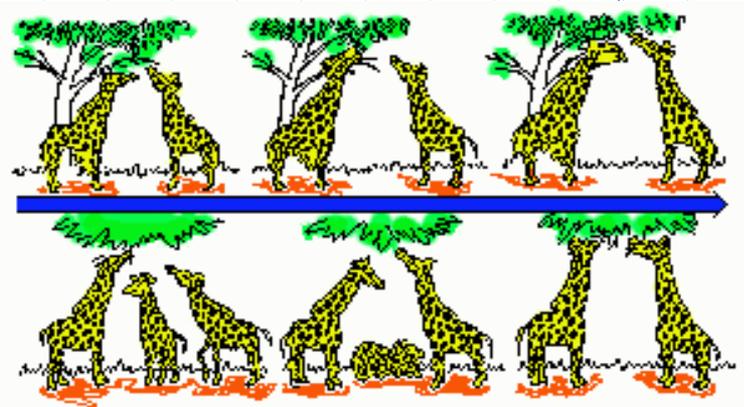


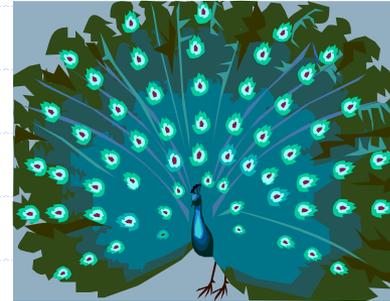
# 性選択: sexual selection

東京大学大学院  
工学系研究科  
電気系工学専攻  
伊庭齐志



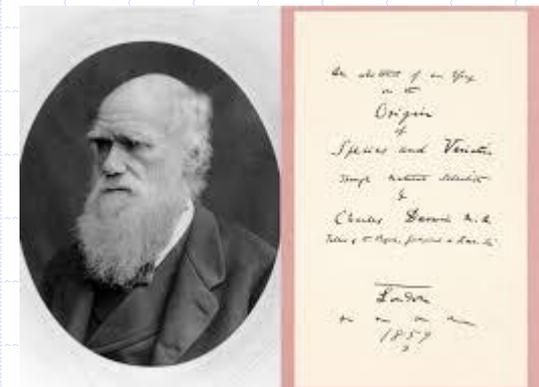
# クジャクの羽はなぜ美しい？

## ◆ クジャクの雄と雌



「クジャクの尾羽を見ると、  
いつも気分が悪くなる。」

1980年、ダーウィンが友人のエイサ・グレイ(ハーバード大の植物学者)に宛てた手紙



# シマウマの縞模様



◆ なぜ目立つ？

◆ 色に対する感覚の違い

- 昆虫は色覚あり
- 哺乳動物の捕食者(犬、猫など)は色盲が多いので、草食性哺乳類の体色は人間に対するものと異なる

◆ 標識説：雄と雌が引き合う

◆ ダーウィン説：性選択

◆ R. ウォレス説：保護色

# ラッセル・ウォレス



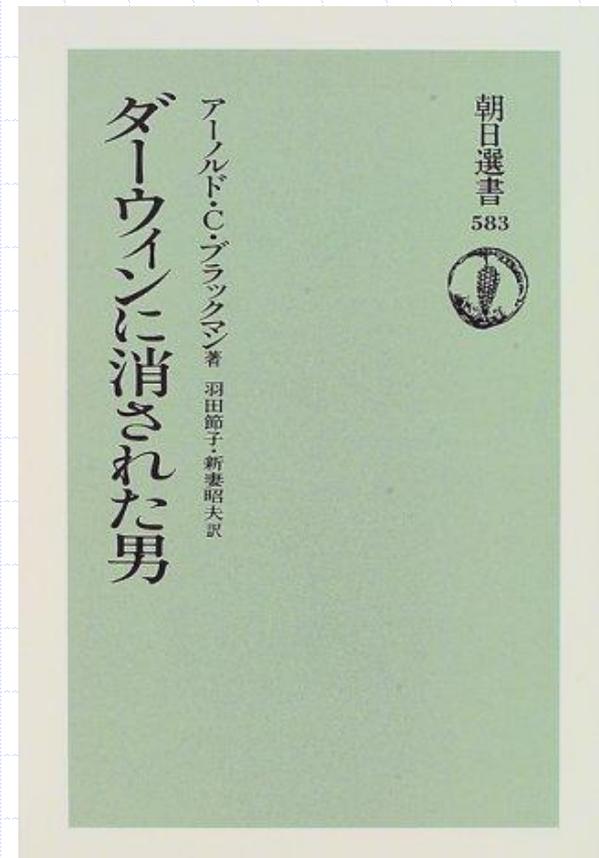
1823年－1913年

◆ ダーウィンに消された男

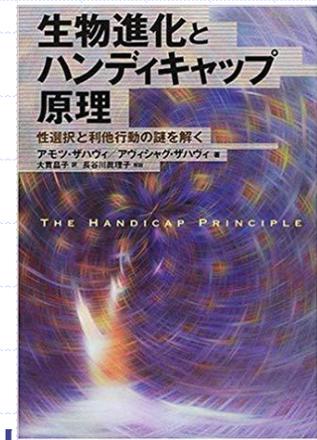
◆ インドネシア:

- ウォレス線
- 生態学的隔離線

◆ 「微妙な調整」



# ハンディキャップ理論



## ◆ アモツ・ザハヴィ

## ◆ 最近、「コスト高シグナリング理論」に拡張された

- コスト高シグナル＝性的装飾
- 適応度表示[ジェフリー・ミラー]
- 品質を広告するだけではなく、保証もする
- 偽造が困難なので、標示は相手を引き付ける

## ◆ ヒトの精神的な特徴の多くも適応度表示として進化した

- 芸術、想像力、知性、やさしさ
- 文化的産物 例: ハマーH1



# W. D. ハミルトン

メスは2倍体、オスは半数体

## ◆ 包括的適合度

- アリ
- ハチ

## ◆ ホールデン

- 八人のいとか二人の息子か。

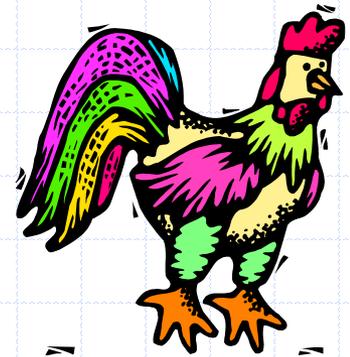
## ◆ 実験による検証

- スズメ目と寄生虫
- 雄の派手さとさえずり(6段階評価)
- 血液中の原虫・吸虫のデータとの相関

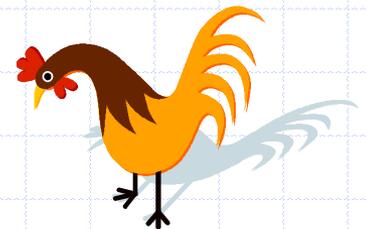


# パラサイト仮説

- ◆ 1982年 ハミルトン、ズック
  - ヒトを含むあらゆる動物は寄生虫により**進化させられた。**



- ◆ ニワトリのオスに回虫を感染させると、回虫に弱いオスはトサカや羽の色・つやが悪くなる
- ◆ その中にメスを入れると、必ずトサカや羽の色・つやのいいオスと交尾する。
- ◆ 寄生虫はヒトを進化させたのか？



# パラサイト理論：最近の研究

- ◆ 2008年 シャラー & マレー
  - 進化心理学
- ◆ 寄生虫量の高い地域ほど開放性と外向性が高い
- ◆ 集団主義 v.s. 個人主義
  - 寄生虫量と集団主義の相関が高い
  - 集団主義の国：中国、インド、中東、アフリカ
  - 個人主義の国：US, 西欧のとくにスカンジナビア諸国

# 性選択説

◆ 雌の選り好み

◆ 数学者: R.A. フィッシャー

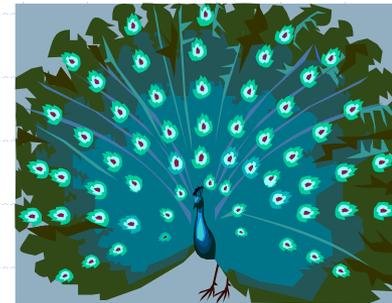
- 「自然選択の遺伝理論(1930)」

◆ ランナウェイ効果

◆ 近年、GAと人工生命による研究で確認された

# Kirkpatrickのモデル

- ◆ ♂ と ♀ とともに、 $T$ (♂の形質) と  $P$ (♀の好み) の遺伝子を持つ
- ◆ 表現型は♂ と ♀ のそれぞれに $T$ と $P$ しか現れないことに注意せよ
- ◆ ♂ :  $T_0 T_1$ 
  - $T_1$ は有害だが、華美とする
- ◆ ♀ :  $P_0 P_1$ 
  - $P_0$   $T_0$  を好む
  - $P_1$   $T_1$  を好む



# つがう確率

$$P(T_0|P_0) = \frac{a_0 t'_0}{t'_1 + a_0 t'_0}$$

$$P(T_1|P_1) = \frac{a_1 t'_1}{t'_0 + a_1 t'_1}$$

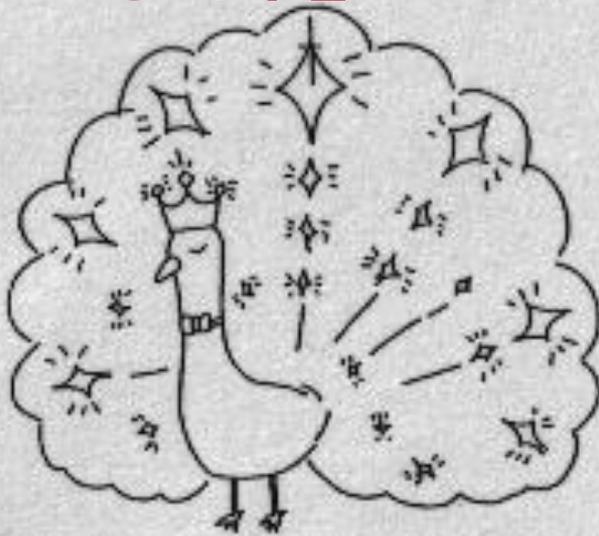
$$P(T_1|P_0) = 1 - P(T_0|P_0)$$

$$P(T_0|P_1) = 1 - P(T_1|P_1)$$

# 華美の有害さ

生き残りやすさは(1-s)倍

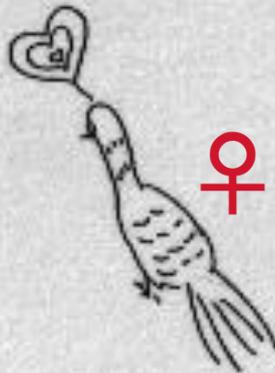
♂ : T1



♂ : T0



♀



# 平衡状態の式

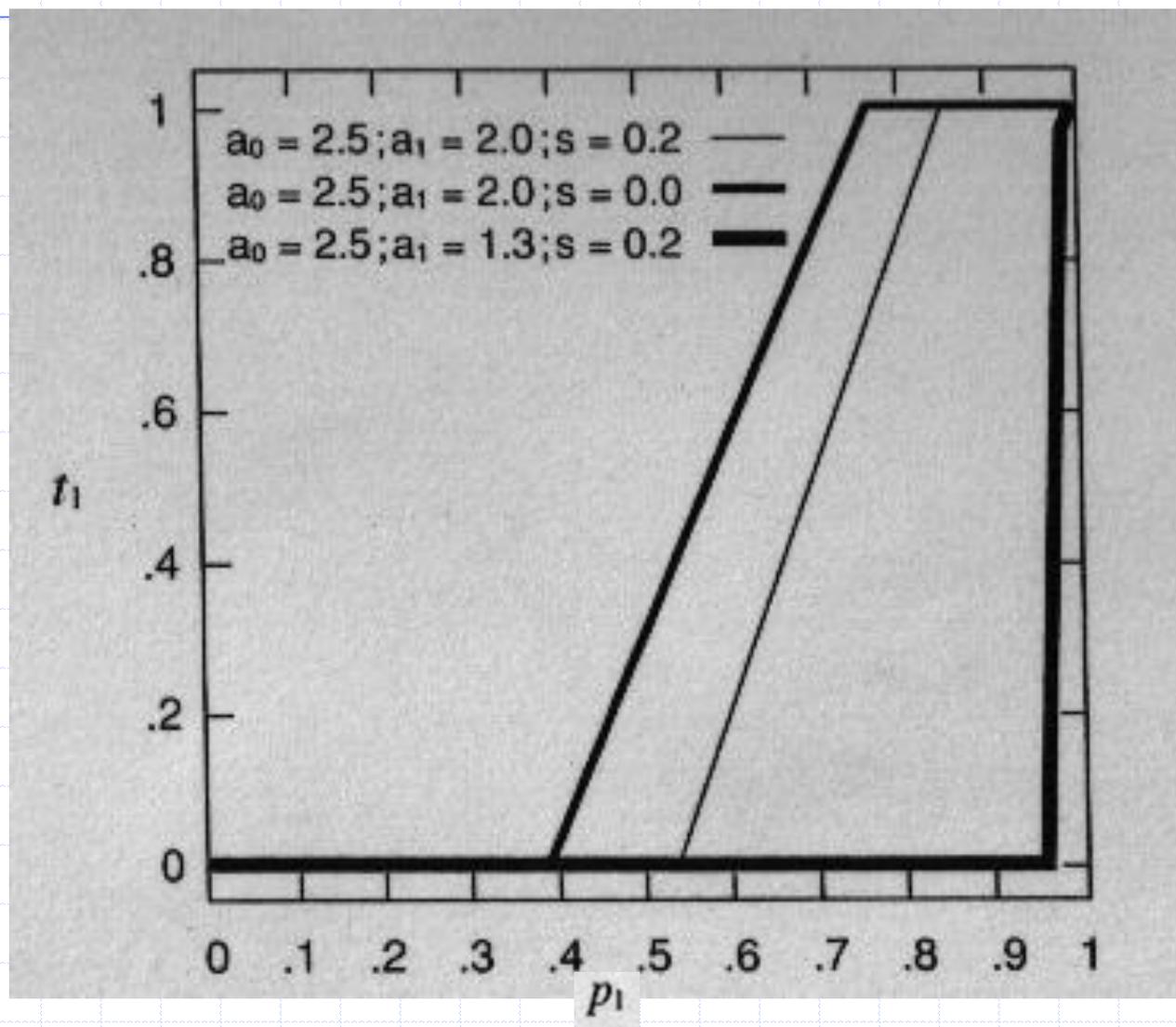
$$t_1 = \begin{cases} 0 & P_1 \leq V_1 \text{ のとき} \\ \frac{(a_0 a_1 - 1)(1 - s)}{(a_0 + s - 1)[a_1(1 - s) - 1]} p_1 - \frac{1}{a_1(1 - s) - 1} & V_1 < p_1 < V_2 \text{ のとき} \\ 1 & V_2 \leq p_1 \text{ のとき} \end{cases}$$

ただし

$$V_1 = \frac{a_0 + s - 1}{(a_0 a_1 - 1)(1 - s)}$$

$$V_2 = \frac{a_1(a_0 + s - 1)}{(a_0 a_1 - 1)}$$

# 平衡状態の例



# 混合条件

$$1 - a_0 < s < 1 - \frac{1}{a_1}$$

が満たされるときのみ、  
T0 T1の両遺伝子が保存される

# GAによるシミュレーション

◆ 集団サイズ: 131,072個体

◆ 突然変異率: 0.00001

◆ 500世代までの実行

# シミュレーション結果(1)

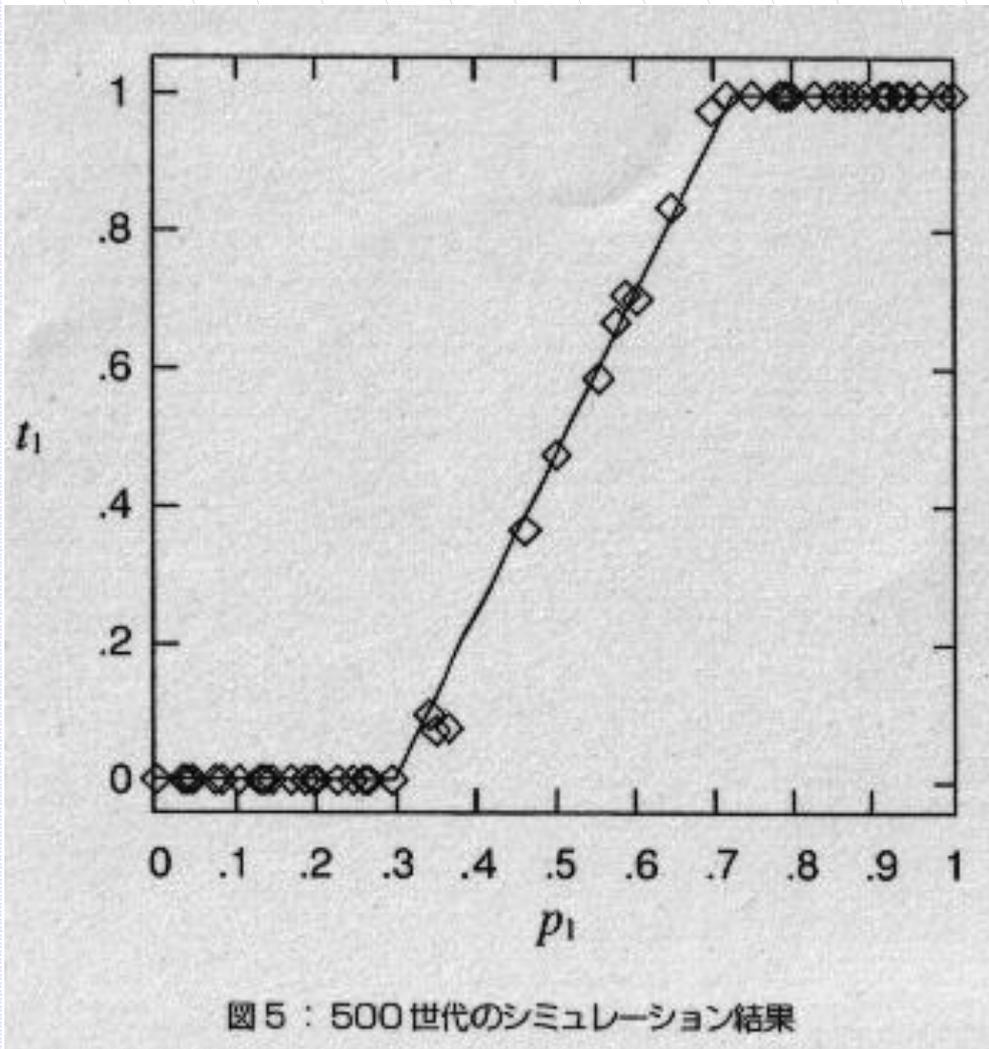
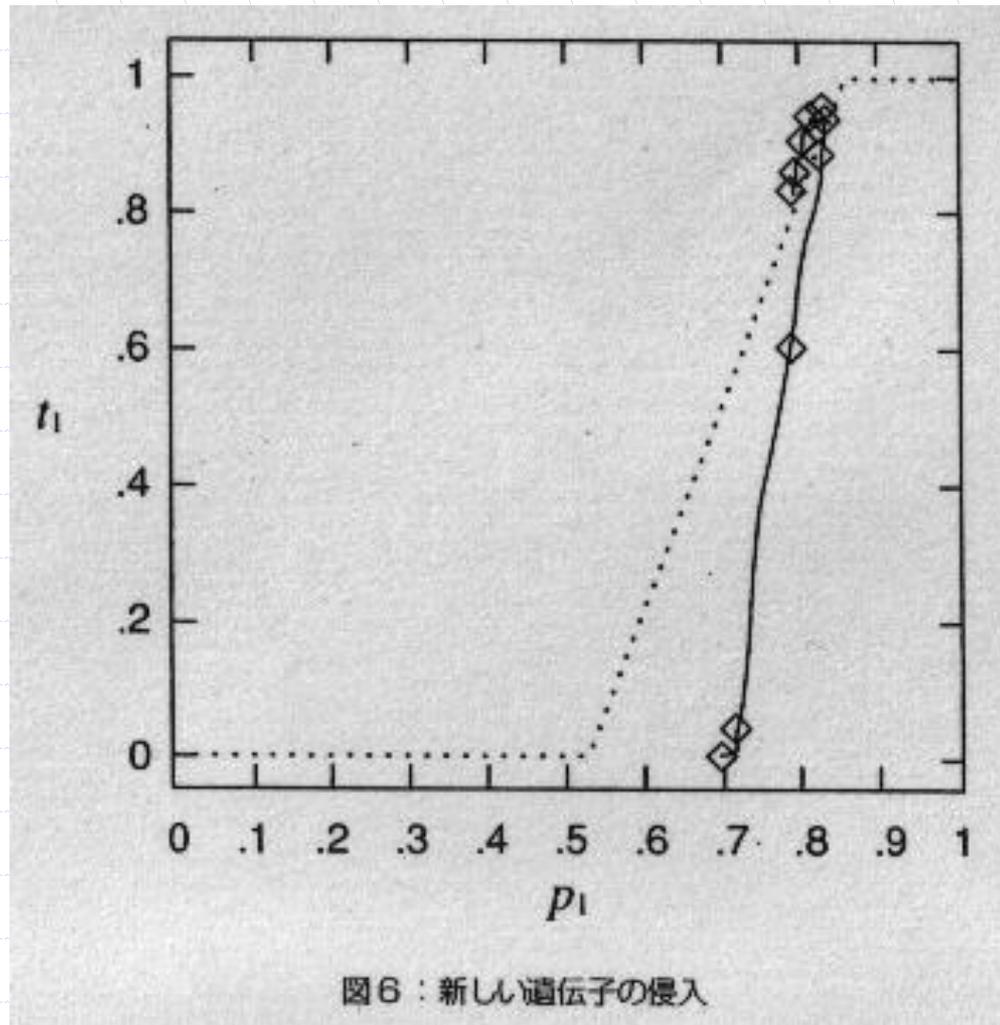
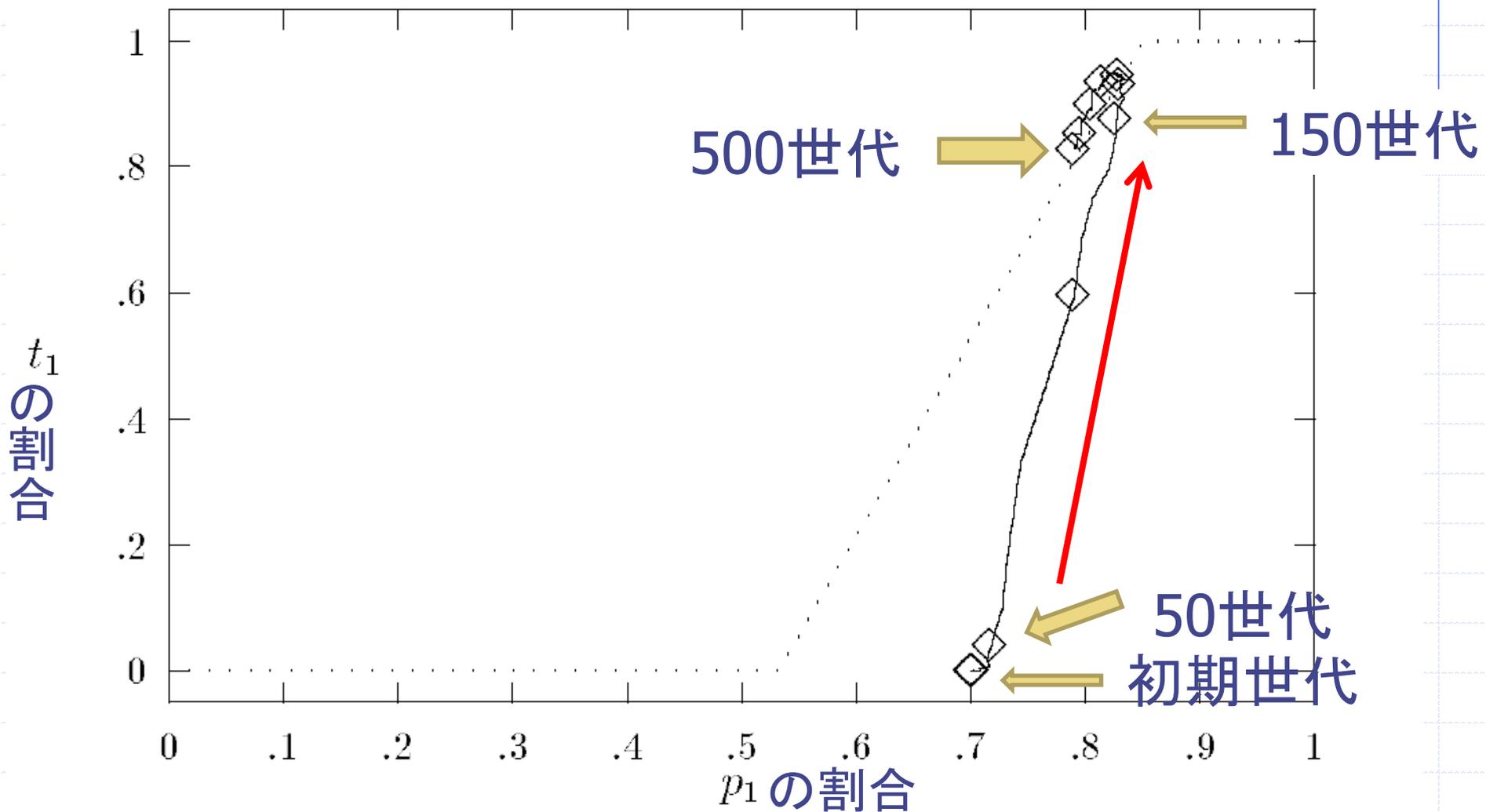


図5：500世代のシミュレーション結果

# シミュレーション結果(2)



# ランナウェイ効果



# シミュレーション結果(3)

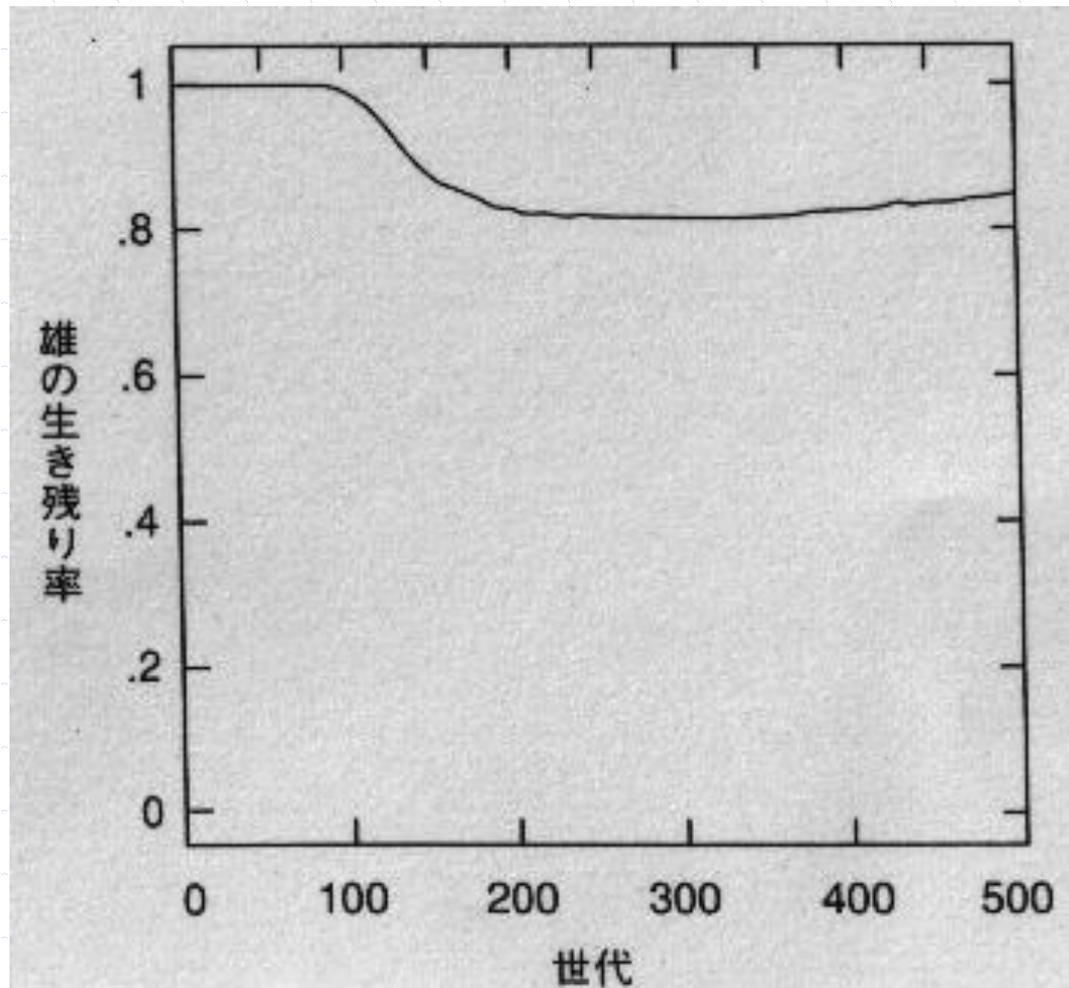
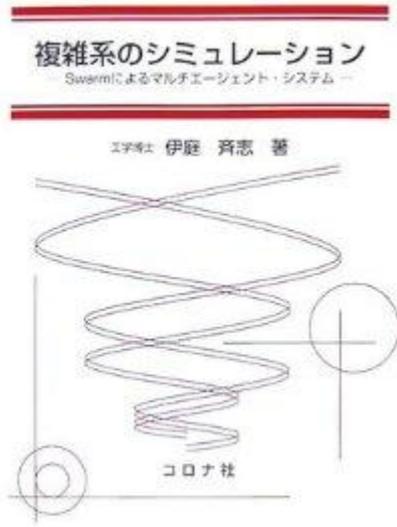
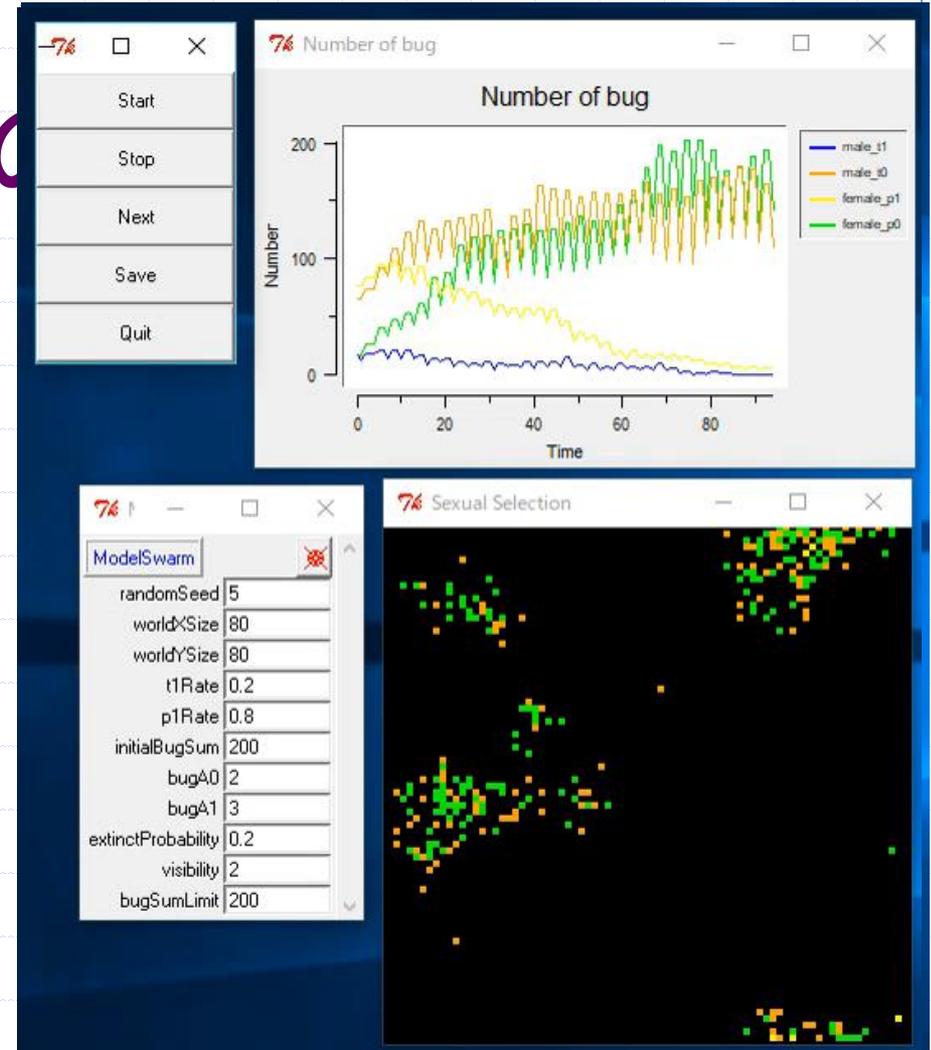


図7：世代ごとの雄の生き残り率

# シミュレーションの



## 2次元にする Swarm

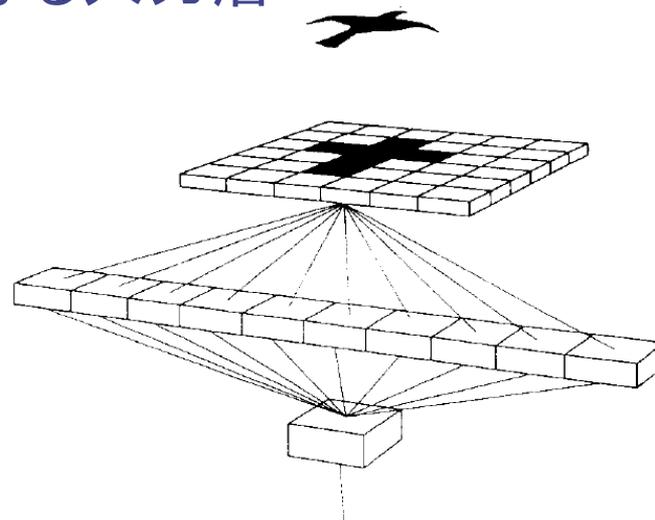


1. 雌は視界にいる雄の中から、頻度と $a_0$ ,  $a_1$  に依って配偶相手を選び子供を一匹生む。
2. その後で雌雄ともにランダムに移動する。

# 雄鳥の尾の長さ v.s. 雌の認知

Enquist, M. and Arak, A., "Selection of exaggerated male traits by female aesthetic senses," *Nature*, vol.361, pp.446--448, 1993.

- ◆ 雌鳥の認知システム(ニューラルネットワーク)と雄鳥の尾の長さの性選択
- ◆ ニューラルネットワーク
  - 網膜=6x6の受容細胞からなる入力層
  - 10ノードからなる隠れ層
  - ノードが1つの出力細胞



- ◆ 出力がしきい値以上=雌が求愛行動を示した

# 雄鳥の尾の長さ v.s. 雌の認知

## ◆ 雌鳥の認知システム(ニューラルネットワーク)

- 突然変異による進化

ニューロ進化 : Neural evolution

## ◆ 雄鳥の尾の長さ

## ◆ ニューラルネットワークへの訓練例

- 長尾の雄(同種)を以下の2つから区別するタスク
  - ◆ 短尾の雄(異種)
  - ◆ ランダム・イメージ
- イメージを複数位置に回転をさせて入力層に与える

# 雄鳥の尾の長さ v.s. 雌の認知

- ◆ テスト例への反応
  - 適切な汎化能力の獲得

訓練例

テスト例

負例

正例

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

ランダム図



# 雄鳥の尾の長さ v.s. 雌の認知

## ◆ 性選択の導入

## ◆ 雄鳥の尾の長さも進化させる

- 適合度 = 雌の求愛行動率
- 長い尾の雄ほど生き残れない



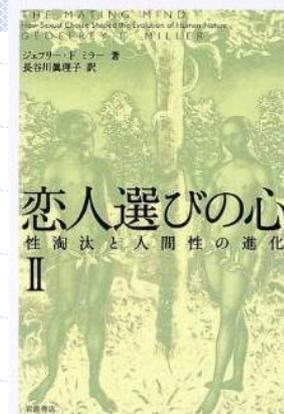
# 性選択の結果

	尾の長さ	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
生存率	2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	3	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
	4	0	0.10	0.20	0.30	0.40
得られた表現型						
原型の認識率 (尾の長さ=2)		100%	88%	84%	58%	59%

- ◆生き残りに不利であっても雄は長い尾となる。
- ◆雌は元の同種の雄への求愛(原型の認識率)が弱くなる

# 対称性の進化

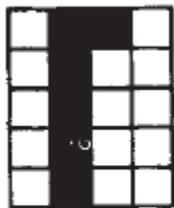
恋人選びの心—性淘汰と人間性の進化  
ジェフリー・F.ミラー (著), 長谷川 真理子 (訳)  
岩波書店



- ◆ 動物が対称性(左右対称性)を好む
- ◆ 男性も女性も左右シンメトリーに近似した個体に魅力を感じやすい。
- ◆ この原則は、顔だけでなく乳房や臀部、性器などの性的形質にも一般に当てはまる。
- ◆ 人間以外の動物にもシンメトリーな形態をした種が多い。
- ◆ 環境適応度を向上させる『安定的な身体の発達』に関係していると考えられる。

# 対称性の進化

- ◆ 動物が対称性を好む
- ◆ 美的選好が性選択で進化する
- ◆ 訓練例 : 多くの対称性のないパターン



Pattern 1



Pattern 2



Pattern 3



Pattern 4



Pattern 5

Johnstone, R., A.,  
` ` Female preference for symmetrical males as  
a by-product of selection for mate recognition,`  
*Nature*, vol.372, pp.172--175, 1994.

# 対称性の進化



High preference



Mean length 4,  
symmetrical



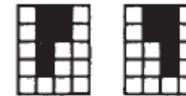
Mean length 3,  
symmetrical



Mean length 4,  
low level  
asymmetry



Mean length 5,  
symmetrical



Mean length 3,  
low level  
asymmetry



Mean length 2,  
symmetrical



Mean length 2,  
low level  
asymmetry



Mean length 3,  
high level  
asymmetry



Mean length 2,  
high level  
asymmetry



Mean length 1,  
symmetrical



Mean length 1,  
low level  
asymmetry

Low preference

Johnstone, R., A.,  
` ` Female preference for symmetrical males as  
a by-product of selection for mate recognition,`  
*Nature*, vol.372, pp.172--175, 1994.

# 批判

Arak, A. and Enquist, M.,  
"Artefact or network evolution?"  
*Nature*, vol.374, pp.313--314, 1995.

- ◆ 幾何学的な特徴は学習していない
- ◆ 単なる平均の効果に過ぎない

- ◆ ベイジアンでは当然の結果

**a**

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36

**b**

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20
21	22	23	24
25	26	27	28
29	30	31	32
33	34	35	36

**c**

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20

**d**

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20

Enquist, M. and Arak, A.,  
"Symmetry, beauty and evolution,"  
*Nature*, vol.372, pp.169--172, 1994.

# 対称性の進化

## Naive networks

Naive



Naive



## Trained networks

Accept



Ignore



Translation



Translation

Translation, rotation



Translation

Translation, rotation, reflection



Translation, rotation, reflection

# 性選択説:まとめ

## ◆ 雌の選り好み

## ◆ ランナウェイ効果

- 適合度の低下にも関わらず生き残る

## ◆ なぜ雌か？

- 雌は次世代を残すために多くの資源を投資する
- 多くの雄は子育てに参加しない
- 雌は相手を慎重に選ぶ

# 性選択説:なぜ雄か？

- ◆ 雌の選り好み？
- ◆ 雌と雄の立場が逆転する種

## ◆ オイランヨウジ

- 雌が雄に対して求愛行動を行い、雄が抱卵と育雛をする。
- 体色は雌の方が鮮やかであり、雄の方が小さくてみすぼらしい
- 性選択の理論の予測通り



タツノオトシゴの親戚であるオイランヨウジ(ヨウジウオ科). メスはオスの腹部に卵を産み付け、オスが子育てを行う. 雌が雄に対して求愛行動を行う.  
@西表、2014

# 性選択説:まとめ



## ◆ ヒレアシシギ

- 鳥類チドリ目シギ科 千鳥の一種

◆ 雌が雄に対して求愛行動を行う

◆ 雄が抱卵、育雛を行う

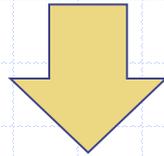
性選択結果から予想される通りである

◆ 体色は雌の方が鮮やかである

◆ 雄の方が小さくてみすぼらしい

# 性選択説:まとめ

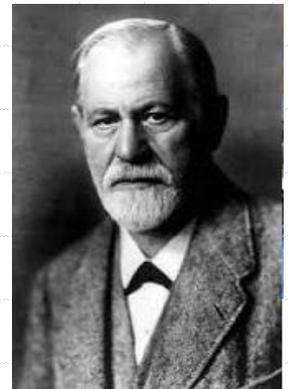
- ◆ 見事な羽を見せびらかす鳥
  - 適合度の低下にも関わらず生き残る



進化心理学

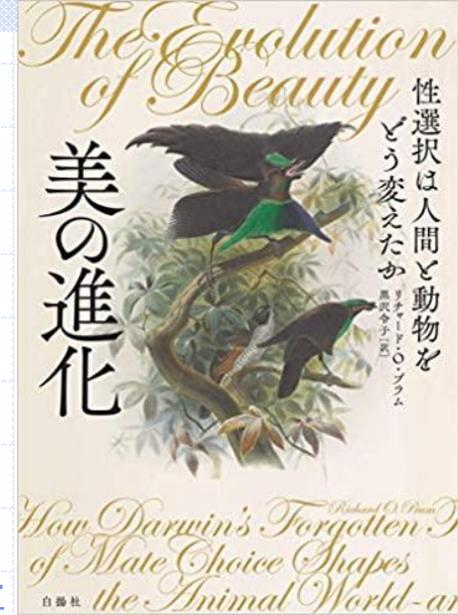
- ◆ 人間でいうと何か？
  - 芸術的才能、創造性
  - 集団の意見への反発
  - 英雄気取り
  - 目立つための消費

≡



ジークムント・フロイト(1856-1939)  
オーストリアの精神分析学者、精神科医

# 性選択説：美の進化



## ◆ 求愛ダンス

- コウロコフウチョウ
- [コウロコフウチョウの求愛ダンス【AAK Nature Watch】 - YouTube](#)

## ◆ あずまや

- アオアズマヤドリ
- チャイロニワシドリ



これらは「**拡張された表現型**」の例である

# 性選択説：美の進化

## ◆ あずまやの遠近法

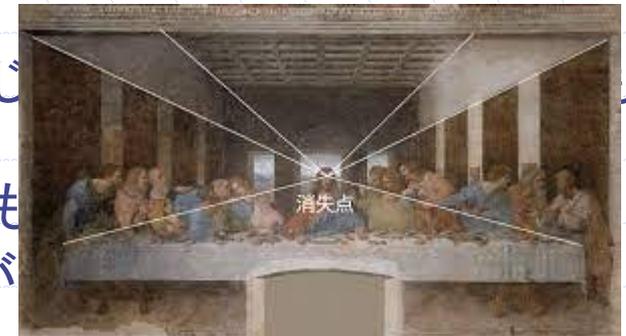
- オオニワシドリ
- あずまやから離れるにしたがって徐々に大きな装飾品をおく
- 目の錯覚を利用



人間の芸術的技法による遠近法  
15世紀のルネッサンス・西洋文化

ヒトよりはるかに先にニワシドリで遠近法が進化した!!

が感じ  
元にも  
率が



Laura A. Kelley and John A. Endler,  
"Male great bowerbirds create forced perspective illusions with consistently different individual quality,"  
PNAS, pp.20980–20985, 2012.

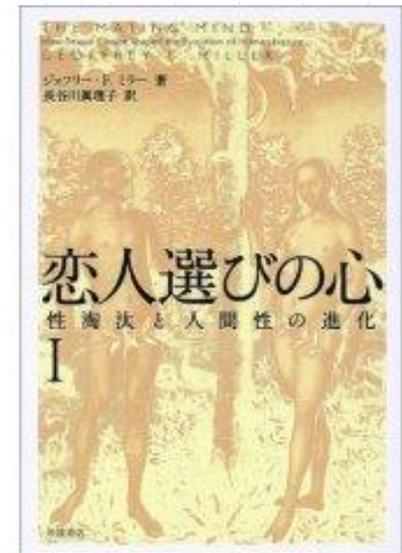
# 性選択 vs. 自然選択

## ◆ 自然選択

- 適者生存
- 過酷な生存競争

## ◆ 性選択

- ベンチャー企業



恋人选びの心—性淘汰と人間性の進化  
ジェフリー・F.ミラー (著), 長谷川 真理子 (訳)  
岩波書店

# 性選択の応用例

## ◆ 霊長類の知能の起源



## ◆ 人間の脳はなぜ大きくなったのか？

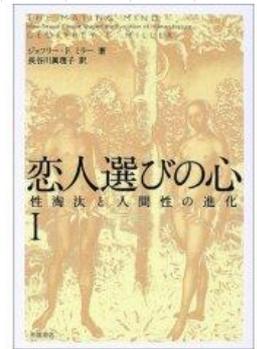
- ◆ 約300万年前にほんの数種の霊長類が脳の容量を急激に増加させた



# 霊長類の知能

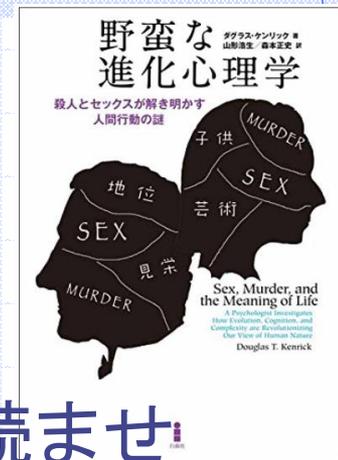
- ◆ なぜ霊長類は哺乳類のなかでとりわけ知能が高いのか？
- ◆ 現在の有力な仮説
  - ◆ 食糧採取仮説
  - ◆ マキャヴェリの知能仮説

# 性選択と脳の進化



- ◆ ディスプレイ仮説[Miller 2000]
- ◆ ヒトは配偶者を選ぶときに、健康、年齢、多産性、社会的地位のほかに、認知的スキルも評価対象にしている
- ◆ 認知的スキル＝愉快で発明の才のあること
- ◆ 女は創造的な脳を持った男を選ぶ
- ◆ 言語はこのプロセスを促進する
  - ◆ 情報の交換、相手の適切さの判断に使われる

# 性選択と脳の進化

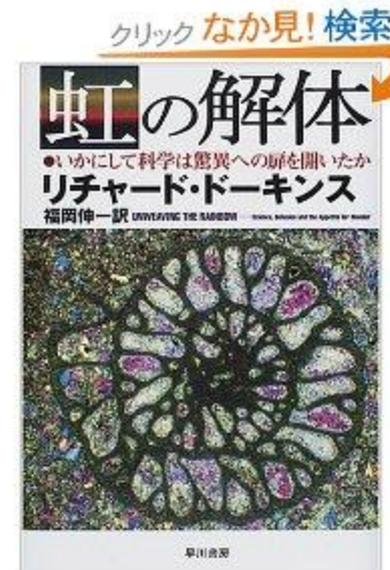


- ◆ 創造性、オリジナリティ、技巧、創造力、読ませる力、ユニークさ、面白さ、魅力。。。。
- ◆ 女性の場合：交配動機は創造性に何の影響も与えていない
- ◆ 男性の場合：交配動機は創造性を高めていた
  - ◆ 交配のことを考えている雄は、創造性に関するテストで高得点をとる
    - ◆ 単語同士の遠い関連性を見つけるテスト
    - ◆ 身近なものの新しい使用法を考案するテスト

野蛮な進化心理学、  
ダグラス・ケンリック、白揚社、2014

# 言語との共進化説

- ◆ リチャード・ドーキンス
- ◆ 虹の解体—いかにして科学は驚異への扉を開いたか
- ◆ ハードウェア(脳)とソフトウェア(言語)の共進化
  - ◆ 言語を持つと有利である
  - ◆ 言語が複雑になるにつれ、言語音の理解と発生をするのにより大きな脳が必要となった



# Last word: Darwin

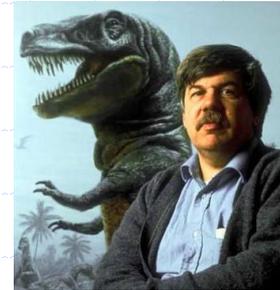
しかし、ほんとうのところ、動物の心についてはなにもわかっていないのである。たとえば、ゴクラクチョウやクジャクのオスが、まるで目的もなしにあんなに苦勞して、メスの前で美しい羽毛を立てたりひろげたり震わせたりしているとは考えられない。あるクジャクのメスたちは、好きなオスとの間に水をさされると、その年の繁殖期間中は他のオスといっしょになろうとせず、ずっと後家を通したという事実を忘れてはならない。

ダーウィン:人間の起源、今西錦司責任編集、世界の名著50、中央公論社、1979

# 適応主義 v.s. 美の進化

## ◆ 適応主義: ドーキンス, ウォレス

- ◆ ハンディキャップ理論
- ◆ パラサイト説



## ◆ 美の進化: ダーウィン

- ◆ 芸術のための芸術
- ◆ 外適応: **グールド**
- ◆ 理解なき有用性: **デネット**

Stephen Jay Gould (1941–2002)。アメリカの古生物学者であり進化生物学者。進化過程の断続平衡説を唱えた。アメリカの科学雑誌『ナチュラル・ヒストリー』誌に毎月エッセイを書き、それをまとめた多数の著書はベストセラーとなっている。同じ進化論の研究者でありながら、リチャード・ドーキンスとは論敵であった。

# 外適応： S.J.グールド

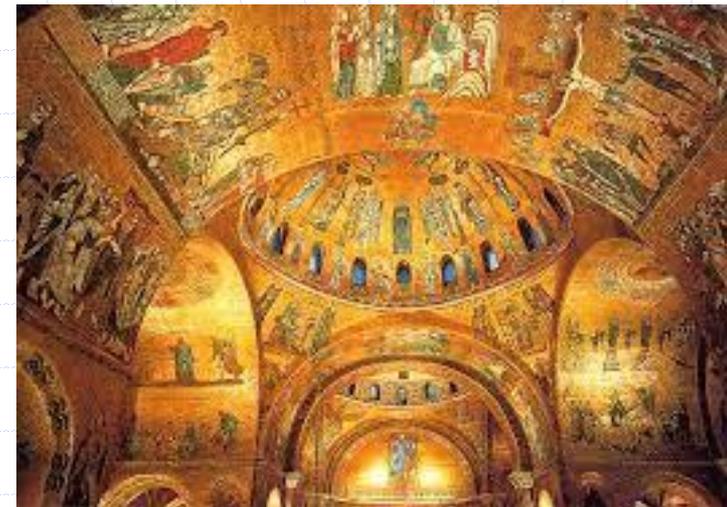
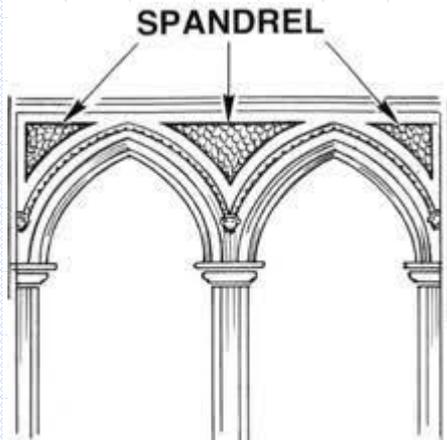
## ◆ 適応は他の用途に転用される

- ◆ 例：恐竜から鳥への進化（イントロンでの例題）
- ◆ 羽は空を飛ぶためではなく体温保全の機能を持って形成された
- ◆ その後明らかに飛ぶ機能のために自然選択によって修正されている



# 外適応： S.J.グールド

- ◆ サンマルコ大聖堂のスパンドレル
  - ◆ アーチに挟まれた三角形の構築物
  - ◆ 適応(アーチ) or 適応の副産物(スパンドレル)か?
  - ◆ 適応は他の用途に転用される



# 適応主義 v.s. 美の進化



## ◆ 適応主義: ドーキンス, ウォレス

- ◆ ハンディキャップ理論
- ◆ パラサイト説

ダニエル・デネット(1942-):  
アメリカの哲学者、著述家、  
認知科学者。

## ◆ 美の進化: ダーウィン

- ◆ 芸術のための芸術
- ◆ 外適応: グールド
- ◆ 理解なき有用性: デネット

## AI: フレーム問題



# 理解なき有用性



- ◆ 進化が生物に与える能力(=**コンピータンス**)には、"理解力" というものが伴ってはいない
- ◆ **自然選択**そのものが非常に有能であり、理解力のかけらもなしに突出した**技巧と効率を備えたデザイン**を作り出す
- ◆ 例1: バクテリアや木々はさまざまな有用性を(自分自身にも他者に対しても)もっているが、その有用性を理解している必要はない
- ◆ 例2: シロアリの塚 v.s. ガウディのサクラダファミリア



@エクスマス(オーストラリア)



# Last word: Darwin

しかし、ほんとうのところ、動物の心についてはなにもわかっていないのである。たとえば、ゴクラクチョウやクジャクのオスが、まるで目的もなしにあんなに苦勞して、メスの前で美しい羽毛を立てたりひろげたり震わせたりしているとは考えられない。あるクジャクのメスたちは、好きなオスとの間に水をさされると、その年の繁殖期間中は他のオスといっしょになろうとせず、ずっと後家を通したという事実を忘れてはならない。

ダーウィン:人間の起源、今西錦司責任編集、世界の名著50、中央公論社、1979

# 性選択と進化計算

◆ GAに性を導入する

◆ 多様性の向上をはかる

◆ Cf.新規性探索  
■ novelty search

 *Artificial Intelligence Review* **19**: 123–152, 2003.  
© 2003 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

123

## Sexual Selection for Genetic Algorithms

KAI SONG GOH<sup>1</sup>, ANDREW LIM<sup>1</sup> and BRIAN RODRIGUES<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Computer Science, School of Computing, National University of Singapore, 3 Science Drive 2, Singapore 117543 (E-mail: alim@comp.nus.edu.sg); <sup>2</sup>School of Business, Singapore Management University, 469 Bukit Timah Road, Singapore 259756

**Abstract.** Genetic Algorithms (GA) have been widely used in operations research and optimization since first proposed. A typical GA comprises three stages, the encoding, the selection and the recombination stages. In this work, we focus our attention on the selection stage of GA, and review a few commonly employed selection schemes and their associated scaling functions. We also examine common problems and solution methods for such selection schemes.

We then propose a new selection scheme inspired by sexual selection principles through female choice selection, and compare the performance of this new scheme with commonly used selection methods in solving some well-known problems including the Royal Road Problem, the Open Shop Scheduling Problem and the Job Shop Scheduling Problem.

**Keywords:** genetic algorithm, scheduling, selection

## 1. Introduction

The ideas behind Genetic Algorithms (GA) (Holland, 1975) are derived from the theory of natural selection originally proposed by Charles Darwin (Darwin, 1888). In GA, potential solutions to a target problem are viewed as individuals in a single population where the fitter individuals in any generation are allowed to reproduce and, in the process, bring forth a new generation of individuals (solutions). As the population of solutions evolves, fitter solutions are produced and, eventually, optimal or near-optimal solutions are reached.

# 性選択に基づくGA

◆ 自然界の生物の性嗜好性を真似て選択を行う。

1. 集団をオスとメスの二つに分ける。 ○○○○ | ●●●●
2. オスが性嗜好性を満たしているかで分ける。 ○○○ ◎
3. メスが性嗜好性を満たすオスを好むか判断する。 ●性true or not
4. **KirkPatrick**のモデルに基づいてメスと交配するオスを選択する。

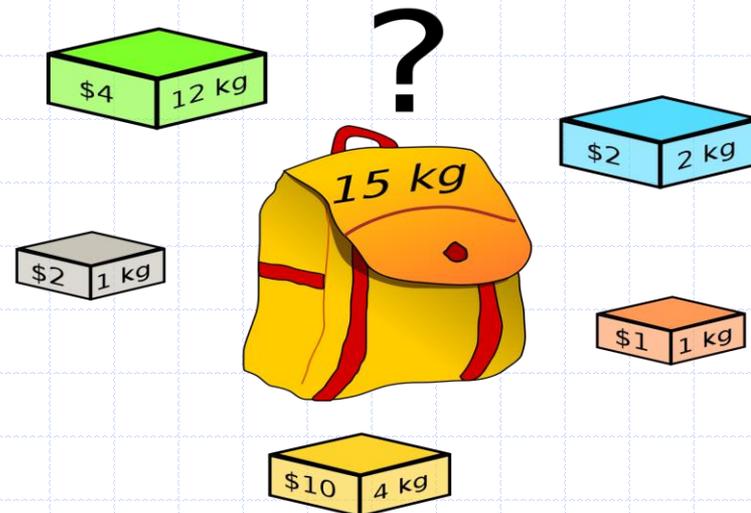
◆ 魅力: 必ずしも適応度の関係ないものを魅力として設定する

- 問題の重要な特徴と関係なくてもよい

# ナップザック問題

◆ ナップザックの容量の制限のもと、ナップザック内の総価値を最大化する問題

◆ NP完全



# 実験1: 動的ナップザック問題

◆ 探索途中でナップザックの容量が変わる

◆ 比較する手法

- トーナメント選択

  - ◆ エリート選択率が75,85,90,95,100%

- 性選択(tournament,odd,max,min)

- 新規性探索

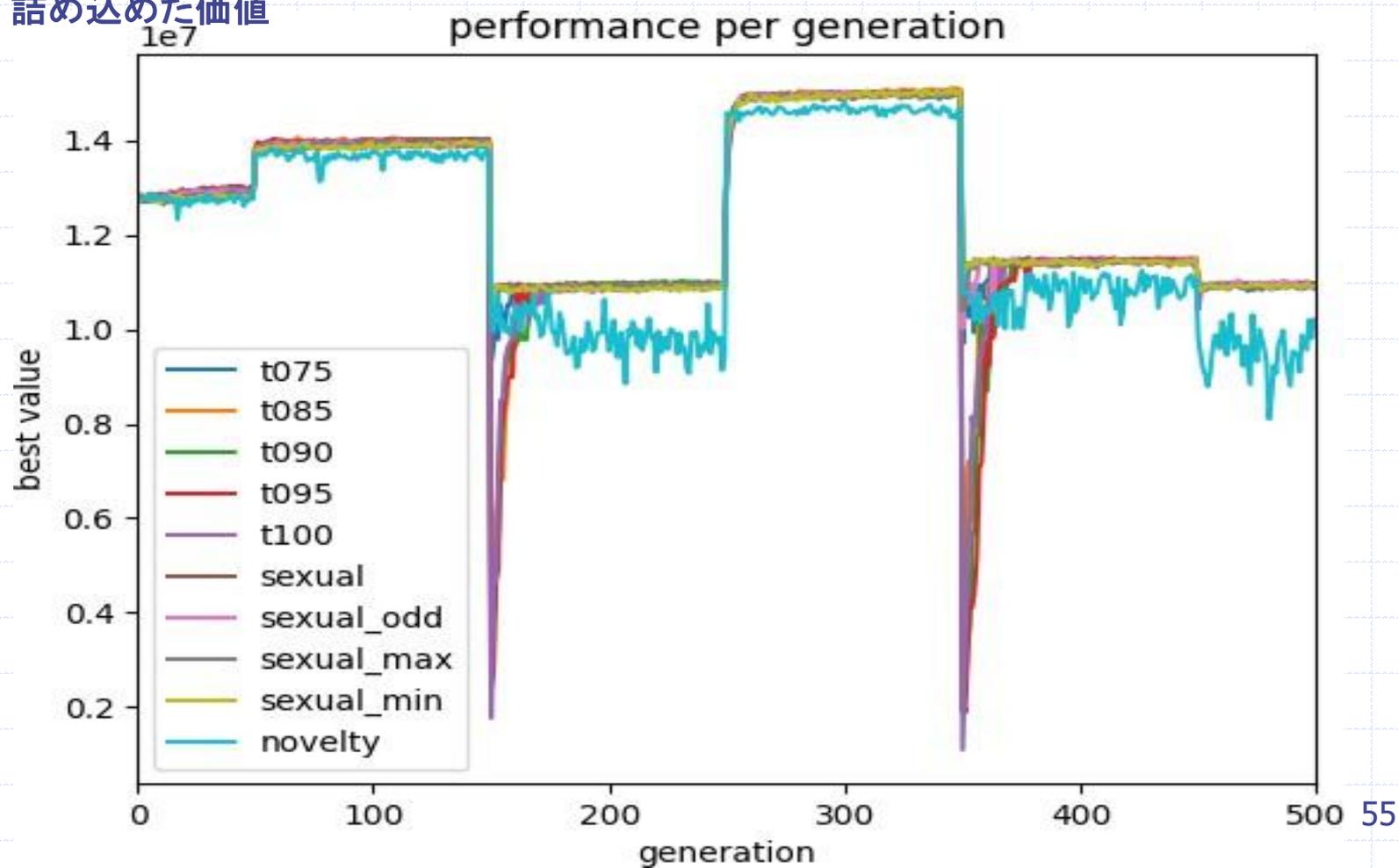
◆ データセット

- p07: 最大容量750、アイテムの個数15個

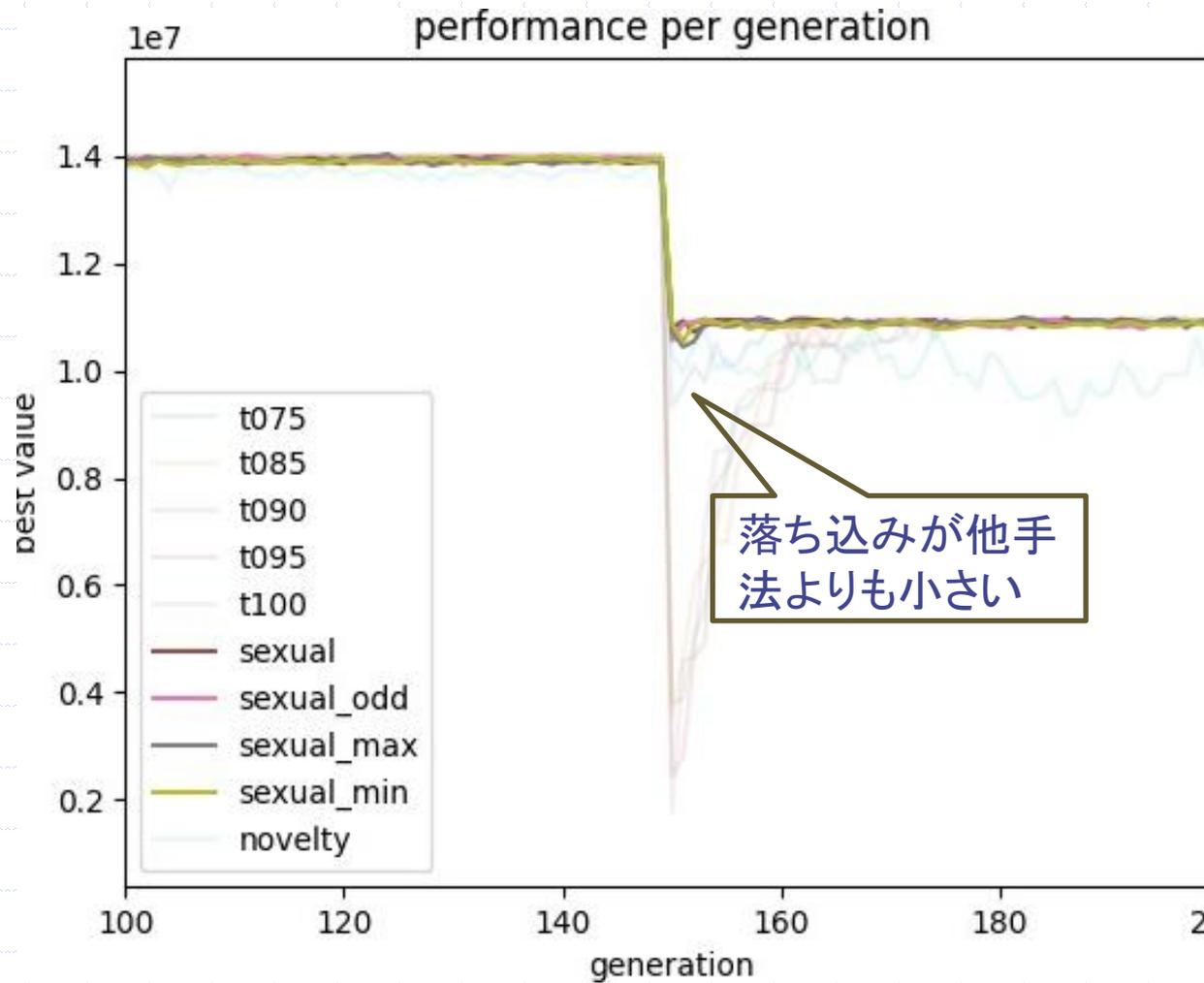
- p08: 最大容量6404180、アイテムの個数24個

# 実験1: 動的なナップザック問題

適合度  
詰め込めた価値



# 実験1: 性選択の場合



# 実験2: 多目的ナップザック問題

## ◆各アイテム

- 価値、重さに加えて環境変数
- 価値を最大化し+環境変数値を最小化

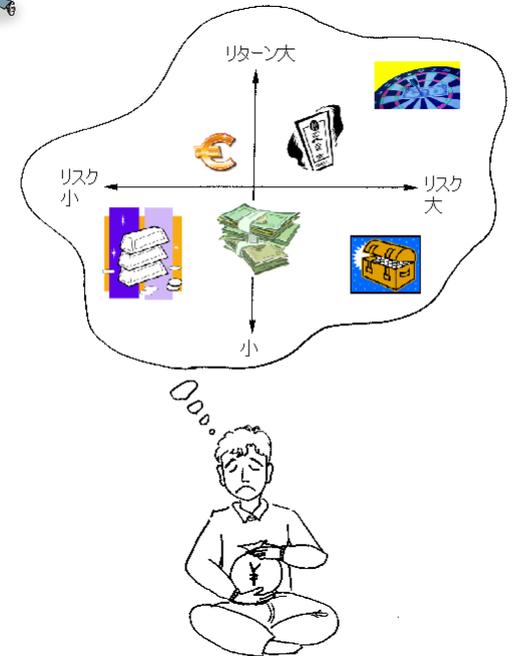
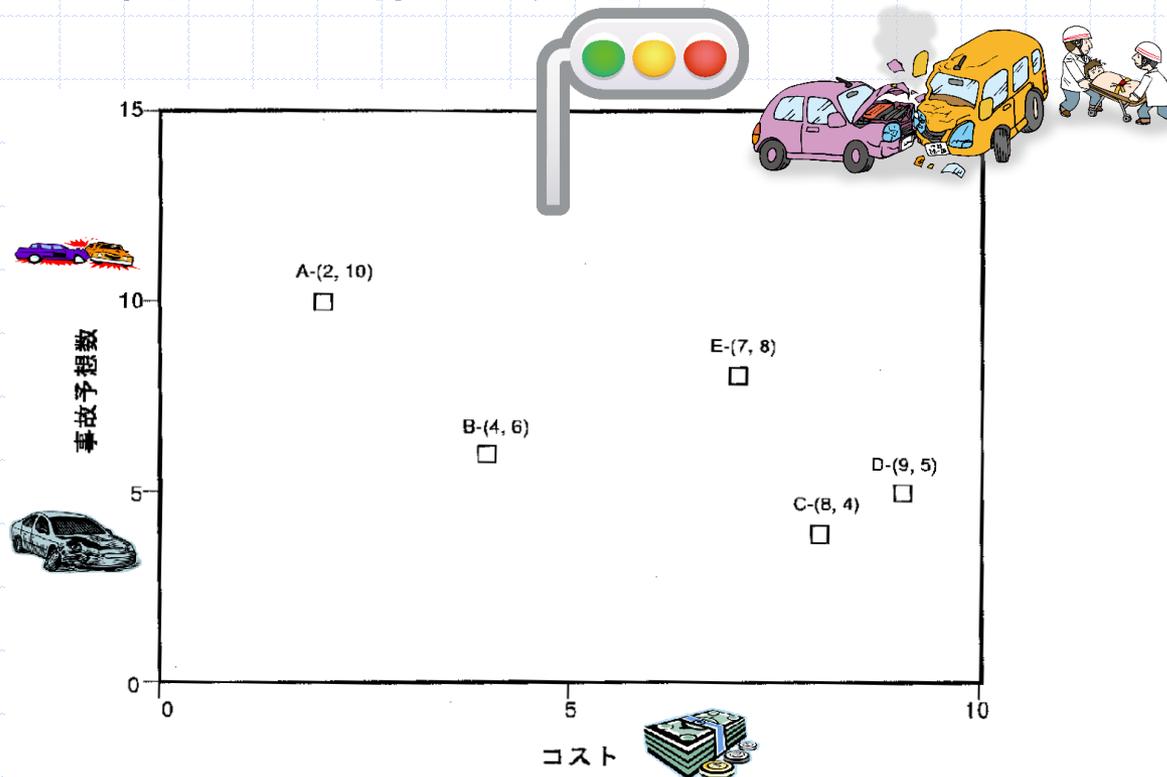
## ◆目的関数が相反する複数個ある

- パレート最適解をもとめる
  - ◆ すべての目的関数において劣っていない解

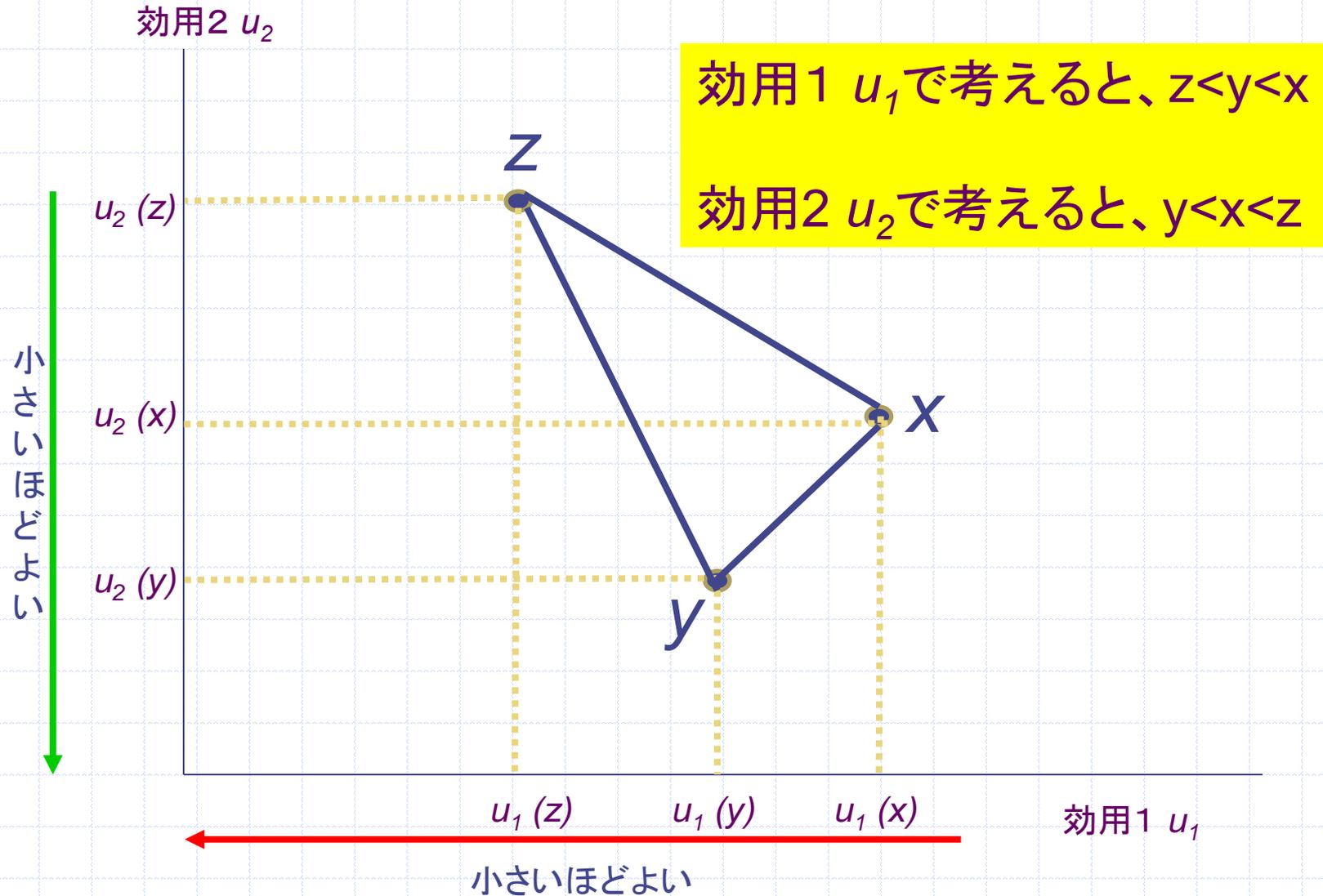
# 多目的最適化とは？

## ◆ 同時に複数の価値を最適化したい

- 目的関数が複数ある
- それらが相反する



# 多次元効用関数



# 無差別曲線

効用2

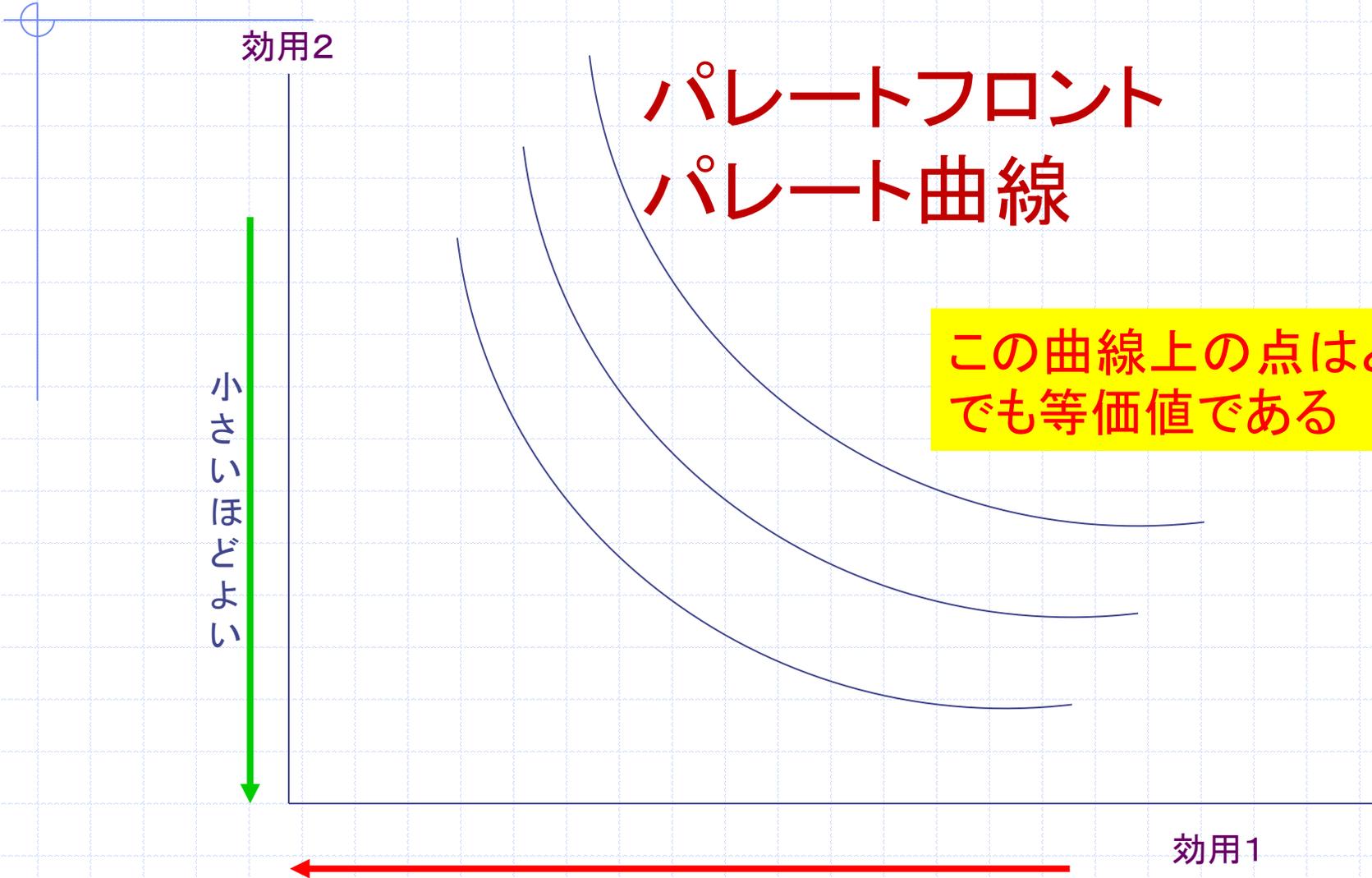
小さいほどよい

パレートフロント  
パレート曲線

この曲線上の点はどこでも等価値である

効用1

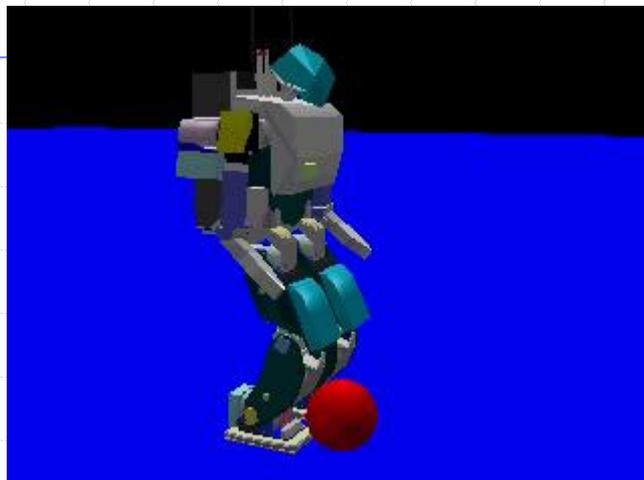
小さいほどよい



# ヒューマノイドロボットの動作最適化

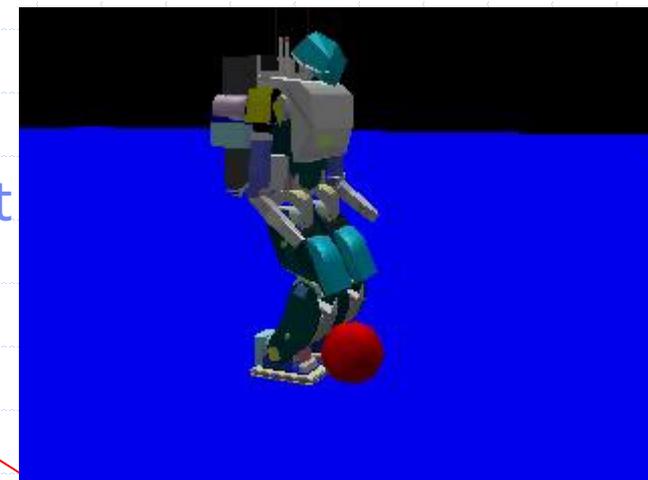
距離はないが、安定している

(1.15, 0.296)



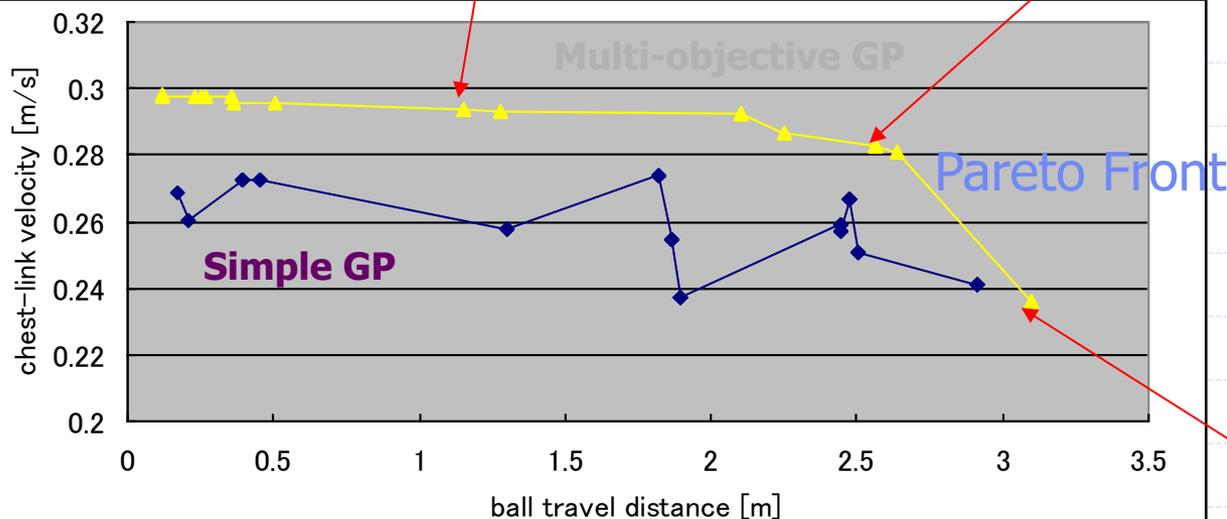
(2.57, 0.283)

距離も安定性も中程度



(3.10, 0.236)

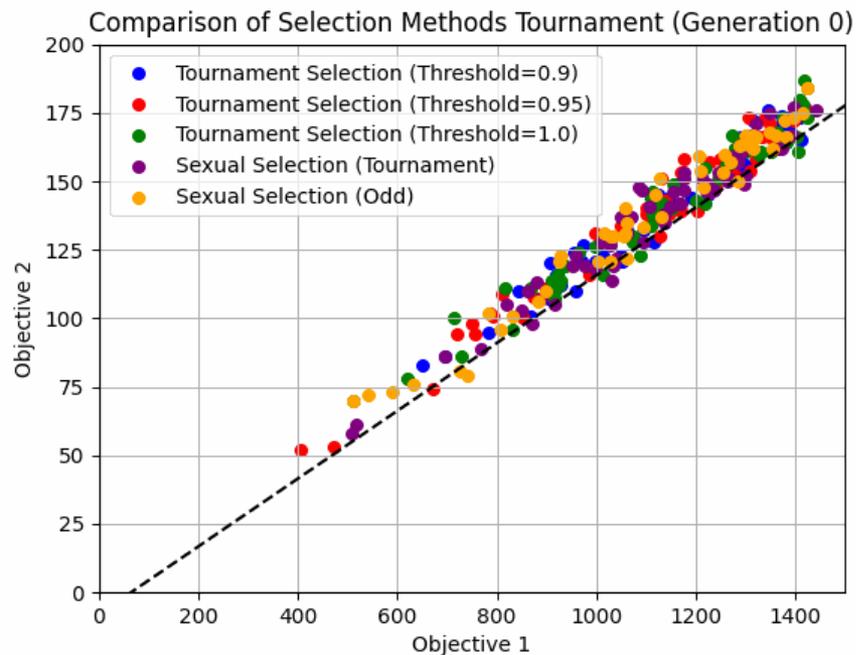
距離はあるが、安定しない



# 実験2: 多目的ナップザック問題

## ◆ Case1:

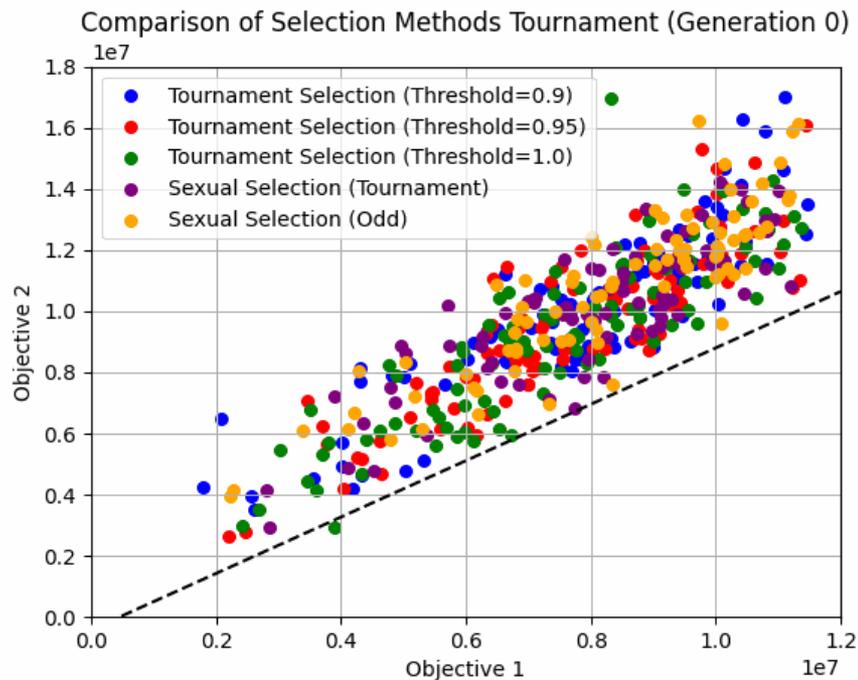
選択手法	エントロピー
Tournament(Threshold=0.9)	2.8506
Tournament(Threshold=0.95)	2.6570
Tournament(Threshold=1.0)	2.7910
Sexual	2.6689
Sexual_Odd	2.6887



# 実験2: 多目的ナップザック問題

## ◆ Case2

選択手法	エントロピー
Tournament(Threshold=0.9)	2.5414
Tournament(Threshold=0.95)	2.6970
Tournament(Threshold=1.0)	2.5615
Sexual	2.8184
Sexual_Odd	2.5608



# 実験結果：性選択＋GA

## ◆ 単目的問題

- 環境が変化しても適応度の落ち込みはなく収束が早く変化に柔軟する。

## ◆ 多目的問題

- 計算量が低いので世代交代にかかる時間は短かった。