

## 両眼視の 3 次元視の研究

### ステレオプシスの視差の研究の意義

Arguin & Aubin (2023) は、ステレオオプシス研究によると人間のゼロ視差、ノーマル視差、あるいは逆点視差で対象の形状認知がしらべられてきたとし、認知のもっとも高度なレベルはゼロ視差、ノーマル視差条件であると報告した。しかし、逆転した視差条件はこれ以外の条件より有意に認知が悪いことが分かっていると、このことは、ステレオプシスが形状知覚のしくみには継続的に刺激が入力する必要性を示した。

これを立証するために Arguin らは、実験を組み立てた。仮説によると網膜へのさまざまな視点からの 2 次元イメージが明確に投影されて 3 次元の形状が成り立つとし、この形状認知のためには奥行情報の潜在的働きを考慮する必要があるとした。Marr (1982) は、かつて陰影やステレオプシスからの手がかりが対象の 3 次元構造を推測する重要な役割を果たしていると提案した。しかし、Julesz (1960) はランダムドットで成り立つステレオグラムだけで 3 次元形状を両眼視して知覚・認知できることを明らかにしたことから単眼視の形状手がかりが無くても形状知覚することを見いだした。その後 3 次元カーブ (De Vries, Kappers & Koenderink, 1993 など他) や面の方向 (Norman, Todd & Phillips, 1995 など他) がランダムドットの両眼視できることが報告され、両眼視差は対象の 3D 形状の情報として効果的であることが明確にされた。

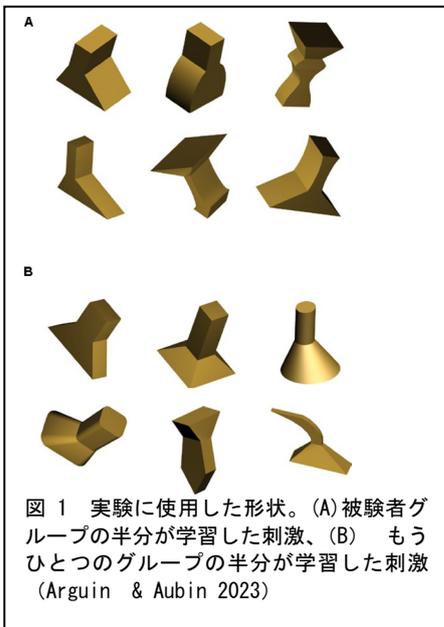
しかし、3D の形状知覚は両眼視差のみで知られるのではなく、陰影、線形図形や写真図でも容易に 3 次元が認知できる (Biederman & Ju, 1988)。両眼視差が有りあるいは無しによる刺激の認知に対する影響がしらべられ、対象認知では視差の存在による効果は明瞭に確定できなかった。Tian et al., (2016) は、両眼視差以外の情報で 3 次元対象を認知できない場合は両眼視差が利用されると出張した。

そこで Arguin らは一貫して安定した両眼視差があり課題文脈がなければ、潜在的効果が

形状認知に及ばさないと考えた。これを確かめるために、両眼視差を通常より反転させ奥行手がかりを反対方向に変えた、反転視差の刺激に対する影響をしらべた。Ichikawa & Egusa (1993) は、反転視差で奥行を逆転し順応させた後、逆転メガネを除去して残効を試したところ、陰影、線形パースペクティブ、オクルージョンに一致した単眼的情報とはコンフリクトして異なる奥行効果が残ることを明らかにした。

この実験では、単眼の手がかりがある場合のステレオプシスの影響をしらべるために両眼視差からの形状認知がノーマルならば逆転視差条件より有利と想定される。もし、単眼の手がかりに潜在的曖昧さが無ければ無視されて両眼視が有利になり、もしステレオオプシスが 3 次元形状の確かなものならば逆転両眼視差は視差がゼロに比較して単眼と両眼の手がかり間の不一致で認知が変わると予測される。

実験では 8 人の 30 歳から 18 歳の視力とテストで健全なステレオプシス被験者を対象とし、両眼が無視差、ノーマル視差、逆転視差の条件をランダムに実験を実施した。実験で使用した刺激対象は 3D の通常は見ないモデル (図 1) で立体的な部分をもたせた。これらの刺激は鏡式ステレオスコープで提示され距離 60cm の決まった位置に固定され垂直軸に 5.42° の角速度で回転、また無視差の条件では同一刺激を両眼に提示した。実験は 3 学習、練習そしてテストからなり、半数の被験者グループでは 6 個の対象からなるセット (図のセット A) を、



図のセット A) を、

もう一つのグループには他のセット（セット B）を十分個別に記憶させた。非学習の新奇な対象はテスト段階で用いた。練習段階では 6 個の学習対象と 3 個の新しい対象について 2 回実施した。被験者には提示された対象が記憶したものか、あるいは初めてかを指示させた。テスト段階では被験者が練習したものの中から 15 個の正確な答えをした後、被験者は各トライアルで示された対象が既知あるいは未知の対象だったかが問われた。この 3 段階をもつ実験は各セッションの学習 2 分、練習 5-10 分、テスト 15-20 分間で継続して実施した。

実験の結果、無視差とノーマル視差条件では逆転視差よりエラーが有意に少ないことが、また無視差とノーマル視差条件の間には有意差がないことそれぞれ示された。この結果は単眼視の奥行き手がかりが豊かでも両眼視差が安定した情報を形状認知に提供していることを示した。しかしもっと複雑な 3 次元対象を取り上げたときは潜在的な単眼奥行き手がかりが関わり結果を変えるかも知れない。

### 眼球間垂直フェーズの視差の検索の手がかり

コントラストについての眼球間視差は検出の手がかりとして提示されると両眼ラスタ（光彩）の輝きを生み出す。空間的キャリアのガボールパッチにおける視差はもちろんラスタの印象を生み出す。そこで、これはラスタにともなう局所的コントラストのフェーズ視差かどうかの問題となった。Kingdom et al. (2023) フェーズとコントラストの視差の両方の検出閾値を測定するために水平方向の各空間周波数とエンベロープのガボールパッチを用い検討した。

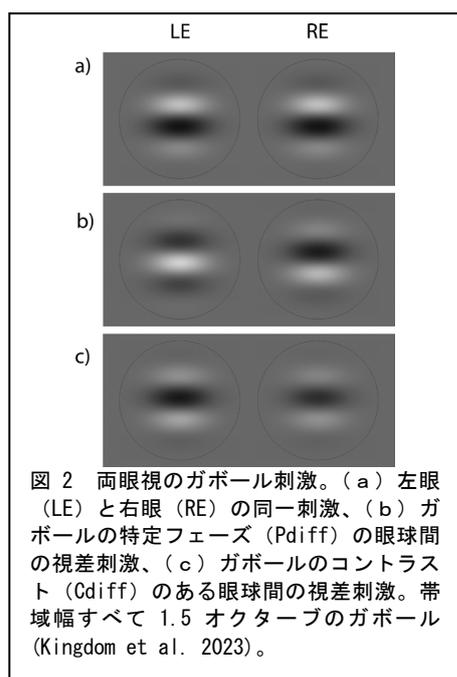


図 2 両眼視のガボール刺激。(a) 左眼 (LE) と右眼 (RE) の同一刺激、(b) ガボールの特定フェーズ (Pdiff) の眼球間の視差刺激、(c) ガボールのコントラスト (Cdiff) のある眼球間の視差刺激。帯域幅すべて 1.5 オクターブのガボール (Kingdom et al. 2023)。

最初にコントラスト手がかりを最小にして Cdiff-contrast を測定した。図 2 には、実験に使用した刺激パターンの両眼視のガボール刺激である。(a) 左眼 (LE) と右眼 (RE) の同一刺激、(b) ガボールの特定フェーズ (Pdiff) の眼球間の視差刺激、(c) ガボールのコントラスト (Cdiff) のある眼球間の視差刺激、帯域幅はすべて 1.5 オクターブのガボールである。左右眼のガボールパッチのコントラスト CL と CR とすると、眼球間フェーズ視差と最高最低間コントラスト視差から測定する閾値を比較するために Cdiff-contrast の測度 Cdiff-phase と同様に、RMS-contrast を用いて次式で測定された。

$$\Delta C = |CL - CR|$$

$$Cdiff\text{-}contrast = \Delta C / \sqrt{2}$$

なお、眼間視差閾値の測定にガボール刺激を使用する場合、

RMS 測定値 Cdiff-phase と Cdiff-contrast がガボールの帯域幅、つまり変調サイクル数によって変化する可能性があるかどうかを調べるために、Cdiff-

phase と Cdiff-contrast を測定した。その結果、Cdiff-phase と Cdiff-contrast は帯域幅に影響されなかった。

実験では 3up-1down の 2 強制選択法で適切な刺激を調整させた。ガボール刺激はコサイン型の一次エンベロープで全体のパターンが 400ms 持続提示され、先行トライアルの反応に従って観察者がコントロールして各トライアルを試行した。初めの刺激は 250ms 提示し、次いでさらに 500ms の間隔で 150ms、5 ピクセルの大きさで赤い円が不正反応として提示され 50 試行後に終了した。被験者の課題はピカピカ (lustrous) する時間を選択することである。Δφ あるいは ΔC のどちらかを最初は 2.5 のファクターで、その後は 1.3 ファク

ターの各トライアルで増大あるいは減少をみることであった。それらの施行は空間周波数、コントラスト、大きさの各条件で 200 あるいは 400 回行われた。

その結果、フェーズ視差条件では、左眼の成分  $\Delta\phi$  は  $(\phi_L + k\Delta\phi/2)$ 、右眼のそれは  $(\phi_L - k\Delta\phi/2)$  となり、手がかりの影響は除去された。コントラスト視差条件ではベースラインをターゲットのインターバル間のコントラスト  $C$  値に、ターゲットの眼球間コントラストを  $\Delta C$  とすると、ターゲット・インターバルは次の 4 条件となる。

一方の眼のコントラスト  $C$  ともう一方の眼のコントラスト  $(C - C)$ 、

一方の眼のコントラスト  $(C + C/5)$ 、もう一方の眼のコントラスト  $(C + C/5 - C)$ 、またはその逆。

非ターゲット・インターバル条件では、両眼のコントラストを等しく 4 つの値からランダムに選択された  $(C - C/4)$ 、 $(C - C/5)$ 、 $(C - C/6)$ 、 $(C - C/7)$ 。

実験の結果、実験 1 のコントラストの変化による閾値 ( $P_{diff}$ ) (0.25 と 0.5cpd の空間周波数のガボール 1.5 オクターブ帯域のコントラスト変化の閾値) は緩やかに増していたが、コントラストが約 10% になると閾値は急速に傾く。しかし  $C_{diff}$ -phase にすると閾値はコントラストとともに増大した。ここでの閾値におけるこの 2 通りの測度は  $P_{diff}$  が一定で  $C_{diff}$ -phase が一定でないことから起きている。そこで、次の実験からすべてのコントラストは  $P_{diff}$  function の最小値、あるいは大きな値にとった。実験 2 では、 $P_{diff}$  /  $C_{diff}$ -phase と  $C_{diff}$ -contrast と空間周波数の関係を検討した。ここではフェーズ視差閾値がガボール空間周波数を帯域 1.5 オクターブ、コントラスト 10% で関数として測定され、実験 1 とは異なり今回はコントラスト視差の  $C_{diff}$ -contrast を測定した。

その結果、0.5cpd より大きい空間周波数ではそれらの閾値が  $P_{diff}$  or  $P_{diff}$  phase あるいは視差の型 ( $P_{diff}$  or  $C_{diff}$ -コントラスト) とは関係なく少しずつ増大した (ただし 0.25 あるいは 0.5cpd の  $P_{diff}$  は第 1 実験と同じ値)。独立変数がコントラストの第 1 実験とは異なり、コントラストは 10% に固定されていたので結果は  $P_{diff}$  and  $C_{diff}$ -phase に類似した。最後に実験 3 では  $P_{diff}$  /  $C_{diff}$ -phase と  $C_{diff}$ -phase の大きさ要因を実験した。ここでは所定のガボール空間周波数の大きさ (これはガボールのガウスエンベロープに伴う標準偏差によって規定されたものであるが) 視差閾値が測定された。この標準偏差の思いがけない結果を得たのでガボール空間周波数の範囲 (0.5, 1, 2, 4 cpd) および 2 通りのコントラスト (0.1 0.8) に広げ、提示持続時間は 400ms に設定した。この条件では実験 2 ( $C_{diff}$ -phase と  $C_{diff}$ -phase) と  $C_{diff}$ -phase はコントラスト変数の増大にはほとんど非 U 型の変化は示されなかった。しかしこの 2 つの指標は標準偏差が低い段階では似ているが、 $C_{diff}$ -phase は真ん中の標準偏差値を超える範囲では  $C_{diff}$ -phase に比べ、 $C_{diff}$ -contrast の閾値は極めて低くなる。

実験の結果、コントラストについての眼球間視差は、差の検出の手がかりとして提示されると両眼ラスタ (光彩) の輝きを生み出し、空間的キャリアのガボールパッチにおける視差はもちろんラスタの印象を生み出した。そこで、これはラスタにともなう局所的コントラストのフェーズ視差かどうかの問題となった。そこでフェーズ (phase) とコントラスト (contrast) の視差の両方の検出閾値を測定するために水平方向の各空間周波数とエンベロープのガボールパッチを用いた。

眼球間の空間的位相差の検出をガボールパッチにおける眼間位相差の検出とガボールパッチにおける眼間コントラスト差の検出と比較した結果、両眼ラスタ (光彩) の輝き眼球間の位相ではなく全体的なコントラストが異なる場合であることが示された。帯域幅を一定に保ち、ガボールの空間周波数を変化させた場合は位相差とコントラスト差の検出は同様のパターンをたどった。しかし、空間周波数を固定し、ガボールエンベロープの標準偏差 (変調サイクル数) を変化させた場合、位相の視差を検出する閾値はガボールの標準偏差の U 字型関数に従うのに対し、コントラスト視差に対する閾値は最初の減少の後、ガボール標準偏差の関数にしたがった。一方、コントラストの閾値は初めに減少し、その後は大体ガボール標準偏差関数にしたがう傾向があった。この傾向を検討した結果、両眼感

覚融合が原因である可能性が高いことが示唆された。両眼感覚融合は、位相差を減少させるがコントラストは減少させないので位相差閾値は選択的に上昇させると考えられた。

### 複合グレーティングパターン知覚奥行に関する粗と細のバンドパスフィルターの相互作用

両眼視差を符号化 (encode) するために、視覚システムは左と右眼の位置あるいはフェーズオフセットのバンドパスフィルターのペアを使用するが、しかしこのようなペアは幅広い視差をエンコードするために複数のスケールで存在すると考えられ、局所的な視差のバンドパス機構による測定は曖昧になることがある。特に、実際の視差がフィルタの優先

空間周波数の半周期よりも大きい場合、曖昧になる。

Chen, et al. (2023) の研究では、視覚系が視差から奥行を推定する際に、より細かいバンドパスでこの曖昧性を解消するために粗-細のバンドパス作用を用いるかどうかをしらべられた。実験は図3に示すように、マルチスケール視差処理メカニズムの予測をしらべるようにデザインされた。各パネルの左の図には粗いスケールと細かいスケールによって示される可能な深さを示す。大きな視差では細かいスケールを無視 (A) し、粗いスケールと細かいスケールの相互作用を利用する (B)。各パネルの右図は、マルチスケール画像の知覚される深さの予測値を示す。各パネルの右図は、粗い視差に対するマルチスケール画像の知覚される奥行を示し、赤、緑、青の曲線は、視差が $-90^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $0^\circ$ の条件を示した。

実験では2つのステレオ格子パッチパターンで上側を比較刺激、下側を標準刺激として提示した。比較パターンには1度と4度の空間周波数が含まれ、低周波数成分の位相差は $0^\circ$  (ホロプターの位置)、 $-90^\circ$  (交差していない位置)、 $90^\circ$  (交差している位置) である。高周波成分の位相は、低周波の視差とは無関係に、 $-90^\circ$  (交差なし) と  $90^\circ$  (交差あり) の間の範囲で変化させた。

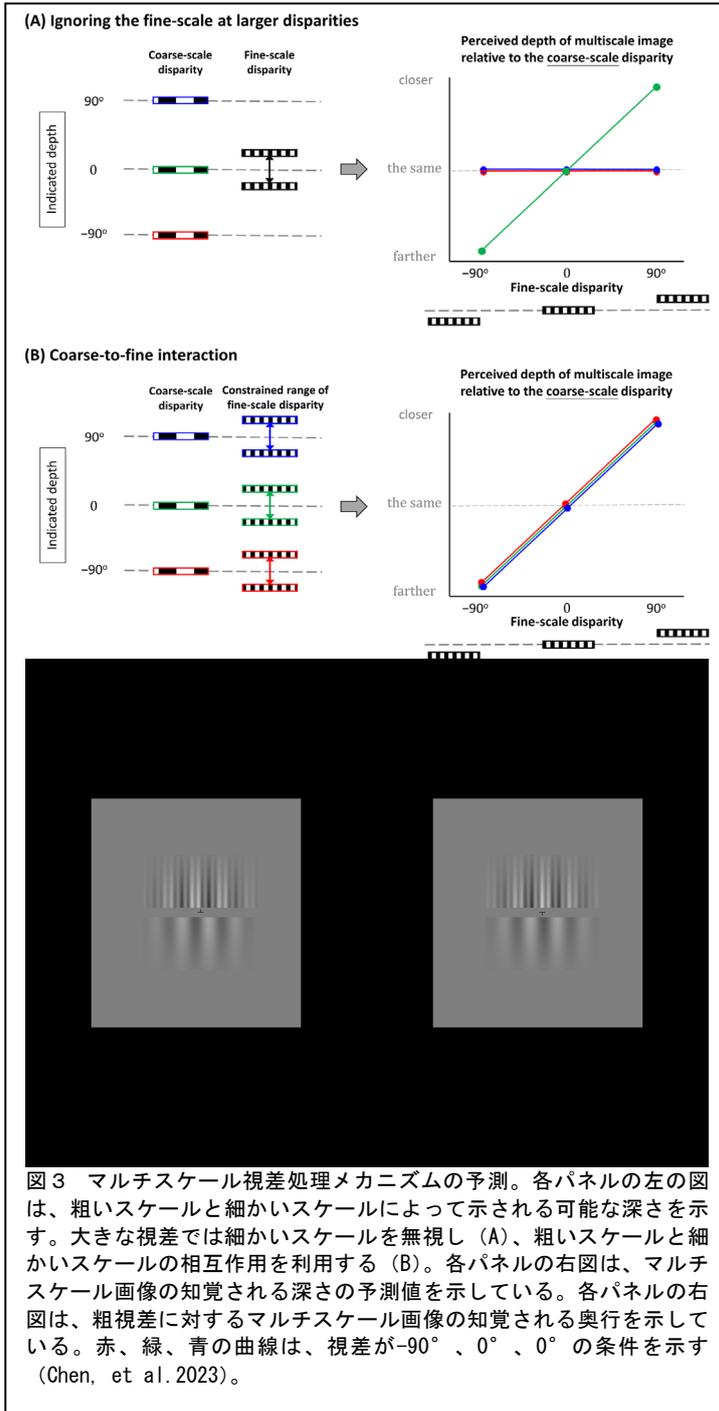


図3 マルチスケール視差処理メカニズムの予測。各パネルの左の図は、粗いスケールと細かいスケールによって示される可能な深さを示す。大きな視差では細かいスケールを無視し (A)、粗いスケールと細かいスケールの相互作用を利用する (B)。各パネルの右図は、マルチスケール画像の知覚される深さの予測値を示している。各パネルの右図は、粗視差に対するマルチスケール画像の知覚される奥行を示している。赤、緑、青の曲線は、視差が $-90^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $0^\circ$ の条件を示す (Chen, et al. 2023)。

被験者にはターゲットが常に低周波視差と視差を共有しターゲットの低周波数成分と同じであるように操作した。比較パターンが 1cpd+4cpd の複合パターンである単純な格子であっても、知覚されるターゲットと比較の奥行順序はターゲットの高周波成分の位相視差に応じて変化した。これは低周波成分がホロプターにあるときだけでなく、高周波成分の 1 周期 ( $\pm 90^\circ$ ) に相当する大きな視差を含むときにも生じ、マルチスケール視差処理における粗と細の相互作用を示唆して低周波数成分の視差に基づいて高周波数の奥行の解釈が変化する。

健常者または矯正視力のある 4 人の被験者の左右の眼に 2 つに分けたモニターを用い暗室で 4 面鏡のステレオスコープを通して刺激を提示した。ステレオスコープの鏡の左眼には左の画像を、右眼には右の画像を反射させたので効果的に融合して立体視することができた。刺激は縞模様のステレオグラムで両眼のターゲットパターンと比較パターンで構成され、上半分と下半分にランダムに割り当てられた。被験者にはターゲットパターンと比較パターンのどちらがより近くに見えるかを判断させた。すべての刺激にはガウス包絡線があるので  $4.19^\circ \text{ H} \times 4.21^\circ \text{ V}$  で、幅パラメータ  $\sigma$  は  $1.04^\circ$  で両眼画像の中央を中心とするガウス包絡線は視差ゼロであった。実験では 2 種類の比較パターンが用いられた。

実験 1 では比較パターンは複合回折格子で、ターゲットパターンと同じ 1-cpd の正弦波輝度変調に 4-cpd の正弦波を加えたものであり、1-cpd 成分の位相視差は対応するターゲットと同じであったが、4-cpd 成分の位相シフトは  $0^\circ$  に固定された。

実験 2 の比較パターンは、垂直方向の 1-cpd 正弦波からなる単純なグレーティングで、この位相差は、対応するターゲットパターンの 1-cpd 成分の位相差と同じであった。

実験 3 では、複視と単純視の両方を比較パターンとして用いた。比較パターンには、複合格子と単純格子で各周波数成分の輝度コントラストは、複合縞では 30%、単純縞では 60%であった。このとき、ターゲットパターンと比較パターンのどちらがより近くに見えるかを判定した。

すべての刺激は、幅パラメータ  $\sigma 1.04^\circ$  で、 $H 4.19^\circ$ 、 $V 4.21^\circ$  のガウス包絡線であった。したがって、両眼画像の中心とするガウス包絡線は視差ゼロであった。これらのデータは 1-cpd 成分が 4-cpd の視差を持つときにも同様の効果があることを予測する。1cpd 成分が  $0^\circ$  または  $\pm 90^\circ$  の位相差を含む場合、4cpd の視差の効果が  $0^\circ$  または  $\pm 90^\circ$  の位相差を含む場合、4cpd の視差が同様の効果をもたらすと予測される。使用したターゲットパターンと比較パターンは複合格子で直接比較することで、ターゲットパターンを直接比較させた。

実験 1 の結果、1cpd 成分が  $0^\circ$  または  $\pm 90^\circ$  の位相差を含む場合、4cpd の視差が同様の効果をもたらし、粗-細スケールの相互作用を利用したメカニズムを支持している。しかし、使用したターゲットパターンと比較のパターンは、いずれも複合格子であったので被験者はそれを直接比較することで、ターゲットと比較パターンの間の相対的な深さを判断して視差をスケールに渡って推定統合し、全体的な奥行深度次数を報告するのではなく、2 つのパターン間の 4cpd 成分の位相シフトを直接比較することで、ターゲットと比較パターン間の相対的な深度を判断する可能性があった。そこで、スケール間の視差推定を統合しマルチスケールパターンの全体的な奥行深さのオーダを報告するのか、あるいは視差情報のクロス周波数統合によるのか、さらに単に 4-cpd 成分の位相シフトを見ただけなのか、確認する必要があった。

そこで実験 1 で発見された効果が、視差情報のクロス周波数統合によるものであるかどうかを調べるため実験 2 で次のような実験を行った。被験者に視差情報のみを含む単純な縞パターンと比較し、ターゲットパターンの奥行の深さを粗スケールの視域成分のみを含む単純な縞パターンの深さと比較して判断させた。その結果、実験 1 と同様に、1-cpd 成分の位相視差にかかわらず 4-cpd 成分の付加的な位相視差情報は複合格子の知覚深度に影響を与えた。実験 1 と 2 では、刺激は被験者が反応を示すまでスクリーン上に提示し、ノニウス線を点滅させ、観察者の輻輳を安定させたが、被験者は試行中に目を動かしたかもしれない。そこで、実験 3 では、刺激提示時間を短くし実験 1 と 2 の条件をすべて繰り返

した。その結果、マルチスケール視差処理における粗視差と細視差の相互作用の予測と一致し、無制限の刺激提示時間を用いた実験1, 2で同様の結果であった。しかし、この4cpdの位相の視差効果は、比較パターンの種類に依存し奥行判断に及ぼす4cpd位相視差の影響は、対象パターンが1cpd単純縞と1cpd+4cpd複合縞と比較した場合には小さく、このような4cpd位相視差の影響の低減は、1cpd+4cpd複合縞模様の実験で観察されたものと一致した。

実験1, 2, 3の結果、ステレオ縞模様パッチの正弦波成分の位相差を操作し、視覚系が視差情報を統合して奥行きを知覚するために粗cpdと細cpdの相互作用を統合、1cpd+4cpdのターゲットパターンを比較パターンと共に提示し、被験者にはどちらが奥行に近いかの判断をした結果、比較パターンに対するターゲットパターンの相対的な奥行判断は、微細な正弦波の位相視差によって変化することがわかった。この効果は比較パターンがマルチスケールの複合(実験1)であっても、低周波数単純グレーティング(実験2)であっても生じたが、300msの短時間の刺激提示(実験3)には効果が弱かった。

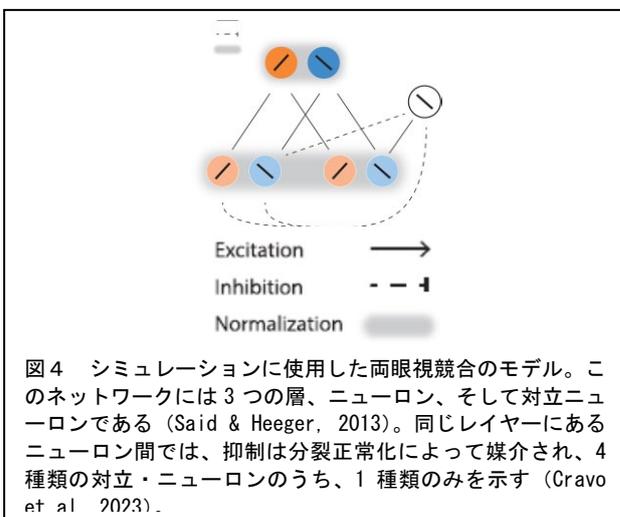
これらの結果から、粗視差から細視差へのマルチスケール視差統合のメカニズムを支持した。

### 両眼視闘争における減法順応の効果のメカニズム

ニューロンの活動は、ランダムなゆらぎの影響を受け、特に感覚系では発火率の適応によって強く順応が調節される。現在、神経細胞のノイズの特性や適応のメカニズムについては現在も議論が続き、特にそれらが知覚にどのような影響を与えるかについてはまだよくわかっていない。ノイズと順応は両眼闘争において重要な影響をもつ。

Cravo et al. (2023)は、様々なノイズおよび適応メカニズムが視覚知覚に及ぼす影響について両眼競合の計算モデルをシミュレートして研究した。ガウスホワイトノイズ(Gaussian white noise)、ピンクノイズ(pink noise)、およびオーンスタイン・ユーレンベック雑音(Ornstein-Uhlenbeck noise)を用い、順応あり、順応なしの条件で影響を比較した。さまざまなノイズの振幅と視覚的コントラストについてモデルをシミュレーションした結果、ホワイトノイズが強い両眼視闘争を引き起こすのは減法順応と組み合わせられたときだけであることがわかった。一方、関係するノイズはパラメータ空間のより広い領域において順応に関係なくダイナミックな両眼闘争が起きる。減法順応を用いたシミュレーションでもノイズ強度の影響が減少し、ノイズプロセス間にわたる知覚持続時間の平均も同様である。知覚持続時間に関する既知の拘束条件とシミュレーションダイナミクスを比較することで、オルンスタイン・ユーレンベック雑音の最小時間相関を決定することができる。

検討したモデルでは2つの直交する方向を考え競合刺激を構成した。モデルには3種類のニューロンおよび眼球対抗性ニューロンである(図4)。左右の単眼ニューロンは、それぞれの眼から視覚入力を方向選択に応じてそれぞれの眼から視覚入力を受け取り、両眼ニューロンは左右の単眼ニューロンの活動を合計する。左右の単眼ニューロンは、それぞれの眼から選択した方向に応じて視覚入力を受け取り、左右の単眼ニューロンの活動を合計する。両眼のニューロンは左右の単眼ニューロンから同一の選択した方向の情報を合計する。2組の対抗ニューロン



(right-minus-left (R-L)) および対抗ニューロン (left-minus-right (L-R)) は、左右の単眼ニューロンから同一方向の選択の活動を差し引き、差し引かれた側のすべての単眼ニューロンを抑制する。

両眼視野闘争のシミュレーション実験の結果、以下の点が明らかにされた。異なるノイズ過程と適応メカニズムが両眼競合モデルをシミュレートして視覚知覚に及ぼす影響をガウス型白色雑音、オーンスタイン・ウーレンベック型雑音、ピンク色雑音を対抗的順応 (divisive adaptation)、減法順応 (subtractive adaptation) および順応なしの各順応方法に変え、9通りの条件でモデルをシミュレートすると、(1) 白色雑音が視野闘争を生むのは減法順応条件に時である、(2) 減法順応は両眼視野闘争のノイズ強度の弱め、そして平均的知覚持続時間の収束を導く、(3) 減法順応はすべてのノイズの中で両眼視野闘争の重要な方法である、などの結果であった。

結局、ホワイトノイズは脳の背景活動を説明するには不十分であり、また減法順応は両眼視ライバルにおいて分割的順応よりも強力で、スイッチング・メカニズムにおいて重要なノイズフィルター特性を持つことが明らかにされた。

### 視野闘争の測定の信頼性

両眼視野闘争は視覚と認知の側面を他の方向からしらべる認知的神経科学で広く用いる現象である。両眼視野闘争のダイナミクス (優位の知覚出現時間、混合知覚出現比率) は個人差があり、視覚的ドミナンスの指標 (両眼間のイメージの知覚的ドミナンスの比較) を測定できる。

Sari et al. (2023) は、両眼視野闘争のダイナミクスの測定の信頼性を検討するために両眼分離視の刺激と異なる抗争刺激を用い、単一の実験セッションによる評価の内的一貫性、および実験日を変えたテスト再テストに基づく 2 側面を別々に正常な視力のある 118 人の被験者に 4 通りの実験を実施した。この研究に含まれる 4 つの実験のセットアップを図 1A-D に示すように、参加者は少なくとも 24 時間の間隔をおいて、2 回の実験に参加させた。刺激は、中心視で二色に呈示された小さな円形回折格子のパターンで、被験者にキーボードの 3 つのキーのうち 1 つを押し続けて直交する縞の排他的知覚を報告させた。

実験 1 および 2 では、二色性刺激を用い、LCD モニターの前にミラーステレオスコープを設置、実験 3 および実験 4 の最初のセッションでは、CRS シャッターゴーグルと CRT モニターを使用、また実験 4 の第 2 セッションでは、赤青アナグリフゴーグルと LED モニターを使用した。刺激パターンは、実験 1 と 3、および実験 4 の最初のセッションでは、単色

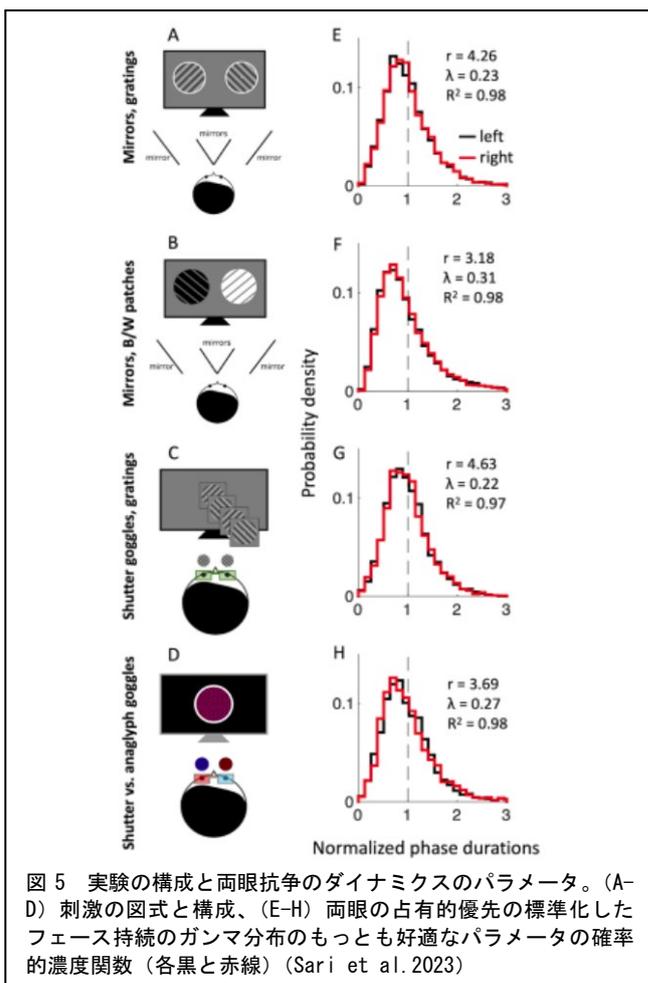


図 5 実験の構成と両眼抗争のダイナミクスのパラメータ。(A-D) 刺激の図式と構成、(E-H) 両眼の占有的優先の標準化したフェース持続のガンマ分布のもっとも好適なパラメータの確率的濃度関数 (各黒と赤線) (Sari et al. 2023)

正弦波グレーティング（実験 1 および 3、実験 4 ではそれぞれの刺激選択）であった。また、実験 4 の第 2 セッションでは、刺激は赤と青のグレーティングにした。実験 2 では、刺激は 3° の円盤で、1 つは白 (295 cd/m<sup>2</sup>) と黒（最小画面輝度 10cd/m<sup>2</sup>）、両眼融合を抑制するため、円盤の上に円盤の上に直交する灰色の線を重ねた。

眼球優位性 (ODI)、右目優位の割合として次式のように定義した。

$$ODI = \frac{Time_{RE} - Time_{LE}}{Time_{RE} + Time_{LE}}$$

Time<sub>RE</sub> と Time<sub>LE</sub> は、右目で見ている時間と左目で見ている時間の合計（秒）である。

実験の結果、両眼視闘争ダイナミックスの信頼性を両眼分離の異なる方法と異なる闘争刺激で実験し、視覚優先性、フェーズ持続時間および混合知覚特性をしらべた。その結果、テストと再テストの信頼性を見出し、さらに視覚優先性の再テストは内的一貫性から予測でき、常に安定していることが見いだされた。しかし、フェーズの持続時間と混合知覚の割合は、内的一貫性から予想されるよりも悪くこの実験で用いたパラメータは状態に依存した変化を受けやすかった。

これらの結果から、眼球優位性指標と両眼視闘争を感覚的眼球優位性とその可塑性の測定に利用すること、しかしフェーズの持続時間や混合知覚および心理的特性や障害のような安定した特性との関連性をしらべる場合には、注意が必要である。

### 弱視のステレオ視

弱視者はステレオ視で奥行判断の能力が劣っているといわれるが、Carrilo et al (2023) は弱視者の残されたステレオ視能力を標準的な医学的ステレオテストではその障害が限られると考えた。この研究ではこの目的のためにデザインされたステレオ視を用いて立体視力について検討した。29 人の弱視の被験者（斜視 3 人、屈折不同 17 人、混合 9 人）と健常者（17 人）には視差で構成された「仲間外れターゲット」ができるランダムドットディスプレイで実験した。臨床で使用する Randot Preschool Test でステレオ視力、両眼と単眼視力を各被験者で測定し、両眼の視力比率を各被験者で各眼間の抑圧を測定する dichoptic global motion task (Gao et al., 2018) を用いて評価した。

その結果、弱視者の 59% の立体視の閾値には 2 つ要因の差が健常者との間にあり、その一つは弱視者の立体視力 103arc なのに健常者 56arc だった。そこで、等量のノイズを弱視者と健常者のステレオ視に加えてその影響をしらべ、弱視のステレオ視の過程少しずつノイズを増量する方法 (linear amplifier model) を用いて探った結果 (238 vs 135 arc)、両群には有意差がなく視差処理は同等であった。多重線形回帰をすると弱視グループ内でステレオ視力の分散が 56%、等価な内部ノイズは単独で 46% 予想され、したがって 2 つの線形増幅モデルでのパラメータが予測された。その結果、この課題で弱視の遂行を限定する要因があり、これが視差シグナルの入力の質を阻んでいる。

### 単眼と両眼のコントラストとボカシが機能的立体視の範囲に及ぼす影響

立体視は最小のステレオ閾値（下限）と融合の上限によって決まる一方、下限はコントラストの低下やボカシによって悪化し両眼よりも単眼でより強くなるが、しかし上限値への影響はまだ不明であった。Lew et al. (2023) は、ステレオ文字認識課題にコントラストとボカシが視差感度関数 (DSF) の範囲に与える影響を評価した。被験者にはランダムドット・ステレオグラムに埋め込まれたステレオグラムに埋め込まれたステレオ文字を識別させ、階段法（上下法）を使用して 2 つの限界を推定した。

この測定方法は心理学測定法の階段法（上下法）でステレオ閾値  $D_{min}$  は、図 6 (A) に示したように、注視平面から検出される最小の視差（視差閾値）と上限（融合限界）はランダムドットステレオグラムでは、視差の交差した文字 V は背景から「飛び出して」知覚と視差が大きくなるので、文字が観察者に近づき複視される前に上限に達する範囲となる。このような立体視の強い奥行知覚はこの 2 つの閾値限界の中で知覚される。また (B) には DSF を評価するための簡単な臨床検査の図で、左から右に向かって文字が小さくなる。縦軸の値は視差の閾値で、 $D_{min}$  曲線（青の破線）は U 字型をしている。視差の閾値を感度（1/視差）に置き換えると、 $D_{min}$  曲線はコントラスト感度関数に似ているし、上部の赤い破線は上限値で DSF の範囲は下限と上限の間にある (Lew et al. 2023)

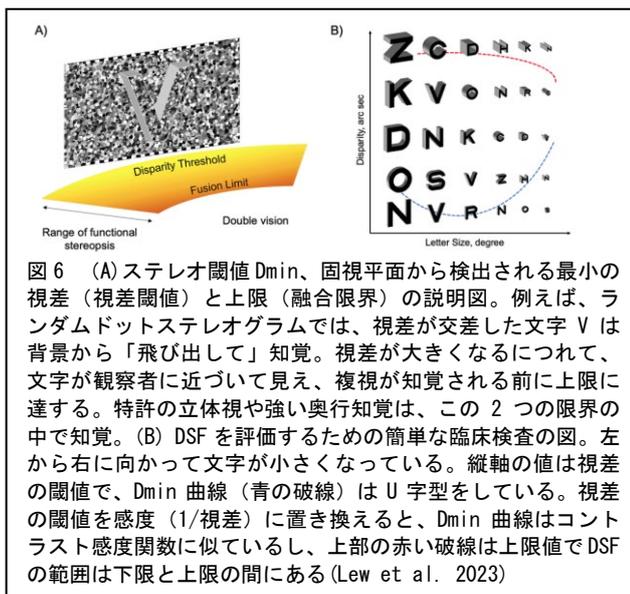


図 6 (A) ステレオ閾値  $D_{min}$ 、固視平面から検出される最小の視差（視差閾値）と上限（融合限界）の説明図。例えば、ランダムドットステレオグラムでは、視差が交差した文字 V は背景から「飛び出して」知覚。視差が大きくなるにつれて、文字が観察者に近づいて見え、複視が知覚される前に上限に達する。特許の立体視や強い奥行知覚は、この 2 つの限界の中で知覚。 (B) DSF を評価するための簡単な臨床検査の図。左から右に向かって文字が小さくなっている。縦軸の値は視差の閾値で、 $D_{min}$  曲線（青の破線）は U 字型をしている。視差の閾値を感度（1/視差）に置き換えると、 $D_{min}$  曲線はコントラスト感度関数に似ているし、上部の赤い破線は上限値で DSF の範囲は下限と上限の間にある (Lew et al. 2023)

(1/視差) に置き換えると、 $D_{min}$  曲線はコントラスト感度関数に似ているし、上部の赤い破線は上限値で DSF の範囲は下限と上限の間にある。

図 7 は知覚実験のセットアップと結果を示す。図中 (A) は 実験中に提示された刺激の例である。各試行では、ランダム・ドット・ステレオグラムに埋め込まれた V のステレオ文字が 1 秒間提示され、その後に応答ページが続くので参加者はキーボードを使って前のページで見たステレオ文字を被験者に選択させた。正解の場合、下限の適応階段法では視差が減少し、上限の階段では視差が増加する。

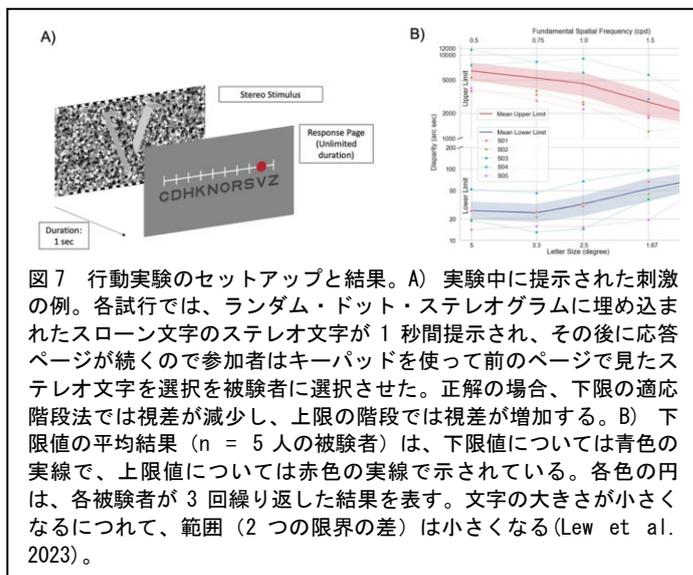


図 7 行動実験のセットアップと結果。A) 実験中に提示された刺激の例。各試行では、ランダム・ドット・ステレオグラムに埋め込まれたスローン文字のステレオ文字が 1 秒間提示され、その後に応答ページが続くので参加者はキーボードを使って前のページで見たステレオ文字を選択を被験者に選択させた。正解の場合、下限の適応階段法では視差が減少し、上限の階段では視差が増加する。B) 下限値の平均結果 ( $n = 5$  人の被験者) は、下限値については青色の実線で、上限値については赤色の実線で示されている。各色の円は、各被験者が 3 回繰り返した結果を表す。文字の大きさが小さくなるにつれて、範囲（2 つの限界の差）は小さくなる (Lew et al. 2023)。

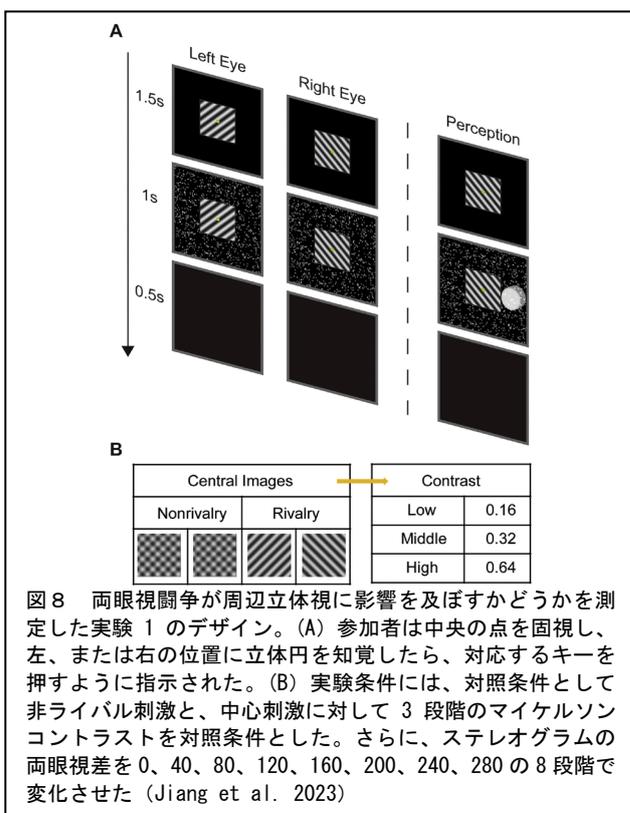
文字が 1 秒間提示され、その後に応答ページが続くので参加者はキーボードを使って前のページで見たステレオ文字を被験者に選択させた。正解の場合、下限の階段法では視差が減少し、上限の階段値では視差が増加する。

(B) 下限値の平均結果 ( $n = 5$  人の被験者) は青色の実線で、上限値については赤色の実線で示した。各色の円は、各被験者が 3 回繰り返した結果を表す。文字の大きさが小さくなるにつれて、範囲（2 つの限界の差）は小さくなる。

5 人の被験者にベースラインコントラスト (100%)、異なるコントラスト (32% と 10%)、ボカシ (+0.75DS と +1.25DS) で、単眼と両眼の条件で実験を行った。その結果、両方の限界の曲線は低減する形状であり、SF が高いほど範囲が狭くなることがわかった。この結果は最初の予測と同様で、コントラストが低く、ボカシが大きい場合、下限値の閾値が大きくなる一方、上限値は小さくなった。DSF の縮小は単眼条件下で顕著であるが、ボカシ条件では被験者間にばらつきがあるので単純な相互相関ステレオマッチングアルゴリズムを用いコントラストとボカシの影響を定量化した。その結果、DSF の範囲は画像の劣化とともに減少するという行動学的結果と一致した。

その結果、両方の限界の曲線は低減する形状であり、SF が高いほど範囲が狭くなることがわかった。この結果は最初の予測と同様で、コントラストが低く、ボカシが大きい場合、下限値の閾値が大きくなる一方、上限値は小さくなった。DSF の縮小は単眼条件下で顕著であるが、ボカシ条件では被験者間にばらつきがあるので単純な相互相関ステレオマッチングアルゴリズムを用いコントラストとボカシの影響を定量化した。その結果、DSF の範囲は画像の劣化とともに減少するという行動学的結果と一致した。

## 両眼視野闘争における統合と抑止の相互作用

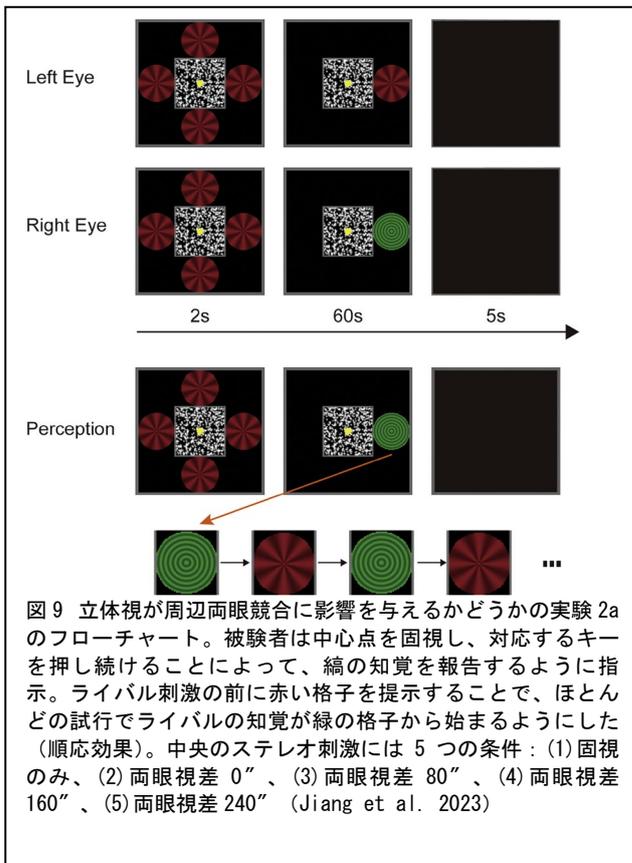


図(B)には実験条件の中心刺激に対して3段階のマイケルソンコントラストを対照条件とした。さらに、ステレオグラムの両眼視差を0、40、80、120、160、200、240、280の8段階で変化させ、両眼視差と視野闘争の相互作用がその強さに依存しているかどうか、また立体視の存在によって、眼球間抑制の強度が弱まるか、あるいは均衡が保たれるかを明らかにしを明らかにする。実験1のデザインは、図8にあるように、(A) 参加者は中央の点を注視し、左、または右の位置に立体円を知覚したら対応するキーを押すように指示、(B) 実験条件には、対照条件として非ライバル刺激と、中心刺激に対して3段階のマイケルソンコントラストを対照条件とし、さらにステレオグラムの両眼視差を0、40、80、120、160、200、240、280の8段階で変化させた。実験1aと1bでは、両眼競合が存在すると周辺立体視を抑制し、またライバルのコントラストが高いほど立体視閾値を有意に上昇させるかをしらべた。さらに実験2aと2bでは、両眼視差が増加すると周辺部の両眼視差の力学が均衡し、より等価な眼優位になるかをしらべた。

実験1の結果、非闘争刺激に比べ、闘争刺激が存在し周辺円の検出精度に影響を与えるのは知覚が両眼統合している場合のみであることが明らかにされた。そこで実験2で立体視の周辺両眼闘争の影響をしらべることを行ない、図9aには実験のフローチャートを示す。被験者には中心点を注視し、対応するキーを押し続けることによって、縞の知覚を報告するように指示し、また闘争刺激の前に赤い格子を提示することでほとんどの試行で闘争刺激の知覚が緑の格子から始まるように順応効果刺激とした。中央のステレオ刺激には、(1) 注視のみ、(2) 両眼視差0、(3) 両眼視差80、(4) 両眼視差160、(5) 両眼視差240の5つの条件を設定した。

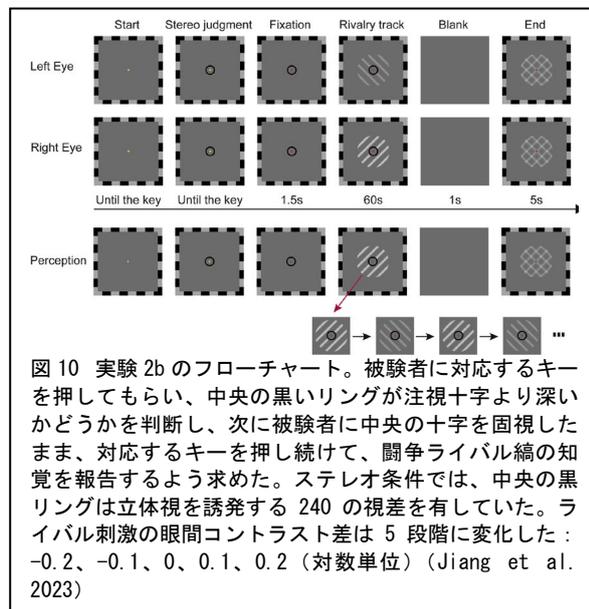
2つの画像を2眼式で提示すると両眼統合が起こり、安定した立体視が生じるが、両眼競合を引き起こすと眼間抑制を誘発する両眼競合を引き起こし両眼統合と眼間抑制の関係となる。統合と眼間抑制の関係は脳がどのように両眼入力を処理し、統一された視覚認識を形成するのにかかわるが、どのように処理されるのかはまだ解明されていない。この疑問を解決するために両眼の相互作用を心理物理学的実験を行い、それぞれ各眼の強さによってお互いを媒介することを明らかにした。

Jiang et al. (2023) は、周辺立体視と両眼対抗視の相互作用をしらべ、実験1では、中心部の両眼視野闘争が周辺部の立体視に及ぼす影響を、また実験2では中心性立体視が周辺性立体視にどのような影響を与えるかをしらべた。実験1ではコントラスト・レベルを変化させ、図8に示したデザインで、図(A) 被験者は中央の点を固視し、左、または右の位置に立体円を知覚したら、対応するキーを押すように指示された。



その結果、実験 2a では視差を交差させたランダムドット・ステレオグラムによって誘発される立体視の存在は、周辺部でのライバル闘争刺激とダイナミクスのバランスをとることができることが示された。実験 2b では、さらに、視差が交差していない共通の黒いリングによって立体視は誘発された。実験 2b ではさらに、視差が交差していない共通の黒いリングによって立体視が誘発された場合に、この効果が再現され一般化され、また、実験 2b では、眼間コントラストを変化させた闘争ライバル刺激を用いて両眼ライバル関係のバランス度合いを操作した。立体視がライバリー・ダイナミクスに及ぼすバランス効果は、両眼ライバリー刺激の元のバランス度によって調節されたが、結局、不均等なライバル関係のみがよりバランスすることができた。これらの結果は、立体視の有無が両眼闘争視の切り替え率に有意な影響を与えないことを示している。

さらに実験 2b では、視差が交差していない共通の黒いリングによって立体視が誘発された場合に、この効果が再現され一般化されるかどうかをしらべ、さらに、両眼ライバル視のバランス度合いを操作し立体視のバランス効果は両眼視の闘争の元のバランス度によって調節される可能性をしらべた。図 10 には実験 2b のフローチャートが示すように、被験者には対応するキーを押し中央の黒いリングが注視した十字より深いかどうかを判断し、さらに被験者中央の十字を注視したまま対応するキーを押し続けて闘争刺激の縞パターンの知覚の報告を求めた。ステレオ条件では、中央の黒リングは立体視を誘発する 240° の視差としを有し闘争刺激の両眼間コントラスト差を 5 段階に変化した（-0.2、-0.1、0、0.1、0.2 対数単位）。



その結果、視差 240° の黒いリングが安定した立体視誘導されるが、この効果は立体視がない状態での両眼視の闘争関係の初期バランス度合いに依存した。また、闘争刺激のコントラストが強い左眼対弱い右眼、強い右眼対弱い左眼に変化するにつれて両眼闘争視の優位眼も変化する個人差があった。両眼視闘争関係においてどちらの眼が優位であったとしても、立体視が存在することでバランスの取れたライバルダイナミクスをもたらしたので

ある。もし立体視が両眼競合に何の影響も与えないのであれば立体視条件と非立体視条件はランダムであり、立体視がない場合の眼球差優位に関連する識別可能なパターンや逆転はない。すべての被験者は補助的なステレオ刺激の検出において 0.9 以上で、視差 240 の黒いリングが安定した立体視につながり立体視がない場合の両眼ライバル関係の初期バランス度合いに依存する。また、個人差では、闘争刺激のコントラストが強い左眼対弱い右眼、強い右眼対弱い左眼に変化するにつれて、優先眼も変化した。これはどちらの眼が優位であったとしても、立体視が存在することでバランスの取れた視野闘争ダイナミクスをもたらす。

これら実験の結果、隣接した両眼闘争視と立体視の相互作用では、より高いコントラストを持つ両眼闘争は周辺立体視閾値を上昇させ、両眼視差が大きくなると周辺部の闘争ダイナミクスを高めることから両眼視における統合と抑制は相反するプロセスではなく両眼バランスの動的調節がこの 2 つの過程に共通するメカニズムの根底にあると考えられる。

### プロトオブジェクトに基づくモデルの立体視が視覚的顕著性に及ぼす選択的注意の影響

ヒトを含む一部の動物は両眼視した画像間の視差から環境に関する空間情報を再構成する立体視がある。他の感覚情報と同様に、このような立体情報も注意の選択に影響を与える。Uejima et al. (2023) は、両眼視の生物学的に妥当なモデルを開発し、ボトムアップの視覚的注意、すなわち視覚的顕著性 (visual Saliency) に及ぼす影響を研究し新しいモデルを作成した。このモデルは、情景は比較的日常的束縛のない注意が作用する原物体 (proto-object) という観点から構成され、立体情報を考慮することで人間の眼球運動の予測におけるモデルの性能が統計的に有意な差で向上する生物学的立体視のモデルを提案し、それをプロトオブジェクトベース顕著性モデルに組み込んだ。奥行と視差の特徴は以前からのモデル (Hu et al., 2016; Mancinelli et al., 2018) と同様に、この提案モデルの出力は顕著性マップであり、参加者がステレオグラム画像を自由に見ている間に得られるオリジナルの 2 次元 (2D) プロトオブジェクトベースの顕著性モデルよりも優れた予測性能があることを考えた。

本研究では、(1) V1、V2、V4 野の視差調整ニューロンとボーダーオーナーシップコーディングニューロンを含む、バイオフィデリックな 3D 視覚顕著性モデルの構築、(2) このモデルを自然な 3D シーンに適用し、自然なシーンを見る人間から収集した注視データを用いて顕著性に対する 3D 効果を評価するのが、それぞれの課題である。

これまでの分野の研究では脳がどのようにして立体視を実現しているのか、多くの研究で解明されている。Julesz がランダムドット・ステレオグラム (Julesz, 1971) を発表して以来、神経科学者たちは、2 次元の奥行手がかりを含まず、視差情報のみを提供するランダムドット・ステレオグラムを開発し研究した。さらにこのパターン刺激を用いて両眼視差によってのみ生成される奥行知覚に対応する脳活動を研究し、Poggio et al. (1985) は知識が何ら事前には必要ないことを示した。立体視の大きな困難の一つは対応問題、すなわち 2 つの 2 次元画像から対応する特徴を見つけることである。この問題を解決するための初期のモデルとして、誤差を最小化する反復計算を用いて一致点を見つける協調過程があり (Marr, 1982; Marr & Poggio, 1979)、少なくとも初期段階では生物学的システムは反復プロセスから予想されるよりも高速に立体視を処理すると考えられた。神経生理学的研究によって立体視は両眼単純細胞と単眼単純細胞の活動を直線的に加算する視差エネルギー・モデルで説明できることが明らかになった。その後、両眼複雑細胞は単純細胞の直交対の二乗反応を合計する (Ohzawa, 1998; Ohzawa et al. 1990, 1997) ことが分かった。Marr と Poggio は、多空間周波数フィルター (すなわち神経細胞受容野) を組み合わせることで、一方の画像の一部と他方の画像の非対応部分との誤一致を防ぐことができると指摘した (Marr & Poggio, 1979)。彼らの独創的なアイデアは、粗いものから細かいものへの逐次的な構造で最初に低い空間周波数の視差を計算し、次に細かい空間周波数に進む。

ついで多空間周波数特徴をプールし、すべての空間周波数からの情報に基づいて対応点を見つける。

知覚・認知過程はデータ駆動型、つまりボトムアップ型の注意であり、低レベルの視覚的特徴やその組み合わせに基づいて最も関連性の高い画像領域を見つける。これらの領域は情景の最も「顕著」な領域と呼ばれる。コッホとウルマン (Koch & Ullman, 1985) による画期的な研究は、これらの領域を見つける体系的な方法を視覚的情景の異なる場所における顕著性のレベルをランク付けする顕著性マップの形で確立した。この理論の予測を行動観察と比較する必要があるが 2 つの考察が重要である。第一に、顕著性マップは眼球運動と相関はあるが同一ではなく、他に潜在的注意のメカニズムとして視覚的注意の行動結果を測定する方法もあるが、顕著的注意の状態を測定する方がはるかに簡単であり、潜在的注意の近似値として顕著性マップを用いることが提案された (Parkhurst et al. 2002)。第二に、顕著性マップはボトムアップの情報しか考慮に入れていないためにトップダウンの注意の影響を最小化し、視覚入力に加えて観察者の内的状態に依存する自由観察法を用いた。

本論文では、生物学的立体視のモデルをプロトオブジェクトベースの顕著性モデルに組み込み、深度と視差の特徴は以前にモデル (Hu et al. 2016; Mancinelli et al. 2018) に統合したので、このモデルは、オリジナルの 2 次元 (2D) プロトオブジェクトベースの顕著性モデルと言える。

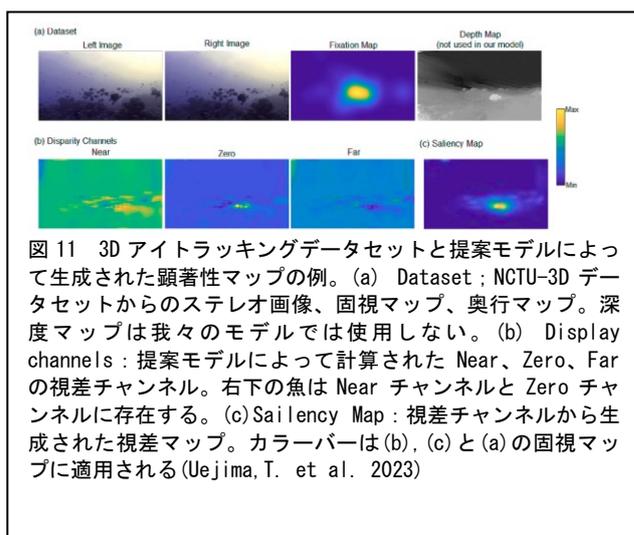
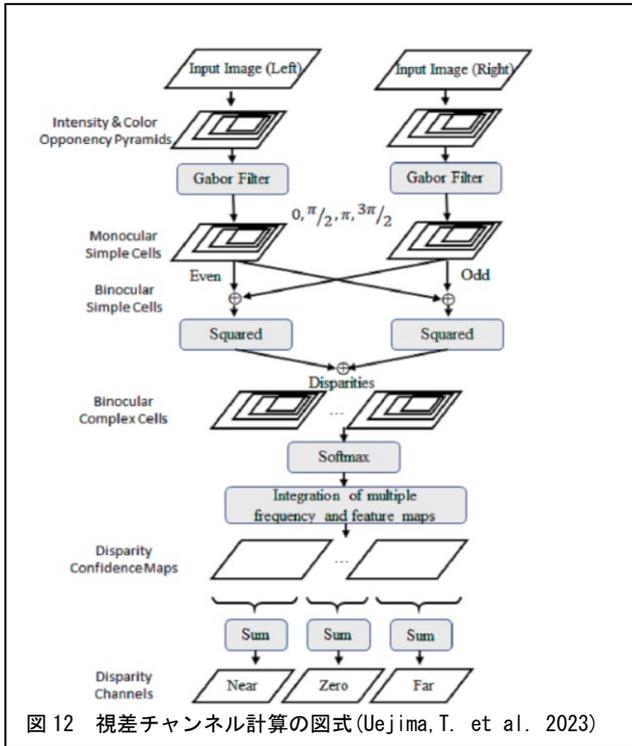


図 11 3D アイトラッキングデータセットと提案モデルによって生成された顕著性マップの例。(a) Dataset ; NCTU-3D データセットからのステレオ画像、固視マップ、奥行マップ。深度マップは我々のモデルでは使用しない。(b) Display channels : 提案モデルによって計算された Near、Zero、Far の視差チャンネル。右下の魚は Near チャンネルと Zero チャンネルに存在する。(c) Saliency Map : 視差チャンネルから生成された視差マップ。カラーバーは (b)、(c) と (a) の固視マップに適用される (Uejima, T. et al. 2023)

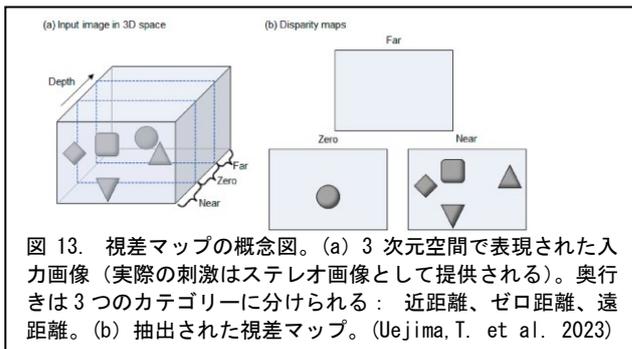
ここでの研究課題は、(1) 視差調整ニューロンなどバイオフィデリックな 3D 視覚顕著性モデルの構築および V1、V2、V4 野の境界のコード化ニューロンなど 3D 視覚的顕著性モデルの構築、(2) このモデルを自然な 3D シーンに適用し、3D の知覚に及ぼす影響の評価である。提案した視差チャンネルとその結果の顕著性マップの例を図 1(b) と (c) にそれぞれ示す。図 11 は 3D アイトラッキングデータセットと提案モデルによって生成された顕著性マップの例。(a) Dataset ; NCTU-3D データセットからのステレオ画像、固視マップ、奥行

マップ。深度マップはこのモデルでは使用しない。(b) Display channels : 提案モデルによって計算された Near、Zero、Far の視差チャンネル。右下の魚は Near チャンネルと Zero チャンネルに存在する。(c) 顕著性 (Saliency Map) : 視差チャンネルから生成された視差マップである。カラーバーは (b)、(c) と (a) の固視マップに適用される。

この図の例における固視マップは、参加者が他の魚よりも観察者に近い下半分の魚を固視する傾向があることを示す。図 11(b) の計算された視差マップは、魚の位置がニア・チャンネルとゼロ・チャンネルによって捉えられ、視差チャンネルに基づいて計算され、図 11(c) に示すように、この魚のおおよその位置で高い値を示す。



距離、遠距離)。 (b) は抽出された視差マップを示す。2次元特徴チャンネルは、入力から強度、色、方向の特徴マップを抽出して生成され、次に2Dチャンネルと視差チャンネルが、プロトオブジェクトベースのモデルによって処理される。図14はモデルの全体図で視差チャンネルを含まないモデル(すなわち、強度と色と方向の特徴のみから計算されるモデル)を2Dモデルと呼び、視差チャンネルを含むモデルを3Dモデルとする。



から、NCTU-3D データセットでは右目) 顕著性マップを計算した。

プロトオブジェクトベースの顕著性モデル(Proto-object based model)の枠組みは次に記すように、視差チャンネルが Russell et al.

(2014)によって導入された顕著性モデルのバリエーションで、ここでは Uejima et al. (Uejima et al. 2020)によって開発された改良されアルゴリズムを使用した。図12は視差チャンネルの計算図式である。計算された視差チャンネルは、2次元の強度、色、方向と同じようにプロトオブジェクトに基づく顕著性モデルへの1セットの入力を形成する。図13は、提案された視差処理で奥行情報がどのように処理されるかを説明する。視差マップの概念図で、(a)は3次元空間で表現された入力画像で、実際の刺激はステレオ画像として提供され、奥行は3つのカテゴリーに分けられる(近距離、ゼロ

また、モデル結果のグランドトゥールースとの比較のために、2つの経験的研究から得られた眼球運動データの Gaze-3D と NCTU の 3D データセット(前者は左目、後者は右目の眼球運動)を用いた。どちらの場合も、眼球運動が記録された眼球に投影された画像から、つまり、眼球運動が記録された眼球に投影された画像から(Gaze-3D データセットでは左目

図 15 は、2D モデルと 3D モデルによって生成された固視マップと顕著性マップの比較を示す。ここでは、2 次元 (Uejima et al., 2020) と同様に、強度、色、方位特徴から

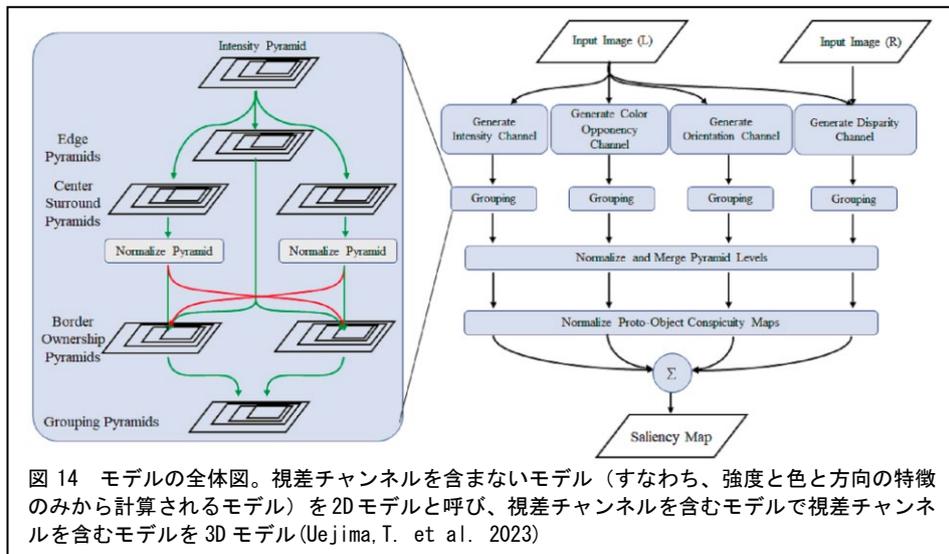


図 14 モデルの全体図。視差チャンネルを含まないモデル（すなわち、強度と色と方向の特徴のみから計算されるモデル）を 2D モデルと呼び、視差チャンネルを含むモデルで視差チャンネルを含むモデルを 3D モデル (Uejima, T. et al. 2023)

顕著性マップを計算したが、このモデルにはテクスチャ特徴は含まれていない。3次元の顕著性マップは、視差チャンネルから生成された深度マップを加えて計算した。これらの例では、2D モデルは人間の固視をある程度予測し、奥行情報はその予測を改善した。例えば、1 行目の例では 3D モデルは 2D モデルよりも飛行船の位置で高い顕著性を示し人間の固視と一致する。3D モデルは、前景物体に対し背景パターンの顕著性を抑制し、奥行が明らかに予測的に注意の役割を果たしている。さらに奥行チャンネルの追加による性能向上を定量化するために奥行情報を追加した場合と深度情報なしで生成された顕著性マップの指標を整理した。

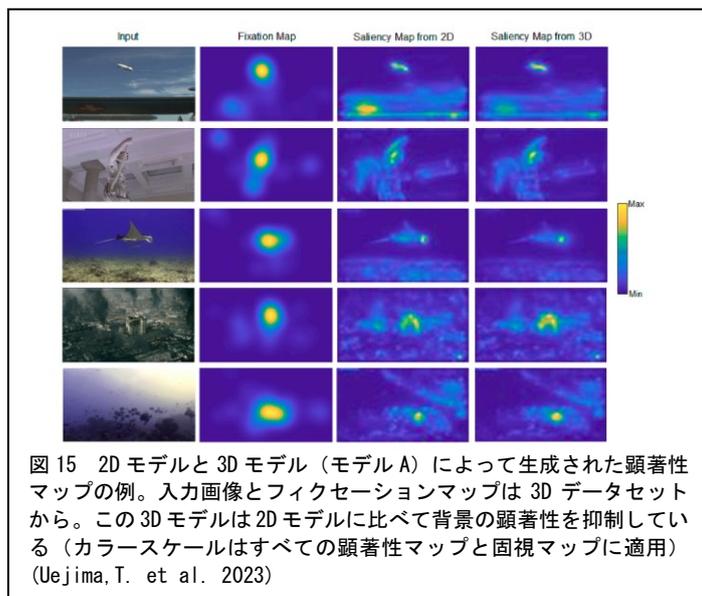


図 15 2D モデルと 3D モデル (モデル A) によって生成された顕著性マップの例。入力画像とフィクセーションマップは 3D データセットから。この 3D モデルは 2D モデルに比べて背景の顕著性を抑制している (カラースケールはすべての顕著性マップと固視マップに適用) (Uejima, T. et al. 2023)

その結果、5 つのモデルすべてにおいて、また 5 つの測定基準すべてにおいて、NCTU3D データセットに顔、身体、または身体の一部が存在すると固視予測性能は低下し大半のテストでは、この低下は有意であった。Gaze-3D データについても同様に、大多数のテストで人間不在の画像の方が高い性能を示し、これらの差の大部分は有意であったが、Gaze-3D データセットは非常に小さいため、統計的検出力には限界があった。

強度情報のみを使用するモデル、すなわちモデル A と B については 2D モデルとそれに対応する 3D 情報を持つ 2 つのモデル (モデル A および B) との間の 10 回の比較のうち、2 つを除くすべてについて、3D 情報を持つモデルは 2D モデルと同等かそれ以上の結果を示した。色情報を追加した場合、3D キューを組み込んだモデル (モデル C と D) は、10 回の比較すべてにおいて対応する 2D モデルと同等かそれ以上であった。3D モデルの中で最も単純なモデル A は、1 つの方向 (垂直方向) のみで、色も他の方向も寄与しない。このモデルは Gaze-3D データセットでは、すべての測定基準で最高のスコ

アであり、NCTU データセットでは、1 つの測定基準を除いてすべての測定基準で最高のスコアである。人間の眼は通常同じ高さにあり、両眼視差はこのように垂直方向に対して対称な位置の間で発生することを考えると、垂直方向が最も重要であることは直感的に理解できる。

霊長類は注意を引く顔や体に強い関心を示す。本研究では、人間の固視位置は同じバイアスを示すと予想され、どのモデルも顔や体の部位を検出する明示的なメカニズムを持っている人物が写っている画像よりも、人物が写っていない画像の方がより良い位置を予測できる。この分析では画像を2つのセットに分け、1つは、人が写っている画像と居ない画像であるが動物や人間の彫像が含まれている可能性がある。その結果、NCTU のデータセットでは、少なくとも部分的に人間が写っている画像が 303 枚、写っていない画像が 172 枚あった。NCTU3D データセットでは、5つのモデル、5つの測定基準すべてにおいて、顔、身体、身体の一部が存在すると、固視予測性能が低下した。大半のテストにおいてこの低下は有意で、Gaze-3D データについても同様に人間のいない画像の方が高い性能を示し、これらの差の大部分は有意であった。全体として、この効果は NCTU3D データよりもやや弱いですが、Gaze-3D データセットは非常に小さいため、達成できる統計的検出力が制限される。

この研究では生物学的にもっともらしい立体視のメカニズムを、プロトオブジェクトベースの顕著性モデルに組み込み立体視画像を入力とし、視差エネルギーモデルからカテゴリカルな奥行情報を計算し、得られた奥行情報を単眼情報（強度、色、方向）と組み合わせて視覚シーンをプロトオブジェクトで表現した。その結果、顕著性マップは、視覚的注意の配分に関する予測を生成し単眼の手がかりのみを用いた対応するマップからの予測よりも、人間の行動と有意によく一致した。