

# デザイン創造過程論 (3)

## —類推—

- 類推の理論とモデル
- 構造写像理論の実証
- 具体的な研究の例

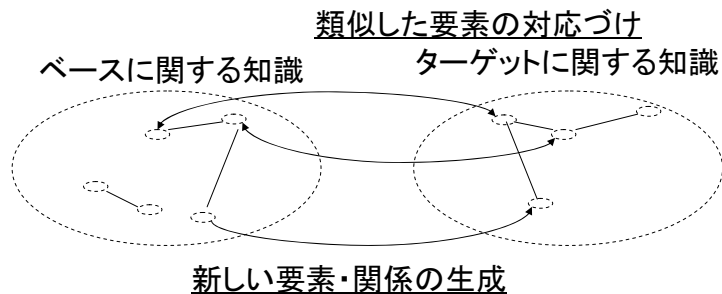
## 類推 (analogical reasoning) とは

- 一般的に
  - 既知の事例を対応づけることで、直面する状況に関する考えを得ること
- 例
  - 従来の研究を調査し、自分の研究についてのヒントを得る
  - 昔見たテレビドラマを思い出し、今見ている映画の結末を予測する
  - 例題を参照することで、数学の問題を解決する
  - 過去の判例を基に、自分の立場を正当化する

2

## 類推とは

- 類推に関与する事物
  - 直面する事物: ターゲット
  - 既知の事物: ベース



類似性に媒介された推論

## 類推のプロセス

- 類推のプロセスは、4つのサブプロセスに分割可能

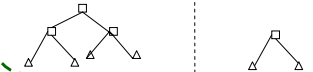
### 1. ターゲットの表現

直面する状況を心的に表現



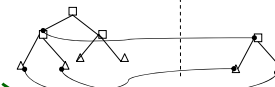
### 2. ベース検索・評価

記憶からベースを検索し類推をする上での良さを評価



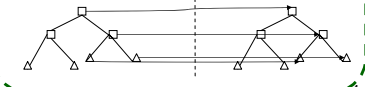
### 3. 対応づけ

ベースとターゲットで要素を対応付ける



### 4. 転写

ベースで成り立つ事柄をターゲットへコピー



## 類推の理論

### □ 構造写像理論

- Gentner (1983). Structure Mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7, 155-170
  - <http://www.psych.northwestern.edu/psych/people/faculty/gentner/papers/Gentner83.pdf>

### □ 構造写像理論の主張

- 主張1: 事物は、命題として心的に表現される
- 主張2: 類推とは2つの命題の対応である
- 主張3: 命題の対応づけは形式的に区別される
- 主張4: 心的処理のレベルと類似の区別は関係する

5

## 構造写像理論の主張1

### □ 事物は命題として心的に表現される

- 述語と引数の組み合わせによる事実・知識の表現(述語論理)

1. 太陽は黄色い = 黄色(太陽)
2. オレンジは黄色い = 黄色(オレンジ)
3. 太陽の周囲を惑星が回る = 周回(惑星, 太陽)
4. 原子核の周囲を電子が回る = 周回(電子, 原子核)
5. 太陽が惑星をひきつけることで、太陽の周囲を惑星が回る = CAUSE(牽引(太陽, 惑星), 周回(惑星, 太陽))

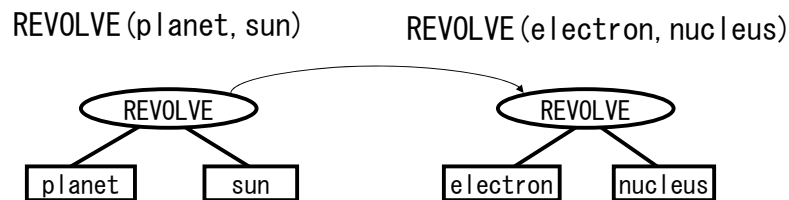
6

Gentner (1983)

## 構造写像理論の主張2

### □ 類推とは、2つの命題の対応づけである

- 対応づけにおいて、述語の共通性が媒介となる
- 述語の共通性に媒介されて、異なる物(オブジェクト)が対応関係におかれる

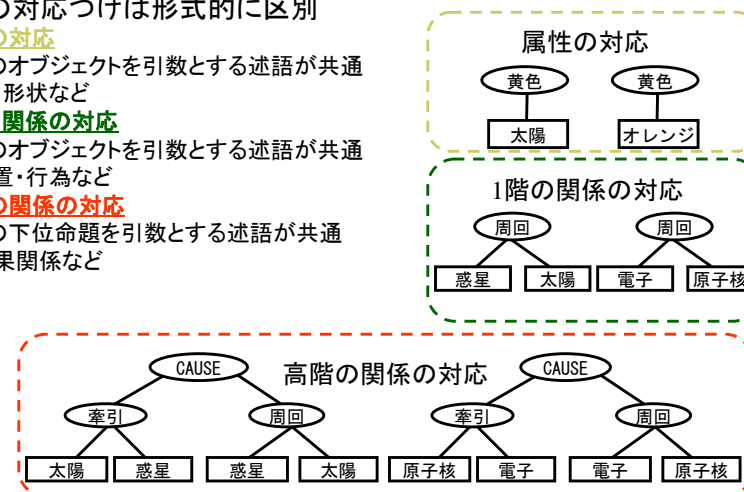


7

## 構造写像理論の主張3

### □ 命題の対応づけは形式的に区別

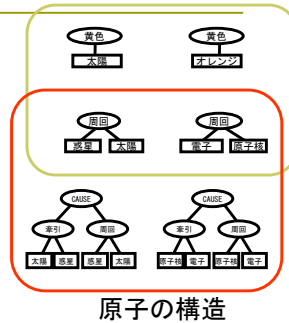
- 属性の対応**  
単一のオブジェクトを引数とする述語が共通  
色・形状など
- 1階の関係の対応**  
複数のオブジェクトを引数とする述語が共通  
配置・行為など
- 高階の関係の対応**  
複数の下位命題を引数とする述語が共通  
因果関係など



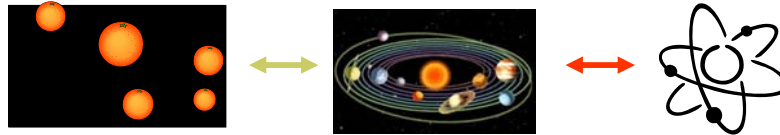
## 構造写像理論の主張3-2

### 命題の対応づけに基づく類似の区別

- 表層的類似性: オブジェクトの類似性
  - ベース・ターゲットでのオブジェクトを引数とする述語(属性・1階の関係)の共有量
- 構造的類似性: 関係構造の類似性
  - 関係的述語(1階・高階の関係)からなる命題構造の一貫した写像の大きさ(パターンの類似)



原子の構造



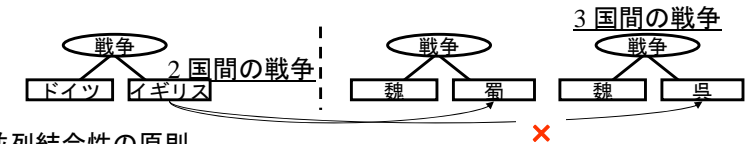
大きさの異なるオレンジ 表層的に類似 太陽系 構造的に類似

9

## 構造写像理論の主張3-2

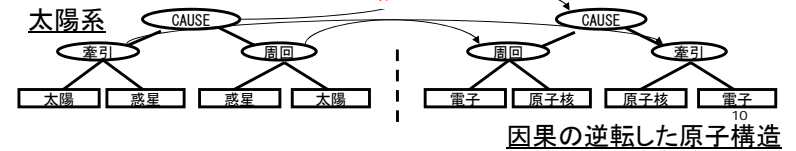
### 一貫した写像: 2つの原則を満たす対応

- 1対1対応の原則
  - 単一のベース要素を複数のターゲット要素へ対応づけない



### 並列結合性の原則

- 述語の対応づけに続き、引数を位置関係に従い対応づける



因果の逆転した原子構造

## 構造写像理論の主張4

### 類似性の程度を見積もるための計算コスト

- 表層的類似性 < 構造的類似性

### 2つの類似性は人間の類推において異なる制約に

- 通常は
  - 表層的類似性に従った簡易な推論
  - 表層的類似性に惑わされる
- 十分に注意深く考える時間が与えられた状況では
  - 構造的類似性に従ったベースとターゲットの組み合わせを類推としてよいものと判断
  - 構造的類似性から導かれる転写の結果を、妥当な推論の結果と判断

11

## 類推の計算機モデル

### 構造写像エンジン (Structure-Mapping Engine: SME)

- Falkenhiner, Forbus, and Gentner (1989). The Structure Mapping Engine: Algorithm and examples. *Artificial Intelligence*, 41, 1-63
  - <http://www.psych.northwestern.edu/psych/people/faculty/gentner/papers/FalkenhinerForbusGentner89.pdf>
  - <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/project/ai-repository/ai/areas/reasonng/analogy/sme/?N=D>

### SMEとは

- 構造写像理論において提唱された構造的類似を計算するプログラム
- ベース・ターゲットに対応する命題表現を入力とし、ベース・ターゲット間での対応を出力する

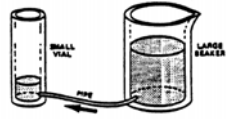
12

# 入力

## □ ベース・ターゲットの記述

- 例題: 水の流れから熱の流れを類推

### 水の流れ(ベース)



ビーカー、バイアル、パイプがある  
 ビーカーの径はバイアルの径よりも大きい  
 ビーカー内の水圧は、バイアル内の水圧よりも大きい  
 パイプを伝わってビーカーからバイアルへ水が流れている  
 水の流れは、水圧の違いを原因とする

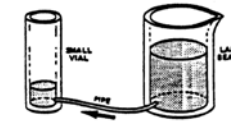
### 熱の流れ(ターゲット)



コーヒー、氷、棒がある  
 氷よりもコーヒーのほうが熱い  
 コーヒーから氷へ、棒を伝わって、熱が流れている  
 コーヒーは液体である

# 人間が類推をする場合

## 水の流れ(ベース)



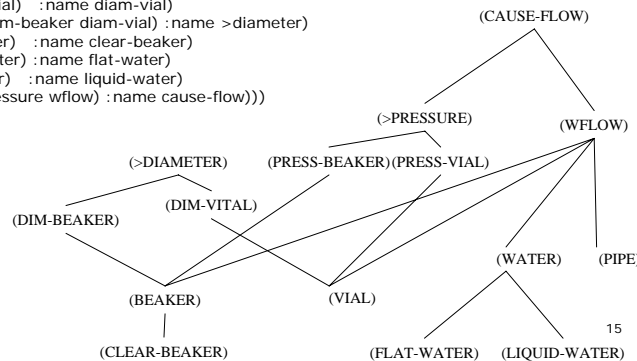
## 熱の流れ(ターゲット)



- 熱が流れることと、水が流れることと対応付けられる
- ベースにおいて流れのもとになるビーカーは、ターゲットにおいて流れのもとになるコーヒーと対応付けられる
- 同様に、流れる先にあるバイアルと氷、流れを媒介するパイプと棒も対応付けられる
- また、ベースにおいてビーカーの水圧はバイアルの水圧よりも高くなっており、ターゲットにおいてコーヒーの熱は氷の熱よりも高くなっている
- なお、ベースにおける水の流れは、水圧の違いを原因とすることがわかっている
- だから、ターゲットにおける熱の流れは、熱の違いを原因とすると考えられる

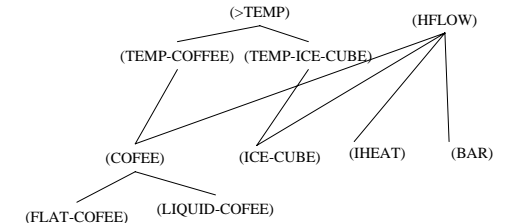
# 入力ファイル(水の流れ)

```
(defDescription swater-flow
  entities (water beaker vial pipe)
  expressions (
    ((flow beaker vial water pipe) :name wflow)
    ((pressure beaker) :name press-beaker)
    ((pressure vial) :name press-vial)
    ((greater press-beaker press-vial) :name >pressure)
    ((diameter beaker) :name diam-beaker)
    ((diameter vial) :name diam-vial)
    ((greater diam-beaker diam-vial) :name >diameter)
    ((clear beaker) :name clear-beaker)
    ((flat-top water) :name flat-water)
    ((liquid water) :name liquid-water)
    ((cause >pressure wflow) :name cause-flow)))
```



# 入力ファイル(熱の流れ)

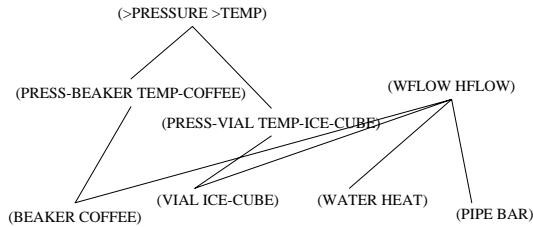
```
(defDescription sheat-flow
  entities (coffee ice-cube bar heat)
  expressions (
    ((flow coffee ice-cube heat bar) :name hflow)
    ((temperature coffee) :name temp-coffee)
    ((temperature ice-cube) :name temp-ice-cube)
    ((greater temp-coffee temp-ice-cube) :name >temp)
    ((flat-top coffee) :name flat-coffee)
    ((liquid coffee) :name liquid-coffee)))
```



# 出力1

□ Gmap(構造的に一貫した対応)

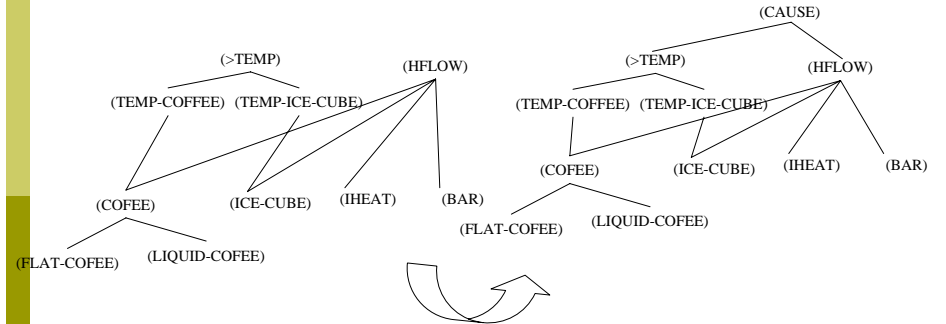
- (>PRESSURE >TEMP)
- (PRESS-VIAL TEMP-ICE-CUBE)
- (PRESS-BEAKER TEMP-COFFEE)
- (BEAKER COFFEE)
- (VIAL ICE-CUBE)
- (WATER HEAT)
- (PIPE BAR)
- (WFLOW HFLOW)
- (BEAKER COFFEE)
- (VIAL ICE-CUBE)
- (WATER HEAT)
- (PIPE BAR)



構造的類似度 (Gmapの大きさ)  
Weight: 5.9917

# 出力2

□ 推論(ターゲットへ新たな命題を追加)  
(CAUSE >TEMP HFLOW)



# アルゴリズム

□ Local matchの構成

- 述語が共通する命題を網羅的に対応づけ、リストに格納する
- 命題が対応付けられた場合に限り、引数となるオブジェクトも対応づける

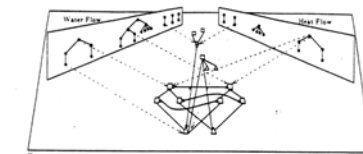
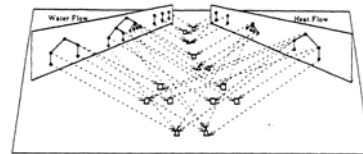
□ Gmapの構成

- 相互に一貫するLocal matchを逐次的に結合する(一対一対応に違反しない)
- 可能なGmapを全探索し、最も大きなGmapを選択する

□ 推論

- ベースに存在し、ターゲットに存在しない命題を生成

Local to Global(局所対応から全体対応へ)



# SMEの派生

Forbus・Gentnerグループ PHINEAS  
SMEを組み入れた定性推論システム

SME with greedy merge algorithms  
SMEの高速化

MAC/FAC  
SMEを組み入れたベース検索のモデル

CyclePad  
MAC/FACを組み入れた設計教育支援システム

sKEA  
SMEを組み入れたスケッチ理解のモデル

他グループ  
ARCS/ACME

HolyoakとThagardによるモデル  
SMEにニューラルネットを組み合わせたようなもの

LISA  
HolyoakとHummelによる類推のモデル  
ACMEの発展形

IAM  
Keanらによる類推のモデル  
段階的な対応付けを実現  
並列構造写像エンジン  
山路らによる拡張

批判へ応えるべく、着実に進歩

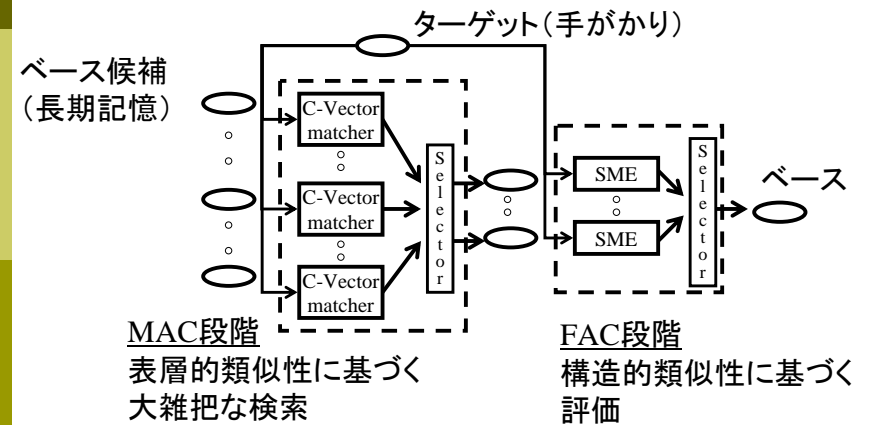
## ベース検索を含むモデル

- MAC/FAC (Many are called, but few are chosen)
  - Forbus, Gentner, and Law. (1994). MAC/FAC: A model of similarity-based retrieval. *Cognitive Science*, 19, 141-205.
  - [http://www.qrg.northwestern.edu/papers/Files/QRG\\_Dist\\_Files/QRG\\_1994/Forbus\\_1994\\_MAC\\_FAC\\_Model\\_Similarity-Based\\_Retrieval\\_CogSci.pdf](http://www.qrg.northwestern.edu/papers/Files/QRG_Dist_Files/QRG_1994/Forbus_1994_MAC_FAC_Model_Similarity-Based_Retrieval_CogSci.pdf)
- MAC/FACとは
  - 事例ベース(長期記憶)に含まれる膨大な候補から効率的に類推のベースを検索し、その後の類推処理へつなげる
  - 表層的類似による素早い検索と構造的類似による評価・対応付けを両立するモデル

21

## MAC/FACの構成

- 2段階のベース検索・評価



22

## MAC段階における表層的類似

### Solar System: Structured representation

```
(CAUSE
 (GRAVITY (MASS SUN) (MASS PLANET))
 (ATTRACTS SUN PLANET))
(GREATER (TEMPERATURE SUN)
 (TEMPERATURE PLANET))
(CAUSE (AND (GREATER (MASS SUN)
 (MASS PLANET))
 (ATTRACTS SUN PLANET))
 (REVOLVE-AROUND PLANET SUN))
```

### Solar System: Content Vector

```
(AND . 1)
(ATTRACTS . 1)
(CAUSE . 2)
(GRAVITY . 1)
(GREATER . 2)
(MASS . 2)
(OBJECTS . 2)
(REVOLVE-AROUND . 1)
(TEMPERATURE . 2)
```

### Rutherford Atom: Structured representation

```
(CAUSE (OPPOSITE-SIGN (CHARGE NUCLEUS)
 (CHARGE ELECTRON))
 (ATTRACTS NUCLEUS ELECTRON))
(REVOLVE-AROUND ELECTRON
 NUCLEUS)
(GREATER (MASS NUCLEUS)
 (MASS ELECTRON))
```

### Rutherford Atom: Content Vector

```
(ATTRACTS . 1)
(CAUSE . 1)
(CHARGE . 2)
(GREATER . 1)
(MASS . 2)
(OBJECTS . 2)
(OPPOSITE-SIGN . 1)
(REVOLVE-AROUND . 1)
```

- dgroupからContent Vectorを構成
- ベクトル間での内積を計算
- 構造を反映しないフラットな類似
- 述語の数え上げのみですむため、計算処理は早い

23

## MAC/FACの予測

- 記憶から検索されるベースのほとんどはゴミ
  - 記憶検索における表層的類似の支配性
- 検索されたベースを選ぶときにのみ、構造の処理が可能になる
  - ベースの評価における構造的類似の支配性

24