

統合の学識によるサイエンス・ミニマム教育

内 田 勝 雄

Education of Minimum Science Requirements by the Scholarship of Integration

Katsuo UCHIDA

Abstract : Boyer¹ described a model of four interrelated types of faculty scholarship; discovery, integration, application and teaching. The duties of university faculty in research and publication, managements in university and services to society and education can be assessed in the framework of the scholarship of discovery, application and teaching. One of the appearances of the scholarship of integration is education of minimum science requirements for non-science majors, which establishes minimal criteria for the study of basic sciences and fosters the integration of knowledge across disciplines. Balancing all forms of scholarship are necessary for faculty development and university distinction. In this report some examples of minimum science requirements for understanding physiologic phenomena are shown: pressure-volume curves of heart and lung, electrical circuit and lung, oxygen disassociation curve and velocity curve of enzyme reactions. The scholarship of integration can give insights to students for realizing the universality based on various scientific fields and the analogy between apparently independent phenomena.

1 Boyer EL. Scholarship Reconsidered: Priorities of the Professoriate. 1990.

Key Words: scholarship of integration, minimum science requirements, analogy, faculty development

はじめに

統合の学識 (Scholarship of Integration) は、発見の学識 (Scholarship of Discovery), 応用の学識 (Scholarship of Application), 教育の学識 (Scholarship of Teaching) と共に大学教員が持たなければならない学識として Boyer¹⁾ が提唱したものである。大学教員は知的活動として研究だけでなく、スカラシップ(学識)も高める必要があり、本当に教育をしようと思えば学識に基づかなければなら

いという Boyer の指摘は、ファカルティ・ディベロップメント (FD) にとっても非常に重要である²⁾。

小学校, 中学校, 高等学校, 盲学校, 聾学校および特別支援学校など初等中等教育の教員は, 教職課程を履修することが教育職員免許法で定められ「教育の学識」が一定基準として求められている。また, 初等中等教育の教員には教育課程の基準として学習指導要領が定められている。これに対し, 大学教員には教職課程の履修が必須ではなく, 学習指導要領もない。大学では同じ科目でも教員が替われば講義内容も変わるというのが普通である。そのような自由が許されるのは, 大学教員は研究を通して「発見の学識」および「応用の学識」を高め, それを教育に反映させるという前提があるからである。実際, 大学教員の公募で各

山形県立保健医療大学 保健医療学部 理学療法学科
〒 990-2212 山形県山形市上柳 260
Department of Physical Therapy, Faculty of Health Sciences,
Yamagata Prefectural University of Health Sciences
260 Kamiyanagi, Yamagata-shi, Yamagata, 990-2212, Japan

大学から示される採用条件は、「教育の学識」が保証される教育職員免許ではなく、「発見の学識」および「応用の学識」が評価される研究業績である。大学教員ならば「発見の学識」と「応用の学識」を持っているという命題に従えば、「発見の学識」と「応用の学識」は大学教員であるための必要条件といえる。しかし、「発見の学識」と「応用の学識」は大学教員であるための必要十分条件ではなく、Boyer¹⁾が言う4つの学識を持つことが求められる。

大学教員の仕事を研究, 教育, 大学運営および社会貢献に分類すると「発見の学識」は研究に、「教育の学識」は教育に、「応用の学識」は大学運営および社会貢献に関係する。このように4つの学識の中で「教育の学識」「発見の学識」および「応用の学識」はわかりやすいが、「統合の学識」は抽象的である。2009年2月16日に東北大学で開かれた「学士課程教育シンポジウム」の講演で絹川正吉氏から「専門は基礎のためにある」という言葉を聞いたとき、専門基礎科目(生体機能学, 栄養代謝学など)を担当し、専門に行ってから困らないように基礎を教育するという思いがあった筆者には意外であった。それ以来、絹川氏のことが頭を離れなかったが、2009年12月15日に山形県立保健医療大学で開かれたFD研修会で講師の矢谷令子氏の資料で文献^{1,2)}を知り、「統合の学識」こそが「専門は基礎のためにある」という意味であると納得した。つまり、専門を深め、それを統合させることで本当の基礎が得られるということである。

サイエンス・ミニマムという言葉は、英語では minimum science requirements³⁾などと表現されるもので、自然科学の専門学科以外の学生が最低限知っておかなければならない「理科の常識」と考えてよいと思う。あるいは「理科のセンス」と言ったほうがよいかもしれない。一橋大学理科教育研究会編の「サイエンスミニマム10講」という図書⁴⁾がある。その中では、自然科学と数学, 力と運動, 電気と磁気, 光の科学, エネルギーとエントロピー, 物質の階層構造と構成要素, 化学結合, 地球の科学, 生物の共通性, 生物の多様性の10章が解説されている。同書の序文に「文科系学生にも適切な理科教育が必要である。それは科学・技術の知識なしには政治, 経済, 社会を見通すことができない

いという実利的な理由ばかりでない。自然科学が人間の知性の最高の表現の一つであり、その論理や方法論が社会科学にも生かされるからであり、そしてなによりも自然界の謎に挑戦していく探究心が人間の本性だからである。」と記されている。そのような理念で書かれたこの本は、一橋大学のような社会科学系の大学の学生だけでなく、本学のような医療系の大学の学生にとっても有用である。また、大学教員にとって「統合の学識」を涵養するための良書であり、それを紹介するだけで本稿の役目は十分であるが、物理化学 (physical chemistry) を学んだ後、生理学の世界に入った経験から、生理学に関係するサイエンス・ミニマムで同書には書かれていない幾つかについて述べたいと思う。物理学, 化学, 生物学, 地学などの基本的事項を個別に説明するのではなく、根底にある普遍性や一見関係ないと思われる事項に共通する類似 (アナロジー) を理解してサイエンス・ミニマムとして講義することは「統合の学識」の発信のひとつである。

エラストランスとコンプライアンス

左心機能を評価するとき横軸に左心室容積 (V), 縦軸に左心室内圧 (P) をとったグラフ (図1) が用いられる。図の s (systolic) は左心室が収縮して大動脈に血液を送り出した状態, d (diastolic) は左心室が弛緩して血液が充満した状態を示す。直線の勾配は心収縮力の強さ (エラストランス elastance, E) に相当する⁵⁾。横軸における d と s の差は、1回拍出量 SV (stroke volume) である。一方、肺機能を評価するとき横軸に胸腔内圧 (P), 縦軸に肺気量 (V) をとったグラフ (図2) が用いられる。図の e は呼気が終わった状態 (expired), i は吸気が終わった状態 (inspired) を示す。 e と i を結んだ直線の勾配は胸腔の拡がりやすさ (コンプライアンス compliance, C) に相当する⁶⁾。縦軸における i と e の差は、1回換気量 TV (tidal volume) である。 $E=1/C$ の関係があり、 E は心臓の硬さ (弾性), C は肺の柔らかさ (柔軟性) を示す。生理学の教科書では心臓の章に図1, 呼吸の章に図2が書いてあることが多いが、両者を並べてアナロジーを説明するとわかりやすい⁷⁾。

P は示強因子 (intensive factor), V は示量因子

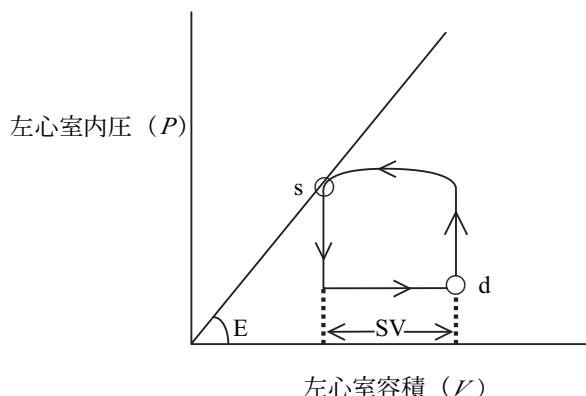


図1 心臓の圧容量曲線

sは左心室の収縮末期, dは左心室の拡張末期で矢印の経路の一周は心周期を示す。SVは1回拍出量。

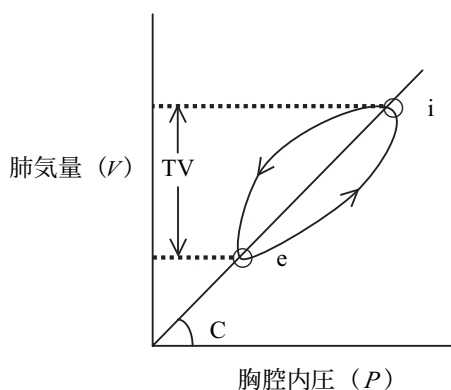


図2 肺の圧容量曲線

eは呼気が終わった状態, iは吸気が終わった状態で矢印の経路の一周は吸気, 呼気の1回の呼吸を示す。TVは1回換気量。

表1 心臓と肺の圧容量曲線のアナロジー

	心臓の圧容量曲線	肺の圧容量曲線
横軸	左心室容積 V	胸腔内圧 P
縦軸	左心室内圧 P	換気量 V
縦軸 / 横軸	エラスタンス (硬さ) $E = P/V$	コンプライアンス (柔らかさ) $C = V/P$
縦軸 × 横軸	仕事量 PV	仕事量 PV

(extensive factor) であり, 両者の積がエネルギーになっている。図1で V が変わらずに (横軸に垂直に) sから P が下がっている経路が等容性弛緩期, dから P が上がっている経路が等容性収縮期である。矢印の経路の一周が心周期で, この経路で囲まれる面積 (PV) が心拍出に関する心臓の仕事量である。図2で eから始まって iに行く矢印の経路が吸気, iから eに戻る矢印の過程が呼気を示し, この経路で囲まれる面積 (PV) が呼吸に関する肺の仕事量である。

表1に心臓と肺の圧容量曲線のアナロジーをまとめた。

電気回路と肺

抵抗 (R) とコンデンサー (C) が直列につながった電気回路の電池 (P) のスイッチを入れると電流が流れ, C に電荷 (q) が充電される。このときの q の時間変化は次式で表わされる。

$$P = R(dq/dt) + q/C \quad (1)$$

(1)は微分方程式であり, これを解くと q が指数関数的に変化し, その時定数が CR であることがわかる。このコンデンサーからの放電と肺から

の呼気の間のアナロジーがある。最大吸気位からできるだけ速く呼出して測定されるフロー・ボリューム曲線のボリューム (V) (換気量) の時間変化(フロー)は, P が胸腔内圧, R が気道抵抗, C が肺のコンプライアンスに相当し, 次式で表わされる。この C は表1および図2の C と同じである。

$$P = R(dV/dt) + V/C \quad (2)$$

この微分方程式を解くと V が指数関数的に変化し, その時定数も CR である。電気回路と肺の間のアナロジーを整理すると表2のようになる。もし, この気道抵抗 R がゼロであるならば (2) の右辺第1項が消え, $P = V/C$ となる。このとき, 図2の eと iを結ぶ矢印の経路は直線状を往復するだけで面積を持たない, つまり仕事量がゼロということになる。

電気現象, 振動現象および音響現象の間には, 電気機械音響類似 (electro-mechano-acoustical analogy) と呼ばれるアナロジーがある⁸⁾。変化を起こさせる力を F , 変化する量を X とするとこれらの現象に共通する一般式は以下のようなになる。

$$F = L(d^2X/dt^2) + R(dX/dt) + X/C \quad (3)$$

加速度 (d^2X/dt^2) に依存する (3) 式第1項を無視したものが, (1) および (2) 式である。Lは電気

表 2 電気回路と肺のアナロジー

	電気回路	肺
変化を起こさせる力	P (電圧)	P (胸腔内圧)
変化する量	q (電荷)	V (ボリューム)
変化速度	dq/dt (電流)	dV/dt (フロー)
変化を遅らせる柔軟性	C (電気容量) = q/E	C (コンプライアンス) = V/P
変化を遅らせる抵抗	R (電気抵抗)	R (気道抵抗)
変化の時間定数	CR	CR

回路ではコイルであり、換気では慣性抵抗に相当する。 R は表 2 のように電気回路および肺でそれぞれ電気抵抗および気道抵抗であるが、振動現象では摩擦に相当する。蛍光スペクトルなどの線幅の中に励起状態からの無輻射過程の存在に起因する部分がある⁹⁾ が、この無輻射過程も光吸収で得た電子エネルギーが振動エネルギー (熱) へ変換される過程と考えれば摩擦である。摩擦によりスペクトルが線幅を持つことは、図 2 の e と i を結ぶ直線がふくらみを持つこととアナロジーがある。

酸素解離曲線と酵素反応速度曲線

ミオグロビン (Mb) と酸素 (O_2) の結合と解離反応 $Mb + O_2 \rightleftharpoons MbO_2$ の平衡定数を K とすると

$$K = [MbO_2]/[Mb][O_2] \quad (4)$$

と表される。Mb の酸素飽和度 (SO_2) は、

$$SO_2 = [MbO_2]/([Mb] + [MbO_2]) \quad (5)$$

なので、(4) および (5) から

$$SO_2 = K[O_2]/(1 + K[O_2]) \quad (6)$$

となり、図 3 のような直角双曲線の酸素解離曲線が得られる。酸素分圧 ($[O_2]$) が充分大きい ($[O_2] \rightarrow \infty$) とき、 $SO_2 \rightarrow 1$ になる。 $SO_2 = 1/2$ のときの $[O_2]$ が P_{50} である。

酵素反応速度を解析するミカエリス・メンテンの式¹⁰⁾ では、酵素 (E) と基質 (S) の反応を $ES \rightleftharpoons E + S$ と書いて解析するのでこの反応の平衡定数 (ミカエリス定数) K_m は、(4) の K と逆数の対応がある。ミカエリス・メンテンの式では、酵素反応速度 v は、最大反応速度 v_{max} 、基質濃度 $[S]$ および K_m を用いて以下のように書ける (図 4)。

$$v = v_{max} [S]/(K_m + [S]) \quad (7)$$

酸素解離曲線と酵素反応速度曲線のアナロジーを整理すると表 3 のようになる。

ヘモグロビン (Hb) は Mb と異なり四量体で協同作用が存在するので Hb の酸素解離曲線は図 4 のような直角双曲線ではなく S 字曲線になる。Hb の酸素解離曲線における P_{50} の上昇 (酸素解離曲線の右方シフト) は Bohr 効果¹¹⁾ としてよく知られている。酵素反応速度曲線における K_m の上昇 (反応速度曲線の右方シフト) は酵素反応の拮抗阻害¹⁰⁾ を示す。

おわりに

文献¹⁾ の訳者解説に「教育と研究のどちらに関心があるか」という大学教員に対するアンケート結果が出ている。その中で日本では「研究に関心あり」が 73 % と研究重視であり、アメリカの 51 % を大きくしのいでいたことが紹介されている。このアンケートの対象が研究大学の教員だけでないことを考えると日本の大学の教員がいかに関心に関心が薄いかがわかる。有本¹⁾ は、この傾向が明治以来、日本の大学がドイツ型の研究志向大学を模範としてきた結果と述べている。このことは日本の大学がどのように形成されてきたかを詳説した天野の近著¹²⁾ でも指摘されている。絹川²⁾ は、研究者が生涯を通じて常に独創的で優れた論文を生産し続けることは現実的に不可能であると述べ、「自己の専門領域の最先端に常に接触を保つ (Stay in Touch) ことが大切」という Boyer¹⁾ の言葉を紹介している。研究大学で多くの大学院生を指導するような場合を除き、年齢を重ねた教員が最先端の研究を若いときのように進めるのは一般に困難である。それは体力、知力の問題ということもあるが、年齢とともに大学運営や社会貢献の仕事求められるからであろう。絹川²⁾ は、大学教員として研究能力を示す「発見の学識」だけで

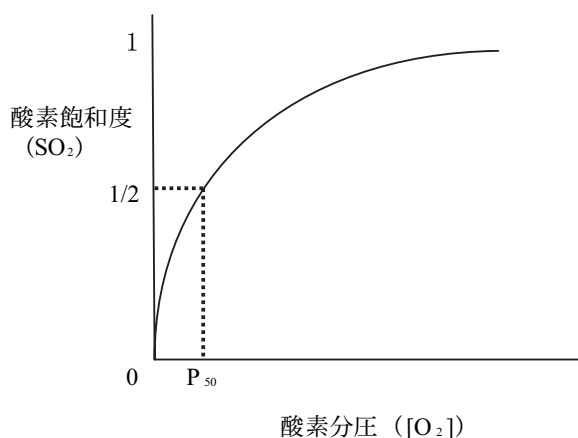


図3 ミオグロビンの酸素解離曲線

$S = 1/2$ のときの $[O_2]$ が P_{50} で、 $P_{50} = 1/K$

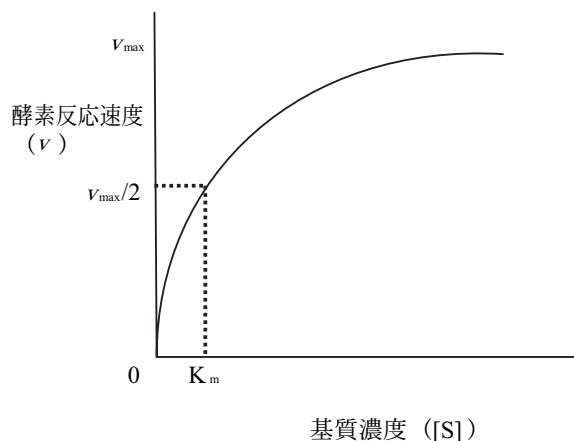


図4 酵素反応速度曲線

$v = v_{max}/2$ のときの $[S]$ がミカエリス定数 K_m

表3 酸素解離曲線と酵素反応速度曲線のアナロジー

	酸素解離曲線	酵素反応速度曲線
横軸	酸素分圧	基質濃度
縦軸	酸素飽和度	酵素反応速度
縦軸の最大値	1	v_{max}
縦軸が最大値の1/2になる ときの横軸の量	$P_{50} = 1/K$	ミカエリス定数 (K_m)
曲線の右方シフト	P_{50} の上昇 (Mb と O_2 の親和性の低下 = Mb から O_2 が離れやすくなる)	K_m の増大 (酵素と基質の親和性の低下 = 酵素反応の拮抗阻害)

は不十分で、大学教員のエクセレンス（優秀性）は「教育の学識」、専門領域の最先端についての造詣および「統合の学識」の3点を尺度として評価されるべきだと述べている。また、論文だけが創造で、教科書のような「作品」を志すことは学者本来の仕事からの逸脱と考える傾向があるがそれは誤りだと断じ、「作品」は「統合の学識」の具現として評価されるべきと強調している²⁾。山崎¹³⁾は、社会一般の断片的・即効的な情報の氾濫が最高学府の中でも起こっており、学生は活字離れが進み、教員はディシプリン（学問分野）の細分化で専門領域の間口を狭くして奥行きを深くせざるを得なくなっていると述べている。教科書も複数の著者が自分の専門分野について書くことが多い。Lehningerの生化学の教科書¹⁰⁾のようにひとりで全体を書けることは正に「統合の学識」の為せることである。このLehningerの教科書(初版)は1011ページに渡り生化学の各分野が詳しく書かれているが、読んでみて実に面白い。

学生は様々な科目を学び個々の事項を覚えるの

に精一杯である。そんな学生たちに例えば、サイエンス・ミニマムに基づく「統合の学識」により、一見関係ない事項の間の結びつきに気付かせることで学問の面白さを伝えることができる。納得して目から鱗が落ちたというような学生の表情を見ることは、論文を書くことと同様に大学教員の喜びである。FDは一般に大学教員の質を上げるためと解釈されるが、「教育の学識」や「統合の学識」を一段低くみるような風潮を打破することもFDの成果であるような気がする。

謝 辞

英文要旨に関して貴重なご意見をいただきましたコロラド大学のDavid M. Weil氏に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 有本章 訳. 大学教授職の使命 スカラー

- シップ再考. 東京: 玉川大学出版部; 1996.
 原書: Boyer EL. *Scholarship Reconsidered: Priorities of the Professoriate*. The Carnegie Foundation for the Advancement of Teaching, 1990.
- 2) 絹川正吉. 大学教育のエクセレンスとガバナンス ~ 絹川学長の教学経営ハンドブック ~. 東京: 地域科学研究会; 2006.
- 3) [homepage on the Internet]. Ann Arbor Huron High School. Available from: http://www.aaps.k12.mi.us/huron.science/minimum_science_requirements.
- 4) 一橋大学理科教育研究会編. サイエンスミニマム 10 講. 東京: 培風館; 1996.
- 5) 菅 弘之, 高木 都, 後藤葉一, 砂川賢二編著. 心臓力学とエナジェティクス. 東京: コロナ社; 2000.
- 6) 肺機能セミナー編. 臨床肺機能検査. 東京: 肺機能セミナー; 1984.
- 7) 片野由美, 内田勝雄. 図解ワンポイント生理学. 東京: 医学芸術社; 2004.
- 8) 長倉三郎, 井口洋夫, 江沢 洋, 岩村 秀, 佐藤文隆, 久保亮五編. 岩波理化学辞典 (第 5 版). 東京: 岩波書店; 1998. p. 913-914.
- 9) Uchida K. *Spectroscopic Studies on Electronic Relaxation Processes in Pyrimidine and Its Derivatives in the Vapor Phase*. Hokkaido University (Ph. D. Dissertation); 1979.
- 10) Lehninger AL. *Principles of Biochemistry*. New York: Worth Publishers; 1982.
- 11) Comroe JH. *Physiology of Respiration*. Chicago: Year Book Medical Publishers; 1974.
- 12) 天野郁夫. 大学の誕生 (上), (下). 東京: 中央公論新社; 2009.
- 13) 山崎正和. 日本の教育のいくつかの問題. 學士會会報 第 880 号. 東京: 学士会; 2010. p. 66-77.

— 2010. 1. 14 受稿, 2010. 2. 25 受理 —

要 旨

ボイヤー¹⁾は, 大学教員が持たなければならないスカラーシップ (学識) として 発見の学識, 統合の学識, 応用の学識および教育の学識を挙げている。大学教員の仕事を研究, 教育, 大学運営および社会貢献に分類すると「発見の学識」は研究に, 「教育の学識」は教育に, 「応用の学識」は大学運営および社会貢献に関係する。サイエンス・ミニマムは, 自然科学以外の専攻の学生にも知っておいてもらいたい科学の基本知識であり, 異なる学問分野に渡る知識を統合させるサイエンス・ミニマムの教育は「統合の学識」の発現のひとつである。この 4 つの学識を共に向上させることがファカルティ・ディベロップメントおよび大学の評価向上のために必要である。本論文では, 心臓と肺の圧容曲線, 電気回路と肺および酸素解離曲線と酵素反応速度曲線を例に生理学に関係するサイエンス・ミニマムを示した。「統合の学識」は, 異なる現象の背景にある普遍的原理や無関係と思える現象の間の類似(アナロジー)を学生に気付かせることができる。

1) Boyer EL. *Scholarship Reconsidered: Priorities of the Professoriate*. 1990.

キーワード: 統合の学識, サイエンス・ミニマム, アナロジー,
 ファカルティ・ディベロップメント