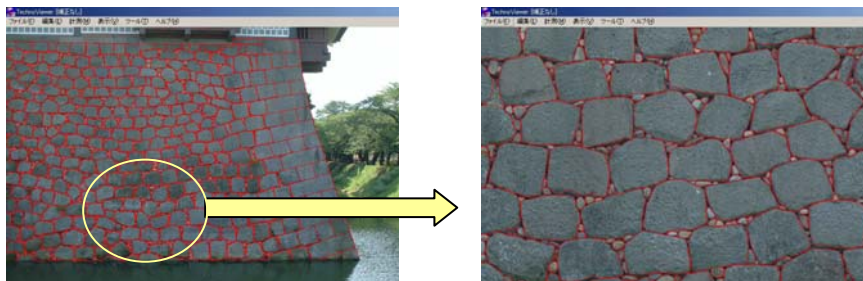


写真-4.12 石垣境界のトレース

⑧トレースした線情報を CAD データとして出力し、図-4.3のように図化する。

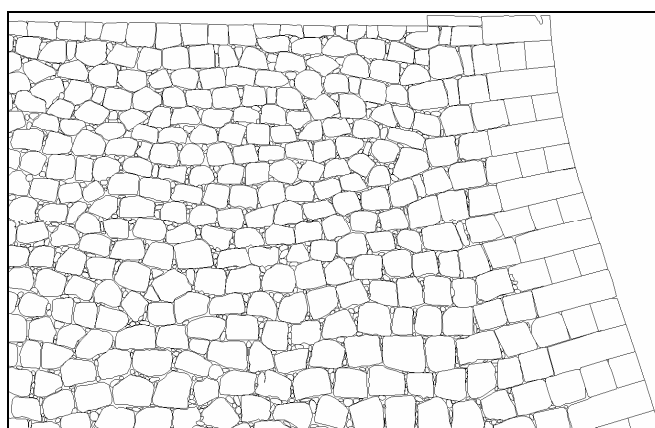


図-4.3 CADにより図化された石垣

B.3D ステレオカメラを用いた石垣調査の試行

A.に述べた石垣調査を、3DステレオカメラFinePix REAL 3D W1でも試験的に実施した。今回は、一般観覧が可能な石垣について撮影のみを行えたため、基準点等の設置は行っていない。また測定データの歪みが大きいためデータ接合した状態での断面図や断彩鳥瞰図の作成も行っていない。測定作業、および図化の流れは以下のようなものである。

- ① 石垣面にデータ接合をするために必要となる基準点を写真-4.13のように設置する。設置した基準点は、従来の計測方法などを用いて実測する。石材の接合部を基準点としても構わないが、接合時の誤差が大きくなる可能性がある。
- ② 基準点が複数(4~5点程度)入るように撮影位置を調整して撮影を行う。



写真-4.13 石垣面への基準点の設置

- ③富士写真株式会社より貸与いただいた FinePix REAL 3D W1 専用変換ソフトを用いて撮影を行った画像の3次元データ変換を行う。

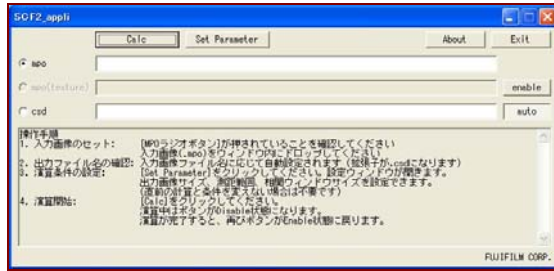


写真-4.14 FinePix REAL 3D W1 専用変換ソフト作業画面

②既存の解析システムへ取り込むためにデータ形式の変換を行う。



写真-4.15 データ形式が変換された測定画像

③基準点に現地座標値を関連付け、座標変換パラメータの設定を行う。

④解析に不要となる植生や障害物などの点群を除去する。

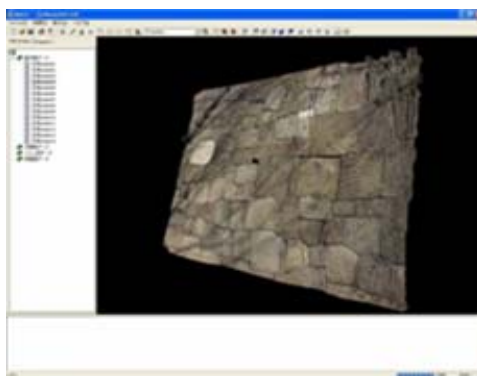


写真-4.16 不要な点群が除去された画像

⑤断面図や断彩鳥瞰図など目的に応じた二次処理を行う。

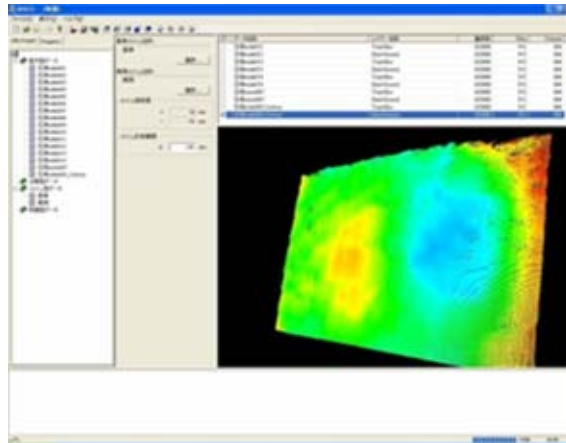


写真-4.17 二次処理画面

上記のような作業から、写真-4.18 に示す石垣表面凹凸のコンターマップを作成した。このなおコンターマップは、測定時に石垣表面に基準点を設けなかったため実際の形状とは異なる可能性がある点に注意する必要がある。

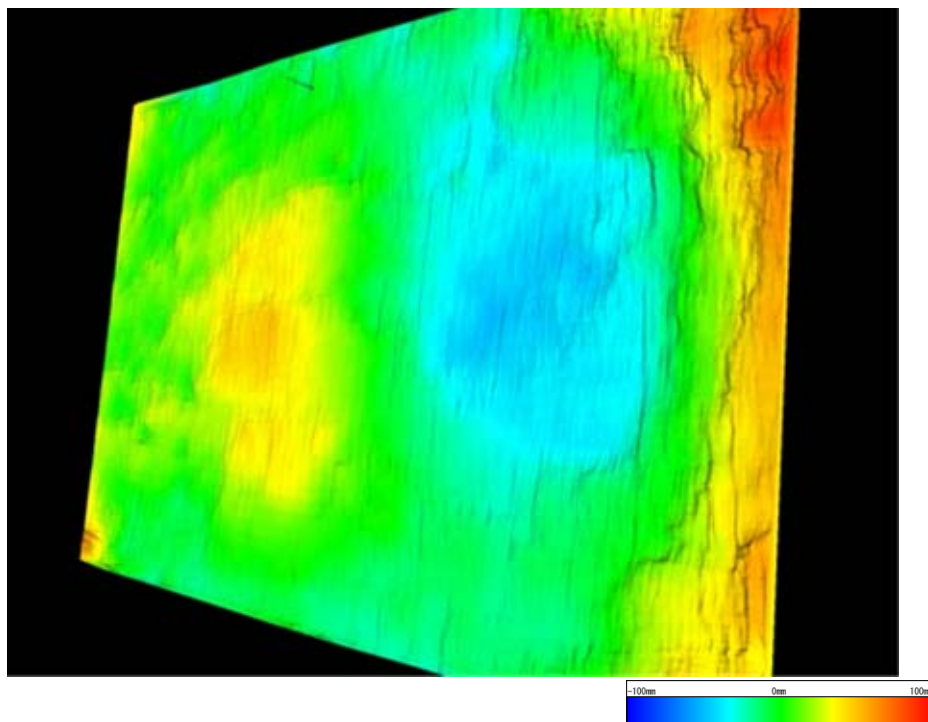


写真-4.18 ステレオカメラデータをもとにした断彩鳥瞰図

(4)石垣調査結果に基づく 3D ステレオカメラ想定に関する考察

ステレオカメラを用いて石垣調査への試験適用を行った結果、3次元レーザースキャナーによる測定と比較して、以下のような知見を得た。

- 1) 機材がコンパクトであるため簡単かつ手軽に計測の実施ができる。
- 2) 機材がコンパクトであるため通行者などの第三者への妨げがない。
- 3) 3次元計測と写真計測が同時に行えるので、現地計測の時間を大幅に短縮できる。
- 4) レーザースキャナーと異なりデータのばらつきが少ない。
- 5) 石材の刻印など細部の形状を把握することができる。

上記利点と機器の価格と合わせて考えれば、ステレオカメラは石垣の日常的な維持管理や災害時の復旧などに対して十分活用可能なツールであると思われる。ただし使い勝手や、継続的な利活用などを考えると、以下のような機能を持つアプリケーションが必要と考えられる。

- 1) 計測データの座標変換を行う機能
- 2) 計測データを接合する機能
- 3) 基本的な二次処理や成果品の作成を行う機能
- 4) 日常的な計測結果を時系列的に管理する機能

また、今回の試験適用では、原因が特定できないが Z 値に大きな歪みが生じているのが確認できた。絶対値がないため定量的な評価はできないが、計測距離約 7m で最大±200mm 程度の歪みとなっている。計測場所や計測条件を変えても、同様の傾向が確認できるのでレンズ収差に起因するものと考えられる。原因の特定は今後の課題であるが、検証をすべき項目となるが出荷時のキャリブレーションで除去しきれない要因であれば、ユーザー側で何らかの対処を行うための手法を検討する必要があるものとする。

4.4 地下構造物施工時における形状測量実験

実際の地下構造物施工は、人工照明の下で工事が行われるため、デジタルカメラの撮影画像品質は太陽光下に比べ著しく低下する。このため、撮影品質が測量精度に直結する3次元ステレオカメラ測量の精度も低下するものと考えられる。ここでは、地下構造物施工の場における一般的な撮影条件の下で、どの程度の測量精度を当該3次元ステレオカメラが確保できるかを検討するため、原位置での測量実験を実施した。その実験概要と実験結果・考察を以下に示す。

(1) 地下構造物施工現場における形状測量実験の概要

形状測量実験は東京都内の地下道拡幅工事において実施した。当該工事は、**図-4.4** に示すように既設地下道を拡幅し、新築ビル群の地下階に接続する工事である。したがって、**写真-4.19** のように既設地下道交通を確保した上で、隣接する新築ビル工事を阻害することのないよう工事が行う必要があり(参照)、工法的にも施工空間的にも制約の大きい工事である。

形状測量実験は、**図-4.5** に示すように既設地下道側壁背面の形状を測定するもので、側壁背面から3mの地点に、1m間隔で17箇所の測定ポイント(#00～#16)を設け、各測定ポイントの撮影高750mm(#00L～#16L)、および撮影高さ1,500mm(#00H～#16H)で形状測定を実施した。さらに、形状測量撮影時には、カメラ搭載フラッシュによる撮影(F)と工事用照明のみの撮影(非フラッシュ撮影:N)の両方で実施した。

また、当該工事では、施工中、工事用資機材を壁面付近に集積しているため、壁面形状のみの形状測定を行うには、これらの資機材を撤去せねばならない。しかし、このような資機材を壁面形状と同時に撮影することは、さまざまな事物の形状を各種条件下(主として撮影距離と照度)で撮影できることと同意であり、その形状再現性を検証することで当該手法の適用性が検討できるものと考え、あえて資機材を整理せず形状測定を実施した。



(a)形状測量実験区間の状況



(b)工区境付近の現場状況

写真-4.19 地下道拡幅工事の状況

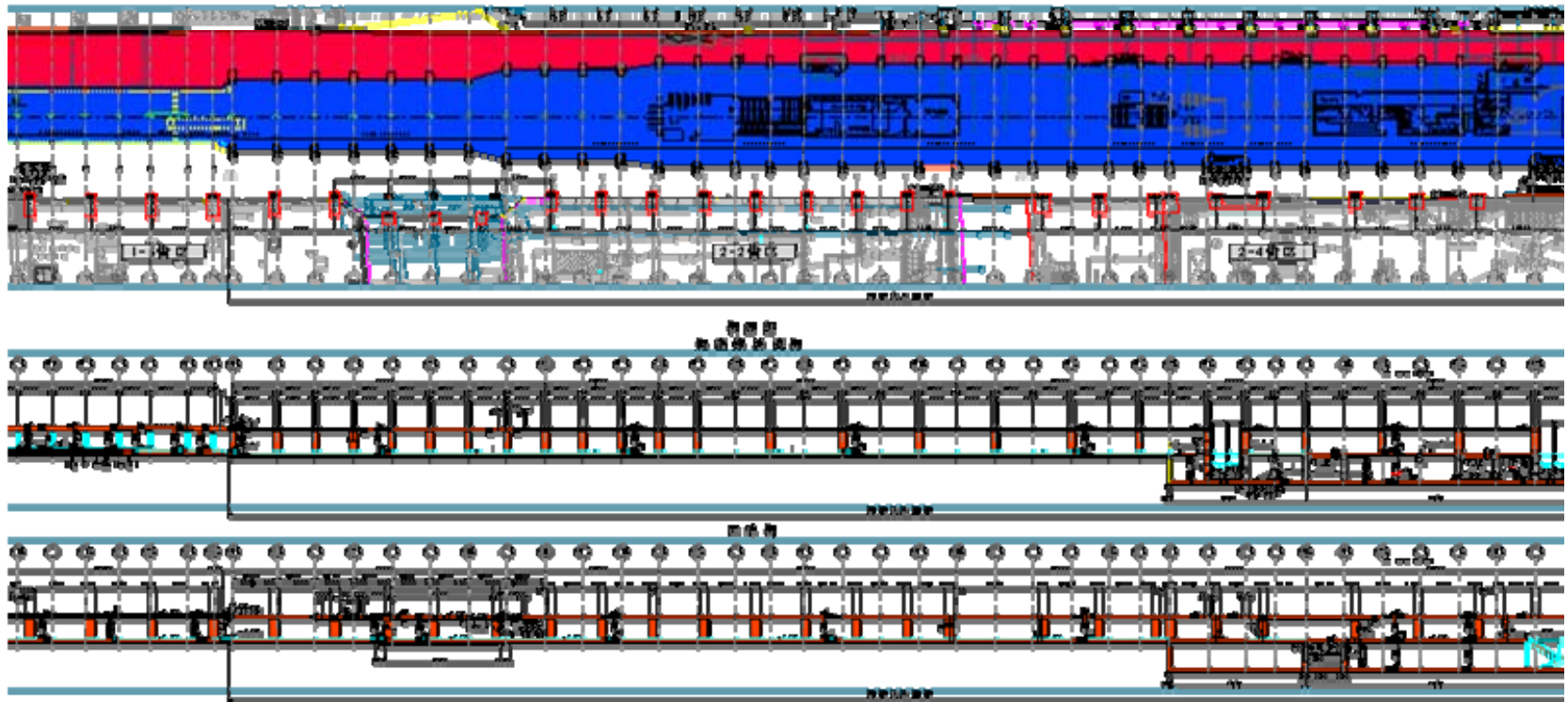


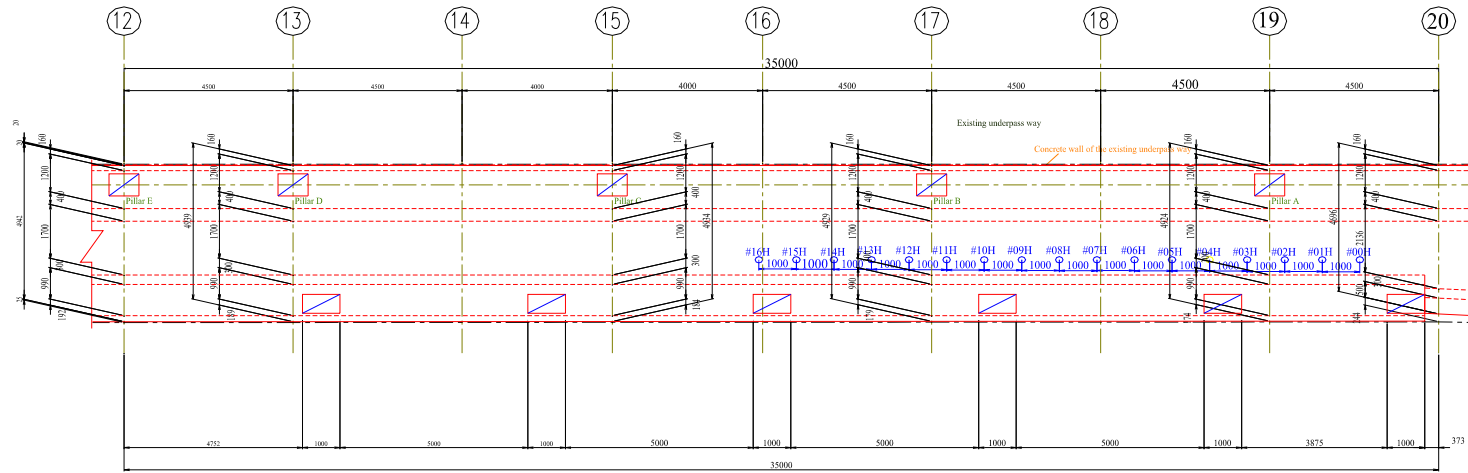
図-4.4 既設地下道と拡幅地下道部の一般平面図、および拡幅地下道の一般縦断図



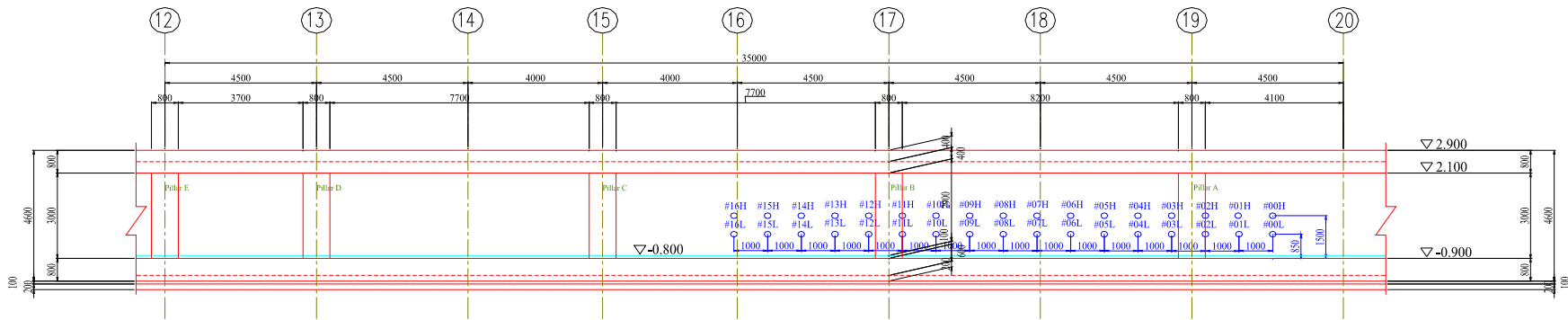
写真-4.20 地下道拡幅工事入口



写真-4.21 既設地下道から拡幅工事部を見る



(a)測量点平面图



(b)測量点縦断図

図-4.5 既設壁面形状測量点位置図

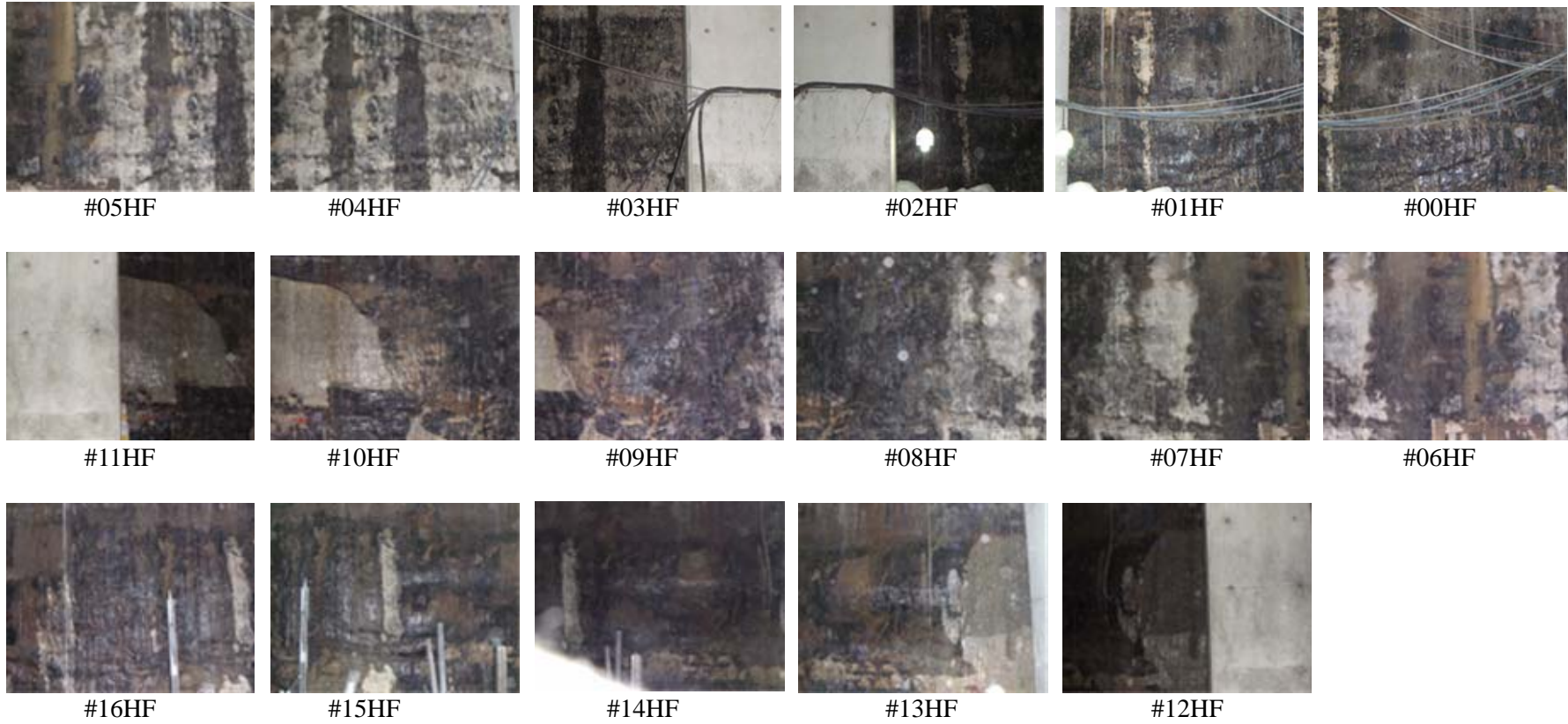


写真-4.22(a) 撮影高 1,500mm における JPEG 画像 (フラッシュ撮影)

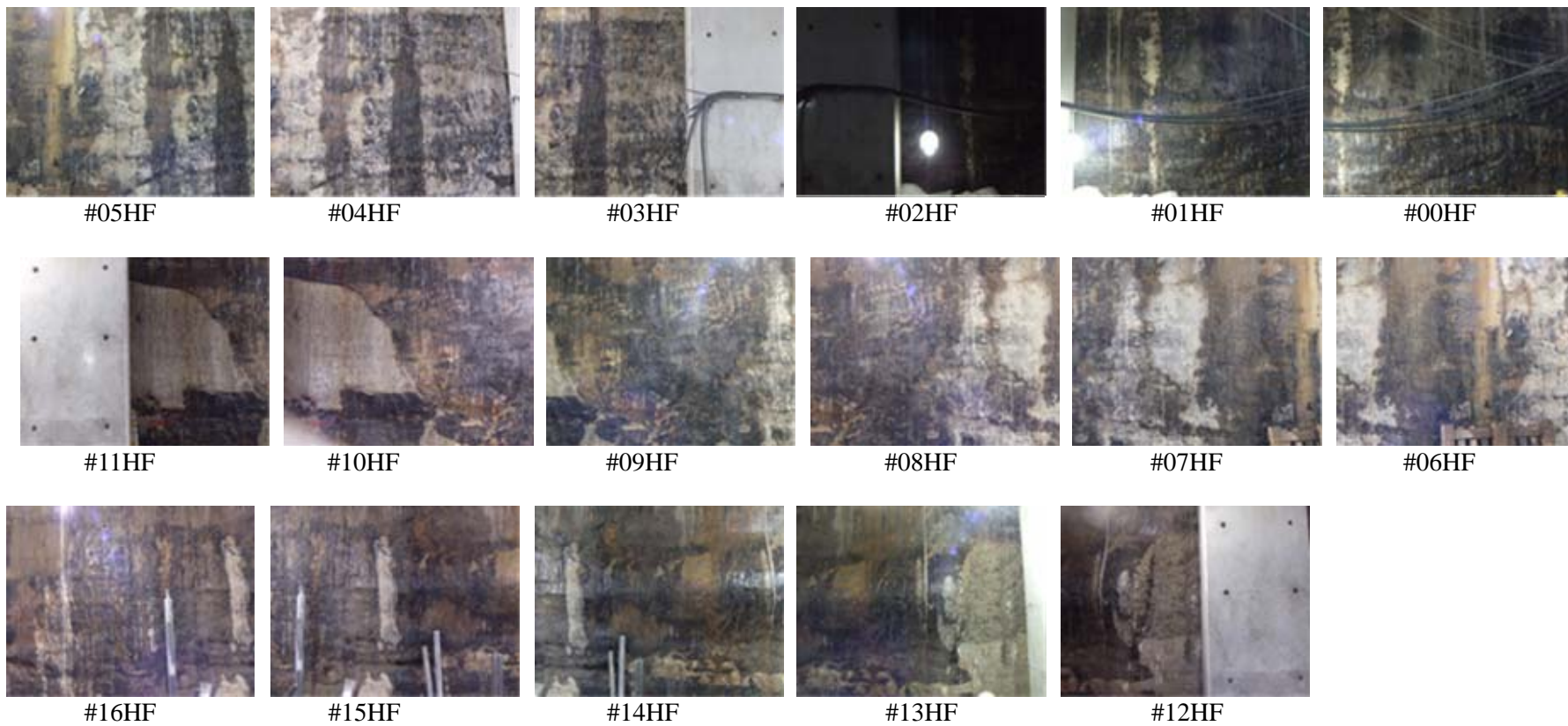


写真-4.22(b) 撮影高 1,500mm における JPEG 画像 (非フラッシュ撮影)



写真-4.23(a) 撮影高 750mm における JPEG 画像 (フラッシュ撮影)



#05HL



#04HL



#03HL



#02HL



#01HL



#00HL



#11HL



#10HL



#09HL



#08HL



#07HL



#06HL



#16HL



#15HL



#14HL



#13HL



#12HL

写真-4.23(b) 撮影高 750mm における JPEG 画像 (非フラッシュ撮影)

(2)フラッシュ撮影による撮影画像

形状測量時と同時に撮影された JPEG 画像を写真-4.22、4.23 に示す。写真-4.22、4.23 は、それぞれ撮影高 750mm (#00L～#16L)、および撮影高さ 1,500mm (#00H～#16H)における撮影画像であり、同一地点でのフラッシュ撮影、および工事照明のみの撮影結果も併せて示すものである。

これらの図は、形状測量に供せられる左右画像と共通するものであり、この段階で不鮮明な画像は形状測量に供することが難しい。撮影高 750mm・1,500mm のいずれでも、フラッシュ撮影には、写真-4.24(a)のような画像不鮮明な領域が点状に多数発生する。この不鮮明画像が発生する理由は、フラッシュが工事用照明とハレーションを起こす、もしくは浮遊粉塵がフラッシュを反射する等が考えられるが、いずれにせよ形状測量に供すことは難しいものと判断した。このため、当該実験では非フラッシュ撮影の画像のみを用いて座標変換を実施した。



(a)フラッシュ撮影



(b)非フラッシュ撮影

写真-4.24 デジタルカメラによるフラッシュ撮影と非フラッシュ撮影の画像比較

なお、地下構造物施工時にデジタルカメラで撮影される画像には、このような点状の不鮮明領域が生じることが一般的である。このため、現時点では当該カメラを用いた地下構造物の形状測量には、フラッシュの使用は不適であり、3次元座標変換は非フラッシュ撮影画像のみを用いて実施することが望ましいと言える。

(3)座標計算結果と考察

表-4.3 に3次元変換時の相対ウィンドウサイズ(RWS)と、変換対象距離、および変換状況を示す。変換後の画像には座標を同定できない空白域がかなりの領域を占めた、そのほとんどは構造支柱(図-4.5 中の Pillar A,B)、工事用照明近傍、複雑な形状の資機材等である。また、図-4.22、4.23 の壁面写真において著しく暗い壁面部、もしくは黒に近い壁面色部も小規模であるが空白領域となっている。

構造支柱は白色に近く、しかも平面であるため3次元座標変換が困難であることは当初より予測された。このため、#11LN の座標変換では表-4.3 に示すように RWS を 81,101,121,141,161,181,201 と変化させたが、ほとんど有意な改善は見られなかった。コンクリート構造物はほとんどが白色の平面で形成されるため、今後、他の同定手法を導入し、その変換精度を向上させる方針である。また、工事用照明近傍はホワイトノイズのような画像しか得られなかったものと判断される。実際の形状測定業務では工事用照明に代えて、撮影専用照明を導入することでこの問題は解決されるものと考ええる。また、壁面が黒色であったり、照明不足の箇所は、座標変換に供すことのできる画像が得られなかったためであると考ええる。これも撮影専用照明の導入によって改善されると考える。

なお、壁面付近に集積された工事用資機材は、実際の形状測量作業時には撤去整理されるものであり、今回は参考として種々の形状測定を試みたものである。予想外に形状を把握できたものもあるが、やはり完全な形状測定は難しいものと考えざるを得ない。特に、平面を持つ金属資材や複雑な形状のものは、ほとんど改善が見られなかった。これは、座標同定が行えなかった。

また、#00LN 中の貯水タンクの座標変換精度を高めるため RWS と変換対象距離を変化させたが、これらのパラメータを変更してもほとんど改善が見られなかった。これは、貯水タンク表面が比較的なだらかな形状であることにもよるが、前節で示したレンズディストーションの影響も排除しきれないように推察された。今回の撮影実験結果全般でも、画面隅部は3次元座標変換の精度が劣ると判断される。

表-4.3 3次元座標変換時の変換条件、および変換状況 (#00LN~#16LN)

地点	RWS	変換 距離	Remaks
#00LN	81/151/181	2.0-3.5m 1.5-3.5m 1.0-3.5m	画面右部の水槽タンク形状を再現するため、距離を変化させたがほとんど効果はない。壁面形状については比較的良好な近時が行えたものと判断する。
#01LN	81	2.0-3.5m	比較的单純な撮影対象であったため、全体として良好な座標変換が行えたものと判断する。また、壁面に立てかけられたコンパネ板の傾斜も良く再現されている。
#02LN	81/151	2.0-3.5m	柱が RWS=81 では不鮮明なため、RWS=151 として再計算するが実用には不十分な座標計算しか行えなかった。
#03LN	81/151	2.0-3.5m	柱が RWS=81 では不鮮明なため、RWS=151 として再計算するが実用には不十分な座標計算しか行えなかった。
#04LN	35/81/151	2.0-3.5m	脚立や土嚢、ケーブル等で雑然とした被撮影区間であり、RWS=81、151 ではほとんど画面が空白となる。これは脚立表面が滑らかであり過ぎること、立て掛けた勾配が緩やかであることなどが大きな原因と思われる。RWS=35 とすると、若干、改善するが実用にはほど遠いものと判断した。
#05LN	81	2.0-3.5m	土のうが十分再現されていないが、他の部分はパレットも含めて、良好な形状測定が行えたものと判断する。
#06LN	81	2.0-3.5m	被撮影区間が単純であったこともあり非常に良好に座標計算が行えた。
#07LN	81	2.0-3.5m	被撮影区間が単純であったこともあり非常に良好に座標計算が行えた。
#08LN	81	2.0-3.5m	被撮影区間が単純であったこともあり非常に良好に座標計算が行えた。
#09LN	81	2.0-3.5m	被撮影区間が単純であったこともあり非常に良好に座標計算が行えた。
#10LN	81	2.0-3.5m	壁面手前 600mm 程度におかれた六角ポールの座標が完全に無視されている。この六角ポールは JPEG 画面で見ても不自然に光沢がなく、形状境界が不明瞭である。
#11LN	81/101/121 141/161/181 201	2.0-3.5m	撮影区間に柱がある。RWS=81 では柱部が空白となるため、RWS=81、101、121、141、161、181、201 と 20 毎に座標変換を実施したがほとんど改善されない。今後テクスチャ・マッピング・モードでの変換を実施するものとする。なお、ドットよりも三角パッチの方が鮮明な描画が可能。
#12LN	201	2.0-3.5m	#LN11 と同様に撮影区間右側に柱がある。柱部の座標変換についてはやはりほとんどが空白となる。また当該区間では顕著に壁面が隆起した部分があるが、この部分の形状測定は良好であると判断する。
#13LN	81	2.0-3.5m	壁面隆起部分の座標計算は良好と判断する。壁面に設置されたボーリングガイドのベース付近は比較的良好に形状測定されているが、安全帯は形状が複雑すぎるためか、空白となっている。
#14LN	81	2.0-3.5m	撮影者の指が左上隅に写っており、この部分は空白となっている。また単管パイプやホイール部品等が比較的良好に形状測定されているのに対し、壁面から 400mm 程度波離れた位置の四角ポールは空白となっている。
#15LN	81	2.0-3.5m	当該区間は資材等が雑然と置かれているため、当該領域はほとんど空白になると予測されたが、中央付近のケーブル、単管ホイール部品等は、比較的良好に形状測定できたものとする。しかし、右側の四角ポールや左側の溶接機等は空白となっている。
#16LN	81	2.0-3.5m	画像中央部での溶接機付近はほとんど空白となっているが、その他の領域では比較的良好な座標計算が行われている。

表-4.3 3次元座標変換時の変換条件、および変換状況 (#00LN～#16LN)

地点	RWS	変換 距離	Remarks
#00HN	81	2.0-3.5m	壁面の黒っぽい箇所が空白となっている。壁面色であるか、物体の影であるかは不明。
#01HN	81	2.0-3.5m	画像左側の電球近傍及び柱部はほぼ空白となっている。他の領域は#00HN とほぼ同じ。
#02HN	81	2.0-3.5m	#01HN とほぼ同様であるが、柱及び電球が画面のほぼ半分を占めるため空白領域が全体の大半を占める。
#03HN	81	2.0-3.5m	画像右側の柱部分はほぼ空白になっている。それ以外の領域は比較的良好な形状測定が行われているものと判断。
#04HN	81	2.0-3.5m	全体に障害物が少なく良好な座標変換が行われているが、壁面の黒っぽい領域が一部空白となっている。
#05HN	81	2.0-3.5m	電球光源近傍の画像左上隅領域に比較的大きな空白が生じている。それ以外は#04HN とほぼ同等と判断する。
#06HN	81	2.0-3.5m	全体は#05HN とほぼ同じと判断する。電球光源位置は画面中央よりやや右の画面上部近傍にある。また下部のパレットの形状測定は下列で測定したものよりも劣るものとする。
#07HN	81	2.0-3.5m	壁面はほとんど空白なく形状測定されているが、画像右下部のパレットはほぼ空白になっている。
#08HN	81	2.0-3.5m	電球光源近傍の画像左上隅領域に比較的大きな空白が生じている。それ以外はほぼ良好な座標計算が行えたと判断する。
#09HN	81	2.0-3.5m	#08HN とほぼ同じと判断する。
#10HN	81	2.0-3.5m	全体に障害物が少なく良好な形状測定が行われている。なお、左下隅の空白は撮影者の指が写り込んだもの。
#11HN	81	2.0-3.5m	画面左側の柱部がほぼ空白になっている。その他の領域は良好な形状測定が行えているものと判断する。
#12HN	201	2.0-3.5m	
#13HN	81	2.0-3.5m	
#14HN	81	2.0-3.5m	
#15HN	81	2.0-3.5m	
#16HN	81	2.0-3.5m	

4.5 まとめ

本章では、3次元形状測量を汎用的に現場施工へと展開することを目的として、富士写真株式会社より発売された一体型3次元ステレオカメラ FinePix REAL 3D W1 による形状測量の可能性に関して検証を行った。なお、形状測量解析ソフトは富士写真株式会社様のご好意により、試作段階のソフトを貸与いただいた。

検証に当たり、三井住友建設技術開発センター内の模擬立坑内で、その壁面形状を測量し、このとき同時に撮影したテープスタッフの読みから測定誤差を検証したところ、最大でも±1.2%程度の誤差に収まった。これは、測量精度として十分に実用に耐えるものであると判断し、原位置での測量試験に移行した。なお、このときテープスタッフのような形状は完全に3次元で撮影できるものではないため、その適用範囲を予め吟味する必要があることが課題として残された。

原位置での測量を実施する前に、3次元ステレオカメラ FinePix REAL 3D W1 による形状測量の用途として以下のような諸元を想定し、そのいくつかについて測定手順と簡単な試測量を実施した。

- 1) 路面計測
- 2) リフォーム分野における室内の現状確認
- 3) 遺跡や石垣など遺構調査
- 4) トンネル切羽や崖面などの地層観察
- 5) 建築工事などでの鉄筋検査(間隔や径など)
- 6) 既設構造物表面の調査

まず、石垣調査を実施し、3次元レーザースキャナーによる測定と比較して、以下のような知見を得た。

- 1) 機材がコンパクトであるため簡単かつ手軽に計測の実施ができる。
- 2) 機材がコンパクトであるため通行者などの第三者への妨げがない。
- 3) 3次元計測と写真計測が同時に行えるので、現地計測の時間を大幅に短縮できる。
- 4) レーザースキャナーと異なりデータのばらつきが少ない。
- 5) 石材の刻印など細部の形状を把握することができる。

以上の結果から、3次元ステレオカメラ FinePix REAL 3D W1 による形状測量は石垣の日常的な維持管理や、災害時復旧などに対して十分活用可能な手法であると判断した。一方で、実務への展開に関しては以下のような機能を持つアプリケーションが必要になると考えられる。

- 1) 計測データの座標変換を行う機能
- 2) 計測データを接合する機能
- 3) 基本的な二次処理や成果品の作成を行う機能
- 4) 日常的な計測結果を時系列的に管理する機能

特に、本調査時にZ値に大きな歪みが生じているのが確認された。それは計測距離約7mで最大±200mm程度の歪みと推定され、計測場所や計測条件を変えても、同様の傾向が確認できた。今後原因の特定が必要であるが、レンズ収差に起因するものが大きいと考えられ、出荷時のキャリブレーションで除去しきれない要因であれば、ユーザー側で何らかの対処を行うための手法を検討する必要がある。

最後に、本研究の主たる対象である地下構造物での適用性を検証するため、東京都内の地下道拡幅工事において既設地下道の壁面背部形状を3次元ステレオカメラ FinePix REAL 3D Wにより測定した。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) フラッシュ撮影時に、画像不鮮明な領域が点状に多数発生した。この不鮮明画像が発生する理由は、フラッシュが工事用照明とハレーションを起こす、もしくは浮遊粉塵がフラッシュを反射する等が考えられるが、いずれにせよ形状測量に供すことは難しいものと判断した。
- 2) 非フラッシュ撮影では、著しく暗い壁面部、もしくは黒色に近い壁面色部も小規模であるが変換後の画像には座標を同定できなかった。以上より、地下工事においては撮影時の照明法を工夫する必要があると判断された。
- 3) 変換後の画像には座標を同定できない空白域がかなりの領域を占めた、そのほとんどは構造支柱、工事用照明近傍、複雑な形状の資機材等であった。
- 4) 構造支柱は白色に近く、しかも平面であるため3次元座標変換が困難であることは当初より予測された。このため、RWSを81,101,121,141,161,181,201と変化させ変換したが、ほとんど有意な改善は見られなかった。土木構造物において、コンクリート構造物はほとんどが白色の平面で形成されるため、これを同定するに足る手法を確立は喫緊であると考ええる。
- 5) 工事用照明近傍はホワイトノイズのような画像しか得られなかったものと判断される。実際の形状測定業務では工事用照明に代えて、撮影専用照明を導入することでこの問題は解決されるものと考ええる。
- 6) 本測定においても、レンズディストーションの影響が懸念された。特に、画面隅部は3次元座標変換の精度が劣るように判断される。

以上より、次元ステレオカメラ FinePix REAL 3D W1による形状測量は、明かり工事において用途を限定するならば、十分活用可能な手法であると判断された。ただし、各用途に応じたア

アプリケーションの整備が必要である。一方。地下構造物の施工においては、撮影時の照明の問題が大きく、これを解決しなければその適用性を評価できない現状にある。至急、これを解決し、改めて検証を行う予定である。

なお、形状測量解析ソフトは富士写真株式会社様のご好意により、試作段階のソフトを貸与いただいたものを使用した。最後に、本研究にご指導、ご助力いただいた富士写真株式会社様、現場試験にご協力いただいた三井住友建設株式会社南光洋二所長に改めて深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 三次元計測の話, <http://www.kurabo.co.jp/el/room/3d>
- 2) 井口征士, 佐藤宏介:三次元画像計測, 昭晃堂, 1990
- 3) <http://fujifilm.jp/personal/3d/camera/finepixreal3dw1/>

Appendix_A STEP の概要

Contents

A.1 統合共通リソース	A-1
A.2 統合応用リソース	A-2
A.3 アプリケーションプロトコル	A-2
A.4 EXPRESS言語	A-2
A.5 EXPRESS-G	A-3
A.6 Paft-21 ファイル	A-3
A.7 STEP の現状	A-4

Appendix_A STEP の概要

STEP (Standard for Exchange of Product model data) は、ISO における製品データの表現及び交換に関する規格 (ISO 10303) であり、ライフサイクル全般にわたる製品の情報データと、図面データの表現方法と、その製品データの交換・共有を実現する方法を規定している。ここで注意すべき点は、STEP は単に CAD データを効率よく交換するためにあるのではなく、異なったアプリケーションシステムの統合化、技術革新に対するデータ資産の保証、システム開発コストと時間の削減、プログラム言語とデータベース技術の選択などの恩恵を利用者が受けられることができるための貴下腕ある点である。

STEP は、“記述方式”、“実装方式”、“適合性試験”、“統合リソース”、“アプリケーションプロトコル”により構成され、Part 1 では、STEP の規格全体の範囲、目的、用語、文書間の関係などについて定義されている。STEP の目的は、製品モデルを曖昧さの少ない形で形式的に記述する言語と記述方式を定めることにあり、Part 11 で定義される EXPRESS 言語は、その代表的なデータ仕様記述言語である。

製品モデル表現は、統合共通リソース (Part・41～46)、統合応用リソース (Part・101～109)、アプリケーションプロトコル (Part・200 番台) に分類される。以下に概要を記す。

A.1 統合共通リソース

統合共通リソースとしては、Part-41～99 までの番号が割り付けられている。以下、Part-41～44 の概要を記す。

- ①Part-41 製品の記述及び支援の基礎:ほかの統合共通リソースにおいて用いられる表現要素の中で、単位系や年号など共通に用いられるものの表現をまとめたものである。
- ②Part-42 幾何及び位相表現:種々の製品の形状記述等において共通的に用いられる幾何形状、また、幾何形状要素の接続などを記述する位相、さらにそれらが整合性を保証する形でまとめられたワイヤーフレームモデルなどの形状モデルを想定するものである。
- ③Part-43 表現構造:アプリケーションプロトコルにおいて、統合共通リソースが参照するための要素を想定したものである。
- ④Part-44 製品構造の構成:図面など、製品データを図画的な形態で表示するために必要な要素、例えば線分の種類や色などの記述要素を規定するものである。

A.2 統合応用リソース

統合応用リソースとしては、Part-101～109 までの番号が割り付けられている。Part-101 の概要を記す。

- ①Part-101 「製図」は、製図の表現に必要な共通表現要素をまとめたものである。製図の表現要素が共通であっても、応用分野や製品データの表現のレベルによっては異なる表現が求められる。

A.3 アプリケーションプロトコル

応用分野のコンテキストを想定して、製品データの交換の単位を規定しているのがアプリケーションプロトコルで、Part 201～1199 までの番号が用意されている。アプリケーションプロトコルでは、各分野別の新規な応用規格であり、アプリケーションの適用範囲、コンクスト及び情報要件が明確に定義されている。Part 101 と 203 の概要を記す。

- ①Part-201 明示的製図:2次元製図に関する製図データモデルについてまとめられている。
- ②Part-203 構成管理設計:製品のバージョン、部品の3次元形状表現と階層構造、製図に関する管理情報を集めて交換の単位としてまとめられたものである。

STEPのもう一方の目的である製品データの交換という面では、実装方式が定められている。実装方式は、製品データの表現と独立した形式になっており、Part 21(Clear text encoding of exchange structure)のファイル形式のデータ交換書式や、Part・22 のデータベースアクセスインターフェースなどがある。

A.4 EXPRESS言語

製品モデリングとは、製品を記述することである。このためにSTEPでは製品を構成している要素に分解し、各要素毎にその内容を EXPRESS 言語で記述する。その後、各々の要素間の関連付けを行う。この各要素のことをエンティティ(entity)と呼び、その内容を記述するものを属性(attribute)と呼ぶ。つまりデータスキーマは entity によって記述され、entityは attribute によって記述され詳細化される。例えば、「橋梁」というものは1つのentityになる。また、橋梁には橋長や支間長等の様々な情報があるが、これらが attribute であると考えられる。橋梁(bridge)をEXPRESS言語仕様にしたがって表現すると図-A.1 のようになる。entityは、ENTITYで始まり、END_ENTITYで終わる。この間に必要な attribute を列記する。

Entity にはentity名を付ける必要がある。attribute はその名前とそのデータ型またはentity名を:で区切って記述する。データ型には、INTEGERやREALのような単純型のほかにLABELのようにタイプ宣言されたものが使用される。

```

SCHEMA example14;
  TYPE Girder_type=ENUMERATION OF(I_Girder_Composite,Box);
  END_TYPE;

  ENTITY Bridge
    SUPERTYPE OF(ONEOF(Girder_bridge, Cable_stayed_bridge));
    span:DOUBLE;
    UNIQUE
      URI:span;
  ENDE_ENTITY;

  ENTITY Girder_bridge
    SUBTYPEOF(Bridge);
    girder:Girder_type;
  ENDE_ENTITY;

  ENTITY Cable_stayed_bridge
    SUBTYPE OF(Bridge);
    main_tower_height:DOUBLE
    Cable_style:OPTIONALSTRING;
  END_ENTITY;
END_SCHEMA;

```

図-A.1 Express 言語によるスキーマ定義の例

A.5 EXPRESS-G

STEP データベースのスキーマを表現する方法として、EXPRESS 言語による表現の他に、EXPRESS-G を用いた図式表現がある。EXPRESS-G は、各種データ型やENTITYの持つデータ種を明示する機能に加え、ENTITY相互の継承関係を表現するのに優れており、スキーマの全体的な構造を把握するのに非常に有用である。

A.6 Part-21 ファイル

EXPRESS や EXPRESS-G は、製品モデルの定義言語であり、STEP データベースのスキーマでしかない。そのスキーマのルールに従い作成される実際の交換用データ(インスタンス)として、STEP物理ファイル、通称 Part・21 ファイルがある。

Part 21 ファイルはテキストファイルであり、図-A.2 のような基本構造をもつ。このように、Part 21 ファイルは、文字列 ISO 10302-21 で始まり、END ISO-103030-21 で終わる。さらにファイルは、大きく分けてヘッダー節とデータ節の2つの部分からなる。ヘッダー節には、ファイル名、作成日時、作成者、作成システムなどのヘッダー情報が記述される。また、STEP 規格中のどのアプリケーションプロトコルに則って作成されたかを示すスキーマ名や実装レベルなども記述される。データ節には、CADシステムなどで作成されたデータ群が、STEPのデータ形式に変換されてSTEPエンティティのインスタンス列として並ぶ。

データ節中のエンティティ・インスタンスの基本的な書式は、以下のようなものである。

#自然数=エンティティ名(属性値 1, 属性値 2, …)

すなわち、1個のエンティティ・インスタンスは、記号#で始まり、記号;で終わる。記号#の次に続く自然数は、1から順番に付ける必要はない。ただし、1つの Part 21 ファイル内で一意でなければならない。この識別子により Part 21 ファイル中のエンティティ・インスタンスを特定出来る。

```
ISO-10303-21;
HEADER;
  FILE_DESCRIPTION((' ', '2;1' );
  FILE_NAME('AP202¥SAMPLEFILE01.p21', '2005-10-15T10:40:07', ('shitani', ( ' ', 'STEP version
    1.0', 'AutoCAD2002', ' '));
  FILE_SCHEMA((sample'));
ENDSEC;

DATA;
  .....
#11=GIRDER_BRIDGE(50, 'I_Girder')
#14=CABLE_STAYED_BRIDGE(100, 'Harp', 20)
#17=AXISPLACEMENT(#24, $$);
#24=CARTESIANPOINT(2.000000E+00, 0.000000E+00, 0.000000E+00);
  .....
ENDSEC;
END-ISO-10303-21;
```

図-A.2 Part 21 ファイルの形式

A.7 STEP の現状

建設業界、特に土木分野におけるSTEPのアプリケーションプロトコルの策定に関しては、何ら進んでいない状況にある。その主な理由として、3つ挙げられると考えられる。

第1に、機械や他の産業に比べて、土木分野は公共事業に関連するものが多く、従来の民間主導のアプリケーションプロトコル開発では実現が困難である点、第2に地勢や地理等、製品(構造物)のモデル化だけでは解決しない要素との関連がある点、第3に土木分野では用途、工種が広範におよび、アプリケーションプロトコル開発のためのモデル化領域の選択や共通資源の抽出などが困難である点である。

仮に簡単な構造物を表現することを考えてみても、構造物の形状の表現にPart 40 番台の幾何要素を用いることになるが、その際、図面情報のグループやレイヤーといった要素を表現することが困難な状況となっている。

Appendix_B IAI の IFC

Contents

B.1 IFC の概要	B-1
B.2 IFC 仕様書リリース・ドキュメント	B-1
B.3 IFC 2×2 の概要	B-3
B.4 IFC2x2 における主要なコンポーネント	B-4

Appendix_B IAI の IFC

B.1 IFC の概要

建築分野では、1990年代半ばに、ISOのSTEPの制定を待たずに業界標準を作成すべく、米国が中心となり関係各国と協調しながら、業界団体IAIを設立した。IAIは、建設業界を中心とした国際的な非営利団体であり、ISO/STEPの建築サブグループと正式にリエゾン関係を結び、協力・協調を行っている。IAIでは、建築構造物を主体としたプロダクトモデルIFC (Industry Foundation Classes)を構築し、本格的な実務への実用化に向けてモデルの仕様の開発等が進められている。

IFCは、建設業界(主に建築分野)での情報の共有化のための方法を提供するために、建設プロジェクトで最小限必要とされるデータ(例えば、梁、柱等)をクラスとして定義し、そのクラスからのオブジェクト(実体となるデータ)の生成、各オブジェクトへのアクセスや演算を行うためのクラスライブラリである。すなわち、IFCは建築構造物の要素ならびに設計・施工・維持管理等の情報をまとめたカスタマイズ可能な業界ベースのオブジェクトを提供している。よって、施主、建築家、構造技術者、設備業者、施工業者等の各プレーヤーがプロジェクト・モデルを共有することが可能となると考えられ、ライフサイクルを通じた各種業務の大幅な効率化が期待されている。

さらに、IFCは、2002年11月に当時の最新バージョンであったIFC 2xの一部が、ISO第184技術委員会/第4小委員会(TC184/SC4)のPAS(a Publicly Available Specification)として認定された経緯があることから、今後も段階的にSTEPの一部として認定を受け、最終的には建設業界の国際標準フォーマットとなることが予想されている。IFCでは、建設業界全体をモデル化の対象としているが、現段階では建築構造物の規定化が主体であり、土木構造物を対象としたモデル化は遅れている。

B.2 IFC 仕様書リリース・ドキュメント

IFC仕様書は、建設業界専門家とソフトウェア技術専門家を対象に作成され、そのリリース1.5のドキュメント概要は以下のようなものである。

(1)IFC エンドユーザ・ガイド

IFC エンドユーザ・ガイドは、建設業界専門家向けに、IFC 準拠の共有プロジェクト・モデルの概念を含むIFC仕様書の概要が記述されている。このガイドは、IFCに準拠したアプリケーションのエンドユーザに対するメリットの概説、IFC IAIの概要、ならびにIFC仕様の構造化プロセス・モデルについても要約されている。

(2)IFC 仕様開発ガイド

IFC仕様開発ガイドは、IAIで使用されるIFCの開発プロセスを定義する文書である。また、プロセス・ダイアグラム作成例、詳細要求定義の作成例、EXPRESS 定義や EXPRESS-G ダイ

アグラムの内容についても説明されている。

(3) IFC オブジェクト・モデル構築ガイド

IFC オブジェクト・モデル構築ガイドは、IFC オブジェクト・モデルの構成を定義する文書である。オブジェクト・モデル構築はモジュールと階層からなり、独自の開発やサブ・スキーマの改良を可能にする。

Volume 1 : IFC がサポートする AEC プロセスについて

IFC でサポートされる AEC プロセスでは、IFC プロジェクト・モデルがサポートする建設業界の各業種の作業プロセスの説明を行っている。

Volume 2 : IFC オブジェクト・モデル・ガイド

IFC プロジェクト・モデル・ガイドでは、IFC で扱うプロジェクト・モデルの定義について説明している。Volume1 の AEC プロセスで必要とされる IFC オブジェクト・クラス、標準インターフェース、それにデータ型についての情報を構造化して明確にするとともに、IFC モデルを構築するにあたってのコンセプト・モデルの構造、設計意図、共有関係、アプリケーション開発者によるモデル拡張、ならびに IFC プロジェクト・モデルが意図しているモデル交換とインターフェース部分についても説明を加えている。

Volume 3 : IFC オブジェクト・モデル・リファレンス

IFC オブジェクト・モデル・リファレンスはクラスと IFC のオブジェクト・モデルで定義されているデータのタイプを詳細に解説したものである。Volume1 で定義された建設プロセスの要求定義、詳細なオブジェクト・クラス・データ、関連、標準インターフェース、タイプの定義、ならびに形状を定義する幾何スキーマの情報モデルの構築についても説明を加えている。

さらに、EXPRESS で定義されているデータモデルのビューと IDL で定義されている標準インターフェースについて説明を行っている。それぞれのコード方式は、IFC 準拠のアプリケーション開発を部分的に自動化するための CASE (Computer Aided Software Engineering) ツールのインターフェースとしてアプリケーション開発に使用される。

Volume 4 : ソフトウェア実現ガイド

IFC ソフトウェア実現ガイドは、IFC 準拠のアプリケーションを実証する方法論を詳細に解説したものである。この中では、準拠評価の概要、IFC モデルのサブセット・データ変換の定義、準拠実証テストで使用されるテスト一式などを説明している。

B.3 IFC 2×2 の概要

IFC2×2 は、図-B.1 に示すように、以下の4つの層から構成されている。

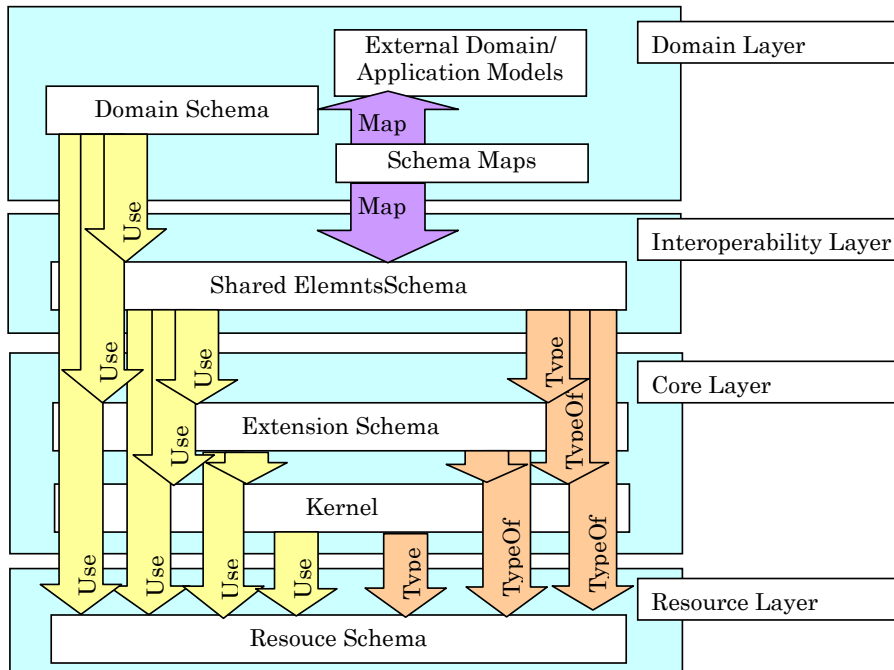


図-B.1 IFC2×2 の4層モデル

Resource Layer

「もの」の定義に使用される要素、点や線、円、サーフェス、ソリッド等を表す関数や、材料、コスト、単位、物理量、時間等を表すクラスが含まれている。これより上位に位置する層で使用される。

Core Layer:「もの」を定義する際に必要不可欠であり、3つの骨格となるクラス。IfcObject、IfcPropertyDefinition、IfcRelationship が定義されている。IFCの各クラスの名前は Ifc で始め、各語を大文字で始め、スペースを入れない命名法となっている。これら3つのクラスの相互関係により、「もの」が定義される。Core Layer コア層は抽象度が高く、具体的な部材等は定義されていない。

Interoperability Layer

はっきりとした形状、属性を持った部材(梁、柱、ドア、窓等のクラス)が定義されている。上層(Domain Layer)で使用される。

Domain Layer

建設業界を構成する各分野(建築、構造、設備、施工等)での使用に特化したクラスが定義されている。これら各層の内部は、各種アプリケーションに応じた複数のリソースによって構成されている。さらに各リソース内には、オブジェクト指向技術が適用されたクラス(Entity)等が数多く定義されている。

IFC2×2 における 3 次元形状と属性(単位重量, 材質, 弾性係数等)を持った「もの」(部材)の表現法は以下のようなものである。まず、「もの」そのものの存在を表すクラスが必要になる。このクラスは IfcObject 起源のクラスとして整備され、例えば柱を表すには IfcColumn クラスが用意されている。次に、そのクラスの 3 次元形状を IfcRepresentationItem のサブクラスを使用して与える。クラスに 3 次元形状を与える。IfcRepresentationItem のサブクラスには、点や線、円、サーフェス、ソリッド等の形状を表すクラスが数多く定義されており、ユーザーはこれらのクラスの中から対象とする柱に最も適した形状クラスを選択してデータを実装する。IFC2×2 では、1 つの部材の形状を表す場合に、1 つ以上(複数)の形状クラスを使用することが許容されているため、これらのクラスを複数個組み合わせることにより、複雑な 3 次元形状を表現することも可能である。

さらに、「もの」(部材)に単位重量や材質、弾性係数等の属性データを、プロパティセットクラス(IfcPropertySet)の一種である IfcPropertySetDelinition のサブクラスを用いて属性を定義し、IfcRelationship クラスを使用して「もの」そのものの存在を表すクラス IfcColumn 等にリンクさせる。

B.4 IFC2x2 における主要なコンポーネント

前述のように、IFCは建築構造物の要素や設計、施工、維持管理等の情報をまとめたカスタマイズ可能な業界ベースのオブジェクトを定義したクラスライブラリである。その中には、ファン(IfcFan)やヒーター(IfcUnitHeater)等の空調設備を定義するクラスや、特定の 3 次元形状を持たないプロセス(IfcProcess)やタスク(IfcTask)、さらに、人(IfcPerson)や組織(IfcOrganization)を表すクラスもあり、その種類や数は膨大である。本項では、その中でも特に、構造物を構成する各部材を表現する場合において必要不可欠な 4 つのコンポーネントを紹介する。

① IfcObject

IfcObject クラスとそのサブクラスは、基本的に実世界に存在する「もの」を定義するクラスである。オブジェクトクラスの例としては、梁(IfcBeam)、柱(IfcColumn)等がイメージしやすいが、空間(IfcSpace)、場所(IfcSite)、プロジェクト(IfcProject)等もオブジェクトの一種である。柱を一つのオブジェクトとして考えた場合、長さや太さ等の形状の表現が必要不可欠となるが、形状を表現する属性は、IfcObject クラスのサブクラス、IfcProduct が持つ。つまり、形状を有する部材の定義は、IfcProduct クラスのサブクラスとして定義される必要がある。

クラスは、対象とするオブジェクトが持つべき属性の一覧を定義する抽象的なデータモデル

であるのに対し、実際に存在する梁や柱等は、各々に対応するクラス(IfcBeam、IfcColumn)内の各属性に長さや断面形状等の実データを入力した物理ファイル、すなわちインスタンスとして表現される。クラスとインスタンスの概念を表したものを図-B.1 に示す。

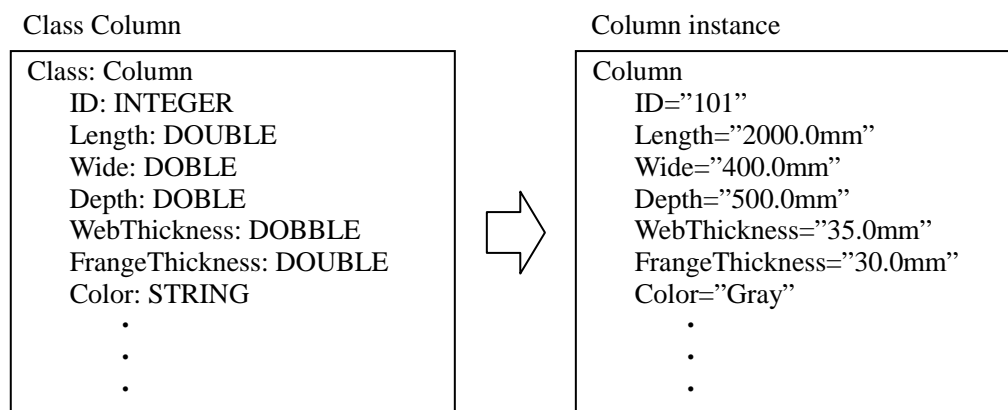


図-B.2 クラスとインスタンスの概念

②IfcPropertyDefinition

IfcPropertyDefinition とそのサブクラスは、IfcObject 及びそのサブクラスが持たない付加的な属性(プロパティ)を定義し、データを実装するために用いられるクラスである。例として柱を対象に考えた場合、弾性係数や降伏応力等の力学的パラメータがこれに相当するものと考えられる。

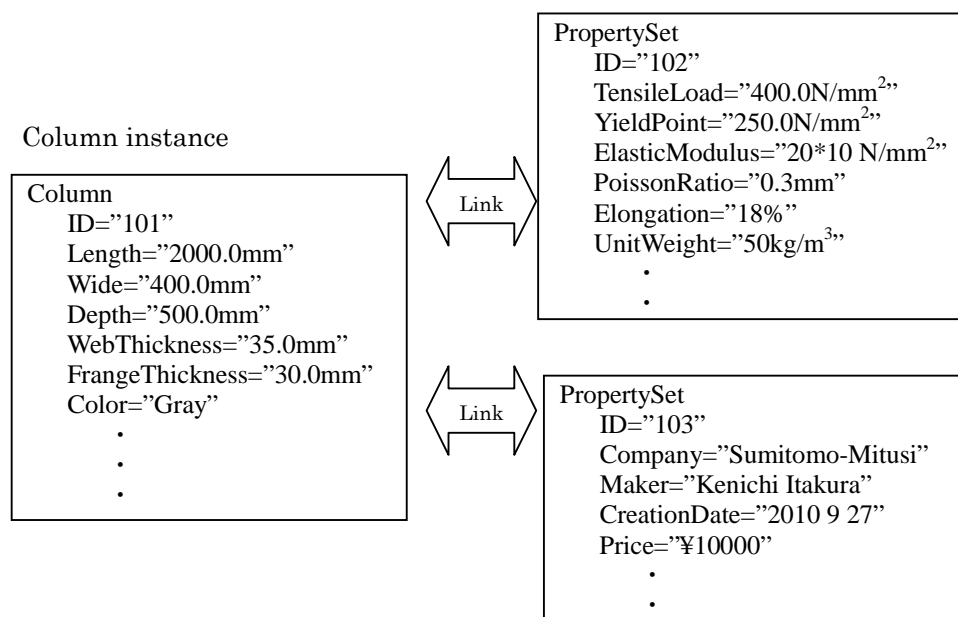


図-B.3 インスタンスとプロパティセットの関係

IfcColumnクラスは、弾性係数や降伏応力等のデータを実装する専用の属性を持たないため、こうしたデータを実装する必要がある場合には、IfcPropertyDefinition 及びそのサブクラス（例えば、IfcPropertySet 等）を使用することとなる。図-B.3 に示すように、オブジェクト(柱)とそのプロパティを分離して定義・実装することにより、複数のオブジェクトが同一のプロパティを共有することも可能である。さらに、複数のオブジェクトが1つのプロパティを共有することによって、同一のデータを重複して実装する必要がなくなるため、インスタンスファイルの肥大化を抑制することにも効果がある。

③IfcRelationship

IfcRelationship とそのサブクラスは、主としてオブジェクト間の関係や、オブジェクトとプロパティセットとの関係を定義するのに用いられるクラスである。IfcRelationship クラスのサブクラスには、特定の関係を定義するためのクラスが定義されている。すなわち、部材間の接合関係を表現するには、要素間の関係を表現する専用のクラス RelConnectsElements がサブクラスとして定義されており、これを用いて部材間の関係を表現する。部材とその部材が所有するプロパティを関連付けるために、オブジェクトとプロパティをリンクさせるクラス IfcRelDefinesBy Properties が定義されている。この他に、オブジェクトの集合体を表す IfcRelArregates や、オブジェクトにプロセス (IfcProcess) を割り当てる IfcRelAssignsToProcess 等のリレーションシップがある。

Appendix__C

標準的な LandXML の要素構成と、
その標準入出力ファイル形式

Appendix_C 標準的な LandXML の要素構成と、その標準入出力ファイル形式

LandXMLとは、土木分野における設計・測量データのオープンなデータ標準を目指したXMLフォーマットであり、そのフォーマットはLandXML.orgにより策定される。スケルトン(構造物の基本設計情報)とは、土木構造物や地物¹の基本的な骨格を抽象化した概念スキーマであり、土木構造物のデータ交換時に前提となる基本的な土木知識の論理的な概念構造が定義される。スケルトンには、以下の要素がある。

- | | |
|----------|---------------------|
| 1. 設計仕様 | 設計条件・制約条件 |
| 2. 形状構造 | 平面線形、縦断線形、横断復員、法面形状 |
| 3. 基本座標系 | グローバル・ローカル |

一方、スケルトンの種類は以下のように分類される。

- | | |
|------------|------------|
| 1. 基本スケルトン | 共通項目定義集 |
| 2. 拡張スケルトン | 設計・施工・維持管理 |

スケルトンにあったオブジェクトを定義して、データ形式を規定することで、情報項目レベルの互換性の維持を図るものである。図-C.1 に標準的な LandXML の要素構成を、また表-C.1、および C.2 に LandXML からの標準入力要素を示す。

¹地物：①地図の表示で、道路、建物、河川、植生等の総称で、等高線等であらわされる地形に対比して使われる。②天然・人工にかかわらず、地上にある全ての物の概念のこと。現実世界に実在する物・現象・環境や実在はしないが適用業務上に仮想的に存在させるものも地物という。：測量用語辞典

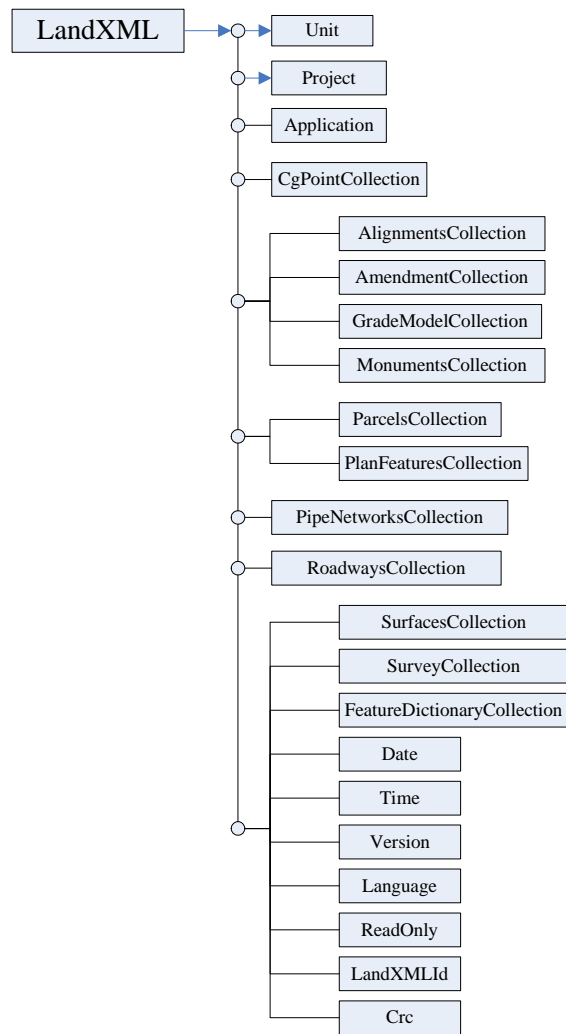


図-C.1 標準的な LandXML の要素構成

表-C.1 LandXML からの標準入力要素

LandXML Element Supported			Notes	
Units			Used for unit conversion if required	
Application				
Author				
CoordinateSystem				
CgPoints			Supports multiple elements。 If <CgPoints> is named, a corresponding point group is created and cogo points added。	
	CgPoint		Imported a cogo point, uses name and desc or code attributes。 Number is auto-assigned if name is alpha-numeric, but name is maintained。	
Alignments	CoordGeom		Line, curve, IrregularLine, chain, and spiral (clothoid, blossom, halfSineWave, and Japanese cubic)	
	AlignPI			
	StaEq		Station equations	
	Superelevation		All super elevation transitions	
	DesignSpeeds		All design speed station ranges imported	
	Profiles	ProfAlign	A design vertical alignment (PVI, Vertical curves: circular, parabolic, and asymmetric parabolic)	
ProfSurf		Imported as static sampled ground surface		
Parcels			Creates parcels from data, supports nested parcels	
	CoordGeom		Line, curve, spiral, IrregularLine and chain	
Monuments			Creates cogo points in a specially named monuments points group	
Surfaces	SourceData	Breaklines	Imported as 3D polylines on layer “<surfacename>_Breaklines”	
		Contours	Imported as 3D polylines on layer “<surfacename>_Contours”	
		DataPnts	Imported as cogo point group named “<surfacename>_DataPoints” on layer “<surfacename>_DataPoints”	
	Definition	TIN	Option to import faces only, then re-triangulate “quick” or maintain the triangulation in the file (slower)。 Supports face edge visibility and face neighbor optimization attributes	
Survey	ReducedObservations		Creates cogo points in a observations point group	
	SurveyMonuments		Creates cogo points in a monuments point group	
	Survey			Survey element
		InstrumentDetails		
		SurveyHeader		Units, CoordinateSystem
ObservationGroup		Setups, raw and reduced observations		
PlanFeatures	CoordGeom		Imported as 3D polylines to current layer	
PipeNetworks			Each <PipeNetwork> is imported as a C3D Pipe Network	
	Pipes	Units diameterUnit	Supports curved pipe	
	Structs	Units diameterUnit		

表-C.2 LandXML からの標準出力要素

LandXML Element Supported			Notes
Units			Always exported
Application			Always exported
Author			
CoordinateSystem			Exports Map Zone name / EPSG name / Open Geospatial Consortium's Well Known Name
CgPoints			Each point group exports as <CgPoints> with matching name and all contained points exported
Alignments	CoordGeom		Line, curve, spiral (clothoid, blossom, halfSineWave, and Japanese cubic)
	StaEq		Station equations
	Superelevation		All super elevation transitions
	DesignSpeeds		All design speed station ranges exported with Corridor model to Roadway element.
	Profiles	ProfAlign	Design profiles (PVI, Vertical curves: circular, parabolic, and asymmetric parabolic)
		ProfSurf	Surface sampled profile data
	CrossSects	CrossSectSurf	Sample lines exported as CrossSectSurfs
		DesignCrossSectSurf	Corridor assemblies exported as DesignCrossSectSurfs
Parcels	CoordGeom		Union parcels exported as nested parcels
Surfaces	SourceData	Breaklines	All exported
		Contours	All exported
		DataPnts	All exported
	Definition	TIN	Complete TIN with optional watershed
		GRID	Not supported
Roadways			Corridors exported as <Roadways> with references to <Alignments> with Profiles and Cross Sections (both sampled ground and design sections) and to 1 or more reference surfaces
PipeNetworks	Pipes	Units, diameterUnit	
	Structs	Units, diameterUnit	

Appendix_D LSDCS のデータ変換・登録操作

Contents

D.1 LSDCS の概要	D-1
D.2 データ変換候補の登録	D-2
D.3 データ変換処理とデータベースへの登録	D-6
(1)データ変換パラメータの変更	D-7
(2)登録後のステップパラメータの変更	D-8

Appendix_D LSDCS のデータ変換・登録操作

D.1 LSDCS の概要

測定されたレーザスキャナデータを、PDM 化し、各種の地質調査・解析に供することのできる形式に変換・登録するためのシステム LSDC(Laser Scanner Data Converter)を設計・構築した。これは、本報告書第3章に示した各種のデータ変換処理や変換結果のデータベースへの登録・管理を自動的に行うシステムであり、ユーザーは変換対象となる測定プロジェクトの指定、ならびに変換パラメータの指定・変更のみを行えばよい。なお、当該システムに関連する各種ファイルの構成は図-D.1 に示すものである。

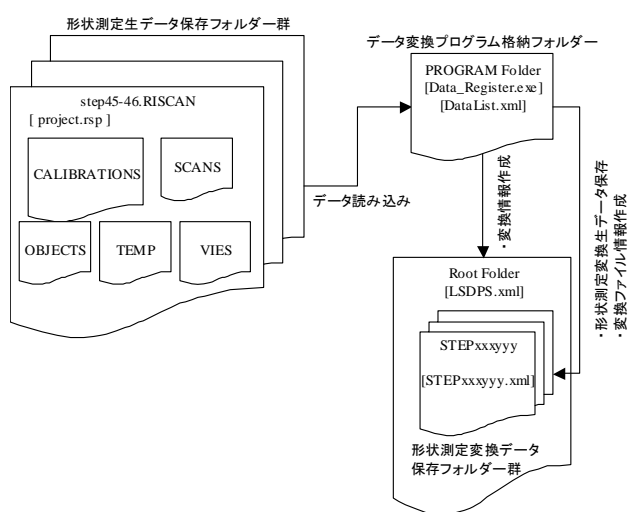


図-D.1 変換データ登録にかかわるフォルダやファイルの相関関係



図-D.2 レーザースキャナ変換マネージャ初期画面

LSDC を起動させると、図-D.2 に示す初期画面が現れ、以降のデータ変換・登録作業はす

べてこの画面上で行われる。なお、各部の機能は図-D.2 に示すとおりである。なお、ここでの記述においては、ウィンドウやフォルダを[]で、コマンドやファイルを{ }で、選択項目を()で囲い表記するものとする。また、システムの画面表示領域を、その表示項目で代表して記述し、< >で囲い表記するものとする。

D.2 データ変換候補の登録

LSDC において、ユーザーが最初に行う作業は、変換処理やデータベース登録の対象となる形状測定プロジェクトを候補として登録することである。これは、図-D.2 中の{登録候補追加}ボタンから開始する。

いま、{登録候補追加}ボタンをクリックすると、変換に供する RiSCAN プロジェクト・ファイル { project.rsp} を選択するために、図-D.3 のようにファイル選択画面[ファイルを開く]が現れる。ユーザーは、この画面上で変換したい RiSCAN プロジェクト・ファイル { project.rsp} を指定すれば、変換対象候補として登録される。

ここで、RiSCAN プロジェクト・ファイル { project.rsp} は3次元レーザースキャナーが形状測定データを管理するために作成するファイルであり、そのファイル名は測定プロジェクトによらず同一である。したがって、測定プロジェクトの選択は図-D.3 に示すように、各測定プロジェクトごとに作成されるフォルダ(ここでは、step45-46.RiSCAN)を検索し、その中にある RiSCAN プロジェクト・ファイル { project.rsp} をダブルクリックすることで行われる。

なお、実際の形状測定データ等は図-D.1 に示すように、RiSCAN プロジェクト・ファイルと同じフォルダの中にある CALIBRATIONS, OBJECTS, SCANS, TEMP, VIEWS 等のサブ・フォルダ群内に格納されており、これらにレーザースキャナー測定時に生成されるプリアンブル・ヘッダー・ブロック、メイン・ヘッダー・ブロック、パラメータ・ブロック等のヘッダー部と、走査データで構成されるデータ部等である。

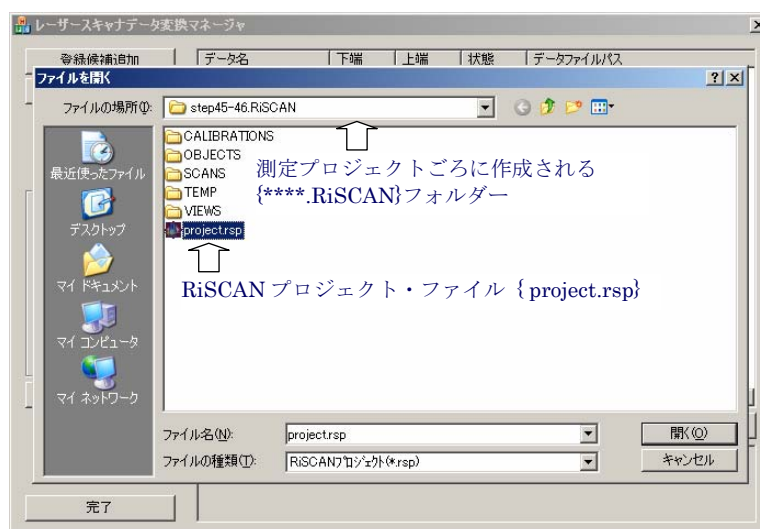


図-D.3 RiSCAN プロジェクト・ファイル { project.rsp} の選択

このようにして変換候補の測定プロジェクトを指定すると図-D.4のように、当該プロジェクトのデータ変換に関連するパラメータの一覧を表示・変更を行う[ステップデータパラメータのセット]ウィンドウが現れる。ここで、各パラメータの意味は以下のようなものである。

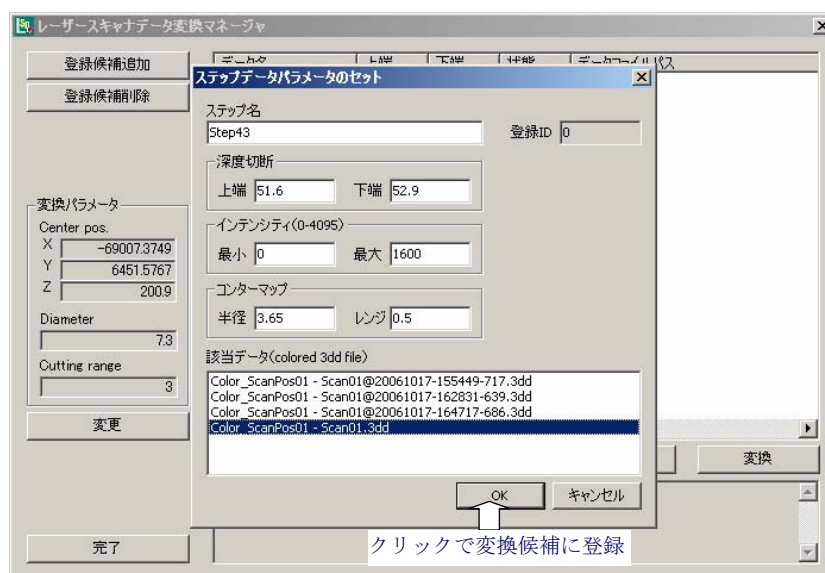


図-D.4 [ステップデータパラメータのセット]ウィンドウ

{ステップ名}

システム内部において使用するプロジェクト名。形状測定プロジェクトの最初のステップ番号をデフォルトとして使用する。

{深度切断} (上端) (下端)

当該プロジェクトにおいて測定対象とする測定区間の上部深度と下部深度。この範囲外にあるデータはすべて切断される。深度対応表の上限深度 UD と下限深度 LD をデフォルトとする。

{インテンシティ(0-4095)} (最小:Imax) (最大Imin)

受光強度データの初期表示に用いるレンジを 12bit(0-4095)で指定する。デフォルトは(最小)=0、(最大)=1600。

{コンターマップ} (半径:R) (レンジ:Range)

設計掘削半径からの距離を計算し、コンターマップで表示するための設計掘削半径と表示範囲。半径=3.65m、レンジ=0.5m をデフォルトとする。

{該当データ(colored 3dd.file)}

当該プロジェクトフォルダ内にある変換対象となる****.3dd ファイルをすべて表示し、変換対象候補として{Color ScanPos01-Scan01.3dd}を設定する。

{登録ID}

当該プロジェクトが変換・登録済みか否かを判定するフラグ。{登録 ID }=0 が未変換、{登録 ID }=1 が変換済みを意味する。

以上のパラメータは、**図-D.4** 中の[ステップデータパラメータのセット]ウィンドウ内で、直接、編集が可能である。パラメータを確認し、{変換・登録実行}ボタンをクリックすると、**図-D.5** のように当該プロジェクトの情報が変換・登録状況表示に表示され、変換処理の候補として登録される。以上の操作を、変換処理を行いたいすべての測定プロジェクトに対して行う。**図-D.6** は3つの測定プロジェクトを変換処理候補として登録した画面を示すものである。

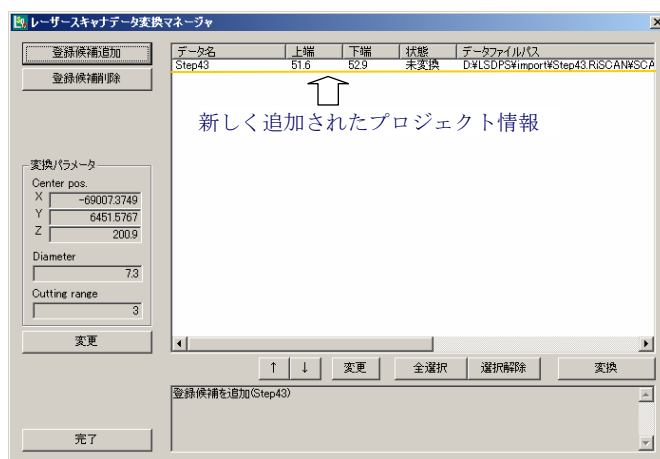
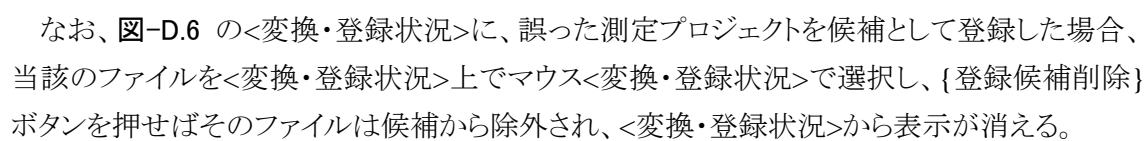


図-D.5 変換処理候補を登録した後の画面



図-D.6 変換処理候補を3つ登録した画面

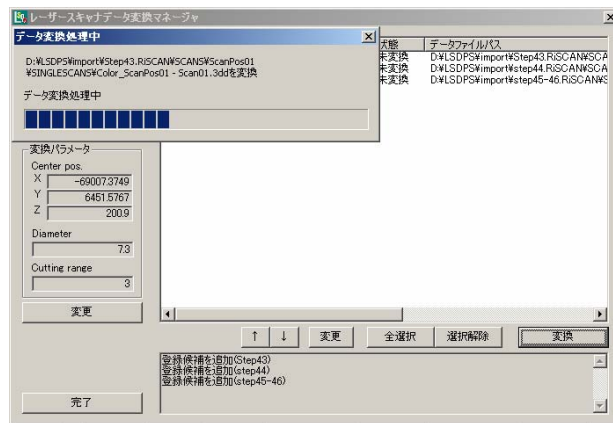
なお、-D.6 の<変換・登録状況>に、誤った測定プロジェクトを候補として登録した場合、当該のファイルを<変換・登録状況>上でマウス<変換・登録状況>で選択し、{登録候補削除}ボタンを押せばそのファイルは候補から除外され、<変換・登録状況>から表示が消える。

D.3 データ変換処理とデータベースへの登録

データ変換処理とデータベースへの登録は、**図-D.7** の画面でデータ変換処理を実施する測定プロジェクトを選択し、{変換・登録}ボタンをクリックすればよい。



(a)[全選択ボタン]をクリックで全候補を選択



(b)変換処理中



(c)変換処理終了後(Log/information に変換完了メッセージ)

図-D.7 一斉変換・登録処理の次第

図-D.7 は、{全選択}ボタンですべての候補プロジェクトを選択し、{登録・変換}ボタンを押し、一斉処理した状況を示したものである。図-D.7(c)の Log/information をみると、“変換完了”のメッセージが、データ変換終了ごとに、逐次、表示されていることが確認される。この後、{完了}ボタンをクリックすれば、すべての変換・登録作業は終了する。

なお、個別にプロジェクトの変換処理を行いたい場合は、マウスか{↑}{↓}ボタンで測定プロジェクトを指定し、{登録・変換}ボタンをクリックすればよい。一方、誤ってプロジェクトを指定した場合も、マウスか{↑},{↓}ボタンで当該の測定プロジェクトを選択し、{選択解除}ボタンをクリックすれば、選択は解除される。

このように、測定データの変換処理とそのデータベースへの登録は簡単な操作で実行することができる。ただし、ユーザーは、この処理の間に、以下の作業も同時に実施されていることを理解することが必要がある。すなわち、

- 1) データ登録管理ログ・ファイル DataList.xml の<datalist>要素に、変換された形状測定プロジェクトの情報を埋め込む。
- 2) Root Folder の下に作成されるプロジェクト管理ファイル LSDPS.xml には、形状測定プロジェクトを管理する情報を埋め込む。
- 3) 変換データを保存する各 Step Folder の下に、ステップ管理ファイル STEPxxxxyy. xml を作成する。

(1)データ変換パラメータの変更

{変換パラメータ変更}ボタンをクリックすると、図-D.8 に示す[変換パラメータの変更]ウィンドウが現れ、データ変換に供するパラメータを変更することが可能になる。ここで、各パラメータの意味は以下のようなものである。すなわち、

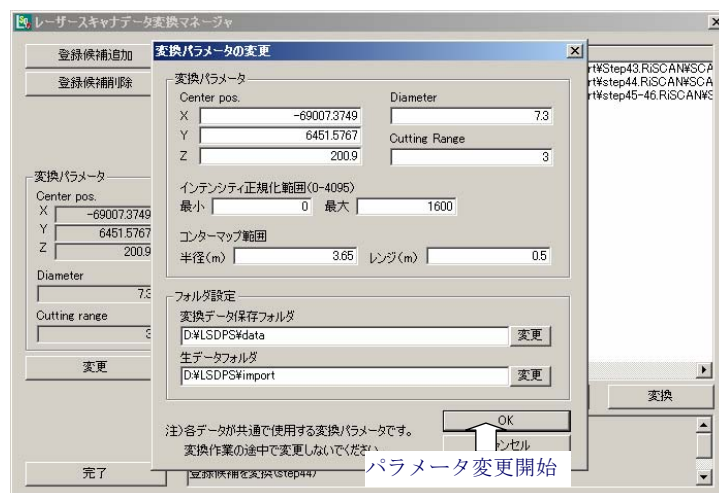


図-D.8 [変換パラメータの変更]ウィンドウ

{Center pos.} (x) (y) (z)

立坑中心の x,y 座標と立坑掘削開始標高の z 座標をそれぞれ示す。なお、そのデフォルトは(x=69,007.3749m),(y=6,451.5767)(z=200.9000m)である。

{diameter}

設計掘削直径を示す。そのデフォルトは(D=7.3000m)である。

{cutrange}

掘削断面内の飛沫や粉塵にデータが反射して得られた錯誤データの削除範囲半径を示す。これは、4.4.1 節で述べたように、水滴等にレーザーが反射した等の理由で工学的に意味を持たない測定データを排除するために設けたものである。このデータ排除作業を試行錯誤的に繰り返したところ、中心より半径 3m の範囲にあるデータを除外すれば、既存のデータでは不適正データを排除できると判断できたため、(r_e=3.0000m)をデフォルトとした。

{インテンシティ正規化範囲(0-4095)} (最小:Imax) (最大 Imin)

受光強度データの初期表示に用いる正規化範囲を 12bit(0-4095)で指定する。デフォルトは(Imax)=0、(Imin)=1600。

{コンターマップ} (半径:R) (レンジ:Range)

設計掘削半径からの距離を計算し、コンターマップで表示するための設計掘削半径と表示範囲。(R=3.6500m)、(Range=0.5m)をデフォルトとする。

{フォルダ設定} (変換データ保存フォルダ:Hout) (生データフォルダ Hin)

変換されたデータ群を保存するフォルダと、変換対象の測定プロジェクトが存在するフォルダをそれぞれ示す。そのデフォルトは(Hout=D:\%LSDPS¥Data) 、(Hin=D:\%LSDPS¥import)である。なお、これらのフォルダは、<parameter>要素の下位要素<savepath>に対応するものであり、データ管理上の Root Folder にあたる。したがって、特別な理由がない限り、これを変更しないことが望ましい。

(2)登録後のステップパラメータの変更

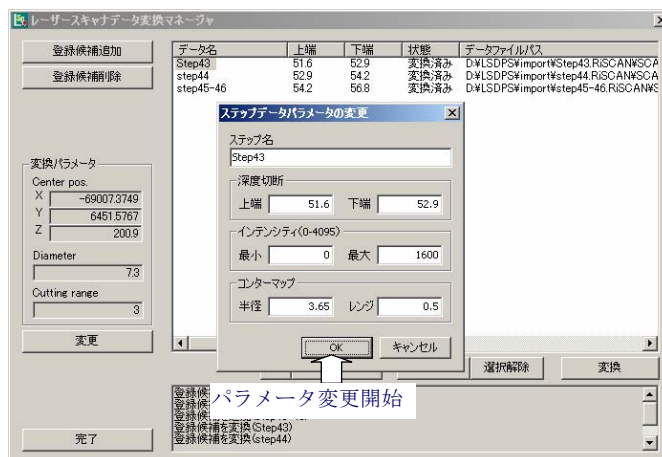
データ変換処理時に設定したステップパラメータを、データベース登録後に変更することが可能である。変更可能なステップパラメータは、(ステップ名)(深度切断)(インテンシティ)(コンターマップ)の4項目であり、変更内容はデータベース上の変換データに反映される。

この操作は以下のようなものである。図-D.9(a)に示すように、<変換・登録状況>上でステップパラメータを変更したい測定プロジェクトを指定し、{ステップパラメータ変更}ボタンをクリック

すると、図-D.9(b)のように[ステップパラメータの変更]ウィンドウが現れる。このウィンドウ内で必要な変更を行い、{OK}ボタンをクリックすれば変更が開始される。



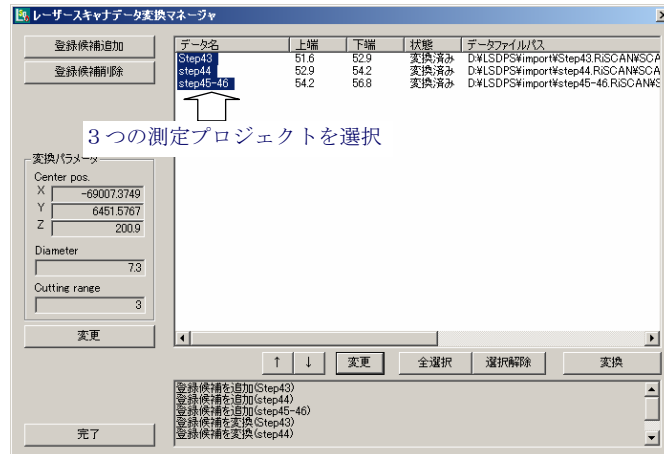
(a)パラメータを変更するステップの選択



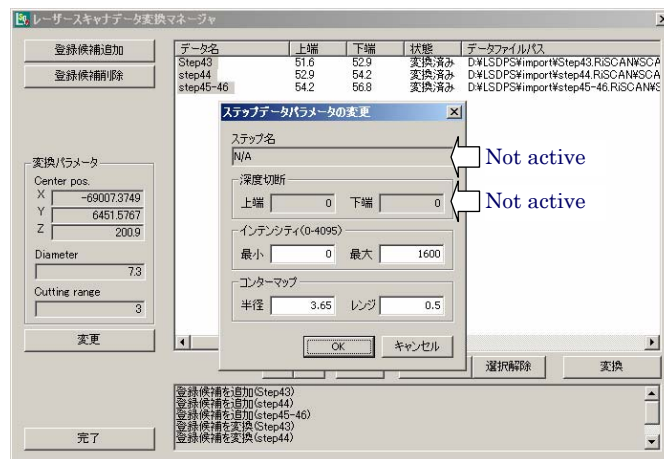
(b)[ステップパラメータの変更]ウィンドウ

図-D.9 ステップパラメータの変更操作次第

なお、図-D.10 のように複数の測定プロジェクトを選択して、一括でステップパラメータを変更することも可能である。この場合、図-D.10(b)のように、複数の測定プロジェクトで共通することのないステップパラメータである{ステップ名}、ならびに{深度切断}は、ウィンドウがアクティブとならず変更できない。なお、変更内容はデータベース上の変換データに一括して反映される。



(a)複数の測定プロジェクトを選択



(b)共通しないパラメータはロックされる

図-D.10 複数測定プロジェクトのステップパラメータ変更操作次第

Appendix_E LSDPS の機能と操作

Contents

E.1	初期操作画面と各ウィンドウの概要	E-01
E.2	[Manager] Window の操作	E-02
	(1)[Step tree Bar]タブの機能と操作	E-02
	(2)[Preview]タブの機能と操作方法	E-06
	(3)[Navigator]タブの機能と操作	E-07
E.3	[2D View]の機能と操作	E-13
	(1)[画像操作]部の機能と操作	E-13
	(2)[座標演算処理]部の機能と操作	E-14
	(3) {Calculate strike angle & dip angle}コマンドの機能と操作	E-17
	(4){Export Intensity to CSV file}コマンドの機能と操作	E--19
E.4	ウィンドウ群の管理と3次元画像の操作	E-20
	(1)ウィンドウ群の管理	E-20
	(2)[Main view]上の3次元モデルの操作	E-22
	(3)[3D view]の表示と操作	E-25

Appendix_E LSDPS の機能と操作

E.1 初期操作画面と各ウィンドウの概要

図-E.1 に LSDPS の初期操作画面を示す。図に示すように、操作画面は機能ごとに独立したウィンドウ群で構成される。これらのウィンドウ群は、必要に応じて分離やサイズ調整を行うことが可能である。それぞれのウィンドウやメニューバーの機能は以下のとおりである。

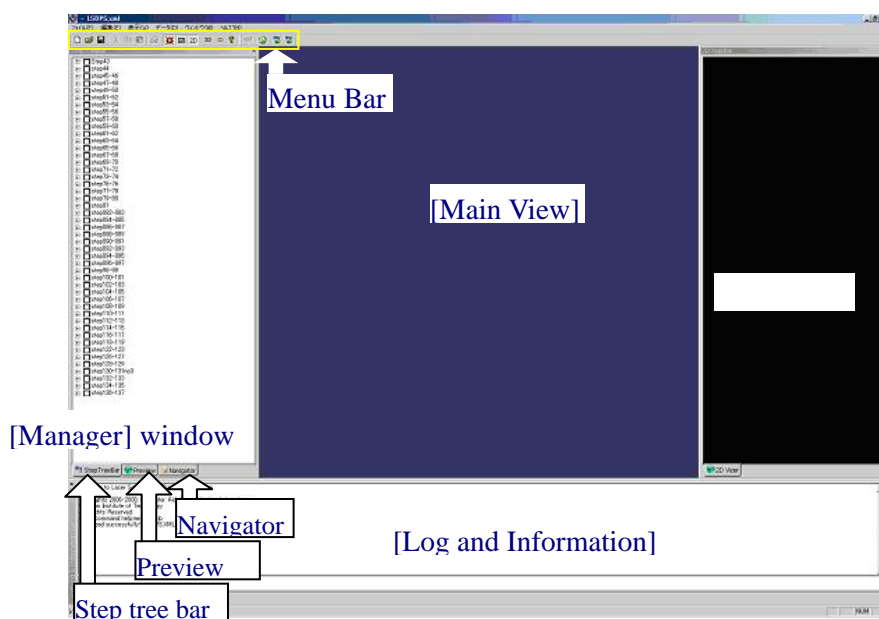


図-E.1 LSDPS 初期操作画面と各ウィンドウ名称

- [Manager] 形状測定データの選択・管理を行う。このウィンドウは[Step tree bar]タブ、[Preview]タブ、ならびに[Navigator]タブで構成される。
- [Preview]タブ : 登録されている形状測定データの RGB 平面展開図がすべて表示されたタブで、現状までの掘削状況を確認するために用いられる。
- [Step tree bar]タブ: 解析・可視化作業の対象領域を指定するためのタブ。ここで指定された測定プロジェクトが 2D ビュー上に平面展開表示される。
- [Navigator]タブ : [2D View]や[Main View]における可視化方法、視点制御機能を統合した。
- [Main View] 形状測定データの3次元形状表示や立坑モデル表示を行う。
- [2D View] 形状測定データの2次平面展開 RGB 表示を行う。また、各種データ操作や表示設定はこの画面上から行われる。
- [Command & Information] コマンド入力と実行処理に対する情報を表示する。2D View 上で

Menu Bar

取得した壁面座標などはこの画面上に表示される。

実装されたアイコン群により、ウィンドウ群の管理と、画像更新を実行する。

以下、各部ごとに、その機能と操作方法について説明を行う。

E.2 [Manager] Window の操作

マネージャーウィンドウは可視化に関する操作機能を統合したウィンドウであり、[Step tree bar]タブ、[Preview]タブ、ならびに[Navigator]で構成される。

(1)[Step tree Bar]タブの機能と操作

形状測定データを可視化・解析するためには、表示・分析の対象とする形状測定データを選択することからはじめなければならない。形状測定データの選択は、**図-E.2** に示すように、[Manager]ウィンドウの[Step tree bar]タブに表示される測定ステップ名の先頭にあるチェックボックスをオンにすることで行う。

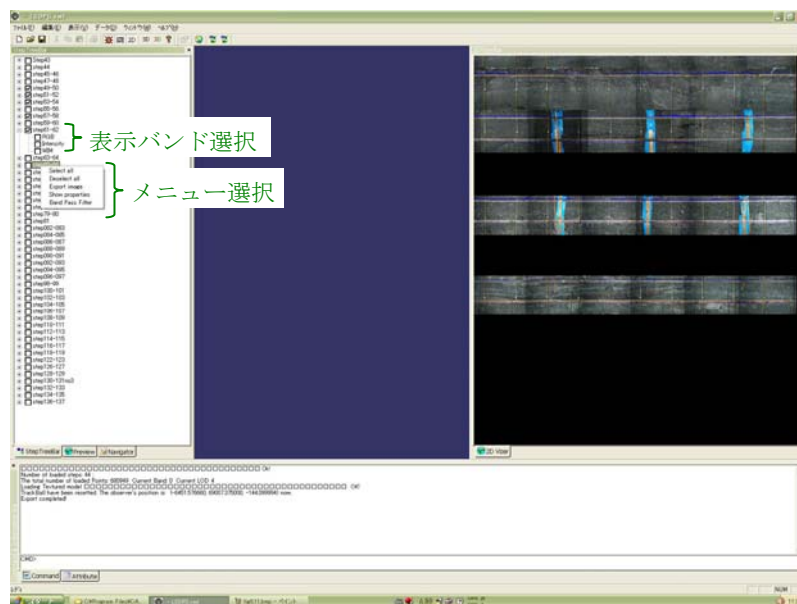


図-E.2 測定ステップの選択と2Dウィンドウ上への壁面平面展開RGB画像表示

測定ステップ名の先頭にあるチェックボックスをチェックすること、チェックしたステップ区間の壁面平面展開RGB画像が、逐次、[2D View]に表示される。**図-E.2**は6つの測定ステップを選択した状況をしたものであり、図に示されるように必ずしも連続して測定ステップを選択する必要はない。

また、それぞれの測定ステップ名の下位には、**図-E.2**に示すように[2D View]に表示するバ

ンドの種類を指定するメニューがあり、任意の測定ステップ名で表示バンドを指定すれば、その変更が[2D View]に反映される。なお、現在、用意されているバンドは RGB 画像{RGB}、受光強度画像{Intensity}、壁面凹凸カラーマップ{WIM(Wall Irregularity Map)}の3種である。図-E.3(a),(b),(c)は、{RGB}、{Intensity}、{WIM}を指定した際の[2D View]表示をそれぞれ示すものである。

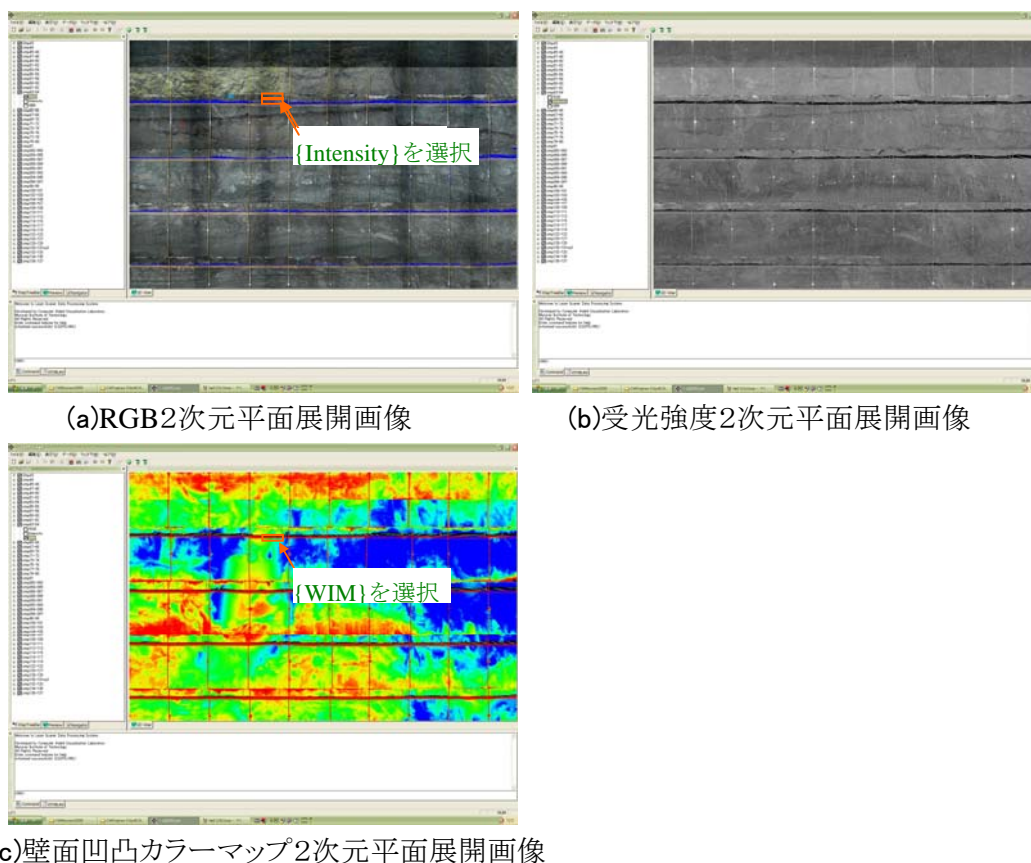
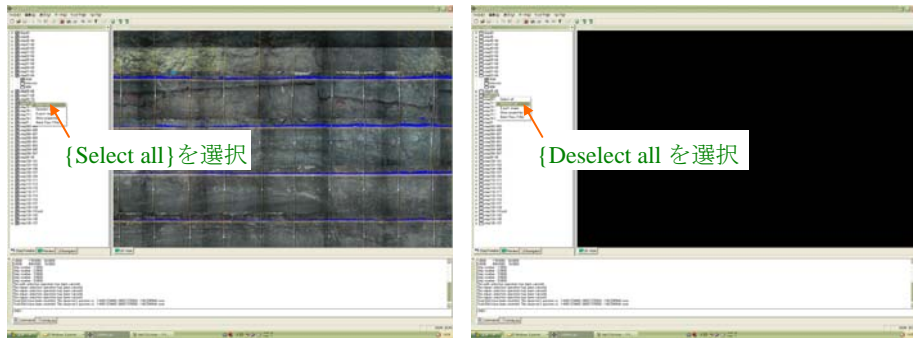


図-E.3 バンド選択による[2D View]の変化

さらに、[Step tree Bar]タブ上の任意の形状測定プロジェクト名上で右クリックすると、図-6.8示すように、メニュー項目が現れる。現在、用意されているメニュー項目は、{Select all}、{Deselect all}、{Export image}、{Show Properties}、{Band Pass Filter}の5項目であり、これらは、それぞれ以下のような機能を持つ。

1){Select all}、{Deselect all}の機能と操作

{Select All}をクリックすると、図-E.4(a)のように[Step tree Bar]タブ上に表示されたすべての測定ステップのチェックボックスが選択され、[2D View]にもすべての選択画像が表示される。一方、[Deselect All]をクリックするとそれまで選択していた測定ステップがすべて非選択となり、[2D view]には何も描画されなくなる。



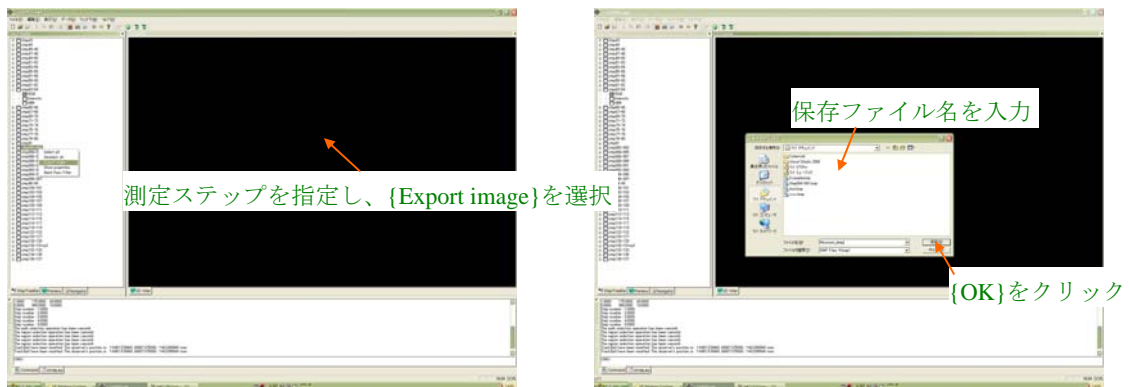
(a){Select All}の実行状況

(b){Deselect All}の実行状況

図-E.4 {Select All}、{Deselect All}の実行

2){Export image}の機能と操作

{Export image}は測定ステップの2次元平面展開画像をビットマップ形式で外部出力する機能を有する。その手順は、図-E.5 のようなものである。すなわち、図-E.5(a)のように、任意の測定ステップを[Step tree bar]タブ上で指定し(このときチェックボックスをオンにする必要はない)、マウスを右クリックして{Export image} を実行すると、図-E.5(b)のように、ビットマップデータを保存するファイル名の入力を要求するので、適当なファイル名を入力して、{OK}をクリックすれば当該形状測定データの2次元平面展開画像が保存される。図-E.6 に保存された RGB 2次元平面展開画像の例を示す。なお、出力される画像は出力時に指定されている表示バンドに従うものである。



(a)データを指定し、{Export Image}を実行

(b)保存ファイル名の入力

図-E.5 {Export image}による2次元平面展開画像の外部出力

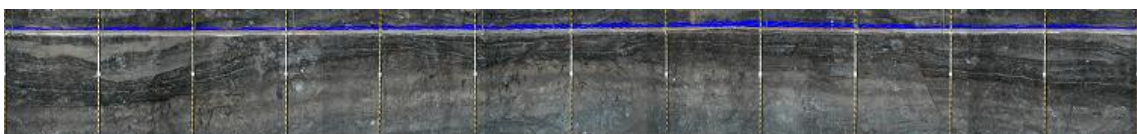


図-E.6 外部出力された RGB2次元平面展開画像

3){Show Properties}の機能と操作

{Show Properties}は測定ステップの各種情報を表示する。図-E.7のように、任意のステップを[Step tree bar]タブ上で指定し(このときチェックボックスをオンにする必要はない)、マウスを右クリックして{Show Properties}を選択すると、[Log and Information]ウィンドウ上に当該ステップの各種情報が表示される。なお、表示される情報は図-E.8のようなものであり{LSDPS.xml}に格納された情報と等価である。

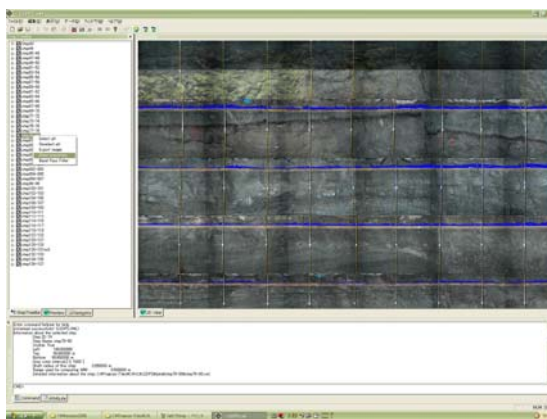


図-E.7 {Show Properties} によるステップ情報の表示

```
information about the selected step:
Step ID: 19
Step Name: step79-80
Visible: True
Left: 180.000000
Top: 96.600000 m
Bottom: 98.800000 m
Gray color interval[ 0, 1600 ]
Shaft radius of this step: 3.650000 m
Range used for computing WIM: 0.500000 m
Detailed information about the step: C:\Program Files\CAVL\LSLSDPS\data\step79-80\step79-80.xml
```

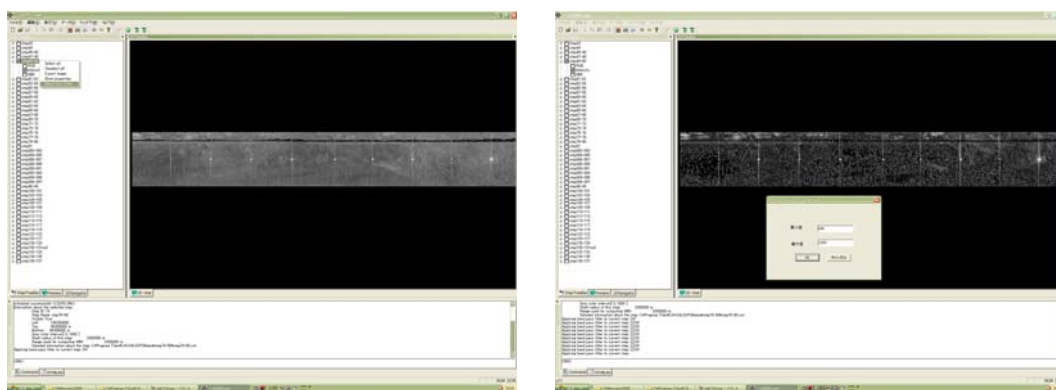
図-E.8 測定ステップ情報の内容

4){Band Pass Filter}の機能と操作

{Band Pass Filter}は、[2D View]上の受光強度画像において、表示する受光強度の範囲を指定する機能を有する。なお、当該の機能は指定した測定ステップのみに有効な機能であることに注意が必要である。

その操作法は以下のようなものである。すなわち、図-E.9(a)に示すように、[Band tree bar]上の任意の測定ステップを指定し、その測定ステップ上で右クリックを行うと図-E.9(b)のように表示する受光強度範囲を指定する[Band Pass Filter Interval]タブが現れる。ここで、表示する受光強度範囲の最大と最小を指定し、{OK}をクリックすると指定された範囲に応じて受光強度画像が書き換えられる。指定可能な受光強度範囲は(0-4096)であり、これまでの瑞浪超深地層研究所立坑の測定データは、ほとんどが(960-1440)の受光強度範囲にあるものとされる。なお、図-E.9(a)の[2D View]上には、受光強度範囲

(0-1600)の画像が、また図-E.9(b)には強度範囲(800- 1200)の画像がそれぞれ示されている。



(a) {Band Pass Filter}の実行

(b) 受光強度範囲指定

図-E.9 受光強度範囲の指定

(2)[Preview]タブの機能と操作方法

[Preview]タブは、可視化や解析に供する測定ステップの選定に当たってその状況を確認するために設けた参照画像タブであり、図-E.10 に示すように C:\¥Program Files¥CAVL ¥LSDPS¥Data フォルダーにあるすべての壁面形状測定データの RGB2次元平面展開画像が、常時、表示されている。このタブ上で、右クリックすると図-E.10 に示すようなメニューが現れ、ここに{Pan}、{Option}の二つの項目が用意されている。

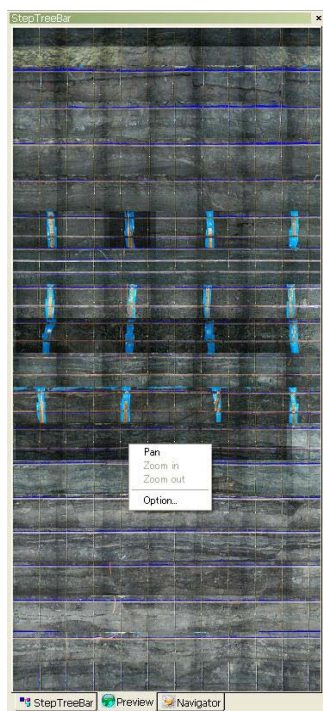


図-E.10 [Preview]タブ画面とメニュー



図-E.11 境界と最大・最小深度の描画

{Pan}は RGB2次元平面展開画像の移動を可能にするもので、これを選択し、マウスをドラッグすると、マウスの動きに合わせて RGB2次元平面展開画像が上下に移動する。また、{Option}を選択すると図-E.11 のように[Dialog]ダイアログが現れ、{ステップの枠を描く}、{ラベルを}描くの二つの項目が用意されている。これらは、それぞれ測定ステップ境界と測定最大・最小深度をRGB2次元平面展開画像上に表示するものである。これらをチェックすると、図-E.11 のように測定ステップ境界と測定最大・最小深度が白で表示される。

(3)[Navigator]タブの機能と操作

[Navigator]タブは、[Main view]ウィンドウや[2D view]ウィンドウの画像操作機能を集約したタブであり、図-E.12 に示す構成からなる。以下、各部の機能と操作を示す。

1){方位ダイヤル}と{深度スライダー}

図-E.12 において、{方位ダイヤル}と{深度スライダー}は、[Main view]上の3次元画像の視野方位と視野深度をマウスによって調整する。このとき描画される3次元画像は、立坑中心から見た画像である。

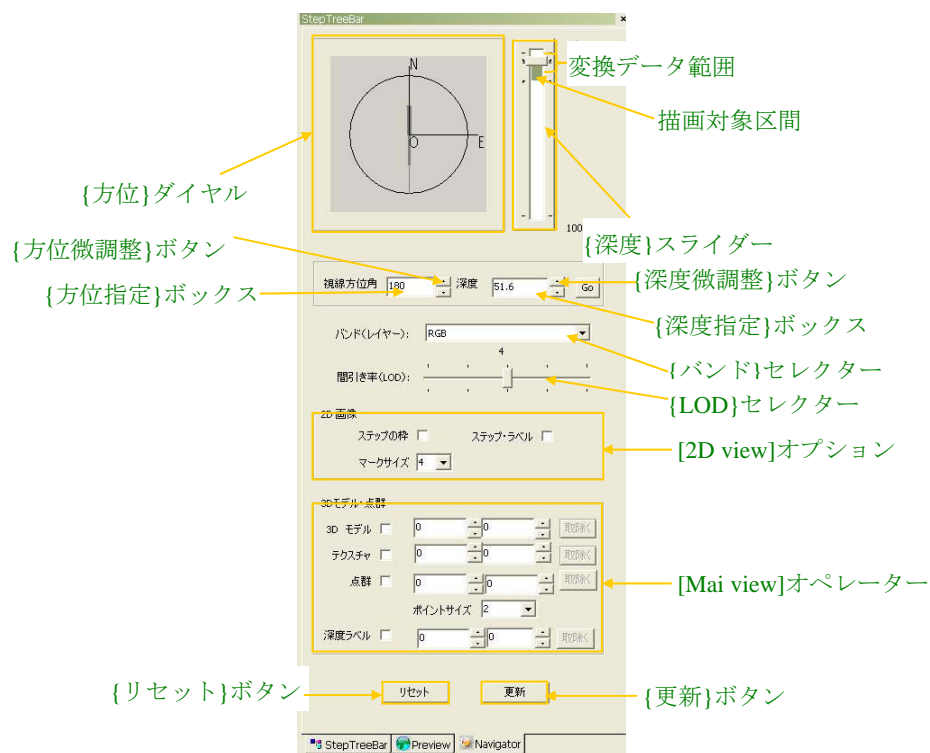


図-E.12 [Navigator]タブの構成

ここで、方位は北を0°、東を90°に定義するものである。また、{深度スライダー}中の薄い緑でマーキングされている範囲は形状測定データが存在する区間を示し、その脇の黒いマー

キング領域が、現在、描画対象と指定している区間を示す。

同様の操作は、{方位指定}ボックスと{深度指定}ボックスによって行うこともできる。これらを用いる場合、見たい方位と深度を、直接ボックスに入力し、{Go}ボタンをクリックすれば入力された方位・深度に応じた画像が描画される。また、{方位微調整}ボタンと{深度微調整}ボタンは、それぞれ方位と深度を微調整するもので、1回のクリックで方位が1°ずつ、深度が0.1mずつ現在の位置から移動する。

2){バンド}セレクター

{バンド}セレクターは、[2D view]と[Main view]に描画するバンドの選択を行う。{バンド}セレクターでバンドを指定後、{更新}ボタンをクリックすると、[2D View]と[Main view]に描画されるバンドが同時に変更される。図-E.13 にバンドの切り替えによる描画面面の変化を示す。



(a)RGB 画像の指定 (b)受光強度画像の指定 (c)ラーマップ画像の指定

図-E.13 バンドの切り替えによる描画面面の変化

3){LOD}セレクター

{LOD}セレクターは、[2D view]と[Main view]に描画される画像の間引き率(LOD)を選択する。間引き率は'0'から'4'までの5段階で、'4'が間引きのない最も精密な画像、'0'が最も粗く間引かれた画像でデフォルト画像となっている。表-E.1 に間引き率とLODの関係を示す。

表-E.1 間引き率と拡大段階の関係

LOD	0(Default)	1	2	3	4
間引き率	1/256	1/64	1/16	1/4	1/1

なお、図-6.20 は LOD の変化に伴う描画面像の変化を示したものである。図に示すように、[2D view]・[Main view]上の画像はいずれもLODの増大に伴い、画像は、逐次、鮮明となるが、これに伴い描画範囲が次第に縮小することに注意が必要である。

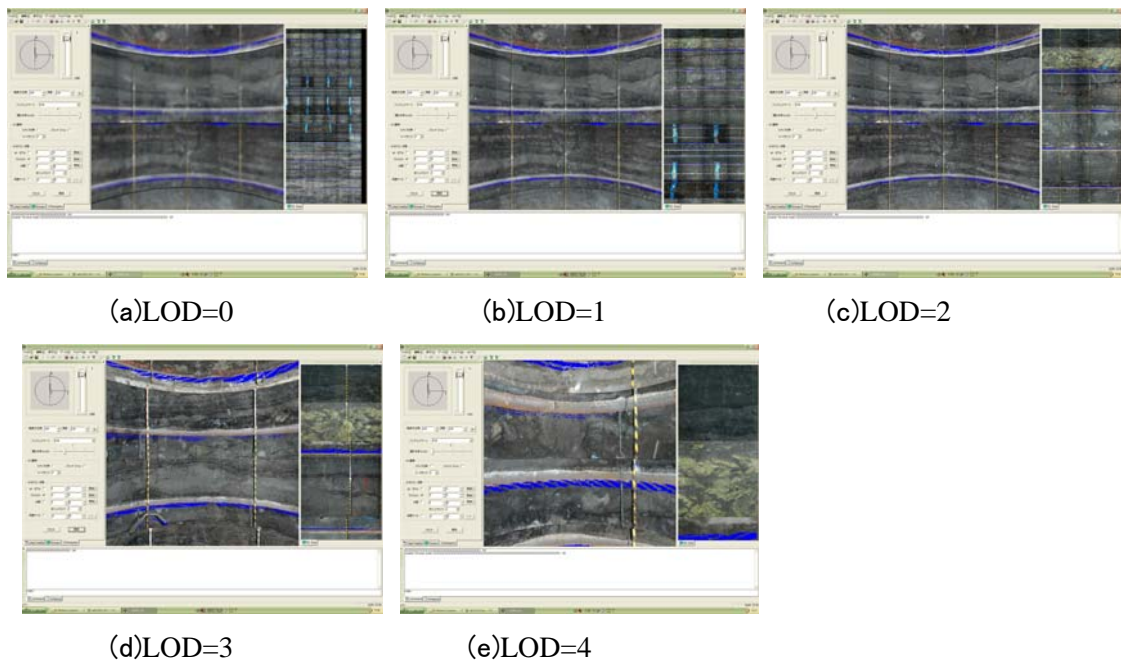


図-E.14 LOD と描画画像の変化

4)[2D view]オプション

[2D view]オプションは[2D view]上の画像表示に関するオプションの設定を行い、{ステップの枠}、{ステップ・ラベル}、{マークサイズ}の3つの項目が用意されている。最初の2項目は、それぞれ測定ステップ境界と測定最大・最小深度を2次元平面展開画像上に表示するものである。これらをチェックすると、図-E.15(b)のように測定ステップ境界と測定最大・最小深度が白で[2D view]上に表示される。

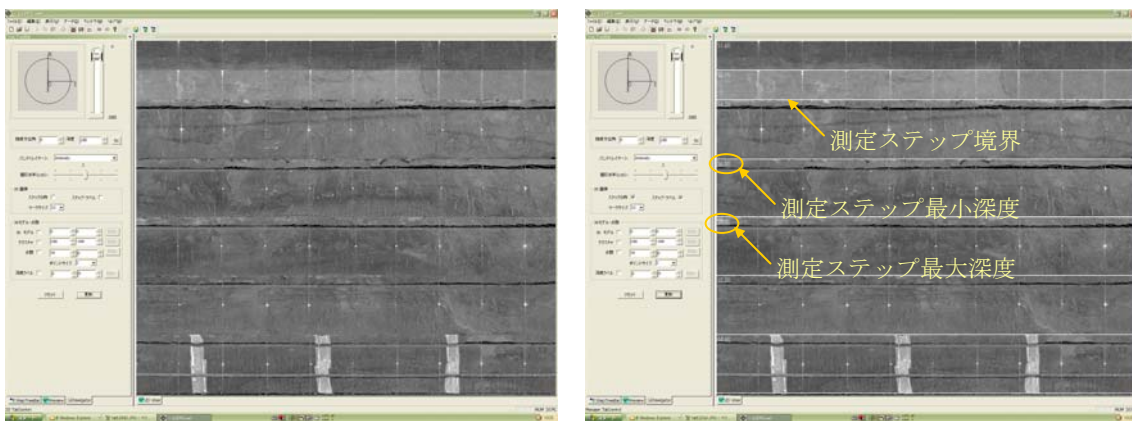
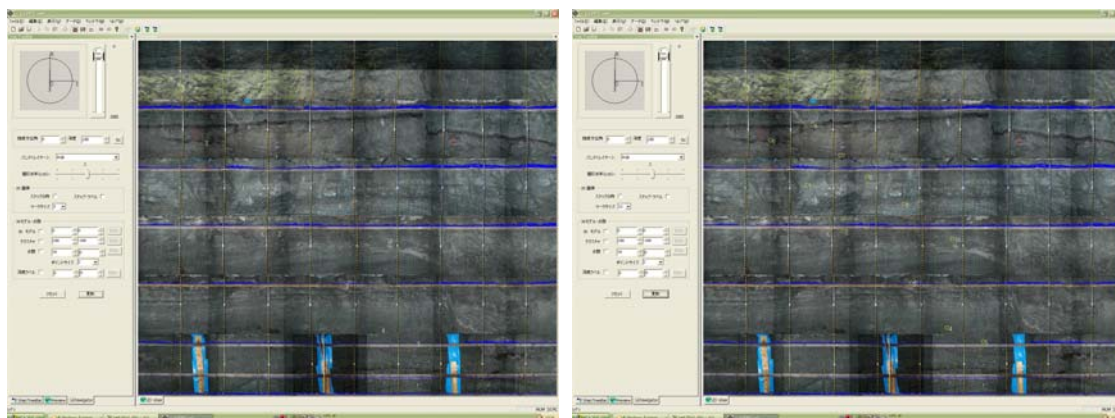


図-E.15 [2D view]上への測定ステップ境界と測定最大・最小深度の表示

また、{マークサイズ}は[2D view]上で座標データ取得等の作業を行う際に、データ取得点位置を表示するマークの大きさを指定する。指定可能な範囲は(0-12)であり、数字が大きいほど大きなマークが表示される。なお、(0)はマークを表示しない。図-E.16 は{マークサイズ}を(3)とした場合と、(12)とした場合に表示されるマークの大きさを比較したものである。



(a)マークサイズ(3)の表示画面 (b)マークサイズ(12)の表示画面

図-E.16 マークサイズの比較

5)[Main view]オペレーター

[Main view]オペレーターは、[Main view]に表示する3次元描画項目を設定し、それぞれの描画において N-S 方向、ならびに E-W 方向の視線の移動を行う。また、描画に関する設定も行うものである。図-E.17 に[Main view]オペレーター各部の操作を示す。

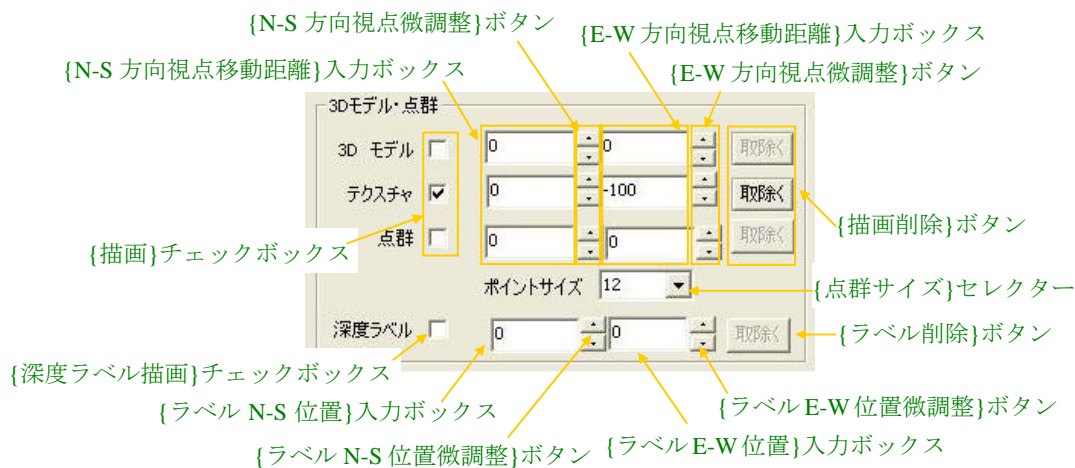


図-E.17 [Main view]オペレーターの各部

描画可能な3次元項目は、図-E.18 に示すように(3D モデル)、(テクスチャ)、(点群)の3種類であり、それぞれの {描画} チェックボックスをチェックすることで各項目が

[Main view]上に描画される。(3D モデル)は図-E.18(a)に示すように、瑞浪超深地層研究所のCG モデルである。また、(テクスチャ)は図-E.18(b)に示すように、(RGB)、(受光強度)、(壁面凹凸カラーマップ)等の画像データを瑞浪超深地層研究所主立坑設計断面上に貼り付けた3次元モデルである。さらに、(点群)は、立坑壁面形状を点群として3次元で表現したモデルである。

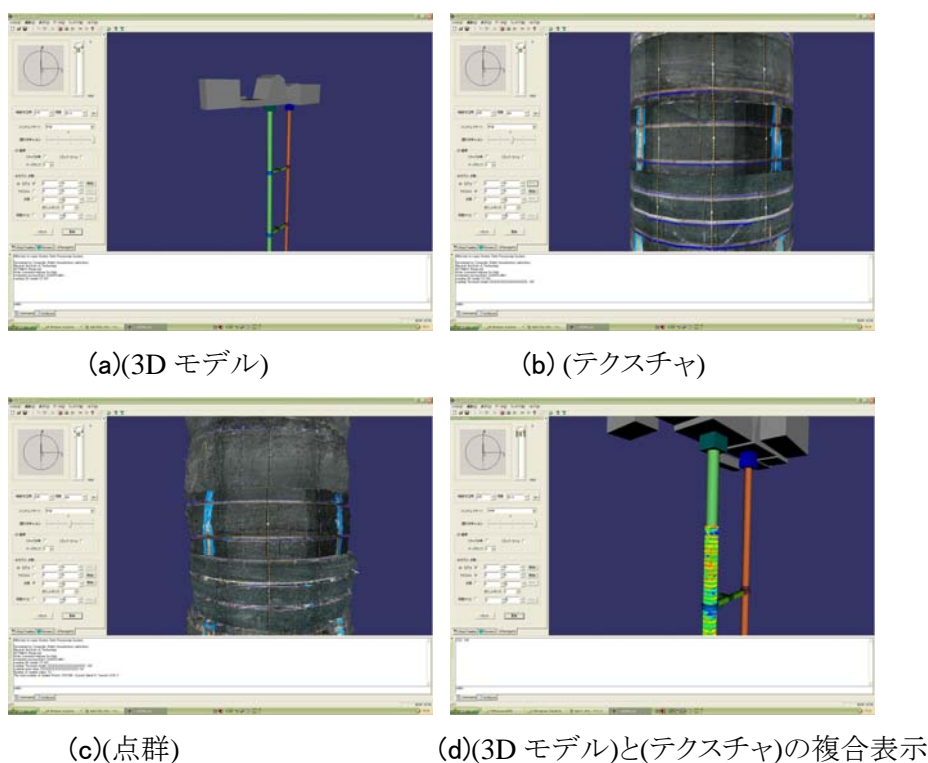


図-E.18 描画項目と複合描画の例

なお、これらの描画項目は、同時に{描画}チェックボックスをチェックすることが可能である。例えば、(3D モデル)と(テクスチャ)の{描画}チェックボックスをチェックすると、図-E.18(d)のように、瑞浪超深地層研究所の主立坑 CG モデル上にテクスチャが貼り付けられ、相対的な位置関係が明瞭となる。なお、{描画削除}ボタンをクリックすると、これらの描画は直ちに消去される。その処理は個別の描画項目に対して行うことができる。

(テクスチャ)と(点群)が最初に描画された際の視点位置は、立坑最上部の立坑中心にあり、N 方位を向いた画像が描画される。方位や深度の調整は、前述の{方位}ダイヤルや{深度}スライダーにより行うが、始点位置そのものを{N-S 方向視点移動距離}入力ボックスと{E-W 方向視点移動距離}入力ボックスによって行うことができる。

入力単位は cm で、N-S 方向の視点移動において N 方向の移動を正值、S 方向の移動を負値とする。また、E-W 方向の視点移動において E 方向の移動を正值、W 方向の移動を負値とする。図-E.19(a)は、(テクスチャ)描画初期の画像を示し、その視点位置は立坑中心にあり、

N 方位を向いている。これに対し、**図-E.19(b)**は 100cm 視点位置を N 方向に移動させた画像を示し、壁面に接近した画像となっている。また、**図-E.19(c)**は 100cm 視点位置を S 方向に移動させた画像を示し、壁面から離れた画像となっている。さらに、**図-E.19(d),(e)**はそれぞれ視点位置を 100cm ずつ E 方向、W 方向に移動させた画像である。なお、視点移動は{更新}ボタンを押す必要はなく、値を入力すれば直ちに画像が変化する。

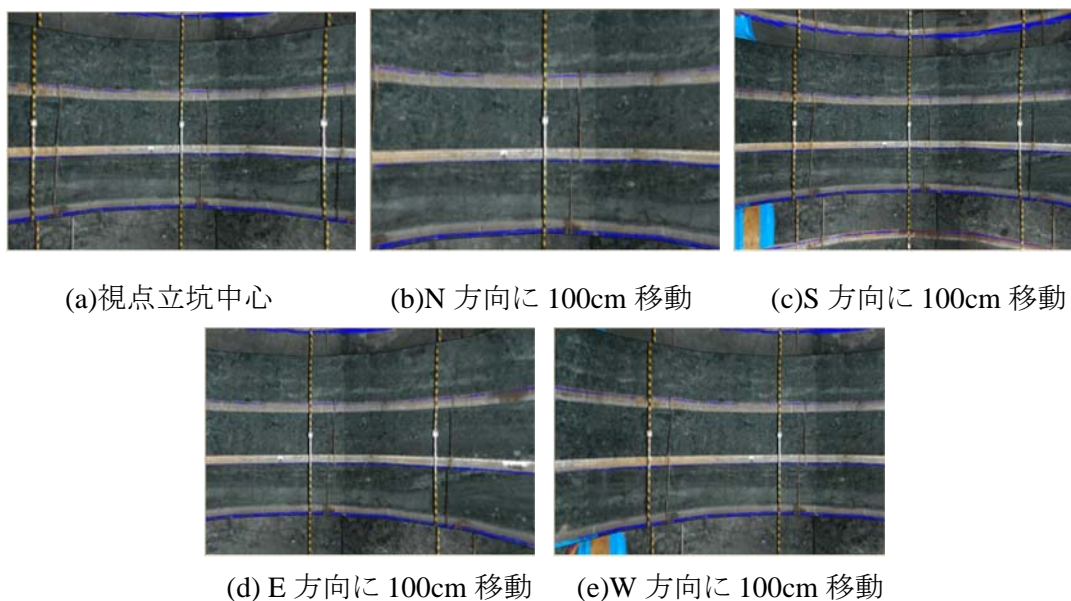
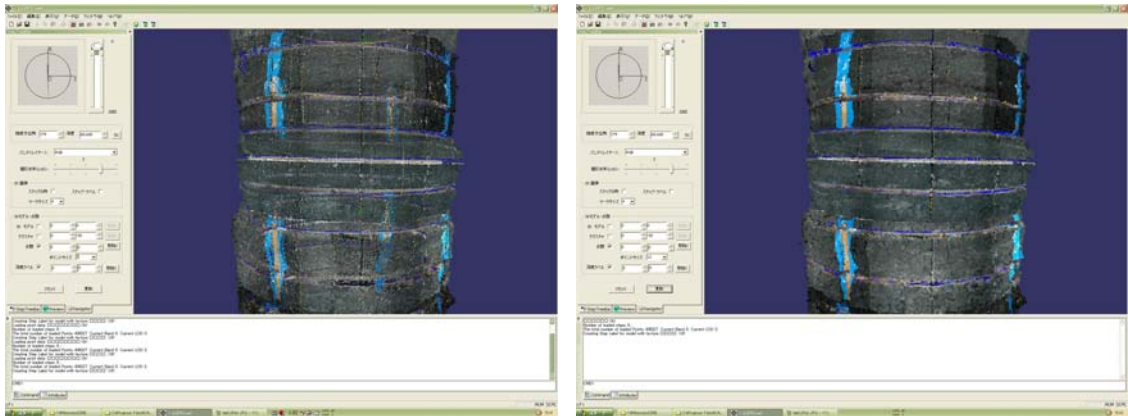


図-E.19 視点移動による画像の変化

視点移動は{N-S 方向視点微調整}ボタン、ならびに{E-W 方向視点微調整}ボタンによっても可能であり、これらのクリックするたびに 1cm ずつ始点が移動する。なお、一つのボタンをクリックし続けると、移動速度が徐々に加速される。

また、{点群サイズ}セレクターは点群表示における一点のサイズを選択するもので、その選択範囲は(0-12)である。数字が大きいほど、大きな点を描画する。なお、(0)は点を描画しないことを意味するものではない。**図-E.20** は、点群サイズを(1)としたときの点群表示と、(12)としたときの表示を比較したものである。(1)の場合では、点間に隙間があり立坑内部が覗き見えるのに対し、(12)の場合では点同士が重なり合っていることがわかる。

最後に、{深度ラベル描画}チェックボックスは、[Main View]上の3次元モデルに深度ラベルを付加する機能を持ち、チェック後、{更新}ボタンをクリックすると立坑中央部に深度ラベルが描画される。ラベル位置の変更は、{ラベル N-S 位置}入力ボックス、もしくは{ラベル E-W 位置}入力ボックスにより行い、入力条件は{N-S 方向視点移動距離}入力ボックスなどと同様である。また、{ラベル N-S 位置微調整}ボタン、および{ラベル E-W 位置微調整}ボタンにより位置の微調整が可能である。{ラベル削除}ボタンにより、描画されたラベルは消去される。



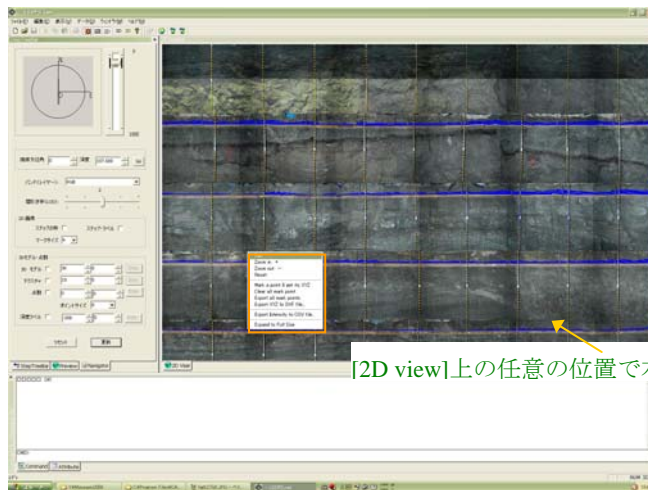
(a) (1)としたときの点群表示

(b) (12)としたときの点群表示

図-E.20 {点群サイズ}による描画の違い

E.3 [2D View]の機能と操作

[2D view]は、各種バンドの2次元平面展開画像を表示するとともに、種々の分析を行う重要なウィンドウである。[2D view]上の任意の位置でマウスを右クリックすると図-E.21のように、[2D view]のメニューが表示される。[2D view]のメニューは、大きく[画像操作]部、[座標演算処理]部、{受光強度出力}、{画像最大化}の3つに大きく分かれる。以下、各部の機能と操作を示す。



[2D view]上の任意の位置で右クリック

- Pan
- Zoom in + [画像操作]部
- Zoom out -
- Reset
- Mark a point & get its XYZ [座標演算処理]部
- Clear all mark point
- Calculate strike Angle & dip angle
- Export all mark points
- Export XYZ to DXF file..
- Export Intensity to CSV file.. {受光強度出力}
- Expand to Full Screen [画像最大化]

(a)右クリックによる[2D view]メニュー呼び出し

(b)[2D view]メニュー

図-E.21 [2D View]上からのメニュー呼び出し

(1)[画像操作]部の機能と操作

[画像操作]部には、{Pan}、{Zoom in}、{Zoom out}、{Reset}の4つのコマンドが用意されて

いる。{Pan}は、2次元平面展開画像を移動する機能で、{Pan}を選定後、[2D view]上の任意点でマウスをドラッグして、上下左右にマウスを移動すると、マウスに併せて画像が移動する。なお、鉛直方向の画像移動はマウスホイールによっても移動することができる。

画像を拡大したい場合、メニューの[Zoom in]をクリック後、拡大したい箇所にマウスを置き、左クリックすると画像が1段階ずつ拡大されるとともに、精密な画像が現れる。拡大段階は'0'から'4'までの5段階で、これは間引き率(LOD)に対応しており、'4'が間引きのない最も精密な画像、'0'が最も粗く間引かれた画像でデフォルト画像となっている。表-E.1 に間引き率とLODの関係を示す

表-E.1 間引き率と拡大段階の関係(再掲載)

LOD	0(Default)	1	2	3	4
間引き率	1/256	1/64	1/16	1/4	1/1

一方、画像を縮小したい場合は、{Zoom out}をクリックして、縮小後の画像中心としたい箇所にマウスを置き、左クリックすると画像が1段階ずつ縮小し、間引かれた画像が現れる。また、[Reset]をクリックすると、デフォルトの描画状態に復帰する。図-E.22 に LOD と2次元平面展開画像の関係を示す。

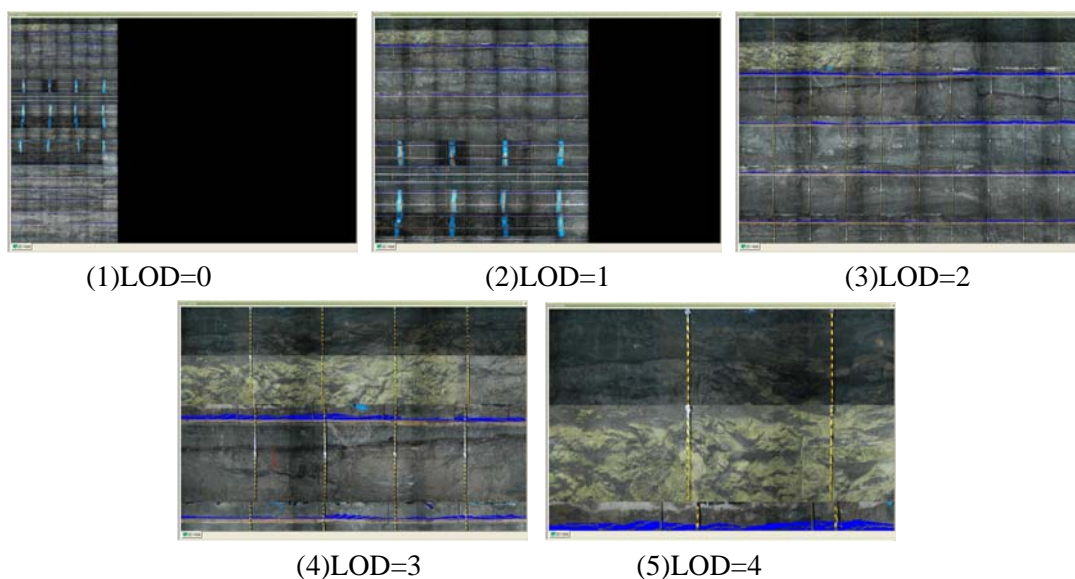


図-E.22 LOD の変化による2次元平面展開画像の変化

(2)[座標演算処理]部の機能と操作

[座標演算処理]部には、{Mark a point & get its XYZ}、{Clear all mark points}、{Calculate strike angle & dip angle}、{Export all mark points}、{Export XYZ to DXF File}の5つのコマンドが用意されている。{Mark a point & get its XYZ}は、指定した点の(x, y, z)座標を読み取る機能で、{Mark a point & get its XYZ}を選定後、[2D view]上の任意点をマウスでクリックすると、

その点が図-E.23(a)のように[Log and Information]に表示される。なお、このとき表示される座標値は、測量座標系の(x, y, z)座標値であり、座標には取得した順に番号が付与される。

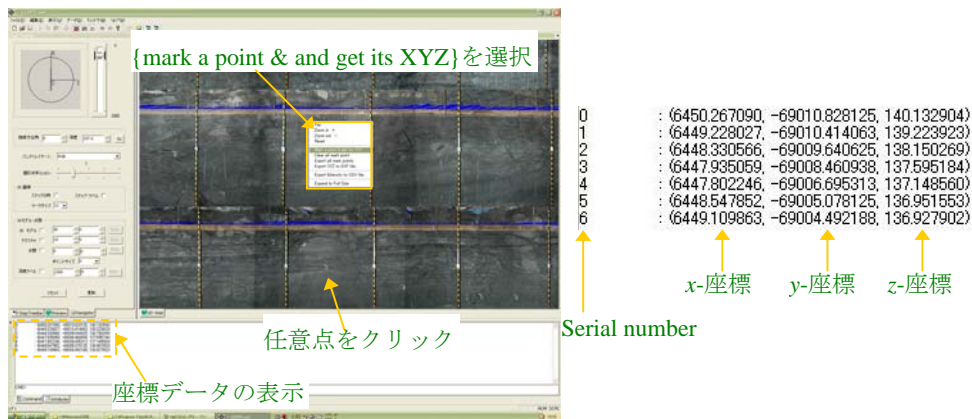


図-E.23 任意点の座標値取得

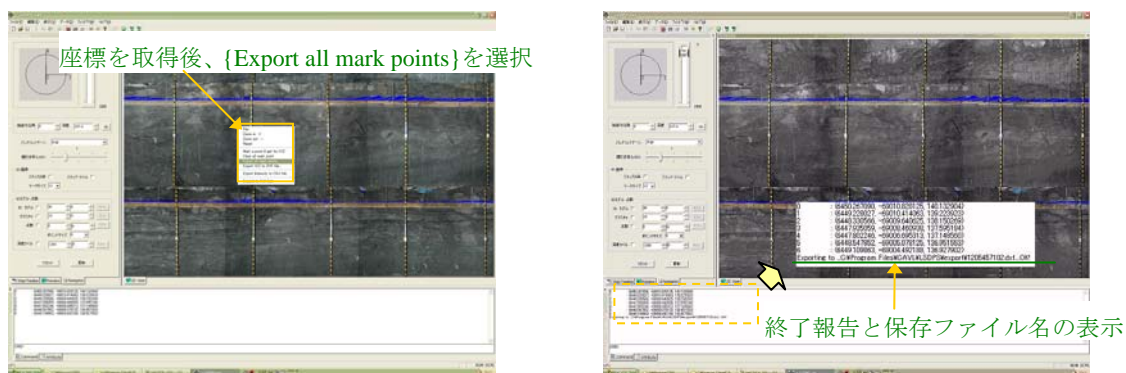
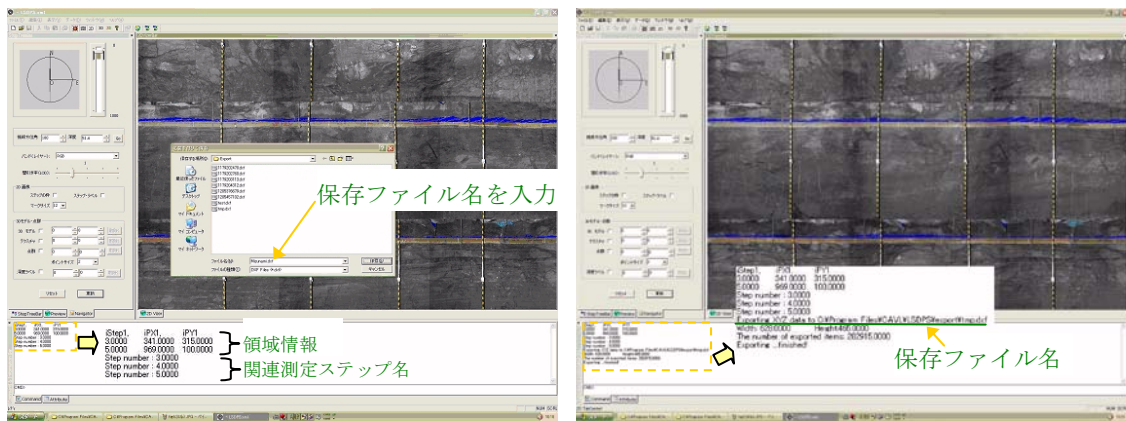


図-E.24 取得座標データの保存



(a) {Export XYZ to DXF File}コマンドの選択 (b)領域選択と領域の修正



(c)領域情報の表示と保存ファイル名の入力

(d)保存終了

図-E.25 任意領域の座標データ保存

取得した座標データの保存は、点の座標を選択後、図-E.24のようにメニューから{Export all mark points}コマンドを選択すると、その取得した座標データが dxf ファイル形式で保存される。保存作業終了後、[Log and Information]に作業の終了報告と保存ファイル名が表示される。一方、{Clear All Marks}コマンドをクリックすると、これまでに指定した点のマークと番号が消去されるが、その後、座標取得作業を再開すると、座標点の番号は新しい続き番号に更新される。

また、一定の領域の(x, y, z)座標値を dxf ファイル形式で保存するためには、{Export XYZ to DXF File}コマンドを用いる。その作業手順は以下のようなものである。図-E.25(a)のように、{Export XYZ to DXF File}を選択すると、座標データを保存したい矩形領域の指定が、2次元平面展開画像上で可能となる。ここで、マウスをドラッグして、矩形領域の左上と右下を指定すると、図-E.25(b)のように指定した矩形領域の左上座標値(cx_0, cy_0)と、右下座標(cx_1, cy_1)を示すダイアログが表示される。この座標値はピクセル座標系であり、その座標系は間引き率(LOD)で異なるが、その最大ピクセル数 cx_max(右端のピクセル座標に当たる)は表-E.2のようなものである。

表-E.2 間引き率と最大ピクセル数の関係

LOD	0(Default)	1	2	3	4
間引き率	1/256	1/64	1/16	1/4	1/1
最大ピクセル数 cx_max	375	750	1,500	3,000	6,000

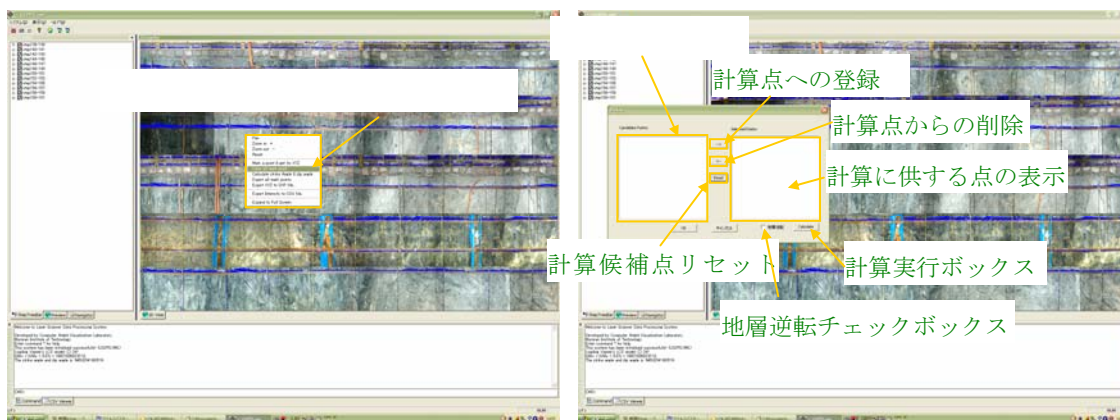
指定した矩形領域は、このダイアログ内の{(cx_0, cy_0)修正}ボックス、あるいは{(cx_1, cy_1)修正}ボックスにドット座標値を入力することで修正が可能である。また、これに付帯する{(cx_0, cy_0)微調整}ボタン、あるいは{(cx_1, cy_1)微調整}ボタンによっても修正することができ、これらのボタンをクリックするたびに1ドットずつ点が移動する。

領域指定を修正し、{OK}ボタンをクリックすると、図-E.25(c)に示すように[Log and Informa-

tion]に、指定領域の情報が表示され、座標データを保存するファイル名の入力画面が現れる。なお、指定領域に関する情報は、**図-E.25(b)**に示すように、指定した矩形領域の左上座標値($cx0$, $cy0$)と、右下座標($cx1$, $cy1$)と、これに関連する測定ステップ名である。保存ファイル名を入力し、{OK}ボタンをクリックすると、座標データの保存が開始され、終了後、**図-E.25(d)**に示すように終了の合図と、保存ファイル名(フルパスネーム)、ならびにファイルサイズ等の情報が表示され、作業は終了する。

(3) [Calculate strike angle & dip angle]コマンドの機能と操作

{Calculate strike angle & dip angle}コマンドは、不連続面の走向・傾斜計算機能が実装されたコマンドであり、その作業手順は以下のようなものである。いま、Calculate strike angle & dip angle }を選択すると(**図-E.26(a)**)、作業ダイアログが現れる。当該ダイアログの構成は、**図-E.26(b)**に示すとおりであり、不連続面の走向・傾斜計算機能は、[2D view]で不連続面上の任意の点を指定し、このダイアログにエントリーすることで実施される。



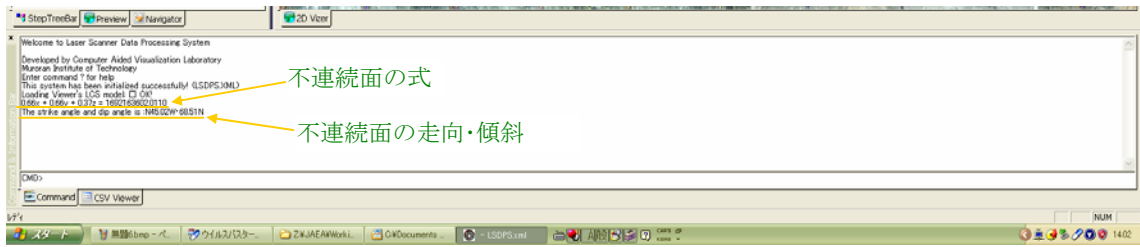
(a) {Calculate strike angle & dip angle}コマンドの選択 (b)作業ダイアログの表示



(c)不連続面上の点を指定

(d)計算に供する点の選択と計算実行

図-E.26 不連続面の走向・傾斜計算の手順(#01)



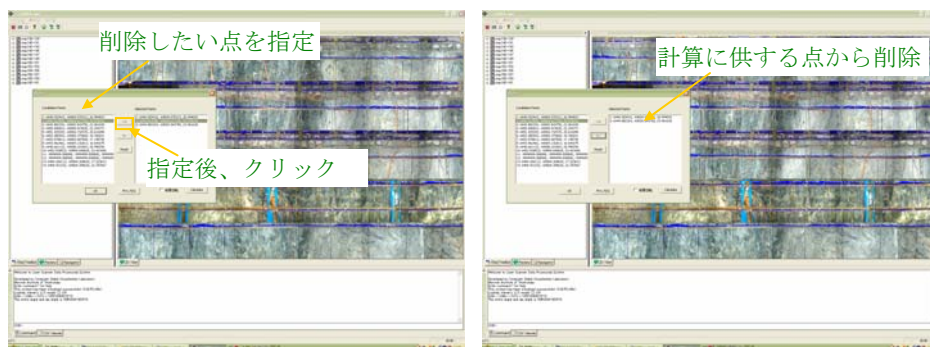
(e)計算結果の表示

図-E.26 不連続面の走向・傾斜計算の手順(#02)

当該ダイアログが表示されると、[2D View]上でクリックした点の3次元座標が図-E.26(c)のように[Candidate]ウィンドウ上に候補として登録される。このとき、クリックした点は[2D view]上に、クリック順序に従い番号が割り振られマーキングされる。また、クリックした点に形状測定データが存在しない場合、当該点は計算に供することはできず、その座標は(-99999999, -99999999, -99999999)として表示される。

必要な点のクリックが終了すると、図-E.26(d)のように走向・傾斜計算に供する点の候補を[Candidate]ウィンドウ上で指定し、{→}をクリックすると指定された[Selected Points]ウィンドウ上に表示され、走向・傾斜計算に供する点として登録される。3点の指定が終了すると、{Calculate}ボタンをクリックすれば、不連続面の式とその走向傾斜が図-E.26(e)のように[Command & Information]ウィンドウ上に表示される。なお、地層の逆転が生じている場合は、{Calculate}ボタンをクリックする前に、{地層逆転}チェックボックスをクリックすれば、これに応じた計算が実行される。

計算に供する点を指定する際に、誤った点を指定した場合、図-E.27(a)のように[Selected Points]ウィンドウ上でその点を指定し、{←}ボタンをクリックすれば、[Selected Points]ウィンドウ上の表示は消去され、計算に供する点から該当点が削除される。また、{Reset}ボタンをクリックすると、[Candidate]ウィンドウ上の点と、[2D View]上のマーキングは全て消去される。

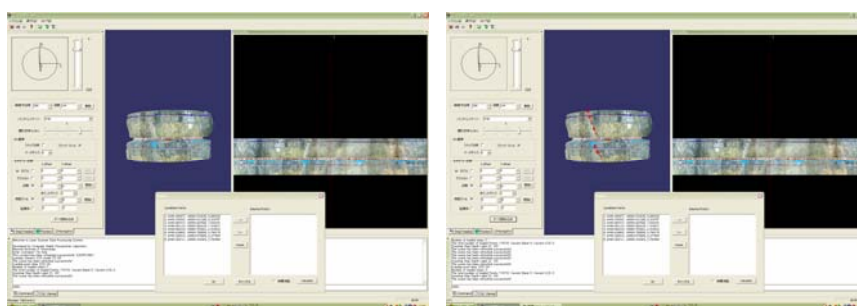


(a)計算に供する点からの削除手順

(b)削除状況

図-E.27 計算に供する点からの削除

また、当該コマンドでは[Candidate]ウィンドウ上の候補点を点群表示上に表示する機能も付加されている。いま、[Main view]上に立坑壁面形状を点群により表示した状態で、[Candidate]ウィンドウ上に計算に供する不連続面上の点を指定した後、**図-E.28(a)**のように[Navigator]タブの{データ読み込み}をクリックすると、赤いマークで[Candidate]ウィンドウ上の候補点が点群上に表示される(**図-E.28(b)**)。これは、平面上で指定した点の3次元空間上での位置を把握し得るようにしたものである。



(a)点群表示と候補点の指定

(b)候補点の点群上への表示

図-E.28 候補点の点群上への表示

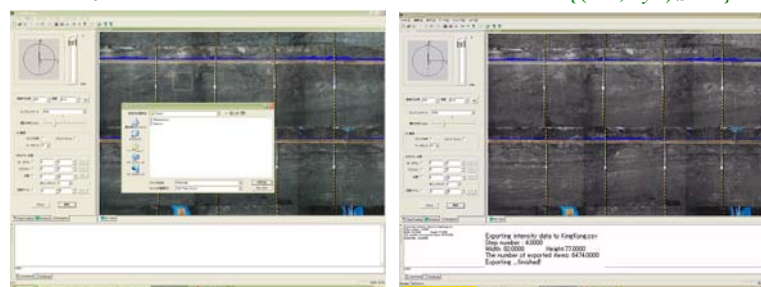
(4)[Export Intensity to CSV file]コマンドの機能と操作

{Export Intensity to CSV file}コマンドは、指定領域の受光強度データをCSV ファイル形式で保存する機能を有する。その作業手順は以下のようなものである。



(a) {Export Intensity to CSV File}コマンドの選択

(b) 領域{(cx1, cy1)修正}ボックス



(c)領域情報の表示と保存ファイル名の入力

(d)保存終了

図-E.29 任意領域の受光強度データ保存

図-E.29(a)のように、{ Export Intensity to CSV file}を選択すると、受光強度データを保存したい矩形領域の指定が、2次元平面展開画像上で可能となる。ここで、マウスをドラッグして、矩形領域の左上と右下を指定すると、図-E.29(b)のように指定した矩形領域の左上座標値(cx_x_0 , cx_y0)と、右下座標(cx_x_1 , cx_y_1)を示すダイアログが表示される。この表座標値はピクセル座標系であり、その座標系は間引き率(LOD)で異なるが、その最大ピクセル数 cx_max (右端のピクセル座標に当たる)は表-E.2 に示したものである。

指定した矩形領域は、このダイアログ内の{(cx_x_0 , cx_y_0)修正}ボックス、あるいは{(cx_x_1 , cx_y_1)修正}ボックスにドット座標値を入力することで修正が可能である。また、これに付帯する{(cx_x_0 , cx_y_0)微調整}ボタン、あるいは{(cx_x_1 , cx_y_1)微調整}ボタンによっても修正することができ、これらのボタンをクリックするたびに1ドットずつ点が移動する。

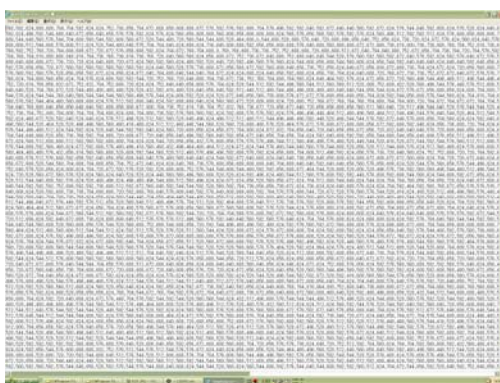


図-E.30 受光強度データの CSV ファイル

領域指定を修正し、{OK}ボタンをクリックすると、座標データを保存するファイル名の入力画面が図-E.29(c)のように現れる。保存ファイル名を入力し、{OK}ボタンをクリックすると、座標データの保存が開始され、終了後、図-E.29(d)に示すように終了の合図と、保存ファイル名、ならびにファイルに関連する情報が表示され、作業は終了する。なお、データが保存されるフォルダーは、特に指定しない限り、C¥Program Files¥CAVL¥MSDPS¥Export である。

なお、表示されるファイル関連情報は図-E.29(d)の上から順に保存ファイル名、指定領域に関連する測定ステップ、指定領域の幅と高さ(ドット数)、受光強度データの数、作業終了の通知である。図-E.30 に出力された CSV ファイル内部を示す。

E.4 ウィンドウ群の管理と3次元画像の操作

(1)ウィンドウ群の管理

LSDPS は複数のウィンドウ群からなる複合可視化システムであり、多くのウィンドウ機構を有するが、その切り替えは図-E.31 に示すメニューバー上のウィンドウ管理コマンド群により行うものとした。

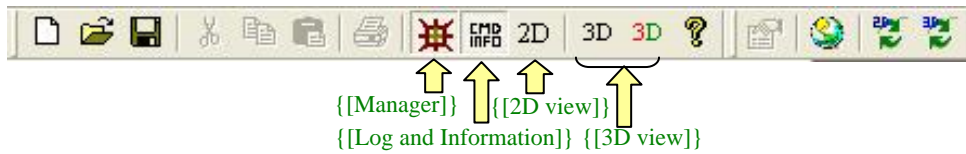


図-E.31 メニューバー上のウィンドウ管理コマンド群

図-E.31 の各アイコンがアクティブ状態にあるとき、各ウィンドウは表示された状態にある。なお、図-E.31 中の[3D view]は LSDPS とは別に起動する3次元ブラウザで、いずれかのボタンがクリックされた時点で起動する。その操作は次々節に示す。

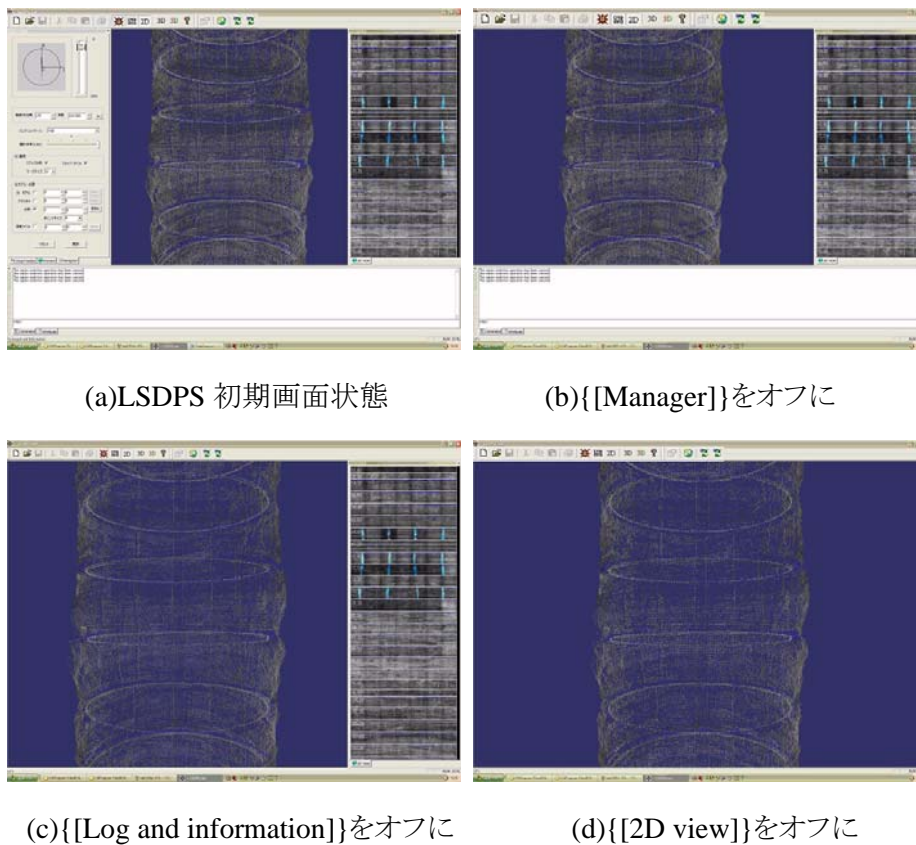


図-E.32 ウィンドウ群の管理

図-E.32(a)は、LSDPS が起動した直後のデフォルトのウィンドウ状態を示すものである。この次点では、[Manager]window、[Log and information]、[2D view]、[Main view]の4つのウィンドウがアクティブな状態にある。この状態から、{[Manager]}をオフにすると、画面構成は図-E.32(b)のように変化する。ここからさらに、{[Log and information]}、{[2D view]}と、順次、オフにしていくと画面構成が図-E.32(c),(d)のように変換し、最終的に[Main view]だけの表示状

態となる。なお、LSDPS では[Main view]を管理するためのコマンドアイコンは設けていないが、その描画は[Navigator]の{描画削除}ボタンによって削除することが可能である。



図-E.33 画像更新コマンドのアイコン群

また、メニューバー上には画像を更新するためのコマンドのアイコン群が、図-E.33 のように用意されている。これらの機能は、[Navigator]の{更新}と同じであるが、以下のように[2D view]と[Main view]を個別に更新管理することができる。

- | | |
|-----------------------|------------------------------------|
| {All Refresh} | : [2D view]と[Main view]を同時に画像更新する。 |
| {[2D view] Refresh} | : [2D view]だけを画像更新する。 |
| {[Main view] Refresh} | : [Main view]だけを画像更新する。 |

なお、メニューバー上には図-E.33 に示すように{Help}アイコンも用意されているが、現在の機能は実装されていない。

(2)[Main view]上の3次元モデルの操作

[Main view]上の3次元モデル操作は、基本的に[Navigator]タブ上のコマンドを用いて行われるが、マウスやキーボードによっても操作することが可能である。その基本的な操作方法を示す。

①マウスによる[Main view]上の3次元モデルの操作

マウスによる[Main view]上の3次元モデルの操作には次の二つがある。

【<右クリック>+<ドラッグ>】

この状態で、マウスを上方に移動させると、3次元モデルは拡大描画され、下方に移動させると3次元モデルは縮小描画される。なお、この作業中に右クリックを解除すると、拡大描画、もしくは縮小描画が連続して行われるため、画像が見えなくなる。このため、マウスを一度とめてから、右クリックを解除しなければならない。なお、拡大・縮小描画が連続して行われた場合、もう一度、右クリックすれば、その時点で描画は中断される。

【<左クリック>+<ドラッグ>】

この状態で、マウスを移動させると、3次元モデルは回転する。この操作は、3次元の回転を2次元画面上で行うため、比較的難しい操作となる。基本的には、水平にマウスを移動させると画面のz軸周りに回転し、鉛直にマウスを移動すると画面のx軸周りに回転することを考慮すればよい。

なお、この作業中に左クリックを解除すると、画像が回転を続ける。このため、マウスを一度止めてから、左クリックを解除しなければならない。なお、回転が連続して行われた場合、もう一度、左クリックすれば、その時点で回転は中断される。

②キーボードによる[Main view]上の3次元モデルの操作

キーボードによる[Main view]上の3次元モデル操作は、{Blank}キー、{↑}{↓}キー、{←}{→}キーによって行われる。その操作方法は以下のようなものである。

【{Blank}キー】

図-E.34 に示すように、ユーザーの視野が立坑外部にあるとき、{Blank}キーを押すと、ユーザーの視野を立坑内部に移動することができる。なお、立坑内部から外部への移動はできない。また、移動後の位置は測定データ最上部の立坑中心である。

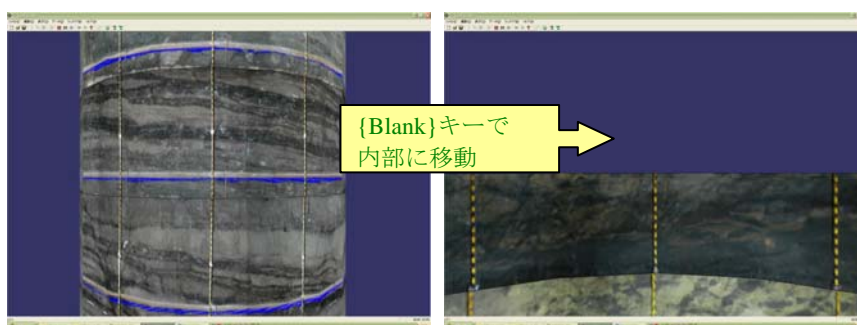
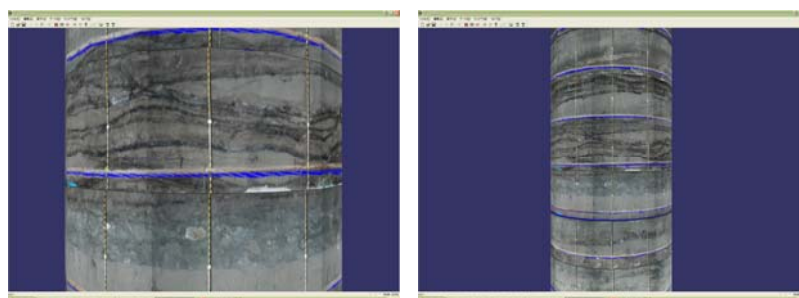


図-E.34 {Blank}キーで立坑内部に移動

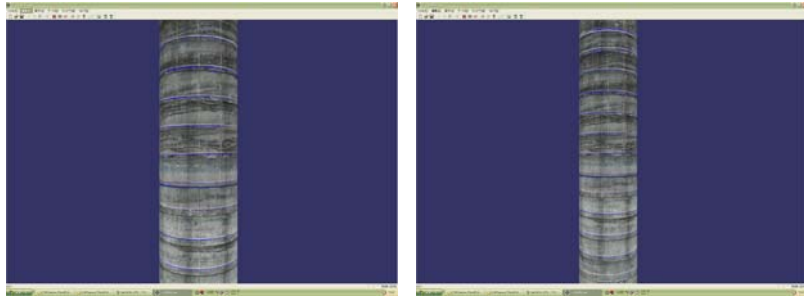
【{↑}{↓}キー】

{↑}{↓}キーは、拡大・縮小操作に用いられ、{↑}キーは縮小操作に、また{↓}キーは拡大操作を行う。図-E.35(a),(b),(c)は図-E.35(a)の画像を、{↑}キーにより一段ずつ縮小した場合の、画像変化を示したものである。



(a)原画像

(b){↑}キーを1回タイプ

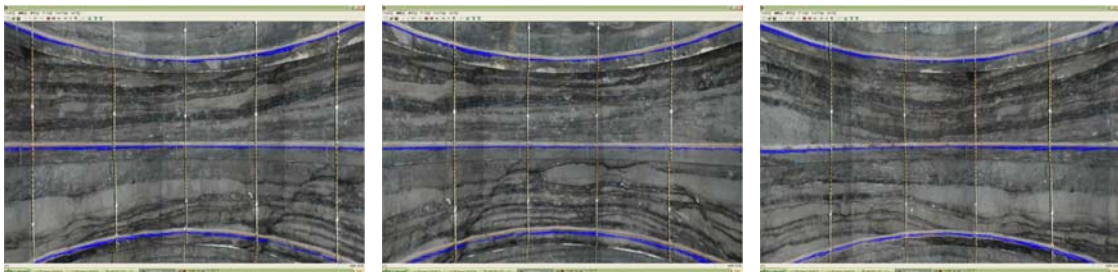


(c){↑}キーを2回タイプ (d){↑}キーを3回タイプ

図-E.35 {↑}キーによる画像の縮小

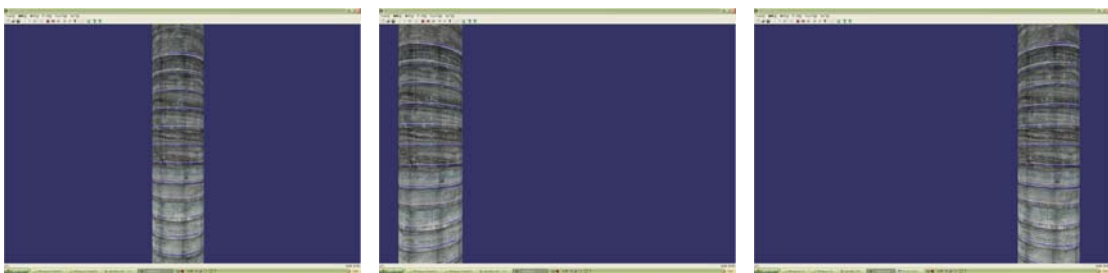
【{←}{→}キー】

{←}{→}キーは、視点が立坑内部にある場合と、外部にある場合とで機能が異なる。立坑内部にあるときは、視点位置を中心に画像が水平面内で回転する。{方位}ダイヤルや{方位指定}ボックスによる画像の回転が、立坑中心で行われるのに対し、当該の回転はそのとき置かれた視点位置を中心に回転することに注意が必要である。なお、回転角度は1回のタイプごとに1°回転する。図-E.36(b)は図-E.36(a)の画像を{←}キーを15回タイプして回転させた画像を、また図-E.36(c)は図-E.36(a)の画像を{→}キー15回タイプして回転させた画像をそれぞれ示す。



(a)原画像 (b){←}キーを15回タイプ (c){→}キー15回タイプ

図-E.36 {←}{→}キーによる画像の回転



(a)原画像 (b){←}キーを5回タイプ (c){→}キー5回タイプ

図-E.37 {←}{→}キーによる画像の移動

一方、視点が立坑外部にある場合は、画像を画面内で平行移動させる。図-E.37(b)は図-E.37(a)の画像を{←}キーを5回タイプして移動させた画像を、また図-E.37(c)は図-E.37(a)の画像を{→}キー5回タイプして移動させた画像をそれぞれ示す。

(3)[3D view]の表示と操作

[3D view]には通常表示と、ステレオ表示の2種類があるが、その操作は同じである。図-E.38に示す{Normal [3D view]}ボタンをクリックすると、図-E.39(a)に示すように DOS プロンプトが起動し、通常表示の[3D view]が現れ、図-E.39(b)のように3次元モデルが描画される。一方、{Stereo [3D view]}ボタンをクリックすると図-E.39(c)のようなステレオ画像が描画される。



図-E.38 {Normal [3D view]}ボタンと Stereo [3D view]}ボタン



(a)DOS プロンプトの起動 (b){Normal [3D view]}表示 (c){Stereo [3D view]}表示

図-E.39 [3D view]の起動

このようにして描画した画像は、以下のようなマウス操作によって拡大・縮小、回転、ならびに平行移動を行うことができる。すなわち、マウスを右クリックして、手前にドラッグすると画像は拡大する。逆に、向こう側にドラッグすると縮小する。また、左クリックした状態で、画面をみながら希望の方向にドラッグすると、マウスの動きに合わせて画像が回転する。これらの操作は、基本的に[Main view]上の3次元モデルの操作と同一である。

また、[3D view]上では左右を同時にクリックした状態で、ドラッグすると、モデルがマウスの動きに合わせて、上下左右に平行移動する。この機能は、[3D view]のみ実装されるものである。なお、[Main view]のように{Blank},{←},{→},{↑},{↓}キー等の機能は実装して

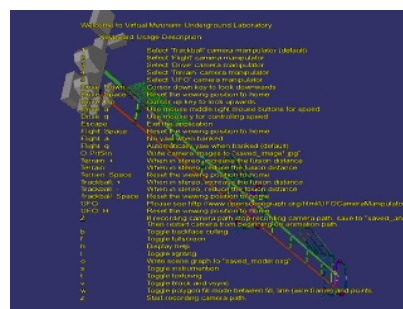
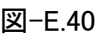


図-E.40 [3D view]の(Help)

いないが、[3D view]の終了は、キーボード上の{Esc}ボタン(エスケープ・ボタン)により行う。また、キーボードの{H}キーをタイプすると、-E.40 のように各種機能を説明した(Help)が現れる。この(Help)を消去するには、再度、{H}ボタンを押せばよい。

Appendix_F

クラウド・コンピューティングによる プロダクトデータモデルの処理

Contents

F.1 概説	F-1
F.2 クラウド・コンピューティングによるプロダクトデータモデルの処理の概要	F-3

Appendix_F クラウド・コンピューティングによるプロダクトデータモデルの処理

A.1 概説

クラウド・コンピューティング (Cloud Computing) とは、インターネット上にグローバルに拡散したコンピューティングリソースを用い、ユーザーに情報サービスやアプリケーションサービスを提供するためのコンピュータ構成、ならびに利用に関するコンセプトである。インターネットや TCP/IP ネットワークは、しばしば雲と表現されることから、インターネットに接続された任意のハードウェアリソース、ソフトウェアリソース、ならびにデータリソースをユーザーがその所在や内部構造を意識することなく利用できる環境をクラウド・コンピューティングと呼ぶ。

従来のコンピュータ・ネットワークでは、ネットワークは単にデータやメッセージが通過する経路であり、ネットワークの両端部にある個々のコンピュータこそが計算や情報処理を行う主体であった。これに対し、クラウド・コンピューティングでは、ネットワーク上に接続された複数のコンピュータがグリッドや仮想化の技術で抽象化され、巨大な1つのコンピュータになるという意味が込められている。

適切な方法でインターネットに接続さえすれば、ユーザーは即座に各種のサービスが利用できるという点では、SaaS¹やASP²はクラウドコンピューティングに近い。ただし、ASPでは特定のサーバファームで処理を行ったが、クラウドではデータ処理が分散化される場合が想定されている点に違いがある。なお、この言葉は、米国Google CEOのEric Schmidtが、英エコノミスト誌「The World In 2007」(2006年11月発行)に「Don't bet against the Internet.」という一文を寄せたことに始まる。

ネットワーク利用料金が高価であった時代は、データをできるだけ利用者の近くに置くことで応答性を向上し、ネットワーク・コストを削減することが重要であったが、ネットワーク技術の発達した今日では、データを社外の集中管理されたデータセンター内のサーバーに置いても十分な性能が発揮されるようになった。情報システムのコスト面における最大の課題は運用コストなどの人件費であるが、サーバー群を集中して運用することでその削減が可能となる。

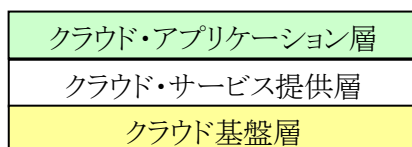


図-F.1 クラウド・コンピューティングの構造

¹SAS: Software As a Service ソフトウェアの機能のうち、ユーザーが必要とするものだけをサービスとして配布し利用できるようなソフトウェアの配布形態。サービス型ソフトウェアとも呼ばれる。

²ビジネス用のアプリケーションソフトをインターネットを通じて顧客にレンタルする事業者のこと。ユーザは Web ブラウザなどを通じて、ASP の保有するサーバにインストールされたアプリケーションソフトを利用する。レンタルアプリケーションを利用すると、ユーザのパソコンには個々のアプリケーションソフトをインストールする必要がないので、企業の情報システム部門の大きな負担となっていたインストールや管理、アップグレードにかかる費用・手間を削減することができる。

クラウド・コンピューティングの実体は、多様なサーバーとストレージ群を稼働するデータセンター群、その上で稼働するアプリケーション群、およびネットワークから構成され、これらは図-F.1のような階層的構造を持つ。図-F.1において、最下層はクラウド基盤層と呼ばれ、サーバーやストレージのハードウェア機能を提供する層であり、仮想化テクノロジーによる柔軟な構成変更、データセンターによる堅牢な運用などが求められる。

その上位の階層は、クラウド・サービス提供層であり、クラウド上のアプリケーションを提供するための基本的サービスを提供する層である。この層に対するインターフェイスはWeb APIと呼ばれることもある。Salesforce.comが提供するForce.comなどのサービスは、アプリケーション開発環境をクラウド上で実現したものであり、一般にPaaS³ (Platform as a Service)と呼ばれるが、このサービスはこの階層に属するものである。

最上位階層はクラウド・アプリケーション層と呼ばれ、エンドユーザーが利用できるアプリケーションを提供する層である。この階層にあるアプリケーションは、企業向けの業務アプリケーションにとどまらず、ワープロやスプレッドシートなどのオフィス系アプリケーションやコラボレーション系のアプリケーションなども含まれ、SaaS 等も階層この階層に属する

F.2 クラウド・コンピューティングによるプロダクトデータモデルの処理の概要

図-F.2 に、GAIA-Brain 向けに構築したクラウド・コンピューティングのシステム構造を示す。

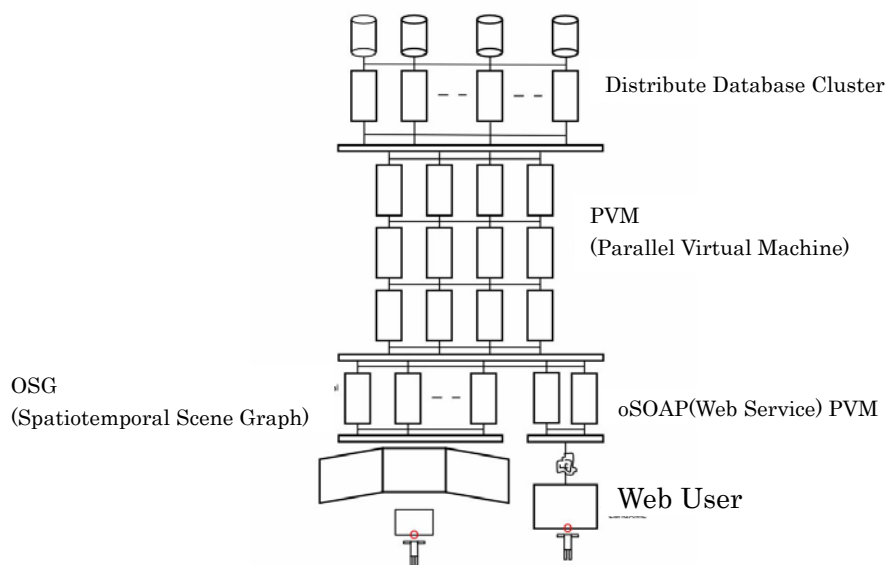


図-F.2 GAIA-Brain のクラウド・コンピューティング構造

³PaaS: Platform as a Service アプリケーションソフトが稼働するためのハードウェアや OS などの基盤(プラットフォーム)一式を、インターネット上のサービスとして遠隔から利用できるようにしたもの。また、そのようなサービスや事業モデル。ソフトウェアを SaaS として提供するための実行環境や課金サービスなどの基盤を提供するサービス、を意味する場合もある。

このシステムは、室蘭工業大学情報工学科内の旧型コンピュータを集めて試験的に構築したものであるが、構造的には図-F.1 に示した階層構造に準じている。すなわち、図-F.2 において oSOAP PVM はサーバーやストレージのハードウェア機能を提供するクラウド基盤層をなし、仮想化テクノロジーにより柔軟な構成変更と堅牢な運用を可能とした。また、PVM は GAIA-Brain アプリケーションの基本的サービスを提供するための複数分散処理をつかさどり、これらはクラウド・サービス提供層に相当する。さらに、クラウド・アプリケーション層に相当する Distribute Database Cluster と OSG は、GAIA-Brain のコア機能である RDBM と可視化処理を分散化して実行する層である。その具体的構成を、図-F.3 に示すものである。今回は、旧型コンピュータを計 34 台使用しシステムを構築した。

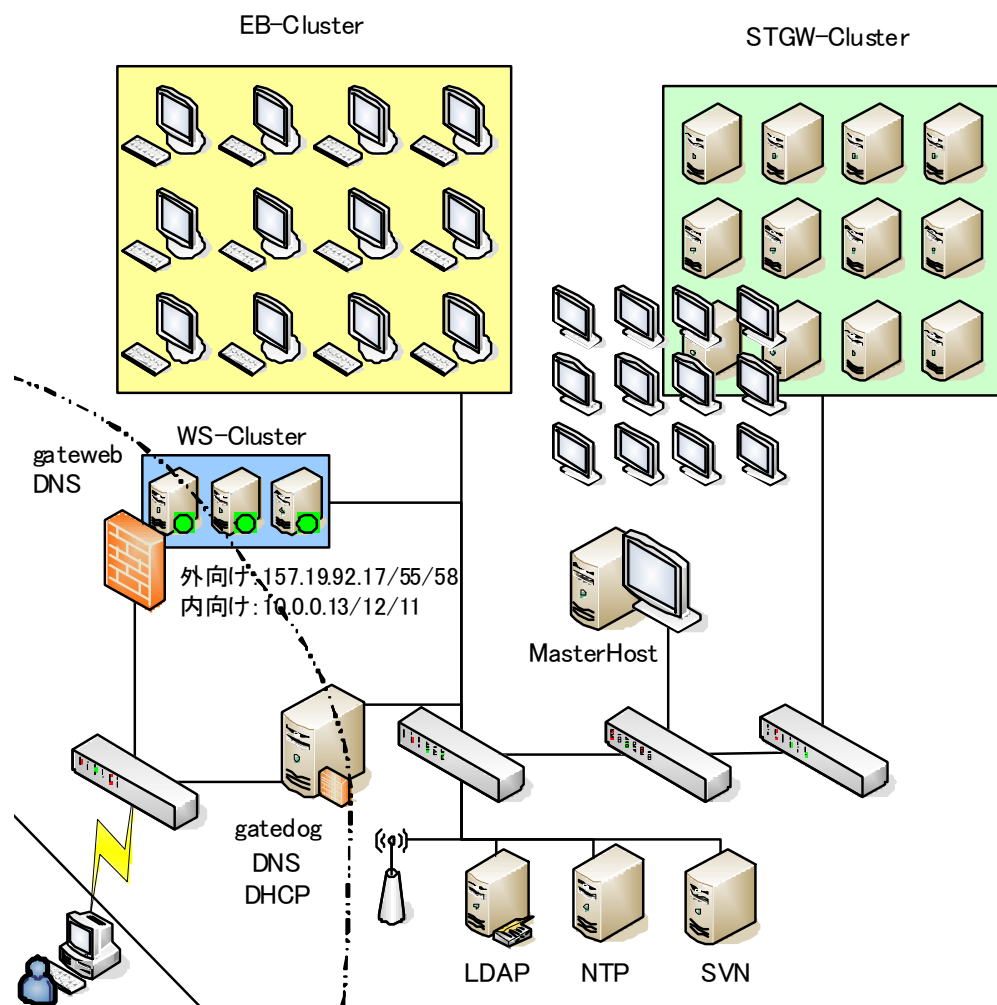


図-F.3 構築した GAIA-Brain 用のクラウド・コンピューティングシステムの概要

図-F.3 において、WS-Cluster (Web Service Cluster) は、図-F.2 のクラウド基盤層 oSOAP PVM に対応するもので、2つのサーバーシステムから構成される。このうち、gate dog はシステム

内部のホストコンピューターから外部ネットワークにアクセスする際のプロキシ・サーバーであり、DNS⁴およびDHCP⁵の機能を有する。また、gatewebはWebサービスをNAT⁶経由で実行するサーバーであり、DNSを兼ねる。また、Master Hostとその下部のNTP⁷、LDAP⁸、およびSVN (Subversion Source Code Management Server)と連動してGAIA-Brainアプリケーションの複数分散処理を司り、図-F. 2のクラウド・サービス提供層PVMに相当する。GAIA-Brainのコア機能であるRDBMはEB-Cluster (Earthly Branches Cluster)が、可視化処理はSTGW-Cluster (Spatio-Temporal GeoWall)がそれぞれ実行するものである。写真-F.1 に、クラウドシステムの設置状況を、またクラウドシステムのソフトウェア環境を表-F.1 に示す。

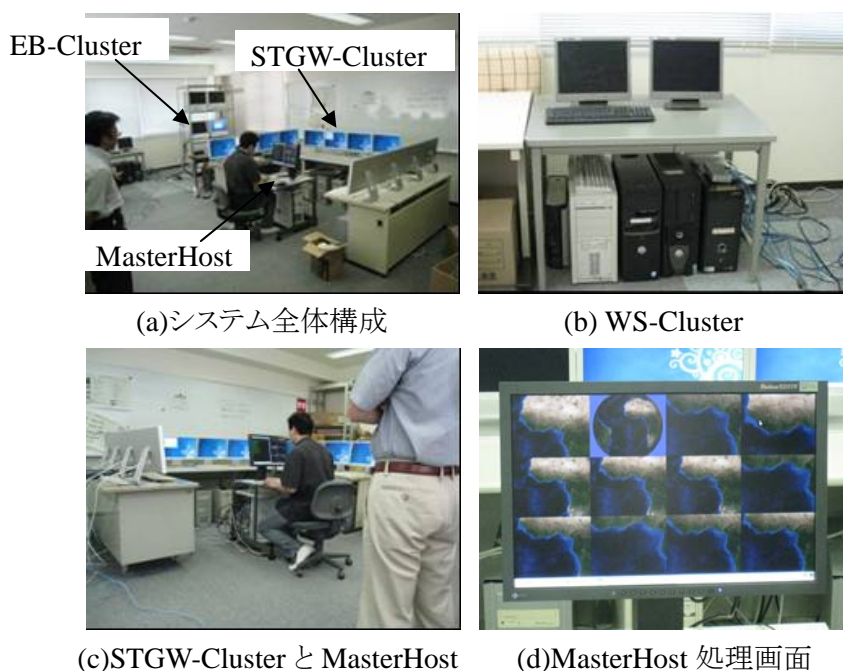


写真-F.1 クラウドサーバー設置状況

⁴DNS(Domain Name Server): インターネット上でのコンピュータの名前にあたるドメイン名を、住所にあたる IP アドレスと呼ばれる 4 つの数字の列に変換するコンピュータ。個々のネームサーバは自分が管理するネットワークに接続されたコンピュータのドメイン名と IP アドレスの対応表を持っており、外部からの問い合わせに答える。

⁵DHCP(Dynamic Host Configuration Protocol server): インターネットなどのネットワークに一時的に接続するコンピュータに、IP アドレスなど必要な情報を自動的に発行するサーバ。ネットワーク設定を手動で行わなくてもすぐに適切な設定で接続することができ、ネットワークの設定に詳しくないユーザでも簡単に接続できる。また、ネットワーク管理者は多くのクライアントを容易に一元管理することができる。

⁶インターネットに接続された企業などで、一つのグローバルな IP アドレスを複数のコンピュータで共有する技術。組織内でのみ通用する IP アドレス(ローカルアドレス)と、インターネット上のアドレス(グローバルアドレス)を透過的に相互変換することにより実現される。

⁷NTP (Network Time Protocol): コンピュータの内部時計を、ネットワークを介して正しく調整するプロトコル。階層構造を持ち、最上位のサーバが GPS 等を利用して正しい時刻を得、下位のホストはそれを参照する事で時刻を合わせる。

⁸インターネットやイントラネットなどの TCP/IP ネットワークで、ディレクトリデータベースにアクセスするためのプロトコル。ディレクトリサービスとは、ネットワークを利用するユーザのメールアドレスや環境に関する情報を管理するサービスのことで、ユーザ名からこれらの情報を検索することができる。最近ではディレクトリサービスを単純なユーザ管理だけでなく、プリンタなどのネットワーク上の共有資源の管理に応用する動きも活発になっている。

表-F.1 クラウドシステムのソフトウェア環境

OS	Centos Linux、WinXP、Mac OS X 10.4、FreeBSD 8.0
Programming Language	C/C++, Javascript
GUI	MFC(ActiveX Plugin), QT(Cross-platform GUI Standalone App)
Web Server	Apache httpd 2.2.15 + mod-dav + mod_dav_svn
WebService	gSOAP
XML Parser	libxml2 libxslt etc
DNS Server	bind 9.7.x
Proxy	Pound, Squid
RDBMS	PostgreSQL 8.x, sqlite3.6
DHCP Server	isc-dhcpd
LDAP Server	OpenLDAP
Scene Graph	OpenSceneGraph 2.82
Remote Management	ssh, rsh, vnc server

参考文献

- 1) 栗原 潔:5分でわかるクラウド・コンピューティング、<http://www.atmarkit.co.jp/fnetwork/rensai/5mincloud/01.html>

Appendix G カメラによる3次元形状計測

Contents

G.1 3次元形状測量の基礎	G-1
G.2 複数のカメラによる座標の同定	G-3
G.3 3次元画像計測の手法	G-5

Appendix_G カメラによる3次元形状計測¹⁾

G.1 3次元形状測量の基礎

3次元形状測量は、三角測量とカメラ写像特性を援用することで可能となる。以下に、その基本事項を整理する。

(1)三角測量

土木工学測量で用いられる三角測量は、三角形の原理を使って離れた地点との距離を計測する手法であり、**図-G.1**のように2点間の正確な距離が既知であるとき、その2点から離れた場所のある地点との距離は、その2点との角度が分かれば確定することができる。この三角測量の原理を利用することにより、離れた場所にある物体の3次元的な形状を測定することが可能となる。

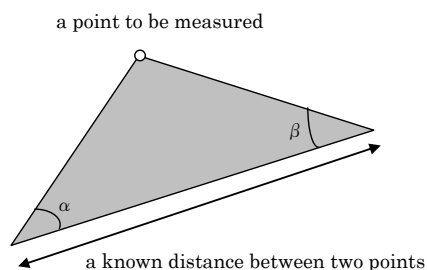


図-G.1 三角測量の概念図

(2)ピンホールカメラの原理

物体に太陽光等の光が当たると、散乱によりいろいろな方向に光が反射される。今、一つの箱を用意し、その外側にピンホールを設けると、箱の外側から入射した光はピンホールによって一つの方向の光だけが箱内へ進入し、それ以外の光は箱によって妨げられる。ここで、ピンホールと反対側の箱の内側に感光材を置くと、その一つの方向の光が感光材上に結像する。これがピンホールカメラ写真の原理である。

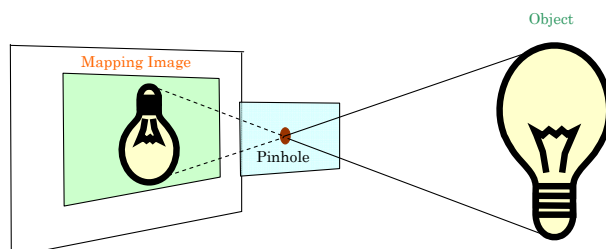


図-G.2 ピンホールカメラの模式図

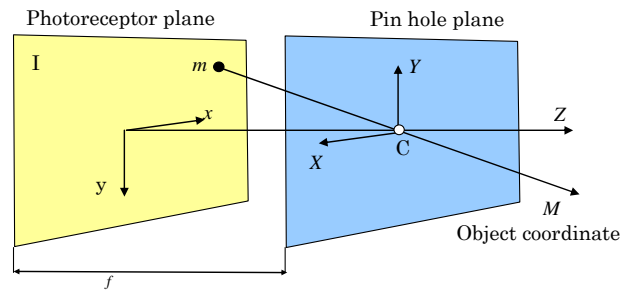


図-G.3 ピンホールカメラを幾何学的に見た場合

このとき、できあがる物体の像は図-G.2 のように 180° 反転した像となり、ピンホールにより結ばれる像と実際の物体の座標の関係は図-G.3 のようになる。図において平面 I は感光材面、距離 f はカメラ箱の奥行きをしめし、平面 I と平行な面 F にピンホールが設けられる。平面 I 上の座標 $m=(x,y)$ と、対象物体の座標 $M=(X,Y,Z)$ には、次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{X}{Z} \\ y &= -f \frac{Y}{Z} \end{aligned} \tag{G.1}$$

この関係から、焦点距離 f と物体の座標 M が明らかであれば、平面 I 上の座標 m を計算することが可能となる。

(3) レンズによる像

一般のカメラでは、ピンホールの代わりにレンズを使って像を結ぶ。図-G.4 の模式図に示されるように、光はレンズを通過する際に、入射角により決まった方向に屈折するが、レンズの形状によって屈折した光は一点に集中して結像する。この点が焦点であり、ピンホールカメラの場合と同じく、結像された物体像は 180° 反転した像となる。

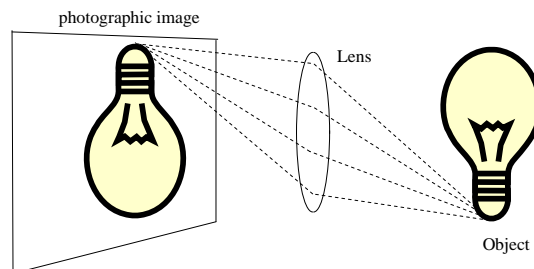


図-G.4 レンズカメラの投影概念図

レンズを使って結像する場合、「歪み」が発生する。特に、レンズ自体の歪みによって直線が

歪んで投影される「放射歪み」は、周辺になるほどその歪みが顕著になる。このため、カメラを用いた3次元計測では測定精度に大きく影響し、予めこの歪みを補正する必要がある。

G.2 複数のカメラによる座標の同定

図-G.5 のように複数のカメラで1つの対象を異なる角度から撮影した場合、一定数以上の注目点がそれぞれにカメラに写り、その点の座標情報からカメラの位置関係を求めることができる。

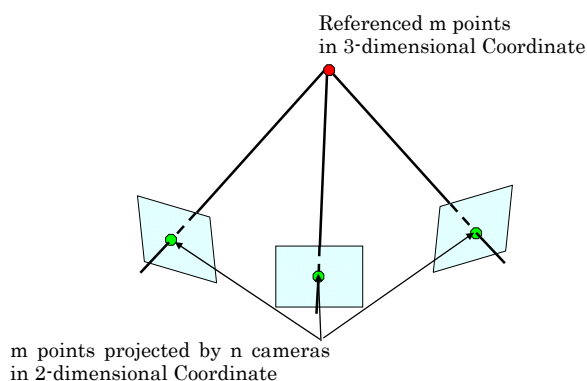


図-G.5 カメラ位置特定の様式図

カメラに写る物体上の点 P の座標 $p(x_p, y_p)$ は、カメラの位置 (X_c, Y_c, Z_c) 、カメラの方向 $(\omega_c, \phi_c, \kappa_c)$ 、点 P の位置 (X_p, Y_p, Z_p) の関数となる。これを式で示すと、以下のようになる。

$$\begin{aligned} x_p &= f(X_c, Y_c, Z_c, \omega_c, \phi_c, \kappa_c, X_p, Y_p, Z_p) \\ y_p &= g(X_c, Y_c, Z_c, \omega_c, \phi_c, \kappa_c, X_p, Y_p, Z_p) \end{aligned} \quad (G.2)$$

今、点が m 個、カメラが n 台 (= 写真 n 枚) の場合を考える (図-G.5 の場合)。このとき、 n 枚の写真上の m 個の点について上記の式を $2mn$ 個たてることができる。また、未知の情報 (未知数の数) は $6n+3m$ 個 (カメラの位置+方向が $6n$ 、点の位置が $3m$) となる。ここでは、座標系の取り方は任意であるので、一つのカメラの位置と方向を基準座標とすることで未知数を6個減らすことができる。また、幾何学的にスケールが不定となるから、未知数はさらに1つ減らすことができる。このため、未知数は計 $6n+3m-7$ 個となる。したがって、 $2mn$ 個の連立方程式を解くためには、式の数未知数の数より多ければよい。すなわち、

$$2mn \geq 6n + 3m - 7 \quad (G.3)$$

を満たせばよいことになる。例えば、写真が2枚 ($n=2$) の場合で考えると、上記の条件は $m \geq 5$

となって、5個以上の点が2枚の写真に共通に写っていれば、原理的には連立方程式を解くことができ、カメラの位置関係が決定することができる。しかし、実際には非線形性がネックとなって5点で方程式を解くことは困難なため、通常の3次元計測では8点の対応点を利用することが多い。

一方、複数カメラの位置関係の決定の方法に基づいて、2台のカメラを用いて物体を撮影し、それぞれのカメラの位置関係が求められているとすると、物体上のある注目点とカメラに投影される画像の関係は図-G.6のようになる。注目している点がカメラ1に写る点とそのレンズ中心を結ぶ直線と、カメラ2に写る点とそのレンズ中心を結ぶ直線が交差する点が、目的の注目している座標として得られる。ただし、ここではカメラ1、カメラ2、および注目点を結ぶ三角形の相対的な関係が求められるだけであるので、絶対スケールを求めるためには最低1カ所の実寸スケールが判明している必要がある。

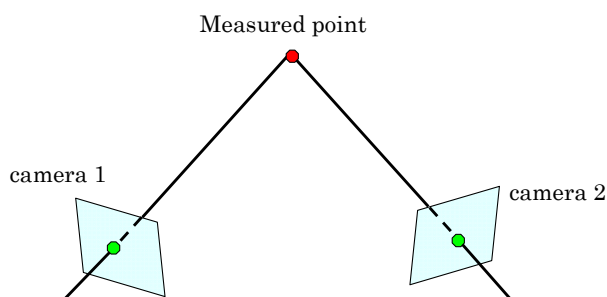


図-G.6 カメラを使った3次元座標特定概念図

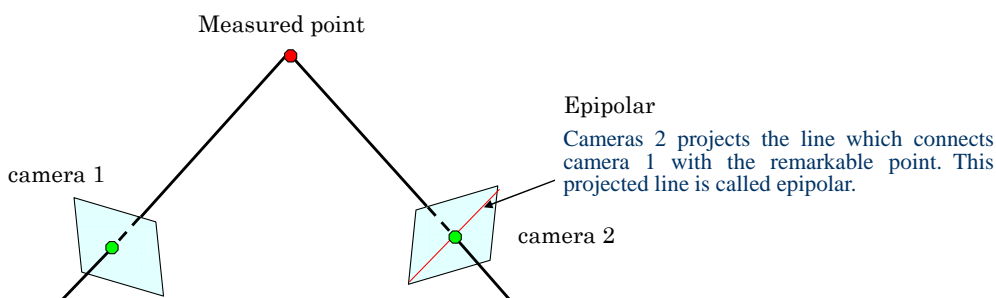


図-G.7 エピポーラ線

一方、カメラ1と注目している点を結ぶ直線は、カメラ2に直線として投影される。この直線をエピポーラ線と呼ぶ。カメラ2と注目している点を結ぶ直線も、同様にカメラ1に投影される。注目している点の座標が分からない場合、カメラ1に写っている点はカメラ2ではこの直線(エピポーラ線)上にあることが分かる。このエピポーラ線の性質を利用して、エピポーラ線を「補助線」として表示し、座標を求める補助手段として利用される。

G.3 3次元画像計測の手法

立体物の形状や三次元位置の計測を「画像」から行うことを総称して「3次元画像計測」と呼ぶが、その手法には様々なものがある。その手法を大きく分類すると、「受動型計測」と「能動型計測」の2つに分かれる。受動型計測は、対象となる物体に対して、計測の補助となる特定の光や電波等を照射することなく行う計測であり、それに対して能動型計測では、3次元計測をするために光、電波、音波などを対象の物体に照射し、その情報を利用して計測を行う方法である。表-G.1 にいくつかの計測手法を示す。

表-G.1 3次元画像計測手法

受動型計測	レンズ焦点法	一眼レフのカメラでフォーカシングにより焦点を合わせるのと同様の原理で、物体の座標とカメラとの距離を計測する方法。ある地点でピントを合わせ、合ったところのダイヤル目盛りから距離を求める。焦点深度の非常に浅いレンズが必要となるため、距離のある測定には向いていない。
	ステレオ法	カメラ等を左右に2台並べ、三角測量の原理で計測を行う方法。カメラの配置方法によって、「両眼視」、「三眼視」、「カメラ移動型」などの方法がある。
能動型計測	光レーザー法	物体に光を当て、その光が戻ってくるまでの時間によって距離画像を得る方法。
	アクティブステレオ法	アクティブステレオ法ではカメラを2台使う代わりに、1台を光を発する装置に置換して計測を行う。投影光の種類によりスリット光投影法*など様々な手法に分類される。 *スリット光投影法:スリット光を物体に投影した状態で撮影を行い、その光の変化の度合いを取り出して計測を行う方法。
	照度差ステレオ法	対象の物体に対して複数の光源を用い、光源を切り替えながら写した複数の画像から面の方向を求める方法。光源に近い物体の面の面素が明るく写ることで光源方向に傾きを計測できるため、これを複数得ることで立体の計測を行うことができる。

参考文献

- 1) 3次元計測の話, <http://www.kurabo.co.jp/el/room/3d>
- 2) 井口征士, 佐藤宏介:3次元画像計測, 昭晃堂, 1990

助成研究者紹介

いたくら けんいち
板倉 賢一

現職: 室蘭工業大学工学部教授(工学博士)

主な著書・論文:

- ・残壁ハンドブック(資源・素材学会 平成 17 年)
- ・室蘭工業大学はこんな授業で勝負する(室蘭工業大学 平成 14 年)
- ・オムニバス技術者倫理(共立出版 平成 19 年)
- ・A Modeling Method on Fractal Distribution of Cracks in Rocks using AE Monitoring (J. of Acoustic Emission, 23, 2005, pp.119-128)
- ・トンネル観測化施工の新しいパラダイムを目指して(土と基礎, 52, 6, 2004, pp.19-21)
- ・さく孔機の機械量データによる天盤構造可視化システムの開発(資源・素材学会誌, 115, 13, 1999, pp.1033-1039)

まつい ひろや
松井 裕哉

現職: 日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門

東濃地科学研究ユニット 結晶質岩工学技術開発グループ

主な著書・論文:

- ・In-situ Experiments on Excavation Disturbance in JNC's Geoscientific Research Programe, Proc. of a European Commission Cluster Conference and Workshop of Impact of the excavation disturbed and damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories, pp.323-329, 2003
- ・Comparison of the results of stress measurements determined by various methods at the Kamaishi mine, Proc. of International symposium on rock stress, pp.95-100, 1997
- ・MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル, サイクル機構報告書 JNC-TN7420 2001-001, 2001

はやの あきら
早野 明

現職: 日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門

東濃地科学研究ユニット 結晶質岩地質環境研究グループ

主な著書・論文:

- ・立坑掘削中の湧水量観測に基づく瑞浪層群中の透水性/遮水性構造の分布の推定およびそれらの地質学的性所について-瑞浪超深地層研究所における立坑掘削を例として-, 平成 18 年度支部研究発表会予稿集, 日本応用地質学会中部支部, pp.25-28, 2006
- ・3D レーザースキャナーを用いた坑壁地質観察の効率化-瑞浪超深地層研究所における適用事例-, 平成 19 年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.211-212, 2007
- ・超深地層研究所計画 研究坑道の掘削を伴う研究段階(第2段階)の現状 (3) 研究坑道

建設における湧水抑制対策の現状, 日本原子力学会 2008 年春の年会, 2008

- Relationship between fractures and flow paths in granitic rock at the Mizunami Underground Research Laboratory site, 36th IAH Congress, 2008

やまち ひろし
山地 宏志

現職: 三井住友建設株式会社 技術研究開発本部技術開発センター(工学博士、技術士
(建設部門))

主な著書・論文:

- PC-based simulations of blasting demolition of RC structures: Construction and Building Materials, Vol.24, pp. 2401-2410, 2010.
- ロックボルトによる極小断面水路トンネル補修の設計と施工法 -極小トンネル内で低粉塵穿孔作業を実現-, 建設機械, Vol.46, No.9, pp.69-73, 2010.
- 可塑性充填材によるトンネル覆工背面空洞の長距離圧送工法の開発-長距離圧送と充填材品質確保の両立について-, 建設機械, Vol.46, No.8, pp.61-65, 2010.
- 小断面トンネルリニューアルシステム工法 -小断面トンネルに特化した補修・補強工法の開発とその調査について-, 建設機械, Vol.46, No.7, pp.61-66, 2010.
- 山岳トンネルにおけるロックボルト 技術資料(ジェオフロンテ研究会 平成 18 年)
- コンクリートライブラリー121 吹付けコンクリート指針(案)【トンネル編】(土木学会 平成 18 年)
- 現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト(トンネル技術協会 平成 17 年)
- 矩形大断面切羽の崩壊機構と引張部材としての鏡ボルトに関する考察(土木学会論文集C, Vol.63, No. 2, 2007, pp.344-357)

大津 慎一

現職: 三井住友建設株式会社 技術研究開発本部技術開発センター(工学博士、技術士
(建設部門))

主な著書・論文:

- 三次元レーザースキャナーを用いたプラント設備における配管図の作成について, 危険物保安技術協会・Safty&Tomorrow, Vol.82, pp.47-52, 2002
- 三次元レーザープロファイラを用いた城郭石垣計測システムの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol.13, pp.165-172, 2004
- 三次元形状計測における大量点群データの処理手法, 土木情報利用技術論文集, Vol.16, pp.27-36, 2007

A RESEARCH ON BUILDING METHOD OF PRODUCT DATA MODELS BY LASER SCANNER DATA AND ITS APPLICATION OF DESIGN/ CONSTRUCTION/ MAINTENANCE FOR UNDERGROUND STRUCTURE

Itakura,K.¹ Matusi.H.² Hayano.A.² Yamachi,H.³ Ootsu,S.³

¹Muroran Institute of Technology ²Japan Atomic Energy Agency. ³Sumitomo-Mitsui Construction Co, Ltd

Generating geometrical computing model of structures makes the generic technology in the intelligent construction technology (ICT). However, it is difficult to conduct precise measurement for natural configuration, such as a tunnel excavating wall, by conventional surveying method.

In this study, we developed generating method for Product Data Models (PDM) of underground structure using shape data acquired by laser scanner instrument. System improvement for applying these data model to design/ construction/maintenance of underground structure was also carried out. So Laser scanner data used in this study is wall surface configuration data measured in the Mizunami Underground Research Laboratory shaft construction.

Since configuration measurement is carried out every excavation step, generating PDM for MURL requires connecting arbitrary measurement data according to reference section. Therefore, quickly required data selecting technique and reasonable connecting technique for selected data must be improved. In this study we have developed RDBM(Relational Data base management) aided system which can deal with above transactions quickly.

A laser scanner surveys structure configuration in the 0.06 degree interval. So an enormous geometric data was generating in one time measurement. In this situation, as a size of reference model area is increasing, there is a limitation of processing ability of personal computer. In order to solve this problem, we developed two techniques; First technique is the transaction way which processes data by culling in proportion to the size of reference region. So if a reference region is relatively large, a rough expression is carried out on PC. And if small, a precise expression is done.

Second is so call cloud computing technique. Therefore, data transaction for required data section is conducted by multiple computers parallelly via internet. In this study, 12 personal computers are used for verifying this technique, and a good result has been shown. This technique is also applied to geological data modeling on PC display. This makes a drawing of an enormous geological data would be able to be executed without stress.

These techniques are the first application for ICT fields and the system that we have developed in this study has capability of practical engineering use. We intend to apply this system for general tunnel construction projects.

In this study, verification of configuration survey using a three-dimensional digital camera is also conducted. The purpose of this verification is that daily survey by a laser scanner is difficult in general construction site since that instrument too expensive for daily work. A three-dimensional digital camera developing at present is comparatively cheap and makes shape measure easy. However, an accuracy which is capable for adopting practical works has not yet acquired by the present.

.
. .

KEYWORDS: *product data model, laser scanner, cloud computing.*

研究 成 果 の 要 約

助成番号	助成研究名	研究者・所属
第2009-1号	レーザースキャナーによる地下構造物のプロダクトデータモデル構築と その設計・施工・維持管理への適用に関する研究	板倉 賢一 室蘭工業大学
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>構造物の正確な3次元幾何学モデルの作成はICTの基盤技術をなす。しかしながら、トンネル掘削形状のような自然形状を従来の測量方法で正確に測定することは難しい。</p> <p>本研究では、レーザースキャナーによる形状測量データを利用して地下構造物のプロダクトデータモデルの構築方法を開発した。併せて、そのデータモデルを地下構造物の設計・施工・維持管理へと適用するための各種システムの整備も実施した。なお、本研究で用いたレーザースキャナーデータは瑞浪超深地層研究所立坑工事で測定された壁面形状データである。</p> <p>当然のことながら、形状測定は掘削毎に行われるため、データモデルの作成にあたっては、対象区間の任意測定データを連結する必要がある。したがって、必要とされる測定データを迅速に選択する手法と、選択された膨大なデータを合理的に連結する手法を整備しなければならない。本研究では、この処理をRDBMを援用して迅速に処理するシステムを開発した。</p> <p>レーザースキャナーは構造物形状を0.06度間隔で測定するため、一回の測定で膨大なデータが発生する。したがって、参照区間が増大すると、パーソナルコンピュータの処理能力に限界が生じる。この問題を解決するために、われわれは2の手法を開発した。</p> <p>一つは、参照領域の大きさに応じて、データを間引いて処理する方法である。すなわち、参照領域が大きければ粗い形状表現を行い、データ参照領域が小さければ精密な形状表現を行う手法である。</p> <p>二つ目は、いわゆるクラウドコンピュータ技術である。すなわち、要求されたデータ参照領域のデータ処理をインターネットを介して、複数のコンピュータが実行するというものである。本研究では、12台のパーソナルコンピュータを用いてこの手法の妥当性を検証し、良好な稼働状況が検証された。また、同手法をPCディ</p> </div> <div style="width: 48%;"> <p>スプレイ上での形状描画にも適用した。これにより、膨大な形状データの描画をストレスなく実行できるようになった。</p> <p>これらの手法は、いずれもICT分野では初めて開発された手法であり、開発したシステムは実務に適用できるものと判断する。今後、一般的なトンネルプロジェクトに適用することを考えている。</p> <p>さらに、本研究では3次元デジタルカメラによる形状測量についても検証を実施した。これは、レーザープロファイラーがいまだに高価であり、日常的な形状測量に適用することが困難なためである。現在開発途上にある3次元デジタルカメラは比較的安価で、簡便に形状測量を行うことができる。しかしながら、現在までのところ、実用に供することのできる精度での測量結果は得られていない。</p> </div> </div>		