魁！20060705（担当：林向達）

CAHPTER 5
Cognitive Tutors
認知的チューター

Kenneth R. Koedinger and Albert Corbett (2006). Cognitive Tutors.
R. K. Sawyer (Ed.), the Cambridge Handbook of the Learning Sciences (pp.61-77).

■Introduction
イントロダクション

インストラクションにコンピュータを使う初期の試みには，Computer-Aided Instruction （Eberts, 1997）と，Intelligent Computer-Aided InstructionまたはIntelligent Tutoring Systems （Corbett, Koedinger, & Anderson, 1997; Sleeman & Brown, 1982; Wenger, 1997）がある。コンピュータをベースにしたインストラクションは，普通の教室指導以上に学習者の学習において効果的だと見られてきた（e.g., Kulik & Kulik, 1991）。しかしながら，人間チューターのレベルにはなかった（Bloom, 1984）。
電子トラブルシューティングを教える知的チューターシステムの初期の試みとしてソクラテス式の対話を真似たり，既存の南アメリカの地理学習CAIシステムに知的質問機能を加えたり，既存の医学診断のエキスパートシステムにチューター方略を追加してみたり，既存の算数の教育ゲームにチューター方略を加えたりもした（Sleeman & Brown, 1082）。

初期に並行していた開発において，人間の学習や記憶，問題解決の認知理論はコンピュータの演算モデルとして実装されていたのである（Newell & Simon, 1972）。1980年代中頃，Jhon R. Andersonとその同僚たちは，２つの典型的な問題を併合し，さらに認知心理学の知見を，以前に主導的であった人工知能の知見に加えるより学際的なアプローチを知的チュータリングシステムの開発と試験へのとして導入した（Anderson, Boyle, & Reiser, 1985）。このアプローチから生まれた知的チューターは，生徒たちの獲得する知識の認知モデル演算を中心として構築され，「認知的チューター」と呼ばれ始めるようになった（Anderson, et al., 1995）。これらの認知モデルは，代数やプログラミング，科学的推論，作文だろうと何だろうと興味を持った領域における学習者の思考や認知を表している。認知モデルは，学習者が初心者から熟達者へ至る道筋におけるステップとしての初期方略や誤解の種類を表したものも含んでいる。

フルスケールの認知的チューターは，中高の数学（Koedinger, Anderson, Hadley, & Mark, 1997; Koedinger, 2002），コンピュータプログラミング（Anderson et al., 1995; Mathan & Koedinger, 2003），そして，学部レベルの遺伝学（Corbett et al., 2005）を含む多様な領域における生徒の学習を助けるためにつくられてきた。認知的チューターは伝統的な問題ベースの指導に比べて，概して学習を速めるかよりよい学習をもたらす（Anderson et al., 1995），そしてよい人間チューターの効果に等しい（Corbett, 2001）。もっとも広く普及した認知的チューターは，代数を扱ったもので，それは高校代数向けに完備されたコースの一部分であり，2004年から2005年には全米2000校で使用されていた。この章のあとで記述するように，これから紹介する認知的チューター「代数」を使った生徒は，コース最後の自由解答式問題解決テストで２倍，そして伝統的な代数クラス在籍の生徒に比べ客観テストで15%も点数が高かった。こうした学校は，高い実行力，資源の豊かな郊外の学校も少しあるが，多くは都会あるいは田舎の学校で，平均的な教師と経済的に不利で，マイノリティ，学習困難な生徒が比較的多くいるところである。私たちの評価では，ほぼ50万人の生徒が合計2000万時間もチューターを使っている。

○Cognitive Tutors Provide Aspects of Human Tutoring
認知的チューターが提供する人間チューターの側面

認知的チューターは，人間のチューターの本質的側面と同じく，実行によって学習をサポートする。実行による学習は，学生ニーズの文脈またはニーズへの反応において，目的概念と技能が適応でき，指導が得られるような実行状況に生徒を置いてみる，という考え方である。認知的チューターは，人間チューターの特徴的な２つの原理的な仕組みに到達する。

(1)生徒の能力をモニタリングし，個別の生徒が必要としたときに状況に沿う指導を提供する，
(2)生徒の学習をモニタリングし，個別の生徒の理解力を超えない程度の知的ゴールを必要とする問題解決活動を選択しすること。

生徒の能力と学習のモニタリングには認知モデルと「モデル追跡」と「知識追跡」という２つのキー・アルゴリズムを使う。「モデル追跡」では，認知的チューターは，複雑な問題領域における生徒の個別経路を把握するため，生徒と一緒に一歩ずつ認知モデルを前へ進めていき，即時正確なフィードバックと文脈に沿うアドバイスを提供する。「知識追跡」では，チューターは生徒の知識を評価するためシンプルなベイジアン手法を使い，より適切な問題を選択するためにこの生徒モデルを使う。

○Chapter Overview
概要

このあとの節で，私たちは認知的チューターとその基礎であるACT-R理論について述べる。拡張的な認知的チューター研究は，ACT-R（ACT-R theory; adaptive control of thought-rational theory）認知構造モデルの検証や修正ともに力を尽くしてきた（cf. Anderson & Lebriere, 1998），そして私たちはこの理論的枠組みから得られた知的チューター設計に関する６つの一般原理を検討する（Anderson at al., 1995）。

略

この章の最後の節で，この問題について私たちが採用した学習科学の理論と方法について述べる。

○Cognitive Tutor Algebra: A Brief Example
認知的チューター：事例

・図5.1のスクリーンショット

・認知的チューターに加える形で，学習科学理論を適用して消耗教科書のようなインストラクショナルマテリアルを開発することで，完全な認知的チューターコースをつくろうとする傾向にあった。実際，数学認知的チューターを使っている全ての学校が，カリキュラムとテキスト教材も使っている。
・典型的な手続きとしては，週の内２日間をコンピュータ教室で認知的チューターに使い，週３日を通常のクラス教室で私たちのテキスト教材を使っている。

・クラスでの学習は活動で，学習者中心，そして主に実行による学習に焦点化している。

・教師は全体グループへのレクチャーに割く時間は減少し，個人や共同の問題解決や学習の促進に多くを割くようになる。教師は生徒がコンピュータのツールと紙と鉛筆のテクニックとの間のつなげるように助ける役目を演じる。
・クラスでは生徒がよく共同グループで認知的チューターが出したものとよく似た問題を解決したりする。

■Leaning Sciences Theory Behind Cognitive Tutors
認知的チューターを支える学習科学

・認知的チューターは学習と実行のACT-R理論をベースした（Anderson & Lebiere, 1998）。理論は，潜在的な実行知識である「手続き的知識」と明示的な言語的な知識と視覚イメージである「宣言的知識」を区別する。
・ACT-Rに拠れば，実行知識は実行することでしか学べず，聞いたり見るだけではダメである。言い換えれば，それは経験の構築から引き起こされるのであり，私たちの頭に直接届けることは出来ない。

・このような実行知識は，if-then表記のプロダクションルールによって表される。プロダクションルールは，内的ゴールまたは外的な知覚合図と新しい内的ゴールと，または外的行動を結合する。

	プロダクションルール in 日本語	その応用例
1	正しいプロダクション：可能な限り潜在的に得られた もし数Qの値を得るのがゴールで，QをNum1で割ったのがNum2ならば，QはNum1かけるNum2である。	「あなたはいくらかのお金を持っていて，８人の人たちに平等に分けたら，１人40でした」を解くため，元々の金額の総額を出すには8かける40。
2	正しいプロダクション：帰納的にプランニング もし２つの三角形の合同証明がゴールで，三角形が辺を共有しているならば，他の対応する辺または角が合致するかチェックする。	三角形ABCとDBCが合同を証明するため，どれか対応している角（BCAとBCDとか），どれか対応している辺（ABとDBとか）が一致しているかどうかチェックを試みる。
3	正しいプロダクション：非伝統的な方略のため もしXの方程式を解くのがゴールであるならば，方程式の右側と左側でグラフを描き，交点を見つける。	sin X=X^2方程式の解は，sin X とX^2両方のグラフを描いて，線がどこで交わるかを探す。
4	正しいがかなり固有なプロダクション もし”ax+bx”が数式として現れて，c=a+bならば，”cx”で置き換える。	“2x+3x”では機能するが，”x+3x”では機能しない。
5	正しくない，かなり概略的なプロダクション もし”Num1+Num2”が数式として現れたたならば，合計で置き換える。	間違った操作手順を導いてしまう：”x*3+4”を”x*7”と書きかえてしまう

プロダクションルールのifパートは，生徒が習得した知識が，一般性が十分なレベルではないときに，確認するのを助けてくれる。

○The Cognitive Model and Model Tracing in Cognitive Tutors
認知モデルと認知的チューターにおけるモデル追跡

○Knowledge Tracing in Cognitive Tutors
認知的チューターにおける知識追跡

○Why Production Rule Cognitive Models Are Powerful
なぜ生産ルール認知モデルは強力なのか

○Model and Knowledge Tracing Implement Features of Human Tutoring
モデル追跡と知識追跡 人間チューターの特徴

■Principles and Methods for Cognitive Tutors Design
認知的チューター設計の原理と方法

1. Represent student competence as a production set
2. Provide instruction in a problem-solving context
3. Communicate the goal structure underlying the problem solving
4. Promote a correct and general understanding of the problem-solving knowledge
5. Minimize working memory load that is extraneous to learning
6. Provide immediate feedback on errors relative to the model of desired performance

○Cognitive Tutors Design Principles
認知的チューター設計の原理

1. プロダクションセットとして生徒能力を表現する

・インストラクショナルデザイナーは領域内容の分析に基づくのではなく，領域について生徒が考えていることに基づいたデザインを案内することを示唆している。
・領域における能力取得は複雑で，私たちは熟達の過程で知らないうちに習得する，驚くほど膨大な数の細かく難解な決定能力を認識していない傾向にある（Berry & Dienes, 1993）。
・スキナー（1968）が４年生の算数の能力を評価したところ，生徒は2万5千もの知識「チャンク」を獲得しなければならない（p.17）。プロダクションルールはそのような知識チャンクと決定能力を表現する手だてを提供する。

・あるプロダクションセットにおけるプロダクションルールのモジュール方式が予見するのは，私たちが特定の生徒の弱点を診断でき，これらが改善する指導活動に焦点化できることである。
・プロダクションルールの文脈特化性が意味するのは，もし知識が使われる文脈と繋がっていなければ，指導も効果を持ち得ないということである。生徒はプロダクションのifパートを学ぶために，領域の原理を適切に使えるような状況の，本当の問題解決経験を必要としている。

2. 問題解決の文脈で指導提供する

・ACT-Rの基礎的な仮定は，脳が人の経験を明示的にも潜在的にも解釈または「符号化」することから一般化するのと同様に，人は「実行によって学習」する。
・生徒が与えられる問題は，情報や指導活動ではなく，経験や参加をするような情報や活動が，問題から構築する知識が何かを決めるのである。
・このように，Andersonの他の原理は，「問題解決の文脈で指導を提供する」である。
・この原理は，学習科学の成果である「指導は本当の仕事の状況で指導せよ」と整合性がある。

3. 問題解決に通底しているゴール構造と理解する

・複雑な問題解決において初心問題解決者が直面する手強い課題は，もともとの提示問題を連続した下位ゴールに分解し，これらの下位ゴールの連続性を保つことである（Singley, 1990）。
・問題解決に横たわっているゴール構造は，しばしば伝統的問題解決の表現に潜在的に残っている。
ゴール構造を明示するのに，私たちは２つのメソッドを採用してきた。

第１，インターフェイス：問題解決インターフェイスでゴール構造を可視化した（Colins et al., 1989）。もっとも注目すべき事例は，幾何証明チューター（Koedinger & Anderson, 1993）である。学習の多様性は見せてきたのは，問題解決インターフェイスに足場を築くよう明示されたゴール構造が，シンプルな問題においては素早い問題解決ができ（Corbett & Trask, 2000），より複雑な問題解決においてよりよい学習成果が得られるという結果（Scheines & Aieg, 1994; Singley, 1990）だった。

第２，問題に横たわるゴール構造はヘルプメッセージを通して理解できる。
典型的なモデル追跡チューターにおいて，最初のレベルのヘルプは，全般的な問題における特定文脈の現時点でのゴールについての記述である。その次のヘルプメッセージは，どうやってゴールを達成するかをアドバイスする。

4. 問題解決知識の正しく一般的な理解を促す

・問題解決において，生徒は彼らが自分で理解したものや問題解決活動または事例から解釈したことをもとにプロダクションルールを構築する。
・これらの解釈はしばしば熟達者のものとは異なる。

・初心者は，横たわっている物理原理よりも，問題の表面上の特徴で物理問題を解釈してしまう（Chi, Feltovich, & Glaser, 1981）。

・生徒は，プロダクションを得たのとは異なる文脈になると間違いを引き起こす曖昧なプロダクションをたやすく得て，問題解決文脈を超えて使えないようなかなり特定のルールも得る。

・私たちは，生徒がより全体的な理解を得るのを助ける異なる方略を展開するのに成功してきた。

5. 学習に関係ない作業記憶負荷を最小にする

・複雑な問題解決における間違いは作業記憶から情報が失われてしまうことが理由で起こる（Anderson & Jeffries, 1988），そして高い作業記憶負荷または「認知的負荷」は学習を妨げる（Sweller, 1988）。

6. 望ましい能力モデルに関係した間違いを即時フィードバックを提供する

・人間チューターは，フィードバックが最小限であろうとも（Fox, 1991; Lepper et al., 1990），
・問題解決のステップ毎に即時フィードバックを与え（Merrill, Reiser, Ranney & Trafton, 1992），
・そして「重要な」間違いのみ提供する（Lirrman, 1991）という傾向にある。
・しかし，これらの研究は，即時フィードバックの関連ある利点について示していない。

・Lisp認知的チューターの研究で，即時フィードバックが目覚ましく迅速な学習を促した（Corbett & Anderson, 2001）。
・即時フィードバックだけが学習を効果的にしたわけではないが，生徒を意欲づけることもできる（Achofield, 1995）。

〇Cognitive Tutor Meta-Design Principles
認知的チューターのメタ設計原理

ACT-Rや認知的チューター原理の効果は，一般的で複数の領域にも適用可能である。しかしながら，これらの原理は，高いレベルのカリキュラム設計の質問を要求する：生徒は何を学ぶべきなのか？どんな問題解決活動が学習をサポートするのか？どんな関連知識を生徒たちがもたらすのか？
私たちは認知的チューターを動くだけでなく，クラスルーム使用や先生の実践，コースの目標の社会的文脈やカリキュラムの内でよく動くようにデザインしなければならない。
ここに私たちが認知的チューターの「メタ設計原理」のセットで経験したことの要約を示す。

1. Design with instructors and classroom use from the start
クラスルームの使い方を初めから指導者とともにデザインしておく

・経験を積んだクラスの教師は，認知的チューター開発プロジェクトにおいて，生徒が直面する特定学習のハードルや，生徒がハードルをパスするのをどう助けるのかという知識を獲得するのに大変な尽力をすることで，たくさんの重要な役目を演じる。
・また，他のコース活動と認知的チューター活動の統合で欠くことの出来ない役割も演じる。

第１，デザインチームの１人でとして経験ある教師がいれば，他のコース活動と調和するように初期のチューター開発を導いてくれるだろう。

第２，経験を積んだ教師はテクノロジーを教室に入れるためのベストなポジションにいる。そして，どのクラスルーム活動がチューター活動と絡み合わないかという状況に関する情報をもとにした観察成果を提供してくれる。

2. Design the full course experrience
完全なコース体験をデザインする

・私たちはANGLE幾何証明プロジェクトでカリキュラム互換性に関する高次元の問題に遭遇した（Koedinger & Anderson, 1993）。プロジェクト開始と教室での初離陸までの間に，学区が証明に重きを置かない新しいカリキュラムを採用した，よってカリキュラムにチューターを統合することが難しくなってしまった。
・チューターのカリキュラム目標に精通していたプロジェクトの教師は，他の教師よりも，新しいカリキュラムにチューターを統合することに成功した。そして，よりよい学習効果を得られた。

・ANGLEプロジェクト後，私たちは次の２つの理由から，テキストを含めた認知的チューター数学コースの完全なコース活動セットを開発した。

第１，教師に，どうやってコースに認知的チューターを統合するのかを考える面倒を掛けさせないため。
第２，隅から隅まで問題ベースの学習を強調したコース開発ができるため。

3. All design phases should be empirically based
全てのデザイン段階は実証に基づくべきである

デザイナーは，原理の実用化を導いたりテストするために生徒のデータを収集すべきである。
(a) デザイン経験は初期デザインを引き出す
(b) 形成的評価は適切な解像度で問題解決活動の成功と失敗を分析する
(c) 累計的評価はコースレベルのカリキュラム目標が到達したかどうか評価する

実証研究方法の範囲は，低予算，低信頼度から高コスト，高信頼度のものまである（e.g., Koedinger, 2002）。

■Design Reseach Examples
デザイン研究事例

この章における重要なメッセージは，私たちは，よくできた理論や原理を前進させることではなく，適切に適用されるだろう原理を一層保証するような実証と分析が結びついた手段を明確に記録することを望んでいる。

このあとの３節は，３つのクラスにおける実証研究の詳しい事例を紹介する。

一つ目は，第５ルール「作業領域負荷の低減」でのデザイン研究の使用を記述している。

二つ目は，第４ルール「一般的知識の促進」でのデザイン研究の使用例を記述している。

三つ目は，認知的チューター「代数」の累計的評価について記述している。

○Design Research Guides Reduction of Working Memory Load
設計研究が示す作業記憶負荷の減少

○Reflection Promotes General Understanding
熟考が生む広範な理解

○Summative Field Study Evaluations and Classroom Observations
累積的なフィールドスタディとクラス観察

■Conclusion and Future Work
結論と今後の作業

（※未完）

以上