準備委員会企画 招待講演

いったい何が違いをもたらすのか ——学業に及ぼす知能の影響——

講 師 エルスベス・スターン（チューリッヒ学習教育研究所教授）
企画・司会 今井むつみ（慶應義塾大学）

What Exactly Makes the Difference? The Impact of Intelligence on Academic Learning

ELSBETH STERN AND MUTSUMI IMAI

(RESEARCH ON LEARNING AND INSTRUCTION, MINT LEARNING CENTER OF ETH ZÜRICH AND KEIO UNIVERSITY)

学習とは何か

知能と学業成績には大きな個人差がある。その個人差はどこから生まれるのか。その個人差に対して教育はどうあるべきなのか。

ここは以下の三つに焦点を当てる。

- (1) 個人の認知能力は同じ学習機会のもとでは学習成果の強力な予測変数である
- (2) 動機づけと自己規律は知能ほど重要ではない
- (3) 知識構築は知能と学習機会との間の相互作用の結果である

認知能力と学習成果との関連について

まず個人の認知能力と学習成果との関連について述べる。

知能研究はもともとは教育的意思決定のための情報を提供するために開発されたものであり、教育と共通の根底を共有していた。しかし残念ながら歴史的に、知能研究と教育とが別れ別れになってしまった。ビネー (A. Binet) 以来、バート (C. L. Burt)、キャテル (R. B. Cattell)、ホーン (J. L. Horn)、キャロル (J. B. Carroll)、クロンバック (L. J. Cronbach) らは教育心理学者として知能検査を教育と関連させて用いてきた。しかし教育現場では分離教育よりも統合教育を進めようとし、意思決定も知能検査よりは学力に基づいてなされるようになった。教育心理学者は集団のばらつきよりも平均値を高めることに関心を示し、学習に及ぼす情意的・動機づけの側面 (Dweck, 2007; Goleman, 1996) や多重知能 (Gardner, 1993, 2011) を強調しすぎる傾向にある。現場の教員もこの方を好むものである。一方、知能研究者は平均値よりばらつきの説明 (知能の因子構造や神経心理学

的機構、遺伝の寄与や遺伝・環境交互作用など) に関心を示した (Herrnstein & Murray, 1994; Ridrey, 2003)。

そのような状況で、教育心理学への個人差の視点を持ち続けることに貢献したのがスノウ (R. Snow) である。彼は個人差の心理学が教育の基本であると考え、「知能は教育の最も重要な“素材” (material) であるばかりでなく、最も重要な“成果物” (outcome) でもある」と述べている。知能テストで測られる認知能力 (非言語テストも含む) を高めるには、遺伝的素質を発現させるための教育が必要不可欠である。IQ は小学校課程で安定するが、学校教育の量的・質的側面は IQ の得点がある程度引き上げることができる。実際、IQ の個人差は数学の学業成績の個人差のほぼ 60% を説明する (Deary et al., 2007)。

動機づけと自己規律

自己規律 (self-discipline) や動機づけが IQ 以上に学業成績に影響を与えるという報告もある (Duckworth & Seligman, 2005; Murayama et al., 2013) が、そのような研究は中流階級のサンプルに片寄り、知能の範囲が限られているため相関が低い。しかも分数やパーセンテージの計算のようなさほど挑戦的とはいえない数学の内容領域に限定されている。こうしたトピックについては、学校外も学校の授業の欠点を補うことができる学習機会がたくさんある。動機づけと自己規律は、知能を学業達成に投資するために重要であるが、知能の欠点を補うものではない。

学習とは知識構築である

スノウが「知能は素材である」といっているように、知能は知識構築のために投資され、築き上げられた知識表象は問題解決に適用されて、はじめてその潜在力

Figure 1 人間の心はどのように働いているか

を開花し真価を発揮する。知識構築とは知識の濃縮化であり、刺激への暴露の繰り返し、あるいは活動の繰り返しの結果として自動化される。手続き的知識 (knowing how) はチャンク化されることでワーキングメモリ容量が少なくて済むかわりに、変容させたり新しい状況に転移させるのが困難になるというコストを生む。いっぽう概念や事実を扱う宣言的知識 (knowing why) は、シンボル体系と結びつけることによって明晰化されて、省察やコミュニケーションに向けて準備される。拡大 (enrichment) や再構築 (restructuring) といった概念学習を通じて、知識は洗練化、再構造化、抽象化、転移されるという利点がある反面、知識構築には時間がかかり、学習経路が予測不能でワーキングメモリをとられる (Figure 1)。

ここでSTEM学習で行われている挑戦は、まさに革新的な概念再構築を行うことである。

たとえば6,7歳の子どもの「米粒の山には重さがある？」とたずねると「ある」と答える。しかしその同じ子どもに「米粒ひとつに重さはある？」とたずねると「ない」と答えるのはどうしてか。これを一般知能の低さとかピアジェ的な形式的操作思考の欠如と考えるのは時代遅れである。ここで「もしアリさんの背中に米粒ひとつ乗せたらどうなるかな。今度は重さはある？」とたずねると「そりゃ、あるよ」と答える。子

どもにとって「重さ」とは「重いと感ずること」である。また多くの大人にとって重さとは「はかりに乗せたときにわかるもの」、そして物理学者には「生じる対象物にかかる重力による力」である。これが概念の再構築なのである。子どもが「きょう学校で、人間は前はサルだって教わったんだ。ボク、いつサルだったの？」というのも同じである。「人間」という概念を種として理解することができていなかったのだ。

数学における例を挙げよう。数の概念理解は、ただ数えることができるということだけではない。たとえば分数では数が大きければ多いとは限らない (たとえば $6/7 > 6/8$)。つまり数の概念を拡張する必要があるのである。

「ここに5羽の鳥と3匹の虫がいます。鳥たちは競い合って虫をとろうとしています。何羽の鳥が虫を捕まえないでしょう？」とたずねれば96%の子どもが正解できるが「鳥は虫よりどれだけたくさんいますか？」とたずねると25%しか正解できない。おなじく「ピーターはおはじきを8つ持っています。ジョンはおはじきを5つ持っています。ジョンのおはじきがピーターと同じ数になるためには、いくつのおはじきがいりますか？」(等化) とたずねれば95%が正解するが「ピーターはジョンよりおはじきをいくつ多く持っていますか？」(比較) とたずねると20%しか正解できない

Figure 2 “5” の表象

のである。ここには数を「個々の集合の集まりを数えるための道具」として理解するか「集合間の関係を記述するための道具」として理解するかの違いがある (Stern, 1993, 2008; Stern & Lehrndorfer, 1992) (Figure 2)。

マックスプランク心理学研究所が、IQ を統制したとき早期 (2 年生) の数学的推論力がその後 11 年生のときの代数理解に及ぼす影響を調べた研究 (Schneider & Bullock, 2008; Weinert & Schneider, 1999) によると、11 年生時点での IQ と代数理解との相関は .41 あるものの、2 年生時の数学的推論力との相関は .58 あり、それと 11 年生時点での IQ との交絡部分を考慮すると、2 年生時の数学的推論力の予測力の方がずっと大きいことが示された (Figure 3)。

このことから、知能は領域固有知識の習得に使われなければその潜在能力を開花させることはできないことがわかる。どんなに高い知能の子でも、概念的变化の過程や知識構築を行わねばならないのである。とすれば、平均的な学業達成を改善し、さらに加えて知能の全範囲を投資させることのできる学習環境をどうデザインするかが重要になってくる。概念変化は、適切な科学教育を早期から始めることによってなされる時間のかかるプロセスであるから、認知的活性化によって概念変化を高めることが必要だということを認識しなければならない。

次の節では物理学の知識構築に関する認知的活性化と認知能力との相互作用に関する最近の研究を紹介しよう。なぜ物理学かといえば、一番知的な学習者の間ですら、他のどの領域よりも誤解しやすい領域であり、

Figure 3 11 年生時の IQ と 2 年生時の数学的推論力が 11 歳の代数理解に及ぼす影響

しかも興味と成績に大きな性差 (女性の方が苦手) のある科目だからである。

将来の物理学の学習の準備となる 初等学校カリキュラムの知識

われわれが行っているスイス Mint 研究 (SMS) では、KiNT-boxes というドイツ・ミュンスター大学の Kornelia Möller らのグループによって開発・評価された教材をもとに、「ものの浮き沈み」「空気と空気圧」「音と音の拡散」「橋を架ける」といった領域に関して作られたカリキュラムによって、生徒の先行知識を活性化させ概念的理解の変容を促す授業を実施した。この研究では 300 以上の小学校学級と 6,000 人以上の生徒 (1 年生から 6 年生) を複数のグループに分けて順次参加させる形で調査している。教師は各カリキュラムごとに丸一日のトレーニングをしたあと授業を行う。なお参加が延期された教師のクラスを統制群として扱った。

Figure 4 学校での学習が物理概念の理解に及ぼす促進効果の個人差

その結果、どのカリキュラムにおいても、介入の後で効果量 (d) において 1.06 から 1.20 もの効果が見出された。これは統制群における 0.21 から 0.27 の効果量をはるかにしのぐものである。しかもそれは領域固有の学習を超えたトレーニングの転移効果を示した。すなわち領域固有のトレーニングがより広範囲の科学的推論に転移し、領域普遍的科学的推論スキルを促進した。さら SMS に繰り返し参加した生徒は、関連領域における追跡カリキュラムを教わった 3 年後でも、先行知識を活性化し利用することができていた (Edelsbrunner et al., 2018)。

つまり小学生において、学校の外では自力で学ばなかったであろう物理概念を教示されることによって、物理概念の理解への促進効果があったのである。初等の物理教育は科学的推論の能力も高めることができる。初期に獲得された概念は将来の学習に役立つ。そしてその効果は特に成績のよい女児に強く表れることも明らかにされたのである (Figure 4 (a), (b))。

認知的活性化によって概念的変化をより高める

工学における伝統的な教示の仕方は、概念に替わっ

て公式や量的問題に焦点を当てるものだった (Hofer, et al., 2018)。

たとえば「ロケット『アリアン』は通信衛星を静止軌道に乗せるために発射されようとしている。離陸時、エンジンの出力は 12×10^6 N (ニュートン) であった。ロケットの重量は 8×10^6 N である。離陸時のロケットの加速度を求めよ。」という典型的な問題を考えてみよう。たとえば「重量」と「かさ」という概念は、日常的にはかさが大きいほど重量も重いから密接な関連がありそうだが、物理学においては概念間の差異は日常的な文脈とは、必ずしも関連性がない。「慣性」(何も力を加えていないが動いている) のような概念も日常経験と矛盾する。運動は力によって生ずるからである。「力」概念なども日常的な文脈とは異なる意味をもつ。「力の作用-反作用」や「力の均衡」といった異なる概念は、その間の関連性が理解されないといっしょにされてしまう。このことから概念変化は教示を通じて行われなければならない。

科学教育で知的な知識構築を促すためには、以下のようなことが必要である。

(1) 学習者の先行知識と誤概念を特定する

- たとえば重い人と軽い人がそれぞれスケートボードに乗りながら互いにロープで引っ張り合いをするとき、どうなるかをたずねる (Figure 5)。
- (2) 認知的に活性化された現象を導入に用いる (Figure 6)。

Figure 5 学習者の先行知識と誤概念を特定する事例

左図を見なさい。
もし 1kg のおもりを測りにつながったロープにかけところ、10N だった。
次に右図を見なさい。
はかりの反対側にもうひとつ 1kg のおもりをかけたらどうなるだろう？
同じだけのニュートンがかかるだろうか、それともちがうだろうか。

Figure 6 認知的に活性化された現象を導入に用いる事例

たわんだ紐なら細くてもそれに吊り下げられた傘をかけていられるのに、ピンと張るとかけていられずに、すぐはずれてしまうのはなぜだろう。

Figure 7 対照的な事例を用いて考える事例

- (3) 生徒に学習の準備をさせる：対照的な事例を用いて考える (Figure 7)。

- (4) 統合化：自己説明を促す

たとえば「大きさと重さは等しいと信じている人もいる。これは誤り。この人の考えが誤りであることを確信させてあげるためにはどのような根拠を与えればよいだろうか。」というような問題を考えさせる。

- (5) 比較したり対照したりする (Figure 8)

- (6) 省察する：メタ認知的疑問を発させる (Figure 9)

このように、認知的に活性化された現象をレッスンの初期の導入として用いることにより、学習者は質問に答えるために先行知識を活性化させたり、自分の知識の限界を知る。その結果学習者は過ちから生産的に学ぶのである。特に IQ で 75 パーセント以上能力の高い女兒に、その効果が大きい (Figure 10)。

「作用」「反作用」《active and reactive forces》と「力の平衡」《equilibrium forces》との概念の違いを理解する

Figure 8 比較と対照の事例

「作用・反作用の力が人や車の前に進む力と関係するかちゃんと理解できていますか？それとも完全にはクリアーとはいえないところがありますか？」

“Have you fully understood how the concept of action and reaction forces relates to the forward movement of persons and vehicles? Or are there specific aspects which are not yet perfectly clear to you?”

Figure 9 省察：メタ認知的疑問の事例

高い知的能力の女の子は、焦点が概念理解に向かうなら、追いつく。

Figure 10 高知能の女兒におよぼす科学教育の効果

要 約

- (1) 計量心理学的な知能は学業の最も重要な一般的な予測変数である。
- (2) 知能がその潜在力を開花させるのは、それが概念に基づく知的な知識表象の獲得に使われるときである。
- (3) より知的な学習者は、そうでない学習者よりもその伸びしろが大きい。それは彼らがその知識を将来の学習や転移により上手に使うからである。
- (4) 初等物理教育や認知的活性化の手段は、物理学の性差を減らしてくれる。
- (5) 初等物理教育や認知的活性化の手段は、知的に最も高い学習者グループにおける性差をほとんどなくしてくれる。
- (6) 生徒が異なれば同じ活動からも異なったことがらを学ぶ。

引用文献

Deary, I. J., Strand, S., Smith, P., & Fernandes, C. (2007). Intelligence and educational achievement.

Intelligence, 35, 13-21. doi:10.1016/j.intell.2006.02.001

Duckworth, A. L., & Seligman, M. E. P. (2005). Self-discipline outdoes IQ in predicting academic performance of adolescents. *Psychological Science*, 16, 939-944. doi:10.1111/j.1467-9280.2005.01641.x

Dweck, C. S. (2007). *Mindset: The new psychology of success*. New York: Ballantine Books.

Edelsbrunner, P. A., Schalk, L., Schumacher, R., & Stern, E. (2018). Variable control and conceptual change: A large-scale quantitative study in elementary school. *Learning and Individual Differences*, 66, 38-53. doi:10.1016/j.lindif.2018.02.003

Gardner, H. (1993). *Multiple intelligences: New horizons in theory and practice*. New York: Basic Books.

Gardner, H. (2011). *The unschooled mind: How children think and how schools should teach*. New York: Basic Books (AZ).

Goleman, D. (1996). *Emotional intelligence*. London, UK: Bloomsbury Publishing PLC.

Herrnstein, R. J., & Murray, C. (1994). *The bell curve: Intelligence and class structure in American life*. New

- York: Simon and Schuster.
- Hofer, S., Schumacher, R., Rubin, H., & Stern, E. (2018). Enhancing physics learning with cognitively activating instruction: A quasi-experimental classroom intervention study. *Journal of Educational Psychology*, 110, 1175-1191. doi:10.1037/edu0000266
- Murayama, K., Peknin, R., & von Hole R. (2013). Predicting long-term growth in students' mathematics achievement: The unique contribution of motivation and cognitive strategies. *Child Development*, 84, 1475-1490. doi:10.1111/cdev.12036
- Ridley, M. (2003). *Nature via nurture: Genes, experience and what makes us human*. London, UK: Fourth Estate Ltd.
- Schneider, W., & Bullock, M. (2008). *Human development from early childhood to early adulthood: Findings from a 20 year longitudinal study*. New York: Psychology Press.
- Stern, E. (2008). The development of mathematical competencies: Sources of individual differences and their developmental trajectory. In W. Schneider & M. Bullock (Eds.), *Human development from early childhood to early adulthood: Findings from a 20 year longitudinal study* (pp. 221-237). New York: Psychology Press.
- Stern, E. (1993). What makes certain arithmetic word problems involving the comparison of sets so hard for children? *Journal of Educational Psychology*, 85, 7-23.
- Stern, E., & Lehrndorfer, A. (1992). The role of situational context in solving word problems. *Cognitive Development*, 7, 259-268.
- Weinert, F. E., & Schneider, W. (1999). *Individual development from 3 to 12: Findings from the munich longitudinal study*. New York: Cambridge University Press.