

高校化学の問題演習型知的教育システムにおける 問題表現と問題解決機構

Representation of problems and construction of a problem-solving unit in an intelligent educational system for high-school chemistry

小西 達裕
Tatsuhiko Konishi

伊東 幸宏
Yukihiro Itoh

静岡大学 情報学部
Faculty of Informatics, Shizuoka University

In this manuscript, we discuss on problem representation, knowledge representation, and problem solving algorithm in our intelligent educational system for high school chemistry. We designed a problem representation syntax by which problem authors can represent all of typical chemical problems independent of problem types. We designed knowledge representation for chemical knowledge necessary to solve the problems written in the syntax. Then we constructed domain knowledge base and a problem solving unit.

1. はじめに

演習問題を解く能力を持つ知的教育システムにおいて、教師が演習問題のオーサリングをする状況や、学習者自身に問題を作成させることにより学習を進めるような状況を想定すると、問題の定義の際にシステム内の知識表現の仕様に関する知識が必要であることは望ましくない。理想的には制約のない自然言語で記述された問題をシステムが扱えることが望ましいが、現在の技術では困難といえる。そこで我々は次善の方法として、人間が直感的に理解でき、かつシステムにとっても解釈が可能な文法に基づいて問題を記述する方法を開発することを目的として研究を進めている。本稿では高校化学の典型的なタイプの問題について、そのタイプによらず一定の形式で記述できる文法を設計した。本研究ではこの文法を「問題表現文法」と呼ぶ。

本稿では、これまでに我々が開発した高校化学を対象とする知的教育システムの問題演習支援ユニットにおける、演習問題を一定の文法に従って記述する方法、ならびにその形式で記述された問題を化学の教材知識を用いて解く機構の構築方法について述べる。

2. 高校化学の演習問題表現

2.1 取り扱う問題タイプ

我々は市販の高校化学教科書[数研出版 2002]・問題集[啓林館 2003] [文英堂 2003]を調査し、典型的演習問題のタイプを、必要な推論と知識のタイプから以下のように分類した。

- ① 化学現象についての部分的情報を与えられ、そこから現象全体を再現すると、その結果(の一部)が解となるもの
- ② 物質とその状態の情報が与えられ、その物質のある属性の属性値を別の属性値や定数等から計算して求めるもの
- ③ ①と②を組み合わせたもの
- ④ いわゆる暗記問題。すなわち化学の世界で一般的に成り立つ事実を直接問うもの

うち④のタイプの問題については、推論による問題解決の必要がなく、知識を検索するだけで解が得られる。本稿では推論

による問題解決機構の構築方法を提案することが目的であるため、このタイプの問題については触れないものとする。

なお、問題の解答形式(穴埋め問題、選択問題、真偽正誤判定問題など)に着目すると上記とは別の分類が可能である。この種の問題タイプの差異は、問題解決に必要な化学の知識やその運用方法という点では本質的な差ではない場合が多い(例えば「...である物質の質量を求めよ」という問題と、「...である物質の質量は以下の選択肢のどれか」「...である物質の質量は Xgである。正しいか」という問題に本質的な差はない)。そこで本稿では解答形式による問題タイプのバリエーションについては考慮せず、最も基本的な「値や事実を直接答える問題」のみを取り扱う。

2.2 問題の初期条件を構成する要因

化学の世界における演習問題の初期条件は、言語表現のみで与えられる場合と、言語表現と非言語情報(図、表、グラフ等)を組み合わせられて与えられる場合がある。多くの非言語情報は言語表現への書き換えが可能であることから、現段階では初期条件は言語表現で与えられるものとする。上述の市販問題集の調査の結果、演習問題中の初期条件は「問題で設定された系に存在する物質」と「同じく生起する現象」について、以下のような制約条件を指定できればそのほとんどが表現可能であるという知見を得た。

[物質に対する制約条件]

- ・ 物質のクラスの名称 (ex. 水素原子, 酸)
- ・ 物質が内包する属性の値 (ex. 原子量が1である原子)
- ・ 物質が他の物質ともつ関係 (ex. 溶液1の溶質である物質)
- ・ 物質が関与する現象における以下の条件
 - 物質がその現象の中で果たす役割 (ex. ~反応の生成物である物質)
 - 物質がその現象のどの時点で存在するか (ex. ~反応の後に存在する物質)
 - 物質がその現象においてどのような変化を起こしたか (ex. ~反応で酸化された物質)

[現象に対する制約条件]

- ・ 現象のクラスの名称 (ex. 中和反応)
- ・ その現象に関与する物質が起こした変化 (ex. Fe が燃焼する現象)

連絡先: 小西 達裕, 静岡大学情報学部, 432-8011
静岡県浜松市中区城北 3-5-1, Tel. 053-478-1454,
FAX 053-478-1499, E-mail konishi@inf.shizuoka.ac.jp

- ・ その現象に関与する物質が現象の中で果たす役割
(ex. HClとNaOHが反応物である現象)

2.3 問題表現文法

上述のように本研究では、2.1で述べた各タイプの問題を表現する文法を「問題表現文法」と呼ぶ。また問題表現文法で記述された問題を「クエリー」と呼ぶこととする。

問題表現文法は人間が直感的に捉えうる構造を持つ必要がある。2.2で述べた問題の初期条件を構成する要因は、その問題において「どのような物質が存在するか」「どのような現象が生起しているか」から成っており、人間が演習問題を捉える枠組みとして一定の理解しやすさを有すると考えられる。そこで我々は問題の初期条件情報として2.2節で述べた制約を記述できるように問題表現文法を設計した。構文図を図1に示す。この文法に従って問題を記述することが一般の教師や学習者にとってただちに容易であるとは言えないが、将来的にこの文法構造に基づいたテンプレートに記入させるインタフェースを持つオンラインツールを提供することにより、問題記述を支援できるものと考えている。

以下、図1の各チャートについて簡単に説明する。

図1において、楕円で表される要素をトークンと呼び、名称や値などを表すシンボルと対応する。また長方形で囲まれた要素は対応する名称のチャートがそこに再帰的に埋め込まれることを意味する。

上述の①～③のタイプの問題では、ある制約を満たす物質・現象の名称、もしくはそれらが持つ属性値が解となる。「問題」チャートでは求めるべき対象の物質もしくは現象を指定し、次に求めるべき属性名を指定する(但し便宜上、物質・現象の名称を求める問題では「名称」という属性名を指定することにする)。

「物質」チャートではその物質が満たすべき制約(物質制約チャートに従って記述される)と物質名を指定する。ここで物質名は任意の抽象度を使用できるので、特に制約がない場合には単に「(化学)物質」とすることもできる。

「現象」チャートも同様に、その現象が満たすべき制約(現象制約チャートに従って記述される)と現象名を指定する。

「物質制約」チャートでは、第1のパスによりその物質が持つ属性値、第2のパスにより他の物質との関係、第3のパスにより現象との関わりを指定できる。

「現象制約」チャートでは、その現象に関与する物質(複数も可)を指定でき、かつその物質がその現象で果たす役割、もしくはその現象内で起こす変化を指定できる。

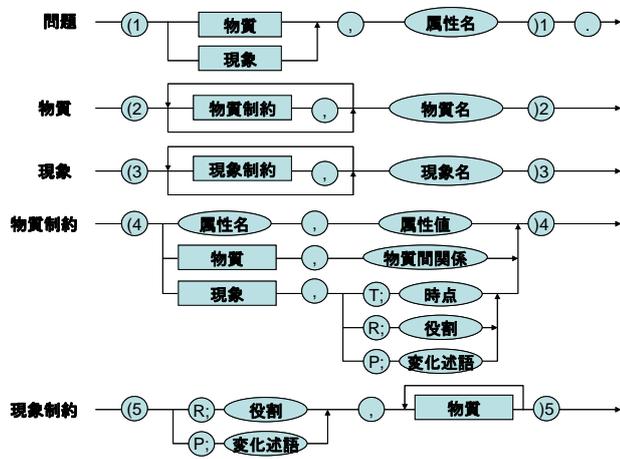


図1 問題表現文法

例として、「1.5gの水素が燃焼する現象において、生成する水の質量を求めよ」という問題に対するクエリーは図2のようになる。

(1 (2 (4 (3 (5 (2 (4 質量, 1.5)4, 水素)2, ;1.5gの質量を持つ水素
P;燃焼)5, 現象)3, ;が燃焼する現象
P;生成)4,水)2, ;において生成する水
質量)1. ;の質量(を求めよ)

図2 クエリーの例

3. 問題解決機構

3.1 問題解決処理の基本手順

上述の①～③の各タイプの問題の標準的な解法を整理する。①は、与えられた情報(現象に関与する物質名、現象名など)を条件として、適用可能な化学現象の因果関係の知識を探し、現象全体を再現する。②ではまず対象の物質が持つ性質・それが置かれた状況・属性の定義式などから、利用可能な数量関係式を想起し、それらを組み合わせるべき値を計算する。③ではまず①の問題を解いて化学現象を再現し、その現象の生起を前提として成立する数量関係式も利用しつつ②の問題を解く。

これらの解法を包含し、各タイプの問題を共通に解ける手順を以下のように設計した。以下では、問題解決過程を記録する記憶領域を **Working Memory (WM)** と呼ぶ。

- (1)クエリーを解釈し、問題中に陽に記述されている情報を WM に設定する。
- (2)(1)の情報と化学の知識を用いて、問題に陽に記述されていない情報を含めた問題状況を WM 上に再現する。具体的には①③においては化学現象の再現を、②③においては利用可能な数量関係式の整理を行う。
- (3)(2)の結果に問題の解が含まれているかを調べ、含まれていない場合にはそれを推論により導出する。具体的には、②③において方程式の計算を行う。

本稿では、問題中に陽に記述されている情報を「初期条件」と呼び、また(2)の過程を「問題状況再現プロセス」、(3)を「求解処理」と呼ぶこととする。

本研究で取り扱うタイプの問題については、問題状況再現プロセスは以下の3つのタイプの処理で構成される。

Type1: 初期条件に表現された化学物質について、その物質概念の知識をインスタンス化してWM上にその物質の具体概念を生成する。初期条件に表現された化学現象についても同様に現象インスタンスを生成する。両者には初期条件に陽に記述された属性情報などを設定する。その際、両者はクエリーに指定された物質制約情報、現象制約情報に従ってリンクされる。

Type2: 初期条件をもとにそこから生起する現象を同定し、化学現象の因果を表す知識を用いて WM 上にその現象を再現する。再現の結果、物質が生成される場合には Type1 の処理と同様にインスタンス物質概念を WM 上に生成する。

Type3: Type1, Type2 の処理で再現された現象とインスタンス化された物質の性質に基づいて、その問題状況において成立する数量関係の知識を知識ベースから検索し、その数量間関係を Type1, Type2 の処理で生成したインスタンス物質概念に適用した式を WM 上に生成する。

Type1~3 の処理を行う過程で、初期条件に含まれる物質概念と、生成されたインスタンス物質概念の対応関係を同定する必要がある。これをユニフィケーション処理と呼ぶことにする。

3.2 問題解決機構の構成

問題解決機構は、問題データベース、教材知識ベース、問題解決部、WM、概念対応表から構成され、更に問題解決部は制御ルーチン、クエリー処理ルーチン、求解処理ルーチン、シミュレーションルーチン、ユニフィケーションルーチンから構成される。それぞれの関係は図3のようになる。

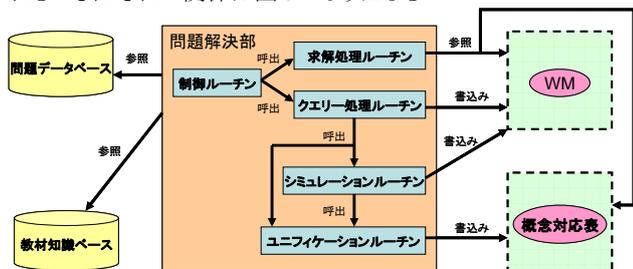


図3 問題解決機構

【問題解決機構を構成する各ルーチン】

(1)制御ルーチン

入力された問題番号から問題データベース内のクエリーを取得し、クエリー処理ルーチン、求解処理ルーチン呼び出し、問題の解を導く。

(2)クエリー処理ルーチン

制御ルーチンから受け取ったクエリーを解釈して問題状況再現プロセスを実行する。

(3)求解処理ルーチン

問題状況を再現した WM を参照し、求解処理を行う。

(4)シミュレーションルーチン

クエリー処理ルーチンが現象に関わる記述をクエリーから読み込んだ際に呼び出され、WM 上で現象の再現(シミュレーション)を行う。

(5)ユニフィケーションルーチン

クエリー処理ルーチンまたはシミュレーションルーチンが物質のインスタンスを生成した際に呼び出される。WM 上にこのインスタンスに対応する概念が既に存在するかを判定し、存在すれば単一化を行なう。(ex.クエリー中に「反応後に存在する塩」が記述されていて、WM にこの情報がセットされているとき、シミュレーションの結果として NaCl が生成されたならば、この NaCl が「反応後に存在する塩」であるとして単一化する)。この結果を記録する領域を概念対応表と呼ぶ。

3.3 高校化学知識ベース

市販の教科書を調査・分析した結果、本研究で取り扱う範囲の問題を解くのに必要な化学の知識は、物質概念・現象概念・属性概念・数量間関係に関わる知識に分類できるという知見を得ている。以下に各知識の記述方法を説明する。教材知識ベースは XML を用いて作成されており、知識間のリンクは各知識に固有に与えられている ID によって指定する。

(1) 物質概念知識

物質概念に関わる知識は、各物質が持つ属性と属性値・その物質がどの物質クラスに属するか・その物質の構造を表す情報からなり、物質概念毎に ID と名称、複数の属性スロット、概念関係スロット、構造スロットを持つ。物質概念知識が属性スロット

を持つことは、その物質がその属性を内包するという意味する。物質概念が決まれば属性値も一意に定まる属性(原子量や原子番号など)に関しては、物質概念知識内にその属性値が予め書き込まれている。体積や質量などインスタンス化されなければ属性値が一意に定まらないものに関しては、知識ベース中では値が空欄となる。属性スロットからはその属性に関する知識へのリンクが張られる。概念関係スロットには、その物質の上位概念・下位概念である物質概念知識へのリンクが張られる。

(2) 現象概念に関わる知識

現象概念に関わる知識は、化学現象知識と状態知識とに分類される。

化学現象知識は、現象の状態間の因果関係を表し、現象毎に ID と名称、現象の初期スロット、プロセススロット、終了状態スロット、数量間関係スロットを持つ。初期状態スロットには化学現象が生起する条件となる状態知識 ID が書き込まれ、プロセススロットには生起した化学現象の変化中の状態に対応する状態知識 ID が書き込まれる。また終了状態スロットには現象が終了した後の状態知識 ID が書き込まれる。数量間関係スロットには、その現象において成り立つ数量間関係を表す数量間関係知識(後述)へのリンクが張られる。

状態知識は、現象におけるある一時点の状態を表し、状態毎に ID と属する化学現象知識へのリンク、その状態に関与する物質概念知識へのリンクが書き込まれる。

(3) 属性概念知識

属性概念に関わる知識からは、その属性の定義式を含む数量間関係知識へのリンクが張られる。物質/現象概念がもつ属性ごとに存在し、各々 ID と定義式スロット、数量間関係スロットを持つ。定義式スロットにはその属性の定義を表す数量間関係知識へのリンクが、数量間関係スロットにはその属性が関係する式をもつ数量間関係知識へのリンクが張られる。

(4) 数量間関係知識

数量間関係知識は、知識毎に ID と式スロットを持ち、式スロットには物質/現象概念の属性の数量間関係を表す式が書き込まれる。数量間関係知識は以下の3つのタイプに分類される。

- ・ 特定の物質が内包する属性について適用可能
- ・ 特定の現象が生起した際、その現象に関与する物質の属性について適用可能
- ・ 特定の属性について適用可能

それぞれのタイプの数量間関係知識は物質に関わる知識、現象に関わる知識、または属性に関わる知識からリンクされており、リンクされていればその対象にその数量関係知識を適用可能である。

3.4 問題表現の解釈と問題解決

(1) クエリー処理

クエリー処理は制御ルーチンから起動され、問題データベース内のクエリーのひとつを処理対象として受け取る。図1の問題表現文法には、問題、物質、現象、物質制約表現、現象制約表現の5種類のチャートが含まれる。各チャート中のトークン(問題表現文法の構文図の円形の記号)を読み込んだ際に、それぞれのトークン毎に定められた規則に従って解析を行う。処理の概要は以下の通り。問題チャートを起点として各パスを通過しつつ、WM にクエリーに書かれた情報をフレーム形式で記述して

ゆく。「物質」のチャートを通り終わった際には、そこに書かれた制約を踏まえて、WM 上に物質概念インスタンスを生成する。このとき、この物質概念に対応する物質概念知識からリンクされた数量間関係知識を検索し、生成した物質概念インスタンスに関する数式に具体化した上で、WM 上に書き込む。「現象」のチャートを通り終わった際には、その現象に関する制約が読み取れるので、まずこれを WM 上に書き込む。この制約から、上述の化学現象知識を用いて化学現象のシミュレーション(後述)を行い、問題中に陽には記述されていない情報を補って現象全体を WM 上に再現する。またこのとき、ここでシミュレーションに用いた化学現象知識からリンクされた数量間関係知識を検索し、生成した現象に関する数式に具体化した上で、WM 上に書き込む。

(2) 化学現象シミュレーション処理

化学現象のシミュレーション処理の概要は以下の通りである。詳細については[Ueda2007]に譲る。

- (i.) クエリー処理の結果 WM に設定された化学現象の初期常態に関する情報を読み取り、これと知識ベース中の各化学現象知識の初期スロットを比較して一致するものを検索
 - 該当する化学現象知識があれば ii へ、なければ終了
- (ii.) i にて該当した化学現象知識が持つ初期状態、プロセス、終了状態スロットに格納されている状態知識をインスタンス化して、WM 上に状態フレームを作成する。
- (iii.) i に戻り、次に生起する現象の再現を行なう。

(3) 求解処理

- (i.) クエリー中の問題チャートにて解として要求されている物質概念フレームに対応するインスタンス物質フレームに着目する。
- (ii.) i にて着目したインスタンス物質フレームが持つ属性のうち、解として要求されている属性の値を参照する。
 - 値が既に具体化されている場合はその値を解とする。値が未知の場合は iii へ。問題タイプ①のように、物質や現象の名称が解になる場合にはこの時点で解が得られる。また計算の必要がない属性値についてもこの時点で解が得られる。
- (iii.) 求めるべき数量概念を含む数量関係式を式 WM から探索する。
 - 該当する式が存在する場合、求める概念以外の項について既に WM 上で値が具体化されていればそれを代入し、具体化されていない場合は再帰的に iii の処理を行う。全ての項の値が代入できたら、計算を行い、その結果を解とする。代入できない項がある場合には、その数量関係式は問題解決に使えないので、別の式を検索する。
 - 該当する式が存在しない場合、その数量概念を求める処理は失敗となる。

3.5 問題解決結果の利用

以上の方法で得られた問題の解答および問題解決プロセスの情報を用いて、解法の説明文を生成するユニットを構築している[岡田 2008]。本稿では詳細は略すが、シミュレーションにより再現された化学現象の過程と計算過程の説明をベースとし、教師が設定した問題の学習テーマや、各学習者の学習状況を踏まえた補足説明を加えた説明文を生成することができる。図 2 で示した問題について、システムが解いた結果から生成した説

明文の例を図 4 に示す。冒頭部分ではシミュレーションの結果再現された化学現象に基づいて反応式を生成している。続いてその反応を前提に成立する数量間関係知識を説明している。その後、求めるべき値を計算する手続きを、求解処理の結果を踏まえて説明している。

この問題において生起する反応の化学反応式は、
 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
 各物質の係数より、この反応は、
 物質質量 $\text{H}_2 : \text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 2 : 1 : 2$
 で反応する。

まず、問題中の水素の質量は 1.5g である。
 次に、水素のモル質量は 2 である。
 ここで、水素の物質量を x とおくと、
 $x = \text{質量} \div \text{モル質量} = 1.5 \div 2 = 0.75$
 以上より、水素の物質量は 0.75mol である。

上で求めたとおり、問題中の水素の物質量は 0.75mol である。
 次に、化学反応式より、水素と水は 1:1 で反応することが分かっている。
 ここで、水の物質量を x とおくと、
 $x = \text{水素の物質量} \times \text{係数比} = 0.75 \times (1/1) = 0.75$
 ※なお、この式は水素 1mol から、水 1mol が生成することを表している。
 以上より、水の物質量は 0.75mol である。

上で求めたとおり、問題中の水の物質量は 0.75mol である。
 次に、水のモル質量は 18 である。
 ここで、水の質量を x とおくと、
 $x = \text{物質量} \times \text{モル質量} = 0.75 \times 18 = 13.5$
 したがって、水の質量は 13.5g である。

図4 解法説明文生成例

4. まとめと今後の課題

本稿ではシステムが解釈可能であり、かつ人間の直感にも沿った構造を持つ問題表現文法を開発するとともに、これに基づいて記述された問題を解く機構の構築方法を示した。今後はこの文法に基づく問題記述を支援するオーサリングツールの開発を行なう予定である。

参考文献

- [数研出版 2002] 高等学校化学 I, 数研出版, 2002.
 [啓林館 2003] ジャイロ基本問題集化学 IB, 啓林館, 2003.
 [文英堂 2003] シグマ基本問題集化学 I, 文英堂, 2003.
 [Ueda2007] T.Ueda, R.Nanko, T. Konishi, Y. Itoh: Representation of Chemical World Model and Problem Solving Process for Intelligent Educational System of High School Chemistry, ICCE2007, Supplementary Proceedings: WS/DSC Vol.1, pp.117-122, 2007.
 [岡田 2008] 岡田泰明, 小西達裕, 伊東幸宏: 問題の解法及び化学知識の理解を支援する説明生成器の構築, 教育システム情報学会 第 2 回学生・院生研究発表会資料, 2008.