解　説

脳とこころ

泰　羅　雅　登*

要旨

二元論の立場をとる人を除いて，人の「こころ」と「脳」の間には密接な関係があると考えている人がほとんどであろう．しかし，密接な関係とは？と聞かれると，かなり漠然としたものでしかないことに気がつくであろう．21 世紀は脳の世紀といわれるが，我々，脳研究者は「こころ」の問題にどこまで答えることができるのであろうか．見回してみると，やはり直接的に触れた研究は残念ながらほとんどない．それにもかかわらず，脳科学が「こころ」に迫ったといわれる理由はなんだろうか．脳研究の成果とその向こうに見え隠れする「こころ」について，考えてみる．

1．はじめに

電子版の「広辞苑」の「こころ」の項目を見ると，『人間の精神作用のもとになるもの．また，その作用.』とあり，下位項目には『１．知識・感情・意志の総体．２．思慮．おもわく．３．気持．心持．４．思いやり．なさけ．５．情趣を解する感性．６．望み．こころざし．７．特別な考え．裏切り，あるいは晴れない心持.』（岩波書店　広辞苑　第５版）とある．これを見ると，「こころ」には純粋に自己の内的な状態にかかわる部分と，自己以外の他との関わりによる部分があることがわかる．

最近の脳研究は「こころ」の問題にふれる様になってきた，というような記事を最近の新聞やメディアで見かける方も多いかと思う．実際に脳科学に携わる研究者としては，そうだなと思う面がないわけではない反面，本当にそうかなとも思う．「こころ」の問題は言うまでもなくとてつもなく大きな問題で，我々脳科学者が正面からぶつかって答えが出せるような問題ではない．それでも冒頭のような話が出てくるのはそれなりの理由がある．一つはヒトが認知的な活動を行っているときの脳の活動を視覚的に表現できる，これまでの手法に比べて比較的容易な研究手法が開発されたことである．もう一つは，覚醒した動物で，比較的複雑な仕事をしている時の脳の神経活動が記録できる様になり，その知見が蓄積されてきたことである．本稿では最近のこれらの研究結果を紹介しながら脳研究がどの程度「こころ」の問題に近づいているのかを考えてみたい．

2004 年 2 月 5 日受付
* 所属：日本大学総合科学研究所
勤務：日本大学大学院医学研究科応用システム神経科学
〒 173-8610　板橋区大谷口上町 30-1
Tel : 03-3972-8111 (内線 2231)　Fax: 03-3972-8292
E-mail : masato@med.nihon-u.ac.jp
キーワード：イメージング，サル

2．こころの理論

「こころの理論（Theory of Mind, ToM)」とは，「こころ」について，自己以外の他との関わりによる部分，つまり「相手の心の中を推測する」あるいは「他者が自分とは異なる意識を持つと考えることができる」能力のことを指している．1980 年代以降の発達心理学の重要なトピックスで，最近では自閉症を代表とする小児の発達障害の病態を考える上で，重要な理論とされている[1,2]．

よく使われる「こころの理論」のテスト課題に「サリーとアンのテスト」がある（図１）．これは「サリーとアンの二人が部屋で遊んでいます．サリーは自分のおもちゃをかごの中に入れて部屋を出ました．アンは，サリーがいない間にそのおもちゃを自分の箱の中に隠しました.」という状況設定を話やマンガ，人形劇で見せておいて「部屋に戻って来たサリーは，まず，どこをさがすでしょうか？」という質問をするテストである．サリーはアンがおもちゃを動かした事実を知らないから，正答は「サリーのかご」であるが，３歳児でテストすると正答できる子供は少ない．つまり，３歳児は自分以外の視点，この場合はサリーの視点に立つことができないことを意味している．ちなみに４～５歳になると他人の視点に立つことができる様になる．また，自閉症の子供のほとんども正しく答えることができず，同年代のダウン症の子供よりも正答率は悪いことが報告されている．

この「こころの理論」についてイメージング研究が行

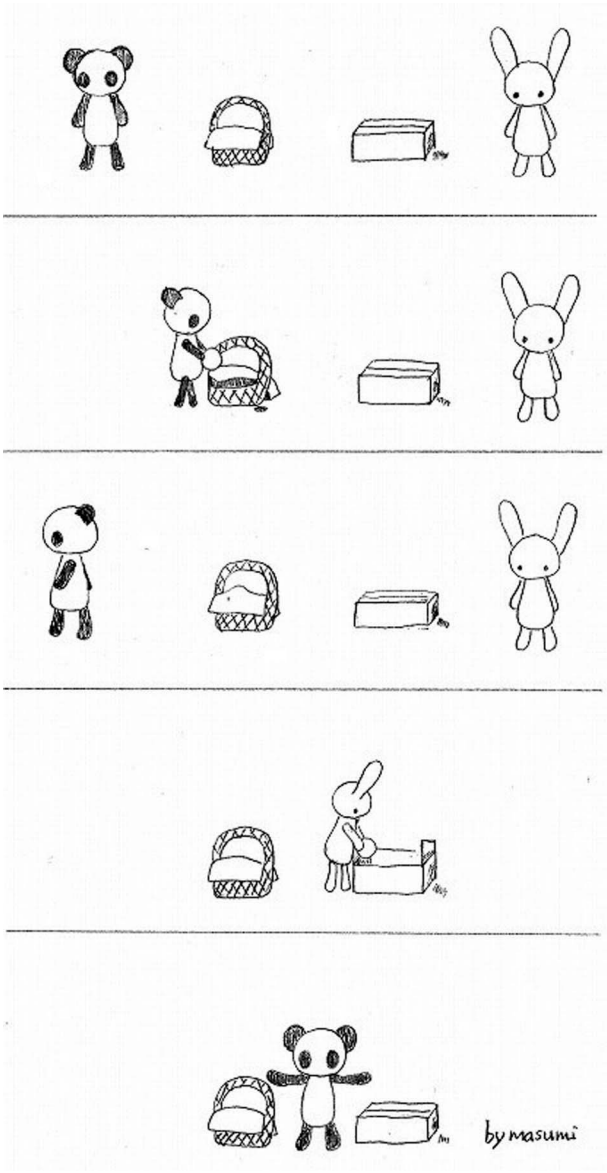


図１　アンとサリーのテスト
１．アン（ウサギ）とサリー（パンダ）が同じ部屋にいる．２．サリーはおもちゃをかごに入れて，３．部屋を出て行く．４．サリーがいない間にアンはおもちゃをかごから取り出して箱の中に入れる．５．サリーが戻ってきたとき，サリーはどこを探すでしょうか．

われている．その結果として３つの領域が特異的に活動することがわかってきた．１つは前頭前野の内側面の帯状回の前方部，傍帯状回，２番目は側頭葉の上側頭溝の後方部，そして３番目が側頭葉の先端部，側頭極である．興味深いのは，検査に使われた課題や，検査方法（視覚，聴覚など）に係わらず，「こころの理論」を調べる研究ではこの３つの領域が活性化されたことである．つまり，相手の心を推測するのに，この３つの領域が密接に関係していることがわかったのである．それぞれの領域の機能については解釈がなされているが，そのなかで，他者の「こころ」と



図２　傍帯状回の活動の模式図
この図は実際のイメージングの結果の図ではない．
傍帯状回はブロードマンの９／３２野に相当する．

の関係で最も注目されているのが傍帯状回である（図２）．Gallagher 達[3]はじゃんけんゲームを使って相手の意図を読むときに働く脳の領域について調べてた．まず彼らは３つの対戦ケースを用意した．いずれもコンピュータ画面で対戦するのであるが，１番目は相手が人間であるケース，２番目は相手はコンピュータであるが，あるルールをもって対戦してくるケース，３番目はやはり相手はコンピュータであるけれども，何のルールもなく，ただランダムにグー・チョキ・パーを選んで対戦してくるケースである．被検者には事前にどのタイプの対戦であるか知らされるので，あらかじめ心構えをもって対戦するようになる．つまり，被検者は最初のケースでは対戦相手のこころ（心理）を読もうとするし，２番目のケースではコンピュータを相手にルールを探そうとし，３番目のケースでは特に考えることなく対戦する．ところが，被検者にはこのように説明するのであるが，実際にはすべて内容は同じで，コンピュータがランダムにグー・チョキ・パーを選んで対戦する．大変興味深いのは，１番目と２番目のケースで脳の活動部位を比較すると傍帯状回にだけ活動部位が現れたことである．つまり，被検者は勝とうとして戦略を立てるわけであるが，相手が人間でその「こころ」を読もうとしたときにだけ傍帯状回が働いたわけである．他の二つの領域について，上側頭溝の後方部には相手の動きをとらえ，理解する機能があり，側頭極には記憶との照合を行う機能があるとされ，どちらかというと「こころの理論」の中では二次的な役割を果たしていると考えられている．

3．神経細胞活動と「こころ」

3.1 意志

1960 年代に Evarts[4] によって覚醒サルが課題を行っている間の神経活動が記録できる様になったことで，脳の神経活動と行動の相関をみながら様々な高次機能に関する知見が得られる様になった．初期の頃の研究は，神経活動との相関を容易に調べることができる，運動についての研究がさかんに行われた．そのなかで我々研究者が大変驚いたのは，こちらに動こう，あるいは動かそうという「意志」を表現する神経細胞が見つかったことである．Wise 達[5] は一次運動野の前方にある運動前野の神経細胞の機能を調べていた．一次運動野の神経細胞は多くが直接脊髄に投射しているので，筋肉の活動と，言い換えれば運動そのものとの相関がきわめて強いけれども，運動前野は高次運動野に属していて，その神経細胞の活動は運動そのものとの相関は強くはなかった．その中で，彼らはサルが運動を始める前に活動を始め，運動を始めると活動が止まってしまう神経細胞を見つけた（図３）．あたかも，運動を準備する，よーい，ドンのよーいの期間に活動するような神経細胞である．しかも，もう一つの大きな特徴は，単に運動の始まりを準備しているのではなく，その活動が，実際の運動が右に手を動かす運動か，左に手を動かす運動かで違っていたことである．つまり，ある神経細胞はサルが左に手を動かそうと準備しているときだけ活動するし，他の神経細胞は右に手を動かそうとするときだけ活動したのである，実験者はのちに「神経細胞の活動を見ていると，次にサルがどうしようとしているのかがわかるので，たまに，あ，こいつ次は間違った方向に手を動かすぞと予測できた」と述べている．この神経細胞の活動自身がサルの「意志」を直接表現しているのかどうかは別として，少なくともこの神経細胞の活動を通して，外面的には見ることができない，サルの「意志」あるいは「意図」が見て取れるのである．このような研究成果は，なにやら怪しげなヘルメットをかぶって脳の活動を見るとその人の考えていることがわかるという映画の 1 シーンがそれほど突拍子でないことを，その当時，思わせた．

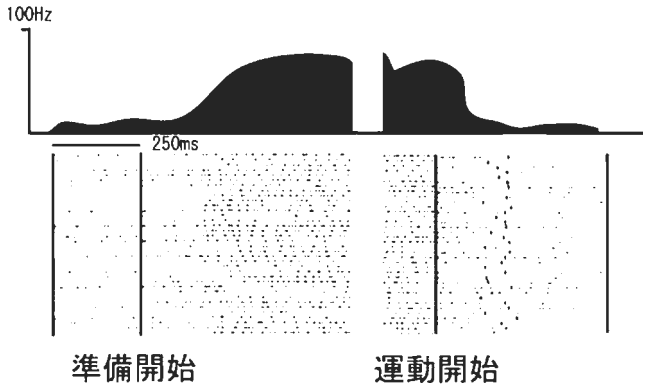


図３　運動前野の準備ニューロンの模式図
このニューロンは運動の準備を始めると活動をはじめ，実際に運動が始まると活動が停止する．右，あるいは左方向への手の運動の前にだけ活動する．（文献５を改変）

3.2 記憶

もう少し抽象的な脳機能と神経細胞の活動との相関については，記憶に関する研究がある．記憶は「こころ」そのものではないが，密接な関係にあることは言うまでもない．カナダの脳外科医 Penfield は重度のてんかんの患者さんに手術を行ったが，多くのケースで側頭葉を摘除する必要があった．しかし，側頭葉，特に左の側頭葉は言語機能を司っているので，むやみに摘除すると言語障害が残こることになる．そこで，Penfield は局所麻酔を使って患者の意識を保ったまま手術を行い，話をしている間に言語に関係した領域を刺激すると話が止ることを利用して，手術中に側頭葉を刺激して言語に関係した領域を区別するという方法を用いた．Penfield はこのときに，側頭葉に記憶と関係した領域があるのを見つけている[6]．その領域が刺激されると「何かが記憶に戻ってきます．センブンアップの建物とハリソンベーカリーが見えます」といった視覚的な記憶や，「誰かが歌を歌っています」といった聴覚的な記憶がよみがえってきた．このことは，我々の記憶が大脳の神経細胞に（大脳の神経細胞の活動に）蓄えられていることを示している．その後，ワーキングメモリー課題（呈示した図形や刺激の位置を短期間覚えておく課題）で，メモリーに蓄えている期間中ずっと活動する神経細胞が前頭連合野や側頭葉で見つかった (図４)[7,8] ことは有名である．

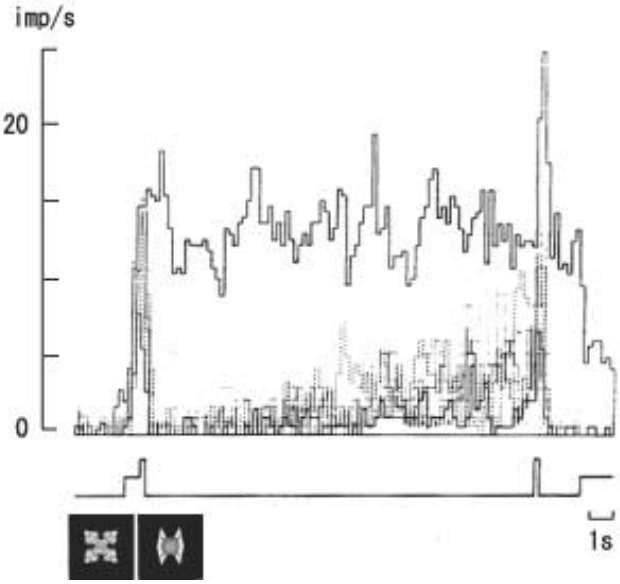


図４　図形の短期記憶に関係のある側頭葉の神経細胞
この神経細胞は一番下の二つの図形をしばらくの間覚えているときに，持続的に活動を続ける．（文献８を改変）

3.3 認識

知る，わかるということについてはどうだろうか．ここでは最近の我々の研究を紹介する．最近の我々の研究テーマは，世界がなぜ三次元的（立体的）に見えるかということである．これは一見簡単そうに見えて実は大変難しい問題である．眼球の水晶体の背後にあって光センサーの働きをしている網膜は平面なので，我々が実際に得ている視覚情報は，世界の二次元投影像にすぎない．ところが，我々が知覚している世界は三次元である．これは，脳が，網膜上に投影された二次元像を元に，物体の立体的な構造や，物体と物体の位置関係を計算しているからである．

立体視の問題は，心理学領域では古くから研究テーマとしてとりあげられ，たくさんの研究成果がでているが，脳内メカニズムについてはブラックボックスとして扱われてきた経緯がある．神経生理学の領域では，1980 年代に初期情報処理過程についての研究が詳しくなされ[9]，脳内には，両目が水平方向に少しずれた位置にあることから生じる網膜像のずれ（両眼視差）を検出する細胞があることが見つかり，脳が三角法を用いて奥行きを計算していることが明らかになった．しかし，視差検出のメカニズムがある程度わかった時点で，立体視についてはほぼわかったとされ，また，「立体的に見える」というその事実が明らかすぎることから認知的な脳内メカニズムについては手つかずの状態であった．繰り返しになるが，視差検出のメカニズムがある程度わかったことで問題が解決したわけではない．なぜなら，片目を閉じると，この方法で奥行きを計算することはできなくなるが，それでも世界は三次元的に見えるからである．それは，脳が単眼像から，両眼視差以外の手がかりを使って奥行きを計算しているということである．二次元画像である絵画や写真に奥行きを感じるのもこのためである．

我々は，以前に両眼視差を使って面の三次元的な傾きを検出する細胞を頭頂連合野で見つけた．使った刺激は図の様なランダムドットの刺激で（図５），まず，サルに一定

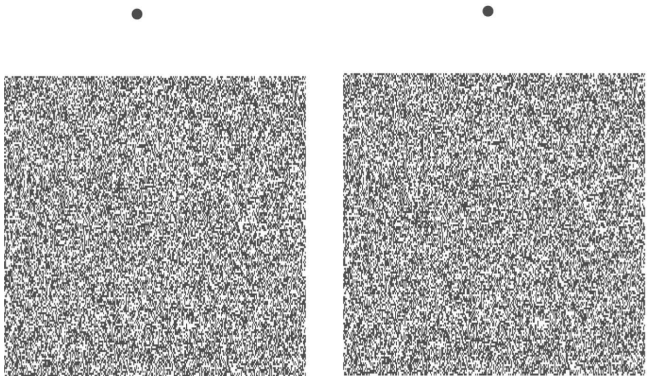


図５　ランダムドットステレオグラム
交差法（目をより目にする方法）で左右を融合すると左側が手前にある傾いた面が知覚できる．融合しないと，何も図形が見えないことに注意．

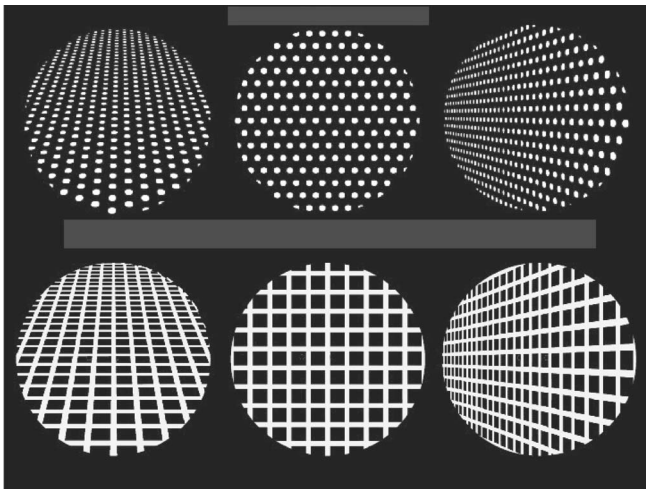


図６　テクスチャーで表現された面
上段はドットテクスチャー（Ｄｏｔ－ＴＰ），下段はラインテクスチャー（Ｌｉｎｅ－ＴＰ）．どちらも明確な面の傾きが知覚できる．視差が付いていないことに注意．（文献１２を改変）

の時間間隔をおいて連続的に呈示される二つの平面の傾きが同じか違うかをボタン押しで答えさせる課題（遅延見本合わせ課題）を訓練した．この課題を遂行中に，頭頂連合野から神経細胞の活動を記録したところ，多くの細胞が平面の傾きに選択的に反応し，視差の勾配の検出を行っていることがわかった[10]．遅延見本合わせ課題のトレーニングには半年から１年かかるが，我々がこの方法を用いたのには意味がある．つまり，単にサルに傾いた面を見せて神経細胞の活動を調べたのでは，サルは刺激の中の傾きという情報に着目してそれを認識しているかどうかがわからない．しかし，遅延見本合わせ課題ではサルは呈示された刺激の中から傾きの情報を取りだし，それを認識しないと正しい答えを出すことができないので，この条件で調べた神経細胞の活動は，サルが面の傾きを認識する神経過程とかなり相関が高いことがいえるのである．

この後我々は 1950 年代にアメリカの Gibson が発表した視覚心理学の理論に着目した[11]．彼は，自然界の物体には，たいていその表面に一様な模様（テクスチャー）があり，このテクスチャーのついた物体が奥行き方向に傾いていると，観察者から近い部分の模様は，密度が低く，大きく見え，逆に，観察者から遠い部分の模様は，密度が高く，小さく見えるので，このテクスチャーの「勾配」によって，奥行きを計算することができると指摘した(図６)．テクスチャーの勾配を検出する細胞があるのではないかという仮説を立て，前の研究と同様に，サルに一定の時間間隔をおいて連続的に呈示される二つのテクスチャー平面の傾きが同じか違うかをボタン押しで答えさせる課題を訓練し，頭頂連合野の神経細胞の活動を調べたところ[12]，多くの細胞がテクスチャー平面の傾きに選択的に反応し，テクスチャー勾配の検出を行っていることがわかった．また，これらの細胞

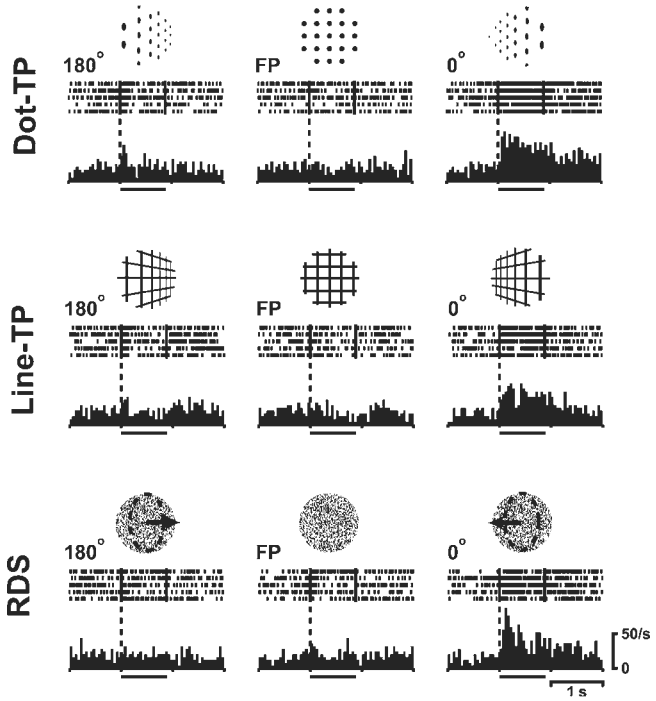


図７　頭頂連合野の神経細胞のテクスチャー刺激とランダムドット刺激に対する反応
この神経細胞は刺激の種類にかかわらず，右が手前に傾いた面に反応している．この活動は我々の自然な認知に近い．

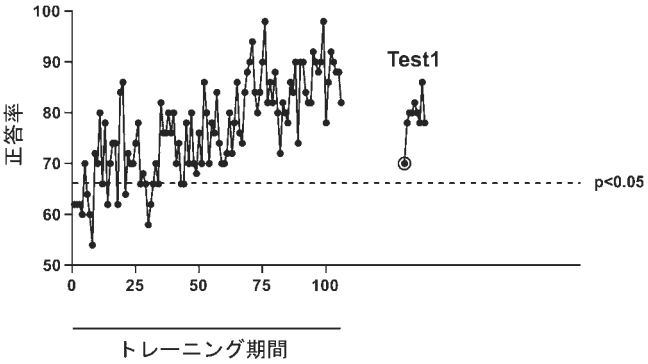


図８　サルの学習の転移の様子
トレーニング期間を経て課題の意味がわかると，それまでに見たことのない傾きの組み合わせでも（Test1）すぐできる様になる．サルは組み合わせを学習したのではなく，課題の意味をきちんと学習している．

は，テクスチャーパターンを変えても選択性は変わらなかったことから，単にテクスチャーパターンに反応しているのではないことがわかった．さらに，ランダムドットステレオグラムを使って同じ細胞を調べてみると，多くの細胞が，テクスチャー勾配と同時に両眼視差にも感受性をもっていることがわかった（図７）．先に述べた様に，我々は両眼視差から面の傾きを認識することもできるし，絵画的な手がかりからも面の傾きを認識できる．我々が見つけた頭頂葉の神経細胞はまさに我々が見て感じる，認識することに近い神経細胞といえる．

さて，同じ神経細胞がランダムドットステレオグラムやテクスチャーの異なる面に反応しても，なお，サルが我々と同じようにこれらの刺激から面の傾きを認識しているのかどうか疑問は残る．この点を明らかにするために，行動実験を行った（図８）．我々はランダムドットステレオグラムとテクスチャーで作られた面を見比べて，面の傾きが同じか違うかをすぐに判断できる．これは我々が刺激の属性によらない「傾き」という概念を持っていて，属性は無視してその概念だけを比較することができるからである．サルにも同じことがいえるのだろうか．サルに言葉で聞くわけにはいかないので，先ほど説明した遅延見本合わせ課題で，最初の刺激にはランダムドットステレオグラムを，二番目の刺激にはテクスチャーでできた刺激を使ってサルを訓練した．するとサルは全然質の違う刺激であっても，その中から傾きを認識して反応すればいいんだなということが徐々にわかってくる（図８トレーニング期間）．ただし，これだけでは，このランダムドットステレオグラムにはこのテクスチャーの刺激と，傾きを無視して何か別の特徴で二つの刺激をペアにして覚えている可能性がある．そこで，訓練が進んで課題ができる様になったときに，これまでは見たことがない傾きのペアで試してやるのである（Test)．もし，サルが刺激をペアで覚えていて，この課題ができる様になっていたら，新しいペアを使った課題は全くできないであろう．一方，サルが傾きを認識すればよいということを学習していれば，新しいペアにしてもそれほど苦労せずにできる様になるはずである．実際の結果は後者で，サルも我々と同様に，テクスチャーから面の傾きを認識する，我々と同様な認識の能力があることがわかった．この最後の部分は本題からは少しはずれる話かもしれないが，動物を使って認知・認識を調べようとするときには，いろいろな手順と苦労が必要なのである．

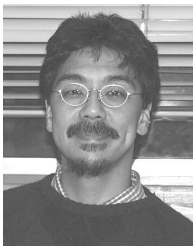
４．最後に

初めにも書いたが，「こころ」の問題はとてつもなく大きな問題で，正面からぶつかったのではとても勝ち目がないような問題である．しかし，ここ 10 年ほどの間に，神経科学者は脇を埋める様な研究成果を上げてきている．21 世紀に入ってからは，サルでの研究も「やる気」あるいは「先を読む」といったことを正面に掲げて論ずる論文も見受けられる様になってきた．まだまだ積み重ねは必要であるが，いつかは「こころ」問題の頂上に登ってみたいものである．

参考文献

1)　Frith, C.D. and Frith, U.: Interacting minds - a biological

basis, Science, 286(5445), 1692-5, (1999).
2) Gallagher, H.L. and Frith, C.D.: Functional imaging of 'theory of mind', Trends Cogn Sci., 7(2), 77-83, (2003).
3) Gallagher, H.L., Jack, A.I., Roepstorff, A. and Frith, C.D.: Imaging the intentional stance in a competitive game, Neuroimage, 16(3 Pt 1), 814-21, (2002).
4) Evarts, E.V.: Temporal patterns of discharge of pyramidal tract neurons during sleep and waking in the monkey, J Neurophysiol, 27, 152-71, (1964).
5) Weinrich, M. Wise, S.P.: The premotor cortex of the monkey, J Neurosci, 2(9), 1329-45, (1982).
6) Penfield, W. and Jasper H.: Epilepsy and the functional anatomy of the human brain, Little, Brown and Company, (1954).
7) Funahashi, S., Bruce, C.J. and Goldman-Rakic, P.S.: Mnemonic coding of visual space in the monkey's dorsolateral prefrontal cortex, J Neurophysiol, 61(2), 331-49, (1989).
8) Miyashita, Y. and Chang, H.S.: Neuronal correlate of pictorial short-term memory in the primate temporal cortex, Nature, 331(6151), 68-70, (1998).
9) Poggio, G.E.: Mechanisms of stereopsis in monkey visual cortex, Cereb Cortex., 5(3), 193-204, (1995).
10) Taira, M., Tsutsui, K.I., Jiang, M., Yara, K. and Sakata, H.: Parietal neurons represent surface orientation from the gradient of binocular disparity, J Neurophysiol., 83(5), 3140-6, (2000).
11) Gibson, J.J.: The perception of the visual world, Houghton Mifflin Company, (1950).
12) Tsutsui, K., Sakata, H., Naganuma, T. and Taira, M.: Neural correlates for perception of 3D surface orientation from texture gradient, Science, 298(5592), 409-12, (2002).



泰羅　雅登（たいら　まさと）
1985 年東京医科歯科大学大学院歯学研究科博士課程修了．同年（財）東京都神経科学総合研究所流動研究員，1987 年日本大学医学部助手，同助教授を経て，現在，日本大学総合科学研究所助教授．その間，米国 Johns Hopkins 大学客員研究員（兼任），米国 Minnesota 州立大学 客員講師（兼任）. 専門は認知神経生理学. サルを使ったニューロン活動の記録実験と fMRI を使ったヒトの脳機能マッピングの実験で高次の認知機能の脳内メカニズムを研究中.