

地下ミニドーム空間内の各種音響物理量と音声明瞭度 Physical Indexes of Room Acoustics and Speech Intelligibility in an Underground Dome

今泉博之^{*}・井上 諭^{**}・加藤雅裕^{**}・杉野 潔^{**}
Hiroyuki IMAIZUMI, Satoshi INOUE, Masahiro KATOU and Kiyoshi SUGINO

While underground spaces have developed and used for industrial facilities or shopping centers, some countermeasures for keeping the spaces safe are essential. Even under construction of the spaces, some hazards such as insufficient communication between operators have to be removed not to be related to occurrence of a disaster. Physical parameters of room acoustics and speech intelligibility are measured in an underground dome without any architectural treatments, and relationships between the parameters and speech intelligibilities are discussed.

Key Words: Underground Dome, Syllable Articulation, Speech Intelligibility, Physical Index, Room Acoustics

1. まえがき

1980年以降、道路・鉄道等の交通網や地下街の構築などで地下空間の開発・利用が積極的に進められる中で、地下空間の利用形態や構築の作業状況に対応した安全対策を施す必要がある¹⁾。地下街や地下鉄駅など、不特定多数の人が利用する場合は、災害などの緊急時に備えて安全で迅速に避難するための対策が不可欠であり、心理的ストレスの軽減という観点からも正確な情報提示および伝達が重要である。また、地下における作業現場においては、時々刻々変化する作業状況に対応しながら、安全に作業が出来るような環境を整えることと同時に、緊急時に備えた避難対策も要求される。

一般的に、人への情報伝達の大部分は視覚および聴覚によるが、音による情報伝達は災害等により視界が十分確保できない場合においても有効である。一方、音の伝搬は、環境条件、境界面の音響特性および空間形状等により影響を受け、音を用いた情報伝達を考慮する場合は注意を要する。地下空間は、閉鎖性に起因して情報伝達の阻害要因も多く考えられ、安全性の観点から地下空間の音響伝搬特性を検討することは重要である。

筆者らは、現在まで地下空間、主にトンネル状空間内における音響伝搬特性および音声情報の伝達特性を把握するための研究を実施してきた。その中で、直線状の単一トンネル状空間内に気流がある場合の音響伝搬では、風下方向に比べて風上方向において減衰量が非常に少ない周波数領域があり、被験者による音声の聴取結果においても風上方向において聴取率が高いことを実験的に明らかにするとともに、音線理論を用いた数値計算でこの現象を定性的に裏付けた²⁾。また、円弧状に湾曲した残響性の単一トンネル内

^{*} 通産省 工業技術院 資源環境技術総合研究所 安全工学部

^{**} 東急建設(株) 技術研究所 環境研究部 音響研究室

においては、音源と受音点の幾何学的配置が音響伝搬特性や音声の聴取傾向に影響し、異聴傾向の分析から音源近傍は空間の残響性、音源からの距離が増加するに従って音声信号の急速な劣化が主要因と考えられる異聴が多いことを示した³⁾。さらに、トンネル状空間が複数に分岐する場合の音響伝搬特性と分岐角度、壁面の音響特性などの要因との関連についても検討している⁴⁾。

一方、通産省は大深度地下空間開発プロジェクトの中で地下約80mに実験用ミニドームを構築し、本プロジェクトで実施された各種技術開発の実証実験を行った。その中で、筆者らはミニドームを作業空間と位置付けた上で「音場計測」を実施した。ドーム状空間の音響特性に関する研究⁵⁾は数件報告されているが、室内音響物理量や音声の聴取傾向を系統的に示したものは少なく、両者の間の相互関係は明確になっていない。本報告では、人と人のコミュニケーションに着目し、各種施工が施されていない状況下における各種室内音響物理量の計測と被験者による音声の聴取試験からドーム状空間の有する基本的な音響伝搬特性について記述し、各物理量と音声聴取率の相関関係を述べる。

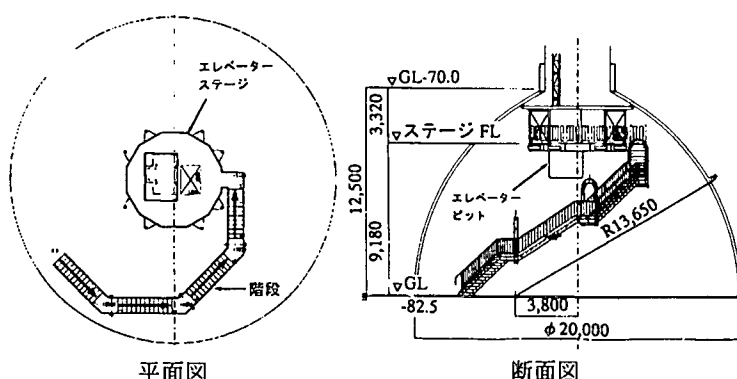


図-1 ミニドーム概要

4 mの縦坑でつながり、ドーム頂部にはエレベーターステージが設置され、螺旋階段によりドーム底面へ降りることができる。なお、実験期間中のドーム空間内における暗騒音は等価騒音レベルで約51dBであり、温度および相対湿度はそれぞれ23～24℃、70～80%の間で変動した。

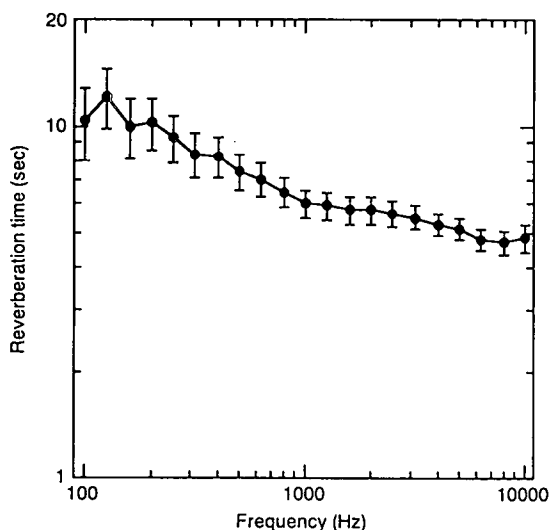


図-2 ミニドーム内における残響時間

2. 実験

2.1 ミニドーム概要

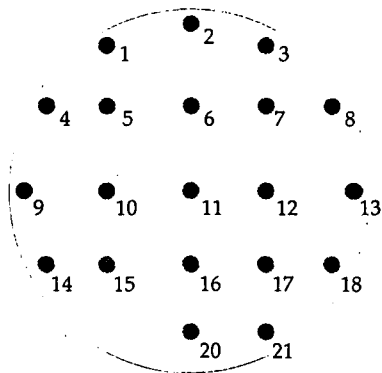
実験用ミニドームは、容積が2320 m³、表面積1140 m²である。図-1に示すように底面における直径は20 m、頂部までの高さは12.5 mである。表面処理としては、壁面部にウレタン・ウレ樹脂が吹き付けられ、底部表面はコンクリート仕上げである。地上とは直径

図-2は、ミニドーム内の数地点で6回ずつ計測した残響時間の平均と標準偏差を示す。残響時間は、1kHz以下の周波数帯で急速に長くなり、125Hzで12秒、500 Hzでは8秒弱であり、一般的に同容積の建築構造物で計測される値⁶⁾に比べて非常に長い。また、測定場所による残響時間の差は、1kHz以下の周波数帯で徐々に大きくなるが、それ以上の帯域では1秒以下であり、バラツキは比較的小さい。

2.2 実験方法

(a)音源-受音点の配置

図-3に示すように、ドーム底面に合計20個の測定点を設けた。ドーム壁面から内側へ1 mの円周上に30度間隔で11点およびドーム中央から4.5 m間隔



図－3 測定点の配置
図中の番号は測定点番号である。

の格子点に9点配置した。

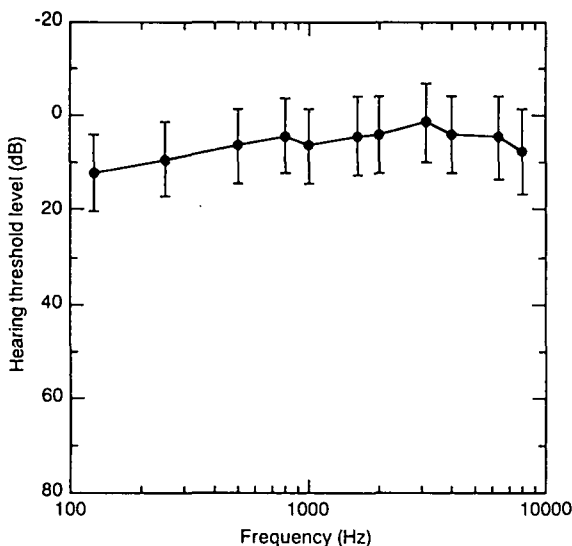
音源の位置は、同図のドーム壁面近傍の13番点、ドーム中央部の11番点および11番点の直上6.5m点（エレベータステージから音源をつり下げた）の3条件について計測を実施した。使用した音源は、12面体無指向性スピーカと口径10 cmの指向性スピーカである。指向性スピーカは、13番点においては9番方向（以下、 DE_x 条件と記す）およびドーム円周の接線方向にスピーカ前面を向けた2条件でそれぞれ測定した。また、11番点については、スピーカ前面を9番方向（以下、DC条件と記す）に向け、エレベータステージ下のスピーカ前面は11番方向である。音源をつり下げた場合を除き、それぞれのスピーカは三脚により底面から1.2 mの高さに固定した。一方、測定点は音源を設置した1点を除く19点に設置し、すべて三脚によって底面から

1.2 m高さに固定した。

なお本報告では、下記の音声情報の伝達特性との関連から、音源条件としてDCおよび DE_x 条件下で測定した結果について記述する。

(b)室内音響物理量の計測

室内音響物理量は、DRA社製のMLSSAシステムを用いて、C値（Clarity）、D値（Deutlichkeit）、ts（時間重心）、RASTI値（Rapid Speech Transmission Index）を19個の測定点で計測した。MLSSAシステムは、M系列（Maximum Length Sequence）信号による変調信号を用い、入出力信号の相互相関関数によりインパルス応答を得ることができる。本実験では、空間内の音場から測定周波数帯域を125～4000 Hzまでの6つの1/1オクターブバンドとした。本測定では、上記同様の指向性スピーカ（Auratone Sound Cube Equalized）を用いた。この指向性スピーカから放出したM系列信号を各測定点において無指向性マイクロホンを持つ普通騒音計（RION製 NA-29）を介してPC（EPSON製Endeavor + 拡張ユニット）へ取り込み、インパルス応答の算出後に各種音響物理量を求めた。



図－4 被験者の平均聴力レベル

(c)音声聴取実験

音声聴取実験には、健常な聴力を有する21～31歳の日本人の男性7名を被験者として用いた。図－4は、オーディオメータ（RION製 AA-96）により実験前に測定した各被験者の聴力レベルの平均および標準偏差を示す。平均聴力レベルはほぼ10dB以上で、そのバラツキも約8dBである。

試験音声として、男性が発声した50個の三連音節から構成された音表、戸井田により作成された50の質問文を女性が朗読した文章⁷⁾をそれぞれ数種類用いた。DAT（Digital Audio Tape）に収録した試験音声を、前記の指向性スピーカから再生した。再生レベルは普通騒音計（RION製 NL-01A）で測定し、スピーカ前方1 m点における時間率騒音レベル L_{20} ⁸⁾

実験を通じて80 dBAになるように設定した。S/N比としては12dB以上であった。被験者には、事前に指定した測定点において1名ずつ着席し、自身が聞こえたように解答用紙へ記入するように教示した。実験に先立って、実際の試験音声を使用した回答練習を数回行った。被験者は、1サイクルの実験が終了する度に測定点を移動し、各聴取点において最低4人の被験者が試験音節を聴取するように実験を計画した。

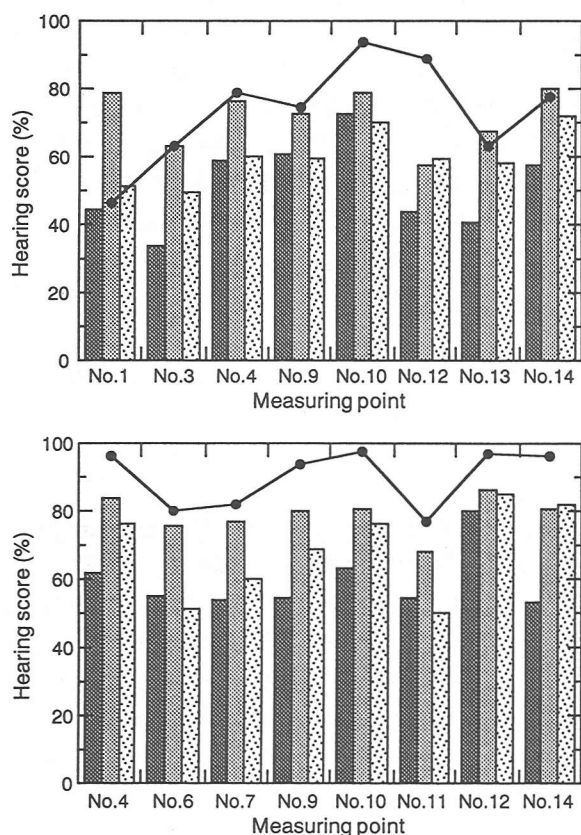


図-5 各音源-受音点配置における三連音節の聴取率の変化（上図はDC条件、下図はDE_x条件）

各測定点で、左から第一音節、第二音節、第三音節の聴取率を示す。●は、文章理解度試験の結果である。

ている。また、概して第一音節の聴取率よりも第二音節の方が高く、第三音節の聴取率は第二音節と同等あるいは低い。しかし、音源配置がDC条件の場合の1番点では第二音節の聴取率が他の二音節にくらべて顕著に高く、また12番点においては音源近傍に位置するにもかかわらず全体的な聴取率が低いなど、特異な結果を示している。

3.2 室内音響物理量

C₈₀, D₅₀, ts, RASTI値は、一般的に室内音場における音の明瞭性に関連する物理指標値であり、図-6に各音源配置における各測定点ごとの音響物理量の変化を示す。ここでは、音声の重要な周波数成分である1および2kHz（1/1オクターブバンド）について記述する。図-6から、両周波数帯における各音響物理量の値は類似した推移傾向を示す。

直接音到来から80msecを境にしてその前後におけるエネルギー比を示すC₈₀について、DC条件では音

3. 実験結果

3.1 音声聴取傾向

図-5は、文章理解度試験と三連音節明瞭度試験における平均聴取率を各音源-受音点条件に対して示している。前述したミニドーム内における残響時間の均一性に比べて、音声聴取率は音源-受音点の配置によって大きく変化している。

文章理解度試験について、図-5上図に示すDC条件の場合、音源極近傍の測定点では良好な聴取率を示すが、音源から等距離に位置する1, 3, 4, 9, 13, 14番点における聴取率には大きな差がある。特に、音源前方にある4, 14番点で聴取率が高く、1番点で最も低い。図-5下図に示すDE_x条件の場合、音源前方に位置する9, 10, 11, 12番点における測定点ではドーム中央11番点で最も低くなり、音源に対して反対側の壁面近傍に位置する9, 10番点で音源極近傍の12番点とほぼ同じ聴取率である。また、4, 14番点においても音源から最も遠い測定点にもかかわらず高い聴取率となっている。反対に、音源から距離的に近い6, 7番点については、11番点と同程度の聴取率にとどまっている。

一方、三連音節明瞭度試験の各音節毎の聴取率は、両音源配置に関して、文章理解度の聴取結果と比較的類似した推移を示し

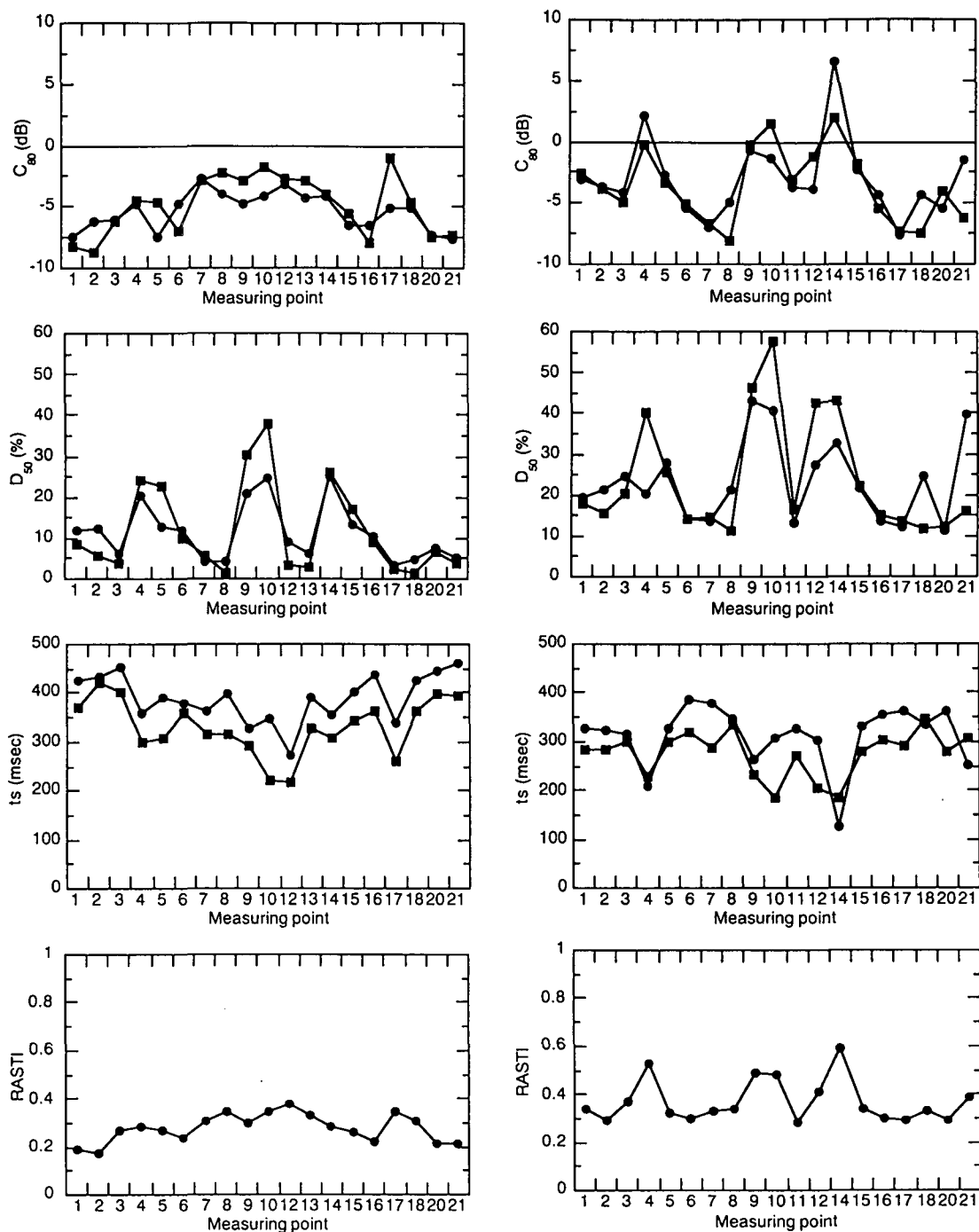


図-6 各種音響物理量の変化 (左図:DC 右図:DE_x)

C₈₀, D₅₀, ts に関して、●は1kHz, ■は2kHzを示す。

源近傍およびドーム円周に近い測定点で若干大きな値を示すが全測定点で負の値であり、80msec以降にも大きな音響エネルギーが存在することを示す。一方、DE_x条件においても音源極近傍を含めて多くの測定点で負の値を示すが、4, 9, 10, 14番点など音源反対側の壁面近くに位置する測定点では他よりも大きな値

を示している。

音の全エネルギーに対する初期音のエネルギー比である D_{50} では、音源近傍および音源前方の壁面周辺の測定点で大きな値を示すDC条件に対して、 DE_x 条件もほぼ同様の分布傾向であるが、全体的な値はDC条件よりも大きく、各測定点で初期音の占めるエネルギー量が多いことがわかる。

室内における音の響き感を示す時間重心 t_s の分布は、全体的にDC条件下における値の方が DE_x 条件下よりも大きい。DC条件では、音源近傍の10, 12番点で極小を示す一方で、 DE_x 条件においては音源から離れた14番点で特に小さく、4, 9, 10番点も各々の周辺の測定点に比べると小さな値を示している。

RASTI値の分布については、DC条件下におけるほぼ全測定点で0.4以下の値を示し、IEC⁸⁾によれば音声伝達の程度は"Poor"あるいは"Bad"である。一方、 DE_x 条件下では、ほぼ0.3以上の値であるが、前述同様に4, 9, 10, 14番点などの音源前方の壁面近傍に位置する測定点で0.5以上の値を示し、"Fair"に分類される。

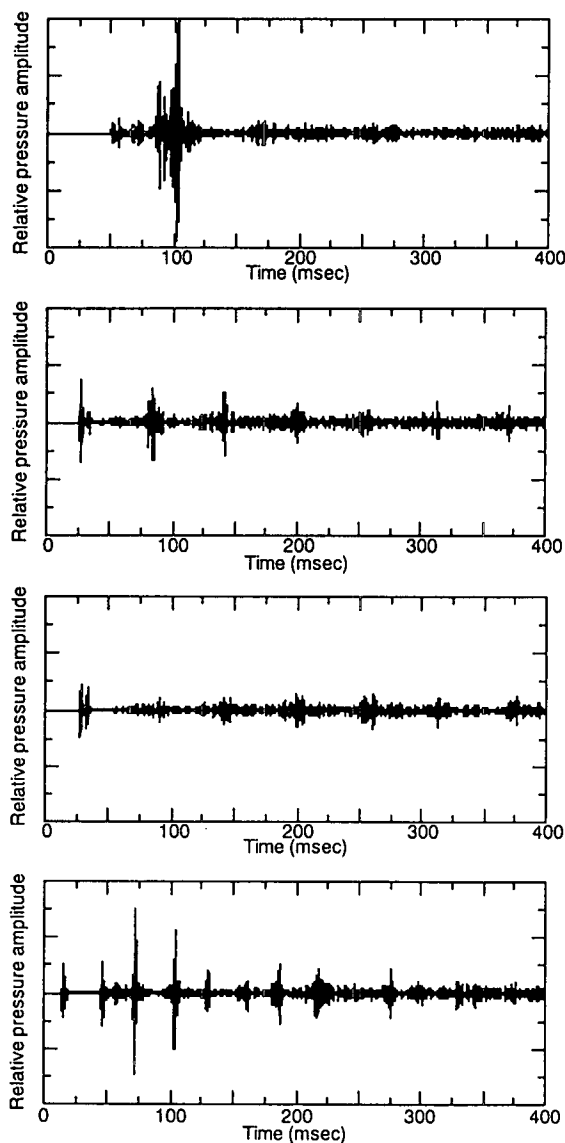


図-7 各音源配置におけるインパルス応答
上から、 DE_x 条件下の14番点、11番点、
DC条件下の1番点、12番点

4. 考察

4.1 音声聴取率の分布

図-5に示すように、ドーム底面における音声聴取試験では、音源極近傍および音源の反対側に位置する測定点において聴取率が高い反面、音源近傍に位置するにもかかわらず聴取率が低いなど、聴取率の分布にバラツキがみられた。

図-7は、 DE_x 条件下で計測された11, 14番点およびDC条件下の1, 12番点における1kHz (1/1オクターブバンド) のインパルス応答を示す。 DE_x 条件における14番点では、直達音から約40 msec以降に反射音があり、60msec前後に特に大きな反射音群がみられ、この傾向は聴取率が高い4, 9番点等で共通する。直達音の到来から40~50msec以上遅れて到来した反射音は二音として弁別される傾向があるが⁹⁾、この場合、直達音と反射音群の振幅差を考慮すると、直達音による聴覚刺激は小さいと考えられ、被験者は特に60msec前後遅れて到来する反射音群による刺激を主に聴取していると推測される。これと関連して、4, 9, 14番点における聴取実験で、4番点上方の壁面に音像が定位することが被験者より報告された。このドーム壁面近傍に位置する測定点で聴取率が高くなる現象は、一般的に言われる"回廊現象"によるものと考えられる¹⁰⁾。また、同一音源配置における11番点で聴取率が低い原因は、直達音の後に約60 msec毎に到来するほぼ等振幅の反射音が正確な音声の聴取の妨げになったものと考えられる。一方、 DE_x 条件で得られた11, 14番点のインパルス応答とは計測時の設定が異なるため波形振幅を直接比較できないが、DC条件における1番点では、直達波の到

来以降、顕著な反射音群もなく、残響音成分がみられるのみである。被験者は直達音から音声を判断しなければならず、聴取率が低くなったものと考えられる。また、12番点に関しては、反射音が繰り返して到来する部分で DE_x 条件下の11番点と類似している。しかし、音源極近傍に位置することに加えて音声刺激が「文章」であるため、その有意味性や親和性、類推性などの要因¹¹⁾により文章理解度が高くなった一方で、日本語として無意味な三連音節の聴取率は低くとどまった可能性が指摘できる。さらに、三連音節の聴取に関しては、反射音の間隔が約30msecと短いことも聴取率が低いことに影響していると推測される。

三連音節の聴取傾向については、残響条件下において第一音節の聴取率が最も高く、第二、第三音節で徐々に聴取率が低下する傾向とは異なり、第二音節の聴取率が最も高い。長友らの研究¹²⁾によると、残響と騒音が同時に付加された場合に本実験と類似した聴取率の推移を示す傾向がある。しかし、前記したようにミニドーム内の等価騒音レベルは約51dBと騒音環境とは言にくい。図-7のインパルス応答との比較から考察すると、DC条件下の1番点のような場合は、音声信号自身の明瞭性が低いため第一音節の聴取率が低いと考えられる。第二音節の聴取率の上昇は、第一音節の残響成分が騒音付加に類似するように作用し、第二音節に対する残響性の影響が低下した可能性がある。また第三音節については、先行する二音

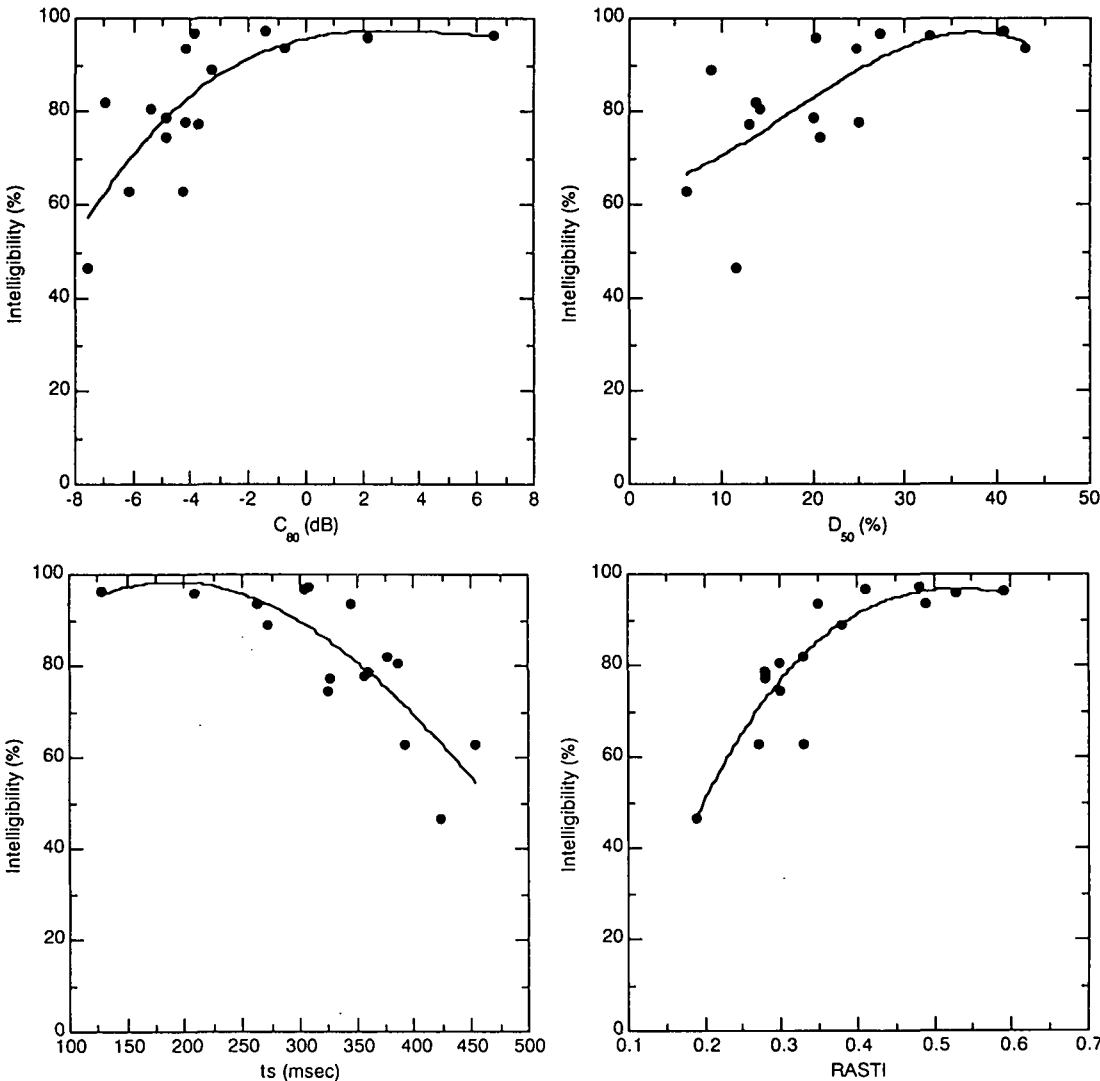


図-8 文章理解度と各室内音響物理量との相関

節の残響成分の影響とともに自身の残響成分による後向性マスキングの影響も考えられる。

4.2 文章了解度と室内音響物理量の相関

図-8は、室内音響物理量と文章了解度試験結果の相関を示す。図-8については、1kHz (1/1オクターブバンド) に対する各室内音響物理量を表し、図中には3次多項式による回帰曲線もあわせて示した。

Bradley¹³⁾は、キャリア文章を伴う単語聴取実験と明瞭度指数 (AI)、対信号雑音比 (S/N(A))、STI (Speech Transmission Index) および各室内音響物理量の関係が3次多項式で良好に近似できると指摘した。その他の報告においても、音声聴取率とAIやSTIなどの間に類似した相関が示されている^{14,15)}。

文章了解度と C_{80} 、 D_{50} 、 ts 、 $RASTI$ の重相関係数はそれぞれ0.77, 0.71, 0.83, 0.90である。 ts 、 $RASTI$ に関してはかなり高い相関を示すが、 C 、 D 値に関してはそれほど高くない。これは、前節で指摘したように、音源-受音点の配置によって直達音が到来して60msec前後に顕著な反射音群がみられる測定点があり、以下に示す C 、 D 値を算出する際の積分区間 t_e により文章了解度との相関も変化すると考えられる。

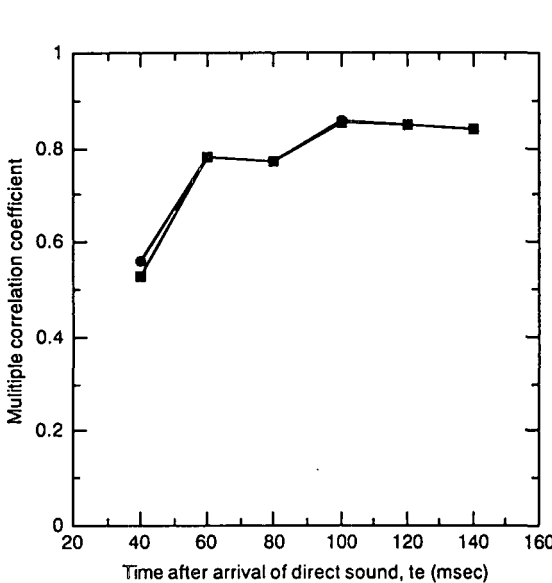


図-9 直達音到来後の時間経過毎の文章了解度と C 値および D 値の重相関係数の変化
●は C 値、■は D 値を示す。

$$C_{t_e} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt} \right], [dB]$$

$$D_{t_e} = \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \times 100, [\%]$$

$p(t)$: sound pressure

そこで、直達音到来からの時間 t_e を40~140 msecまで20msec間隔で変化させた場合の C_{t_e} 、 D_{t_e} 値と文章了解度の間の重相関係数の変化を図-9に示す。40msecから60msecの間で両音響物理量と文章了解度の間の重相関係数は急速に上昇し、その後時間が経過するに従って100 msecまで徐々に上昇して約0.85の最大値を示し、それ以降ではほぼ一定となっている。また筆者らは、文章了解度スコアの高さを基に測定点を3グループに分類した際の各グループ内の C_{t_e} 、 D_{t_e} の平均値が60msec前後で急激に増大

し、その後非常に緩やかな増加傾向にあることを示した¹⁶⁾。これらの結果から、図-7に示すインパルス応答にみられた直達音到来から約60msec以降の反射音群が文章了解度に大きく影響していることは明らかである。

4.3 文章了解度と連音節明瞭度

空間内の音声伝達特性を評価するための試験音源としての音節明瞭度と了解度の関係は、文章の有意性や冗長性などにより、両者を単純に比較することは困難である。三浦¹⁷⁾は、通話系について音節明瞭度と文章了解度の対応を実験的に検討し、実際の電話回線で得られる明瞭度と了解度の関係を示す境界線を指摘した。

図-10は、本実験より得られた文章了解度と三連音節中の第二および第三音節の聴取率との相関を示す。三浦の結果と同様に、第三音節の明瞭度と文章了解度は高次多項式により近似できる一方、第二音節については著しくかけ離れた傾向を示す2点を除いた場合でも、明確な相関を見出すには至らない。しか

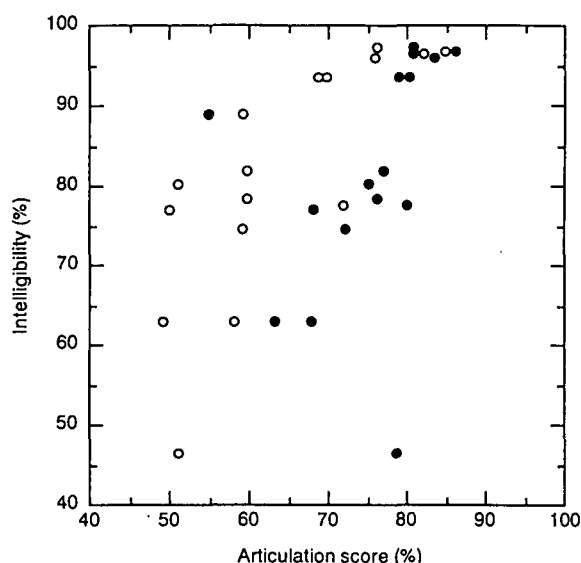


図-10 文章了解度と連音節明瞭度の相関
●は第二音節、○は第三音節を示す。

し、本実験における音節明瞭度と了解度は、三浦が示した境界線の下方に分布し、伝送系としてはかなり劣悪と判断される。また、聴取率の観点からの両者の関係として、通話系や建築音響の分野において音節明瞭度が70~75%の時、文章了解度は100%に達すると言われるが、ミニドーム内では100%の文章了解度は得られておらず、通常の建築構造物内の音場と等価に考えられない可能性を示している。

空間内の音声伝達特性を評価する際の試験音源に関しては諸々の問題点¹⁸⁾が指摘されているが、今後このようなドーム空間内の音場を改善する方法を考慮する際の基礎資料として、聴取率という値による解釈に加えて、各音節の聴取傾向を分析するという視点からの検討も必要と考える。

5. あとがき

ミニドームを作業空間として捉えた場合に、人のコミュニケーションが十分確保出来るかという観点から、未施工状況における各種室内音響物理量の測定と被験者による音声聴取実験の結果を述べ、ドーム空間の基本的な音響特性を示した。また、室内音響物理量と音声聴取特性を比較検討した。その結果、下記のことが明らかになった。

- 1)残響時間はドーム空間内ではほぼ一様であり、500Hzの値は一般的な建築構造物に比べて極端に長い。
- 2)音節明瞭度および文章了解度は音源-受音点の配置により変化し、概して音源極近傍および音源反対壁面の近傍に位置する測定点で聴取率が高いなど、ドーム空間内の分布にバラツキがある。
- 3)音の明瞭性にかかわる各種の室内音響物理量の計測から、音声聴取傾向と同様にその分布傾向は不均一である。
- 4)音源反対側の壁面近傍の受音点におけるインパルス応答の解析から、直達音が到達した後40~100msec、特に60msec以降に顕著な反射音群が到来し、被験者は直達音とともにこの反射音群を聴取することで明瞭度および了解度が高くなったことを指摘した。この現象は、ドーム状空間でみられる"回廊現象"の影響と考えられる。
- 5)文章了解度と室内音響物理量の相関関係は、3次多項式により比較的良好に近似できる。特に、時間重心(t_s)とRASTIは高い相関を示す。
- 6)定義式中の積分区間の設定を変化させた場合のC,D値と文章了解度の重相関係数は、60msecで急激に増大した後100msecの時に極大となり、上記の反射音群が文章了解度に密接に関係する。
- 7)三連音節明瞭度の第三音節の聴取率と文章了解度の関係は高次多項式で近似できる一方、第二音節との関係は特異点があるなど明確ではない。また、一般的な建築構造物における聴取率に関する両者の関係と若干異なる。

今後は、ドーム空間内における音響伝搬シミュレーションを実施することにより、反射音群の発生メカニズムについて検討する必要がある。また、音声聴取実験を引き続き行うことで、音節明瞭度と文章了解度の関連を明確にするとともに、異聴分析などにより各音節毎の明瞭性の把握も音声伝達の評価手法の基

礎資料として有効である。さらにミニドーム内の音場改善について、各種室内音響物理量と音声聴取試験を通じて簡易施工による有効な対策技術の開発も不可欠である。

謝辞

文章了解度試験用音源の使用を快諾いただいた東京都立大学・戸井田義徳先生、音源テープを提供いただいた東北大学・佐藤洋先生に深謝の意を表します。また、三連音節明瞭度試験用音源の使用を快く了解いただいた日本技研コンサルタント株式会社の小川有子氏に感謝の意を表します。なお、本研究は、通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度の中で実施した研究をまとめたものであり、一部新エネルギー・産業技術開発機構が（財）エンジニアリング振興協会に委託した研究を含んでいる。

6. 参考文献

- 1)土木学会: ニューフロンティア地下空間, pp.83-106, 技報堂出版, 1990.
- 2)今泉博之・井清武弘・匂坂正幸: 通気のある坑道内での音の伝搬と音声情報の聴取,安全工学, 31-4, pp.228-239, 1992.8.
- 3)Imaizumi H., Kinoshita M., Kunimatsu S. and Isei T.: Sound Propagation and Speech Hearing in a Curved Reverberant Tunnel, Journal of Acoustical Society of Japan (E), 18-3, pp.129-137, 1997.5.
- 4)Imaizumi H., Kunimatsu S., Isei T.: Sound Energy Distribution at an Intersection of an Underground Tunnel, Proceedings of ASA and ASJ Third Joint Meeting, pp.415-420, 1996.12.
- 5)安岡博人・赤尾伸一・岩本毅・嶋田泰: 岩盤地下大空洞における音響特性と演奏実験, 日本音響学会秋季研究講演論文集, pp.927-928, 1995.9.
- 6)前川純一: 建築・環境音響学, pp.62, 共立出版, 1990.
- 7)戸井田義徳: エコーとノイズが文章了解度に及ぼす影響について - 野外拡声装置の明瞭度改善に関する研究 その2 -, 日本建築学会論文報告集, 346, pp.112-123, 1984.12.
- 8)IEC publication 268: Sound system equipment - Part 16: The objective rating of speech intelligibility in auditoria by the RASTI method, 1988.3.
- 9)境久雄: 音響工学講座6 聴覚と音響心理, pp.91-96, コロナ社, 1978.
- 10)宮島徹・霜田英麿・中川清: Bergeron法による音場解析とその可視化 - ささやきの回廊モデルの場合 -, 日本音響学会秋季研究講演論文集, pp.889-890, 1995.9.
- 11)Miller G. A., Heise G. A., and Lichten W.: The intelligibility of speech as a function of the context of the test materials, Journal of Experimental Psychology, 41, pp.329-335, 1951.
- 12)長友宗重・佐藤洋・矢島吉紀: 無意味三連音節明瞭度試験法による残響・騒音の明瞭度に及ぼす影響の評価に関する研究, 東北大学建築学報, 32, pp.187-194, 1993.3.
- 13)Bradley J. S.: Predictors of Speech Intelligibility in Rooms, Journal of Acoustical Society of America, 80-3, pp.837-845, 1986.9.
- 14)Steeneken H. J. M. and Houtgust T.: A physical method for measuring speech-transmission quality, Journal of Acoustical Society of America, 67-1, pp.318-326, 1980.1.
- 15)Payton K. L., Uchanski R. M. and Braida L. D.: Intelligibility of conversational and clear speech in noise and reverberation for listeners with normal and impaired hearing, Journal of Acoustical Society of America, 95-3, 1994.3.
- 16)井上諭・加藤雅裕・石田康二・杉野潔・今泉博之: 吸音処理を施さない地下ドーム空間における明瞭度, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA96-39, 1996.11.
- 17)三浦種敏 (監修): 新版聴覚と音声, pp.411-413, (社)電子情報通信学会, 1989.
- 18)戸井田義徳: 空間内における音声情報伝達, 日本音響学会誌, 51-4, pp.312-316, 1995.