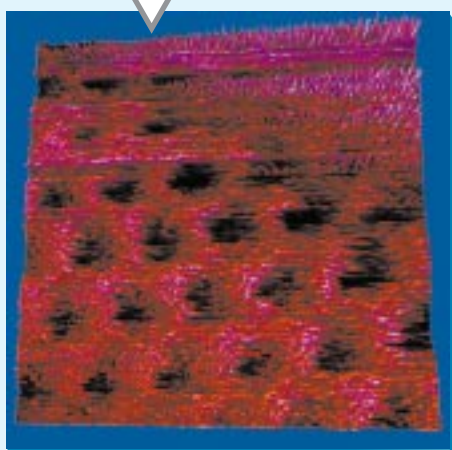
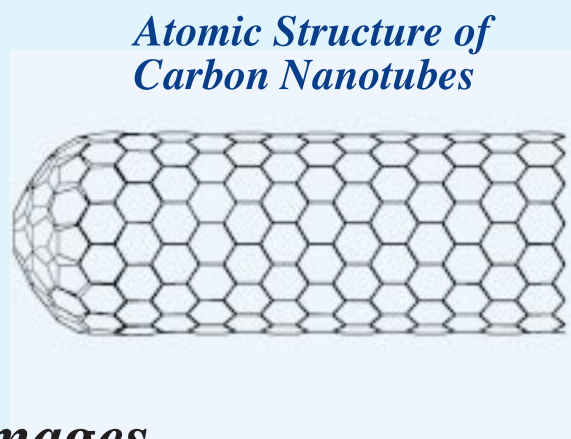


Topographic Image

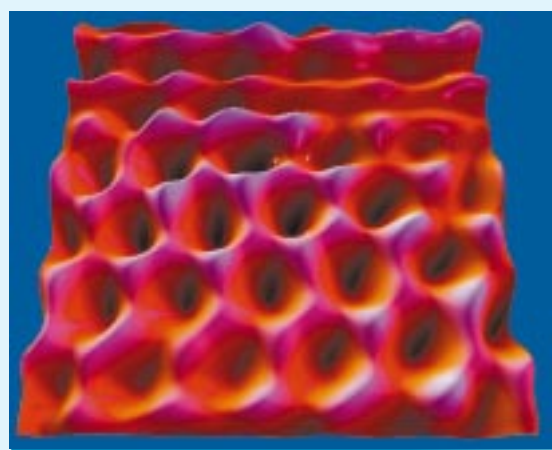


True Atomic Resolution

STM Images



FFT Filtering



Perspective view

電総研ニュース

朗読を聴くときの脳活動の男女差

パルスタイミング揺らぎを 7.5 fs に抑圧

カーボンナノチューブの高分解能 STM 原子像とトンネル分光

その他

2000.10 vol.609

朗読を聴くときの脳活動の男女差

- 男性は左脳だけ、女性は右脳も大活用 -

Sex Differences in the Brain Activity During Linguistic Processing of Narratives

情報科学部 脳機能ラボ

Information Science Division, Neuroscience Lab.

It has been hypothesized that language functions are more strongly lateralized to the left hemisphere in males than in females. Previous anatomical data and patient studies have suggested that the posterior language areas should exhibit sex-differences. However, neuroimaging studies to date have only provided support for differences in the anterior language areas. To look for differences in the posterior language areas, functional magnetic resonance imaging scans were obtained while male and female subjects listened attentively to a story read aloud and to the same story replayed in reverse. Comparing activation in the superior and the middle temporal gyri during a story to activation during reverse replay of the story showed lateralization to the left in males but not in females. We infer that females use the posterior temporal lobes more bilaterally during linguistic processing of global structures in a narrative than males do.

1 .言語野はどこ？

言語機能は脳のどこが司っているのだろうか。脳の病変の部位に応じた言語機能の障害が発見されたのは100年以上昔のことである。フランスの外科医ブローカは1861年に「タンタン」としか話すことのできない患者の脳を調べ、左の前頭葉の一部が損傷していることを発見した。これがいわゆる「ブローカ野」の発見で、この部位の損傷で発話に障害が生じることから別名運動性言語中枢と呼ばれる(図1 B)。一方、ドイツのウェルニケはよくしゃべるけれども、人の言うことも自分で言ったことも全く理解できないという患者を見出し、このような症状を示す患者の病変が左側頭葉の後上部に存在すると発表した。1874年のことである。これが「ウェルニケ野」、別名感覚性言語中枢の発見である(図1 W)。これらの報告以来、言語に関する機能は基本的に左脳が司っていると考えられてきた。

2 .男は左、女は両側か？

しかし、その後多数の症例の積み重ねの中で、臨床医達は男女の言語障害に差があることに気付いた。すなわち、左脳の損傷の部位と程度が同程度でも女性患者の言語障害は男性患者に比べて軽いことがあるというのだ。このような経験の蓄積に基づいて20~30年程前に男性と女性で言語野の分布に差があるのではないか、という仮説が提案された。男性は左側だけで言語を処理するのに対し、女性は右側も使う

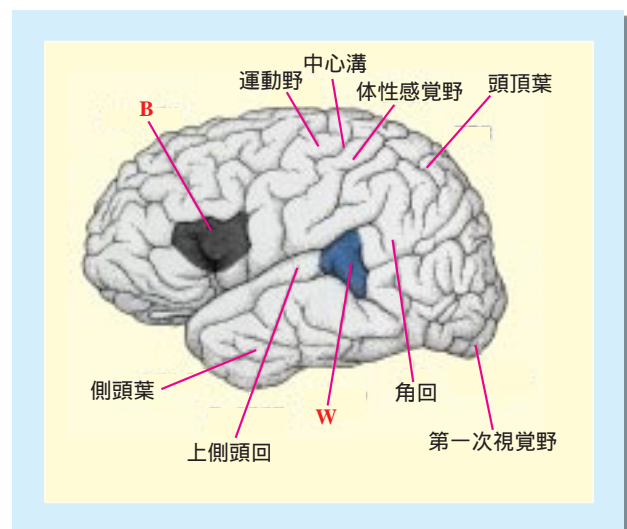


図1 大脳皮質と言語野 前頭葉のブローカ野(B)と側頭葉のウェルニケ野(W)を示す

のではないかと、という仮説である。しかし、症例の蓄積だけで結論を出すのは、条件のばらつきが大きいので困難を伴った。

幸いなことに、現在では正常な被験者の脳の活動を、何らの苦痛を与えることなく画像化することができる。機能的磁気共鳴画像(fMRI)が1990年代に発達した恩恵である。脳が活動すると、その場所で酸素が消費され、それに伴って酸素化された新鮮な血液が流れ込む(図2)。すると、その場所でのオキシヘモグロビン(酸素と結合したヘモグロビン)と、デオキシヘモグロビン(酸素を放出したヘモグロビン)の

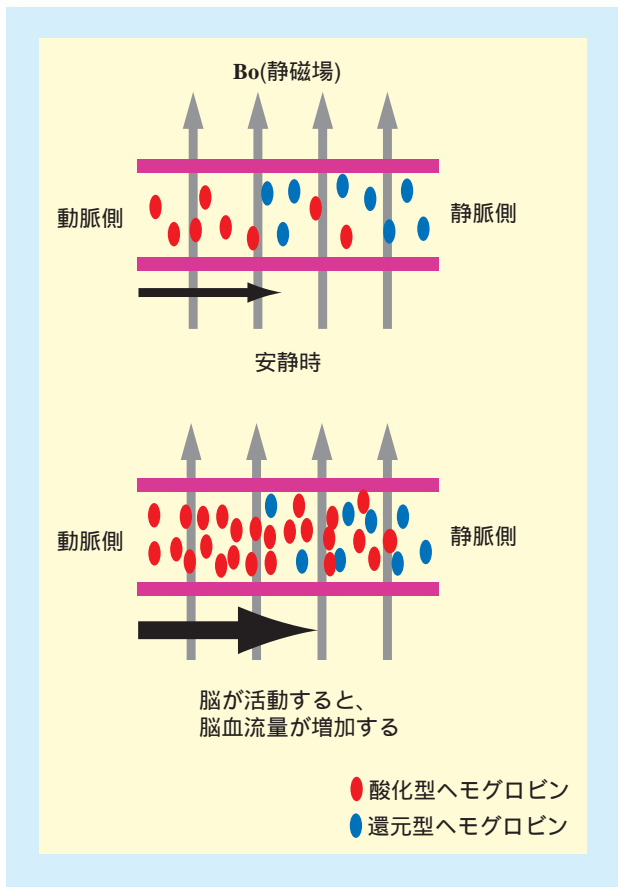


図2 機能的磁気共鳴画像法の原理

濃度の割合が変化する。オキシヘモグロビンとデオキシヘモグロビンの磁石としての性質(磁化率)は異なるので、脳活動が盛んな領域の磁化率は活動していない領域と微妙に異なってくる。機能的磁気共鳴画像法はこの磁化率の違いを検出して画像化する技術である。

このfMRIの恩恵を受けて1995年にアメリカのシェイヴィッツらは有名な研究報告を行った。彼らは、「2つの単語が韻を踏んでいるか」を判定する課題の際の男女の脳の活動を調べ、前述のプロローカ野の活動がまさに「男は左、女は両側」であることを見出した。プロローカ野が運動性言語中枢、つまり「おしゃべり」に関係していることから、「女性がおしゃべりな科学的根拠」として最近では一般図書にもよく引用されている。しかし、これには注意が必要である。このデータは「2つの単語が韻を踏んでいるか」を判断しているときに得られたもので、決して実際の会話をしているときに得られたものではない。

いずれにしてもプロローカ野の活動には予想された男女差があった。では、「言語を理解する」ウェルニケ野に関してはどうだろう？実は1999年に仮説を否

定するデータが発表された。アメリカのフロストラによると、「単語の意味判断を行う課題では、脳活動の男女差は見出されなかった」という。

臨床報告が正しければ、意味を理解するための言語野にも男女の差がでるはずだ、と我々は考えた。フロストラは「単語」を切り出したがために男女差の検出に失敗した可能性がある。日常大切なのは人の話を全体として理解することだから、もっと日常に近い普通の文、あるいは文章を聞いて理解する課題を使えば男女差が検出できるかもしれない。

3 エッセイの朗読を聴くときの脳の活動

そこで我々は、短いエッセイの朗読を聴いて内容を理解する、という課題を使って男女のボランティアの脳の活動を比較することにした。何種類かのエッセイを選び朗読してそれぞれ160秒の刺激を準備する。さらに単なる音の刺激で生じる言語理解とは無縁の活動を差し引くために、逆転再生した刺激も準備した。実際の実験では40秒ごとに順方向の意味の分かる刺激と、逆転再生を切り替えて、ヘッドフォンから聞いてもらい、その間の脳の活動を計測した(写真1)。実験が終わるたびに参加者には簡単な質問をして、話の内容を聞いて理解していたかどうかを確かめた。こうして我々は男性16名、女性14名の被験者からのデータを集めた。



写真1 3テスラ超高磁場磁気共鳴装置
脳活動の検出感度が高い新鋭機

図3がその結果である。通常の朗読を聞いている間の活動から、逆転した意味不明の刺激を聞いている間の活動を引き算して、言葉を理解することに関係している活動だけを表示してある。一目瞭然、男性では左側だけに活動が局在しているが、女性では左

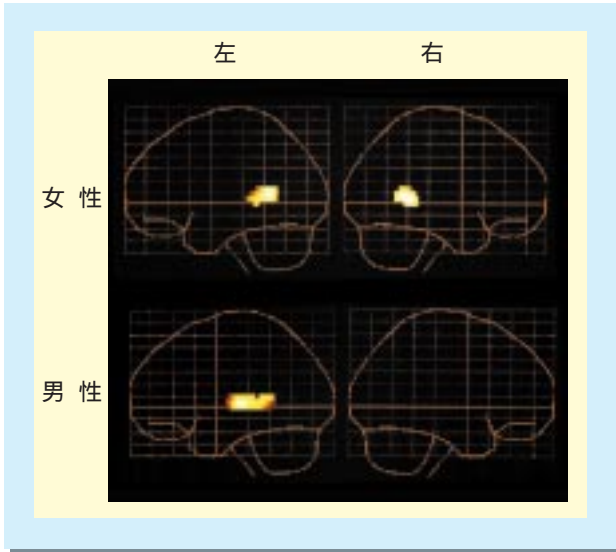


図3 朗読を聴いて理解する際の脳活動の男女差

にも右にもほぼ同じ強さの活動が認められる。活動している場所は、側頭葉の中側頭回という部分の後方で、図1と較べるとわかるようにウェルニケ野のごく近傍である。古典的なウェルニケ野は側頭葉の上側頭回後方なので、検出された領域(中側頭回)は少し下方である。実は、最近この中側頭回こそが文章の理解に重要であると考えられているので、まさに「文章の意味を理解する」領域で男女差が検出された、と言えるだろう。実際、朗読を1秒ごとに断片化して、順番を入れ替えた刺激を使うと、男女差が消えてしまうことも確かめた。男女の差は、文と文、あるいは文章全体にわたるような総合的な言語処理の過程で生じるらしい。このような男女の脳活動の差は、一人一人のデータだけでも十分に覗くことができる(図4)。

4. 男女差の意味するところ

我々は「文章の意味を聞いて理解する」という過程で、脳の活動に男女差があることを明瞭に示した。男性は左の中側頭回だけを使い、女性は左に加えて右の中側頭回も同じくらい使っていた。では、右の中側頭回を使うメリットは何か？男性と女性で話の理解の深さや性質が異なるのか？女性は注意深い聞き手なのか？残念ながら、誰もが最も関心を持つ点について、明快な答えを出すデータは持ち合わせていない。

でも次のようなことは言えるだろう。近年のデータによると、右脳は時間的に離れた2つの刺激を結びつける働きを持っているらしい。右脳と左脳をつなぐ脳梁を切断した分離脳の研究からも、一般的に左脳は情報を分析的に、右脳は全体として処理すると言われている。もし右側の中側頭回の活動についてもこの傾向が成り立つとすれば、女性は男性よりも話の中の離れた部分同士を結びつける能力に優れている可能性がある。文法的、統語的な「固い」左脳型の理解に、柔軟で「飛んだ」右脳的能力を加えることによって、多様で個性的な理解の扉が開かれているのかもしれない。

逆に、女性と男性が話を聞いて理解する際の理解の仕方の違いを「科学的に」とらえることができれば、右脳の言語情報処理の性質を解明するきっかけになるかもしれない。どうすれば「理解の個性」を定量化することができるのか？我々の挑戦は続く。



図4 脳活動の個人例(男女各3名ずつ)

参考文献

Kansaku K, Yamaura A, Kitazawa S (2000) Sex-differences in lateralization revealed in the posterior language areas. *Cerebral Cortex* 10:866-872.

研究課題

目標達成型脳科学研究推進制度

ヒトを含む霊長類のコミュニケーションの研究

ラボメンバー (Lab. Members)

北澤 茂 (Shigeru Kitazawa)

e-mail:kitazawa@etl.go.jp

神作 憲司 (Kenji Kansaku)

情報科学部 (Information Science Division)

千葉大学大学院医学研究科 (Chiba University School of Medicine)

パルスタイミング揺らぎを 7.5 fs に抑圧

- 高安定フェムト秒レーザーを開発 -

7.5 fs Pulse Timing Jitter

- in a Phase-Locked Femtosecond Laser -

光技術部

Optoelectronics Division

The output pulse from a mode-locked Cr:LiSAF laser has been phase-locked to an electrical reference signal by controlling the laser cavity length and the pump power simultaneously. The phase difference between the laser and the reference is detected by the use of a digital phase detector and is fed back to a piezoelectric transducer and to a laser diode injection current. An rms timing jitter of 7.5 fs relative to the reference has been obtained for 25 mHz – 10 kHz bandwidth.

1 .はじめに

モード同期レーザーの性能、信頼性が着実に向上し、種々の科学、産業分野におけるフェムト秒光パルスの利用が始まっている。実用的な観点からは、持続時間の短い光パルスを発生するだけでなく、発生する光パルスのタイミングを正確に制御すること、および光パルスを電気信号に同期することが重要な課題である。これらの要請に応えるため、タイミング揺らぎを高精度評価する技術¹⁻³⁾や、タイミングを高度に安定化する技術⁴⁻⁸⁾の開発が進められている。タイミングの安定化には位相同期ループの技術が用いられ、レーザーパルスと基準となる安定な電気信号との間の位相差を検出し、その偏差に応じてレーザーを制御する手法が採用されている。

当所では、産業科学技術開発制度「フェムト秒テクノロジーの研究開発」において、テラビット情報伝送や光応用計測への応用の観点から、レーザーパルスのタイミング揺らぎを計測・制御する技術の開発を進めている。タイミング揺らぎの評価については、時間領域復調法^{1, 2)}、およびタイムインターバル解析法³⁾と呼ばれる独自の計測手法を開発し、フーリエ周波数1mHz-1MHzの領域で揺らぎのパワースペクトルを240dB以上のダイナミックレンジで測定することを可能にした。

一方、タイミング安定化については、従来のアナログ方式に代わる独自のデジタル位相検出器を開発して固体レーザーの制御に適用し、タイミングジッターを世界最高の20fsにまで抑圧した⁴⁾。これによりジッターをレーザーのパルス幅(80fs)以下に抑えることが初めて可能になったが、最近ではパルス幅が10fs

程度のレーザーも製品化されており、一層の低ジッター化が要求されている。残留ジッターの要因は、主として周波数500Hz-10kHzの領域に存在する比較的速い変動成分であり、制御帯域の不足により抑圧されず残ったものである。安定化にはピエゾアクチュエータ(PZT)による共振器長制御を用いているため、制御帯域はPZTの機械的な応答速度に制限され、1kHz程度が限界であった。

本研究では制御帯域の改善を図るため、従来の共振器長制御に加えて、レーザーの励起光強度を同時に制御する新しい方式を開発した。すなわち、デジタル位相検出器で得られた誤差信号の高周波成分を、励起光源であるに半導体レーザーの注入電流に帰還することにより、制御系の広帯域化を図った。その結果、タイミング揺らぎをパルス幅の約1/10である7.5fsまで抑圧することに成功した。

2 .励起光強度に対するレーザーの応答

図1に示すように、実験には半導体可飽和吸収ミラー(SESAM)を用いた受動モード同期Cr:LiSAFレーザーを使用した。定電流駆動された2台の半導体レーザー(波長670nm)を励起光源として用いた。半導体レーザーの励起パワーをそれぞれ300mWに設定した場合、Cr:LiSAFレーザーの平均出力パワーは43mW、パルス幅は80fs、繰り返し周波数は100MHzである。励起光強度は半導体レーザーの電流を変調することにより可変した。

安定化を行う前に、励起光強度に対するCr:LiSAFレーザーの応答特性を測定した。一方の半導体レーザーの出力光強度を変調し、このときのCr:LiSAF

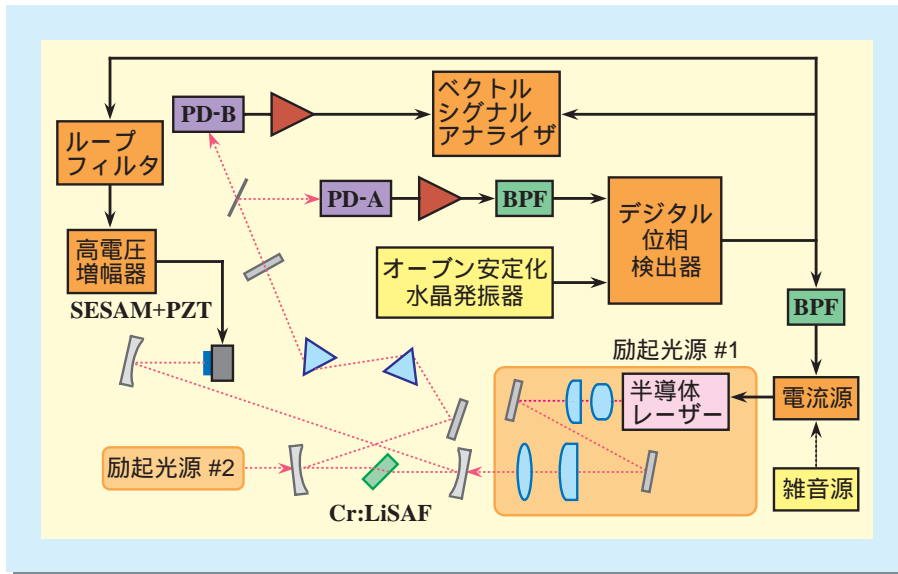


図1 共振器長・励起光強度制御を利用したモード同期レーザーのパルスタイミング安定化装置

レーザーのパルス振幅、および位相を時間領域復調法¹⁾により解析した。変調信号として、帯域幅500kHzの白色雑音を用いた。変調振幅は20mA_{p-p}、半導体レーザーのしきい値、直流バイアス電流はそれぞれ400mA、690mAである。レーザー出力をpinフォトダイオードにより受光し、ベクトルシグナルアナライザを用いて振幅、位相雑音パワースペクトル(PSD)を計算した。

図2はフーリエ周波数10Hz-1MHzにおけるパワー

スペクトルの測定結果である。Aは変調された半導体レーザーの振幅雑音である。周波数100kHz以下では白色雑音に近い特性になっているが、高周波側で減衰する傾向があり、カットオフ周波数は150kHzである。これは半導体レーザーを駆動する定電流源の周波数特性によるものである。Bは変調時、Cは無変調時のCr:LiSAFレーザーの振幅雑音である。雑音は低周波側で増加する傾向にあるが、周波数100Hz-100kHzの領域に変調の影響が明瞭に現れている。

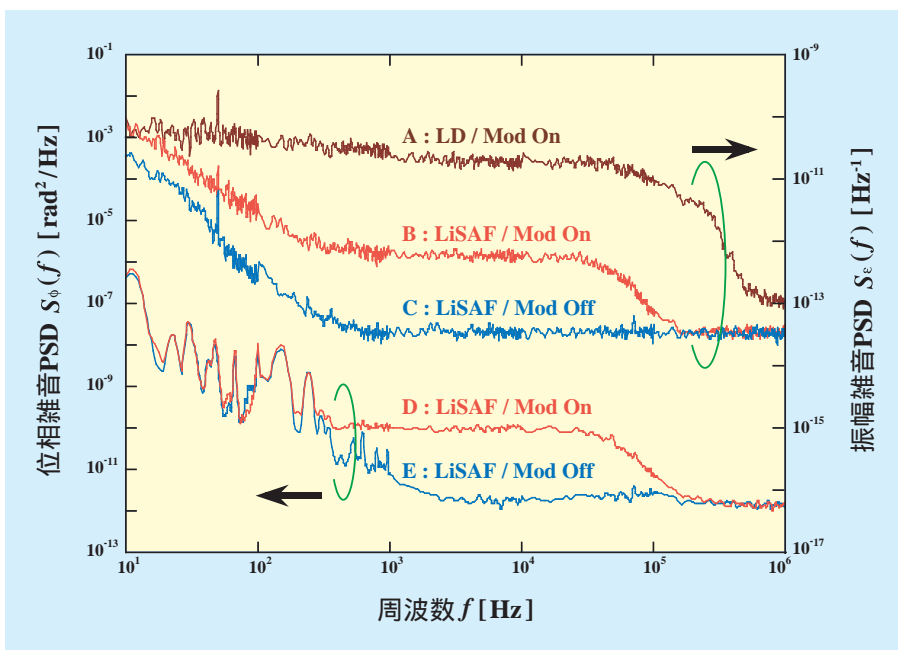


図2 励起光強度変調に対するCr:LiSAFレーザーの周波数応答

カットオフ周波数は60kHzで、半導体レーザーのカットオフよりも低周波側にあり、Cr:LiSAFレーザーの動作機構に基づくものと考えられる。Dは変調時、Eは無変調時のCr:LiSAFレーザーの位相雑音である。500Hz以下の低周波領域では、種々の外乱による雑音が支配的であるが、周波数500Hz-100kHzの領域で変調の効果が現れている。カットオフ周波数は55kHzで、振幅雑音の場合とほぼ一致している。これらの観測結果は、励起光強度の変調によりパルスタイミング制御が可能であり、PZTよりも高速の制御が期待できることを示唆している。

3. タイミング安定化実験

前節の測定結果に基づき、共振器長と励起光強度制御を併用した安定化装置を試作した。図1に示すように、基準電気信号として周波数100MHzのオープン安定化水晶発振器(OCXO)を用いた。SESAMをPZTに張り付けて、共振器長を可変できる機構とした。共振器に組み込んだPZTの共振周波数は10kHzであり、制御帯域は1kHz程度に制限される。レーザー出力をpinフォトダイオードで受光し、100MHzの基本波成分をOCXOの出力とともにデジタル位相検出器⁴⁾に入力した。デジタル位相検出器はコンパレータ、位相/周波数比較器、フィルタ、差動増幅器から構成され、2つの入力信号に対して、位相の進み/遅れと、立ち上がりの時間差を検出し、位相差に比例する直

流電圧を発生する。位相検出器の感度は-7.84V/radである。デジタル位相比較器の出力を二分し、一方はループフィルタ、高電圧増幅器を介してPZTに、もう一方はフィルタ(BPF)を介して半導体レーザーの定電流源に帰還した。デジタル位相検出器の出力をベクトルシグナルアナライザにより解析し、基準に対する相対的なタイミング揺らぎを評価した。

図3に位相雑音パワースペクトルとタイミングジッターの測定結果を示す。タイミングジッター σ_J は、パワースペクトル $S_\phi(f)$ より次式を用いて算出される。

$$\sigma_J(f_h, f_l) = \frac{1}{2\pi f_l} \sqrt{\int_{f_l}^{f_h} S_\phi(f) df} \quad (1)$$

ここで、 f_l はパルス繰り返し周波数、 f_l 、 f_h は積分の下限、上限を表す。 σ_J の値は $f_h = 10\text{kHz}$ として、 f_l の関数としてプロットした。Aはデジタル位相検出器自体が有する雑音のパワースペクトルで⁴⁾、揺らぎ抑圧の限界に相当する。0.1Hz以下の領域での急激な増加は、測定器の分解能帯域幅の影響である。Aから見積もられたジッター抑圧の限界は、25mHz-10kHzの周波数帯域で0.67fsである。

図3Bは、従来の共振器長制御による安定化で得られたパワースペクトルである⁴⁾。周波数50Hz以下ではデジタル位相検出器の雑音にほぼ等しく、限界ま

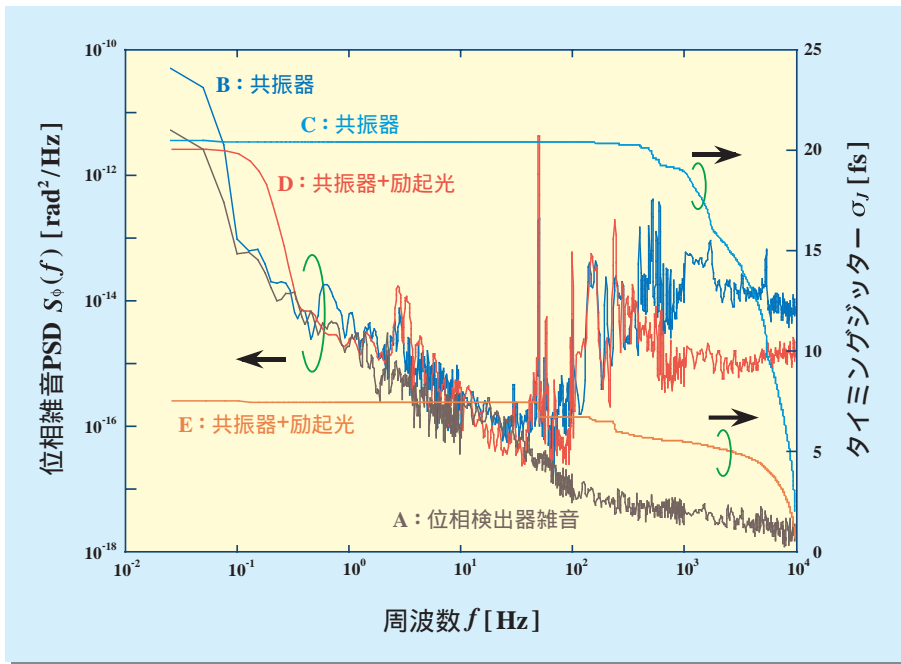


図3 位相雑音パワースペクトルとタイミングジッター

で到達していることがわかる。しかしながら、周波数100Hz以上ではAとBの差が大きく、雑音の抑圧が不十分であることを示している。これはPZTの応答速度に起因する制御帯域の不足が原因である。Cは対応するタイミングジッターで、25mHz-10kHzの周波数帯域で20fsにまで抑圧されている。周波数500Hz以下ではジッターはほぼ一定であり、残留ジッターの原因が周波数500Hz-10kHzのタイミング揺らぎであることを示している。したがって、低ジッター化を図るには、周波数500Hz以上の揺らぎを抑圧することが効果的である。

図3Dは、共振器長と励起光強度制御を併用した場合のパワースペクトルである。周波数500Hz以下の雑音は共振器長制御の場合(B)とほぼ等しいが、500Hz-10kHzの範囲で雑音が1桁程度減少している。Eは対応するタイミングジッターであり、25mHz-10kHzの周波数帯域で7.5fsまで減少している。揺らぎ抑圧の限界(A)との差はまだ大きい、励起光強度制御を併用した効果が顕著に現れている。一層の低ジッター化のためには制御系の最適化が必要である。

図2の測定結果からもわかるように、励起光強度の変調はタイミングの変化だけでなく、振幅の変化も引き起こす。図4Bはフリーランニング時、Cは安定化時の振幅雑音パワースペクトル測定結果である。Aは測定器自体の雑音を表し、B、Cよりも十分に小さくなっている。BとCはほぼ一致しており、励起光強度制御の影響が無視できるほど小さいことがわかる。これは励起光強度変調による振幅雑音の増加分が、Cr:LiSAFレーザーが本来持っている雑音に比べて極めて小さいためであると考えられる。

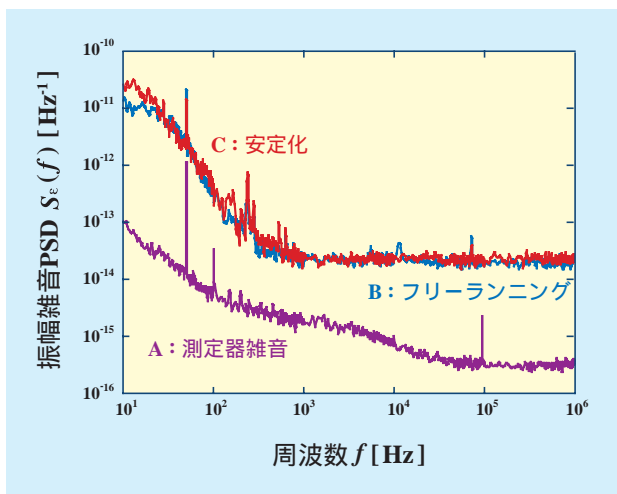


図4 励起光強度制御の振幅雑音への影響

図5は本研究で得られたタイミングジッターを、従来の報告と比較したものである。横軸は積分周波数範囲、縦軸はジッターを表し、線の長さは積分範囲に対応している。積分の上限と下限について明確なきまりがなく、設定されている積分範囲が異なり、単純な性能比較はできないが、広い積分範囲で小さいジッター値が得られることが望ましい。本研究で設定した積分範囲は最も広く、かつ得られたジッター値も最小であることがわかる。

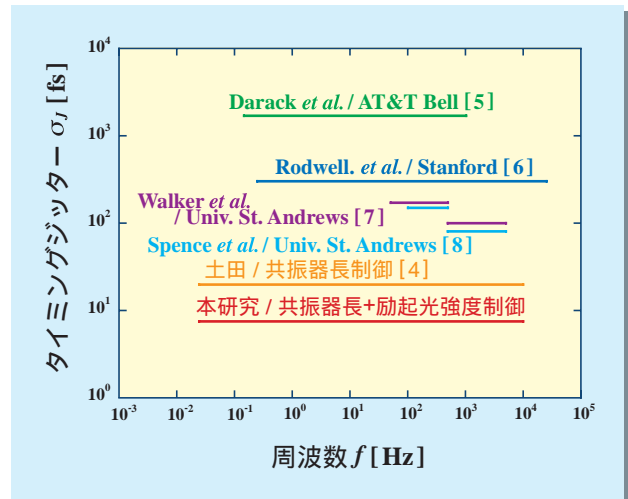


図5 タイミングジッターの比較

4.まとめ

モード同期レーザーのパルスタイミング安定化において、従来の共振器長制御に励起光強度制御を付加することにより、制御系の広帯域化を実現した。基準電気信号に対するタイミングジッターは、25mHz-10kHzの周波数帯域で7.5fsまで減少した。今後は制御系の最適化により、一層の性能向上を図る予定である。

参考文献

- 1) H. Tsuchida, "Wideband phase noise measurement of mode-locked laser pulses by a demodulation technique", Opt. Lett., vol.23, 286 (1998).
- 2) H. Tsuchida, "Correlation between amplitude and phase noise in a mode-locked Cr:LiSAF laser", Opt. Lett., vol.23, 1686 (1998).
- 3) H. Tsuchida, "Time interval analysis of laser pulse timing fluctuations", Opt. Lett., vol.24, 1434 (1999).
- 4) H. Tsuchida, "Pulse timing stabilization of a mode-locked Cr:LiSAF laser", Opt. Lett., vol.24, 1641 (1999).

- 5) S. B. Darack, D. R. Dykaar, and G. T. Harvey, "Timing-jitter stabilization of a colliding-pulse mode-locked laser by active control of the cavity length", Opt. Lett., vol.16, 1677 (1991).
- 6) M. J. W. Rodwell, D. M. Bloom, and K. J. Weingarten, "Subpicosecond laser timing stabilization", IEEE J. Quantum Electron., Vol.25, 817 (1989).
- 7) D. R. Walker, D. W. Crust, W. E. Sleat, and W. Sibbett, "Reduction of phase noise in passively mode-locked lasers", IEEE J. Quantum Electron., vol.28, 289 (1992).
- 8) D. E. Spence, J. M. Dudley, K. Lamb, W. E. Sleat, and W. Sibbett, "Nearly quantum-limited timing jitter in a self-mode-locked Ti:sapphire laser", Opt. Lett., vol.19, 481 (1994).

研究課題

産業科学技術開発

石油及びエネルギー需給構造高度化技術開発評価
超短パルス光エレクトロニクス技術の評価

用語説明

モード同期レーザー (mode-locked laser)

レーザー発振している各モードの位相を同期させることをモード同期とよび、これを利用してピコ秒からフェムト秒領域の超短光パルスを発生するレーザーをモード同期レーザーとよぶ。多数のモードで発振するレーザーでは、各モードの位相関係は一般的には不規則であり、出力光は時間的に不規則な変動を伴うが、位相を同期させることにより鋭いパルスとなる。レーザー共振器内に変調器を配置して、外部信号により同期を行う能動モード同期と、可飽和吸収体などの非線形性を利用する受動モード同期がある。モード同期は固体、半導体、色素などを利得媒質としたレーザーで実現されている。

時間領域復調法 (time-domain demodulation technique)

レーザーパルスのタイミング揺らぎを評価するために、1998年に当所において開発された測定法で、信号の瞬時位相を時間領域で復調してタイミング揺らぎを評価する。信号をAD変換によりデジタル化した後、その実数部と虚数部を分離して検出し、復調により位相変化のみを抽出する。時間領域で測定を行うため、従来のSSB位相雑音測定法に比べて、解析周波数範囲やダイナミックレンジが著しく改善される。また、振幅雑音と位相雑音を分離して検出できるため、両者の間の相互相関などより高度な評価も可能である。このような復調方式はデジタル移動体通信における変調信号の解析にも利用されている。

土田 英実 (Hidemi Tsuchida)

e-mail:tsuchida@etl.go.jp

カーボンナノチューブの 高分解能STM原子像とトンネル分光 Atomic Resolution Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy of Carbon Nanotubes

材料科学部 分子性ハイブリッド材料ラボ
Materials Science Division, Molecular Hybrid Materials Lab.

The highest resolution Scanning Tunneling Microscopy (STM) topographic imaging of carbon nanotubes (CNTs) has been achieved. And Scanning Tunneling Spectroscopy (STS) of individual CNTs enables us to correlate microscopic structure - property relationship at nanometer (nm) - scale. We have succeeded in such observations not only for single-wall carbon nanotubes (SWCNTs) but also for multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs). A true atomic resolution STM & STS leads us to the study of local electronic states of CNTs as well as CNT nanodevices.

1 .研究の要旨

カーボンナノチューブ (CNT) の走査型トンネル顕微鏡 (STM) 像の観測において世界最高の分解能を達成した。また CNT 一本一本の走査型トンネル分光 (STS) 測定を行うことにより、個々のCNTの電気特性 (電子状態) を測定し、CNTの微視的構造 (螺旋度や直径) との対応関係を明らかにすることが、室温大気中で可能であることを示した。単層CNTだけでなく、多層CNTについてもそのような実験が可能であることを示した。さらに、それぞれのCNTについて、原子分解能 STS 測定による局所電子状態の研究の可能性を示した。これらのナノテクノロジーは今後のCNTエレクトロニクスならびにCNTナノデバイスの開発にとって必要不可欠である。

2 .研究の背景

CNTは炭素原子だけでできた直径数ナノメートル (nm) の円筒で、1991年にNECの飯島氏により発見された¹⁾。炭素間結合の網目模様の螺旋度や直径の微妙な違いにより、金属的になったり半導体的になったりするという極めて特異な電気特性が翌1992年に複数のグループによって理論的に予測された²⁾。実験的には1998年1月になって初めてSTMとSTSの組合せにより、オランダのデルフト工科大学 (C. Dekker) と米国ハーバード大学 (C. M. Lieber) のグループによって上記の特性が確認された³⁾。前者は液体ヘリウム温度、後者は液体窒素温度でいずれも極低温高真空中における実験であったが、当所では同年12月に同様

な実験が室温大気圧でも可能であることを示した⁴⁾。これらの実験はいわゆる単層カーボンナノチューブ (SWCNT) に関する実験であったが、当所ではその後多層カーボンナノチューブ (MWCNT) についても、STMによるトポグラフィ像とSTSによる電流 - 電圧特性の対応関係を観測することに成功し、金属的なMWCNTと半導体的なMWCNTが存在することを明らかにした⁵⁾。

3 .CNTの原子分解能STMとSTS

CNTをナノメートルサイズの分子エレクトロニクス用の素材としてみた時、その最大の特徴は、それ自身のイントリンシックな電子状態が極めて構造敏感な点である。そのために直径や螺旋度のほんの少しの違いで、半導体になったり金属になったりする。CNTの発見からほぼ10年経過した現在でも、内部構造や電気特性の異なるCNTを作り分けたり、分離精製できる技術はまだ開発されていない。従って、今日入手可能なCNT試料は全て、色々な内部構造や電気特性のCNTを含んだ混合物である。そのような現状においては、試料に含まれる一本一本のCNTの特性が異なるので、それを区別しないで行われる大雑把な実験では、結果の解釈にも曖昧さがつきまとい、結局何をやっているか判らないことになりかねない。従って、CNTの電気的な性質に関する信頼できる実験をしようと思えば、CNT表面の炭素結合の網目模様が判別できるくらい高分解能な顕微鏡技術 (ナノテクノロジー) が必要不可欠で、それなしにはCNT

の特異な電気的性質を活かしたCNTエレクトロニクスやCNTナノデバイスの開発はあり得ない。

当所では、1998年以来、種々のCNTのSTMおよびSTSの室温大気中における測定技術の向上を図って来た。最初にSWCNTのSTMおよびSTSの観測に成功し⁴⁾、ついでMWCNTについても、世界にさきがけ、同様な実験を成功させることができた⁵⁾。最近では、CNTのSTM原子像観測の技術レベルとして、世界最高の分解能を実現し、真の原子分解能STMトポグラフィ像の観測に成功している。測定はデジタルインストルメンツ社製の走査型プローブ顕微鏡 Nanoscope IIIa を用いて室温大気中で行った。

単層カーボンナノチューブ(SWCNT)

最初に測定した試料はアーク放電法でNi-Y (Ni:Y=4.2:1 at.%)を触媒として作製されたSWCNTで、東京都立大学の阿知波研究室から提供されたものを、エタノール中で超音波分散し、高配向熱分解黒鉛(HOPG)基板にキャストして乾燥させたものを用いた。

図1は直径と螺旋度の異なる種々のSWCNTの原子分解能STMトポグラフィ像を示す⁴⁾。試料と探針(Pt-Ir)との間のトンネル電流が一定($I=300\text{pA}$)になるように探針の高さをフィードバック制御し、試料表面を走査しながら探針の高さを記録して測定された生の

STMトポグラフィ像であり、画像処理は一切施していない。図の暗い点の並びが炭素の六角形の中心に相当し、その配列とチューブの軸方向との間の角度を、螺旋角(カイラルアングル)と呼んでいる。各CNTの直径と螺旋度は、それぞれ(a)1.2nm・11°、(b)2.9nm・23°、(c)1.8nm・10°、(d)2.5nm・16°である。このように、孤立したCNTの直径と螺旋度は一本一本異なり、分布も多様でどのタイプが特に多いということは見られなかった。但し、ロープ(あるいはバンドル)と呼ばれるCNTが束になった状態では、互いに良く似た直径と螺旋度のCNTがまとまって観測されることが多い⁴⁾。

図2は直径と螺旋度の異なる種々のSWCNTのSTSの測定結果で、STMの走査を中断し、フィードバックを切って位置を固定した状態で、電圧を変化させトンネル電流を測って得られる、電流-電圧(I-V)特性を示す⁴⁾。(e)は金属的なCNTの場合で、ほぼバイアス電圧に比例したトンネル電流が観測される。それ以外は半導体的なCNTで、バイアス電圧が低いところでは殆ど電流が流れないが、半導体のギャップを越えるバイアス電圧が掛かると急激にトンネル電流の増大が観測され、そのことから容易に半導体CNTと金属CNTを区別することができる。各CNTの直径と螺旋度は、それぞれ(a)1.6nm・30°、(b)1.7nm・

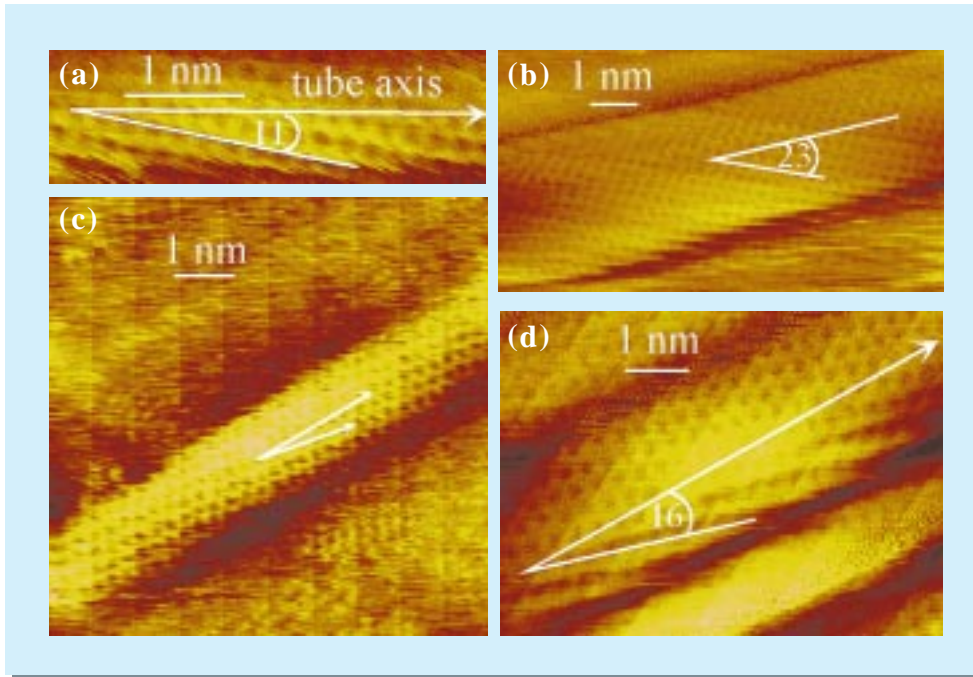


図1 直径と螺旋度の異なる SWCNT の STM トポグラフィ像
(a)1.2nm・11° (b)2.9nm・23° (c)1.8nm・10° (d)2.5nm・16°

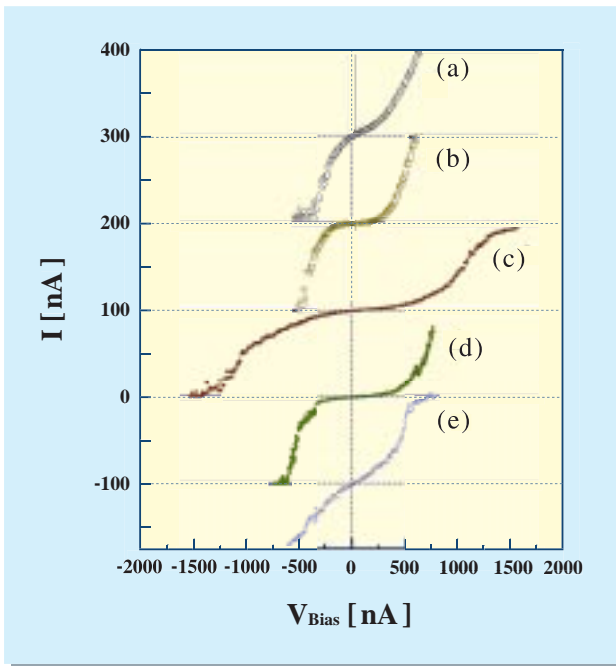


図2 直径と螺旋度の異なるSWCNTのSTS(I-V特性)
 (a)1.6nm・30° (b)1.7nm・18° (c)1.5nm・21°
 (d)1.8nm・11° (e)1.4nm・0°

18°、(c)1.5nm・21°、(d)1.8nm・11°、(e)1.4nm・0°である。(a)はジグザグ型、(b)-(d)は螺旋(カイラル)型、(e)はアームチェア型と呼ばれる構造のCNTである。測定した40本の孤立CNTの中で、2本だけがアームチェア型で残りはカイラル型ないしジグザグ型のCNTであった⁴⁾。

SWCNTの原子分解能STSの測定例を図3に示す。左図はSTMトポグラフィ像で、その中の×印の各点で測定したトンネルスペクトルが右下図のSTSプロットに重ね書きされており、極めて高い再現性を示している。右上図は一定のバイアス電圧での電流像すなわちトンネル分光電流像(CITSイメージ)を示す。CITS像はそれぞれの領域での表面の電気特性を示し、局所電子状態の研究に威力を発揮することが期待されるが、残念ながら現状では十分な空間分解能が得られていない。

多層カーボンナノチューブ(MWCNT)

SWCNTの場合には、明確な理論的な予測があり、それに対応する実験結果が得られたが、MWCNTの

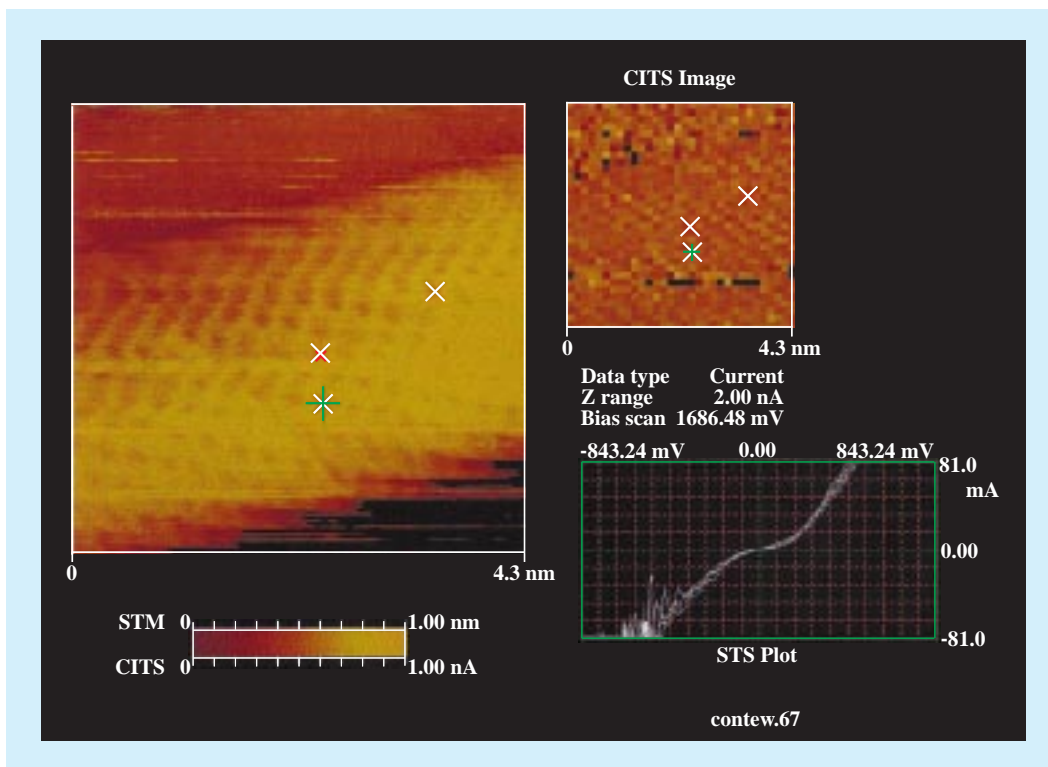


図3 原子分解能STS
 (左) SWCNTのSTMトポグラフィ像
 (右上)トンネル分光電流像(CITSイメージ)
 (右下)STS(I-V特性)

場合にはそもそも理論的予測が極めて難しい。STMは原理的に表面第一層しか見ることが出来ないの、表面から見えない内側の層からの寄与がどの程度あるのかということが大きな問題である。グラファイトの場合と違って、異なる層の間の幾何学的な関係には多様な可能性があり、理論的予測も容易では無い。

我々が測定に用いたMWCNTは二種類あり、最初に測定したのは通常のヘリウムガス中でアーク放電法で作製されたMWCNTをCuCl₂を用いて精製した試料で、物質工学工業技術研究所の湯村グループから提供された。次いで、名城大学安藤研究室で水素雰囲気中でアーク放電法で作製されたMWCNTを、この場合は提供された未精製の試料をそのまま測定に用いた。基板はいずれの場合もHOPGである。

図4はMWCNTの典型的なSTMトポグラフィ像を示す。各CNTの直径と螺旋度は、それぞれ(a)6.2nm・30°、(b)4.1nm・30°である。すなわち両方ともジグザグ型であるが、直径の違いにより、(a)は金属的、(b)は半導体的なMWCNTであった⁵⁾。

いうまでもなく通常STMはMWCNTの表面第一層の炭素原子を見ているわけであるが、精製したMWCNTにおいては、最外層が部分的にとれて第二、第三の内側の層のSTM像を観察することができる場合もある⁵⁾。

図5は2本のMWCNTのSTS (I-V特性)を示す⁶⁾。それぞれの直径と螺旋度は、(a)3.2nm・0°、(b)2.8nm・30°、すなわち前者はアームチェア型後者はジグザグ型であった。I-V特性から(a)は金属的、(b)は半導体的な電気特性のMWCNTであることが判る。STSで得られるMWCNTの電気特性は表面最外層の構造か

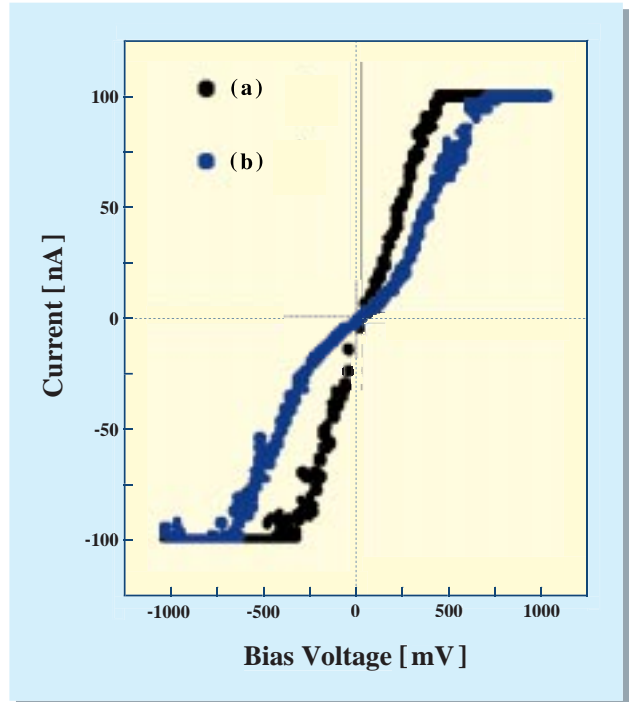


図5 MWCNTのSTS (I-V特性)
(a)金属 (b)半導体

ら予測される電気特性と良く対応しており、内側の層からの影響は小さいと考えられる。

図6はMWCNTの現在世界最高の高分解能のSTMトポグラフィ像(生データ)(a)とそれに画像処理(フーリエ・フィルタリング)を施して得られた鳥瞰図(b)を示す。ここまで拡大すると単に六角格子の中心の暗い部分だけでなく、それを構成する6個の炭素原子とその結合(分子軌道)に対応した電子分布が明瞭に観測される。グラファイトのSTM像では、第二層の強

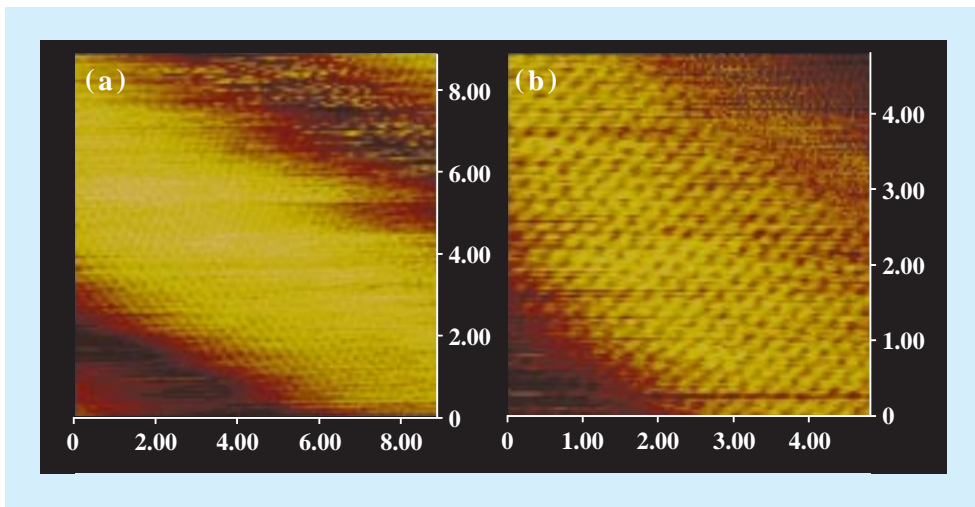


図4 MWCNTのSTMトポグラフィ像 (a)ジグザグ型・6.2nm (b)ジグザグ型・4.1nm

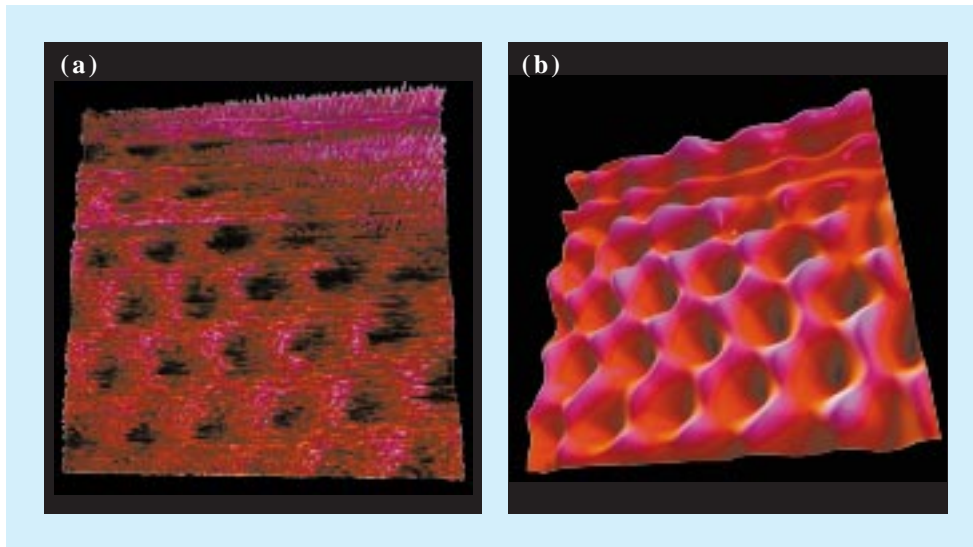


図6 MWCNTの世界最高分解能のSTMトポグラフ像(a)と鳥瞰図(b)

い影響により6個の炭素原子の内3個だけしか観測されていないと解釈されているが、CNTの場合には6個の炭素原子が全て観測されていることがわかる。但し、MWCNTの場合はよく見ると少し第二層の影響が見られ、6個の炭素原子が全て同一ではなく、1個おきに明るさ(高さ)が微妙に異なる部分があり、その模様が場所によって変化して行く様子が観察される。

CNT ナノデバイス - 分子内接合 -

CNTはそれ自身多様な構造をとり、種々の半導体や金属的特性をもつことができるので、二種類のCNTを融合することにより、CNTだけから成る半導

体 - 半導体、半導体 - 金属、金属 - 金属など種々の接合(「分子内接合」と呼ばれる)を形成することが可能である。図7はそのようなCNT分子内接合のSTM原子像の観測例とそれに対応する分子構造モデルである。原子分解能STMトポグラフ像から、右半分はアームチェア型CNTで金属的、左半分は半導体的なジグザグ型CNTから成るCNT分子内接合であることが判る。従って、これはいわば世界最小のダイオードの観測例と言える。これはCNTナノデバイスとして期待されている多様な可能性の一部であるCNT分子内接合のほんの一例に過ぎない。

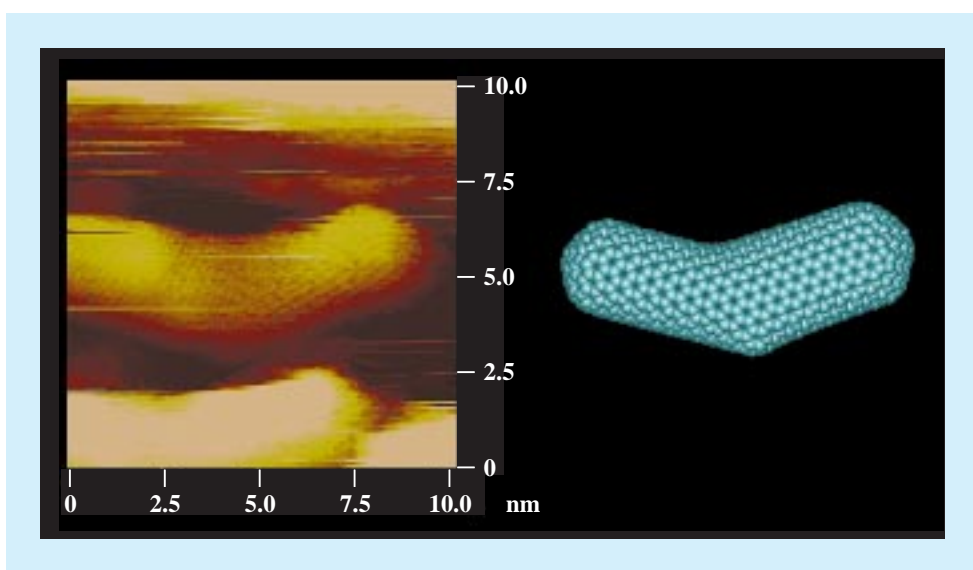


図7 CNT分子内接合の原子分解能STMトポグラフ像と対応する分子模型。世界最小のダイオード。

4 .まとめと今後の展望

CNTのSTM像の観測において世界最高の分解能を達成した。またCNT一本一本のSTS測定を行うことにより、個々のCNTの電気特性(電子状態)を測定し、CNTの微視的構造(螺旋度や直径)との対応関係を明らかにすることが、室温大気中で可能であることを示した。単層CNTだけでなく、多層CNTについてもそのような実験が可能であることを示した。さらに、それぞれのCNTについて、原子分解能STS測定による局所電子状態の研究の可能性を示した。これらのナノテクノロジーは今後のCNTナノエレクトロニクスやCNTナノデバイスの開発にとって必要不可欠である。今後は温度可変型STMを用いた低温におけるマニピュレーションと真の原子分解能STM&STSを併用してCNTナノデバイスの開発に取り組んでいきたい。

謝辞

本研究に用いたCNT試料を提供して頂いた下記の方々に感謝します。

SWCNT : 東京都立大学阿知波研究室、他

MWCNT : 物質工学工業技術研究所湯村グループ、名城大学安藤研究室

参考文献

- 1) S. Iijima: *Nature* 354, 56 (1991)
- 2) N. Hamada, S. Sawada and A. Oshiyama : *Phys. Rev. Lett.* 68, 1579 (1992); R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhouse and M. Dresselhouse : *Appl. Phys. Lett.* 60, 2204 (1992); K. Tanaka, K. Okahara, M. Okada and T. Yamabe : *Chem. Phys. Lett.* 191, 469 (1992)
- 3) J. Wildoer, L.C. Venema, A.G. Rinzler, R.E. Smalley and C. Dekker : *Nature* 391, 59 (1998); T. Odom, J.L. Huang, P. Kim and C.M. Lieber : *Nature* 391, 62 (1998)
- 4) A. Hassanien, M. Tokumoto, Y. Kumazawa, H. Kataura, Y. Maniwa, S. Suzuki and Y. Achiba : *Appl. Phys. Lett.* 73, 3839 (1998)
- 5) A. Hassanien, M. Tokumoto, S. Ohshima, Y. Kuriki, F. Ikazaki, K. Uchida and M. Yumura : *Appl. Phys. Lett.* 75, 2755 (1999)
- 6) A. Hassanien, M. Tokumoto, X. Zhao and Y. Ando : *Electronic Properties of Novel Materials - Molecular Nanostructures* eds. H. Kuzmany et al. (AIP, in press)

関連研究課題

科学技術振興調整費総合研究

「超薄膜材料設計技術に関する研究(フラーレン系超薄膜材料)」(94-98)

特別研究

「スーパーヘテロ機能材料に関する研究(分子性電荷移動ハイブリッド材料)」(99-)

ラボメンバー (Lab. Members)

徳本 圓 (Madoka Tokumoto)

e-mail:madoka@etl.go.jp

ハサニエン アブド (Abdou Hassanien)

e-mail:hasanien@etl.go.jp

材料科学部 (Materials Science Division)

材料科学部 (Materials Science Division)

9月26日～28日までの3日間、東京国際展示場(東京ビッグサイト)において「国際新技術フェア2000」(主催: 日刊工業新聞社)が開催されました。

本技術フェアは、産学官の技術交流および技術移転の促進を目的として昨年に引き続き開催されたもので、当所などの国立研究機関をはじめ、大学、特殊法人、企業等が出展し、最新の研究・開発の成果について、実演を交えた展示が行われました。当所からは「顔の自動認識」に関する研究成果を出展しました。また、特別企画として行われたロボットテクノプラザに「筋電制御義手」を出展しました。



特別講演会のお知らせ

テーマ: 情報・エネルギー・エレクトロニクス・計測標準技術の過去・現在・未来

日時: 平成12年11月1日(水) 9:30～17:00

場所: グランドアーク半蔵門

東京都千代田区隼町1番1号 (TEL. 03-3288-0111)

参加費: 聴講無料

申込・問合せ先

総務部庶務課(担当: 吉岡)

TEL. 0298-61-5016 FAX. 0298-61-5063 e-mail:yoshioka@etl.go.jp

平成12年度工業技術院研究所関西地区講演会のお知らせ

テーマ: 新法人・関西拠点における今後の展開

- 人間・生活環境科学、電子・光技術と計量、地質の取り組みから -

日時: 平成12年11月8日(水) 10:00～17:00

場所: 池田市民文化会館 大ホール(アゼリアホール)

大阪府池田市天神1-7-1 (TEL. 0727-61-8811)

主催: 電子技術総合研究所大阪ライフエレクトロニクス研究センター

計量研究所大阪計測システムセンター

大阪工業技術研究所

地質調査所大阪地域地質センター

参加費: 聴講無料

申込・問合せ先

大阪工業技術研究所 総務部業務課広報係

〒563-8577 大阪府池田市緑丘1-8-31

TEL. 0727-51-9606 FAX. 0727-51-8396 URL.<http://www.onri.go.jp/>

人事異動

氏名	(新)	(旧)
平成 12 年 9 月 18 日付		
DE VRIES, Ferdinand Jan	辞職	情報アーキテクチャ部主任研究官
平成 12 年 9 月 30 日付		
GRIMBERGEN, Evert Reijer Willem	辞職	知能情報部
平成 12 年 10 月 1 日付		
池上 敬一	企画室企画班長の併任解除	電子基礎部主任研究官兼企画室企画班長
大垣 英明	企画室企画班長に併任 企画室国際班長の併任解除 企画室国際班国際研究係長の併任解除 国際研究協力推進室国際企画係長の併任解除	量子放射部主任研究官兼企画室国際班長兼 企画室国際班国際研究係長兼国際研究協力 推進室国際企画係長
三浦 永祐	企画室国際班長に併任 企画室国際班国際研究係長に併任 国際研究協力推進室国際企画係長に併任	エネルギー部主任研究官兼企画室エネルギー 技術研究調査官
井上 貴仁	企画室に併任	超分子部主任研究官
右田 真司	採用 (電子デバイス部主任研究官)	電子デバイス部 第2号任期付研究員
ZAYETS, Vadym	採用 (材料科学部) 任期は平成 17 年 9 月 30 日まで	
篠岡 賢三	大阪工業技術研究所庶務課長補佐	大阪ライフエレクトロニクス研究センター - 庶務課長補佐
芝原 徹	大阪ライフエレクトロニクス研究センター - 庶務課長補佐	工業技術院人事課人事専門職兼筑波研究支 援総合事務所庶務課
平成 12 年 10 月 16 日付		
芝原 徹	筑波研究支援総合事務所庶務課の併任解除	大阪ライフエレクトロニクス研究センター - 庶務課長補佐兼筑波研究支援総合事務所庶 務課

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(61)5059

表紙写真 : カーボンナノチューブの世界最高分解能のSTM
原子像

URL <http://www.etl.go.jp/> e-mail: info@etl.go.jp
印刷・製本 ニッセイエプロ株式会社