

## 【報 告】

## 物理未修学生に配慮した力学の授業開発

石川 洋<sup>1)</sup>\*

1) 東北大学理学研究科

高校で物理を学んでいない学生（物理未修学生）が理系の学部に入學するのははやめずらしいことではない。東北大学の理系の学部では全学教育の物理学を必修または選択必修としているため、物理未修学生も物理の授業を履修する必要がある。物理未修学生にとって大学の物理の授業は難解であり、内容が消化できず、授業についていけなくなることも多い。この状況を前に、以前から改善の必要性が認識されていたが、本格的な対応はされないままであった。2014年度になって、筆者を含むグループにより農学部対象の全学教育科目物理学Aの見直しが始まり、物理未修学生にも配慮した新しい形の授業が作られた。本稿では、この授業の開発の経緯ならびに2019年度まで6年間の実施状況について報告を行う。

## 1. はじめに

東北大学の全学教育科目は主に大学1～2年生を対象とした教養教育（共通教育）を行うための科目群である。その中の一つ、1セメスター（1年前期）開講の物理学Aは、物体の運動を扱う物理学の分野である力学を主題とし、理系学生のほぼ全員が受講する基礎的な科目となっている。受講者の多くは高校で物理を学んだ学生（以下では物理既修学生と呼ぶ）だが、中には、物理を学んでいない（または、基礎的な部分のみで学習を終えている）学生も含まれている。こうした学生（以下では物理未修学生と呼ぶ）は物理の内容に馴染みがないことに加え、そもそも物理に対する興味が希薄なことから、物理既修者と同じ授業を受けても内容が理解できず、授業についていけなくなることも多い。

物理未修学生は生命科学系の学部（学科）に多く、特に農学部ではその割合が約6割と過半数に達し、学生による授業評価でも問題が見られたことから、物理学委員会では対応を検討することとなった。その結果、2014年度から筆者を含むグループにより農学部向け物理学Aの見直しが行われ、未修学生にも配慮した、新しい形の授業が作られた。本稿ではこの授業について、授業設計の考え方および内容を紹介するとともに、2019年度まで6年間の実施状況について報告を行う。

## 2. 授業設計の方針

物理未修学生への対応としてまず考えられるのは、物理既修学生と未修学生を別クラスとし、未修クラスの授業内容を高校で履修する内容も含めた平易なものとするところである。ただ、この場合、実質的に2つの異なる科目を作ることになり、クラスをまたいで学生の成績を比較することは困難である。農学部では、1年次の成績を使って2年次以降のコース分けを行っており、評価基準は全体で共通とする方が望ましいことから、未修学生を特別扱いすることなく、既修と未修の双方で同じ内容の授業を行うことにした。

では、どのような内容にすれば未修学生でも大きな困難を感じずに消化できるような授業になるのだろうか。学生による授業評価の回答などから判断すると、未修学生がつまづく主な理由は、物理に対する学習意欲が低いことに加えて、（暗黙のうちに）高校の物理の内容を前提に授業が行われていたことにあった。既修者にとってはおなじみの、速度、加速度、力、仕事、エネルギーといった物理の基本的な概念も、未修学生には初めて学ぶもの、あるいは一度聞いた程度であまり習熟していないものということもある。（物理の場合、「仕事」のように、日常的に使われる単語で物理概念が表されていることも事情を複雑にしている。）授業でこういった事項をあたりまえのように使われてしまっては学習意欲が続くはずもない。自分の専門に

\*）連絡先：〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学理学研究科 hiroshi.ishikawa.b3@tohoku.ac.jp

関係ない（と学生が思っている）場合はなおさらである。

それならば、授業の中で高校物理の内容を補うようにすればよいかというと、実際のところ十分な時間を取るのには難しい。授業時間数は変えられないので、高校の内容を補うということは大学ではじめて学ぶ内容を減らすことになる。大学の授業としての水準を保つためには高校の内容の占める割合をあまり多くすることはできず、物理未修学生（その多くは物理に強い苦手意識を持つ）にとっては焼け石に水となりかねない。また、既修学生はすでに学んだことをもう一度聞かされることになり、内容を退屈に感じてしまうかもしれない。高校の物理の延長線上に大学での物理を位置付けようとする、未修と既修の間には簡単には越えられない壁があるように思われた。

そこで、発想を変えて、高校の物理に依存しない、独立な科目として授業を作ることを考えた。高校物理で学ぶ内容は、一言で言えば、様々な物理量（物理概念）の定義とそれらを関係付ける公式の集まりである。本来、物理の公式は少数の基本法則から導かれるものであるが、高校の物理ではそういった視点は強調されず、多くの公式が並列に教えられている。「高校物理は公式の暗記」と言われる所以であるが、これは、公式の導出に不可欠な数学（特に微積分）の使用が、高校の物理では制限されていることによるところが大きい。一方、大学の物理ではこのような制限はない（入学者は高校で微積分を習得している）ので、基本法則から出発して、数学を使って現象を理解する過程を見せることができる。このように、高校物理と大学物理はかなり性格の異なる科目となっており、高校物理を学んだからといって必ずしも大学の物理の理解が容易になるとは限らない。扱う概念や題材を限定した上で、高校では学ばない部分、つまり数学を使って法則から現象を説明する過程を中心に据えて授業を行えば、高校の履修歴の違いはさほど重要な問題ではなくなるように思われた。

### 3. 授業の内容

以上のような方針のもと、農学部向け物理学Aの授業内容の見直しを行った。扱う分野は質点と剛体の

力学であり、これについては変更はないが、取り上げる内容を減らし、法則のはたす役割を前面に出すことで、高校物理と独立な科目にすることを意図した。

力学の基本法則（の一つ）は運動方程式である。そこで、授業の目標を「運動方程式から運動が定まることの理解」とした。高校でも運動方程式は習うが、物体にはたらく力と加速度の間の関係式という以上のものではなく、あまり重要性は感じられない。これは主に高校の物理で微積分を使えないという事情によるものと思われるが、逆に、微積分を自由に使うことさえできれば、運動方程式が物体の運動を定める式であることを納得するのはそれほど難しい話ではない。「少数の基本法則をもとに現象を説明する」ことは物理学の持つ特徴の一つであり（須藤 2017）、運動方程式から運動を定める過程にはそれがよく現れている。全学教育科目の物理学として、運動方程式の意味の理解はちょうどよい目標のように思われた。

具体的な題材の選択においては、できるだけ「運動方程式の理解」という授業目標に直結するものに限り、物理未修学生が消化不良に陥ることのないようにした。表1に授業内容を示す。大まかな流れはそれまで行われていた授業と変わらないが、初年次向けの力学で扱われることの多い、物体の衝突や惑星の運動、非慣性系は取り上げなかった。物理概念についても、運動方程式に必要なもののほかはエネルギー（とそれに

表1. 農学部向け物理学Aの授業内容

回数	内容
1	運動の記述
2	運動の法則
3	単振動
4	運動エネルギーと仕事
5	ポテンシャルとエネルギー保存則
6	束縛運動
7	質点系の運動
8	剛体の運動
9	剛体振り子
10	剛体の平面運動
補足	運動量と角運動量

関係するもの)のみ扱うこととし、新しい概念の導入が原因でつまづくことのないようにした。ただし、さらに進んだ内容を学習する学生のことを考えて、運動量と角運動量については最後に補足という形で簡単に紹介することにした。また、剛体の回転運動については角運動量を経由して運動方程式を導出するのが一般的だが、回転軸の向きが変化しない場合に限ることにより、角運動量を表に出さない形で扱うようにした。

使用する数学については高校で学ぶ範囲で理解可能なものに限定するようにした。数学の説明のために授業が中断することにより、受講学生の注意が削がれるのを避けたかったからである。運動方程式については、等加速度運動と単振動を例に、方程式から運動が定まる様子をていねいに見せるようにしたが、減衰振動など、これらを越える場合の解法には踏み込まなかった。

授業内容が固まったので、続いて教科書の検討に入った。他大のシラバス等も参考にして、既存の力学の教科書をいくつか見てみたが、多くは物理を専門とする(または物理を使う)学生を念頭に書かれていて、物理を専門としない初学者が最後まで読めそうな本は意外に見当たらなかった。初学者向けを謳っている本でも内容はあまり変わらず、ただ記述や計算過程をていねいに行っているだけという印象のものが多かった。過程をていねいに説明するとどうしても全体の分量が増える。物理に対する学習意欲がある学生ならばこうした本でもよいが、そうでなければ読み通すのは難しいように思われた。そこで、既存の本から教科書を選ぶことはせずに、新たに教科書を作成することにした。内容が固まるまでには試行錯誤があったが、最終的に100ページほどの本として出版した(石川 2019)。

読み比べた教科書は当然のことながらどれも「物理の内容」を理解することを目標に書かれていた。知識の体系をもれなく伝えるために、記述はどうしても網羅的になり、分量も多くなる。一方、この授業では、高校物理からの独立性を高めた結果として、物理の内容そのものよりも、基本法則から現象を説明するという「物理の考え方」が主題となった。物理を専門の基礎として学ぶ場合には体系的な理解は必須であるが、(自分の分野を相対化するための)教養として学ぶのであれば、詳細な内容は必ずしも必要ではなく、分野

の考え方にふれるだけでも十分と考えられる。物理を専門としない学生のためには、物理の考え方に馴染むことを目的とし、議論の骨組みがよく見えるように内容を制限した本があっても良いと思われた。

## 4. 実施状況

### 4.1 クラス分け

農学部は1学年150人ほどからなるが、毎年、ほぼすべての学生が物理学Aを履修していた。前述のように授業内容は物理既修と未修で共通としたが、同じクラスに既修と未修が混在しては柔軟な対応ができないとの考えから、既修1クラス、未修2クラスの3クラスに分けて、筆者を含む3名の教員で授業を担当した。(筆者は主に未修クラスを担当した。)クラス分けは学生からの自己申告で行い、高校で物理と名のつく科目をまったく履修していないか、物理基礎(旧課程は物理I)のみ履修の学生を未修クラスとした。図1に未修クラスを選択した学生の割合を示す。およそ6割程度が物理未修であることがわかる。

### 4.2 基礎事項確認テスト

授業では高校物理の内容は前提にしないことにしたが、数学は使う必要があるため、初回の授業で簡単な試験を行い、学生の数学力をあらかじめ把握しておくことにした。内容は、ベクトルが3問、微分が2問、積分が2問の計7問であり、いずれも高校の教科書に載っている練習問題と同程度のものである。図2に、ある年の正解数分布を示す。単純な計算ミスということもあるので、1問程度の不正解にそれほど大きな意味があるとは思えないが、中には正解数が4問を下回

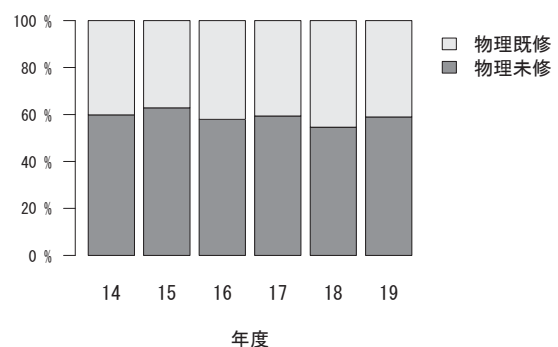


図1. 物理未修クラスを選択した学生の割合



る学生もいて、数学力に問題があるように思われた。正解数の少ない学生は特に物理未修で多く、数学の使用にも慎重さが求められることがわかった。

数学に加えて、物理についても以下のような問題を尋ね、理解を確認することにした。(実際の問題は図を使って説明している。)

- A) 鉛直に投げ上げたボールが最高点に達したとき、ボールにはどのような力がはたらいているか。
- B) 円運動しているおもりを円の中心と結ぶひもが切れたとき、おもりはどちらに飛んでいくか。

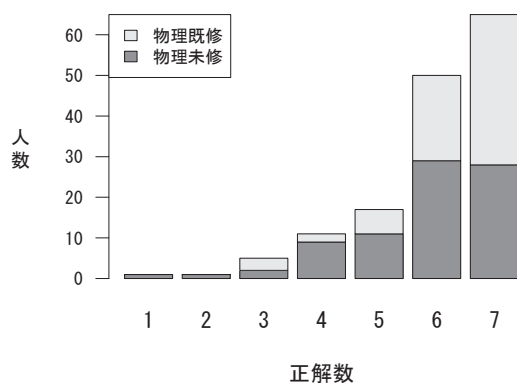


図2. 基礎事項確認テスト(数学, 全7問)の正解数分布

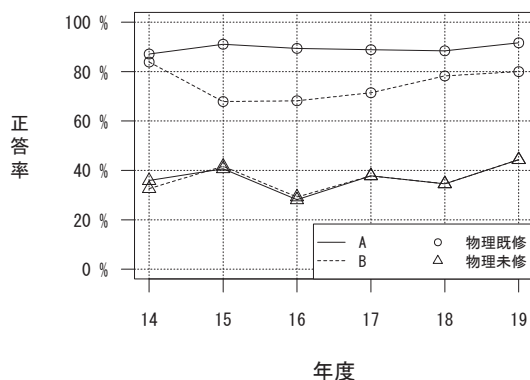


図3. 基礎事項確認テスト(物理, 2問)の正答率の推移(履修歴別)

図3に履修歴別の正答率を示す。年によって多少のゆらぎはあるが、既修、未修による差がはっきりと出ていることが見て取れる。物理への習熟度にこれだけの差がある集団に対して、高校物理を前提とした授業

を行っていたのだから、うまくいくはずもない。学生からの授業評価で不満が出るのも当然といえる。なお、誤答で多かったものはAでは「重力と投げ上げたときの上向きの力」で、Bでは「おもりの回転方向から45度外側に傾いた方向」であった。

### 4.3 授業の様子

授業は表1に沿って、基本的に1回につき1つの項目をこなす形で進めた。(他に、中間試験と期末試験を実施し、年によっては質問対応や補習のための回を設けたこともある。)学生の理解を確認するため、毎回、授業のはじめに10分程度の小テストを行った。

学生の履修態度はおおむね良好であった。特に、未修クラスの学生は少しでも気をぬくと授業についていけなくなると考えていたようで、緊張感を持って熱心に取り組んでいたように思う。それに比べると既修クラスの方は余裕が感じられ、ほどほどの力で授業をこなそうとしているように見える学生もいた。

気になる未修クラスでの内容理解だが、結論から言えば大きな問題はなかった。速度や加速度の定義、基本法則としての運動方程式の理解、初期条件から運動を決定する手続きなど、この授業の目標としていた内容について、多くの学生は理解していたように思う。難しかったのはやはり物理概念が関わる理論的な箇所。運動エネルギーと仕事を扱う回では学生の顔から表情が消えてしまっているように見えることもあった。そのようなときには一般論はほどほどにして、具体例を中心とした授業を行うことにより、学習意欲を途切れさせないことを心がけた。これに対して、具体的な運動を扱う回は、学生がイメージを持ちやすいこともあって、比較的うまくいったように思う。時間があるときには、教室内で適当な物を投げたり、揺らしたり、回したりなどして、運動方程式から導かれた運動が確かに起こることを見てもらったが、学生にはこれが好評だった。

一方の既修クラスでは、最初のうちは高校で学んだ内容を微積分を使って書き直しているようなものなので、つまり学生はほとんどいなかった。未修クラスのように基本的な概念の説明に時間を割く必要がないため、未修クラスでは扱うことができなかった変数分

離法による運動方程式の解法や、単振動の方程式の一般解の導出といった、やや数学的な内容にもふれることができた。こうした内容（教科書には【参考】という形で入れてある）を適宜取り入れることで、既修の学生を退屈させることなく授業を進めることができたように思う。

未修学生に配慮した形に授業内容を見直してはみたものの、授業を始めるまでは、未修学生は既修学生に比べて高校物理の蓄えがない分、かなり不利になるのではと考えていた。だが、授業が進むにつれて、必ずしもそうでないことがわかってきた。

前述のように、高校物理の内容は実質的には公式集のようになってしまっており、公式そのものの由来や相互の関係は背景に押しやられている。言ってみれば「公式原理主義」であり、公式より遡って物事を考えることはあまりない。既修クラスの中には、このような姿勢が染み付いてしまっているがために、基本法則から出発して運動を導いていくという物理学本来の考え方に馴染めない学生が少なからず見られた。例えば、物体にかかる力が一定の場合、運動方程式を積分していけば物体の位置が時間の2次式で与えられることが容易にわかるわけだが、こうした学生はその場合でも暗記している「等加速度運動の公式」ですべて処理しようとするのである。受験勉強の弊害というほかはない。一方、未修クラスでは高校物理の影響はそこまで強くなかったためか、多くの学生は運動方程式を解いて運動を求めるという考え方を素直に受け入れることができていた。高校物理の履修が大学物理の習得を容易にするわけではないことは理解していたつもりだったが、図らずも、障害にもなりうることを認識させられることになった。

#### 4.4 成績評価など

成績評価は、中間試験と期末試験の結果に小テスト成績を加味して行った。担当者3名で協議し、試験問題、採点基準、評価基準、すべてについて3クラス共通のものを作成し、学生にも3クラス共通の基準で評価することを周知した。ある年の期末試験の得点分布を図4に示す。成績上位に既修が多いのは自然であるが、未修学生もかなり健闘している様子が伺える。一

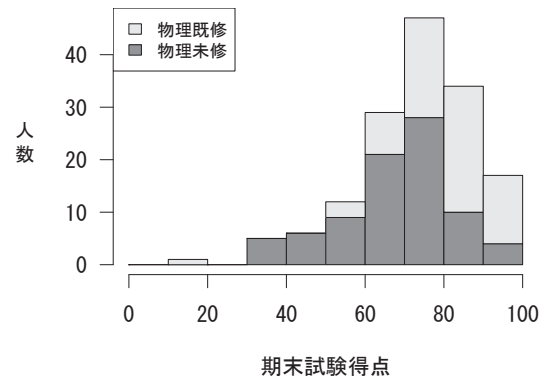


図4. 期末試験の得点分布

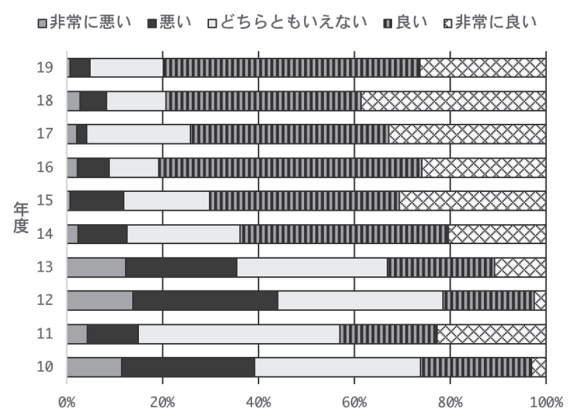


図5. 授業評価結果（授業全体の印象）の推移

方で、既修でも成績中位より下に沈んでいる学生もいる。高校物理の履修歴による差があるのは確かだが、それほど大きい印象はない。高校物理と独立な内容を持ち、既修、未修の双方がともに学べる科目を作るという目標は達成されたといつてよいのではないかと思う。

最後に学生による授業評価の結果を見ておく。図5に、2010年度から10年間の「この授業を総合的に判断するとどのような評価になりますか？」という設問に対する回答（農学部向け物理学A全クラスを合計したもの）の推移を示す。本稿で述べた授業の見直しを行った2014年度以降、評価が改善し、「非常に良い」「良い」を合わせて6割を越えるようになったことがわかる。図6に、見直し後の2014年度以降の6年間について、既修、未修に分けて集計した結果を示す。既修、未修の間で大きな差は見られないことがわかる。未修だけでなく、既修の学生からも良い評価なのは興味深い。学生からは「物理が苦手だったが、この授業はよ

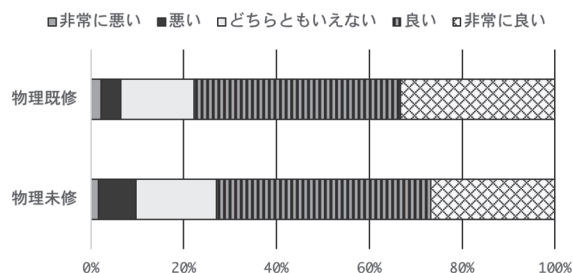


図6. 授業評価結果（履修歴別）

く理解できた」「高校の物理よりわかりやすかった」「生物選択者にもちょうどよい量だった」といった好意的なコメントが多数あった。

## 5. おわりに

農学部向け物理学Aにおける物理未修学生に配慮した新しい形の授業の開発と実施について報告を行った。新たな教科書を作成したこともあり、見直しに要した作業量はかなりのものとなったが、手間をかけただけの結果が得られたのではないかと考えている。昔から行われている力学の授業に比べると、やや軽い内容のものとなったことは否めないが、今の学生が自ら取り組もうと思うには、これくらいの程度がちょうどよいのかもしれない。大学の授業を作る上では、内容の水準を保つことももちろん重要だが、それ以上に、学生に合った適切な目標を設定して、学生が学習を続けていけるようにすることも重要な観点ではないかと思う。

## 謝辞

まず、筆者がこの授業開発に関わるきっかけを作った下だった学務審議会物理学委員会前委員長の日笠健一先生にお礼を申し上げたい。日笠先生には授業の立案の段階から教科書の内容に至るまで、様々な形でお世話になった。また、理学研究科の前田和茂先生、佐貫智行氏のお二人には、授業開発の初期から授業を担当していただき、内容の具体化に向けてご尽力いただいた。この授業の内容が現在のような形にまとまったのはお二人のご協力によるところが大きい。ここに記して謝意を表したい。

## 参考文献

- 須藤 彰三（2017）「物理学・天文学分野の参照基準：概要と策定の意図」, 日本物理学会誌72巻7号 p. 509-512.  
石川 洋（2019）「力学入門」東北大学出版会.