

能動学習型科学概念形成におけるICT活用

— ICT活用した鍵実験で活性化する予想・討論・検証の手順 —

小林 昭 三・興 治 文 子

要 旨：科学の新概念を生む新展開には科学革新の鍵となる実験的な検証が不可欠である。誤概念を転換するには、鍵となる実験を予測・検証する方法の工夫が必要となる。その際、ICTを活用することで実験的検証を的確に実施出来るようになり、学習の能動化による効果的な科学概念形成が可能となる。ICT活用による能動的な実験的検証は科学概念形成にどれほど効果的か、その進展・成果・課題について報告する。アクティブ・ラーニング（AL：能動学習）は、学習者の能動化・活性化を必然化する一連の手順（予測・相互討論・検証過程を中核に含む）で、学習者に科学概念の効果的形成をもたらす学習法として注目され、事前事後テストによりその効果が実証評価・改善されながら、国際的教育研究として推進・蓄積されてきている。100人を超える大規模講義から、数十人の中規模講義、少人数（数人から30人）の実験実習、等の多様な授業環境・形態において、著しい効果を上げる点が特に注目されよう。AL型授業法は、従来の座学による受動型講義授業法と比べて、科学概念をどれほど効果的に形成し得るか。科学教育の到達目標をどれほど効果的に達成できるか。特にICT即時活用で活性化する予想・討論・検証実験はAL効果の増大にどれほど効果的か。そうした、ICT活用をベースとしたAL型科学教育研究の新展開について国際的な視点から考察し、その具体化の試みの幾つかを報告する。

◎Key Words 能動学習, ICT活用による科学概念の効果的形成, 事前事後テストによる実証評価

1. はじめに

科学の基礎的で基本的な概念をより確かに形成するためには、日常体験などから強化される素朴概念を転換して科学概念を形成する際に鍵となる実験・現象を学習者に提示し、実験結果を主体的・能動的に予測・討論・対話・葛藤などを経て、ワクワク・ドキドキしながら実際に実験的な検証をする「能動的学習過程」（アクティブ・ラーニング、ALと略記）が重要である。

例えば、「力と運動」の分野を理解するための基本的な概念を形成する授業でも、アリストテレスが日常体験を体系化した考え方に類似した生徒の素朴概念を転換するためには、説得力ある実験的検証が欠かせない。ケプラー、ガリレイ、ニュートン等は、「摩擦が無視できる天与の真空中における天体の運動法則の観測的検証」、「日常世界の奥に潜み、摩擦が無視できる世界で姿を見せる、地上の運動法則の実験的検証」、「天上と地上の運動法則の統一的集大成と検証」、などによってニュートンの運動法則を形成した。その結果、現代的な科学的認識を確立して、科学の大革新を成し遂げた。学習者が摩擦に富む日常生活で育んだ素朴概念を克服し基本的な科学概念を形成する学習でも、「摩擦が無視できる世界における工夫に富む実験的検証法」などが、その成否を決定付ける程の効果を生む。

科学や科学教育に不可欠な実験的検証手段は、科学技術の進歩（望遠鏡や顕微鏡の発明を含む新科学分野の興隆）にともない準備される。科学技術環境の変化で生まれる教育への新たな可能性を取り入れて科学概念形成で鍵となる実験的検証手段を見出すことが重要である。そうした能動学習型授業法の研究開発を推進

してきた。

高価な実験器具の購入が困難な教育現場にも、こうした能動学習を広く普及するには、身近に入手できる（例えば、100円ショップ）安価で有用な素材を工夫した手軽な教材資源の蓄積が欠かせない。

近年、情報コミュニケーション技術（ICT）が目覚ましい発展を遂げ、理科教育におけるコンピュータ活用法は大変貌を遂げた。顕微鏡が微生物・細胞・マイクロ世界の解明・理解に、望遠鏡が宇宙のマクロ世界の解明・理解に不可欠となり、その観察・観測手段の発展は教育法に大変貌を遂げさせた。同様に、ICTの活用は科学教育のやり方に大変貌をもたらす。何故なら、ICTをうまく活用すれば、科学の基礎・基本となる法則を身につける概念形成過程で、その鍵となる実験・現象に対して「予測の正否を決定・決着する証拠が得られる（白黒がつけられる）」有効な手段を生むからである。解り易い視覚的画像表示が出来るので、誰もが納得できる明快さで即座の検証が可能になるからである。私たちは、そうしたICT活用による効果的な能動学習型の科学概念形成授業を実現する「授業用の実験教材」資源を豊富に蓄積した^[1,3]。

力学分野での有力な実験の検証手段の開発、多種・多様な分野における効果的な科学概念形成授業の蓄積を推進してきた。特に、ミリ秒の分解能を持つICTの活用は、「摩擦が無視できる世界における美しい法則性」や「電気の世界における美しい法則性」に関する詳細な可視化を可能にする。^[2]最近、私たちが開発したタピオカ・ストローを使った吹き矢パイプ系システムによる能動学習では、高速度撮影カメラの活用によって、効果的な力学概念の形成が、安価で手軽に実現できるようになる。

こうした能動学習型のICT活用法を工夫・改善して、低い達成度で問題・課題が未解決な分野でも、目覚ましい学習効果が上がるような状況をもたらす可能性が生まれる。その結果、多様な学習者が科学の基礎・基本となる広い分野で持続的に強い興味・関心を持って、ICTを活用した能動学習をもたらすような科学教育を創生できる。

これにより、昨今の理数学力低下傾向を克服し、理科好きな児童・生徒・学生を大幅に増加できる。日常的にセンサーや運動分析ソフトをどう用いれば魅力的なAL型理科授業が実現できるかについて論じる。

2. 効果的な科学概念の形成を実現する授業法を求めて

「力と運動」の分野において学習者が根強く有している素朴概念をめぐる調査を1980年代に筆者の一人は何度か実施・蓄積してきた^[4,5]。1982年には、その蓄積をより体系的調査問題として集大成して、大学生約130人（教育・理・工・農学部の学生）と高等学校（5校の各1クラス）の生徒約220人、総計350名規模の大学生・高校生に対する調査を実施した^[5]。特に、根強い素朴概念の克服には、丁寧な正しい概念形成の授業が必要となる。「力と運動」分野では、次の3系統の「素朴概念・科学概念」の対として整理できる問題群で、試験形式・無記名回答による実態調査を実施した。

それは、1)「ものの軽さと重さ・質量概念」、2)「動く方向だけへの力・力と運動の法則」、3)「一方的に及ぼす力・作用と反作用」という3系統の対を問うものである。^[5]

この3系統の素朴概念をその対となる「基本的な科学概念」へと転換することが未だに困難な現状にある。これを克服するには、小学校から大学に至るまでの理科の授業法を抜本的に革新することが必要である。実は、最近のICTをめぐる目覚ましい発展によって、こうした新たな能動型学習法の開発を新展開できる可能性が急速に開かれてきているからである。

2012年9月には、理系大学生（理学部・農学部・工学部・教育学部）に対する理科教育法の集中講義中において、3系統の同じ体系的調査問題をクリッカーによる回答を得る方法で実施した。以下では、こうした、1)「ものの軽さと重さ・質量概念」、2)「動く方向だけへの力・力と運動の法則」、3)「一方的に及ぼす力・作用と反作用」、についての1980年代と2000～2012年の実態調査とを、3系統毎に相互比較しながら、それぞれの分野における根強い誤概念をどう克服するかの基礎資料として、総合的な分析・評価を試みる。

「ものの軽さと重さ・質量概念」をめぐる素朴概念の実態調査結果。

- ① 「鉄の容器をはじめ真空にして重さをはかり、次に水素を詰めて重さをはかった。真空の時と水素をつめたときとで重さはどうなるか。次のあてはまる番号を選択せよ。真空の時の方が重い。水素を詰

めた時の方が重い。どちらでも同じである。水素のつめ方が少しなら重くなるが、多いと軽くなる。水素のつめ方が少しなら軽くなるが、多いと重くなる。その他」^[7]を問う問題の調査結果について最初に検討する。

1982年におけるこの問題の調査結果は、「水素ガスに重さがある」という正答率は、全体の平均61%（大学生67%、高校生58%）であった。そして、重さがない（軽さがある）という誤答率は、全体39%（大学生33%、高校生42%）であった。^[5]

同じ問題で、1980年代には何度も調査をしたが、その正答率は60%~70%だった^[4]（水素は軽さ持つという素朴概念は根強い）ので、この結果はかなり普遍的な素朴概念の実状を提示している。

この調査問題は、板倉の文献^[6]の「物理学入門」に記述された1962年の調査問題であるが、当時の調査結果では、正答率は、中学生で26%、高校生で48%であった^[6]（つまり、高校生の正答率は、その後10%程しか上昇しなかった）。当時の一流大学物理専攻では88%であった^[6]。2012年の理系大学生は85%なので、1960年代と全く同様に「大学生でも100%にはならない」点は、今日と同じ状況であり注目に値しよう。

② 図1のように、小石を水中に入れると「小石はその体積に等しい水の重量分の浮力を受ける、逆に、水槽はその反作用を小石から受け、その浮力と逆向きで同じ大きさの力を水槽に及ぼす」。

図1の棒グラフのように、2012年の理系大学生の正答率は49%だった。17%は水いれが小石から受ける力（浮力の反作用）に気づかず500gのままだと考えた。26%は水いれが逆に20g軽くなると混乱した。こうして、約半分の理系学生は、正しい浮力概念形成には程遠い現状にあった。実は、1980年代の調査結果では、これよりはるかに低い正答率だった^[4,5]。

即ち、1982年の調査におけるこの問題の正答率は、全体が28%（高校生24%、大学生33%）だった^[5]。「浮力は物体が水中で軽さを持つため生じる」というように、水中で重さが無くなる、というような素朴概念をかなりの高校生・大学生が持っていた。この問題の正答率が特に目立って低いのは、当時の小学校や中学校の浮力に関する教育が、このように不十分だった（平成10年以降は皆無で現指導要領で加わる）ために、素朴概念のまま放置されたままであり、浮力についての科学的な概念形成が全く行われていなかった状況を示している。^[5]

実は、板倉の文献^[7]に示された正答率は中学生17%・高校生37%で、ほぼ同様だった（水中で重さが無くなる・軽さがある・重さは保存しない）。但し、物理専攻の大学生の正答率は84%だった。^[7]

③ 「空気の出入りが無視できるガラス容器の中の鳥が、飛んでいる時と、止まっている時では、そのガラス容器全体の重さはどうなるか」^[8]

図2の棒グラフは2012年の調査であるが、理系学生の正答率は34%と低く、止まっている時の方が重いと61%が誤答した。1982年の結果では、重さは変わらないという正答率は、高校生30%、大学生37%だった^[5]。飛ぶと重さが無くなると、6~7割が考えてしまう。如何なる場合も重さは保存するという質量保存則がいかに定着し難いかを如実に示す結果である。

こうして、「軽さがある」という素朴概念を克服して、「どんなものにも重さがある」、「ものには重さだけがある」という「正しい重さ概念や質量概念」を、どのようにすれば効果的に形成できるのかが問われている。質量概念形成教育の革新は当時からとても重要な課題だった。

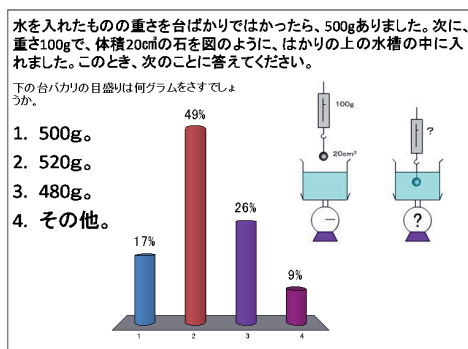


図1 石を沈めた下の台ばかりの値は何グラムになるか？

このように不十分だった（平成10年以降は皆無で現指導要領で加わる）ために、素朴概念のまま放置されたままであり、浮力についての科学的な概念形成が全く行われていなかった状況を示している。^[5]

実は、板倉の文献^[7]に示された正答率は中学生17%・高校生37%で、ほぼ同様だった（水中で重さが無くなる・軽さがある・重さは保存しない）。但し、物理専攻の大学生の正答率は84%だった。^[7]

③ 「空気の出入りが無視できるガラス容器の中の鳥が、飛んでいる時と、止まっている時では、そのガラス容器全体の重さはどうなるか」^[8]

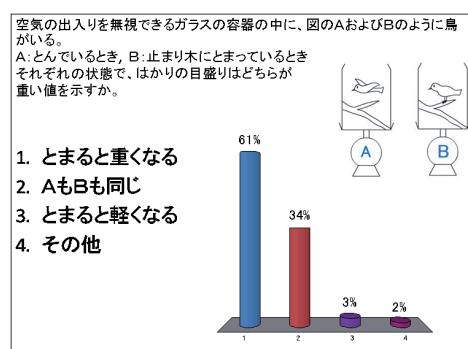


図2 鳥が止まる前と後のガラス容器の重さはどうなるか？

3. 高速動画カメラの利用で衝突現象から質量測定：無重量世界（宇宙船）で質量をはかれるか？

小学校の1年生から6年生までにおいては、理科と算数で「ものの重さや体積」についての学習をする。その「体積や重さの概念形成」には大きな問題がある。特に、ものの重さの概念形成では、「物には重さや軽さがある」という日常的な生活体験を法則化したアリストテレス的（4元素説）な「ものは重さと軽さをもつという素朴概念」を克服すること、そして「どんなものにも重さがあり（軽さはない）・ものの重さは保存する」という科学的な「重さ・質量」概念の形成が重要な課題となる。

新指導要領では3年生に重さの学習として「(1)物と重さ。粘土などを使い、物の重さや体積を調べ、物の性質についての考えをもつことができるようにする。ア物は、形が変わっても重さは変わらないこと。イ物は体積が同じでも重さは違うことがあること」を学習することが、新しく盛り込まれた。しかし、中学校の質量概念の基礎となるような重さ概念の形成が、3年生におけるこのような学習で可能か否かが問題となる。

中学校では、重量と質量の違いを明快に体得する学習教材が乏しい現状にある。そうした「ものの重さ、質量、重量の関係と区別」をめぐる「学習者の素朴概念やミスコンセプションをいかに克服するか」という問題を一気に解決する授業が、次に取り上げる「AI型授業モジュール：無重量世界（宇宙船）で質量をはかれるか？」である^[2]。これにより、素朴概念（重さ・軽さの段階）を克服して確かな質量概念を形成できる。その際、超高速デジタルカメラや各種ITセンサー等のミリ秒分解能を有するICT活用により、新しい理科教育の可能性がもたらされる。

(1) 無重量世界（宇宙船）で質量をはかれるか？

衝突問題を身近な現象に応用する場面としては、巨大風船（直径約1m、見かけの重量約130g、質量約800g）と、質量約130gのラクロス球（水風船でもよい）、質量約800gの物体（水風船を用いた）を図3のように準備する。

これらの物体を出来るだけ長い紐に吊り下げて、ゆっくり動く振り子にして、正面衝突させる。その衝突現象で巨大風船内の空気の質量を測定する能動学習モジュールを考案した。こうして、「巨大風船内の空気の質量」を、衝突実験によって、周囲の空気による浮力の妨げ無しで、正確に測定できる。^[2]

その授業で「気体の重さと軽さ」のような素朴概念を根本から覆す。これらとは全く異なる「巨大風船内の空気の正味の質量」が衝突では本質的な跳ね返り難さの尺度=衝突の衝撃度となる。実験的検証や実体験で「加速しにくさである質量概念」を深く理解する。

さらに、どのような2つの物体を振り子にしても、それらの質量比が衝突によって測定できることを体得する。多様な衝突現象を高速度動画映像で分析すれば、同様な精密な質量比の測定法をもたらすのである。^[2]

実験では、より長い紐に巨大風船を吊るせば、その振り子同士の衝突速度を限りなく小さくでき、巨大風船への空気抵抗を可能な限り小さく抑制できる。又、巨大風船はとてよく弾むので、ほぼ完全弾性衝突をする。その様子を高速度カメラで動画として撮影する。その動画をスローモーション再生し、LoggerProのような運動分析ソフト^[10]により衝突前後の風船の位置の変化、速度の変化、加速度、等を詳細に観測できる。それを基に、如何なる衝突であるかを明確に検証できて、巨大風船内の空気の質量を「浮力の影響を受けず」に単純に測定できるのである。

AI型の授業展開：次の問題を提示し、生徒は予測し討論して、信念に基づく予測を実験的に検証する。^[2]

問題：巨大風船（ゴムの全体の質量130g）に、空気を入れて周囲が314cmになるまで膨らませ（半径50cm）長い糸でこれを吊るした。はかりで量ると130gだった。これと同じ質量の約130gのラクロス球を同じ長さの振り子にして、互いに接するようにぶら下げる。巨大風船を静止させラクロス球をそっと引き離して、速度 v で巨大風船に正面衝突させた。衝突の前と後に巨大風船とラクロス球の運動量の総和が保存

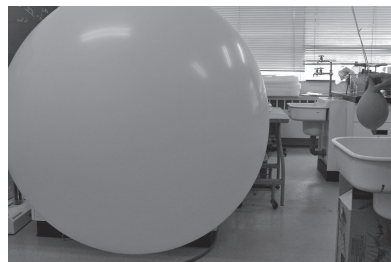


図3 巨大風船と水風船の衝突による空気質量測定法

し、運動エネルギーの総和も保存する完全弾性衝突をするならば、その後の巨大風船とラクロス球の運動は次のどれになるか。

1. ラクロス球が静止し巨大風船が速度 $v/2$ で動き出す
2. ラクロス球が静止し巨大風船が速度 v で動き出す。
3. ラクロス球が静止し巨大風船が $2v$ で動き出す。
4. ラクロス球が、逆向きの「もとの速度の大きさに近い速度」で跳ね返り、巨大風船はほとんど動かない。
5. ラクロス球と巨大風船とは、合体して、質量 $260g$ のラクロス・巨大風船となって速度 $v/2$ で動き出す。

図4は2010年6月のAL授業の結果であるが、56%が「2. ラクロス球とビッグバルーンは質量が等しい衝突（ラクロス球は止まり、代わりに同じ速度でビッグバルーンが動き出す）と回答した（22%だけが正解の4とした）。大方の予想に反して、ビッグバルーンはほとんど動かずに、ラクロス球を軽々と跳ねとばすという意外な印象深い検証結果になる。巨大風船はラクロス球よりはるかに重くてほとんど動かないが、ラクロス球はもとの速さで跳ね返る「4.の衝突」であることが確認された。^[2]「空中で測ると両者はほとんど同じ重さ」であるにも関わらず「ラクロス球の質量は巨大風船よりはるかに小さい」。^[2]

次に、ラクロス球に代えて、約 $800g$ の水を入れた水風船を紐に吊るして、振り子にして衝突させる。それは、ほぼ等質量の玉突き現象（図3では、約 $800g$ の水風船が巨大風船を突き飛ばして、ピタリと止まる）となる。さすがに、図5に示すように今度は62%が正解を予想する（約 $800g$ の水風船はピタリと止まり、代わりに同じ速度でビッグバルーンが動き出す）。

等質量の衝突を高速度カメラで撮影しそのスローモーション再生した衝突直後の動画の中のひとコマが図3である。等質量衝突という単純な衝突なので、一方がピタリと止まる特別単純な現象なので「巨大風船質量は約 $800g$ 」が容易に確定できる^[2]。一般には、任意の質量比の衝突を分析するには、（衝突が速すぎて観測がし難いので）、高速度撮影カメラ（120fps、240fps程度）で撮影して、スローモーション再生による、詳細な位置の分析が必要になる。このように、衝突現象により、正確な質量比を（浮力により減じられてしまう重さではなく）求めることが出来る。従来までは、速すぎて観測が困難だった衝突現象でも、ミリ秒まで時間を分解できる安価な高速度カメラを活用した解り易い質量測定が可能になる。

これらのも能動学習の発展として、原子や原子核や素粒子のようなマイクロ世界では、微小な粒子の質量をどのように測定するのだろうかと考察させるより高い目標への見通し開かれている。小中高大への統一的方向目標に沿う豊かな授業展開も切り開かれよう。

(2) 重心系での振り子衝突で錘の質量を決定

摩擦が無視できる空中での運動の中で、力学の歴史的発展において重要な役割を果たしたのは、「振り子による衝突現象」である。特に、「重心系衝突（ホイヘンスの振り子衝突におけるテコの原理）」が成り立つ重心系での衝突法を手軽に実現できる巧妙な手法を、私たちは研究開発した。

その重心系振り子衝突を「ミリ秒分解能ICT活用」によって詳細に分析して効果的な質量概念を形成する「AL型授業モジュール」を作成した^[2]。

例えば、ホイヘンス達は次のことを解明していた。「完全弾性衝突では運動量とエネルギーの保存則が成

ラクロス球(LB)とビッグバルーン(BB)の運動は次の中のどれか。

1. LB静止し、BB速度 $v/2$ で動き出す
2. LB静止し、BB速度 v で動き出す。
3. LB静止し、BB速度 $2v$ で動き出す。
4. LBは跳ね返り(- v)、BBはほとんど動かず。
5. LBとBBは合体して $v/2$ で動き出す。

図4 ラクロス球とビッグバルーン衝突の予測

水球とビッグバルーン(BB)の衝突後の運動は次の中のどれか。

1. 水球は静止し、BBは速度 v で動き出す
2. 水球は跳ね返り、BBはほとんど動かず。
3. 両者は合体して $v/2$ で動く。
4. その他。

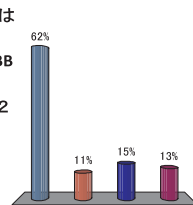


図5 水球とビッグバルーン衝突結果の予測結果

り立つ。衝突現象を『動いている座標系に移って観測する』という思考実験を工夫して、重心系や実験室系等の最も理解しやすい座標系を選んで衝突前後の質量や速度や運動量を議論できる。それは「衝突現象の本質」は座標変換により不変であることによる。等々。」

特に、重心系では「衝突の前後・全過程で、2つの衝突物体の重心の位置は不動」である。これから、衝突全過程における、2球の位置は「重心を原点にして、常に、正負逆の符号で、それぞれの重心からの距離はその質量に逆比例する」。速度や加速度についても、全く同様であり、「互いに逆符号で、大きさは質量に逆比例する」。このような美しい法則性は「衝突におけるテコの原理」と呼ばれる。重心系の衝突では衝突におけるテコの原理」成り立つ。ニュートンも、こうした衝突現象の分析を継承発展させて、「運動量の保存則」「作用反作用の法則」「運動の第2法則」等、を導いた。^[2]

このように「運動量の保存やエネルギーの保存」を体験させる際に欠かすことの出来ない「典型的な素過程」として、物体の衝突現象を位置づけることは妥当なものと思われる。その意味で、昨今、急速に新たな手段が手軽に得られる「ミリ秒の世界」で、こうした方向での衝突現象の教材開発は「効果的な力学概念の形成」を生むことを可能にする貴重な宝庫となる。

特に、最近では、子供でも日常的に使えるような身近な道具として「千分の1秒の分解能を持つ高速デジタル動画カメラ」などがある。衝突の様子を千分の1秒の分解能において視覚化することで、「衝突の科学的な理解の促進」と「効果的な運動と力の概念形成」を効果的に実現できる全く新しい可能性が開かれている。千分の1秒の分解能を持つカシオEX-F1カメラやカシオEX-ZR100,200,300^[11]などで、様々な衝突実験を撮影し、その衝突を超スローモーションで視覚化できるからである^[2,11]。

鉄球や強力磁石球などの衝突現象は、実際に肉眼では観測するのが極めて困難な一瞬（非常に短い時間）に生じることがほとんどである。それらを千分の1秒の分解能で視覚化できるので、学習者や教える側も楽しみながらAL型の授業を実施できる。従来は、視覚化できずに教材化が困難だった現象であるが、今や「衝突現象の意外な奥深い事実を感動的に実体験」出来るので、多様な衝突現象を教材化して、その重要な意義と役割を、教育的に現実化できるようになった。

ミリ秒の分解能を持ったICTツールやLoggerPro^[10]等を駆使すればこのような新しい条件を生み、「予想を定量的に検証する効果的な場面」が豊富に設定可能になる。的確な予想・検証過程を感動的に実体験する「最先端のAL型の理科授業モジュール」を系統的に開発できる。

従来からのてんびん等による重量測定のみならず、何らかの物質の実質の量を測るにふさわしいやり方を見つけて、「質量を易しく教えることはできないか」という夢は、なかなか実現されてこなかった。しかし、今では衝突現象における上記のようなミリ秒世界のICT活用で、実際に「易しく質量を教える」という夢は、容易に叶おうとしている。以下では、衝突現象をめぐる、そのような最新の取り組みについて報告する。それは、衝突現象をめぐる最新のICT活用によるアクティブ・ラーニング型授業モジュールであり、こうした方向での魅力的理科授業への創新を目指す試みである。

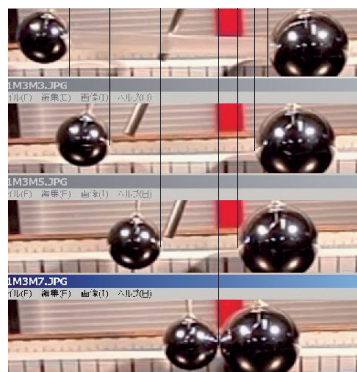


図6 M-3M重心系振り子衝突における重心からの距離が質量に逆比例（衝突におけるテコの

(3) 「M球と3M球の重心系での衝突現象」と「ミリ秒でのスローモーション分析」

質量比が3:1であるような、2球を正面衝突させる現象を取り上げよう。質量比が3:1の2個の鉄球の完全弾性衝突は「特別に面白い規則性を示す衝突」であることが、従来からよく知られている。

それを、カシオEX-F1で1200fpsの高速度動画映像として撮影して、パソコンで位置分析をし、運動分析ソフト等で詳細に運動分析をした^[2]。そのような運動の分析を基軸とした「AL型授業モジュール」を「他の様々な衝突の典型例」として、最初に詳しく論じておこう。

次節の実験室系での議論で示すが、一般的には「運動量保存の法則（精密に成り立つ）」と「エネルギー保存則（よい近似で成立）」とが、衝突前後の速度や運動量を決定する際に決定的な鍵となる役割を果た

す。

しかし、実験室系では、我々が特に工夫した「手軽に重心系での振り子衝突を実現」してしまう方法が、以下の議論のように、重要かつ決定的な役割を果たす。

それは、図6、7に示すように、2つの振り子の鉄球の間に太めのストローを挟んで吊り下げることによって、それら2球の重心は振り子の真下になり、任意の重量の2球に対して「重心系」を実現する手軽な方法である。そのストローをサッと外すと「重心系の振り子衝突」がいつも簡単に開始してしまう。

図7は、Mと3Mの鉄球の振り子衝突を「常に重心系で実現」するような、「2球間にストローを挟む」工夫を示す。その「V字型の2つの振り子」で、2球間に挟んだストローを外す寸前の状態にある静止画である。^[2]

その2球間に挟んだストローを外すと、Mと3Mの鉄球の振り子は、どのような運動をするだろうか。

その詳細はEX-F1の1200fps高速動画映像として撮影され、ひとコマ送りまで可能なパソコン上のquick time動画として提示して、スローモーションや任意のコマ送りで詳細に2球の位置が分析できる。

図6は典型的な2球の位置を示す4枚の静止画像である。それぞれが、M球と3M球の重心系衝突において「重心系衝突におけるテコの原理」を明瞭に示す。つまり、2球はその重心を変化させない位置に常にある。衝突の前後で2球は重心からの距離が常にその質量に逆比例している位置に常に存在しているのである。^[2]

最下端の2球の接触点で、垂直に実線が引いてある。そこから2球の移動距離は常に質量に逆比例する距離、即ち、左右への移動距離は常に3対1（質量は1対3）であることを、その左右に動いたM球と3M球（下から2、3、4番目の画像の）に接する「垂直な実線」により示されている。従って、その衝突の全プロセスにおいて、互いに逆向きで質量に逆比例する大きさの「速度および加速度で跳ね返る」ことが常に成り立つ。従って、質量と速度の積（運動量）は常に逆向きで相等しく運動量の総和は常にゼロである。このように重心系の衝突は「衝突におけるテコの原理」が成り立つ単純明快な予測・検証過程を生む。^[2]

実は、この「ふれ幅が小さい水平方向の振り子の振動」は単振動（かなり高い精度で近似できる）である。2球は最下端の重心の位置を中心に単振動をする。初速度ゼロで始まる最大振幅から中心（原点）に向かい、最下端の重心に達する直前に、図6のように、向き合う鉄球に衝突して跳ね返って、逆向きの中心から遠ざかる方向に単振動をする。再び中心に戻って、再度衝突する。何度もこのような単振動と衝突を繰り返す。^[2]

図7は、M球-3M球の重心系振り子衝突をVideo Point^[10]により運動分析した結果を示したものである。

図の上部の○印は、左のM球が位置を、右の3M球より常に3倍大きく変化させ（○印の粗密さでわかる）、常に3倍ほど速く動いている様子を示す（原点は衝突点、xの正方向は右方向、なるx、y座標を設定）。

その下部は、上がx-tグラフ、下がv-tグラフである。いずれも、Sin（正弦）カーブのほぼ半分直前までを描く。振幅が小さいx-t、v-tグラフが3M球の位置と速度を表している。振幅が大きいx-t、v-tグラフ（それぞれ3倍の振幅）がM球の位置と速度を表している。^[2]

以上の分析から明らかなように「M球-3M球の重心系振り子衝突」を手軽に具現化して「ミリ秒の世界」で視覚化して分析することは振り子衝突の本質と質量・運動量・エネルギーの詳細な分析を可能にする。

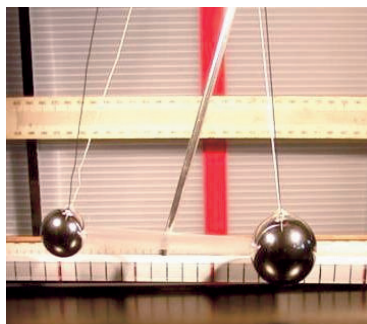


図7 質量M-3Mの2鉄球の重心系での振り子衝突を実現する巧妙な方法（太めのストローを挟む）。

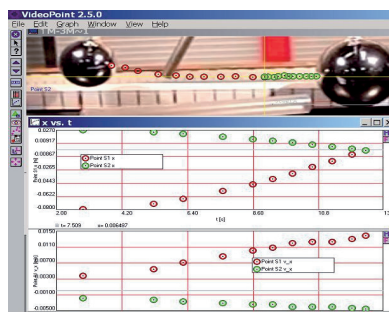


図8 Mと3Mの鉄球の重心系振り子衝突のVideo Point^[7]による運動分析（上-x-t、下-v-t）

4. ICT活用によるAL型科学概念形成授業法の有効性

さらに、2)「動く方向だけへの力」3)「一方的に及ぼす力」をめぐる素朴概念調査では(後述)、誤った素朴概念はより高い率だった。その厳しい状況は、昨今の調査結果でも基本的に変わらない。

教育方法の根本的な革新・改革なしでは根強い誤認識の克服が困難なため、「運動の法則」の学習は「小中学で消え去る寸前」まで、ゆとり教育時代には縮小した。そうした困難な状況を改善するには、誤認識を克服し得る鍵となる実験教材の開発が急務だった。そのような教育研究の源流は、1950年代から1970年代の日本の小学校から高校における理数分野の教育革新運動であろう。

1957年のスプートニク・ショックに端を発した世界的な教育改革の流れと連動して、日本各地で小・中学校の授業改善の取り組みは、本格的な教育改革の力強い潮流として育ち始めた。教育の現代化運動、分析と総合、帰納と演繹、系統性と順次性、科学の基礎・基本の明確化、原子論教育の見直し等、様々な科学概念形成授業法のイノベーション的な展開・進展が開始した。水道方式(1958遠山)、新しい理科教室(田中1956)、板倉聖宣の仮説実験授業が1963年に^[6]、高橋金三郎の極地方式が1970年に^[8]、玉田泰太郎の到達目標・学習課題方式が1976年に開始した。これらの潮流を教訓として、1980年代に私達も3系統の素朴概念調査を基礎に科学教育革新の取り組みを進展させた^[4,5]。

板倉等の仮説実験授業は「科学的認識は、対象に対して〈仮説・予想〉をもって意識的に問いかける〈実験〉によってのみ成立する。科学的認識は社会的な認識であって、個々の人間が仮説実験的に確かめた事柄を越えた認識を目指すもので、授業には各クラスの教師と生徒の個性を越えた法則性がある」、というような基本的立場に立つものである。

玉田泰太郎の到達目標・学習課題方式(三井澄雄氏の命名)は、「到達目標→具体的内容→教材構成・指導計画；課題を出し→生徒「自分の考え発表」→討論→ひとの意見を聞いて→実験をして→実験で分かったことをノート」なるものである。

1970年代から1980年代には、欧米でも、大学生の授業によって「素朴概念や誤概念がどれだけ転換され、正しい科学的認識をどれだけ身に付いたか」という科学教育における効果的概念形成に関する実態調査が急進展した。ワシントン大学のグループ(Arons, L. C. McDermott, 他)などが、力学分野や電磁気学分野の素朴概念や誤概念の調査による教育改善の成果をもたらし、その後の教育革新への奔流を生む事になる。そうした国内外の科学教育の達成度の調査によって、従来型の受動的に聞き覚えるタイプの授業によっては「素朴概念が根強く、力学の基本的な概念を生徒・学生には正しく形成されない実態」が浮き彫りにされ、克服法の研究開発が進展した。

さらに、1990年代には、強力に育ち始めたICT活用とタイアップさせて、受動的学習・講義スタイル→能動的学習スタイルにより、素朴概念や誤概念を転換して科学的概念形成を効果的にもたらす「アクティブ・ラーニング型授業が進展した^[12]。運動分析ソフト(ビデオポイント)^[10]の元祖がPriscilla Laws達である^[13]。

そうした運動分析ソフトやITセンサー活用によるAL授業展開法を確立した「Sokoloff, Thornton, Lawsのプロジェクト」は、日本とは逆に、大学→高校へと研究開発・実践蓄積・世界的普及が急速に実現したものである^[12,13,14]。素朴概念や誤概念を転換して科学的概念形成を効果的にもたらすために、テレビ用の動画映像をパソコン画面に取り込み、物体の位置をマウスクリックしてその時間的変化や速度の時間変化(x-tグラフ、v-tグラフと呼ぶ)を分析・表示する「LoggerPro^[10]のような運動分析ソフト」が開発された。

さらに、位置センサーにより、物体の位置や速度や加速度を、瞬時にパソコン上に表示して、運動を分析するというような、ICT活用による能動学習法が進展した^[12,13,14]。ICTを活用した能動的な授業展開、即ち、AL授業法が、米国の大学から高校へと広まり始め、間もなく世界的な普及を開始した。典型的な実験・現象の結果を予測させ、その結果を、ICT(センサーや運動分析ソフト)で、ほぼリアルタイムに検証するというような、とても効果的な授業法が可能になった^[12,13,14]。私達も、日本のデジタル動画カメラの進展等を背景に、こうした本格的なICT活用法を急進展させた。1980年代に試行・蓄積した教育革新の基盤上に、ICT活用型能動学習を本格化させた。^[1~3]

こうしたICT活用によるAL型授業は従来の座学が主な受動(PL; パッシブ・ラーニング)型授業と比べ科学概念をどれほど効果的に形成し得るか「事前・事後テスト」で確認された調査結果を概観しよう。

力と運動の分野においては、FMCEやFCIとよばれる事前・事後テストによる概念理解の評価がある^[12]。オレゴン大学(図9; 文献^[13]から作成)や、タフツ大学におけるPL型の講義での事前・事後試験によるFMCEの調査結果では、コイン投げ上げ問題で10%、斜面上の台車押し上げ問題で5%程度と僅かしか理解が深まっていない^[12,13]。これに対して、図9のオレゴン大学の調査結果では、「リアルタイム物理」というICTを活用したAL型授業により、PLよりも力学の概念形成が著しく向上した^[12,13]。従来型のPL授業では、力学の基本的な概念を生徒・学生に正しく形成することが著しく困難であることが、様々な達成度調査によって明らかになっていた。そして、ITセンサーや運動分析ソフトなどで、典型的な実験・現象をリアルタイムに実体験し明快に検証する効果的な授業法が育った^[12,13]。

タフツ大学におけるAL型授業による力学学習のFMCE調査結果では、90%を越える驚異的な事後テストの達成度を示した。以上のように、力学概念の形成度を評価するため、米国の多くの大学では、FMCEによる事前・事後テストが実施され、学生の素朴概念は、リアルタイムにICTを活用したAL型授業での検証実験によって見事に克服されることを実証するものであった^[12,13,14]。

図10はHakeプロット^[15]と呼ばれる、6542名の学生に対するFCIテスト調査の結果を示すグラフである。達成度の増加率を、事前テストの正答率ごとにプロットしたグラフである。ここで、達成度の増加率G(ゲイン)の定義は、 $G = (\text{事後test}(\%) - \text{事前test}(\%)) / (100 - \text{事前test}(\%))$ である^[15]。例えば、事前テスト結果が10点であれば、事後テスト結果から10点引いたものを、90点で割った値がGとなる。

AL型授業(Interactive Engagement)は明らかにPL型授業(Traditional)よりも高いG値である。AL型授業の平均値0.48はPL型授業の平均値0.23の2倍以上であり、倍以上の目覚ましい達成度増加となる^[15]。従って、AL型授業はPL型授業の指導方法よりもはるかに優れているという結論を明瞭に確認された。^[15]

こうしたAL学習法のアジアにおける普及・促進活動は、1999年1月にスタートしている。全米科学財団(NSF)の援助で、メルボルン(オーストラリア)で開催されたアクティブ・ラーニング・ワークショップ(ALW)が最初である。

その後Thornton, Sokoloff, Lawsの3人が講師団を形成し、アジア各地からのASPEN(Asian Physics Network)メンバーもその受講者となった。2000年以降におけるASPENワークショップはこれを雛形として、タイ、全州(韓国)、ペラデニア(スリランカ)、マニラ(フィリピン)

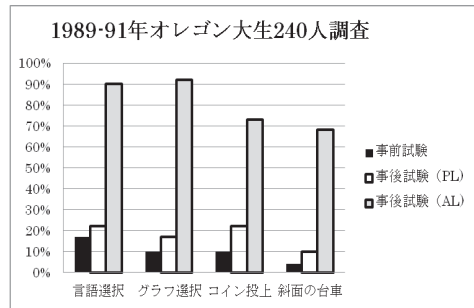


図9 受動型とリアルタイム物理によるFMCE結果^[12,13]

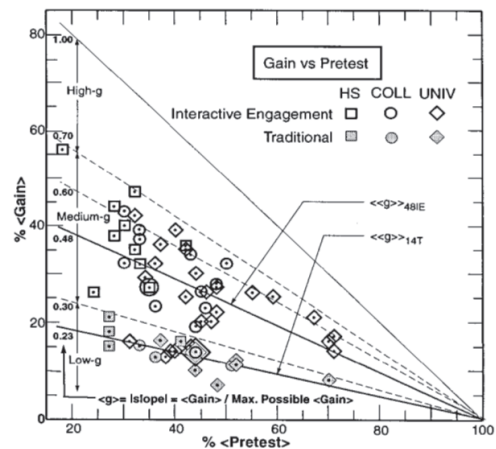


図10 FCIテスト調査の結果のHakeプロット

空中を空気の抵抗を受けながら飛行しているジェット機がある。一定の速度で水平に飛行している時、ジェット機の水平方向の推進力と水平方向の空気抵抗の関係は次のどれか。

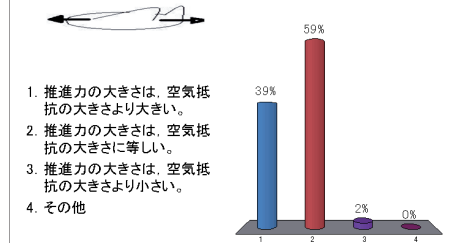


図11 一定速度で水平飛行するジェット機に働く2力

ン), ビエンチャン(ラオス), マレーシア, 日本等, アジア各地で次々と開催された。アジア各地の社会的・文化的風土に適合するようにしながらAL(能動的学習法)の適応・改善・促進が進展した(筆者小林はその日本代表)。2001年にASPEN(韓国)でALワークショップが実施され, 全北大学や新潟大学を含むアジアの各大学でAL型授業研究が進展した。2003年には, CIEC学会のPCカンファレンス鹿児島でASPEN事務局長Alex Mazzolini(現議長)を招いたAL講演会を開催した。その後, 東京においてAL講習会(筆者も実演)を開催した。さらに, 2005PCカンファレンス新潟では, 韓国のASPEN元議長や委員2名を招いたAL講演会が実施され, その後も韓国のICT視察等が進展した。

日本でのALの本格的な普及推進の取り組みは, 2006年のICPE東京(International Conference on Physics Education)である。Sokoloff, Laws, Redish達を招いた講演やALワークショップ, 香川大・ASPENの連携で, ALプレ・ワークショップに多数の日本人の参加を実現した。なお, 以上のAL型授業法を2000年前後から体験した(小林)際の第一印象は「AL型授業法は仮説実験授業などと手順・方法・ねらいを一にしている」というものだった。これまで私たちが試行・工夫を重ねてきた「予測・討論・検証」における実験的検証法でも, ICT活用を本格化することで, 能動学習の効果を高めることが出来た。そうした従来型の受動的な講義中心の教授法を「ICTを活用した能動学習法」に革新するような, 力と運動, 作用と反作用, 他の分野の具体的進展について概観しよう。

5. 軽量力学台車で力と運動の関係についての効果的な概念形成授業法

前節の2)「動く方向だけへの力・力と運動の法則」において, ICT活用は誤概念を科学的な概念に転換する上でどれほど効果的かを詳しく考察する。特に, 1982年と現代の調査結果を示しICT活用の効果を論じる。

空中を一定速度で水平飛行しているジェット機がある。右の様な一定の速度で水平飛行している時の, 推進力の大きさと空気抵抗の大きさを比較せよ。という図11, 12のような問題に対し, 1982年には, 誤概念である「動く方向に力が働く(推進力の大きさは空気抵抗より大きい)」とした誤答率は, 全体は69%(大学生56%, 高校生77%)だった。文献^[9]にある中村敏弘(運動と力)の調査(216人)でも52%だった。2012年の理系学生(図11)でも59%だった^[5]。推進力と空気抵抗の大きさは等しいという正答率は, 1982年の調査では全体の26%(大学生43%高校生16%)^[5], 文献^[9]では36%, 2012年の理系学生でも39%だった。以上のように, 今日の理系の大学生に至るまでが, 60%~70%がアリストテレス的誤概念「動く方向に力が働く」を転換できない。

さらに「このエンジンが止まったらジェット機に推進力が働くか?」について問う問題では(図12), エンジンが止まっても推進力は働くは, 1982年の全体平均で59%(大学生53%, 高校生63%), 2012年の理系学生(図12)の65%と答えた。働かないという正答は, 全体の38%(大学生45%, 高校生33%)だった^[5]。

2012年には35%でほぼ同じ傾向である。即ち, 「動く方向には, 力がいつも働いている」というアリストテレス的な素朴概念はかくも強固なのである。

同様に, 図13のようにボールを斜方投射した後の「放物線運動中に働いている力」についての回答(複数回答可)を1982年実施した。^[5]

問題: 斜め右上に上昇中, 最高点, 斜め下方に下降中, のボールには, どのような力が働いているか?

この問いの答えとして, 各瞬間のボールに働く力のベクトル(5方向矢印を記入)から, 働く力を選択する(複数可能)問題である。1982年の結果: 下方に働く重力(オ)を選ぶ正答率は, 全体がAで65%(大学生80%, 高校生60%), Bで65%(大学生78%, 高校生58%), Cで80%(大学生90%, 高校生76%)である。進行方向の力を誤って選択する回答は, 全体がAで40%, (大学生28%, 高校生50%), Bで52%(大

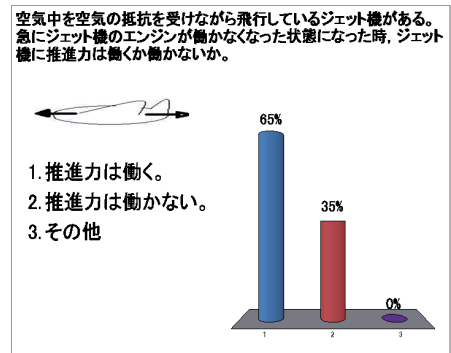


図12 エンジンが停止したジェット機の推進力はどうなる

学生45%，高校生55%），Cで30%（大学生20%，高校生40%）ほどである。^[5]

ここでも動く方向に力が働くという素朴概念がとて根強いのである。

自転している太陽と、太陽の周りを公転している地球（自転もする）について、図14のように示された働く力の候補から複数選択させる問題での1982年実施した調査結果は、次のようであった。

実在する万有引力を正しく選択できた正答率は、全体45%～60%（大学生は高校生より20%ほど正答率が高い）。実在しない力を上げる回答率はかなり高い。例えば、太陽の自転方向の力を答えた大学生は37%，高校生49%，地球の公転方向への力を答えた大学生は41%，高校生は54%，地球の自転方向への力は、大学生の40%，高校生の41%，と云うように、いずれでも「40%前後が回転方向の力が働く」というアリストテレス的な誤概念を持つのである。^[5]

このような「動く方向に力が働いている」という素朴概念を「いかに効果的に覆すか」が問題となる。ICTを活用する能動学習型授業によるそのような授業改善の方策を研究開発したのでこれに触れよう^[1-3]。

「動く方向に力が働いている（ボールの投げ上げ）」のようなアリストテレス的素朴概念をどう転換するか

摩擦がごく少ない滑走台と力学台車とを、図15のように、2セット並べて置く。1セットは、ゆるい傾きの滑走台（図15の最上部の斜面）の斜面に沿って下方に、台車は重力と抗力との合力（ F_A ）を受ける。即ち、斜面方向の重力成分に等しい力で、斜面下方に等加速度運動を行う。

他の1セットは水平な滑走台であり（図15の上から2番目の滑走台）、この上に力学台車に携帯扇風機を載せて、ミニ扇風機によって左方向に一定の推進力（ F_B ）を台車に加え続けさせる（等加速度運動を行わせる）。2セットの推進力がほぼ等しくなるように滑走台の傾斜の傾き角を調整する。 $F_A \approx F_B$ なるように、うまく調整できれば、両台車はほぼ同一の等加速運動を実現出来るので、この2セットの運動を対比させる実験が実施出来る。^[1]

次の問題を学生に予測させてAL型授業を実施する。

問題1：斜面上で台車を離すとどのような運動をするか。その時どのような力が働いているか。（選択肢省略）

問題2：携帯扇風機のプロペラが勢いよく回っている台車を台上に置いて手を離すとどのような運動をするか。また、どのような力が働くか。

問題3：斜面の上方向に勢いよく台車を押し放し、上って、反転し、下るときに、それぞれの場所（上り、反転点、下り）ではどのような力が働いているか。

問題4：携帯扇風機の推進方向と逆向きに勢いよく走らせるとき、どのような運動をするか〔位置や速度の時間的変化のグラフ（ $x-t, v-t$ ）はどうなるか〕。上り・反転・下る最中には、どのような力が働くか。

[1]

斜面の運動と携帯扇風機による運動との、それぞれを対比させて考察させ、結果の予測を実験で検証する流れで、演示実験授業を行う。

ここで、特に注目にするのは、任意の時と場所で携帯扇風機の推進力を（扇風機を取り去って）0に出来ることである。

運動分析ソフトLoggerPro^[10]（又は距離センサー）を使って、その等加速度運動を分析する。動画上の物体の位置をマウスでクリックして得る位置の時間変化グラフ（図15の右下）、速度の時間変化のグラフ（図15の左下）をパソコン・液晶プロジェクターで示し各実験の位置や速度グラフを予測させICTで検証する。

特に、問題2の推進方向と逆向きに勢いよく走らせ、反転して戻ってくる運動、問題3の台車を斜面の上方向に押し出し反転して戻ってくる運動とを、同時にほぼ同様にさせて対比したもので（図15左下の右下がりの速度グラフ）ある。反転する瞬間に載せた扇風機を取り去ると、推進力をゼロにできる。すると台車

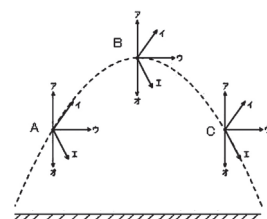


図13 放物線運動中に働く力

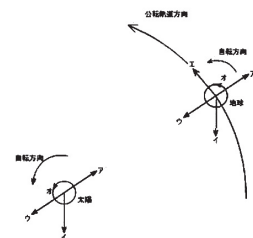


図14 動く地球や太陽に働く

は止まる（図15下の図の左下：反転後に速度ゼロを保つグラフ）が、斜面上の台車は反転して下る^[10]。以上のようにして、反転の瞬間にも重力はゼロにならない証拠を対比実験と分析グラフで明快に示すことができたのである。

力学台車を一定の力で制御する等加速度運動や、斜面上方へ力学台車の押し上げる運動（ボールの投げ上げ運動に相当）等、超軽量力学台車やICTが無い1980年代には実現が不可能だったことでも、今では自由自在に実施できるようになった。

このような、2セットの運動を対比させる事によって、投げ上げ運動の上昇中・反転点・下降中に働く重力を、大きさを自在に変えて実態を捕え易くしたり視覚化し易くして「重力と対比できるミニ扇風機の推進力」を重力の代わりとして使うことで、「そこに働く力と運動をICT活用により視覚化して詳しく調べる」ことができるようになった。記録タイマーしかない1980年代には不可能だった夢が具体化できたのである。

こうした工夫が自由にできる「ICTを活用したAL型授業」を受けた学生は、力学台車が斜面を上るときにも、重力（扇風機の推進力）が下る向きに実際に働く実体験をして驚く。このICT活用実験によって「力は動く方向に働いているという信念（アリストテレス的な誤概念）」を効果的に覆す事が可能となったのである。

大学生（約100人）や高校生（約40人）の予測結果（2003年）では、どちらも約60%、「台車が斜面を上る時は上る向きに力が働く」という誤概念を持っていた。^[1]

最上部で台車が反転する際に「働く力はゼロ」と50%前後が答えた。常に斜面を下る向きに一定の大きさの力が働いているという正解は大学生21%、高校生23%だけだった。^[1]

以上の結果から、「ものが動くときはその動く方向に必ず力が働いている。速さは力に比例する」というアリストテレス的な誤概念が根強いが、それを効果的に転換できる授業が実現できたことがわかる。^[1-3]

2012年の理系学生に対する調査結果では、ボールの投げ上げの調査結果では、正しいv-tグラフを選択できた学生は66%だった。

2005年度の高校理科全国学力調査結果では（図16）；v-tグラフの解答の状況は（正解は3番目の等減速運動）、高校生の23.6%が正解を解答した（AL学習後の大学生は78.3%）。高校生の場合、大部分は間違ったv-t

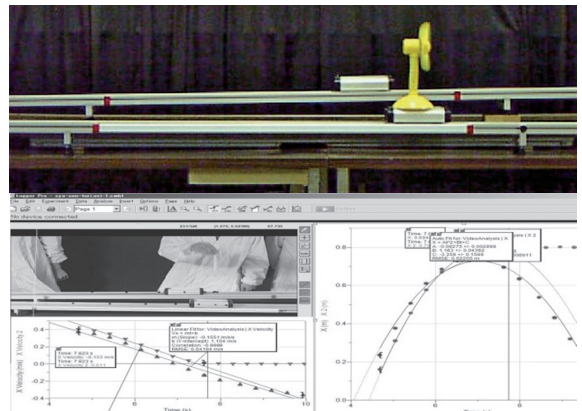
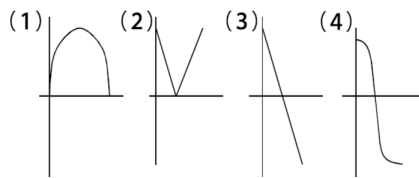
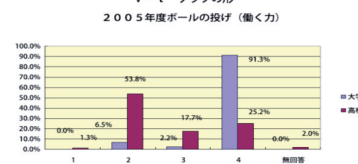
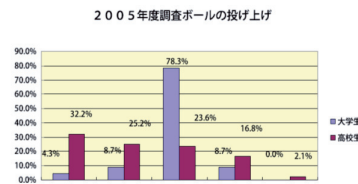


図15 斜面上（台車）と水平面上（扇風機をとる）での反転の対比



グラフ	上昇中	最高点	下降中
(1)	上向き	上向き	上向き
(2)	上向き	力働かず	下向き
(3)	下向き	力働かず	下向き
(4)	下向き	下向き	下向き

図16 2005年度の高校理科全国学力調査結果；ボールの投げ上げの「v-tグラフ(上)と働く力(下)」

グラフを選んだ。注目すべきは、ボールが「上昇中には上向き」、「最高点では、ゼロ」、「落下中には下向き」、の力が働くというように、大部分の高校生は誤答していることである。これは「力が働く方向に運動する・動く方向に力は働いている」という素朴概念にある状況を示す。AL学習後の大学生の正答率は91.3%だった。^[1]

運動の第一法則と第二法則のAL型授業法

通常は、その前後には、運動の第一法則、第2法則に関するAL型授業モジュールを配置して実施する。

運動の第一法則： 図17は、運動の第1法則（慣性の法則）に関するAL型授業モジュールである。

問題 力学台車(摩擦がほとんど無視できる水平な滑走台上)を、勢いよく、正の方向に手で押し出した後には、どのような運動をするか。台車の速さの時間的な変化のグラフ(v-tグラフ)は、次の何番になるか？

問題 力学台車(摩擦がほとんど無視できる水平な滑走台上)を、勢いよく、正の方向に手で押し出した後には、どのような運動をするか。台車の速さの時間的な変化のグラフ(v-tグラフ)は、次の何番になるか？

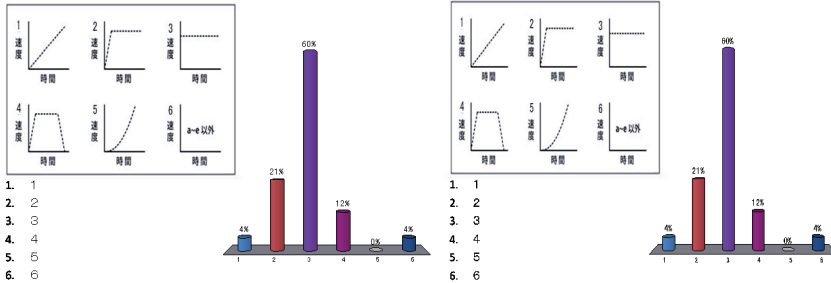


図17 運動の第1法則（慣性の法則）に関する誤認識の示体調査の結果（理系学生約100人）

を知識理解したとしても、「力が働かなければものはやがて静止する」・「動くものには動く方向に力が働いている」というような素朴概念によって、無意識化では支配されるようなことになる。

2012年度の理系学生への授業では、図17のように「力学台車の運動に対するv-tグラフ」の正答率は60%で、等速直線運動に際しては「力は働かない」が62%（30%程は正方向の力を考える）程という結果である。

運動の第1法則の概念形成が1回だけの学習で実現出来るという安易な期待は裏切られるのが常である。従って、概念形成が不完全な段階でも、続けて第2法則を学習して「力が働けば速度が変化する・加速度を生じること、力がゼロであれば加速度は生じないこと（等速直線運動をすること）。という実体験を通して、力は速度でなく、加速度をもたらし、逆に、「力がゼロなら等速直線運動になる」という、第一法則の体験的に深めることで、その理解を1段階程高い確信にまで進めることがとても重要なステップと思われる。

さらに、第一法則は慣性座標系という「運動法則の前提条件を与えるという特別な役割を持つ座標系」であること。それらの慣性座標系は座標変換（位置座標を等速直線運動させるガリレイ変換）で相互に移行できること。「全く同一な運動法則」どの慣性系でも成り立つ。どの慣性座標系（ニュートンの運動法則が成り立つ座標系）も対等であり、私たちの絶対的な等速運動が指定できる特別な慣性系は存在しない。慣性法則はより深い体験から概念形成が深まり本格化するものである。等を後に学習することがさらに必要となる。

運動の第2法則： 図18は、運動の第2法則（力は加速度に比例する）に関するAL型授業モジュールである。第二法則の学習は、滑らかな滑走台上における「ミニ扇風機を載せた力学台車によって一定の大きさの

問題 滑らかな滑走台上に台車が静止している。台車には摩擦力が働いていないものとする。この台車に、ミニ扇風機で、一定の大きさの力を、正方向に働かせつづけたら、台車の速度の時間的な変化は次のどのグラフのようになるか？あてはまる番号を選択せよ。

問題 ボールを手で真上に投げ上げた。ボールは手から離れたあと、上昇して、最高点で反転し、落ちてきた。ボールには摩擦力や空気抵抗が働いていないものとして、上昇中、最高点、下降中には、ボールにどのような力が働くか、次からあてはまる番号を選択せよ。

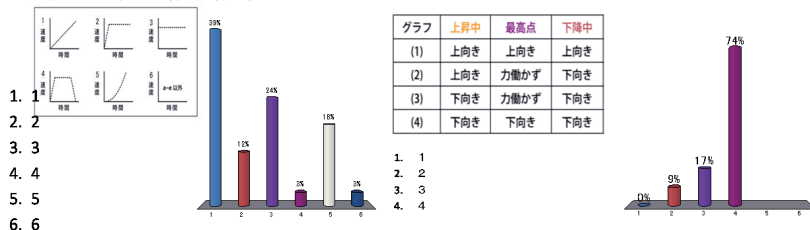


図18 運動の第2法則（ミニ扇風機の推進力による加速度、ボールの投げ上げ運動）の概念形成実態

摩擦が完全に無視できる世界において、力が全く働かない運動（摩擦が無視できる天与の真空における理想的な運動）は、日常的な世界では極めて稀なので、慣性の法則を自然に身につける事はとても困難である。頭で第一法則

力を及ぼす運動」のような「摩擦力が無視できる典型的な等加速度運動のAL型学習」から開始する。従来は、バネの伸びが一定になるように力学台車を引くような試行があったが、安定性ではこちらが勝る。

その際、「この運動

はどのような運動か」と云う問いを提示し、「予測を書かせて、討論し・距離センサーや運動分析ソフトによる検証実験で、予測結果を実験的に検証する」という流れで、能動学習を実施する。図18のように、39%は「1のような等加速度運動のグラフ(v-tグラフ)」を予測するが、6割ほどは等速運動・放物運動のような位置の変化のグラフを選択する。従来は、記録タイマーでテープの切り張りに時間・集中力を取られて、様々な運動のx-tグラフやv-tグラフに触れて、様々な運動の定量的な体験を手軽に蓄積する授業が実現し難かった。位置・速度・加速度グラフの体験が圧倒的に不足した状況があった。

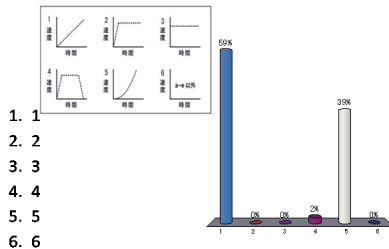
次は「地上でいつも存在して意識化しにくい天与の重力」と云う見えない力による等加速度運動に関する問題・x-tグラフの予測・力の予測を通して、重力の意識化を促す斜面の運動に関する問題・予測・討論・検証授業である。図19のように、59%が「1の等加速度運動のv-tグラフ」を選択(4割近くが位置のグラフ・放物運動と間違ふ)する。位置の時間的変化(x-tグラフ)についても、等加速度運動では丁寧に扱う必要がある事を、この結果は示す。斜面方向の「2. 下向きで一定の大きさの力」という正解は83%である。

最後に、ボールの投げ上げに相当する、斜面上での力学台車の押し上げ運動についての能動学習をする。

問題：台車を手で押して斜面を上がらせます。台車は手から離れたあと、坂を途中まで上がり、反転して下ってきました。台車が斜面を上がっているときには、どのような力が働いていると思いますか？台車の摩擦力や空気抵抗は無視できるものとし、あてはまる答えを選択せよ次の質問にあてはまる答えを選択せよ。

- 1 台車が斜面を上がっているときには、どのような力が働いていると思いますか？
- 斜面を上がる向きにだんだん強くなる力が働く
 - 斜面を上がる向きに一定の大きさの力が働く
 - 斜面を上がる向きにだんだん弱くなる力が働く
 - 斜面を下る向きに、だんだん強くなる力が働く
 - 斜面を下る向きに、一定の大きさの力が働く
 - 斜面を下る向きに、だんだん弱くなる力が働く
 - 力が働いていない(つまり0の力)
 - 上る向きから下る向きに力に反転するよう力が働いている

問題 台車が斜面を下っているとき、台車の速さの時間的な変化のグラフはどのようなようになるか？台車の摩擦力や空気抵抗は無視できるとして、次の何番になるか。



問題

台車が斜面を下っているとき、台車の摩擦力や空気抵抗は無視できるとして、斜面方向には、どのような力が働いているか？

- 下る向きにだんだん強くなる力が働いている
- 下る向きに、一定の大きさの力が働いている
- 下る向きに、だんだん弱くなる力が働いている
- 力が働いていない(つまり0の力)
- その他

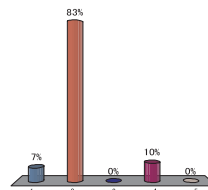


図19 重力認識と運動の第2法則(重力による加速度)をめぐる誤概念の調査結果(理系学生約100人)

そして、正解であるeを選んだ学生は13.3%だった。

Post-Testでは「正解であるeを選んだ学生が59.6%と、正答率は50%近くも著しく上昇した」。このように、ITを活用することで、感動的な実体験をもとにしっかりと誤概念を転換する授業が実現できた。

他方ITによる検証授業を行わなかった問題に対して正答率は10%から20%しか上昇しないのである。

6. カセンサー・カプレートによる力の素朴概念の抜本的な転換

根強い力の素朴概念は、動く方向に働く力のほうが大きいというものである。1982年^[5]と2003年^[11]と2012年までの間の、様々な機会に実施された次に示すような様なAL型授業について触れておこう。

問題：太郎と花子が手を握り合って、引っ張り合い競争をしたところ、花子は太郎の方に動かされた。動

Pre-Testでは「cを選んだ学生が50.6%と大多数を占めた」。斜面を上昇すると、だんだんその速度が小さくなることから、だんだん弱くなる力が働くという、cを選んだ学生が多かったのである。

くときの、太郎の手が花子を引く力と、花子の手が太郎を引く力の大きさを比べると次のいずれか。また、その理由は何か。

1. 太郎の手が花子を引く力の大きさの方が大きい
2. 花子の手が太郎を引く力の大きさの方が大きい
3. 太郎の手が引く力の大きさと花子の力は等しい。
4. その他

1982年には、全体の85%（高校生の94%，大学生の69%）が「太郎が引く力が大きさはより大きい」と誤答し^[5]，この傾向は今も変わらない。力は目に見えないため、この素朴概念の誤りを効果的に転換させるには、力センサーを活用して、及ぼし合う力を視覚化することがとても有効である。太郎と花子の手それぞれ力センサーを付けさせて、実際に相互に及ぼし合わせて、その力の大きさを「パソコンの画面・プロジェクターで、リアルタイムで提示する（図20）^[1-3]。太郎の手が花子を引く力の大きさは花子の手につけたセンサーで表示され、花子の手が太郎を引く力は、太郎の手につけたセンサーで刻々と表示される。センサーを強く押す（引く）と、図20のようにその力の変化がリアルタイムで教室のスクリーンに表示される。

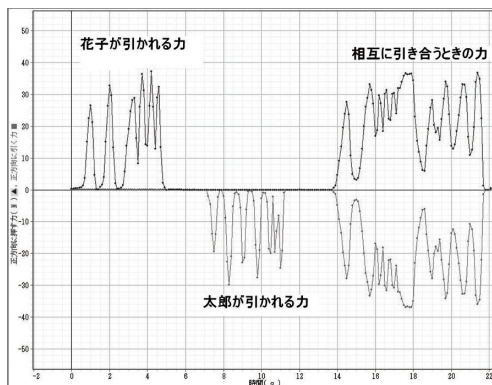


図20 太郎と花子が引き合う力センサーの結果



図21 カセンサーを搭載したトラック・軽自動車の衝突

太郎と花子が相互に引き合ったり押し合ったりするときにそれぞれが受ける力の大きさの大小関係を問う。その予想をグラフに（正反對向きに及ぼし合うので）書かせるか大小関係を選択肢で聞く。なぜそう思うかを討論させ、必要なら予想を修正させる。その後、センサーを付けて「太郎と花子の受けるそれぞれの力の大きさ」をプロジェクターに表示しその予測を検証する。どんなにしても、どう頑張っても、上下にグラフ表示される。「作用・反作用」を異なる大きさに出来ない（これはとても感動的である）。

この問題と同様な結果は、止まっている軽自動車にはるかに重いトラックを正面衝突させるとき、相手に及ぼす力の大きさはどちらが大きいか、あるいは等しいかという問題からも得られる（図21）。

2002年の理科教育法の授業でこの力センサーによってミリ秒の分解能の力センサーで、軽自動車にはるかに重いトラックを正面衝突を視覚化するAL型授業では、本格的に学期初めのPre-testと学期末のPost-test調査を実施した^[1]。その結果は；誤答の「重いトラックが軽自動車より大きさが大きな力を及ぼす」がPre-testで40.4%は、Post-testで13.5%に減少し、正解の作用・反作用で等しいという答えはPre-testで22.9%，Post-testで82.0%へと劇的に増加した。衝突実験における2つの力センサーによる千分の1秒の力の及ぼし合いで、作用と反作用は「どの瞬間にも逆向きで等しい感動的実体験」の成果である（文献^[1]の43頁）。

作用反作用に関する素朴概念の転換

しばしば、作用と反作用の力は「つりあう力」と誤認識される。1982年には、体重計の上で（図23の左上）

上下に押し合う問題で実施したが、当時の調査結果ではこれを「釣り合う力」と85%程は誤認識していた^[5]。2003年には「太郎と花子の押し合い・引き合い」に働き合う力を予測・討論させ、それを力センサーで視覚的する検証法でニュートン

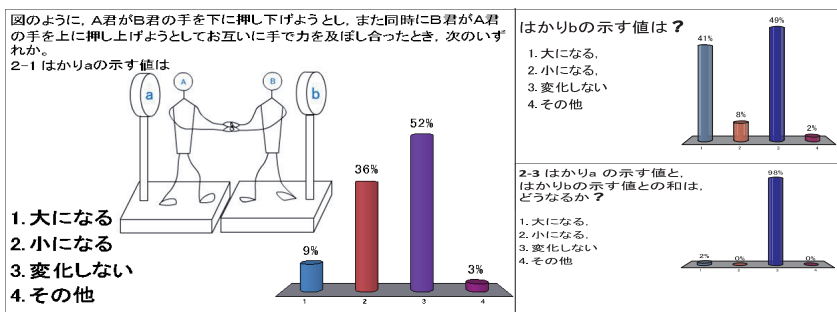


図22 運動の第3法則（作用と反作用）に関する誤概念をめぐる実態調査結果（理系学生約100人）

の第3法則を、上記のように効果的に能動学習したのである^[1]。

1982年の問題の体重計を、2012年には体重計をカプレートセンサーに代え、「同じ上下に及ぼし合う問題でその予測を検証する」次のようなAL型授業モジュールにより実施した。その結果を最後に示そう。

問題：図23や図24右の上のように力を及ぼし合った時、はかりの目盛りの値は、次のいずれか。(1)はかりaの示す値は 1. 大になる,2. 小になる,3. 変化しない。(2)はかりbの示す値は, 1. 大になる,2. 小になる,3. 変化しない。(3)aの値とbの値の和は1. 大になる, 2. 小になる,3.変化しない。

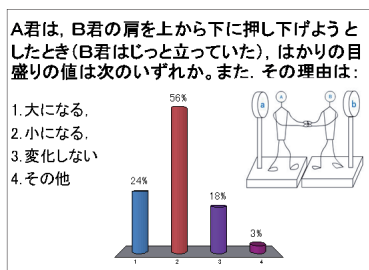


図23 運動の第3法則（作用と反作用）肩

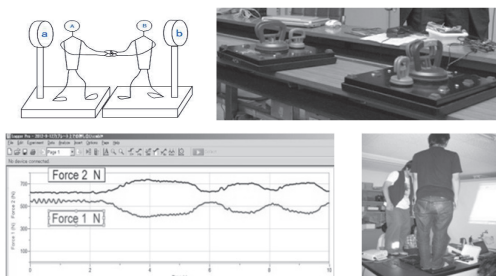


図24 体重計やカプレートに乗って力を及ぼし合う

ここで、カプレートセンサー（以下、カプレートと略記）とは、図24の右上に示したような人が載る辺が約30cmの正方形の台（プレート）である。これを押す力の時間的変化は、USB接続

したパソコンに表示される。そのような2台のカプレートに乗って、手で相手を上下に押し合うと、乗ったそれぞれのカプレートに加わる力は、「図24 左下のForce 1 と2のグラフ」に表示される。2012年度に実演させた検証実験の結果では「打ち消し合って目盛りは変化しない」という多数の信念は見事に覆される。どの瞬間も「互いに逆向きで上下に向く互いに相等しい力」という作用と反作用の法則を、カプレートによる力の可視化で実体験する。図22はクリッカーにより応答結果のグラフで、「はかりaは変化しないと理系大学生52%が誤答した」。「下に押し下げるA君の力と上に押し上げるB君の手の力」とは作用と反作用であり、力の作用する対象が異なる力である。このことが理解できないので、これらは「つり合う力で相殺してはかりに何の影響も及ぼさない」と考えてしまった。50%程が「図22のようにはかりbには何の変化も及ぼさない」と答えていることで、このことが確認された（98%がはかりaとbの和は変化しないと正答しても理解していることにはならない）。

図23は「A君は、B君の肩を上から下に押し下げようとしたとき（B君はじっと立っていた）、はかりの目盛りの値は次のいずれか」の調査結果である。aの目盛りがB君からの反作用を受けて小になる正解に至るのは56%（変化しないの誤答が18%）という結果になる。さらに、2人カプレートを持たせて押し合わせ「どう頑張っても上下にグラフ表示される作用・反作用を異なる大きさにできない」という感動的実体験を積み上げる。

以上に例示した「作用・反作用における2力を各瞬間毎に変化するミリ秒分解能に及ぶリアルタイムな視覚的表示」のような、感動的な作用反作用をめぐる実体験を丁寧に積み上げる事はとても重要である。このような「力センサーやカプレートで、力をリアルタイム表示するAL型授業」等によって、作用反作用をめぐる根強い誤概念を抜本的に転換出来ることが、プレテスト・ポストテストでも明確に確認できたのである。

7. タビオカ・ストロー吹き矢による具体化

平成17年度の高校教育課程実施状況調査では運動エネルギーと位置エネルギーの単元の達成度が悪かった。例えば、振り子の運動における力学的エネルギー保存の法則を問う問題では、高さを2倍にすると最下点でのおもりの速さはおよそ1.4倍が正答だが、正答率は60%を期待したのに対しわずか35.5%だった。誤答である2倍との回答率は37.7%、4倍が20.0%であった。初めの位置エネルギーを増やすと、最下点での位置エネルギーが増加することは理解できるが、エネルギー変換の数量的な把握が不十分なのである。

ここでは、エネルギー保存則を利用した仕事やエネルギー概念を形成するために開発した2つの授業実践

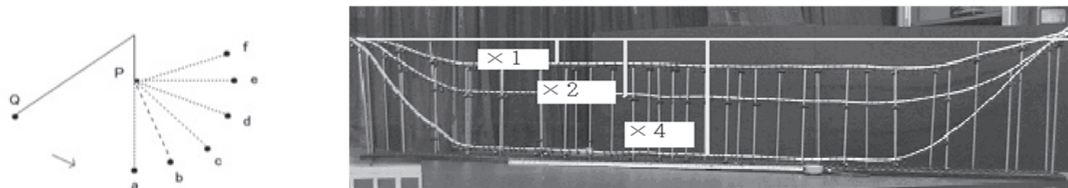


図25 全エネルギー（位置エネルギーと運動エネルギーの和）保存則：①ガリレイの振り子・何処まで上がるか（左）。②どのボールが一番早くのぼり終わるか（3軌道でボールを転がす競争）

モジュールを紹介する。図25の左は、エネルギー保存則を考えさせるためのガリレイが巧みに工夫した振り子で、点Pで揺れている振り子の長さを変えたときにどこまで、振り子は上がるかを選ばせる問題である。

図25の右は、高さが異なる3軌道に、左上のスタート地点からそれぞれボールを同時に転がしたときにどれが最も早く到着するかを、予測し・討論し・検証するという、AL型授業のモジュールである。

左端から、同時に3軌道に沿ってボールを転がした場合の予測は、一番上が最も早く、下ほど遅く右端に到着する、というものだが、大方の予想に反して、1番下の軌道が圧倒的に速く右端にボールが届く。

さらに、それを高速動画カメラで撮影して、運動分析ソフト・LoggerProでボールの位置や速度の時間変化を分析すると^[10]、下の方の軌道になるほど位置エネルギーが減少し、ある高さ(h)だけ落下した位置エネルギー (mgh) が、ボールの運動エネルギー $\{=1/2 (mv^2)\}$ に転化し、速度の2乗に比例することが解る。

つまり、図25のように、ボールが落下した高さの比が、1 : 2 : 4の比であれば、それぞれの水平方向の速度の比は1 : 1.414 : 2のようになることが検証できる。位置エネルギーが運動エネルギーに転化したことで、横向の速度が最下部では最上部の2倍なので、とても速く右端に到着したのである。

タピオカ・ストローによる吹き矢の科学：最後に、タピオカ・ストロー吹き矢システムという安価で携帯性に富む力学実験システム^[16]、によって、吹き矢物体への吹く力がする仕事と運動エネルギーや吹き矢の飛び上がる高さ、等のAL型学習法についての概要を解説する。この力学システム一式は約100円程で手軽に作成できるのが特徴である。軽量で携帯性に富むので、学習者全員に一式を手渡し各自が能動学習する授業が実施できる。このタピオカ・ストローとは、豆状のタピオカを吸うためのストローの名称である。吹き矢物体を吹くための吹き筒としてこれを用いる。長さ21cm、内径が12mm、13mmのストローは交互に刺し込んで継いで長さを20~40、60、80cmへと、何倍にも伸ばして使えるので、とても便利である。これらの適当なタピオカ・ストローを吹き筒として使う。これを内径6mm前後の細いストロー（吹き専門；細いと天井に衝突しない）で「垂直真上方向」に「一定の吹き上げ力で物体を吹き上げる」力学実験を系統的に実施する。

筒中に入れる「吹き矢物体」としては外径が約10mmの白いプラスチック栓（コメリ等で入手）が使いやすい（高速度カメラで撮影するには黒く染めると物体が見易くなる）。

外径13mmの黒いプラスチック栓や、ビー玉などは、より太い15mmのタピオカ・ストローの場合に吹き矢物体として用いると、子どもが室内で吹き矢物体を強く吹いても、40cmより短ければ、天井に届く程度である。6mmのストロー（吹く専門）をくわえて、吹き矢物体をタピオカ・ストローの先端から、0cm、10cm、20cm、30cm・・・の所に於いて、真上に吹き上げると、その飛び上がる高さはどうなるかを問い、実際に吹いてAL型能動学習を実施するのに、丁度、都合がよいのである。^[16]

これによって、吹き上げ力が吹き矢物体にする仕事、飛び出し口までに得る運動エネルギー、最高点に達した時の位置エネルギー等についての「体系的なニュートン力学」の能動学習が具体化できる（以下で示す）。

吹き矢を水平でなく垂直にする理由：

- 1) 垂直にすると「筒と吹き矢物体との摩擦力が最小になり」ほぼ摩擦が無視できる世界が実現できる。
- 2) しかも垂直吹き矢パイプ系では、吹き矢に働く「吹く力と重力」をつり合わせて宙づりにし、重力を意識化できる恰好な教材（吹く力を無くすと落ち、強めると飛び上がる）。次が「力のつり合い」に関する授業の具体化例である：

問題：垂直パイプ内の吹き矢型物体は宙吊りになるか？

- 1.宙吊りになる
- 2.宙吊りにならない
- 3.上下運動する。
- 4.その他。

問題：吹き矢は如何なる力を受けるか（選択肢省略）。

また、等速運動、仕事とエネルギーに関わる概念形成の核心的部分は、高速度撮影動

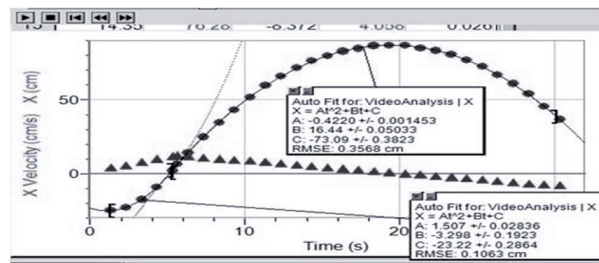


図26 タピオカ・ストロー吹き矢：位置・速度の時間変化

画カメラの動画を再生し、「筒内での等加速度」と筒から発射される後の「吹き矢の吹き上げ運動」を運動分析ソフトで「コマ毎にマウスでクリックして解析して検証できる。マウスでクリックした位置の時間変化（図26の左、x-tグラフ；2種の放物線），速度（差分）の時間変化（図26の左、v-tグラフ；等加速する2直線）が得られる。筒内での等加速度運動，筒外での吹き上げ運動，筒内の仕事で得た運動エネルギー増，最高点での位置エネルギー等，が分析できる。^[11]

特に、吹き矢物体が到達する高さは、丁度「ストロー内で物体を吹いて動かした長さ」に比例する。その比例関係に関する「能動学習」は、以下の通りである。

実験：タピオカ・ストローの長さを2倍にすると物体の飛び上る高さはどうなるか？ 1.上る高さは2倍になる。2.上る高さは1/2に。3.上る高さは同じ。4.その他。

特に、垂直方向に吹き上げる、吹き矢物体の到達できる高さの予想と、検証実験は、鉛直方向における吹き矢型物体への仕事による運動エネルギーと位置エネルギーとの相互転換に関する予測検証実験である。

さらに、動く方向と逆向きの力による運動「ボールの投げ上げに相当」を真正面から問う検証実験をして素朴概念を克服するものである点は、特に注目し値する。これは、「ブローと重力の合力」の推進力によってパイプ内の吹き矢型物体が一定の力を受け続けた時の運動である。

これを、吹き矢型物体の（垂直方向）に関するミリ秒分解能デジタルカメラによる分析により、吹き上げるまでの筒内のパイプ中の吹き矢型物体の運動＝等加速度運動を詳細に検証できる^[16]。その後のパイプから吹き上げた後の吹き矢型物体はボールの投げ上げ運動＝自由落下運動である。これを真正面から問い、予測を明快に検証する実験によって「動く方向にいつでも力を受けている」という素朴概念を転換・克服するのである。

「吹き矢の力学」を最初に体系的に世に問うたのは、板倉達の「ストローを水平に用い、その勢いと力積の関係を実験場」のものであろう。板倉は1999年3月30日の日本物理学会広島大会で「吹き矢の力学」という試みを「学生生徒の物理離れに対して物理学者はどのようなことができるか」の例示として講演し、「力積（力×時間）を感動的に教える」ため「吹き矢の力学」で力積の体系的教材化を目指したと報告した。「このような授業を受けた人々は、みな力そのものは物理的に何の効果も持たないことに驚き、「力×時間＝力積」の概念の重要性に感動するのである」、「（ストローとマッチ棒）という簡単な実験道具だけで、力積概念が教えられるということに気付いた人がいなかったからである」等と述べている^[17]。日本の高橋金三郎らの理科サークルや愛知岐阜サークルが始めたものを、「本格的な吹き矢の力学」にする方針で、板倉らがこれを発展させたという^{[17][24][1]}。その後、サイエンスシアターシリーズ「力と運動」の「(2)吹き矢の力学」として出版された。^[17]

私たちは、タピオカ・ストローを垂直に用いることによって、水平に比べて「摩擦が無視できるより理想的な力学の実験場」の舞台を用意できることを実際の授業実践でも実証できた。垂直方向において「吹き矢型物体に働く2力のつり合いとその破れ」の場面を意識的に提供でき、風力がつり合う（つり合いを破る）客観的存在としての重力の意識化・客観化を可能にした。しかも、アクリルパイプとブローのような「一定な風力と風圧を保つ工夫」を重ねてより微妙にコントロール可能になるので、理想的なニュートン力学の授業システムが実現できる。その高速カメラ動画によるミリ秒分解能でのスローモーション提示やその運動分析ソフトによる「x-tグラフやv-tグラフと同期させた手軽な提示・視覚化」などが可能になる。このように

して、吹き矢型物体の等加速度運動（垂直方向）をミリ秒分解能デジタルカメラ・LoggerProの分析提示機能によって、力学現象の体系的で解り易いAL型力学授業の体系的な授業法の具体化ができる^[6]。

8. おわりに

現象即本質ならば科学は要らないと言われる。日常現象が即科学の本質なら教育の出番無しでも科学は日常的に身につく。その日常的な素朴概念が科学の本質から懸け離れるほど教育の価値は高まる。科学からの乖離から救えるのは科学教育だけなのである。受動的な学習者のままでは、根強い素朴概念とそれに基づく信念とが、自然理解の新たな枠組みへの転換の機会を奪う。信念を持って能動的に自然に問いかけるための自然の奥を覗く新たな手だてが工夫されて予測の正否が明快に検証される中で、素朴概念を心底から転換する授業が実現される。そのような問いかけと実験的検証法を準備することこそが、科学教育の醍醐味であり科学教育の真髄なのである。その際、ICTの活用は実験的検証法を強力に支える役割をもたらす。能動学習をサポートする様々な機能を用意して効果的な手段を生む。そのようなICTを活用した科学概念形成授業の意義・成果・課題について、以下に特記すべき事柄を列記して、本論考を締めくくろう。

- (1) 従来は目で追えなかったミリ秒の動きや瞬間毎の「力・位置・速度・電流・電圧・温度・等の実験値」の変化等を実験動画映像と同期させて即座に提示できる。予測・討論・実験的な検証結果を「ミリ秒分解能を有するICT機能」で臨場感と理解し易い提示検証機能において、ICT活用の意義と役割がある。
- (2) 「力と運動」の分野は、頭の中の想像だけで教科書を理解しがちで、実体験なしの理屈・暗記におちいりがちなため、動の実験抜きの場合は事後テストの達成度が低い（50%以下）。物理量を明瞭に視覚化するICT活用の工夫で、実験に基づく予測の能動的な検証が可能になるので事後テストの達成度は80%台となる。
- (3) 例えば力プレートを使うと、子どもたちは視覚的に力の瞬間的な変化を見ることが出来る。力の及ぼし合いを、言葉だけの説明ではない「能動的な実験的検証による、感動的で印象深い体験的理解を生む。
- (4) 「吹き矢物体が一定力で動かされる際にされた仕事」＝「飛び出し直後の運動エネルギー」＝「最高点での位置エネルギー」なる仕事と全エネルギーの相互転換と保存則や「風力と重力のつり合いとその破れ」などを、手軽に効果的に学習できるようになった。
- (5) 急進展する現代的ICT基盤を活用して、明治期以来から日本各地で目指された優れた科学教育目標を、現代的視点に基づいて効果的に再構築・新展開して、科学概念形成を豊かにもたらす可能性が生まれた。

参考文献

- [1] 小林昭三：「力と運動の素朴概念を転換するIT活用法の有効性」, 「教育実践総合研究」新潟大育附属教育実践総合センター紀要, No.2, pp.39-62 (2003)。 <http://www.ed.niigata-u.ac.jp/files/cepr/report02.pdf>。
- [2] 小林昭三, 興治文子, 畠山森魚：「衝突現象の効果的概念形成とICT-Based Active Learning - ミリ秒分解能で分子運動・波動・衝突の世界をスッキリと解明 -」, CIEC研究会論文誌 (CIEC学会), Vol.1, pp. 41-48 (2010年3月)。
- [3] 興治文子, 小林昭三, 畠山森魚：“ICTを基盤とした物理教材の開発と活用の推進 - 新潟大学でのとりくみ -”, CIEC研究会論文誌 (CIEC学会), Vol.1, pp. 49-54 (2010年3月)。
- [4] 小林昭三：「力学形成の論理と力学教育の論理」 (I), 『新潟大学教育学部長岡分校紀要』第26集, 45-53 (1980), 同 (II), 『新潟大学教育学部紀要』第22巻, 1-26 (1980), 同 (III), 同第23巻, I -15 (1981)。
- [5] 同：「力学形成の論理と力学教育の論理」 (IV), 第24巻, 9-25 (1982)。
- [6] 板倉聖宜：「物理学入門」, 国土社, 15頁 (1964)。
- [7] 同：前掲書, 32頁。
- [8] 高橋金三郎・細谷純, 「極地方式入門」, 国土者, 100頁 (1990)。

- [9] 同：前掲書, 185頁
- [10] 米国Vernier 社製運動分析ソフトLoggerProと各種センサー<http://www.vernier.com/soft/lp.html>。及び, 米国のPASCO社のVideo Point : software of Lenox Softworks, <http://www.lsw.com/videopoint/>。
- [11] CASIO EX-FC150/ZR100/ZR200 /ZR300 : 120, 240, 480,1000fps。
- [12] R.K.Thornton, D.R.Sokoloff, "Assessing student learning of Newton's law" , Am.J.Phys. 66, pp.338-352, 1998.
- [13] 小林昭三：“物理教育における概念的な理解の改善－ITを活用したアクティブ・ラーニング・メソッドの促進－プリシラ・W・ローズ (Priscilla W. Laws, デイクソン大学, USA) の報告”, 物理教育 (物理教育学会) 55-3, pp. 248-251, 2007。
- [14] 日本物理教育学会編, 『科学をどう教えるか アメリカにおける新しい物理教育の実践』2012 ; E.F. Redish, "Teaching Physics with Physics Suite", Willy & Sons, Inc. (2003) 。
- [15] Richard R. Hake, "Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-studentsurvey of mechanics test data for introductory physics courses " , Am. J. Phys.66, pp.64-74 (1998) 。
- [16] 小林昭三, 興治文子, 畠山森魚, 遠藤霞, 今井友之, 高野和明, ICT-based Active Learning型力学概念形成授業の吹き矢・パイプ・システムによる具体化, 新潟大学教育学部研究紀要・自然科学編, 第5巻第1号, pp.1-20 (2012) 。
- [17] 板倉聖宜・塩野広次：『吹き矢の力学』, 仮説社, 2005。板倉聖宜：「(特別講演) 物理学者にとって物理教育の研究とは何をする事なのか」, 日本物理学会広島大会・当日配布資料 (1999), は水平な吹き矢による「力積」の仮説実験授業である。我々の垂直方向での仕事とエネルギーの能動学習。