

ベイズはコンピュータ、  
人工知能の父である!!

植野真臣

電気通信大学

情報理工学研究科

情報数理工学プログラム

# 今後のスケジュール（予定）

- 4月13日 授業の概要とガイダンス
- 4月20日 ベイズの定理
- 4月27日 ベイズはどのように誕生したか？
- 5月11日 ベイズはコンピュータ、人工知能の父である！！
- 5月18日 アランチューリングとベイズ
- 5月25日 ビリーフとベイズ
- 6月1日 尤度と最尤推定(1)
- 6月8日 尤度と最尤推定(2)
- 6月15日 ベイズ推定と事前分布(1)
- 6月22日 ベイズ推定と事前分布（2）
- 6月 29日 国際会議でオンデマンド授業：データサイエンス：ルービン因果推論
- 7月6日 テストのデータサイエンス
- 7月13日 階層ベイズとデータサイエンス
- 7月27日 ベイジアンネットワークと因果推論
- 8月3日 テストと総括

# 授業の目標

ベイズの定理とコンピュータ誕生の  
関係を学ぶ！！

文献：シャロン・バーチュ・マグレイン著。  
富永 星訳。異端の統計学 ベイズ。草思  
社。2013。

トーマス ベイズ

•1702-1761 ロンドン

ピエールシモン ラプラス

1749-1827

フランス 数学者、物理学  
者

1814年、現在の定理を導く

$$P(A_i|B) = \frac{P(A_i)P(B|A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i)P(B|A_i)}$$

地球科学、気圧変動の推定に用いる。  
ラプラスはナポレオンにかわいがられ、  
内務大臣も務めた。

# ラプラス批判

ラプラスの死後、フランス革命が起き、多くの学者たちはラプラス批判を繰り返した。ドモルガンは、ラプラスは人の論文を盗用している、と書いている。この噂はそれから150年間信じられてきた。ジョン・スチュアート・ミルやマリはラプラスは政治家に媚びへつらい、民衆から搾取してきたと書いている。数学的理論への批判というより、フランス革命による王族への反抗であり、それに巻き込まれた形になってしまったのである。

# 頻度主義の台頭

数学者ポアソン、統計学者カールピアソンは、ラプラスの手法は誤用とても正しい手法ではないと批判している。特に事前確率や主観確率について強く批判している。ベイズの定理は絶対に用いてはいけないもので葬り去るものであると統計学の世界では信じられてしまった。

特に統計学を開いたカールピアソンとロナルドフィッシャーはベイズを忌まわしいものと信じ切っており、それを用いる人は統計学者ではないと断言していた。

# 頻度論の哲学

理論的に何度でも繰り返せる出来事だけを統計の対象とし、サンプルだけが唯一の情報源で、新たに得られたデータは、それぞれ別の問題とみるべきであると考えていた。また、統計的に判断ができるだけの十分なデータ数があればよいが、そうでないのであればそのデータはすべて廃棄すべきであると考えていた。

ロナルド フィッシャー

1890-1962

イギリス、ケンブリッジ大学

検定、分散分析、最尤法など現在  
統計学の礎を築く。大のベイズ嫌  
いで、ベイズの普及を遅らせた張  
本人。ベイズの定理は誤りである  
と強く主張。ベイズ学者から見  
ると大悪役！！

簡単に検定を説明しましょう！！

# 検定

薬Dは血糖値を下げるのに有効かどうかをどうやって確かめるか？

# 検定

薬Dは血糖値を下げるのに有効かどうか  
をどうやって確かめるか？

患者からランダムに二つのグループA,B  
を作り、Aには薬Dを投与し、Bには何も  
投与しない。実験の最初と最後に血糖値を測  
る。各グループの患者の血糖値の平均を  
求め、Aの平均値のほうがBより有意に大  
きければ良い。

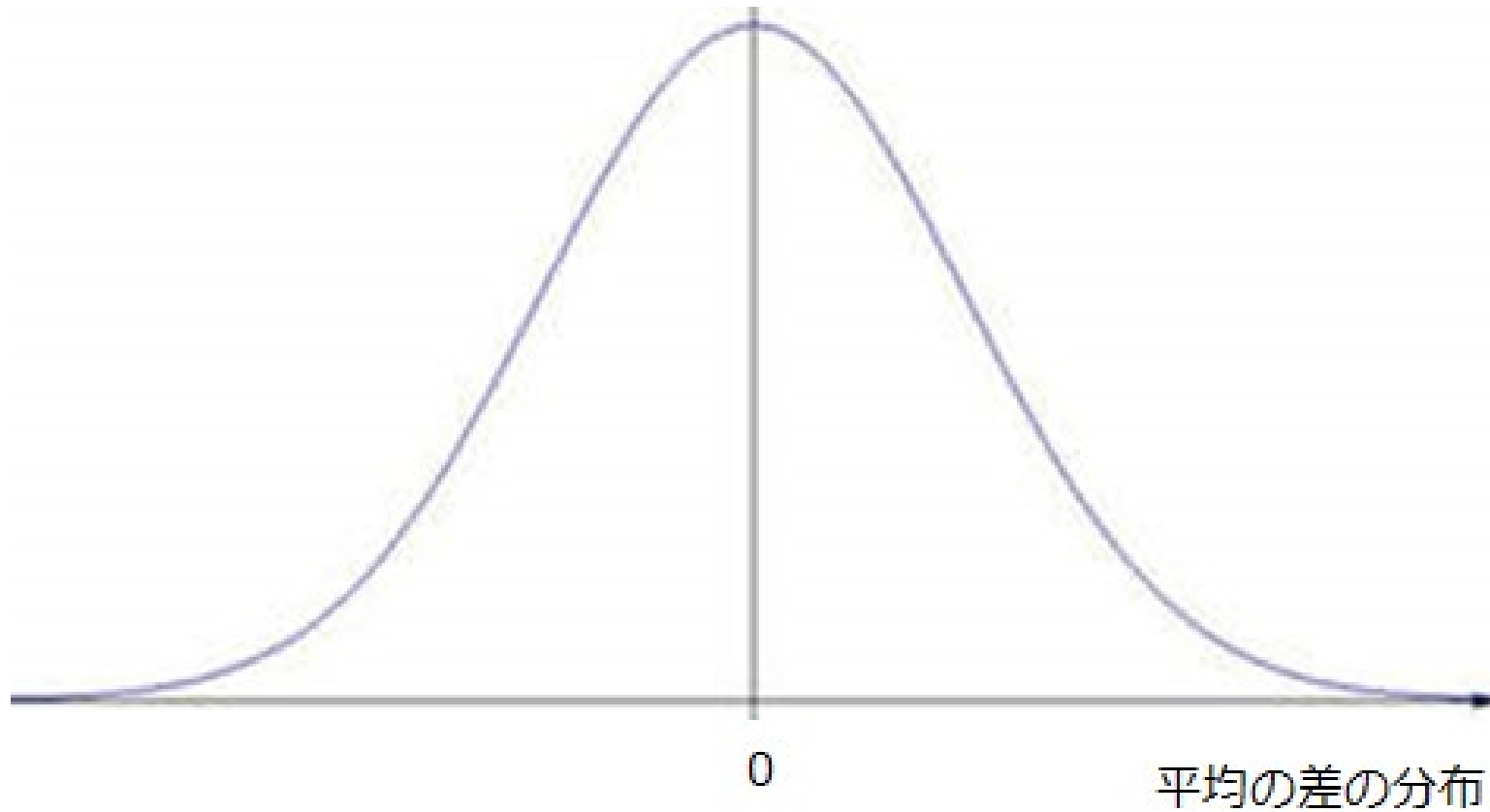
# 仮説

- 帰無仮説：棄却されることを期待して立てる仮説「2グループの平均に差がない」
- 対立仮説：示したい仮説「2グループの平均に差がある」

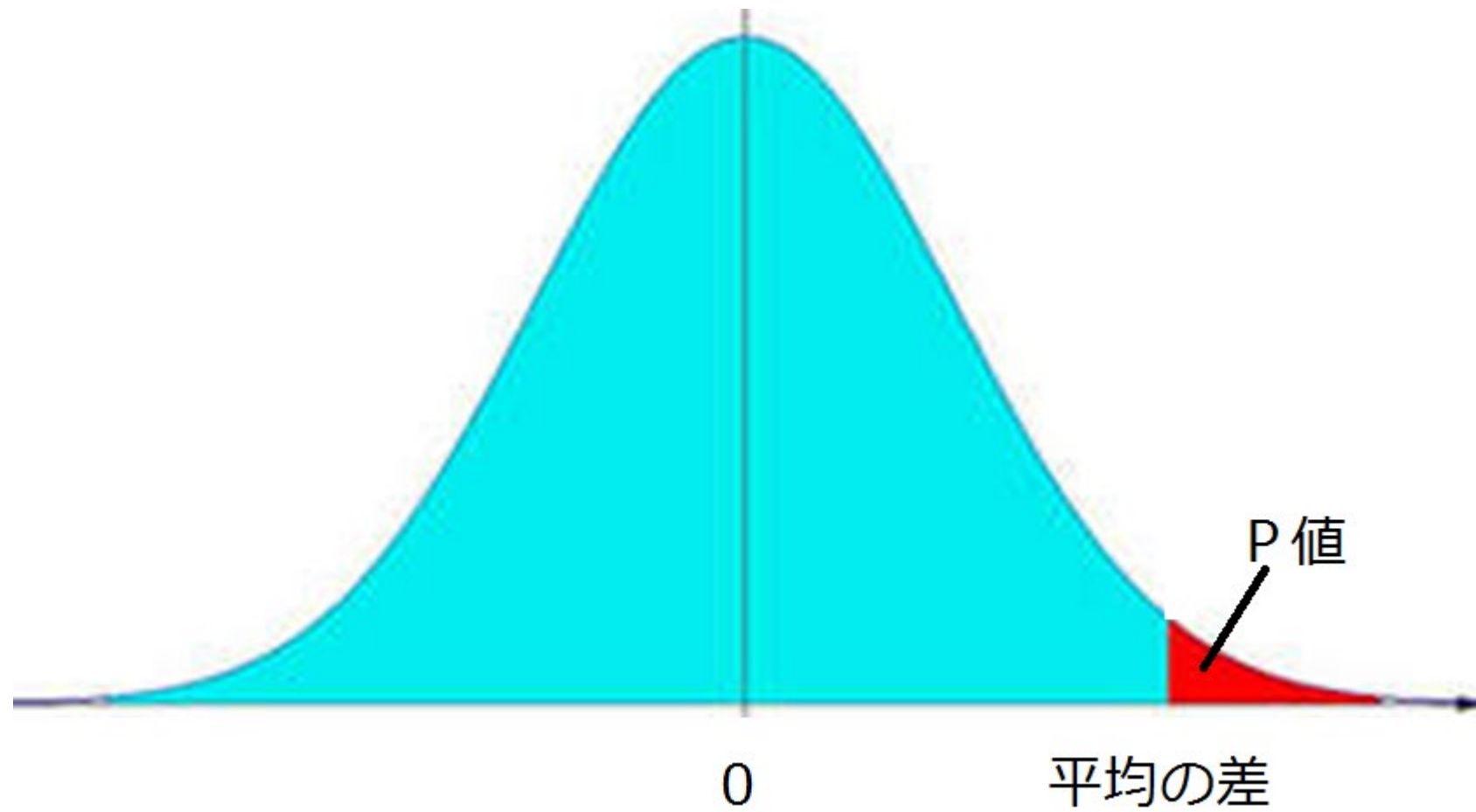
統計的検定では

帰無仮説を元に理論を作  
ります！！

2グループが同一正規母集団から発生しているときの差異の分布



# 誤り確率をP値



# 検定とは

有意水準  $\alpha = 0.05$  などを設定し、 $P$  が  $\alpha$  以下のときに仮説が棄却され、有意差があったと判定できる。



# ジェフリーズの頻度論批判

フィッシャーが導入した 有意水準、  
またはP値について大きな疑問が  
あった。帰無仮説に従ってモデルを  
つくり、データがそのモデルに当て  
はまる確率がP値である。棄却したい  
のでP値が小さいと棄却できる。

# ジェフリーズの頻度論批判

なぜ、実際に起きていない結果をよりどころに、仮説が棄却されて、捨て去らねばならないのだろうか？一つの実験を何度もランダムに繰り返すというが、そんなことはできない。特定の地震を繰り返すことは無理じゃないか？頻度論学者は、データを仮説を棄却するためにのみ用いて、仮説の正しさを証明するためには用いることができない。ベイズでは、データに基づいた仮説の事後確率を直接計算することができるのに。

# ベイズ V.S. 統計検定

- $H$  仮説、 $\neg H$  帰無仮説（棄却したい仮説）
- $X$  データ
- ベイズ的考え方

$$P(H|X) = \frac{P(X|H)P(H)}{P(X|H)P(H) + P(X|\neg H)P(\neg H)}$$

- 統計的検定の考え方

$P(X|\neg H)$ がある値より小さいと $P(H|X)$ が大きいと考える（根拠薄い）

# 学問上の対立

王立統計協会のジャーナルで二人のやり取りが何度も掲載されたが、大衆にはフィッシャーが受け入れられた。そもそもジェフリーズは温和で人を攻撃しないが、フィッシャーはその逆でわかりやすい。また、フィッシャーの手法は数式が少ないが、ジェフリーズの手法は複雑で難しい。さらにジェフリーズは話すのが不得意で、ジェフリーズが正しいときも、他の人には負けているように見えたといわれている。

# ベイズ統計の没落

1939年 フィッシャーらの活躍で、ベイズは事実上統計学の中で、夕  
ブーになる

# 軍隊で生き続けたベイズの定理

ラプラス以降、フランス軍は、敵の位置や空気の密度や風の方角、大砲の誤差や初速などの多くの情報を入力して、照準の決め方をベイズの定理により推定した表を学ばせていた。第一次世界大戦中は、弾薬の品質管理にベイズの定理を用いていた。第二次世界大戦中にも続けられ、オペレーションズ リサーチと呼ばれるようになった。

# 第二次世界大戦で大活躍

第二次世界大戦中ドイツ軍のUボートが大きな戦果をあげ、そのための暗号 エニグマを解読することが連合国の共通の目標となる。

英国首相 チャーチルからの指令でエニグマを解くための数学者が集められる

ケンブリッジのあの人も

反ベイズの旗手ロナルド フィッ  
シャーも手を挙げたが、ドイツの  
学者たちと親しい関係にあり、却  
下された。

選ばれたのは

選ばれたのは

- アラン チューリング
- 1912- 1954
- ケンブリッジ大学
- 数学者

- 第二次世界大戦時、ドイツ軍の潜水艦Uボートに連合軍は劣勢となっていた。Uボートをつかさどるドイツ軍の最強の暗号「エニグマ」を解読したイギリスの天才数学者アラン・チューリング。天才であるが故に純粹でゲイであるが故に孤独な、そして愛に飢えた独りの天才数学者が、戦争終結を早めた。この事実をイギリス政府は50年に渡って極秘扱いとされていた。そして、アラン・チューリングはベイズを用いて開発した暗号解読機は、現在のコンピュータの元となったのである。

# BOMBE (世界で最初のコンピュータ)

- ベイズを用いて暗号の原文を確率的に推定する機械を開発する
- ばらばらに入ってくるデータを逐次的に処理するオンライン学習機

BOMBE (1940)

エニグマ解読器 (ベイズ復号機)

# ジョーン・エリザベス・ラウザー・マ レー

ケンブリッジ大学の数学科出身。  
Welchmanが指導教員。数学で大学1位  
の成績で大学院で学位を目指したが女性  
は学位をとれないことを知り、指導教員  
より暗号学校を勧められ、そこから無線  
通信研究所に配属される。

パズルで募集されたのはフィクションだ  
が、チューリングとの婚約などはすべて  
本当。戦後も無線通信研究所で働き、副  
主任を経てインドへ赴任。戦後7年後に  
インドで退役軍人マレー中佐と結婚。6  
0歳で研究所を引退。

Irving John ("I. J."; "Jack") Good

ベイズの専門家

# アメリカからの支援

- 連合軍から、アメリカの研究者が協力者に加わった。

# クロード シヤノン

- 1916-2001
- 米国 ベル研究所
- 情報理論の創始者
- 伝達情報量、相互情報量はベイズの事前分布の情報量と事後分布の情報量の差異のこと。すなわち、データを得ることによってどれほど情報を得ることができるかということを示している。

# 暗号理論

- ベイズ復号機には、情報の正しさを評価するために、事後確率と事前確率の比に対数をとったベイズファクターが用いられるようになった。
- シヤノンも 第二次世界大戦のプロジェクトのためにベイズ理論を多用している。

# Uボートの壊滅

- チューリングのベイズ復号機により、暗号解読に成功。
- ドイツの潜水艦Uボートは壊滅状態に

# 1945年 ベイズにドイツ敗戦

ドイツ軍は、連合軍でのベイズ研究により、見事敗戦。

しかし、その後ベイズは軍事機密として、まだ学問界には君臨できなくなる。

# Uボート壊滅とドイツの敗戦の後

- 1952年、無名の救国の英雄チューリングは、同性愛者であることが見つかり、英国に逮捕され、強制的に女性ホルモンを打たれた。（当時は同性愛）
- その2年後、1954年、チューリングは青酸カリをリンゴに塗り、自殺。

# 再評価

1. 1966年から、コンピュータ科学者らによる国際的学会のACMは、同学会の守備範囲であるコンピュータ科学を中心とした分野の最高の賞として、チューリング賞を授与している。物理や化学といったようなかなり広い分野の最高の賞、という位置づけにあるものとして、コンピュータ科学分野におけるノーベル賞に相当する。
2. 2013年12月24日にエリザベス女王の名をもって正式に恩赦が発行され、キャメロン首相は、彼の業績をたたえる声明を発表した。

# チューリング

6月の第1週には毎年花粉症に悩まされるので、彼は花粉を吸わないようガスマスクをして自転車でオフィスに通っていた。自転車は故障していて、定期的にチェーンが外れていた。それを修理してもらう代わりに、ペダルをこいだ回数を数えて、危なくなると一旦降りてチェーンを調整していた。

マグカップが盗まれるのを防ぐために、それをラジエータパイプに鎖で繋いでいた。

第二次世界大戦に大貢献のベイズ理論

その後、どうなった？

# 第二次世界大戦に大貢献のベイズ理論

ドイツが降伏した数日後、チャーチルは暗号解読に関する極秘資料、文章、あらゆる証拠を消去せよと命じる。関係者には、この事実が超機密事項として伝えられた。

実は、この後もベイズを用いて、ソビエトの暗号を解読していたので、その手法が他国にばれることは戦略的にまずかったのである。

# 世界最初の汎用コンピュータ

(米) 1946年、ENIAC  
(弾道計算) 0進数の使用が可能でプログラミングが可能

チューリングは死んだ。しかし、

**Irving**

**John ("I. J.";**

**"Jack") Good**

# チューリングは死んだ。しかし

**Irving John ("I. J."; "Jack") Good**

1916~2009

ケンブリッジ大学で数学の学位所得後にMI5の無線通信研究所に配属

Bigramを発明、チューリングとベイズ研究に没頭

戦後 ベイズ統計学者 **Virginia Tech** 教授

900本のベイズ統計の論文を書く

世界最初の機械がオンラインで手法をベイズ  
オンライン学習する機械学習の論文を執筆  
(チューリングとの仕事の延長)

チューリングは死んだ。しかし

**Irving John ("I. J."; "Jack") Good**

1916～2009

一生独身。。。教え子の助手にプロポーズしたが振られる。

[https://en.wikipedia.org/wiki/I.\\_J.\\_Good](https://en.wikipedia.org/wiki/I._J._Good)

# 保険業界

- 統計学を学んできたアーサー L. ベイリーは、保険数理士となった。彼はドライバーの年齢、性別、事故履歴や飲酒歴などをエビデンスとして、事故確率をベイズ推定し、適正な保険料を予測するシステムを確立した。事故率は事前分布がないと正しく、推定できないことがわかった。
- これはアメリカの保険業界に革新をもたらす。保険分野ではベイズが主流になる。

# 物理学

エンリコ フェルミ は ベ  
イズにより物理モデルを発表  
(ノーベル賞受賞)

統計物理学の元祖：逆温度によ  
るボルツマン分布

妻のラウラ・カポーネはユダ  
ヤ人でムツソリーニの弾圧か  
ら逃げてノーベル賞受賞と同  
時にアメリカに移住

物理学

リチャード ファインマン  
（ノーベル賞学者）

量子力学、量子ベイズ主義

量子コンピュータの理論  
原理

# 医学

- ジェローム・コーンフィールドにより、肺がんの原因をベイズで推定し、遺伝ではなく喫煙がその原因であることを証明した。

ロジスティック回帰分析の提唱者

また、彼はコレステロールが心臓病の原因になることをベイズで示した。

- タバコ会社のコンサルタントをしていたフィッシャーは、このタバコが癌の原因であるという結果を厳しく批判。

# 科学と主観主義

- 「事前の意見が科学者によって違ってよいとなるとデータ解析の科学的客観性はいったいどうなるのか。」
- サヴェッジ

「データや証拠が集まってくると科学者たちの意見が一致してくるのと同様に、データが乏しいときには主観主義者でありつづけるが、データが多くなってくると、結果は客観的に一つに収束してくる、そして客観主義者になる。科学はまさにそうやっで行われる。」

# 意思決定理論

- ライフアとシュレイファー
- ベイズ意思決定理論
- 期待効用最大化  $\sum P(X_i)(U_i)$
- デシジョンツリーの開発
- 経済学や経営学の分野で大ブ  
レーク

# 選挙の出口調査

1960年にジョン・テューキーが選挙の出口調査での得票確率をベイズを用いて推論する手法を開発

事前分布に加え、性別や年齢などの補助情報も加えるので驚くべき、精度で予測できることがわかり、一般的な手法となる。

# 原発事故の確率

- ハロルド・ルイスが1974年に原発事故の起こる確率をベイズ推定。高い確率で事故が起こると予測していた。
- 頻度派が大きく、この結果に反対する。
- 1979年に スリーマイル島の原発事故が起こる。

# ベイブズ的手法の波及

『日本の原発事故率が7倍 500年に1回(54基なら10年に1回)に改定』

原発保険料7倍に…1か所、年2億4000万円。

政府は20日の閣議で、原子力発電所の事故による損害賠償に備え、電力会社に義務づけている保険契約について、4月1日から電力会社が負担する保険料を約7倍に引き上げることを選んだ。

# 1980年以降コンピュータの普及

- 頻度派の統計学は 紙と鉛筆で計算できるように考えられてきた。

ベイズは複雑な数理であるが、コンピュータの普及に伴い、実現化してくる。

# スペースシャトルの事故確率

- 1983年にアメリカ空軍が契約した統計分析会社 テレダイン社がベイズにより、スペースシャトル チャレンジャーの事故の確率を推定したところ、頻度派のコンサルタントが出した結果 10万分の1とは異なり、 $1/35$ と推定。
- 頻度派はベイズの結果に大きく反対する。
- 1986年チャレンジャーは25回目の打ち上げで大爆発を起こす。

# ディーゼルエンジンが肺がん に与える影響分析

- 1983年デュムシエルは、ディーゼルエンジンの肺がんへの影響は無視できることを証明。

# 因果推論 データサイエンス

- Rubin Causal Model (傾向スコア)

Rubin(1974) "Estimating Causal Effects of Treatments in Randomized and Nonrandomized Studies". [J. Educational Psychology.](#) **66** (5): 688–701

- Missing Data Theory
- EM algorithm
- MCMC法
- ABC分析

# ベイズ画像解析

- 1985年
- スチュアート ジーマンとドナルド ジーマン が画像解析のためにMCMC法（マルコフチェーンモンテカルロ法）によるギブスサンプリングアルゴリズムを開発。



# 1990年代 ベイジアンネットワーク

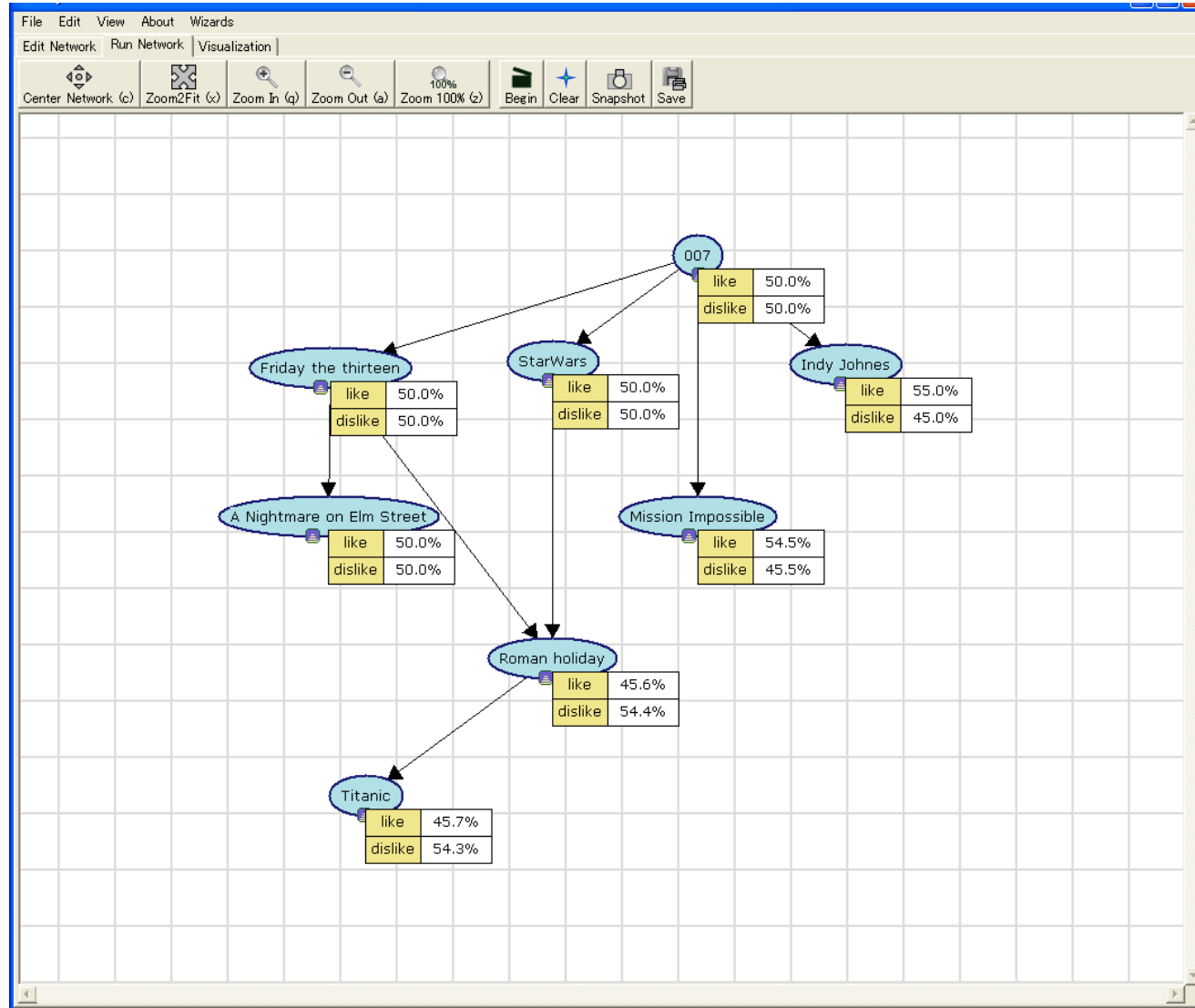
- デヴィッド ヘッカーマン
- スタンフォード大学 医学部終了後、マイクロソフト社へ
- ベイジアンネットワークの教祖
- ジュディア パールは 命名したこととベイジアンネットワークの前の確率木の開発者
- 2010年代にトップカンファレンスUAIにおいてベイジアンネットワークの数学モデルが確立し、因果モデリング手法としてデータサイエンスブームも巻き起こす。

Prof. Judea Pearl

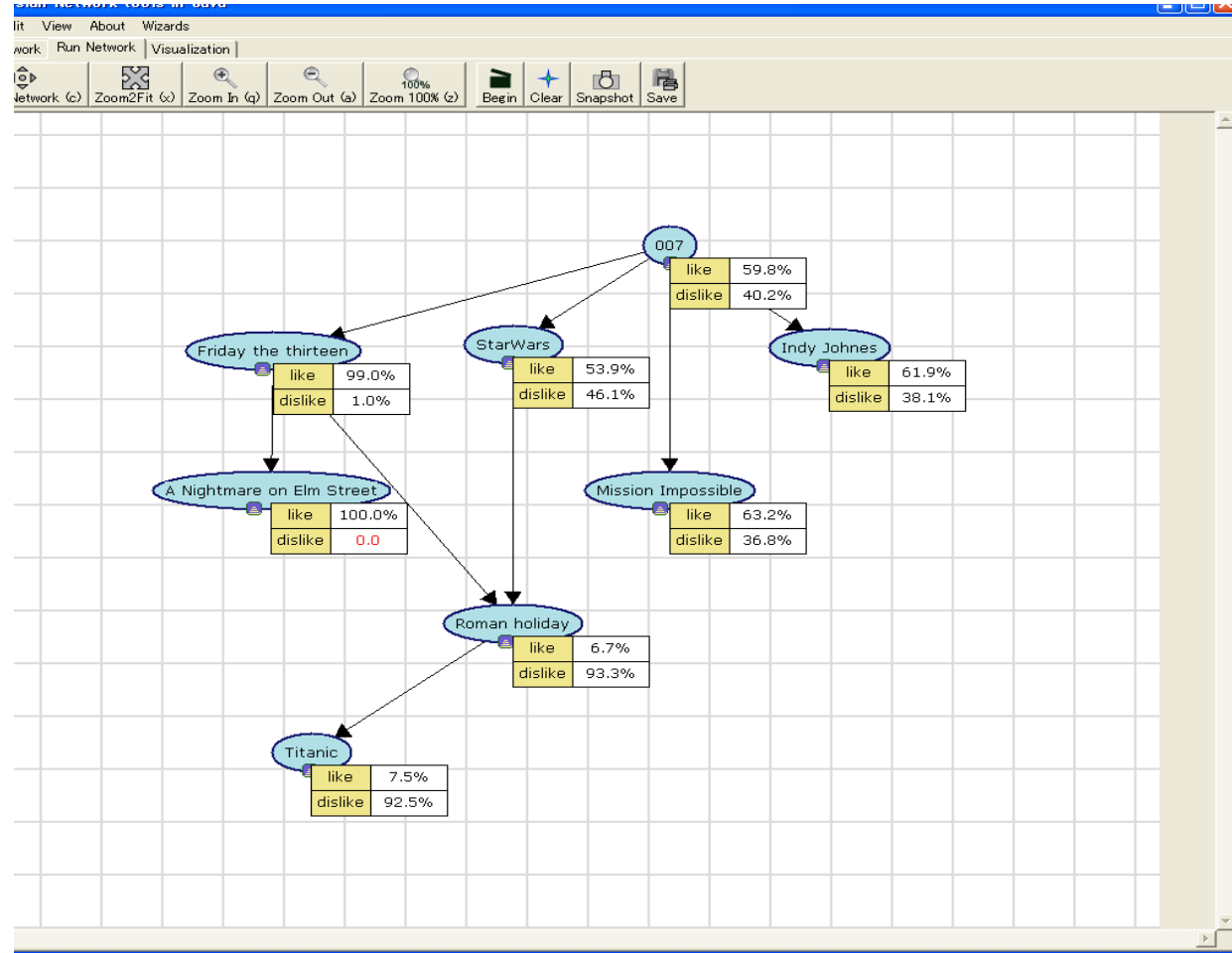
2012 Turing Award Winner

David Heckerman : UAI President

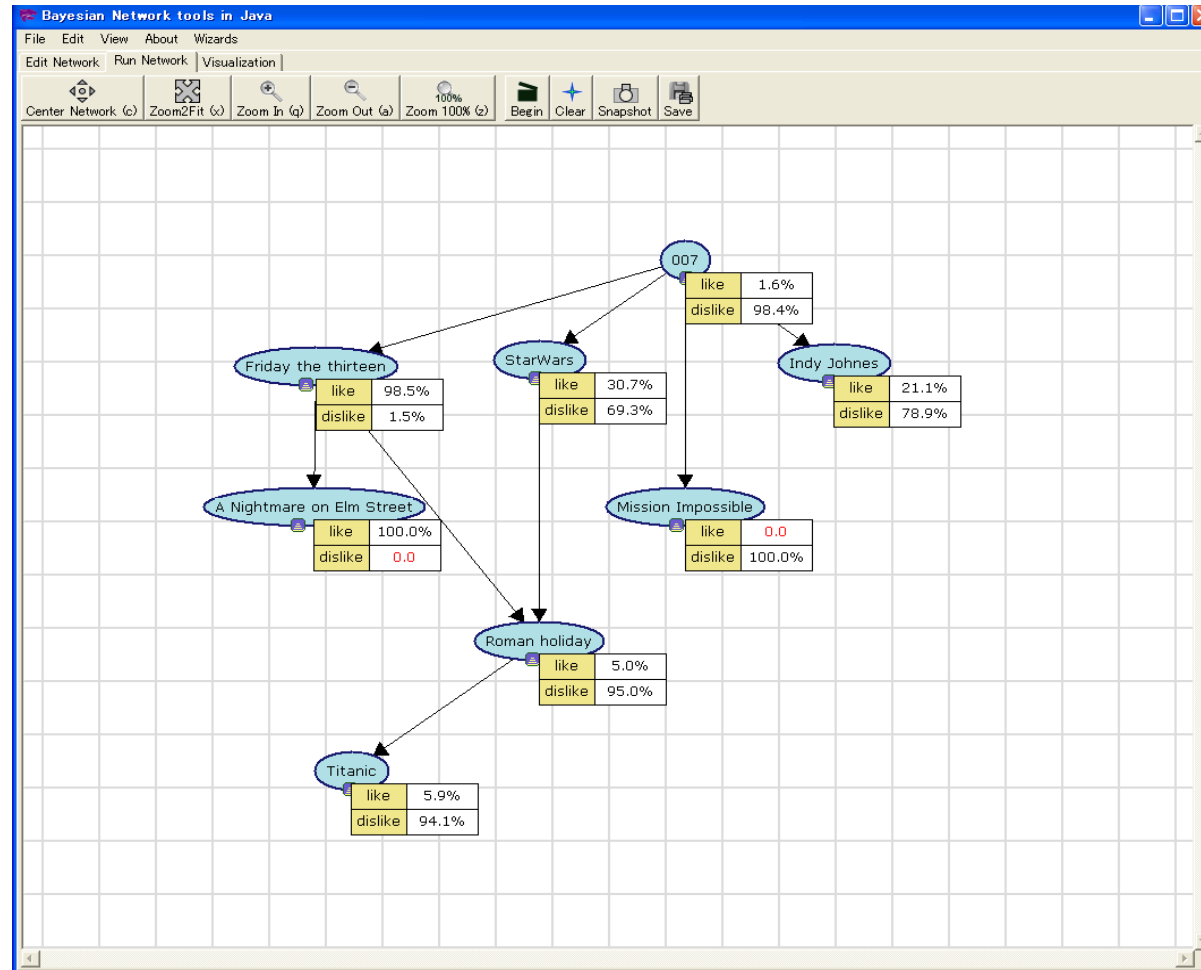
# ベイジアン・ネットワークの事前の確率



# 証拠 「「エルム街の悪夢」が好き」



# 証拠「「ミッション・インポッシブル」は嫌い」



# M S 商品

- 手書き文字認証
- お勧めシステム
- H E L P の対応システム
- スパムメール駆除
- 売り上げ予想システム
- 交通渋滞の予想システム
- ペーパークリップのキャラクター  
クリPPER

# グーグル

- 検索エンジンにベイズ
- スпамメールなどの処理に ナイーブベイズ

# 推薦システム

- ネットフリックスが主催した10億円のコンテストで2009年にAT&T社のベイジアンネットワークによる推薦システムが優勝
- 機械学習 トップカンファレンス UAI が開催した予測コンテストで2010年 UCLAグループのベイジアンネットワークが優勝

# 自然言語処理

- マーサーとブラウン
- 1998年 IBMベイズによる機械翻訳システム
- 2005年 グーグル ベイズ機械翻訳システムが世界機械翻訳コンテストで優勝
- 現在、グーグルは25言語でベイズ翻訳システムを実用化

# アダプティブ ラーニング

ACT\*の開発者であるカーネギーメロン大学の人工知能学者アンダーソンのグループは、ベイジアンネットワークで学習者の行き詰まりを同定し、適正な問題を選択し、適正なヒントを提示するシステムを1990年代に提案している。その後、商品化され、現在ではKnewton社が多くのシステムを開発し販売している。2016年より日本にも進出して来る。

<http://wired.jp/2013/04/27/adaptive-learning/>

## •一人ひとりにあった学習を実現！ 教育業界の新潮流「アダプティヴラーニング」

- 個人個人に最適化された学習内容の自動提供を実現する「アダプティヴラーニング」。ビッグデータを用いたその仕組みによって、これから教育分野でGoogleに匹敵する企業が誕生する可能性もあると期待されている。その注目の動向を紹介しよう。

# 2010年代から2020年代

- ベイズ理論を先祖とする深層学習（Deep Learning）が提案され、2010年代後半から2020年代に爆発的に普及し、現在に至る。

# まとめ

1. 世界最初のコンピュータはチューリングのベイズ機械学習。
2. オペレーションリサーチ、情報理論、統計物理、意思決定理論、ゲーム理論などの分野につながる
3. 1970年代にルービンの因果推論が提案され、2010年代のベイジアンネットワークブームとともにデータサイエンス分野を確立
4. 1980年代にジーマン兄弟のIEEE論文、MCMCにより一機にベイズが普及
5. 1990年以降ベイジアンネットワークが出現