

雲の発生原理を理解する実験教材の開発に関する研究

Study on Development of Experimental Teaching Materials to Understand the Principle of Cloud Formation

小池守¹, 佐藤直也², 百瀬莉子³, 長澤啓亮³, 野口瑛斗³, 魏徳良³, 倉山智春¹
帝京科学大学教育人間科学部¹, 入善町立入善中学校², 帝京科学大学教育人間科学部学生³

Mamoru KOIKE¹, Naoya SATO², Riko MOMOSE³, Keisuke NAGASAWA³, Akito NOGUCHI³,
Deling WEI³, Tomoharu KURAYAMA¹

¹Faculty of Education & Human Sciences, Teikyo University of Science

²Nyuzen Town nyuzen lower secondary school

³Undergraduate Student in Faculty of Education & Human Sciences, Teikyo University of Science

要約：雲の発生原理を、空気の膨張収縮と温度変化、急激な圧力変化に伴う温度変化と雲の発生、上昇気流に見られる僅かな圧力変化に伴う温度変化と雲の発生の3の要因に分けて実験することで気圧変化や温度変化と雲の発生原理を結び付けることのできる教材を開発した。次に、中学校の理科授業において、開発した実験教材が生徒の雲の発生原理に関する理解を深めるために有用であるか検証した結果、以下の2点が明らかとなった。

- 1) 授業前の生徒に、雲の発生原理に関する知識はなかったが、授業後には、空気の膨張と温度変化、気圧変化と温度変化、露点と凝縮などを関連させて、雲の発生原理を正しく理解していた。
 - 2) 生徒は、分かりやすく、新たな発見があることを理由に、教材に対して有用感をもっていた。
- 以上のことから、本研究で開発した実験教材は、生徒が雲の発生原理を理解するために、有用な教材であることが示唆された。

I. 問題の所在

雲の発生原理は、中学校第2学年理科「天気の変化」の単元で学習する(文部科学省, 2018)。しかし、雲の発生過程は、通常の加熱・冷却過程と異なり、直接的な熱の授受を伴わないため、生徒にとっては理解し難い学習内容といえる。

「雲のでき方」をキーワードに、これまでの研究を調べると、教材に関する論文のほぼ全てが雲の発生原理を「断熱膨張による温度低下である」と言葉で説明していた(鈴木・来見, 1995; 松井, 2002; 山根・山川, 2009; 中川, 2013)。そのため、空気の膨張に伴う温度変化を理論的に示し、実験を通して検証した論文は見当たらない。これは、断熱状態の体積変化に伴う温度変化は熱力学第一法則から導き出されたものであり、中学校までの教育範囲を超えるためである。

中学校までの教育においても、熱力学的な知識と矛盾しない理解や生徒の発達段階に応じた説明

は必要である。しかし、膨張収縮に視点を当て、気圧変化など温度以外の条件を考慮せずに、実験容器内の温度低下と水蒸気の凝縮とを結びつける説明が多く、生徒に誤った概念を与えかねないとの指摘(勝田, 2015)もある。

中学校学習指導要領解説理科編には、雲の発生実験について、「雲の成因については、高度による大気圧の変化と、大気の上昇に伴う気温の低下を取り上げる。例えば、密閉された袋が高度変化に伴う気圧の低下によって膨らむ現象などを取り上げることが考えられる。」と記されている(文部科学省, 2018)。また、中学校第2学年「理科」の教科書(岡村・藤嶋他, 2020)には、「断熱膨張」という言葉はないが、指導書(新編新しい科学編集委員会・東京書籍株式会社編集部, 2016)には「空気は膨張すると温度が下がる。これは、断熱膨張で、空気自身のもっているエネルギーが膨張するために使われてしまうので、空気自身の温度

が下がる。」と記されている。このため、指導する教員が雲の発生原理の説明場面で実験を通して得られた事実ではなく、「断熱膨張」という言葉を用いて説明することも考えられる。

勝田(2015)は、この原因を日常の感覚に合致することや説明が論理的構造を持つためとし、「一見納得できそうな説明をもう一度疑って、きちんと物理的に考察してから授業に持ち込むべきことが肝要である。」と事実を直視し言葉を鵜呑みにしない教育を提言している。

改めて、中学校学習指導要領解説理科編を見ると「教科の目標」には、「(2) 観察, 実験などを行い, 科学的に探究する力を養う。」と記され、「科学的に探究する力を育成するに当たっては, 自然の事物・現象の中に問題を見だし, 見通してもって観察, 実験などを行い, 得られた結果を分析して解釈するなどの活動を行うことが重要である。」と記されている(文部科学省, 2018)。しかし、後述するが、雲の発生原理の学習においては、空気を膨張させて雲を発生する実験を通して、気圧低下と温度降下、露点、水蒸気の凝結といった全ての現象(要因)を一度に説明するため、生徒の理解の範囲を超えた教え込み学習となり、実験などで得られた結果を分析・考察するといった探究活動は十分になされていない。

II. 研究の目的

本研究では、これまで雲の発生原理について、学習指導要領や教科書で、どのように扱われてきたかを調査分析する。また、探究活動を通して理解する実験教材の開発を行い、中学校の理科授業において、教材及び授業の有効性を検証する。

III. 学習指導要領や教科書での取り扱い

1. 中学校指導書及び学習指導要領解説書の変遷

中学校学習指導要領は、現在までに7回の改訂が行われている(表1)。また、雲の成因に関する記述は表2で示すようになっている。

昭和53年、平成元年の中学校指導書理科編(文部省, 1978, 1989)及び平成10年、平成20年の中学校学習指導要領解説理科編(文部省, 1999; 文部科学省, 2008)には、「大気(水蒸気)が上昇して断熱変化して雲ができる」、「断熱膨張(断熱変化)による冷却に触れる」、「断熱膨張による冷却の原理には深入りしない」とあり、断熱膨張(断熱変化)についての記述は見られる。しかし、

表1 中学校学習指導要領の改訂および実施時期

	改訂時期	実施年度
1	昭和33~35年改訂	中学校昭和37年度
2	昭和43~45年改訂	中学校昭和47年度
3	昭和52~53年改訂	中学校昭和56年度
4	平成元改訂	中学校平成5年度
5	平成10~11年改訂	中学校平成14年度
6	平成20~21年改訂	中学校平成24年度
7	平成29~30年改訂	中学校令和3年度

表2 中学校指導書理科編及び中学校学習指導要領解説理科編に記載された雲の成因に関する内容

	雲の成因に関する記述内容
昭和53年	地表から蒸発した水蒸気が上昇して雲ができる理由を考察させ、水が雲から降水となって地表に戻ることを理解させることもできよう。水蒸気が上空で冷やされて雲のできる理由を断熱変化の実験に関連付けて考察させることもできるが、この場合も断熱変化の説明に深入りする必要はない。
平成元年	雲の成因については、大気の上昇に伴う断熱膨張による冷却に触れる必要がある。大気圧の存在については、第1分野(2)エ(ア)ですでに学んでいるが、その高度による変化についてはここで扱うことになる。登山の機会などに携帯気圧計(高度計)を用いて実測させることも考えられる。実測できない範囲については、適当な資料を用いることとなろう。断熱膨張による冷却の原理には深入りしない。
平成10年	雲の成因については、大気の上昇に伴う断熱膨張による冷却に触れる必要がある。大気圧の存在については、第1分野で学習しているが、高度による変化についてはここで扱うことになる。例えば、密閉された袋が高度変化に伴う気圧低下によって膨らんだりする身近な現象に触れ、真空ポンプを活用した減圧実験、校外学習や登山の機会などを利用して携帯気圧計(高度計)を用いた実測などの実験が考えられる。断熱膨張による冷却の原理には深入りしない。
平成20年	霧や雲の発生についての観察、実験を行い、そのでき方を気圧、気温及び湿度の関係と関連付けてとらえること。雲の成因については、大気の上昇に伴う気温の低下(断熱膨張)に触れる。また、大気の高さによる変化を扱う。例えば、密閉された袋が高度変化に伴う気圧の低下によって膨らむ減少などを話題として取り上げる。その際、真空ポンプを活用した減圧実験や校外学習などを利用した携帯気圧計(高度計)による大気測定が考えられる。
平成29年	霧や雲の発生についての観察、実験を行い、そのでき方を気圧、気温及び湿度の関係と関連付けてとらえること。雲の成因については、高度による大気圧の変化と、大気の上昇に伴う気温の低下を取り上げる。例えば、密閉された袋が高度変化に伴う気圧の低下によって膨らむ現象などを取り上げることが考えられる。

平成29年の中学校学習指導要領解説理科編（文部科学省，2018）においては、「そのでき方を気圧、気温及び湿度の関係と関連付けてとらえる。」と、断熱膨張（断熱変化）の記述はなくなり、気圧と温度の関係を関連付けることが記されている。平成29年度の変更は、断熱膨張（断熱変化）という言葉による説明に頼り、気圧や温度といった科学的要素と関連付けた考察を行わない学習を懸念したためと考えられる。

2. 教科書の変遷

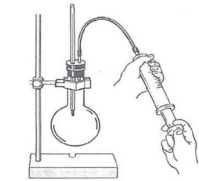
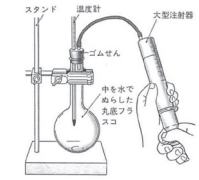
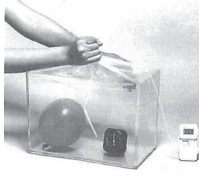
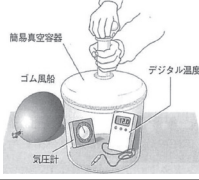


東京書籍株式会社の中学校理科教科書を例に、雲の発生実験に関する記述内容を調査すると、大きく4回の変遷が見られた（表3）。

第1回目は、昭和54年までの教科書（茅・服部ほか，1968；蓮沼・藤井ほか，1977，1979）に見られる丸底フラスコと大型注射器を用いた生徒による雲の発生実験（以下、フラスコ実験）である。この実験は、丸底フラスコに水と線香の煙を入れ、大型注射器を用いて膨張・圧縮して、フラスコ内に生じる雲を観察するものである。上昇気流を再現する膨張現象である上、事前に空気の膨張と減圧の関係を丸底フラスコに入れた風船の膨らみ方から学び、雲の発生を目視観察できるが、温度計の感度が悪く、気圧と温度、雲の発生の3者を関連付けることは困難である。

第2回目は、昭和56年～平成2年までの教科書（藤井・近角・長倉・江上ほか，1981，1984；近角・長倉・江上・海野・水野ほか，1987，1990）に見られるフラスコ実験の教員による演示である。それまで生徒実験であったフラスコ実験が教員による演示に変わった。理由は不明だが、仮に大型注射器で空気を抜く（減圧時）際にフラスコが破損する事故が発生しても、減圧時の破損ではガラスが飛び散ることはなく、大事故とはなり得ない。このため、生徒実験から演示実験への変更は、単なる扱い方の軽減と考えられる。

第3回目は、平成5年～平成9年までの教科書（上田・三浦・水野・綿抜ほか，1993，1997）に見られる水槽にビニルシートを付けた実験装置による実験（以下、水槽実験）である。水槽内にデジタル温度計、気圧計、ゴム風船、線香の煙などを入れ、ビニルシートを水槽に押し込んだ後、強く引き上げる操作を通して、雲の発生を確認する。しかし、この実験で雲の発生を目視確認することは困難である。水槽実験は、フラスコ実験で

表3 雲の生成実験に関する教科書の記述

時期	仕様	実験装置	評価
昭和43年 52年, 54年	生徒 実験		膨張 ○
			気圧低下 ○
			温度低下 △
			雲発生 ○
昭和56年 59年, 62年 平成2年	説明と 演示 実験		膨張 ○
			気圧低下 ○
			温度低下 △
			雲発生 ○
平成5年 9年	生徒 実験		膨張 ○
			気圧低下 ○
			温度低下 ○
			雲発生 ×
平成14年 18年	実験		膨張 ×
			気圧低下 ○
			温度低下 ○
			雲発生 △
平成24年 28年 令和3年	実験		膨張 ○
			気圧低下 ×
			温度低下 ×
			雲発生 ○
	実験		膨張 ×
			気圧低下 ○
			温度低下 ○
			雲発生 △

※実験装置図は、中学校理科教科書（東京書籍株式会社）より転写。

は観測しなかった気圧や温度の測定を行うことから、雲の発生原理を探るために、一歩前進しているが、空気がビニルシートの隙間から漏れるなど、実験制御が難しく生徒実験には適していない。

第4回目は、平成14年以降の教科書（岡村・藤嶋ほか，2012，2016；梶田・真行寺・永原・西原ほか，2021）に見られる簡易真空容器による実験（以下、真空容器実験）である。真空容器内に気圧計、デジタル温度計と少量の水、線香の煙、空気を入れ封をしたビニル袋を入れた後、真空容器中の空気を抜き、気圧と温度と雲の発生とを関連付けることができる。しかし、容器から空気を抜

く行為は、自然界の上昇気流（空気の膨張）とは異なり、生徒の思考に混乱をきたす可能性がある。

また、平成14年～平成17年の教科書に真空容器実験とは別に掲載されていた2つのペットボトルをゴム管で接続する実験（以下、2つのペットボトル実験）は、フラスコ実験と同様の発想で雲の発生を目視確認できるが、気圧と温度、雲の発生を関連付けることは困難である。

ところが、東京書籍株式会社を除く、4社の令和3年度版中学校第2年理科教科書（大矢・鎌田ほか、2021；有馬朗人ほか、2021；室伏・養老ほか、2021；霜田・森本ほか、2021）には、いずれもフラスコ実験が掲載されている。ここでは、丸底フラスコに繋いだ大型注射器のピストンを引き、空気を膨張させ、温度変化と雲の発生する様子を観察する実験が展開される。しかし、空気の膨張と減圧とを結び付ける説明や実験がなく、生徒に「空気が膨張すると雲ができる」との誤解を招く恐れがある。また、学校図書株式会社の教科書『中学校科学2』には、空気を膨張させたときと収縮させたときで温度の変化量が等しいとの記述がある。後述するが、雲の発生時には凝縮熱が発生するため、両者の変化量は異なり、誤った記述といえる。

改めて、雲の発生原理は、以下の3つの現象（要因）が短時間に順次生じることにある。

- 1) 空気膨張（気圧低下）により温度は低下する。
- 2) 温度低下に伴い、露点に達した水蒸気は凝結核に凝縮して水滴になる。
- 3) 水蒸気が凝縮する際に発生する凝縮熱のため、雲発生時には、温度低下が軽減される。

上述の学習指導要領及び教科書の扱いから、生徒に学ばせるべき内容は、1) 2) の2つの現象（要因）であることが分かる。しかし、温度変化と雲の発生とを関連付けるためには、3) の凝縮熱にも触れる必要がある。

改めて、市販教科書の実験及び記述内容を見直すと、教えるべき複数の現象（要因）を、一度に一つの実験で説明しようとしていることがわかる。むしろ、各現象（要因）を一つずつ取り出して実験することが、より深い理解を得るために近道なのだが、そうしたスモールステップ的な視点をもつ教科書は見当たらない。

そこで、本研究では、以下において、雲の発生原理である上記3つの現象（要因）を一つずつ取

り出し、3ステップで実験を通して確認する教材の開発を行う。

IV. 教材開発

1. 気圧変化に伴う温度変化を提示する教材

(1) 断熱変化での圧力変化に伴う温度変化（理論値）

理想気体では、断熱変化するときの圧力 P [Pa] と体積 V [m³]、比熱比 γ には、①式の関係があり、ポアソンの法則と呼ばれる。

$$PV^\gamma = \text{一定} \quad (1)$$

比熱比 γ は、定圧モル比熱 C_p 、定積モル比熱 C_v 、気体定数 R から③式で表される。

$$C_p - C_v = R \quad (2)$$

$$\frac{R}{C_v} = \frac{C_p}{C_v} - 1 = \gamma - 1$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3)$$

初期状態を添え字 a 、最終状態を添え字 b で表すとポアソンの法則①式は、④式になる。

$$P_a V_a^\gamma = P_b V_b^\gamma \quad (4)$$

断熱状態における熱力学の第一法則（⑤式）から、内部エネルギーの減少分（ $-\Delta U$ ）と気体が外部にした仕事量 W は等しく（⑥式）、 W は⑦式で表される。

$$dU = -P dV \quad (5)$$

$$-\Delta U = W \quad (6)$$

$$W = \int_{V_a}^{V_b} P dV = \frac{P_a V_a}{\gamma - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{V_a}{V_b} \right)^{\gamma - 1} \right\} \quad (7)$$

また、理想気体 1 [mol] 当たりの内部エネルギーの増加分 dU に対して成り立つ⑧式を基にすると、 n [mol] の理想気体の内部エネルギーの増加分 ΔU は⑨式で表される。 ΔT は温度の増加分である。

$$dU = C_v dT \quad (8)$$

$$\Delta U = n C_v \Delta T \quad (9)$$

圧縮比を α 、圧力比を β とすると、

$$\alpha = \frac{V_a}{V_b} \quad \beta = \frac{P_b}{P_a} \quad \text{となるので、}$$

両者の関係は⑩式で表される。

$$\alpha = \beta^{\frac{1}{\gamma}} \quad (10)$$

これらを用いると、温度変化 ΔT と圧力比 β の関係を導くことができる（⑪式）。

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\Delta U}{nC_V} = -\frac{W}{nC_V} = -\frac{1}{nC_V} \cdot \frac{P_a V_a}{\left(\frac{C_P}{C_V} - 1\right)} (1 - \alpha^{\gamma-1}) \\ &= \frac{P_a V_a}{nC_P - nC_V} (\alpha^{\gamma-1} - 1) = T_a (\alpha^{\gamma-1} - 1) \\ &= T_a \left(\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

空気の場合、2原子分子理想気体と近似できるため、定圧モル比熱 C_P と定積モル比熱 C_V から、 γ は1.4である。

$$C_P = \frac{7}{2}R \quad C_V = \frac{5}{2}R \quad \gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{7}{5} = 1.4$$

⑪式に初期条件（気温 $T_a = 20^\circ\text{C}$ 、初期気圧 $P_a = 1$ 気圧）を入れ、断熱変化に最終気圧 P_b [atm] と温度変化の関係式を表したものが⑫式である。

$$\Delta T [\text{K}] = 293 \left((P_b)^{0.2857} - 1 \right) \quad (12)$$

初期気圧 P_a を1気圧にし、初期気圧から任意気圧 P_b まで断熱圧縮、または断熱膨張させたときの温度変化を、⑫式を基に算出し、図1にプロットした。その結果、断熱圧縮・断熱膨張に伴う温度変化は曲線になった。

しかし、この曲線は、断熱圧縮・断熱膨張のみ考慮し算出したものであり、熱損失率や空気中に含まれる水蒸気凝縮の影響は考慮していない。

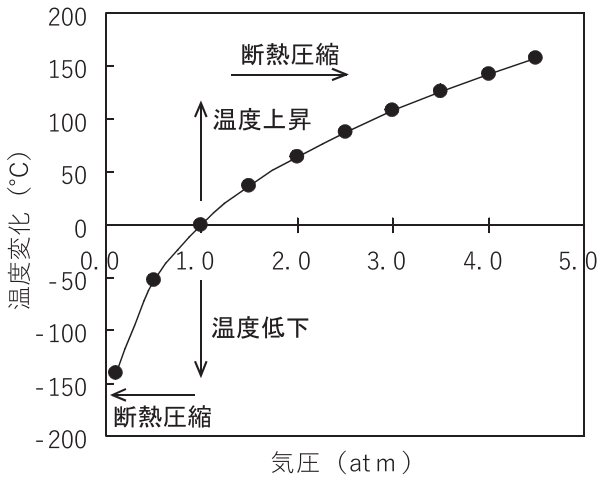


図1 断熱膨張・断熱圧縮時の温度変化の計算値

※温度変化は、 20°C を基準とした変化量。

※気圧は、初期気圧 $P_a = 1$ atm に対する最終気圧 P_b 。

(2) 雲の発生実験時の温度変化（予測値）

中学校理科「天気の変化」の授業で行う雲の発生実験について考えるとき、ペットボトルなど加压可能な容器に空気を押し込み、その後瞬間的に

空気を排出・減圧して雲を発生させる実験を想定すると、その操作過程自体、断熱変化とはいえ、断熱状態における気圧と温度変化の関係式(⑫式)をそのまま適用できない。例えば、ポンプで容器内に空気を押し込む操作は、数10秒程度で完了するが、熱が容器を通して外部に逃げる可能性がある。また、開閉弁を外して、容器に押し込んだ空気を瞬間的に放出する操作においても熱の散逸が起こる可能性がある。そこで、容器内の気圧が4気圧になるまで空気を押し込んだ（圧縮）後、開閉弁を開き瞬間的に空気を放出（膨張）したときの温度変化を、熱の損失がない場合と熱損失率92.5%の場合について計算し、図2にプロットした。

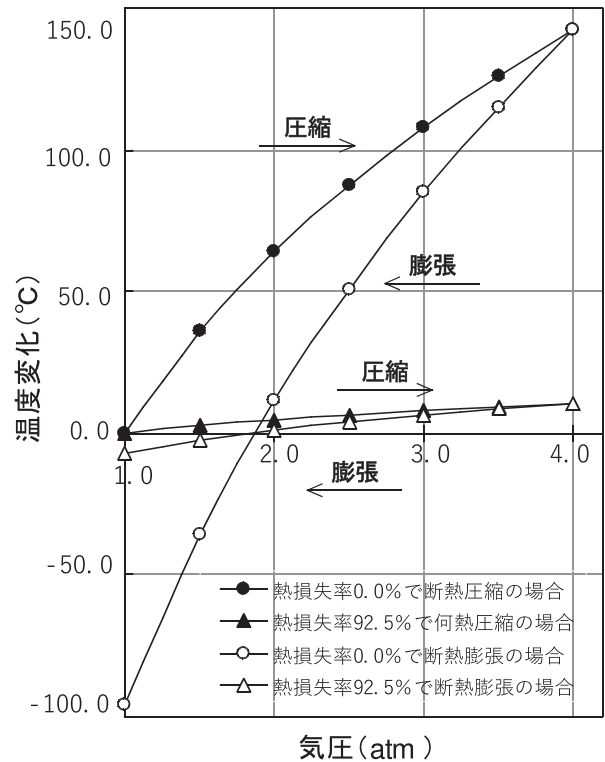


図2 圧縮・膨張時の実験容器内の温度変化の計算値

※水蒸気の凝縮熱等の影響は考慮していない。

その結果、熱損失率92.5%では、1気圧から4気圧へ加压時の上昇温度は 10.7°C 、圧縮ポンプの開閉弁を開いて4気圧から1気圧へ減圧時の下降温度は 17.9°C となるので、計算上容器内の温度は最初の温度よりも 7.2°C 低下する。このため、容器内の水蒸気が凝縮して水滴になり、雲が発生する可能性は十分にある。

なお、熱損失率を92.5%に設定したのは、以下

で行うペットボトルを用いた実験装置による測定結果と比較するためである。

(3) 雲の発生実験時の温度変化 (実測値)

1) ペットボトルを用いた実験装置

図3のように、炭酸飲料水用のペットボトル(500 ml)の底部分をカッターで切り取り、飲み口に炭酸飲料水の炭酸抜けを防ぐ目的で販売されている圧縮ポンプと開閉弁の付いた栓(AOZORA: SODA FRESH)を取り付けた。次に、ペットボトル底の切り口に温度計測用センサ(T&D: SK-2-1.0-U, 6500円)とボールノズル(サギサカ: W07078)を差し込んだシリコン栓((株)カサイ: 23号, 上径67×下径59.5×高さ45 mm)を接着剤(コニシ: #05141)で固定し、空気漏れのない実験装置(以下、ペットボトル実験器)を組み立てた。

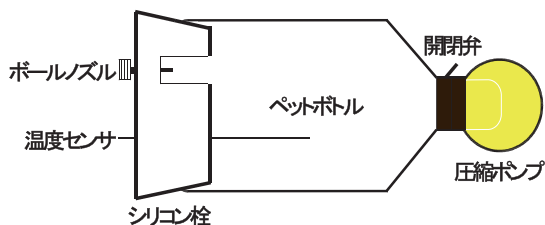


図3 ペットボトル実験器

2) 実験方法

ボールノズルにメーター付きアルミポンプ(LIXIL: EM-172VB; 以下、アルミポンプ)を繋ぎ空気を押し込み、ペットボトル実験器内(以下、実験容器内)の気圧が初期状態(写真1; 左)より3気圧高い4気圧まで空気を封入後、開閉弁を開けて瞬間的に空気を排出する(写真1; 右)一連の過程の温度を、0.1秒毎にマルチチャンネルレコーダー(T&D: MCR-4TC)で測定した。

3) 実験結果

前項の実験手順に従い、アルミポンプを用いて、実験容器内に空気を外部から押し込み、4気圧まで加圧封入後、開閉弁を開き瞬間的に空気を放出する一連の過程における実験容器内の温度を、0.1秒毎に35秒間計測し、その値を図4にプロットした。

その結果、加圧を開始したA点(23.4℃)から温度上昇が始まり、4気圧に達したB点(34.1℃)で最高温度になった。その後、開閉弁を開けて瞬間的に空気を放出したところ、一瞬実験容器内に霧状の水滴が発生すると同時に、温度はC点

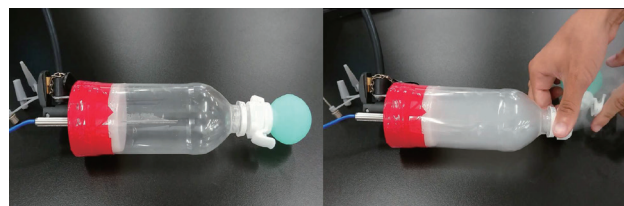


写真1 ペットボトル実験器による雲の発生実験

※左: 初期状態(1気圧), 右: 開閉弁を開けた瞬間

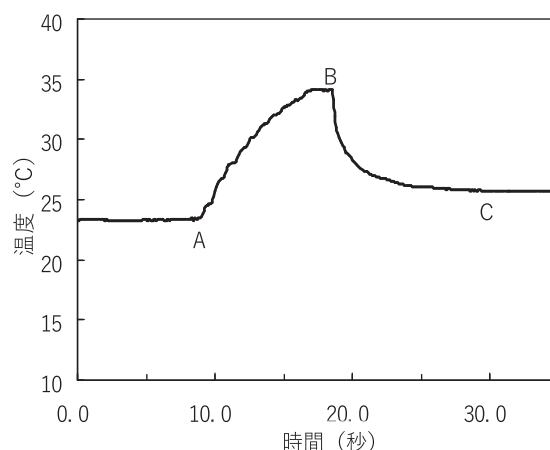


図4 実験容器内の温度

(25.7℃)まで低下し、ほぼ一定温度になった。この値は、予測値とは異なった。

4) 考察

予測値と実測値が異なるのは、予測値は熱損失率は考慮したが、単に断熱圧縮と断熱膨張が連続して起こることを想定したものであり、実験容器内の水蒸気の影響(空気中の水蒸気が凝縮して霧状の水滴が発生する)については全く想定していないためである。

実験では、空気封入に伴い空気中の水蒸気も封入される。これと並行して加圧による断熱圧縮に伴う温度上昇が生じる。実験容器内の気圧が4気圧に達した瞬間、空気放出による断熱膨張に伴う温度低下が起こると同時に、水蒸気の一部が凝縮して水滴になる。水蒸気が水滴に変化する際の凝縮熱は、断熱膨張に伴う温度低下を軽減する。このため、実際に測定された温度変化は予測値と異なる結果になったと考えられる(図5)。

測定値は、上昇温度10.7℃、下降温度8.4℃となり、IV.1.(2)項の予測値と上昇温度は一致したが、下降温度は一致せず、予測値より9.5℃高かった。

この温度差が容器内の水蒸気の凝結に伴う凝縮熱の発生にあると仮定し、500 mlペットボトル内

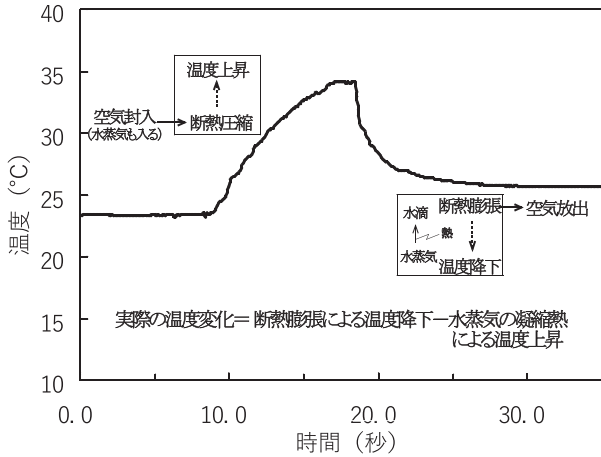


図5 予測値と実測値が異なる理由

で凝結した水蒸気量 x [g] を計算したところ、約 0.014 g の水蒸気が凝結したことが分かった(図6)。

水の凝縮熱は2442J/gであり、 x [g]の水蒸気が水に凝結する際に発生する熱量は2442 x [J]である。発生熱は、水滴とペットボトル容器、ペットボトル内の空気、シリコン栓の表層部¹⁾の温度を上昇させる。軽減された温度を9.5℃、水の比熱を4.2J/(g・K)、ペットボトル容器の比熱を1.1J/(g・K)、湿度100%の空気の比熱を1.0J/(g・K)、4気圧、20℃の空気密度²⁾を 4.8×10^{-3} g/cm³、シリコン栓の比熱を1.3J/(g・K)とすると、凝結した水蒸気量 x [g]は、水の凝縮熱による熱量と、容器(ペットボトル及びシリコン栓の表層部)及び容器内の物質(水滴・空気)が得た熱量の合計とが等しいことを利用して計算できる(⑬式)。

$$2442x = 9.5 \times \{4.2 \times 0.01 + 1.1 \times 0.1 + (1.0 \times 4.8 \times 10^{-3}) \times 500 + 1.3 \times 0.81\} \quad \text{⑬}$$

$$2442x = 9.5 \times 3.6 \quad x = 0.014\text{g}$$

このため、ペットボトル内では0.014gの水蒸気が凝結して水滴に変化したことになる。

図6 ペットボトル内で凝結した水蒸気量

気温34.1℃の飽和水蒸気量は37.8 g/m³、気温25.7℃の飽和水蒸気量は24.0 g/m³である。仮に両者の飽和水蒸気量の差13.8 gが1 m³の容器で析出するなら、500 mlのペットボトルでは0.0068 gの水蒸気が凝結することになる。ペットボトル実験器では、1気圧から4気圧まで3倍量の空気を封入圧縮したことを考慮し、析出量を3倍とすると最大で0.021 gの水蒸気が析出するため、0.014 gは妥当な値といえる。このことから、水蒸気の凝結に伴う凝縮熱により気温低下が軽減されたと生徒

に説明できる。

しかし、ペットボトル実験器を用いた加圧・減圧実験は、雲の発生原理の一つである断熱変化での気圧変化に伴う温度変化については説明できるが、ここで行う容器内に空気を押し込む操作や空気を抜く操作は、上昇気流との関連性は薄い。そのため、空気の膨張と上昇気流とを関係付ける実験教材が必要である。

2. 上昇気流に伴う雲の発生を提示する教材

ペットボトル実験器による気圧変化に伴う温度低下、そして雲の発生を自然界で見られる上昇気流を関係付けるためには、容器内から空気を外部に排出するのではなく、容器の体積を拡げて空気を膨張させる必要がある。

(1) 丸底フラスコを用いた実験装置

Ⅲ. 2項で説明したとおり、空気を外部に排出せず容器の体積を拡げて空気を膨張させることのできる教材として、フラスコ実験、水槽実験、ペットボトル実験が存在する。しかし、水槽実験は空気漏れの心配がある上、ペットボトル実験は減圧率が小さく、共に雲の発生を容易に目視確認できない。平成4年以前の東京書籍株式会社の中学校理科教科書³⁾に掲載されていたフラスコ実験は、空気漏れはないが、棒温度計を利用していたため、瞬時に温度計測できなかった。しかし、デジタル温度計の普及で0.1秒毎の温度計測が可能となったことから、フラスコに取り付けた大型注射器を用いてフラスコ内の気圧を変化させたときの温度を、比較的短時間に測定できる。そこで、この長所を活かした実験装置(以下、改良フラスコ実験器)を製作することにした(図7、写真2)。

改良フラスコ実験器は、乾燥させた丸底フラスコ(300 ml)に、温度センサ(T&D:SK-2-1.0-U)とガラス管(NaRiKa:外径4 mm)を取り付けたシリコン栓(アズワン:No.8)をはめ込み、温度センサにマルチチャンネルレコーダー(T&D:

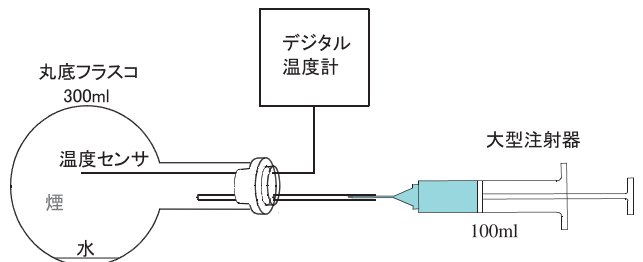


図7 改良フラスコ実験器

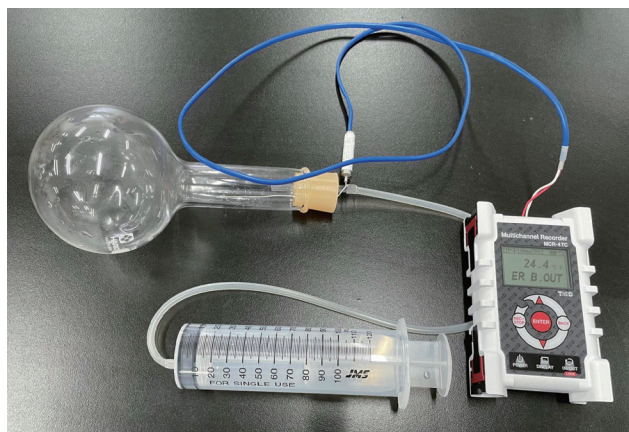


写真2 改良フラスコ実験器

MCR-4TC) を, ガラス管に大型注射器 (JMS : JMS シリンジ 100 ml, 横口) をそれぞれ接続した装置である.

大型注射器のピストンを所定の体積⁴⁾ (20 ml, 40 ml, 60 ml, 80 ml, 100 ml, 120 ml) 引くことで, フラスコ内の気体は, 所定の気圧 (0.94 atm, 0.88 atm, 0.83 atm, 0.79 atm, 0.75 atm, 0.71 atm)⁵⁾ に減圧される. 減圧時のフラスコ内の温度をマルチチャンネルレコーダーで0.1秒ごとに測定する. 同時に, フラスコ内に発生する雲を目視確認する.

(2) 実験方法

1) 乾いた空気の減圧に伴う温度変化

空気だけを入れたフラスコ A と空気と線香の煙を入れたフラスコ B を用意し, それぞれ改良フラスコ実験器を組み立てた. 次に, 大型注射器のピストンを引き, 所定の気圧 (0.94 atm, 0.88 atm, 0.83 atm, 0.79 atm, 0.75 atm, 0.71 atm) に減圧し, フラスコ内の温度を測定した. その結果, 減圧に伴い温度は低下し, ほぼ同じ軌道を通ったが, 減圧に伴う雲の発生は目視確認できなかった (図 8 ; フラスコ A : \triangle , フラスコ B : \blacktriangle).

2) 湿った空気の減圧に伴う温度変化

蒸留水 1 ml を入れて壁を水で濡らしたフラスコ C, 蒸留水を入れ壁を水で濡らした後線香の煙を入れたフラスコ D を用意し, それぞれ改良フラスコ実験器を組み立てた. 次に, 大型注射器のピストンを引き, 所定の気圧 (0.94 atm, 0.88 atm, 0.83 atm, 0.79 atm, 0.75 atm, 0.71 atm) に減圧し, フラスコ内の温度を測定した. その結果, 減圧に伴い温度は低下した (図 8 ; フラスコ C : \circ , フラスコ D : \bullet). フラスコ C の減圧に伴う

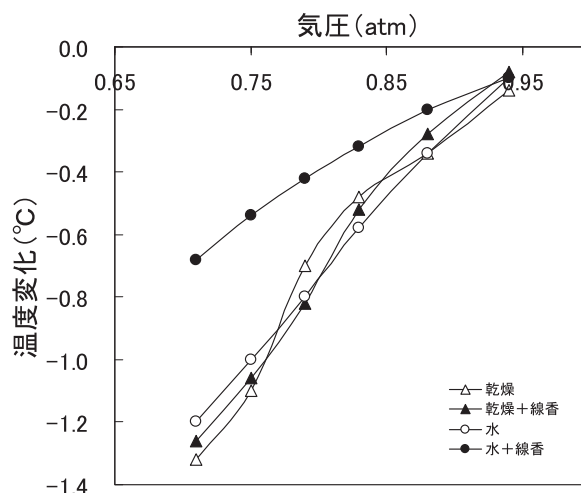


図8 改良フラスコ実験における減圧に伴う温度低下

※温度変化: 初めの温度から変化した温度

温度変化は, フラスコ A, B と類似したが, フラスコ D の温度変化は, 他のフラスコと比べて小さかった. また, 減圧に伴う雲の発生は, フラスコ D では全ての減圧段階で目視確認できた (写真 3) が, フラスコ C では目視確認できなかった.

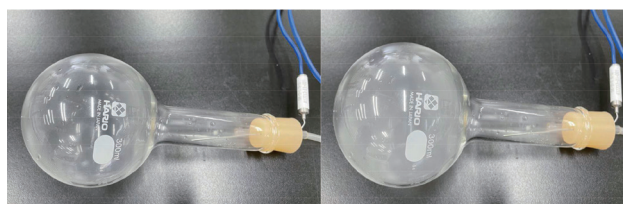


写真3 改良フラスコ実験器による雲の発生実験

※左: 大型注射器のピストンを引く前の状態

右: 大型注射器のピストンを 100 ml まで引いた状態

丸底フラスコ内の気圧 (0.94 atm, 0.88 atm, 0.83 atm, 0.79 atm, 0.75 atm, 0.71 atm) を, 高等学校「地学」教科書 (磯崎・江里口ほか, 2013) の「高度が 16 km 高くなると気圧が 1/10 になる」との記述⁶⁾ に基づき, 計算すると表 4 のようになる. 最も低い気圧 0.66 atm でも, 高度に換算すると 2900 m で, 富士山 (標高 3776.12 m) には及ばない.

表4 フラスコ内気圧に対応する高度

気圧 (atm)	0.94	0.88	0.83	0.79	0.75	0.71
高度 (m)	430	880	1290	1640	1990	2370

※地上気圧 1.0 atm, 地上気温 25°C

東京都で有名な高尾山山頂の標高は 599 m, 気圧に換算すると約 0.92 atm になる. 上昇気流で一

気に山頂付近まで吹き上がると、この標高（気圧）でさえも条件さえ揃えば、改良フラスコ実験（フラスコD）同様に雲が発生する可能性がある。具体例を示して雲の発生原理を生徒に説明することができる。

これらのことから、適度な湿度と凝結核が存在する気体は、上昇気流により上空に持ち上げられると、空気膨張により温度低下が起こり、それほど高い高度でなくとも、雲が発生することが明らかとなった。

(3) 改良フラスコ実験器を用いる教育的意義

改良フラスコ実験器を用いた実験結果から、以下の3点が明らかになった。

- 1) 大型注射器で容器全体の体積を拡げて、空気を膨張させると温度は低下した。
- 2) 凝結核（煙）が存在すると水蒸気は水滴に凝縮した。
- 3) 水蒸気が凝縮すると、凝縮熱の発生により温度低下が軽減された。

IV.1 (3)項のペットボトル実験器による雲の発生実験は、自然界では到底起こりえない極端な事例である。しかし、改良フラスコ実験は、自然界で起こる程度の空気膨張（上昇気流）によって雲が発生し、水蒸気の凝縮に伴う凝縮熱の存在も確認できる。

以上のことから、改良フラスコ実験器とペットボトル実験器を併用することで、雲の発生原理を実験を通して生徒に説明することができる。

3. 雲の発生原理の理解を深める3ステップ実験

雲の発生過程は、上昇気流→空気膨張→気圧低下→温度低下→露点→凝結核での凝縮→凝縮熱の発生と、連続して複数の現象が比較的短時間に起こる変化である。実験室で再現する雲の発生実験は、自然界の現象よりも更に短時間に起こる一瞬の変化であり、複数の現象がほぼ同時進行する。このため、一つの実験で説明したり、理解させることが困難であることは言うまでもない。また、上述のとおり、断熱膨張に伴う温度低下、水蒸気の凝縮に伴う凝縮熱の発生など、雲の発生原理と直結する事項は、中学校理科の学習範囲を超えるため通常扱わない。そのため、雲の発生原理については、上昇気流→空気膨張→温度低下→露点→凝縮→雲の発生と簡略的な説明によりなされており、生徒の抱く、「①なぜ気体は膨張すると温度が下がるのか、②雲ができると温度は低下するの

か、③どのくらいの高さに上昇すると雲ができるのか」といった素朴な疑問に答えられる実験や授業は行われていない。

本研究では、生徒の素朴な疑問に応え、深い理解を得るために、雲の発生原理を、1) 空気の膨張収縮と温度変化（改良フラスコ実験器）、2) 急激な圧力変化に伴う温度変化と雲の発生（ペットボトル実験器）、3) 上昇気流に見られる僅かな圧力変化に伴う温度変化と雲の発生（改良フラスコ実験器）の3つ要因に分け、3ステップで実験を通して学び、自然事象と気圧変化や温度変化の関係を結び付ける授業を提案するものである。

以下において、中学校理科において、本研究で開発した実験教材を用いた授業が、生徒の雲の発生原理に関する理解を深めることができるか検証する。

V. 検証授業

1. 調査対象学級と調査時期

長野県の公立中学校2年生1学級（対象学級：男子18名、女子16名、計34名）を調査対象に、令和3年9月上旬に調査校の理科教員が、検証授業（以下、授業）を行い、筆者の内1名は授業補助を担当した。授業は、単元「天気とその変化」の中の小単元「雲のでき方と前線」（全4時間扱い中の1時間目）の中で行い、「気圧の変化に伴う温度変化を調べる活動を通して、雲の発生原理を理解する。」をねらいとした（表5）

2. 調査及び検証方法

(1) 使用した検証用ソフトウェア

本研究で使用した検証用ソフトウェアは、クエード検定はエクセル統計（柳井、2018）を、 χ^2 検定はjs-STARX Rrelease1.1.3j（田中・中野、1998）を用いた。なお、期待度数に5以下のものがある場合、 χ^2 検定できないとの制約がある（山上・倉智、2018）。本研究では、この制約を確認した上で検定を行った。

(2) 知識確認テストによる理解状況調査

調査対象生徒（以下、生徒）の雲の発生原理に関する知識・理解を探るため、教科書⁷⁾に記載されている文章をそのまま用いた穴埋め式の知識確認テスト（10分間、一問10点、計100点、図9）を作成し、授業前（令和3年7月下旬）と授業後（令和3年8月下旬）、授業2ヶ月後（令和4年10月下旬）に実施した。

表5 検証授業計画

	学習内容
導入	<p>1. 前時の復習 ※気温が露点以下に下がると、空気中の水蒸気が飽和状態になり、水滴が出てくる。 ○学習カード1を配布する。 学習問題：「雲はどうやってできるのか？」</p> <p>2. 「温度が下がれば、水蒸気が露点に達して、雲ができるのなら、冷蔵庫の中には雲が一杯あるはず」との問いかけから、雲ができる条件について話し合い、予想を立てる。 ※気圧（圧力）が下がれば温度は下がるのか。</p>
展開	<p>3. 圧力と温度の関係を考える 改良フラスコ実験器を用いた生徒実験</p> <p>1) 空気が入っていない大型注射器を丸底フラスコに繋ぎ、ピストンを引き温度を測る。 2) 空気を100 ml入れた大型注射器を丸底フラスコに繋ぎ、ピストンを押し込み温度を測る。 ※圧力が高くなると温度は高くなり、低くなると温度は低くなった。でも雲はできなかった。 4. もっと圧力変化が大きければ雲はできるのか？ ペットボトル実験器を用いた演示実験 1 気圧→4 気圧→1 気圧へ、圧力を変化させる。 ※雲はできたが、水蒸気が水滴になるときに熱が出るため、始めの温度よりも高くなった。 5. 自然界には気圧を大きく下げる場面はあるのか 山を昇る空気、上昇気流など ※自然界の変化では3気圧の気圧差はできない。 僅かな気圧差でも雲ができるのか考えさせる。 ○学習カード2を配布する。</p> <p>6. 水と煙を入れて再挑戦 ※改良フラスコ実験器 フラスコに水と煙を入れて、ピストンを引き、温度変化と雲の生成を調べる。 3) 水で濡らした丸底フラスコで実験 4) 水で濡らした丸底フラスコに煙を入れて実験 ※圧力と温度変化の関係をプロットさせる。 ※雲ができる時には、熱が発生するため温度があまり下がらないことをグラフから読み取る。 ※雲ができたフラスコの温度は下がりにくかったから、フラスコ内の雲は水蒸気が凝縮した水滴が漂っている雲である。</p>
まとめ	<p>7. 授業で分かったことを学習カードにまとめる。 ※雲は、上昇気流などで気圧が急に下がり、温度が低下し、水蒸気が露点になって出てきたもの。 ※自然界の気圧変化でも雲はできる。 ○最後に学習カード1・2を回収する。</p>

※教員のつぶやきや指導内容 ○教員の動き

(3) 学習カードによる理解状況及び教材の好感度調査

生徒の学習理解状況及び教材に対する好感度を探るため、授業で使用する学習カードの最後に、理解状況及び教材に対する好感度を探る質問を設定した。本研究で行った質問調査は、5段階の評

□の中に適切な言葉や数字を入れなさい。

- 空気を冷やしていくと、空気に含まれている水蒸気の一部が□①□に変わる。これを□②□といい、空気に含まれる水蒸気が□②□し始める温度を□③□という。
- 一定量の水に溶けることのできる物質の質量に限界があるように、空気を含むことのできる水蒸気量にも限界がある。1 m³の空気を含むことのできる水蒸気の最大質量を□④□という。□④□を超える水蒸気は、気体として空気中に留まることができないので、液体の□①□となって出てくる。
- 気温が20℃の時の□④□は17.3g/m³である。このとき空気1 m³に含まれている水蒸気の質量が9.4gであるとき、湿度は□⑤□%である。
- 容器内の気圧が下がると、□⑥□も下がる。□③□まで温度が下がると、空気中に含みきれなくなった水蒸気が□①□として出てくる。
- 空気が暖められたり、山の斜面にぶつかり、水蒸気を含む空気のかたまりが□⑦□すると、上空の気圧が低いと□⑧□して□⑥□が下がる。□③□よりも低くなると、空気中含みきれなくなった水蒸気は□①□になる。さらに、□⑥□が低くなると□⑨□の粒になり、□①□や□⑨□の粒が集まって□⑩□ができる。

図9 知識確認テスト

解答例：①水滴、②凝縮、③露点、④飽和水蒸気量、⑤54、⑥温度（気温）、⑦上昇、⑧膨張、⑨氷、⑩雲

定尺度や自由記述で回答させるものである。生徒には、どれも選択できない場合は、その理由を自由に記述することを伝えたが、そのような生徒はいなかった。

(4) 調査結果の分析方法

- 生徒の雲の発生原理に関する知識及び理解状況は、学習カードに設定した質問の回答内容、授業前（以下、前テスト）・授業後（以下、後テスト）・授業2ヶ月後（以下、定着テスト）に行った知識確認テストを基に検討した。
- 生徒の教材に対する好感度は、学習カードに設定した質問の回答内容を基に検討した。
- 調査結果は、筆者の内3名が別々に評価し、合意の下にまとめた。5段階の評定尺度による回答は同じ尺度にまとめた度数集計表を作成した。理由及び自由記述については、類似する言葉を抽出し、類似する意味の言葉（以

下, ラベル) に分けた分割表を作成した. 筆者3名が評価結果を持ち寄り確認した結果, 合致率は96.5%であった. 一致しなかった項目については話し合いにより決めた.

(5) 授業の実際

授業は, 理科室で4人1組の8班(2つの班は5名)で行った. 夏休み明け最初の授業のため, 前時の復習を教科書を見ながら行った後, 学習カード1を配布した.

次に, 教員は, 学習問題「雲はどうやってできるのか?」と黒板に板書した. 生徒からは, 「温度が下がって露点になり水蒸気が水滴になってできる.」という声も出されたが, 教員は「温度が下がると雲ができるなら, 冷蔵庫の中には雲が一杯できているはずですね.」と切り返した. 生徒と教員の言葉のやり取りの中で, 「温度だけが原因なのか」と「暖かい赤道付近でどうやって雲ができるのか」という二つの疑問に話しが集約した. 教員は黒板に, 二つの疑問点を書きながら, 「今日はこのことをみんなで考えていきましょう.」とまとめた.

次に, 教員は改良フラスコ実験器を提示し, 実験装置の説明をしながら, 「空気が膨張・収縮すれば温度が変わるのか」確かめてみましょうと話した.

生徒は, 班毎に用意された改良フラスコ実験器を使い, 膨張時と収縮時の温度を測定した. その結果, 膨張・圧縮すると圧力が変化して温度も変わることを知り, 生徒からは「冷蔵庫がなくても, 空気が膨張して圧力が下がれば温度が下がるから雲ができる.」という声が聞かれた.

そこで, 教員が「でも, フラスコの中に雲はできなかつたよね.」と話すと, 生徒からは「もっと激しく圧力を下げればできる.」, 「ちょっとの温度変化では, 露点にならない.」などの意見が出された. そこで, 教員はペットボトル実験器を持ち出し, 「皆さんの要望に応えるために, 圧力を大きく変化させる実験をします. 前に集まってください.」と話し, 教卓でペットボトル実験器を使った演示実験を行った. 実験後に, 生徒からは「雲ができた.」, 「やっぱり, 激しく気圧が下がらないといけない.」などの声が出された. 教員は, 温度変化のグラフ(図4)を示して, 「始めの状態よりも, 雲ができたときの温度は下がらないけど, これは水蒸気が凝縮するときに熱が出

るからです.」との説明を加えた.

生徒が班の机に戻った後, 教員から, 「皆さんに質問ですが, 3気圧も変化するようなことって自然界にありますか?」と質問した. 生徒からは, 「上昇気流」「山に風がぶつかる時」などの意見が出されたが, 「宇宙まで行っても0気圧になるだけ, 1気圧から0気圧なので, 1気圧しか下がらない.」との意見も出され, 結局大きく気圧が低下する現象が現実的ではないことに気付いた.

ここで, 教員は学習カード2を配布し, 「皆さんは, 気圧を大きく下げる方法ばかりに目が向いているけど, 上昇気流のように少しだけ気圧が下がるだけでも, 雲ができるって知っていますか?」と話し, 改良フラスコ実験器の中に煙や水を入れることを提案した.

生徒は, 教員の指示で, 水で濡らして減圧したときの温度測定と雲の発生状況確認, さらに線香の煙を入れて減圧したときの温度測定と雲の発生状況確認を行い, グラフ用紙に圧力と温度変化の関係をプロットした. 僅かな気圧の変化や温度変化で雲が発生する事実を確認した生徒からは, 感動の声が聞かれた(図10).

最後に, 学習ノートに, 授業で分かったことや教材についての質問に答えるようにとの教員の指示で, 生徒は学習カードの問いに答えていた. 約5分後に, 学習カードを回収し, 教員の「次の時間に, 今日の学習のまとめをします.」との声だけで授業は終了した.

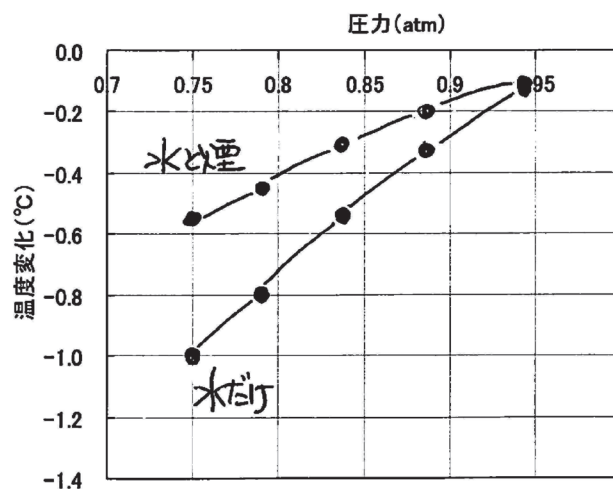


図10 生徒が描いたグラフ

VI. 結果と考察

1. 生徒の雲の発生原理に関する知識及び理解状況

(1) 学習カードによる調査結果

生徒の雲の発生原理に関する理解状況を探るため、学習カードに、「授業内容は理解できましたか？」(5択, 自由記述)と「授業で分かったことをまとめてみましょう。」(自由記述)の設問を設けた。

「授業内容は理解できましたか？」の設問について、回答結果を5段階の評定尺度で表6にまとめた。生徒の授業内容の理解傾向を探るため、1要因(調査学級)×5要因(できた・少しはできた・どちらともいえない・余りできない・できない)について χ^2 検定を行った結果、1%水準で有意な差が見られた($\chi^2_{(4)}=35.706$)。ライアンの名義水準を用いた多重比較の結果、「できた」, 「少しはできた」は他項目と比べて多く、有意な差が見られた(「できた」>「余りできない」&「できない」: $p=0.0008$, 「少しはできた」>「どちらともいえない」: $p=0.0088$, 「少しはできた」>「余りできない」&「できない」: $p<0.0002$)。

表6 授業内容が理解できたか否か(自己評価)

授業内容は理解できたか？					
評定尺度	できた	少しはできた	どちらともいえない	余りできない	できない
調査学級	13	17	4	0	0

※ $n=34$, 単位(人)

次に、「授業で分かったことをまとめてみましょう。」の設問について、回答欄の自由記述を雲の発生原理の視点で評価・抽出し、5項目(圧力と温度・露点・膨張・水と煙・熱)のラベルに分類し、回答数を表7にまとめた。過半数の生徒が、「圧力と温度」, 「露点」, 「膨張」のラベルに関する記述をしていた。

表8は、生徒が学習カードの設問に対して、回答記述したラベルの数をまとめたものである。その結果、5つの全ラベルに該当する内容を記入した生徒や全く記入しなかった生徒はいなかった。最も多かったのは、3種類のラベルに該当する内容を記述した生徒だった。

これらのことから、学習内容を理解できなかった生徒はいないと推察される。

表7 学習カードの記述例とラベル, 回答者数

ラベル	記述例	回答数
圧力と温度	<ul style="list-style-type: none"> ・圧力が下がると温度も下がる ・圧力が上がると温度も上がる ・圧力と温度は関係する. ・圧力と温度が連携している ・雲は気圧の変化が始めに起こって、<u>気温</u>が変化して起こる 	24
露点	<ul style="list-style-type: none"> ・空気の温度が下がり、<u>露点</u>になると凝縮して雲ができる ・気温が下がり<u>露点</u>になり水滴が出てきて雲になる. ・気温が<u>露点</u>以下になるから雲ができる. 	23
膨張	<ul style="list-style-type: none"> ・地球上では上昇気流で空気が<u>膨張</u>して雲ができる. ・上昇気流で空気が<u>膨張</u>して温度が下がって雲ができる. ・雲ができるためには、空気が<u>膨張</u>する上昇気流が必要. 	21
水と煙	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>水と煙</u>は、水蒸気が水滴になるために必要なもの. ・<u>水と煙</u>が入っていると、少しの温度低下でも雲ができる. ・<u>煙</u>があると、そこに水滴がついて雲ができる. 	15
熱	<ul style="list-style-type: none"> ・雲ができるときには<u>熱</u>が出る ・水蒸気が水滴になるときは<u>発熱</u>する. ・雲ができるときは、始めの温度よりも<u>温度</u>は高くなる. 	9

※ $n=34$, 単位(人), 複数回答

表8 生徒が記述したラベルの数

記入ラベル数	5	4	3	2	1	0
生徒数	0	3	19	11	1	0

※ $n=34$, 単位(人), 複数回答

(2) 知識確認テストによる調査結果

生徒の雲の発生原理に関する理解状況を探るため行った知識確認テスト(前テスト・後テスト・定着テスト)の問題別誤答者数を表9にまとめた。なお、単元で水蒸気は、小単元「水蒸気の変化と湿度」を示し、雲は小単元「雲の作り方」を示す。

過半数の生徒が間違えた問題枠を色付けしたが、色付け箇所は前テストだけで、後テストや定着テストにはなかった。前テストは、小単元「水蒸気の変化と湿度」を終えたばかりの段階で行い、小単元「雲の作り方」には入っていない。このため、生徒の雲の発生原理に関する問題の正答率が低いのは想定範囲内である。

表9 各テスト各問題の誤答者数

単元	問	解答例	前テスト	後テスト	定着テスト
水蒸気	①	水滴	5	1	1
	②	凝縮(凝結)	9	2	1
	③	露点	6	1	2
	④	飽和水蒸気量	3	1	1
	⑤	54	9	1	2
雲	⑥	温度(気温)	28	0	0
	⑦	上昇	32	1	0
	⑧	膨張	33	1	1
	⑨	氷	33	1	1
	⑩	雲	32	0	0

※ $n = 34$, 単位(人)

表10は、3回行った知識確認テストの平均点と標準偏差をまとめたものである。前テストの平均点は、後テスト・定着テストと比べて低く、後テストと定着テストの平均点は近似した。各テスト点に差があるか危険率1%で検定(キュード検定)⁸⁾した結果、帰無仮説(実施時期に差はない)は棄却され、前テストと後テスト・定着テストの間に有意な差があると考えられた($p = 4.32 \times 10^{-22}$)。

表10 知識確認テストの平均点と標準偏差

	前テスト	後テスト	定着テスト
平均点	44.1	97.4	97.4
標準偏差	21.16	13.57	12.20

※ $n = 34$, 100点満点

授業前の生徒は、雲の発生原理に関する知識はなかったが、授業後の生徒は、空気の膨張と温度変化、気圧変化と温度変化、露点と凝縮などに関連させて、雲の発生原理に関する内容を正しく理解していた。また、その理解は2ヶ月後も継続していた。

これらのことから、生徒は授業を通して、雲の発生原理に関する正しい知識を獲得したと推察される。

2. 生徒の教材に対する好感度

生徒の使用教材に対する好感度を探るため、授業時に使用した学習カードに「教材は役に立ちましたか?」(5択, 自由記述)の設問を設け、5択の回答結果を5段階の評定尺度で表11にまとめた。1要因(調査学級)×5要因(役立った・少しは役立った・どちらともいえない・余り役立たない・

役立たない)について χ^2 検定を行った結果、1%水準で有意な差が見られた($\chi^2_{(4)} = 31.588$)。ライアンの名義水準を用いた多重比較の結果、「役立った」、「少し役立った」は他項目と比べて多く、有意な差が見られた(「役立った」>「余り役立たない」&「役立たない」: $p = 0.0002$, 「少しは役に立つ」>「余り役に立たない」&「役立たない」: $p < 0.0006$)。

表11 教材は役に立ったか否か(自己評価)

教材は役に立ちましたか?					
評定尺度	役立った	少しは役立った	どちらともいえない	余り役立たない	役立たない
調査学級	15	14	5	0	0

※ $n = 34$, 単位(人)

回答欄の自由記述を役立つ理由を示す言葉という観点で評価・抽出し、教材の持つ特性に関する4項目(理解・発見・簡単・斬新)のラベルに分類し、回答数を表12にまとめた。その結果、多くの生徒が、「理解」と「発見」に関するラベル内容の記述をしていた。

これらのことから、生徒は分かりやすく、新たな発見のある教材に対して有用感をもっていると推察された。

表12 回答欄の記述例とラベル, 回答者数

ラベル	記述例	回答数
理解	・分かりやすい。 ・謎が解けた。 ・疑問が解けた。 ・してることが分かる。	21
発見	・発見があった。 ・考えたことができる。 ・かゆいところに手が届く。 ・細かな気付きがある。	14
簡単	・簡単な実験装置。 ・仕組みは簡単で内容が濃い。 ・身近なものを使っている。	6
斬新	・アイデアがよい。 ・よく考えられている。	2

※ $n = 34$, 単位(人), 複数回答

VII. まとめ

雲の発生原理を、空気の膨張収縮と温度変化、急激な圧力変化に伴う温度変化と雲の発生、上昇気流に見られる僅かな圧力変化に伴う温度変化と

雲の発生の3ステップに分けて実験することで、気圧変化や温度変化と雲の発生原理を結び付けることのできる教材を開発した。次に、中学校理科授業において、開発した実験教材が生徒の雲の発生原理に関する理解を深めるために有用であるか検証した結果、以下の2点が明らかとなった。

- 1) 授業前の生徒は、雲の発生原理に関する知識はなかったが、授業後には、空気の膨張と温度変化、気圧変化と温度変化、露点と凝縮などに関連させて、雲の発生原理を正しく理解していた。
- 2) 生徒は、分かりやすく、新たな発見があることを理由に、使用教材に対して有用感をもっていた。

以上のことから、本研究で開発した実験教材は、生徒が雲の発生原理を理解するために、有用な教材であることが示唆された。

謝辞

本研究を進めるに当たり、快く検証授業を引き受け頂いた公立中学校の校長、理科教員、調査学級生徒の皆様に感謝申し上げます。

註釈

- 1) シリコン樹脂の熱伝導率は0.15~0.17 W/(m・K)と小さいため、水蒸気の凝縮に伴う熱はシリコン栓の表層部の温度を変化させるだけと考えられる。そこで、シリコン栓表層の厚さ0.1 mm部分の質量を求め、温度変化の計算に用いた。

質量=体積×密度

$$= \pi \times (3.35\text{cm})^2 \times 0.01\text{cm} \times 2.3\text{g/cm}^3 = 0.81\text{g}$$

- 2) 気体の密度 ρ [kg/m³] は、状態方程式を用いて、平均分子量 M 、気圧 P と温度 T から求められる (⑭式)。

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad \text{⑭}$$

R を気体定数 (8.31 J/(K・mol)) とし、4 気圧 20℃ の空気の密度を求めると、

$$\rho = \frac{(4 \times 101325\text{Pa}) \times (28.8 \times 10^{-3}\text{kg/mol})}{8.31\text{J/(K}\cdot\text{mol)} \times (273 + 20\text{K})}$$

$$\rho = 4.8 \text{ kg/m}^3 = 4.8 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

となる。

- 3) III.2 項で述べたとおり、令和3年に発行された東京書籍株式会社以外の中学校理科教科書にはフラスコ実験が掲載されている。

- 4) 大型注射器は、容量100 mlの規格を使用した。補助目盛として120 mlまで記されているため、120 mlまで吸引した。
- 5) ボイルの法則より、初期気圧 P 、初期体積 V 、大型注射器のピストンを引き、膨張させたときの体積を V' とすると、膨張時の気圧は P' は⑮式により、求められる。

$$PV = P'V'$$

$$P' = \frac{PV}{V'} = \frac{1 \times 300}{V'} \quad \text{⑮}$$

例えば、ピストンを20 ml 引くと、体積は $V' = 320$ ml となり、容器内の気圧は $P' = 0.9375$ atm と計算できる。

- 6) 地上の気圧を P_0 [atm]、高度を h [km] とすると、

$$P = P_0 \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{h}{16}} \quad \text{⑯}$$

で高さ h [km] の気圧を求めることができる。

また、気圧の大きさ P [atm] から、高度 h [km] を求めることができる。

- 7) 調査対象校で使用している教科書は東京書籍株式会社の「新しい科学2」である(梶田・真行寺・永原・西原ほか, 2021)。
- 8) 関連のある多群(3つ以上)の差の検定では、各水準のデータが正規分布に従っていると見なせる場合は一元配置分散分析法を用いて検定するが、今回はデータの分布に正規分布からの偏りが見られたためクエード検定を用いた。クエード検定は、対応のある3つ以上の水準に対する帰無仮説「水準間に差はない」を検定している。

引用文献

- 有馬朗人ほか(2021).『理科の世界2』. 東京: 大日本図書株式会社, 263.
- 藤井隆・近角聰信・長倉三郎・江上信雄ほか(1981).『新しい科学2分野下』. 東京: 東京書籍株式会社, 27.
- 藤井隆・近角聰信・長倉三郎・江上信雄ほか(1984).『改訂新しい科学2分野下』. 東京: 東京書籍株式会社, 25.
- 蓮沼宏・藤井隆ほか(1979).『新編新しい科学2分野下』. 東京: 東京書籍株式会社, 19.
- 磯崎行雄・江里口良治(2013).『地学』. 東京: 株式会社新興出版社啓林館, 213.
- 伊藤英樹・山下修一(2015).「雲の発生について

- の大学生の認識調査」『日本科学教育学会年会論文集』第39巻, 406-407.
- 梶田隆章・真行寺千佳子・永原裕子・西原寛ほか (2021). 『新しい科学2』. 東京: 東京書籍株式会社, 192-193, 200.
- 勝田仁之 (2015). 「断熱膨張は『雲の発生』を説明できているのか?」『物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集』第32巻, 49-50.
- 茅誠司・服部静夫ほか (1968). 『新編新しい科学2年』. 東京: 東京書籍株式会社, 249.
- 茅誠司・服部静夫ほか (1977). 『新訂新しい科学2年』. 東京: 東京書籍株式会社, 253.
- 松井健治 (2002). 「雲の発生を簡単に確かめるための実験の工夫」『理科の教育』第51巻, 1号, 30-32.
- 三浦登ほか (2002). 『新しい科学2分野下』, 東京: 東京書籍株式会社, 13.
- 三浦登・岡村定矩ほか (2006). 『新編新しい科学2分野下』. 東京: 東京書籍株式会社, 9.
- 文部科学省 (2008). 『中学校学習指導要領解説理科編』. 東京: 大日本図書株式会社, 79-80.
- 文部科学省 (2018). 『中学校学習指導要領 (平成29年告示) 解説理科編』学校図書株式会社, 23, 92-95.
- 文部省 (1978). 『中学校指導書理科編』. 東京: 大日本図書株式会社, 92-94.
- 文部省 (1989). 『中学校指導書理科編』. 東京: 学校図書株式会社, 86-88.
- 文部省 (1999). 『中学校学習指導要領 (平成10年12月) 解説 - 理科編 -』. 東京: 大日本図書株式会社, 80.
- 室伏きみ子・養老孟司ほか (2021). 『自然の探求 中学理科2』. 東京: 教育出版株式会社, 183.
- 中川英貴 (2013). 「概念形成を促す観察, 実験の工夫: 簡易雲発生装置の作製をとおして」『日本理科教育学会九州支部大会発表論文集』第40巻, 16-17.
- 岡村定矩・藤嶋昭ほか (2012). 『新しい科学2』. 東京: 東京書籍株式会社, 231.
- 岡村定矩・藤嶋昭ほか (2016). 『新編新しい科学2』. 東京: 東京書籍株式会社, 167.
- 大矢禎一・鎌田正裕ほか (2021). 『未来へひろがるサイエンス2』. 東京: 株式会社新興出版社啓林館, 87-88.
- 霜田光一・森本信也ほか (2021). 『中学校科学2』. 東京: 学校図書株式会社, 238-240.
- 新編新しい科学編集委員会・東京書籍株式会社編集部 (2016). 『新編新しい科学2 教師用指導書指導展開編/観察・実験編』東京書籍株式会社, 268-269.
- 鈴木智恵子・来見誠二 (1995). 「断熱圧縮と断熱膨張の演示法」『日本理科教育学会全国大会要項』第45巻147.
- 近角聰信・長倉三郎・江上信雄・海野和三郎・水野丈夫ほか (1987). 『新編新しい科学2分野下』. 東京: 東京書籍株式会社, 23.
- 近角聰信・長倉三郎・江上信雄・海野和三郎・水野丈夫ほか (1990). 『新訂新しい科学2分野下』, 東京: 東京書籍株式会社, 23.
- 上田誠也・三浦登・水野丈夫・綿抜邦彦ほか (1993). 『新しい科学2分野下』. 東京: 東京書籍株式会社, 10.
- 上田誠也・三浦登・水野丈夫・綿抜邦彦ほか (1997). 『新編新しい科学2分野下』. 東京: 東京書籍株式会社, 11-13.
- 山上暁・倉智佐一編著 (2018). 『新版要説心理統計法』京都: (株) 北大路書房, 120-123.
- 山根津貴子・山川亮 (2009). 「断熱膨張と温度変化 - 中学校: 雲の発生の実験 -」『物理教育』第57巻, 3号 231-232.

付録

検証授業で使用した学習カード

学習カード1

雲のでき方を調べよう

番号 _____ 氏名 _____

1. 目的

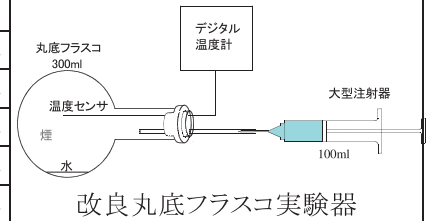
雲が発生する原因を, 実験を通して調べる.

2. 予想 「温度が下がれば, 水蒸気が露点に達して, 雲ができるのなら, 冷蔵庫の中には雲が一杯あるはず. でも, 冷蔵庫では雲はできない. 雲ができる条件とは何でしょう. 予想を書きなさい. 」

3. 空気は, 膨張・圧縮すると温度は変わるのか?

- 1) 空気が入っていない大型注射器を丸底フラスコに繋ぎ, ピストンを引いて(膨張させて)温度を測る.
- 2) 空気を100ml 入れた大型注射器を丸底フラスコに繋ぎ, ピストンを押して(圧縮して)温度を測る.

1) 膨張させると温度はどうなるか?			2) 圧縮すると温度はどうなるか?		
ピストンを引く量	圧力	温度	ピストンを押す量	圧力	温度
0ml	1.0atm	℃	0ml	1.0atm	℃
-20ml	0.94atm	℃	+20ml	1.07atm	℃
-40ml	0.88atm	℃	+40ml	1.13atm	℃
-60ml	0.83atm	℃	+60ml	1.20atm	℃
-80ml	0.79atm	℃	+80ml	1.27atm	℃
-100ml	0.71atm	℃	+100ml	1.33atm	℃



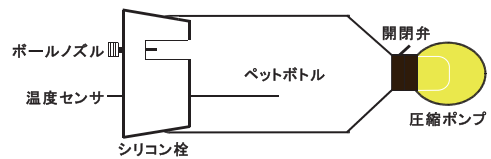
<分かったこと>

4. 演示実験「もっと圧力変化が大きければ雲はできるのか?」

- 1) 始めは1気圧, 空気を押し込んで4気圧まで上げる.
- 2) 4気圧になったら栓を開けて, 気圧を1気圧まで下げる.
- 3) 温度はどのように変化し, 雲はできるか.

操作	圧力	温度
始めの状態	1.0atm	℃
空気を押し込んだ状態	4.0atm	℃
空気を出した状態	1.0atm	℃

※始めの温度と最後の温度を比べてみよう.



<分かったこと>

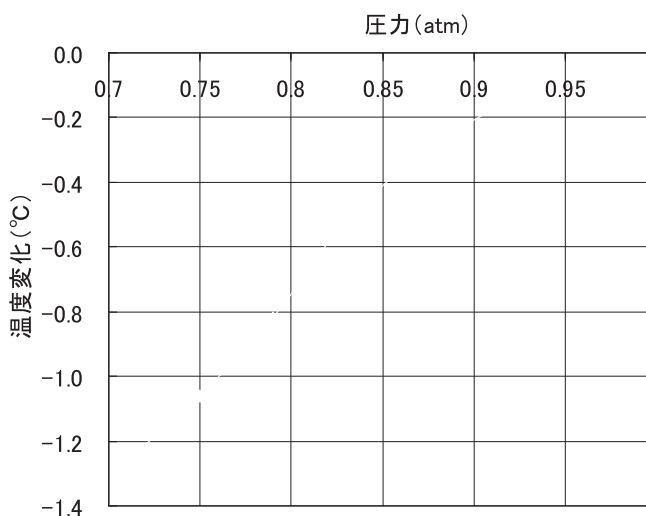
5. 自然界に, 空気が膨張して, 圧力(気圧)が大きくなる場面はあるか?

少しだけ, 気圧が下がっただけでも雲ができるのだろうか?

学習カード2

6. 水と煙を入れて再挑戦 ※改良フラスコ実験器を使う。 ※温度変化は、はじめの温度から変化した温度

ピストン	フラスコ	水だけ入れる		水と煙を入れる	
引く量	圧力	温度	雲発生	温度	雲発生
0ml	1.0atm	℃		℃	
20ml	0.94atm	℃		℃	
40ml	0.88atm	℃		℃	
60ml	0.83atm	℃		℃	
80ml	0.79atm	℃		℃	
100ml	0.71atm	℃		℃	

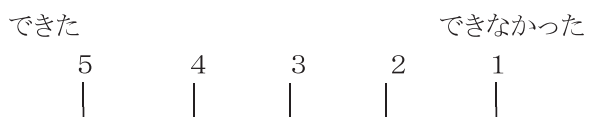


圧力と温度変化の関係を確認しましょう。

<分かったこと>

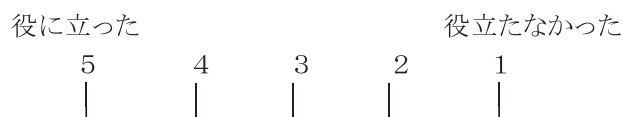
7. 授業で分かったことをまとめてみよう

8. 授業内容は理解できましたか？



<その理由>

9. 教材は役に立ちましたか？



<その理由>

番号 _____ 氏名 _____

