

# 言語進化の構成論

橋本敬

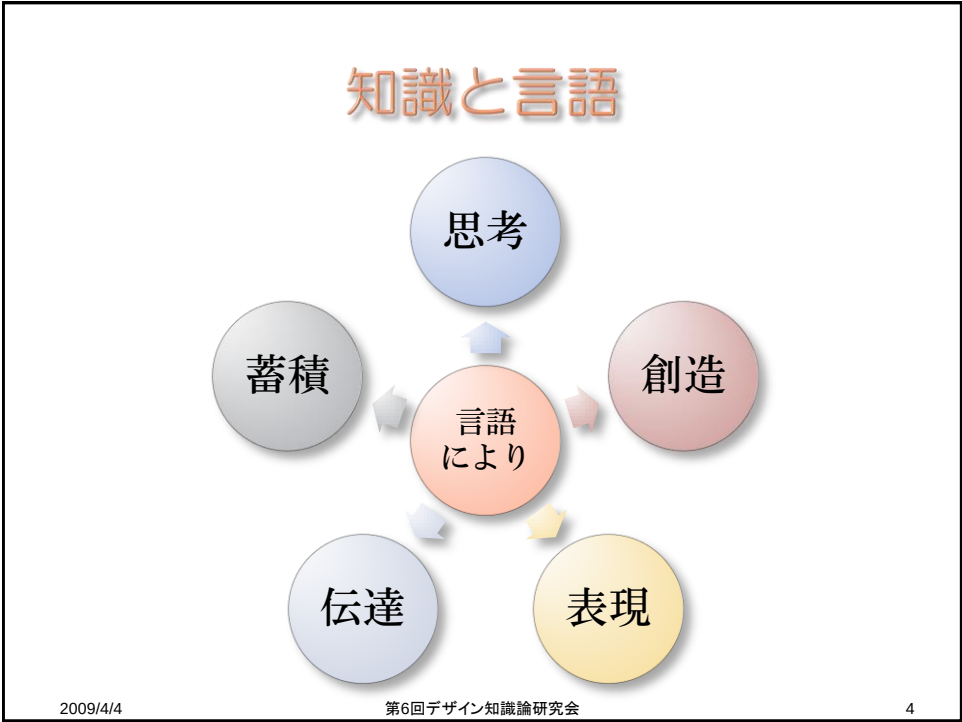
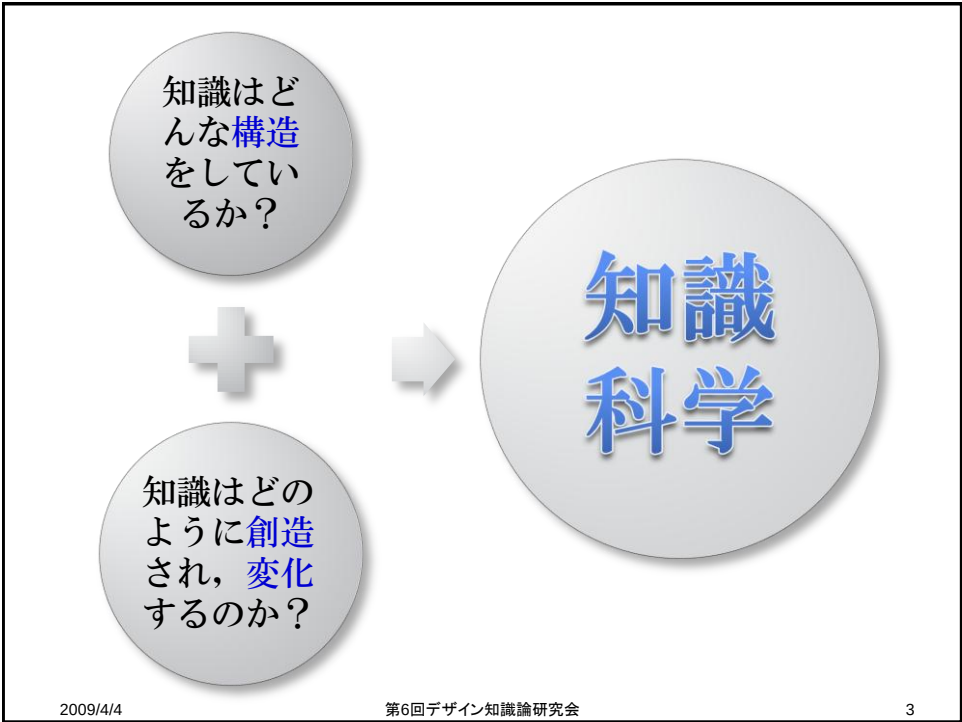
hash@jaist.ac.jp

北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST)

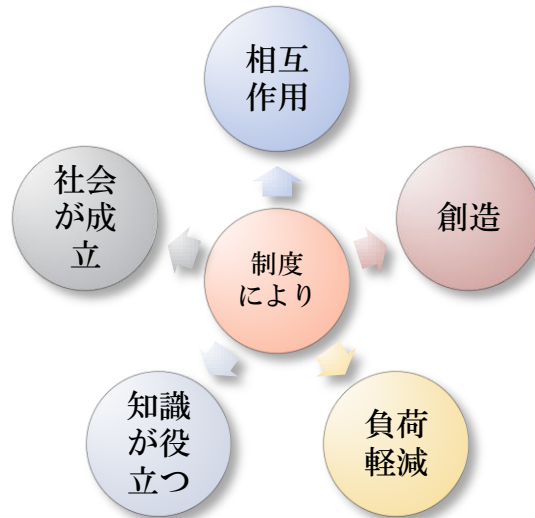
知識科学研究科

## アウトライン

1. 知識科学，複雑系
2. 言語の起源と進化
3. 構成論的アプローチ
4. 文法化のシミュレーション
5. 言語進化から創造性へ
6. まとめ



## 知識と制度

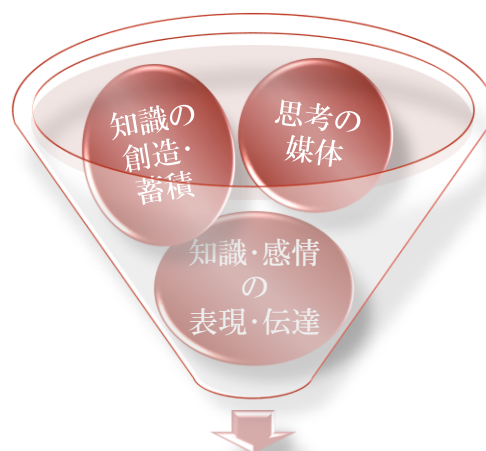


2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

5

## 言語の起源・進化



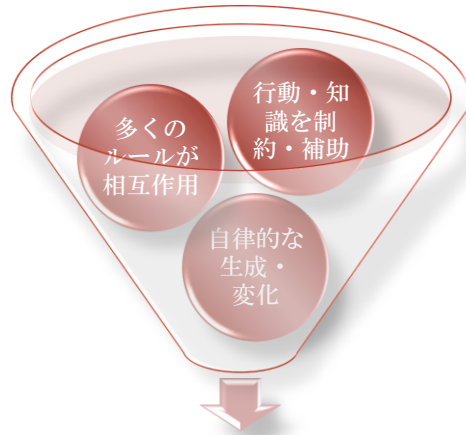
どうやってこんな言語をつかうようになったのだろう？

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

6

## 制度の生成・維持・変化



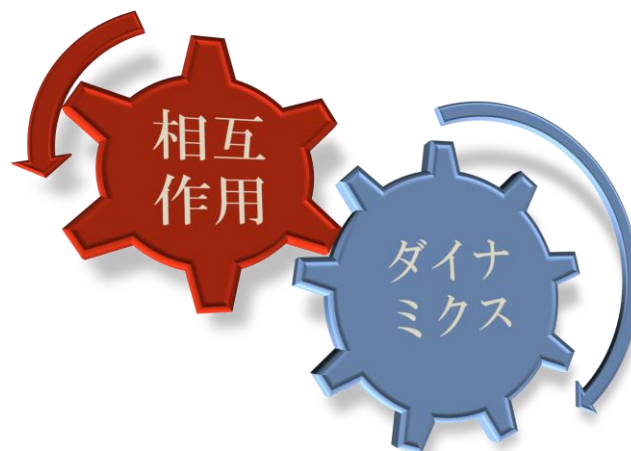
どうやってそんな**制度**ができたのだろう？

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

7

## 複雑系



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

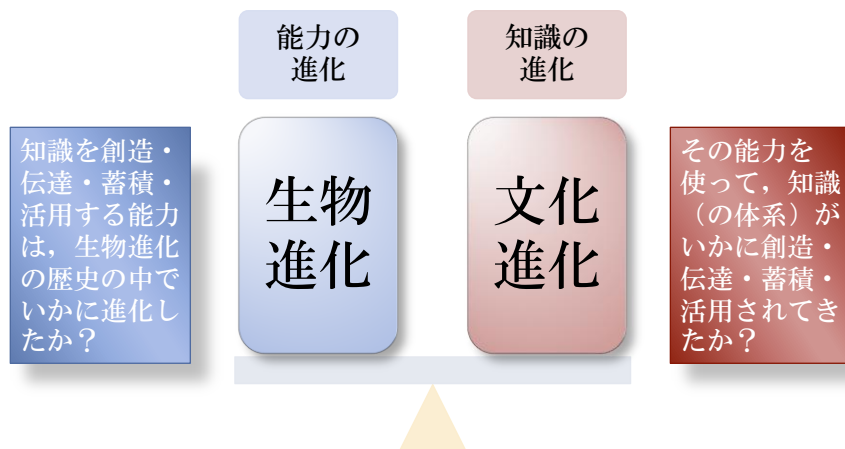
8

## 複雑系と三つの分離不可能性

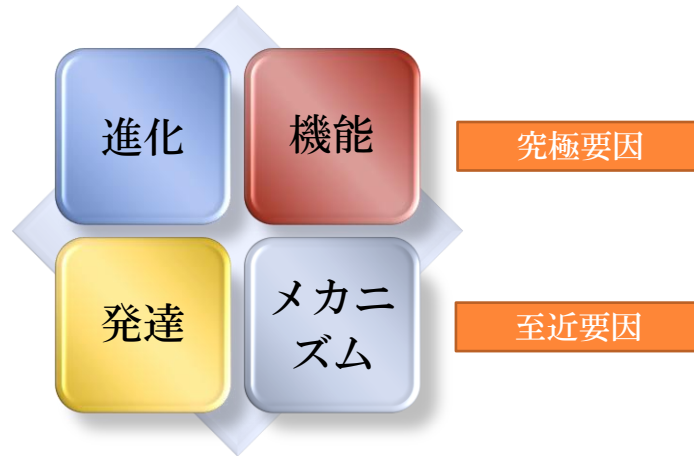
- ▣ オペレータとオペランドの分離不可能性
  - ルールダイナミクス
- ▣ 全体と部分の分離不可能性
- ▣ 観測者と観測対象の分離不可能性

(橋本, 2008a; Hashimoto et al, 2008)

## 進化知識論



## ティンバーゲンの4つの問い



(Tinbergen, 1973)

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

11

## 4つの問いの対象を拡張

- これは、生物の行動について求められる説明
  - ティンバーゲンは動物行動学の祖の一人
- 人間という生物の行動
  - 言語コミュニケーション, 倫理・道徳, 制度形成, 組織構築, 知識創造, ...
- 社会・組織・知識そのものに対し, この4つを問いかけるのも面白いのではないか

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

12

## 進化認識論

- 擬合理装置 ratiomorphic apparatus
  - 自分たちと環境のconsistentな結合
  - Autopoieticなりアリエーを構成
- 人間は擬合理を越えた合理・非合理 rational&irrational を持つ
  - なぜ世界はこうなっているのか、なぜ自分はそう考えるのか、というmetaな、self-referentialな問いに対する答え方
  - 擬合理装置の性質を引きずっているはず
- この進化的起源を問うこと
  - カントのa priori→進化のa posteriori

(Wuketits, 1990)

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

13

## 人間言語の特徴

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 記号システム               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 象徴性, 多様性, 超越性</li> </ul> </li> <li>□ 統語システム               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 合成性, 二重分節, 再帰</li> </ul> </li> <li>□ 音声システム               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 音素の弁別, 発声</li> </ul> </li> <li>□ 社会的認知               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 他者の「心を読む, 操作する」</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 文化伝達、学習               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 生得的能力+学習によるルールを獲得</li> <li>▪ 臨界期</li> </ul> </li> <li>□ Open-ended               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 無限種類の文を生成・理解</li> <li>▪ 創造性</li> <li>▪ 安定性と変化可能性</li> <li>▪ 共有性と個別性</li> </ul> </li> </ul> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

2009/4/4

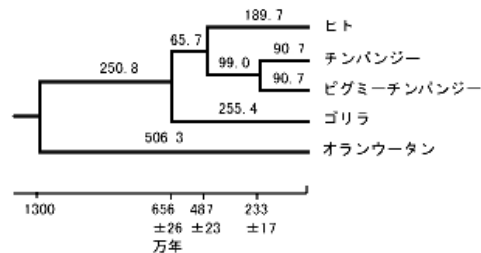
第6回デザイン知識論研究会

14

## 言語の起源と進化

### □ このような特徴を持ったコミュニケーションシステム

- ヒトだけのようだが、本当にそうだろうか？
- いったいどうやって言語ができたのか？
- いつできたのか？
- はじめの言語はどんなものだったのか？
- どうやっていまのような言語になったのだろうか？



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

15

## 言語の起源と進化という問い

### □ 言語起源 → 生物進化

- 言語を持たない状態から言語を持つ状態への変化は、いつ、なぜ、どのようにして起きたのか？
- 言語を使えるようになる**身体的・認知的能力**はいかに進化したのか？

### □ 言語進化 → 文化進化

- 言語は、最初の状態から、なぜ、どのようにして**複雑化・構造化**して今に至っているか？

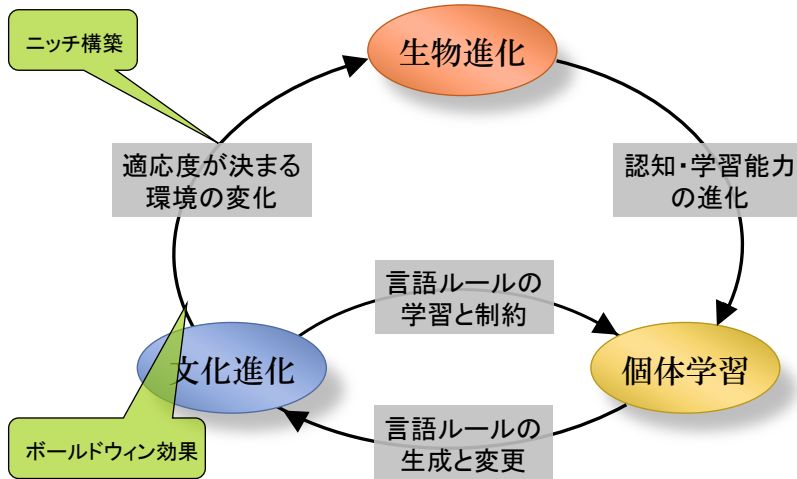
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

16



## 言語進化のDouble Loop Dynamics

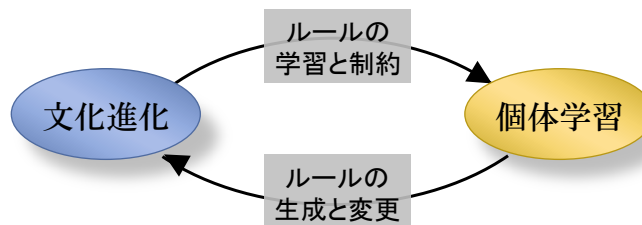


橋本敬，言語進化とはどのような問題か？～構成論的な立場から，第18回日本人工知能学会AIレクチャ（CD-ROM），2004  
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

17

## ルールダイナミクス



□ ルールに基づいた行動を通してルールそのものが変化する

- オペレータとオペランドの分離不可能性
- 知識を得る・創造する基盤となる知識がある
- 新たに得た・創造した知識は，基盤となる

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

18

## 三つの適応的变化

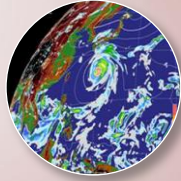
- ▣ 時空間スケールが異なる三つの適応的变化が相互作用するダイナミクス
  - 生物進化 → 遺伝子に働く
  - 個体学習 → 脳・神経系で働く
  - 文化進化 → 集団・コミュニティで働く
- ▣ レベル（部分・全体）の分離不可能性

## 構成的アプローチ

- ▣ 対象をつくって動かすことにより理解しようとする科学的方法論
  - コンピュータシミュレーション、ロボット、生体分子など
- ▣ なにをどう理解するのか
  - 現象の模倣ではなく、裏にある本質・必然
  - 起源と進化
    - ▣ 実証的観察が困難な現象
    - ▣ 歴史性・一回性をもつ現象
    - ▣ 理解できないくらい複雑なものを作るというパラドックス
  - 仮説検証・仮説生成

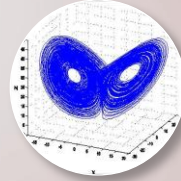
Hashimoto, et al., 2008, Evolutionary Constructive Approach for Studying Dynamic Complex Systems, *Recent Advances in Modelling and Simulation*

## 2種類のシミュレーション技法



### リアリスティック・シミュレーション

- 地球シミュレータ, システム生物学の細胞シミュレーション, マルチスケールシミュレーション



### 構成的シミュレーション

- ローレンツモデル, チューリングパターン, チューリングマシン, フォンノイマンの自己増殖オートマトン, レスラー系, 結合写像系

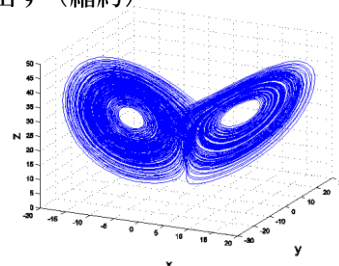
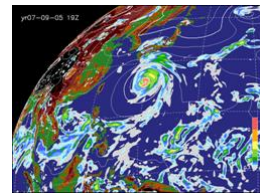
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

21

## ローレンツ・モデル

- 気象の理解のしかた
  - 地球シミュレータ (Sato, 2004)
  - ローレンツ・モデル (Lorenz, 1963)
- ローレンツ・モデルでは
  - 現象→ナビエ・ストークス方程式→モード展開→主要な3モードを抜き出す(縮約)
- 天気予報はできないが、
  - カオス(予測不可能性)の発見
  - なぜ予報ができないかを理解
  - **カオスの本質的メカニズム**  
(引き延ばしと折りたたみ)



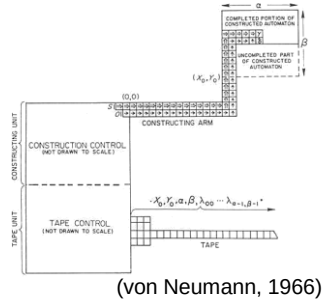
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

22

## ノイマンの自己複製オートマトン

- 自己複製
  - 実際の細胞がどうやって自己複製するか
  - どのような論理的構造が十分条件か
- 万能工作機+記述+記述複製機
  - 生命の特徴のひとつは機械によっても可能であることを、その機械を構成することで証明
- 構成過程で以下のことを発見
  - 自己複製機械は工作機、その記述、記述複製機を持つべき
  - 記述に含まれる情報は、解釈される・されないという二通りで使われるべき
    - DNAの発見により実証
- 論理的（情報）構造という観点から生命の本質的問題を理解



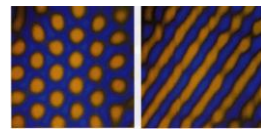
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

23

## チューリング・パターン

- 形態形成
  - 体軸形成のタンパクを追跡
  - チューリング・パターン (Turing, 1952)
- Morphogenという仮想的化学物質の相互作用
  - 具体的現象がないところからモデルを構成
- 一様状態から空間パターンが生じる
  - Morphogenがどのような性質を持つべきか
  - どのような相互作用になっているべきか
  - どんな不安定性・分岐が生じるか
- Cf.チューリングマシンも同じようなところがある



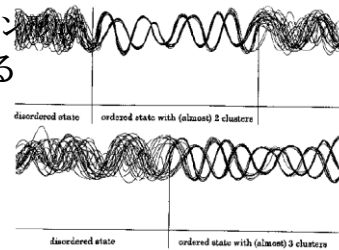
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

24

## カオス結合系

- 多自由度カオスを理解したい
- 1自由度カオスをたくさん結合させて多自由度カオスを構成 (Kaneko, 1986)
  - なにかの模型ではない（なので「モデル」とは言えない）
  - 研究対象自体の創造
- 多自由度カオス系で起きることをたくさん発見
  - 時空カオス、カオスの遍歴、パターン
- それが起きる論理を明らかにする



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

25

## 構成的モデル化

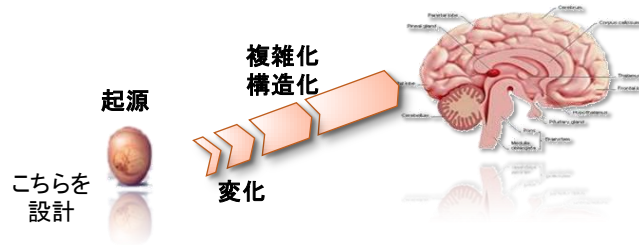
- 対象の**本質的**（**と思える**）**部分**だけを取り出したモデルを構成
  - 個別具体的な現象をリアリスティックにモデル化するわけではない
  - ミクロ構造の詳細ははぶかれる
  - なんでもいいから思いついたモデルを作るわけでもない
- **その中で**
  - **必然的**に起きることはなにか？
  - どのような**論理**で対象としている現象が起きるのか？
  - 対象としている現象がおきる**十分条件**はなにか？

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

26

## 進化的構成的方法



- ▣ 理解したい対象をはじめてから作ろうとするのではなく、その**起源となるシステム**を用意
- ▣ そのシステムが自ら**変化するプロセス**を組み込む
  - 複雑すぎてわからないものを作ることはできないというパラドックスからの解放
  - **変化のパス**も観測できる

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

28

## 起源と進化の理解

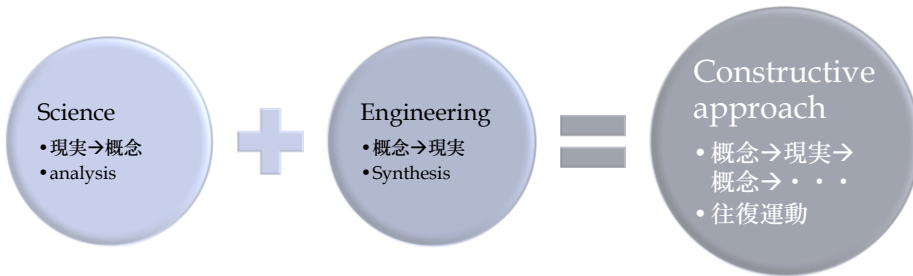
- ▣ パラメータや初期状態、あるいは、変化のアルゴリズムを変えて
  - どのような条件により得たい状態を実現できるのか
  - 対象となるシステムが複雑化する過程を観察
  - 実際には見られないあり得る状態についての知見
- ▣ **起源と進化の理解**に有効なアプローチ
  - 実証的・経験的観察が難しい
  - 歴史性・一回性

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

29

## 理解の様式

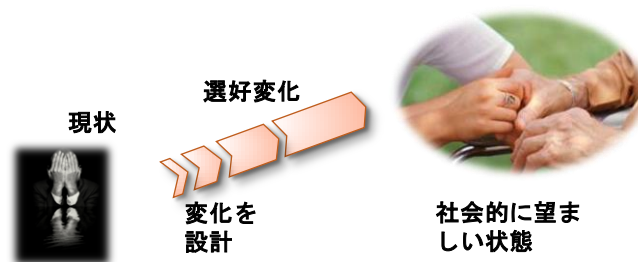


2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

31

## 進化主義的制度設計



- 実現したい社会状態を直接デザインするのではなく、そこへ自然に至るように**制度をデザイン** (cf. 西部, 2006)
- 選好変化を考慮
  - 制度=多くの人に共有されている思考・行動の習慣（再帰的共有信念）
  - メカニズムデザインは「行動の設計」

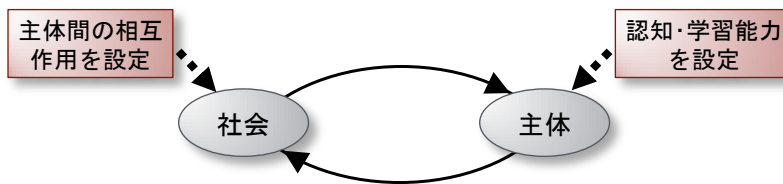
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

32

## 言語進化の構成論的研究

- 言語に見られる普遍的特徴に着目
- それが生じる簡単なモデルを作って、操作して、その特徴が現れる十分条件を調べる
  - どのような論理で、言語のある普遍的性質が成り立つか？
- 文法化の構成論的シミュレーション



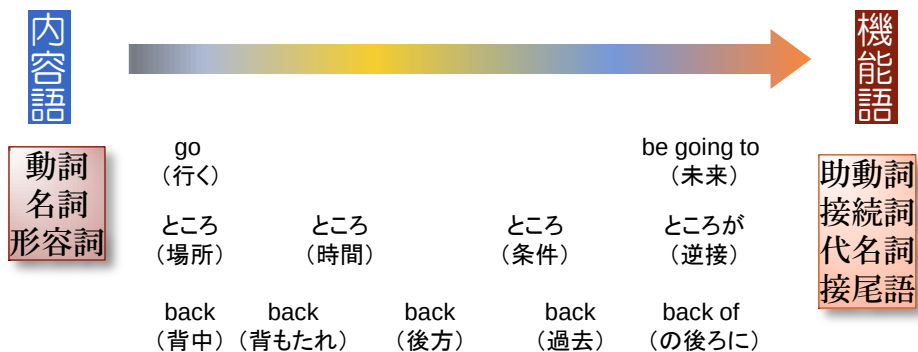
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

33

## 文法化

- **内容**をあらわすことばが文法的**機能**をもつようになる意味変化 (Heine, 2005)



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

34



## 文法化の特徴

- 普遍性：世界中の言語で同様の変化
  - 一方向性：機能語から内容語への変化はあまりない（具体から抽象への方向性）
- 人間の認知傾向の普遍性を示唆

それはどんな認知傾向（メカニズム）か？

- **言語進化との関連**
  - 言語は文法化プロセスにより複雑化した (Heine&Kuteva, 2002)
  - 初期言語の文法を再構成できる (Hurford, 2003; Heine & Kuteva, 2007)

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

35

## 再分析と類推

- 「再分析」と「類推」の現象が文法化に必須 (Hopper & Traugott, 2003)

|      |                        |                           |
|------|------------------------|---------------------------|
| 第1段階 | be going<br>進行 方向を示す動詞 | [to visit Bill]<br>目的を表す節 |
| 第2段階 | [be going to]<br>時制    | visit Bill<br>行為を表す動詞     |
| 第3段階 | [be going to]<br>時制    | like Bill<br>動詞           |

再分析  
reanalysis

「区切り」  
が変わる

類推  
analogy

規則の適用  
範囲が広がる

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

36

## 認知能力

言語知識（文法）を汎化するための学習 (Hashimoto & Nakatsuka, 2006)

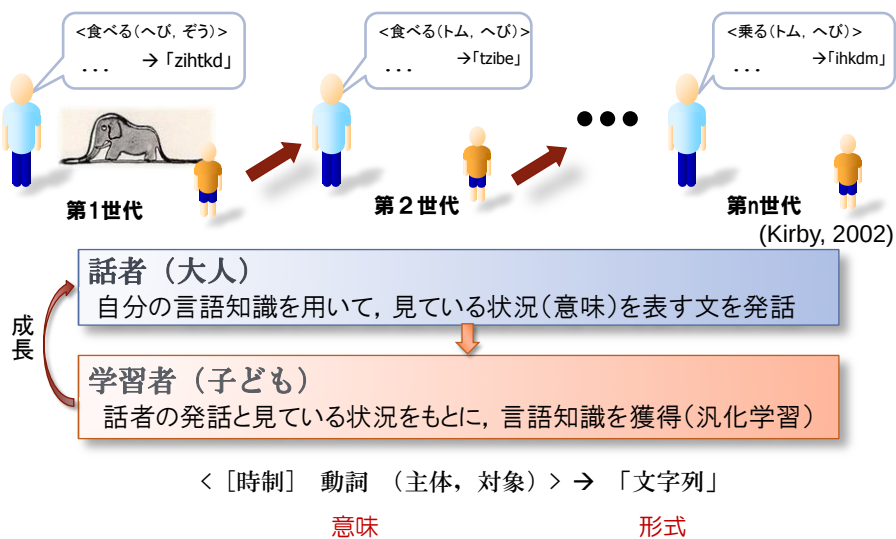
- 再分析
  - 文の区切りを決定し，文の構造を把握する能力
- 言語的類推
  - 文法規則をそれまで適用されていなかった形式に拡大適用できる能力
- 認知的類推
  - 形式間，および，状況間に類似性を見いだす能力

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

37

## 繰り返し学習モデル



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

38

## 言語知識

### □ 確定節文法（文脈自由文法）

- 意味（状況）と形式（発話）を対応させるルールセット

ex.  $S/\text{eat}(\text{snake}, \text{elephant}) \rightarrow \text{zihtkd}$   $G1$  (Kirby, 2002)



$\text{eat}(\text{snake}, \text{elephant}) \rightarrow \text{zihtkd}$

意味

発話(形式)

ex.  $S/\text{eat}(x, \text{elephant}) \rightarrow z N/x \text{tkd}$   $G2$   
 $N/\text{snake} \rightarrow \text{ih}$

↑  
カテゴリ

「<snake> というカテゴリNに属する意味は「ih」という形式で表される」

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

39

## 学習アルゴリズム

**Chunk** ある2つのルールにおいて、意味と形式のそれぞれの異なる部分が一部分だけであるなら、これら2つを変数を含んだ階層的なルールセットに統合する。

$S/\text{eats}(\text{tiger}, \text{sausages}) \rightarrow \text{ik}$   
 $S/\text{eats}(\text{john}, \text{sausages}) \rightarrow \text{ot}$



$S/\text{eats}(x, \text{sausages}) \rightarrow u N/x$   
 $N/\text{tiger} \rightarrow \text{ik}$   
 $N/\text{john} \rightarrow \text{ot}$

↑  
新たなカテゴリを作る

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

40

# 学習アルゴリズム

**Merge** 左辺の非終端記号だけが異なる2つのルールがあった場合、これらと同じ非終端記号を持つすべてのルールを、どちらかの非終端記号に統合する。



# 学習アルゴリズム

**Replace** あるルールの意味と形式の両方が別のルールに含まれているならば、後者を変数を含み前者を代入することができる新しいルールに置き換える。



(中塚, 2006)

## 学習操作と認知能力の関係

- 認知的類推能力
  - chunk, merge, replace の3操作すべてで前提とされている
- 再分析能力
  - 主に chunk により担われている
- 言語的類推能力
  - 主に replace により担われている

(中塚, 2006; 橋本・中塚, 2007)

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

43

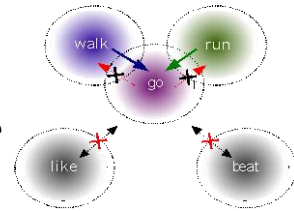
## 意味認識のバイアス

(中塚, 2006; 橋本・中塚, 2007)

### 語用論的拡張

＜行く＞という意味を表すのに、  
＜歩く＞＜走る＞を意味する語を用い  
ることができる

類似性の認識



### 共起

＜行く＞という状況は  
＜未来＞時制のことが多い

随伴性の認識



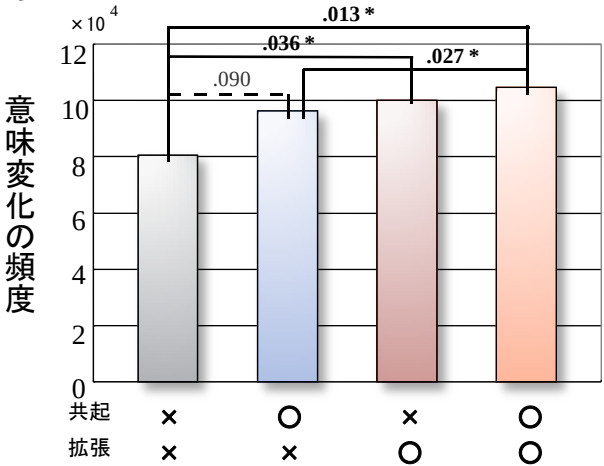
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

44

# 語用論的拡張の効果

## 意味変化が増加



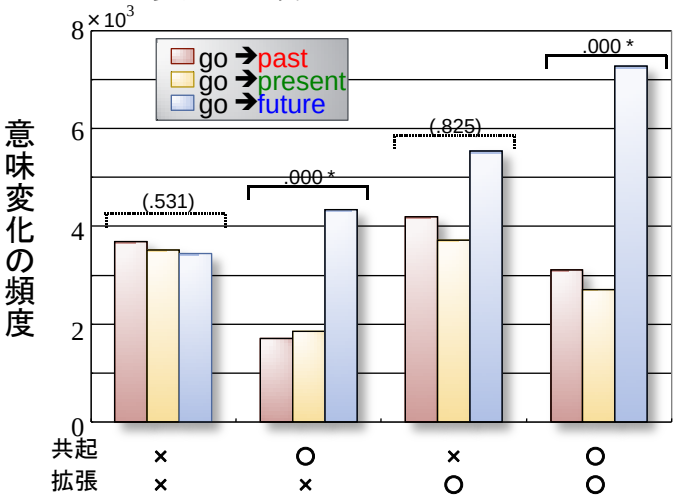
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

45

# 共起の効果

## 一方向的変化の傾向



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

46

# 認知バイアスの効果

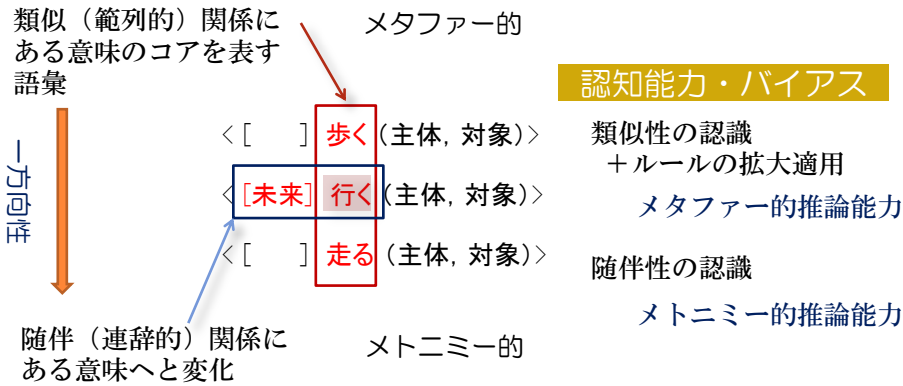
| バイアス   | 意味変化 | 一方向性                   |
|--------|------|------------------------|
| 語用論的拡張 | 増加   | <行く>←<歩く><br><行く>←<走る> |
| 共起     |      | 増加<br><行く>と<未来>        |

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

47

# 記号的関係

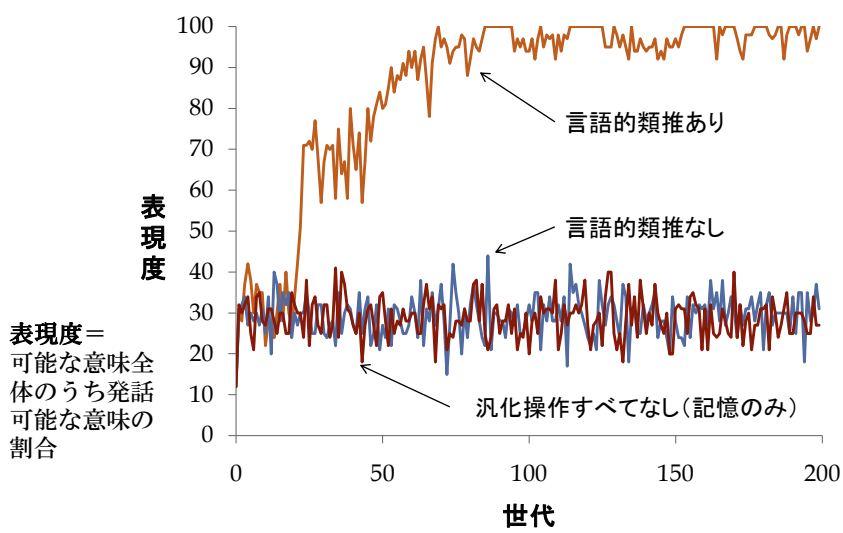


2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

50

# 言語的類推の効果

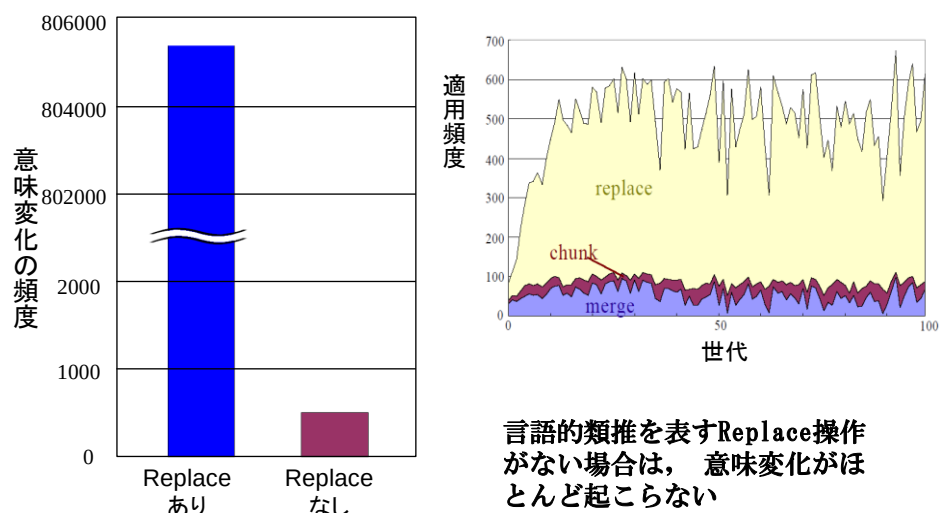


2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

51

# 言語的類推 (Replace) の効果



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

52



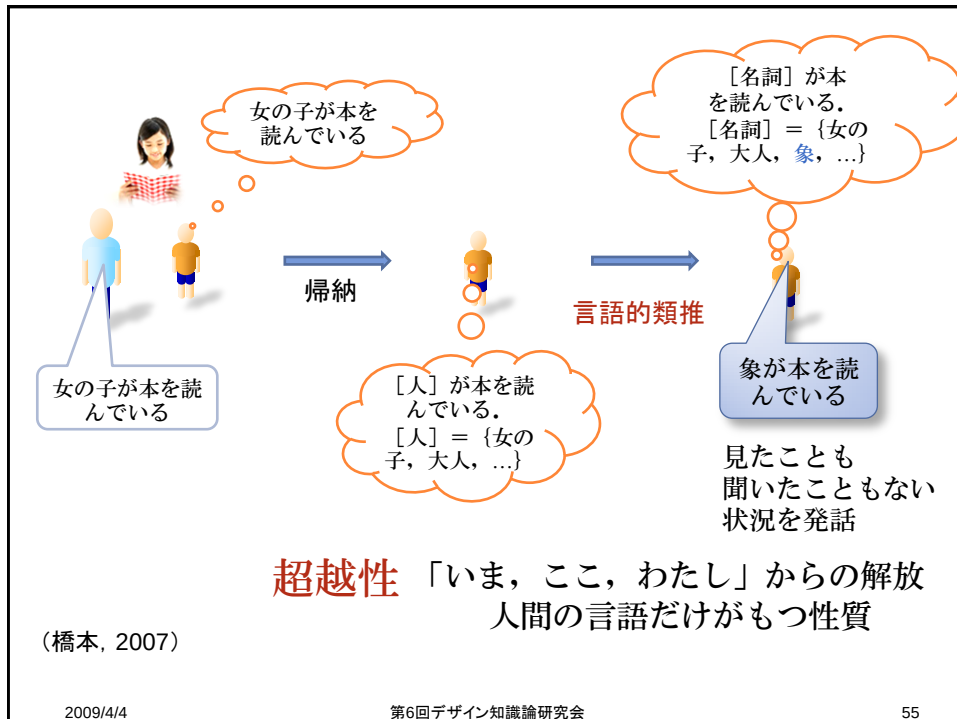
## 言語的類推の効果

- **言語的類推能力**（言語ルールを拡大適用する能力）がない場合
  - 言語知識の表現力が上がらない（汎化学習ができない）
  - 意味変化がほとんど起こらない

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

53



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

55

## 言語的類推から意味づけへ

言語的類推 → 新しい文の創造

形式レベル＝「非現実的」

＜意味づけ＞

文が意味を持つように（正当化  
されるように）する

現実と文の  
解釈を変更

創造的メタファー

現実を変更

イノベーション（ものづくり）

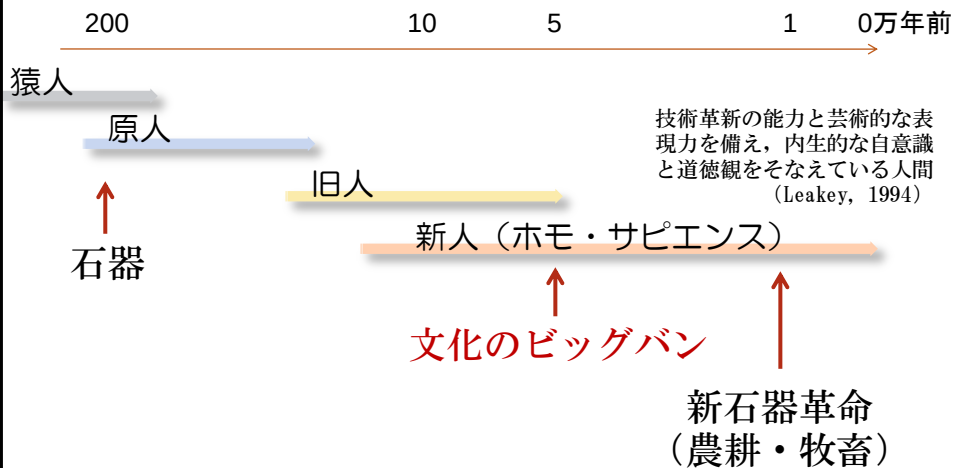
（橋本, 2009）

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

56

## 人類進化



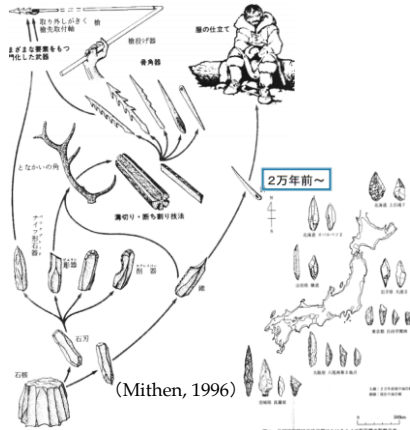
2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

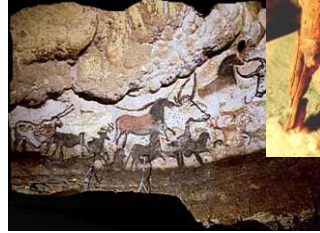
57

## 文化のビッグバン

道具（石器）の  
機能的多様化・分化  
地域的多様性



宗教・芸術



シンボル  
らしきもの

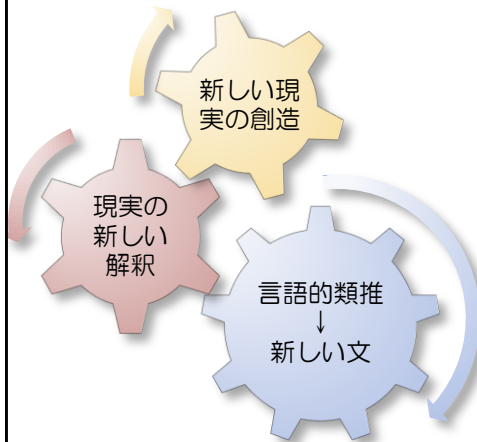


2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

58

## 言語を用いるヒトの特性



### □ 現実の多重認識可能性

- 現実が今まで理解されていたようにのみ解釈されるわけではない
  - 言語を獲得することの効用 (Tomasello, 1999)
  - 応用行動分析による自閉症治療 (北澤, 2008)

### □ Symbol **de**-grounding and **neo**-grounding (記号飛翔&新接地<意味づけ>)

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

59

## Dynamic view of language

Almost all sentences are firstly encountered.

(橋本, 1999; Hashimoto, 2001)

For novel expressions,

✕ valid / not valid      ○ accept / not accept

Meaning of words/sentences are *created* at each communication by individual activity of *sense-making process*.

✕ Word — mapping — Meaning

○ Word ← *Sense-making process* → Meaning

Bakhtin (1920's) *individualistic subjectivism*

Language is an activity, unceasing process of creation realized in individual speech acts

Tokieda (1930's) *language as processes*

Fukaya & Tanaka (1996) *Theory of sense-making*

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

60

## 言語的ルールの性質

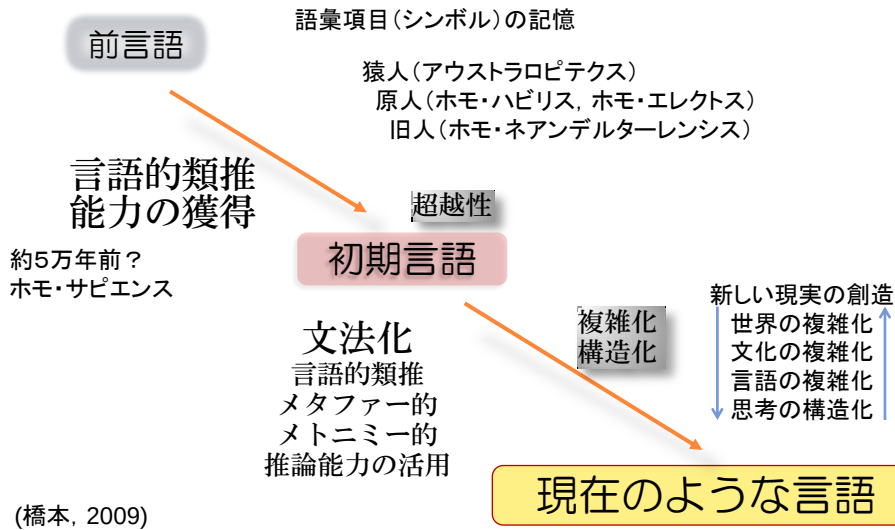
- 抽象性
  - ルールがグラウンドされすぎていると、使える状況が限定的
    - Cf. 一般的な思考の「型」、身体運動の「型」、行動のルーティン
  - De-groundingの重要性
    - 経験にGroundingした記憶
    - 汎化学習により抽象性が上がる
- モジュール性
  - ルールの一部だけを交換可能
- これらの性質により、「拡大適用」をしやすい
  - 「経験→抽象」の一方向的变化
- 議論
  - 言語を用いる以前から、想像・創造は可能だったのでは
  - 他のルールの拡大適用は？

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

61

## 言語の起源・進化に関する仮説



2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

62

## まとめ

- 知識科学，複雑系
  - 知識の構造，変化，創造
  - 複雑系：ダイナミクスと相互作用→三つの分離不可能性
  - 進化知識論：進化という目で知識を見る
    - 能力の生物進化と，その能力による文化進化
- 言語の起源と進化
  - ダブルループダイナミクス
    - 生物進化，個体学習，文化進化の相互作用
- 構成論的アプローチ
  - つくって動かす→メカニズムの理解（予測ではなく）
  - 変化を組み込む
    - 起源・進化の理解へ

2009/4/4

第6回デザイン知識論研究会

63

## まとめ

- 文法化の構成論的モデル化
  - 文法化：内容→機能（一方向的意味変化）
  - 一方向的意味変化を生み出す認知能力・バイアス
  - 類似性の認識（メタファー的推論能力）
    - 語用論的拡張：意味変化のsource→記号関係の拡張
  - 随伴性の認識（メトニミー的推論能力）
    - 共起＝意味変化のdestination→記号関係の変化を収束
  - 汎化・意味変化
    - 言語的類推能力（言語ルールの拡大適用）

## まとめ

- 言語進化から創造性へ
  - 言語的類推→超越性
    - 「いま・ここ・わたし」からの解放
  - Symbol de-grounding & neo-grounding
    - 新しい文→現実の新しい解釈→創造的メタファー
    - 新しい文→新しい現実の創造→ものづくり
- 5 万年前の文化のビッグバン
  - 新しい現実の解釈と創造が起きたとき？
    - 言語の起源か？

## ご静聴ありがとうございます

- hash@jaist.ac.jp
- <http://www.jaist.ac.jp/~hash/>
- 中塚雅也君（元院生），金野武司君（研究員）との共同研究

## 参考文献

- Kirby, S. (2002) Learning, bottlenecks and the evolution of recursive syntax. In T. Briscoe, (ed.) *Linguistic Evolution through Language Acquisition*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 173-203.
- Hashimoto, T. (2001) The constructive approach to the dynamic view of language, *Simulating the Evolution of Language*, A. Cangelosi & D. Parisi (Eds.), 307-324, Springer
- Hashimoto, 2007, Three types of undecomposabilities in complex systems, *European Conference on Complex Systems*
- 橋本敬 (1999) 動的言語観に基づいた単語間関係のダイナミクス, *認知科学*, 6 (1), 55-65,
- 橋本敬 (2004) 言語進化とはどのような問題か? ~構成論的な立場から, 第18回日本人工知能学会AIレクチャ (CD-ROM)
- 橋本敬 (2008a) 複雑系, 杉山他 (編), *ナレッジサイエンス~知を再編する81のキーワード*, 近代科学社, pp. 166-171.
- 橋本敬 (2008b) 構成論的手法, 杉山他 (編) *ナレッジサイエンス~知を再編する81のキーワード*. 近代科学社, pp. 178-181.
- 橋本敬 (2009) 言語変化の構成論的シミュレーション—文法化のメカニズムから言語進化へ, *月刊言語*, 38(2), 42-49.
- 橋本敬, 中塚雅也 (2007) 文法化の構成的モデル化—進化言語学からの考察—, *認知言語学会論文集*, 7, 33-43
- Hashimoto, T. & Nakatsuka, M. (2006), Reconsidering Kirby's compositionality model - towards modelling grammaticalization In: *The evolution of language*, Cangelosi, A., Smith, A. D. M. & Smith, K. (Eds.), pp. 415-416, World Scientific, Singapore
- Hashimoto, T. & Nakatsuka, M. (2008) Unidirectional meaning change with metaphoric and metonymic inferencing, *The Evolution of Language, Proceedings of the 7th International Conference (EVLANG7)*, A.D.M. Smith et al. (eds.), pp. 433-434, World Scientific.
- Hashimoto, T. et al., (2008) Evolutionary constructive approach for dynamic systems, *Recent Advances in Modelling and Simulation*, G.Petrone & G.Cammarata (eds.), I-Tech Books, pp.111-136.
- Heine, B. (2005) Grammaticalization. P. Strazny (ed.) *Encyclopedia of Linguistics*. Vol.1, Taylor & Francis Books, pp. 402-404.
- Heine, B. & T. Kuteva (2002) On the evolution of grammatical forms. In A. Wray (ed.), *The Transition to Language*. Oxford: Oxford University Press, pp. 376-397.
- Heine, B. & T. Kuteva (2007) *The Genesis of Grammar: A Reconstruction*, Oxford: Oxford University Press.

## 参考文献

- Hopper, P. J. & E. C. Traugott (2003) *Grammaticalization*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hurford, J. R. (2003) The language mosaic and its evolution. In M. H. Christiansen and S. Kirby (eds.), *Language Evolution*. Oxford: Oxford University Press, pp. 38–57.
- Kaneko, K. (1986), *Collapse of Tori and Genesis of Chaos in Dissipative Systems*, World Scientific, Singapore
- 北澤茂 (2008) 言語と社会性の起源～自閉症治療からの示唆～, 進化学会ワークショップ「言語の起源と進化V: 言語を支える能力の進化」における口頭発表
- Leakey, R.E. (1994) *The Origin of Humankind*, London: Weidenfeld & Nicolson.
- Lorenz, E. N. (1963), Deterministic nonperiodic flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 20, 130-141
- Mithen, S. (1996) *The prehistory of the mind : a search for the origins of art, religion, and science*, London : Thames and Hudson.
- 中塚雅也 (2006) 再分析と類推に着目した文法化のモデル構築. 北陸先端科学技術大学院大学平成18年度修士論文.
- 西部忠 (2006) 進化主義的制度設計におけるルールと制度, *経済学研究*, 56 (2), 133-146.
- Sato, T. (2004), The earth simulator: roles and impacts, *Parallel Computing*, Vol. 30, No. 12, 1279-1286
- Tomasello, M (1999) *The Cultural Origins of Human Cognition*, Harvard University Press.
- Tinbergen, N. (1963) On Aims and Methods in Ethology. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 20: 410-433
- Turing, A. M., (1952), The chemical basis of morphogenesis, *Philosophical Transactions of the Royal Society B (London)*, Vol. 237, No. 641, 37-72
- von Neumann, J. (1966), *Theory of Self-Reproducing Automata*, Burks, A. W., (Ed.), University of Illinois Press, Urbana (高橋秀俊 (訳) (1975) 自己増殖オートマトンの理論, 岩波書店)
- Wuketits, F. M. (1990) *Evolutionary Epistemology and Its Implications for Humankind*, State University of New York Press, New York. (入江重吉 (訳) (1994), 進化と知識—生物進化と文化的進化, 法政出版)