

インテリジェント地震緊急停止システムの開発

An Intelligent Emergency Shutdown System in Case of Earthquake

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

林 功
Isao Hayashi

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

古川 洋之
Hiroyuki Furukawa

キーワード

地震, BCP, 防災, SI 値, 液状化

昨今多発する地震を契機に、製造業における BCP (Business Continuity Plan: 事業継続計画) の動きが加速している。この中で地震対策強化策としては、地震発生時の人命および環境の安全確保や設備装置の保護のため、製造設備をいかに速やかに安全に停止させ復旧させることができるかが課題となっており、地震を検知し製造設備を停止して従業員の安全確保をする仕組みの見直しが行われている。本論文では、このソリューションである、「インテリジェント地震緊急停止システム」を開発したので報告する。また、東京ガス株式会社様に採用されているインテリジェント地震センサの東日本大震災の稼働実績を併せて報告する。

With earthquakes occurring more frequently in recent years, business continuity planning (BCP) has gained momentum in the manufacturing industry. The challenge for BCP in improving earthquake response measures is to suspend and restore manufacturing equipment operation quickly and safely, in order to ensure the safety of human life, the environment, and the equipment. Against the background of this challenge, a system for detecting an earthquake and suspending the operation of manufacturing equipment was a desideratum. This paper reports the development of the "Intelligent Earthquake Emergency Shutdown System" by our company as a BCP solution. It also reports on the performance of an intelligent earthquake sensor used by Tokyo Gas Co., Ltd., during the Great East Japan Earthquake.

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災を教訓に、多くの企業では地震対策を見直している。その中の重要な課題の一つが、大地震発生時における設備装置の自動遮断処理による安全確保である。本論文では、この課題の背景と、課題解決のためのソリューションを技術的変遷や稼働実績も交えて報告する。

2. BCP (事業継続計画) としての地震対策

東日本大震災以降、「BCP」という言葉が企業において盛んに使われるようになった。9.11同時多発テロを始め、多数の死者を出した SARS など、現在の BCP 対象

は自然災害だけではなくなっている。しかし「日本において企業の事業継続を脅かす最大の脅威は地震である」⁽¹⁾。

日本はユーラシアプレート、フィリピン海プレート、北米プレート、太平洋プレートの4つのプレートがぶつかり合う所に位置する世界に類例のない複雑な地殻の上に作り上げられている。歴史的に見ても約70年ごとに大地震災害が起きている事実がある。したがって企業としては、「地震は起こるもの」という前提で防災の準備をすることが重要になってくる。

京都大学防災研究所、林教授は日本で使われている「防災」という言葉の意味が変化してきていると指摘している。「防災は、かつては消防と同じ言葉のように使われていた。災害が起きるかどうかは神のみぞ知ること、起きたらそのときに対処するしかないという考えだった。ところが近年は被害を抑止する (Mitigation),

軽減する (Preparedness) という概念が加わり、災害時の脆弱性 (Vulnerability) を取り除くという考え方に変わった⁽²⁾。

ここで、顧客から得た情報を下に東日本大震災時に実際に起こった事象をあげてみよう。

- ・地震計の値を、人が見て判断し設備を停止させる仕組みになっていたが、揺れが大きすぎ冷静に判断できなかった (判断しても停止させることができなかった)。
- ・地震計が正常に作動しなかった (不作動、誤作動)。
- ・設備を上手く停止させられなかったのが原因で、再稼働に時間が掛かった。
- ・設備が火災、爆発した。
- ・緊急地震速報が東北地方には来たが、関東地方は来なかった。

大地震発生を想定した BCP 策定には、ビジネスインパクト分析により事業継続に大きな影響を及ぼす要素を特定して最悪の被害を想定して対策を計画する必要がある。この BCP 策定にあたっては上記に列挙した経験から、ある一定以上の地震が来たときには安全側に作動する信頼性の高い仕組みを作ることが、社員の安全を第一に考え、近隣住民の安全に配慮し、設備を保護する最良の方法であると考えられる。そしてこのことが、林教授が指摘するような「防災」であると考えられる。

3. 地震計の技術的変遷⁽³⁾

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 年ごろ)、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)。機械式地震計は、1880 年初頭から 1960 年代ごろまで普及した。

機械式地震計は、針先や、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を使用したものも登場したが取扱いが容易でなく、かつ計測分解能には限界があった。

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 年代ごろ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直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、計測分解能が数千倍から数万倍に向上した。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、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 年ごろからは、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て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。

2000 年前後からは、マイクロプロセッサベースの地震計はさらに発展し、従来の地震計測・観測を中心とした利用法から、制御に応用できる小型・高機能かつ高信頼かつ、取扱いが容易な「センサ」型の地震計 (地震センサ) が登場し、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、ガス供給網や鉄道網、道路網などの大規模な社会インフラの管理・制御用として発展している。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。その最先端の地震センサが、インテリジェント地震センサ SES シリーズである。

4. インテリジェント地震センサ

インテリジェント地震センサ SES シリーズ (SES50, 51, 55, 60) は東京ガス株式会社様と共同開発を行った製品である。インテリジェント地震センサは東京ガス株式会社様開発の最先端の都市ガス供給地震防災システム SUPREME に約 4,000 台が使用されており、1998 年のシステム稼働開始以来 14 年間の稼働実績において、誤遮断を引き起こすようなセンサの誤動作は発生していない。また、他のガス会社、プラント、工場などを合わせると 9,000 台を超える販売実績があり信頼性の裏付けとなっている。

現行モデルのインテリジェント地震センサ SES60 は小型 / 低価格 / 高機能をコンセプトに開発され、高さ 113mm のケースに高精度のサーボ型加速度センサを 3 個搭載している。SES60 は地震被害推定に用いられる加速度、SI 値⁽⁴⁾ (Spectrum Intensity)、計測震度相当値 (加速度と SI 値を使った計測震度の相関式により算出した値) の演算および液状化判定機能⁽⁵⁾ を有しており、計測と制御に利用可能である。また、記録時間 2 分間の加速度波形を 10 波形記録することができ地震波形の解析が可能である。写真 1 に SES60 の外観を示し、表 1 に主な仕様を示す。

SES60 の高い信頼性を維持するため内部回路の常時診断を行っており、メモリ (ROM, RAM, EEPROM) 異常、AD コンバータ異常、内部電源電圧異常、感震出力異常、温度異常などの検出が可能である。また、メンテナンスモードに移転することにより加速度検出部を物理的に動かし診断を行う加速度センサの自己診断機能がある。以上の診断結果により異常が検出された場合は重故障状態となり、重故障警報を出力し、各計測および制御出力はシステムを誤動作させないように動作するよう配慮している。

さらには、地震波形とは異なるノイズ波形の特徴を識別し、誤った出力を出さないノイズプロテクト機能を有しており、ノイズプロテクト状態であっても波形記録は有効であるため、波形を解析することでノイズの発生



写真 1. 地震センサ SES60 外観

源を特定し対策に繋げることが可能となる。

表 1. 地震センサ SES60 仕様

| 項目 | 内容 |
|-----------------|---|
| 加速度測定レンジ | ±2000Gal (x,y,z軸) |
| 測定分解能 | 1Gal (DC加速度計測にて) |
| 計測加速度周波数 (-3dB) | DC-30Hz |
| 加速度サンプリング | 10ms |
| 定格電圧 | DC12V±10%/DC24V±10% |
| 消費電力 | 5W以下 (4~20mA出力含む), 400mA以下 |
| 感震出力 | リレー 1a |
| 液状化出力 | NPNオープンコレクタ |
| 重故障出力 | NPNオープンコレクタ |
| 軽故障出力 | NPNオープンコレクタ |
| 4-20mA出力 | 2ch, カレントソース SI値, 合成加速度, 計測震度相当値より選択 |
| 診断入力 | フォトカプラ入力カレントソース |
| RS-485通信 | 3線式, 19200bps |
| 波形記録 | 120s×10波形 (10msサンプリング) |
| 精度保証温度 | 周囲温度: 0~+50°C (ただし, 凍結しないこと) |
| 使用温度 | 周囲温度: -10~+60°C (ただし, 凍結しないこと) |
| 防爆規格 | Exd II BT4 (耐圧防爆構造) |
| 防水・防じん性 | IP67 (水中1m, 30min) JISC0920 防浸形 (金属製ケーブル配管部は除く) |
| 質量 | 1.8kg |
| 付属品 | 耐圧パッキンセット ケーブルグランドセット 六角レンチ 電池: (寿命通電時10年以上, 非通電時6カ月 20°Cにて) |
| 別売品 | パソコンローダ (SLP-SE6) |

5. 東日本大震災での実績⁽⁶⁾⁽⁷⁾

東京ガス株式会社様では、約 4,000 箇所、約 0.9km 四方に 1 箇所の地区ガバナ (主に一般家庭向けの供給圧力に整圧するガス供給設備) にインテリジェント地震センサ SES シリーズが設置されており、地震観測およびガスの供給停止制御を行っている。東日本大震災の際には azbil 製のテレメータ DCX350 を使って約 5 分間で全域の地震情報を収集し、地震発生後約 10 分で地域ごとのきめ細かい被害状況を把握できた。このときの SUPREME が観測した SI 値の分布を図 1 に示す。また、図 2 に地区ガバナの制御システムを示す。

さらに約 10 分後には SES60 を使った液状化の発生状況の推定も完了している。SES60 の液状化検知機能は液状化発生の波形パターンを識別し判定を行うものであり、直接水位を計測するセンサのようなボーリング工事が不要であるため、多くのポイントでの計測が実現できた。今回の液状化判定の結果を図 3 に示す。実際の液状化発生と SES60 の液状化判定結果を比較すると表面波による長周期成分の影響による相違は僅かにあったが、約 20 分間で液状化の傾向をとらえることができたのは非常に有益であると考えられる。

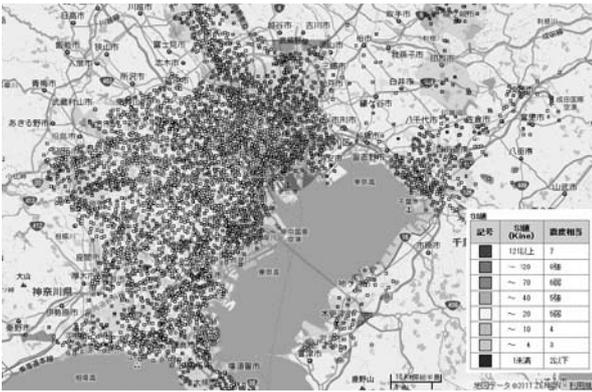


図1. SUPREME 観測画面

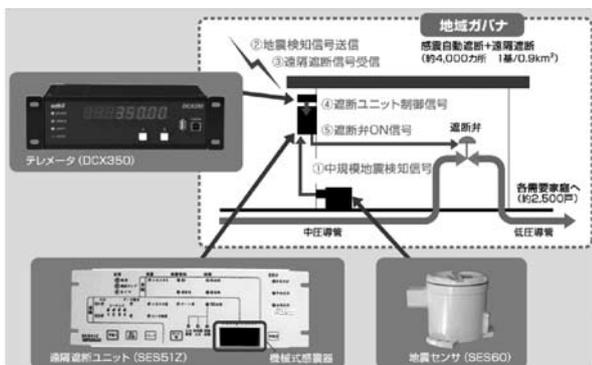


図2. 東京ガス様 地区ガバナ制御システム

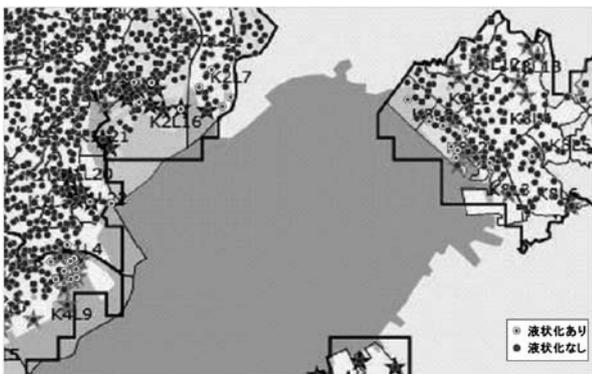


図3. SUPREME 液状化判定結果 (東京湾北部)

また、地区ガバナのうち14基はSI値が40kine (cm/s) または50kineを超えたため、インテリジェント地震センサと機械式感震器を搭載した遠隔遮断ユニットSES51Zの両方の閾値設定を上まわり冗長性制御により自動遮断を行った(図2)。

このことより、約4,000台の地震センサが地震の規模に応じて正常に動作し、東京ガス株式会社のガス供給システムの安全性を確保できたことが証明された。

東京ガス株式会社の日立支社構内に設置された地震センサが記録した東日本大震災の本震の波形を図4に

示す。日立市においては、最大SI値が70kineを記録したため、東京ガス株式会社様が定める保安規程に基づき、日立支社供給区域の全域で供給停止を行い、供給停止戸数は30,008戸を数えた。東京ガス株式会社様ではSUPREME および地区ガバナの制御システムにより、震災時における迅速な対応が実現でき、お客さま(ガス利用者)の安全を確保し、二次災害を引き起こすことは無かった。

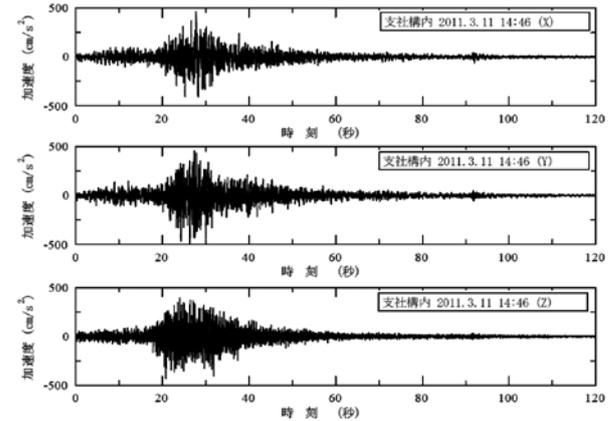


図4. 東日本大震災地震波形(東京ガス株日立支社様)

6. インテリジェント地震緊急停止システム

地震発生時に局所的なガス遮断を行うアプリケーションとは異なり、コンビナートの大規模プラント全体を決められた手順で安全・安定に遮断するための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、一つの誤作動がシステムの誤作動につながり、一つの不作動がシステムの不作動になるため、地震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、たとえば「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。このためこれらのシステムでは誤作動、不作動の問題を同時に解決することはできない。

これに対して、3系統による多数決(2 out of 3)システムでは、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。この判定結果を用いることにより、一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。

そこで、「インテリジェント地震緊急停止システム」(図5)では、地震センサから論理演算回路、そしてDO

出力まですべてが2 out of 3の3重化された構成を採用したシステムとした。さらに、入出力は3重化されたカードをバックアップ冗長できる構成として、活線メンテナンスを可能とした。

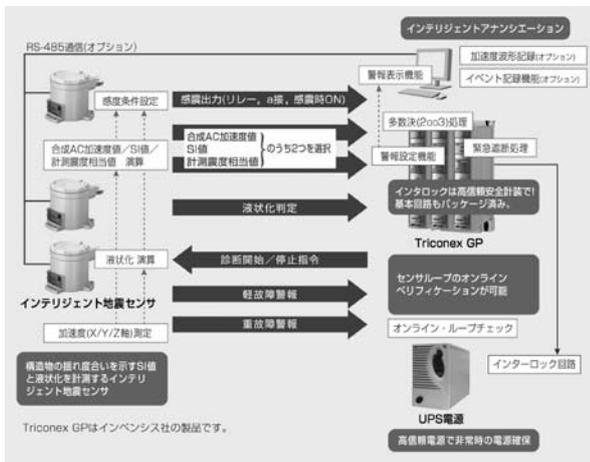


図5. インテリジェント地震緊急停止システム

6.1 高信頼コントローラによる地震判定処理

インテリジェント地震緊急停止システムでは、論理回路処理部として、インベンシス社製の3重化高信頼化コントローラ「Triconex GP」(写真2)を採用した。Triconex GPは、ワンクラス上の高信頼運転を実現する安全計装システム用コントローラである。



写真2. Triconex GP 外観

Triconex GPの特長を以下に示す。

- ・誤作動と不作為を最小限に抑える TMR (3重化多数決方式) (図6)
- ・高速論理処理が可能
- ・堅牢なモジュール構造
- ・フィールド配線と入出力端の健全性確認を含む強力な自己診断
- ・プラント稼働中にフィールド配線ははずすことなく故障モジュール交換可能

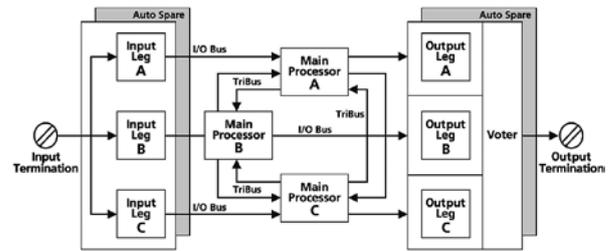


図6. Triconex GP 内部ブロック

6.2 地震判定処理の基本回路のパッケージ化

地震センサから送られてくる信号の多数決 (2 out of 3) 処理や、各種地震センサ測値の警報処理など、地震判定処理の基本回路はパッケージ化されているので、省エンジニアリングで導入できる。

6.3 センサループのオンラインチェック

地震センサやコントローラ単体の健全性はもちろん、さらに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、数カ月～数年ごと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。「インテリジェント地震緊急停止システム」では、地震センサ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。なお、自動点検の際には地震センサ2台の制御に切り換えてシステムとしての地震判定処理は継続しながら、休止した地震センサをメンテナンスモードに移行させ加速度センサの診断も順次実行している。このことでシステムに潜在している不作為状態を検出し、システムの信頼性をさらに向上させている。

「インテリジェント地震緊急停止システム」で、誤作動、不作為に最も強いシステム機能を提供する。

7. おわりに

大地震発生時における設備装置の自動遮断処理による安全確保が重要であることが、東日本大震災で再認識された。近代の地震計は明治時代の機械式地震計からマイクロプロセッサベースの地震計に発展してきたが、さらに制御に応用できるセンサ型地震計 (地震センサ) が出現し、自動遮断処理を小型・高機能・高信頼でかつ取扱いが容易な「インテリジェント地震センサ」に発展し、多点観測網が実現できるようになった。そして東京ガス株式会社様のガス供給網の地区ガバナ制御システム用として、約4,000台の地震センサが配備され、東日本大震災でも二次被害防止に貢献し、その有効性が確認できた。さらに、その発展形として、大規模プラントの自動

遮断処理を行うための、不作動・誤作動を極力排除した高信頼な「インテリジェント地震緊急停止システム」を開発し導入が進んでいる。今後も地震センサのさらなる機能向上を図っていききたい。また、今回のシステムは大規模プラント向けに最適なソリューションであるが、中小規模製造設備や低リスク設備向けに最適なソリューションも提供していきたい。

8. 謝辞

東日本大震災の地震センサの稼働実績においては、東京ガス株式会社 防災・供給部 防災・供給グループの乗藤雄基様に貴重な情報と助言をいただきました。この誌面を借りまして感謝の意を表します。

<参考文献>

- (1) 内閣府、中央防災会議「民間と市場の力を活かした防災力向上に関する専門調査会」企業評価・業務継続ワーキンググループ：事業継続ガイドライン、第二版、－わが国企業の減災と災害対応の向上のために－、2009年11月
- (2) 「防災からレジリエンスへ」、リスク対策.com、2011年9月
- (3) 「地震計の歴史」、国立科学博物館／日本館
- (4) 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 VOL.17、アズビル株式会社、pp2-11、1999年
- (5) 鈴木崇伸、清水善久、小金丸健一、中山渉：ゼロクロス周期を用いた液状化判定法の適用結果、土木学会第56回年次学術講演会、pp46-47、平成13年10月
- (6) 猪股渉、乗藤雄基：東北地方太平洋沖地震における東京ガスの対応について、日本災害情報学会第13回研究発表大会予稿集、pp103-106、2011
- (7) 乗藤雄基、猪股渉、石田栄介：2011年東日本大震災における液状化地区の推定、日本災害情報学会第13回研究発表大会予稿集、pp185-188、2011

<商標>

SUPREME は、東京ガス株式会社の商標です。
TRICONEX は、Invensys plc、関連会社または提携者の商標です。
SES は、アズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

林 功 アドバンスオートメーションカンパニー
マーケティング部
古川 洋之 アドバンスオートメーションカンパニー
開発3部