

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

小林 昭三・興治 文子・畠山 森魚
遠藤 霞・今井 友之・高野 和明

要 旨：科学の基礎・基本となる概念を効果的に学ぶために「科学概念形成への鍵を担う実験」の結果を予測して、予測結果の正否を明快に検証するような、最新のICT活用によるActive Learning（以下ALと略記）型授業に関する研究開発を推進してきた。その際、「科学的概念の効果的な形成を促すAL型授業」を体系的に実施するための「身近な素材で工夫したAL型教材資源の系統的な開発と蓄積」を進めてきた。近年、超高速デジタル動画カメラやミリ秒分解能を有するような最新のICT機器を活用したAL型授業に関する新しい広大な可能性が開かれつつあるので、本論考では、特に、こうした最新のミリ秒分解能を有するICT活用による授業研究開発に焦点をあてた報告をする。私たちは、ミリ秒分解能に達する超高速デジタル動画カメラ等の新しいICT活用によって、吹き矢・パイプ系の2系統のシステムを開発して、科学概念形成における鍵となる効果的な実験とその適切な検証法を具体化できるようにした。そのような系統だったICT-based-AL型力学概念形成、特に、ミリ秒分解能ICT基盤システム上における体系的なAL型授業モジュールの構築を目指した「吹き矢・パイプ系によるAL型力学授業の具体化」を報告する。その小学～大学授業と教員養成でのICT-based-AL型授業講習・研修実践にも触れられよう。

1. はじめに

科学の基礎的で基本的な概念をより効果的にアクティブ・ラーニング（以下ALと略記）できるようにすることを旨とした科学教育の研究開発を推進してきた[1-4]。科学の基礎・基本となる概念を形成するための鍵となる実験・現象を工夫する必要があるが、身近なところで手軽に入手できるような（例えば、100円ショップで）単純な素材を工夫して、それらを効果的に実施できるような教材資源を豊富に蓄積することが望まれる。その際、鍵となる実験や現象を最新のICT活用によって詳細に分析・解析することで得られるようになってきた決定的な結果を視覚的なデジタル画像として解り易く表示して、それらに対する事前の予想が正しいか否かを明快に検証することが肝要である。

そうしたICT活用による効果的なアクティブ・ラーニング（AL[5]）型の科学概念形成授業を実現する「授業用の実験教材モジュール」資源の豊富な蓄積が望まれている。多種・多様な分野における効果的な科学概念形成に不可欠な、ICT活用AL授業モジュールを私たちは研究開発してきた[1-4]。

最新のアクティブ・ラーニング（AL[5]）型理科授業の様々な工夫・改善によって、低い達成度しか得られなかったような従来からの問題点や課題を克服して、多様な学習者が科学の基礎・基本となる分野に強い興味・関心を持続的に持って、能動的に学習する意欲を自然に引き出せるよう科学教育の本流を構築できる。そうした理系分野の教育の抜本的な改善に取り組むことによって、昨今の理数学力の低下傾向を克服して、理科好きな児童・生徒・学生を大幅に増加できる科学教育を目指してきた[1-4]。特に、ICTを効果

的に活用したAL型理科授業を教育現場で日常的に実施するために、近年、著しく有用性が高まったITセンサーや運動分析ソフトを「どう用いればより魅力的で効果的なAL型理科授業が可能になるか」に焦点を当てた研究を推進してきた[1-4]。最新のミリ秒の分解能を持つICT活用によれば、「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」などに関するICT活用をベースにした詳細な可視化が可能になり「驚異に満ちた魅力的なミリ秒の世界」をアクティブ・サイエンスできるからである。

本論考は、「手軽な吹き矢パイプ系システム」による「実験・予測・検証の各ステップ」を、「ミリ秒の分解能を持つ超高速カメラ」の活用により実現するAL型力学授業研究開発の報告であり、AL型「吹き矢の力学」による効果的な力学概念形成を目指した教育実践の報告である。ミリ秒分解能を有する最新のICT活用によるAL型科学教育の取り組みは、小・中・高・大の理科教育全体を一貫した視点から効果的・統一的に基本的な科学概念の形成をもたらそうとする試みなので、特に、小・中・高・大を一貫した科学概念形成教育の見通して鳥瞰した教育・研修・講習プロジェクト研究としても期待できよう。こうしたICT活用AL型理科授業モジュールの研究開発の成果を、教育現場でどのように有効に活用できるかは、様々な授業実践・各地での講習普及活動・実践的な検証によるフィード・バックによって、改善と新たな発展を生んできているものでもある[1-4]。

2. ICTの活用の立ち遅れを解消する「アクティブ・ラーニング型の理科授業」の重要性

2008年度JST他の調査によれば、「情報通信技術の活用（ICT）」の指導について、理科教員の約51%が情報通信技術（ICT）を活用した指導を「やや苦手」か「苦手」と感じている。情報通信技術（ICT）を活用した指導における苦手意識を、教職経験年数別にみると、苦手意識を持つ割合は、教職経験年数が短い教員と長い教員のいずれでも、かなり高い傾向が見られる。実は、パソコンの経験がそれほど長くないベテラン教員だけでなく、パソコン経験やICT経験は小学校以来からのかなり長い経験のはずであり、それらに親しみを感じているはずの若手教員でさえも「ICTを活用した指導をするのが苦手である」という意識が強い[6]。

さらに、「理科や算数、国語の授業中のコンピュータ使用状況調査」が「PISA 2009年デジタル読解力調査」に際して行われた[6]。理科、算数、国語の授業でコンピュータを全く使っていないが、理科で98.4%、算数で98.7%、国語で99.0%である。OECDの調査参加29カ国の平均は、理科で75.4%、算数で84.2%、国語で74.0%、とこれらよりはるかに低い。コンピュータを少しでも使っているのは、（それぞれの週に30分以下、31分以上60分、60分以上）の順で、その%値の次のカッコ内に、該当する割合を示す。理科では、1.6%（0.8%、0.6%、0.2%）、算数では、1.3%（0.7%、0.4%、0.2%）、国語で1.0%（0.6%、0.2%、0.2%）。OECDの平均値（コンピュータを少しでも使っている）は、理科で24.6%、算数で25.8%、国語で26.0%と、いずれも日本に比較してかなり高い割合である。[6]

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の効果・効用は大変貌を遂げた。顕微鏡が微生物・細胞・マイクロ世界の解明・理解に不可欠となり、望遠鏡が宇宙のマクロ世界の解明・理解に不可欠となった。そうした観察・観測手段の発展はマイクロやマクロな世界の探求法や教育法に大変貌を遂げさせた。同様に、最先端のICT活用は科学教育のやり方に変貌をもたらす。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「予測の正否を決定づける証拠が得られる（白黒がつけられる）」有効な手段を生むからである[1-4]。日本ではこの急進展に対応する教育現場の科学教育改善は著しく立ち遅れたままである。私たちはICT活用基盤上に「根強い素朴概念を克服・転換できて、科学の基礎的で基本的概念の効果的・形成ができる」ような、自然界の謎を解くICT活用によるAL型科学授業法の研究開発と授業実践を推進してきた。それに基づく充実・普及・発展のため10年前後の系統的に取り組みの成果として豊富な教育資源を蓄積してきた。

以下は、そのような「ミリ分解能ICT基盤に新展開する能動型概念形成授業の吹き矢(5)パイプ系による具体化」についての最新の研究開発の取り組みとその具体化への経過も含めた、詳細な報告である。

3. 「吹き矢の世界におけるAL型授業法の具体化」と「ミリ秒ICT活用による超高速現象可視化」の概要

「吹き矢の世界におけるAL型概念形成授業」によって「摩擦が無視できる理想的な世界」における力と運動の効果的な学習を実現できることを明らかにしよう。その際に、最新の「ミリ秒分解能を有するICTの活用によって、超高速現象でも明快なスローモーション映像として解り易く可視化することが出来る」ようになったことで、従来までの授業で「解り易い視覚化・視覚的理解が不可能だった様々な運動法則の謎」を「一目瞭然な実験的検証」によって感動的に解き明かし得るのである。そのような未開拓な教育条件を早急に切り開くことの意義はとて大きく、どれほど強調しても強調し過ぎることはないほどである。具体的には、「アクリルパイプやタピオカ・ストローのパイプを垂直にして、プロワヤ人間の吹き息、等によって「その中に一定の風力と重力をパイプ内の吹き矢物体に及ぼす」ことにより、「パイプ内では摩擦が無視できる理想的な世界における吹き矢型物体の運動」が実現できるような新しい実験システムを開発してきた。

その際、アクリルパイプやタピオカ・ストローの管内の内圧を、微妙に変化させて制御することで、吹き矢に及ぼす力を自由自在にあやつる。さらに、風力（風圧）の作用による加速運動の加速度（速度の変化）を、超高速デジタルカメラによる超スローモーションと同期させて提示する事によって、吹き矢の運動法則の詳細を視覚化して検証する新しい可能性が開かれる、というものである。そのように手軽な高速動画撮影や分析・提示の手段が自由自在に活用できるのである。

それは、透明なアクリルパイプやタピオカ・ストローの管内に、適切な断面積と質量を有する円筒物体を吹き矢として採用・活用して、その際、管内における空気抵抗が無視できる適切な速度範囲で実験を実施して、一定の風力（風圧）による等加速度運動に関する法則（運動の第2法則）を実験的に検証するものである。

風力を「一定値」又は「零値」にセットして、吹き矢型物体の質量や断面積を適当な値に設定・変化させ、ある質量の「吹き矢型円筒」と「それに加わる力」のそれぞれを「多様に変化」させて実施することで得られる「実験の結果を予想して、（準）リアルタイムで検証して視覚的に提示すること」で「予測・討論・検証」に基づく効果的なAL型理科授業が実現できるからである。

「摩擦が無視できる理想的世界」を実現する力学実験システム（手軽に入手する身近な素材）の例：

「摩擦が無視できる世界を実現するシステム」によって、ニュートンの運動法則を感動的に実体験できるAL型学習を実現するため、次の4種類のAL型授業システムに関する研究開発を蓄積した：

1. 超軽量力学台車と軽量の携帯扇風機のシステムによるニュートン運動法則のAL型ジュール
2. ホバーサッカー・ホバーホッケー等の浮上型滑走体によるニュートン運動法則のAL型モジュール
3. ガラスビーズ敷き手作り滑走台上の「滑走物体」によるニュートン運動法則のAL型モジュール
4. V字型振り子状物体の相互衝突で慣性質量測定をする等の衝突法則のAL型モジュール。

これ等は実験室に常時装備して、力学授業において常時活用できる完成度にある[1-4]。

3. 1 第5番目の「摩擦が無視できる理想的世界」の「吹き矢の世界におけるAL型授業法の具体化」

今回の力学実験システムは、上記の4種類の「作り込んだ定常的に設置・準備」しておくタイプに比較して「とても手軽に持ち運べる「携帯型の力学実験用システム」であることが、特筆すべき特徴である。安価な素材（例えばタピオカ・ストロー）を事前に「ウェブ上のネット販売店にインターネット注文して入手」さえしておけば、それを「何時でも・何処にでも容易に携帯して授業を実施」できる。必要な数（演示用のセット、又は、生徒自身が組み立てて授業で実際に用いる数）だけ、手軽に準備できる手軽な携帯性が著しい優位性なのである。

竹を加工した吹き矢は、狩りの道具としてアジア諸国で古来から使われてきた、なじみ深い装置であったという[7]。安価に入手でき・手軽に使える手頃な教材となる、という優れた特徴がある「タピオカ・ストローシステムは、摩擦が無視できる世界における「ニュートンの運動法則に関する鍵実験の予測・討論・検

証において、その威力を発揮できる。これに基づく効果的で本格的な力学授業を、今後、アジア各国で可能にする「優れた携帯型教具」として期待できる。その有効性が理解され、各地の実情にマッチした授業法への改良・改善が進展して広く普及されるよう期待したい。吹き矢の高速運動を超高速デジタルカメラで撮影した動画を、運動分析ソフトで即座に解析し、結果を超スローモーション提示しながら予測を明快地に検証する、というAL型授業モジュールを研究開発した。その際の「超高速デジタル動画カメラの活用」は「従来までは捉え難かった吹き矢型物体の超高速運動の明瞭な動画記録と明快な検証可能性」をもたらす最新のICT活用法として注目されよう。

超高速デジタル動画カメラ活用をもたらす科学教育における新たな可能性：

例えば、右の図1のように、噴水を超高速動画カメラ撮影して、Logger Proソフトで分析したx-t、v-tグラフ上の点とSlow motion movieとを、同期させて動かして示すと、放物線運動の詳細をととも解り易く示すことができる。この例は、ミリ秒ICT活用による超高速現象の可視化により、様々な興味深い現象をとりあげて、その特徴や本質を解き明かす典型的な授業素材・教材例となり得る。加速度運動を感動的に提示体験するAL型授業素材として有効に活用すべき優れた例が多数見いだせる。

他にも、摩擦が大きな世界における最新のICT活用の例などをこれまでに多数蓄積してきている。例えば、超軽量紙カップ・アルミカップの空中における落下の法則、水中での落下の法則の実験例等がある。[1-4]

摩擦の無視できる世界の吹き矢（アクリルパイプ・ストロー）の科学に加えて、日常的な体験としては「摩擦が大きな世界」が大部分であるので、そのような「摩擦が大なる世界の運動の法則」の教育が不可欠となる。そうした「AL型の吹き矢系システムにおける終端速度の世界」における美しい法則の具体化の可能性も開発してきた。但し、こうした「摩擦が支配的な世界における、終端速度に関する吹き矢パイプ系によるAL型授業の具体化」については、本論文の範囲を超える新たな工夫が必要とされるので、別な論考においてそれらの詳細は報告されよう。

3. 2 AL型「吹き矢の力学」の「吹き矢型物体」と「アクリルパイプ系・タピオカ・ストロー系」による具体化

ミリ秒ICT活用によるActive-Learning (AL) 型力学授業の吹き矢パイプ系システムによる具体化を以下に示す。次の2つのパイプ素材のケースを詳細に検討したので、その内容と成果を報告する。

(1) 授業・講義で演示する「アクリルパイプ・ブロウによる具体化」のケース：

アクリルパイプにブロウによって空気を吹き込むシステムを用いるものである。アクリルパイプの長さ10cm～20cm前後、その1倍、2倍、3倍の長さの筒の中にある「吹き矢型物体」に、ブロウによる一定の風力を及ぼすことで、垂直に置かれたアクリルパイプにより、真上に吹き上げる吹き矢実験を実施する。

それは、図2に示すようなもので、ブロウの風力によって、吹き矢型物体に一定の風力を筒内で及ぼ

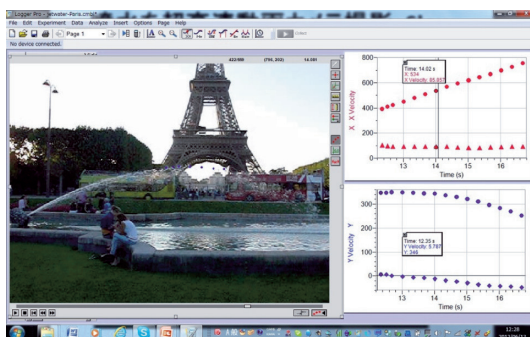


図1：噴水（高速カメラ動画）の放物線運動：
(v-t, x-t) グラフ



図2：ブロウ、吹き矢型物体、アクリルパイプ、
風力調整用の水道栓

し続けることで、等加速度運動を実現するシステムである。その際「適当なプロアの風力と適当な質量の吹き矢物体」を選択することが特に重要である。

アクリルパイプの太さ（内径が、6mm、8mm、10mm、15mm）について、それぞれに、適当な直径の円筒型の吹き矢型物体を、適当なプロアの風力に調整して、真上に噴出するテストを繰り返した。こうして最適な実験条件を探りあててを試みた。吹き矢型物体として、丸鉛筆、バルサ材による円筒型物体、長さ \propto 質量を何種類か選ぶ。

このような様々なアクリルパイプの長さ（10cm～60cm程度まで）に於いて、かなり安定した等加速度運動が確認することができた。

図3は、縦長のドアの横にパイプを床から天井に向かって配置して実験したときの実験結果である。動画は縦に撮影したが、この分析ソフトでは右回り90°回転している。真ん中のグラフは、筒の中から発射された吹き矢型物体の(v-t)グラフであり、右のグラフは、(v-t)、(x-t)グラフを示している。

これらのグラフ上の位置や速度の各点と、動画上の動いている物体上の位置を示す点とを同期させて、提示できる。

吹きあげ実験を多数のケースについて実施し、高速デジタルカメラの動画撮影データを多数蓄積してきた。

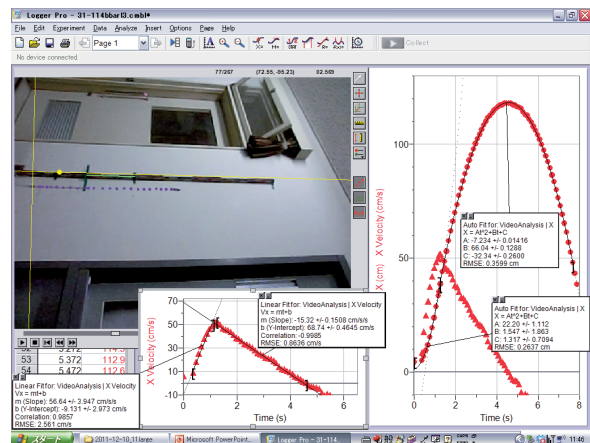


図3：吹き矢物体の垂直パイプ中の等加速度運動・直後の吹き上げ運動

(2) 児童・生徒自身によるタピオカストロー吹き矢の実験をアクティブ・ラーニングするケース：

タピオカ・ストローによる吹き矢システムを用いる。吹く専門の6mmのストローをくわえて、12mm、又は15mmのタピオカ・ストローに一定の風力で息を吹き込むという手軽な実験である。

但し、人間の吐く息は体温程の暖かさなので、すぐに筒内で冷えてストローに露が生じる。ストローと吹き矢物体とが「濡れる・濡れる事による摩擦が生じる」という問題が生じる。1-2回だけストローを吹くだけにして、直ちにタピオカ・

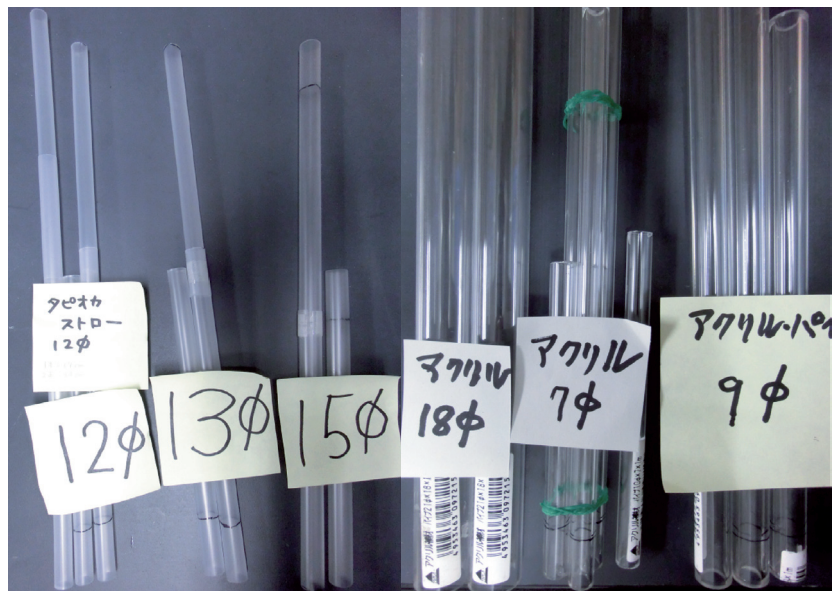


図4：「タピオカストロー、内径12,13,15mmの写真」, 及び、「アクリルパイプ、内径18,7,9mmの写真」

ストローを交換すれば濡れは無視できる程度になる。何度も息を吹き込むことが必要になる場合には（後の、垂直な筒内での、吹き矢物体に働く風力と重力のつり合い実験、等）、大容量のペットボトルに溜まっている「ストローと同じ温度の空気」を「先にストロー内に吹き込む」というような「ペットボトル内の大量の空気を押し出して吹き込む（細い6mmストローの差し込み口と吹き出し口とを取り付けるような工夫をして）」ことで、ストローの濡れを最小限に抑制することができる。

図4の左側のタピオカ・ストローの写真は、内径が12mm, 13mm, 15mmの3種類について、1本で、17cm, 2本つなぎで、34cmにしたものである。細い6mm程の吹き専用のストローの吹き口に4cmほど、内部に挿入して吹くので、21mmのストローの17cm部分で吹き矢は加速されて飛び出す。2本なら、34cmの部分で加速されて飛び出す。

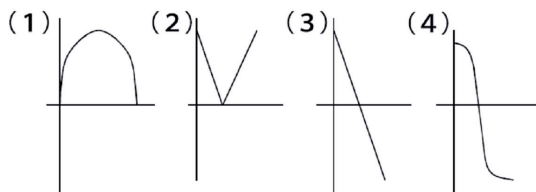
右側のアクリルパイプの場合は、1mほどの長さのものを吹き口の数cm先から、10cm, 20cm, 30cm程の長さの部分で、ブロウによる一定の風力で吹き矢物体は加速され筒外に飛び出す。このように使用するもの。

タピオカ・ストローの場合は、適当な直径（10mm, 12mm）で、長さが13mmほどの、プラスチック栓を「吹き矢物体」として用いる。数個の栓を両面テープで接着接続すると「吹き矢型物体の質量を2倍、3倍に変えた実験」も可能になる。プラスチック栓がない場合は、バルサ材円柱、又は色チョーク（直径12mm前後、長さ13mm程度に折る、但し、粉で汚れるのが難点）などを吹き矢型物体とすれば、目的に沿う実験が可能である。

アクリルパイプにブロウによる実験の方が、ある一定の風力に調整する実験条件の詳細な制御性では、ストローの使用に勝る。しかし、その材料の安さ・手軽さ・携帯性・全員の使用等では、タピオカ・ストローに一定の風力で息を吹き込むことによる「吹き矢物体の垂直吹き上げ」の方が、はるかに優位性がある。

3. 3 投げ上げ運動のv-tグラフを予測・検証するAL型概念形成授業の重要性（その意義と役割）

ここで、従来の力学学習において最も欠けていた「投げ上げ運動」を用いた授業の重要性について注意を喚起しよう。即ち、素朴概念を覆し科学概念を形成するような『本格的な力学概念の形成』にとって、絶対に欠かせない学習場面として、『力が働く方向とは逆向きに運動するケース』についてのAL型授業を挙げる事ができる。ということについて具体的な論証とその具体化について立ち入るような論議をあらかじめ深めておいて、吹き矢を真上に吹き上げる実験の意義と役割を明らかにしておこう。



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

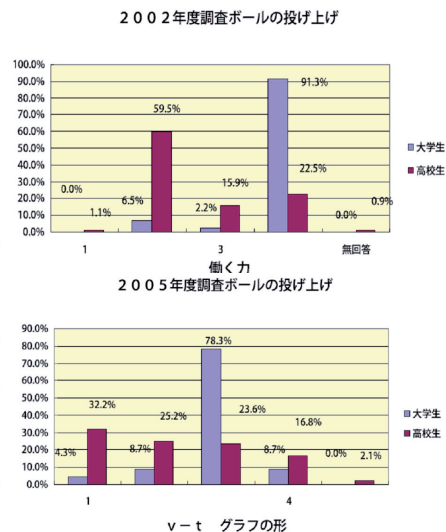


図5：「ボールの投げ上げ」の「v-tグラフ、ボールに働く力」についての日本の高校生への2002年、2005年調査結果。

最上部には、左から右に4種のv-tグラフがあるが、これを1から4として選択させた時に、右に示す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16%；2002年，24%；2005年が正解を解答。4選択中の一つなので25%以下は偶然の一致レベルの解答），高校生の場合は，こうして大部分は間違ったv-tグラフを選ぶ。

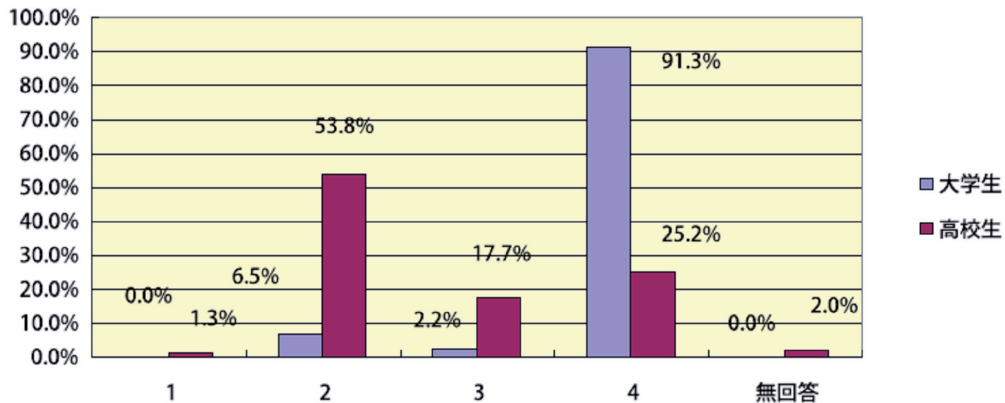


図6：2005年の高校生の回答結果（ボールに働く力）で約54%が(2)と回答した

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，大部分の高校生は解答していることである。これは「力が働く方向にもは運動する，ものが動く方向に力は働いている」という素朴概念に支配されていることを意味する。上の解答で，大学生の91.3%が正解4であるのは，3節の(1)超軽量力学台車と軽量な携帯扇風機のシステムによるニュートン運動法則のAL型モジュールによって，斜面を押し上げて昇り下りる「超軽量力学台車」の運動や，携帯扇風機の逆噴射状態の運動，による，AL型学習後における科学概念形成後の「ポストテスト結果」なのである。即ち，投げ上げ型のAL型学習を経験抜きのまま，こうした根強い素朴概念を克服して正しい「力と運動に関する概念」を形成する事は，以上の高校生や大学生に対する実態調査が示すように，とても困難なことなのである。

従って，「吹き矢パイプ系システムによる吹き上げ型物体の考察を行うAL型授業の具体化」には，このような最重要な課題に，冒頭の「吹き矢の運動」における導入部から，「真正面から投げ上げ型運動の解明に取り組む」点において，他に例がないような「優れた特色ある教材・教育内容」であると見做せよう。

3. 4 ミリ秒分解能ICT活用の現代的な意義と役割

(1)(2)のいずれの場合も，吹き矢型物体の「吹き筒内での等加速度運動」，「筒外での空中における自由落下運動」，等を「超高速カメラにより撮影」により，それを運動分析ソフト（LoggerPro）で分析することが重要となる。これにより，位置や速度や加速度の時間的な変化のグラフを得る事が出来る。それらのグラフを，動画と同期させて「視覚化・グラフ化」して示す（グラフ上の各点を動画のスローモーションと同期させて提示する）ことができる。

このような「ミリ秒ICT活用法」によって，次に示すように実験の結果を予測させ，その理由を討論し，その予測を，わくわくしながら明快に検証できる。驚くべき検証結果になる現実をリアルに体験することによって，従来までの誤概念を自ら修正する必要性に迫られることによって，正しい科学的な概念を体得・形成できる「AL型の吹き矢の力学授業」が実現できる。

その際，「ミリ秒分解能ICT活用の現代的な意義と役割」には，特に注意されたい。従来までは，吹き矢のような超高速な運動は肉眼では捕え難い対象だった。その速度や加速度を視覚化して具体的に認識する事は困難だった(5)。しかし，超高速カメラやミリ秒分解能があるITセンサーを活用して，それらを手軽に視

覚化して、実験に対する予測を明快に検証することができる。それによって、解かりやすい「アクティブ・ラーニング型理科授業の新展開」が可能になったのである。こうして、手軽な吹き矢の力学の本格的な具体化への道が大きく開かれた。明治初・中期に目指した「高いレベルの教育目標・力学のコア概念（質量・運動量・エネルギー等）の形成」等が、最新のICTを活用することで新展開できた。即ち、今日的達成度が効果的に得られるAL型概念形成授業に相応しい「鍵実験を明快に予測し検証する新段階の授業モジュール」の現代的再構成版が実現したのである。

3. 5 アクティブ・ラーニング型授業の一般的な流れ（その意義と役割）

AL授業環境としては；講義形式（ILD：Interactive Lecture Demonstrations）、実験授業形式、に大別されよう。AL授業環境としては、大きいクラス、あるいは小さいクラス、のどちらでも、とても効果的な授業が可能である。たとえば、学習参加者の規模、目的とする学習内容、使用できる機材の数、等によって、小さいクラス用か、大きいクラス用か、等を選択すればよいのである。

ILD:インタラクティブ講義デモンストレーション型は、多人数授業のアクティブ・ラーニング型講義形式の授業である。

十分な数のIT 機材が用意できる場合は、数人のグループ実験を単位とした、30人前後のクラス規模の「実験室におけるAL実験授業法」形式を実施することができよう。

アクティブ・ラーニング型授業の基本的な流れとその特徴

アクティブ・ラーニング型授業の基本的なステップと各段階のねらいの概要・特徴は次の様である。

- ① 「どのような実験かをあらかじめ把握できるように（ICTを使わない範囲の）概要を提示する。
- ② 鍵となる実験に関する予測をするために実験結果の予測に関する設問を示して予測させる。
- ③ 予測の理由・根拠についてそれぞれ意見を述べ相互討論をする（予測の変更を行うことも可能）。
- ④ 予測を明快に検証する実験を実施し検証結果（ICT活用で視覚的に表示）を受講者の全員に示す。
- ⑤ 検証結果に基づき最終的な理解を確認して記録させる。検証結果（予測の正否）を論証する。
- ⑥ 類似した物理現象として他の異なる状況においてどのようなものがあるかを発表させる。

このような一連の「予測・討論・検証」のステップを踏むアクティブ・ラーニング型授業の具体化の例として、「AL型の吹き矢の力学」によるAL型授業の具体化に関する、私たちの研究開発の詳細を以下に示す。これにより、プロアでアクリルパイプ中を吹き上げる手法や、タピオカ・ストロー中に息を吹き込む手法により、「吹き矢に働く垂直方向の2力のつり合い」・「風力による重力の意識化」・「投げ上げ運動における、力と運動の概念形成」「吹き矢型物体への仕事とエネルギーの理解」、などに関するニュートン力学の学習による理解において、鍵となる概念形成がどれだけ有効に達成できるかを、以下に於いて具体的に検討しよう。

実は、私たちがこれまで実施してきた「ICTを活用した様々なAL型授業の効果」については、前述の、4種類の摩擦の無い世界を実現した工夫例などの「ICT活用AL型授業」において「授業効果の事前・事後テストによる達成度調査結果（力学の誤概念がどれだけ転換されたか）が多数得られ、優位性が実証された。世界的な多数の調査結果によってAL型授業優位性は確認されてきた[1-5]。

その主要な特徴を簡潔に次に簡潔に要約する。力学などの分野における誤概念がどれだけ転換できたかについて、我々のAL型・能動型授業による場合と、従来型の受動型授業(パッシブ・ラーニング型)による場合との比較調査を実施してきた。それらの授業の前後における、Pre-Post（半年後）-Testによる結果による比較調査結果では、AL型によれば「正答率は50%~60%も上昇」して、力や運動、運動法則の授業で「Pre-Post-Testの正答率は30%から60%上昇し60%から80%の定着率」となる。このような著しい授業効果が得られている（従来型は10%前後の上昇、30%-40%程度の定着率）[1]。同様の特徴的結果は世界各国のAL型授業効果で系統的調査で確認されてきた[1, 5]。

3. 6 重力を意識させる垂直方向の力のつり合いの重要性（その歴史的な意義と今日的な役割）

重力は身近な遠隔力であるのに、児童・生徒にとって地球の引力・重力の確かな意識化は困難だった。重

力をどのように導入し「その垂直（鉛直）方向でのつり合い」をどう教材化するかは今も重要な課題である。

例えば、高橋金三郎は「糸で下に引かれたクリップ（鉄）を磁力で宙づり」にして、「垂直方向のつり合い（1959年）」として「クリップに働く磁力と重力のつり合い」を意識化をさせようとする教育法を試みた。板倉は仮説実験授業にこれを取り入れ、「力つり合いの原理」の導入部にそれを用いた。最近になると、机にセロテープで留めた糸の他端にクリップを付け、それを強力磁石で丁度宙づりにする（糸を弛ませるような）ことで、垂直方向での磁力と重力と糸の張力（ゼロ）を、強力磁石を用いてなんとか実現する。これにより、磁力と重力を上手くつり合わせることによって「重力の意識的な導入を磁石の力とのつり合いにより」実現する、というような試みである。

これ等では、垂直方向のつり合いに、どうしても糸の張力が入ってくるので「3力のつり合い」が最初から混入する、という難点がある。張力が介入しない「2力のつり合い」を単純に実現するような工夫が望まれる。水平方向であれば、「水に浮かせた発泡材上の鉄に両側の2磁力のつり合い」、「台車に互いに逆向きの扇風車を載せて2つの風力による「水平方向のつり合い」等がある。しかし、それでは「垂直方向の重力と？とのつり合い」で生じる「重力の意識的導入」の際の意外性や驚きを体験する流れが生み難いのである。

3. 7 吹き矢に働く「垂直方向の2力のつり合い」と風力による重力の意識化

吹き矢パイプ系においては、吹き矢に働く「重力と風力のつり合い」を次のようにとても容易に実現できる。このような「効果的な重力の意識的な導入」は、重力による運動法則の学習において特に重要な役割を果たすものと思われる。次に示すように「吹き矢による垂直方向の2力のつり合い」の導入が実現できる。

吹き矢系のAL型力学授業モジュールの核心部を端的示すため、最初に、最も重要な2つの展開部における、概念形成に鍵となる実験の概要とその「予測のための設問・明快な検証法」を提示する。

(1) AL型吹き矢系の「垂直方向における2力のつり合い」の法則、に関するAL型力学授業の概要

問題：垂直パイプ内の吹き矢型物体は宙吊りになるか？

- ①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：「吹き矢型物体」はどのような力を受けているか？

- ①重力だけにより下向きに引かれている。②風力だけにより上向きに力を受けている。③同じ大きさの下向きの重力と上向きの風力を受けてつりあっている。④その他

(2) 「垂直方向の運動法則」：「筒の長さど吹き矢が到達できる最高値」に関するAL型授業展開の概要

「ストローの長さ \propto 風力が吹き矢にする仕事=吹き矢が到達できる高度；吹き矢運動エネルギーの位置エネルギーへの転換」を、うまく関係づけることができるような、AL型力学教材の具体化となる。

「パイプ長と到達できる高さ=パイプ内での風力のする仕事」のAL授業の展開の流れの概要；

問題：タピオカ・ストローの長さを二倍にすると、物体の飛び上る高さは、どうなるだろうか？

- ①上る高さは2倍になる。②上る高さは1/2になる。③上る高さは変わらない。④その他。

上記の問題1、2は、吹き矢に働く「垂直方向の2力のつり合」、問題3は、「筒の長さど吹き矢が到達できる最高値」を予測して検証するため鍵となる実験に対する「AL型の予測をするための設問である。

この(1)及び(2)が「吹き矢系システムによるAL型力学授業の具体化」での最重要な鍵実験である。

3. 8 鉛直方向での吹き矢実験により実現できる「摩擦がゼロに近い世界における力学学習」の優位性

「鉛直方向で吹き矢の実験をする理由」としては、「垂直なパイプの内壁と吹き矢物体との摩擦を最小限にして、運動法則を調べることで、“ほぼ摩擦が無視できる理想的世界が実現できる”からである。

それが、吹き矢実験を「鉛直方向で実施する」ことに秘められた最も注目されるべき優位性である。

このように吹き矢を使用する授業法は、これまでの所では、他に例がないように思われる。

実は、水平方向での吹き矢の実験では、吹き矢物体と筒の間の静止摩擦や動摩擦は無視できない程度に働く。それは、特に、低速な筒内での運動に於いては、水平に置かれた筒内での、筒と吹き矢物体との摩擦は無視できない程度である。但し、高速な運動になれば、そうした摩擦は無視できるようになる。

特に、力のつり合いや低速な運動における等加速度運動を取り扱う際には、「垂直方向での筒内の運動」の方が、「水平方向での筒内での運動」よりも、はるかに“摩擦が無視できる理想的な世界が実現できる”のである。こうした、垂直方向での吹き矢パイプ系の「優れた特性」を重視して、意識的にそれを活用することは、とても重要なことであるように思われる。

4. 「力のつり合いの法則とその破れ」に関する「吹き矢系システムによるAL型授業の具体化」

具体的な吹き矢系システムによるAL型授業は、次の4. 1の「垂直方向のつり合いとその破れ」について、次のような基本的な6ステップをたどりながら行われる。[5] すなわち、吹き矢型物体が受ける2力の、それぞれの場合におけるつり合いと、その破れについてである。

①鍵となる実験を提示する。②実験の結果に関する設問に対する予測をする（示された選択肢中から予測を選択）。③その理由を討論する（討論結果予測を変えることも可能）。④実験をして予測を検証する（ミリ秒分解能を有するICT活用を含む）。⑤検証結果を確認し、検証された法則の理解を整理する。⑥応用：同様な法則が成り立つ他の実験・現象例を考え合って例示する。[6]

同様に、4. 2では運動の第2法則の「吹き矢系AL型授業」の具体化も同様に、①から⑥の各ステップを踏んで進む。そのような4. 1, 4. 2の典型的な実験・設問・予想選択肢の概略は次のようである。

4. 1 垂直方向の「2力のつり合いとその破れ」：吹き矢型物体が受ける力（重力と風力など）の考察

問題1 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2 そのとき「吹き矢型物体」はどのような力を受けているか？

1. 重力だけにより下向きに引かれている
2. 風力だけにより上向きに力を受けている
3. 同じ大きさの下向きの重力と上向きの風力を受けて、つりあっている
4. その他

問題3 実験的な予測の検証と重力の意識化：吹き矢に働く風力で、それにつり合う重力を意識化

問題4-1 プロアの調節スイッチで、パイプへの風を遮断したら、宙ぶり状態にある「吹き矢型物体」はどうか？

問題4-2 実験的な予測の検証と共有：「吹き矢型物体」のつり合いの破れで、重力を意識化

問題5-1 この状態でプロアの風力を強くしたら、止まっていた「吹き矢型物体」はどうか？

問題5-2 実験的な予測の検証と共有：「吹き矢型物体」のつり合いの破れで、重力を意識化

以上のような「垂直方向の2力のつり合いとその破れ」についての、実験・設問・予想選択肢などとなる。

4. 2 垂直方向における「運動の第2法則の吹き矢系によるAL型授業の具体化」

問題6-1 物体はプロアで強く吹き上げられた；パイプ中の「吹き矢型物体」の速度の時間的変化(v-t)のグラフは次のどれか？（ただし上を正方向とする）

問題6-1 物体はプロアで強く吹き上げられた；パイプから飛び出した後の「吹き矢型物体」の速度の時間的変化(v-t)のグラフは次のどれか？

ここで、吹き矢の鉛直方向の運動に関する実験画像解析は次のように行う：その際には、(1/1000)秒（ミリ秒）までの時間的な解像度を有するデジタルカメラである「CASIO EX-FC150/ZR100/ZR200/ZR300;それぞれ、120, 240, 480 and 1000fps (frames per second) の高速な動画撮影が可能」、により、高速すぎて目にも止まらぬ「吹き矢が発射される」動きに際しても、それをひとコマひとコマ毎に鮮明に解像して認識

できる動画映像として撮影できる。その動画を「LoggerProによる手軽な運動分析機能」によって、 $x-t$ グラフ、 $v-t$ グラフとして、高速な吹き矢の運動を解明できる。特に、

実験1：吹き矢を加速させるパイプの長さを変える。

実験2：吹き矢の質量を変える（長さを変化させる）。

パイプの長さを（1倍、2倍）に変えて行う実験について、吹き矢物体の飛び上がる高さがどう変化するかを予想をたてさせて、その予測の正否を実験的に検証する。

この実際は、アクリルパイプをブローで吹き矢物体を吹き上げることによって、「パイプが10cmの時、20cmの時に、吹き矢型物体は、垂直方向のどれだけの高さまで飛び上がるか」を予想して検証するものである。

タピオカ・ストローの場合は、17cm、34cmの長さで、長さを1倍、2倍した時の、予想を検証する実験を実施する。

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」についての予想・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、その位置エネルギーへの転換」に関する、見事な予測検証実験となる。以下に、その具体化の実際的な流れの概要を簡潔に示す。

問題7 パイプの長さを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になる
3. 上る高さは変わらない
4. その他

問題8 パイプの長さを二倍にすると、パイプから飛び出した瞬間の物体の運動エネルギーはどうなるか？

問題9 パイプの長さが二倍になると、物体が「ブローと重力の合力」から受ける仕事はどのように変化するか？

以上がその中心的部分の具体的な流れの概要を整理したものである。次の第5章では、このような流れを「実際の授業において実施した場合にどうだったか」という授業実践の結果を示す。授業は、教育学部理科2年生20名、理学部3年生9名を対象に2012年6月に行った。（以下の回答総数は19名）

5. 吹き矢系システムの「力と運動（垂直方向）におけるAL型授業の具体化」と授業実践結果

5.1 垂直方向のつり合い

吹き矢型物体が受ける力、力による運動、物体のエネルギーなどの考察についての問いと回答率である。

問題1 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

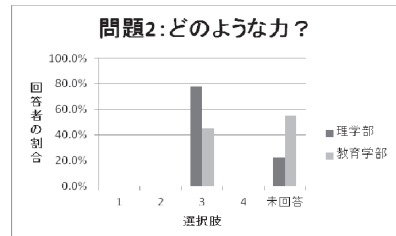
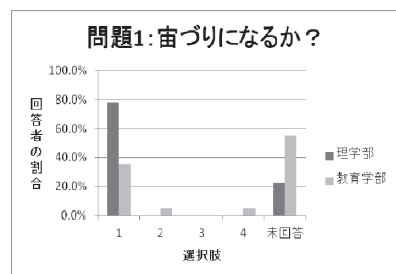
問題2 そのとき「吹き矢型物体」はどのような力を受けているか？

1. 重力だけにより下向きに引かれている
2. 風力だけにより上向きに力を受けている
3. 同じ大きさの下向きの重力と上向きの風力を受けて、つりあっている
4. その他

問題3 結果からわかること：

「吹き矢型物体」は、どのような力を受けているか？

問題2と同じ4つの選択肢から選ぶ



問題4-1 ブロアの調節スイッチで、パイプへの風を遮断したら、宙ぶり状態にある「吹き矢型物体」はどうなるか？

1. 止まり続ける
2. 下り始める
3. 上り始める
4. その他

問題4-2 その時「吹き矢型物体」はどのような力を受けているか？

1. 重力だけにより下向きに引かれている
2. 風力だけにより上向きに力を受けている
3. 同じ大きさの下向きの重力と上向きの風力を受けて、つりあっている
4. その他

問題5-1 この状態からブロアの風力を強くしたら止まっていた「吹き矢型物体」はどうなるか？

1. 止まり続ける
2. 下り始める
3. 上り始める
4. その他

問題5-2 ブロアの風力をより強くした時「吹き矢型物体」が受ける力はどうなるか？

1. 下向きの重力は、上向きの風力と同じ大きくなる
2. 上向きの風力は下向きの重力より大きくなる
3. 下向きの重力は上向きの風力より大きくなる
4. その他

以上の「宙吊りにできるかどうか」では、吹き矢型物体が受ける風力を上手く重力に釣り合うように調整できるか否かを問うことで、重力を客観的に意識化するような能動的問いかけをする。

大学生（理学部の大部分、教育学部のかなり）は、重力の客観的意識が出来ている結果を得たが、今後タピオカ・ストローで授業を実施する場合は、自らつり合わせる作業を実体験する時にどうなるか、小・中学生でどうなるかは、とても興味深い。

5. 2 運動の第2法則の「吹き矢系AL型授業」（単直方向）の具体化

問題6-1 物体はブロアで強く吹き上げられて最高点まで上り落下した；

パイプ中の「吹き矢型物体」の速度の時間的変化（v-t）のグラフは次のどれか？（ただし上を正方向とする）

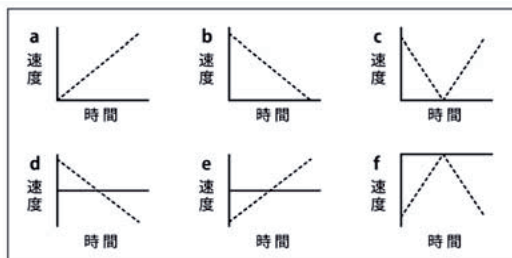
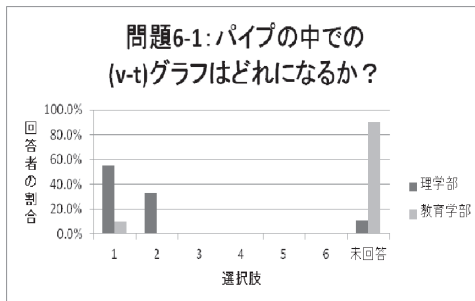
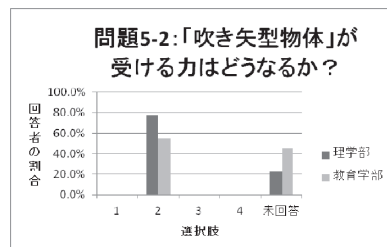
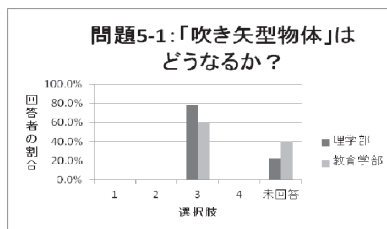
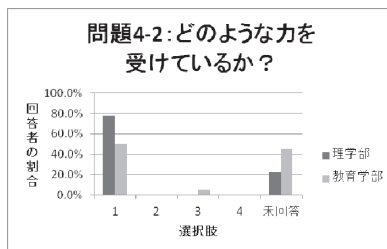
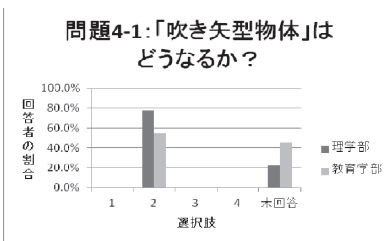


図7：問題6-1のv-tグラフ



問題6-2 物体はプロアで強く吹き上げられた；
パイプから飛び出した後の「吹き矢型物体」の速度の
時間的变化 (v-t) のグラフは次のどれか？

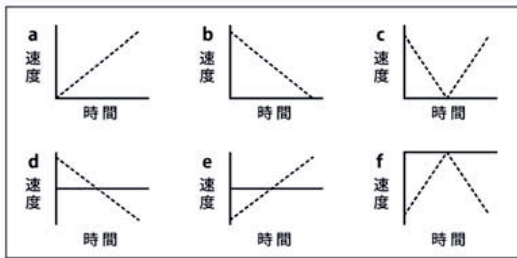


図8：問題6-2の v-t グラフ

1・a, 2・b, 3・c, 4・d, 5・e, 6・f

問題7 パイプの長さを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になる
3. 上る高さは変わらない
4. その他。

問題8 パイプの長さを2倍にすると、パイプから飛び出した瞬間の物体の運動エネルギーはどうなるか？

1. 運動エネルギーは2倍になる
2. 運動エネルギーは1/2になる
3. 運動エネルギーは変わらない
4. その他

パイプを2倍にしたときの実験結果は、図3はで示した。

問題9 パイプの長さが二倍になると、物体が「プロアと重力の合力」から受ける仕事はどのように変化するか？

1. 受ける仕事は2倍になる
2. 受ける仕事は1/2になる
3. 受ける仕事は変わらない
4. その他

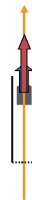
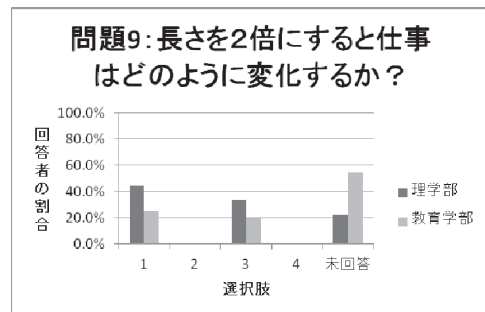
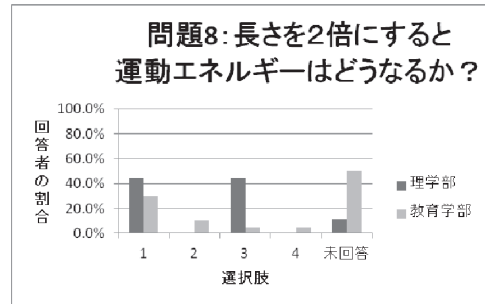
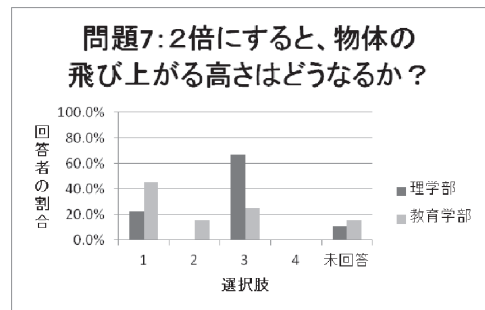
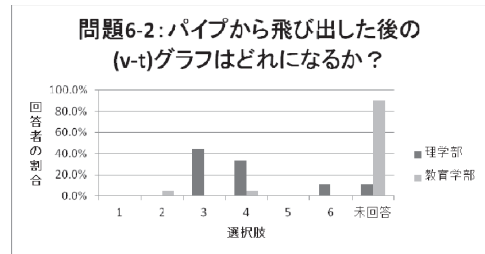


図9：問題9の筒中における仕事



パイプ中と、パイプを出た後の吹き矢物体の速度 (v-t) グラフの正答率はそれぞれ、50%強、30%強の理学部学生 (教育学部はかなりの低率) であった。

「パイプの長さを2倍にすると2倍高く飛び上る」の正答率は理学部20% (教育学部40%) : 理と教で逆転した。運動エネルギーや仕事は2倍になるは、理が40% (教が30%) で、予測を覆す実験によって仕事やエネルギーの概念形成に効果的な実験であり、理系にもタピオ・カストロー体験は有益である。問題9を質問した後に、パイプの長さを1倍、2倍にした実験結果を分析・整理したグラフを見せる。

図10のグラフからパイプの長さ（加速する距離）と飛び上がる高さ（力学的エネルギー）が比例することがわかる。

「運動の第2法則」・「仕事と運動エネルギー・位置エネルギー」についてのAL型授業

「運動の第2法則」の理解において鍵となる基本的な実験・演示実験を提示して、その実験に関する設問に対する予測をするように指示する。その後、各自の予測についての相互討論により、各自の予測を検討する。予測の検証実験の結果をITツールでグラフ表示する。この「一連の予測・討論・検証実験」の手順を単位にしたAL授業例を以上に示した。同様な「仕事と運動エネルギー・位置エネルギー」の手順を単位にしたAL授業例も示した。その設問をポストテスト（半年後の期末に実施）することにより、これらの「鍵概念の形成がどれだけ実現したか」の授業効果を評価する。

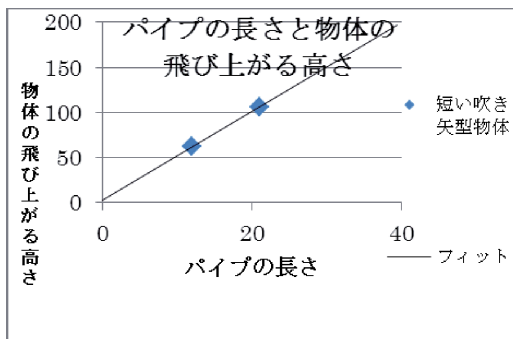


図10：吹き矢パイプの長さとし吹き矢型物体の飛び上がる高さ

5. 3 吹き矢型物体の等加速度運動（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

等加速度運動＝パイプ中の吹き矢型物体の運動、及び自由落下運動＝パイプから吹き上げた後の吹き矢型物体の落下運動についての分析結果

一定の力を加え続けたときの運動

「プロアと重力の合力」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：等加速度運動

パイプから飛び出した後は、吹き矢型物体には重力しか働かないので、常に重力で減速され、最高点まで上がり落下に転ずる運動（物体の投げ上げ運動）を分析して、「動く方向にいつでも力を受けている」という素朴概念をくつがえす授業を実現する。

その後に、吹き矢型物体の質量を変えたらどうなるか？ についての授業手順を実施する。

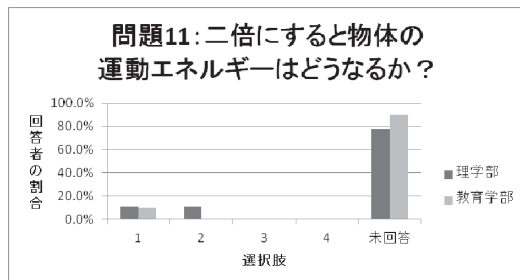
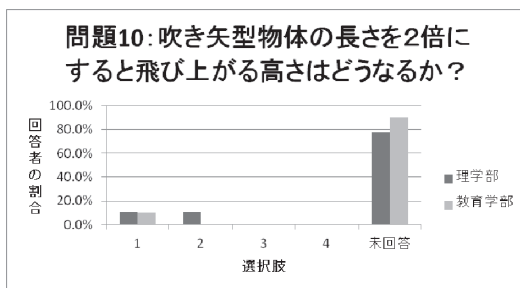
但し、質量の変化 (Δm) による重力のする仕事の変化 ($-\Delta mgh$) が無視できる単純化が望ましいので以下は風力の仕事に比べて $\Delta m \cdot gh$ が無視できる実験設定とする。水平方向ではそれが成り立つので、水平方向で具体化も可能。

問題10 パイプ内の物体の長さを2倍にすると物体の飛び上がる高さはどうなるか？

1. 上る高さはほぼ2倍になる
2. 上る高さはほぼ1/2になる
3. 上る高さはほぼ変わらない
4. その他

問題11 物体の長さを2倍にすると、パイプを飛び出した直後の、物体の運動エネルギーはどうなるか？

1. 運動エネルギーはほぼ2倍になる
2. 運動エネルギーはほぼ1/2になる
3. 運動エネルギーはほぼ変わらない
4. その他



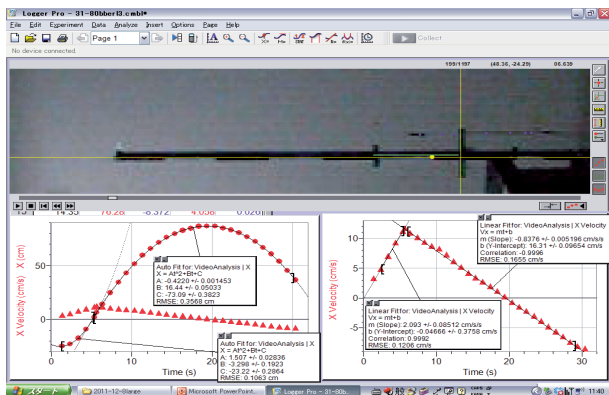


図10：吹き矢型物体の長さを2倍にしたときの実験

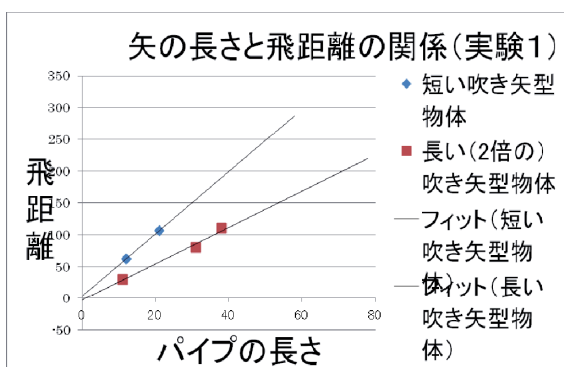


図11：吹き矢型物体の長さ（パイプ）と飛び上がる高さ

問題12 物体の長さを2倍にすると、物体が「上向きの合力」から受ける仕事はどのように変化するか？

1. 受ける仕事は2倍になる
2. 受ける仕事は1/2になる
3. 受ける仕事は変わらない
4. その他



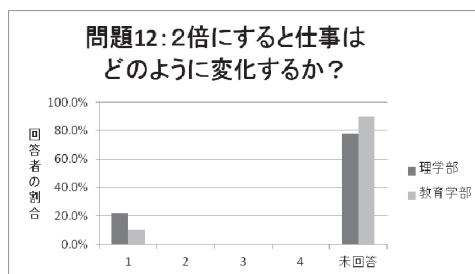
図12：問題12の仕事

実験結果

この設問に対する答えは以下の通りである。左の図は実験室の入り口のドアの横にパイプを床から天井に向かって配置して実験したときの実験結果である。動画は垂直運動（縦方向）を撮影したが、この運動分析ソフトにおける動画映像は、90度右回りに回転した、水平方向に示されている。左下のグラフは、筒の中から発射された吹き矢型物体の $(x-t)$ グラフであり、右のグラフは、 $(v-t)$ グラフを示している。

左のグラフは、吹き矢型物体の長さを変えたときの飛距離の変化を表わしたグラフである。吹き矢型物体の長さが短い方が長い方に比べて飛距離が長いことがわかる。

以上のように、風力が同じ時の吹き矢型物体の質量（=長さ）を2倍にすると、仕事やエネルギーはほぼ変わらないが、飛び上がる高さは質量に逆比例するので、ほぼ半分になることの理解を深めることに、効果的であることが解る（時間不足で未回答・正答率が多い）。



5. 吹き矢系システムの「力と運動（水平方向）」における「AL型授業の具体化」

水平運動の画像分析は、垂直方向の運動に関する実験と同様に1/1000秒までの分解能を有するカシオ製のデジタルカメラを用いて、吹き矢が発射される際の連続写真を撮影する。吹き矢物体の運動分析は、その動画をLogger Pro 3.8（運動分析ソフト）により、垂直方向の場合と同様に進める事ができる。すなわち、垂直方向と同様に、最初の段階の実験では、「吹き矢型物体を加速させるパイプの長さを変えた」ときについての「予測・討論・検証」、つぎの段階の実験では、「吹き矢の長さを変化させた」ときについて「予測・討論・検証」の「AL型授業のプロセス」を実施する。

- (1) 吹き矢系の「2力のつりあいとその破れ」(水平方向)における「AL型授業の具体化」
 (2) 吹き矢系の「運動の第2法則」(水平方向)における「AL型授業の具体化」

(1)及び(2)のような、水平方向における力と運動に関する「吹き矢系アクティブ・ラーニング型授業の具体化」について設問の詳細は、垂直方向と同様な流れなので紙幅がないため省略する。

ただし、ここでは垂直方向とはかなり異なる「ブローによる水平方向の風力による吹き矢型物体の運動」についてだけは、特に、触れておこう。

①パイプから吹き出た物体は2次元の放物運動をする。

②水平な「1mの水平方向アクリルパイプ中での吹き矢型物体の運動」を高速デジタルカメラで撮影して、それをLoggerProで分析した結果の特徴は、次のようである。

右図は水平な実験テーブル上の「1mのアクリルパイプ中にブローで一定の風力を吹き込むときの吹き矢型物体の運動」を、LoggerProで分析した結果である。LoggerProでは、動画映像の超スローモーションにピタリ同期させて、右の上にした「 $(v-t)$ グラフ」、及び、その下の「 $(x-t)$ グラフ」の各一定時間間隔毎における v 、 x の値をスライドしながら提示できる。このアクリルパイプ中での吹き矢型物体の水平直線運動は、ほぼ摩擦が無視できる世界における等加速度運動をすることを示す。

ここで、 $(v-t)$ グラフは、吹き矢型物体が動き出す際には、「水平方向のアクリルパイプの壁面との摩擦が無視できないために、徐々に加速されて等加速運動に移行するようすが見て取れる。

特に、上記の「等加速度運動を1mのアクリルパイプ中で継続する条件」は、パイプの内径がより細く(6mm, 8mm)、吹き矢型物体の「パイプの断面当りの密度が高い(風圧当りの質量大)」と、より低速である、などが挙げられる。ただし、ブロー風力を吹き出し直後からパイプ先端まで「常に一定にコントロールする事」にはまだ工夫の余地がある。特に、ブローの吹き出し開始時の風圧過大(逆に出口での風圧過少)などに、今後の改善すべき余地が残されている。

次は、摩擦(空気抵抗)が無視できないために、吹き矢型物体がパイプ中で終端速度(等速度)に達するケースを右図に例示する。1mのアクリルパイプ中において終端速度(等速度)に達する条件としては、パイプの内径が太く(15mm)、吹き矢型物体が「パイプの断面当りの密度が低く(風圧当りの質量が小:バルサ材・発泡材等)」、「瞬時に高速に達し易い」等が挙げられよう。すなわち、風圧当りの質量を小さく変化させて(超軽量紙カップの落下実験に当る条件)、その終端速度の法則を探るAL型授業が可能となるのである。

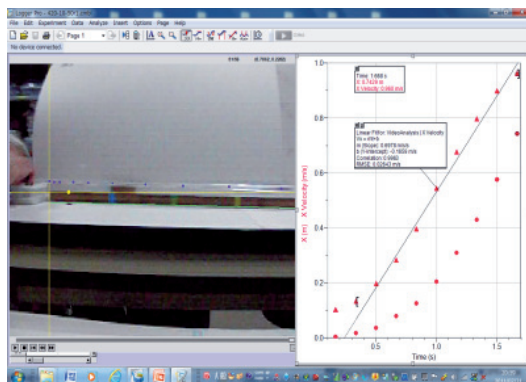


図13: 吹き矢型物体の水平パイプ中の等加速度運動

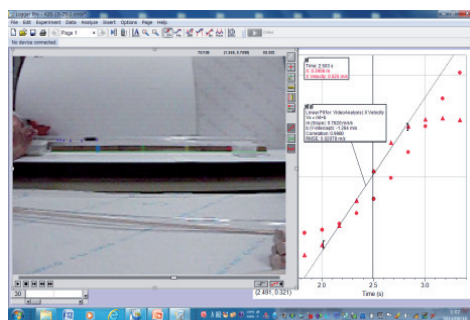


図14: 水平パイプ中で終端速度に至る吹き矢型物体

6. 「吹き矢系AL型授業」の具体化に関する超高速カメラによる分析結果とその理論的な考察

- (1) 運動分析ソフトによる、より詳細な分析結果の考察

「吹き矢型物体の超高速動画を運動分析ソフトで解析した結果」の理論的な考察をしておこう。

実験1: 吹き矢型物体に働く2力のつり合いとその破れ(重力の意識化)

実験2: 吹き矢型物体を加速させるパイプの長さを変える(パイプ中の仕事を考える)。

実験3：吹き矢型物体の長さを変化させる（風圧当りの質量を変える）。

なる3種類の特徴的な実験において「実現する物理的な状況により浮き彫りにできる本質的な力学概念」とその効果的な概念形成の場面はどのようなものかそれを生む本教材の特質を以下に述べる。

- ①空中で重力とブローの風力がつりあったときは、見えない重力を風力で視覚化できる。
- ②飛距離が長さに比例するので長さを倍にすると運動エネルギーが倍になるを視覚化できる。
- ③エネルギーの概念と力による仕事の概念とを明瞭に示すことが可能となる（力一定で動かす距離を変化させると、飛び上がる高さや、横に法物線運動する飛距離が伸びること、等から）
- ③実験材料が安価で手に入りやすく、しかもとても手軽に実験を実施できる。

(2) 力学的エネルギーの保存の法則の理論的な考察（鉛直吹き上げの場合）

ここで、本教材に関わる「力による仕事と力学的エネルギー保存の法則」について整理する。吹き矢物体の質量を m 、筒の長さを L 、矢が筒を飛び出した後の高さ y における吹き矢型物体の速度を $v(y)$ 、筒の中の風力と重力の合力を F （ \equiv 一定）、重力加速度を g とすると、吹き矢型物体の力学的エネルギーは、

$$E = \text{運動エネルギー}(K) + \text{位置エネルギー}(U)$$

で表わされるので、矢の高さが y のときの力学的エネルギーは

$$E(y) = K(y) + U(y) = \frac{1}{2}mv(y)^2 + mgy$$

となる。ただし、筒の出口の高さを位置エネルギーの基準点（ $y = 0$ ）とした。

吹き矢型物体は、打ち出されるまでに合力により加速される。その際に、吹き矢型物体は運動方向に力（風力と重力との合力）を受ける。よって、運動方向の力、つまり合力は

$$\text{合力} = \text{風力} - mg = F$$

であり、合力から吹き矢型物体がされる仕事は

$$\text{仕事} = F \cdot L = \frac{1}{2}mv(0)^2$$

となる。パイプを飛び出した後の吹き矢型物体は、「重力による等減速運動、すなわち、投げ上げ運動」をする。

力学的エネルギー保存則より、吹き矢型物体が筒から打ち出される位置の高さを $y = 0$ 、最高点を $y = h$ とすると、

$$\frac{1}{2}mv(0)^2 = mgh$$

が成り立つ。

筒の長さを n 倍にした場合（ $L \rightarrow nL$ ）には、合力 $F = \text{一定}$ なので、合力からされる仕事は $F_{nL} = F \cdot nL$ となり、 n 倍となる。その仕事によって、飛び出した直後の運動エネルギーは n 倍になる。

$$K = n \frac{1}{2}mv(0)^2$$

よって、倍の高さ nh まで上がることができる。そのときの吹き矢型物体の速度は、 $v(h') = 0$ となる。

筒の長さを n 倍にした場合の位置エネルギーも、

$$U = mgy = mgh' = nmgh$$

と n 倍になる。何故なら、力学的エネルギー保存の法則より高さ y における全エネルギーは

$$E(y) = K(y) + U(y) = \frac{1}{2}mv(y)^2 + mgy = \text{一定} = n \frac{1}{2}mv(0)^2$$

だからである。

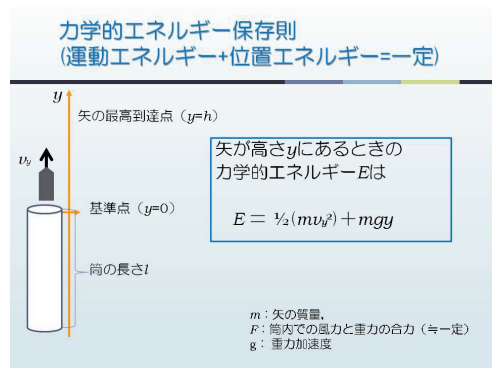


図15 吹き矢型物体の力学

(3) 力学授業展開の歴史的考察（「吹き矢の力学」の仮説実験授業、玉田方式、のぼりおり、等）

板倉たちの「吹き矢の力学」の仮説実験授業と対比：上記の私たちの「垂直な吹き矢パイプ系システムによる具体化」と「板倉等の仮説実験授業のそれ[7]」との比較・考察などを記して本論考をしめくくることにしよう。

板倉は、1999年3月30日の日本物理学会広島大会で、当時進行中であった「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た。「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[7]。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[7の124頁]。「吹き矢は竹が豊富なアジアで発達した（西洋でなく）[7]」も面白い。

板倉は、その講演資料に次のように書いた。「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」、「そこで、いつまでたっても、ガリレイのような落下実験をやって、加速度運動を教えるやり方がとられてきたのである。しかし落下実験より、この実験の方がはるかに感動的でわかりやすいことはあきらかである」、のように、その意義を述べている[7]。その後、様々な試行を経て、サイエンスシアターシリーズの「力と運動」における「(2)吹き矢の力学」として出版された。というような経緯がある[7]。

本論考では、特に「垂直方向における吹き矢の力学を重視したAL型力学授業モジュール」としての具体化を行った。板倉達が、ストローを水平に用い、その勢いと力積の関係を教材化した事に対して、私達は、アクリルパイプやタピオカ・ストローを垂直に用いることによって、「風力のする仕事＝吹き矢パイプの長さ×風力＝仕事により得た運動エネルギー＝到達可能な高度で有する位置エネルギー」というAL型授業として、感動的なエネルギー概念の形成が可能なることを実証した。

しかも、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、アクリルパイプとプロアのような「一定な風力と風圧を保つ工夫」をさらに重ねれば、より微妙にコントロール可能な理想世界が実現できる。それを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。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型力学授業の具体化ができる。

今日では、ミリ秒までの分解能をもつデジタルカメラによる観察手段が手に入り、LoggerProのようなICT活用手段により、ガリレイやニュートン時代には不可能だった「ミクロな時間を拡大して表示し分析する」理想的な手段（ミクロな空間を拡大する顕微鏡や遠い世界を拡大する望遠鏡に匹敵）を自由自在に活用できるようになった。しかも、コンピュータの機能によってそれらの量的な変化をグラフ化し、物体の動きと同期させて、様々な物理量（矢印ベクトルやスカラー量など）を、動く吹き矢物体上の重心からの矢印ベクトル（や高さ）の動きで示すことで、分かり易く動かして視覚的に提示できる。今回は、そうした動画的な表示までは提示しないが、運動分析ソフトで物理量を動画上に動かして提示するさえ可能な時代なのである。クリカーのような応答システムの活用も普及してきている。ガリレイ時代には、高速すぎて観測が困難な落下運動の分析を長い緩い斜面上におけるとてもゆっくりした運動に置き換えて、視覚的な観察や思考実験的な考察を交える思考の積み上げによって、等加速度運動や落下運動の本質を発見・解明した。「しかし、いつまでたってもこのような落下の法則の教え方[7]」という状況を見事に克服する環境を本論考で整えた。

日本や世界におけるAL型授業の取り組み事例：

以上の取り組みで示したAL型授業方式と日本の仮説実験授業・玉田方式・のぼりおり表方式、等は、予

想・討論・検証等の共通な概念形成方式であるので、簡潔な歴史的整理検討をしておく。

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革新運動は、日本の生活単元・問題解決学習批判・民間の教育改善運動と連動し、世界と日本に多様な教育改革の力強い潮流を生んだ。

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、等々、様々な科学概念形成授業法のイノベーション的な展開や進展が生じた。

水道方式（1958遠山）、新しい理科教室（田中1956）、仮説実験授業（1963板倉）、極地方式（1970高橋）・玉田方式（1976）等が代表的な潮流として例示できる。1950年代後半から1970年代に日本では世界に誇れる独創的で効果的な理数分野の教育方式の潮流が育った。そのウェブ頁等の簡潔な要約をする。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」なる基本的立場に立つ。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→実験で分ったことをノート」なるもの。

欧米でも、1970年代から1980年代には、生徒の概念形成の実態調査（素朴概念や誤認識）が進展し、同様な潮流が大きな奔流に成長・発展を遂げた（L. C. McDermott, ・・他）。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」が大進展する。その運動分析ソフト（ビデオポイント）の元祖がPriscilla Laws達である。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・世界的な普及定着を実現した。大人数講義実験的ILD（Interactive Lecture Demonstrations）、30人前後の実験室規模でのActive Learning型実験・実習・ワークショップ、等々の科学概念形成を「8段階のステップで実験に対する予測・討論・検証・応用の段階をICT活用で見事に進める」として、様々な規模の授業形態に適応できるものとして新展開してきているのである。

6. おわりに

最後に、本論考で解明した特徴的な成果と結論や今後の展望と課題を簡条書式的に整理しよう。

1. 現代的ICT基盤が急速に進展し、最新のICT活用によってこれまで未達成だった多くの分野の科学概念形成を効果的に行う課題が解決され、科学教育の新展開と再構築の道が切り開かれた。
2. ミリ秒分解能で解き明かすことが要求される分野（吹き矢の力学・衝突現象・電磁現象・波動現象等）での「ICTを効果的に活用したAL型概念形成授業の創新」が注目されてきている。
3. 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」・「重力と風力がつり合う（つり合いを破る）客観的存在を提示することで重力の意識化・客観化の道を切り開いた。即ち、吹き矢型物体を吹き出すアクリルパイプ系とタビオカ・ストロー系の両システムによるAL型力学授業を実施して「風力で重力を意識化する感動的な釣り合わせ体験」を可能にした。
4. 垂直上方に吹き出すタビオカ・ストロー系で「風力のする吹き矢物体への仕事＝ストローの長さ×風力」と「吹き矢物体の到達高度＝得た運動エネルギー＝到達可能な高度の位置エネルギー」という効果的な「仕事・運動・位置エネルギーの保存・転換」のAL型授業を具体化した。
5. こうした「ミリ秒の世界での衝突現象の教材開発」は「効果的な力学概念の形成」授業の貴重な宝庫であることを、具体的な授業展開により提示し、今後の改良・改善への基礎を築いた。
6. パッシブ・ラーニングからアクティブ・ラーニングに転換する効果的な科学概念形成授業を様々な分野で実現しつつある。本論考で示した最新のICT活用をしたAL型授業の推進は、小学から大学までの科学教育に統一的観点に基づく一貫した見通しをもたらしてきている。
7. プロア風力を「吹き出し直後からパイプ先端まで一定に保つ」等での工夫を含む、吹き矢系システムに

よるAL型授業の実践を重ねながらその改善のプロセスを実行することが課題となる。

8. 水平方向に吹き出す「吹き矢系システムによるAL型授業の具体的な授業実践」の課題がある。
9. 水平方向における終端速度に関する「吹き矢系システムでのAL型授業の具体化」の課題がある。

Acknowledgement

本研究は科学研究費（H21-23）基盤研究（B）（課題番号：21300289）「ICTを基盤にした科学教育の創成で科学概念を形成活用する能動学習システムの構築」による研究成果を含むものである。

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 (03), pp.39-62, 2003。 <http://www.ed.niigata-u.ac.jp/files/cerp/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] Akizo Kobayashi and Fumiko Okiharu: Active Learning Approaches by Visualizing ICT Devices with Milliseconds Resolution for Deeper Understanding in Physics, Proc. of ICPE2009, AIP Vol.1263, pp.134-138（2010）。
- [5] R.K. Thornton, D.R. Sokoloff： “Assessing student learning of Newton’s law”, Am. J. Phys. 66, pp.338-352（1998）。
- [6] 「平成20年度中学校理科教師実態調査」 <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20080912/besshi.html>, 「平成20年度中学校理科教師実態調査, PISA2009年デジタル読解力調査」, http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/23/06/1307642.htm。
- [7] 板倉聖宜・塩野広次：「吹き矢の力学」, 仮説社, 33頁～90頁, 2005年1月。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ことなのか」, 日本物理学会広島大会・当日配布資料（1999年3月）
- [8] LoggerPro version 3.6： Vernier 社製の各種センサー; <http://www.vernier.com/soft/lp.html>。
- [9] Video Point： software of Lenox Softworks, <http://www.lsw.com/videopoint/>。
米国のPASCO社製のPASPORT USB Sensor。DataStudio という解析・分析・表示するソフト使用。