

音片発振器の周波数安定度に及ぼす諸要因

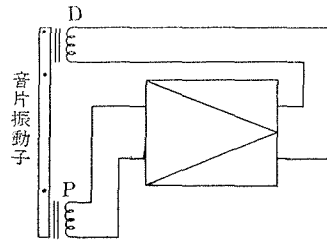
木 村 瑞 雄*

信州大学工学部通信工学教室

(昭和32年9月20日受理)

1. 緒 言

音片発振器の基本回路は第1図に示す如くであつて、音片振動の電圧を受振コイル (pick-up coil) P に誘起し、之を増巾して駆動コイル (drive coil) D に正饋還して振動を維持するものである。本報告に於ては音片発振器の周波数安定度に影響を及ぼす主要因並びにその対策について概説する。



第1図 音片発振回路

2. 音片発振器の周波数安定度の定義

発振器の周波数安定度の定義は実際の所明確ではないが、大体次のような二通りの意味を持つている。

- (1) 電源電圧、温度、気圧、外部衝撃等の発振周波数に変化を及ぼす要素を一つだけ取出して変化させ、他を一定にしておいた場合の周波数変動数の大きさを表わす。例えばプレート電圧1ボルト変化した場合、発振周波数が百万分の1だけの割合で変化したら、プレート電圧1ボルトに対する周波数安定度が 1×10^{-6} であると言う。
- (2) 発振器を発振させ放置しておいて、何等人為的な周波数変動を与えない場合の発振周波数変動の中 (標準周波数よりの偏差率の最大値と最低値の差) を言う。此の場合同一発振器でも定電圧装置を使用しているかないか、或いは恒温槽を使用しているかないか等によつて安定度が変わつて来る事は当然である。又この意味の安定度を総合安定度とも呼ぶ。

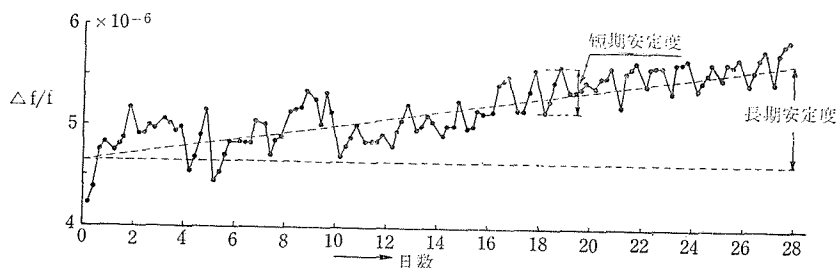
又 (2) の意味の安定度について短時間安定度 (5~6時間に対する安定度)、長時間安定度 (10~100時間程度に対する安定度)、短期安定度 (1~数日程度に対する安定度)、長期安定度 (一ヶ月、三月、半年或いは一年等に対する安定度) と言うように呼ぶ事がある。

周波数安定度の外に周波数精度と言う言葉が用いられるが、之はその発振周波数のい

* 信州大学教授

わゆる公称値からのずれを指すのであつて、周波数確度 $\pm 1 \times 10^{-5}$ と云えば、 $1,000 \text{ c/s}$ に対してはその公称値（標準周波数）よりの差が $\pm 0.01 \text{ c/s}$ 以内にある事を意味する。我々の音片発振器に対する究極の目的は結局(2)の意味の安定度の向上にあるのである。

短時間或いは短期安定度は大体電源電圧、温度等の影響による総合的の変動であり、長期安定度は之等に振動子、真空管、磁極等の枯れの影響が加つたものである。第2図にその状態を示す。



第2図 短期安定度と長期安定度の測定例

3. 振動子の共振尖鋭度

音片発振器の周波数安定度は音片の共振尖鋭度 Q の大きさに関係し、 Q の高い程即ち対数減衰率 δ^* の低い程、安定度の高くなる事はよく知られている。今音片発振器の電気回路系（発振回路系）に於ける振動電流の位相偏位角を θ 、発振周波数の音片の共振周波数 f_0 からのずれを Δf とすれば発振周波数の偏倚量 $\Delta f/f_0$ は次式で表される。⁽¹⁾

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2Q} \tan \theta \quad (1)$$

即ち同一位相角の偏位に対し Q の高い程発振波数の偏倚は小となる。例えば $\theta=20^\circ$ の時、 $Q=3,000$ なら $\Delta f/f_0 = 6 \times 10^{-5}$ 、又 $Q=10,000$ なら $\Delta f/f_0 = 1.8 \times 10^{-5}$ となる。

Q に影響する要因としては次の如きものが考えられる。

- イ) 材料の内部粘性抵抗
- ロ) 周囲媒質の抵抗
- ハ) 支持抵抗
- ニ) 電気機械変換装置の影響による見掛けの機械的抵抗
- ホ) 振動振巾
- ヘ) 磁極空隙

イ)の内部粘性抵抗は使用材料の種類によつて異つて来るが、エリンパー、インパーの如き特種合金では鋼に比して可成り大きくなる。又同一材料でも熱処理によつて異なるもので一般に鋼の場合は、焼入れた方が焼鈍した時より Q が高くなる。又周囲温度によつても Q が多少変化する。若し変化温度内に材料の結晶組織の変態点があれば不連続

* $\delta = \pi/Q$ の関係がある。又 $1/Q$ を損失係数と呼ぶ。

的に急変する。又二種の金属を貼合せた接着振動子では単一体振動子よりは多少 Q が低下する。

ロ) の周囲媒質の抵抗は振動子の形状、大きさ、及び振動様式等によつて異つて来るが、通常は可成り大きい。若し振動子を真空中又は低圧中に封入すればこの影響を取除く事ができる。

ハ) の支持抵抗は支持方法の良否によつて非常に異つて来る。支持による抵抗を小にするためには、振動部分はできるだけ自由に振動させ、静止部分又は極めて振動の小さい部分をできるだけ小さな面積で支持する事が必要である。然し一方この事は支持を確実にすると言う方面から制限を受ける。若し支持装置が多少の振動を免れぬものとするれば、この部分から外部に流失する振動勢力を、出来るだけ小さくする工夫が必要である。

ニ) の抵抗は振動子の駆動及び受振のための電気機械変換装置の影響による見掛けの機械的抵抗であつて、例えば電磁制御方式に於ける鉄損に基づく機械的抵抗が之である。即ち電磁コイルの磁束が、振動子を通過するために生ずる鉄損失(渦流及びヒステリシス損失)に基づく見掛けの機械的抵抗による振動勢力損失であつて、振動子材料及びその熱処理等により可成り異なるものである。

ホ) の振動振巾の影響は、振巾が大となると Q は低下する。之は振巾が増大すると、音片の等価インピーダンスが非直線的に変化する事と、音片に対する磁気的影響による見掛けの機械的抵抗が増大するためと考えられる。

ヘ) の磁極空隙の影響は空隙が小さい程、即ち空隙の磁路の短い程同一振動振巾に対する Q は低下する。之は空隙の小さい程、音片に対する磁気的影響による見掛けの機械的抵抗が増大するためと考えられる。なお磁極空隙が小さくなるに従い Q の低下は著しくなるが、空隙がある程度以上に大きくなると、空隙をそれ以上大きくしても Q の変化は殆んど生じない。従つて音片の Q を高くするためには、磁極空隙は実用上差支えない範囲で大きく、又振動振巾は充分小さく保つ事、即ち音片と電磁コイルとの相互関係をできるだけ疎に保つのがよい。

通常のスプリング支持、鉄インバー接着 1,000c/s 音片に於いては、大気中の Q が 10,000~20,000 を有し音叉等に比し 2~3 倍程度高い。

4. 温度の影響

周波数安定度に及ぼす最も大きな要因は温度である。之に対しては周波数温度係数の微少な特殊合金、例えばエリンバー等を使用する事によつて、 $(1\sim 5)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度に、又接着音片を用いる事によつて $(1\sim 10)\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 程度に微少化できる。又音片の支持状態によつても多少周波数温度係数の値が變つて来るものであつて、スプリング支持が温度係数の微少化に最も有効である。⁽³⁾

その他交叉共振による周波数温度係数の微少化法も極めて有効な方法である。⁽⁴⁾

温度変化の影響を避けるため恒温槽を使用する事が多いが、内部温度変動を 100 分の 1 度以内に保つ事は極めて困難である。10 分の 1 度以下に保つためにも二重恒温槽にす

る必要がある。1°C 以内に保つ事は比較的容易となるが、小型軽量の装置では通常 1 ~ 2°C 程度の変動を見ねばならない。恒温槽を使用する場合は周波数変動が恒温槽の故障のため生ずる事が多く、又一旦故障が生ずると之が復旧しても、周波数が完全にもとに戻るには相当の時日を要するから、高精度を要求する場合は注意を要する。音片の周波数温度係数が一桁向上すれば、使用恒温槽の規格は一桁低いもので間に合い、実用的に非常に助かる事になる。又場合によると無恒温槽でも間に合う事になり、周波数温度係数の微少化は極めて重要な問題である。

5. 気圧の影響

周囲気圧の変化に対する音片の振動周波数は、気圧が大となれば直線的に比例して低下する。その量は音片の形状、寸法等によつて異なるが、通常の平形音片では、気圧 1mmHg の変化に対し $(3 \sim 7) \times 10^{-7}$ 程度である。他の形の音片に於いては之より小さくなり、殊に M 形^{(6) (6) (7)} 及び狭巾音片⁽⁸⁾ では 10^{-8} 台も得られる。高度の安定度を要求される場合は、音片と外気圧を遮断した真空封入音片又は密閉形音片^{(9) (10)} を用いなければならない。

6. 湿度の影響

湿度の影響は音片の周波数安定度に対しては、實際上余り問題とならない。勿論湿度が飽和以上になつて、振動子面に露が附着するようになれば、周波数は著しく低下し、或いは振動が停止してしまう。実際にこの影響の表われるのは、低温度に冷却された音片を急に温度の高い場所に取り出した時で、音片面に水滴又は氷の薄層が附着し、振動が停止する場合が生ずる。

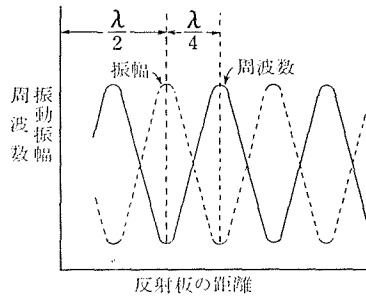
7. 磁界の影響

音片に対しその長さ又は厚さの方向に磁界を加えると、その発振周波数が変化する。その変化の方向は受振、駆動両コイルの磁極の極性の配列の仕方によつて異り、又その大きさは加える磁界の大きさによつて変化する。地磁気程度の磁界に対しては、最も大きい場合 5×10^{-6} 程度変化するので可成り問題である。之を防ぐには 0.5 ~ 2 mm 程度の薄鉄板で一重又は二重遮蔽する事によつて著しく軽減できる。

8. 反射板の影響

音片の振動面の附近に反射板が存在すると、その音波の反射のため周波数が変化する。反射板の音片面からの距離が、空气中に於ける音波としての周波数の略々 4 分の 1 波長毎に、周波数及び振巾が周期的に変化する(第 3 図)。若し音片振動が比較的弱い時は最

小振幅の点で振動が停止してしまう。周波数が高くなるに従つてこの変化の山と谷との距離が近くなるから、反射板の位置が、音片面から音波の4分の1波長の奇数倍附近の距離に位置しないように注意を要する。又反射板が音片の両側にあると、その影響は重畳されたものとなるが、反射板の材料による差は顕著でない。



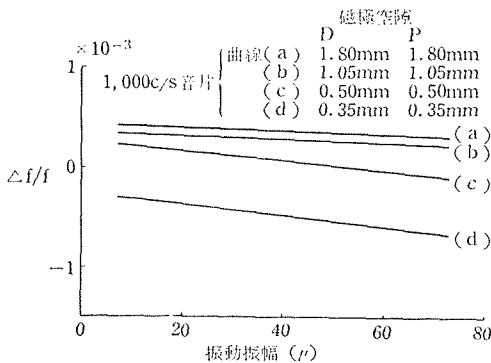
第3図 反射板の距離に対する振動振幅及び周波数の変化特性

9. 支持の影響⁽²⁾⁽³⁾

音片は支持により多少その固有振動数が変化する。即ち一般に支持による音片振動の拘束のため振動数は上昇する。線支持音片では支持により最大 10^{-3} の桁で変化する。又支持の取付けが弛んでいると Q が著しく低下し、周波数安定度が下る。又支持台の重い程 Q が高くなり、又固有振動数の変化が小さい。スプリング支持では支持の拘束が小さいため支持による振動数変化は殆んど生じない。又支持台の影響も小さいのでスプリング支持では支持台を用いず枠組にもできる。音片の振動数が高くなると音片支持部の振動に対して支持装置の共振が生じ、音片振動を抑制する抑振現象が現れる事がある。従つてこのような高振動数音片に於いては抑振作用の起らぬよう支持装置の形状、寸法等を選ばなければならない。

10. 振動振幅の影響

振動振幅の小さい程振動子の Q が高くなり安定度が向上する。(第5図参照)



第4図 振動振幅対 $\Delta f/f$

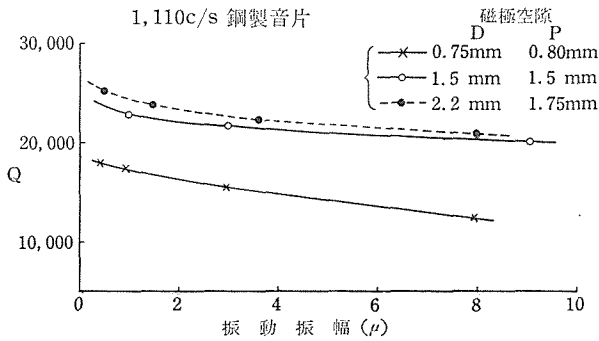
又振動振幅が変化すると、発振周波数が変化し、振幅増大に対し発振周波数は直線的に低下する。第4図は磁極空隙をパラメーターにとつた振動振幅対周波数変化特性の測定例である。本図より分る如く、磁極空隙の小さい時は、振動振幅変化に対する周波数変化が大きい、磁極空隙が大きい時はこの周波数変化は著しく小さくなる。

このように振動振幅増大によつて周波数が低下する理由は、振動振幅が増大すると音片自体の実効スチフネスが低下する事の他に、電磁極の影響に基

づく負スチフネス（或いはエレクトロダイナミックスチフネス）の影響による実効スチフネスの低下が大きくなるためと考えられる。特に磁極空隙の小さい時は、この後者の電磁極の影響による実効スチフネスの低下が大きく作用して来るものであろう。

11. 音片と磁極との空隙の影響

磁極空隙の大きい程振動子のQは高くなる。第5図に磁極空隙をパラメーターとした場合の振動振幅とQとの関係の測定例を示す。

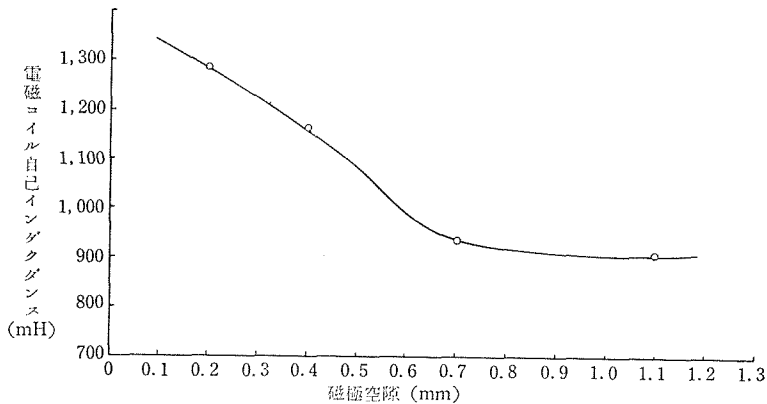


第5図 振動振幅対Q

又磁極空隙が小さくなると発振周波数が可成り大きく低下する。この低下の原因としては次の如きものが挙げられる。

- イ) 負スチフネスの増加
- ロ) 振動振幅の増加
- ハ) 電磁コイルの自己インダクタンスの増加に基づく電気回路系の位相角偏移

イ) 及びロ) の影響は音片の実効スチフネスを低下して発振周波数を低下する。又ハ) の影響は一般に指摘されて居らないが実際には可成り大きな影響を有する。第6図に自己インダクタンス約900mHの二極形電磁コイルと1,000c/s接着音片とを用いて、その磁極空隙を変化した場合の自己インダクタンスの変化の測定を示した。即ち磁極空隙0.8mm以下になると急激に自己インダクタンスは増加して来る。通常受振コイルは、



第6図 磁極空隙の大きさに対する電磁コイル自己インダクタンスの変化

之と並列に挿入したコンデンサと共に振動周波数に対し同調をとつているので、この電磁コイルの自己インダクタンスの増加は、電気回路系の位相角偏移を生じ、発振周波数を低下せしめるように働く。測定及び計算によれば、磁極空隙変化による周波数変化量に対し、この自己インダクタンス変化に基く周波数変化量は約その30%程度の割合を負つている事となり可成り大きい。

前節の振動振巾の影響と本節の磁極空隙の影響とから見て、周波数安定度を向上するためには、磁極空隙はできるだけ大きく、又振動振巾はできるだけ小さく保つべきである*。

12. 保持位置の影響

音片の保持位置を使用位置から横、縦、転倒と言うように変化すると磁極空隙が変るため発振周波数が変化する。

単純スプリング支持音片ではこの影響が大きく1,000 c/s 平形音片でその最大変化量が 1×10^{-5} ($\Delta f/f$) 程度、又300 c/s M形音片では 10^{-4} 台で可成り大きい⁽¹¹⁾が、V形スプリング支持により二桁近く軽減され、又発振コイルを対向配置或いは平衡配置にすると殆んど無視できる程度になる。

13. 電源電圧の影響

電源電圧が変化するると発振回路の増巾度が変化する、従つて振動子の振動振巾が変化してその発振周波数が変化する。

この影響は振動子の Q の高い程、又磁極空隙の大きい程小さくなる。多くの場合、電源定電の変動に対し周波数変動の小さい特殊な安定化発振回路を用いる。之によると例えばプレート電圧1ボルトの変化に対し $0.3 \sim 2 \times 10^{-7}$ 程度に微少化され、単純な発振回路の場合に対し一桁以上改善される⁽¹²⁾。

然し又重要な事は磁極電圧の変動に対し、真空管定数の変化の少い真空管を用いる事であつて、このような真空管を使用すれば、特別な回路を選ぶ必要は殆んどなくなる。

14. 真空管交換の影響

発振器の真空管を交換するとその特性が多少異なるため発振周波数が変化する。通常は 10^{-6} 台であるが、大きい場合は 10^{-5} 台にも達するから、高度安定度を望む場合は特性の揃つた真空管を準備しておく必要がある⁽¹²⁾。

15. 回路定数の影響

発振回路の回路定数が変化すれば当然発振周波数が変化する。例えば発振周波数の微

* 例えば長さ10cm程度の1,000 c/s 音片なら、振動振巾は 10μ 以下に保つのがよい。

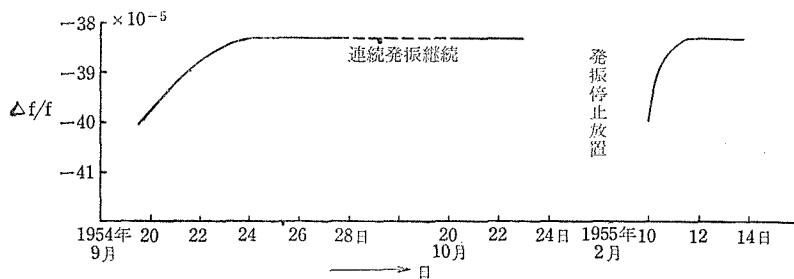
調整のために受振コイルに並列に入れた同調コンデンサを変化させる方法がある。この場合の周波数変化は振動子の Q が高い程小さく、音片の場合は 10^{-5} 程度の变化より生じないので周波数調整の方から言えば Q が高すぎるとも言える。⁽¹²⁾

16. 負荷の影響

発振器の負荷が変動すれば、発振周波数も多少変動する。然し負荷を結合する場合は、必ず緩衝増巾器を介して結合するのが普通であり、実際には殆んど問題はない。

17. 音片の枯れの影響

音片の固有振動数は製作時より時間と共に変化する。之を枯れ (aging) 又は経時効果の影響と言う。この枯れの影響は最も測定しにくいものであるが、製作してから最初の数日間は 1 日当り 10^{-6} 台で高くなつて行くが、数日経ればその変化率は小さくなつて 1 日当り 10^{-7} 程度となり、数ヶ月経れば 1 ヶ月間の変動が 10^{-7} 台になる。この程度になれば果して音片自体の枯れの影響か、或いは真空管又は電磁コイルの枯れの影響か識別できなくなる。又長期連続運転した音片を暫らく振動停止放置して再び動作させると、周波数は最初の数時間に可成りの割合で変化するが、極めて速かに安定状態に達する。又振動停止期間の長い程安定状態に達するのに長い時間を要する。第 7 図にその測定の一例を示す。⁽¹³⁾



第 7 図 音片の枯れによる周波数変化の一例

然し完全に音片が枯れるには連続運転して 1 年乃至 2 年経過する事が必要である。この枯れの影響は音片発振器に於いて最も厄介な影響で、成るべく速かに枯れを促進して安定化する必要がある。音片を速かに枯らすには、緩慢に焼鈍する事、又は植物油で数時間以上煮沸する事、或いは高温度と低温度の間で循環的に繰返し熱処理する事等が初期の枯れの促進 (初期変動の促進) に効果がある。

18. 真空管の枯れの影響

新しい真空管を用いると最初発振周波数が上昇する。従つて予備真空管は 100 時間程度使用してから備えておくのがよい。又真空管の寿命は種類によつて異なるが、安全のため一年位で交換して行くのがよいものと思われるが、此の点については更に検討を要する。

19. 電磁コイルの枯れの影響

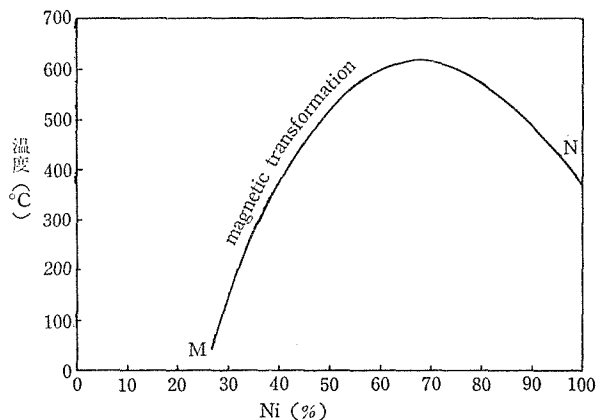
発振用コイルの永久磁石の枯れの影響によつて発振周波数が徐々に上昇する。この影響は音片自身或いは真空管の枯れの影響との分離が困難なので、はつきりした値は測定できないが、不良な永久磁石を用いる時は顕著に現れる。従つて新 KS 鋼、或いは O.P 磁石等の如く保磁力の大きい材料を用いるのがよい。或いは例えば永久磁石を 100°C の沸騰する湯中で 1~2 時間煮沸して、充分枯らしてしまつてから用いるのも一方法である。又材質の不良な永久磁石を用いると、衝撃によつて忽ち磁気を失つてしまうので絶対避けるべきである。

20. 音片磁化の影響

若し音片が始めから磁化されていると、運転中次第に消磁されるため周波数変化を生じる。この影響も可成り大きいものと思われるが、定量的測定は困難である。然し最初故意に大きく磁化しておくとその影響が顕著に現れるので、この影響の存在する事は間違いない。又音片を消磁した場合としない場合とで、周波数が変つて来る事からも認められる。従つて音片は支持台に取付ける前に必ず消磁する必要がある。

21. 音片材料の磁気的性質の変化の影響

ニッケル鉄合金でニッケル含有量と温度に対する磁気変態点との関係を第 8 図⁽¹⁴⁾に示す。即ち MN 線の如く磁気変態を示し、ニッケル 20~30% 合金は弱磁性となるのでその温度係数の値を小さくするような目的のため、正素子合金



第 8 図 ニッケル鉄合金の磁気変態

インバーのニッケル量を大きく減ずる事は危険である。又接着音片の負素子として鍍の発生を防ぐ目的でニッケル鉄合金を用いる時も充分注意を要する。それは之等の場合温度が上昇すると 100°C 以下でも弱磁性になり、発振周波数が臨界的に変化する危険が起り得るからである。

22. 外部震動及び衝撃の影響

音片装置に機械的震動や衝撃が加わると振動子が震動し、発振周波数が動揺する。又場合によると取付け状態の変化を生じそのため発振周波数が変動する。

単純スプリング支持は、外部震動及び衝撃に多少弱いので、震動及び衝撃を受け易い場所に使用する時は、音片装置をゴム紐又はスプリング等で吊るとか、緩衝ばね、緩衝ゴム或いはゴムクッションを介在させる等の方法で防震対策を講ずるのが良い。

又発振用コイル磁極に音片が直接衝突しないように磁極に保護ダンパーをつけるのがよい。

23. その他の影響

その他音片の発錆に原因する周波数変動や、熱処理によるヤング弾性率の変化による周波数変動もある。

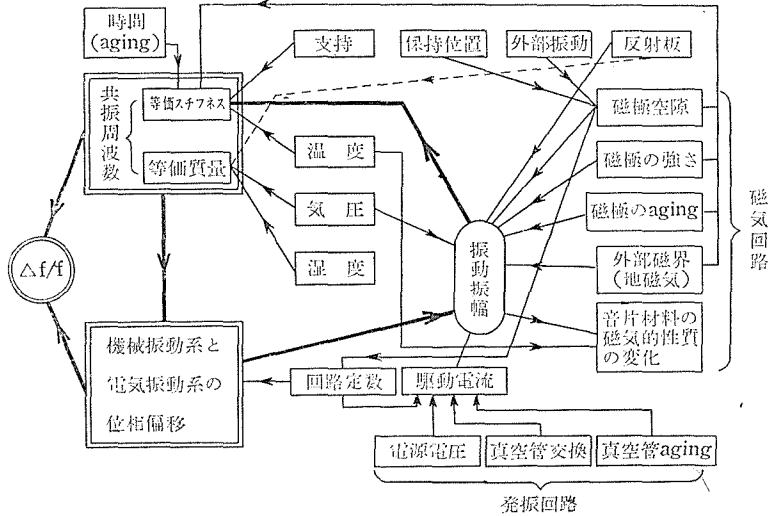
又実際によく起る例であるが音片と磁極の間に細かい鉄粉がつかがって発振不安定又は不能の原因となつたり、或いは音片に細かいごみが附着して、之が音片振動と共に転つて発振周波数が不規則に動揺する場合があるから注意を要する。

24. 結 言

音片発振器の発振周波数に影響を及ぼす要因について概説したが、更に之等要因の相互関係を分り易くするため、第9図にその主な要因について簡略化して之を図表に示した。即ち之等の要因には直接振動子自体の等価スチフネス又は等価質量に影響して、その共振周波数を変化するもの、振動振幅を変化するもの、及び機械振動系と電気振動系の間の位相偏移を変化するものとに分けられる。この中振動振幅の変化は共振周波数の変化を引き起し、共振周波数の変化は機械系と電気系の位相偏移を変化し、又この位相偏移の変化は振動振幅を変化するのであつて、之等三者の間に循環的变化が生じながら次第に平衡して、最終の発振周波数及び発振振幅に落ち着くのである。

之等の周波数安定度に影響する要因の一つ一つについて充分の対策を講ずれば発振周波数安定度を長期に亘り 10^{-6} ~ 10^{-7} 台に保つことができる。然し実際に商品として現場に実用される場合は一桁乃至半桁程度安定度に余裕をおいて使用するのが安全であろう。

終りに音片発振器の研究に対し終始御懇篤な御指導並びに御援助戴いている東北大学電気通信研究所長永井健三博士に深甚の謝意を表す。



第9図 周波数安定度に影響する主な原因の相互関係

参 考 文 献

- (1) 日本学術振興会編：電気通信に於ける同期とその応用 (1951) P. 25
- (2) 木村：信州大学紀要第一号 p. 101 (昭26—07)
- (3) 永井，木村：電気通信学会誌 35. p. 260 (昭27—06)
- (4) 永井，木村：電気三学会東京支部連合大会講演論文集8. 11 (昭26—11)
- (5) 永井，木村：電気三学会第26回連合大会講演論文集10. 24 (昭27—05)
- (6) 永井，木村：電気三学会東京支部連合大会講演論文集192 (昭29—05)
- (7) 木村：昭和32年電気通信学会全国大会講演論文集47 (昭32—11)
- (8) 永井，木村：電気三学会東京支部連合大会講演論文集10. 27 (昭27—10)
- (9) 木村：信州大学紀要第三号 (昭28—05)
- (10) 永井，木村：電気通信学会誌36. p. 377 (昭28—07)
- (11) 永井，木村：昭28年電気三学会支部連合大会講演論文集157 (昭28—11)
- (12) 木村：信州大学工学部紀要 第七号 P. 161 (昭32—12)
- (13) 前掲(1) p. 37
- (14) J. S Marsh : Alloy of Iron and Nickel. Vol. 1 (1938) p. 42

Summary**On Factors Affecting to the Frequency
Stability of the "Onpen Oscillator"**

Mizuo KIMURA

(Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering)

It is well known that the "Onpen Oscillator" which is controlled by the tuning-bar vibrator has the highest frequency stability in audio-frequency range. But there are many undesirable factors which affect the frequency stability of "Onpen Oscillator". One who desires to use "Onpen Oscillator" at its best condition, must understand the character of these factors.

In this paper the outlines of all kinds of these factors are treated and the counter-measures for them are mentioned. When the "Onpen Oscillator" is operated with great carefullness for these factors, it is not difficult to keep the frequency stability in figures 10^{-6} ~ 10^{-7} over a long period.