一寸一服

Sound Spotlight

非線形パラメトリックスピーカー

㈱リコー 技術本部 米山正秀

1. 理論的背景

音の世界では波源のサイズに比して波長が長いために，光の場合のような収束ビームを作ることは従来不可能であった。しかしながら，ここ2～3年の間に筆者等の研究により非線形パラメトリックスピーカー（以後パラメトリックスピーカーと略称する）と称するまったく新しい発音機構を有するスピーカーが提唱されている。このスピーカーは有限振幅超音波の非線形相互作用を利用したものであり，オーディオ信号で振幅変調された超音波をアレー状に構成された振動子から空気中に有限振幅レベルで放射することによって実現されるものである。この場合，超音波放射器である振動子のアレーサイズと超音波周波数の組み合わせを適当に選べば比較的長い近接音場領域を形成することができる。

振動子アレーから放射された有限振幅超音波は空気の非線形特性により自己復調が起こり，そのスペクトル構造が変化する。この作用を非線形相互作用（または非線形パラメトリック作用）と称し，現象としては搬送波である超音波と上側帯波および下側帯波が非線形干渉を起こすことによって，変調波であるオーディオ信号のスペクトルが新たに生じることになる。

一般に空気中における超音波の減衰は相当に大きいので，有限振幅レベルで伝搬する距離は比較的短く，その結果，非線形相互作用の起こる範囲は近接音場域のほぼ2倍程度であることがシミュレーションによって確かめられている。近接音場域の2倍程度の距離では未だ超音波はビーム状に近い形状を保っていると考えてよい。したがって，非線形相互作用の結果として自己復調が起こり，変調波であるオーディオ信号のスペクトルを有する仮想音源が超音波ビーム内に縦形アレーとして形成されることになる。ここで，非線形相互作用の対象となる被変調超音波を1次波（または1次音）と称し，これに対して非線形相互作用の結果生じたオーディオ信号の復調音を2次波（または2次音）と称することにする。

次に，パラメトリックスピーカーの有する大きな特徴である超指向特性について説明する。受聴者がパラメトリックスピーカーから聴く音は2次音であるが，これは1次波中に縦形アレー状に形成された2次音の仮想音源からの合成音として得られるため，非常に鋭い指向特性を有することになる。一般に，非線形相互作用によって生じる2次音の指向特性は1次波のメインローブに近い特性が得られるが，サイドローブが極端に抑圧されるのが特徴で，このため，非常に鋭い指向特性が得られる。

したがって，パラメトリックスピーカーの指向特性は，今までのいかなるタイプのスピーカーよりも鋭い特性を有しているのが著しい特徴であり，これによって今まで不可能であった音のスポットライト（Sound Spotlight）の実現が可能になった。

2. 設計上の諸問題

ここでは，パラメトリックスピーカーの設計上の問題点について簡単に触れる。このタイプのスピーカー

は，振動板の機械的振動によって空気中に疎密波を放射する従来タイプのスピーカーと発音機構がまったく異なるため，今までになかった特徴と問題点を有している。パラメトリックスピーカーの問題点をまとめると次の4点に絞られる。

(1) 再生音圧レベル

(2) 2次高調波ひずみ

(3) 再生音の周波数特性

(4) 超音波の遮断

次に，上記問題点について若干の解説をおこない，設計上の留意点についても考察を加える。

まず1番目の問題として，再生音圧レベルの問題について考えてみる。

パラメトリックスピーカーでは大きな再生音圧を得るのが難しいが，これは非線形相互作用を利用しており，しかも空気は水その他の媒質に比して非線形パラメーター値が小さく，非線形現象の起こりにくい媒質であることに起因している。しかしながら，2次波の再生音圧は1次波の初期音圧 P_0（放射器を出た直後の音圧）の2乗に比例しており，大きな P_0 が得られれば，ある程度実用的な音圧を得ることができる。この P_0 は1次波周波数に強く依存しており，非線形吸収その他の影響により，1次波周波数が高くなるほど変換効率が低下する。また1次波周波数を低くすると2次波ビームが拡がり，パラメトリックスピーカーの超指向特性の長所が失われる。

シミュレーション結果によると，1次波周波数（f_1）としては30kHz～70kHzくらいが適当であるといえる。f_1=40kHzのときは P_0=150dBくらいでもっとも高い2次音圧が得られることになる。

次に2番目の問題として，2次高調波ひずみの問題について考える。

一般に，AMの変調度 m を上げると，再生音圧は m に比例して増大する。しかし，この場合，搬送波を中心とした上下の側帯波同士が非線形相互作用を起こし，信号の高調波成分に相当するスペクトルを生じる。今までの研究結果によると，2次高調波ひずみ率は変調度が m のとき m% となることが明らかになっている。したがって，ひずみを減少させるには変調を浅くすればよいわけであるが，信号音圧も m に比例するので，浅い変調の場合には再生音圧も低下するというジレンマがある。この問題を解決する手段として，SSB-AM変調方式が有効である。さらに，MDSB（変形両側帯波）変調方式という新しい変調方式が提案されている。どちらの変調方式を用いても，通常の振幅変調方式に比して大幅に2次高調波ひずみの低減が達成されている。

3番目として，再生音の周波数特性の問題であるが，非線形相互作用によって生じる2次波の音圧は2次波周波数の2乗に比例するという特徴がある。したがって，パラメトリックスピーカーの周波数特性は理論的には12dB/octの直線にのることになるが，実際問題としては超音波振動子の周波数特性の影響等により2kHz～3kHz以上の周波数では12dB/octの特性から外れるようになる。パラメトリックスピーカーに対して平坦な周波数特性を望む場合には，信号波を−12dB/octの低域強調イコライザーに通した後，変調器に導くような処理を加えればよい。しかし，このようなイコライザーを用いると，低域での変調度が増大するので，低域でのひずみ率特性が極端に劣化するという欠点がある。

最後に，このタイプのスピーカーの受聴者の安全性の問題があげられる。受聴者は信号である2次音を聴くと同時に1次波である超音波をも浴びることになる。このとき浴びる1次波の音圧は相当に高いので長期にわたって被爆すると人体に何らかの影響が及ぼされることが心配される。これを防ぐためには，1次波ビーム中にビーム径より十分大きな音響的低域フィルターを挿入し，1次波をカットすると同時に2次波はできるだけ減衰なく通過させるような措置を施すことが必要である。この場合，音響フィルターの挿入位置と材質が問題である。挿入位置については，振動子に近すぎると，仮想音源アレーが形成されきらない内に1次波が遮断されるため，十分な2次音圧と指向特性が得られないことになる。最適挿入位置は仮想音源の縦形アレーの形成直後が望ましい。これは大略，近接音場域の2倍くらいと考えてよい。

次に材質であるが，これは1次波の周波数に大きく左右される。フィルターを構成する場合，1次波と2次波の周波数比が大きい方が容易であることはいうまでもない。筆者等の研究ではエアーパットフォーム（クッション材）が有効であった。

以上，パラメトリックスピーカーの設計上の注意点について述べたが，非常に多くのパラメーターが相互にからみ合っており，単純な考察では最適設計することが難しいと思われる。したがって，各種のコンピ

ューターシミュレーションによってパラメーターの最適値を求める手続きが必要である。

シミュレーションを実施する場合のもっとも大きな制約条件は超音波振動子の性能である。特に中心周波数，放射音圧，帯域幅等が重要なパラメーターとなる。特に帯域幅はAM波の側帯波成分をも放射する必要から十分広い特性が望まれるが，現実には非常に Q が高い場合が多く，再生信号音圧の高域成分が失われる原因になっている。

このように，現在では超音波振動子がパラメトリックスピーカーの性能向上の足かせとなっており，理論限界まで性能を引き出すためには振動子のより一層の進歩が切望される次第である。

3. 応用分野の見通し

パラメトリックスピーカーの応用分野を考える前に，扱う情報について考えておく必要がある。このタイプのスピーカーは前節で述べたごとく，通常のスピーカーと比べて異なった特性を有しているため，扱う情報も自ずと限定されるのは避けられないことである。筆者の個人的な見解では，パラメトリックスピーカーは音楽情報を扱うのには適さず，音声によるメッセージ情報の伝達に使われるのではないかと予想している。

それは音楽情報を扱うには超音波振動子に ±15kHz の帯域幅が要求され，超音波振動子の中心周波数の最適範囲が 30kHz～70kHz であることを考えると，これは非常に困難な要求であると思われるからである。さらに2次高調波ひずみが大きいことを指摘したが，これは音楽情報を扱う上で致命的な欠陥である。これに対し，音声情報では振動子に対する要求帯域幅が狭く（約⅓くらい），また，2次高調波ひずみに対しても明瞭度はそれほど大きく左右されないこと等を考えると，やはり扱う情報は音声が本命であるといわざるを得ない。

したがって，パラメトリックスピーカーは音響的スポットライトという従来技術では考えられなかった特長を生かして，音声によるメッセージ伝達をおこなう特殊用途に多くの応用が考えられよう。騒音公害に悩まされている現代社会では，発音体の無指向性のゆえに聞かなくてもよい聞きたくない音を聞かされている場合が多い。必要なメッセージを必要とする人にだけ伝達することは今後の人間社会で重要であり，このような目的にパラメトリックスピーカーの超指向性が利用できないかと考えている昨今である。

4. 参考文献

パラメトリックスピーカーに関する文献を以下に列挙する。

(1) 米山，河面，藤本，佐々部：非線形パラメトリック作用のスピーカへの応用，電子通信学会電気音響研究会資料，EA81-65（1982年1月）.

(2) 超音波に対する空気の非線形性を利用して可聴音波を発生するスピーカ，日経エレクトロニクス，3-15，No. 286（1982）.

(3) 米山：非線形パラメトリック作用のスピーカへの応用，電気学会全国大会，シンポジウム，S1-6（1983年4月）.

(4) M. Yoneyama et al.: The Audio Spotlight: An Application of Nonlinear interaction of Sound Waves to a New Type of Loudspeaker Design, JASA, Vol. 73. No. 5, 1532～1536 (May, 1983).

(5) M. Yoneyama and J. Fujimoto: An Application of Nonlinear Interaction of Sound Waves to the Loudspeaker: Foundamental and Improvement, 11th ICA, Proceedings Vol. 1, 1.9-6, 325～328 (July, 1983).

(6) 鎌倉，米山，池谷：パラメトリックスピーカの変調方式の検討，電気関係関西支部連合大会(1983. 11).

(7) 鎌倉，米山，池谷：パラメトリックスピーカの諸問題と対策，音響学会研究発表会講演論文集，1-1-17，285～286（1984年3月）.

(8) 鎌倉，池谷，米山：パラメトリックスピーカの問題点とその対策，電子通信学会研究会資料，EA84-7（1984年5月）.

"音の21世紀がはじまった"　主催 日本オーディオ協会　(03)403-6649

第33回 全日本オーディオフェア　10月5日→9日

入場料＝¥500(前売) ¥600(当日)　東京・晴海　輸入オーディオ会場 10月3日→5日

二輪車・自動車での来場禁止。周辺は全面駐車禁止。九段下・グランドパレス