

情報科学の本質的理解を促す教育手法としての コンピュータサイエンスアンプラグド

嘉 田 勝†1

コンピュータサイエンスアンプラグド (Tim Bell et al.) は、子どもの情報科学への興味を引き出すとともに、大学で教えらるるレベルの情報科学の本質的理解を促すためにも有効な教育手法である。本発表では、コンピュータサイエンスアンプラグドの「情報科学の本質的理解を促すための教育手法」という側面について、可能性と課題を検討し、再評価を試みる。また、スーパーサイエンスハイスクール指定校の高校生を対象とした実践事例を紹介し、効果を検証する。

Computer Science Unplugged Revisited: Toward the Education of the Heart of Computer Science

MASARU KADA†1

Computer Science Unplugged (Tim Bell et al.) is not just a method to attract children's interest toward computers, but also an effective approach to the education of the heart of computer science. We will reevaluate the potential of Computer Science Unplugged as an approach in higher education to introduce the essence of college-level theoretical computer science.

1. はじめに

コンピュータサイエンスアンプラグド (以下、CS アンプラグドと記す) は、Tim Bell 氏の考案による、情報科学の原理を小学生程度の子どもに効果的に教えるための教育手法で、教師向けの指導書が公開されている¹⁾。子どもを主な対象としていることから、学習活動は

グループワークやゲームを取り入れるなど、子どもたちが楽しみながら活動に取り組めるように工夫されている。また、子どもの情報科学への興味を呼び起こすことを狙う一方、小学生程度の発達段階に合わせて、理論的内容については易しいレベルにとどめている。

日本では、2007年にCS アンプラグドの教師向け指導書の日本語訳が出版され²⁾、主に中学生や高校生を対象とした教育実践事例が報告されている³⁾⁻⁵⁾。これらの報告では、生徒の情報科学への興味や学習意欲を引き出すという側面が注目されてきた。

嘉田は、CS アンプラグドの学習活動は大学情報系学科で教えられているレベルの情報科学の理論の本質を伝えるためにも有効に利用できると考えた。そして、情報科学の理論の本質を伝えるための手段として、自身が担当する授業の範囲内で、CS アンプラグドの英語原書講読と学生による模擬授業を取り入れたり、授業内容に関連するCS アンプラグドの学習活動のデモンストレーションを行ったりする試みを行っている。

本発表では、従来は初等中等教育向けの教材として、あるいは、生徒の興味や学習意欲を引き出すための教育手法として評価されることが多かったCS アンプラグドを、「情報科学の理論の本質的理解を促すための教育手法」という視点で捉えなおし、再評価を試みる。特に、スーパーサイエンスハイスクール (SSH) 指定校の高校生を対象とした大学訪問研修でCS アンプラグドを利用した実践事例を紹介し、この事例をもとに、大学レベルの情報科学の理論的内容を教える教材としてのCS アンプラグドの可能性を検証する。

2. これまでの実践事例

この節では、現在までに報告されている、大学レベルの情報科学教育へのCS アンプラグドの適用事例を紹介する。

嘉田は、大阪府立大学理学部情報数理科学科の授業「情報数理科学ゼミナール I」(2008年度)で、CS アンプラグドの英語原書講読と学生による模擬授業を取り入れた実践を行った⁶⁾。この授業では、セミナー形式でCS アンプラグドの英語原書の内容を学生が相互に発表することで、各学習活動とその情報科学的意義を理解することに重点を置いた。CS アンプラグドの各章の末尾には“*What's it all about?*”と題された教師向けの解説があり、その部分をていねいに読み解くことで、学習活動自体の理解だけでなく、学習内容の情報科学的意義のより深い理解に導くことができた。

和田勉氏は、長野大学での情報科学の授業(2008年度以後)で、CS アンプラグドの実習と板書講義を併用して情報科学のトピックの本質的理解を促す授業実践を行っている⁷⁾。CS アンプラグドの学習活動を実施した後に、板書講義でより正確な理論的解説を行うこと

†1 大阪府立大学

Osaka Prefecture University

で、大学での授業にふさわしい程度の理解に引き上げることを企図している。

兼宗進氏は、津田塾大学での教職科目「情報科教育法」(2008-2009年度)で、学生による模擬授業にCSアンプラグドを取り入れる実践を行った。この実践の報告⁸⁾では、模擬授業を行った学生から「授業には周到な準備が必要である」「教えるためには教員に深い理解が必要である」という感想が聞かれたことが報告されていて、学生にCSアンプラグドの模擬授業を行わせることが、学習内容に対する学生自身の深い理解を促す効果があることが示されている。

3. CSアンプラグドの学習活動の再評価

小学生でも取り組めるようにデザインされたCSアンプラグドの学習活動は、大学レベルの情報科学を教えるための教材として、どれほど利用に堪えるだろうか。

嘉田は、この問いに答えるためのアプローチとして、「学習活動が情報科学的内容の本質を的確に捉えているか」という視点で、それぞれの学習活動を再評価する必要があると考える。原書に示された学習活動が本質を的確に捉えたものであれば、学習活動を深化させてより高度な内容に導ける可能性があるが、そうでなければ、子どもの興味を引き出すには十分であっても、情報科学の高度な理解のための土台としては使えないだろう。

本節では、上述の視点から、CSアンプラグドの学習活動のいくつかを取り上げ、再評価を試みる。

3.1 いちばん軽いといちばん重い(学習7: 整列アルゴリズム)

整列アルゴリズムの学習において、選択ソートやクイックソートのような、比較ベースかつ in-place の整列アルゴリズムを対象に、データの個数と比較回数を知ること、基本的な学習項目である。

CSアンプラグドの学習7「いちばん軽いといちばん重い」は、天秤を使って8個のおもりを重さの順に並べる活動である。選択ソートとクイックソートのアルゴリズムと、アルゴリズムの違いによる天秤使用回数の違いを知ることが学習の中心である。「発展と応用」で挿入ソート、バブルソート、マージソートが簡単に説明されている。

天秤を使った学習活動は、「比較ベースの整列」という考えについて、実にうまく本質を捉えている。天秤では一度に2個のおもり(データ)の比較しかできないことに加えて、見かけでは区別できないおもりを扱うことで、データ全体を見渡して見当をつけることができず、いちいち天秤で比較するしか方法がないという状況を実現していて、比較ベースの整列の考え方を理解させるのに適した教材となっている。ただし、実際に天秤とおもりを使っ

た作業をするときには、作業中のおもりの置き場として、ある程度広い机上のスペースをとるのが現実的で、in-place という状況は必ずしも実現されない。

おもりの個数を8個に限定しているのは、作業量の制約とともに、子どもの理解力に合わせて易しいレベルにとどめる意図によると考えられる。この点は、高校生や大学生が対象であれば、8個のおもりを並べる活動でアルゴリズムを理解した後に、机上での計算の議論に移行して「おもりの個数が9個の場合は? 10個なら? 20個なら?」と問いかけながら考えさせることで、データの個数の制約を取り払って、より高度な計算量の議論に導くことができる。特に、整数の和の公式 $\sum_{k=1}^N k = N(N+1)/2$ や対数を学習済みの高校2年生以上が対象なら、大学レベルの情報科学の教科書で扱うレベルの議論も可能である。

3.2 みかんゲーム(学習10: ネットワークにおけるルーティングとデッドロック)

5-6人で車座になり、ひとりひとりに2個ずつ、ただし1人だけは1個のボールを割り当て、ランダムにボールを持った初期状態から「手が空いている人に隣の人がボールを手渡す」という動作の積み重ねによって、全員が自分のボールを持つ終了状態に到達することを目的とする、協調型のゲームである。

CSアンプラグド原書では、この学習のテーマは「ルーティングとデッドロック」とされている。実際、ネットワークのルーティングを強く意識して、プレイヤーの配置を実際のコンピュータネットワークを模した形(スター型など)にしてボールの動きをパケットの伝送に見立てた実践事例も報告されている^{5),9)*1}。

しかし、情報科学の本質的理解に導くことを目標とする場合、この学習活動をルーティングやデッドロックに結び付けることには注意を要する。このゲームの特徴を考えるに、この学習活動は当初からルーティングやデッドロックを教えるためにデザインされたものではないと思われるからである。「ルーティングとデッドロック」という題目は、教師向け指導書を書き起こす段階などで、何らかの意図で付け加えられたと考えられる^{*2}。

その意味で、「ルーティングとデッドロック」という標題に注目する限り、この学習活動は本質を捉えているとはいえず、子どもの興味を引き出すきっかけとしては有用としても、情報科学の本質的理解のための教材としては難があると評価せざるを得ない。

*1 Tim Bell氏による紹介ビデオ (<http://www.youtube.com/user/csunplugged> で閲覧可能)でも、ネットワークに結び付けて解説している。

*2 嘉田は、みかんゲームの当初の意図は「最適化問題における局所最適解と大域最適解」を子どもに体験させることだったと考えている(根拠の一つは、原書でこの学習がアルゴリズムを扱う「第2部」に置かれていることである)。指導書を書く段階で、それは子どもや教員にとって難しすぎると考えて、後からルーティングとデッドロックに結び付けるように方針を変えたのではなかろうか。

3.3 宝島 (学習 11: 有限状態オートマトン)

乗る船を選択して島から島へ渡りながら「宝探しの地図」を完成させる活動で、有限状態オートマトンの考えを理解させることが目的である。

この学習活動については、有限状態オートマトンについて、伝えるべき情報科学的本質を「機械の状態遷移」と考えるか、それとも「言語の認識」と考えるかによって、授業のデザインが変わってくることに留意する必要がある。

機械の状態遷移を意識するなら、「宝島にたどり着く」という目的はそれほど重要ではなく、試行錯誤を繰り返して地図を完成させることが活動の目的となる。発展的な学習の方向性としては、たとえば、身近な家電製品などの状態遷移図を作らせることが考えられる。

一方、言語の認識を念頭に置くと、「宝島 (受理状態) に到達できる船の選び方 (記号列)」が何であるかが重要になる。そこで、地図を完成させて終わりではなく、たとえば、船の選び方を指定した「乗船券」を生徒に与えて、宝島にたどり着くかどうかを確かめさせる (実際に島めぐりをさせてもよいし、図上でトレースしてもよい) などの新たな活動を取り入れる必要があろう。

なお、原書では、発展的な学習活動として、宝探しの活動を言語の認識に結び付けるための、いくつかの学習活動の提案が示されていて、原著者 Tim Bell 氏が言語の認識を念頭に置いていたことがうかがえる*1。

3.4 まとめ

本節での考察からわかるように、CS アンプラグド原書の学習活動には、教えるべき情報科学的本質を的確に捉えているものと、そうでないものが混在している。本質を的確に捉えた学習活動を選べば、工夫次第でより高度な理解に導く授業のデザインが可能である。

CS アンプラグドを大学レベルの情報科学の教育に適用するには、個々の学習内容を注意深く再評価して、教えるべき内容の本質を捉えているかどうかを見極める必要がある。本節で取り上げていない学習活動についても、同様の観点による再評価を進める必要があろう。

4. 実践事例

大阪府立大学理学部では、スーパーサイエンスハイスクール (SSH) 指定校である大阪府立泉北高等学校のプログラム「大学訪問研修」を受け入れている。嘉田は、2008 年 12 月

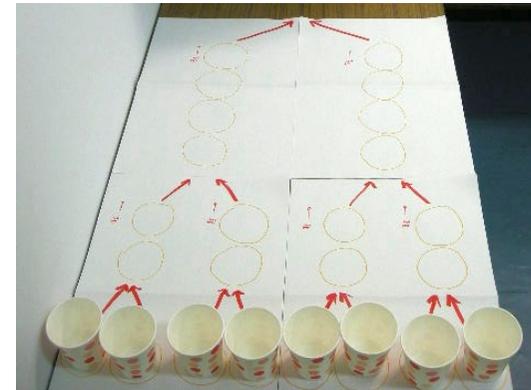


図 1 マージソートの手順説明用シート

に、大学訪問研修の講座のひとつとして、高校 2 年生 3 人を対象に、CS アンプラグドの学習 7「いちばん軽いいちばん重い」をもとにした実習を行った。

大学訪問研修は SSH プログラムの一環であることから、大学レベルに近い高度な学習内容が期待されていると考えた。そこで、「天秤を使って 8 個のおもりを重さの順に並べる」という CS アンプラグドの本来の学習活動を出発点としつつ、アルゴリズムと計算量についての高度な理解に導く授業展開を試みた。前節で議論したとおり、学習 7 は整列アルゴリズムの学習の本質をうまく捉えていて、より高度な学習内容への発展を図りやすい。

実習の概要

大学訪問研修の実習では、選択ソート、クイックソート、マージソートの 3 種類の整列アルゴリズムをとりあげ、8 個のおもりと天秤を使ってアルゴリズムの動作を理解した後に、一般の個数のデータを整列するときの比較回数を机上の計算で議論するという授業展開を図った。対象の生徒は高校 2 年生で、整数の和の公式や対数を学習済みなので、数学的議論の前提となる知識については問題ないと判断した。

マージソートのアルゴリズムは、口頭や文章での説明だけでは完全に理解して実行するのは困難なので、比較の手順を図式的に示した大型のシート (図 1) を作り、シートの上でおもりを移動していくことで、比較の手順を迷わず実行できるようにした。

実際に行った実習の流れを表 1 に示す。時間は 90 分である。

この実習については、2010 年 3 月に行われた高校教科「情報」シンポジウム 2010 春で、当時泉北高校の情報科教員だった中村亮太氏 (現・大阪府立阪南高等学校) がポスター形式

*1 一方、Tim Bell 氏による紹介ビデオ (<http://www.youtube.com/user/csunplugged> で閲覧可能) では、機械の状態遷移に結び付ける解説がなされている。

表 1 2008 年泉北高校 SSH 大学訪問演習で行った実習の流れ

- (1) 導入：データを整理することの必要性*1
- (2) 天秤を使って 3 個のおもりを整理する (デモンストレーション)
- (3) 選択ソート
 - (a) アルゴリズムの説明
 - (b) 天秤を使った整理の実行 (生徒それぞれ 1 セット), 天秤使用回数の報告
 - (c) 一般の個数のデータについて, 比較回数の理論値を議論
- (4) クイックソート
 - (a) アルゴリズムの説明
 - (b) 天秤を使った整理の実行 (生徒それぞれ 2 セット), 天秤使用回数の報告
 - (c) 一般の個数のデータについて, 比較回数の理論値 (最良, 最悪) を議論
- (5) マージソート
 - (a) アルゴリズムの説明 (おもりの比較手順を図式で表したシートを使用)
 - (b) 天秤を使った整理の実行 (生徒 3 人で協力して 1 セット), 天秤使用回数の報告
 - (c) 一般の個数のデータについて, 比較回数の理論値 (最悪) を議論
- (6) まとめ

で報告を行っている¹⁰⁾。この報告ポスターの原稿を図 2 に示す。このポスターには、実習を受講した生徒が校内向けの報告会で用いたポスターの抜粋が含まれており、実習内容を生徒がどれほど理解したかを読み取ることができる。

実習を振り返って

この実践の結果を評価する際のポイントとしては、次の 3 点が考えられる。

- (1) 教具を使った活動から机上の計算での議論に円滑に接続できたか?
- (2) 板書講義のみの授業と比べて、より優れた効果が得られたか?
- (3) 最終的に、高度な理論的内容の理解に到達できたか?

これらの観点を念頭に、実習の結果を振り返って検討する。

ソートの比較回数の理論値を議論する際、板書講義だと、教員が正答を提示する形の説明になりがちで、生徒が考える余地がなくなってしまう。正答を提示する前に生徒に問いかけで考えさせる方法も考えられるが、その場合でも、答を導き出すにはアルゴリズムを理解している必要があり、即座に答えるのは難しいと予想される。今回の実習では、アルゴリズムの動作はすでに生徒自身が手を動かして体験しているので、考える手掛かりが与えられており、生徒自身が考えて答を導き出すきっかけが生じる。そこで、教員が正答を提示する前

*1 架空の試験点数データを生成して「ランダム」「氏名ふりがな昇順」「点数降順」の 3 種類の点数表を作り、それぞれ別の生徒に手渡して、「○○さんの点数は?」などと問いかけて、見つけ出す早さを競わせた。

大阪府立泉北高等学校
高大連携講座における CS アンプラグド

大阪府立泉北高等学校のスーパーサイエンスハイスクール事業の一環として、大阪府立大学・大阪市立大学・近畿大学などの研究室を訪問させていただいた。
その訪問先の 1 つ「大阪府立大学 理学部 情報数学科 嘉田研究室」に生徒 3 名と教員 1 名がお邪魔させていただきました。コンピュータサイエンスアンプラグドの実習を嘉田先生に行っていた。

- (1-1) 選択ソートのアルゴリズム説明
- (1-2) 選択ソートの実行, 比較回数報告 (3 人それぞれ 1 セット)
- (1-3) 選択ソートの比較回数理論値を議論
→「実はもっと効率のいい方法がある」
- (2-1) クイックソートのアルゴリズム説明
- (2-2) クイックソートの実行, 比較回数報告 (3 人それぞれ 2 セット)
- (2-3) クイックソートの比較回数理論値 (平均, 最悪) を議論
→「最悪ケースを改善する方法は?」
- (3-1) マージソートのアルゴリズムを説明
- (3-2) マージソートの実行 (3 人で協力して 1 セット, アルゴリズムを図式として描いたシートを使用)
- (3-3) マージソートの比較回数理論値 (最悪) を議論



～ここから生徒がまとめたレポート～

研究室の概要
学ぶのが難しいと思われていたコンピュータの基本原則を、コンピュータを使わずに、学生でも大人でもわかりやすく学ぶことができる新しい教育ソケット、コンピュータサイエンスアンプラグド (Computer Science Unplugged) を研究している。
整列アルゴリズム (並び替え) を学び、それを使ってより早くプログラムを作る。データがある順序に従って並んでいる重要性を知って、コンピュータは『一度に 2 つのデータの大小を比べる』ことしかできないことを知った上で、3 つの整列ソーティング (選択ソート、クイックソート、マージソート) について学んだ。

研修の内容
8 つの重さの異なるおもりの入ったコップを、1 つの天秤を使い軽い順番に、天秤を何回使えば並べられるかという実験をした。

- ・選択ソートの場合
8 つの中から 1 番軽いコップを選ぶ
7 つの中から 1 番軽いコップを選ぶ
これを繰り返して最後 1 つになるまでですと並ぶ。
それにかかる回数は 28 回である。
- ・クイックソートの場合
8 つの中から基準を 1 つ選びそれより軽いか重いかを比べる
分けられた塊から基準を選んでそれより軽いか重いかを比べる
これを繰り返して順番に並べる。
これはどこを基準にするかで回数が変わってきて
常に 1 番軽い (or 重い) を選ぶと最多で 28 回
常に真ん中を選ぶと最少で 13 回になる。
- ・マージソートの場合
右の図のように 1 つ 1 つづつが軽いか比べてペアを作る
ペアのうち軽い同士を比べて軽い順に並べていく
最後にまた軽い同士を軽い順に並べていく
最多で 17 回、最少で 12 回になる。

この数値は、実験からも出たが計算で求めることができる。おおよその値は n が大きければ、次のようになる。選択ソートは左側で、クイックソートとマージソートは右側である。

$$\frac{n^2}{2}$$

$$n \log_2 n$$

生徒の感想
最初は興味本位でこの講義を受けたのですが、講義を受けている内にだんだん面白くなっていき、実験にも積極的に参加することができました。順番に並べることがコンピュータには大切であることがわかりました。現在のコンピュータが、クイックソートを使っている理由を知り、マージソートは場合によってはコンピュータには適さない (多くのメモリーを必要とするため) らしく、そのことについて質問すると親切に教えていただいてありがたかったです。こういう機会を作っていただきありがとうございます。

図 2 実習の報告ポスター (高校教科「情報」シンポジウム)

に生徒同士の議論を促し、最終的に生徒から正答を引き出すことができた^{*1}。このように、今回の授業実践では、教具を使った学習活動から机上の計算の議論への接続を考えた授業デザインができていたうえ、生徒が自分で手を動かしてアルゴリズムを理解してから比較回数の理論値の議論に移行することで、生徒に自発的に考えて議論することを促す結果となり、板書のみ講義より効果的な授業となったと考えられる。

図2の生徒による報告の部分を見ると、比較回数の議論について、まず8個のおもりについて具体的な値を示した後に、「おおよその値は n が大きければ、次のようになる」として、選択ソートの比較回数の漸近的評価 $n^2/2$ と、クイックソート(最良ケース)とマージソートの比較回数の漸近的評価 $n \log_2 n$ を提示している。これらの計算量の評価は大学レベルのアルゴリズムの教科書で扱う範囲である。オーダーの議論など、数学的にはまだ詰め甘さがあるものの、高校2年の前提知識でここまで理解できれば、「大学レベルの情報科学の本質的理解に到達させる」という授業の目標は達成されたといえよう。

なお、前節で述べたとおり、天秤を使った整列の学習活動では in-place という状況は必ずしも実現されない。今回の実習ではクイックソートとマージソートを扱ったが、生徒から「マージソートがいつでも最良なんですね」という発言があり、この点については「マージソートには『作業中のデータの置き場が余分に必要』という欠点がある」と口頭で補足した(図2の「生徒の感想」参照)。図らずも、「天秤を使った学習ではアルゴリズムが in-place であるかどうかを意識させることは難しい」という問題点が明らかにされる結果となった。

5. おわりに

本発表では、CS アンブラグドを「情報科学の本質的理解を促すための教育手法」と捉えて学習内容を再評価するとともに、SSH 指定校の高校生を対象とした実践事例をもとに、CS アンブラグドをより高度な学習のための教材に発展させる可能性を検証した。

今回の考察と実践によって、CS アンブラグドは、初等中等教育で生徒の興味や学習意欲を引き出すだけにとどまらず、教えるべき内容の本質を捉えた適切な学習活動を選んで、発展的な学習内容に向けた授業をデザインすることで、大学レベルの情報科学の本質的理解を促す教材としても利用に堪えることが示された。

*1 生徒は、8個のおもりに選択ソートする際の天秤の使用回数について、一発で正答を見出したわけではない。初めのうちは $8+7+\dots+1$ や $7+6+\dots+2$ などの誤答が次々に出て、生徒同士で議論した末に、正答の $7+6+\dots+1$ にたどり着いた。クイックソートの最良ケースについても、生徒からは「ピボットが常に『2番目に軽い』場合」という予想外の誤答が出た。

今後、高校や大学などで、より高度な情報科学の教育の場面でCS アンブラグドが効果的に利用され、教育の質の向上が図られることを期待している。本発表がその一助となれば幸いである。

謝辞 本発表にあたり、日頃から諸会合および Moodle (dolittle-edu, csunplugged) で議論させていただいている方々のご意見を大に参考にさせていただきました。特に、本発表の内容に関連して示唆に富んだご意見をくださった、兼宗進(大阪電気通信大学)、和田勉(長野大学)、辰己丈夫(東京農工大学)、中野由章(千里金蘭大学)の各氏に、感謝の意を表します。また、泉北高校 SSH 大学訪問研修についての報告ポスター原稿を提供くださった中村亮太氏(大阪府立阪南高等学校)に感謝します。

参考文献

- 1) Tim Bell, Ian H. Witten and Mike Fellows: *Computer Science Unplugged — An enrichment and extension programme for primary-aged children* (2006). <http://csunplugged.com/csunplug/books>
- 2) 兼宗進 ほか: コンピュータを使わない情報教育 アンブラグドコンピュータサイエンス. イーテキスト研究所 (2007).
- 3) 井戸坂幸男, 兼宗進, 久野靖: 中学校におけるコンピュータを使わない情報教育(アンブラグド)の評価. 情報処理学会研究報告, Vol.2009-CE-93, No.7, pp.49-56 (2009).
- 4) 保福やよい, 井戸坂幸男, 兼宗進, 久野靖: 高校情報 B における CS アンブラグドの活用. 情報処理学会 情報教育シンポジウム論文集, Vol.2008, pp.201-206 (2008).
- 5) 井戸坂幸男, 西田知博, 兼宗進, 久野靖: 中学校における CS アンブラグドの授業提案. 情報処理学会研究報告, Vol.2009-CE-98, No.24, pp.163-170 (2009).
- 6) 嘉田勝: 大学生もアンブラグド—洋書講読と模擬授業による授業実践. 情報処理学会 情報教育シンポジウム論文集, Vol.2008, pp.269-270 (2008).
- 7) 和田勉: アンブラグドコンピュータサイエンスと板書講義を併用した大学でのアルゴリズムの授業. 情報処理学会研究報告, Vol.2009-CE-100, No.5 (2009).
- 8) 兼宗進, 佐藤義弘: 情報科教育法での CS アンブラグドの利用. 情報処理学会研究報告, Vol.2009-CE-103, No.24 (2010).
- 9) 上川直樹, 上田一正, 西木毅, 兼宗進: アンブラグドを利用したオープンキャンパスイベントの試み. 情報処理学会研究報告, Vol.2009-CE-101, No.6 (2009).
- 10) 中村亮太: 大阪府立泉北高等学校高大連携講座における CS アンブラグド. 高校教科「情報」シンポジウム 2010 春 資料集, 情報処理学会 (2010).