

# オープンプランオフィスにおける上部開放型ブースの音環境評価

37-216132 深田 竜岐

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

オンライン会議の普及に伴い、オープンプランオフィスではパーソナルブースの設置が進んでいるが、その遮音性能の評価方法は未確立である。ISO 23351-1<sup>1)</sup>ではブース単体の遮音性能の残響室測定法が提示されているが、実際のオフィスに設置されたブースの遮音性能は室内音響特性の影響を受ける。特に国内では消防法の観点から上部開放型のブースが設置されることが多く、これらのブース内部からの漏洩音は、天井反射音の影響が大きくなることから、室内音響性能や話声の指向性による影響を受けやすいと考えられる。一方、ISO 3382-3<sup>2)</sup>ではオープンプランオフィスの室内音響特性として、特に音声の空間減衰性能の測定・評価法が規定されている。

### 1.2 ISO3382-3

オフィス内に音源-受音点を配置し、音圧レベル測定 (SPL 測定) とインパルス応答測定 (IR 測定) を行う。それぞれの測定結果から各種音響物理指標を算出する。男性、女性による一般的な話声 (speech effort: Normal voice) の平均を通常音声のパワーレベルとして想定し、音圧レベルの測定値に対してオクターブバンドレベルに従った重みづけを行い、音声レベルに換算する。音源-受音点間の距離と各受音点での音声レベルを直線近似することで各種音響物理指標を算出する。インパルス応答の結果から各受音点での STIr を算出する。各受音点における STIr を直線近似することで  $r_D$  (妨害感距離) を求める。**倍距離減衰量  $D_{2,S}$  [dB]** 音声レベルの距離二倍あたりの空間減衰率。

**4m 音声レベル  $L_{p,S,4m}$  [dB]** 音源位置から 4.0 m の距離における音声レベル。

**快適距離  $r_C$  [m]** 音声レベルが 45 dB 以下となる音源位置からの最短距離。

**話声伝送指数 STIr** 音声の明瞭性を予測するための物理指標であり、音声伝送される部屋や空間の音響特性や背景騒音に基づいて計算される。

**妨害感距離  $r_D$  [m]** STI が 0.5 以下となる音源位置からの最短距離。

## 2. 研究目的

オープンプランオフィス内の上部開放型ブースの音環境を評価するための音響測定方法を、実際のブースでの測定を行うことで検討する。特に指向性の異なるスピーカを用いて上記測定法を適用し、遮音性能評価に関する検討を行った。次に、測定実験から得られた音響物理指標と聴感印象との対応関係を調べるために、ブースからの漏洩音の聞こえと作業への妨害感などに関しての主観評価実験を行った。以上の測定実験・主観評価実験を通して、(I)ブースの測定法(II)ブースの遮音効果(III)ブース測定時の音響物理指標と心理評価の関係性という3点についての知見を得ることを目的とした。

表1 実験室の残響時間

Center Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$T_{20}$ (s)	0.45	0.31	0.30	0.36	0.37	0.39	0.35

## 3. 測定実験\_概要

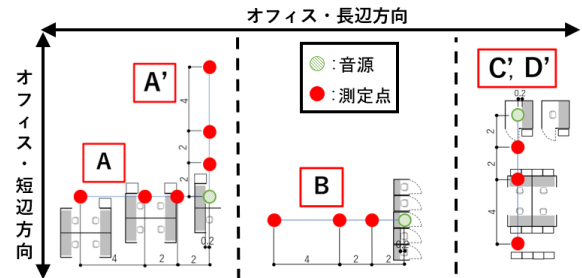


図1 ブース・測定点の配置

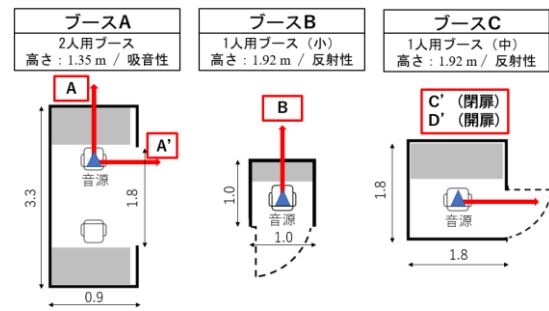


図2 ブースの寸法・仕様

(1) **測定環境** オープンプランオフィス（平面：20 m × 80 m）の一角に設置された3種類のブース（図1）を対象とした。スラブ表しの天井高は3.7 mであり、高さ2.6 mに幅0.6 m、長さ16 mの非吸音性パネルが長辺方向に2 m間隔で並んでいる。オフィスの壁面はガラスやボードなどの反射性で、床はフロアカーペット敷の吸音性である。室内にはデスクやソファ、収納家具などが点在している。インパルス応答から求めた残響時間 ( $T_{20}$ ) は表1の通りであり、いずれの周波数帯域でも0.3~0.4秒程度と非常に短くなっている。ブースの仕様を図2に示す。Aは吸音性ローパーティション、B、Cは反射性ハイパーティションで構成され、ブース内面積はBが1.0 m 四方、Cが1.8 m 四方と広さが異なる。

(2) **測定方法** ISO規格では全指向性音源を用いることとしているが、今回の測定では小型12面体スピーカ (OS) に加えて、指向性を有する小型フルレンジスピーカ (DS)、人工ロススピーカ (MS) も用いた。音源はブース内座席位置（高さ1.1 m、机端から0.2 m）とし、DS、MSの正面は机方向とした。

SPL測定時の音源信号にはピンクノイズを用い、ブース外の音源から2, 4, 8 mの3点（高さ1.1 m）で125~8k Hzオクターブバンドの音圧レベルを測定する。IR測定はSwept-sine法を用い、SPL測定と同じ音源・受音点で測定を行った。ただし、IR測定ではMSでの測定は行わなかった。ブースAは正面・側方、Bは正面、C・Dは側方に受音点を配置した。なお、B、Cは閉扉状態、DはブースCの開扉状態である。また、家具のないエリアを基準条件Nとし、正面・側方で1 m点を追加して同様の測定を行った。

ISO規格に準じ、音圧レベルの測定値から音声レベルに換算し、倍距離減衰量  $D_{2,s}$  [dB]、4 m 音声レベル  $L_{p,S,A,4m}$  [dB]、快適距離  $r_c$  [m]（音声レベルが 45 dB となる距離）を算出する。その際、各スピーカの出力が ISO 規格の音声パワーレベルに相当するように、条件 N の正面 1m 音圧レベルから各バンドの補正值を求め、各受音点の音声レベルを算出した。ただし、DS、MS については ISO 規格が例示する指向性音源の正面 1m 音圧レベルにより補正した。また、インパルス応答から STIr を算出する際には、暗騒音として基準条件 N における実測の暗騒音（42.1 dBA）を用いた。STIr から妨害感距離  $r_c$  [m] を算出した。

#### 4. 測定実験\_結果

条件 N における各スピーカの正面・側方 1m 音圧レベルを図 3 に示す。正面の周波数特性は DS が平坦であり、OS は中音域が大きく持ち上がっている。正面に対する側方のレベル差を見ると、MS よりも DS の方が高音域で大きく、指向性が強いことがわかる。これらのスピーカを用いて測定した倍距離減衰量・4m 音声レベル・快適距離・妨害感距離の算出結果を ISO 規格による good/poor の参考値とともに図 4, 5 に示す。

倍距離減衰量ではスピーカによる差は小さく、条件 N の 6 dB 弱に対して A で 7.5 dB 程度となり、B が最小の 4 dB、D' が最大の 8 dB となった。B では 2m 点のレベルが相対的に低下し、2m から 8m までの減衰量としては小さくなったものと考えられる。

4m 音声レベルではスピーカによる差が現れ、条件 N では OS が DS, MS より 2 dB 程度低く、側方の A', C', D' では 2~3 dB 高い。また、ブース B, C の低減量としては、OS では 2 dB, 4 dB、DS, MS では 4 dB, 5 dB となった。ブース内に OS を設置した場合、上部からの回折音及び天井反射音が過大に反映されるため、低減量が小さくなったものと考えられる。

快適距離については 4m 音声レベルと類似した結果となった。条件 N において OS では 5 m、DS, MS では 7 m に対して、A ではスピーカによらず 4 m とローパーティションながら吸音性の効果が現れたものと思われる。一方、ハイパーティションの B, C, D では OS の方が 1 m 程度大きくなるものの、ISO 規格の good に相当する 5 m 未満に収まることが確認できる。

妨害感距離については、条件 N ではスピーカによらず 10 m 弱となった。A では 3 m、B, C, D では 4~5 m ほど OS の方が大きくなるが、DS では ISO 規格の good に相当する 5 m 未満にほぼ収まっていることが確認できる。A' では OS では 14 m と poor に相当しているが、N' よりこれほど大きな値となっているのは、ブースによる減衰量の違いによると考えられる。

オープンプランオフィスにおけるブースからの音声伝搬測定を ISO 3382-3 に基づき実施したが、上部開放型ブースでは全指向性スピーカの使用は遮音性能の過小評価につながる可能性が示唆された。ISO3382-3 において、全指向性のスピーカでの測定が推奨される理由は、オオフィスの内では、ワーカーの発話方向が必ず一定でないことが要因である。一方で、ブース内で行われるオンライン会議では、机の向きによって発話方向が一定となるため、人工ロスピーカを用いた測定が適していると考えられる。また、本実験では一般的な小型スピーカの方が十二面体スピーカよりも人工ロスピーカの結果と比較的一致した。以上より、フルレンジスピーカでの測定は、簡易で比較的精度が高いという点で測定に適していると考えられる。

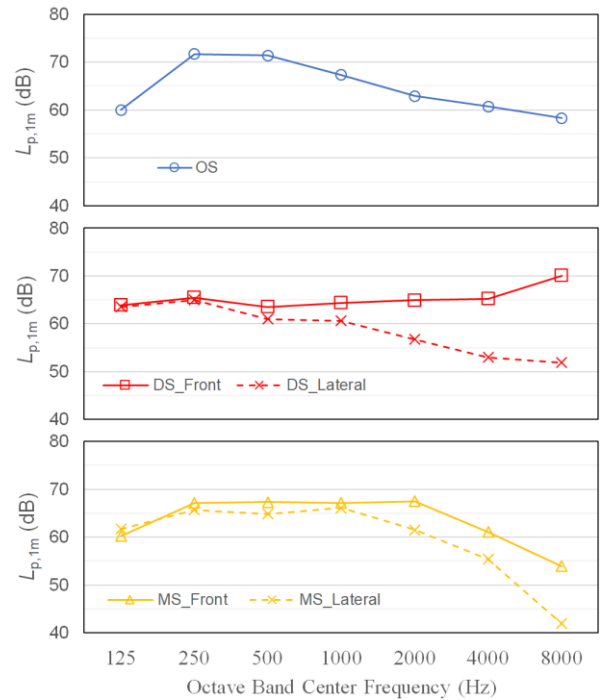


図 3 スピーカの周波数特性 (1m 音圧レベル)

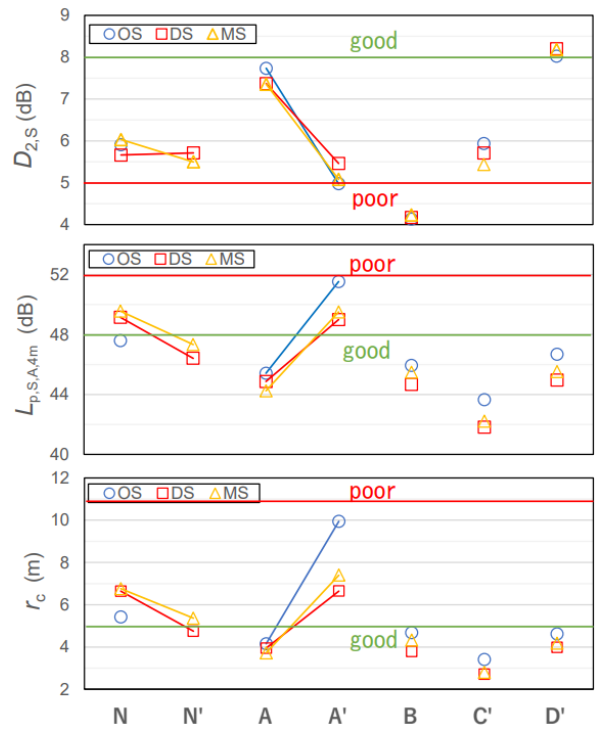


図 4 倍距離減衰量 (上段)・4m 音声レベル (中段)・快適距離 (下段) の算出結果



図 5 妨害感距離の算出結果

## 5. 聴感印象実験\_概要

実験場所は測定実験と同一のオフィスであり、被験者は20代の男女8名(男性5名, 女性3名)の学生及び対象オフィスのワーカーである。被験者は1条件につき30秒間の読解作業を行い、作業中には音声音源を聞かせた。読解作業終了後に音声に関して、聞こえや作業のしやすさに関して段階尺度法(7段階)で評価を行った。読解作業・評価を12条件で行った。

(1) **音源音声** 対話音声の内、片方の話者の声(男声)のみとしたもので、長さは30秒間である。基準条件Nにおける正面1m点での測定結果及び、ISO標準会話音のSPLを図6に示す。30秒間の等価騒音レベル $L_{Aeq}$ は63.3dB(A)であった。

(2) **実験条件** 測定実験を行ったA, B, C', D', Nに加えて、ブースB\*に対して後述の吸音・遮音対策を施した条件をB\*とした。図7に示すように、各条件においてブース外の音源から2, 8mの2点において実験を行った。

(3) **ブースの吸音・遮音対策** 図8の通り、ブース内壁面の内、出入り口部を除く三面に吸音パネルを、天井にはふさぎ板とその下に吸音材を設けた。その際、天井は机が設置されている側に寄せて設置した。

## 6. 聴感印象実験\_結果

### 6.1 実験条件におけるSTIrと音声レベル

図9に各実験条件におけるSTIrと音声レベル(dB)を示す。ただし、STIr・音声レベルの算出には図6に示す音源のSPLと、各地点で計測した暗騒音レベルを用いた。STIrと音声レベルの間には相関関係があることが確認できる。対策条件であるB\*では、Bと比べて2m点ではSTIrが0.2、音声レベルが10dB低下しており、8m点ではSTIrが0.2、音声レベルが5dB低下しており、特にブース近傍において大きく対策の影響が表れていることが確認できる。図中のSTIr: 0.5、音声レベル: 45dBにおける橙線はそれぞれ妨害感距離、快適距離の基準値である。

### 6.2 作業しやすさとSTIr・音声レベル

図10~16に各評価項目の平均評点と、標準偏差を示す。横軸は各条件における音声レベルとSTIrである。『単語理解度』『内容理解度』『うるささ』という条件において、条件N, N'における標準偏差が大きくなっている。これは、いずれの被験者も1, 2回目に条件N, N'で実験を行ったということが寄与している可能性がある。

B\*という吸音・遮音対策条件において『うるささ』『気になる』『集中しやすさ』『作業しやすさ』の項目において、標準偏差が大きく、評価にバラつきが大きかったことが分かる。これは、音圧レベルは小さいが明瞭性が低く、こもっているという音声になっており、耳障りな印象を与えた可能性がある。つまり、一部の被験者にとって、この特徴的な音声が作業妨害感につながったと考えられる。

『声の大きさ』『単語理解度』『うるささ』について、STIrよりも音声レベルと相関関係が強いことが確認できる。これらの項目はラウドネスに関連するものであるが、音圧レベルが高いほど評価が高くなることが確認できた。これらの項目では、音声レベルが45dBの条件から49dBの条件において平均評点が正に転じており、音源からの距離が快適距離の位置では、ラウドネスが少し小さいという印象を受けるといことが分かる。一方で、『内容理解度』『気になる』『集中しやすさ』『作業しやすさ』という項目では、音声レベルとSTIrによる相関関係の強さにあまり違いが見られなかった。

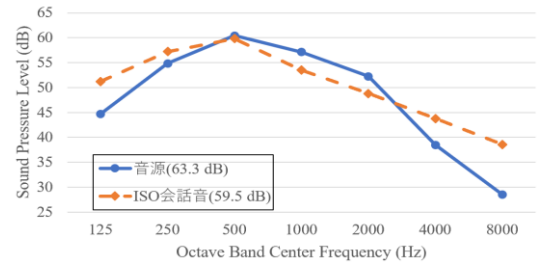


図6 音源・ISO標準会話音のSPL

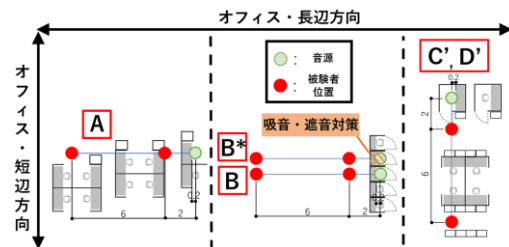


図7 音源と被験者位置

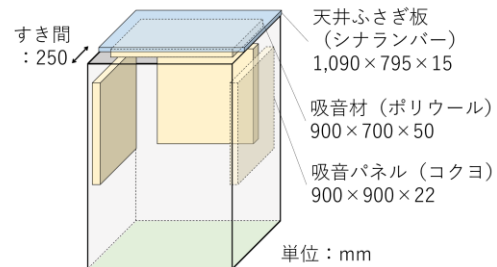


図8 B\*(吸音・遮音対策条件)の仕様

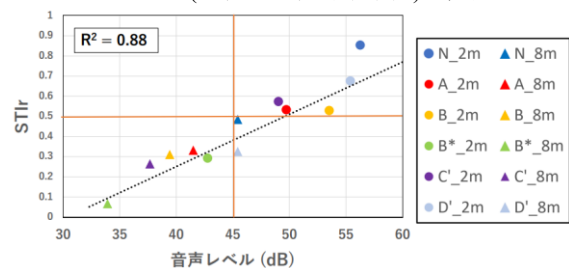


図9 各条件におけるSTIrと音声レベル

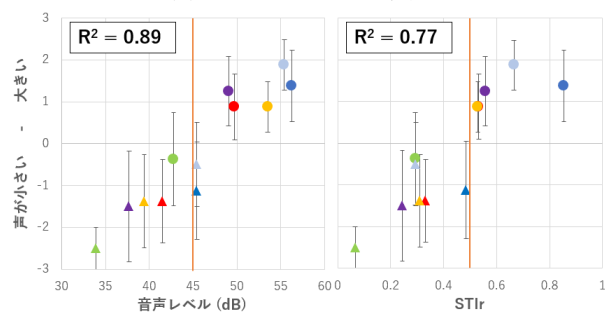


図10 声の大きさ

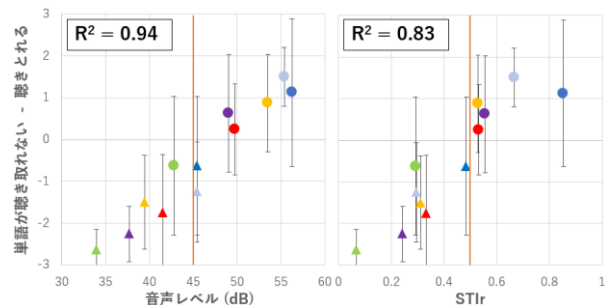


図11 単語理解度



これらの項目は、音声レベルに加えて、音の明瞭性も評価に大きく寄与する項目である可能性がある。『内容理解度』について、音声レベルでは 50 dB、STIr では 0.5 付近で平均評点が正に転じている。つまり、音源からの距離が快適距離である位置では漏洩音の内容が理解できない割合が多いが、妨害感距離に一致する地点では、理解できる割合は中立的であることが分かる。『気になる』『集中しやすさ』『作業しやすさ』では、音声レベルが 45 dB の条件から 49 dB の条件において平均評点の正負が逆転しており、STIr が 0.5 付近の条件で平均評点の正負が逆転している。つまり、音源からの距離が快適距離に一致する地点ではポジティブよりの評価となり、妨害感距離に一致する地点では中立の評価である。したがって、作業のしやすさに関する心理評価では、妨害感距離の方が厳しい評価であることが確認できた。

本実験は暗騒音条件下(40~47 dB)での実験であったため、暗騒音と音声とを完全に区別して評価することは困難であると考えられる。そのため、音声のみを評価するという実験ではあったが、評価の中には暗騒音の影響を受けている可能性があると考えられる。したがって『気になる』『集中しやすさ』『作業しやすさ』において、B\*\_8m の評価が音声レベル・STIr から予想される評価よりも高くなっているが、このように低い音声レベル・STIr での条件においては、その評価に暗騒音の影響も含まれると考えられる。

## 7. おわりに

研究結果から、ブースの測定には全指向性のスピーカよりも指向性のあるスピーカを用いた方が適している可能性が示唆された。ブースの周囲の音環境を評価するための音響物理指標としては倍距離減衰量  $D_{2,s}$  は妥当でないことが確認できた。被験者実験の結果からは作業のしやすさに関して、心理評価との相関関係は STIr と音声レベルではあまり変わらないということが確認できた。また、妨害感距離  $r_D$  での評価は快適距離  $r_C$  での評価よりも厳しい評価となる可能性が示唆された。

本研究における被験者実験は被験者数が 8 人と少数である。ブースの設計における基準値を定めるには、さらに被験者数を増やして実験を行う必要がある。また、本実験では 30 秒間という短い時間の作業に対する評価であった。作業時間によって許容される暗騒音のレベルが異なることから、長時間の作業に関する作業しやすさについても検討する必要があるだろう。また、本実験は天井がスラブ表しのオフィスのみで行われており、異なる天井条件での検討が今後の課題である。上部開放型のブースでは、天井反射音の影響が大きくなることから、天井の高さや吸音条件などの条件は設置ブースの周囲の STIr や音声レベルなどの物理量および周囲の執務者に与える妨害感に大きく影響を及ぼすと考えられる。

本研究では ISO3382-3 に基づく音響物理指標でブース周囲の音環境を評価しようと試みたが、本規格は空間全体のスピーチプライバシーを評価する目的で作られたものである。ブース周辺の音声レベル、STIr などの物理量からブースの音環境を評価するにあたって、これらの音響物理量をそのまま用いることが適切かどうかは今後も検討する必要がある。一方で、測定・評価の容易性については、簡単な装置で測定でき、S/N 比のみで評価できることが望まれている。本研究の結果から、オフィスワーカーの作業性に及ぼす周囲騒音の影響を、音声レベルだけで予測することが可能であることが示唆された。

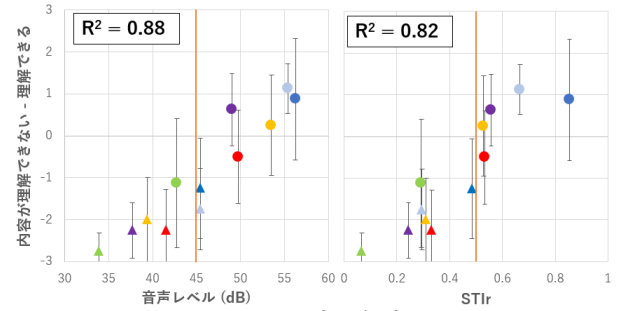


図 12 内容理解度

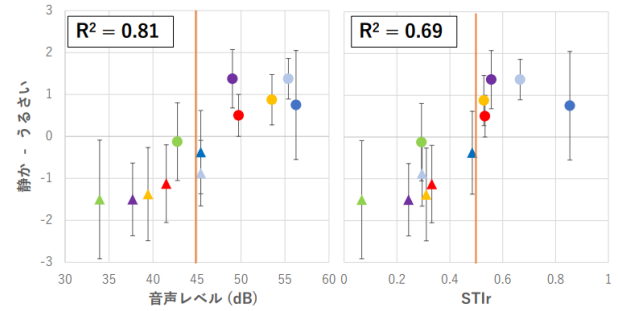


図 13 うるささ

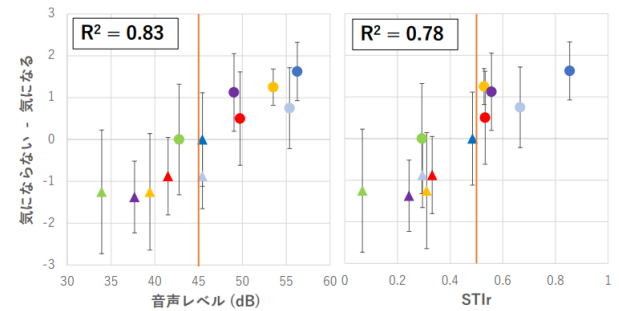


図 14 気になる

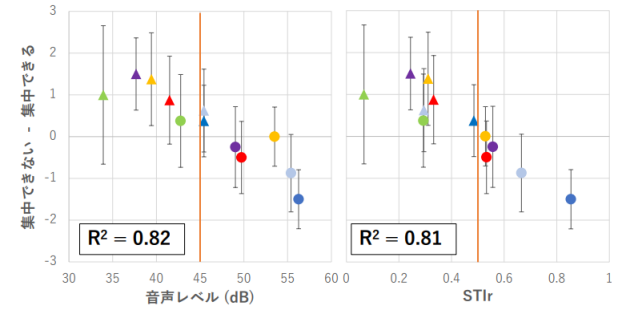


図 15 集中しやすさ

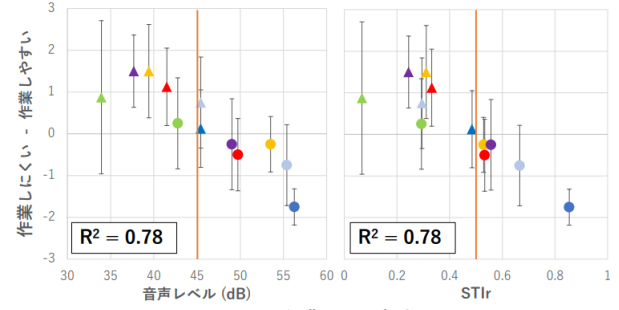


図 16 作業しやすさ

## 8. 参考文献

- [1] ISO 23351-1:2020, Acoustics - Measurement of speech level reduction of furniture ensembles and enclosures, Part 1: Laboratory method
- [2] ISO 3382-3:2022, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters, Part 3: Open plan offices