

演繹的推論に及ぼす信念バイアス効果: 発達神経科学的アプローチによる研究

日本大学医学部 辻井 岳雄

Belief-bias effect on deductive reasoning: a neuro-developmental study

Nihon University, School of Medicine TSUJII, Takeo

要約

演繹的推論は、与えられた前提から論理規則に基づいて妥当な結論を導く過程であり、問題文の意味内容の処理とは本来独立に行われるものである。しかし、実際にヒトが行っている推論は、本来不要なはずの意味処理の影響を強く受けることが知られており、主に信念バイアス効果の研究を通じて実験的に検討されてきた。成人被験者を対象とした脳画像研究は、信念バイアス効果は右半球の前頭葉下部の活動と深い関わりがあることを示しているが、その発達的变化は未だに明らかではない。本研究の目的は、小学生被験者(11・12歳)が三段論法の問題を解いているときの前頭葉下部の活動について近赤外分光法(NIRS)を用いて計測し、信念バイアス推論の神経基盤の発達的变化を検討することである。本研究の結果から、明らかな右半球優位を示す成人被験者とは対照的に、小学生被験者は前頭葉下部の活動の半球非対称性が少ないことが明らかになった。

【キー・ワード】 演繹的推論, 信念バイアス効果, 前頭葉下部, 発達的变化

Abstract

Deductive reasoning is the process of drawing valid conclusions from a given set of premises. Although deductive reasoning should be performed independently of prior knowledge and intuitive beliefs, actual human reasoning often relies on them. This tendency towards bias in human reasoning has been experimentally studied through the demonstration of the belief-bias effect in syllogistic reasoning. Recent neuroimaging studies showed that right inferior frontal cortex is important for belief-bias reasoning, using adult subjects. The aim of this study was to examine the activity of inferior frontal cortex in children performing belief-bias reasoning task, using near-infrared spectroscopy (NIRS). We found that children exhibited the less hemispheric asymmetry in inferior frontal cortex activity compared with adult subjects who showed strong right-lateralization associated with belief-bias reasoning.

【Key words】 deductive reasoning, belief-bias effect, inferior frontal cortex, developmental change

序 論

最近の脳画像研究では、論理的思考、特に演繹的推論の神経基盤に関する研究が急速に明らかにされている (Goel, 2007)。演繹的推論は、与えられた前提から論理規則に基づいて妥当な結論を導く過程であり、問題文の意味内容の処理とは本来独立に行われるものである。しかし、実際にヒトが行っている推論は、本来不要なはずの意味処理の影響を強く受けることが知られており、主に信念バイアス効果 (belief-bias effect) の研究を通じて実験的に検討されてきた (Evans, 2008)。

信念バイアス効果とは、論理的な正しさに関する判断が、(本来それとは無関係な) 問題文の意味内容の正しさに影響されてしまう現象をいう。信念バイアス効果の実験では、論理的な正しさと結論の意味内容の正しさが一致する問題と、一致しない問題を作成する (図 1 参照)。一致条件では、意味処理が論理推論を促進する形で作用するが、不一致条件では、意味処理が論理推論に干渉してしまうため、推論成績が悪くなることが知られている (De Neys, 2006a, 2006b; Evans, 2008; Tsujii & Watanabe, 2009, 2010)。

		論理的な正しさ (reasoning)	
		正しい (valid)	正しくない (invalid)
信念 (belief)	正しい (Believable)	どの哺乳類も鳥でない すべてのイヌは哺乳類である ----- ∴ どの哺乳類も鳥でない	どのハトも哺乳類でない すべてのハトは鳥である ----- ∴ どの鳥も哺乳類でない
	正しくない (Unbelievable)	どの哺乳類も鳥でない すべてのハトは哺乳類である ----- ∴ どのハトも鳥でない	どの鳥もイヌである すべてのイヌは哺乳類である ----- ∴ どの哺乳類もイヌでない
		□ 一致条件 (congruent)	□ 不一致条件 (incongruent)

図 1 信念バイアス効果の実験パラダイム

信念バイアス効果の説明原理として最も良く用いられているのは、論理的推論の二重過程モデル (dual-process model) である。二重過程モデルは、論理規則や確率理論に基づく分析的思考 (analytic system) と、常識・気分・個人的経験などに基づく直感的思考 (heuristic system) という 2 つの思考システム間の相互作用を通じてヒトの推論は行われることを提案している。直感的思考 (ヒューリスティクス) は素早く自動的に行われるのに対して、分析的思考は時間と処理容量を必要とする過程である。日常生活における推論や意思決定のほとんどはヒューリスティクスにより行われているが、三

三段論法や数学の問題を解く時にはヒューリスティクス過程を一時的に抑制して、分析的思考のモードに切り替える必要があることを二重過程モデルは提唱している (Evans, 2008)。

成人被験者を対象とした最近の脳画像研究は、演繹的推論に及ぼす信念バイアス効果は右半球の前頭葉下部の活動と深い関連があることを示唆している (Goel & Dolan, 2003; De Neys et al., 2008; Tsujii & Watanabe, 2009, 2010; Tsujii et al., 2010a, 2011b)。例えば、Goel & Dolan (2003)は、機能的 MRI を用いて三段論法課題遂行中の脳活動を測定したところ、不一致条件の推論に正答した試行は、右半球の前頭葉下部の活動が高いことを示した。また、Tsujii & Watanabe (2009)は、近赤外分光法 (NIRS; near-infrared spectroscopy)を用いた研究において、右半球の前頭葉下部の活動が高い被験者ほど、不一致条件の推論成績が良いことを示した。さらに、Tsujii et al. (2010a, 2011b)は、経頭蓋磁気刺激 (TMS: transcranial magnetic stimulation)を用いて右半球の前頭葉下部の活動を抑制すると、不一致条件の推論成績のみが著しく悪化することを明らかにした。これらの結果は、右半球の前頭葉下部の活動が、不一致条件の推論に深い関わりを持つことを示唆している。

しかし、これら一連の先行研究は成人被験者だけを対象としており、前頭葉下部の半球非対称性が発達段階のいつ頃から始まるのか等、演繹的推論の神経基盤の発達の变化については明らかにされていない。本研究の目的は、近赤外分光法(NIRS)を用いて小学生児童 (11・12 歳) が定言的三段論法 (categorical syllogism)の問題を解いているときの前頭葉下部の活動を測定し、小児における信念バイアス効果の神経基盤について検討することである。NIRS は非侵襲で安全性が高く、子供を対象とした発達神経科学の研究に適している (Minagawa-Kawai et al., 2008, 2009; Tsujii et al., 2009, 2010c)。De Neys et al. (2009)は、小学生児童 (11・12 歳)の推論成績を調べたところ、成人被験者に比べて信念バイアス効果を受けやすく、子供は不一致条件の推論成績が著しく悪いことを報告した。しかし、De Neys et al. (2009)は、行動指標 (正答率)しか調べておらず、その神経基盤については明らかにされていない。本研究は、成人被験者において用いられてきた NIRS 実験 (Tsujii & Watanabe, 2009, 2010)と基本的に同じパラダイムを用いて、小学生児童 (11・12 歳)が推論課題を行っているときの前頭葉下部の活動を調べる。

方 法

被験者

11-12歳の日本人小学生16名が参加した(男9名,女7名)。平均年齢は11.25歳(SD=0.45)で、全員右利きで正常な視力、または矯正視力を有していた。

手続き

定言的三段論法の問題を64問用意した。32問が一致条件(16: valid-believable, 16: invalid-unbelievable)で、残りの32問が不一致条件(16: valid-unbelievable, 16: invalid-believable)であった。問題文はラップトップPCの画面にて被験者に提示し、三段論法の妥当性を判断してもらった。反応はマウスで行った。各試行の制限時間は20秒であった。本研究では、制限時間以内であ

れば反応を自由に変えることができ、制限時間内に反応がない場合は自動的に誤答とし、被験者には問題文の意味内容ではなく、推論の妥当性を判断するように強調した。本研究では NIRS 測定の都合上、ブロックデザインを用いた。一致条件と不一致条件はそれぞれ 4 試行ずつブロックを構成し、一致条件ブロックと不一致条件ブロックが交互に提示されるように構成した。既に幾つかの先行研究がこのブロックデザインを用いて、不一致条件における前頭葉下部の活動を検出し、成人被験者の信念バイアス推論の神経相関を明らかにしており (Tsuji & Watanabe, 2009, 2010; Tsujii et al., 2010b), 本研究でも基本的に同様な実験デザインを用いた。

NIRS 測定

推論課題遂行中の前頭葉下部の酸化ヘモグロビン濃度変化 (Δ oxy-Hb)を、2 チャンネル携帯型 NIRS (浜松ホトニクス製; PNIRS-10)を用いて測定した。この NIRS 装置は、 $735 \pm 15\text{nm}$, $810 \pm 18\text{nm}$, $850 \pm 20\text{nm}$ の三波長の近赤外光を計測することにより、修正ピア-ランバート側を用いて酸素化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンの濃度変化を推定している。NIRS プローブ (浜松ホトニクス製; P-Probe1)は左右両半球の下前頭回にそれぞれ配置した。国際 10-20 法の F7 と F8 は、下前頭回に相当することが過去の研究より知られている (例: Jurcak et al., 2005, 2007; Okamoto et al., 2004), 本研究では NIRS プローブの検出器 (detector)を左半球は F7, 右半球は F8 の近傍に置くようにした。サンプリング周波数は 10.2 Hz (97.8 ms/data)であった。一致条件ブロックをベースラインとして、不一致条件ブロックの Δ oxy-Hb を算出し、左右両半球において加算平均を行った。

結 果

行動指標

一致条件 (valid-believable, invalid-unbelievable) と不一致条件 (valid-unbelievable, invalid-believable)の正答率を図 2 にまとめた。論理的な妥当性 (validity)と信念 (believability)の 2 要因分散分析を行ったところ、有意な交互作用が認められた ($F(1, 15) = 59.63, p < 0.01$)。単純主効果の検定を行ったところ、Believable な条件では妥当な問題文の方が、正答率が高く ($F(1, 30) = 45.26, p < 0.01$)、Unbelievable な条件では妥当でない問題文の方が、正答率が高かった ($F(1, 30) = 21.61, p < 0.01$)。つまり、一致条件は不一致条件よりも正答率が有意に高く、強い信念バイアス効果が認められた。交互作用の有意性とは対照的に、妥当性の主効果 ($F(1, 15) = 2.36, p = 0.15$)と信念の主効果 ($F(1, 15) = 0.18, p = 0.68$)は有意でなかった。

生理指標

不一致条件ブロックにおける酸化ヘモグロビン濃度の変化量 (Δ oxy-Hb)を左右両半球について求めたところ、右半球の平均値が 7.21 ($SD = 7.66$)で、左半球が 6.53 ($SD = 5.09$)であった。対応ある T 検定を行ったところ、両半球には有意差が認められなかった ($t(15) = 1.06, p = 0.30$)。なお、本研究では Δ oxy-Hb の単位は、通常ミリモルなど濃度単位を用いることが多いが、修正 Beer-Lambert

則を用いたヘモグロビン濃度推定には、各被験者の光路長 (optical path-length)が未知であるなどの問題点が指摘されているため、本研究では任意単位 (arbitrary unit)とした。

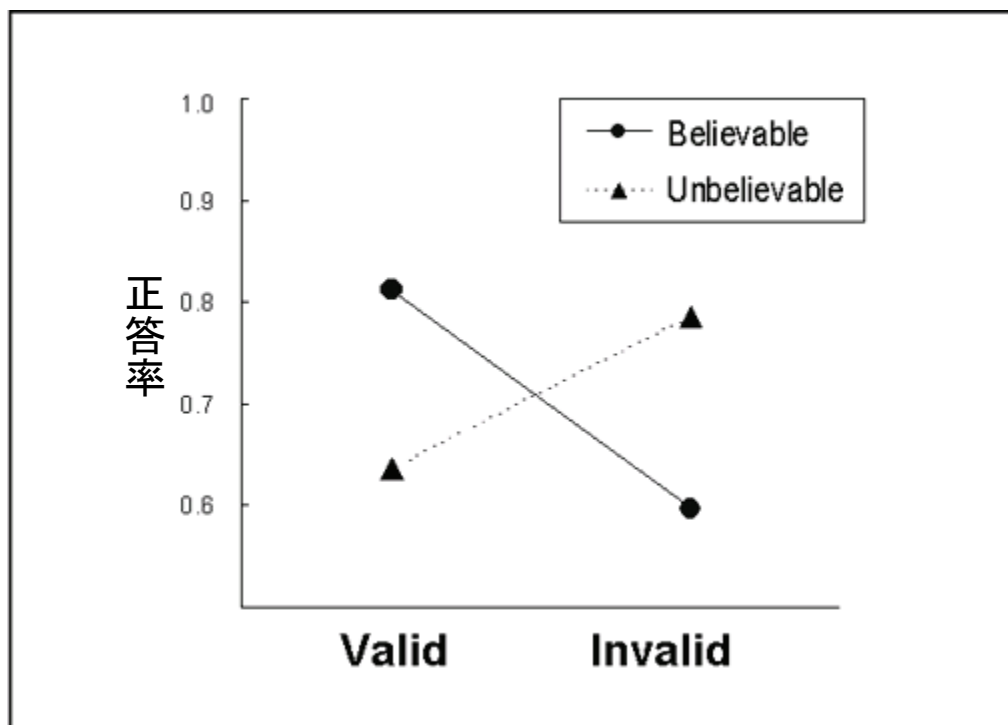


図2 推論課題の行動指標 (正答率)

考 察

本研究の目的は、小学校高学年 (11-12 歳)の児童の演繹的推論に及ぼす信念バイアス効果を調べ、近赤外分光法 (NIRS)を用いてその神経基盤を明らかにすることである。行動指標の分析結果から、論理的妥当性と信念が一致している時 (valid-believable, invalid-unbelievable)は、一致していない時 (valid-unbelievable, invalid-believable)よりも正答率が高く、小学生児童の推論に強い信念バイアス効果が起きることが明らかになった。この結果は、同じ年代 (11-12 歳)の信念バイアス効果を調べた行動研究 (De Neys et al., 2009)と一貫するもので、De Neys らは、子供は大人に比べて信念バイアスを受けやすいことを主張している。しかし、De Neys らは行動指標しか調べておらず、脳活動については明らかになっていない。そこで、本研究では NIRS を用いて子供が信念バイアス推論を行っている時の前頭葉下部の活動について検討した。

演繹的推論に及ぼす信念バイアス効果に関する最近の脳画像研究の結果は、信念バイアスを防ぎ、論理的な推論を行うためには、右半球の前頭葉下部が重要な役割を果たすことを示唆してきた (Goel & Dolan, 2003; De Neys et al., 2008; Tsujii & Watanabe, 2009, 2010; Tsujii et al., 2010a, 2010b,

2011b)。例えば、Tsuji & Watanabe (2009, 2010)は、前頭葉下部の活動の右半球優位が強い被験者ほど不一致条件の推論成績が良いこと明らかにし、二重課題やタイムプレッシャーを与えて右前頭葉下部の活動を抑制すると推論成績が低下することを示した。また、Tsuji et al. (2010a, 2011b)は、経頭蓋磁気刺激 (TMS)で右半球の前頭葉下部の活動を抑制すると不一致条件の推論成績が著しく低下することを明らかにした。彼らの実験では、左半球の前頭葉下部を磁気刺激で抑制しても、不一致条件の推論成績に低下は起こらなかった。これらの結果は、右半球の前頭葉下部の活動が不一致条件の推論において決定的な役割を果たすことを示唆している。

本研究の NIRS 分析結果は、成人被験者の脳画像研究の結果とは対照的に、子供が不一致条件の推論を行っている時の前頭葉下部の活動には有意な半球差がないことを示した。年少児の脳活動に半球非対称性が見られない現象は現在まで数多く報告されており、例えば Tsuji et al. (2009)は、空間的ワーキングメモリ課題を行っているときに右半球優位性は 5 歳児では認められず、発達に応じて半球非対称性が出現する結果を報告している。本研究の結果は、演繹的推論課題の遂行における半球非対称性は、小学生 (11-12 歳)の段階ではまだ明らかな右半球優位性が出現していないことを示唆するものである。一般に、右半球の前頭葉下部は抑制機能 (inhibitory function)と深い関わりがあることが指摘されている (例: Aron et al., 2004; Boecker et al., 2007; Tsuji et al., 2011a)。例えば、Tsuji et al. (2011)は、Go/No-Go 課題遂行中の前頭葉下部の活動を NIRS で計測したところ、右半球優位な被験者ほど No-Go 試行の遂行成績が良いことを示した。De Neys et al. (2009)は、子供は大人に比べて抑制機能が発達しておらず、そのために信念バイアスを受けやすく、不一致条件の推論成績が悪くなることを主張している。不一致条件の推論を適切に行うためには、不必要な意味処理ヒューリスティクスを抑制する必要がある。子供の前頭葉下部の活動には右半球優位が見られないという本研究の結果は、こうした主張の生理学的裏づけを与えるものであると考えられる。

本研究の結果は、高齢者が推論課題を行っている時の前頭葉下部の活動を調べた Tsuji et al. (2010b)の先行研究の結果と良く似た結果のパターンを示している。Tsuji et al. (2010b)の実験では、高齢者が不一致条件の推論を行っている時の前頭葉下部の活動には半球非対称性が見られないことが示されている。子供と同様に、高齢者も、若年成人に比べて抑制機能が弱く、推論時に信念バイアスを受けやすいことが指摘されている (例: De Neys et al., 2009)。子供と高齢者における信念バイアスの現象が共通した神経基盤によるものなのかどうかは興味深い研究テーマである。今後の研究では、子供が推論を行っている時の神経活動と、高齢者の神経活動の類似点と相違点をさらに詳しく調べることが必要となるであろう。

本研究は、小児の推論の神経基盤について調べた最初の研究である。本研究の結果から、成人被験者とは異なる神経活動で小児が推論を行っている可能性が示唆された。現段階の問題点としては、(1) 被験者数が少なく統計的検出力が低いこと、半球非対称性の有無について強い結論が言えないことと、(2) 単一の発達段階 (11-12 歳児)しか調べておらず、論理的思考の神経基盤の発達の变化を調べるには中学生や高校生など多様な発達段階の被験者のデータを収集する必要があること等が挙げられる。近赤外分光法 (NIRS)は発達神経科学に適した脳画像装置であり、今後の研究の進展により、論理的思考の神経基盤の発達の变化の解明が進むことが期待される。

引用文献

- Aron, A.R., Robbins, T.W., Poldrack, R.A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 170-177.
- Boecker, M., Buecheler, M.M., Schroeter, M.L., Gauggel, S. (2007). Prefrontal brain activation during stop-signal response inhibition: an event-related functional near-infrared spectroscopy study. *Behavioural Brain Research*, 176, 259-266.
- De Neys, W. (2006a). Automatic-heuristic and executive-analytic processing during reasoning: Chronometric and dual-task considerations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59, 1070-1100.
- De Neys, W. (2006b). Dual processing in reasoning: two systems but one reasoner. *Psychological Science*, 17, 428-433.
- De Neys, W., Vartanian, O., & Goel, V. (2008). Smarter than we think: when our brains detect that we are biased. *Psychological Science*, 19, 483-489.
- De Neys, W., & Van Gelder, E. (2009). Logic and belief across the lifespan: the rise and fall of belief inhibition during syllogistic reasoning. *Developmental Science*, 12, 123-130.
- Evans, J.B.T. (2008). Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 255-278.
- Goel, V. (2007). Anatomy of deductive reasoning. *Trends in Cognitive Science*, 11, 435-441.
- Goel, V., Dolan, R.J. (2003). Explaining modulation of reasoning by belief. *Cognition*, 87, B11-22.
- Jurcak, V., Okamoto, M., Singh, A., Dan, I. (2005). Virtual 10-20 measurement on MR images for inter-modal linking of transcranial and tomographic neuroimaging methods. *Neuroimage*, 26, 1184-1192.
- Jurcak, V., Tsuzuki, D., Dan, I. (2007). 10/20, 10/10 and 10/5 systems revisited: their validity as relative head-surface-based positioning systems. *Neuroimage*, 34, 1600-1611.
- Minagawa-Kawai, Y., Mori, K., Hebden, J.C., Dupoux, E. (2008). Optical imaging of infants neurocognitive development: recent advances and perspectives. *Developmental Neurobiology*, 68, 712-728.
- Minagawa-Kawai, Y., Matsuoka, S., Dan, I., Naoi, N., Nakamura, K., Kojima, S. (2009). Prefrontal activation associated with social attachment: facial-emotion recognition in mothers and infants. *Cerebral Cortex*, 19, 284-292.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *Neuroimage*, 21, 99-111.
- Tsujii, T., Masuda, S., Yamamoto, E., Ohira, T., Akiyama, T., Takahashi, T., & Watanabe, S. (2009). Effects of sedative and non-sedative antihistamines on prefrontal activity during verbal

- fluency task in young children: a near-infrared spectroscopy (NIRS) study. *Psychopharmacology*, 207, 127-132.
- Tsujii, T., Masuda, S., Akiyama, T., & Watanabe, S. (2010a). The Role of inferior frontal cortex in belief-bias reasoning: an rTMS study. *Neuropsychologia*, 48, 2005-2008.
- Tsujii, T., Okada, M., & Watanabe, S. (2010b). Effects of aging on hemispheric asymmetry in inferior frontal cortex activity during belief-bias syllogistic reasoning: a near-infrared spectroscopy study. *Behavioural Brain Research*, 210, 178-183.
- Tsujii, T., Sakatani, K., Masuda, S., Akiyama, T., & Watanabe, S. (2011a). Evaluating the roles of the inferior frontal gyrus and superior parietal lobule in deductive reasoning: an rTMS study, *Neuroimage*, 58, 640-646.
- Tsujii, T., Sakatani, K., Nakashima, E., Igarashi, T., & Katayama, Y. (2011b). Characterization of the acute effects of alcohol on asymmetry of inferior frontal cortex activity during a Go/No-Go task using functional near-infrared spectroscopy, *Psychopharmacology*, 217, 595-603.
- Tsujii, T., & Watanabe, S. (2010). Neural correlates of belief-bias reasoning under time pressure: a near-infrared spectroscopy study. *Neuroimage*, 50, 1320-1326.
- Tsujii, T., & Watanabe, S. (2009). Neural correlates of dual-task effect on belief-bias syllogistic reasoning: a near-infrared spectroscopy study. *Brain Research*, 1287, 118-125.
- Tsujii, T., Yamamoto, E., Ohira, T., Takahashi, T., & Watanabe, S. (2010c). Antihistamine effects on prefrontal cortex activity during working memory process in preschool children: a near-infrared spectroscopy (NIRS) study. *Neuroscience Research*, 67, 80-85.
- Tsujii, T., Yamamoto, E., Masuda, S., & Watanabe, S. (2009). Longitudinal study of spatial working memory development in young children. *Neuroreport*, 20, 759-763.