

物理教育 第61巻 第1号 抜刷

## ハイスピードカメラを用いた高校物理教材の在り方と開発

渡會 兼也

金沢大学附属高等学校

## ハイスピードカメラを用いた高校物理教材の在り方と開発

渡會 兼也 金沢大学附属高等学校 921-8105 石川県金沢市平和町 1-1-15

時間尺度の短い物理現象をハイスピードカメラ（以下、HSカメラと呼ぶ）で事前に撮影し、その映像を授業で示すような教育活動は多くの実践がある。では、授業中に教員（あるいは生徒）がHSカメラで現象を撮影し、その映像をその場で『観察』と同時に『測定・分析』を行うような使い方はできないものだろうか。筆者はフレームレートが120コマ/秒～1000コマ/秒程度のHSカメラを利用することでセンサーやデータロガーと同じ効果が期待でき、さらにICT機器の普及が促進されるのではないかと考えている。ここでは、HSカメラを高等学校の授業で活用する際の意義や、ターゲットの選定、教材利用の仕方について議論したい。

**キーワード** 物理教育, ハイスピードカメラ

### 1. はじめに

現状での高等学校での物理実験は多くの問題を抱えている。その原因としては①時間数の不足、②教員の多忙化、③予算と実験用具の不足、④大学入試との関連などが挙げられる<sup>1)~3)</sup>。これらの原因はどれも高校には不可避、且つ、解決困難で、多くの高等学校ではやろうと思いつながらできない、というジレンマを抱えている。

近年、ICT (Information, and Communication Technology) 機器が大学や高校の物理実験に利用されている。高等学校の学習指導要領第5節理科の第3款にも、「各科目の指導に当たっては、観察、実験の過程での情報の収集・検索、計測・制御、結果の集計・処理などにおいて、コンピュータや情報通信ネットワークなどを積極的に活用すること。」という文言があり、理科全体でICTの活用が推奨されている<sup>4)</sup>。例えば、センサーやデータロガーなどの機器を使った実験は従来の物理実験の精度を高めただけでなく、教育現場における問題の①実験時間の不足、を解消する1つの手段となっている。ここで筆者はICT利用のもう1つの方法としてHSカメラを利用することを提案したい。単に高速度で起こる現象をゆっくりと観察するという用途以外に、HSカメラを測定機器としての利用方法を考えている。

過去に物理教育におけるHSカメラの利用は多方面で報告されている<sup>5),6)</sup>。特に高橋らは、HS動画から得たデータはフォトゲートによる精密なデータとほぼ同じ結果を得ていることから、動画を利用した方法が教育的に有効であると結論づけている<sup>7),8)</sup>。また、真鍋らは、中学校理科において慣性の法則や弦の振動などを観察する手段としてHSカメラを利用している<sup>9)</sup>。その他にも、弦楽器

の振動の可視化なども応用例として挙げられる<sup>10)</sup>。高等学校においては観察だけでなく、測定によって現象を定量的に扱うという特徴がある。こういった特徴を活かすようなHSカメラの利用法について報告事例は少ない。

筆者は動画から直接測定を行ない、データを取得する方法を考えている。アイディアは極めて簡単で、動画の背景にメジャーやグラフ用紙を置き、HSカメラを用いて数値を読み取る。そのデータを元の実験結果を解析するのである。実際にHSカメラを利用して測定に使う専門分野は多く存在する。もし、こういった手法が確立すれば、先に挙げた高等学校の物理実験の問題点①や③を解決するのに役立つだろう。重要なのは『パソコンや専用の測定機器などを介さずデータを得ること』であり、これが普及につながると考えている。ここでは、HSカメラを利用した『映像実験』を通じ、視覚的な測定方法の探求を行いたい。

以下、第2章で使用したHSカメラの紹介を行い、第3章で撮像すべきターゲットについて考察する。第4章では、ハイスピードカメラを用いた実験方法の提案と、実践例を紹介する。第6章では議論を行い、終章では提案とまとめを行う。

### 2. カメラについて

今回用いたカメラはCASIOのHigh Speed EXILIM FH-FX100である（数年前にFX-1という型が発売されたが現在は生産完了となっている。今回のFX100も現在は生産完了であるが、後継機が出ている）。詳しい性能についてはCASIOのホームページをご覧ください<sup>11)</sup>。FX100では1秒あたりのフレーム数（＝フレームレート）が120fps (frame per second), 240fps,

420fps, 1000fps のハイスピード動画の撮影が可能である。通常のビデオカメラは 30fps<sup>1</sup> である (1 秒で約 30 コマの撮影)。ゆえに, 120fps で撮影した映像を普通に再生すると 1 秒の現象が 4 秒に引き伸ばされる (240fps なら 8 秒, 420fps ならば 14 秒, 1000fps ならば 33.3 秒に引き伸ばされる)。

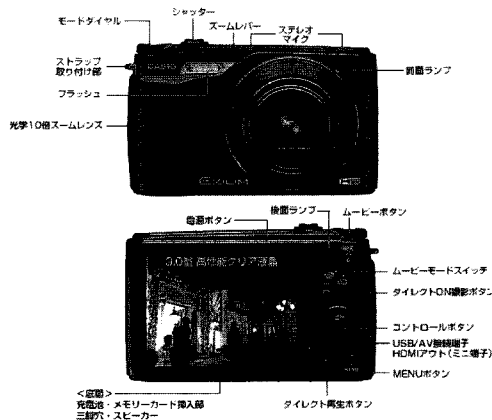


図 1 FH-FX100 の写真。カシオのホームページより。

High Speed EXILIM シリーズのカメラはフレームレートを高くすると解像度が下がる。例えば, 通常の HD 動画 (30fps) では  $1280 \times 720$  の画素数があるのに対し, 120fps だと  $640 \times 480$ , 1000fps だと  $224 \times 64$  になる。FX100 では, 性能上は 1000fps が可能であるが, 解像度とのバランスを考えて撮影をする必要がある。また, どのモードで撮影しても 10 秒程度の動画を撮るとデータサイズは 6-8Mb 程度になる。

また, 説明書にある 1000fps という値は, 実際は 0.1% 程度の誤差がある。そのため, 厳密には 1000fps で計算すると実時間との時間にずれが生じるが, ここで紹介するような実験ではそもそも数 fps の違いによる時間精度がない。よって, マニュアルに書かれているフレームレートを使って解析をしても問題ないと思われる。

一番大きなメリットは市場価格が 3 万円弱, と非常に手に入れやすい価格であることである。10 班分用意しても 30 万円弱で揃えることが可能である。1000fps 以上の機能を求めると専用の HS カメラが必要になり, そちらの価格は数十万から数百万円のオーダーである。

<sup>1</sup> National Television System Committee (NTSC) 方式では 29.97fps, Phase Alternating Line (PAL) 方式では 25fps となっている。

### 3. ターゲットの選定

教材にするターゲットはカメラのフレームレートと現象の典型的な時間尺度を考慮して選択する。フレームレートの逆数を取れば,  $1/1000 \text{ sec}/1 \text{ frame} = 1 \text{ フレーム}$  当たり  $10^{-3} \text{ sec}$  であるから, ミリ秒オーダーの現象が分解できる計算になる (実際に映像を分解するには, 現象の時間尺度には余裕を持たせる必要がある)。ただし, 物体の落下運動や水面波などの現象はビデオカメラでもコマ送りやスロー再生をすれば十分に解析ができる。

表 1 高等学校で扱う現象の中で今回の HS カメラが撮影可能な現象の一覧。括弧内は文献にあった実験。

現象名	物理現象・実験名	判定
力学・エネルギー	物体の運動 (自由落下)・力学的エネルギー保存・慣性の法則 <sup>7)</sup> ・空気抵抗・重力加速度・物体の衝突・振り子の周期	◎
波動	水波: ウェーブマシンを使った波の重ね合わせ・反射・屈折・回折。定常波のでき方など。 音波: ゴムひもや弦楽器の振動 <sup>10)</sup> (低周波)。	◎ ○ △
熱力学	断熱膨張で雲を作る実験	△
電気と磁気	交流: 手回し発電機の作る交流の周期, 蛍光灯のちらつき <sup>10)</sup>	○
原子	霧箱による放射線の観察	△
その他	化学変化 (硝火綿ロケット, アセチレンの燃焼反応)	○

表 1 は高校物理で扱う実験について, 筆者が HS カメラで実際に行った実験, あるいは, 文献に載っていた実験の一覧である (表 1)。表の◎は十分に時間分解可能 (データの取得が可能), ○はゆっくりと見えるがデータの取得が困難, △はほとんど見えない現象である。

ターゲットとなる現象は, 力学分野では運動量保存や衝突, 単振動など, 波動では音波 (弦の振動, 縦波) あたりであろう。固体同士の衝突では, 衝突前後の速度の変化 (運動量保存) は追うことができるが, 衝突の瞬間の振動や変形まで見ようと思うと 1000fps では足りない。固体同士の衝突の際の振動は固体の音速程度で伝わるためである。

音波では弦 (ゴムひも) の振動ならば観察と測定が可能である。音叉の振動は 1000fps でも振動の測定はできなかった。波動 (光) と原子分野は難しいが, フィゾーの実験やフーコーの実験で高速で点滅する干渉縞の観測

にも使えるかもしれない(フーコーの実験の回転鏡の回転数は800回/秒程度)。

電気分野では使う機会が少ないが、交流を使ったもの、例えば、蛍光灯による光の点滅(インバーター式でないもの)、テレビやパソコンの液晶画面のリフレッシュレートなども、HSカメラの実視観測で測定が可能である<sup>10)</sup>。

霧箱による放射線を観測する際に、リアルタイムで $\alpha$ 線と $\beta$ 線、ミュオンなどを区別するのは難しいため、ハイスピードカメラが役に立つかもしれない。筆者は平成24年に北海道大学で行われた第29回物理教育研究大会中に出向していたナリカに頼み、ベルチェ素子を使った霧箱を撮影させていただいた。420fpsで霧箱内を撮影したが、雲の発生の時間尺度は非常に早く、作られ方を調べるのは困難だった。しかし、背景に方眼紙をおけば、飛程を測定して $\alpha$ 線のエネルギーを測定することも可能である。

硝火綿のロケットやアセチレンの燃焼過程も撮影してみたところ、こちらは非常に綺麗に解像できた。特に、アセチレンの燃焼過程は通常一瞬で終わるが、HSカメラを使えば燃焼の反応が伝播していく様が撮影できた。幾つかの化学反応についてはHSカメラが有効であろう<sup>12)</sup>。

注意すべきことは、通常のビデオカメラでも解像できそうなものをターゲットにしてもHSカメラを使うメリットがあまりない(もったいない)ことである。坂道の物体の落下や水面波の伝搬などは通常のビデオカメラでも十分に観察できる。ゆえに、ターゲットの選択は現象の典型的な時間尺度を事前に考えてから行うべきである。

#### 4. 授業中での利用方法

現在はインターネット検索を行うと多くのHS実験映像が掲載されているサイトがあるが、高速現象の映像を撮影し、理解することに主眼が置かれている。高等学校での教材利用を考えると、最低限の情報として、現象のサイズや位置が分かる(測定できる)ものと時間を記録する道具が必要である。もし、メジャーとストップウォッチがあれば、あとは撮影した映像を通じて物体の速度が計算できる。精度はセンサー・データロガーにはかなわないが、HS動画は視覚的に計測が可能になることが利点である。

具体的には2種類の方法がある。1つ目は、教師が生徒の前で演示実験を行い、それをHSカメラで撮影する。撮影したHS動画をスクリーンに投影し、それを皆で確認しながら測定を行う。2つ目は、生徒実験でセンサーと同様に、班で1つHSカメラを渡して測定機器として使用させる方法である。どちらにせよ、観察だけで終わ

らせず、測定まで行う、という考え方である。次章で前者の例を幾つか挙げる。

どの実験においても必要な物は、HSカメラ、ストップウォッチ、数値・目盛りが読みやすいスケール(定規)などである。目盛が大きければ、撮影の際に視野を広くしても測定が可能になる。三角測量で使われているスケールは、目盛と数値が見やすいのでお勧めしたい。

### 5. 実践例

#### 5.1 例1 ピンポン玉の反発係数の測定

一斉授業による実験案を挙げてみたい。ピンポン玉の反発係数の測定では、一般的には衝突前後の速度を測る代わりに、衝突前後で物体が跳ね上がる高さを計測して求めることが多いだろう。通常の実験では目で物体の高さを測定するため、誤差が大きい。多数回行っても測定誤差はなかなか小さくならない。そこでHSカメラを使う。

まず、教師がこの実験を演示し、生徒にHSカメラで撮影をしてもらう。撮影した映像をその場でスクリーンに投影し、生徒に観察してもらうと同時に、高さの計測を行ってもらった(このときのフレームレートは420fpsとした。このときは1秒が14秒間に引き伸ばされる)。この際に何度か映像を繰り返し流しておけば、生徒は衝突前後のデータを読み取ることができる。実際に生徒が実験を行ったわけではないが、その場で起こった現象を観察したという実感があり、計測・解析も行うことができる。

この実験の利点は、①その場で行った実験を繰り返して観察できること、②多くの生徒にある程度同じ実験結果を提供できること、などが挙げられる。数値は目視では不可能な小数点以下1桁まで読み取ることが可能である。得られたデータの精度が高く、適当に読み取ってもデータの分散は低い。この実験では、合計7回の衝突に対してデータを取得でき、映像を見せるところからデータ分析まで20分程度で行うことができた。生徒が行っても直線のグラフが引けて、反発係数も一定値( $\approx 0.92$ )となった(図3)。直線を引く際に原点を通るかを考えさせることも重要である。今回の実験は演示実験で行ったが、班数分のHSカメラがそろえば生徒実験で行うことも可能である。

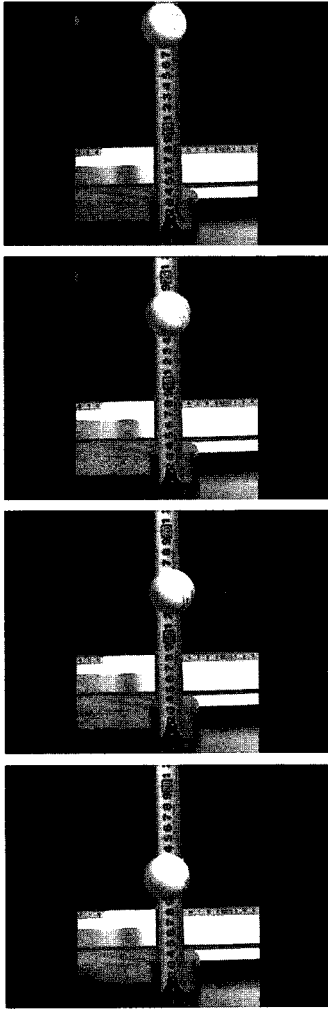


図2 反発係数の測定。動画は420fpsで撮影した。図ははじめから3回衝突後の最高点の画像を並べている。

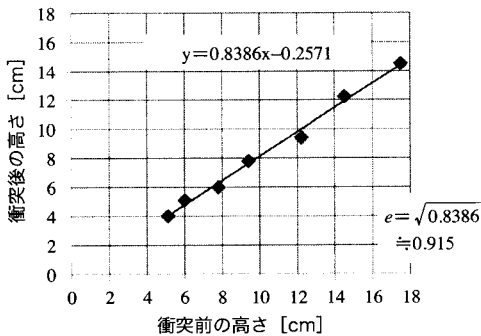


図3 衝突前後のピンポン玉の高さ。生徒が取得したデータを元に筆者がExcelで図を作成した。

## 5.2 例2 台車の衝突：運動量保存

エアトラックを使った台車の衝突実験で衝突前後の運動量をHSカメラで撮影し、運動量の保存を確かめる。この実験は授業での演示を行っていない。今回の実験は以下のとおりである。

①質量比2:1で台車を衝突(240fps, 映像は1秒間が8秒間に伸びる)。

②映像を再生し、衝突前後の位置と時間を測り、運動量を計算し、衝突前後の運動量を比較する。

筆者は適当に位置を決め、衝突前後で台車が10cm移動するのにかかる時間をストップウォッチで計測し、それを実時間に直して速度を算出した。この実験を6回行った結果、誤差の平均は4%程度となった(ここで誤差は、衝突前後の運動量の差/衝突前の運動量、で評価した)。HSカメラとストップウォッチのみでこの精度が得られることがポイントである。ちなみに、エアトラックと台車の間には摩擦があるので、外力による力積が無視できないために運動量は完全には保存しない。

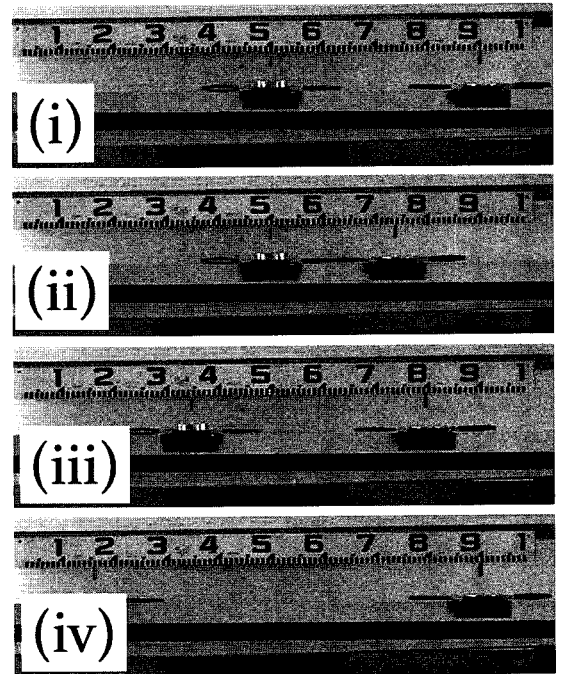


図4 エアトラックを使った衝突実験(240fpsで撮影)。HS動画の映像では台車はゆっくり移動するので、目盛を読み取ることが可能。

## 6. 議論

### 6.1 映像実験のポイント

High Speed Exilimシリーズのカメラを使って実験を行うために幾つかのポイントがあるのでまとめておく。

#### ◎カメラの視野と対象のサイズ調整

遠目に置いてズームで調整するのがよい。対象とカメラが近すぎると視野が狭くなる。

#### ◎適切な解像度とフレームレートの選定

実用は、120fps～420fps。1000fpsモードでは低解像度（画素数224×64）。

#### ◎外部光源の準備

フレームレートが高くするにつれて露光が不足するため、外部照明が必要になる。当然ながら、点滅しない光源が望ましい。

また、三脚はあった方がよいが、なかったとしてもハイスピード撮影の場合は手振れのスピードも遅くなるため、目盛りを読むことができれば、測定にそれほど影響はない。これもHSカメラの利点ではないだろうか。

### 6.2 測定誤差

HSカメラを利用する際、物体の位置測定には誤差が含まれている。これは物体のサイズと物体とカメラの距離に依存する。図5のように、物体のサイズを $r$ 、カメラから定規までの垂直な距離を $d$ 、物体の測定位置を $x$ とおくと、測定誤差 $\Delta x$ は、

$$\Delta x = \frac{r}{d-r} x$$

となる。読み取り誤差を10%程度にするには、物体のサイズと距離の比を1:10程度にする必要がある。例えば、

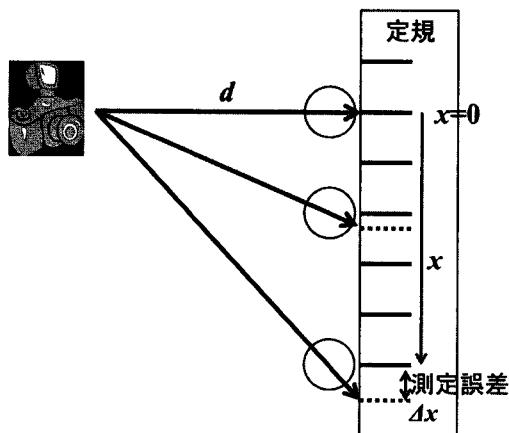


図5 自由落下する物体の読み取り誤差の概念図。

例1の反発係数の実験で直径4cmのピンポン玉の測定誤差を10%以下にするには、40cm以上離れた場所から撮影する必要がある。この誤差を減らすためにカメラと定規までの距離 $d$ を大きくしすぎると解像度が下がるため、どの位置で撮影するかは実験ごとに経験的に決めなければならない。例2の実験のように物体にマーカーがある場合は、物体のサイズによる読み取り誤差は殆ど考慮しなくて良いと思われる。

### 6.3 教材利用の方法

高等学校では、スーパーサイエンスハイスクール(SSH)等で重点的に予算を配分されるケースを除いて、データ分析を行う環境は整っていないのが現状である。学校にコンピュータを使用可能な環境があったとしても、コンピュータ室で実験はできないのである。物理の実験室に1人1台ノートパソコンがある環境は余程の設備投資がないと実現できない。一般的な高等学校でのICT普及を考えるならば、「簡単に誰でも導入できる」教材が求められる。例えば、今回のように演示実験をカメラで撮影し、それをスクリーンに投影する。実験データを生徒に取得させる。この方法は実験による測定を直接的にする上に、実験による測定の本質を失っていない、という点も重要である。

カメラを複数購入できれば、生徒実験の際に測定機器として使うことができる。最初にカメラの使い方を教えておけば、パソコンが無くても、カメラの画面を見て計測が可能になるのは利点ではないだろうか。設備投資がなされ、映像機器が使える環境が整っても、データの分析はパソコンで…、という方法では高等学校の現場には浸透しにくいだろう。教員が多忙化し、実験準備に時間をかけられないからである。簡易で、且つ、測定の本質を見失わずに済むのがこのHSカメラであると筆者は考えている。ただ、すべての実験に対してHSカメラを使おう、というわけではない。HSカメラを使ったほうが良い実験とそうでない実験があるだろう。今後はどういった測定方法が現象を理解する際に適しているか、を見極めていくことも必要である。

## 7. まとめ

平成20年度高等学校理科教員実態調査によれば、教職経験年数が少ない若手教員は「すぐに使える優れた教材情報」「優れた指導法に関する情報」などの項目で、教職経験年数が多い教員よりも期待する割合が高い、という結果が出ており、若手教員の新しい教材に関するニーズがある<sup>3)</sup>。私自身もまだ教員経験は6年目である

が、ハイスピードカメラの利用法については、導入への敷居が低いと感じている。

本研究では、授業中の演示実験・生徒実験でHSカメラを利用し、その映像から実験データを生徒に取得させる方法を提示した。この方法には物理実験の「観察」と「測定」を同時に行うことができる利点がある。また、導入しやすく、且つ、測定の本質を見失わずに済む。HSカメラが現場におけるICT利用の普及に少しでも貢献できれば幸いである。

資料を探す中で藤井らによる物理現象をストロボ写真で撮影した新書に出会った<sup>13)</sup>。筆者が今回提案したことは、本質的にはこの本の内容と変わらない。逆に、ストロボ写真でできることは殆どHSカメラでできると言っても良い。興味の有る方は一度参照されたい。

## 8. 謝 辞

この研究は平成22年度武田科学財団奨励研究による援助を受けています。この研究にあたってアドバイスを頂いた新潟大学教育学部的小林昭三、興治文子、両先生に感謝いたします。また、ハイスピードカメラの教材や研究の方向性について議論していただいた、京都教育大学の沖花彰先生、金沢大学人間社会学域の松原道男先生にもアドバイスをいただきました。エアトラックの衝突実験では金沢桜丘高校の中村公弘先生にご協力いただき

ました。この場を借りてお礼申し上げます。

## 引用文献

- 1) 山崎敏昭, 井上賢, 谷口和成, 内村浩:物理教育 55-1 (2007) 33-38.
- 2) 山崎敏昭, 井上賢, 谷口和成, 内村浩:物理教育 59-2 (2011) 101-107.
- 3) (独) 科学技術振興機構理科教育支援センター:平成20年度高等学校理科教員実態調査報告書(2010).
- 4) ITを活用した指導の効果等の調査研究会:文部科学省委託事業「教育の情報化の推進に資する研究(ITを活用した指導の効果等の調査等)報告書」独立行政法人メディア教育開発センター(2006).
- 5) 興治文子, 小林昭三:可視化情報 30-117 (2010) 108-114.
- 6) 加藤徹也, 本田敦也:千葉大学教育学部研究紀要 58 (2010) 387-395.
- 7) 高橋尚志, 中山貴之, 穴吹佑太, 金家弘枝:物理教育 58-4 (2010) 217-218.
- 8) 高橋尚志, 金家弘枝, 玉井英明:物理教育 57-4 (2009) 293-296.
- 9) 真鍋陽子, 山田茂樹, 川上紳一, 東條文治:岐阜大学教育学部研究報告(自然科学) 33 (2009) 55-58.
- 10) 沖花彰:フォーラム理科教育 10 (2009) 19-24.
- 11) カシオデジタルカメラのホームページ  
[http://casio.jp/dc/products/ex\\_fh100/](http://casio.jp/dc/products/ex_fh100/)
- 12) 渡會兼也:石川県高等学校教育研究会理化部会研究紀要(2011) 13-16.
- 13) 藤井清, 中込八郎:物理現象を読む, 講談社ブルーバックス(1978).

(2012年10月2日受理)

onePoint

## 冬至

2012年12月21日は冬至の日であった。冬至の日とは、どのように定められているのか。

どこかのテレビから、「今日は、夜が一年中で一番長い日です。」と聞こえてきた。本当かなと思うと同時に、夜とは何かが気になった。広辞苑には、「日没から日の出までの時間」と「太陽が没して暗い間」の二通りの説明がある。初めの説明では、夜が明けたときには翌22日になっている。次の説明では、夜が午前と午後のご二つに分かれている。従って、夜の長さで冬至の日が定義されている筈はない。

(答は11ページ)

編集委員会, A (2013年2月22日受理)