

改修工事における 3次元レーザー計測と
内装プレカット部材の配置の最適化に関する研究

Study on 3D Laser Scanning and Optimum Design of
Pre-Cut Interior Finishing Components for Renovation Works

2014年2月

石田 航星
Kosei ISHIDA

博士論文

改修工事における 3次元レーザー計測と
内装プレカット部材の配置の最適化に関する研究

Study on 3D Laser Scanning and Optimum Design of
Pre-Cut Interior Finishing Components for Renovation Works

2014年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
建築学専攻 建築生産マネジメント研究

石田 航星

Kosei ISHIDA

改修工事における 3次元レーザー計測と 内装プレカット部材の配置の最適化に関する研究

第1章 序論.....	1
1.1. 本研究の背景.....	1
1.2. 本研究に関する既往の研究.....	2
1.2.1. 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究.....	2
1.2.2. 内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究.....	2
1.2.3. 内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究.....	3
1.3. 本研究の目的と研究項目.....	3
1.3.1. 本研究の目的と研究の範囲.....	3
1.3.2. 本研究における研究項目.....	4
第2章 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究.....	8
2.1. 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握手法の概要.....	8
2.1.1. 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握手法の手順.....	8
2.1.2. 鉄筋コンクリート建築物における3次元計測手法とデータ処理手法の必要性.....	8
2.1.3. 本手法における用語の定義.....	9
2.1.4. 3次元レーザースキャナーによる計測の概要.....	9
2.1.5. 鉄筋コンクリート建築物の点群データの分析の概要.....	9
2.2. 鉄筋コンクリート建築物における3次元レーザースキャナーによる計測の手法.....	11
2.2.1. 点群データと設計CADデータ、施工箇所の座標系の一致手法.....	11
2.2.2. 異なる座標系にあるターゲットの一致手法.....	12
2.3. 鉄筋コンクリート建築物の点群データからのノイズと線形状の点群の除去手法.....	17
2.3.1. 点群データからのノイズの除去手法.....	17
2.3.2. 線形状の点群データの抽出手法.....	20
2.4. 鉄筋コンクリート建築物からの点群データの取得と形状の把握手法の適用実験.....	24
2.4.1. 点群データ,設計CADデータ,施工箇所の座標系の一致による部材干渉の確認.....	24
2.4.2. 点群データへのノイズ除去手法と線形状の点群の抽出手法の適用実験.....	31
2.5. 結言.....	36
第3章 内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究.....	37
3.1. 内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化手法の概要.....	37
3.1.1. 内装工事におけるボード材の割付図と加工図作成の必要性.....	37
3.1.2. 本手法での用語の定義と最適化計算における前提条件.....	38
3.1.3. 割付図と加工図の作成の手順.....	38
3.1.4. ポリゴンモデルや点群データを用いた部材の詳細設計.....	39
3.1.5. 軸組材とボード材との連携.....	40
3.2. 割付図と加工図の最適化手法.....	40
3.2.1. 割付図の作成手法.....	40
3.2.2. 加工図の作成手法.....	42
3.3. 間仕切壁における割付図と加工図の最適化に関する計算実験.....	46
3.3.1. 計算実験の概要.....	46
3.3.2. 割付図の作成.....	46
3.3.3. 加工図の作成.....	48
3.3.4. 3×6版の定尺ボード材における最適な割付図の選定.....	49
3.3.5. 各規格材の割付図と加工図の作成結果からの本手法の有効性の確認.....	50
3.4. 結言.....	54

第4章 内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究	55
4.1. 内装プレカット部材を用いた改修工法における施工手法の概要と実施手順.....	55
4.1.1. 点群データを用いた既存躯体の形状把握とプレカット部材の加工寸法の算出手法	55
4.1.2. 点群データを用いた既存躯体の形状把握とプレカット部材の詳細設計の手順.....	56
4.1.3. 内装に使用する軸組材の加工寸法の算出手法.....	58
4.1.4. 施工実験の実施による本手法の実現性の確認.....	60
4.2. 施工実験の概要	60
4.3. 3次元レーザースキャナーを用いた既存躯体の計測	62
4.3.1. 既存躯体の計測	62
4.3.2. ターゲットの自動対応と座標の統合	64
4.3.3. 地墨取得用球ターゲットの中心座標に基づく設計 CAD 座標系への重ね合わせ	68
4.3.4. 点群データの計測精度の確認.....	70
4.4. 点群データに基づく躯体のポリゴンモデルの作成.....	71
4.5. ポリゴンモデルによる間仕切壁の部材のプレカット寸法の算出	72
4.5.1. ポリゴンモデルからの間仕切壁設置位置の躯体断面の算出	72
4.5.2. 割付図と加工図の最適化計算の適用	76
4.6. プレカット部材の加工・取り付けと設計寸法の妥当性の検証.....	83
4.6.1. プレカット部材の作成	83
4.6.2. スタッドとランナーの隙間に基づく、スタッドの加工寸法の妥当性の検証	84
4.6.3. せっこうボードのプレカット部材の加工精度の検証.....	87
4.6.4. 差分分析によるスタッドとせっこうボードの設置位置の精度検証	90
4.7. 結言	97
第5章 結論.....	98
付章	1
附.1 座標統合における最小二乗法	1
附.2. 多角形状の扱い.....	4
A. 多角形の表現方法.....	4
B. 2つの図形の共通部分の算出	4
C. 長方形の重複関係の判別	5

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1. 本研究の背景

都市部への人口集中により東京などの大都市においてはマンション・オフィスなどの建設が続けられて来た。特にマンションストック数は昨今の不況下においても一貫して増加し続け、平成24年時点で、590万戸¹⁾ものマンションストックが存在し、日本の人口の約1割が居住している。他方、マンションの老朽化が進行しており、築年数が40年を超える分譲マンションが東京都だけで2008年の5万4千戸から2023年には42万8千戸²⁾に大幅に増加するものと予測されている。ただ、マンションは区分所有が一般的であり、全棟一斉に屋内を改修するような工事は想定しづらく、居ながら施工が求められる。また、オフィス建物に関しても、築年数の経過に伴う賃料の低下を防ぐために、定期的な改修工事が実施される。耐震性能のみならず、環境配慮型ビルへの改修や、バリアフリー対応、セキュリティの向上、OAフロア化など、社会的ニーズの変化に対応するための工事が常に必要となるが、改修工事を実施しているフロアは賃料収入が望めないため、工事の短工期化や居ながら施工が望ましい。

そのため、マンションやオフィスビルの改修工事の需要が増大しているが、居ながら施工を行う必要性が高いため、騒音が小さく現場廃棄物の少ない環境対応型の施工法が求められるとともに、工期の短い工法の開発が必要である。しかしながら、間仕切壁のように躯体面に隙間なく設置する部位の多い内装工事では、現場合わせを前提とした工法が一般的であり、加工作業による工事騒音が発生しやすく、施工箇所での作業時間が長くなりやすい。特に施工誤差による微妙な凹凸がある鉄筋コンクリート躯体での改修工事では、内装工事の現場合わせは必須である。この内装工事において居ながら施工を実現するには、工事騒音や粉じんの原因となる現場切断や加工作業を行わずプレカット部材を用いて施工することが必要である。

しかし、改修工事では竣工図の紛失などで図面が得られないことも多く、使用する部材の寸法や形状を事前に正確に把握することが出来ない問題がある。また、躯体等の既存部分には通常、施工誤差が存在するため、たとえ竣工図が存在してもそれに基づいて部材を事前に切断・加工して既存部分の寸法・形状に合致するように取り付けることは難しい。

また、新築工事においても、都市部での騒音の低減や生産性の向上を目指してプレカット化を進めようとする動きもあり、どのようにしてプレカット部材を取り付け位置の寸法や形状に合わせて正確に切断・加工するかが大きな課題となる。

型枠により施工されている鉄筋コンクリート建築物の躯体形状には、施工誤差による微小な凹凸が存在する。この凹凸を内装工事实施前のわずかな時間で把握する手段がなかったために、内装工事では現場加工による施工が行われてきたが、躯体の3次元形状を点群データとして取得できる3次元レーザースキャナーの性能が建築生産で使用可能な水準に達してきたことにより、躯体の形状把握が事前に行える環境が整いつつある。しかしながら、この点群データに基づいて3次元CAD上で内装のプレカット部材を作成し、施工するには、まずは、詳細設計を実施するのに適した、形状情報と地墨などの施工箇所の躯体に記載された情報を点群データに記録する方法が必要である。また、鉄骨やプレキャストコンクリートに見られるように、部材をプレカットして工場生産する場合、施工前段階においてプレカット部材の詳細設計を実施しておく必要があるが、在来工法では現場作業者が設置箇所の寸法に合わせて、その場で加工切断していたため、膨大な数に上る内装部材の設計CADモデルを新たに作成する必要が生じる。特にせっこうボード材の割付では残材量が最小となる割り付けを実施するなど、躯体の形状情報以外に、計算すべき項目が生じるため、内装部材の数量と加工寸法の割り出しとCADモデル作成には、残材量を最適化する技能が求められる。更に、3次元計測技術と内装部材の数量と加工寸法の最適化技術などの要素技術を組み合わせることで内装のプレカット部材による施工を実施するには、躯体の計測、内装部材の詳細設計、プレカット部材の加工・施工、取付精度の確認(計測)という一連の流れ全体を整理し、体系化する必要がある。

以上を踏まえると、社会的必要性がある内装のプレカット部材の作成には下記の問題を解決し

なければならない。

- (1) 鉄筋コンクリート建築物の躯体形状を把握する手法の考案
- (2) 内装工事におけるボード材の詳細設計を事前に行う手法の考案
- (3) 躯体の計測、内装部材の詳細設計、プレカット部材の加工・施工、取付精度の確認（計測）による施工手法の体系化

1. 2. 本研究に関する既往の研究

1. 2. 1. 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究

3次元レーザースキャナーを生産活動において用いることは土木分野や自動車産業で先行して行われてきた。自動車産業における活用例として、プレスした鋼板の出来形や金型の出来形が設計CADと比較して、差異なく出来ているかを確認するリバースエンジニアリング³⁾での活用があげられる。土木分野では土地の起伏の測定や、盛土の出来形⁴⁾や進捗管理⁵⁾に用いられている。プラント分野においては改修工事時の、既存プラントの配管などの設備の3次元モデル作成⁶⁾に3次元レーザースキャナーを用いている。ただ、プラントでは配管の設置位置や中心軸の位置を取得するために点群データから3次元モデルを作成する必要があり、膨大な労務が必要である。これらの点群の分析手法として、伊達は点群から曲面を作成⁷⁾する手法についてまとめている。建築分野においても同様で、点群データからCADモデルを作成する必要がある。平面や球、円筒などプリミティブ図形の認識だけでなく壁面や床、窓などの部位の認識⁸⁾の自動化に関しても研究が行われている。

建築生産の合理化に関しては出来形の進捗管理や精度管理に関する研究が行われている。嘉納らは出来形を計測した点群データと3次元CADモデルを比較することにより内装部材の取り付け精度確認⁹⁾を行うだけでなく、施工中の部位を複数回計測することによって進捗状況を取得する研究⁹⁾を行っている。また、竹内らは3次元レーザースキャナーを用いて、建設現場の作業進捗のモニタリング¹⁰⁾を実施している。加えて、3次元レーザースキャナーの鉄筋検査¹¹⁾への適用を試みている。佐藤らは3次元レーザースキャナーによる大規模建築物の曲面外壁の施工精度確認¹²⁾を実施している。以上の研究は点群データのモデル化や設計CADとの比較を行ったものである。

しかしながら、建築生産の分野で適用した事例の多くは、設計CADデータが事前に存在することを前提として、3次元レーザースキャナーを出来形の検査に使用したものが多く、施工箇所の3次元形状に基づくプレカット部材の寸法の算出のような、微小な凹凸を設計に反映するための計測手法に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

1. 2. 2. 内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究

設計の最適化については造船や集積回路の設計において、研究が盛んに行われてきている。

工業生産においては平面形状の大きな母材から、残材を最小にして必要な部材を切り出す方法が研究されている。これらの問題は切り出す部材の形状によって、1次元資材切り出し問題¹³⁾、長方形詰込み問題、多角形詰込み問題などに大別¹⁴⁾される。軸材の最適化計算は1次元資材切り出し問題に相当し、ボード材などの割付は長方形詰込み問題に類似している。

建築分野における生産設計の自動化に関する研究としては豊田による木造住宅の軸組材のプレカット設計¹⁵⁾に関する研究がある。

せっこうボードなどの長方形をした部材の割付の最適化は、長方形詰込み問題の一種である。複数の部材をせっこうボードのような定尺材から、少ない残材で切り出す方法としては、長方形詰込み問題における解法の1つであるBL法(Bottom-up Left-justified algorithm)¹⁶⁾がある。剣持らは長方形をした部材を最小の残材で切り出す方法に関して研究¹⁷⁾を行っている。

詰込み問題は工業分野で発達した数理手法であり、建築における割付問題とは以下の点で異なる。

- (1) 配置領域に対して、定尺ボード材が小さい。
- (2) 割付においては隙間なくボード材を配置する必要がある。

(3) 割付けたボード部材を定尺ボード材から効率的に切り出す方法を作成する必要がある。

(4) ボードから切り出す部材の形状は長方形以外に多角形が存在する。

このようにボード材の割付は従来の数理手法をそのまま適用できない。建築生産における2次元部材の残材の最小化を目的とした設計最適化に関する研究はほとんど行われていないため、内装部材の詳細設計の最適化手法の研究が新たに必要である。

1.2.3. 内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究

鉄筋コンクリート造の内装工事の合理化を目指した研究として横山らは集合住宅において内装・設備の部品をユニット化することで、専門職でない作業員でも施工可能な簡易施工部品による内装構法¹⁸⁾を考案し、多能工による内装設備の一貫施工を実現している。三根らは内装・設備工事の工程に関して調整・分析を行い、内装工事の工程を明らか¹⁹⁾²⁰⁾にするとともに、研究により得られた知見を基にリブパネル構法²¹⁾を考案している。永尾らは従来のパネル工法よりも在来軸組工法に近い工法として間仕切り壁パネル工法²²⁾を開発している。しかしながら、躯体の凹凸、特に床や天井の躯体面に凹凸があるため、ユニット化した部材を如何に躯体面に追従させるかが課題となることを指摘している。

現在では躯体の形状把握については3次元形状を正確に計測出来る3次元レーザースキャナーが登場し、躯体の凹凸を事前に把握することが可能となっている。

印藤らは福島第一原子力発電所の建屋カバーの建設に際して、建屋を3次元レーザースキャナーで計測し、建屋カバー²³⁾の設計に活用している。

しかしながら、内装工事のように部材数が多く、現場加工を前提とする一般的な工法について、3次元レーザースキャナーによる計測に依って、躯体の計測、設計、施工に至る一貫した生産改善手法に関して行われた研究は少ない。また、既存躯体との隙間がないように設置する必要がある間仕切壁のように、1-2mmの精度でプレカット部材の寸法の割り出しが求められる分野に関する研究事例はなく、新たな手法が必要である。

1.3. 本研究の目的と研究項目

1.3.1. 本研究の目的と研究の範囲

建築物の施工では、通常、逃げ寸法を用意しておき、施工箇所で先行して取り付けられた部材の形状に合わせて、現場加工を行う工法が一般的であった。これはJIS A 0003²⁴⁾の建築公差においても部材により10mm-100mm程度の建築公差を許容していることから伺える。しかしながら、本研究では、施工箇所の凹凸を3次元レーザースキャナーにより正確に計測する技術を考案し、この計測結果に基づいて躯体に隙間なく取りつく内装のプレカット部材を作成する手法を開発することにより、逃げ寸法を必要としない内装プレカット部材を用いた改修工法を開発し、騒音・振動や粉塵などが生じない改修工法の実現を目的としている。

故に、まず、既存躯体の微妙な凹凸を反映したプレカット部材、1つ1つの寸法を求めるために、躯体の3次元形状を正確に把握する手法を考案する必要がある。

鉄筋コンクリート建築物の3次元形状の把握は従来、目視や手計測、現場写真により実施されてきたが、計測対象の3次元形状を取得できる3次元レーザースキャナーの登場により、施工箇所の出来形形状を3次元のデジタルデータとして計測することが可能となっている。他方、3次元CADを用いた設計が一般的に行われるようになり、3次元CAD上に出来形の3次元点群データを正確に一致させる技術が存在すれば、嘉納らの研究⁹⁾にもあるように設計CADデータと直接比較することが可能となる。このように1つの3次元CAD上に、日々変化する施工箇所の状況と3次元設計データ、そして工事実施後の出来形の形状を読み込むことが可能となっている。しかしながら、建築工事において3次元レーザースキャナーを導入し出来形の品質を確認するには、施工箇所、設計CADデータ、点群データの座標系を一致させる方法が必要である。また、取得した複数箇所から計測した点群データを同一座標系に効率的に統合する技術や点群データに含まれるノイズを除去する技術などの、取得した点群データを適切に処理する新たな技術が必要である。

他方、3次元レーザースキャナーにより施工箇所の形状を把握できても、そこに取り付ける部材の3次元設計を行う手法は、存在しなかった。特に内装工事においてプレカット部材を作成するにはすべての内装部材の加工寸法を記した詳細設計図が必要となるため、内装部材のような数の多い部材を逐一手作業で設計するのは設計の手間が膨大になり現実的でない。内装部材のプレカット化を実現するためには3次元レーザースキャナーや自動加工技術に加えて、3次元CAD上でのプレカット部材の設計作業を省力化もしくは自動化する手法が必要となる。特に、軸組材などの1次元材に関しては、他分野において研究が実施されているが、ボード材割付に関しては従来の詰込み問題における計算手法が使えないため、新たな計算手法が必要である。

加えて、プレカット部材の導入による組み立て施工を、3次元レーザースキャナーによる躯体の計測と詳細設計の最適化手法の両方を用いることにより、内装のプレカット部材が取り付け可能なかを検証したうえで、手順を体系化する必要がある。

本研究は現場加工による工法が一般的な内装工事において、施工箇所の3次元形状を素早く把握する3次元レーザースキャナーによる計測技術と、膨大な数になるプレカット部材の設計CADモデルを作成する技術を開発したうえで、これらの要素技術を用いて、計測、点群データ処理、プレカット部材の設計、加工・取り付け、出来形の計測という3次元計測と3次元設計を前提とした新たな施工手順を開発することを研究の目的とする。

1.3.2. 本研究における研究項目

本研究では鉄筋コンクリート建築物において、内装のプレカット部材を以下の手順で作成し、施工を行う内装プレカット部材を用いた改修工法の開発を行う。

- (1) 3次元レーザースキャナーを用いた躯体形状の計測
- (2) 内装部材の詳細設計に適した点群データの処理
- (3) 点群データに基づく躯体のポリゴンモデルの作成
- (4) ポリゴンモデルを用いた間仕切壁部材の設計
- (5) プレカット部材による組み立て施工
- (6) 出来形の計測に基づく施工品質の確認

上記の6つの手順でプレカット部材を作成するには、まず3次元レーザースキャナーによる計測と取得した点群データの処理技術について研究を行い、内装部材が躯体に隙間なく取り付け可能な精度で躯体形状を設計CAD上で把握する手法を新たに開発する必要がある。また、内装のプレカット部材の加工寸法を効率的に作成する手法の開発が必要である。更に計測や、点群データとCADデータの一致、ポリゴンモデルへの変換、プレカット部材の加工作業などの各段階において誤差が発生するため、この手順で実際に間仕切壁を施工した場合、設置可能であるかを実験的に検証することが必要である。

故に前項で示した研究目的を達成するために、以下の3つの研究を実施した。

- (1) 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究
- (2) 内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究
- (3) 内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究

A. 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究における研究項目

内装部材のプレカット化を実現するためには、点群データを用いて内装部材の詳細設計を行い、現場において適切な位置に設置するために地墨の位置の記録を軸とした「施工箇所」「点群データ」「設計CADデータ」の3つの空間座標を一致させる手法を開発した。

また、躯体を隈無く計測するために複数回の計測が必要であるが、複数の点群データを効率的に座標統合するために新たな手法を開発した。

取得した点群データは、CAD等に読み込めば計測対象の形状を目視により確認することが可能であるが、点の集合にすぎないため、そのまま設計CADに読み込んでも利用しづらい。そのため、取得した点群データをポリゴンモデルに変換し、設計CAD上で扱いやすいデータに変換する必要があるが、この際に躯体以外の点群を予め除去しておく必要がある。躯体の点群とそうでない点

群をより分けるには最小二乗法などの数学的手法を用いて、球や平面、円筒などのプリミティブな形状を認識する手法を用いることで、必要な形状の点群を抽出したり、不要な点群を除去したりすることが可能である。しかしながら、建築部材の形状には、円筒より細く、自由曲線を描くような線形状のものが多く存在するため、これらの線形状の点群を認識する手法が新たに必要である。また、これらの形状認識を正確に実施するには点群データに含まれるノイズを除去する必要がある、これらの点群データの分析技術の開発も行った。

B. 内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究における研究項目

本研究では、間仕切壁の生産設計において、ボード材の割付の最適化を行う手法を考案することを主眼としている。

ある割付図が、優れているかを議論するには労務費と材料費に基づいて判断することが必要である。このうち材料費の評価は定尺ボード材の「残材量（使用枚数）」に基づいて行う。またプレカットしたボード部材の取付にかかる労務量は部材を運搬するために往復する回数と目地処理を行うのにかかる作業時間で決まるため、「割付ボード部材数」と「目地長さ」によって評価を行う。

目地長さや割付ボード部材数は割付図によって判断でき、残材量は部材を定尺ボード材から切り出す加工図から算出できる。そのため、最適な割付図を作成するには「割付図」と「加工図」の両方を最適化する手法を考案する必要がある。故に下記の2項目に関して、新たに手法を考案した。

(1) 複数の割付図の作成手法

(2) 割付ボード部材を定尺ボード材から効率良く切り出す加工図の作成手法

なお部材のプレカットを前提とする場合、NC機械等により自動加工されることが予想されるためカットの長さは考慮しない。また、本研究はコンピュータを用いて、数値に基づいたボード材の割付図と加工図の設計を行う手法の研究が主題である。

C. 内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究における研究項目

本研究は3次元レーザースキャナーによる躯体計測により取得した点群データに基づいて、軸組材とボード材のプレカット部材の寸法を割り出すことで、在来の建材を用いる従来の構法により間仕切壁を施工する手法の開発を目指す研究である。そのため本研究は躯体の計測、プレカット部材の設計、組立による施工、設置精度の確認に至る一貫した手法の開発を目指している。

点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究と、内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究を実施しているが、実際に内装部材をプレカット化するにはこの両方の手法を用いた上で、計測から設計、加工、取付け、取付け精度の確認に至る「内装プレカット部材を用いた改修工法」が実施可能であるのかについて施工実験に基づいて検証する研究が必要である。本研究においては、実際に鉄筋コンクリート建築物を計測し、プレカット部材を作成し、組立施工後に、取り付けられたLGSとせっこうボードの取り付け精度を手計測により確認し、その上で3次元レーザースキャナーを用いて出来形の計測を実施し、間仕切壁全体の設置位置の確認を行った。これらを踏まえ、内装プレカット部材を用いた改修工法が実際に実施可能であるのかについて検証している。

参考文献

- 1) 国土交通省 マンションに関する統計・データ等：分譲マンションストック数（平成24年末現在）
<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/torikumi/tenpu/H24stock.pdf>, 2013.7.5 参照
- 2) 東京都都市整備局：東京のマンション2009, p10, 2009.10,
http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/juutaku_seisaku/manshon-2009-3.pdf, 2013.7.5 参照
- 3) 村岡芳和：三次元測定機による塑性加工部品の計測技術、塑性と加工 第51号 第596号、
p.42-49、2010年5月
- 4) 遠藤和重、梶田洋規、渡邊賢一：施工管理データを搭載した3次元測量機器による出来形管理
手法の研究、建設の施工企画 No.721、p.9-13、2010年3月
- 5) 小西昭裕、織田重和、櫻井雄二郎他：3次元レーザースキャナーを用いたトンネル覆工
巻き厚管理の現場適用、土木情報利用技術講演集 31、p.61-64、2006年
- 6) 河村幸二：3次元計測とモデル化による配管エンジニアリングの革新、設計工学 Vol41, No.2、
p27-31、2005年5月
- 7) 伊達宏昭：点群からの曲面作成手法、設計工学 Vol41, No.2、 p.12-20、2005年11月
- 8) Antonio Adan, Xuehan Xiong, Burcu Akinci, Daniel Huber: AUTOMATIC CREATION OF
SEMANTICALLY RICH 3D BUILDING MODELS FROM LASER SCANNER DATA, The 28th International
Symposium on Automation and Robotics in Construction, Proceedings (PART1) p342-p347,
2011.7
- 9) 嘉納成男, 河原吉則, 柿崎甫, 石岡宏晃：建築生産における3次元スキャナーの活用に関する研
究 -3次元スキャナーによる出来形と工事進捗の計測-、日本建築学会第25回建築生産シンポ
ジウム論文集 p.187-192
- 10) 竹内啓五、太田達見：簡易型形状取得装置による建物施工モニタリング技術の検討、日本建築
学会大会学術講演梗概集（関東）、A-1、p.953-954、2011.8
- 11) 竹内啓五、太田達見：鉄筋観測のための小型形状スキャナの適用性評価、日本建築学会大会
学術講演梗概集（東海）、A-1、p.193-194、2012.9
- 12) 佐藤康弘、長瀧慶明：新時代を拓く最新施工技術(第15回)建築分野における三次元レーザ
スキャナーの活用事例、建築技術(732)、p.68-75、2011.01
- 13) 梅谷俊治、今堀慎治：切出し・詰込み問題とその応用：(1)1次元資材切出し問題(OR研究の
最前線)、オペレーションズ・リサーチ:経営の科学 50(4)、p.270-276、2005.4
- 14) 今堀慎治、梅谷俊治：切出し・詰込み問題とその応用 - (2)長方形詰込み問題- オペレーシ
ョンズ・リサーチ：経営の科学 50(5)、p.335-340、2005.5
- 15) 豊田 丈輔：プレカット材料取り合わせのための新しい交叉操作による遺伝的アルゴリズム、
電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, 128(7)、p.1131-1136、2008.7
- 16) Brenda S. Baker, E. G. Coffman, Jr., Ronald L. Rivest: ORTHOGONAL PACKINGS IN TWO
DIMENSIONS, SIAM J. COMPUT, Vol.9, No.4, p.846-855, 1980.11
- 17) 剣持光俊、今道 貴司、野々部 宏司、柳浦 睦憲、永持 仁：矩形パッキング問題に対する厳
密解法、電子情報通信学会技術研究報告. COMP, コンピューテーション 105(7)、p.5-14,
2005.4
- 18) 横山謙司、三根直人、高世厚史、岡建雄：部品のユニット化と多能工施工による住宅内装設
備施工の合理化に関する研究、日本建築学会技術報告集 第13号、p.175-180、2001.7
- 19) 三根直人、高田博尾、梶隆：内装・設備工事の工程分析 集合住宅における内装工事に関する
研究 その1、日本建築学会計画系論文集 第534号、p.233-240、2000.8
- 20) 三根直人、梶隆：内装・設備工事の工数と工数からみた工程の特徴 集合住宅における内装工
事に関する研究 その2、日本建築学会計画系論文集 第564号、p.263-270、2003.2

- 21) 三根直人、梶隆：内装・設備工事における作業の習熟効果 集合住宅における内装工事に関する研究 その3、日本建築学会計画系論文集 第568号、p.109-116, 2003.6
- 22) 永尾眞、宗永芳、安間由倫：間仕切り壁パネル工法の開発 集合住宅における内装工事の生産性向上、日本建築学会技術報告集 第20号、p.27-30、2004.12
- 23) 印藤正裕、梶波信一、西川裕他：福島第一原子力発電所1号機 原子炉建屋カバー工事の取組み(その1)構造計画および施工計画、建築技術 第747号、p.46-53, 2012.4
- 24) 日本規格協会：JISハンドブック8 建築I 材料・設備 2011, 日本規格協会, p.28, JIS A 0003

第2章

点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物 の形状の把握に関する研究

第2章 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究

2.1. 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握手法の概要

2.1.1. 点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握手法の手順

従来、鉄筋コンクリート建築物の躯体形状を事前に限なく把握する手段がなかったために、内装工事では現場加工による施工が行われてきたが、既存の躯体が露出した時点で、3次元レーザースキャナーを用いることにより躯体の3次元形状を点群データとして取得することが出来る。この点群データに基づいて3次元CAD上でプレカット部材の詳細設計を行い、内装のプレカット部材を作成するには、3次元レーザースキャナーによる計測技術と点群データの処理技術を内装工事において使用するのに適したものにする必要がある。特に鉄筋コンクリート躯体には施工誤差による微小な凹凸があるため、躯体の3次元形状を正確に把握する手法の開発が重要である。

そこで躯体の3次元形状を正確に把握可能で内装のプレカット部材の配置位置と加工寸法を正確に設計するのに適したポリゴンモデルを作成する手法を考案した。この手法は以下の手順で実施される。

- (1) 3次元レーザースキャナーによる計測
- (2) 取得した点群データの座標統合
- (3) 点群データからの通り芯の抽出
- (4) 通り芯と水平面の位置合わせによる設計CAD座標への変換
- (5) ノイズや鉄筋コンクリート躯体ではない点群データの除去
- (6) 点群データのポリゴン化

2.1.2. 鉄筋コンクリート建築物における3次元計測手法とデータ処理手法の必要性

施工箇所と点群データ、設計CADデータはそれぞれに独立した座標を持っている。点群データに基づいて間仕切壁のプレカット部材の設計寸法を求めるには、躯体の3次元形状を正確に取得した点群データに、間仕切壁を設置する位置を記録した上で、点群データをポリゴンモデルに変換し、設計CAD上に正確な位置でポリゴンモデルを読み込む手法が必要である。

また、取得した点群データには、光波により距離を取得する計測器に特有のノイズが発生する。このノイズは実空間においては何も物体が存在しない場所に発生するため、除去する必要がある。更に点群データには鉄筋コンクリート躯体以外にも、工事中に使用する電源設備の配線を計測した点群が含まれるため、これらの除去が必要となる。それ故に、内装のプレカット部材の加工寸法を算出するのに適したポリゴンモデルを作成するには以下の2つの研究を実施し、新たな手法を開発する。

- (1) 施工箇所と点群データ、設計CADデータの座標系を一致させるための計測手法
- (2) 鉄筋コンクリート建築物の点群データからのノイズと線形状の点群の除去手法

2.1.3. 本手法における用語の定義

本研究で使用する用語を以下の如く定義する。

- (1) 点群データ：3次元レーザースキャナーにより計測した計測対象の3次元形状を点の集合である点群として記録したデータを指す。各点はXYZ座標により構成される。
- (2) ターゲット：3次元レーザースキャナーによる点群データに特定の点の位置を記録するために用いる目標のこと。点群データの座標の統合を行う際に必要となる共通点としてや、地墨の位置を記録する際に用いる。
- (3) ノイズ：点群データに含まれる、本来はなにも存在しない空間に存在する点を指す。
- (4) PTS ファイル：点群データのデータ形式の1つで、X, Y, Z座標に加え計測点の輝度を記録したデータ形式を指す。
- (5) 座標統合：複数箇所から取得した点群データを同一の座標系に変換する、若しくは設計CADの座標系に正確に合うように座標の変換を行うことを指す。複数の点群データや設計CAD上にある同一のターゲットを目印として、同一の座標系に変換するが、ターゲットは微小な誤差を有しているため、座標変換には最小二乗法などにより回転行列を解く^{附1)}必要がある。
- (6) ポリゴンモデル：三角形の組み合わせにより立体物を表したCADモデルを指す。
- (7) ポリゴン化：点群データからポリゴンモデルに変換する作業を指す。
- (8) 設計CADデータ：建物や内装などのこれから作成する建築物の形状や設計寸法やデータを示す3次元モデルを指す。

2.1.4. 3次元レーザースキャナーによる計測の概要

3次元レーザースキャナーを用いた計測では計測対象を隈なく計測するために、複数回の計測を行うことが必要である。また、生産設計に基づいて作成した部材を躯体に取り付けるには、プレカット部材と躯体の設計誤差を2~3mmに抑える必要がある。3次元レーザースキャナーにより取得される点群データ1つ1つは数mmの誤差を持つ。だが、点群データの誤差は正規分布しているため、躯体面での計測点を十分な密度に保つことにより最小化できる。また、後述するように3次元レーザースキャナーは地墨や水平面の記録が行えないため、地墨や水平面を表すターゲットを用いる必要がある。

複数箇所から計測した場合、点群データを同一の座標系に統合する必要がある。また、3次元レーザースキャナーにはチルトセンサーが付いていないため、陸墨の位置を写真2.1に示す平板ターゲットにより記録し、このターゲット位置に基づいて点群データの水平補正を実施する。

これらの処理を実施したのち、内装部材の設計において使用する躯体部分の点群データをポリゴンモデルへ変換する。

躯体の3次元形状を反映したポリゴンモデルを設計CADに読み込み、部材の詳細設計を実施する。従来の設計においては、部材は現場合合せとするため個々の部材の寸法や形状を正確に設計図の中に示す必要は無かった。しかし、プレカット部材を使用するには、これら一つ一つの部材を正確な寸法・形状で図面として事前に求めておくことが必要になる。このような詳細設計を実施するには下記の2つの条件を満たすことが必要である。

- (1) ポリゴンモデルに施工箇所の通り芯が記録されている
- (2) 設計CADとポリゴンモデルの座標系が一致している

2.1.5. 鉄筋コンクリート建築物の点群データの分析の概要

点群データの分析は「点群の分析の前準備」と「点群の形状の分析・モデル化」の2つの段階に分類できる。点群の分析の前準備とは取得した点群データからターゲットを抽出し、複数の点群データを同一の座標系に統合するというような、点群データから必要な情報を取り出す前に行うデータ処理を指す。他方、「点群の形状の分析」は文字通り、点群データを形状ごとに分類し、点群データから抽出したい形状に関して分析を行う、特定の形状をした点群を抽出する段階である。これら各

段階における分析手順は、それぞれ以下の手順となる。

A. 点群の分析の前準備

- (1) 取得した点群データを PTS ファイルで出力する
- (2) 点群データの座標統合を行う
- (3) ノイズなどの不要な点群を削除する
- (4) 点群データの水平の向きを正しい方向に補正する
- (5) 通り芯を取得する

B. 点群の形状の分析・モデル化

- (1) プリミティブな形状について分析を行う
- (2) 線形状の点群の認識し、抽出する
- (3) 点群データをポリゴンモデルに変換する

点群の形状の分析にはまず、プリミティブな形状の認識がある。ここでの「プリミティブな形状」とは、球、平面、円筒などの幾何学的形状を指す。一方、建築工事においてはワイヤーなどのように躯体面を示すポリゴンモデルに置き換えるべきではないが円筒などの単純な形状をしていないために、従来の形状認識手法では抽出することのできない、線形状をした点群データが存在する。本研究ではこの線形状の認識手法についても研究を行う。

2.2. 鉄筋コンクリート建築物における3次元レーザースキャナーによる計測の手法

2.2.1. 点群データと設計CADデータ、施工箇所の座標系の一致手法

A. 地墨を基準にした点群データと設計CADデータ、施工箇所の座標系の一致手法

3次元レーザースキャナーによる計測で取得できる点群データはXYZ座標とレーザの反射輝度からなる。また、カメラが内蔵されているタイプの3次元レーザースキャナーでは、レーザ照射点の色情報をRGBで取得することも可能である。ただ、輝度は計測対象までの距離と、照射点へのレーザの入射角によって変化し、RGBは3次元レーザースキャナーの設置箇所の明るさや計測対象の状態によって変化するため、安定的なデータを取得できない。

そのため、プレカット部材の取付け位置と関係する、記録できない情報には下記のものがある。

- (1) 陸墨（水平面）
- (2) 地墨（通り芯）

水平面の記録については、レーザ水準器などを用いて、陸墨を出し、平板ターゲットの中心をこの陸墨上に4か所以上設置することで記録を行う。

B. 地墨取得用球ターゲットの開発

地墨を取得するには床面に直接、写真2.1に示すような平板ターゲットを設置して地墨の位置を記録する方法もあるが、3次元レーザースキャナーからターゲットへ照射されるレーザ光の入射角が大きくなりすぎて正確にターゲットの中心位置が取得できないことが多い。

そこで、この地墨の位置を点群データに記録するために球状のターゲットを開発した。

地墨取得用ターゲットの写真を写真2.2に、設計の概念を示した図と詳細な設計図を図2.1に示す。このターゲットは白い球体である「球ターゲット」と球ターゲットを載せる「台座」から成る。台座は磁性をもつステンレス鋼であるSUS430で構成され、中心に真円の穴の開いたドーナツ形状をしている。球ターゲットの底面には磁石が埋め込まれているため、台座の上に球ターゲットを安定的に据えることが出来る。台座の中心には穴が開いており、その底面にはプラスチック板が装着され、円形の穴の中心がけがされている。このプラスチック板の中心と台座の球ターゲット設置部分の真円の中心、球の中心が一直線上に来るような構造になっており、台座の上面の水平度を担保した状態で設置すると、球の中心が、地墨の鉛直方向に設置可能になっている。なお、台座の水平は脱着可能な円形気泡管により保たれている。

この球ターゲットの中心座標を最小二乗法によって求め、水平補正後に点群データから求めた床面に鉛直方向に投影することで、通り芯を求める。球は直径が100mmであり、台座の高さも20~30mmほどであるため、球の中心は床面から100mm以内の高さに存在する。そのため、台座の水平のズレが0.5°以下であれば表2.1に示す如く、地墨の位置を1mm以内の誤差で取得可能である。



写真 2.1 平板ターゲット



写真 2.2 通り芯に設置した球ターゲット

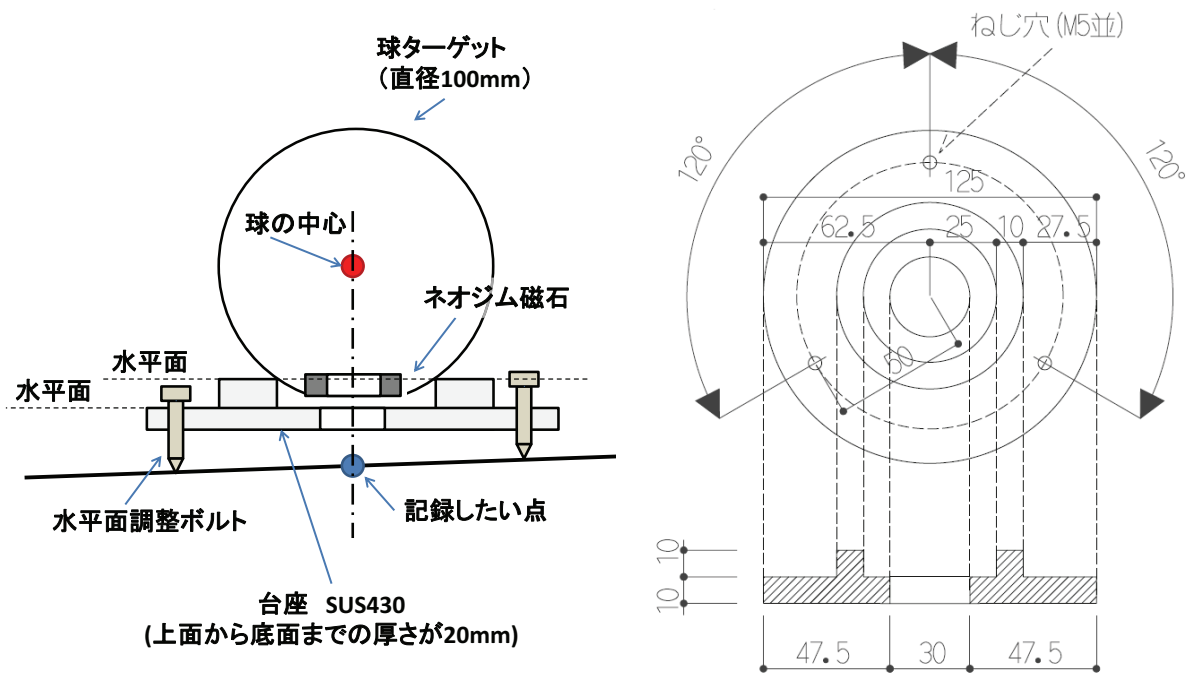


図 2.1 本研究において開発した地墨取得用の球ターゲットの設計寸法

表 2.1 球ターゲットの地墨への設置精度 (mm)

角度(度)		0.020	0.100	0.200	0.500	0.800	1.000
中心の床面 からの高さ (mm)	70mm	0.024	0.122	0.244	0.611	0.977	1.222
	80mm	0.028	0.140	0.279	0.698	1.117	1.396
	100mm	0.035	0.175	0.349	0.873	1.396	1.746

2.2.2. 異なる座標系にあるターゲットの一致手法

3次元レーザースキャナーはスキャナー本体からレーザー光を直接、照射できる範囲しか計測できないため、計測対象を限なく計測するには複数回、計測する必要がある。その際、座標統合用に使用するターゲットは複数存在し、計測位置によって使用する座標統合用ターゲットは異なる。また、地墨や陸墨の記録においてもターゲットを使用するため、各計測位置のデータには複数のターゲットが存在している。座標統合の際には異なる計測位置から取得したターゲットのうち、同一のターゲットを計測したペアを事前に対応させておく必要がある。この対応を手作業で行うのは手間がかかるとともに対応付けのミスを誘発するため、計測位置ごとのターゲットを自動的に対応させる手法を考案した。

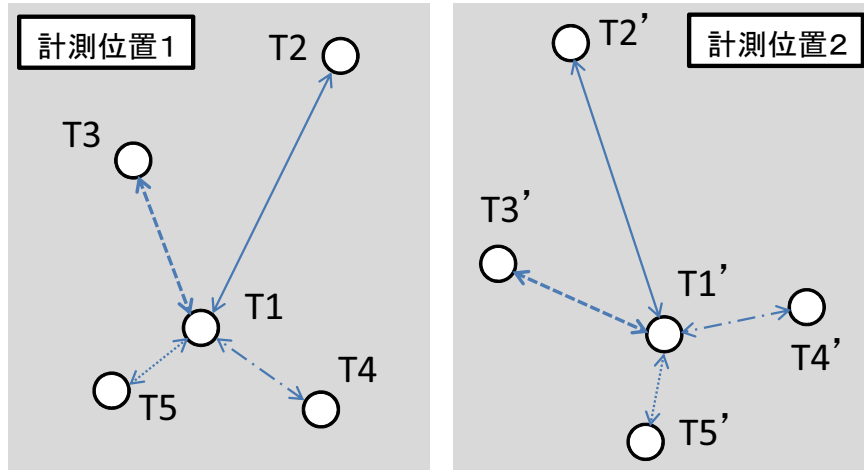


図 2.2 異なる座標系にある同一ターゲットの相互距離の同一性

座標統合用ターゲットの自動対応は同一のターゲットを複数個計測した場合、異なる座標系であってもターゲットの配置位置は図形的に合同であるため、図 2.2 に示す如く対応するターゲット間の距離はほぼ等しくなる原理を利用する。座標統合を行うには4つ以上のターゲットを同定することが必要であるため、ターゲットの相互距離が3つ以上で一致したものを選択すればよい。また、相互距離であるため、正しくない組み合わせであっても相互距離が一致するものが1つ以上存在する。そのため、相互距離が最も多く一致するものをターゲットのペアとして対応させる。

表 2.2 に示す如く計測位置 1 から取得した m 個のターゲット群を $T1$ 、計測位置 2 から取得した n 個のターゲット群を $T2$ とする。 $T1$ は表 2.3 に示す m 個の XYZ 座標データをもつターゲットで構成され、 $T2$ は表 2.4 に示す n 個のターゲットから成る。これらのターゲットの XYZ 座標は $T1, T2$ では異なる座標系に存在するため、同一のターゲットが $T1, T2$ に複数個含まれていても、座標の数値は異なっている。

今、 $T1, T2$ から同一のターゲットの組み合わせを取り出せると仮定し、同一のターゲットの組み合わせである $T1(j1), T1(i1)$ と $T2(j2), T1(i2)$ を取り出した場合、 $T1(j1), T1(i1)$ の距離を示す $d(T1(j1), T1(i1))$ と $T2(j2), T1(i2)$ の距離を示す $d(T2(j2), T2(i2))$ は以下の式を満たす。

$$d(T1(j1), T1(i1)) = d(T2(j2), T2(i2)) \quad \dots(1)$$

しかしながら、3次元レーザースキャナーによるターゲットの位置には誤差を含むため、計測誤差を α とすると(1)は以下ようになる。

$$d(T1(j1), T1(i1)) = d(T2(j2), T2(i2)) + \alpha \quad \dots(1')$$

いま $T1, T2$ に p 個の同一のターゲットが含まれていると仮定し、 $T1(i)$ 、 $T2(k)$ が同一のターゲットである場合について考える。 $T1(i)$ と $T1(j)$ の相互距離と $\text{dis}T1(j) = d(T1(j), T1(i))$ とし(ただし、 $j=1, 2, \dots, m$ かつ $j \neq i$)、 $T2(k)$ と $T2(l)$ の相互距離と $\text{dis}T2(l) = d(T2(k), T2(l))$ とする(ただし、 $j=1, 2, \dots, m$ かつ $j \neq i$)。この時、 $\text{dis}T1(j)$ と $\text{dis}T2(l)$ の数値を総当りで比較した場合、(1)'式より $|\text{dis}T1(j) - \text{dis}T2(l)| < \alpha$ となるような j と l の組み合わせが $p-1$ 個存在することになる。

もし、 $T1(i)$ 、 $T2(k)$ が同一のターゲットでない場合、 $|\text{dis}T1(j) - \text{dis}T2(l)| < \alpha$ となるような j と l の組み合わせは $p-1$ 個より小さい値となるはずである。

そのため、 $|\text{dis}T1(j) - \text{dis}T2(l)| < \alpha$ となるような j と l の組み合わせが最も多い $T1(i)$ と $T2(l)$ を見つけ出せれば、この2つのターゲットは同一のターゲットであると言える。

なお、 $T1, T2$ に含まれる同一のターゲット数が3つ以下であると座標の統合は行えない。特に

3つの場合は3つターゲットが2等辺三角形に近い形状をしていると、座標統合結果が上下逆さまになる可能性がある。そのため、T1,T2に含まれる同一のターゲット数が4つ以上含まれていないと、座標系の統合は行えないため、ターゲット間の相互距離が3本以上等しくならない限り、同一のターゲットであると断言できない。

距離異なる座標系にあっても位置関係は、2-3mmの誤差でターゲットの対応を自動的に行うには下記の手順を経る。またこの手順を図2.3に示す

- (1) $i=1$ とする
- (2) T1(i)に対応するターゲットをT2から探す。まずT1(i)をMainPointとし、T1(i)とT1(i)以外のT1のターゲットとの相互距離を求め、変数T1dis(j) ($j=1\sim m$ 、ただし $j\neq i$)に記録する
- (3) $j=1$ とする
- (4) T2(j)をSubPointとし、T2(j)とT2(j)以外のT2のターゲットとの相互距離を求め、変数T2dis(k) ($k=1\sim n$ 、ただし $k\neq j$)に記録する
- (5) T1に含まれるMainPointの相互距離T1disとT2に含まれるSubPointの相互距離T2disを総当りで比較する。k番目のT1disとl番目のT2disの値の差である $|T1dis(k) - T2dis(l)|$ が基準値 α より小さくなるペアの数をカウントし、これを K_α とする。SubPointであるT2(j)のペア数をPair(j)に記録し、 $j \leftarrow j+1$ として $j\leq n$ ならば(4)に戻る。 $j=n+1$ となったら(6)に進む。
- (6) Pair(j) (ただし $j=1\sim n$)の中から最も大きな数となるものを探し、そのときのjをjMaxとする。
- (7) Pair(jMax)が3以上であれば(つまり相互距離が一致するペアが3つ以上存在するのであれば)T1(i)とT2(jMax)は同一のターゲットであると判定し、T2'(i)にT2(jMax)を記録する。 $i \leftarrow i+1$ として $i\leq m$ ならば(2)に戻る。 $i=m+1$ となったら(8)に進む。
- (8) (1)~(7)の繰り返しにより見つかった対応するターゲットが m' 個であるとき、このT1とT2'を用いて座標統合^{附1)}を実施する。座標統合によるT1とT2'の対応するターゲット同士の距離の平均が許容値以下であれば座標変換を実施する。

表 2.2 計測位置ごとのデータ

計測位置の名称	計測位置 1	計測位置 2
ターゲット群	ターゲット群 T1	ターゲット群 T2
ターゲット個数	m 個	n 個

表 2.3 ターゲット群 T1

	X	Y	Z
T1(1)	X_{1-1}	Y_{1-1}	Z_{1-1}
T1(2)	X_{1-2}	Y_{1-2}	Z_{1-2}
T1(3)	X_{1-3}	Y_{1-3}	Z_{1-3}
T1(4)	X_{1-4}	Y_{1-4}	Z_{1-4}
⋮	⋮	⋮	⋮
T1(m)	X_{1-m}	Y_{1-m}	Z_{1-m}

表 2.4 ターゲット群 T2

	X	Y	Z
T2(1)	X_{2-1}	Y_{2-1}	Z_{2-1}
T2(2)	X_{2-2}	Y_{2-2}	Z_{2-2}
T2(3)	X_{2-3}	Y_{2-3}	Z_{2-3}
T2(4)	X_{2-4}	Y_{2-4}	Z_{2-4}
⋮	⋮	⋮	⋮
T2(n)	X_{2-n}	Y_{2-n}	Z_{2-n}

表 2.5 ターゲット群 T1 における T1(j) と相互距離である disT1 の関係

	T1(1)	T1(2)	T1(3)	⋯	T1(j)	⋯	T1(m)
T1(1)	----	$d(T1(1),T1(2))$	$d(T1(1),T1(3))$	⋯	$d(T1(1),T1(j))$	⋯	$d(T1(1),T1(m))$
T1(2)	$d(T1(2),T1(1))$	----	$d(T1(2),T1(3))$	⋯	$d(T1(2),T1(j))$	⋯	$d(T1(2),T1(m))$
T1(3)	$d(T1(3),T1(1))$	$d(T1(3),T1(2))$	----	⋯	$d(T1(3),T1(j))$	⋯	$d(T1(3),T1(m))$
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
T1(j)	disT1(1)	disT1(2)	disT1(3)	⋯	----	⋯	disT1(m)
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
T1(m)	$d(T1(m),T1(1))$	$d(T1(m),T1(2))$	$d(T1(m),T1(3))$	⋯	$d(T1(m),T1(j))$	⋯	----

表 2.6 ターゲット群 T2 における T2(j) と相互距離である disT2 の関係

	T2(1)	T2(2)	T2(3)	⋯	T2(l)	⋯	T2(n)
T2(1)	----	$d(T2(1),T2(2))$	$d(T2(1),T2(3))$	⋯	$d(T2(1),T2(l))$	⋯	$d(T2(1),T2(n))$
T2(2)	$d(T2(2),T2(1))$	----	$d(T2(2),T2(3))$	⋯	$d(T2(2),T2(l))$	⋯	$d(T2(2),T2(n))$
T2(3)	$d(T2(3),T2(1))$	$d(T2(3),T2(2))$	----	⋯	$d(T2(3),T2(l))$	⋯	$d(T2(3),T2(n))$
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
T2(l)	disT2(1)	disT2(2)	disT2(3)	⋯	----	⋯	disT2(n)
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
T2(n)	$d(T2(n),T2(1))$	$d(T2(n),T2(2))$	$d(T2(n),T2(3))$	⋯	$d(T2(n),T2(l))$	⋯	----

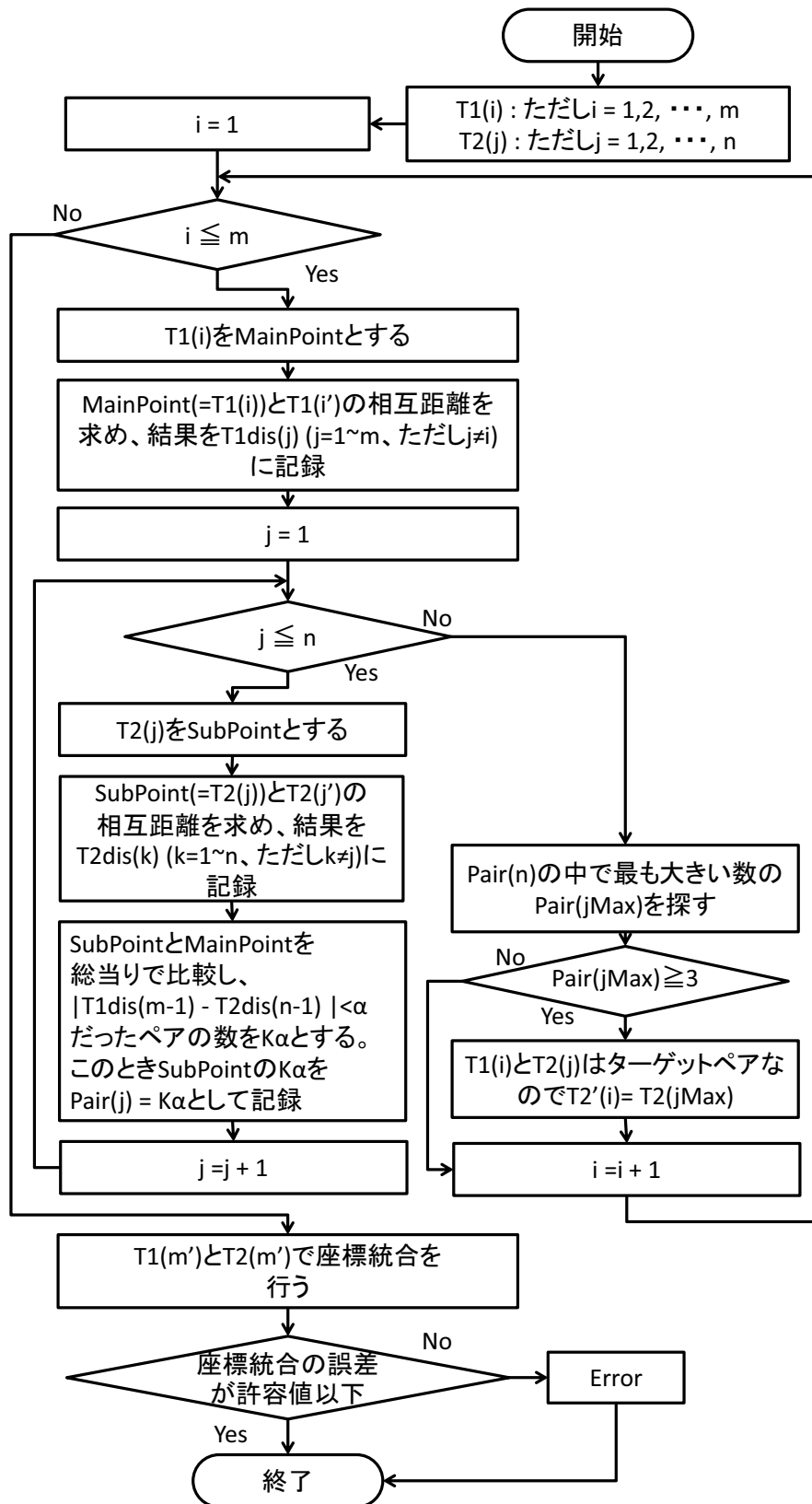


図 2.3 座標統合用ターゲットの対応の自動化手法の処理フロー図

ただし、通り芯の交点に球ターゲットを設置して、この球ターゲットを座標統合用ターゲットとする場合、図 2.4 に示す如く、ターゲット間の距離に差の少ない組み合わせが多い配置となる。そのため、図 2.4 のように判別用ターゲットを設置する。判別用に規則性をずらしたターゲットが 1 つ以上存在することによって、相互距離のペアが正しく選別できるようにする。

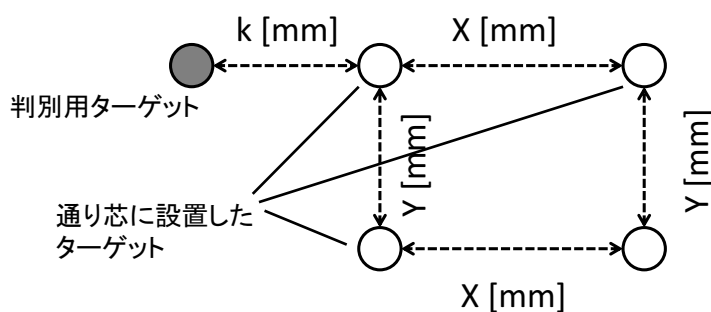


図 2.4 判別用ターゲットの配置

2.3. 鉄筋コンクリート建築物の点群データからのノイズと線形状の点群の除去手法

2.3.1. 点群データからのノイズの除去手法

3次元レーザースキャナーはレーザの照射方向である鉛直角 θ を変化させて縦方向に測定し、1列の測定が終了したら水平角 ϕ を変化させ次列を同様に測定する (図 2.5)。

ただ、3次元レーザースキャナーが計測に使用するレーザ光線は図 2.6 に示す如く、厚みを持っている。図 2.6 は HDS3000 の計測時の様子を 1 秒間の露光で写真撮影したものである。図 2.6 で写真撮影したレーザ光線の太さは 4mm であった。このレーザが計測対象をかすめるように照射されると、図 2.7 に示す如くレーザの照射範囲が 2 か所にまたがるスポット割れと呼ばれる現象が生じるため、2 か所のレーザ照射点の間に点群が生じる。これはノイズであり、何も物体が存在しない空間に発生する点群である。

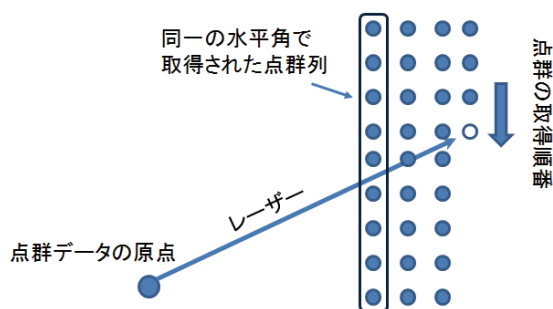


図 2.5 3次元レーザースキャナーの原理

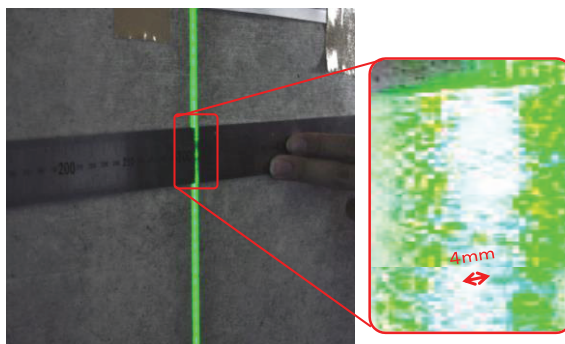


図 2.6 計測時におけるレーザ光線の様子

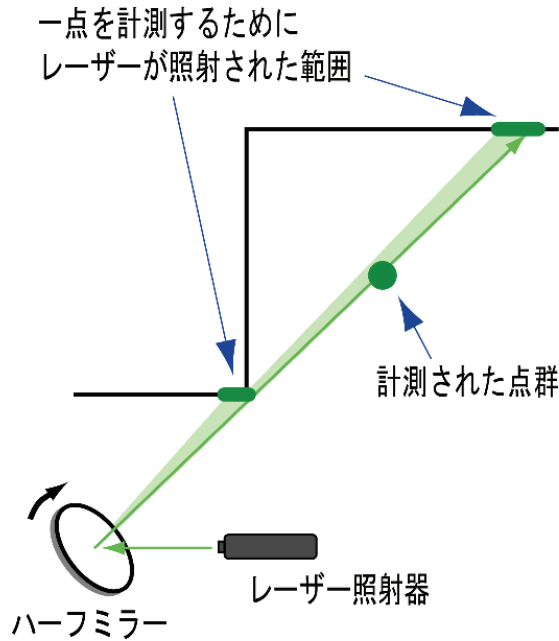


図 2.7 レーザー光線のスポット割れによるノイズの発生

A. 点群間の相互距離の比較によるノイズ除去手法

3次元レーザースキャナーによる計測では測定間隔を計測時に指定するが、測定対象の表面へのレーザーの入射角と距離によって測定間隔が変化するため、計測時に3次元レーザースキャナーと測定対象までの距離、そしてレーザーの入射角を考慮し、測定間隔が大きく変化しないように測定を実施する。設定した測定間隔 D より実際に物体を計測した点群の最大間隔は大きくなるが、間隔 D が α 倍以下の範囲で納まるよう計測を実施するので、線形状の物体の点群の間隔は必ず最大間隔 $\alpha \cdot D$ より小さくなる。一方ノイズは前後の点群との間隔が $\alpha \cdot D$ より大きくなる特徴がある。なお、実際の計測では設定した測定間隔の 1.5 倍以下の間隔で計測できるように計測しているため、安全率を加え、 α は 1.5~2.0 としている。このノイズの特徴を基にノイズを除去するアルゴリズムを作成した。

同一の水平角で取得した点群列において、 i 個目に取得された点 i とし、直前に取得した点 $i-1$ との距離 d_i としたとき、式①を満たす時、ノイズと判定する。

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}$$

$$d_i > \alpha D \quad \text{かつ} \quad d_{i+1} > \alpha D \quad \dots \text{①}$$

ただし D : 3次元レーザースキャナーの測定間隔の設定値

α : ノイズ判定係数 (1.5~2.0 程度)

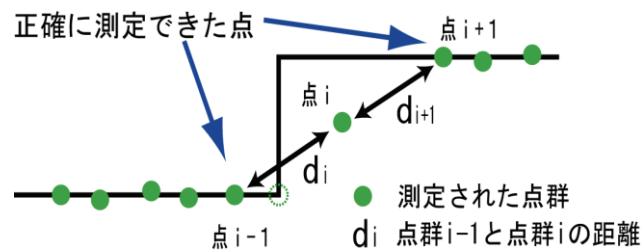


図 2.8 正常な点群とノイズの特徴

ただ、点群データを PTS ファイルなどの形式で 3 次元レーザースキャナー制御ソフトから出力したデータは点群の取得順では出力されないこともあるため、点群データを計測時の取得順番と同様の順番に並び直すプログラムも合わせて作成する必要がある。

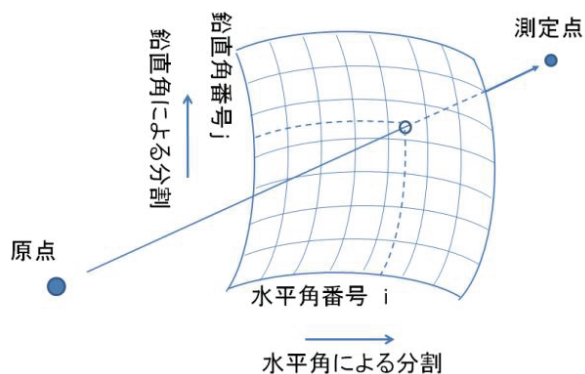


図 2.9 点群データの極座標系へ変換

座標統合前の点群データを、極座標系に変換し、水平角と鉛直角の大きさによって、(水平角による分割数) × (鉛直角による分割数) 個の領域に点群を分類する。各領域において水平角による並び替えを行い、その結果をもとに点群データ全体を水平角について並びかえ、降ベキの順で整列し、同一点群列ごとに分けたのち、同一点群列内で鉛直角による並び替えを行う。なお並び替えはすべてクイックソート法により行っている。この並び替えを行った後、ノイズ除去の計算を実施している。

B. 点群の密度の比較によるノイズの除去手法

正確に取得できた点群は設定した測定間隔に近い間隔で取得できるため、高密度な点群として取得されるのに対して、ノイズは粗い点群として存在する特徴に着目し、点群の体積当たりの密度によるノイズ判定を行う手法を考案した。この時、配線表面の密度も小さいことが多く、一緒に除去されてしまうが、配線の点群は使用しないため除去しても問題ない。また遠方にある物体の点群の密度も小さいが、点群密度が小さいと、ポリゴンモデルに変換する際に点 1 つ 1 つの誤差を丸めることが出来ず、不正確なポリゴンモデルが作成されるため、これらの点も除去して問題ない。

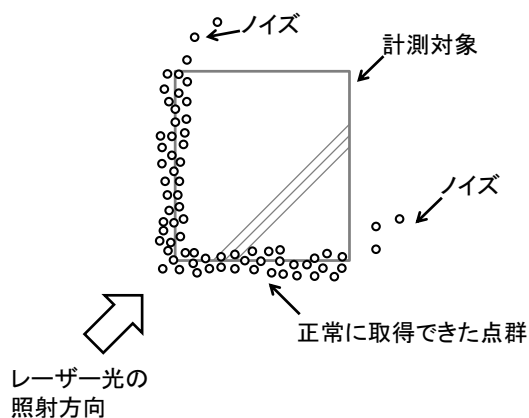


図 2.10 点群の密度の大小によるノイズの抽出

C. 2つのノイズ除去手法による除去精度の向上

点群データからのノイズ除去では「相互距離の比較によるノイズ除去」と「密度の比較によるノイズの除去」を併用することで、ノイズの除去精度の向上を実現する。相互距離の比較によるノイズ除去では、事前に設定した計測密度と比較して点群の計測間隔が大きいものをノイズとして除去するが、レーザー光線の躯体への入射角が大きい場合も計測間隔が大きくなるため、相互距離の比較のみでノイズ除去を行うと、躯体の点群を誤って除去してしまう可能性がある。また、密度の比較によりノイズを除去する場合、複数のノイズがたまたま近傍に発生した場合、除去できない。そのため、まずは「相互距離の比較によるノイズ除去」により確実にノイズである点群を除去し、ノイズの点群数のみを減らしたうえで、「密度の比較によるノイズの除去」を適用し、残ったノイズの除去を行う。これにより、精度よくノイズ除去が実施可能となる。

2.3.2. 線形状の点群データの抽出手法

A. 線形状の点群の抽出手法

細長い物体を3次元レーザースキャナーで計測した場合、レーザースキャナーの計測誤差により取得される点群がばらついていて、計測間隔に比べて計測対象の物体が細いために綺麗な円筒形状をしていない。故に最小二乗法などを用いた円筒形状の当てによって、線形状の物体の点群を直接的に選別することが難しい。そこで、線形状の物体の点群を含んだ点群データを、線形状の物体の軸方向を法線とする分析平面ごとに切断し、平面内で形状分類を行う手法を新たに考案した。

線形状の物体の点群のみを抽出する手順は以下の通りである。

- (1) 点群を平面で切断し、切断面ごとに形状の判別
- (2) 切断面に含まれる点群を塊ごとに分離しグループ化
- (3) グループ化された点群の形状を判断し、点群の塊ごとに形状の判別を行い、線形状の物体の可能性の高い点群を抽出

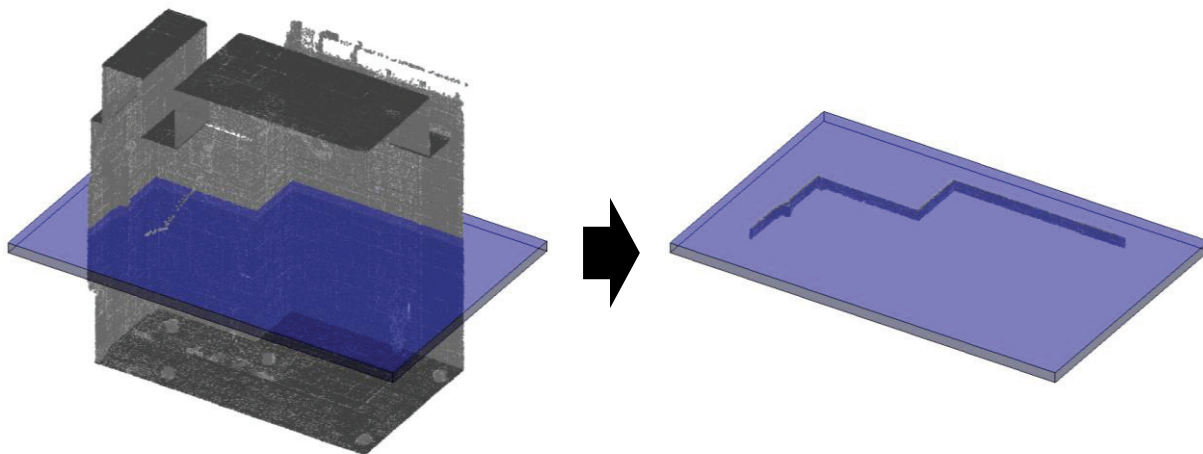


図 2.11 点群を平面の断面ごとに分析するイメージ図

線形状の物体の点群は図 2.11 のように水平面で切断すると線形状の点群の断面がばらばらに出現する。この特徴に着目し、切断面に対して鉛直方向に延びる点群を抽出するために、垂直方向に 10mm の厚さで切り出した点群を水平面に投影し、平面内で線形状の物体の点群を分離する分析を行う。

B. 切断平面内の点群のピクセル化と形状判定

線形状の点群は、球形状や平面形状をしていないため、球や平面を除去した後でも残ってしまう。また、線形状の点で密度があまり低い場合にはノイズとしてすべて除去できるわけではない。そこで図 2.12 に示す如く、その他の点群に分類されたものについては、図 2.11 で示した切断し、2次元平面として分析にかける。

切断平面内での分析は点群のまま行なわず、点群データを正方形の枠に当てはめ、図 2.13 に示すようにピクセルデータに変換して分析を行っている。これにより複雑に入り組んだ点群を、ピクセルの隣接関係をみることによって、連続している点群ごとにスムーズに分類することが可能となる。

切断平面内の点群データをピクセル化した後、点群の塊ごとに図 2.14 に示した 4 つの形状に分類する。切断平面に対して鉛直方向に延びる線形状の点群は水平断面内では”a. 円形の点群”か”b. 点群密度の濃い塊”として現れている。そのため図 2.15 にしめす如く、a, b の 2 種類の点群を抽出することで線形状である可能性の高い点を選別する。

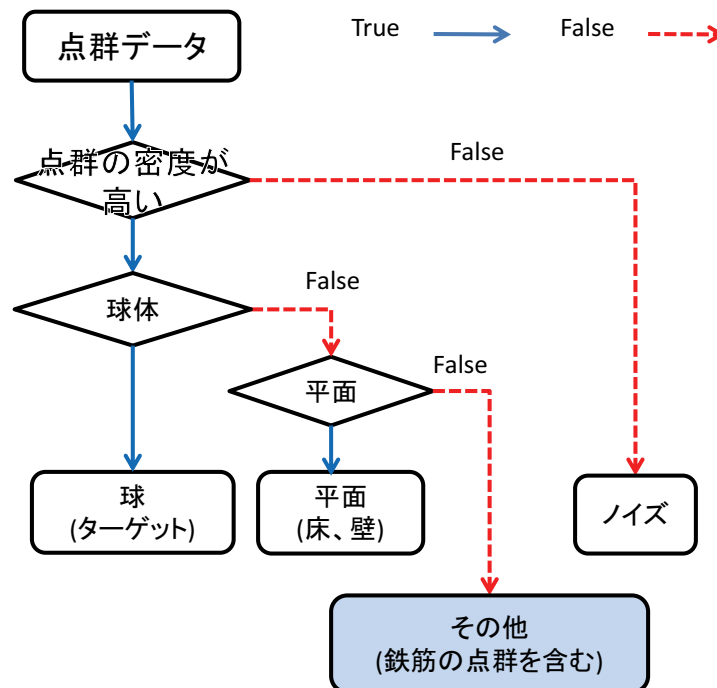


図 2.12 3次元系における点群の形状の分類

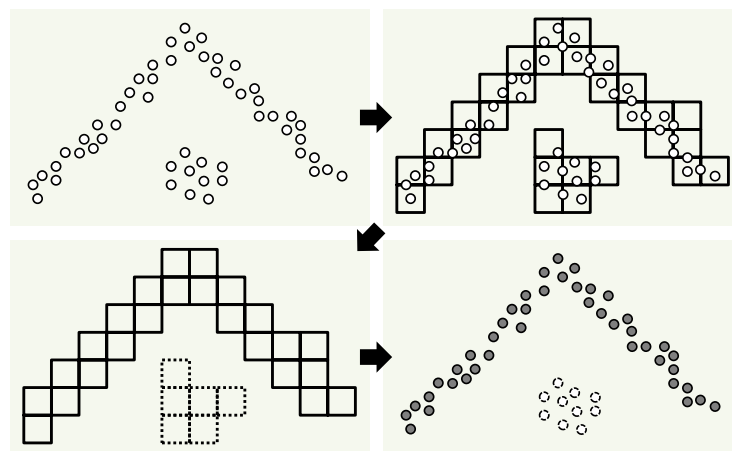


図 2.13 分析平面における点群のグループ化

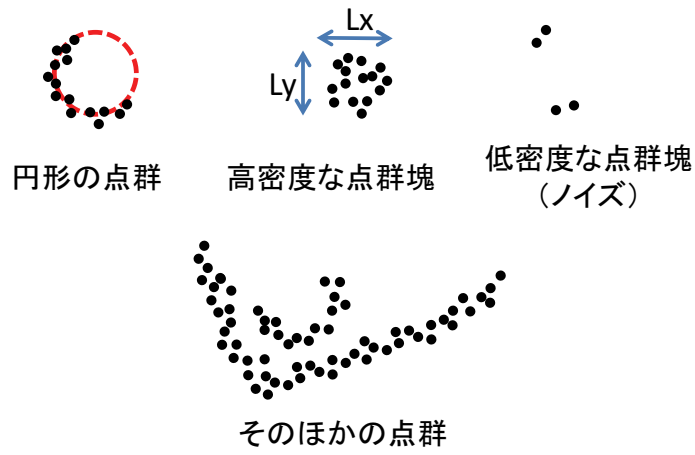


図 2.14 2次元系における点群の形状の分類

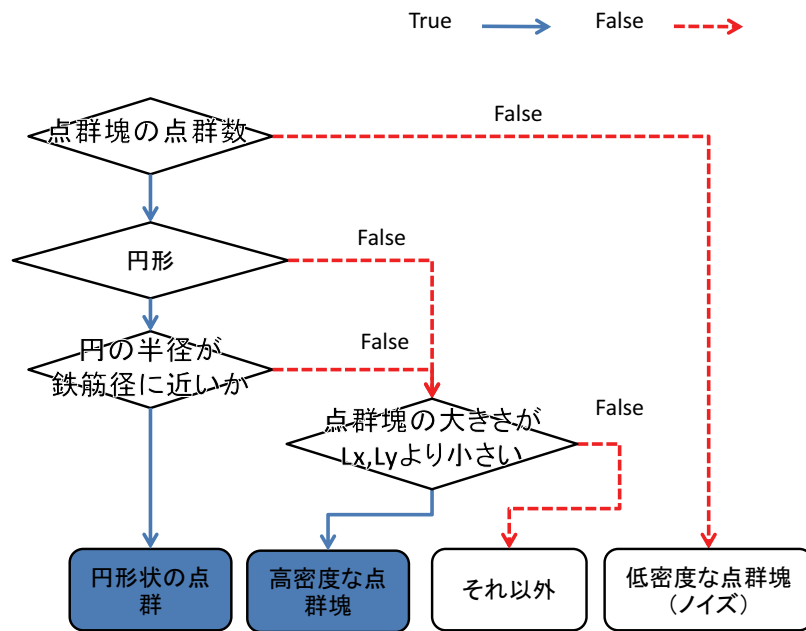


図 2.15 2次元系における点群の形状の分類

C. 点群塊ごとの連続性に基づく線形状の点群の抽出

前項の手法により水平断面の法線方向に延びる線形状の物体の点群を抽出した後、線形状の物体の点群塊1つ1つの中心位置や径を取得する。

線形状の点群は円筒形に近い形状をしていることも多く、円筒形の当てはめ式が使えるのだが、径に対して各点の誤差が大きいうえに、コードのように滑らかに変形する曲線状の場合もあり、その一部のみを取り出したとしても円筒の近似に必要な点群数を得られない場合が多い。そこで、切断平面に点群を投影し、図 2.15 の手法で形状判定をおこなったのち、縦方向の線形状の点群の断面である可能性の高い点群は最小二乗法を用いて最も近い円の方程式を当てはめ、線形状の点群の中心位置を算出する。

続いて水平断面ごとに、縦方向の線形状の点群の中心座標と径を求め、異なる水平断面にある線形状の点群の中心の位置と比較して、点群塊の連続性について分析を行う。線形状の物体はある程度の長さを持つ滑らかな曲線として存在している。各水平断面で分離した点群の塊もその点群が線形状の物体のものであれば上下に同様の大きさの点群塊が隣接して存在するはずである。異なる水平面の点群塊で隣り合って存在する点群塊をひとまとめにし、連続した線形状の点群へとまとめていく (図 2.16)。

これによりなめらかな曲線を描く線形状の点群を抽出することができる。線形状の物体の軸の向きが切断平面の法線に対して 20° 程度までであれば抽出可能である。

このようにして切断平面に対して鉛直方向に延びる点を抽出する分析を X, Y, Z 軸方向にたいしてそれぞれ行うことで、様々な方向に延びる線形状の点を抽出する。

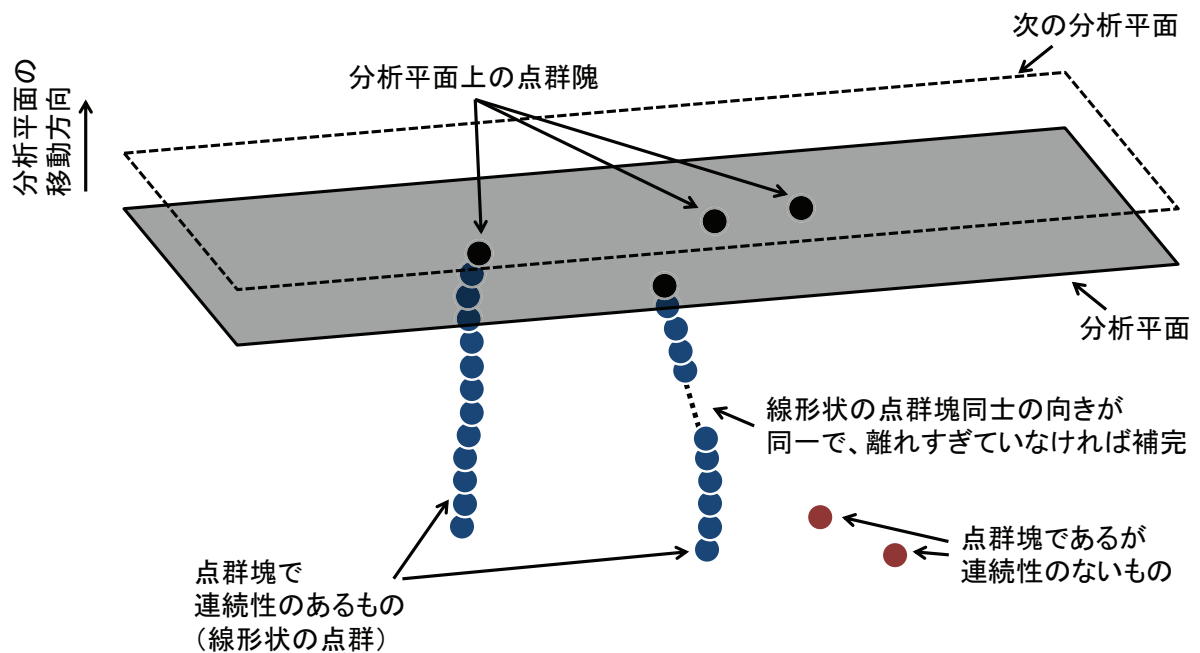


図 2.16 なめらかな曲線状の点群を抽出する方法

2.4. 鉄筋コンクリート建築物からの点群データの取得と形状の把握手法の適用実験

2.4.1. 点群データ, 設計 CAD データ, 施工箇所の座標系の一致による部材干渉の確認

A. 機械室の改修工事における点群データと設計 CAD データの重ね合わせ

事務所ビルとして利用されている鉄筋コンクリート建築物の機械室における設備機器の改修工事を想定し、既存の配管類の位置を点群データに基づいて把握可能であるか確認する実験を行った。

計測対象とした機械室の概要と新設する配管とダクトの設計 CAD モデルを図 2.17 に示す。また、写真 2.3 に計測時の状況を示す。写真 2.4 に示す如く、ダクトや配管などが様々な位置に存在する機械室になっている。

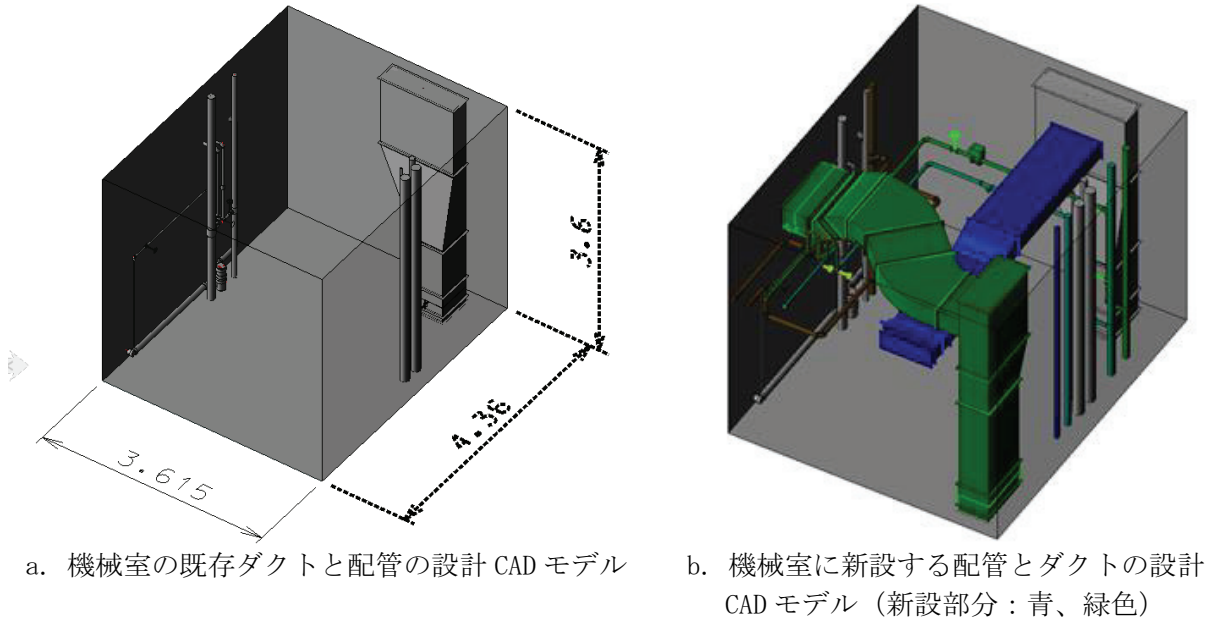


図 2.17 計測対象の部位



写真 2.3 計測対象の機械室



写真 2.4 配管とダクト類の接合部

B. 計測の手順と使用するターゲット

3次元レーザースキャナーのHDS3000を用いて、配管類の形状・位置の測定をおこなった。

通り芯の位置を記録するターゲットには、機械室の大きさが狭く、床面へのレーザー光線の入射角が大きくなり過ぎない事により、床面を正確に計測できる環境であったため、本実験では市販されている平板ターゲットを使用した。

また、本実験では水平ターゲットを設置した。今回使用した3次元レーザースキャナーは、精度の高い水準器を有していないため、計測においては別途水準器（レーザー水準器）を用いて、計測範囲の周囲（360度）に水平位置に平板ターゲットを設置した。

以上の点を踏まえ、計測の手順を以下に示す。

- (1) レーザーレベルを用いて、水平面を求めるためのターゲットの設置
- (2) 座標統合用の平板ターゲットの設置
- (3) 躯体に地墨を書き込み、通り芯の位置を記録するターゲットを設置
- (4) 3次元レーザースキャナーの設置位置の検討を行い、HDS3000による複数箇所から躯体の計測



写真 2.5 地墨の位置を取得するために設置した平板ターゲット

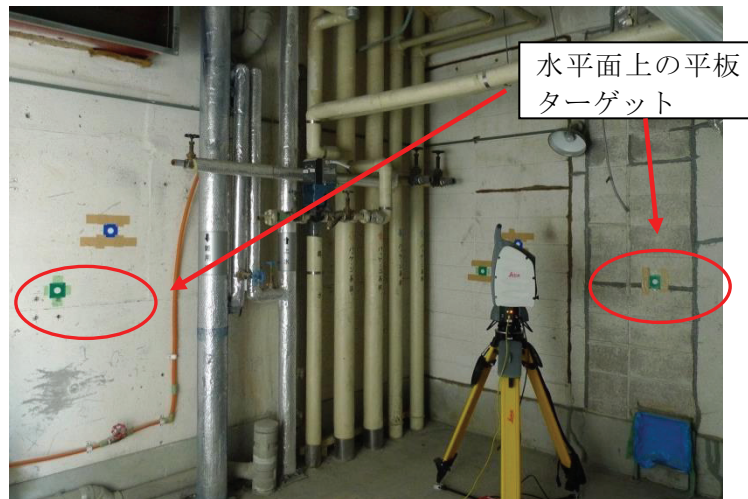


写真 2.6 水平面を記録するために設置した平板ターゲット

C. 計測の実施と点群データの統合

本実験に使用した機械室は既設の配管が多数存在し、1回の計測では影が多くできるため、4か所から計測を実施した(図 2.18)、なお、計測位置 4 は機械室全体を粗い密度で計測したものであり、平面図上の位置は設置位置 1 と同じであるが設置位置 4 の方がより高い位置から計測している。

設置位置が複数箇所になったため、平板ターゲットから取得した座標統合用の基準点を用いて、点群データの座標統合を行った。座標統合後の点群データを図 2.19 に示す。

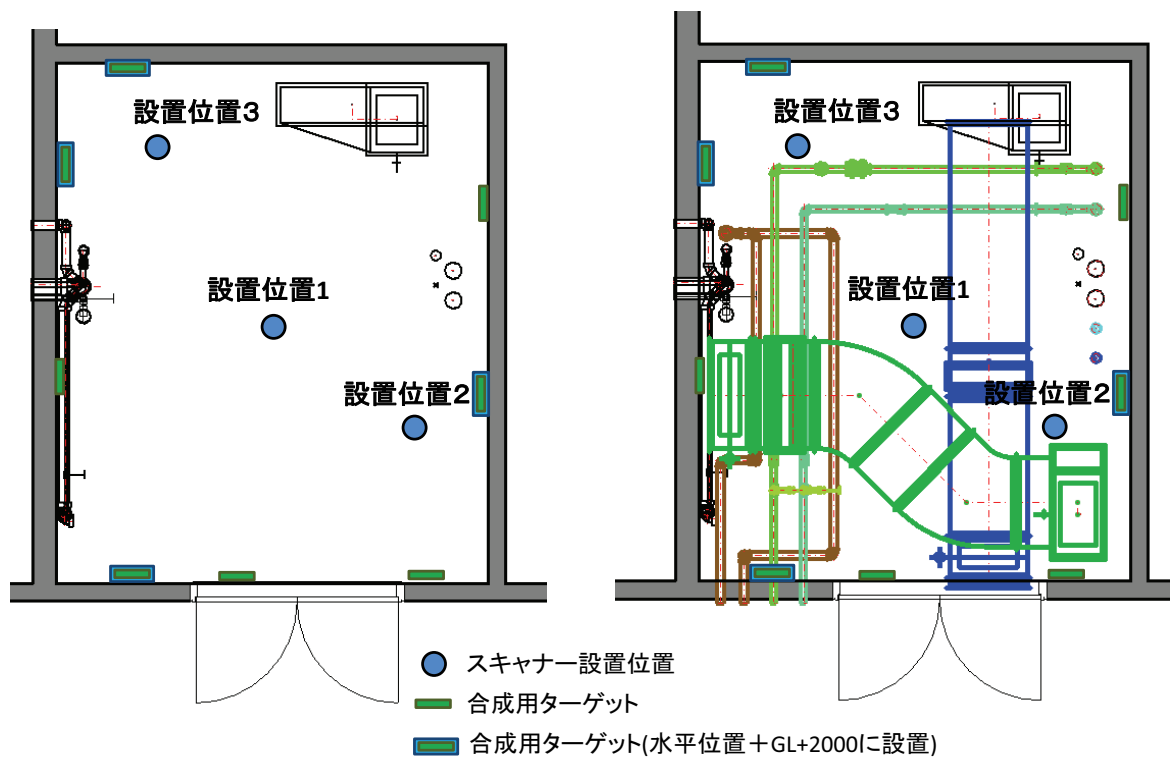


図 2.18 スキャナーとターゲットの設置位置
(設置位置 1 と 4 は平面図上では同じ位置にあるが、異なる高さから計測している)

表 2.7 計測位置ごとの点群数

データ名	点群数
計測位置 1	7512199
計測位置 2	1398717
計測位置 3	1267522
計測位置 4	971231
合計	11149669

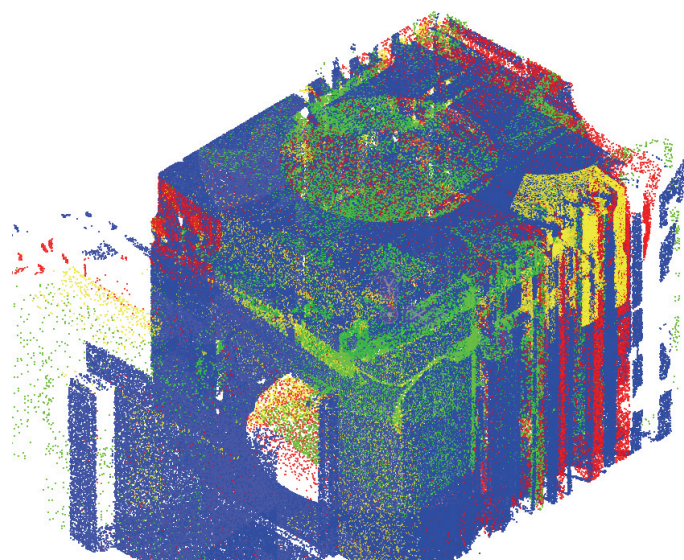


図 2.19 4か所から取得した機械室の点群データ

D. 配管のモデリングと天井・床の点群のポリゴン化

天井面の点群データをポリゴンモデルに変換し、設計 CAD 上に読み込んで、ダクトや配管の吊金物の長さを求めるのに使用する。ポリゴンモデルの作成は既存のソフトウェアである Giomagic を用いた。また、既存配管と新設の配管との接合部の位置や配管同士の干渉を確認するために、配管の点群は円筒モデルのサーフェスモデルに変換した。円筒モデルへの変換には Leica より販売されている Cyclone を使用した。以下に、ポリゴン化と円筒モデルの作成手順を示す。

- a. 天井面と床面の点群のポリゴン化
 - (1) 天井面（床面）の点群を切り出す
 - (2) 点群の密度を 6mm 間隔に調整する
 - (3) Giomagic に読み込み、ポリゴン化する
- b. 筒形をした点群の円筒モデル化
 - (1) 機械室全体の点群データを Cyclone に読み込む
 - (2) 円筒形をした点群データを Cyclone 内で切り出す
 - (3) 同一の円筒の点群を選択し、円筒モデル作成する

モデルの作成結果を図 2. 21-25 に示す。図 2. 20 に示す点群データから床と天井部分を切り出し、ポリゴン化するとともに、円筒形状をした点群を手作業で取り出し、円筒モデルに置き換えたものが図 2. 21、22 である。この床、天井と円筒形のモデルと設計 CAD 上のモデルとを重ね合わせたものが図 2. 23 である。グレーの部分が設計図面から作成した既存ダクトや設備配管であり、緑や青で示されたモデルが新設するダクト類である。図 2. 24, 25 は既存のダクトの CAD モデルと実測した点群との比較である。設計図面に記載されている形状と実際の形状とは大きく異なっていることが確認できた。

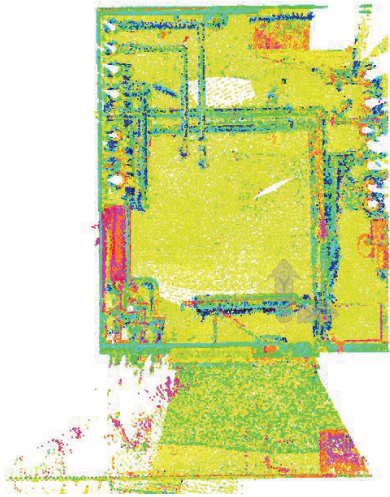


図 2.20 機械室の点群データ (モデル作成前)

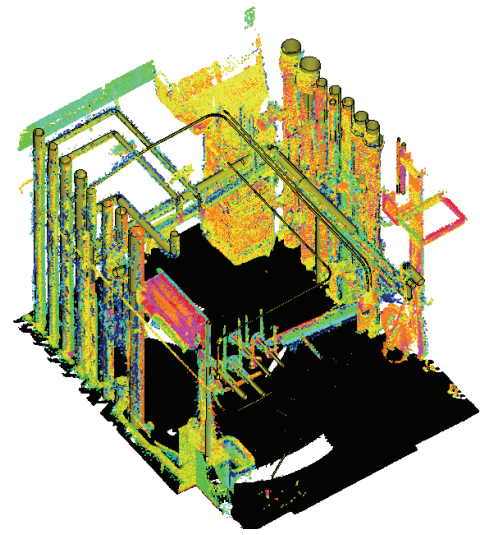


図 2.21 床をポリゴン化し、円筒の点群をサーフェス化したモデル

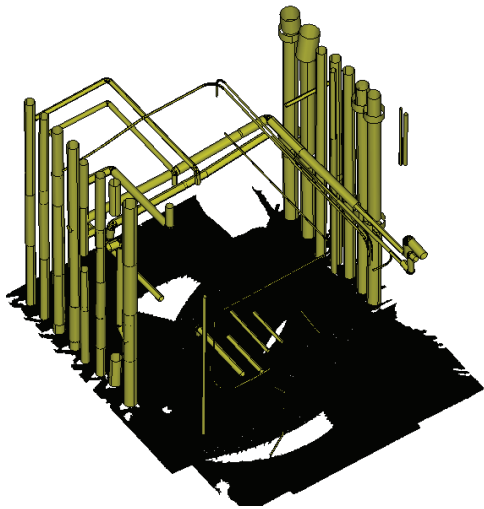


図 2.22 床をポリゴン化し、円筒の点群をサーフェス化したモデル2

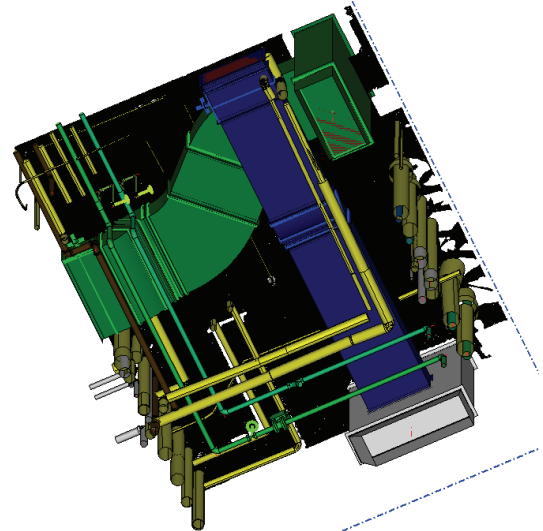


図 2.23 床をポリゴン化し、円筒をサーフェス化したモデルと設計案とを重ね合わせたモデル

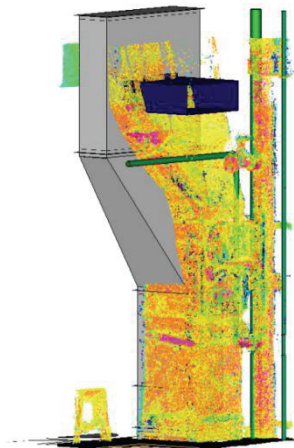


図 2.24 ダクトの設計CADデータと点群データ

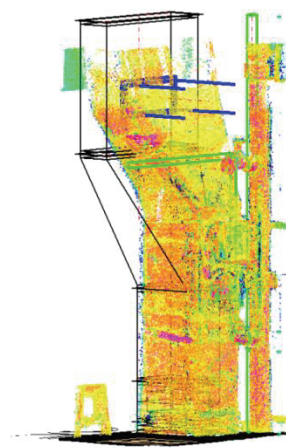


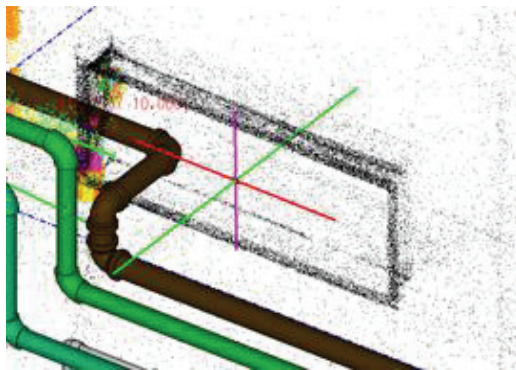
図 2.25 ダクトの設計CADデータと点群データ2

E. 点群データと CAD データの重ね合わせによるダクト・配管の干渉の確認

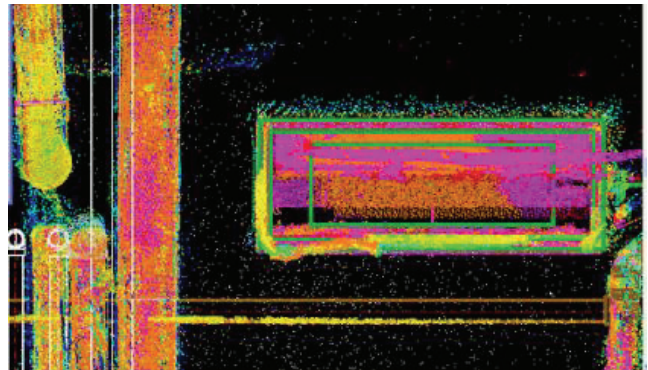
ダクト部分の点群データから、設計図面から作成した CAD モデルを修正した。竣工時の図面から作成した既存設備の CAD モデルと、実際のダクトの位置がずれていたため、既存のダクトと新設するダクトとの接合部の位置を図 2.26 に示す如く修正した。この修正により設計 CAD モデルと点群データの位置が一致した。

また、図 2.25 で示した機械室内の既存縦ダクトについて、点群モデルから保温材内部のダクトの位置を推定した(図 2.27)。その結果、ダクトの寸法が既存図面の情報と異なっていることが分かったため、ダクト寸法を修正して新設ダクトを設計した。

点群と新設ダクトの CAD モデルを重ねて表示したところ、新設ダクトの経路上に既設配管の支持金物が存在することが判明した(図 2.28)。そのため、支持金物をずらすことで干渉を回避することとした。

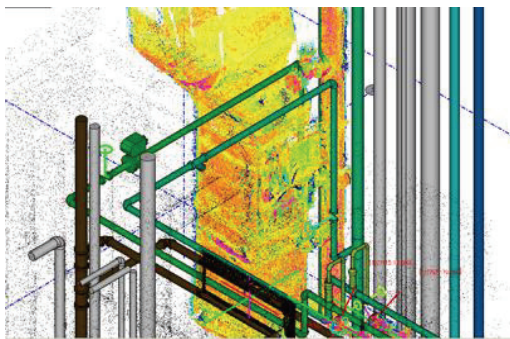


a. 既存のダクトの中心点と方向

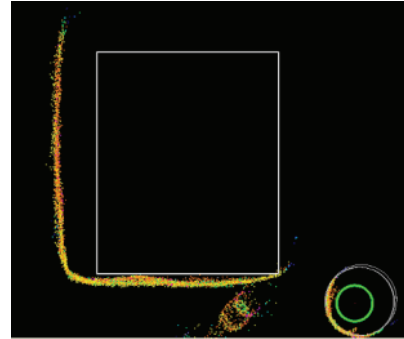


b. 点群に基づくダクト接合部の位置修正の結果

図 2.26 ダクトの接合部の位置の修正



a. 機械室の既存ダクト



b. 点群の断面と既存図面での形状

図 2.27 設計図面での縦方向の既存ダクトと実際のダクト形状の差異

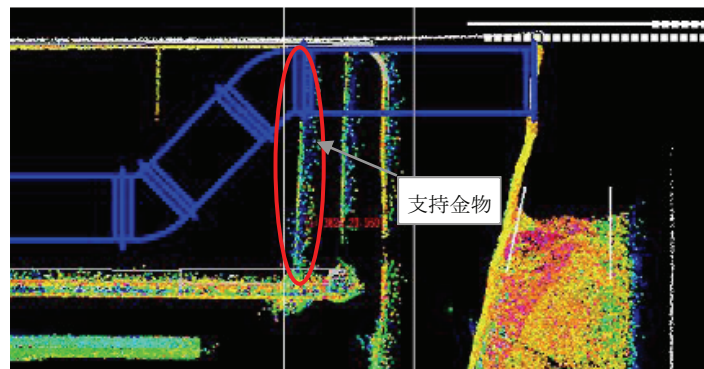


図 2.28 ダクトと支持金物の干渉(断面図)

2.4.2. 点群データへのノイズ除去手法と線形状の点群の抽出手法の適用実験

A. 鉄筋コンクリート躯体とLGSの計測と取得した点群データの概要

前節で述べたノイズ除去の手法の有効性を検証するために鉄筋コンクリート建築物の点群データの取得を行った。第4章で示す内装間仕切壁の設置工事において写真2.7に示すスタッドを設置した後、出来形を計測したところ、図2.29に示す点群データが得られた。この点群データには多くのノイズが発生した。そこで、ノイズ除去を行うシステムを作成し、スタッドの計測時に発生するノイズが除去できるか、確認した。

B. ノイズ除去の適用

躯体の点群データを計測した場合、梁の角などにノイズが発生するので、このノイズの除去を行った。また、スタッドの計測時に大量のノイズが発生したので、スタッドの点群データに対してもノイズ除去を実施した。ノイズ除去手法を適用した結果を図2.30-33に示す。

ノイズ以外に室内に残っていたコード類の点群も除去された。躯体の計測は2mm間隔で行っているが、コード類は直径で1cm程度なので、コードを計測した点群は非常に疎な点群となることによる。そのため、図2.33に示す如く、コード類の点群が除去されている。



写真 2.7 計測対象のランナーとスタッド



図 2.29 取得したランナーとスタッドの点群



図 2.30 スタッドのノイズの除去の断面図(青い点がノイズとして除去された点)

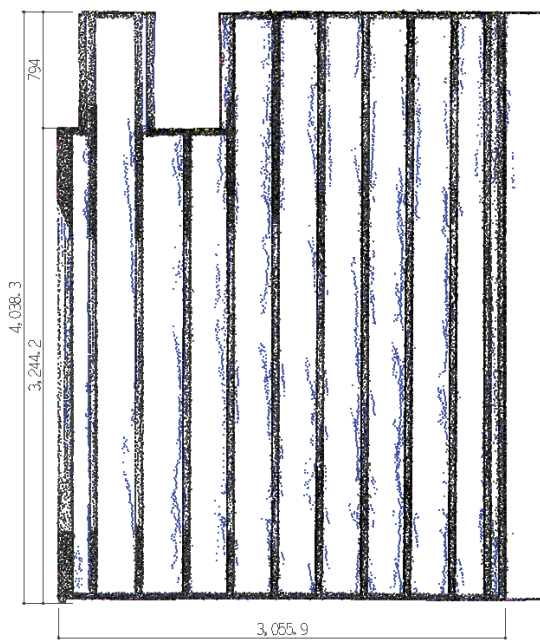


図 2.31 スタッドのノイズの除去
(青い点がノイズとして除去された点)

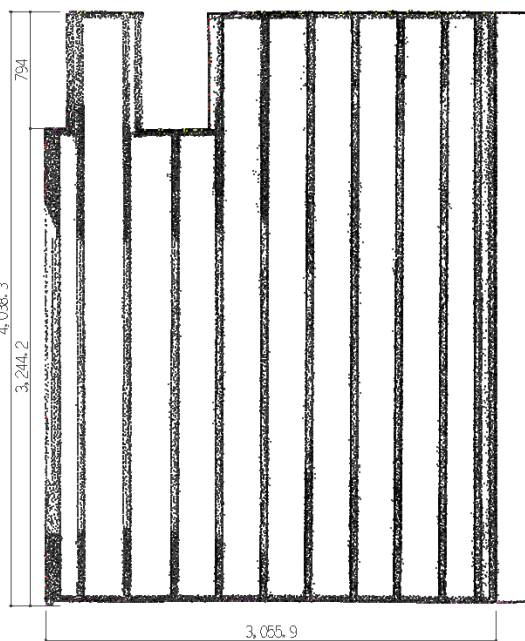


図 2.32 スタッドのノイズを除去した
点群データ

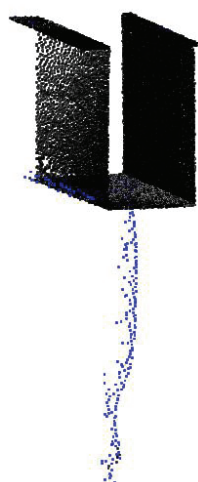


図 2.33 点群のノイズの除去により除去した配線の点群

C. 線形状の判別

躯体の点群データに形状分析を実施した。

点群データを水平断面でスライスして、スライスした点群を2次元系で形状分析にかけた。密度の小さい点群を青、線形状の点群を緑、それ以外の点群を灰色で示している。

計測対象とした鉄筋コンクリート建築物には、躯体以外に写真2.10に示す如く電気配線などが残されていて、取得した点データ上にも線形状をした点群データが存在している。図2.34に示す如く、線形状をした点群データが低密度の点群（青）か線形状をした点群（緑）として抽出されている一方で、鉄筋コンクリート躯体である平面部分の点群が残存していることが確認できた。図2.34左側の青が密度の低い点群、緑が線形状の点群である。これらの点群を除去した点群を図2.34右側に示す。



写真 2.8 計測対象の鉄筋コンクリート躯体



写真 2.9 鉄筋コンクリート躯体の天井部分



写真 2.10 計測時に残っていた配線コード類

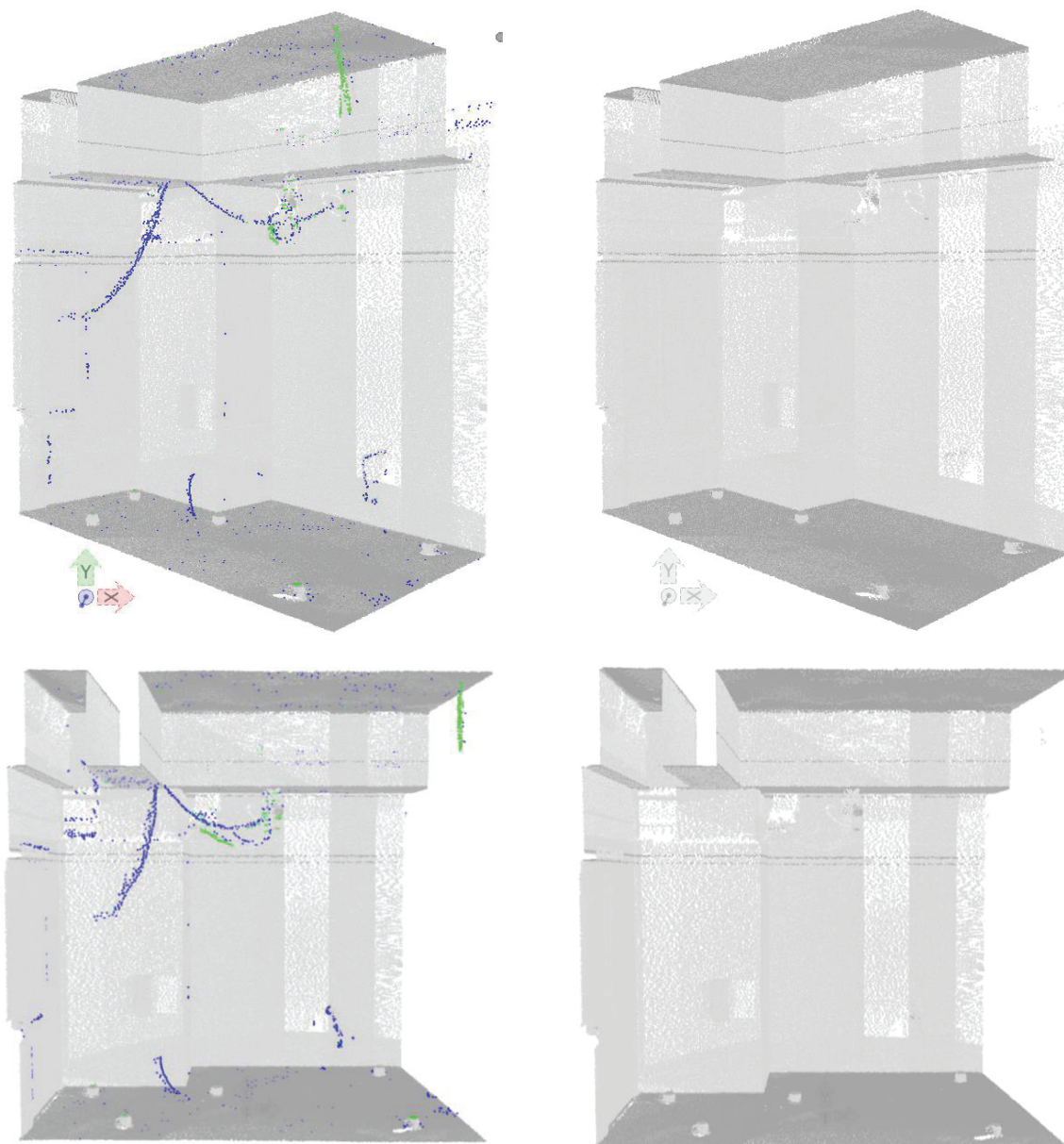


図 2.34 低密度点群と線形状の点群の形状認識結果
 (青：密度の低い点群 緑：線形状の点群 灰色：その他の点群)

2.5. 結言

本章においては点群データに基づいて鉄筋コンクリート建築物の形状を把握する手法について述べた。

第1節においては、内装部材の詳細設計に必要な情報を含む点群データを取得する計測手順と点群データの処理手順に関して述べた。3次元レーザースキャナーにより躯体や取り付けた内装部材の3次元形状を取得し、設計CAD上で利用するには、施工箇所、点群データ、設計CADデータの座標系を一致させる手法と鉄筋コンクリート躯体を計測した点群データからノイズと線形状の点群を抽出する分析手法が新たに必要となることを指摘した。

第2節においては、3次元レーザースキャナーによる計測技術として、施工箇所、点群データ、設計CADデータの座標系を一致させる手法を考案し、その内容を詳細に説明した。これは施工箇所の躯体に描かれている地墨を基準点として3つの座標系を統合する手法であるが、地墨の取得には通常のターゲットでは誤差が生じやすいため、地墨取得用球ターゲットを新たに開発した。これにより、地墨位置を正確に取得することが可能となった。また、複数の点群データを同一座標系に統合する必要があるため、異なる点群データ上のターゲットを自動的に対応させる手法も考案し、その分析手順とデータ処理をフローチャートにして示した。これにより座標統合の手間を省力化するとともに人為的ミスを削減することに成功した。

第3節では、鉄筋コンクリート躯体を計測した点群データを設計CADに読み込むのに適したデータへと変換するためのデータ処理技術として新たに開発したノイズ除去と線形状の点群の抽出の2つの手法について述べた。3次元レーザースキャナーによる計測では、物体が存在しない空中にノイズが発生するため、あらかじめ除去する手法が必要であり、点群の取得順序ごとの相互距離と点群の密度の二種類の手法を併用することにより、ノイズの除去を行う方法を考案した。また、建築部材では配線などの曲線の点群が存在するため、新たに線形状の点群を抽出する手法を考案した。線形状の点は、あてはめを行う式が存在しないため、最小二乗法をそのまま適用して求めることが出来ないが、2次元の平面でスライスすることにより、線形状点群の断面が密度の高い点群塊として抽出し、続いて点群塊同士の距離を調べ、連続性の高い点群塊をつなぐことで線形状の点群を抽出している。ノイズ除去手法と線形状の認識手法が実現されることにより、鉄筋コンクリート躯体を示す点群の抽出をより正確に行うことが可能となり、プレカット部材の設計に用いる躯体のポリゴンモデルの正確さの向上に成功した。

第4節では第2節、3節において示した手法を実際の建築工事において適用した事例を示し、本研究の有効性の検証を行った。施工箇所、点群データ、設計CADデータの座標系を一致させる手法は設備の改修工事において適用し、施工箇所の既存躯体や設備を計測した点群データを設計CAD上に読み込み、重ね合わせた。その上で、設計CADモデルと既存設備の干渉を点群データにより確認し、空調設備の設計案を変更し、施工時における手戻りを未然に防いだ。ノイズの除去手法は、スタッドを計測した際に大量に発生するノイズの除去に適用し、ノイズの識別が成功していることを確認した。線形状の点群の形状認識に関しては、鉄筋コンクリート躯体の解体現場において取得した点群データに適用した。躯体から垂れ下がるコード類の点群を正確に識別できていることを確認した。

本章において示した手法を組み込むことにより、躯体の施工誤差による微小な凹凸を点群データに記録し、設計CAD上に正確な位置でポリゴンモデルを読み込むことが可能となることを示した。

第3章

内装工事におけるボード材の割付図と加工図 の最適化に関する研究

第3章 内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究

3.1. 内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化手法の概要

3.1.1. 内装工事におけるボード材の割付図と加工図作成の必要性

内装工事においては、現場合わせで内装部材の加工を実施していたため、現場作業者が壁面や天井面へのボード材の割付図と加工図の作成を行ってきた。前章で述べた3次元計測手法を用いることにより、鉄筋コンクリート躯体の露出後、躯体の3次元形状を設計CAD上で把握することが可能となる。しかしながら、躯体のポリゴンモデルに合わせて、内装のプレカット部材の詳細設計を手作業で作成する場合、内装部材の部材数は膨大であるため、その労務量が膨大であり、現実的ではない。そのため、作業の省力化の観点から、軸組材の配置図やボード材の割付図と加工図を効率的に作成する手法が必要である。また、昨今、3次元CADの普及に伴い、3次元設計とBIMの導入が進んでいるが、詳細な3次元CADモデルの作成に非常に大きな労力が必要となるため、問題となっていた。本章では、部材点数の多い内装部材の設計CADモデルの作成を効率的に行うだけでなく、残材量や部材数、目地長さなどの材料費や作業時間に大きな影響を与える因子を最適化する手法に関する研究を扱う。

内装間仕切壁の壁面を構成するボード材は定尺ボード材を図3.1に示す如く、隙間なく敷き詰めることにより作成され、壁面からはみ出る部分は壁面の形状に合わせて加工される。この割付図の作成を行う方法について本研究で扱っている。また、これらの割付図は、定尺ボード材から最小の残材量となるように加工する加工図が必要となるため、図3.1.右下に示すような加工図の作成手法についても研究を実施している。

なお、本研究におけるボード材の割付図と加工図の最適化とは、「残材量」が少なく、「目地長さ」「部材数」が最小となるボード材の割付図と加工図を作成することを指す。また、本研究では割付図と加工図を複数案作成し、それぞれの割付図と加工図から、残材量や目地長さなどの数値情報を求め、この数値に基づいて、割付図と加工図を最適化する手法の考案と計算実験を実施した。また、本研究では同一の定尺ボード材のみを用いて、割付図と加工図の作成を行う場合について論じている。故に本研究では以下の2つの項目に関して研究を行う。

- (1) 残材量が最小化される可能性の高い複数の割付図の作成手法
- (2) 割付ボード部材を定尺ボード材から最小の残材量で切り出す加工図の作成手法

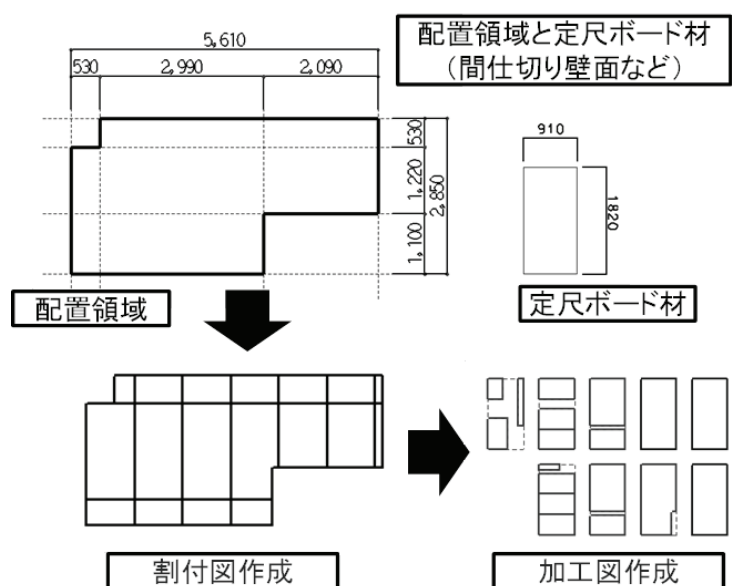


図3.1 割付図と加工図の作成

3.1.2. 本手法での用語の定義と最適化計算における前提条件

A. 用語の定義

本研究で用いる割付に関する用語を下記の如く定義をする。

- (1) 配置領域：割付を行う壁面や天井面の形状を示す多角形を指す。
- (2) 定尺ボード材：壁面や天井面を構成するのに用いる長方形をしたボード材で、3×6 版などの規格材や、施工箇所の発注に従い同一形状のボード材を大量に作成したものを指す。
- (3) 割付図：配置領域に定尺ボード材を規則的に配置し、配置領域からはみ出した部分をカットしたものを指す。
- (4) 割付ボード部材：配置領域に合わせて定尺ボード材をカットした部材1つ1つを指す。
- (5) 加工図：割付ボード部材を定尺ボード材から最小の残材量で切り出すための切り出し計画図のことを指す。

B. 配置領域の直角多角形化

主要な改修工事対象として想定する鉄筋コンクリート造のマンションや事務所ビルでは天井面と床面は平行であり、部屋の形状、梁、柱の形状は矩形であることが一般的である。そのため、本章で扱う割付図と加工図の最適化手法では配置領域の頂点は直角に限定する。配置領域を直角多角形に限定しても大部分の内装工事に適用できる。

また、3次元レーザースキャナーによって取得した躯体のポリゴンモデルは躯体の微小な凹凸を反映しているが、間仕切壁の設計断面を作成する際には、直角多角形に一旦、変換し、最適化計算を実施することを前提とする。躯体断面を示す多角形を内包する直角多角形に図形を置き換えると、直角多角形の面積のほうが大きいため、実際の残材量が増加するが、第4章の施工実験で使用した鉄筋コンクリート造の躯体断面を直角多角形に置き換えた例では表4.6に示す如く約0.7%しか面積が増加していないことから、直角多角形に限定してもほとんど影響がないといえる。

3.1.3. 割付図と加工図の作成の手順

内装工事におけるせっこうボードの残材の割合は10%前後が一般的である。本手法において示す手法においては残材の割合が少なくとも10%を切る案で、更に残材量が理論上の最小値をとる案の作成を目指す。任意の配置領域に対して、最小の残材量となるような詳細設計案を作成するには、まず複数の割付図を作成し、そのなかで最小の残材量となる割付図を選択することで、最適化された割付図の作成を行う。それぞれの割付図の残材量を算出するには、割付図を構成する割付ボード部材を定尺ボード材から切り出す加工図を作成することにより求める。

以上をふまえ、内装間仕切壁におけるボード材割付の最適化は下記の手順により実施させる。また、計算フロー図を図3.2に示す。

- (1) 配置領域、定尺ボード材を指定する
- (2) 配置開始点を作成し、 $Sp(i)$ とする
- (3) 配置領域に定尺ボード材を配置して割付図を作成し、この割付図を構成する直角多角形集合である割付ボード部材群を $T(j)$ とする
- (4) $T(j)$ を定尺ボード材に詰込むことにより加工図を作成する
- (5) 各割付図・加工図の計算結果から数値を集計し、最適な割付図・加工図を選択する

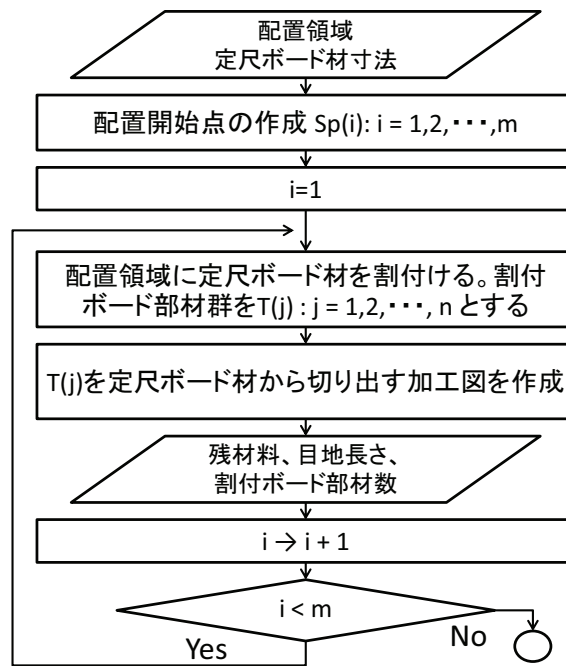


図 3.2 ボード材の詳細設計の手順

3.1.4. ポリゴンモデルや点群データを用いた部材の詳細設計

3次元レーザースキャナーにより躯体の計測を実施し、躯体形状を記録したポリゴンモデルに基づいて内装の設計を実施する。そのため、内装間仕切壁の設計は3次元CADで実施する。割付図と加工図の作成においては図3.3に示す如く、ボード材の割付の検討を行う面を3次元モデルから取得し、2次元平面に面の形状を変化させずに変換した配置領域を用いて行う。またこの配置領域はベクトルデータ^{附2.A)}として取得される。

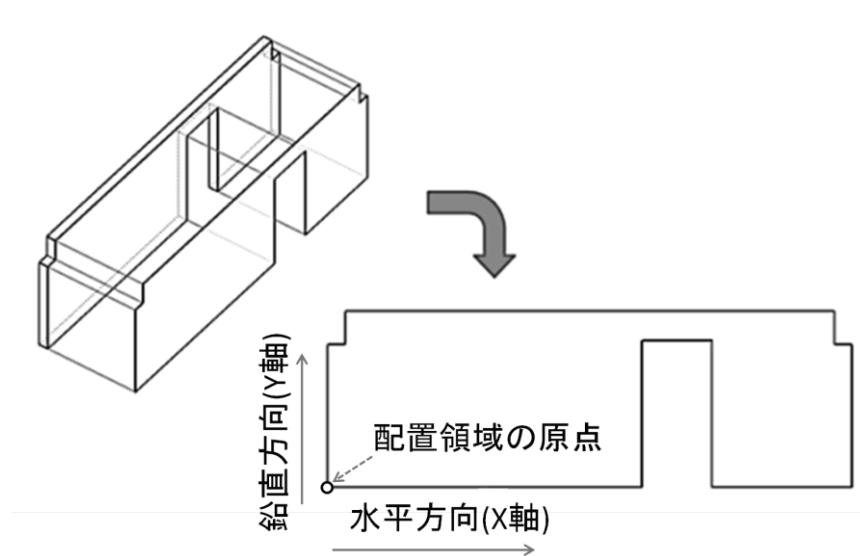


図 3.3 配置領域の2次元座標への変換

3.1.5. 軸組材とボード材との連携

内装部材において軸組材とボード材とを併用して壁面を構成する際には、ボード材の目地の位置に軸組材をあてがう必要がある。そのため、軸組材の位置を先に定めた場合、ボード材の配置は軸組材に制限される。他方、ボード材の配置を先行して設計した場合、軸組材がボードの目地位置にくるように配置する必要がある。本章で扱う手法では「ボード材の配置」を優先して行う。ボード材の割付の最適化を行った後、割付図の目地に合わせて軸組材を配置する。

3.2. 割付図と加工図の最適化手法

3.2.1. 割付図の作成手法

A. 複数の割付図の作成

本章で扱う手法では複数の割付図を作成し、その割付図に対応する加工図を作成した後、残材量や目地長さなどの数値化された評価値に基づいて、最適な割付図と加工図を選定する。

本項においては複数の割付図の作成を行うための下記の2つの手法について扱う。

- (1) 配置領域に対する割付図の作成手法
- (2) 残材量が少ない可能性が高い割付図の配置開始点の作成手法

なお、ボード材を配置領域に割り付ける場合、定尺ボード材の割付は、図3.4に示す如く、縦方向と横方向の目地を揃える貼り方と1方向の目地をずらす貼り方がある。目地を揃える貼り方は間仕切壁において、1方向の目地をずらす貼り方は天井において主に用いられる。

本研究においては、図3.4左に示す如く、間仕切壁で一般的な目地を揃える貼り方で割付を実施する。

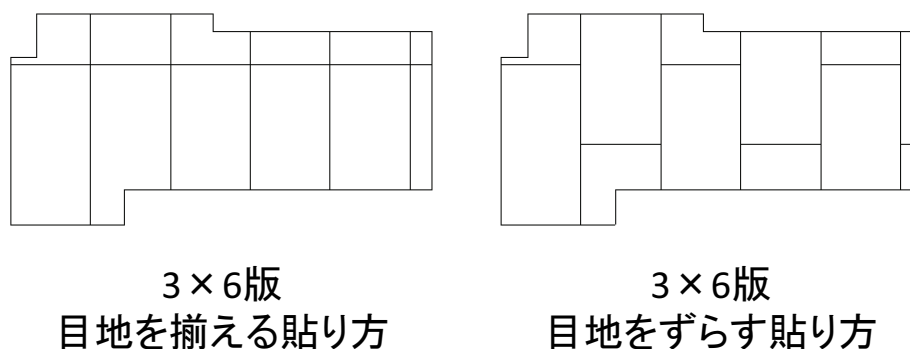


図3.4 定尺ボード材の貼り方

B. 割付図の作成手法

長方形の定尺ボード材を配置領域に隙間なく配置し、はみ出した部分をカットすることによって割付図を求める。

図 3.5 に示す如く、規格寸法が $W \times H$ である定尺ボード材を示す長方形集合 T を用いて、配置領域を示す多角形 F に対して割付図を作成するには、下記の 2 つの手順で行う。

- (1) 配置領域 F に長方形集合 T に含まれる長方形を覆うように配置する (図 3.6 左)。
- (2) 配置領域 F と定尺ボード材を示す長方形 T の共通部分^{附 2. B)} を取り出す (図 3.6 右)。

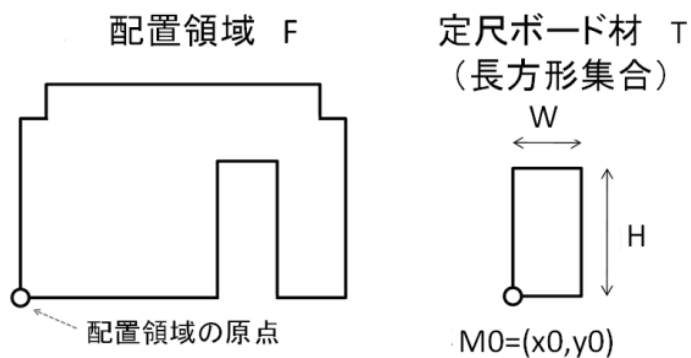


図 3.5 割付図作成における入力情報

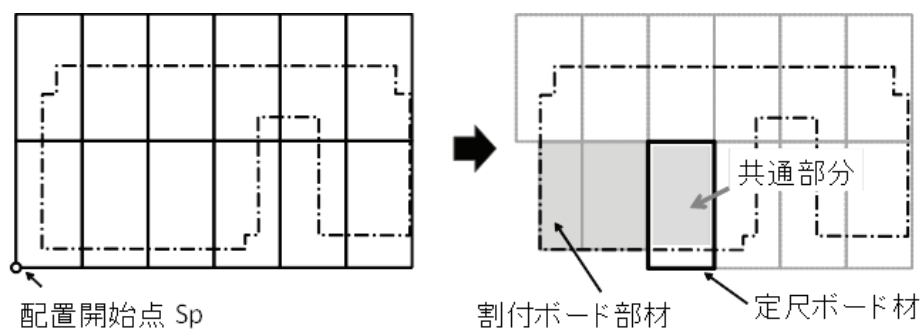


図 3.6 割付図の作成

上記の手順により作成した割付図から求めることができる情報は下記の三つである。

- (1) 割付ボード部材の枚数 n
- (2) 目地の長さ
- (3) 各長方形と配置領域 F との共通部分を記した割付ボード部材を示す多角形集合 $R = \{ 1, 2, \dots, n \}$

C. 割付図の配置開始点の作成手法

定尺ボード材の割付を行うために、1枚目の定尺ボード材を割り付ける配置開始点を設定する。割付図の作成では、割付を開始する配置開始点は例えば任意の位置から開始しX,Y方向に1mmずつずらすなどすれば無限に存在する。ただ、その全ての割付図に対する加工図を求めるには膨大な計算数が必要となるため、残材量が最小となる可能性の高い配置開始点にあらかじめ絞って計算する必要がある。本研究では図3.7に示す、配置領域の頂点を基準として作成する手法を採用している。このように配置領域の頂点から基準線をX,Y軸方向に引き、その交点を配置開始点とした根拠は、定尺ボード材の辺と配置領域の辺とが一致する可能性が高くなり、定尺ボード材の形状をあまり加工することなく使用できる可能性が上がるためである。

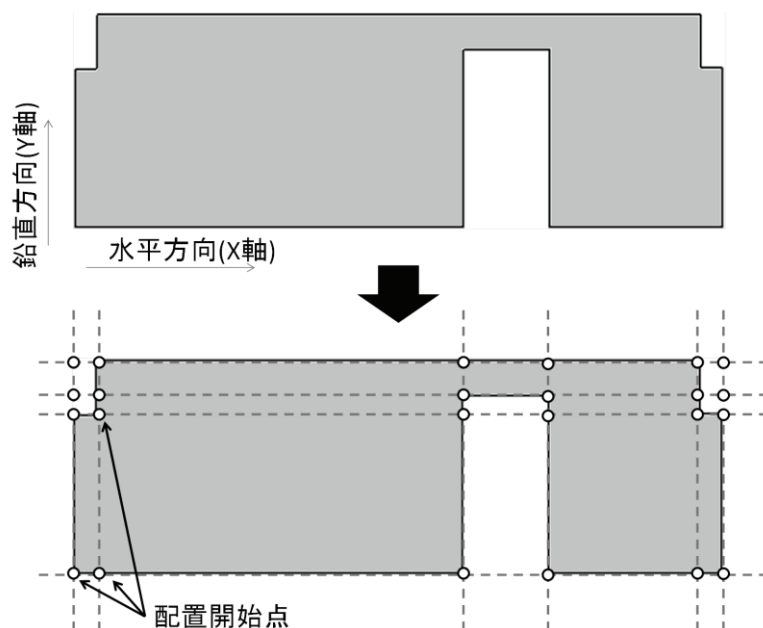


図 3.7 配置開始点の候補

3.2.2. 加工図の作成手法

A. 残材量が最小化された加工図の作成

間仕切壁の壁面への割付では、壁面の割付図を作成した後、割付ボード部材を定尺ボード材から効率的に切り出すための加工図の作成が必要である。割付ボード部材は頂点が全て直角である多角形（以後、直角多角形と呼ぶ）の部材も存在するが、割付ボード部材同士の重なりや残材となる部分を認識し、長方形をした定尺ボード材にこれら直角多角形を詰込む手法が必要である。そこで本章では、加工図作成において長方形詰込み問題のBL (Bottom-up Left-justified) 法を参考にして、加工図作成において長方形詰込み問題のBL (Bottom-up Left-justified) 法を参考にして、加工図を作成する手法を新たに考案した。BL法は長方形をした母材により小さな複数の長方形を最も少ない数の母材に詰込む方法を最適化する手法である。しかしながら、割付図を構成する割付ボード部材は長方形以外に直角多角形が含まれるため、そのままでは加工図作成には適用できない。そのため、まずは割付ボード部材を示す多角形集合を長方形に詰込むことにより加工図を作成する手順を考案した。その上で、本手法では直角多角形を長方形に置き換える事により、加工図の作成を行う。

これらを踏まえ、本項では以下の3つの内容を扱う。

- (1) 残材量が最小化された加工図の作成手順
- (2) BL法を用いた割付ボード部材を示す長方形の詰込み手法
- (3) 直角多角形の長方形への置き換え手法

B. 加工図の作成手順

下記の手順で割付ボード部材を定尺ボード材から切り出す加工図を作成する。

- (1) 割付図を構成する多角形を多角形集合 R とする (図 3.8-①)。
- (2) 多角形集合 R を定尺ボード材と同じ大きさの図形、直角多角形、定尺ボード材より小さい長方形に分ける。直角多角形を直角多角形集合 P_0 、定尺ボード材より小さい長方形を長方形集合 T とする (図 3.8-②)。
- (3) 直角多角形集合 P_0 は各直角多角形を内包する最小の長方形に置き換え、長方形集合 T に加える。置き換えた際に生じる余白には余白より小さい長方形を T から詰込む (図 3.8-③)。
- (4) 長方形集合 T に含まれる長方形を面積の大きい長方形から順に BL 法により定尺ボード材に詰込み、加工図を作成する (図 3.8-④)。

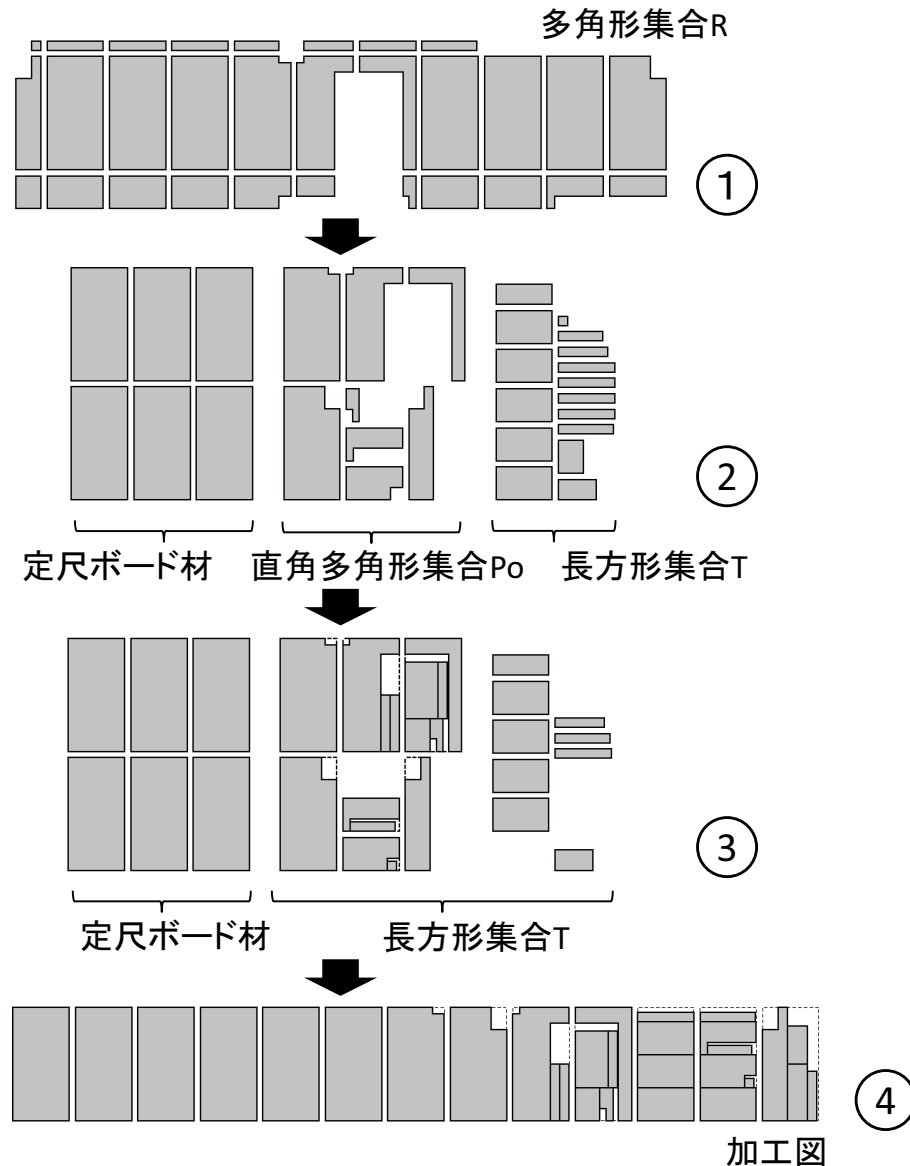


図 3.8 加工図の作成手順

C. BL 法を用いた長方形の詰込み

1 つの定尺ボード材に出来るだけ多くの長方形をした割付ボード部材を詰込める案を BL (Bottom-up Left-justified) 法を用いて求めた。BL 法とは、図 3.9、図 3.10 に示す如く定尺ボード材に長方形を詰込む際に、出来るだけ下から詰めていき、同一高さでは左側から詰めていく方法である。著者らは BL 法を用いて下記の手順で詰込みを行っている。

- (1) 長方形の面積の大きい順に詰込み順を定める。この際、長方形の番号を面積の大きい順に振りなおし、長方形集合 $T(i)$, ($i=1, 2, \dots, n$) とする。
- (2) 配置開始点群 S_p に図 3.9 に示す如く、定尺ボード材の左下の頂点 M_0 を加える。
- (3) 配置開始点群 S_p の中で最も左下にある点を配置候補点とし、長方形 $T(i)$ を配置する。
- (4) 図 3.10 に示す如く、長方形が配置可能^{附2.0)}である場合、配置候補点を P から排除し、図 3.11 に示す如く、 $T(i)$ の右下の頂点と左上の頂点を配置開始点群 S_p に加え、 $T(i)$ を長方形集合から削除し、(6)に進む。配置が不可能であった場合、(5)に進む。
- (5) 長方形を 90 度回転し、(3)に戻る。回転済みだった場合、(6)に進む。いま選択している配置候補点に配置可能な長方形が 1 つもなかった場合、配置開始点群 S_p から配置候補点を削除し、 $i=1$ とし、(6)に進む。
- (6) 配置開始点群 S_p に配置候補点が残っていれば、 $i \rightarrow i+1$ として(3)に戻る。配置候補点がなく、これ以上、長方形の詰込みを行えない場合、長方形の詰込みをした定尺ボード材は加工図となる。長方形集合 $T(i)$ に未配置の長方形が残っている場合、新しい定尺ボード材を用意し、(1)に戻る。全ての長方形を定尺ボード材に配置済みで、長方形集合 $T(i)$ が空になっている場合、計算を終了する。

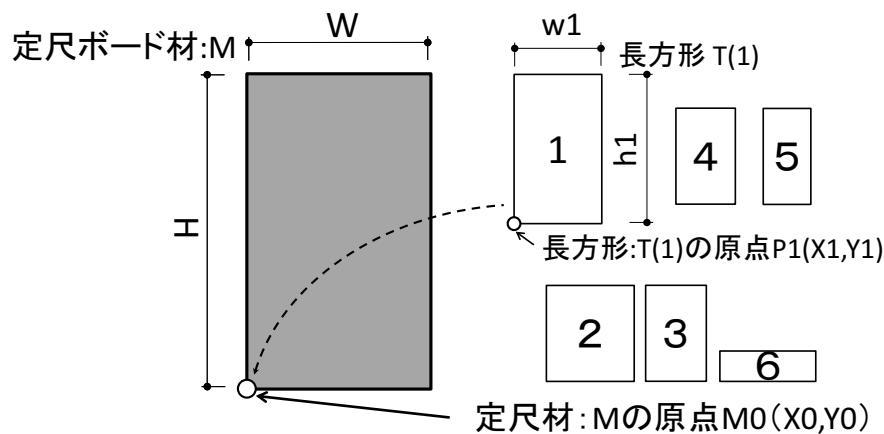


図 3.9 BL 法による割付ボード部材の詰込み (開始時点)

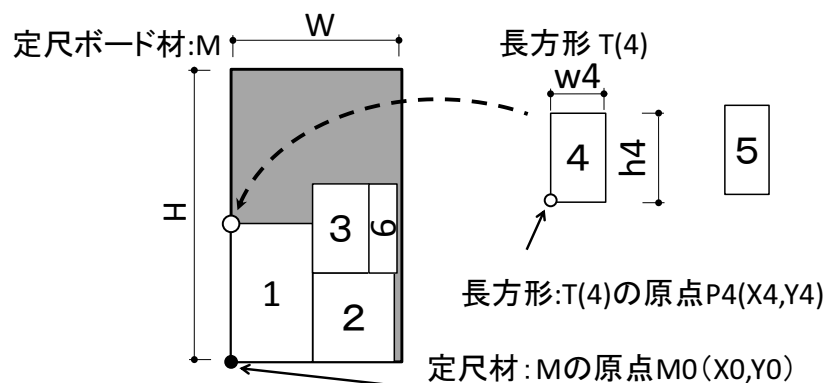
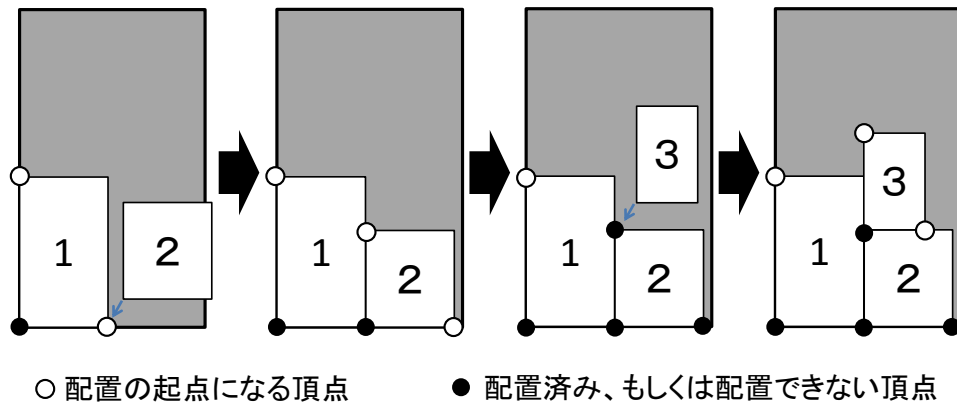


図 3.10 BL 法による割付ボード部材の詰込み



○ 配置の起点になる頂点 ● 配置済み、もしくは配置できない頂点
 図 3.11 詰込み可能な長方形がある場合の配置開始点の追加

D. 直角多角形の長方形への置き換え

割付ボード部材には直角多角形も存在するが、BL 法は長方形の詰込みしか行えない。そこで本手法では直角多角形を長方形に置き換えた後、BL 法により最適な加工図を求める手法を開発した。ただ直角多角形に置き換える際に、図 3.12 に示す如く、直角多角形の欠けている部分から長方形領域を取り出し、この欠けている部分へ、より小さな長方形を詰込む。これにより、直角多角形を長方形に置き換えることで発生する残材を小さくしている。

下記の手順により実施している。

- (1) 長方形の割付けボード部材を長方形集合 $T(i)$ に、直角多角形を直角多角形集合 $Po(j)$ に仕分けする(図 3.8-②)。
- (2) 直角多角形集合 $Po(j)$ を面積の小さい順に並べなおす。
- (3) $j=1$ とする。
- (4) 直角多角形集合 $Po(j)$ を内包する最小の長方形領域を算出する。この長方形を R_0 とする(図 3.12 左)。
- (5) 長方形 R_0 と直角多角形 $Po(j)$ の差領域を求め、差領域から長方形を取り出す。この長方形を R_s とする(図 3.12 中)。
- (6) R_s に長方形集合 $T(i)$ の長方形を BL 法により詰込む。詰込み可能な長方形を $T(i)$ から除外する。
- (7) 長方形を詰込んだ直角多角形を長方形に置き換え、長方形集合 $T(i)$ に加える(図 3.12 右)。
- (8) $j \rightarrow j+1$ とし、(4)に戻る。全ての直角多角形がなくなるまで繰り返す。

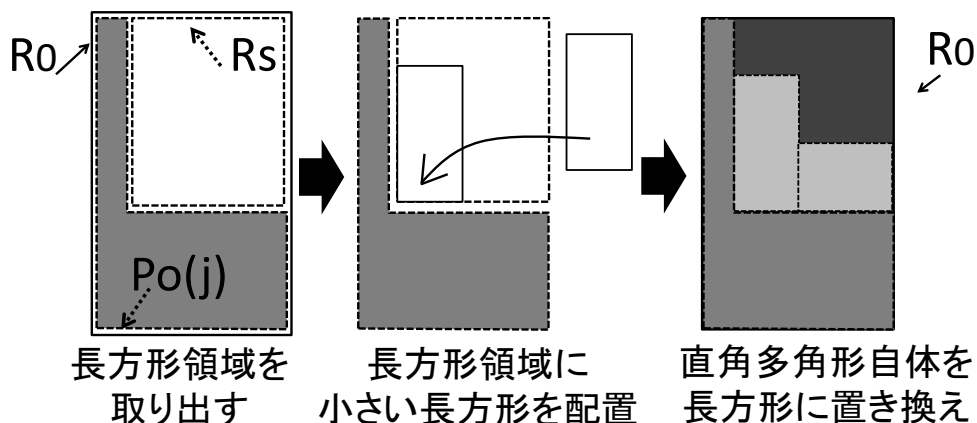


図 3.12 直角多角形の長方形への置き換え

3.3. 間仕切壁における割付図と加工図の最適化に関する計算実験

3.3.1. 計算実験の概要

図3.13に示す頂点がすべて直角で構成された配置領域Fに3×6版（910×1820）、2×6版（606×1820）、メートル版（1000×2000）、3×8版（910×2420）の定尺ボード材を同じ向きで用いた場合の割付の計算実験を行った。なお、以下の条件で割付を実施する。

- (1) 同一の定尺ボード材のみで割付を行う
- (2) 定尺ボード材は長尺方向を高さ方向に向けて割り付ける
- (3) 水平、鉛直方向の目地が揃う条件で割付をおこなう

本計算実験では前述の4種類の定尺ボード材に関して複数の割付図と加工図を作成し、以下の3つの数値を求め、残材量が最小となる割付図と加工図を算出することを目的としている。なお、配置領域の面積は常に一定であるため、（定尺ボード材の面積）×（必要な定尺ボード材の枚数）から配置領域の面積を引くと残材量となる。

- (1) 残材量（必要な定尺ボード材の枚数）
- (2) 目地長さ
- (3) 割付ボード部材数

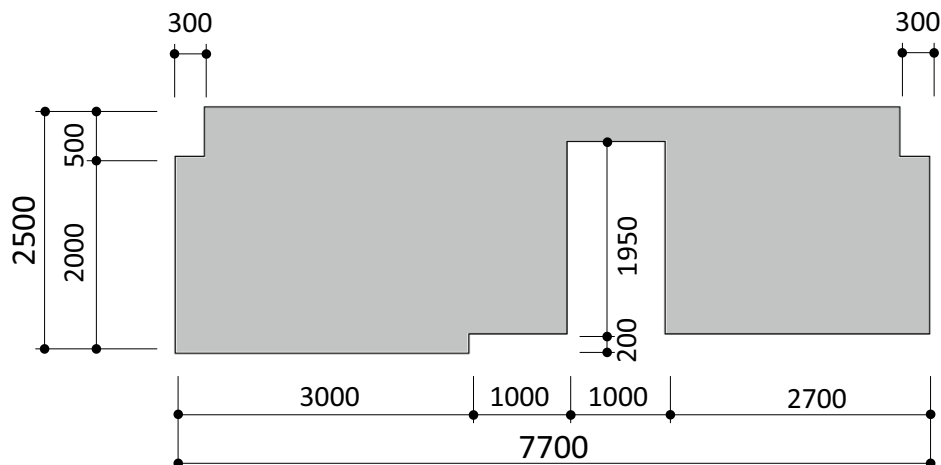


図 3.13 配置領域の形状

3.3.2. 割付図の作成

定尺ボード材を配置領域の頂点に合わせて設置すると切断されるボード材の枚数が少なくなるので、配置領域Fの頂点に基づいて配置開始点を設定した。定尺ボード材の割付を行う起点となる配置開始点は図3.14に示す35箇所、用意する。本計算実験においては35箇所の配置開始点から4種類の定尺ボード材を縦使いでそれぞれ割り付けた場合について計算を行った。3×6版の定尺ボード材を縦使いで35箇所の配置開始点から割り付けた結果を図3.15に示す。

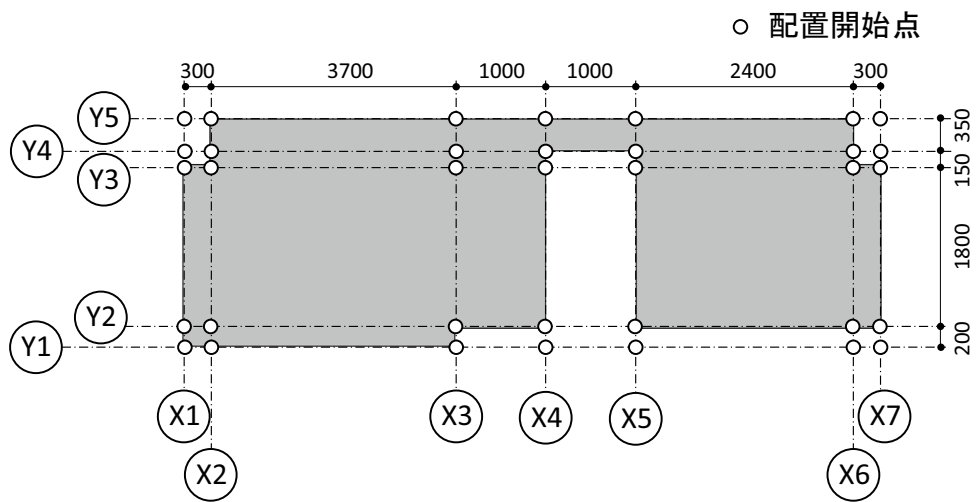


図 3.14 配置領域の形状と配置開始点

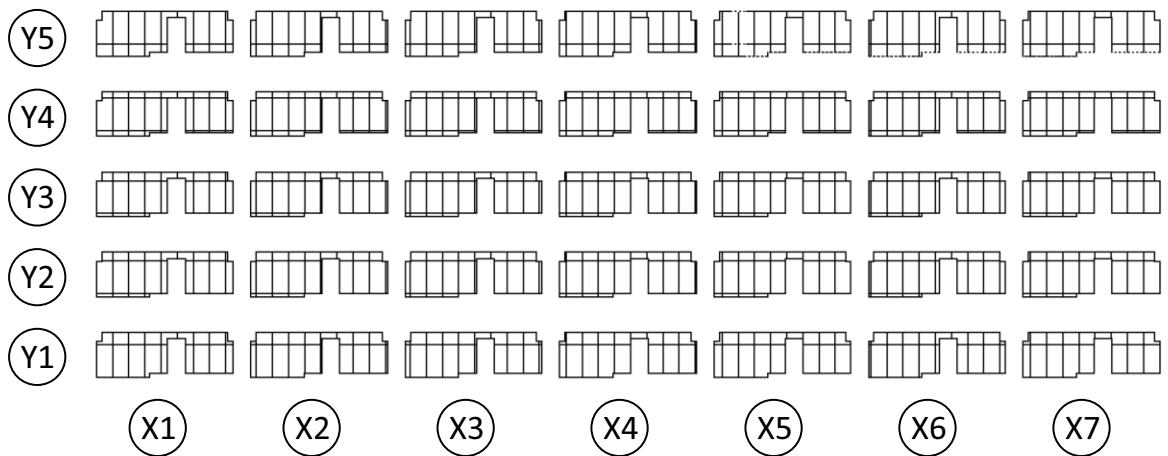


図 3.15 3×6 版を縦使いで割り付けた結果

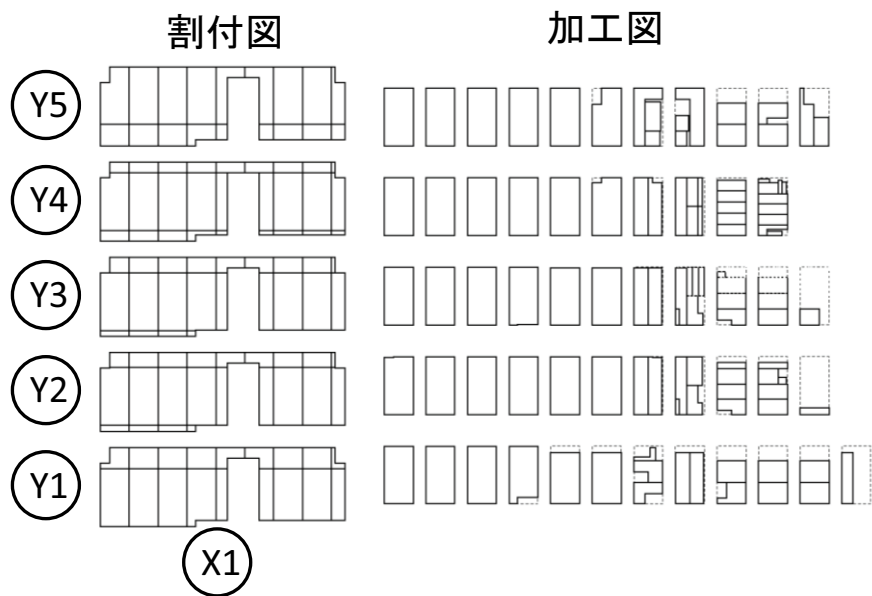


図 3.16 配置開始点 X1-Y1 から 3×6 版を割り付けた場合の割付図と加工図

3.3.3. 加工図の作成

作成した割付図は140通り(各35通り×4)であった。割付図を作成する際には加工図も合わせて求め、各割付図の「残材量(必要な定尺ボード枚数)」、「割り付けボード部材の枚数」、「目地長さ」の算出も合わせて行っている。図3.16において、3×6版のX1-Y1~X1-Y5の5つの割付図ごとの加工図の作成結果を示す。3×6版を用いて各配置開始点から作成した割付図と加工図を基に、配置開始点ごとの割付ボード部材の枚数、目地長さ、残材量を集計した結果を表3.1に示す。

表 3.1 3×6版を縦使いで用いた場合の計算結果

割付 開始点	定尺ボード材 枚数	割付ボード部材 の枚数	目地長さ(m)	残材量(m ²)
X1 - Y1	12	18	23.75	3.81 (19.19%)
X1 - Y2	11	22	26.15	2.16 (11.84%)
X1 - Y3	11	22	26.15	2.16 (11.84%)
X1 - Y4	10	27	29.85	0.50 (3.03%)
X1 - Y5	11	18	23.75	2.16 (11.84%)
X2 - Y1	12	20	25.05	3.81 (19.19%)
X2 - Y2	11	22	27.45	2.16 (11.84%)
X2 - Y3	11	22	27.45	2.16 (11.84%)
X2 - Y4	11	28	31.15	2.16 (11.84%)
X2 - Y5	11	20	25.05	2.16 (11.84%)
X3 - Y1	12	20	25.05	3.81 (19.19%)
X3 - Y2	11	22	27.45	2.16 (11.84%)
X3 - Y3	11	22	27.45	2.16 (11.84%)
X3 - Y4	11	28	31.15	2.16 (11.84%)
X3 - Y5	11	20	25.05	2.16 (11.84%)
X4 - Y1	12	19	23.60	3.81 (19.19%)
X4 - Y2	10	22	26.00	0.50 (3.03%)
X4 - Y3	10	22	26.00	0.50 (3.03%)
X4 - Y4	10	27	29.70	0.50 (3.03%)
X4 - Y5	11	19	23.60	2.16 (11.84%)
X5 - Y1	12	17	21.80	3.81 (19.19%)
X5 - Y2	11	21	24.20	2.16 (11.84%)
X5 - Y3	11	21	24.20	2.16 (11.84%)
X5 - Y4	10	25	27.90	0.50 (3.03%)
X5 - Y5	11	17	21.80	2.16 (11.84%)
X6 - Y1	12	20	25.25	3.81 (19.19%)
X6 - Y2	11	23	27.65	2.16 (11.84%)
X6 - Y3	11	23	27.65	2.16 (11.84%)
X6 - Y4	10	28	31.35	0.50 (3.03%)
X6 - Y5	11	20	25.25	2.16 (11.84%)
X7 - Y1	12	17	21.80	3.81 (19.19%)
X7 - Y2	10	21	24.20	0.50 (3.03%)
X7 - Y3	11	21	24.20	2.16 (11.84%)
X7 - Y4	10	25	27.90	0.50 (3.03%)
X7 - Y5	11	17	21.80	2.16 (11.84%)

最少の残材量となった割付案は塗潰しとなっている。また残材量における百分率は使用した定尺ボード材の合計に対する残材量の割合を示す。

3.3.4. 3×6版の定尺ボード材における最適な割付図の選定

前項で示した如く、3×6版の定尺ボード材を配置領域に縦方向で割付を行い、35通りの割付図と加工図を得た。表3.1に示した残材量の大きいものから順に並べなおしたグラフを図3.17に示す。配置領域の面積は16.06㎡であり、3×6版の定尺ボード材の面積は1.66㎡である。そのため、そのまま割ると9.67枚の定尺ボード材が必要であるため、理論上の最小枚数は10枚である。残材量が理論上の最小枚数に一致した割付図は8つあり、それは図3.18に示す割付図である。残材量はY4の配置開始点から開始すると最小されやすいが、配置領域の底辺から割付を開始することになるY1を含む配置開始点から割付を行うと残材量が最大となる。また、目地長さの長いものから順に並べたものが図3.19である。割付ボード部材数と目地長さには相関関係があるが、残材量とは関連性が薄いことが分かる。図3.20は目地長さが短い割付図と長い割付図を示した図である。残材量の場合とは逆にY4を含む配置開始点から割付を行うと目地が長くなってしまふことが分かる。この2つの結果から、残材量が最も少ない割付図のなかで、目地長さが短いものはX7-Y2の配置開始点から割付を行ったものであった。

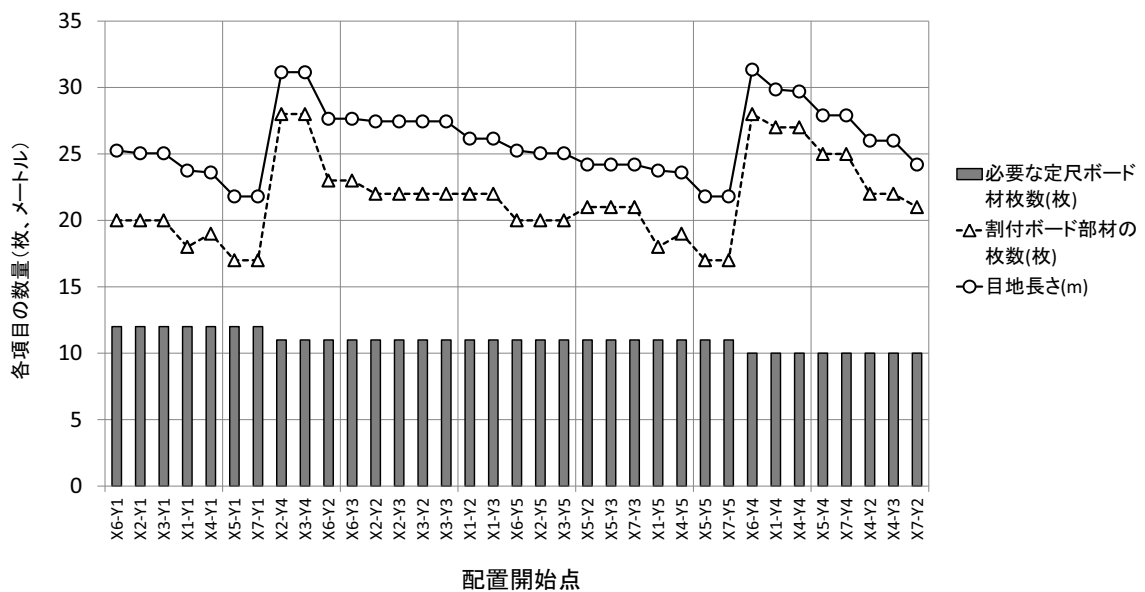


図 3.17 3×6版の割り付けた場合の残材量、目地長さ、割付ボード部材数（残材量を降順）

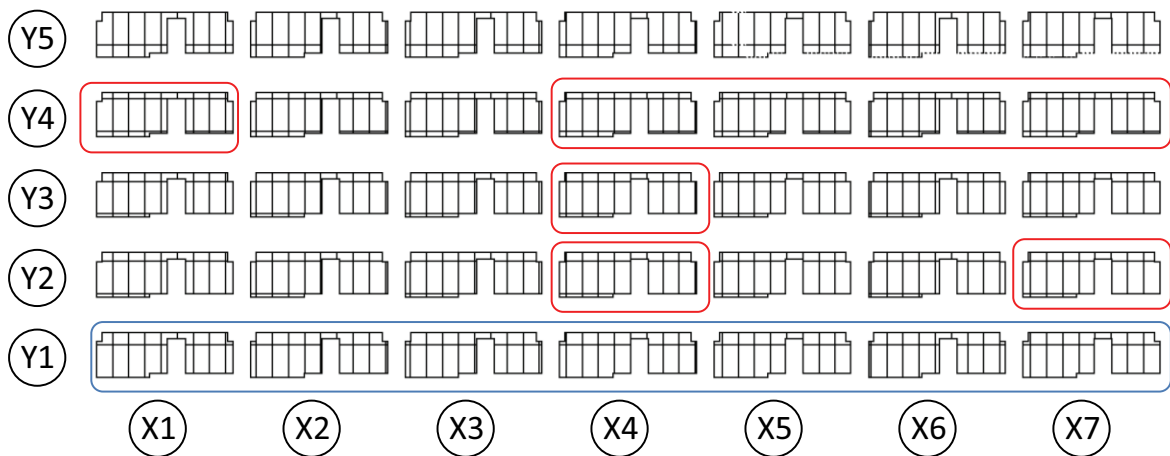


図 3.18 3×6版における残材量が最小の割付（赤枠）と最大の割付（青枠）

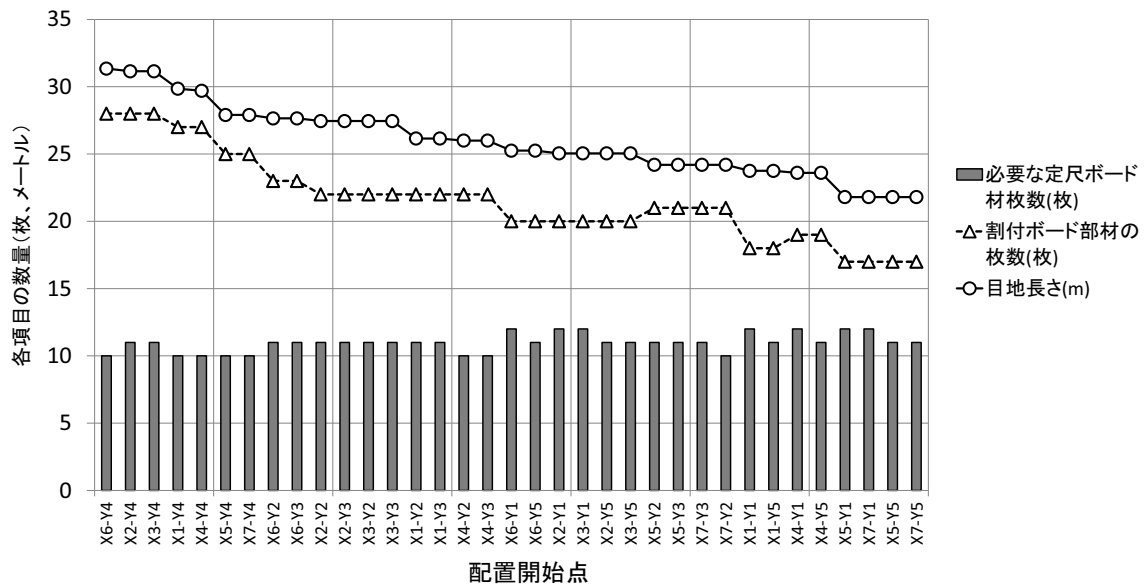


図 3.19 3×6 版の割り付けた場合の残材量、目地長さ、割付ボード部材数（目地長さを降順）

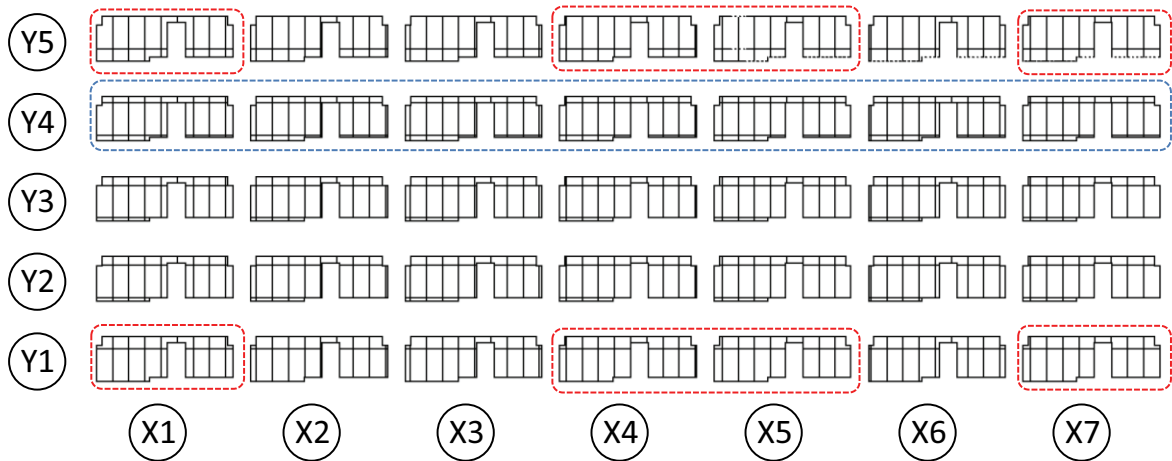


図 3.20 3×6 版における目地長さが短い割付（赤枠：下位 8 位まで）と長くなる割付（青枠：上位 7 位まで）

3.3.5. 各規格材の割付図と加工図の作成結果からの本手法の有効性の確認

前項で行った方法と同様に、配置領域の面積は 16.06 m²であるため、3×6 版、2×6 版、メートル版、3×8 版、の定尺ボード材を用いた場合、表 3.3 に示す如く必要な定尺ボード材の最小値はそれぞれ 10, 15, 9, 8 枚である。作成したボード材の割付図と加工図の自動作成システムでは表 3.2 に示す如く 4 つの定尺ボード材全てに対して、残材量（必要な定尺ボード材）が理論上の最小値と一致する割付図と加工図を見つけることが出来た。本計算実験では、第 3 章で述べた如く、配置領域の頂点を配置開始点として使用しているが、この方法が妥当であることが表 3.2 の結果より確認できた。

定尺ボード材ごとの割付図と加工図の残材量、目地長さ、割付ボード部材数をグラフにしたものを図 3.21 に示す。

また図 3.23 に定尺ボード材の規格ごとに最小の残材量となった割付図と加工図の内、目地長さが最小となったものを示す。表 3.4 に図 3.23 の割付図と加工図の残材量、目地長さ、割付ボード部材数を示す。各定尺ボード材の最適化された割付図・加工図を比較すると、2×6 版で割付を行

った場合に残材量が最小となっている。しかしながら、2×6版で割付を行うと目地の長さが長くなるため、残材量がほとんど変わらない3×6版で割付を実施した方が、総合的には最適な割付であると言える。図 3.22 は横軸に残材量を縦軸に目地長さをとったものである。この図からも3×6版が2×6版との最小の残材量はほぼ同じであり、また目地長さは3×6版の方が短いことが確認できる。しかしながら、目地長さという観点では3×8版のほうが有利である。施工箇所の環境や工期、費用などの条件に応じて、優位な割付図を選択することが可能である。

表 3.2 各定尺ボード材を用いた際の残材量(m²)

割付 開始点	3×6版	2×6版	メートル版	3×8版
X1 - Y1	3.81	3.79	1.94	3.76
X1 - Y2	2.16	1.59	1.94	3.76
X1 - Y3	2.16	1.59	1.94	3.76
X1 - Y4	0.50	1.59	1.94	3.76
X1 - Y5	2.16	1.59	1.94	3.76
X2 - Y1	3.81	3.79	1.94	3.76
X2 - Y2	2.16	1.59	1.94	1.56
X2 - Y3	2.16	1.59	1.94	3.76
X2 - Y4	2.16	1.59	1.94	3.76
X2 - Y5	2.16	1.59	1.94	1.56
X3 - Y1	3.81	3.79	1.94	3.76
X3 - Y2	2.16	1.59	1.94	1.56
X3 - Y3	2.16	1.59	1.94	3.76
X3 - Y4	2.16	1.59	1.94	3.76
X3 - Y5	2.16	1.59	1.94	1.56
X4 - Y1	3.81	3.79	1.94	1.56
X4 - Y2	0.50	0.48	1.94	1.56
X4 - Y3	0.50	0.48	1.94	3.76
X4 - Y4	0.50	1.59	1.94	3.76
X4 - Y5	2.16	1.59	1.94	1.56
X5 - Y1	3.81	3.79	1.94	1.56
X5 - Y2	2.16	1.59	1.94	3.76
X5 - Y3	2.16	1.59	1.94	3.76
X5 - Y4	0.50	0.48	1.94	3.76
X5 - Y5	2.16	1.59	1.94	1.56
X6 - Y1	3.81	3.79	1.94	3.76
X6 - Y2	2.16	1.59	1.94	1.56
X6 - Y3	2.16	1.59	1.94	3.76
X6 - Y4	0.50	0.48	1.94	3.76
X6 - Y5	2.16	1.59	1.94	1.56
X7 - Y1	3.81	3.79	1.94	1.56
X7 - Y2	0.50	1.59	1.94	3.76
X7 - Y3	2.16	1.59	1.94	3.76
X7 - Y4	0.50	0.48	1.94	3.76
X7 - Y5	2.16	2.69	1.94	1.56

塗潰しは残材量が理論上の最小値と合致したものを示す。

表 3.3 各定尺ボード材を用いた際の理論上の最小値

	3×6版	2×6版	メートル版	3×8版	配置領域
規格寸法(mm)	910×1820	606×1820	1000×2000	910×2420	----
面積(m ²)	1.66	1.10	2.00	2.20	16.06
理論上の 最少残材量(m ²)	0.50	0.48	1.94	1.56	----
理論上の最少の 定尺ボード材枚数	10	15	9	8	----

表 3.4 定尺ボード材の規格ごとの最適化例

規格	配置開始点	必要な定尺ボード材枚数	割付ボード部材の枚数	目地長さ(m)	残材量(m ²)
3×6版	X7 - Y2	10	21	24.2	0.50 (3.03%)
2×6版	X4 - Y3	15	32	35.6	0.48 (2.92%)
メートル版	X1 - Y1	9	15	18.7	1.94 (10.77%)
3×8版	X7 - Y5	8	13	18.1	1.56 (8.84%)

残材量の項目における百分率は使用した定尺ボード材の合計に対する残材量の割合を示す。

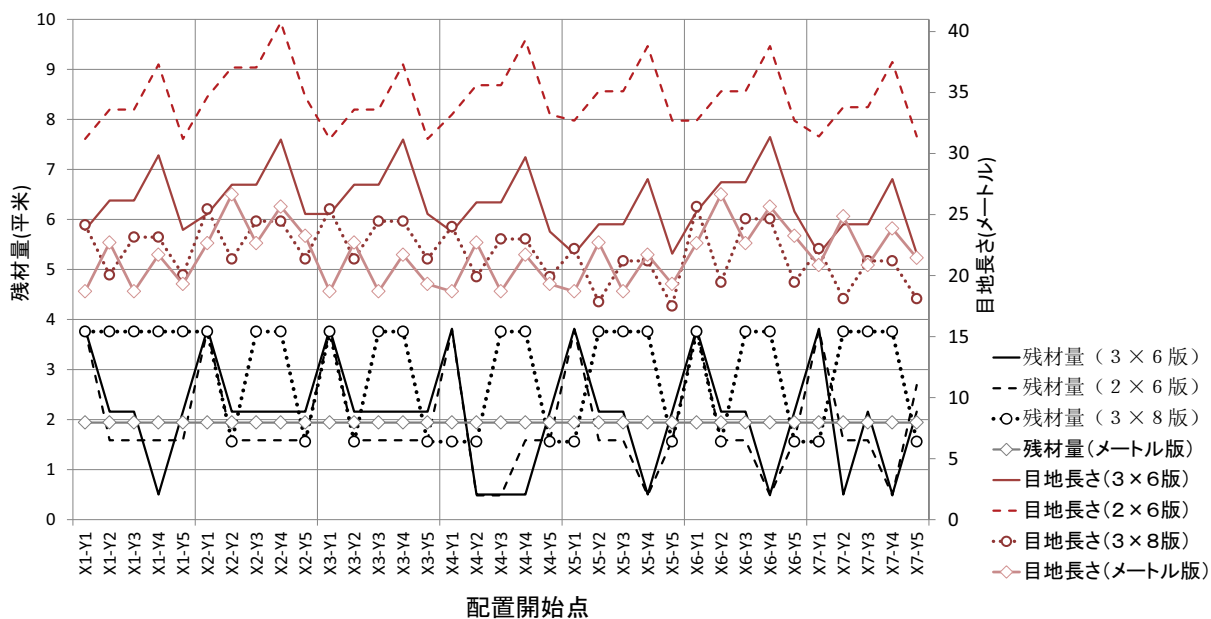


図 3.21 各定尺ボード材の残材量と目地長さ

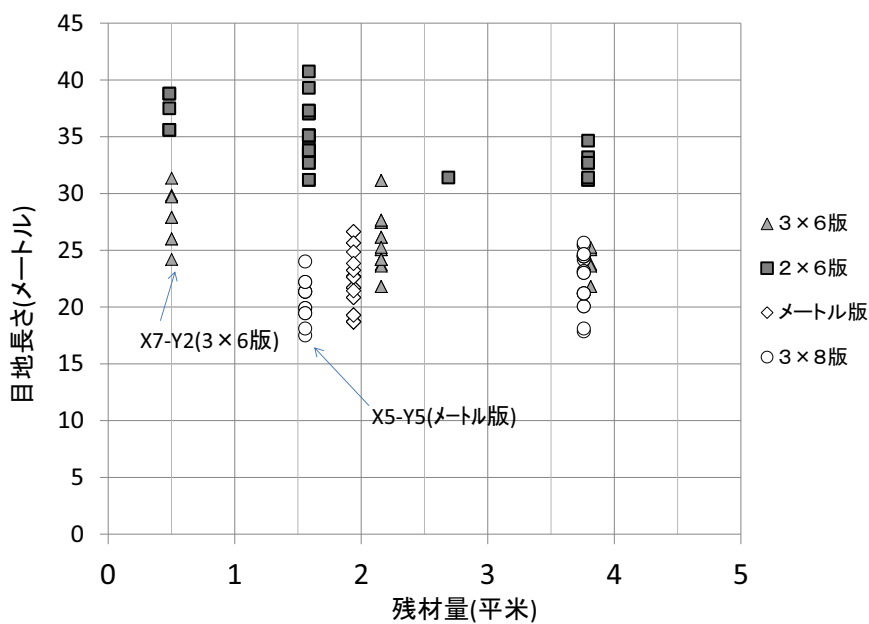


図 3.22 目地長さと残材量の関係

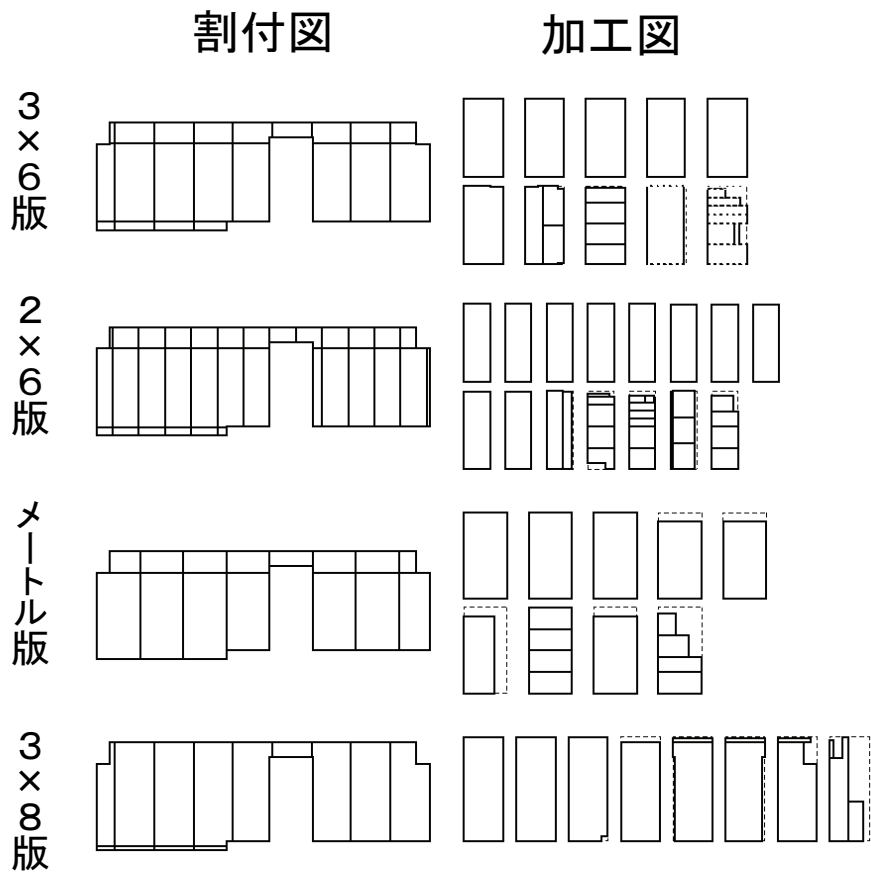


図 3.23 各定尺ボード材を用いた場合の最小の残材量で目地長さが最小となる割付図と加工図

3.4. 結言

プレカット部材の設計の自動化において、最適な設計案を作成する手法の考案が重要となってくるが、ボード材の最適な部材配置を行う際に、本章で扱った方法が有効であることを確認した。

第1節では、ボード材の割付図と加工図の最適化の概要を述べている。ボード材のプレカット部材の設計では割付図に加え加工図が必要であることを指摘した上で、本研究で用いる用語の定義と、割付図と加工図の最適化計算の条件を示した。特に本研究では割付ける壁面の領域である配置領域を直角多角形に限定したうえで、割付図と加工図の最適化における判断基準として、残材量（必要な定尺ボード材枚数）、割付ボード部材数、目地長さの3つの指標を基準とすることを示した。

第2節においては、割付図の作成手法を詳細に示した。本手法では、最小の残材量で、目地長さが短い割付図となる可能性が高い割付図を複数案作成したうえで、各割付図の加工図を求め、残材量と目地長さが最小となる案を選択することにより、最適化を行うが、割付を開始する配置開始点を、壁の配置領域の頂点に基づいて定めることより、無数に存在する配置開始点の数を絞ることに成功している。

加えて、割付図を構成する割付ボード部材を最小の残材量で切り出す加工図の最適化手法について述べた。加工図の作成では計算時間を大幅に削減するためにBL法に基づいて考案した加工図作成の手法を考案した。この手法は割付ボード部材を「定尺ボード材のまま利用できる部材」「直角多角形状をした部材」「長方形形状をした部材」に分類し、直角多角形状をした部材は長方形に置き換えることにより、BL法の適用を可能にした。直角多角形を長方形に置き換える際に余白が生じるため、この余白により小さな長方形を詰込むことで残材量の削減を行うとともに計算時間の高速化を実現出来る手法を開発した。

その上で第3節では、本研究で考案した手法を実装したシステムを作成し、計算実験を行った事例を示した。計算実験により4通りの定尺ボード材について、残材量を最小化できることを確認した。また第3節で使用した配置領域であれば、最も部材数の多い2×6版の35通りの計算では、加工図の最適化に合計で1415万通りの組合せ計算を行っているが、XeonE5630を搭載したPC（2010年製）とVBAを用いて21分で計算可能であった。

本手法を用いることで、最適化された割付図と加工図が得られ、これによって内装部材のプレカット化のボトルネックになっていたプレカット部材の詳細設計業務の省力化が図られるとともに、内装の設計において数的な根拠に基づいた設計手法を実現できることを示した。

今回の研究では、残材量や目地長さなどの数値化に主眼を置き、複数の評価項目の優先順位は生産設計者にゆだねているが、軸組材の設計を合わせて行うことにより、「残材量」や「目地長さ」、「部材数」、「ビス数」などに基づいて、工期とコストを算出することが可能となる。

また、コンピュータ上で詳細設計を実施するには建築工事標準仕様書や公共建築工事標準仕様書、各種製品の施工要領書などに記載されている規則を読み替える作業が必要となる。このように内装部材の配置の最適化においては様々な規則や禁則が存在するが、本研究で示した手法は可能性のある割付図案全てについて計算を実施しており、新たに導入すべき規則や禁則により適当ではない割付図を加工図の最適化計算前に間引くことにより、計算回数の削減が望めるため、本研究で示した手法の実現性がより高まるものと考えられる。内装工事において現場合合わせをほとんど必要としないプレカット部材を導入するためには、間仕切壁を構成する全ての部材の設計を行うことが必要となる。本手法により、プレカット部材の加工寸法の割り出しが速やかに行えるとともに、実際に取り付けた形状を正確に記録した内装部材全てをBIM上で記録・管理することを実現できる技術を開発した。

第4章

内装プレカット部材を用いた改修工法の 体系化に関する研究

第4章 内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究

4.1. 内装プレカット部材を用いた改修工法における施工手法の概要と実施手順

4.1.1. 点群データを用いた既存躯体の形状把握とプレカット部材の加工寸法の算出手法

本章で扱う研究は施工箇所の凹凸を3次元レーザースキャナーにより正確に計測する技術を用いて、計測結果に基づいて躯体に隙間なく取りつく内装のプレカット部材を作成することにより、逃げ寸法を必要としない部材を作成し、組立施工を実現する、内装プレカット部材を用いた改修工法の開発に関する研究である。

内装のプレカット部材の製作においては躯体形状を正確に把握することが必要となる。特に施工誤差を有する鉄筋コンクリート造においてもプレカット部材の加工寸法を求めるには、躯体の形状を3次元レーザースキャナーによって取得し、その点群データを設計CADデータに取り込んで、躯体形状に合わせて内装部材を設計し、部材の正確な加工寸法を施工前段階において把握する必要がある。

また、せっこうボードなどのボード材の割付図とせっこうボードの目地に配置する必要があるLGSなどの軸組材の配置位置を求めるには、せっこうボードの加工による残材が少なくなるような割付図を作成する必要がある。従来、この割付図の作成は現場作業者が実施していたが、内装のプレカット部材の作成においては、ボード材の割付図と加工図や軸組材の配置図と加工寸法を事前に求める必要があるため、設計する部材数が膨大な量になる。それ故、それらの計算を自動的に行う手法が必要となる。

故にLGSとせっこうボードによる間仕切壁のプレカット部材を製作するには下記の項目を事前に明らかにする必要がある。

A. 点群データに基づくポリゴンモデルから算出可能な配置位置・寸法に関する項目

- (1) ランナーの長さ・本数
- (2) 軸組材の設置位置における長さ
- (3) ボード材を配置する面の断面形状

B. 点群データに加えて残材量や目地長さなどプレカット部材の詳細設計に関する考慮が必要となる項目

- (4) ボード材の割付図
- (5) ボード材の加工図
- (6) 軸組材の内、スタッドなどの鉛直方向の軸材の配置位置と本数

4.1.2. 点群データを用いた既存躯体の形状把握とプレカット部材の詳細設計の手順

本研究では鉄筋コンクリート建築物において、内装のプレカット部材を以下の手順で作成し、施工を行う「内装プレカット部材を用いた改修工法」の開発を行う。またこの手順のイメージ図を図4.1に示す。

- (1) 3次元レーザースキャナーを用いた躯体形状の計測
- (2) 内装部材の詳細設計に適した点群データの処理
- (3) 点群データに基づく躯体のポリゴンモデルの作成
- (4) ポリゴンモデルを用いた間仕切壁部材の設計
- (5) プレカット部材による組み立て施工
- (6) 出来形の計測に基づく施工品質の確認

この手順のうち、「3次元レーザースキャナーを用いた躯体形状の計測」と「内装部材の詳細設計に適した点群データの処理」においては、「点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究」で開発した手法を使用する。また、「ポリゴンモデルを用いた間仕切壁部材の設計」においては、ポリゴンモデルに基づいて内装部材のプレカット寸法を求める手法を新たに考案し、その上で内装工事に関する技能者の助言に基づいて内装のプレカット部材の詳細設計を行う。また、「内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究」において開発した手法を用いて、ボード材の割付図と加工図の作成を行い、現場作業者による設計案と本研究において開発した手法による設計案の比較を行い、その正確さの確認を行う。加えて、作成したプレカット部材の設置精度を、間仕切壁完成後に3次元レーザースキャナーにより出来形計測により確認する。

更にこれらの手順は既往の技術と本論文において開発した手法とを組み合わせることにより、実現される工法であるが、計測や、点群データと設計CADデータ的一致、ポリゴンモデルへの変換、プレカット部材の加工作業などの各段階において誤差が発生するため、この手順で実際に間仕切り影を施工した場合、設置可能であるかを実験的に検証することが必要である。

故に内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究では以下の2点を明らかにすることを研究の目的とする。

- (1) ポリゴンモデルに基づいて内装部材のプレカット寸法を求める手法の開発する
- (2) 様々な要素技術を組み合わせて実現される本工法の実現性を実験に基づいて検証する

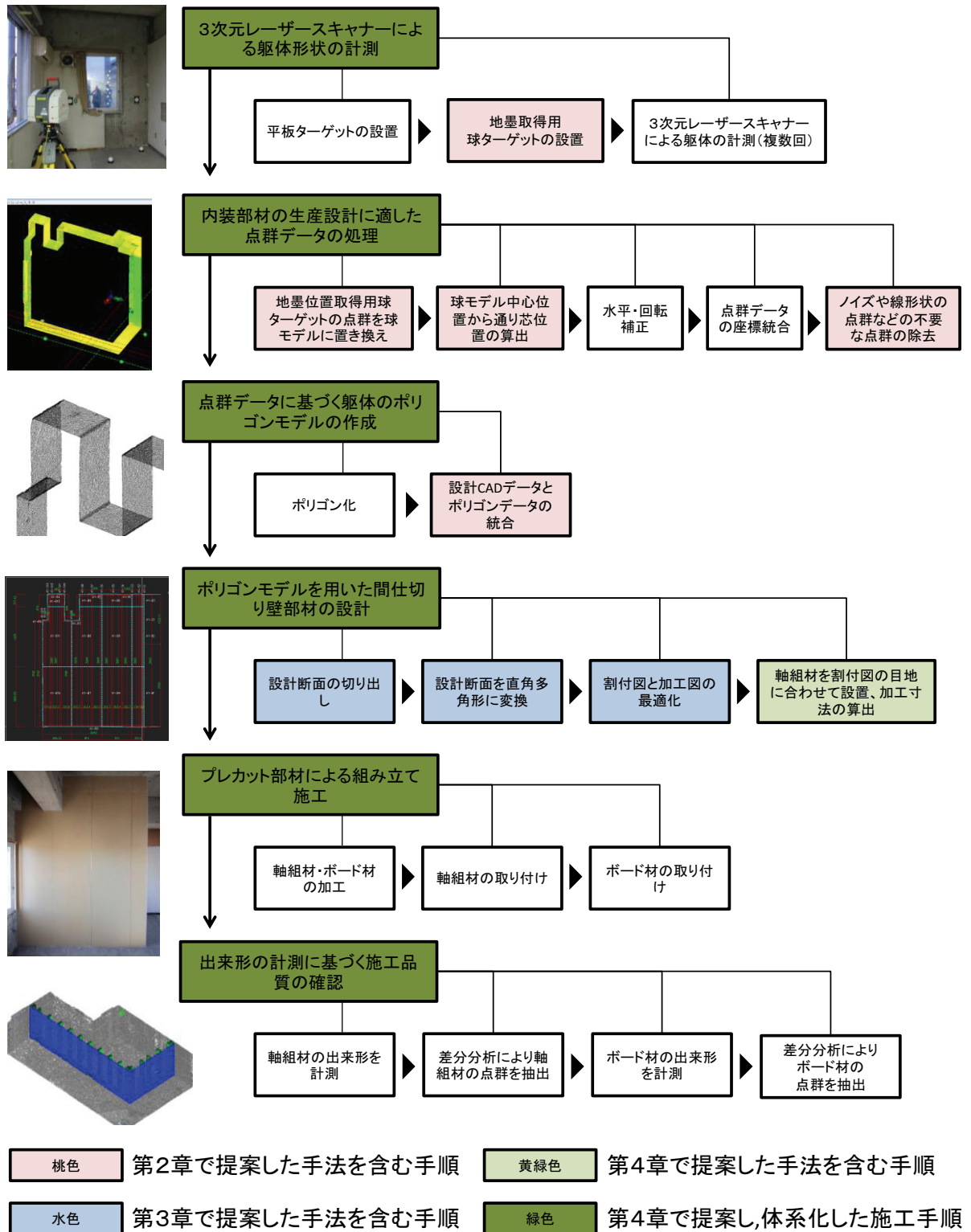


図 4.1 内装プレカット部材を用いた改修工法における施工手順

4.1.3. 内装に使用する軸組材の加工寸法の算出手法

従来、建築工事においては内装部材の配置位置やボード材の割り付けと加工寸法は建築工事標準仕様書や作業要領書の規定に基づいて、現場作業者の判断によって決められている。これは躯体の凹凸を設計時点で把握することが困難であったためである。本研究では3次元レーザースキャナーにより取得した点群データから躯体の3次元形状を反映したポリゴンモデルを作成しているため、詳細設計を実施する時点でプレカット部材の作成が可能になる。

ポリゴンモデルを用いて内装部材の詳細設計を行うために「面墨」という概念を導入している。2次元図面での設計では通り芯や壁芯などの基準線を引き、設計を行っている。面墨とはポリゴンモデルを用いる3次元CAD上での設計において基準線を3次元に拡張したもので、間仕切壁の設計においては間仕切壁の中心部分にこの面墨を図4.2に示す如く配置する。

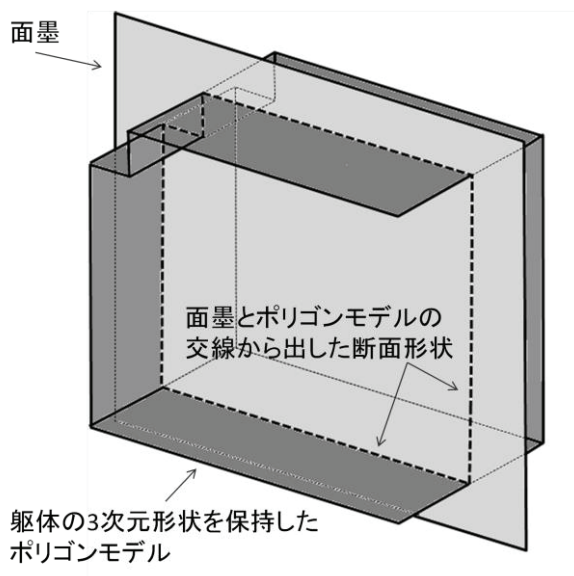


図 4.2 壁面設置位置の躯体断面形状を算出するための面墨

躯体形状を反映したポリゴンモデルと面墨を用いて、壁厚が T_i (mm) である間仕切壁の設計手順を以下に示す。また、この時の各部分の名称を図4.3に示す。

- (1) 設計CADに読み込んだポリゴンモデルにおける地墨の位置を設計CAD上のXY座標に合わせる。
- (2) 壁面を設置する位置に、面墨を配置する。この面墨は鉛直面で、XY平面上にある間仕切壁の通り芯を通る面である。
- (3) 面墨から法線方向に $\pm T_i / 2$ の範囲にあるポリゴンモデルを切り出し、面墨がある平面上に法線方向で投影する。
- (4) 躯体の断面線を用いて面材であるせっこうボードの割り付け図を作成する。その後、加工図を作成する。
- (5) 面墨上に投影された壁面の断面線に従い、軸組部材を配置する。軸組材はボード材の割り付け図の目地に従って配置する。軸組材のスタッドの長さは断面線より求めた長さより K mm 短くする。

なお、(5)にある K mm 短い長さで設計する理由は、スタッドをランナーにはめるためには、少し短く切る必要がある事と、ランナーが躯体の変形には完全に追従できないことによって、ランナーと躯体面との間に隙間が生じることを考慮したことによる。

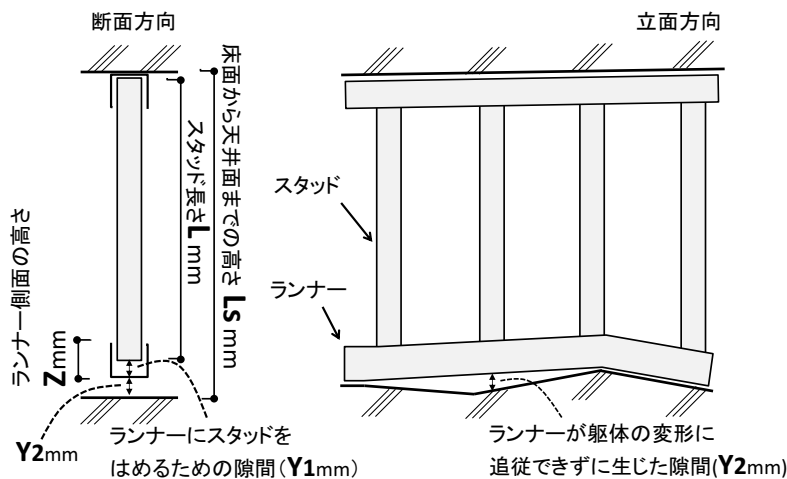


図 4.3 ポリゴンモデルからのスタッド長さの算出方法

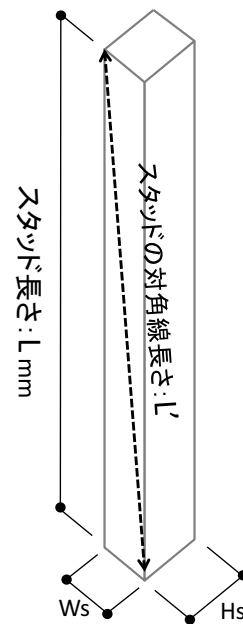


図 4.4 スタッドの対角線長さ

床面から天井面までの高さを L_s 、ランナー側面の高さを Z とし、ランナーとスタッドの隙間を Y_1 、を Y_2 とした時、長さ K (mm) は以下の式を満たす。

$$Y_1 + Y_2 \leq K \leq Z \quad \text{ただし } K + L = L_s$$

なお、 Z が 40mm 程度の製品の場合、 K は 10mm 程度を想定している。

K が 10mm 程度とした根拠は以下の式に基づいて求めた。

スタッドはランナー上に設置するため、ランナーの底面の厚み分である $2 \times D$ の長さ分、短く切る必要がある。また、スタッドをランナーにはめこむには、はめ込む際にスタッドを斜めに入れて入れる分、短くする必要がある。この長さは底面の形状が W_s (mm) \times H_s (mm) で長さが L (mm) あるスタッドの最大長さは図 4.4 に示す如く対角線になるため、対角線長さとスタッド長さの差である $(L' - L)$ 分短くすれば十分である。また、躯体の凹凸にランナーが完全に追従できずに僅かな隙間が生じることを踏まえる必要がある。更にスタッドを切断する加工機の加工誤差 S_1 と点群データ自体がもつ誤差により生じるポリゴンモデルの誤差 S_2 がある。この S_1 と S_2 は正規分布に近い状態で存在しているとすると、短く切る長さ K は以下の式により求められる。

$$K = (L' - L) + 2 \times D + Y_2 + \sqrt{S_1^2 + S_2^2} + \alpha \quad (\text{ただし, } Y_1 = L' - L)$$

- L' : スタッドの対角線長さ
- L : スタッド長さ
- D : ランナー底面の鋼板の厚さ
- Y_1 : ランナーとスタッドの間に生じる隙間
- Y_2 : ランナーの躯体面への追従不足により生じる隙間
- S_1 : スタッドの加工誤差
- S_2 : ポリゴンモデルの計測誤差
- α : 余裕量

今、仮に $L=4000$ mm, $W_s = 45$ mm, $D = 0.6$ mm, $Y = 2$ mm, $S_1 = 3$ mm, $S_2 = 3$ mm とすると、 $K = 7.70$ mm である。少し余裕を持たせ、10mm 短く切ることとした。

4.1.4. 施工実験の実施による本手法の実現性の確認

内装のプレカット部材の作成において活用する要素技術である、3次元レーザースキャナーによる躯体の計測やボード材の割付図と加工図の最適化手法の検証はすでに行っているが、これらの技術を用いて、「計測」「点群データの処理」「プレカット部材の設計」「加工・取付」「出来形の計測による品質の確認」という一連の流れで、プレカット部材が本当に作成できるのかを検証する必要がある。本研究で実施する施工実験では下記の事項の検証を実施する。

- (1) ランナーにスタッドを嵌めるためにスタッドを短めに設計する必要があるが、この余裕は10mmで妥当であるかの確認
- (2) ボード材の割付図と加工図の最適化手法を適用した設計案が現場作業者の設計案と比較して妥当なものであるかの確認
- (3) 施工実験に基づく「内装プレカット部材を用いた改修工法」の実現性の検証

4.2. 施工実験の概要

本研究で開発した手法が実際の施工に耐えうるかを検証するために施工実験を実施した。事務所建築の一室を対象として、改修工事における、内装間仕切壁工事を想定した。図4.5に示す間仕切壁を作成する。

本実験において内装間仕切壁は躯体に直接取り付ける構法を想定しているため、内装間仕切壁を設置する箇所の既存内装材は解体した状態で実験を行った。建築物の概要と実験を実施した期間を表4.1に示す。

また、本実験において求める数量・寸法情報は下記の如くである。

- (1) ランナーの本数・長さ
- (2) スタッドの本数・長さ
- (3) せっこうボードの加工形状

上記の数量・形状情報を取得するには、間仕切壁と躯体とが接する位置の躯体の3次元形状が必要である。

また、3次元CADを用いて設計した間仕切壁の位置座標と実際に間仕切壁を設置する位置座標とを一致させるためのベンチマークを設置する必要がある。改修工事においては躯体に記された地墨をベンチマークとするため、地墨の位置を点群データに記録する。

本実験において、3次元レーザースキャナーを用いて下記の情報を取得することとした。

- (1) 間仕切壁と躯体とが接する部分の躯体の3次元形状
- (2) 躯体の地墨の位置
- (3) 点群データにおける水平面

表 4.1 建築物の概要と実験を実施した期間

用途	事務所
構造	鉄筋コンクリート造
測定箇所	会議室 (階高 約 4000mm)
実験実施期間	2010年11月29日～2010年12月17日

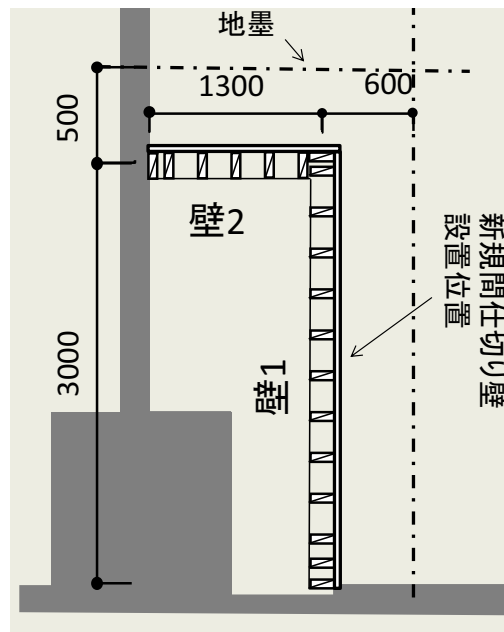


図 4.5 施工実験において設置する間仕切壁

本施工実験において、作成する間仕切壁に使用した軸組み材とボード材の仕様は、以下の通りである。

- (1) スタッド：SQ-BAR 45100 (45x100、ピッチ：303mm)
- (2) ランナー：SQ-ランナー100 (42x102)
- (3) コーナー材：ピットコーナー
- (4) せっこうボード：GB ボード 12.5mm 片面

また、間仕切壁完成後に、施工した間仕切壁の部材の設計寸法が正しいのか検証を行うために、せっこうボードとスタッドと躯体との隙間を計測する。更に、LGS とせっこうボードの設置位置が正しい位置にあるかを確認するために、LGS の取り付け完了時点と、せっこうボードの取り付け完了時点において 3次元レーザースキャナーにより出来形の計測を行う。

以下の表 4.2 に各施工段階における計測日時と回数を示す。

表 4.2 各施工段階における計測日時と回数

計測対象	日時	計測回数
躯体	2010/11/29	4 回
スタッド	2010/12/15	3 回
せっこうボード	2010/12/17	5 回
	合計	12 回

4.3. 3次元レーザースキャナーを用いた既存躯体の計測

4.3.1. 既存躯体の計測

本実験においては、施工誤差による凹凸を有する鉄筋コンクリート躯体の形状に合わせた間仕切壁のプレカット部材の加工寸法を求めるために、3次元レーザースキャナーによる計測を行った。せっこうボード部材と躯体とが隙間なく接続されることが望ましいため、設計に使用する躯体のポリゴンモデルの精度は1mm以下であることが必要である。ポリゴンモデルは点群データから変換して作成する。この時に最小二乗法などの数学的処理により点群データの1つ1つの点を持つ誤差が丸められるが、そのためには個々の点を持つ計測誤差を丸めるだけの点群数が必要となる。

また、間仕切壁などの内装工事では鉛直・水平が非常に重要であるため、点群データに水平面の向きを記録する必要がある。更に施工箇所、点群データ、設計CADデータの3つの座標系を統合するための基準となる地墨位置の記録も行う。

故に本実験における計測の要領は下記の通りである。

- (1) 測定間隔を2mmとする
- (2) レーザー水準器を用いて水平面の位置を記録する平板ターゲットを設置する
- (3) 座標統合用の平板ターゲットの設置する
- (4) 地墨の位置に、球ターゲットの設置する
- (5) 3次元レーザースキャナーを用いた計測を5か所から実施する

図4.6に示す位置に球ターゲットを設置し、S1からS5までの五か所から計測を実施した。計測においては、写真4.1に示す平板ターゲットを水平位置の記録と座標統合用ターゲットとして使用した。写真4.2に示す球ターゲットを写真4.3の如く、コンクリート床面に打たれた地墨の鉛直上に設置した。施工箇所には、写真4.4のようなコード類が残っており、これらを計測した点群データは、点群データ取得後、除去する必要がある。計測位置S1, 3, 4, 5からの計測では、図4.8の如く、三脚に設置して計測を実施した。S2の位置では、写真4.7に示すように梁と壁に挟まれた凹形状をしていたため、3次元レーザースキャナー本体を壁面ギリギリに設置する必要があり、写真4.6のように三脚を用いずに、地面に直接本体を設置し、計測を実施した。

5か所から取得した点群データは、一つの座標系に統合され、水平補正と躯体の通り芯に合わせた後、ノイズの除去を行った。これにより5か所から得た点群データが統合された、1850万点からなる点群データを得た(表4.3)。そして、間仕切壁が触れる部分の躯体の点群を取り出し、点群からポリゴンモデルを作成した。このポリゴンモデルを用いて、間仕切壁の設計を行い、ランナーとスタッドの寸法、せっこうボード材の形状を求めた。

なお、線形状の点群の認識に基づく、ワイヤーの点群の抽出は第2章4節の図2.34で示した如くである。

表 4.3 計測位置ごとの点群数

計測位置	点群数
S1	2,645,938
S2	3,126,787
S3	4,499,767
S4	7,509,244
S5	725,492

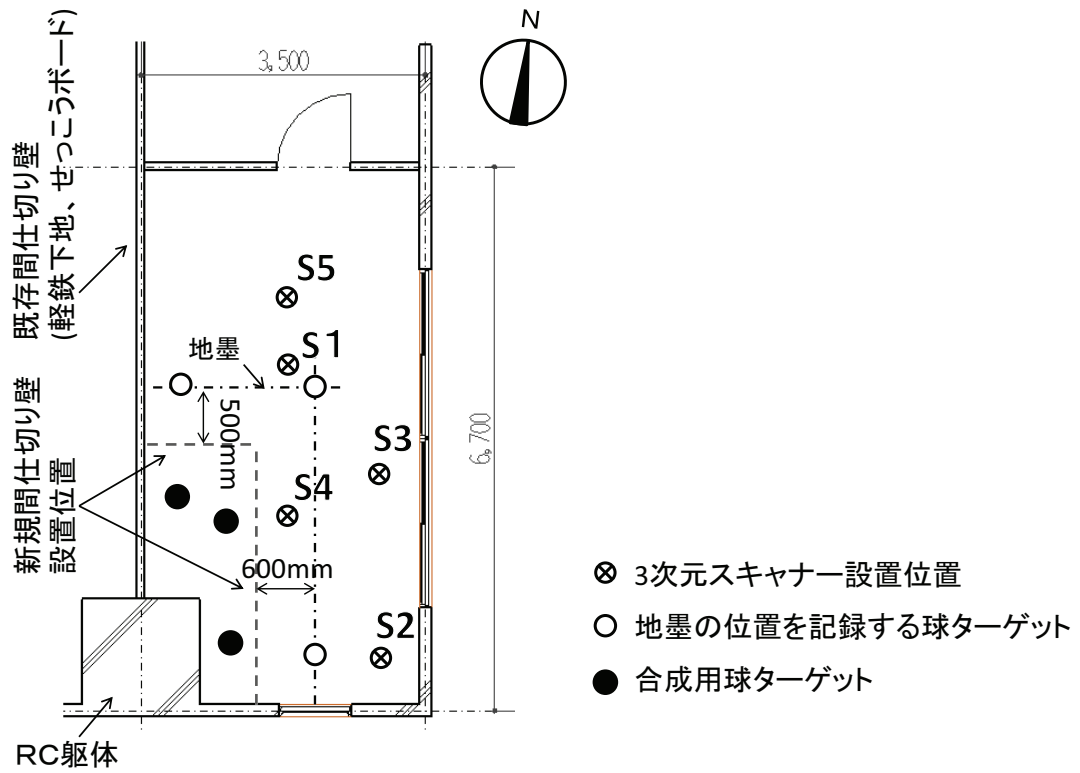


図 4.6 実験に使用した会議室に新設する間仕切り壁の平面図と 3次元レーザースキャナーの設置位置



写真 4.1 平板ターゲット



写真 4.2 地墨取得用球ターゲット



写真 4.3 通り芯に設置した地墨取得用球ターゲット



写真 4.4 配線コード、天井下地等の雑下地材の 残存状態

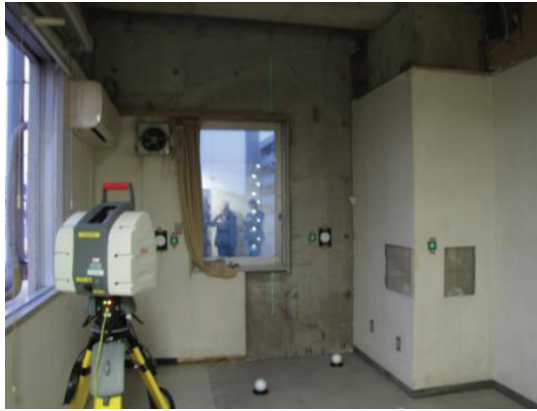


写真 4.5 3次元レーザースキャナーで躯体を計測する様子



写真 4.6 三脚なしでS2の位置に据え付けられたスキャナー

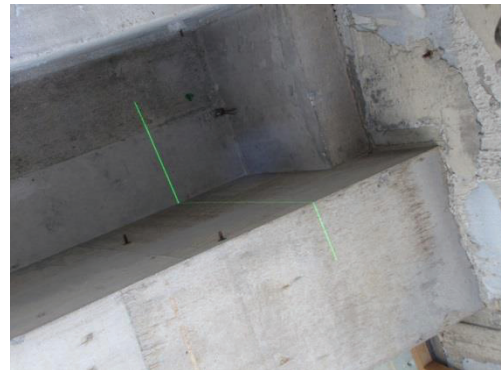


写真 4.7 梁側面へのレーザー照射の状況

表 4.4 ターゲットの自動対応と座標変換の実施結果(mm)

名称	S1			S3			誤差
	X	Y	Z	X	Y	Z	
T1	224.0	2462.3	-228.4	223.4	2463.7	-228.4	1.5
T2	1626.7	2539.2	-227.9	1626.3	2540.7	-227.8	1.5
T3	2230.1	1217.5	-227.3	2230.3	1218.7	-227.5	1.2
T4	2864.1	-1232.9	-228.4	2866.0	-1234.0	-228.2	2.2
T5	1507.6	-4031.0	-228.3	1507.4	-4032.8	-228.3	1.7
T6	206.2	-4052.0	-227.6	205.3	-4053.2	-227.6	1.6
T7				1232.9	-4037.6	812.7	----
T8				2843.3	72.3	1009.2	----
T9	-533.1	-962.6	-228.3				----

4.3.2. ターゲットの自動対応と座標の統合

本実験においては5か所から計測を実施した。実験に使用した部屋には計9個の座標統合用の平板ターゲットを設置した。計測位置によって取得できるターゲットは異なっているため、ターゲットの自動対応手法を用いて、同一のターゲットの検索を実施し、座標の統合を行った。S1からは7か所の、S3からは8か所のターゲットの中心座標の取得が行えた。その内、表4.4のT1-T6に示す6つターゲットが同一のターゲットである。本研究の第2章で示した手法を適用することにより、この6つのターゲットを正しく対応させることが出来た。表4.4右にS3とS1のターゲットの対応を行い、座標の統合を実施した際の統合の誤差を示す。なお、表4.4の誤差とはS1

と S3 の対応するターゲットの直線距離を意味している。

表 4.4 に示す如く、座標統合によるターゲット間距離の差は最大で 2.2mm 以下であり、自動対応と座標統合が正常に行い得たことを確認することが出来た。

図 4.7 に 5 か所から取得した点群データを同一の座標系に統合した点群データを以下に示す。また、間仕切壁は接する部分の躯体の点群を南北方向に切り出した点群を図 4.9 に示す。この居室の天井高は図面上では 4000mm であるが、点群データに基づいて測ると 4000mm 前後であった。図 4.10 は図 4.9 の A 部分の点群である。壁面と床面が接する部分には、大きな凹みがあり、その形状が点群データにも表れていた。図 4.11 にしめす部分 B の梁の点群の端部にはノイズが発生していることが観察できた。図 4.12 に示す部分 C は梁端部とノイズを拡大した図である。梁端部から 90 mm の範囲にノイズが存在していることが確認できた。

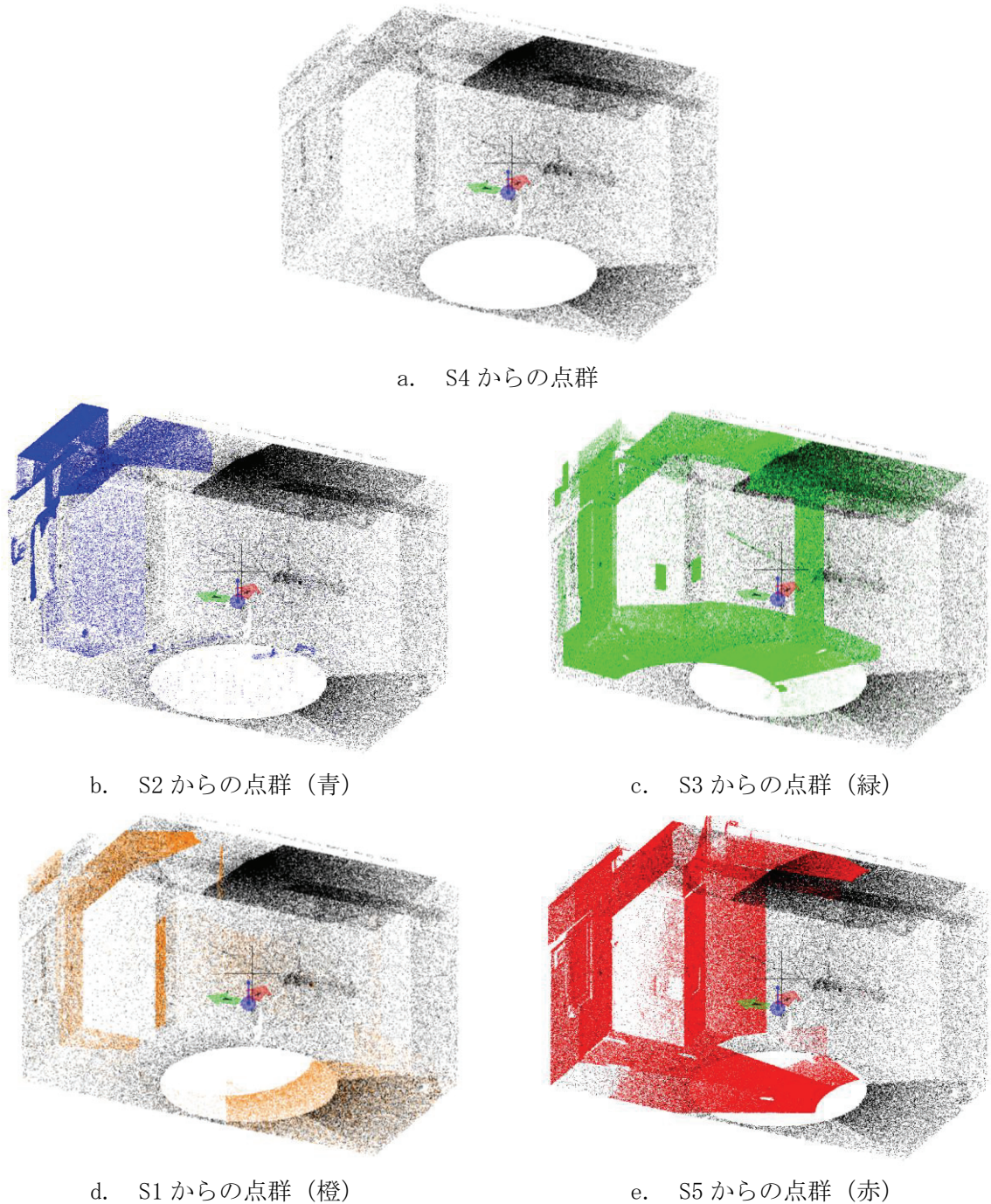


図 4.7 5 か所からの点群の計測状況

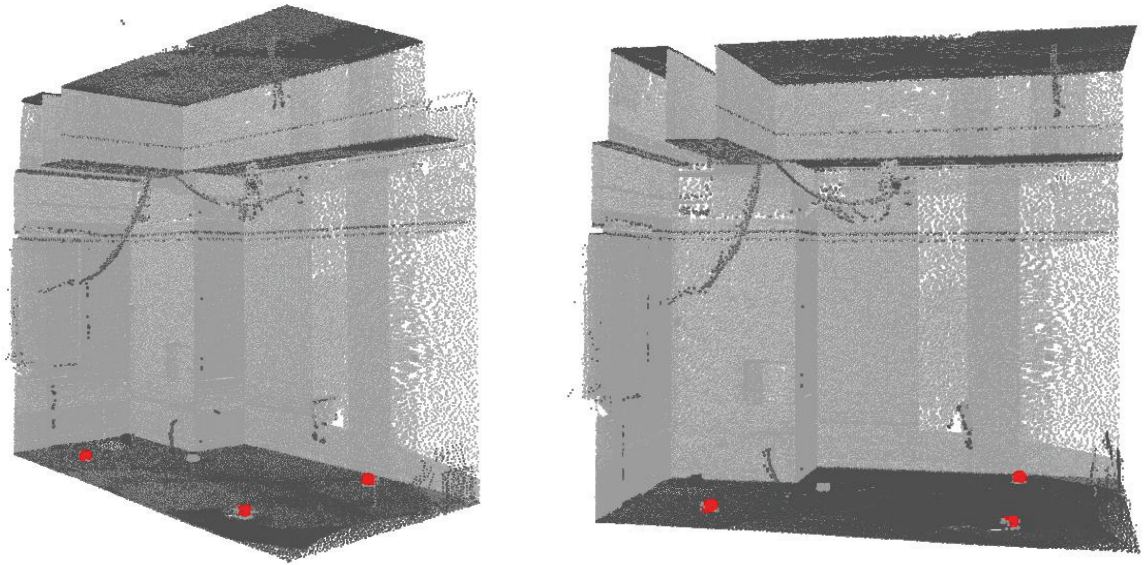


図 4.8 5か所から取得した躯体の点群データの座標統合結果
 (見やすくするために天井や床面を濃い灰色に、地墨取得用球ターゲットを赤に変更)

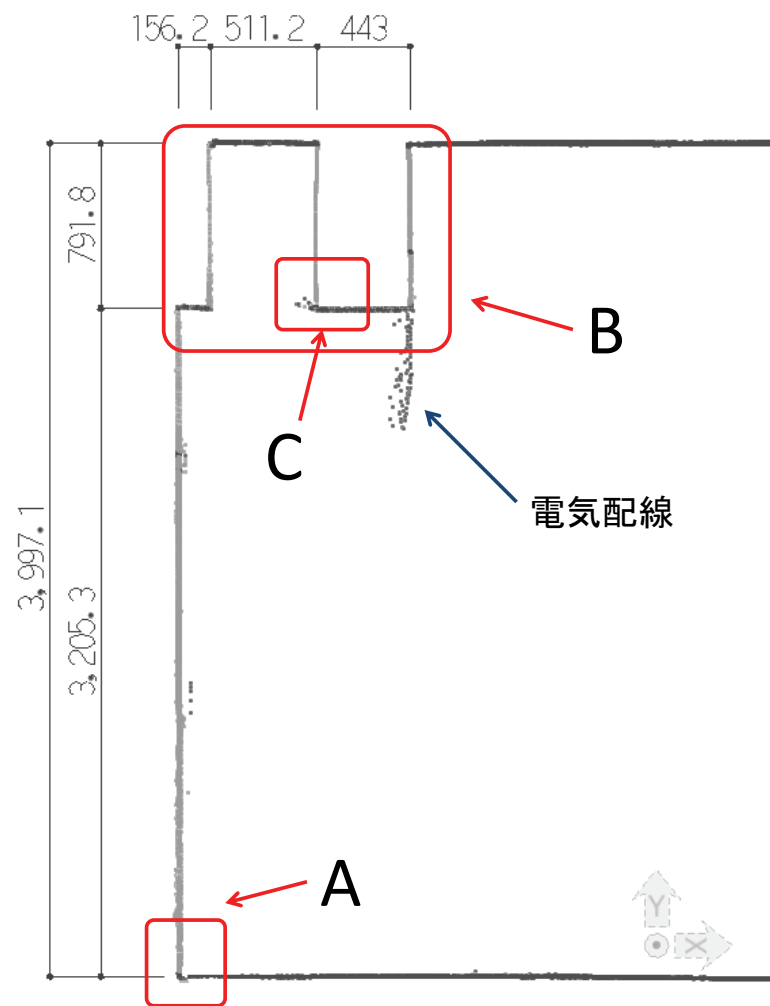


図 4.9 間仕切壁の接する部分の躯体の点群

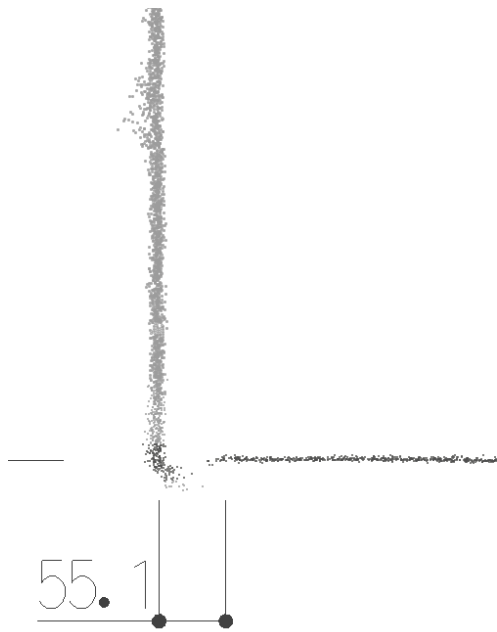


図 4.10 部分 A の凹凸部分の点群 (左) と実際の状況 (右)

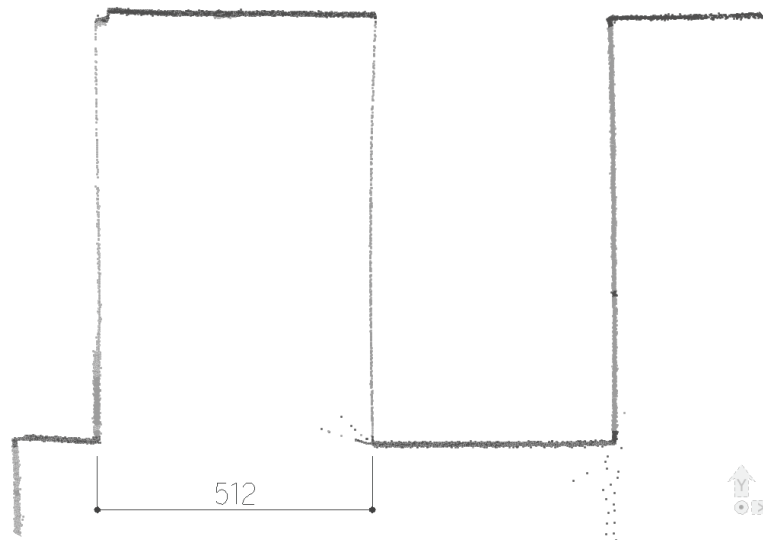


図 4.11 部分 B の梁部分の点群

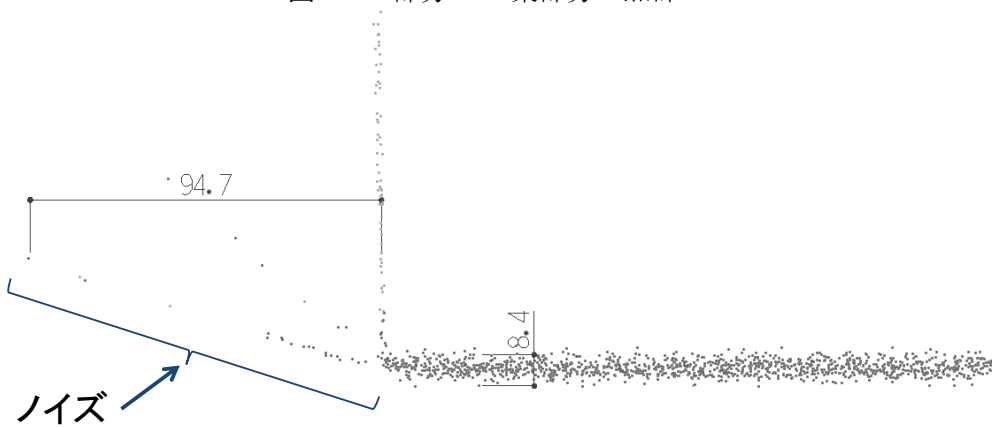


図 4.12 部分 C の梁下端部分に生じたノイズ

4.3.3. 地墨取得用球ターゲットの中心座標に基づく設計 CAD 座標系への重ね合わせ

座標統合した点群データに対して、水平補正を行った後、設計 CAD の座標系に変換する処理を実施した。点群データは計測時の 3 次元レーザースキャナーの設置位置の座標を原点とする座標系で得られる。この点群データから地墨の位置を抽出し、CAD 上の X 軸・Y 軸の向きに点群データを揃える必要がある。

本実験においては点群データに建築物の座標軸を記録するために、躯体に墨出した x、y 方向の通り芯上に地墨取得用球ターゲットを設置し、3 次元レーザースキャナーによりを計測し、点群データを取得した (図 4.13 左上)。球ターゲットを 3 次元レーザースキャナーによって計測した場合、大量のノイズが生じるため、点群データから球の表面部分 (図 4.13 左下) の点群データのみを抽出し、球の表面の点群データの座標から最小二乗法を用いて球近似を行い (図 4.13 右下)、通り芯上に設置した球ターゲットの中心座標を算出した。

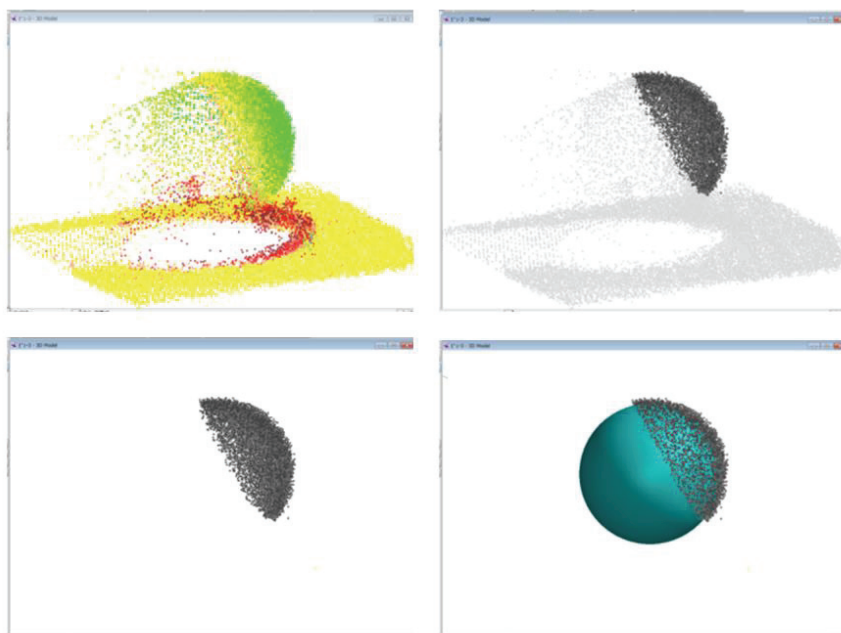


図 4.13 点群データから球ターゲットの算出

通り芯上においた 3 つの球ターゲットの座標算出結果の位置関係を図 4.14 に示す。

球ターゲットから点群データに記録された通り芯を読み取った結果、図 4.14 にあるように通り芯のなす角度が $89^{\circ} 40'$ となり 90° ではなかったため、ターゲット間の距離が長い南北方向の通り芯を採用することとし、これを CAD の y 軸に一致させるように、点群の座標を回転させた。

球ターゲットで設定した通り芯の交差角度が 90 度にならなかった原因の一つとしては、実験場所で墨出しをした際の誤差によるものと考えられる。

点群データの南北方向の通り芯を CAD 上の X 軸に回転した後の点群データを図 4.15 左に示す。この点群データは床面から高さ 1 メートル以下の位置にある点群データを見下げたものである。竣工時の図面に基づいて作成した平面図である図 4.15 右と比較すると、同じ形状になっていることが確認できた。

点群データに不要点群の除去、水平補正、点群座標の回転の操作を行い、通り芯の位置から間仕切壁が接する部分の躯体の点群データを抽出した結果を図 4.16 に示す。

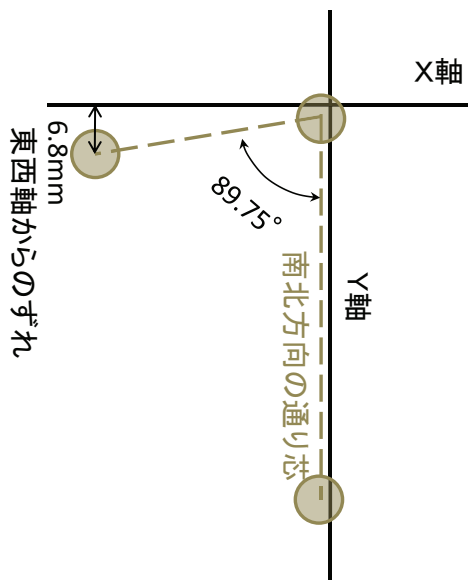


図 4.14 南北方向通り芯とY軸の位置関係の模式図

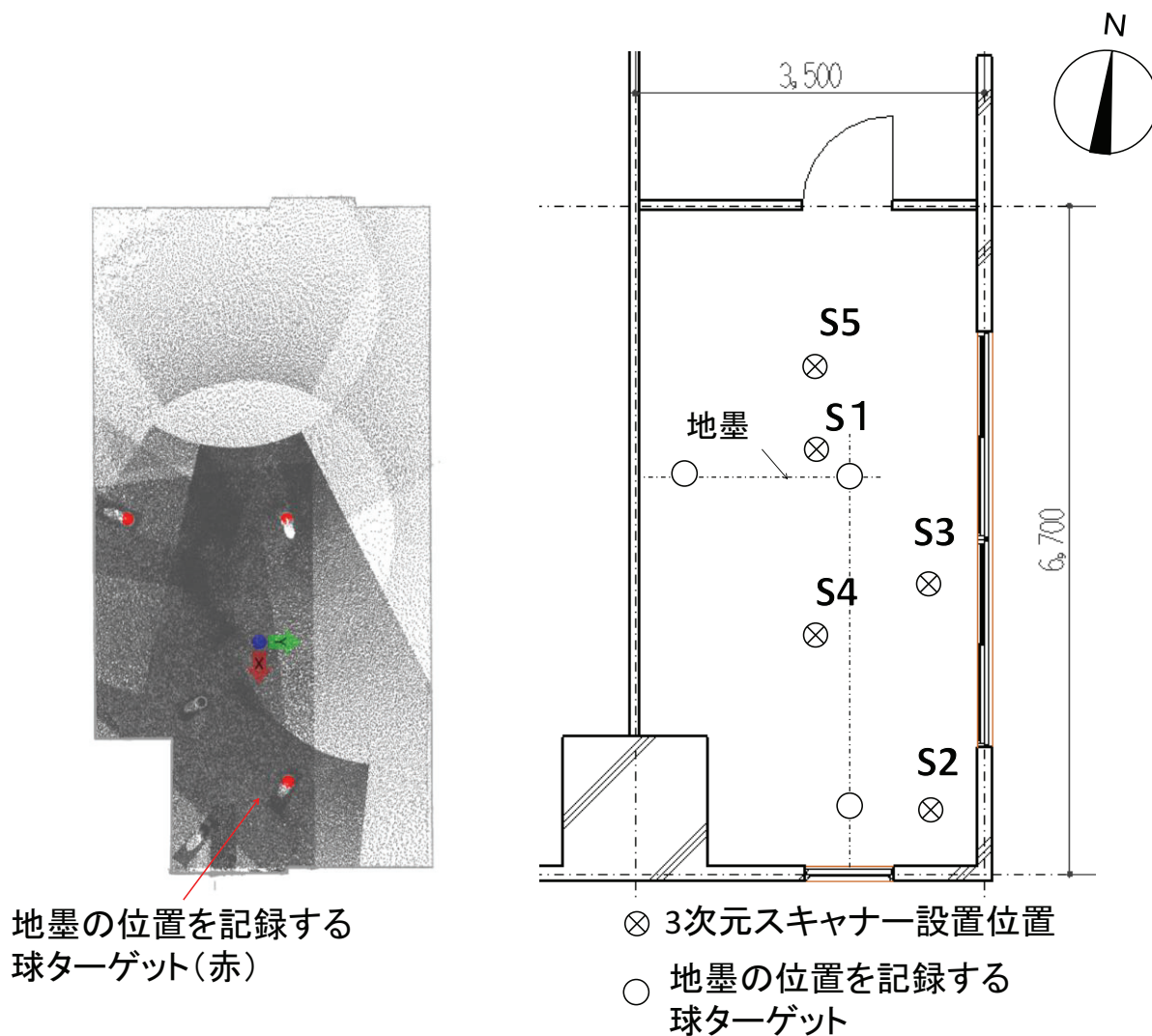


図 4.15 点群データの南北方向の通り芯をCAD上のX軸に回転した後の点群データ(左)と竣工時の図面(右)との比較

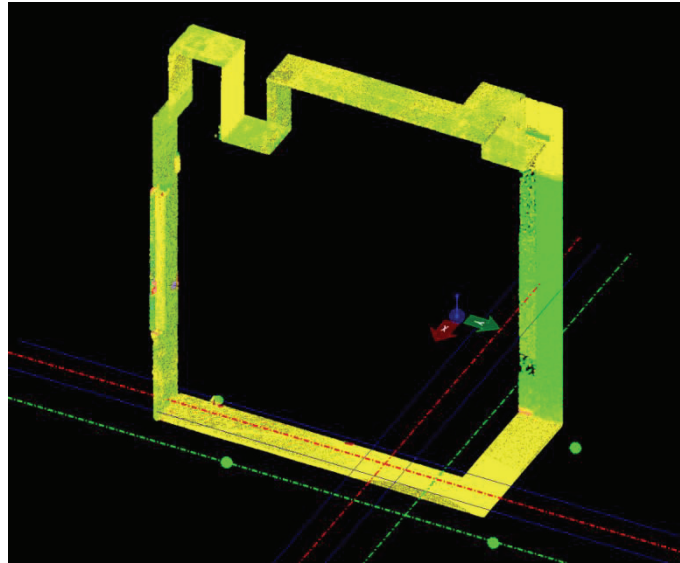


図 4.16 ポリゴン変換用の点群データ

4.3.4. 点群データの計測精度の確認

水平補正と通り芯に基づいた回転、座標の統合を実施し、図 4.16 に示す統合点群を作成した。この点群データの計測精度を確認するために、天井高さを手計測で取得し、点群データから求めた天井高さとの比較を図 4.17 に示す箇所について行った。この比較結果を表 4.5 に示す。点群データと手計測の結果とを比較するとその差は-4.2mm~+3.2mm の範囲であり、大きな差がないことが確認できた。

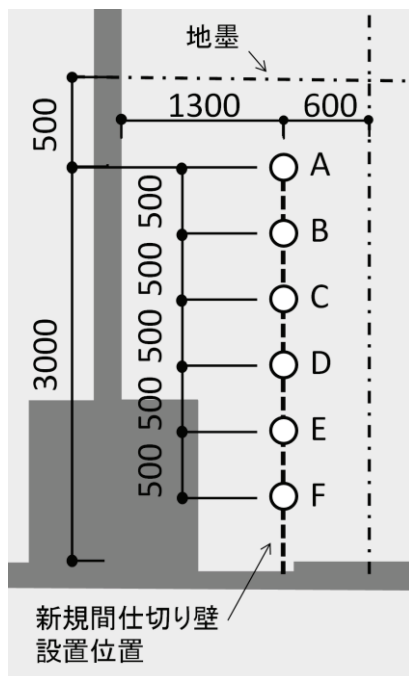


図 4.17 手計測による高さの計測位置

表 4.5 点群データから取得した天井高さ
と手計測の比較(mm)

位置	点群	手計測	誤差
A	4005.9	4005	0.9
B	4003.2	4000	3.2
C	3996.9	3998	-1.1
D	3993.8	3998	-4.2
E	3198.1	3195	3.1
F	3999.9	3997	2.9

4.4. 点群データに基づく躯体のポリゴンモデルの作成

取得した点群データを設計 CAD で利用しやすいポリゴンモデルに変換した。ポリゴンモデルの作成は、本実験では、既存のソフトウェアである GeoMagic を使用した。以下にその手順を示す。

- (1) 点群について、 $2 \text{ 個}/\text{mm}^3$ の密度で密度調整を実施した後の点群を求め、X, Y, Z 座標が記載されたデータ形式で出力する。
- (2) GeoMagic で点群データを読み込む。
- (3) 作成されたポリゴン面の凹凸を調べ多い場合は、ポリゴンの緩和処理を行う。
- (4) 作成されたポリゴン面の面数を調べ多い場合は、ポリゴン面の削減処理を行う。
25%程度までポリゴン面を削減しても、面の精度はそれほど低下しない。なお、今回の実験では、ポリゴンモデルを間仕切壁の部分に限定して作成したため、ポリゴン数がそれほど多くなかった。そのため、ポリゴンの削減処理は行っていない。
- (5) ポリゴンモデルを DXF ファイルで出力する。

以上の手順によって、作成したポリゴンモデルが、図 4.18 である。図 4.19-22 に壁・梁及び天井部分のポリゴンモデルを示す。同図で示すポリゴンモデルが有するポリゴン（3 角形）の数は、11 万 8116 個である。モデルを構成するポリゴンの一辺の大きさは、概ね 5~10mm 程度であった。

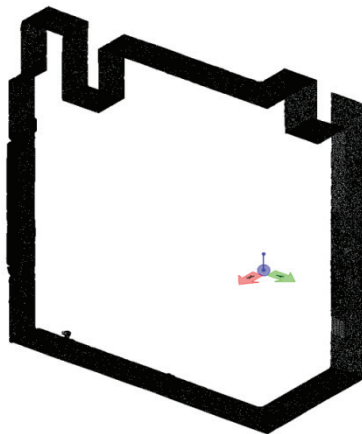


図 4.18 間仕切壁が躯体と接する部分のみの点群を抽出

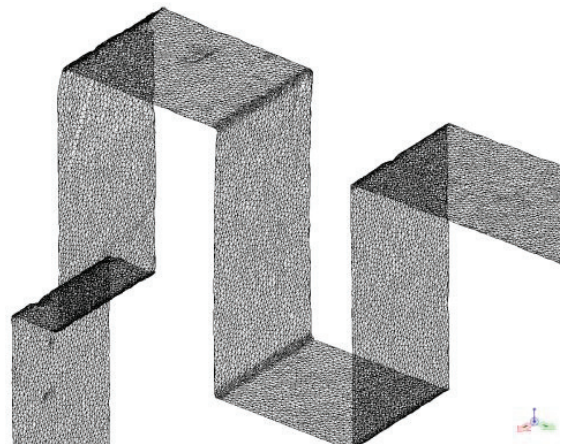
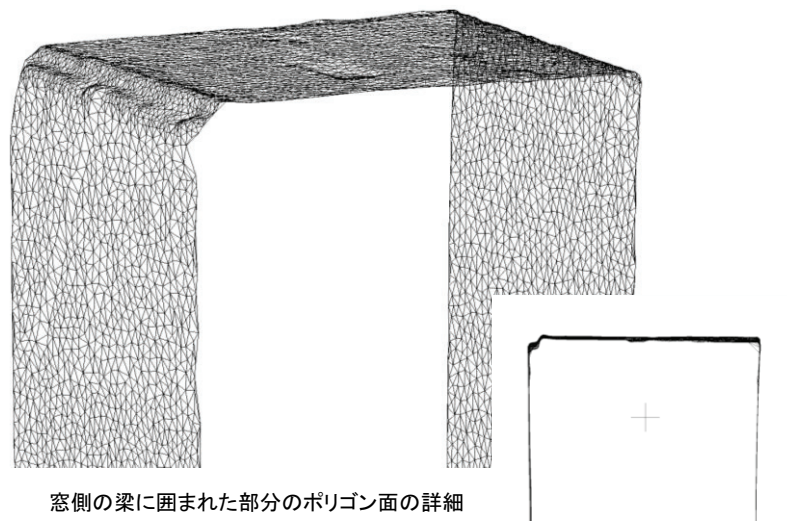


図 4.19 壁・梁・天井のポリゴンモデル



窓側の梁に囲まれた部分のポリゴン面の詳細

図 4.20 梁に囲まれた天井部分の詳細

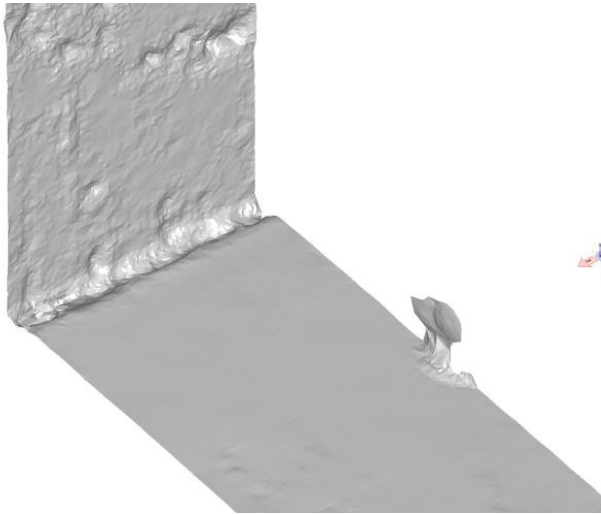


図 4.21 ポリゴンモデルの部分詳細
(サーフェス)

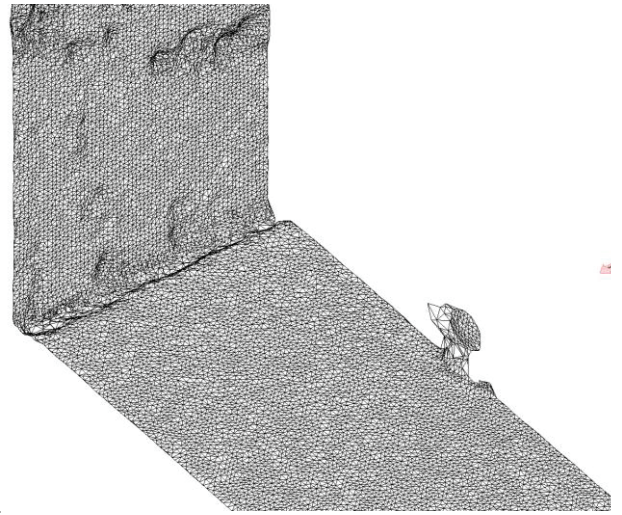


図 4.22 ポリゴンモデルの部分詳細
(ワイヤーフレーム)

4.5. ポリゴンモデルによる間仕切壁の部材のプレカット寸法の算出

4.5.1. ポリゴンモデルからの間仕切壁設置位置の躯体断面の算出

間仕切壁が接する部分の躯体の3次元形状を示すポリゴンモデルを設計CADモデルの形式であるDXFデータで作成し、設計CADに読み込み、ポリゴンモデルに基づいて間仕切壁のせっこうボードの割付図と加工図を作成した。設計においては間仕切壁の設置位置を示す面墨を配置し、その後、図4.23に示す如くランナー、スタッドとせっこうボード材を設置する部分の躯体断面をポリゴンモデルから作成した。なお、せっこうボードの割付を行った後、せっこうボードの目地位置を基準としてスタッドの位置を定めた。そのため、せっこうボードの詳細設計を行った後に、LGSの詳細設計を実施している。

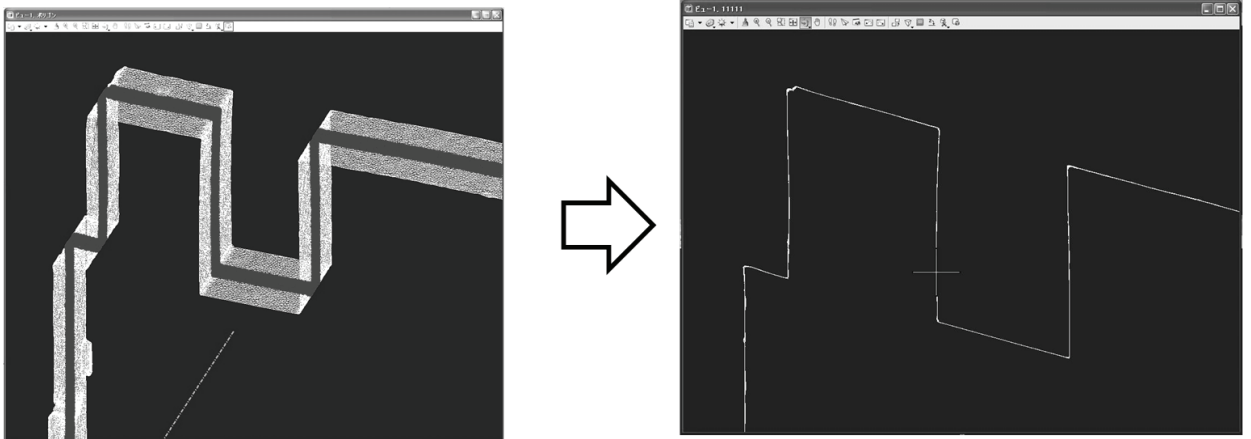


図 4.23 ポリゴンモデルからの設計断面の作成

A. せっこうボードの割付図と加工図の作成

面墨に基づいてポリゴンモデルから躯体の断面形状を求め、せっこうボード材の割付を実施した。使用した定尺材は3×6版である。

現場作業者と詳細設計の実務経験者の助言に基づいて作成したせっこうボード材の割り付け図を図4.24に示す。今回の実験では、事前加工が必要としない部材は、部材K1-B5のみであり、他のすべては取り付け前に計測に基づいた躯体の形状に合わせて、部材の形状を加工する必要がある。

る。

また、床面が水平ではないが、せっこうボード同士の目地が水平・鉛直となるよう、壁の範囲における床レベルが最も低い箇所に合わせてボードの配置開始点を定め、床レベルがそれよりも高い部分は床の高さに対応してボードの下部を切除した。そのため、床面に接するせっこうボード部材 K1-B7, K1-B4, K2-B1 については、床面が水平ではないため、その傾斜に合わせて部材の下部を左右で 2 mm 程度傾斜をつけて加工する必要が生じた。

なお、せっこうボード同士の間隙である目透しが無い条件で割付を実施した。せっこうボードは取り付け時にやすりで削ることによって容易に寸法を調整することが出来るため、躯体断面と全く同じ形状でプレカット部材を作成しても、取り付けることが出来るためである。



図 4.24 ポリゴンモデルに基づく割付図

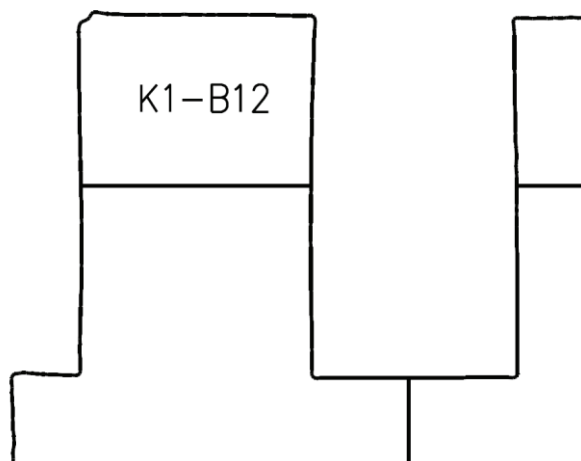


図 4.25 ポリゴンモデルに基づく割付図の一部

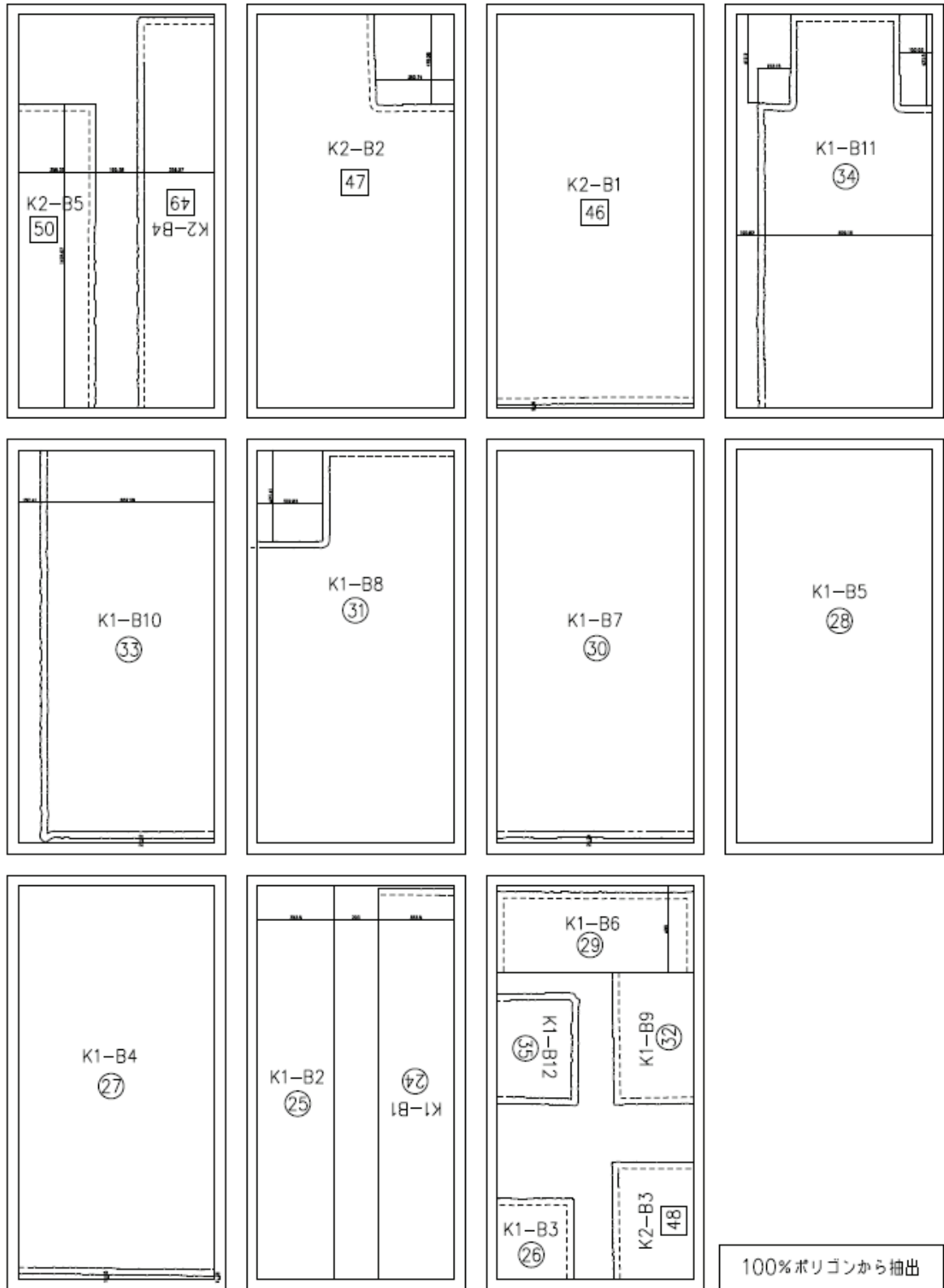


図 4.26 割付ボード部材を作成するための加工図

B. LGSのプレカット部材の設計

ポリゴンモデルから求めた設計断面からランナー、スタッドの加工寸法を求めた。今回、使用したランナーの側面高さは40mmである。スタッドをランナーに嵌め込むために、スタッドは設置位置の床と天井の距離より10mm短くなるように設計した。作成したランナーとスタッドのCADモデルを図4.27に示す。せっこうボードの目地の位置にスタッドを配置する必要があるため、せっこうボードの割付図にあわせてLGSの設置位置の決定を行っている。LGSの配置図を図4.28に示す。

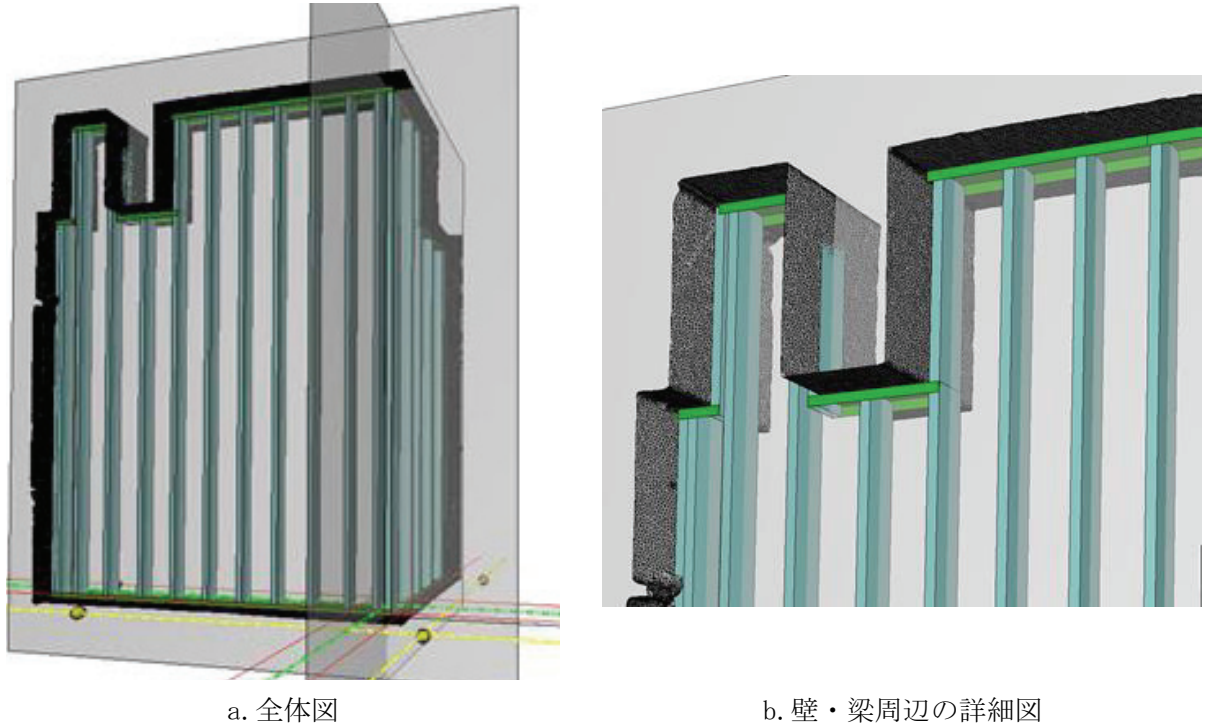


図4.27 ランナーとスタッドの設計CADモデルとポリゴンモデル

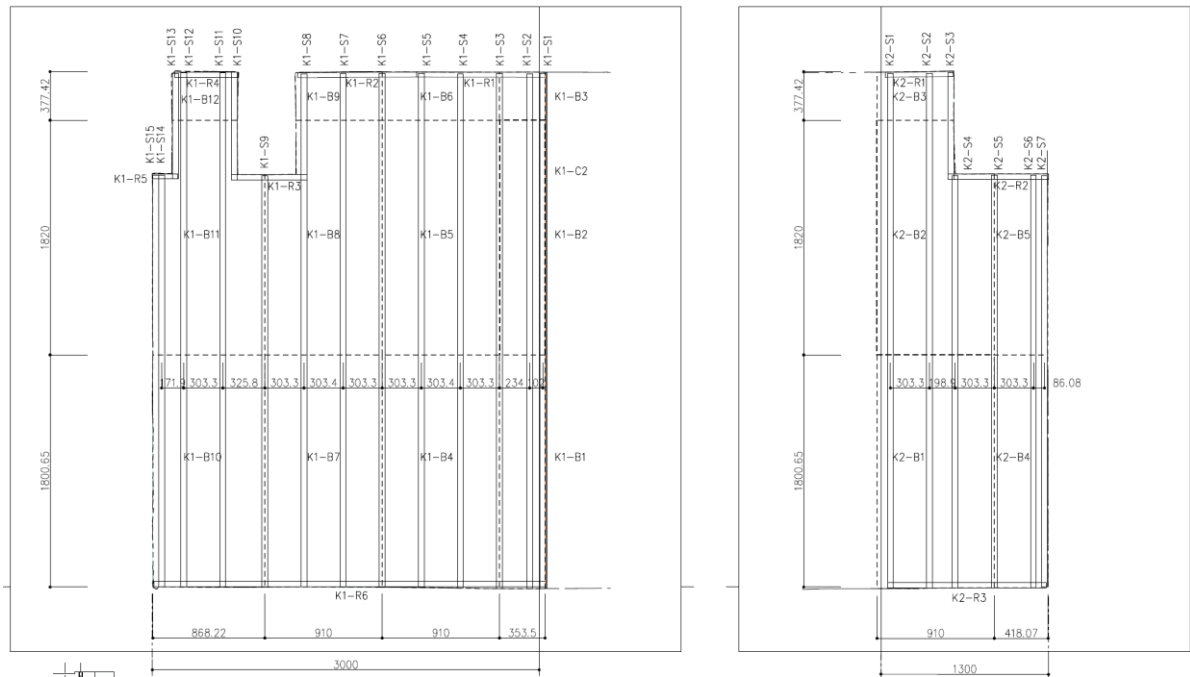


図4.28 作成したランナーとスタッドの配置図

4.5.2. 割付図と加工図の最適化計算の適用

前項の図 4.24 と図 4.26 で示した割付図と加工図の作成は、現場作業者の助言に基づいて作成したものである。今回は施工実験であり、規模も小さいため、手作業で割付図・加工図の作成を行ったが、このプレカット部材の設計は第3章で示した手法に基づいて作成したシステムにより自動的に作成することを目指している。本項では、第3章で示した手法を用いて、今回の壁面へのせっこうボード材の割付図と加工図の最適化を実施した。

A. ポリゴンモデルから作成した設置断面からの配置領域の作成

ポリゴンモデルから切り出した躯体の断面形状は、鉄筋コンクリートの施工誤差により多角形状をしている。そのため、まず断面形状を示す多角形を内包する直角多角形を図 4.29 に示す如く作図した。この直角多角形は表 4.6 に示す如く、壁 1 の場合もとの直角多角形より 0.076 m² 大きい、元の面積に対しては 1/100 以下の変異である。図 4.32 に間仕切壁 1 の配置領域と断面形状の違いを観察できる部分詳細図を示す。

表 4.6 壁 1・2 の断面の面積と配置領域の面積 (m²)

	壁 1	壁 2
断面の面積	11.6901	4.7294
配置領域の面積	11.7661	4.7602
面積の差	0.076	0.030

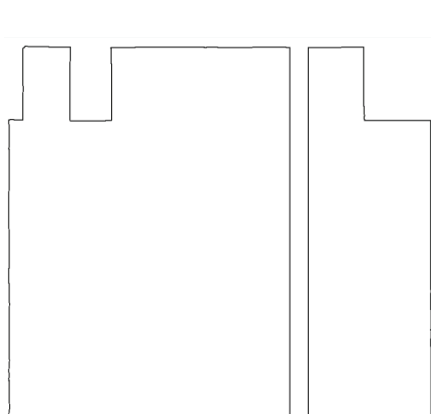


図 4.29 ポリゴンモデルから切り出したせっこうボード設置位置の断面形状

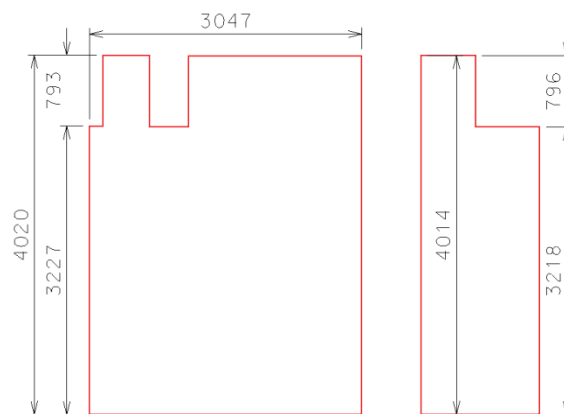


図 4.30 ポリゴンモデル断面から作成した間仕切壁 1(左)と壁 2(右)の配置領域

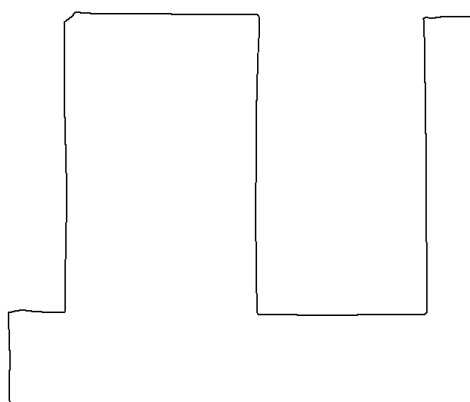


図 4.31 ポリゴンモデルから切り出したせっこうボード設置位置の断面形状の詳細

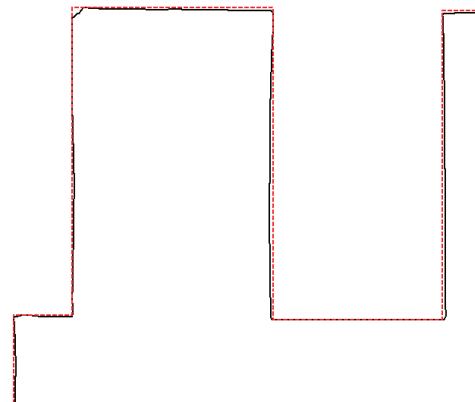


図 4.32 間仕切壁 1(左)の配置領域と断面形状の違い (赤線：配置領域 黒線：断面形状)

B. 2面の配置領域への割付

本施工実験で作成する間仕切壁は2面あり、それぞれの壁の外側にせっこうボードにより構成される壁面が存在する。この2面の壁面の配置領域は、目地の位置を連動させる必要が本工事ではないため、それぞれの壁面に割付を実施できる。しかしながら、割付図の作成は独立して行えるが、割付ボード部材の作成では、共通の定尺ボード材から作成するため、2面分の割付ボード部材を効率的に切り出す加工図の作成が必要である。そのため、以下の手順で割付図と加工図の作成を実施する。

- (1) 間仕切壁1と間仕切壁2の配置領域において、それぞれ割付図を頂点に基づいて作成する
- (2) 間仕切壁1の25通りの割付図と間仕切壁2の9通りの割付図から1組ずつペアを作り、それぞれの割付図を構成する割付ボード部材を同一のグループとして、加工図の作成を行う
- (3) 25×9通りの割付図と加工図を作成し、残材量の少ない割付図と加工図を選ぶ

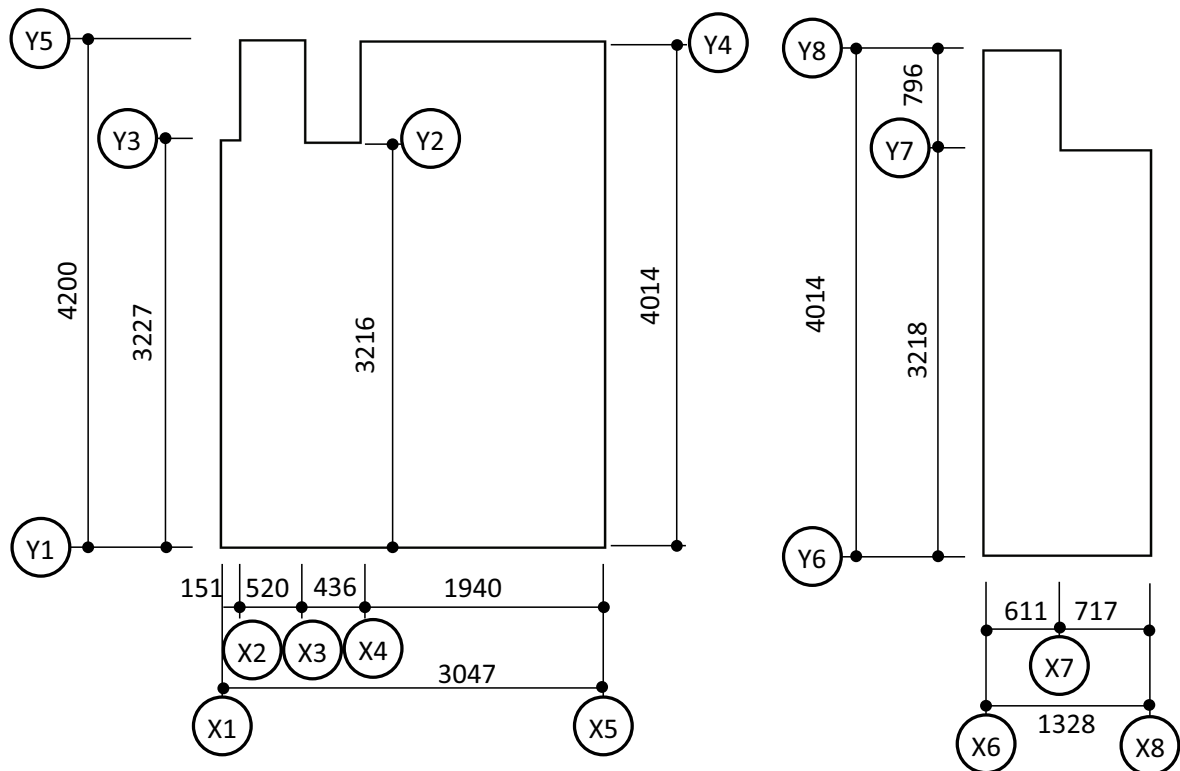


図 4.33 壁1と壁2における配置開始点

C. 割付図と加工図の作成結果

図 4.34 に示す如く、壁1には配置開始点が25点、壁2には9点存在したため、割付図はそれぞれ25通りと9通り作成した。加工図の作成では、壁1と壁2の割付ボード部材を合わせて加工図の作成を行った。壁1と壁2の割付図を総当りで組合せたため、25×9通りの割付ボード材群の加工図の作成を実施した。その結果、図 4.36 左に示すような割付図の組み合わせが225案、得られた。また、それぞれの組み合わせに関して加工図を作成した例の一部が図 4.36 右である。

本論文での割付図と加工図の最適化計算に関しては、壁1と壁2の割付図を総当りで組合せ、計算を実施したが、現実の施工においては、目地高さを揃えるなど、残材量より優先すべき禁則が加わるため、計算すべき割付図の組み合わせはより少なくなる。

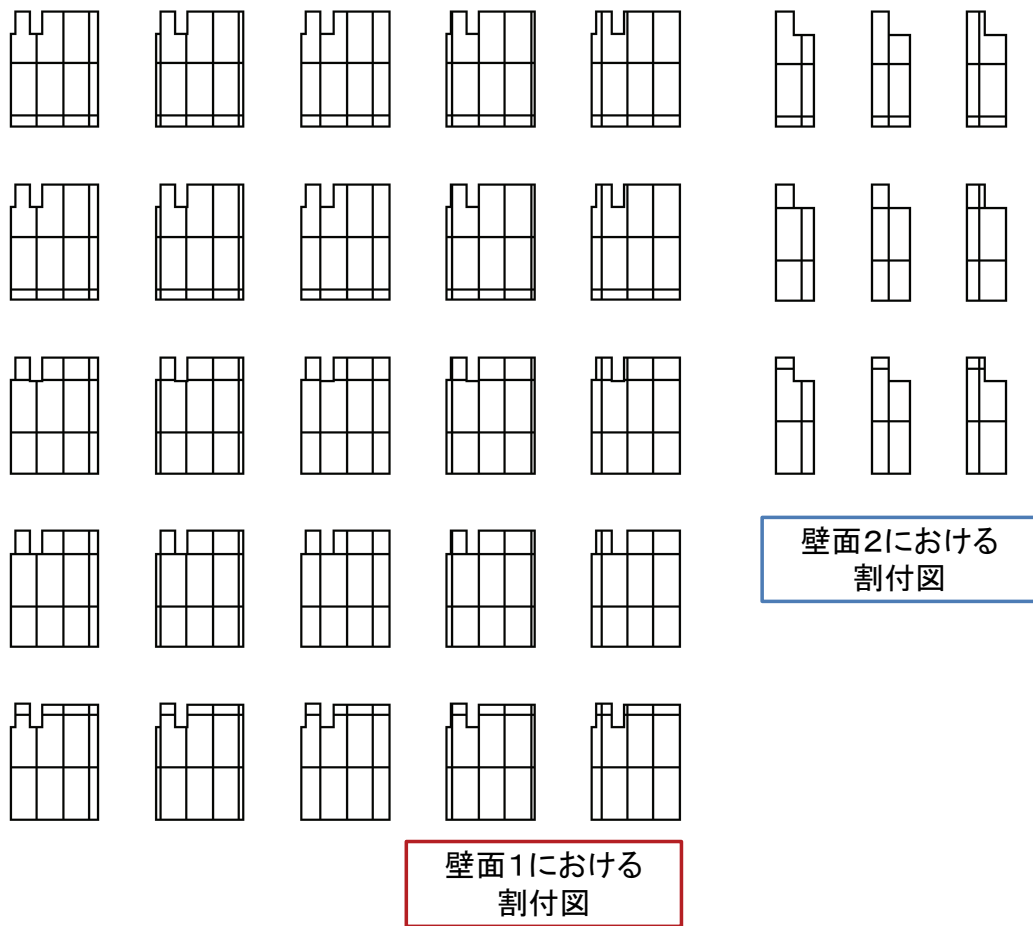


図 4.34 間仕切壁 1 の 25 通りの割付図と間仕切壁 2 の 9 通りの割付図

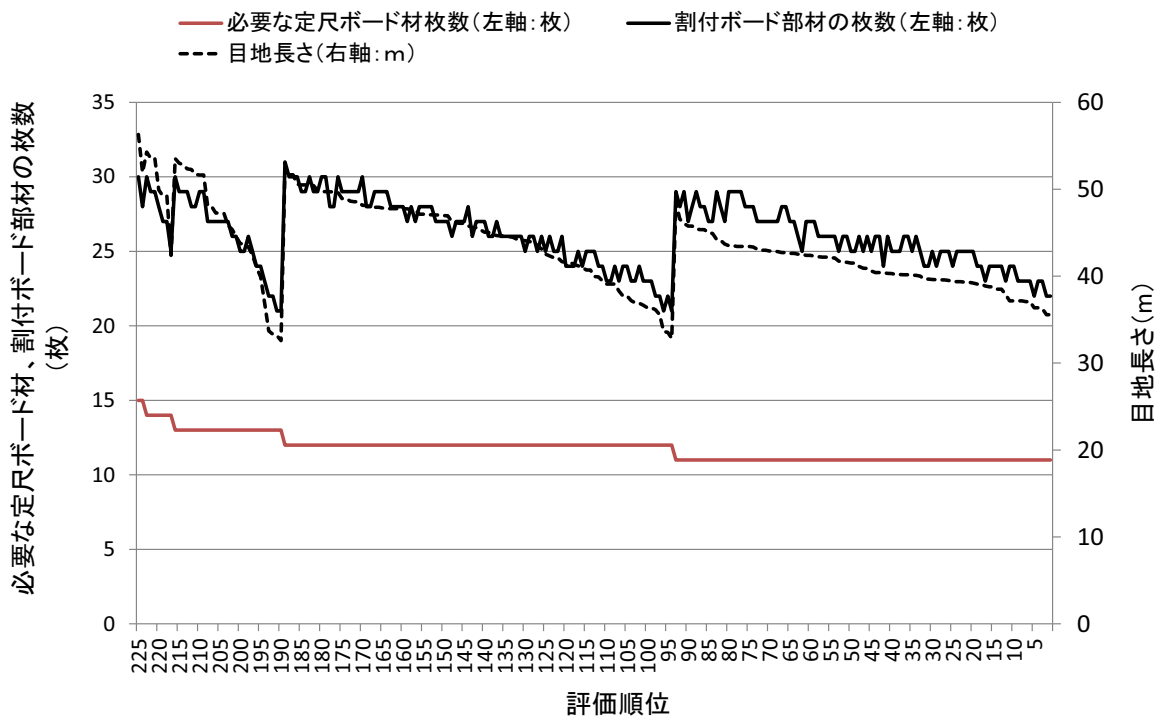


図 4.35 間仕切壁 1・2 の割付図と加工図の組み合わせごとの計算結果
 (注：評価順位は必要な定尺ボード材枚数を第一位で、目地長さを第二位で並び替えたもの)

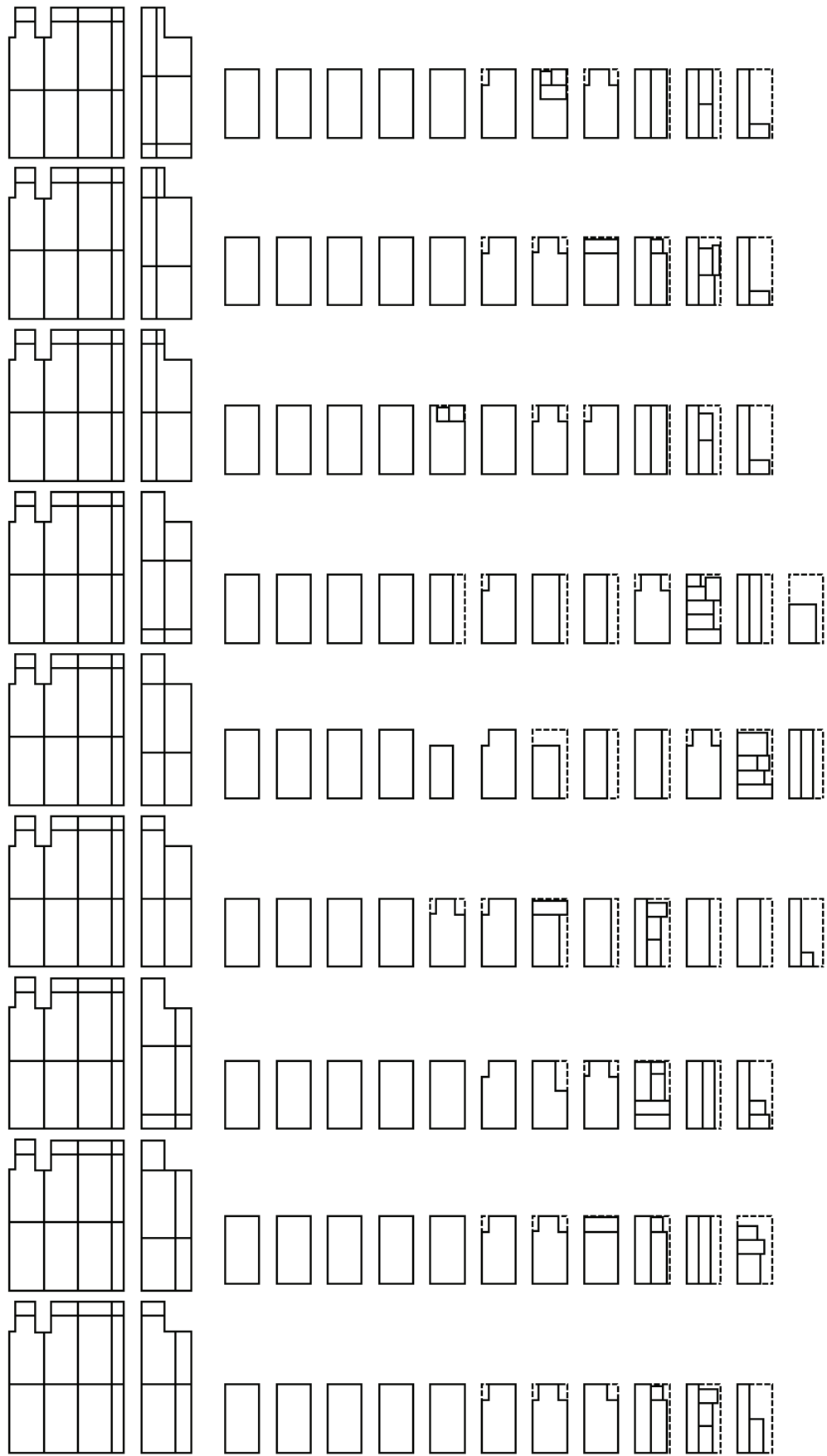


図 4.36 作成した割付図と対応する加工図の例

D. 割付図と加工図の作成結果の考察

間仕切壁 1・2 の割付図と加工図の全ての計算結果を図 4.35 に示す。計算の結果、残材量が最小化された割付図は 11 枚の加工図から成り、93 通り確認できた。そのうち、目地長さが最も短い案が図 4.37-38 に示す如く、2 案あった。この時の残材量は 1.69 m²であり、使用し定尺ボード材に対する残材量の比率（残材率）は 9.28%であった。また、間仕切壁を設置する躯体断面を直角多角形に変換した際に生じた差が表 4.6 に示した如く 0.106 m²であるため、この割付図における加工時において生じる残材量は約 1.8 m²であり、最終的な残材率は 9.86%であった。

表 4.7 最適化した割付図と加工図の結果

必要な定尺 ボード材枚数	割付ボード部 材の枚数	目地長さ	残材量
11	17	35.5m	1.69 m ²

以下に最適化した二通りの割付図と加工図の結果を示す。

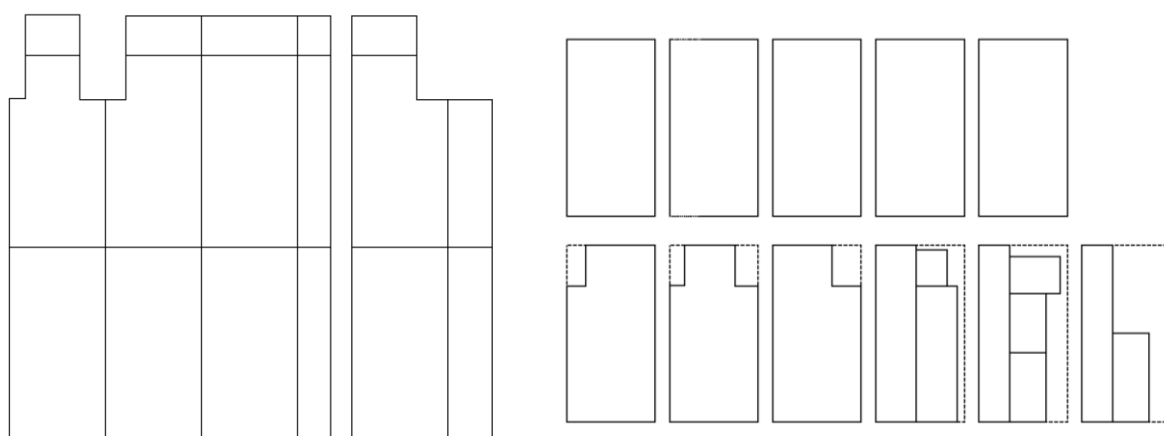


図 4.37 残材量が最小となる割付図の中で目地長さが最小となった割付図と加工図の設計案 1

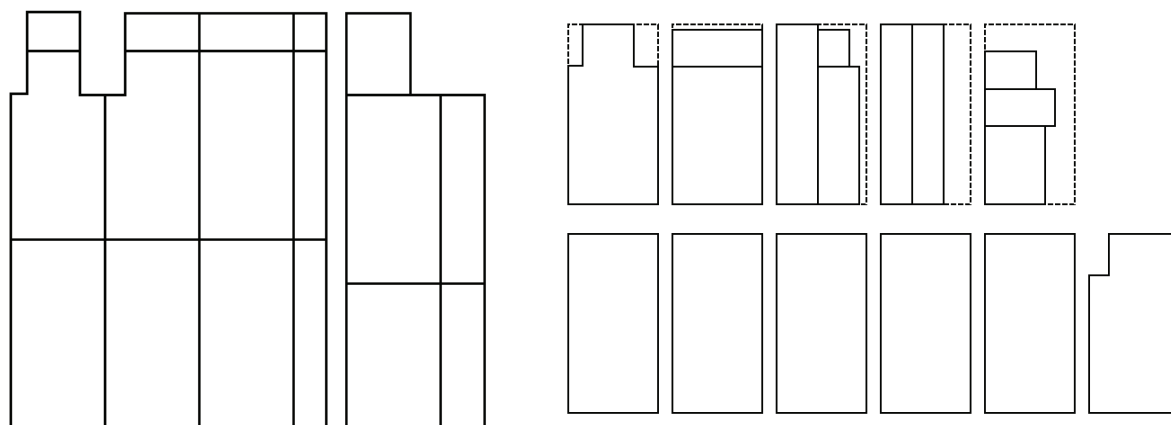


図 4.38 残材量が最小となる割付図の中で目地長さが最小となった割付図と加工図の設計案 2

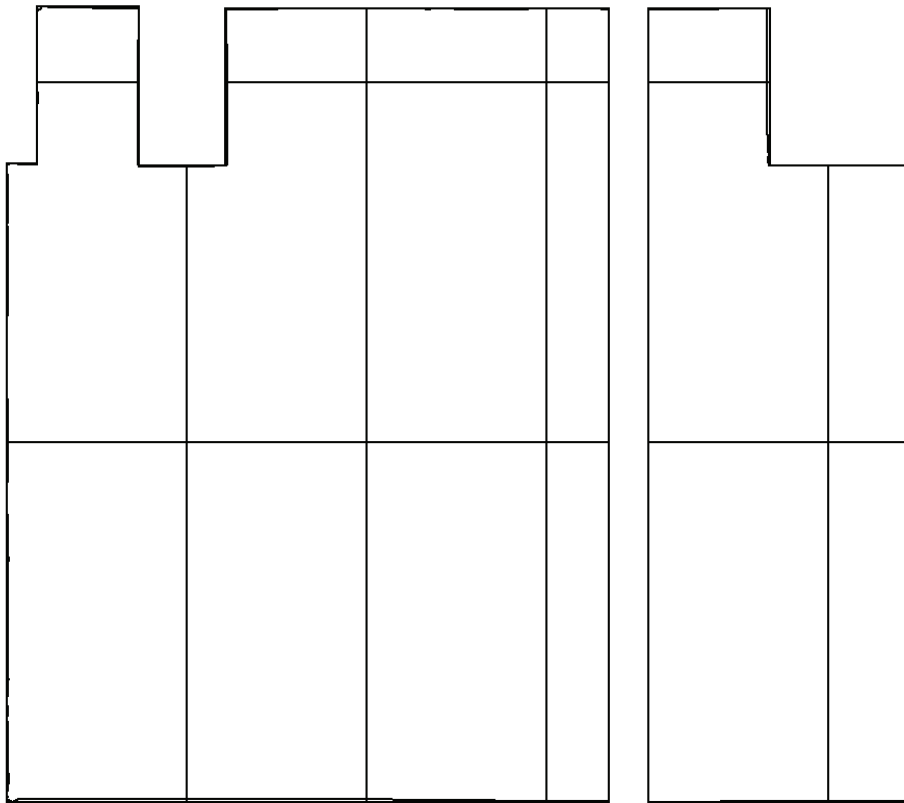


図 4.39 設計案 1 の割付図と躯体断面

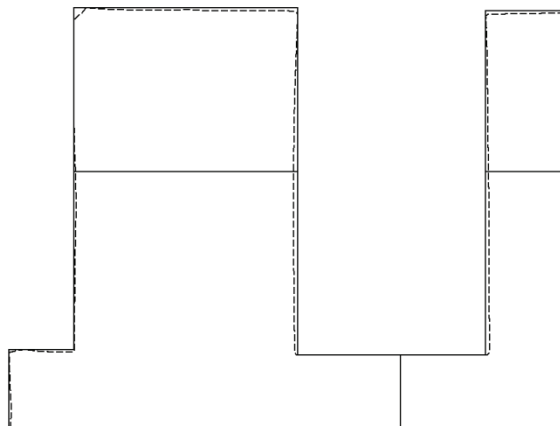


図 4.40 最適化された壁 1 の割付図の詳細と
躯体断面

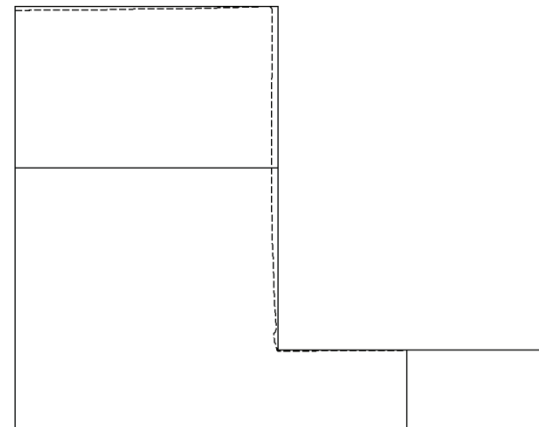


図 4.41 最適化された壁 2 の割付図の詳細と
躯体断面

E. 現場作業による設計結果と割付図と加工図の最適化手法による設計結果の比較

割付図と加工図の最適化手法により作成した設計案のうち図 4.37 に示した設計案 1 が、現場作業者の助言に基づいて作成した案に類似する案になっている。この案は、間仕切壁 1 では X1,Y1、間仕切壁 2 については X6,Y6 から割付を実施したものである。この割付図と加工図は壁 1、2 とともに最下段に定尺ボード材が使用でき、また、目地の高さが 2 つの壁でそろっている案であり、故に設計案 1 が設計案 2 より望ましい案であると言える。図 4.42 が現場作業による割付図と加工図の設計結果であり、図 4.43 が割付図と加工図の最適化手法により求めた設計案 1 である。

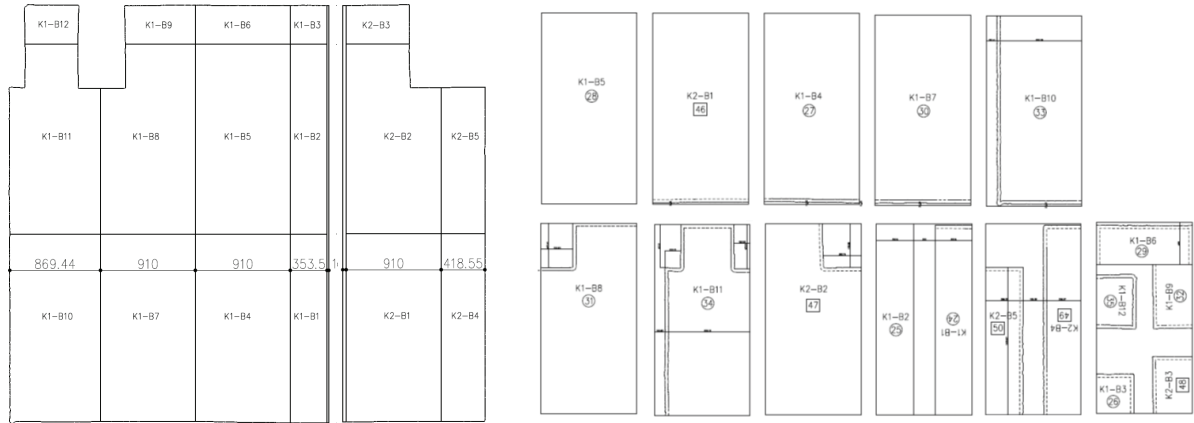


図 4.42 現場作業による割付図と加工図の設計結果

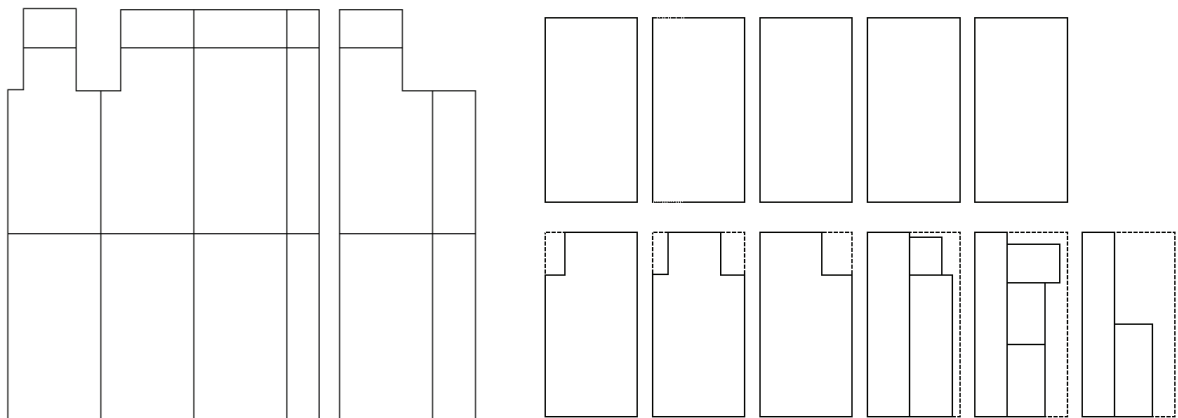


図 4.43 割付図と加工図の最適化手法による設計結果

4.6. プレカット部材の加工・取り付けと設計寸法の妥当性の検証

4.6.1. プレカット部材の作成

第4章5節1項において示したランナーとスタッドの3次元CADモデルから加工寸法を求め、軸組材のプレカット部材の作成を行った。スタッドの加工はプレカット寸法に基づいて、軸組工により加工を行った。このスタッド及びランナーについては、写真4.8に示す如く、作業場の近くにおいて前日に切断した。部材の切断は通常の作業よりも慎重に行い、ランナーやスタッドのカットリストに示された寸法通りに切断されるようにした。切断精度は概ね±1mm程度と考えられる。

また、せっこうボードに関しても加工図に従ってせっこうボードの加工を行った。その結果を写真4.10、11に示す。なお、せっこうボードの加工では、加工図を実寸大でプロッターにより出力し、この印刷した型紙をせっこうボードに貼り付け、印刷された線に従って、ボード工が手作業により加工を実施している。しかしながら、この加工作業はNC加工機のような機械化された加工手法により加工することを想定して、研究を実施している。



写真 4.8 スタッドの切断の様子



写真 4.9 プレカットされたスタッド

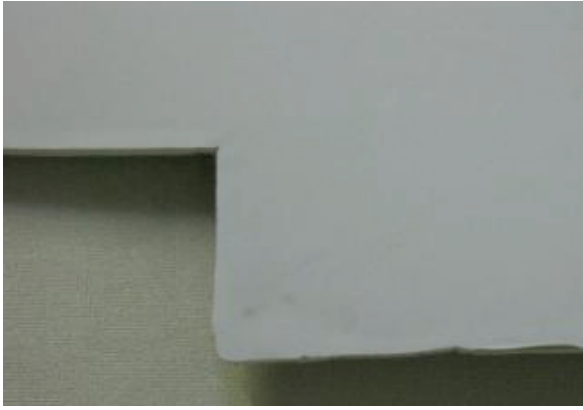


写真 4.10 プレカットしたせっこうボード

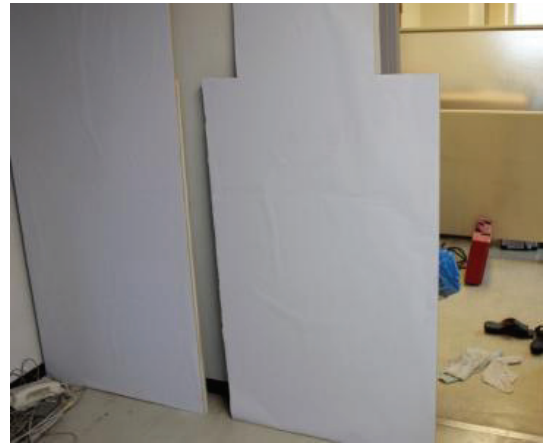


写真 4.11 プレカットしたせっこうボード

4.6.2. スタッドとランナーの隙間に基づく、スタッドの加工寸法の妥当性の検証

事前に加工した軸組材を施工箇所に設置し、写真4.12に示す壁面の下地をLGSにより作成した。写真4.13に示す如く、梁側面の型枠のたわみで梁側面が孕んでおり、スタッドと梁側面に隙間が生じた。この隙間は、14.5mmであるが、図4.44に示す如く、梁側面に触れるスタッドを鉛直の向きで設置するために、プレカット部材の設計時点から予め設定された逃げによって出来た隙間である。設計時点では11.8mmの隙間となっていた。



写真 4.12 LGS の出来形



写真 4.13 スタッドと梁に生じた隙間の様子

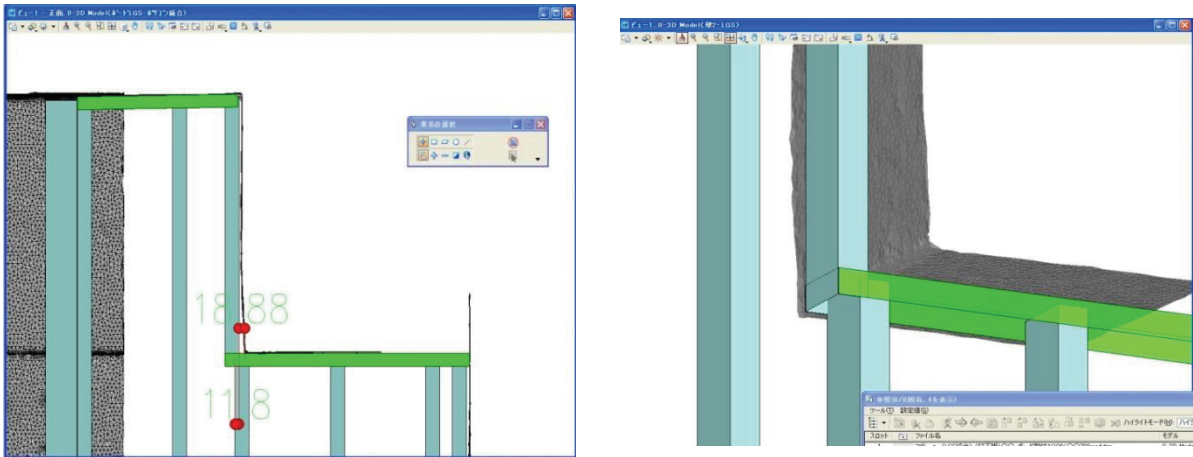


図 4.44 設計 CAD におけるスタッドと梁に生じた隙間の様子

スタッドの取り付け後、ランナーとスタッドの隙間を実測した結果が図 4.45 である。なおここでの隙間とは、図 4.46 における Y_1 である。使用したランナーの側面の高さは 40mm であり、スタッドのはめ込みの効率を良くするために 10mm 短く設計しても問題ないと判断した。そのため、設計時にはランナーとスタッドの隙間は 10mm である。

実験の結果ではランナーとスタッドの隙間の実測値は表 4.8 に示す如く平均値 4.3 mm と、設計値を 5 mm 程度下回った。隙間が当初の設計よりも 5mm 短くなった原因は、床や天井の不陸にランナーが完全には追随していないためと考えられる。写真 4.14 は微小な凹凸のある床にランナーを取り付けた状況を示している。床の凹凸により生じたランナーと床の間の隙間が観察できる。



写真 4.14 床の凹凸により生じたランナーと床の間の隙間と床の形状に合わせて加工したため隙間なく取りつくせこうボード

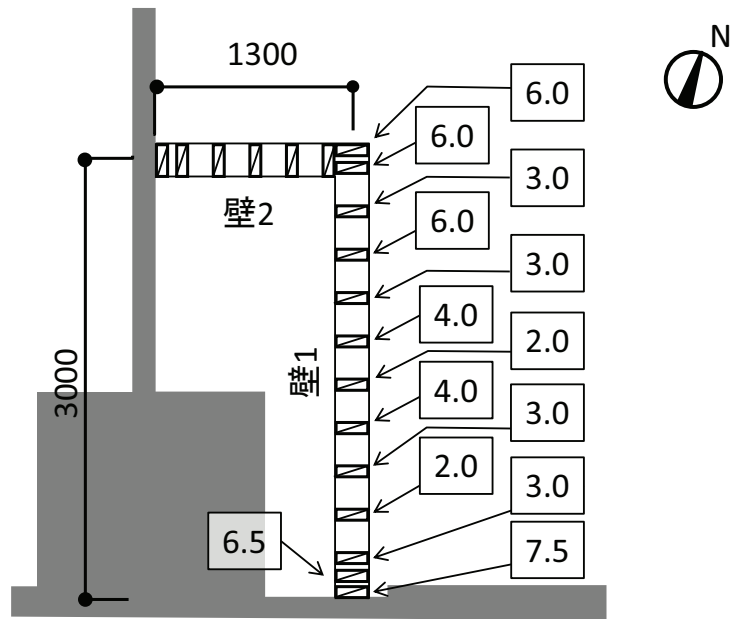


図 4.45 設置したスタッドとランナーの隙間の実測結果 (mm)

表 4.8 設置したスタッドとランナーの隙間

平均	4.31mm
個数	13
分散	3.17
標準偏差	1.78mm

表 4.9 設置したスタッドとランナーの存在範囲

範囲	長さ(mm)
$\mu + 3\sigma$	9.65
$\mu + 2\sigma$	7.87
$\mu + 1\sigma$	6.09
μ	4.31
$\mu - 1\sigma$	2.53
$\mu - 2\sigma$	0.74
$\mu - 3\sigma$	-1.04

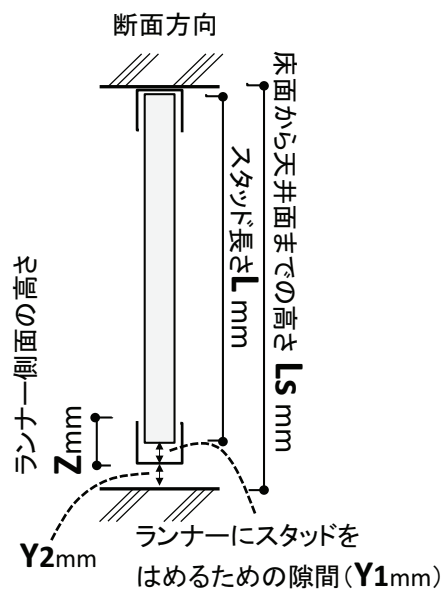


図 4.46 スタッドとランナーの隙間Xの位置

4.6.3. せっこうボードのプレカット部材の加工精度の検証

せっこうボードの加工においては、原寸図を型紙として使用し、せっこうボードに張り付けそれに沿って部材の切り出しを行い、更にヤスリ掛けによって原寸図に忠実に加工した。なお、印刷には、A0判インクジェットプリンターを使用した。印刷寸法の精度は、プリンターの紙送り寸法の誤差、及び印刷時点とボードの加工時点での伸び縮み誤差がある。この値は、概ね1～2mm程度あると考えられる。

本実験で作成した間仕切壁は高さが約4000mmで3×6版のせっこうボードを縦使いで割り付けているため、せっこうボードは上部、中部、下部の3段で割り付けている。写真4.16は上部のせっこうボードを取り付けている様子である。写真4.17、18、19に示す如く、プレカットしたせっこうボードは躯体にピッタリ納まっていた。

取り付けにおいては既存躯体の壁側から下部のボードを全て取り付けしたが、角部に取り付けるコーナー材とせっこうボードの間に1mm隙間が生じた。また、上部のせっこうボード取り付けにおいては、せっこうボードの高さ方向の寸法が1～2mm程度大きく、そのままでは嵌らなかったため、せっこうボードの短辺をヤスリで削り、取りつけた。この誤差の原因は、せっこうボードの寸法製造誤差(約±2mm)、原寸図の印刷による用紙の伸び縮みおよびプリンターヘッドの位置の誤差(約±1mm～2mm)、躯体の計測誤差(約±2mm)の3つの原因が存在すると考えられる。せっこうボードの寸法製造誤差や原寸図の誤差は、せっこうボードの加工を行った後に再度、加工寸法の確認を実施することで取り除くことが可能である。また、今回使用した3次元レーザースキャナーの公称誤差は6mmであるが、高密度計測によって点群の誤差を最小化することが可能であることを確認できた。技術進歩によってより計測精度の高い3次元レーザースキャナーが登場することによって計測誤差に関しても、解決すると考えられる。

せっこうボードのプレカット部材により作成した間仕切壁を写真4.18、19に示す。この間仕切壁は水平の向きに補正した点群データを用いているため、写真4.20、21に示す如く、下部のせっこうボードを設置した後で、上辺の目地を確認すると水平になっていた。写真4.22、23、24には同一箇所の各施工段階の間仕切壁の状況を示す写真を示す。図4.47に示す割付図通りの施工が行われていることが確認できた。また、南側の躯体壁面と床面の取り合い部分がへこんでいたが、図4.48に示す如く、その形状を点群データとして正確に取得し、ポリゴンモデルに変換しても形状が失われていないことが確認できた。



写真4.15 せっこうボードのプレカット部材の作成の様子



写真 4.16 天井に接するボードの取り付け



写真 4.17 梁周辺のせっこうボードの状況



写真 4.18 ボード材の出来形

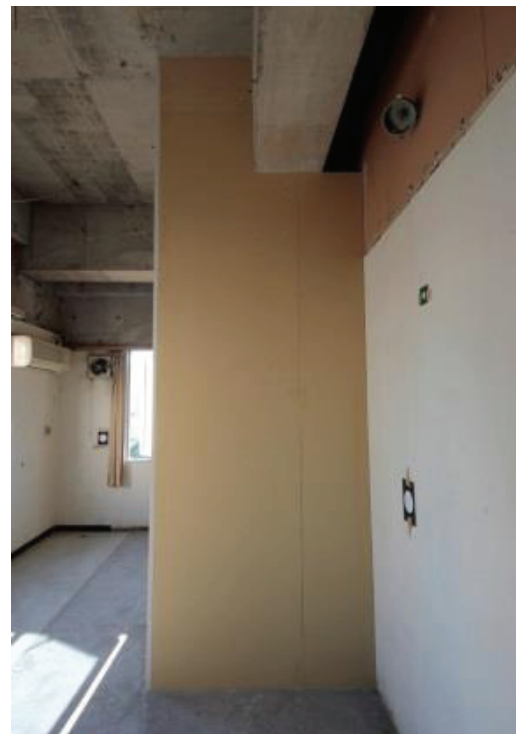


写真 4.19 ボード材の出来形 2



写真 4.20 水平方向の目地の様子 1

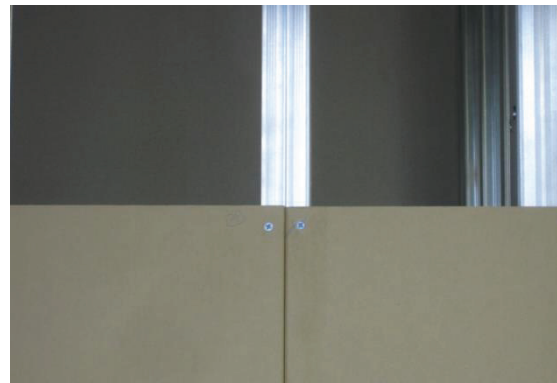


写真 4.21 水平方向の目地の様子 2



写真 4.22 取り付け前の躯体

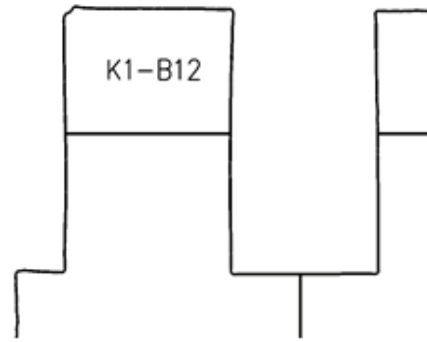


図 4.47 該当部位のせっこうボードの図面



写真 4.23 LGS 取り付け後の状況



写真 4.24 ボード材取り付け後の状況

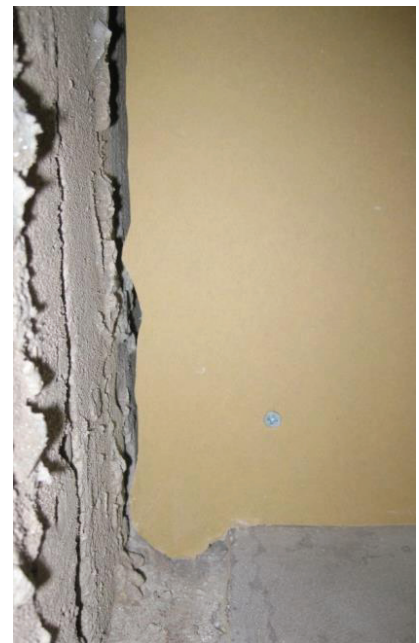
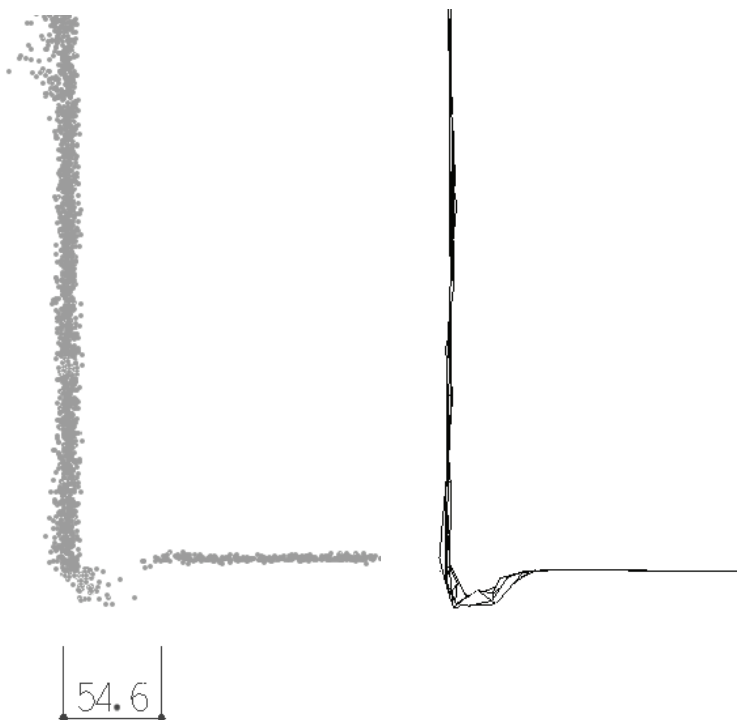


図 4.48 躯体の凹凸に合ったせっこうボード材の設置
 (左：点群データ 中央：ポリゴンモデル 右：躯体の凹凸に合ったボード材)

4.6.4. 差分分析によるスタッドとせっこうボードの設置位置の精度検証

LSGとせっこうボードのプレカット部材を取り付けたのち、各取り付け作業が完了した時点で、3次元レーザースキャナーにより、取り付け部材の計測を実施した。その後、取得した点群データを躯体の点群データと比較する差分分析を適用し、新たに設置された部材の点群データの抽出を行う。以下に本項における3次元計測と差分分析の手順を示す。

- (1) LGS取り付け作業完了後に3次元レーザースキャナーにより出来形の計測
- (2) LGSと躯体の点群データの差分分析によりスタッドの点群を抽出
- (3) LGSの点群を設計CADに読み込み、設計CADモデルと比較による設置位置の確認
- (4) せっこうボードの取り付け作業完了後に3次元レーザースキャナーにより出来形の計測
- (5) せっこうボードと躯体の点群データの差分分析によりせっこうボードの点群を抽出
- (6) せっこうボードの点群を設計CADに読み込み、設計CADモデルと比較による設置位置の確認

表4.2に示した如く、12/15にスタッドの設置位置の確認を目的として、LGS取り付け作業の完了後の出来形計測を実施し、12/17にせっこうボードの設置位置の確認を目的として、せっこうボードの取り付け完了後の出来形計測を実施した。施工箇所以外の鉄筋コンクリート躯体の形状に変異はないので、取り付けスタッドとせっこうボードを中心に範囲を絞って計測を実施した。故に、それぞれ1.5時間と2時間程度で計測が行えた。

以下の表4.10と表4.11に計測位置ごとの点群数を示す。

鉄筋コンクリート躯体を計測した点群データを図4.51に示す。この躯体の点群データにスタッドの出来形を計測した点群を重ね合わせたデータを図4.52に示す。躯体の点群を赤、スタッドの点群を青で示している。また、躯体の点群データにせっこうボードの出来形を計測した点群を重ね合わせたデータを図4.53に示す。躯体の点群を赤、スタッドの点群を緑で示している。

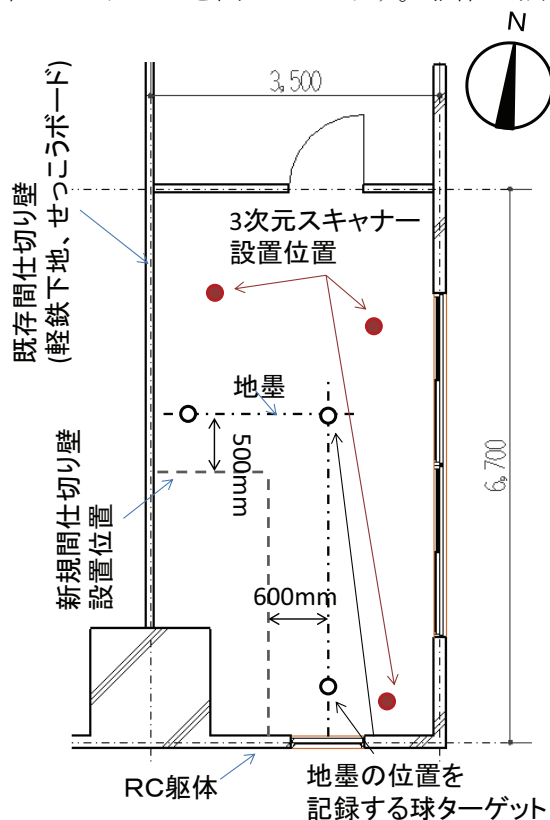


図4.49 LGS取り付け作業完了時点における計測位置

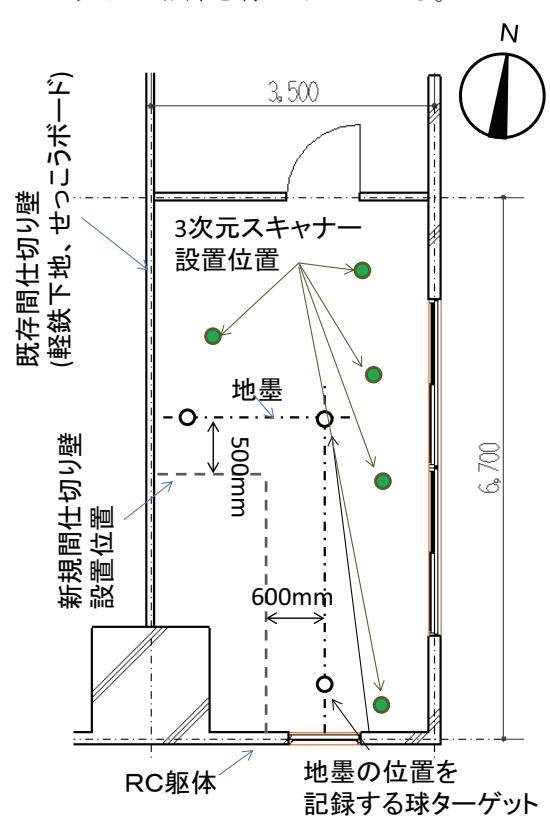


図4.50 せっこうボード取り付け作業完了時点における計測位置

表 4.10 躯体の点群数

計測箇所	点群数
躯体 1	2645938
躯体 2	3126787
躯体 3	4499767
躯体 4	7509244
躯体 5	725492
合計	18507228

表 4.11 スタッドの点群数

計測箇所	点群数
スタッド 1	1560972
スタッド 2	1546917
スタッド 3	1062020
合計	4169909

表 4.12 せっこうボードの点群数

計測箇所	点群数
せっこうボード 1	1848518
せっこうボード 2	1419217
せっこうボード 3	1081293
せっこうボード 4	3240747
合計	7589775

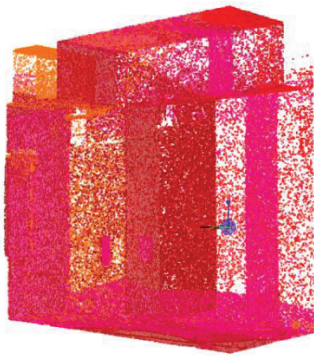


図 4.51 躯体の点群データ

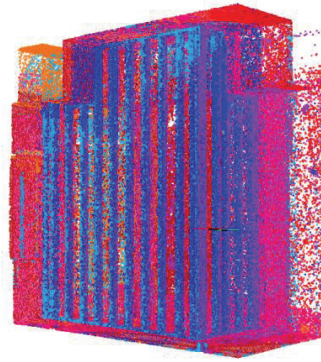


図 4.52 LGS の点群データ

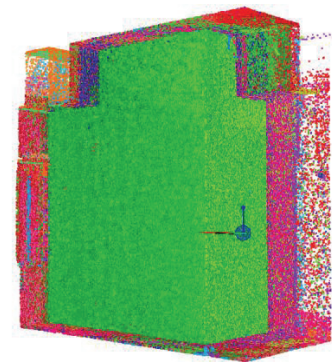
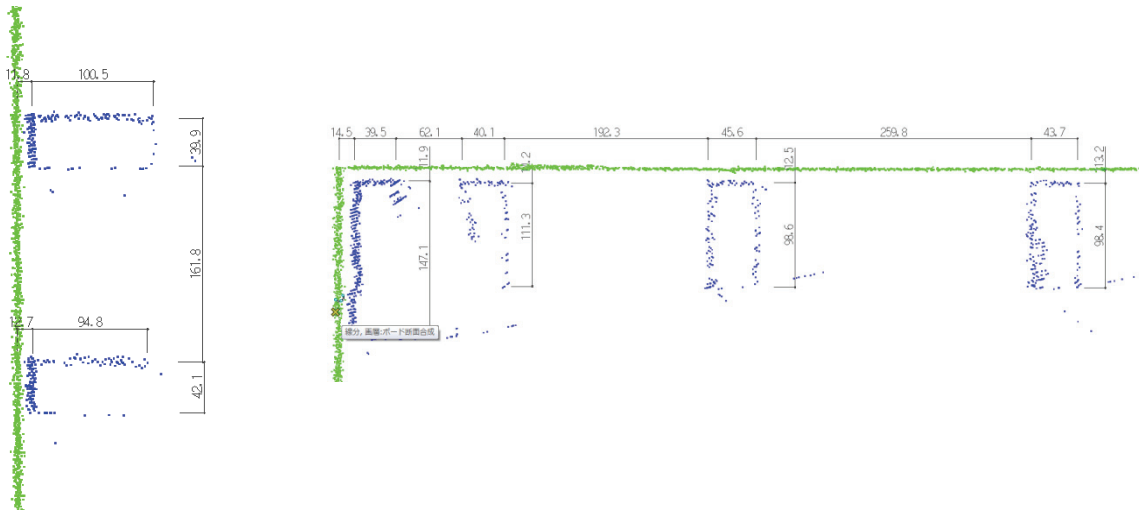


図 4.53 せっこうボードの点群データ



図 4.54 スタッドの出来形の断面とスタッドの断面寸法



a. 壁 2 におけるスタッドとボードの点群

b. 壁 1 におけるスタッドとボードの点群

図 4.55 スタッドとせっこうボードの出来形断面
(赤：躯体の点群、青：スタッドの点群、緑：せっこうボードの点群)

A. 差分分析による LGS とせっこうボードの点群の取り出し

前章の点群データ座標統合手法によって、内装間仕切壁工事を記録した点群データの座標系の統合を行った。この点群データを用いて、嘉納らが考案した差分分析手法⁹⁾を用いて、工事の進捗状況を点群データにより把握する。本項で行う差分分析による点群の分類を表 4.13 に示す。

表 4.13 差分分析における点群の分類

点群の変化	点群の種類	図における色
t 期に存在し t+1 期にも点群がある	変化のない部分	灰
t 期に存在したが t+1 期には点群がない	仮設物などで計測対象が消失したか、遮蔽物が出来て計測出来なくなった部分	灰
t 期になかったが、t+1 期には点群がある	t 期において計測出来なかった箇所か、新規で現れた点群	緑、青
t 期もしくは t+1 期の密度が過少	判別不明	灰

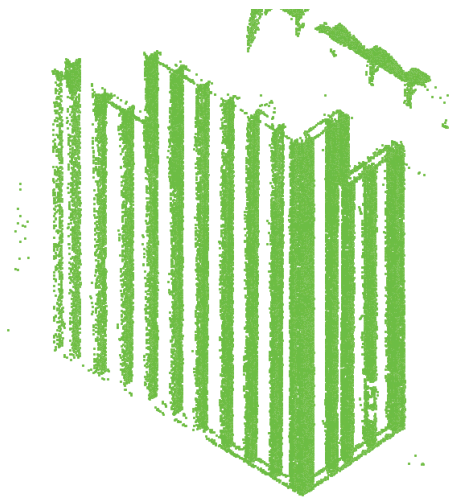


図 4.56 スタッド取り付け後に新規で出現した点群

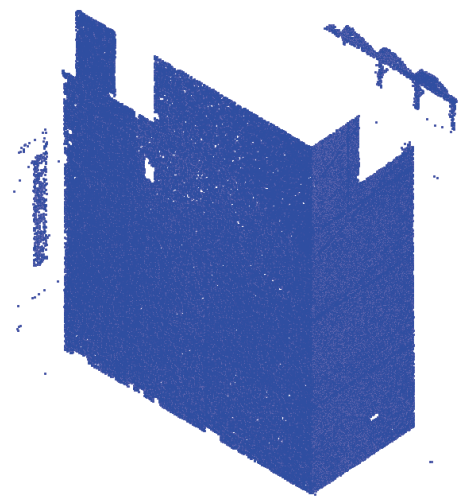


図 4.57 せっこうボード取り付け後に新規で出現した点群

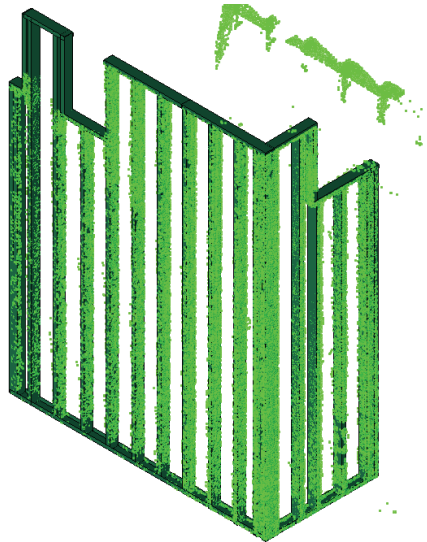


図 4.58 LGS の設計 CAD モデルとスタッドの点群の重ね合わせ

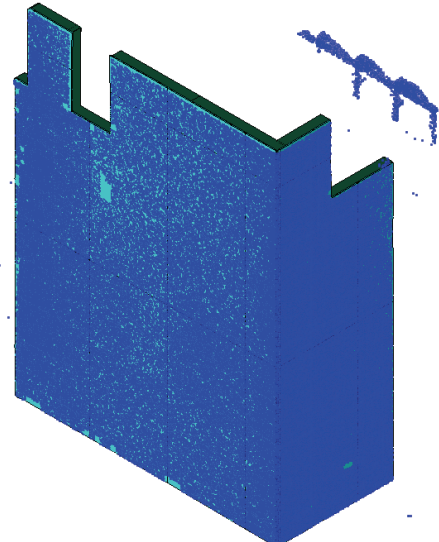


図 4.59 せっこうボードの設計 CAD モデルと点群の重ね合わせ

B. 設計 CAD データとの重ね合わせによる LGS とせっこうボードの設置位置の精度検証方法

ランナーとスタッドの設置後、施工箇所を 3 次元レーザースキャナーにより計測し、取得した点群データから図 4.56 に示す如く LGS の点群のみを抽出した。同様にせっこうボードの設置完了後に、計測を実施し、図 4.57 に示す如くせっこうボードの点群データのみを抽出した。

そして LGS とせっこうボードの点群データを差分分析により抽出した後、この点群データを通り芯の位置に従って、設計 CAD データに重ね合わせることで、適切な位置に設置されているかを確認する。以下の手順により点群データと設計 CAD データの重ね合わせを行った。

- (1) 設置箇所の部材の点群を差分分析により取り出す
- (2) 点群データの通り芯位置と設計 CAD データの通り芯位置とを合わせる
- (3) 設計 CAD モデルと取り付け部材の点群データとを重ね合わせた結果に基づいて、設置位置の精度の確認を行う

LGS の点群を設計 CAD データに重ね合わせたものを図 4.58 に、せっこうボードの点群を重ね合わせたものを図 4.59 に示す。

C. 間仕切壁の設置精度の確認

LGS とせっこうボードの点群データと設計 CAD データを重ね合わせたのち、設置精度の検証を行った。図 4.61 は重ね合わせた結果を床面から 1 メートル付近の水平面でスライスし、上から見下げた図である。壁 1 のせっこうボードの外面は設計 CAD と点群データがほぼ重なっていて、壁 2 においては 4 – 5 mm ほどずれで納まっていることが確認できた。

壁 2 の位置のずれが生じた理由として、まず、本実験では写真 4.25 に示す如く、窓のある南側躯体壁面に接するランナーから設置したことが考えられる。ランナーも、プレカット寸法に基づいて加工済みのものを持ち込み、南側躯体壁面に接するものから詰めて設置したが、この際、南側の躯体壁面の凹凸にランナー断面が隙間なく取り付けることが出来なかったため、壁 1 の軸方向に取り付け位置の誤差が集積したことが考えられる。また、せっこうボードをスタッドに固定する際に、スタッドの微妙なたわみや凹凸により完全に隙間なく取り付けことは出来ないと考えられるため、隙間が生じる。これら 2 つの誤差は必ず壁面 2 の表面を北側にずらす向きに蓄積する。

加えて、現在の内装に用いる建材は現場加工を前提としており、JIS規格が規格寸法にある程度の許容差を設けているため、製造誤差が存在する。スタッドの幅Bとせっこうボードの厚みには表4.14、15に示す如く、±0.5mmの許容差が認められる。本実験で使用したスタッドはJIS規格外の製品であるがその許容差は同様であると考えられる。それ故、加工せずに使用する部材の寸法を実測して、部材の正確な寸法を把握する必要がある。

更に点群データ自体の計測誤差とポリゴンモデルへの変換により生じる形状の誤差と、施工箇所・点群データ・設計CADデータと出来形の点群データとの座標統合による誤差が存在する。

故に以下に示す6つの誤差により壁面2の位置が北側にずれたものと考えられる。

- (1) 窓のある南側躯体壁面と壁面1の下部ランナーの間に生じた隙間 (約1mm)
- (2) せっこうボードとスタッドとの間に生じた隙間 (約1mm)
- (3) 壁面2のスタッド寸法の製造誤差 (±0.5mm)
- (4) せっこうボードの厚みの製造誤差 (±0.5mm)
- (5) 点群データの計測誤差とポリゴンモデルへの変換誤差 (約±2mm)
- (6) 施工箇所・点群データ・設計CADと出来形の点群データとの座標統合による誤差 (約±2mm)

(1)と(2)は本実験において生じた隙間であるが、(3)~(6)が場所や条件により生じる誤差であり、その誤差の分布は正規分布すると考えられる。これらの誤差を計算すると壁面2の位置の誤差が北側にずれる最大の量は以下の数値となり、出来形計測によるずれに一致する。

$$1 + 1 + \sqrt{0.5^2 + 0.5^2 + 2^2 + 2^2} = 4.92mm$$

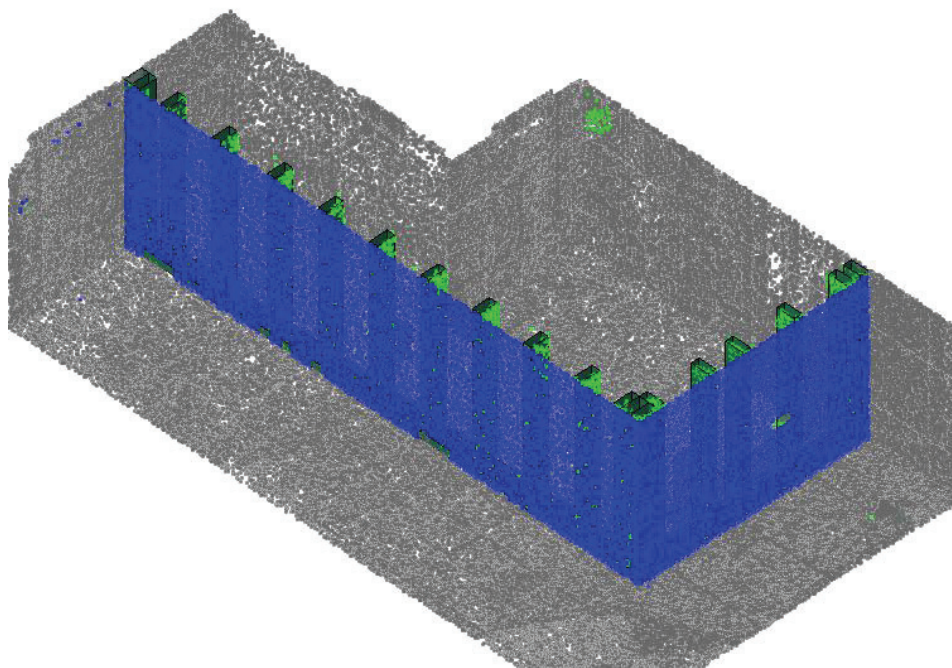


図4.60 躯体の点群とスタッド、せっこうボードの点群の重ね合わせ
(躯体の点群：灰 スタッドの点群：緑 せっこうボードの点群：青)

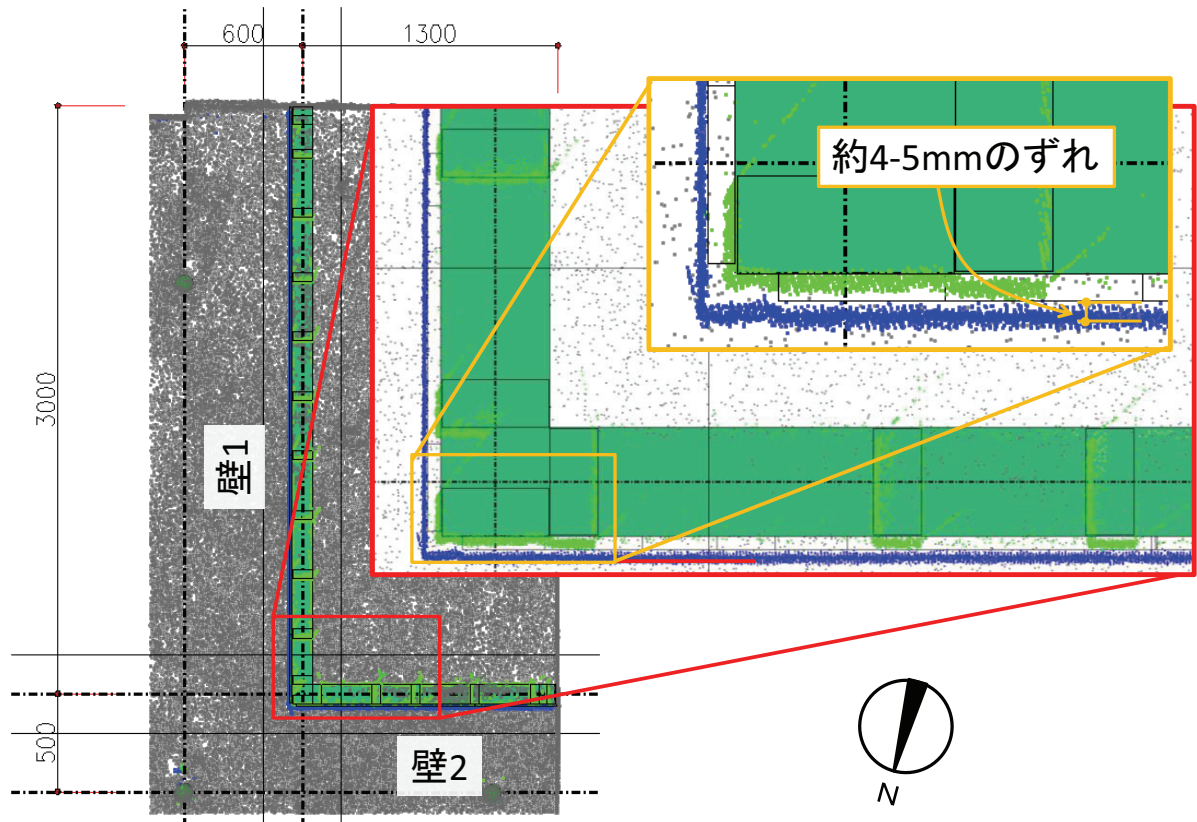


図 4.61 躯体の点群とスタッド、せっこうボードの点群と設計 CAD モデルの重ね合わせ
 (躯体の点群：灰 スタッドの点群：緑 せっこうボードの点群：青)

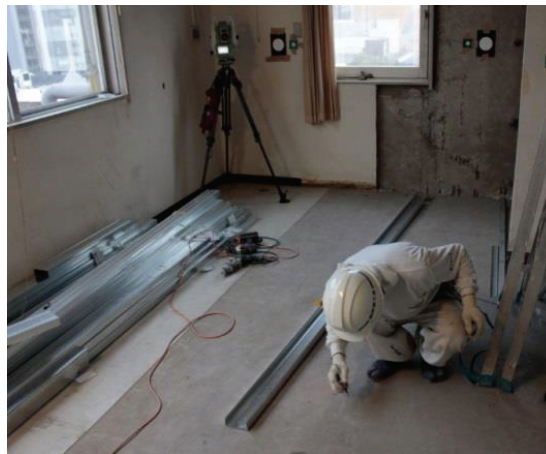


写真 4.25 ランナーを南側躯体壁面に接するように取り付ける状況

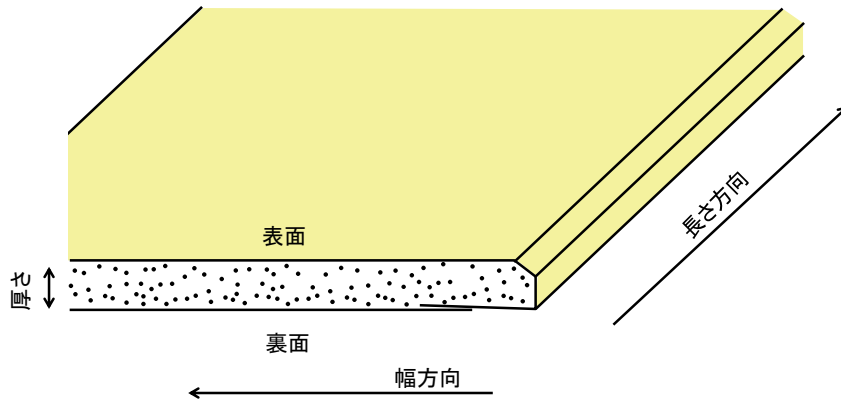


図 4.62 ベベルエッジ形状のせっこうボード

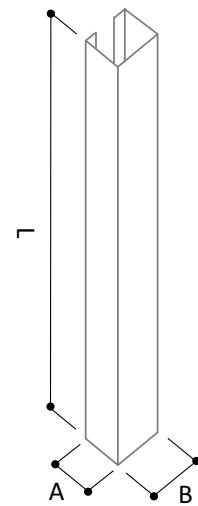


図 4.63 JIS 規格品のスタッド形状

表 4.14 せっこうボードの寸法の許容差 (単位 mm)

厚さ	長さ	幅
±0.5	+3	0
	0	-3

(出典)日本規格協会：JIS ハンドブック 8 建築 I 材料・設備 2011, 日本規格協会, pp862-864, JIS A 6901 表 13 より

表 4.15 スタッドの寸法の許容差 (単位 mm)

A	B	L
±0.5	±1	+40
		0

(出典)日本規格協会：JIS ハンドブック 8 建築 I 材料・設備 2011, 日本規格協会, JIS A 6517 表 8 より

4.7. 結言

本章では3次元レーザースキャナーによって取得した点群データからポリゴンモデルを作成し、ポリゴンモデルに基づいて切断・加工したプレカット部材を用いて内装間仕切壁を施工する、内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化を行い、その上で施工実験を行った。

第1節では内装プレカット部材を用いた改修工法における施工手順を示し、その概要を述べた。また、ポリゴンモデルから求めた設計断面上でLGSなどの軸組材のプレカット寸法を求める手法を考案し、纏めている。その上で、3次元レーザー計測やポリゴンモデルの作成、プレカット部材の加工、そして取り付け時に生じる誤差が積み重なることで施工上の問題が生じないかについて、実験に基づいた検証が必要であることを指摘した。

第2節では、鉄筋コンクリート造の事務所ビル内に内装プレカット部材を用いた改修工法により間仕切壁を設置する施工実験の概要を述べた。

第3節では、第2章で提案した手法に基づいて、3次元レーザースキャナーにより躯体の計測を行い、点群データから地墨取得用球ターゲットにより地墨位置を求めた上で、設計CADの座標系へと変換した点群データを作成した結果について述べた。地墨用球ターゲットにより施工箇所と点群データの座標系を一致させることに成功した。

第4節ではこの点群データをポリゴンモデルに変換し、設計CAD上への読み込みを行った。ポリゴンモデル上に地墨の位置を示すことにより、壁面を設置すべき位置を正確に示すことが出来た。

第5節においては、ポリゴンモデルから求めた設計断面に基づいてせっこうボードとLGSのプレカット部材の加工寸法を求めた。せっこうボードの割付図と加工図の作成では、現場作業員の助言に基づいて割付図と加工図を作成するとともに、第3章で示した最適化手法により割付図と加工図を求めた。最適化手法により作成した割付図と加工図のうち、残材量が最も少なく、次いで目地長さが短い割付図と加工図の案が2つあったが、そのうち1つが現場作業員の助言に基づいて作成した割付図と加工図に一致する案であることが確認でき、第3章で示した手法の妥当性を示すことが出来た。

第6節ではプレカット部材を作成し、間仕切壁の施工を行った結果を示した。プレカット部材によって組立施工された間仕切壁の設置精度を確認し、正確に、かつ僅かな隙間で取りついていることを示した。これにより、本研究で考案した内装プレカット部材を用いた改修工法が実現可能であることが確認できた。

本研究により点群データから作成したポリゴンモデルが実際の躯体の寸法を正確に記録していることを確認した。また本研究で示した手順によって取り付けたせっこうボードの目地を水平面で揃えることが出来ることを確認した。これは、点群データに水平面の位置を平板ターゲットにより記録するとともに、躯体をポリゴンモデルとして正確に記録でき、かつ点群データ、設計CADデータ、施工箇所の座標系が正確に一致していることを示している。

なお、本研究では2000年代初頭に販売が開始された3次元レーザースキャナーを使用しているため、計測に7時間程度を要したが、最新機器では毎秒数十万点の計測が可能となっており、本研究と同様の計測は、ターゲット設置や移設も含め1時間程度で可能である。

また、点群データの処理とポリゴンモデルの作成は約12時間を要したが、本研究で示した一連の点群処理プロセスを自動的に実施するシステムを開発することで、更なる効率化と省力化が可能である。

本研究で開発した内装プレカット部材を用いた改修工法の施工実験により、既存躯体の形状に正確に合致させる部材を事前に作成可能であることを確認した。これにより、3次元レーザースキャナーによる計測手法と内装部材の詳細設計手法に基づく、逃げ寸法をほとんど必要としない内装部材のプレカット化が技術的に可能であることが確認できるとともに、より小さな建築公差での部材製造が可能であることを示した。

第 5 章

結論

第5章 結論

本論文は鉄筋コンクリート建築物における内装工事において、3次元レーザースキャナーにより躯体の3次元形状を取得することにより、現場での切断、加工を不要とするプレカット部材による組立施工を実現する技術に関する研究である。

第1章においては、本論文の研究背景と目的について述べている。第1節においては、研究の背景について述べた。近年、鉄筋コンクリート建築物における、内装の改修工事の需要が増加しているが、事務所建物や集合住宅における居ながら施工が必要とされる場合が多く、工事騒音が少なく、現場廃棄物が発生しないプレカット部材の使用による施工が必要とされている。鉄筋コンクリート建築物の躯体形状は、型枠により施工されているため施工誤差による微小な凹凸があり、これを、内装工事実施前のわずかな時間で把握する手段がなかったために、内装工事では現場加工による施工が行われてきたが、躯体の3次元形状を点群データとして取得できる3次元レーザースキャナーの性能が建築生産で使用可能な水準に達してきたことにより、躯体の形状把握が事前に行える環境が整いつつある。しかしながら、この点群データに基づいて3次元CAD上で内装のプレカット部材を作成し、施工するには、在来の内装工事とは全く異なる工法となるため、内装のプレカット部材を点群データに基づいて設計する手法が新たに必要となる。そのため、内装工事において重要な情報である地墨のように形状のない情報を計測する手法とノイズ除去などの点群データの処理手法が必要である。また、大量に設計する必要がある内装のプレカット部材の詳細設計を効率的に行う手法が必要である。これらの背景を踏まえ、第2節においては「点群データに基づく鉄筋コンクリート建築物の形状の把握に関する研究」、「内装工事におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究」、「内装プレカット部材を用いた改修工法の体系化に関する研究」に関する既往の研究について、まとめた。第3節では、研究の目的を述べた上で、前節の既往の研究を踏まえ、本研究で行う3つの手法における研究項目について述べた。

第一に、内装のプレカット部材の加工形状を点群データから求めるには、施工箇所、点群データ、設計CADデータの座標系を一致させたいうで、点群データを設計CAD上で利用しやすいデータに変換する手法が必要である。

第二に、内装部材のプレカット部材を作成するために、事前に、膨大な数になるプレカット部材のCADモデル作成を行う必要がある。そのため、コンピュータ上での内装部材の詳細設計の最適化計算手法が必要である。

第三に計測、詳細設計、プレカット部材の作成と取り付け、工事完了後の出来形の計測に至る一連の流れで施工を行う技術を考案し、その上で施工実験を実施し、本章で考案した技術の検証を実施する必要がある。

本論文ではこれら3つの手法を確立し、論文とした。

第2章においては点群データに基づいて鉄筋コンクリート建築物の形状を把握する技術について述べた。第1節においては、内装部材の詳細設計に必要な情報を含む点群データを取得する手法に関して概要を述べた。3次元レーザースキャナーにより躯体や取り付けた内装部材の3次元形状を取得し、設計CAD上で利用するには3次元計測と点群データ処理の2つの技術が新たに必要となることを指摘した。第2節においては、3次元レーザースキャナーによる計測技術として、施工箇所、点群データ、設計CADデータの座標系を一致させる手法について論じた。これは施工箇所の躯体に描かれている地墨を専用の球ターゲットを用いて点群データ上に記録することにより実現した。また、複数の点群データを同一座標系に統合する必要が生じるため、異なる点群データ上のターゲットを自動的に対応させる手法も開発した。第3節では、鉄筋コンクリート躯体を計測した点群データを設計CADに読み込むのに適したポリゴンモデルへと変換する前にすべき、ノイズの除去と線形状の点群の認識に関して述べた。3次元レーザースキャナーによる計測では、レーザーのスポット径が数mmの大きさがあるため、計測対象の端部を計測した場合、スポット割れを起し、ノイズが発生する。このノイズを、あらかじめ除去する手法が必要であり、点群の取得順序ごとの相互距離と点群の密度の二種類の手法を併用することにより、ノイズの除去を行

う方法を開発した。また、建築部材では配線などの曲線の点群が存在するため、新たに線形状の点群を抽出する手法を開発した。第4節では、施工箇所、点群データ、設計CADデータの座標系を一致させる手法を設備の改修工事において適用し、設計CADデータと既存設備の点群データの重なりにより、干渉する部分を工事前に発見した。また、躯体やスタッドの点群に、本章で述べた手法により作成したシステムを適用し、ノイズの除去と、線形状の点群を抽出が正確に行えていることを確認した。

第3章では内装部材の詳細設計のうち、ボード材の割付図と加工図の最適化を実施する手法について述べた。第1節では内装のプレカット部材の詳細設計の必要性を述べた上で、ボード材の割付図と加工図の最適化の手順を述べた。その上で、第2節では、「残材量」が少なく、「目地長さ」「部材数」が最小となるボード材の割付図と加工図の設計手法について述べた。これまで3次元CAD上でモデルを作成する必要がなかった内装部材1つ1つのモデルを作成する手法として、ボード材の割付図と加工図の最適化手法を開発した。ボード材割付の最適化するには複数の割付図の作成と、各割付図を構成するボード部材を最小の残材量で切り出す加工図の作成が必要となる。割付図は、ボード材を割付ける配置領域の頂点に基づいて、複数の配置開始点を作成し、この配置開始点から定尺ボード材を配置領域に対して隈なく均等に敷き詰めたのち、配置領域と定尺ボード材の共通部分を抽出することにより作成した。また、加工図作成においては、最小の残材量で定尺ボード材から割付ボード部材を切り出すために、長方形詰込み問題で用いられるBL (Bottom-up Left-justified) 法を基にした最適化計算手法を開発し、少ない計算回数で最適化する手法を実現した。第3節では、ボード部材の割付図と加工図の最適化手法に関して、間仕切壁を想定した計算実験を行った。この計算実験では4種類の定尺ボード材の割付について実験を実施し、残材量が理論上の最小値を取る割付図と加工図を求められることを確認した。また、防音性能や目地埋め作業に掛かる時間に影響がある目地長さや、移動回数に影響を与える割付ボード部材数の最小値を求めることにも成功した。

第4章では、第2章と第3章で研究した手法を用いて、改修工事における内装のプレカット部材を作成し、施工する手順を開発するとともに、間仕切壁の施工実験を実施し、その検証結果について述べた。第1節では内装のプレカット部材を作成する手順を述べた上で、軸組材のプレカット部材の設計手法について述べた。第2節では、本研究において実施した施工実験の概要について述べた。本施工実験では、天井高が約4mの鉄筋コンクリート建築物の一室に2面からなる間仕切壁を施工した。第3節では3次元レーザースキャナーにより躯体の点群データを取得した実験に関して述べた。3次元レーザースキャナーにより躯体を計測し、点群データに記録した地墨の位置を球ターゲットより抽出し、設計CAD上の通り芯に座標系を一致させた。第4節では、点群データをポリゴンモデルに変換する手順について述べた。第5節では設計CAD上に読み込んだポリゴンモデルに基づいてプレカット部材の詳細設計を行う手順について述べた。まず、ポリゴンモデルからLGSとせっこうボード材が躯体に接する部分を切り出し、切り出した断面形状に基づいて各内装部材の寸法を求めた。施工実験の実施段階ではボード材の割付図と加工図作成は、現場作業員の助言に基づき、作成した。その後、割付図と加工図の妥当性を確認するために施工実験で作成した壁面にたいして第3章の割付図と加工図の最適化手法を適用する計算実験も併せて実施した。最適化手法により作成した割付図と加工図のうち、残材量が最も少なく、次いで目地長さが短い割付図と加工図の案が2つあったが、そのうち1つが現場作業員の助言に基づいて作成した割付図と加工図に一致する案であることが確認でき、第3章で示した手法の妥当性を示すことが出来た。第6節では、プレカット部材を実際に作成し、施工箇所に取り付ける実験について述べた。LGSとせっこうボードのプレカット部材を躯体や他部材との隙間を調査し、予定した施工精度に納まっていることを確認した。加えて、壁面の施工が完了した段階で再度、3次元レーザースキャナーによる計測を実施し、出来形の点群データから、間仕切壁部分の点群データを差分分析により取り出し、設計CADデータと間仕切壁の点群データを重ね合わせた結果、設置した間仕切壁がほぼ正しい位置に設置できていることが確認でき、本方法論に基づいたプレカット部材による施工が正確に行えたことを示した。

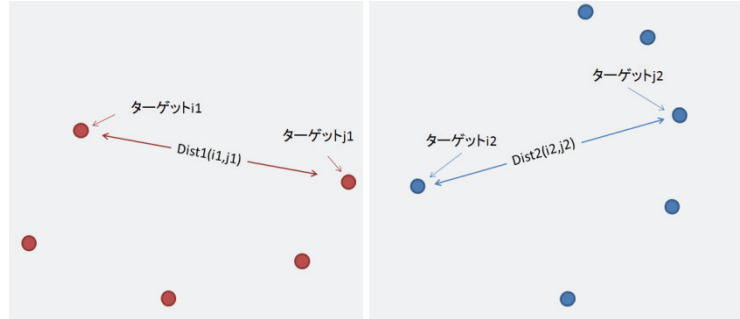
第5章においてはこれらの研究成果に関して総括した。

本研究で示した手法により、3次元レーザースキャナーを用いて既存躯体の建築物の形状を正確に計測することで、内装部材のプレカット化が実現できることを明らかにした。建築物の内装工事では、通常、逃げ寸法を用意しておき、施工箇所の形状に合わせて、現場加工を行う工法が一般的であった。しかしながら、本研究では、施工箇所の凹凸を3次元レーザースキャナーにより正確に計測する技術を考案し、この計測結果に基づいて躯体に隙間なく取りつく内装のプレカット部材を作成する手法を開発することにより、逃げ寸法を必要としない内装プレカット部材を用いた改修工法の開発に成功し、騒音・振動や粉塵などが生じない改修工法を実現した。

附章

附.1 座標統合における最小二乗法

複数の座標系の点群データを用いる場合、各データのターゲット座標を元に、同一の座標系への変換を行うが、この際座標変換のズレを最小にする必要がある。この座標変換については最小二乗法を用いた手法開発されているので、正確に座標変換を行えるシステムを作成した。



附図1 異なる座標系にあるターゲットのイメージ

異なる座標系をもつ点群データを座標統合する問題は下記のように表現できる。

主座標系のターゲット群を $R_2(i=0,1,\dots,N)$ 、変換対象のターゲット群を $R_1(i=0,1,\dots,N)$ とする。 R_1 を回転行列 R を用いて回転し、 T だけ平行移動した R_1 が R_2 に一致するような R 、 T を求めればよい (①式)。

$$R_2 = R * R_1 + T \quad (i=0,1,\dots,N) \quad \dots \textcircled{1}$$

いま、式①の各行列を下記の如く定義する。

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad R_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad R_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

この時、①式の右辺は以下の式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad \dots \textcircled{2}$$

回転行列を、 x 軸を回転の軸として ω 、 y 軸を回転の軸として φ 、 z 軸を回転の軸として κ だけ回転すると回転行列 R は下記のようになる。

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{pmatrix}$$

②式の左項を $R'_1 = (x'_1 \ y'_1 \ z'_1)^t$ とおく。ターゲット群 R_2 に含まれる、あるターゲットを R_{2i} とし、ターゲット群 R_1 に含まれる、 R_{2i} と同一のターゲットを R_{1i} としたとき、 R_{1i} を座標変換した R'_{1i} と R_{2i} の距離の差は以下の式で表すことができる。

$$D_i(A) = \|R_{2i} - R'_{1i}\|$$

しかしながら、2つのターゲットには計測誤差が含まれるため、 $D_i(A)$ はゼロにはならない。ゆえに、以下の式③を最小化するような変数群 $A(\omega, \varphi, \kappa, x_0, y_0, z_0)$ を探す問題に帰着する。

$$D_i(A)^2 = \|R_{2i} - R'_{1i}\|^2$$

$$\sum_{i=0}^n D_i(A)^2 = \sum_{i=0}^n \|R_{2i} - R'_{1i}\|^2 \dots \textcircled{3}$$

③式は以下の③式を用いると④式に書き換え可能である

$$Fx_i = x_2 - x'_1$$

$$Fy_i = y_2 - y'_1$$

$$Fz_i = z_2 - z'_1$$

$$\sum_{i=0}^n (D_i(A))^2 = \sum_{i=0}^n (Fx_i^2 + Fy_i^2 + Fz_i^2) \dots \textcircled{4}$$

④式が最小値をとるとき、④式を変数 $A(\omega, \varphi, \kappa, x_0, y_0, z_0)$ についてそれぞれ偏微分した式の値はゼロになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^n \frac{\partial(D_i(A))^2}{\partial\omega} = 2 \sum_{i=0}^n (Fx_i \frac{\partial Fx_i}{\partial\omega} + Fy_i \frac{\partial Fy_i}{\partial\omega} + Fz_i \frac{\partial Fz_i}{\partial\omega}) = 0 \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial(D_i(A))^2}{\partial\varphi} = 2 \sum_{i=0}^n (Fx_i \frac{\partial Fx_i}{\partial\varphi} + Fy_i \frac{\partial Fy_i}{\partial\varphi} + Fz_i \frac{\partial Fz_i}{\partial\varphi}) = 0 \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial(D_i(A))^2}{\partial\kappa} = 2 \sum_{i=0}^n (Fx_i \frac{\partial Fx_i}{\partial\kappa} + Fy_i \frac{\partial Fy_i}{\partial\kappa} + Fz_i \frac{\partial Fz_i}{\partial\kappa}) = 0 \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial(D_i(A))^2}{\partial x_0} = 2 \sum_{i=0}^n Fx_i \frac{\partial Fx_i}{\partial x_0} = 0 \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial(D_i(A))^2}{\partial y_0} = 2 \sum_{i=0}^n Fy_i \frac{\partial Fy_i}{\partial y_0} = 0 \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial(D_i(A))^2}{\partial z_0} = 2 \sum_{i=0}^n Fz_i \frac{\partial Fz_i}{\partial z_0} = 0 \end{array} \right. \dots \textcircled{5}$$

つまり、⑤式を満たすような $A(\omega, \varphi, \kappa, x_0, y_0, z_0)$ を求めればよい。

なお、付録 A に偏微分の結果を示す。⑤式は非線形連立方程式なので LM 法を用いて、最適解を求めた。なお、水平度の保たれた計測機で計測した場合、 ω と φ は 0 になるので、より最適解が求めやすくなる。

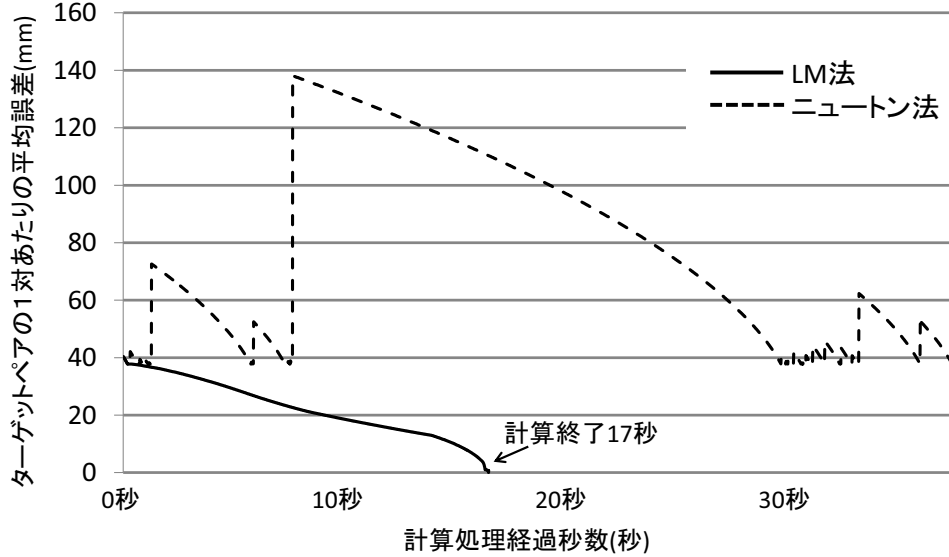
下表のターゲット群 R1,R2 は人工的に作成したデータで、R1 は R2 を $x_0=15, y_0=15, z_0=15$, 平行移動させ、 $\omega=-1.00 \varphi=-1.00 \kappa=2.00^\circ$ 回転させた、その上で各 XYZ 座標に $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲でランダムに誤差を加えたデータある。このターゲット群を検証用データとして、上記の手法を基に作成したプログラムに用いた結果が下表である。LM 法はよく収束し、近似解も真の値に近い値が出ていることが確認できる。

附表 1 LM 法による近似解算出結果

	R1(被変換系)			R2(主座標系)			R2(R1をR2に変換したもの)			誤差 (R2とR2の距離)
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
T1	1443.9	1070.5	1993.6	1500.0	1000.0	2000.0	1499.3	999.5	2001.1	1.435
T2	45.0	1021.7	1969.2	100.0	1000.0	2000.0	99.3	999.2	2000.7	1.278
T3	-135.3	1963.5	-1050.8	-100.0	2000.0	-1000.0	-100.0	2000.9	-998.8	1.526
T4	-1490.2	133.0	-34.1	-1500.0	200.0	10.0	-1499.9	200.0	9.7	0.324
T5	-76.9	-150.6	-163.9	-100.0	-130.0	-150.0	-99.8	-129.6	-150.0	0.489
T6	954.1	1527.5	476.7	1000.0	1500.0	500.0	999.6	1500.3	501.3	1.357
T7	-89.6	-61.4	384.5	-100.0	-50.0	400.0	-100.0	-49.9	400.0	0.108
T8	16.7	-13.7	-13.5	1.0	1.0	1.0	1.2	1.4	1.1	0.398
T9	1015.3	213.3	-400.4	1000.0	200.0	-400.0	1000.2	200.8	-399.5	1.002
T10	113.6	0.4	87.1	100.0	10.0	100.0	100.1	10.3	100.1	0.362
T11	91.7	129.1	1192.8	102.0	120.0	1208.0	101.7	119.7	1208.2	0.454
T12	91.9	1198.4	75.5	120.0	1208.0	109.0	119.8	1208.3	109.8	0.893
T13	-76.8	-221.4	-32.7	-100.0	-203.0	-20.0	-99.8	-202.7	-20.1	0.417
T14	146.4	1990.8	-44.9	200.0	2000.0	1.0	199.7	2000.4	2.3	1.405
T15	4.9	-62.6	-1014.2	-30.0	-30.0	-1000.0	-29.5	-29.1	-1000.0	1.064
T16	-2.4	-113.8	76.9	-20.0	-100.0	90.0	-19.8	-99.7	90.0	0.338
T17	314.4	194.1	-112.6	304.0	200.0	-100.0	304.1	200.5	-99.7	0.583
T18	23.3	296.4	80.5	20.0	309.0	100.0	20.1	309.3	100.3	0.402
T19	243.8	94.5	-112.2	230.0	103.0	-100.0	230.2	103.5	-99.8	0.540
T20	-388.1	-411.5	985.2	-400.0	-400.0	1000.0	-400.1	-400.3	999.7	0.447

附表2 LM法とNewton法による近似解算出結果

	誤差	ω	ϕ	κ	x_0	y_0	z_0	計算時間
初期値	40.34	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	----
LM法	0.74	1.03	0.98	-1.99	-14.85	15.35	15.07	17秒
Newton法	37.92	0.00	0.00	0.00	-2.70	-2.83	8.52	36秒
真の値	0.00	1.00	1.00	-2.00	-15.00	15.00	15.00	----



附図2 LM法とNewton法による近似解算出結果

付録 A

$$\frac{\partial Fx}{\partial x_0} = 1 \quad \frac{\partial Fy}{\partial y_0} = 1 \quad \frac{\partial Fz}{\partial z_0} = 1 \quad \frac{\partial Fx}{\partial \omega} = 0$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial \phi} = -(\sin\phi\cos\kappa)x_1 + (\sin\phi\sin\kappa)y_1 + (\cos\phi)z_1$$

$$\frac{\partial Fx}{\partial \kappa} = -(\cos\phi\sin\kappa)x_1 - (\cos\phi\cos\kappa)y_1$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial \omega} = (-\sin\omega\sin\kappa + \cos\omega\sin\phi\cos\kappa)x_1 + (-\sin\omega\cos\kappa - \cos\omega\sin\phi\sin\kappa)y_1 - (\cos\omega\cos\phi)z_1$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial \phi} = (\sin\omega\cos\phi\cos\kappa)x_1 + (\sin\omega\cos\phi\sin\kappa)y_1 + (\sin\omega\sin\phi)z_1$$

$$\frac{\partial Fy}{\partial \kappa} = (\cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\phi\sin\kappa)x_1 + (-\cos\omega\sin\kappa - \sin\omega\sin\phi\cos\kappa)y_1$$

$$\frac{\partial Fz}{\partial \omega} = (\cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\phi\cos\kappa)x_1 + (\cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\phi\sin\kappa)y_1 - (\sin\omega\cos\phi)z_1$$

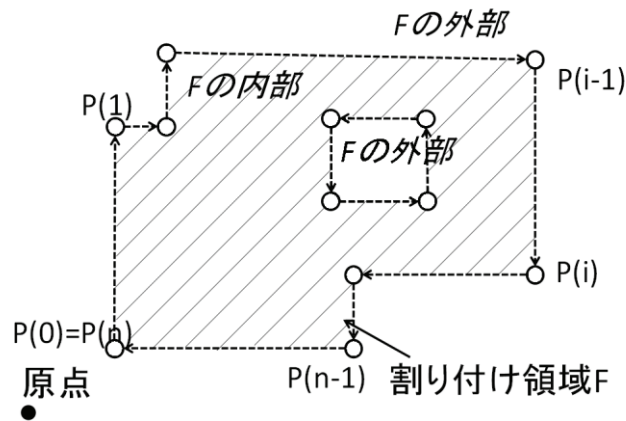
$$\frac{\partial Fz}{\partial \phi} = (-\cos\omega\cos\phi\cos\kappa)x_1 + (\cos\omega\cos\phi\sin\kappa)y_1 - (\cos\omega\sin\phi)z_1$$

$$\frac{\partial Fz}{\partial \kappa} = (\sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\phi\sin\kappa)x_1 + (-\sin\omega\sin\kappa + \cos\omega\sin\phi\cos\kappa)y_1$$

附. 2. 多角形状の扱い

A. 多角形の表現方法

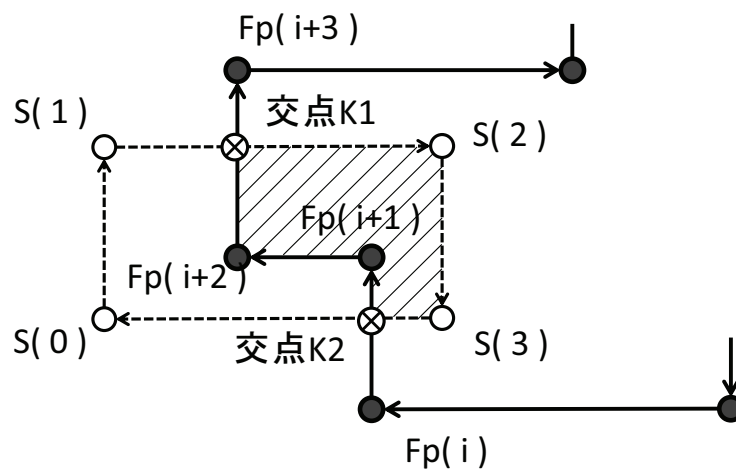
定尺ボード材の割付の計算は、定尺ボード材同士の隣接関係を把握しながら、重ならないような条件のもとで計算を行う必要がある。そこで、コンピュータ上では配置領域やボード材を附図3に示すような、 n 個の頂点を持つベクトルデータとして表現する。この多角形を示すベクトルデータは時計回りで各頂点の座標をデータ系列 P に記録していて、 n 個の頂点を持つ多角形では各頂点は $P(0), P(1), \dots, P(n-1), P(n)$ という $n+1$ 個のデータ系列として表現する。なおこの場合、 $P(0) = P(n)$ である。ベクトル $P(k)P(k+1)$ の進行方向右側が領域の内側であり、左側が外側となる。内部に開口部などの空隙が存在する場合、空隙を示す多角形の頂点を反時計回りで結ぶことで、表現できる。



附図3 多角形の表現方法

B. 2つの図形の共通部分の算出

2つの多角形の共通部分（あるいは差集合）を求めるには、附図4に示す如く2多角形の交点を求め、内部の点（差集合の場合には外部の点）を起点として多角形の頂点を時計回りに回収し、交点をもつ辺に差し掛かった際に他の多角形の頂点を時計回りで回収していくと共通部分の多角形を示すベクトルデータを得ることが出来る。



附図4 共通部分の算出方共通部分の算出

C. 長方形の重複関係の判別

XY 平面上にある長方形で、90 度回転のみ許容する場合、長方形が配置可能であるかは下記の方法で判別する。

附図 5 左に示す如く、寸法が $H[\text{mm}] \times W[\text{mm}]$ である定尺ボード材 M の左下の頂点を $M0:(x_0, y_0)$ とし、割付ボード部材の 1 つである長方形を $T(i)$ とする。この長方形 $T(i)$ の左下の頂点は $V_i:(x_i, y_i)$ 、寸法は $h_i[\text{mm}] \times w_i[\text{mm}]$ である。この時、定尺ボード材に長方形 $T(i)$ が内包されている条件は下記の①、②式を同時に満たす場合である。

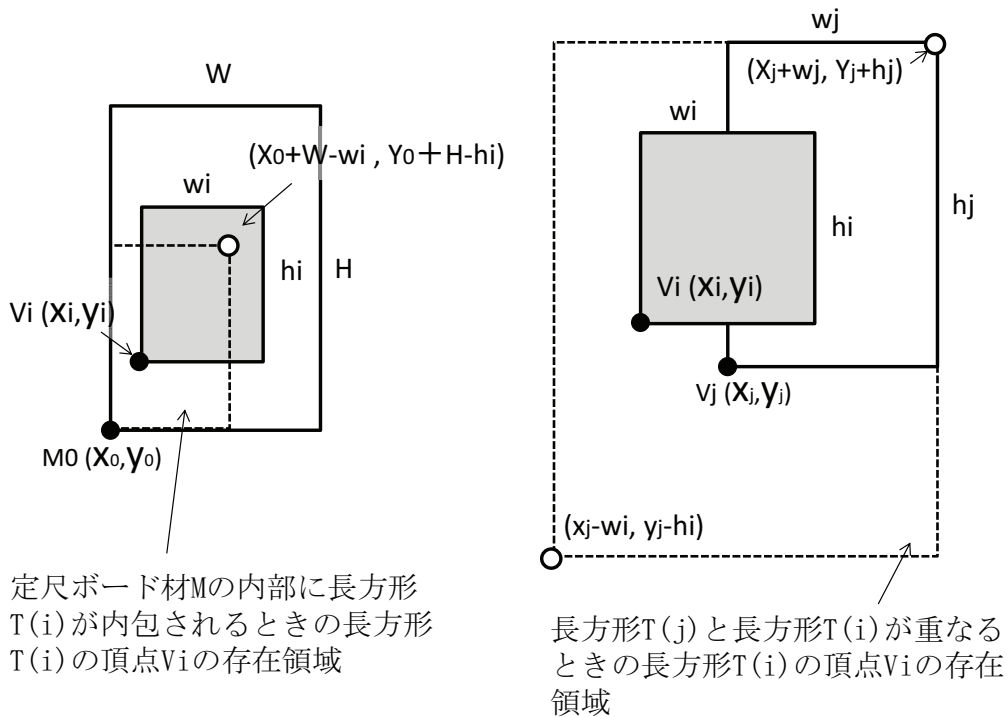
$$x_0 \leq x_i \leq (x_0 + W) - w_i \cdots \text{①}$$

$$y_0 \leq y_i \leq (y_0 + H) - h_i \cdots \text{②}$$

他方、附図 5 右に示す如く長方形 $T(i)$ が先行して定尺ボード材に配置されている長方形 $T(j)$ に重なっていないための条件は③、④式の両方を満たさない場合である。

$$x_j - w_i < x_i < x_j + w_j \cdots \text{③}$$

$$y_j - h_i < y_i < y_j + h_j \cdots \text{④}$$



附図 5 長方形の重なるの判別

謝辞

本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励とご指導、ご鞭撻を頂いた早稲田大学創造理工学部建築学科教授 嘉納成男博士に心より感謝申し上げます。嘉納博士には、理工学部在学中より、建築生産と情報化施工、3次元計測技術のみならず、論文作成や共同研究の進め方に至るまで、ご指導とご教授を賜りました。理工学部3年後期の嘉納博士の講義において当時まだ珍しかった3次元レーザースキャナーや現在のBIMにつながる情報化施工に関する最新の研究を知り、この分野に導いて頂くとともに、非常に高価な計測機器や設計CADを自由に使える環境と必要な技術的指導を頂いたことに心より感謝申し上げます。

学位論文審査において、貴重なご指導とご助言を頂いた早稲田大学創造理工学部建築学科 教授 小松幸夫博士、同教授 輿石直幸博士、早稲田大学理工学術院理工学研究所 客員教授 五十嵐健博士に心より感謝申し上げます。

修士・博士課程在学中、本研究を進めるうえで嘉納研究室における諸先輩方、後輩の皆様にご多大な協力を得たことを記すとともに心より感謝申し上げます。特に3次元レーザースキャナーによる計測実験の実施に当たり、嘉納研究室3次元計測班の熱心な協力がなければ多くの計測実験を行うことが出来ず、論文をまとめることはできなかったと感じています。

本研究において実施した、鉄筋コンクリート躯体の計測や間仕切壁の施工実験にあたり熱心なご協力をいただいた、前田建設工業株式会社建築事業本部 BIM 推進グループや、新菱冷熱工業株式会社中央研究所イノベーションシステムグループの皆さまに心より感謝申し上げます。

また、研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力を頂きながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます。

最後に、本研究を纏めている長い間、多大な心配をかけた両親、祖母と昨年に永眠した祖父、そして、公私ともに支えてくれた妻、加奈子にこの論文を捧げたい。

本研究は、多くの研究助成、補助金、資金負担等により実施されたものです。ここに記して感謝の意を表します。

- (1) 住宅・建築関連先導技術開発助成事業費(平成 21,22,23 年)
- (2) 2011年度早稲田大学若手研究者支援事業 (アーリーバードプログラム)
- (3) 2012年度早稲田大学若手研究者支援事業 (アーリーバードプログラム)

平成26年2月

本研究に関する研究業績

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者
論文○	<p>題目：内装間仕切壁におけるボード材の割付図と加工図の最適化に関する研究 出典：日本建築学会計画系論文集 第78巻 第692号, p.2173-2180 著者：<u>石田航星</u>, 嘉納成男, 五十嵐健 発表年：2013年10月</p>
論文○	<p>題目：内装部材のプレカット化のための3次元レーザースキャナーを用いた計測と生産設計の手法に関する研究 出典：日本建築学会計画系論文集 第78巻 第688号, p.1355-1363 著者：<u>石田航星</u>, 嘉納成男, 五十嵐健, 他4名 発表年：2013年6月</p>
論文○	<p>題目：A Study on Measuring of Reinforced-Concrete Structure by 3D Laser Scanner and Making Design of Precut Interior Finishing Components with Polygon Model 投稿先：30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2013), 8ページ(データ版のためページはなし) 著者：<u>Kosei Ishida</u>, Naruo Kano, Takeshi Igarashi 発表年月：2013年08月</p>
論文○	<p>題目：Shape Recognition with Point Clouds in Rebars 投稿先：29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2012), 8ページ(データ版のためページはなし) 著者：<u>Kosei Ishida</u>, Naruo Kano 発表年月：2012年06月</p>
講演○	<p>題目：内装間仕切壁におけるボード材と軸組材の詳細設計の最適化に関する研究 出典：日本建築学会第29回建築生産シンポジウム論文集 p.297-304 著者：<u>石田航星</u>, 嘉納成男, 五十嵐健 発表年月 2013年7月</p>
講演○	<p>題目：内装間仕切壁におけるボード材割り付けの最適化に関する研究 出典：日本建築学会第27回建築生産シンポジウム論文集 p.231-238 著者：<u>石田航星</u>, 嘉納成男, 五十嵐健 発表年月 2011年7月</p>
講演○	<p>題目：品質管理における3次元スキャナーの活用に関する研究 -点群データに基づく各種寸法の解析について- 出典：日本建築学会第27回建築生産シンポジウム論文集 p.297-304 著者：嘉納成男, 木本健二, 五十嵐健, <u>石田航星</u>, 他5名 発表年月 2011年7月</p>
講演	<p>題目：点群データに基づく配筋状況の把握のためのシステムに関する研究 出典：日本建築学会第26回建築生産シンポジウム論文集 p.187-194 著者：<u>石田航星</u>, 嘉納成男, 木本健二, 五十嵐健, 四釜侑也, 福田結磨, 帯包知成 発表年月 2010年7月</p>

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者
講演	<p>題目：鉄筋を計測した点群データの形状認識に関する研究 -点群データからの帯筋の抽出-</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 11-12</p> <p>著者：石田航星，嘉納成男，木本健二，五十嵐健</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発（その 4）既存設備配管・ダクト類の計測と点群モデルの解析</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 23-24</p> <p>著者：嘉納成男・五十嵐健・石田航星・福田結磨・酒本晋太郎・富田裕行・藤井裕彦・曾根巨充</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発（その 6）既存躯体の点群を利用した 3 次元 CAD モデル作成</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 27-28</p> <p>著者：三上瑛・嘉納成男・藤井裕彦・曾根巨充・大澤雄司・石田航星・酒本晋太郎・富田裕行</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：写真計測に基づく既存建物における正射投影画像付き 3 次元モデルの作成 計測精度の確認と 3 次元モデルの作成</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 13-14</p> <p>著者：中村友也・嘉納成男・佐藤康弘・石田航星</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：3 次元 CAD を利用した作業工程シミュレーションに関する研究</p> <p>出典：日本建築学会大会（東海）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 5-6</p> <p>著者：渡辺文志朗・嘉納成男・石田航星</p> <p>発表年月：2012 年 9 月</p>
講演	<p>題目：面材の割り付け最適化に関する研究 一定尺ボード材の残材量の最小化-</p> <p>投稿先：日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 1299-1300</p> <p>著者：石田航星，嘉納成男，五十嵐健</p> <p>発表年月：2011 年 8 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発（その 1）既存建築物の計測と点群データの解析に基づく躯体モデルの作成</p> <p>投稿先：日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 1303-1304</p> <p>著者：嘉納成男・五十嵐健・石田航星・福田結磨・酒本晋太郎・富田裕行・藤井裕彦・曾根巨充</p> <p>発表年月：2011 年 8 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発 その 2 プレカット部材の 3 次元 CAD による設計と部材の切断・加工</p> <p>投稿先：日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 1305-1306</p> <p>著者：藤井裕彦・嘉納成男・曾根巨充・大澤雄司・五十嵐健・石田航星・酒本晋太郎・富田裕行</p> <p>発表年月：2011 年 8 月</p>
講演	<p>題目：改修工事におけるエコ生産のための 3 次元レーザースキャナーを用いた計測技術の開発 その 3 プレカット部材のレーザー照射による位置決めと取り付け</p> <p>投稿先：日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集 F-1 分冊，p. 1307-1308</p> <p>著者：富田裕行・嘉納成男・酒本晋太郎・田中幸悦・五十嵐健・石田航星・藤井裕彦・曾根巨充</p> <p>発表年月：2011 年 8 月</p>

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者
講演	<p>題目：A Study on the Optimization Method for Panel Layout Problem in Drywall 投稿先：28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2011) 著者：Kosei Ishida, Naruo Kano 発表年月：2011年06月</p>
講演	<p>題目：品質確保のための建築各部の3次元情報の取得と設計図との照合に関する研究（その1） 鉄筋工事における品質情報とその検査項目 出典：日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），p.1307-1308 著者：五十嵐健・嘉納成男・木本健二・石田航星・四釜侑也 発表年月：2010年9月</p>
講演	<p>題目：品質確保のための建築各部の3次元情報の取得と設計図との照合に関する研究（その2） 品質管理に適した3次元オブジェクトのモデリング方法 出典：日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），p.1309-1310 著者：四釜侑也・木本健二・嘉納成男・五十嵐健・石田航星 発表年月：2010年9月</p>
講演	<p>題目：品質確保のための建築各部の3次元情報の取得と設計図との照合に関する研究（その3） 点群データに基づく配筋状況の把握に関するシステムの開発 出典：日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），p.1311-1312 著者：石田航星, 嘉納成男, 木本健二, 五十嵐健, 四釜侑也, 福田結磨, 帯包知成 発表年月：2010年9月</p>
講演	<p>題目：建築工事のモニタリング手法に関する研究—Kinectを用いた測定精度の検証 出典：日本建築学会関東支部研究報告集 83(II), p.493-496 著者：太田裕輔、嘉納成男、石田航星 発表年月：2013年3月</p>
講演	<p>題目：施工シミュレーション手法に関する研究 —3次元モデルを用いた施工情報の視覚化— 出典：日本建築学会関東支部研究報告集 83(II), p.501-504 著者：田口直也、嘉納成男、石田航星 発表年月：2013年3月</p>
講演	<p>題目：施工シミュレーション手法に関する研究 —鉄筋コンクリート工事における作業人数による作業効率の比較— 出典：日本建築学会関東支部研究報告集 83(II), p.505-508 著者：岩崎辰哉、嘉納成男、石田航星、渡辺文志朗 発表年月：2013年3月</p>
講演	<p>題目：建築生産における3次元モデルの情報構造に関する研究：建築関係者の多様な観点に対応した階層的情報構造の提案 出典：日本建築学会関東支部研究報告集 82(II), p.517-520 著者：有坂 徹，嘉納 成男，石田 航星 発表年月：2012年3月</p>
その他 (総説)	<p>題目：3次元レーザースキャナーによるコンクリート躯体の計測とその形状解析 出典：コンクリート工学 Concrete journal 50(9), p.856-862, 著者：嘉納成男、石田航星 発表年：2012年09月</p>