

4. 植樹帯の物理的減音効果

58年度までの研究から植樹帯の減音メカニズムに関してほぼ定性的に明らかとなった。しかし、そこで求めた減音効果としての挿入損失には、地表面による過剰減衰を植樹帯が打消す結果生じる増幅分を含んでおり、純粹に植樹帯だけの挿入損失ではない。植樹帯のみによる挿入損失を得るには反射音の無い自由空間中に植樹帯を設置して実験せねばならない。しかしその場合、植樹帯の葉面積密度や植栽密度を安定させることが困難となる。そこで59年度は極力自由空間に近い地表面を選定し、植樹帯の物理量と挿入損失との関係を把握することを試みた。さらに、植樹帯と遮音壁とを併用する場合、及び実際に道路に植樹帯を適用した場合に音場はどのように変化するかを模型実験により検討した。実験の進行順序は次の通りである。

実験1 地表面の選定

実験2 植樹帯の挿入損失

実験3 植樹帯と遮音壁の併用効果

実験4 市街地の道路に植樹帯を設置した場合の効果

この章では実験1と2を取り扱うこととし、実験3と4は章を改めて取り上げる。

実験に用いた実験装置は3-2で用いたものであり、実験場所も神奈川県公害センターの無響室である。無論ジェットノズルも同一ではあるが、59年度に測定した自由音場の距離減衰結果から求めたジェットノイズのパワーレベルを図II-25に示す。また距離1mで得たノズルの軸に直角な面の指向特性を図II-26に、ノズルの軸を含む面の指向特性を図II-27に示す。なおこの4章の実験では、すべての実験においてマイクロホンの軸を音源に向けている。

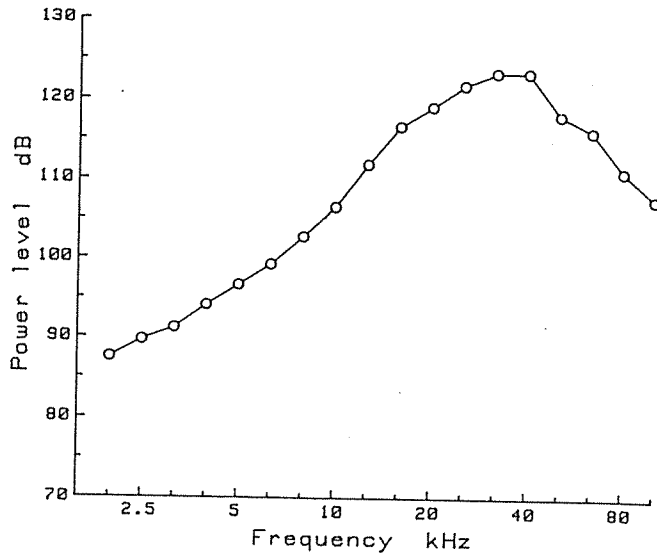


図 II-25 ジェットノイズのパワーレベル 1

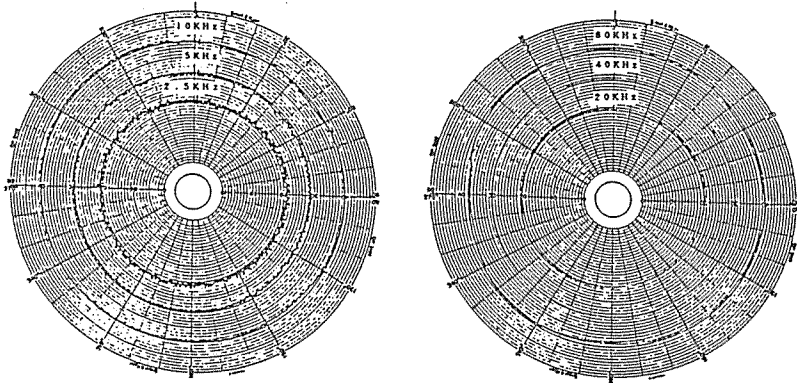


図 II-26 ジェットノイズの指向特性 (ノズルの軸に直角な面)

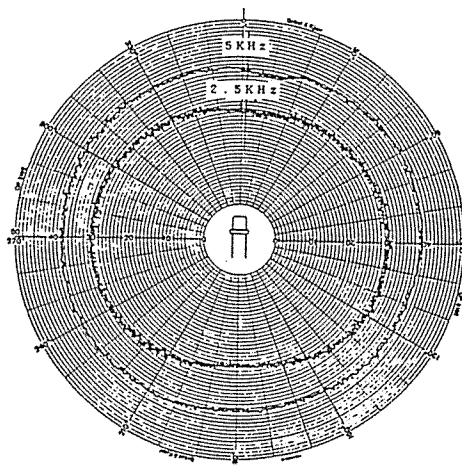


図 II-27 ジェットノイズの指向特性 (ノズルの軸を含む面)

4 - 1 地表面の選定

ここでは植樹帯を設置することが可能でかつ極力自由空間に等しい距離減衰特性を示す地表面を求めることを目的としており、58年度使用した完全反射面も含め次の5種類の材料を地表面とし選んだ。

完全反射面

完全反射面+シート (厚さ 0mmと見なした。綿100%)

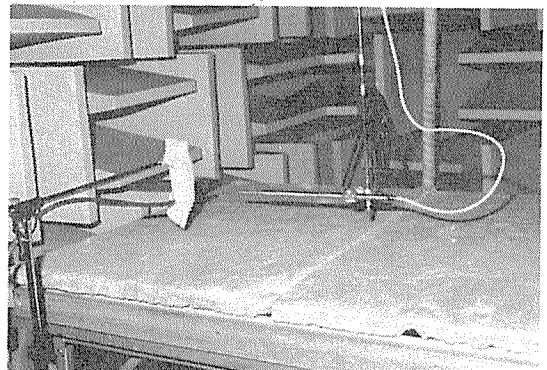
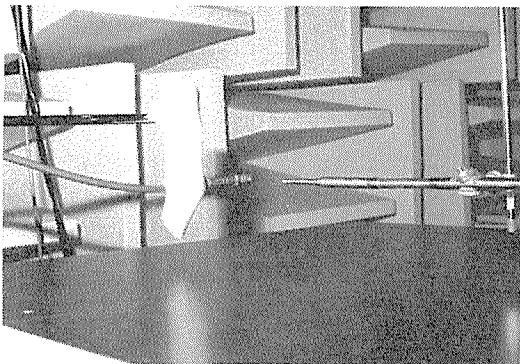
完全反射面+発泡スチロール (厚さ 3mm)

完全反射面+毛布 (厚さ 7mm)

完全反射面+グラスウール (厚さ30mm, 密度 24kg/m^3)

4 - 1 - 1 実験方法

選んだ地表面上 0.1mの高さで距離減衰を測定した。ただしシートの場合は完全反射面上 0.1mである。音源とマイクの距離は 0.1m、0.2m、0.4m、0.6m、0.8m、1.0m及び 1.6mである。地表面による過剰減衰は自由音場での音圧レベルから各位置における音圧レベルを引いて求めた。完全反射面と完全反射面+グラスウールの実験風景を写真II-4、II-5に示す。



写真II-4 完全反射面上の実験状況 写真II-5 グラスウール上の実験状況

4-1-2 結果及び考察

各地表面による過剰減衰を図 II-28 ~ II-32 に示す。図中の丸印は測定値である。破線は純音に対する過剰減衰の理論値を (13) 式より求めてから 1/3オクターブバンドに換算した値である。各地表面に与えられた単位長さ当りの流れ抵抗 σ の値は実寸に換算した値であり、横軸の周波数は10分の1、パラメータの距離は10倍した場合に相当するものである。流れ抵抗が大きくなるにつれ理論値と実測値の差が増す傾向にあるが、過剰減衰を生じる周波数は殆ど合致している。Embleton (前出表 II-2) や井清 (同表 II-3) によれば、今回使用した材料を実際の地表面に相当させると次の様になる。

選定地表面	σ	地表面
完全反射面	20000	コンクリート, アスファルト
完全反射面+シート	2000	硬い土
完全反射面+発泡スチロール	1200	柔らかい土
完全反射面+毛布	50	雪 (sugar snow)
完全反射面+グラスウール	10	雪 (2m), 新雪 (0.3m)

毛布とグラスウール以外は音源からの距離 0.6m位でも 10kHz~20kHzの中周波数域に明瞭な過剰減衰が認められ、自由音場でのレベルを与える地表面とは言えない。また毛布やグラスウールにしても距離が大きくなるに従い低周波数域での過剰減衰は大きくなり、これも自由音場とは言い難い。しかし、低周波数域では植樹帯は音に対して殆ど作用しないことが3章で判明していること、また自由音場音圧レベルとの差の絶対値が最も小さいことから、次の植樹帯の挿入損失を検討する実験で用いる地表面はグラスウールとする。

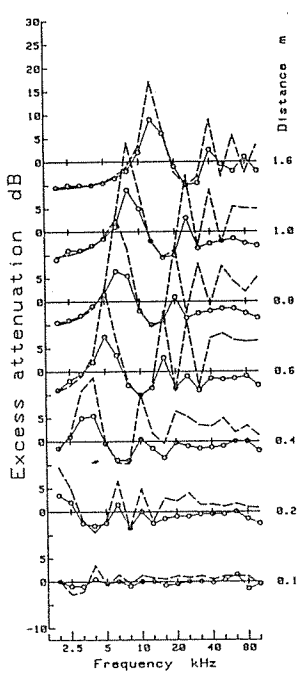


図 II-28 完全反射面による過剰減衰
($\sigma=20000\text{rayls/cm}$)

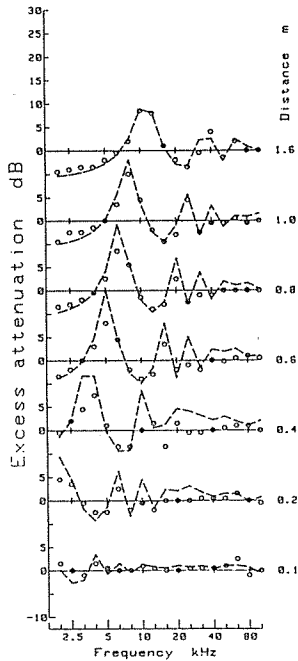


図 II-29 (完全反射面+シート) による過剰減衰 ($\sigma=2000\text{rayls/cm}$)

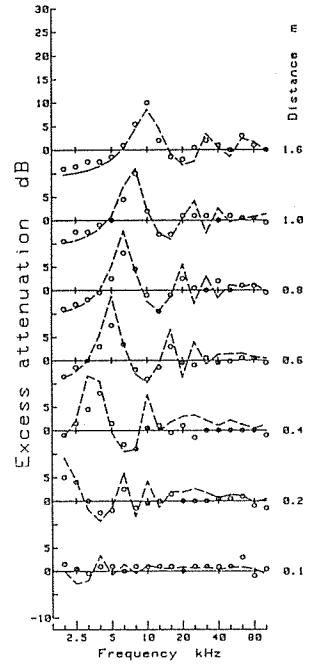


図 II-30 (完全反射面+発泡スチロール) による過剰減衰
($\sigma=1200\text{rayls/cm}$)

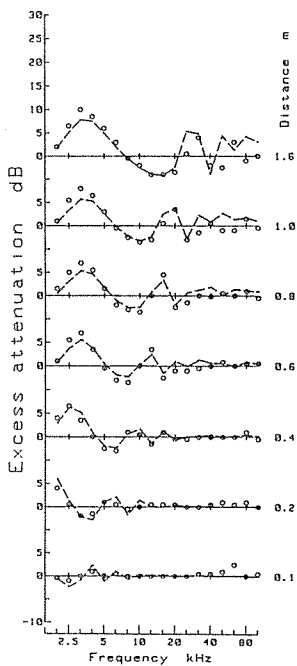


図 II-31 (完全反射面+毛布) による過剰減衰 ($\sigma=50\text{rayls/cm}$)

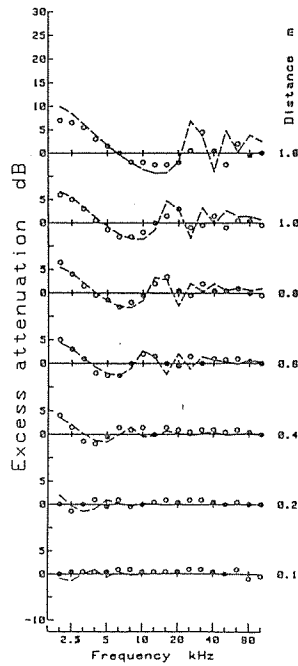
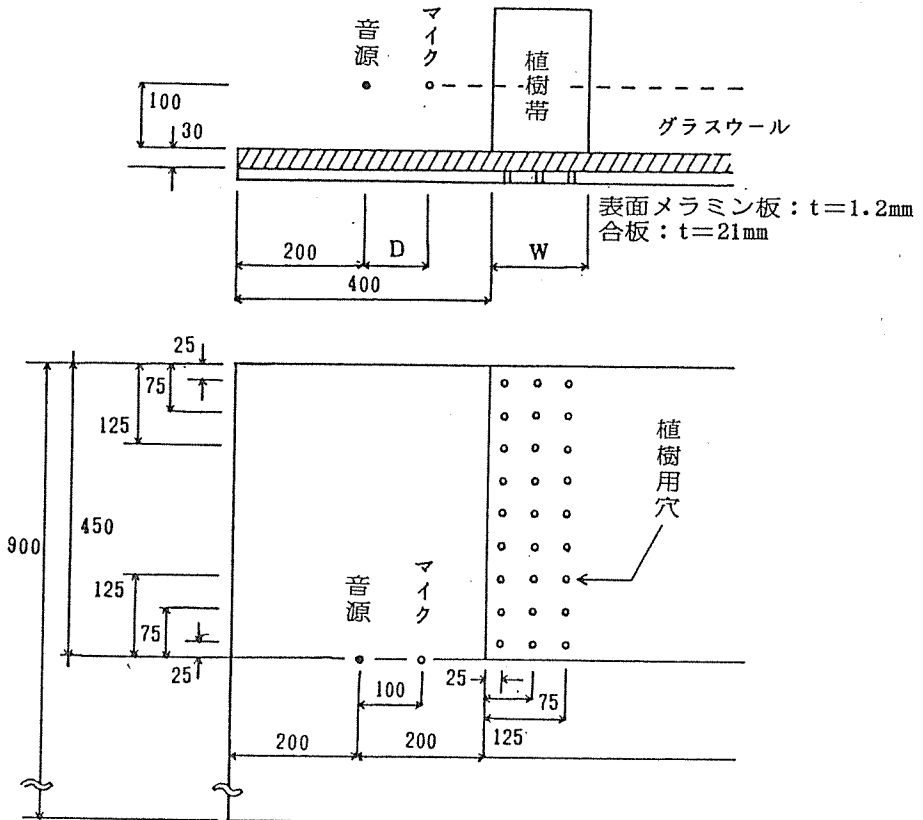


図 II-32 (完全反射面+グラスウール) による過剰減衰 ($\sigma=10\text{rayls/cm}$)

4-2 植樹帯の挿入損失

4-2-1 実験方法

使用した樹種は58年度と同じであり、ストウツゲ、ヒサカキ、クサツゲの3種類である。また植栽密度も58年度と同じであり、1本/100cm²、2本/100cm²、4本/100cm²の3種である。しかし59年度では植樹帯の高さは各樹種一定とした。ストウツゲとヒサカキは共にガラスウール面上0.28mとクサツゲは同0.22mとした。植樹帯の幅は0.15m、0.30m、0.60mに新たに0.45mを加えた。完全反射面上に厚さ30mmのガラスウール(24kg/m³)を敷きつめ、植樹帯の無い場合の音圧レベルから植樹帯がある場合の音圧レベルを差引いて挿入損失を求めた。図II-33に音源と植樹帯及び受音点の配置を示す。



図II-33 音源，植樹帯，受音点の配置 2 単位mm

音源の高さはグラスウール面上 0.1m一定である。受音点もグラスウール面上 0.1m一定とし、植樹帯の幅が 0.6mの場合のみ音源からの距離を 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.6mと変化させた。距離 0.2と 0.8mは各々植樹帯の前面と後面に相当する。また距離 0.4と 0.6mは植樹帯の内部である。その他の植樹帯幅の場合は音源と受音点の距離を 1m一定とした。

表 II-9に測定条件の一覧を、表 II-10に各植樹帯の物理特性を示す。また写真 II-6~II-8に各植樹帯を使用した測定状況を示す。

4-2-2 結果及び考察

a. スドウツゲ

図 II-34に植樹帯の幅 0.6mの結果を植栽密度別に示す。また図 II-35に幅 0.45m以下の結果を幅別に示す。挿入損失は5kHz位から現われ始め、10kHzでは顕著に生じ、周波数が高まるに従い大きくなっている。

次に図 II-34の挿入損失を音源からの距離別に見ると、受音点が植樹帯の内部に入らない 0.1mでは殆ど認められない。距離 0.2mは植樹帯の音源側の面に当る位置であり、植栽密度 4本/100cm²を除けばこの位置でも殆ど挿入損失は無い。距離 0.4mと 0.6mは植樹帯の内部であり 0.8mは受音点が植樹帯内部から外部へ出る位置に当る。挿入損失はその 0.4mで明確に現われ、減衰が認められる周波数では 0.6m、0.8mと順に大きくなっているのが判る。また植栽密度の増加及び植樹帯の幅の拡幅が挿入損失の増大につながっている。ただし 80kHz以上では挿入損失に頭打ちが認められる。この原因は植樹帯の幅0.60m、植栽密度 4本/100cm²の場合、距離0.80m以上では明らかに暗騒音の影響であるが、他の場合はマイクロホンの特性から来るものと思われる。

表 II-9 測定条件の一覧

樹種	スドウツゲ			ヒサカキ			クサツゲ		
植樹幅 (m)	植栽密度 (本/100cm ²)			植栽密度 (本/100cm ²)			植栽密度 (本/100cm ²)		
	4	2	1	4	2	1	4	2	1
0.60	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.45	○	○	○	△	△	△	△	△	△
0.30	○	○	○	△	△	△	△	△	△
0.15	○	○	-	△	△	-	△	△	-

○ 音源と受音点との距離が、0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.6m

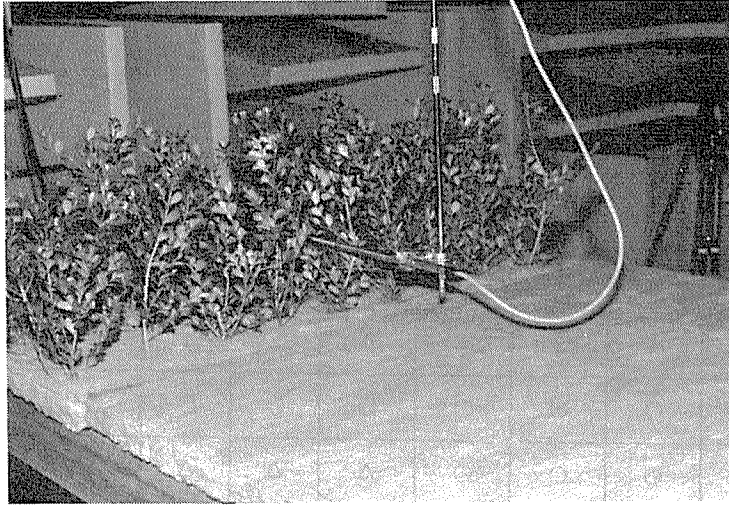
△ 音源と受音点との距離が、1.0 m

表 II-10 植樹帯の物理特性

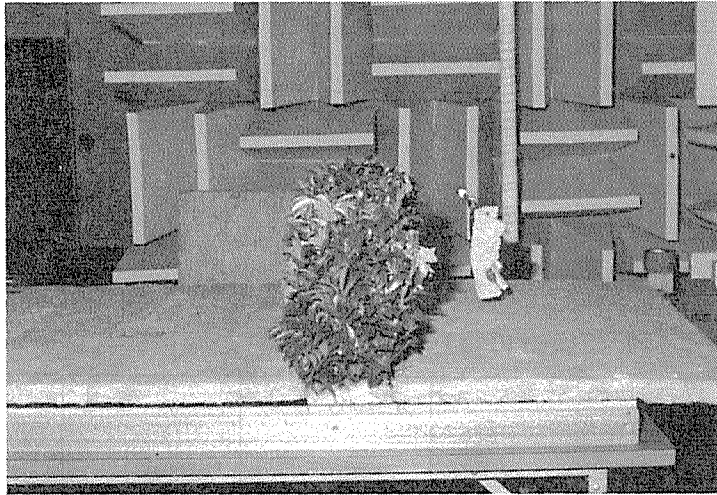
樹種	スドウツゲ	ヒサカキ	クサツゲ
樹高 (mm)	280	280	220
総葉数 (枚/本)	413.9	327.5	397.3
通過部分葉数 (枚/本)	168.3	126.5	246.2
葉の長径 (mm)	17.5	46.8	18.7
葉の短径 (mm)	10.7	18.7	7.6
葉の面積 (mm ²)	121.7	568.9	92.4
サンプル数 (本)	10	12	12

・通過部分葉数は、受音点の高さの上下5cmずつの計10cmに含まれる一本当りの葉数

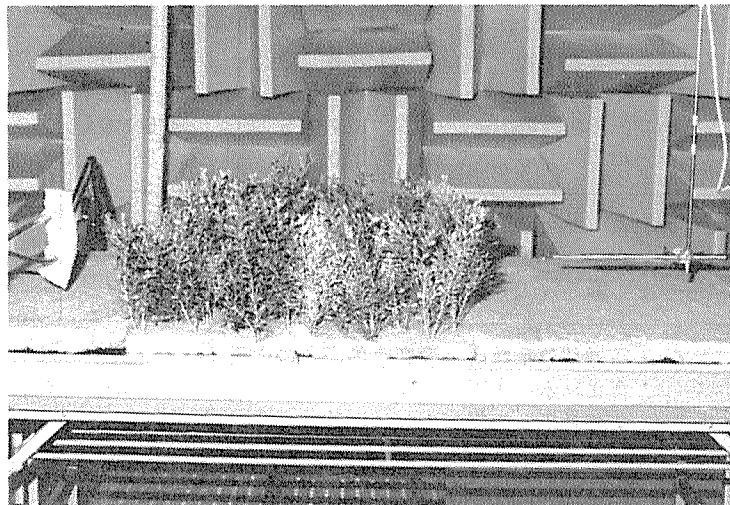
・葉の長径、短径、そして面積は、サンプル内での平均値



写真Ⅱ-6 スドウツゲ 高さ0.28m 幅0.3m 植栽密度 1本/100cm²



写真Ⅱ-7 ヒサカキ 高さ0.28m 幅0.15m 植栽密度 4本/100cm²



写真Ⅱ-8 クサツゲ 高さ0.22m 幅0.60m 植栽密度 2本/100cm²

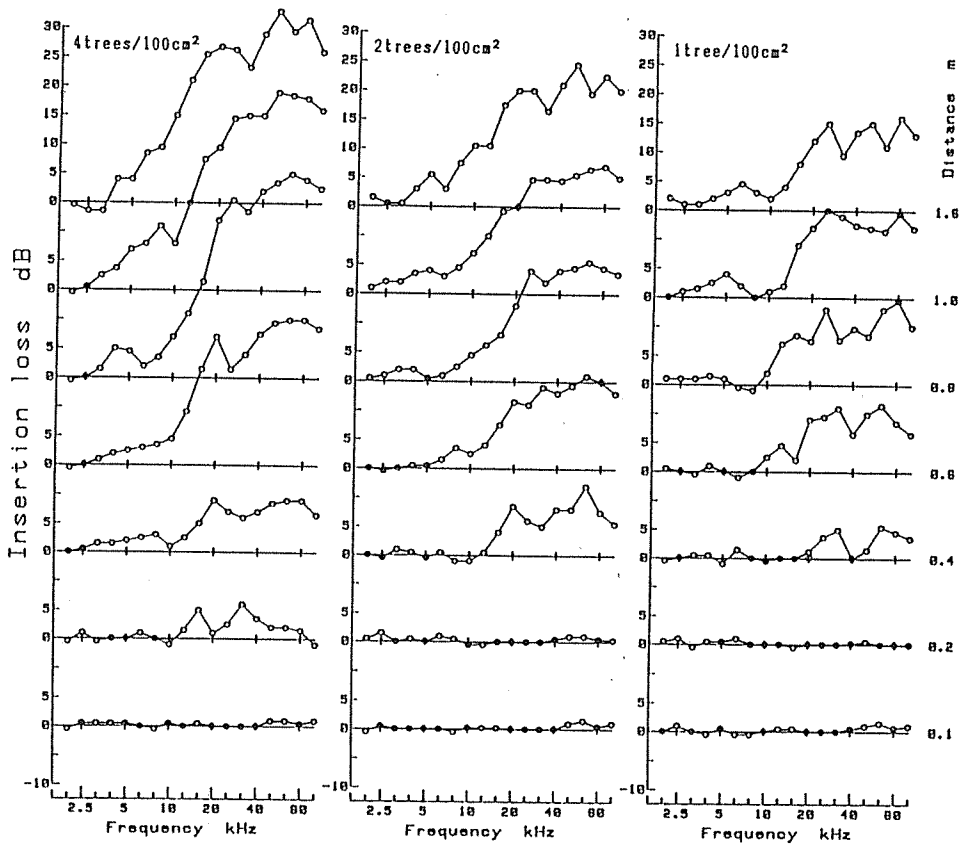


図 II-34 スドウツゲの挿入損失 (幅 0.6 m)

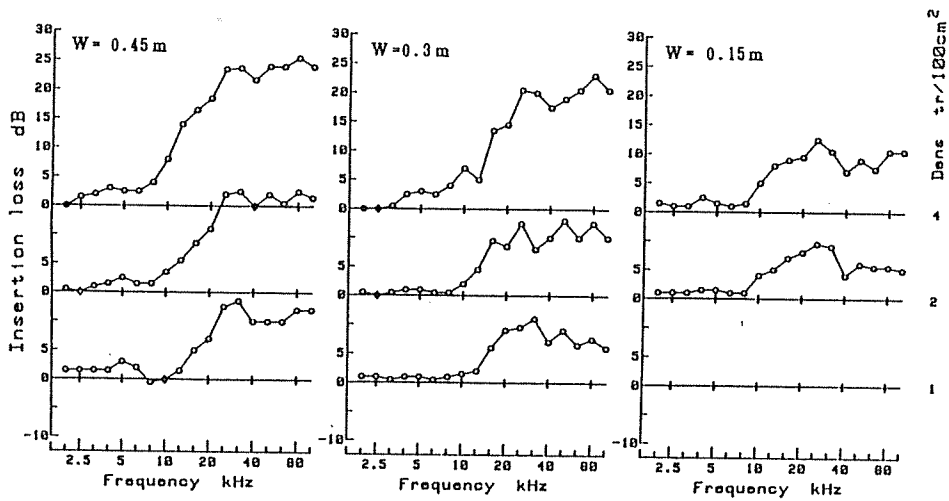


図 II-35 スドウツゲの挿入損失

現場実験では 500Hzから 250Hz以下で植樹帯は音に対して殆ど作用を及ぼさなかった。それがそのまま模型実験に適用できるとすれば、グラスウール上での過剰減衰(図II-32)がそのまま挿入損失に出現するはずである。例えば図II-34の植栽密度 4本/100 c m²、距離 1mの4kHz以下では挿入損失がプラスとなり2kHzでは約 6dB程になるはずであるが、そうはなっていない。逆にその周波数域でも植樹帯が過剰減衰を打消すとすれば挿入損失は見かけの増幅となるはずだが、これもそうはなっていない。結果はその中間位の値となっている。これが模型と現場との差であるのか、また何によるかは明らかでない。しかし中周波数域以上に見られる凹凸には過剰減衰の影響が多少認められる。

b. ヒサカキ

ヒサカキの植樹帯幅 0.6mの結果を図II-36に、幅0.45m以下の結果を図II-37に示す。高い周波数になる程挿入損失が大きくなるのはスドウツゲと同様であるが、挿入損失がプラスとなる周波数に大きな変動が認められ、2kHzで大きく減衰する場合(幅 0.6m、植栽密度 4本/100 c m²、距離 1.6m)もある。平均的に見ると、スドウツゲよりは低周波数の 2.5か 3.5kHz位から減衰が認められ、5kHz以上では大きく減衰する。

ヒサカキの場合、挿入損失に対する低周波数域のグラスウールによる過剰減衰の影響はスドウツゲの場合より複雑である。例として図II-36の幅 0.6m、植栽密度 2本/100 c m²の場合を図II-32と比較する。音源からの距離 1.6mの場合には植樹帯がグラスウールの過剰減衰を打消したように 3.15kHz以下で挿入損失はマイナスである。一方その周波数に対して、距離 0.6mでは植樹帯は音に何も作用しないかのように、3.15kHz辺りでゼロとなり、それ以下の周波数で過剰減衰がそのまま残りプラスとなっている。これ等の原因には葉量、葉の大きさ、音源からの距離等種々考えられるが、現在では明確な説明が付かない。今後の課題となろう。

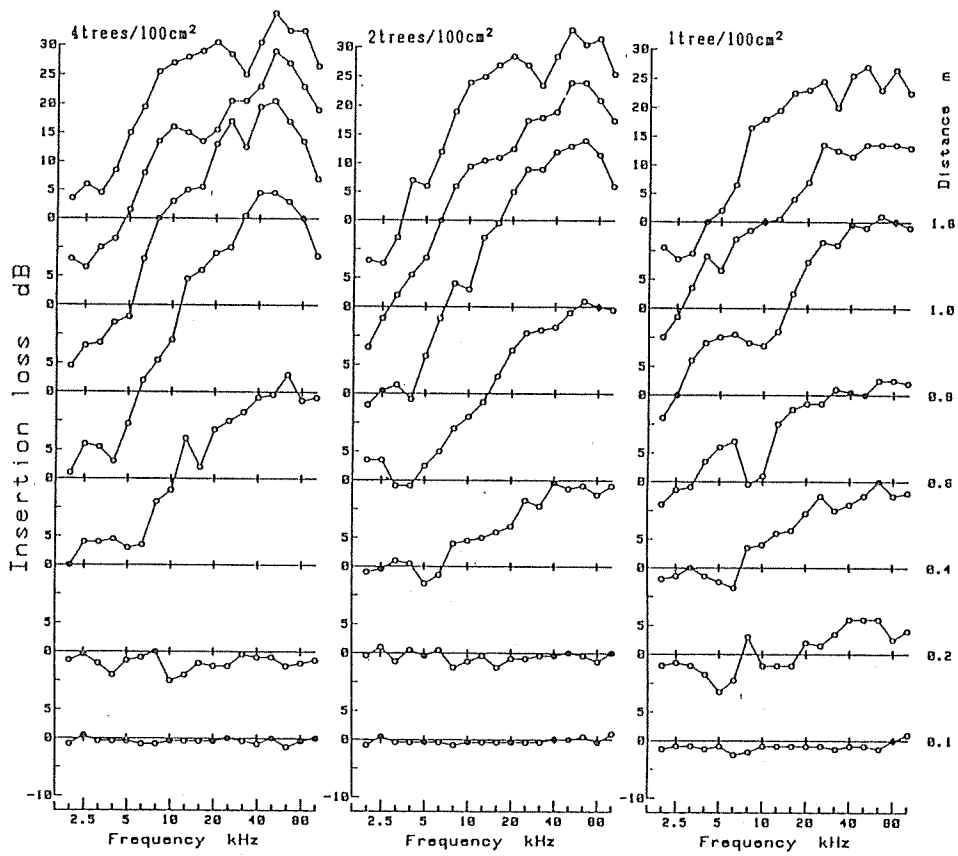


図 II-36 ヒサカキの挿入損失 (幅 0.6 m)

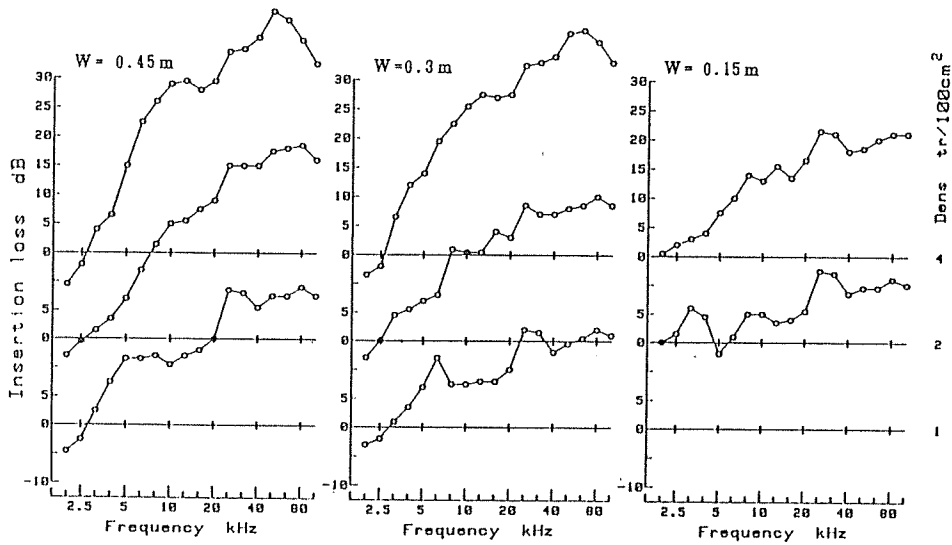


図 II-37 ヒサカキの挿入損失

c. クサツゲ

クサツゲの植樹帯幅 0.6m と 0.45m 以下の結果を図 II-38、II-39 に示す。クサツゲの特徴は挿入損失がプラスとなる周波数がスドウツゲやヒサカキに比べ高く、約 10kHz 近辺から始まることである。他の一般的性質は前 2 種と同様である。

4-2-3 まとめ

挿入損失がプラスとなる周波数はヒサカキ < スドウツゲ < クサツゲの順に高くなっており、全体的な葉の大きさが関係すると考えられる。先の表 II-10 に示した葉の大きさ（長径，短径）ではヒサカキ（46.8mm，18.7mm） > スドウツゲ（17.5，10.7） > クサツゲ（18.7，7.6）の順に小さくなっている。言い替えれば葉面積の順とも言える。

挿入損失の絶対量は各樹種共通に幅の増大、植栽密度の増加に伴って増している。樹種別に挿入損失の絶対量を比較するとヒサカキ > スドウツゲ > クサツゲの順であり、これも葉面積の順に等しい。植樹帯内部では距離の増大に従い挿入損失も大きくなる。5~10kHz 以上ではグラスウールによる過剰減衰を植樹帯が打消すため、過剰減衰を生じる周波数に凹凸が認められる。しかし 5~10kHz 以下では音に対する植樹帯の作用は複雑であり、過剰減衰を打消す場合もあれば、そのまま残す場合もある。これが葉量の差によるものなのか、或は他の条件によるのか今のところ不明であり今後の課題となる。

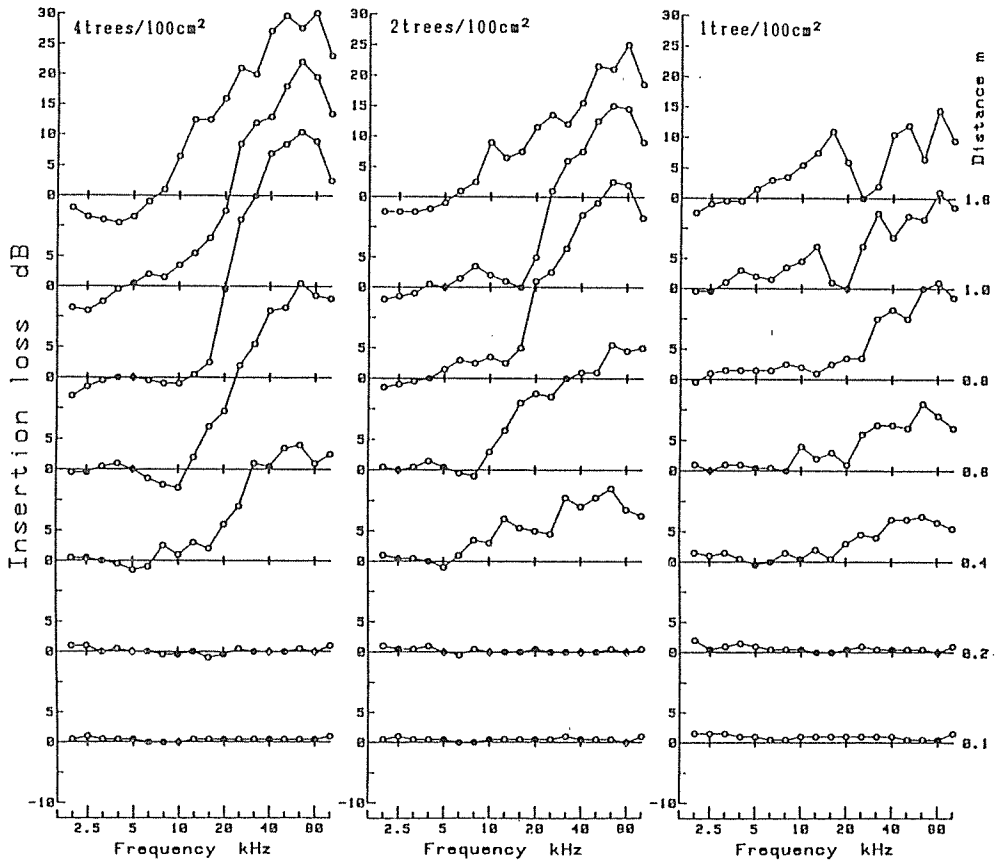


図 II-38 クサツゲの挿入損失 (幅 0.6m)

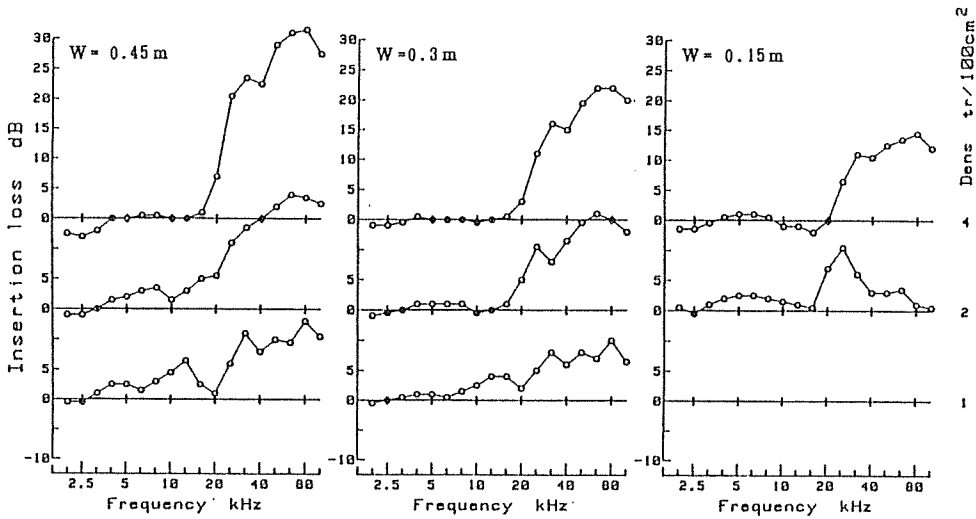


図 II-39 クサツゲの挿入損失

4-3 音源からの距離と挿入損失

4-3-1 植樹帯内部における挿入損失

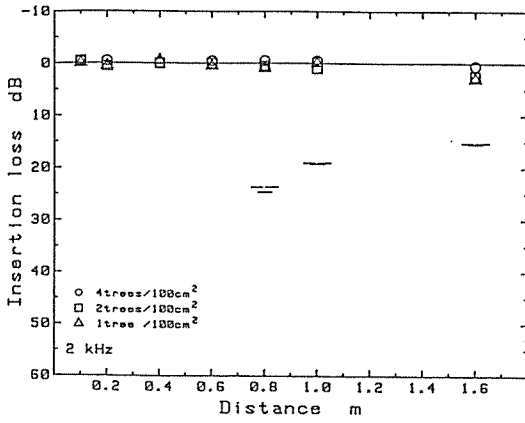
先に記述したように、植樹帯の内部では挿入損失は距離が増すと非常に大きくなる。そこで植樹帯の幅が 0.6m の場合について、各樹種による植栽密度別挿入損失と音源からの距離を周波数毎に示したものが図 II-40 ~ II-93 である。

植樹帯は 0.2m ~ 0.8m に存在しており、その間ではある周波数以上の植栽密度別挿入損失は距離に対して直線で表わされ、しかも植栽密度が大きい程大きな傾きの直線となっている。ストウツゲでは周波数 10kHz 以上で、ヒサカキでは 5kHz 以上で上記の事実が認められる。クサツゲの場合は 16kHz 位から傾きを持つようだが余り明瞭ではなく、25kHz 以上でその状態がはっきりしている。植栽密度の増大、及び音源からの距離の増大即ち植樹帯の幅の増大は、両者共に植樹帯の物理量の増大に他ならない。従って、植樹帯の内部ではある周波数以上の音は植樹帯の物理量に比例して減衰すると言える。(この植樹帯の物理量とは、58年度の結果から、音が通過する部分の全葉量とほぼ判明している。)

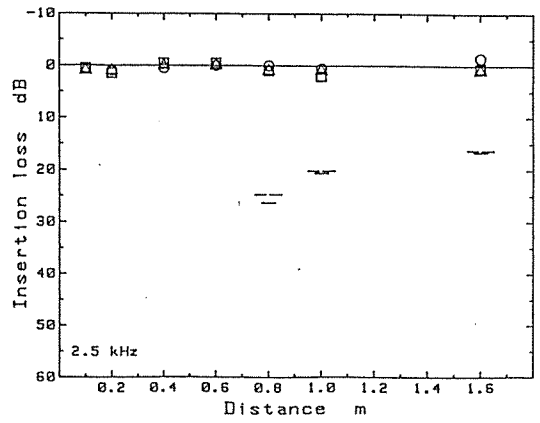
4-3-2 植樹帯外部における挿入損失

実際に植樹帯を遮音用として使用する場合、受音点が植樹帯内部に存在するのは普通ではない。一般には音源と受音点の間に植樹帯を設けると考えられる。そこでここでは植樹帯外部における挿入損失について前項に示した図 II-40 ~ II-93 を使用して検討する。

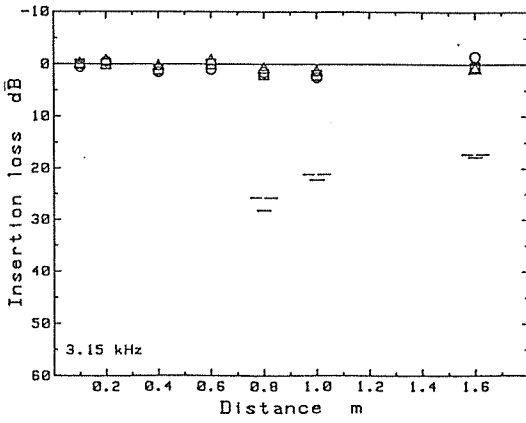
音は光と異なり進行方向に音を透過させない障害物があっても障害物の裏側にまで到達する。これを音の回折現象と呼ぶ。そして障害物が無い場合に比べ障害物のある場合には音は減衰する。この減衰量を求めるものとして世界的に有名なのが前川チャート³⁵⁾と呼ばれるものである。もし障害物がある程度音を透過するものであればその減衰量は全く音を透過させない場合より小さくなるはずである。



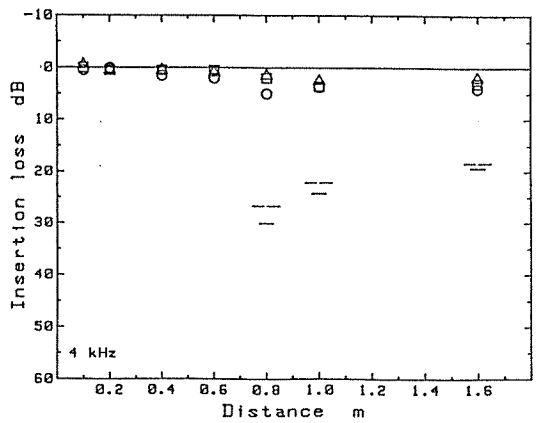
☒ II-40 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 2kHz



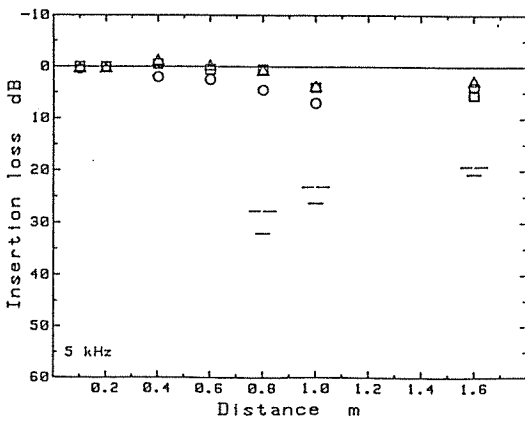
☒ II-41 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 2.5kHz



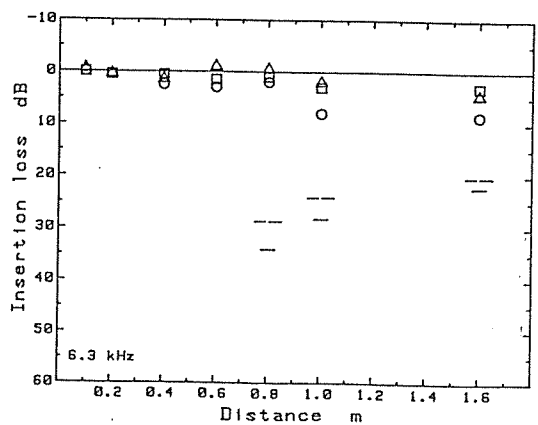
☒ II-42 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 3.15kHz



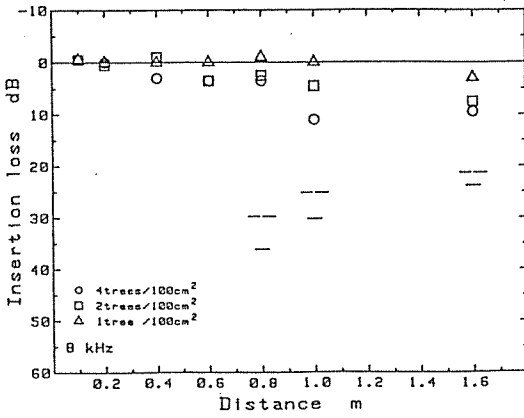
☒ II-43 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 4kHz



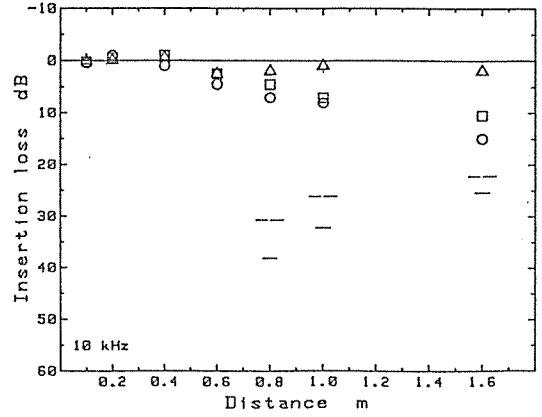
☒ II-44 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 5kHz



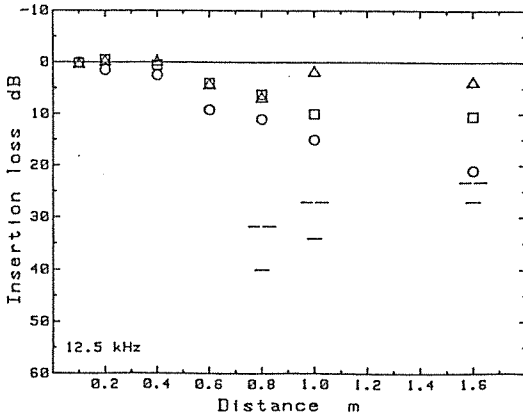
☒ II-45 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 6.3kHz



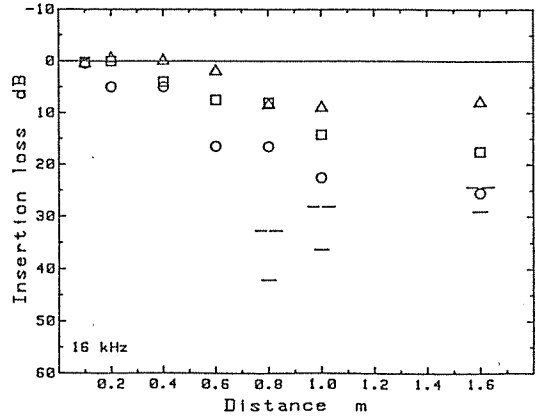
☒ II-46 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 8kHz



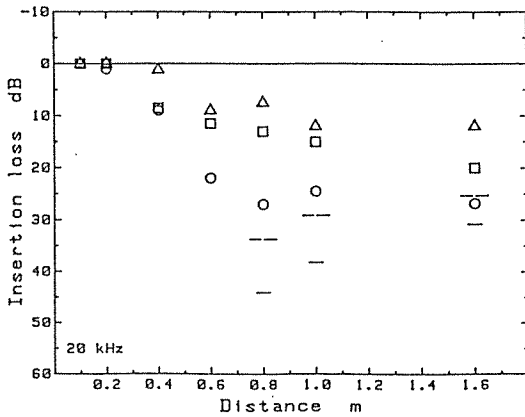
☒ II-47 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 10kHz



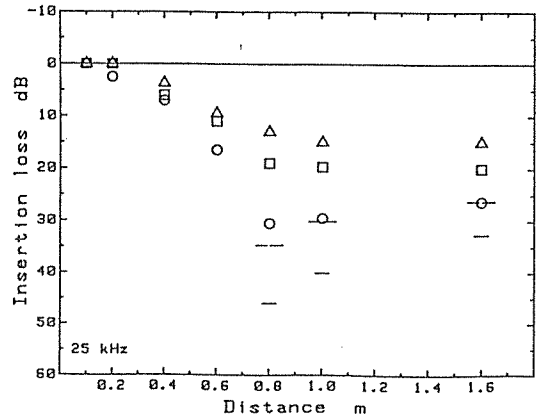
☒ II-48 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 12.5kHz



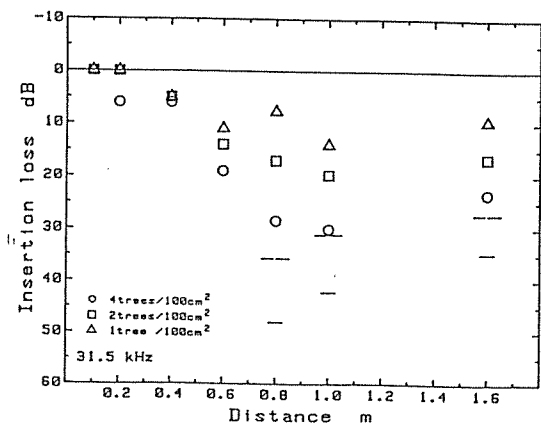
☒ II-49 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 16kHz



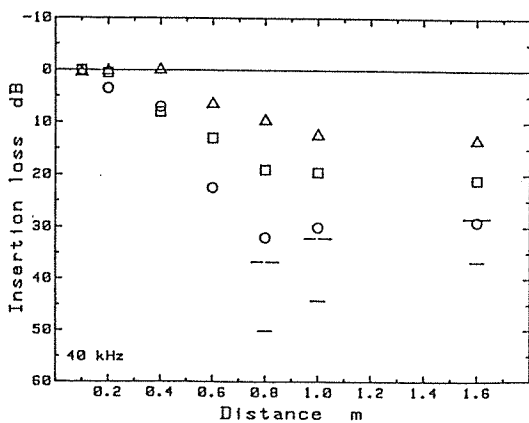
☒ II-50 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 20kHz



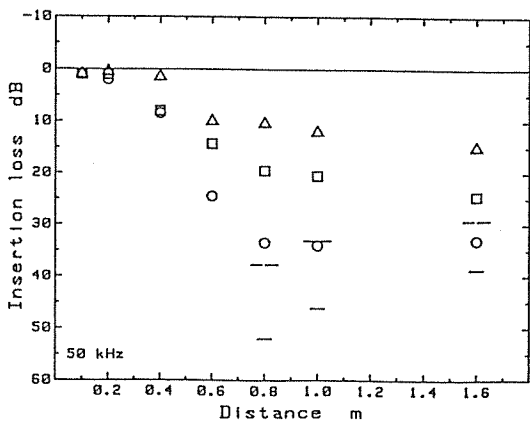
☒ II-51 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 25kHz



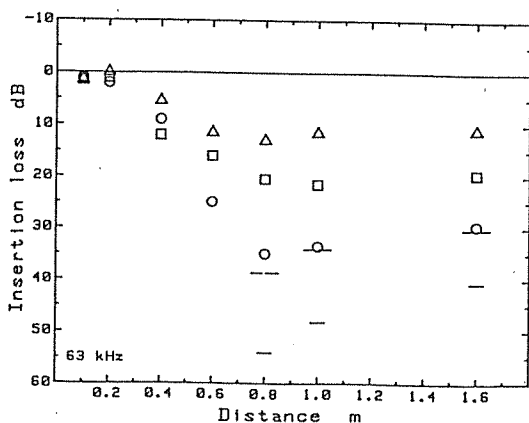
☒ II-52 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 31.5kHz



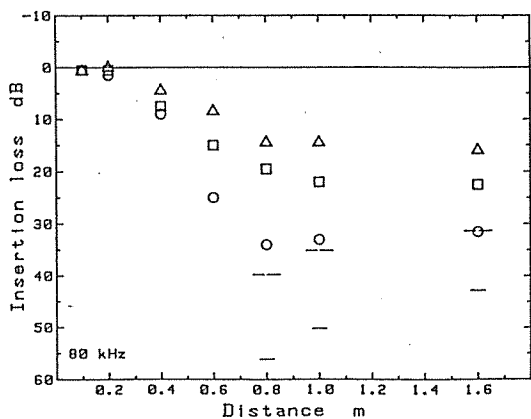
☒ II-53 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 40kHz



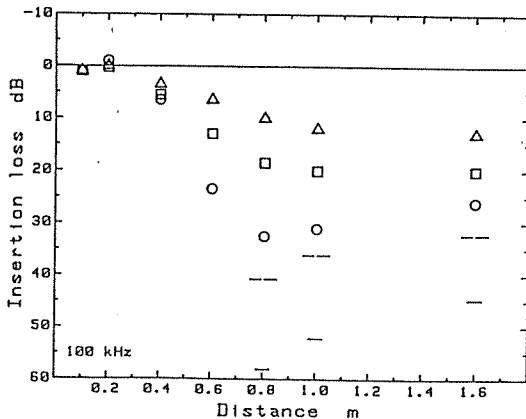
☒ II-54 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 50kHz



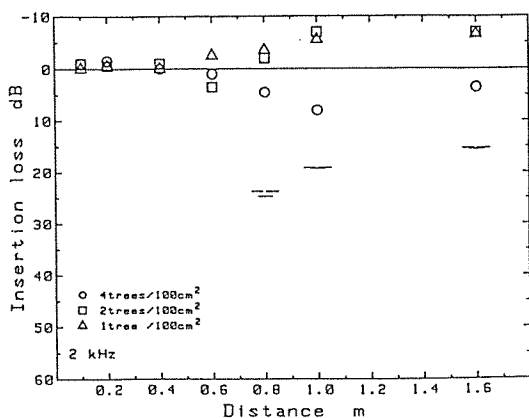
☒ II-55 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 63kHz



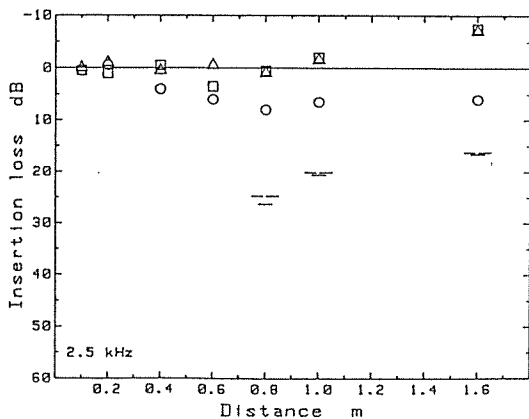
☒ II-56 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 80kHz



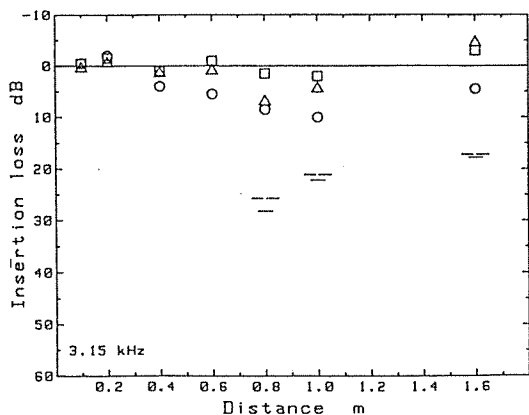
☒ II-57 スドウツゲ
植栽密度別挿入損失 100kHz



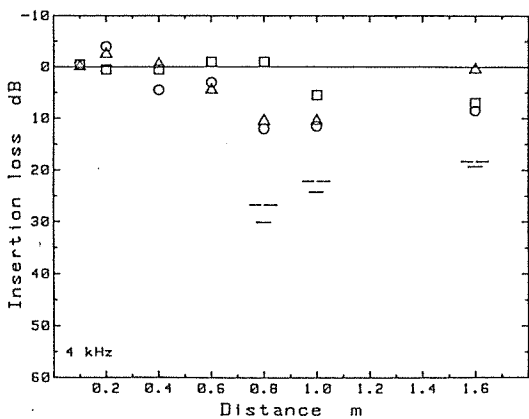
☒ II-58 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 2kHz



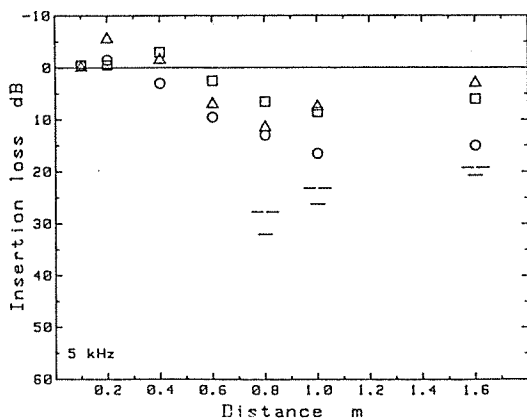
☒ II-59 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 2.5kHz



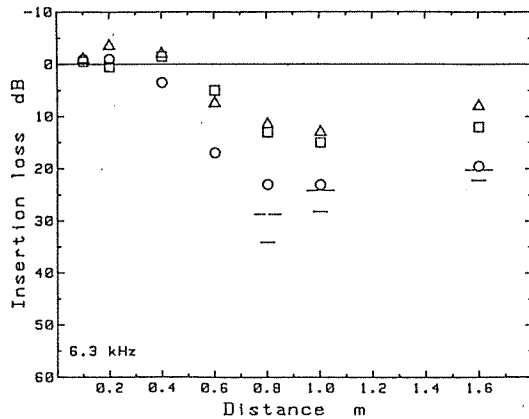
☒ II-60 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 3.15kHz



☒ II-61 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 4kHz



☒ II-62 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 5kHz



☒ II-63 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 6.3kHz

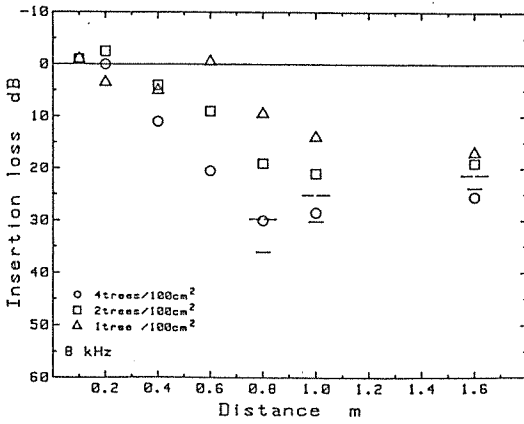


図 II-64 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 8kHz

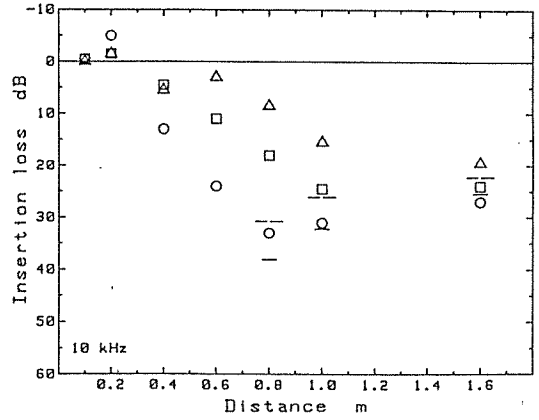


図 II-65 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 10kHz

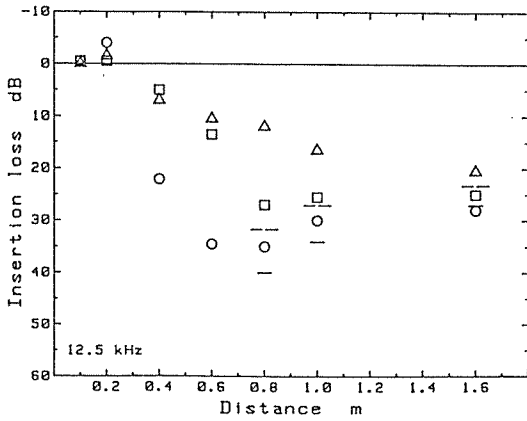


図 II-66 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 12.5kHz

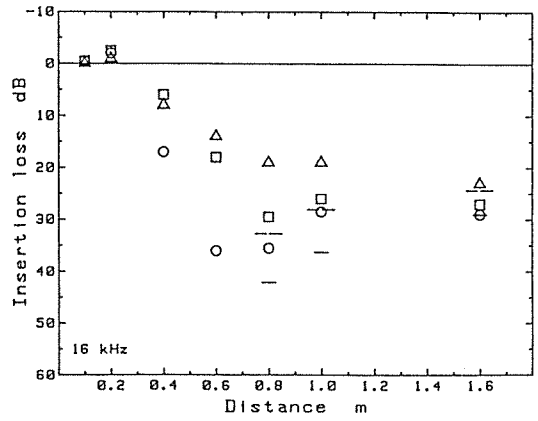


図 II-67 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 16kHz

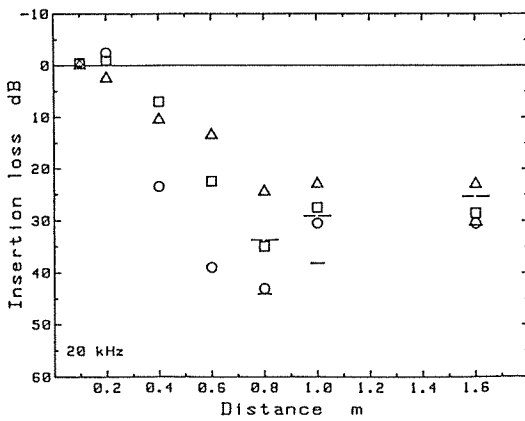


図 II-68 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 20kHz

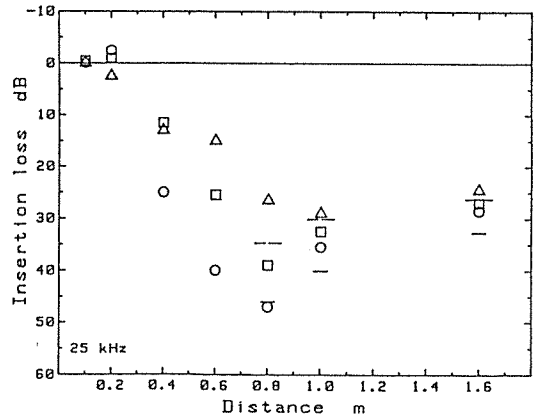


図 II-69 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 25kHz

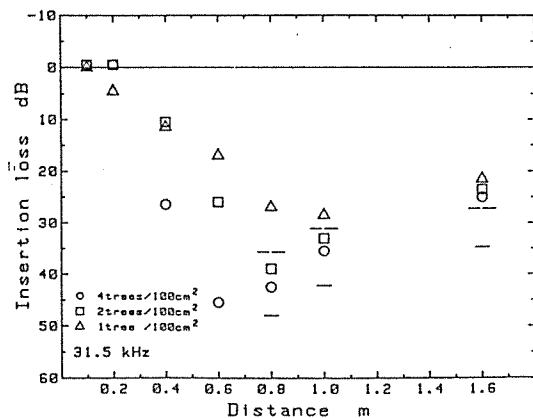


図 II-70 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 31.5kHz

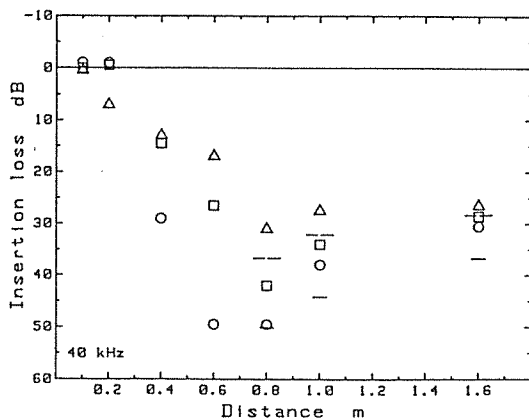


図 II-71 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 40kHz

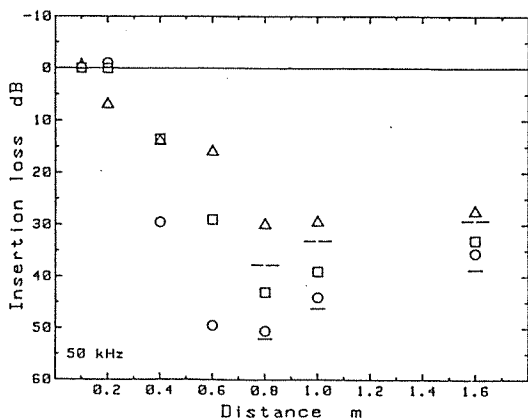


図 II-72 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 50kHz

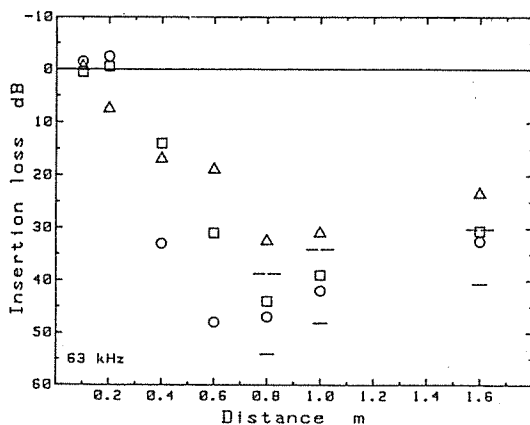


図 II-73 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 63kHz

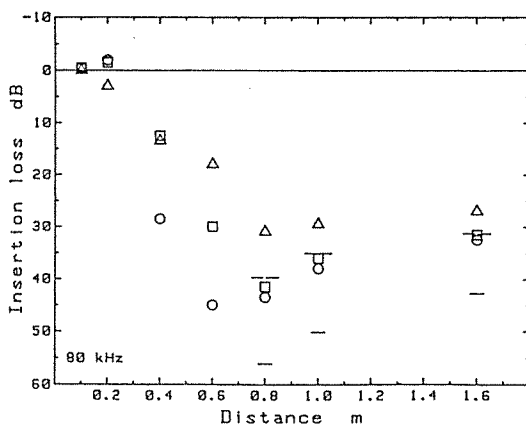


図 II-74 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 80kHz

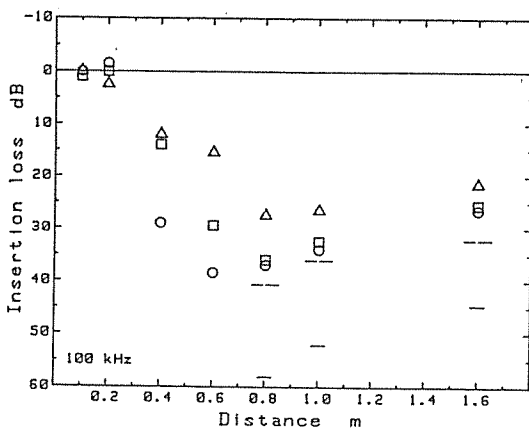


図 II-75 ヒサカキ
植栽密度別挿入損失 100kHz

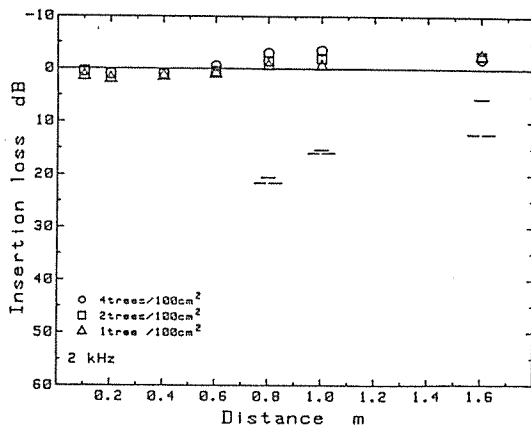


図 II-76 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 2kHz

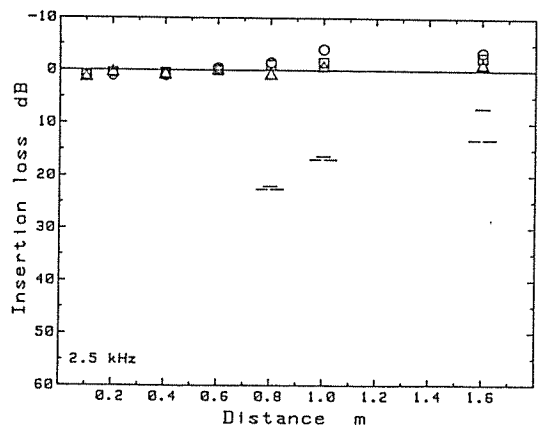


図 II-77 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 2.5kHz

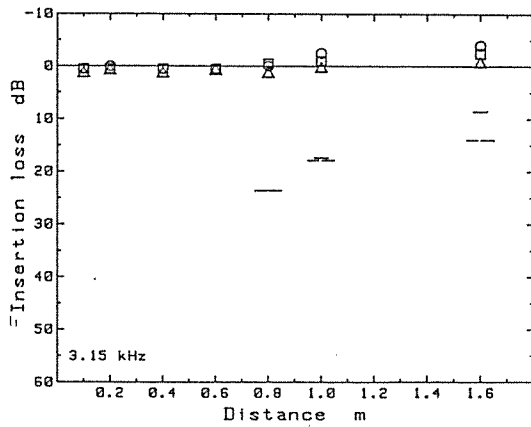


図 II-78 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 3.15kHz

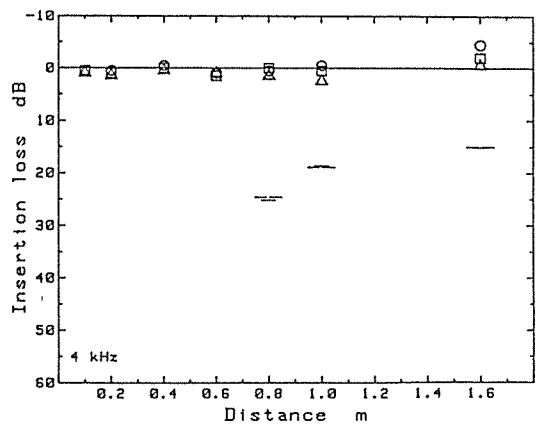


図 II-79 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 4kHz

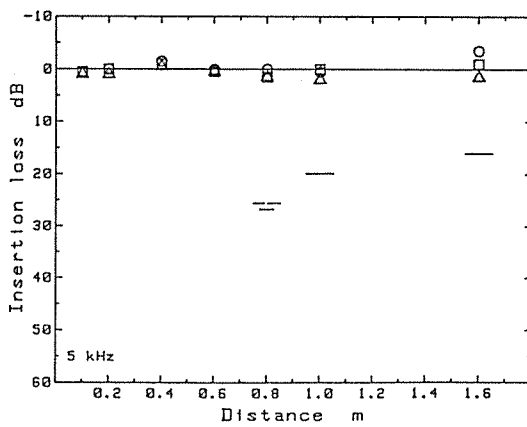


図 II-80 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 5kHz

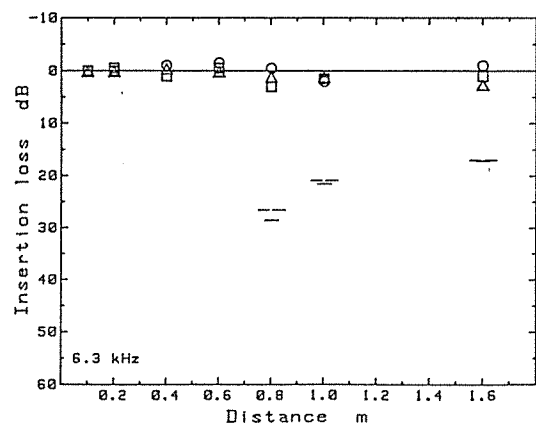


図 II-81 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 6.3kHz

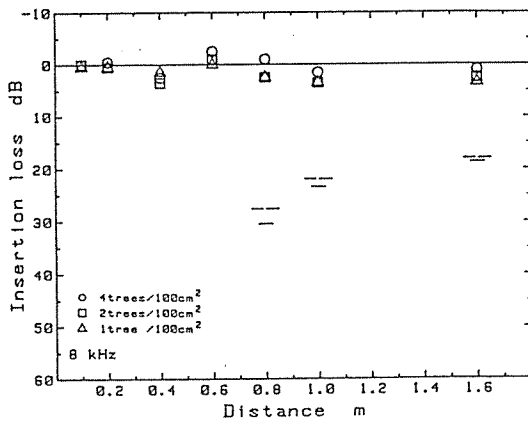


図 II-82 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 8kHz

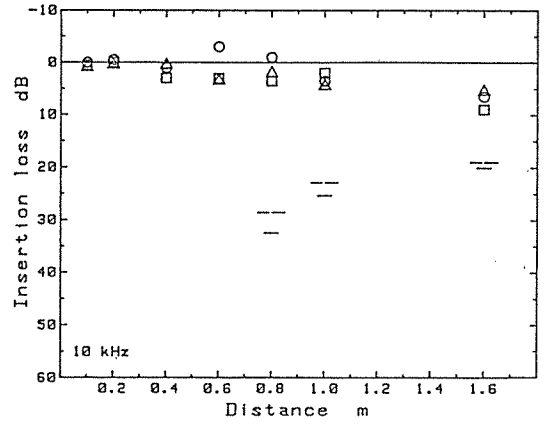


図 II-83 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 10kHz

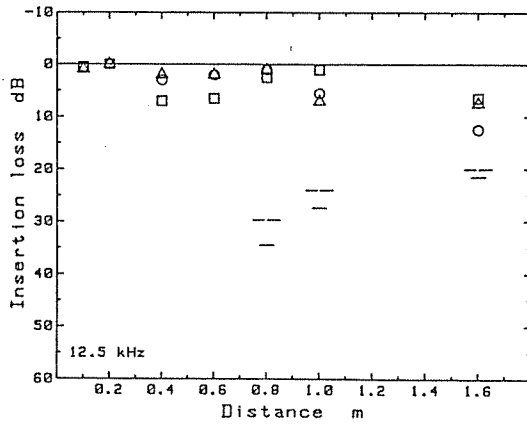


図 II-84 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 12.5kHz

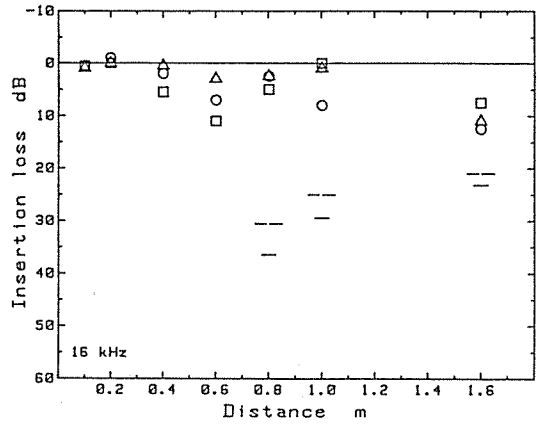


図 II-85 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 16kHz

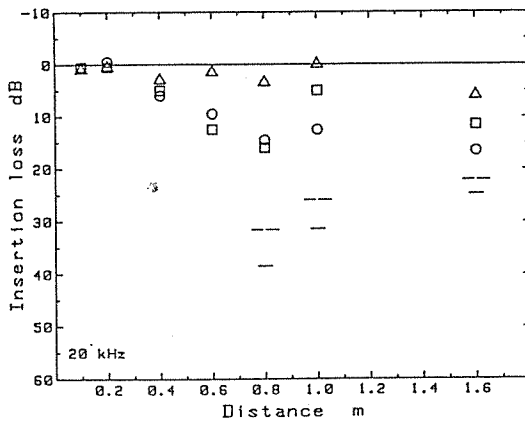


図 II-86 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 20kHz

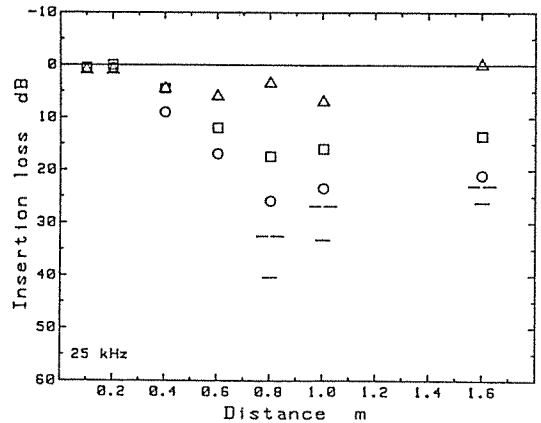


図 II-87 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 25kHz

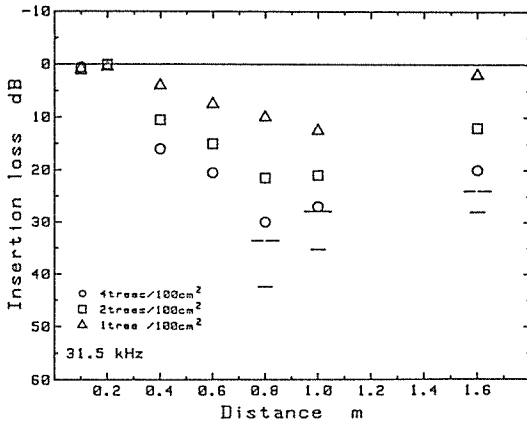


図 II-88 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 31.5kHz

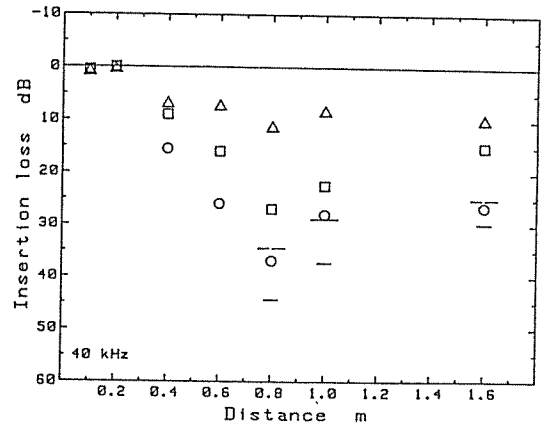


図 II-89 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 40kHz

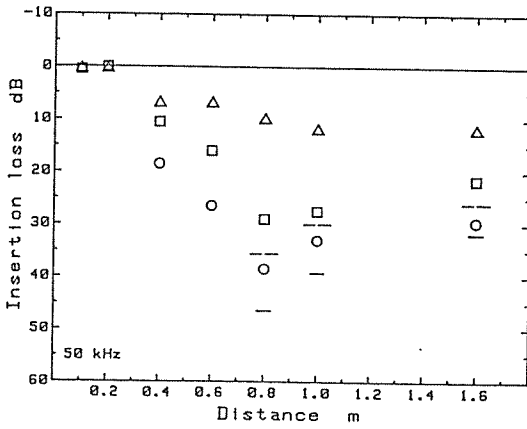


図 II-90 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 50kHz

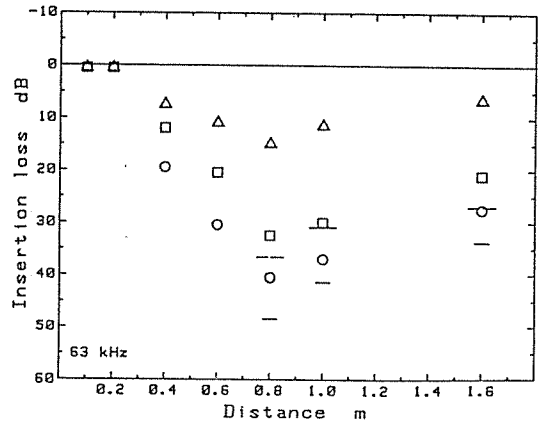


図 II-91 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 63kHz

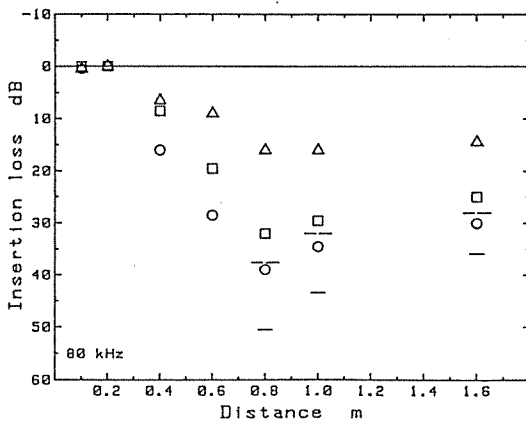


図 II-92 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 80kHz

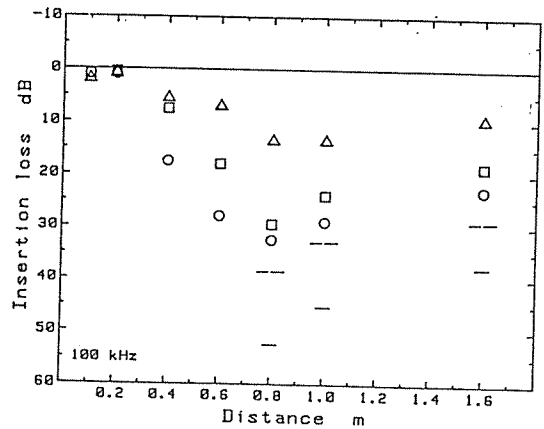


図 II-93 クサツゲ
植栽密度別挿入損失 100kHz

ここで図 II - 68、ヒサカキの周波数 20kHz の挿入損失を見ると、植栽密度が 1本/100 c m² の場合には、植樹帯外部の距離 1m でも 1.6m でも植樹帯後面（距離 0.8m）の挿入損失にほぼ等しい。これに対して 2本、4本/100 c m² の場合には、距離 1m と 1.6m の挿入損失は植樹帯の後面のそれより小さい。1本/100 c m² の場合には音が植樹帯を透過し易く、つまり植樹帯の透過率が大きく距離 1m でも 1.6m でも音のレベルは透過音だけで決定され、回折音の影響を受けていないと言える。植栽密度 2、4本/100 c m² の場合には植樹帯の透過率が小さく、距離 1m と 1.6m における透過音のレベルが非常に小さくなり、かえって植樹帯上部からの回折音の影響を受けていると言える。このように考えると植樹帯はある程度音が透過する障害物と考えてよい。

厚さのある障害物による回折減衰量を求める場合の計算法として次の簡単な方法³⁶⁾が使われる。

(1) 図 II - 94 のように S X の延長線と R Y の延長線の交点 O に頂点を持つ薄い遮音壁があると仮定し、前川チャートを利用する。

(2) Kurze の近似理論式を用いる (図 II - 95)。

$$A_{tt} = [N_x] + [N_y] - 5 + 20 \log (L / d) \quad (14)$$

[N_x] : 径路差 S X R' - S R' に対するフレネル数 N_x と前川チャートから求まる減衰量

[N_y] : 径路差 S' Y R - S' R に対するフレネル数 N_y と前川チャートから求まる減衰量

$$d = S R$$

$$L = S X Y R$$

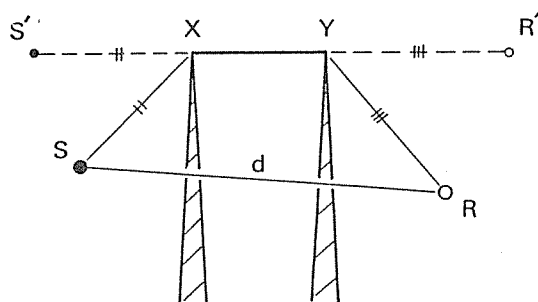
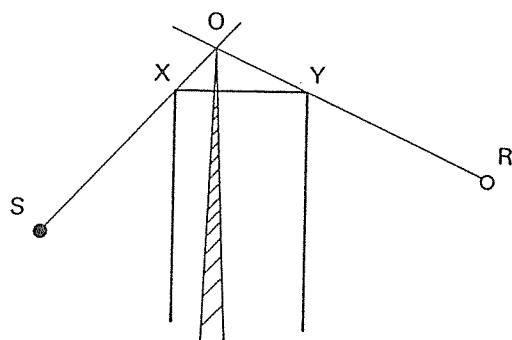


図 II - 94 厚さのある障害物の簡易計算法 図 II - 95 Kurze の近似理論式の計算法

ヒサカキの周波数 20kHzに (1)を適用した減衰量を破線で示し、(2)を適用した値を実線で図中に示している。植栽密度 4本/100 c m² の挿入損失と (2)の方法による減衰量が概ね合致している。(1)及び (2)の方法は障害物の透過率をゼロと仮定しているから、植栽密度 4本/100 c m² のヒサカキは 20kHzの音に対して透過率ゼロに近い障害物と見なしうる。そして植栽密度 1、2本/100 c m² の植樹帯は透過率がゼロから1の間にある障害物と言える。従って、挿入損失ゼロを示す横軸は透過率1を持つ植樹帯を示すと考えられる。ただし植樹帯の挿入損失の最大値は剛な障害物による回折減衰量を越えることはないと考えるのが自然であろう。

植栽密度 4本/100 c m² のヒサカキの場合に透過率ゼロとなるのは概ね 10kHz以上と思われる。ストウツゲとクサツゲは Kurzeの近似式に近い挿入損失を示すものはないが、(1)の方法で透過率ゼロに近づくとと思われる周波数は植栽密度 4本/100 c m² の場合でそれぞれ 25kHz以上、40kHz以上と考えられる。

4-3-3 まとめ

植樹帯の挿入損失は植樹帯の物理量に比例し、植樹帯そのものの挿入損失は植樹帯内部における挿入損失から求めることができる。また植樹帯は透過率ゼロと1の間にある障害物として取扱うことができる。

4-4 葉面積と挿入損失

4-4-1 葉面積係数 (F・L) と挿入損失 (I L)

植樹帯そのものによる挿入損失は4-3で検討したように植樹帯内部での挿入損失と考えられる。そこで各樹種について植樹帯の幅 0.6m、植栽密度 1、2、4本/100 c m² の植樹帯内部の挿入損失と葉面積の関係を考察する。対象とする挿入損失は図II-96に示した受音点のものであり、音源からの距離 0.4mの位置は幅 0.2mの植樹帯に相当する。同様に 0.6mと 0.8mの位置は幅 0.4m及び 0.6mの植樹帯に相当する。

ここで葉面積に関する記号と言葉を次のように定義する。

F : 単位体積当りの(片側)葉面積 [m^{-1}]

L : 音が通過する植樹帯部分の長さ [m]

F · L : 葉面積係数 [無次元]

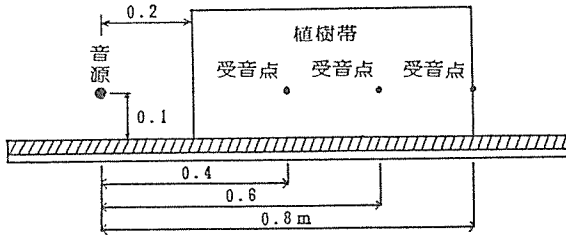


図 II -96 植樹帯内の受音点

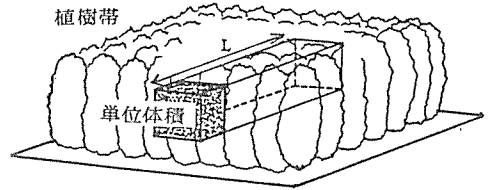


図 II -97 葉面積係数 (F · L) の概念

図 II -97 に示すように F は一辺が単位長さの立方体に含まれる総葉面積であり、4 - 2 の表 II -10 に示した各樹種の通過部分葉数と葉面積を用いて算出した。F · L は単位断面積当りの、音が通過していく経路中に実際に存在する総葉面積を意味する。各植栽密度における植樹帯の F と F · L を表 II -11 に示す。

表 II -11 単位体積当りの葉面積と葉面積係数

樹種	植栽密度	F mm^{-1}	F · L		
			200 mm	400 mm	600 mm
スドウツゲ	1	0.02048	4.1	8.2	12.3
	2	0.04097	8.2	16.4	24.6
	4	0.08193	16.4	32.8	49.2
ヒサカキ	1	0.07198	14.4	28.8	43.2
	2	0.14395	28.8	57.6	86.4
	4	0.28790	57.6	115.2	172.7
クサツゲ	1	0.02275	4.6	9.1	13.7
	2	0.04550	9.1	18.2	27.3
	4	0.09100	18.2	36.4	54.6

図 II -98 ~ II -115に葉面積係数 ($F \cdot L$) と挿入損失 ($I L$) の関係を周波数別に示す。これらの図では挿入損失が大き過ぎて暗騒音の影響を受けているデータは除いた。ただし、マイク特性から 80kHzと100kHzのデータは不正確であると思われるが、一応測定結果として掲げておく。

挿入損失は周波数2kHzではどの樹種でも葉面積係数に関係なく殆ど認められず、2.5kHzでヒサカキだけが葉面積係数に比例している。4~6.3kHz辺りからスドウツゲの挿入損失に傾きが認められ始める。この周波数域ではヒサカキの傾きは植栽密度により異なっていて、密度の小さい方が傾きは大きい傾向がある。8kHzでヒサカキの傾きはほぼ一直線状となり、それ以上の周波数でも同様である。10kHzでスドウツゲの傾きがヒサカキの線に乗るようになり、クサツゲも一部は乗るものの植栽密度の大きいものはヒサカキの線から大きくはずれている。20kHz位からクサツゲの傾きも明確となり始め、25kHz以上では3樹種共に同じような傾きを持った直線状をなす。

挿入損失の傾きは10kHzより低い周波数では植栽密度により異なっている。しかしそれは葉面積係数が小さくかつ挿入損失も小さい範囲でのバラツキである故、それらは無視しうる。従って樹種別に葉面積係数 $F \cdot L$ が判っていれば、これらの直線より特定の周波数の挿入損失が求められる。これで実用上は十分であると思われる。

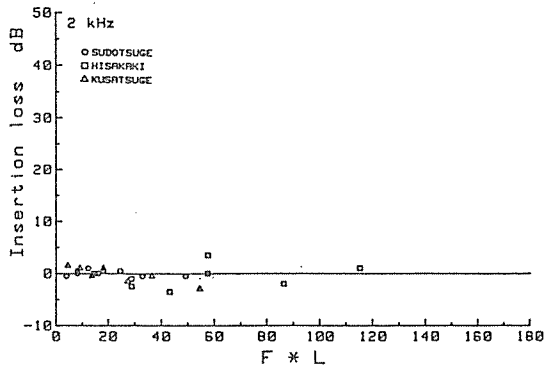


図 II - 98 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 2kHz

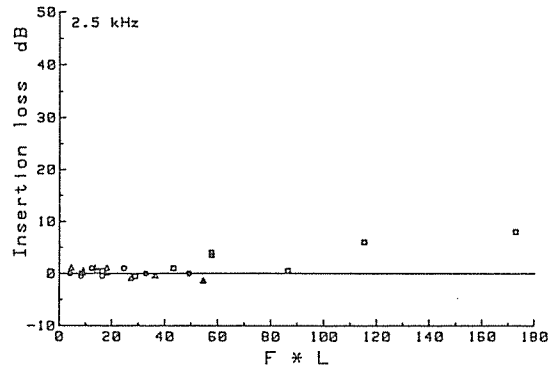


図 II - 99 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 2.5kHz

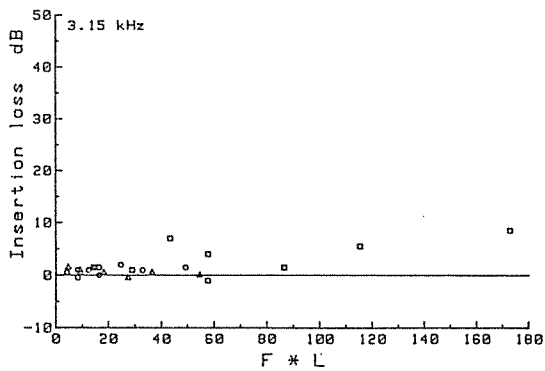


図 II - 100 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 3.15kHz

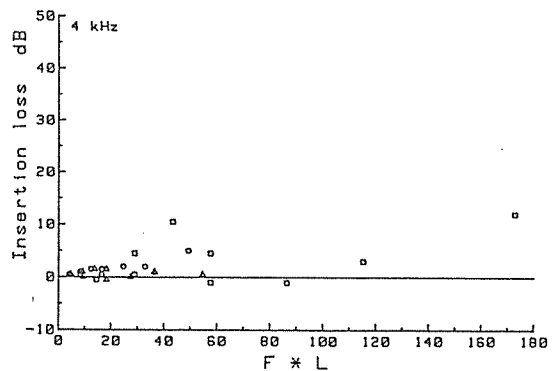


図 II - 101 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 4kHz

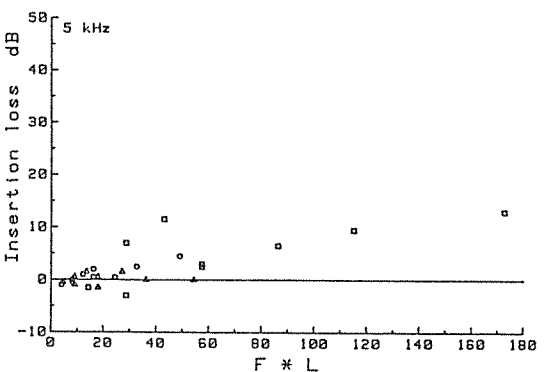


図 II - 102 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 5kHz

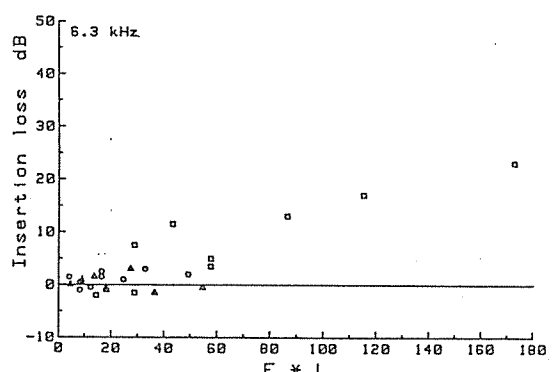
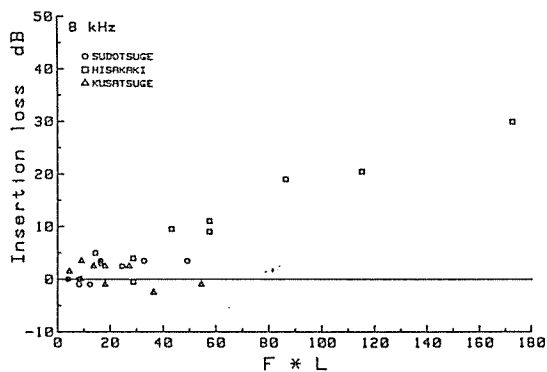
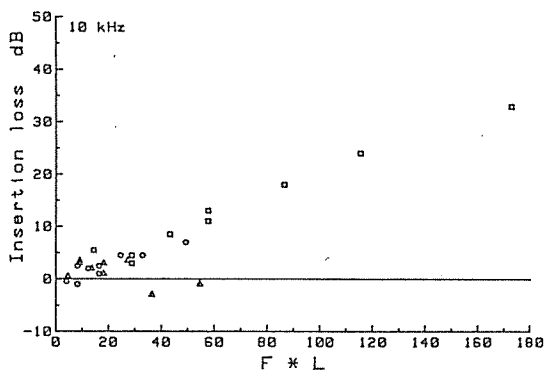


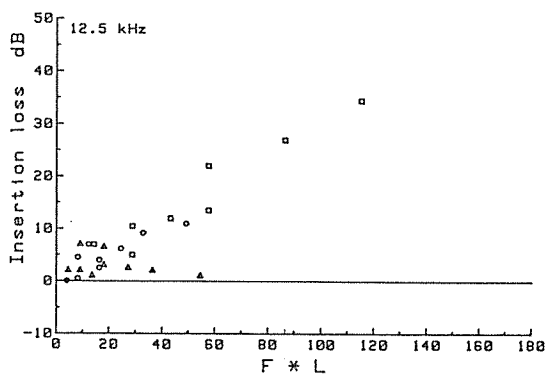
図 II - 103 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 6.3kHz



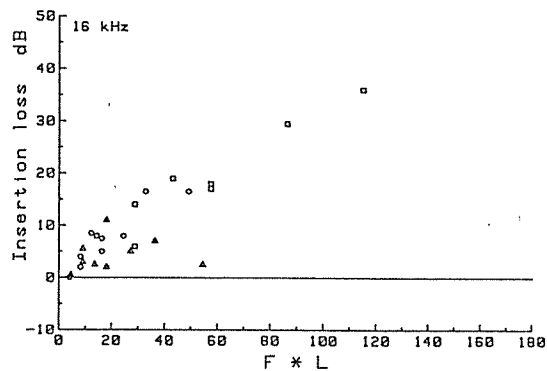
☒ II-104 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 8kHz



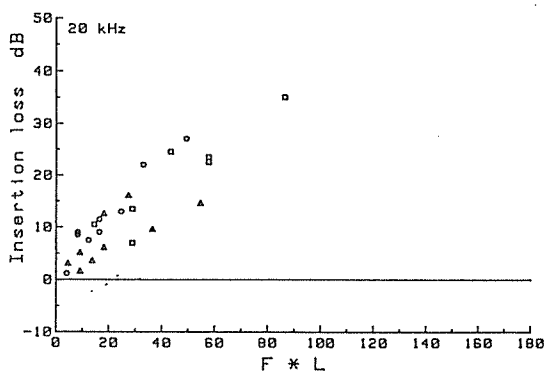
☒ II-105 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 10kHz



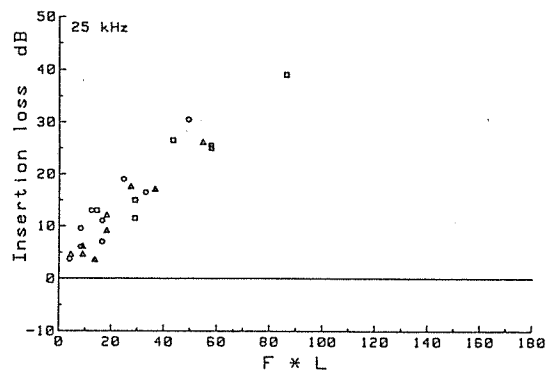
☒ II-106 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 12.5kHz



☒ II-107 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 16kHz



☒ II-108 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 20kHz



☒ II-109 葉面積係数 (F · L) と挿入損失 (I L) 25kHz

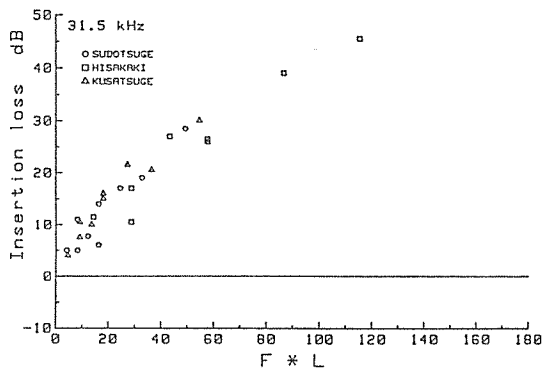


図 II - 110 葉面積係数 ($F \cdot L$) と挿入損失 (I L) 31.5kHz

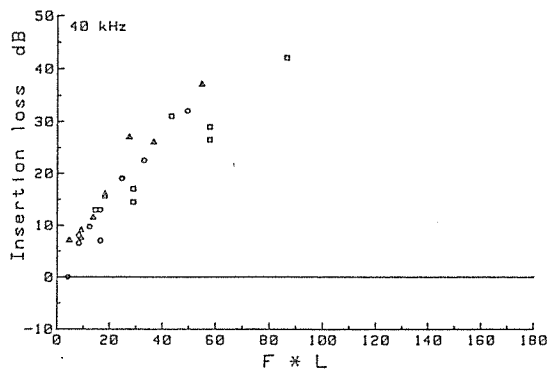


図 II - 111 葉面積係数 ($F \cdot L$) と挿入損失 (I L) 40kHz

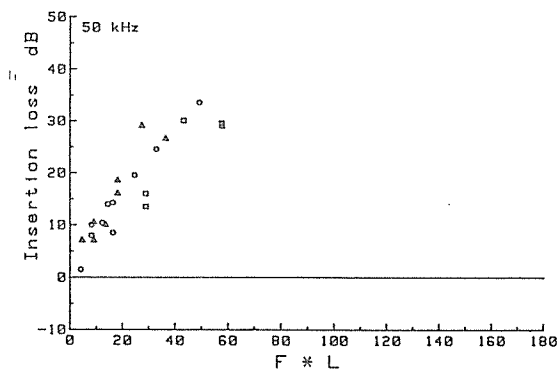


図 II - 112 葉面積係数 ($F \cdot L$) と挿入損失 (I L) 50kHz

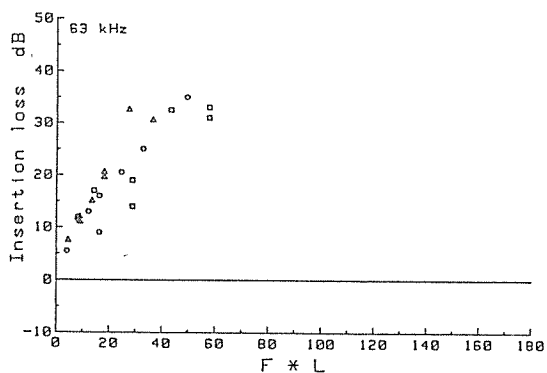


図 II - 113 葉面積係数 ($F \cdot L$) と挿入損失 (I L) 63kHz

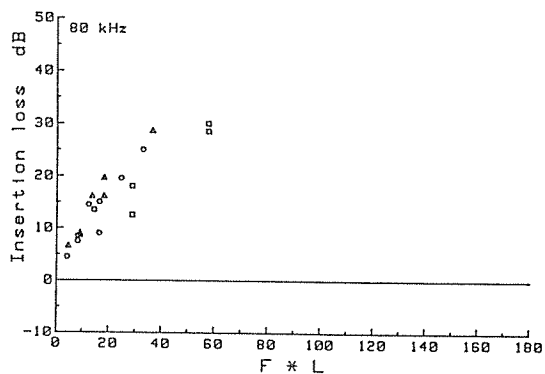


図 II - 114 葉面積係数 ($F \cdot L$) と挿入損失 (I L) 80kHz

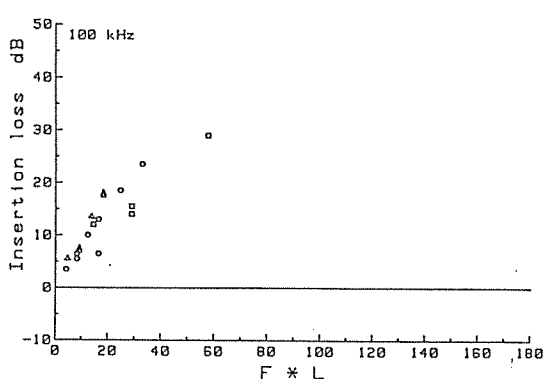


図 II - 115 葉面積係数 ($F \cdot L$) と挿入損失 (I L) 100kHz

4-4-2 単位葉面積係数当りの挿入損失 ($IL/F \cdot L$) と植栽密度

前項で示した図から植樹帯の挿入損失、つまり植樹帯内部における特定周波数の挿入損失は葉面積係数 ($F \cdot L$) にほぼ比例することが分った。従ってある周波数の挿入損失の傾き、即ち (挿入損失) / (葉面積係数) が周波数に対してある規則にのっとっていれば、前項で示した図は一枚の図に整理できる。そこで横軸に周波数の対数値をとり、縦軸に単位葉面積係数当りの挿入損失 (以下 $IL/F \cdot L$ と表現する) をとって、樹種ごとに示したものが図 II-116~II-118である。

これらの図を見ると、ある周波数まで $IL/F \cdot L$ はゼロの近辺に集中し、樹種により異なるが、ある周波数以上で $IL/F \cdot L$ は周波数の対数値、即ち $\log_{10}(f)$ に比例している。そして全樹種を通して、植栽密度 1本/100cm² の場合の $IL/F \cdot L$ が 4本/100cm² のそれより大きな値を示しており、その中間に 2本/100cm² の $IL/F \cdot L$ が入ってくる傾向がある。

植栽密度が大きい場合は、植樹帯の幅が同一であれば、当然葉面積係数 ($F \cdot L$) も大きい。従って前項で明らかなように、同一の幅の植樹帯では挿入損失の絶対量は植栽密度の大きい方が大きい。しかし個々の植栽密度別に見た $IL/F \cdot L$ は植栽密度の小さい方が大きな値となっている。この理由は次のように考えられる。植栽密度が大きい場合は何枚もの葉が密に狭い空間に存在してしまい、数枚の葉が一枚の葉に相当して音を散乱すると思われる。つまり逆に植栽密度が小さい場合には一枚一枚の葉が十分に散乱効果を発揮するためと思われる。

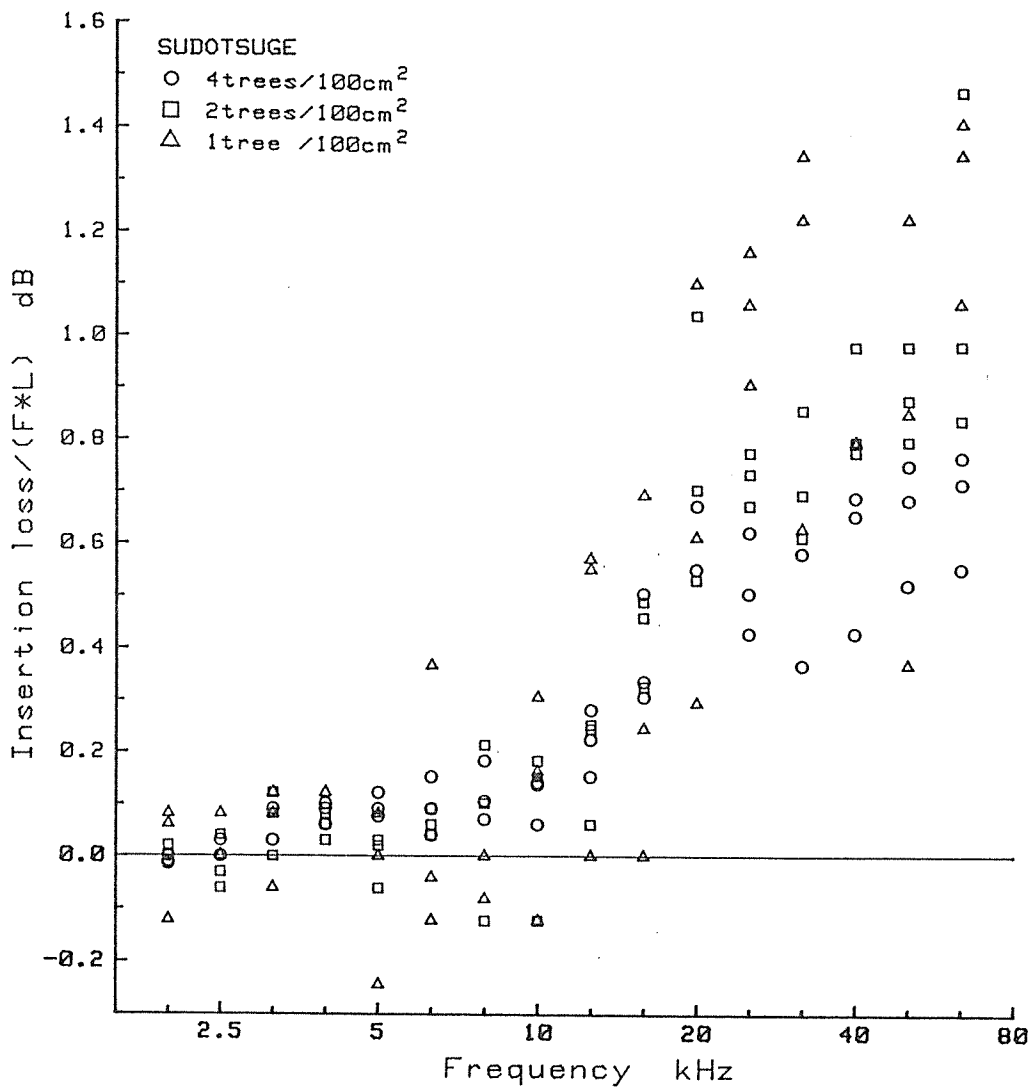


図 II -116 (挿入損失) / (葉面積係数) スドウツゲ

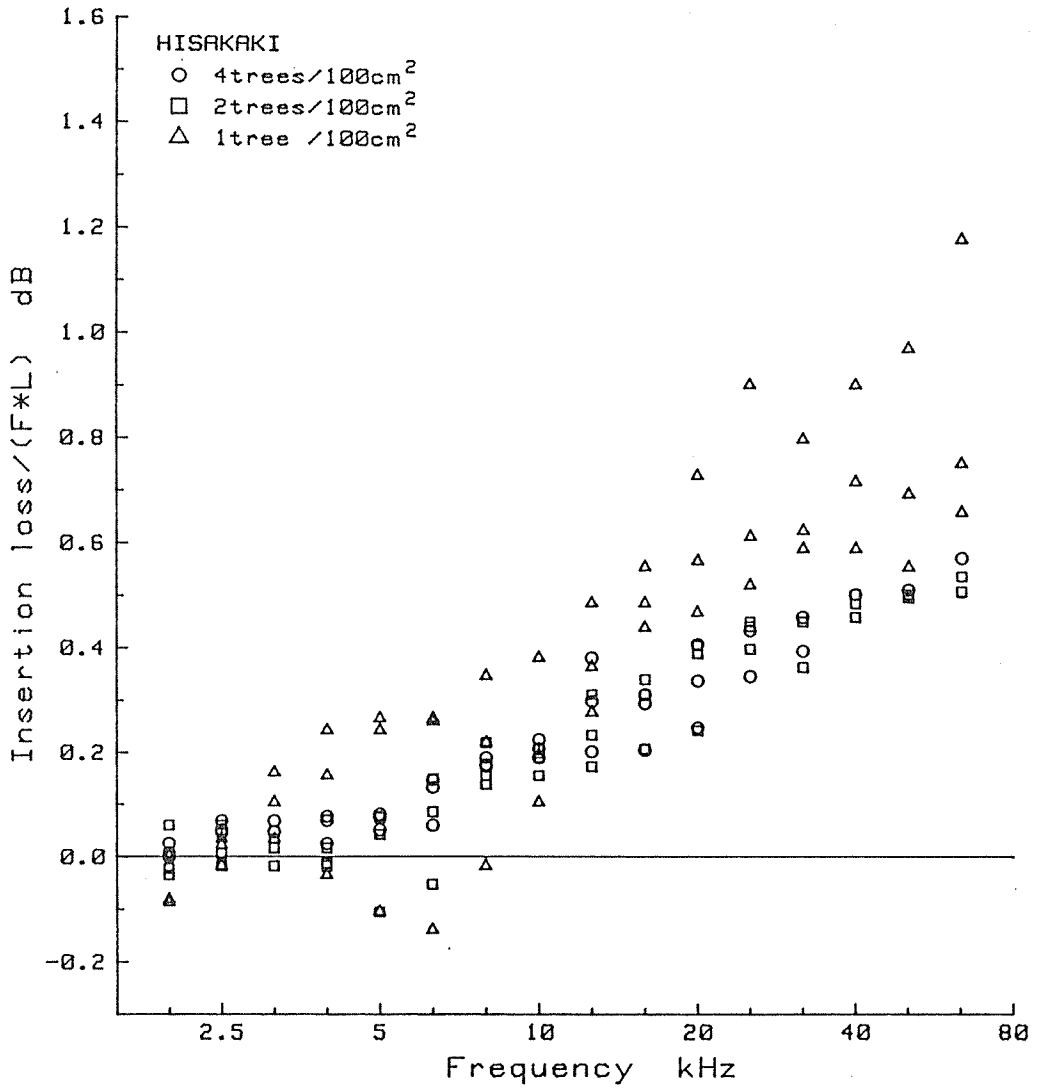


図 II -117 (挿入損失) / (葉面積係数) ヒサカキ

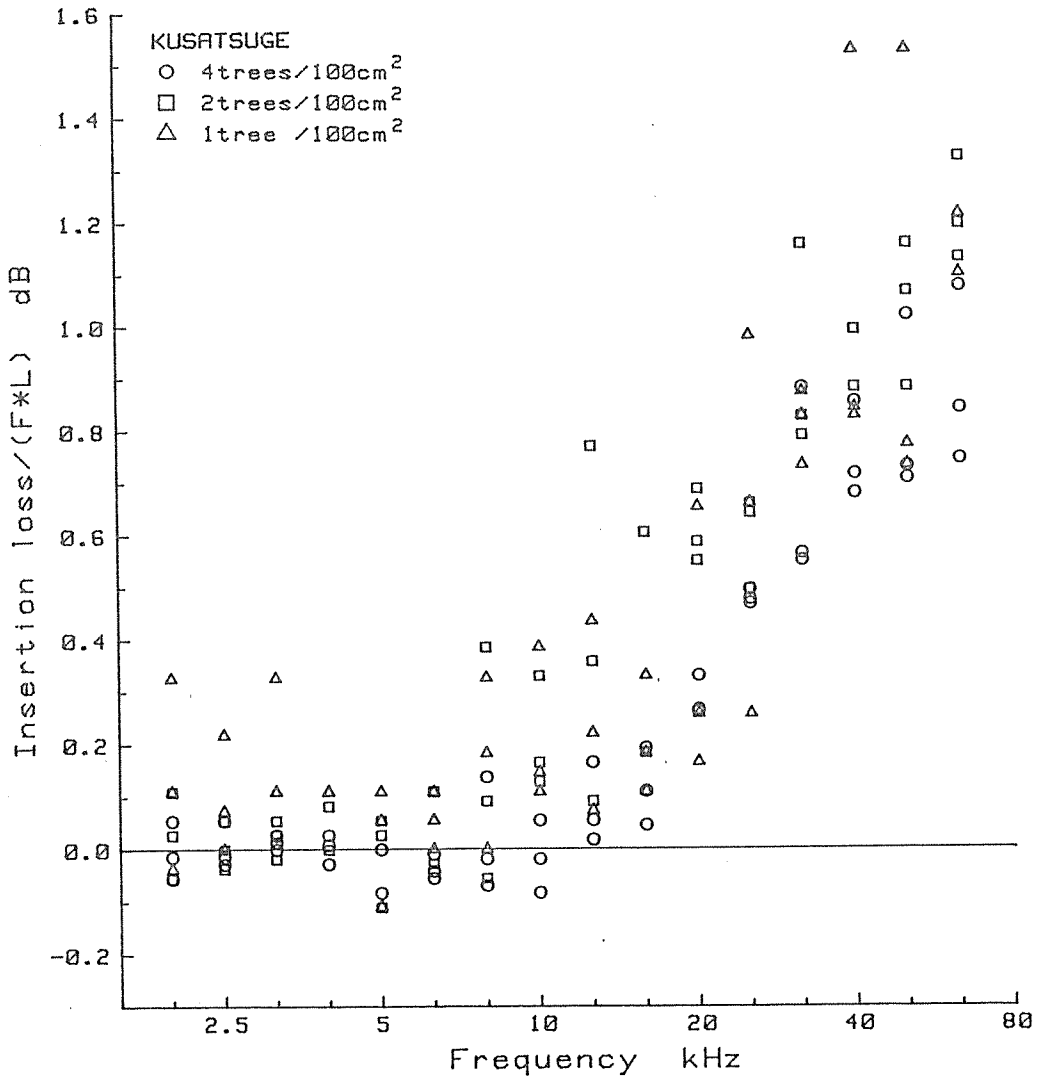


図 II -118 (挿入損失) / (葉面積係数) クサツゲ

このことは植樹帯で遮音する場合の注意点となろう。植樹帯の減音効果を十分に引出すためには、極端に密植するよりは樹冠 (canopy) が 1本の樹全体を十分に覆うように植栽し、かつ植樹帯の幅を大きくとることが必要となる。つまり、同じ葉面積係数 $F \cdot L$ の場合単位体積当りの葉面積 F を大きくして、音が通過する植樹帯部分の長さ L を小さくするよりは、 F を小さくして L を大きくする方が一枚の葉の散乱効果は良くなる。勿論同じ L なら F が大きい方が挿入損失の絶対量は大きい。これは道路周辺の土地の利用状況から F 及び L が決定されるべきことを示唆している。

この植栽密度による音の散乱効果の差についてここで解析することは現段階では困難である。そこで次に植栽密度別 $I L / F \cdot L$ の平均値を樹種ごとに図 II-119~II-121に示す。スドウツゲでは周波数 16kHz までは植栽密度の差は余りなく、20kHz 以上で明白である。

ヒサカキの場合は、植栽密度 1本/100 cm^2 の $I L / F \cdot L$ が周波数の増加と共に顕著に大きく、他の2つは殆ど同値と言える。ヒサカキの葉は先に表 II-10 に示したように他の2種に比べ極端に大きく長径 46.8 mm、短径 18.7 mm である。実験は 1/10 スケールで実施しているから、実寸換算のそれらは 46.8 cm、18.7 cm の葉となる。実際にこのような植樹帯を求めることは困難であろう。そしてヒサカキの単位体積当りの葉面積 F も他の樹種の約 3 倍となっている。これらのことから、 F が極端に大きくなるとそれ以上 F を大きくしても葉が音を散乱する効果は変化せず、植栽密度に無関係に挿入損失は葉面積係数 ($F \cdot L$) に比例する結果となると考えられる。従って、ヒサカキの場合に植栽密度 2本/100 cm^2 以上では挿入損失がリニアに $F \cdot L$ に比例しており、結果として $I L / F \cdot L$ も同じ値になっていると説明しうる。

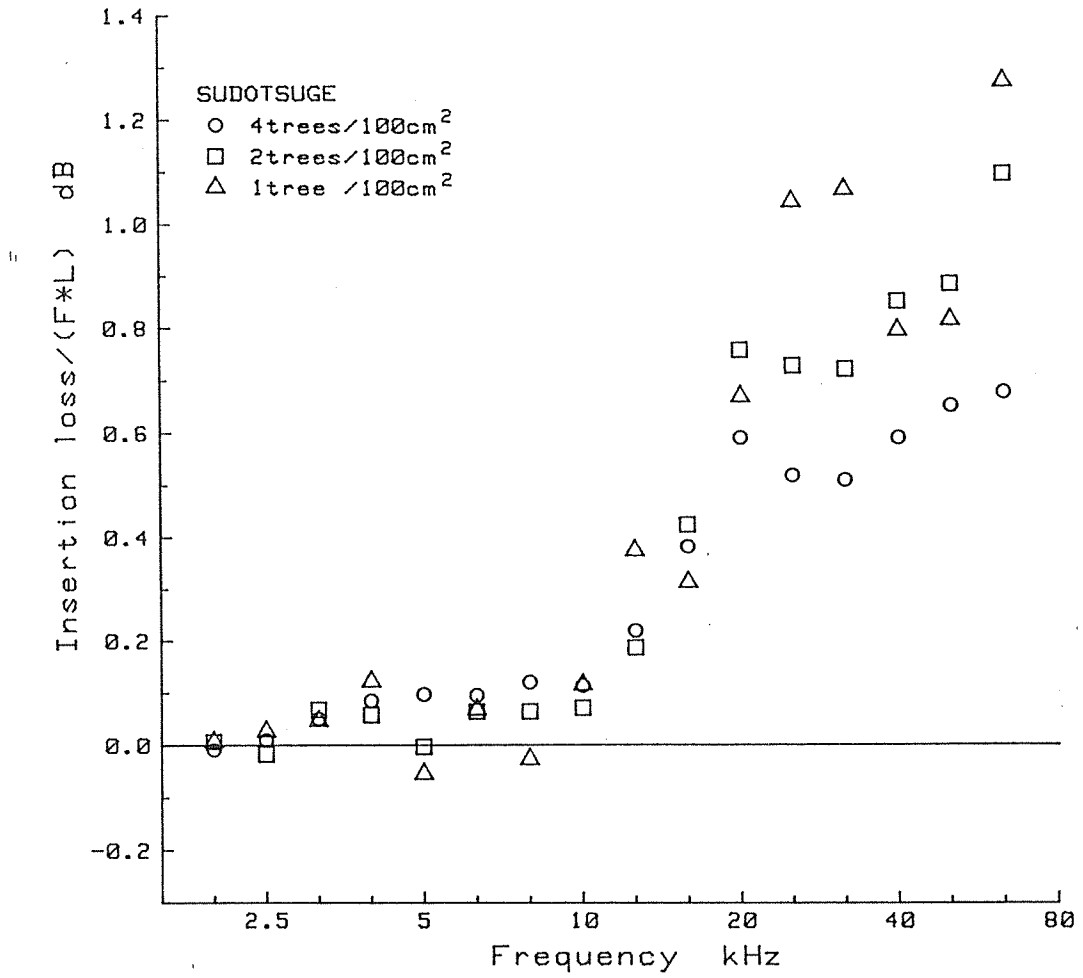


図 II -119 (挿入損失) / (葉面積係数) スドウツゲの平均値

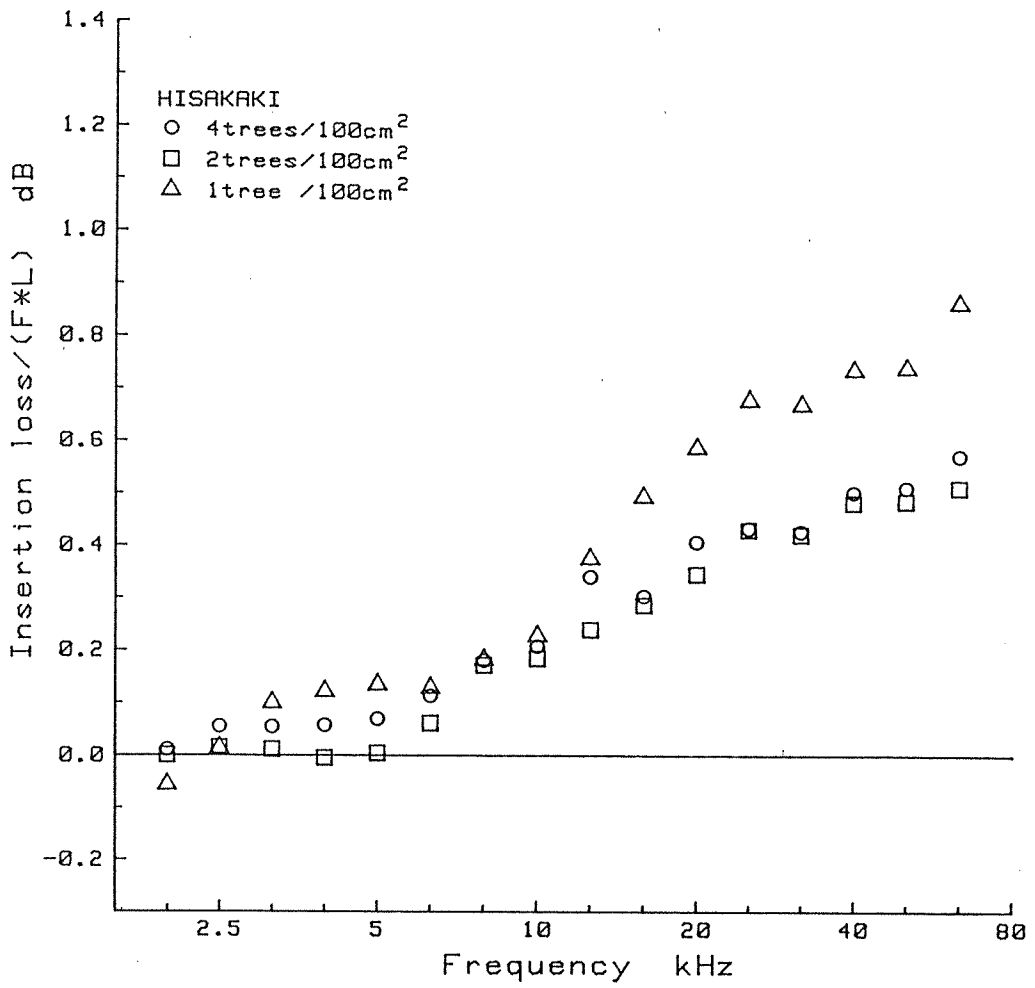


図 II -120 (挿入損失) / (葉面積係数) ヒサカキの平均値

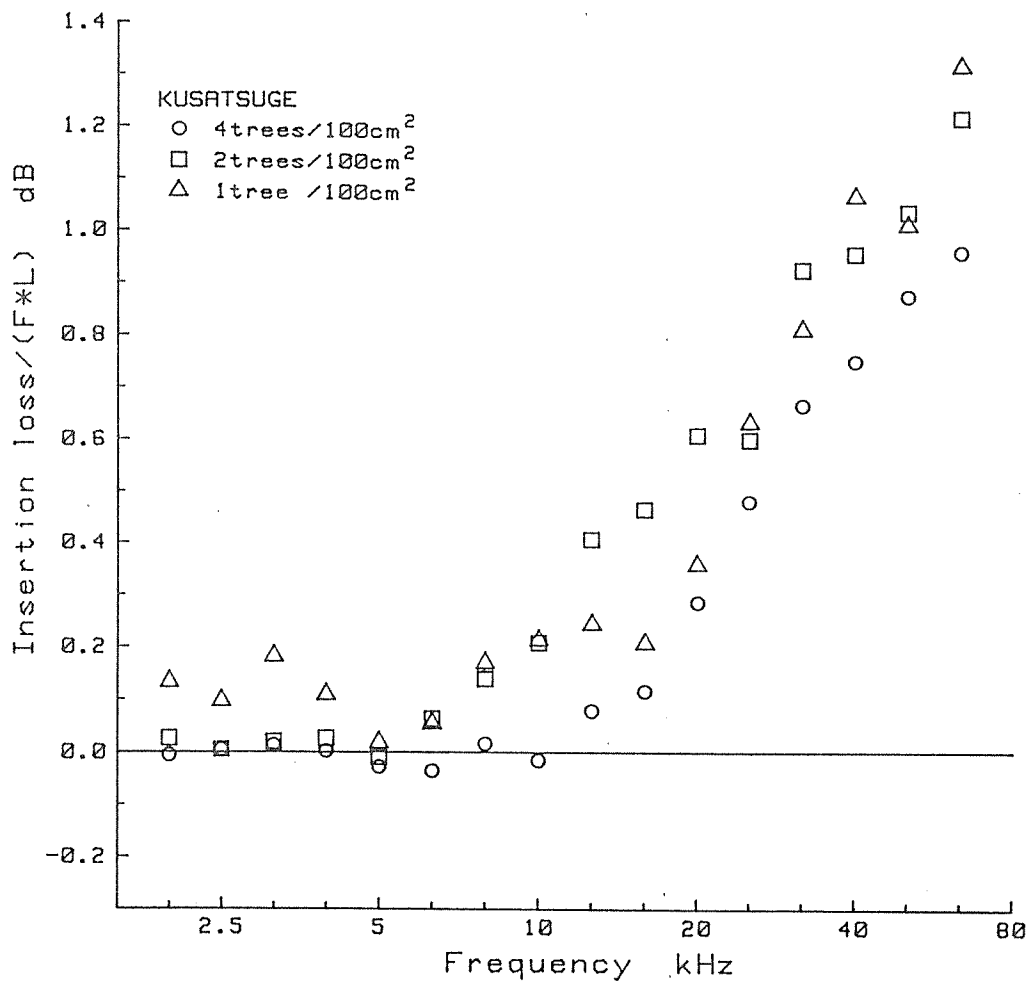


図 II -121 (挿入損失) / (葉面積係数) クサツゲの平均値

クサツゲでも植栽密度の小さい方がやはり $IL/F \cdot L$ の値は大きい傾向にあると言える。3樹種を通して植栽密度による $IL/F \cdot L$ の値の差を見ると、スドウツゲが最も大きく、20kHz以上で 0.4~0.5dB である。ただし、測定結果は 20kHz以上で素直な線形をしているとは思えず、測定上の問題が多少入っていると思われる。ヒサカキの $IL/F \cdot L$ 値の差は 0.2~0.3dB であり、クサツゲも同様の値である。実際に実験結果から単位葉面積係数当りの挿入損失 ($IL/F \cdot L$) 値を求める場合に、厳密に植栽密度別に求める必要は余りないと考えられる。

そこで図 II-122 に樹種別に $IL/F \cdot L$ の平均値を示す。これを見るとスドウツゲとクサツゲは約 10kHz 以上で同じような傾きを持っており、ヒサカキだけが小さい傾きである。ヒサカキの植栽密度別 $IL/F \cdot L$ の平均値 (図 II-120) は植栽密度 1本/100 cm^2 の場合だけ大きく、他の2つの植栽密度の場合が明らかに小さい値であった。従って、3つの植栽密度による $IL/F \cdot L$ 値をすべて平均した結果、ヒサカキだけは平均値の傾きが小さくなってしまっている。

次に各樹種の傾きがほぼ直線となり始める周波数を見ると、ヒサカキが 5kHz 辺り、スドウツゲが 8kHz 辺り、クサツゲの場合に 10kHz 辺りである。この順は各樹種の葉の大きさヒサカキ > スドウツゲ > クサツゲの順に相当している。これは前にも述べたように葉が大きい程低い周波数から減音効果が出てくることを示すものと言えよう。

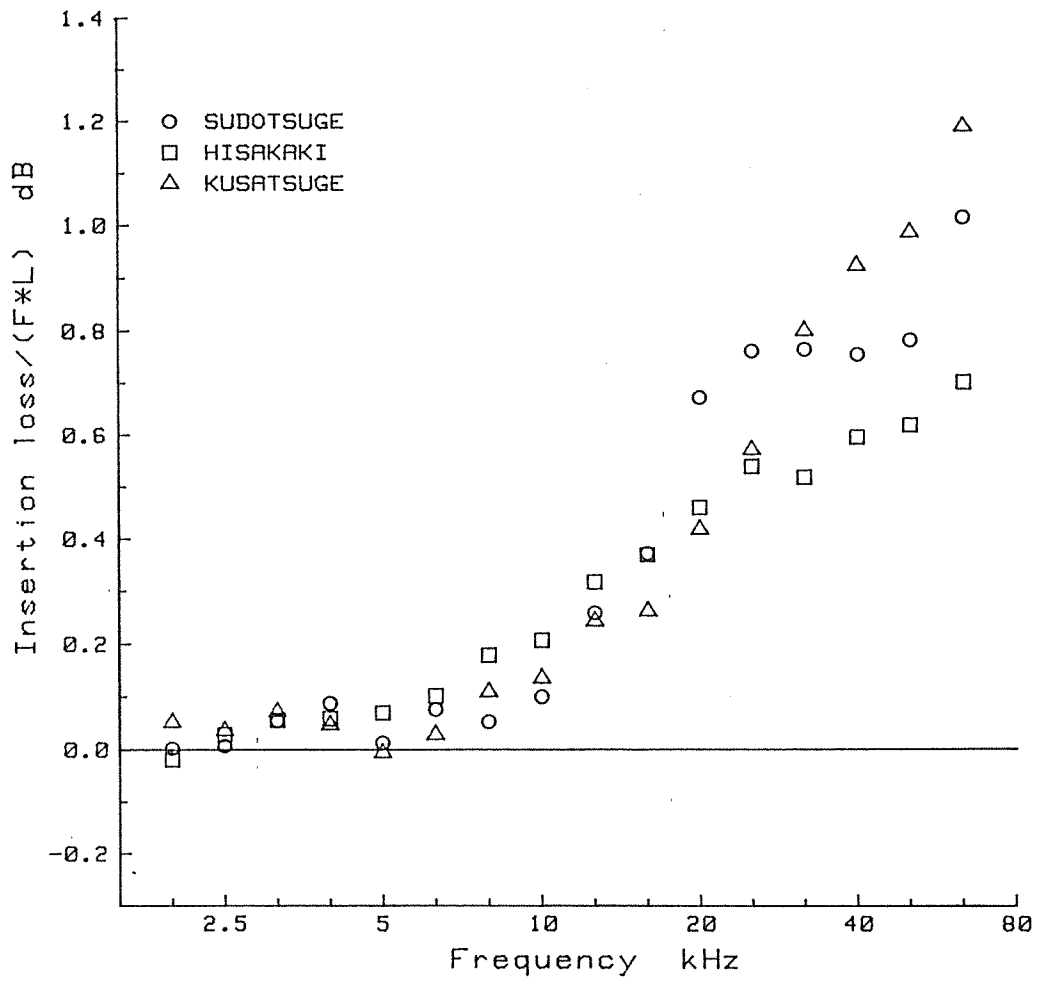


図 II -122 (挿入損失) / (葉面積係数) 樹種別平均値

4 - 4 - 3 単位葉面積係数当りの挿入損失 ($I L / F \cdot L$)
と散乱係数 ($k \cdot a$)

これまで無次元数である葉面積係数と挿入損失について検討してきた。その結果、挿入損失を葉面積係数で割った値 ($I L / F \cdot L$) はある周波数以上で周波数の対数值に比例することが判明した。しかし、この周波数も無次元数で表現されれば、植樹帯の挿入損失に関与する全てのパラメータを一般化でき、模型植樹帯の実験結果を実際の植樹帯に適用できることになる。

ここで周波数 f から求められる波長 λ と葉の大きさ a からなる無次元数である“散乱係数” $k \cdot a$ を定義する。

$$k \cdot a = (2 \pi / \lambda) \cdot a \quad (15)$$

ここで $k = 2 \pi / \lambda$: 波長定数 $[m^{-1}]$
 $\lambda = c / f$: 波長 $[m]$
 c : 大気中の音速 $[m \cdot s^{-1}]$

結局、散乱係数 $k \cdot a$ は周波数 f を葉の大きさ a で無次元化された周波数とも言える。ここで a は各樹種の葉の平均的大きさであり、各樹種の葉面積と同一の面積を持つ円の直径である。表 II-12 に 3 樹種の葉の大きさ a を示す。

表 II-12 葉の大きさ

樹種	a mm
スドウツゲ	12.4
ヒサカキ	26.9
クサツゲ	10.8

先に 4 - 4 - 2 で求めた各樹種の $I L / F \cdot L$ の平均値と $k \cdot a$ との関係を図 II-123 に示す。ここで葉の大きさ a 、単位体積当りの葉面積 F 及び音が通過する植樹帯の幅 L は測定可能なものである。そして k は周波数から決まる値である。従って k 、 a 、 F 、 L が判れば植樹帯による挿入損失は求められる。ただし、ここで言う挿入損失は音の回折や反射の影響を受けない植樹帯だけの、または植樹帯内部における挿入損失である。

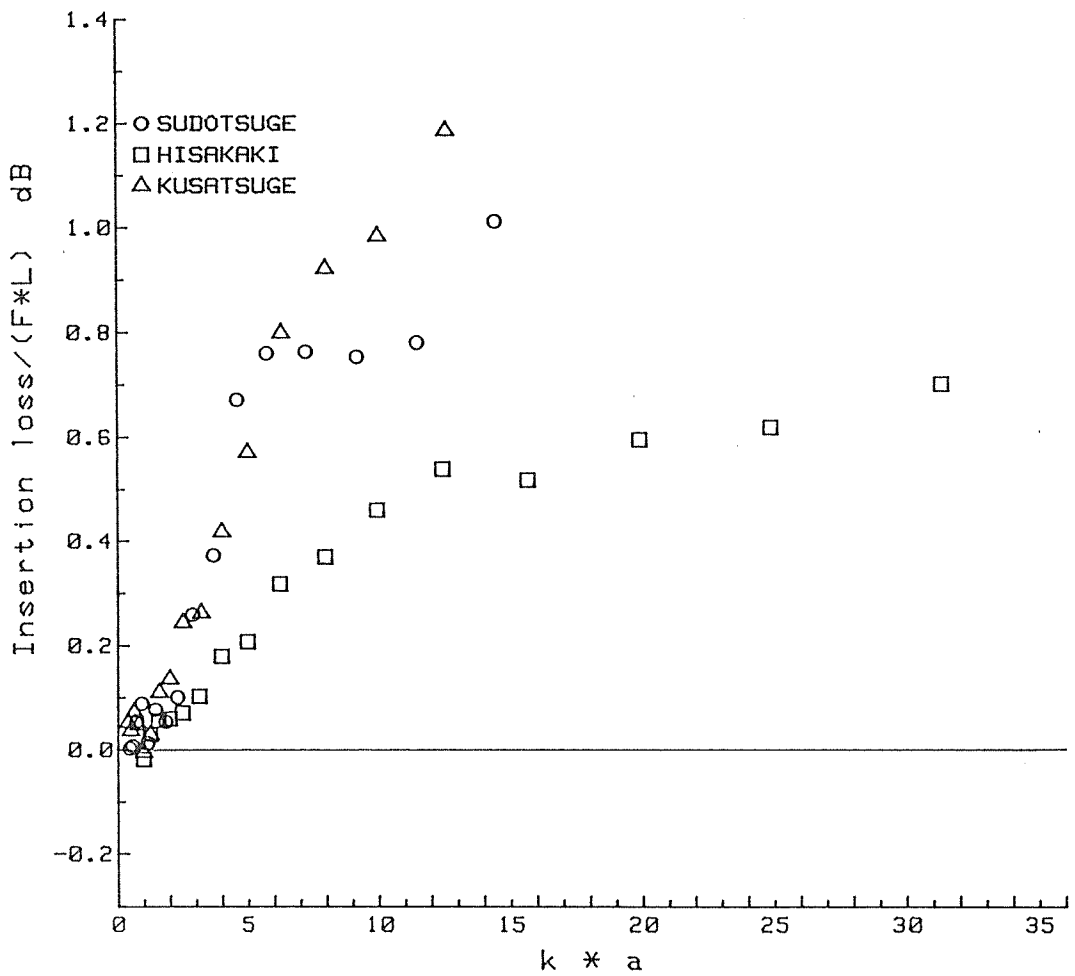


図 II -123 (挿入損失) / (葉面積係数) と散乱係数の関係

この図で散乱係数 $k \cdot a$ と葉面積係数 $F \cdot L$ は無次元数故、樹種に無関係に 1 本の線になることが望ましい。しかしストウツゲとクサツゲの場合は $k \cdot a = 7$ 程度まで 1 本の線上であるがそれ以上ではばらついている。ヒサカキは兩者より小さな値でかなり離れている。ヒサカキの場合は前項に述べたように極端に葉が大きいこと、 $IL / F \cdot L$ の平均化の際に植栽密度 2、4 本/100 cm^2 での小さな値に引っ張られていることから、実用上問題があると思われる。実用ではストウツゲとクサツゲの線が適当と言えよう。

4-4-4 植樹帯の挿入損失の求め方

ここで実際に図 II-123 を用いて植樹帯の挿入損失を求めてみよう。ただし前述の理由からヒサカキの線は用いない。

便宜のためこれまで定義した用語、葉面積係数と散乱係数及び記号をここに再掲する。

葉面積係数 $F \cdot L$: 単位断面積当りの、音が通過していく経路中に実際に存在する総葉面積

散乱係数 $k \cdot a$

F : 単位体積中の (片側) 総葉面積 $[\text{m}^{-1}]$

L : 音が通過する植樹帯の幅 $[\text{m}]$

$k = 2\pi / \lambda$: 波長定数 $[\text{m}^{-1}]$

a : 葉の大きさ $[\text{m}]$

$\lambda = c / f$: 波長 $[\text{m}]$

$c = 340 \text{ m} / \text{s}$: 大気中の音速 $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

f : 周波数 $[\text{Hz}, \text{s}^{-1}]$

周波数 2000 Hz の音に葉の大きさ 0.1 m の樹を用いる場合を想定すると、波長定数 k は、

$$k = 2\pi / \lambda = 2\pi f / c = 2 \times 3.1416 \times 2000 / 340 = 37$$

従って、散乱係数 $k \cdot a$ は

$$k \cdot a = 37 \times 0.1 = 3.7$$

この $k \cdot a = 3.7$ の値をストウツゲ、又はクサツゲの線にあてはめると $I L / F \cdot L$ の値 0.4 が求まるから、挿入損失 $I L$ は

$$I L = 0.4 \times F \cdot L$$

ここで 2000Hz の音を 8dB 減音する必要があるれば、葉面積係数 ($F \cdot L$) 20 を持つ植樹帯が必要となる。また、葉面積係数が最初から 10 と決まっていれば、その植樹帯は 2000Hz の音を 4dB 減音することになる。

4-4-5 まとめ

- (1) 植樹帯の挿入損失 ($I L$) は単位体積当りの総葉面積 (F) と音が通過する植樹帯の幅 (L) の積 $F \cdot L$ (葉面積係数と呼ぶ) の増加と共に大きくなる。
- (2) 単位葉面積係数当りの挿入損失 ($I L / F \cdot L$) はある周波数 f 以上で $\log_{10} (f)$ に比例して増加する。
- (3) 上記周波数は葉の大きさに関係し、葉が大きい程低い周波数から挿入損失が認められる。
- (4) (2) の周波数を波長定数 (k) と葉の大きさ (a) の積で無次元化し、無次元数である葉面積係数 ($F \cdot L$) と共に挿入損失を整理することが可能である。ここでは挿入損失を与えるパラメータがすべて一般化されており、この図 II-123 より植樹帯の挿入損失が計算できる。ただし、本実験で用いたヒサカキのように極端に葉が大きい場合に他の樹種と異なる結果となること、及びストウツゲの結果がなめらかな線にならなかったこと、これらは測定精度の向上と共に今後の課題である。
- (5) $I L / F \cdot L$ は樹木の植栽密度が小さい方が大きくなる傾向がある。これは植栽密度が大きいと、葉一枚の散乱効率が落ちるためと思われる。従って同じ葉面積係数 ($F \cdot L$) でも F を小さくし L を大きくする方が効率が良い。しかしこの機構の解明も今後の課題である。