

衝撃現象の計測におけるいくつかの問題点

SOME PROBLEMS IN DETECTING IMPACT/IMPULSIVE PHENOMENA

大野 友則*、藤掛 一典**、井元 勝慶***、別府 万寿博****

Tomonori OHNO, Kazunori FUJIKAKE, Katsuyoshi IMOTO and Masuhiro BEPPU

*工博 防衛大学校 教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**博(工) 防衛大学校 講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***工博 大林組技術研究所 担当部長 コンサルタント1部 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)

****博(工) 防衛大学校 助手 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：衝撃現象、計測機器、周波数特性、フィルター、信号処理

(impact/impulsive phenomena, measuring device, frequency characteristics, filter, signal treatment)

1. はじめに

衝撃問題に関する研究の歴史は古いが、工学的に本格的な研究としては米国等において軍事上の必要性から行われたようである。その後、1975年代からは原子力発電の開始にともなってその安全性に関する信頼性向上のために仮想事故時を想定した各種の飛来物に対する構造物の耐衝撃性に関する研究が世界各国で行われるようになった。また近年、土木工学の分野でも社会基盤の高密度化にともなって、落石防護構造物、土石流対策工、ガードレール等、衝撃荷重を考慮して設計しなければならない構造物が多くなっている^{1),2)}。衝撃力が構造物に作用した際の応答現象を衝撃応答解析法によって検討する場合、応力波の波動伝播や局所的な破壊といった特有の衝撃現象が現れるので、材料特性にはひずみ速度効果を考慮するとか、数値解析モデルに工夫を加えるなどの対策が必要となる。いずれにしても、現在の段階では、汎用の衝撃応答解析コードを用いた場合でも解析精度や解析結果の信頼性が静的解析あるいは地震応答解析のように保証されておらず、衝撃については各個に実験を行ってその信頼度を確認しているのが現状である。

一般に、衝撃荷重の作用時間は構造物の最低次固

有周期よりもかなり短いので、応力波動が動的応答に及ぼす影響が極めて大きい。したがって、実験においても、試験体設置条件の微妙な差が実験結果に大きな誤差を与えてしまう。また衝撃応答には、材料の応力波動伝播挙動が混在するので、その応答の計測データには多くの高周波成分が含まれることになる。その複雑な応答波形から、応答の真値あるいはその実験目的に対応した波形を記録・再生するためには、センサー、増幅器、波形記録装置の適切な選定と構成が必要である。現在のところ、標準的な衝撃実験法および計測法、データ処理法等に関する規定がなく、各研究者の経験に基づく判断によって処理されている。このことが、各研究者によって行われる実験や計測の精度・信頼性に対する疑義がいつまでも残ってしまい、衝撃工学の発展上大きな損失になっていると言える。

そこで本研究では、まず衝撃実験において現象計測を行うにあたってのいくつかの基本的な事項を取り上げ、その問題点を指摘することにより衝撃実験・計測を行う上において今後の参考に資することを目的としている。いずれにしても、共通認識の下で、より高精度で信頼性の高い標準衝撃実験・解析法を早期に確立することが望まれる。

2. 衝撃現象の計測

(1) 計測機器の概要

衝撃現象を調べるために必要な計測項目および計測センサーの代表的なものを、表-1に示す。

表-1 計測項目・センサー

| 計測項目 | センサー | 備考 |
|------|--------------|---------------------------------|
| 変位 | 変位計 | 非接触型 ・渦電流式 ・レーザー式 ・光学式 |
| ひずみ | ひずみゲージ | 静的実験用と同じ |
| 加速度 | 加速度計 | ・歪ゲージ式 ・圧電素子式 |
| 荷重 | 荷重変換器（ロードセル） | ・歪ゲージ式 ・圧電素子式 |
| 速度 | 速度計 | レーザー式 |
| 挙動 | 高速カメラ・ビデオ | 光学式 |

上記の計測センサーは試験体の挙動を直接または近接位置で測定するために用いられ、センサーに生じた物理量の変化は電気信号に変換される。微弱な電圧または電流である信号は、さらにアンプで増幅され、続いて時間とともに変化する連続的な現象（電気アナログ信号）はA/D変換器を経由してデジタル化され、記録装置に入力される。なお、衝撃現象の継続時間は極めて短いので、センサーを含めた計測機器には高い応答性や感度が要求される。

(2) 各センサー等の種類、特徴および主要性能

衝撃現象計測用のセンサー・機器で、その応答性を示す代表的な特性が固有振動数および応答周波数である。センサー類の固有振動数は、無負荷時におけるセンサー自体の自由振動の周波数である。応答周波数は、正弦的に変化する負荷に対してセンサーの出力が規定内で応答できる周波数であり、いずれもセンサーの応答特性を表す性能として用いられている。過渡的な振動状態は定常状態とは異なるので、その特性で衝撃現象を正確に捉えられるとは断定できないが、衝撃実験に用いるセンサーを選択する際の目安として重要な特性である。

センサー類の応答周波数は固有振動数の1/5から1/10程度で表示されることが多い。これは、強制振

動が加えられた時の静的な振幅と動的な振幅の比で生じる誤差の割合から便宜的に定められているものである。例えば、1自由度系の振動数 ω の調和強制振動が加えられた場合、出力は強制振動の振動数がセンサーの固有振動数の1/10の時に約1%、1/5の時に約5%の誤差を含むことになる。すなわち、応答周波数は理論上の誤差をどの程度許容するかで便宜的に定められている場合が多く、固有振動数も計測器に付随する取り付け具の取り付け状態や実験条件によって変わってくる。衝撃現象をどの程度の精度で計測できるかを判断するには、それぞれのセンサー・計測器および計測システム全体の特性について検討する必要がある。

センサーの応答性を表現する用語として、共振周波数、固有振動数、応答周波数、周波数範囲および周波数特性などが用いられている。共振周波数と固有振動数は同じで、センサー自体の振動特性でありこの周波数に近い現象の計測データの信頼性は望めない。応答周波数と周波数範囲は同じ定義のものであり、いわゆるf特と呼ばれている。この数値の範囲では、出力が安定しているのでデータには信頼性がある。一般に、共振周波数あるいは固有振動数より小さく（1/3～1/4）に設定されている。

以下では、各センサーの中でもとくに周波数特性に敏感な加速度センサーを対象として、計測の際に起きる種々の問題点について考察する。

(3) 加速度センサーの応答性

加速度センサーは、衝突体が構造物等に衝突した際の加速度あるいは振動などの測定に使用されるもので、ひずみ変換式と圧電変換方式がある。ひずみ変換式のセンサーの固有振動数は圧電変換式のものに比べると小さいが、半導体型は高応答性・高出力の特徴を有している。また、ひずみゲージによっては、平坦な周波数特性を得るために内部オイルを使用してその粘度を調整しているものがある。このため、オイル温度によって粘度が変化して周波数特性と位相特性に影響が現れることがある。したがって、応答周波数の1/10以上の帯域での測定や精度の高い測定が必要な場合には注意が必要である。さらに、

取り付け方によっても周波数特性が変化することにも留意する必要がある。

圧電変換式は、ひずみ変換式と比較して、一般に小型・軽量・広帯域・高感度・波形の位相ひずみが少ないなどの特徴がある。この方式のセンサーは、圧電効果（圧電物質に力を加えると対向する2つの電極間に正負の電荷を生じ、2つの電極間に電圧を印加すると機械的ひずみを発生する現象）により、発生した加速度を電気信号に変換するものである³⁾。構造形式により、シェア型、コンプレッション型、ベンディング型の3種類がある。取り付けは、ひずみ変換式と同様に、ねじ止め、接着剤、両面接着テープ、ワックスのいずれかを用いて行われる。これらの取り付け方法の特徴を、表-2に示す。また、取り付けがねじ止めの場合と両面接着テープを用いた固定による計測結果の相違を調べたのが、図-1である。

表-2 取り付け方法の相違による比較

| 取り付け方法 | 長所 | 短所 |
|---------|-----------------------------|-------------------------------------|
| ねじ止め | 高域周波数まで精度良く測定できる | 対象物にねじ穴加工が必要 |
| 両面接着テープ | ・取り付けが簡単 ・対象物を傷めない | 測定範囲： 約 500Hz 以下 |
| 瞬間接着剤 | ・比較的高域周波数まで測定可能 ・取り付けが簡単 | ・対象物によっては取り付けができない ・衝撃によって剥がれやすい |
| ワックス固定 | ・比較的高域周波数まで測定可能 ・取り付けが簡単 | 高温では使用不適 |

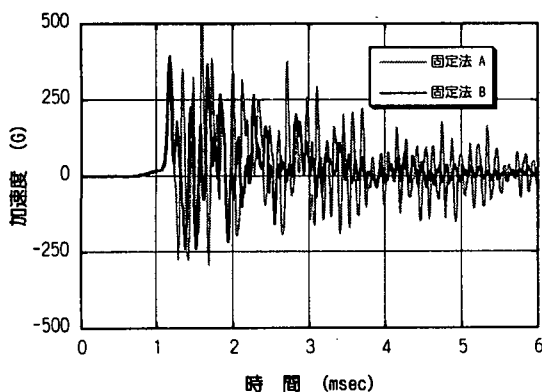


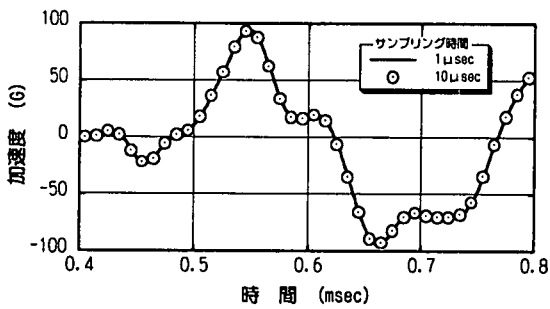
図-1 センサーの取り付け方法の相違による計測波形の比較

図から、両面接着テープで固定した場合（固定法 B）には、ねじ止めによる場合（固定法 A）と比べて振幅が減少するとともに、振動の減衰が大きいことがわかる。これは、振動体とセンサーの間にあるテープ自体が緩衝材として働いているためと考えられる。また、含まれる高周波の振動成分も少なく、テープが一種のローパス・フィルターのよう働いている。したがって、高精度の衝撃現象計測を行いたい場合は、ねじ止め固定とする必要がある。

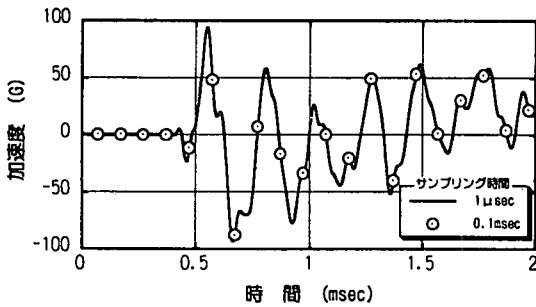
また、圧電式のセンサーの出力インピーダンスは非常に高いので、このセンサーと他の機器の接続にはローノイズ処理されたケーブルを使用することが望ましい。センサーで計測された信号は、A/D 変換された後デジタル値として記録装置に記録されるか、あるいはアナログ信号のまま記録された後で A/D 変換処置される。ここでは、一例としてデジタル・メモリーを用いてデータ計測・収録する場合について基本的事項を述べる。

(4) サンプリング・タイムの決定

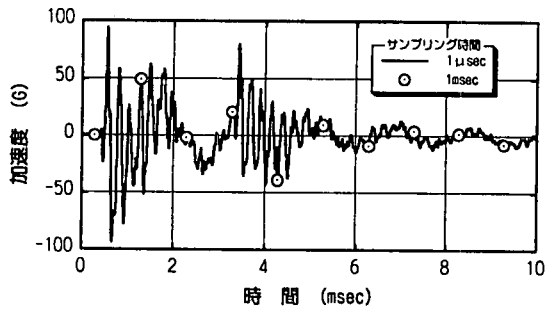
サンプリング・タイムは、デジタル・メモリーの記憶容量の大きさに関係する（記憶容量=デジタル・データ数×サンプリング・タイム）ので、経験上あるいは過去に行った同様の実験結果を参考として、どの程度の応答時間になるのかを推定して決定する。また、記憶容量の大きさに余裕があつてサンプリング・タイムが任意に小さく設定できる場合でも、小さ過ぎると無意味な（ノイズとみなす）高周波成分の現象までも記録してしまうことになる。サンプリング・タイムの設定によっては、計測された波形に大きな相違が生じるため、現象の解析・考察の結果にも重大な影響を及ぼすことになる。図-2は、一つの加速度センサーを用いて検出された信号を、4種類のサンプリング・タイム（ $\Delta t = 1\mu s$ 、 $10\mu s$ 、 $100\mu s = 0.1ms$ 、 $1ms$ ）で同時に計測した波形を示したものである。図には、 $\Delta t = 1\mu s$ で計測した波形を基準として、各サンプリング・タイムにより計測されたデータを○点で表示している。



(a) $\Delta t = 1\mu s$ と $10\mu s$ により計測されたデータの比較



(b) $\Delta t = 1\mu s$ と $0.1ms$ により計測されたデータの比較



(c) $\Delta t = 1\mu s$ と $1ms$ により計測されたデータの比較

図-2 サンプルング・タイムの相違による計測データの相違

この現象の振動周期は約 $0.29ms$ であり、この時間内にサンプルング・タイムが $\Delta t = 1\mu s$ では 290 個のデジタル値が含まれ、 $\Delta t = 10\mu s$ の場合は 29 個である。図を見ると、これらのデータを直線で結んだ波形は $\Delta t = 1\mu s$ の波形とほとんど同じであることがわかる。一方、サンプルング・タイムが大きくなるにしたがって、振動 1 周期の時間に含まれるデータ数が減少 ($\Delta t = 0.1ms$ では 2 個、 $1ms$ では 0) するため、得られる波形は $1\mu s$ で計測された波形と全く異なったものになる。すなわち、サンプルング・タイムが大きくなるとその時間内に現れた微小時間の現象は検出されないため、波形から読み取った評価には相違が生じるということである。衝撃のよう

に、微小な時間間隔で発生する現象が問題となる場合には、サンプルング・タイムを決定する際の大小(粗密)が実験結果に基づいて行われる最大値などの応答の評価に重要な影響を及ぼすことに留意する必要がある。

(5) センサーの性能によるデータ波形の相違

次に、性能が異なる 2 種類の加速度センサーを用いて同一現象の計測を行った。用いたセンサーの性能の比較を表-3 に示す。

表-3 加速度センサーの性能比較

| | 加速度 A | 加速度 B |
|-------------|----------|-------|
| 感度 (mV/g) | 1000 | 20 |
| 周波数範囲 (Hz) | 0.5~2k | 1~7k |
| 共振周波数 (kHz) | 10 | 38 |
| 測定範囲 (G) | 5 | 250 |
| 分解能 (Gpk) | 0.000005 | 0.005 |
| 方式 | 圧電方式 | |

加速度センサー A、B の性能で大きく異なるのは、感度と分解能であることがわかる。この 2 つのセンサーを、鋼製の片持ち梁上に隣り合わせて固定し、その近傍で小さく衝撃加振した。この時のサンプルング・タイムは、 $\Delta t = 10\mu s$ である。両センサーによる計測波形を図-3 に示す。

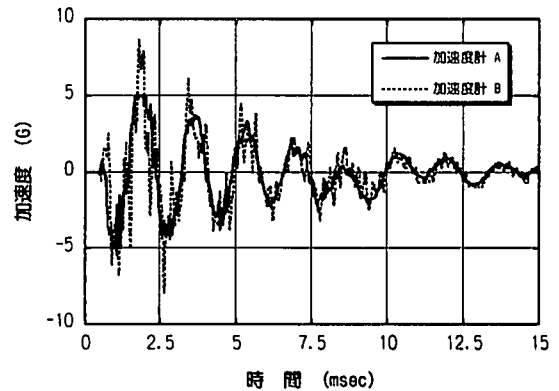


図-3(a) 性能の異なるセンサーによる計測波形の比較 (0~15ms)

図-3(a)から、実線で示した加速度センサー A による波形は最大振幅が測定範囲の約 5G で頭打ちとなっているのに対し、B による波形では最大約 8G の振幅が計測されている。

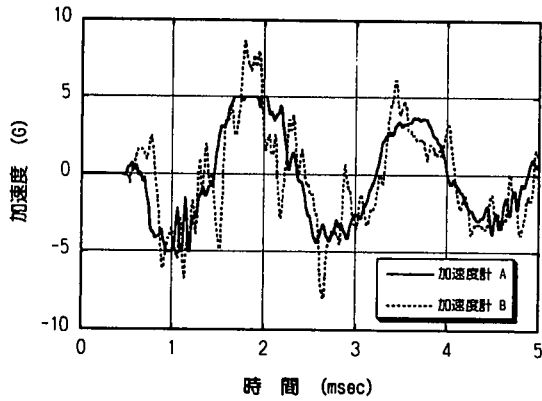


図-3(b) 性能の異なるセンサーによる計測波形の比較(0~5ms)

また図-3(b)から、Bによる波形には分解能による影響と考えられる不規則な振動成分が多く含まれてことがわかる。すなわち、センサーの性能によっても、得られる現象の計測・解析には大きな相違が生じるということである。

(6) フィルターの適用による波形の変化

図-4に、細い実線で描いた波形は、鋼製片持梁の衝撃加振による振動を加速度Bで計測した(サンプリング・タイムは、 $\Delta t = 1\mu s$)波形である。この波形(原波形と呼ぶ)に含まれる周波数成分を調べると、図-5に示すフーリエ・スペクトルから500Hzと4kHz付近にピークを持つことがわかる。そこで、原波形に対してカットオフ周波数が $f = 2kHz, 1kHz, 500Hz$ のローパスフィルターを適用すると、図-4中および図-6中に太線で示す結果が得られる。

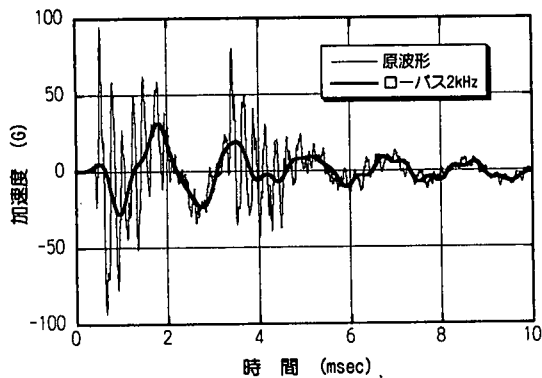


図-4 衝撃加振による計測波形 ($\Delta t = 1\mu s$)

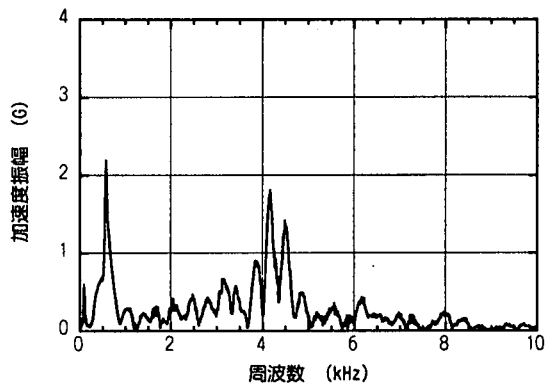
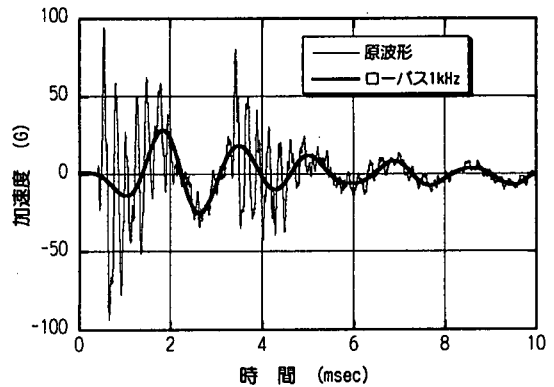
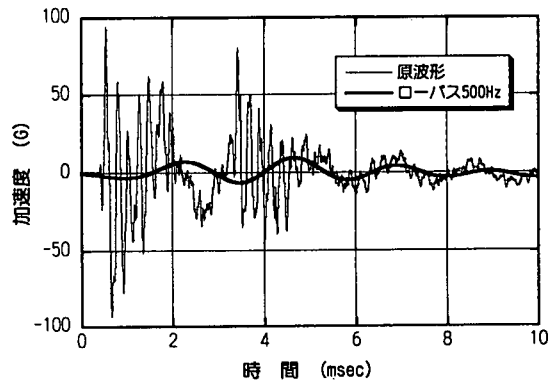


図-5 原波形のフーリエ・スペクトル



(a) 原波形と $f = 1kHz$ のローパス・フィルターによる波形の比較



(b) 原波形と $f = 500Hz$ のローパス・フィルターによる波形の比較

図-6 フィルターの適用による原波形の変化

なお、ここで用いたフィルターは、周波数領域法における周波数領域処理型フィルター(FFTフィルター)である。図-7には、フィルターの適用による各波形を重ねて示している。図-6から、カット

オフ周波数が $f=2\text{kHz}$ から 500Hz と小さくなるにつれて、波形の高周波成分が取り除かれて滑らかになっていくことがわかる。さらに図-7 からは、振幅の大きさが減少するとともに位相にもずれが生じて

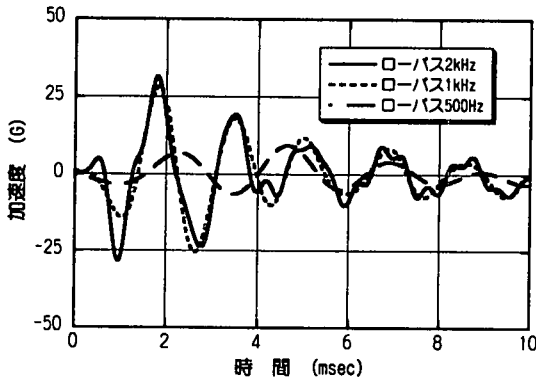


図-7 波形形状と振幅の変化

いる状況がわかる。 $\Delta t=1\mu\text{s}$ で計測・記録された波形の最大振幅は 98G であるのに対し、 $f=2\text{kHz}$ のローパス・フィルターを適用すると最大振幅は 33G 、 $f=1\text{kHz}$ では 28G 、 500Hz の場合には最大振幅は 10G にまで小さくなってしまふ。FFT フィルターを用いずに、移動平均法などを用いて平滑化処理を行う場合も、平均に用いるデータ数（または時間間隔）によってはFFT フィルターによる処理と同じ結果を与えることになる。ちなみに、移動平均法を用いたデジタル・フィルターは、ローパスフィルターの一つであり、平滑化点数を N 、サンプリング・タイムを Δt およびカットオフ周波数を f とすると、 $f=1/(N \cdot \Delta t)$ の関係がある⁴⁾。したがって、移動平均法（とくに単純移動平均法）を用いる場合には、平滑化点数だけでなくサンプリング・タイムも考慮する必要がある。例えば、 $\Delta t=20\mu\text{s}$ で計測したデータを、カットオフ周波数が $f=300\text{Hz}$ のFFT フィルターで処理することと、多項式適合法による移動平均法で平滑化点数が $N=167$ で処理することはほぼ同じ結果を与える。ただし、同じ平滑化点数を単純移動平均に適用した場合には、重み関数に矩形関数を用いているため振幅の大きさが小さくなる影響が現れることに注意が必要である。

3. まとめ

衝撃実験で最も困難でやっかいな部分は、計測法の確立である。最近の計測機器（センサー、増幅器、データ収録装置等）やコンピュータの発達が目覚しく、以前では困難とされていた高速度の衝撃現象の計測・データの記録や解析がほぼリアルタイムで行えるようになってきている。また、多種多様の性能特性を有するセンサー・機器類が各メーカーによって製作されており、実験の目的に応じて任意に選択できるようになっている。ところが、これら高性能のセンサー・機器で計測する際の計測条件（サンプリング・タイム）やシステムとしての構成および計測されたデータの処理が問題なのである。本論文では、とくに加速度センサーを対象として、計測の際の①サンプリング・タイムの大小による影響、②センサーの応答性能による影響、③フィルターの適用上の問題、などについて述べた。衝撃実験に限らず、実験を行う場合には多くの経験と工学的な判断（勘）が必要となることが多い。しかしながら、周到に準備された実験を行っても、正しい現象のデータ計測・処理が行われなければ、せっかくの実験が無駄に終わってしまうことになる。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法、構造工学シリーズ6、平成6年1月
- 2) 土木学会：ロックシェッドの耐衝撃設計、構造工学シリーズ8、平成10年11月
- 3) 東陽テクニカ：'99総合カタログ、1999年版
- 4) 酒巻 勝：衝撃現象計測における工学的データ処理法に関する基礎的研究、防衛大学校理工学研究科修士論文、平成8年3月
- 5) 共和電業：共和・電子計測器総合カタログ、'98～'99年版