

京都教育大学

2020 年度 修士論文

3D ソフトウェアを用いた立体図形の指導の在り方
—視線移動計測による分析を通して—

京都教育大学 大学院教育学研究科

教科教育専攻 数学教育専修

青木駿介

指導教員：黒田恭史 教授

柳本 哲 教授

目次

第1章 序論

1.1 研究背景	3
1.2 研究目的	11
1.3 研究方法	11
1.4 本論文の構成	11

第2章 今日の日本における空間図形の指導

2.1 学習指導要領における空間図形の学習内容と構成	13
2.2 学力調査からみた空間図形に対する今日的課題	18

第3章 立方体の切断課題に関する認識調査

3.1 大学生への認識調査	21
3.2 高校生への認識調査	25

第4章 視線移動計測実験

4.1 実験の概要	28
4.2 行動分析による考察	34
4.3 視線移動データによる分析及び考察	34

第5章 3D フリーソフトウェアを用いた 3D 教材制作及び教育実践

5.1 「3D Builder」について	41
5.2 立方体の切断を題材とした 3D 教材制作	41
5.3 金属結晶の構造モデルを題材とした 3D 教材制作	46
5.4 教育実践による 3D 教材の活用とその教育的効果	53

第6章 総合討議

6.1 各章の研究成果	59
6.2 今後の展望	60

引用・参考文献

第 1 章 序論

本章では研究背景、研究目的と方法、本論文の構成について論じる。

1.1. 研究背景

1.1.1. 空間図形の指導に関する課題

空間図形は、小学校低学年から段階的に指導がされているが、児童生徒の空間図形に対する理解度は他の単元に比べて十分でないことが指摘されている。その要因として鈴木 (2010) ^[1] は学習指導要領の内容配列の視点から、次の 3 点を挙げている。1 点目は、図形分野は他の分野に比べて教科書で扱われる頁数が少ない点である。2 点目は、学年があがるにつれて前学年の内容が新たに見直される点である。この背景として、学習指導要領がもつ特性の 1 つである同心円の構造が要因であると述べている。3 点目は、現実世界の中での様々な実践を通して、子どもがもつ合理的な対象の捉え方を、幾何に関わる原理・法則として捉え直す視点が欠如している点である。また、立花ら (2016) ^[2] は、「小・中・高等学校での算数・数学教育を通じて、事象を数理的に考察し表現する能力を高めるために図形領域の学習内容は必要不可欠なものであるが、見取図等の空間図形を平面図形に表現したものから、空間図形を捉えることに大きな課題がある」と指摘している。近藤ほか (2019) ^[3] は、公立小学校第 4 学年～第 6 学年及び公立中学校第 1 学年～第 3 学年の総計 1357 名を対象に、立方体の見取図に関する調査問題を課した。その結果、立方体の 3 つの頂点を通る一平面を想定してできる図形を的確に読み取る課題に関して、小学校第 4 学年及び第 5 学年の正答率は 10% 台、小学校第 6 学年～中学校第 2 学年は 30% 台と低く、中学校第 3 学年でも 52.4% と約半数にとどまる結果となった。この結果を受けて、空間図形を念頭で操作し推論する機会の充実の必要性を指摘している。岩崎ほか (2019) ^[4] は、公立中学校の第 2 学年 4 クラスを対象に、立体の切断面を問う課題及び図形の定義を問う課題の 2 部構成の認識調査を実施した。その結果、見取図の見かけの形のまま解答してしまう生徒が多く見られ、図形の性質等の知識が定着していないことが明らかとなった。こうした実態を受けて、実際に立体に触れることができる環境・教材を構築するとともに、図形の性質の理解につながる見方を育成する指導の必要性を指摘している。さらに、中西 (1996) ^[5] は、「立方体の切断課題等の空間図形を平面で切断したときの断面図の作図方法は、問題を解く際の手段になっている場合が多く、切断面の作図方法そのものを目的とした先行研究や実践報告が十分でない」と指摘している。

これらの先行研究から、空間図形の指導においては、小学校から高等学校まで段階を踏んで系統的に行いながらも、学習内容を発展させるだけではなく、既習の学習内容との関連を意識できるような指導法が必要ではないかと考えられる。具体的には、立体の観察や操作に終始するのではなく、算数・数学的な原理・性質を用いた測定や求積等の数学的活動の充実を図ることにより、空間図形を平面図形として表現したり、逆に、空間図形を平面図形に表現したものから空間図形を捉えたりするといったことを、既習の算数・数学の学習内容を活

用して数理的に考察することが可能になると考える。

本研究では、空間図形課題として立方体の切断を取り扱う。岩田（2017）^[6]は、立方体の切断を取り扱うねらいとして、「立方体は切断する位置によって切断面がそれぞれ異なることを正しく理解し、切断面における辺や面の位置関係について、筋道を立てて説明できるようにすること」と述べている。しかし、立体図形の頂点、辺、面の位置関係を正確に読み取ることや、立体図形を二次元平面上に表すことは容易ではなく、苦手意識をもつ児童生徒も少なくないことを指摘している。また、現在使用されている中学校数学の教科書^[7]では、立方体の切断に関する学習内容は発展課題として1ページ取り上げられるにとどまっており、学習時間が十分に確保されにくいことも児童生徒の苦手につながっていると考ええる。

これらの先行研究から、空間図形の学習の中でもとりわけ立方体の切断においては、立方体や切断面の頂点、辺、面の位置関係を正確に読み取ることや、切断面を見取図上に表すことが困難であることに加えて、教科書での扱いが少ないことによる学習時間の不足によって特に苦手意識をもつ児童生徒が多いことが明らかとなった。立方体の切断の学習をより細やかに取り扱うことより、切断する平面によって切断面の形が変化することを理解し、切断面における頂点、辺、面の位置関係について筋道を立てて説明する能力を養うことができると考える。

紙面上に表現された空間図形のみを用いて指導することは、学習者にとっても指導者にとっても困難である。これまで、空間図形のより効果的な指導方法を模索するにあたって様々な立体教材を活用しての実践が行われてきた。石井（2011）^[8]は、高等学校第2学年を対象とした数学の授業実践の中で、正四面体と正八面体の実物モデルを利用し、生徒の学習意欲を引き出すことにより、立体教材を場面に応じて使用する指導方法の有用性を実証している。濱口・高遠（2018）^[9]は、空間図形の学習に用いられる実物教材やタブレット教材、スライド教材といった様々な立体教材の教育的効果を検証するために、授業実践及びアンケート調査を行った。様々な立体教材を場面に応じて併用することで、立体教材やタブレット教材等の有効性を示したほか、教員自身が容易に立体教材やタブレット教材等を作成することができる環境が構築可能であることを指摘している。

これらの先行研究から、空間図形の指導にあたっては、従来の指導方法に加えて、指導者だけでなく学習者自身が容易に利用することが可能な「3D ソフトウェア等を活用した立体教材」（以降 3D 教材と記す）を開発し、それを用いた空間図形の新たな指導法を考案することで、教育的効果を見出すことができるのではないかと考える。

以上より、空間図形の学習を進める上では、作図や操作等の手段としての学習だけではなく、数理的原理や法則に基づいた学習を行うとともに、平面上に表現された空間図形の正確な読み取りや、反対に、空間図形を平面上に正確に表現するといった相補的な学習の設定が必要であると考えられる。加えて、実物の立体図形教材やデジタル教材を場面に応じて活用することで、様々な角度から空間図形を観察・操作し、理解をより深めることが可能な学習環境の構築が必要であると考えられる。

1.1.2 学習者の空間認知能力

空間能力 (spatial ability) や空間認知 (spatial cognition) についてはこれまで多くの研究がなされてきた。影山 (2000) ^[10] は、「空間能力の発達 は生物学的なものなのか、学習の効果によるものかという空間能力の発達の過程や契機については様々な論的立場があり子どもの実態に即した指導原理の構築には至っていないのが現状である」と述べている。加えて、指導の可能性について論じる以前に、空間能力とは何かについて検討する必要があるとしている。また、図形・空間の学習場面ではさらに、認知的処理能力としての空間能力をはたらかせつつ数学的に考えたり推論したりするという場面も考慮しなくてはならないとも述べている。

ところで、空間的思考は「空間能力」と「数学的思考」との2観点と関係することから、それぞれについて検討されている。影山は空間能力について、「空間能力は、人間の認知的諸能力の中で一定の領域を占めるものであり、必ずしも課題に空間的ないし視覚的な刺激を含まなくても問題解決過程において視空間的な方略が用いられるときには関与する能力であって、空間関係や視覚化などの下位能力にさらに分類することが可能なものである。」と捉えている。これを踏まえて、「空間関係の認識、視覚化などの様々な下位能力 (初源的能力) の総称もしくは統合」として空間能力の概念を定めている。「数学的思考」については、「顕在化した認知的処理 (課題解決のための方略) に対して、どのような概念基盤、資源によって、どのような意図のもとでそれがなされたのかといった視点」と定め、以下の2観点から捉えることとしている。

①単なるイメージ処理ではない、高次の幾何的思考

- ・空間内の垂直・平行関係、ねじれの位置の認識
- ・対称性 (線対称・点対称) の認識
- ・測量
- ・相似性の認識

②内容と関連する数学的な考え方

- ・それぞれの図形や図形に関する関係、操作の意味を知ること
- ・いろいろな図形の概念を深めること
- ・他の概念との関係を考えたり、概念を拡張したりすること
- ・移動や展開などの操作の意味や性質を理解すること
- ・概形を用いること
- ・基本的な作図や操作などを、形式的にできるようにすること、また証明を正しくすること
- ・空間特有の数学的な考え方

様々な国で幾何教育における標準的な枠組みとして用いられる van Hiele の5つの幾何的思考水準^[11]は次のように示されている。

- 第1水準：身の回りのいろいろな具体物を対象として、大局的な外観、つまり「形」に着目して、それらを観察・分類する水準。正方形と長方形は異なる形であり、また三角形、正方形、立方体などと述べることはできるが、形の性質を明白には同定していない。
- 第2水準：第1水準で思考の方法であった「形」を思考の対象として、それらをその性質に着目して考察する水準。三角形や四角形を辺がいくつ、角がいくつなどの観点から考察し、形の性質を導き出すため、図形はそれら性質の運搬者である。しかし、それらの性質を明白に関連づけたり順序づけたりしておらず、したがって正方形を長方形として捉えることはできない。
- 第3水準：形の「性質」を思考の対象として、それらの間の関係づけを行う、すなわち命題を作り出す水準。三角形において、「2 辺が等しい」、「2 角が等しい」などの性質を考え、「2 辺が等しいならば 2 角が等しい」などの命題を構成する。しかし、それらを正当化するような命題の系列を組織することはしない。
- 第4水準：「命題」を思考の対象として、命題間の関係、すなわち論理的体系を構築する水準。二等辺三角形の定義などに基づいて、演繹的にその性質を証明する。つまり、ある命題から他の命題を演繹するために、命題の系列を開発する。しかし、厳密さの要求を認識せず、他の演繹体系の間の関係も理解しない。
- 第5水準：「論理的体系」を思考の対象として、より優れた体系を構築したり、論理的体系間の比較をしたりする水準。幾何学の基礎に対するヒルベルトの方法に匹敵する高次の厳密さをもって、様々な演繹体系、例えばユークリッド的公理系の論理構造を考察する。その体系の性質を公準の無矛盾性、独立性、完全性として理解する。

以上の5つの思考水準を、Hoffer (1983) ^[12]は次のように整理している。

- 第1水準：認識ないし視覚化—子どもは物理的状況で幾何学的概念を認識する。
- 第2水準：分析—子どもは図形の性質を分析できる。
- 第3水準：整理—子どもは論理的に図形や関係を整理できるが、数学的体系において操作していない。したがって、単純な演繹はできるが、全体としての証明は理解できない。
- 第4水準：演繹—子どもは演繹の意味と、演繹的構造における異なった要素の意味を理解する。したがって、子どもは証明を‘再発明’でき、少なくとも理解できる。
- 第5水準：精緻化—子どもは様々な公理的体系において取り組むことができる。また抽象的演繹ができる。

Gutierrez ら (1991) ^[13]はこの van Hiele の5つの思考水準のうち第5水準を除いた4

つの水準を「認識」、「分析」、「インフォーマルな演繹」、「形式的演繹」と定めることによって3次元幾何へと応用している。しかし、影山は、「空間能力と数学的思考との相互作用はそれほど意識されておらず、よって思考水準について一般的に考察するためには、空間能力の特性や空間そのものの特性—三次元性—を考慮して、以下のように思考水準を捉え直す必要がある」と指摘している。

第1水準：認識—子どもは全体的な見えによって具体物を認識するのみで、その幾何的性質や構成要素をそれとして認識しない。よって、空間内にある対象どうしの位置関係を認識せず、主として視覚に基づいた「～のように見える」的な推論しかできない。また具体物がない状態でのイメージ活動（初源的空間能力）は困難である。

第2水準：分析—子どもは具体物の固有の性質や構成要素を認識し、それらに関連づけて心的にいくつかの合成単位を構成する。しかしながら、合成単位どうしの関係については考察しない。また空間内にある対象どうしの位置関係や具体物の持つ対称性といった諸性質は、それを用いた具体的操作や実験によって発見できるのみである。この水準は、全体的見えから抽象したただ1つの数学的性質によって推論することが特徴的であり、構成要素どうしを全体として適切に協応させた表現をすることへの移行期にあたる。

第3水準：インフォーマルな推論—子どもは対象の持つ性質間の関係を理解し、それに基づいて適切に表現したり、インフォーマルながらも推論したりすることができる。この水準にいる子どもは、構成要素からなる合成単位どうしを全体的に協応・統合させることができる。いくつかの形式的証明を理解することができ、自分でも簡単な推論を行うことができる。しかしながら、比較的直接的な状況や経験的参照物のある文脈において、性質間の関係を用いることができるのみである。

第4水準：形式的推論—子どもは演繹的扱いを理解し、解決過程のなかで関係を道具として用いることができる。

第5水準：子どもはそれまでの幾何学として確立された公理体系を吟味したり、新しい公理体系を採用したりする。この水準にいる子どもは、代数的処理によって空間を解析することができる。しかしながら、この van Heile の水準にまで達する子どもはほとんどいないとされること、空間能力と数学的思考との相互作用としての空間的思考から見た場合に、代数処理には空間能力の要素が見出されにくいことなどから、この水準は除くこととする。

また、影山は、duval (1998) ^[14]の複雑な幾何的活動の様相における相関関係を、「イメージ活動及び視覚化」、「表現」、「空間的推論」の3つの構成要素へと拡張させた。このうちの「表現」を、他者とのコミュニケーションを意識して描かれた「描写的表現」と自然

言語や数学言語を用いた「言語的表現」に細分した4点を横軸として、前述の van Heile の思考水準を見直した4つの水準を縦軸として、小学校から高等学校までの空間図形の学内容を割り当てている。図 1-1-1 は、幾何的活動の様相における相関関係を横軸、4つの思考水準を縦軸として、影山が小学校から高等学校までの空間図形の学習内容を割り当てた表である。

	イメージ活動および視覚化	表 現		空間的推論
		描写的	言語的	
形式的推論	対象の中に見出した幾何的性質を課題解決に用いようとする、またより多くの情報を得るために、幾何的性質を用いようとする	与えられた図表現からもとの対象を演繹的に構成する、また対象を表す図表現を作る	与えられた状況を数学的用語を用いて適切に記述説明する 定義や命題を表す媒体として数学的用語を用いる。	証明を進展させるために、様々な幾何的性質や論理規則を用いる
インフォーマルな推論	対象の構成要素どうしの関係に基づく、様々な幾何的性質（平行・垂直関係、対称性・双対性など）を見出す 対象の中に作り出している合成単位どうしを協応・統合して、全体として一貫した心的モデルを構成する。	様々な観点から対象を図表現する（展開図、投影図など）、逆に与えられた図表現からもとの対象や、それと関連するほかの対象をイメージ的に構成することができる 「見え－実体」が完全に区分されており、表現の規則したがって図表現することができる。	対象間の相互関係やその構成要素どうしの関係を適切に記述説明する 対象の定義文や定理、命題文を解釈する。 与えられた状況を数学的用語によって記述説明する。	定義文から様々な性質が導かれることを理解する 対象が一通りに決定されるための条件を探索したり、ある分類が別の分類に含まれるかどうかを決定する（包含関係）。
分析	全体的な形態や分析的観点（点や辺の数、長さなど）によって、対象の持つ性質に注目する 対象の構成要素どうしを関連づけていくつかの合成単位を作り出す。	対象のもつ性質を用いて図表現したり、図表現からもとの対象を構成したりする 「見え－実体」は区分されているが、部分どうしが統合された図を描くことはできない。	対象の様々な性質を、導入された用語を用いて言葉で記述したり、図表現では補えない情報を補足する 用語の用い方は必ずしも適切ではない。	様々な分析的観点から対象を異なるタイプに分類することができる 対象を区別するためにその性質を用いるが、必ずしも適切ではない。
認識	身の周りの具体物や描かれた絵に対して、その全体的な形態に類似点や相違点を見出す ある1つの視点から対象を認識するのみで、それを心的に操作することはしない。	具体物のある1つの視点からスケッチする 「見え－実体」が未分化で、見えない情報までも図表現しようとする、逆に与えられた図表現からは、見えている部分のみを認識する。	与えられた具体物に、その特徴を生かした名前をつける 対象を記述するのに用いられる言語は、その特殊なイメージに基づいた視覚的なものである。	対象間に類似点や相違点があることに気づく 空間内の様々な位置に同型の図形があることを認識する。

図 1-1-1 空間的思考の構成要素とその水準

この表から、「イメージ活動及び視覚化」の水準を高次のものにするためには、多角的な視点から対象となる空間図形を観察・分析し、そこから幾何的性質（平行・垂直関係、対称性・双対性など）を見出すことによって、課題解決や新たな情報を得るために幾何的性質を用いようとする能力を養うことが必要だと考えられる。

「描写的表現」の水準を高次のものにするためには、対象となる空間図形の「見えている

形」と「実際の形」の違いを区別し、展開図や投影図等の表現の規制に従って表現したり、逆に与えられた図表現から対象を表す図表現を作図したりすることができる能力を養うことが必要だと考えられる。

「言語的表現」の水準を高次のものにするためには、対象となる空間図形の定義、定理、命題や性質を解釈し、数学的用語を用いて適切に記述説明することができる能力を養うことが必要だと考えられる。

「空間的推論」の水準を高次のものにするためには、様々な分析的観点から対象間に存在する類似点や相違点を認識し、それらの包含関係を理解し、様々な幾何的性質や論理規則を用いて証明を発展することができる能力を養うことが必要だと考えられる。

以上のことから、空間図形の指導にあたっては、様々な幾何的性質を用いて、「見えている形」と「実際の形」の共通点や相違点を見出すとともに、数学的用語あるいは条件に従った図表現を用いてそれらを適切に表現し、証明や課題解決へと発展させることが重要であると言える。

一方、影山（2009）^[15]は、「思考水準としての一貫性や妥当性、概念による水準の違いが問題とされたり、算数から数学への移行、すなわち図形の考察から幾何学への考察への移行がそのままでは明確でない」ことを課題として挙げている。思考水準は絶対的なものではなく、あくまで空間図形に対する思考における発達段階を示す一指標であることを念頭に置いて研究を進めることとする。

1.1.3 学習者の特性分析における生体情報の活用

近年の科学技術の進展により、軽量化、小型化された生体情報計測装置が開発され、安全かつ容易に生体情報を計測することが可能である。学習者の通常の活動状態における無意識的な生体情報を計測することにより、従来の行動観察やアンケート調査では確認することのできなかった学習者の無意識的な行動をデータ化することが可能である。黒田（2008）^[16]は、「指導にあたっては、児童生徒の思考過程を正しく把握する必要があるが、こうした過程は紙面に残りづらく、従来の行動観察手法のみでは捉えられない特徴もある」と指摘している。このことから、児童生徒が空間図形においてどのようなところに困りを抱えているのかを解明するためには、従来の分析手法のみでは不十分であると考えた。そこで、本研究では、生体情報を用いた分析手法を併せて採用することとした。

生体情報の1つである視線移動計測に関する先行研究として、黒田ほか（2014）^[17]は、複合立体図形の見取図から立面図を解答する課題を与え、課題解決時の学習者の視線移動を計測する実験を行った。その実験結果から、ある視点から隠れて見えない部分や、立体の乖離している部分を把握することに困難を示すことを明らかにしている。北條ほか（2016）^[18]は、特異的読字障害児17名とADHDの児童10名及びコントロール群の児童12名を対象に4種類の音読検査課題を課し、読み飛ばしや読み誤りの回数を測定し、同時に注視点の数や視線停滞時間を、アイトラッカー（視線移動計測装置）を用いて分析している。その

結果、読み飛ばしや読み誤りはともに特異的読字障害児童、ADHD 児童、コントロール群児童の順に回数が多い傾向が見られ、読字障害児童の注視点の数がコントロール群の児童の注視点の数よりも多いことが明らかになっている。このことから、「読字障害の児童の視線の動きをアイトラッカーで可視化することは、読字障害の児童が“具体的にどのように読字に困難を伴っているか”を理解するために有用である」と述べている。中野(2017)^[19]は、大学生 18 名を対象にタングラムを用いた実験課題を課し、その際の視線移動を計測する実験を行った。実験の結果、洞察が生じた被験者は特定のピースや位置に視線を停留させるのではなく、全体的に視線を走査させる傾向があることが明らかとなった。木下ほか(2020)^[20]は、立方体ブロックで構成された複合立体のブロック数えあげ課題について、課題提示媒体を「実物」、「タブレット」、「紙面」の 3 種類とし、視線移動と脳活動の同時計測実験によって学習者の視線移動及び脳活動の特性を分析した。その結果、実物条件とタブレット条件は異なる結果が見られ、タブレット条件と紙面条件に近い傾向が見られたことから、実物教材の代替としてタブレット教材を使用した指導法に慎重になる必要性を指摘している。

そこで本研究では、生体情報の 1 つである視線移動を分析対象として、視線移動計測実験を行うことで、立方体の切断課題遂行時の視線移動の特徴の関連性を分析し、従来の分析手法では見ることのできなかった学習者の課題解決に至る過程を生理学データに基づいて明らかにすることとする。

1.1.4 3D ソフトウェアを活用した空間図形教育

今日では、インターネットサービスの普及や科学技術の進展により、教育分野に関しても情報化が急速に進んでいる。教育場面における情報化の推進について、令和 2 年に文部科学省^[21]は『新時代の学びにおける先端技術導入実証研究事業（学校における先端技術の活用に関する実証事業）について』の中で、「Society5.0 の時代において求められる資質・能力を育成するためには、新学習指導要領の着実な実施やチームとしての学校運営の推進が不可欠であり、その中核を担う教師を支え、その質を高めるツールとしての先端技術を効果的に活用することが重要である」と指摘しており、教育のあらゆる場面において ICT を基盤とした様々な先端技術を効果的に活用することによる教育の質の向上を掲げている。それに関連して、令和元年に同省^[22]は『教材整備指針（一部改定案）』の中の技術革新等関連において、3D プリンターやソフトウェア等の昨今の技術革新を踏まえた機器を学校現場に導入し、活用することを推進している。

以上から、教育現場の急速な情報化に伴い、3D ソフトウェア等を活用した 3D 教材の開発と、それを用いた指導法の教育効果について実践・検証を重ねていくことが必要と考える。そのためには、教育現場等での円滑な使用を視野に入れ、児童生徒や教員が活用しやすいよう 3D ソフトウェア及び 3D 教材の基本操作方法や専門用語等についてのマニュアル作成も早急に求められる。

1.2. 研究目的

本研究の目的は、以下の 2 点である。

- (1) 学習者の立方体の切断課題遂行時の課題解決に至る過程を、視線移動計測実験から明らかにし、空間図形の切断課題に関する困難な点を解明することである。
- (2) 小・中・高等学校の各段階における空間図形の学習内容を整理し、3D ソフトウェアの活用を見据えた立体教材を制作するとともに、それを用いた空間図形教育の効果的な指導方法を検証することである。

1.3. 研究方法

本研究の方法は、以下の 3 点である。

第一に、これまでの算数・数学教育における空間図形の学習に関わる現状と課題、教育実践等に関する先行研究を概観する。3D ソフトウェアを用いることを踏まえた課題と解決策について言及する。

第二に、視線移動計測実験を行うため、実験課題を開発し大学生及び高校生を対象に認識調査を行う。その結果をもとに課題の修正を行い、視線移動計測実験を実施することにより、立方体の切断課題遂行時における学習者の課題解決過程の特性を分析し、基礎データとする。

第三に、実験結果をもとに、3D ソフトウェアを用いた空間図形の 3D 教材を作成するとともに、それを用いた指導法を考案し高校生を対象とした教育実践を行う。

1.4. 本論文の構成

本論文の構成を、図 1-4-1 のように設定し、各章では次の内容を明らかにする。

第 1 章の「序論」において、本研究の研究背景、研究目的、研究方法、本論文の構成について論じる。

第 2 章の「今日の日本における空間図形の指導」では、今日の小・中・高等学校各段階での空間図形教育に関する学習内容と課題について論じる。また、学力調査の結果を概観し、空間図形教育における今日的課題について言及する。

第 3 章の「立方体の切断課題に関する認識調査」では、立方体の切断課題を用いた大学生及び高校生を対象とする認識調査の結果について述べ、大学生、高校生それぞれの課題解決過程の特徴を明らかにするとともに、課題の難度や条件設定の見直しについて論じる。

第 4 章の「視線移動計測実験」では、視線移動計測の原理について論じるとともに、第 3 章を踏まえて作成した立方体の切断課題を用いて視線移動計測実験を行い、その結果から得られる課題解決過程の特性を明らかにする。

第 5 章の「3D ソフトウェアを用いた 3D 教材制作及び教育実践」では、3D フリーソフトウェアである「3D Builder」を用いて小・中・高等学校の各段階に対応した 3D 教材制作

を行う。また、制作した 3D 教材を用いた指導方法について言及するとともに、高校生を対象とした教育実践の結果について論じる。

第 6 章の「総合討議」では、本研究の成果について章毎に整理し、今後の展望について論じる。

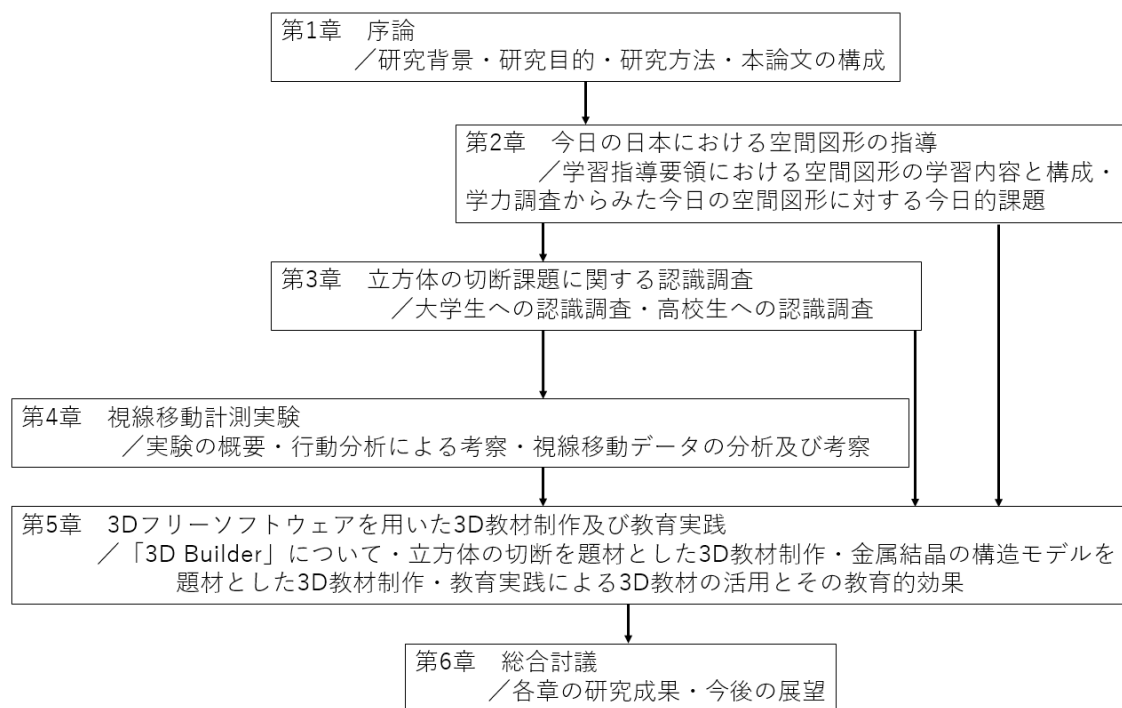


図 1-4-1 本論文の構成

第2章 今日の日本における空間図形の指導

本章では、空間図形教育に関する今日の課題や、今後の動向について論じる。

2.1. 学習指導要領における空間図形の学習内容と構成

2.1.1. 小学校算数科における空間図形の学習内容と構成

小学校算数科における空間図形の指導内容を、「小学校学習指導要領【算数編】（平成 29 年告示）」^[23]を参考に表 2-1-1 のように整理した。表 2-1-1 の縦軸は、小学校における学年を表す。横軸は、小学校学習指導要領における指導内容の構成のうち空間図形に関するものを抜粋したものと、それに対応する数学的活動に関する記述内容を表す。ここに示す空間図形の指導内容は、小学校算数科の 4 領域の中での「B 図形」の領域に含まれるものを指す。

第 1 学年では、身の回りにあるものの形を観察や構成の対象とし、形を見つけたり、形作りをしたりする活動を重視するとともに、構成や分解の様子を、言葉を使って表すことを指導する。ここでは、積み木や箱、折り紙といった具体物を操作しながら図形に関わりをもつとともに、児童の日常生活や学校生活の場面と算数の学習を関連づけていく。これらの学習を通して、ものの形や大きさ、位置などを認識して、形を認め、形の特徴について捉えられるようにするとともに、形について学ぶことの楽しさを感じる経験を通して、図形に対する関心を喚起し、図形に対する豊かな感覚を養う。

第 2 学年では、身の回りにある箱の形をしたものを取り上げ、空間図形について理解する上で素地となる学習を行う。ここでは、正方形や長方形で構成されている箱の形について指導する。これらの学習を通して、日常にある図形や事象を捉える際にも、全体を見て概要を捉えた後に図形を構成する各要素に着目して思考し、判断する態度を養う。

第 3 学年では、主に球について学習をする。第 1 学年ではボールのような形と捉えてきたものを、球を平面で切断すると切り口はいずれも円になることや、球を 2 等分に切断した場合の切り口が最大になることなどの観察や操作を通して、球の性質について指導する。これらの学習を通して、図形の構成や問題解決の際に、それらの性質を明確にし、それを用いて解決しようとする態度を養う。

第 4 学年では、立方体、直方体について、頂点、辺、面といった構成要素に着目し、辺と辺、辺と面、面と面の平行及び垂直の関係について学習する。ここでは、空間図形をどのようにして平面上に表現するか、また逆に、平面上に表現された図からどのようにして空間図形を構成できるかを考察するとともに、現実事象を図形の性質から捉え直すことをねらいとしている。これらの学習を通して、立方体や直方体についての理解を深め、空間についての豊かな感覚を養う。

第 5 学年では、基本的な角柱や円柱（直角柱、直円柱）について、図形を構成する要素である底面、側面に着目し、図形の性質を見いだすとともに、その性質をもとに立方体や直方体といった既習の空間図形の性質を捉え直すことをねらいとしている。ここでは、頂点や辺

や面の個数や面の形を捉えたり、辺と辺、辺と面、面と面のつながりや位置関係を調べたりする。これらの学習を通して、分類した図形の性質をもとに、既習の図形を統合的に捉えることができるかを検証しようとする態度を養う。

第6学年では、角柱や円柱の体積について、必要な部分の長さを測定し、計算によって体積を求めるという考えをもとに、公式を導出し、それを用いることができることをねらいとしている。

黒田（2011）^[24]は、小学校における空間図形の理解が不十分である要因として、次の3点を挙げている。1つ目は、教科書主体の学習では、立体図形の頂点、辺、面の位置関係が正しく理解できず、立体図形が存在する空間の意味や特徴が意識されない点である。2つ目は、数学的内容と現実場面との関連づけが希薄である点である。3つ目は、指導者側も、立体図形や空間に関する学習経験が不足しており、適切な指導に至らない点である。

以上から、小学校算数科では空間図形は小学校第1学年の段階から、日常生活や学校生活での経験的な活動をもとに学習し、学年が進行するとともに、図形の性質などを学習する。一方で、第4学年以降では空間図形の学習内容に対応する数学的活動が記されておらず、数理的原理や法則に基づいた学習内容の構成が不十分となり、空間図形の学習が作図や計算等の手段にとどまってしまう要因の1つと考えられる。さらに、教科書だけでなく、実物の立体やソフトウェア等を活用し、立体図形の頂点、辺、面の位置関係を正しく理解するとともに、立体図形が存在する空間の意味や特徴を捉えることが重要である。

表 2-1-1 小学校算数科における空間図形の指導内容及び数学的活動（筆者作成）

学年	空間図形に関する内容の構成	対応する数学的活動
第1学年	形とその特徴の捉え方 形の構成と分解 方向やものの位置	身の回りの事象を観察したり、具体物を操作したりして、数量や形を見いだす活動
第2学年	正方形や長方形の面で構成される箱の形	算数の学習場面から見いだした算数の問題を、具体物、図、数、式などを用いて解決し、結果を確かめる活動
第3学年	球	身の回りの事象を観察したり、具体物を操作したりして、数量や図形に進んで関わる活動
第4学年	立方体、直方体 直線の平行や垂直の関係 見取図、展開図 ものの位置の表し方	記述なし
第5学年	角柱や円柱 体積の単位(cm^3 , m^3)と測定 立方体及び直方体の体積の計算による求め方	記述なし
第6学年	角柱及び円柱の体積の求め方	記述なし

2.1.2. 中学校数学科における空間図形の学習内容と構成

2.1.1.と同様に、中学校数学科における空間図形の指導内容を、「中学校学習指導要領【数学科】（平成29年告示）」^[25]を参考に表2-1-2のように整理した。表2-1-2の縦軸は、中学校における学年を表す。横軸は、中学校学習指導要領における指導内容の構成の

うち空間図形に関するものを抜粋したものと、それに対応する数学的活動に関する記述内容を表す。ここに示す空間図形の指導内容は中学校数学科の4領域の中での「B 図形」の領域に含まれるものを指す。

第1学年では、空間における直線や平面の位置関係を知ったり、直線や平面図形の運動によって空間図形を構成したり、空間図形を平面上に表したり、平面上に表現された空間図形から性質を読み取ったりすることを学習する。小学校算数科で立体図形として扱っていたものを、空間における線や面の一部を組み合わせた空間図形として捉え直し、抽象化された直線や平面の位置関係を考察する。ここでは、観察や操作、実験などの活動を通して、図形の構成要素や構成の仕方に着目し、図形の性質や関係を直観的に捉え論理的に考察する力を養う。

第2学年では、空間図形に関する内容の構成が記述されていない。

第3学年では、観察や操作、実験などの活動を通して、三角形の相似条件などを用いて図形の性質を論理的に確かめ、数学的な論理の必要性や意味及び方法の理解を深め、図形の性質や計量について論理的に考察し表現する力を養う。ここでは、基本的な立体の相似の意味を理解し、相似な図形の性質を用いて図形の計量ができることをねらいとしている。

以上から、中学校数学科では小学校算数科の学習内容を踏まえ、抽象化されたものの性質や関係を観察や操作、実験などの活動を通して捉え直すとともに、数学的な推論に基づいて論理的に考察し表現する力を養う。一方で、第2学年では空間図形の扱いが無いことや、空間図形の学習内容に対応した数学的活動例が示されていないことが課題として考えられる。

表 2-1-2 中学校数学科における空間図形の指導内容及び数学的活動（筆者作成）

学年	空間図形に関する内容の構成	対応する数学的活動
第1学年	直線や平面の位置関係 基本的な図形の計量 空間図形の構成と平面上の表現	記述無し
第2学年	該当無し	記述無し
第3学年	相似な図形の相似比と面積比及び体積比の関係	記述無し

2.1.3. 高等学校数学科における空間図形の学習内容と構成

高等学校数学科における空間図形の指導内容を、「高等学校学習指導要領【数学編 理数編】（平成30年告示）」^[26]を参考に表2-2-1のように整理した。表2-2-1の縦軸は、高等学校における数学科の各科目を表す。横軸は、高等学校学習指導要領における指導内容の構成のうち空間図形に関するものを抜粋したものを表す。空間図形の指導内容については、高等学校数学科の指導内容が中学校数学科の4領域をもとに各教科によって異なる位置づけをされているため、ここでは「B 図形」の領域に関連づけた指導内容を括弧内に

示す。

数学Ⅰでは、図形の構成要素間の関係に着目し、日常の事象や社会の事象などを数学的に捉え、問題を解決したり、解決過程を振り返って事象の数学的な特徴や他の事象との関係を考察したりする。ここでは、三角比や正弦定理、余弦定理などの活用場面として、簡単な空間図形の計量を取り扱う。また、唯一の必修科目であることから、数学Ⅰだけで履修を終える生徒を含めたすべての高校生に必要な数学的素養を身につけさせることをねらいとしている。

数学Ⅱでは、空間図形に関する内容の構成が記述されていない。

数学Ⅲでは、定積分を利用して、立体の体積を求める学習を行う。曲線で囲まれた図形の面積の求め方をもとに、簡単な角錐などの体積を求める方法を考察したり、閉区間 $[a, b]$ において、曲線 $y=f(x)$ と x 軸とで囲まれた図形を x 軸のまわりに回転させてできる立体の体積 V が次の公式で求められることを導いたりする。

$$V = \pi \int_b^a \{f(x)\}^2 dx \quad (a < b)$$

数学 A では、空間図形に関する基本的な性質について理解するとともに、図形の構成要素間の関係や既習の図形の性質に着目し、図形の新たな性質を見だし、その性質について論理的に考察したり説明したりする。このような活動を通して、空間認識力を高めたり、空間図形の中に平面図形を見だし、図形の性質を統合的・発展的に考察したりする力を養う。また、空間における直線や平面についての基本的な性質について理解し、それらを身近な事象の考察に活用できるようにする。

数学 B では、日常の事象や社会の事象において、数・量・形やそれらの関係に着目し、理想化したり単純化したりして、問題を数学的に表現する。ここでは、国際的な調査でも注目されている「数学的リテラシー」も念頭におきながら、社会生活等における問題を解決するための資質・能力を養う。

数学 C では、座標及びベクトルの考えが平面から空間に拡張できることを理解し、ベクトルやその内積の基本的な性質などを用いて、空間図形の性質を見いだしたり、多面的に考察したりする力を養う。さらには、数量や図形及びそれらの関係に着目し、日常の事象や社会の事象などを数学的に捉え、ベクトルやその内積の考えを問題解決に活用する力を養う。

以上から、高等学校数学科では、中学校数学科の学習内容を踏まえ、既習の知識や技能から新たな性質を見いだしたり、社会事象などを数学的に捉えたりして、社会生活における問題解決能力を養う。一方で、コース履修による教科選択の関係から数学Ⅰしか履修しない生徒もいるため、そういった生徒に空間図形に関する資質・能力を身につけさせることが難しいといった課題が考えられる。

表 2-2-1 高等学校数学科における空間図形の指導内容の構成（筆者作成）

	空間図形に関する内容の構成(内容)
数学Ⅰ	図形の計量(図形と計量)
数学Ⅱ	該当無し
数学Ⅲ	面積，体積，曲線の長さ(積分法)
数学A	空間図形(図形の性質) 数量や図形と人間の活動(数学と人間の活動)
数学B	数理的な問題解決(数学と社会生活)
数学C	空間座標，空間におけるベクトル(ベクトル)

また、学習指導要領改訂により、各学科に共通する教科「理数科」が新設された。理数科においては、「理数探究基礎」及び「理数探究」の2科目で編成される。理数科の開設の背景として、「高等学校学習指導要領（平成30年告示）解説理数編」^[27]では次の5点を挙げている。

1. 国際的な学力調査では小・中学生とも良好な結果であり、数学及び理科を学ぶ楽しさや学習意義等に対する意識が改善される一方で、諸外国と比べると肯定的な回答の割合が少なく、学校段階があがるごとに低下していく傾向があること。
2. 高等学校の数学及び理科の分野における探究的な学習を中核に据えた科目として「数学活用」及び「理科課題探究」が設定されているが、大学入学者選抜における評価がほとんど行われないことや、指導方法が教員間で共有されていないことから、高等学校における科目開設率が極めて低いこと。
3. 数理横断的なテーマに徹底的に向き合い考え抜く力を育成するため、数学と理科の知識や技能を総合的に活用して主体的な探究活動を行う必要があること。
4. スーパーサイエンスハイスクール（SSH）で行われている「課題探究」等と同様、将来、学術研究を通じた知の創出をもたらすことのできる人材育成を目指し、そのための基礎的な資質・能力を身につけさせる必要があること。
5. 我が国が様々な問題に直面しており、解決を担う研究者には深い知的好奇心や自発的な研究態度、自ら課題を発見したり未知のものに挑戦したりする態度が求められるとともに、革新的価値は多様な学問の知の統合によって生まれることが多く、従来の慣習や常識にとらわれない柔軟な思考と斬新な発想が必要であること。

理数科では、様々な事象に関わり、数学的な見方や考え方や理科の見方・考え方を組み合わせるなどして働かせ、探究の過程を通して課題を解決するために必要な資質・能力の育成を目的としている。数学という教科の枠組みにとらわれず、教科横断的な学習を進めていくとともに、生徒自らが試行錯誤し、問題解決を目指していくことが重要であり、変化に応じた指導体系の構築が早急に求められている。

2.2. 学力調査からみた今日の空間図形に対する課題

全国学力・学習状況調査は、2007 年度から開始された学力調査である。小学校第 6 学年及び中学校第 3 学年を対象に実施され、原則として対象学年の全児童生徒が調査に参加する。岡本（2010）^[28]は、「学校現場への影響は大きく、現状を把握する 1 つの評価方法であることを超え、教育内容や教育方法のあり方にまで影響を及ぼしている」と述べている。これを踏まえて、本研究では、空間図形に対する今日的課題を明確に把握するための評価方法の 1 つとして、全国学力・学習状況調査の結果を用いることとした。

図 2-2-1 は、平成 27 年度に実施された全国学力・学習状況調査中学校数学 A の大問 5 の問題である。

小問（1）は、直方体において、与えられた辺に垂直な面のうちの一つをかく問題であり、空間における直線や平面の位置関係を理解しているかどうかを確かめるものである。

小問（2）は、直角三角形の斜辺を軸として回転させてできる立体の見取図を選択する問題であり、平面図形の運動による空間図形の構成についての理解度を確かめるものである。

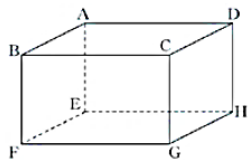
小問（3）は、与えられた投影図から立体を読み取り、その立体を選択する問題であり、与えられた投影図から空間図形を読み取ることができるかどうかを確かめるものである。

小問（4）は、与えられた式で体積が表される立体をすべて選択する問題であり、与えられた式を用いて体積を求めることができる立体を理解しているかどうかを確かめるものである。

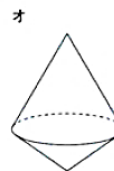
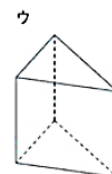
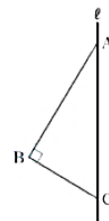
小問（1）の正答率は 47.9%と小問（2）の 83.8%、小問（3）の 84.1%、小問（4）の 57.3%に比べて低いことや、数学 A 全体の平均正答率は 65.0%であることから、空間における直線や平面の位置関係の理解に課題があることがわかる。同報告書^[29]はこれらの指導について、「身近な立体を観察したり見取図を見たりして、直線と直線、直線と平面、平面と平面の位置関係を考察する場面を設定し、空間における直線と平面の位置関係を理解できるように指導することが大切である」と述べている。

5 次の(1)から(4)までの各問に答えなさい。

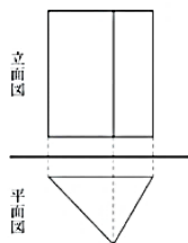
(1) 下の図の直方体には辺CGに垂直な面がいくつかあります。そのうちの1つを選んで書きなさい。



(2) 右の図の直角三角形ABCを、直線ℓを軸として1回転させて立体をつくります。
このとき、できる立体の見取図が下のアからオまでの中にあります。正しいものを1つ選びなさい。



(3) 右の図は、ある立体の投影図で、正面から見た図(立面図)と真上から見た図(平面図)で表したものです。この投影図が表す立体が下のアからオまでの中にあります。正しいものを1つ選びなさい。



(4) 下のアからオまでの立体は、円柱、角柱、円錐、角錐のいずれかです。下の図において、Sは色のついた部分の面積を、hは図に示した線分の長さを表すものとします。

このとき、体積が次の式で表される立体を、下のアからオまでの中からすべて選びなさい。

$$\frac{1}{3}Sh$$

ア 三角柱

イ 四角柱

ウ 三角錐

エ 四角錐

オ 円錐

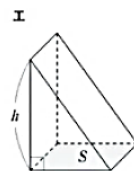
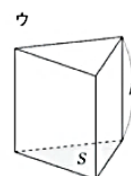
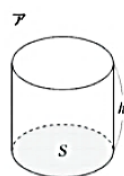


図 2-2-1 平成 27 年度全国学力・学習状況調査中学校数学 A 大問 5

また、渡邊(2008)^[30]も、空間図形を苦手とする中学生が多いことを学力調査の結果をもとに述べており、「日常生活に密接に関わる空間図形を苦手としている中学生が多いことは日本の数学教育の大きな問題点である」と警鐘を鳴らしている。熊倉ら(2000)^[31]は「空間図形の理解の様相をとらえるための観点」として、以下の4点を設定している。

- ①基本的な立体図形に関する理解
- ②空間における直線や平面に関する理解
- ③空間図形の操作能力
- ④空間図形への活用能力

これらの先行研究から、日常生活に潜む身近な空間図形を観察したり、見取図を見たりして、直線と直線、直線と平面、平面と平面の位置関係を考察する機会を充実させることの必要性が明らかとなった。具体的には、立方体などの基本的な立体図形に関する辺と辺、辺と面、面と面の位置関係を理解し、それが2次元平面上に見取図として表現されたときに、保存される関係性と保存されない関係性とを判別することが課題の1つであると考えられる。また、与えられた立体図形を指定された距離や方向、角度に平行移動・回転移動させたり、指定された平面で切断したりするといった念頭での空間図形操作能力も重大な課題と考えられる。

第3章 立方体の切断課題に関する認識調査

本章では、視線移動計測実験を行う前に、大学生 27 名を対象に、作成した立方体の切断課題 14 題のプレテストを行い、実験課題を選定するとともに、立方体の切断に関する理解度を把握する。このプレテストの結果をもとに実験課題を設定し、高校生 80 名を対象に視線移動計測実験で使用するものと同様の課題 4 題の認識調査を実施した。この認識調査の結果を踏まえて、課題の難度や、制限時間等の条件の妥当性を再度調整した。

3.1. 大学生への認識調査

3.1.1. 目的

本調査の目的は、学習者の立方体の切断課題遂行時における解決過程を解明するための、視線移動計測実験を実施するにあたり、作成した実験課題のプレテストを行うことで、課題の難度や、問題数等の条件の妥当性を検証することである。

3.1.2. 対象

・京都教育大学 学生 27 名

3.1.3. 調査時期及び場所

2018 年 5 月 9 日に、京都教育大学の教室にて調査を行った。調査は一斉に行い、被験者には一定の間隔をあけて着席させた。監督者として筆者が在室した。監督者は、解答用紙の配布と時間測定、解答用紙の回収を行った。

3.1.4. 調査課題

本調査では、紙面課題として、「PowerPoint2016」の作図ツールを用いて作成した斜投影法の立方体の見取図を用意した。紙面上にかかれた立方体の辺上に等間隔に 5 つずつ存在する計 44 の黒点のうち、指定された 3 点（白点で表示）を通る平面で立方体を切断したときの切断面を作図するという課題を設定した。また、課題は計 14 題とした。以下図 3-1-1 ～図 3-1-14 は作成した課題である。

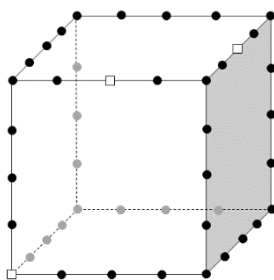


図 3-1-1 課題 1

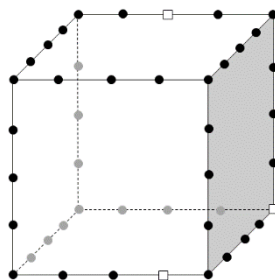


図 3-1-2 課題 2

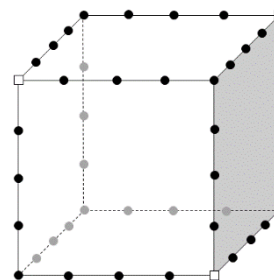


図 3-1-3 課題 3

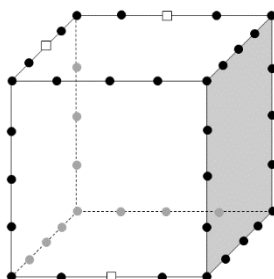


図 3-1-4 課題 4

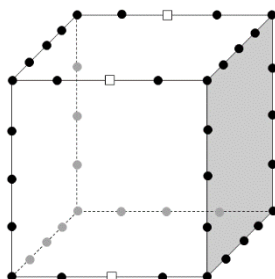


図 3-1-5 課題 5

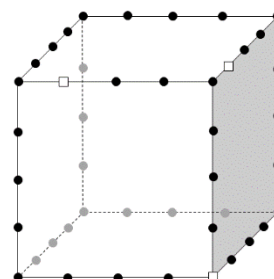


図 3-1-6 課題 6

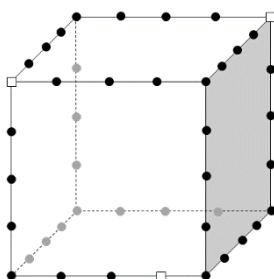


図 3-1-7 課題 7

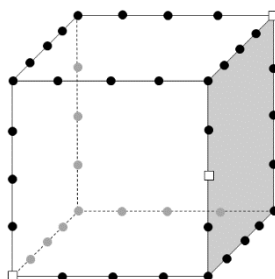


図 3-1-8 課題 8

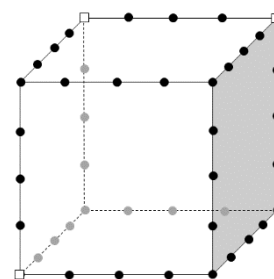


図 3-1-9 課題 9

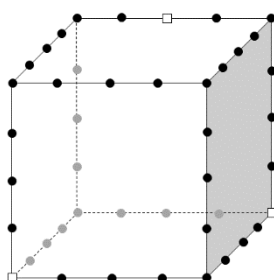


図 3-1-10 課題 10

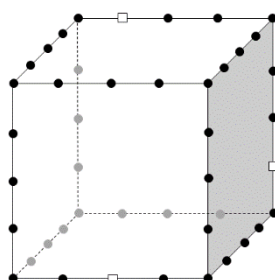


図 3-1-11 課題 11

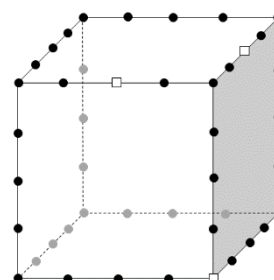


図 3-1-12 課題 12

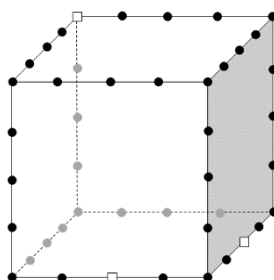


図 3-1-13 課題 13

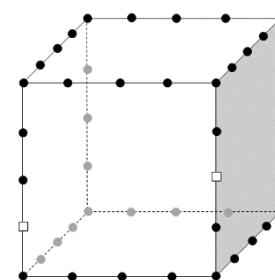


図 3-1-14 課題 14

課題 1 の断面図は等脚台形、課題 2 の断面図は平行四辺形、課題 3 の断面図は正三角形、課題 4 の断面図は正六角形、課題 5 の断面図は正方形、課題 6 の断面図は三角形、課題 7 の断面図は等脚台形、課題 8 の断面図はひし形、課題 9 の断面図は長方形、課題 10 の断面図は等脚台形、課題 11 の断面図は六角形、課題 12 の断面図は二等辺三角形、課題 13 の断面図は五角形、課題 14 の断面図はひし形となる。解答にあたっては、物差しの使用の有無や、点線や補助線等の使用の有無は正誤に影響しないものとした。

3.1.5. 調査手順

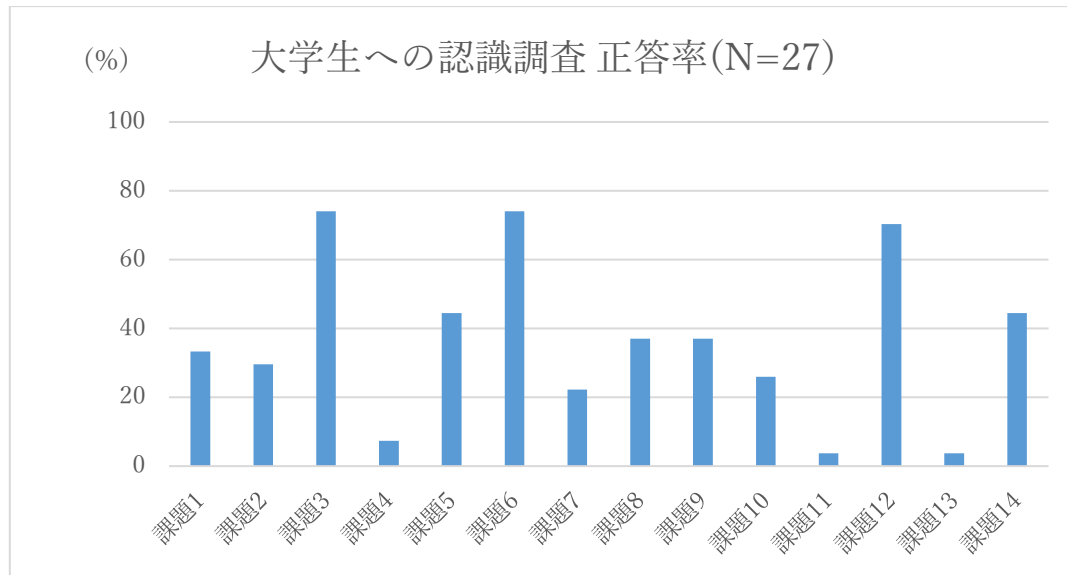
学習者が着席した後に、実験者が課題の説明を行う。実験者の「はじめ」の合図とともに学習者は課題に取り組む。制限時間は各課題につき 1 分程度を想定し、15 分に設定した。課題を解き終えた場合、学習者の合図をもって調査終了とした。調査終了後、解答用紙を回収し、調査終了とした。

3.1.6. 調査結果

本調査における、各課題の正答率及び誤答例について論じる。

はじめに、正答率についてグラフ 3-1-1 に示す。

グラフ 3-1-1 大学生への認識調査の正答率(N=27)



グラフ 3-1-1 より、正答率が 60%を超える課題は課題 3、課題 6、課題 12 となった。3 題の共通点として、断面図が三角形になることであり、与えられた 3 つの白点を結ぶだけであるため、正答率が高くなったと考えられる。一方で、正答率が 20%を下回った課題は課題 4、課題 11、課題 13 となった。この 3 題は断面図が五角形や六角形であり、より多くの頂点を決定しなければならないことや、作図方法が他の課題に比べて手順が多く複雑

であることが要因として考えられる。また、誤答例をいくつか挙げる。図 3-1-15 は、学生 A の課題 1 の解答である。白点 3 点を結ぶことによってできる辺が立方体の内部を通っている誤答パターンである。このような誤答をしてしまう要因の 1 つに、切断することによってできる切断面の辺が、立方体の面上に表れることを理解できていないことが考えられる。こうした学習者には、第 1 章で紹介した岩田（2017）が実践しているような切断面の辺の位置が視覚化できる立体教材等を用いた支援が必要である。図 3-1-16 は、学生 B の課題 4 の解答である。切断面の作図は正しくできているが、紙面上の見かけの形を答えてしまっている誤答パターンである。このような誤答をしてしまう要因の 1 つに、実際の空間図形を紙面等の 2 次元平面に表現した際に、保存される関係と保存されない関係を理解できていないことが考えられる。こうした学習者には、ある切断面を表した立体とそれを紙面上等の 2 次元平面に表したものを比較検証させ、辺の長さや角度などの測定により、保存される関係と保存されない関係を整理する支援が必要である。

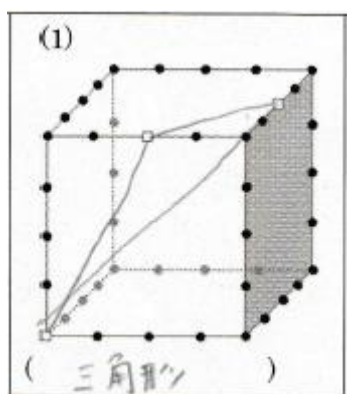


図 3-1-15 学生 A の誤答

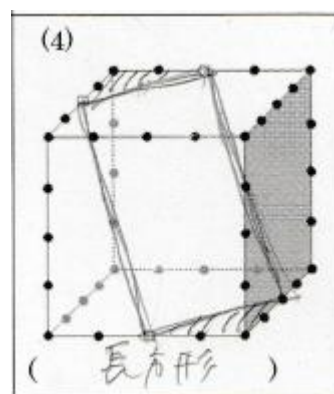


図 3-1-16 学生 B の誤答

以上から、明らかになったことは、以下の 3 点である。

- (1) 本調査で用いた課題に関して、断面図が三角形になる課題に関しては、3 つの白点を線分でつなぐのみであることから正答率が高くなったことである。
- (2) 断面図が五角形や六角形になる課題は 3 つの白点以外に多くの頂点を決定しなければならず、また、線分を延長させるなど作図方法が他の課題に比べて複雑であるため正答率が低い結果となったことである。
- (3) 本来断面図の辺々は立方体の面上にこななければならないにも関わらず、立方体の内部を通る線分を作図している誤答が多くみられたことから、辺と面、面と面の位置関係やそれに関する数学的性質の理解が不十分であることである。

3.1.7. 認識調査を踏まえて

正答率が極端に高い課題では、被験者の所要時間が短く生体情報が正確に取得できない可能性が考えられる。また、正答率が極端に低い課題では被験者が課題解決に至らず課題

解決過程を追うことが困難であることが考えられる。よって、断面図が三角形、五角形、六角形となる課題を実験課題から除外し、すべて四角形に統一することにした。さらに、視線移動計測実験での被験者への負担を考慮し、課題数を4問に絞ることにした。今後の認識調査及び視線移動計測実験で使用する課題は、断面図が四角形であり、かつ、すべて異なる図形になるように、課題1（等脚台形）、課題2（平行四辺形）、課題8（ひし形）、課題9（長方形）とする。

3.2. 高校生への認識調査

3.2.1. 目的

本調査の目的は、学習者の空間図形課題遂行時における解決過程を解明するための、視線移動計測実験を実施するにあたり、大学生への認識調査結果をもとに作製した実験課題のプレテストを行うことで、所要時間や課題の難度等の条件を検証することである。

3.2.2. 対象

・高校生 80 名

京都市内の高等学校第一学年 2 クラス 80 名を対象に調査を行った。

3.2.3. 調査時期及び場所

2018 年 7 月 19 日に、対象の高等学校の教室にて調査を行った。調査はクラスごとに一斉に行い、監督者として数学科の担当教員の方に依頼した。監督者は、解答用紙の配布と時間測定、解答用紙の回収を行った。

3.2.4. 調査課題

本調査では、大学生への認識調査問題と同様、紙面上にかかれた立方体の辺上にある 3 つの点を通る平面で、立方体を切断したときの切断面を作図するという課題を設定した。課題は前述のとおり前調査と同一のものを使用し、課題 1（等脚台形）、課題 2（長方形）、課題 3（ひし形）、課題 4（平行四辺形）の 4 題とした。さらに、調査用紙に各課題の難度を 5 段階で評価するアンケート項目を設定した。

3.2.5. 調査手順

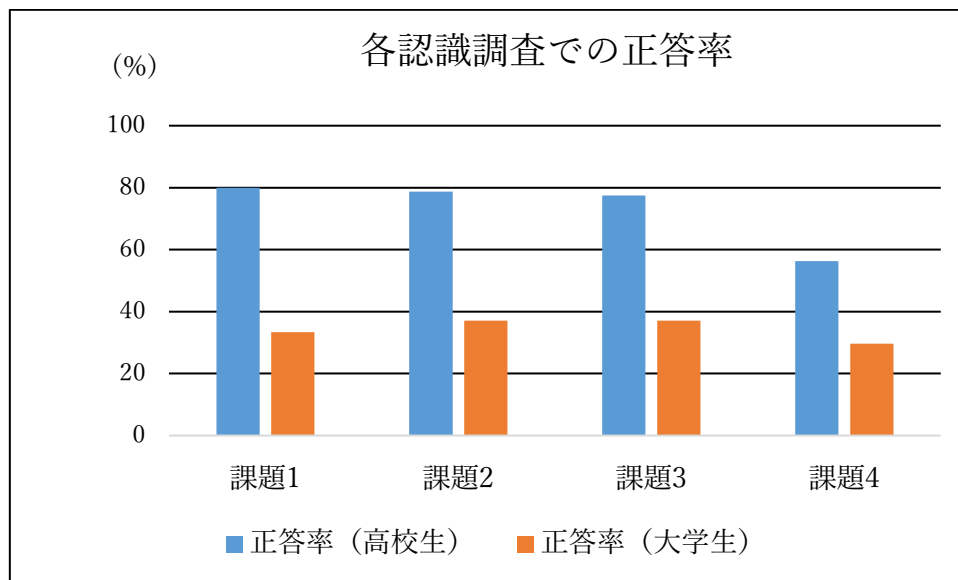
学習者が着席した後に、監督者が課題の説明を行う。監督者の「はじめ」の合図とともに学習者は課題に取り組む。制限時間は 15 分に設定した。調査終了後、解答用紙を回収し、調査終了とした。

3.2.6. 調査結果

本調査における、各課題の正答率及び誤答例について論じる。

はじめに、本調査の正答率について、前調査の大学生の正答率とともにグラフ 3-2-1 に示す。

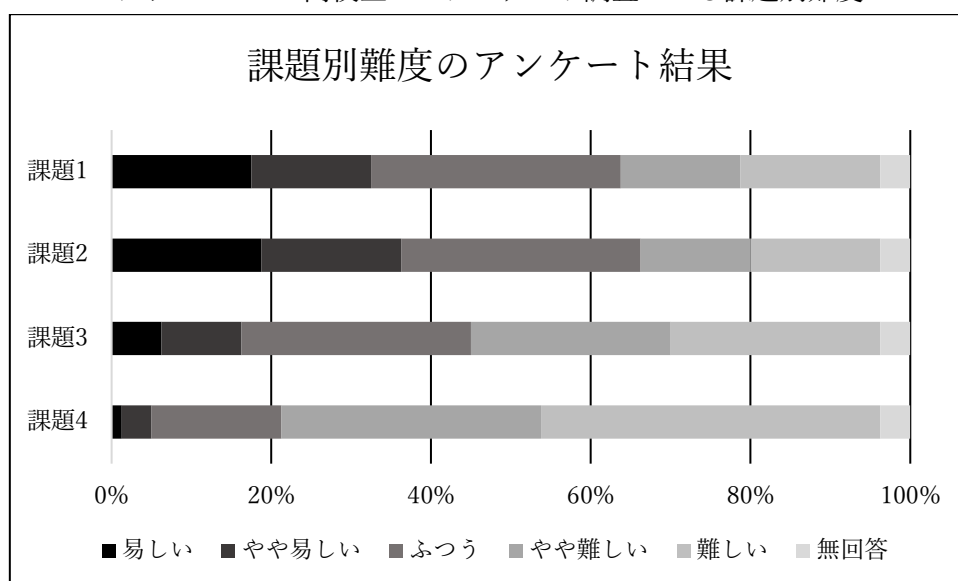
グラフ 3-2-1 高校生及び大学生への認識調査の正答率



グラフ 3-2-1 より、全課題において高校生の正答率が、大学生の正答率を上回る結果となった。高校生については課題 1、課題 2、課題 3 については 7 割以上の生徒が正答している。一方、課題 4 については、高校生、大学生ともに計 4 題の中で最も正答率が低い結果となった。

次に、認識調査での高校生による課題別難度の調査結果をグラフ 3-2-2 に示す。

グラフ 3-2-2 高校生へのアンケート調査による課題別難度



グラフ 3-2-2 より、課題 1 と課題 2 においては、60%以上の生徒が課題に難しさを感じ

ていないことが明らかとなった。一方で、課題 3 では 50%を下回り、課題 4 では 20%程度にとどまってしまっていることから、同じ四角形の断面図作図課題の中でも、難度に差が生じる結果となった。

以上から、明らかになったことは、以下の 2 点である。

- (1) 認識調査においては、高校生の正答率が、大学生の正答率を上回る結果となり、空間図形の学習内容が十分に定着していないことである。
- (2) 課題 4 の正答率が大学生、高校生ともに最も低く、高校生を対象に実施したアンケート結果からも、課題 4 について難しいと感じている割合が最も高いことである。

3.2.7. 認識調査を踏まえて

全課題において高校生の正答率が、大学生の正答率を上回る結果となったことから、中学校で学習した空間図形の学習内容が定着しておらず、半数以上の学生が立方体の切断課題を正しく理解していないことが考えられる。受験数学を目的とした形式的な作図方法の獲得だけではなく、辺や頂点、面の位置関係や図形の性質等を用いた数学の原理・法則に基づいた理解が重要である。そのためには、教科書や問題集の演習だけではなく、学習者自身が実感を伴った理解をする必要があり、立体教材等を用いて観察・実験といった経験的な学習の機会を設けることが、空間図形の理解を促す指導方法の 1 つであると考え。

そこで、教科書のような平面に表された空間図形を扱うときの、学習者の生体情報を取得することで、どのような困りがあるのかを明らかにしていくとともに、教科書のデメリットを補うことのできる新たな教材開発をしていく。

第4章 視線移動計測実験

本章では、視線移動計測実験の内容とその結果について論じる。まず、実験の概要について述べる。次に行動観察に関して論じ、それに加えて、生体情報をもとにした学習者の立方体の切断課題遂行時の解決過程の特徴について論じる。

4.1. 実験の概要

4.1.1. 実験課題

実験課題は、第3章での認識調査をもとに改良を加え課題1つ1つをA3サイズで印刷した。問題用紙に直接断面図を作図する形式である。以下に実験課題を示す。

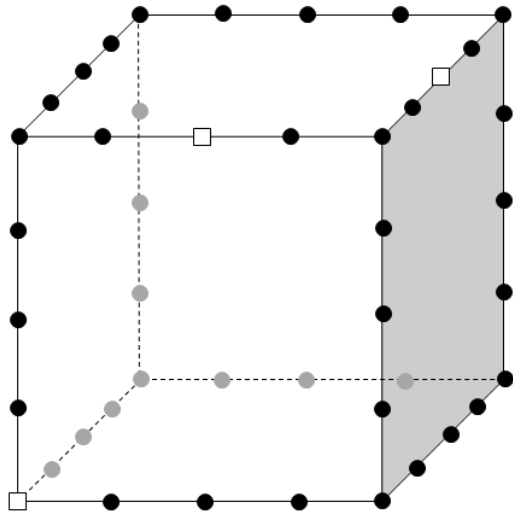


図 4-1-1 実験課題 1

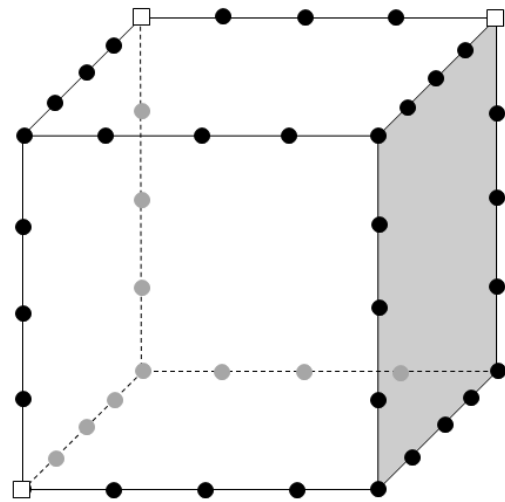


図 4-1-2 実験課題 2

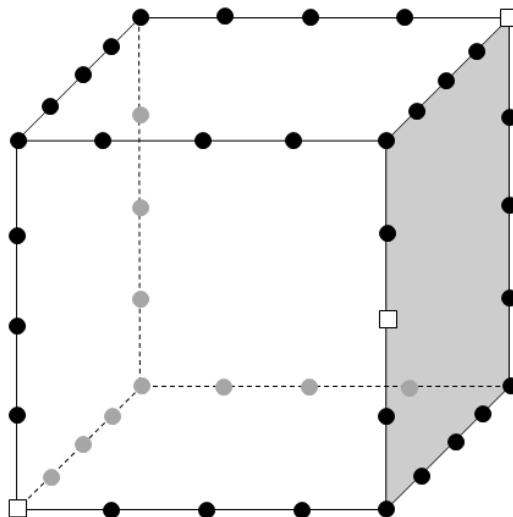


図 4-1-3 実験課題 3

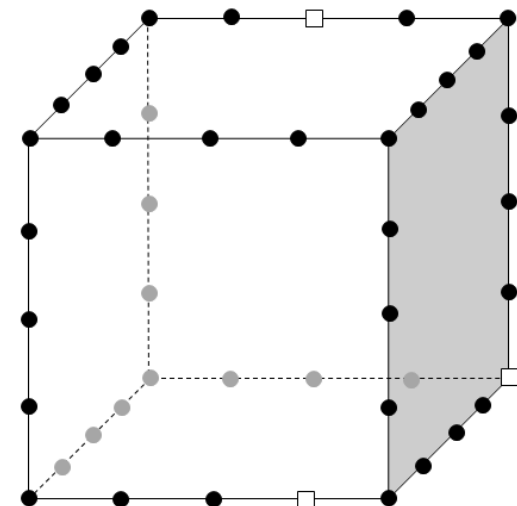


図 4-1-4 実験課題 4

各課題における性質は以下のとおりである。

実物課題 1 (図 4-1-1) は、3 つの白点のうち 1 つが立方体の頂点にある。また、断面図の辺の内、3 本が学習者の視点から見える面上にある。断面図は等脚台形となる。

実物課題 2 (図 4-1-2) は、3 つの白点がすべて立方体の頂点にある。また、断面図の辺の内、3 本が学習者の視点から見える面上にある。断面図は長方形となる。

実物課題 3 (図 4-1-3) は、3 つの白点のうち 2 つが立方体の頂点にある。また、断面図の辺の内、2 本が学習者の視点から見える面上にある。断面図はひし形となる。

実物課題 4 (図 4-1-4) は、3 つの白点のうち 1 つが立方体の頂点にある。また、断面図の辺の内、2 本が学習者の視点から見える面上にある。断面図は平行四辺形となる。

これらの課題の特徴をまとめたものが表 4-1-1 である。

表 4-1-1 実験課題の特徴

	立方体の頂点と一致する白点	見える面上にある辺の本数
課題 1 (等脚台形)	1	3
課題 2 (長方形)	3	3
課題 3 (ひし形)	2	2
課題 4 (平行四辺形)	1	2

課題 1 の解法は以下の通りである。

点 F、点 I は同一平面 BFGC 上にあるため、点 F と点 I は結ぶことができる。

同様にして、点 I と点 J も結ぶことができる。

平行な平面に、1 平面が交わってできる交線は平行であるから、2 平面 ABCD、平面 EFGH と平面 FIJ との交線は平行である。

点 F を通り、線分 IJ に平行な直線を引くと、点 H を通る。

よって、点 F と点 H は結ぶことができる。

点 J、点 H も同一平面 CGHD 上に存在するため、結ぶことができる。

以上より、四角形 FIJH となり、 $IJ \parallel FH$ 、 $FI = HJ$ より四角形 FIJH は等脚台形となる。

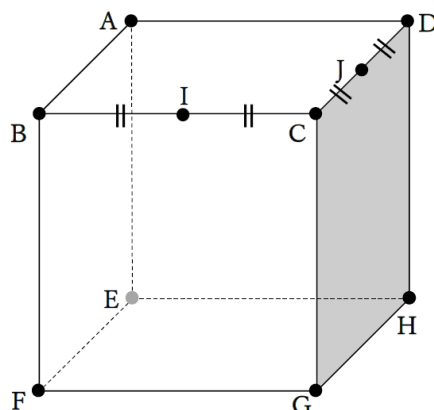


図 4-1-5 課題 1 の作図方法

課題 2 の解法は以下の通りである。

図点 A、点 F は同一平面 ABFE 上にあるため、点 A と点 F は結ぶことができる。

同様にして、点 A と点 D も結ぶことができる。

平行な平面に、1 平面が交わってできる交線は平行であるから、2 平面 ABFE、平面 DCGH と平面 FAD との交線は平行である。

点 D を通り、線分 AF に平行な直線を引くと、点 G を通る。

よって、点 D と点 G は結ぶことができる。

点 F、点 G も同一平面 EFGH 上に存在するため、結ぶことができる。

以上より、四角形 AFGD となり、 $\angle A = \angle F = \angle G = \angle D = 90^\circ$ より四角形 AFGD は長方形となる。

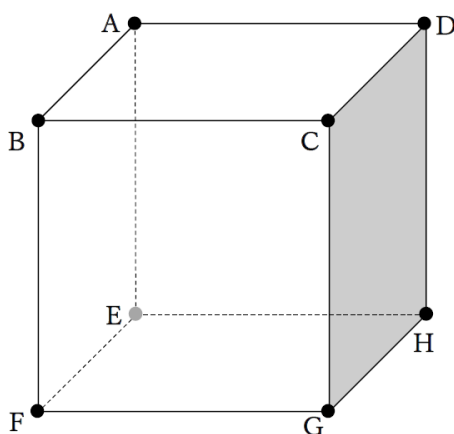


図 4-1-6 課題 2 の作図方法

課題 3 の解法は以下の通りである。

点 D、点 I は同一平面 DCGH 上にあるため、点 D と点 I は結ぶことができる。

同様にして、点 I と点 F も結ぶことができる。

平行な平面に、1 平面が交わってできる交線は平行であるから、2 平面 ABFE、平面 DCGH と平面 FID との交線は平行である。

点 F を通り、線分 ID に平行な直線を引くと、点 J を通る。

よって、点 F と点 J は結ぶことができる。

点 J、点 D も同一平面 AEHD 上に存在するため、結ぶことができる。

以上より、四角形 FIDJ となり、 $FI = ID = DJ = JF$ 、 $JI \perp FD$ より四角形 FIDJ はひし形となる。

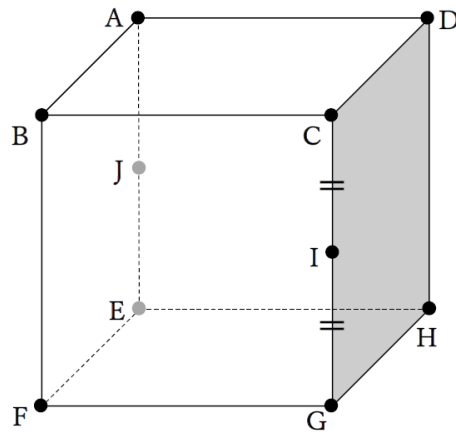


図 4-1-7 課題 3 の作図方法

課題 4 の解法は以下の通りである。

点 I、点 H は同一平面 AEHD 上にあるため、点 I と点 H は結ぶことができる。

同様にして、点 H と点 J も結ぶことができる。

平行な平面に、1 平面が交わってできる交線は平行であるから、2 平面 ABCD、平面 EFGH と平面 IHJ との交線は平行である。

点 I を通り、線分 HJ に平行な直線を引くと、点 K を通る。

よって、点 I と点 K は結ぶことができる。

点 K、点 J も同一平面 BFGC 上に存在するため、結ぶことができる。

以上より、四角形 KJHI となり、 $KI = JH$ 、 $KI \parallel JH$ より四角形 KJHI は平行四辺形となる。

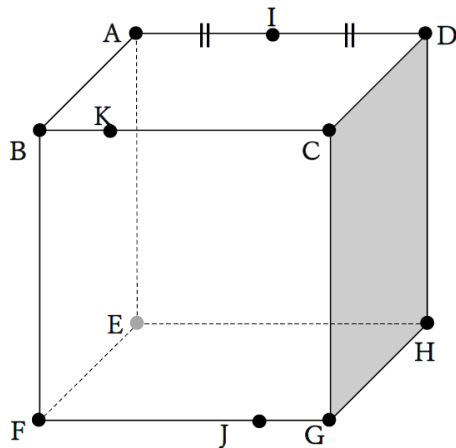


図 4-1-8 課題 4 の作図方法

4.1.2. 対象

京都教育大学生 36 名

4.1.3. 実施日

2018 年の 11 月から 12 月の 2 か月間で 24 名を対象に実験を行い、2019 年の 11 月から 12 月の 2 か月間で 12 名を対象に追加実験を行うことで、被験者を計 36 名とした。

4.1.4. 実験場所

京都教育大学実験室

4.1.5. 本実験で使用した生体情報計測装置

視線移動計測装置として、Tobii pro グラス 2 (Tobii Technology 製) ^[32]を使用した。この装置は、近赤外 LED を用いた瞳孔-角膜反射法 (PCCR ; Pupil Centre Corneal Reflection) に改良を加えたシステムである。図 4-1-5 は、今回使用した視線移動計測装置である。45g と軽量であり、眼鏡をかけるような形で容易に装着が可能のため、視野を狭めずに安全かつ自然に視線データを収集することができる。眉間の部分にあるシーンカメラが視野映像を記録するとともに、画像処理アルゴリズムによって目と光の反射パターンを検出することにより、空間中の目の位置に応じた画面上の視点を算出・表示する。これにより、被験者の視野映像に直接視点を表示することができる。



図 4-1-5 視線移動計測装置

4.1.6. 実験方法

被験者ごとに単独で実験を行った。測定者は 2 名とし、2 名で視線移動計測装置の装着及び操作を行った。実験中においては、1 名は課題の差し替え、1 名はストップウォッチによる所要時間の測定及び記録を行った。

4.1.7. 実験手順

- (1) 被験者 1 人、測定者 2 人で実験を行う。測定者は、筆者と、同研究室に所属する大学院生の 2 名である。被験者を椅子に座らせた状態で、測定者によって視線移動計測装置を装着し、装置の調整を行う。その後、測定者が例題を 1 問提示し、それを用いて実験課題について説明する。
- (2) 被験者は、実験開始まで閉眼安静状態を保つ。測定者の「始めてください」の

合図により被験者は開眼し、課題に取り組む。各課題の制限時間は 60 秒に設定し、課題間には 60 秒のレスト（閉眼安静状態）を設ける。レストの間に測定者は所要時間の記録及び課題の差し替えを行う。その際、問題用紙が解答中にずれないようにテープで固定する。

- (3) 制限時間内に解答を終えた場合、被験者の「終わりました」の合図で、レストに移行する。制限時間に達した場合は、測定者の「終了してください」の合図で、レストに移行する。
- (4) 全課題終了後、視線移動計測装置を外し、アンケート用紙を配布する。アンケート内容は、各課題の難度について、5 件法（1.易しい、2.やや易しい、3.ふつう、4.やや難しい、5.難しい）で自己評価を行うものである。アンケート用紙では、各課題を比較して、難度を 5 段階で評価させる項目と、類似の課題に取り組んだ経験の有無を問う項目を設け、用紙のサイズは A4 サイズを用いた。

図 4-1-6 は、実験の流れを表したものである。

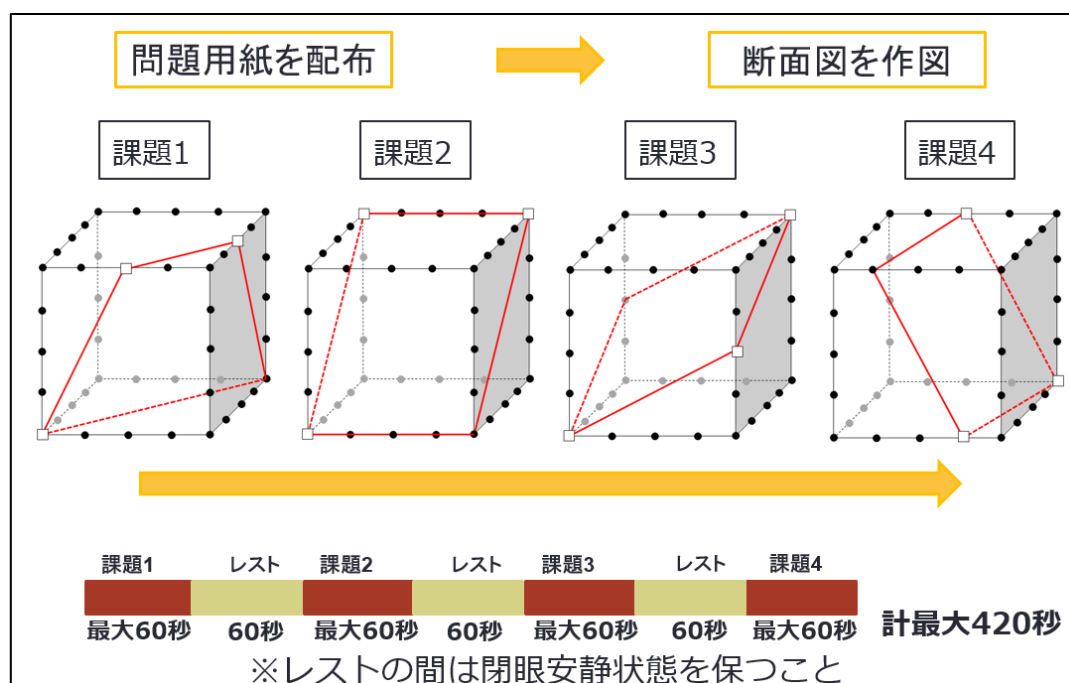


図 4-1-6 実験手順

視線移動計測において、被験者の視覚的な癖や眼球等の身体的な個人差によって、視線移動計測装置に搭載されているビデオカメラのフレームの外で立体を観察してしまう被験者が存在した。この場合、被験者の注視点を正確に記録することができないため、該当する被験者のデータを分析対象から除外した。

以上より、視線移動データを正確に分析できる被験者は、計 30 名となった。以降、この 30 名のデータについて分析を進めていく。被験者 30 名の正答率、所要時間等の行動観

察の結果について論じ、それを踏まえ、生体情報を用いた分析について論じる。

4.2. 行動観察による考察

図 4-2-1 は、正答率、平均所要時間、難度平均を表したものである。難度平均については、実験後のアンケート調査の 5 件法の数字の平均値であり、数値が大きいほど被験者の感じている難度が高いと推察できる。なお、制限時間内に解答することができなかった被験者の所要時間は 60 秒として扱う。まず、正答率及び平均解答時間に着目すると、課題 1 は 47%/48.1 秒、課題 2 は 80%/38.9 秒、課題 3 は 73%/45.0 秒、課題 4 は 57%/54.6 秒となり、課題 2 及び 3 は他の課題と比べて正答率が高く所要時間が短い。一方課題 1 は正答率が最も低く所要時間が長い傾向にある。難度平均に着目すると、課題 1 は 3.4、課題 2 は 2.6、課題 3 は 3.5、課題 4 は 4.2 となり、正答率が 47%の課題 1 と 73%の課題 3 において難度平均がそれぞれ 3.4 と 3.5 と、ほとんど同じ結果となった。このことから、被験者の感じる難度と実際の正答率等の行動観察の結果とは必ずしも一致せず、行動観察のみで学習者の理解度を評価することに対して、慎重にならなければいけないことが示唆される。

課題	正答率(%)	平均所要時間(秒)	難度平均
1	47%	48.1	3.4
2	80%	38.9	2.6
3	73%	45.0	3.5
4	57%	54.6	4.2

図 4-2-1 正答率・平均所要時間及び難度平均 (N=30)

行動観察の観点から明らかとなったのは、以下の 2 点である。

- (1) 立方体の頂点と各課題の切断面の頂点との一致数が少ないほど、正答率が低く、平均解答時間が増加する傾向にあること。
- (2) 課題 1 と課題 3 において、難度平均が同程度の課題にもかかわらず、正答率に大きな違いが見られたことから、学習者の感じている難度と実際の正誤は必ずしも関係性があるとは言えず、評価の際には慎重にならなければいけないこと。

4.3. 視線移動データの分析及び考察

本研究での視線移動計測によるデータの分析手法として、視線移動計測装置によって録画した動画を、フリーソフトウェア「Free Video to JPG Converter」を用いて 0.4 秒間隔の画像に変換し、被験者の注視点を集計する手法を用いた。今回、用いた視線移動計測装

置のフレームレートが 25fps であったため、10 コマごとに画像へと変換することにより、0.4 秒間隔の画像に分割することとした。各実験課題の立方体の辺上に等間隔に 5 つずつ計 44 の点を打ち、識別番号を割り振るとともに、変換した画像 1 枚 1 枚でどの点を注視しているのかを確認し、画像 1 枚当たり 0.4 秒その点を注視していると判断して集計する。なお、録画した動画には、被験者の注視点が赤い丸で表示される。44 個の点の内、変換した画像で表示されている赤い丸と最も距離の近い点を注視点として集計する。また、解答用紙を注視している場合と、立体、解答用紙以外を注視している場合を合わせて、「解答用紙」として分類した。図 4-3-1 は分析方法を表したものである。

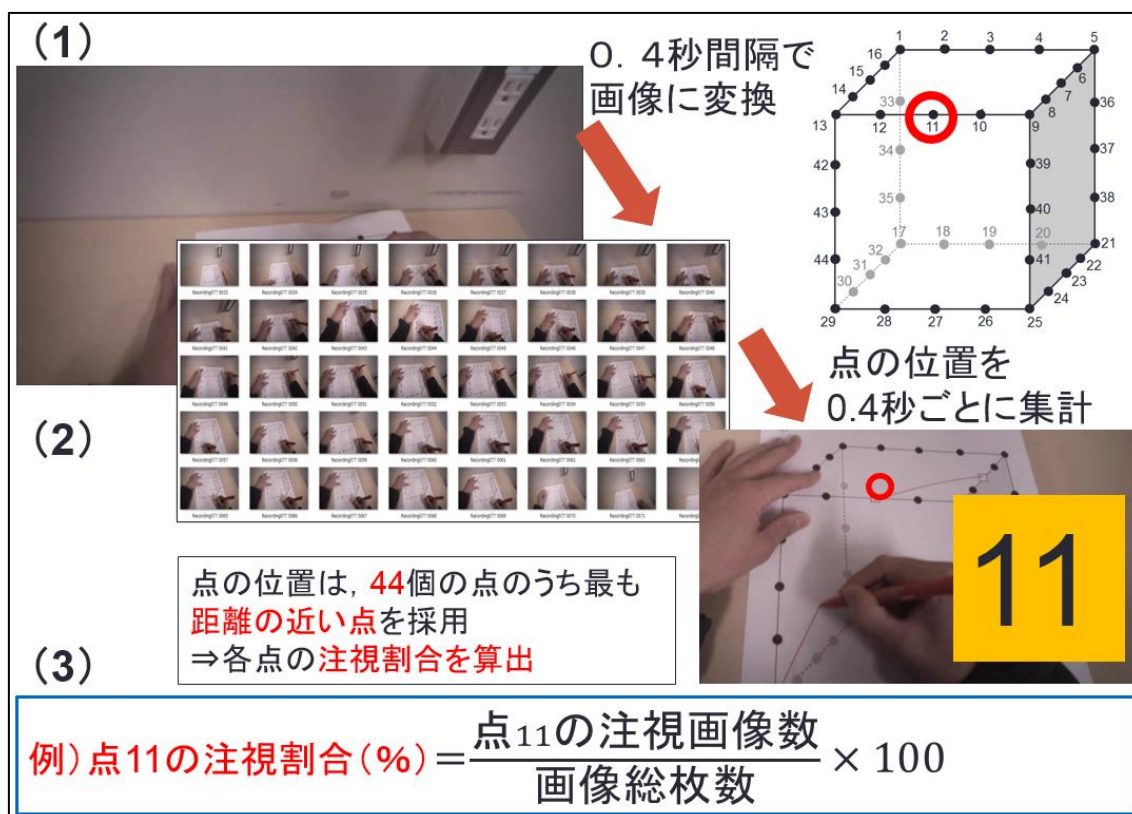


図 4-3-1 分析方法

以下では、実験課題遂行中の被験者の注視点について論じる。図 4-3-2 は、44 個の点の内、立方体を注視している時間に占める注視割合の大きい上位 5 個の点の注視割合を表示している。切断面の 3 個の白点以外の頂点（以下 4 点目の頂点と表す）の注視割合については、上位 5 位以内でない場合も含めて別色で表示している。

はじめに、被験者 30 名全体における特徴について述べる。図 4-3-2 より、注視割合の大きい 5 個の点がいずれも切断面の辺付近に集中していることから、被験者は切断面の辺付近を注視する傾向にあることが明らかになった。注視割合について、全 44 箇所の点のうち、上位注視箇所合計が 32.3%～45.4%であることから、被験者は課題全体を満遍なく観察するのではなく、いくつかのポイントを限定的に観察して課題に取り組んでいると考えられ

る。また、3 個の白点の注視割合合計は、26.9%、22.6%、21.5%、23.2%といずれの課題においても 20%を超えており、白点を起点として課題を観察することができていると予想できる。一方で、どの課題においても 4 点目の頂点の注視割合が他の点の注視割合よりも比較的小さいことから、4 点目の頂点を認識する段階に困難を感じていることが推察される。

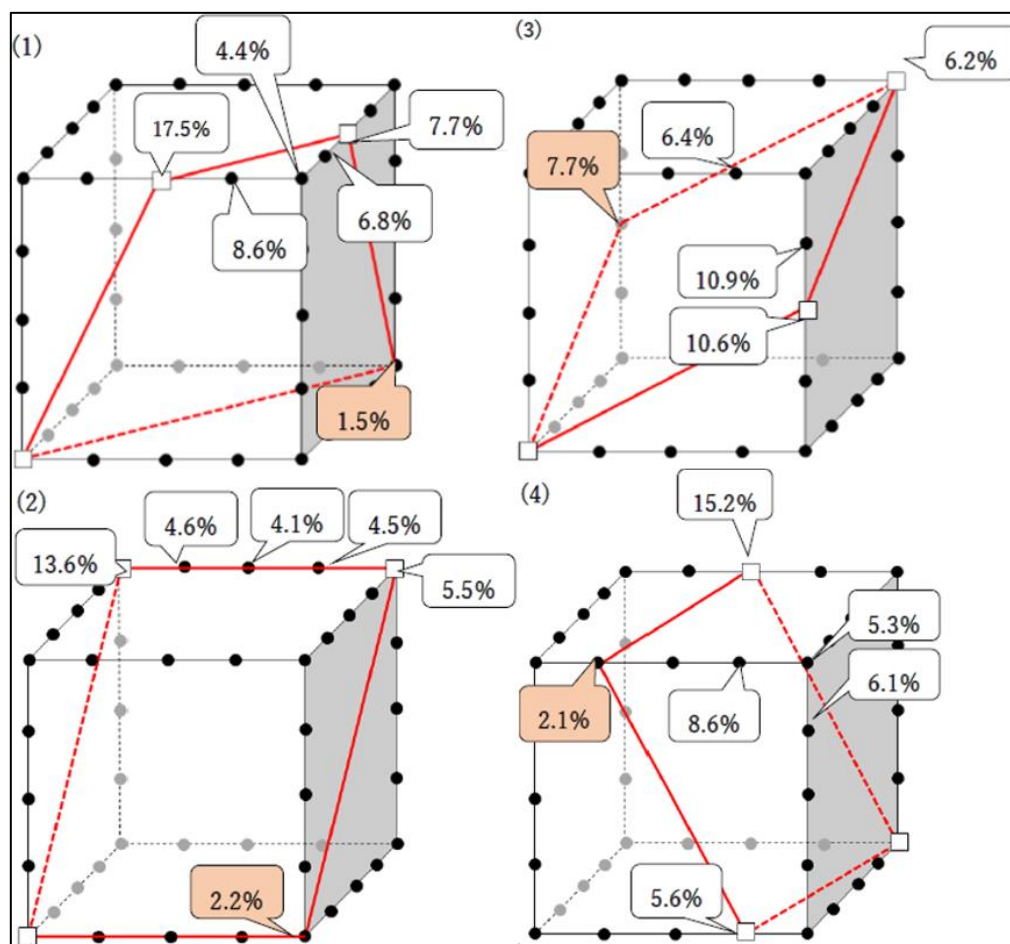


図 4-3-2 上位 5 位及び 4 点目頂点の注視割合

次に、課題ごとに正答と誤答に分類して分析を行う。図 4-3-3 から図 4-3-10 は、それぞれ図 4-3-2 の注視割合を課題ごとの正誤別に分類し、課題ごとに表したものである。また、注視割合の大きい 5 個の点の注視割合を合計したものを、上位注視箇所合計として表している。図 4-3-3 から図 4-3-10 より、正答者と誤答者によって注視する点の位置に大きな差はみられず、切断面の辺付近を注視する傾向にあることが明らかになった。また、上位注視箇所合計については、正答者は課題 1 から順に 42.0%、30.8%、42.9%、35.5%であるのに対して、誤答者は 46.9%、35.3%、46.8%、45.1%と、いずれの課題においても誤答者が大きい結果となった。正答者が課題解決のために立方体を全体的に観察しているのに対して、誤答者は特定の位置を注視する傾向にある。4 点目の頂点の注視割合は、正答者は課題 1 から順に 2.4%、2.4%、11.0%、3.8%であるのに対して、誤答者は 0.2%、1.9%、1.6%、1.4%

といずれの課題においても誤答の方が小さい結果となった。課題解決に必要な 4 点目の頂点の位置を正しく把握できていないことが誤答につながっていることが推察される。

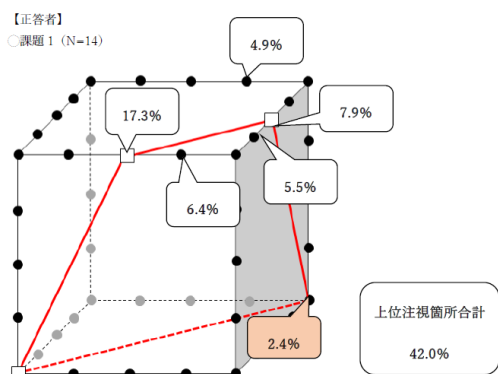


図 4-3-3 課題1 正答者注視点 (N=14)

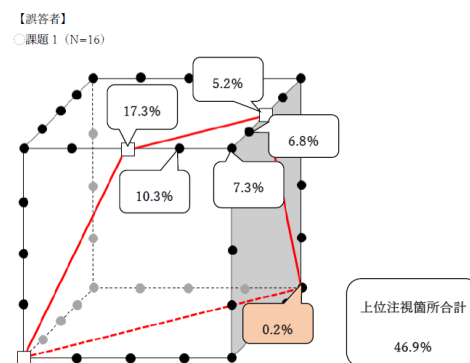


図 4-3-7 課題1 誤答者注視点 (N=16)

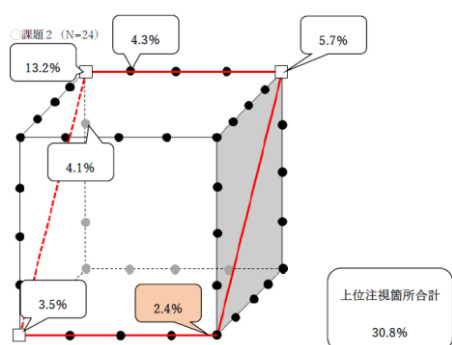


図 4-3-4 課題2 正答者注視点 (N=24)

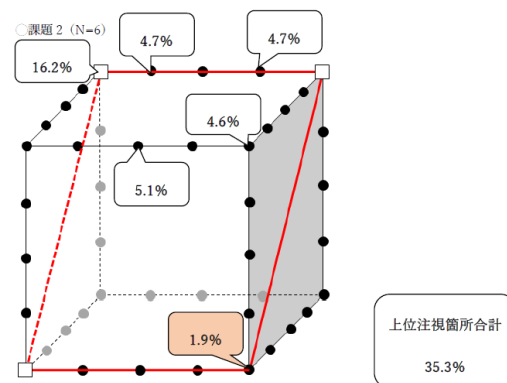


図 4-3-8 課題2 誤答者注視点 (N=6)

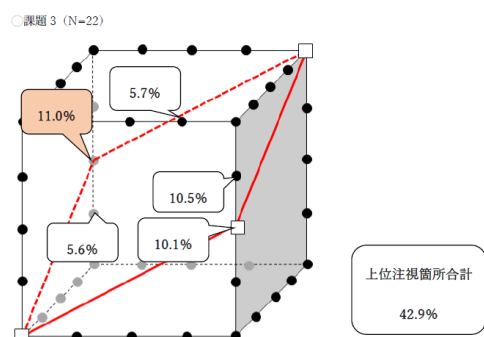


図 4-3-5 課題3 正答者注視点 (N=22)

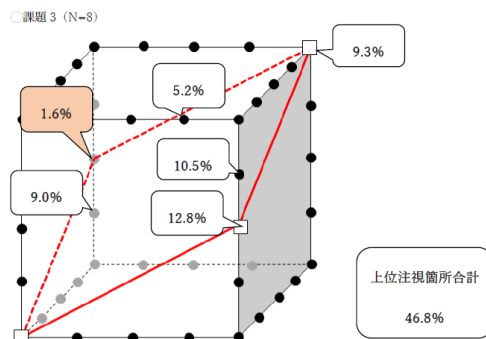


図 4-3-9 課題3 誤答者注視点 (N=8)

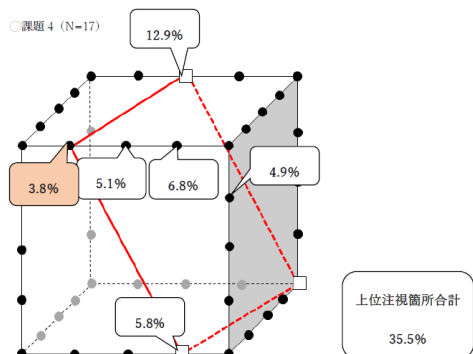


図 4-3-6 課題4 正答者注視点 (N=17)

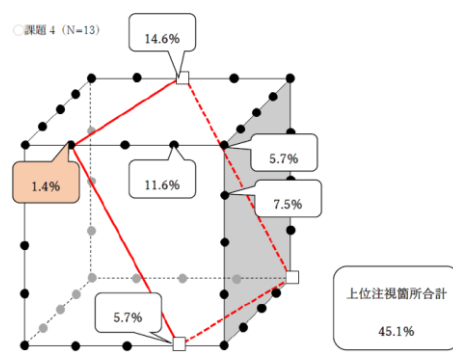


図 4-3-10 課題4 誤答者注視点 (N=13)

図 4-3-11、図 4-3-12 は、それぞれ正答者及び誤答者の注視実時間の内訳を表したものである。縦軸は各課題番号を表しており、横軸は左から 3 個の白点、4 点目の頂点、その他の点、解答用紙の注視時間合計（秒）を表している。その他の点は、44 個の点のうち、3 個の白点及び 4 点目の頂点を除く 40 個の点を表している。3 個の白点・4 点目の頂点・その他の点・解答用紙の注視時間の総和を所要時間とする。正答者の平均所要時間は、課題 1 から順に 40.7 秒、36.2 秒、44.2 秒、54.3 秒であり、誤答者は、54.7 秒、49.5 秒、47.2 秒、54.9 秒となった。正答者の各課題における 3 個の白点の注視時間合計は、課題 1 から順に 9.5 秒、6.0 秒、6.4 秒、10.4 秒であり、誤答者は 11.9 秒、8.9 秒、9.5 秒、12.2 秒と、いずれの課題においても誤答者の注視時間が長い結果となった。正答者の 4 点目の頂点の注視時間は 0.8 秒、0.6 秒、4.1 秒、1.8 秒であり、誤答者は 0.1 秒、0.7 秒、0.6 秒、0.7 秒と、いずれの課題においても誤答者の注視時間が短い結果となった。正答者のその他の点の注視時間合計は、22.6 秒、20.1 秒、26.3 秒、35.2 秒であり、誤答者は 35.8 秒、29.4 秒、26.9 秒、36.8 秒と、いずれの課題においても誤答者の注視時間が長い結果となった。これらの結果から、正答者は課題解決に必要な 4 点目の頂点を特定し、その点を起点として課題を解決しているのに対し、誤答者は 4 点目の頂点を特定することができず課題解決に時間を費やし、必要以上に 3 個の白点を注視してしまうことや、課題解決と関係性の薄いその他の点の注視時間が長くなってしまうことが推察される。

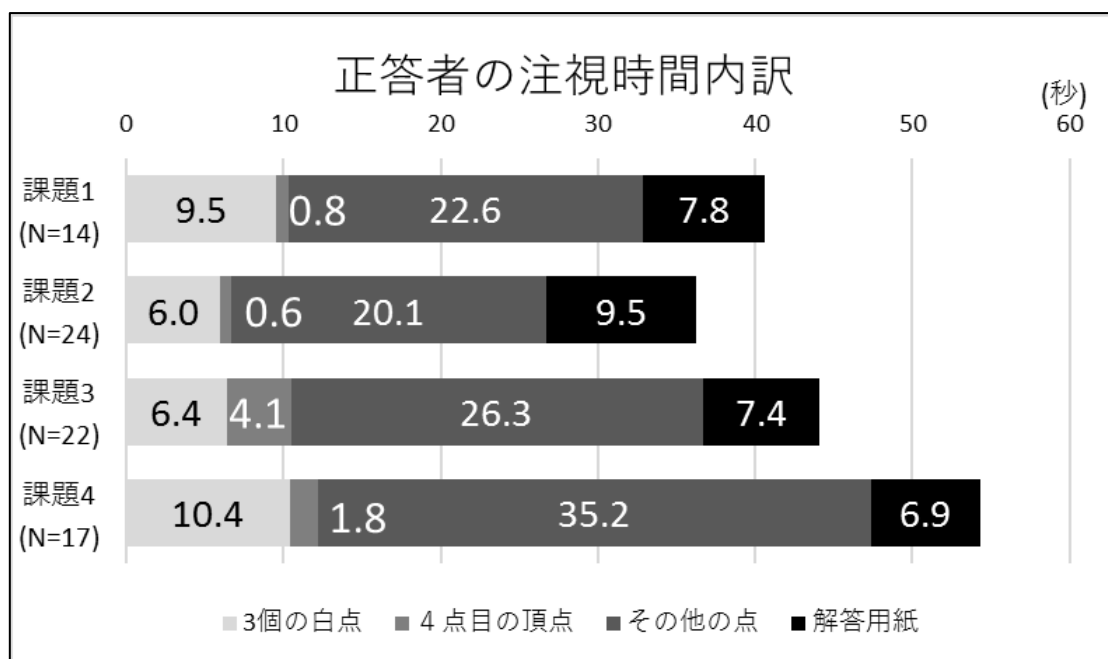


図 4-3-11 正答者の注視実時間内訳

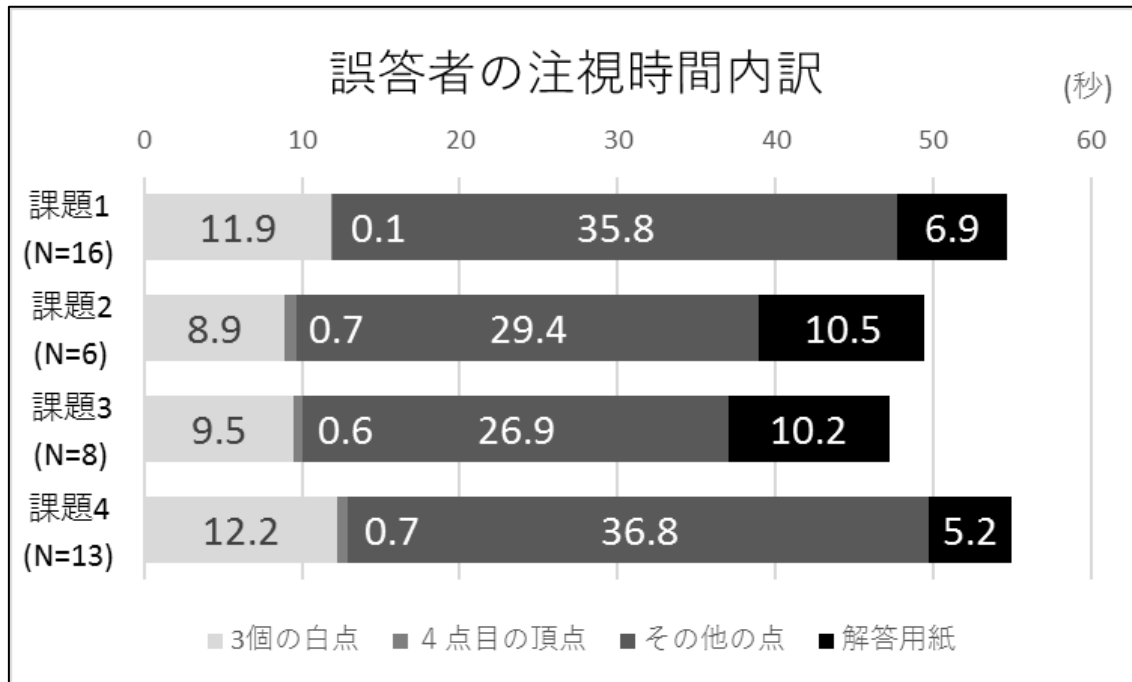


図 4-3-12 誤答者の注視実時間内訳

第5章 3Dフリーソフトウェアを用いた立体教材制作及び教育実践

本章では、3Dソフトウェアを用いて制作した立体教材の内容について論じる。まず、本研究で利用した3Dソフトウェアである「3D Builder」について述べる。次に、立方体の切断を題材とした立体教材及び金属結晶の構造モデルを題材とした立体教材の内容について論じる。

5.1. 「3D Builder」について

本稿では、Windows10以降に標準搭載されている「3D Builder」(Microsoft Corporation)を教材作成に用いた。このソフトウェアを用いた理由として、フリーのソフトウェアであるため費用が抑えられること、また、マウスでの容易かつ直観的操作が可能であるため、指導者だけでなく学習者も容易に用いることができ、教育現場での活用を視野に入れることができることが挙げられる。このソフトウェアでは、基本的な空間図形の平行移動・回転移動・拡大縮小・切断・結合・長さの測定等が可能である。作成した立体教材は画面上で360°任意の方向から観察が可能である。数値を入力することで正確な距離、角度、長さ等の設定も可能であり、算数・数学の授業利用に適している。また、互換性のある3Dプリンターに接続することで、作成した立体教材を実物教材として出力することもできる。加えて、指導者と学習者双方が円滑に活用することができるよう、3D Builderのマニュアルを作成した。ソフトウェアの基本的な操作方法や専門用語の説明など、誰が見ても理解しやすいように詳細に記述している。また、指導者の利用を想定した立体教材の作成方法や、学習者の利用を想定した、立体教材を活用した練習問題といった指導書や教科書の役割を兼ね備えたマニュアルとなっている。

5.2. 立方体の切断を題材とした立体教材制作

立方体の切断は、中学校第1学年の学習内容である。しかし、ほとんどの教科書では、章末の発展問題として数頁扱われる程度であることや、切断面の作図方法や考え方が明確にかかれていないことから、切断面のパターンを記憶して形式的に解答したり、念頭操作による直観的な解答をしたりしてしまう要因の1つとして考えられる。粘土や水槽に入れた水などを用いて様々な立体教材が開発され、授業実践などで用いられてきたが、立方体を切断する手段の一つとして用いられるだけで、数学的な活動に帰結できていないという問題がある。他にも、学習者全員に配布することの困難さや、繰り返し試行錯誤することが難しいといった課題が山積しているのが現状である。

次に、立方体の切断を題材とした立体教材の制作手順について述べる。

図5-2-1は、「3D Builder」のホーム画面である。この画面から、中央の「新しいシーン」を選択する。

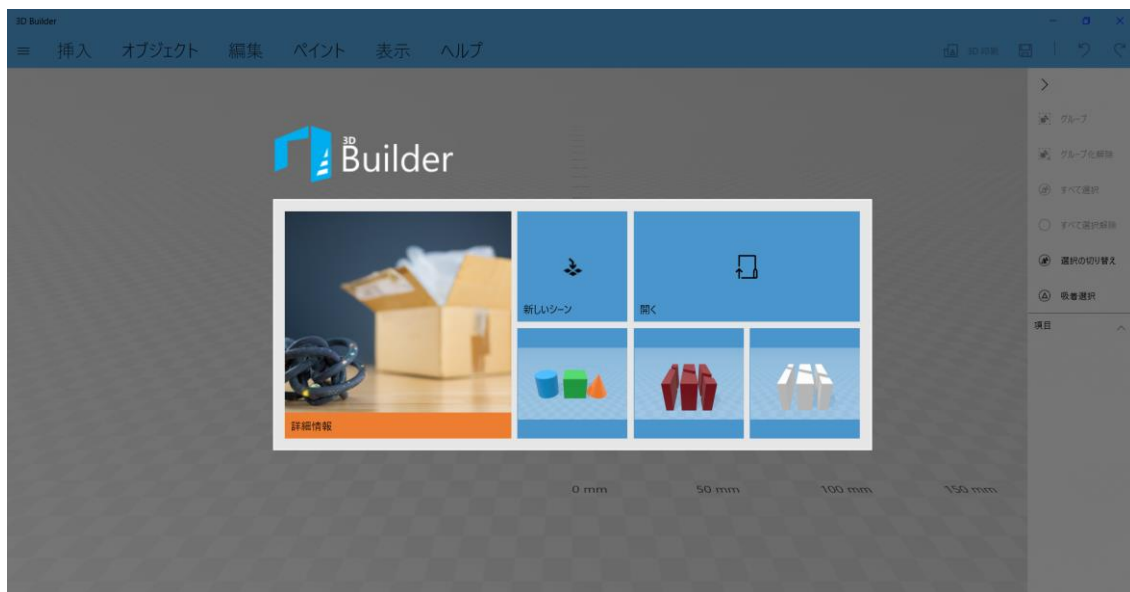


図 5-2-1 3D Builder ホーム画面

図 5-2-2 は、ホーム画面から「新しいシーン」を選択した状態の画面である。上部の「挿入」タブをクリックし、「立方体」をクリックする。ここで操作方法を説明する。画面をドラッグすると、視点を回転させることができる。また、ダブルクリックすると、その方向に視点を移動することができる。

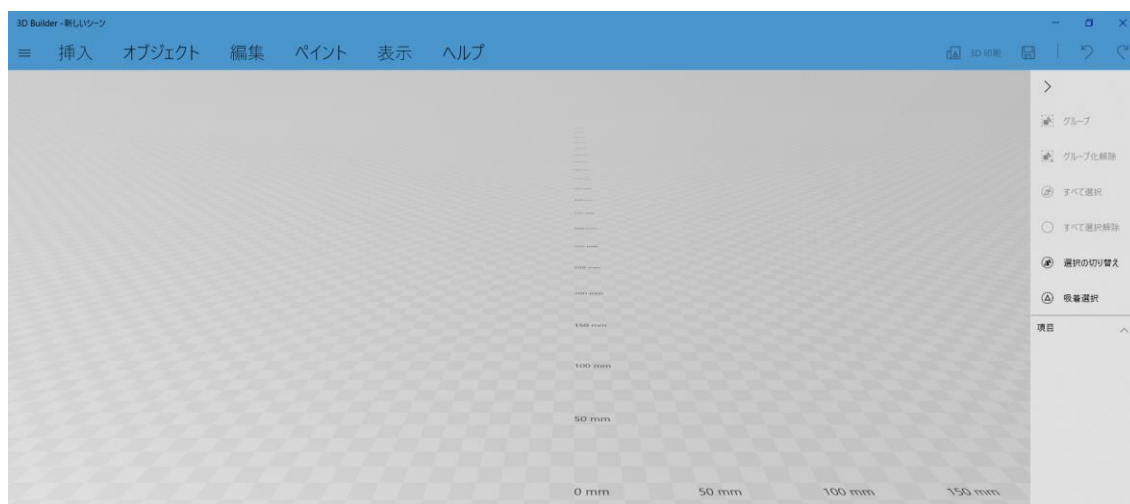


図 5-2-2 3D Builder 製作画面

図 5-2-3 は、「立方体」をクリックした画面である。下部のツールバーには、左から順に、移動（平行移動）・回転（回転移動）・スケール（拡大縮小）というボタンが設置されている。



「移動」

対象となる立方体を選択し、「移動」ボタンをクリックすると、x 軸、y 軸、z 軸方向に矢印が表示される。平行移動させたい方向の矢印をドラッグすることで選択した方向に立方体を平行移動することができる。ツールバー右部に数値（単位：mm）を入力することで初期位置（ $x=0$ 、 $y=0$ 、 $z=20$ ）から正確な平行移動も可能である。

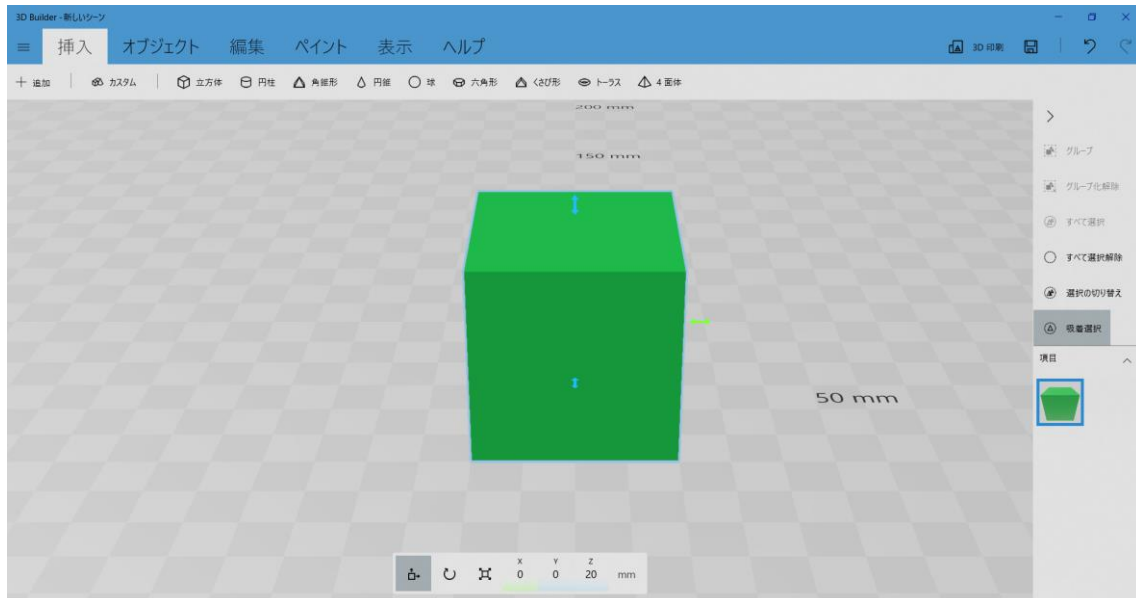


図 5-2-3 立方体の平行移動

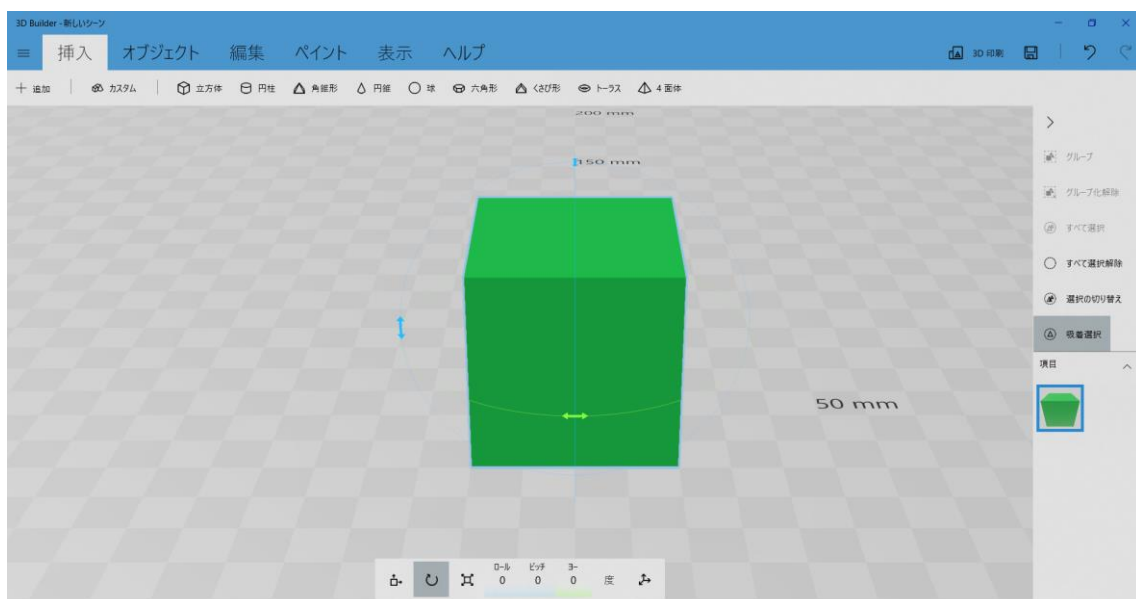


図 5-2-4 立方体の回転移動



「回転」

図 5-2-4 は、対象となる立方体を選択し、ツールバーの回転をクリックした画面である。「移動」と同様に、矢印を 1 つドラッグすることでオブジェクト（選択した立体図形）の質量の中心を原点とする 3 軸の 1 つを中心としてオブジェクトが回転する。また、ツールバー右部に数値（単位：度）を入力することで初期位置（ $x=0$ 、 $y=0$ 、 $z=0$ ）から正確な回転移動も可能である。



「スケール」

図 5-2-5 は、対象となる立方体を選択し、ツールバーのスケールをクリックした画面である。矢印を 1 つドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持せずに選択した矢印の方向にオブジェクトを拡大・縮小する。四角形のウィジェットをドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持したまま拡大・縮小する。また、ツールバー右部に数値（単位：mm）を入力することで初期サイズ（ $x=40$ 、 $y=40$ 、 $z=40$ ）から正確な拡大・縮小も可能である。ツールバー右端の鍵マークをクリックしてから数値を入力することで、縦横比を維持したまま正確な拡大・縮小ができる。

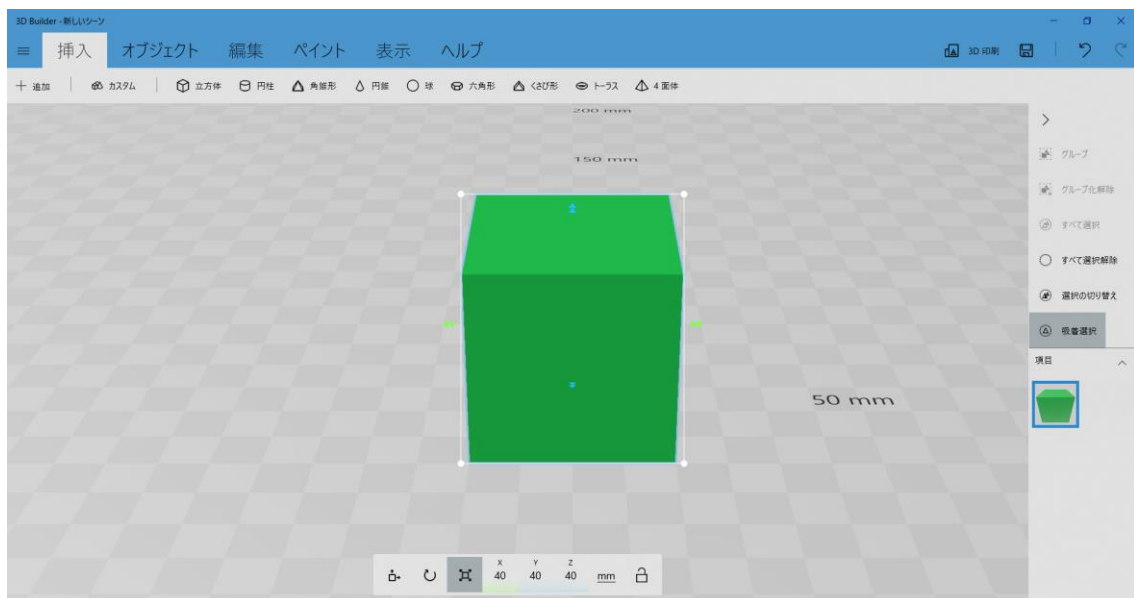


図 5-2-5 立方体の拡大・縮小

次に、立方体の切断方法について説明する。図 5-2-6 は、上部青色タブの「編集」をクリックした画面である。

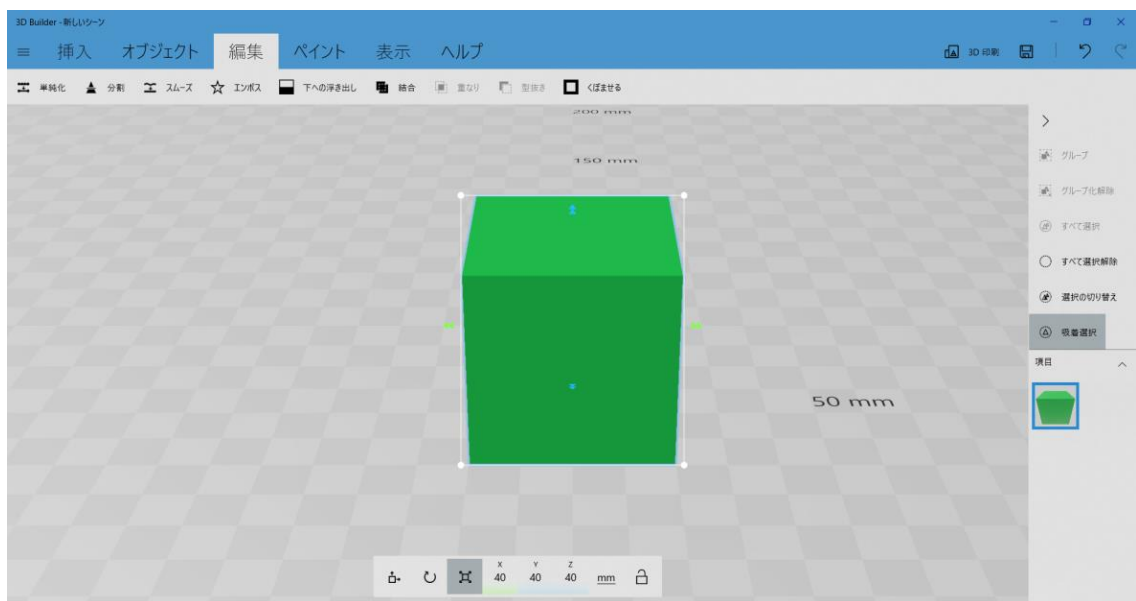


図 5-2-6 立方体の分割

図 5-2-7 は、対象となる立方体を選択し、「分割」をクリックした画面であり、切断面とツールバーが表示される。矢印の 1 つをドラッグすることで切断面を回転移動することができる。また切断面をドラッグすることで、現在の切断面に対して鉛直方向に平行移動することができる。下部のツールバーに数値を入力することで「移動」や「回転」同様に正確な平行移動や回転移動も可能である。



図 5-2-7 立方体の切断画面

切断面を定めることができたなら、上部のタブから両方を保持を選択する。その後「分割」をクリックすることで、切断を行う。切断面が見にくい場合は、切断したどちらかの立体

図形を移動させる。製作した3Dデータは保存することができ、そのファイルを3Dプリンターで読み込むことで出力することもできる。

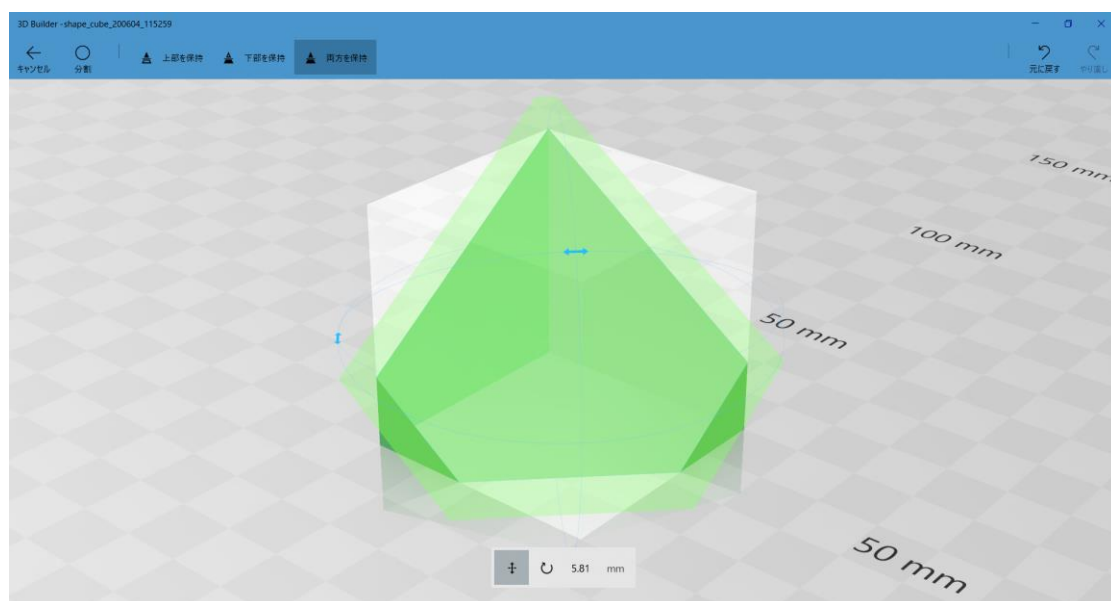


図 5-2-8 立方体の切断を題材とした3D教材

図 5-2-8 は、3D Builder を用いて筆者が作成した数学の立方体の切断を題材とした3D教材の1つである。立方体の作成方法、立方体の切断方法をマニュアル化し、指導者自身が教材を作成することができる環境を構築した。また、学習者の利用を想定して、立体教材を用いた練習問題を設定している。学習者自身が3D教材を作成し観察することも可能であり、実際に立体を作成しながら図形の性質に着目することができると考えられる。制作したマニュアルについては、資料に掲載する。

5.3. 金属結晶の構造モデルを題材とした立体教材制作

金属結晶の構造モデルについては、高等学校の化学分野で学習する内容である。高校化学の教育課程ではこの結晶構造を用いて主に単位格子中の原子数、配位数、原子半径と格子定数の関係、充填率などを算出していく。用語については簡単に以下に記す。

原子数：単位格子中に含まれる原子の数。完全な球を1として、計算する。

配位数：ある原子に着目したときの、最近接している原子の数

格子定数：単位格子の1辺の長さ

充填率：単位格子の体積に占める原子の体積の割合

以上の算出を行う際、教科書^[33]では図 5-3-1 のような格子モデルを用いるが、紙面上に表されているため立体的な構造が理解しにくく、立体教材が学習者の理解を助けると同時

に、化学的な学習内容の中に数学的見方や考え方を適用することができるのではないかと考えた。金属原子の配列パターンを視覚化し、配位数や充填率を求める際に、立体教材が用いられることあるが、指導者が作成した教材を演示することが多く、学習者自身が構造モデルを作成したり、それを用いて試行錯誤したりする場面は少ないと考えられる。そこで、本研究では、「3D Builder」によるデジタル立体教材を制作することとした。

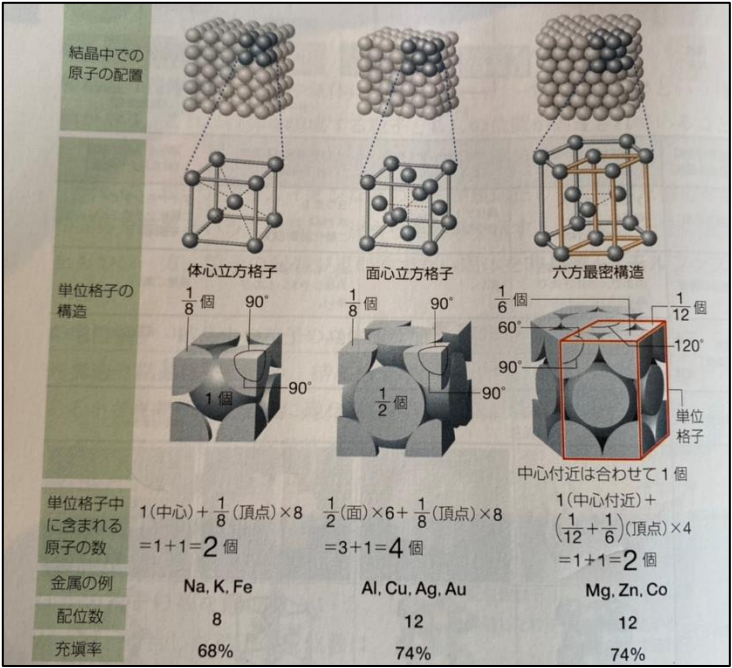


図 5-3-1 教科書にかかれている金属結晶の構造モデル図

次に、金属結晶の構造モデルを題材とした立体教材の制作手順について述べる。図 5-3-2 は「3D Builder」のホーム画面である。この画面から、中央の「新しいシーン」を選択する。

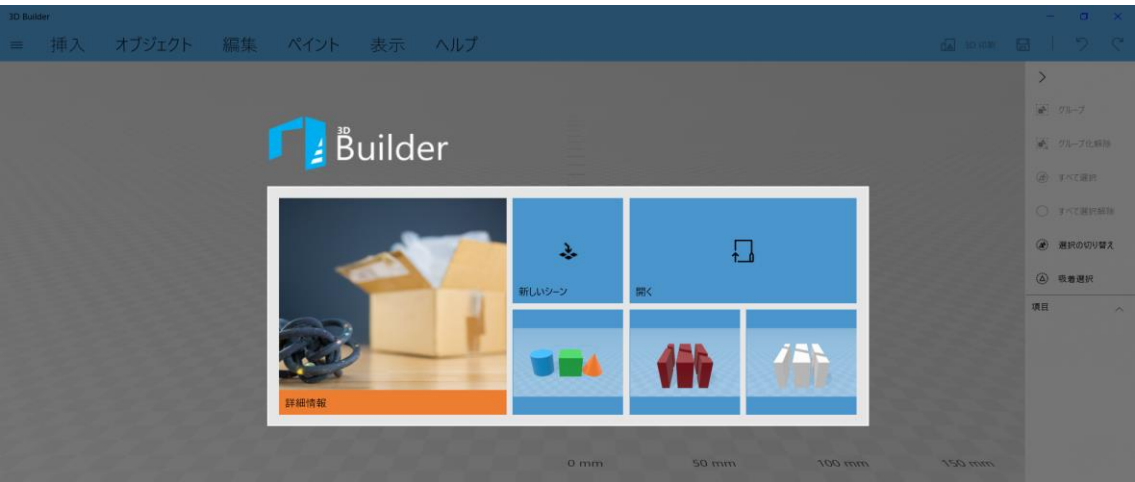


図 5-3-2 3D Builder ホーム画面

図 5-3-3 は、ホーム画面から「新しいシーン」を選択した画面である。上部の「挿入」タブをクリックすると、カスタム・立方体・円柱・角錐形・円錐・球・六角形・くさび型・トーラス・四面体を選択することができる。今回の立体モデル教材で使用する球を用いて説明を進めていく。



図 5-3-3 3D Builder 製作画面

図 5-3-4 は、球をクリックした画面である。下部のツールバーには、左から順に、移動（平行移動）・回転（回転移動）・スケール（拡大縮小）というボタンが設置されている。

はじめに「移動」について説明する。「移動」をクリックすると、x 軸、y 軸、z 軸方向に矢印が表示される。平行移動させたい方向の矢印をドラッグすることで選択した方向にオブジェクトを平行移動することができる。ツールバー右部に数値（単位：mm）を入力することで初期位置（ $x=0$ 、 $y=0$ 、 $z=20$ ）から正確な平行移動も可能である。

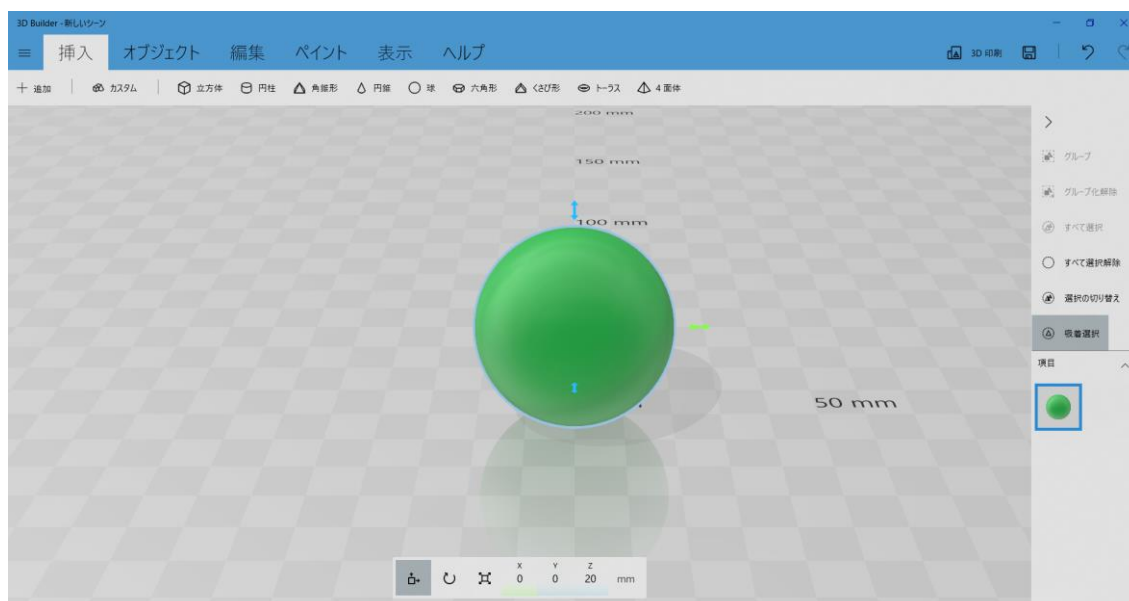


図 5-3-4 球の平行移動

次に、「回転」について説明する。図 5-3-5 は、ツールバーの「回転」をクリックした画面である。移動と同様、矢印を 1 つドラッグすることでオブジェクトの質量の中心を原点とする 3 軸の 1 つを中心としてオブジェクトが回転する。また、ツールバー右部に数値（単位：度）を入力することで初期位置（ $x=0$ 、 $y=0$ 、 $z=0$ ）から正確な回転移動も可能である。

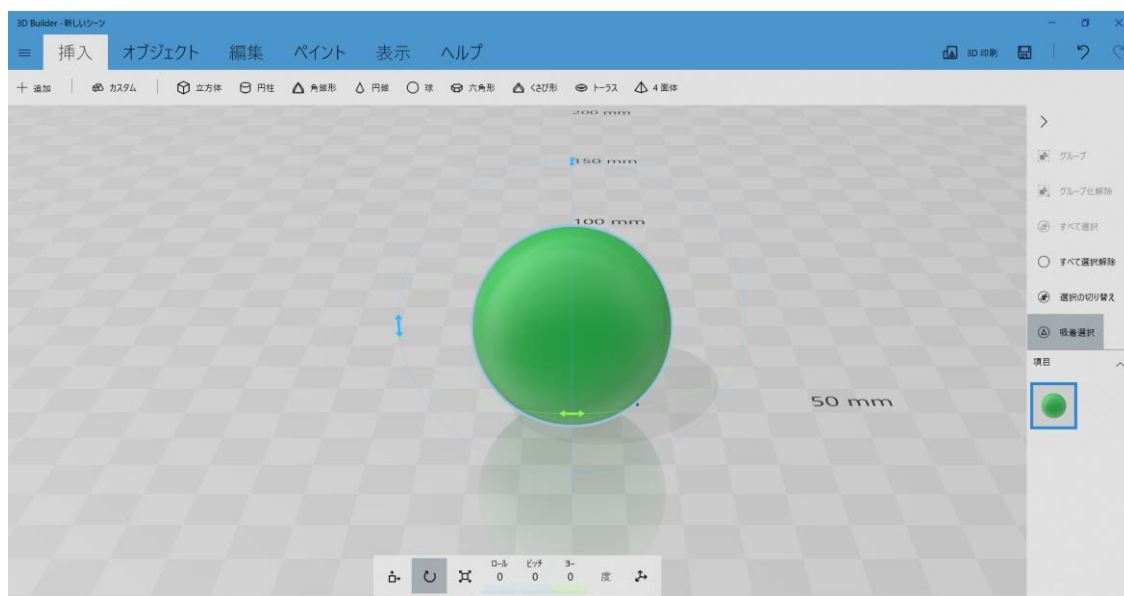


図 5-3-5 球の回転移動

最後に、「スケール」について説明する。図 5-3-6 は、ツールバーの「スケール」をクリックした画面である。矢印を 1 つドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持せずに選択した矢印の方向にオブジェクトを拡大・縮小する。四角形のウィジェットをドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持したまま拡大・縮小する。また、ツールバー右部に数値（単位：mm）を入力することで初期サイズ（ $x=40$ 、 $y=40$ 、 $z=40$ ）から正確な拡大・縮小も可能である。

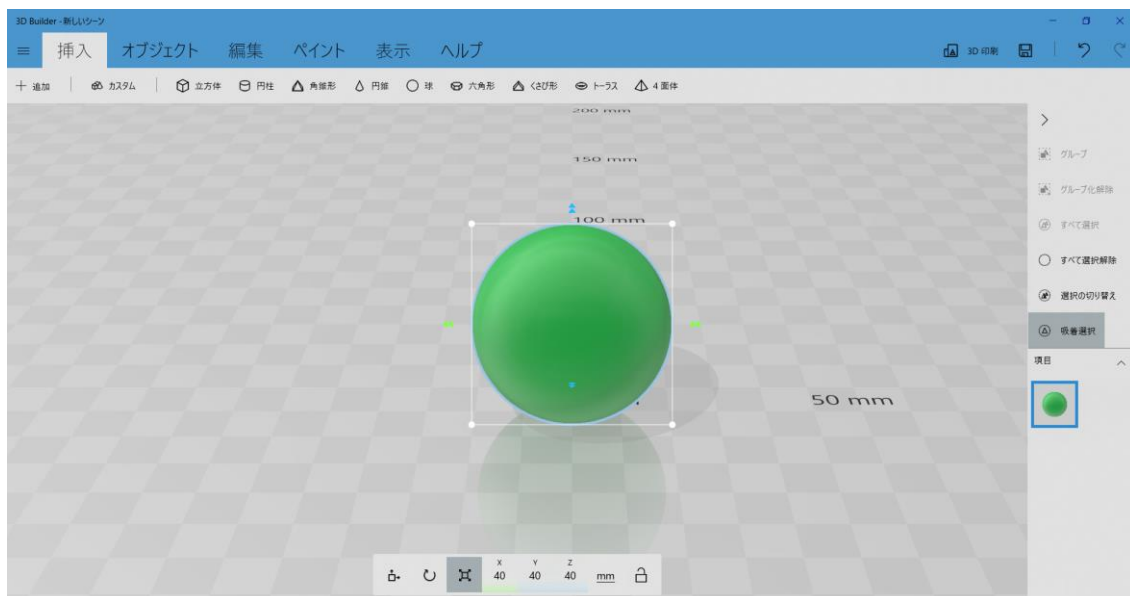


図 5-3-6 球の拡大・縮小

図 5-3-7 は「分割」をクリックした画面であり、切断面とツールバーが表示される。矢印の1つをドラッグすることで切断面を回転移動することができる。また切断面をドラッグすることで、切断面を平行移動することができる。下部のツールバーに数値を入力することで「移動」や「回転」同様に正確な平行移動や回転移動も可能である。切断面を定めることができたなら、上部のタブから上部を保持・下部を保持・両方を保持を選択する。その後分割をクリックすることで、切断した図形のどちらか、あるいは両方を残すかを選択してオブジェクトの切断を行う。

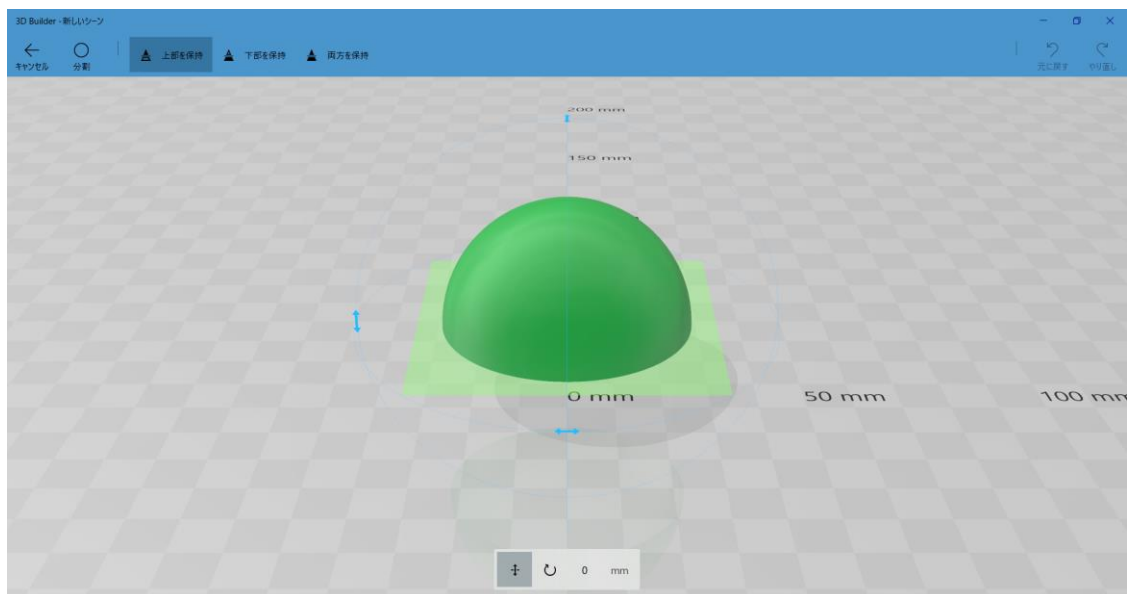


図 5-3-7 球の切断画面

図 5-3-8 は、同様に筆者が 3D Builder で作成した、体心立方格子モデルを題材とした 3D 教材である。この 3D 教材は、球どうしの間隔を計算した後、球を平行移動させたり、切断したりすることで容易に作成が可能である。

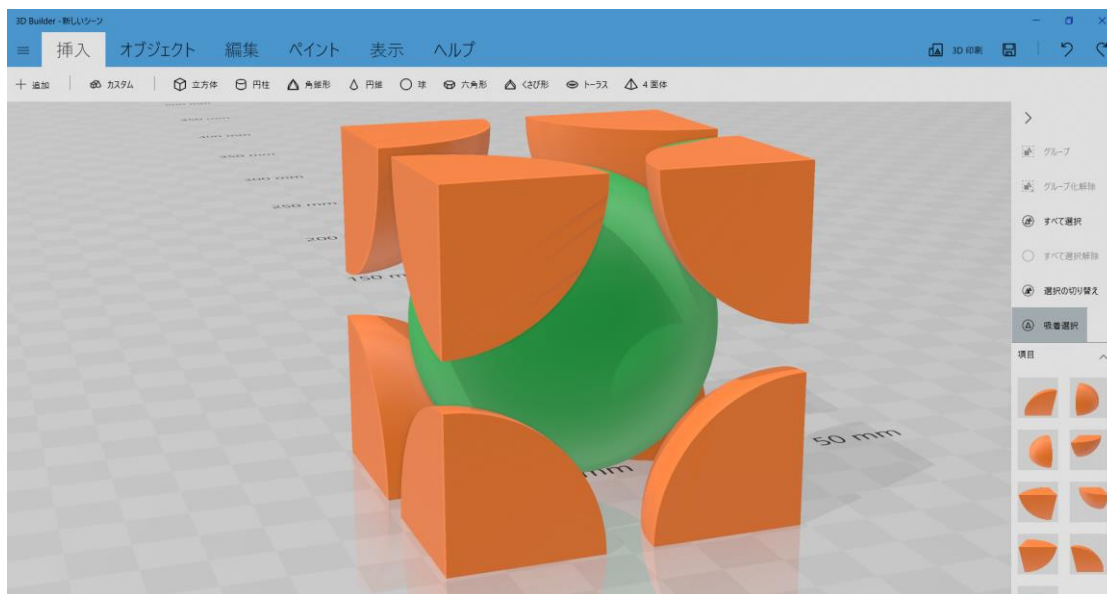


図 5-3-8 体心立方格子を題材とした 3D 教材

図 5-3-9 のように、作成した 3D 教材をさらに切断することで断面図の形を確認することができるため、原子半径と単位格子の 1 辺の長さとの関係式や充填率などの導出にも利用することが可能である。

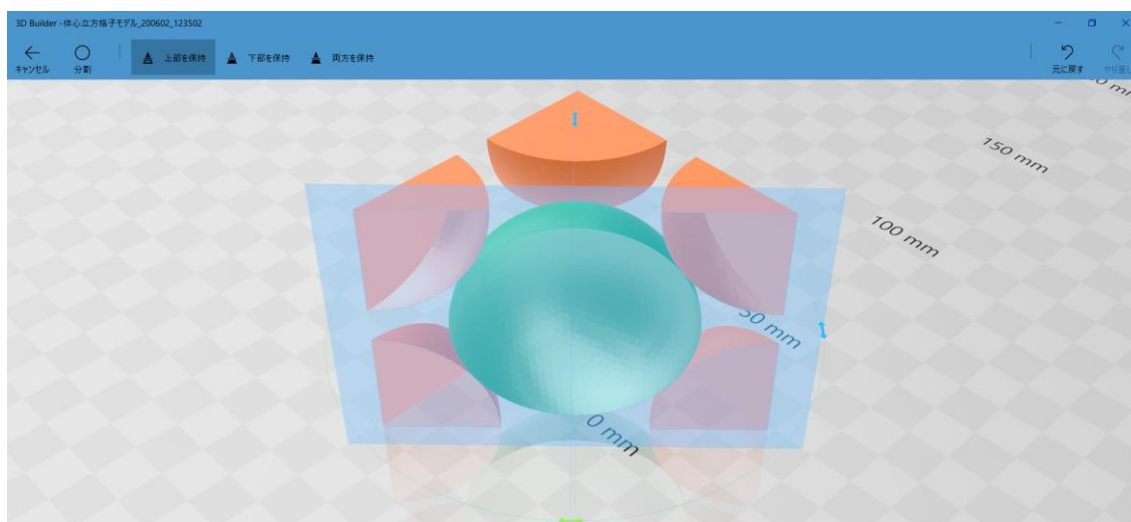


図 5-3-9 体心立方格子モデルの断面図

金属結晶の構造モデルを題材とした立体教材についても、立方体の切断と同様にマニュアルを制作した。こちらのマニュアルについても資料に掲載する。こうした立体教材の利

点として、「戻る」をクリックすることで容易に試行前の状態に復元することが可能であるため、従来の立体教材よりも学習者の試行錯誤を支援することに適しているといえる。こうした教科横断的な指導法については、STEAM 教育としても注目されている。

STEAM 教育についての諮問・提言がいくつかなされている。「Society 5.0 に向けた人材育成～社会が変わる、学びが変わる～」^[34]では新たな時代に向けて取り組むべき政策の方向性として、高等学校時代においては、「あわせて、思考の基盤となる STEAM 教育を、すべての生徒に学ばせる必要がある。こうした中で、より多くの優れた STEAM 人材の卵を産みだし、将来、世界を牽引する研究者の輩出とともに、幅広い分野で新しい価値を提供できる数多くの人材の輩出につなげていくことが求められている。」と述べられている。「新しい時代の初等中等教育の在り方について（抄）」^[35]では、新時代に対応した高等教育の在り方について、「いわゆる文系・理系の類型に関わらず学習指導要領に定められた様々な科目をバランスよく学ぶことや、STEAM 教育の推進」を挙げている。「技術の進展に応じた教育の革新(抄)」^[36]では、Society 5.0 で求められる力と教育の在り方について、「国は、幅広い分野で新しい価値を提供できる人材を養成することができるよう、初等中等教育段階においては、STEAM 教育（Science、Technology、Engineering、Art、Mathematics 等の各教科での学習を実社会での問題発見・解決にいかしていくための教科横断的な教育）を推進するため、「総合的な学習の時間」や「総合的な探究の時間」、「理数探究」等における問題発見・解決的な学習活動の充実を図る。その際、各発達段階において、レポートや論文等の形式で課題を分析し、論理立てて主張をまとめることも有効である。そのため、国は、カリキュラム・マネジメントの視点を踏まえ、人材活用も含め産学連携や地域連携による STEAM 教育の事例の構築や収集、モデルプランの提示や全国展開を行う。また、グローバルな社会課題を題材にした、産学連携 STEAM 教育コンテンツのオンライン・ライブラリーを構築する。」と示している。「統合イノベーション戦略 2019」^[37]では、初等中等教育からリカレント教育に至るまでの人材育成改革の具体的施策として、「これからの社会の中で生きていくために必要な力の育成に向け、各教科での学習を実社会での課題解決に生かしていくための教科横断的な教育である STEAM 教育を推進し、具体的な社会課題と紐付けながら学習する環境を確保する。」と示している。

「まち・ひと・しごと創生基本方針 2019」^[38]では、各分野の施策の推進の内、教育分野において、「AI による効果的な学習等を実現する EdTech の活用により学びの個別最適化を進めるとともに、地域の課題解決にも資する STEAM 教育の好事例創出・横展開等を推進する。」と述べられている。新井（2018）^[39]によると、STEM 教育は、元々米国で科学技術による国際競争力を高めるため、理工系科目 Science（科学）、Technology（技術）、Engineering（工学）、Mathematics（数学）の履修を高めることを目的として進められた（この次期の STEM 教育を便宜上 STEM 教育 1.0 と呼んでいる）。現在の STEM 教育（これを STEM 教育 1.5 と呼んでいる）には、コンピュータサイエンスや Liberal

Arts、Robotics、Ethics など新たな概念が拡大している。「数学」、「理科」、「技術・家庭」は STEM 教育 1.0 の中心的な教科であり、「音楽」、「美術」、「保健体育」は STEM 教育 1.5 に関わる教科である。また、「国語」、「英語」は言語能力にかかわる中核的な教科であり、「社会」は STEM 教育が取り組むべき社会的課題を考える上で重要である。このように STEM 教育にかかわる要素は既に存在しているため、これらを融合させた課題設定を行うとともに、STEM 教育として明示してそれに取り組むことで STEM 教育の実践は可能であると述べている。さらに、IoT やビッグデータの活用、AI 技術の活用といった時代の変化に伴い、AI が普及する社会に必要な能力の育成として STEM 教育 1.5 が注目されるようになった。しかし、新井（2018）は、STEM 教育 1.5 の Science、Engineering、Mathematics について次の問題点を述べている。はじめに、Science は、コンピュータサイエンスだけでなく、AI そのものの基礎を学べるようにすることが必要で、AI を理解した上で、社会の在り方を考えることが求められる。次に、Engineering は、実際に問題解決するための創造的な思考の育成に重要であるが、学習指導要領に埋め込めるように構造化されていない。最後に、Mathematics は純粋数学の視点だけでなく、応用数学の視点も必要である。加えて、日本の STEM 教育の課題として、2020 年度から実施される新学習指導要領にも取り扱いに関する記載がないことや、履修すべき内容が増える中での時間の確保、教員の研修や養成、目標や評価の設定、そして政策としての位置づけや予算の設定を挙げている。以上の点から、「これからの STEM 教育は、文系・理系の枠を超えて、AI 社会の現実課題の解決に臨む活動であり、それは S/T/E/M に何かを加えた派生形の概念ではなく、現在の STEM 教育 1.5 に対して非連続的な概念かもしれない」と述べている。

ところで、GIGA(Global and Innovation Gateway for All)スクール構想実現のために、文部科学省は令和 5 年度までに小・中学校全学年の児童生徒が 1 人 1 台コンピュータを利用できるよう学習環境の整備を進めている。『「児童生徒 1 人 1 台コンピュータ」の実現を見据えた施策パッケージ」^[40]では、ICT 環境の抜本的充実、デジタルならではの学びの充実、日常的に ICT を活用できる指導体制の 3 観点から、個別最適化された学びの実現を目指しているが、自治体や各学校により整備状況には差がある。学習者が自らデジタル教材を活用して試行錯誤することのできる環境の構築及びデジタル教材の活用方法を指導できる教員の育成の双方が早急に必要である。

5.4. 教育実践による立体教材の活用とその教育的効果

5.4.1. 対象

国立 A 附属高等学校第 3 学年 2 名

5.4.2. 実施期間

2021 年 1 月 12 日に A 附属高等学校にて実践を行った。放課後に実践を行い、実践時間

は 70 分を 1 コマに設定した。

5.4.3. 実施場所

国立 A 附属高等学校

5.4.4. 実施内容

1 コマの実践につき、生徒 2 名と指導者 1 名で、指導者は筆者が担当した。生徒には 1 人 1 台 PC を使用できる環境を設定した。

この実践を通して生徒に身につけさせたい能力は以下の 2 項目である。

- ・空間図形の平行移動、回転移動、拡大・縮小を理解し、空間上における辺と辺、辺と面、面と面の位置関係がわかる。
- ・立方体の切断面の図形を 11 種類見つけ出すことができ、3D ソフトウェアを用いてそれらを表現することができる。

授業内容は以下の通りである。

導入では、筆者が作成したワークシートを生徒に配布し、切断面が正方形となる立方体を例題として用いて説明し、その後立方体の切断面の作図問題を解かせる。その際、立方体を切断する位置や方向などの方法が異なっている場合、切断面の図形の種類が同じである場合は数に含めないことに注意させる。

展開 1 では、パソコンを生徒 1 人につき 1 台用意し、筆者が作成した 3D Builder のマニュアルを配布する。生徒はマニュアルを用いて、本実践で使用する 3D ソフトウェアの「3D Builder」の簡単な操作や用語を学習する。基本的に、生徒はマニュアルをもとに学習し、課題を進めていくが、わからない部分があるときは指導者に質問することができる。

展開 2 では、導入で解答した作図問題に再度取り組ませる。生徒たちは、3D ソフトウェアを自ら操作しながら、最初に解答した図形が正しいかを確認したり、他の種類の切断面が存在するかを調べたりする。3D Builder の使用の有無がわかりやすいようにするため、3D Builder を用いたことで新たに発見した切断面や導入で解答した内容の正誤確認は、赤色で記入する。

まとめでは、アンケート調査を実施し、教育実践の全行程は終了とする。教育実践の指導案や配布したマニュアル及びワークシートについては、資料に掲載する。

5.4.5. 実践結果

図 5-4-1、図 5-4-2 は、2 名の生徒の解答用紙である。黒色でかかれた解答は、導入部分での 3D Builder を使用しない状態のものである。赤色の解答は、展開部分での 3D Builder を用いて自身で再度試行錯誤を行い、解答の確認あるいは追加を行なったものである。それぞれの解答内容を表にしたものが表 5-4-1 である

表 5-4-1 3D Builder 使用前後での解答累計 (N=2)

	生徒 A	生徒 B
3D Builder 使用前	長方形、三角形、正三角形	長方形、三角形、正三角形
3D Builder 使用后	五角形、六角形	五角形、台形、六角形

練習問題 1

作成した立体の切断面を図にかき、太枠内に切断面の名称をかいてください。
正方形以外に、切断面の図形を 11 種類求めよう。

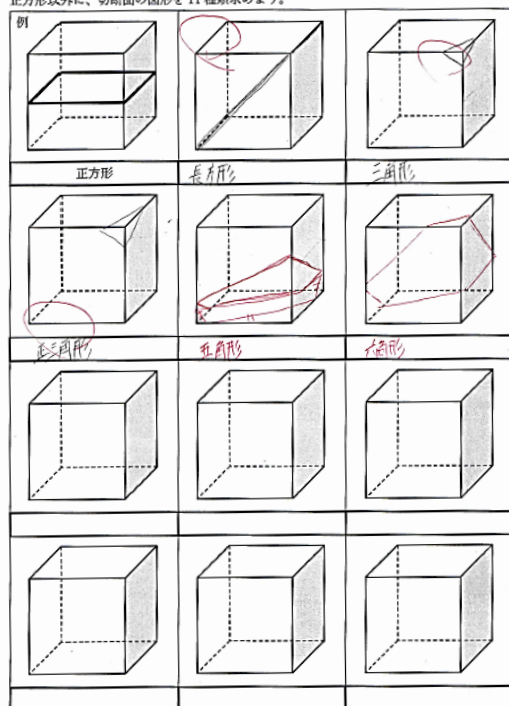
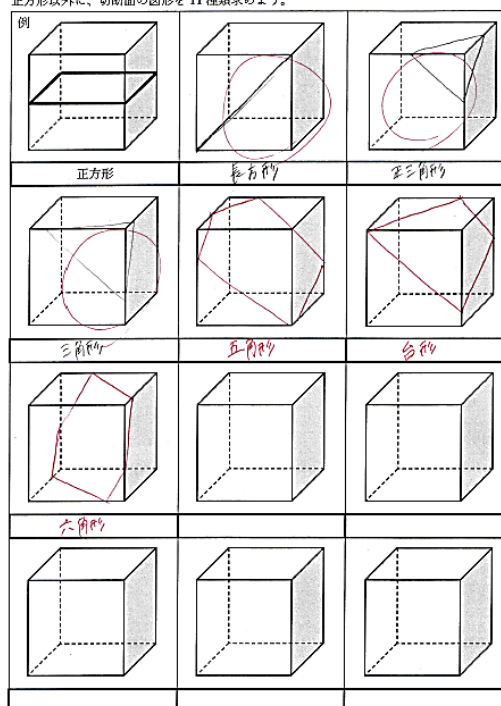


図 5-4-1 生徒 A の解答用紙図

練習問題 1

作成した立体の切断面を図にかき、太枠内に切断面の名称をかいてください。
正方形以外に、切断面の図形を 11 種類求めよう。



5-4-2 生徒 B の解答用紙

3D Builder を使用する前段階では、11 種類のうち長方形、三角形、正三角形の 3 種類しか切断面を見つけることができなかったが、3D Builder を使用することで、五角形や六角形などの新たな切断面を自ら求めることができた。図 5-4-3、図 5-4-4 は、生徒が 3D Builder を用いて実際に六角形の切断面を制作している様子である。両名とも試行錯誤を繰り返しながら、最終的には指導者の補助無しで六角形の切断面を発見することができた。加えて、解答用紙に切断面を記入する際、3D Builder の視点を問題用紙に表された見取図と同じ視点になるように回転させる様子や、繰り返し画面と解答用紙を見比べ、新たな断面図を発見したり自身の解答の正誤を確認したりする様子が見られた。

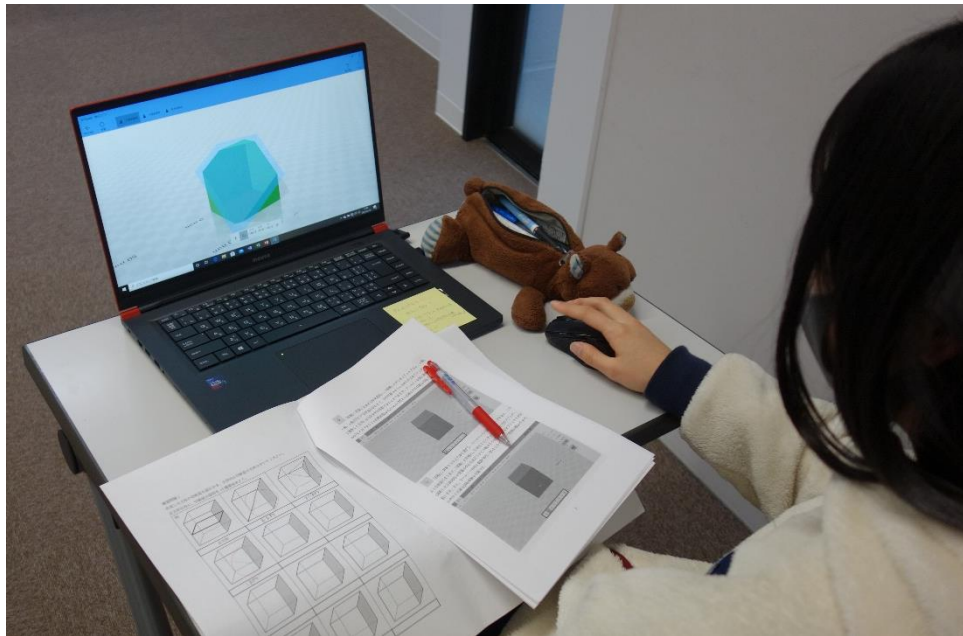


図 5-4-3 生徒の 3D 教材操作風景①



図 5-4-4 生徒の 3D 教材操作風景②

次に、アンケートの結果について述べる。

アンケート項目は以下の通りである。

Q1. 3D Builder の操作の難易度はどうでしたか。

Q2. 3D Builder を活用した授業は楽しんで取り組むことができましたか。

Q3. マニュアルの説明はわかりやすかったですか。

回答はすべて 5 段階評価で行う選択式である。

表 5-4-2 は、アンケート結果を表したものである。

表 5-4-2 アンケート結果 (N=2)

項目	生徒 A	生徒 B
Q 1	4.やや難しい	3.ふつう
Q 2	5.楽しめた	4.やや楽しめた
Q 3	4.ややわかりやすい	5.わかりやすい

表 5-4-2 より、3D Builder の操作については若干難度が高いという結果になった。生徒は両名とも 3D Builder を扱った経験が無く、最初は慣れない様子だったが、10 分ほど操作していると、ほとんどこちらの補助なく操作できるようになっていた。授業については肯定的な回答が得られたことから、立方体の切断を扱った立体教材は学習者の意欲を引き出すことができたと言える。マニュアルの内容についても肯定的な回答が得られた。一方で、口頭での説明と併せることでよりわかりやすくなったという記述がみられたことから、マニュアルのみでは伝わりにくい部分も存在したと考えられる。マニュアルのみで説明するだけでなく、状況に応じて口頭での説明を交えることが効果的であることがわかった。

図 5-4-5、図 5-4-6 は、2 名の生徒の感想記述である。紙面上では気づくことのできなかったことも、3D Builder を用いて立体的に観察することで新しく気づくことができている。また、消しゴム等の実物を使用するよりも 3D Builder を使用することで正確に切断が可能であることにも触れられている。立体の回転や切断は念頭操作や紙面上の表現では困難だが、3D Builder によって容易に表現ができる利便性も感じていた。

●3D Builder を使用してみて、わかったことや気付いたことを自由にかいてください。

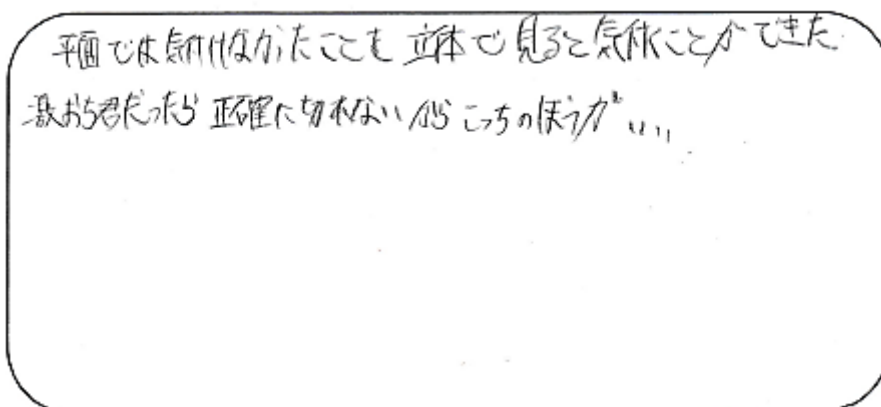


図 5-4-5 生徒 A の感想記述

●3D Builder を使用してみて、わかったことや気付いたことを自由にかいてください。

3Dの物体を扱うことになって、発見に近づくとが容易
にできると分かった。回転レベル、切断レベルが、ボタン
1つあれば簡単にできる。

図 5-4-6 生徒 B の感想記述

5.4.6. 今後の課題

今回は高校生 2 名を対象に授業実践を行った。新型コロナウイルス感染症に伴う緊急事態宣言発令の影響もあり、十分な生徒数での検証ができなかった。さらなる実践を重ねていくとともに、十分な分析をしていくことが今後の課題の 1 つである。また、今回の実践では生徒たちは 3D Builder の操作方法に慣れるまで 10 分程度かかったため、通常授業の中で扱う際には操作方法を学習する時間と実際に演習を行う時間の 2 時間構成にしたり、生徒の人数が増えても対応できるよう補助スタッフを配置したりするなどの改善も必要であると考えられる。また、開発した金属結晶の構造モデルを題材とした 3D 教材をはじめとした他の単元や教科の 3D 教材のさらなる開発と、それらを用いた教科横断的な指導方法の構築と実践が早急の課題である。

第 6 章 総合討議

本章では、各章における研究成果を整理し、今後の課題について論じる。

6.1. 各章の研究成果

6.1.1. 第 2 章 今日の日本における空間図形の指導

第 2 章では、小学校算数科、中学校数学科、高等学校数学科（理数科）における空間図形に関する指導内容について学習指導要領をもとに整理した。

小学校算数科においては、第 4 学年以降では空間図形の学習内容に対応する数学的活動が記されていないことから、教科書だけでなく、実物の立体やソフトウェア等を活用した立体図形の性質や立体図形が存在する空間の意味や特徴を捉えることの必要性が明らかとなった。

中学校数学科においては第 2 学年での空間図形の扱いがない点や、空間図形の学習内容に対応した数学的活動例が示されていないことが課題として明らかになった。

高等学校数学科（理数科）においては、数学という教科の枠組みにとらわれず、教科横断的な学習を進めていくとともに、変化に応じた指導体系の構築が課題であることを見出すことができた。

また、学力調査から、身近な立体を観察したり見取図を見たりして、直線と直線、直線と平面、平面と平面の位置関係を考察する場面を設定し、空間における直線と平面の位置関係を理解することに課題があることが明らかとなった。

6.1.2. 第 3 章 立方体の切断に関する認識調査

第 3 章では、視線移動計測実験を実施するにあたって大学生、高校生を対象にそれぞれ行った認識調査の結果・考察について論じた。

大学生への認識調査により、視線移動計測実験に用いるに適切な課題の難度を把握するとともに、高校生への認識調査及び大学生への視線移動計測実験で使用する課題の設定を行うことができた。

高校生への認識調査からは、空間図形の学習内容の定着や、辺や頂点、面の位置関係や図形の性質等を用いた数学の原理・法則に基づいた理解が不十分であることが明らかとなった。そこで、学習者の生体情報を取得・分析することにより、どのような困りがあるのかを解明する必要性が示唆された。

6.1.3. 第 4 章 視線移動計測実験

第 4 章では、大学生を対象に行った視線移動計測実験の概要や結果・考察について論じた。

行動観察による分析の結果、立方体の頂点と各課題の切断面の頂点との一致数が少ないほど、正答率が低く、平均解答時間が増加する傾向にあることを解明することができた。一

方で、被験者の感じる難度と実際の正答率等の結果とは必ずしも一致せず、行動観察のみで学習者の理解度を評価することに対して、慎重にならなければいけないことが明らかとなった。そこで、行動観察の他に、生体情報による分析・考察が重要であると考え、生体情報の 1 つである視線移動に着目してデータの収集及び分析を行った。その結果、正答者が課題解決のために立方体を全体的に観察しているのに対して誤答者は特定の位置を注視する傾向にあることや、課題解決に必要な 4 点目の頂点の位置を正しく把握できていないことが誤答につながっていることが明らかとなった。要因として、正答者は課題解決に必要な 4 点目の頂点を特定しているのに対し、誤答者は 4 点目の頂点を特定することができず課題解決に時間を費やし、必要以上に 3 個の白点を注視してしまうことや、課題解決と関係性の薄いその他の点の注視時間が長くなってしまうことが推察される。

6.1.4. 第 5 章 3D ソフトウェアを用いた立体教材制作及び教育実践

第 5 章では、3D Builder を用いて、立方体の切断を題材とした 3D 教材（中学校 数学）と金属結晶の構造モデルを題材とした 3D 教材（高等学校 化学）の 2 種類の 3D 教材を制作した。また、それらを教育現場で有効的に使用できるように各種操作マニュアルも制作した。

また、高校生を対象に行った、立方体の切断を題材とした 3D 教材を用いた教育実践の結果について論じた。3D Builder を使用する前と比較して課題を多くこなせていたことから、3D 教材の有用性は立証できたと考えられる。3D Builder の使用経験が無い状態でも、マニュアルを読み込み即座に操作方法を習得し、指導者の補助をほとんど得ずに生徒自らが試行錯誤することができた。紙面上では気づくことのできなかったことも、3D Builder を用いて立体的に観察することで新しく気づくことができていた。立体の回転や切断といった念頭操作や紙面上の表現では困難なものも 3D Builder によって容易に表現できることへの利便性も感じていた。

6.2. 今後の展望

本研究の目的は以下の 2 点であった。

- (1) 学習者の立方体の切断課題遂行時の課題解決に至る過程を、視線移動計測実験から明らかにし、空間図形の切断課題に関する困難な点を解明することである。
- (2) 小・中・高等学校の各段階における空間図形の学習内容を整理し、3D ソフトウェアの活用を見据えた立体教材を制作するとともに、それを用いた空間図形教育の効果的な指導方法を検証することである。

本研究により、研究目的 (1) の空間図形の切断課題に関する困難な点については、第 3 章での認識調査及び第 4 章での視線移動計測実験の分析によって明らかにすることができた。

研究目的 (2) の小・中・高等学校の各段階における空間図形の学習内容については、第 2 章より、学習指導要領をもとに整理することができた。また、3D ソフトウェアの活用を見

据えた立体教材の制作については、第 5 章より、立方体の切断及び金属結晶の構造モデルを題材とした 3D 教材を制作することができた。空間図形教育の効果的な指導方法の検証については、第 5 章より、教育実践を行い制作した 3D 教材を用いた指導法の有効性が見られた。

今後の課題として、本研究の成果をもとに、さらなる単元・教科で活用できる 3D 教材の制作及びそれらを用いた指導方法の構築と実践である。また、新たな視線移動データの分析手法や、他の生体情報と関連づけた分析手法の構築が必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 鈴木正彦 (2010)「第 6 章 図形」；黒田恭史編著、『初等算数科教育法—新しい算数科の授業をつくる—』,p92-97,ミネルヴァ書房, 2010 年 4 月
- [2] 立花正男・山本一美・佐藤真・菊池信夫・藤井雅文・佐々木亘 (2016)「空間概念を育成する指導 (II)」, 岩手大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要, 第 15 号, pp.89-99
- [3] 近藤裕・熊倉啓之・國宗進・藤田太郎 (2019)「空間図形の理解に関する調査研究：小・中学生の見取図の理解に関して」, 奈良教育大学紀要-人文・社会科学, Vol.68, No.1, pp.147-156
- [4] 岩崎彩乃・青山和裕・辻宏子 (2019)「中学生の空間図形の認識に関する研究」, 日本科学教育学会研究会研究報告, Vol34, No.3, pp.89-92
- [5] 中西正治 (1996)「立方体の切断面の作図法についての一考察」, 日本数学教育学会, 数学教育論文発表会論文集, 第 29 巻, pp.277-282
- [6] 岩田俊義 (2017)「空間概念を形成する指導に関する一考察：立方体の展開・切断を通して」, 千葉敬愛短期大学紀要, 第 39 号, pp.59-68
- [7] 「中学校数学 I」, 数研出版, p.189, 平成 27 年 2 月 27 日
- [8] 石井雅代 (2011)「空間図形の理解を促す手作りの立体教材」, 日本科学教育学会年会論文集, Vol.35, pp.430-431
- [9] 濱口直樹・高遠節夫 (2018)「立体モデルおよびタブレット・スライドを併用した空間図形教材の教育効果」, 日本科学教育学会年会論文集, 第 42 巻, pp.91-92
- [10] 影山和也 (2000)「空間的思考の階層性に関する考察—大局的特徴づけとその具体化—」, 全国数学教育学会誌数学教育学研究第 6 巻, pp.163-173
- [11] van Hiele (1986) ,*Structure and Inght : A Theory of Mathematics Education*, Academic Press.
- [12] Hoffer,A. (1983) ,Van Hiele-Based Research, In Lesh, R. & Landau, M. (Eds.), *Acquisition of Mathematics Concepts and Processes*, Academic Press, pp.204-227
- [13] Gutierrez, A.,Jaime, A. and Fortuny, J. M. (1991), An Alternative Paradigm to Evaluate the Acquisition of the van Hiele Levels, *Journal for Research in Mathematics Education*, Vol.22, No.3, pp.237-251
- [14] Duval, R. (1998) , Geometry from a Cognitive Point of View, *Perspectives on the Teaching of Geometry for the 21st Century : An ICMI Study*, C. Mammana and V. Villani (eds.) , Kluwer Academic Publishers, pp.37-51
- [15] 影山和也 (2009)「集合の考えを生かした図形指導の一考察」, イブシロン, Vol.51, pp.29-35
- [16] 黒田恭史 (2008)「第 2 章 評価」；黒田恭史編著、『数学科教育法入門』, 共立出

- 版, pp.21-31
- [17] 黒田恭史・中島悠・岡本尚子 (2014)「立面図・見取図・立体の変換過程時における視線移動の特徴」, 佛教大学教育学部学会紀要, 第 13 号, pp.49-58
 - [18] 北條彰・田角勝・阿部祥英・花岡健太朗・小林梢・板橋家頭夫 (2016)「特異的読字障害児の音読における視線の特徴」, 昭和学士会誌, 第 76 巻, 第 5 号, pp.598-606,
 - [19] 中野良樹 (2017)「数理パズル“タングラム”の洞察的問題解決における視線移動の検討」, 北海道心理学研究, 第 39 巻, p.32
 - [20] 木下卓海・岡本尚子・黒田恭史 (2020)「実物・タブレット・紙面における立体図形課題遂行時の学習者の解決方略の特徴—生体情報を用いた分析を通して—」, 数学教育学会誌, Vol.61, No.1・2, pp.89-97
 - [21] 文部科学省 (2019)「教材整備指針（一部改定案）に関する資料」, 教育課程部会, pp.1-53
 - [22] 文部科学省 (2018)「教材整備指針の改訂について（概要）」, 最終検索日 (2020.12.14),
https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/__icsFiles/afieldfile/2019/08/06/1316723_1_2.pdf
 - [23] 文部科学省著『小学校学習指導要領解説 算数編』, 日本文教出版, 平成 30 年 2 月
 - [24] 黒田恭史 (2011)「第 3 章 立体・空間・変換」; 黒田恭史編著『数学教育の基礎』, ミネルヴァ書房, pp.40-65
 - [25] 文部科学省著『中学校学習指導要領解説 数学編』, 日本文教出版, 平成 30 年 3 月
 - [26] 文部科学省著『高等学校学習指導要領解説 数学編 理数編』, 学校図書, 平成 31 年 3 月
 - [27] 文部科学省著『高等学校学習指導要領解説 理数編』, 東京書籍, 平成 30 年 7 月
 - [28] 岡本尚子 (2010)「第 10 章 評価と学力調査」; 黒田恭史編著『初等算数科教育法—新しい算数科の授業をつくる—』, ミネルヴァ書房, pp.164-176
 - [29] 国立教育政策研究所『平成 27 年度全国学力・学習状況調査中学校数学報告書』, pp.52-59, 平成 27 年 8 月
 - [30] 渡邊伸樹 (2008)「第 5 章 幾何」; 黒田恭史編著『数学科教育法入門』, 共立出版, pp.96-99
 - [31] 熊倉啓之・久保良宏・八田弘恵・国宗進 (2000)「空間図形の理解に関する研究」, 第 35 回数学教育論文発表会論文集, pp.331-336
 - [32] Tobii Pro グラス 2 | トビー・テクノロジー, 最終検索日(2020.12.14)
<https://www.tobiipro.com/ja/product-listing/tobii-pro-glasses-2/>
 - [33] 「改訂 化学」, 東京書籍, pp.66-67, 令和 2 年 2 月 10 日
 - [34] 文部科学省「Society 5.0 に向けた人材育成～社会が変わる、学びが変わる～」,

Society 5.0 に向けた人材育成に係る大臣懇談会, 新たな時代を豊かに生きる力の育成に関する省内タスクフォース報告, pp.12-13, 平成 30 年 6 月 5 日

- [35] 文部科学省 「新しい時代の初等中等教育の在り方について(諮問)」, 中央教育審議会, 平成 31 年 4 月 17 日
- [36] 内閣府「技術の進展に応じた教育の革新、新時代に対応した高等学校改革について(第十一次提言)」, 教育再生実行会議, pp.5-7, 令和元年 5 月 17 日
- [37] 内閣府, 「統合イノベーション戦略 2019」 p.11, 令和元年 6 月 21 日
- [38] 内閣府, 「まち・ひと・しごと創生基本方針 2019」, pp.43-47, 令和元年 6 月 21 日
- [39] 新井健一 (2018) 「これまでの STEM 教育と今後の展望」, STEM 教育研究 Vol.1, pp.3-7, 日本 STEM 教育学会
- [40] 文部科学省 「『児童生徒 1 人 1 台コンピュータ』の実現を見据えた施策パッケージ」, 最終検索日 (2020.12.17)

https://www.mext.go.jp/content/20200219-mxt_jog

謝辞

本研究に取り組んできた中で、多くの方々にご協力いただきました。この場をお借りしまして、感謝申し上げます。

指導教員である黒田恭史先生（京都教育大学教授）は、学部1回生として入学したときから担任として熱心なご指導を賜り、3回生の頃から4年間、研究室で大変お世話になりました。研究活動以外にも、様々な学会での発表経験という貴重な経験の場を設けてくださり、研究活動だけでなく、一教員になる立場として非常に成長することができる大学生を送らせていただきました。

同じく指導教員である柳本哲先生（京都教育大学教授）には、大学院での講義を通して、自身の研究内容をわかりやすく伝えること、あらゆる分野の視点から多面的に分析をすることの大切さを丁寧にご指導いただきました。また、常に体調や進捗状況を気にかけくださり、修士論文を執筆するにあたり親身になって接していただきました。岡本尚子先生（立命館大学准教授）には、本研究の分析手法や実験装置の扱い方など、視線移動計測実験に関わる専門的な事柄に関するご指導をいただきました。

黒田研究室の先輩である津田雅秀先生（京都教育大学附属小中学校教諭）、葛城元先生（京都教育大学附属高等学校数学科教諭）、木下卓海先生（京都府立山城高等学校数学科講師）には、論文の添削指導や、学会での発表指導など、親身になってご指導いただきました。葛城元先生につきましては、認識調査や教育実践にも快く協力していただきました。

栗ありささん（京都教育大学大学院教育学研究科2年）、石川大悟さん（京都教育大学大学院教育学研究科2年）、猪股隼人さん（京都教育大学大学院教育学研究科2年）、藤野真子さん（京都教育大学大学院教育学研究科2年）は、同回生として共に講義や研究に取り組みました。その姿を見て、切磋琢磨することができました。

近藤竜生さん（京都教育大学大学院教育学研究科1年）をはじめとした黒田研究室の後輩の皆様にもお力添えをいただきました。また、京都教育大学数学領域の後輩の皆様や、フォークソングクラブの後輩の皆様には、実験の被験者として本研究にご協力いただきました。

学部期間を含めた6年間、研究活動に専念することのできる環境を用意していただいた家族の皆様にも心から感謝の意を申し上げます。

上記の皆様のご協力のもと、修士論文を作成することができました。今後も感謝の意を忘れることなく、6年間の経験を生かせるよう、教育者として邁進してまいります。

2021年1月29日

あおき しゅんすけ

青木 駿介

視線移動計測実験における被験者の課題別正誤及び所要時間（正答：○，誤答：×）

(N=30)

	課題 1		課題 2		課題 3		課題 4	
	正誤	所要時間	正誤	所要時間	正誤	所要時間	正誤	所要時間
被験者 1	×	60.00	○	57.19	○	35.11	×	60.00
被験者 2	○	31.60	○	30.69	○	54.96	○	39.59
被験者 3	○	60.00	×	60.00	×	60.00	×	60.00
被験者 4	×	48.96	×	55.05	○	60.00	○	60.00
被験者 5	○	19.09	○	28.56	×	35.71	×	39.56
被験者 6	○	35.42	○	38.91	○	36.13	×	53.61
被験者 7	○	60.00	○	35.51	○	60.00	○	60.00
被験者 8	○	15.68	○	15.78	○	18.76	○	48.15
被験者 9	○	49.17	○	22.84	○	28.64	○	51.56
被験者 10	○	34.15	○	33.91	○	29.46	×	60.00
被験者 11	×	58.12	○	41.04	×	50.03	×	60.00
被験者 12	×	60.00	○	39.93	○	42.84	○	52.31
被験者 13	×	60.00	○	43.03	○	48.35	○	51.12
被験者 14	○	29.43	○	29.18	○	44.23	○	40.24
被験者 15	○	34.26	○	31.13	○	36.53	○	60.00
被験者 16	×	60.00	×	36.79	×	39.43	×	60.00

被験者 17	×	60.00	×	60.00	○	60.00	○	60.00
被験者 18	×	26.85	○	22.96	○	30.96	○	51.32
被験者 19	×	56.31	○	38.43	○	45.21	×	60.00
被験者 20	×	60.00	×	39.78	○	51.36	○	60.00
被験者 21	×	60.00	○	28.81	×	56.62	×	60.00
被験者 22	×	24.35	○	46.03	○	38.07	×	34.09
被験者 23	○	28.17	○	25.95	×	39.07	○	57.28
被験者 24	×	60.00	○	54.32	×	60.00	○	60.00
被験者 25	×	60.00	○	36.03	○	59.53	○	60.00
被験者 26	○	51.64	○	30.65	○	47.68	○	55.84
被験者 27	○	60.00	○	60.00	○	60.00	×	60.00
被験者 28	×	60.00	×	45.26	×	36.83	×	60.00
被験者 29	×	60.00	○	21.19	○	35.74	×	47.61
被験者 30	○	60.00	○	56.87	○	47.12	○	55.58

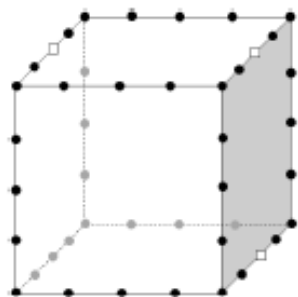
大学生への認識調査用紙

3 点の□を通る平面で立方体を切断したときの切断面を作図し，切断面の名称を書け。

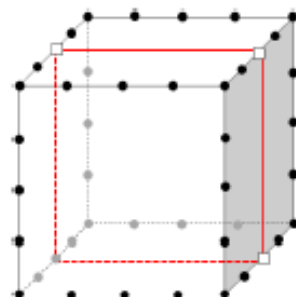
(例題 1) (正三角形)	(例題 2) (正方形)	(1) ()	(2) ()
(3) ()	(4) ()	(5) ()	(6) ()
(7) ()	(8) ()	(9) ()	(10) ()
(11) ()	(12) ()	(13) ()	(14) ()

問 1 次の立方体を、3 点の□を通る平面で切断したときにできる切り口と、断面図の名称を教えてください。

例

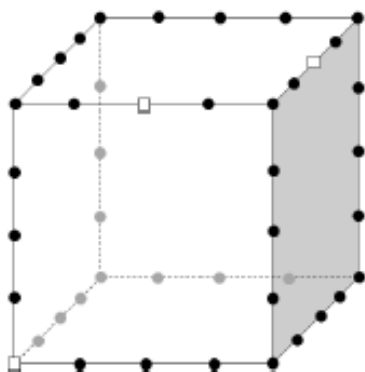


解答



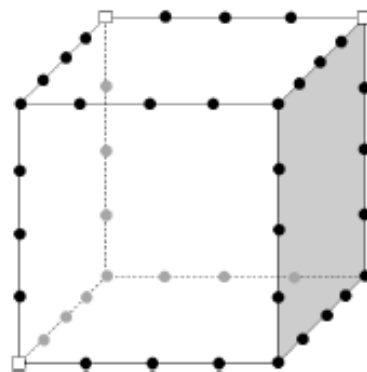
(正方形)

(1)



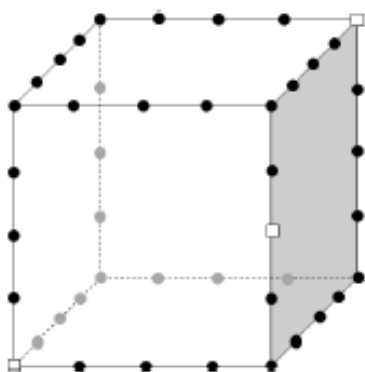
()

(2)



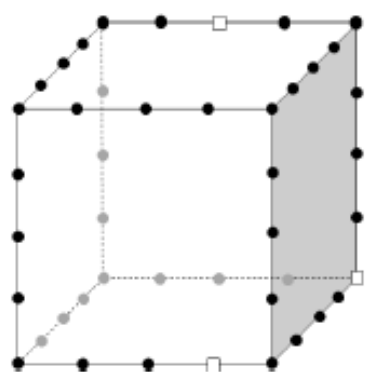
()

(3)



()

(4)



()

問 2 問 1(3),(4)の断面図をどのように考えて描きましたか。作図した手順をできるだけ具体的に説明してください。図を用いても構いません。

(3)

(4)

問 3 問 1 の難易度についてどう感じましたか。丸を付けてください。
また、その理由を下の空欄に必ず書いてください。

問 1(1) 1 難しい 2 やや難しい 3 ふつう 4 やや易しい 5 易しい

--

問 1(2) 1 難しい 2 やや難しい 3 ふつう 4 やや易しい 5 易しい

--

問 1(3) 1 難しい 2 やや難しい 3 ふつう 4 やや易しい 5 易しい

--

問 1(4) 1 難しい 2 やや難しい 3 ふつう 4 やや易しい 5 易しい

--

教育実践指導案

2021 年 1 月 12 日

指導者：青木駿介

- ・日時 2021 年 1 月 12 日（火曜日）16：30～17：40（70 分間）
- ・対象 京都市内 A 高等学校第 3 学年 2 名
 - ・目標 ○空間図形の平行移動、回転移動、拡大・縮小を理解し、空間上における辺と辺、辺と面、面と面の位置関係がわかる。
 - 立方体の切断面の図形を 11 種類見つけ出すことができ、3D ソフトウェアを用いてそれらを表現することができる。

・展開

○主なる指示・発問

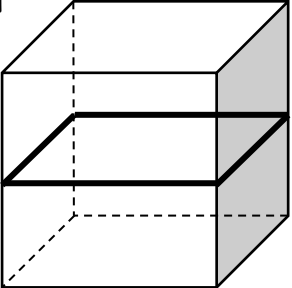
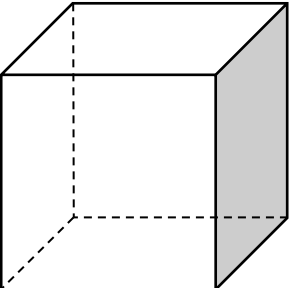
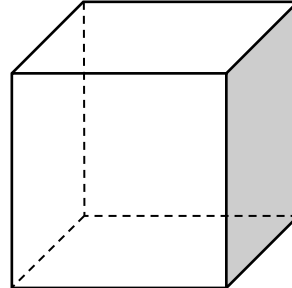
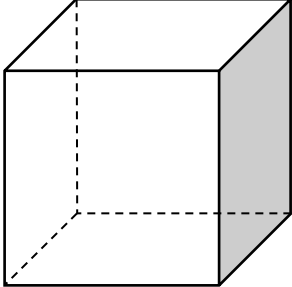
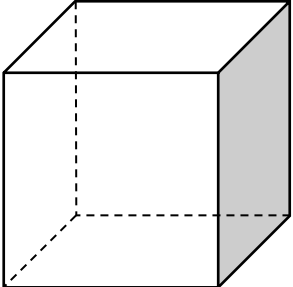
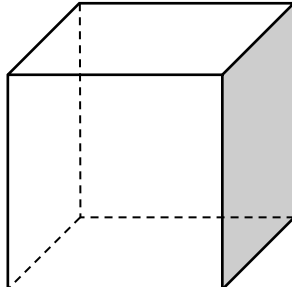
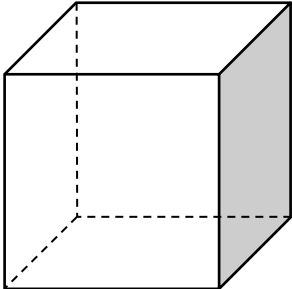
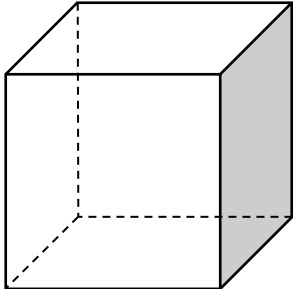
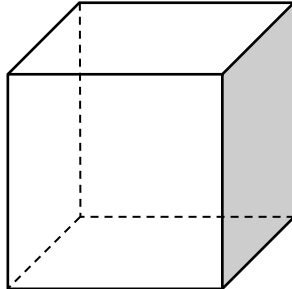
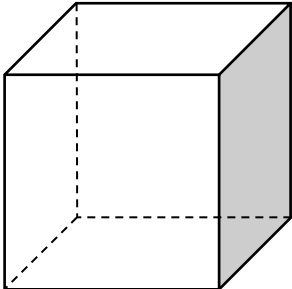
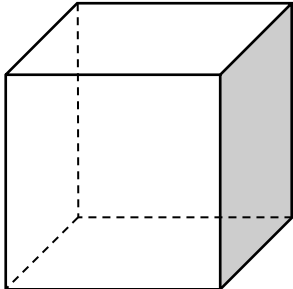
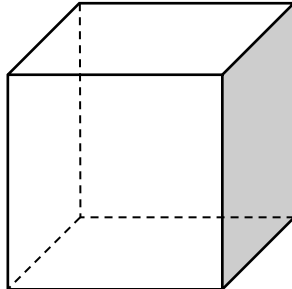
区分	学習活動と反応 (予想される生徒の反応)	指導上の留意点・支援・評価 (教師の活動)	準備物 資料等
導入 15 分	・ 本時の活動の確認と諸注意を受ける。	○ワークシートを配布し、例題を用いて課題の説明を行う。	筆記用具 ワークシート
問題：正方形以外に、切断面の図形を 11 種類求めよう。			
	・ 黒色の筆記用具で記入する。	・問題を解くよう指示する。 その際、黒色の筆記用具を用いるよう指示する。 ○切断する位置や方向などの方法が異なっても、切断面の図形の種類が同じである場合は数に含めないことを強調する。	
展開 1 15 分	・ マニュアルを読み、3D Builder の基本操作を学習する。	・パソコンを生徒 1 人につき 1 台用意し、3D Builder を立ち上げる。 ○マニュアルを配布し、3D Builder の操作方法について説明する。	パソコン (3D Builder) マニュアル

	・マニュアルをもとに、立方体の平行移動、回転移動、拡大・縮小を行う。 ・マニュアルを読んでも理解できなかった点は質問する。	○基本操作をはじめ、平行移動、回転移動、拡大・縮小の方法が理解できているかを確認し、十分でないときには補助を行う。 ○立方体の切断方法について理解できているかを確認し、十分でないときには補助を行う。	
展開 2 30 分	・3D Builder を用いて、立方体の切断を行い、切断面の図形を 11 種類求める。 ・既に解答している図形についても、3D Builder を用いて再現し、切断面の図形の形状を確認する。	○3D Builder を用いて、練習問題を再度解答させ、切断面の種類に漏れがないかを指示する。 ○漏れがあった場合は、赤色の筆記用具を用いて記入するよう指示する。 ○既に解答している図形については、正答している場合丸付けを行い、間違っている場合は赤色の筆記用具で修正を行うよう指示する。	
まとめ 10 分	・アンケートに感想等を記入し提出する。	○ワークシートへの記入を促す。 ○アンケートに感想等を記入するよう指示する。	

練習問題 1

作成した立体の切断面を図にかき、太枠内に切断面の名称をかいてください。

正方形以外に、切断面の図形を 11 種類求めよう。

例 		
正方形		
		
		
		

●3D Builder を使用してみて、わかったことや気付いたことを自由にかいてください。



▼アンケートにご協力をお願いします。該当する数字に○をつけてください。

Q1. 「3D Builder」の操作の難易度はどうでしたか。

1 易しい 2 やや易しい 3 ふつう 4 やや難しい 5 難しい

Q2. 3D Builder を活用した授業は楽しんで取り組むことができましたか。

1 楽しめなかった 2 やや楽しめなかった 3 ふつう 4 やや楽しめた 5 楽しめた

Q3. マニュアルの説明はわかりやすかったですか。

1 わかりにくい 2 ややわかりにくい 3 ふつう 4 ややわかりやすい 5 わかりやすい

わかりやすい、もしくはわかりにくいと答えた理由を教えてください。



以上で終わりです。ご協力ありがとうございました。

1. 「3D Builder」での機能及び用語説明

1.1 ホーム画面

図1は「3D Builder」のホーム画面です。この画面から、中央の「新しいシーン」をクリックします。

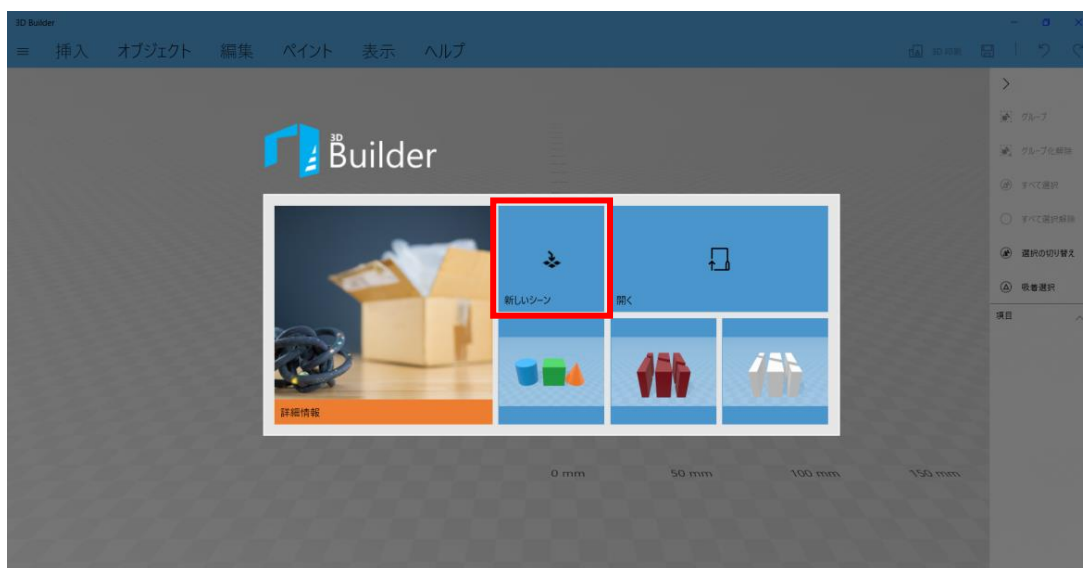


図1 3D Builder ホーム画面

1.2 「タブ」

「新しいシーン」を選択すると、図2のような画面に切り替わります。シートの操作方は、ドラッグすることで視点を回転させることができ、ダブルクリックでその方向へ視点移動することができます。上部の青い部分を「タブ」といいます。タブには「挿入」、「オブジェクト」、「編集」、「ペイント」、「表示」、「ヘルプ」があります。また、青いタブの左端のボタンをクリックすると、「新しいシーン」や「保存」があります。

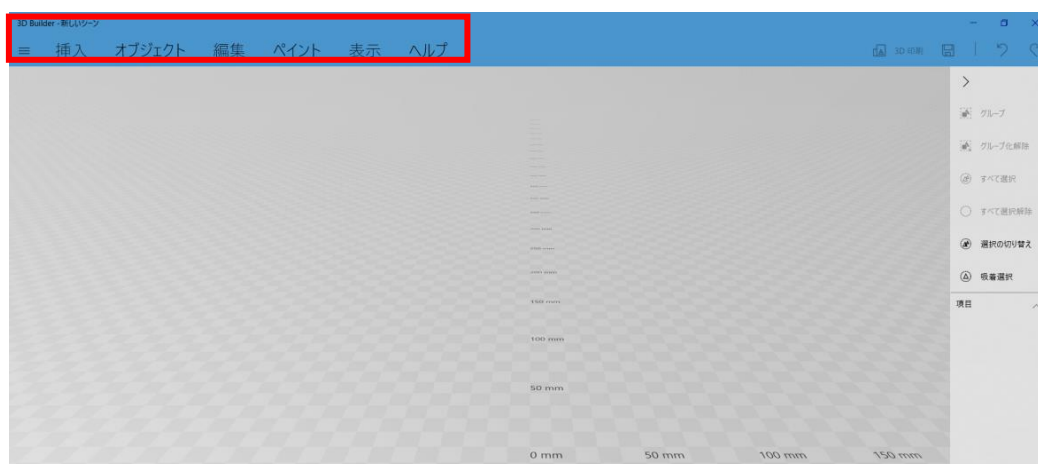


図2 3D Builder 製作画面

1.2.1 「挿入」

「挿入」をクリックすると図3のように「挿入」に関する新しいタブが表示されます。この「挿入タブ」は、「追加」、「カスタム」、そして立体図形の「立方体」、「円柱」、「角錐形」、「円錐」、「球」、「六角形」、「くさび形」、「トーラス」、「4面体」から構成されます。

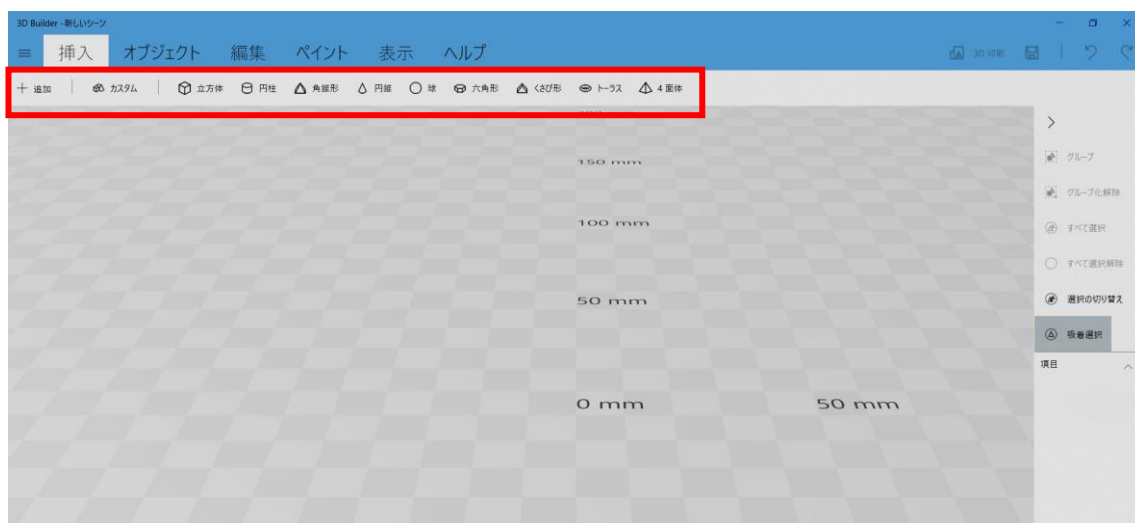


図3 「挿入タブ」の画面

「追加」をクリックすると、過去に製作したオブジェクトや、インターネット等で入手したオブジェクトを配置することができます。

「カスタム」をクリックすると、図4のような画面になります。基本となる立体図形を「シェイプ」から立方体・球・円錐・トーラス・円柱から選択します。「ワイヤーフレーム」をオンにすることで、面の構成を可視化することができます。

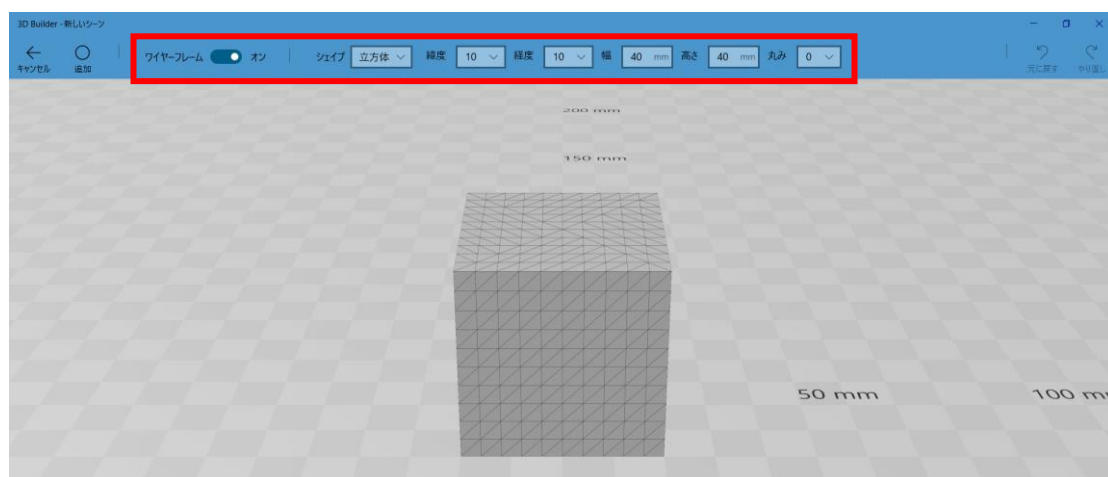


図4 「カスタム」の画面

「緯度」や「経度」は、立体図形の緯線や経線の本数を変化させることができます。これについては球を用いて説明します。「緯度」と「経度」を10に設定すると、図5のよう

な球状の立体ができます。

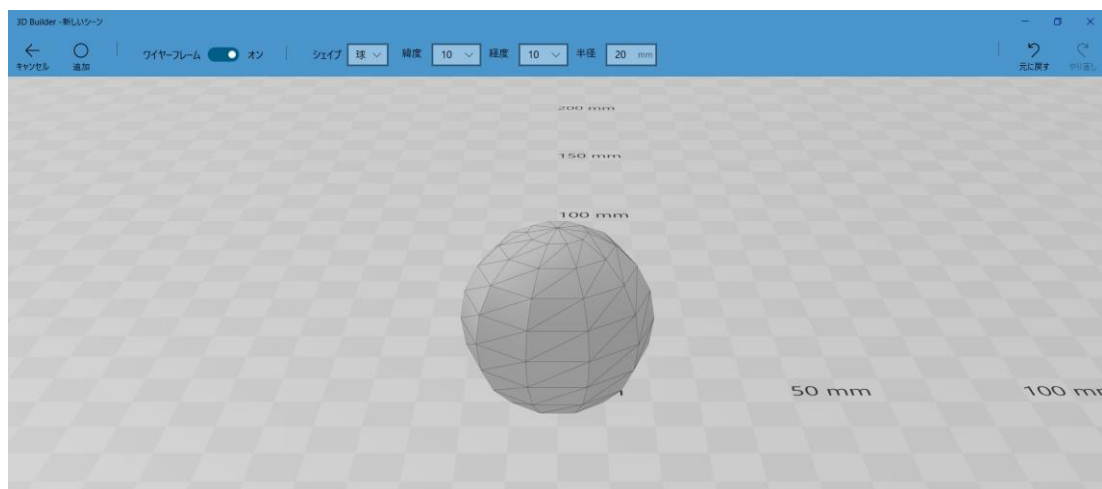


図5 「緯度」と「経度」の設定画面

「丸み」は、数値を大きくすることで図6のように立体図形の角に丸みをもたせることができます。

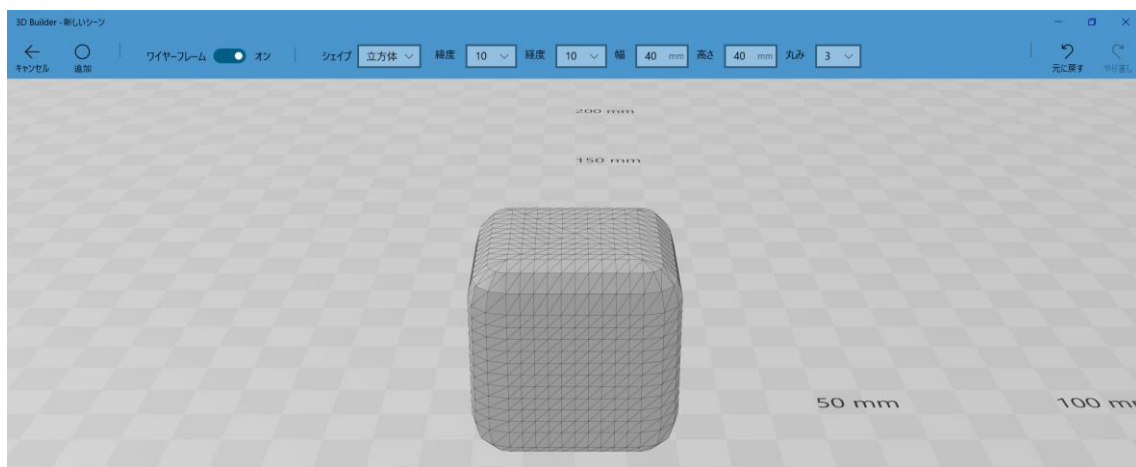


図5 「丸み」の設定画面

立体図形の「立方体」、「円柱」、「角錐形」、「円錐」、「球」、「六角形」、「くさび形」、「トラス」、「4面体」をクリックすると、図6のようにそれぞれ立方体、円柱、正四角錐、円錐、球、正六角柱、三角柱、トラス、正四面体が置かれます。今回は立方体を用いて説明を続けます。

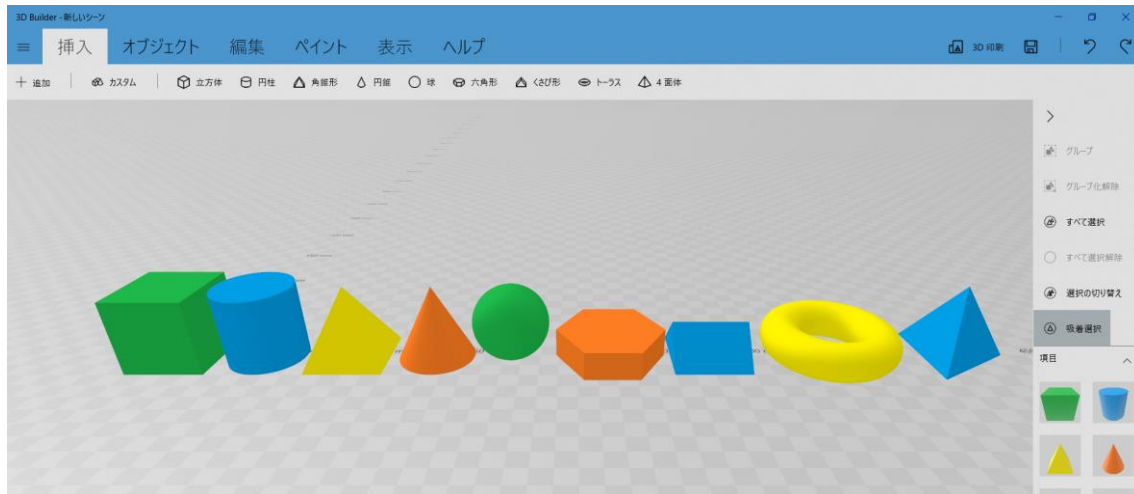


図6 挿入による立体図形の一覧

立体図形をクリックすると、下部に図7のような「ツールバー」が表示されます。下部のツールバーには、左から順に、「移動(平行移動)」・「回転(回転移動)」・「スケール(拡大・縮小)」というボタンが設置されています。



「移動」をクリックすると、x軸、y軸、z軸方向に矢印が表示されます。平行移動させたい方向の矢印をドラッグすることで、選択した方向に立方体を平行移動することができます。ツールバー右部に数値を直接入力することで初期位置(x=0, y=0, z=20)から正確な平行移動も可能です。

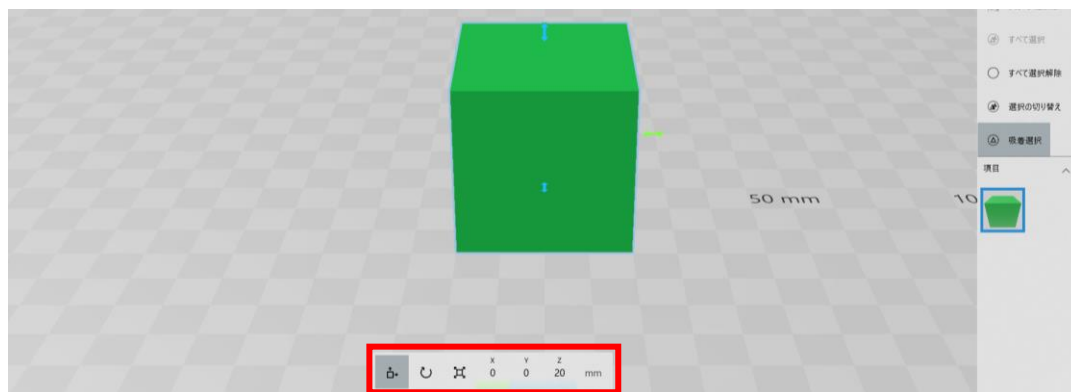


図7 オブジェクトの平行移動



「回転」をクリックすると、図8のような画面になります。「移動」と同様に、矢印を1つドラッグすることで、オブジェクトの質量の中心を原点とする3軸の1つを中心としてオブジェクトが回転します。また、ツールバー右部に数値を入力することで初期位

置($x=0, y=0, z=0$)から正確な回転移動も可能です。



図8 オブジェクトの回転移動

「スケール」をクリックすると、図9のような画面になります。矢印を1つドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持せずに、選択した矢印の方向にオブジェクトを拡大・縮小します。四角形のウィジェット(図5の白線)をドラッグすることで、オブジェクトの縦横比を維持したまま拡大・縮小します。また、ツールバー右部に数値を入力することで初期設定($x=40, y=40, z=40$)からの正確な拡大・縮小も可能です。ツールバー右端の鍵マークをクリックしてから数値を入力することで、縦横比を維持したまま正確な拡大・縮小ができます。

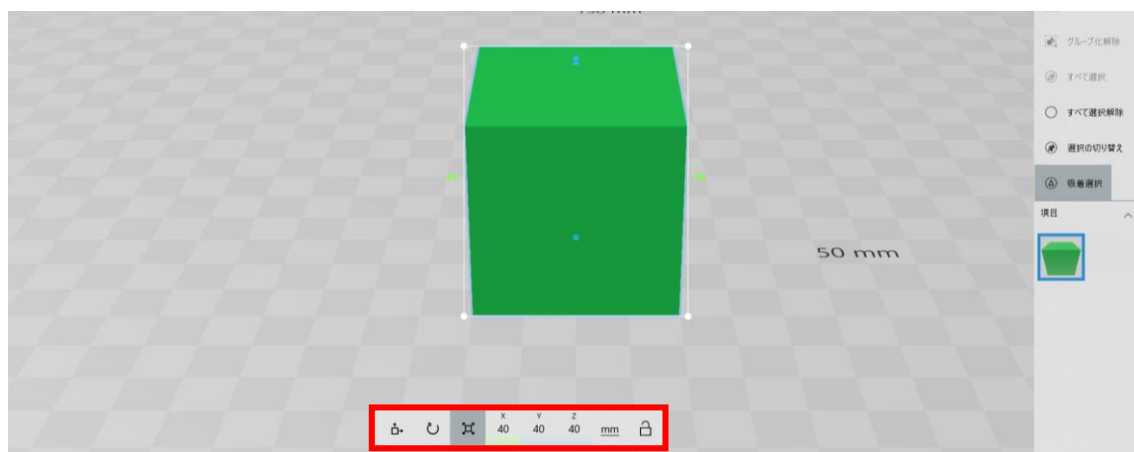


図9 オブジェクトの拡大・縮小

1.2.2 「オブジェクト」

「オブジェクト」をクリックすると、図10のような画面になります。「オブジェクトタブ」は、「複製」、「コピー」、「切り取り」、「貼り付け」、「削除」、「配置」、「ミラー」、「測定」から構成されます。

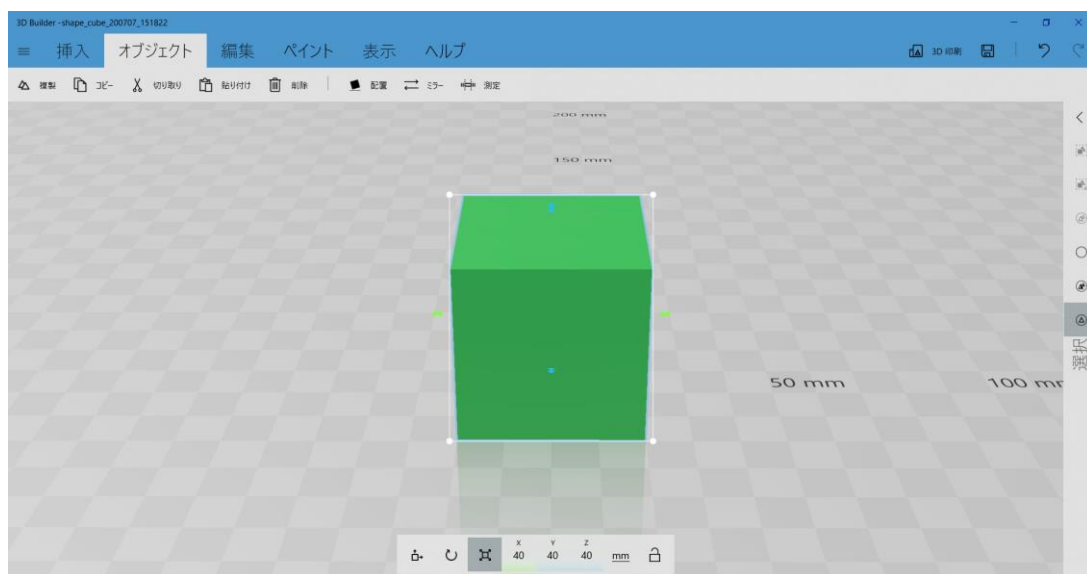


図 10 「オブジェクトタブ」の画面

「複製」をクリックすると、選択したオブジェクトと同じオブジェクトを複製します。

「コピー」をクリックすると、選択したオブジェクトをクリップボードにコピーします。

「切り取り」をクリックすると、選択したオブジェクトをシーンから切り取り、クリップボードに保存します。

「貼り付け」をクリックすると、以前に「コピー」または「切り取り」をしたオブジェクトを貼り付けます。

「削除」をクリックすると、選択したオブジェクトを削除します。

「配置」をクリックすると、図 11 のように、選択したオブジェクトの位置を調整し、フロアプレートに水平になるよう再配置することができます。3D プリンターで出力する際に、自立が不安定なオブジェクトはうまく出力することができないため、この機能を利用しましょう。

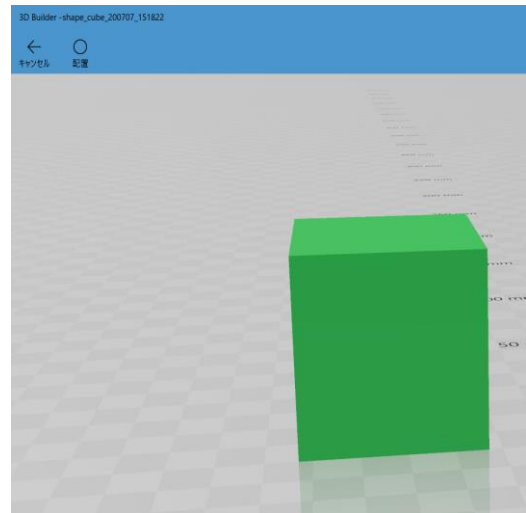
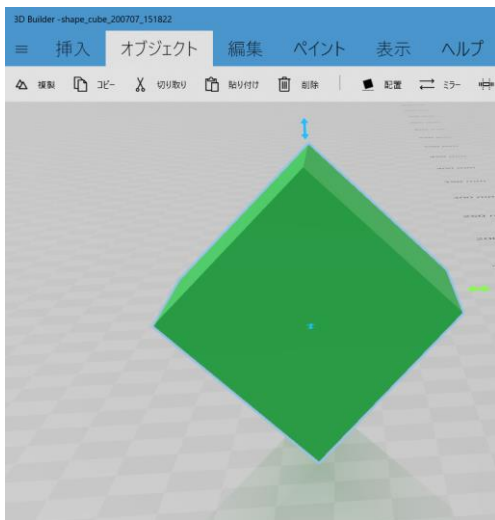


図 11 配置前オブジェクト(左)と配置後オブジェクト(右)

「ミラー」をクリックすると、X 軸を基準にして、選択したオブジェクトが左右反転します。

「測定」をクリックすると、図 12(左)のようにマウскарソルがポインターに変化します。任意の点をクリックするとその位置が固定されます。再びマウскарソルがポインターに変化するので、移動させると図 12(右)のように固定された点からの直線距離が表示されます。オブジェクトの辺の長さや高さなどを測定することができます。

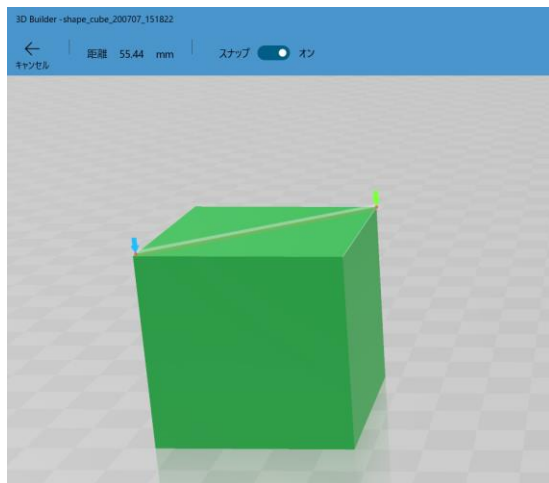
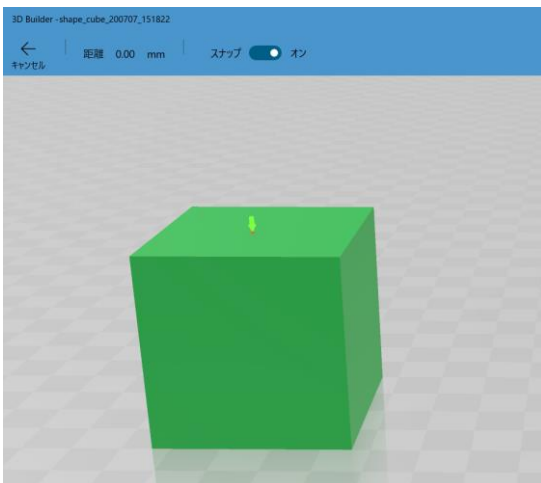


図 12 「測定」によるオブジェクト面の対角線の長さの表示

1.2.3 「編集」

「編集」をクリックすると、図 13 のような画面になります。「編集タブ」は、「単純化」、「分割」、「スムーズ」、「エンボス」、「下への浮き出し」、「結合」、「重なり」、「型抜き」、「くぼませる」から構成されます。

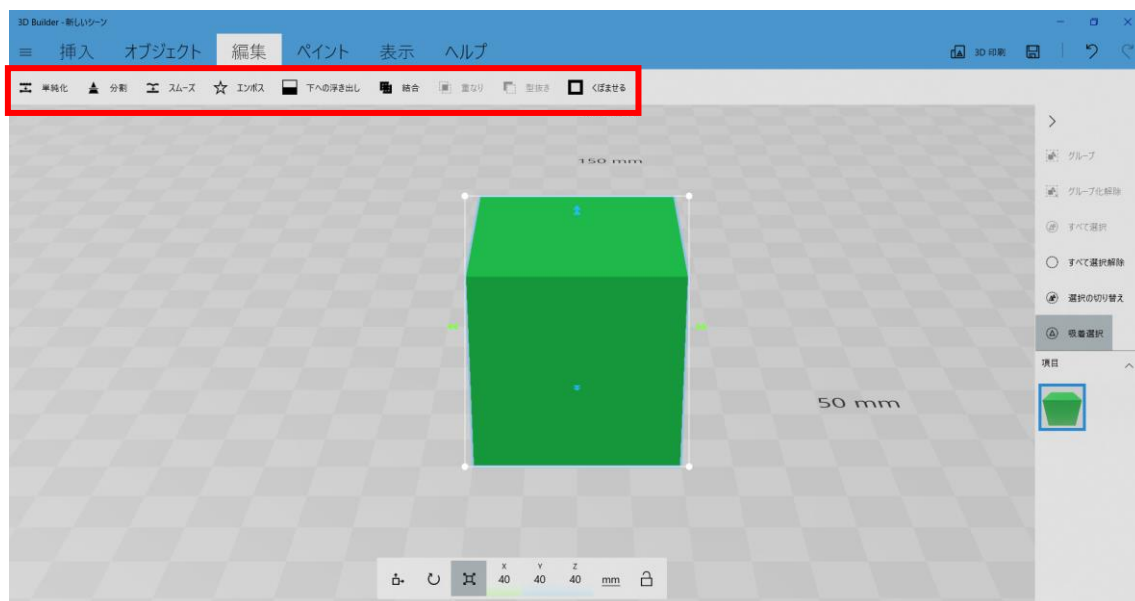


図 13 「編集タブ」画面

「単純化」をクリックすると、三角形で構成した面が表示されます。この三角形の数を減らすことにより面を減らし、オブジェクトを簡易的に表示することができます。球などの曲面に使用すると効果がよくわかります。

「分割」をクリックすると、選択したオブジェクトを平面で切断することができます。切断面をドラッグすると、切断面を平行移動・回転移動することができ、任意の位置で切断することができます。また、下部ツールバーに数値を入力することでも切断面を決定できます。切断後のオブジェクトは、「上部を保持」または「下部を保持」でどちらか片方を残すことも、「両方を保持」で両方を残すことも可能です。

「スムーズ」をクリックすると、選択したオブジェクトの表面を均一にスムーズにします。

「エンボス」をクリックすると、選択したオブジェクトにテキストや輪郭をエンボス加工することができます。平面だけでなく、円柱の側面や球面にも使用できます。

「下への浮き出し」をクリックすると、モデルでの高さのしきい値を選択できます。また、フロアプレートに到達するまで、この値よりも低い高さで素材を押し出すことができます。

「結合」をクリックすると、選択した複数のオブジェクトを結合して1つのオブジェクトを作成します。

「重なり」をクリックすると、選択した複数のオブジェクトの共通部分のみを新たなオブジェクトとして作成します。

「型抜き」をクリックすると、選択したオブジェクトに重なっているすべてのオブジェクトが、共通部分を除去されます。

「くぼませる」をクリックすると、選択したオブジェクトの内部をくりぬきます。その際の壁の厚みを調節することが可能です。オブジェクトを軽量化したいときに行うことができます。くぼませた後「分割」することで内部の様子を確認することもできます。

1.2.4 「ペイント」

「ペイント」をクリックすると、図 11 のような画面になります。「ペイントタブ」は、「素材」、「色」、「テクスチャ」から構成されます。

「素材」をクリックすると、選択したオブジェクトの素材を変更することができます。「リアル」を選択すると、金属のようなメタリックな質感を画面上で表現することができます。色やオブジェクトの反射率を変更することも可能です。「半透明」を選択すると、ガラスのような質感を画面上で表現することができます。色やオブジェクトの反射率、半透明度を変更することも可能です。

「色」をクリックすると、オブジェクトに単色で描画します。色を選択し、オブジェクト内の描画したい箇所をクリックすることで全体に描画することも、特定の部分を描画することも可能です。

「テクスチャ」をクリックすると、オブジェクトにテクスチャが適用されます。「色」と同様に、描画範囲を設定することもできます。既存のテクスチャに加え、画像から取り込むことも可能です。

1.2.5 「表示」

「表示」をクリックすると、図 12 のような画面になります。「表示タブ」は、「中央に表示」、「網かけ」、「影」、「色」、「反射」、「スムージング」、「ワイヤーフレーム」、「グリッド」、「X 線」から構成されます。

「中央に表示」をクリックすると、選択したオブジェクトが画面の中央にくるように視点を移動します。

「網かけ」をクリックすると、オブジェクトに影をつけて自然な色で表示します。デフォルトは選択された状態です。

「影」をクリックすると、オブジェクトによってできる影のレンダリングの状態をオンまたはオフにします。

「色」をクリックすると、素材(色・テクスチャ・印刷素材)のレンダリングの状態をオンまたはオフにします。

「反射」をクリックすると、オブジェクトの反射表示をオンまたはオフにします。

「スムージング」をクリックすると、表面が滑らかか多面的かを切り替えます。

「ワイヤーフレーム」をクリックすると、ワイヤーフレームレンダリングの状態をオンまたはオフにします。

「グリッド」をクリックすると、フロアや印刷台にあたる面のグリッド表示をオンまた

はオフにします。

「X線」をクリックすると、選択されていないすべてのオブジェクトを透明にします。

1.2.6 「ヘルプ」

「ヘルプ」をクリックすると、図 13 のような画面になります。「ヘルプタブ」は、「開始」、「互換性のあるプリンター」、「ユーザーガイド」から構成されます。

「開始」をクリックすると、チュートリアルを再度見ることができます。

「互換性のあるプリンター」をクリックすると、互換性のある 3D プリンターの web ページが開きます。

「ユーザーガイド」をクリックすると、ユーザーガイドの web ページが開きます。

2. 立方体の切断(対象：中学校第 1 学年以上)

2.1 立方体の作成方法

「3D Builder」を起動させます。すると、図 1 のようなホーム画面になります。この画面から、中央赤枠の「新しいシーン」を選択します。

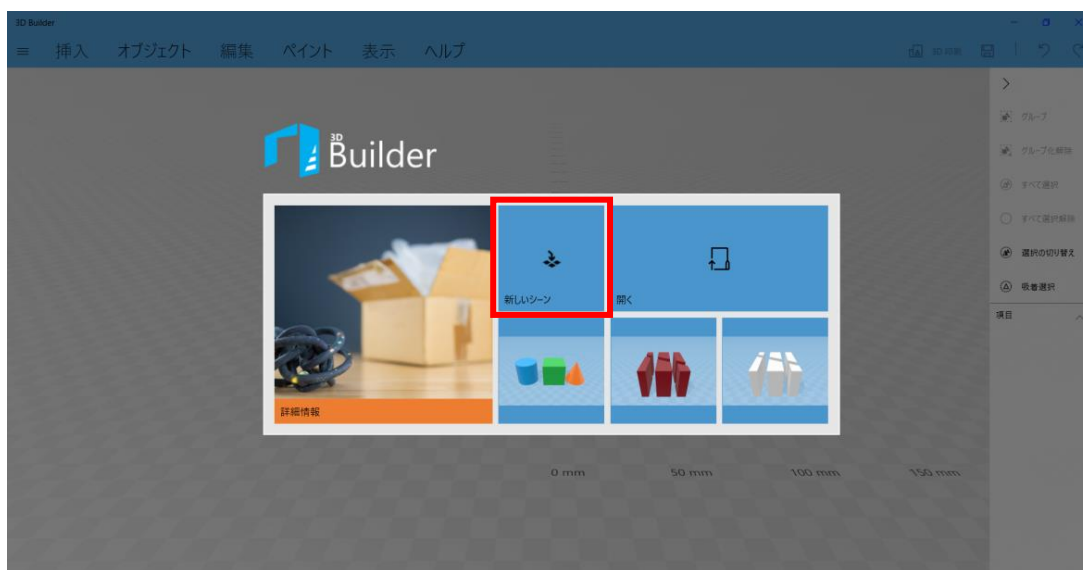


図 1 3D Builder ホーム画面

「新しいシーン」を選択すると、図 2 のような画面に切り替わります。上部の「挿入」タブをクリックし、立方体をクリックします。



図2 3D Builder 製作画面

立方体をクリックすると図3のような画面になります。ここで操作方法を説明します。画面をドラッグすると、視点を回転させることができます。また、ダブルクリックすると、その方向に視点を移動することができます。下部のツールバーには、左から順に、移動(平行移動)・回転(回転移動)・スケール(拡大縮小)というボタンが設置されています。



「移動」

対象となる立方体を選択し、「移動」ボタンをクリックすると、x 軸、y 軸、z 軸方向に矢印が表示されます。平行移動させたい方向の矢印をドラッグすることで選択した方向に立方体を平行移動することができます。ツールバー右部に数値(単位：mm)を入力することで初期位置(x=0, y=0, z=20)から正確な平行移動も可能です。

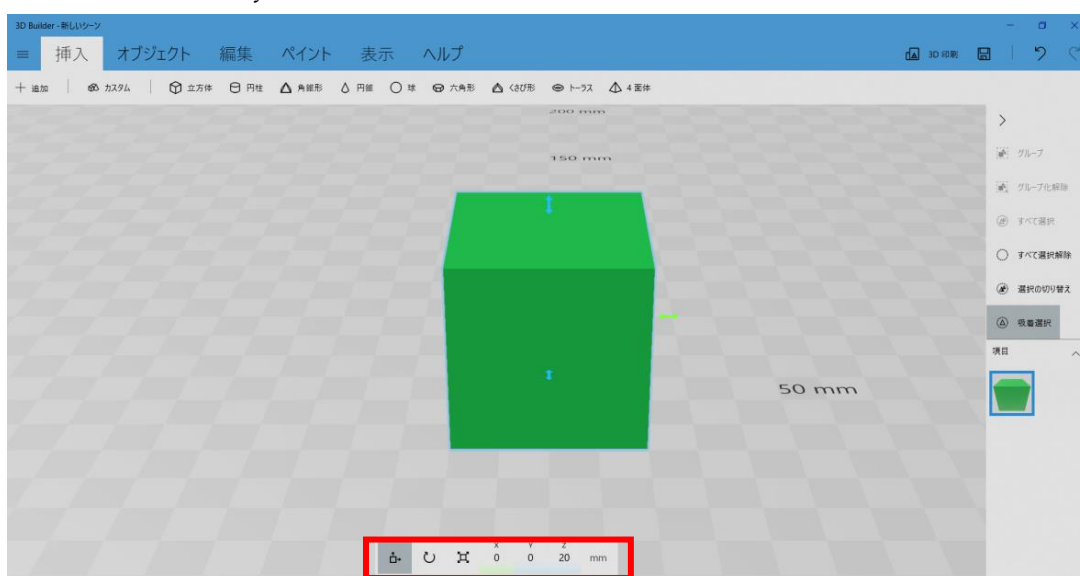


図3 立方体の平行移動



「回転」

対象となる立方体を選択し、ツールバーの回転をクリックすると、図4のような画面になります。「移動」と同様に、矢印を1つドラッグすることでオブジェクト(選択した立体図形)の質量の中心を原点とする3軸の1つを中心としてオブジェクトが回転します。また、ツールバー右部に数値(単位:度)を入力することで初期位置($x=0, y=0, z=0$)から正確な回転移動も可能です。

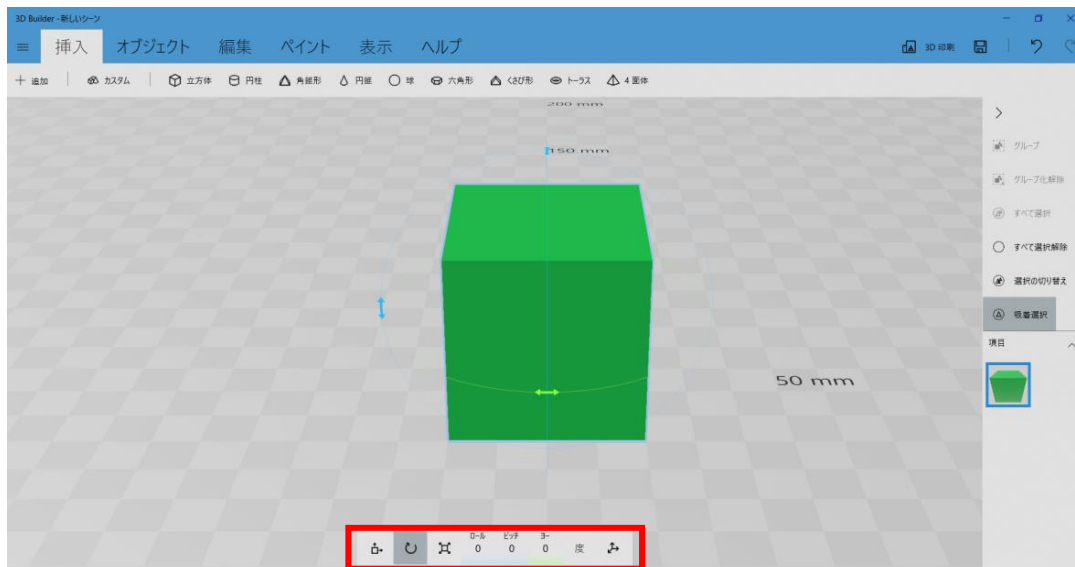


図4 立方体の回転移動



「スケール」

対象となる立方体を選択し、ツールバーのスケールをクリックすると、図5のような画面になります。矢印を1つドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持せずに選択した矢印の方向にオブジェクトを拡大・縮小します。四角形のウィジェット(図5の白線)をドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持したまま拡大・縮小します。また、ツールバー右部に数値(単位:mm)を入力することで初期サイズ($x=40, y=40, z=40$)から正確な拡大・縮小も可能です。ツールバー右端の鍵マークをクリックしてから数値を入力することで、縦横比を維持したまま正確な拡大・縮小ができます。

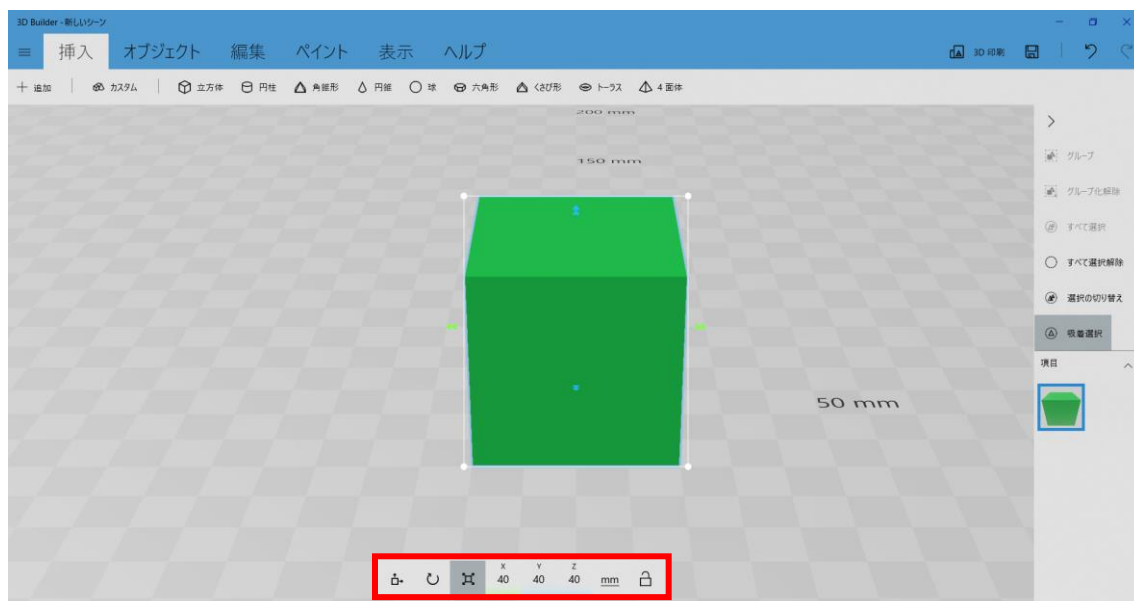


図5 立方体の拡大・縮小

2.2 立方体の切断方法

次に、立方体の切断方法について説明します。上部青色タブの「編集」をクリックすると、図6のように「分割」が表示されます。対象となる立方体を選択し、「分割」をクリックすると、図7のように切断面とツールバーが表示されます。

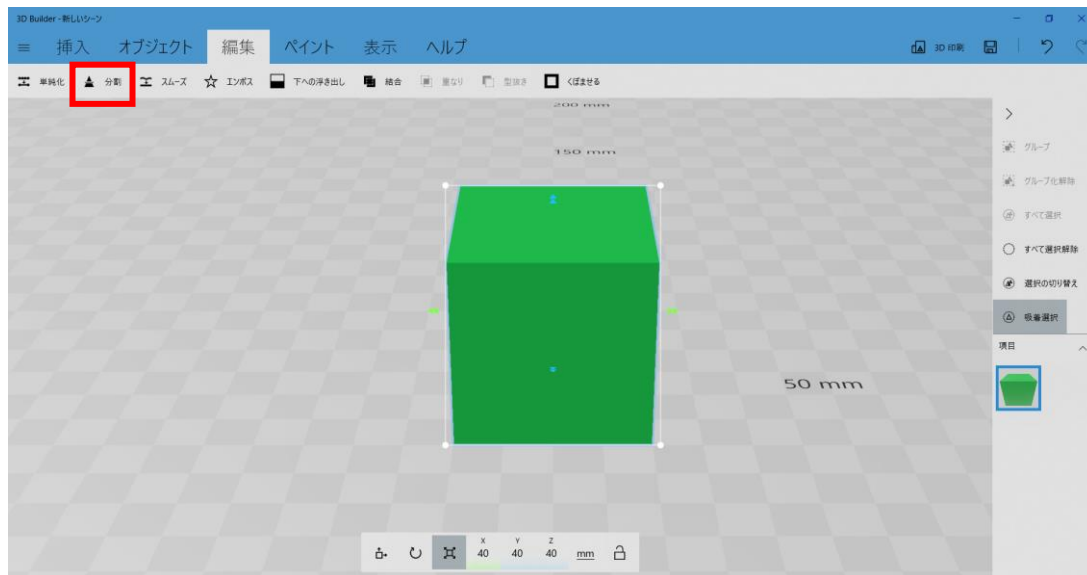


図6 立方体の分割

矢印の1つをドラッグすることで切断面を回転移動することができます。また切断面をドラッグすることで、現在の切断面に対して鉛直方向に平行移動することができます。下部のツールバーに数値を入力することで「移動」や「回転」同様に正確な平行移動や回転移動も可能です。切断面を定めることができたなら、上部のタブから両方を保持を選択し

ます。その後「分割」をクリックすることで、切断を行います。切断面が見にくい場合は、切断したどちらかの立体図形を移動させます。



図7 立方体の切断画面

切断したオブジェクトを配置することで、図8のような立方体の切断の立体モデルを製作できます。製作した3Dデータは保存することができ、そのファイルを3Dプリンターで読み込むことで出力することもできます。

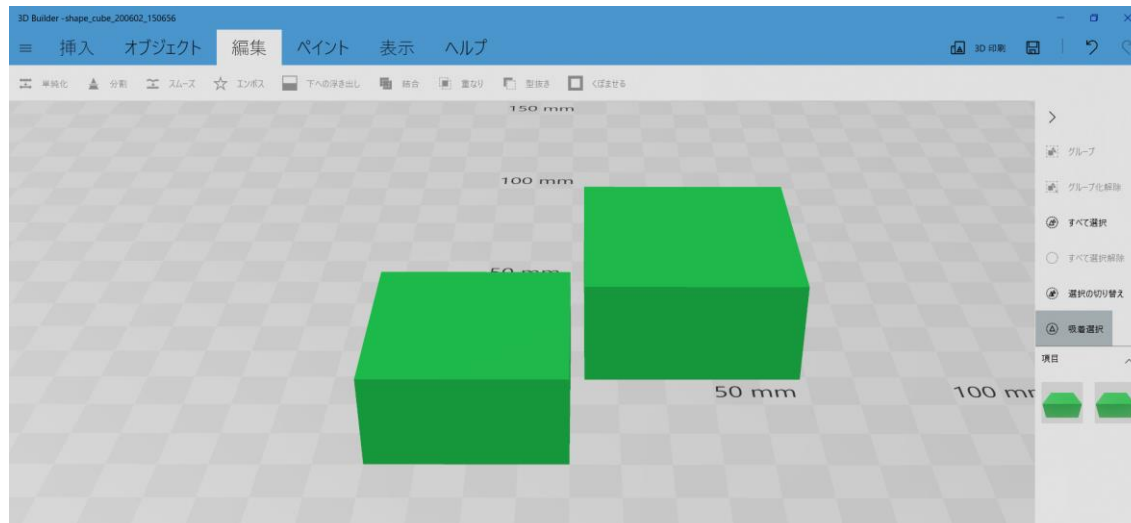


図8 立方体の切断モデル例

※出力時の注意

図9のようにオブジェクトが宙に浮いていたり、不安定な形の場合、うまく出力することができません。このような場合には、「オブジェクト」をクリックし、対象のオブジェクトを選択した状態で「配置」をクリックします。するとオブジェクトが接地されます。

2.3 練習問題

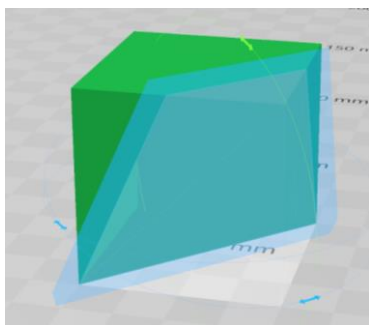
○「3D Builder」を用いて、立方体の切断面にはどのような図形があらわれるかを調べてみましょう。

・ヒント

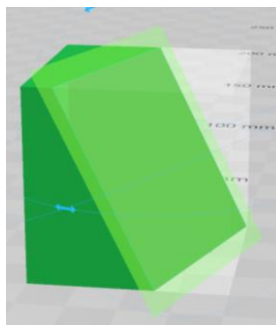
図8の切断面の形は正方形です。他の断面図の形がないか調べてみよう。

2.4 解答例

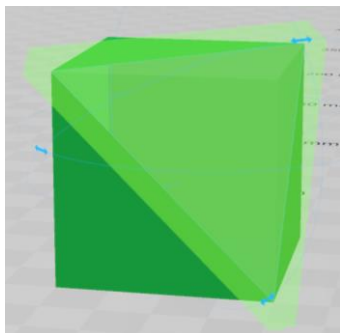
①等脚台形



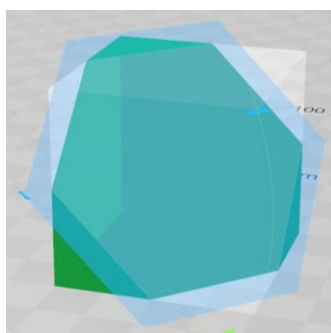
②平行四辺形



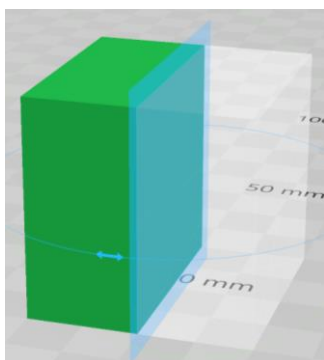
③正三角形



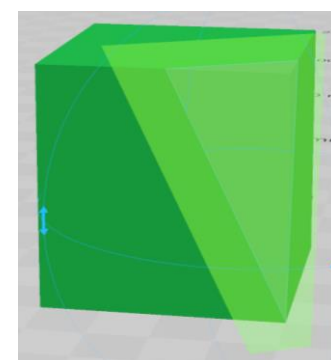
④正六角形



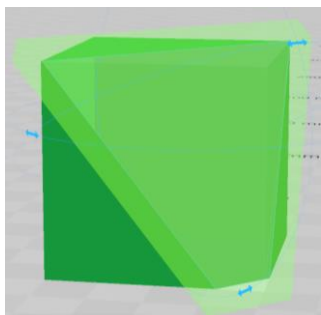
⑤正方形



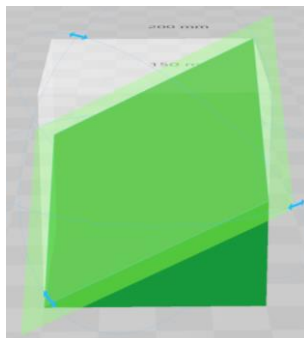
⑥三角形



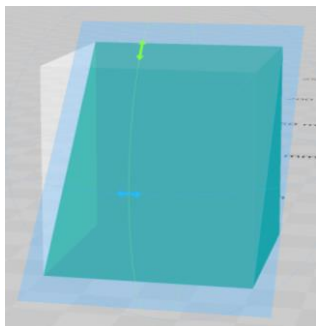
⑦等脚台形



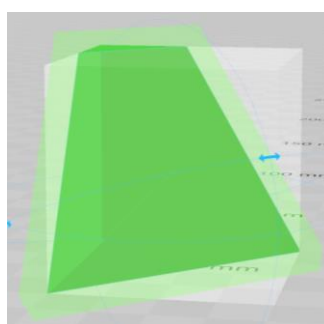
⑧ひし形



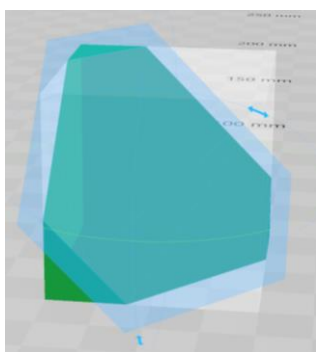
⑨長方形



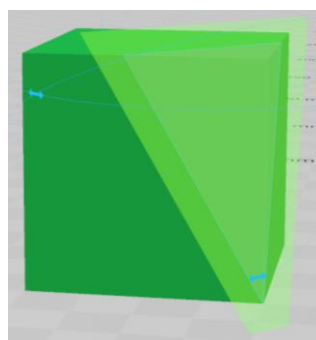
⑩等脚台形



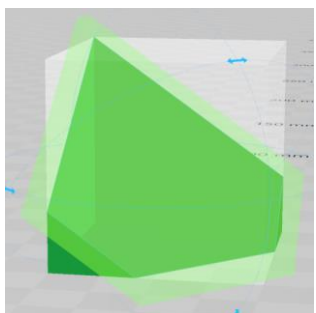
⑪六角形



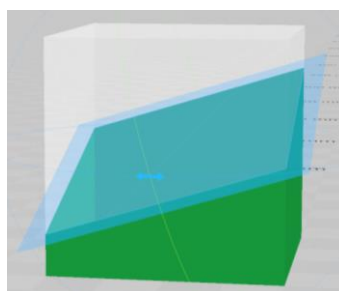
⑫二等辺三角形



⑬五角形



⑭ひし形



3. 金属結晶の構造(対象：高等学校第1学年以上)

3.1 球の作成方法

図1は「3D Builder」のホーム画面です。この画面から、中央赤枠の「新しいシーン」を選択します。

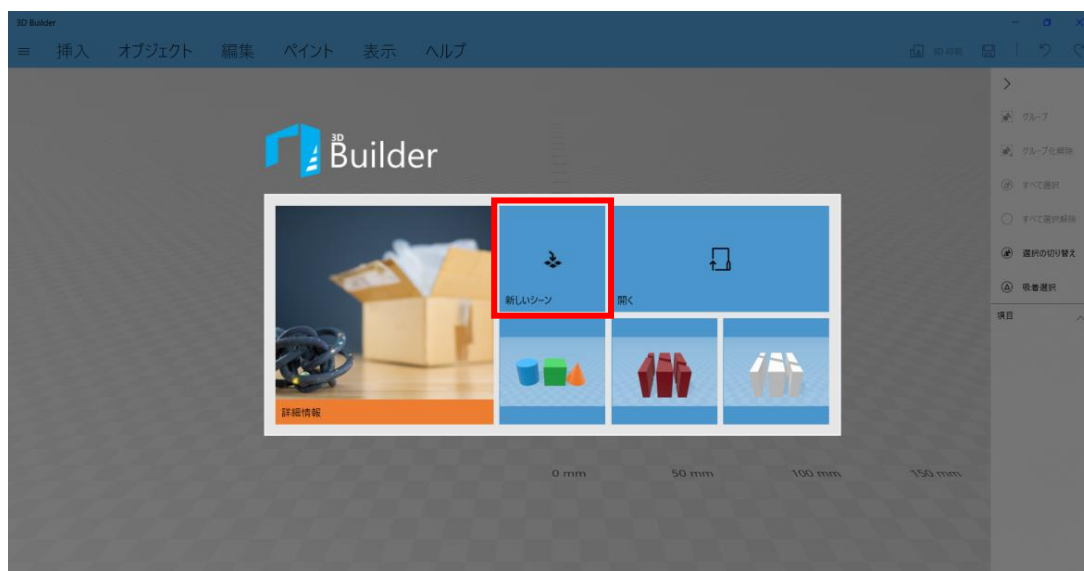


図1 3D Builder ホーム画面

「新しいシーン」を選択すると、図2のような画面に切り替わる。上部の「挿入」タブをクリックすると、カスタム・立方体・円柱・角錐形・円錐・球・六角形・くさび型・トーラス・四面体を選択することができる。今回の立体モデル教材で使用する球を用いて説明を進めていく。



図2 3D Builder 製作画面

球をクリックすると図3のような画面になる。下部のツールバーには、左から順に、移動(平行移動)・回転(回転移動)・スケール(拡大縮小)というボタンが設置されている。

はじめに「移動」について説明する。「移動」をクリックすると、x 軸、y 軸、z 軸方向に矢印が表示される。平行移動させたい方向の矢印をドラッグすることで選択した方向にオブジェクト(ソフト上で製作された立体図形)を平行移動することができる。ツールバー右部に数値(単位: mm)を入力することで初期位置($x=0, y=0, z=20$)から正確な平行移動も可能である。

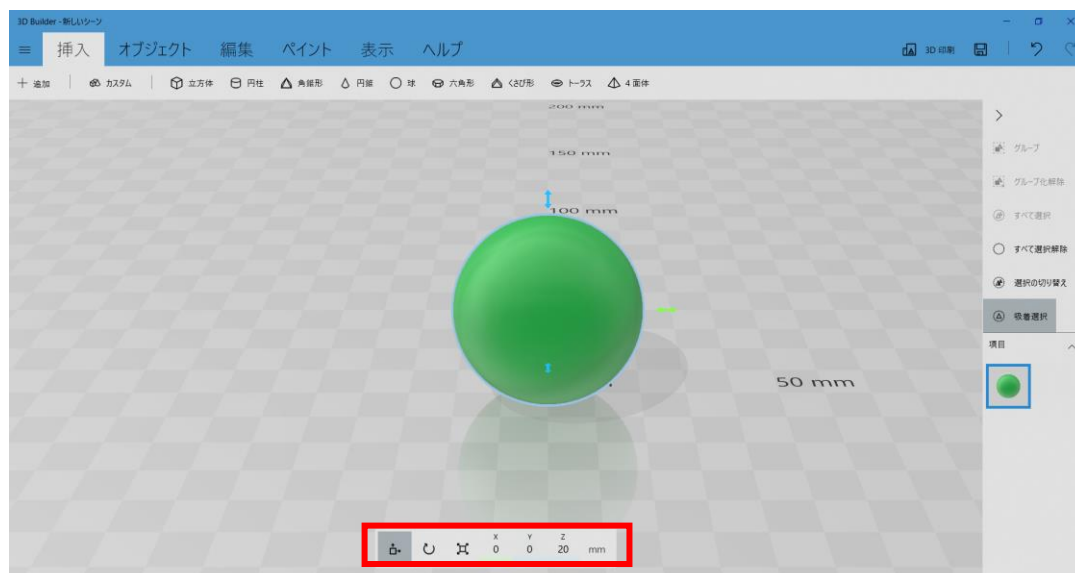


図3 球の平行移動

次に、「回転」について説明する。ツールバーの回転をクリックすると、図4のような画面になる。移動と同様矢印を1つドラッグすることでオブジェクトの質量の中心を原点とする3軸の1つを中心としてオブジェクトが回転する。また、ツールバー右部に数値(単位: 度)を入力することで初期位置($x=0, y=0, z=0$)から正確な回転移動も可能である。



図4 球の回転移動

最後に、「スケール」について説明する。ツールバーのスケールをクリックすると、図5のような画面になる。矢印を1つドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持せずに選択した矢印の方向にオブジェクトを拡大・縮小する。四角形のウィジェット(図5の白線)をドラッグすることでオブジェクトの縦横比を維持したまま拡大・縮小する。また、ツールバー右部に数値(単位: mm)を入力することで初期サイズ($x=40, y=40, z=40$)から正確な拡大・縮小も可能である。

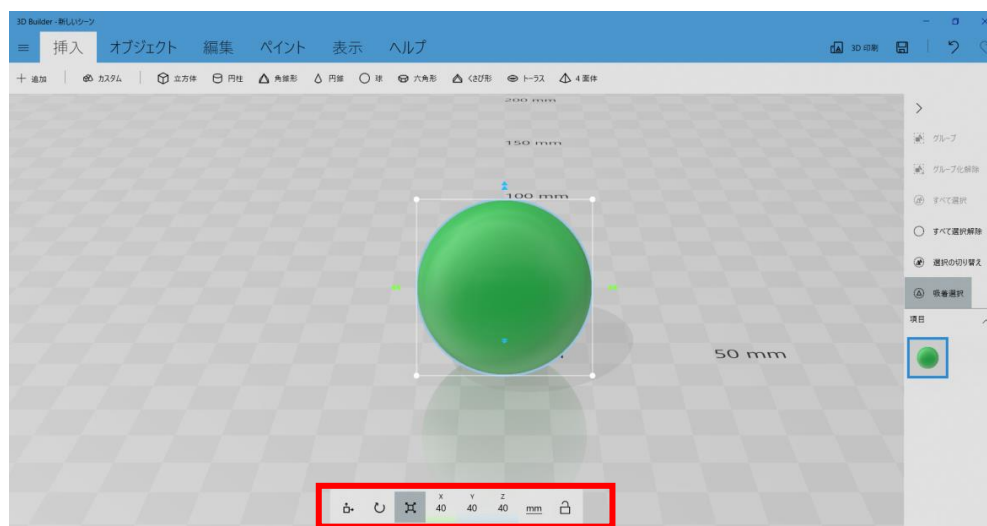


図5 球の拡大・縮小

3.2 球の切断方法

次に、オブジェクトの切断方法について説明する。上部の編集タブをクリックすると、図6のように「分割」が表示される。「分割」をクリックすると、図7のように切断面とツールバーが表示される。

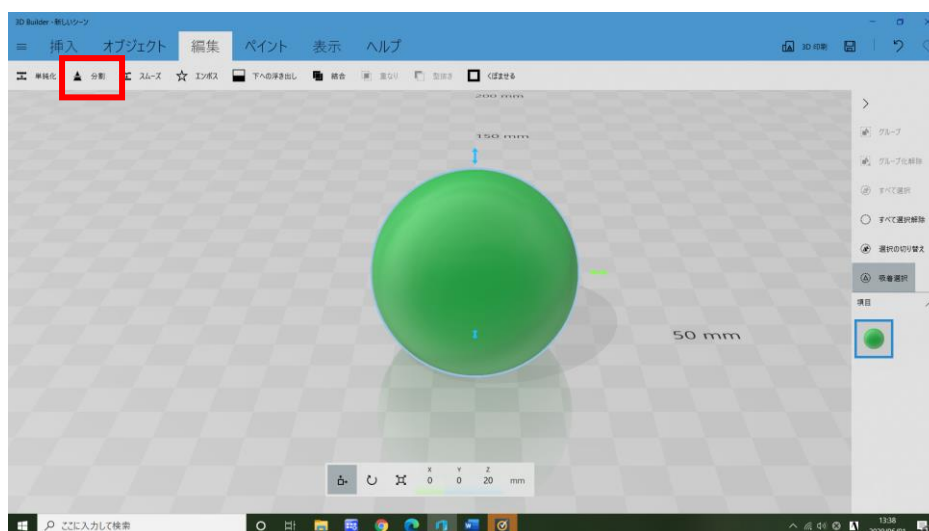


図6 球の分割

矢印の1つをドラッグすることで切断面を回転移動することができる。また切断面をドラッグすることで、切断面を平行移動することができる。下部のツールバーに数値を入力することで「移動」や「回転」同様に正確な平行移動や回転移動も可能である。切断面を定めることができたなら、上部のタブから上部を保持・下部を保持・両方を保持を選択する。その後分割をクリックすることで、切断した図形のどちらか、あるいは両方を残すかを選択してオブジェクトの切断を行う。

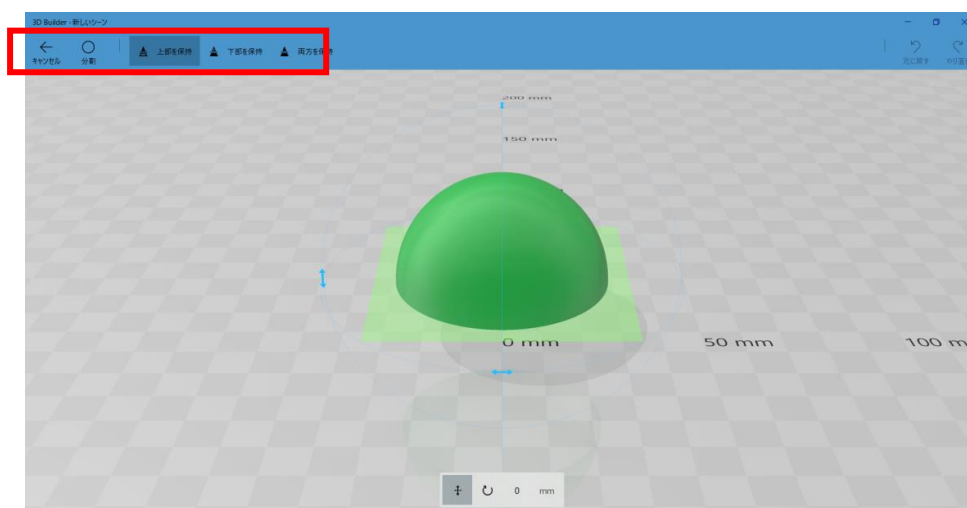


図7 球の切断画面

3.3 「体心立方格子」の立体モデル教材

切断したオブジェクトを配置することで、図8のような体心立方格子モデルを製作することができる。色分けをすることも可能であるが、3Dプリンターで出力するには機種によって複数色を同時出力することができないので、色ごとにデータを分ける必要がある。製作した3Dデータは保存することができ、そのファイルを3Dプリンターで読み込むことで出力することもできる。

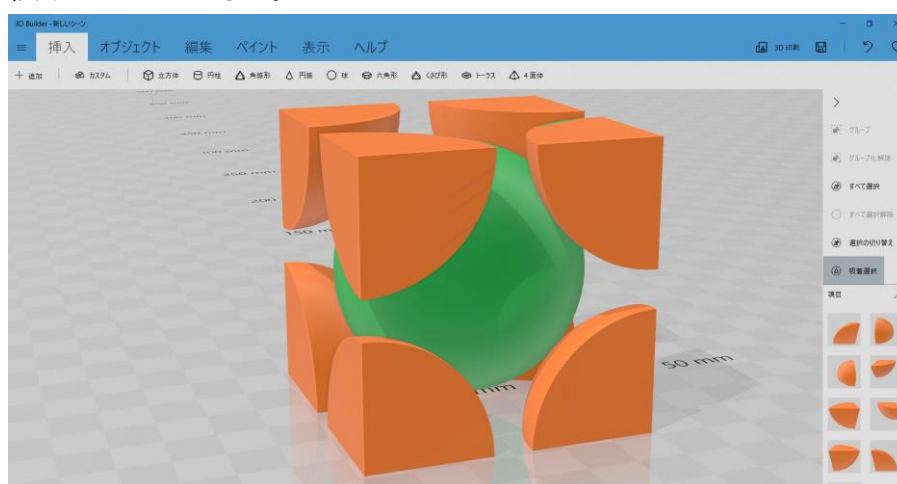


図8 体心立方格子モデル

3.4 「面心立方格子」の立体モデル教材

切断したオブジェクトを配置することで、図9のような面心立方格子モデルを製作することができる。

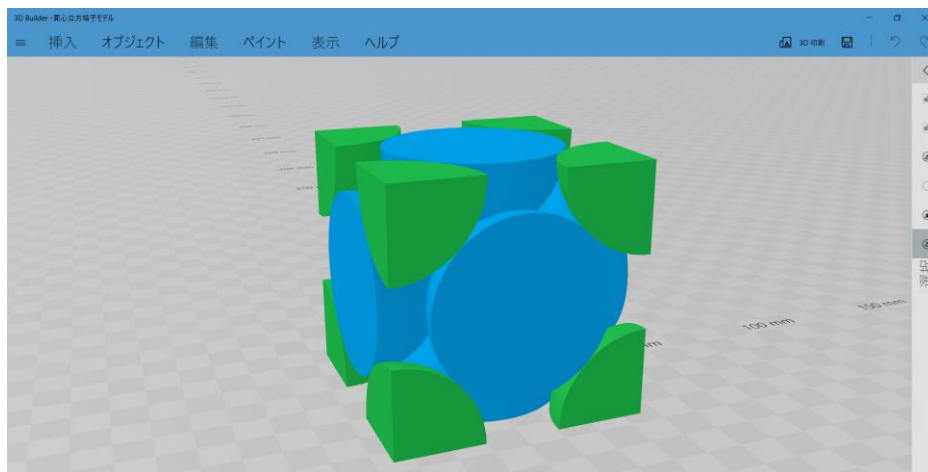


図9 面心立方格子モデル

3.5 練習問題

○「3D Builder」を用いて、図8、図9のような体心立方格子モデルや面心立方格子モデルを作成しましょう。