

# 探究学習を推進する観察と定量化の試み

—金星を教材として—

安部 賢一

## 1. はじめに

主体的・対話的で深い学びを実現するためには、教科の特性に応じた見方・考え方を働かせながら、知識を相互に関連付けてより深く理解する必要がある。理科の場合は、事物・現象を数理的に捉えたり、観察・実験を通して科学的に探究したりする場面を適切に設定することが肝要であり、学習場面の多くで数学との教科横断的な思考が不可避である。このことは、学習指導要領の改訂に伴い、高等学校の新科目として「理数探究」、「理数探究基礎」が新設されたことから明らかである。

一方で、領域や学ぶ内容によっては、観察・実験や数量化が難しい単元もある。中学校段階になると、物理的領域及び化学的領域を学ぶ第1分野と生物的領域及び地学的領域を学ぶ第2分野に分類されるが、自然の事物・現象を扱う第2分野の方が観察・実験や数量化が概して難しい。

中学校学習指導要領解説においても「生物体に見られる複雑な相互作用から生じる現象や長大な時間の経過に伴う生物の進化、及び日常の経験を超えた時間と空間の中で生じる地質や天体の現象は、授業の限られた条件の中で再現することは難しい。このような自然の事物・現象は、数量化が困難であったり、仮説の検証が十分に行えないものがあったりする。」<sup>1)</sup>とこれを認めている。そのため、映像やモデル、ICTを活用して直接経験に準ずる活動をしたり、既存のデータを利用して表やグラフを作成して規則性や関係性を見出したりして科学的に探究していくことになる。

しかし、映像やICTの利用は、あくまで生徒が日課時程内の限られた条件や環境下で学習するための次善の策である。時間的・空間的広がりを経験する機会があるなら生徒の学習意欲をより高めることができ、実際に観察したデータから数量化する学習過程があれば、科学的に探究するための幅をより広げることができることは論を俟たない。

## 2. 「地球と宇宙」単元の特徴

第2分野のうち、火山や地層を扱う「大地の成り立ちと変化」、生物の変遷や進化を扱う「動物の生活と生物の変遷」、遺伝子を扱う「生命の連続性」、天体を扱う「地球と宇宙」は時間的、空間的スケールが長大で観察・実験が難しい単元である。特に「地球と宇宙」は、時間的、空間的スケールが長大であり、観察・実験、および仮説の検証が難しい単元と言

えるだろう。そのため最近では優れたシミュレーションソフトによって、コンピュータ上でプラネタリウムのように時空を超えた再現ができ、授業に活用する教員も増えている。

しかし、星空は日食や月食のような稀な現象を除けば、どこからでも見ることができる。都市部では近隣の街明かり（光害）があつてよく見えない、観察好機が天候に左右される、太陽以外は日課時程内では観察できない等の課題はあるものの、太陽や月をはじめとする天体は、火山や地層、進化や遺伝子と比較しても生徒にとってずっと身近な存在である。

一方、理科教育振興法に基づく小・中学校への理科教材設置台数の基準数は、顕微鏡が小学校21台、中学校や41台なのに対し、天体望遠鏡は小・中学校ともに1台である。「天体」は事物・現象としては身近だが、それを観察・実験するための教材・教具は決して身近ではなく、教員にとってはやりづらさを感じる一因でもある。（図1）



図1 学習用天体望遠鏡

安藤<sup>2)</sup>は、中学校教科書に掲載されている観察・実験の実施状況について調査している。その結果、教員の性別・年代、大学での専攻の違いによる際立った特徴は見られず、生徒実験の実施状況は化学78%、物理62%、生物57%、地学32%だった。そのうち、教具が比較的整備されている「光」「音」「圧力」「電磁誘導」は「教員による演示」が多く、生物教材を用いる観察実験はどれも60%以上の割合で「説明のみ」、そして「太陽の黒点」「月面のようす」「金星の動き」「気象観測」「地層の観察」は、「説明のみ」と「ビデオ」が80%以上を占めたことを明らかにしている。

また、かねてより地学領域は、小学校においても指導に困難を感じる領域といわれている。奥村ら<sup>3)</sup>は、教員は地学教材の指導に困難さを感じている割合が最も高く、中でも特に困難と感じられているのは「星の明るさ・色・位置」であり、高学年の地学教材（「星の明るさ色・位置」，「太陽・月の形・位置」）では、教員としての経験年数が増えても指導上の困難があると答えた割合が減少しなかったと報告している。

そこで、本稿では、生徒にとって身近な存在であるはずだが指導の困難性が高い地学領域「地球と宇宙」の中で、最も観察・実験が困難で数量化が難しいと考えられる金星について、直接的な体験を重視した観察・実験、そして探究活動に導くための定量的な取扱（数量化）の具体的方策について検討した。

なお、学習指導要領解説編では、具体的な金星の取り上げ方として「金星の運動と見え方については、観測資料を基に金星の見かけの形と大きさが変化することを見いださせる。」とし、「地球から見える金星の形がどのように変化するかという課題を解決するため、太陽と金星の位置関係に着目してモデル実験の計画を立てて調べさせる。」<sup>4)</sup> ことを一例として提唱している。具体的な観察が困難な対象であることから、観測資料の提供はあくまで金星の見かけの形と大きさが変化することを知らせるだけの定性的なものであり、この単元において金星の具体的な観察や定量的な取扱を求めている。

### 3. 金星の実視体験

金星を実際に見た経験があるだけでも、学習の導入が円滑になる。明るく輝く金星を肉眼で見ることは容易だが、それを金星であると認識しているとは限らない。あらかじめ指導したうえで実際の空で金星を確認するための留意点を整理しておきたい。

#### (1) 金星を肉眼で目視する

金星は「宵の明星」、「明けの明星」として知られる。太陽、月に次いで明るい天体で光度は最大光輝時にマイナス4.6等級（1等星の170倍）にもなるため、夕方の西の空、あるいは明け方の東の空にひときわ明るく輝き、印象的である。そのため、ときとして飛行機などの人工物と混同されるときがある。

宵の明星として輝いているときであれば、部活動帰りの下校時等に西の空を注目するように知らせておくことで体験でき、明けの明星として輝いているときは早起きをさせて東の空に金星の輝く姿を実際に体験させることが可能である。非常に明るい天体のため闇夜である必要はなく、どちらも日の出直前、日の入り直後の薄明の空でも容易に確認することができる。

しかし、指導計画上は大きな課題がある。金星の会合周期（地球から見た太陽との相対位置が一巡する日数）が約584日（約1年7ヶ月）と長く、宵の明星が再び宵空に輝くのは約1年半後となるのである。年周運動が半周以上ずれるため、季節も背景の星座も、また見える方位も大きく変わる。さらに、太陽との離角が小さい期間は総じて見づらいため、宵空に1年中ほとんど現れない年もあるからある。

そのため、生徒に肉眼で確認する経験をさせるには、当該単元の授業に入る1年半前から観察好機を調べておき、タイミング良く生徒に指導しなくてはならない。

#### (2) 金星を天体望遠鏡で目視する

内惑星である金星は太陽から一定以上離れることがない。このことを逆手にとれば、太陽が南中する正午前後には金星は必ず天空のどこかに見えていることになる。天体望遠鏡を使用すれば、年間を通じて日中観察可能な教材として、太陽の次に適した天体である。（図2）

また、金星は白昼でも肉眼で見ることができる唯一の惑星である。しかし、白昼の青空に肉眼で金星を見つけるためには透明度が高く澄み渡った青空であること。そして太陽から十分離れて

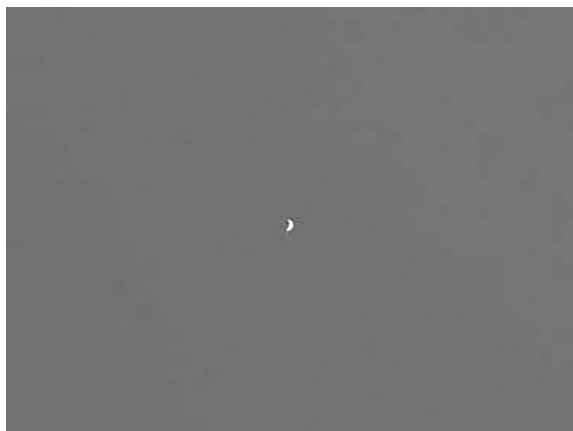


図2 白昼の金星

いる必要があり、実際にはかなり困難である。そのため、天候さえ良ければ確実に目視することができる天体望遠鏡が有効である。

天体望遠鏡が無ければ、双眼鏡を三脚に固定することでも代用できる。金星は地球に接近している時期は視直径（みかけの大きさ）が1分角（60秒角）近くまで大きくなるため、このころになると双眼鏡でも容易に三日月状の金星が分かり、満ち欠けの様子まで確認することができる。

#### 4. 金星の定量的な観測

金星を直接目視する体験から観測に昇華させることで、この単元を定量的な学習に発展させることができる。天体の運行は精密ギアのように正確である。それゆえ数学との親和性が高くなり高い領域である。

中学校理科では、内惑星の金星が満ち欠けするだけでなく、みかけの大きさも大きく変化し、満ち欠けと視直径が相関関係にあることに気づかせる。また、内惑星は天球上で太陽から一定距離以上離れることがなく、深夜には見えないことを学ぶ。

こうした現象は、太陽・地球・金星の3天体の位置関係を理解する必要があるが、数量的な内容に踏み込むことはない。しかし、金星の軌道半径が小さければ太陽から大きく離れることがなく、軌道半径が大きいくほど太陽から大きく離れるという定性的な理解から、太陽と金星の離角と公転軌道との定量的な関係に発展させることができれば、科学的思考を一層深めることができるだろう。さらに、公転軌道と太陽及び金星のみかけの大きさとの関係から、太陽と金星の大きさを検証することも可能である。

その物理量を測定する方法はいくつか考えられるが、ここでは内惑星としての金星がどれくらい太陽から離れるのか、その天球上の距離（離角）、金星の満ち欠けの度合い（輝面比）、そして金星のみかけの大きさ（視直径）を観測する方法を検討した。

##### (1) 金星の離角と軌道半径の関係

地球（E）からみた太陽（S）と金星（V）の視線方向のなす角を金星の離角（ $\theta$ ）といい、太陽と金星が最も離れて見えるときのことを最大離角という。最大離角は太陽の東西で起き、それぞれ東方最大離角（ $V_2$ ）、西方最大離角（ $V_4$ ）という。最大離角時は金星が太陽から十分離れているため観測好機である。（図3左）

地球と金星の軌道が太陽を中心とした円であり、同一平面上を公転していると仮定すると、最大離角時の金星の位置は、地球から見て金星の軌道に向かって引いた接線の接点に位置する。（図3右）

このとき、金星のからみた太陽と地球のなす角 $i$ が $90^\circ$ になることは、数学で学んだ「円の接線は、その接点を通る半径と垂直になる」という定理から生徒は気づくことができ、太陽（S）、地球（E）、金星（ $V_4$ ）の3天体の位置関係は直角三角形になる。これにより、最大離角時の太陽と金星の視線方向のなす角 $\theta$ を観測することで、三平方の定理を応用して太陽と金星の相対距離（軌道半径）、及び最大離角時の地球と金星の相対距離を求めることができる。

最大離角時の太陽と金星の離角 $\theta$ と金星の軌道半径 $R_v$ との関係は、地球の軌道半径 $R_E$ を1としたとき次の通りとなる。

$$R_v = \sin \theta$$

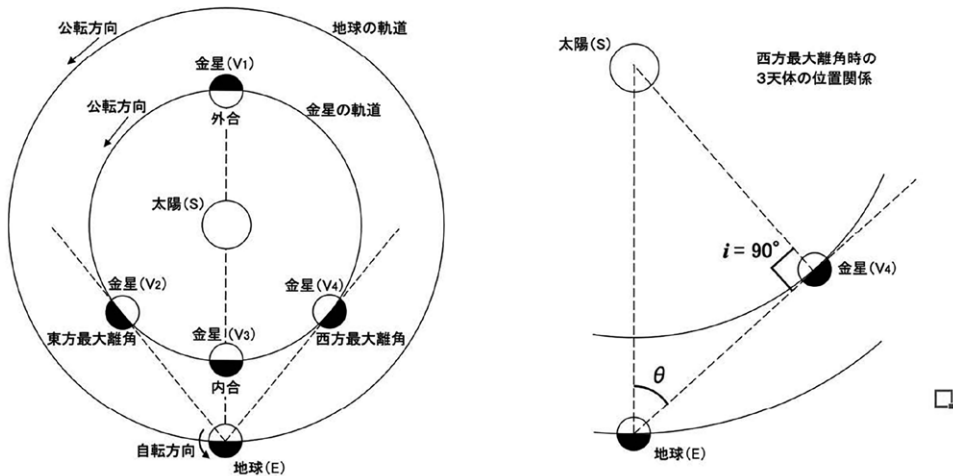


図3 地球と金星の軌道と位置関係

高等学校なら三角関数を用いて計算可能だが，中学校の場合は，分度器を用いて作図させてもよいし，三角関数表を与えてもよい。精度は $\pm 1^\circ$ で十分である。これにより，地球と太陽の距離を1としたときの金星と太陽の相対距離，そして地球と金星の相対距離を求めることができる。なお，その数値はそのまま天体単位（AU）という太陽系スケールに欠かせない数量となる。

こうしたことは金星や地球の軌道を円と仮定した場合に成り立つことであるが，幸い金星は太陽系の惑星の中で軌道離心率が0.0068と小さく最も真円に近い。また，地球の軌道離心率も0.0167と十分小さいため，実際の離角は $46^\circ \sim 48^\circ$ と安定している。

筆者はこの方法による授業実践で，多くの生徒が金星の軌道半径を0.70～0.75 AUと求めることができることを確認している<sup>5)</sup>。ちなみに金星の軌道半径（正確には軌道長半径）は0.723330AUである。

## (2) 金星の離角測定

金星の軌道半径を求める取組は，金星の最大離角値を生徒に与え，作図や計算から始めても良いが，太陽と金星の最大離角時に実際に測定させることで理解が深まる。さらに，断続的に観測が可能なら，最大離角時の前後1～2ヵ月間の離角の変化から最大離角の値を求めることができる。天体望遠鏡を設置したままにしておけるのなら，生徒を当番制にして週に一度の昼休みに行く程度でよい。

なお，最大離角となるタイミングは1会合周期に2度しかなく，東方最大離角から西方最大離角まで約5ヵ月，西方最大離角から次の東方最大離角まで約1年2ヵ月かかることから，この場合も単元に入る前年度から計画的に組む必要がある。

具体的に2天体の角距離を測定する方法はさまざま考えられ，また実践されている。六分儀に似た簡単な教具を分度器や角材を用いて自作しても十分である。（図4）ただし，2天体の一方が太陽のため直視しないよう相応の安全対策が必要である。



実際に天体望遠鏡で金星を観察させた機会に、天体望遠鏡に付属している目盛環を用いて計測する方法もある。目盛環とは天球上の赤道座標を表示するもので、地球の経度、緯度にあたる赤経、赤緯を読み取る装置である。(図5)

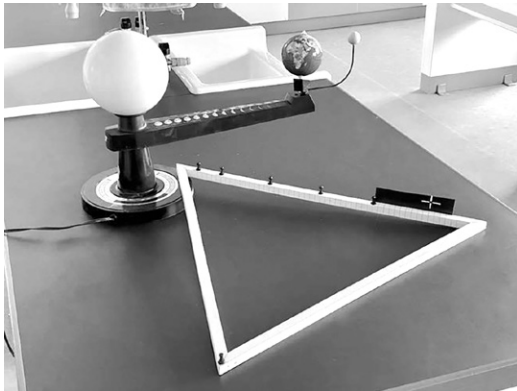


図4 手作り簡易六分儀(手前)と三球儀



図5 天体望遠鏡の経緯度目盛環(赤経・赤緯)

離角を求めるのに必要なデータは、太陽と金星それぞれの赤緯と赤経の経緯度差である。天体望遠鏡の場合、赤緯目盛環は角度表示だが、赤経目盛環はたいいてい時分で表示されている。したがってあとから1時間 = 15°,あるいは4分 = 1°で換算する必要がある。

2天体の離角 $\theta$ は、太陽の赤緯を $\delta s$ 、金星の赤緯を $\delta v$ 、太陽と金星の赤経差(°)を $A$ とすると、次の球面三角法の公式で求められる。ただし、赤緯値は赤道より北にある場合を(+),南にある場合を(-)とする。

$$\cos \theta = \cos (90 - \delta s) \cdot \cos (90 - \delta v) + \sin (90 - \delta s) \cdot \sin (90 - \delta v) \cdot \cos A$$

この場合も中学校では、グラフ用紙等を使用して平面上に作図して求める近似値で問題ない。黄道の傾きが約23.4°,金星の軌道傾斜角(公転面の傾き)が地球を基準として3.39°であるため計算値が大きく外れることはないからである。

#### (4) 金星の位相角と軌道半径の関係

金星からみた太陽と地球の離角を金星の「位相角」と呼び、金星の満ち欠けの度合い「輝面比」から求めることができる。(図6, 図7)

この位相角と、そのときの地球から見た太陽と金星の離角がわかれば3天体でつくる三角形の2角が明らかになるため、それぞれの相対距離を計算や作図で求めることができる。

先の最大離角時の太陽離角から求める相対距離に比べて精度は落ちるが、離角を継続観測できなかったり、最大離角時を逃してしまったりした場合など、離角を含めて1回の観測で済むことが最大の利点である。

輝面比は、視直径ACに対する光っている部分の最大の幅ABの比である。実際には欠けている部分が見えないため、視直径ACの代わりにその垂直方向(極方向寄り)を代用する。これは金星が球体であると仮定して成り立つことであるが、これも幸い金星のような地球型惑星は木星型惑星のように極端に偏平(回転楕円体)ではなく、実際に金星はほぼ球体である。

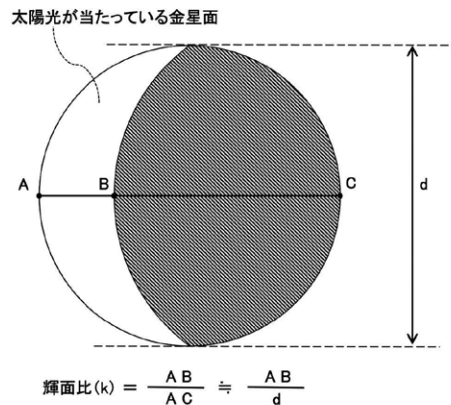
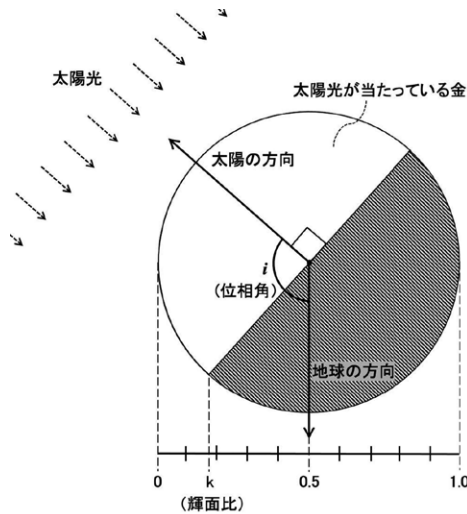


図6 金星の位相角(図3のV<sub>3</sub>とV<sub>4</sub>の間に位置) 図7 金星の輝面比(図6を地球から見たとき)

この観測を実視で行うためには天体望遠鏡とスケールの入った接眼レンズが必要だが、スマートフォン等で撮影してその画像(図2)から求めるのが簡便である。

位相角  $i$  は、輝度比  $k$  から次の式で計算できる。

$$\cos i = 2k - 1$$

この場合も式に三角関数が登場するので、中学校ではやはり作図や三角関数表から求める。実際には金星は厚い大気で覆われているため、位相角  $i = 90^\circ$  のときでも厳密には輝度比  $k = 0.5$ 、すなわち半月状にはならないことが知られている。しかしその量は無視してよい程度である。

これにより、地球の軌道半径を1としたときの金星の軌道半径  $R_v$  と位相角  $i$ 、当日の太陽と金星の離角  $\theta$  の関係は、正弦法則から次の通りとなる。(ただし  $i > 0$  とする)

$$R_v / \sin \theta = 1 / \sin i$$

中学校ではここでも  $\theta$  と  $i$  の2角から三角形を作図して三辺の比を求めることができる。筆者はこの方法による授業実践で、多くの生徒が0.60～0.80AUの範囲に収めることができ<sup>6)</sup>、金星の軌道半径についておおよその把握はできると考えている。

ただし、金星は満ち欠けに伴って視直径が大きく変化するため、輝面比  $k$  の値が大きい、すなわち東方最大離角の前や西方最大離角の後の輝面比0.5以上のときは、視直径もかなり小さくなるため、有意な観測は事実上無理である。

## (5) 金星の大きさ

前出の方法で地球と金星の軌道半径が分かれば、太陽と金星の視直径(見かけの大きさ)の比較から、金星の相対的な大きさを知ることができる。

金星の視直径は、最接近時(内合)に1分角以上にもなり、観察しやすい最大離角時で約0.5分角、一方、最遠時(外合)では0.1分角しかない。太陽の視直径が約30分角であ

るから、最大離角時（半月状）の金星の視直径は太陽の約60分の1である。

具体的な測定として最も簡便な方法は、太陽投影板の投影像と金星や太陽黒点を同一倍率で撮影することである。これにより金星と太陽のみかけの大きさの比を求めることができる。



図8 投影板に映った太陽



図9 スマートフォンによる撮影

太陽のみかけの大きさを1としたときの金星のみかけの大きさを $V_A$ とし、先に作図等で求めた太陽と地球の距離を1としたときの地球と金星の相対距離 $EV$ が分かれば、金星の相対的な大きさ $V_D$ は次のようにして求められる。

$$V_D = EV \cdot V_A$$

単純な比の問題のため、式を提示しなくても生徒は自ら解くことが可能である。これにより、おおよそ金星が太陽の100分の1の大きさという結果が得られる。中学校ではこの単元の前に「惑星と恒星」で、地球や太陽の大きさを学習しており、この結果から地球と金星の実際の大きさが、ほぼ同じ大きさであることを気付かせることができるだろう。

## 5. まとめとして

生徒に金星を肉眼で目視させるには、年度を超えた指導計画が必要である。また、観察好機の時期を逃さずに指導するためには、場合によっては中学1年生のときから2年後の学習内容を意識しておく必要があるだろう。

また、金星は時期をほとんど問わず、白昼に目視させることが可能であるが、そのためには天体望遠鏡が必要不可欠であり、教員はその操作を熟知しておかなければならない。肉眼でも天体望遠鏡を使用しても、生徒に金星の目視を体験させるには理科教員の日頃の教材研究と教師力が問われることになる。

金星の離角や輝面比、視直径を測定することで、金星の軌道半径や大きさまで検証することができることは、この単元の数量化が探究活動の深化に大きく寄与する可能性を意味する。実際に観測することのハードルが高ければ、目視の機会に離角やデジタルカメラ等で記録しておけば、その映像資料やデータを生徒に提供して定量的に探究させることが可能である。



稲田・関口<sup>7)</sup>によれば、アメリカの小学校の理科教科書には、"Math in Science" や "Math LINK" と示された「数学的な活動」が、観察・実験とは異なる場面に数多く載せられており、これらは学習内容の手順に沿って設定されているものの、その単元で学ぶ科学的な概念を習得していなくても児童が活動できるという特徴が見られたという。そのため、こうした手法は、理科の学習内容を完全には理解できていない児童であっても活動に取り組み易くなるのではないかと指摘している。

こうした観察・実験とは異なる場面での計算や数量化を行う課題を与えることは、日本の理科教育では、小学校に限らず中学校でもあまり見られない手法である。

「地球と宇宙」の単元における数量化は、中学生にとってさまざまな困難がある。三角関数を用いなければ作図が不可避で、しかも分度器が不可欠である。（数学で言う作図教具とはコンパスと定規である）それでも、数量化が最も難しい金星にも定量的なアプローチが不可能でないことが分かる。現在の教育課程では数学的アプローチがほとんどない「地球と宇宙」の単元における定量的な取組は、高校の理数探求や理数探究基礎に繋がる新しい視点を生み出すかも知れない。

## 6. おわりに

探究心を支えるのは生徒の興味・関心である。生徒らは天体観察を通して昼でも星が見えることに新鮮さを感じ、天体望遠鏡を通して金星や太陽が、日周運動によって刻一刻と望遠鏡の視野や投影板上を移動していく様子に地球の自転を体感する。こうした自然の事物・現象の直接的体験による感動は天体モデルやICTでは得られないものである。理科教師は体験と理論が探究活動の両輪であることを常に念頭に置く必要がある。

この論考を通じて最大の課題と感じたのは、天体望遠鏡が教育現場で十分に定着していないということである。教員の苦手意識は操作の難しさだけではないだろう。理振法による設置基準台数が1台のみで、理科準備室のスペースにも限りがある。また、近年は天体望遠鏡の高価格化も整備や更新が進まないことの一因として考えられる。教材として最適な学習用天体望遠鏡は既に市場から消え、近年の天体望遠鏡は天体の鑑賞用として電子化が進み自動導入機能を備えたものも少なくない。しかし、目盛環も無く計測器として機能しないものが大半である。小・中学校の学習用として基本的な機能を備えた小型天体望遠鏡の再販で新規開発が望まれる。

## 【引用文献】

- 1) 文部科学省 (2017) 「第2分野の目標」,『中学校学習指導要領 (平成29年度告示) 解説・理科編』 pp.71-72. (学校図書)
- 2) 安藤秀俊 (1991) 「中学校理科教科書に掲載されている観察・実験の実施状況」,『理科教育学研究』 Vol.44, No.3, pp.35-42.
- 3) 奥村清・重信陽二・片平克弘 (1991) 「小学校新学習指導要領 (理科) の指導上の問題点についてのアンケート調査」『日本理科教育学会研究紀要』 Vol.32, No.1, pp.13-20.
- 4) 前掲書1) p.108.
- 5) 安部賢一 (1993) 「金星の観測」,『理科の教育』 平成5年8月号, p.44. (東洋館出版)
- 6) 前掲書5) p.45.
- 7) 稲田結美・関口響祐 (2016) 「理科教育における計算および数量化に関する一考察—日米の小学校理科教科書の比較を通して—」,『上越教育大学研究紀要』 Vol.35, pp.220-226.