

明治 150 年に挑んだ能動学習型力学授業の最新 ICT 活用による 現代的再構成と新展開

小林 昭三*1・興治 文子*1

Email: kobayasiakizo@ed.niigata-u.ac.jp

*1: 新潟大学教育学部

◎Key Words 科学教育の明治 150 年, ICT 活用能動学習, IOT で力学教育再生

1. はじめに

来年は明治 150 年(本年は大政奉還 150 年)であるが、全国各地の文書館を訪問して埋もれている明治 150 年に及ぶ筆記文書他の記録を全国網羅的に探索・収集してきた。当時において挑み続けた世界最先端の科学教育における目標・内容・課題の実相について、そうした 1 次資料に基づく資料科学的な分析研究を系統的に進めてきた。

その際、当時の高等小学校生徒や教師の授業筆記等による授業現場の生々しい実態を裏付け得る直接的な証拠を探索して史的新知見を実証する研究手法を特に重視した挑戦的研究を新展開してきた。その中で明治期の Gage 教科書に示されたアクティブ・ラーニング (AL) 型授業を記録した物理学筆記を埼玉で発見をするに至った⁽¹⁾。

このような世界的最先端に挑んだ能動学習型科学教育の源流である明治の力学教育の課題・目標・内容の史的解明を重視して、一次資料としての筆記文書を読み解く実証的な研究を新展開してきた。明治 150 年に渡って挑み続けたそのよう価値ある力学教育の課題・目標・内容を、最新の ICT・IOT を活用して現代的に再構成する事を試みた。そうした私達の最近の成果を報告する。

特に、急進してきた最新のモバイル ICT・IOT 基盤(無線センサー・高速カメラ・モバイルタブレット端末他)を有効に活用することで、明治期には困難で未完なままだった価値ある教育課題の現代的な再構成が可能になった。そうした ICT を活用した AL 型力学授業法による現代的に蘇がえらせる実践的研究について報告する。

2. 筆記文書データベース作成とその分析研究

北海道から四国・九州(北海道・秋田・宮城・福島・新潟・群馬・埼玉・栃木・茨城・東京・千葉・神奈川・長野・静岡・愛知・岐阜・富山・石川・福井・京都・大阪・兵庫・岡山・広島・鳥取・島根・山口・徳島・香川・熊本他)に及ぶ各地の筆記文書の探索・発見・分析を進めてきた⁽¹⁾。

特に新潟・群馬・埼玉・茨城・栃木・神奈川・長野・石川等の 8 県では、ウェブで文書検索が可能な機能が進展した ICT 環境をフル活用して、当該文書館に存在する理数授業筆記の記録が含まれる授業記録文書を、かなり系統的で網羅的に探索し収集してきている。明治初期に各県に形成された地域的な教育会が発行を開始した教育会雑誌も関東信越で収集し蓄積した。それらを系統的デジタルデータベース作成へと進展させ、理数工教育分野の

授業記録文書に関する 2-3 千件に及ぶ授業記録・主要部分や全文をデジタルカメラ撮影し、そのデジタル映像集・PDF 文書集としてネットワーク上に蓄積・整理した。それらの網羅的・系統的なデータベース・デジタル集録庫(デジタル・リポジトリ)の作成・完成を目指してきている。

2.1 科学・理科筆記で解明した明治 20 年代の実相

明治 20 年代から明治後期まで進展した理数教育の歴史の変遷を読み解いて、従来の知見を超える意外性に満ちた理科・科学教育の実相を解明しつつある。

特に、当時の授業ノート内容と同時に記載された実験装置図の記載等から、当時の授業で使用された数種の鍵教科書内容や鍵実験内容等が特定できると共に、当時のアクティブ・ラーニング型授業等の国際的連関と日本での新展開に挑んだ次に列記する様な新実相を解明した。

最初にそうした特徴的新知見を簡潔に列記・整理する。

①新潟県村上の木村家科学筆記文書を木村初男氏(名古屋大学名誉教授)から新潟大学図書館に寄贈された。木村氏の祖父である新潟の村上高等小学校の遠藤俊吉は、1-2 学年で理科控え簿(動物・植物・金石を明治 21-22 年)、2, 3, 4 学年では生理筆記(同 22 年)、物理筆記(同 23 年)、化学筆記(同 24 年)の授業筆記を残した⁽²⁾。

その筆記資料の分析により、明治 21 年以降の理科の時代に於いて本格的な科学教育が行われた新実相が解き明された。高等小学校の低学年理科では博物館が、高学年では生理学・物理学・化学等の高いレベルの科学教育が明治 22 年から 24 年の間に教えられていたことが確認された^(1,2)。

②新潟永井玄真『物理学筆記』(明治 25-26 年) 埼玉県平野政一郎『物理筆記』(明治 22 年)、埼玉県藤城時郎『物理学筆記』(明治 22 年)は『小生物理書』と細部まで一致する事を確認できた⁽¹⁾。

③新潟師範・倉茂吾八『諸教案』(明治 23 年) 筆記文書の発見により、教育実習の教案筆記の全てが『小生物理書』による「問答と実験的検証・開発主義的授業法」である実態を示す内容であることを確認できた⁽¹⁾。

④永井玄真『物理学筆記』は、『小生物理書』が 7 割、『物理全志』・『物理小誌』・『スチュワート物理学』・『小学理科新書』が約 3 割で、当時の『小生物理書』と世界先端の物理学教科書による授業だったと確認した⁽¹⁾。

⑤群馬県立文書館と埼玉県立文書館で所蔵中の『小学校生徒用物理書』は、埼玉文書館 9 冊・歴史と民族の博物館 3 冊。群馬文書館 15 冊(赤羽氏の探索で 6 冊増)であ

った。その過半数の『小生物理書』の裏表紙に教科書所有者名(当時の高等小生・使用者名)が記入されていた⁽¹⁾。赤羽らの群馬での最初の発見⁽³⁾が群馬・埼玉・新潟他にも拡大でき、より広く一般化できることを意味する。

⑥理科開始後14年後(1900)の松岡豊吉(埼玉)の『物理学筆記』を発見した。実は、これは世界先端級のアクティブ・ラーニング型授業の開始期にゲージにより書かれた物理学教科書による授業の筆記であった。しかも、これ等は当時の原子・分子論・階層的自然観・物質進化等の考え方を本格的に導入したという、当時における世界先端級の授業筆記であることを確認した⁽¹⁾。

⑦明治39~40年の十日町高等小3,4年生松沢やうの理科筆記4巻により、明治20年~40年頃まで原子分子論を重視した科学教育の実施が立証され、原子分子・階層的自然観重視の本格的科学教育の確認だった。

⑧約150年前の頃に、英国の物理教科書の著者カッケンボスやスチュワーの影響下で使用された日本の科学実験器具・装置・道具・機械が、神戸・大阪・埼玉の明治20~34年頃に、長野伊那郡高等小学校伊那富分教場生徒宇治橋正則の理数筆記、大阪の高等科2年の井岡忠雄、等の理科筆記他により解明してきている。

以上のように、150年頃に欧米で世界最先端的な科学教育が、パーカー・カッケンボス・スチュワート・ゲージ他の物理教科書に基づいて形成され、それが日本から欧米に派遣された留学生などによる、翻訳教科書を用いた高等小学校生徒への科学教育の授業内容となったことを解明した。理科の開始した明治20年代以降における⁽¹⁻⁴⁾、こうした代表的な教科書の翻訳教科書を用いた授業の生徒筆記や、後藤牧太や、中川謙二郎などの日本人による日本流教科書である『小学校生徒用物理書』等による物理学授業の生徒筆記を、私達は各地で次々と発見した⁽¹⁾。その特徴的な授業内容とその歴史的価値や意義等を解明した。

2.2 モバイル ICT 活用で明治科学教育の現代的再生

近年、無線センサーやスマートカート(図1,2)などの、多様なIoT(Internet of Thing)活用する技術的進展が著しい。IoT機器内蔵のモバイルツール・ICT(Internet and Communication Technology)システムは急速な発展を遂げた。携帯電話や時計他に内蔵された加速度センサーや音声センサーやGPS位置情報で計測されたデータは、タブレットPC・スマートフォン・モバイル機器に無線で送られて、適切な無料アプリケーションを作成・供給できれば、それで瞬時にタブレット上に測定値の時間的変化のグラフ化・可視化が出来る。特に、科学教育で不可欠な実験値の計測に有用な無線センサーによる、計測データの送受信・保存処理・データ処理・グラフ化や可視化する機能・可視化結果を無線で共有・タブレットやスクリーン投影表示機能、他が、急進している。何時でも何処でも教育現場で日常的なICT活用できる教育活用機能が大幅に増した。

2018年度から日本版GPS(衛星利用測位システム)が本格的運用を開始すれば、今後は、物体に付けたGPS装置

の3次元位置情報は、最小の計測誤差6センチの正確さで、無線LANで刻々と取得可能になろうとしている。「準天頂衛星みちびき1号~4号機」までが、本年度中には打ち上げられて、常時4基配置する(3基以上が日本上空にある)日本版GPSシステムが完成するからである(6年後には7基システムへと拡充する)。従来までのカーナビやスマートフォンの利用に馴染んだが、これは米国版GPSシステムなので約10メートルの計測誤差があり(軍事機密の制約下のためか?)、物体の位置や速度や加速度を扱う科学教育用の位置計測には、かなり不十分な状況だった。

しかし、6センチGPS計測誤差となる来年からは、3次元の位置を計測したい物体に軽量GPSを付着して、位置・速度・加速度情報を自在に取得するツールで、望み通りのAL型力学授業へのイノベーション的再編の期待ができよう。

3. 世界最高に挑んだ明治科学教育の現代的再生

3.1 IoTで蘇らせる明治150年の未完成科学教育

私たちは、GPS機能、ドライブレコーダー、高速カメラやスマートセンサー他のICTを活用して、明治期の価値ある力学授業他のアクティブ・ラーニング型授業法による現代的な再構成を推進してきた。特に、力学授業用無線センサーシステムであるWireless Dynamics Sensor System(WDSS, \$346, Vernier社)などを10年前程から使ったAL型力学授業のモジュール開発で多くの成果を得た。

約2年前から力学台車の車輪回転の量から位置、速度や加速度を計測できる力学教育システム作りが米国他で探求され、昨年にはPASCO社からスマートカートとして発売された。図1は、そのSmartCartという4種の無線センサーを内蔵した力学台車である。転がり摩擦を無視できるレベルのボールベアリング付き車輪の回転から、移動距離を計測する無線距離センサーが内蔵されている。さらに進行方向(1次元)の力を測定する無線力センサーも内蔵されている。力学台車の衝突や押し引きする際に及ぼし合う力を測定して、測定データを無線でタブレット端末やPCに送信する。加えて、3次元の加速度と3次元の角速度(トルク)センサーが内蔵されている。こうして、力学運動の8種類の重要な物理量データを瞬時に同時取得できる無線センサー付きスマートカートである。



図1. スマートカート

特に、進行方向への変位(距離・速度・加速度)については、車の回転量で測定するので、とても正確でノイズが全くない見事なデータ取得が可能となった。従来の超音波反射型での距離データ取得法では、反射物体の凸凹・背景の動き・台車上の扇風機の回転などがノイズとなる。綺麗な位置データを得るにはかなりの工夫と苦勞が要る。最新のスマートカートは8種類の物理量を無線送信して瞬時に記録するので、生徒に無線スマートカートを手渡して自在に操作させて、能動的活用が可能になる。有線では回転系のデータは得難いが、無線なら自由自在な活用の可能性を数多く齎す。¹

¹ Pasco社のSPARKvueは、iphone ipad Smart-phone用は無料アプリケーションを使う。パソコン用SPARKvueは有料(¥15000)である。Pasco社のSmartCart(¥42000)力学台車用やその他の全無線センサーで必要

なパソコン用ソフトはCapstone(¥30000 島津理化)だ。Vernier社無線センサー用はLoggerPro(\$160は所属学校全生徒用ライセンス)だ。iphone ipad Smartphone用のLabQuestViewerも含め、充実したソフト環境である。

さらに、そのデータを解析して表示するPCソフトに関して、新たな可能性が開かれている。タブレット・スマートフォンの無料アプリケーションとして、その力学運動解析ソフトが提供されるからだ。従来は高額な運動センサー・ソフトが普及を阻んだが、今後は無料アプリの採用で、実験分析教育環境が一変する。力学教育を革新するとともに有利な状況が生まれたからだ。その活用による科学教育法におけるノベーションを生む最新のAL型力学授業法や、モバイルICT活用の新たな可能性が、近年大きく開かれた。

3.2 ICT・IoT活用したアクティブラーニング型授業

明治19(1886年)に高等小学校で「理科」が開始された⁽⁴⁾。にもかかわらずその後も明治27(1894)年頃まで、特に、明治33(1900)年頃までも、当時の世界的最先端レベルの物理学教育が日本で如何に実施されてきたかを私たちは解明してきた⁽¹⁾。そうした物理学教育の内容、特にアクティブ・ラーニング(AL)型授業の明治期の源流について幾つかの特徴的な内容を紹介しよう。さらに、その中でいち早く日本流に開発され重要な役割を果たした身近な教具教材活用や簡易実験開発の流れや、未完だったが志で世界先端的なレベルに挑戦した当時の教育内容を、ICT活用で現代的に再構成する試みを報告する。

近年、日本の初等・中等・高等教育の全領域で、アクティブ・ラーニング型教育の推進が極度に強調され、それへの関心が異常な高まりを見せていた。しかし、科学教育分野におけるアクティブ・ラーニング型教育は、実は、戦後の理数教育を革新する1950年代からの運動の中で、多くの先達者が先進的に開拓した日本生まれの教育法だった。

それは、理数科学の価値ある基礎的で基本的な概念形成をするには、人類が如何に誤概念を克服して科学概念を形成したかを教訓にし、科学の形成過程と科学教育の形成過程との深い関連を考察する中で教育的な概念形成の過程として再構成する、戦後の教育改革運動の取り組みとして進展した。科学の基礎的で基本的な概念をより深くより確かに形成するには、日常体験などで日毎に強化される素朴概念を能動的な学習により自ら正しい科学概念に転嫁することが不可欠なのである。その実現には、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の検証する「能動的学習過程」(アクティブ・ラーニング、ALと略記)が重要となる。

その代表的な戦後の潮流には、仮説・討論・実験に特徴的な「仮説実験授業方式(板倉方式)」、丁寧なノート記述方式などの特徴を有する「到達目標・学習課題方式の授業(玉田方式)」、はしりもの・かわりだね・ものづくりの特徴を含む「極地方式授業」、帰納・演繹や方向目標・到達目標の考察討論を特徴とする「のぼりおり表作成授業方式」がある。どれも戦後日本において生まれ発展普及した。

本稿では、①戦前と戦後における能動学習的授業法に基づいて、②科学概念形成授業の源流を基礎・基本に据えた基盤上に、③AL型授業に値する教育内容・目標を最前提にして、④最新のモバイルICT手段を最有効に活用したのものとして、明治期末未完だった科学概念形成授業を現代的な再構成して、蘇らせるAL型授業形成に挑戦した。

私たちのe-Learningによる教員免許更新講習・選択(約10年間ほど継続)において、各種ICTセンサーを使って

表1のようなAL型科学概念形成授業として実施してきた。

これらの授業内容は、最新のSmartCartを使えば、より決定的でより明快なAL用鍵実験が可能で、より効果的な授業を新しく再構成・新展開できる。従来型では超音波反射の往復時間で測る距離センサー設置の故に、直線的滑走台上での位置情報の測定という強い制約に縛られた。

車輪なら摩擦が無い平面・斜面・曲面の台さえあれば、その上で直線運動、曲線運動、円運動や面上の任意の運動(ボール投げ上げに相当する台車の斜面押し上げ運動)等で、車の回転量から得る「ノイズなしの見事なグラフ;力-時間(F-t)・位置グラフ(x-t)・速度グラフ(v-t)」が自在に得られ、**直線的滑走台の制約が一切無くなる。**

1	力と運動法則の教え方と学び方の現状と問題点、一作用と反作用、多様な位置・速度・加速度運動の体験—運動分析ソフトの実習—
2	位置・速度の体験から第1法則へ—摩擦の無視できる超軽量台車やホバースッカー—IT活用による「センサー実験・動画映像で運動分析」
3	慣性の法則から第二法則へ—第一法則とガリレイの相対性の検証—
4	ニュートンの運動の第2法則—等加速度運動・自由落下運動・携帯扇風機による逆噴射の運動・物の投げ上げ運動・斜面上の落下運動—
5	摩擦のある世界の運動—空気中と水中の落下の法則—
6	運動量や角運動保存の法則—運動量の変化は力積に等しいや角運動量保存の法則をIT活用で実体験—
7	エネルギー保存の法則—3レーンの落下・走行・上昇実験等の検証等—

表1. 科学概念形成AL型力学のe-Learningシラバス

特に、概念形成の鍵を担う力学台車のあらゆる実験で明瞭なグラフを得られるので、受動的でなく能動的な予測・討論を経た実験的な検証を明快に視覚化できる授業が、より効果的なAL型力学授業として実現できる。従来の高価な2メートル級の滑走台(10万円台)に代え、身近にある滑らかでよく曲がる斜面と曲面が手軽に使用できる優位性は測り知れない。その有望・多彩な曲面上でのスマートカートシステムを活用したニュートンの運動法則に関する新たなAL型科学概念形成授業法を、私達は、以下のように工夫・考案・試行し、適切な実現を目指す。

最初に、ガリレイが斜面実験を考案し、落下の法則発見に至るプロセスを提示した「ガリレイの新科学対話(下)42~44頁」の「斜面の実験」の記述を参考の為に引用する。

「長さ約12キュービット=5.4m(指先から肘までの長さをキュービット=18インチ=18*2.5cm=45cm)、幅1/2キュービット、厚さ3指幅の定規又は角材をもって来ます。その縁に幅1指幅余りの溝を切ります。この溝はきわめて真直に作られ、平滑に、かつ磨かれ、なおその内側に、出来るだけ平滑な、つるつるした羊皮紙が張ってあります。その上を硬く、平滑な、完全に丸い真鍮の球を転がすのです。この板を、その一端が他端より、1乃至2キュービット(45から90cm)引き上げて、傾斜した位置に置き、上に述べた球を溝に沿って転がし、その落下に要する時間を次に述べるような仕方記録するのです。我々はこの実験を繰り返して、再度の観測の差が1脈拍の10分の1を超えない迄に精密なものにしました。(以下、全体の長さの1, 2分の1, 4分の1, 3分の2, 4分の3, …任意の分数をなすものと比較した。100回はたっぷり繰り返したのですが、かような実験に於いては、我々は常に、経過距離が時間の2乗に比例すること、又それが板の、即ち我々が球を転がした溝の傾斜が何拘わらず真なることを見出したのであります。)・・・中略・・・時間を測る為には、水を入れた大きな器を高い所に置いて用いました。この器の底には直径の小さい管がロウ付けされて居

り、それぞれを通じて細い水流を流失せしめ・・・その水流の水を小さいコップに集めました。かように集められた水は、降下の都度、極めて精密な天秤で秤量されたのであります。その重さの比から、時間の差及び、比が得られたわけですが、それは極めて精密なもので、幾回繰り返してもその結果には目立った偏差は生じなかったのです

以上のように、ガリレイは落下の法則を確証し広く公認させるための熟慮された精密実験を考案した。長さ 5.4m の斜面上を真鍮球がゆっくり転がり落ちる位置の時間的変化を正確に観測・記録する実験法を実現した。「10分の1程の緩い傾斜実験」の工夫では、斜面に溝を掘り摩擦が無視できるほど滑らかに磨き上げて、つるつるした羊皮紙を張った。その溝の上で完全に丸い真鍮の球を転がして、落ちる位置の時間的変化を測定誤差が10分の1秒以下にできる水時計装置で計測した。その斜面落下の実験は、100回繰り返しても同一結果を得る精度だった。

その結果、真鍮球の斜面落下距離は落下時間の2乗に比例するという「ガリレイの落下の法則」を発見した。そして、落下の法則は、斜面の角度や落下物体の質量によらない地上における普遍的な法則であることを解明した。

明治時代の Gage の教科書では、4m の斜面で勾配 4cm/400cm (ガリレイの斜面の10分の1) の緩斜面の観測実験によるアクティブ・ラーニング授業の工夫がされた。しかし、当時の日本の高等小学校で実施した物理学筆記にはこの実験をした記録が今までのところ未発見である。

このような精密実験の実施が困難だったからだろう。落下運動をゆっくり演示するアトウツの装置の活用も、日本の高等小学校ではそれほど一般的でなかったようだ。こうして、落下の法則を容易に実現するアクティブ・ラーニング授業法は明治以来今日まで未完のままなのだ。

その状況を大転換すべき、急進展する ICT・IoT 活用型新 AL 力学授業の時代が、今では次のように幕開けした。その一つが SmartCart を使った明快な決定的な斜面実験法であろう。来年度には、6センチの位置測定誤差の GPS 活用による AL 力学授業の実現が期待できるだろう。



図2. 無線スマート・センサー

3.3 スマートカート用滑走台を手作りしてみよう！

準備する素材は、4m/2m 級滑走台用の材料と粘着テープである。コメリや武蔵などの資材館で、大建廻縁 3.9m を 3 個又は大建廻縁 1.94m を 3 個買って準備しておけばよい。(商品名；05MT702331ML・@¥898, 又は 5MT702331MA・@¥488) 何れにも 5mm 幅の溝があるので、これを右図のように 3 枚を並べ粘着テープで張り合わせる作業 (30分) だけで、よく曲がるスマートカート用滑走台が完成できる。2本の5mm幅の溝が6.3mmの間になり(スマートカートの車輪幅にピタリと一致する6.3mmレール幅)、自在に曲げられるスマートカート活用に最適な資材である。その滑走台が30分ですぐ完成する事は特に注目しよう。

4. おわりに

最後に、スマートカートを使えば、次のような問題例に

よる AL 型力学授業法ではいかなる改善と新プランが効果



図3. よく曲がるスマートカート用 4m 級手作り滑走台

SmartCartの重力による円曲面レーン上振動の位置x-tグラフ・速度v-tグラフ

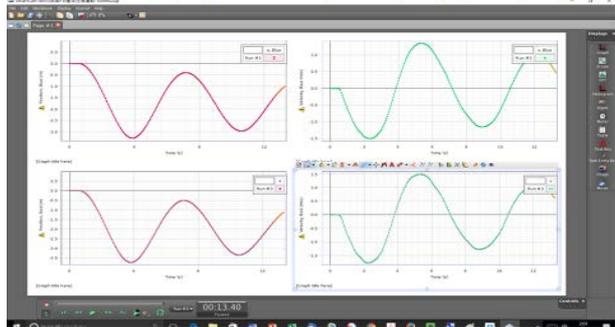


図4. スマートカートの円曲面レーン上の単振動グラフ的かを探索させた。その提示した課題は、以下の AL 力学で、ニュートンの第一法則、第二法則、第三法則、摩擦大な日常世界での落下法則他、の従来型を示し、これを ICT・IoT 活用型の新 AL 力学授業ではどう変更し改善すべきかを問うた。その解答は図 3-4 をヒントに考案可能か？問題1 力学台車 (摩擦が無視できる水平な滑走台上) を勢いよく正の方向に手で押し出しました。手を離れた後における、台車の速度の時間的な変化のグラフ (v-t グラフ) はどのようになりますか？また、手を離れた後には、どのような力が働いていますか。

問題2 台車が斜面を下っているとき、斜面方向にはどの力が働いていますか？台車の摩擦力や空気抵抗は無視できるものとして、あてはまる答えを選択してください。

問題3 台車に載ったミニ扇風機を回して、推進力の方向にそっと離れたら、台車は動き出しました。あてはまる答えを選択してください。但し、台車には摩擦力が働いていないものとします。1 台車の速さの時間的な変化のグラフ (v-t グラフ) は次のどのグラフになるか？あてはまる記号に○をつけよ。2 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？以下略。そのスマートカート AL 型力学版 (例：3-4) を報告する。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 15H02912, 15K12373, 15H02913, および、17K01022 によるものである。

参考文献

- (1) 木村初男, 『日本物理学会誌』 63 巻, (2008) 877 頁。
- (2) 小林昭三・興治文子, 『科学史研究』 第 52 巻, (2013 年) 200-210 頁, 及び, 同書, 240-248 頁。
- (3) 高橋浩, 赤羽明, 所澤潤, 玉置豊美, 森下貴司, 滝沢俊治, 『科学史研究』 第 43 巻 (No. 230) (2004 年), pp. 74-82.
- (4) 板倉聖宣, 『増補日本理科教育史(付・年表)』 仮説社 (2009 年), p.152, p.162 or p.176.