

Y-S³ スピーカシステムデザインガイド

シミュレーション設計および実測確認

- 直接音と反射音の影響 -

2008年12月

目次

はじめに	2
1. スピーカの狙い位置の設定	3
2. 特定の受聴点における応答の評価	8
3. 出力レベルの設定	11
まとめ	14

はじめに

Y-S³ は、スピーカを中心とした出力系システムの設計支援ソフトであり、特に、スピーカの配置設計において有効なツールとなる。このソフトを用いることで、設計者は必要な床面形状を簡易に入力することができ、所定の位置と角度でスピーカを設置したときの床面上でのカバーエリアを 3 次元内にて検討することが可能となる。

また、Y-S³ は複数スピーカによる干渉を考慮した音圧分布の計算や、特定の受聴点における応答の計算、システムのゲイン設定を変更することによる床面での SPL 計算などを実行することが可能で、このソフトを使うことにより出力系システムの設計時点において検討すべき多くの項目に関する有効な情報を得ることができる。

以下では、スピーカの狙い位置の設定、特定の受聴点における応答の評価、出力レベルの設定を例に取り、実際の設計過程において Y-S³ の計算結果がどのように利用できるかの例を示す。また、Y-S³ は簡易形状入力と適切なカバーエリアの設定によるスピーカ配置設計を前提として、直接音のみの影響を計算しているが、実際の音場における応答は、壁、床、天井からの反射音の影響を受ける。従って、直接音計算の結果が実際の音場における応答にどのように反映されるかを把握しておくことは、設計時点での評価に際して有効である。以下では、実測の例も併せて示すことで、計算結果と実音場における応答との対応を示す。

例として用いたホールは 600 席の多目的ホールで、台形型の床面を持つ。室幅は 22m、奥行き 24m（舞台先端から客席後壁まで）、天井高は 14m（客席部最大）で、室の残響時間は 1.2 秒（500Hz 帯域、空席、幕設備状態）である。

- ◇ ホール：600 席の多目的ホール
- ◇ スピーカ種類：IF2112/64 × 2 台からなるスピーカアレイ 1 つ
- ◇ スピーカ位置：正面高さ 8m（舞台床面から 7.2m）

1. スピーカの狙い位置の設定


Y-S³ では、スピーカアレイごと、またはそれを構成するスピーカごとのコンター図が出力できるため、床面上でのカバーエリアをチェックしながら、スピーカの狙い位置を調整することができる。このとき、複数のスピーカによるカバーエリアの重なりが大きいと、床面上での音圧分布に位相干渉による谷間が広い範囲で現れる。Y-S³ では音圧分布のカラーマップ表示を使って、この影響を評価できる。ただし、Y-S³ では直接音による影響のみを計算するため、反射音による影響を含んだ実際のホール内における音圧分布とは異なることが予想される。この反射音の影響がどのように現れるのかを把握しておくことは、カバーエリアの設計において重要である。

以下では、センター位置に 2 台構成のスピーカアレイを設置した場合を例にとり、スピーカ狙い位置の設定例とそのときの位相干渉による音圧分布上での谷間の状態を示し、最後に、実際のホールで測定した音圧分布との比較例を示す。

☑ スピーカ狙い位置の設定

➤ 開き角による狙い位置の違い

まず初めに、スピーカの開き角の違いによる、スピーカごとの狙い位置の評価例

を示す。Y-S³ 上では、 をクリックして Single Mode 表示にすると、アレイを構成するスピーカ 1 台ずつの狙いエリアを示すコンターが確認できる。また、画面左上の Frequency と Band を変更することで、表示するコンターの中心周波数とバンド幅が変更できる。以下では、1/1 OCT Band における結果を用いる。

例えば、Splay Angle を 60.0 とすると、黒い四角で示される各スピーカの狙い位置はかなり壁際に近い位置となっており、客席形状に対してスピーカの開き角が広すぎる、という印象を受ける。そこで、Splay Angle を 50.0 に変更すると、各スピーカはそれぞれ左右エリアの中央付近を狙っており、直感的にはほぼ適切な狙い位置になっていると考えられる。

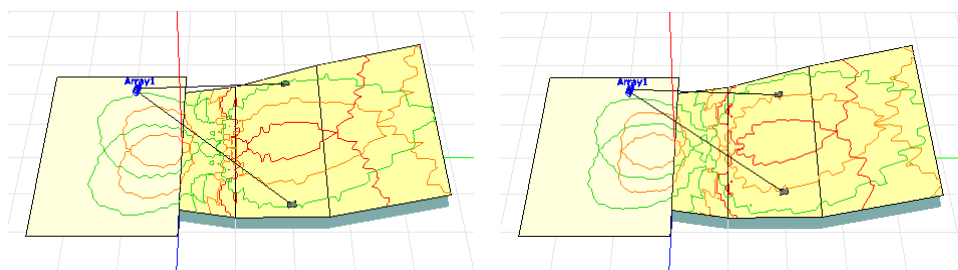

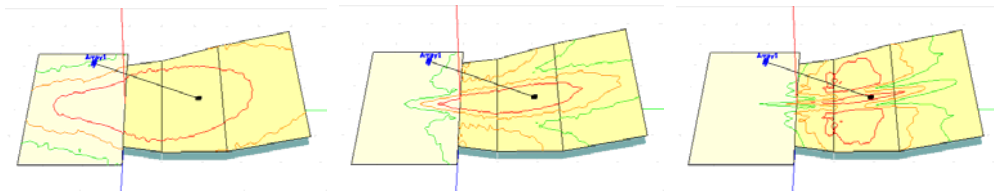


図 1: Splay Angle の変更 (左 : 60.0 右 : 50.0)

➤ カバーエリアの確認


次に、このスピーカが、アレイ全体として適切なエリアをカバーしているかどうかをチェックする。Y-S³上では、をクリックして **Array Mode** に切り替えると、アレイ全体によるコンター図が表示される。下図に **Splay angle 50.0** のときの結果を示す。この図を見ると、現在のアレイ設定で客席内の主要部分となる中央付近をカバーできていることが確認できるが、一方、**1kHz** のコンターでは複数スピーカからの音の干渉によって生じる音圧分布の谷間が観測される。



カバーエリアのチェック (左: 250Hz、中: 1kHz、右: 4kHz 全て 1/1 Oct.Band)

☑ 音圧分布の確認

➤ 周波数帯域による音圧分布の違い

続いて、複数スピーカ間の位相干渉による影響を確認する。Y-S³上では、をクリックして **SPL** モードに切り替えると、音圧分布のカラーマップが表示される。**250Hz** 帯域の分布では、複数スピーカの干渉による音圧の谷間は現れていない。これは対象周波数帯域の波長が 2 台のスピーカの間隔に比べて十分長いためである。

1kHz 帯域の分布では、スピーカ間の干渉による音圧の谷間が観測される。この谷間が許容されるかどうかは、設計の考え方によって変わるが、例えば、室の中央付近ではその分布のばらつきは約 **10dB** 以内に収まっているため許容範囲である、といった判断が可能である。

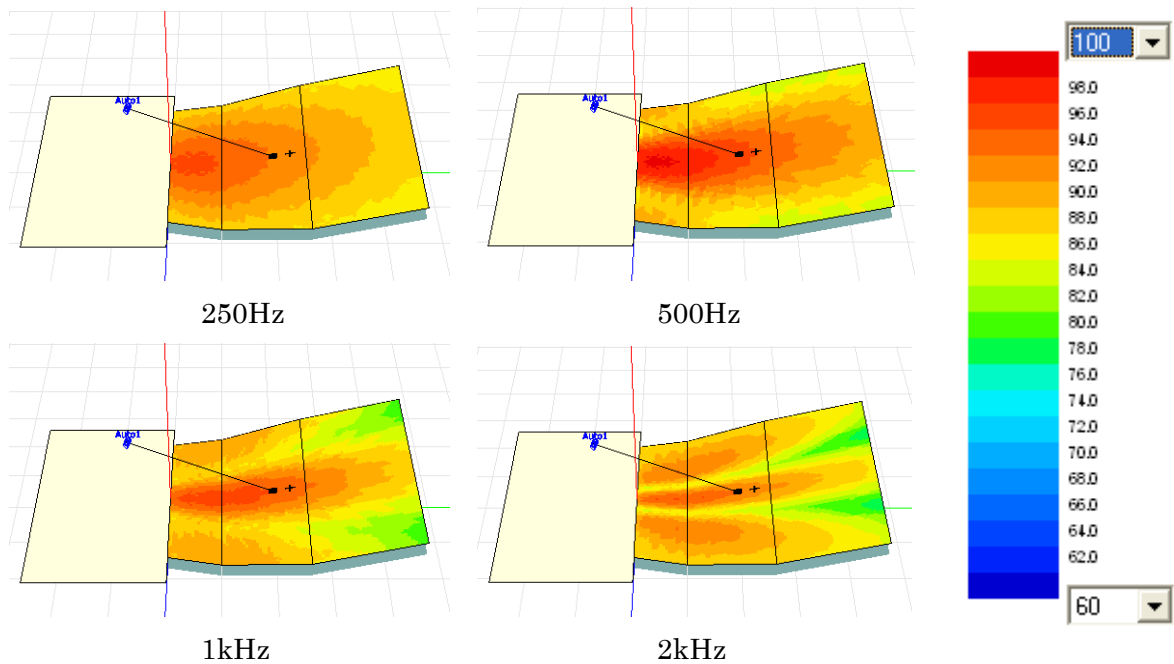


図 2: 周波数帯域ごとの音圧分布 (全て 1/1 OCT Band、周波数は中心周波数)

☑ 実測との比較

複数スピーカ間の位相干渉による音圧分布の谷間は、実際の音場では反射音の影響を受ける。この反射音の影響がどのように現れるのかを把握するため、以下に実測結果との比較を示す。

➤ 実測の条件

実際の音場では、スピーカ IF2115/64 × 2 台を、所定の金具で開き角 50° にて固定し、舞台上部のバトンに吊り下げて舞台床面から 7.2m の高さに設置した。受聴点には無指向性のコンデンサーマイクを設置し、合計 30 点でインパルス応答を測定した。

➤ 中高音域における音圧分布の谷間

500Hz、1kHz、2kHz 帯域での音圧分布を図 3 に示す。図右側は実測結果を示し、図左側は計算結果を示す。共に、1/1OCT Band における結果を示し、実測結果は直接音到来から 1 秒分の積分値を示している。先ほど示したように、1kHz と 2kHz 帯域では、2 台のスピーカによる干渉で音圧が落ち込んでいるエリアが認められる。これと同様の分布は、実測結果にも表れている。この分布の違いは、壁面への放射量によって異なるが、ある程度適切な狙いエリアが設定されている条件下では、このように、中音域において複数スピーカ間の干渉による音圧分布の谷間が実測においても同様に現れる。このことから、直接音のみによる計算結果を使って、干渉エリアを少なくするように設計することは、現実の音場においても有効であると考えられる。

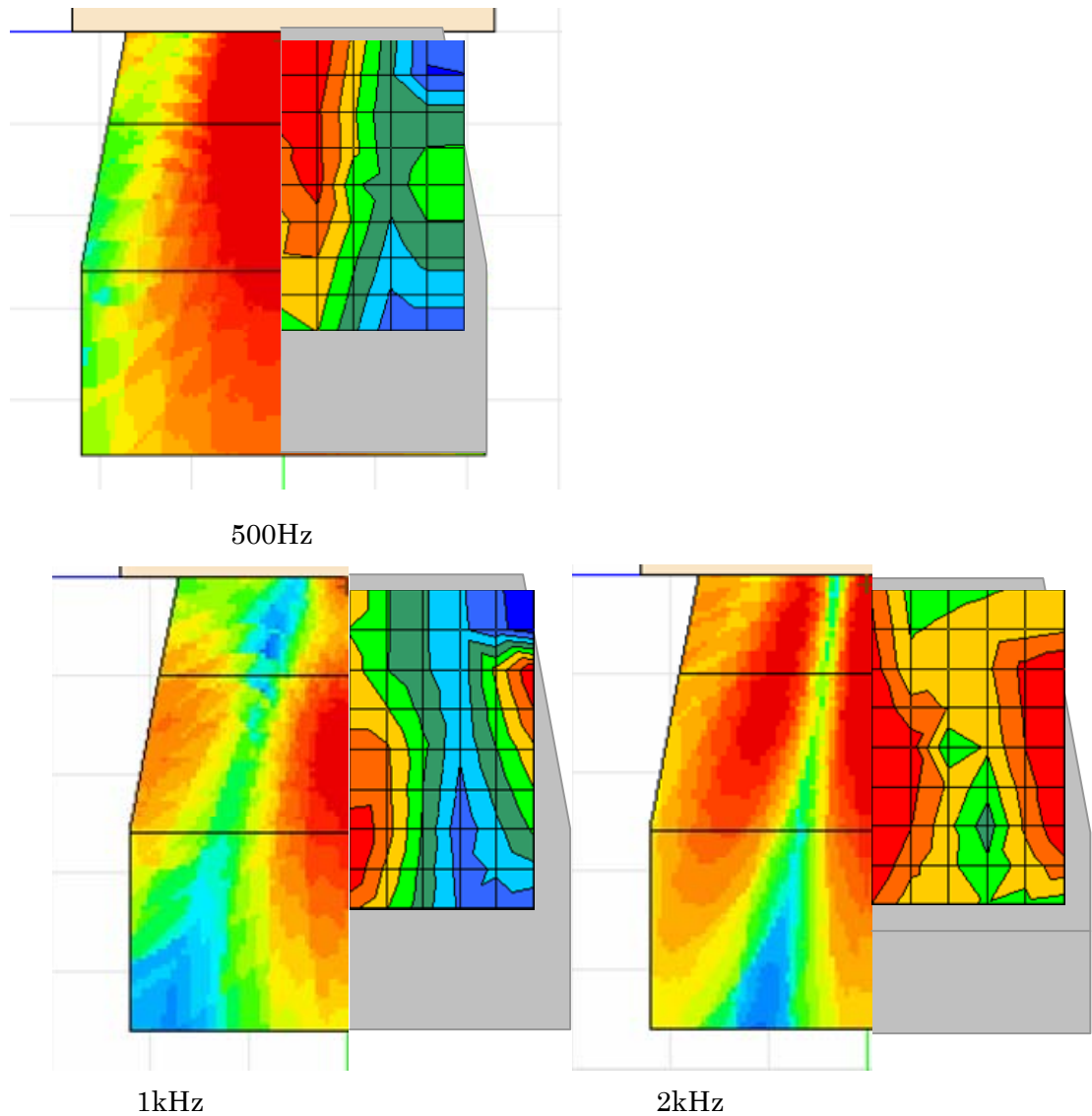


図 3: 周波数帯域ごとの音圧分布 (中音域)
(左: Y-S³による計算結果、右: 実測結果)

➤ 低音域における反射の影響

250Hz と 125Hz 帯域での音圧分布を図 4 に示す。各図左側の計算結果では、対象周波数帯域の音波の波長がスピーカ間隔に比べて十分長いことから、複数スピーカ間の干渉による音圧分布上でのディップは認められない。一方、各図右側の実測結果においては、音圧分布上で干渉による谷間が認められる。これは、スピーカからの直接音と、壁面からの 1 次反射音による干渉が原因と思われる。低音域においてはスピーカの指向性が広いために壁面への放射量が多く、また、壁面の凹凸に比べて対象周波数の波長が長いために拡散効果が発揮できず、直接音と 1 次反射音の干渉が広い範囲に渡って均一に表れるため、このような分布の谷間が

生じている。以上のように、低音域では反射波による影響が分布の不均一として現れることがある。これは部屋のモードの影響である、といった解釈も可能である。通常のエンクロージャー型スピーカでは、低音域における指向性制御が困難なため、スピーカの狙い角の設定だけではこうした谷間を解消することはできない。しかし、こうした分布の不均一は、直接音のみを対象とした設計評価の時点では観測されないが、実際の音場においては現れることがある、という事実は把握しておく必要がある。

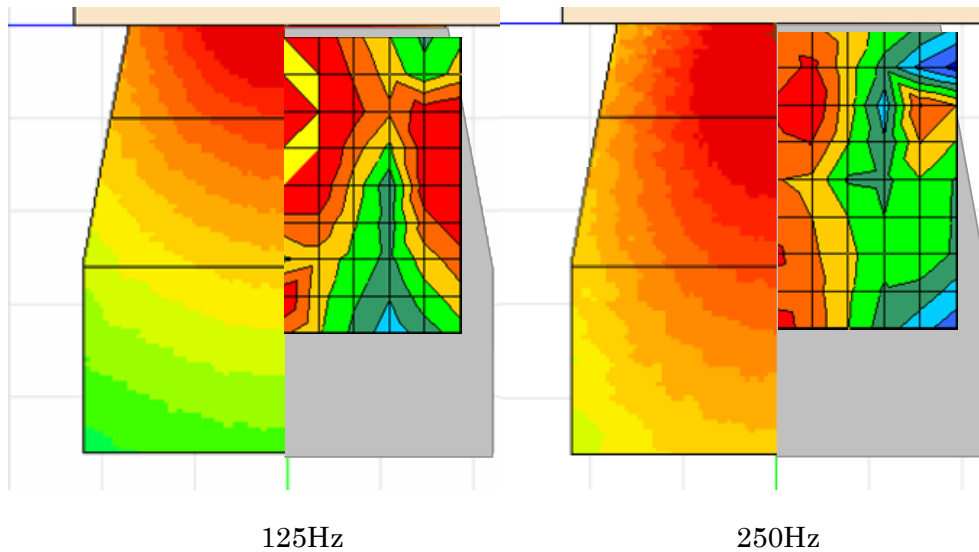


図 4: 周波数帯域ごとの音圧分布（低音域）

（左：Y-S³による計算結果、右：実測結果）

2. 特定の受聴点における応答の評価

前章で示したような、複数スピーカによる干渉の影響は、受聴点での応答においては周波数特性上のディップとなって現れる。このとき実際の音場においては、反射音の影響によってディップの深さが緩和されることが予想される。

以下では、前章と同じくセンター位置に 2 台構成のスピーカアレイを設置した場合を例にとり、直接音のみによる計算結果と実際のホールにおける測定結果との比較例を示す。

受聴点における周波数特性

➤ 深いディップが表れる場合の評価

図 5 に点 A ($x=6m$, $y=6m$) の点における結果を示す。この点は、客席中央から 6m 上手側に寄った場所（客席上手側半分のエリアのほぼ中央付近）に位置する。青線は Y-S³ の計算結果、赤線は実際のホールでの測定結果で直接音到来から 15ms までの積分値、ピンクの線は同じく実測結果で 100ms までの積分値を示す。実測結果は、8192 ポイントのフーリエ変換によって求めたスペクトラムを、25 ポイントごとの移動平均により平滑化している。グラフの縦軸は相対音圧レベルで、それぞれの最大値を 0dB として基準化している。

Y-S³ での計算結果（青線）では、1.2kHz 付近に 20dB 程度のディップが現れている。このディップの良否を判断するのは難しいが、Y-S³ では、可聴化機能を用いて、この応答を音として聞くことで、判断の材料とすることができる。

ただし、こうしたディップは実際の音場では反射音の影響によって緩和されることに注意が必要である。実測における 15ms までの積分値（赤線）の結果では、該当するディップは若干高い周波数に現れているが、その深さは緩和されていて、最大でも 10dB 程度に収まっていることがわかる。また、このディップは、15ms までの積分値、および、100ms までの積分値の両方に現れており、直接音付近の強い到来音による特性が、初期反射音部分全体の特性にも強く影響し、よって、聴感にも大きな影響があることを示している。このことから、複数スピーカからの到来音同士の干渉による影響を設計段階で確認しておくことは、重要であると言える。

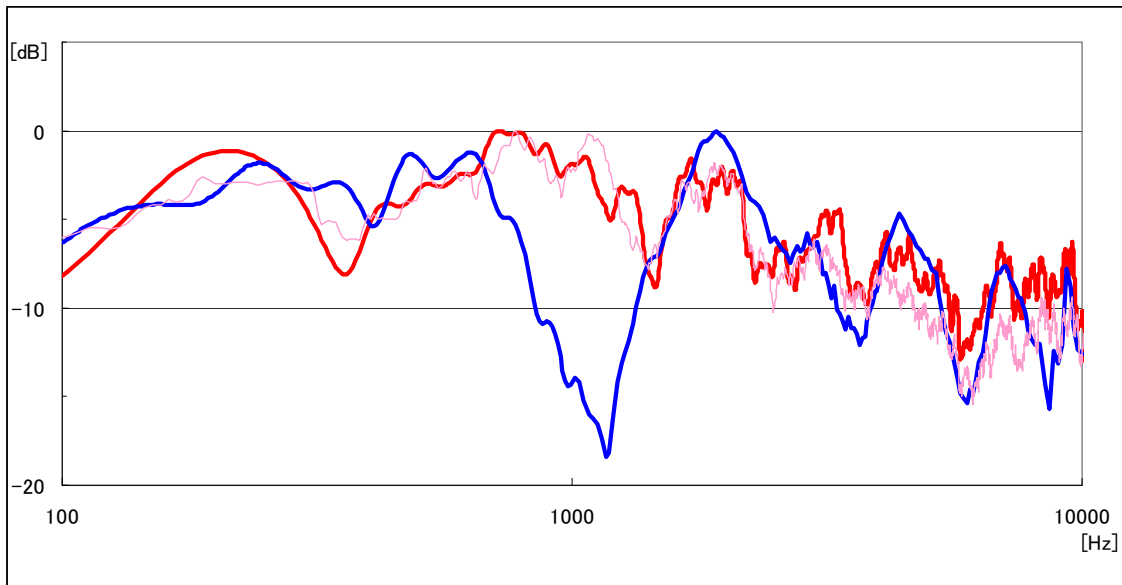


図 5: X=6,Y=6 の点における結果

青：Y-S³，赤：実測／直接音到達後 15ms 積分値，ピンク：実測／同 100ms 積分値
(実測は移動平均値)

➤ 高域の落ち込みとして現れる場合の評価

つづいて図 6 に、点 B (x=1m, y=10m) における結果を示す。この点は、客席全体のほぼ中央付近に位置する。青線は Y-S³ の計算結果、赤線は実際のホールでの測定結果で直接音到来から 15ms までの積分値を示す。実測結果は、8192 ポイントのフーリエ変換によって求めたスペクトラムを、25 ポイントごとの移動平均により平滑化している。グラフの縦軸は相対音圧レベルで、それぞれの応答の最大値を 0dB として基準化している。

Y-S³ での計算結果（青線）を見ると、特定周波数でのディップは表れておらず、4kHz 付近から右肩下がりの特性となっている。これは、受聴点から 2 つのスピーカまでの距離差が小さいために、干渉によって打ち消しあう周波数がかなり高い帯域に存在することによる。

この高音域での落ち込みは、実際の音場でも同様に観測される。実測における 15ms までの積分値（赤線）の結果を見ると、約 2kHz 付近からその特性が落ち込んでいて、最大で 20dB 程度の低下となっていることが分かる。また、点 A において見られた床からの反射音によるディップは、この点では同じ周波数には表れていない。これは、点 A が座席中の測定点であるのに対し、点 B が通路上の測定点であることから、反射音の性状が異なるため、と考えられる。

以上より、Y-S³ を用いた設計評価において見られる受音点ごとの応答の特徴は、実音場における結果にも同様に表れることが分かる。こうした特徴を設計段階で把握しておくことは、設置後の現場における測定と最終調整に対しても有効であ

ると考えられる。

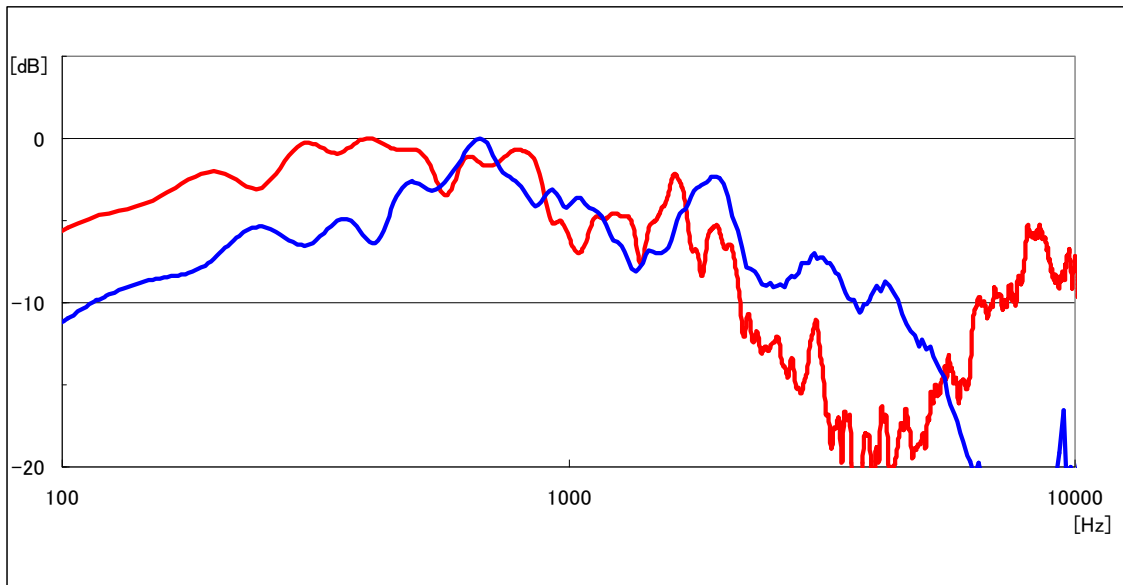



図 6: X=1, Y=10 の点における結果

3. 出力レベルの設定

Y-S³ では、アンプの種類やゲイン設定、入力レベルなどの設定を変化させながら、受聴点における想定音圧レベルを計算することができる。この計算結果は、場内で所望の音圧レベルが得られるシステムであるかどうかを評価する際に有効である。ただし、直接音ベースの計算においては、受聴点での SPL はスピーカからの距離が増加するに伴い単調減衰するが、実際の音場では拡散音の影響により遠方に行くに従ってその減衰率は低下する。以下では、Y-S³ を用いたレベル設定の例を示し、直接音のみによる計算結果と実際のホールにおける測定結果との距離減衰の比較例を示す。

☑ Y-S³ を用いたレベル設定例

- **Speaker Property** の **Config** タブで、入力レベルとアンプのアッテネータを設定し、所望の SPL が得られるようなレベルセッティングを検討する。
- 最初にスピーカを設置したときや、スピーカ種類を変更したときは、推奨アンプが選択され、レベルセッティングはデフォルト値 (Input Level が +4.0dBu、 (Attenuator) が -10dB) に設定される。

このとき例えば、ポイント (X=0, Y=11.5) における Overall SPL は 90.7dB となる。

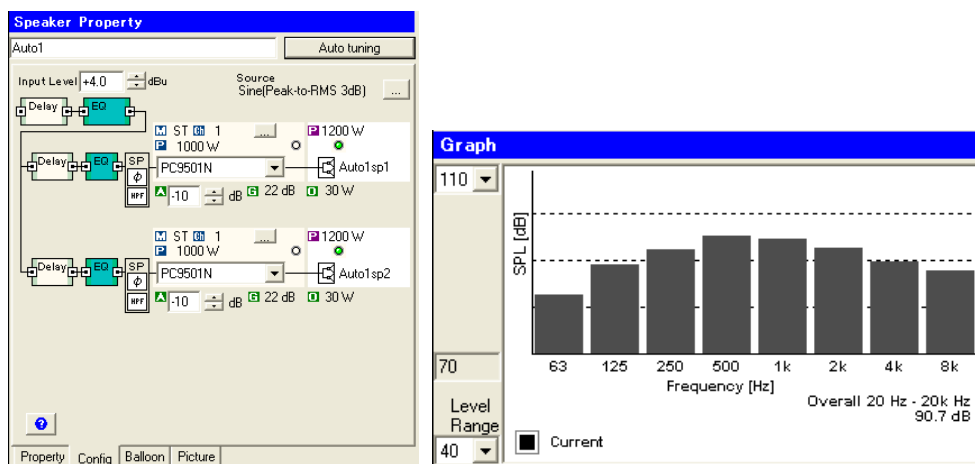


図 7: レベル設定 (デフォルト時)

- ここで、SPL を約 100dB とするために、アンプのアッテネータを -6dB に変更し、さらに、Input Level を 10dBu まで上げる。すると、Overall SPL は 100.7dB となる。

Y-S³ ではこのように、アンプへの入力レベルを変更しながら、同時にアンプのアッテネータ設定を変更することで、定格入力時の最大 SPL や、規定レベル入力時の SPL の目安値などを計算できる。

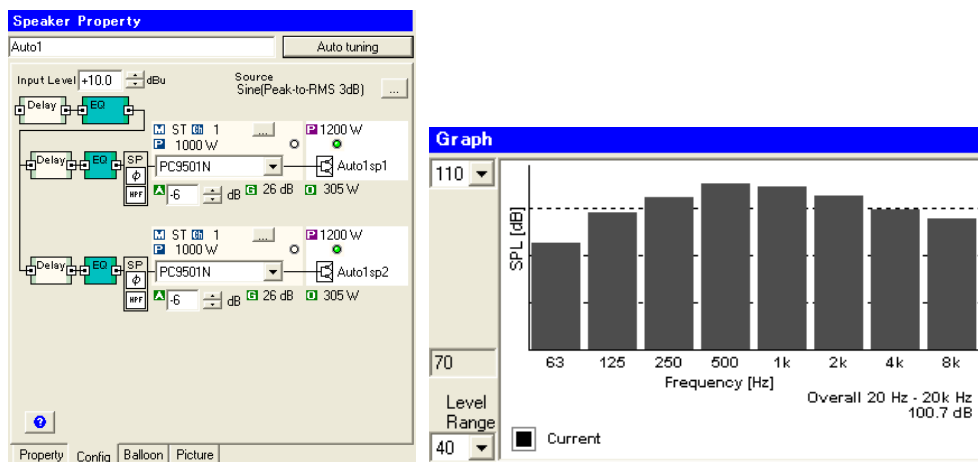


図 8: レベル設定 (変更時)

- このとき遠方の点、例えば (X=0, Y=22.0) における SPL は 95.4dB となっている。しかし、実際の音場では、反射音の影響により、ここまでのレベル低下は起こらないため、結果の評価とシステムの選定にはこの点での配慮も必要である。そこで次に、実際の音場における測定結果と比較しながら、この影響を示す。

☑ 距離減衰の比較

ステージ上にスピーカを設置し、距離減衰を比較した。スピーカは舞台上に設置し、スピーカより 2m の点から 18m の点まで 2m ごとの点における応答を測定した。また、Y-S³ 上でも同じ条件での応答を計算した。音源と受音点の位置関係と結果を図 9 に示す。横軸は音源からの距離 (x 軸方向) を示し、縦軸は、3m 地点の応答を基準とした相対レベルを示す。1kHz の結果をみると、Y-S³ の計算結果では一様な減衰が認められるのに対し、実音場での結果では、拡散音の影響で 13m 地点から減衰がほとんど認められない。11m 地点は中通路の点であり、床面からの反射の影響が他と異なるため、特異な結果を示している。また、2kHz 帯域の結果では、Y-S³ の計算結果で、距離による減衰が 1kHz 帯域に比べてゆるやかに見える。これは、客席面が傾斜しているために受聴点が徐々にスピーカの軸上に近づき、指向性の影響によってレベルが上昇するためである。実音場での応答では、1kHz 帯域の結果と同様に、13m 地点以降で減衰が認められない。また、指向性によるレベル上昇は、反射音の影響に埋もれて、個別には観測できない。

このように、実音場では、遠方の点において拡散音の影響で定常状態の SPL が上昇するため、直接音ベースの計算結果を使ったシステムの選定をする場合に配慮が必要となる。例えば、場内全点において所望の SPL を得ようとする場合のシステム選定では、遠方の点における計算結果が所望の SPL を上回るように選定すると、実際に必要なシステムに比べて、かなり大き目のシステムを選んでしまう可能性がある。この距離減

衰が鈍化する点は、室の大きさや吸音条件によって異なるが、例えば図 10 に示すような理論値の計算方法が示されている。

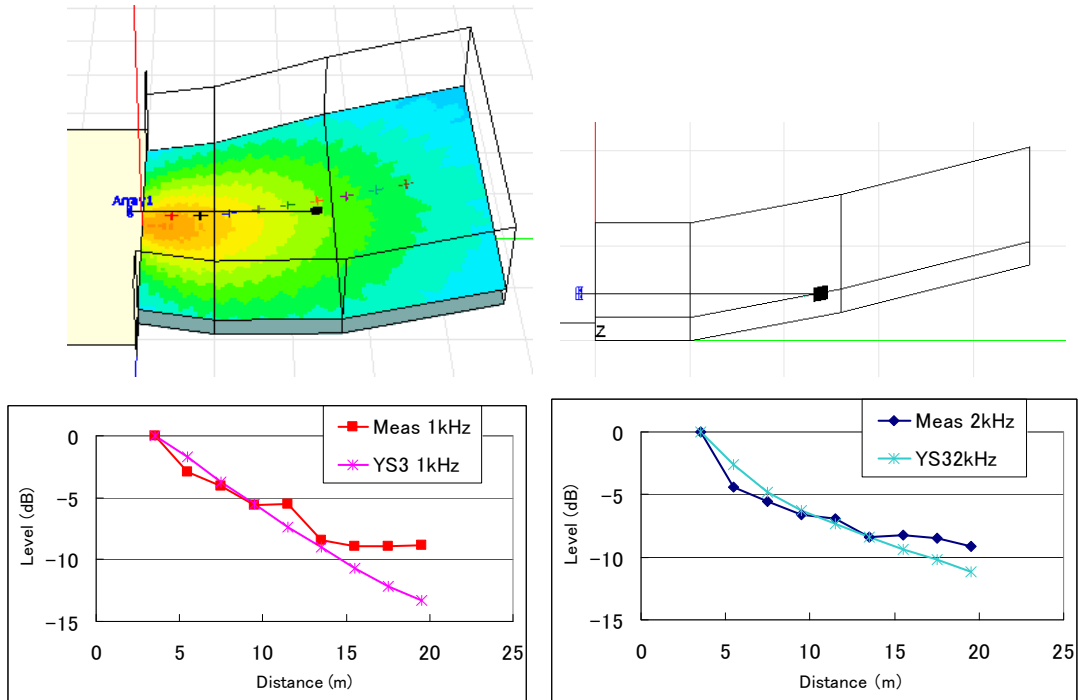


図 9: 距離減衰の比較 上：音源と受音点の位置関係、下：測定結果

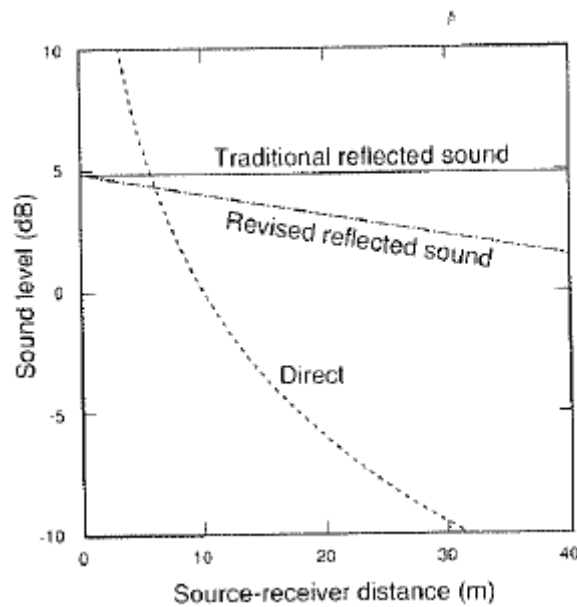


図 10: 直接音と間接音の減衰の理論値 Barron による修正式

(pp32. M. Barron, "Auditorium Acoustics and Architectural Design", E&FN Spon, 1993)

まとめ

位相を考慮した Y-S³ シミュレーションを利用することで、下記のような検討が可能である。またその有効性は実測でも確認された。

- 複数スピーカ間の干渉。
- スピーカの設置位置、狙い、数による音圧分布の変化。

実際のホールにおける実測結果からも、カバーエリア計画において位相を考慮した検討を加えることの有効性が示された。

ただし、以下の点については直接音によるシミュレーションでは顕在化しないため、配慮しておく必要がある。

- おもに低域周波数における反射波の影響（部屋に固有なモード）。
- 遠距離での距離減衰（有響空間では計算より緩慢になる）。

Y-S³ を用いることで、複数スピーカ間の干渉やカバーエリアなどを事前に予測でき、スピーカの適切な設置位置を事前に検討できる。逆にもしシミュレーション上で問題となるような配置を行った場合、その問題は実音場でも同様に再現されうるため、問題を回避するための指針となる。実際の有響空間では計算結果に現れない影響がいくつか出てくるが、計算手法の特徴を把握しておくことで、設計段階で検討すべき有効な情報を得ることが出来る。