

炭素材を用いた電気二重層コンデンサの 製作と活用

富山 哲之* 太田真奈美**
(平成24年10月31日受理)

Electric Double Layer Capacitor Made of Carbon Materials and Their Applications

Noriyuki TOMIYAMA* Manami OHTA**
(Received October 31, 2012)

1. はじめに

電気二重層キャパシタ(以下,コンデンサと呼ぶ)は,従来の大容量の電解コンデンサと二次電池のほぼ中間に位置する性能を有し,充放電サイクル特性や急速充放電に優れた特性をもつことが知られている。およそ30年前に商品化されて以降,高いパワー・エネルギー密度の実現により,大型の蓄電デバイスとして自動車・産業機械などの分野において利用が拡大している。^{1,2)}

これまで,教材用の電気二重層コンデンサに関して,炭素棒と硫酸水溶液を用いた製作や物理実験への利用などの報告^{3,4)}がみられる。従来型のコンデンサの簡便な製法について,筆者が既に報告⁵⁾しているが,アルミニウム箔を用いた巻回型のコンデンサであり,その電気容量は小さいものに限られていた。

新しい教育課程では,小学校理科6年の単元「電気の利用」⁶⁾において,コンデンサなどの新素材の活用が推奨されている。市販教材のコンデンサは電気容量が数F級の電気二重層コンデンサであり,乾電池や手回し発電機からコンデンサに蓄電した後,LEDの点灯,および電子オルゴールや模型モーターを動作させるなどの理科実験に利用されている。

本研究では,廃乾電池から取り出した炭素棒と精製塩で製作できる電気二重層コンデンサの特性を明らかにするとともに,エネルギー教材としての有用性について検討した。

2. 実験

2.1 電気二重層コンデンサの動作原理

電気二重層コンデンサの原理を図1に示す。固体電極を水溶液系または有機系の電解液中に浸漬して両電極間に直流電圧を加えると,正極側に分極された電極と負極側に分極さ

*長崎大学教育学部, **宮崎県児湯郡都農町立都農中学校

れた電極の界面に静電気で引き付けられた正・負の電荷が極めて短い距離で対向し配列した電気二重層が形成される。充電が完了した後、負荷を接続すれば放電が始まり電解質イオンが溶液内を移動する。二次電池のように充放電を繰り返しても化学反応による物質変化がなく、単に物理現象だけが起きているため性能の劣化は少ない。電極の材料として比表面積の非常に大きな材料を用いることにより大容量のコンデンサが得られるなどの特徴がある。

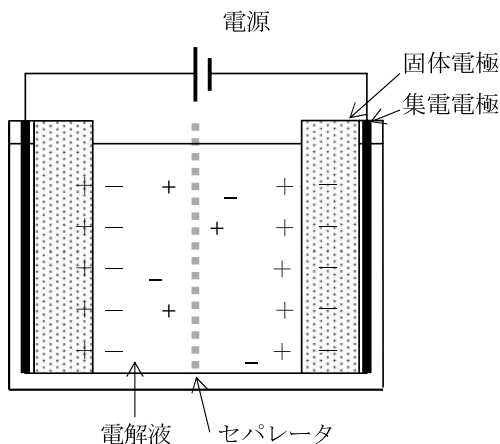


図1 電気二重層コンデンサの構造

2.2 コンデンサ・セルの構成

図1に示すように、電気二重層コンデンサ本体は、格納容器、集電電極、固体電極材料、電解液、セパレータなどで構成される。

本実験では、安全性に配慮して、入手できる身近な材料を使用する。固体電極として廃マンガン乾電池の炭素棒、および集電電極の銅箔、電解液に塩化ナトリウムを99%以上含有する精製塩の水溶液、セパレータのレーヨン紙などから成る。

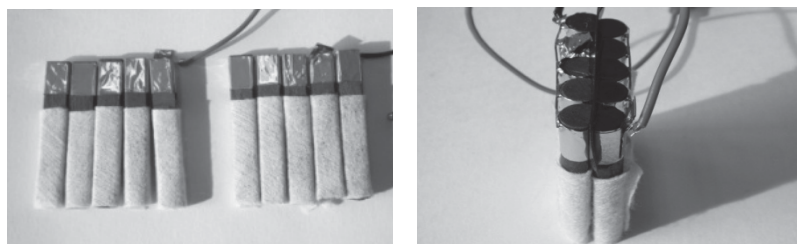
2.3 コンデンサ・セルの作成

電気二重層コンデンサは、次のようにして作成した。廃乾電池（単一型）を分解して炭素棒を取り出す。その後、熱湯で煮沸しワックスを溶出させる。超音波洗浄・乾燥後、粗めのヤスリを使って炭素棒の軸方向に沿って半分位に削り取る。更に切削面を細目のヤスリで仕上げる。この炭素棒の断面は半円形を成し、寸法は約0.5cm×0.8cm×5.7cm、電気抵抗は平均1.2Ωである。炭素棒の表面に付着した炭素粉を綿布で拭き取り再度の洗浄・乾燥後、棒の上部に幅1.2cmの銅箔を巻き付けて電極とする。銅箔と炭素棒との接触部分には銀ペーストを塗布する。銅箔の端部に電極の引き出し線をハンダ付けした後、銅箔の表面に接着剤を塗布する。炭素棒が電解液に浸漬する部分に幅約4cmのレーヨン紙を巻く。

図2(a), (b)に炭素棒を5本束ねた一組のセルを示す。一对の炭素棒の平坦部を対向させて輪ゴムで縛る。容積が100cc程度のピーカーの中にセルを固定する。電解液に浸漬したときの極板対向面積は約16.0cm²である。炭素棒にレーヨン紙を複数回巻くことによ

り対向電極間距離が約0.5mm, 1.0mm, 5.0mmの3種類のセルを準備する。

電解液は、塩化ナトリウムを99%以上含む精製食塩を蒸留水に溶解した上澄み液を用いる。デジタル塩分計で塩分濃度を測り4.5%及び9.0%の水溶液を準備する。炭素棒のセルを固定したピーカーに食塩水を約70cc注ぐ。水溶液の温度は約20℃に保持する。



(a) 一对の炭素電極

(b) 対向電極側面の様子

図2 廃マンガン乾電池の炭素棒で作製した炭素電極

2.4 コンデンサの特性測定

直流電圧に対するコンデンサの性質を調べるために図3の回路を作成した。製作した電気二重層コンデンサCを図の中央に配置する。また、手製コンデンサと電気的特性を比較するために、既製品のコンデンサ（NEC製；電気容量1.0F，耐電圧5.5V）を用いた。

図3の左側は直流安定化電源装置Eと100Ωの固定抵抗器R₁を接続したコンデンサの充電回路，右側は100Ωの固定抵抗器R₂を接続した放電回路であり，切り替えスイッチA，Bで回路を選択できる。図4，図5に測定装置の外観を示す。

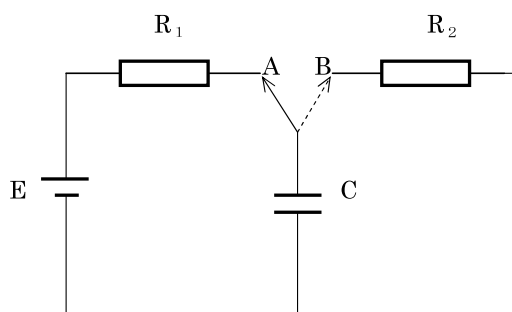


図3 充放電回路

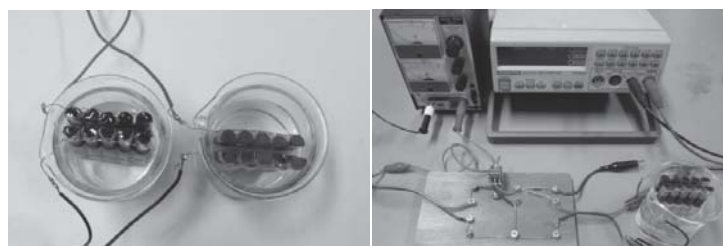


図4 コンデンサ・セル

図5 測定装置の外観

コンデンサ C の端子電圧の変化を調べるため、コンデンサ C に対して直流安定化電源装置で一定の直流電圧を加える。ただし、コンデンサ C の両端に加える電圧は電気分解が発生する電圧以下にしなければならない。本実験では、1 V、または 2 V 程度の電圧を加えたときのコンデンサ C の両端の電圧変化 V [V] をデジタルボルトメーターで測定する。スイッチを A 側に切り替え、抵抗 R_1 [] を通してコンデンサ C [F] に充電する。その際に、充電時間に対するコンデンサ C の端子電圧の値を読み取った。充電が完了したら、スイッチを B 側に切り替え、コンデンサ C [F] から抵抗 R_2 [] を通して、放電の際のコンデンサ C の端子電圧をデジタルボルトメーターで読み取った。

手製、および既製のコンデンサの電気容量は、コンデンサの充放電に関する関係式を使って求めた。⁷⁾

3. 実験結果と考察

3.1 電解液の濃度を変えたときの充放電特性

炭素棒の極板対向面積が 16.0cm^2 の電極を用いた場合について、図 6、図 7 に電解液の濃度が 4.5%、および 9.0% のときの手製コンデンサの充電特性、および放電特性を、それぞれ、印、印で表す。このときの充電電圧は、それぞれ、平均 1.014V および 1.003V である。

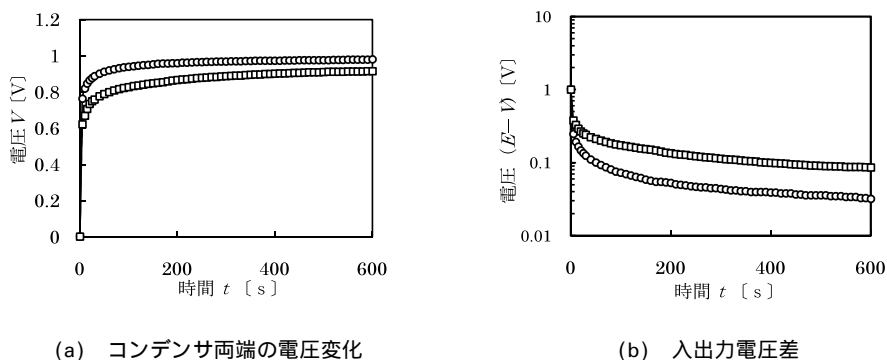


図 6 手製コンデンサの充電特性 (極板面積 16.0cm^2 、電解液濃度: 4.5%, 9.0%)

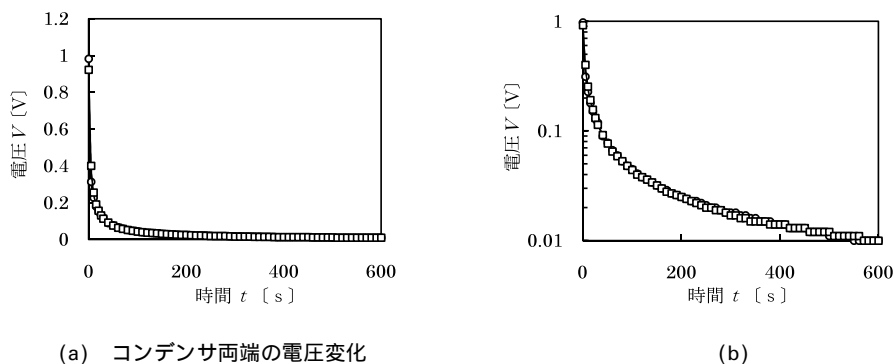


図 7 手製コンデンサの放電特性 (極板面積 16.0cm^2 、電解液濃度: 4.5%, 9.0%)

各図の直交座標の X 軸は時間軸であり， Y 軸に対して，図 6 (a) にコンデンサ両端の電圧変化，図 6 (b) に入出力電圧差を示す。充電時間が10分経過したときに開始した放電の様子を，図 7 (a) にコンデンサ両端の電圧変化，図 7 (b) に片対数グラフを示す。

各図に示すように，コンデンサ C と抵抗 R の RC 回路では過渡的な現象がみられる。電解液濃度の低い方が充電は早く進んでいる。放電開始直後の電圧は急に低下するが電解液の濃度による電圧変化の違いはみられない。

3.2 手製及び既製コンデンサの充放電特性

図 8，および図 9 に充電電圧 1.0V または 2.0V のときの手製コンデンサの電圧変化を，それぞれ，印，印で表す。また，比較のために測った既製コンデンサの充電電圧 1.0V または 2.0V のときの電圧変化を，それぞれ，印，×印で表す。

極板面積 16.0cm^2 ，極板間距離 5.0mm ，電解液濃度 4.5% のときの手製コンデンサの充電特性を図 8 (a)，および図 8 (b) に片対数グラフを示す。充電電圧は，それぞれ，平均 1.020V および 2.004V である。

充電が約10分経過した時点で放電を開始したときの放電特性を図 9 (a)，および図 9 (b) に片対数グラフを示す。

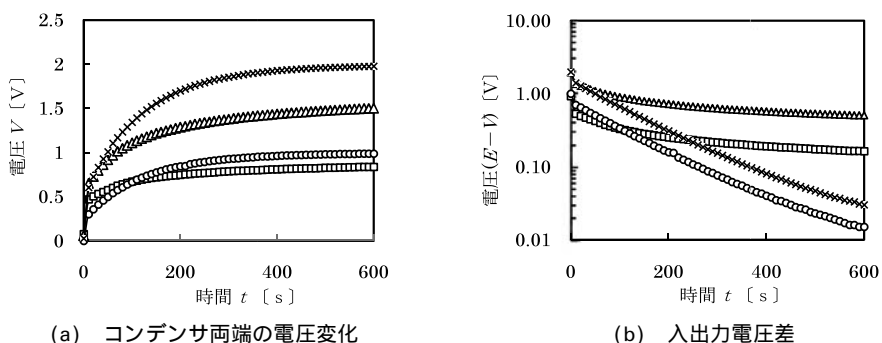


図 8 手製コンデンサの充電特性（極板面積 16.0cm^2 ，電解液濃度： 4.5% ，手製コンデンサの充電電圧： 1.0V ， 2.0V ，既製コンデンサの充電電圧： 1.0V ， $\times 2.0\text{V}$ ）

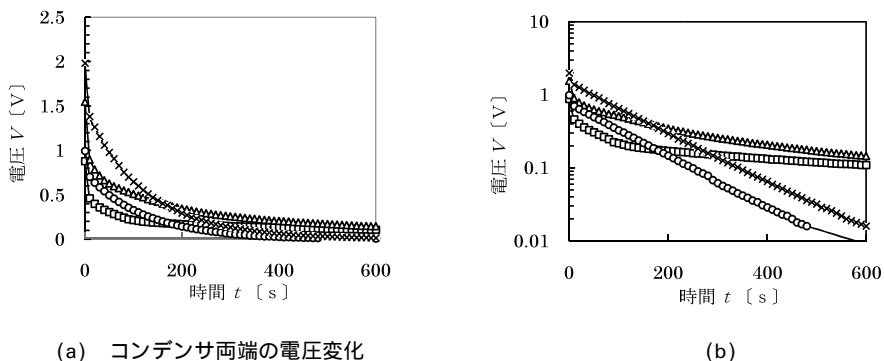


図 9 手製コンデンサの放電特性（極板面積 16.0cm^2 ，電解液濃度： 4.5% ，手製コンデンサの放電電圧： 1.0V ， 2.0V ，既製コンデンサの放電電圧： 1.0V ， $\times 2.0\text{V}$ ）

既製コンデンサの方が早めに充電電圧に達している。放電開始から約10秒間の電圧降下は大きいですがそれ以降はほぼ指数関数的に電圧が減少する。

放電初期の電圧降下は、既製コンデンサではごく僅かしか起こらないが、手製コンデンサではやや大きいことがわかる。また、手製コンデンサの放電は緩やかであり0.1V程度までしか低下していないが既製コンデンサは約10分間経過した時点で0.01V以下になる。

コンデンサの電気容量は、充電、または放電曲線を片対数表示したときの直線式の勾配から求めることができる。⁷⁾ 図8 (b)の充電特性、または図9 (b)の放電特性の直線の勾配から求められた手製コンデンサの電気容量の平均約2.2F、および既製コンデンサの電気容量は平均1.1Fである。

3.3 極板間距離を変えたときの充放電特性

図10、および図11の各図に手製コンデンサの極板間距離0.5mm、1.0mm、5.0mmに対する充電特性、および放電特性を、それぞれ、印、印、印で表す。充電電圧は、それぞれ、平均1.004Vおよび1.011V、1.005V、セルの極板面積16.0cm²、電解液濃度4.5%である。

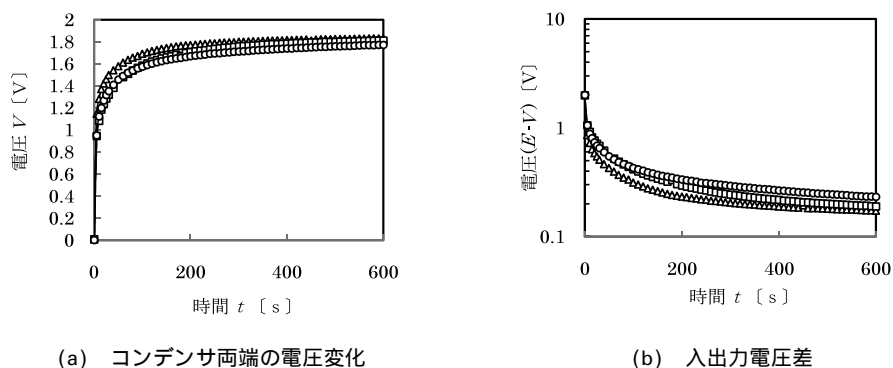


図10 手製コンデンサの充電特性 (極板面積16.0cm²、電解液濃度: 4.5%、
極板間距離 [mm]: 0.5, 1.0, 5.0)

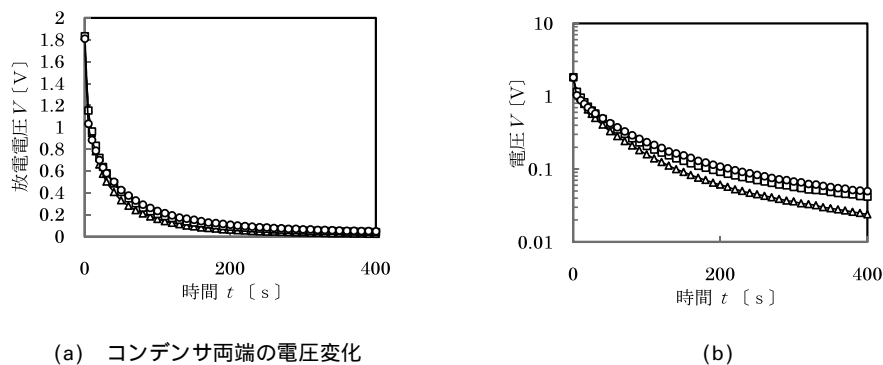
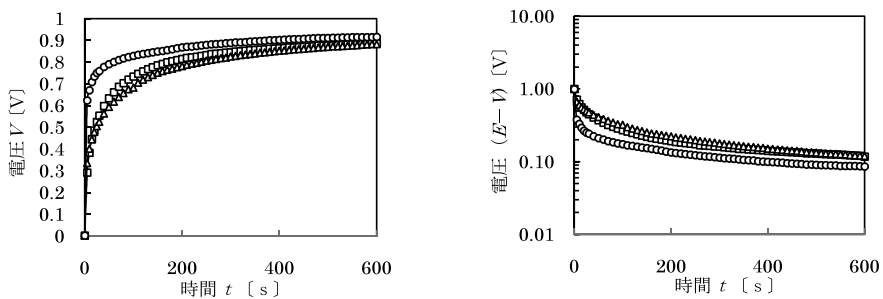


図11 手製コンデンサの放電特性 (極板面積16.0cm²、電解液濃度: 4.5%、
極板間距離 [mm]: 0.5, 1.0, 5.0)

手製コンデンサの放電の初期では電圧降下大きい。極板間距離が大きいほどグラフの傾きは小さく、放電が緩やかな傾向にある。放電特性の実測値から得られた手製コンデンサの電気容量 C は、極板間距離が0.5mm, 1.0mm, 5.0mmについて、それぞれ、平均1.5F, 1.7F, 2.2Fとなる。

3.4 コンデンサ・セルの接続を変えたときの充放電特性

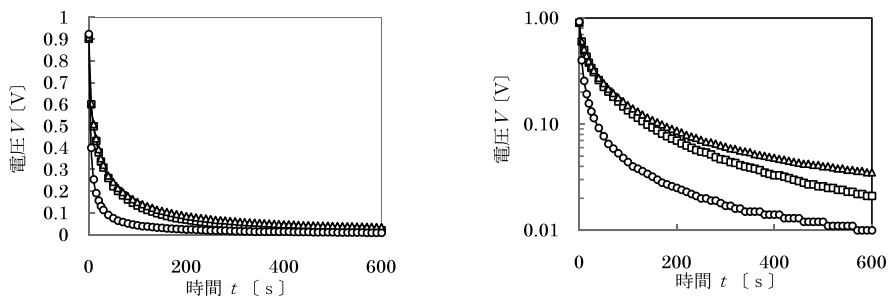
図12, および図13に手製コンデンサのセルの単体, 直列, 並列接続の場合の充電特性, および放電特性を, それぞれ, 印, 印, 印で表す。充電電圧は, それぞれ, 平均1.012Vおよび1.007V, 1.009Vである。セルの諸量は, 極板面積16.0cm², 極板間距離5.0mm, 電解液濃度4.5%である。



(a) コンデンサ両端の電圧変化

(b) 入出力電圧差

図12 手製コンデンサの充電特性 (極板面積16.0cm², 電解液濃度: 4.5%,
セルの接続: 単体, 直列, 並列)



(a) コンデンサ両端の電圧変化

(b)

図13 手製コンデンサの放電特性 (極板面積16.0cm², 電解液濃度: 4.5%,
セルの接続: 単体, 直列, 並列)

図13は直列接続のときグラフの傾きは小さく、放電は緩やかである。セルの接続を変えたときの電気容量は、単体, 直列, 並列接続のとき, それぞれ, 平均2.2F, 2.5F, 2.3Fとなる。いずれの場合も電気容量は2Fを越えている。

手製コンデンサの物理的な極板間距離またはセルの接続を変えた場合, それぞれについて電気容量の顕著な違いはみられなかった。何れも放電の初期段階において電圧降下が大

きい。これはコンデンサの内部抵抗として電解液の抵抗や電極と電解液界面抵抗などによる漏洩電流の影響が考えられる。手製コンデンサの放電特性によりセルの内部抵抗の実測値は平均約0.8 になる。このような内部抵抗を減らす工夫が必要である。

手製コンデンサの電気容量は約2Fのものが得られた。また、既製コンデンサの電気容量は平均1.1Fであり定格値に近い値であった。手製コンデンサのセルを直列接続して充電電圧が約1.0Vの場合、放電回路に繋いだ太陽電池用モーターは約3秒間作動した。充電電圧が約2.0Vの場合、モーターは約10秒間、LEDと電子オルゴールはそれぞれ約1分間、約15分間作動するので電気エネルギー貯蔵用のコンデンサとして使うことができる。

手製コンデンサの充電電圧を徐々に上げたとき電解液を流れる電流値は約1.3Vのときの約1mAから緩やかに上がり始めて約2.3Vのとき約3mAに達した。充電電圧約2.3Vのとき炭素棒の周囲に気泡の発生は見られないが更に電圧を高くすると電流は増えるので電気分解の影響は無視できなくなる。

4. おわりに

本稿では、廃マンガン乾電池の炭素棒、および精製塩を用いた電気二重層コンデンサの製法と電気的特性について検討した。コンデンサの電気容量として既製のコンデンサと同程度のもものが得られた。作製したコンデンサを用いて、LEDや電子オルゴール、模型モーターなどを作動できる。この手製のコンデンサを再使用する場合は、炭素電極表面に塩化ナトリウム粒子が付着して劣化するので、炭素棒表面の汚れや電解液などを交換してコンデンサ・セルを作り直すことが必要である。

小学校から高校までのエネルギー教育では、エネルギーの発生、変換、貯蔵、利用の過程について学習が展開されている。本研究で開発した大容量のコンデンサは、エネルギーを蓄えておくことの大切さを体験できるもの作りの教材である。今後、本装置についてさらに改良を加えた上で、より詳細な検討を行う必要がある。また、各校種における理科の学習段階にあわせた活用を図りたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 岡村迪夫：電気二重層キャパシタと蓄電システム，日刊工業新聞社（1999）25．
- 2) 長谷部章雄：まてりあ，第41巻，第6号（2002）427．
- 3) 安田 明：物理教育，第31巻，第3号（1983）121．
- 4) 安田 明：物理教育，第31巻，第4号（1983）217．
- 5) 富山哲之：長崎大学教育学部教科教育学研究報告，第31号（1998）19．
- 6) 文部科学省編：小学校学習指導要領解説理科編，（平成20年8月）60．
- 7) 例えば，雨宮好文：過渡現象の考え方，オーム社（1996）7．