

デジタル超広帯域化超音波検査装置への一つのアプローチ

An approach of wider-band digitized ultrasonic tester

Imaging Supersonic Laboratories Co.,Ltd .
有限会社 アイ・エス・エル 宇田川 義夫

非常に広い総合帯域を持ち、リアルタイム合成開口処理できる、デジタル超広帯域検査装置 UCT12 を開発した。周波数領域に於、同じ探触子が、10 kHz の可聴周波から 5 MHz の通常探傷器周波数領域までをカバーする。外部に繋がれたコンピュータのデジタルフィルターに依って、同じ探触子が 10 kHz ~ 5 MHz 内の任意の周波数の従来型探触子と同じように機能する。また、開口合成によって、等価的に 10 倍程度までの振動子径と同等の結果を実現できる。小さい径の探触子が、より大きな径の探触子と同じ様に機能する。この 2 つの核になる技術に依って、従来不可能とされてきた、高減衰材、高散乱材への非破壊試験手法が適応可能と

1. はじめに

近年、汎用超音波探傷器、肉厚計はデジタル型化されている。しかし、従来のアナログ型の表示や記録関係をデジタルに置き換えたにとどまり、超音波基本性能はアナログ型の旧来の機器とほとんど変わらない。

デジタル化の一つのメリットは、デジタル化された波形データに、各種のデジタル処理を施せる事である。例えば、帯域フィルターを例にとると、1 MHz と 1.5 MHz 成分を取り出し、1.2 MHz 成分と 1.8 MHz 成分を取り出さなく無い時、アナログ型では不可能である。デジタルでは可能となる。従来不可能な試験が、可能とも成りうる。

一方、デジタル化されたデータが、デジタル処理をするに十分な情報を含まないと、処理結果の向上は望めない。

材料、送信受信振動子の特性も含め、計測系全体がどうあるべきかを考慮しながらシステムを構築した。

受信超音波の周波数が低く、高いパルス繰り返し周波数が不要で、従来十分な SN 比が得られなかったコンクリートの試験用（割れや傷の検査、版厚測定）機器を第一目標として、開発を行った。この UCM12 を使って、コンクリートやそれ以外の材料、例えば木材、発泡材、コンポジット材への適応で、大きな前進を見ることが出来る。

2. 必要な周波数帯域

送信超音波の周波数が高いにも関わらず、受信周波数の周波数が低い現象に、時々出くわす。粒子の粗い金属、発泡体、複合材、コンクリート等がこの現象を示し、それらは同時に検査が難しい材料でもある。これらの材料は、超音波の産卵、減衰が激しいと思われていた。実際、市販の探傷器ではそのように観測される。実際には大きな散乱と同時に、超音波が散乱体を迂回しながら伝播するため、経路長の異なる超音波が受信される為に、受信周波数が低域へのシフトされるのである。

ジャンプローブ(株)製広帯型探触子 5 MHz \pm 10 を送受信に 2 個用い実験した。送信に 500V 50nS 立上、4700pF の結合コンデンサー、ダンピング抵抗 1k の市販の汎用探傷器と同様のスパイク

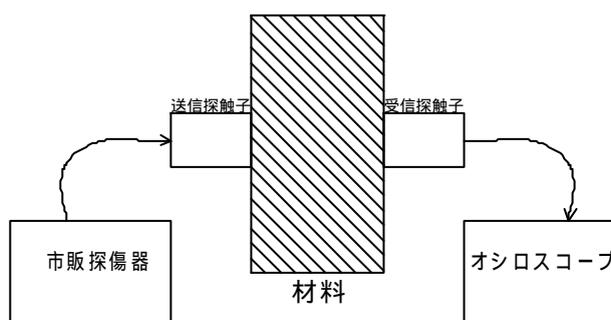


図 1 . 透過波形計測概念

型送信回路を接続した(図1)。受信探触子に直接オシロスコープを接続した。2種のウレタン板の透過エコーを観測した。図2は比重1.2の無発泡のウレタン板、図3は比重0.97の発泡ウレタンである。厚さは共に2.5cmである。図1で示される無発泡のウレタン板では比較的高い周波数の透過エコーが観測される。中心周波数は1MHzである。振幅は3Vもあり、通常の探傷器の最大許容入力電圧に近い。この波形には5MHz成分も十分含まれていて、通常の探傷器で計測可能である。

図3の発泡ウレタンでは、中心周波数は200kHzに下がっている。散乱と伝播遅延によって高周波が失われ、拡散によって低周波が失われて帯域も狭くなっている。この波形は500mVの振幅で、市販探傷器の検出限界電圧数十 μ Vと比較して、十分な振幅である。が、この波形には、500kHzを超える成分は殆ど含まれていない。これは500kHz以上を対象としている市販の汎用探傷器を用いる限り計測困難な現象である。が、市販探傷器の送信回路とオシロスコープの組み合わせで、容易に計測可能となる。

受信帯域が十分低域まで延びていれば、低い増幅度のアンプでも、検出できると言える。

各種材料、モルタル、コンクリート、木材、ハニカム、CCコンポジット、アラミドコンポジット、コールタール等で同様の試験をすると、材料によっては数kHzの必要性もでてくるが、大半は50kHz程度の周波数で、十分な透過エコーが観測される。可聴周波数帯域になると、外来音響雑音が多くなる。実験結果からは数kHz以下まで帯域を伸ばす事は容易と判断されたが、安定した計測を重視し、50kHz以上を対象としたシステムの開発を

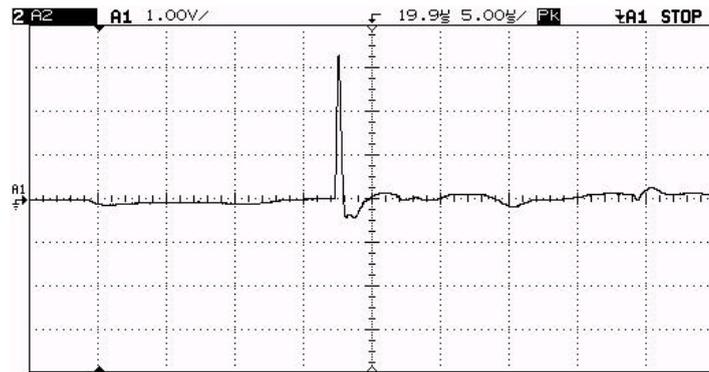


図2．無発泡ウレタン板の透過エコー

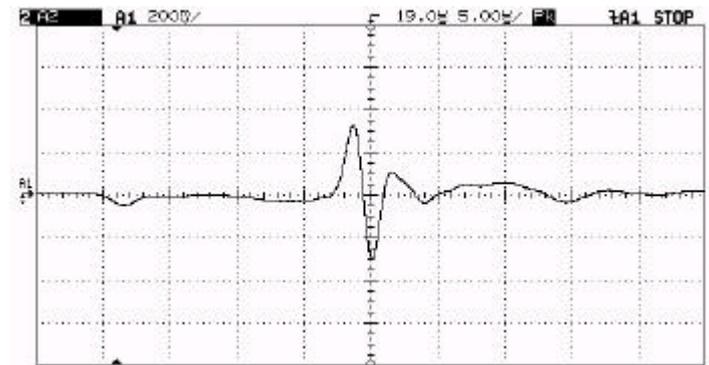


図3．発泡ウレタン板の透過エコー

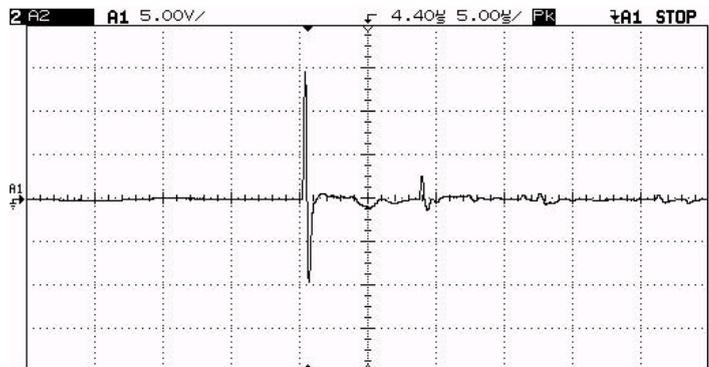


図4．A1試験片の透過エコー

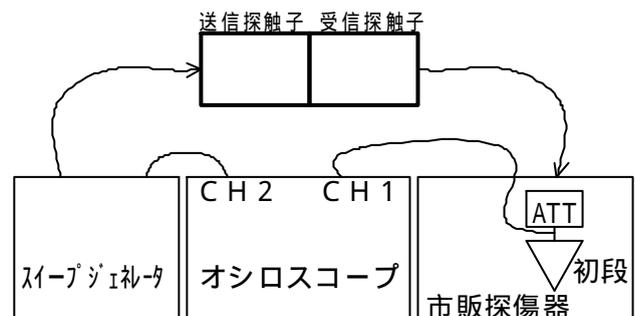


図5．探触子送受信特性測定概念

行う事にした。

比較の為に、A1試験片の25mm厚さの透過エコーを同じ測定系で観測したものが図4である。音速が早く、拡散による低周波の損失で、図2より、波数が多く成っている。

3. 市販探触子の周波数特性

市販の探触子は感度の高い、振動子の共振周波数付近での使用が大半である。これは特定の周波数付近の送信波を出して、その近傍周波数の受信情報を使う、連続波理論を前提にしている。その為、汎用探傷器の帯域は比較的狭くなるような設計がなされている。市販の広帯域探傷器とジャッパプローブ(株)製2MHz20広帯域探触子との組み合わせに依る送受信周波数特性の一例を図6に示す。信号の取り出しは、図5の様に初段アンプの直前とした。凡そ1.3MHzで感度が高く、100kHzでは感度は1/100に落ちている。

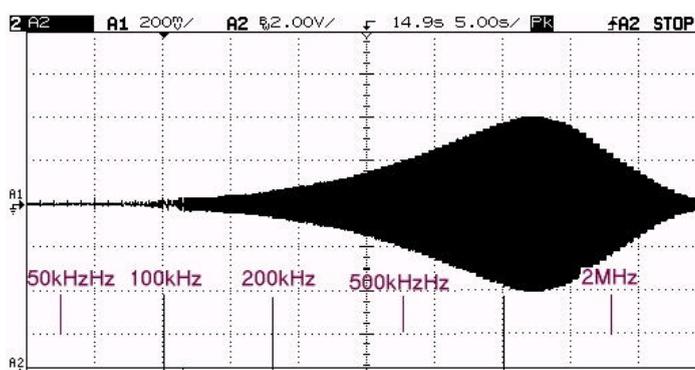


図6. 市販探触子の受信周波数特性

一般に圧電素子を用いた探触子の無負荷送受信音圧感度は、共振周波数以下では、周波数に反比例する。100kHzでは1MHzの1/10程度でも良いはずであるが、市販の探傷器では低域を延ばす考慮がされていない為、或いは販売戦略上の性能を求め、低域感度が急に下がる事になる。

4. 広帯域受信用アクティブ探触子の開発

計測検査現場では電気外来ノイズが多い。トンネル等の現場では、探触子のみを数十～数百m離れた所に配置したい場合がある。これらを考慮し、また低域感度を上げる為に探触子ケースの中にアンプを組み込んだアクティブ探触子を開発した。アンプの感度は、必要情報がその出力で飽和しない程度とした。外来ノイズの影響を最小に抑える事ができ、且つ帯域も広がった。振動子素材は上記探触子と同等の性質のものを用いた。上図が(有)アイ・エス・エル製2MHz20アクティブ受信探触子の受信特性である。図5の受信探触子と市販探傷器の代わりにアクティブ探触子を用い計測した。ピーク感度周波数は、前述の探触子とほぼ同じである。低域は数kHz程度まで十分な感度である。周波数に反比例するという理論にも合致している。20kHzでピーク感度の1/100程度感度である。低域で多少凸凹しているが、これはケース等構造的共振である。金属の様に丈夫な材料、即ち低周波での減衰の少ない材料でケースを作る限り、この凸凹は皆無にはできない。この低い周波数だと通常探触子に用いるコルク等の音響遮断材は用をなさない。コンピュータで波形データを処理するのに不都合が無い程度に凸凹を小さくする様形状など工夫した。

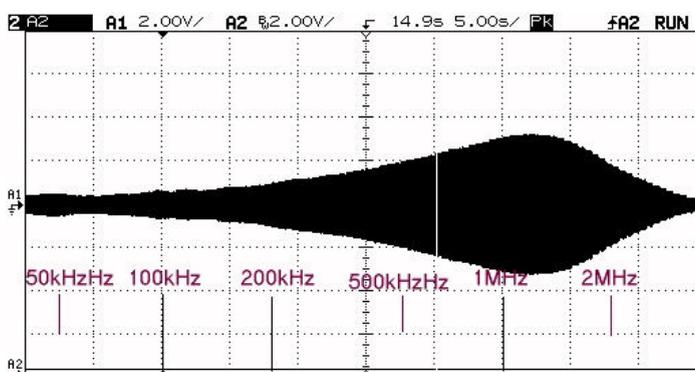


図7. 2MHz20 アクティブ探触子の受信特性

図5の受信探触子と市販探傷器の代わりにアクティブ探触子を用い計測した。ピーク感度周波数は、前述の探触子とほぼ同じである。低域は数kHz程度まで十分な感度である。周波数に反比例するという理論にも合致している。20kHzでピーク感度の1/100程度感度である。低域で多少凸凹しているが、これはケース等構造的共振である。金属の様に丈夫な材料、即ち低周波での減衰の少ない材料でケースを作る限り、この凸凹は皆無にはできない。この低い周波数だと通常探触子に用いるコルク等の音響遮断材は用をなさない。コンピュータで波形データを処理するのに不都合が無い程度に凸凹を小さくする様形状など工夫した。

5. 送信用アクティブ探触子の開発

圧電素子を探触子に使う事を前提にすると、低域では感度は周波数に反比例する。受信アンプに積分特性を持たせて、補正する方法がある。が、実際の試験計測する現場では、可聴周波数のノイズが多く受信される。従って、受信が側で補正するより、送信側で低周波ほど大きなエネルギーの超音波を送信した方が、実用SNが上がる。

一般に超音波探傷器に使用されている超広帯域発生用の送信回路としては、ニードル型（ヘビサイド関数型）スパイク型がある。これらは低域感度が非常に低い。スクエア型又はバースト型は、特定の周波数が強く、後でデータ処理する場合にその補正が厄介である。また低域送信出力はそれほど強くない。チャープ方式の様にスイープする方法は電子回路が複雑で、電力を食い、また送信時間が長く、パルス繰り返し周波数が低くなる欠点がある。そこで、低域感度の高い、ステップ型を選択した。積分アンプを使用する代わりに、関数の積分形状、即ちステップ型を送信回路とした訳である。ステップ型は周波数に反比例して、送信電力が増えるので、上記目的に非常に合致している。

ステップ型の送信回路では、長時間高電圧を振動子に印加する必要がある。送信回路を探傷機内部に設けると、探触子ケーブルの切断時等に感電の恐れがある。そこで、探触子ケース内部に電子回路を組み込み、探触子ケーブルには安全な信号電力のみが伝わる構成のアクティブ探触子を開発した。

この送信用アクティブ探触子と前述の受信用アクティブ探触子を用いた総合伝達特性を図10に示す。図10の下が受信波形である。ステップ関数状の波形による励振によって、送信振動子の厚さが瞬時にステップ状の一定厚の変化をし、その結果として半波の波が受信されている。理想的な、完全に理論波形と一致した波形が示されている。その幅は約500nsで振動子の共振周波数2MHzとも当然一致する。

この受信波形のFFT分析結果が図10の上の波形である。低域で少し凸凹しているが、これはウィンドウにHammingを用いた為である。右下がりの特性は探触子の電極間容量に依る積分効果で、使用する振動子と送信インピーダンスに依って、多少変化する。-6dBダウンで、20kHz~1.2MHzと非常に広い範囲をカバーしている。

後述の様に高分解能ADコンバータとの組み合わせで、実質10kHz~5MHzと500倍の帯域情報を得るこ

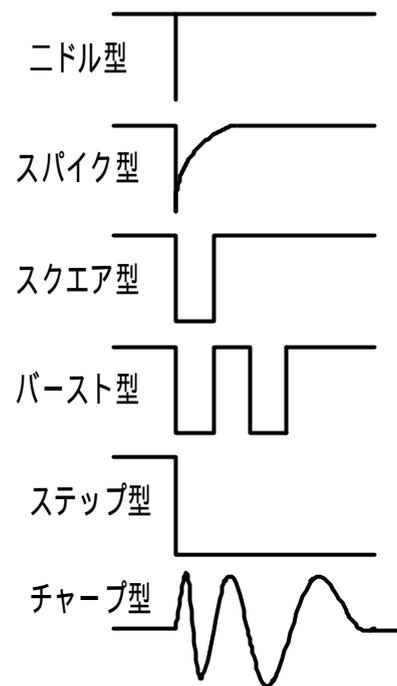


図9. 各種の送信回路方式

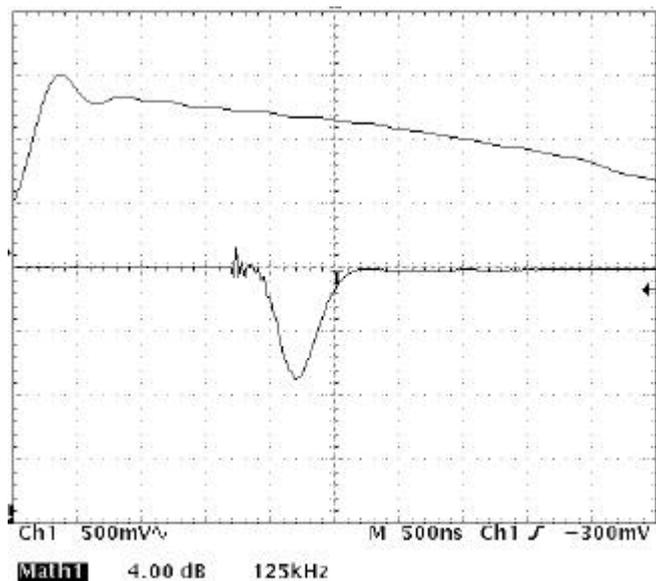


図10. 2MHz 20 ステップ型アクティブ探触子と受信用アクティブ探触子の総合特性

とが出来た。従来の広帯域パルサー・レシーバと広帯域探触子の組み合わせでは、せいぜい3倍の帯域である事を考えると、遥かに広い、超広帯域と言える。

また、送信受信探触子内部に電子回路を組み込んだ為、電子回路間の漏れ信号が非常に少なく、超音波送信前を含め、受信波形全体を有効に利用できる。従来は二探触子法であっても、超音波送信直後の一定期間は電氣的ノイズの為に不感帯が発生していたが、それをほぼ無くす事が出来た。

図10では、1Vの透過超音波の直前に高周波のノイズ観測される。これは探触子同士を接触した為に電氣的漏れが伝わったものである。送受信探触子を数十cm離して観測すると送信タイミングでの電気ノイズは殆ど観測されない。数十cm以内だと、空中伝播の超音波が観測される。

6. 開口合成と振動子の大きさ

探触子はその振動子のサイズによって指向特性が変わる。5MHz \times 10mm とか、5MHz \times 20mm とか、同じ周波数で異なる径の探触子を用いて、目的に合った指向角の探触子を試験に用いる。

指向角が狭いほど、その方向の情報を容易に取得しやすい。指向角が広いと、広い範囲の情報が得られる一方、感度がその分悪くなる。例えば5MHzで10mmの振動子で1000mmの位置にある反射体を計測するには、10mm探触子の100倍の感度が必要である。

5MHz \times 10mmの探触子の指向角と同等の指向角を0.1MHzで実現するには、10mmの50倍の500mmの振動子が必要になる。500mm

の大径の探触子は製作難しい。また、実際に手による走査は困難だ。数mのコンクリートの版厚を測定しようとする場合、この程度の探触子径が必要とされる。合成開口技術を用いて、小さな振動子で以って、等価的に大きな振動子を実現する事を考えた。複数の小さな探触子群を一台の探傷器に繋いで、等価的に大きな探触子として試験する方式は従来からも使われて来た(図11)。その延長線上である。が、1個の送受信兼用探触子からのデータで開口合成すると、複数の探触子を同時に繋いだ場合と同じ結果にならない。大きな振動子と等価な結果が期待される二探触子法とし、送受信探触子を一定の面積の中をランダム走査する方法とした。また、アレイ探触子の様に一定範囲内の複数の固定点のデータを取る方法では無く、一定の時間、連続的に生波形を加算する方法を取った。一定期間中の走査範囲を広くすると、その分等価的に大きな振動子となる。20mmの探触子が、等価的に容易に500mmの探触子にもなる。20mmの探触子で500mmの面を隅々まで走査するのは時間がかかるので、20mmの他28mm、40mm、56mm、76mmと4種の径の探触子を開発し、走査時間の短縮を図った。

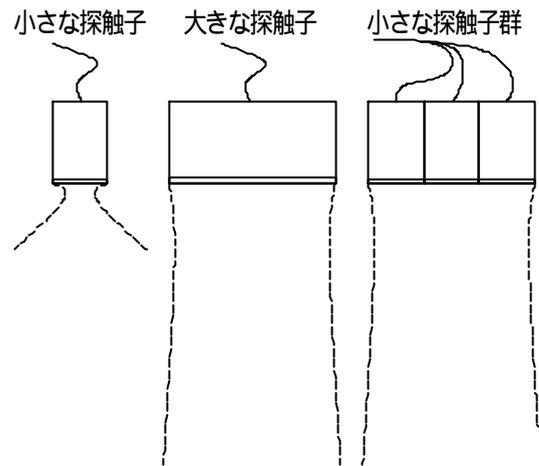


図11. 開口合成の雄念

7. 被試験対象形状と合成開口走査方法

複数の探触子を使わず、1組の探触子を走査するという手法を取った為に、被試験材の形状に起因する妨害波形を最小にするような走査ができ、SNの向上に貢献した。或いは特定の形状の対象を検出したい場合は、それが検出し易い様な走査をすれば良

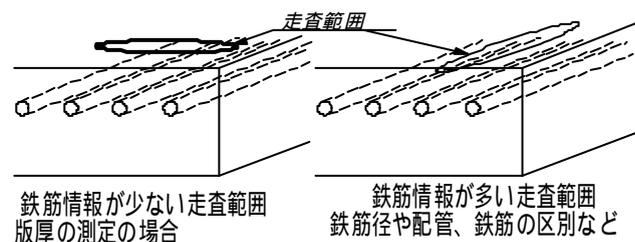


図12. 開口合成走査範囲例

い。(図12参照)

8. ADコンバータの有効ビット数

市販の探傷器では8ビット程度のADコンバータが使われている。本システムは従来難しいと考えられている計測、試験を可能にするのが、目標である。例えばコンクリートの内の鉄筋径を測りたい場合、大きな散乱エコーの中に含まれる弱い波形を観測しなければならない。この場合、8ビットのADコンバータではダイナミックレンジが足りない。16ビット以上の有効ビットが必要な場合が多い。本構成の合成開口は実質平均化処理である。回路兼用で、実質18ビットの有効ビットのデータが使える様にした。この非常に大きな25万対1のダイナミックレンジにより、フルスケールの0.1%以下の微弱信号でも十分な精度で解析可能となった。同時にダイナミックレンジが広いので、送受信感度の低い低周波領域と、探触子共振周波数以上の帯域内情報をも使用可能となった。実用的、低域限界は10kHz、広域限界は探触子の振動子共振周波数の2~3倍である。

9. 全体構成

最後に全体のブロック図を示す。主要回路は探触子内部に組み込まれており、シンプルな構成となっている。コンピュータからの計測コマンドにより、UCT12本体が開口合成(平均化)した結果をコンピュータに渡す。この24bit x 8k点の波形データを元に、コンピュータが各種デジタル処理を行う。アプリケーション・ソフトウェアに依って、5MHz以下の各種試験に用いられる。

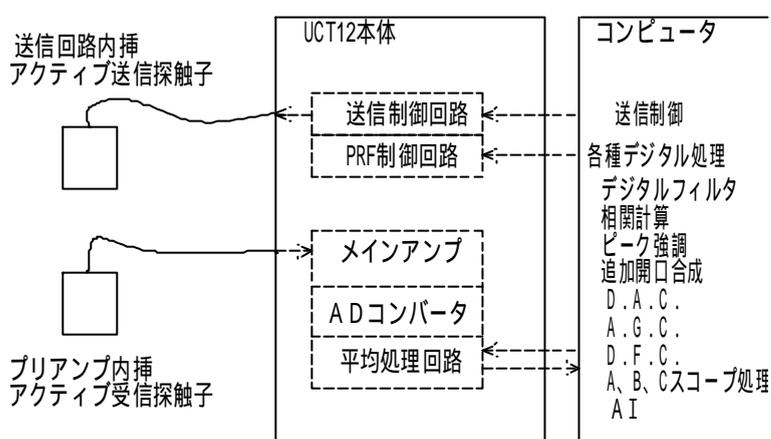


図13. 全体ブロック図

[参考文献]

- (1) United State Patent 5,269,189 Donald O.Tompson;David K.Hsu. both of Aims,Iowa
- (2) 「Technique for Generation of Unipolar Ultrasonic Pulse」 Donald O.Tompson;David K.Hsu IEEE Vol35,No.4,July 1988
- (3) 「超音波開口合成法を用いたコンクリート内部欠陥の断面表示に関する研究」 倉持 貢 日本建設学会学術講演関東 1993年9月
- (4) 「Development of Wide band pulser with Step-functioned waveform」 Y.Udagawa;K.Date 1994MTQ
- (5) 「広帯域トランスミッターの開発」 平成6年NDI春季大会

[謝辞]

ジャパンプローブ株式会社中田氏にはこの研究の初期の段階で探触子多数の援助頂いた事を感謝する。