

自閉スペクトラム症における特異な感覚— 運動協応への予測制御と脳内抑制性の関与の検討

杏林大学医学部	渥 美 剛 史
筑波大学人間総合科学学術院・杏林大学医学部	伊 藤 晴 香
杏林大学医学部	上 田 明 音
国立障害者リハビリテーションセンター研究所・脳機能系障害研究部	福 富 朋 恵
関西医科大学リハビリテーション学部	松 島 佳 苗
国立障害者リハビリテーションセンター研究所・脳機能系障害研究部	井 手 正 和
杏林大学医学部	寺 尾 安 生

A study of the involvement of predictive control
and neural inhibition in atypical sensory-motor coordination in autism
spectrum disorders.

Faculty of Medicine, Kyorin University	ATSUMI, Takeshi
Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba / Faculty of Medicine, Kyorin University	ITO, Haruka
Faculty of Medicine, Kyorin University	UEDA, Akane
Department of Rehabilitation for Brain Functions, Research Institute of National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities	FUKUTOMI, Tomoe
Faculty of Rehabilitation, Kansai Medical University	MATSUSHIMA, Kanae
Department of Rehabilitation for Brain Functions, Research Institute of National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities	IDE, Masakazu
Faculty of Medicine, Kyorin University	TERAO, Yasuo

要 約

自閉スペクトラム症（ASD）では特異な感覚処理特性や運動の困難がみられ、当事者喫緊の課題である。ASD 中核症状の神経生理学的メカニズムとして、感覚情報に基づく予測生成の異常が指摘されている。ASD では脳内抑制性神経の機能不全による興奮／抑制バランスの変調が広く報告されており、病態や予測制御への関連も示唆されている。一方、それが特異な感覚・運動特性へどのように関与しているか明らかではない。本研究は、ASD における感覚—運動協応の特性を明らかにし、予

測生成の困難および脳内抑制性との関連を明らかにすることを目的とした。実験1では、被験者へ不安定な感覚フィードバックを伴う運動学習課題を実施し、その結果、ASD者では学習における高精度な確率分布への依存が強く、感覚入力への弱い仮説を持っていることが推察された。実験2では、ASD者では運動制御のみならず認知機能においても刺激の予測困難さの影響が顕著である可能性が示された。これらは、神経抑制機能に起因すると想定される、ASDの予測符号化における弱い事前分布を支持するように推察された。

【キーワード】 自閉スペクトラム症, 感覚過敏, 運動機能, 予測符号化, GABA

Abstract

Individual with autism spectrum disorder (ASD) often experience sensory challenges and motor difficulties on a daily basis, resulting in a reduced quality of life. Researchers have suggested that abnormal prediction mechanisms based on sensory input in ASD may be the underlying neurophysiological basis of symptomatology. Excitatory/inhibitory (E/I) imbalance due to dysfunction of inhibitory neurotransmission may be associated with the pathology in autism and the predictive mechanism. However, it is still unknown how the E/I imbalance relates to sensorimotor characteristics in ASD. In this study, we sought to clarify the relationship between the property of sensorimotor coordination, the prediction mechanism and neural inhibition in ASD. Participants performed a motor learning task with jittered sensory feedback, and the result suggested that individuals with ASD may have a weak hypothesis for incoming sensory inputs. Participants in the ASD group may show greater effects of stimulus unpredictability in motor and cognitive domains. The results may support the weak prior hypothesis in autistic predictive coding, which seems to be induced by neural inhibitory function.

【Keywords】 autism spectrum disorder, sensory hyperreactivity, motor function, predictive coding, GABA

問題と目的

自閉スペクトラム症（ASD）は、社会コミュニケーション困難と限局的な興味・常同行動を中核症状とし、発達早期からその症状がみられる神経発達症であるが、後者では主に感覚・運動の問題が焦点となっている。ASD児の9割は感覚過敏・鈍麻を示し（Tomchek & Dunn, 2007）、8割は運動の問題を抱えているとされ（Green et al., 2009）、いずれも当事者喫緊の課題である。

ASDの生物学的特性として、脳内で抑制性神経伝達物質として働くγアミノ酪酸（GABA）の機能不全が広く報告されており、病態との関連が示唆されている。ASD児者では、GABAの濃度が低いほど強い感覚過敏を示すことが報告されている（Umesawa et al., 2020a; Wood et al., 2021）。また我々は、ASD者では、前頭葉の一部である補足運動野のGABA濃度が低いほど運動技能が低いこ

と (Umesawa et al., 2020c), 上肢運動が視覚情報の影響を受けづらいことを見出している (Umesawa et al., 2020b)。さらに、運動は時系列情報であるが、ASD 者では時間情報処理の精度と感覚過敏が関連する (Ide et al., 2019 ; Kaneko et al., 2024) ため、これら生物学的特性、および感覚運動特性との連続性が示唆される。

このような ASD の多様な病態について近年では、感覚情報に基づく外界の状態についての予測モデル更新の異常との関連が指摘されている (Sterzer et al., 2018)。モデルの更新はベイズ則に従うと考えられるが、予期される感覚入力信号について、ASD 者では広い事前確率分布 (弱い事前分布) を持つと指摘されている (Pellicano & Burr, 2012)。内的な予測モデルである確率分布を感覚入力の信号によって更新する脳の働きは、一般的な感覚・知覚、運動メカニズムの共通基盤と目される (Friston, 2010)。ところが、脳内の神経伝達物質に起因した興奮／抑制 (E/I) バランスが不均衡な場合、内的モデルは適切に更新されず、発達障害や精神疾患の病態につながるものが想定される (Friston et al., 2014 ; Jardri & Denève, 2013 ; Sterzer et al., 2018)。

これらの知見から、ASD の脳内抑制性の不全が、感覚入力の予測とそれに基づく神経出力調整を阻害することが運動困難に結びつくと推測された。本研究では、ASD の感覚－運動協応の特性が、脳内抑制性低下に起因した感覚情報に基づく予測生成を阻害し、病態に結びついている可能性を検討した。脳内抑制性の評価には、高次運動野の GABA 濃度との関連が報告されている Stop signal 課題を用いた (Hermans et al., 2018)。

方 法

本研究では、ASD の感覚－運動協応の特性について運動中の感覚フィードバックとの予測誤差、および脳内抑制性との関連が指摘されている行動抑制機能について、コンピュータを用いた実験から評価した (実験 1)。また、ASD 者において感覚過敏の強さとの関連が報告されている時間認知機能について、刺激の予測性に着目して分析を行った (実験 2)。

被験者：

以下に述べる感覚運動協応課題および Stop signal 課題については、ASD 者 10 名 (男：女 = 1:9, 平均年齢 [± SD] = 29.50 [6.69]), ASD の診断の無い定型発達 (TD) 者 7 名 (4:3, 18.57 [0.54]) を対象とした。また時間認知課題については、ASD 者 16 名 (2:14, 26.81 [6.97]), TD 者 21 名 (6:15, 23.29 [4.69]) を対象とし、ASD 診断群では、その他の課題を実施した被験者と 5 名が重複していた。実験にあたり、各被験者の特性について質問紙によるスクリーニングを実施した。ASD 特性の強さについては、自閉スペクトラム指数 (AQ) により評価した。また、感覚処理の特性については、青年・成人感覚プロファイル (Adolescent / Adult Sensory Profile) により評価した。

装置：

感覚運動協応課題および Stop signal 課題では、TUF GAMING VG279QM モニター (ASUS) を接続した Dell Precision 3630 タワー PC とラップトップ PC (ASUS, ROG Zephyrus GA502, 15.6 インチ) (共に 240Hz リフレッシュレート), および MacBook Pro (14 インチ, 2023, 60Hz リフレッシュレート) を用いた。時間認知課題については、上記 Dell PC を用い、反応取得に Cedrus response キーボード (RB-740) を用いた。この課題において、視覚刺激の呈示には同 240Hz モニタを用い、触覚刺激の呈示にはアタッチャブルスピーカ (TafuOn) と骨伝導イヤホン (earsopen WR-3, BoCo) を使用した。

感覚運動協応課題：

マウスカーソルを用い、モニタ上部に表示される標的図形へ赤い円形カーソルを到達させる以下の課題を実施した (Figure 1)。下部のスタート位置にカーソルが移動すると、標的図形がその位置から一定距離のランダムな位置に出現した。被験者はできるだけ素早く、正確に図形へカーソルを移動させるよう求められた。このときカーソルの位置は、マウスの進行角度に対し平均 15° と 45° の範囲でランダムな角度差で移動 (Jerk) した。このとき、平均角度差に対し標準偏差 $\pm 2.5^\circ$ で変化する条件を「Narrow」条件、標準偏差 $\pm 10^\circ$ を「Broad」条件とした (Figure 1 right)。1 ブロックは、カーソルの動きに角度差が無いペースライン 10 試行 (Figure 1 left top)、1 つの平均角度差と標準偏差で Jerk がある 15 試行、およびそれとは平均角度差・標準偏差の一方、あるいは両方が異なる 15 試行から構成された (Figure 1 left middle)

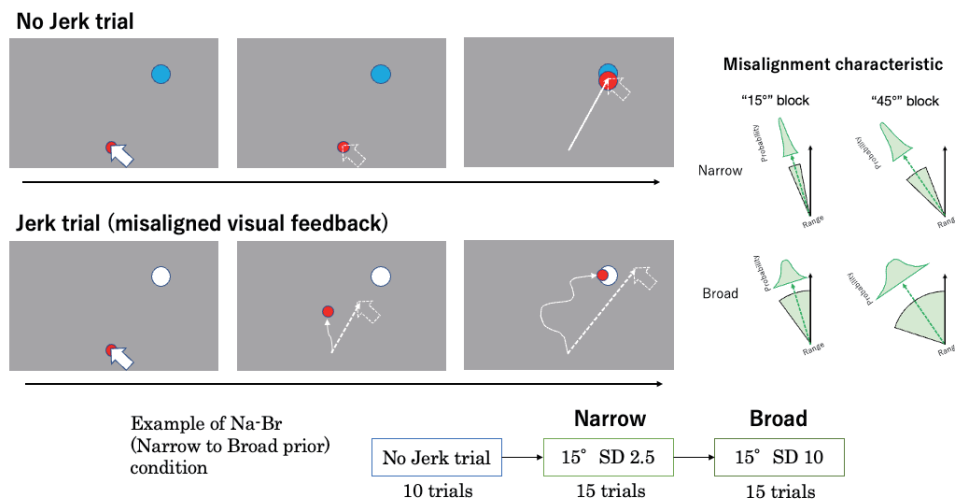


Fig 1. Schematic description of the sensorimotor coordination task.

Participants had to move a red colored mouse cursor to a target circle. The movement of the red cursor was jerked at two mean angles and two standard deviations (SD) from the mean (right panel). A block started with ten consecutive baseline (no jerk) trials (left top). The following 15 trials were jerked cursor movements, defined by a mean change angle and a SD (left middle).

1 試行は 1.0 ～ 1.5 s の試行間隔の直後開始され、被験者がカーソルを動かし始めてから標的図形

に到達するか、10 秒経過するまで継続した。各被験者は、平均角度差・標準偏差の組み合わせからなる 12 条件をランダムな順序で遂行した。各被験者は、最後の組み合わせ条件の直後に挿入されたベースライン試行 10 試行を含め、計 490 試行を実施した。

Stop signal 課題：

抑制機能を評価するため、合図に応じて素早くボタン押しを中止する、Stop signal 課題を実施した。課題は、大部分を Hermans et al. (2018) に準拠して作成された。被験者は、マウスのボタンを押しながら伸び続ける水色インジケータをモニタ上部の赤色水平バーの付近で停止させることが求められた (Go 試行, **Figure 2A, B**)。ボタンを押しながら伸び続ける水色インジケータは 0.8 秒で水平バー中央に到達した。Go 試行では、押し始めから 0.8 秒までのどの時点でインジケータを停止できたかによって、課題成否が色でフィードバックされた。ボタン押し開始から 0.8 秒経過 20 ミリ秒前で停止できた場合は直後に水平バーが緑、40 ミリ秒前では黄、60 ミリ秒前では橙色に変化した。被験者は、水平バーが緑か黄色に変化することを目指すよう求められた。10 回の練習試行のうち、水色以外のインジケータが呈示される場合、ボタン押し中に不意にインジケータが停止する Stop 試行 (**Figure 2C**) を含む練習ブロック 90 試行が実施された。Stop 試行では、色ごとにそれぞれ 20%、30%、40% の確率でインジケータの伸長が停止した。停止した場合、被験者は直ちにボタン押しを中止する必要がある。Stop 試行においても、ボタン押し開始から 0.8 秒経過までにボタン押しをキャンセルできた場合、直後に水平バーが緑色に変化した。ブロック開始直後のベースライン 20 試行以降、異なる停止確率 (Stop signal probability : SSP) の Stop 試行はランダムに挿入され、インジケータごとの SSP 学習機会を担保した。続くテストブロックでは、ベースライン 25 試行の後、20% と 40% SSP の試行がランダムに呈示され、被験者は計 175 試行を実施した。解析の対象はテストブロックのボタン押しまでの反応時間とした。Stop 試行の反応時間は、Go 試行・Stop 試行それぞれの成功・失敗試行における反応時間から算出された (Verbruggen & Logan, 2009)。

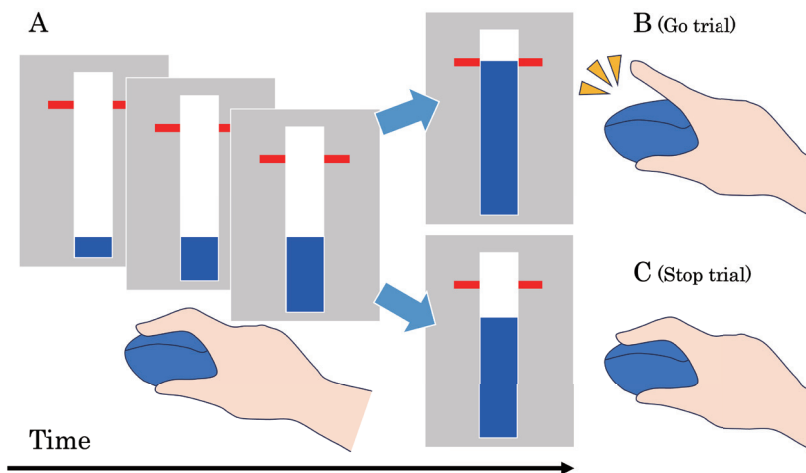


Fig 2. Schematic description of the stop signal task (Hermans et al., 2018).

時間認知課題：

本研究では、視覚と触覚について時間順序判断課題を実施した。被験者は、様々な時間差で呈示される左右 2 つの感覚刺激について、後続呈示側をボタン押しで回答することが求められた。視覚課題では、モニタ左右視野中央に呈示されるガボールパッチについて、触覚課題では左右中指に呈示される振動刺激について回答が求められた。各課題では、課題遂行に無関係な妨害刺激が呈示された。視覚では、フレームごとに更新されるブロックノイズがガボールパッチ呈示箇所以外に呈示された。触覚では、左右人差し指と薬指に設置された骨伝導イヤホンから白色雑音振動刺激が呈示された。各試行では、妨害無しを含む 5 段階で妨害ノイズ刺激の強度が操作された。2 つの標的刺激時間差（刺激開始非同期、Stimulus onset asynchrony:SOA）から反応データに 4 パラメータロジスティックモデルによるシグモイド関数をフィッティングすることで、SOA ごとの閾値（丁度可知差異：Just noticeable difference：JND）を算出した。JND は、2 つの感覚モダリティについてノイズ条件ごとに算出され、分析の対象とされた。

本研究は、杏林大学と国立障害者リハビリテーションセンター研究所の共同で実施された。行動実験は、研究代表者が両機関で実施した。また本研究は、上記 2 研究機関の倫理委員会において承認された。

結果と考察

実験 1：

実験 1 の被験者について、各群の AQ スコアは、ASD 診断群の平均値 $[\pm \text{SD}]$ は 32.69 [8.74]、TD 群では 20.48 [9.44] であった (Permutation t -test: $p < 0.0001$, Cohen's d [95 %CI] = 2.65 [1.34, 3.96])。AASP スコアでは、低登録 (Low registration)、感覚過敏 (Sensory sensitivity)、および感覚回避 (Sensation avoiding) において ASD 診断群で TD 群より高いスコアであった一方、感覚探求 (Sensation seeking) で低いスコアであった (Table 1)。

Table 1. Group difference of AASP scores.

AASP subscale	ASD (n = 10)	TD (n = 7)	Cohens's d [95% CI]
Low registration	46.40 [10.42]	35.43 [6.73]	* 1.2 [0.16, 2.25]
Sensation seeking	35.10 [6.33]	43.14 [7.97]	* -1.14 [-2.18, -0.1]
Sensory sensitivity	50.40 [12.79]	38.71 [8.54]	‡ 1.04 [0.01, 2.06]
Sensation avoiding	52.40 [10.07]	34.00 [7.07]	"" 2.05 [0.86, 3.23]

Mean scores $[\pm \text{SD}]$ in each group are shown. CI: confidence interval. ‡ $p < 0.1$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

感覚運動協応課題について、ベースライン試行、異なる平均角度差の Jerk あり試行それぞれにおけ

るカーソルの制御精度について被験者ごとに分析した (**Figure 3**)。各角度差 (ベースライン 0° , 15° , 45°) 試行の制御誤差 (エラー) は群間で差がなかった。このことから, 運動学習の能力について本課題における違いは無いと考えられた。

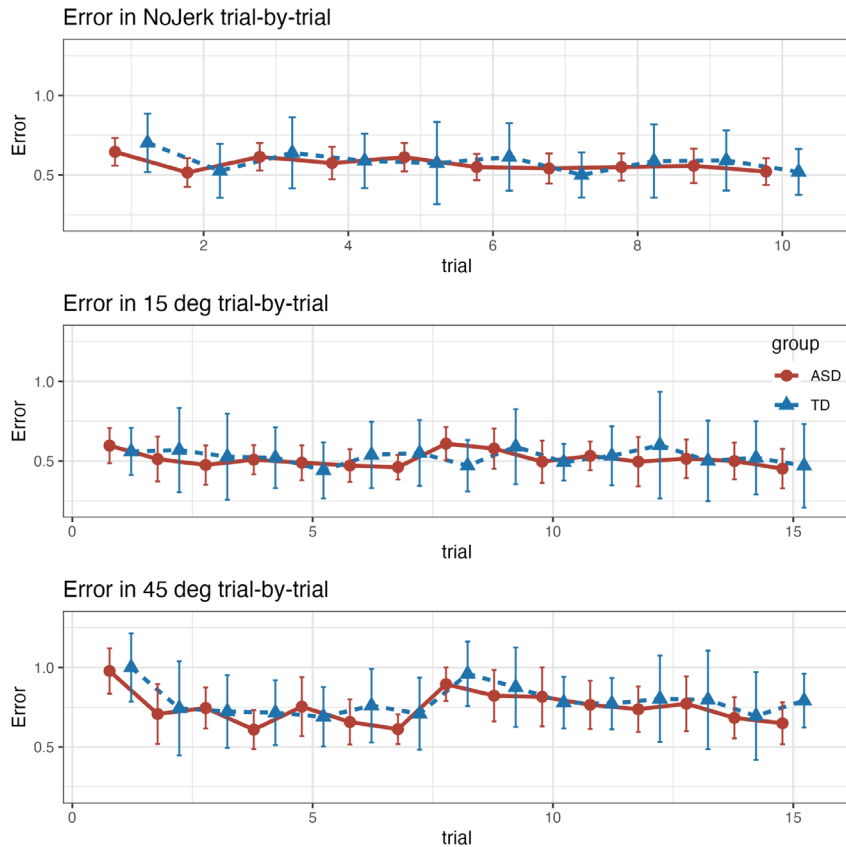


Fig 3. Averaged trial-by-trial error of cursor control in each group.
Error bars represent 95% confidence interval.

Jerk あり試行について, 平均角度差で区別せず標準偏差条件ごとにエラーを分析した。標準偏差 2.5 (Narrow : Na) から 10 (Broad : Br) に切り替わる Na-Br 条件, その逆の Br-Na 条件それぞれについて群間の平均値差を算出した。その結果, Na-Br では ASD において Post でのエラーが TD より大きい傾向にあった (Permutation t -test: $p = 0.066$, $d = 0.97$, 95% CI = $[-0.05, 1.99]$, **Figure 4**)。平均値に群間差が無いことを確認するため, ベイズ推定による独立 2 群の t 検定でも分析したところ, $BF_{01} = 0.69$ であり, 帰無仮説が正しいとするエビデンスは乏しかった。なお, ASD 診断群では Na-Br 条件におけるエラーと年齢の間に相関はみられなかった ($r = 0.23$, $p = 0.51$, power $[1 - \beta] = 0.099$)。Br-Na 条件では群間で差がなかった ($p = 0.98$, $d = -0.01$, CI = $[-0.98, 0.96]$)。

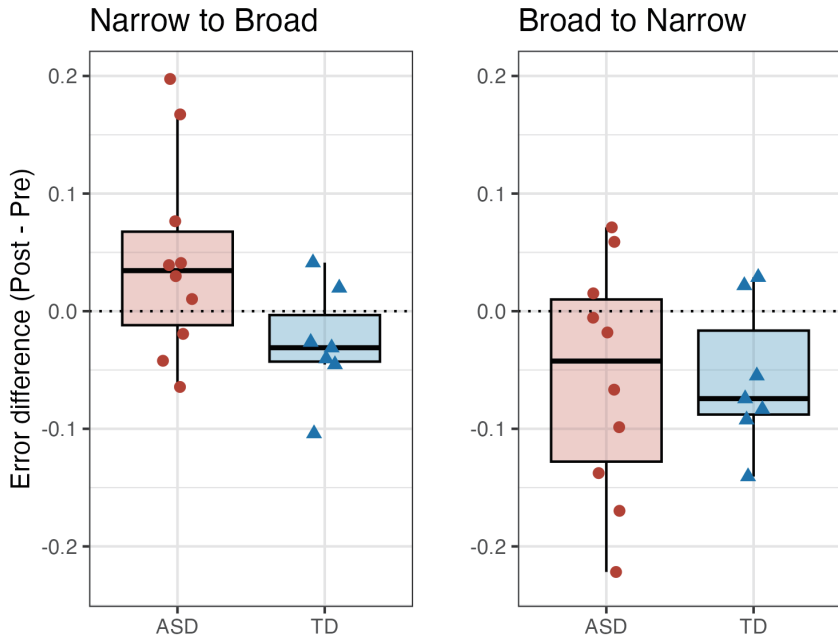


Fig 4. Changes in error induced by pre-post prior change (ignoring the mean angle).

これらの結果から、ASD 者では感覚フィードバックに対する弱い事前分布を有するため、平均角度差に近い角度変化が生じやすい狭い（強い）確率分布へ依存し、広い分布に切り替わったときに運動エラーが生じやすいものと推察された。

Stop signal 課題では、Stop 試行出現確率が 20% と 40% のブロックにおいて、Go 試行における成功率は $ASD < TD$ であった (Permutation t -test: $p = 0.02$, $d = -1.2$, $CI = [-2.25, -0.16]$)。ボタン押下中伸長するバーの停止からボタンを離すまでの遅延時間 (SSRT) を比較したところ、Stop 試行出現ブロックにおいて群間で差はみられなかった ($p = 0.40$, $d = 0.43$, $CI = [-0.55, 1.4]$)。Stop 試行出現確率の影響を分析するため、20% 試行 - 40% 試行の変化を比較したところ、SSRT 変化量は ASD で TD より大きい傾向にあった ($p = 0.099$, $d = 0.81$, $CI = [-0.19, 1.81]$)。再びベイズ推定 t 検定を行い、 $BF_{01} = 0.99$ で、平均値が等しいというエビデンスは乏しいことが示された。

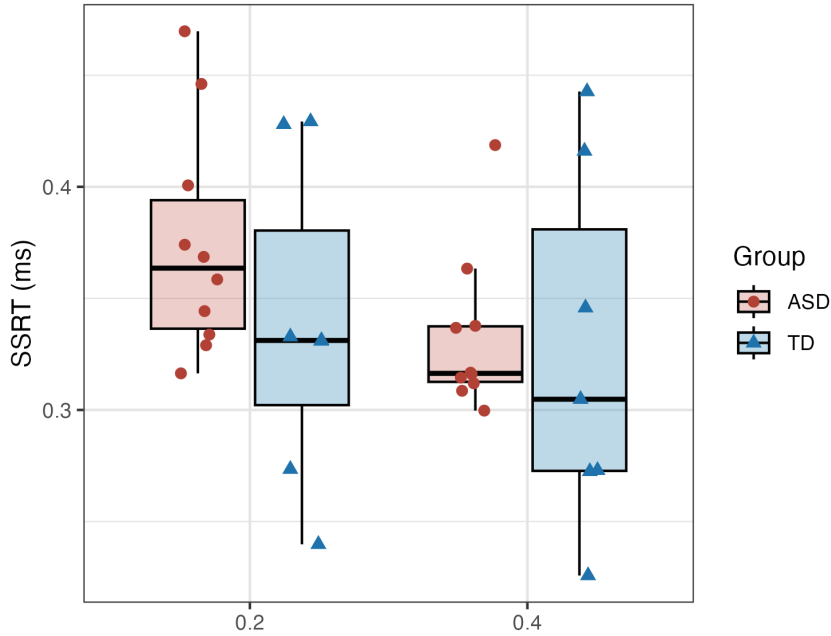


Fig 5. Stop signal reaction time (SSRT) in each stop signal probability condition (0.2 and 0.4 SSP).

これらの結果から、ASD 者では予測が困難な状況（低い SSP）に対してより行動制御が困難になるものと推察された。

実験 2 :

時間順序判断課題の被験者について、各群の AQ スコアは、ASD 診断群の平均値 [± SD] は 32.69 [8.74], TD 群では 20.48 [9.44] であった (Welch の t -test : $t_{33.61} = -4.07$, $p < 0.001$, Cohen's d [95 %CI] = 1.33 [0.62, 2.05])。AASP スコアは、低登録、感覚過敏、および感覚回避において ASD 診断群で TD 群より高かった (Table 2)。

Table 2. Group difference of AASP scores.

AASP subscale	ASD (n = 16)	TD (n = 21)	Cohens's d [95% CI]
Low registration	43.06 [10.95]	32.38 [9.13]	** 1.07 [0.38, 1.77]
Sensation seeking	39.13 [7.69]	39.62 [8.08]	-0.06 [-0.71, 0.59]
Sensory sensitivity	53.75 [9.89]	34.33 [9.11]	*** 2.05 [1.25, 2.86]
Sensation avoiding	51.44 [11.97]	36.43 [12.56]	** 1.22 [0.51, 1.93]

Mean scores [± SD] in each group are shown. CI: confidence interval. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

課題非関連なノイズの変化に対する JND の変化について、各ノイズ強度条件に対する傾きを分析したところ、視覚課題では ASD では TD より小さい傾きで ($t_{32.67} = -2.60$, $p = 0.014$, $d = -0.8$ [-1.48, -0.13]), 触覚では同等であった ($t_{32.47} = 0.29$, $p = 0.78$, $d = 0.09$ [-0.56, 0.74])。ASD ではノイズ強度に対する線形な JND の増大が無いと考え、ノイズ無し条件と各ノイズ条件との JND の変化量を評価した。その結果、視覚では ASD 群において TD 群より大きな変動がみられた ($t_{34.95} = 2.94$, $p < 0.01$, $d = 0.94$ [0.26, 1.63])。触覚については、群間で中程度の同様な差がみられた ($t_{28.41} = 2.01$, $p = 0.054$, $d = 0.69$ [0.02, 1.36])。さらに ASD 群では、ノイズによる JND 変動の大きさは各被験者の過反応 (感覚過敏スコア + 感覚回避スコア) と正の相関にあった (視覚: $r = 0.60$, $p = 0.014$, $\text{power}(1 - \beta) = 0.73$; 触覚: $r = 0.59$, $p = 0.016$, $\text{power}(1 - \beta) = 0.71$; Figure 6)。

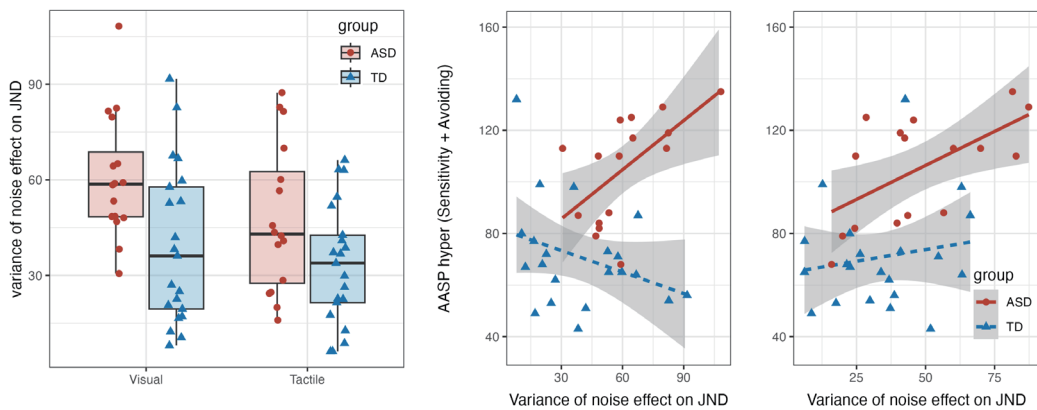


Fig 6. Variance of the just noticeable difference (JND) change between with and without noise conditions (left panel) and the associations with AASP sensory hyperreactivity score (Sensory Sensitivity + Sensation Avoiding) (middle and right panels; shaded areas represent 95% confidence interval).

総合考察

視覚一運動協応課題における自己運動と視覚フィードバック誤差の影響は、学習フェーズで標準偏差が小さかった場合、ASD 群では直後のテストフェーズとの軌跡エラーの変化量で顕著であった。このことは、ASD 群では感覚入力に対する弱い事前分布 (Pellicano & Burr, 2012) があり、運動学習時に獲得される強い (狭い) 分布により強く依存する傾向にあることを示唆する。同様な傾向は、Stop signal 課題において、ASD 群では停止信号の出現がより予想しづらい状況下で行動抑制が困難になるという結果からも支持されうる。これら運動制御においてのみならず、感覚入力の予測が困難な状況は時間認知にも影響をおよぼしたことが示唆された。神経における予測符号化の機構を鑑みれば、流入しうる感覚入力に対する適切な仮説が乏しい場合、運動や知覚・認知などあらゆる情報処理が困難になりうる (Sterzer et al., 2018)。ASD 群において強い感覚過敏がみられることから、弱い

事前分布が感覚入力に対し強い情動反応のような極端な応答や、感覚情報に基づく運動制御の困難につながっていることが考えられる。

本研究では、ASD 群において停止信号の出現確率が行動抑制に影響を与えたが、行動抑制の反応時間 (SSRT) そのものには対照群と差がみられなかった。ASD で顕著とされる脳内代謝物質に起因した神経応答の興奮／抑制比との関連は明らかでないが、今後 MR スペクトロスコピーや脳波等から分析することで、ASD の予測符号化特性の神経基盤から病態の理解を目指す必要があるだろう。

引用文献

- Aron, A. R., Fletcher, P. C., Bullmore, E. T., Sahakian, B. J., & Robbins, T. W. (2003). Stop-signal inhibition disrupted by damage to right inferior frontal gyrus in humans. *Nature Neuroscience*, 6 (2), 115–116. <https://doi.org/10.1038/nn1003>
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11 (2), 127–138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
- Friston, K. J., Stephan, K. E., Montague, R., & Dolan, R. J. (2014). Computational psychiatry: the brain as a phantastic organ. *The Lancet Psychiatry*, 1 (2), 148–158. [https://doi.org/10.1016/S2215-0366\(14\)70275-5](https://doi.org/10.1016/S2215-0366(14)70275-5)
- Green, D., Charman, T., Pickles, A., Chandler, S., Loucas, T., Simonoff, E., & Baird, G. (2009). Impairment in movement skills of children with autistic spectrum disorders. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 51 (4), 311–316. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2008.03242.x>
- Hermans, L., Leunissen, I., Pauwels, L., Cuypers, K., Peeters, R., Puts, N. A. J., Edden, R. A. E., & Swinnen, S. P. (2018). Brain GABA Levels Are Associated with Inhibitory Control Deficits in Older Adults. *The Journal of Neuroscience*, 38 (36), 7844–7851. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0760-18.2018>
- Ide, M., Yaguchi, A., Sano, M., Fukatsu, R., & Wada, M. (2019). Higher Tactile Temporal Resolution as a Basis of Hypersensitivity in Individuals with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 49 (1), 44–53. <https://doi.org/10.1007/s10803-018-3677-8>
- Kaneko, A., Atsumi, T., Ide, M. (2024). Temporal resolution relates to sensory hyperreactivity independently of stimulus detection sensitivity in individuals with autism spectrum disorder. *Perception*, 53 (9), 585–596. <https://doi.org/10.1177/03010066241259729>
- Jardri, R., & Denève, S. (2013). Circular inferences in schizophrenia. *Brain*, 136 (11), 3227–3241. <https://doi.org/10.1093/brain/awt257>
- Pellicano, E. & Burr, D. (2012). When the world becomes ‘too real’: a Bayesian explanation of autistic perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 16 (10), 504–510. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.08.009>

- Sapey-Triomphe, L. A., Temmerman, J., Puts, N. A. J., & Wagemans, J. (2021). Prediction learning in adults with autism and its molecular correlates. *Molecular Autism*, 12 (1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s13229-021-00470-6>
- Sapey-Triomphe, L. A., Timmermans, L., & Wagemans, J. (2021). Priors Bias Perceptual Decisions in Autism, But Are Less Flexibly Adjusted to the Context. *Autism Research*, 14 (6), 1134–1146. <https://doi.org/10.1002/aur.2452>
- Sterzer, P., Adams, R. A., Fletcher, P., Frith, C., Lawrie, S. M., Muckli, L., Petrovic, P., Uhlhaas, P., Voss, M., & Corlett, P. R. (2018). The Predictive Coding Account of Psychosis. *Biological Psychiatry*, 84 (9), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2018.05.015>
- Tomchek, S. D., & Dunn, W. (2007). Sensory processing in children with and without autism: a comparative study using the short sensory profile. *The American Journal of Occupational Therapy : Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, 61 (2), 190–200. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17436841>
- Umesawa, Y., Atsumi, T., Chakrabarty, M., Fukatsu, R., & Ide, M. (2020). GABA Concentration in the Left Ventral Premotor Cortex Associates With Sensory Hyper-Responsiveness in Autism Spectrum Disorders Without Intellectual Disability. *Frontiers in Neuroscience*, 14:482. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00482>
- Umesawa, Y., Atsumi, T., Fukatsu, R., & Ide, M. (2020). Decreased utilization of allocentric coordinates during reaching movement in individuals with autism spectrum disorder. *PLOS ONE*, 15 (11), e0236768. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236768>
- Umesawa, Y., Matsushima, K., Atsumi, T., Kato, T., Fukatsu, R., Wada, M., & Ide, M. (2020). Altered GABA Concentration in Brain Motor Area Is Associated with the Severity of Motor Disabilities in Individuals with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 50 (8), 2710–2722. <https://doi.org/10.1007/s10803-020-04382-x>
- Verbruggen, F. & Logan, G. D. (2009). Models of response inhibition in the stop-signal and stop-change paradigms. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33 (5), 647–661. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.014>
- Wood, E. T., Cummings, K. K., Jung, J., Patterson, G., Okada, N., Guo, J., O'Neill, J., Dapretto, M., Bookheimer, S. Y., & Green, S. A. (2021). Sensory over-responsivity is related to GABAergic inhibition in thalamocortical circuits. *Translational Psychiatry*, 11 (1), 39. <https://doi.org/10.1038/s41398-020-01154-0>