

粒径分布をもつ微小気泡群からの反射音波の応答

西川 智英、 土屋 健伸、 遠藤 信行 (神奈川大・工)

はじめに

水中に存在する気泡に対して超音波を照射したときの緒現象についての報告は数多くなされている。¹⁾²⁾またこうした気泡の非線形応答は医療分野でも注目されている。その応用の一例である **Contrast Agent** は、コーティングした微小気泡を生体内に注入し、反射エコーレベルが微弱な血液や毛細血管からのエコーを増強し、増強された信号を画像化するものである。更に最近、気泡から発生される高調波に着目した、**Harmonic Imaging** と呼ばれる概念が提唱されている。この選択的高調波画像法は、低速流動する血流や癌細胞などの生体組織の非線形性に関する特徴を画像化できることから、新しい診断法の開発に関して大きな期待が持たれている。その一方で安全性を考えると、微小気泡が照射音波のエネルギーで圧潰し、その時に衝撃波が生じることにより生体組織が損傷するということが懸念されている。それにより生体組織への影響などの基礎的研究が各国で行われています。そこで本研究では水中に存在する微小気泡の超音波照射に対する非線形応答を知るため、単一気泡及び粒径分布を持つ気泡群にパルス状音波を照射したときの応答を数値計算する。ならびに PVC(ポリ塩化ビニール)製マイクロバルーンに音波を照射し、これからの散乱波を観測することで2次高調波の発生状態、音圧に対する気泡の寿命について観察を行いました。

数値計算

液体媒質中の気泡にその直径よりも十分に長い波長をもつ音波が入射すると気泡は呼吸運動を行う。また気泡の運動を考える上で半径数十 μm 程度の気泡では、気体と液体との界面に生じる表面張力、液体の粘性などの影響が大きく、無視できなくなる。そこでこれらの影響と液体の蒸気分圧を考慮した数学モデルとして **RPNNP**(Rayleigh, Plesset, Noltingk and Neppiras, and Poritsky)モデル³⁾を用いる。**RPNNP** モデルは次式で表される。

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho_0} \left\{ \left(P_0 + \frac{2\delta}{R_0} - P_v \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - P_0 + P_v - P_a - \frac{2\delta}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \right\}$$

ここで、 ρ_0 は液体の密度、 P_0 は無限遠点での静圧力、 P_a は入射音圧、 R_0 は気泡半径の平衡値、 R は気泡半径の瞬時値、 δ は液体の表面張力、 μ は粘性、 P_v は液体の蒸気分圧、 γ は気体内部の比熱比である。また各パラメータを Table.1 に示す。このモデルにおける照射音波に気泡の応答を計算するために、4次の **Runge-Kutta** 法を用いて瞬時気泡半径 R を時間波形として求める。次にこの時間波形に **FFT** 処理を施し得られた周波数スペクルから散乱音圧波形の周波数成分を次式から算出する。

ここで、 r は気泡の中心から観測点までの距離である。この散乱スペクトルを、逆FFT処理を施し観測点における音圧波形を推定する。

粒径分布をもつ気泡群の応答

粒径分布をもつ気泡群にパルス状音波を照射した時の応答を解析するために Fig.1 の様な状態を仮定する。全ての気泡及び観測点は直線上に存在し、気泡は等間隔に整列してるものとする。また隣り合う気泡の径は乱数によって決められたものである。さらに任意の気泡から放射された散乱波は他の気泡の影響を及ぼさず、また減衰も考えないものとする。

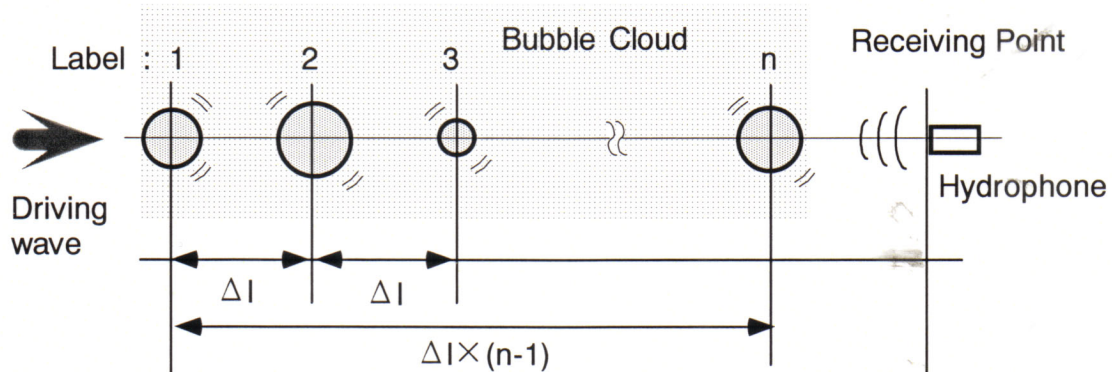


Fig.1 Method of simulation

測定システム

非測定用気泡として PVC(ポリ塩化ビニール)でコーティングされた空孔率 95% のマイクロバルーンを数十 $\mu\text{g/ml}$ に希釈する。このマイクロバルーンは最外層に親水性の皮膜をもっており水とよく馴染むので、殆ど任意の混合率で、懸濁できる。懸濁液の顕微鏡写真及び画像解析によって求めた粒径分布を Fig.2 に示す。本研究の計測システムのブロック図を Fig.3 に示す。このマイクロバルーンの音波に対する非線形応答を観測するため、中心周波数 **2.0MHz**、波漣長 **10cycles** のバースト状音波を照射する。またマイクロバルーンの非線形応答により生じたと考えられる第2次高調波を選択的に観測するため、中心周波数 **4.0MHz** の受波器を用いて散乱波を受波する。また送波器と受波器の音響軸は、送波器の音響放射面から距離 **100mm** のマイクロバルーン中心で、角度 **20度** で交差するように設置して測定を行う。

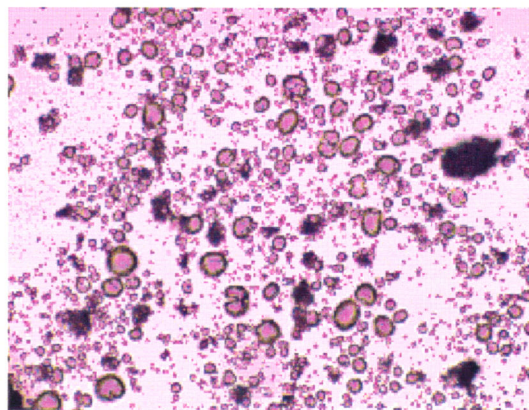


Fig.2 Particle-size distribution of Micro balloon

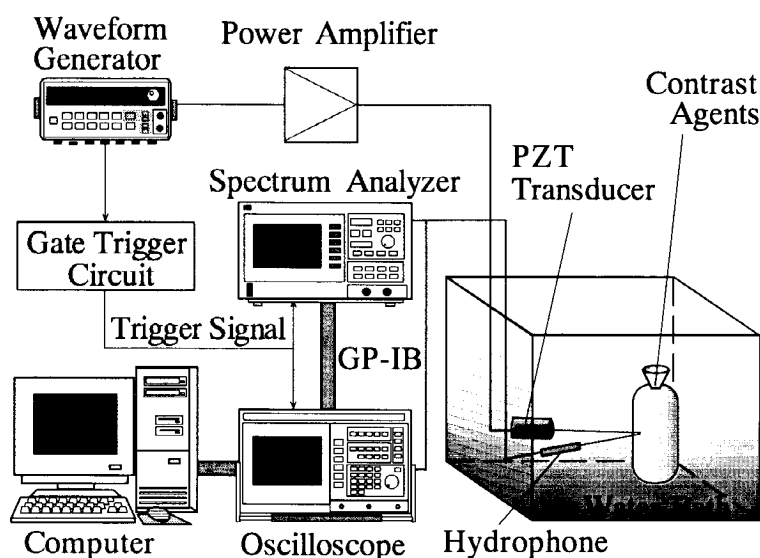


Fig.3 Schematic diagram of measurement system

数値解析

水中に単一に存在する気泡にパルス状音波を照射したとき場合について数値解析した結果を Fig.4 に示す。入力波形と比較すると正圧力時には凝縮、負圧力（引力）時には膨張が起こり、位相がほぼ逆相となっていることがわかる。実験と同一の粒径分布を用いて数値解析した結果を Fig.5 に示す。入力音圧波形及び気泡の応答波形におけるスペクトラム成分を比較すると、反射エコー信号には照射波のスペクトラムに存在しない **4MHz**、**6MHz** といった気泡の非線形現象による高調波成分が発生すると推定される。次に気泡が照射音波によって圧潰、消滅することわかっている。そこで気泡が音波によって消滅するであろうことを考慮し、粒径分布に「気泡の壊れやすさ」を想定する重み関数を掛け合わせることで2次高調波成分の径時変化を推定する。この重み関数を Fig.6 に示す。粒径分布の推移による2次高調波成分の時間変化の推定結果を Fig.7 に示す。この結果より、粒径分布の変化に伴い2次高調波は指数関数状に減少していくことが推定できる。

実験結果

一方、Peak 音圧約 **600kPa** の音圧を照射したときの結果を Fig.8 に示す。音波の伝達媒質の伝搬に伴う非線形現象による高調波成分でなく、気泡共振に伴うと考えられる高調波成分の発生が確認できる。この発生した2次高調波の時間推移を Fig.9 に示す。ただし、気泡より発生した第2次高調波のみ取り出すために気泡混入前の第2次高調波の発生量を差し引いたものとする。音波の照射開始直後から次第にはほぼ指数関数状に減衰している。さらに、指数近似曲線の半値時間と各音圧との関係を Fig.10 に示す。比較的低い音圧に於いて一定の傾きをもって減少している。4気圧前後より増加する。これは **2MHz** に共振する径を持つ気泡の機械的強度の限界がこの点であると推察できる

終わりに

水中に存在する単一気泡及び粒径分布をもつ気泡群の非線形波形応答を数値解析より推定し、ならびに実験では気泡群にパルス状音波を照射し、波形応答の観測を行った。共に気泡振動に伴う2次高調波の発生が確認できた。また高調波の発生傾向は **RPNNP** モデルを用いた数値解析に近い傾向を示した。数値解析では、より効率よく第2次高調波を得るための条件の推定など微小気泡造影剤の基本的な応答解析の可能性を示唆した。

参考文献

1. 浅田、渡辺：「2周波駆動に伴う水中気泡の非線形振動の数値解析」
音響学会誌、Vol.48, No.6, pp.375-381
2. 竹内、スタント他：「超音波パルスによるマイクロバブルの非線形応答」
電子情報通信学会技術研究報告、US95-106, pp35-42
3. W.Lauterborn："Numerical investigation of nonlinear oscillations of gas bubble in liquids"
J.Acoust. Soc. Am59, 283-293 (1976)

謝辞

本研究を行うにあたり、多大な御協力を頂いた、池野泰教さん（現富士通コミュニケーションシステムズ）に深く感謝の意を表します。

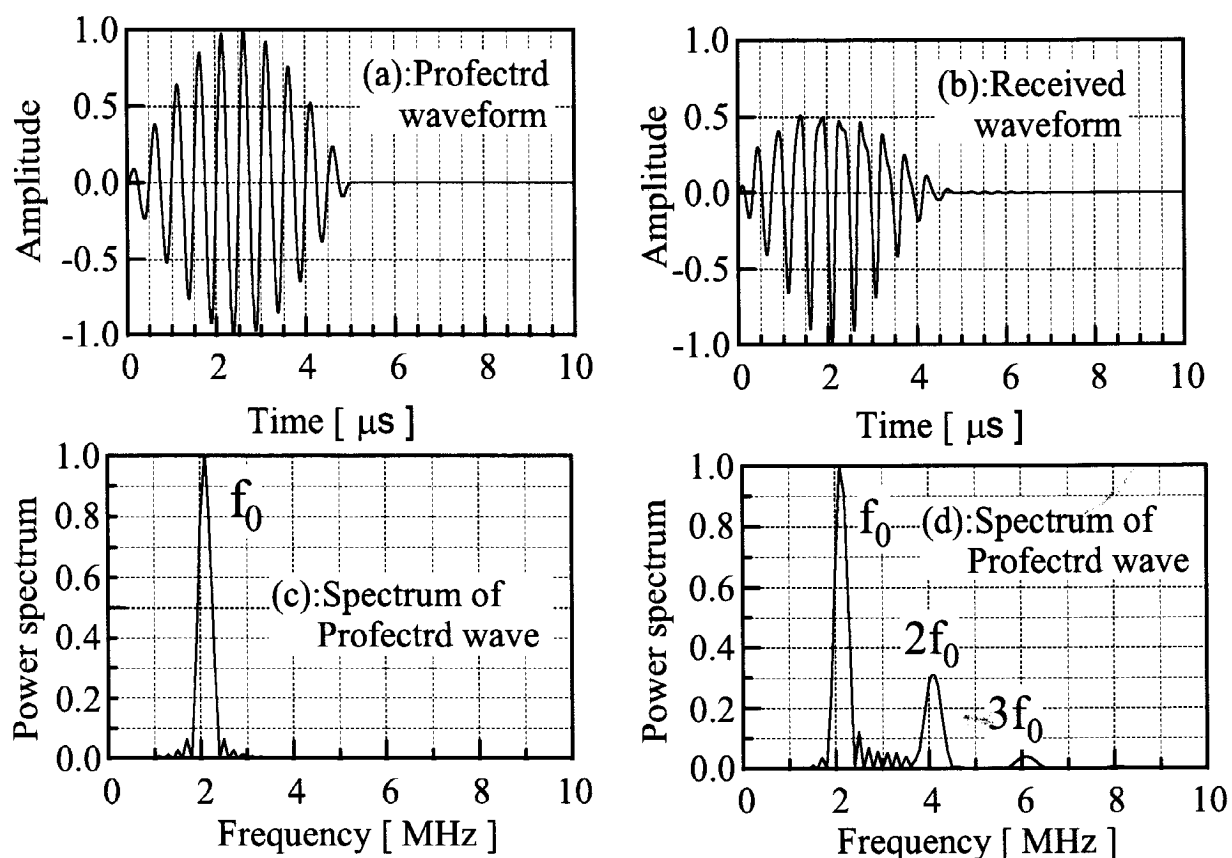


Fig.4 Power spectrum of projected wave and received wave.

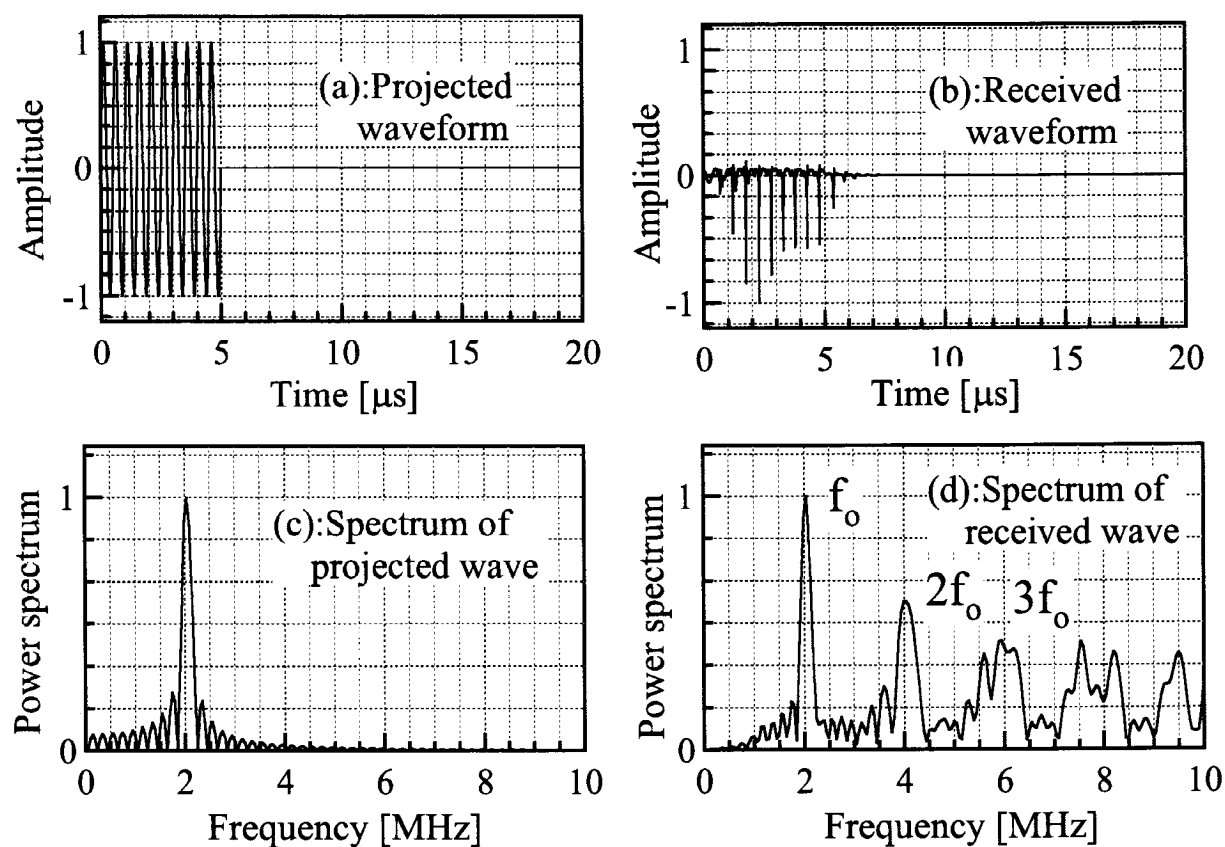
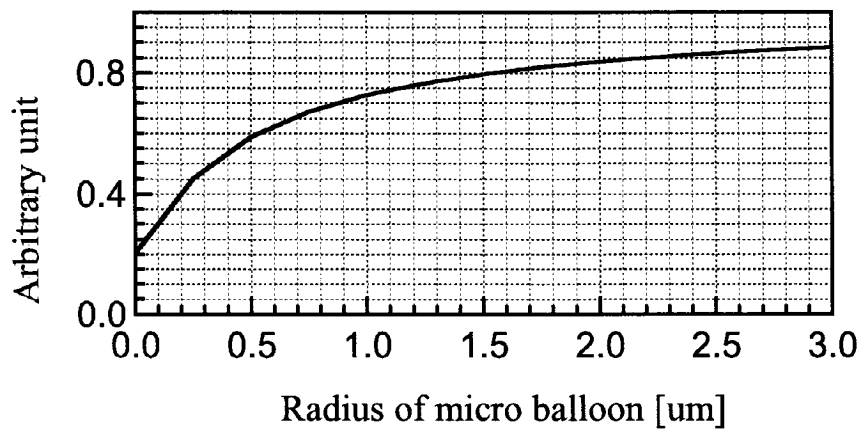
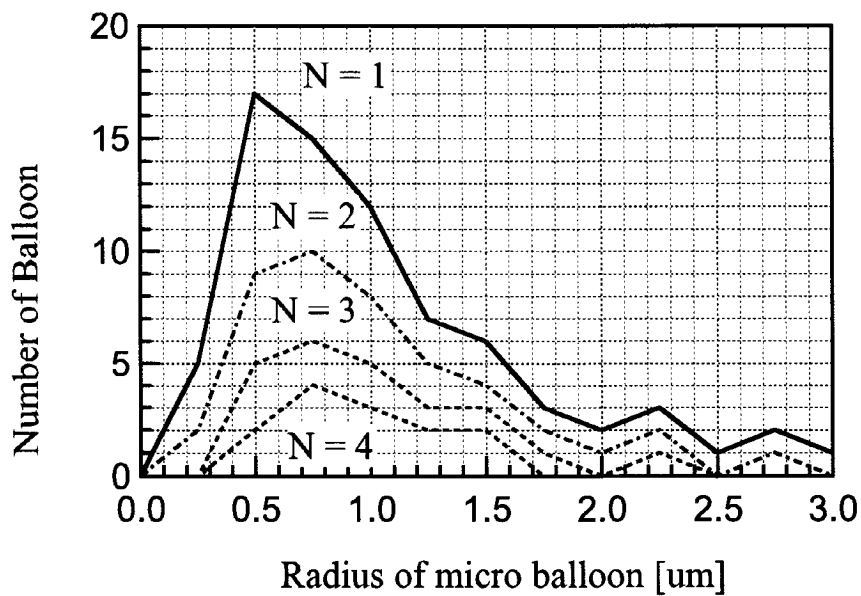


Fig.5 Power spectrum of projected wave and received wave from microbubbles with particle-size distribution.



Weighting factor.



Particle-size distribution.

Fig.6 Weighting factor and particle-size distribution.

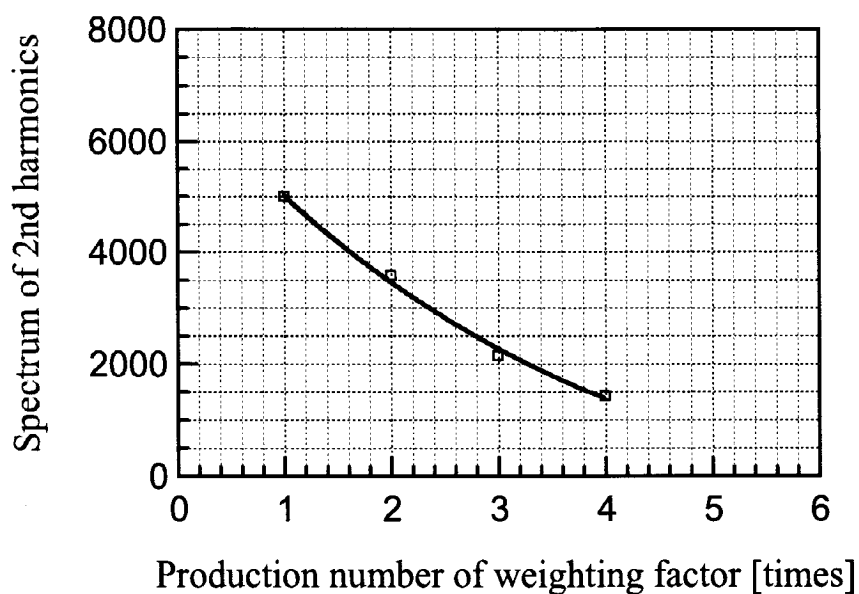


Fig.7 2nd harmonics vs. production number of weighting factor.

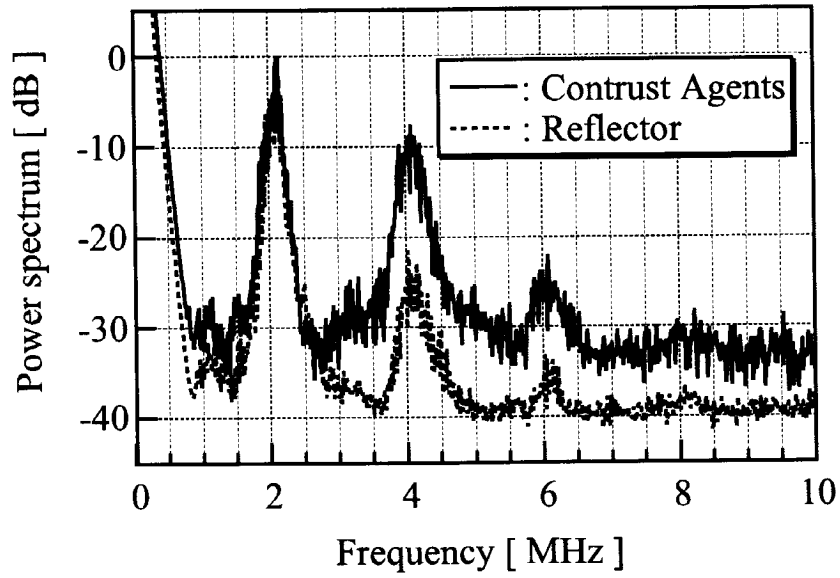


Fig.8 Power spectrum of received wave.

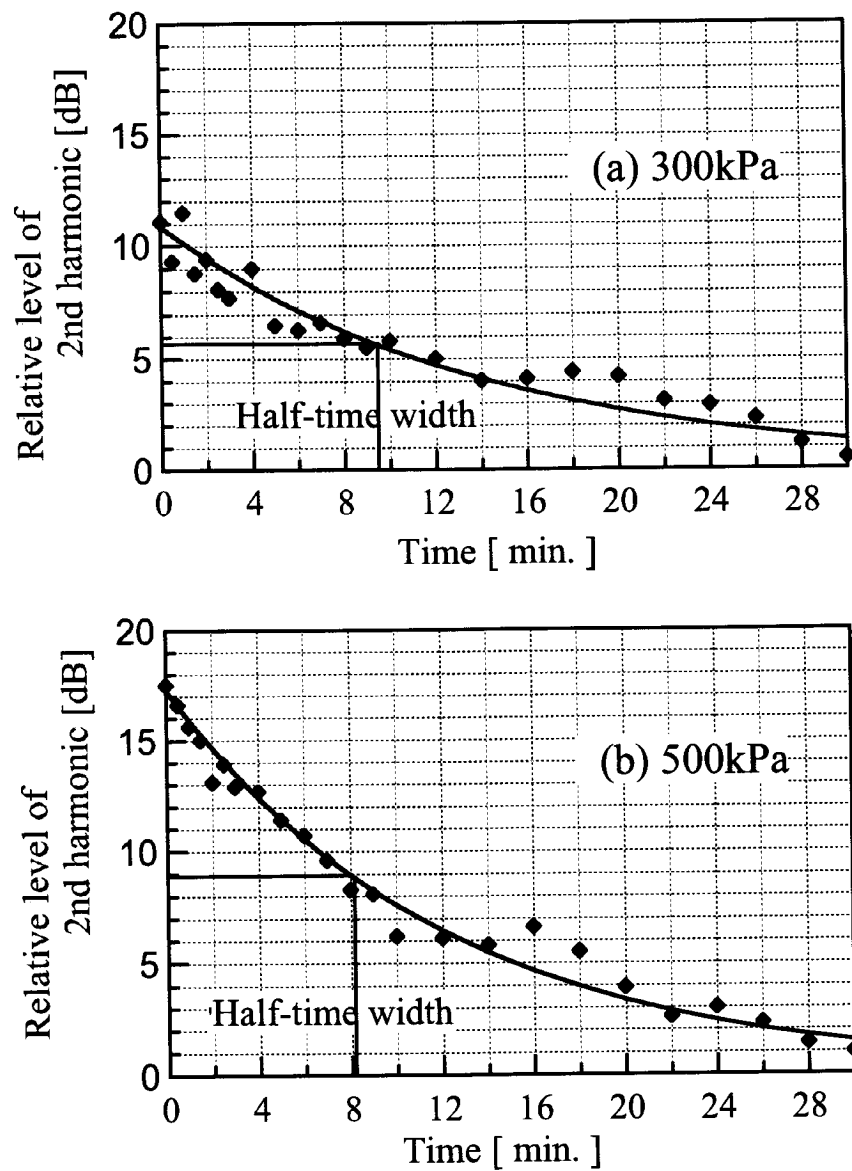


Fig.9 Relative level of 2nd harmonics vs. time.

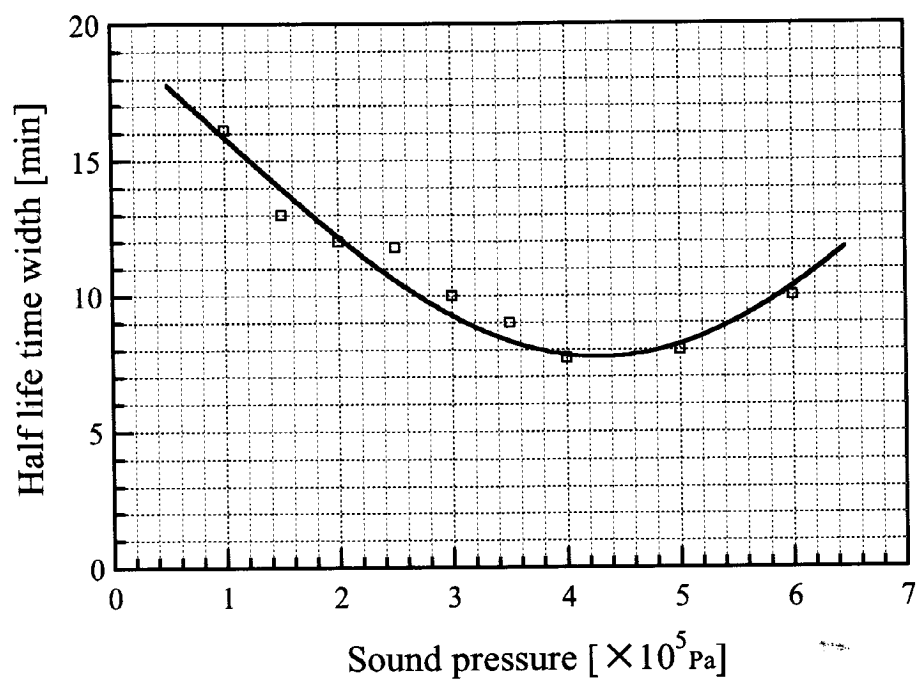


Fig.10 Half life time width of 2nd harmonics vs. sound pressure.