

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

2017 年度
修 士 論 文

家庭用設備機器の低周波音放射及び屋外伝搬に関する研究
Study on the propagation and radiation of low-frequency noise
from household equipment.

2018 年 1 月 22 日提出
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

角谷 純平
Kadotani, Jumpei

目次

第 1 章	序論	5
1.1	研究の背景	5
1.1.1	低周波音問題の変遷	6
1.1.2	低周波音の発生源	8
1.1.3	低周波音に関する苦情・影響	8
1.1.4	低周波音の防止対策	9
1.2	関連の既往研究	11
1.3	研究の目的	12
1.4	論文の構成	12
第 2 章	家庭用ヒートポンプ給湯機の設置環境に関する予備調査	13
2.1	はじめに	13
2.2	調査概要	14
2.2.1	対象地域	14
2.2.2	調査項目の検討	15
2.3	調査結果	16
2.3.1	家庭用ヒートポンプ給湯機の設置状況	16
2.3.2	外構塀と家屋の配置関係	18
2.3.3	隣戸との関係	19
2.4	まとめ	21
第 3 章	家庭用設備機器の低周波音放射及び屋外伝搬に関する数値解析	23
3.1	はじめに	23
3.1.1	本章で取り扱う低周波音源	24
3.1.2	解析概要	25
3.1.3	評価指標	27
3.2	外構塀に関する検討	29
3.2.1	配置の影響	29
3.2.2	高さの影響	37
3.2.3	外壁からの後退距離の影響	45

3.2.4	幅の影響	50
3.2.5	音源と外構塀の配置の影響	56
3.3	隣戸に関する検討	61
3.3.1	隣戸の影響	61
3.3.2	隣戸が存在する状況下における外構塀の影響	63
3.4	隣戸面への影響検討	67
3.4.1	解析概要	67
3.4.2	解析結果	70
3.5	まとめ	72
第4章	総括	73
4.1	研究の成果	73
4.2	今後の課題	74
付録A	有限要素法の基礎理論	75
A.1	はじめに	75
A.1.1	積分方程式導出のための基礎事項	75
A.2	音場の数値解析理論	77
A.2.1	音場の基礎方程式	77
A.2.2	音場の境界条件	77
A.2.3	有限要素法による音場の解析	78
A.3	PML(Perfectly Matched Layer) の数値解析理論	85
A.3.1	PML の基礎方程式	85
A.3.2	PML と音響領域の連続条件と PML 終端の境界条件	86
A.3.3	有限要素法による PML の解析	86
A.4	要素積分の評価	90
A.4.1	内挿関数とその微分形	90
A.4.2	Gauss-Legendre 積分による面積分・体積分の評価	96
付録B	調査シート	99
	図目次	101
	表目次	103
	参考文献	105

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

近年，地球温暖化に伴い建築分野において建物の長寿命化や省エネルギー対策を求められるようになってきた。その中で設備機器の高効率化により 2000 年代以降から家庭用ヒートポンプ給湯器が普及され始めた。家庭用ヒートポンプは家庭用エアコンと同じ原理で二酸化炭素素 (CO₂) 冷媒を圧縮加熱した熱を利用してお湯を作り出す。一般的に料金の安い深夜電力を使用するため，エネルギー効率は高くこれからも多くの普及が見込まれている。

しかし同時に家庭用ヒートポンプ給湯器による被害も顕在化してきた。家庭用ヒートポンプ給湯器の周波数特性として回転数に起因した周波数 (40~60Hz) とその倍調成分が主成分である音が卓越する。それに伴い，普段気にならなかった程度の大きさの騒音による問題が発生している。

日本冷凍空調工業会では「家庭用ヒートポンプ給湯器の騒音に関する研究会」を設置し，家庭用ヒートポンプ給湯器における騒音発生の実態について調査を行った。その結果，据付け環境によっては騒音レベルが上昇する場合があることが判明し，また実際の騒音苦情の事例を分析すると，ヒートポンプ給湯器の据付け位置や方法を工夫することで改善される場合があることも確認できた。

しかし具体的な低周波音の伝搬メカニズムは把握できておらず，低周波音の音響透過・伝搬現象は多くの複雑な要素が関係しており，低周波音による物理現象に関して不明な点が多い。さらに具体的な工夫策の影響は未だ明らかにされていないことが現状だ。

1.1.1 低周波音問題の変遷

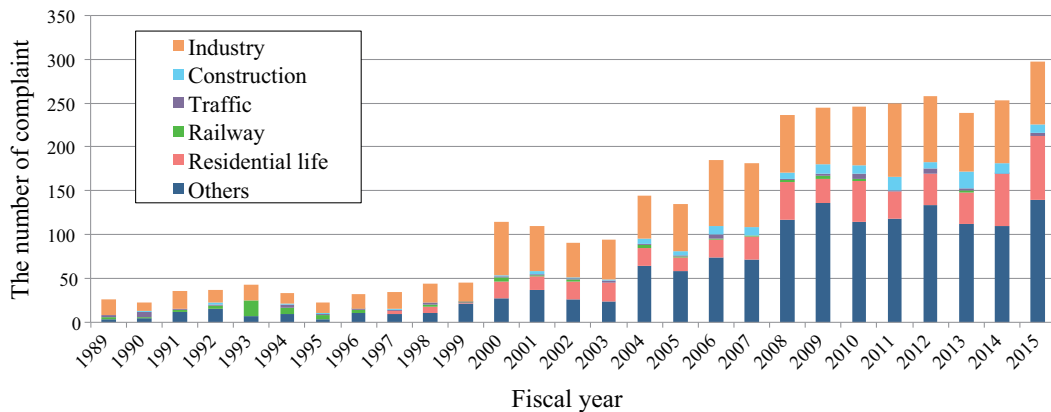


Fig. 1.1: The Number of complaints about low frequency.

人間の可聴域は個人差はあるものの一般に 20~20,000 Hz である。低周波音とは 100 Hz 以下の音のことを言い、中でも人間の可聴域以下とされる 20 Hz 以下の音を超低周波音と言う。この低周波音に関する動向を国内のトピックスを中心に Table 1.1 にまとめた。また、1989 年以降の低周波音に起因する苦情件数の推移を [25] の調査データを参考に Fig.1.1 に作成した。

日本でこの低周波音の問題が発生したのは 1960（昭和 35）年代後半と言われている。当時は工場周辺の家屋の窓や建具ががたつくといった訴えから、ディーゼル発電機や空気圧縮機から発生する低周波音（当時は低周波空気振動と呼ばれた）によるものと判明した。環境庁では 1976 年から低周波音の実態調査を開始している。苦情件数は年々全体的に増加傾向である。当時の主な発生源は工場・事業場に設置された大型機器からのものが多く、影響としては 20 Hz 以下の超低周波音による建具のがたつき等の苦情が多くを占めていた。工場・事業場における大型機器の低周波音対策はメーカーを中心に発生原因の解明や防止対策の研究が行われ、1980 年頃までに苦情件数は減少した。

近年では低周波音への関心の高まりや家屋の遮音性能向上等により、心身に係る苦情が急増している。近年の苦情発生源として増加傾向にあるうちの一つが一般家庭に普及している小規模な室外空調機や家庭用ヒートポンプ給湯器等の建築設備機器である。これらは比較的レベルな低周波音であるが、安い深夜電力を使用して稼働するものも多く、就寝時に機器が稼働し低周波音が気になって眠れない等の苦情になることがある。また、設置場所が隣家に非常に近い、設置された面が隣家の方向を向いている等、設置場所の検討が十分でないことが多い。このような苦情の多くは、暗騒音が小さな静かな地域で発生する傾向にある。そのような現状に対し、日本冷凍空調工業会では建築設備機器の販売・据付けに携わる人や企業に向けて、「騒音防止を考えた家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック」[26] を発表する等の取り組みが行われている。

また環境庁（当時）2000 年に「低周波音の測定方法に関するマニュアル」[21] や、2002 年には対策事例集 [22] を公表し、低周波音の全国実態調査を実施した。2004 年には「低周波音問題の対応の手引書」[23] を公表し、この中で低周波音が苦情の原因であるかどうかを判断するために「心身に係る苦情に関す

る参照値」を示しているが、この参照値以下でも苦情が寄せられる場合は存在しており、未だ不明確な部分が多い。2007年には「よくわかる低周波音」[24]を発表し、環境省が先導的な役割を果たしている。

また2000年頃から風力発電施設から発生する低周波音の苦情件数も増加している。このような問題は風力発電の先進国であるヨーロッパ諸国でも同様に発生しており、ガイドラインの設定等の行政的な対応も行われてきている。一方、日本国内においては、このような風力発電所の騒音問題に対して現在のところ統一的な基準やガイドラインが整備されるには至っていない。

Table 1.1: Movements related to low-frequency noise.

1970年頃～	我が国で低周波音問題発生
1976年	環境庁，低周波空気振動実態調査を開始
1984年	環境庁，低周波空気振動調査結果を公表
1985年頃	工場等の大型機械・施設から超低周波音対策が進む，苦情減少
1993年	新幹線の高速化により低周波音問題発生
1994年	環境庁，低周波音に関する調査を再開
1995年	ISO-7196，低周波音の周波数重み特性（G特性）規定
2000年	環境庁，「低周波音の測定方法に関するマニュアル」公表
2002年	環境省，「低周波音防止対策事例集」公表
2002年頃～	近隣の住宅・店舗・施設等の機器からの低レベルの低周波音による苦情発生
2004年	環境省，「低周波音問題対応の手引書」公表
2007年	環境省，「よくわかる低周波音」公表
2007年頃～	風力発電施設からの低周波音苦情が発生

1.1.2 低周波音の発生源

低周波音の発生機構と発生機構別の発生源を以下に示す。

- (1) 平板の振動：大型の振動ふるい，道路橋，いっ水ダムの水流
- (2) 気流の脈動によるもの：空気圧縮機，真空ポンプの圧縮膨張による容積変動
- (3) 気体の非定常励振によるもの：大型送風機の翼の旋回失速やシステムのサージング，振動燃焼等
- (4) 空気の急激な圧縮，開放によるもの：発破，鉄道トンネルでの高速での列車突入等

低周波音問題が発生する可能性があるものを以下に示す。このうち，大型の機械については，正常な稼動状況ではない場合に超低周波音が発生する恐れがあることが報告されている。

送風機，往復式圧縮機，ディーゼル機関，真空ポンプ，風車，振動ふるい，ジェットエンジン，ガスタービン，ヘリコプター，機械プレス，治水施設，ガスエンジン，水車，変圧器等

1.1.3 低周波音に関する苦情・影響

低周波音の苦情は大きく物的影響（1）と心身に関わる影響（2）の2つに分けられる。

(1) 物的影響

物的影響は人には聞こえないが低周波音が空気を伝わり建具や置物を振動させてしまう現象である。具体的には戸や窓等の建具がガタガタする，置物が移動するといったことが挙げられる。落合らによると建具は 20 Hz 以下の周波数で人の感覚閾値より小さい音圧レベルでがたつき始める場合があるということが分かっている [9]。環境省では，実験室において 15 種類の建具について，がたつき始める音圧レベルを測定している [19]。実験結果によると，揺れやすい建具で 5 Hz : 70 dB，10 Hz : 73 dB，20 Hz : 80 dB あたりからがたつき始めている。また，落合らは試験する建具の種類と測定する周波数帯域を増やして同様の測定を行い，個々の建具についてがたつき始める音圧レベルを測定した [10]。

(2) 心身に関わる影響

心身に係る影響は，心理的影響と生理的影響の2つに大別される。心理的影響は，不快感や圧迫感を感じる，気分がいらいらすと言った影響である。生理的影響は，頭痛や耳鳴りがする，睡眠妨害を引き起こす等の影響である。心身に係る影響については，個人差によって問題が発生するレベルは大きく異なる。そのため，低レベルのものであっても，苦情者にとっては深刻な問題になっていることが多い。

低周波音の聴覚閾値や，聴感印象については個人差が大きく，苦情に対する対応が難しい。環境省では行政の方に向けて，「低周波音問題対応の手引き書」[23] を発行し，レベル変動の少ない固定された機械，施設から発生する定常的な低周波音を対象として，苦情の原因が低周波音によるものか否か，目安の参照値として物的苦情に関する参照値，心身に係る苦情に関する参照値が示されている。

1.1.4 低周波音の防止対策

一般騒音において、騒音低減対策に”音源系”, ”伝搬系”, ”受信系” と3つに分けて対策が考えられ、低周波音においても同様である。そのためには各系統において、低周波音による物理現象（発生、伝搬、透過のメカニズム）を正しく把握し、適切な対策を施すことが重要である。屋外の低周波騒音源による屋外伝搬に影響を及ぼす要素を Fig.1.2 に示す。特に低周波音問題に関しては,”音源系”における騒音低減対策が中心に進められ,”伝搬系”, ”受信系” についての検討は十分にされていない、またそれらにおける定量的な騒音低減効果は明らかになっていない。

”音源系”, ”伝搬系”, ”受信系” における騒音低減対策について、順に説明する。

■ 音源系における対策

音源の発生音を低減させるためには、機械等による強制力の軽減（風車の回転、振動ふるいの振動、アンバランス等による強制的な振動に起因した音の軽減）、波動の吸収（プレスの揃い踏み等波動を吸収するような機構、配置への変更）、共鳴現象の防止、放射効率の低減、燃焼調整、不具合要因の除去等、各々の機械に合った方法がとられる。二次的対策はダクト系に消音器挿入、機械本体は防音エンクロージャーの対策がある。消音器は、膨張型消音器、共鳴型消音器、サイドブランチ型消音器、アクティブ消音器、等が用いられる。通常の騒音の場合には吸音型消音器が広く用いられるが、低周波音に対しては材料の吸音率が小さく、効果が少ない。音源を密閉する防音エンクロージャーの場合、質量則によっては低周波音はあまり遮音されないので、剛性を考慮し、共鳴を防止するような防音カバーを設計する。

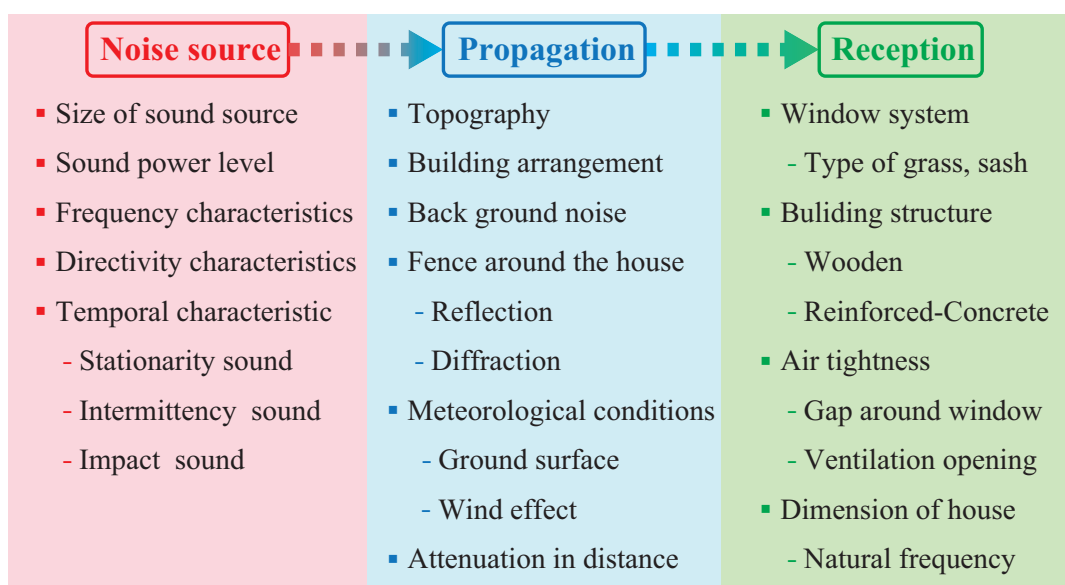


Fig. 1.2: Elements affected low-frequency sound insulation performance.

■ 伝搬系における対策

伝搬系における対策としては、塀、壁、指向性の利用、距離減衰が考えられる。低周波音に関しては波長が長く、音波の波動的な性質の影響により、塀・壁等の遮蔽効果もあまり期待できないと言われている。また、低周波音の距離減衰については、物理的には音波であるため、点音源の場合は距離が倍になれば6 dB 減衰するが、地表面吸収や空気吸収による超過減衰の影響は極めて小さい。一方で、低周波音の発生源は一般に構造が大きなものが多く、音源近傍においては距離減衰が一律的な傾向で現れない場合も多い。本研究では塀や音源の位置での屋外伝搬の影響の把握を目的とする。

■ 受音系における対策

受音系における対策としては、外壁の高重量化、窓ガラス・サッシの交換等の対策が考えられる。なお、一般に建物自体の遮音性能も低周波音に関しては期待できない。低周波音の遮音においては、騒音領域で用いられる質量則と剛性則がある。

質量則 板材料の音響透過損失 $R[\text{dB}]$ は音の周波数を一定とすれば板の面密度 $m[\text{kg}/\text{m}^2]$ が大きいほど大きくなる。入射角 θ における透過損失 R_θ の質量則を Eq.(1.1) に示す。この質量則による遮音量の推定は 20 ~ 100 Hz の付近の周波数帯域の低周波音に対して適用されることが多い。

$$R_\theta = 10 \log_{10} \left(1 + \left(\frac{\omega m \cos \theta}{2\rho_0 c} \right)^2 \right) \quad (1.1)$$

ここで、 $\rho_0 [\text{kg}/\text{m}^3]$ は空気の密度、 $c [\text{m}/\text{s}]$ は音速である。

剛性則 有限平板の透過損失について、1 次の固有周波数 f_0 以下の周波数帯域においては、平板の剛性のみにより支配される領域がある。平板の剛性により、透過損失の値が決まることを剛性則といい、入射角 θ における透過損失 R_θ の剛性則は Eq.(1.2) で表せる。

$$R_\theta = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{Z_m \cos \theta}{2\rho_0 c} \right)^2 \quad (1.2)$$

ここで、 Z_m は平板のインピーダンスである。さらに、 Z_m は Eq.(1.3) で表される。

$$Z_m = \frac{K}{\omega}(\eta - j) \quad (1.3)$$

ここで、 η は板の内部損失、 $K[\text{N}/\text{m}^3]$ は等価剛性である。4 辺単純支持の矩形平板において、等価剛性 K は Eq.(1.4) で表される。

$$K = \frac{Et^3\pi^4}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \quad (1.4)$$

ここで、 $E [\text{N}/\text{m}^2]$ はヤング率、 $t [\text{m}]$ は板厚、 ν はポアソン比、 $a, b [\text{m}]$ は平板の寸法である。Eq.(1.3),(1.4) より、内部損失のない、単純支持の矩形平板の垂直入射の等価損失 R_0 は Eq.(1.5) で表される。

$$R_0 = 10 \log_{10} \left\{ 1 - \frac{jEt^3\pi^4}{24\omega\rho_0c(1-\nu^2)} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \right\}^2 \quad (1.5)$$

1.2 関連の既往研究

最初に低周波音に対する家屋の遮音性能に関する既往研究，報告について説明する。環境庁大気保全局は，低周波音発生源付近の家屋 59 戸において，家屋内外で音圧レベルを測定し，家屋構造別，窓構造別に内外音圧レベル差を算出している [20]。5 Hz 以下の周波数帯域においては，家屋構造や窓の種類による有意な変化は認められず，5 Hz 以上の周波数帯域については，周波数の上昇と共に内外音圧レベル差が上昇する傾向にあった。比較的軽量な木造家屋に比べ，RC 造のような高重量の家屋の方が遮音性が高いという定性的な知見は得られたものの，各家屋において音源と家屋の位置関係，周囲の建物の配置，家屋の寸法等の他の不確定要素による影響については明らかになっていない。

土肥らは低周波音発生装置を開発し [6]，周囲からの反射の影響の無い広大な敷地において，模擬家屋を用いたフィールド試験を行っている [7]。家屋の窓の存在や窓の振動が屋内音場に影響を及ぼすことを示している。10 Hz 付近の周波数帯域において家屋の窓が著しく振動し，家屋内に音波が透過しやすい条件になることを示している。一方で，窓の固有振動が窓のみの要因で決定するのか，或いは家屋内の空気と連成して決定するかは明らかになっていない。また，家屋内で三次元の音圧レベル分布を測定した結果，20 Hz 以上の周波数帯域では家屋内に分布が生じ，家屋内における計測点位置について注意を払う必要性を述べている。家屋近傍の屋外の測定点においては，25 Hz 付近の周波数帯域で家屋から反射が生じ始め，屋外の音圧レベルが上昇する傾向にあることを示している [8]。既往研究の多くは，家屋内外レベル差を低周波領域の遮音性能の評価指標として用いており，基準とする屋外の音圧レベルの測定位置の選定を行う上で参考となる知見である。

また，Doi は家屋の気密性が低周波領域の家屋の遮音性能に及ぼす影響についても検討を行っている [2]。測定では，模擬家屋に設置されたドアの微小開放やドア周囲をテープで気密することにより気密性の影響について検討している。特に 10 Hz 以下の帯域において，条件間に差が生じ，気密性の影響が顕著に現れた。一方で，ドアを微小に開放することで，ドアを閉じている状態よりも家屋内の音圧レベルが低下するような傾向も見られたが，どのような要素に起因するかは不明瞭である。10 Hz 以下の周波数帯域における家屋の気密性が遮音性能に及ぼす影響について，理論的に考察している [3]。

また，本研究に関連する既往研究として橋本，加美らは家屋近傍に設置された音源から発生する定常的な低周波音を対象として，有限要素法による音響振動連成解析と縮尺模型を用いた実測を行っている [13][14][15][16][17]。主に受音系における低周波音領域の遮音性能に関わる要素として，(1) 窓の質量・剛性 (2) 外壁の質量 (3) 微小な隙間 (4) 床下空間 (5) 換気口からの屋内音場に与える影響を考察している。その中で，“音源位置”の影響を観察しており，音源位置を家屋の平面に対して斜め方向（家屋の角に存在）に設置することで，家屋内で遮音性能が高くなった。低周波領域においては波長が長く，透過損失の入射角依存性が小さいものと考えられる。一方，斜め方向から音波が入射した場合には正面方向よりも見つけ面積が小さくなるため，この結果になると考察している。しかし，屋外における影響は観察しておらず，伝搬系の影響の把握は多くはない。

1.3 研究の目的

以上のような背景から、伝搬系の対策による伝搬現象の知見は多くない。そのため本研究では家屋近傍の音源（家庭用設備機器等）から生じる定常的な低周波音を対象とし、伝搬系の対策による屋外伝搬現象の把握を行い、予測する為の基礎的な知見を得ることを目的とする。

研究方法としては、有限要素法を用いた定常音場解析により、家庭用設備機器からの低周波音放射及び屋外伝搬に関する研究を行う。本研究で 検討行う項目を以下のように設定する。

- 外構塀に関する検討
- 隣戸に関する検討

また、その中で影響を詳しく観察する為、以下の項目に着目する。

- 外構塀の高さ/幅/配置の影響
- 外壁からの後退距離の影響
- 音源と外構塀の配置の影響

これらの検討・考察を踏まえた上で、低周波音による物理現象を把握し、伝搬系での騒音対策に関する知見の取得を目標とする。将来的には、低周波音を発生する騒音源と外構塀の適切な配置や、効果的な遮音対策の開発への発展が見込まれる。

1.4 論文の構成

以下に論文の構成を示す。

第1章では、研究の背景として、低周波音に関わる苦情・影響、低周波音問題の動向について、これまでの先行研究についてをまとめた上で、本研究の位置付け及び目的について述べる。

第2章では、予備調査として実際の住宅における家庭用ヒートポンプ給湯器の設置環境について述べる。「家庭用ヒートポンプ給湯器の据付けガイドブック」[26]に記載している据付け場所の選定ポイントに着目し、実際の住宅にて観察を行う。

第3章では、低周波領域における家屋の数値解析モデルの構築について述べる。想定する低周波音源について述べ、解析モデル・音源モデルを示す。外構塀の影響として、塀の高さ・幅や外壁からの後退距離、そして音源と塀の配置に関する影響を観察する。また隣戸の影響として外構塀との関係を踏まえ伝搬現象を観察し、隣戸面への影響を考察する。

第4章では得られた知見を整理し、今後の展望を述べる。

第 2 章

家庭用ヒートポンプ給湯機の設置環境に関する予備調査

2.1 はじめに

本章では、実際の住宅が設置されている家庭用ヒートポンプ給湯機の設置状況を確認する。平成 26 年に消費者庁が「家庭用ヒートポンプ給湯機から生じる運転音・振動等により不眠等の健康上の症状が発生したとの申出事案」[28]と称し、調査を行った。その中で電気店及び電気工事業者と工務店及びハウスメーカーに対して「家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック」[26]についての認知率のアンケート調査を行った Fig.2.1。電気店及び電気工事業者では約 2 割、工務店及びハウスメーカーでは約 3 割と普及が不十分であると判明し、実際の設置状況は各世帯異なっていることが想定される。

そこで実態把握として実際の設置状況をガイドブックにおける据付け場所の選定項目に準じて観察した。さらに外構塀の種類や家屋との関係性も含め観察したことを述べる。

調査対象	母数 (加盟数)	アンケート送付数	回答状況		据え付けガイドブックを 知っているか		据え付け ガイドブックの 認知度
			回答数	%	知っている	知らない	
電気店等 (9都道府県)	6,812	395	238	60.3 %	46	190	19.3 %
工務店等 (4協会)	1,414	306	93	30.4 %	28	65	30.1 %

Fig. 2.1: Recognition rate of guidebook from installment point of heatpump.

2.2 調査概要

2.2.1 対象地域

対象は家庭用ヒートポンプ給湯機を設置している戸建て住宅とする。その中で、家庭用ヒートポンプ給湯機の普及時期が 2000 年以降であるため、この時期を境目に 2000 年以前と 2000 年以降に開発された地域に分けて調査を行う。対象地区は 5 地域で、Table 2.1 に示す。

特に 2000 年以降に開発された地域に関しては、ハウスメーカー等に分譲されている住宅群を中心に選定した。2000 年以前に開発された地域は、主に住宅が密集し比較的古い戸建て住宅を中心に選定した。

Table 2.1: Summary of investigation area.

Investigation area	Developing age	Number of house
A	1985～	193
B	2010～	133
C	2010～	73
D	2010～	25
E	2010～	59

■地域概要：地域 A

1985 年以降から開発が始まった、比較的古い戸建て住宅群である。計画的に開発された地域であるため、碁盤のように住宅が存在し、とても密集している地域である。

■地域概要：地域 B

2007 年に開業した大型ショッピングモールに合わせて 2010 年以降から開発が始まった、比較的新しい戸建て住宅群である。地域 A に比べると敷地面積は広く庭や駐車場が広くなるように設計している。

■地域概要：地域 C

2010 年以降に開発された比較的新しい地域である。ここはハウスメーカー 10 社により開発された大型分譲住宅地である（全 96 世帯）。多くはオール電化住宅で同じような設計の住宅は多数存在し、外構塀はあまり存在せず庭や駐車場を隣戸の間に設けて敷地を分けて、見晴らしの良い地域である。

■地域概要：地域 D

2010 年以降に開発された比較的新しい地域である。ここは地域 C に比べハウスメーカー 1 社のみが開発された分譲住宅地である（全 26 世帯）。全住宅がオール電化住宅である。

■地域概要：地域 E

2010 年以降に開発された比較的新しい地域であり、様々な戸建て住宅が存在している。この地域は太陽光発電等の設備機器に力を入れている地域であることが特徴である。

2.2.2 調査項目の検討

「家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック」[26] では据付け場所の選定ポイントを大きく 3 つに分けて対策が組まれている。その 3 項目を以下に示す。

- お客様および隣接するご近所様の寝室の側は避ける
- ヒートポンプユニットの近辺に窓や床下通風口等の音の進入口があれば極力距離をとる
- ヒートポンプユニットの周囲に極力スペースを設け、壁や塀で音が反射しないように工夫する

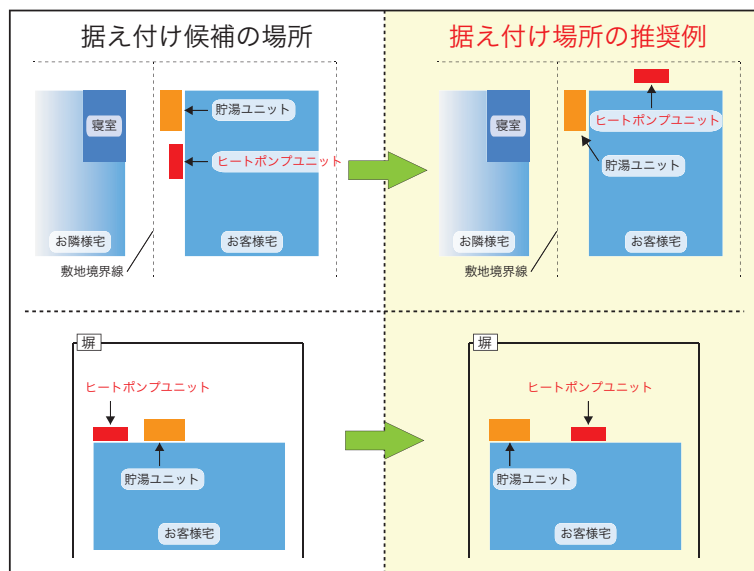


Fig. 2.2: Example of measures.

このように分類されており、Fig.2.2 のように家屋・音源・塀の幾何学的関係を整理している。そこで今回の予備調査では以下の項目について調査する。

- (1) ヒートポンプユニットの配置：隣戸側もしくは道路側に設置しているのか
- (2) 外構塀の関係：ヒートポンプユニットの前面から外構塀までの距離・塀の高さ
- (3) 開口部との関係：ヒートポンプユニットの前面・背面方向に存在するものは何か（外壁・窓）
- (4) 隣戸との関係：ヒートポンプユニットから隣戸までの距離

以上の 4 項目を調査した。調査用紙は付録 B に示す。

2.3 調査結果

2.3.1 家庭用ヒートポンプ給湯機の設置状況

■ 設置割合

家庭用ヒートポンプ給湯機の設置割合の結果を Fig.2.3 に示す。地域の住宅情報を Table2.2 に示す。まず、本調査対象地域の中で家庭用ヒートポンプ給湯機が設置されている住宅は 389 戸中 144 戸となっている。各地域で家庭用ヒートポンプ給湯機の設置率は様々だが、地域 A に関しては開発時期が 1985 年頃とこの対象地域の中では比較的古くから存在する住宅が多数あり、その時代ではガス給湯器が主流で未だその名残が強く残っているためか低い設置率となった。その他の地域に関しては 2000 以降に開発された地域であるため約 50% 以上となっていたが、地域 C に関しては、ハウスメーカー 1 社が分譲している住宅が多く存在し、ここではガス給湯器に統一していたため比較的低い値になった。

Table 2.2: Summary of heat pump.

Investigation area	Number of house	Number of heat pump	Installation rate[%]
A	158	10	6
B	93	50	54
C	52	18	35
D	24	24	100
E	62	42	68
Total	389	144	37

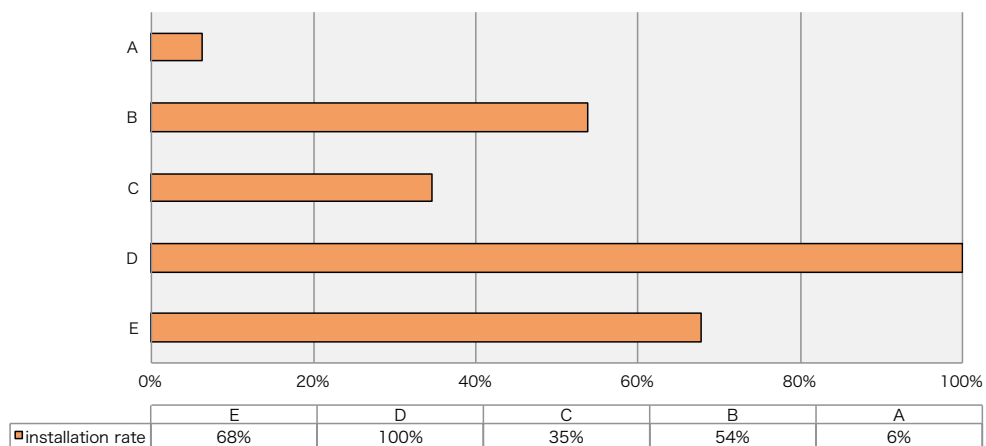


Fig. 2.3: Installation rate of heat pump hot water on household.

■ 設置方向

騒音源であるヒートポンプユニットの設置方向の結果を Fig.2.4 に示す。ガイドブック [26] ではヒートポンプユニットを道路側に設置することで、隣戸への音の影響を軽減するよう推奨されている。本節の調査対象地域では全地域で隣戸側にヒートポンプユニットを設置している割合の方が高くなっている。どの地域も住宅は密集しているが、計画的に開発されているため多くが道路側に面している部分は存在していた。

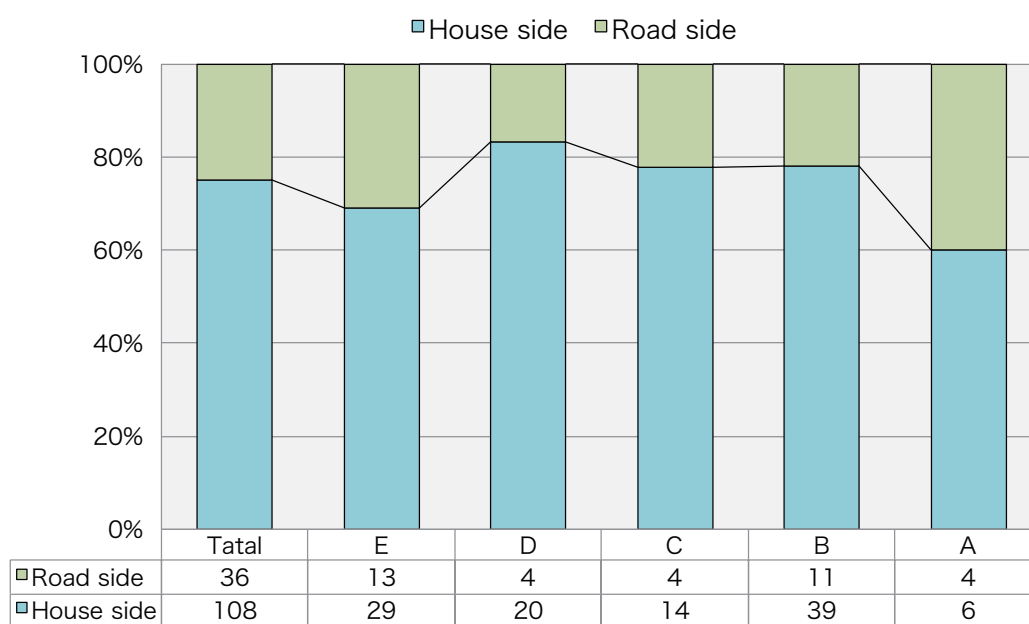


Fig. 2.4: Direction of heat pump unit.

2.3.2 外構塀と家屋の配置関係

■ 外構塀に関して

調査対象の中で家庭用ヒートポンプ給湯器が設置されている住戸は144戸であり、そのヒートポンプユニットの前面に外構塀が存在している住戸は56戸であった。さらにヒートポンプユニット前面から外構塀までの距離と外構塀の高さについての結果を Fig.2.5 に示す。

家庭用ヒートポンプ給湯器が設置されている地域の多くは2000年代以降に計画的に開発された地域であり、ハウスメーカー等により分譲されており同じ設計・配置の住戸が多く存在している。この地域ではあまり敷地境界線上に塀を設ける設計はせず、木材等で敷地を区切っている手法が主流であったため、少ない傾向になったと考えられる。その中で、ヒートポンプユニット前面から外構塀までの距離に関しては約98%は2m以下となることが示された。2%ほど2m以上離れている場所も存在したが、多くは2m以下であるとわかる。さらに、外構塀の高さに関しては約90%が0.5m未満であることが示された。

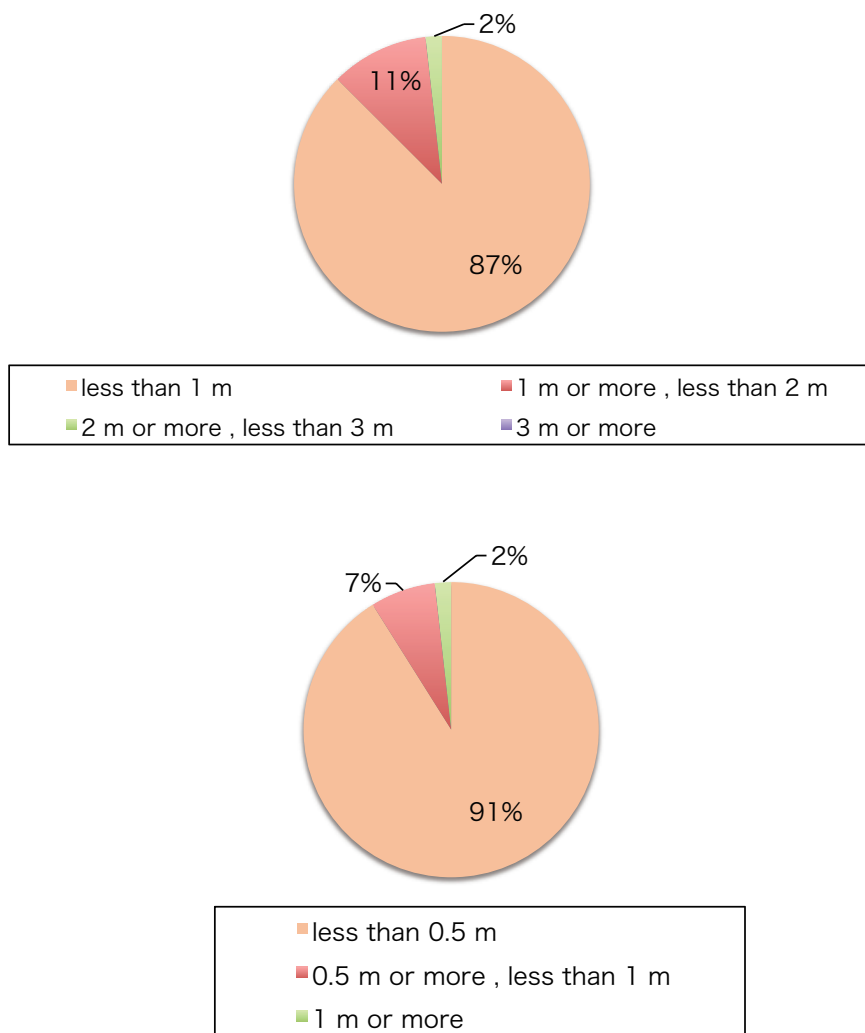


Fig. 2.5: Distance from heat pump unit to fence and height of fence.

2.3.3 隣戸との関係

■ ヒートポンプユニットと開口部との関係

ガイドブック [26] では「ヒートポンプユニットの近辺（上方向含む）に窓や床下通気口等の音の侵入口があれば極力距離をとる」と記載している。そのため、本節ではヒートポンプユニットの正面方向（隣戸側）と背面側（設置家屋側）に開口部が存在するかどうかを観察した。ここでは大きく分けて外壁もしくは開口部なのかを観察している。さらに開口部に関しては窓の下枠が床面とほぼ同じの高さで人が出入りできる大きさの窓である「掃き出し窓」と、掃き出し窓以外の人が出入りできないような「小窓」で分けて調査を行った。但し、ヒートポンプの幅の正面にあるものを評価するものとする。その結果を Fig.2.6 に示す。

設置家屋側（背面方向）では1階2階ともに調査対象のヒートポンプユニットの約80%が外壁面に存在している。掃き出し窓のように大きな開口部はあまり存在してなかったが、約20%は開口部面にヒートポンプユニットが存在している。隣戸側（正面方向）では設置家屋側とは大きく異なっている。1階2階ともに開口部面に設置している割合が設置家屋側と比べ大幅に大きくなっている。1階では掃き出し窓と外壁の割合がほぼ同じであり、大きな開口部面に向けてヒートポンプユニットを設置している家屋が多く見られた。2階に関しては開口部面に向けて設置している家屋が多いことがわかった。このようにガイドブック [26] で記載している据え付け場所の選定ポイント等の実施はあまりされない印象は薄く、今回調査を行った対象地域では隣戸面に関してヒートポンプユニットは開口部に向けて設置していることがわかった。ある地域ではヒートポンプユニット同士を対面させるように設置していた。ハウスメーカーが分譲している場所は他にもあったがこの場所のみこのような設置状況であった。実際にヒアリングすることはできなかったが、音源同士が対面することで音の重ね合いが発生してより悪化してしまう可能性が示唆された。

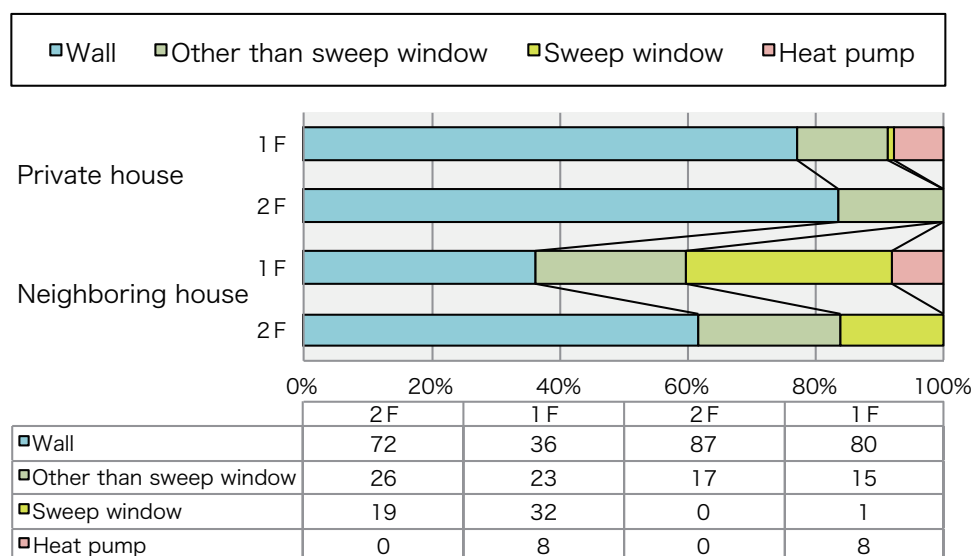


Fig. 2.6: Relation between heat pump unit and window.

■ ヒートポンプユニットから隣戸までの距離

ヒートポンプユニットから隣戸までの距離がより離れるほど家庭用ヒートポンプ給湯器の低周波音による問題は少なくなることは明白である。そのため、ヒートポンプユニットから隣戸までの距離を観察した。その結果を Fig.2.7 に示す。全体ではヒートポンプユニットから隣戸までの距離が 1m 以上 2m 未満が一番多いになっているが、2m 以上離れている住宅も約 50% 近く存在している。調査地域に関して地域 A 以外は 2000 年代以降に開発された比較的新しい地域でハウスメーカー等に最初から区画まで整理された分譲住宅が多く存在しているため、多くの住宅では隣戸との間に庭や駐車場を設け密集しないような設計がされていた。そのため 2m 以上離れている住宅が多く存在したものと考えられる。顕著に現れている場所は地域 E であり、2m 以上離れている住宅が全体の約 90% も占めている。さらに 3m 以上離れている住宅も全体の中で一番多く、約 50% も存在していた。

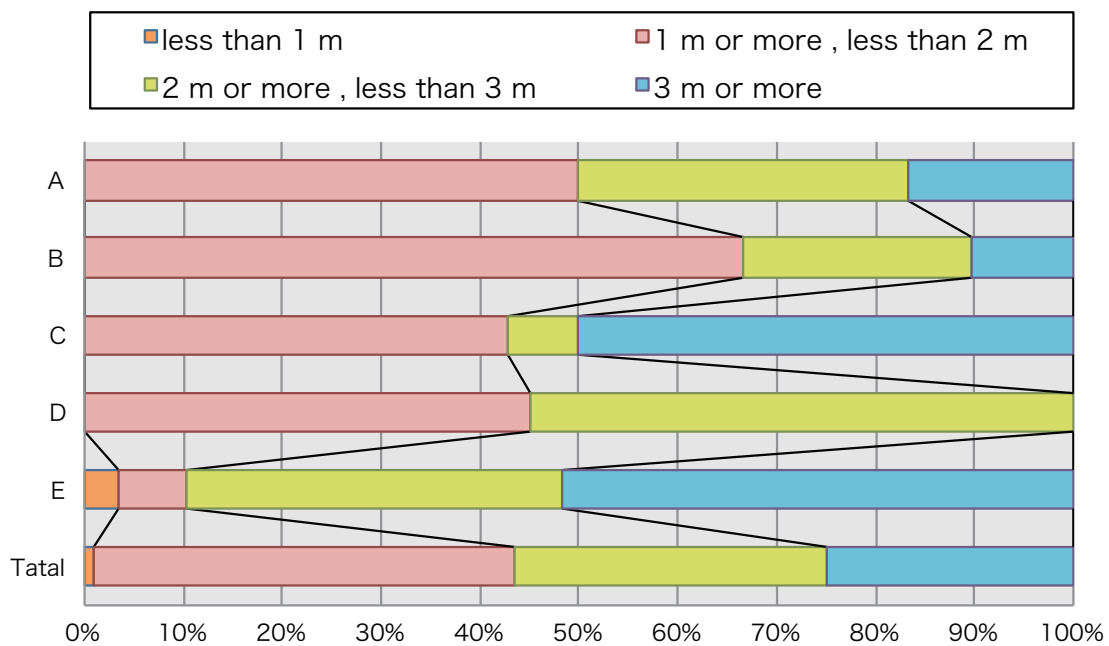


Fig. 2.7: Distance from heat pump unit to neighboring house.

2.4 まとめ

本章では実際に設置された家庭用ヒートポンプ給湯器の設置環境について予備調査を行い観察した。ここでは以下の点に注目した。

- ヒートポンプユニットの配置
- ヒートポンプユニットと外構塀の関係
- 開口部の関係
- 隣戸との関係

2.3.1 項では家庭用ヒートポンプ給湯器の設置状況について観察した。本調査対象地域は全住宅数 389 戸中 144 戸が家庭用ヒートポンプを設置していた。地域により違いはあるが、全体的に開発時期が最近の 2000 年代以降に開発された地域の方が比較的設置数が多い傾向にあった。2000 年代以前に開発された地域に関しては開発当初はガス給湯器が主流で交換時期のタイミング等で家庭用ヒートポンプの普及率があまり高くなかった。さらに騒音源であるヒートポンプユニットの設置方向に関しては全地域で隣戸側に向けてヒートポンプユニットを設置していることがわかった。実際には道路側に向けることが厳しい可能性はあるが、ガイドブック [26] の普及率の低さからも意図的に設置してない場合が多いことが示された。2.3.2 項では外構塀と家屋の関係について観察した。ヒートポンプユニットの前面に外構塀が存在している住戸は 144 戸中 56 戸であり、ヒートポンプユニットから外構塀までの距離は多くの住宅が 1m 未満であり 2m 以上離れている住宅はあまり存在しなかった。さらに塀の高さに関しては多くは 0.5m 未満であることがわかった。本調査対象地域では塀を設置せず木や鉄の穴開きフェンス等で敷地や外部からの視線を区切っていた。2.3.3 項では隣戸との関係について観察した。ここではガイドブック [26] に記載している選定ポイントの一つである開口部との関係について、本調査対象地域ではヒートポンプユニットの前面（隣戸側）に開口部である掃き出し窓や小窓が多く存在していることがわかった。さらにそのヒートポンプユニットから隣戸までの距離に関しては 2m 未満の住宅が一番多く存在していた。2m 以上離れている住宅も多く存在しており、2000 年代以降に開発された地域では敷地が広く、広く距離を離し設置している傾向であった。

以上より実際の設置環境について観察を行った。その中で、本調査対象地域の多くの住宅がヒートポンプユニットから外構塀までの距離は 1m 未満であり、隣戸との距離については地域ごとに様々であるが、家庭用ヒートポンプ給湯器が多く設置されている 2000 年代以降に開発された地域では 2m 以上離れていることがわかった。ガイドブック [26] の「音の進入口がない場所に設置」という項目に関しても、ヒートポンプユニット前面に開口部がある場所に設置している住宅は多く存在していた。この距離間で開口部が存在している場合、騒音被害が発生する可能性も示された。さらに塀の高さに関しては本調査対象地域が家庭用ヒートポンプ給湯器の前面に塀を設置していない住宅が多い為、多くが 0.5m 未満であった。この高さでは塀の遮蔽効果はあまり期待できないが、ガイドブックで検討されている音源から 1m 高い塀を設置することで場所によっては 10 dB ほどの減音量が見込まれている（500 Hz の場合）。そのため低周波領域において、その程度の高さを有する塀の遮蔽効果があるのか検討する必要がある。

第 3 章

家庭用設備機器の低周波音放射及び屋外伝搬に関する数値解析

3.1 はじめに

本章では低周波音領域における屋外音場の伝搬影響を把握するため、有限要素法を用いる。尚、解析理論自体は既に周知された手法であり、それを議論することは目的ではないため、理論の詳細は付録 A に示す。

一般的に低周波音に関わらず音響透過現象は、“音源系”、“伝搬系”、“受音系”の各系統で様々な要因が相互に影響し合い現象が複雑である。過去の既往研究でも、各々からどの程度の寄与があるかは明らかになっていない。そこで本章では、家屋近傍に設置している家庭用設備機器等から発生する低周波音を対象として、“音源系”、“受音系”について以下のような一定の条件を与え、“伝搬系”における要素が音源の放射や屋外音場に及ぼす影響を1つずつ検討していく。

- 音源系：定常的な低周波音を発生するような家庭用設備機器が家屋近傍に設置されている
- 受音系：全面剛壁で開口部が無い単純な形状の家屋

Fig.3.1 に示すような地表面が剛の半自由空間上に単純な形状の家屋とその近傍に低周波音源が設置されている状況を想定する。

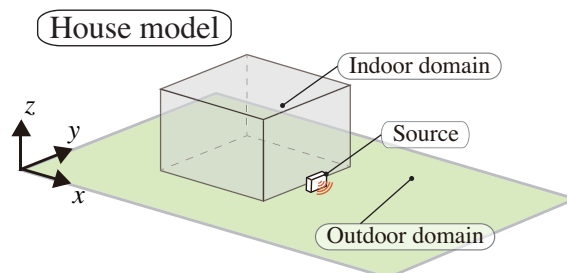


Fig. 3.1: A house is assumed to be a box-shaped placed on the semi-free field. A stationary sound source generating low-frequency noise is assumed to be equipment item placed closely to the house.

3.1.1 本章で取り扱う低周波音源

本章では、定常的な低周波音を発生する設備機器として、“家庭用ヒートポンプ給湯機”を想定している。家庭用ヒートポンプ給湯機は一般的に電気代の割安な夜間電力を使用し、暗騒音の低い静謐な深夜に稼働しているため、この家庭用ヒートポンプ給湯機から発生する低周波音による問題が起こりやすい。さらに設置場所に関して敷地内や家屋近傍に設置され、その設置面が隣戸側に向いている等の設置位置が適切でないことも問題発生の要因の一つである。

家庭用ヒートポンプ給湯機は、家庭用エアコンと同じ原理で二酸化炭素 (CO₂) 冷媒を圧縮加熱した熱を利用してお湯を作り出す。お湯を作り出すヒートポンプユニットとお湯を蓄える貯湯ユニットの二つから構成されている。低周波音の発生源は主にヒートポンプユニットの冷媒圧縮機及び送風機から発生すると考えられている。Fig.3.2 に家庭用ヒートポンプ給湯機の構成を示す。ヒートポンプ給湯機の騒音レベルは、ヒートポンプユニット近傍で 40～45 dB 程度であるが、外気温度や水温等の環境条件によってヒートポンプユニットの運転状況は変化する。特に冬場は給湯の必要性が増す為、冷媒圧縮機や送風機の回転数が上昇し、運転音が大きくなり低周波数領域の音の大きさも増大する傾向がある。消費者安全調査委員会は、苦情申出者宅において、ヒートポンプ給湯機の運転音及び住宅内外で実測を行っている [29]。苦情申出者が症状が重いと感じる部屋において、住宅内で 1/3 オクターブバンド中心周波数の 40 Hz において、音圧レベルが 50 dB 程度であり、設置場所周囲の多重反射や屋内へ伝搬すること影響を示している。周波数特性としては、回転数に起因した周波数 (40～60 Hz) とその倍調波成分 (80, 120, 180Hz) が主成分である音が発生する。

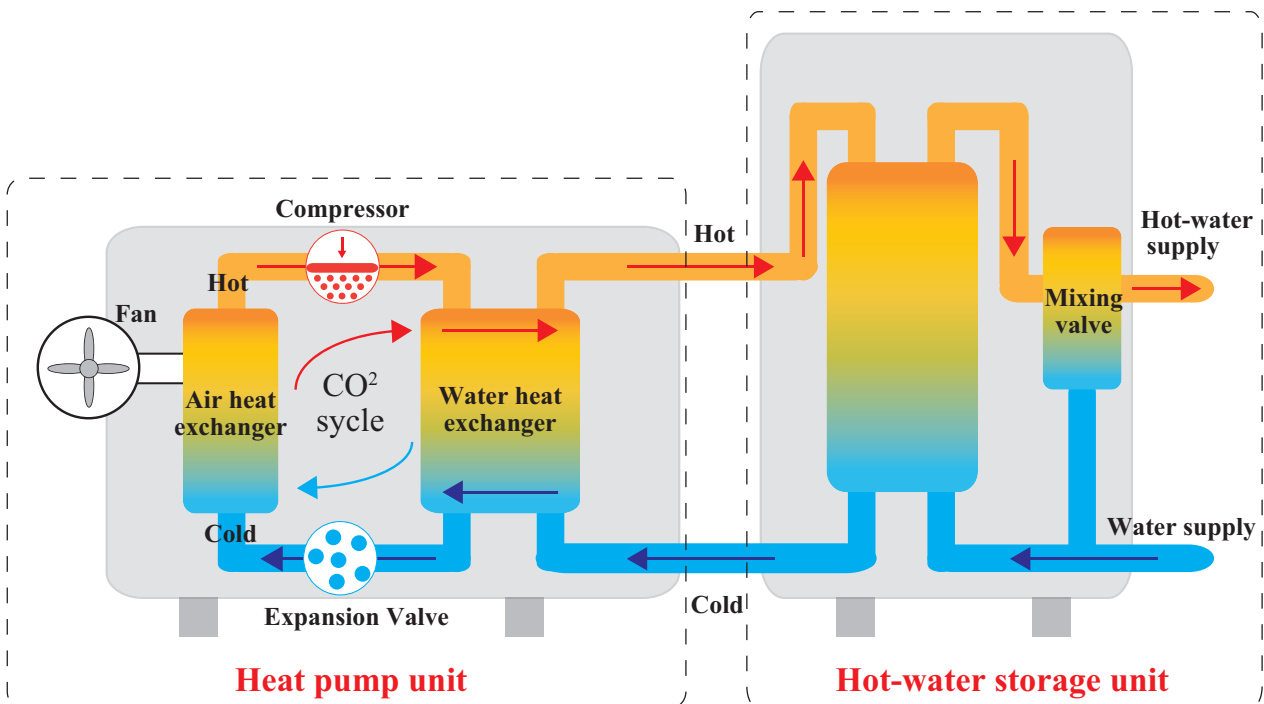


Fig. 3.2: Constitution of heat pump hot water supply machine for home use.

3.1.2 解析概要

家屋の大きさ・形状

本研究では現象を一つずつ把握していく為に、単純化した家屋モデルを作成し建物の要素と遮音性能の関係を一つずつ観察していく。家屋の形状については単純な直方体とした。既往研究 [13][14] では実大実験や縮尺模型実験で行った家屋のモデルの寸法で解析を行っていた。さらに寸法が小さい整数比のとき室内の固有モードで低音域においても縮退し、現象把握が煩雑になる可能性があるが、本研究では室内の現象を把握することが目的ではなく、実際に存在する寸法の家屋がある状況で伝搬系の対策による屋外音場の影響を観察する為、あまり留意していない。以上より延べ面積や容積は国土交通省、平成 27 年度、住宅経済関連データ [32] を参考に一般的な 2 階建ての戸建て住宅を想定した。家屋モデルの寸法は $8.0\text{ m} \times 8.0\text{ m} \times 6.0\text{ m}$ の大きさとした (Fig.3.3)。

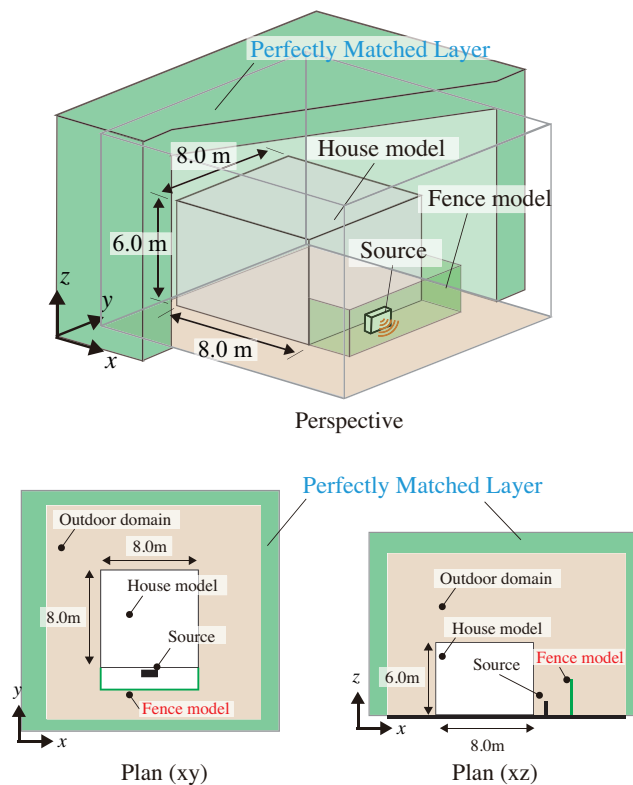


Fig. 3.3: A numerical model of a house. External acoustic field is truncated with Perfectly Matched Layer(PML).

屋外音場のモデル

屋外音場のような開領域を模擬する為に、人工吸音層（PML: Perfectly Matched Layer）の用いて領域を打ち切る。PML は家屋から 2.0 m 離れた周囲に設定し、音場領域と PML の領域の境界面上で反射が起きないように、PML の厚さ方向の領域分割数 n_{PML} は 3 にした。また、音場領域では四面体二次要素で分割した。音場領域・PML の領域共に、接点間の距離（要素長）は解析周波数の最短波長（140.3 Hz の波長 2.45 m）の 1/8 以下の長さになるように分割し、要素長は 0.3 m とした。

尚、空間の離散化については、Christophe Geuzaine と Jean-Francois Remacle によって開発された有限要素法におけるメッシュ作成用のフリーソフトウェアである Gmsh を用いて行った。

解析周波数

解析周波数は 1/24 オクターブバンドの中心周波数で 3.5 Hz（1/3 オクターブバンドの 4 Hz 帯域の下限周波数）から 140.3 Hz（1/3 オクターブバンドの 125 Hz 帯域の上限周波数）までを解析した。また、1/3 オクターブバンド中心周波数において、上限周波数から下限周波数までの平均値を 1/3 オクターブバンドのレベルとして算出している。

音源モデル

音源は家庭用ヒートポンプ給湯機のヒートポンプユニットの大きさを模擬した直方体の一面が振動境界になっているユニットを家屋の一面から 0.2 m 離れた位置にユニットの振動面が家屋面ではない方向に設置する。振動面で一様の振動速度を与える。この解析モデルでは所有する家庭用ヒートポンプ給湯機から低周波音が発生している状況を想定している (Fig.3.4)。

塀モデル

伝搬系の騒音低減対策の一つとして塀を設けることがある。本研究ではその塀に関して補強コンクリートブロック塀を想定する。さらにこのブロック塀に関しては JIS A 5406[31] で推奨されている C 種を使用することを想定する (Fig.3.4)。1 ブロックの寸法は 0.39 m×0.15 m×0.19 m の大きさで規定されており、本研究ではこの塀は敷地境界線に存在するものとする。本章では主にこの塀の影響に関して考察を行う。条件設定に関しては追って説明する。

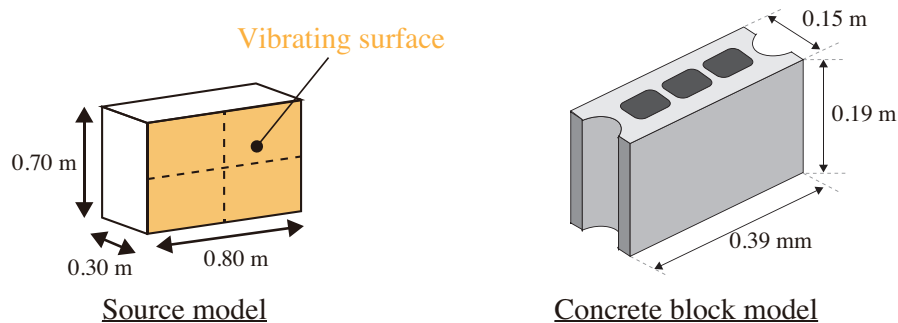


Fig. 3.4: A numerical model of source and fence.

3.1.3 評価指標

評価指標として、(1) 音源面の放射効率と (2) 各断面における挿入損失を算出し評価に用いる。

(1) 音源面の放射効率

本章では塀を設置することで音源自体に及ぼす影響を観察する為、音源面の放射効率を算出指標とする。

無限大の剛平面が速度 v でピストン振動するとき、表面の空気粒子も同じ速度 v で振動するが空気中の平面はインピーダンスが ρc なので、音圧は ρcv となる。ゆえに放射される音響パワーは 1 m^2 あたり ρcv^2 となるため、パワーレベルは Eq.(3.1) で表せる。

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{\rho cv^2}{10^{-12}} = 10 \log_{10} \frac{v^2}{v_o^2} + 10 \log_{10} \frac{\rho cv_o^2}{10^{-12}} \quad (3.1)$$

ここで $v_o = 5 \times 10^{-8}$ を入れると、 $\rho c \simeq 400$ として第二項は 0 となり、 $L_w = L_v$ となる。すなわち、振動速度レベルは音響放射パワーレベルに等しくなる。さらに、本章のような音源では振動面が音の波長より小さくなる。そのため、表面の空気粒子は側方へ逃げるため音圧は上がらなくなる。そして、音の放射効率は振動面の波長に対する相対的な大きさによって変化する。面積 s の平面が速度 v で振動するときの放射効率 σ は Eq.(3.2) で表せる。

$$\sigma = \frac{W}{\rho cv^2 s} \quad (3.2)$$

ここで W は音源のパワー、 $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$ は空気密度、 $c[\text{m}/\text{s}]$ は音速、 $v^2[\text{m}^2/\text{s}^2]$ は音源の振動速度、 $s[\text{m}^2]$ は音源の面積である。

さらに、 W に関しては、解析により各接点の音圧と粒子速度から求めたインテンシティの法線方向の面積積分 (Eq.(3.3)) から算出している。

$$W = \int \frac{1}{2} \text{Re}(pv^*) ds \quad (3.3)$$

ここで p は音圧、 v は粒子速度である。

以上より算出した放射効率 σ を dB 表示し評価に用いた。

(2) 各断面における挿入損失

本章では塀設置による屋外音場の影響を把握する為、塀設置前後の各点での音圧レベル差である挿入損失 $L_{w/o} - L_w$ を算出し評価する。塀が存在しない条件 (Fig.3.5 における左) の断面 I の各点の音圧レベル $L_{w/o,f}$ から、塀が存在する条件 (Fig.3.5 における右) の断面 I の各点の音圧レベル $L_{w/f}$ の差から算出している。この挿入損失は塀を配置することによる屋外の音圧レベル低下量を表している。Fig.3.6 のように断面 II や III における挿入損失も算出する。

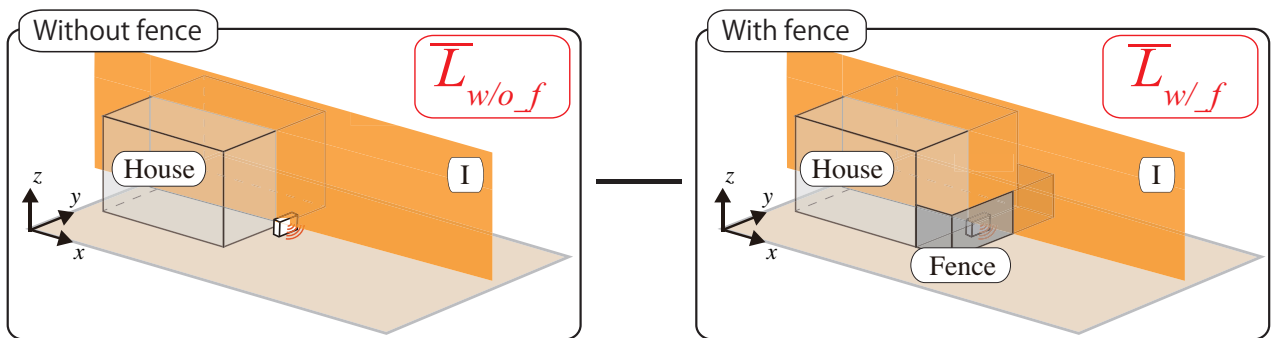


Fig. 3.5: Schemematic diagram of the calculation of insertion loss before and after the fence : cross section I.

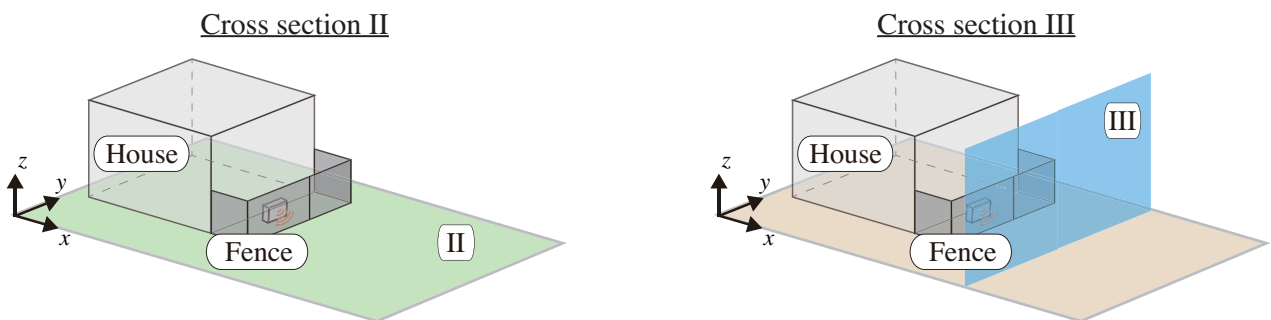


Fig. 3.6: A variety of cross section II, III.

3.2 外構塀に関する検討

3.2.1 配置の影響

解析条件の設定

騒音対策において伝搬系の要因である外構塀に関する影響を一つずつ検討を行う。一般的にヒートポンプユニットを壁や塀の間隔が極端に狭い場所へ据付けた場合に反射により音が大きくなる場合がある。ガイドブック [26] では 500Hz 付近に主な成分を持つ音源での塀による遮音効果を求めている。音源の高さより 1m ほど高い塀を設置することである場所では 10dB ほどの減音量が見込まれると示している。さらに家屋 1 軒が存在し、音源がある面に塀を設置している条件をシミュレートと実測により検討を行っている。しかし、具体的な減音量は示されていない。そこで本節では塀の配置の影響を検討する。

配置のみの影響を観察するため、家屋外壁や外構塀については剛壁とし解析を行う。外構塀の位置については Fig.3.7 に示すように、正面及び両側面に塀が配置している TypeA 正面のみに塀が配置している TypeB 正面及び片側面に塀が配置している TypeC の 3 条件と塀が存在しない条件も含め解析を行った。塀のパラメータに関してはガイドブック [26] のように塀の高さは音源の高さより 1 m 高い 1.63 m と外壁からの後退距離は 2.0 m とした。

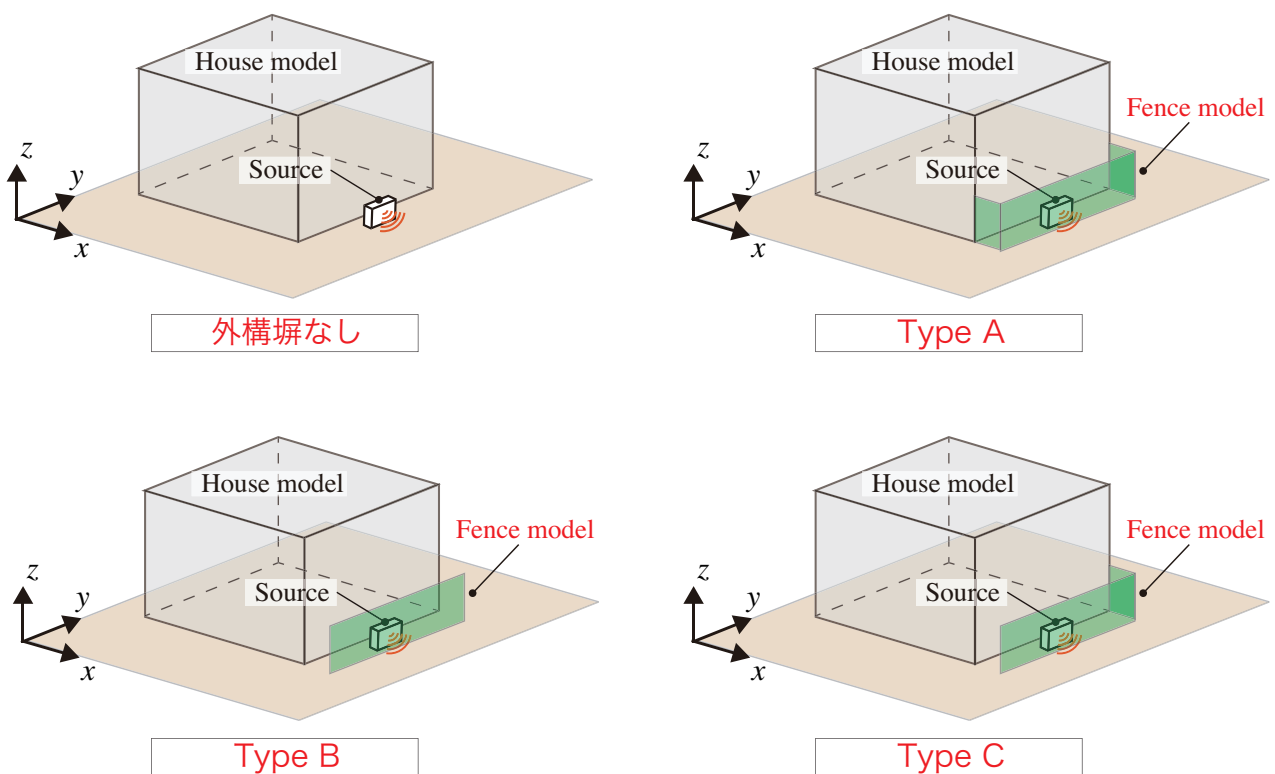


Fig. 3.7: Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house.

結果と考察

音源面の放射効率の解析結果を Fig.3.8 に示す。さらに各条件のピーク・ディップ周波数の音圧分布を Fig.3.10 に示す。

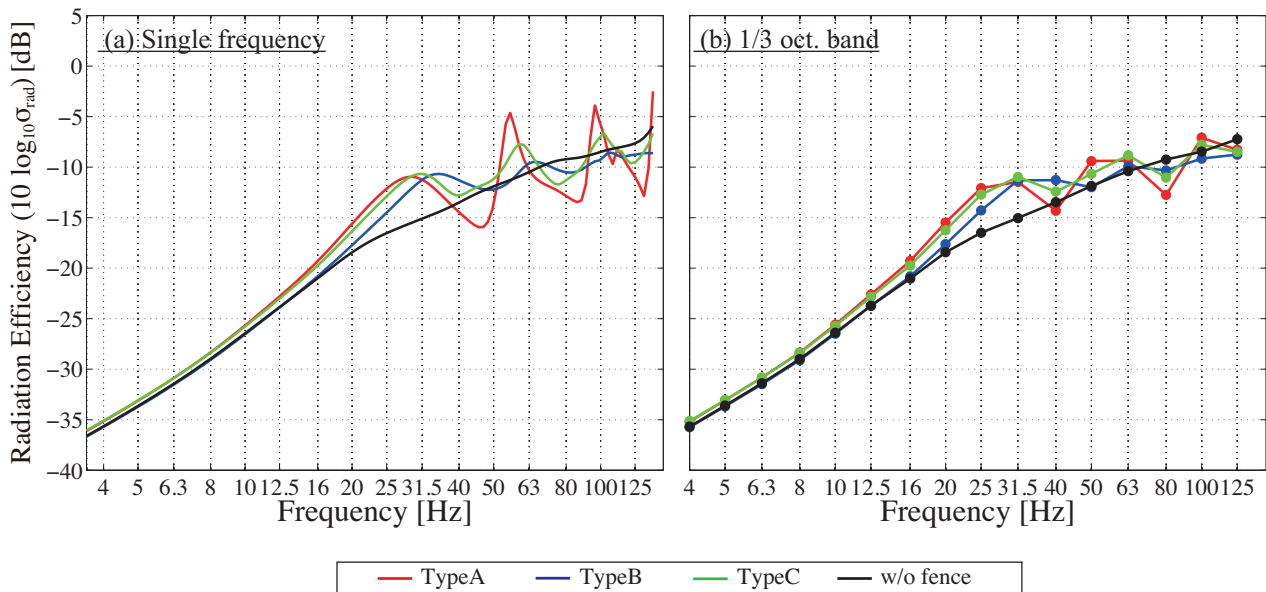


Fig. 3.8: Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of fence, "Type A,B,C,w/o fence".

■ 放射効率

各条件で 25 Hz で緩やかな大きなピーク、50 Hz 以上では鋭いピーク・ディップが生じており、Type B→C→A の順で変化が大きくかつ鋭くなっていることがわかる。25 Hz の第一のピーク以外でのピーク・ディップは堀内の音圧分布 Fig.3.10 から確認すると堀内の長手方向の固有モードが発生しており、そのため音源面の放射効率の変化が生じたと考えられる。堀の壁面を全剛壁とした各境界条件の共鳴周波数 f_n は以下の式で表される。

$$f_n = \frac{c}{2L}n \quad (3.4)$$

$$f_n = \frac{c}{4L}(2n - 1) \quad (3.5)$$

$$f_n = \frac{c}{2L}n \quad (3.6)$$

上から、" 両端閉管 (TypeA)", " 片方開管かつ片方閉管 (TypeC)", " 両端開管 (TypeB)" の共鳴周波数となっている。

L は堀の長手方向 (y 軸方向) の寸法であり、 n はモード次数である。対象の周波数帯域における堀の固有モード周波数の理論値を Table3.1 に示す。

Table 3.1: Natural frequencies of the fence (direction:y-axis).

	Mode order									
	Type A/B					Type C				
	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
Frequency [Hz]	22.3	44.6	66.9	89.2	111.5	10.9	32.8	54.7	76.6	98.4

塀内の固有モードと理論値を比較すると、概ね近い周波数帯域でピーク・ディップが生じている。これより塀内の長手方向の固有モード周波数帯域で音源面の放射効率に変化することがわかる。

Type A に関して音圧分布 (Fig.3.10) より、50 Hz 付近のピーク・ディップは2次モード、90 Hz 付近のピーク・ディップでは4次モードに対応している。さらにピーク・ディップともに同次でのモードが生じていることが確認できる。そこで音源面付近の位相差 (Fig.3.9) を確認すると、この共振周波数前後では音源面の音圧位相が変化していることがわかる。そのため同次でのピーク・ディップが形成されたものと考えられる。さらに音源位置はモードの節に当たる部分に存在しているため、奇数モードに対応したピーク・ディップは生じていない。

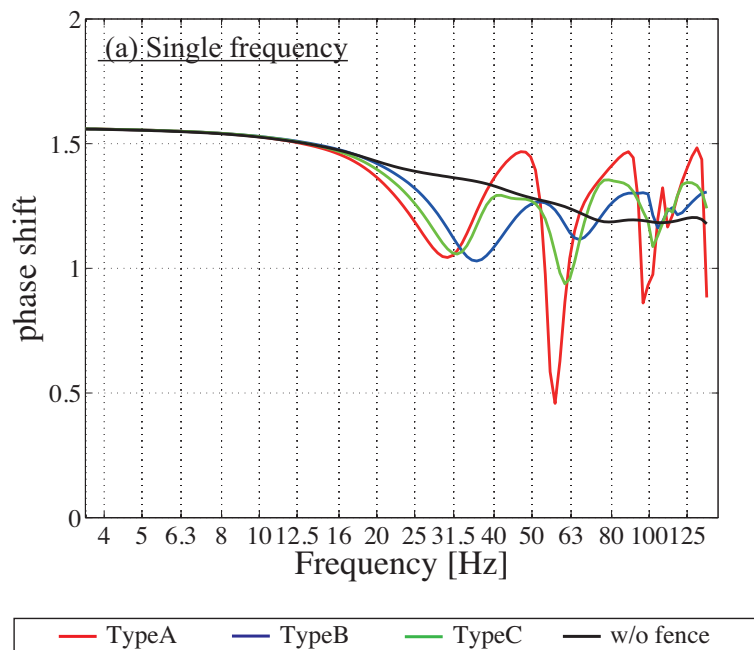


Fig. 3.9: Phase shift of sound source plane for a variety of arrangements of fence, "Type A, B, C, w/o fence"

Type B に関して Type A に比べると大きな変化は少ないが、60 Hz 付近のピーク・ディップでは3次モードに対応しているように塀内の固有モード周波数に起因している。Type B では両端が開放しており Type A に対して放射効率のピーク・ディップが反転しているとともに鈍化していることがわかる。さらに音源位置が節に当たる偶数モードに対応したピーク・ディップは生じていない。Type C に関して塀内の固有モード周波数に起因してピーク・ディップが生じている。

特に、家屋近傍の低周波音源としてあげられるヒートポンプ給湯器の周波数特性としては、回転数に起因した周波数(40~60 Hz)とその倍調波成分(80, 120, 180Hz)が主成分である音が発生するため、固有モード周波数が同様な帯域に存在する場合は、音源面の放射効率が上昇し塀設置する前に比べ屋外では悪化してしまう可能性がある。

■ 超低音域における家屋内の音圧レベルの上昇

各条件において、31.5 Hz 以下の周波数帯域でピークが生じており、塀の配置による違いはあまり現れてはいない。音圧分布を確認すると塀内が一様に分布していることから、この第一のピークに関しては塀内の空気をばね、上方開口部の空気質量による鉛直方向の共振系が形成されて励起されたものと考えられる。この超低音領域における放射効率のピークについては橋本が理論的考察をしている [13]。

■ 屋外音場における塀の挿入損失

各条件における断面 I の 1/3 オクターブバンドの挿入損失分布を算出した (Fig.3.11 - Fig.3.12 - Fig.3.13)。全条件ともに屋外音場において放射効率の変化に影響しているように見える。Type A では 31.5 Hz 付近の最初のピークまで緩やかに放射効率が増加している。挿入損失に関してもその帯域まで徐々に音圧レベルの上昇が見られる。その周波数以降に関しては放射効率に対応して屋外音場が変化している。Type B, C に関しても同様の傾向になっており、挿入損失の分布に関しても同じような分布になっていることがわかる。ただし Type C の方が片側面塀が存在しているため、反射の影響が強く音圧レベルの変動が大きくなっている。

ヒートポンプ給湯器の卓越周波数である 40,80 Hz に着目すると、放射効率においては両周波数帯域で塀設置前に比べ低下しており、挿入損失においても音源面付近で音圧レベルの低下が見られた。しかし、40 Hz 帯域では塀正面方向において距離が離れるほど音圧レベルの上昇している。そのため、干渉等の影響から複雑に屋外音場は変化するが、全体的に放射効率の低下から塀による挿入損失向上は示唆された。

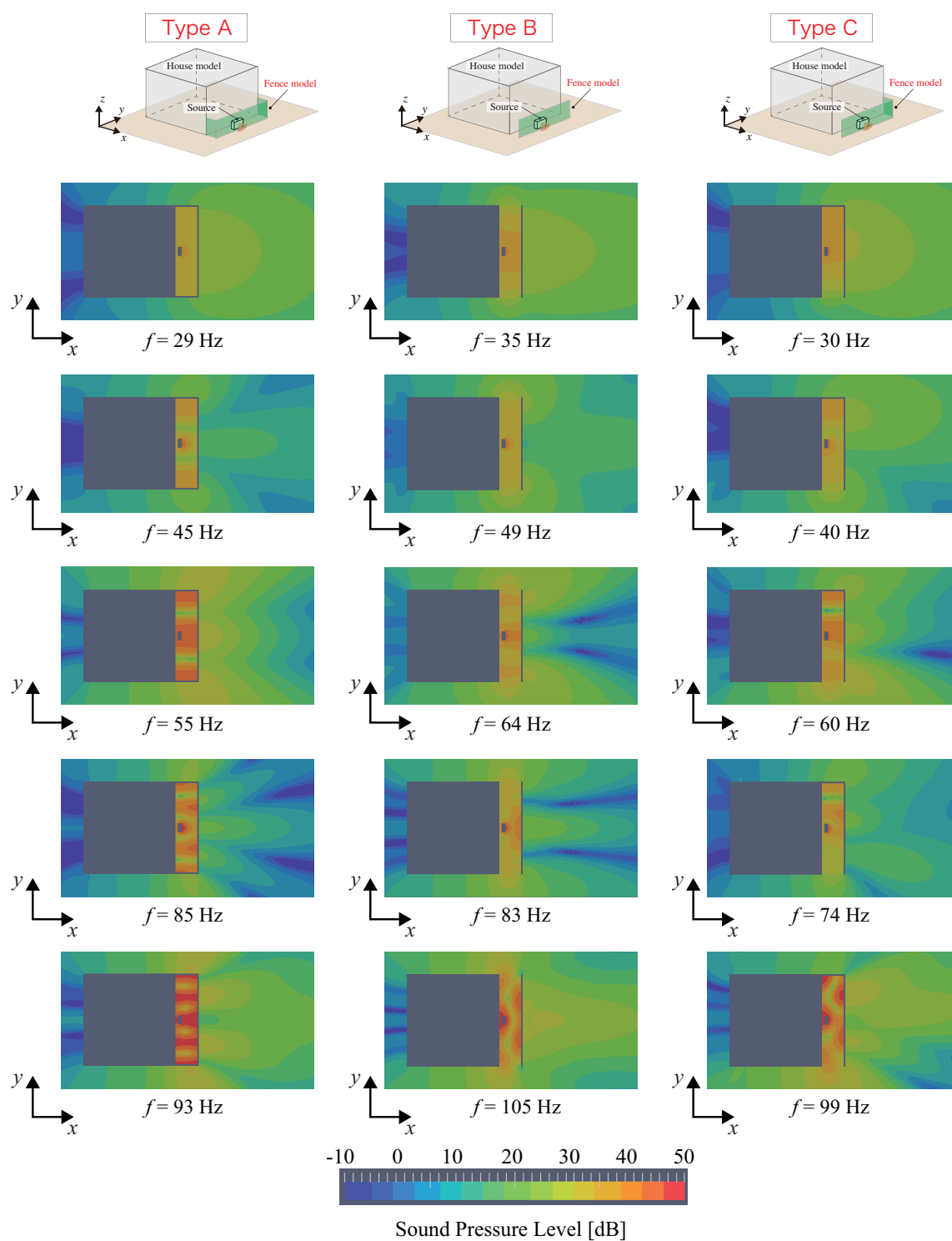


Fig. 3.10: Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA ,TypeB and TypeC ($d=2.0$ [m], $h=1.63$ [m]).

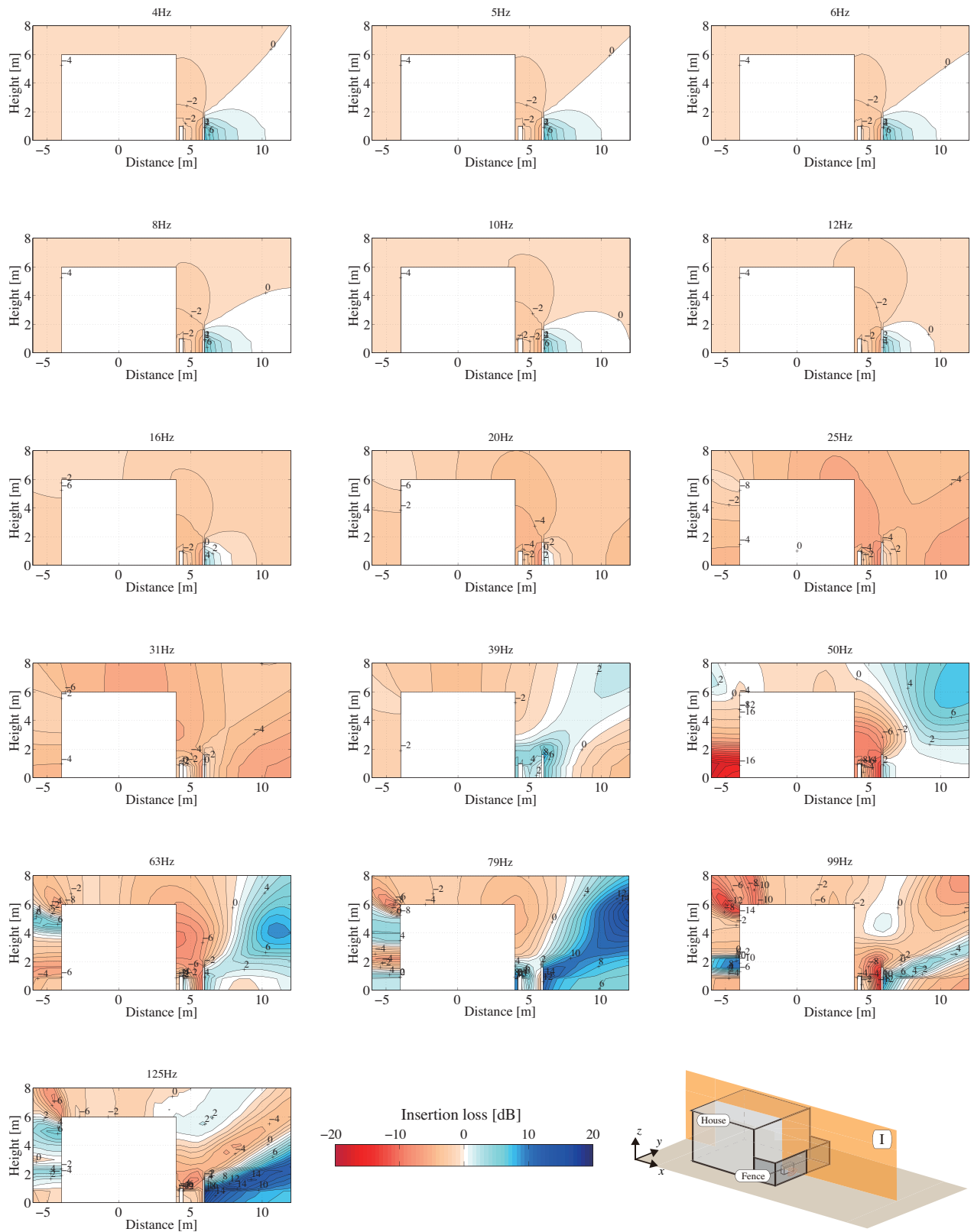


Fig. 3.11: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with $d = 2.0$ [m], $h = 1.63$ [m].

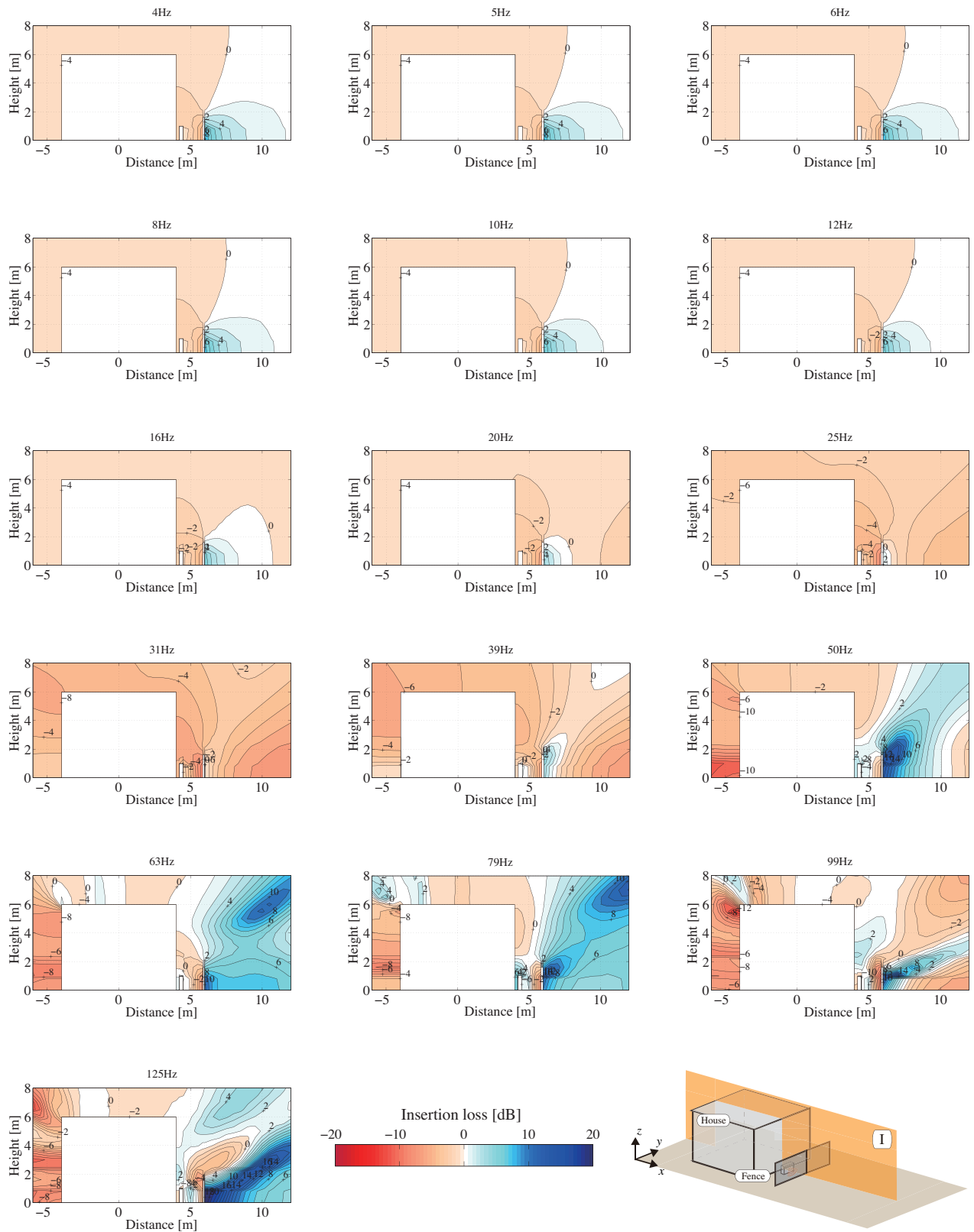


Fig. 3.12: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B with $d = 2.0$ [m], $h = 1.63$ [m].

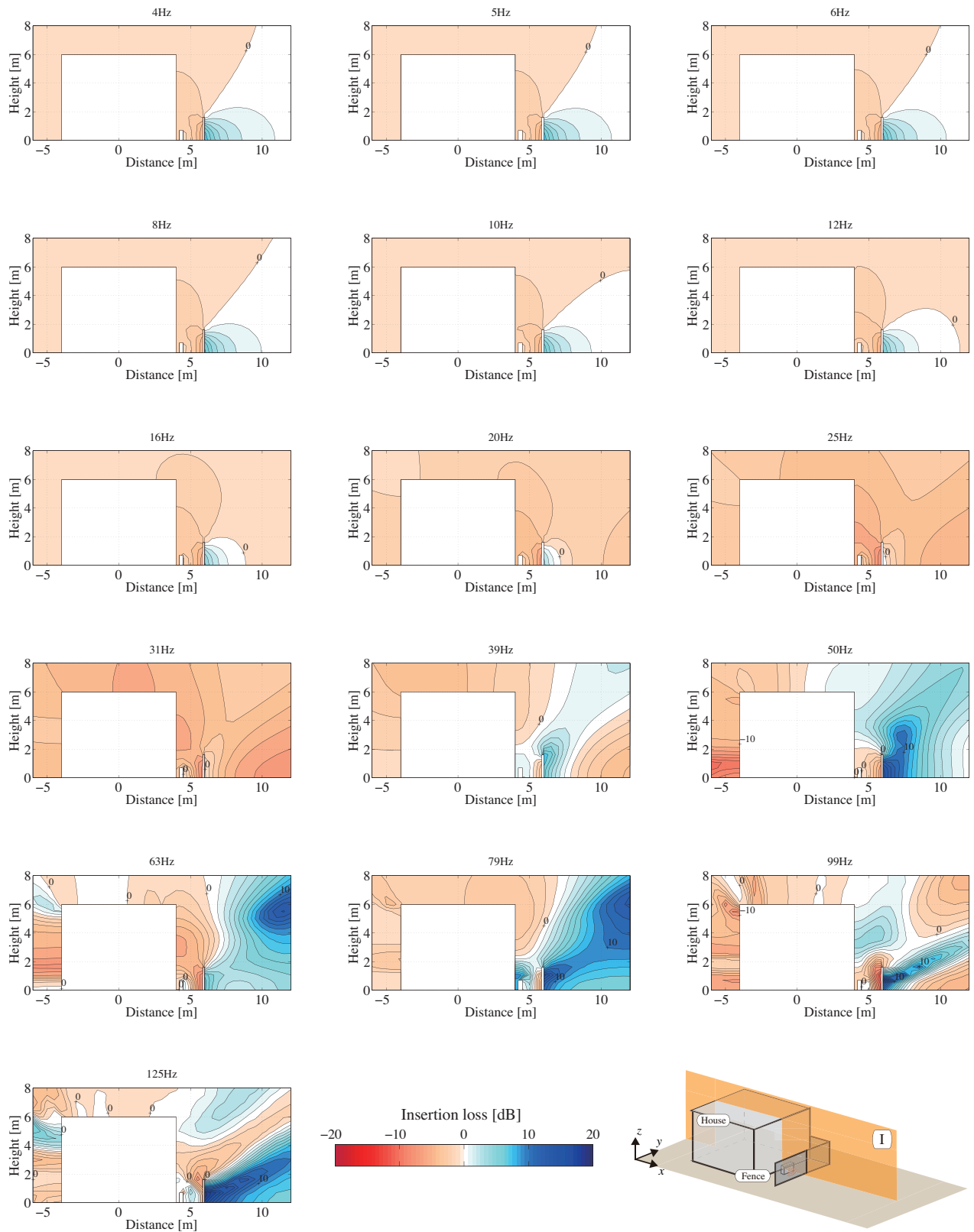


Fig. 3.13: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types C with $d = 2.0$ [m], $h = 1.63$ [m].

3.2.2 高さの影響

解析条件の設定

前項では配置について検討を行った。そこで音源の放射効率には塀の長手方向の固有モードに強く影響することが示された。さらに、屋外における塀の挿入損失については特に変化の激しい周波数は塀の配置にあまり関係はなく同様に放射効率の変化に影響することが示された。本項では外構塀自体の高さの影響について検討を行う。本章の塀は補強コンクリートブロックを想定しているため、建築基準法施行令第 62 条の 8 に規定されている通り高さは 2.2 m 以下で検討するものとする。さらに JIS A 5406[31] で推奨されている C 種を使用することを想定しているため、1 ブロックの寸法は 0.39 m×0.15 m×0.19 m の大きさである。そのため、この寸法で区切って高さを検討を行う。塀の条件は Table 3.2 に示す。解析モデルは Fig. 3.14 に示す。塀の配置に関しては Type A と Type B の 2 条件を行う。

Table 3.2: Condition of fence.

Height of fence(h) [m]	1.06, 1.63, 2.2
Setback distance from side-boundary(d) [m]	2.0

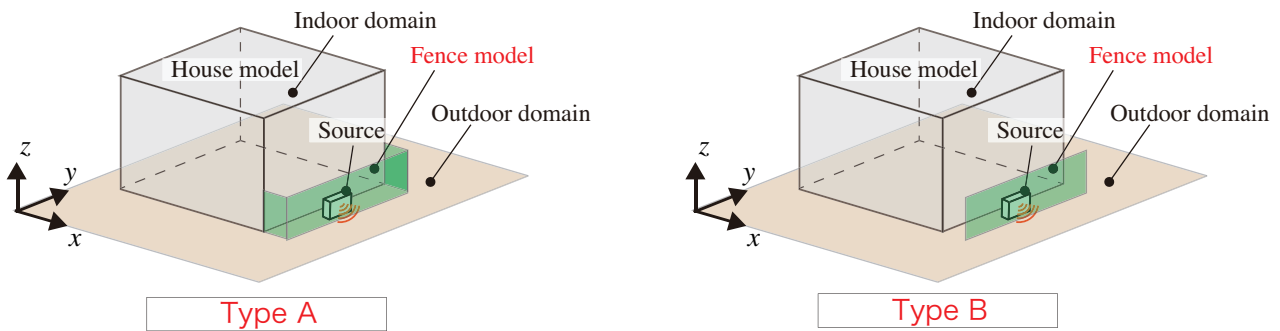


Fig. 3.14: Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house : Type A, B.

結果と考察

音源面の放射効率の解析結果を Fig.3.15 に示す。。さらに各条件のピーク・ディップ周波数の音圧分布を Fig.3.16 に示す。

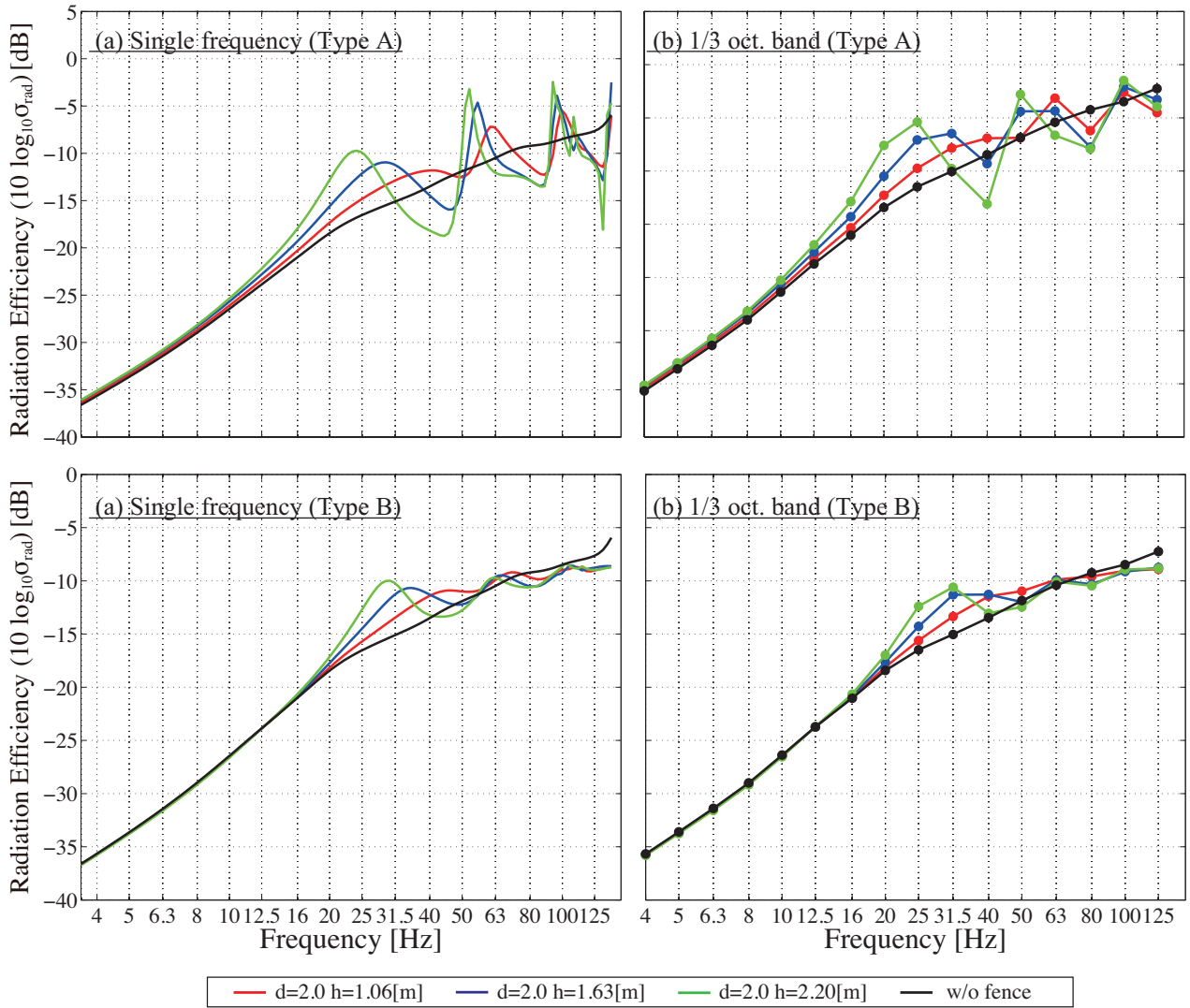


Fig. 3.15: Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence (height; 1.06m, 1.63m, 2.2m).

■ 放射効率

第一のピーク以外に関して、Type A, B ともに前項で述べたように塀内の長手方向の固有モード周波数付近でピーク・ディップが生じている。80 Hz 以上の周波数帯域では塀の高さは関係なくほぼ同様の周波数特性が見られる。ただし全周波数帯域で、塀が高いほど放射効率のピーク・ディップが顕著である。Type A の塀高 2.2 m では特に 100 Hz 付近のディップで大幅に塀設置前に比べ放射効率の低下が見られるが、Type B では大きな変化は見られない。80 Hz 以下の周波数帯域では塀が高くなるほどピーク・ディップが低域側にシフトしている。特に第一のピークでは顕著にシフトしている。前節（塀の配置）では同様の周波数特性が見られたが、塀の高さが変化することで塀内の寸法が変化し、空気バネが重くなり低域側にシフトしたと考えられる。Type A に比べ Type B では塀設置前からの変化は比較的小さく、塀の高さの変化による変動も小さく鈍化している。

■ 屋外音場における塀の挿入損失

各条件における断面 I の 1/3 オクターブバンドの挿入損失分布を算出した (Fig.3.17 - Fig.3.18 - Fig.3.19 - Fig.3.20)。

前項で屋外音場の挿入損失は放射効率に大きく影響することが示された。そのため、Type A において塀高 2.2m では 25 Hz 付近で大きなピークが生じており全体的に音場の音圧レベルが上昇し、31.5 Hz では放射効率の低下とともに音圧レベルも低下していることがわかる。25 Hz 付近の周波数帯域では波長が塀内よりも長く塀後方においてもあまり遮音されていないことがわかる。次の 50 Hz でのピークで音源面付近の音圧レベルは上昇しているが、塀後方では音圧レベルの低下が見られた。50 Hz の周波数帯域の波長の 1/4 波長の長さが外壁からの後退距離 2.0m とほぼ一致していることからこのように低下したと考えられる。それ以降の周波数帯域も同様である。塀高が高くなることで塀設置前に比べて放射効率の変動が大きくなっている。そのため塀設置前に比べて挿入損失の変動も塀が高くなることで大きくなっていることが示された。Type B においても同様の傾向が見られた。

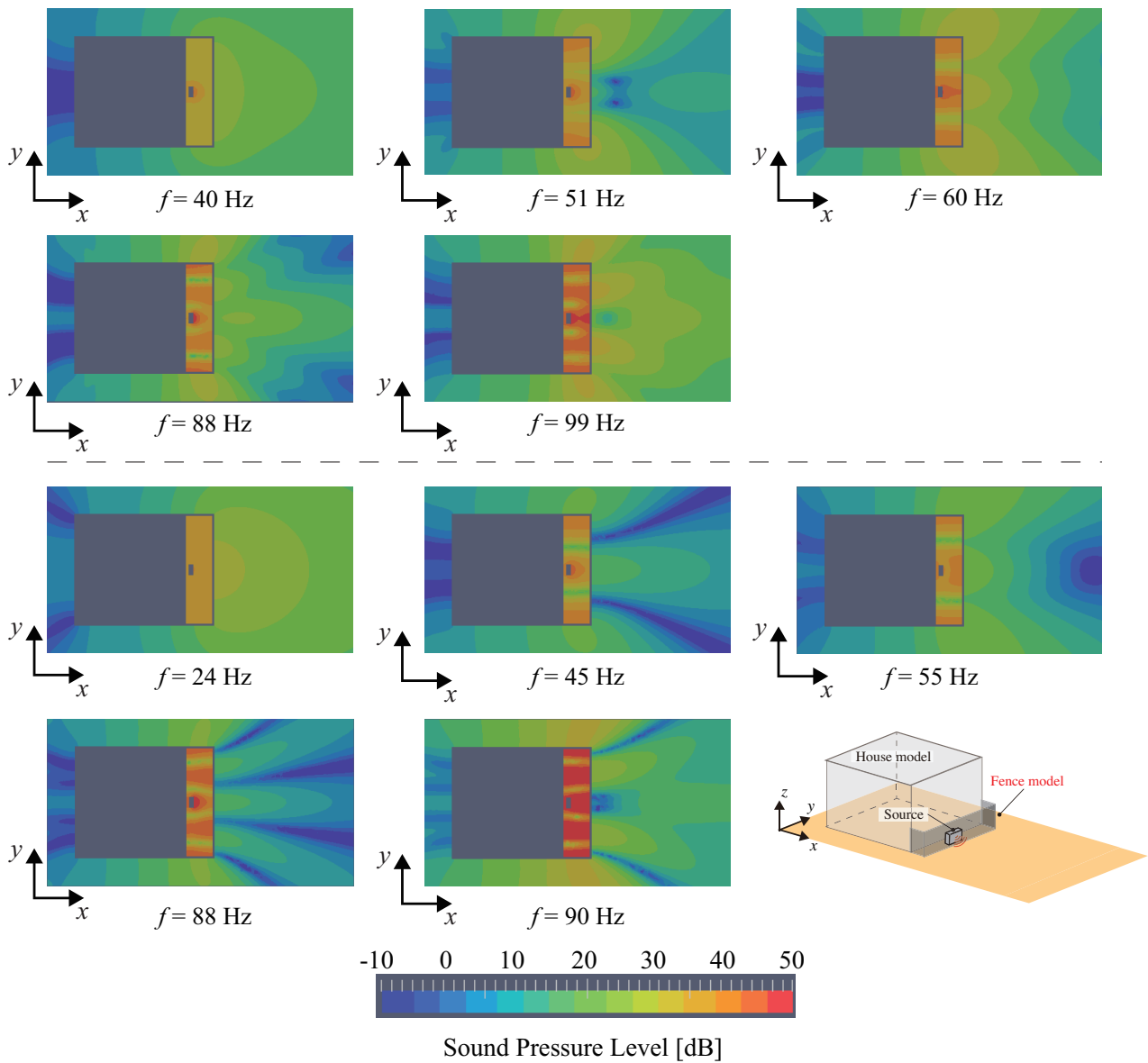


Fig. 3.16: Distributions of sound pressure level on the ground for Type A, "a variety of height".

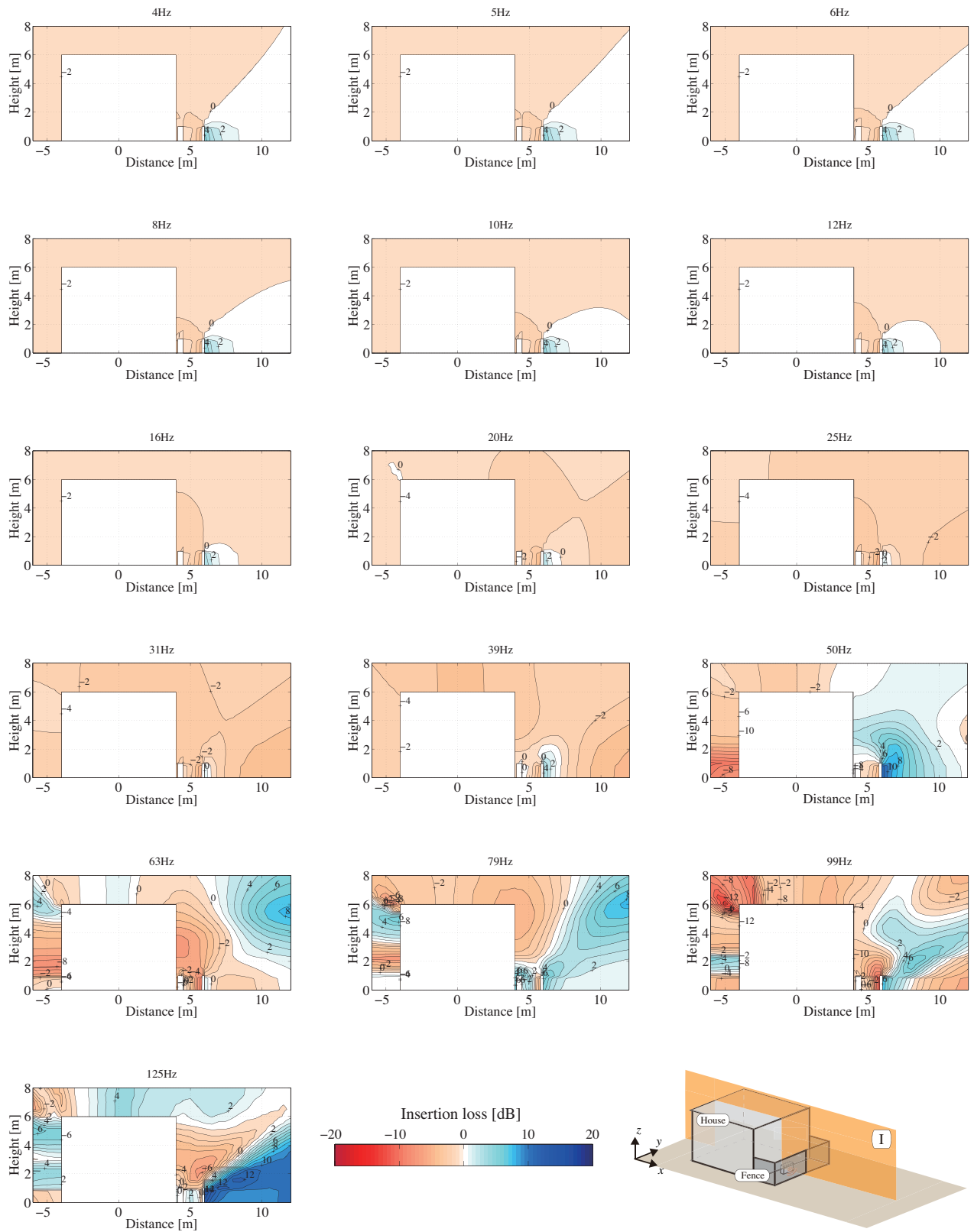


Fig. 3.17: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with $d = 2.0$ [m], $h = 1.06$ [m].

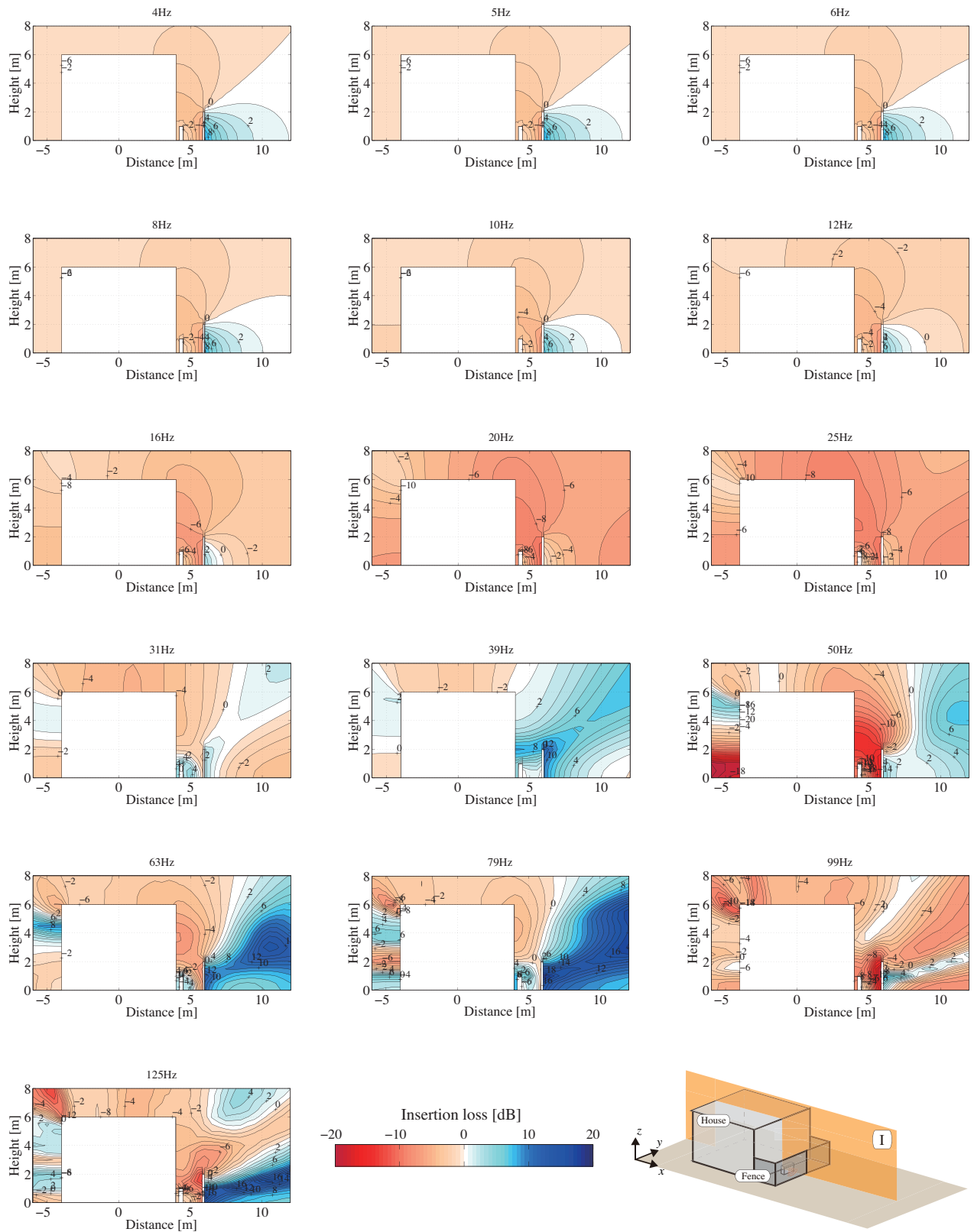


Fig. 3.18: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with $d = 2.0$ [m], $h = 2.2$ [m].

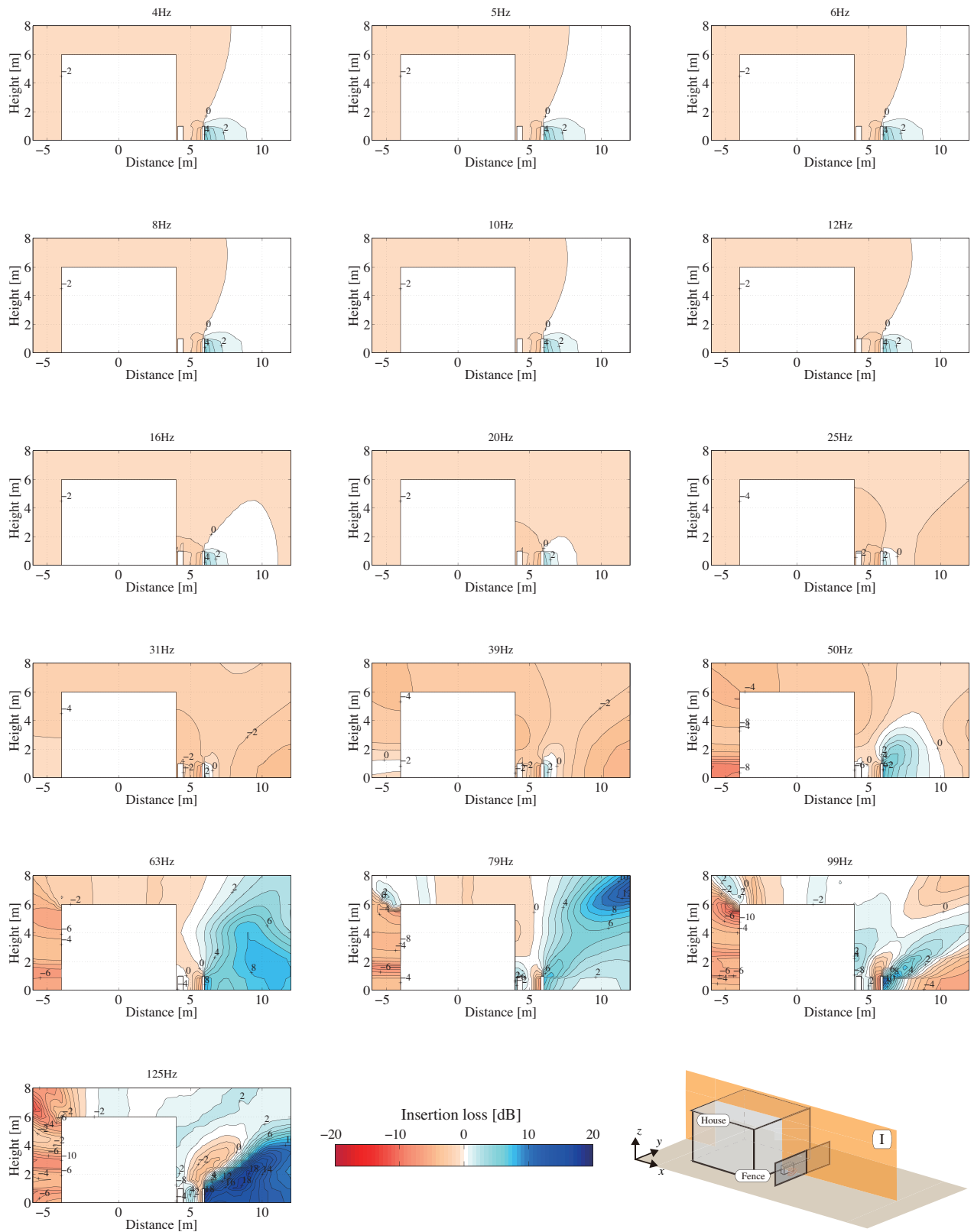


Fig. 3.19: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B with $d = 2.0$ [m], $h = 1.06$ [m].

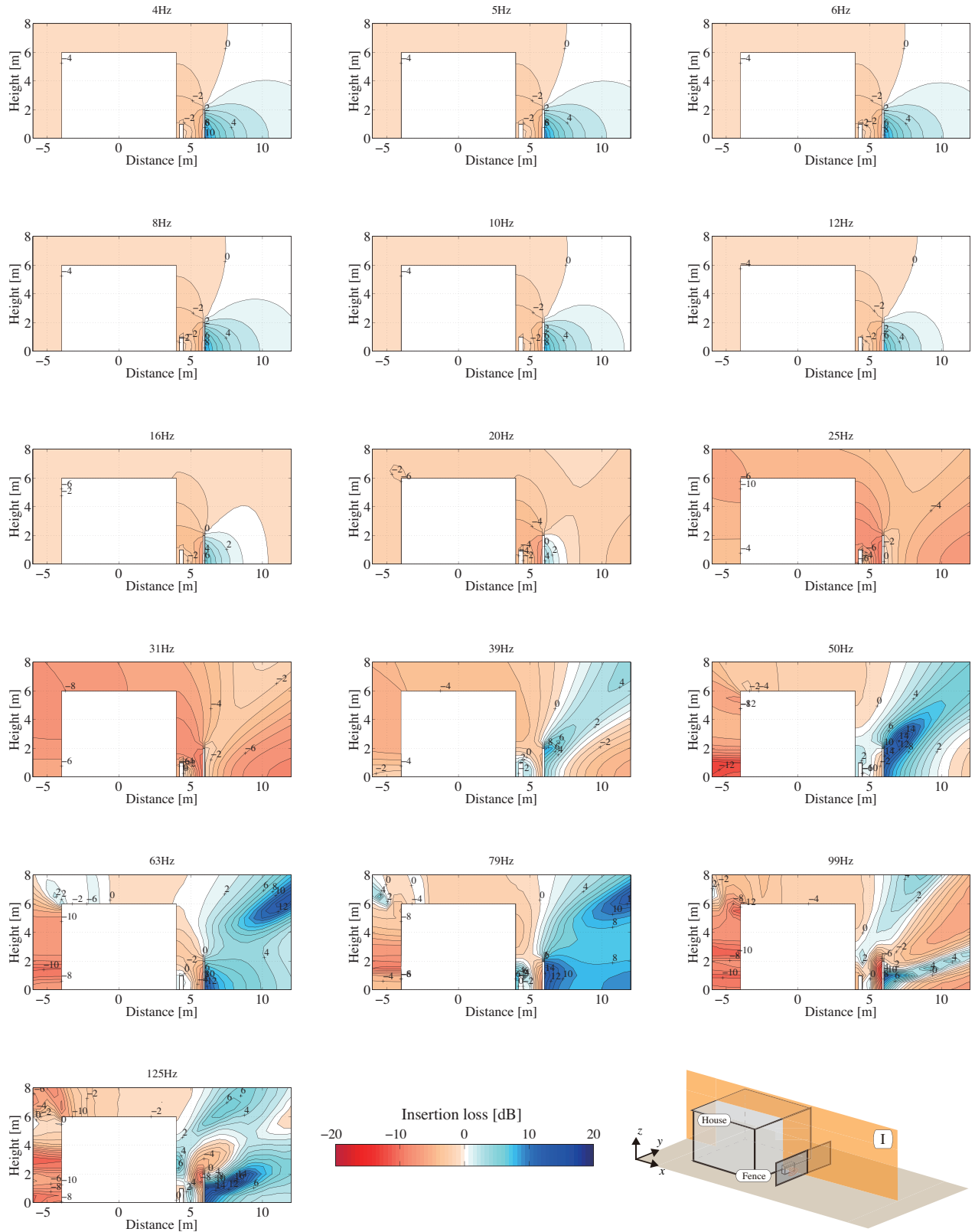


Fig. 3.20: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B with $d = 2.0$ [m], $h = 2.2$ [m].

3.2.3 外壁からの後退距離の影響

解析条件の設定

実際に外構塀を設置する場合には家屋の外壁から後退させなければならない。その規制に関しては建築基準法だけではなく数種類存在し、地方自治体ごとで異なる緩和措置がある。外壁後退距離に関して民法234条では全国共通で0.5 m 離さなければならない規定がある。但し、防火地域又は準防火地域内の耐火構造の外壁のみに関して隣地境界線に接して設けることができる緩和措置が設けられている。さらに建築基準法54条では第一種低層住居専用地域又は第二種低層住居専用地域内で1.0 m もしくは1.5 m と定められている。このように様々な規定がされているが、民法は立地場所関係なく全国一律にはたらく規定であり、原則最低限でも0.5 m を離すことが求められている。本項では予備調査からより一般的な後退距離は1.0 m 以上であると示されたため、条件として1.0 m と2.0 m の2条件に設定する。塀の条件はTable3.3に示す。解析モデルはFig.3.21に示す。塀の配置に関してはType A と Type B の2条件を行う。

Table 3.3: Condition of fence.

Height of fence(h) [m]	1.63
Setback distance from side-boundary(d) [m]	1.0, 2.0

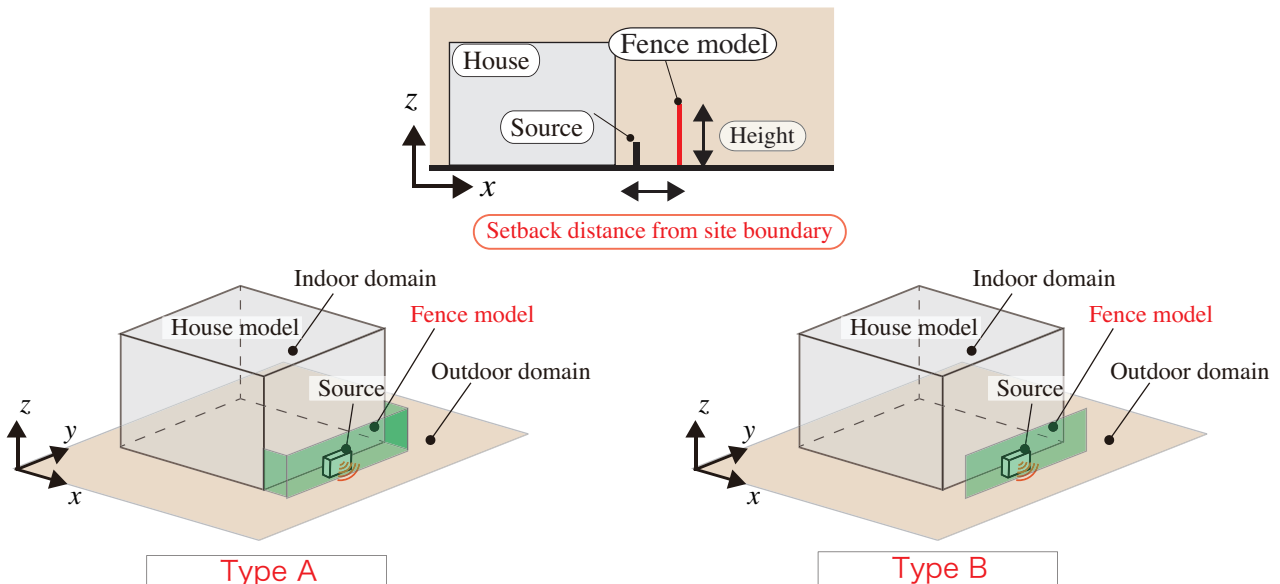


Fig. 3.21: Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house : Type A, B.

結果と考察

音源面の放射効率の解析結果を Fig.3.22 に示す。

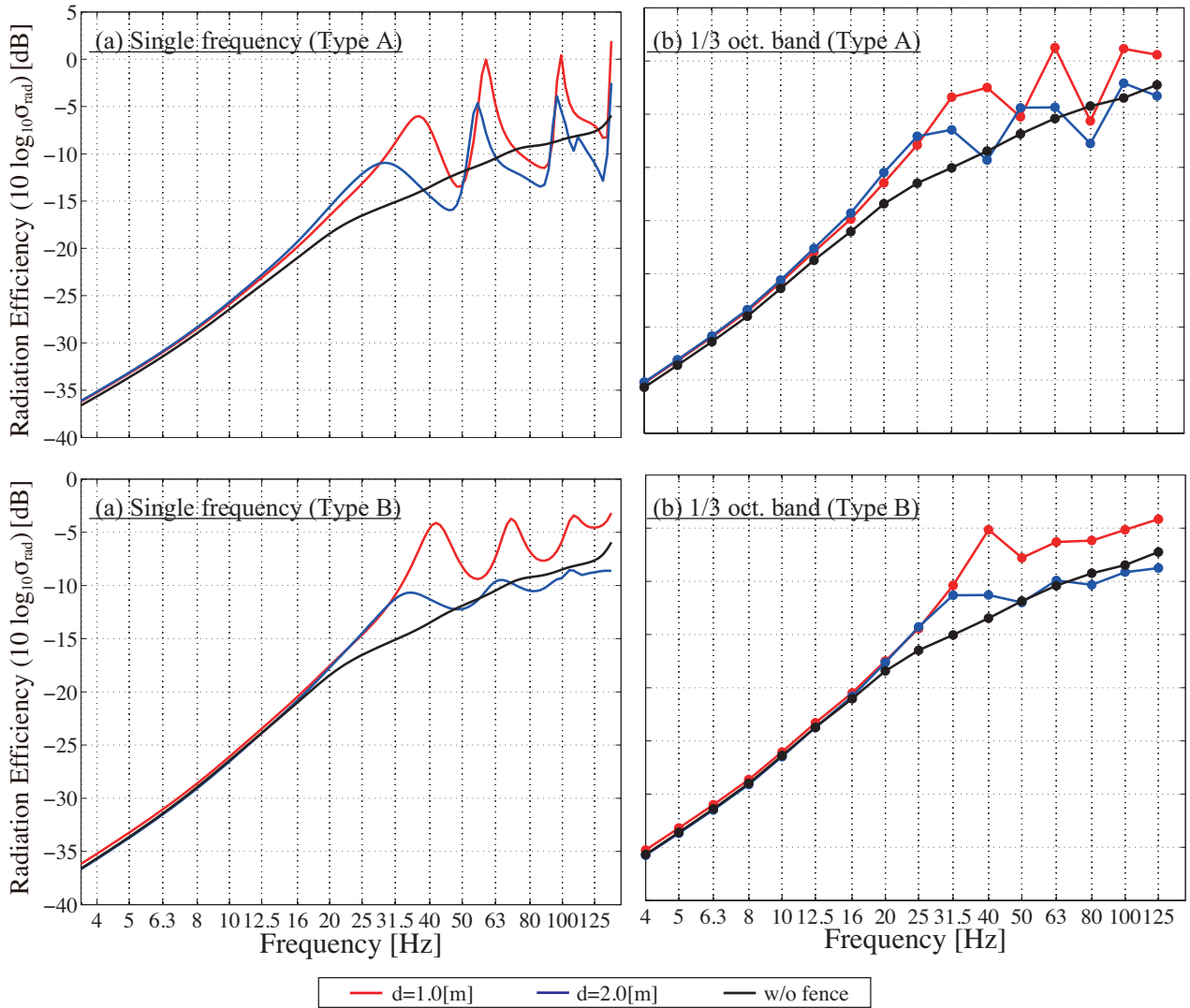


Fig. 3.22: Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence, (setback distance from side-boundary,; 1m, 2m).

■ 放射効率

音圧分布 Fig.3.23 より Type A, B ともに外壁からの後退距離の変化とは関係なく, ピーク・ディップの周波数は前項と同様に塀の長手方向の固有モードにより励起されている。さらに外壁からの後退距離 (d) が 1.0 m になることで 20 Hz 以上の全周波数帯域において放射効率が増加している。特に Type B については全周波数帯域で放射効率が塀設置前に比べ増加している。剛な反射面である塀では音源の放射面が塀に近いほど放射効率は上昇するものと考えられる。音源に近接して塀を設置することで幾何的に音源からの遮蔽効果は広がるが, 逆効果として放射効率が上昇しうることには留意が必要だと言える。

■ 屋外音場における塀の挿入損失

各条件における断面 I の 1/3 オクターブバンドの挿入損失分布を算出した (Fig.3.24 - Fig.3.25)。基本的に前項と同様の傾向があるが, Type A, B ともに外壁後退距離を 1.0m にすることで全周波数帯域で音圧レベルの上昇が見られた。

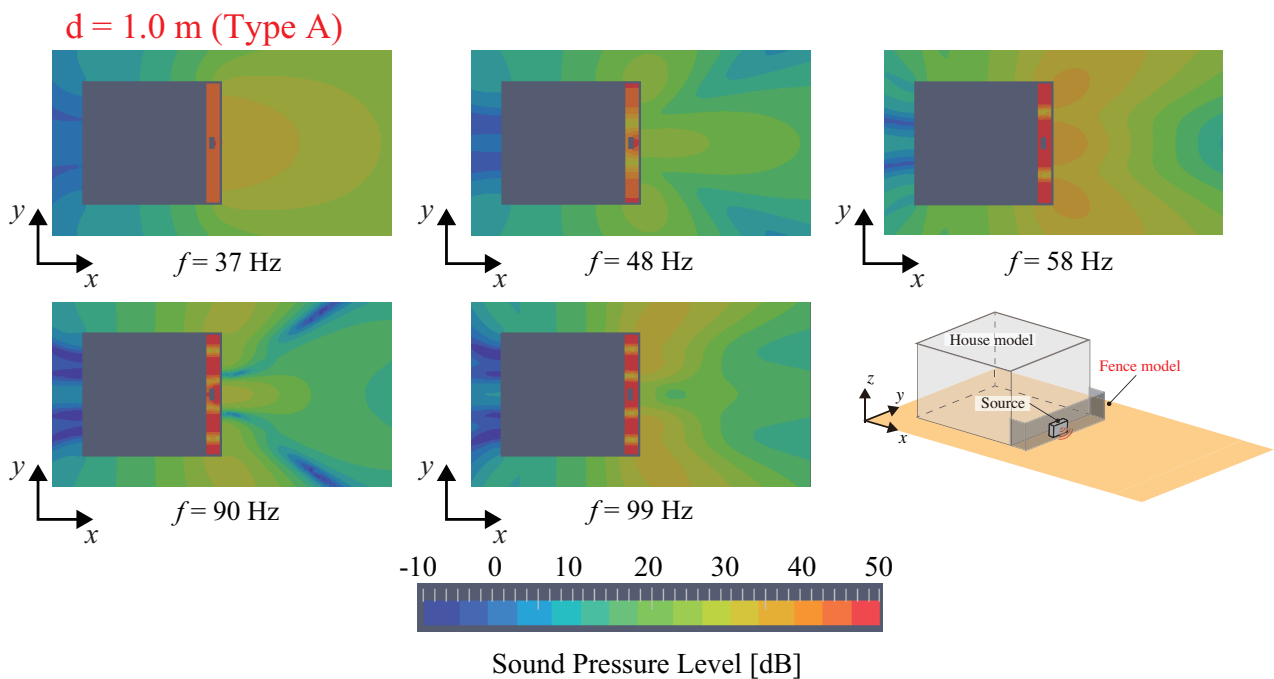


Fig. 3.23: Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA (d = 1m).

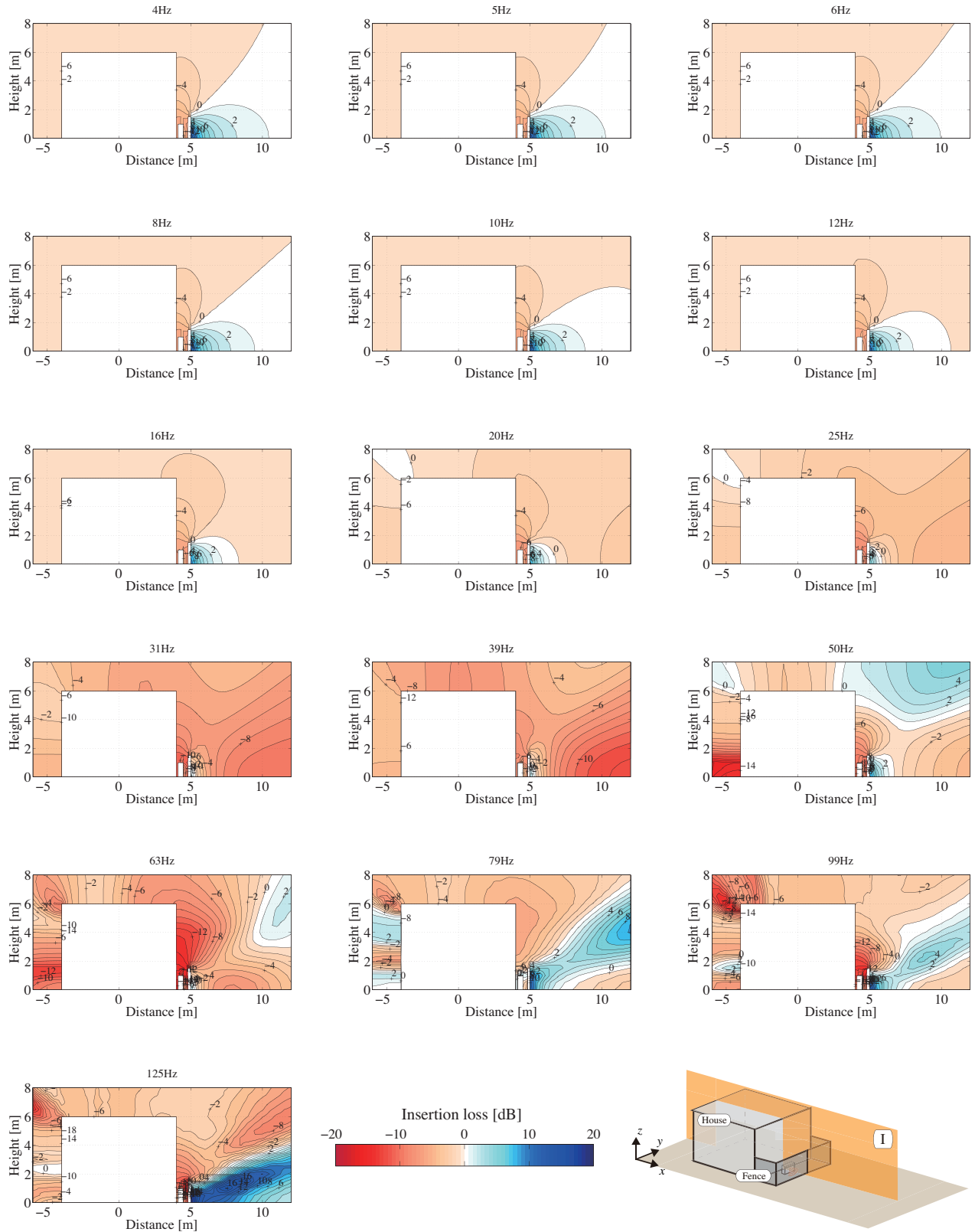


Fig. 3.24: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with $d = 1.0$ [m], $h = 1.63$ [m].

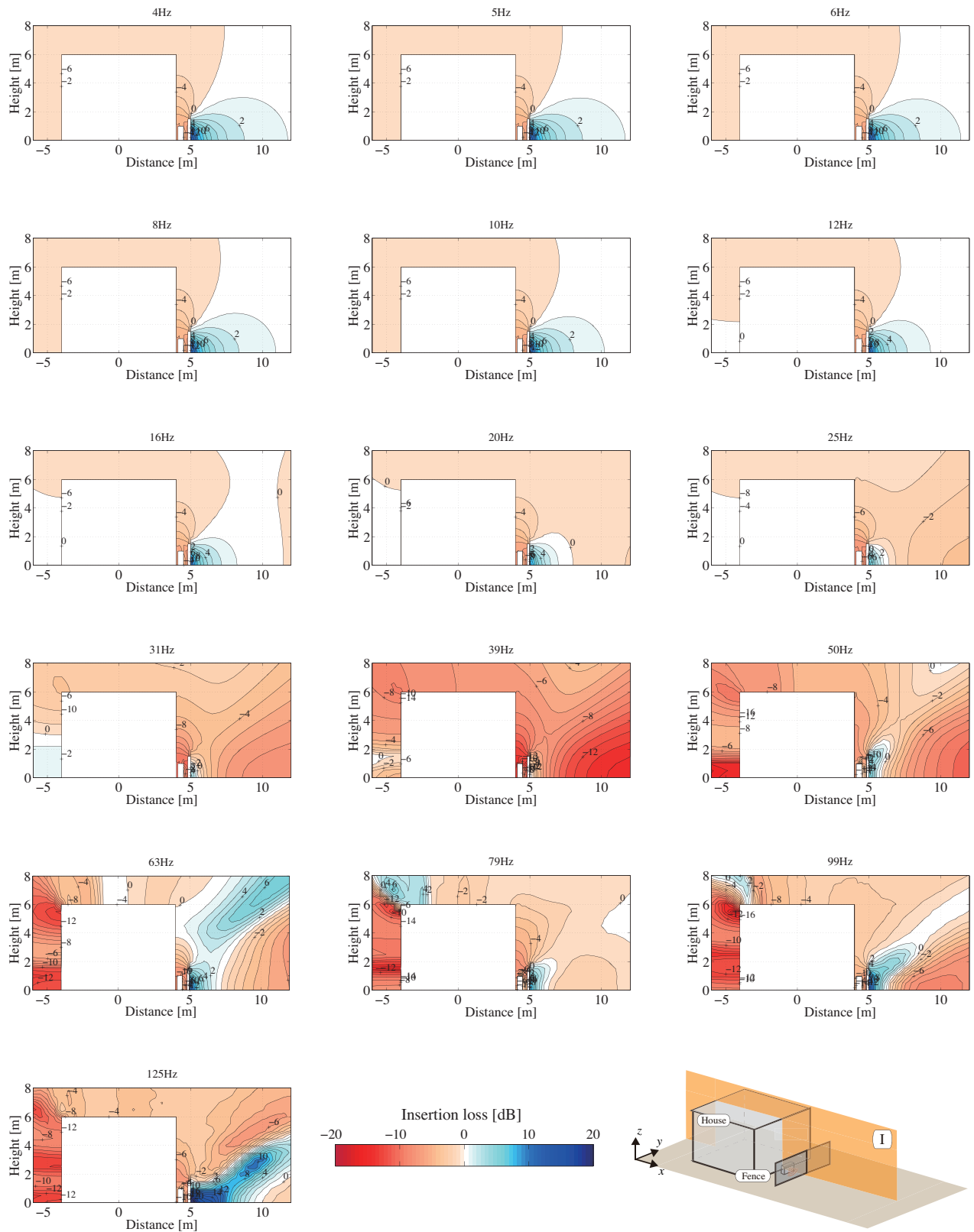


Fig. 3.25: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B with $d = 1.0$ [m], $h = 1.63$ [m].

3.2.4 幅の影響

解析条件の設定

前項より塀の配置や高さ，そして外壁からの後退距離の変化による放射効率の変化はあるが，主に塀の長手方向の固有モードに起因していることが示された。本項では長手方向 (y 軸) の寸法を変更させ，塀による影響を詳しく検討する。塀の条件としては Table 3.4 に示すように，高さ方向と外壁からの後退距離は前項と同様に 2 条件と 3 条件。さらに塀幅を 4.0 [m] と 8.0 [m] の 2 条件に設定した。塀の配置については Fig. 3.26 に示すように Type A と Type B の 2 条件を行う。

Table 3.4: Condition of fence.

Height of fence(h) [m]	1.06, 1.63, 2.2
Setback distance from side-boundary(d) [m]	1.0, 2.0
Width of fence(w) [m]	4.0, 8.0

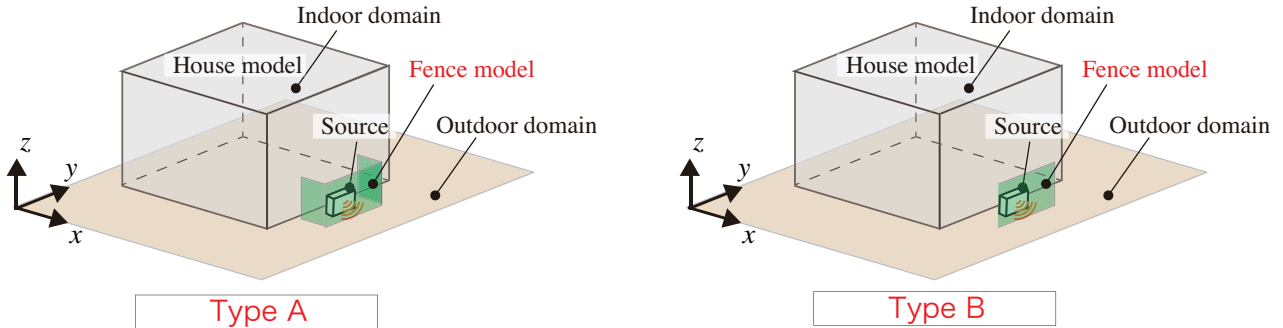


Fig. 3.26: Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house : Type A, B.

結果と考察

塀幅 (w=4.0m) の音源面の放射効率の解析結果を Fig.3.27 に示す塀幅 (w=8.0m) の結果は前項の Fig.3.15 に示す。各条件におけるピーク・ディップ周波数の音圧分布を Fig.3.28 示す。対象の周波数帯域における塀の固有モード周波数の理論値を Table3.5 に示す。

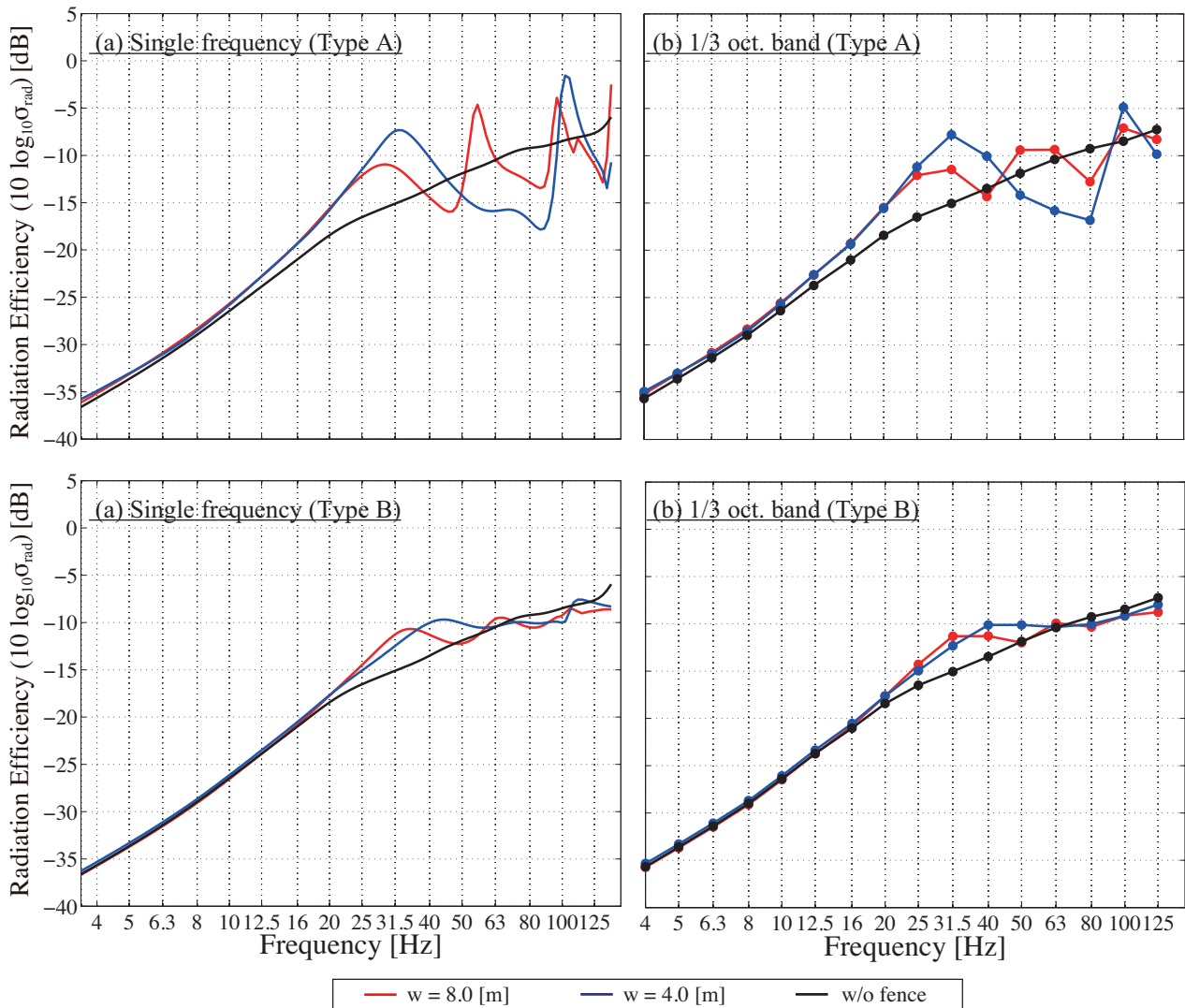


Fig. 3.27: Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence, (width: 4m)..

Table 3.5: Natural frequencies of the fence (direction:y-axis; 4m, 8m).

	Mode order (Type A/B)							
	w = 4.0 [m]			w = 8.0 [m]				
	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
Frequency [Hz]	46.4	92.8	139.2	22.3	44.6	66.9	89.2	111.5

■ 放射効率

Fig.3.27 より、顕著なピーク・ディップが生じている。要因は前述したように塀内の音場モードから励起されていると考えられる。高さ方向の影響としては、塀幅関係なく 80 Hz を境目に変化しており、同様の周波数特性が見られた。外壁からの後退距離についても塀により近づくことで放射効率は全体的に増加しており、塀幅を変化させても同様の傾向が見られた。25.5 Hz から 40 Hz 付近で第 1 のピークが生じており、他のピークに比べて緩やかである。これは塀内に一応な音圧分布が見られることから、前述したように塀内の空気バネと上方開口部の空気質量による鉛直方向の共振系によるものと考えられる。次の第 1 のディップ及び第 2 のピークは Fig.3.28 より塀内の 2 次モードに起因していることが確認できる。同次でのピーク・ディップが存在する要因として、この共振周波数前後での音源面の音圧位相が変化し形成されたと考えられる。対象の周波数帯域でのピーク・ディップは Fig.3.15 よりも数が減少している。その要因としては Table3.5 により塀幅を変更することで固有周波数が大きく変化したためと考えられる。

このように放射効率において対象の周波数帯域（特に第 1 のピーク以降）では塀内の固有モードが支配的であることが示された。

■ 屋外音場における塀の挿入損失

各条件における断面 I の 1/3 オクターブバンドの挿入損失分布を算出した (Fig.3.30 - Fig.3.29 - Fig.3.31)。Type A においては塀幅を 4.0m にする事で塀設置前に比べ放射効率が低下する周波数帯域が広がっている。そのため屋外音場の音圧レベルについても低下している帯域は塀幅 8.0m に比べ多くなっている事がわかる。第 1 のピークについては周波数帯域は同様であるが、塀幅 4.0m の方がより放射効率が増加しており、その変化に伴い屋外音場も 4.0m の方が音圧レベルが上昇し、より悪化している部分が増えている。しかし、家庭用ヒートポンプ給湯器の卓越周波数付近の 63 Hz 及び 80 Hz では挿入損失が 10 dB 以上となっている場所もあり、この低減効果はより広い帯域での放射効率の低下によるものと考えられる。Type B も同様の傾向が見られるが、Type A のような大きな変化はあまり見られなかった。

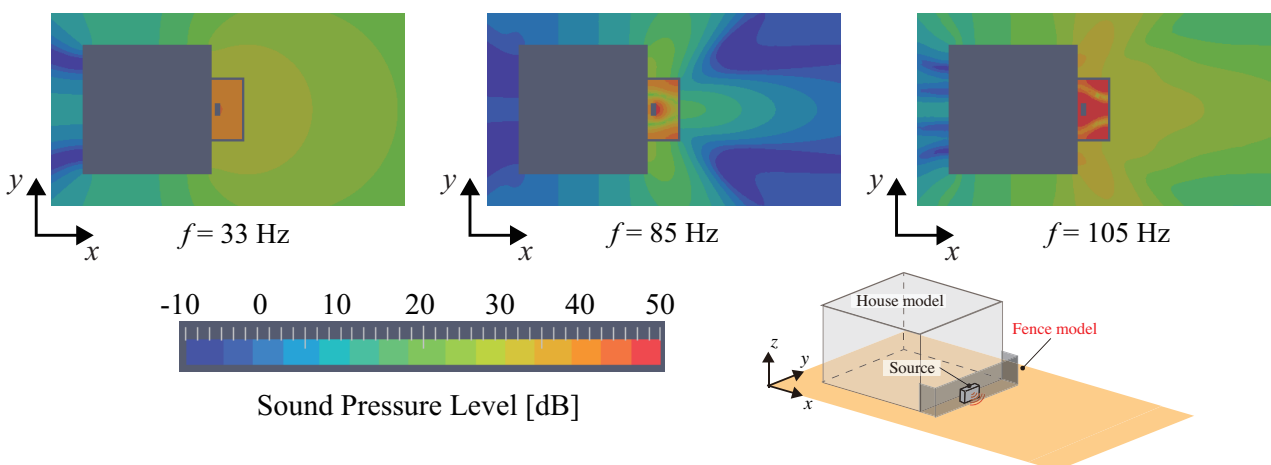


Fig. 3.28: Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA (h = 1.63m, d = 2m, w = 4m).

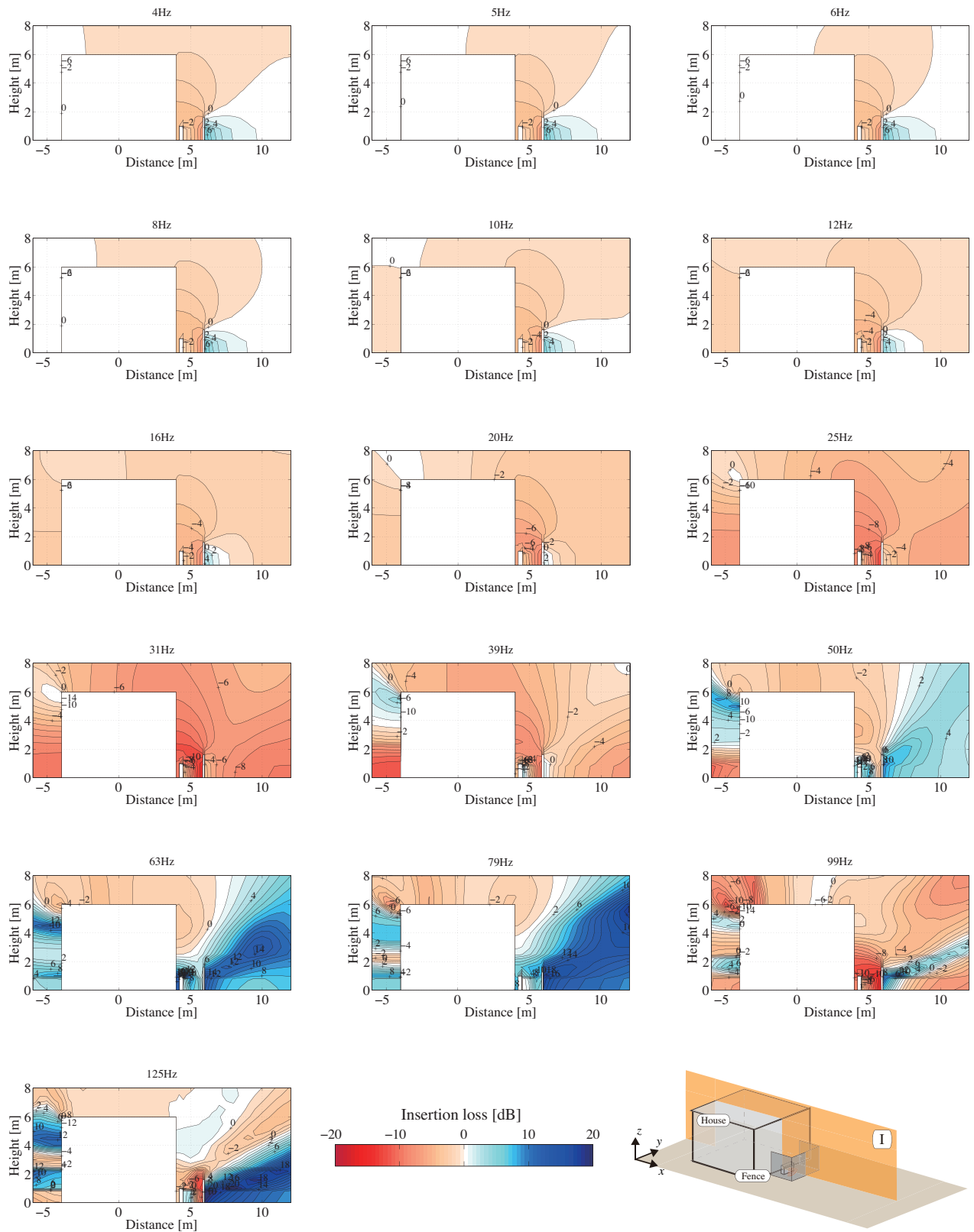


Fig. 3.29: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with $w = 4.0$ [m]; x-z plane..

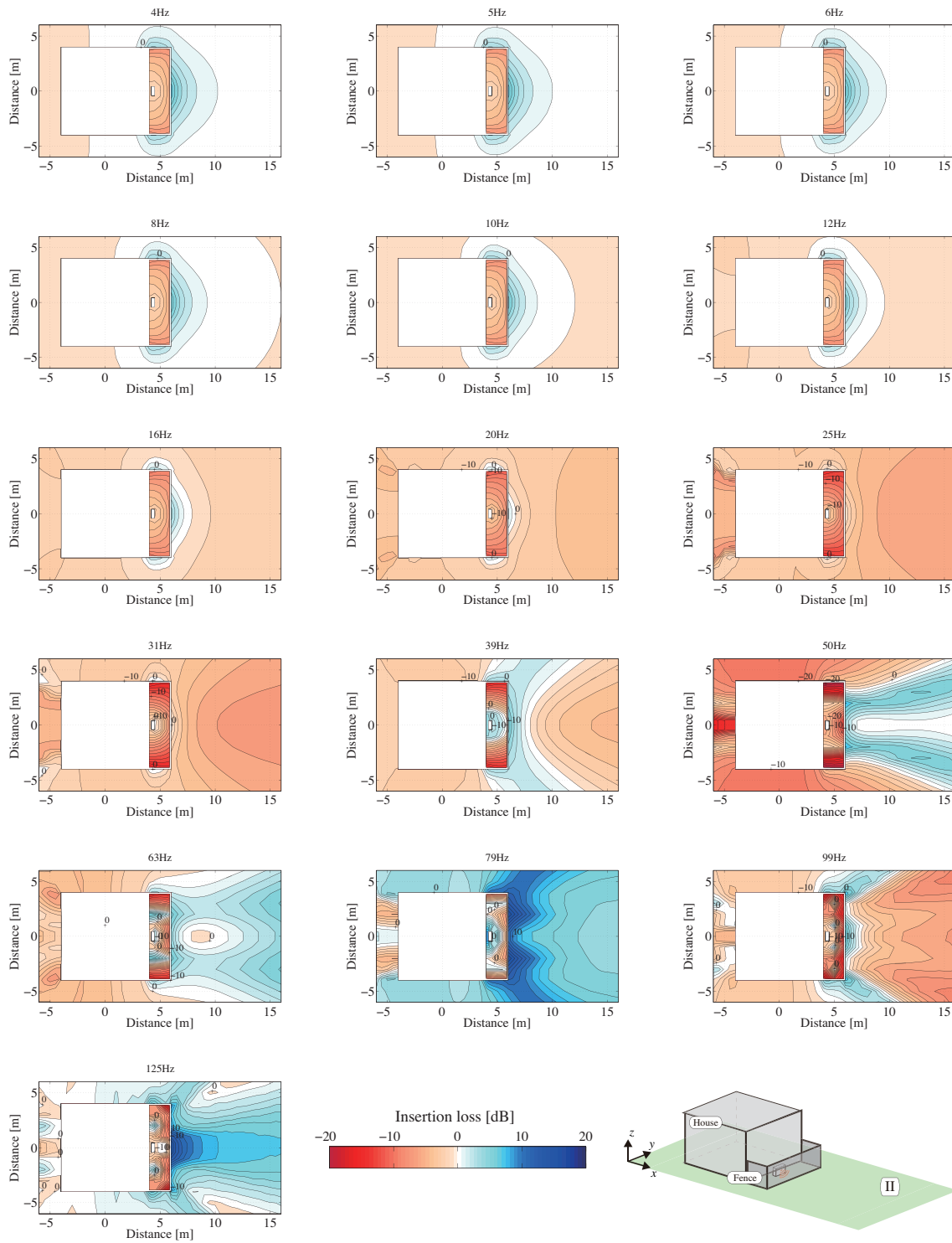


Fig. 3.30: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with $w = 8.0$ [m]; x-y plane.

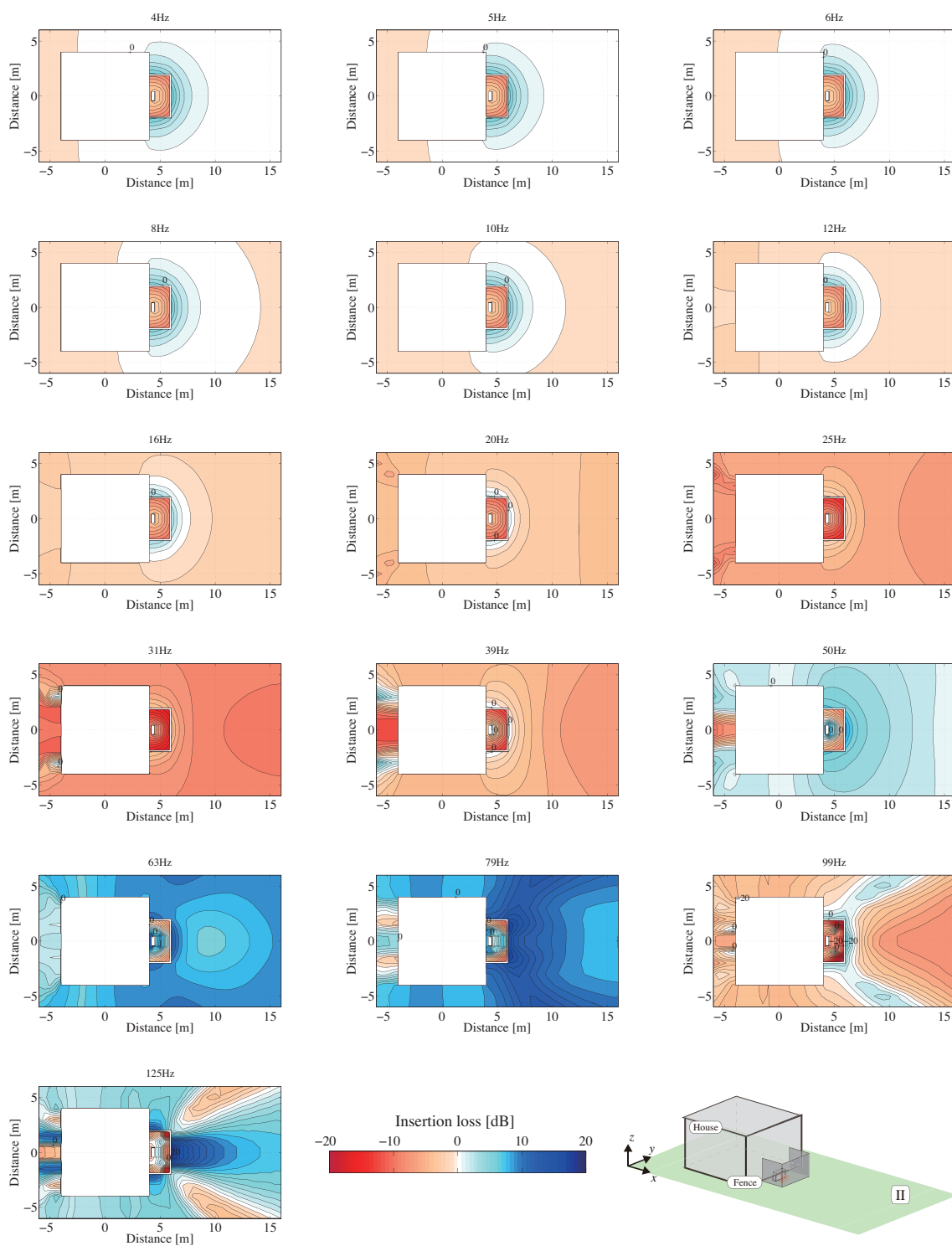


Fig. 3.31: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with $w = 4.0$ [m]; x-y plane..

3.2.5 音源と外構塀の配置の影響

解析条件の設定

騒音源の”ヒートポンプユニット”を単独で移動することが可能である。そのため、ガイドブック [26] ではヒートポンプユニットを移動させた対策例を提案している。前項より音源の放射効率は塀内の音場モードに強く影響を受けることが示されているが、音源との配置関係による影響はまだ明らかにされていない。そのため本項では音源と外構塀の配置関係について検討を行う。条件については一般的な塀の寸法とするため、高さは 1.63[m]、外壁からの後退距離については 2.0[m] とする。音源位置については塀の中央に設置する場合と塀の端部に設置する場合の 2 条件を検討した Fig.3.32。塀の配置については Type A(両端開管)と Type B(両端閉管)の 2 条件行う。

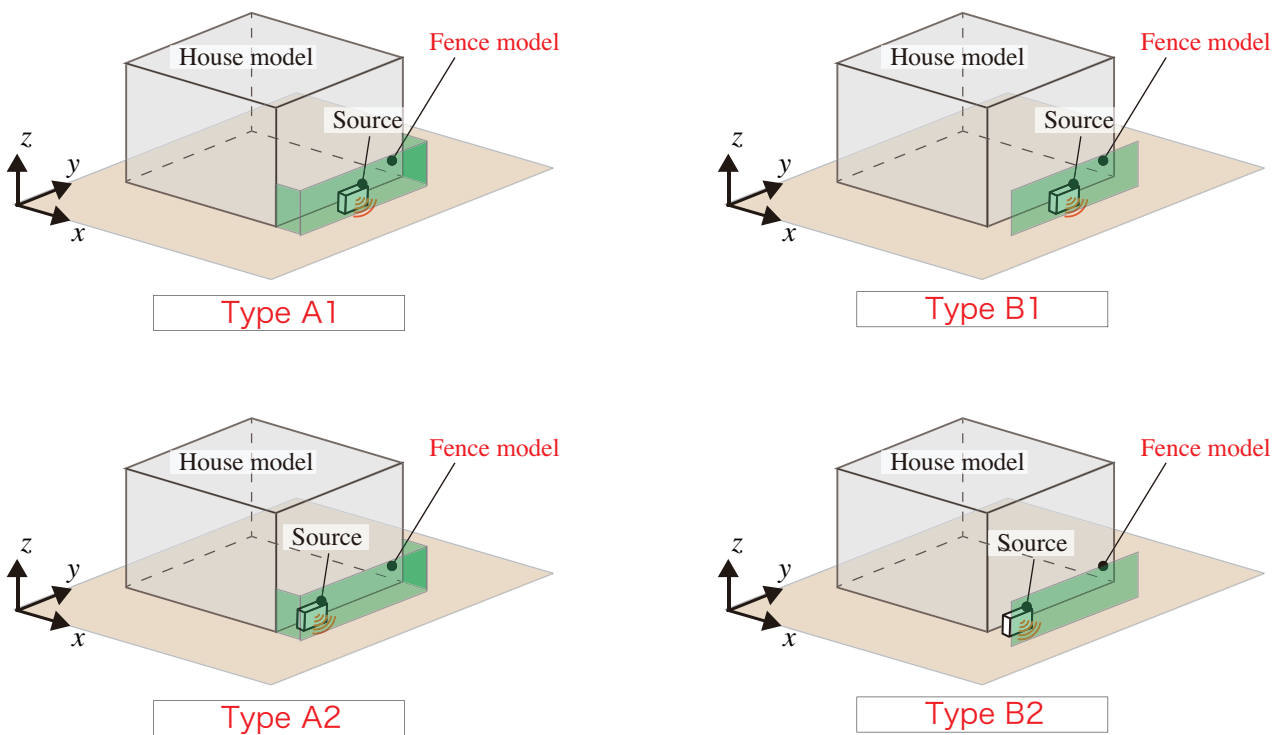


Fig. 3.32: Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house : Type A1/2, B1/2.

結果と考察

音源面の放射効率の解析結果を Fig.3.33 - Fig.3.34 に示す。音圧分布を Fig.3.35 に示す。

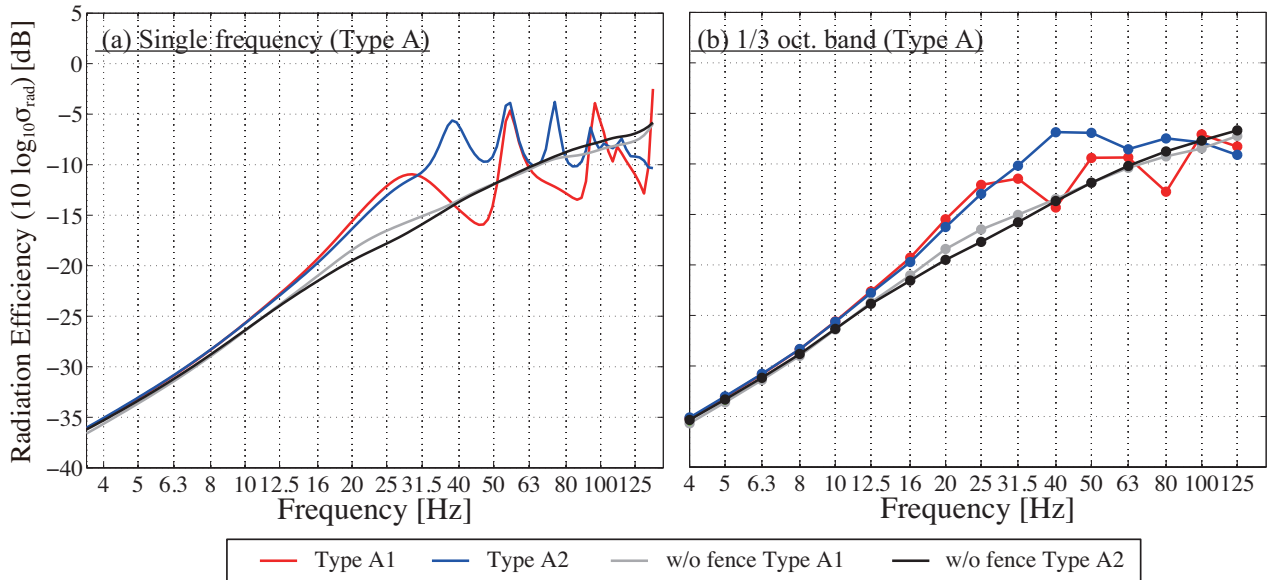


Fig. 3.33: Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence, (Type A1/2).

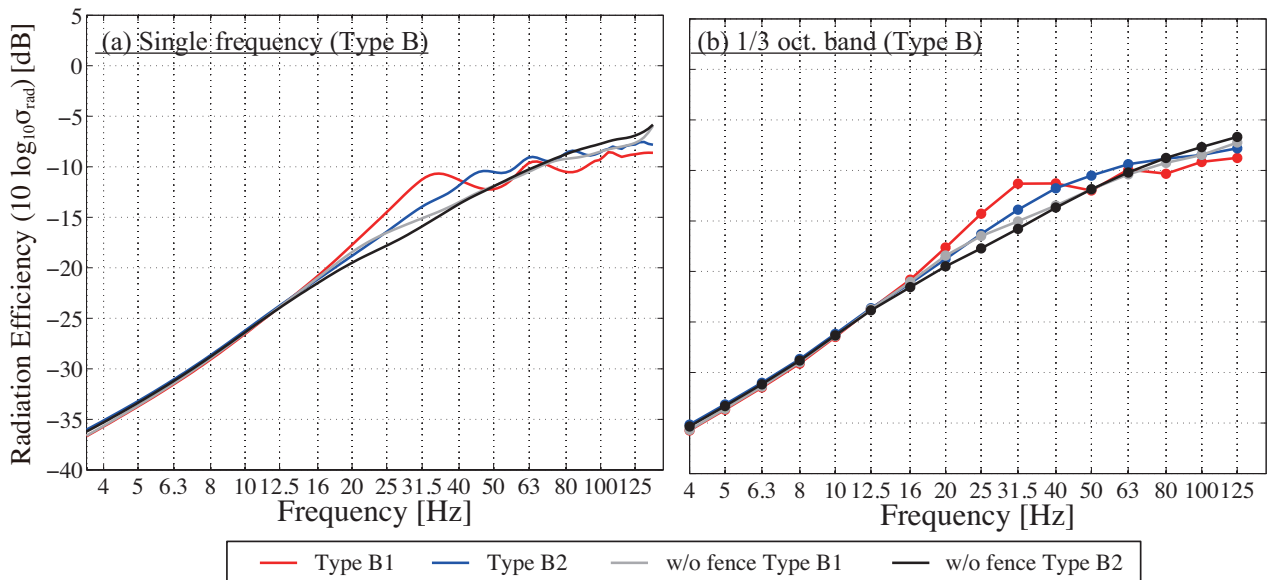


Fig. 3.34: Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence, (Type B1/2).

■ 放射効率

全条件において概ね塀内の固有モード周波数付近でピーク・ディップが生じているように見える。要因としては前述したように塀内の音場モード（塀内のバネマス共振系，長手方向の固有モード）に起因しているものと考えられる。音圧分布は Fig.3.35 に示す。音源位置が異なることでピーク・ディップの数が増減していることがわかる。Type A1 や Type B1 の条件ではモードの節に位置する場所に音源が設置して

いるため、1次3次と言った奇数モードに対応したピーク・ディップは形成されていない。しかし Type A2 や Type B2 の条件のように塀の端部に音源を設置している条件では1次～4次モードに対応したピーク・ディップが形成している。

ヒートポンプ給湯器は40～60 Hz とその倍調波成分が卓越する周波数特性を持っている。このように音源位置をモードの節の位置に設置することで、この周波数帯域で放射効率の低下する帯域が広がり予測できる可能性を示した。

■ 屋外音場における塀の挿入損失

Type A1, B1 における断面 I の 1/3 オクターブバンドの挿入損失分布は (Fig.3.11 - Fig.3.12) に示す。Type A2, B2 における挿入損失分布は (Fig.3.36 - Fig.3.37) に示す。Type A2 では音源がモードの節に当たる位置に存在していないため、Type A1 に比べてピーク・ディップの数が多くなっている。さらに塀設置前に比べて放射効率が増加している帯域が多いため、Type A1 に比べ屋外音場の音圧レベルがより上昇している事がわかる。Type B にも同様の傾向が見られるが、両条件ともに音源位置を変更することで放射効率の低下に伴い屋外音場の音圧レベル低下に繋がる事が示された。

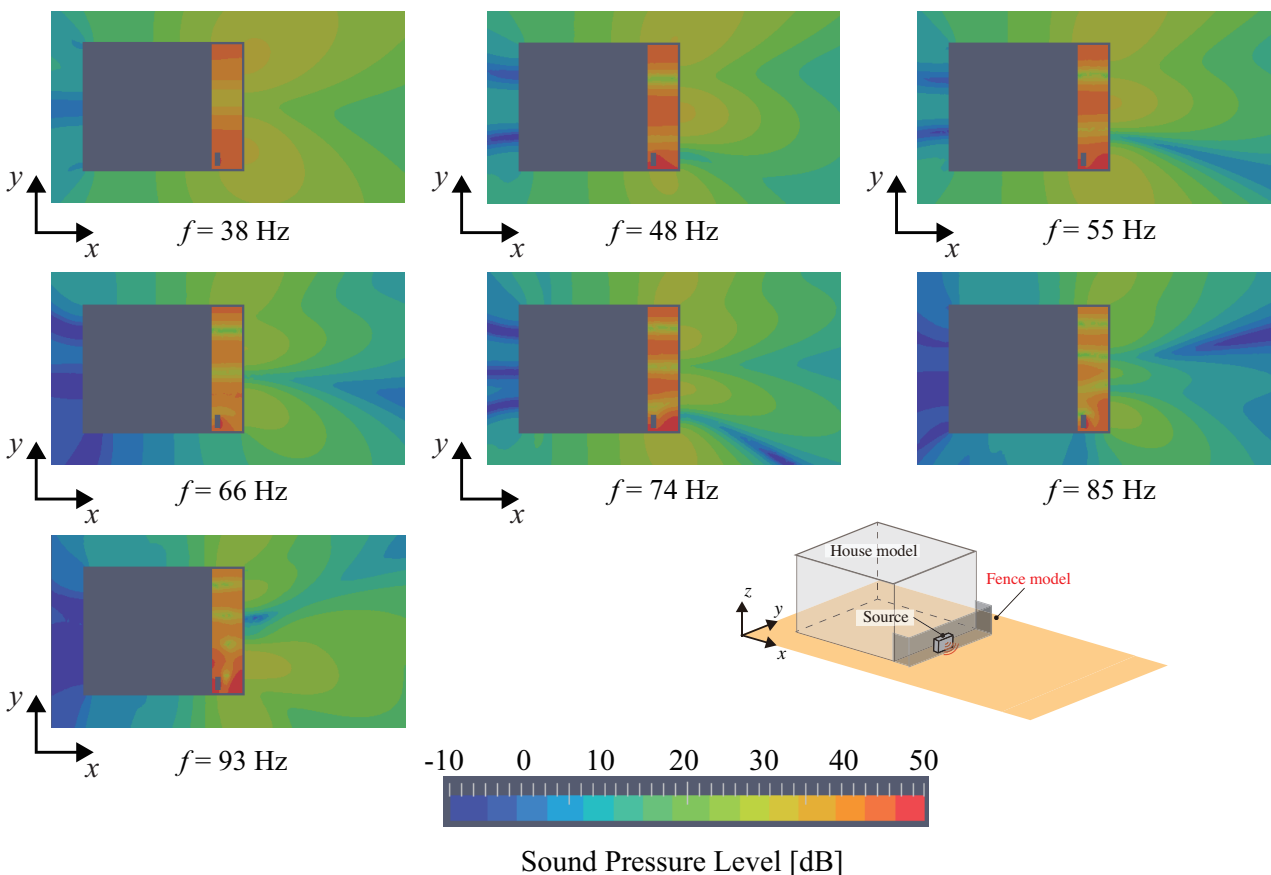


Fig. 3.35: Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA2.

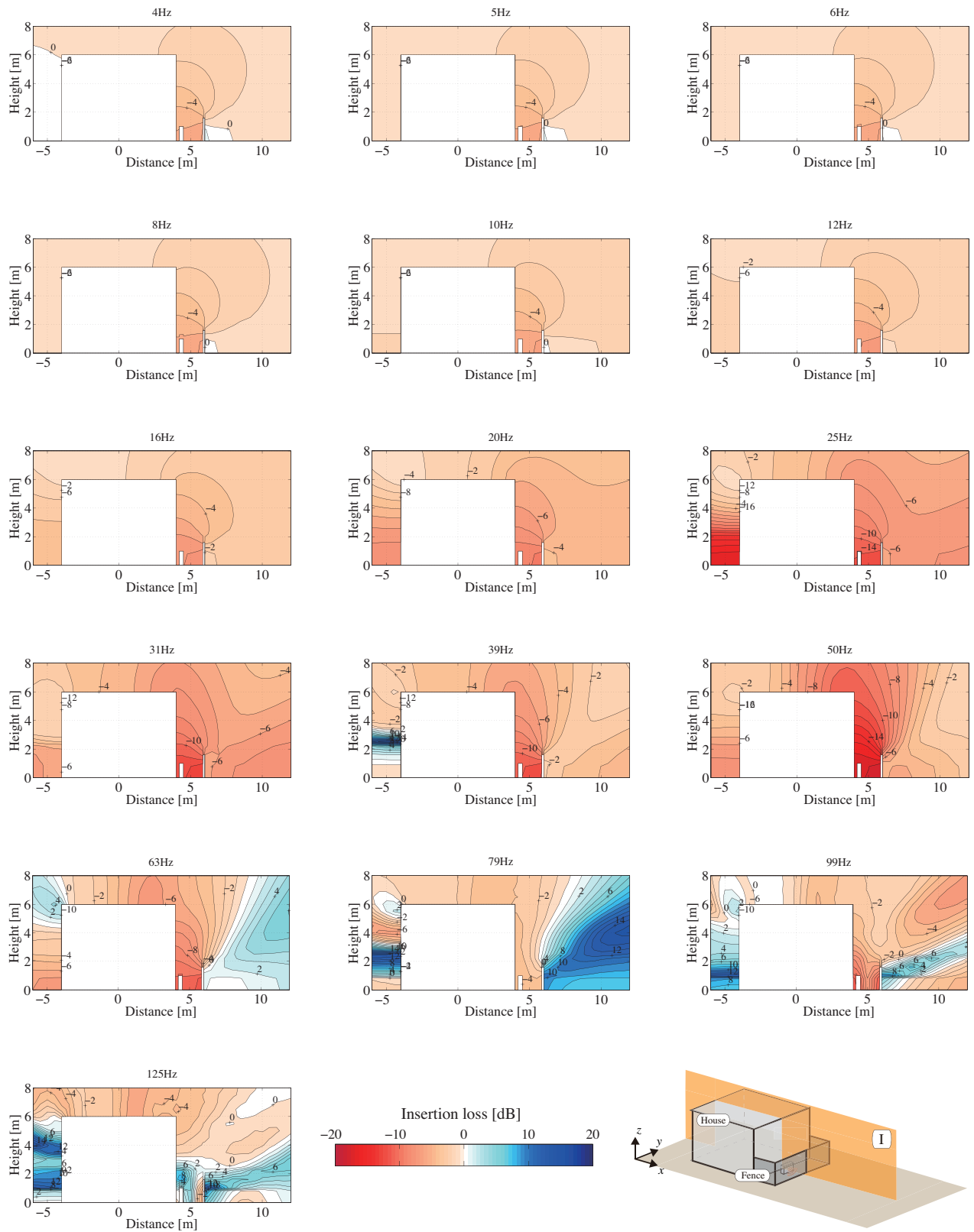


Fig. 3.36: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A2 with $d = 2.0$ [m], $h = 1.63$ [m].

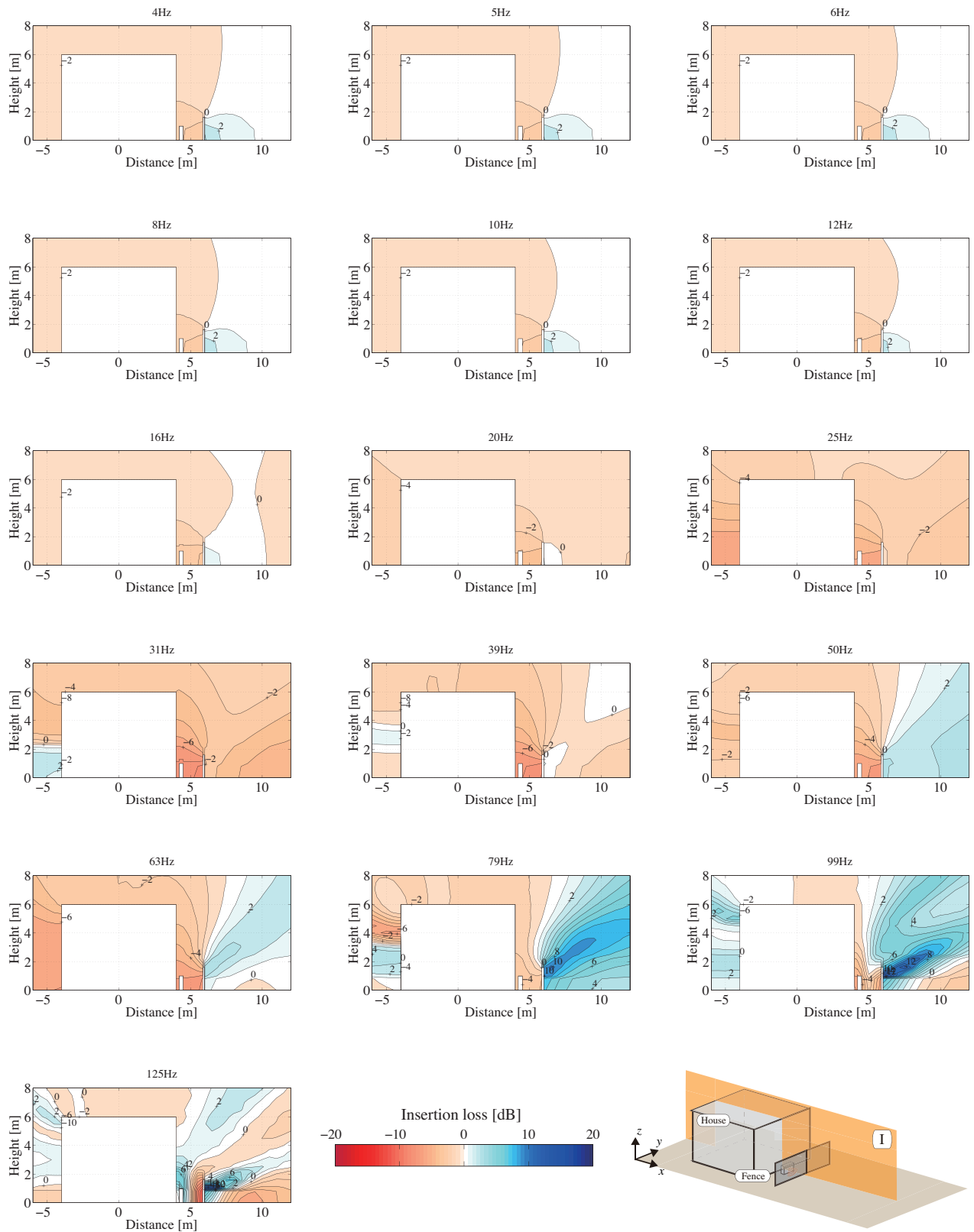


Fig. 3.37: Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B2 with $d = 2.0$ [m], $h = 1.63$ [m].

3.3 隣戸に関する検討

3.3.1 隣戸の影響

解析条件の設定

前節では単一家屋に対しての外構塀と音源の配置影響について検討を行った。そこでは外構塀による伝搬メカニズムを解明したが、実際のように隣に家屋がある状況での検討は行っておらず、さらにガイドブック [26] でも単一家屋での検討しか行ってない。そのため本節では実際に隣戸が存在する状況を想定し、隣戸の影響やその中で外構塀設置による影響を検討する。

家屋に関しては前節と同様に家屋モデルの寸法は $8.0\text{ m} \times 8.0\text{ m} \times 6.0\text{ m}$ の大きさとし、家屋正面に対向する配置でもう一つ家屋を配置した Fig.3.38。さらに本項では外構塀は設置せず家屋間の距離 (L) を 2.0 m と 4.0 m の2条件設置し、家屋のみの影響を検討した。

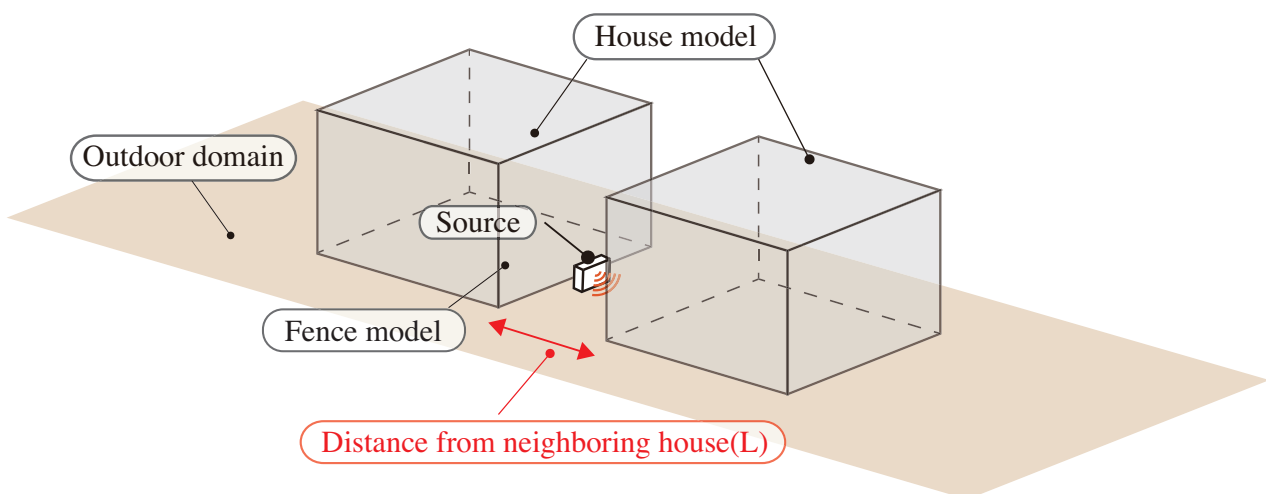


Fig. 3.38: Numerical model of a sound field around house.

結果と考察

音源面の放射効率の解析結果を Fig.3.39 に示す。隣戸間の固有モード周波数は Table3.6 に示す。

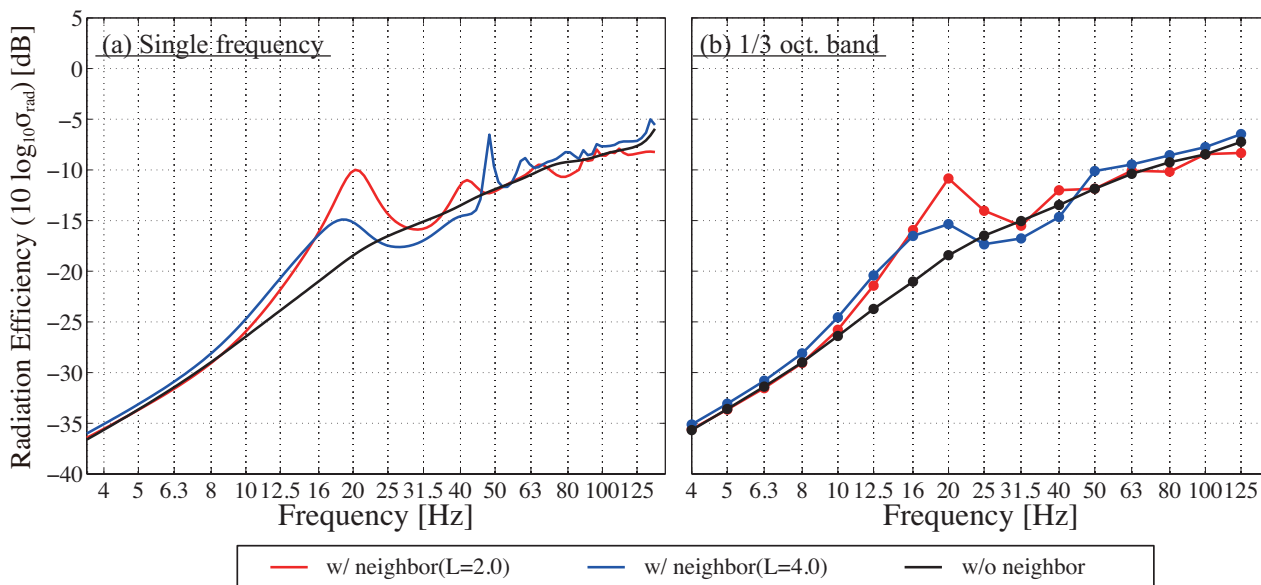


Fig. 3.39: Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of house.

■ 放射効率

両条件ともに概ね隣戸間軸モードの固有周波数付近でピークが生じている傾向が見られる。隣戸間距離 (L) が 2.0m の条件では 40 Hz 付近で家屋幅方向 1 次モードに対応するピークが生じている。20 Hz 付近に見られるピークでは、音圧分布 Fig.3.43 より隣戸間で音圧がほぼ一様に分布することから、このピークについては隣戸間の空気をバネ、上方・側方開口部の空気質量によるバネマス共振系によるものと考えられる。この帯域を除くと、隣戸による放射効率の変化はあまり大きくないことが示された。

Table 3.6: Natural frequencies of the distance from neighboring house,(2m, 4m).

	Mode order				
	L = 2.0		L = 4.0		
	n=1	n=2	n=1	n=2	n=3
Frequency [Hz]	85.9	171.7	42.9	85.9	128.8

3.3.2 隣戸が存在する状況下における外構塀の影響

解析条件の設定

さらに隣戸が存在する状況で外構塀を設置することによる影響を検討する。塀の条件に関しては Table 3.7 に示すように高さ 3 条件, 外壁からの後退距離 2 条件, さらに塀の配置については 3.3.1 項のように 3 条件設定し検討を行った Fig.3.40。

Table 3.7: Condition of fence.

Height of fence(h) [m]	1.06 , 1.63 , 2.2
Setback distance from side-boundary(d) [m]	1.0 , 2.0

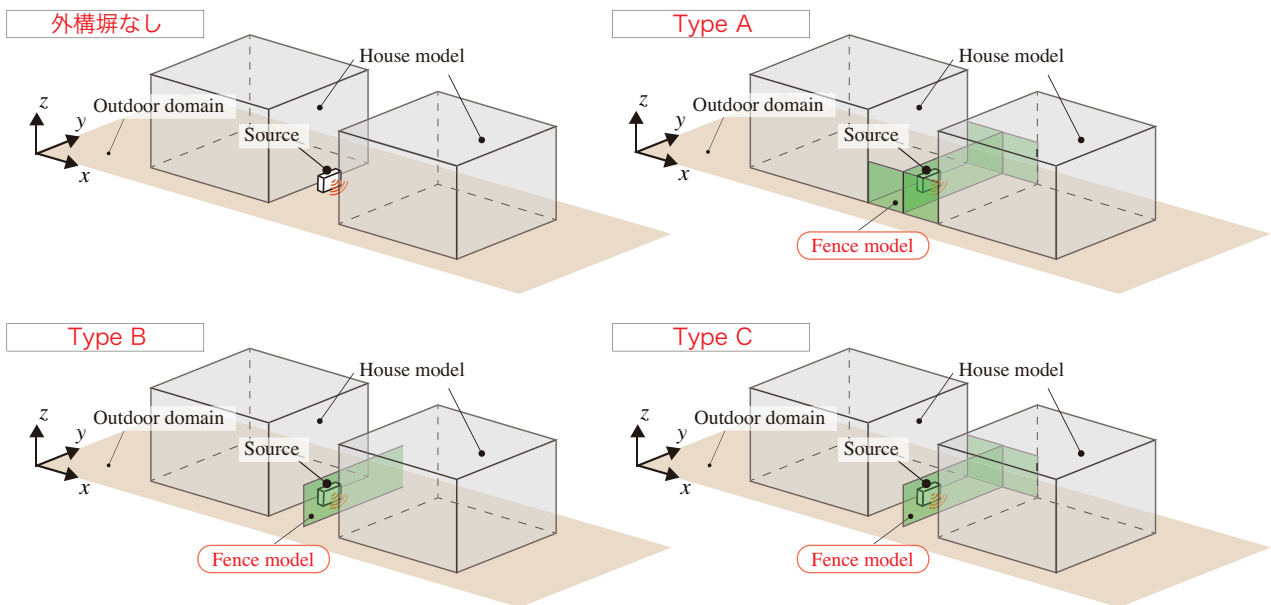


Fig. 3.40: Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house.

結果と考察

音源面の放射効率の解析結果を下記に示す。Fig.3.41 では塀の配置の影響，Fig.3.42 には Type A における塀の高さ・外壁からの後退距離の影響の結果を示す。

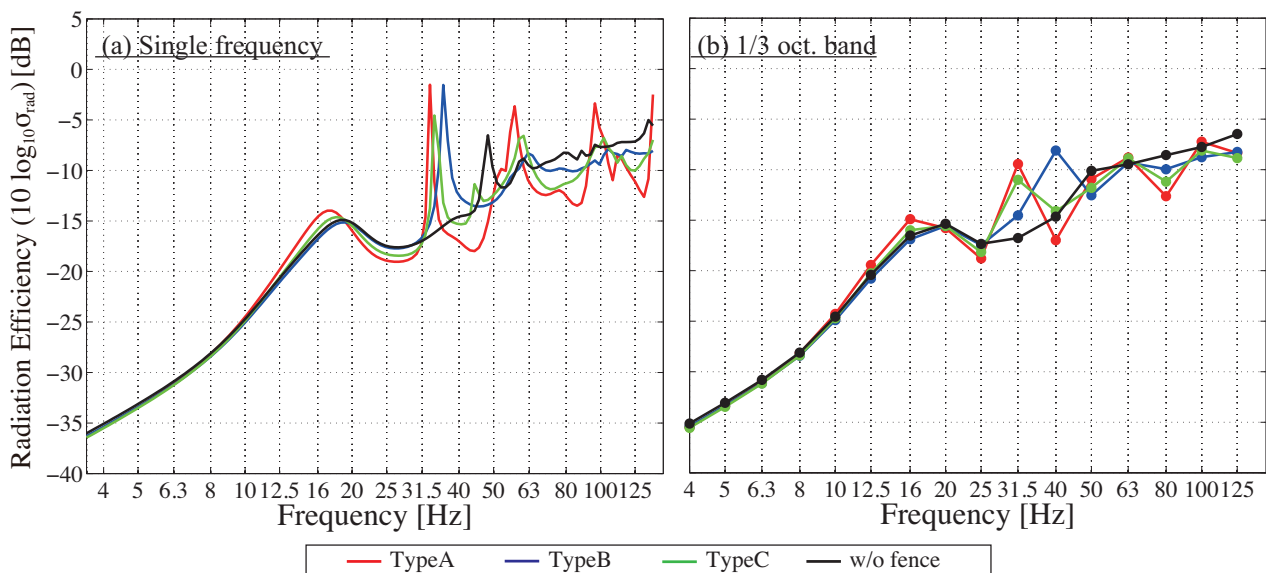


Fig. 3.41: Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of fence, ” TypeA, B ,C, w/o fence”.

■ 放射効率（塀の配置の影響）

全条件において概ね塀内長手方向の固有周波数付近でピーク・ディップが生じている。尚，Type A では奇数モード，Type B では偶数モードで節と音源の位置が一致するため，モードが励起されないものと考えられる。20 Hz 付近の第 1 のピークは外構塀が存在しない条件と同様に隣戸間の空気をバネ，上方・側方開口部の空気質量によるバネマス共振系によるものと考えられる。さらに，外構塀が存在することで配置による変化もなく 31.5 Hz 付近で鋭いピークが生じている。これらの周波数においては音圧分布 Fig.3.43 より両側の塀内で音圧が一様に分布し，さらに位相が反転している。よってこれらは気柱の連成共鳴として知られる現象であり塀内及びその上方の空気を交換するような振動状態になっている。

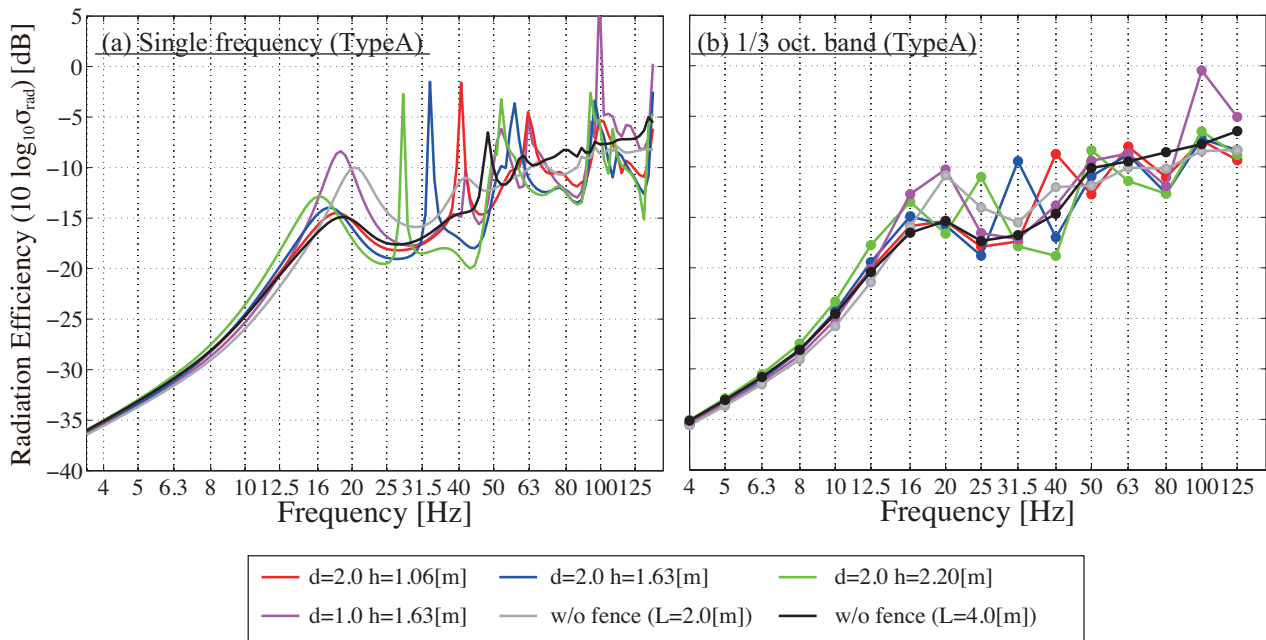


Fig. 3.42: Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of fence, (a variety of height).

■ 放射効率（高さ・外壁からの後退距離の影響）

ピーク・ディップについては前述したように塀内の音場モードに影響して生じている。さらに隣戸が存在しない条件と同様に、塀の高さ方向や外壁からの後退距離の影響は同じ傾向になっている。前項に述べた”気柱の連成共鳴”について、塀を高くすることで低域側にシフトしていることがわかる。第1のピークは塀の高さは関係なく同様の周波数特性であるため、第1のピークでは”家屋の高さ”が支配的であり、第2のピークでは”塀の高さ”が支配的であることが示された。

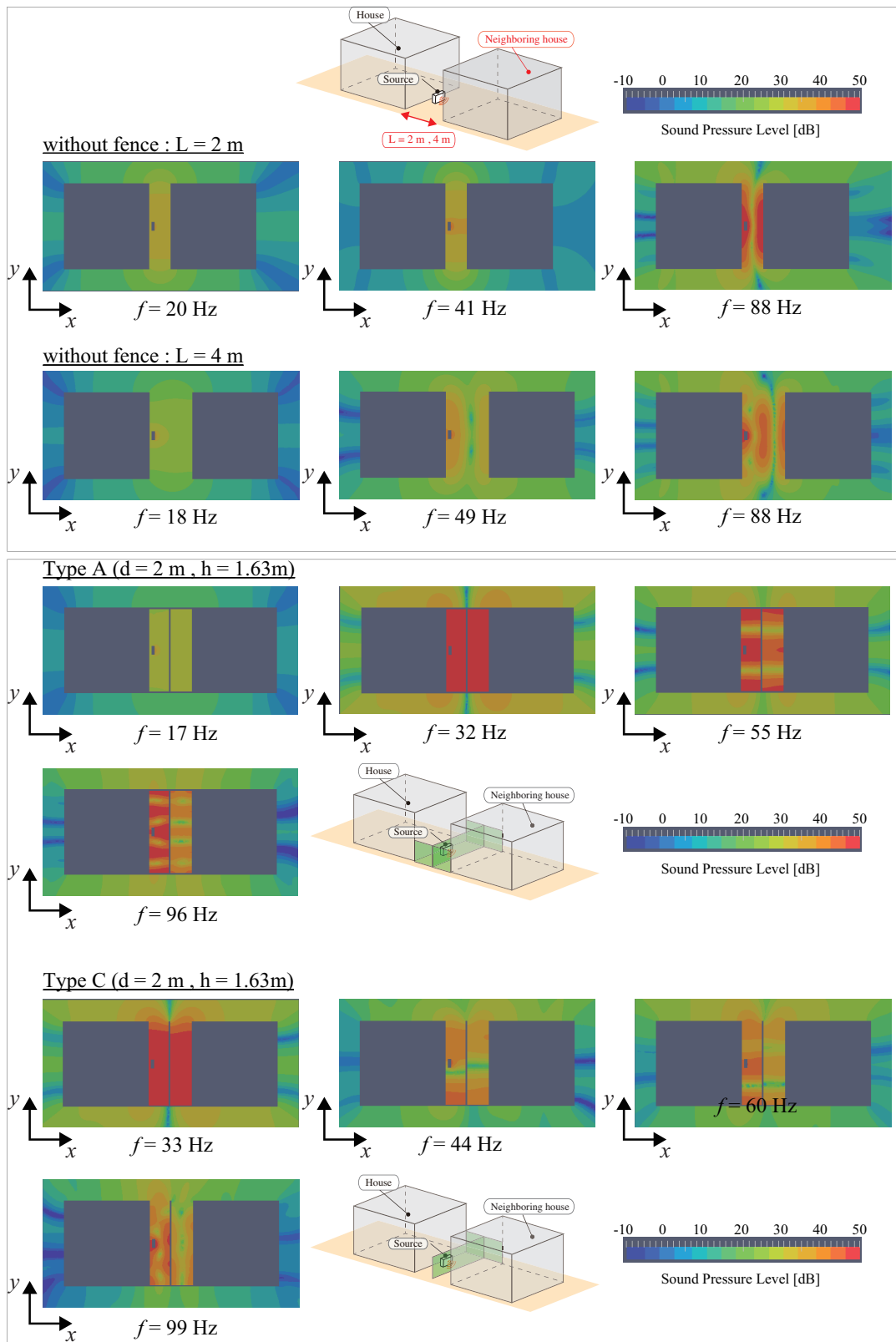


Fig. 3.43: Distributions of sound pressure level on the ground for neighboring house with fence.

3.4 隣戸面への影響検討

3.4.1 解析概要

前節において家庭用設備機器から発生する低周波音を対象とした屋外伝搬のメカニズムを検討した。しかし周囲への影響把握として外構塀等を設置することで隣戸に与える影響は明らかになっていない。そのため本節では隣戸が存在する状況において、ヒートポンプユニット正面の隣戸面への影響を検討する。本節では(1) 隣戸の影響 (2) 外構塀の影響を検討する。

解析条件の設定

(1) 隣戸の影響

隣戸を設置することでの影響を観察するため、Fig.3.44のように外構塀は存在せず、前項と同様の大きさ(8.0 m×8.0 m×6.0 m)の家屋を2軒対面する配置し、外壁を剛壁としてモデル化した。音源についても同様に家庭用ヒートポンプ給湯機のヒートポンプユニットの大きさを模擬した直方体(0.3 m×0.8 m×0.7 m)をモデル化し、家屋の正面から0.2 m離れた位置に配置した。この音源については1面を振動境界で一般的な振動速度1 m/sを与えた。さらに隣戸間隔(L)は2mと4mの2条件に設定し解析を行った。

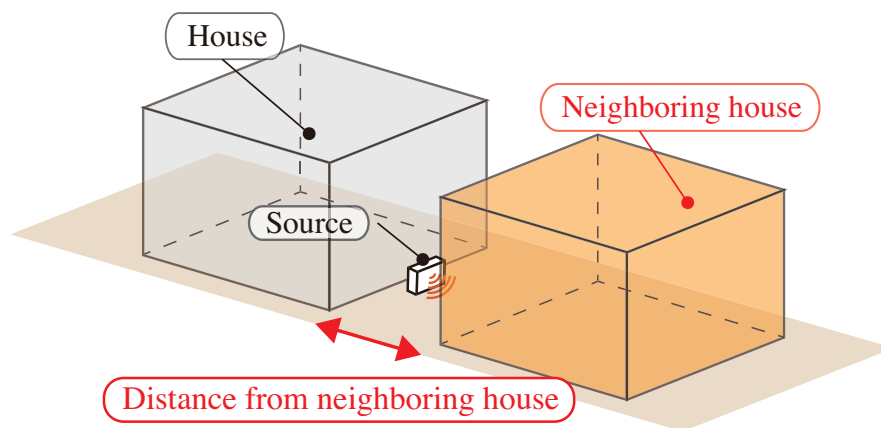


Fig. 3.44: Numerical model of a sound field around house.

(2) 外構塀の影響

隣戸が存在する状況で外構塀を設置することでの影響を観察するため、Fig.3.45のように家屋(8.0 m×8.0 m×6.0 m)が対面する配置で、かつその隣戸間に外構塀を配置しモデル化した。音源は(1)と同様のモデルを使用する。塀モデルは補強コンクリートブロック塀を想定し、1ブロックの寸法は0.39 m×0.15 m×0.19 mの大ききで規定されており、本研究ではこの塀は敷地境界線に存在するものとする。高さは3条件、外壁からの後退距離は2条件に設定するTable3.8。さらに配置についてはFig.3.45に示すように、正面及び両側面に塀が配置しているTypeA 正面のみに塀が配置しているTypeB 正面及び片側面に塀が配置しているTypeCの3条件を設置し解析を行った。

Table 3.8: Condition of fence.

Height of fence(h) [m]	1.06, 1.63, 2.2
Setback distance from side-boundary(d) [m]	1.0, 2.0

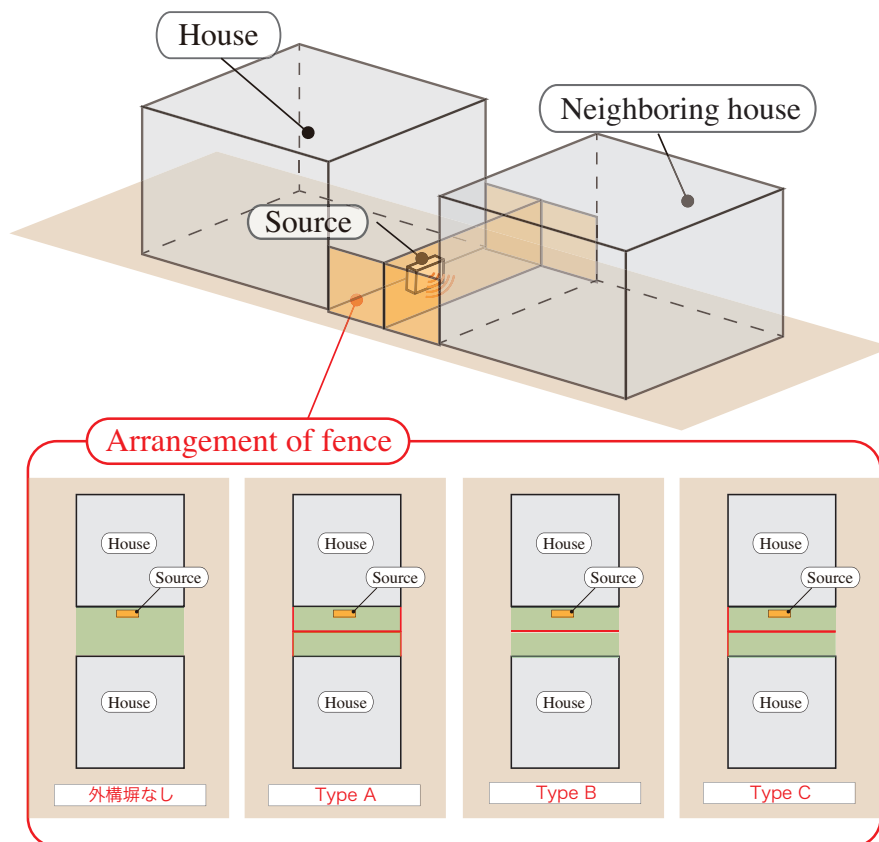


Fig. 3.45: Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house and neighboring house.

評価指標

隣戸面に対する影響を評価する指標として、隣戸設置前後 ($L_{w/_n}, L_{w/o_n}$) 及び隣戸設置後かつ外構塀設置前後 ($L_{w/_f}, L_{w/o_f}$) の平均音圧レベル差を算出し評価する。

(1) 隣戸の影響

隣戸が設置されている条件での隣戸面 (Fig.3.46 における青面 (左)) の音圧レベルを $L_{w/_n}$ とし、隣戸が設置されていない条件において隣戸面に相当する面 (Fig.3.46 における青面 (右)) の音圧レベル L_{w/o_n} として、その差分を取り評価する。 $L_{w/_n}, L_{w/o_n}$ については全節点における音圧レベルのエネルギー平均値とする。

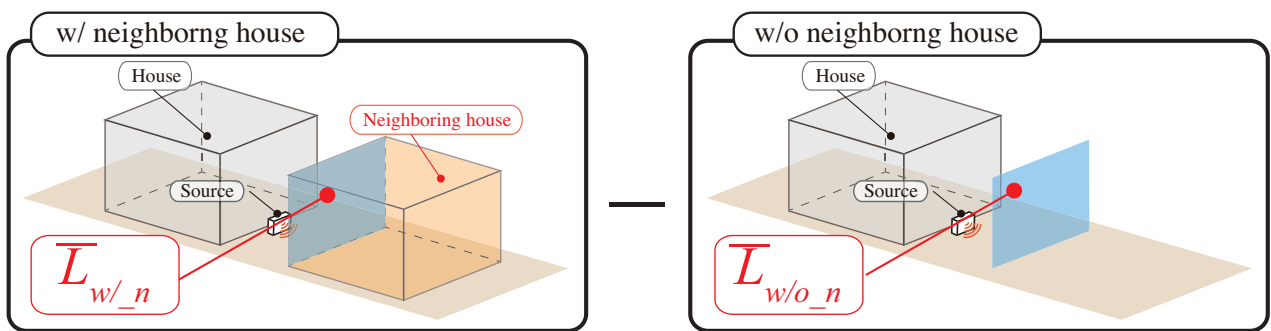


Fig. 3.46: Schemematic diagram of the calculation of insertion loss before and after the neighboring house : cross section.

(1) 外構塀の影響 (配置/高さ/外壁からの後退距離)

隣戸が設置されている条件において、外構塀が設置されている条件での隣戸面 (Fig.3.47 における青面 (左)) の音圧レベルを $L_{w/_f}$ とし、外構塀が設置されていない条件での隣戸面 (Fig.3.47 における青面 (右)) の音圧レベル L_{w/o_f} として、その差分を取り評価する。 $L_{w/_f}, L_{w/o_f}$ については全節点における音圧レベルのエネルギー平均値とする。

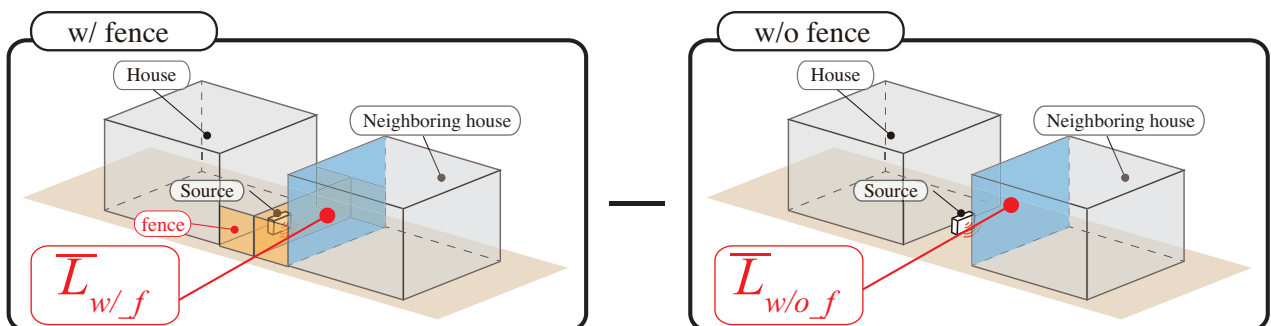


Fig. 3.47: Schemematic diagram of the calculation of insertion loss before and after the fence : cross section.

3.4.2 解析結果

(1) 隣戸の影響

Fig.3.48 に隣戸設置前後の結果を示す。尚、音圧倍増に相当する +6 dB の線を併記する。

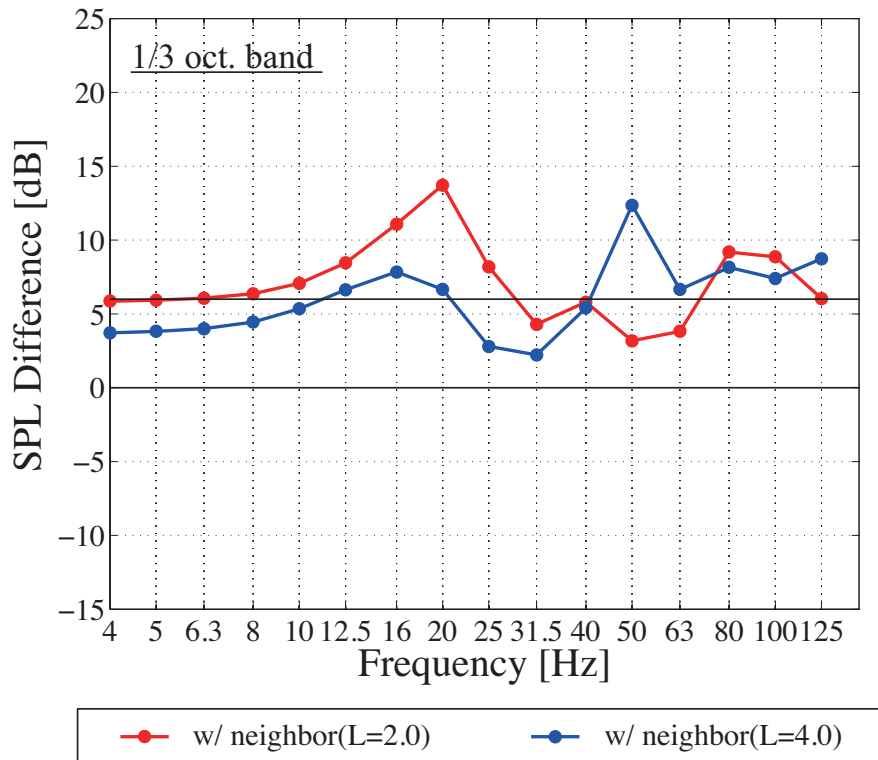


Fig. 3.48: Average sound pressure level difference of the neighborhood front surface for a variety of arrangement of house.

ピークについては放射効率のピークと同様の周波数で生じている。20 Hz 付近のピークは隣戸間の空気をバネ、上方・側方開口部質量によるバネマス共振系に起因しているものと考えられ、20 Hz 以上の帯域のピークについては家屋間 (2m,4m) の両端閉管のモードに起因していると考えられる。さらに、隣戸を設置することで音圧レベルが全周波数上昇しているが、上昇量が 6 dB を上回る周波数は隣戸間隔によって変化している。31.5 Hz 以下では隣戸間隔の狭い方が音圧レベルは高いが、それ以上の周波数では対向壁間のモードの影響で隣戸間隔によって放射効率及び音圧のピークが変化していると考えられる。

(2) 外構塀の影響

Fig.3.49 に隣戸への外構塀設置前後の結果を示す。

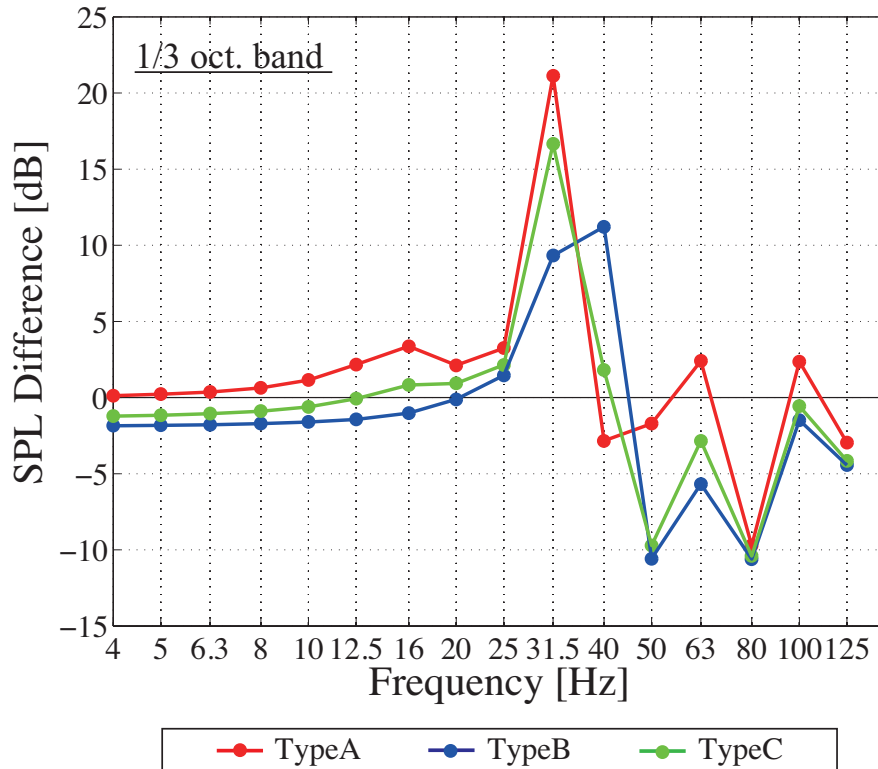


Fig. 3.49: Average sound pressure level difference of the neighborhood front surface for a variety of arrangement of and fence.

全条件において 31.5 Hz 付近で音圧レベルの上昇が見られる。これは放射効率の結果 (Fig.3.41) とも対応することから、隣接する塀内空気の連成共鳴によるものと考えられる。50 Hz 以上の帯域では、塀設置によって音圧レベルは概ね低下しており、最大 10 dB の低下が見られた。音源近傍や塀より低い隣戸壁面では塀の遮蔽効果が多少生じたものと考えられるが、音源側の塀内のモードにより放射効率が低下するとともに、塀内からの放射指向特性に変化が生じた可能性も考えられる。

3.5 まとめ

本章では家屋近傍に設置された家庭用設備機器から発生する低周波音を対象に、外構塀や隣戸を設置することで生じる影響を定常音場解析にて検討を行った。1節では解析モデル・条件及び評価指標について整理した。

2節では外構塀の影響について検討を行った。ここでは配置・高さ・幅・外壁からの後退距離及び音源との配置関係について考察を行った。音源面の放射効率については塀内の音場モードに強く影響することが示された。31.5 Hz 付近で生じる第1のピークは塀内の空気をバネ・上方開口部を質量としたバネマス共振系に起因していると考えられる。以降のピーク・ディップは音圧分布より塀内の長手方向の軸モードに起因していることが示された。そのため、高さや外壁からの後退距離を変更してもピーク・ディップの周波数はあまり変化はないが、音源と外構塀の距離を近づけることで全周波数帯域で塀設置前に比べ放射効率の上昇が見られた。そのため音源に近接して塀を設置することで幾何的に音源からの遮蔽効果は広がるが、逆効果として放射効率が上昇しうることには留意が必要であることが示唆された。さらに長手方向の軸モードに起因していることから、塀幅を狭くすることで家庭用ヒートポンプ給湯器の卓越周波数(40~60 Hz とその倍調波成分)の帯域で放射効率の低下が見られた。これは塀幅が狭くなることで長手方向の固有周波数が広域側にシフトしたためと考えられる。音源と塀の配置についてはモードの節に音源が設置された場合にそのモードに対応するピーク・ディップは生じないことが示された。よって各設備機器の周波数特性に応じて外構塀と音源を配置することで放射効率を低下させる可能性が示唆された。

3節では隣戸の影響について検討を行った。3.2.1項では隣戸のみの影響を考察した。前節では長手方向のモードに起因して放射効率が変化していたが、本項では外構塀が存在しない状況であるため隣戸間の軸モードに起因していた。家屋の長手方向に起因したピークは生じていたが、より支配的なのは隣戸間の軸モードであった。3.2.2項では隣戸が存在する状況において外構塀設置による影響を考察した。大半のピーク・ディップが前節と同様に塀内の音場モードに起因していることが示された。第1のピークは前節同様の塀内でバネマス共振系により生じているが、31.5 Hz 付近の周波数において隣戸が存在しない条件と比べさらに鋭い第2のピークが生じている。両側の塀内で位相反転していることから、これは気柱の連成共鳴として知られる現象であり、塀内及びその上方の空気を交換するような振動状態になり生じた現象と考えられる。そこで塀の高さ・配置条件を変更し解析を行ったところ、第1のピークは”家屋の高さ”が支配的であり、第2のピークは”塀の高さ”が支配的であることが示された。

4節では隣戸面への影響について検討を行った。隣戸のみ設置する状況では全周波数帯域で音圧レベル上昇が見られたが、隣戸が存在する状況で外構塀を設置することで40 Hz以上の帯域では音圧レベル低下が見られた。これは塀内の音場モードによる放射効率の低下や塀内からの放射指向特性の変化により生じたものと考えられる。

第4章

総括

本章では、本研究により得られた成果を総括し、今後の課題について述べる。

4.1 研究の成果

1章では研究の背景について概説し、低周波音問題の変遷から低周波音の基礎及び既往研究について述べた。本研究では低周波領域における屋外側対策の知見の取得を目的に音響数値解析によるパラメトリックスタディを行うことにした。検討対象としては大きく分けて、”外構塀”、”隣戸”の設置による影響を考察することにした。その中で、外構塀の配置・高さ・幅・外壁からの後退距離及び音源位置との関係について細かな要素を検討し、屋外伝搬現象の把握を目指した。

2章では家庭用ヒートポンプ給湯機の設置環境に関する予備調査を行った。家庭用ヒートポンプ給湯機は2000年以降に普及され始めたため、同時期に開発された地域に多く存在していた。その中で騒音源であるヒートポンプユニット単独で移動させることが可能だが、対象地域での多くは隣戸側に向けて設置されていた。さらにヒートポンプユニット前面に掃き出し窓等の開口部が多く存在していた。ガイドブックには「音の進入口がない場所に設置する」という項目があるが、このように大きな開口部に面した位置に設置しており距離も広く離れている状況は多くなく、騒音被害が発生する可能性が示された。

3章では家庭用設備機器から発生する低周波音を対象として外構塀や隣戸等の伝搬系における影響を音響数値解析にて検討を行った。1節では対象とする家屋近傍に設置された定常的低周波音を発生する設備機器（家庭用ヒートポンプ給湯機）・解析概要及び評価指標について述べた。2節では外構塀の影響として、配置・高さ・幅・外壁からの後退距離及び音源位置との関係について考察した。音源面の放射効率のピーク・ディップについては以下のものが影響することが確認された。

- (1) 塀内の空気をバネ，上方開口部の空気を質量とした鉛直方向のバネマス共振系
- (2) 塀内長手方向の一次元モード

(1)については40 Hz以下の低域側で生じる第1のピークで現れる現象であり、塀高や外壁からの後退距離で共振周波数は変化するため各条件で変化することが確認された。(2)については(1)の第1以降のピーク・ディップで生じる現象である。塀内の長手方向の一次元の固有周波数付近でピーク・ディップが生じており、この共振周波数前後では音源面の音圧位相が変化するため同次でのピーク・ディップが形成

されたものと考えられる。そこで扉幅を狭くした条件では固有周波数が広域にシフトし対象の周波数帯域でのピーク・ディップの数が減少し、放射効率が扉設置前に比べ低下している帯域が広がることが確認された。さらに音源位置がモードの節にあたる位置に設置された場合は、そのモードに対応したピーク・ディップが生じないことが示された。よって各設備機器の周波数特性に応じて外構扉と音源を配置することで放射効率を予測することができると推測される。

3節では隣戸の影響を考察した。隣戸のみの配置では隣戸間のモードが強く影響することが示された。さらに隣戸が存在する状況で外構扉を設置した条件では、主に放射効率のピーク・ディップは前節と同様な要因が影響していた。しかし第1のピークは隣戸間の空気がバネ、上方・側方開口部の空気を質量としたバネマス共振系に起因しており、さらに31.5 Hz付近では隣戸が存在しない条件に比べて鋭いピークが生じていることが確認された。ここでは両側の扉内で位相反転していることから、扉内及びその上方の空気を交換するような振動状態になり生じたピークと考えられる。扉の配置や高さの条件を変更し解析を行ったところ、第1のピークは”家屋の高さ”，第2のピークは”扉の高さ”が支配的であることが示された。

4節では隣戸面への影響を考察した。外構扉が設置されていない場合では全周波数帯域で音圧レベルの上昇が見られ、音圧倍増である6 dBを超える帯域も存在した。しかし外構扉を設置することで40 Hz以上の帯域では音圧レベルの低下が確認された。これは扉内の音場モードによる放射効率の低下や扉内からの放射指向特性の変化により生じたものと考えられる。以上より外構扉を設置することで音圧レベル低下の可能性が示唆された。

4.2 今後の課題

ここでは本論文において残された課題点について述べる。

まず音源について、実際の家庭用設備機器等の特性と異なっている点である。実際には冷媒圧縮機や送風機から発生し、扉からの反射波の影響により振動速度は変化することが考えられる。本研究では音源モデルのある一面から振動速度一定に設定し解析を行っており、扉内の長手方向の1次元モードによるピーク・ディップはより鋭く励起されている。そのため今後は反射波の影響を考慮した音源モデルでの検討が必要である。

扉や家屋の外壁のモデル化について、本研究では伝搬メカニズムを把握するため全条件で剛壁に設定している。実際には透過等の質量・剛性の影響が懸念されるため、実際の材料の物性値を考慮したモデルでの検討が必要である。

また受音系について、本研究では隣戸面の平均音圧レベル差を検討しているが、家屋内での音圧レベルの変化は検討していない。既往研究では家屋への影響として内外音圧レベル差による検討をしているため、今後は本研究で得られた知見とともに伝搬系対策による家屋内部の影響を検討する必要がある。そして数値解析モデルの妥当性の検証をするため屋外模型実験との比較検討も課題の一つとして挙げられる。

以上、本論文で残された課題を示した。これらが解決され、低周波音に対する効果的な遮音対策の開発に役立て、低周波音問題解決の一助となることを期待し、本論文を締めくくる。

付録 A

有限要素法の基礎理論

A.1 はじめに

本論文では音場・振動場の解析に有限要素法を用い、定常状態における解析を行う。波動音響学的手法による音響数値解析においては、音響伝搬は波動方程式に従うことを前提としており、音響問題に一般的に用いられている断熱過程の仮定をして波動方程式を導出している。断熱過程とは、気体の圧縮・膨張に伴い、微小気体から熱の流入・流出がなく、熱伝導よりも気体の圧縮・膨張のほうが速いことを仮定している。つまり、気体の体積変化は圧力変化によるものであり、温度の変化によるものではないことを仮定している。高周波領域の音波は振動が速く、熱伝導より体積変化の方が速いと考えられるため、一般に断熱過程が成立すると考えられる。一方、低周波領域においては、高周波領域の音波と比べて振動が遅く、熱伝導の影響が少なからず考えられる。そのため、高周波領域よりも断熱過程の仮定が成立しにくいと考えられる。本論文では上記の影響を考慮した上で検討・考察を行うものとする。

A.1.1 積分方程式導出のための基礎事項

時間因子と空間微分に関する演算子

本論文では定常状態における音場・振動場の解析を行う。この時、時間因子は一貫して $\exp(j\omega t)$ を採用することとした。

スカラー場 B に対する勾配及びベクトル場 $\mathbf{A}(A_x, A_y, A_z)$ の発散をあらわす演算をそれぞれ以下のよう書く

$$\text{grad}B = \nabla B = \frac{\partial B}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial B}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial B}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (\text{A.1})$$

$$\text{div}\mathbf{A} = \nabla \cdot \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (\text{A.2})$$

ただし、 $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ はそれぞれ x, y, z 軸方向の単位ベクトルである。

発散定理

境界 ∂D で区切られる領域 D におけるベクトル場 \mathbf{A} において、以下の発散定理が成り立つ。

$$\int_D \text{div}\mathbf{A}dV = \oint_{\partial D} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}dS \quad (\text{A.3})$$

ただし、 \mathbf{n} は境界における外向き法線方向ベクトルである。発散定理の意味するところは、領域内における湧き出しの総和は境界における流出の和に等しい、ということである。

発散定理において $\mathbf{A} = \phi \nabla \psi$ とおくと、Green の第一恒等式は次式のようにかける。

$$\int_D (\text{grad}\phi \cdot \text{grad}\psi + \phi \nabla^2 \psi) dV = \oint_{\partial D} \phi \frac{\partial \psi}{\partial n} dS \quad (\text{A.4})$$

ここで $\frac{\partial}{\partial n}$ は境界における法線方向微分を表す。

A.2 音場の数値解析理論

A.2.1 音場の基礎方程式

均質かつ粘性の無い空気中を音波が伝搬する時、以下の連続の式及び運動方程式が成り立つ。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\kappa \operatorname{div} \mathbf{v} \quad (\text{A.5})$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\operatorname{grad} p \quad (\text{A.6})$$

ただし、 p :音圧、 \mathbf{v} :粒子速度ベクトル、 κ :体積弾性率、 ρ :空気密度である。これより、音圧に関して以下の波動方程式が成り立つ。

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{A.7})$$

空気中の音速 c は $c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}$ で表される。

ここで、調和振動を仮定すると、流体中の Helmholtz 方程式が以下のように書ける。

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (\text{A.8})$$

A.2.2 音場の境界条件

空気中の定常音場において粒子速度 \mathbf{v} は運動方程式, Eq.(A.6) より以下のようにかける。

$$\mathbf{v} = -\frac{1}{j\omega\rho} (\operatorname{grad} p) \quad (\text{A.9})$$

この時、単位ベクトル \mathbf{r} 方向への粒子速度は次のように表される。

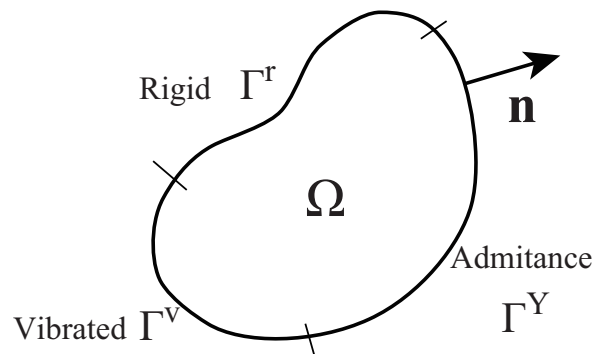


Fig. A.1: Analytical model for acoustic field.

$$\begin{aligned}
v_r &= \mathbf{v} \cdot \mathbf{r} \\
&= -\frac{1}{j\omega\rho}(\text{grad}p) \cdot \mathbf{r} \\
&= -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial r}
\end{aligned} \tag{A.10}$$

音場の境界では局所作用が成り立つものとし、実際の音場との対応から境界 Γ について剛壁境界 Γ^r , アドミッタンス境界 Γ^Y , 振動境界 Γ^v の 3 種類を考慮する。各々の境界では境界面外向き法線方向の粒子速度 v_n が以下の式を満たすものとする。

$$v_n = \begin{cases} -v^f & (\text{on } \Gamma^v) \\ \beta p & (\text{on } \Gamma^Y) \\ 0 & (\text{on } \Gamma^r) \end{cases}$$

ただし, v^f : 内向き法線方向振動速度, β : 法線方向音響アドミタンスである。これより, 境界面における音圧の法線方向傾度について各々の境界条件は以下のようにかける。

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \begin{cases} j\omega\rho v^f & (\text{on } \Gamma^v) \\ -jk\beta_n p & (\text{on } \Gamma^Y) \\ 0 & (\text{on } \Gamma^r) \end{cases} \tag{A.11}$$

β_n は空気のアドミタンスで基準化した法線方向音響アドミタンスである。

A.2.3 有限要素法による音場の解析

Helmholtz 方程式の弱形式化

ここでは重み付き残差法に基づき, 支配方程式を弱形式に変形する。Eq.(A.8) に重み関数 δp を乗じ, 領域内部全体で積分する。

$$\int_{\Omega} \delta p (\nabla^2 p + k^2 p) dV = 0 \tag{A.12}$$

上式第一項は, Green の第一恒等式を適用し下式のように変形できる。

$$\int_{\Omega} \delta p \nabla^2 p dV = - \int_{\Omega} (\text{grad} \delta p \cdot \text{grad} p) dV + \int_{\Gamma} \delta p \frac{\partial p}{\partial n} dS \tag{A.13}$$

Eq.(A.13) を Eq.(A.12) に代入すると以下のように弱形式の積分方程式が得られる。

$$\int_{\Omega} (\text{grad} \delta p \cdot \text{grad} p) dV - k^2 \int_{\Omega} \delta p p dV - \int_{\Gamma} \delta p \frac{\partial p}{\partial n} dS = 0 \tag{A.14}$$

さらに上式第三項に境界条件 Eq.(A.11) を適用すると, 非連成音場について以下の積分方程式が成り立つ。

$$\int_{\Omega} (\text{grad} \delta p \cdot \text{grad} p) dV - k^2 \int_{\Omega} \delta p p dV + jk\beta_n \int_{\Gamma^Y} \delta p p dS - j\omega\rho_0 \int_{\Gamma^v} \delta p v^f dS = 0 \tag{A.15}$$

積分方程式の離散化

ここでは Eq.(A.15) にガラーキン法を適用し、数値的に解くことができる形式に変形する過程を示す。積分領域を N 個の要素に分割し、各要素内について Eq.(A.15) を評価し、領域全体でその影響を重ね合わせることを考える。ここで、ある要素内の任意点で音圧 p は要素節点における値 p_i と内挿関数 N_i を用いて次式で近似する。

$$p = \sum_i N_i p_i \quad (\text{A.16})$$

ここで $\{\mathbf{N}\}$, $\{\mathbf{p}_e\}$ なるベクトルを次式のように定義する。

$$\{\mathbf{N}\} = \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_I\} \quad (\text{A.17})$$

$$\{\mathbf{p}_e\} = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_I\}^T \quad (\text{A.18})$$

これらを用いると、Eq.(A.16) は次式のようにベクトルの内積として表すことができる。

$$p = \{\mathbf{N}\} \cdot \{\mathbf{p}_e\} \quad (\text{A.19})$$

さらに、ガラーキン法では重み関数 δp の内挿を試験関数と同一にとる。

$$\delta p = \{\mathbf{N}\} \cdot \{\delta \mathbf{p}_e\} \quad (\text{A.20})$$

以上の関係を用い、Eq.(A.15) を各要素内におけるマトリックス形式として表し、最終的に全体マトリックスを構築する過程を以下に示す。

要素マトリックスの導出

まず、ある要素 e について Eq.(A.15) の第一項は

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_e} \nabla \delta p \cdot \nabla p dV &= \int_{\Omega_e} \nabla \left(\sum_i N_i \delta p_i \right) \cdot \nabla \left(\sum_j N_j p_j \right) dV \\ &= \int_{\Omega_e} \left(\sum_i \frac{\partial N_i}{\partial x} \delta p_i \sum_j \frac{\partial N_j}{\partial x} p_j + \sum_i \frac{\partial N_i}{\partial y} \delta p_i \sum_j \frac{\partial N_j}{\partial y} p_j + \sum_i \frac{\partial N_i}{\partial z} \delta p_i \sum_j \frac{\partial N_j}{\partial z} p_j \right) dV \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e\}^T \int_{\Omega_e} [\mathbf{B}^a]^T [\mathbf{B}^a] dV \{\mathbf{p}_e\} \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e\}^T [\mathbf{K}_e^a] \{\mathbf{p}_e\} \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

となる。ここで、 $[\mathbf{B}^a]$ 及び $[\mathbf{K}_e^a]$ はそれぞれ歪みマトリックス、剛性マトリックスと呼ばれ、以下のよう

$$[\mathbf{B}^a] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial N_I}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial N_I}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \cdots & \frac{\partial N_I}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

$$[\mathbf{K}_e^a] = \int_{\Omega_e} [\mathbf{B}^a]^T [\mathbf{B}^a] dV \quad (\text{A.23})$$

続いて, Eq.(A.15) 第二項における積分項は

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_e} \delta p p dV &= \int_{\Omega_e} \left(\sum_i N_i \delta p_i \right) \cdot \left(\sum_j N_j p_j \right) dV \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e\}^T \int_{\Omega_e} \{\mathbf{N}\}^T \{\mathbf{N}\} dV \{\mathbf{p}_e\} \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e\}^T [\mathbf{M}_e^a] \{\mathbf{p}_e\} \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

となる。ここで, $[\mathbf{M}_e^a]$ は慣性マトリックスと呼ばれ, 以下のように定義される。

$$[\mathbf{M}_e^a] = \int_{\Omega_e} \{\mathbf{N}\}^T \{\mathbf{N}\} dV \quad (\text{A.25})$$

次に, Eq.(A.15) 第三項はインピーダンス境界に関する項であり,

$$\begin{aligned} \beta_0 \int_{\Gamma_e} \delta p p dS &= \int_{\Gamma_e} \left(\sum_i N_i \delta p_i \right) \cdot \left(\sum_j N_j p_j \right) dS \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e\}^T \beta_0 \int_{\Gamma_e} \{\mathbf{N}\}^T \{\mathbf{N}\} dS \{\mathbf{p}_e\} \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e\}^T [\mathbf{C}_e^a] \{\mathbf{p}_e\} \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

と表せる。ここで, $[\mathbf{C}_e^a]$ は一般に減衰マトリックスと呼ばれ, 以下のように定義される。

$$[\mathbf{C}_e^a] = \beta_0 \int_{\Gamma_e} \{\mathbf{N}\}^T \{\mathbf{N}\} dS \quad (\text{A.27})$$

最後に第四項は振動境界に対する項であり, 外力条件や弾性体, 板などの変位や速度により記述される振動場との連成条件を表す項である。ここでは一定速度 $v(\Gamma_e)$ で駆動される境界を考える。この時, 第四項における積分項は

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma_e} \delta p v^f dS &= \int_{\Gamma_e} \left(\sum_i N_i \delta p_i \right) dS v(\Gamma_e) \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e\}^T \int_{\Gamma_e} \{\mathbf{N}\}^T v(\Gamma_e) dS \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e\}^T \{\mathbf{Q}_e^a\} v(\Gamma_e) \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

となる。ここで、ベクトル $\{\mathbf{Q}_e^a\}$ は以下のように定義される。

$$\{\mathbf{Q}_e^a\} = \int_{\Gamma_e} \{\mathbf{N}\}^T dS \quad (\text{A.29})$$

振動場との連成問題における第四項は適合マトリックス $[\mathbf{Q}]$ として表される。本研究では振動場との連成解析を行っていないため説明は省くが、詳しくは [12] や [14] で考察している。

本論文では Eq.(A.23),(A.25),(A.27),(A.29) は数値積分により評価する。

全体マトリックスの構築

有限要素法においては領域を N 個の要素に分割し、定義領域全体での積分を各要素に対して領域区分した積分の総和として評価する。この時、Fig.A.2 に示すようなモデルケースを想定し、要素マトリックスを重ね合わせて全体マトリックスを構築する手順を具体的に示す。

$$\int_{\Omega} dV = \sum_n \int_{\Omega_n} dV \quad (\text{A.30})$$

要素 Ω_1, Ω_2 に対し、Eq.(A.21) がそれぞれ次のように得られるとする。

$$\{\delta \mathbf{p}_e^1\}^T [\mathbf{K}_1^a] \{\mathbf{p}_e^1\} = \begin{pmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \\ \delta p_3 \\ \delta p_4 \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & k_{13}^1 & k_{14}^1 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 & k_{23}^1 & k_{24}^1 \\ k_{31}^1 & k_{32}^1 & k_{33}^1 & k_{34}^1 \\ k_{41}^1 & k_{42}^1 & k_{43}^1 & k_{44}^1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} \quad (\text{A.31})$$

$$\{\delta \mathbf{p}_e^2\}^T [\mathbf{K}_2^a] \{\mathbf{p}_e^2\} = \begin{pmatrix} \delta p_3 \\ \delta p_4 \\ \delta p_5 \\ \delta p_6 \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{11}^2 & k_{12}^2 & k_{13}^2 & k_{14}^2 \\ k_{21}^2 & k_{22}^2 & k_{23}^2 & k_{24}^2 \\ k_{31}^2 & k_{32}^2 & k_{33}^2 & k_{34}^2 \\ k_{41}^2 & k_{42}^2 & k_{43}^2 & k_{44}^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{pmatrix} \quad (\text{A.32})$$

全節点音圧ベクトル $\{\mathbf{p}\}$ を $\{\mathbf{p}\} = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}$ を用いると、上に示した 2 式はそれぞれ次式と同値である。

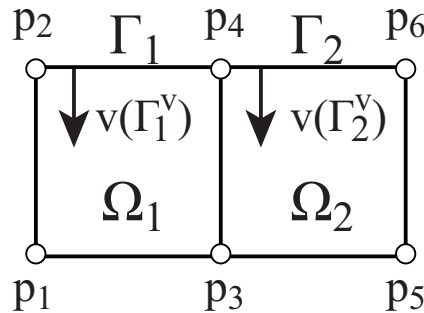


Fig. A.2: A model case for the assembly step in FEM.

$$\{\delta \mathbf{p}\}^T [\mathbf{K}'_1] \{\mathbf{p}\} = \begin{Bmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \\ \delta p_3 \\ \delta p_4 \\ \delta p_5 \\ \delta p_6 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & k_{13}^1 & k_{14}^1 & 0 & 0 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 & k_{23}^1 & k_{24}^1 & 0 & 0 \\ k_{31}^1 & k_{32}^1 & k_{33}^1 & k_{34}^1 & 0 & 0 \\ k_{41}^1 & k_{42}^1 & k_{43}^1 & k_{44}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.33})$$

$$\{\delta \mathbf{p}\}^T [\mathbf{K}'_2] \{\mathbf{p}\} = \begin{Bmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \\ \delta p_3 \\ \delta p_4 \\ \delta p_5 \\ \delta p_6 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{11}^2 & k_{12}^2 & k_{13}^2 & k_{14}^2 \\ 0 & 0 & k_{21}^2 & k_{22}^2 & k_{23}^2 & k_{24}^2 \\ 0 & 0 & k_{31}^2 & k_{32}^2 & k_{33}^2 & k_{34}^2 \\ 0 & 0 & k_{41}^2 & k_{42}^2 & k_{43}^2 & k_{44}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.34})$$

以上の関係から、領域全体の積分を以下のようにマトリックス形式で表す事ができる。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \nabla \delta p \cdot \nabla p dV &= \int_{\Omega_1} \nabla \delta p \cdot \nabla p dV + \int_{\Omega_2} \nabla \delta p \cdot \nabla p dV \\ &= \{\delta \mathbf{p}_e^1\}^T [\mathbf{K}'_1] \{\mathbf{p}_e^1\} + \{\delta \mathbf{p}_e^2\}^T [\mathbf{K}'_2] \{\mathbf{p}_e^2\} \\ &= \{\delta \mathbf{p}\}^T [\mathbf{K}'_1] \{\mathbf{p}\} + \{\delta \mathbf{p}\}^T [\mathbf{K}'_2] \{\mathbf{p}\} \\ &= \{\delta \mathbf{p}\}^T ([\mathbf{K}'_1] + [\mathbf{K}'_2]) \{\mathbf{p}\} \\ &= \begin{Bmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \\ \delta p_3 \\ \delta p_4 \\ \delta p_5 \\ \delta p_6 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_{11}^1 & k_{12}^1 & k_{13}^1 & k_{14}^1 & 0 & 0 \\ k_{21}^1 & k_{22}^1 & k_{23}^1 & k_{24}^1 & 0 & 0 \\ k_{31}^1 & k_{32}^1 & k_{33}^1 + k_{11}^2 & k_{34}^1 + k_{12}^2 & k_{13}^2 & k_{14}^2 \\ k_{41}^1 & k_{42}^1 & k_{43}^1 + k_{21}^2 & k_{44}^1 + k_{22}^2 & k_{23}^2 & k_{24}^2 \\ 0 & 0 & k_{31}^2 & k_{32}^2 & k_{33}^2 & k_{34}^2 \\ 0 & 0 & k_{41}^2 & k_{42}^2 & k_{43}^2 & k_{44}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{Bmatrix} \\ &= \{\delta \mathbf{p}\}^T [\mathbf{K}^a] \{\mathbf{p}\} \end{aligned} \quad (\text{A.35})$$

このように、部分剛性マトリックス $[\mathbf{K}'_1], [\mathbf{K}'_2]$ より、全体剛性マトリックス $[\mathbf{K}^a]$ を構築する際には、それぞれの部分マトリックスにおいて共通する節点に対応する成分を加算すればよい事がわかる。

次に、要素 Γ_1^v, Γ_2^v に対し、Eq.(A.28) がそれぞれ次のように得られるとする。

$$\{\delta \mathbf{p}_e^1\}^T \{\mathbf{Q}'_1\} v(\Gamma_1^v) = \begin{Bmatrix} \delta p_2 \\ \delta p_4 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \end{Bmatrix} v(\Gamma_1^v) \quad (\text{A.36})$$

$$\{\delta \mathbf{p}_e^2\}^T \{\mathbf{Q}'_2\} v(\Gamma_2^v) = \begin{Bmatrix} \delta p_4 \\ \delta p_6 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} q_1^2 \\ q_2^2 \end{Bmatrix} v(\Gamma_2^v) \quad (\text{A.37})$$

全節点音圧ベクトル $\{\mathbf{p}\}$ を用いると、上に示した 2 式はそれぞれ次式と同値である。

$$\{\delta\mathbf{p}\}^T \{\mathbf{Q}'_1^{\mathbf{a}}\} v(\Gamma_1^{\mathbf{v}}) = \begin{Bmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \\ \delta p_3 \\ \delta p_4 \\ \delta p_5 \\ \delta p_6 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} 0 \\ q_1^1 \\ 0 \\ q_2^1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} v(\Gamma_1^{\mathbf{v}}) \quad (\text{A.38})$$

$$\{\delta\mathbf{p}\}^T \{\mathbf{Q}'_1^{\mathbf{a}}\} v(\Gamma_2^{\mathbf{v}}) = \begin{Bmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \\ \delta p_3 \\ \delta p_4 \\ \delta p_5 \\ \delta p_6 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_1^2 \\ 0 \\ q_2^2 \end{Bmatrix} v(\Gamma_2^{\mathbf{v}}) \quad (\text{A.39})$$

以上の関係から，振動境界全体での積分を以下のようにマトリックス形式で表す事ができる。

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma^{\mathbf{v}}} \delta p v^{\mathbf{f}} dS &= \int_{\Gamma_1^{\mathbf{v}}} \delta p v^{\mathbf{f}} dS + \int_{\Gamma_2^{\mathbf{v}}} \delta p v^{\mathbf{f}} dS \\ &= \{\delta\mathbf{p}_e^1\}^T \{\mathbf{Q}'_1^{\mathbf{a}}\} v(\Gamma_1^{\mathbf{v}}) + \{\delta\mathbf{p}_e^2\}^T \{\mathbf{Q}'_2^{\mathbf{a}}\} v(\Gamma_2^{\mathbf{v}}) \\ &= \{\delta\mathbf{p}\}^T (\{\mathbf{Q}'_1^{\mathbf{a}}\} v(\Gamma_1^{\mathbf{v}}) + \{\mathbf{Q}'_2^{\mathbf{a}}\} v(\Gamma_2^{\mathbf{v}})) \\ &= \{\delta\mathbf{p}\}^T [\{\mathbf{Q}'_1^{\mathbf{a}}\}, \{\mathbf{Q}'_2^{\mathbf{a}}\}] \{v(\Gamma_1^{\mathbf{v}}), v(\Gamma_2^{\mathbf{v}})\}^T \\ &= \begin{Bmatrix} \delta p_1 \\ \delta p_2 \\ \delta p_3 \\ \delta p_4 \\ \delta p_5 \\ \delta p_6 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ q_1^1 & 0 \\ 0 & 0 \\ q_2^1 & q_1^2 \\ 0 & 0 \\ 0 & q_2^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v(\Gamma_1^{\mathbf{v}}) \\ v(\Gamma_2^{\mathbf{v}}) \end{Bmatrix} \\ &= \{\delta\mathbf{p}\}^T [\mathbf{Q}^{\mathbf{a}}] \{\mathbf{v}^{\mathbf{f}}\} \end{aligned} \quad (\text{A.40})$$

ここで，境界面振動速度ベクトル $\{\mathbf{v}^{\mathbf{f}}\}$ を $\{\mathbf{v}^{\mathbf{f}}\} = \{v(\Gamma_1^{\mathbf{v}}), v(\Gamma_2^{\mathbf{v}})\}^T$ と定義した。

同様に慣性・減衰マトリックスについても共通成分を重ね合わせると，音場のみの非連成系において，Eq.(A.15) はマトリックス形式で以下のように書く事が出来る。

$$\{\delta\mathbf{p}\}^T (([\mathbf{K}^{\mathbf{a}}] - k^2[\mathbf{M}^{\mathbf{a}}] + jk[\mathbf{C}^{\mathbf{a}}]) \{\mathbf{p}\} - j\omega\rho[\mathbf{Q}^{\mathbf{a}}] \{\mathbf{v}^{\mathbf{f}}\}) = 0 \quad (\text{A.41})$$

上式が $\{\delta\mathbf{p}\}$ によらず解を持つためには

$$([\mathbf{K}^{\mathbf{a}}] - k^2[\mathbf{M}^{\mathbf{a}}] + jk[\mathbf{C}^{\mathbf{a}}]) \{\mathbf{p}\} = j\omega\rho[\mathbf{Q}^{\mathbf{a}}] \{\mathbf{v}^{\mathbf{f}}\} \quad (\text{A.42})$$

が要求される。

プライム'に関する注意

以降の節では、マトリックスに対するプライム $[\cdot]'$ は上述のように、マトリックス $[\cdot]'$ と全節点ベクトルにより表される二次形式（ベクトル・マトリックス・ベクトル積）が、要素マトリックス $[\cdot]$ と要素節点ベクトルの二次形式と同値になるように無関係な成分に 0 が埋められたマトリックスであることを意味することとする (Eq.(A.33) 及び (A.34))。 $\{\cdot\}'$ についても同様であり、ベクトル・ベクトル積が同値となるように 0 パディングを行うことを意味する (Eq.(A.38) 及び (A.39))。ただし、これは数式の表現上の暗黙のルールを少なくするための記述であり、有限要素法のコード化においてこのステップをとる必要はないことを強調しておく。

このような仮定をする事で、同様の手順で全体マトリックスを構築する場合、次式のように書く事ができる。

$$[\mathbf{K}^a] = \sum_{e \in \Omega} [\mathbf{K}_e'^a] \quad (\text{A.43})$$

A.3 PML(Perfectly Matched Layer) の数値解析理論

A.3.1 PML の基礎方程式

Bermudez らは PML 領域 Ω_A における Helmholtz 方程式を以下のように示している [1]。

$$\frac{1}{\gamma_x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\gamma_x} \frac{\partial p_A}{\partial x} \right) + \frac{1}{\gamma_y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\gamma_y} \frac{\partial p_A}{\partial y} \right) + \frac{1}{\gamma_z} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\gamma_z} \frac{\partial p_A}{\partial z} \right) + k^2 p_A = 0 \quad (\text{A.44})$$

ここで $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ は PML 領域内における減衰関数であり、音響領域から遠ざかるほど減衰が大きくなるように与える。減衰関数 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ は下式で与えられる。

$$\begin{aligned} \gamma_x(x) &= \begin{cases} 1 & (x < A) \\ 1 + \frac{j}{k(A^* - x)} & (A \leq x < A^*) \end{cases} \\ \gamma_y(y) &= \begin{cases} 1 & (y < B) \\ 1 + \frac{j}{k(B^* - y)} & (B \leq y < B^*) \end{cases} \\ \gamma_z(z) &= \begin{cases} 1 & (z < C) \\ 1 + \frac{j}{k(C^* - z)} & (C \leq z < C^*) \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{A.45})$$

ここで、 A, B, C 及び A^*, B^*, C^* は PML 内部境界、PML 外部境界の x, y, z の座標を表す。また、Eq.(A.46)において、

$$\begin{aligned} \hat{x}(x) &= \int_0^x \gamma_x(s) dS = x + \frac{j}{k} \int_A^{A^*} \frac{1}{A^* - s} dS & x \in [A, A^*) \\ \hat{y}(y) &= \int_0^y \gamma_y(s) dS = y + \frac{j}{k} \int_B^{B^*} \frac{1}{B^* - s} dS & y \in [B, B^*) \\ \hat{z}(z) &= \int_0^z \gamma_z(s) dS = z + \frac{j}{k} \int_C^{C^*} \frac{1}{C^* - s} dS & z \in [C, C^*) \end{aligned} \quad (\text{A.46})$$

となる座標系を導入する。この時、各軸に対する微分オペレータは、

$$\frac{\partial \hat{x}}{\partial x} = \gamma_x, \quad \left(\frac{\partial}{\partial \hat{x}} = \frac{1}{\gamma_x} \frac{\partial}{\partial x} \right), \quad \frac{\partial \hat{y}}{\partial y} = \gamma_y, \quad \left(\frac{\partial}{\partial \hat{y}} = \frac{1}{\gamma_y} \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad \frac{\partial \hat{z}}{\partial z} = \gamma_z, \quad \left(\frac{\partial}{\partial \hat{z}} = \frac{1}{\gamma_z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (\text{A.47})$$

と表すことができ、Eq.(A.44) は以下のような一般的な Helmholtz 方程式と等価的な形式に書き換えられる。

$$\hat{\nabla}^2 p_A + k^2 p_A = 0 \quad (\text{A.48})$$

ここで、 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ に関する微分演算子 $\hat{\nabla}, \hat{\nabla}^2$ は下式で与えられる。

$$\hat{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \hat{x}} \mathbf{e}_x + \frac{\partial}{\partial \hat{y}} \mathbf{e}_y + \frac{\partial}{\partial \hat{z}} \mathbf{e}_z, \quad \hat{\nabla}^2 = \frac{\partial^2}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \hat{y}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \hat{z}^2}$$

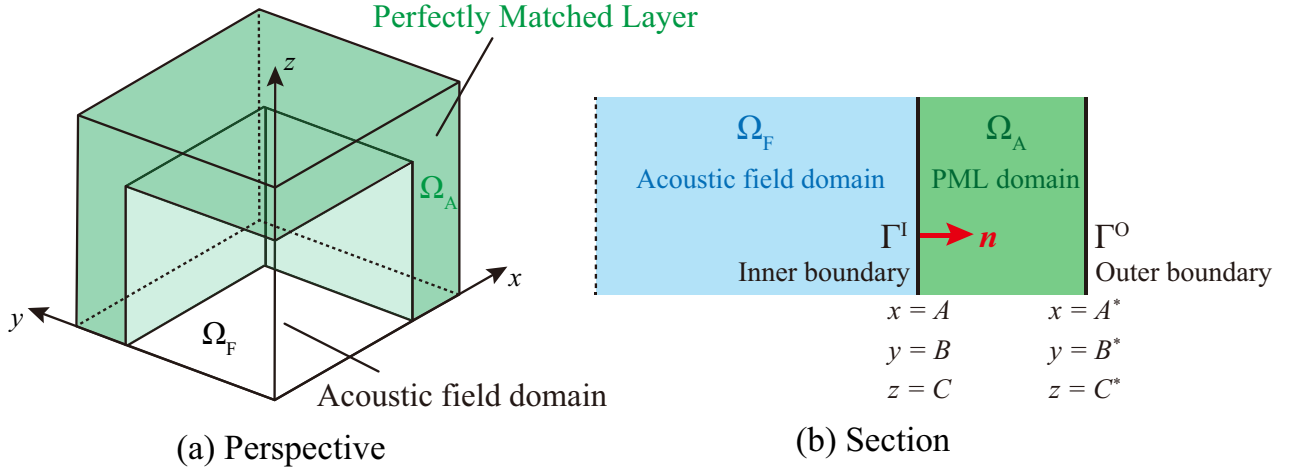


Fig. A.3: Analytical model for perfectly matched layer.

A.3.2 PML と音響領域の連続条件と PML 終端の境界条件

本論文では、Fig.A.3 (a) のように、デカルト座標系の x, y, z 軸に垂直な面で構成される PML を扱うものとし、PML 内部境界 (音響領域との境界) Γ^I において以下の連続条件を満たすものとする。

$$p_F = p_A \quad (\text{on } \Gamma^I) \quad (\text{A.49})$$

$$\frac{p_F}{\partial n_i} = \frac{\gamma_j \gamma_k}{\gamma_i} \frac{\partial p_A}{\partial n_i} \quad (\text{A.50})$$

上式はそれぞれ、音圧及び粒子速度の連続を意味する。ここで、添え字 (i, j, k) は (x, y, z) を循環的にとるものとし、 n_i は音響領域から外向き方向の単位法線ベクトルの i 方向成分である。また、PML 外部境界 Γ^O においては以下の境界条件を満たすものとする。

$$p_A = 0 \quad (\text{on } \Gamma^O) \quad (\text{A.51})$$

A.3.3 有限要素法による PML の解析

PML 領域内の Helmholtz 方程式の弱形式化

ここでは重み付き残差法に基づき、支配方程式を弱形式化する。Eq.(A.48) に重み関数 δp_A を乗じ、領域内部全体で積分する。

$$\int_{\Omega_A} \delta p_A \left(\hat{\nabla}^2 p_A + k^2 p_A \right) d\hat{V} = 0 \quad (\text{A.52})$$

上式第一項は、Green の第一恒等式を適用し、下式のように変形できる。

$$\int_{\Omega_A} \delta p_A \hat{\nabla}^2 p_A d\hat{V} = - \int_{\Omega_A} (\hat{\nabla} \delta p_A \cdot \hat{\nabla} p_A) d\hat{V} + \int_{\Gamma_A} \delta p_A \frac{\partial p_A}{\partial \hat{n}} d\hat{S} \quad (\text{A.53})$$

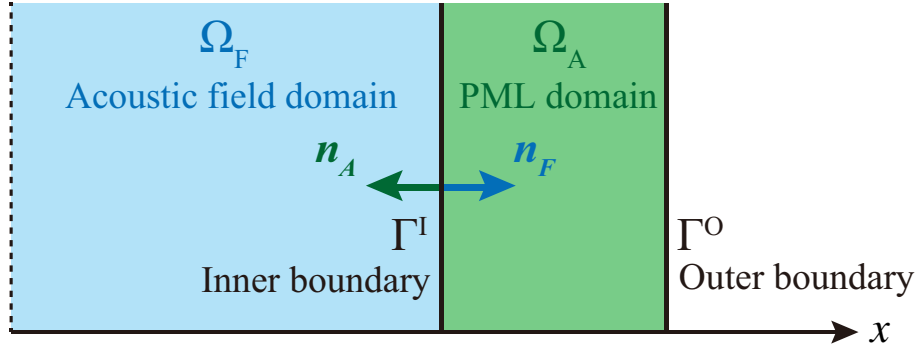


Fig. A.4: Perfectly matched layer in x-dimension with each domain's unit vectors.

Eq.(A.53) を Eq.(A.52) に代入すると、以下のように弱形式の積分方程式が得られる。

$$\int_{\Omega_A} (\hat{\nabla} \delta p_A \cdot \hat{\nabla} p_A) d\hat{V} - k^2 \int_{\Omega_A} \delta p_A p_A d\hat{V} - \int_{\Gamma_A} \delta p_A \frac{\partial p_A}{\partial \hat{n}} d\hat{S} = 0 \quad (\text{A.54})$$

Eq.(A.54) の第三項の境界積分項については、PML 内部境界 Γ^I と PML 外部境界 Γ^O を考慮すると、以式のように表せる。

$$\int_{\Gamma_A} \delta p_A \frac{\partial p_A}{\partial \hat{n}} d\hat{S} = \int_{\Gamma^I} \delta p_A \frac{\partial p_A}{\partial \hat{n}} d\hat{S} + \int_{\Gamma^O} \delta p_A \frac{\partial p_A}{\partial \hat{n}} d\hat{S} \quad (\text{A.55})$$

まず、PML 内部境界 Γ^I について、PML 領域、音響領域のそれぞれの境界積分項 I_1, I_2 の和を考える。ここでは例として、Fig.A.4 のような x 方向の成分のみを考慮することとした。

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= \int_{\Gamma^I} \delta p_A \frac{\partial p_A}{\partial \hat{n}} d\hat{S} + \int_{\Gamma^I} \delta p_F \frac{\partial p_F}{\partial \hat{n}} d\hat{S} \\ &= \int_{\Gamma^I} \delta p_A \frac{\partial p_A}{\partial \hat{n}_{Ax}} d\hat{S} + \int_{\Gamma^I} \delta p_F \frac{\partial p_F}{\partial n_{Fx}} dS \\ &= \int_{\Gamma^I} \delta p_A \frac{\gamma_y \gamma_z}{\gamma_x} \frac{\partial p_A}{\partial n_{Ax}} dS - \int_{\Gamma^I} \delta p_A \frac{\gamma_y \gamma_z}{\gamma_x} \frac{\partial p_A}{\partial n_{Ax}} dS \end{aligned} \quad (\text{A.56})$$

I_1 については、 $\frac{\partial}{\partial \hat{n}_i} = \frac{1}{\gamma_i} \frac{\partial}{\partial n_i}$ 、 $d\hat{S} = \gamma_y \gamma_z dS$ とした。 I_2 については、Eq.(A.49) の音圧の連続条件、(A.50) の境界条件を利用し、各領域の外向き法線方向を考慮すると、 $I_1 + I_2 = 0$ となり、音響領域と PML 領域の境界上で粒子速度の連続は自然に達成される事を意味している。

次に、Eq.(A.55) の PML 外部境界 Γ^O における境界積分項について、Eq.(A.51) より、 $\delta p_A = 0$ となり、

$$\int_{\Gamma^O} \delta p_A \frac{\partial p_A}{\partial \hat{n}} d\hat{S} = 0 \quad (\text{A.57})$$

となる。よって、Eq.(A.54) の境界積分項は 0 となる。ここで、Eq. (A.47) における変数を元に戻し、整理すると下式のように表せる。

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\gamma_y \gamma_z}{\gamma_x} \frac{\partial \delta p_A}{\partial x} \frac{\partial p_A}{\partial x} + \frac{\gamma_x \gamma_z}{\gamma_y} \frac{\partial \delta p_A}{\partial y} \frac{\partial p_A}{\partial y} + \frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_z} \frac{\partial \delta p_A}{\partial z} \frac{\partial p_A}{\partial z} \right) dV - k^2 \int_{\Omega} \delta p_A p_A \gamma_x \gamma_y \gamma_z dV = 0 \quad (\text{A.58})$$

積分方程式の離散化

ここでは Eq.(A.58) にガラーキン法を適用し、数値的に解くことができる形式に変形する過程を示す。積分領域を N 個の要素に分割し、各要素内について Eq.(A.58) を評価し、領域全体でその影響を重ね合わせることを考える。ここで、ある要素内の任意点で音圧 p_A は要素節点における値 p_{Ai} と内挿関数 N_i を用いて次式で近似する。

$$p = \sum_i N_i p_{Ai} \quad (\text{A.59})$$

ここで $\{\mathbf{N}\}$, $\{\mathbf{p}_{Ae}\}$ なるベクトルを次式のように定義する。

$$\begin{aligned} \{\mathbf{N}\} &= \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_I\} \\ \{\mathbf{p}_{Ae}\} &= \{p_{A1}, p_{A2}, p_{A3}, \dots, p_{AI}\}^T \end{aligned} \quad (\text{A.60})$$

これらを用いると、Eq.(A.59) は次式のようにベクトルの内積として表すことができる。

$$p_A = \{\mathbf{N}\} \cdot \{\mathbf{p}_{Ae}\} \quad (\text{A.61})$$

さらに、ガラーキン法では重み関数 δp_A の内挿を試験関数と同一にとる。

$$\delta p_A = \{\mathbf{N}\} \cdot \{\delta \mathbf{p}_{Ae}\} \quad (\text{A.62})$$

以上の関係を用い、Eq.(A.58) を各要素内におけるマトリックス形式として表し、最終的に全体マトリックスを構築する過程を以下に示す。

要素マトリックスの導出

まず、ある要素 e について、Eq.(A.58) の第一項は、

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} \left(\frac{\gamma_y \gamma_z}{\gamma_x} \frac{\partial \delta p_A}{\partial x} \frac{\partial p_A}{\partial x} + \frac{\gamma_x \gamma_z}{\gamma_y} \frac{\partial \delta p_A}{\partial y} \frac{\partial p_A}{\partial y} + \frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_z} \frac{\partial \delta p_A}{\partial z} \frac{\partial p_A}{\partial z} \right) dV \\ &= \int_{\Omega_e} \left(\frac{\gamma_y \gamma_z}{\gamma_x} \left(\sum_i \frac{\partial N_i}{\partial x} \delta p_A \sum_j \frac{\partial N_j}{\partial x} p_A \right) + \frac{\gamma_x \gamma_z}{\gamma_y} \left(\sum_i \frac{\partial N_i}{\partial y} \delta p_A \sum_j \frac{\partial N_j}{\partial y} p_A \right) + \frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_z} \left(\sum_i \frac{\partial N_i}{\partial z} \delta p_A \sum_j \frac{\partial N_j}{\partial z} p_A \right) \right) dV \\ &= \{\delta \mathbf{p}_{Ae}\}^T \int_{\Omega_e} [\mathbf{B}^{\text{pml}}]^T [\mathbf{B}^{\text{pml}}] dV \{\mathbf{p}_{Ae}\} \\ &= \{\delta \mathbf{p}_{Ae}\}^T [\mathbf{K}_e^{\text{pml}}] \{\mathbf{p}_{Ae}\} \end{aligned} \quad (\text{A.63})$$

ここで、 $[\mathbf{B}^{\text{pml}}]$ 及び $[\mathbf{K}_e^{\text{pml}}]$ は以下のように定義した。

$$[\mathbf{B}^{\text{pml}}] = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{\gamma_y \gamma_z}{\gamma_x}} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \sqrt{\frac{\gamma_y \gamma_z}{\gamma_x}} \frac{\partial N_2}{\partial x} & \cdots & \sqrt{\frac{\gamma_y \gamma_z}{\gamma_x}} \frac{\partial N_I}{\partial x} \\ \sqrt{\frac{\gamma_x \gamma_z}{\gamma_y}} \frac{\partial N_1}{\partial y} & \sqrt{\frac{\gamma_x \gamma_z}{\gamma_y}} \frac{\partial N_2}{\partial y} & \cdots & \sqrt{\frac{\gamma_x \gamma_z}{\gamma_y}} \frac{\partial N_I}{\partial y} \\ \sqrt{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_z}} \frac{\partial N_1}{\partial z} & \sqrt{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_z}} \frac{\partial N_2}{\partial z} & \cdots & \sqrt{\frac{\gamma_x \gamma_y}{\gamma_z}} \frac{\partial N_I}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (\text{A.64})$$

$$[\mathbf{K}_e^{\text{pml}}] = \int_{\Omega_e} [\mathbf{B}^{\text{pml}}]^T [\mathbf{B}^{\text{pml}}] dV \quad (\text{A.65})$$

続いて, Eq.(A.58) の第二項における積分項は,

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_e} \delta p_A p_A \gamma_x \gamma_y \gamma_z dV &= \int_{\Omega_m} \left(\sum_i N_i \delta p_A \sum_j N_j p_A \right) dV \\ &= \{\delta \mathbf{p}_{Ae}\}^T \gamma_x \gamma_y \gamma_z \int_{\Omega_m} \{\mathbf{N}\}^T \{\mathbf{N}\} dV \{\mathbf{p}_{Ae}\} \\ &= \{\delta \mathbf{p}_{Ae}\}^T [\mathbf{M}_e^{\text{pml}}] \{\mathbf{p}_{Ae}\} \end{aligned} \quad (\text{A.66})$$

ここで, $[\mathbf{M}_e^{\text{pml}}]$ は以下のように定義した。

$$[\mathbf{M}_e^{\text{pml}}] = \gamma_x \gamma_y \gamma_z \int_{\Omega_e} \{N\}^T \{N\} dV \quad (\text{A.67})$$

A.4 要素積分の評価

ここでは、これまでに扱ってきた内挿関数 N_i について述べ、それを用いた数値積分法を示す。ここでは、本研究で使用している三角形二次要素と四面体二次要素について、具体的に説明する。ここでは Fig.A.5 の番号付けに基づくものとする。

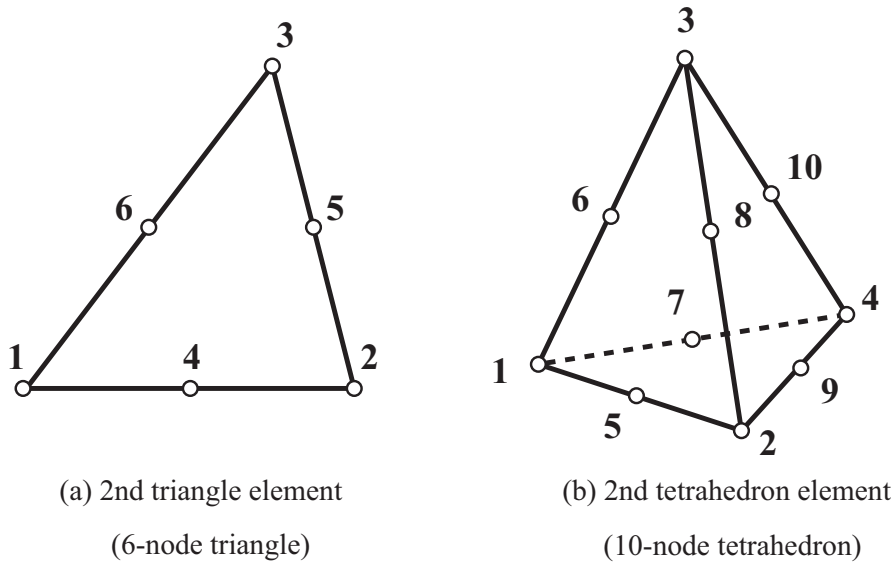


Fig. A.5: The shape of element with nodes.

A.4.1 内挿関数とその微分形

■ 三角形二次要素

面積座標

デカルト座標系 (Fig.A.6(b)) で三角形の頂点の座標が (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) となる三角形において, L_1, L_2, L_3 で示される面積座標系 ((Fig.A.6(c)) と以下の線形関係を持っている。

$$\begin{aligned}
 x &= L_1 x_1 + L_2 x_2 + L_3 x_3 \\
 y &= L_1 y_1 + L_2 y_2 + L_3 y_3 \\
 1 &= L_1 + L_2 + L_3
 \end{aligned}
 \tag{A.68}$$

L_1, L_2, L_3 は点 $P(L_1, L_2, L_3)$ と三角形の一辺からなる三角形と要素三角形全体の面積の比を表している。また、面積座標系と局所座標系は以下のような関係である。

$$\begin{aligned}
 L_1 &= 1 - \xi - \eta \\
 L_2 &= \xi \\
 L_3 &= \eta
 \end{aligned}
 \tag{A.69}$$

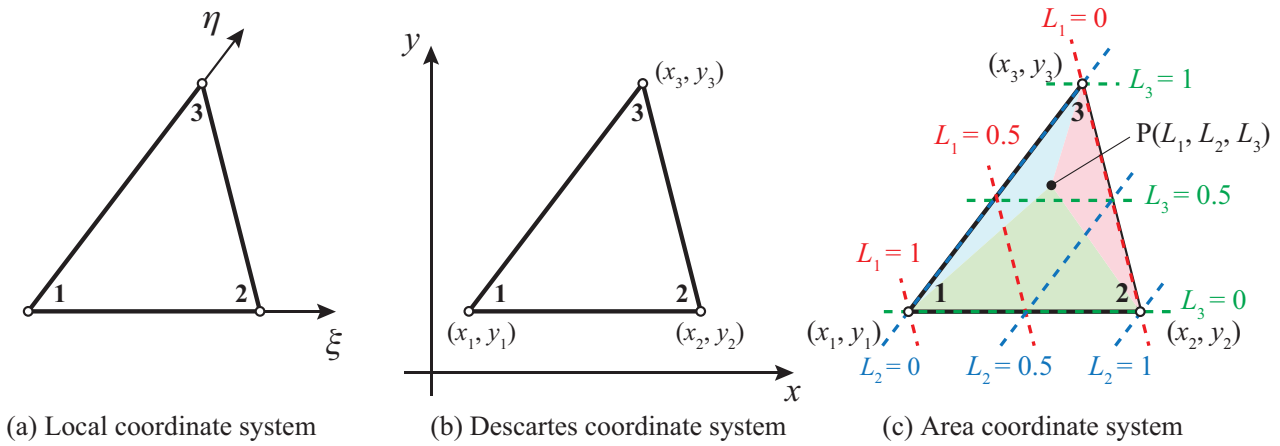


Fig. A.6: The coordinate systems of triangle element.

内挿関数

要素内の座標 (x, y) は三角形二次要素において、 i 番目の節点における内挿関数 N_i は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 N_1 &= L_1(2L_1 - 1) \\
 N_2 &= L_2(2L_2 - 1) \\
 N_3 &= L_3(2L_3 - 1) \\
 N_4 &= 4L_1L_2 \\
 N_5 &= 4L_2L_3 \\
 N_6 &= 4L_3L_1
 \end{aligned}
 \tag{A.70}$$

内挿関数の微分形

以上の内挿関数は局所座標を用いて表されている。前節までに示した要素剛性マトリックスの計算には、内挿関数の全体座標系での空間偏微分値 $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$ を算出する必要がある。しかし、この値は陽な形で表示することは大変な労力であり、有限要素法のプログラムを構築する際に必ずしも効率的であるとは限らない。ここでは内挿関数の全体座標系での空間偏微分値と局所座標系での空間偏微分値を対応づける方法を説明する。

合成関数の偏微分に関するチェインルールより以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} \\
 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta}
 \end{aligned}
 \tag{A.71}$$

上式をマトリックス形式で表すと、以下のように書く事ができる。

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{pmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{pmatrix} \\
&= [\mathbf{J}] \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{A.72}$$

従って、内挿関数の全体座標系での空間偏微分は以下のように表す事ができる。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{pmatrix} = [\mathbf{J}]^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{pmatrix} \tag{A.73}$$

ここで、 $[\mathbf{J}]$ は座標変換に関するヤコビ行列であり以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
[\mathbf{J}] &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i \\ \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \sum_{i=1}^6 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} & \frac{\partial N_5}{\partial \xi} & \frac{\partial N_6}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} & \frac{\partial N_5}{\partial \eta} & \frac{\partial N_6}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \\ x_5 & y_5 \\ x_6 & y_6 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{A.74}$$

以上の関係から、内挿関数の局所座標系での偏微分値及び節点の座標より、内挿関数の全体座標系での偏微分値を算出する事が可能である。

内挿関数の局所座標系での偏微分値について、Eq.(A.71) は下式のように書き換え、 i 番目の節点における内挿関数 N_i のそれぞれについて算出する。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial L_1}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial L_1} + \frac{\partial L_2}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial L_2} + \frac{\partial L_3}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial L_3} = \frac{\partial N_i}{\partial L_2} - \frac{\partial N_i}{\partial L_1} \\
\frac{\partial N_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial L_1}{\partial \eta} \frac{\partial N_i}{\partial L_1} + \frac{\partial L_2}{\partial \eta} \frac{\partial N_i}{\partial L_2} + \frac{\partial L_3}{\partial \eta} \frac{\partial N_i}{\partial L_3} = \frac{\partial N_i}{\partial L_3} - \frac{\partial N_i}{\partial L_1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_1}{\partial \xi} &= 1 - 4L_1 & \frac{\partial N_1}{\partial \eta} &= 1 - 4L_1 \\
\frac{\partial N_2}{\partial \xi} &= 4L_2 - 1 & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} &= 0 \\
\frac{\partial N_3}{\partial \xi} &= 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} &= 4L_3 - 1 \\
\frac{\partial N_4}{\partial \xi} &= 4(L_1 - L_2) & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} &= -4L_2 \\
\frac{\partial N_5}{\partial \xi} &= 4L_3 & \frac{\partial N_5}{\partial \eta} &= 4L_2 \\
\frac{\partial N_6}{\partial \xi} &= -4L_3 & \frac{\partial N_6}{\partial \eta} &= 4(L_1 - L_3)
\end{aligned}
\tag{A.75}$$

■ 四面体二次要素

体積座標

デカルト座標系 (Fig.A.7(b)) で四面体の頂点の座標が $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$ となる四面体において, L_1, L_2, L_3, L_4 で示される体積座標系 (Fig.A.7(c)) と以下の線形関係を持っている。

$$\begin{aligned}
x &= L_1x_1 + L_2x_2 + L_3x_3 + L_4x_4 \\
y &= L_1y_1 + L_2y_2 + L_3y_3 + L_4y_4 \\
z &= L_1z_1 + L_2z_2 + L_3z_3 + L_4z_4 \\
1 &= L_1 + L_2 + L_3 + L_4
\end{aligned}
\tag{A.76}$$

L_1, L_2, L_3, L_4 は点 $P(L_1, L_2, L_3, L_4)$ と三角形からなる四面体と要素四面体全体の体積の比を表している。また, 体積座標系と局所座標系は以下のような関係である。

$$\begin{aligned}
L_1 &= 1 - \xi - \eta - \zeta \\
L_2 &= \xi \\
L_3 &= \eta \\
L_4 &= \zeta
\end{aligned}
\tag{A.77}$$

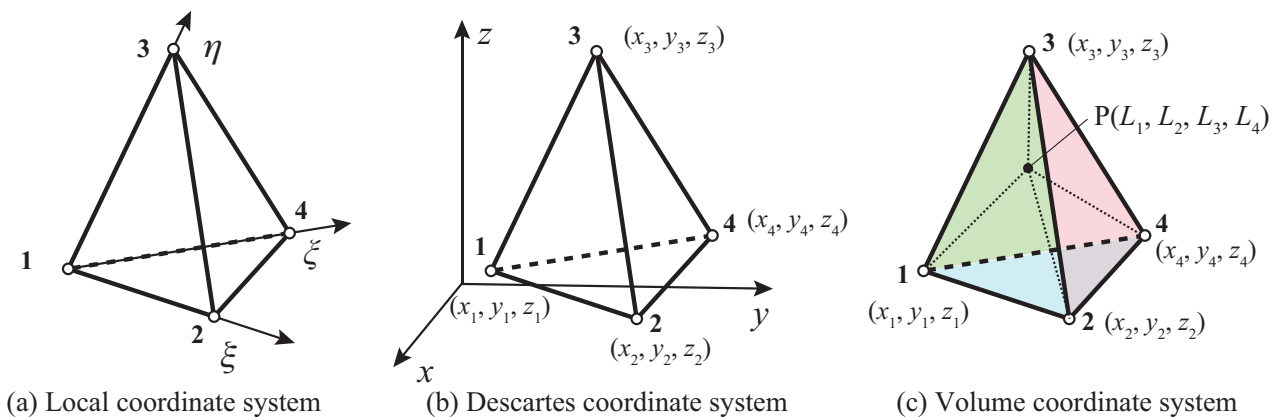


Fig. A.7: The coordinate systems of tetrahedron element.

内挿関数

要素内の座標 (x, y) は四面体二次要素において、 i 番目の節点における内挿関数 N_i は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 N_1 &= L_1(2L_1 - 1) \\
 N_2 &= L_2(2L_2 - 1) \\
 N_3 &= L_3(2L_3 - 1) \\
 N_4 &= 4L_1L_2 \\
 N_5 &= 4L_1L_3 \\
 N_6 &= 4L_1L_4 \\
 N_7 &= 4L_4L_1 \\
 N_8 &= 4L_2L_3 \\
 N_9 &= 4L_2L_4 \\
 N_{10} &= 4L_3L_4
 \end{aligned} \tag{A.78}$$

内挿関数の微分形

ここでは内挿関数の全体座標系での空間偏微分値と局所座標系での空間偏微分値を対応づける方法を説明する。

合成関数の偏微分に関するチェインルールより以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi} \\
 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \eta} \\
 \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \zeta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \zeta} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \zeta}
 \end{aligned} \tag{A.79}$$

上式をマトリックス形式で表すと、以下のように書く事ができる。

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} \\
 &= [\mathbf{J}] \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.80}$$

従って、内挿関数の全体座標系での空間偏微分は以下のように表す事ができる。

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = [\mathbf{J}]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (\text{A.81})$$

ここで、 $[\mathbf{J}]$ は座標変換に関するヤコビ行列であり以下のように定義される。

$$\begin{aligned} [\mathbf{J}] &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i & \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i & \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \\ \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} x_i & \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} y_i & \sum_{i=1}^{10} \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} z_i \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \dots & \frac{\partial N_{10}}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \dots & \frac{\partial N_{10}}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_2}{\partial \zeta} & \dots & \frac{\partial N_{10}}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{10} & y_{10} & z_{10} \end{bmatrix} \quad (\text{A.82}) \end{aligned}$$

以上の関係から、内挿関数の局所座標系での偏微分値及び節点の座標より、内挿関数の全体座標系での偏微分値を算出する事が可能である。内挿関数の局所座標系での偏微分値について、Eq.(A.79) は下式のように書き換え、 i 番目の節点における内挿関数 N_i のそれぞれについて算出する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial L_1}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial L_1} + \frac{\partial L_2}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial L_2} + \frac{\partial L_3}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial L_3} + \frac{\partial L_4}{\partial \xi} \frac{\partial N_i}{\partial L_4} = \frac{\partial N_i}{\partial L_2} - \frac{\partial N_i}{\partial L_1} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial L_1}{\partial \eta} \frac{\partial N_i}{\partial L_1} + \frac{\partial L_2}{\partial \eta} \frac{\partial N_i}{\partial L_2} + \frac{\partial L_3}{\partial \eta} \frac{\partial N_i}{\partial L_3} + \frac{\partial L_4}{\partial \eta} \frac{\partial N_i}{\partial L_4} = \frac{\partial N_i}{\partial L_3} - \frac{\partial N_i}{\partial L_1} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} &= \frac{\partial L_1}{\partial \zeta} \frac{\partial N_i}{\partial L_1} + \frac{\partial L_2}{\partial \zeta} \frac{\partial N_i}{\partial L_2} + \frac{\partial L_3}{\partial \zeta} \frac{\partial N_i}{\partial L_3} + \frac{\partial L_4}{\partial \zeta} \frac{\partial N_i}{\partial L_4} = \frac{\partial N_i}{\partial L_4} - \frac{\partial N_i}{\partial L_1} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{lll}
\frac{\partial N_1}{\partial \xi} = 1 - 4L_1 & \frac{\partial N_1}{\partial \eta} = 1 - 4L_1 & \frac{\partial N_1}{\partial \zeta} = 1 - 4L_1 \\
\frac{\partial N_2}{\partial \xi} = 4L_2 - 1 & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} = 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \zeta} = 0 \\
\frac{\partial N_3}{\partial \xi} = 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} = 4L_3 - 1 & \frac{\partial N_3}{\partial \zeta} = 0 \\
\frac{\partial N_4}{\partial \xi} = 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} = 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \zeta} = 4L_4 - 1 \\
\frac{\partial N_5}{\partial \xi} = 4(L_1 - L_2) & \frac{\partial N_5}{\partial \eta} = -4L_2 & \frac{\partial N_5}{\partial \zeta} = -4L_2 \\
\frac{\partial N_6}{\partial \xi} = -4L_3 & \frac{\partial N_6}{\partial \eta} = 4(L_1 - L_3) & \frac{\partial N_6}{\partial \zeta} = -4L_3 \\
\frac{\partial N_7}{\partial \xi} = -4L_4 & \frac{\partial N_7}{\partial \eta} = -4L_4 & \frac{\partial N_7}{\partial \zeta} = 4(L_1 - L_4) \\
\frac{\partial N_8}{\partial \xi} = 4L_3 & \frac{\partial N_8}{\partial \eta} = 4L_2 & \frac{\partial N_8}{\partial \zeta} = 0 \\
\frac{\partial N_9}{\partial \xi} = 4L_4 & \frac{\partial N_9}{\partial \eta} = 0 & \frac{\partial N_9}{\partial \zeta} = 4L_2 \\
\frac{\partial N_{10}}{\partial \xi} = 0 & \frac{\partial N_{10}}{\partial \eta} = 4L_4 & \frac{\partial N_{10}}{\partial \zeta} = 4L_3
\end{array} \tag{A.83}$$

A.4.2 Gauss-Legendre 積分による面積分・体積分の評価

Gauss-Legendre 積分は数値積分法の一つであり、積分値を総和の形式で得る手法である。Gauss-Legendre 積分では $\xi \in [-1, 1]$ に正規化された区間における積分に対し、積分区間内における評価点 ξ_i 及びその点における重み w_i が与えられ、任意の関数 $f(x)$ の積分を以下のような総和で表すことができる。

$$\int_{-1}^1 f(\xi) d\xi = \sum_i f(\xi_i) w_i \tag{A.84}$$

また、任意の積分区間については座標変換を行い、積分区間を $x \in [-1, 1]$ に正規化することで表す事ができる。

$$\begin{aligned}
\int_b^a f(x) dx &= \frac{a-b}{2} \int_{-1}^1 f(x(\xi)) d\xi \\
&= \frac{a-b}{2} \sum_i f(x(\xi_i)) w_i
\end{aligned} \tag{A.85}$$

さらに、多次元化することも可能であり、任意の三角形領域に対する面積分、及び任意の四面体領域に対する体積分について以下のように書ける。

$$\begin{aligned}
\iint_S f(x, y) dx dy &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(x(\xi, \eta), y(\xi, \eta)) |\mathbf{J}| d\xi d\eta \\
&= \sum_i \sum_j f(x(\xi_i, \eta_j), y(\xi_i, \eta_j)) |\mathbf{J}| w_i w_j
\end{aligned} \tag{A.86}$$

$$\begin{aligned}\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz &= \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(x(\xi, \eta, \zeta), y(\xi, \eta, \zeta), z(\xi, \eta, \zeta)) |\mathbf{J}| d\xi d\eta d\zeta \\ &= \sum_i \sum_j \sum_k f(x(\xi_i, \eta_j, \zeta_k), y(\xi_i, \eta_j, \zeta_k), z(\xi_i, \eta_j, \zeta_k)) |\mathbf{J}| w_i w_j w_k\end{aligned}\quad (\text{A.87})$$

ただし、 $|\mathbf{J}|$ は座標変換によるヤコビ行列の行列式の値である。

付録 B

調査シート

家庭用ヒートポンプ給湯機の設置環境に関する予備調査											
調査日時	調査 チェック内容	調査地区	記入例	記入欄 (下欄は住宅番号記入)						NO.	
配置	ヒートポンプユニットはどの方向に向いているか (①隣戸 or ②道路側)		①								
	ヒートポンプユニットの前面に扉は存在するか		○								
扉との関係	ヒートポンプユニット前面から扉までの距離 (①1m未満 or ②1m以上2m未満 or ③2m以上3m未満 or ④3m以上)		①								
	扉の高さ (①0.5m以下 ②0.5m~1m ③1m以上)		②								
窓との関係	ヒートポンプユニットの正面方向 (隣戸側) もしくは後面方向 (設置家屋側) に存在するものは? (①外壁 or ②小窓 or ③掃き出し窓) ※窓の場合は階数も記入	設置家屋側	1階	①							
			2階	②							
		隣戸側	1階	③							
			2階	④							
隣戸との関係	隣戸との距離 (①1m未満 or ②1m以上2m未満 or ③2m以上3m未満 or ④3m以上)		①								
自由記述欄											

目次

1.1	The Number of complaints about low frequency.	6
1.2	Elements affected low-frequency sound insulation performance.	9
2.1	Recognition rate of guidebook from installment point of heatpump.	13
2.2	Example of measures.	15
2.3	Installation rate of heat pump hot water on household.	16
2.4	Direction of heat pump unit.	17
2.5	Distance from heat pump unit to fence and height of fence.	18
2.6	Relation between heat pump unit and window.	19
2.7	Distance from heat pump unit to neighboring house.	20
3.1	A house is assumed to be a box-shaped placed on the semi-free field. A stationary sound source generating low-frequency noise is assumed to be equipment item placed closely to the house.	23
3.2	Constitution of heat pump hot water supply machine for home use.	24
3.3	A numerical model of a house. External acoustic field is truncated with Perfectly Matched Layer(PML).	25
3.4	A numerical model of source and fence.	26
3.5	Schematic diagram of the calculation of insertion loss before and after the fence : cross section I.	28
3.6	A variety of cross section II, III.	28
3.7	Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house.	29
3.8	Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of fence,"Type A,B,C,w/o fence"	30
3.9	Phase shift of sound source plane for a variety of arrangements of fence,"Type A, B, C, w/o fence"	31
3.10	Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA ,TypeB and TypeC (d=2.0 [m], h=1.63 [m]).	33
3.11	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with d = 2.0 [m], h = 1.63 [m].	34
3.12	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B with d = 2.0 [m], h = 1.63 [m].	35
3.13	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types C with d = 2.0 [m], h = 1.63 [m].	36
3.14	Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house : Type A, B.	37
3.15	Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence (height; 1.06m, 1.63m, 2.2m).	38
3.16	Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA,"a variety of height".	40
3.17	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with d = 2.0 [m], h = 1.06 [m].	41
3.18	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with d = 2.0 [m], h = 2.2 [m].	42
3.19	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B with d = 2.0 [m], h = 1.06 [m].	43
3.20	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B with d = 2.0 [m], h = 2.2 [m].	44
3.21	Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house : Type A, B.	45
3.22	Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence, (setback distance from side-boundary,: 1m, 2m).	46
3.23	Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA (d = 1m).	47
3.24	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with d = 1.0 [m], h = 1.63 [m].	48
3.25	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B with d = 1.0 [m], h = 1.63 [m].	49
3.26	Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house : Type A, B.	50
3.27	Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence, (width: 4m)..	51
3.28	Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA (h = 1.63m, d = 2m, w = 4m).	52
3.29	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with w = 4.0 [m]; x-z plane..	53
3.30	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with w = 8.0 [m]; x-y plane.	54

3.31	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A with $w = 4.0$ [m]; x-y plane..	55
3.32	Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house : Type A1/2, B1/2.	56
3.33	Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence, (Type A1/2).	57
3.34	Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence, (Type B1/2).	57
3.35	Distributions of sound pressure level on the ground for TypeA2.	58
3.36	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types A2 with $d = 2.0$ [m], $h = 1.63$ [m].	59
3.37	Distributions of insertion loss on the three cross sections in 1/3 octave bands, for Types B2 with $d = 2.0$ [m], $h = 1.63$ [m].	60
3.38	Numerical model of a sound field around house.	61
3.39	Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of house.	62
3.40	Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house.	63
3.41	Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of fence, " TypeA, B ,C, w/o fence".	64
3.42	Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of fence, (a variety of height).	65
3.43	Distributions of sound pressure level on the ground for neighboring house with fence.	66
3.44	Numerical model of a sound field around house.	67
3.45	Arrangements of fence on numerical model of a sound field around house and neighboring house.	68
3.46	Schemematic diagram of the calculation of insertion loss before and after the neighboring house : cross section.	69
3.47	Schemematic diagram of the calculation of insertion loss before and after the fence : cross section.	69
3.48	Average sound pressure level difference of the neighborhood front surface for a variety of arrangement of house.	70
3.49	Average sound pressure level difference of the neighborhood front surface for a variety of arrangement of and fence.	71
A.1	Analytical model for acoustic field.	77
A.2	A model case for the assembly step in FEM.	81
A.3	Analytical model for perfectly matched layer.	86
A.4	Perfectly matched layer in x-dimension with each domain's unit vectors.	87
A.5	The shape of element with nodes.	90
A.6	The coordinate systems of triangle element.	91
A.7	The coordinate systems of tetrahedron element.	93

表目次

1.1	Movements related to low-frequency noise.	7
2.1	Summary of investigation area.	14
2.2	Summary of heat pump.	16
3.1	Natural frequencies of the fence (direction:y-axis).	31
3.2	Condition of fence.	37
3.3	Condition of fence.	45
3.4	Condition of fence.	50
3.5	Natural frequencies of the fence (direction:y-axis; 4m, 8m).	51
3.6	Natural frequencies of the distance from neighboring house,(2m, 4m).	62
3.7	Condition of fence.	63
3.8	Condition of fence.	68

参考文献

- [1] A. Bermudez, L. Hervella-Nieto, A. Prieto, R. Rpdriquez, An optimal perfectly matched layer with unbounded absorbing function for time-harmonic acoustic scattering problem. *J. Comp. Physics.*, Vol. 223, Issue 2., pp469-488, 2007.
- [2] Doi. T, Kaku. J. Investigation of sound insulation of bulidings to low frequency sounds. *Inter Noise 2010*
- [3] Doi. T, Iwanaga, K, Naka. Y. Experimental approach on transmission of low-frequency sound into a buliding. *Inter Noise 2014*
- [4] Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger,S. (1959) Theory of plate and shells (2nd ed.). McGraw-Hill, NewYork.
- [5] 広沢邦一, 藤原恭司, 山川啓介 回折伝搬音に対する建築物窓面の遮音性能に関する研究, 日本音響学会誌, Vol.56, No.5, pp.324-333, 2000.
- [6] 土肥哲哉, 加来治郎, 可搬型低周波音発生装置の開発, 日本音響学会講演論文集, pp. 955-956, 2010.9.
- [7] 土肥哲哉, 中右介, 家屋内外における低周波音の音圧レベル分布 -低周波音発生装置と模擬家屋を用いたフィールド実験-, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2012-26.
- [8] 土肥哲哉, 超低周波音の建物内外音圧レベル分布 -超低周波音発生装置を用いたフィールド試験-, 日本音響学会誌, Vol.70, No.11, pp.593-598, 2014.
- [9] 落合博明, 低周波音の評価, 騒音制御, Vol.17, No.6, pp.13-16, 1993.
- [10] 落合博明, 田矢晃一, 低周波音による建具のがたつき始める音圧レベルについて, 騒音制御, Vol.26, No.2, pp.120-128, 2002.4.
- [11] 落合博明, 牧野康一, 低周波音の家屋内外レベル差の測定, 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-2004-37.
- [12] 井上尚久, 音響振動連成解析による積層型音響材料の部材性能予測に関する研究, 東京大学博士論文, 2015.
- [13] 橋本梯, 低周波音の家屋内外伝搬に関する数値解析, 東京大学修士論文, 2016.
- [14] 加美梢, 低周波音の家屋内外伝搬に関する縮尺模型実験, 東京大学修士論文, 2017.
- [15] 加美梢, 井上尚久, 佐久間哲哉, 低周波音の家屋内外伝搬に関する実測と数値解析の比較-外壁質量及び減衰の影響-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 40095, pp.317-318, 2016.
- [16] 加美梢, 井上尚久, 佐久間哲哉, 低周波音の家屋内外伝搬に関する縮尺模型実験, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, 2-4-10, pp.257-258, 2016.

- [17] 橋本梯, 井上尚久, 佐久間哲哉, 土肥哲也, 低周波音の家屋遮音性能に関する研究-縮尺模型実験による外壁質量の影響の検討-, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集,1-3-8,pp.857-858,2017.
- [18] 前川純一, 森本政之, 阪上公博, 建築・環境音響学 第三版. 共立出版, 2000.
- [19] 環境庁, 昭和 52 年度低周波空気振動等実態調査 (低周波空気振動の家屋等に及ぼす影響の研究) 報告書, 1977.
- [20] 環境庁大気保全局, 低周波空気振動等実態調査報告書 -低周波空気振動の実態と調査-, 1984.
- [21] 環境庁大気保全局, 低周波音の測定方法に関するマニュアル, 2000.
- [22] 環境省環境管理局大気生活環境室, 低周波音防止対策事例集, 2002.
- [23] 環境省環境管理局大気生活環境室, 低周波音問題対応のための手引書, 2004.
- [24] 環境省水・大気環境大気生活環境局, よくわかる低周波音, 2007.
- [25] 環境省, 平成 27 年度騒音規制法等施工状況調査の結界について, 2017.
- [26] 社団法人 日本冷凍空調工業会 ヒートポンプ給湯機委員会, 騒音防止を考えた 家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック, 2011.
- [27] 日本建築学会, 住宅の設備機器を対象とした低周波領域の音と振動問題への対応資料, 2010.
- [28] 消費者庁 消費者安全調査委員会, 家庭用ヒートポンプ給湯機から生じる運転音・振動等により不眠等の健康上の症状が発生したとの申出事案. 2014.
- [29] 松本浩司, 家庭用ヒートポンプ給湯機から生じる運転音・振動により不眠等の健康症状が発生したとの申出事案 -消費者安全調査委員会報告書の概要-, 日本騒音制御工学会講演論文集, pp.5-8, 2015.4
- [30] JIS C 9220: 2011 「家庭用ヒートポンプ給湯機」.
- [31] JIS A 5406: 2010 「建築用コンクリートブロック」.
- [32] 国土交通省, 住宅経済関連データ:一住宅当たり平均述べ床面積の都道府県比較, 平成 27 年度.

謝辞

本論文は、筆者が東京大学 大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻修士課程において、同専攻の佐久間哲哉准教授の指導のもとに行った研究をまとめたものであります。佐久間先生には本研究に取り組むにあたって、物事に対する考え方や姿勢、文章の書き方や適切な言葉遣い等あらゆる面でご指導して頂きました。また、筆者の知識不足にも終始的確な指導を頂き、深く感謝致します。

副指導教員である同専攻の佐藤淳准教授には、普段見落としがちな視点からご助言を頂きました。ここに感謝申し上げます。

同専攻特任研究員の井上尚久博士には音響学の基礎から、技術面の補助、文章作成、発表練習等に対して日々ご指導を賜りました。筆者の至らない点が多くありましたが、厳しくも的確なご指導により正して頂きました。ご指導無しには研究を進められることが出来なかったと思います。さらに研究室旅行や様々な行事で楽しく充実した研究室生活を過ごすことができ、無事に本論文を執筆することができました。心から感謝致します。

研究室の先輩であります江田和司さん、石川聡史さん、會田祐さんには短い間でしたが楽しい時間を過ごさせて頂きました。

先輩である加美梢さん、藤浪南夏子さん、LIMESA Richard Arthur Jeremia さんには身近な存在として様々なことを教えて頂きました。後輩の坂本栞さん、谷野葵さん、堤遼さん、西川宏作さん、松井温子さん、兪凡さんとは研究室生活の中で様々な思い出を共有できたことを大変嬉しく思います。研究生の孔敬受さん、陳業勲さんとは、短い間でしたが楽しい時間を過ごさせて頂きました。

さらに先輩である劉金雨さんには、研究を進める中で多くのご協力を頂きました。深く感謝申し上げます。さらに沢山の思い出を共有できた事を大変嬉しく思います。

そして多くの時間を共有した同期である駒井彩乃さん、坂吉佑太さんとは2年間事あるごとに助け合っ
て過ごしてきました。研究を進める中で躓く事もありましたが、お二人の存在が大きな支えとなっていた事は数え切れません。本当にありがとうございました。出会えたことに感謝申し上げると共に、新天地でのご活躍をお祈り致しております。

最後になりましたが、筆者の長い学生生活を暖かく見守り、支えてくださった家族に多大なる感謝の意を表します。

2018年1月22日

角谷 純平

発表論文一覧

■修士論文梗概

■本研究に関する発表論文

1. 角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉, ”家屋周辺における低周波音伝搬の数値解析 -外構塀の影響”, 日本建築学会研究発表会講演論文集, 40132, pp.275-276, 2017.
2. 角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲, ”家屋周辺における低周波音伝搬の数値解析 -音源と外構塀の配置の検討”, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, 1-4-24, 2017.9.
3. 角谷純平 井上尚久, 佐久間哲哉, ”家庭用設備機器からの低周波音屋外伝搬の数値解析 -外構塀の影響検証”, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, 2-3-05, pp.209-212, 2017.
4. 角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲, ”家庭用設備機器からの低周波音伝搬の数値解析 -隣戸と外構塀の配置の影響”, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, 2-2-3, 2017.3.

家庭用設備機器の低周波音放射及び屋外伝搬に関する研究

Study on the propagation and radiation of low-frequency noise
from household equipment

学籍番号 47-166729
氏名 角谷 純平 (Kadotani, Jumpei)
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1 はじめに

1.1 背景

近年、100 Hz 以下の音を指す低周波音の苦情件数は増加傾向にあり社会問題になっている。具体的には、戸や窓の揺れやがたつきといった「物理的現象」や、人に不快感や圧迫感をもたらす「感覚的現象」といった影響がある。その騒音源である家庭用ヒートポンプ給湯機は 2000 年代から広く普及され始め、低周波音の苦情がより顕在化してきた。その家庭用設備機器による騒音対策の一例として、“家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック”¹⁾がある。ここでは、家屋・音源・塀の幾何学的関係と遮音効果に関する一般的知見が整理されているが、波動性が顕著となる低周波領域において、塀設置が音場に及ぼす影響は不明な点が多い。

1.2 目的

以上の背景を踏まえて、本研究では家庭用設備機器から発生する低周波音を対象に屋外側対策の伝搬現象把握することを目的とし、数値解析において外構塀の影響、隣戸の影響について観察する。本研究から得た知見から低周波音による物理現象を把握し、予測・制御への一助となることを目指す。

2 研究手法概要

2.1 検討対象

半自由空間上に単純な形状の家屋が存在し、その近傍に定常的な低周波音を発生する設備機器が設置されている状況を想定する。

2.2 数値解析手法

低周波音の波動的な現象を考慮する為、波動音響解析の有限要素法 (FEM : Finite Element Method) を用いた定常音場解析を行う。有限要素法は領域全体を節点と要素に分割し、要素間の応力や変位を連立させて解く数値解析手法である。尚、有限要素法において屋外音場のような開領域を模擬するために、人工吸音層 (Perfectly Matched Layer) を設定し領域を打ち切り解析した (図 1)。

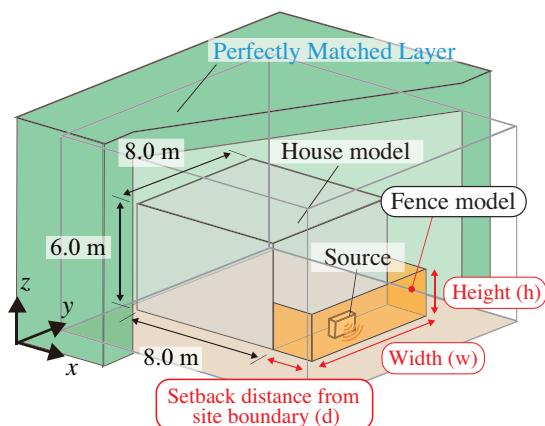


Fig. 1 Numerical model of a sound field around house

3 外構塀と隣戸の影響に関する検討

3.1 外構塀の影響

解析モデル 家屋は図1に示すように8 m × 8 m × 6 mの一般的な2階建ての戸建住宅を想定し、外壁を剛面としてモデル化した。音源はヒートポンプユニットを模擬した直方体(0.3 m × 0.8 m × 0.7 m)を家屋中央に設置し、外側一面に振動速度1 m/sを与えた。塀はJIS A 5406²⁾の建築用コンクリートブロックC種(厚さ0.15 m)を想定し、高さ(h)、外壁後退距離(d)、幅(w)を表1の条件で設定した。塀は正面と両側面に配置しているものとする。

評価方法 各条件における音源面の放射効率を算出した。

3.1.1 解析結果

図2に各条件における音源の放射効率を示す。図中に、塀内y方向の軸モードの固有周波数を参考値として示す。

図2(a)より全条件で概ね塀内の固有周波数付近でピーク・ディップが生じているように見える。しかし第1のピークについては音圧分布を別途確認したところ塀内では一様に分布していた。そのため塀内の空気をバネ、上方開口部の空気質量による鉛直方向の共振によるものと考えられる。一方、

第1のピーク以降のピーク・ディップについて、塀内でy軸方向の2次4次モードに対応して生じていることがわかる。ここでは固有周波数前後で音源面の音圧位相が変化するため、同次でのピーク・ディップが形成されたものと考えられる。さらに音源はモードの節にあたる位置に設置しているため1次3次の奇数モードに対応したピークは励起されていない。

塀の高さの影響 80 Hz付近を境目に周波数特性が変化しており、80 Hz以下では塀が高くなるにつれてピークが低域側にシフトし、80 Hz以上では同様の周波数特性が見られた。

外壁後退距離の影響 概ね両条件とも塀の高さの条件と同様の周波数特性である。外壁後退距離が1 mの条件において、20 Hz以上の全周波数帯域において増加が見られた。剛な反射面である塀では、音源の放射面が塀に近いほど放射効率は上昇すると考えられる。

Table. 1 Conditions of fence

Width of fence	w = 4.0, 8.0 [m]
Height of fence	h = 1.06, 1.63, 2.20 [m]
Setback distance from site boundary	d = 1.0, 2.0 [m]

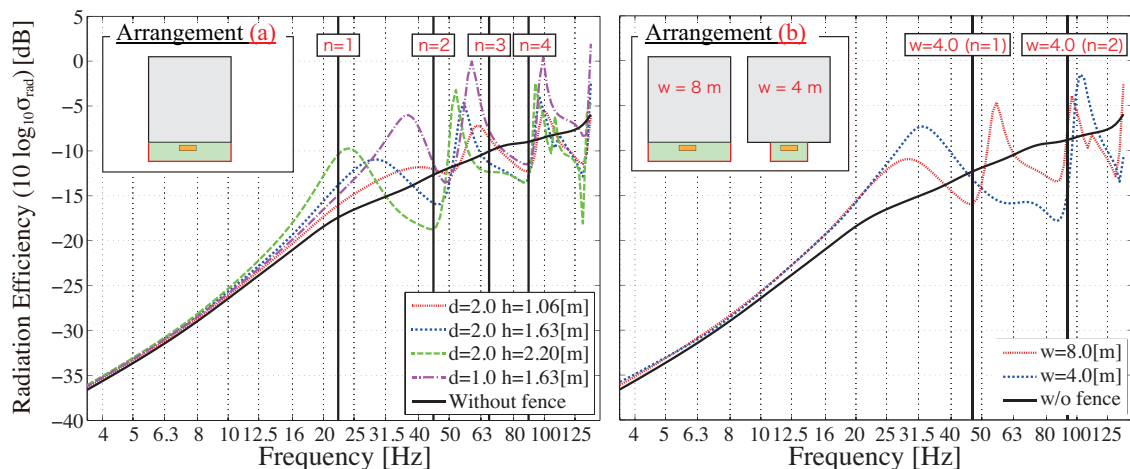


Fig.2 Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of fence

塀の幅の影響 (b)より塀幅 4 m, 8 m ともに顕著なピーク・ディップが生じており、塀内の音場モードに起因しているものと考えられる。音圧分布から確認すると、第 1 のピークやそれ以降のピーク・ディップは前述したように鉛直方向のバネマス共振系と塀内長手方向の軸モードに起因して生じていることがわかる。しかし塀幅を 4 m にすることでピーク・ディップの数が減少している。これは 8 m に比べて塀幅が狭く、塀内長手方向の固有周波数が高域側にシフトしたためと考えられる。

3.2 隣戸の影響

解析モデル 隣戸の影響を検討するため、前節での家屋モデル(8 m×8 m×6 m)を対面させる配置に設定し戸建住宅が 2 棟存在する状況を想定した(図 3)。音源は前節と同様のモデルを設定し、塀の条件として高さ 1.63 m、外壁後退距離 2 m に設定した。塀の配置についても同様に Type A(正面と両側面), Type B(正面のみ), Type C(正面と片側面)の 3 条件を考慮した(図 3)。また隣戸間隔 L については 2 m と 4 m の 2 条件に設定した。

評価方法 各条件における音源面の放射効率及び音源側の隣戸壁面(断面 I)の平均音圧レベルを算出した。

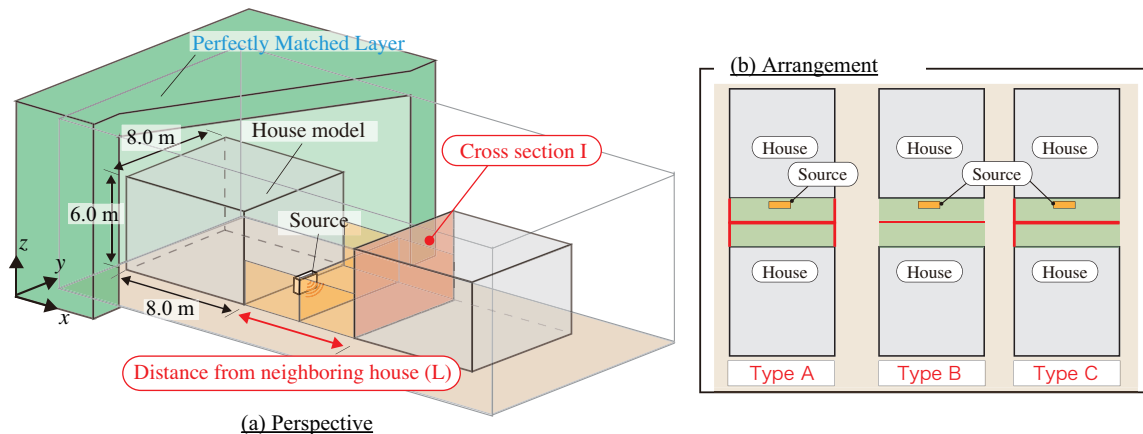


Fig.3 Numerical model of a sound field around house ; (a) perspective, (b) arrangement

3.2.1 解析結果

■音源面の放射効率

図 4 に各条件における音源面の放射効率を示す。図中、隣戸間隔(L)及び塀内長手方向の固有周波数(4 m)を併せて示す。

(c)外構塀なし 隣戸間隔によらず 20 Hz 付近で最初のピークが生じている。この周波数付近の音圧は一様に分布していたため、隣戸間の空気バネと上方・側方開口部の空気質量による共振系によるものと考えられる。隣戸間隔 4 m では家屋幅(y 軸)方向の軸モードによる鋭いピークが 50 Hz 付近で生じているが、50 Hz 以上では隣戸間隔によらず、放射効率への影響は比較的小さいことがわかる。

(d)外構塀あり 先ず 20 Hz 付近のピークは塀の影響を殆ど受けないことがわかる。次に全条件で 31.5 Hz 付近に鋭いピークが生じているが、両側の塀内で音圧が一様に分布しており、さらに音圧位相が反転していることを確認した。そのため塀内及びその上方空気を介した連成共鳴が生じたものと考えられる。それ以上の周波数では Type A,B,C ともに概ね塀の長手方向軸モードの固有周波数付近でピーク・ディップが生じている。尚、Type A では奇数モード、Type

B では偶数モードで節と音源の位置が一致しモードが励起されないものと考えられる。

■隣戸壁面の平均音圧レベル差

図 5 に断面 I における隣戸設置前後の平均音圧レベル差 (c), 隣戸間への外構塀設置前後の平均音圧レベル差 (d)を示す。尚, (c) には音圧倍増に相当する +6 dB の線を併記する。

(c) 隣戸の影響 隣戸設置によって音圧レベルは全周波数で上昇しているが, 上昇量が 6 dB を上回る周波数は隣戸間隔によって変化することがわかる。31.5 Hz 以下では隣戸間隔が狭い方が音圧レベルは高いのに対して, それ以上の周波数では隣戸対向壁間のモードの影響により, 放射効率及び音圧のピークが隣戸間隔ごとに変化していると考えられる。

(d) 外構塀の影響 全条件において 31.5 Hz 付近で音圧レベルの上昇が見られる。これは放射効率の結果とも対応することから, 隣接する塀内空気の連成共鳴によるものと考えられる。50 Hz 以上の帯域では概ね塀設置前に比べて最大 10 dB の低下が見られた。これは塀内のモードにより放射効率が低下するとともに, 塀内からの放射指向特性が生じたことが一因と考えられる。

4 終わりに

本研究では, 家屋近傍に設置された家庭用設備機器から発生する低周波音を対象として, 屋外音場における外構塀や隣戸の影響を考察した。音源面の放射効率や隣戸外壁面の音圧レベルは塀内の音場モードや隣戸対向壁間のモードに影響を強く受けることが示された。

参考文献

- [1] 日本冷凍空調工業会, 家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック, 2011
- [2] JIS A 5406 “建築用コンクリートブロック”

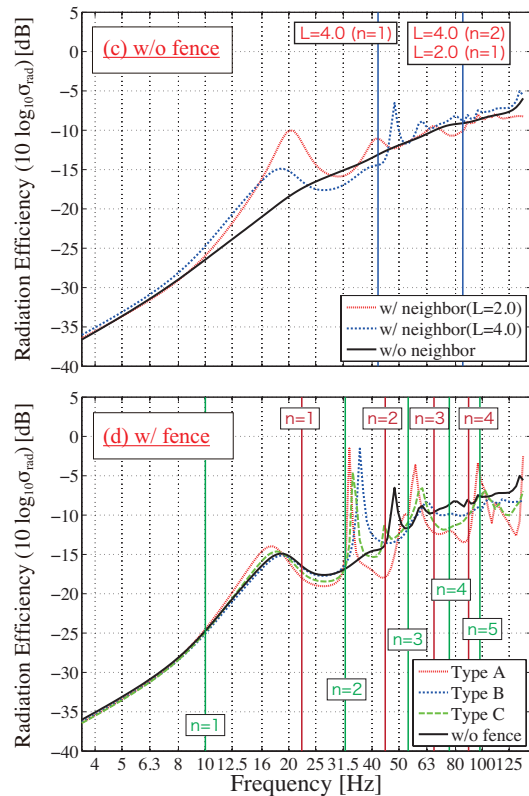


Fig.4 Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of house and fence

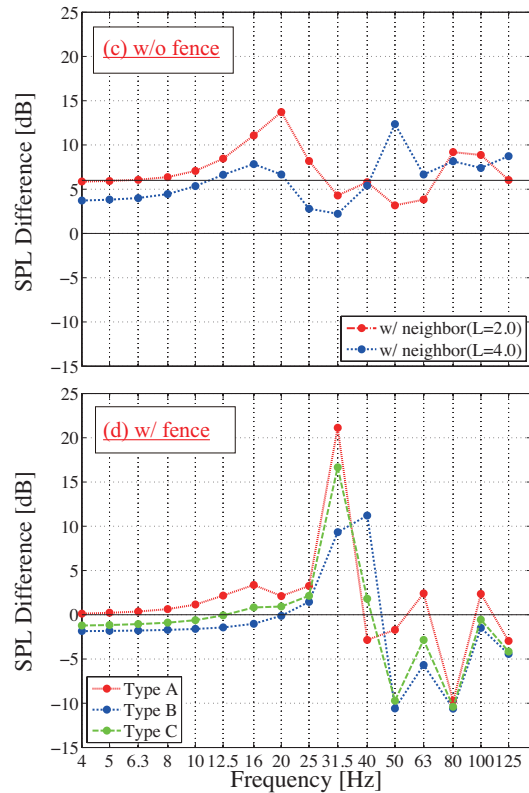


Fig.5 Average sound pressure level difference of the neighborhood front surface for a variety of arrangement of house and fence

家屋周辺における低周波音伝搬の数値解析 –外構塀の影響–

正会員 ○角谷純平*
 同 井上尚久**
 同 佐久間哲哉***

低周波音 屋外伝搬 数値解析
 塀 家屋

1. はじめに

近年、戸建住宅周囲における、室外空調機、給湯機等の設備機器による騒音問題が顕在化してきた。その伝搬系対策の一例として、日本冷凍空調工業会による騒音等防止を考えた「家庭用ヒートポンプ給湯器の据付けガイドブック」¹⁾では、家屋・音源・塀の幾何学的関係と遮音効果に関する一般的知見が整理されている。一方、波動性が顕著となる低周波領域において、塀設置が音場に及ぼす影響は不明な点が多い。

本報では、設備機器等から発生する低周波音を対象とし、有限要素法を用いた定常音場解析を行い、塀の設置前後での音圧レベル差（挿入損失）及び音源の放射効率の変化を観察した結果を報告する。

2. 解析概要

音源・家屋・塀の設定 解析条件の概要を図1に示す。家屋は8 m×8 m×6 mの一般的な2階建ての戸建住宅を想定し、外壁を剛面としてモデル化した。音源として、家庭用ヒートポンプユニットを模擬した直方体を家屋正面に設置し、外側の一面に振動速度1 m/sを与えた(図1(a))。塀については JIS A 5406²⁾による建築用コンクリートブロックC種（厚さ0.15 m）を想定し、高さ(h)・外壁後退距離(d)を表1のように設定した。また、塀の配置については Type A(前及び左右面)及び Type B(前面のみ)の2条件(図1(b))を考慮した。

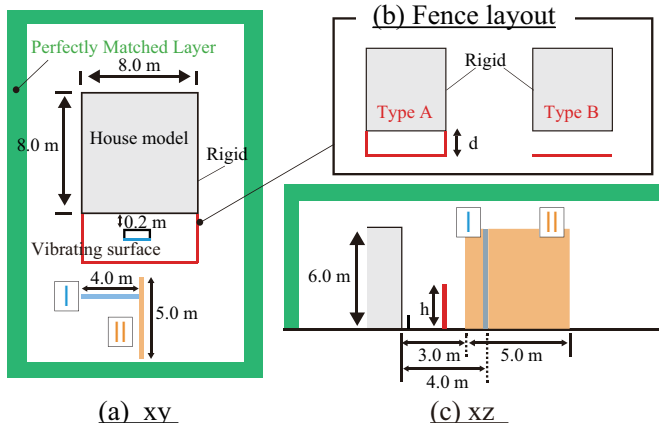


Fig. 1 Numerical model of a field around a house.

解析条件 解析は有限要素法を用いて行った。音場は四面体二次要素、最大辺が解析波長の1/8以下になるように離散化した。屋外音場を模擬するため人工吸音層（Perfectly Matched Layer）を設定し、定常解析を行った。

評価方法 塀設置前後の断面 I, II (図1(c))における音圧レベル差（挿入損失）を算出した。また、各条件で音源面の放射効率を算出した。

3. 解析結果

図2に各条件での放射効率、図3に一般にヒートポンプの卓越周波数となる40, 80 Hzにおける挿入損失の分布の解析結果を示す。

3.1. 塀の高さの影響

Type A, B いずれも80 Hz以下で塀が高くなるにつれて放射効率のピークが低周波数側にシフトする傾向が見られる。一方、80 Hz以上ではほぼ同様の周波数特性が見られる。ただし、Type Aについては塀が高いほどピーク・ディップが顕著である。Type Aに比べ、Type Bの放射効率は塀なしからの変化が比較的小さく、塀高さの変化による変動も小さい。

Type Aの40 Hzの放射効率に目すると高さ1.06 mでは塀設置前より2 dB程度増加し、2.20 mでは5 dB程度も減少し、比較的大きな影響があると言える。挿入損失については、特に断面IIでType A, B間で分布の変化は小さいものの、絶対値は放射効率に応じて変化し、高さによって挿入損失が負の場合も見られる。一方、80 HzにおいてはType A, Bともに塀の高さによる放射効率の変化は小さい。しかし、波長が40 Hzに比べ短くなるため、挿入損失の分布については変化が見られ、塀が高くなるにつれ挿入損失の大きくなる範囲が拡大した。

Table 1 Conditions of fences.

Height of fence	h = 1.06, 1.63, 2.20 [m]
Distance from house	d = 1.0, 2.0 [m]

3.2. 外壁後退距離

Type A, B いずれも外壁後退距離が 1.0 m となることで、20 Hz 以降の全周波数帯域において放射効率が增加している。特に Type B については全周波数帯域で放射効率が塀設置前より増加している。剛な反射面である塀では、音源の放射面が塀に近いほど放射効率は上昇するものと考えられる。音源に近接して塀を設置することで、幾何的に音源からの遮蔽領域は広がるが、逆効果として放射効率が上昇しうることには留意が必要と言える。さらに 40, 80 Hz における挿入損失についても、1.0 m では塀設置前に対して悪化する傾向である。

4. おわりに

本報では、設備機器等から発生する低周波音伝搬において、外構塀の影響に関する数値解析を行った。低音域では塀設置により逆効果となる場合があり、音源の放射効率の変化に十分留意する必要が示唆された。塀が家屋正面から側方まで配置された囲い型の場合では、放射効率が周波数によって大きく変動するため、このような特性に着目した対策の考案が今後の課題である。

参考文献

- 1) 日本冷凍空調工業会, 家庭用ヒートポンプ給湯器の据付けガイドブック, 2011
- 2) JIS A 5406 ” 建築用コンクリートブロック ”

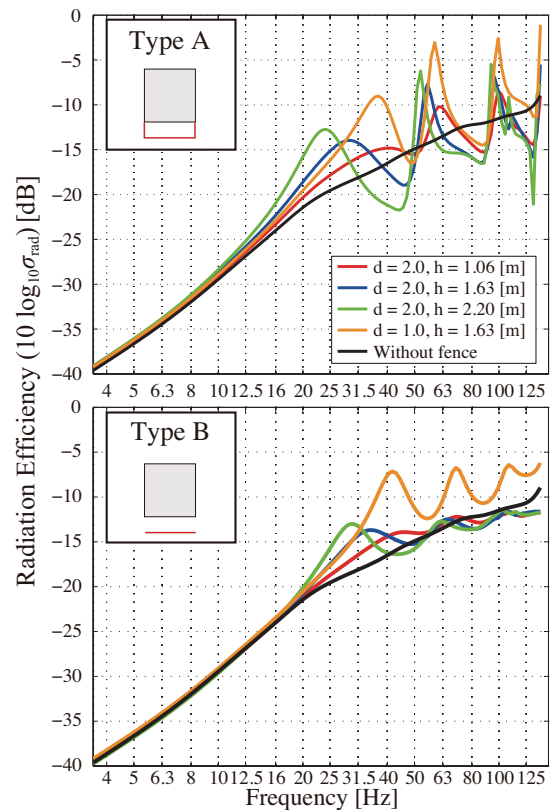


Fig. 2 Radiation efficiency of the source calculated for each condition of fence.

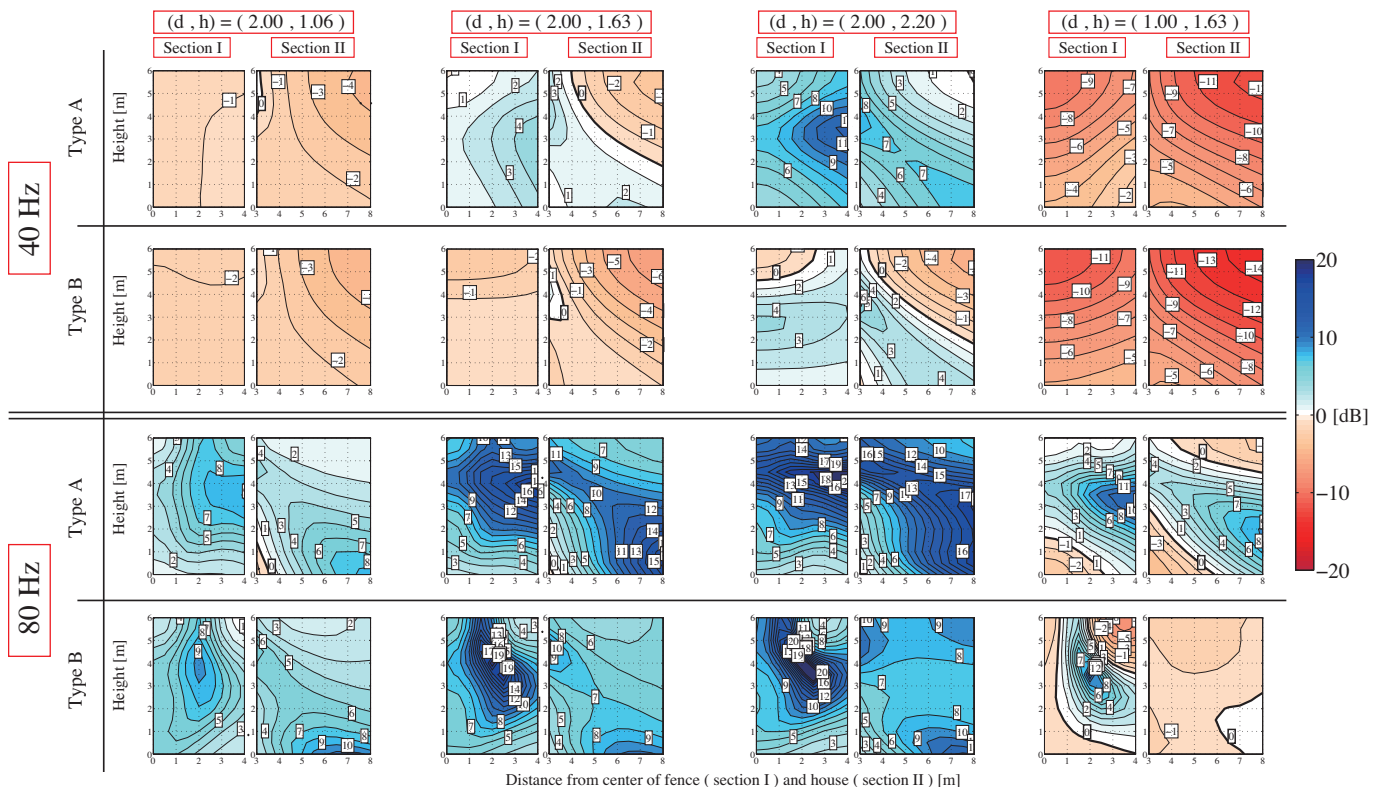


Fig.3 Distribution of the insertion loss on the Section I and II at (a) 40 Hz and (b) 80 Hz.

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程
 ** 同 特任研究員・博士 (環境学)
 *** 同 准教授・博士 (工学)

* Grad. Student, Grad. Sch. of Frontier Sciences, Univ. of Tokyo
 ** Project Researcher, ditto, Dr. Environ.
 *** Assoc. Prof, ditto, Dr. Eng.

家屋周辺における低周波音伝搬の数値解析 -音源と外構塀の配置の影響-

☆角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉 (東大・新領域)

1 はじめに

筆者らは家屋近傍の設備機器から発生する低周波音を対象とした屋外伝搬の研究を進めている。既報[3]では外構塀の高さと配置について検討し、それらが音源面の放射効率に影響することを確認した。本報では、音源と外構塀の位置関係の影響に関して数値解析による検討を行った。塀の設置前後での音圧レベル差(挿入損失)及び音源の放射効率の変化を観察した結果を報告する。

2 解析概要

音源・家屋・塀の設定 解析条件の概要を図1に示す。家屋は8 m×8 m×6 mの一般的な2階建ての戸建住宅を想定し、外壁を剛面としてモデル化した。音源は家庭用ヒートポンプユニットを模擬した直方体(0.3 m×0.8 m×0.7 m)を家屋中央と端部に設置(図1(b))し、外側一面に振動速度1 m/sを与えた。塀はJIS A 5406²⁾の建築用コンクリートブロックC種(厚さ0.15 m)を想定し、高さ2.2 m、外壁後退距離2.0 mとした。塀の配置はType A1,2(三面)及びType B1,2(前面のみ)の2条件を考慮した。

解析条件 解析には有限要素法を用い、四面体二次要素、最大辺が解析波長の1/8以下と

して空間を離散化した。屋外音場を模擬するため人工吸音層(Perfectly Matched Layer)を設定し、定常解析を行った。

評価方法 各条件で塀設置前後の家屋中央断面(図1(c))における音圧レベル差(挿入損失)および音源面の放射効率を算出した。

3 解析結果

3.1 音源面の放射効率

図2に各条件における音源面の放射効率を示す。図中、塀内長手方向の両端閉・開管の固有周波数を参考値として示す。また、Type A1,2(塀三面)におけるピーク・ディップ周波数の音圧分布を図3に示す。

全条件において概ね塀内の固有周波数付近でピーク・ディップが生じているように見える。しかし、第1ピークの図3(I)では塀内の音圧分布は一律であり、塀内の空気バネと上方開口部のリアクタンスによる鉛直方向の共振系と考えられる。一方、第2,3ピークの(II),(IV)では塀内1,2次モードが生じているが、音源が中央の場合は1次モードに対応するピークは生じていない。また、ディップに対応する(III)では2次モードが見られ、固有周波数前後で音源面の音圧位相が反転することにより、ピーク・ディップが形成されるものと考えられる。

なお、Type B1,2(塀前面)では、塀内両端の開放によりモードの位相が変化し、概ね塀三面に対して放射効率のピーク・ディップが反転するとともに、かなり鈍化することがわかる。

3.2 屋外での挿入損失

図4にType A1,2(塀三面)における挿入損失分布として、一般的なヒートポンプの卓越周波数である40 Hzおよび80 Hzの1/3オクターブバンド値を示す。

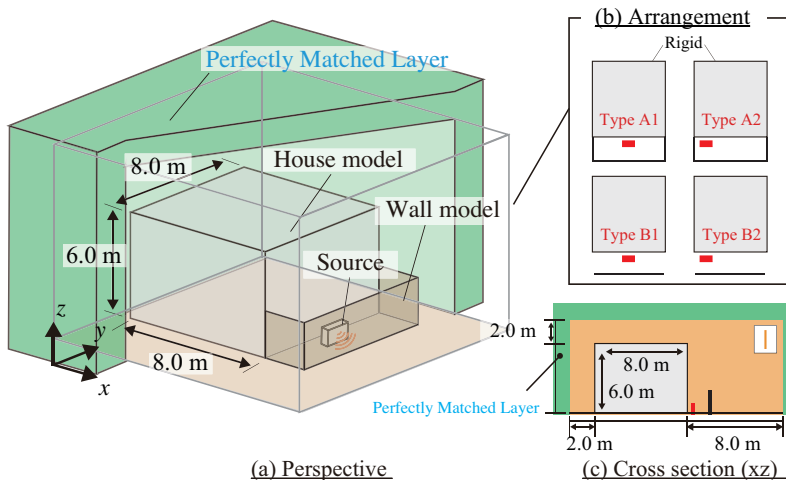


Fig. 1 Numerical model of a sound field around a house

* Numerical analysis of low-frequency noise propagation around a house – Influence of arrangement of sound source and fences, by KADOTANI Jumpei, INOUE Naohisa and SAKUMA Tetsuya(Univ of Tokyo).

40 Hz の放射効率では Type A1 (音源中央) が Type A2 (音源端部) より 8 dB 程度小さいことを反映し、全体的に前者の方が挿入損失は大きい。特に音源端部の場合、塀内の上方にかけて挿入損失が負となり、塀後方では音源中央の方が 5 dB 程度大きい挿入損失が得られている。80Hz では両方の音源位置において放射効率は塀無しに対して若干低下し、塀後方で 10 dB 以上の挿入損失が得られることが確認された。

4 おわりに

本報では、家屋近傍音源の低周波音の放射効率は塀内の音場モードの影響を強く受けることが示され、モードの節への音源配置により塀の挿入損失向上の可能性が示唆された。今後は隣家の配置の影響を検討する予定である。

参考文献

- [1] 日本冷凍空調工業会, 家庭用ヒートポンプ給湯器の据付けガイドブック, 2011
- [2] JIS A 5406 "建築用コンクリートブロック"
- [3] 角谷他, AIJ 大会梗概集, 2017

謝辞 本研究は科研費(No. 17H03350)の助成を受けて行われた。

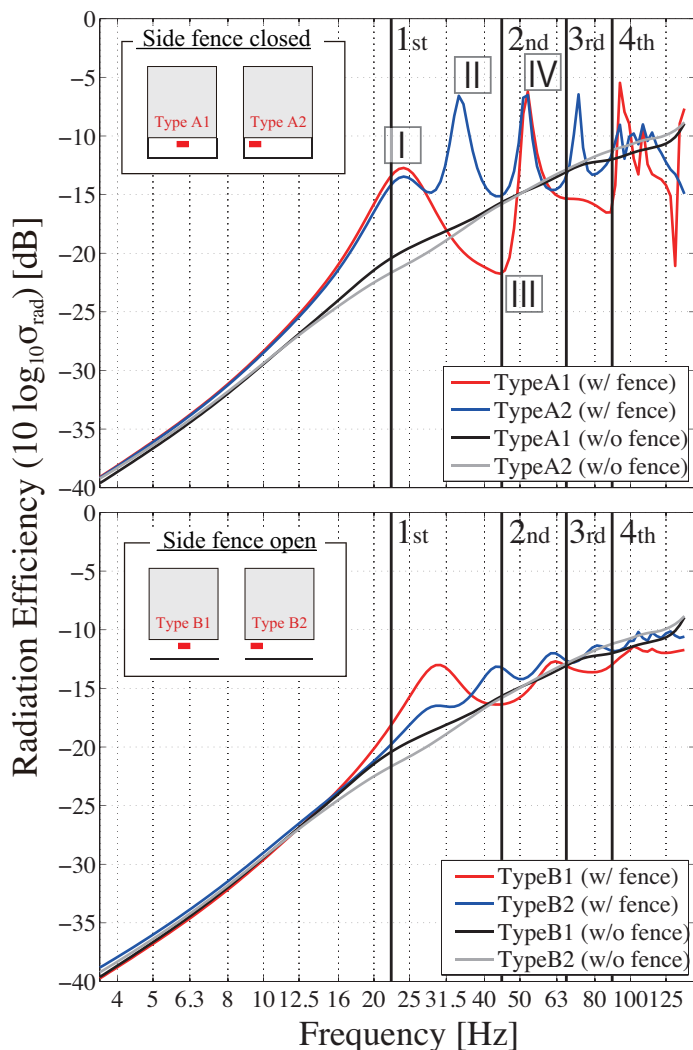


Fig. 2 Radiation efficiency of the source for different arrangements of source and fence.

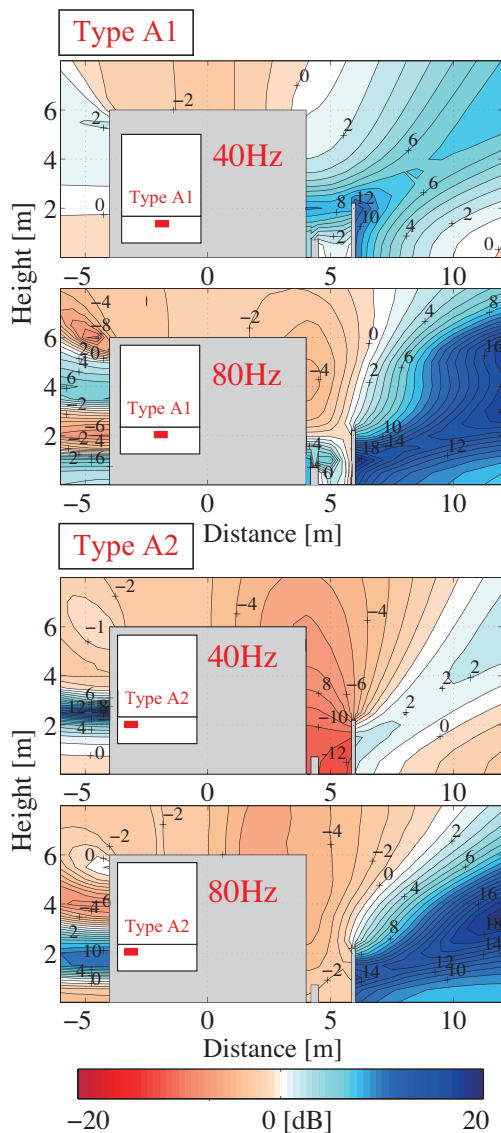


Fig. 4 Distributions of insertion loss on the vertical section at 40 Hz and 80 Hz (1/3 oct.).

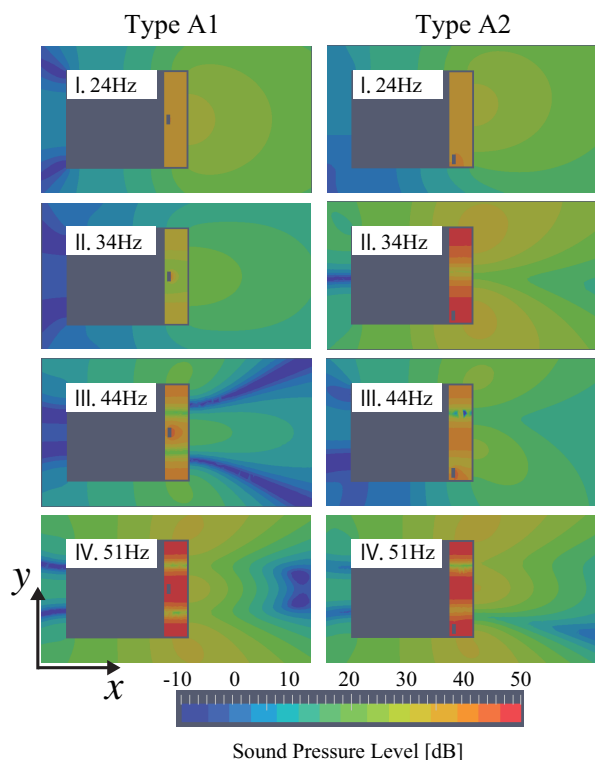


Fig. 3 Distributions of sound pressure level on the ground for Types A1 and A2.

家庭用設備機器からの低周波音屋外伝搬の数値解析
 -外構塀の影響検証-

◎角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉 (東大・新領域)

1. はじめに

低周波音は建具のがたつきや人に圧迫感をもたらす、波動的性質の影響が強いため、一般に遮音対策は困難である。特に近年普及している家庭用ヒートポンプ給湯器等の影響により、低周波音の苦情が増加傾向にある。筆者らは、家屋近傍の設備機器等から発生する低周波音の屋外伝搬について研究を行っている。既報[1,2]では外構塀と音源配置の影響について検討し、音源面の放射効率は外構塀内の音場モードの影響を強く受けることを確認した。本報では外構塀の範囲・高さ・奥行きを変化させて、音源の放射効率および塀の挿入損失を数値解析により検討する。

2. 解析概要

音源・家屋・塀の設定 解析条件の概要を図1に示す。家屋は8 m×8 m×6 m (H)の一般的な2階建ての戸建住宅を想定し、外壁を剛面としてモデル化した。音源は家庭用ヒートポンプユニットを模擬した直方体(0.8 m (W)×0.3 m (D)×0.7 m (H))を家屋正面に設置し、外側の一面に振動速度1 m/sを与えた。塀は

JIS A 5406[3]が規定する建築用コンクリートブロックC種(厚さ0.15 m)から構成されるものとし、塀の幅・高さ・外壁後退距離を表1のような条件に設定した。また、塀の配置についてはType A(正面及び側面)及びType B(正面のみ)の2条件を想定した。

解析条件 数値解析は有限要素法を用いて行った。音場は四面体二次要素、最大辺が解析波長の1/8以下になるように離散化した。屋外音場を模擬するため人工吸音層(Perfectly Matched Layer)を設定し、定常解析を行った。

評価方法 まず上記の各条件における音源面の音圧から放射効率を算出した。次に、3方向の断面(図4)における塀設置前後の音圧レベル差を挿入損失として算出した。

Table. 1 Conditions of fence

Width of fence	w = 4.0 , 8.0 [m]
Height of fence	h = 1.06 , 1.63 , 2.20 [m]
Distance from house	d = 1.0 , 2.0 [m]

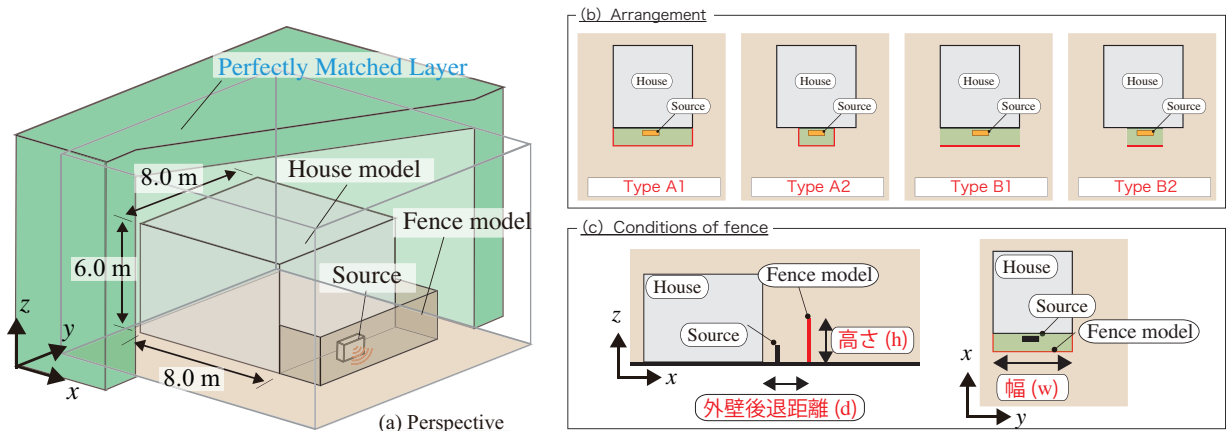


Fig. 1 Numerical model of a sound field around house

3. 解析結果および考察

3.1. 音源面の放射効率

図2に各条件における音源の放射効率を示す。図中に、塀内長手方向の軸モード（両端剛）の固有周波数を参考値として示す。また、図3に Type A1, A2 の塀高 2.2 m, 外壁後退距離 2.0 m におけるピーク及びディップ周波数の音圧分布を示す。

Type A1, A2 では顕著なピーク・ディップが生じており、塀内の音場モードに起因するものと考えられる。外壁後退距離 2.0 m では塀が高くなるにつれて放射効率のピークは上昇するとともに、低周波数側に移動する傾向にある。また、外壁後退距離 1.0 m ではピークがより顕著となり、全体的に放射効率が増加している。

Type A1, A2 の第1ピークは 40 Hz 以下のほぼ同じ周波数で生じており、図3ではともに塀

内に一様な音圧分布が見られることから、塀内の空気バネと上方開口部の空気質量による鉛直方向の共振によるものと考えられる。一方、次の第1ディップおよび第2ピークは、図3の音圧分布より、Type A1, A2 とともに塀内の2次モードに起因していることが確認できる。共振周波数前後では音源面の音圧位相が変化するため、ピーク・ディップが形成されたものと考えられる。なお、今回は音源を中央に配置したため、奇数モードに対応したピーク・ディップは生じていない。

Type A1 に比べて塀幅の狭い Type A2 では第2ピークが 100 Hz 以上となり、放射効率が低下する第1ピークとの間の周波数帯域が拡大している。なお、Type B1, B2 では、塀幅によらず放射効率のピーク・ディップは顕著に鈍化することが確認された。

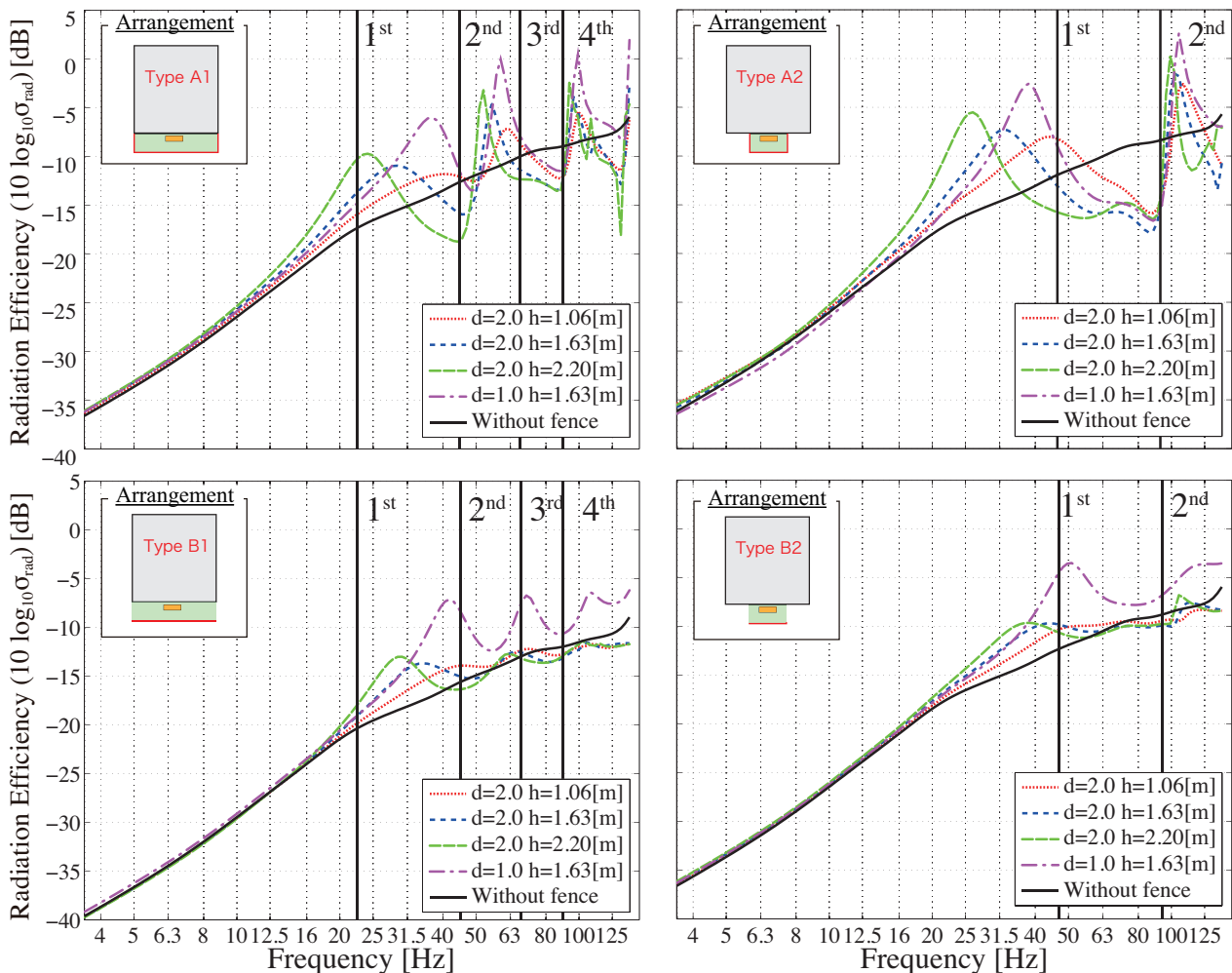


Fig. 2 Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of fence.

3.2 塀の挿入損失

図4はType A1, A2 (塀高1.63 m, 外壁後退距離2.0 m)を設置した場合の断面I, II, IIIにおける40 Hz から80 Hz の1/3オクターブバンドの挿入損失分布を示す。なお, 断面IIIは塀から外側に2 m離れた隣戸の家屋面位置を想定している。

Type A1では, 全帯域で家屋上方の挿入損失がマイナスとなり, 80 Hz 以外では家屋側方も同様に音圧レベルが上昇しているが, 80 Hz では正面の塀外側で5 dB以上の挿入損失が生じている。この挿入損失の上昇は図3に示した80 Hz 付近の放射効率の低下と塀の回折減衰の両方によるものと考えられる。

Type A2では, Type A1と同様に家屋上方において音圧レベルの上昇が見られるが, 50 Hz 以上では正面の塀外側で挿入損失がプラスとなっている。特に63 Hz および80 Hz では挿入損失が10 dB以上となっており, この低減効果はType A1より広い周波数帯域の放射効率の低下によるものと考えられる。ただし, 40 Hz ではType A1よりも全体的に音圧レベルの上昇はやや大きくなっている。

4. おわりに

本報では, 家屋近傍に設置された設備機器から発生する低周波音を対象として屋外音場に塀設置が及ぼす影響に関する数値解析を行った。側方が閉鎖された塀では塀内の音場モードにより音源の放射効率が大きく変化し, 隣戸側の音圧が増大または低下することが確認された。特に, 音源を中心として側方に塀がある場合, 鉛直方向のモードと長手方向の2次モードの固有周波数の間に放射効率の低い周波数帯域が生じるため, 塀の高さと幅の調整により1オクターブ程度で挿入損失の向上が見込まれる。ただし, 塀内, 家屋上方や側方において音圧レベルの上昇が見られた。今後は隣戸が存在する状況における外構塀の影響を検討する予定である。

参考文献

- [1] 角谷他 AIJ大会梗概集, 2017
- [2] 角谷他 音講論(秋),
- [3] JIS A 5406 “建築用コンクリートブロック”
- [4] 2017 日本冷凍空調工業会, 家庭用ヒートポンプ給湯機の据付けガイドブック, 2011

謝辞 本研究は科研費(No. 17H03350)の助成を受けて行われた

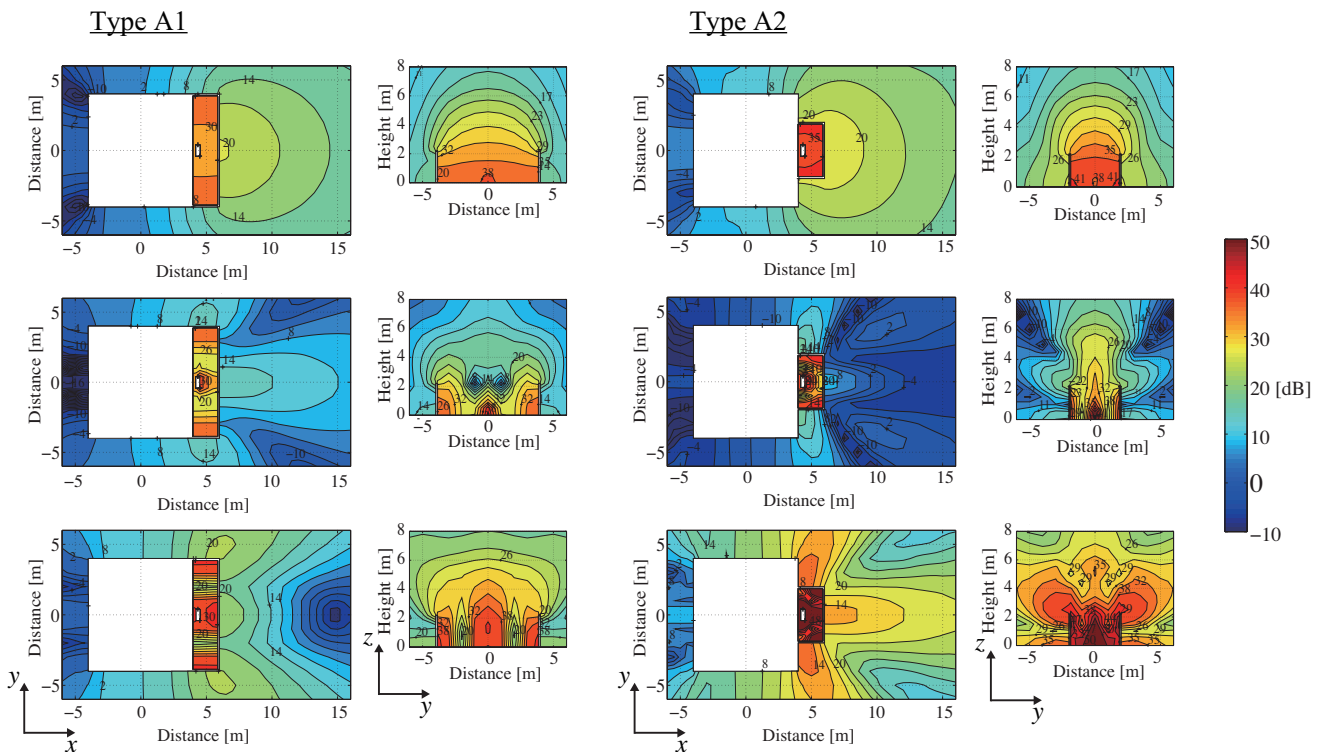


Fig. 3 Distributions of sound pressure level on the ground and inside the fence for Type A1 and A2.

家庭用設備機器からの低周波音伝搬の数値解析 - 隣戸と外構塀の配置の影響 -*

☆角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉 (東大・新領域)

1 はじめに

筆者らは家屋近傍の家庭用設備機器から発生する低周波音を対象とした屋外伝搬の研究を行ってきた。既報^[1,2,3]では音源面の放射効率には外構塀の高さ・幅と外壁後退距離が影響していることを確認した。本報では隣戸と外構塀の配置の影響に関する数値解析を行った。音源面の放射効率の変化及び隣戸と外構塀の設置前後での平均音圧レベル差の結果を報告する。

2 解析概要

音源・家屋・塀の設定 解析条件の概要を図1に示す。家屋は8 m×8 m×6 mの一般的な2階建て戸建て住宅2棟を想定し、外壁を剛壁としてモデル化した。音源は家庭用ヒートポンプユニットを模擬した直方体(0.3 m×0.8 m×0.7 m)を家屋正面に設置し、外側の一面に振動速度1 m/sを与えた。塀は厚さ0.15 m, 高さ1.63 mの剛壁とし、隣戸との中間に配置した。加えて、側方の塀の有無により、Type A (正面及び両側面)とType B (正面のみ)とType C (正面及び片側面)の3条件を設定

した。また、隣戸間隔 L については2 mと4 mの2条件に設定した。

解析条件 解析には有限要素法を用い、四面体二次要素、最大辺が解析波長の1/8以下として空間を離散化した。屋外音場を模擬するため人工吸音層を設定し、定常解析を行った。

評価方法 各条件における音源面の放射効率及び音源側の隣戸壁面上(断面I)の平均音圧レベルを算出した。

3 解析結果及び考察

3.1 音源面の放射効率

図2に各条件における音源面の放射効率を示す。図中、隣戸対向壁間及び塀内長手方向の軸モードの固有周波数を併せて示す。

(a)外構塀なし 隣戸間隔によらず20 Hz付近で最初のピークが生じている。この周波数では隣戸間で音圧がほぼ一様であり、隣戸間の空気バネと上方・側方開口部の空気質量による共振系によるものと考えられる。隣戸間隔4 mでは対向壁間1次モードの固有周波数50 Hz付近で鋭いピークが見られるが、50 Hz以上では隣戸間隔によらず隣戸の放射効率への影響は比較的小さいことが分かる。

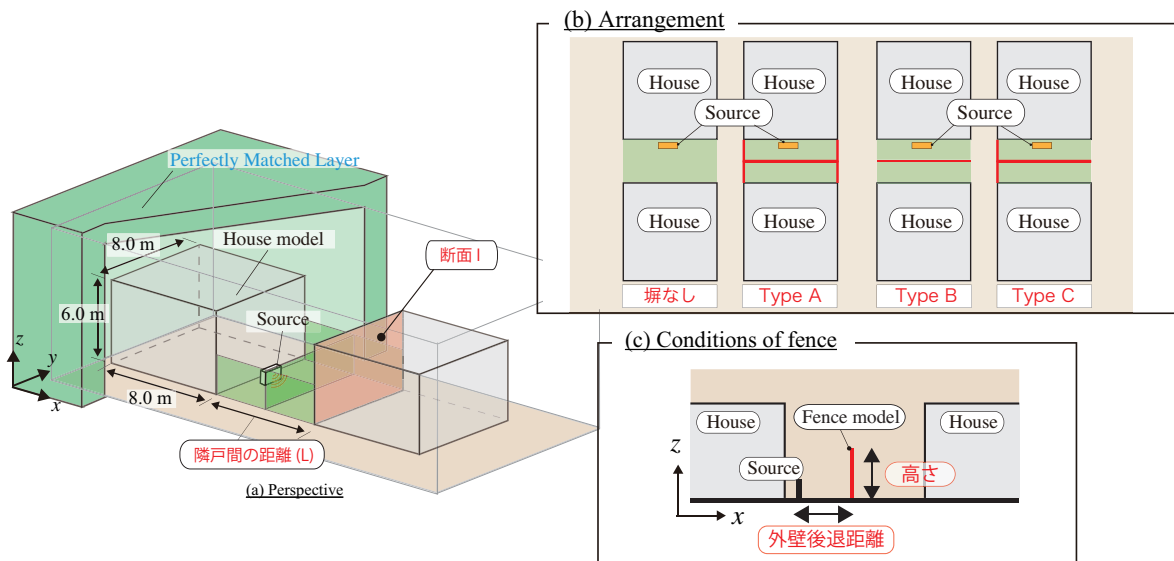


Fig.1 Numerical model of a sound field around house

* Numerical analysis on the propagation of low-frequency noise on household equipment – Effect of a neighboring house and exterior fences, by KADOTANI, Jumpei, INOUE, Naohisa and SAKUMA Tetsuya (Univ. of Tokyo).

(b)外構塀あり 先ず 20 Hz 付近のピークは塀の影響を殆ど受けないことが分かる。次に、全条件で 31.5 Hz 付近に鋭いピークが生じているが、両側の塀内で位相反転が確認されたため、塀の上部空間を介した連成共鳴が生じたものと考えられる。それ以上の周波数では、側方に塀のある Type A と Type C において概ね塀内長手方向軸モードの固有周波数付近でピーク・ディップが生じている。尚、Type A では奇数モードで節と音源の位置が一致し、モードが励起されないものと考えられる。

3.2 隣戸壁面の平均音圧レベル

図 3(a)に断面 I における隣戸設置前後の平均音圧レベル差、(b)に隣戸間への外構塀設置前後の平均音圧レベル差を示す。尚、(a)には音圧倍増に相当する+6 dB の線を併記する。

(a)隣戸の影響 隣戸設置によって音圧レベルは全周波数で上昇しているが、上昇量が 6 dB を上回る周波数は隣戸間隔によって変化することが分かる。31.5 Hz 以下では隣戸間隔の狭い方が音圧レベルは高いのに対して、それ以上の周波数では対向壁間のモードの影響により、隣戸間隔によって放射効率および音圧のピークが変化していると考えられる。

(b)外構塀の影響 全条件において 31.5 Hz 付近で音圧レベルの上昇が見られる。これは放射効率の結果とも対応することから、隣接する塀内空気の連成共鳴によるものと考えられる。50 Hz 以上の帯域では、塀設置によって音圧レベルは概ね低下しており、最大 10 dB の低下が見られる。音源近傍や塀より低い隣戸壁面では塀の遮蔽効果が多少生じたものとも考えられるが、音源側の塀内のモードにより放射効率が低下するとともに、塀内からの放射指向特性に変化が生じた可能性も考えられる。

4 おわりに

本報では、家屋近傍に設置された家庭用設備機器から発生する低周波音を対象として、隣戸と外構塀の配置の影響に関する数値解析を行った。隣戸対向壁間や外構塀により複雑なモード場が形成され、音源面の放射効率や隣戸外壁面の音圧レベルがその影響を強く受けることが示された。

参考文献

- [1] 角谷他, AIJ 梗概集, 2017
- [2] 角谷他, 音講論 (秋), 2017
- [3] 角谷他, INCE-J 講論集, 2017

[4] JIS A 5406, ”建築用コンクリートブロック”
謝辞 本研究は科研費(No.17H02250)の助成を受けて行われた。

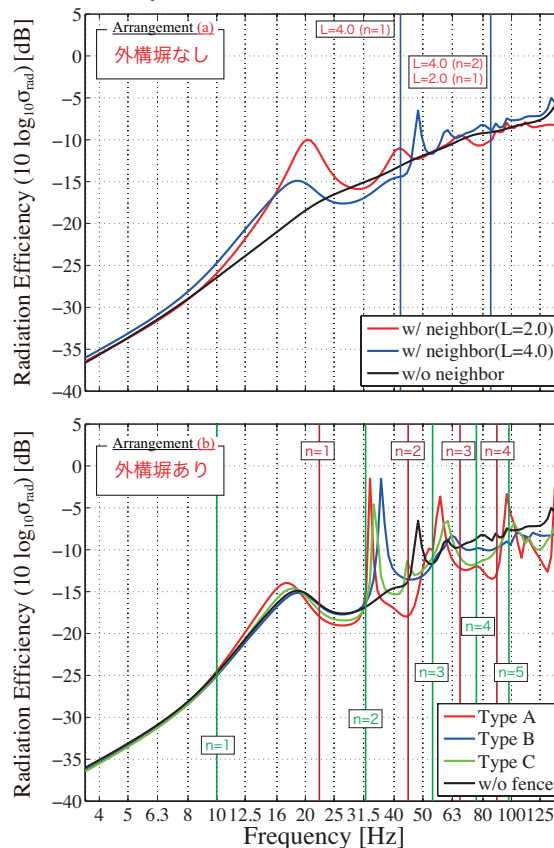


Fig.2 Radiation efficiency of the source for a variety of arrangements of house and fence

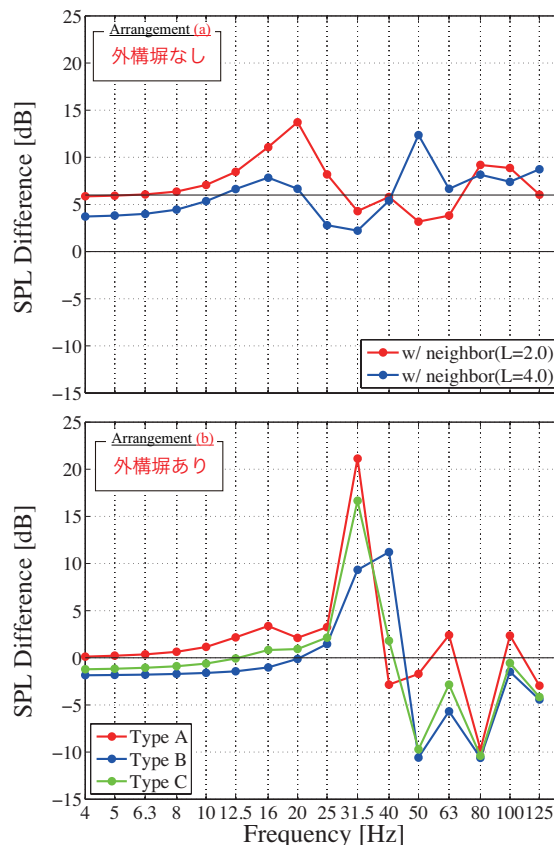


Fig.3 Average sound pressure level difference of the neighborhood front surface for a variety of arrangement of house and fence