

ペットボトル鉱石ラジオの解体新書

Understanding of AM Radio Receiver Using a Germanium

岡田敏美

Abstract

「ペットボトル鉱石ラジオ」を作ります。そして，“こんな簡単な仕掛けで、なぜ中波ラジオ放送がよく聞こえるのか”という疑問の解明に挑戦します。ゲルマニウムという鉱石とペットボトルやアルミホイルなど身近な材料と、はさみやセロハンテープなど家庭にある道具だけを用います。

キーワード：電波、アンテナ、鉱石ラジオ、中波放送、ペットボトル

1. はじめに

筆者はこれまで小・中学校や大学のイベントで「ゲルマラジオ製作教室」を何度も開いてきました。昨年(平成15年1月)には電子情報通信学会主催の「小・中学生の科学教室」を富山県立大学で開催しましたが、参加された生徒さんだけでなく御父兄の方々にも，“不思議で面白い”と大人気でした。これらの経験を基に改良を加えてようやく到達したのがここで紹介する「ペットボトル鉱石ラジオ」です。

2. 電波とは何か

電波(電磁波と同じ)は、電界と磁界が進行方向に直角に振動しながら波として伝わるエネルギーの流れであり、大気中ではほぼ光速(秒速30万km)で伝わります。このことをマクスウェルが理論的に予測し(1864年)、ヘルツが実証しました(1888年)。電線に交流電流を流すと電波が出ると考えてよいでしょう。その逆に、電線が電波を受けると電線に交流電圧が発生します。この電波を通信に応用したのはイタリアの電気技術者マルコー

ニ(1909年にノーベル物理学賞を受賞)です。今日では電波は携帯電話や電子レンジなど身近なものとなっています。これからも一層いろいろな分野に応用されることは間違いありません。

3. 音声情報を電波に乗せる仕組み

音声の周波数(用語)は約20kHz以下の低い周波数の波です。また、空気中を伝わる音波の速度は秒速約300mと余り速くありません。これに対して、電波は光速で伝わるので、速く遠くへ広範囲に伝える通信に適しています。では、どのようにして低周波の音声を周波数の高い電波に乗せるかという仕組みを、図1を見ながら考えましょう。まず音声(A点の波形)をマイクロホンによって電気信号(B点の波形)に変えます。音声の強弱によって電気信号は増減します。次に、この低い周波数の電気信号の強さに比例して電波の強さを変えます。図1のC点にその波形が示されていますが、それを見ると高い周波数で振動する電波の波形の頂点をつないだ点線(包絡線という)は音声波形(A点の波形)と同じになっていることが分かります。このような変換を行う送信機の出力を電線につなぐと電波が発信されます。受け取る方では、受信した電波の強弱を電気に変えることによって音声波形を復元させることができます。このような通信方式は振幅変調(AM: Amplitude Modulation)と呼ばれ、

岡田敏美 正員 富山県立大学工学部電子情報工学科
E-mail okada@pu-toyama.ac.jp
Toshimi OKADA, Member (Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University, Toyama-ken, 939-0311 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.87 No.8 pp.669-673 2004年8月

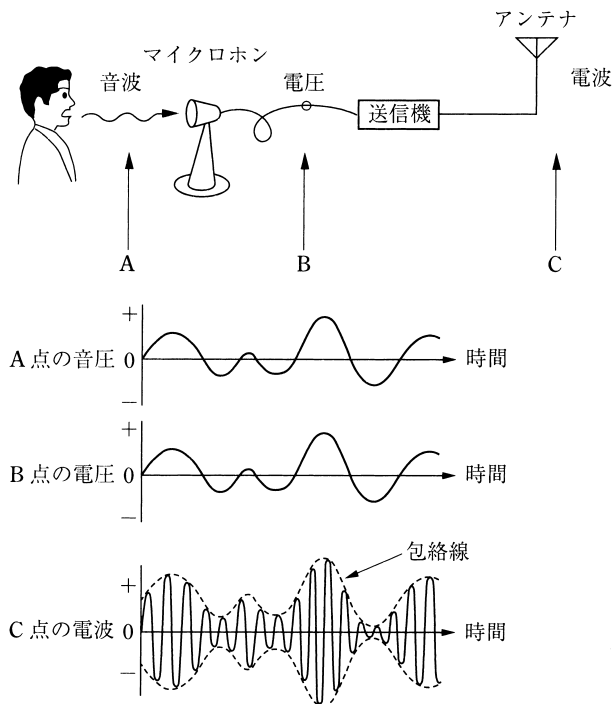


図1 振幅変調方式によって音声を電波に乗せる仕組み

ラジオ放送に使われています。この AM ラジオ放送は 1920 年から実用化され、その電波の周波数は日本では 531 kHz から 1,602 kHz までを 9kHz 間隔で使うように決められています。

4. AM ラジオの 4 要素

AM 放送電波を受信するラジオは、アンテナ、同調回路、検波回路、イヤホンの四つの要素からできています。このラジオの動作原理を図 2 に示す受信機の回路図を参考にして調べていきましょう。

4.1 アンテナ

アンテナは電波のエネルギーを電気に変換するエネルギー変換器です。簡単なアンテナとしては、2本の電線をペアとして用いるダイポールアンテナがあります。これは電線をまっすぐ伸ばしたアンテナエレメント #1 と #2 を地面に対して垂直に立て、抵抗^(用語) R1 の両端につなぎます。電波が伝わってくると抵抗の両端に交流電圧が生じます。この電圧は電波の強さに比例し、また、電線が長いほど大きくなります。実は、オーロラの研究用に打ち上げられた我が国の人工衛星「あけぼの」には宇宙空間から地球周辺の電波を計るために電波受信機が搭載されていますが、その原理は図 2 のように抵抗 R1 に生じる電気信号をコンピュータで分析するようになっているのです。

それでは、抵抗 R1 の両端のポイント①と②にイヤホンをつなげばラジオ放送が聞こえるのでしょうか。答え

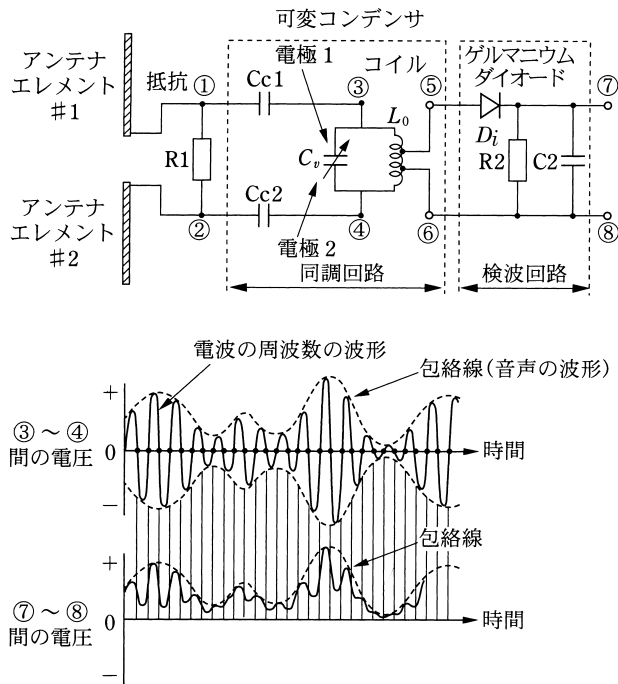


図2 振幅変調信号から音声信号を取り出す回路

は、ノー、です。その第 1 の理由は混信です。実際には多くの放送局から異なる周波数の電波が飛び交い混ざっています。このためアンテナにつながった抵抗 R1 にはいろんな放送局の電波が混ざった信号波形となります。このような混在した波形の中から聞きたい放送局の波形だけを抜き取るために考え出されたのが同調回路です。もう一つの理由は、先にも触れたように電波の周波数は非常に高いので人間の耳には聞こえません。聞こえるのは、音声の波形と同じ形をした電波の包絡線の波形だけです。これを取り出す回路は検波回路と呼ばれています。それでは同調回路と検波回路の仕組みを調べましょう。

4.2 同調回路

同調回路は共振回路あるいはチューナとも呼ばれる回路ですが、これは並列に接続された可変コンデンサ^(用語) C_v とコイル^(用語) L_0 、そしてこれに直列に接続された固定コンデンサ^(用語) C_{c1} , C_{c2} とから構成されます。この可変コンデンサ C_v の大きさを変えると、回路図の③と④の間の電圧は、特定の周波数(同調周波数といいます)だけで大きくなり、反対にそれ以外の周波数では小さくなります。この原理により、希望する放送局の周波数を選ぶことができるのです。同調周波数 f_0 は、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0^{(H)} C_v^{(F)}}}$$

で計算できます。今回のペットボトルに巻いて作るコイルの L_0 はだいたい $500\mu\text{H}$ ($=0.5 \times 10^{-3}(\text{H})$) です。また、可変コンデンサの値 C_v は $30\text{pF} \sim 130\text{pF}$ ($=30 \sim 130 \times 10^{-12}(\text{F})$) の範囲で変わります。これらの値をこの式に入れて計算すると同調周波数

はおおよそ 630kHz から 1,100kHz になります。このようにペットボトルは、中波放送局の周波数に同調しやすいコイルとコンデンサを作るのに適しています。また、ペットボトルのキャップを回せばコンデンサの容量が簡単に変えられるので放送局を選ぶとき便利でもあります。

4.3 検波回路

検波回路は、同調回路によって選ばれた周波数の電波の包絡線を得るための大事な部分です。これは、ゲルマニウムダイオード^(用語) Di と抵抗 R2、固定コンデンサ C2 から構成されており、同調回路のコイルのポイント⑤、⑥に接続されています。ゲルマニウムダイオードの整流特性によって、回路図 2 の端子⑤の電圧が正のとき抵抗 R2 に電流が流れ、反対に負のときは電流が流れません。更に、コンデンサ C2 と R2 の働きによって、ポイント⑦と⑧の間には図 2 に示されるように包絡線に近い波形

の電圧が出てきます。方鉛鉱という鉱石も整流特性を持っているので 1945 年以前はよく使われていました。しかし、ゲルマニウムダイオードの方が性能が良いので、今回の実験で製作するラジオにはゲルマニウムダイオードを採用します。ゲルマニウムも鉱石なので、このラジオは鉱石ラジオと呼んでいます。

4.4 イヤホン

最後に必要な部品はイヤホンです。これはポイント⑦と⑧の間に生じた低周波の電気信号を音波に変換するエネルギー変換器です。その構造は、黄銅の薄い振動板に薄いセラミック素子が張ってあり、低周波の電圧を加えると振動して音波を発生します（これを圧電効果といいます）。このようにしてラジオ放送の電波が音声なのです。なお、イヤホンはコンデンサの役割をするので、実際の製作では図 2 における C2 は省略します。

■ 用語解説

初めてラジオの設計図である電子回路を見たときは、意味が分からない部品記号や数字・単位が書いてあって、とまどってしまうものです。しかし、この記号は長い間の経験に基づいて考案されたとても便利な道具であり、何度も繰り返して書き写したり、実際にラジオを製作する体験によって身につく、電子回路を理解できるようになります。ここでは、今回の設計図に出てきた回路部品について説明します。

周波数(Frequency) 電波や音波など波の周波数とは、1 秒間の振動回数です。例えば 1 秒間に 50 回振動すれば、50 回/秒となります。回/秒を Hz という単位で表し、ヘルツと呼びます。また、1,000 倍のことを k と書き、キロと呼びます(1グラムの1,000倍は1キログラムというように)。したがって、20 kHz は、20 キロヘルツと呼び、 $20 \times 1,000 = 2$ 万回/秒の振動であることを意味します。

抵抗(Resistance) 抵抗という名前の部品は、三つのギザギザによる記号で表され、文字 R で示されます。単位はオーム、Ω です。オームの法則によれば、電圧 V と電流 I、抵抗 R の間には、 $I = V/R$ 、という関係があり、例えば、9 ボルト (V) の電池に 100 Ω の抵抗をつなぐと $I = 9$ (V) / 100 (Ω) = 0.09 (A) の電流が流れます。抵抗とは電流の流れにくさを表します。実際の抵抗 (抵抗器ともいう) は、炭素皮膜や金属膜などの材料で作られます。今回は炭素皮膜抵抗 (カーボン抵抗) を用います。

可変コンデンサ (Variable Capacitor (Condenser), バリコン), 固定コンデンサ コンデンサという名前の回路部品は、2 枚の金属 (電極という) を向かい合わせた構造をしており、回路図でも 2 本の縦線を書いて表します。この電極の間に電荷をためることができますが、電荷の量 Q (単位はクーロン) は電極間に加えられる電圧 (V) に比例し、 $Q = CV$ で表されます。この比例定数 C は静電容量と呼ばれ単位はファラッド (F) です。1 ピコファラッド、1pF、というのは、1 ファラッドの 10 の 12 乗分の 1 を意味し、非常に小さい静電容量であることを示します。静電容量は、電極の面積に比例し、電極の間隔に反比例しますので、面積か間隔を変えることにより変ります。このように静電容量が変

コンデンサを可変コンデンサあるいはバリコンといい、C_v という文字で表します。今回のペットボトルラジオではこれを自作します。

これに対して静電容量が変らないコンデンサを固定コンデンサといいます。いろいろなタイプが市販されていますが、今回はセラミック (磁器) の誘電体特性を用いたコンデンサを採用します。セラミックコンデンサ 100pF の容量は、 $100 \times 10^{-12} \text{F}$ と表現できます。

コイル コイルという名前の電子部品は、プラスチックなどの円筒にエナメル線をスプリング、すなわち、ばねのように巻いて作ることができます。ラジオの設計図では、そのスプリングの形に似た形を書いて、L、と表示します。コイルに交流電圧 (V) をかけると、電流 (I) が流れ、磁力線が発生します。一定電圧を加える場合、コイルに流れる電流は周波数 (f) に反比例するという不思議な特性があり、 $I = V / (2\pi f) L$ となります。この式において L は電流の流れにくさを表すコイルの定数で、インダクタンスと呼ばれ単位はヘンリー (H) です。インダクタンスは、コイルの巻数が大きいほど、また円筒の直径が大きいほど、大きくなります。なお、1mH は、1H の 1,000 分の 1 を、1μH は、1H の 1,000,000 分の 1 を意味します。

ゲルマニウムダイオード 小さなゲルマニウム結晶の一方の側に電線をつなぎ、反対の側に細い電線 (例えばインジウム合金線) を一点で接触させます。そして、これらをガラス容器に入れたものが、点接触ゲルマニウムダイオードと呼ばれる電子部品です。回路図では、縦の線と矢印でできた記号で表され、Di という文字がつけられます。IK60 とか IN60 などという記号名のダイオードが市販されています。

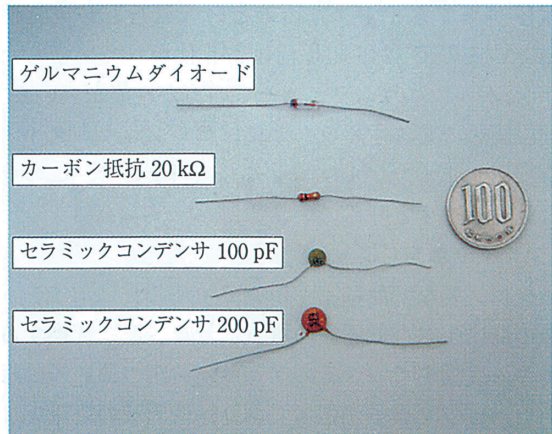


図3 電子回路部品の外観

5. ペットボトル鉱石ラジオの作り方

5.1 使用する電子回路部品

ペットボトル（大き目のサイズ（直径8cm，高さ30cm程度））2本，アルミホイル（幅25cm，長さ20cm）；以下の部品は電気店か無線パーツ屋さんで購入できます。全部で500円程度です。エナメル線20m（10mを2巻でもよい），クリスタルイヤホン1個，ゲルマニウムダイオード（IN60またはIK60）1個，カーボン抵抗（20kΩ 1/8W）1個，セラミックコンデンサ（100pF，200pF）各1個。以上の部品の外観を図3で示す。

5.2 工作用具

はさみ，セロハンテープ，紙やすり，のり

5.3 作り方

図4に示す組立て図と図5を参考にして作ります。

「同調回路のコイルを巻く」

10mのエナメル線2巻を使う場合：まず，エナメル線1mを切り取り，25cmの線1本，15cmの線1本，10cmの線6本に切り分けます。そして，それぞれの線の両端2cmを紙やすりで磨きエナメルを削り取ります。このエナメルが残っていると電気が通じないことがあるのでしっかり磨きます。これらの6本の線は部品と部品の接続に用います。

残りのエナメル線9mをペットボトルに巻きつけます。途中，15回巻いたらタップ1を出します。タップとはコイルの途中でエナメル線を3cm程度引き伸ばした枝のようなもので，部品をつなぐために用います。その作り方は，図4の下の説明図を参考にして下さい。さて，35回くらい巻くと巻き終わりますので，もう一つの10mのエナメル線をつなぎます。更に巻いていき，55回目でもタップ2を出します。残りのエナメル線を全部巻きつけます。巻いたエナメル線がほどけないようにセロハンテープでとめながらペットボトルに巻くとよいでしょ

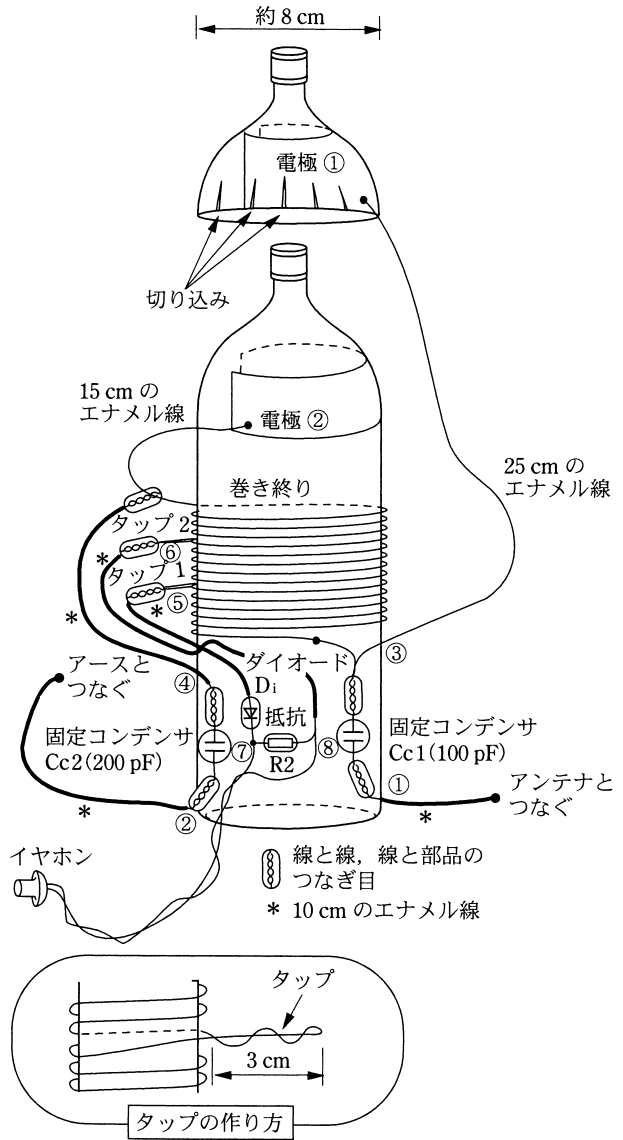


図4 ペットボトル鉱石ラジオの組立て図 番号①～⑧は図2の回路図中の番号で示す点を示します。

う。巻き終えたエナメル線の端やタップを紙やすりで磨き，エナメルを削り取ります。以上でコイルは完成です。

「可変コンデンサを作る」

可変コンデンサは2枚の電極の重なる面積と間隔を変えればよいので，いろいろな作り方が考えられます。ここでは電極②として，ペットボトルの一番上の部分にアルミホイルを張ります。まず，長方形（縦幅は8cm，横幅は20cm）のアルミホイルシートを作ります。これでペットボトルの円周の4分の3を取り巻くことができます。ペットボトルに糊をつけ，作成したアルミホイルシートを張ります。次に，15cmのエナメル線をアルミホイルシートの隅にセロハンテープでつなぎます。更に，アルミホイルシートがペットボトルからはがれないようにセロハンテープをアルミホイルシートの全表面に貼りま

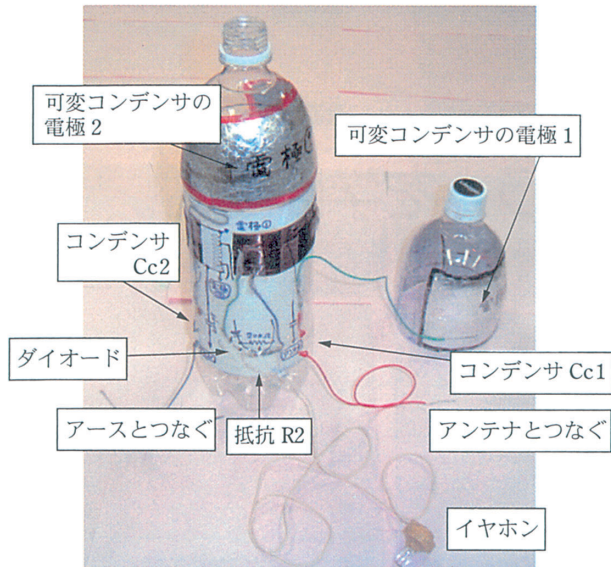


図5 ペットボトル鉱石ラジオ

す。これで電極の一つは完成です。

もう一つの電極①は、別に用意したペットボトルの上部約10cmをはさみで切り取って使います。電極②の場合と同じ要領で、ペットボトルの外側に長方形（縦幅は8cm、横幅は20cm）のアルミホイルシートを張ります。そして25cmのエナメル線を接続します。この線とアルミホイルがはがれないようにセロハンテープでしっかりとめます。この電極①が電極②とスムーズに重なるように、電極①の下の方に長さ約3cmの切り込みを7か所ほど入れます。以上で可変コンデンサは完成です。

「電子部品の接続」

図4に示すように、作成したコイルと可変コンデンサ、市販のセラミックコンデンサ2個、ゲルマニウムダイオード1個、抵抗1個、そしてイヤホンをつなぎます。これらの電子部品の接続には、先に作った短いエナメル線をくるくるとねじって巻きつけます。そして、ペットボトルの中央にセロハンテープで張り付けます。最後に、可変コンデンサの電極②を本体にかぶせます。これでペットボトル鉱石ラジオが出来上がりました。なお、図2における抵抗R1はいりません。

「アンテナ」

アンテナは、原理的には二つのアンテナエレメントから成り立つのですが、実際に上下方向に2本の電線を張ることは難しいです。それで、その代りとして、1本の長い電線（できるならば10m以上）を垂直方向に張ります。例えば、1階の部屋に自作のラジオを置く場合は、屋根の上に電線を引っ掛けるとか、ビルの3階の部屋の場合は、窓から電線を垂らします。アンテナは放送局の

見える方角に立てます。アンテナがビルの陰になると電波が弱くなるので気をつけて下さい。もう一方のアンテナエレメントの代りとして、電線を地面に埋める方法（これをアースという）や、水道の蛇口やベランダの手すりに電線を巻く方法、手で握る方法などがありますが、いろいろと試して下さい。水道の蛇口に電線を巻く方法はかなり有効です。

6. 使 い 方

アンテナとアースの線を自作のペットボトルラジオに接続し、イヤホンを耳につけると、もう何かが聞こえているはずですが、音声は聞き取れない場合は、同調（チューニング）をとります。そのためには、ペットボトルのキャップを持って可変コンデンサの電極②を上下左右に動かし、電極①との重なり面積を変えます。そうするとどこかよく聞こえる放送局が見つかるはずですが、少なくとも2局以上の放送局が受かると思います。私の勤めている富山県立大学工学部の研究室（4階）ではNHK富山第一放送（645 kHz）と北日本放送（735 kHz）がきれいに聞こえます。

7. ま と め

以上の実験から、音声を電波に乗せて送信する仕組みや、電波から音声を取り出す仕組みが理解できたことと思います。それでは復習を兼ねて以下の問題を考えて下さい。

- ① なぜペットボトル鉱石ラジオには電池が要らないのか
- ② どうして放送局を選ぶことができるのか
- ③ アンテナはなぜ2本のエレメントから構成されるのか
- ④ ダイオードの整流特性とは何か

皆さん自身が製作されたペットボトル鉱石ラジオの実験で良い受信結果が得られた場合や、逆にうまくいかなかった場合でも、メールで岡田敏美まで御連絡頂けますと幸いです（メールアドレス okada@pu-toyama.ac.jp）。



岡田 敏美（正員）

昭47金沢大・工・電気卒。昭49名大大学院修士課程了。同年群馬大・工・助手。昭51名大空電研助手。平2富山県立大・工・助教授、平9同教授。磁気圏観測衛星「あけぼの」、[ジオテイル]及び火星探査機「のぞみ」搭載のプロープシステムの開発を担当。工博。昭62地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞、平6とやま賞受賞。地球電磁気・地球惑星圏学会、米国地球物理学学会各会員。