音響解析ソフトウェアAdvance/FrontNoise/Rayのご紹介

田之上 文彦* 徳永 健一* 松原 聖**

Introduction of Advance/FrontNoise/Ray

Fumihiko Tanoue*, Ken-ichi Tokunaga* and Kiyoshi Matsubara**

当社では、有限要素法による音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の開発を行っている。有限要 素法は精度の高い解析結果を得られるが、解析領域が広くなるほど、また、周波数が高くなるほど計算 負荷が高くなるため、土木や建築分野などで求められる広大な空間における音響解析は困難であった。 当社では、広大な空間における音響解析のニーズに対応するために、幾何音響学に基づく音線法ソルバ ーAdvance/FrontNoise/Ray を新たに開発した。本稿では Advance/FrontNoise/Ray の特徴や Advance/ FrontNoise との違い、Advance/FrontNoise/Ray を用いた解析事例を紹介する。

Keywords: 音響解析、音線法、メッシュフリー、クラウド、土木分野、建築分野

1. はじめに

音響解析では、例えば有限要素法 (FEM) や有 限差分時間領域法 (FDTD) などのように、波動方 程式を基礎方程式としたソルバーが広く用いら れている。FEMやFDTDは解析精度が高いが、音 が伝播する空間すべてに適切な寸法のメッシュ が必要とされるため、解析領域が大きくなるにつ れて多くの要素や節点が必要とされる。また、解 析周波数が高いほど解像度の高いメッシュが求 められて解析規模が大きくなる。例えば図 1の国 立競技場を含む空間 (800 m×600 m×100 m) に おいて、1 kHz で周波数解析を行う場合を考えて みよう。FEM の Advance/FrontNoise で解析する場 合は音の伝播する空間に四面体メッシュを作成 する必要がある。Advance/FrontNoise では、1kHz の周波数で十分な空間分解能を得るために、およ そ1.2×10¹²の節点が必要とされる。節点の3次元 座標はそれぞれ 8 byte で表現されるため、節点の 座標情報だけでも 28.8 TB のメモリが必要とされ る。解析では節点の座標情報のほかにも要素や材

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部

2nd Computational Science and Engineering Group, AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 代表取締役社長 President, AdvanceSoft Corporation



図 1 国立競技場を含む解析領域 (800 m×600 m×100 m)のうち、600 m×600 m×100 mを可視化した図。形状は PLATEAU[1]を利用した。弊社における PLATEAU の活用については、本誌の「当社における国土交通省 PLATEAU プロジェクト活用の取り組み」[2]もご覧ください。

料の情報、さらに節点の座標情報の数倍のメモリ が計算のために必要とされるため、図 1の国立競 技場を含む空間の音響解析を有限要素法で実施 することは現実的ではない。

広大な空間の音響解析が求められる土木や建築分野では、幾何音響学に基づく音線法が広く用いられている[3]。音線法ではメッシュは不要で、計算負荷は計算する音線の数にのみ依存する。当社では、広大な空間の音響解析のニーズに応えるために、音線法ソルバーAdvance/FrontNoise/Rayを



図 2 球面波(左)と平面波(右)の概念図

開発し、音響解析ソフトウェア Advance/ FrontNoise version 6.1の一部として、2023年4月 にリリースした。本稿では、音線法の概要と、 Advance/Front Noise/Ray の特徴や Advance/Front Noise/Ray を使用した解析事例を紹介する。

2. 音線法

2.1. 音線

音の進路を示す直線を音線といい、音源から音線を出して反射伝播経路を追跡計算する手法を 音線法という。Advance/FrontNoise/Rayでは、音波 のエネルギーを持った、大きさを持たない音粒子 の運動を解析する。Version 6.1 では、媒質の温度 および密度は一様としており、障害物がない空間 では音粒子は直進する。

2.2. 音波の表現

音波には点音源から生じる球面波と、面音源か ら生じる平面波がある。球面波と平面波を音線で 表した場合の概念図を図 2 に示す。球面波では、 音源から遠くなるほど、同じ半径の球面の単位面 積を通過するエネルギーは減少する。音線法では、 音源から遠いほど同じ半径の球面の単位面積を 通過する音線が減少し、エネルギーの減少が表現 される。平面波は、減衰のない空間では減衰せず に直進する。音線法においても、平面波は、各音 線は並行を保ったまま直進する。

2.3. 境界面

境界面における反射の模式図を図 3 に示す。境 界面における音線の反射方向は、反射角 θ_r と入 射角 θ_i が等しくなる方向である。境界面に入射



する音波のエネルギーを E_i 、反射する音波のエネ ルギーを E_r 、境界面で欠損するエネルギーを E_l 、 境界面を透過する音波のエネルギーを E_t とす ると、エネルギー保存則より次式が成り立つ。

$$E_i = E_r + E_l + E_t \tag{1}$$

Version 6.1 では、境界面の透過は考慮せず、

$$E_t = 0 \tag{2}$$

である。反射率 R は入射波のエネルギー E_i に 対する反射波のエネルギー E_r の割合で表され るので、

$$R = \frac{E_r}{E_i} \tag{3}$$

となる。反射しないエネルギーはすべて境界面に 吸収されるとすると、吸音率 *α* は、

$$\alpha = 1 - R = 1 - \frac{E_r}{E_i} \tag{4}$$

となる。なお、幾何音響学では音波が持つエネル ギーのみを考えるため、境界面ではインピーダン スではなく反射率 *R* や吸音率 α を用いる。

3. Advance/FrontNoise/Ray の特徴

Advance/FrontNoise/Ray の特徴を表 1 に示す。 また、Advance/FrontNoise の特徴も示した。 Advance/FrontNoise/Ray は音線法により音の伝播 を解析する。解析領域においてメッシュは不要で あり、必要に応じて構造物の壁面などの境界面が 利用できる。Version 6.1 では、回折や散乱は考慮 していないため、回折や散乱の影響は解析できな い。計算コストは音線の数に依存するものの、 FEM や FDTD に対して計算コストは低いため、 クラウド環境でご提供している。したがって、ソ

項目	Advance/FrontNoise/Ray	Advance/FrontNoise
計算手法	音線法	有限要素法/有限差分時間領域法
想定される解析対象	巨大な構造物を含む広い領域	あまり大きくない機器や建物
		(解析周波数にも依存)
解析の種類	時間領域	周波数領域/時間領域
メッシュ	不要:必要に応じて構造物等の境界面	必要:音が伝わる空間すべて
	6	G
計算コスト	低い(音線の数に依存)	高い(節点数が多い、周波数が高いほ
		ど高負荷)
計算精度	あまり高くない	高い
	(回折、散乱は解析不可)	
ご利用環境	クラウド	ご自身の Linux やスパコン

A I AUVAILO TIULIUUSCINAY C AUVAILO TIULIUUSC VI	表	1	Advance/FrontNoise/Ray	と	Advance/FrontNoise	の特	} 徦
--	---	---	------------------------	---	--------------------	----	------------

フトウェアのインストールは不要で、お手持ちの PC 等からすぐにご利用いただくことができる。

一方、Advance/FrontNoise は波動方程式を基礎 方程式とするため、回折や散乱も計算可能で計算 精度は高い。しかし構造物を含む、音が伝播する 空間に対してメッシュを作成する必要があり、ハ ードウェアのスペックや解析規模によっては解 析が難しいことがある。

Advance/FrontNoise/RayとAdvance/FrontNoiseは 得意分野が異なり、解析対象や所望する解析結果 によってユーザーに使い分けていただくことを 想定している。回折や散乱の影響は考慮せず広大 な空間の解析を行いたい場合や音の伝播経路を 解析したい場合はAdvance/FrontNoise/Rayのご利 用を推奨し、解析精度が求められる場合は Advance/FrontNoiseのご利用を推奨する。

4. Advance/FrontNoise/Ray version 6.1 の仕様 4.1. 主な仕様

Advance/FrontNoise/Ray version 6.1の主な仕様を 表 2に示す。Version 6.1 では解析空間の密度や温 度は一様である。そのため、障害物がない空間で は、音粒子は直進する。音源は音粒子で与え、音 粒子に対して初期の座標とエネルギー、速度ベク 表 2 Advance/FrontNoise/Ray version 6.1 の主 な仕様

項目	内容
基礎方程式	音響幾何学に基づく音線法
物性值等	
密度	解析領域で一様
温度	解析領域で一様
	音粒子の座標 (m)、初期エネ
音源	ルギー (J)、速度ベクトル
	(m/s) を与える
境界条件	境界面に反射率を定義する
解析結果	時刻ごとの音粒子のエネルギ
(1)	ーと速度ベクトル
	時刻ごとに構造格子を通過し
	た音粒子のエネルギーの時間
解 析 結 果	平均値と、今まで構造格子を
(2)	通過した音粒子のエネルギー
	の和。

トルを設定する。解析領域に壁面などの境界を含 める場合は、境界面に反射率を設定することがで きる。壁面では、音線は図 3 に示したように反射 角 θ_r と入射角 θ_i が等しくなるように反射する。 解析結果は、時刻ごとの音粒子のエネルギーと 速度ベクトルが出力される。また、空間の任意の 位置に構造格子を定義することで、時刻ごとに構 造格子を通過した音粒子のエネルギーの時間平 均値と、今まで構造格子を通過した音粒子のエネ ルギーの和を評価できる。

4.2. 入出力ファイル

入力ファイルを表 3 に示す。初期音源ファイル は初期の音粒子の座標 (m)、エネルギー (J)、速度

項目	内容
	初期の音粒子の座標、エネルギ
初期音源	ー、速度ベクトルを VTK
	UnstructedGrid 形式で与える。
	解析領域の中心に点音源を設定
	する場合は自動生成することも
	できる。
	壁面をポリゴンデータで与え
境界面	\mathcal{Z}_{\circ} Standard Triangulated
	Language 形式 (.stl)、Wavefront
	形式 (.obj)、Polygon File Format
	形式 (.ply)、VTK UnstructedGrid
	形式、三角形要素のみの VTK
	UnstructedGrid 形式 (.vtk) に対
	応。
	ポスト処理をするための領域の
	範囲と解像度を、VTK
評価領域	ImageData 形式で与える。境界
	面を含む bounding box から自
	動生成することもできる。

表 3 入力ファイル

表 4 出力ファイル

項目	内容
	出力時刻における音粒子の位
主持マの八左	置、エネルギー、速度ベクトル
自松丁の万加	が VTK UnstructedGrid 形式で
	出力される。
	構造格子の評価領域が与えら
	れた場合、出力時刻における
エネルギーの	エネルギー密度と、出力時刻
評価	までのエネルギーの積算値が
	VTK ImageData 形式で出力さ
	れる。

ベクトル (m/s) の情報を VTK UnstructedGrid 形 式で与える。点音源からの球面波を音源とする場 合は、ブラウザ上で定義することもできる。解析 する空間に壁などの境界面を含む場合は、ポリゴ ンデータファイルを使用して境界面を定義する ことができる。境界面として利用できるファイル フォーマットは、Standard Triangulated Language 形 式 (.stl)、Wavefront 形式 (.obj)、Polygon File Format 形式 (.ply)、三角形要素のみの VTK UnstructedGrid 形式 (.vtk)である。VTK UnstructedGrid 形式の場 合、cell data に reflectivity という変数を定義する ことで、三角形要素に反射率を与えることができ る。任意の空間におけるエネルギーを評価したい 場合、評価領域を VTK ImageData 形式の構造格子 で定義できる。評価領域では、ある時刻における 格子ごとのエネルギーやある時刻までのエネル ギーの総和を評価できる。

出力ファイルを表 4 に示す。音粒子の分布は時 刻ごとに出力され、その時刻の音粒子の位置 (m)、 音粒子のエネルギー (J)、音粒子の速度 (m/s) が 含まれる。また、評価領域におけるその時刻のエ ネルギーと、その時刻までのエネルギーの総和が 含まれたファイルが出力される。

5. 解析例

5.1. 概要

Advance/FrontNoise/Rayの解析事例として、図 1 に示した国立競技場を含む空間の音響解析を紹 介する。国立競技場内で発生した音がどのように 周辺に広がるか確認する。

5.2. 解析条件

解析領域は図 1 に示した国立競技場を使用す る。境界面は、当社が開発している PLATEAU Platform (詳細は[2]をご覧ください)を利用して、 PLATEAU[1]のデータから抽出した。

解析条件を表 5 に示す。時間刻みを 10 ミリ秒 とし、10 秒間の解析を実施した。初期音源は点音 源とし、図 4 に示した位置から球状に放射するよ うに 10 万本の音線を設定した。音速は 360 m/s、 各音線のエネルギーの初期値は 1.0 J とした。境

表 5 解析条件

項目	設定値
時間刻み (s)	0.01
ステップ数	1000
音源	点音源(図 4)
音速 (m/s)	360
初期音線数	10
(万本)	10
初期音線工	1
ネルギー (J)	1
境界面の反	0.7
射率	0.7



図 4 初期の点音源位置

界面の反射率はすべて一定値で0.7とした。

5.3. 解析結果

10 秒間のエネルギー密度レベルのコンター図 を図 5~図 7 に示す。競技場内で発生した音は、 競技場上部の開放部から抜けていくが、およそ 7 秒後から減少した。また、7 秒経過後も競技場内 部では残響が生じていることが確認された。これ は、壁付近の屋根によって音が閉じ込められてい ることと、音源に与えた初期のエネルギーが大き いためである。なお、コンター図の形状が四角い 形状であるのは、エネルギー密度を評価するため のメッシュ形状が反映されているためである。







6. Advance/FrontNoise/Ray のご利用方法 6.1. サービスのご提供

Advance/FrontNoise/Ray はクラウドでご提供し ている。Version 6.1 では、Advance/FrontNoise の年 間ライセンスをご契約いただいているお客様に は、Advance/FrontNoise/Ray の計算ライセンスも付 属している。また、Advance/FrontNoise/Ray のみの ご利用ライセンスもご提供している。クラウド版 のため、Advance/FrontNoise/Ray に限り、年間ライ センスの他に月間ライセンスもご提供している。

6.2. 操作方法

6.2.1. 概要

PC などお手元の端末のブラウザで当社指定の URL にアクセスしていただき、計算設定や計算を 実行していただく。本節では計算の流れをご説明 する。なお、図は Google Chrome で表示したとき の画面である。

6.2.2. ログイン方法

指定の URL にアクセスしていただくと、図 8 に示すログイン画面が表示される。画面上でご登 録いただいたメールアドレスと当社より発行し たパスワードを入力していただき、ログインして いただく。ログイン後、画面の上部に「新規計算」、 「計算状況」、「マニュアル」の3つのボタンが常 に表示される。「新規計算」で計算設定、「計算状 況」で計算ジョブの確認や結果のダウンロード、 「マニュアル」でオンラインマニュアルを閲覧す ることができる。

6.2.3. 計算設定と実行方法

「新規計算」ボタンをクリックすると計算設定を 行うことができる。計算設定画面を図 9 に示す。 計算設定画面では、「計算設定」、「音源の初期条 件」、「境界条件」、「評価領域」の設定ができる。 設定項目と内容を表 6 に示す。「計算設定」はす べての項目の設定が必須である。「初期音源」はフ ァイルで与えるか、解析領域の中心に点音源を自 動生成するかを選択する。ファイルで与える場合 は VTK UnstructedGrid 形式の音源ファイルを与

Welcome t	o Advan	ce/FrontNoi	se/Ray
A/FNoise	Your Email		
	Your Password		
	Login		
Copyright © 2022 Advances	on Corporation All Hig	ints Reserved. URL:https://ww	w.advanceson.jp/
义	8 🗆	ガイン	画面
新規計算	計算状況	マニュアル	
101000194	0194000		
計算設定			
ジョブ識別名		first_sample	
時間刻み (s)		0.0001	
ステップ数		1000	
	-		
■ 首源の初期	条件		
◎ファイル			
ファイル	しを選択 init	ial_ray.vtk	
○中心に音源			
☑ 境界条件			
7774	eta boy utk		
2747Vel	EJ/C DOX.VIK		
☑ 評価領域			
●ファイル			
ファイノ	しを選択 are	ea.vti	
Oバウンディ:	ングボックス		
_			

図 9 計算条件設定画面

表 6 計算条件の設定項目

項目		内容
言	+算設定	必須
	ジョブ	解析を識別するための名前。
	識別名	任意の値を設定可能。
	時間刻み	1ステップの時間。単位は秒。
	フテップ粉	解析ステップ数。解析時間は
	ヘノツノ数	(時間刻み)×(ステップ数)。
初	D期音源	いずれか必須
	ファイル	ファイルで指定(表 3)。
	由ふた立海	解析領域の中心に自動生成。
	中心に自你	音粒子の個数のみ設定可能。
垆	意界面	必須
	ファイル	ポリゴンデータ (表 3)。
	P価領域	いずれか必須
	ファイル	ファイルで指定(表 3)。
	バウンディ	解析領域のバウンディングボ
	ングボック	ックスが設定される。構造格
	ス	子の大きさを設定する。

	-					
	Boundary	Number	Number	Number		lob
Job Name	Name	Polygons	Particles	Steps	Job Submit	Status
first_sample	box.vtk	80	1000	1000	2023-01-24	計算中
mar_admple	DOX. VIK	00	1000	1000	19:40:57 518791	0124

図 10 計算状況の確認画面(計算中)

Job Name	Boundary File Name	Number of Polygons	Number of Particles	Number of Steps	Job Submit	Job Status
first_sample	box.vtk	80	1000	1000	2023-01-24 19:40:57.518791	完了: 計算結 果

新規計算 計算状況 マニュアル

図 11 計算状況の確認画面(計算完了)

項目	内容
Job name	ジョブ識別名
Boundary File	ビーション
Name	境界面のファイル名
Number of	境界面に含まれるポリゴンデ
Polygons	ータ数
Number of	初期主源の主持この教
Particles	初期自愿的自私于仍数
Number of	計算フテップ粉
Steps	計算ヘノツノ奴
	計算状況。計算が完了すると
Lab Chatan	「計算結果」をクリックして
Job Status	表 4の出力ファイルをダウン
	ロードすることができる

表 7 計算状況の確認画面のテーブルの内容



える (表 3)。自動生成する場合、点音源から放射 される音粒子の個数を設定する。なお、点音源の 位置は境界面のバウンディングボックスの中心 となる。「境界面」はポリゴンデータで与える。ポ リゴンデータのファイル形式は表 3 の「境界面」 に示した形式が対応している。「評価領域」はファ イルで与えるか、境界面のバウンディングボック スから自動生成するかを選択する。ファイルで与 える場合は VTK ImageData 形式で与える(表 3)。 自動生成する場合は、境界面のバウンディングボ ックスが評価領域として設定される。評価領域の 構造格子のサイズはブラウザ上で指定できる。表 4 の「エネルギーの評価」は設定した評価領域で 評価される。

すべての項目が完了したら、ページ下の「計算 開始」ボタンをクリックする。未設定項目がある 場合、計算は開始されず未設定項目の文字が赤字 に変わる。この場合は未設定項目を設定し、改め て「計算開始」ボタンをクリックする。

6.2.4. 計算状況の確認

計算が開始されると、「計算状況」の画面に遷移 する。計算を開始したときの計算状況の画面を図 10に、計算が完了したときの計算状況の画面を図 11に示す。また、計算状況の確認画面のテーブル の内容を表 7 に示す。計算が完了すると"Job Status"が「完了」となり、「計算結果」のリンク から、zip 形式に圧縮された表 4 の出力ファイル ー式をダウンロードすることができる。なお、本 画面は画面上部の「計算状況」ボタンをクリック して表示することもできる。

6.2.5. マニュアル

画面上部の「マニュアル」ボタンをクリックす ると新しいタブにオンラインマニュアルが表示 される。オンラインマニュアルの例を図 12 に示 す。マニュアルのトップページに簡単なチュート リアルがあるので、初めての方はチュートリアル による試計算の実施を推奨する。

7. まとめ

Advance/FrontNoise version 6.1 では、新たに音線 法ソルバーである Advance/FrontNoise/Ray をリリ ースした。Advance/FrontNoise は解析精度が高い が、ハードウェアの性能による制約などの理由で 広大な領域の解析には向いていない。一方、 Advance/Front Noise/Ray は回折や散乱は解析でき ないが、Advance/FrontNoise では計算できないよ うな広大な空間を解析したり、音の伝播経路を可 視化できる。解析対象や目的に応じてソルバーを 使い分けることで、有限要素法や有限差分時間領 域法では難しかった音響解析が実施できるよう になった。Advance/FrontNoise で解析できない例 として、国立競技場を含む 800 m×600 m×100 m の広大な空間に対して、Advance/FrontNoise/Ray を 使用した音響解析の事例を紹介した。

Advance/FrontNoise/Ray は計算コストが低いた め、クラウドでご提供している。ユーザーは専用 のページにログインし、ブラウザ上で計算設定を 行い、音響解析を実施することができる。

参考文献

- PLATEAU [プラトー] | 国土交通省が主導 する、日本全国の 3D 都市モデルの整備・ オープンデータ化プロジェクト, https://www.mlit.go.jp/plateau/
- [2] 徳永健一、田之上文彦「当社における国土 交通省 PLATEAU プロジェクト活用の取り 組み」アドバンスシミュレーション Vol. 30 (2023).
- [3] 前川純一,森本政之,阪上公博,「建築・ 環境音響学第3版」共立出版株式会社 (2011).
- ※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、 アドバンスソフト株式会社 ホームページのシ ミュレーション図書館から、PDF ファイル(カ ラー版)がダウンロードできます。(ダウンロ ードしていただくには、アドバンス/シミュレ ーションフォーラム会員登録が必要です。)