

量子雑音に埋もれた微小信号の検出と応用

慶應義塾大学 日吉物理教室 三井隆久、青木健一郎

概要

光計測は他の計測法と比較すると極めて高感度であるが、光の量子効果に起因した散乱雑音が伴い、これ以下の信号の検出はそのままでは検出できない。同じ現象を繰り返し再現できる場合には、単純な積算法により、散乱雑音の低減化を行うことができる。この方法により、半導体チップ上のトランジスタの動作時の熱膨張を検出することに成功した。一方、ランダムな信号の場合には単純な積算法を用いることができず、散乱雑音以下の計測はあきらめられていた。我々は、新しい計測系を考案し、散乱雑音に埋もれたランダム信号を検出することに成功した。この方法を用いて、様々な物体表面の熱エネルギーによる運動を計測した。水や油表面など、従来から測られているものだけでなく、接着剤やゴム、眼球表面などの熱運動計測を行い、熱運動と物性の関係を調べた。

散乱雑音とは

太陽電池のような半導体素子を用いて光を電気に変換する際に発生する雑音。光が半導体素子に照射されてから電子が放出（励起）されるまでの時間は定まっておらず、ランダムに揺らぐため一定強度の光を照射しても光電流には雑音が生じる。これを散乱雑音 (shot noise) といい、光計測では不可避であり理論限界を与える雑音である。

同一波形の現象が繰り返し再現できる場合は、単純な積算で散乱雑音を低減化できる

散乱雑音の低減化ができれば、極めて小さな信号の検出が可能である。例として半導体素子表面の計測結果を示す。半導体集積回路内にはトランジスタや抵抗など様々な素子が組み込まれている。これらの素子に電流が流れると発熱し、熱膨張する。この熱膨張を検出すれば、素子内に流れる電流が判る。集光したレーザー光を用いると、 $1\mu\text{m}$ 以下の微小な素子内電流の計測が可能である。図1はCMOSリニアイメージセンサの計測例であり、メーカーの公開している規格と同様の信号が取得できている。図2はオペアンプと呼ばれる増幅素子の測定例である。赤で示した部分の熱膨張が大きい。出力側のトランジスタや抵抗であると思われる。 10^{-13}m (原子の大きさの1/1000)程度の熱膨張であるが、積算により計測が可能となった。本研究には、光計測の観点から光テコを用いた微小変位計測の有効性を示したことで、非接触集積回路診断装置としての実用的な意味、従来計測ができなかった金属電極のない半導体表面上や内部の電流を測定できるという半導体物理学における基礎研究上の意義がある。

図1

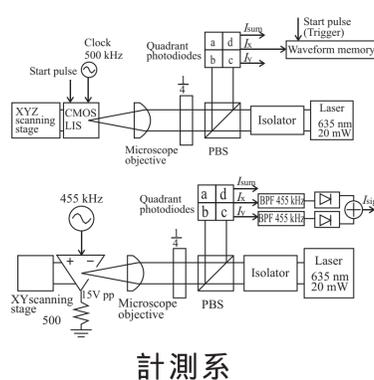
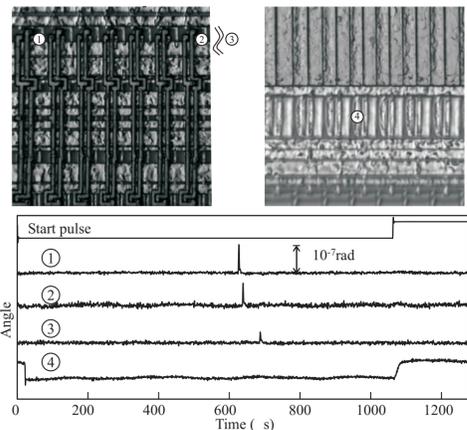
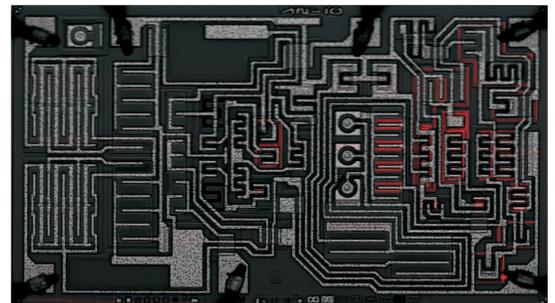


図2



増幅器(オペアンプ)の計測結果
赤で示した部分に多く電流が
流れている。

全ての物体は熱運動している

原子は小さく目で見るできないが、原子の乱雑な運動は熱として日常生活にも深く関わっている。熱は全ての物体にあるので、全ての物体は熱運動している。物体表面も熱運動しており、液体表面の熱運動のことをリップロンという。リップロンは原子の大きさより小さいが、光の回折効果を利用して従来計測されていた。しかし、油のような高粘度の液体面上のリップロンは光を効率よく回折しないので、計測が困難であった。回折効果を利用しない直接的なレーザー計測には散乱雑音が伴い、計測できなかった。

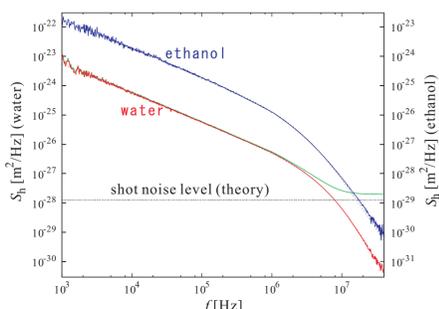
熱運動のような微小なランダム信号のレーザー計測は難しい

レーザー計測には散乱雑音が伴い、ランダム信号との区別が単純にはできない。このため、積算の可能な繰り返し信号でなければ散乱雑音以下の計測は不可能と思われていた。光計測における散乱雑音限界と呼ばれ、従来、これ以下のランダム信号は計測対象とはならず、挑戦することすらせず、あきらめられていた。

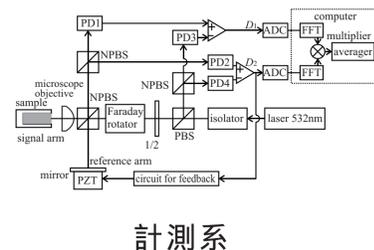
散乱雑音以下のランダム信号計測技術の開発に成功した

同一もしくは同等な複数の計測系を同時に複数測定し、相互相関を計測することで散乱雑音の統計的な低減化が可能となる。同時に複数の計測系で測定するため、異なる波長のレーザービームを複数用意して相互相関を測定する方法、および1つのレーザービームを複数に分けて相互相関を求める方法の提案を行い、どちらもうまくいくことを実験で証明した。同一のレーザービームを用いた計測は、散乱雑音が量子効果により生じ、同一光源から分かれた光であっても互いに無相関に生じることを用いる。どちらの方法を用いても、同時に測定された複数のデータにおいて、ランダム信号には相互相関があり、散乱雑音は相互に無相関となるので、統計処理でランダム信号と散乱雑音の区別ができるようになる。以下に様々な物体の測定例を示す。

図3

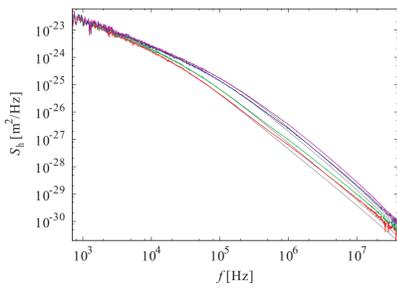


マイケルソン干渉計を用いた
液体表面上のリップロンの計測



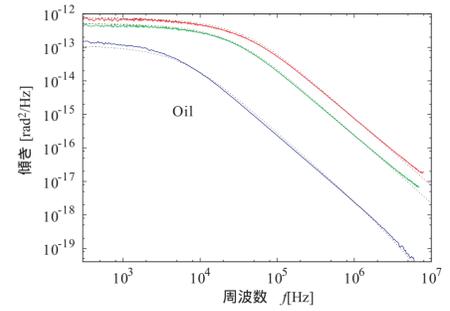
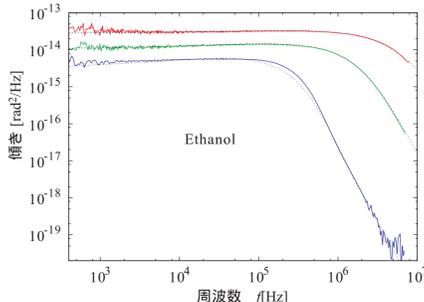
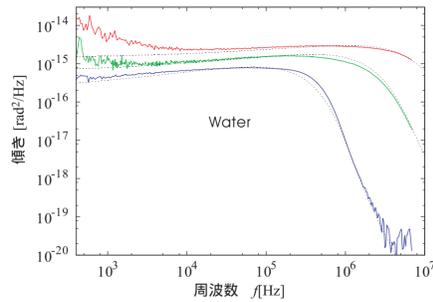
計測系

無風で静止した液体表面は鏡のように平らに見えるが、分子レベルで見ると、分子のランダムな熱運動によりさざ波が無数に生じている。このさざ波をリップロンという。図3はリップロンをマイケルソン干渉計を用いて測定した結果である。緑は散乱雑音の低減化を行わない従来の方法で測定した結果であり、散乱雑音限界より小さな変位の計測ができないことが判る。赤は散乱雑音の低減化を行った場合であり、散乱雑音より2桁以上小さな信号が正確に計測できていることがわかる。また、赤で示した水の計測結果は、既存の理論と極めてよく一致している。青はエタノールの計測結果であり、高周波側が僅かに理論とずれていることが判る。

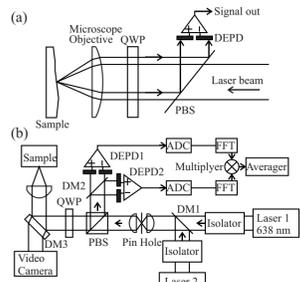
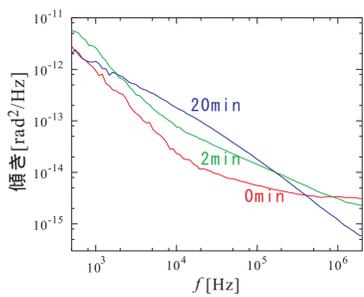


油表面のリブロン

マイケルソン干渉計を用いた油(イメージジョンオイル)表面の計測。油は粘度が高く、リブロンが長距離伝搬しない(コヒーレンス長が短い)ので、従来から用いられている回折法での計測が困難であるが、干渉計を用いれば容易に測定が可能である。測定結果は着色表示を行い、既存の理論を用いた結果を黒で示した。下から上に向かって温度が上がっている。室温から70度C程度まで温度を変えている。温度が上がると粘度が下がるので、高い周波数のリブロンが増える。実験結果は既存の理論と僅かに異なっている。これは、油表面に単純な液体と異なる構造があるためであると予想されるが、詳細は解析中である。

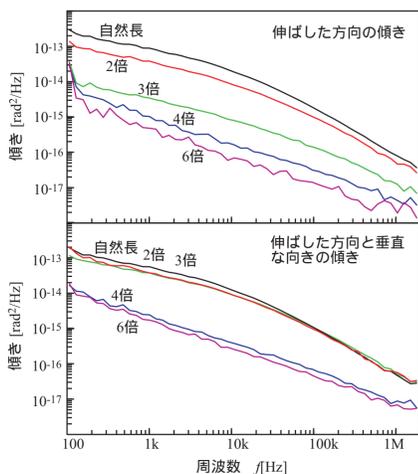


水、エタノール、油(イメージジョンオイル)表面のリブロンを、光テコを用いた傾き計測により測定。対物レンズを用いてレーザー光を集光して照射しているが、その際に用いる対物レンズの開口数(NA)を3種類変えて測定した。NAが大きくなると、集光されたレーザービームが小さくなり、高い周波数のリブロンが計測できるようになる。



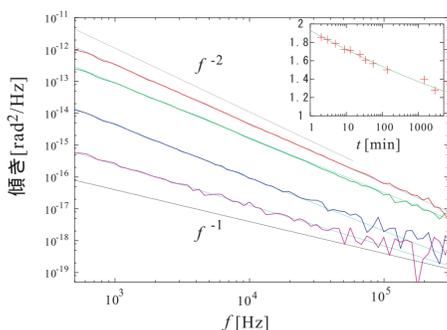
魚の目のリブロン
(傾き計測)

魚(鮎)の目を測定した結果である。計測法は、光テコを用いた傾き計測である。干渉計は液面の変位に敏感で、液体の蒸発や熱膨張などにより液面の変化が激しい場合、計測が困難である。しかし、光テコは液面の傾き角度を計測するため、変位変化に鈍感であり、魚の目など制御が困難な対象物の計測に適する。0minは、魚の目に水を一滴たらした直後で、その後2分(2min)と20分(20min)の計測結果が示してある。時間の経過とともに水が蒸発し、眼球表面の状態が変化するため、スペクトルの形が変わる。0minのデータにおける低周波側の傾いた信号は、弾性体に典型的な信号であり、 10^4 Hz以上の水平な信号は水に特有の信号である。このことから、湿った弾性体であることが判る。時間の経過と共に水が減少して、ゴムと同じような乾いた弾性体に変化していることがわかる。ドライアイの診断や眼底の硬さ計測などに応用できないか検討している。



ゴム表面の分子運動

ゴム表面の分子運動を測定した結果。光テコを用い、傾き振動を測定している。傾き方向は、伸ばした方向と平行な向きと、垂直な向きで測定。生ゴムをナイフで切り、更に伸ばしているのでゴムの表面は鏡面といえるほど平らではないが、レーザービームを $1\mu\text{m}$ 程度に集光して光リテコで測定すると再現性の高いスペクトルが測定できる。伸ばした方向と平行な向きの振動は4倍までは伸びに従いスペクトルが変化するが、その後はあまり変化しない。一方、伸ばした方向と垂直な向きの振動は、3倍まではスペクトルが変化せず、4倍から急激に変化する。これらは、ゴムの弾性係数が伸びに従い変化することと関連している。



エポキシ接着剤の硬化に伴う
表面分子運動の変化

エポキシ接着剤の硬化に伴う表面の分子運動を測定した結果である。接着剤内部には多量の気泡があり、更に表面も平らではないので、回折を用いた従来の計測では困難であるが、光テコを用いれば容易に測定が可能である。高粘度液体から固体へ変化する様子がスペクトルから分かる。図の中にある小さなグラフは、分子運動スペクトラムを f として近似したときの時間変化を示している。3000分(2日)の範囲で がゆっくりと下がって行くのがわかる。

まとめ

新規に開発した散乱雑音除去法を用いた計測をマイケルソン干渉計と光テコに適用し、従来計測が困難であった様々な物質の表面の運動を計測した。単純液体や理想な弾性体の場合には理論があるが、エタノールや油など比較的単純な構造を持つ物質であっても表面には何らかの構造があり、理論からわずかにずれる。眼球やエポキシなど複雑な物質には適用できる理論がないので、今後の理論的な研究が必要である。