

【研究報告2】


澤 幸祐（心理科学研究センター研究員／専修大学教授）

「因果推論を通じて連合学習とベイズ推論を考える」

2015年10月24日
専修大学心理科学研究センター シンポジウム
融合的心理学の創成：心の連続性を探る

因果推論を通じて 連合学習とベイズ推論を考える

澤 幸祐
専修大学 人間科学部 心理学科



ラボメンバーと研究概要

- ・ 関口勝夫
ヒトとハトの空間学習方略の連続性・異質性
- ・ 高橋良幸
ラット海馬神経活動のベイズモデリング
- ・ 蔵屋鉄平
抑うつモデルマウスの長期活動量データに対する時系列モデリング
- ・ 栗原彬
若年者と高齢者の主観的予期学習の相似と乖離
ラットの因果推論と連合学習
- ・ 宮下遥
抑うつモデルラットの恐怖学習と再発

こんにちは。専修大学の澤でございます。

プロジェクトに関わってきた5年間、何をやっていたかという、子供ができたこともあるのですが、ラボの中では何人かプロジェクトに関わってくれた大学院生やポスドクがおります。全て紹介するわけにはいかないのですが、何人かの研究は、エレベーターホールにてポスター発表がございますので、ぜひご覧いただければと思います。

心の連続性？

- ・ ヒトと動物の連続性
- ・ 若年者と高齢者の連続性
- ・ 基礎研究と臨床応用の連続性
- ・ 要素的理論と高次認知の連続性

今回のプロジェクトのテーマには、「心の連続性」という言葉が入っておりました。僕のラボは動物の研究もしておりましたので、人と動物の連続性を探ってみたり、あるいは高齢者を使った研究では加齢の影響というところで連続性を見てみたり、また、抑うつ研究では基礎と応用・臨床の連続性であるとか、あるいは今日お話しする連合学習と因果推論であるとか、自己主体感というようなものをつないでみようということで、要素的なものから高次認知というような連

続性なんかも、この5年間の中でいろいろと扱ってまいりました。

古典的条件づけって何ですか？

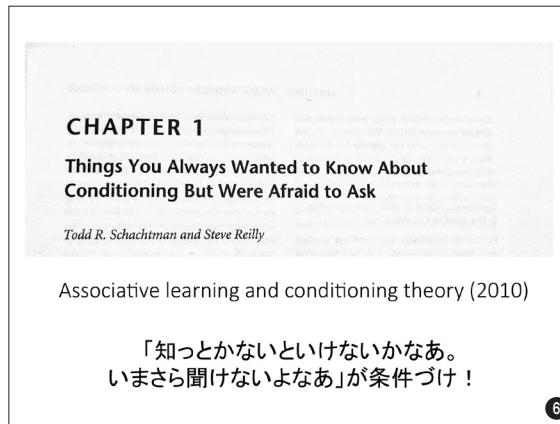
4



5

今日のトピックは「連合学習」というところからスタートするのですが、古典的条件づけというものを、皆さん言葉はご存じだと思います。心理学の教科書にも、最初のほうにまず間違いなく出てくるものですが、平たく言うとこれですね。これを見ると、皆さん唾液が出るというので鉄板だと思っていたのですが、他の大学の授業でやってみた時に、フランス人の留学生から「俺、出ないです」という答えがあって、自然条件反射ってやはりそういうものなんだと思いました。「ピクルスを想像したら出るだろう？」と聞いたら「それは出るわ」というような会話をしたことがありますが、梅干しを見ると唾液が出るというのは、いわゆる条件反射でよく出てくる例です。

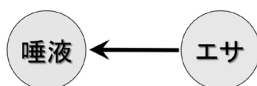
伝統的にははじめはイヌを使って実験していました。イヌが条件づけされていて、餌が出てくる前にメトロノームの音を聴かせると、メトロノームの音を聴いただけで唾液が出るというのがもとの実験系でしたが、人間でも行われていまして、これは梅干しです。僕が大学院でお世話になっていた関西学院大学での実験風景で、宮田洋先生という、僕のお師匠さんよりも年上の方なのですが、その方がお若い頃にやっていた実験の風景の写真をいただきました。



これが古典的条件づけでよく出てくる話なのですが、実際のところ、僕らが今やっている研究というのは、“Pavlovian Conditioning. It's Not What You Think It Is.” という論文のタイトルが示すように、いわゆる条件反射、唾とひきつりの心理学といわれるようなものとは大きくかけ離れています。この論文を書いたのはRobert Rescorlaという人で、彼の理論的な研究以降、条件づけ研究は大きく変化しました。実は2012年にこのセンターのシンポジウムにもお呼びいたしまして、これは僕の一生の思い出なのですが、そのあたりのお話などもしていただきました。

この論文は1988年のものですが、2010年にも『いまさら聞けない古典的条件づけ』みたいなタイトルが出てくるぐらい、知っておかないといけないと思いつつも、「今さら聞けないよな。なんとなく現象だけは知っているし」というのが古典的条件づけといわれるものであり、連合学習といわれるものです。

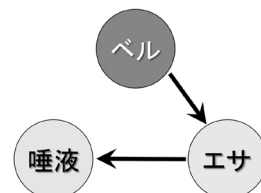
古典的条件づけの連合構造



無条件反応（いわゆる反射など）

7

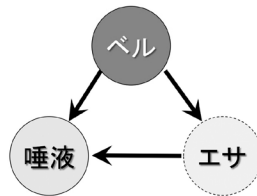
古典的条件づけの連合構造



対提示手続きと連合形成

8

古典的条件づけの連合構造



連合に基づいた反応生成

9

では、実際に皆さんは連合学習をどれくらいご存じかというのがちょっと分からないので、古典的条件づけの連合構造を簡単に紹介しますと、もともと「餌を提示されると唾液が出る」となっているわけですね。これが無条件反応であり、いわゆる反射です。それだけに限りませんけれども、平たく言うとそういうことです。これにたとえばベルというような中性刺激を対提示します。そうすると、このベルと餌との間に「連合」といわれるようなものができて、最終的にはベルを提示すると唾液が出るわけです。

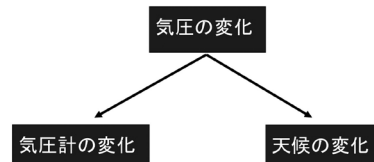
問題

「ベルのあとにはエサがくる」という経験をしたとき、「ベルはエサ到来の原因である」と言ってよいのか？

因果関係がある、と生物は考えてしまうか？

10

因果推論の例



「気圧が変わったから、天候が変わるはずだ」
→原因から結果へ

「気圧計が変わったから、気圧が変わっていたはずだ」
→結果から原因へ

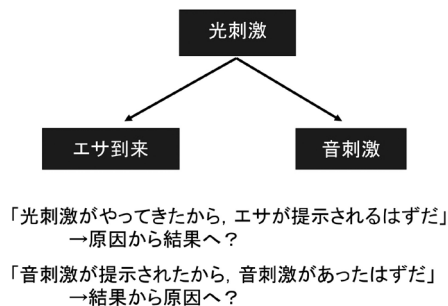
11

では、問題です。ベルのあとに餌がくるという経験をした時に、皆さんは、「ベルは餌がきた原因である」という発想になるでしょうか。つまり、因果関係がそこにあるというように生物は考えてしまうだろうか、というわけです。やっていることは単なる対提示なのですが、因果関係なるものを、果たして導いてしまうでしょうか。

たとえば、因果推論の例でよく出てくる例が「気圧が変わると、天候が変わります」というものです。これはよくご存じだと思います。そして「気圧が変わると、気圧計も変わります」というもの。これもご存じですよ。気圧の変化というのは、僕らは基本的には観察できないわけで

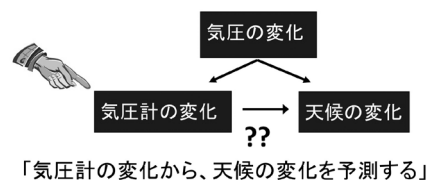
すね。気圧が下がると頭が痛くなるという方もおられますが、僕は気圧の変化というのを直接的に観察することはできない。なので、気圧計を見るわけです。気圧計が変化することにより「天気が変わるだろう」という推論ができるので、僕はそれに頼っています。「気圧が変わったから天候が変わるはずだ」というように原因から結果を推論することもできますし、「天気が変わったから気圧が変わったはずだ」というように結果から原因を推論することだってできるわけですね。

因果推論の例？



12

因果と共変の区別



「気圧計の変化から、天候の変化を予測する」

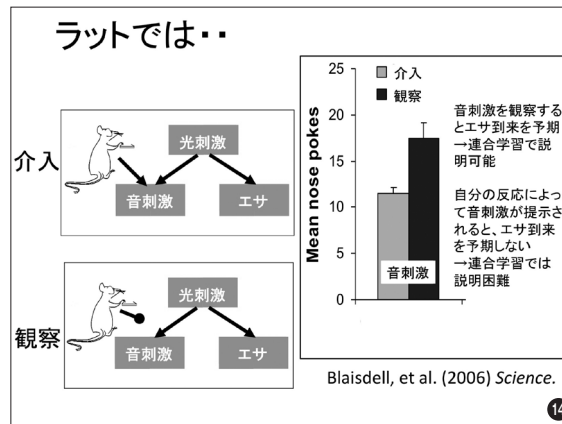
気圧計の変化と天候の変化は共変関係にある
人為的に気圧計を変化(介入)させた場合にはこうした予測は“誤り”
単純な共変関係のみの知識では不十分

13

では、このような場合はどうでしょうか。光のあとには音がくる、光のあとには餌がくるというような経験をした時に、「光刺激がやってきたから、餌が提示されるはずだ」というような因果関係を推論できるか。どうでしょう？また、「音刺激が提示されたから、光刺激が提示されたはずだ」というように、結果から原因へというような推論を、果たして動物ができるかどうか。おそらく、光のあとに餌がきた時に「餌がきたのは光が原因だ」と胸を張って言う人は少数派だと思います。では、これを動物が経験した時はどうでしょう。複数の事象が時間的に前後して起こっているということを僕らが単に観察しているだけなのに、それと同じようなことを果たして彼らが認識できるかどうかというようなことが知りたいわけですね。

これをただ見ているだけでは観察しているだけなので、因果関係は断言できないということになるわけですが、例えば気圧計が変化した時に、僕は「これを観察すると天候が変わる」ということを予測します。なぜなら、「気圧計が変わったということは、観察できなかったけれど気圧が変わったのだろう。ということは天候が変わるはずだ」というような予測をするからなのですが、誰かが人為的に気圧計に手を入れたり悪さをしたりしたのを見ていて、その結果気圧計が変わった時、先ほどと同様に天候の変化が起きるというように推論するかというと、しないわけですね。この場合、気圧が変わったから気圧計が変わったのではなく、誰かがちょっかいを出したから気圧計が変わったわけです。だから、気圧の変化が起きたわけではないので、天候の変化も起きないというような推論をしますね。これは実験的にも確かめられ、報告されています。

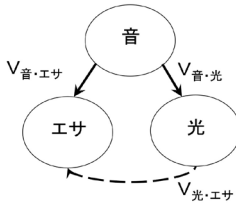
なので、二つの結果事象に対して一つの共通原因があるときに、この共通原因が観察できずに結果だけが観察されている場合、この二つの間にどのような関係があるのかは「介入するか否か」というようなことでしか特定できなくて、単純な共変関係というようなものだけを見ていると、因果と共変は区別できないということになっています。



先ほどお話したように、気圧計に対して誰かが悪さをした時と、気圧計が単に変わった時とで、人間は推論の仕方を変えるわけですが、実はラットでも変わるというお話があります。「光のあとには餌」、「光のあとには音」という古典的条件づけの訓練をしたあとに、ラットがレバーを押したら音が鳴るというような状況を作ります。そうすると、レバーを押したときには「レバーを押したら音が鳴った。この音が鳴ったのは俺がレバーを押したからであって、光があったからではないから、餌皿には行っても無駄」、単に音刺激を観察しただけの時には「見逃したかもしれないが、光があったはずだ。ということは餌があるだろう。餌皿に行こう」というような結果が得られました。このグラフの縦軸が餌皿に行く頻度なのですが、観察の時と介入の時とでこのように差があるというような結果が出ています。これは人間の推論のお話からすると当然なのですが、連合学習で説明しようと思うとなかなか難しいのです。

Causal Bayesian networkと 連合学習理論

	Phase 1	Phase 2	Test	結果
感性予備 条件づけ	音 → 光	音 → エサ	光	エサ皿への 接近

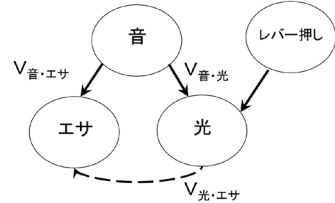


接近して生じた事象間、表象間の連合強度の計算
連合を通じた機械的活性化の伝播

15

Causal Bayesian networkと 連合学習理論

	Phase 1	Phase 2	Test	結果
感性予備 条件づけ	音 → 光	音 → エサ	光	エサ皿への 接近



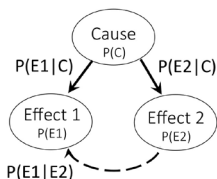
接近して生じた事象間、表象間の連合強度の計算
連合を通じた機械的活性化の伝播

16

では、説明が難しいのならどうするかということで、そこで出てくるのがベイズでございまして、因果ベイジアンネットワークというものがあります。これを連合学習理論と対比させてみると、先ほどの実験では「音のあとには光」「音のあとには餌」というような訓練をするわけですが、連合学習だと、音と光の間に結び付きができる。音と餌の間に結び付きができる。そしてこの結び付きの強さを計算することにより、光と餌の間の間接的に形成される結び付きを計算するということになるのです。これが連合学習理論の基本的なルールなわけですが、ではレバーを押して光が提示された時にどうなるかという、光が提示された時点で、残りはすべて構造が一緒なので、光を観察しようが、レバー押しのあとに光が出ようが、餌の表象の活性化の程度に差を見出すことができないわけです。ですから、先ほどのように餌皿に行く頻度が変わるというような結果を得ることはできません。

Causal Bayesian networkと 連合学習理論

	Phase 1	Phase 2	Test	結果
感性予備 条件づけ	音 → 光	音 → エサ	光	エサ皿への 接近

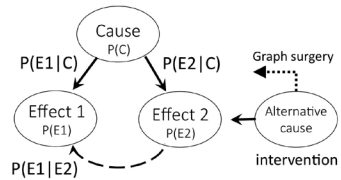


条件付き確率の計算

17

Causal Bayesian networkと 連合学習理論

	Phase 1	Phase 2	Test	結果
感性予備 条件づけ	音 → 光	音 → エサ	光	エサ皿への 接近



条件付き確率の計算
介入によって「条件付き独立」に(graph surgery)

18

因果と連合

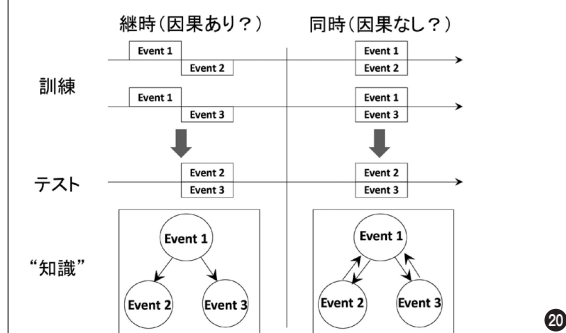
- 連合は時空間的接近によって形成され、双方向的なものである
- 因果には時間的順序関係が存在する
 - 原因が結果に先行する
 - Causal Bayes netは有向非巡回である
- 連合は因果を包含できない・・・？

19

一方でベイジアンネットワークだと、連合強度、すなわちその連合の強さを計算するのではなくて、条件付き確率の計算になります。算数の話は僕もあまり得意じゃないので飛ばしますけれども、何か別の原因事象になるようなものがこの結果事象を引き起こした時には、いわゆる「条件付きの」というやつが計算で出てきて、ここがカットされる。こちら側にいかないのです。ここがカットされて、この原因はなかったというような計算が起こって、こちら側の結果事象の生起確率っていうのを落とすというようなことが説明されるわけです。なので、ベイジアンネットワークを使えば、先ほどのような結果は説明することができるということなのです。

この二つの間で非常に大きな齟齬があるのかどうかは悩ましいところなのですが、そもそものシンプルな連合というのは、教科書にも書いてあるように、時空間的な接近によって形成され、双方向的なものです。つまり、光と音の対提示をすると、光が提示されたら音のイメージは活性化しますし、音が提示されたら光のイメージは活性化されるというような形になるわけですが、一方で、因果というのは時間的な順序関係があります。つまり、原因は必ず結果に先行しないとイケないというわけですね。なので、因果というものは、連合が持っている特徴とは微妙に違うのです。そもそも因果とは何か？という話をするとう哲学になってしまうので話しませんが、連合と完全にイコールとはいえない、あるいは言えないということで、「連合というものは因果というものを包含できないものかな」という問題が出てきます。

因果推論には時間情報が必要か？



Design

Groups	Phase 1 4 days	Phase 2 2 days	Testing
同時群	Event 1 - Event 2	Event 1 - Event 3	Lever -> Event 2
継続群	Event 1 -> Event 2	Event 1 -> Event 3	Lever -> Event 2

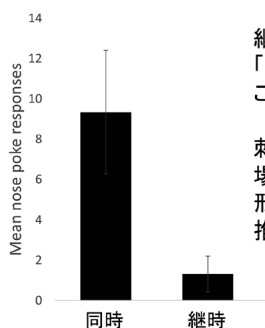
Note. Events 1 and 2; Tone or light, Event 3; sucrose solution

継続群では、前後の時間関係が存在するために「因果推論」を行って「エサは来ない」と予測する？

同時群では前後の時間関係がなく、「因果関係」を想定できないために「エサが来る」と予測する？

21

結果



継続群に比べて、同時群では「エサが来る」と予測していることを示唆

刺激間の前後関係がない場合には、刺激間に連合形成はしても因果関係は推測しない？

Sawa & Kurihara (2014). *Front. Psych.*

22

この時間的順序関係というのは、因果関係の学習や知識に非常に重要だということなので、そこをいじってみようというような実験をしています。先ほどの例のように、「イベント1のあとに2がくる」・「イベント1のあとに3がくる」というように継続的な訓練をしたあとに、イベント2をレバー押しに対して随伴させるというルールと、「イベント1とイベント2」・「イベント1とイベント3」が全部同時に起こるという時に、テストでイベント2がレバー押しに随伴するということになるとどうだろうかというものです。

どちらもイベント1をアンカーにして時間的な地図をまとめてしまうと、イベント2とイベント3の関係はどちらも同じなのですね。ですが、左側は継続的なので因果関係がありそうな状況なのですが、右側は同時なので因果関係は基本的には仮定しにくいということで、この2つの条件で差が出てくるかを見てみると、見事に出てきました。

継続的に訓練をした時には、先ほど紹介した先行研究と同じように餌皿に行きません。ところが、同時提示をした時には餌皿に行くという結果が得られます。つまり、継続的ということはどういうことかということ、自分が反応した時に出てきた刺激の時間的に前に別のものを経験してい

て、これのあとに餌が出てきていたので、自分がレバーを押した時には、もともとの共通原因がなかったので反応しない。ところが、同時だとそうした因果関係を仮定できないということになるので、「餌皿に行けば餌があるのでは？」というようなことで、ラットは餌皿に行くことになります。

Discussion

- 刺激間の対提示によって獲得された知識を用いて「因果推論」が可能
- 刺激間の時間関係は「因果推論」の実行に影響を与える
- 既存の連合学習理論では不十分
- 時間情報と確率計算の融合
 - 同時確率、条件付き確率の区分だけでいける？

23

この実験の訓練で使っているのは、完全に古典的条件づけそのままですので、刺激間の対提示だけで彼らが知識を獲得し、それを使って何かしらの推論のような行動を引き出しているわけです。つまり因果関係の推論というようなものが可能であると。さらに、訓練の時の刺激間の時間関係が、因果推論をするかしないかに影響を与えるということで、ますます「因果みたいなものが、古典的条件づけの手続きの中で形成できるのではないか？」という感じになってきたわけです。

先ほどもお話ししたように、これ自体は既存の連合学習の理論ではなかなかうまくできないところですので、時間情報であるとか確率計算であるとかを使って拡張することが必要になってくるだろうと思います。ベイズというのは、まさにそのあたりを扱っていくのにいい方法だろうというふうに考えているわけです。

因果から自己主体感へ

24

問題2

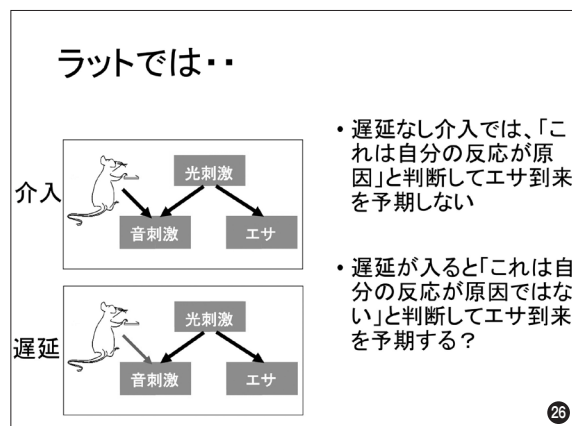
「自分がレバーを押したから刺激が提示された」のように、ラットは自分の反応と結果の間に因果関係を認識しているか？

「自分が反応したから」という自己主体感をラットも持っているのか？

25

もうひとつ、さらにhigher orderな話で「自己主体感に関する研究」というのもやっています。ふたつ目の課題は、「自分がレバーを押したから刺激が提示された」というようなことを果たしてラットは認識しているかと考えてみる。皆さんは、「自分が反応したから何かが起きた」という時に、自己主体感なるものを主観的には経験すると思うのですが、果たしてそのようなものがラットにあるのかどうか。

自己主体感ということ自体は主観的経験ですので、動物で経験するのはけっこう骨が折れるわけですが、チンパンジーの研究はあります。チンパンジーがモニターの前に座っていきまして、トラックボールで画面のカーソルを動かします。そして、自分が動かしたカーソルがそのあと出てきたかどうか。それとも、今出ているやつは自分が動かしたやつでないか、という弁別学習をやらせるわけですね。そうすると、ちゃんと正解することができるようになるのですが、そのあとテストでは、自分が動かしたカーソルの動きに、自分が動かしてから画面が動くまでの遅延時間を入れてみたり、自分が動かした方向から何度か角度をずらしてみたりというようなことをするわけです。そうすると、遅延時間が入ったり角度が変わったりすると、動かしたのは自分ではない、自分の反応とは違うというような結果がチンパンジーでは出てきます。



ではラットでやってみましょうということで、もちろんラットはトラックボールなんていじれないのでどうするかというと、レバーを押してから音が出るまでに遅延時間を入れます。ディストーションはできませんので、遅延だけ入れてやる。そうすると、遅延時間が長くなればなるほど、「これは自分が押したのではないぞ」感が出てくるだろうから、反応、つまり餌皿に行く頻度が上がっていくと考えられます。そして、遅延なし、遅延500ミリ秒、遅延1秒という順番で、だんだんと餌皿に行く反応が増えていくという結果になるわけです。

まとめ

- 複数事象の対提示によって、ヒトや動物は新たな反応を獲得する
- 獲得する知識は多様であるが、結局のところ「連合+ α 」である
- 連合理論の拡張

27

連合理論の拡張

- お世辞にも連合学習理論の説明力は高くない
- 連合対象が「刺激」や「事象」そのものである場合が多く、融通が利かない
- 計算対象の多くは「連合強度」であり、情報が足りない
- 柔軟なモデル化、明確なアルゴリズム
- ベイズ理論の利用による拡張

28

このように、複数事象を対提示するだけで、人間や動物は何らかの反応を獲得するというのが古典的条件づけのエッセンスなのですが、そこで獲得される知識というものはもちろんさまざまですけれども、やはり単なる付帯的な連合というものにプラスアルファが必要そうだということは間違いない。なので、連合理論は拡張しなければならないと思うわけですが、その時の拡張の仕方としていくつか書いてみました。連合強度だけ計算するというのはやめて何か増やしたほうがいいかもというので、モデルはもっと柔軟にしないといけないし、理論ですからアルゴリズムをきっちりしなくてはいけないしということで、ベイズ理論を使えばいいのではないかなということを考えて、今もやっていますし、これまでもやってきたというわけです。

別に突拍子もない発想ではございませんので、もうすでにいくつか試みはあります。もう不可避な流れだと思いますので、連合学習というのは唾とひきつりで終了というのではなくて、もっと説明力を高めつつ、もともと持っているいいところも残して、新しい理論が作っていければなと思っています。

以上です。ありがとうございました。