

## 超伝導スピーカ

Super Conductive Loudspeaker

小谷野 進司

Shinji Koyano

**要 旨** スピーカの変換効率を改善するために超伝導現象を応用したスピーカの開発を行った。スピーカの構造としては誘導型エッジダンパーレスとし、2次コイルを超伝導ワントーンとした。液体窒素温度で超伝導状態になり、約100dBの音圧レベルを得ることができた。誘導型スピーカの等価回路により解析を行いその動作について検討を行った。結果として、理想状態では定速度駆動となり、変換効率、音圧レベル共に改善されることが明らかになった。

**Summary** We have developed the loudspeaker that was applied super conductive phenomenon in order to improve the loudspeaker efficiency. Its construction is the inductive type, no surround, no spider and the secondary coil is one turn coil made of the super conductive material. We obtained about 100dB SPL with 20cm cone when the coil reached the temperature of liquid nitrogen and became super conductor. We investigated its motion to use the equivalent circuit of the inductive loudspeaker. The result revealed that in ideal condition it was the steady velocity drive and improved both the conversion efficiency and sound pressure level.

**キーワード** : スピーカ, 超伝導, 誘導型, エッジダンパーレス

### 1. まえがき

(社)日本オーディオ協会では、「21世紀のオーディオ」を目指し、1999年4月に「次世代オーディオ機器研究委員会(委員長:早稲田大学教授:山崎芳男氏)」を発足させ、産学協同で新しいオーディオ機器について研究を行なった。この研究における最初のテーマとして「超伝導現象」を応用したスピーカの研究を「超伝導スピーカWG」においておよそ1年半に渡り行い、その成果を2001年10月5日から開催された「Audio Expo 2001」において発表し<sup>(1)</sup>、大きな反響を得た。このとき試作した超伝導ス

ピーカについて概要を以下に報告する。

### 2. 現在のスピーカの問題

現在、我々が使っているオーディオ再生用のスピーカの殆どはコーン型に代表される動電型直接放射型である。この形のスピーカの原型は1925年に発表されたC.W.Rice, E.W.Kellogのコーン型ダイナミックスピーカに遡る。その後今日まで磁石、磁気素材、振動板素材などマテリアルの進歩および多くの研究者の手による解析の結果、再生帯域の拡大、直線性の改善、変換効率の改善など現在見られる性能を得ること

が可能となった。

しかし、3/4世紀が過ぎた現在においても解決されていない問題が有る。最大の課題は、スピーカの変換効率の改善である。一般に直接放射型では入力された電気エネルギーが音響エネルギーに変換される変換効率は0.数%から数%程度、ホーンのような音響変成器を用いても20～30%程度となっている。従ってスピーカに入力された電力の殆どは音に変換されずにボイスコイルの熱エネルギーや機械的なロスとなっている。そのために十分な音圧を得るためには大出力の増幅器を必要とし、さらに大きな電力を必要とすることになる。早稲田大学の山崎教授の試算によれば、日本における全てのオーディオ機器のエネルギーロスは発電所2基分に相当するとされている。

次の課題は振動板の支持機構である。正確な再生を行うためには振動板の中心保持を確実にし、振幅可能範囲において正確なピストン運動を行えるように支持しなければならない。これを実現する機構として初期のスピーカから、エッジおよびダンパによる2点支持が行われてきた。

しかし、この確実な保持と動き易さという相反する状態を実現するため、支持体に使われる材料および形状にさまざまな工夫がされてきたが、経年変化、微小振幅や大振幅時の非線形動作、特定周波数における共振現象などの問題を残している。

### 3. 超伝導現象について

上述の2つの課題を解決する手段として着目したのが「超伝導現象」のスピーカへの応用である。超伝導現象には次の4つの性質がある。

- 1) 電気抵抗が零となり永久電流が流れる。
- 2) 磁場と反発したり(マイスナー効果)、磁場をトラップして(ピン止め効果)磁気浮上などが起こる。
- 3) 超高速・超低電力消費タイプな電子素子が作れる(SFQ素子)。

4) 超高感度磁気・電磁波センサができる(SQUID, ジョセフソン素子)。

これらの性質のうち、1)および2)を適用することにより前述の課題が解決できるのではないかと考え、WG内で検討を行った。

### 4. 超伝導スピーカの構造

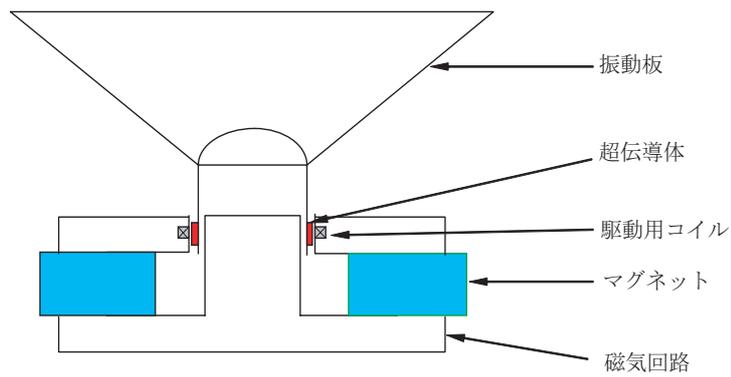
超伝導スピーカとしての基本的な構成は図1の3つのタイプとした。タイプBは2001年3月に筑波大学で開催された日本音響学会春期研究発表会において発表を行い<sup>(2)</sup>、超伝導スピーカの可能性を示した。さらに、スピーカとしての性能を向上させるためタイプAのエッジレス・ダンパレス誘導型スピーカを試作し、Audio Expoでの公開を目指した。

誘導型とした理由は、ピン止め効果により磁気浮上が期待できるためエッジダンパレス構造が容易に実現できること、および駆動コイルへの電力供給が非接触で行えるため給電線との接合問題を解決できるためである。参考に従来のスピーカの構造を図2に示す。

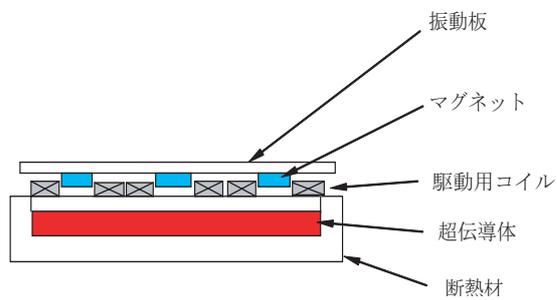
試作したスピーカの詳細構造を図3に示す。振動板は抄紙コーンにセラミックをコートした20cm口径フルレンジ再生可能なタイプである。2次側コイルを超伝導材のワンターンコイルとしてある。

今回用いた超伝導材は新日本製鐵(株)が開発したY-Ba-Cu-O希土類系酸化物単結晶超伝導バルク材QMG(「QMG」は新日本製鐵(株)の登録商標)で、これを内径25.9mm外径29.6mm高さ3mmのリング状に加工し使用した。この材料は液体窒素温度(77°K, -196°)で超伝導状態になる。磁気回路はNd-Fe-B磁石を用い、常温で8000ガウスの磁束密度を得ている。1次コイルは銅線で作製し、常温で4Ωの抵抗値を持っているが、冷却状態では約0.7Ωまで抵抗値が低下する。

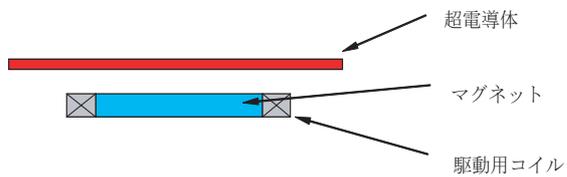
図4に試作したスピーカの実測特性を示す。超伝導スピーカでは100dB以上の音圧を示し、大きく改善していることが解る。



TypeA : 誘導型



TypeB : フローティングマグネット型



TypeC : フローティング超伝導型

図 1 超伝導スピーカの構造

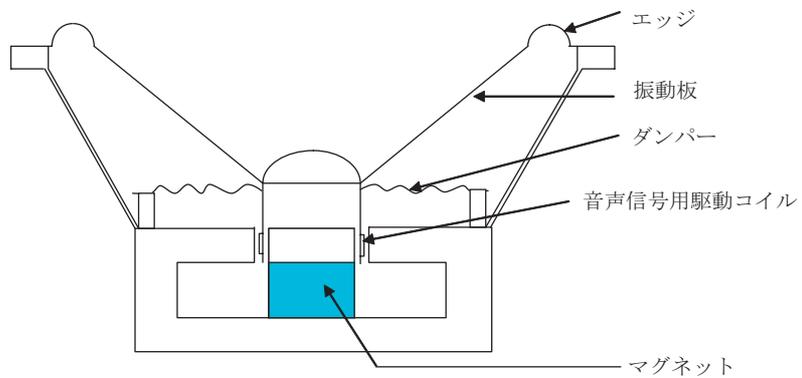


図 2 コーン型ダイナミックスピーカ構造

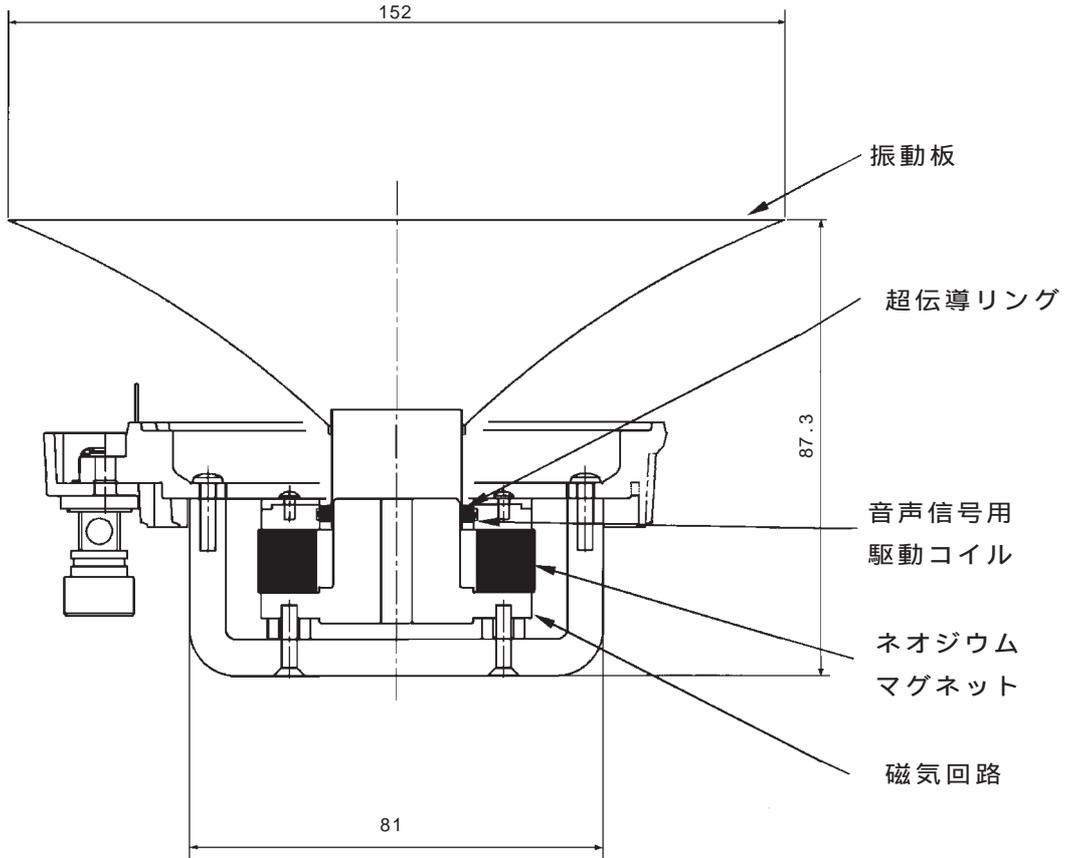


図 3 エッジレス，ダンパレス誘導型超伝導スピーカ

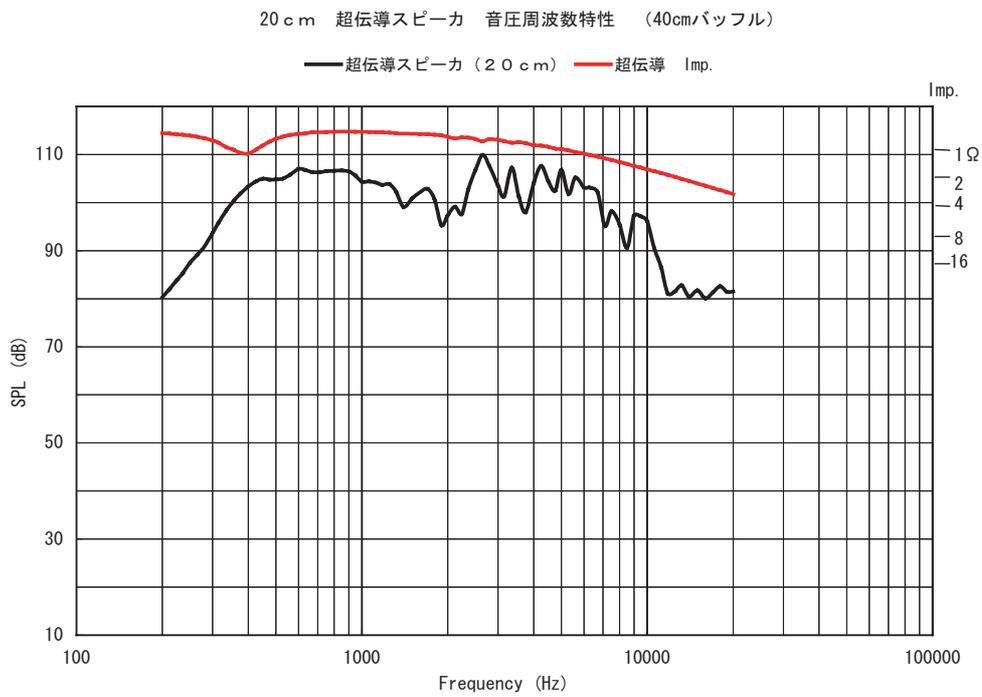


図 4 誘導型超伝導スピーカ特性

## 5. 動作解析

試作したスピーカを基に超伝導状態での動作を解析するため、簡易的な等価回路を作り、幾つかの状態における動作解析を行なった。図5(a)に通常のスピーカの等価回路を示す。これを基に変換効率を求めると、従来の導電型スピーカでは、

$$\eta = \frac{\pi \rho a^4 (Bl)^2}{2cM^2 R_{vc}} \times 100(\%)$$

で有るが超伝導では、

$$\eta = \frac{\pi \rho a^4 \omega}{2cM} \times 100(\%)$$

となり、周波数に比例した特性となる。

誘導型超伝導スピーカの等価回路を図5(b)

に示す。これを基に振動板速度を求める。

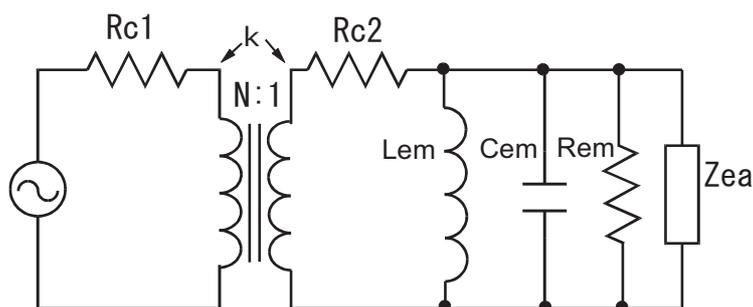
誘導型の基本式は、

$$\begin{aligned} E_1 &= (R + j\omega L_1)I_1 + j\omega MI_2 \\ 0 &= (Ze + j\omega L_2)I_2 + j\omega MI_1 \end{aligned}$$

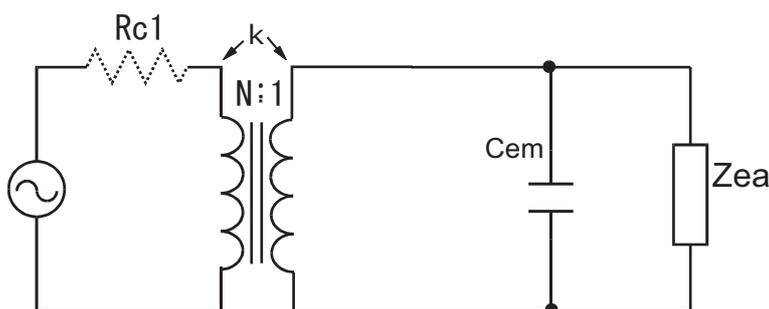
であり、これから振動速度を求めると、

$$v = -\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \frac{E}{A}$$

となり定速度で振動する抵抗制御となることが解る。図6にこれを基に計算した結果を示す。これから解るように入力全てが放射インピーダンスに加わるので振動板の状態によらず音圧レベルが改善されることが解る。今回の試作では1次コイルの抵抗が有ること、および結



(a) 通常の誘導型スピーカ等価回路



(b) 試作超伝導スピーカの等価回路

記号説明:

- Rc1: 1次コイル直流抵抗
- Rc2: 2次コイル(1ターン)直流抵抗
- k: 結合係数
- Lem: 電気回路に変換した振動系コンプライアンス
- Cem: 電気回路に変換した振動系質量
- Rem: 電気回路に変換した機械抵抗
- Zea: 電気系に変換した放射インピーダンス

図5 各スピーカの等価回路

合係数が1とならないため(図7)理想的な特性に至っていないが,1次コイルも超伝導状態になれば6dB/octで周波数に比例して上昇する特性となることが予想される。この状態では完全な抵抗制御となっており,従来の慣性制御によるスピーカとは異なる音質が期待される(解析

の詳細については付録を参照)。

Audio Expoで公開した試作品は理想特性には至っていないが,再生音質は非常にクリアーで応答性が良く,直接放射型にもかかわらずホーンスピーカのような雰囲気を持っている。図8に発表したスピーカの外觀を示す。

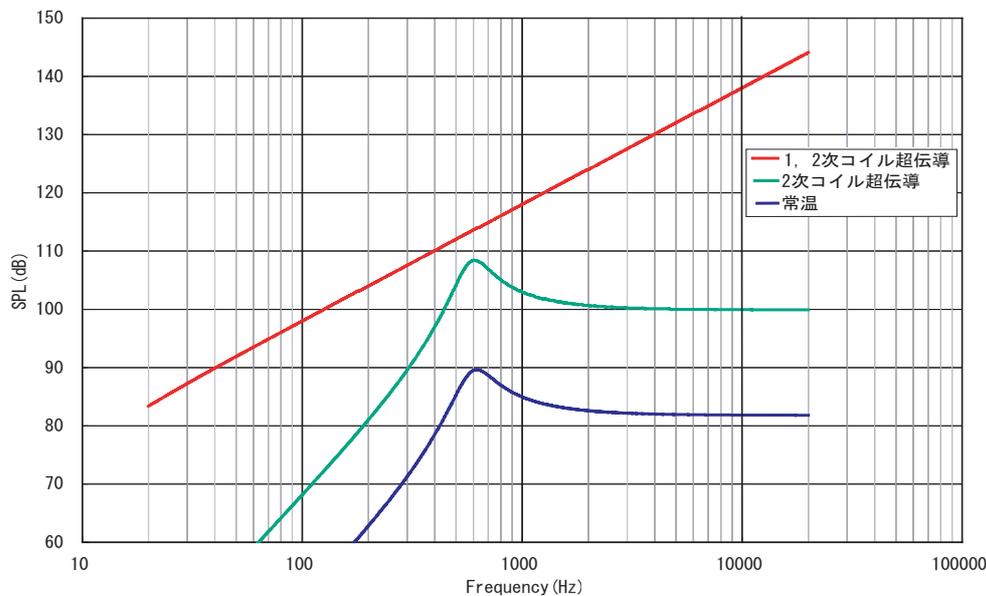


図6 誘導型超伝導スピーカの音圧周波数特性シミュレーション

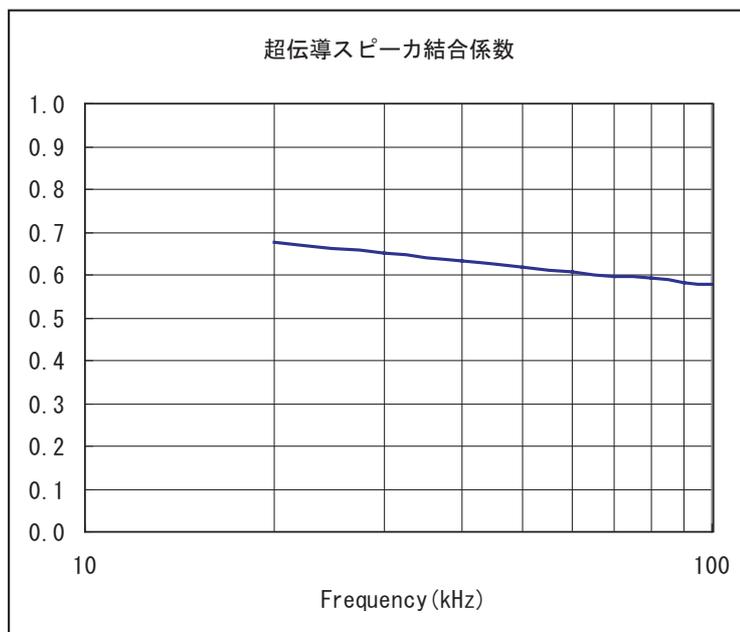


図7 誘導型超伝導スピーカ結合係数



写真1 動作前



写真2 動作時

図8 Audio Expoで発表したスピーカの外觀

## 6. 超伝導スピーカの課題

より理想特性に近いスピーカを実現するためにはまだ解決しなければならない問題が山積している。第一に駆動アンプをどうするかである。抵抗零の世界では従来の考えのオーディオアンプでは駆動できなくなる。スイッチングアンプという手もあるが素子の持つ抵抗が問題になり、素子自体も超伝導素子で作らなければならない。また、配線材も超伝導でということになる。さらに電源はどうするのか等々。第二に超伝導材がどこまで高温で動作するかは実用とする上で大きな問題である。現在液体窒素の値段はミネラルウォーターより安いといわれているが、音を出している間中10分ごとに使うのでは大変なことになる。小型で強力な冷凍機が安価に供給されれば空気中に幾らでも存在する窒素なので、実現の可能性があるかもしれない。しかし、やはり高温超伝導材(できれば室温で)の発見に期待するところが大きい。最近の研究では117°Kで超伝導状態になる物質が発見されており、将来に期待したいところである。

第三に超伝導状態におけるスピーカの動作はどのようにになっているのか、解明する必要がある。上述の二つの課題が解決されたとしても動作モデルが構築出来ない状況では、良いスピーカを創り出すことは困難である。今回の開発課程では従来の等価回路の考えを用いて解析しているが、まだ疑問点が多くあり、さらに研究が必要である。

## 7. まとめ

以上のような課題を残しているが、本WGは日本オーディオ協会から早稲田大学が引き継ぎ、磁気回路および一次コイルを内外二重構造として結合係数を改善するなどの改良を行い、さらに性能の向上を図ったが、2004年4月をもって活動を完了した。

## 8. 謝辞

最後に「超伝導スピーカWG」に参加され、活発な議論を頂いたWGの各委員(筆者を除く)、並びに試作に当たり素材の提供、製作にご協力頂いた大学、企業並びに関係者をご紹介しますとともに、深く感謝の意を表します。

### 超伝導スピーカWG委員

委員長	山崎 芳男
	中島 平太郎
	藤島 啓
	大林 國彦
	佐伯 多門
	茶谷 郁夫
	五月女 弘海
	田中 正人
	北澤 宏一
	堀 昌司
	須田 誠

### 協力

早稲田大学  
東京大学

新日本製鐵(株)  
ソニー(株)  
パイオニア(株)  
東北パイオニア(株)

(以上順不同, 敬称略)

参 考 文 献

- (1) (社)日本オーディオ協会創立50周年記念セミナー「超伝導スピーカ」資料, 2001年10月  
(2) 山崎, 中島; 超伝導のピン止め効果を利用したエッジダンパーレススピーカの試

作, 音講論集, 2001年3月  
(3) 小谷野; 超伝導スピーカ, JAS ジャーナル, 2002年1月

筆 者

小 谷 野 進 司 (こやの しんじ)

所属: 研究開発本部 モバイルシステム開発センター

入社年月: 1975年4月

主な経歴: 入社以降スピーカユニット, システムの設計, 開発に従事。現在, 音場制御, デジタル信号処理, 変換器の研究に従事。

(付録1) 超伝導スピーカの効率

無限大バツフル中の半径 a の振動板が速度 v で振動しているとき, 放射抵抗を  $R_s$  とすると放射パワー W は,

$$W = R_s |v|^2 \quad (1)$$

となる。

放射インピーダンスを  $Z_s$  としたとき,  $ka < 1$  では,

振動系の機械インピーダンスを  $Z_m$ , 全機械インピーダンスを  $Z$  とすると,

$$Z_s = R_s + X_s \quad (2)$$

$$R_s = \frac{\pi \rho a^4 \omega^2}{2c} \quad X_s = \omega \frac{8}{3} \rho a^3$$

$$Z = Z_m + Z_s$$

また, 駆動力を F とすると, 振動速度 v は

$$v = \frac{F}{Z} \quad (3)$$

これらから,

$$W = \frac{\pi \rho a^4 \omega^2}{2c} \left| \frac{F}{Z} \right|^2 \quad (4)$$

いま, 振動系が慣性制御域すなわち,  $\omega > \omega_0$  では,  $Z = M$  となるので W は周波数と無関係に一定となる。この時,  $ka < 1$  なので,  $R_s < X_s$ , で  $Z_s = X_s = \frac{8}{3} \rho a^3$  となり,  $M = M_m + \frac{8}{3} \rho a^3$  となる。

$$W = \frac{\pi \rho a^4}{2cM^2} |F|^2 \quad (5)$$

$ka > 2$  では,  $R_s = a^2 c$  となり,  $M > R_s$  を満たす 場合は,

$$W = \frac{\pi a^2 \rho c}{\omega^2 M^2} |F|^2 \quad (6)$$

となり, 周波数の自乗に反比例してパワーが減少する。

スピーカへの入力パワーを  $W_i$ , 音響パワーを  $W_a$  とすると, スピーカの効率  $\eta$  は,

$$\eta = \frac{W_a}{W_i} \times 100(\%) \quad (7)$$

と定義される。よって音響パワーは,

$$W_a = \frac{\pi \rho a^4}{2cM^2} |F|^2 \quad (8)$$

$$= \frac{\pi \rho a^4}{2cM^2} \left| \frac{Bl}{Rvc} E \right|^2 \quad (9)$$

入力パワーは,

$$W_i = \frac{E^2}{Rvc} \quad (10)$$

(7), (9), (10) より,

$$\eta = \frac{\pi \rho a^4 (Bl)^2}{2cM^2 Rvc} \times 100(\%) \quad (11)$$

となる。

超伝導スピーカでは、スピーカの運動方程式は、

$$\begin{cases} E = RvcI + Blv \\ F = Zmv - BII \end{cases} \quad (12)$$

において、 $Rvc=0, F=0$  とすると、

$$\begin{cases} E = Blv \\ 0 = Zmv - BII \end{cases} \quad (13)$$

これから音響パワーは、

$$Wa = \frac{\pi\rho a^4 \omega^2}{2c} \left( \frac{E}{Bl} \right)^2 \quad (14)$$

また入力パワーは、

$$Wi = \frac{Zm}{(Bl)^2} E^2 \quad (15)$$

となる。

よって超伝導スピーカの効率 は、

$$\eta = \frac{\pi\rho a^4 \omega}{2cM} \times 100(\%) \quad (16)$$

となり、常伝導状態からの効率 は、

$$\eta_r = \frac{\omega MRvc}{(Bl)^2} \quad (17)$$

だけ改善する。

この時の 1 m の点における音圧  $P_o$  は、常伝導スピーカの場合、

$$P_o = \frac{\rho a^2}{2M} \left( \frac{Bl}{Rvc} E \right) \quad (18)$$

となり、慣性領域では一定の音圧となる。

超伝導スピーカの場合音圧  $P_s$  は

$$P_s = \frac{\rho a^2 \omega}{2} \left( \frac{E}{Bl} \right) \quad (19)$$

となり、周波数に比例して上昇する特性となる。

よって音圧レベルの改善率  $Pr$  は、

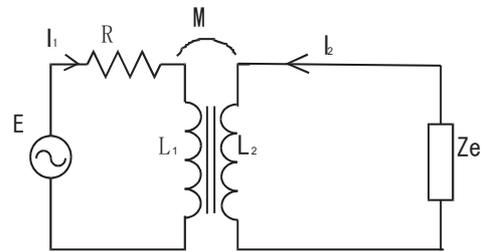
$$Pr = \frac{P_s}{P_o} = \frac{\omega MRvc}{4(Bl)^2} \quad (20)$$

となる。

## (付録 2) 誘導型超伝導スピーカの動作解析

### 1. 解析回路

付図 1 に示す等価回路により解析を行う。



付図 1 動作解析用等価回路

図中の各記号は次の通りである。

$E$  : 入力電圧 (信号源電圧)

$I_1$  : 1 次側電流

$R$  : 1 次側コイル抵抗

$L_1$  : 1 次側コイルインダクタンス

$I_2$  : 2 次側電流

$L_2$  : 2 次側コイルインダクタンス

$M$  : 相互インダクタンス

$k$  : 結合係数

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

$Z_e$  : 入力から見たスピーカインピーダンス

$$Z_e = Rvc + A^2 / Zm$$

$Rvc$  : 2 次コイル抵抗

$A$  : 力係数  $B \times L$

$B$  : ギャップ磁束密度

$L$  : 2 次コイル長

$Z_m$  : 振動系機械インピーダンス

$R_m$  : 機械抵抗

$M_m$  : 振動系質量

$C_m$  : 支持系コンプライアンス

## 2. 解析

トランスを含む回路において1次側及び2次側の関係は次式となる。

$$E_1 = (R + j\omega L_1)I_1 + j\omega M I_2 \quad (1)$$

$$0 = (Z_e + j\omega L_2)I_2 + j\omega M I_1 \quad (2)$$

これから  $I_2$  を消去すると1次側から見た式が求まる。

$$E_1 = \left( R + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_{vc} + \frac{A^2}{Z_m} + j\omega L_2} \right) I_1 \quad (3)$$

( ) 内が1次側から見た全インピーダンスとなる。

また,  $M = k^2 L_1 L_2$  であるから(3)式は,

$$E_1 = \left( R + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 k^2 L_1 L_2}{R_{vc} + \frac{A^2}{Z_m} + j\omega L_2} \right) I_1 \quad (4)$$

(4)式から, 慣性制御領域での動作および2次コイルを超伝導材としたときは,

$$E_1 = \left( R + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 k^2 L_1 L_2}{\frac{A^2}{j\omega M_m} + j\omega L_2} \right) I_1 \quad (5)$$

$$E_1 = \left( R + j\omega L_1 \left( 1 + \frac{\omega^2 k^2 L_2 M_m}{A^2 - \omega^2 L_2 M_m} \right) \right) I_1 \quad (6)$$

さらに, (6)式において,  $A^2 \ll \omega^2 L_2 M_m$  が成り立てば,

$$E_1 = (R + j\omega L_1 (1 - k^2)) I_1 \quad (7)$$

と成り,  $k = 1$  の時は入力から見たインピーダンスは1次コイル抵抗値  $R$  となる。

次に, 振動板の速度を,  $v$  とすると,

$$v = \frac{A}{Z_m} I_2 \quad (8)$$

2次電流  $I_2$  は(1),(2)式より,

$$I_2 = \frac{-j\omega M}{(Z_e + j\omega L_2) \left( R + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_e + j\omega L_2} \right)} E \quad (9)$$

(8),(9)式より

$$v = \frac{A}{Z_m} \frac{-j\omega M}{(Z_e + j\omega L_2) \left( R + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_e + j\omega L_2} \right)} E \quad (10)$$

$$= \frac{A}{Z_m} \frac{-j\omega M}{(R + j\omega L_1) \left( R_{vc} + \frac{A^2}{Z_m} + j\omega L_2 \right) + \omega^2 M^2} E \quad (11)$$

1次側の時と同様に  $R_{vc} = 0$ , および慣性領域とすると,

$$= \frac{A}{j\omega M_m} \frac{-j\omega M}{(R + j\omega L_1) \left( \frac{A^2}{j\omega M_m} + j\omega L_2 \right) + \omega^2 M^2} E \quad (12)$$

$$= \frac{-j\omega A k \sqrt{L_1 L_2}}{R(A^2 - \omega^2 L_2 M_m) + j\omega L_1 (A^2 - \omega^2 L_2 M_m (1 - k^2))} E \quad (13)$$

(13)式において1次側も超伝導と仮定し,  $R = 0$  とすると,

$$= \frac{-A k}{(A^2 - \omega^2 L_2 M_m (1 - k^2))} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} E \quad (14)$$

さらに,  $k = 1$  とすると,

$$= \frac{-\sqrt{L_1 L_2}}{L_1 A} E = -\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \frac{E}{A} \quad (15)$$

となり, 定速度駆動となる。