

計 装 設 備 維 持 規 格

(2020 年 10 月 9 日追補)

この追補は、2017 年 11 月 5 日に改訂された“計装設備維持規格”2020 年版の追補である。したがって、今後、**JPI-8S-5-2017** とは、この追補も含むものとする。

なお、この追補は、石油学会ホームページ上で、該当箇所のみを示す。2020 年 10 月 9 日の追補は次の 1 箇所である。

<u>JPI-8S-5-2017 の該当頁： 13 頁 (管理番号：8S-5-2017 追補 01)</u>	2
<u>管理番号 8S-5-2017 追補 01 で挿入する I 付属書D</u>	38-1

JPI-8S-5-2017 の該当頁：13 頁（管理番号：8S-5-2017 追補 01）

4 長期連続運転のための改善

b) 計装設備信頼性向上のための改善

6) 地震計。（検討事例を付属書Dに示す）

追記

（管理番号：8S-5-2017 追補 01）の**解説**

設備の信頼性向上のための改善を進めるには、最新の技術情報収集も重要な要素である。屋外設置が主流となる計装設備では、自然災害である地震被害も多数報告されている。地震から設備を保護するための基礎知識や対策事例を取りまとめ付属書として添付することとした。

I 付属書D 地震 を 38 頁と 39 頁の間に挿入する。次回改訂まで付属書のページを 38-1,2,3....と記載する。

I 付属書 D 地震計¹

1. はじめに

本付属書では、地震計の技術的変遷、現在使用されている地震計の種類およびその適用分野について概観し、東日本大震災を経験して需要の高まっている、産業用プラントの地震対策向けの地震計システムについて紹介し、産業用プラントにおける地震計の設置方法や維持管理手法について述べる。

2. 地震計の技術的変遷

いわゆる地震計と呼ばれるものには、地震動の波形を記録する「地震計」と、地震動の波形を記録するのではなく、地面が揺れたことを捉える「感震器」とに大別される。現在では、感震機能に特化したものを感震器、地震動の波形記録に感震機能も具備したものを地震計と呼ぶことが多い。

感震器の歴史は古く、少なくとも 132 年に張衡（ちょうこう、78 年～139 年、後漢代の政治家、科学者、文学者）が発明したとされる「地動儀」と呼ばれる、玉が落ちて地震を知らせる感震器に遡る。この「落球式」の原理は、現在でも使用されており長い歴史を有する。近代になって機械式地震計が登場した際には、地震計を起動させる装置として用いられた。その後その役割は不要となったが、より精度を上げた感震器が開発され、地震を検知して緊急通知をしたり装置を停止させたりして二次災害を防止するために使用されている。

地震計は、明治の初めに来日した外国の科学者たちが地震を体験して驚き、科学的に地震を捉えようとして地震計を作り出したことに始まり、その後日本人の研究者も出てきて改良を加えていった。

地震を捉えるために各種の試みが行われたが、「振り子」を使うことが現実的であるという結論に至り、振り子を利用した精密な機械仕掛けの地震計が製作された（ユーイング・グレイの円盤式地震計（1880 年初頭）、大森式地震計（1898 年頃）、ヴィーヘルト式水平動地震計（1904 年）、今村式 2 倍地震計（1911 年。1923 年の関東大震災を記録している）、石本式加速度計（1931 年）など）。現在でも原理的にはこの振り子を利用したものが多い。機械式地震計は、1880 年初頭から 1960 年代頃まで普及した。

機械式地震計は、針先や、梃子（てこ）の支点の摩擦に打ち勝って性能を向上するために大型化が図られ、1 トンを超えるおもりのものも登場したが取扱いが容易でなく、かつ拡大倍率には限界があった。

その欠点を克服するために、振り子の動きを光学的な仕組みで捉えて印画紙に記録する地震計が登場した（ミルン水平振り子地震計（1894 年）、ウッド・アンダーソン式地震計（1924 年））。しかし、摩擦の問題は解消できたものの、現像する手間がかかる短所があったことと、その後登場する電磁式の利便性が高かったこともあり、1970 年代頃までは製作されたものの、大きな普及には至らなかった。

電磁式は、同じく機械式地震計の摩擦の問題を克服するために、コイルを磁場の中に置き地震動を電圧の変化に変えることで記録をする方式である（ガリッチン式地震計（1907 年）、59 型電磁式地震計（1959 年））。当初は地震計のコイルの起電力でじかに電流計を動かして記録する方法をとっていたが、後のエレクトロニクスの発達により増幅器が使われるようになり、拡大倍率が数千倍から数万倍を超えるようになった。また、地震動をいったん電気信号に変えれば、記録データの保存性もよく、

¹ アズビル株式会社 アドバンスオートメーションカンパニーSS マーケティング部 林 功

かつデジタル化によるデータ処理も容易なことから急速に普及し、現在ではほとんどの地震計が電磁式になっている。

1990 年頃からは、マイクロプロセッサ技術を応用してデジタル回路を組み合わせで記録する地震計が登場してきた。マイクロプロセッサ技術が劇的に向上していく中、小型・高精度・高機能な地震計が安価で実現できるようになった。地震の震度は、揺れに対する人の感覚や地震動の建造物と自然界への影響の大きさを表す尺度であり、従来は体感や被害の程度から人が決めていたが、1995 年兵庫県南部地震を契機に、客観性や速報性が一層強く求められるようになり、従来の震度階（旧震度階：8 段階）から、震度を機器により計測（計測震度）する方式に対応した新震度階（10 段階）に 1996 年に変更された。このことに対応して 1996 年に初の計測震度計が登場した。このことは、マイクロプロセッサ技術の向上により、複雑な演算処理が高精度かつ高速で行えるようになったことが大きく貢献している。新旧震度階、加速度及び計測震度の関係を示す（表 1）。

2000 年以降は、マイクロプロセッサベースの地震計はさらに発展し、計器の自己診断により高信頼化を図ったもの、液状化判定など複雑な信号処理技術を搭載したものが登場している。また、小型・高機能かつ高信頼な地震計が登

表 1 震度階（新・旧）、加速度及び計測震度の関係

旧震度階		新震度階	
震度	加速度 (Gal)	震度	計測震度
0	0.8 未満	0	0.5 未満
1	0.8 以上 2.5 未満	1	0.5 以上 1.5 未満
2	2.5 以上 8.0 未満	2	1.5 以上 2.5 未満
3	8.0 以上 25.0 未満	3	2.5 以上 3.5 未満
4	25.0 以上 80.0 未満	4	3.5 以上 4.5 未満
5	80.0 以上 250.0 未満	5弱	4.5 以上 5.0 未満
		5強	5.0 以上 5.5 未満
6	250.0 以上 400.0 未満	6弱	5.5 以上 6.0 未満
		6強	6.0 以上 6.5 未満
7	400.0 以上	7	6.5 以上

（注）この表の震度と加速度値の関係は目安です。

特に、加速度の高周波成分は実際の被害への影響が小さくなるため、高周波成分が大きい加速度波形では誤差が大きくなります。
計測震度の計算には、加速度の大きさの他にも、揺れの周期や継続時間が考慮されるため、最大加速度が大きい場所が震度も大きくなるとは限りません。

場したこととインターネットなどの大規模ネットワーク網が登場したことにより、従来の少数点在の観測網から多点観測網が実現できるようになり、気象観測用の他、鉄道網や道路網、ガス供給網などの大規模な社会インフラの管理・制御用としても発展している。さらに一般の工場や事務所などの二次災害防止用としての地震警報装置や自動緊急遮断装置への活用が進んでいる。

3. 地震計の種類と適用分野

地面が揺れたことを捉える機能に限定した「感震器」は、現在でも機械式のものが多く、落球式、倒立棒式、摩擦式、バネ式、磁石式などがある。これらは地面の揺れにより単純な機械的動作をする仕組みで精度には限界があり誤作動や不作動を防ぐ対策が取りにくい面があるが、単純・小型・安価であるのでエレベータ、ストーブ、温水器、小型ボイラなどに多く使用されている。磁石式の例を示す（図 1）。

現在の「地震計」の多くは、上述したよう

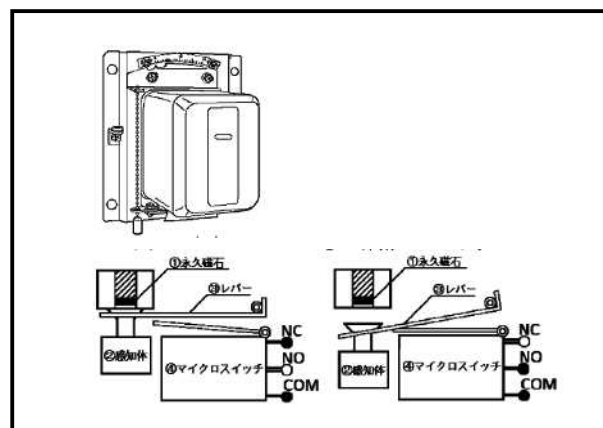


図 1 磁石式感震器の例

に振り子の原理を利用した電磁式で、地震動の波形を記録することができ、かつ感震機能を持つ。この振り子の原理を利用した地震計は、サイズモ系地震計と呼ぶ。サイズモ系地震計は、質量（錘（おもり））、弾性要素（ばね）、減衰要素（ダンパ）で構成されている。また、現在サイズモ系地震計で主流になっているのは、「サーボ型」である（図2）。サーボ型は、サイズモ系のおもりの位置を検出しサーボアンプでその信号を駆動コイルにフィードバックし、磁石との反発力などを使っておもりの位置を元に戻すよう制御し、その制御信号を地震動波形として取り出す方式で、可動部を持つサイズモ系センサでありながら、可動部を動かさずに計測ができるという特徴があり、精密かつ高信頼な計測ができる。その他の方式としては、圧電式、静電容量式、ピエゾ抵抗式などがある。

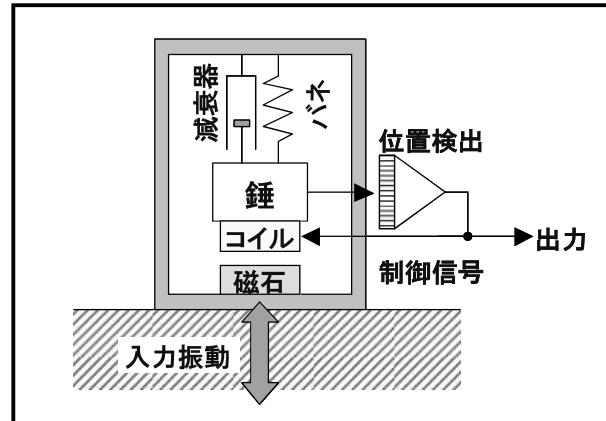


図2 サイズモ系サーボ型地震計

適用分野としては、地震動の計測および解析を目的とするもの、二次災害を防止することを目的とするものに大別される。さらに二次災害防止には、小さな装置や機器などの小規模なものから、産業用プラント、社会インフラおよび交通システムなど大規模なものまで幅広い利用分野があり、目的に応じてそれに適用する感震器や地震計は、計測の原理的には同じでも具備すべき機能が異なる（表2）。

表2 地震計の機能と適用用途

		用途	機能	適用分野例
サイズモ系	電気式	地震計測・解析	監視／測定装置 ・加速度／計測震度測定 ・データ収集機能 ・表示機能 ・テレメータ機能	・気象観測 ・ダム管理 ・振動解析 ・電力設備管理 ・鉄道施設管理
		二次災害防止（高リスク）	監視／測定装置 ・加速度／計測震度測定 ・感震接点出力（設定値可変）	・道路管理 ・ガス供給網管理 ・石油／化学プラント地震対策
	機械式	電気式用途と同じ ※機械式は電気式に置き換わりつつある	電気式機能と同じ ※機械式は電気式に置き換わりつつある	電気式の適用分野例と同じ ※機械式は電気式に置き換わりつつある
非サイズモ系	電気式	二次災害防止（低リスク）	感震器 ・接点出力（設定値固定）	・エレベータ監視 ・ボイラ管理 ・暖房機管理 ・建物被害度監視
	機械式			

4. 産業用プラント地震対策向け地震計システム

地震動の計測および解析を目的とする地震計においては、東日本大震災規模の経験を踏まえ、さらなる測定上限の拡大や広域・多点データ収集能力の向上と解析機能の向上が求められている。また、その観測網を生かした地震予報システムの構築は未だ精度的な課題が多いものの早期の完成が望まれている。

また、二次災害防止目的の地震動計測においては、その地震動が建造物にどの程度の被害を与える

のかを知ることが必要であり，SI（Spectrum Intensity）値が使用されている。SI 値は，建造物への地震動による破壊力を表すひとつの指数であり，Dr. G. W. Housner により提唱された（図 3）。この SI 値は建造物への被害度との相関が高く，計測震度とも相関が高いことが確認されている（図 4）。最新型地震計では，加速度や計測震度はもとより，この SI 値さらには地震動波形から地盤の液状化判定をリアルタイムに計測・演算できるインテリジェント型の地震計も登場している（写真 1）。

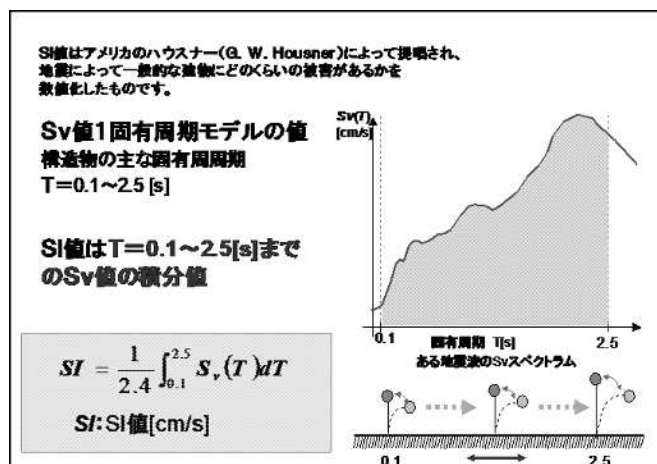


図 3 SI（Spectrum Intensity）の計算式

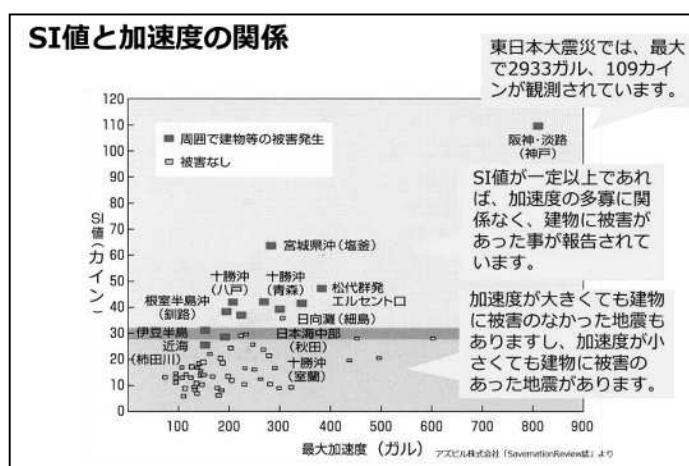


図 4 SI 値と加速度の被害度の相関



写真 1 インテリジェント型地震計（SI センサ）

二次災害防止目的の地震計の運用としては，地震計の感震機能による緊急通知を受けての設備の自動または手動停止と避難という行動になるが，東日本大震災においては，地震計の不作動，揺れが激しいため，手動停止の冷静な判断や操作自体ができなかった，緊急解放できず部屋に閉じ込められたなどの問題が浮上した。また，緊急に停止はできたものの，安定した状態ではなかったため，復旧に手間取った事例も報告された。これらを解決すべく，緊急時には自動的に設備を安全・安定で停止させて，避難ゲートの緊急開放を自動的に行うことができるシステムも登場した。

製造設備の自動停止や避難ゲートの緊急開放を目的とする地震判定システムにおいては，誤作動（地震が発生していないのに地震と判定してしまうこと）と不作動（地震が発生しているのに地震と判定しないこと）を極力少なくするシステム設計が必要である。1 系統のシステム（非冗長システム）では，ひとつの誤作動がシステムの誤作動につながり，ひとつの不作動がシステムの不作動になるため，地震計センサや論理演算回路の冗長化が考えられる。

しかし、2 系統だけを用いた『直列システム』や『並列システム』では、誤作動、不作動の問題を十分に解決することはできない。基本的に 2 系統だけを用いたシステムでは、どちらの系統の判定が正しいのかを判定結果から判断することはできない。

そしてさらにこの判定結果を用いて『直列システム』、『並列システム』を構成したとき、『直列システム』の場合、どちらかの系統が不作動状態となったとき、地震判定が正しく

出力されない。また、『並列システム』の場合、どちらかの系統が誤作動したとき、地震判定が誤って出力されてしまう。

このシステムは、平常時の誤作動や緊急時の不作動を極限に少なくするため、システム全体を 3 重化し、3 系統による多数決（2 out of 3）システムとし、どの系統の判定が正しいかを高い精度で判断することができるようにした。この判定結果を用いることにより、ひとつの系統が誤作動をしても、不作動をしても、システムの地震判定出力に影響を与えることが極めて少なくなる。

さらに地震計やコントローラ単体の健全性のみならず、それらの接続配線も含めたループ全体が正しく動作するよう保つことが重要である。従来、ループの動作チェックは定期点検時に手動による確認を行っていることが多いが、数ヶ月～数年毎の動作チェックでは高信頼性を保つには必ずしも十分とはいえず、かつ手動による動作チェックには手間とヒューマンエラーによる誤動作リスクも生じる。このシステムでは、地震計の点検とループ配線チェックも自動的に定期点検を行うことにより、システム全体の健全性を常に保つことができる仕組みを備えている。このことでシステムに潜在している不作動状態を検出し、システムの信頼性をさらに向上させている。このチェックは地震判定処理を中断することなく行うことができる（図 5）。

5. 地震計の設置と維持管理

産業用プラントの保安のための地震計の設置基準については、法令等で定める基準や業界標準というものはない。参考になるものとしては、気象庁の「震度計設置環境基準」が挙げられる。ただしこの基準はあくまでも気象観測を目的とした地震計のための設置基準であり、産業用プラントの保安目的としては、必ずしもすべての要件を満足する必要はない。

地震計の設置場所は、アクション（例：緊急停止）を起こす装置の近傍に設置することが望ましい。もし事業所全

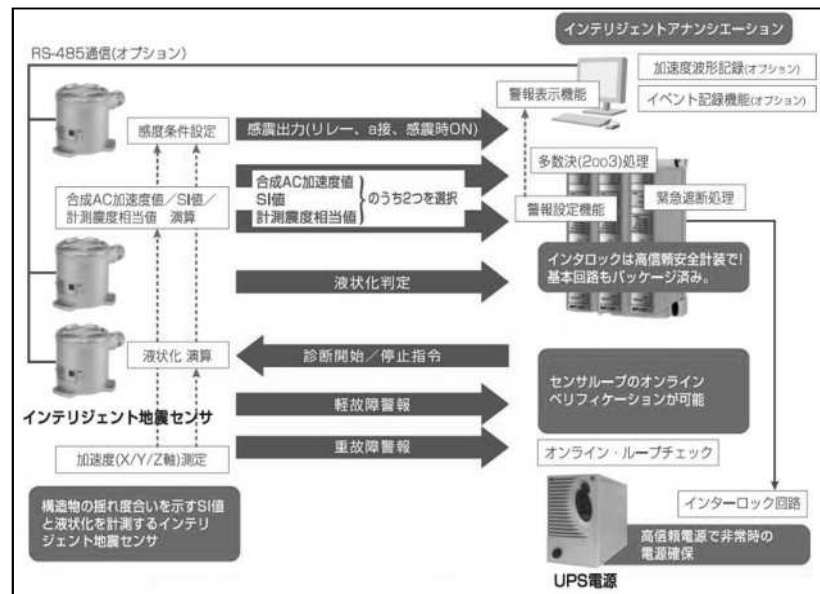


図 5 高信頼型地震時緊急停止システム



写真 2 地震計設置例

体の代表で地震計を設置する場合は、その事業所の地盤を代表する場所に設置する。ただし、トラックや工事用車両が頻繁に通る道路付近、動力機械が作動して微振動が発生している場所等の機械的振動が常在する場所の設置は避ける必要がある。

産業用プラントの保安用としては、地震計を3台設置して多数決を取る方式を採用することも多い。この場合に、3台の地震計はまとめて設置するのがよいのか、または離して設置するのがよいのか、ということが議論になることがある。例えば、共通的な原因(例:人が誤ってぶつかってしまう)で誤作動してしまうような状態で、同じ土台にまとめて設置するのは好ましくない。また、地盤条件が異なるほど離して設置するのも好ましくない。可能な限り同じ地盤条件で、少なくとも数m程度は間隔を置いて個別に設置することが望ましい(写真2)。

地震計は、地震計の質量に対して十分大きな質量をもったコンクリート製の土台に、1台ずつ設置することを推奨している(図6)。ここで、この土台を置く地盤をしっかりと固める必要があるかという点が議論になることがある。

しかし、地震計付近の地盤だけを強固にするのは本末転倒であり、アクション(例:緊急停止)を起こす装置の設置されている基礎と地盤条件が同じであることが望ましい。またさらに、雷が多い地域では、計器保護のために地震計側と制御盤側に避雷器を設置することが望ましい。

地震計は、定期的に動作及び精度確認を行うことが望ましい。設置されている現場で行える精度確認方法として、静的加速度精度確認法がある。

静的加速度精度確認法では、静的加速度治具(写真3)により、XYZ軸各個別に加速度測定精度の確認を行う。この方法で、XYZの各軸方向に対して基準加速度値である地球重力980Galでの測定値から精度を確認する。この静的加速度治具に地震センサを取り付け、XYZ各方向に重力加速度をかけ、計測値をロードにより読み出し精度を算出する。

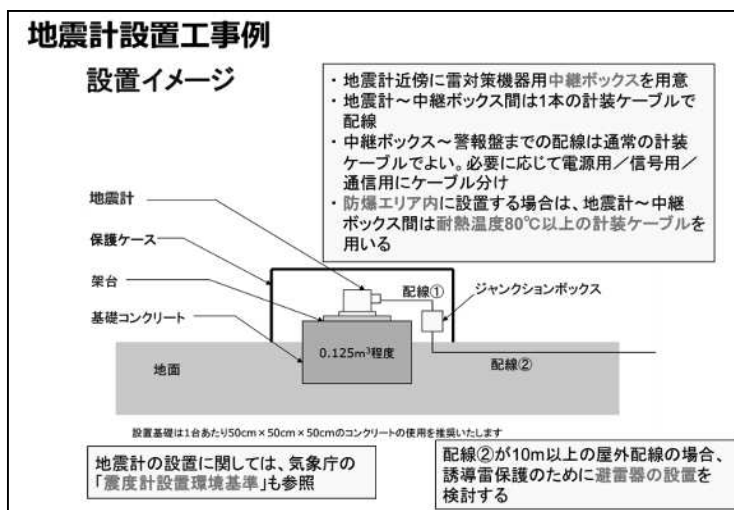


図6 地震計設置工事要領

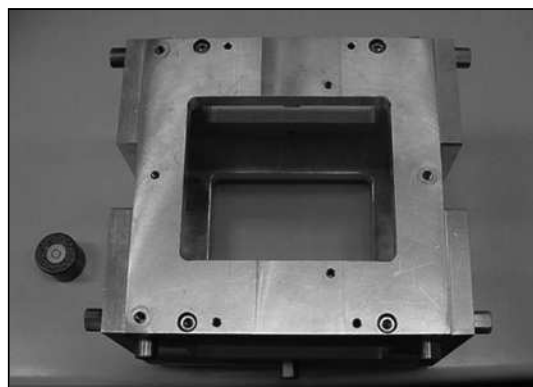


写真3 定期点検用静的加速度治具

<参考文献>

- 1) 「地震計の歴史」, 国立科学博物館/日本館
- 2) 林, 茨木, 瀬戸口, インテリジェント地震緊急停止システム, 計装, 2012年6月号
- 3) 古川, 田久保, 築田, 市田, 清水, 小金丸, 中山, インテリジェント地震センサの開発, Savemation Review, 1999年8月