

衝撃ひずみの測定をめぐって

On Measurement of Impulsive Strain

大井光四郎*・小倉公達*

Koshiro OI and Kimisato OGURA

ひずみ計を用いて衝撃ひずみを測定することは広く行なわれているが、必ずしも精度良く行なわれているとは限らないようである。本文では筆者らの失敗も含めて測定技術上注意すべきであると思われる点について述べる。

1. ま え が き

抵抗型ひずみ計は衝撃ひずみや衝撃力の測定に適しているので、この方面の測定に広く用いられている。筆者らはこれに関連する二、三の研究を行なった。この研究の途中実験上まどついたことがあった。このようなことは学会の論文には書きにくいものであるが、記録しておくに役に立つことがある。そこでまどついたことも含め

て、衝撃ひずみの測定に役立ちそうな注意をすこし述べてみたい。

2. ゲージ自体の衝撃追従能力

物体に衝撃的なひずみが発生したとき、それに接着されているひずみ・ゲージがどれほど忠実に追従できるかという点に関しては論文¹⁾に詳しく論じてある。簡単のために鋼製丸棒の軸に沿って進行する弾性縦波によるひずみを棒に接着したゲージによって測定する場合を念頭に置いて話を進める。図1(a)のような完全にステップ状の波が音速 c で走るものとする。ゲージや測定装置の高周波特性には上限があるから、得られる結果は図1(b)のようになるであろう。このとき高周波特性の悪さを示す量として立ち上り時間 τ_r を用いる。ここに τ_r は全立ち上り高さの 10% から 90% に達するのに要する時間である。もしもゲージおよび測定装置の特性が完全であるとすれば、ゲージ長 L の距離をステップ波の波頭が通過するのに要する時間は L/c である。したがって得られる結果は図1(c)のように L/c の間に直線的に上昇することになり、立ち上り時間は $0.8 L/c$ となる。有限のゲージ長を持つゲージを使用する限り、立ち上り時間が少なくとも $0.8 L/c$ であることは宿命的なものである。

次にすこし実際的な考察を加える。 $L=3\text{ mm}$, $c=5100\text{ m/s}$ とすると $0.8 L/c \approx 0.47\text{ }\mu\text{s}$ である。この程度の速さならば測定装置としては高帯域の増幅器と高性能のブラウン管装置を用いれば問題ない、とくに記録にはポラロイド・カメラを用いれば ASA 10000 のフィルムも用意されているから写真の技術としてはきわめて容易である。

さて上のような装置を用いてゲージの τ_r を実験的に求めようとするときに困るのは、完全な、またはそれに近いステップ状の弾性波を得ることである。丸棒中の縦波の運動方程式

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

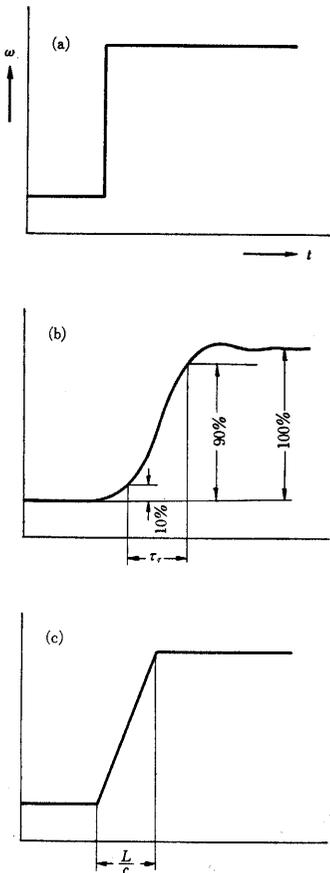


図1 ゲージの立ち上り時間

* 東京大学生産技術研究所 第1部

が完全に成立すればステップ波はその形をくずすことなく進行する。しかし上の方程式はポアソン効果による棒の太さの変化に伴う棒の軸に直角方向の運動量を無視している。棒の直径に比べて波の波長が十分に長いときには式(1)は正確に成り立つが、波長が直径と同程度になると式(1)は実際とかけ離れてくる。ステップ波には波長が短い成分が多量に含まれているから、ステップ波は進行とともにすぐに波形がくずれる。ステップ波がくずれることはしかたがないこととしても、なるべく立ち上りの良い波を作ることにも問題がある。式(1)が成立していると仮定すると等質の2本の棒の縦衝撃によってステップ波が生ずることは理論的に良く知られていることであるが、実際には棒の端面を正確に衝突させることはむずかしく、立ち上りの良い波が得られない。

鋼のぜい性破断を利用して得られる波はかなり良い立ち上りを示すので、これを利用して検討するとゲージの立ち上り時間として

$$\tau_r < (0.8 L/c) + 0.5 \mu s$$

となる。この $0.5 \mu s$ というのは実験上の制約によって残ったあいまいさであって、かなり安全側の数字である。筆者らは実際にはこれが $0.2 \mu s$ 以下であると想像しているが、決め手になる実験手段が思い付かない。

ゲージの応答性を表現するのに別の方法がある。すなわち周波数の高い正弦的弾性波（進行波であっても定在波であってもさしつかえない）をゲージに与えたときに周波数が高くなるに従ってひずみ感度が落ちてくる。与えるひずみの大きさを一定にしておき、このひずみを静的に与えた場合に比べてひずみ感度が $1/\sqrt{2}$ になる周波数をしゃ断周波数と呼び、 f_c で表わす。 f_c が求められれば $0.3 f_c$ の周波数のときは感度は 95% 以上、 $0.1 f_c$ の周波数に対しては 99% 以上というように周波数特性のおよその見当をつけることができる。しかし実験的にこのような周波数特性を求めることは、高い周波数の弾性波のひずみ振幅の絶対値を知らなくてはならないので、実現することはむずかしい。20 kc くらいまでは光学的方法を併用してひずみ感度が変わらないという

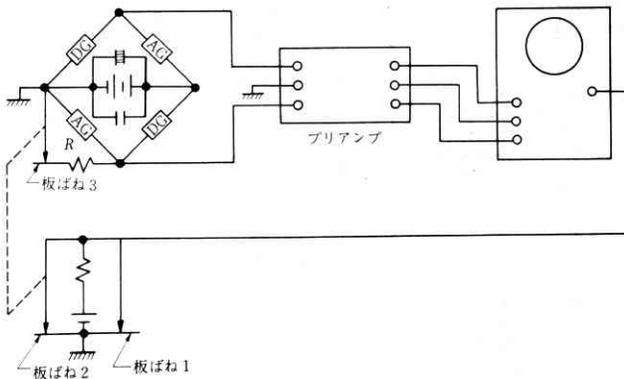


図2 ブロック・ダイアグラム

結論を出している例もある。 f_c と τ_r との関係は古くから電子工学の方面で近似的に

$$f_c \tau_r \approx 0.35$$

なる式が用いられている。この $f_c \tau_r$ の積は考えている系の特性によって少しずつ違うわけであるが、代表的な例について解析的に計算してみると、いずれも 0.34 と 0.86 の間になる。

そこで前に述べた τ_r の式に対し、 c を鋼棒中の弾性縦波に対する値を採用して f_c を計算すると

$$L = 1 \text{ mm に対し } f_c > 530 \text{ kc}$$

$$L = 3 \text{ mm に対し } f_c > 360 \text{ kc}$$

$$L = 10 \text{ mm に対し } f_c > 170 \text{ kc}$$

となる。

3. 測定例

これはある講習会の実習のために用意した測定の例である。シャルピの衝撃引張試験の規格試験片の平行部を一部太くして、半硬鋼 (0.41C) の試験片を製作し、太くした部分に2枚のゲージを背中合わせに接着し試験機で毎秒約 5 m の速さで引張衝撃を与えた。ゲージはブリッジの対辺に入れて、図2のような装置を組んだ。ブラウン管は2本の電子ビームを持つものを用い、同時に2種類の掃引速度で同一現象を記録した。得られた結果

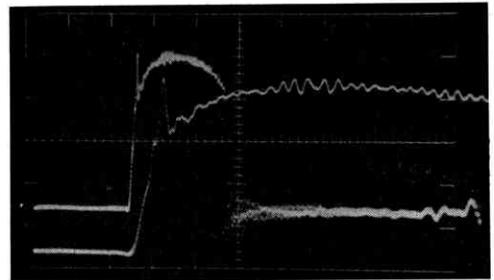


図3 衝撃引張りの例(横軸は1こま 0.5 ms (上)および 0.1 ms(下))

の1例を図3に示す。

実験法を少し詳しく説明する。使用したゲージは 120 Ω のポリエステル・ゲージでシアノアクリレート系の接着剤で接着した。ゲージ電流は 25 mA、図2の3枚の板ばねは燐青銅板の小さなばねで、電氣的接点を持っている。板ばね1は測定の際のブラウン管の掃引開始の信号を発生させるためのもので、振子が振り下りて来て、衝撃が起こる寸前に振子の一部に触れて回路を開くようになっている。回路が開くと一つの電子ビームが掃引を始め、ついで装置に内蔵された遅延装置により、適当な時間だけ遅れて別のビームの掃引が開始する。図3においては第一のビームは1こま 0.5 ms、第二のビームは1こま 0.1 ms の掃引速度である。

図2中破線で結んだ板ばね2と板ばね3とは感

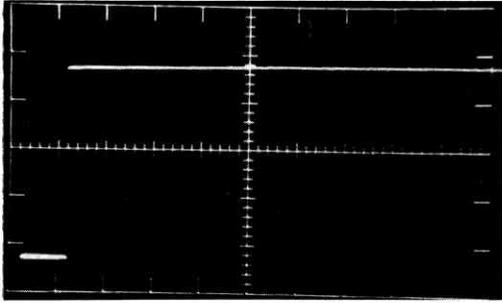


図 4 感度検定用ステップ波 (横軸1こま 0.5 ms)

度検定のためのものである。2枚の板ばねは30cm くらいの高さからレールに沿って落とされる重錘によって次々に回路が開かれるようになっている。まず第一に板ばね2の回路が開かれて掃引開始の信号が発生し(このときには板ばね1は開いておく)、次いで板ばね3の回路が開きブリッジの一边の抵抗がステップ状に変化する。かくして得られる記録を図4に示す。この回路に入れている抵抗 R とゲージ抵抗とゲージ率とから図のステップの高さに相当するひずみの大きさが求められる。

このステップ波はひずみの大きさの検定に用いられるだけでなく、測定系全体の周波数特性の検定にも役立つ。すなわち切れ味の良い立ち上りは高周波特性が十分に良いことを表わし、ステップが水平に走っているのは低周波特性が不足ではないことを示している。

4. プリアンプについて

上の実験ではゲージは抵抗値が 120Ω のものを用いているので出力電圧が低く、筆者らの手元にあるブラウン管装置に入れるためにはプリアンプで増幅しておく必要がある。プリアンプの配線図を図5に示す。このプリアンプの高周波特性を検定するために矩形波を入れた結果は図6のとおりであって、図の一こまは $1\mu s$ であるから、ゲージを用いた普通の測定には十分な特性を持っている。

低周波特性に関してはこのプリアンプは必ずしも安心できない。容量結合の増幅器であるから低周波特性が低下するのは当然であるが、このプリアンプではどの程度になっているのであろうか。初段の真空管の $2k\Omega$ の負荷抵抗の上流にコンデンサと $10k\Omega$ の抵抗が付加されているのは主として低周波特性を増強するためのものであるが、これでも十分ではない。図4はプリアンプの終段管のグリッド・リークの $1M\Omega$ の可変抵抗をほとんど一杯に上げた状態で得られたものである。これをすっかり抜いて $1M\Omega$ の固定抵抗だけにすると図7のようにステップが坂になる。なお図4すなわち抵抗を入れた状態で掃引速度を一こま $5ms$ に落とすと図8のようになる。すなわち現象全体が $5ms$ 程度のときまではこのプリアンプは使用できるが、 $50ms$ ともなれば全然使用に耐えない。 $5\sim 50ms$ 程度の現象を記録させるのには普通の搬送波形式の動ひずみ測定器と電磁オシログラフとの組み合わせでは少し無理である。たとえば搬送波の周波数を $5kc$ とすると、これを整流して固有振動数が $1kc$ 程度の振動子に入れるのが普通であるが、それでは継続

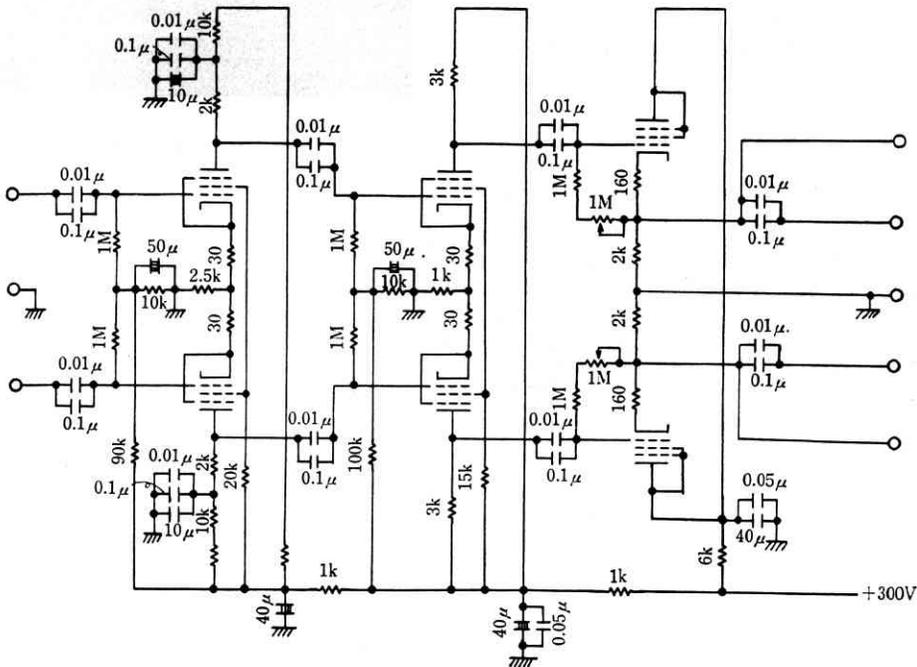


図 5 プリアンプ配線図 (真空管はすべて 6 AH 6)

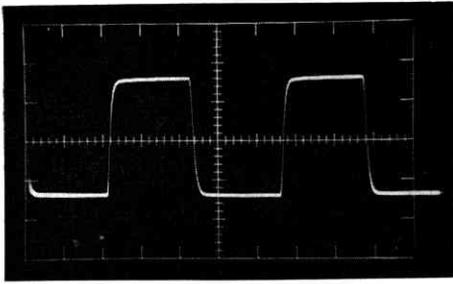


図 6 高周波特性 (横軸 1 さま $1 \mu\text{s}$)

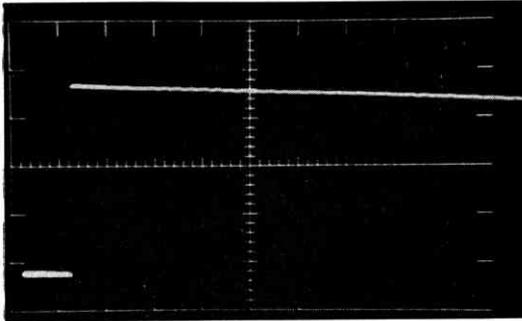


図 7 低周波特性の微細調整 (横軸 1 さま 0.5 ms)

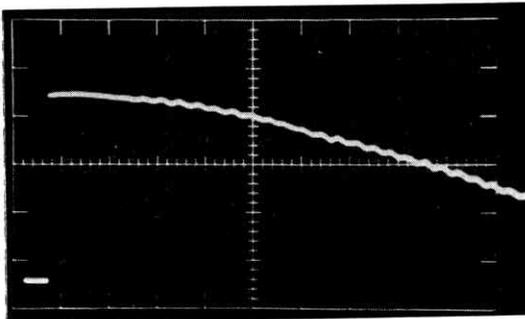


図 8 低周波特性 (横軸 1 さま 5 ms)

時間がたとえば 10 ms の現象の細部までを計測するのは無理である。したがってこの辺の速さの現象を測定するには高感度の直流増幅器とブラウン管を用いるのが適当であろう。幸いに最近では高感度の直流増幅器を組み込んだブラウン管装置も入手できる。しかし高感度のものは高周波特性は低く設計されているのが普通である。

抵抗値の高いひずみ・ゲージを用いるとブリッジからの出力電圧が高く取れるので、このような場合便利であるし、半導体ゲージも出力電圧が高いので応用できる。ただ後者はひずみ対出力の直線性やゲージ率の温度依存性などに依然として難がある。

いずれにしても衝撃ひずみの測定はいわば一品料理であって、問題の性質によっていろいろのくふうが必要である。

なお図 2 においてブリッジからの出力を差動的にとり、プリアンプもそれに応じて差動増幅器を採用しているのはラジオの電波の影響を避けるためである。ラジオ

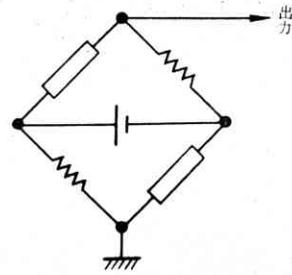


図 9 ブリッジの出力の不適當なとり方

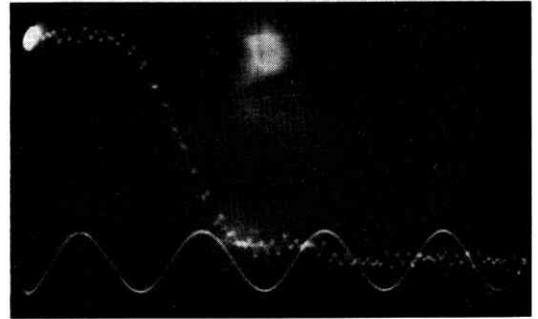


図 10 ラジオ波の妨害を受けた場合(正弦波は 97 kc)

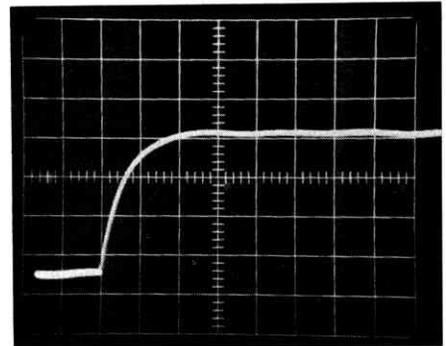


図 11 悪い立ち上り (1 さま $50 \mu\text{s}$)

の電波の波長は $200 \sim 600 \text{ m}$ 程度であるから、ブリッジ回路のあたりが空間的に数 m の範囲に収まっていれば全体が同位相の波を受けることになる。配線に注意してループを作らないようにすればブリッジ回路全体の電位が同位相で上下して、差動増幅器によって増幅されない。それを図 9 のような結線にするとラジオ波をまともに増幅することになって記録の上に著しい雑音に乗ることになる。その 1 例を図 10 に示す。

5. 困った経験

§ 3 に述べた測定を準備しているときに理解に苦しむような現象に出会った。感度検定のステップを入れたところが図 11 のような立ち上りの悪い線を得た。

このときの掃引は $1 \text{ さま } 50 \mu\text{s}$ である。この原因がわからないので増幅器の点検などに長時間つぶした。この実験装置ではダミー・ゲージや検定用の抵抗を一まと

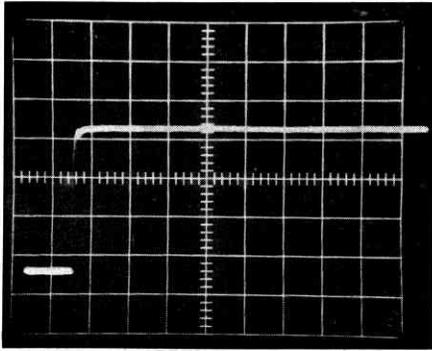
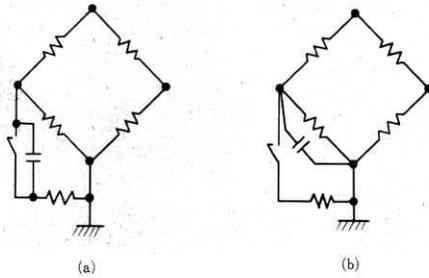
図 12 改善された立ち上り (1こま 50 μ s)

図 13

めにして合成樹脂板に取り付け、それと電気接点とを同軸ケーブルで結んであった。これが失敗の主要な原因であった。配線を変えて検定用抵抗を電気接点の近くに移したところ図 12 のような結果になった。使用した同軸ケーブルは中心導体と外側導体との間の静電容量は規格では 67 pF/m のものである。この静電容量と抵抗の関係を配線図の形にすると図 13(a), (b) のようになる。(a) は前の場合に、(b) は後の場合に相当する。検定用抵抗はゲージ抵抗より桁違いに大きい。(a) のように容量が検定用抵抗に直列にはいるときには時定数が大きくなるが、(b) のようにブリッジの一边に多少の容量が並列に入るとはほとんど苦にならない。このように原因がわかって見れば図 11 のステップが水平になったところの高さを利用すれば結果的には実害がなかったわけであるが、原因がわからない間は不安で実験を先に進められなかった。

同じような理由で衝撃ひずみの測定にあまり抵抗値の高いゲージを使用することは得策でない。たとえば、10 k Ω とでもなると浮遊容量の影響を受やすくなる。せいぜい 2 k Ω 止まりではあるまいか。

6. 磁わい効果の影響

強磁性材料がひずみを受けると磁束に変化を生じ、その磁力線によって切られる導体中に起電力が発生する。この現象がひずみ計によって衝撃ひずみを測定する場合に誤差の原因になる可能性があることは、熊本大学の清田教授その他の人々によって以前から指摘されている。しかしひずみ計に対する磁わい効果の影響に 2 種類があ

ることは必ずしも明確に意識されていないようで、各人はそれぞれ一つの場合について論じて総合的な考察は行なわれていないようである。筆者らもまだ十分に研究は行なっていないが、実際には磁わい効果によって測定が乱されている実例を見聞しているので簡単な注意を述べたい。

2 種類の効果のうちの第一は抵抗線自体が強磁性体である場合である。抵抗線に電流が流れると線の各部分は環状に磁化される。線が伸縮すると透磁率が変わり、環状の磁束が線を入出する。このために線の長さの方向に沿って起電力が発生する。同様のことが環状の残留磁気によってもひき起こされるかも知れないがその大きさの程度はよくわからない。したがって強磁性材料を抵抗線に用いたゲージは衝撃ひずみの測定には適当でない。静的ひずみまたは準静的ひずみの場合には磁力の移動する速さが遅いのでそのための起電力は無視できる。

第二の場合は抵抗線には磁氣的性質がなく、それを接着した物体が強磁性体の場合である。この場合も物体がひずむと磁束が入出する。この磁束が外部のゲージおよび配線を切る起電力が発生する。配線が作るループの面積が小さいときは各部分に発生する起電力は打消し合うからその影響は小さくなる。とくに丸棒の縦衝撃を測定する場合に棒の軸に平行に 2 枚のゲージを背中合わせに接着し、さらに 2 枚のゲージを軸に直角に接着して、これらを 4 辺としてブリッジを組むときにはブリッジが棒をまわるループをなすように配線しやすい。このような配線は避けるべきである。

要するに強磁性体を入り出りする磁束によって配線が作っているループ内の磁束の量の変化が少ないように配線することが大切である。このような場合にはブリッジ電源だけを切って、実際の測定と同様な操作をすれば、磁わいの効果だけを分離して測定することができる。その効果が大き過ぎる場合には配線の配置を変えてみるか、または抵抗値の大きいゲージを用いて出力を高くして、磁わいによる影響を相対的に小さくする等のくふうをしなければならない。

7. む す び

衝撃的ひずみの測定は各所で広く行なわれているが、必ずしも満点とはいいかねるような場合も見聞している。本文は決してこれらの問題に良い解答を与えているものではないが、すこしでもご参考になる点があれば幸いである。

(1968年5月28日受理)

文 献

- 1) 大井：ひずみ計の過渡応答性について、機械学会誌，69，575 (昭41. 12)。