

超音波パルスエコーのゼロクロス追尾による自動音速測定

Automatic Measurement of Ultrasonic Velocity using pulse-Echo Method with Zero-Cross Tracking

小久保 旭*・根岸 勝雄*

Akira KOKUBO and Katsuo NEGISHI

1. はじめに

超音波を用いて物質中の音速を測定する方法には、これまでも多くの方法が開発されてきた。^{1),2)}

それらのうち超音波パルスエコーの位相に着目して、きわめて高い測定精度を得ることのできる方法としてパルスエコー重畳法^{3),4)}(Pulse-Echo-Overlap法)があるが、この方法は測定を自動化するには向いていない。一方、音速を自動的に測定する方法にシングアラウンド法^{5),6)}(Sing Around法)がある。これは現在最も広く普及している方法であるが、音速情報の検出点が超音波受波パルスに対して一定の閾値をもつため、超音波受波パルスが振幅変化を起こすような測定条件のもとでは、大きな誤差を生ずることがある。そこで筆者らは、振幅変化に影響されずに音速を自動測定する方法として、超音波パルスエコー中の特定の位相点を検出するとともに、その自動追尾を行う“ゼロクロス追尾法”を開発した。この方法は測定中に刻々と振幅と音速が変化するような条件のもとで、音速を自動的に精度よく測定するのに適したものである。以下に、このゼロクロス追尾法とその装置について報告する。

2. ゼロクロス追尾法の原理

図1に原理を示す。ここで、A、Bのパルスエコーは同一次数のもので、音速の変化によって時間軸上の位置が変わったものとする。また、エコーの振幅も変化している。このようなパルスエコーの波形から振幅変化の影響をうけずに精度よく音速情報を検出するため、図に示すようにキャリアのゼロクロス点を検出する。そのために高速・高精度のゼロクロス検出器を用いる。

また、音速が変化してエコーがAからBに時間軸上を移動したとき、パルスエコーのキャリアの位相検出位置も変わってはならない。図1では、A、Bエコーのキャリアの2周期目を検出している。このように音速が変化しても着目したキャリアの位相のゼロクロス点を

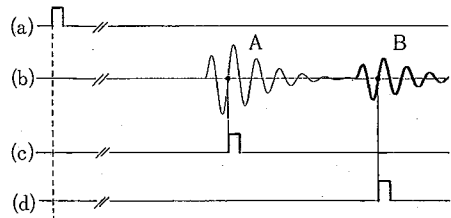


図1 ゼロクロス追尾法の動作原理

- (a)送波スタート信号
- (b)超音波パルスエコー
- (c)エコーAのゼロクロス検出信号
- (d)エコーBのゼロクロス検出信号

追尾しつづければ、精度の高い自動測定が可能である。このためにトラッキング・コントローラを用いる。

この方法を用いて音速を測定する方法には、いくつかのバリエーションがあるが、基本的な方法は送波スタート信号(a)からゼロクロス検出信号(c)、(d)までの間の時間間隔を測る方法である。

次にどのようにして追尾を行うか、トラッキング・コントローラの動作について述べる。

図2にブロック図とタイムチャートを示す。パルサーの送波に同期したトリガ発振器($4f_0$ の発振周波数、 f_0 は超音波振動子の共振周波数)とTTLデジタルICのプリセットプル・カウンタでデジタル遅延回路を構成する。ストローブ・パルス回路はプリセットプル・カウンタに設定された時間 T_d 後に、パルス幅 T_w ($T_0 < T_w < 3T_0/2$)のストローブ・パルス(d)を発生する。ただし、 $T_0 = 1/f_0$ 。 T_d は、はじめシンクロスコープの画面上でパルスエコーの次数とキャリアの位相を選ぶため、プリセットプル・カウンタにデジタルスイッチで設定する。

ゼロクロス検出器の出力は、キャリアのスロープの正負に対応して狭いパルス列(b)、(c)に変換された後、ANDゲートに入力し、ストローブ・パルスと論理積をとる。ANDゲート出力はフリップ・フロップで音速検出信号として成形される(e)。

もし、音速が下がれば、エコーは時間軸上を右に移動

* 東京大学生産技術研究所 第1部

し、ANDゲート出力は(c)のパルス列のうち2個を検出する。逆の場合、(b)のパルス列のうち2個を検出する。このような場合、あらかじめ設定されていた T_d 値に1カウント分プラスまたは、マイナスされた $T_d \pm 1$ 値がプリセッパブル・カウンタにセットされる。1カウントの時間は $1/4f_0$ である。次の送受波のときにはストロープ・パルスは新たに設定された $T_d \pm 1$ 時間後に移動する。音速の変化がパルスエコーの位相の $T_0/2$ 以内では、ひきつづき前回の T_d 値を保持する。

図3に $T_d \pm 1$ カウント動作を行うトラッキング・コン

トローラの回路を示す。IC 74181はALU⁷⁾(ARITHMETIC LOGIC UNITS)で論理演算、数値演算のできる多くの機能をもった素子であるが、 $A+1$ 、 $A-1$ 、 B (ここでは初期設定時にデジタルスイッチの値をよみこむ)、 A (ここでは T_d の値を保持する)の4つの機能のみを使用している。IC 7442とゲート回路はそれぞれ4つの機能が働くようMANUAL/AUTO、 $A+1$ 、 $A-1$ の入力信号を変換するオーダーデコーダを構成する。ALU LOAD 信号はストロープ・パルスの出た約数 μs 後にALUの演算結果をとり出す信号である。

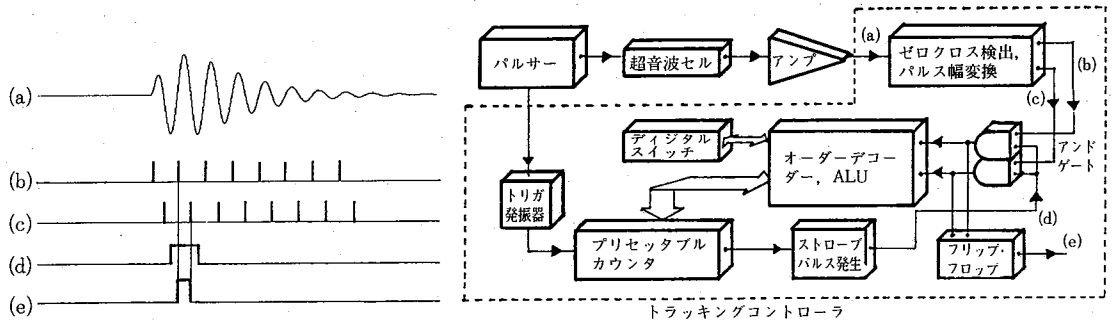


図2 ゼロクロス追尾装置のブロック図とタイムチャート

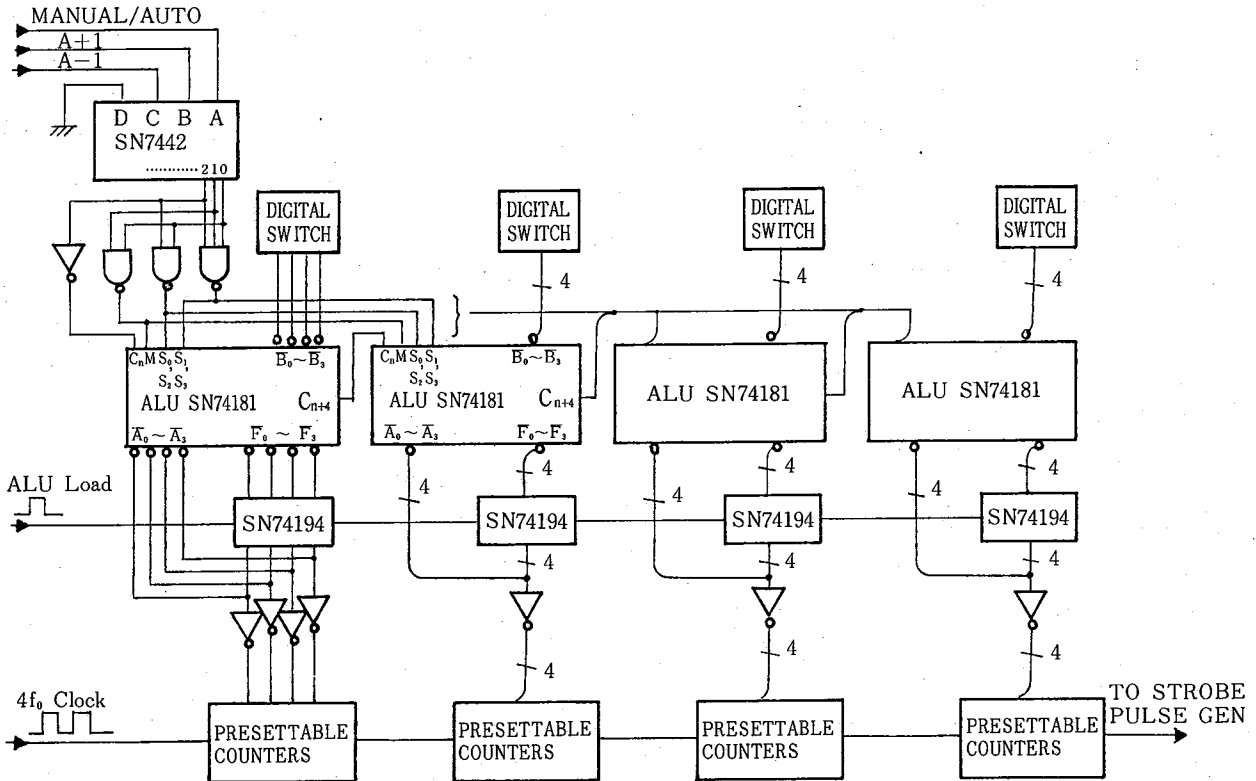


図3 $T_d \pm 1$ カウント部回路図

研究速報

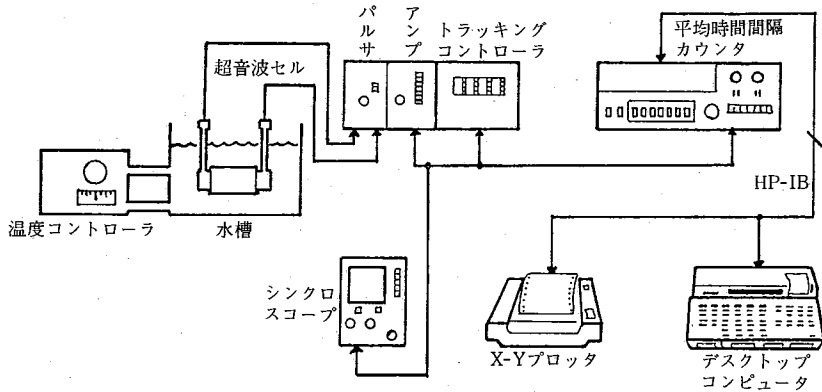


図4 音速測定システム

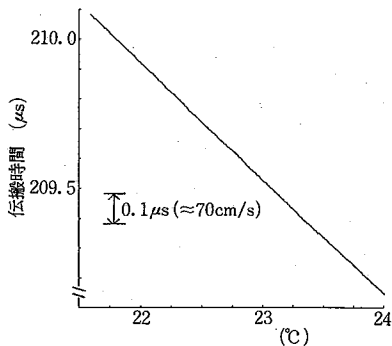


図5 水温変化による伝搬時間変化

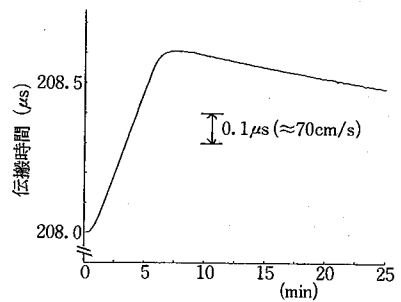


図6 水温による伝搬時間変化の経過

測定開始時においてシンクロスコープでモニタしながら、手動でエコーとキャリア位相を選択する初期設定を行い自動追尾に切りかえると、検出信号に応じてストロブ・パルスが移動して常にきめられた位相を追いつづけることができる。

この方法の音速変化に対する応答は、送波の繰返し時間（パルス法では普通エコー同士の干渉を防ぐため、1回の送波によるエコー列が完全に消滅してから次の送波を行う。）の間に超音波パルスの伝搬時間の変化が $T_0/2$ 以内であれば追尾が可能であり、通常の実験条件では、全く問題がない。

3. 測定例

ゼロクロス追尾法を用いた測定例を以下に述べる。測定システム全体を図4に示す。ここで用いた平均タイムインターバルカウンタは、超音波の伝搬時間を測るもので、時間間隔を高分解能で測定するため、多数回データをよみこんだうえでアベレージングを行う機能をもったものである。デスクトップ・コンピュータはこのカウンタからデータを取りこみ、X-Yプロッタに送り作図を行わせるものである。

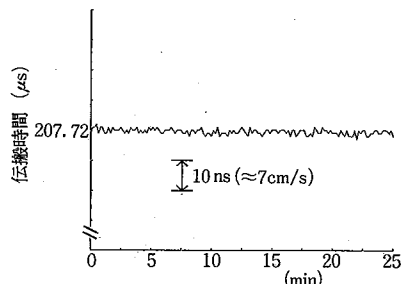


図7 音速測定システムの安定度

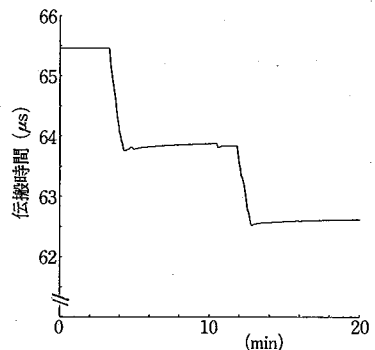


図8 水-ブタノール濃度変化による伝搬時間変化

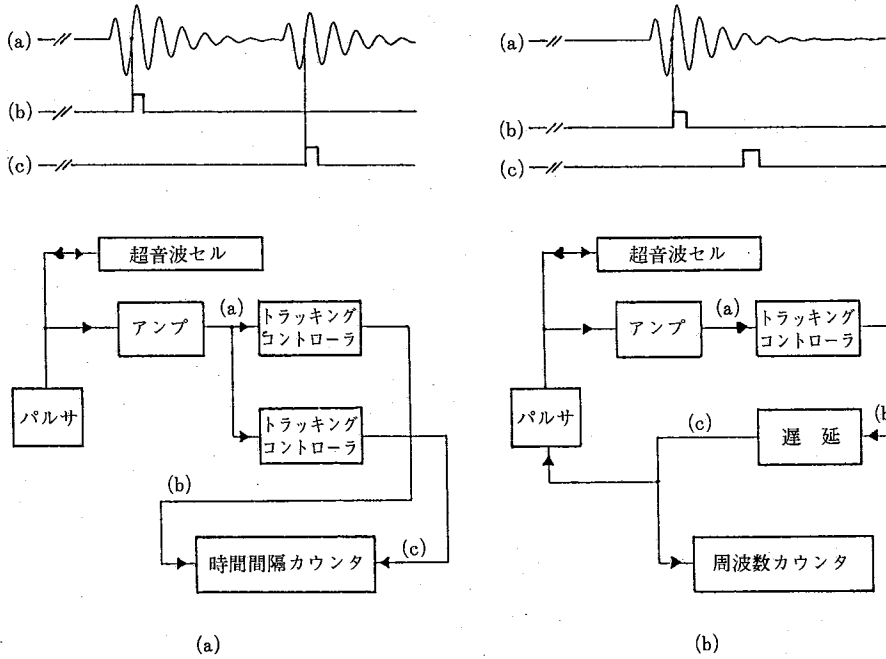


図9 ゼロクロス追尾法による他の測定方法例

図5は、冷やされた水が室温にむかって温度上昇していく過程を追尾測定したものである。図6は約27°Cの水を測定開始とともに5分間、約1.5°C冷やした後室温に放置したときの例である。図5は音速が一方向に変化したもの、図6は両方向に変化したものをそれぞれ追尾測定を行ったものである。

図7は水温を28°Cに制御したときのもので、この付近の音速が相対変化にして0.7 cm/s程度の安定度で測定されているのがわかる。測定に用いた超音波セルは、送受波器間距離6.2 cm、3 MHz水晶振動子で、測定では第3エコーを追尾したので、伝搬距離31 cmである。図8は、送受波器間距離10 cm、5 MHz圧電磁器の超音波セルを用いて、25°Cの水100 ccにブタノール5 ccを2回にわけて加えたときの第1エコーを追尾した測定結果である。ブタノールを加えるとエコーは激しく振動的に振幅変化を起し音速も急激に変化したものを追尾測定を行った。本装置は30 dBの振幅変化に対してカウント変化は認められず、振幅変化に影響されない測定法であることがわかる。

以上の測定例は、本装置を用いた基本的な測定方法であるが図9に他の組合せの測定方法の例を示す。図9(a)は追尾装置を2台用いてエコー間の位相を測るもので、絶対測定の1例である。図9(b)はシングアラウンド法に応用したもので、図3のALU LOADに必要な遅延時間後にパルサーをトリガする。遅延時間の設定には

安定なものが必要だが、この方法によってエコーの振幅変化に影響されないシングアラウンド法ができる。

4. む す び

測定例において伝搬時間の測定精度を上げるために平均タイムインターバルカウンタを用いたが、そのために1回の測定時間が数秒以上必要となる。1回の超音波送波に対する伝搬時間を測定するような高速測定には、測定カウンタをもっと高速のものにするか、TAC (Time to Amplitude Converter) を用いればよい。本測定法は比較的簡単な装置で、振幅変化に影響されない高精度自動測定を可能にしたもので、今後音速測定のほか、各種の応用計測に新たな可能性を開くものと考えられる。

(1984年7月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 和田八三久：超音波エレクトロニクス・シンポジウム講演予稿集 1, 1 (1980)
- 2) 和田, 中島, 高木：日本物理学会誌 35, 996(1980)
- 3) E. P. Papadakis：Rev. Sci. Instrum. 47, 806(1976)
- 4) 小沢, 高木, 根岸：生産研究 31, 701(1979)
- 5) R. L. Hanson：Jour. Acous. Soc. Am. 21, 60(1949)
- 6) S. Mitaku, A. Sakanishi：Rev. Sci. Instrum. 48, 647(1977)
- 7) Texas Inst.：TTL Application Manual Data Book (Electronics Digest Company)