

海洋の層構造と深層循環の理解を深める授業展開
～水のあたたまり方・冷やされ方のモデル実験を通して～
Class development to deepen understanding of ocean layer structure and deep circulation
～Through model experiments on how water is heated and cooled～

○佐藤栄治^{*1}, 根岸 漂^{*2}

SATO Eiji^{*1}, NEGISHI Hyou^{*2}

^{*1}愛媛大学教育学部, ^{*2}愛媛大学附属高等学校

^{*1}Faculty of Education, Ehime University, ^{*2}Ehime University Senior High school

[要約] 高校地学基礎の「大気と海洋」で扱う海洋の水温鉛直分布や海洋の熱塩循環のモデル実験を行った。今回の取組は、実験の目的を示し、予想をさせ、実験後に再度予想と同じ問いに答えてもらう形式で教師主導でのまとめを行わずに進めた。ビーカー内という深さの差がわずか 10cm 程度しか差がない空間で実験する制約もあり、全員が理想的な結果になることは困難であったが、教師の誘導がなくても多くの生徒は妥当な考え方を獲得していた。彼らの思考を助けたのは、サーモインクを用いたことで、あたためられた水や冷やされた水の動きが明確となり、視覚的に水の動きと温度変化を捉えることができたからである。しかし、水の動きが激しい場合や温度計の設置位置が不適切な場合は、妥当な結果を導くことが困難な場合もあり、まだまだ改善が必要であるが、水を上方・下方からあたためたり冷やしたりする単純な実験が生徒の実感を伴った理解に有効であった。

[キーワード] 高等学校理科, 海洋の層構造, 水の対流, サーモインク

I. 問題の所在

高等学校地学基礎の海水の層構造についての記述内容は、海面から深層へ3つの層に分けられること、表層は風や波で混合されていて、季節変化や緯度による影響が大きいこと、深層は水温がほぼ一様な層となっていることはどの教科書でも共通に記載されているが、層構造が作られる仕組みに言及した記述は見当たらない。温度が高い部分が上に移動し、低い部分が下に移動するという概念は常識的概念であると考えられているからであろう。

佐藤・中井 (2023) は、生徒 22 名に対して、水を上方・下方からあたためたり冷やしたりするモデル実験を行い、上層と底層の温度変化を調べた後、あたためられた水や冷やされた水の動きについてワークシートと聞き取りによりどのように理解しているか調査した。その結果、水を上部からあたためた場合は、上層のみがあたたまることを全員が認識していた一方、上部に氷を置いて冷やす実験は、全員が下層から冷えることを確認していたのに、3名は「水の動きはない」、6名が「水の動きを意識していない」と考えていたことがわかった。さらに、佐藤・中井 (2023) は、高校生 445 名に対して Microsoft Forms によるオンラインのアンケートを実施した。それによると「ビーカーに入

れた水温 20℃の水を上部から温めたときどこが最初に 40℃になるか」との問いに 65%が上層と回答し、理由として、あたためられた水は水面近くに留まる (51%)、対流によりあたたかい水が上層に集まる (40%) をあげた。また、「ビーカーに入れた水温 20℃の水を上部から氷で冷やすと、どこが最初に 10℃になるか」という問いに 54%が表層と回答し、その理由として、87%が氷に近いところから冷えると回答した。また、水はどこから凍るかの問いには 83%が「表層から凍る」と正しく回答した。この結果を素直に解釈すると、水は表面から冷え、冷えた水の動きは考えていない生徒が少なくないと解釈できる。

相場・柘原 (2009) は、小学生がほとんど持っていない対流に伴う回転運動という誤概念を多くの中学生が獲得していることを問題視し、改善のためのモデル実験を提案している。そして、対流概念を正しく身に付けるにはサーモインクを利用することが有効であると述べている。

今回は、温度を測定するだけでなく、サーモインクを用いて温度変化を視覚的に捉えることで、生徒に水の動きを意識させることをねらった取組を行った。その結果、水のあたたまり方や冷え方についての概念形成に有効であったので、その実践を報告したい。

II. 研究の方法

1. 対象と期間

高校2年生地学基礎履修生で、海水の運動の単元を履修済の生徒（3クラス93名）を対象とした。

授業実践は、2時間構成で、1時間目は水を温め、2時間目は水を冷やしての水のあたたまり方、冷え方と水の動きを捉える展開とした。2時間連続して実験を行うものの、教師のまとめは行わず、モデル実験を行うことで生徒自らが概念を形成できるかみた。本実践で用いたサーモインクは、約35°C以上でピンク、約35°C以下で青色に呈色する。今回は、授業前に実験の予想をMicrosoft Formsを用いて回答させた後、授業後に同じ内容で回答させた。この後、教師による総括を行い、生徒の学びをサポートする計画で進めた。

2. 授業実践と分析方法

(1) 予習課題と振り返り課題の記述分析

授業実践前に海洋の層構造の説明を求めた。2時間の授業が終わってから、改めて同じ内容について、学んだことを踏まえて回答させ、記述内容の深まりを分析した。

(2) 1時間目の実験

ア 実験方法

図1のように1L ビーカーに電子温度計を上層(A)、中層(B)、下層(C)に設置し、サーモインクを加えた水を約30°C(青色)に調整し、端からバーナーで加熱して

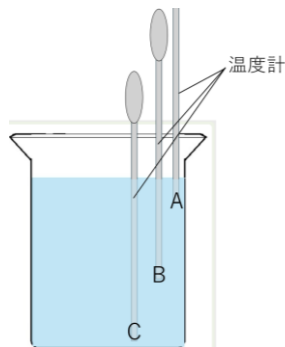


図1 温度計の位置

温度変化を調べる。同様に約30°Cに調整したサーモインク入りの水を上部から白熱球で加熱して温度変化を記録しながら、色の変化と水の動きを記録した。

イ 実験の結果

(下方からバーナーで加熱)

図2は、下方端からバーナーで5分程度加熱した時の写真である。加熱を始めてしばらくすると、下層の加熱点近くでピンク色になった水が筋状に上昇し、層状にピンク色の水が広がる様子が観察できる。他方、加熱点に近い下層の一部を除くと他は青色のま



図2 5分加熱

まで、上層の温度が最も高くなる。なお、炎の勢いが強すぎると複雑で激しい流れが発生し、短時間でビーカー全体があたまり、観察は困難となるので注意が必要である。表1に実際に生徒実験で得られた温度の測定結果を示す。

表1 下方から加熱した温度変化

時間(分)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	32.6	33.3	34.5	35.6	36.3	37.5	38.6	40.1	41.4
B	32.1	32.8	33.6	34.7	35.8	37.1	37.6	39.1	40.9
C	32.1	32.7	33.5	34.6	35.8	36.9	37.7	38.5	40.3

※ A, B, Cは図1に示す温度計の位置である。

(上方から白熱電球で加熱)

図3のように、上方から白熱球であたためた。3分程度あたためた後のビーカーの様子を図4に示す。上方からあたためた場合、水の流れは発生せず、上層のピンク色の水の層が次第に厚くなっていく様子が観察される。



図3

バーナーの加熱と異なり、水の流れがほぼないので結果は安定しており、どの班でも同じ結果が得られた。



図4

温度測定を行うと、上層の温度上昇に対して中層・下層の温度変化はほとんど無視できる範囲になっている。表2に実際に生徒実験で得られた温度変化の測定結果を示す。

表2 上方から加熱した温度変化

時間(分)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	32.7	33.8	35.0	35.8	36.9	37.7	38.5	39.3	40.0
B	31.8	31.8	31.8	31.8	31.8	31.8	32.3	32.3	32.3
C	30.4	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9

(3) 2時間目の実験

ア 実験方法

1時間目の実験と同様に温度計とビーカーを用意し、サーモインクを加えた溶液を40°C程度(ピンク色)に調整し、保冷剤をクリップでビーカーの上端に固定して水温を下げ、上層(A)、中層(B)、下層(C)の温度変化と溶液の色の变化や水の動きを調べる。保冷剤はすぐに融解するので3分程度で交換する。次に、ビーカーの下部に保冷剤を置いて、おもりを輪ゴム等で固定して浮かばないようにして、サーモインクを

加えた水（ピンク色）の底に沈め、温度変化を調べて、溶液の色の変化と水の動きを観察する。

イ 実験の結果

図5は右端上部にダブルクリップで保冷剤を固定して約8分冷却したところである。上から冷やしているのが下から青色になっている様子が観察できる。保冷剤が融解して、冷却能力が落ちるので、保冷剤（上方から冷却）を3分ごとに交換した。上方を冷やしているのに最も低温になるのは下層である。ただし、温度差は1℃程度であった。表3に生徒実験で得られた温度変化の測定結果を示す。保冷剤の周りにピンク色の水ができ、それが底に沈んでいく様子を観察できた班もあった。



図5

表3 上方から冷却した温度変化

時間(分)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	38.0	37.6	37.0	36.1	35.8	35.3	34.6	34.3	33.9
B	37.6	37.0	36.4	35.7	35.3	34.9	34.4	34.0	33.5
C	37.0	36.4	35.9	35.3	34.8	34.4	34.5	33.3	33.0

III. 結果

1 あたためる実験

(1) 授業前アンケート分析

ア 下方からバーナーで加熱

図6のような問いを与え Forms で回答させた。

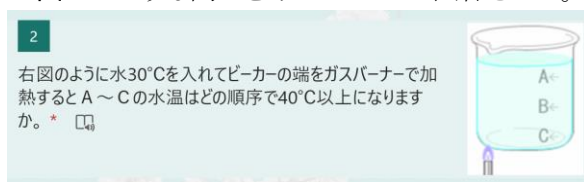


図6 下方から加熱に関する問い

図6の問いに対する結果は図7のとおりである。

図7のアンケートで

は、C→B→Aの順であたたまると予想する生徒が最も多く、そう考えた理由として「下から炎を当てているので下から順にあたたま

る」「熱源のある所から順にあたたまる」などの答えが69%を占め、これらの生徒は、水の対流を考えずに回答していたが、

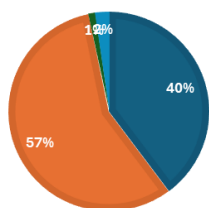


図7 授業前

下方からバーナーで加熱

C→B→Aと答えた生徒の中には、「あたたまった水が上に動く」と記述している生徒が21%含まれていた。この生徒たちは、底層で水が十分にあたたためられ、その後上昇すると捉えている。実際に温度を測定すると、あたためられた水は次々に上昇するので上層に温度が高い水が溜まり、上層の水温が最も高くなるが、水の対流を順番に考えた回答であろう。

イ 上方から白熱電球で加熱

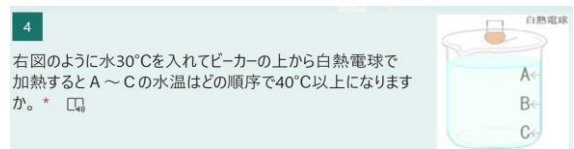


図8 上方から加熱に関する問い

図9より、ほとんどの生徒が図8の問いに対してA→B→Cの順にあたたまると予想した。あたたかい水が上層にできるので対流を無視でき、水のあたたまり方をすべて熱伝導と捉えても同じ答えになると考えられる。

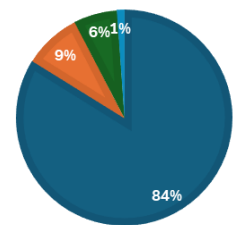


図9 授業前

上方から白熱球で加熱

ここで、C→B→Aと答えた生徒は、「光によってビーカーの底がまずあたたまり、あたたまった水が上昇する」と考えており、気温の上昇の時、まず地面があたたまり、空気があたたまっていく現象と同様にとらえている。

(2) 授業後アンケート分析

ア 下方からバーナーで加熱

まず、下方からガスバーナーで加熱した場合は、A→B→Cと考える生徒が40%（図7）から73%に増えている。また、C→B→Aと答えている生徒の56%が「下側であたためられた水が上昇する」と

まず、下方からガスバーナーで加熱した場合は、A→B→Cと考える生徒が40%（図7）から73%に増えている。また、C→B→Aと答えている生徒の56%が「下側であたためられた水が上昇する」と

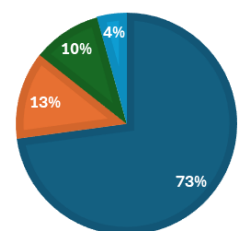


図10 授業後

下方からバーナーで加熱

答えており、これらの生徒は、水が熱源によってあたためられてから上昇すると捉えている。対流を考えずに、熱伝導としてとらえている生徒も少

数であるが見受けられた。問題は、実験結果を理由に C→B→A と答えた生徒の存在である。温度計を熱源に近い位置に設置したため、C が最も高い温度を示す結果が得られた班もあり、回答者はその結果を根拠に回答したと考えられる。「下側であたためられた水が上昇すると考えた生徒の中にも、ピンク色の水が上昇の様子を捉えつつ、温度計の指す値はCが最も高いという結果からこの答えを導いている者もいた。

イ 上方から白熱電球で加熱

A→B→C の順にあたたまると思った生徒が 84%から 88%に増えた。図 11 のその他は、「A のみがあたたまる」サーモインクの色は上層のみピンク色になっていて、中層・下層の色は変わらないこと、中層・下層の温度変化は上層に比べてわずかであることから、上層のみあたたまるというのも妥当な答えである。従って、ほとんどの生徒が実験結果を反映した妥当な答えに到達したと言える。これは、水の動きがほとんどないことで観察が容易であることが関係していると考えられる。

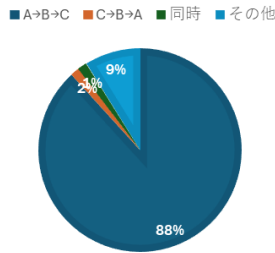


図 11 授業後 上方から白熱電球で加熱

2 冷やす実験

(1) 授業前アンケート分析

ア 上方から冷却

同様の方法で Forms を用いた問いに回答させた。

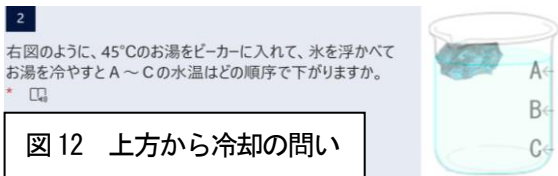


図 12 上方から冷却の問い

図 13 のとおり、図 12 の答えを A→B→C と考える生徒が最も多く (57%)、C→B→A と考える生徒 (42%) を超える。A→B→C と考える生徒の、そう考えた理由をみると、「上を冷やしているから」「上から少しずつ

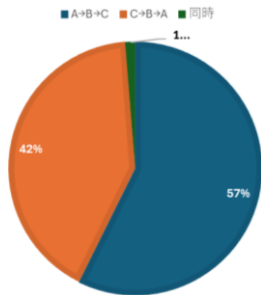


図 13 授業前 上方から冷却

下に伝わる」など対流を無視した記述である。A→B→C と考える生徒の 89%が下から冷やすと下から冷えると考えていることから、低温部が熱伝導で広がると考えている生徒も存在していた。

イ 下方から冷却

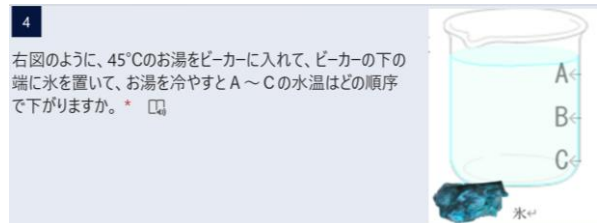


図 14 下方から冷却の問い

図 15 のとおり、82%の生徒が C→B→A を選んだ。A→B→C を選んだ生徒は「水は上から冷えると聞いた」「水面が凍るから」など彼らが獲得した何らかの知識をもとに思考しているようであった。

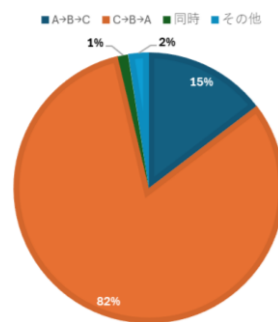


図 15 授業前 下方から冷却

(2) 授業後アンケート分析
ア 上方から冷却

授業前アンケートで C→B→A を選んだ生徒は 42% (図 13)、授業後は 56% (図 16) となり、冷たい水が底層に沈み込むことを認識した生徒は増加した。

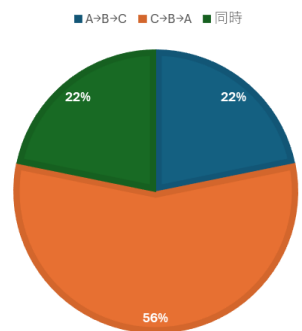


図 16 授業後 上方から冷却

しかし、A→B→C を選んだ生徒が 22% もいる。そう考えた理由の記述内容をみると「上から冷やされているから」など対流を考慮しない回答が約半分を占める。しかし、中に「実験結果から」と書いている生徒もいた。実際、上層が早く冷えた結果になった班もあった。表 3 からわかるように上層と下層の温度差がわずか 1℃程度で班によってはそれ以下であったこと、保冷剤を交換するとき水が攪拌されたこと、温度計の設置位置が保冷材に極めて近く、班によっては接触していたことなどの要因が考えられる。

イ 下方から冷却

C→B→A と考える生徒が95%、Cのみ冷えると考えた生徒を併せると、1名を除いて下層から冷えることを認識している。しかし、熱伝導で考えても同じ結論になる。そう考えた理由の中に、「下に保冷剤があるから」「下から順々に冷やされる」などの記述も散見される。水の動きがほぼないのでこの記述は間違いではないが、**図16**と合わせて考えると、最初から対流の考え方を適用せず熱伝導の考え方で思考している可能性も否定できない。

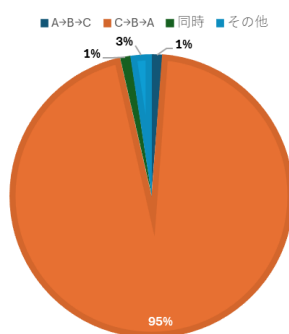


図17 授業後
下方から冷却

(3) 予習課題【課題】から見た生徒の認識の変化

【課題】右図は低緯度地域の海洋における水深と海水温の関係を示したものです。アの海水温が高く保たれ、ウの海水温は1～3℃で季節や緯度によらずほぼ一定です。このような温度分布になっている理由を簡単に説明してください。

本単元は履修済みの生徒であったので、上記課題を予習として回答させた。主な回答としては、「深層は日光が届かないので水温が低い」「深層は風や波の影響を受けない」という記述が多い。2時間のモデル実験を終えての記述で大きく変わったのは「あたためられた海水は密度が低くその場に留まる(上に上がる)」と言及した記述を1/3以上の生徒が書いていることである。今回のモデル実験が水の温度による鉛直方向の移動をテーマとしていたことは間違いはないが、海水の動きが水温によって引き起こされたり引き起こされなかったりすることを意識するようになった生徒が増えたことはこの取組の成果と考えている。

IV. 考察

(1) 温度変化をサーモインクで可視化した効果

サーモインクは温度が高いか低いかを明瞭に色で表現できるので、あたためられた水、冷やされた水の挙動を観察するには絶好である。温度差がない場合の水の動きも注意深く観察すると捉えることが可能である。生徒の感想でも、温度変化を可視化できてよかったという記述が多数確認できたことから、水の動きについて意識させる効果は高かったと考えている。

(2) 生徒の対流に対する理解の深まりの評価

今回の実験は、生徒実験を教師が見守る形で行い、アンケートで生徒の理解度を測定した。この取組の後ですべての班の結果を総括したまとめの授業を行ったが、授業者は生徒の反応の良さを実感している。現在、日常生活の中であたためられた水が上層、冷たい水が下層に偏在することを体験として知っている生徒が少ない中で、このような生徒の感性に訴える実験は有効であろう。

(3) 水は水面から凍るという認識について

水はどこから凍るかという問いに対して、本実験後にアンケートで尋ねたところ、水面から凍る57%、水底から凍る37%であった。佐藤・中井(2023)が愛媛県の生徒445名に対して行った同様の問いでは、水面から凍る73%、水底から凍る8%と比べると明らかに誤った回答が多いことがわかる。これは、今回の授業で冷たい水が底層に動くことを多くの生徒が認識した結果ともとらえられる。佐藤・中井(2023)では、この問いに水面から凍ると答えた生徒の回答理由の73%が水面から順に冷えて水温が低い部分が広がっていくからと水の対流を無視した答えになっていた。この問いを実験前後で投げかけていないので、実験の影響を検証してはいないが、本取組に参加した生徒の水底から凍る理由は「実験で水は下から冷えることがわかったから」であった。科学的に物事を考える態度としてはむしろ好ましく、水の特殊性を理解するには、むしろ好都合ではないかと考える。

(4) 今後の課題

今回実施した実験で、温度差による水の動きがほとんどない、上方からの加熱、下方からの冷却は、実験結果が安定していて、すべての班で同じ結果が得られた。しかし、水の動きがある、下方からの加

熱、上方からの冷却は水の動きを十分にとらえることができている。特に、加熱はバーナーの火力を制御して乱流が発生しないようにする必要があるし、冷却は保冷剤を取り換えるときに攪拌しないように気を付ける必要がある。加熱を電熱線にして制御しやすくする、保冷剤の交換時に攪拌しないようにする工夫が必要と考えている。

V. おわりに

このモデル実験は、生徒が海洋の鉛直構造の理解、熱塩循環の理解には有効であった。単純な実験ではあるが、深さの差が10cm程度しかない状況の中で、電子温度計で温度差を検出することは意外に難しい。それを改善するためにサーモインクの利用は温度を色で可視化できるという点で極めて有効であった。しかし、水の動きが激しい状況では、すぐに混じってしまって観察が困難となったり、インクの色が混じって紫色に見えるなど観察し辛い状況が生じるため、注意深く実験操作をする必要があった。寺田・中嶋(2013)は、示温インクを利用したビーカーでの観察方法では、観察が難しいと述べている。しかし、実験をするのが高校生であることも影響していると思われるが、半数以上の生徒がほぼ狙った結果を導き出している。

今回の実験後のアンケートの質問の答えの根拠に、実験の結果をあげる生徒が一定数いる。冷やした時に同時に冷える、あたためたときに同時にあたたまると答えた生徒の中に「実験結果がそうだった」との理由をあげる生徒もいた。確かに温度差が小さくそう捉えても仕方ないという状況もあるが、もしも差が検出できていたら妥当な答えになっていたかもしれないと考えると、より確実な結果が得られる実験を開発する必要がある。

今回は、教師は実験の指導のみで結果の総括や考え方を説明するなどのサポートは行っていない。その中で、より妥当な方向に生徒の思考が変化していることは一定の評価ができると考えている。その後の授業においても、生徒の反応は良く、理解も早かったということも成果の一つと言える。

現代の生活では風呂の上下の温度差を解消するために攪拌してから湯に入ることもないし、エアコンの温度管理も高度になり、足元が異常に冷えることもあまり経験しなくなった。経験不足を補うために、あたためる冷やすといった単純な実験は有効である。水の

あたたまり方をメインに扱うのは小学校4年生である。例えば、教育出版の教科書では今回扱ったサーモインクでの加熱実験を取り上げている。その後は中学校2年生の物質・エネルギー領域で扱うものの教科書で丁寧に扱うことはない。小学校学習指導要領解説では「金属は熱せられた部分から順に温まるが、水や空気は熱せられた部分が移動して全体が温まること」を指導することになっており、冷えた水の下降流については学ぶことがない。これらのことから、生徒は対流について必ずしも理解できていないと考えるべきではないかと思う。ベテラン教師の世代が当たり前に実体験として経験していたことを現代の生徒は経験していないかもしれないというところからスタートし、当たり前があたりまえでないかもしれないという視点から授業を組み立てることも必要ではないかと感じている。

付記・謝辞

この実践研究を進めるために、愛媛大学附属高校の施設・設備を活用させていただいた。また、この取組について、愛媛大学教育学部 中本剛教授からの有益な助言をいただいた。ここに感謝の意を表す。

文献

- ・相場博明・柊原礼士(2009)：小学校4年「水のあたたまり方」における誤概念と「サーモインク」教材の有効性，理科教育研究，Vol. 49 No. 3
- ・教育出版(2014)：未来をひらく小学理科4
- ・佐藤栄治・中井芳恵(2023)：高校地学「海洋の鉛直分布と熱塩循環」の実感を伴った理解のために，愛媛大学教育学部附属科学教育センター紀要 Vol. 2.
- ・寺田光宏・中嶋健二(2013)：小学校4年生理科「水のあたたまり方」の指導の現状と改善，日本科学教育研究会報告，27巻5号p97-102
- ・文部科学省(2017)：小学校学習指導要領解説 理科編