



Title	微小な力の測定
Author(s)	遠藤, 勝義
Citation	大阪大学低温センターだより. 1991, 75, p. 20-22
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/7235
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

微小な力の測定

工学部 遠藤勝義 (吹田 4646)

力の測定は、古典的な物理量の測定であるが、最近になって、原子間力をを利用して表面の形状を測定する原子間力顕微鏡という手法が提案され、再びクローズアップされてきている。ここでは原子間力（化学結合ならば、 $5 \sim 30 \times 10^{-10} \text{ N}$ 程度）とは言わないまでも、 10^{-9} N オーダの微小な力を簡便に測定する方法について紹介する。

一般に、力の測定は、力によって弾性体を変形させ、その変位量や歪を種々の物理現象を利用して計測することによって行う場合が多い。また、天秤を利用して質量とのバランスから力を測定することもある。たとえば、一般的な化学天秤は、最大荷重 100 g で 0.1 mg の精度を持つ測定ができ、さらに市販の精密電気天秤 (Cahn 社製など、負帰還天秤の一種) を用いれば 1 μg の測定も可能である。このように、質量は他の物理量と比較して案外簡単に高精度な測定が可能であるため、力の測定に天秤を利用するのには得策である。さらに、走査型トンネル顕微鏡の技術を用いれば、0.01 nm の変位測定が可能であることから、10 N/m のバネ定数を持つ片持ち梁を用いれば、 10^{-10} N オーダすなわち原子間力の測定も可能となる。

ここでは、微小な力の簡便な測定方法として、測定すべき力を先端に作用させた片持ち梁の弾性変形量を歪ゲージ¹⁾で測定する方法について述べる。まず、簡便なという意味で市販のストレーンアンプを用い、ゲージファクター K_G ($K_G = (\Delta R/R)/\epsilon$ 、 R : 抵抗、 ϵ : 歪) が 100 程度である半導体歪ゲージを用いる場合を考え、測定可能な力を見積もってみる。一般的なストレーンアンプは、 $K_G = 2$ の金属抵抗線歪ゲージを用いることによって、 10^{-6} の歪の測定が可能である。したがって、 $K_G = 100$ の半導体ゲージを用いれば感度が 50 倍となり、さらに感度が 2 倍になる 2 ゲージ法で弾性体の歪を測定するすれば、 10^{-6} の歪の 100 倍の感度すなわち 10^{-8} の歪の測定が可能ということになる。そして、弾性論に従えば、厚さ $t = 0.1 \text{ mm}$ 、幅 $b = 5 \text{ mm}$ 、長さ $l = 100 \text{ mm}$ の弾性変形域の大きいりん青銅 (ヤング率 $E = 9.11 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$) の片持ち梁のクランプ位置に半導体歪ゲージを貼ることによって測定できる最小の力 F は、

$$F = \frac{bh^2 E}{12l} \epsilon$$

となる。したがって、半導体ゲージとストレーンアンプの組み合わせで測定可能な歪 $\epsilon = 1 \times 10^{-8}$ を代入すると $F = 3.8 \times 10^{-8} \text{ N}$ となる。つまり、上記のような弾性片持ち梁によって $1 \times 10^{-8} \text{ N}$ オーダの測定が充分に可能ということになる。

そこで、実際に図 1 に示すようなりん青銅の片持ち梁を作製した。片持ち梁の先端を細くしたのは、梁の自重によるたわみを少なくするためであり、また温度補償が可能でしかも感度が 2 倍になるように梁の表と裏に歪ゲージを貼っている。そして、片持ち梁に作用する力に対する歪の測定結果いわゆる較

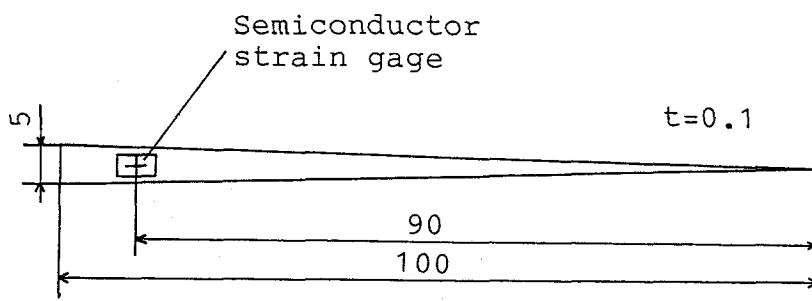


図1 半導体歪ゲージを貼った片持ち梁の形状

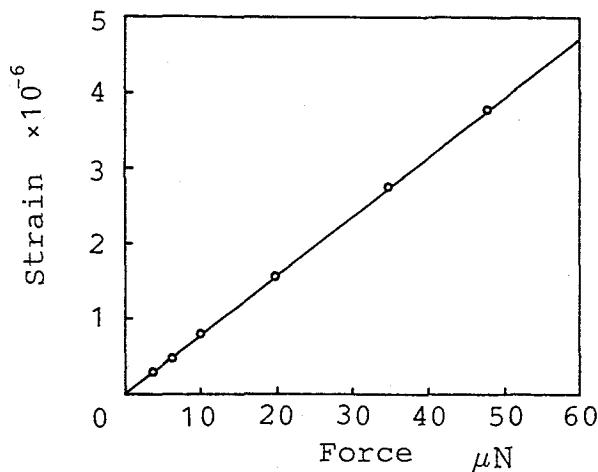


図2 片持ち梁に作用する力と歪の関係

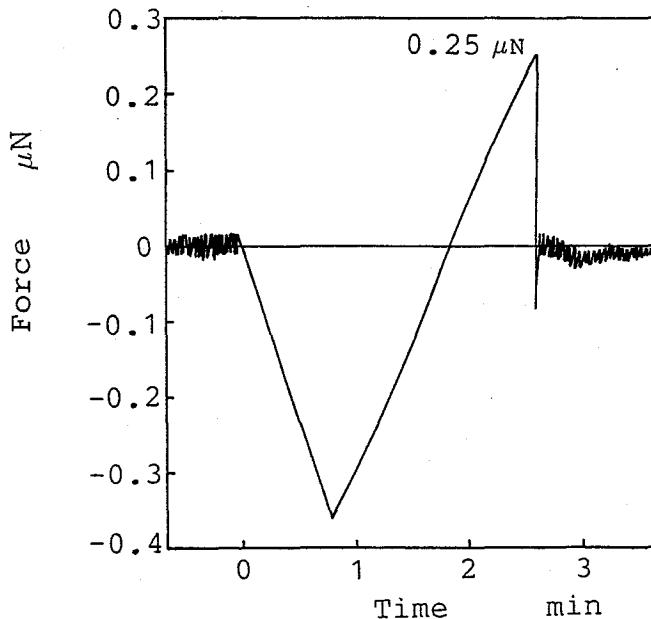


図3 微小な力 (Van der Waals力) の測定例

正曲線を図2に示す。この片持ち梁を用いて、2固体を接触させたときに作用するvan der Waals力を測定した結果を図3に示す。これは、微小な先端半径（5～20 μm ）を持つチップを片持ち梁の先端に吊るし、表面あらさが1 nm以下のプレートと弾性接触させた後、引き離すときの力として測定した結果である。チップとプレートは、1 $\mu\text{m}/\text{分}$ 程度の速度で近づけられ横軸時間の0分で接触し、その後1分程度まで接触荷重が加えられている。最大荷重0.36 μN が加えられた後に、チップとプレートは引き離され、2分30秒のところで分離した。このとき、van der Waals力に基づく力は0.25 μN と測定されており、このような簡単な装置でも10⁻⁸ Nオーダの精度で力の測定ができる事を示している。

ただし、半導体ゲージは、他の歪ゲージよりも抵抗温度係数が大きいため、温度の影響が大きい。したがって、温度変化を小さくする工夫が必要であり、室温付近で自己温度補償ができるN型半導体を用いるべきである。また、当然であるが徹底した防振対策も必要である。さらに、半導体ゲージの場合、歪だけでなく光伝導によっても抵抗変化があるため半導体ゲージに光が入射しないようにしなければならない。以上の三点に注意すれば、10⁻⁸ Nオーダの精度で力の測定が可能となる。このような簡便な方法によっても、工夫次第では原子の数にして100個オーダに当る原子間力の測定が可能である。

参考文献

- 1) 渡辺 理: ひずみゲージとその応用（改定版），日刊工業新聞社（1977）