

## パヴロフ型条件づけにおける 時間的符号化仮説について

漆原 宏次・中島 定彦

パヴロフ型条件づけを形成する場合、条件刺激 (CS) を無条件刺激 (US) に先行して呈示する順行条件づけ手続きでは大きな条件反応 (CR) が生じるようになるが、CS と US を同時に呈示する同時条件づけ手続きでは生じる CR は比較的小さく、CS を US の後に呈示する逆行条件づけ手続きではほとんど CR が生じない。この事実は、パヴロフ型条件づけが発見された当初から知られており (Pavlov, 1927)、条件づけを時間的接近の概念で単純に説明しようとする立場にとっては問題の一つであった。時間的接近の点から見れば、同時条件づけ手続きで CR が最大になり、CS と US の時間間隔が同じであれば、CS→US (順行条件づけ) でも、US→CS (逆行条件づけ) でも同程度の CR が生じるはずである。

この問題については、これまでに数多くの理論的解釈が提出されてきたが (例えば, Guthrie, 1952; Hull, 1943; Mackintosh, 1983; Pavlov, 1927; Rescorla, 1972, 1980)、いずれも決定的な説明には至らなかった。しかし、最近 Miller らが提唱している時間的符号化仮説 (temporal coding hypothesis; Matzel, Held, & Miller, 1988; Miller & Barnet, 1993) はこの問題を説明し得るだけでなく、パヴロフ型条件づけにおけるその他の現象を説明することも可能な注目すべき理論である。本稿では、時間的符号化仮説の骨子を紹介し、この理論を支持する研究を概観する。

## 時間的符号化仮説の骨子とその特色

以下の4点は、時間的符号化仮説を、Millerらの最近の論文(Blaisdell, Denniston, Miller, 1997)に従って要約したものである。

1. 「接近」は2事象間の連合形成の必要十分条件であり、形成される連合の強度は2事象間の時間的・空間的接近の程度によって決定される。
2. 連合する2事象間の時間関係についての情報は連合の一部として自動的に符号化される。また、事象間の連合は双方向的であり、先行事象から後続事象へ生じる一方的連合ではない。
3. 符号化された時間的情報は、その後で一方の事象が呈示されたときに、連合に基いて生じる反応の強度や性質の決定に関して重要な役割を担う。
4. 複数の事象についての時間関係は、それらが異なったときに訓練されたものであっても、反応が出力される際に統合される。つまり、事象は時間地図の中に重ねられる。

これまでの学習理論は、CSとUSの間の連合強度は、CSを呈示した際に生じるCRの大きさに反映されるという立場から、同時および逆行条件づけの結果CSに対して生じるCRの弱さを、学習すなわち連合の失敗として捉えていた。これに対し、時間的符号化仮説は、連合の表出の失敗として説明する。つまり、逆行条件づけや同時条件づけの結果CSとUSの間に連合が生じないとするのではなく、連合は生じているがそれが表出していないと主張する。

この主張は、ラットを被験体とし、音や光をCS、電撃をUSに用いた恐怖条件づけ事態で行われた数多くの実験研究によって支持されている。これらの研究は感性予備条件づけや二次条件づけなどの手法を用いており、実験デザインがやや複雑であるが、一例として、同時条件づけによって生じる連合を二次条件づけパラダイムを用いて検証したBarnet, Arnold, & Miller (1991)を

取り上げよう。この実験では二次条件づけの第1段階で、5秒間の一次CS ( $CS_1$ )と5秒間の電撃USの同時対呈示を、第2段階で、5秒間の二次CS ( $CS_2$ )と5秒間の $CS_1$ の順行対呈示を行った(図1の上段と中段)。その後、 $CS_1$ と $CS_2$ を単独で呈示し、それらに対するCRを測定した。その結果、USと同時に対呈示された $CS_1$ に対しては、わずかなCRしか観察されなかった。これは「同時条件づけ手続きではCRが小さい」という従来の知見と合致する。しかし、 $CS_2$ に対しては、明確なCRがみられた。一連の手続きにおいて、 $CS_2$ は直接USと対呈示されて

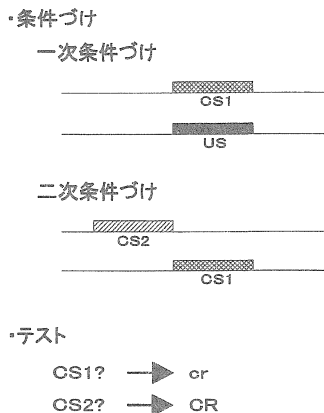


図1 Barnet, Arnold, & Miller (1991) の実験パラダイムと結果

いないため、 $CS_2$ に対するCRが生じたという事実は、 $CS_1$ とUSの間に何らかの連合が生じたと考えなければ説明できない。このことから、第1段階における同時条件づけ手続きの結果、 $CS_1$ とUSの間には連合が生じたが、この連合は $CS_1$ に対する直接の反応を産み出さなかったと結論することができる。

同様の発見は、逆行条件づけ (Barnet, Cole, & Miller, 1997; Barnet & Miller, 1996 a; Matzel et al., 1988) についてもなされている。さらに、順行条件づけ手続きの一種ではあるが、大きなCRがみられない痕跡条件づけ手続きでも同様の報告がある (Cole, Barnet, & Miller, 1995)。これらの研究は一貫して、同時、逆行、痕跡条件づけ手続きの結果、CRが生じない、もしくは小さいCRしか生じないのは、これらの手続きの結果、CSとUSの間に連合が生じないからではなく、CSとUSの間に形成された連合がCRとして表出しないためであることを示している。

これらの現象は時間的符号化仮説によって説明可能である。上で取り上げたBarnet et al. (1991) を例として説明すると、以下ようになる。まず、第1段階における $CS_1$ とUSの対呈示の結果、これら二つの刺激の間には連合

が生じ、そのとき刺激間の時間関係（CS と US の同時生起）も符号化される。CS によって US の到来が予告される場合に限り、US に対する予期的反応である CR が表出すると考えれば、US と同時に対呈示されていた CS<sub>1</sub> は US の到来を予告しないために、CS<sub>1</sub> の単独呈示は CR を誘発しない。一方、第 2 段階において CS<sub>2</sub> と CS<sub>1</sub> の間に連合が生じ、CS<sub>2</sub>→CS<sub>1</sub> という時間関係も符号化される。第 1 段階および第 2 段階で符号化された刺激間の時間関係を、二つの手続きに共通して呈示される CS<sub>1</sub> を介して統合すると、CS<sub>2</sub> と US の時間関係は、CS<sub>2</sub> が US を予告する形になる。このため、CS<sub>2</sub> は、US に対する予期的反応である CR を誘発する。

時間的符号化仮説は、刺激間の時間的接近を連合形成の必要十分条件とする接近理論である。しかし、これまで強度という一次元でしか捉えられていなかった連合という概念に、時間関係という新しい属性を付加した点、そして、行動的結果の予測・説明を行う際に、学習時だけではなく反応出力時の情報処理も重視する点が、これまでの単なる接近理論とは異なるこの理論の特色としてあげられるであろう。

### さまざまな場面における時間的符号化

時間的符号化仮説を支持する結果は、条件づけ訓練における刺激間の時間関係の違いによる結果の相違だけでなく、条件づけのその他の場面においても確認されている。ここではそうした研究を簡単に紹介し、展望する。

#### 刺激間の競合と時間的符号化

複数の CS を US と対呈示した場合、それぞれの CS に対する CR は、単独で条件づけを行った場合と比べて小さくなる（隠蔽効果、表 1 上段）。また、このとき、前もって一方の CS を US と十分な回数対呈示しておくとし、もう一方の CS に対する CR がほとんど生じなくなる（阻止効果、表 1 下段）。こうした現象は、複数の CS が US と連合する際に競い合うという意味

表 1 隠蔽及び阻止の実験パラダイム

・ 隠蔽				
群	条件づけ		テスト	結果
実験群	CS <sub>x</sub> - US CS <sub>a</sub>		CS <sub>x</sub> ?	CR
統制群	CS <sub>x</sub> - US		CS <sub>x</sub> ?	CR
・ 阻止				
群	第 1 段階	第 2 段階	テスト	結果
実験群	CS <sub>a</sub> -US	CS <sub>x</sub> - US CS <sub>a</sub>	CS <sub>x</sub> ?	cr
統制群		CS <sub>x</sub> - US CS <sub>a</sub>	CS <sub>x</sub> ?	CR

で「刺激間の競合」と呼ばれる。刺激の対呈示によって生じる時間的符号化は、このような刺激間の競合にも影響を及ぼすことがいくつかの研究で示されている。

Barnet, Graham, & Miller (1993) は、阻止効果を検討するパラダイムにおいて、訓練の第 1 段階における CS<sub>a</sub> と US の時間関係、および第 2 段階における CS<sub>a</sub> と US の時間関係や CS<sub>x</sub> と US の時間関係を変化させていくつかの実験を行った。この結果、第 1 段階、第 2 段階を通じて CS<sub>a</sub> と US の間の時間関係が一貫しており、それが第 2 段階での CS<sub>x</sub> と US の間の時間関係と同じである場合において、阻止効果が最大（つまり、CS<sub>x</sub> によって誘発される CR が最小）になることを示した。また、Blaisdell et al. (1997) は、隠蔽効果についても、CS<sub>a</sub> と US との間の時間関係と CS<sub>x</sub> と US との間の時間関係が同じ場合に最大（つまり、CS<sub>x</sub> によって誘発される CR が最小）になることを明らかにしている。

これらの発見は一貫して、複数の CS が US との間に、同じ時間関係を持つ場合にのみ刺激間の競合が生じ、US との間の時間関係が異なる複数の CS の間には刺激競合が生じないことを示している。

### 制止条件づけと時間的符号化

パヴロフ型条件づけにおいて制止条件づけを形成する方法は多数あるが、その中の一つに、Pavlov の条件制止と呼ばれるものがある(表2)。これは、CS<sub>a</sub> を単独で呈示した場合に US を呈示するが(強化)、別の刺激 CS<sub>x</sub> と複合呈示した場合には US を呈示しない(非強化)、というものである。この操作を繰り返すと、最終的には、CS<sub>a</sub> を単独で呈示した場合にだけ CR が生じ、CS<sub>x</sub> と CS<sub>a</sub> を複合呈示したときは CR が生じなくなる。このように訓練された CS<sub>x</sub> は、CS<sub>a</sub> だけでなく、異なる場面で訓練された CS (表2の CS<sub>b</sub>) によって生じる CR をも制止する力を持つ刺激となる。

制止条件づけに関しても時間的符号化が影響を及ぼすことが最近の研究において明らかになった(Barnet & Miller, 1996 b; Denniston, Blaisdell, & Miller, 1998; Denniston, Cole, & Miller, 1998)。これらの研究においては、表1の制止条件づけ訓練における、刺激対呈示時の4つの時間関係、すなわち、第1段階における CS<sub>a</sub>-US と CS<sub>x</sub>-CS<sub>a</sub>、第2段階における CS<sub>b</sub>-US、テスト時における CS<sub>x</sub>-CS<sub>b</sub> のうち2つを操作し、どのような場合に最大の制止がみられるか(CS<sub>x</sub> の呈示により CS<sub>b</sub> に対する CR が減弱するか)を検証した。数多くの組み合わせが考えられるが、3つの研究を通じて6つの実験を行った結果、すべて、時間的符号化仮説の予測が支持された。

例えば、図2は、Denniston et al. (1998) の実験1の手続きと結果の一部を簡略に示したものである。上段が第1段階、中段が第2段階の条件づけ時における刺激間の時間関係を、下段がテスト時における刺激間の時間関係とそれらに対する結果を示している。すべての CS の呈示時間は5秒である。第1段階は、4種類の試行から成り立っている。CS<sub>a1</sub> が単独で呈示された場

表2 Pavlov の条件制止の実験パラダイム

第1段階	第2段階	テスト	結果
CS <sub>a</sub> - US	CS <sub>b</sub> -US	CS <sub>b</sub> ?	CR
CS <sub>x</sub> - no US CS <sub>a</sub>		CS <sub>x</sub> ? CS <sub>b</sub>	cr

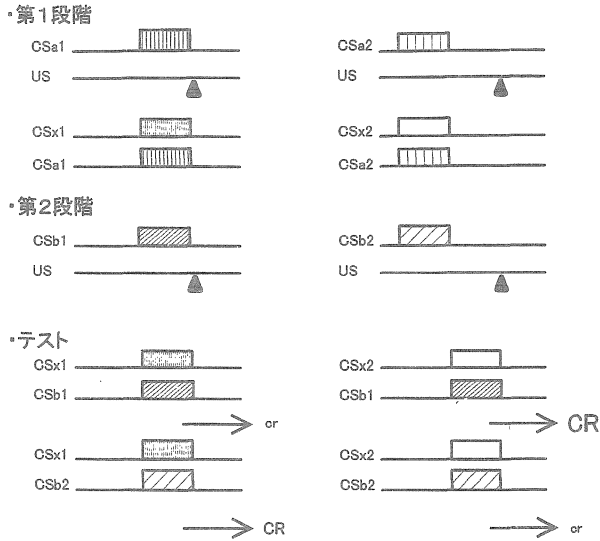


図2 Denniston, Cole, & Miller (1998) 実験1のパラダイムと結果

合、その終了直後に US が呈示される。しかし、この刺激が CS<sub>x1</sub> と複合呈示されたときは、US が呈示されず非強化である。別の刺激 CS<sub>a2</sub> は痕跡条件づけになっており、単独呈示終了から 5 秒経過した時点で US が呈示される。しかし、この刺激も CS<sub>x2</sub> と複合呈示された場合には非強化である。第 2 段階では、新たな刺激 CS<sub>b1</sub> と CS<sub>b2</sub> が用いられており、それぞれ、呈示終了直後、呈示終了から 5 秒後に US と対呈示される。最後にテストで、CS<sub>x1</sub> または CS<sub>x2</sub> を CS<sub>b1</sub> または CS<sub>b2</sub> と複合呈示して、CR の大きさを検討したところ、CS<sub>x1</sub> と CS<sub>b1</sub> の複合試行および CS<sub>x2</sub> と CS<sub>b2</sub> の複合試行では CR がほとんど見られなかったが、CS<sub>x1</sub> と CS<sub>b2</sub> の複合試行や CS<sub>x2</sub> と CS<sub>b1</sub> の複合試行では明らかな CR が確認された (なお、CS<sub>x1</sub> と CS<sub>b2</sub> の複合試行で若干 CR が小さいのは、第 2 段階での CS<sub>b2</sub> の訓練が痕跡条件づけ手続きであったためである)。

この結果は、以下のように解釈されている。通常の条件づけ (興奮条件づけ) において CS と US の間の時間関係が符号化されるのと同様、制止条件づけにおいても CS と US の不在 (本来呈示されるはずの US の非呈示) の

表3 Hall-Pearce の負の転移の実験パラダイム

	第1段階	第2段階	テスト	結果
実験群	CS - us	CS - US	CS?	cr
統制群	-	CS - US	CS?	<b>CR</b>

間の時間関係も符号化されると仮定する。第1段階において動物は、CS<sub>a</sub>とUSの時間関係を学習するが、同時に、CS<sub>x</sub>と（呈示されるはずなのに）呈示されなかったUSの時間関係を学習する。第2段階では新たな刺激CS<sub>b</sub>とUSとの時間関係を学習する。テスト時に制止が最も大きく見られるのは、CS<sub>x</sub>が予告するUS非呈示の時間的位置とCS<sub>b</sub>が予告するCS呈示の時間的位置が一致している場合であり、このときCS<sub>x</sub>はCS<sub>b</sub>によって誘発されるCRを大きく制止するのである。

#### Hall-Pearce の負の転移課題と時間的符号化

時間的符号化仮説の妥当性は、Hall-Pearce の負の転移課題 (Hall & Pearce, 1979) においても確認された。Hall-Pearce の負の転移とは、あるCSを弱いUSと対呈示する操作を行ってから、そのCSを強いUSと対呈示した場合、そのような操作を行わなかった場合と比べて、条件づけが遅れるという現象である(表3)。このとき、第1段階におけるCSと弱いUSの間の時間関係が、第2段階におけるCSと強いUSの間の時間関係と一致する場合にはHall-Pearceの負の転移が生じるが、これらの時間関係が異なっている場合には生じにくいことが報告されている (Savastano, Yin, Barnet, & Miller, 1998)。

#### 時間的符号化仮説の問題点と今後の課題

以上、時間的符号化仮説の概略とそれを支持する研究についてふれたが、時間的符号化仮説にはいくつかの問題点がある。ここではそれらについて簡単に



触れる。

時間的符号化仮説の第1の問題点は、仮説を支持する結果が、Millerらの研究室でしか得られておらず、また彼らの研究室で用いられている実験事態が、ラットを用いた恐怖条件づけに限られているということであろう。しかも、それらは一つの例外 (Savastano et al., 1998) を除いて、用いるベースライン反応も指標もすべて同じ (摂水反応の抑制) である。また、わずかではあるが、時間的符号化仮説の予測と食い違う結果が他の研究室において確認されている (例えば, Holland & Lamarre, 1984; Ward-Robinson & Hall, 1996, 1998)。これらの点を考慮すると、時間的符号化仮説を支持する結果がどれほどの一般性を持つのか疑問が残る。

第2の問題は、他の理論との整合性の難しさである。時間的符号化仮説は、先述したように接近理論にその礎をおくが、そこから発展していった他の連合理論と比較して、連合という概念そのものの捉え方が異なる。時間的符号化仮説だけでは、条件づけの獲得・消去、刺激間の競合などをうまく説明することができないが、これらを説明するために時間的符号化仮説と他の理論とを統合する際、そもそも基礎となるべき連合という概念の捉え方が全く異なることで、既存の理論を根底から作り直す必要がある。このことは特に、数式等を用いてシミュレーションを行うことができる理論 (例えば, Rescorla & Wagner, 1972) と統合する際に問題となるであろう。

Millerらは、時間的符号化仮説を組み合わせる相手として、彼ら自身が提出しているコンパレータ仮説 (Miller & Matzel, 1988) を考えているようであるが、コンパレータ仮説そのものにも大きな問題点がいくつか存在する (例えば, Nakajima & Kawai, 1997; Robbins, 1988)。現在のところ、時間的符号化仮説には適切な伴侶が存在しないように思える。

このような問題点があるものの、本稿で紹介した現象のほとんどが、時間的符号化仮説によってしか説明できないものであることを考えると、この仮説は無視することのできない重要なアイデアを条件づけの研究に提供しているといえよう。この仮説が主張する、パヴロフ型条件づけ場面における刺激間の時間

的符号化について、今後ともさらなる研究がなされるべきである。

#### 引用文献

- Barnet, R. C., Arnold, H. M., & Miller, R. R. (1991). Simultaneous conditioning demonstrated in second-order conditioning: Evidence for similar associative structure in forward and simultaneous conditioning. *Learning and Motivation, 22*, 253-268.
- Barnet, R. C., Cole, R. P., & Miller, R. R. (1997). Temporal integration in second-order conditioning and sensory preconditioning. *Animal Learning & Behavior, 25*, 221-233.
- Barnet, R. C., Graham, N. J., & Miller, R. R. (1993). Temporal coding as a determinant of blocking. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 19*, 327-341.
- Barnet, R. C., & Miller, R. R. (1996 a). Second-order excitation mediated by a backward conditioned inhibitor. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 22*, 279-296.
- Barnet, R. C., & Miller, R. R. (1996 b). Temporal encoding as a determinant of inhibitory control. *Learning and Motivation, 27*, 73-91.
- Blaisdell, A. P., Denniston, J. C., & Miller, R. R. (1997). Temporal encoding as a determinant of overshadowing. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 24*, 72-83.
- Cole, R. P., Barnet, R. C., & Miller, R. R. (1995). Temporal encoding in trace conditioning. *Animal Learning & Behavior, 23*, 144-153.
- Denniston, J. C., Blaisdell, A. P., & Miller, R. R. (1998). Temporal coding affects transfer of serial and simultaneous inhibitors. *Animal Learning & Behavior, 26*, 336-350.
- Denniston, J. C., Cole, R. P., & Miller, R. R. (1998). The role of temporal relationships in the transfer of conditioned inhibition. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 24*, 200-214.
- Guthrie, E. R. (1952). *The psychology of learning* (2nd ed). Gloucester MA: Peter Smith. (富田達彦・訳 (1980). 学習の心理学 清水弘文堂)
- Hall, G., & Pearce, J. M. (1979). Latent inhibition of a CS during CS-US pairings. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes, 5*, 31-42.
- Hull, C. L. (1943). *Principles of behavior: An introduction to behavior theory*. New York: Appleton-Century-Crofts.

- Holland, P. C., & Lamarre, J. (1984). Transfer of inhibition after serial and simultaneous feature negative discrimination training. *Learning and Motivation*, 15, 219-243.
- Mackintosh, N. J. (1983). *The psychology of animal learning*. New York: Academic Press.
- Matzel, L. D., Held, F. P., & Miller, R. R. (1988). Information and expression of simultaneous and backward associations: Implications for contiguity theory. *Learning and Motivation*, 19, 317-344.
- Miller, R. R., & Barnet, R. C. (1993). The role of time in elementary associations. *Current Directions in Psychological Science*, 2, 106-111.
- Miller, R. R., & Matzel, L. D. (1988). The comparator hypothesis: A response rule for the expression of associations. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 22, pp. 51-92). San Diego, CA: Academic Press.
- Nakajima, S., & Kawai, N. (1997). Failure of retrospective inference in rats' taste aversion. *Japanese Psychological Research*, 39, 87-97.
- Pavlov, I. P. (1927). *Conditioned reflexes: An investigation of the physiological activities of the cerebral cortex*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Rescorla, R. A. (1972). Informational variables in Pavlovian conditioning. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 6, pp. 1-46). New York: Academic Press.
- Rescorla, R. A. (1980). Simultaneous and successive associations in sensory preconditioning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 6, 207-216.
- Rescorla, R. A., & Wagner, A. R. (1972). A theory of Pavlovian conditioning: variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In A. H. Black, A. & W. F. Prokasy (Eds.), *Classical conditioning II: Current research and theory* (pp. 64-99). New York: Appleton-Century-Crofts.
- Robbins, S. J. (1988). Role of context in performance on a random schedule in autoshaping. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 14, 413-424.
- Savastano, H. I., Yin, H., Barnet, R. C., & Miller, R. R. (1998). Temporal coding in Pavlovian conditioning: Hall-Pearce negative transfer. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51 B, 139-153.
- Ward-Robinson, J., & Hall, G. (1996). Backward sensory preconditioning. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 22, 395-404.

Ward-Robinson, J., & Hall, G. (1998). Backward sensory preconditioning when reinforcer is delayed. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51 B, 349-362.

——漆原 宏次 大学院文学研究科博士課程後期課程——

——中島 定彦 文学部専任講師——