

1998.5

ISSN 0011-846X

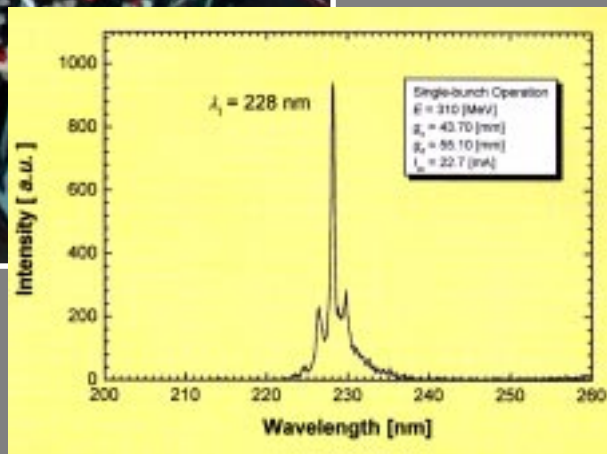
電総研ニュース

<http://www.etl.go.jp/publication-j/news-j.html>

1998年5月号 580号



小型蓄積リング NIJI-IV



- 誤差か行く先か? ~小脳の複雑スパイクの謎に迫る~
- 脳磁計測ではじめてわかったヒトのニオイの脳内活動場所
- サッカー実況システム MIKE
- 世界最短波長 (228nm) の自由電子レーザー発振を達成
- 受賞・お知らせ

誤差が行く先か？

～小脳の複雑スパイクの謎に迫る～

Function of complex spikes in the cerebellum

情報科学部 脳機能ラボ 北澤 茂

Neuroscience Lab, Shigeru Kitazawa

e-mail:kitazawa@etl.go.jp

Cerebellar Purkinje cells receive two kinds of synaptic inputs: numerous parallel fibre inputs from cerebellar granule cells, and just one climbing fibre synapse per Purkinje cell, from the inferior olive nuclear complex in the brain stem. Activation of the climbing fibre synapse results in a massive response, called the complex spike. These occur with ultra-low frequency and two rival theories have been developed to explain their role. We used information theory to analyse the link between complex spike firing and motor activity during arm movements. In reality, functions suggested by both theories seem to be combined: complex spikes early in a reaching movement encode the target location and those at the end encode the final error on completion of the movement, thus contributing to the long-term improvement of such movements.

生体が柔らかく、なめらかに体を動かすことができるのは、小脳のおかげである。この小脳が持つ運動学習と制御機能の鍵を握るのが、小脳のプルキンエ細胞の複雑スパイクと呼ばれる電気信号である。ところがこの信号は1秒に1回程度しか生じない上に、運動の最中に限って出現するわけでもない。せいぜい気まぐれに生じているようにしか見えないために、何を伝えて何に役立っているのか、論争が続いてきた。われわれはこの謎の解明に挑み、複雑スパイクが運動の開始時には運動の行く先を、終了時には運動の誤差を伝えていることを発見した。気まぐれな見かけによらず、周到に複数の情報を伝達していたのだ。この成果は4月2日発行のNatureに発表された。

誤差が行く先か？

筋肉をただ動かすためには大脳の運動野があれば足りるが、なめらかで正確な運動を獲得するには小脳が不可欠である(図1、左)。この小脳への入力系には苔状線維と登上線維の2種類がある(図1、中央)。苔状線維からの入力は顆粒細胞と平行線維を経て、プルキンエ細胞に「単純スパイク」と呼ばれる電気信号を高頻度(最高400-500 Hz)で発生させる(図1、右上)。一方、登上線維からの入力は、複雑な波形の電気信号、「複雑スパイク」を超低頻度(1 Hz程度)で引き起こす(図1、右下)。今からおよそ30年前にMarr, Albus, 伊藤らは、複雑スパイクは運動学習のための誤差信号だと予想した。ところが、その後複雑スパイクは運動の始めに出て、運動の開始を補助するという説も唱えられ、誤差を表現して学習に

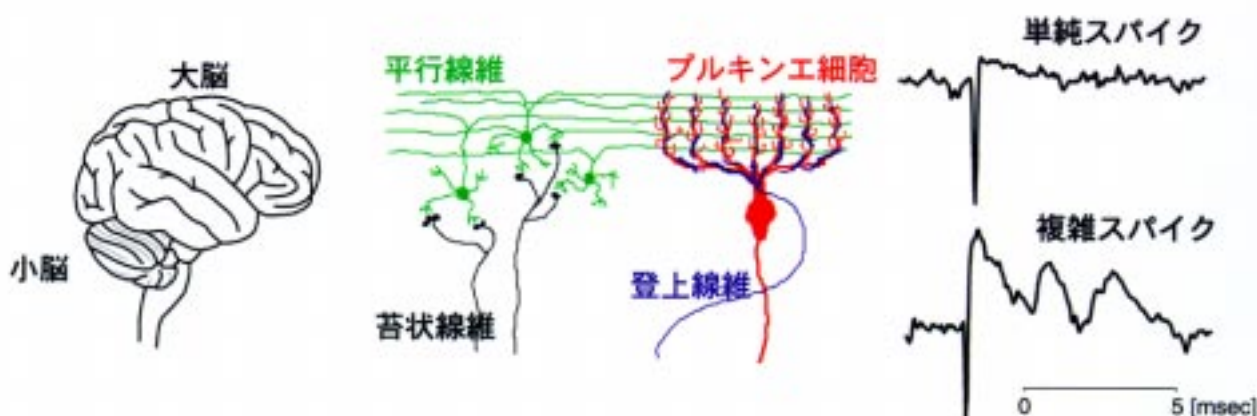


図1 小脳のプルキンエ細胞が発生する電気信号(スパイク)

貢献するという説との間で論争が繰り広げられてきた。もし、複雑スパイクが運動の開始に貢献するならば、複雑スパイクは運動の行く先に応じて発火しているだろう。一方、学習説の予想通り運動学習に貢献するならば、運動の誤差そのものを表現しているべきである。持続時間が1秒以下の速い運動では、せいぜい1発の複雑スパイクしか起こりえない。この1発は果たして運動の行く先を表現するために使われているのだろうか、それとも運動の誤差を表現するために使われているのか。これが、私たちの問である。

複雑スパイクは気紛れ

この問に答えるために、私たちは視覚目標に対して手を伸ばして触れる到達運動をサルに訓練して行わせ、その運動の間に、小脳のプルキンエ細胞の電気活動を記録した。

サルの眼の前にはサルの視界を開閉するために液晶シャッターを置いた。サルが目の下20cmに固定されたボタンを指で押えると、液晶シャッターが開き(図2、試行開始)、予告音に引き続いて眼の前方20cmに置いた画面上5×5cmの範囲内のランダムな位置に十字の目標が現われる(目標)。サルは目標提示から240 msec以内に指を乗せていたボタンから手を離し(運動開始)、手を離してから300 msec以内に画面に触れ(運動終了)なければならない。考える間もなく最高のスピードで運動しないと間に合わない条件である。ところが、ボタンを離すと同時に眼前の液晶シャッターが閉じてしまうので、サルは手と腕の視覚情報なしにその速い運動を行う。シャッターは指が画面に触れると同時に再び開き(開)、到達位置を保持したままの手と目標の位置、つまり運動の誤差、が300 msec、視覚情報として与えられる。試行の終了時には、報酬として誤差の量に反比例した量のジュースを与えた。ちょうど正確に目標を捉えた場合には、たくさんのジュースがもらえるが(大当たり)はずれてしまうと急激にジュースの量は減ってしまうのでサルは一生懸命、速く、正確に運動をしてくれる。

図2(下)にはこの運動の前後のどんなタイミングで単純スパイクや複雑スパイクが出たのか、1つのプルキンエ細胞から記録した20試行分のデータを示した。赤い線が単純スパイク、緑の丸が複雑スパイクの出現を示している。単純スパイクはたくさん出ていて、運動の終了直前に減って、直後に急増していることがわかる。いかにも運動の制御に関係している雰囲気をもっている。ところが、複雑スパイクは、

1試行中に1回でるかでないか、出ても2回まで、と本当にまばらである。なんと頼りなく、きまぐれな出現の仕方である。こんな気紛れな信号に本当に行く先や誤差の情報が含まれているのだろうか？

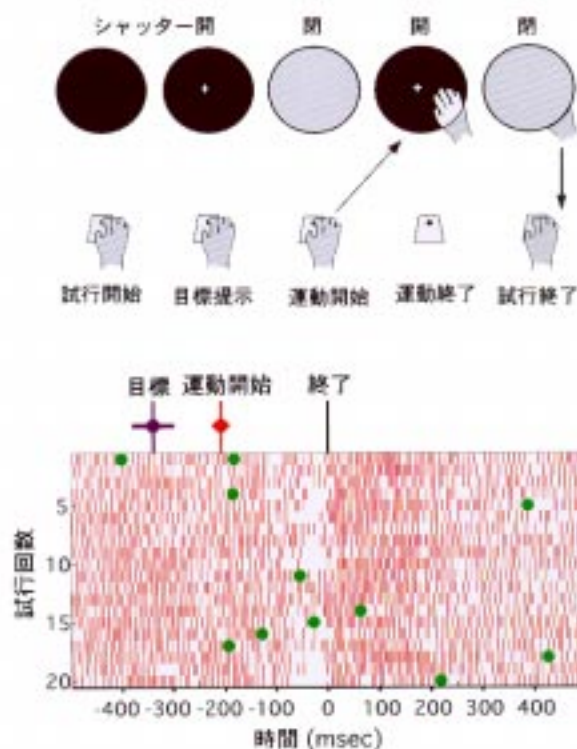


図2 気紛れな複雑スパイクの発火
上段：サルが行う到達運動。下段：1個のプルキンエ細胞の電気活動。赤線が単純スパイク1個、緑丸が複雑スパイク1個。20試行分を表示。

誤差も行く先も！

複雑スパイクはなかなか出ない。これが謎の原因である。ならば、十分な数が出るまで記録し続けよう。というわけで、1つの細胞から1000回以上にもわたって粘り強く記録を取り続けた。すると複雑スパイクの数もずいぶんたまっていく。たとえば、1400回記録を続けたあとで、運動の開始時の1/10秒間に注目すると、133回の試行で複雑スパイクが出現していた。目標はスクリーン上のランダムな場所に出現するので1400回の試行でサルが触った点(運動の行く先)は、四角い領域を万遍なく覆っている(図3左、赤点)。ところが、運動の開始時に複雑スパイクが出た133回の試行に限って黄色い丸をつけると、黄色の丸は右下に集中していた。黄色

の丸の数を数えると、左上の第2象限には14個しかないが、右下の第4象限には56個あるので、運動の開始時に複雑スパイクが出た場合には、サルがスクリーンの右下に触れる確率が高い、ということになる。つまり、運動開始時の複雑スパイクは運動の行く先の情報をもっている。

次に、同じ細胞で、運動の終了直後の1/10秒間に注目しよう。この時間内には92回の試行で複雑スパイクが生じていた。今度はサルが目標をどれくらいはずしたか、運動の誤差に注意する。1400回の試行の誤差は、目標のまわりにどの方向にもほとんど均等に分布していた(図3右、赤点)。ところが、運動終了直後に複雑スパイクが出現した92回の試行に限って見ると、誤差は左上に集中していた(図3右、黄丸)。運動の終了時に複雑スパイクが出た場合には、サルが目標を左上にはずした確率が大きいことになる。つまり誤差に関する情報が得られるわけだ。同じ細胞の複雑スパイクが、出る時機に応じて行く先と誤差の両方の情報をそれぞれ伝えていたのである。

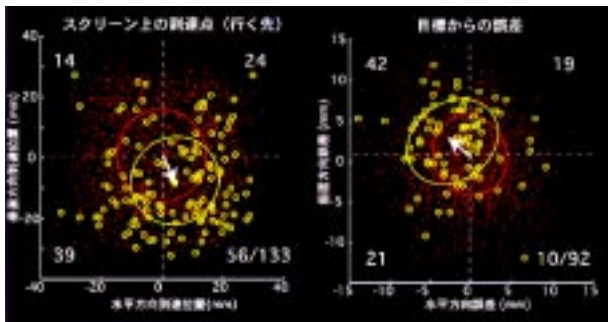


図3 1400回の試行の行く先(左)と誤差(右)の分布。1400回の試行の分布を赤点で、複雑スパイクが運動開始時(左)または運動終了時(右)に出現した試行に黄色い丸をつけた。黄色の丸の分布の片寄りに注目。

この行く先と誤差に関する情報は、ビット単位で定量化することができる。図4に50個の細胞の情報量を加算した結果を示した。50個の細胞の単純スパイクの発火頻度の変化はそれぞれまったく異なる変化を示したにもかかわらず、「行く先」(ピーク1)または「誤差」(ピーク2、3)に関する情報量が現われるタイミングは驚く程再現性が高かった。すなわち、「行く先」の情報は運動開始直後から運動前半にかけてピーク1を形成し、一方「誤差」の情報は運動終了直前から直後250 msecにかけて1つまた

は2つ(ピーク2、3)のピークを形成した。小脳の複雑スパイクは運動の開始時には「行く先」を、終了直前直後には「誤差」を表現していたのである。つまり、誤差も行く先も!というのが私たちの得た解答である。

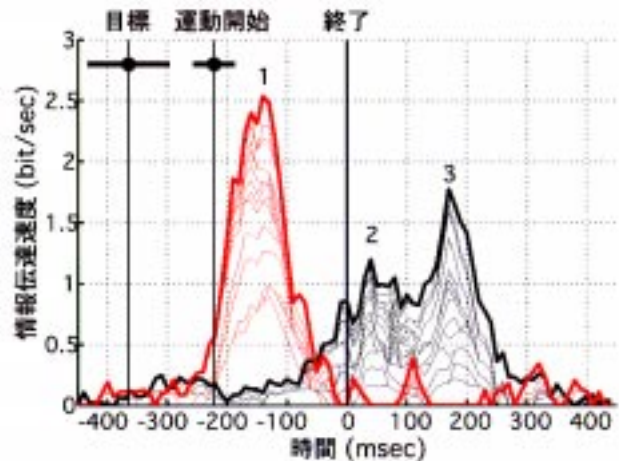


図4: 50個の細胞が持つ情報量。運動開始時に行く先(赤線) 終了時に誤差(黒線)の情報がピークを作る。

これから

ロボットのまねをしてくれと言われると、たいいてい人はぎこちない「ロボットのような」動きをしてみせよう。それだけ、日頃の「私たち」の運動はなめらかなのである。この研究がきっかけとなって、小脳の運動学習、制御の仕組みの解明がさらに進めば、いつか私たちの動きにロボットが追い付いて「ロボットのまね」ができなくなる日がくるのではないか。それが私たちの夢の一つである。

バイオニクス特別研究

「霊長類神経系での情報の保持機構の研究」

独創的個人研究育成事業

参考文献

Kitazawa S, Kimura T, Yin P-B (1998) Nature 392: 494-497.

脳磁計測ではじめてわかったヒトのニオイの脳内活動場所

Visualized human olfactory activities in the brain using the 122-ch MEG measurements

脳磁計測・解析ラボ / MEG 視覚化ラボ / 多点データ解析ラボ

MEG measurements and analyses lab / MEG visualization lab / Spatio-magnetic analysis for internal source lab

大阪 LERC Life Electronics Research Center (<http://www.etl.go.jp/> LERC/)

外池光雄^{*} 山口雅彦^{**} 浜田隆史^{***} 岩木 直^{****}

Mitsuo Tnoike^{*}, Masahiko Yamaguchi^{**}, Takashi Hamada^{***}, Sunao Iwaki^{****}

基礎計測部 Metrology Fundamentals Division

葛西直子^{*****}

Naoko Kasai^{*****}

e-mail: ^{*}tonoike@etl.go.jp ^{**}myamagut@etl.go.jp ^{***}hamada@etl.go.jp ^{****}iwaki@etl.go.jp ^{*****}nkasai@etl.go.jp

ヒトの脳内の嗅覚機構は、新皮質領域への接続部位やその機能などはまだ殆ど判っていなかったが、当所大阪研究センター設置の脳磁計を使って、ニオイを嗅いだとき脳のどこが活動するかはじめて明らかにした。

我々は呼吸同期方式による独自のニオイ刺激装置と、全頭型多チャンネルSQUID センサーとを用いて、被験者の呼吸に同期したパルス状の匂いを与え、ヒトが匂いを嗅いだ時に近い状態の嗅覚活動部位をリアルタイムに外部から何も傷つけることなく非侵襲と呼ばれる方法で計測し、脳内に幾つかの活動部位を特定した。この結果、ヒトの嗅覚に関する活動部位が前頭葉眼窩野(がんかや)近辺の左右両半球に少し非対称な深部に2ヶ所、さらにニオイ吹き付けの刺激圧効果による三叉神経応答として対側の側頭部体性感覚野に1ヶ所、さらにニオイの認知課題タスクでのみに現われ、且つ比較的遅い応答潜時で側頭部近辺に得られたもの、これら嗅覚関連の活動源が少なくとも脳内の4ヶ所以上の部位に推定され、これらはMRI 脳画像上に特定されるとともに、各応答部位がそれぞれ異なる役割を担っている可能性が示唆された。ニオイは注意や情動の制御に大きく関与しており、脳の機能が注意や情動、意欲等でどう変化するか、機能間の相互作用の研究に今後発展させていく。

The human olfactory pathways, their functional organization and the neocortical projections are current debatable.

We have detected human olfactory activities in brain by odorant pulses using an olfactory stimulator synchronized

with subject's respiration and multi-channel SQUID gradiometer(Neuromag-122) in the real-time state and recently we have also visualized a few another olfactory activated areas at the experiments of a cognitive task using two odorants.

The generators of these olfactory magnetic fields were estimated at least in the four areas on MRI mapping brain in which were located such as two fairly non-symmetric regions near bilateral orbito-frontal areas which were considered as human olfactory nervous centers, the ipsi-lateral temporal area as the trigeminal activity, and a few superior temporal areas which were shown to the role of perceptive and cognitive responses of odorants were detected in the human brain. We will apply the olfactory MEG experiments to a continuous frontier study of attention and emotion on the human brain function.

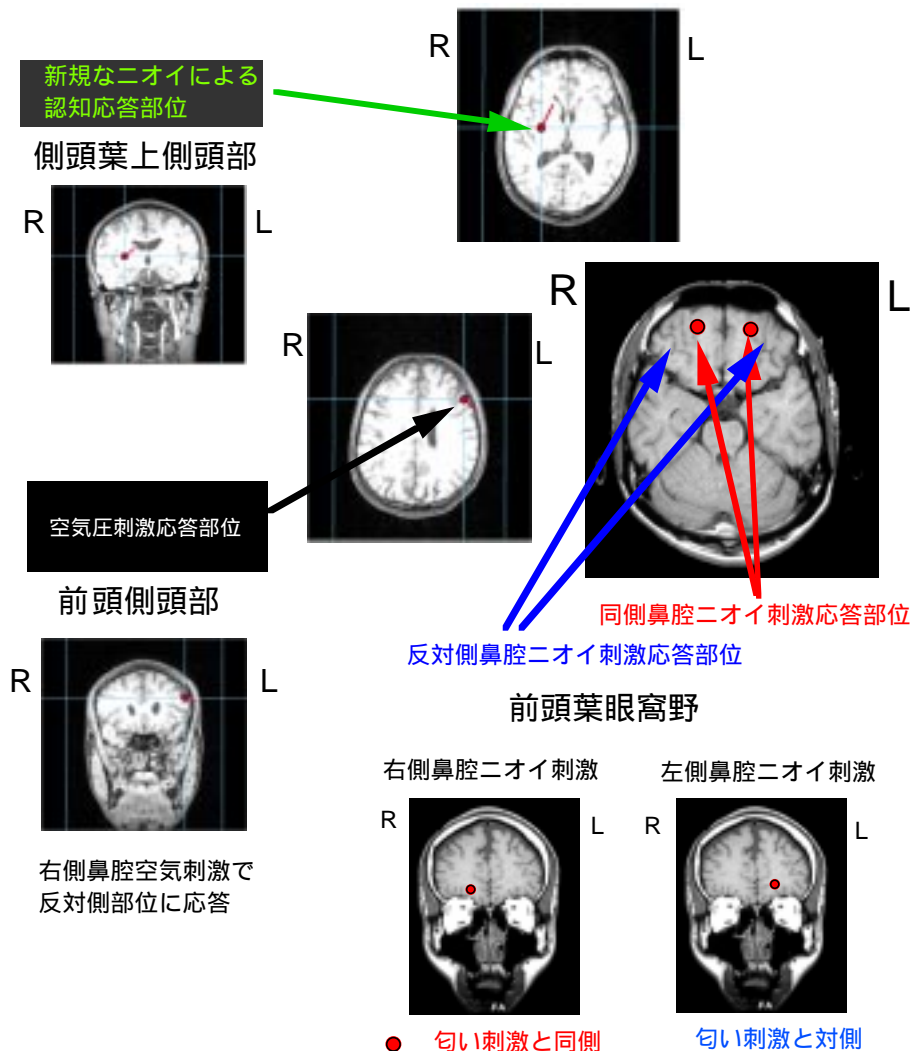


ニオイの MEG 実験マスクを装着した被験者

1. はじめに

近年、ヒトの脳を非侵襲的に計測して脳活動を可視化する技術が注目されている。中でも脳磁図 (MEG; Magnetoencephalography) はヒトの脳内の局所神経磁界活動を実時間 (リアルタイム) で計測することができる。この技術は高感度の多チャンネル SQUID で頭全体を同時計測する全頭型脳磁計により得られた脳磁図データから、逆問題計算によって脳内の信号源を推定するものである。我々は122チャンネルの平面型 SQUID を持った全頭型脳磁計 (Neuromag-122) を用いてこれまで研究が遅れていたヒトの嗅覚応答を非侵襲客観的に計測した。この実験では呼吸同期式

ニオイ刺激法を用いて、ヒトがニオイを嗅ぐ時の状態に近いアクティブな嗅覚の活動を計測し、その時の脳内における嗅覚神経活動をリアルタイムに視覚化することに成功した。これらの研究の結果、ヒトの脳内に少なくとも4ヶ所以上の嗅覚活動部位を発見し、これらの脳部位がニオイ識別の中枢処理、あるいはニオイ嗅ぎ分けに関連した体性感覚応答処理、さらにはより高次のニオイの知覚・認知機能処理など、それぞれの部位が異なった独自の役割を担った嗅覚活動部位である可能性を初めて明らかにした (図1)。



右、左の片側鼻腔の匂い刺激によって計測された嗅覚中枢の応答推定部位

図1 ニオイのMEG実験より得られた応答部位

2. 全頭型脳磁計の長所を活かした MEG 嗅覚計測

ヒトの脳を観る非侵襲的計測には、現在、脳波 (EEG) や機能的磁気共鳴画像法 (fMRI)、陽電子放射映像法 (PET) などがあるが、神経活動を直接リアルタイムに計測する脳磁図 (MEG) が他にない長所を持った新たな非侵襲計測法として活躍している。従来、我々はヒトの嗅覚の脳活動を脳波で計測してきたが、脳波は脳神経細胞集団の活動を頭皮上の電位として検出する際に、頭骨、髄膜、脳髄液、脳の各組織などの導電率の違いで電気抵抗による歪みを受けるため、脳内活動や信号源部位を推定する上で大きな障害であった。しかし、脳のこれらの生体組織は磁気的にはほとんど歪みなく扱えるので MEG の方が脳波よりも位置推定精度に優れている。そこで、脳内のある部位の局所神経細胞群が同時且つ一斉に活性化されればこれを近似的に電流双極子 (電流ダイポール) で表わしその信号源を求めるモデルが成り立つ。全頭型脳磁計は被験者の大脳全体を同時に計測するので、複数の脳内部位が同時に活性化される場合を捉えることができる長所を持っている。その他 MEG 計測は時間分解能に優れており、図 2 に示す様にミリ秒単位で神経活動を追いかけて解析できる上に、信号源がベクトルで表わせるので、神経活動の大きさをダイポールモーメントで、また脳内の信号処理の流れをベクトルの方向から求めることができる。我々のラボでは以上の様な全頭型脳磁計による MEG 計測の長所を最大限に活かす工夫を行ってヒトの嗅覚機能計測を実施してきた。

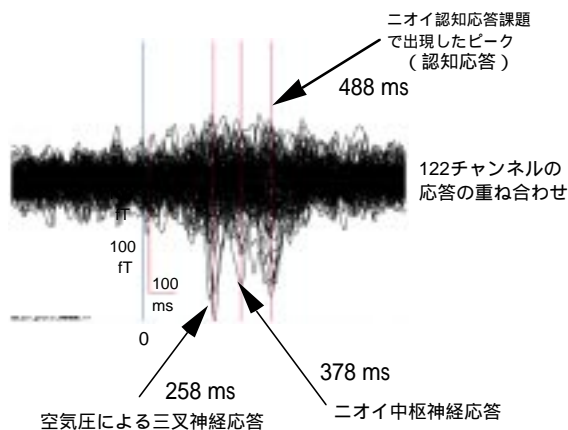


図2 ニオイ刺激後の脳内ニオイ信号の伝搬の可視化

3. ヒトがニオイを嗅ぐ時の状態に近い呼吸同期式ニオイ刺激法

嗅覚や味覚は主に化学反応によるセンサー部の神経細胞が刺激の強さや刺激量によってすぐ飽和したり順応したりするので、実験ではこれを十分考慮しなければならない。また、嗅覚ではヒトがニオイを嗅ぐ時アクティブに息を鼻に吸い込んで嗅ぐので、この状態に近い実験系を実現させる必要があった。このため我々は被験者の呼吸に同期させた短い時間 (300 ミリ秒) のニオイパルスランダムに鼻腔に注入刺激し、ヒトがニオイを嗅いだ状態の脳神経活動を客観的に計測できる「呼吸同期式ニオイ刺激法」を独自開発した (特許取得)。また、MEG 嗅覚実験のために非磁性体材料、光ファイバセンサ等を使用した空気圧バルブ制御のニオイ刺激装置を考案した。これによって、ニオイリセプター部の神経細胞群を最適ニオイ濃度で一斉に発火させ、MEG による脳磁図を計測することが可能になった。この刺激系では、写真の様に呼吸用マスクを装着した被験者の鼻に付けた細いチューブ (カニューラ) を通して左右どちらかの鼻腔に直接ニオイを与え、ニオイガスが含まれた呼吸はマスク内に吐き出す息と共に排気チューブを通して磁気シールドルーム外の活性炭槽内で吸着し排気させる。また、このニオイパルス刺激はマスクに取り付けた光ファイバセンサーによって被験者の呼吸をモニターし、息を吸い込む吸気の瞬間に同期して与えられる。従ってこの方法では、被験者の呼吸が自然な状態でニオイが呼吸に同期してランダムに与えられるため、刺激を予測することなく、またニオイの順応が少ない状態でニオイを無理なく嗅ぐことができる。

4. 無臭空気刺激のコントロール実験と片側鼻腔ニオイ刺激実験

被験者の呼吸に同期して出力するトリガー信号とニオイパルスが鼻腔に到達するまでの時間差は脳神経応答の時間遅れを計測する上で重要であるが、上記に示した我々の刺激装置を校正した結果、装置による遅れ時間は約 100ms であった。また、我々のニオイ刺激では鼻腔内に直接にニオイパルス刺激を与える blast 法を用いているため、鼻腔内上部に位置した嗅神経を刺激する以外に、鼻腔内全体に分布している三叉神経をも刺激している。このため、ニオイによる嗅覚神経磁界応答と三叉神経による体性感覚応答とを分離するコントロール実験が必要であった。そ

ここで以下の実験によってニオイ刺激の場合とニオイの無い新鮮無臭空気との応答差を計測し解析を行った。

まずニオイ刺激は嗅覚テストによく用いられる甘い香りのアミルアセテート(バナナ臭)を選び、6人の被験者(男性・右利き・21才～50才)にMEG嗅覚計測を実施した。その結果、左右の鼻腔に別々にニオイパルスを与えたところ、幾つかの興味あるニオイの感覚応答の結果が得られた。1つは、応答が前頭部の深部に強く現われたことである。特に刺激した鼻腔側と同側の前頭部に強い脳磁界応答が現われ、また対側のやや非対称の位置にも別の応答が少しの時間遅れ(10数ミリ秒)で現われた(図3)。また、刺激の鼻腔を逆にすると全く逆の結果となり、両鼻腔の結果を併せると少なくとも6人中4人で両半球に2ヶ所ずつ計4ヶ所ニオイ刺激に応答する脳内信号源部位が推定された。上記の実験結果は嗅覚神経系が同側優位性の支配を受けている可能性を示唆している。ところで6人の被験者の応答潜時はかなり個人差があり、各個人の応答潜時の再現性は良いにもかかわらず、6人の平均のバラツキはこれを大きく上回るため、被験者の平均値で論ずることはあまり意味をなさない結果であったが、

各被験者のMRI脳画像による推定部位は前頭部眼窩野周辺の部位に共通してニオイを知覚識別していると予測される嗅覚応答が明瞭に検出された。

コントロール実験は、まず最初ニオイパルス刺激と同じ刺激圧で鼻腔に無臭の空気を加えた場合には顕著な磁界応答が見られず、ニオイ刺激応答との有意差が明確であった。次に、あえて3～5倍強くした刺激圧で、左右別々に無臭空気を刺激して脳磁図を観測するとそれぞれ刺激した鼻腔側と対側の側頭部体性感覚野にニオイ応答のピーク潜時(約360ms)よりも速い潜時(約270ms)の応答ピークが観測された(図4)。これは三叉神経活動による体性感覚応答が現われたものであると考えられ、以上の実験と解析からニオイ刺激に伴う嗅覚神経活動と体性感覚処理活動とが分離された。

5. ニオイの認知機能を調べるMEG嗅覚実験

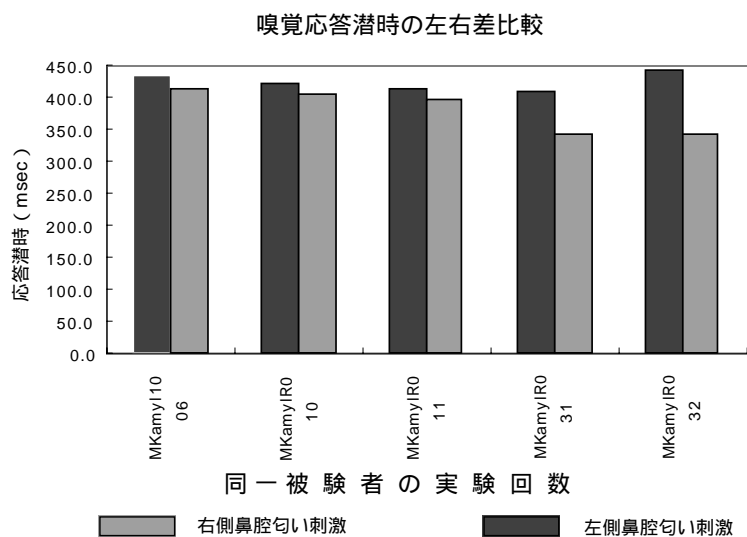
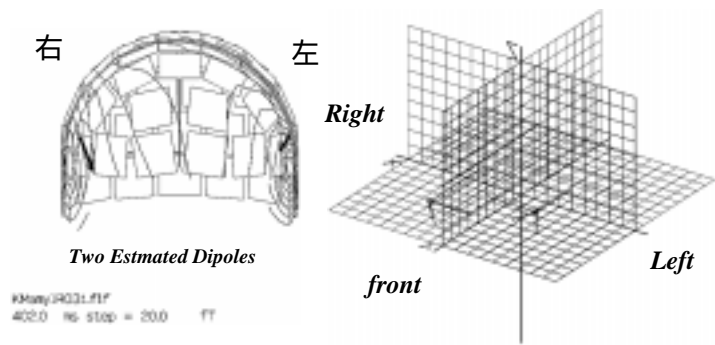
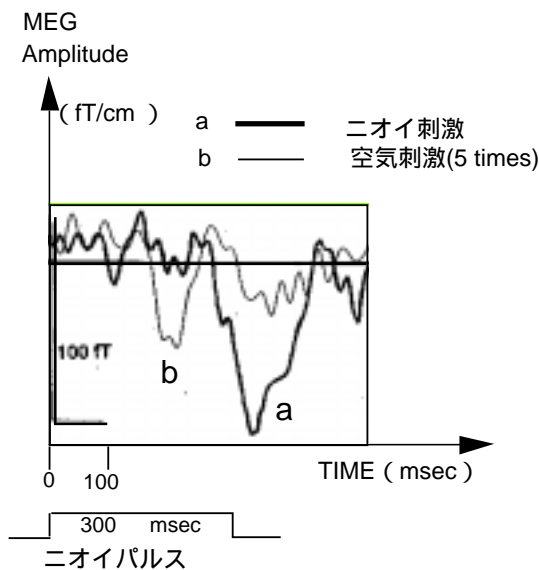


図3 右側鼻腔ニオイ刺激による右側大脳半球の優位性(潜時比較)

最近、我々は2種類のニオイを用いてヒトのニオイ認知機能を客観的に調べるMEG嗅覚実験を実施した。この実験タスクは2種類のニオイを上記と同様に自然のニオイ嗅ぎ状態に近い呼吸同期式刺激法でランダムに被験者に与え、稀にくるニオイと頻繁にくるニオイを1:3の確率で刺激して、被験者には稀にくる方のニオイをターゲットとして注目させ、その刺激回数を数えさせる知覚・認知実験(オドボール課題と呼ばれる)である。2種類のニオイは違いが良くわかる様にアミルアセテート(バナナ臭)の快適なニオイとイソ吉草酸(汗くさい臭い)の不快臭とを用い、3人の被験者に実施した。この結果、上記で述べた1種類のニオイ刺激実験と同様にこの実験でも前頭部の同様の部位に2種類のニオイ刺激とも共通した磁界応答ピークが観測され、これはニオイの知覚識別に関わる嗅覚中枢の応答と考えられる。さらに、この実験では稀なニオイ刺激の方のみに応答する磁界反応が計測され、これを信号源推定すると、主



Strength of Air pressure = (about 5 X Odorant pressure)

図4 無臭空気刺激応答とニオイ応答の差異

に側頭部の前部と後部の少なくとも2ヶ所の部位に新たに複数の活動部位が求められた。これらの活性部位は、ターゲットに用いたニオイの種類(快臭か不快臭か)あるいは被験者によってその推定部位が異なるものの、応答潜時は、ほぼ共通して約560msという様にこれまで観測された1種類のニオイ刺激応答よりは遅い潜時に出現した。また、各被験者毎のMRI脳画像に重ねて分析した結果では、これらの部位が上側頭部や島皮質部位の周辺部に推定され、以上の結果からこれらの部位がニオイの認知機能処理に関与している可能性が示唆された。

6. 結果と考察、並びに今後の研究展望

全頭型脳磁計を用いた非侵襲MEG実験によってヒトの嗅覚機能をリアルタイムに計測し可視化する研究を実施した。この結果、ヒトが自然な状態でニオイを嗅ぐ方法に近い呼吸同期式ニオイ刺激法を開発し、これを用いたMEG嗅覚実験によって少なくとも4ヶ所以上の複数の脳部位が活性化されることが明らかになった。また、これらの脳活動部位は前頭眼窩野、対側側頭体性感覚野、上側頭葉、島皮質部位、等の複数部位が推定され、ニオイ刺激の実験方法等によりそれぞれの部位がニオイ知覚識別機処理、体性感覚応答処理、ニオイ認知応答処理等のそれぞれの機能に関与している可能性が初めて示唆された。前頭部眼窩野周辺に推定されたニオイ実験では、片側鼻腔

刺激で嗅覚神経系の同側優位性が示唆されたが、被験者の中には刺激した鼻腔と同側に強く応答しない、同側に弱く、対側に強く出現するヒトや、対側のみ応答する被験者もあり、ヒトの嗅覚機能を統一的に述べるにはまだ困難がある。しかし、我々がMRI画像上で特定したニオイ中枢部位はアカゲザルの生理学実験の結果や、fMRIに測定よる人のニオイ応答の血流実験の結果で得られた傾向とも一致するなど、皮質におけるヒトのニオイ感覚処理メカニズムに新しい知見が得られた。また、最近のMRI研究ではアクティブにニオイを嗅いだ時とそうでない時は、脳の活性化される部位に違いがあるという報告もあるので、これまでのニオイ刺激法とは異なりもっとアクティブにかき分ける様な刺激法等、他の嗅覚実験結果とも比較検討していく予定である。ニオイは注意や情動の制御に大きく関与しているので、ニオイを用いたMEG実験によってヒトが注意や情動、意欲などで如何に

修飾され、脳内の信号処理において機能間の相互作用がどのように働いているかを明らかにすることができるであろう。現在、ニオイの認知機能に関与すると考えられる部位が側頭部に複数観測されているが、こうした機能が感覚modalityに依存しないかどうか、あるいは情動に関連した複数の感覚相互間の関係など、全頭型脳磁計の特色を活かした非侵襲MEG計測と解析を推進し、今後さらにヒトの脳研究の発展に寄与していきたい。

参考文献

- 1) 特許第1889980号、特許第1915590号
- 2) Tonoike M., Maeda A., Kawai H. and Kaetsu I.: Electroenceph. Clin. Neurophysiol., Suppl.47, 143-150, 1996.
- 3) Yamaguchi M., Tonoike M., Kaetsu I. and Koizuka I.: In Brain Topography Today (Koga Y., Nagata K. and Hirata K.:eds), Elsevier Science, Tokyo, PP.740-743, 1997.
- 4) Tonoike M., Yamaguchi M., Matsumoto Y., Seo R., Koizuka I. and Kida H.: Abstracts of The 6th Int. Evoked Potentials Symp., Okazaki, 1998.
- 5) Yamaguchi M., Tonoike M., Matsumoto Y., Seo R., Kaetsu I., Kida H., and Koizuka I.: Chemical Senses Vol.23, No.2, P.237, 1998.

特別研究

- 「認知・行動の非侵襲計測並びにモデル化の研究」
- 「刺激物質情報の識別機構における脳内相互作用の研究」
- 「多点計測技術及び発生源同定技術に関する研究」

サッカー実況システム MIKE

Soccer Commentator MIKE

ゲーム戦略ラボ 言語学習ラボ

知能情報部 ¹松原 仁 ²田中 久美子 ³橋田 浩一 ⁴Ian Frank
情報科学部 ⁵野田 五十樹 ⁶中島 秀之

e-mail: ¹matsubar@etl.go.jp ²kumiko@etl.go.jp ³hasida@etl.go.jp ⁴ianf@etl.go.jp ⁵noda@etl.go.jp ⁶nakashim@etl.go.jp

MIKE, an automatic commentary system for the game of Soccer is developed. Since soccer is played by teams, describing the course of a game call for reasoning about multi-agent interactions.

Also, events may occur at any point of the field at any time, making it difficult to fix viewpoints. MIKE interprets this domain with several soccer analysis modules that run concurrently within a role-sharing framework.

はじめに

MIKEはMulti-agent Interactions Knowledgeably Explainedの略で、電子技術総合研究所で開発して世界中で使われているサッカーサーバのシミュレーションの試合の実況を日本語(英語、フランス語)で行なうことができる(図1参照)。MIKEへの入力には各選手とボールの100msecごとの位置で、出力は音声によるサッカーの実況である。市販のゲームソフトの実況は、あらかじめ予想される状況についての説明パターンを持っていてそのいずれかを選んで話すだけであるが、MIKEは時々刻々と変化する状況にその場で対応できる。リアルタイムで実況を行なうシステムとして世界初である。

まず例としてロボットによる国際サッカー大会第1回のRoboCup-97の決勝前半に対しMIKEの出力した実況の一部を以下に示す。日本とドイツのプログラムが対戦したので、選手にはそれぞれの国の代表選手の名前を割り当ててある。

ノヴォトニー、ツィーゲ、ノヴォトニーがパス、日本のカット、ツィーゲが取りそう、ツィーゲ、ツィーゲがクリンスマンにパス、クリンスマン、川口、ピアホフ、キーパー川口守れるか、ドイツのキックイン、ピアホフ、秋田が取れそう、川口、相馬が取れそう、日本、クリンスマン、ドイツの得点です、4点です、4対0、とうとう4点差、ドイツ大差、クリンスマン、得点、クリンスマンのセンターからのシュート!日本のキックオフ、日本は長いパスを通しています、ノ

ヴォトニーからツィーゲ、ロペス、ロペスが取りそう、ドイツ、ピアホフがシュートです!キーパ、日本、ツィーゲにとられます、川口が山口にパス、すばらしいパスです、日本のカット、ロボカップ97決勝戦です。

マルチエージェントシステムとサッカー

現在、情報処理の分野では以下のような問題を抱えている。

複雑化してゆくプログラムをいかに効率良く作成するか?

雑音やトラブルなどに対し頑健なシステムをどのように構築するか?

動的に変化してゆく対象や環境にどうやってリアルタイムに追従してゆくか?

このような問題を解決するための有力な候補として、マルチエージェントシステム(Multi-Agent System, MAS)が考えられている。MASとは、独立して動く計算主体(エージェント)が多数集まり、人間の組織のような自律分散型の柔軟なシステムをつくって複雑な処理を実現するものである。そして、このような形態をとることで、

単一のエージェントでは対処することが難しい複雑な処理を多数のエージェントの協調という形で実現できる。

一部のエージェントにトラブルが生じてても、自律分散的に動作することで他のエージェントがそのエージェントの処理を補うことができ、システム全体として頑健に動作させることができる。

システムの構成法にバリエーションを持たせ、エージェントが自律的にそれらを選択することで、多様に変化する対象に追従させることができる。

といった長所を持たせることができる。しかし逆に、このような協調や組織化をどうやって実現するかが研究課題となっている。が、これまでの研究では比較的静的、あるいは単純な問題を対象にしており、実世界でみられる複雑で動的な問題にどれくらい有効であるかは示されていない。

一方、サッカーは典型的なマルチエージェント対戦型ゲームである。MAS研究の立場から見た時、サッカーは以下のような特徴を備えている。

チームプレーした方が有利であり、協調が大きな意味を持つ。

緻密さよりも頑健さが重要である。ボールの動きなどに不確定要素が大きく、失敗やミスを前提としてプレーを構成していく必要がある。

ルール上、ゲームはあまり中断されないため、全作

戦を前もって考えることは難しく、リアルタイムに作戦を考えなければならない。

ルールや動作が単純であり、計算機上でのシミュレーションが容易である。

このような点から、サッカーは近年、MASを評価する問題として様々なところで取り上げられている。ロボットによる国際サッカー大会RoboCupも始まり、そこでは実際のロボットによる試合とともにプログラム同士を対戦させるシミュレーションの試合が行なわれている。本システム MIKE はそのシミュレーションのサッカーを例題として、マルチエージェントシステムの挙動をリアルタイムで適切に実況するものである。

MIKE の概要

サッカーサーバはボールと各選手の位置情報を100msecごとに送る機構が備わっている。MIKEもこれを転用し、サッカーサーバから位置情報を受取っ



図1. サッカーサーバとMIKE

て、解説を出力する。

現状での解析手法は以下の5つである。

1. 基礎解析 kickの判定、選手間の距離、ボールへの到達の予測
2. 高度技術の解析 long pass, back pass, through pass, intercept, dribble, one-two passの判定、以上の成功あるいは不成功の判定
3. ボールプレーの遷移を利用した解析
4. Voronoi 図を用いた解析
5. 統計量を利用した解析 選手の平均位置、分散、選手がボールを持っていた時間平均、チームがボールを持っていた時間平均、ボールの周りに集まっている味方の平均数、平均的陣形、パスの平均距離

以下では例として3に関して簡単に説明する。

ある選手から別の選手へのボールプレーの遷移数(遷移確率)を調べる。すると黄金パターン(シュートに結びつく一連のパス)や選手の活躍状況がわかる。例としてRoboCup-97決勝戦前半でのボールプレーの遷移を表1に示す。表には、2回以上起こったボールプレー遷移、シュートへの全ての遷移が記されている。表の左側が優勝チーム Humboldt(選手の背番号 1-11)、右側が敗けたチーム andhill(選手の背番号 12-22)である。尚、背番号欄の23とは、Right Goalを示す。敵にボールを取られた遷移には '+'印をつけた。(表1 決勝前半のボールプレーの遷移)これにより、得点数6であった Humboldt 側に関してわかることは、

11番は4回もシュートを入れており、大活躍である。

11番は14、15にマークされている。

11番には7番がパスを3回も通している。

7番には6番がパスを通してしている。

以上より、6、7、11という黄金パスがわかる。

7は10番にやはりパスを成功しており、7番はシュートのチャンスメーカーである。

8番、9番が活躍できていない。

などである。

つぎに得点数0であった Andhill 側に関してわかることは、

フォワードの21はボールをことごとく5、6に取られている。特に5は21を上手にマークしている。同様に20番は4番にボールを取られている。

18は優秀で何度も21、22にパスを通してしている。

13はことごとくボールを敵にとられ、まったく活躍できないなどである。

以上のような情報は他のゲームでも観察され、一般

に勝ったチームには黄金パターンが存在し、優秀な選手が何人も居り、敵にボールを取られてばかりいる選手がいない。敗けたチームに関してはこの逆が言える。

上の5手法より解説可能な内容は現段階ではつぎのとおりである。尚、括弧内の数字は、前に列挙した手法の番号に対応し、その解析結果に基づいて判定できることを表す。

a. チームの現状(観衆がわからないことを解説)

- 陣形の変化(5)
- ポジション替え(5)
- 高度な技の指摘(2)
- 過去の試合での勝ち方(過去の試合の要約)

b. チームの力量の評価

- 問題選手の指摘
- ボールを取れる場所に配置されているのに、取ることができない(1、3)
- マークされていてパスを受けられない(3)
- 優良選手の指摘(3、5)
- 平均陣形の良さ、悪さ(5)
- ある瞬間の陣形の良さ、悪さ(4)
- 黄金パターンの有無(3)
- 無駄な動き(1)
- 選手の良い位置、悪い位置(4)

c. チームを強くするための改良法の提案

- 手薄な場所の指摘と問題選手の配置替え(3、4)
- 統計量の偏りを指摘(5)

d. ゲーム展開の予測

- 黄金パターンに基づく得点の予測(3)
- パスすべき選手の予測(4)

e. 見ればわかる内容の実況(1)

自然言語生成にはテンプレートを採用している。実際に声にする部分は市販の音声出力装置を利用している。

テンプレートの例を示す。

- EvMiss (1が)/ ボールを / ミスしました
- EvNeutral 混戦状態です
- EvNeutral スクラム状態です
- EvWasteMove (1が)/ なぜ / 動いているのでしょうか / スタミナの / 無駄です

EvWasteMove (1 が)/ ここで /動いても /無駄でしょう
 EvWasteMove (1 が)/ ここで /動いても /無駄ですね
 EvChangeTeam (1 が)/ ボールを /取り返しました
 EvChangeTeam 1 が /ボールを /取り返します
 EvChangeTeam 1 は /攻めに /転じます
 EvTeamFormChange 1 の /陣形が /2 から /3 に /変化しました
 EvTeamForm 1 の /陣形は /2 です
 EvTeamForm 1 は /2 の /陣形です
 EvPlayerPositionChange 1の /ポジションが /2から /3へ /変わりました

サッカーの実況としてはまだ改良の余地が大きい

ので、さらに高度な推論機能を付加させるべく改良中である。MIKEは今後のRoboCupの大会で観客への実況システムとして使用されることになっている。

参考文献

K.Tanaka-Ishii, I. Noda, I. Frank, H. Nakashima, K.Hasida and H.Matsubara: MIKE: an automatic commentary system for soccer, to appear in Proc. of The Third International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-98)

表 1 : 決勝前半のボールプレーの遷移

Humbolt			andhill		
背番号	背番号	数	背番号	背番号	数
3	5	2	+12	10	2
5	8	2	+12	11	3
+5	14	2	+13	5	2
6	7	2	+13	6	3
7	10	2	+13	7	3
7	11	3	+14	6	2
7	23	1	+14	7	2
+10	12	2	14	12	2
10	23	1	+15	7	2
+11	14	2	+15	11	3
+11	15	2	15	14	10
11	23	4	16	14	3
			18	13	4
			18	21	6
			18	22	2
			+20	4	2
			+21	5	4
			+21	6	2
			22	17	2

世界最短波長 (228 nm) の自由電子レーザー発振を達成

- 小型蓄積リング NIJI-IV -

Lasing at 228 nm in storage-ring free-electron laser

- NIJI-IV broke the wavelength record -

自由電子レーザー・ラボ

Free Election Laser Lab

量子放射部 Quantum Radiation Division

山田家和勝、清 紀弘、山崎鉄夫、大垣英明、三角智久、杉山 卓

Kawakatsu Yamada, Norihiro Sei, Tetsuo Yamazaki, Hideaki Ohgaki, Tomohisa Mikado, Suguru Sugiyama

The lasing wavelength of the NIJI-IV storage-ring free-electron laser, at the Electrotechnical Laboratory, reached 228 nm on May 12, 1998. Insertion of SQS (Sextupole-Quadrupole-Sextupole) magnets into the ring lattice enabled us to obtain 5 times as large peak current as before even in such a small and simple storage ring and to break the world's shortest wavelength record (239 nm) in free electron lasers.

はじめに

電子技術総合研究所では、従来より自由電子レーザー・ラボにおいて、世界初の自由電子レーザー専用小型蓄積リング NIJI-IV * を利用した自由電子レーザーの短波長・高品質化の研究を行ってきましたが、この程、従来の記録 (239nm) を破る世界最短波長 (228 nm) でのレーザー発振に成功しました。

自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) は、真空中を光速に近い速さで走る高エネルギー電子ビームを、アンジュレーターと呼ばれる周期磁場発生装置で振動させて光ビームと相互作用させることにより、レーザー光を得るもので、広い波長域にわたる連続波長可変性に加えて、高出力、高効率という優れたポテンシャルを持っています。

今回、このような遠紫外域への短波長化に成功したのは、短波長域での光共振器ミラーの特性の把握とその適正条件での使用に加えて、電子蓄積リング内の電子ビームの不安定性を抑えることにより、ビームのピーク電流値を大幅に向上させることに成功したことが大きな要因です。

現在、世界では日米欧を中心に FEL の研究が進められていますが、特に米国デューク大学においては大型の電子蓄積リングを使用して、最近 230nm を切る波長での発振に成功したと非公式に伝えられており、正に短波長化の研究に鎬を削っているところで、当所でのこの成果は、よりコンパクトな蓄積リングを使って最短波長化に成功したものであり、FEL 実用化に繋がる技術として大きな意味が有ると言え

ます。

FEL は、赤外域での分子振動励起を利用した、物性研究、生体・医療分野、紫外～真空紫外域での光化学反応による材料開発等の他、原子炉壁の改質や核融合プラズマの加熱といった原子力分野等、幅広い応用が期待されていますが、今回、このような遠紫外域でのレーザー発振に成功したことにより、その応用分野をより広げる可能性が出てきたと言えます。

本研究は科学技術庁が推進している「原子力基盤クロスオーバー研究」の一環として行われています。

*蓄積リング NIJI-IV は、電総研と川崎重工 (株) の協力により平成 2 年に建設され、平成 3 年から稼働しています。

1. これまでの経緯

FEL は、原子や分子をレーザー媒質として用いる従来型のレーザーとは異なり、真空中をほぼ光の速さまで加速した電子ビームを、アンジュレーターと呼ばれる交番磁場発生装置で振動させて光を発生・増幅し、レーザー光を得るものです。このため原理的にはマイクロ波から X 線に至る広大な波長域で連続波長可変で、高出力、高効率という優れたポテンシャルを持っています。FEL の研究には各種の電子加速器が用いられていますが、レーザー波長が短くなる程、高エネルギーで高品質の電子ビームを必要とするため、短波長 FEL の発生には、蓄積リングの使用が適しています。

当所では、従来より小型電子蓄積リングの開発を手がけ、これを用いた短波長域におけるFELの研究に取り組んできました。その結果、当所の汎用電子蓄積リングTERASを用いて平成3年3月に国内初の可視域(598 nm)FELの発振に成功し、これは当時世界的にも数少ない成果として大きく評価されました。また平成2年に完成した世界初の自由電子レーザー専用小型蓄積リングNIJI-IVを用いて、平成4年には可視域(595 ~ 488nm)で、平成6年には近紫外域(~ 350nm)でレーザー発振に成功し、着実に短波長化進めてきました。

FELの持つ優れたポテンシャルを実現するためには、極めて高品質で高ピーク電流の電子ビームを必要とします。このため実際にはレーザーゲインは小さく、レーザー発振を得るためには、非常に低損失(高反射率)のレーザーミラーが必要となります。350nmより短い波長域では、低損失ミラーを得るのは極めて難しくなるため、より高いレーザーゲインを発生することが必要となりますが、蓄積リングNIJI-IVは非常に小型でかつシンプルな構造であるため、電子ビームのピーク電流が増加すると電子ビーム内に様々な不安定性が起こり、これまでレーザーゲインが1%以下に制限されていました。

これに対し電総研では、電子ビームの縦振動を抑えるためのアクティブ・フィードバック・システムの導入に続いて、今回小型の6極 - 4極 - 6極(SQS)電磁石を開発し、蓄積リング内に設置しました。これはリングを構成するビーム収束用4極電磁石による色収差(クロマティシティー)を補正するもので、これにより電子ビーム内の不安定性(ヘッド - テール不安定性)が抑えられ、電子ビームのピーク電流の増加と共に、レーザーゲインが従来より大幅に向上しました。またこれに加えて電総研ではこれまでに、低損失の光共振器に関する多くの技術も開発しており、これらを駆使して短波長域でのレーザー発振実験を行いました。その結果、本年3月20日に300nm付近での発振が可能となり、更に5月12日には、228nmまで短波長化することに成功したものです。

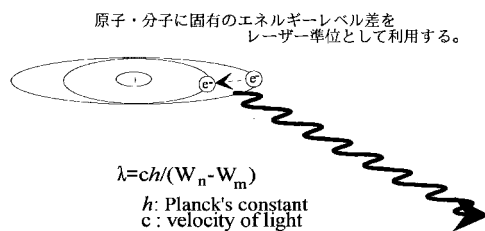
FELの短波長発振は、これまでブドカ核物理研究所(ロシア)の240nm及び分子科学研究所(日本)の239nmでの発振が報告されていましたが、今回の当所の成功により、10nm以上短波長化されたこととなります。遠紫外域におけるFEL発振に関しては、デューク大学(アメリカ)において、より大型の電子蓄積リング(周長:107 m, 電子エネルギー:1.1GeV)

を用いたFEL装置が稼動を開始し、当所と相前後して230nmを切る波長域でレーザー発振に成功したと非公式に伝えられており、国際的にも技術開発が活発化しつつあるところですが、当所での成果は、非常に小型でシンプルな構造の蓄積リング(周長:30 m, 電子エネルギー:0.3GeV)を用いて達成されたものであり、FEL実用化に繋がる技術として大きな意味があると言えます。

2. 自由電子レーザーとは

レーザーは、一般的には各種の原子や分子をゲイン媒質とする光増幅器であり、原子や分子に固有のエネルギーレベル差をレーザー準位として利用するため、スペクトル線幅が小さく、且つ位相の揃った強力な光を発生することができます(図1(a))。しかし従来型のレーザーは、特定のレーザー媒質を用いることから、発振波長が限定されるという欠点を持っています。これに対してFELはゲイン媒質を用いず、真空中を光速に近い速さで走る電子ビームを、アンジュレータと呼ばれる周期磁場発生装置で振動させることによりレーザー光を得るもので(図1(b))、電子エネルギー、アンジュレータの磁場の強さ、電子の振

*従来型レーザー



*自由電子レーザー

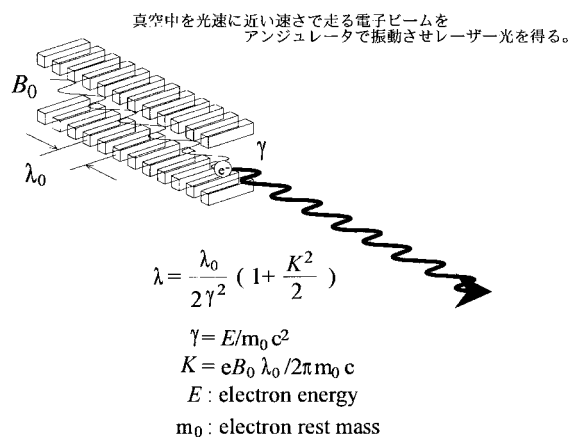


図1 .自由電子レーザーと従来型レーザーとの比較

動波長の何れかを変えることによって、原理的には任意の波長のレーザーを取り出すことができます。

FEL 装置の構成は図 2 のようなものです。電子加速器を用いて高エネルギーに加速された電子の集団(バンチ)は偏向電磁石で曲げられて、光クライストロン(高ゲイン型アンジュレータ)に入り、アンジュレータ内で振動することにより光が放出されます。この光は低損失のミラーで構成された光共振器で閉じ込められ、電子ビームと何度も相互作用し、増幅されてレーザー光になります。

短波長 FEL では、高エネルギーで、エネルギーの良く揃った、収束性の良い高ピーク電流電子ビームが必要で、小型の蓄積リングを用いてこれを実現するためには、従来より更に高度な加速器技術を開発する必要があります。また出来るだけ高いゲインを発生するための長尺アンジュレータ技術、短波長域での低損失光共振器技術の開発も不可欠になります。

3 . NIJI-IV 自由電子レーザーシステム

電総研で使用している NIJI-IV FEL システムの構成を図 3 に示します(表紙写真参照)。NIJI-IV は周長約 30m の世界初の FEL 専用電子蓄積リングであり、小型ながら 7.25m の長直線部を持ったレーストラック型で、ここに 6.3m の光クライストロン(アンジュレータ)が設置されています。電子ビームは光クライストロン内を通過するたびに、スペクトル幅の比較的狭いアンジュレータ光を発生します。アンジュレータ光は光クライストロンを囲んで両側に設置された光共振器で閉じ込められ、レーザーゲインが光共振器の

損失(1%以下)に打ち勝つと急激に増幅されて、レーザー発振に至ります。共振器長は約 15m で、共振器内の光パルスの往復とリング内の電子バンチの周回が、一致する様になっています。

NIJI-IV は通常、310MeV のエネルギーで運転され、リング内には 16 個の電子バンチが回っています。ただし、光共振器内をアンジュレータ光が往復する時間と、電子バンチがリングを 1 周する時間が等しいため、レーザーゲインに寄与できる電子バンチは、この内 1 バンチだけであるため、FEL 実験では、RF-KO 法を用いて余計な 15 バンチを取り除き、1 バンチのみで運転されます。1 バンチモードでの最大平均蓄積電流は ~ 30mA です。

NIJI-IV 用の光クライストロンは、永久磁石ブロックを交互の極性で並べたもので、2 台の平面アンジュレータで、強磁場を発生する分散部を挟んだ構造となっています。この構造によって、レーザーゲインを数 ~ 10 倍程度向上させることが出来ます。交番磁場の周期長は 72mm 周期数は 84 で光クライストロンの全長は 6.3m となっています。

FEL は一般にゲインが小さいため、レーザー発振を得るには、非常に低損失の光共振器を用いる必要があります。NIJI-IV の光共振器は、低損失誘電体多層膜ミラー 2 枚を用いて構成されています。また、FEL では共振器長調整及びミラーアラインメントを、極めて精度良く行う必要があります。NIJI-IV システムでは、ステップモーターとピエゾ素子を用いて、15m の共振器長を 0.2 ミクロンの精度で、またミラーアラインメントを 4 マイクロラジアン の精度で設定することができるようになっています。

短波長 FEL においてレーザー発振を難しくするもう一つの点は、光共振器ミラーの劣化です。共振器に使用される誘電体多層膜ミラーは、短波長になるほどミラー損失が大きくなることに加えて、強いアンジュレータ光に晒されることによって劣化し、反射率が低下して、レーザー発振が難しくなって行きます。電総研ではこのようなミラー劣化のメカニズムを解明するとともに、酸素プラズマとアニール処理を併用したミラー劣化回復技術の開発等も行ってい

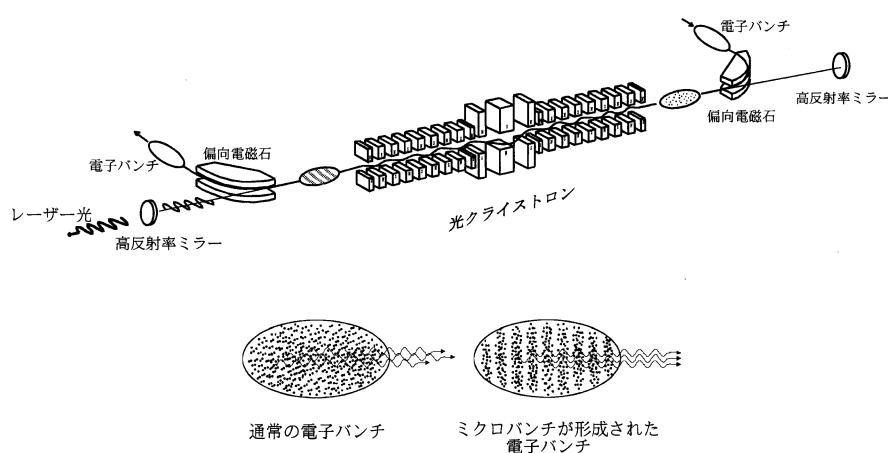


図 2 . 典型的な自由電子レーザーの構成

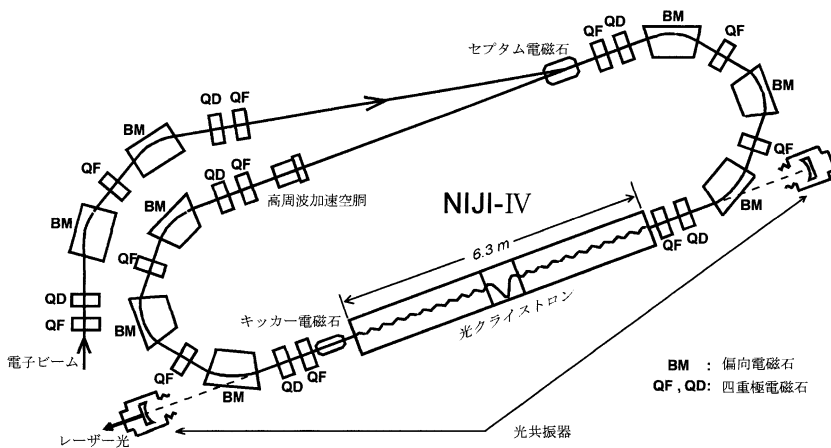


図3 . NIJI-IV 自由電子レーザーの模式図

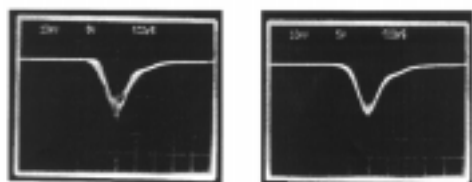
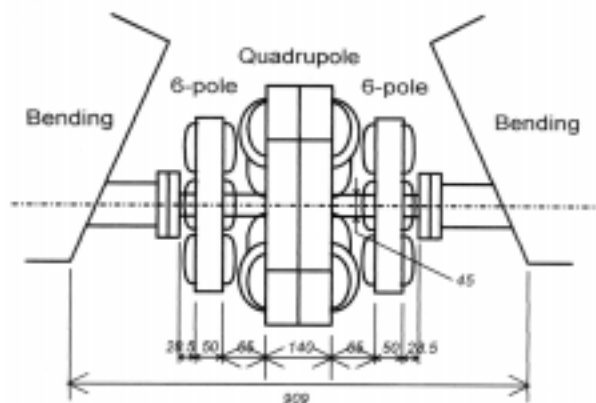
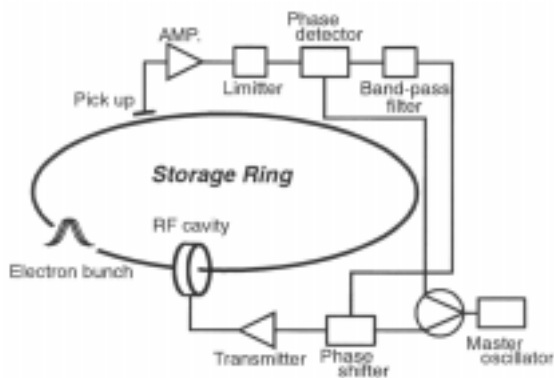
ます。

4 . NIJI-IV の改造によるビーム不安定性の抑制とピーク電流の増加

NIJI-IVは、6個の偏向電磁石と12個の収束電磁石、及び電子加速用高周波加速空洞で構成された、小型でシンプルな蓄積リングです。このためピーク電流が大きくなるにつれて、電子ビーム内に様々な不安定性が起こり、レーザーゲインはこれまで1%程度に抑えられていました。この限界を克服するため、電子

ビームを安定化させる新たな技術開発を行いました。図4はアクティブ・フィードバック・システムとそれによる電子ビーム振動の抑制の様子を示しています。アクティブ・フィードバック・システムは、ビームの振動をピックアップ電極で検出し、電子加速用高周波信号の位相を、検出したビーム振動と逆位相でシフトさせるもので、電子ビームの縦振動が効果的に抑制されているのがわかります。NIJI-IVではまた、収束用4極電磁石による色収差(クロマティシティー)によりビームが不安定となり(ヘッド-テール不安定性)、ピーク電流が制限を受けていました。これを解決するために、今回非常に小型の6極-4極-6極(SQS)電磁石を設計試作し、リング内の4ヶ所に導入しました。これにより、ヘッド-テール不安定性が効果的に抑制され、リングのピーク電流が飛躍的に向上し、今回の遠紫外における自由電子レーザー発振に繋がりました。図5にSQS電磁石の模式図と写真を、図6にその効果を示します。図6よりSQS電磁石を5.2~5.3A程度の電流で励磁することにより、クロマティシティー

不安定となり(ヘッド-テール不安定性)、ピーク電流が制限を受けていました。これを解決するために、今回非常に小型の6極-4極-6極(SQS)電磁石を設計試作し、リング内の4ヶ所に導入しました。これにより、ヘッド-テール不安定性が効果的に抑制され、リングのピーク電流が飛躍的に向上し、今回の遠紫外における自由電子レーザー発振に繋がりました。図5にSQS電磁石の模式図と写真を、図6にその効果を示します。図6よりSQS電磁石を5.2~5.3A程度の電流で励磁することにより、クロマティシティー



(a) feedback off (b) feedback on

図4 . アクティブ・フィードバック・システムとビームの縦振動の抑制

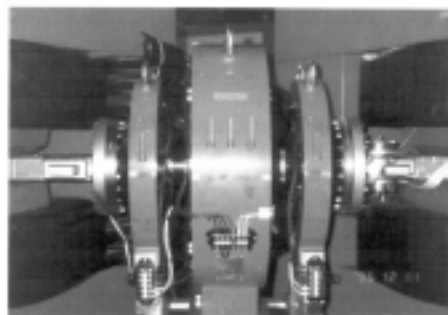


図5 . SQS 電磁石の模式図と写真

はゼロとなり、高ピーク電流のビーム蓄積が可能となることがわかります。図7は蓄積電子ビームの平均電流に対するバンチ長の変化を表しています。一般にビームの平均電流の増加とともにバンチ長も増加しますが、SQS電磁石の効果によりバンチ長の増加も小さく抑えられ、これがピーク電流の一層の向上に寄与しています。結果としてレーザーゲインは

従来に比べ、現状で5倍の増加が得られ、最短波長自由電子レーザーの発振が可能となりました。

5. レーザー発振特性

上述の様に、NIJI-IVの高性能化のための改良を施した結果、従来、可視(595 nm)から近紫外(349 nm)であったレーザーの可変波長域が、一気に遠紫外域

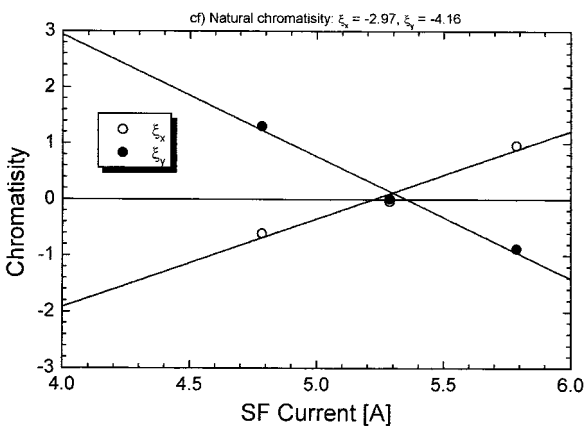
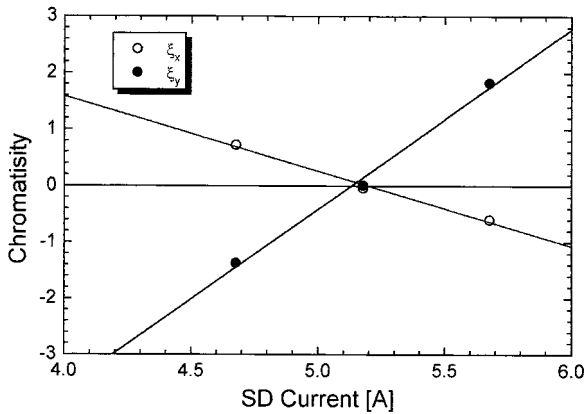


図6. 6極電磁石のクロマチシティ補正効果

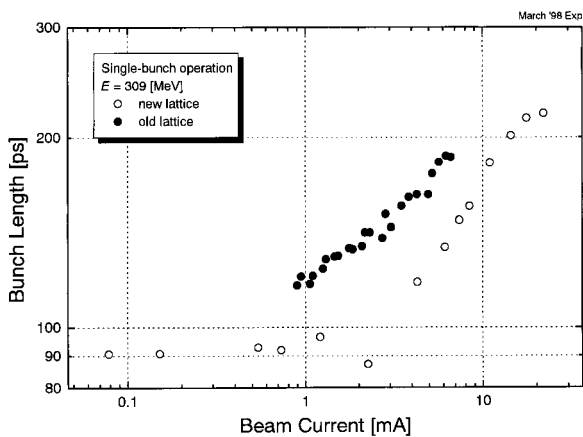


図7. SQS磁石導入によるバンチ長の電流依存性の変化

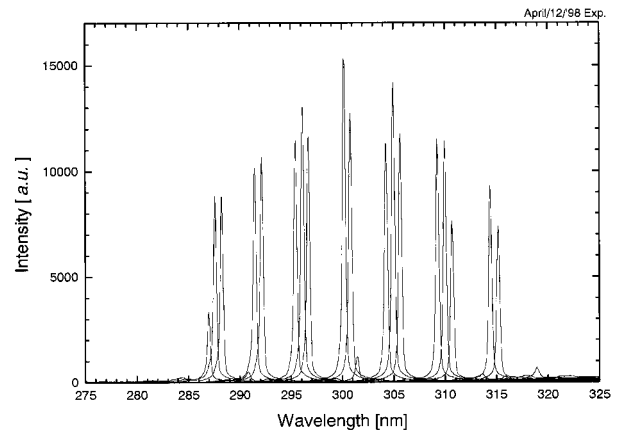


図8. 波長300nm付近での自由電子レーザースペクトル

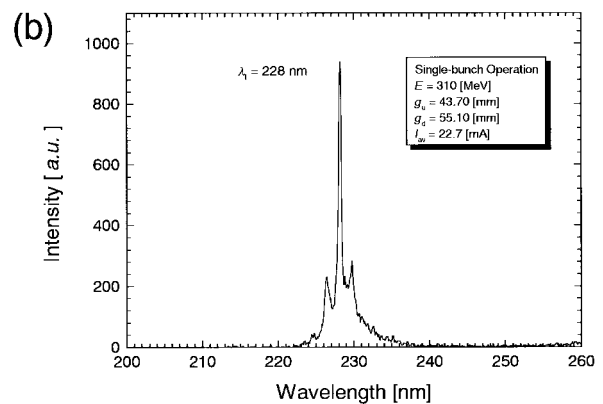
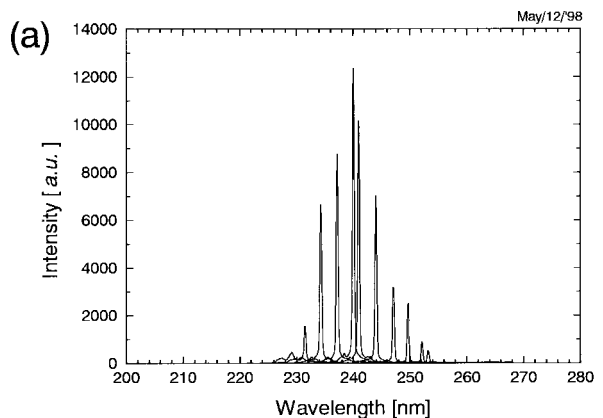


図9. 240nm付近でのレーザースペクトル(a)と最短波長のレーザー発振(b)

(228 nm)まで短波長化されました。ここでは、レーザーの発振を最も顕著に表す出力光スペクトルの観測例を示します。スペクトルは高感度フォトダイオードアレーを付けた分光器で実時間観測されました。今回の実験では300nm付近、及び240nm付近で高反射率が得られる誘電体多層膜ミラーを光共振器に使用しています。

図8に波長300nm付近でのレーザースペクトルを示します。これはアンジュレータの磁場の強さを変えた時のレーザー発振線を重ねて描いたもので、287～315nmの範囲でレーザー波長が自在にチューニングできることを示しています。この時レーザー共振器長調整には $\pm 10 \mu\text{m}$ 、共振器アラインメントには0.1mradの精度が必要でした。レーザーの時間波形は共振器長の調整により、CW(連続)モード及びパルスモードが観測されました。レーザー発振時の電子ビームの平均電流は20～1.5mAで、レーザーピークパワーは波長300nmにおいて約300mWでした。

図9(a)に240nm付近でのレーザースペクトルを示しています。スペクトル観測時の電子ビームの平均電流は23～5.5mAでした。300nm付近と同様に、使用した誘電体多層膜ミラーのバンド幅に従って、レーザー波長のチューニングが可能であることがわかります。同図(b)は今回の実験で得られた最短波長(228nm)のレーザー発振線を示しています。今回光共振器に使用した誘電体多層膜ミラーは、この波長で反射率が非常に小さくなっているため、レーザー発振は強くありませんが、明らかに光がレーザー増幅されていることがわかります。電子ビーム電流はまだ増加が可能であり、ミラーの最適波長を調整することによって、レーザー波長は更に短波長化できることは確実です。

6. おわりに

FELは、従来型のレーザーとは原理的に異なり、非常に広い範囲で連続波長可変性を実現し得るレーザーですが、その実現のためには、高エネルギーで、エネルギーの揃った収束性の良い大電流電子ビームを発生する、高性能電子加速器技術の開発が必要です。特に小型の加速器を用いる場合、技術課題は一層大きくなります。また加速器開発に加えて、高精度な長尺アンジュレータ技術や、低損失の光共振器技術の開発等、多くの課題を克服しなければなりません。電総研ではこれまで小型蓄積リングの開発とその高度化、これを用いた短波長自由電子レーザーの研究を推進

し、多くの技術課題を一つ一つ解決しながら、レーザーの短波長化を着実に進めてきました。特に今回、NIJI-IVの性能向上により、遠紫外域での自由電子レーザー発振に成功したことは、小型蓄積リングを用いたFELの可能性・実用性を示すものであると共に、更なる真空紫外域への短波長化の可能性を示すものとして大きな成果であると言えます。

電総研では今後も、FELの持つ優れたポテンシャルを引出すため、FELにおける先端的な技術開発を推進し、200nmを切る真空紫外域での発振を目指すと共に、前例のない蓄積リングを用いた赤外CW FELの開発等により、FELの広帯域化を進めていきたいと考えています。この研究は自由電子レーザーのみならず、シンクロトロン放射、アンジュレータ放射等の一層の高輝度化を可能とし、放射光の実用性の向上とその利用研究の拡大に大きく貢献すると共に、このような広帯域FELが実現すれば、紫外～真空紫外域での光化学反応や赤外域での分子振動励起を利用した、新材料開発、物性研究、レーザーメス、癌や心筋梗塞の治療、医薬品製造等の生体・医療分野、フロンガスの光解離等の環境分野、原子炉壁改質、耐放射線半導体材料の創製等の原子力分野等へ、幅広い波及効果を及ぼすものと期待されます。

e-mail

kyamada@etl.go.jp (山田家勝)

sei@etl.go.jp (清 紀弘)

tyamazak@etl.go.jp (山崎鉄夫)

ohgaki@etl.go.jp (大垣英明)

mikado@etl.go.jp (三角智久)

ssugiya@etl.go.jp (杉山 卓)

等々力達氏が勲二等瑞宝章の荣誉

(平成10年4月29日授章決まる)



功 績 (電総研在職中の概要)

氏は、電力系統の保護機器である遮断器に関する研究で、短絡電流遮断能力の検証のための合成等価試験法を考案し、電気試験所にモデル設備を建設、変電所から数km以内の架空線路上で短絡が発生する事故、いわゆる近距離線路故障現象の詳細を明らかにしたことにより、以後の遮断器の性能向上に大いに貢献した。これにより「電気学会論文賞」および「電気技術実用化協会技術賞」を受賞。

昭和41年度からは、大型プロジェクトの“1kWMHD発電機用鞍型超電導電磁石の開発研究”を担当し、この大型プロジェクト研究を通して指導し、わが国の現在の超電導技術を世界のトップレベルに導く基となった。さらに革新的な超電導技術の、産業分野、特にエネルギー技術分野の電力機器への応用や核融合発電炉技術への応用に着目し、我が国の実用超電導技術の基本技術の確立に貢献した。これにより(財)岩谷直治記念財団から「岩谷直治記念賞」を受賞した。これらの成果は現在の超電導発電機などの超電導技術開発に重要な手がかりを与えたものである。

昭和49年4月にエネルギー部長として、大型プロジェクト「MHD発電技術開発」第2期計画(昭和51年度より)では、長時間の耐久性能をもつ高出力型MHD発電機の開発と実証運転が計画された。氏はこの計画の策定と推進に尽力し、設計出力100kWのMark VII機の企画、設計、建造を指揮して研究開発路線を確定した。後に、このMark VII機は当初計画

した定格出力を維持しながら200時間以上に及ぶ耐久性の実証運転に成功し、MHD発電機の実用化に必要とされる耐久性に関わる技術障壁の打開に大きく貢献した。氏のその実現への努力が、高く評価され、(社)電気学会より電力賞を授賞。

環境問題ではクリーンなエネルギー技術開発の検討を進め、太陽エネルギーを始めとする新エネルギー技術、エネルギー変換・貯蔵・輸送等の省エネルギー技術の研究計画を他に先駆けて提案した。この案の多くは通商産業省におけるサンシャイン計画、ムーンライト計画に取り込まれ、その立案、ならびに実施体制の確立と研究推進に大きな貢献をした。

昭和54年5月には次長に昇任し、移転推進室長を兼務して、多くの困難を抱えた研究所の筑波移転事業の中心となり、移転を完了させ、生活環境や研究環境の整備・充実に配慮し、迅速な研究の再開を果たした。

昭和56年4月に所長に就任し、同所の一層の発展に尽力しその国際的評価を高めた。昭和57年の新世代コンピュータ技術開発機構(ICOT)発足に当たっては、所長として、同所からの人的協力など、研究開発の実施・推進体制の確立に大きな貢献をした。

その後、以下のところで活躍された。

昭和59年10月工業技術院長

昭和61年9月(財)日本産業技術振興協会

昭和63年7月三洋電機株式会社

平成9年9月(財)日本産業技術振興協会

科学技術庁長官賞（科学技術功労者）

（平成 10 年 4 月 15 日受賞）

富增多喜夫氏

現職（株）自由電子レーザ研究所顧問（元量子放射部長）



左から 3 人目が富増氏

「小型シンクロトロン放射装置の開発」

業績

従来のシンクロトロン放射（SR）装置は、入射器である電子リニアックが大型であること、照射野を拡大するためにはビームラインが長大になること等により、全体的に大型かつ高価で、産業界において建設して利用することは不可能であった。氏は、これらの問題点を解決するため、超高真空技術により蓄積リングへの低エネルギー・大電流電子入射を可能にしてリング本体を小型化する技術、新型加速管による電子リニアックの小型化、波動リング法によるリソグラフィ照射野の拡大によるビームラインの小型化等の要素技術を開発し、これらを総合的に組合わせて SR 装置全体を小型化する技術を世界に先駆けて開発した。

この結果、世界最先端の小型かつ高品質な SR 装置が実現し、建設、運転に要するコストが大幅に低減して、その後の産業界における小型 SR 装置開発の原動力となった。

科学技術庁長官賞（科学技術功労者）

（平成 10 年 4 月 15 日受賞）

横山 浩氏

超分子部主任研究官



「走査型マクスウェル顕微鏡の研究」

業績

半導体デバイスや材料の超微細化がますます進展するなかで、ミクロン以下の極微小領域において、材料・デバイスの構造と、物性・機能を同時に観測する評価技術の重要性が急速に高まっている。なかでも、電気的な機能と構造との対比は、電子デバイス・材料の開発では必須のことであるにもかかわらず、従来の手法は空間分解能が低く、サブミクロンからナノメートルの領域に達した先端的な材料・デバイスには全く適用することができなかった。

氏は、原子間力顕微鏡（AFM）を発展させ、ナノメートル領域での電気的な機能・物性を、形態と同時に観測することを可能とする走査型マクスウェル応力顕微鏡（SMM）を開発した。SMMは、AFMの微小探針に外部から変調電圧を導入して、探針に電気力による強制振動を誘起し、この振幅と位相を解析することで形態と表面電位などの局所情報を抽出する手法で、これまで全く知ることのできなかったミクロな電子状態と材質・形態との間の相関を、電子デバイスから有機材料・生体試料におよぶ広範な対象について、ナノメートルの空間分解能で視覚的に表示する機能を持つ強力な表面解析技術である。SMMは、市販の走査型プローブ顕微鏡に取り入れられ、多くの研究機関で、先端的な電子デバイスの微視的機能や材料プロセスの解析に広く応用されて、ナノメートル領域での研究開発の効率化に大きく貢献している。

本開発は、電子デバイスの超微細化の一助として、半導体産業の発展に貢献が期待される一方で、生体機能の基本であるタンパクやその複合体の構造・機能解析にも適用が開始されており、バイオテクノロジーの発展への貢献も期待される。

第30回市村学術賞貢献賞

(平成10年4月28日受賞)

松本和彦氏

電子デバイス部主任研究官



「STM超微細加工法による室温動作単一電子トランジスタの研究開発」

業績

今日の爆発的に増大する情報処理に対処するために、素子の微細化による半導体集積回路の高集積化の研究が精力的になされている。しかし近い将来、素子の寸法が数10nm程度になると、従来の動作原理ではデバイスが動作しなくなる。このブレークスルー

として、極微細構造中にトンネル効果で流れる電子を一個づつ制御する単一電子トランジスタが最近注目を浴びている。しかし従来の微細加工技術の限界から、これまで試作された単一電子トランジスタの動作温度は1K以下の極低温に限られており、本素子の実用化のためには新たな極微細加工技術の開発による素子の室温動作の達成が必要不可欠であった。候補者は、従来の微細加工技術の加工限界をブレークスルーするために、従来の手法とは全く異なる「走査型トンネル顕微鏡を用いた新しい微細加工技術」を考案、開発し、これを用いて10nmオーダーのサイズの電子デバイスが作製できることを世界で初めて示した。更にこの10nmオーダーの微細加工技術を用いて、従来手法では形成できない新しい平面構造の単一電子トランジスタの構造を考案し、試作した。この平面構造の単一電子トランジスタでは、従来の積層構造の単一電子トランジスタと比較して、素子容量が2桁以上小さくできることを明らかにした。これにより室温において一つの電子によるクーロンブロード効果を発生させることができ、単一電子トランジスタの室温動作に世界で初めて成功した。候補者による室温動作単一電子トランジスタの実現は、将来の電子デバイスにおいて実用化されることが見込まれるものである。さらに従来の微細化の限界にもブレークスルーが得られることが明らかになり、電子デバイスの将来に明るい展望が得られた。本研究の成功に刺激されて、様々な手法を用いて室温動作をめざした単一電子素子の研究が世界中で活発に展開されるようになった。また候補者が考案した「走査型トンネル顕微鏡を用いた新しい微細加工技術」は、世界中の研究者が様々な材料や、新しい構造のデバイス作製に応用するに至っている。

お知らせ

当所では、電総研ニュースを6月20日から、電総研ホームページから取り出すことが可能となりました。まだ、掲載したばかりなので皆様から使用しにくい、開かないなどの意見がありましたら、下記宛に下さい。

- ・電話 0298-54-5059,5061 (業務課広報係)
- ・FAX 0298-54-5349
- ・e-mail:info@etl.go.jp

編集 〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-4 工業技術院 電子技術総合研究所 0298(54)5059

URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail:info@etl.go.jp

印刷・製本 朝日印刷株式会社