

Attention and salience in associative blocking

Stephen E. Denton and John K. Kruschke

Learning & Behavior, 2006, 34(3), 285-304

★ はじめに

◇ Blocking

- ▶ すでに結果を予測するためのものとして学習されている手がかりがあるとき
 - 新しい手がかりと結果を関連付けにくい
 - = 手がかりについての学習がブロックされる

A → B 学習 ⇒ C → B ブロッキング A=ブロックする手がかり C=ブロックされる手がかり
--

◇ Rescorla & Wagner (1972)

- ▶ 結果が予測外であったときにだけ結合力は変化する
 - その手がかりと結果の間の結合は学習されていないため、新規な手がかりはブロックされる

◇ Mackintosh (1975)

- ▶ attentional theory
 - 使われない関連する手がかりについての何かが学習される
 - 不注意の学習, 学習された注意の向け方 → ブロッキング

◇ 注意は学習において重要な役割を果たす

- ▶ より注意を割り当てられる手がかりが学習を支配する
- ▶ Edgell et al. (1996)
 - 無関係な手がかり → 関連する情報の利用を弱める
 - 関連する追加手がかり → 最初の手がかりの利用はさらに弱められる
 - より大きな妥当性のある手がかり → 他の手がかりへの注意を犠牲にして注意を引く
 - すべての手がかりの顕著さが同様の場合のみ

◇ Hall, Mackintosh, Goodall, & dal Martell (1977)

- ▶ ねずみと鳩を用いた実験
- ▶ 妥当な手がかりの学習と顕著な手がかりの学習は同様の過程である
 - ~な手がかりが~ではない手がかりを目立たなくして, よりコントロールを得る
- ▶ 最初に学習された手がかりがより顕著な手がかりと関連付けられる場合
 - ブロッキングの効果は減少, またはなくなる
- ▶ 顕著さの低いブロックする手がかりならば, 結果の完璧に妥当な手がかりであっても, いくらかのコントロールを失う

◇ 重要な点

▶ Rescorla-Wagner model

- 刺激が妥当な結果予測をできないときにだけ結合力は弱まる

- ▶ Hall et al.
 - たとえ妥当であっても顕著さが低いと手がかりの能力は低められる
- ◇ Attention shifting theory により説明される
 - ▶ たとえ、ブロックする手がかりと結果の結合力が強くても、ブロックされる手がかりが顕著なら注意をブロックする手がかりから引きはなす
- ◇ 目的
 - ▶ 人間におけるブロックする(される)手がかりの顕著さの影響
 - 統制条件: 標準ブロッキング課題
 - 実験条件: 特定の特徴を顕著にする
- ◇ 仮説
 - ▶ 顕著さが高い手がかりはブロッキング課題における注意のシフトを混乱させる
- ◇ 予測結果
 - ▶ Hall らによる動物実験と同様の発見
 - ブロックされた手がかりが顕著なら
 - ・ ブロッキングは減少する
 - ・ ブロックする手がかりはコントロールを失う(妥当な手がかりでも)
- ◇ EXIT モデル(Kruschke, 2001)のシミュレーション結果を示す
 - ▶ 3つの理論的問題
 - 顕著な刺激における、ブロッキングの減少についての注意的な解釈はあるのか?
 - ブロックする手がかりの力の減少についての注意的な解釈はあるのか?
 - ブロックする手がかりの力の減少を説明できる注意の他のメカニズムはあるのか?
→weight decay mechanism との比較

★ EXPERIMENT

◇ Effects of Salience on Blocking

- ▶ 目標
 - 標準的なブロッキング課題と、いくつかの手がかりが顕著な課題の比較
- ▶ 手がかり: 並んだドットの異なる色 (Figure 1)
- ▶ 反応: 3つのうち1つのボタンを選択
- ▶ 3つの Phase (Table 1)
 - early
 - ・ $A \rightarrow R1 \quad C \rightarrow R2 \quad F \rightarrow R3$
 - late
 - ・ $A.B \rightarrow R1$ (ブロックする=A ブロックされる=B)
 - ・ $C \rightarrow R2$ (前と同じ)
 - ・ $D.E \rightarrow R3$ (新しい)
 - Test
 - ・ いろいろな組み合わせ
- ▶ 条件
 - ESC (equal-salience condition)
 - ・ すべての手がかりの顕著さが同様

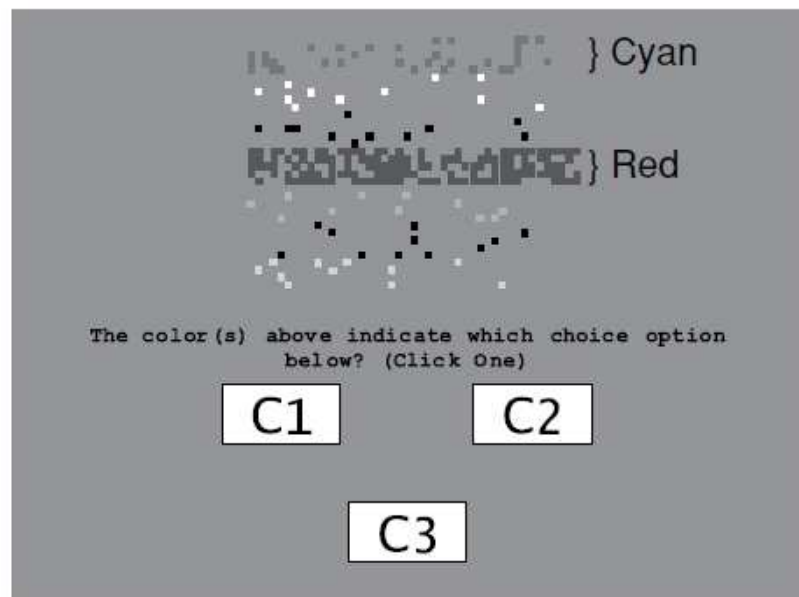


Figure 1. Example stimulus display from the second training phase. This stimulus contains two cues: one salient, corresponding to the densely dotted color red in the fourth stripe of the array, and one faint (nonsalient), corresponding to the relatively sparsely dotted color cyan in the first stripe of the array. All other colors were presented at a very sparse background density. The words *red* and *cyan* did not appear in the actual stimulus display; the words appear here to help the reader interpret this grayscale reproduction.

Table 1
Experimental Design

Phase	Cue(s) → Correct Response × Frequency			No. Blocks
Early	A → R1 × 2	C → R2 × 2	F → R3 × 2	To criterion (8 minimum)
Late	A.B → R1 × 2	C → R2 × 2	D.E → R3 × 2	15
Test	A.B → R1 × 3	C → R2 × 3	D.E → R3 × 3	2
	A → (R1,R2,R3)	D → (R1,R2,R3)	F → (R1,R2,R3)	
	B → (R1,R2,R3)	E → (R1,R2,R3)	N → (R1,R2,R3)	
	A.C → (R1,R2)	A.E → (R1,R3)	C.D → (R2,R3)	
	B.C → (R1,R2)	B.D → (R1,R3)	C.E → (R2,R3)	
	A.D → (R1,R3)	B.E → (R1,R3)	C.F → (R2,R3)	
	A.F → (R1,R3)	A.N → (R1,R3)	C.N → (R2,R3)	

Note—Each cell indicates cues → correct response. If there is no correct response, allowed responses are shown in parentheses. The cues in bold were salient for the high-salience condition.

- HSC (high-salience condition)
 - ・ 2つの手がかり(Table 1 で太字の手がかり)がほかの5つより顕著

◇ Method

◇ Participants

- ▶ 93名の学生2つのグループに振り分け(HSC46名, ESC47名)

◇ Stimuli

- ▶ Red, orange, yellow, green, cyan, blue, purple
- ▶ 顕著さは密度で表現
 - present: 15%
 - salient: 65%
 - faint: 5%

◇ Procedure

- ▶ スクリーン上に教示
- ▶ early training
 - 正確さがある基準 (2ブロック(12試行)中 11試行正答) に達するまで
 - フィードバックあり
 - 最初の2ブロックはバックカラーなしで行う
→学習を促進するため
- ▶ late training
- ▶ 1ブロック 6試行 × 15ブロック
 - 各刺激タイプ 2試行ずつ
 - フィードバックあり
 - ・ 正誤, 正しい反応
- ▶ test ブロック
 - 1ブロック 27試行×2ブロック
 - A.BとCとD.E試行のみフィードバックあり
 - 選択が許されないボタンがある
→選びなおし
 - ・ 参加者の関連のない方略の使用を減らすため
 - ・ 表示されている刺激と今まで一度も組み合わせられたことのない選択
- ▶ カラードットの出現時間: 1秒
- ▶ (不正解の音: 1秒)
- ▶ フィードバック表示: 1秒
- ▶ "continue"ボタン

◇ Result

- ▶ テストブロックでD.Eタイプの問題に6問中5問以上正解した参加者を含む
 - ちゃんと学習を行っているか
- ▶ ESC20名, HSC14名除外
 - 有意差なし ($\chi^2 = (1, N = 93) = 1.472, p = .23$)

- ◇ 主な結果: Table 2
- ◇ 全結果 Appendix B, Table B1

結果予測

	ESG	HSC
A	R1	R1?
B	?	R1
C	R2	R2
D	R3?	?
E	R3?	R3
F	R3?	R3?
N	?	?

Table 2
Response Choice Percentages in the Test Phase

		Equal-Salience Group			High-Salience Group			
		Response Type			Response Type			
Stimulus Type	Cue Type	R1	R2	R3	Cue Type	R1	R2	R3
Late phase maintenance	A.B	96	1	4	A.B	92	2	6
	C	1	95	4	C	2	95	3
	D.E	1	4	95	D.E	2	3	96
Early phase retention	A	96	2	2	A	66	30	5
	F	6	7	87	F	11	27	63
Important novel test items	B	22	17	61	B	70	6	23
	D	15	4	82	D	17	45	38
	E	7	6	87	E	5	5	91
	B.D	24	–	76	B.D	70	–	30
	B.E	20	–	80	B.E	34	–	66

Note—Boldface cues were salient. The bold italicized percentages correspond to the normative response. Percentages within rows do not all sum to 100%, owing to rounding error. Dashes indicate disallowed responses.

◇ Late Phase Maintenance

- ▶ テストブロックにおける late training の刺激のパフォーマンスはよい
 - A.B → R1 ESC 96% HSC 92%
 - C → R2 ESC 95% HSC 95%
 - D.E → R3 ESC 95% HSC 96%

◇ Is Cue B Blocked?

- ▶ R1 とは手がかり A がすでに関連付けられている
 - 手がかり B が手がかり A によりブロックされている → R1 以外
 - 手がかり B が手がかり A によりブロックされていない → R1
- ▶ 手がかり B における R1 への反応: ESC 22% HSC 70%
 - 手がかり B は ESC よりも HSC において反応をコントロールしている
- ▶ 手がかり B に対する R1 反応の回数(最大 2 回)
 - ESC: 0.44 HSC: 1.41 ($t(57) = 4.61, p < .001, d = 1.21$)
 - HSC より ESC においてブロッキングが強い
- ▶ 被験者内検定
 - A.B → R1 D.E → R3 ⇒ B.D & B.E → ?
 - B がブロックされていれば手がかり(D.E)に基づき選択 → R3
- ▶ ESC 条件
 - R1 22% R3 78%
 - B.D と B.E において R3 を選んだ回数: 3.11
 - チャンスレベル 2 ($t(26) = 5.15, p < .001, d = .99$)
 - 手がかり B はブロックされている
- ▶ HSC 条件
 - B.E タイプが提示されたとき

- ・ Eに基づいて選択=R3: 66%
- ・ Bに基づいて選択=R1: 34%
- R3を選択した回数: 1.31
- チャンスレベル 1 ($t(31) = 2.27, p = .031, d = .40$)
→手がかり B はブロックされている
- ▶ B.E テストでは ESC より HSC のほうが弱いブロッキングを示した
 - HSC のほうが R1 と R3 の差が小さい
- ▶ グループ間のテストは有意に達しない ($t(57) = 1.35, p = .182, \text{two-tailed}$)
 - 検定力不足による(0.26)

◇ Does the Blocking Cue A Lose Strength in the HSC?

◇ Primary evidence

- ▶ 手がかり A 弱められていない→R1 弱められている→R1 以外
- ▶ R1 の選択 ESC:96% HSC: 66% ($t(57) = 3.31, p = .002, d = .86$)
→HSC では手がかり A は力を失っている

◇ Ancillary evidence

- ▶ C,D,N との組み合わせ
- ▶ R1 の選択

	ESC	HSC	検定
A.C	46%	31%	$t(57) = 1.21, p = .23, d = .32$
A.N	87%	78%	$t(57) = 1.25, p = .22, d = .33$

→検定力不足

- ▶ A.C, A.N, A.D をプールして検定
 - R1 の選択 ESC > HSC ($t(57) = 2.09, p = .04, d = .29$)
- ▶ A.D → R1 ESC: 94% HSC: 77% ($t(57) = 2.28, p = .027, d = .59$)
→手がかり A は HSC においてよりコントロールを失う
- ▶ 統制手がかり F
 - early で学習してから test まで現れない
- ▶ 手がかり F に対する R3 の選択
 - ESC: 87% HSC: 63% ($t(57) = 2.62, p = .011, d = .69$)
 - ESC より HSC において F は力を失っている
- ▶ 手がかり A.F に対する反応
 - 条件間で差がない ($t(57) = 0.48, p = .962$)
→HSC において手がかり A も手がかり F と同様に力を失っている

◇ Is D Overshadowed?

◇ Primary evidence

- ▶ 手がかり D は手がかり E とペアになっていた (D.E → R3)
 - ESC→互いに目立たなくさせる
 - HSC→E が顕著なため手がかり D は目立たない
- ▶ 手がかり D による R3 の選択
 - ESC: 82% HSC: 38% ($t(57) = 4.22, p < .001, d = 1.10$)
→HSC において手がかり D はあまり学習されない

◇ Ancillary evidence

- ▶ 手がかり D はどちらの条件でも弱いコントロールしかない
 - C.D → R3 ESC: 9.3% HSC: 6%
- ▶ A.D → R3 ESC: 6% HSC: 23% (手がかり A が弱められているため)
- ▶ HSC では手がかり D への反応は新規な手がかり N への反応と変わらない ($\chi^2 (2, N = 128) = 0.555, p = .758$)
 - 手がかり D は手がかり E に目立たなくされている

◇ What Else Does the N Cue Tell Us?

- ▶ 手がかり N への反応は両条件とも偏っていた(ESC: $\chi^2 (2, N = 54) = 30.333, p < .001$; HSC: $\chi^2 (2, N = 64) = 9.500, p = .009$)
- ▶ ESC と HSC で違いがある ($\chi^2 (2, N = 118) = 17.186, p < .001$)
 - ESC: R3 HSC: R2

◇ Discussion of Results

- ▶ HSC におけるブロッキングの減少と、ブロックする手がかりによるコントロールの減少
- ▶ Hall et al.の拡大
 - 7つの手がかりを見て、14の異なる組み合わせをテストした
→いろいろなテストができた
 - 被験者内比較ができた

★ MODELING

◇ 注意のメカニズムを用いたモデルの提案

- ▶ 実験の結果
 - 結果が予測できた手がかりでも力が弱まった
 - 本実験では刺激は常に提示されていた
- ▶ 先行モデル
 - Rescorla-Wagner model
 - ネガティブな学習率の利用
- ▶ 今回の結果には十分ではない
 - 力の減少を説明できない
 - 刺激の存在/不在しか仮定されていない
→注意メカニズムによる説明
- ▶ すべてのインプットは活性化されていたが、程度が異なった
 - Ghirlanda (2005) model
 - ・ 存在しない刺激は小さいポジティブな活性化
 - 存在/不在(背景)は段階的な活性化で表現

◇ 目的

- ▶ 結果を説明するために関連学習に付け加える新たなメカニズムとは?
- ▶ 2つのメカニズムが手がかりの力の減少を説明できる
 - attention shifting
 - ・ 注意が離れると力が弱まる
 - forgetting

- =associative weight decay
 - ▶ 4つのモデルの比較
 - full model
 - attention model
 - decay model
 - restricted model
- ◇ The Full Model
 - ▶ EXIT model の改良版
 - connectionist 構造 (Figure 2)
 - ▶ 刺激の提示
 - 顕著さに基づく cue node の活性化 式(1)
 - ▶ 手がかり間での注意の分配
 - 事例による調整
 - Exemplar node の活性化 式(2)
 - 各事例における手がかりの影響の集積
→exemplar 特有の注意の分配を学習することができる
 - exemplar node と input node の活性化を元に注意を分配する 式(3,4)
 - exemplar node の活性化の重み付けと input node の活性化により決まる
 - 重み付けははじめは 0 で学習される
 - ▶ output node の活性化 式(5)
 - ▶ 反応 式(6)
 - output node の活性化により各反応の確立が決まる
- ◇ 学習過程
 - ▶ フィードバック後に反応と正しい反応の差を検出 式(7)
 - ▶ エラーが小さくなるように調節する
 - ① エラーを起こす手がかりから注意をそらす 式(8)
 - ② 結合力を調整する = 注意の重み付けの学習
 - ②-1 手がかりと output を結合する 式(9)
 - ②-2 bias node と output を結合する 式(10)
 - ②-3 exemplar node と attention node を結合する 式(11)
- ◇ The Attention Model
 - ▶ attention model (no-decay model)
 - attention shifting のメカニズムのみ利用し、forgetting を利用しない
 - full model から decay の部分を取り除く
- ◇ The Decay Model
 - ▶ decay model (no-attention model)
 - フルモデルから注意の要素を取り除く
- ◇ The Restricted Model
 - ▶ フルモデルから attention と decay を取り除く
- ◇ Fit of the Models

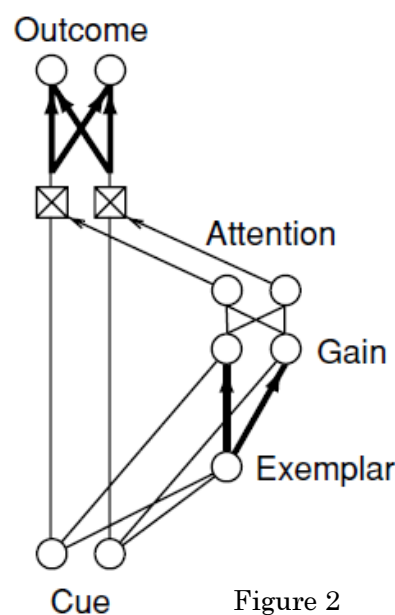


Figure 2

- ▶ early training 12 ブロック (人間の平均 11.75 ブロックより)
 - ▶ late training 15 ブロック
 - ↓
 - ▶ 2 テストブロックの予測を行う
 - ▶ 50 の仮想参加者をラン
- ◇ Model comparison
- 一般化尤度 (G^2) を用いてフィッティング
 - ▶ G^2 : 小さい = 人間の結果に近い
 - ▶ G^2 の値
 - full model 115.7
 - attention model 193.6
 - decay model 259.6
 - restriction model 379.7
 - full model が一番、人間の結果に近い
 - ▶ χ^2 臨界値 9.49
 - モデルのフィットは有意に異なる
 - attention と decay メカニズムはモデルのフィットを有意に向上させる
- ◇ Is cue B blocked?
- ▶ すべてのモデルは ESC において手がかり B のブロッキングを示している
 - HSC でのブロッキングが少ないことも示している (Figure 3)
 - ▶ 複雑なモデルほど人間に近い
 - ▶ すべてのモデルは手がかり B のブロックに関しては質的に異なる
- ◇ Does the blocking cue A lose strength in the HSC?
- ▶ attention mechanism が含まれるモデルでは手がかり A への反応力が人間と同程度まで減少 (Figure 4)
 - ▶ decay model では人間と同程度までは落ちない
 - ▶ attention model において結合力は 2 回目のトレーニングが終わっても変化しない
 - (ESC と HSC の平均は同じ) 3.09 → 3.10 (HSC)
 - attention model で R1 への反応が減ったのは注意のシフトによる
 - ▶ 注意の分配が異なる (Figure 5)
 - ESC では高い注意が保持
 - HSC では分散が大きい
 - ▶ A.B トレーニングにおける学習内容からの一般化によりシフトが起こる
 - 手がかり B が顕著なため、注意を奪う
 - exemplar-to-gain 結合による学習 (②-3) → 手がかり A だけが現れても、A.B 事例が部分的に活性化され注意が奪われる
- ◇ The insufficiency of forgetting
- ▶ decay model は HSC において手がかり A の反応に十分な減少を示さなかった
 - ▶ 手がかり F に関するテスト
 - 手がかり F における R3 への反応は ESC より HSC のほうが低かった
 - decay model はこの減少を説明できない (Figure 6)

- ・ どちらの条件でも同じように扱う
 - ▶ 顕著な手がかりからの推論により HSC で **forgetting** が加速されるとすれば使えるかもしれない
 - この加速は手がかり固有でなければならない
 - ▶ 手がかり固有の減少は選択的注意ですでに取られている
 - やる意味がない
- ◇ The importance of attention
- ▶ 手がかり A への反応を予測できる
 - ▶ 手がかり固有のため、ESC と HSC で異なるコントロールで反応することができる
 - ▶ 手がかり F における減少も説明できる
 - ▶ 顕著な手がかり E と B が注意を引くため、注意のシフトが起こる
- ★ SUMMARY AND DISCUSSION
- ◇ 本研究
- ▶ 先行研究の人間への拡張
 - ブロックされる手がかりが顕著だとブロックされにくい
 - 事前に学習されたブロックする手がかりはより顕著なブロックされる手がかりとペアにされると力を失う
- ◇ 結果は注意のメカニズムで説明される
- ▶ 顕著な刺激は、顕著ではない刺激から注意を奪う
 - モデルにおいては注意のメカニズムだけが結果に則した結果を示した
 - **decay** のみのモデルはコントロールの減少を示すのに失敗した
- ◇ フルモデルでも説明できないいくつかの点が残っている
- ▶ 手がかり N に対する反応
 - ESC では R3、HSC では R2 反応をする傾向があった
 - ▶ ESC における R3 への反応は以下の学習されたヒューリスティックにより説明できる
 - A から R1C から R2 への強い結合があるが、いくつかの手がかり(D,E,F)は R3 を示す
 - R3 は"そのほか"に対応しているように感じる
 - ▶ HSC における R2 への反応は **faint** と顕著の区別による学習により説明できる
 - 顕著な B→R1、顕著な E→R3 ⇒**faint** は R2
 - 手がかり D でも同様の傾向が見られる
 - ▶ 手がかり F への反応も、一部これらのヒューリスティックで説明できる
 - ▶ モデルに組み込まれていないほかの方略も使っていただろう
- ◇ 将来的に
- ▶ 追加的なメカニズムを含んだモデルを作る
 - ▶ 新しい実験方法をデザインする
 - ▶ **late training** の拡大によって、さらに注意について検討

Figure

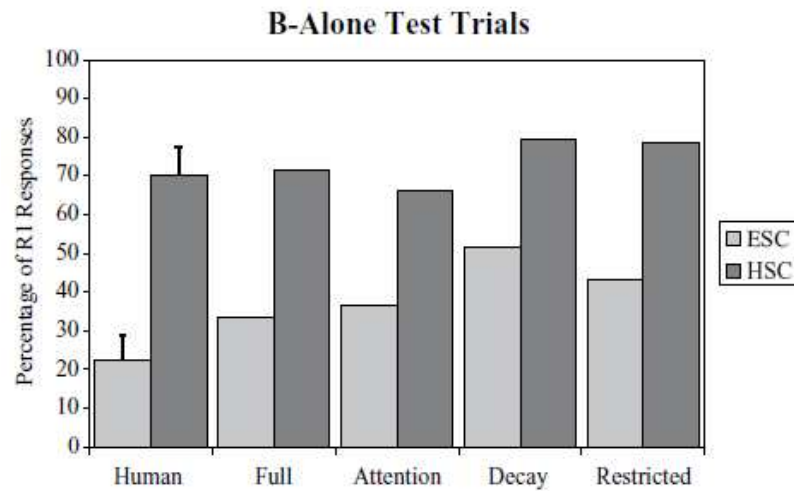


Figure 3. Percentage of R1 responses to the blocked cue B. Error bars indicate one standard error. Human, human data. Full, full model. Attention, attention model. Decay, decay model. Restricted, restricted model. ESC, equal-salience condition. HSC, high-salience condition.

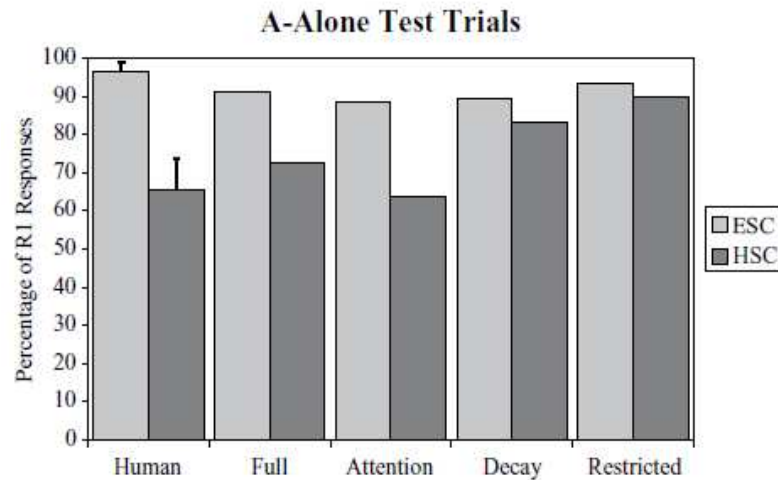


Figure 4. Percentage of R1 responses to the blocking cue A. Error bars indicate one standard error. Human, human data. Full, full model. Attention, attention model. Decay, decay model. Restricted, restricted model. ESC, equal-salience condition. HSC, high-salience condition.

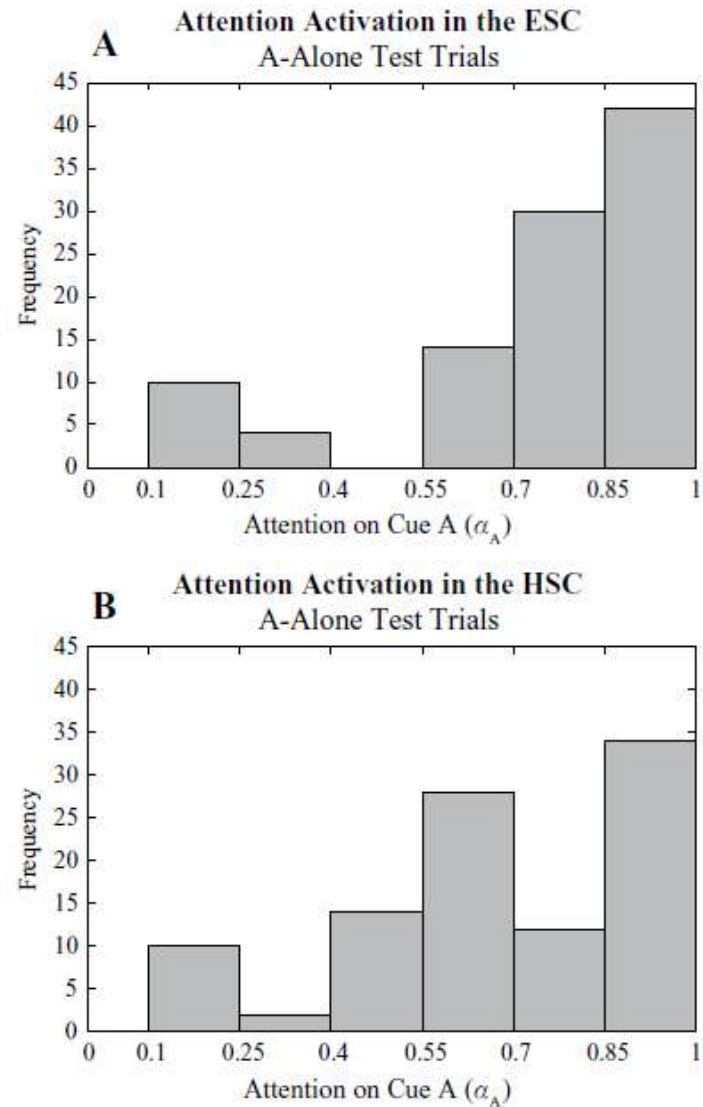


Figure 5. Histograms of attention allocation in the attention-only model for the A-alone test cue. The upper panel shows simulations of the equal-salience condition (ESC), and the lower panel shows simulations of the high-salience condition (HSC). The count indicates single trials.

Appendix B

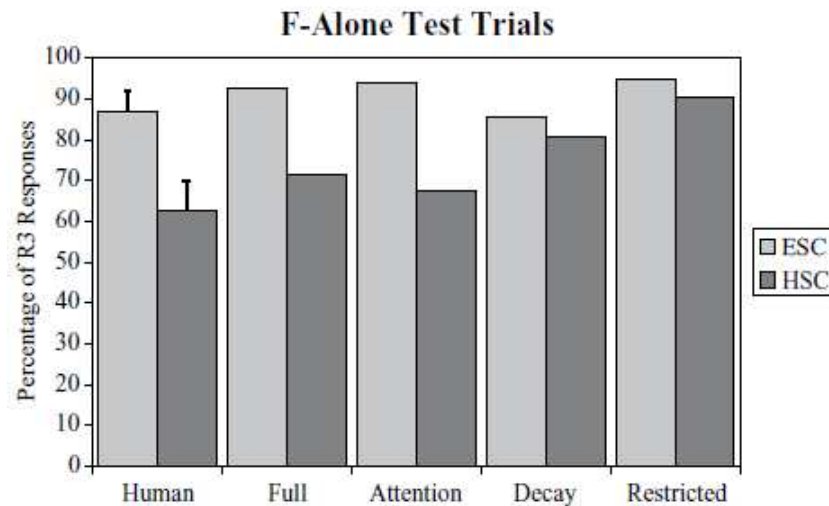


Figure 6. Percentage of R3 responses to cue F. Error bars indicate one standard error. Human, human data. Full, full model. Attention, attention model. Decay, decay model. Restricted, restricted model. ESC, equal-salience condition. HSC, high-salience condition.

Table B1
Response Choice Percentages

Phase	Cue Type	Equal-Salience Group			High-Salience Group			
		Response Type			Response Type			
		R1	R2	R3	R1	R2	R3	
Early	A	98.1	0.0	1.9	A	98.4	1.6	0.0
	C	0.0	100.0	0.0	C	2.3	95.3	2.3
	F	0.9	0.9	98.1	F	0.0	0.8	99.2
Test	A	96.3	1.9	1.9	A	65.6	29.7	4.7
	A.B	95.7	0.6	3.7	A.B	91.7	2.1	6.3
	A.C	46.3	53.7	—	A.C	35.9	64.1	—
	A.D	94.4	—	5.6	A.D	76.6	—	23.4
	A.E	88.9	—	11.1	A.E	31.3	—	68.8
	A.F	63.0	—	37.0	A.F	61.9	—	38.1
	A.N	87.0	—	13.0	A.N	78.1	—	21.9
	B	22.2	16.7	61.1	B	70.3	6.3	23.4
	B.C	11.1	88.9	—	B.C	70.3	29.7	—
	B.D	24.1	—	75.9	B.D	70.3	—	29.7
	B.E	20.4	—	79.6	B.E	34.4	—	65.6
	C	1.2	95.1	3.7	C	2.1	94.8	3.1
	C.D	—	90.7	9.3	C.D	—	93.6	6.4
	C.E	—	83.3	16.7	C.E	—	31.3	68.8
	C.F	—	66.7	33.3	C.F	—	78.1	21.9
	C.N	—	90.7	9.3	C.N	—	93.8	6.3
	D	14.8	3.7	81.5	D	17.2	45.3	37.5
	D.E	1.2	3.7	95.1	D.E	1.6	2.6	95.8
	E	7.4	5.6	87.0	E	4.7	4.7	90.6
F	5.6	7.4	87.0	F	10.9	26.6	62.5	
N	13.0	18.5	68.5	N	18.8	50.0	31.3	

Note—Boldface letters indicate salient cues. Dashes indicate disallowed responses.

Appendix C

Table C1
Best-Fitting Parameter Values

Parameter	Model			
	Full	Attention	Decay	Restricted
δ_w	0.0069	–	0.0051	–
λ_g	0.122	0.970	–	–
λ_x	0.369	0.0317	–	–
c	1.82	1.86	–	–
P	3.05	2.44	6.91	1.86
ϕ	3.41	2.46	3.67	3.46
λ_w	2.35	3.04	0.220	0.248
λ_b	0.328	0.815	0.543	0.124
b	0.837	0.864	0.0001	0.429
f	1.0 (fixed)	1.0 (fixed)	1.0 (fixed)	1.0 (fixed)
s	1.56	1.59	1.66	2.15

Table C2
Best-Fitting Predictions of the Full Model

Phase	Equal-Saliency Group				High-Saliency Group			
	Cue Type	Response Type			Cue Type	Response Type		
		R1	R2	R3		R1	R2	R3
Early	A	95.9	2.0	2.1	A	95.9	2.0	2.1
	C	1.7	96.0	2.3	C	1.7	96.0	2.3
	F	1.7	1.1	97.1	F	1.7	1.1	97.1
Test	A	91.4	3.1	5.5	A	72.6	15.7	11.6
	A.B	94.4	2.1	3.5	A.B	95.8	1.6	2.6
	A.C	47.6	52.4	–	A.C	28.6	71.4	–
	A.D	83.9	–	16.1	A.D	82.1	–	17.9
	A.E	84.1	–	15.9	A.E	20.6	–	79.4
	A.F	53.6	–	46.4	A.F	54.4	–	45.6
	A.N	92.6	–	7.4	A.N	85.1	–	14.9
	B	33.4	22.0	44.6	B	71.7	10.0	18.3
	B.C	5.2	94.8	–	B.C	55.6	44.4	–
	B.D	21.0	–	79.0	B.D	69.6	–	30.4
	B.E	21.2	–	78.8	B.E	36.6	–	63.4
	C	2.1	94.3	3.6	C	1.8	96.2	2.0
	C.D	–	86.2	13.8	C.D	–	95.4	4.6
	C.E	–	86.0	14.0	C.E	–	23.3	76.7
	C.F	–	56.6	43.4	C.F	–	78.5	21.5
	C.N	–	92.2	7.8	C.N	–	95.8	4.2
	D	9.5	11.0	79.5	D	22.9	41.5	35.6
	D.E	3.1	3.2	93.7	D.E	2.3	2.1	95.6
E	9.3	10.5	80.2	E	3.8	3.8	92.4	
F	3.3	4.2	92.5	F	10.6	18.1	71.3	
N	20.7	23.1	56.1	N	24.3	44.9	30.8	

Note—Boldface letters indicate salient cues. Dashes indicate disallowed responses.

Table C3
Best-Fitting Predictions of the Attention Model

Phase	Equal-Saliency Group				High-Saliency Group			
	Cue Type	Response Type			Cue Type	Response Type		
		R1	R2	R3		R1	R2	R3
Early	A	91.8	3.4	4.9	A	91.8	3.4	4.9
	C	3.5	91.1	5.4	C	3.5	91.1	5.4
	F	4.8	2.6	92.6	F	4.8	2.6	92.6
Test	A	88.3	2.9	8.7	A	63.8	21.3	14.9
	A.B	95.6	1.8	2.6	A.B	95.3	1.6	3.2
	A.C	39.3	60.7	–	A.C	32.3	67.7	–
	A.D	80.1	–	19.9	A.D	84.7	–	15.3
	A.E	79.8	–	20.2	A.E	25.7	–	74.3
	A.F	50.7	–	49.3	A.F	47.5	–	52.5
	A.N	94.7	–	5.3	A.N	90.2	–	9.8
	B	36.6	20.7	42.7	B	66.1	10.5	23.4
	B.C	2.3	97.7	–	B.C	62.6	37.4	–
	B.D	15.2	–	84.8	B.D	65.8	–	34.2
	B.E	15.3	–	84.7	B.E	47.0	–	53.0
	C	1.0	96.2	2.9	C	1.4	96.8	1.8
	C.D	–	84.2	15.8	C.D	–	94.5	5.5
	C.E	–	84.5	15.5	C.E	–	25.8	74.2
	C.F	–	64.6	35.4	C.F	–	72.6	27.4
	C.N	–	93.4	6.6	C.N	–	95.8	4.2
	D	4.7	6.4	88.9	D	19.5	43.3	37.2
	D.E	1.9	1.1	97.0	D.E	2.7	1.6	95.6
E	4.6	6.5	88.9	E	5.6	4.4	90.0	
F	3.2	2.9	93.9	F	12.5	20.0	67.5	
N	14.7	24.7	60.7	N	21.1	49.1	29.8	

Note—Boldface letters indicate salient cues. Dashes indicate disallowed responses.

Table C4
Best-Fitting Predictions of the Decay Model

Phase	Equal-Salience Group			High-Salience Group				
	Cue Type	Response Type			Cue Type	Response Type		
		R1	R2	R3		R1	R2	R3
Early	A	93.9	3.1	3.0	A	93.9	3.1	3.0
	C	3.1	93.9	3.1	C	3.1	93.9	3.1
	F	3.1	3.1	93.8	F	3.1	3.1	93.8
Test	A	89.5	4.9	5.6	A	83.4	8.8	7.8
	A.B	94.4	2.8	2.8	A.B	94.8	2.7	2.6
	A.C	40.8	59.2	–	A.C	29.8	70.2	–
	A.D	72.0	–	28.0	A.D	82.1	–	17.9
	A.E	72.0	–	28.0	A.E	16.0	–	84.0
	A.F	64.3	–	35.7	A.F	55.8	–	44.2
	A.N	92.2	–	7.8	A.N	89.3	–	10.7
	B	51.7	22.7	25.6	B	79.5	10.5	10.0
	B.C	9.3	90.7	–	B.C	52.7	47.3	–
	B.D	28.2	–	71.8	B.D	84.2	–	15.8
	B.E	28.1	–	71.9	B.E	29.7	–	70.3
	C	2.9	94.2	2.9	C	2.8	94.4	2.8
	C.D	–	82.3	17.7	C.D	–	92.8	7.2
	C.E	–	82.0	18.0	C.E	–	24.9	75.1
	C.F	–	77.4	22.6	C.F	–	78.7	21.3
	C.N	–	95.7	4.3	C.N	–	96.1	3.9
	D	9.2	10.1	80.7	D	21.0	28.1	50.9
	D.E	2.8	2.8	94.4	D.E	2.6	2.7	94.8
E	9.1	10.0	80.9	E	3.6	3.9	92.5	
F	6.5	7.8	85.7	F	8.0	11.3	80.7	
N	26.5	31.0	42.5	N	27.3	38.6	34.1	

Note—Boldface letters indicate salient cues. Dashes indicate disallowed responses.

Table C5
Best-Fitting Predictions of the Restricted Model

Phase	Equal-Salience Group			High-Salience Group				
	Cue Type	Response Type			Cue Type	Response Type		
		R1	R2	R3		R1	R2	R3
Early	A	88.7	5.6	5.6	A	88.7	5.6	5.6
	C	5.7	88.6	5.7	C	5.7	88.6	5.7
	F	5.7	5.6	88.6	F	5.7	5.6	88.6
Test	A	93.4	2.8	3.8	A	89.9	5.3	4.8
	A.B	93.9	3.0	3.0	A.B	94.7	3.0	2.3
	A.C	49.9	50.1	–	A.C	39.4	60.6	–
	A.D	78.0	–	22.0	A.D	91.0	–	9.0
	A.E	77.9	–	22.1	A.E	15.9	–	84.1
	A.F	53.9	–	46.1	A.F	50.0	–	50.0
	A.N	93.3	–	6.7	A.N	92.3	–	7.7
	B	43.4	23.9	32.7	B	78.5	12.0	9.6
	B.C	7.7	92.3	–	B.C	45.6	54.4	–
	B.D	22.8	–	77.2	B.D	86.4	–	13.6
	B.E	22.8	–	77.2	B.E	24.7	–	75.3
	C	3.0	93.8	3.2	C	2.9	94.1	3.0
	C.D	–	81.0	19.0	C.D	–	94.5	5.5
	C.E	–	81.0	19.0	C.E	–	19.9	80.1
	C.F	–	58.0	42.0	C.F	–	63.0	37.0
	C.N	–	94.3	5.7	C.N	–	95.3	4.7
	D	8.6	8.3	83.1	D	28.1	33.8	38.1
	D.E	3.2	3.2	93.6	D.E	2.8	3.0	94.3
E	8.6	8.3	83.1	E	2.4	2.5	95.1	
F	2.7	2.5	94.8	F	4.4	5.3	90.3	
N	25.9	24.4	49.7	N	29.9	36.6	33.5	

Note—Boldface letters indicate salient cues. Dashes indicate disallowed responses.

モデルにおける各式

◇ cue node の活性化

- ▶ cue node = 色
- ▶ 活性化の程度 = 密度

$$- a_i^{\text{in}} = \begin{cases} b & \text{if background density} \\ f & \text{if faint density} \\ s & \text{if salient density} \end{cases} \quad \text{式(1)}$$

- $b < f = 1 < s$
- b, s はフリーパラメータ

◇ 注意分配の学習

◇ exemplar node の活性化

$$- a_x^{\text{ex}} = \exp\left(-c \sum_i |\psi_{xi} - a_i^{\text{in}}|\right) \quad \text{式(2)}$$

- ψ_{xi} は exemplar x における手がかり i の程度
- c は各 exemplar node の受容力の幅を決定する決まったパラメータ
 - ・ 大きい→ひとつの exemplar からほかの exemplar への学習された注意分配の一般化は小さい

◇ 注意力の決定 (注意ゲート)

- ▶ input node との一対一対応と, exemplar からの重み付け接続によりなされる (gain node)

$$- g_i = a_i^{\text{in}} \exp\left(\sum_x w_{ix} a_x^{\text{ex}}\right) \quad \text{式(3)}$$

- w_{ix} は exemplar node x から gain node i への活性化の重み付け

- ▶ 手がかりへの注意は限界があるため, 注意の競合がおこる
- ▶ 注意力の標準化を行う (attention node?)

$$- \alpha_i = \frac{g_i}{\left(\sum_j g_j^P\right)^{\frac{1}{P}}} \quad \text{式(4)}$$

- P は attentional capacity のパワーパラメータ
 - ・ 全体的な注意の重み付けを決める
 - ・ 大きい→注意力が大きい=学習が早い
 - ・ 小さい→手がかりの間で激しい競合がある

◇ output node の活性化

- ▶ input node の活性化が注意力により調整され, それが集積されて output node の活性化が決定される

$$- a_k^{\text{out}} = \sum_i w_{ki} \alpha_i a_i^{\text{in}} \quad \text{式(5)}$$

- ▶ a_i は input node i への注意力

◇ 各反応の確率の決定

- ▶ output node の活性化により反応が決まる

$$- p(r) = \frac{\exp(\phi a_r^{\text{out}})}{\sum_k \exp(\phi a_k^{\text{out}})} \quad \text{式(6)}$$

- ϕ は decisiveness パラメータ

- ▶ Luce の決定ルール

- ϕ が大きい → 小さな活性化でも選択に大きな影響を及ぼす
- ϕ が小さい → 活性化の差が大きくても選択にそれほど影響しない

◇ 選択バイアス

- ▶ 選択バイアスを説明するために追加的な input node を設ける (bias-to-category)
 - どの選択肢を選びやすいか
 - 常に活性化 ($a_b^{\text{in}} = 1.0$)
 - 注意は一定 ($\alpha_b = 1.0$)

◇ 学習過程

- ▶ エラーの検出

$$- E = .5 \sum_k (t_k - a_k^{\text{out}})^2 \quad \text{式(7)}$$

- t_k = teacher value

$$- t_k = \begin{cases} \max(+1, a_k^{\text{out}}) & \text{if stimulus is in category } k \\ \min(0, a_k^{\text{out}}) & \text{if stimulus is not in category } k \end{cases}$$

- カテゴリ k のとき a_k^{out} が 1 以上ならエラーではない
- カテゴリ k ではないとき a_k^{out} が 1 以下ならエラーではない

◇ Attention shifting (①)

$$- \Delta g_i = \frac{\lambda_g \sum_k (t_k - a_k^{\text{out}}) (w_{ki} a_i^{\text{in}} - \alpha_i^{p-1} a_k^{\text{out}})}{\left(\sum_j g_j^p \right)^{\frac{1}{p}}} \quad \text{式(8)}$$

- λ_g : shift rate for attention エラーへの反応においてどれほどの大ききでシフトが形成されるか

- ▶ 10 の比較的小さなステップ → 1 つの大きなシフト

◇ Associative weight learning with decay (②)

- ▶ ②-1 $\Delta w_{ki} = \lambda_w (t_k - a_k^{\text{out}}) \alpha_i a_i^{\text{in}} - \delta_w w_{ki}$ 式(9)
 - λ_w : learning rate for output weight (注意の部分)
 - δ_w : output weight decay rate (decay の部分)
- ▶ ②-2 $\Delta w_{kb} = \lambda_b (t_k - a_k^{\text{out}})$ 式(10)
 - λ_b : bias learning rate
- ▶ ②-3 $\Delta w_{ix}^s = \lambda_x (g_i^{\text{shift}} - g_i^{\text{init}}) g_i^{\text{init}} a_x^{\text{ex}}$ 式(11)
 - λ_x : attentional weight learning rat