

温帯低気圧周辺の雲分布の特徴についての教授法

岩崎博之

群馬大学教育実践研究 別刷

第34号 39～45頁 2017

群馬大学教育学部 附属学校教育臨床総合センター

温帯低気圧周辺の雲分布の特徴についての教授法

岩崎 博之

群馬大学教育学部理科教育講座

Educational method on features of cloud distribution associated with extratropical depressions

Hiroyuki IWASAKI

Faculty of Education, Gunma University

キーワード：温帯低気圧，雲分布，傾圧不安定

Keywords : extratropical depression, cloud distribution, baroclinic instability

(2016年10月31日受理)

1. はじめに

1) 中学理科における温帯低気圧の位置付け

春季や秋季には移動性高気圧と温帯低気圧が周期的に日本列島を通過し、日本の気象の多様性を作り出し、人々の日々の生活にも大きな影響を与えている。この移動性高気圧と温帯低気圧の構造やそれに伴う天気の変化について、中学2年で学習する。

中学校学習指導要領では、中学2年理科の「気象とその変化」の単元において、「前線の通過に伴う天気の変化の観測結果などに基づいて、その変化を暖気、寒気と関連付けてとらえ」、更に、日本周辺の大気の動きを「気象衛星画像」を利用することが定められている（文部科学省，2008a）。これを受けて、中学校学習指導要領解説理科編において「天気図や気象観測のデータなどから、高気圧、低気圧のまわりの風の吹き方に触れ」、さらに、「気象衛星画像や各種のデジタル教材などを積極的に活用して視覚的にとらえさせる」との記述があり（文部科学省，2008b）、それに対応して、各教科書においても、図1のように低気圧と高気圧周辺の地上風系とその収束・発散に対応した上昇気流と下降気流のモデル図が掲載されている。また、図2に

示すような静止気象衛星ひまわりの赤外画像（温度分布）と地上天気図を並べながら、前線と低気圧の移動のようすが掲載されている。

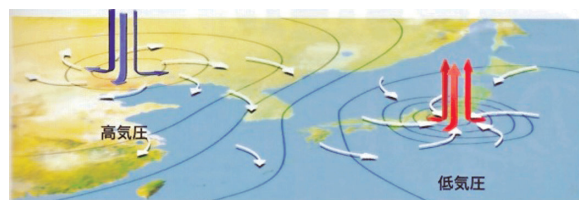


図1 高気圧と低気圧付近の風のふき方
(新しい科学 2年 p199より引用)

2) 中学理科教科書における問題点

図1に示す高気圧と低気圧付近の風のふき方に関するモデル図は、平成27年の教科書目録に登載された5種類の教科書（東京書籍・大日本図書・学校図書・教育出版・啓林館）の全てに掲載されている。その説明の方法やその後の展開も基本的には同じなので、ここでは、授業実践で用いた東京書籍の教科書（平成23年検定済）を例に話を進めて行く。この「気象とその変化」の単元では、図1の高気圧・低気圧の構造を学習する。更に、上昇気流に伴い空気が上昇すると、空気の温度は低下し、相対湿度が100%に達すると雲が形

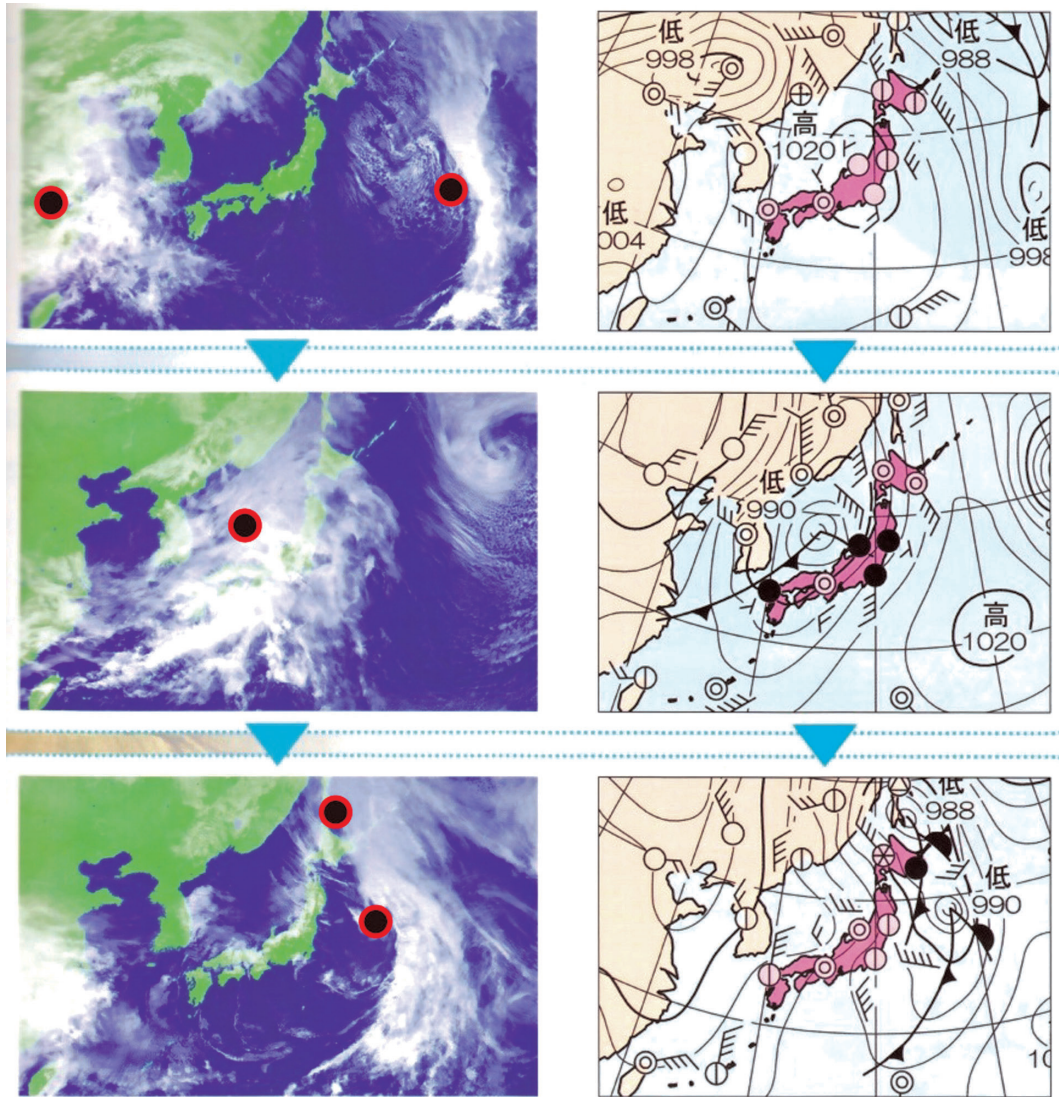


図2 2009年3月21日12時(上)と3月22日12時(中)と23日12時(下)の雲のようすと天気図(新しい科学 2年p201より引用). 雲分布(赤外画像)の○は温帯低気圧の中心の位置を示す.

成されることを学習する. この雲の発生と低気圧の構造を結びつけるために, 教科書では「低気圧の中心部では, 空気は上空に向かって移動し, 雲が発生することが多い」と説明している.

これを学習した生徒は, 温帯低気圧に伴う雲は, その中心で生じた上昇気流によって作られ, 温帯低気圧の中心と雲域の幾何学的中心が一致すると解釈することになる. また, このモデル図との因果関係は不明であるが, 著者が大学で担当する気象学の受講者(25-30名/年)のほとんどが, 同じように解釈している事実もある.

東京書籍の教科書では, 図1を用いた低気圧の構造を説明した頁に続いて, 1日毎の温帯低気圧に伴う雲分布と天気図を掲載している(図2). この2つを比較

すると, 地上天気図における温帯低気圧の中心(図2の○印)は, 雲分布の幾何学的中心とは一致せず, 温帯低気圧の中心の東側に雲域が分布する特徴が読み取れる. つまり, 図1とその説明から連想されるような温帯低気圧を中心に広がる雲域は一般的ではなく, 第2章で説明するように, その東側に雲域が広がること—雲分布の東西非対称—が一般的なのである. そのため, 教科書の図と説明を丁寧に読んだ生徒は矛盾を感じるに違いない. これは中学理科教科書における問題点の1つと言える.

3) 本研究の目的

温帯低気圧に伴う循環と雲分布の教科書の説明は, 前述したように, 丁寧に教科書を読んだ生徒に誤解が

生じる危険性がある。それを回避するための1つの方法として、「傾圧不安定」の原理を簡略化し、温帯低気圧周辺の気温分布と風分布の図を基に雲の生成メカニズムを説明する方法が考えられる。しかし、1991–2016年までの中学理科教科書では低気圧周辺の温度分布が掲載されたことはなく、また、この「傾圧不安定」に基づく教授法が試行されたという報告も見当たらない。そこで、本研究の第1の目的は、簡略化された傾圧不安定に基づき温帯低気圧周辺の雲分布が決まるメカニズムを説明する授業実践を行い、レポートの自由記述を基に生徒の理解度を確認し、教材としての可能性を考察することである。

また、理科の学習は現象や用語を暗記することに力点が置かれる傾向があり、特に地学分野ではその傾向が強く（例えば、長崎，2014；松森と一瀬，2015），そのため現象のメカニズムの理解に時間を掛けにくいのが現状であろう。そこで、授業実践においては、小学校4年の理科や前時の授業で学んだ「暖かい空気は上昇する」ことや中学1年での既習事項である「浮力」という概念を意識的に用いて、雲の形成に必要な上昇気流の成因を説明する。そして、温帯低気圧周辺の上昇気流や下降気流の成因を「浮力」などの用語を用いてレポートで説明できるか調べ、生徒の応用力の実態を確認することが第2の目的である。

2. 温帯低気圧に伴う雲分布の特徴

1) 温帯低気圧周辺の雲・気温・風分布の特徴

低気圧は周辺よりも気圧の低い大気擾乱であり、気温が水平方向に一樣な熱帯で発生・発達する熱帯低気圧と気温の南北傾度が大きな温帯で発生・発達する温帯低気圧とに分類される。温帯低気圧の本質は、南北の温度勾配に起因した偏西風波動（傾圧不安定波）であり（Charney, 1947; Eddy, 1949），南北の温度差が温帯低気圧のエネルギー源となっている。

この南北の温度勾配が温帯低気圧周辺の特徴的な雲分布を作り出し、その特徴は発達した温帯低気圧で明瞭になる。そこで、1999年10月27日20時に千葉県佐原アメダス（現在の香取アメダス）で1時間雨量153mm（日本歴代1位）の豪雨をもたらした温帯低気圧を例に、雲分布の特徴と南北の温度傾度との関係を概観する。図3aは、10月27日09時の気象衛星ひまわりの赤外画像であり、温帯低気圧に伴う雲分布を示している。この時間の温帯低気圧の中心（図中の×）は四国沖にあり、その東～北側に雲域が広がり、それに対して西側には雲が少なく、東西非対称な雲分布が認められる。図1の低気圧のモデル図から想像される雲分布とは異なり、図2に見られる雲分布の特徴に近いことが分かる。

温帯低気圧に伴う雲分布の東西非対称の原因は、図3bに示した850hPa面高層天気図（高度1500m付近の天気図に相当）の気温分布と風分布から説明できる。

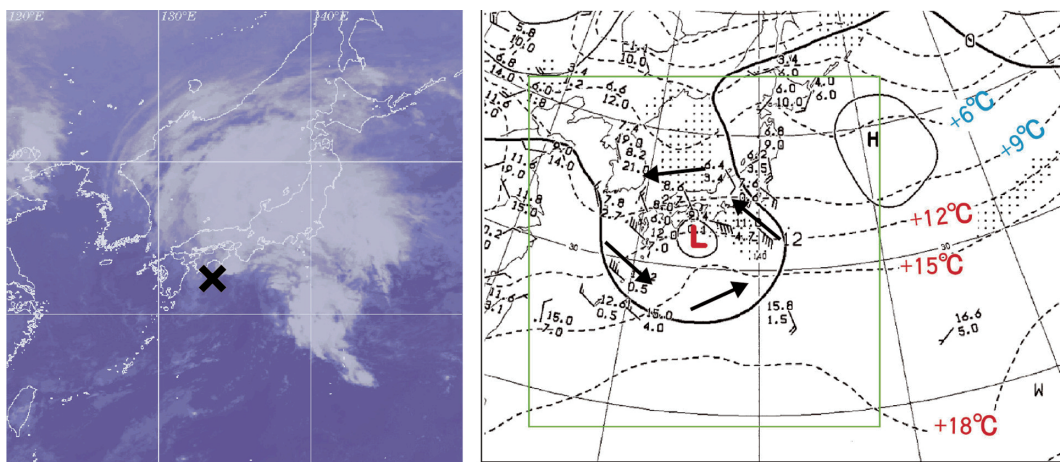


図3 (a) 1999年10月27日09時（日本時間）の静止気象衛星の赤外画像。温帯低気圧の中心の位置を示す。（東京大学生産技術研究所衛星画像データベースより引用）
 (b) 1999年10月27日09時（日本時間）の850hPa高層天気図（気象庁天気図より引用）。温帯低気圧周辺の風向（矢印）を加筆した。

南北の温度勾配が大きな領域が北緯30-40度に帯状に分布し、その領域に温帯低気圧が位置している。図中の矢印で示したように、温帯低気圧は反時計回りの循環を伴うために、その東側では南風成分、西側では北風成分を持った風が吹く。言い換えれば、温帯低気圧の東側では気温の高い空気塊が気温の低い領域に侵入することになる。逆に、温帯低気圧の西側では気温の低い空気塊が気温の高い領域に侵入することになる。

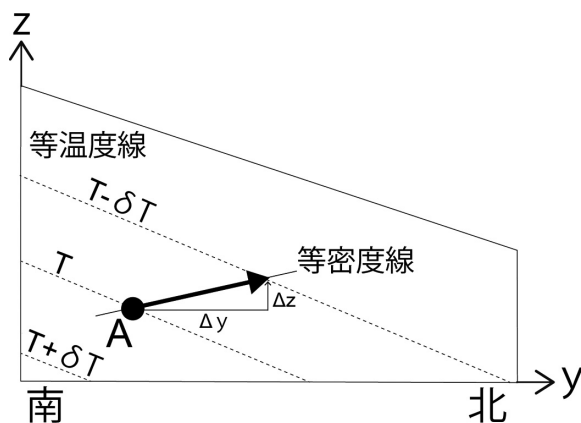


図4 中緯度における傾圧不安定のモデル。低気圧循環に伴いA点の空気塊が南から北に移動(Δy)する際には、等密度線に沿って運動するため、鉛直方向にも移動(Δz)する。その結果として、上昇気流が作られることを説明している。

この条件下での空気塊の運動を、中緯度における気温と密度の鉛直-緯度断面図で考える(図4)。中緯度の地上では、南の気温が高く($T + \delta T$)、北に向かうにつれて気温は低下する($T - \delta T$)。気温逓減率を一定と考えれば、図4の点線で示したように等温線は北に向かうにつれて高度が下がることになる。ここで、木村(1994)のパーセル法を用いて、空気塊の運動を考える。A点の空気塊が南から北に向かって移動すると、空気塊は等密度線に沿って運動する。そのため、A点と等しい密度の地点を求めることで、空気塊の運動を議論できる。この空気塊の周囲にある空気の密度に注目する。大気は上空ほど気圧が低くなるため、その効果で、上空の空気の密度は低くなる。同時に、中緯度では北に向かうにつれて気温が下がるため、その効果で、北側の空気の密度は高くなる。現実の大気においては、南北の温度傾度の大きさによって、図4における等密度面の傾きの符号が決まるが、平均的な中

緯度の南北の温度傾度であれば、図4に示すように、北に向かうにつれて等密度線の高度が上昇する。そのため、図3bにおいて温帯低気圧の東側では、空気塊は低気圧循環に伴い北に移動し、かつ、等密度線に沿って上昇することになる。つまり、温帯低気圧の東側では上昇流が卓越し、雲が形成されやすくなる。これは温暖前線に伴う広域の雲の形成メカニズムと言ってもよい。逆に、温帯低気圧の西側では空気塊は北から南に移動するため、下降気流が卓越し、雲が形成されにくくなる。この結果、図3aに示すように温帯低気圧に伴う雲分布には東西非対称性が生じる。これを「傾圧不安定」という(傾圧不安定の「傾圧」は、等圧面と等密度面が交わることを意味する。ここでは説明を簡単化するために、等圧面の代わりに等温面を説明に利用している)。

2) 授業実践のための傾圧不安定の簡略化

中学2年生には、この等密度線の分布を理解するのは難し過ぎるであろう。そこで、授業実践では、図4は使わずに、次のように簡略化して傾圧不安定を説明する。

- ①温帯低気圧の東側では、低気圧循環に伴い空気は気温の高い南から気温の低い北に向かって移動する。
- ②気温が高く密度の小さな空気塊が北に移動すると(図4の Δy に相当)、その周辺には、気温が低く密度の高い空気が存在する。
- ③密度の低い空気には正の浮力が働き、周囲の密度と同じになるまで上に移動する(図4の Δz に相当)。その結果、上昇気流が作られる。
- ④温帯低気圧の西側では、低気圧循環に伴い空気は気温の低い北から気温の高い南に向かって移動する。その結果、下降気流が作られる。

この説明には、密度ではなく、保存量である温位を用いるべきであり、厳密には正しい説明とは言えない。しかし、中学2年生に新しい概念を紹介するためには許される範囲の簡略化だと考えている。

3) 温帯低気圧の中心の上昇気流の扱いについて

図2と図3aに見られる温帯低気圧の東側に広がる雲域を作る上昇気流の成因は、図1の上昇気流の成因と異なることを説明した。しかし、図1に描かれた下層収束に伴う上昇気流が正しくないという意味ではな

く、この上昇気流は温帯低気圧の中心付近の雲の形成に寄与することは間違いない。

また、図3で例示した温帯低気圧の中心付近では、10月27日の午後に積乱雲が発達し、千葉県佐原アメダスで日本歴代1位の1時間雨量153mmが観測された。低気圧の中心付近の上昇気流が積乱雲の発達に寄与していたと考えられる。従って、授業実践においては、温帯低気圧には2つの上昇気流を作るメカニズムが共存していると説明する。

3. 授業実践の概要

教科書の図と記述を活用し、温帯低気圧に伴う雲分布の特徴を理解させるための授業実践を、2016年3月4日に群馬大学教育学部附属中学校の2年生4クラスを対象に行った。通常と同じ50分間授業を、各クラス1回、計4回行った。

1) 理科担当教諭との事前の打ち合わせ

理科担当教諭には、前時の授業までに、

- ①上昇気流と雲の形成の関係
- ②図1のモデル図を用いた高気圧と低気圧の構造を説明するように依頼した。著者は2つのクラスの授業を参観し、生徒の反応や理解度を確認した。

2) 授業の構成

一方的な講義形式にならないように、授業では生徒に質問し、その回答を基に進めることを心掛けた。また、説明の途中で、生徒の理解度を確認することを心掛け、次の①～⑥の順で授業を進めた。

- ①理科担当教諭が行った前時の授業の復習。図1のモデル図について生徒に説明させる。
- ②図3aの赤外画像を見せて、温帯低気圧の中心の位置を予測させる。
全クラスとも約90%の生徒が、温帯低気圧の中心と雲域の中心が一致すると予想した。
- ③地上天気図を見せ、雲域の南西端に温帯低気圧の中心があることを示す(図3aの×)。
クラスによっては、「前時の授業で理科担当教諭が説明した『低気圧中心で上昇気流が起き、それに伴い雲が形成される』という説明は間違いか」という主旨の質問が出た。「間違いではない」「低気圧中心の

上昇気流については、後で説明する」と回答し、授業を進めた。

- ④図3bを用いて、簡略化された傾圧不安定の考え方にに基づき、温帯低気圧の東側で上昇気流が卓越するため雲域が広がり、西側では下降気流が卓越するため雲域は発生しないことを説明。その際に、「浮力」という用語を用いて、小学校や前時の授業で学習した「暖かい空気には浮力が働き上昇する」ことを確認。
- ⑤温帯低気圧の東側で卓越する上昇気流は、次の授業で学習する温暖前線に伴う上昇気流と考えて良いことを説明。
- ⑥温帯低気圧には、「図1の低気圧中心の上昇気流」と「低気圧の東側の上昇流」の二つが共存することを説明。更に、図1の上昇気流は、台風(熱帯低気圧)の中心でも起きていることを説明。

3) レポートについて

授業のテーマである温帯低気圧に伴う雲分布の特徴と上昇気流との関係についての生徒の理解度を調べるために、「あなたが理解したことをまとめなさい。図を使うと、まとめやすくなるでしょう。」と書かれたA4サイズの白紙1枚を生徒に配布し、後日、理科担当教員が回収した。

4. レポートの評価方法と評価結果

1) 評価基準

レポートの評価においては、以下の4つの項目に注目した。

- 項目1：温帯低気圧が南北の温度勾配が大きな領域に位置することを明記しているか。
- 項目2：温帯低気圧に伴う反時計回りの風系を明記しているか。
- 項目3：浮力の概念を用いて、温帯低気圧の上昇気流・下降気流の成因を説明しているか。
- 項目4：温帯低気圧に伴う雲分布の東西非対称性について明記しているか。

各項目について、文字や図を用いて正しく表現していれば、理解できていたと判断し、1点を加点した。目的2において、「浮力」の考え方を活用し、温帯低気圧周辺の上昇流・下降流の形成と雲分布を説明するこ

とと設定している。そのため「温度差」、「密度差」や「浮力」などの語句を用いて説明していなければ、加点しない。また、項目4については、温帯低気圧の東側の雲域についてのみの記述は加点しない。西側では雲が少ないことも記述してある回答のみに加点した。

なお、図を使ってまとめることを奨励したこともあり、生徒は全ての項目を文章で説明しているとは限らない。そのため、文章の分かりやすさは評価の対象にできなかった。

2) 結果

表1と表2は、それぞれ、クラス別の得点分布と各項目における正答者数を示している。授業で説明した内容を十分に理解し、温帯低気圧の中心よりも東側に雲域が広がり、西側では雲が少なくなる理由を正しく説明できた生徒（評価4点）は全体の32.4%を占め、このランクの生徒が最も多い。

次に、評価3点のランクの生徒が28.4%を占めている。この生徒のほとんどは低気圧周辺の上昇気流・下降気流の説明（項目3）が正しくなかった。この項目3については第1章で説明したように、「浮力」や「密度差」などの語句を用いない場合、例えば、単に「(低気圧の東側では) 上昇流により雲が発生する」という回答は正答にしない。この判断基準により、項目3の正答率は39.9%と極端に低い(表2)。この記述を正答と見なせば、正答率は62.8%となり、他の正答率と大きな差はなくなる。言い換えれば、既に学習している

表1 クラス別の得点分布

	A	B	C	D	計	比率(%)
4点	17	11	12	8	48	32.4
3点	5	15	13	9	42	28.4
2点	3	6	8	8	25	16.9
1点	6	3	2	8	19	12.8
0点	6	1	2	5	14	9.5
計	37	36	37	38	148	

表2 各項目におけるクラス別の正答者数

評価項目	A	B	C	D	計	正答率(%)
項目1 南北の温度勾配	24	33	29	25	111	75.0
項目2 低気圧性循環	26	30	33	29	118	79.7
項目3 上/下昇気流の成因	18	13	18	10	59	39.9
項目4 雲域の東西非対称	27	28	25	19	99	66.9
計	95	104	105	83	387	

「浮力」や「密度差」により空気塊が上昇するという知識が、実際の大気現象における上昇気流の形成メカニズムの理解に活用されていなかったとも言える。

評価3点以上の生徒の割合は全体の60.8%であり、この生徒は授業の内容を理解していたと見なしてもよいであろう。

評価2点の生徒25人のうち18人が「南北の温度傾度」「低気圧性循環」を記述した。そのうち6名が温帯低気圧に伴う上昇気流について図1のようなモデル図を描き、8名が「暖かい南の空気が北に移動することで、暖かい空気が北側の気温の低い空気によって冷やされて雲ができる」と記述し、雲が形成される過程を誤解していた。共に、CとDのクラスに集中していたことを考えると、このクラスの授業で行った説明に不備があった可能性もある。

評価1点以下の生徒のレポートは教科書や資料集をまとめた内容が多く、授業の説明とは関係のない内容であった。つまり、少なくとも22%の生徒が、授業の内容を理解できなかったと言える。

3) 考察

評価3点以上の生徒が授業の内容を理解したと考えれば、授業を受けた生徒の60%が、温帯低気圧に伴う雲域の成因を理解できたと言える。これらの生徒に対しては、簡略化された傾圧不安定に基づく教授方法が有効であった。

授業実践を行った付属中学校生徒の特殊性を考えると、このままの形で、簡略化された傾圧不安定を一般校の授業に導入しても同じような効果が得られるとは考え難い。しかし、60%の生徒が理解できたことから、科学に興味を持つ生徒ならば理解できる難易度だったと考えられる。

そこで、発展的学習としての利用が考えられる。例えば、大日本図書の理科2年の教科書(平成23年検定済)では、トピックの欄を設け、中学校では学習しない

気化熱の考え方をを用いて、乾湿計を使った湿度の測定原理を説明し、生徒の深い理解の手助けをしている。このような発展学習として教科書に提示できれば、図1の低気圧の構造から連想される雲分布が、図2に示された実際の温帯

低気圧の雲分布と異なることを説明でき、誤解が生じる危険性を減らせると考えられる。

5. まとめ

中学理科2年の教科書に掲載されている低気圧の構造のモデル図のみでは、温帯低気圧周辺の雲分布の特徴を説明しにくいという問題点がある。その問題点を解決するために、簡略化した傾圧不安定の考え方をを使って温帯低気圧周辺の雲分布の特徴を説明する方法を考案し、群馬大学教育学部附属中学校2年生を対象に授業実践を行った。

生徒が提出した自由記述形式のレポートから、温帯低気圧に伴う雲分布の特徴と雲分布が決まるメカニズムについての理解度を調査した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 全生徒の23%の生徒は授業の内容を理解できなかったが、全体の60%の生徒が理解できたとみなされた。この簡略化した傾圧不安定に基づく教授方法は一定の効果があったと言える。
- 2) 温帯低気圧に伴う雲分布を決める上昇気流や下降気流の成因を「浮力」などの既存の概念を活用して説明できる生徒は39.9%と極端に少なかった。

謝辞

授業実践の機会を与えて頂いた群馬大学教育学部附属中学校と理科担当の矢嶋将之教諭・下平明德教諭・加瀬健教諭に感謝いたします。特に、2年生担当の加瀬健教諭には、授業進行の調節など様々な点でお世話になりました。深く感謝を致します。

参考文献

- Charney, J. G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Meteor.*, 4, 135-162.
- Eady, E., 1949: Long waves and cyclone waves. *Tellus*, 1, 33-52.
- 岡村定矩ら, 2014. 新しい科学2年, 東京書籍, 190-207.
- 木村龍治, 1994: 8章 温帯低気圧, 大気科学講座2 雲や降水を伴う大気, 東京大学出版会, 225-228.
- 松森靖夫・一瀬絢子, 2015. 月に対する小学校教員志望学生の認識状態の分析. *理科教育学研究*, 56, 271-277.
- 長崎栄三, 2014. 日本の戦後教育の変遷と課題. *科学技術リテラシーに関する課題研究報告書*, 93-120.
- 中井睦美・中井均, 2008. 現在の理科教育と教員養成の問題—主に初等教育について—. *地質学雑誌*, 114: 170-179.
- 文部科学省, 2008a. 中学校学習指導要領, 67-68.
- 文部科学省, 2008b. 中学校学習指導要領解説 理科編, 78-82.

(いわさき ひろゆき)

