

*Journal of the Institute of Nuclear Safety System*  
2011, Vol.18, 218-227

原子炉格納容器鋼板埋設部の腐食測定技術の開発（第4報）  
— 超音波探触子出力の解析評価 —

Development of an Ultrasonic Testing Technique to Inspect Corrosion on Containment  
Vessel Plates Embedded in Concrete of a Nuclear Power Plant (IV)  
— Evaluation of Ultrasonic Transducer Output by Numerical Analysis —

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)



株式会社 **原子力安全システム研究所**

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated

〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64号

Tel 0770-37-9100 Fax 0770-37-2008

URL <http://www.inss.co.jp>

# 原子炉格納容器鋼板埋設部の腐食測定技術の開発（第4報） — 超音波探触子出力の解析評価 —

Development of an Ultrasonic Testing Technique to Inspect Corrosion on Containment Vessel Plates Embedded in Concrete of a Nuclear Power Plant (IV)  
— Evaluation of Ultrasonic Transducer Output by Numerical Analysis —

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)\*<sup>1</sup>

**要約** 本研究の目的は、原子力発電所の原子炉格納容器下部のコンクリート埋設部鋼板を対象とした、直接接近することが困難な構造物の超音波検査技術の開発である。

これまでに、3個のSH波振動子を組み合わせた大型（3連振動子）探触子、5個の探触子の受信信号を合成し、受信信号強度の向上を図るマルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムを開発した。

実規模試験体を用いた測定試験は困難である。そこで、伝播距離約25mの実際の原子炉格納容器埋設鋼板の超音波探傷試験を行うために必要な超音波探傷試験システムの仕様を超音波伝播有限要素解析により検討した。その結果、超音波入力強度としては、前述の大型（3連振動子）探触子の約23倍の入力強度が必要であることがわかった。

**キーワード** 超音波探傷試験, 原子炉格納容器, 超音波探触子, 超音波伝播解析, 有限要素解析

**Abstract** The purpose of this study is to develop an ultrasonic technique for testing of structures such as nuclear containment vessel plates embedded in concrete to which direct access is difficult.

We have already developed a shear horizontal (SH) wave transducer that has three active elements and a Multi channel probe synthesis system which uses 5 transducers to synthesize the original signals from the transducers and enables us to get high amplitude signals.

It is difficult to test transducers with the same scale as mock-up vessel plates, so we have tried to evaluate specifications of an ultrasonic testing system for testing steel plates embedded to a depth of 25m in the containment vessel in a nuclear power plant. We evaluated required output of the ultrasonic transducers by ultrasonic wave propagation finite element analysis. As a result, we determined that the required output was about 23 times that of the three-element SH wave transducer.

**Keywords** ultrasonic testing, reactor containment vessel, ultrasonic transducer, ultrasonic wave propagation analysis, finite element analysis

## 1. はじめに

加圧水型原子炉（pressurized water reactor, PWR）の原子炉格納容器（以下格納容器）は、その内部に原子炉圧力容器、原子炉冷却系などを格納し、事故時に放射性物質が外部へ放散することを防止する機能を有する重要な設備である。そのため格納容器は、定期検査毎に漏洩率試験によって、格納容器バウン

ダリとしての機能を確認することになっており、PWRの原子炉格納容器鋼板は、現在までのところその機能に影響するような腐食が発生する可能性は、ほとんどないと考えられている<sup>(1)</sup>。しかし、格納容器の下部はコンクリート構造物中に埋設されており、接近して目視することは不可能である。したがって、コンクリート埋設鋼板に腐食の無いことを確認し、将来腐食、減肉等の懸念が生じた場合にも、

\*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システムシステム研究所

的確にその位置および程度の評価を可能にする検査技術を用意しておくことが望ましい。

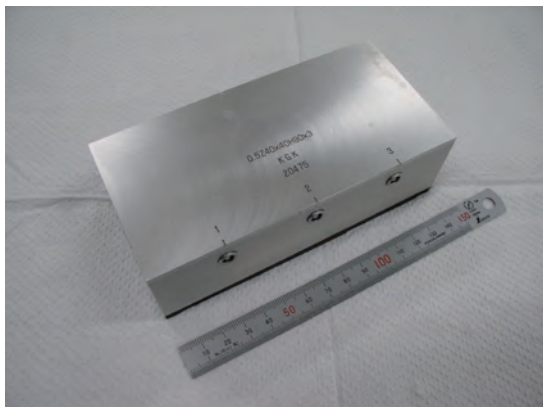
コンクリート埋設鋼板部の検査には、接近が可能な位置から距離約 25m の範囲にある部材の検査が可能な技術が求められる。このような遠距離までの部材の検査に適用可能な技術として、長距離配管や大きな容器の減肉測定等を対象としたガイド波の適用に関する研究開発が近年活発になされている。ガイド波は超音波伝播モードのひとつであり、その発生方法として、電磁超音波 (electromagnetic acoustic transducers, EMAT) 法<sup>(2)(3)</sup>、磁わい効果を利用する magnetostrictive sensor (MSs) 法<sup>(4)(5)</sup>、および通常の超音波探触子に用いる圧電素子を用いる方法がある。このうち、コンクリート埋設鋼板部の長距離範囲の検査技術として、実機適用に至るような完成されたものは未だ存在しない。

これに対して、著者ら<sup>(6)(7)</sup>は、現状の超音波探傷試験において広く利用されている、圧電素子を用いた探触子による手法を応用し、表面の腐食減肉の検知に有効で、かつ鋼板からコンクリートへの超音波の透過が少ないと考えられる屈折角 90 度の、振動方向が試験体の表面に平行な横波 (shear horizontal 波, SH 波) を用いた、低周波数の大型探触子を新たに製作した。すなわち、振動子材料である圧電素子として製作可能な振動方向の幅 40mm (奥行き 40mm) の SH 波振動子を 3 個組み合わせて使用することによって、単一の振動子としては製作できない幅 120mm に相当する大型探触子を実現した。すなわち、全体で幅 120mm (奥行 40mm) 相当の振動子とし、これを 1 つの筐体に入れていた。図 1 に大型 (3 連振動子) 探触子の外観写真を示す。

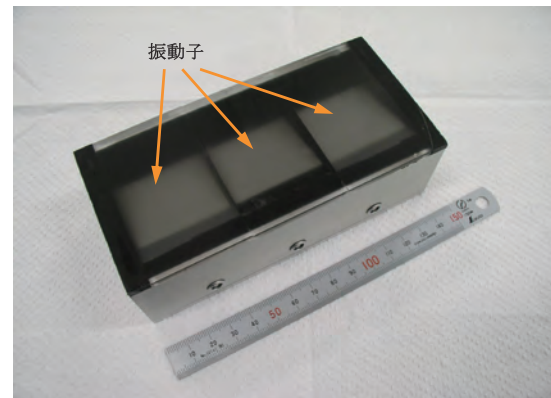
コンクリートによって覆われた厚さ 38mm の鋼板試験体を用いた試験によって、探触子からの距離約 1.5m の位置の鋼板表面上の深さ 19mm および 9.5mm の腐食を模擬した人工減肉 (くぼみ) からの反射波の検出、距離 0.7 ~ 1.7m の位置の鋼板表面に溶接されたスタッドボルトからの反射波の検出、さらに鋼板の端面間の多重反射波の検出による約 12m の距離範囲までの SH 波の伝播を確認した<sup>(8)(9)</sup>。探触子の発信超音波の指向角の測定によって、3 個の振動子を組み合わせた大型探触子から伝播する超音波が、伝播方向のより狭い範囲に集中していることを確認し、これにより超音波伝播性能が向上したものと評価した。

さらに、より強度の大きい受信信号を得ることを目的に、複数個の探触子を複数個の超音波送受信機により個別に駆動し、それぞれの探触子の受信信号を合成処理するマルチチャンネル・プローブ・シンセサイザーシステムを開発した<sup>(10)~(12)</sup>。図 2 に同システム概念を示す。コンクリート埋設鋼板の測定試験によって、鋼板表面の人工くぼみからの反射波について、その合成処理によって約 3.9dB 信号振幅が向上することが確認された。

長さ 2m の鋼板試験体を用いた測定試験によって、その基本的な性能が評価された大型 (3 連振動子) 探触子およびマルチチャンネル・プローブ・シンセサイザーシステムを基に、伝播距離約 25m の実際の原子炉格納容器埋設鋼板部の検査に適用可能な超音波探傷試験システムを実現するために、必要な仕様の一つである超音波の入力強度について、超音波伝播有限要素解析により評価を行った。



(a) 上面



(b) 底面 (超音波入射面)

図 1 大型(3連振動子)探触子の外観写真

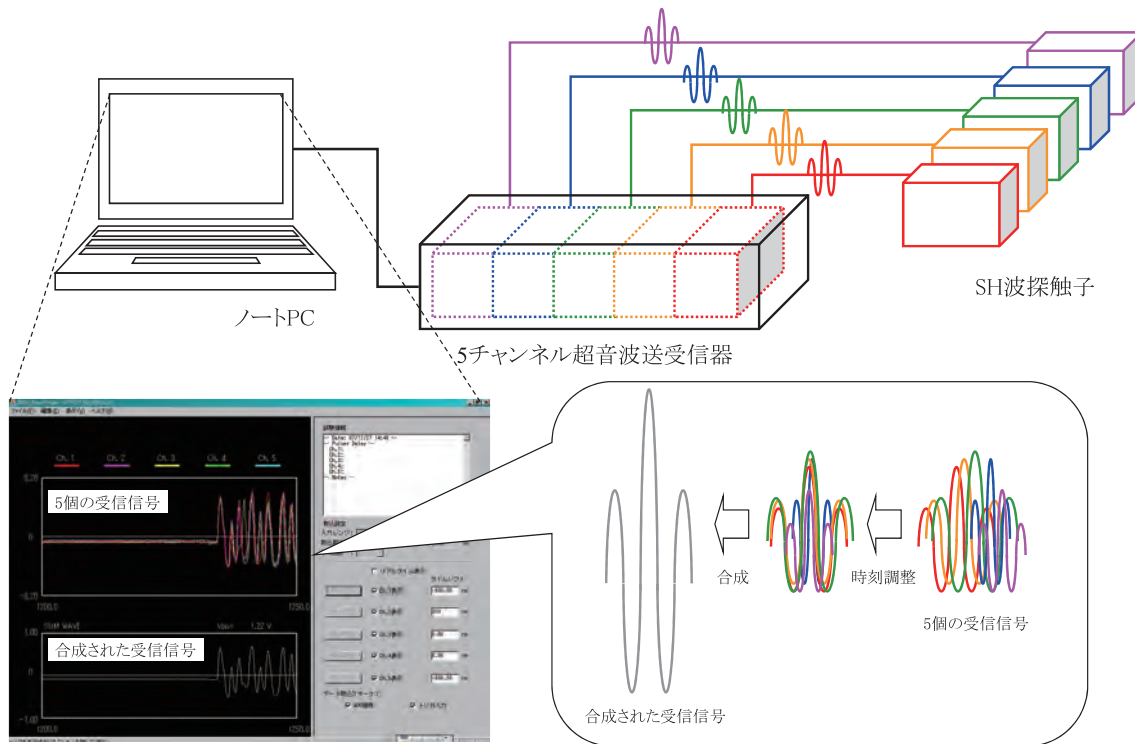


図2 マルチチャンネル・プローブ・シンセサイザーシステム

## 2. 評価方法

### 2.1 評価の手順

探触子位置から距離約 1.5m の位置にある減肉を模擬した表面の人工くぼみを検出できる大型（3連振動子）探触子の入力強度を基準に、距離 25m 位置の超音波強度を以下の手順により評価した。

#### (1) 平鋼板超音波伝播の 3次元解析評価

大型（3連振動子）探触子により計測が可能な超音波探触子からの距離 1m 位置と距離 15m 位置の超音波強度を解析評価する。

#### (2) コンクリート接触平鋼板超音波伝播の 2次元解析評価

3次元解析により評価した距離 15m 位置とさらに距離 25m 位置の超音波強度をコンクリート接触平鋼板について 2次元解析評価する。

#### (3) コンクリート接触曲鋼板超音波伝播の 2次元解析評価

2次元解析により評価した平鋼板上の距離 25m 位置の超音波強度と曲鋼板上の距離 25m 位置の超音

波強度を 2次元解析評価する。

以上によって、大型（3連振動子）探触子により計測した超音波探触子からの距離 1m 位置の超音波強度を基準とした曲鋼板上の距離 25m 位置の超音波強度を算出することによって、大型（3連振動子）探触子を基準とした必要入力強度を評価するものである。

### 2.2 解析モデル

#### (1) 平鋼板 3次元解析評価

鋼板などの材料中の超音波伝播解析は、超音波探触子から入力される超音波（弾性波\*）の伝播現象を構造物の伝播領域を対象にモデル化して行われる。しかし、大規模構造物を対象とする場合には、解析モデルも大規模なものとなり、解析計算に必要なメモリ、時間などに影響する。

材料中を伝播する超音波の強度は、超音波入力位置から時刻とともに伝播する超音波の先端領域の強度が評価される。すなわち、図3に示すように超音波探触子から入力された超音波の位置は、時刻と

\* 鋼材等の弾性体中を伝播するものは弾性波であるが、“超音波探触子”等一般的に用いられる超音波という用語を使用した。

もに変化し、超音波の伝播経路上の位置によって評価すべき時刻が異なる。大規模な構造物を対象とする解析モデルの場合、超音波強度の評価対象となる領域はその一部であり、時刻とともに移動する。

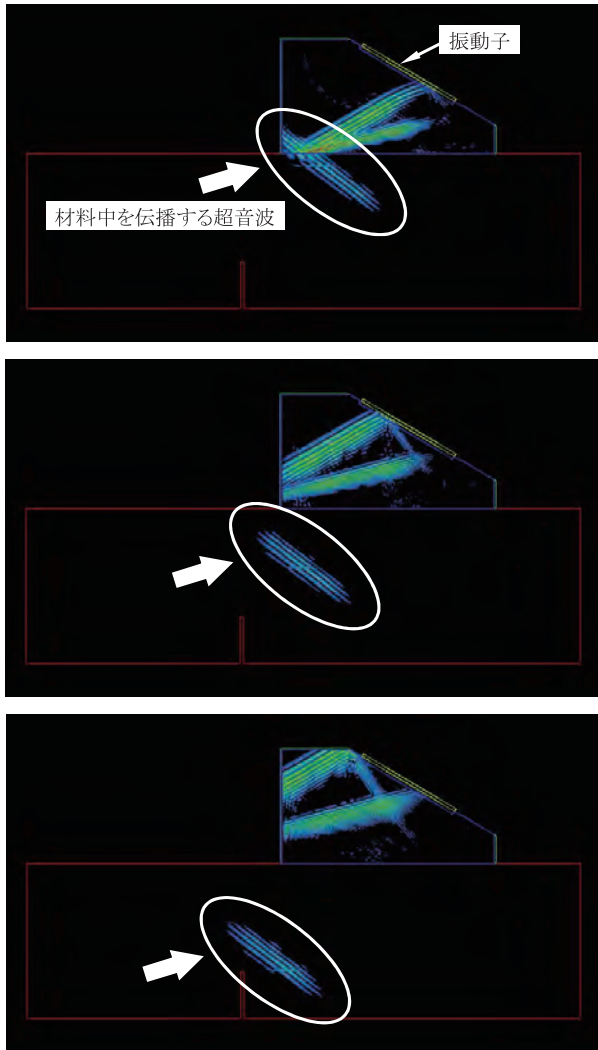


図3 超音波伝播の状況

以上のことから、大規模な解析モデルを解析可能な領域に分割することによって、超音波の先端の伝播解析を行う領域を小さくする方法を考えた。図4に分割モデルによる解析方法を示す。幅  $W$ 、厚さ  $T$ 、長さ  $L$  の鋼板の端部 A 側に超音波探触子を配置したものをモデル①とする。超音波探触子からの超音波がもう一方の端部 B から距離  $M$  までの領域 ( $M$  領域と呼ぶ) に伝播する時刻  $t_1$  まで解析を行う。次にモデル①とは  $M$  領域が重複する同じ大きさのモデル②を配置し、重複する  $M$  領域の時刻  $t_1$  の解析結果を初期条件に、モデル②において超音波がも

う一方の側の  $M$  領域に伝播する時刻  $t_2$  まで解析を行う。以下同様の繰り返しを行うことによって、長さ  $[(L-M) \times \text{繰り返し回数}] + M$  の領域の解析が可能となる。解析には、超音波シミュレーションソフトウェア ComWAVE<sup>(13)</sup> を使い、本ソフトウェアのリスタート機能<sup>(14)</sup> を使用して、上記の繰り返し計算を実行した。

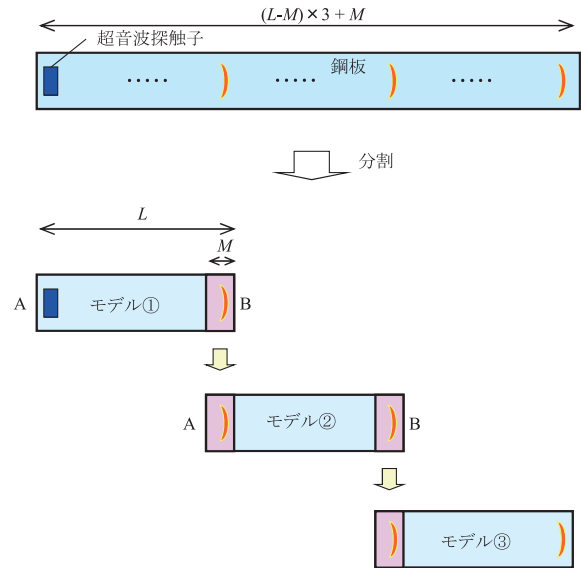


図4 分割モデルによる解析方法

図5に解析モデルを示す。幅  $W=500\text{mm}$ 、厚さ  $T=38\text{mm}$ 、長さ  $L=4000\text{mm}$  の平鋼板モデルにより、重ね合わせ距離  $M=1000\text{mm}$ 、繰り返し回数5回により、15m 相当の鋼板材料中の超音波伝播解析を行った。大型 (3連振動子) 探触子と同じ入射角度 26 度のクサビ上に配置した幅  $W_t=120\text{mm}$ 、長さ  $L_t=40\text{mm}$  の振動子に、SH 波を模擬して鋼板表面に平行な方向の変位  $v$  を式(1)により入力した。

$$v = A_0 \cos(2\pi ft) * (1 - \cos(\frac{2\pi ft}{3})) \quad (1)$$

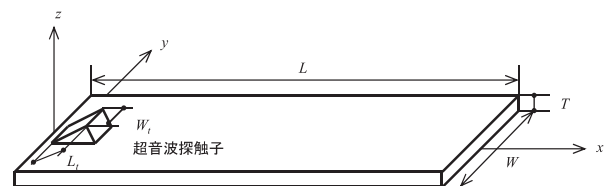


図5 平鋼板3次元解析モデル

ここで、 $A_0$  は振幅、 $f$  は周波数、 $t$  は時刻を示す。

鋼板の材料定数として、縦波伝播速度  $C_L = 5900\text{m/s}$ 、横波伝播速度  $C_S = 3200\text{m/s}$ 、密度  $\rho = 7800\text{kg/m}^3$ 、超音波探触子のクサビの材料定数として、 $C_L = 2700\text{m/s}$ 、 $C_S = 1430\text{m/s}$ 、 $\rho = 1180\text{kg/m}^3$  とし、入力変位の周波数  $f = 0.3\text{MHz}$  とした。

解析モデルを1辺が0.5mmの8節点六面体要素により分割した。要素数は約6.2億である。

解析結果により、鋼板表面上の変位分布、超音波探触子から距離25000mmまでの500mm毎の位置を観測点とし、それぞれの位置における変位の時刻歴を求めた。これは、観測点位置に超音波探触子を配置した場合の受信信号に相当する。

### (2) コンクリート接触平鋼板2次元解析評価

図6に解析モデルを示す。2次元平面上の厚さ  $T = 38\text{mm}$ 、長さ  $L = 27000\text{mm}$  の平鋼板に、(1)と同じ探触子を2次元モデルとして配置した。鋼板および超音波探触子のクサビの材料定数、入力変位の周波数は、(1)と同じである。厚さ  $T_c = 30\text{mm}$  のコンクリートを平鋼板の両表面に接触させて配置した。コンクリートの材料定数は、 $C_L = 4600\text{m/s}$ 、 $C_S = 2500\text{m/s}$ 、 $\rho = 2000\text{kg/m}^3$  とした。また、鋼板およびコンクリートにおいて材料減衰を導入し、それぞれの減衰定数を、 $\alpha_s = 10.6\text{dB/m}$ 、 $\alpha_c = 100\text{dB/m}$  とした。

解析モデルを1辺が0.5mmの8節点六面体要素により分割した。要素数は約1600万である。

解析結果により、平鋼板断面の変位分布、平鋼板表面の超音波探触子から距離25000mmまでの500mm毎の位置における変位の時刻歴を求めた。

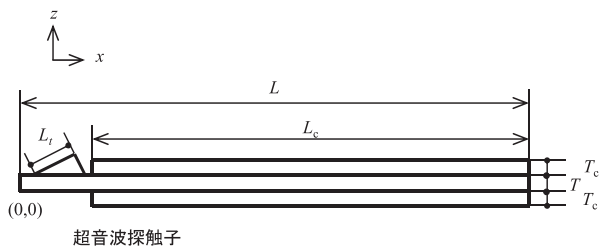


図6 コンクリート接触平鋼板2次元解析モデル

### (3) コンクリート接触曲鋼板2次元解析評価

図7に解析モデルを示す。厚さ  $T = 38\text{mm}$ 、外周の曲率半径  $R_0 = 17188.7\text{mm}$ 、外周長さ  $L = 27000\text{mm}$

の曲鋼板に、(1)、(2)と同じ探触子モデルとコンクリートを曲鋼板の両表面に接触させて配置した。曲鋼板、超音波探触子のクサビおよびコンクリートの材料定数、入力変位の周波数、鋼板およびコンクリート減衰定数は、(1)、(2)と同じである。

解析モデルを1辺が0.5mmの8節点六面体要素により分割した。要素数は約1600万である。

解析結果により、曲鋼板断面の変位分布、曲鋼板外周表面の超音波探触子から距離25000mmまでの500mm毎の位置における変位の時刻歴を求めた。

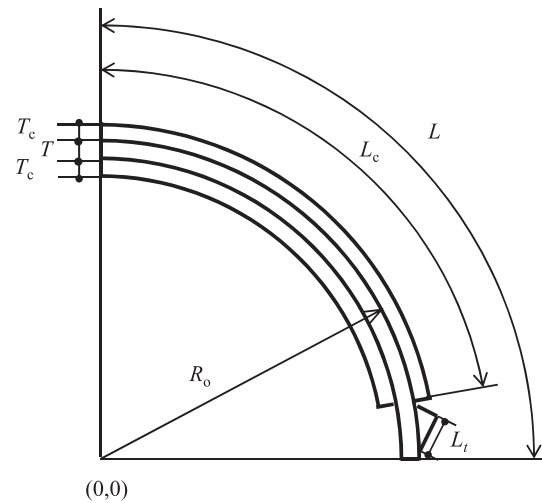


図7 コンクリート接触曲鋼板2次元解析モデル

## 3. 解析結果

### 3.1 超音波伝播状況の可視化

解析結果により得られた時々刻々の変位分布を、鋼板上の超音波の伝播状況として可視化した。

図8に3次元解析による平鋼板の表面の、図9に2次元解析によるコンクリート接触平鋼板断面の、図10に2次元解析コンクリート接触曲鋼板断面の超音波伝播状況を示す。これらの図より、超音波入力位置である超音波探触子から超音波が時刻とともに伝播する様子が観察される。

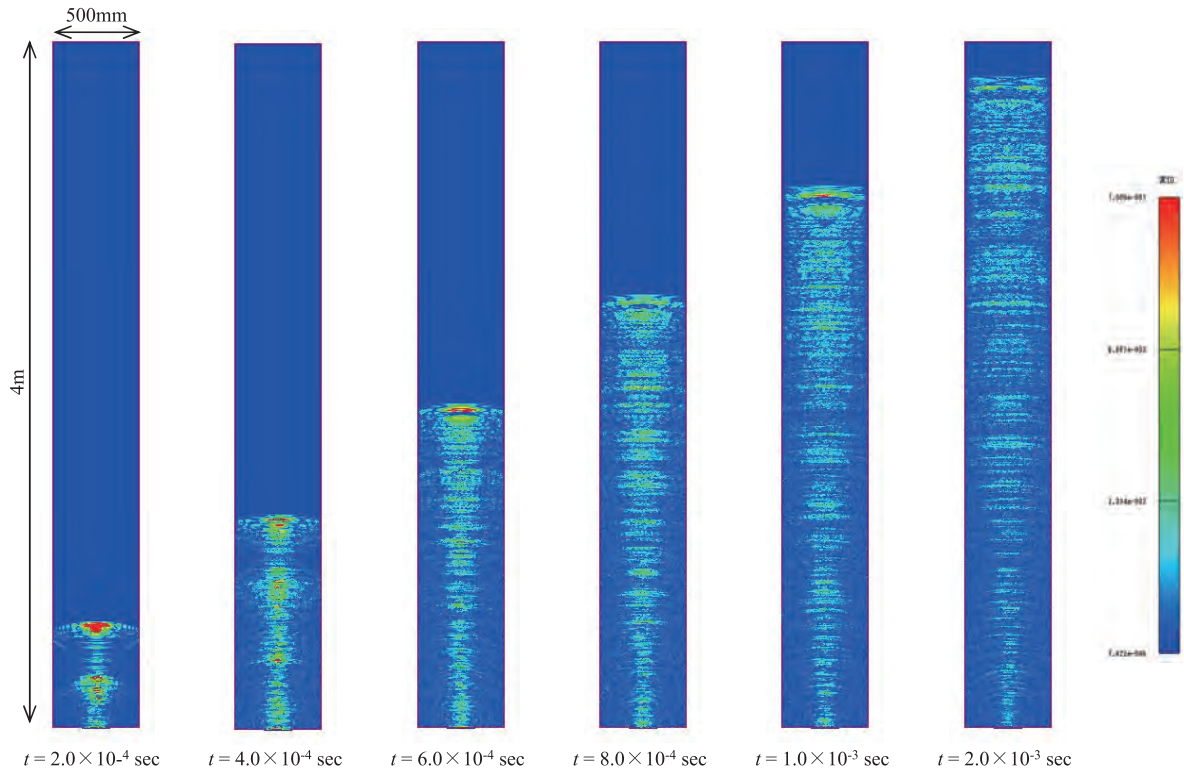


図8 鋼板上の超音波の伝播状況（平鋼板3次元解析モデル）

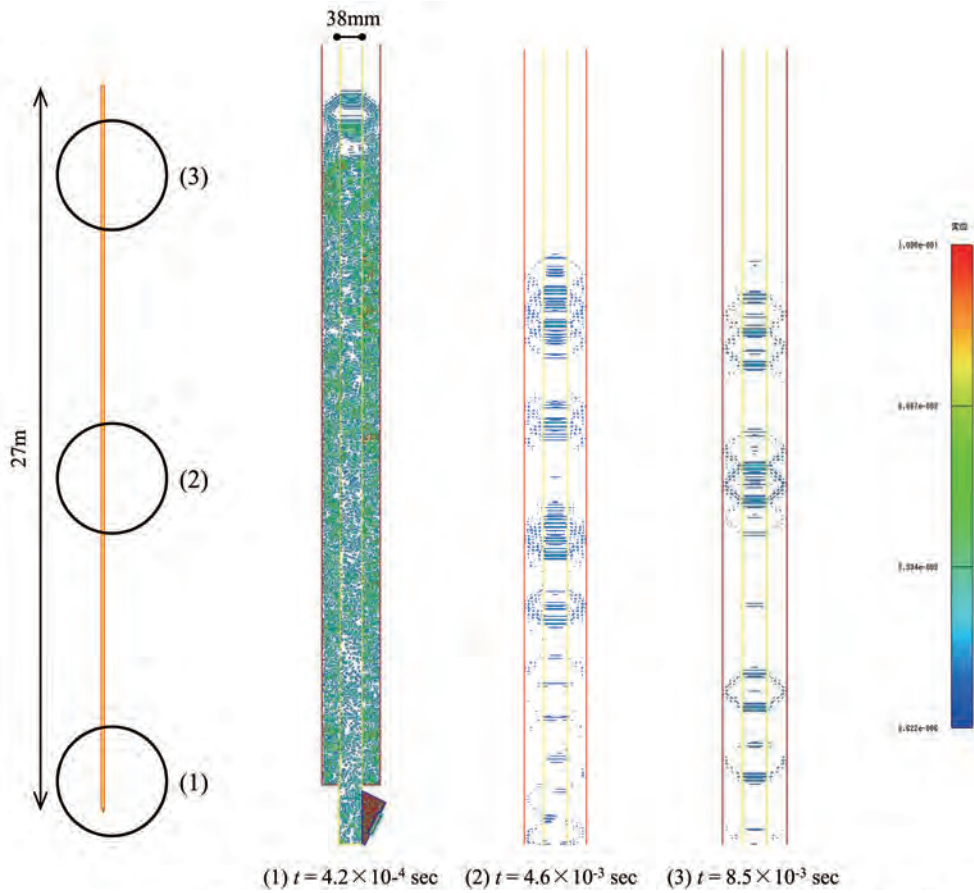


図9 鋼板上の超音波の伝播状況（コンクリート接触平鋼板2次元解析モデル）

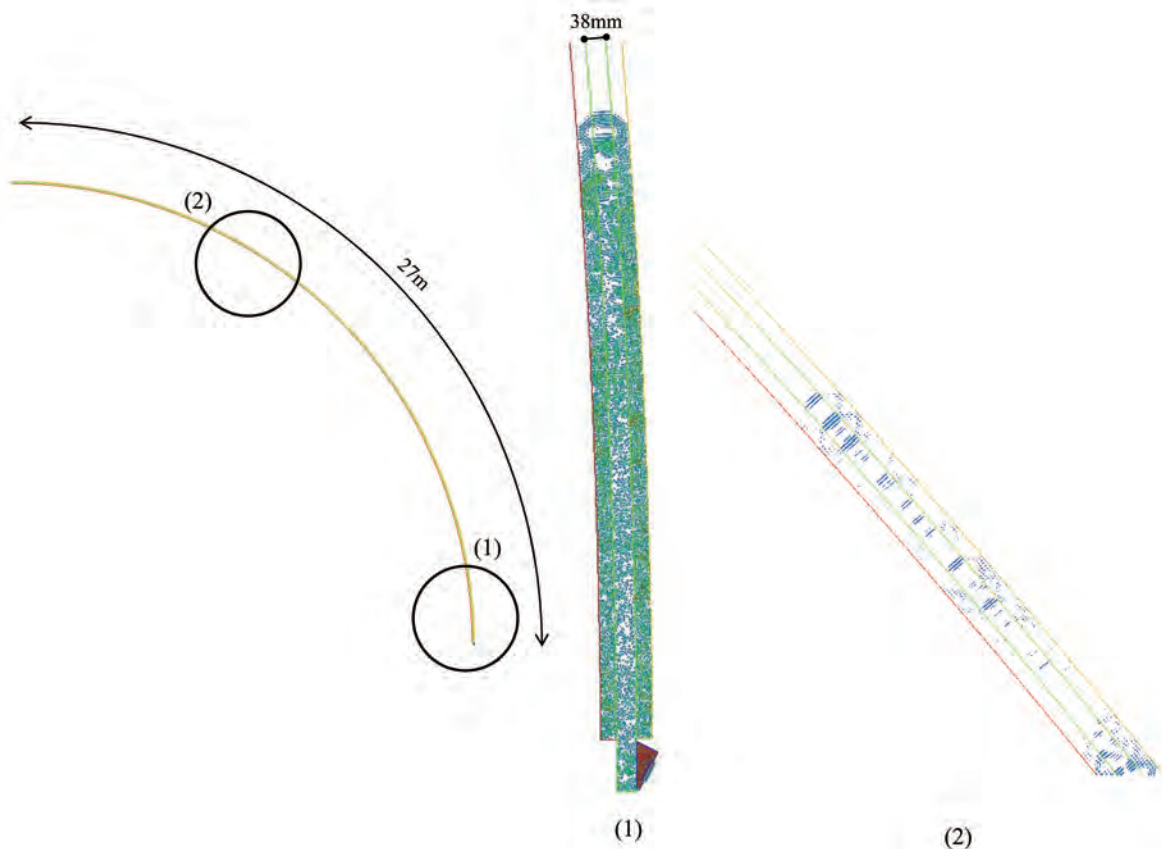


図10 鋼板上の超音波の伝播状況（コンクリート接触曲鋼板2次元解析モデル）

### 3.2 超音波の強度評価

解析結果により、それぞれの観測点における変位を算出し、その変位の時刻歴から、伝播する超音波の先端に相当する時刻の最大変位を求めた。図11～図13に、それぞれの観測点における変位の時刻歴の例を示す。

図14に、3次元解析による平鋼板表面の変位 $v$ の超音波探触子からの距離 $x$ による変化を示す。縦軸は変位 $v$ を探触子位置における変位 $v_0$ で規格化した値である。平鋼板材料中の超音波の伝播に伴う拡散、すなわち平鋼板の幅方向および厚さ方向への広がりにより変位が小さくなる。基準とする距離1m位置の変位に対して、距離15m位置で約 $1/10$ となる。

図15に、2次元解析による平鋼板および曲鋼板の表面の変位 $v$ の超音波探触子からの距離による変化を示す。2次元解析においては、鋼板の幅方向では同一の変位変化にあることから、板厚方向における超音波の拡散によってのみ変位が低下する。この

低下の割合は3次元解析の場合より小さい。

平鋼板の2次元解析の結果から、平鋼板の3次元解析において評価した距離15mの位置の変位に対して、距離25mの位置の変位は約 $1/1.25$ に低下する。

さらに曲鋼板の2次元解析の結果から、距離25m位置の変位は平鋼板に対して、約 $1/1.85$ となる。

以上から、曲鋼板表面上の超音波探触子から距離25mの位置の変位は、超音波探触子から距離1m位置の変位の約 $1/23$ となる。コンクリートが接触する曲鋼板距離25m位置において、大型（3連振動子）探触子による距離1m位置における検出性能と同等の結果を得るためには、超音波入力強度は、大型（3連振動子）探触子の約23倍が必要であると評価できる。

これまでに開発したマルチチャンネル・プローブ・シンセサイザシステムを用いれば、伝播領域における超音波強度の6dB程度（約2倍）の向上が期待できるが、伝播距離25mを実現するためには、さらに入力強度の大きい超音波探触子の開発が必要である。



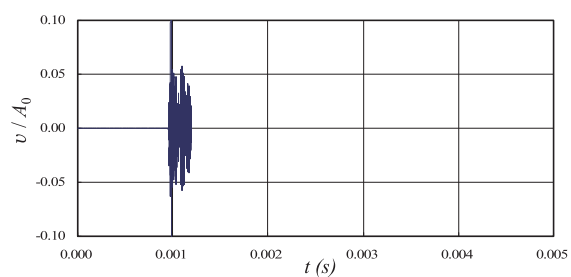
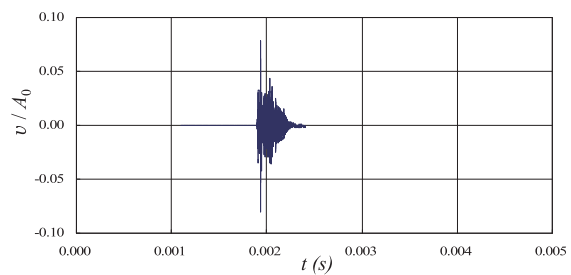
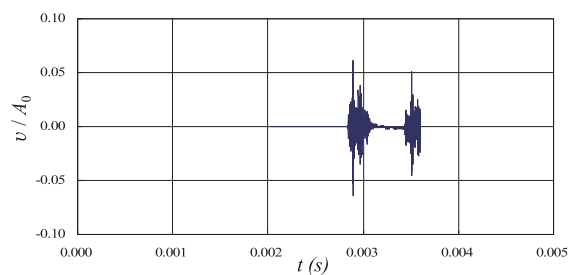
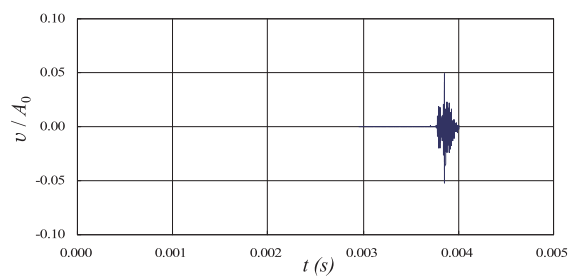
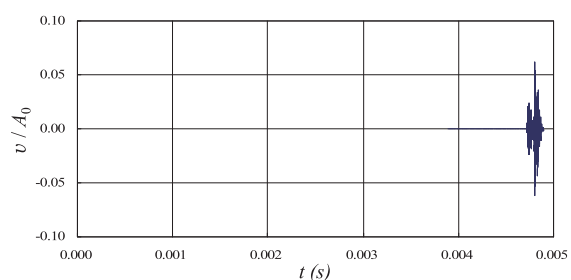
(1)  $x=3000\text{mm}$ (2)  $x=6000\text{mm}$ (3)  $x=9000\text{mm}$ (4)  $x=12000\text{mm}$ (5)  $x=15000\text{mm}$ 

図 11 観測点の変位の変化 (平鋼板 3次元解析モデル)

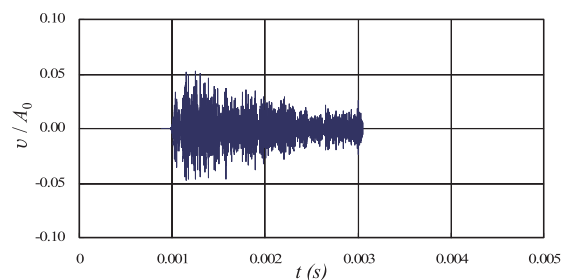
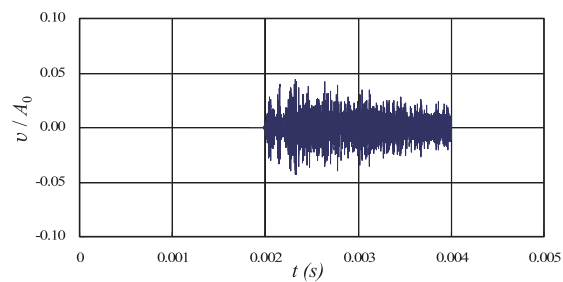
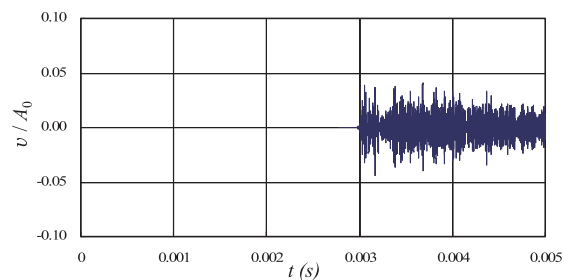
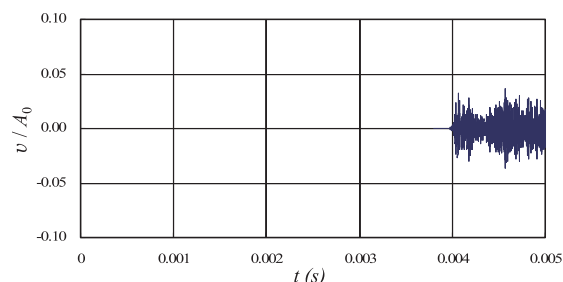
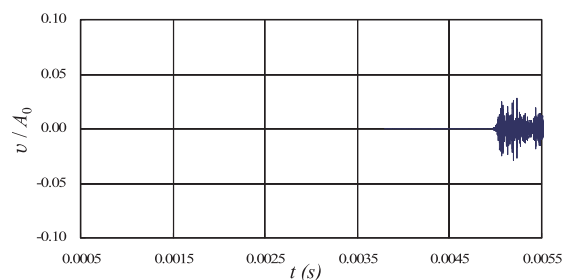
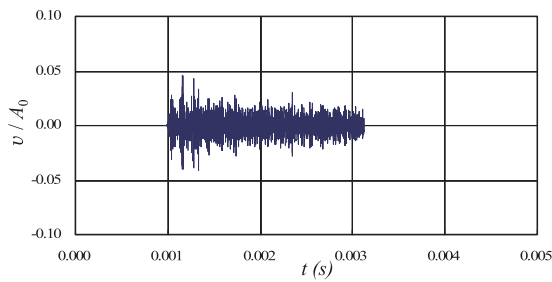
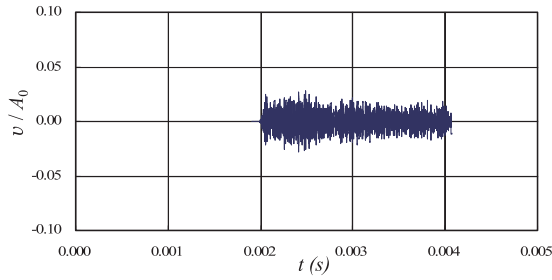
(1)  $x=3000\text{mm}$ (2)  $x=6000\text{mm}$ (3)  $x=9000\text{mm}$ (4)  $x=12000\text{mm}$ (5)  $x=15000\text{mm}$ 

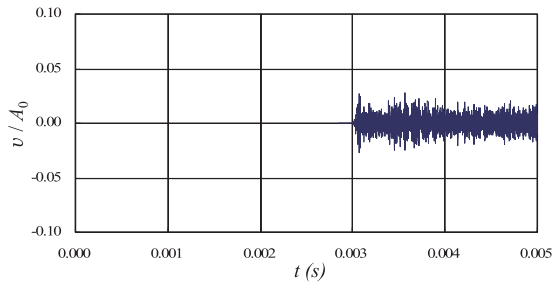
図 12 鋼板上の超音波の伝播状況 (コンクリート接触平鋼板 2次元解析モデル)



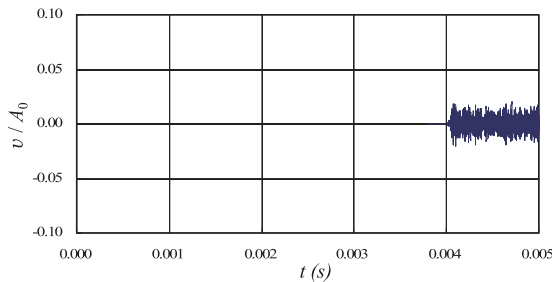
(1)  $x=3000\text{mm}$



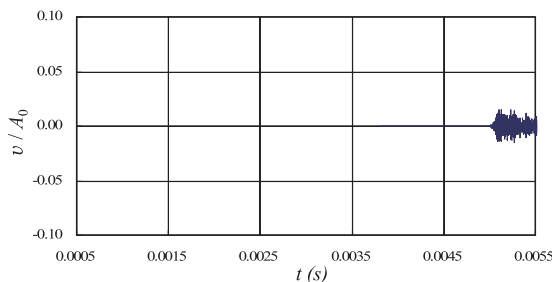
(2)  $x=6000\text{mm}$



(3)  $x=9000\text{mm}$



(4)  $x=12000\text{mm}$



(5)  $x=15000\text{mm}$

図 13 鋼板上の超音波の伝播状況 (コンクリート接触曲鋼板 2次元解析モデル)

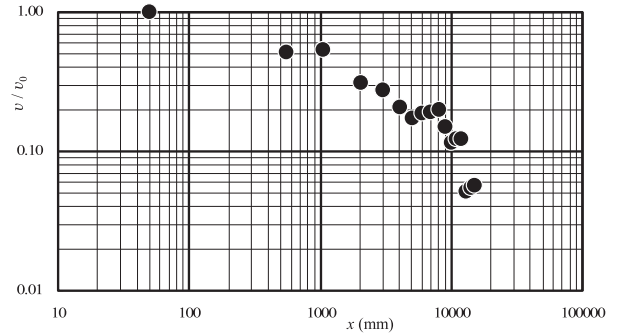


図 14 変位の超音波探触子からの距離による変化 (平鋼板 3次元解析結果)

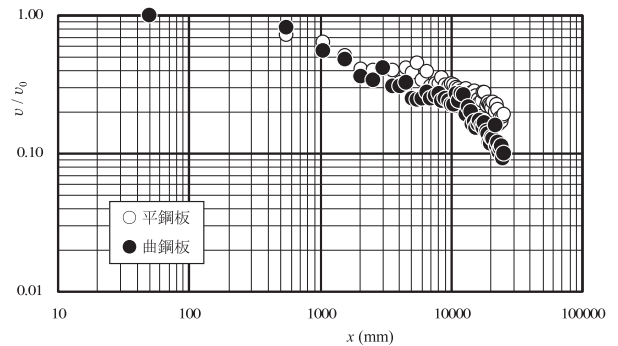


図 15 変位の超音波探触子からの距離による変化 (コンクリート接触平鋼板および曲鋼板 2次元解析モデル)

#### 4. おわりに

伝播距離約 25m の実際の原子炉格納容器埋設鋼板部の検査に適用可能な超音波探傷試験システムとして実現するために、必要な仕様の一つである超音波の入力強度について、超音波伝播有限要素解析により評価を行った。

平鋼板の 3次元解析、コンクリート接触平鋼板およびコンクリート接触曲鋼板の 2次元解析を行い、鋼板表面上の強度を評価した。その結果、コンクリートが接触する曲鋼板距離 25m 位置において、大型 (3連振動子) 探触子による距離 1m 位置における検出性能と同等の結果を得るためには、超音波入力強度は、大型 (3連振動子) 探触子の約 23 倍が必要であると評価された。

これを実現するためには、大変位を入力することが可能な超音波探触子の高出力振動子の今後の開発が期待される。

## 文献

- (1) (社)日本機械学会, 発電用原子力設備規格 維持規格 (2004年版), (社)日本機械学会, 解説 2-1-16, (2004).
- (2) J. Li, J.L. Rose, "Guided Wave Inspection of Containment Structure," (2000).
- (3) J. Li, J.L. Rose, "Guided Wave Testing of Containment Structures," *Materials Evaluation*, 59, p. 783, (2001).
- (4) H. Kwun, "Feasibility of Magnetostrictive Sensor Inspection of Containments," ORNL/SUB/98-SZ272V, (1999).
- (5) H. Kwun, S. Y. Kim, "Guided Wave Inspection of Plates Using Magnetostrictive Sensors," 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, New Orleans, Louisiana USA, May 24-26, (2000).
- (6) Ishida, H., Y. Kurozumi, and Y. Kaneshima, "Development of ultrasonic testing technique to inspect containment liners embedded in concrete on nuclear power plants," 16th World Conference on Nondestructive Testing, Montreal, Canada, Aug.30-Sep.3, 2004, T3.6.4, (2004).
- (7) 石田仁志, 黒住保夫, 金島慶在, "大型探触子超音波探傷法によるコンクリートで覆われた原子炉格納容器鋼板の腐食測定技術の開発," *INSS Journal*, Vol. 11, p. 198, (2004).
- (8) 石田仁志, "大型探触子超音波探傷法によるコンクリートで覆われた原子炉格納容器鋼板の腐食測定技術の開発 (第2報)," *INSS Journal*, Vol. 12, p. 271, (2005).
- (9) Ishida, H., "An ultrasonic technique for the testing of nuclear containment vessel plates embedded in concrete," *Materials Evaluation*, 65, p. 139, (2007).
- (10) H. Ishida, "An ultrasonic technique for the testing of plates embedded in concrete with a multielement probe," *Materials Evaluation*, 66, p. 1228, (2008).
- (11) 石田仁志, "原子炉格納容器鋼板埋設部の腐食測定技術の開発 (第3報)," *INSS Journal*, Vol.16, p. 200, (2009).
- (12) H. Ishida, Y. Kurozumi, "An Ultrasonic Technique for the Testing of Plates Embedded in Concrete with Synthesis of Signals from a Multi-element Probe," *Proceeding of the 7th International conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, Yokohama, Japan, May 11-14, 2009, p. 561, (2009).
- (13) 伊藤忠テクノソリューションズ, 超音波シミュレーションソフトウェア ComWAVE, <http://www.engineering-eye.com/ComWAVE/>
- (14) 伊藤忠テクノソリューションズ, ComWAVE Ver.4 操作マニュアル, p. 144.