

過変調による AM のサイドの広がり

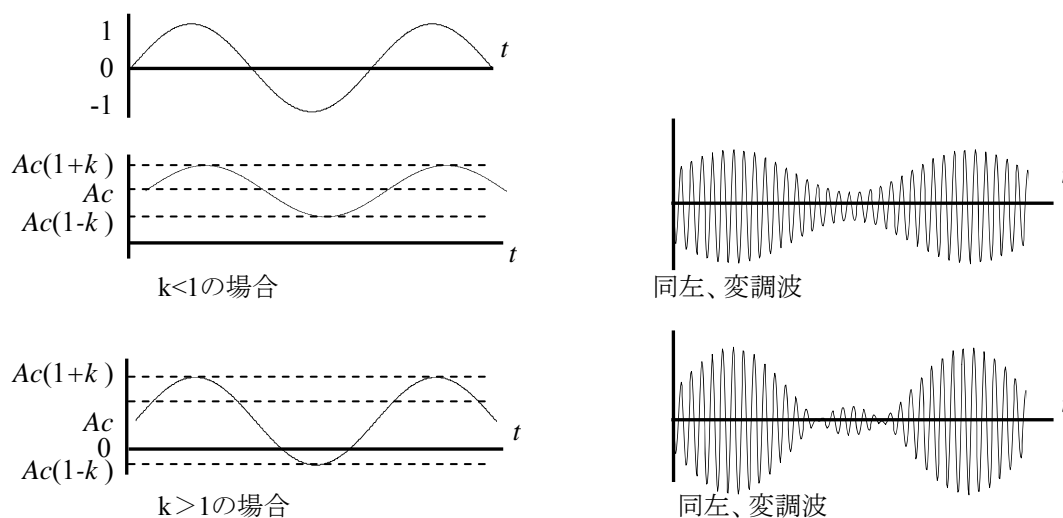
AM波は、古くから、「過変調すると占有周波数帯幅が広がる」といわれている。本稿では、その度合いを定量的に把握できないかと試みた。

終段変調した AM 波

よく知られているように、AM 波は、搬送波の振幅を、変調信号 $s(t)$ に比例して変化させることにより得られる。AM 波を $gAM(t)$ とすると、

$$gAM(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c t) + A_c \cdot k \cdot s(t) \cdot \cos(\omega_c t)$$

ここで、 k は、搬送波の振幅と変調信号の最大振幅との比であり、変調指数(変調度)と呼ばれる。AM波は、 k や変調回路方式に応じて様々な形状を取る。



上記は数式通り実現する場合の例であるが、最近のFT5000などの機械はこのように働くと聞いている。エンベロープ検波ではモガモガになるが、同期検波では問題なく復調できる。一方、終段変調のように、変調波の負の領域を扱うことができない回路方式では、 $k > 1$ では、変調波のボトムピークが0でクリップされる。

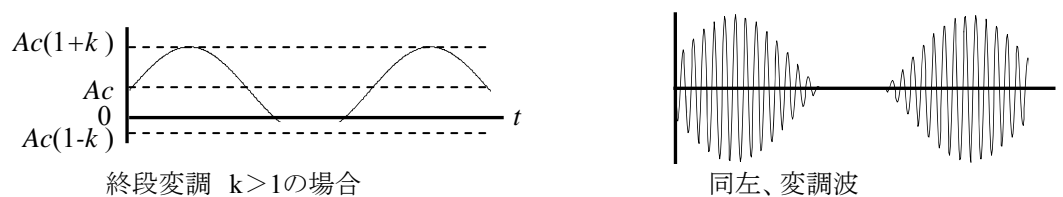


Fig.1 様々な AM変調波形(上段:定義式通り発生、下段:終段変調で発生)

この状態は、変調波のネガティブピークがクリップされた状態といえる。本稿ではこれを「過変調」と呼ぶ。過変調状態では、変調波に発生する高調波のため、占有周波数帯幅が広がる。占有周波数帯幅の拡大は、ネガティブピーククリップ以外にも、ポジティブピーククリップでも生ずる。

以下本稿では、このような、様々な原因によるネガティブ、ポジティブピークのクリップによる占有周波数帯幅の広がりについて、正弦波、のこぎり波を用いて解析し、実際の音声波との比較を試みる。まず、正弦波、のこぎり波を用いて、過変調状態のネガティブクリップによる占有周波数帯幅拡大の理解を進め、これを実際の音声波の場合に適用して検討する。

続いて、変調機の飽和も考慮して、ポジティブ側のクリップも加えた条件での検討を行う。

正弦波によるシミュレーション

変調波を単一正弦波としたとき、終段変調で過変調が発生して占有周波数帯幅が広がる様子を調べる。ここでは変調信号を 200Hz の正弦波とし、過変調で変調波のネガティブ側がクリップされる様子を波形として再現し、これをフーリエ変換することで、占有周波数帯幅の広がりを確認する。

以下、変調率 100%、103%、105%、110%、115%、120%、130%、150%、180%について、変調波(上)とそれをフーリエ変換したスペクトル図(下)を示す。

スペクトル図の横軸は、200Hz の基本波に対し 6kHz まで目盛っているが、例えば基本波 600Hz で検討したい場合には、単に 6kHz を 36kHz と読み替えるだけでよい。縦軸は、キャリアに対するレベルを dB 値で示している。

またこのシミュレーションでは、0 での急峻なクリップ(ハードクリップ)に加え、終段変調回路に積極的にクリップの制御を行う回路を実装して「ソフトクリップ」した場合についてもあわせて検討した。ここでは、変調率は 130%、140%、150%について、ハードクリップとソフトクリップの両方の結果を示した。

Fig.2 変調率 100%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)

変調波に高調波は発生していない。

キャリアに対し 200Hz の成分は-6dB 落ち。

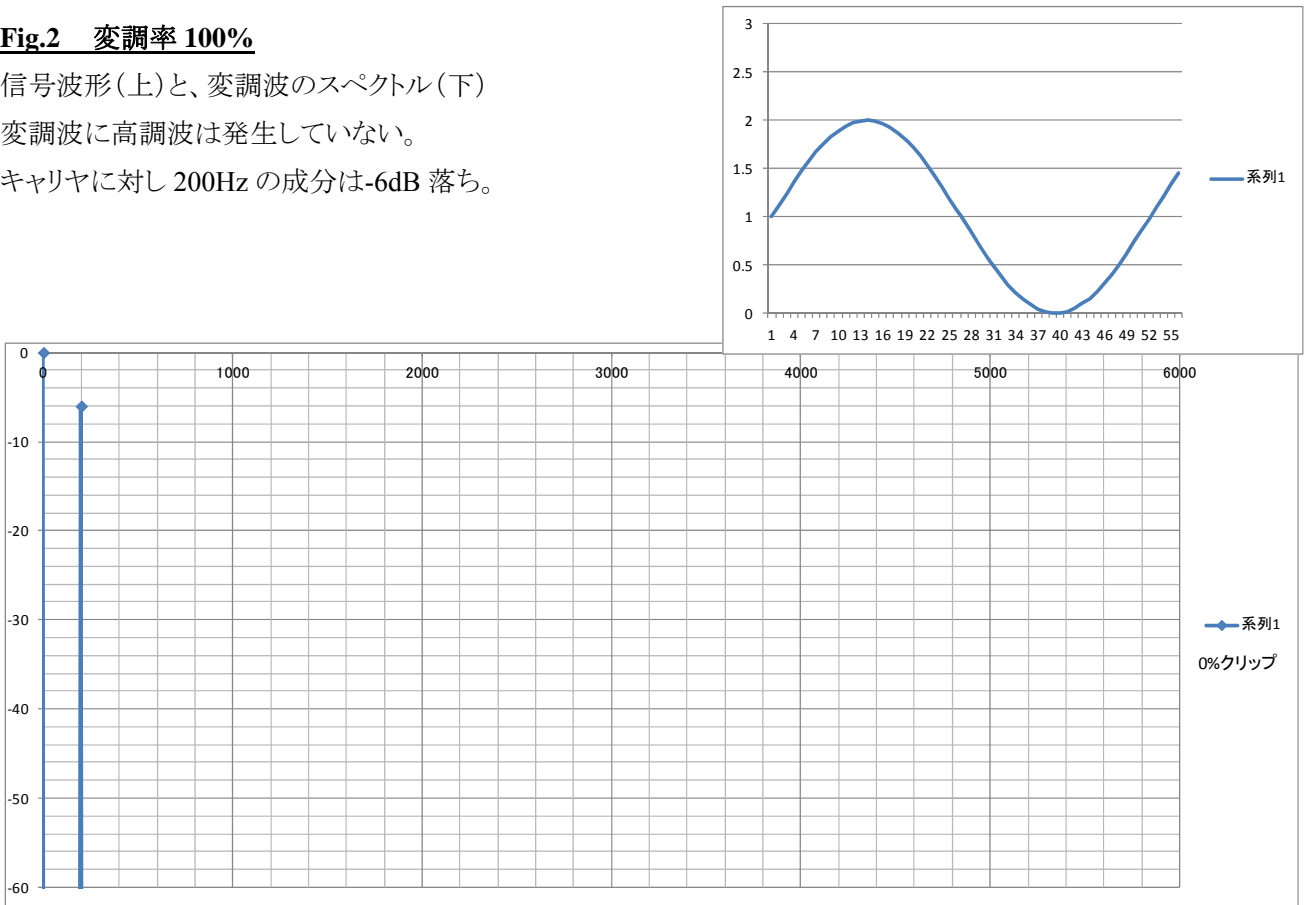


Fig.3 変調率 103%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)
クリップにより、-56dB 程度の高調波が発生

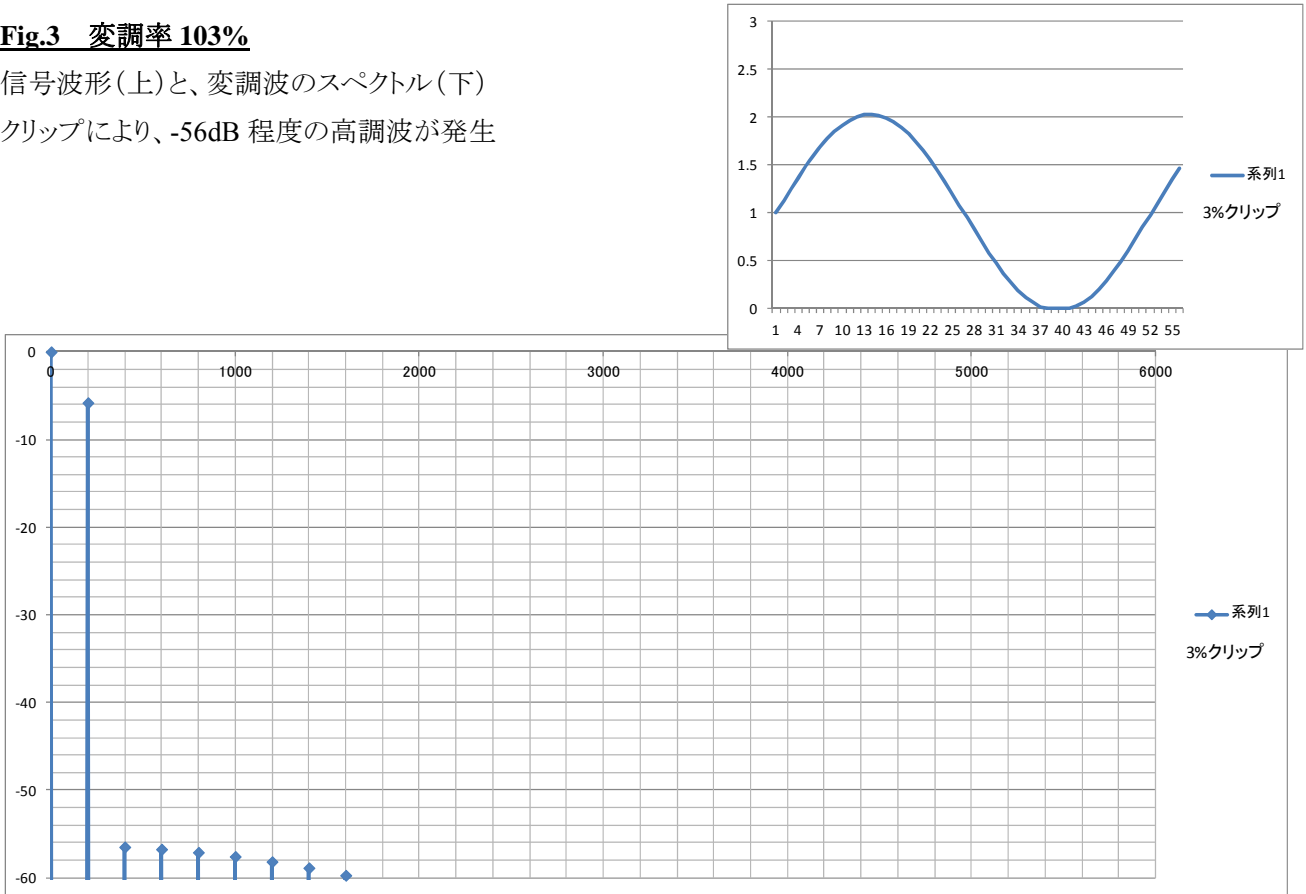


Fig.4 変調率 105%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)
高調波が-50dB 程度まで増加

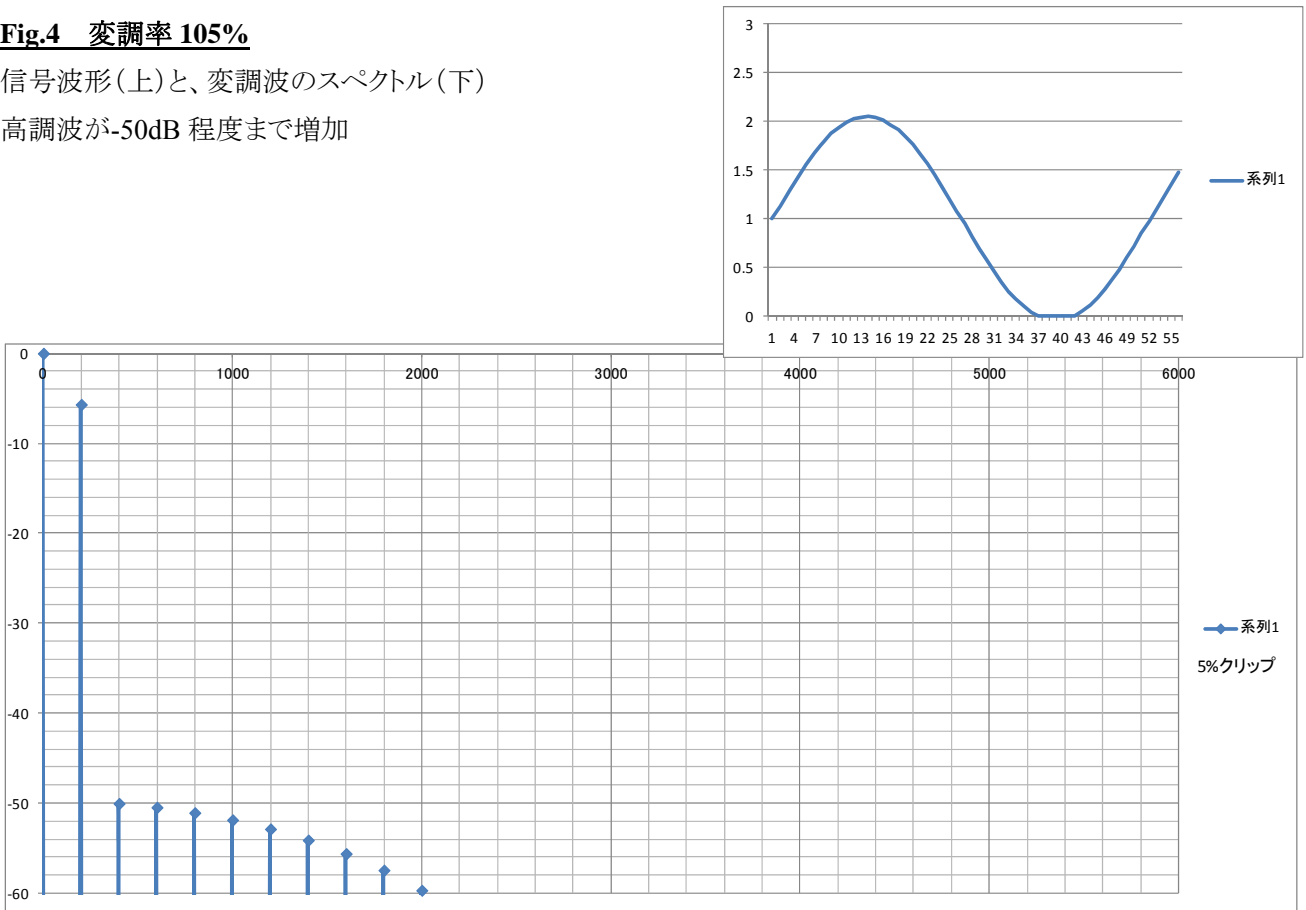


Fig.5 変調率 110%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)

第2 高調波 -42dB 程度

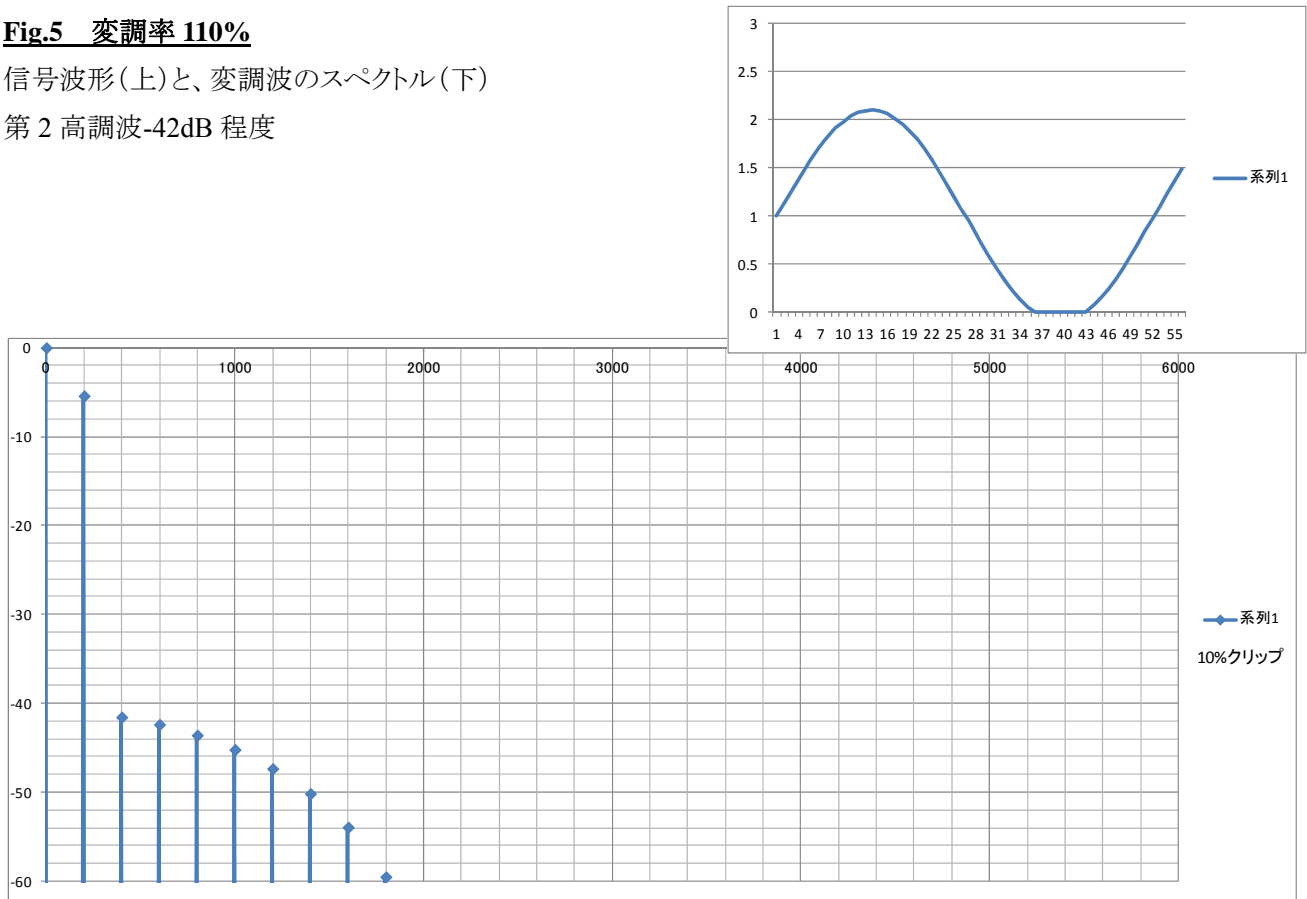


Fig.6 変調率 115%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)

第2 高調波が-37dB 程度。

高調波のヌル周波数が次第に低下し、一方、2kHz 以上に新しい跳ね返りが出現。

これは、周期パルスをフーリエ展開したときの特有の「形」

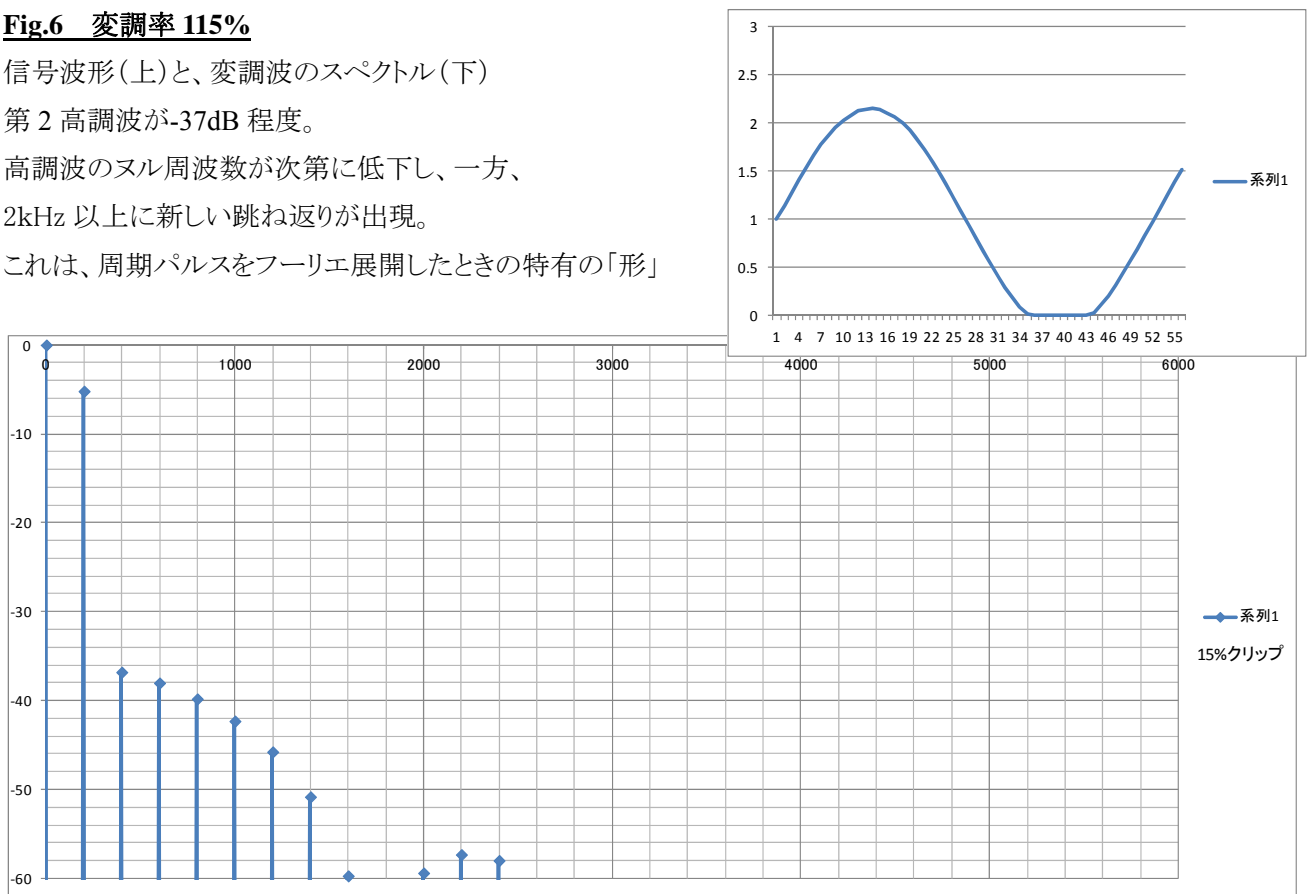


Fig.7 変調率 120%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)

高調波は-34dB 程度まで上昇

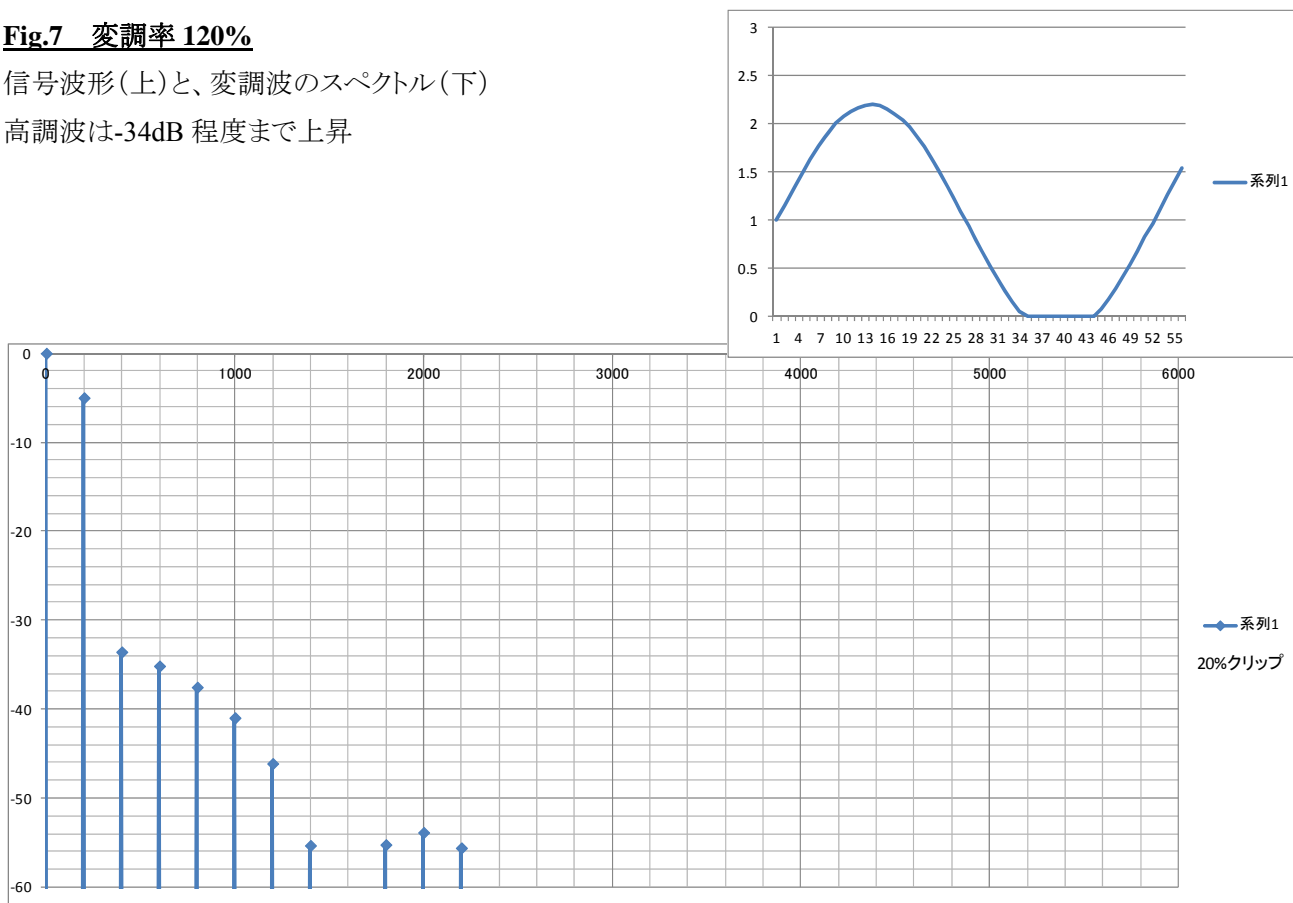
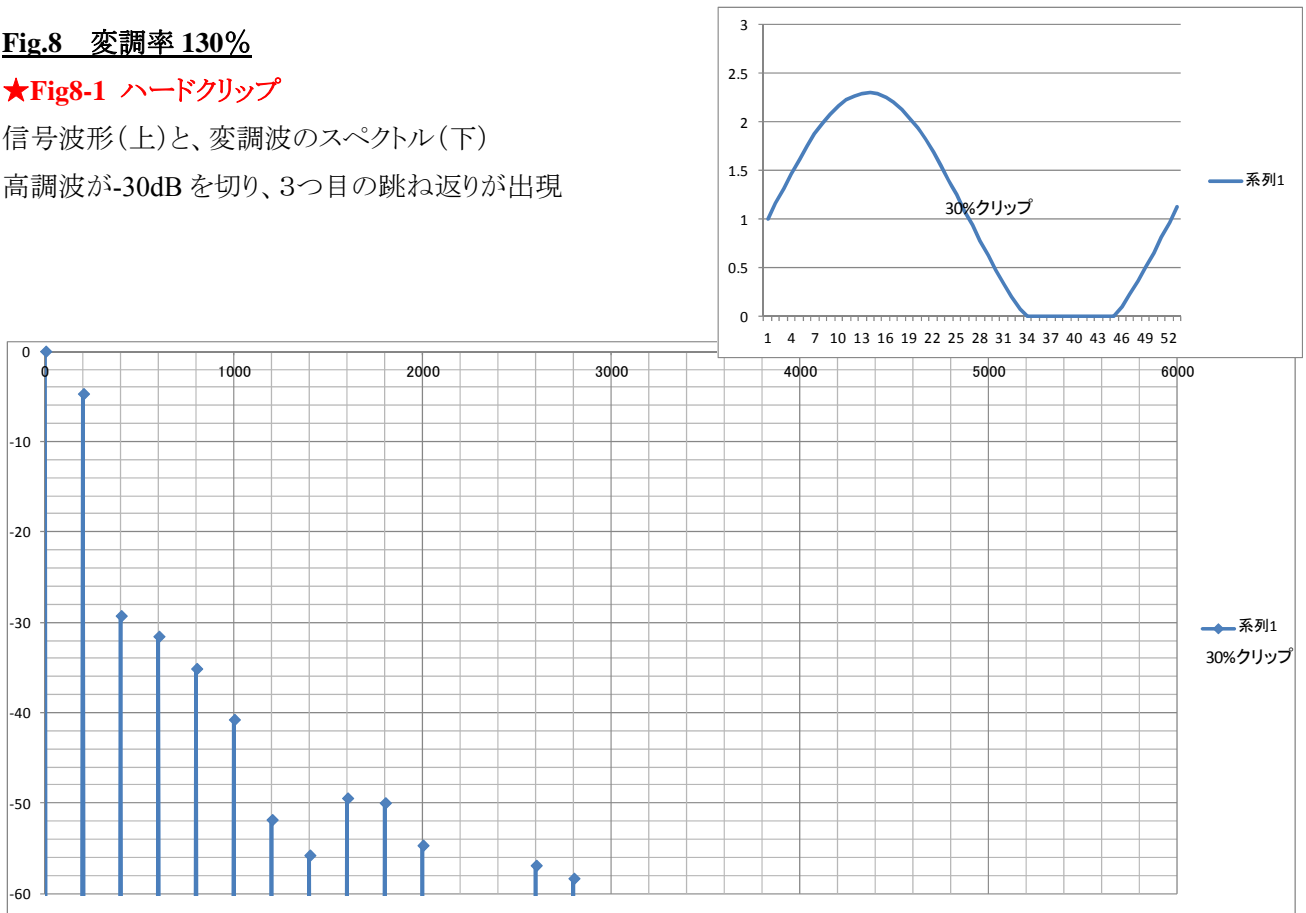


Fig.8 変調率 130%

★Fig8-1 ハードクリップ

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)
高調波が-30dB を切り、3つ目の跳ね返りが出現



★Fig.8-2 ソフトクリップ

跳ね返りの、高次の高調波が数 dB 減少

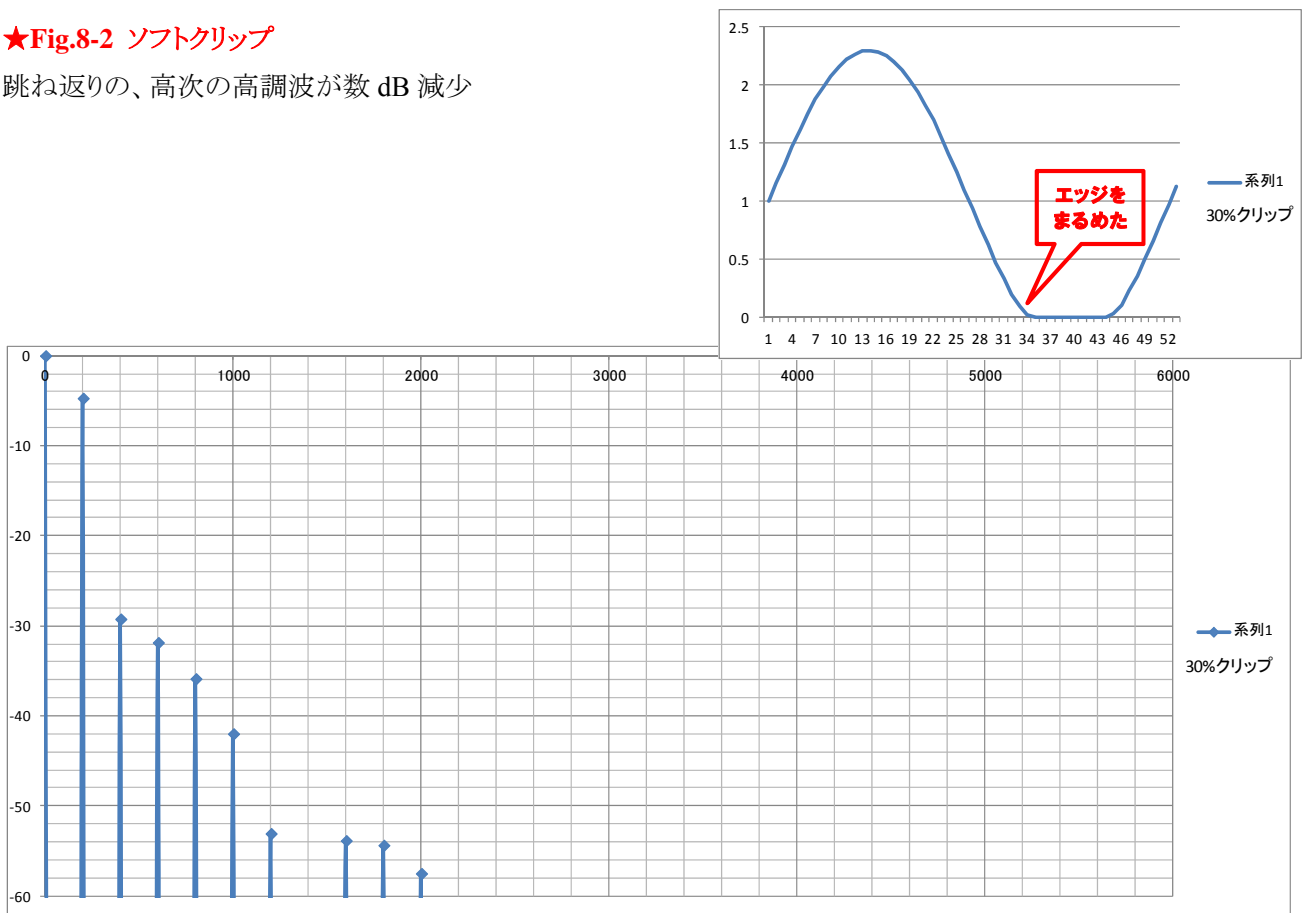
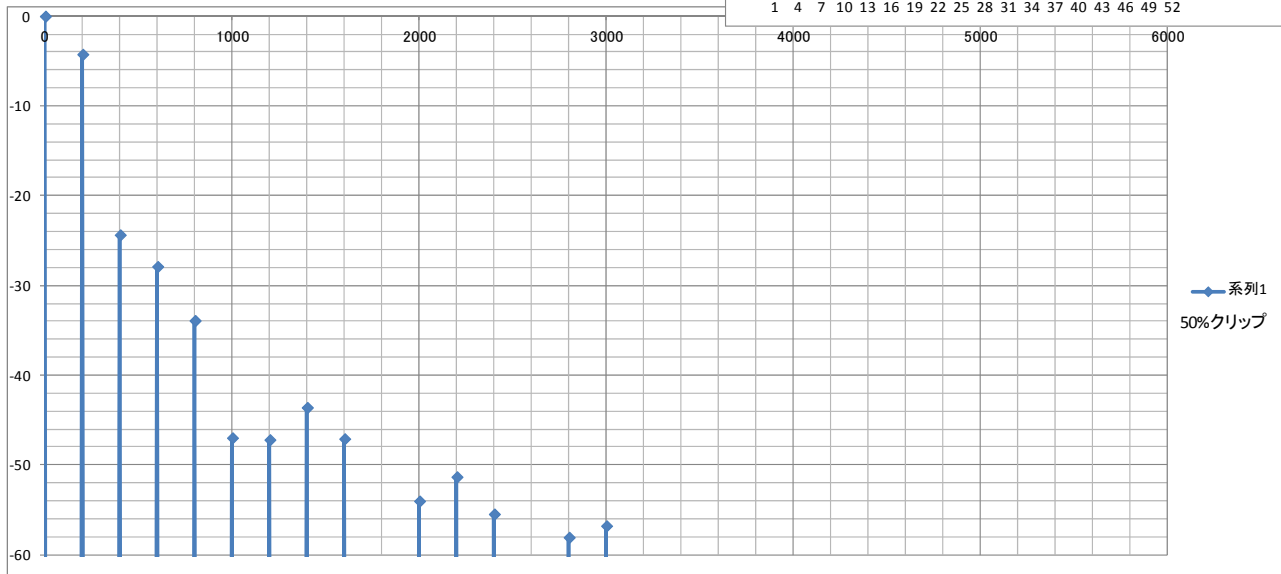
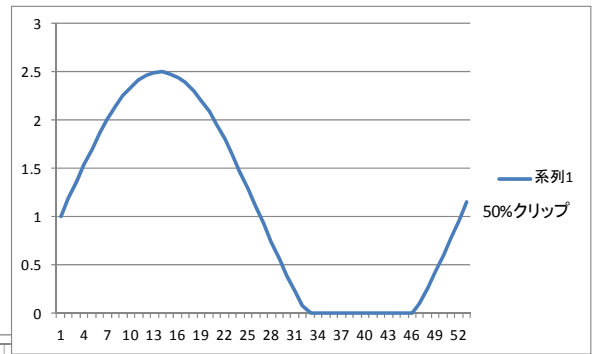


Fig.9 変調率 150%

★Fig.9-1 ハードクリップ

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)
低次の高調波は増加するが、ヌル点が低下する影響で
跳ね返り以降の高次高調波のレベルは比較的低い。



★Fig. 9-2 ソフトクリップ

10次以降の跳ね返り部分の高次高調波のレベル
が 10dB 近く低下

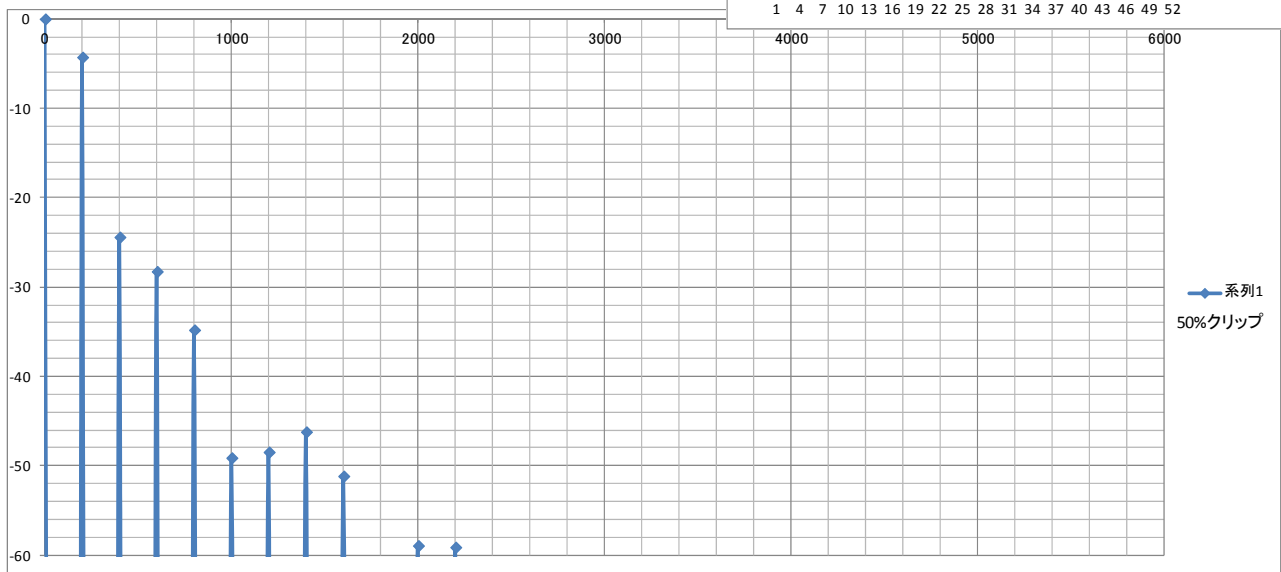
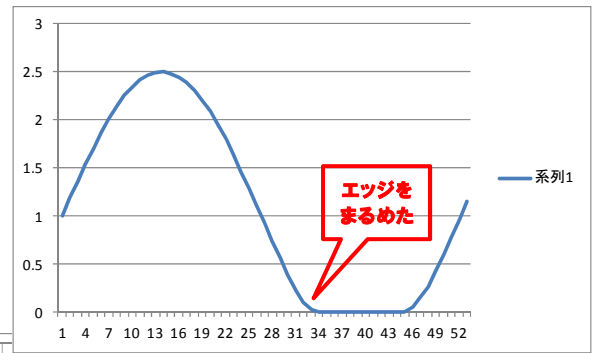
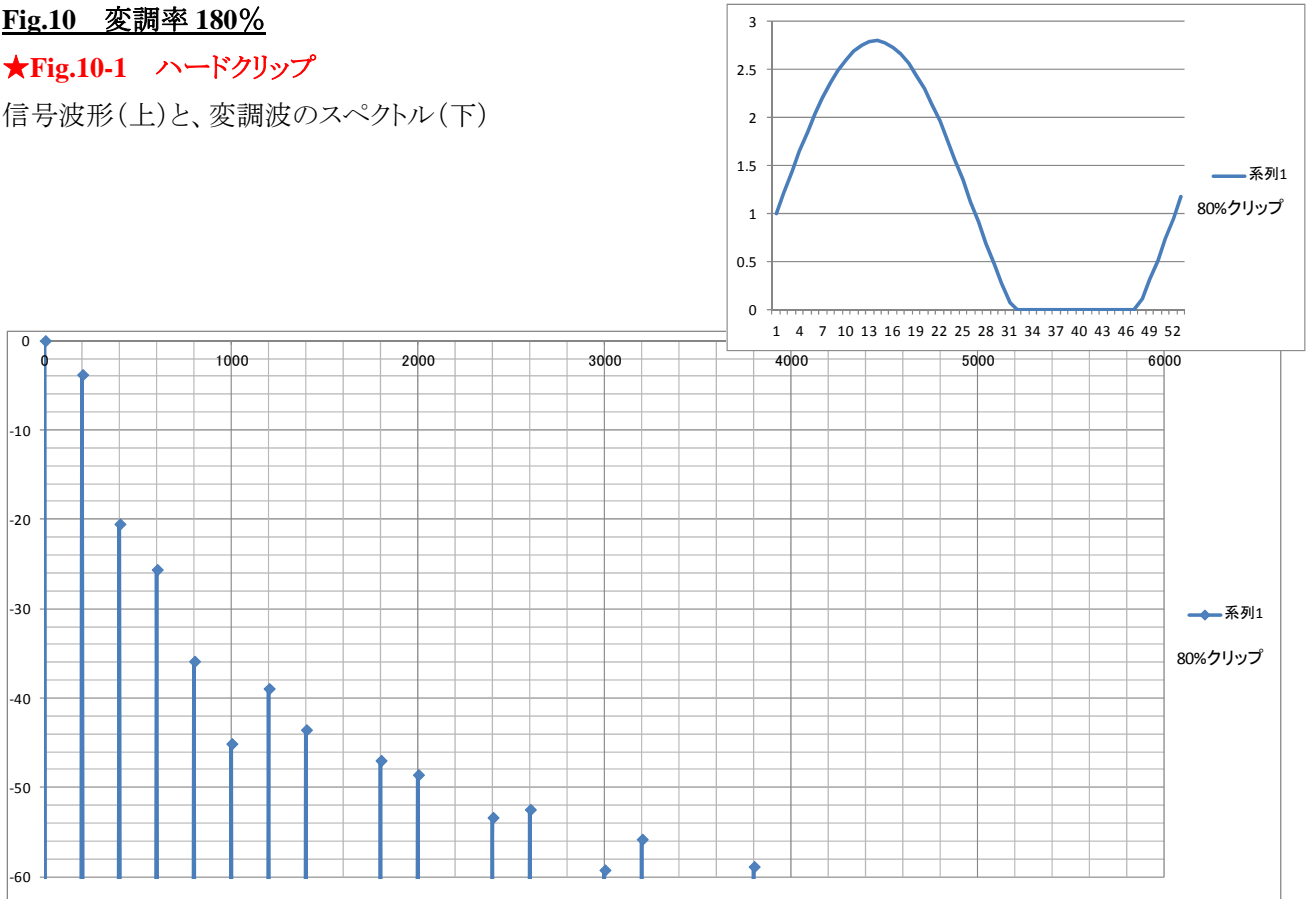


Fig.10 変調率 180%

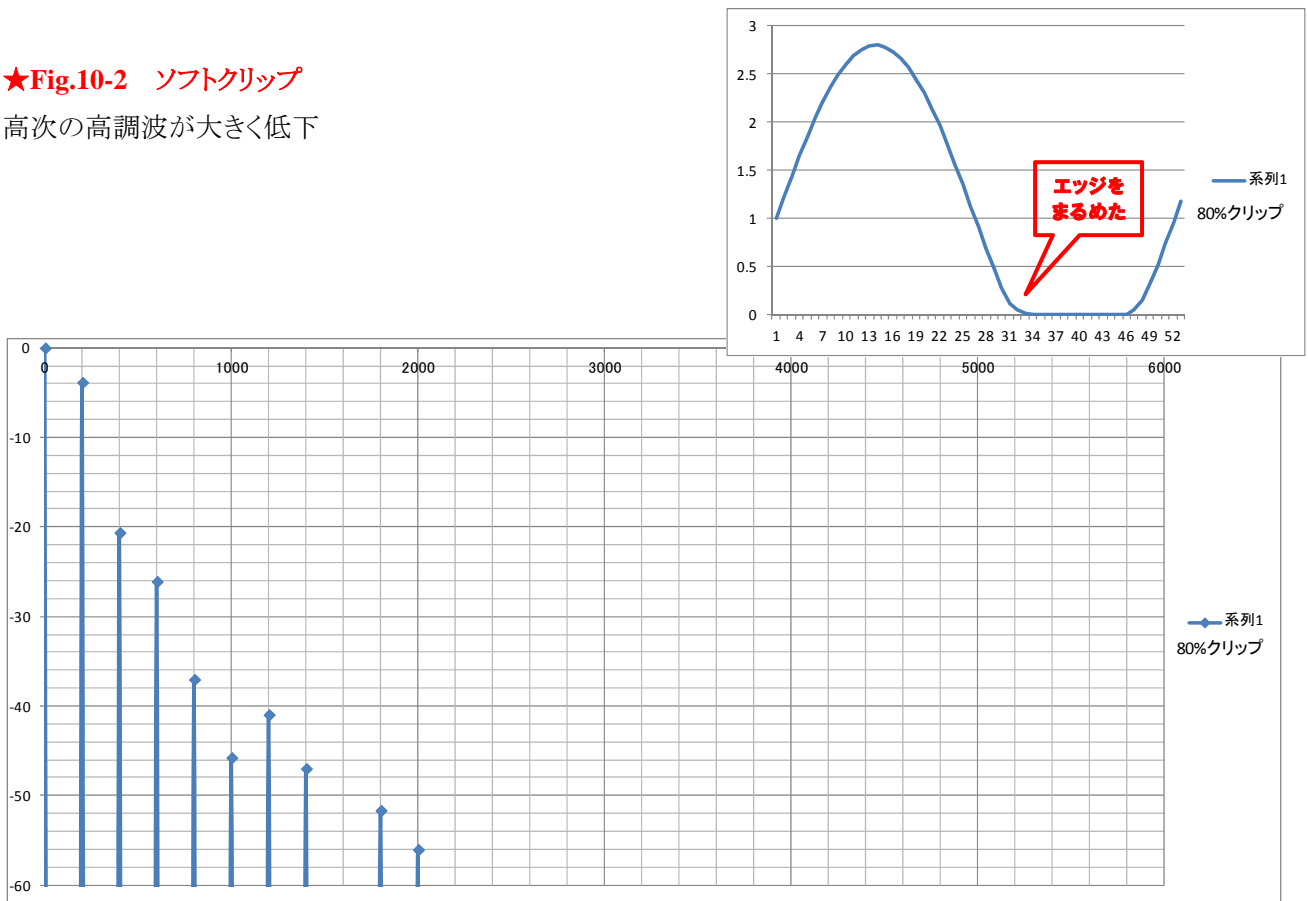
★Fig.10-1 ハードクリップ

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)



★Fig.10-2 ソフトクリップ

高次の高調波が大きく低下



幾何学波形を用いたシミュレーション

先の単一正弦波に関するシミュレーションを、複数の正弦波の重ね合わせで成り立つ波形を用いたシミュレーションに拡張する。ここでは、基本波 200Hz で第 5 次高調波までを含む(もともとの帯域が 1kHz である)のこぎり波について、正弦波の場合と同様に、**ネガティブ側**のクリップについての解析を行った。

のこぎり波は、高調波の次数に比例して振幅が減少する正弦波の重ね合わせで構成されており、単一正弦波のシミュレーションに比較し、音声波(高域でのエネルギーが少ない)に近いと思われる。

たとえば、帯域限界を 3kHz とし、第 5 高調波が帯域限界に近くなるよう 500-600Hz に基本波を選ぶと、この基本波周波数は男性の音声の基本波周波数に近く、また、第 5 高調波が DC に対して 20dB 強低下する波形であることも音声に近い。

スペクトル図の縦軸、横軸は、正弦波の場合と同様であり、上記を満足するためには、横軸 1kHz を 2.5kHz と読み替えるだけで、基本波 500Hz のシミュレーションに相当するといえる。

以下、変調率 100%、110%、120%、130%、140%、150%について、変調波(上)とそれをフーリエ変換したスペクトル図(下)を示す。

Fig.11 変調率 100%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)
1kHz 帯域である

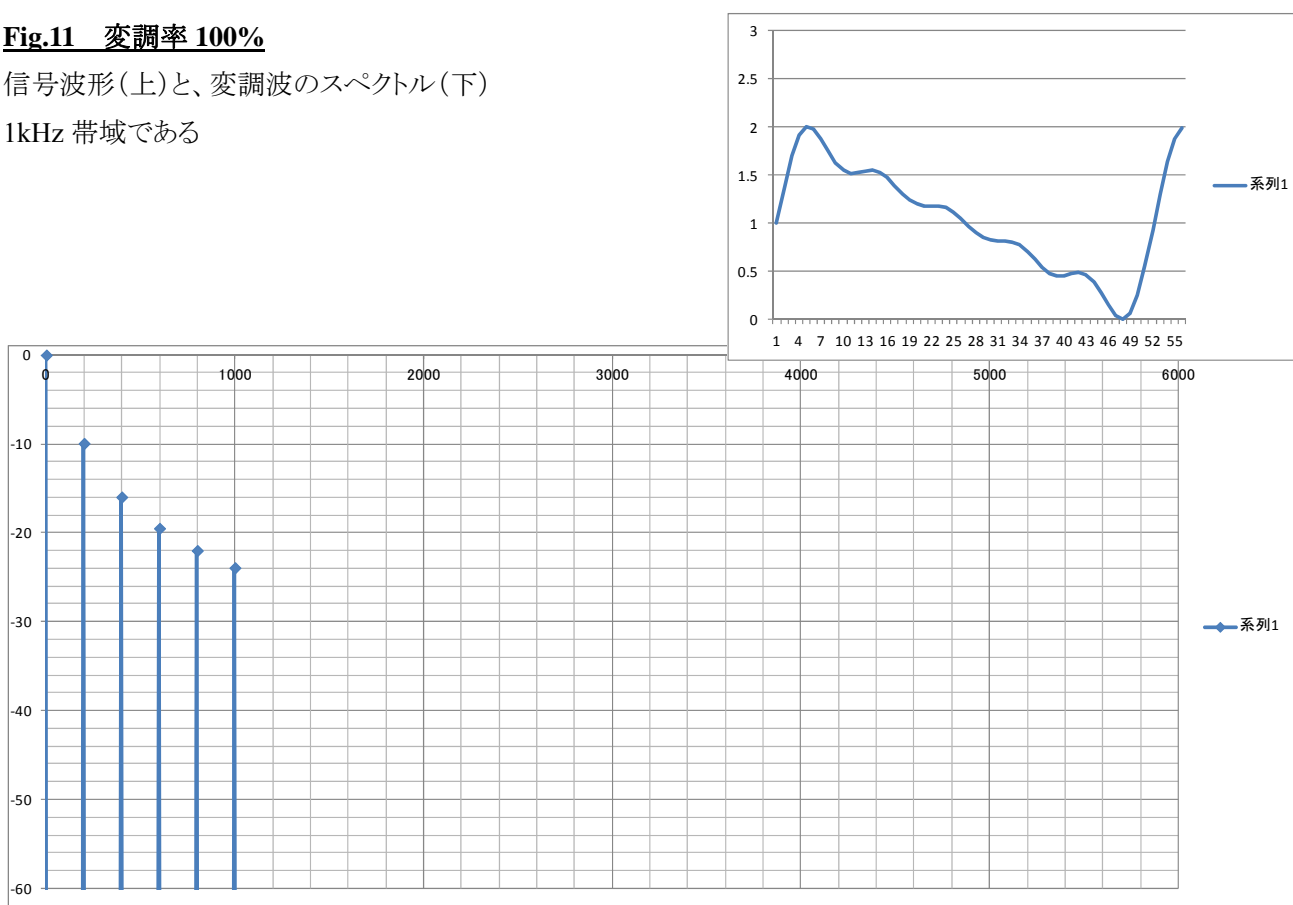


Fig.12 変調率 110%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)

-50dB 程度の高調波が発生。

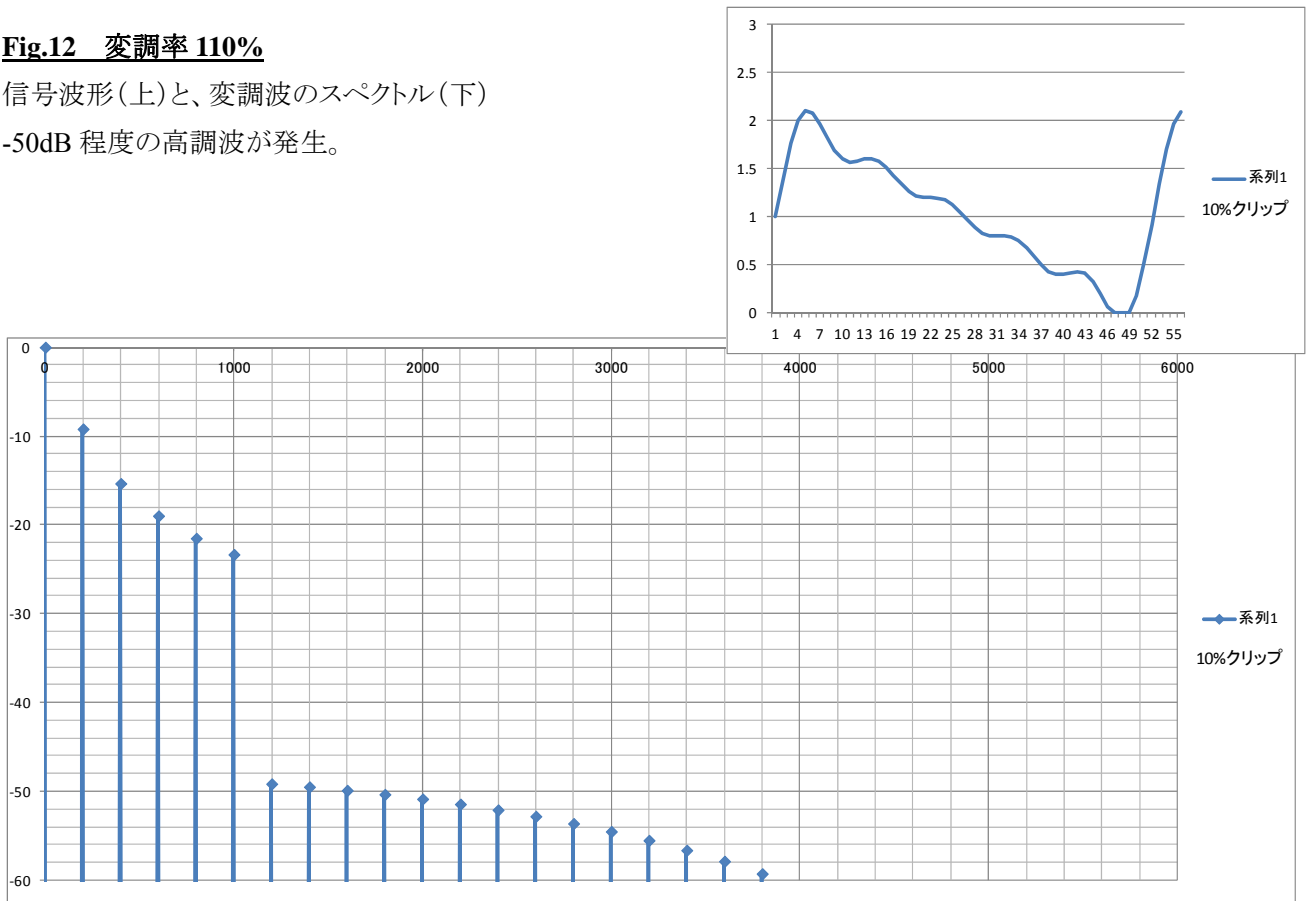


Fig. 13 変調率 120%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)

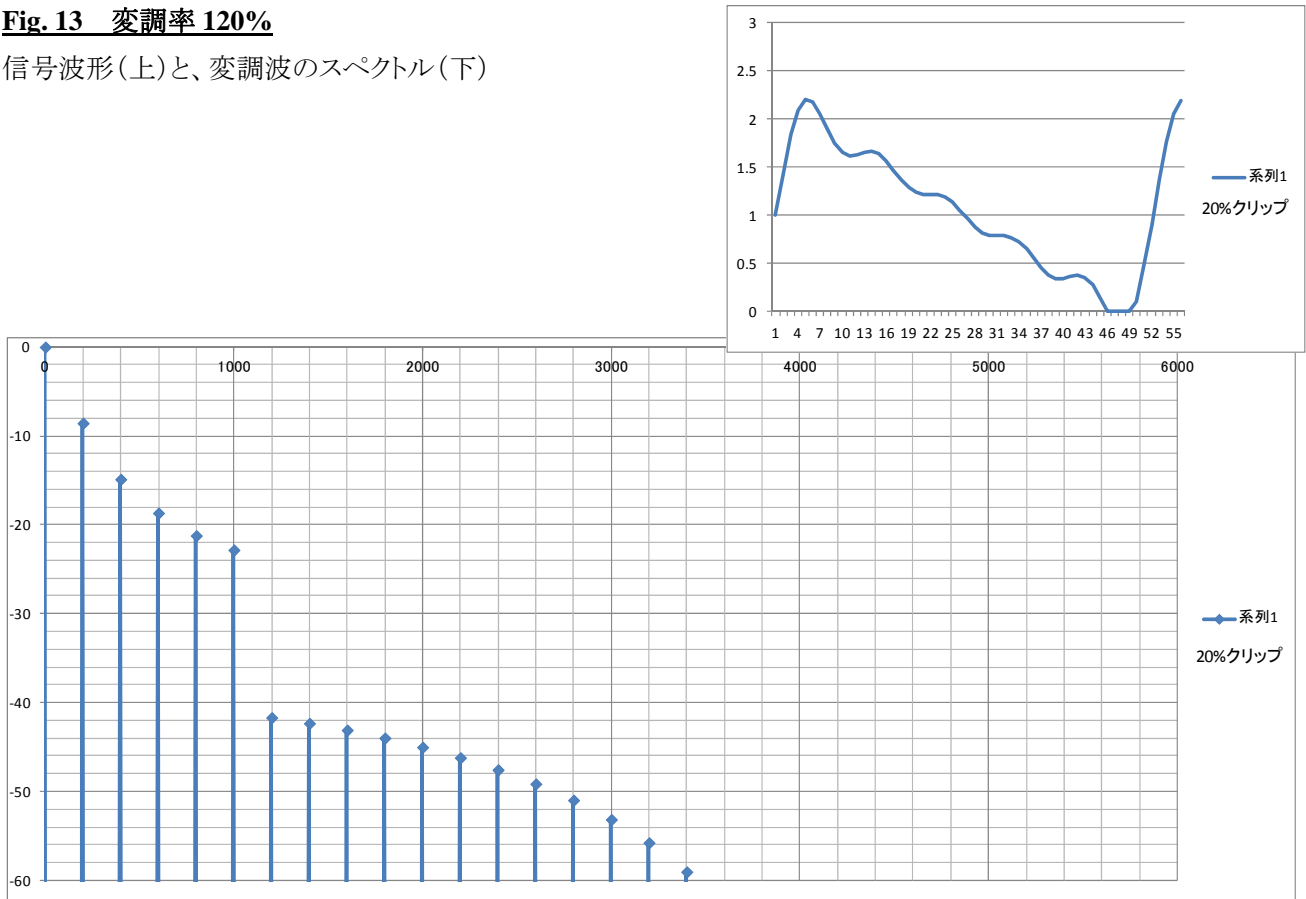


Fig. 14 変調率 130%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)

不要信号が-40dBを割った

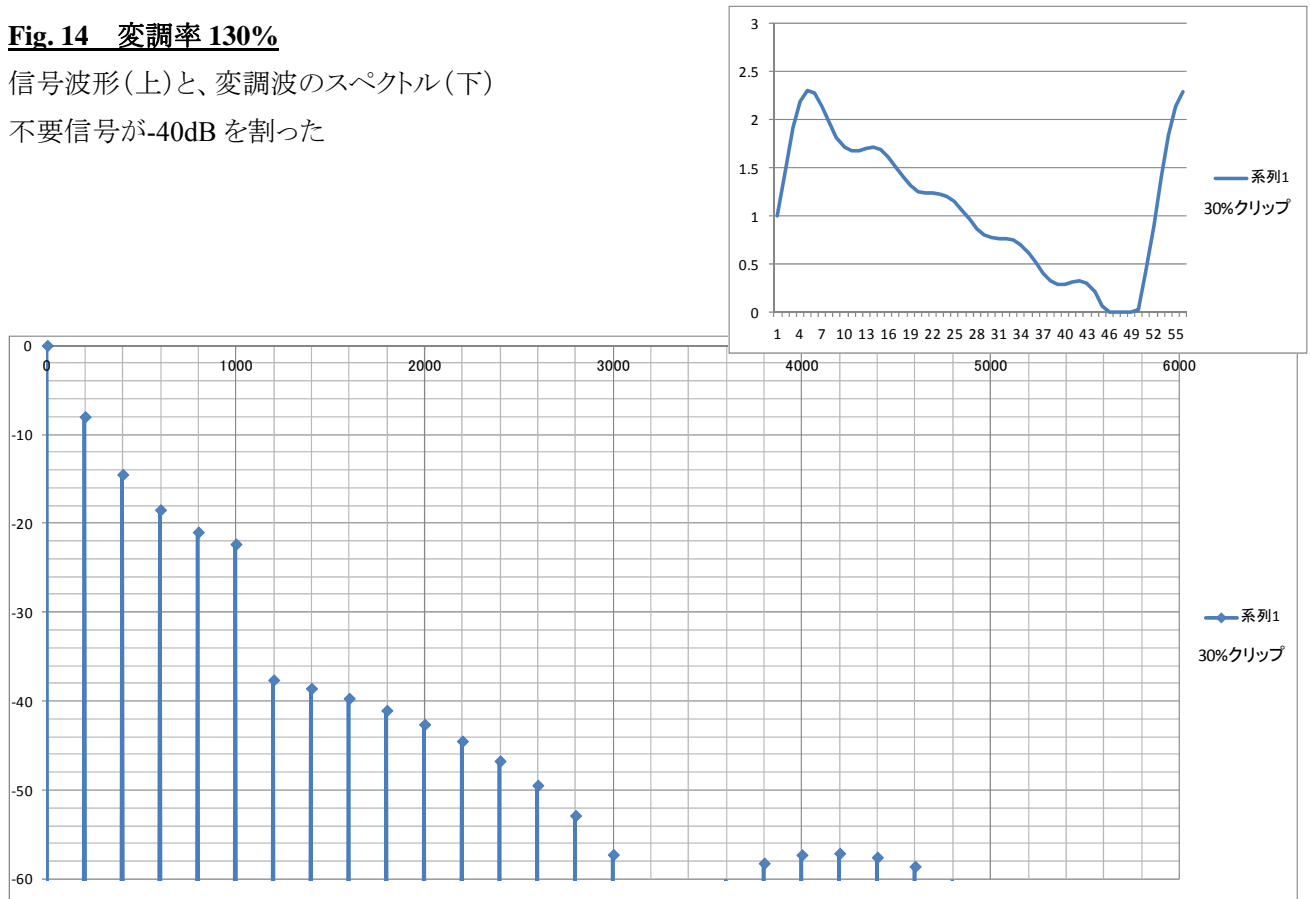


Fig.15 変調率 140%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)

不要信号が-40dBを割った

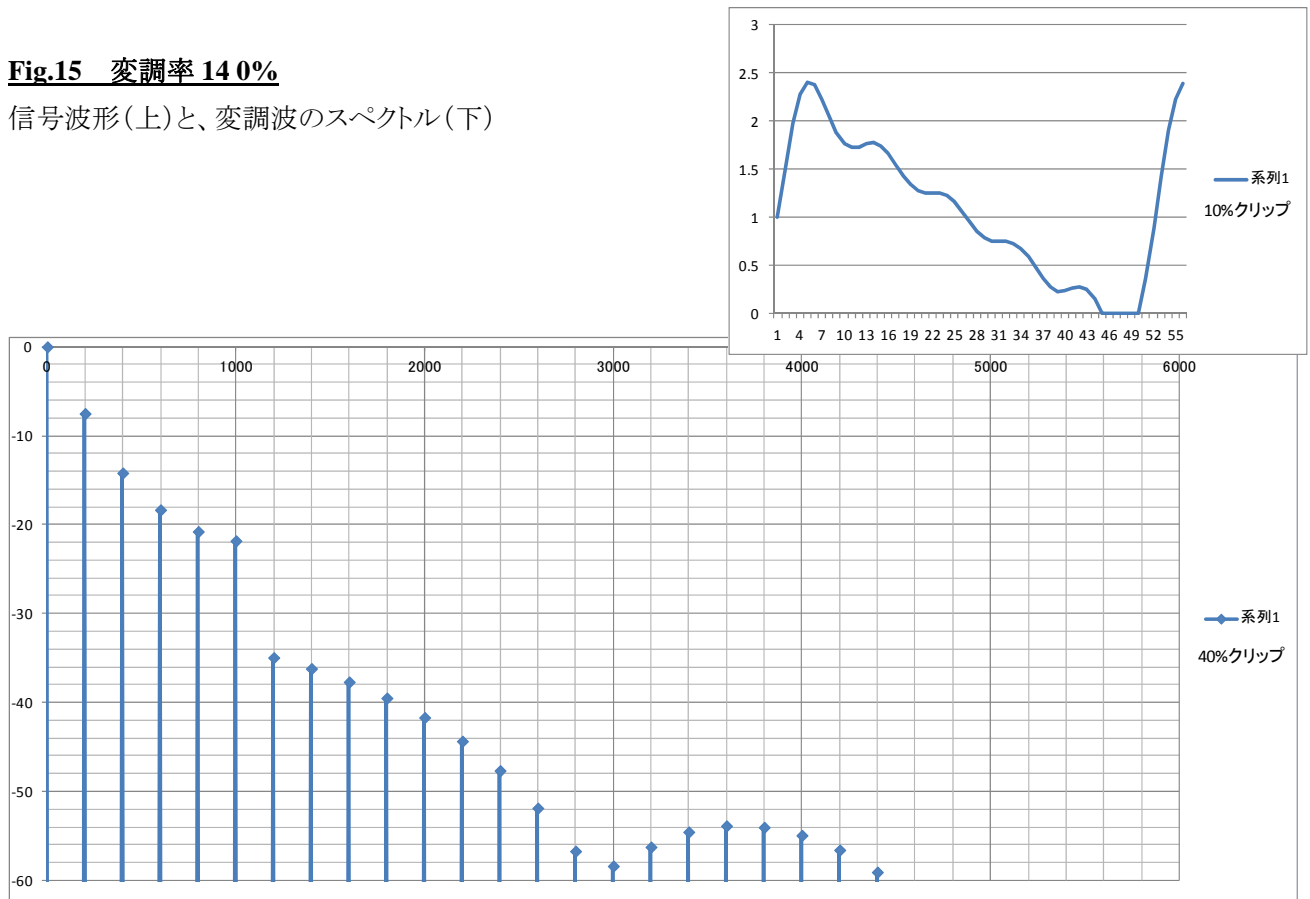
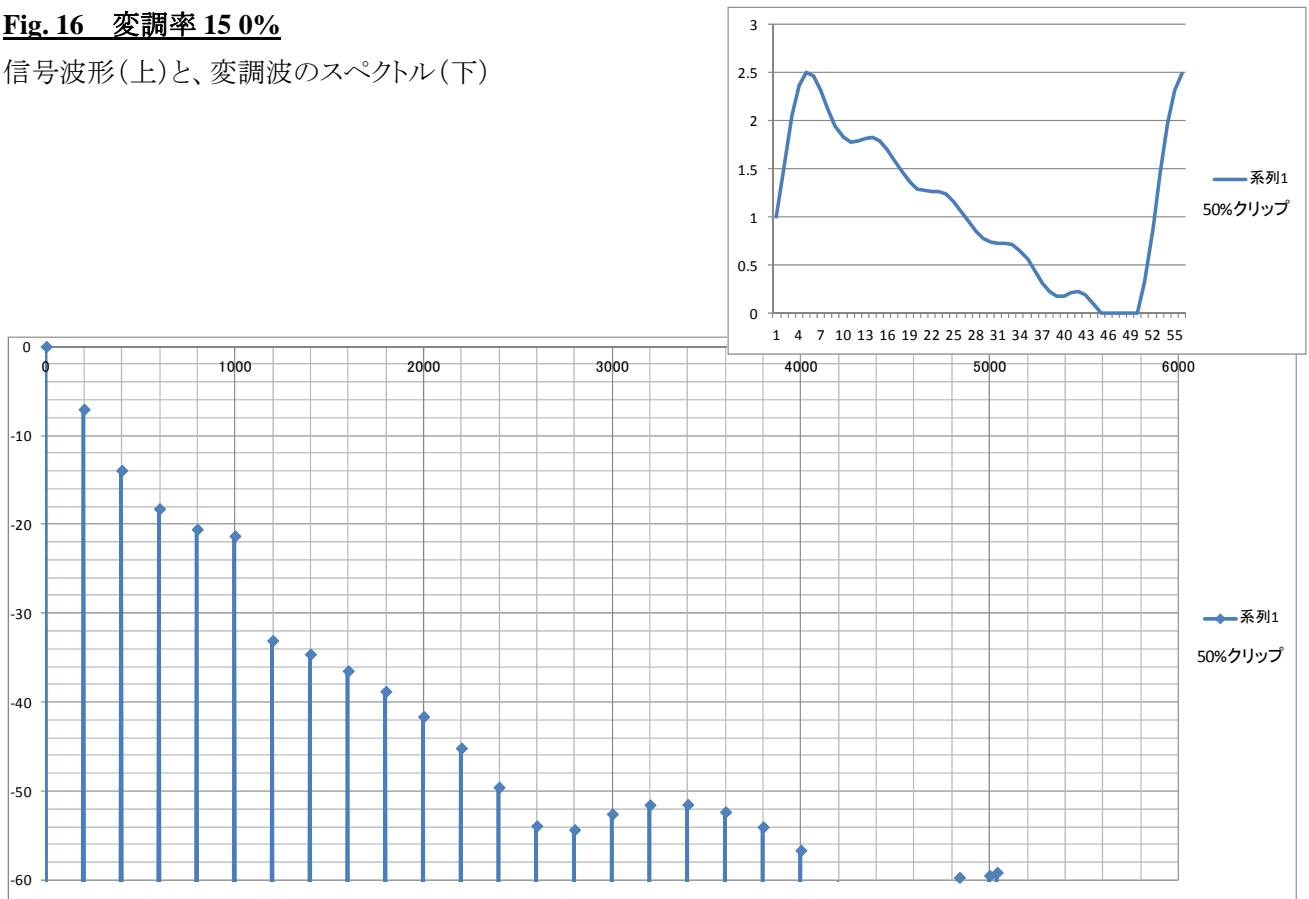


Fig. 16 変調率 15 0%

信号波形(上)と、変調波のスペクトル(下)



音声波を用いたシミュレーション

実際の音声波形を用いて、過変調の状態をシミュレーションし、結果を正弦波やのこぎり波の場合と比較する。

被験者は 50 歳台の男性 1 名。用いる音声波は、「JR3XUH」をフォネティックスコードで連呼させつつ録音した中から、ちょうど Juliet にあたる部位の約 0.7 秒分を用いた。マイクは水晶マイクを用い、録音は CD 品質とした。wav ファイルからデータへの変換は、フリーソフト”wavcsvwav”を用いた。

フーリエ変換の都合から、これを、サンプル周波数 5.51kHz に間引いて使用した(折り返しを生じない様、適切なローパス処理を併用)。サンプル数は、 $0.74 \times 5.51e3 = 4096$ とした。フーリエ変換の分解能は 1.345Hz となり、最高周波数は 2.755kHz となる。

用いた波形(縦軸は 16 ビットに量子化された数値そのもの、横軸はサンプル番号)と、そのスペクトル図を示す。

被験者の声には、概ね 6dB に至る、大きな上下非対称性があることがわかる。

またスペクトル図によると、被験者の声は、140Hz 程度に基本波があり、水晶マイクを用いると、各次数の高調波が 700Hz 程度まで強く出ることがわかる。逆に水晶マイクを用いても、1kHz 以上は大きく低下し、1.5kHz ないし 2kHz 以上は成分が無いと言ってもよい状況 である。比較的「低い声」であるといえよう。

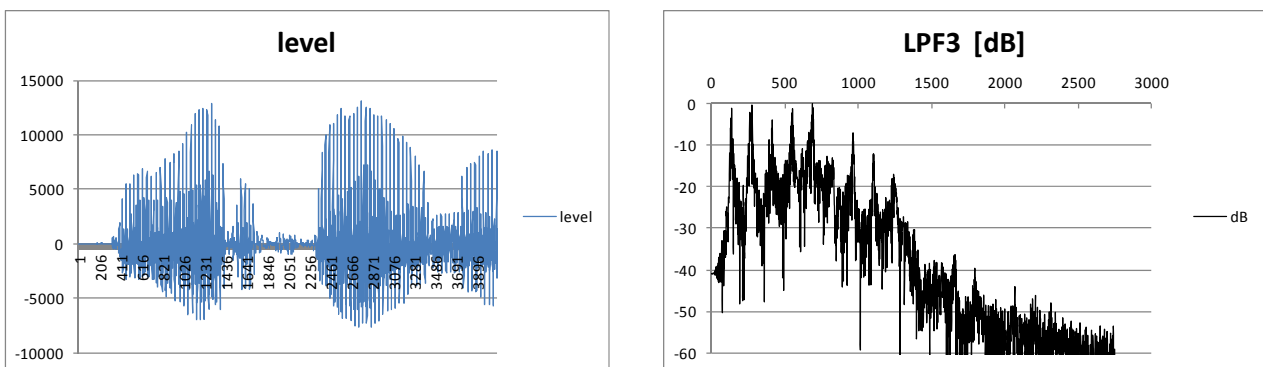


Fig. 17 検討に用いた音声波

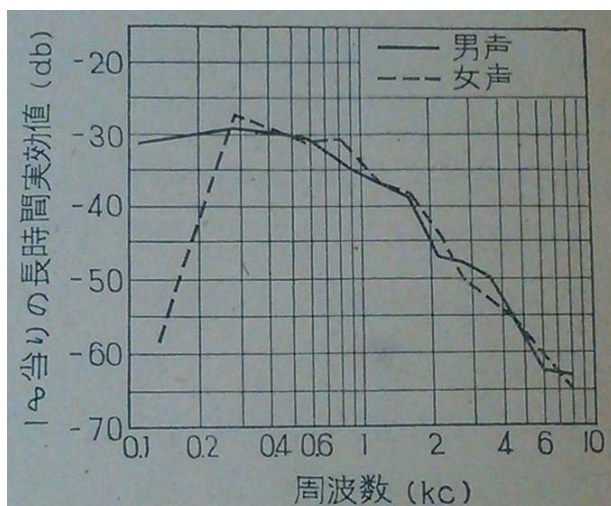


Fig 18 音声の周波数分布(参考)

中摩雅年著：変調の理論と応用 オーム社刊
昭和 35 年 10 月 5 日 第 9 版 より、
図 2・34

Fig.19 マイクゲイン 120%(+1.6dB)

ピークが 1.1 倍程度まで出ている。
スペクトル的には大きな変化はない。

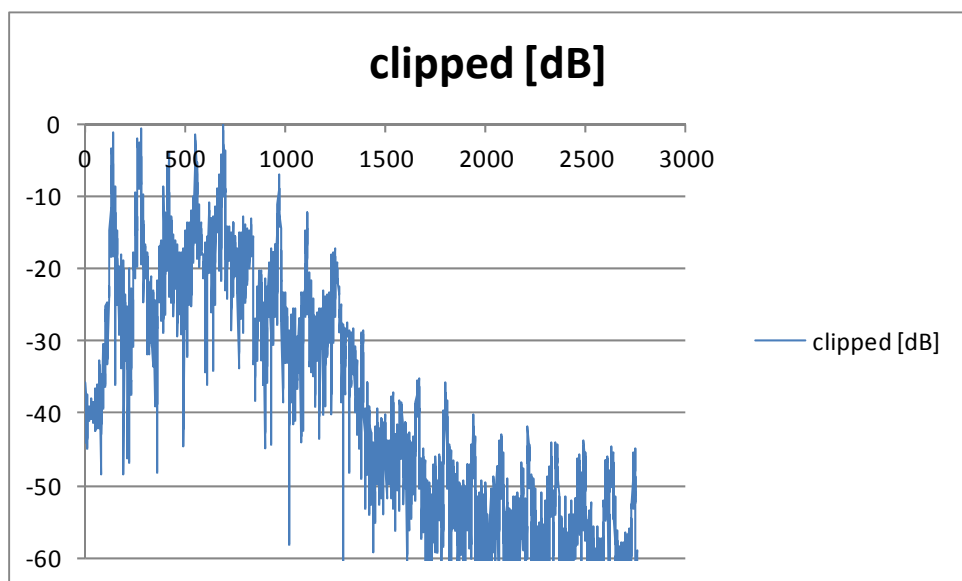
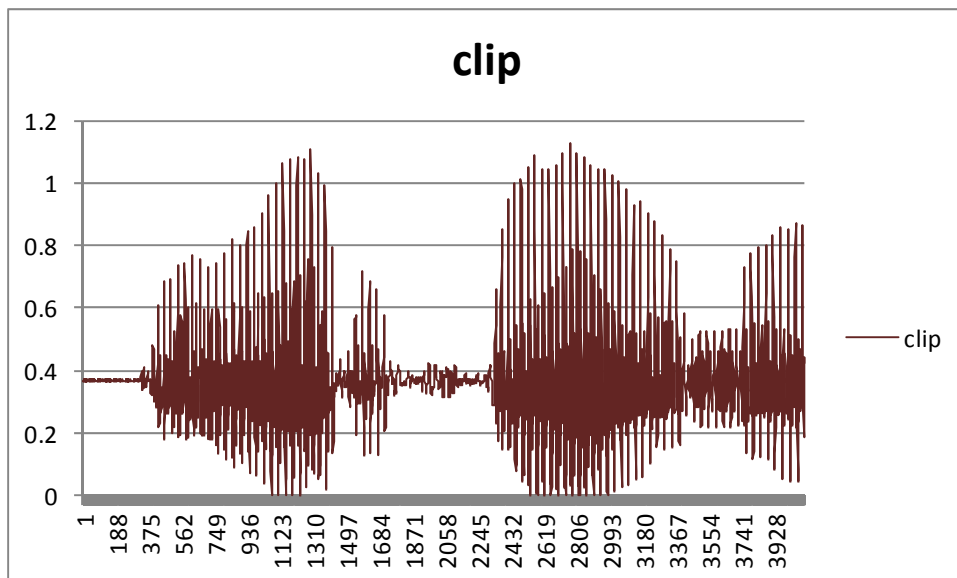


Fig. 20 マイクゲイン 140%(+2.9dB)

ピークが 1.2 倍程度まで出ている。
2kHz 以下の不要波が若干増加した。

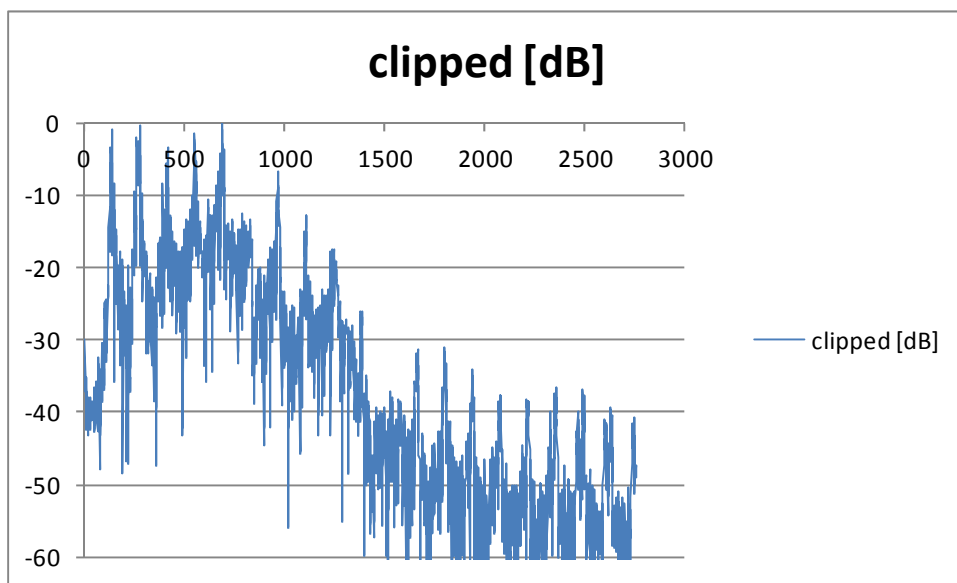
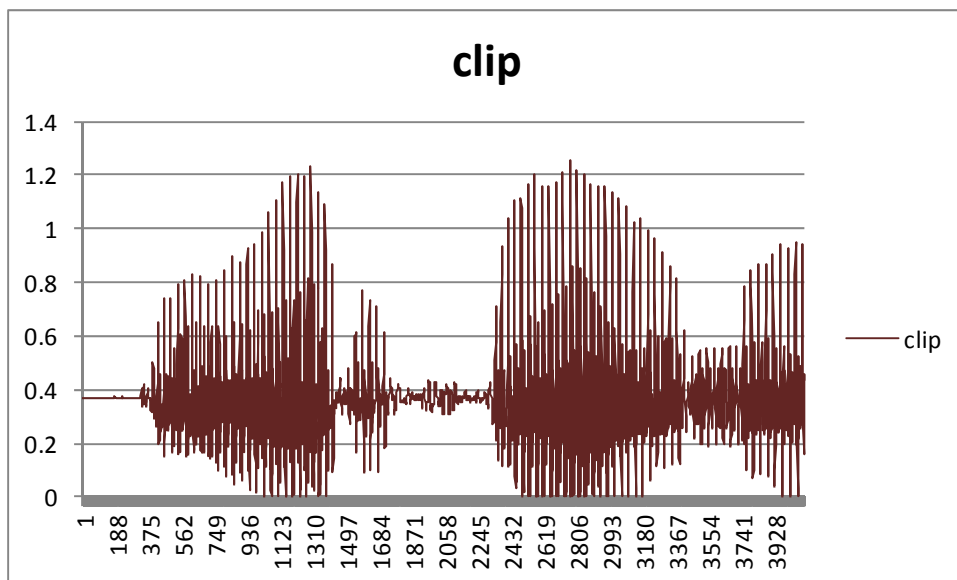
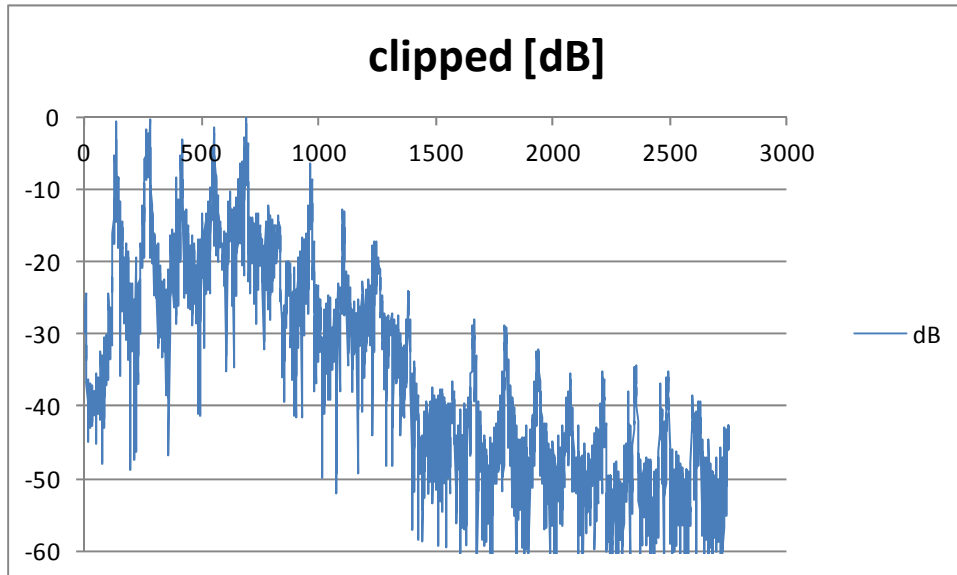
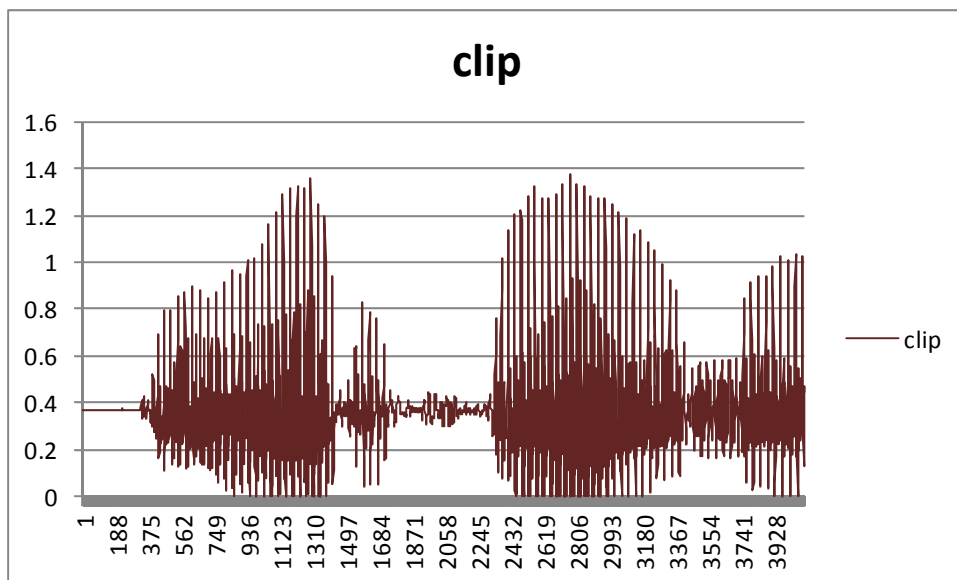


Fig.21 マイクゲイン 160%(+4.1dB)

ピークが 1.4 倍程度まで出ている。
不要波強度が増し、-30dB に近づいている



変調機出力がポジティブ側の一定値でクリップすると仮定した場合のシミュレーション

これまでのシミュレーションは、変調機の動作が理想的で歪みがないと仮定し、ネガティブ側のクリップについてのみ扱ってきた。しかし、実際には変調機自体が特定のレベルで飽和する問題を考慮する必要がある。このため、変調機出力のポジティブ側のクリップについても影響を調べた。

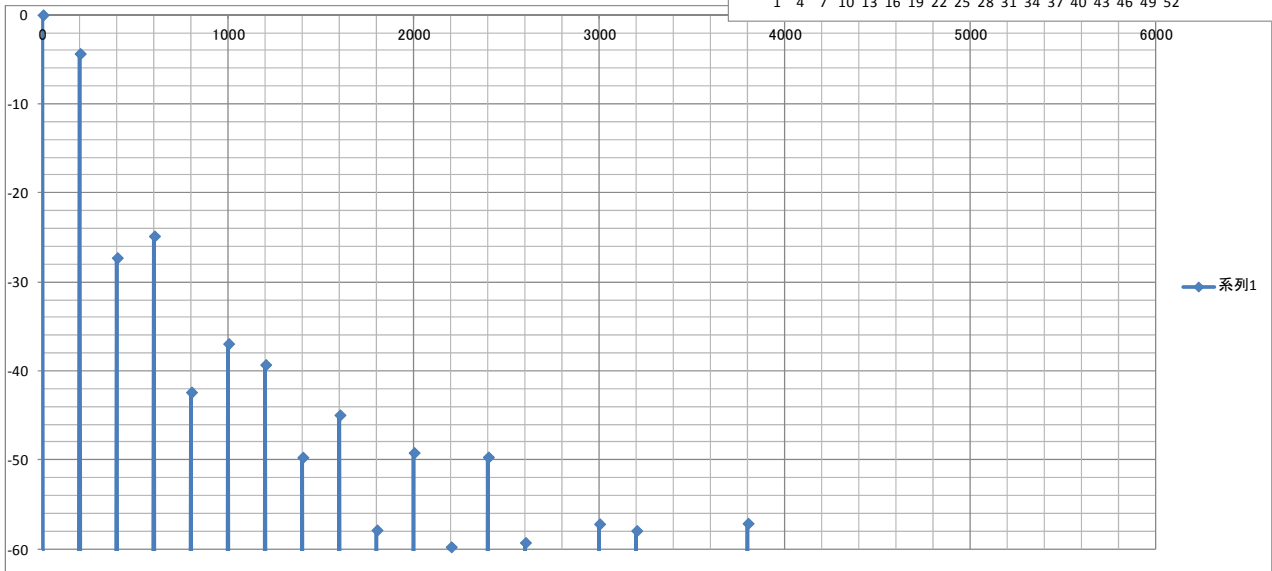
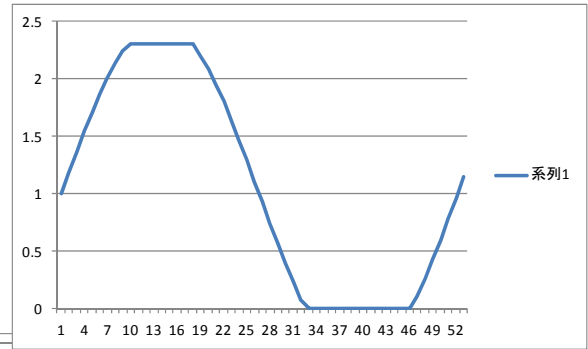
ここでは、ネガティブ側は常に 100% でクリップするとし、これに加え、変調機がポジティブ側 130% でクリップする場合について、①正弦波 150% 変調に相当する状態、②正弦波 180% 変調に相当する状態、③通常の音声でゲインを 160% としたとき の 3 種について調べた。

130% 変調まで使える変調機は、定格出力に比較すると、電力で、1.69 倍の出力が可能な変調機であるといえる。変調機としては、相当余裕のある設計であるといえよう。150% 変調や 180% 変調は、そのような変調機に過大な入力を加えた場合を想定しているが、出力が-100% から+130% までの範囲では、大きな入力に対しても正常に動作する。

Fig. 22 正弦波で、変調率 150%に相当する状態

ネガティブ側は-100%、ポジティブ側は 130%でそれぞれクリップ(ハードクリップ)すると仮定。

下の再掲 Fig9-1と比較して、占有周波数帯幅の大きな拡大はないものの、低レベルの裾野は広がっている。波形的に方形波に近づくので奇数次高調波が強い傾向あり。



再掲 Fig.9-1

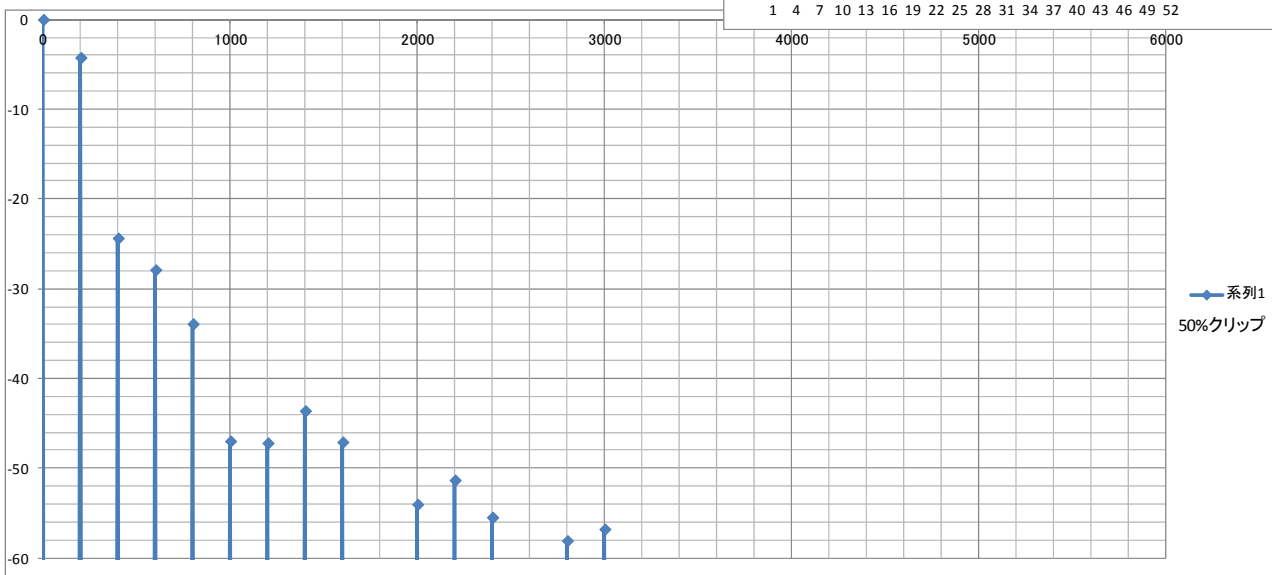
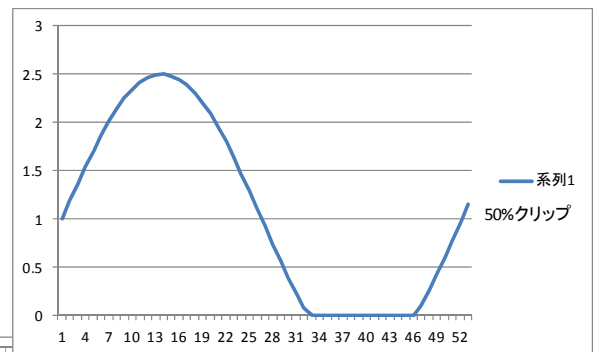
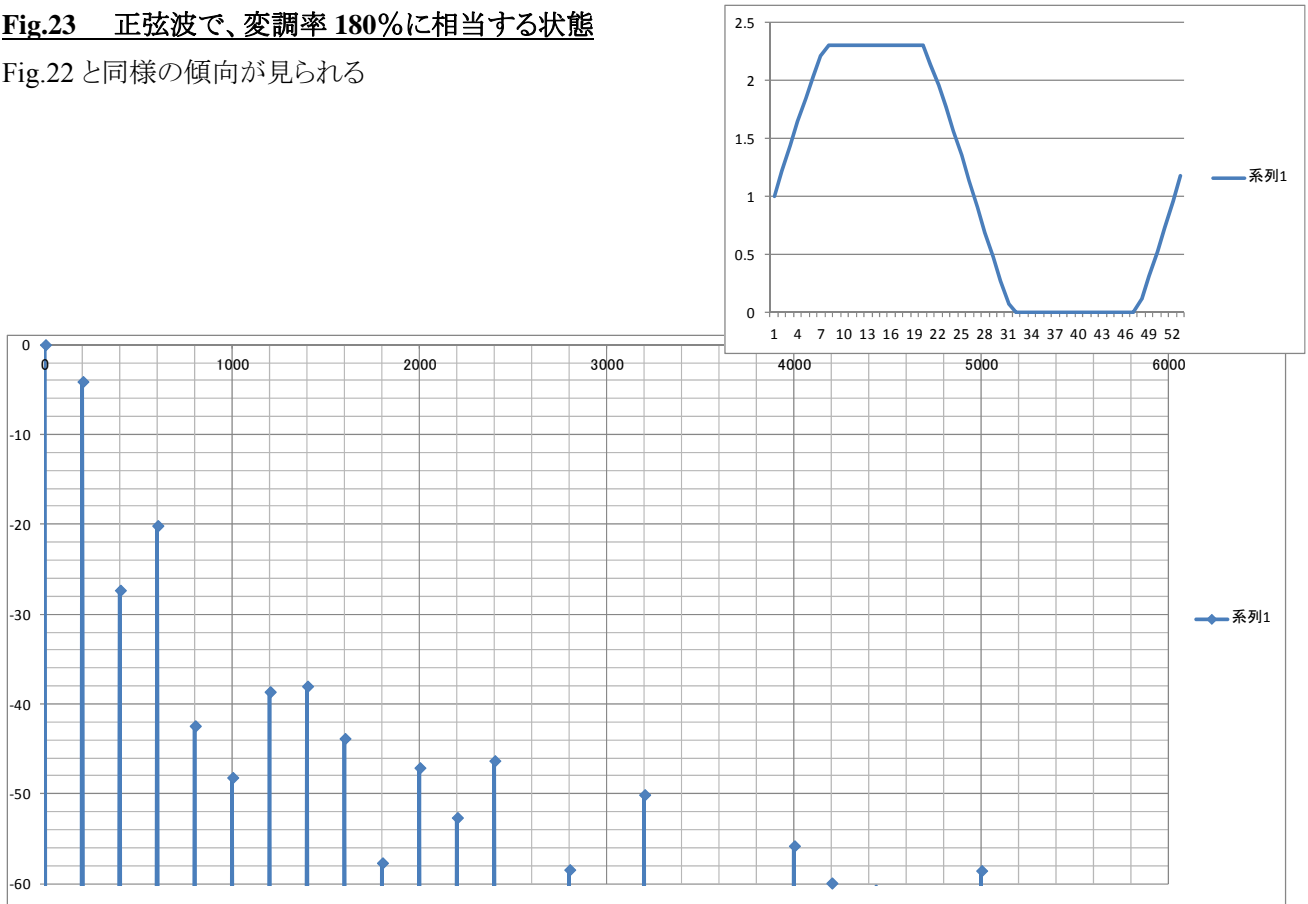


Fig.23 正弦波で、変調率 180%に相当する状態

Fig.22 と同様の傾向が見られる



再掲 Fig.10-1

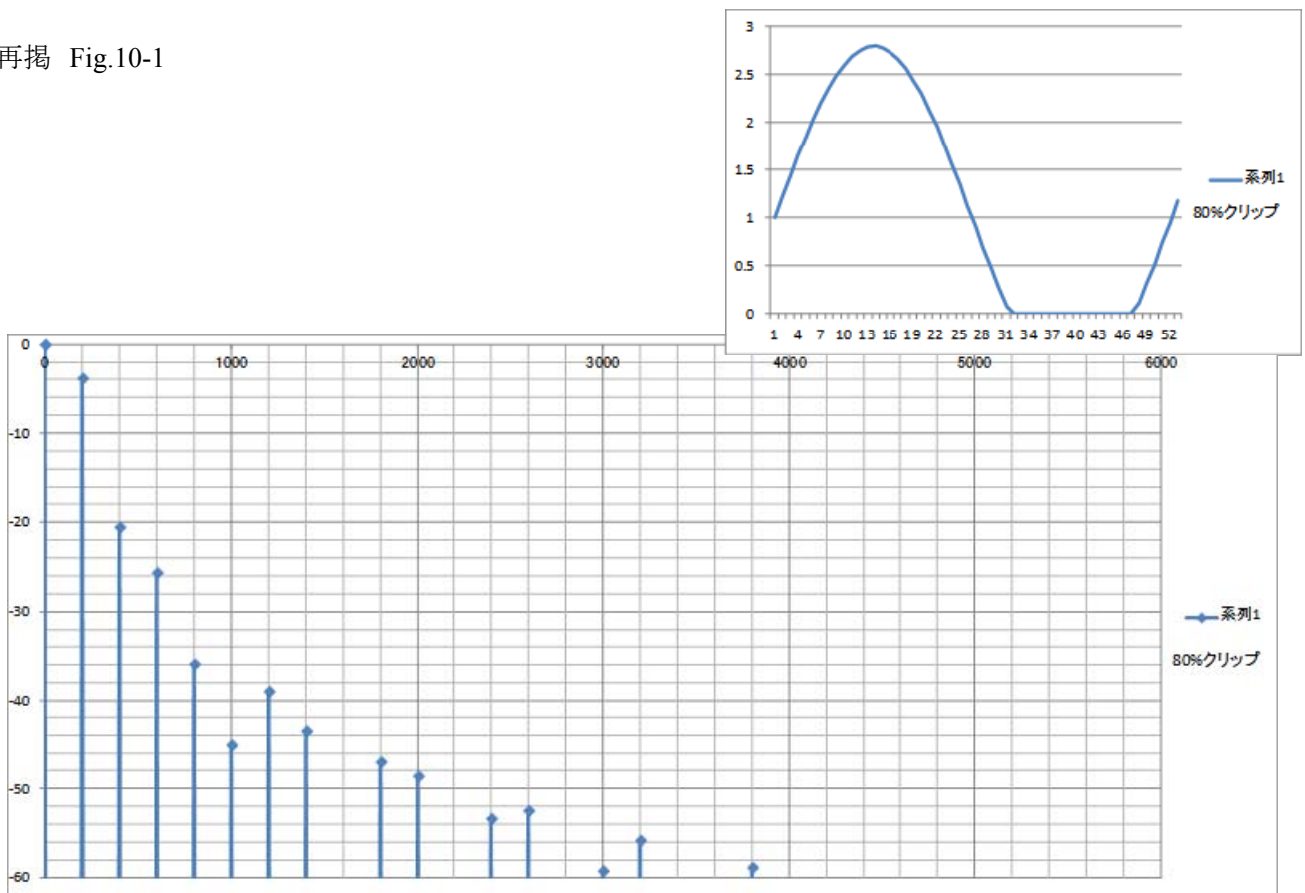
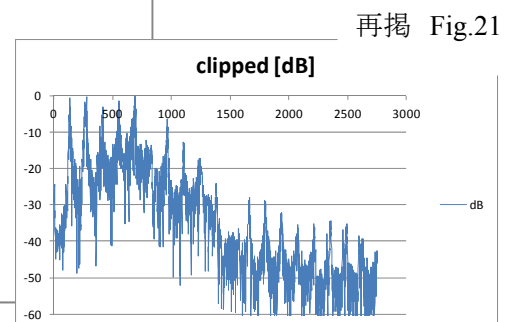
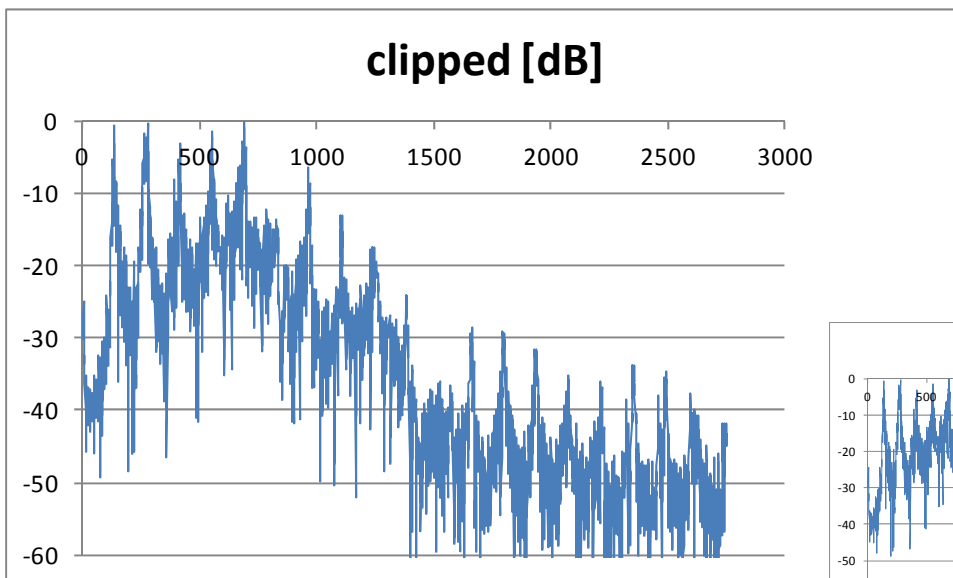
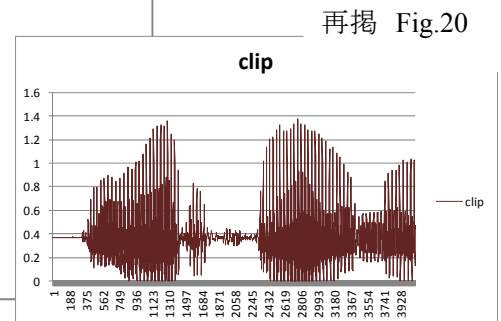
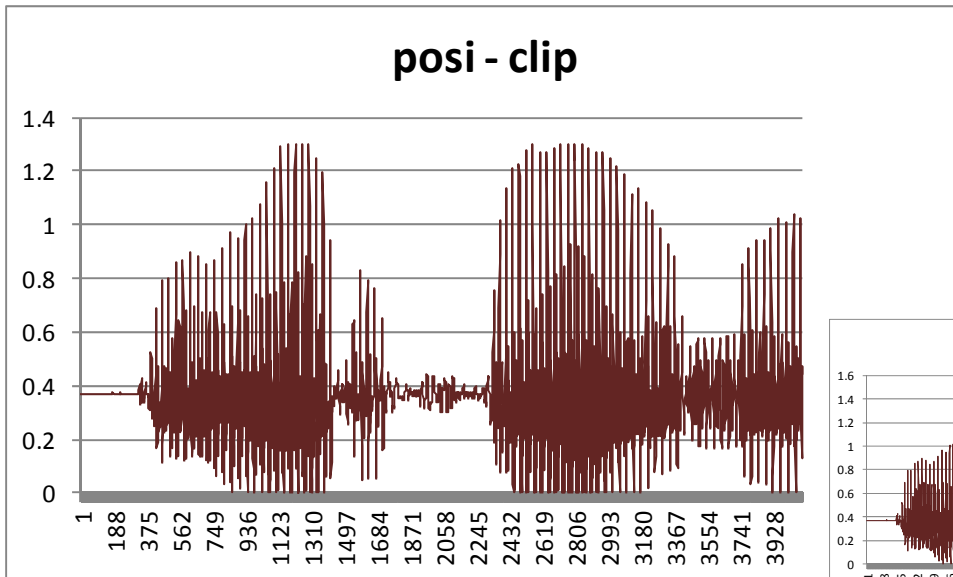


Fig.24 マイクゲイン 160%(+4.1dB)の場合

変調機が 130%でクリップする と仮定。

本来、ピークが 1.4 倍程度まで出ていたところ、130%でクリップされる。ネガティブ側も 100%でクリップを受けるとした。正弦波の場合と同様、ピーククリップありなしで大きな変化はない。



考察

終段変調について、過変調状態によって生ずる占有周波数帯幅の広がりについて検討した。

この検討の範囲では、占有周波数帯幅は、以下の影響を受けることが分かった。

- (1) 原信号の周波数分布
- (2) 過変調の程度
- (3) ハードクリップか、ソフトクリップか
- (4) 変調機の飽和による、ピーク側のクリップ

(評価の基準)

この検討の結果に基づき、占有周波数帯幅の拡大から見た変調限界を具体的に指し示すためには、どの程度の高調波が発生したら占有周波数帯幅が広がることになるか、という評価基準を決める必要がある。これには、電波法施行規則によるほか、実験的手法に基づく考察、あるいは経験的な判断が必要であるが、以下では、ひとまず、キャリア-40dB 以上の不要な信号が発生しないこととする¹⁾。また、許される占有周波数帯幅は3kHz とする。

(正弦波、のこぎり波を用いた評価)

200Hz の単一正弦波では、Fig.10 に示すように、180%変調でも3kHz 以上への帯域の広がりはない(-40dB以上の不要波は発生しない)。また、基本周波数200Hz ののこぎり波では、Fig.16 に示すように、変調率150%でも占有周波数帯幅超過にはならない。

より音声に近いと思われる条件、たとえば、500Hz を基本波とすると(この検討のシミュレーションでは、スペクトル図の1.2kHz の位置を帯域限界3kHz に相当すると読み替える)、次のことが言える。

正弦波では、Fig.9 に示す150%程度の大きな過変調でも、占有周波数帯幅超過にはならない一方、のこぎり波ではFig.13、14 に示すように、120%から130%程度の過変調で占有周波数帯幅超過になる。

また、了解度を向上させる目的で、高域のレベルを増加させるような場合を想定すると、更に注意が必要である。たとえば、基本波を1kHz として、3kHz の第3 高調波が-40dB 以下、あるいは、基本波2kHz として、4kHz の第2高調波が-40dB 以下になるのは、正弦波のシミュレーション、Fig.5、6 から予測できるように、いずれも変調率112%程度である。

(註1) 占有周波数帯幅の定義は、電波法施行規則によると、帯域外の全放射エネルギーが帯域内に比較して5%になる周波数 と決められている。これに比較すると、よって、ここで用いたキャリア-40dB という定義は少し甘いかもしれない。

(解釈)

上述のように、占有周波数帯幅の広がりには原信号の特性とクリップの程度に大きく依存する。

基本波500Hz 程度ののこぎり波の例は、基本周波数、高域が減衰する周波数分布とも、通常の音声に近いといえようが、このような信号では、120－130%の過変調が許容できる限界となる。このような大きな過変調が許容できるのは、波形的なピーク部分に位置し、クリップの影響を受けやすい高周波成分が、もともと小さいことに依る。過変調に伴う占有周波数帯幅増加も、比較的緩やかであるといえよう。

一方、イコライジングやクリスタルマイクを利用して、音声の主成分を1kHz 以上に配置するよう ことさらに工夫するような場合には(1kHz 程度以上の大きな振幅の基本波が存在するような条件では)、10%程度のわずかな過変調にも注意が必要であるといえよう。

(実際の音声波との比較)

実際の音声波を用いたシミュレーションでは、Fig.20 などに、マイクゲインをあげると基本周波数の高調波が着実に増加する様子が見えた。しかし、ゲインを数十%あげても、占有周波数帯幅の増大には大きな影響を与えないことが分かった。

これは、これまでの考察で述べたように、声の基本周波数に関連すると考えられる。つまり、被験者の声は、基本周波数が140Hz 付近にあり、正弦波のシミュレーションで用いた200Hz と同様、許容帯域幅3kHz に比較して充分周波数が低いため、上記のごとく、過変調しても占有周波数帯幅には大きな影響は与えなかったと考えられる。

この点は、明らかに個人の声の特性(基本周波数)に依存する。声の高い人や、声を加工する場合には注意が必要となろう。

(ソフトクリップとハードクリップ)

ソフトクリップを行うと、Fig.8、9、10-2 に述べたように、高次の高調波(とくに跳ね返り部分にあるような高次の高調波)が数dB から10dB 減少する効果がみられる。第2 高調波、第3 高調波などには効果が薄く、基本周波数を高い周波数にする場合には効果は期待できない一方、比較的低い基本周波数成分を持たせる場合には、占有周波数帯幅拡大防止に一定の効果が期待できよう。

これが、終段被変調回路に付加回路を挿入して、クリップ特性を積極的に制御することの効果であるといえる。

(変調機出力のクリップについて)

これまでの考察は、変調機の動作が理想的で歪みがないことを前提として、ネガティブ側でのクリップについてのみ考察してきたが、実際には変調機自体の動作を考慮する必要がある。本検討では、変調機出力が130%(出力換算すると定格の169%)で飽和するとし、それをポジティブ側のクリップとして、正弦波と音声波を用いて影響をシミュレーションした。

その結果、ここに示した条件では(Fig.21、22: 正弦波150%、180%変調で、変調機が130%でクリップ、Fig.23: 音声波でマイクゲインを160%にセットし、変調機が130%でクリップ)、ポジティブクリップ無しの状況に比較して大きな変化はないことが分かった。

(変調機への要求)

本シミュレーションでは、変調機の歪みは無視した。つまり、変調機の歪みは出力に係わらず常にゼロで一定であるとし、定めたクリップによる歪みがすべてであるとしてシミュレーションした。本稿では、不必要な電力がキャリア-40dB となることを評価の基準としたから、本検討の結果を活かすには、少なくとも変調機の歪率が、全出力範囲に渡って1%以下(-40dB 以下)である必要がある。そしてそのようなシステムであれば、先に述べたように、120%や130%などの過変調を行ってクリップが生じて、占有周波数帯幅は3kHz を大きく超えてくることはないと言える。

しかし、この要求を実機で達成するのは困難である。歪みはゼロにはならず、出力に比例して増加する。アンプの最大出力は、通常、3%、4%程度の歪み率で定義するが、一般にはそれ以上出力を増やそうとすると急速にクリップが始まり歪みが増す。変調機を限界いっぱいを使用するような際には、ひずみ率10%などが、当然のごとく起こりうる。この場合、-20dB の不要波が観察されるから、占有周波数帯幅が大きく広がる可能性がある。逆に、最大出力を歪み率1%で定義すると、期待するほどの大きな出力は取れないのが普通である。従って、本稿で期待する1%という数値は、実際のハードウェアの観点からはなかなか厳しいといえる。

とはいえ、変調機がよく整備されて、必要な出力レンジ全域にわたり、低いひずみ率で動作すれば、本稿で述べた内容が実現できる。まず一歩目の目標を、全レンジ、全周波数範囲にわたって、ひずみ率1%以下 とおくのが妥当であろうか。レンジ管理のためには、コンプレッションアンプの併用が望ましいと思われる。また、占有周波数帯幅の拡大は高い周波数成分の影響を受けやすいから、数100Hz～1kHz 以上の周波数での歪み率を、最大出力付近でも低く抑えることがポイントであろう。

まとめ

(定義)

①占有周波数帯幅 3kHz、②許容する不要波成分-40dB、③過変調の定義:ネガティブクリップの程度

(前提)

変調機は、歪みが無視できるほど低く、出力に応じて増加しない

(結果)

・過変調による占有周波数帯域幅の拡大は、通常の音声では大きな問題にはならない。

通常の音声信号(基本周波数が ~200Hz 程度であり、高域に向けて急激にエネルギーが減衰する信号)であれば、150%などの大きな過変調をしても占有周波数帯域幅が3kHz 以上に拡大することはない。

・地声の特性には注意が必要。

基本周波数が500kHz 程度の場合には、120%～130%程度の過変調で占有周波数帯域幅が3kHz を超過する可能性がある。

1kHz を超える領域に大きなエネルギーを持つ場合には(クリスタルマイクやエンハンサーを用いて音調を調整する場合を含む)、110%程度の過変調でも占有周波数帯域幅が3kHz を超えることがあるから注意が必要。

・クリップはソフトクリップの方が望ましい。

ソフトクリップすると、通常のハードクリップに比較して高次の高調波が10dB 近く減衰する効果がある。低い基本周波数をもとにクリップで発生する、高次の高調波による占有周波数帯幅拡大を防止することに一定の効果がある。

・歪み特性の良い変調機が重要である。

出力範囲全域にわたって歪み率1%以下のものを実現することが、上記を活用する一歩目と言えよう。特に数100Hz～1kHz 以上の高域周波数の歪み率に注意すべき。

付記

冒頭の図に示した、数式を忠実に実行する AM 波の発生方法 (FT5000 などのAM 信号) では、 $k > 1$ としたとしてもクリップは生じない。したがって、このような条件でも占有周波数帯幅の拡大は生じない。平行変調にキャリアを注入してAM 波を得る発生方法でも同じ状況になると思われる。

このようにして発生させた信号は一般的な包絡線検波では正しく復調できず、SSB のようにモガモガ音になってしまう課題がある。

しかし、クリップにより占有周波数帯幅が広がらないことに加え、旧来のA3A (片側波帯の低減搬送波AM。ここでは両側波帯としたい)と同様、電力の呼び値の定義に関しても利点がある。同期検波を用いれば正しく復調できるので(BFO を注入したプロダクト検波でも大きな問題は生じない。同期検波自体は、現代では難なく実現可能)、今後、AM の仲間として見直してもよいのではないかと感ずる。