

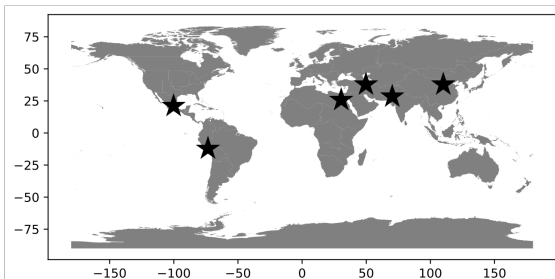
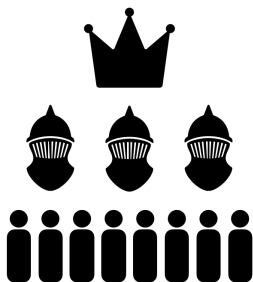
人間社会の多様な構造の生成原理：親族構造と人口転換

板尾健司（理化学研究所）

Mar. 24, 2024

第 12 回統計物理学懇談会

人類史に典型的な社会構造があるのはなぜか？



遍在する階層的な王国

- 神聖な王、貴族/軍事エリート、一般大衆の階層構造は遍在
 - 時には建築物（例えばピラミッド）が似ていることも
- なぜ離れた地域の社会が構造的に似ているのか？

類似性の起源

仮説1：似ているのは真似したから

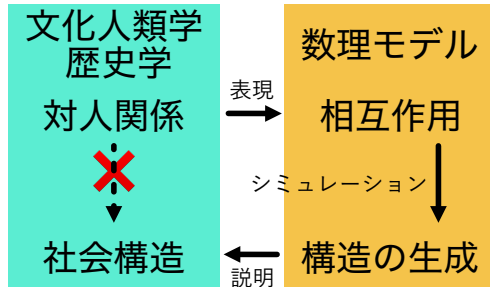
- 平城京が長安の都に似ているのは真似したから
- * それでは古代ローマと中国の古代王朝が似ているのは？

仮説2：祖先は皆同じだから

- 火や言語の使用は出アフリカ以前から共有されていた
- * 農耕以降のことまでアフリカにいた頃から決まっていた？

仮説3：共通のメカニズムで独立に発生したから

- 人々の相互作用の仕方自体はどの社会でも同じだが、人口規模などの条件に応じて帰結が変わる
- 同じような条件のもとでは同じような構造が見られる？
- cf. 水は0°Cで凍り、100°Cで沸騰 → 統計物理の方法が使える



普遍的なメカニズムを抽出するためのミニマルモデル

- 人間社会に一般的な対人関係を数理モデル化し、人類史に典型的な社会構造の生成をシミュレーション
 - 社会構造を生む仕組みと構造の違いをもたらす条件を説明
- 普遍的な視座から人類史を考察する普遍人類学へ

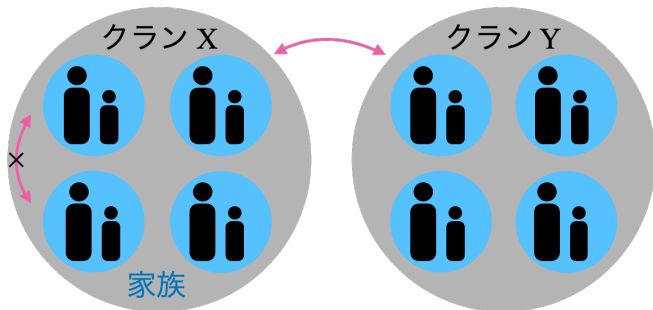
氏族社会における親族構造の進化

- 親族構造は文化集団ごとに結婚すべき相手を定める
 - 結婚は義理の親族に連帯、ライバルに競争をもたらす
- 諸地域に共通する相互作用を数理モデルで表現
- 文化的同胞集団が自発的に生まれ、婚姻の規則が進化

人口転換における二つの普遍的経路

- 近代の少子化について、国を問わない二つの普遍パターン
- 人口転換における二つの普遍的な「相」を特徴づけモデルによって相の間の遷移を説明

氏族社会における親族構造の進化



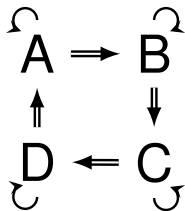
用語法

家族 血縁者の集団

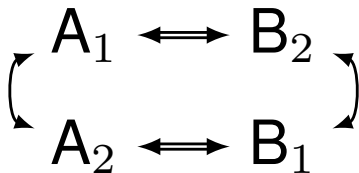
クラン 必ずしも血縁のない家族の集合（氏族）

クラン内婚は文化的な同族婚として禁止

文化人類学の基礎課題：親族構造の普遍性と多様性



一般交換



限定交換

氏族社会の社会構造

- 所属するクランごとに誰と結婚すべきかが定まる
 - * $A \Rightarrow B$ のとき A の女性と B の男性が結婚
- 子供の属するクランは親のクランに依存する
 - * $A \rightarrow B$ のとき父親の所属が A ならば子供は B

カリエラ族（オーストラリア）の親族体系

- 男性は Nuba と呼ばれる女性とのみ結婚できる
- 母の兄弟の娘、妻の姉妹、兄弟の妻などの呼称が Nuba

レヴィ＝ストロースの功績

- 同じ呼称のカテゴリーをクラン ($A, B, C, \dots$) として同定、婚姻の規則をクラン間関係 ($A \Rightarrow B$) として整理
 - Nuba とは B の男から見た A の女を指す
- クラン間関係のレベルで諸地域の事例に類型性を見出す
- ヴェイユは親族構造を群論で表現
- * いかにしてこうした構造が生まれるのか？

親族構造を生むメカニズム

- 社会はなぜいくつかのクランに分割されるか？
 - * 一つにまとまるのでもなく、無数に増えるのでもない
- 増やす力と減らす力の釣り合い？

人間社会に典型的なミクロの相互作用としての結婚

- 配偶者の親族は義理の親族としてつながる
 - 配偶者の希望が重複するライバルは競争する
- つながりの効果を高めるには少数クランにまとまると得、競争を避けるにはクランを増やすと得
- 結婚によるつながりと反発をモデル化

親族構造の生成原理

- 子供が父親のクランに属する場合に制限し、
婚姻関係（⇒）がサイクルを作るメカニズムを調べる

親族構造の多様性

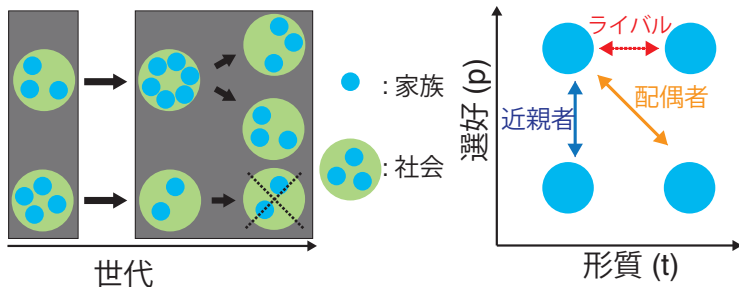
- 結婚の過程を陽にモデル化し、
父親と母親からの形質の継承を考える
- 現実に見られた多様な構造を説明し尽くす

民族誌データベースによる検証

- 民族誌データベースの統計解析により理論の妥当性を検討

親族構造の生成原理

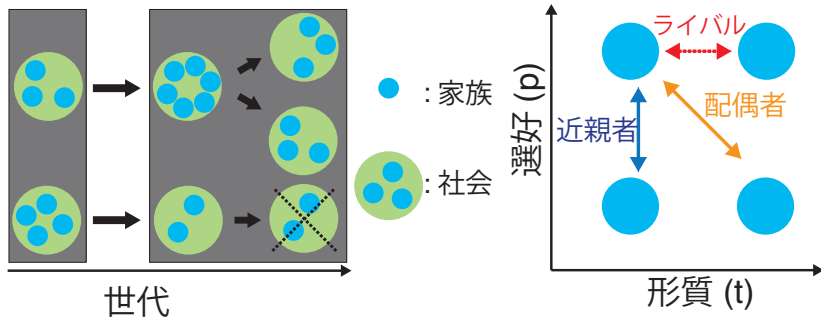
モデルの設定



結婚による家族間の相互作用

- 形質（自分が何者か）と選好（誰と結婚したいか）を導入
- 結婚によるつながりと競争を形質 t と選好 p の関数で表現
- 家族 i の男性と j の女性が結婚する確率は $\exp(-(t_i - p_j)^2)$
- 近親者、配偶者とは協力 → 人口成長
- 配偶上のライバルとは競争 → 成長抑制

モデルの設定



形質と選好の継承

- 子供は父親の t と p を継承
- t と p の初期値は 0 で、継承時に分散 μ^2 の変異が加わる
- 子供の数は (協力度 + $r(1 - \text{競争度})$) $\times$ 結婚確率で決まる
- 家族・社会レベルでのマルチレベル進化

家族の人口成長

家族の人口成長

家族 i の成長率は協力者と競争者の密度と被選好度で決まる

$$D_f^i = \langle \exp(-(t_i - t_j)^2) + (1 - \exp(-(t_i - t_j)^2)) \exp(-(p_i - t_j)^2) \rangle_j \\ \simeq \langle \exp(-\min((t_i - t_j)^2, (p_i - t_j)^2)) \rangle_j$$

$$D_r^i = \langle \exp(-(p_i - p_j)^2) \rangle_j$$

$$D_p^i = \langle \exp(-(t_i - p_j)^2) \rangle_j / \langle \exp(-(t_i - t_j)^2) \rangle_j$$

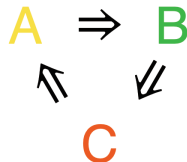
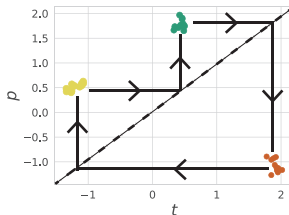
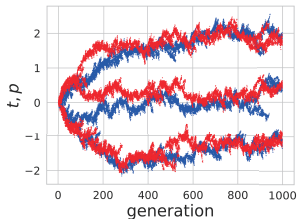
$$\underbrace{g^i}_{\text{成長率}} \propto \underbrace{(D_f^i + r(1 - D_r^i))}_{\text{生存確率}} \underbrace{D_p^i}_{\text{結婚確率}}.$$

r は競争回避の必要性/協力の必要性

ここでは結婚の過程は陽に考えず、結婚確率のみを計算

$\langle \cdot \rangle$ は社会内の平均を示す

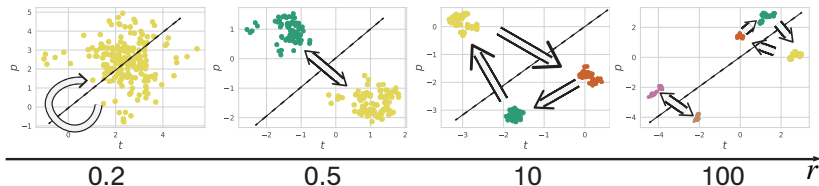
親族構造の進化



婚姻・親子関係を持つ親族構造の形成

- ライバルを減らしたい → p は分散
 - 協力相手は欲しい → t は凝集
 - 結婚することが必要 → t は誰かの p とマッチ
- 内部での結婚を禁じた同胞集団であるクランが生まれる
- クラン間の選好関係として親族構造が進化

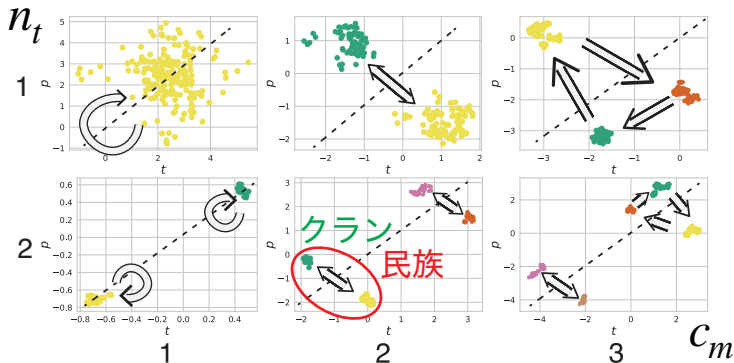
進化する構造の r 依存性



異なる r のもとで進化した構造の例

- 進化する構造は r : 競争回避の必要性/協力の必要性に依存
- r が大きいほどクラン数を増やして競争を回避

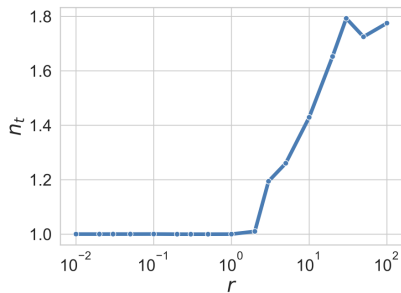
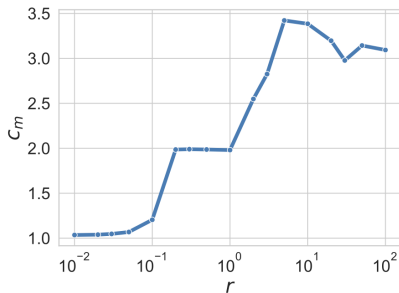
親族構造の進化



クランの生成と親族構造の進化

- 親族はサイクル（民族）内に分布
- クラン数を増やすには周期 c_m か民族の数 n_t を増加
- r が大きくなると c_m, n_t が増える

諸変数の r 依存性



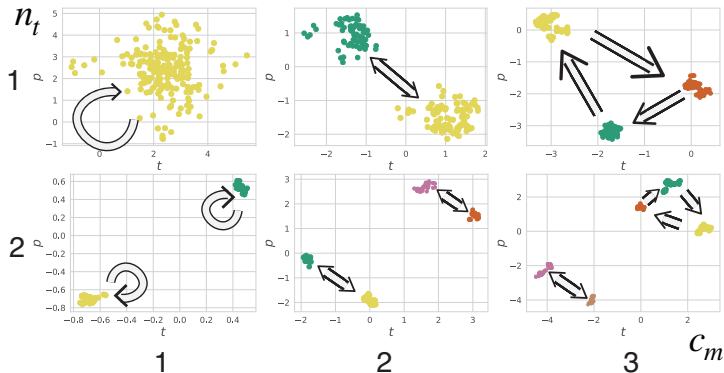
c_m, n_t の r 依存性

- r が大きくなると c_m と n_t は増大
- どの変数も $0.2 \leq r \leq 1$ と $r \geq 10$ のあたりにプラトー
- 上は $N = 100$, $\mu = 0.03$ の結果

$t - p$ 空間上で家族間に働く力

- $t - p$ 空間上でクラスターに接近すると
近親者、義理の親族、ライバルを同時に得る
 - $r = 2$ で協力者二人とライバル一人の寄与がつりあう
- $r < 2$ (> 2) では家族間に引力 (斥力) が働く
- $r < 2$ では二クランの相互選好 ($c_m = 2, n_t = 1$) が最適
 - $r > 2$ ではクラン数を増やす ($c_m n_t \rightarrow \infty$) のが最適
- * c_m と n_t のどちらが増えるかは N, μ に依存

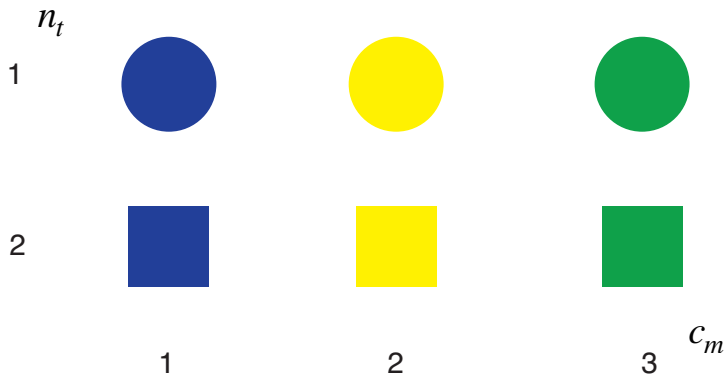
親族構造の進化



クランの生成と親族構造の進化

- $c_m = 2$ or $c_m n_t = \infty$ が最適だが、
実際には多様な周期 c_m や民族の数 n_t を持つ構造が進化

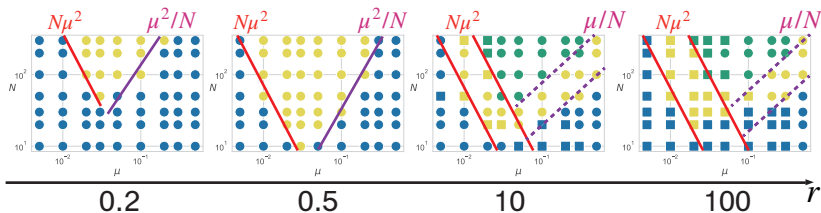
親族構造の進化



判例

- 色は周期 $c_m = 1$ (青)、2 (黄)、 ≥ 3 (緑) を表す
- 形が部族数 $n_t = 1$ (丸)、 ≥ 2 (四角) を表す

相図



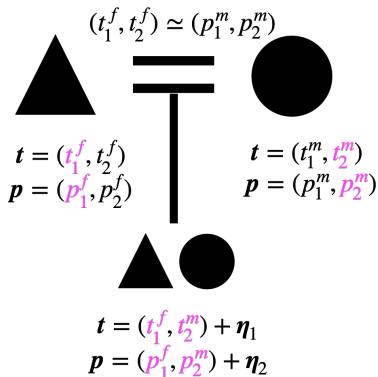
進化する構造の N, μ 依存性

- $N\mu^2$ が大きくなると多くのクランが生まれる
- μ^2/N または μ/N が大きいと壊れる
- r と 2 との大小関係が相境界の傾きを決定

相境界の N, μ 依存性

- 局所安定な構造が複数あり、揺らぎにより遷移
 - 全体の t, p の分散は $N\mu^2 \rightarrow$ 構造生成の駆動力
 - 選好するクラン間の t, p のミスマッチがあると崩壊
 - 引力優位なら単峰的に分布するので、重心の揺らぎが μ^2/N
 - 斥力優位なら半径 μ で平たく分布しているので、マッチする家族がいる確率は μ/N
- μ^2/N (or μ/N) が小さい時に構造が安定的に存在
- 相境界は $N\mu^2, \mu^2/N, \mu/N$ でスケールされる

親族構造の多様性



両親からの形質と選好の継承

- 男性の t と女性の p が近いときに結婚する
- 形質と選好は一次元目を父、二次元目を母から継承
- 初期には形質と選好が一様に $(0, 0)$ の状態を与える

家族の人口成長率

各家族 i について人口成長率 growth は

$$d_{i,j} = \min(|t_i - t_j|, |p_i - t_j|, |t_i - p_j|),$$

$$D_f^i = \langle \exp(-d_{i,j}^2) \rangle_j,$$

$$D_r^i = \langle \exp(-|p_i - p_j|^2) \rangle_j,$$

$$g^i = b \exp(-d_c(1 - D_f^i) - d_m D_r^i).$$

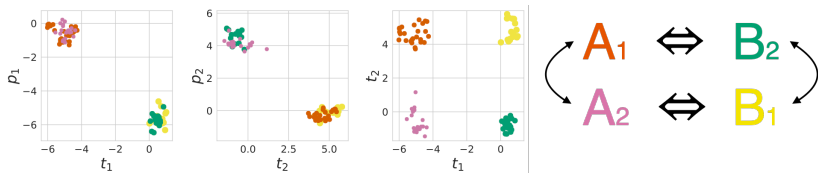
i の男が j の女と結婚する確率は $\exp(-|t_i - p_j|^2)$ に比例

パラメータ ($r = d_m/d_c$)

d_c 協力の必要性（非協力に伴う死亡率の増分）

d_m 競争回避の必要性（競争に伴う死亡率の増分）

親族構造の生成



婚姻・親子関係を持つ親族構造の形成

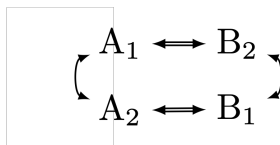
- 家族は $t-p$ 空間でクラスター化 → クラン
 - クラン間関係で親族構造、形質の分化で出自様式が進化
 - 出自様式では父系、母系、双系がありうる
- * 本例では、両親の形質を参照する双系出自が進化

親族構造の分類

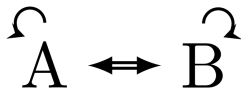
クラン内婚



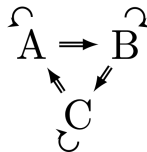
限定交換



双分組織



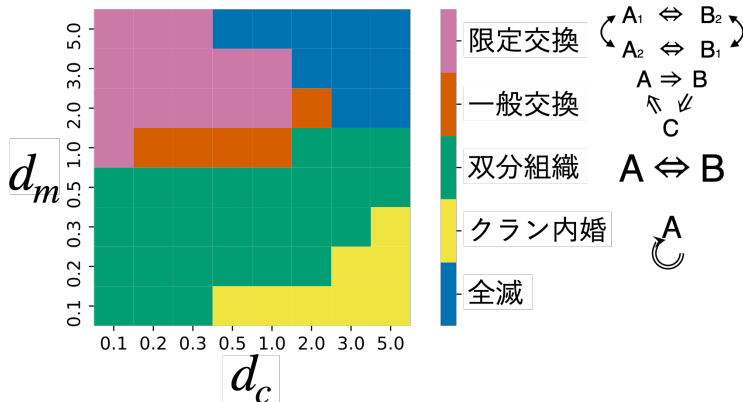
一般交換



婚姻周期 c_m と出自周期 c_d に応じた親族構造の分類

$c_d \backslash c_m$	1	2	3 ~
1	クラン内婚	双分組織	一般交換
2 ~	—	限定交換	—

親族構造の相図

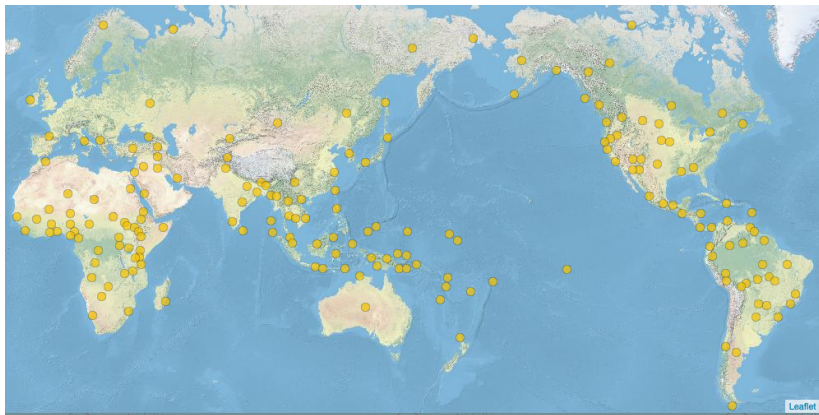


d_m/d_c 依存的な親族構造の転移

- d_m/d_c (競争回避の必要性/協力の必要性) が大きくなると順にクラン内婚、双分組織、一般交換、限定交換に遷移
- d_m/d_c が大きいほどクラン数を増やして構造を複雑化

民族誌データベースによる検証

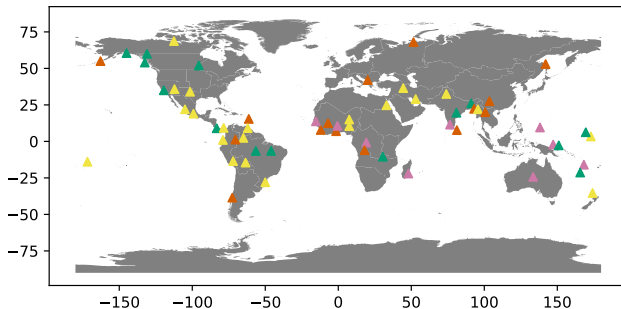
Standard Cross-Cultural Sample



データ

- 186 の社会について 2000 項目のデータ（欠損は多い）
- 18、19 世紀の民族誌調査に基づく

親族構造の分布



親族構造の分布

- クラン内婚を黄、双分組織を緑、一般交換を橙、限定交換を桃で示す
- 伝播ではなく環境への適応による収斂進化に見える

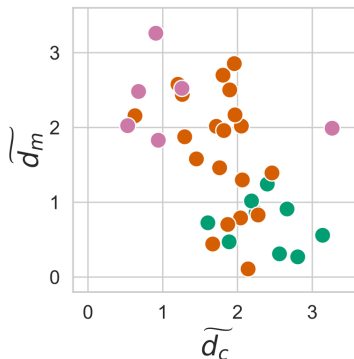
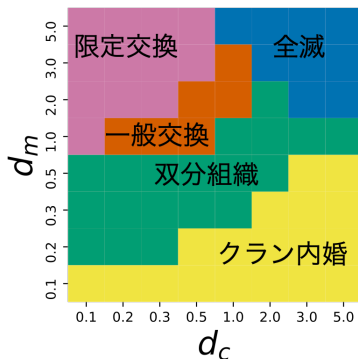
非協力による生存率低下の指標

- SCCS1737: 徴税の重さ
 - SCCS791: 社会内の紐帯の強さ
 - SCCS905: 社会内での褒賞の頻度
- } 社会内の連帯関係
- SCCS1772: 異民族への敵意
 - SCCS1770: 異民族への暴力の許容性
- } 社会間の争い
- 平均 0、分散 1 に標準化して平均をとることで欠損を補う
- * 社会レベルでの協力の必要性和程度に関する指標

結婚にまつわる競争性の指標

- SCCS173 : 強姦への態度の厳しさ
 - SCCS960 : インセストタブー違反の罰
 - SCCS962 : 婚前交渉に対する罰
- } 姦通への態度
- SCCS782 : 社会内の暴力の禁止度
 - SCCS768 : 社会内の争いの頻度
- } 社会内の争い
- 平均 0、分散 1 に標準化して平均をとることで欠損を補う
- * 姦通に起因する社会内の争いの程度に関する指標

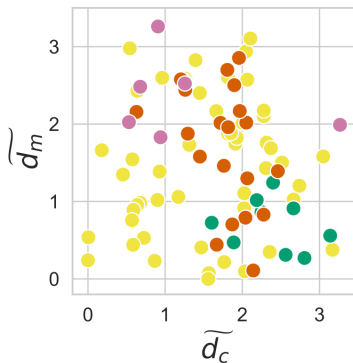
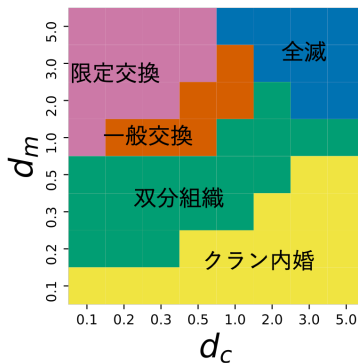
親族構造の相図



理論と統計解析の結果の定性的な整合性

- 最小値が0になるように適当な値を足して、 $\widetilde{d}_c$ 、 $\widetilde{d}_m$ を推定
- d_m/d_c （競争回避の必要性/協力の必要性）が大きくなると順に双分組織、一般交換、限定交換が見られる

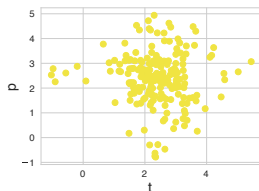
親族構造の相図



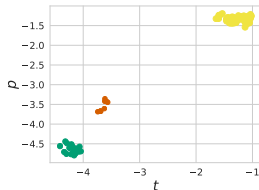
相図

- クラン内婚は広く分布してしまっている
- 親族構造以外の政体等の社会構造により環境に適応？

cf. 動物の「親族構造」



A



A B C

義理の親族のつながりを認知しない場合

- モデルから義理の親族の連帯を削除
- クラスターは $t = p$ 線上に整列 → 種分化（生殖隔離）
- 認知特性が親族構造を人間固有の社会組織にしている

共通部分

結婚がもたらす
つながりと反発



普遍のメカニズム

量的差異

協力の必要性
競争回避の必要性



多様性の由来

まとめ

- 同胞の絆、義理の親族の連帯、ライバルの競争に注目し、それを規定する形質と選好の文化進化をモデル化
- 結婚と義理の親族の認知だけで成り立つ普遍のメカニズム
- 親族構造の環境条件依存性はデータと整合的
- Itao and Kaneko, PNAS 2020; PRSB 2022; PNAS 2024.

人口転換における二つの普遍的経路

近代社会における出生率の低下

- 前近代は出生率と死亡率が共に高い多産多死社会
 - まず死亡率が下がり、多産少死社会で人口成長
 - 次に出生率も下がり、少産少死社会に
 - 近年はさらに出生率が低下して人口減少
- 低下の仕方に典型的なパターンやメカニズムはあるか？

人口転換の諸「相」：定性的に同一視できる現象のクラス

第一次・第二次人口転換

- 女性一人当たりの平均出生率（TFR）が2に至る過程を第一次人口転換と呼ぶ
- TFR がさらに下がる過程を第二次人口転換と呼ぶ

統一成長理論 by Oded Galor

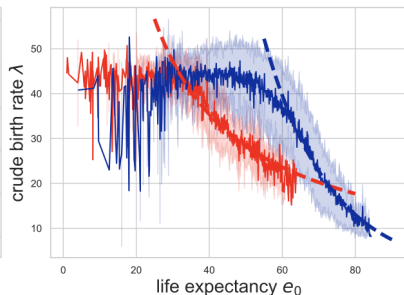
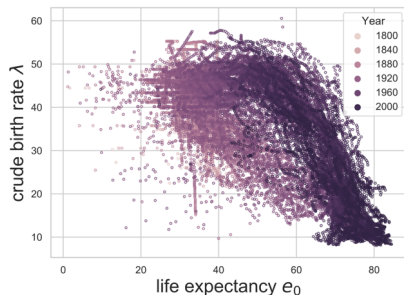
- 人口規模が定常成長するマルサス成長相
- 一人当たり GDP が定常成長する近代成長相

問い

- これらの相が西欧で段階的にみられるのは良いとして、その他の地域にどれだけ当てはまるか？
- これらの相を駆動する普遍的なメカニズムはあるか？

出生率と寿命の関係

平均寿命と出生率の関係 1930年以前・以後の経路

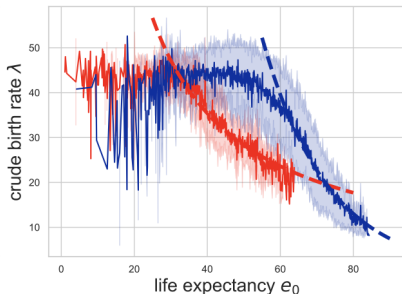
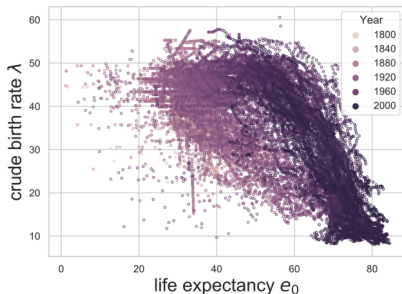


粗出生率 λ と平均寿命 $e_0 (= 1 / \text{死亡率})$

- 195 カ国 200 年間の粗出生率 λ と平均寿命 e_0 をプロット
 - 粗出生率とは人口 1000 人あたりの新生児の数
 - 右図では 1930 年以前（赤）と以後（青）で色分け
- 平均寿命の増加の時期依存で異なる経路の人口転換

出生率と寿命の関係

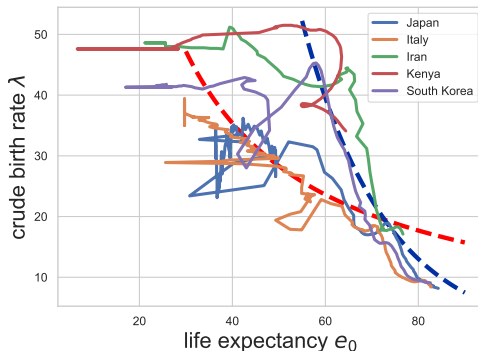
平均寿命と出生率の関係 1930年以前・以後の経路



粗出生率 λ と平均寿命 $e_0 (= 1 / \text{死亡率})$

- λe_0 と $\lambda \exp(e_0/18)$ がそれぞれ保存する二つの相が存在
- 平均寿命の増大に対する出生率の応答の仕方が二通り
- Phase I (赤) : $\lambda e_0 = 1400$ はおよそ、年率 1% の人口成長
- Phase II (青) : $\lambda \exp(e_0/18) = 1100$ は別のメカニズムを示唆

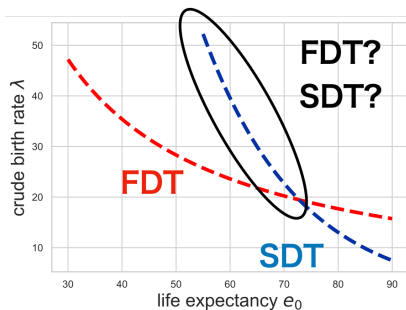
各国の経路



国別の人口転換の経路

- 日本・イタリアは Phase I（赤）で落ちて、マスターカーブの交点のあたりで Phase II（青）へ
- イラン・ケニアはおおよそずっと Phase II
- 韓国は Phase 間をシフト

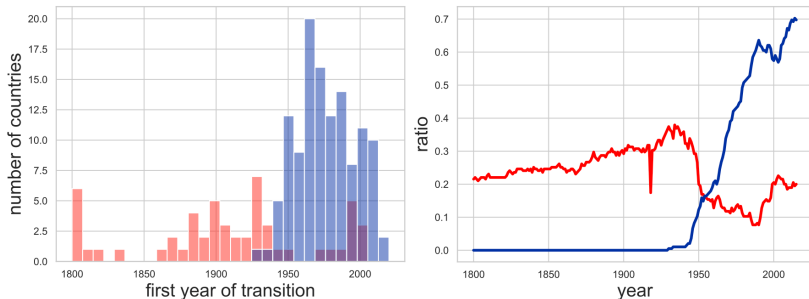
人口転換の分類について



人口転換の普遍的経路

- 赤線は人口成長率一定条件なので、 e_0 が大きくなると $TFR = 2$ に漸近（第一次人口転換）
 - 青線が赤線に交差した後は $TFR < 2$ なので第二次人口転換
 - 黒の部分は $TFR > 2$ だが第二次人口転換と見るべき？
- マスターカーブとの距離に基づく分類を提案

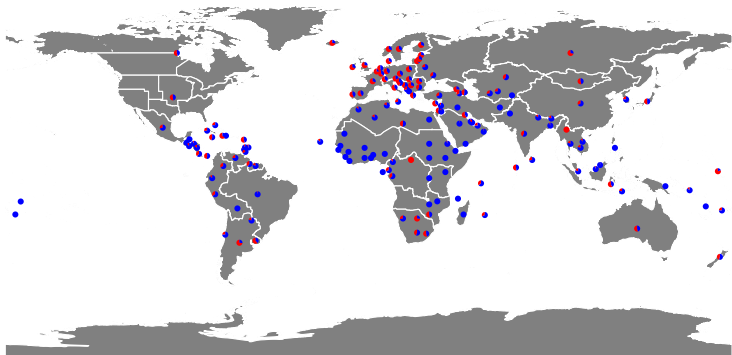
転換のタイミング



国別に人口転換の相を同定

- λe_0 一定の転換 (Phase I) は時期を問わない普遍的な現象
- $\lambda \exp(e_0/18)$ 一定の転換 (Phase II) は戦後特異的な現象
- 1950 年頃から急に Phase II の割合が増える

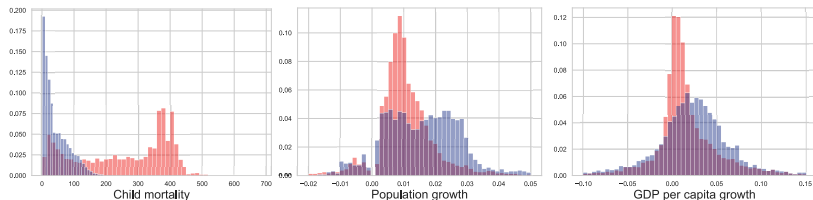
転換の相の分布



国別に人口転換の経路を同定

- 欧米日豪などの先進国では Phase I の期間が長い
- アジアやアフリカの新興国の多くでは Phase II が優位

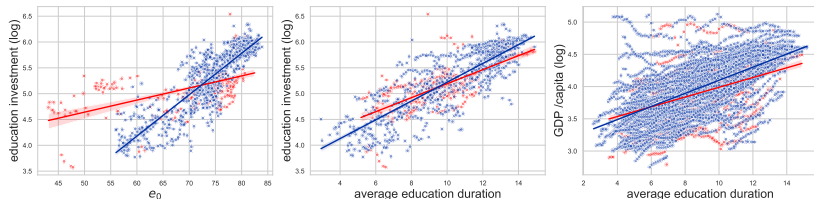
相別の特徴



人口転換の期間中の諸特徴量

- 乳幼児死亡率、人口と GDP の増加率は相ごとに特徴的
 - Phase I は人口増加率が 1% 程度で一定
 - Phase II は一人当たり GDP 増加率が 2% 程度で一定
- 統一成長理論の二相と整合的

相別の特徴



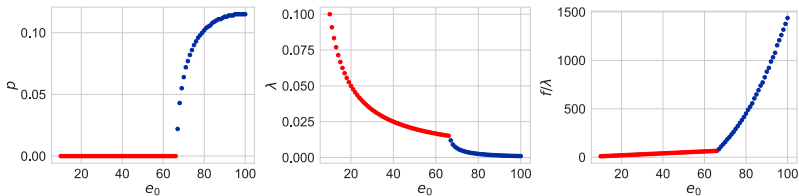
人口転換の期間中の諸特徴量

- * 先行研究では、教育により子供の「量」よりも「質」に投資することが出生率低下の要因と議論される
- 特に Phase II で寿命に対して教育投資が指数的に増大
- 教育期間に対しコストも効果（GDP/capita）も指数成長

$$\begin{array}{c}
 e_0 \\
 \left(\begin{array}{|c|c|} \hline \text{education} & \text{production} \\ \hline p & 1-p \end{array} \right)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{Cost: } \lambda(e_0 + c \exp(\beta p e_0) - c) \leq 1 \\
 \text{Product: } \max_{\lambda, p} \lambda(1-p)e_0(1 + \alpha \exp(\beta p e_0) - \alpha)
 \end{array}$$

出産と教育のトレードオフ

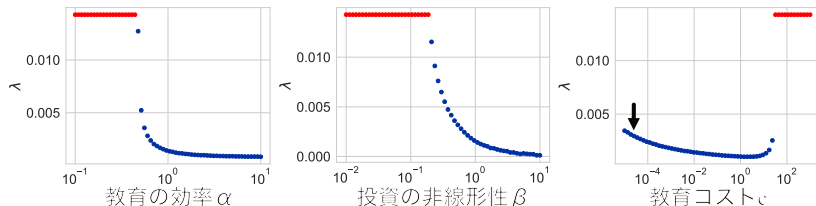
- 寿命 e_0 のうち $p e_0$ を教育、残りを生産に使うとする
- 教育にはコストがかかるが、その分生産効率を上げる
- 教育の効率 α 、投資の非線形性 β 、教育コスト c
- 予算制約のもとで λ, p を動かして総生産性を最適化



Phase 間の転移

- ある e_0 で教育期間 p が急増
 - λ, e_0 の関係は実データを再現
 - 子供の数を最大化する $p = 0$ だと λe_0 が保存
 - 総生産性を最大化する $p > 0$ だと $\lambda \exp(\beta p e_0)$ が保存
 - 教育に注力する Phase II では GDP /capita が定常成長
- * 転移点は国ごとのパラメータ α, β, c に依存

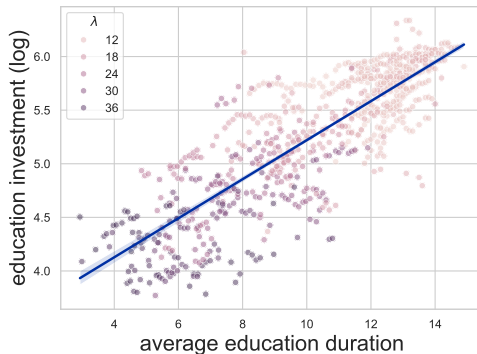
政策的介入効果の検討



出生率を改善する政策の検討 ($e_0 = 70$)

- 教育の効率 α 、投資の非線形性 β が小さく、教育コスト（家計の負担） c が大きいと Phase I になる
- Phase II のまま、出生率を上げるには c を下げるしかない

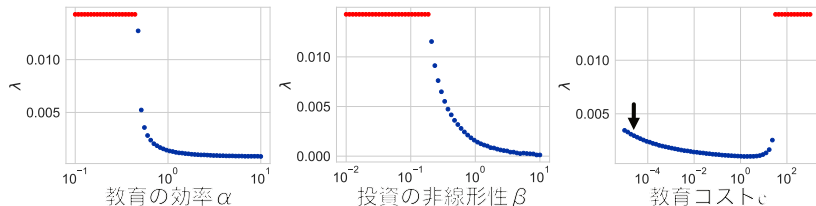
教育コストと出生率の関係



教育コスト c の削減は出生率を改善するか？

- 青線より下の領域で教育コストは割安
- 小さい c のもとで高い出生率 λ が実現

近代化の過程と相轉移の関係



近代化の過程について

- 近代化によりマクロパラメータ α, β, c が変動
 - Phase II は α, β が大きく、 c が小さいときに生じやすい
- 安くて効率的な教育と、社会の流動性の増大が Phase II への移行をもたらした？
- 新興国の近代化は α, β, c か行動様式の文化伝播による？

まとめ：人口転換の二つの普遍的経路

データに基づくマクロな普遍法則

- 195 の社会について粗出生率 λ と平均寿命 e_0 の関係进行分析
 - 各国の経路は $\lambda e_0 = 1400$ または $\lambda \exp(e_0/18) = 1100$ の二つのマスターカーブのいずれかに沿う
- 人口転換についての普遍的なマクロ現象論
- λe_0 を保存する Phase I は時期を問わずに起きる
 - $\lambda \exp(e_0/18)$ を保存する Phase II は戦後特異的に起きる
 - 出産に投資するのが Phase I、教育に投資するのが Phase II
- 出生率低下の普遍的なメカニズムを提案

Itao “Two universal pathways in demographic transition” *arXiv*.

contact: kenji.itao@riken.jp

補遺：親族論

カリエラ族（オーストラリア）の親族体系

- 祖父と孫に対する呼称が Maeli
 - 母の兄妹の娘、妻の姉妹、兄妹の妻への呼称が Nuba
 - 親族をいくつかのカテゴリーに分類
 - どれかのカテゴリーの人とのみ結婚できる（本例は Nuba）
- * 分類やルールには通文化的な類型性

親族代数学

- Lévi-Strauss の要請で A. Weil がはじめた
 - j が i の妻を ${}_iW_j$ 、 i が k の父を ${}_iC_k$ とかくと
Maeli は $C^{-2} = C^2$ 、Nuba は $C^{-1}WC = W$ と表せる
 - Kariera 族の体系は $C^4 = W^2 = I$ 、 $WC = CW$ のアーベル群
- * 群の位数によって類型性を整理

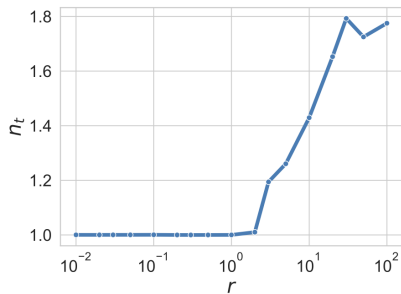
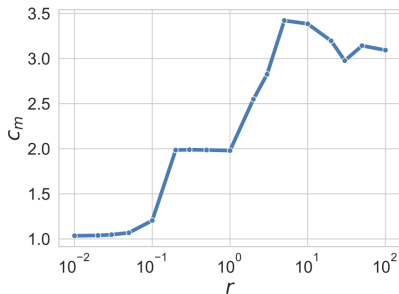
『人間の由来』(Darwin, 1871) とそれへの批判

- 協力的な集団の進化の由来は集団間競争に求めるべき
- マルチレベル進化のためには、小さな集団内分散と大きな集団間分散が必要
- 人間社会はマルチレベル進化の対象となるのか？

近年の知見 (Bowles, 2006)

- 一夫一婦婚や食べ物の共有の慣習は集団内分散を縮小
 - 頻繁な民族対立は集団間分散を増大
- 人間社会にマルチレベル進化は働きうる
- * 直接戦争をせずとも人口成長率の差があれば良い

諸変数の r 依存性



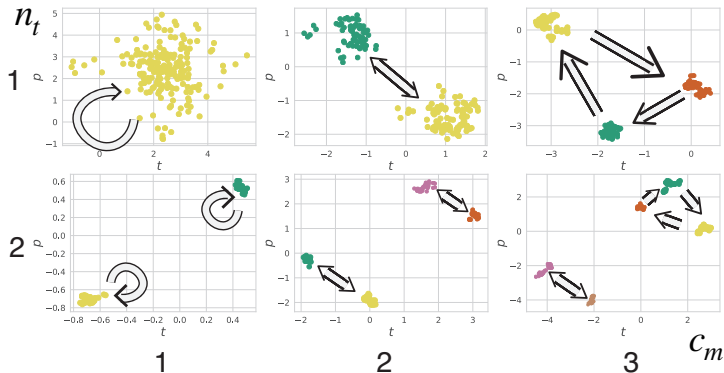
c_m, n_t の r 依存性

- r が大きくなると c_m と n_t は増大
- どの変数も $0.2 \leq r \leq 1$ と $r \geq 10$ のあたりにプラトー
- 上は $N = 100$, $\mu = 0.03$ の結果

$t - p$ 空間上で家族間に働く力

- $r < 2$ では近親者、義理の親族、ライバルを同時に得ると得
→ ニクランが相互に選好する構造 ($c_m = 2, n_t = 1$) が最適
- $r > 2$ では近親者、義理の親族、ライバルを同時に得ると損
→ なるべく多くのクランを持つ構造 ($c_m n_t \rightarrow \infty$) が最適
- $r > 2$ (< 2) では家族間に引力（斥力）が働く
- * c_m と n_t のどちらが増えるかは N, μ に依存

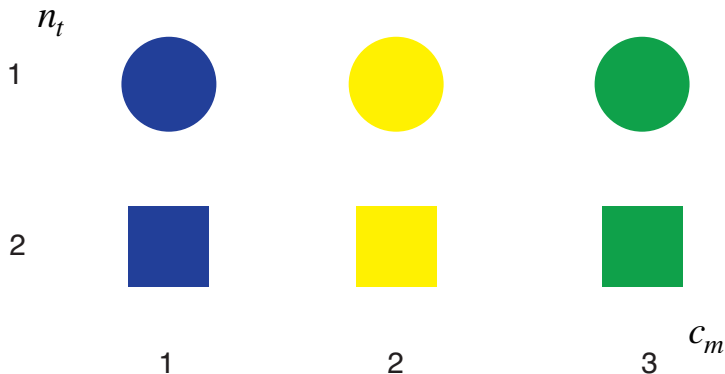
親族構造の進化



クランの生成と親族構造の進化

- $c_m = 2$ or $c_m n_t = \infty$ が最適だが、
実際には多様な周期 c_m や部族数 n_t を持つ構造が進化

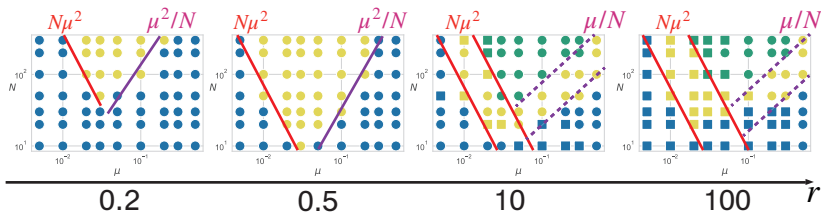
親族構造の進化



判例

- 色は周期 $c_m = 1$ (青)、2 (黄)、 ≥ 3 (緑) を表す
- 形が部族数 $n_t = 1$ (丸)、 ≥ 2 (四角) を表す

相図



進化する構造の N, μ 依存性

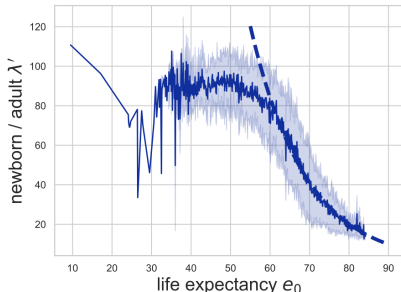
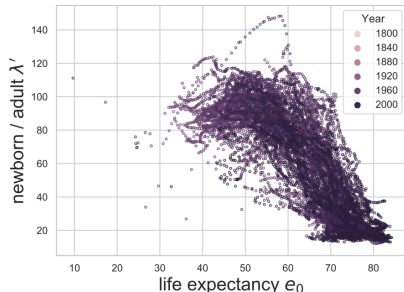
- $N\mu^2$ が大きくなると多くのクランが生まれる
- μ^2/N または μ/N が大きいと壊れる
- r と 2 との大小関係が相境界の傾きを決定

相境界の N, μ 依存性

- 局所安定な構造が複数あり、揺らぎにより遷移
 - 全体の t, p の分散は $N\mu^2 \rightarrow$ 構造生成の駆動力
 - 選好するクラン間の t, p のミスマッチがあると崩壊
 - 引力優位なら単峰的に分布するので、重心の揺らぎが μ^2/N
 - 斥力優位なら半径 μ で平たく分布しているので、マッチする家族がいる確率は μ/N
- μ^2/N (or μ/N) が小さい時に構造が安定的に存在
- 相境界は $N\mu^2, \mu^2/N, \mu/N$ でスケールされる

補遺：人口論

労働人口あたり出生率と寿命の関係

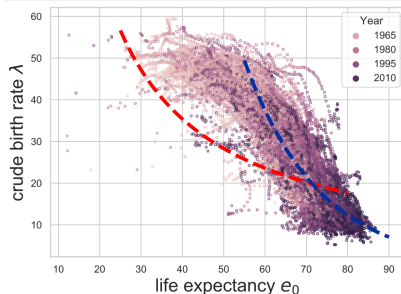


労働人口あたり出生率 λ' に対するプロット

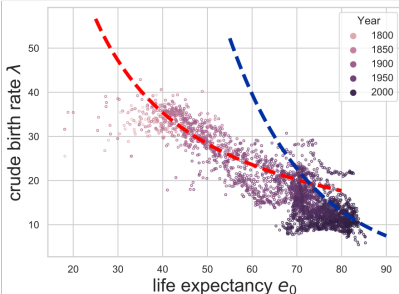
- 粗出生率 λ (新生児数/人口 $\times 1000$) の代わりに λ' (新生児数/15～60歳人口 $\times 1000$) を用いた
 - 1950年以降のデータしかないが Phase II についてはほぼ同じで $\lambda' \exp(-e_0/14)$ を保存 (cf. $\lambda \exp(-e_0/18)$ の保存)
- 保存量の違いは高齢者の増加による自然な帰結ではない

異なるデータベースでの検証

UN



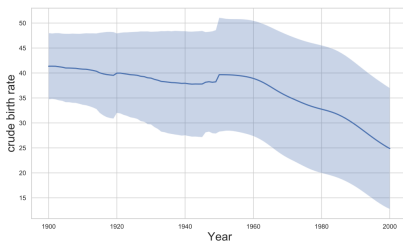
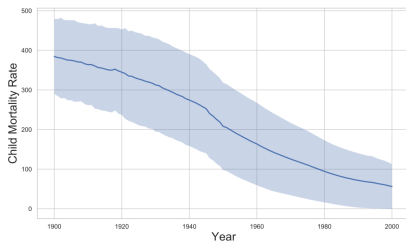
HMD



粗出生率 λ と平均寿命 e_0 の関係

- Gapminder のデータは不確かなものも含んでいるので、UN、HMD のデータでも検証した
- UN は 1950 年以降、HMD は西欧のデータが中心だが、二つの相の普遍性を支持

1950 年頃に何が起きたか？



乳幼児死亡率、粗出生率の経時変化

- 乳幼児死亡率は 20 世紀を通じて減少（1950 年が変曲点？）
- ペニシリンの発見は 1928 年
- 粗出生率は全般的な減少傾向の中で 1950 年付近で微増（ベビーブーム？）

今のモデルは現代の行動に対しても妥当か？

- 親の投資として子供の出産と教育のトレードオフを考えるのは、現代的には不適當？
 - 子供への投資と親の余暇のトレードオフを考えうる
- △ 一方で、データの的には第三の相があるようには見えない
- Gapminder のデータは 2015 年までしかないので、ここ 10 年のデータを加えると新しい相があるかも
- データと理論の両面から現代の行動を検討する可能性

第一次・第二次人口転換との関係

- 人口転換の理論（Lesthaeghe 2014, Zaidi and Morgan 2017）では第一次人口転換が近代化による子供のコストの増加、第二次人口転換が未婚化および無子化に関係づけられる
- ↔ Phase I を FDT、Phase II を SDT とみなせば、今回の結果は子供のコストの増加が SDT のダイナミクスをうむと示唆

「統一成長理論」との関係

- 人口成長率一定のマルサス成長相と一人当たり GDP 成長率一定の近代成長相は Phase I, II と対応
- これらは第一次・第二次人口転換とも対応
- ガローのモデルよりもはるかにシンプルに相転移を説明し、加えて保存量も導出