



# 匂いの脳内情報処理

## —匂いの VR 技術に向けて—

外池光雄

産業技術総合研究所



### 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) は、現在、視聴覚を中心に幅広い分野で研究が進められており、またそれらを応用した技術開発が種々の分野に展開されている。実際、視覚や聴覚の世界においては、3D 画像や、立体的な音を現在の情報通信システムに載せて遠隔伝送できるし、また送られてきた伝送情報から、元の画像や音声を極めて正確に、リアルタイムに再現することも可能となっている。他の感覚系においても、最近では、例えば触覚などの体性感覚に対するバーチャルリアリティ技術が研究されてきており、ロボットの手が物を握った時の圧力、接触、把持の状況を VR 情報に取り込み、例えば手術ロボットへ適用するなどの研究技術開発が行われている。

しかしながら、感覚系の中で嗅覚や味覚の感覚については、これまで、バーチャルリアリティへの試みがあまり行われてこなかった。この原因の一つには、匂いや味の刺激の主体が化学物質であるため、このような化学感覚については、他の感覚系のように物理的な刺激を制御するには簡単に取り扱うことができなかったことがあげられる。この問題は、後に述べるように刺激手法の問題や、センサー開発などの技術的な困難性にも関係していたように思われる。

本報では、このような状況を踏まえ、匂いの脳内情報処理に関する研究の現状と匂いの VR 技術開発への展望を述べる。

### 2. 匂いの VR 技術の課題とは？

匂いのバーチャルリアリティ技術を大別すると、匂い刺激を実験対象者に実際に提示した時に起こる生体側の反応、つまり、我々の鼻で匂いを嗅いで受容する受容変換機構の問題と、匂いを大脳で知覚・認知して、「これは〇〇の匂いだ」と認識する脳内情報処理の問題とがある。

ここでは、匂いが脳内でどのように情報処理されているかという脳の中核情報処理について検討する。

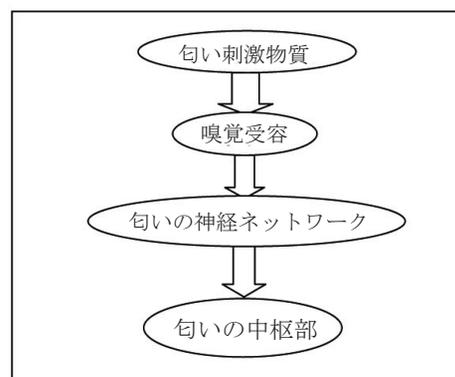


図 1 匂いの生体情報処理の図

#### 2.1 匂いの刺激法と刺激装置

バーチャルリアリティに限らず、一般に匂いの研究、匂いの実験における重要な技術上の課題に、匂いの刺激方法 (呈示方法)、及び匂い刺激装置の問題がある。

これまでに幾つかの匂い刺激法 (呈示法) が試みられ

てきたが、ここでは筆者ら [1] が、主に匂いの脳波 (EEG)、脳磁場 (MEG) 計測の実験に用いるために独自に開発してきた匂い刺激法、及び刺激装置の紹介を行う。

(1) 呼吸同期式匂い刺激法と受動的匂い刺激装置：

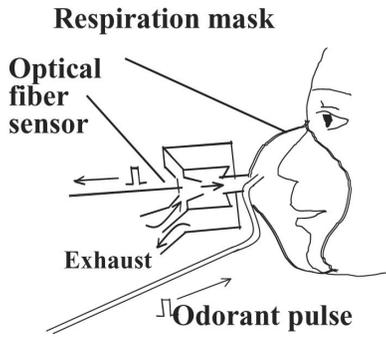


図2 呼吸同期式匂い刺激法 (blast 法)

これは、呼吸用のマスクを改造し、リップ弁部に呼吸を検出する光ファイバセンサーを取り付けたもので、これにより被験者の呼吸の吸入期に同期して、匂いパルスを用いたテフロンチューブを用いて鼻腔内に注入刺激する。

(2) 匂いスニффイング法と能動的匂い刺激装置：

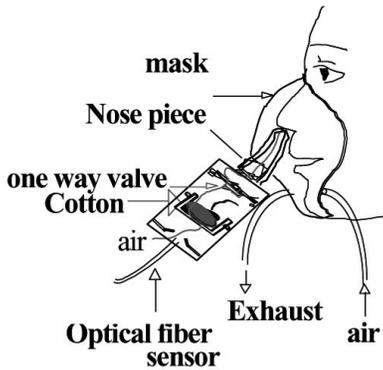


図3 匂いのスニッフイング法 (能動的匂い刺激法)

これは、マスクにぶら下げて取り付けられた匂いボトル容器内の綿に含ませた匂いを、自分自身の鼻でスニッフイングした時のみ、1方向弁を用いて鼻腔内に送って能動的に匂い刺激する。

2.2 匂いセンサー開発の著しい進展

匂いが生体に受容される受容変換機構の研究については、本報で倉橋が詳細に述べているように、最近、画期的な進展があった。これによって従来、未知であった匂いの受容機構の全容がいよいよ解明されるように

なってきた。このような受容機構研究の発展は、匂いセンサー開発にも大きな影響を与え、事実、これまでは存在しなかった新しい原理に基づく匂いセンサーが、近年、工学的に続々と開発されてくるようになった。これら新型の匂いセンサーの特徴は、昔のものとは違って、生体の匂い受容に極めて近いもの、あるいは中には、一部分において生体の感度以上に高感度なセンサーまでも既に開発されるようになってきたことである。つまり、これら最先端技術に支えられた新しい匂いセンサーの実現は、現実刺激した種々の匂いを、あたかも動物や人間の鼻が匂いを捉えるように匂いの情報を瞬時に捕らえ、且つ、それらの信号を電気信号に変換して伝送する技術が現実可能となってきたことを意味するものである。

3. 脳神経によって伝達・処理される匂いの情報

3.1 アカゲザルの脳における匂いの中枢部位

一般に人間が感覚器を介して捉らえた種々の感覚情報は神経を通じて人間の脳に伝達・投影され、脳において知覚・認識されている。もちろん匂いも例外ではなく、嗅覚神経によって匂いの情報が脳に送られ、匂いの中枢部位において情報処理されていることは間違いない。図4に示すように人間に近いアカゲザルにおける神経生理学的研究によって匂いの脳内神経路と脳内における二つの匂い中枢部位が明らかにされたが、人間における匂いの中枢部位の研究は遅れていた。人間の匂いの神経経路や匂いの中枢部位が研究されるようになったのは、ごく最近のことである。

高木ら [2] によって研究された無麻酔のアカゲザルの匂い刺激に反応する脳細胞のユニットレコーディングに

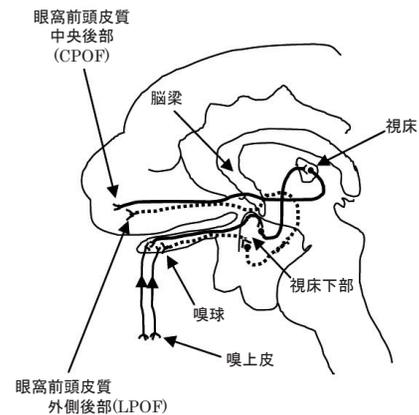


図4 アカゲザルの嗅覚神経経路と二つの匂い中枢部位 (Takagagi SF より引用、一部改変)

関する膨大な神経生理学研究によって、嗅球以降の嗅覚神経路は視床下部を經由して前頭眼窩外側後部 (LPOF) 部位に投射する神経路 (図中の破線) と、視床の背内側核を經由して前頭眼窩皮質中央後部 (CPOF) 部位に投射する神経路 (図中の実線) の二つの経路が存在することが明らかとなった。この研究の結果から、サルの大脳前頭葉の深い部位 (眼窩野) には、2 箇所にも嗅覚中枢が存在することが証明され、LPOF の中枢部位では、匂いの識別処理が行われており、一方、CPOF の中枢部位では、匂いの統合処理が行われている可能性が示唆されている。

### 3.2 脳磁図による人間の脳の匂い中枢部位特定

アカゲザルの脳内の匂い神経路、匂い中枢部位は前述のように明らかになったが、人間の脳における嗅覚神経路、及び匂いの中枢部位は、依然、未解明であった。そこで、我々は [1]、脳磁図 (magnetoencephalography: MEG) を用いて人間に対する匂いの研究を推進し、図 5 に示すように人間の匂いの中枢部位の特定を行った。

## 4. 匂いの知覚と認知の脳内情報処理

### 4.1 匂いの知覚機能に関する脳内の情報処理

人間の匂いの知覚に関する研究では、我々は前述の呼吸同期式匂い刺激法 (blast 法) を用いて、匂いを被験者の呼吸に同期させて鼻腔内に注入刺激し、その匂い知覚応答を脳磁図 (MEG) 計測によって記録し・解析した。その結果、図 5 に示したように、大脳の左右両側の前頭眼窩野近辺の部位から応答活動が記録され、それらの信号源推定によって、主に刺激鼻腔側と同側の対側大脳半球が優位 (同側優位) ながら、両側に応答が見られ、これらの結果、求められた嗅覚中枢部位は既にア

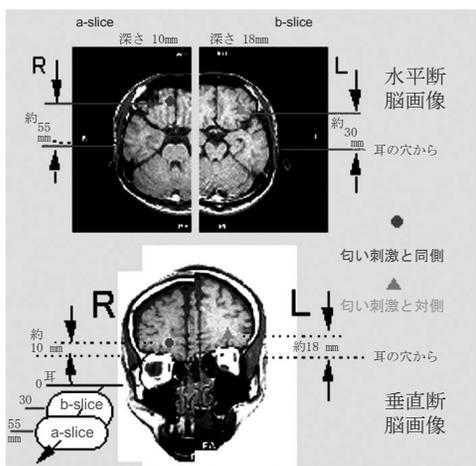


図 5 匂いの MEG 実験によって求められた人間の嗅覚中枢部位の特定

カゲザルの生理学実験によって得られている図 4 に示した応答部位と、極めて良く類似した部位となった。匂いの知覚機能に関する中枢情報処理、つまり、匂いの識別に関する知覚の情報処理機構はこのように明らかになったが、さらに匂いの認知機能を調べるため、以下のような実験を行った。

### 4.2 匂いの認知に関する脳内の情報処理

次に我々は [3]、2 種類の匂い (例えば快い匂いと不快な匂いの 2 種類) を用いて匂いの認知に関する MEG 実験と解析の研究を実施した。これは、一般にオドボール実験課題 (odd ball task) といわれている実験課題であるが、異なる 2 種類の匂い刺激は、被験者にランダム提示されるが、呈示確率が異なり、稀に刺激される匂い (rare 刺激) と頻繁に刺激される匂い (frequent 刺激) とが用いられる。今回はこの呈示比率は 1:3 とした。

被験者には稀に来る匂いを target 刺激として注目させ、その呈示回数数を数えるように指示した。このようなオドボール実験課題では、一般に認知応答 (cognitive response) として、P300m の事象関連応答が記録されている。今回の我々の実験の結果、稀な匂いの target 刺激に注目させることによって、匂いの認知に関わる脳磁界応答として P300m の応答を初めて記録することに成功した。この応答部位は、上側頭部、あるいは側頭部深部の島皮質 (insula) 部位周辺に求められ、応答時間は刺激後、約 500 ms の潜時で、第 3 番目の応答ピークとして観測された (図 6 参照)。

以上の結果は、これまで、単独の匂い刺激による blast 法の実験の応答で得られていた両側の対側大脳前頭眼窩野部に求められた匂い知覚に関する中枢部位と比較し

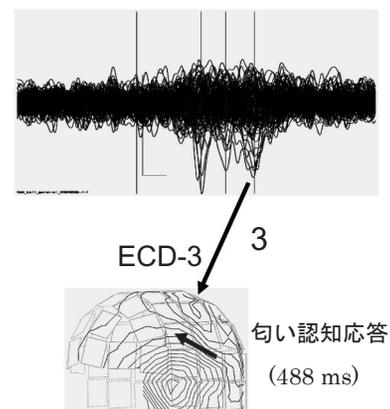


図 6 匂いの MEG オドボール実験によって得られた匂いの認知応答結果

て、神経活動の場所も、応答潜時も異なっているのに、匂い知覚の応答(約350~400ms)処理が行われた後に、「匂いの知覚」→「匂いの認知」へ処理の移行が行われ、その後に、引き続いて匂いの認知処理が(約500msの期間に)実施されたものと推察できる。

これは、匂いの知覚と認知に関する匂いの脳内の情報処理機構が初めて客観的に明らかになった実験と解析の実例[3]であろう。

### 5. 能動的嗅覚実験による匂いの認知応答

次に我々が実施した研究は、図2に示したような能動的嗅覚に関する研究である。従来の匂い研究では、動物実験も含めて、全て受動的な匂い刺激による実験研究がほとんどであり、能動的な研究の例はまだ極めて少ない。

我々も、今まで行ってきた人間に関する匂いの実験では、図1に示したような呼吸同期式匂い刺激法では、被験者の呼吸に同期させて、外から強制的に匂いを吹き付ける方法(blast法)を用いていた。他の研究者も手法は異なっても、ほとんどの匂い刺激は受動的匂い刺激法であった。

これに対して、Sobel N.ら[4]は、初めて被験者自らが匂いを自分の意志で積極的に嗅ぐスニフing法(sniffing法)を用いた実験を行い、その脳活動の応答をfMRIを用いた脳血流で計測する実験を行った。このSobel N.らの研究結果では、スニフing法によって無臭空気を吸う段階で、既に梨状葉の部位の活動が活性化されるとともに、さらに匂い刺激によって大脳右側の前頭眼窩野部が特に強く活性化された結果を報告している[5][6]。

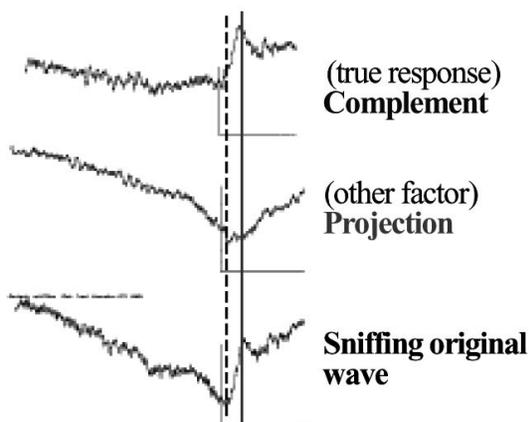


図7 能動的嗅覚実験の脳応答結果

そこで、我々も図3のようなスニフing法による能動的匂い刺激装置を試作して、被験者が自ら能動的に匂いを嗅ぐ実験を行い、この時の応答をMEGで計測する研究を実施した。

我々が行った匂いのスニフingによるMEG実験の結果、図7に示すような大きなMEG応答波形の変化が観測された。ところが、無臭空気によるスニフing時にも同様の大きなMEG応答波形が観測され、且つ、この応答波形変化が、実は既に刺激を行う前から開始されていることが明らかになった。そこでこの大きなMEG応答波形を詳細に分析したところ、この応答は被験者がスニフingを行う時の呼吸に伴って出現する運動準備活動に関する応答であることがわかった。そこで、図7に示すようにスニフingの運動準備活動に関わる成分を引き去れば、残った成分が純粋に匂いのスニフingのみによって活性化された匂い応答成分であると考えられる。

図7のsniffing original waveから、無臭空気に対するスニフingで得られた応答のother factor (projection)を引き去れば、true response(complement)として、匂い刺激(破線部分)後の応答が、潜時、約350~400msに応答ピークが認められた(実線部分)。この解析には主成分分析法(principal component analysis: PCA)を適用した。

また、このようにしてスニフingによる匂い刺激で求めた応答の信号源部位の推定を行った結果、3人の被験者ともに、図8に示すように右側の前頭眼窩野部にのみ信号源が推定され、明らかに右側優位の応答結果となった。これはZatorreら[7]のPETによる結果に類似する。

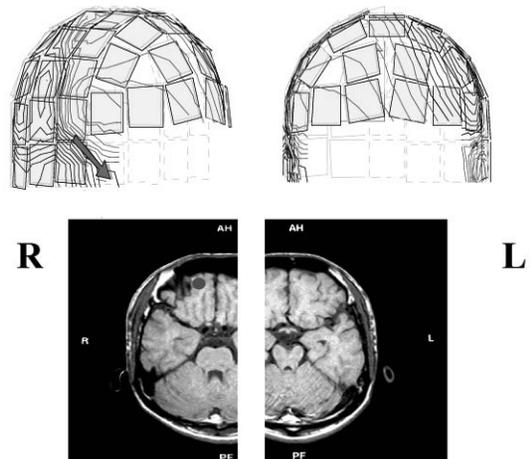


図8 スニフing法の能動的匂い刺激で得られた右側前頭眼窩野優位応答

以上のように、スニッフィングに伴う呼吸の運動準備活動の成分を除去した匂い応答成分に対する MEG 脳応答の部位は、Sobel N.らによる匂いのスニッフィングによる fMRI の実験結果と極めて類似する結果となった。

以上のように匂いのスニッフィング法による能動的匂い刺激の MEG 実験から [1], 右側の前頭眼窩野部が優位に活性化される結果を得た。しかし、このようなスニッフィングによる匂い応答の結果が、呼吸同期式 blast 法などの受動的匂い応答結果や、オドボール課題による匂いの認知活動応答などとは異なっている意味が、今のところ明瞭に説明できる状態ではない。恐らく、受動的な匂い刺激による被験者の意識や注意の状態が、スニッフィングによる能動的匂い刺激時による被験者の意識や注意状態と異なるために、脳の活性化状態、特に右側前頭部の活性化の状態が異なっている可能性が考えられる。これらの可能性とこの実験の追試、解析等については今後も引き続き研究を実施していく予定である。

## 6. 匂いの VR 技術開発への展望

最近、VR 関係者の方々の強い問題意識の高揚によって、匂いのバーチャルリアリティへの可能性が、ようやく議論できる状態になってきたことは大変重要なことであると考えられる。なぜなら、従来、手つかずであった匂いや味のような化学感覚の VR 技術が付加されることによって、真に五感の総ての感覚がバーチャルリアリティによって表現される時代に入ってきたことを示すからである。五感の総てが VR によって表現され、遠隔伝達され、変換・処理されて、また元の状態に再現された時、我々が実際如何なる現実感とリアリティの意識を持つかについては、恐らく、現在の VR 技術では想像できなかった世界がそこに実現されることであろう。映画のアナロジーでこのことを論ずる気はさらさらないが、例

えて言えばこれまでも興味ある映画で話題になった「Internet」や、「Six senses」, 「Matrix」のような世界においてさえもまだ体験されなかったような新しい VR 技術が、近い将来可能になって、私達に極めて有益な精神的世界と、これまでには実現が不可能とさえ思われていた全く新しい分野にも VR 技術の応用が開花する時代が間近に来ているように思われる。

本報告が、まだ極めて未熟な段階ながら、今後の匂いの VR 技術開発に対して何らかの議論の端緒になれば、筆者の存外の喜びである。

## 参考文献

- [1] Tonoike M & et al.: Proc. of 12th Biomag, pp.288-291 (2000)
- [2] Takagi FS: "Human Olfaction", University of Tokyo Press (1989)
- [3] Tonoike M & et al.: Journal Temp., Design, 3, pp.43-53 (2004)
- [4] Sobel N & et al.: Nature 392, pp.282-286 (1998)
- [5] Sobel N & et al.: J. Neurophysiol. 83, pp.537-551 (2000)
- [6] Sobel N & et al.: Chem. Senses, 25, pp.1-8 (2000)
- [7] Zatorre AJ & et al.: Nature 360, pp.339-340 (1992)

## 【略歴】

外池光雄 (TONOIKE Mitsuo)

独立行政法人 産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門 暮らし情報工学グループ 主任研究員

1967年静岡大学文理学部理学科物理学専攻卒業、同年通商産業省工業技術院電気試験所入所。1975年京都大学霊長類研究所神経生理部門招聘研究員、1985年大阪大学より工学博士。電子技術総合研究所企画室企画班長、研究室長、産業技術総合研究所副研究ラボ長等を経て現職。専門は生体医工学。著書『匂いの応用工学』(朝倉書店), 『匂いと脳・行動』(フクランス・ジャーナル社)など。