

## 音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の大規模並列計算性能の評価

尾川 慎介\*

## Evaluation for Large-scale Parallel Computing Performance of Advance/FrontNoise

Shinsuke Ogawa\*

音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise は、周波数領域または時間領域で有限要素法によりの音響方程式を解くソフトウェアである。このソフトウェアの特長は、大規模並列計算を可能としていることである。当社では、本ソフトウェアを含む当社のソフトウェアを国内の複数のスーパーコンピュータ環境で活用するための共同研究を実施した。本稿ではその実施内容である、前述の環境における本ソフトウェアの動作確認と、その大規模並列計算性能に関する評価について報告する。なお、この共同研究の成果はアドバンス/スーパーコンピューティング・サービスとしてすでに提供中である。

Key word: スーパーコンピュータ、大規模解析、音響解析、シミュレーションソフトウェア

## 1. はじめに

産業界での製品に対する品質向上への要求から、製品全体に対する大規模シミュレーションのニーズが高まっている。また、計算機の性能向上および価格の低下により、大規模な計算により精度の高い解析が可能となってきている。その1つの手段として、当社では、並列化を中心としたシミュレーションの大規模化および高速化を実現するためのソフトウェアの開発に取り組んできた<sup>[1][2][3][4][5][6][7][8][9][10][11]</sup>。

この方針のもと、当社では、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を独自に開発し、これまで、機械による環境騒音低減<sup>[10]</sup>や騒音低下のための機器設計<sup>[5][6][8]</sup>の一環として、音響シミュレーションに関するサービスを提供してきた。また、音響シミュレーションについては、構造解析における固有値の観点から別のアプローチも行ってきた<sup>[7]</sup>。現在では、有限要素法で億を超える要素数を対象に解析を行うことができるようになった。また、ユーザー様からの要望を開発に取り入れることで、大規模計算や音響解析に関する周辺機能

も次第に整備されてきている。

しかし、いくらソフトウェアを開発しても、大規模解析や連成解析はどこでも簡単に実施できるものではなく、相応のハードウェアを必要とする。この問題に関しては、従来は研究用途でしか利用できないスーパーコンピュータシステムがほとんどであったが、近年は個人や企業に開放されたシステムが国内外で増えてきたことや、それによって認知度が高まり活用事例も増えてきたため、時間とともに状況はさらに改善されると考えている。

このようにハードウェアとソフトウェアの双方で環境が整ってきたことから、当社は「アドバンス/スーパーコンピューティング・サービス」として、国内のスーパーコンピュータの産業利用を促進させるために、保有するソフトウェアを必要に応じて利用できるサービスの提供を開始した。本サービスで対象としているシステムは次の通りである。

- 大規模共有メモリシステム UV2000  
(所有：海洋研究開発機構)
- スーパーコンピュータ「京」  
(所有：理化学研究所 計算科学研究機構)

\*アドバンスソフト株式会社 第1事業部

1<sup>st</sup> Computational Science and Engineering Group,

AdvanceSoft Corporation

本サービスを開始するにあたって、関連機関との共同研究として Advance/FrontNoise を含む当社のソフトウェアの移植や動作確認と、大規模並列性能の評価を実施した。具体的には、「UV2000」については海洋研究開発機構と、「京」については互換環境である「FX10」を対象として高度情報科学技術研究機構とそれぞれ共同で実施した。本稿ではその共同研究で得られた成果を報告する。

## 2. Advance/FrontNoise の機能

### 2.1. 周波数領域ソルバー

本ソフトウェアは、音源の位置とその大きさ等を入力として与え、解析領域内の粒子速度・音響速度ポテンシャルや音圧レベルを求める。また、空間的に分布する場の流れがある場合には、その流れを考慮した方程式を解く。さらに、温度場等の設定された密度分布のある場に関する解析も可能である。理論に関する詳細は本稿では割愛するため、文献<sup>[1]</sup>を参照されたい。また、適用可能な境界条件は表 1 の通りで、これらはいずれも周波数ごとに指定することができる。

離散化においては、解析条件を柔軟に設定できる有限要素法を採用している。利用可能な要素の種類は四面体 1 次要素のみであるが、音響解析はポテンシャル問題であるため、構造解析などで生じるような精度に関する問題はない。そして、四面体要素は形状適合性が高いため、ユーザーによるメッシュ作成の自由度は比較的高い。

周波数領域の機能では、有限要素法で離散化したのちに、自動領域分割による並列化を行う。並列計算は MPI を用いて行っている。また、行列解法には、デフォルトとして GMRES 系の反復解法を採用しているが、その他の代表的な前処理手法・反復法および直接法も利用可能である。

解析結果として出力できるものは、音響ポテンシャル、音圧、粒子速度、音圧レベルである。解析結果をソフトウェアに付属するツールで処理することで、音響特性等を求めることも可能である。

表 1 Advance/FrontNoise の機能

項目	内容	
基礎方程式	(1) 音響ポテンシャルに関する波の方程式を周波数空間に変換した方程式	
	(2) 空間的に分布する場の流れおよび空間的に分布する音響伝播媒体を考慮可能	
解析領域	内部領域、および外部領域	
物性値等	速度	場の速度を指定可能 (デフォルトは速度 0)
	温度	場の温度 (音の伝播媒体) を要素ごとに指定可能 (デフォルトは均一媒体)
境界条件	面音源	壁境界に対して、周波数ごとに音圧または粒子速度を設定可能
	点音源	節点に対して、単極子、双極子、または、四重極子のパラメータを設定可能
	インピーダンス	周波数ごとに壁境界に音響インピーダンスを設定可能
	外部境界	$\rho c$ 境界 (音響インピーダンス) を設定可能
数値解法	離散化	有限要素法
	要素	四面体 1 次要素
	並列計算	自動領域分割による MPI 並列
	行列解法	GMRES 系列の反復法
	大規模実績	4 億要素・8000 万節点 (四面体 1 次要素)
解析結果	音響ポテンシャル、音圧、音圧レベルについて、周波数ごとにバイナリ形式でファイル出力	
プリポスト	プリポストの正式リリース版はなく、お持ちのプリポストとの接続については要相談	

### 2.2. 時間領域ソルバー

本ソフトウェアでは、周波数領域ソルバーとともに、時間発展の基礎方程式を直接解く時間領域ソルバーも Advance/FrontNoise/TD として提供している。その機能を表 2 に示す。本ソフトウェアでは、外部領域・内部領域にかかわらず、音圧と粒子速度の波の方程式を時系列で解く。理論に関する詳細は文献<sup>[1]</sup>を参照されたい。音の伝搬する媒体の物性値は全領域で一定とする。境界条件としては、点音源、壁にインピーダンスを与える条

件、開口部等を模擬する無反射境界、拡散反射境界である。

数値解法は陽解法の有限要素法である。また、自動領域分割で MPI による並列化を行っている。今後、機能の追加を行っていく予定である。

表 2 Advance/FrontNoise/TD の標準機能

項目	機能	
基礎方程式	音圧と粒子速度の波の方程式を時系列で解く	
解析領域	内部領域、および外部領域	
物性値等	場で一定とする	
境界条件	点音源	節点に時系列でエネルギーを設定可能
	インピーダンス	壁境界に音響インピーダンスを設定可能
	透過境界	面（外部境界）に c 境界を設定可能
	拡散反射境界	拡散反射境界部分に拡散反射条件を設定可能
数値解法	離散化	有限要素法
	要素	四面体 1 次要素
	時間積分	陽解法
	並列計算	自動領域分割による MPI 並列
解析結果	音圧等を指定された出力間隔でファイル出力 定点の音圧等の時系列データをファイル出力 音圧等のある区間で平均化して出力	

## 2.3. 特長

### 2.3.1. 大規模解析が可能

4 億要素、8000 万節点程度の実績がある。

### 2.3.2. 低コスト

本ソフトウェアでは、騒音・音響解析の最小限度必要なコア部分のみを合理的な価格で提供している。複数 CPU での稼動については同一料金を設定している。周波数領域および時間領域の機能に関しては、ユーザーにはコア数制限なしの並列計算機能を提供している。

### 2.3.3. 充実したサポート体制

自社開発ソフトのため、ユーザー固有のニーズに応じたサポートやカスタマイズが可能である。

## 3. スーパーコンピュータシステムへの移植

### 3.1. ビルド

移植先でのビルドは、依存ライブラリも含めておおむね問題なく実施できた。ただし、FX10 環境（および「京」）のコンパイラは固有のものであるため、対話的ジョブとして計算ノード上で実施するほうがスムーズである。

### 3.2. チューニング

コンパイラオプションによる最適化は行ったが、ソースコードレベルでのチューニングは特に実施していない。

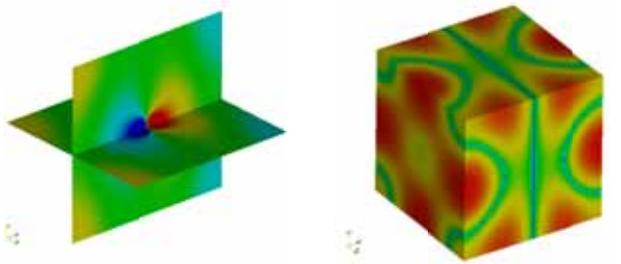
FX10 環境では MPI 並列と OpenMP マルチスレッド並列の両方を活用するハイブリッド並列の適用についても検討したが、本ソフトウェアでは外部ソルバー PETSc<sup>[12]</sup>を利用して対応が困難であるため断念した。

## 4. 大規模並列性能の評価

### 4.1. UV2000 における大規模並列

ソフトウェアに付属する 2 つのチュートリアル例題を用いて、UV2000 における本ソフトウェアの並列処理性能を計測した。用いた例題は、箱に閉じ込められた双極子音源の音場解析（モデル B1, 図 1）と屋外環境騒音解析（モデル C2, 図 2）である。それぞれのモデルについて、本ソフトウェアに付属するリファイナーによりメッシュ規模を大きくした解析モデル（B1R および C2R）を作成した。解析モデルのメッシュ規模を表 3 に示す。

これらのモデルを GMRES 法（反復法）で解析した場合の並列処理性能の計測結果を図 3 から図 6 に示す。これらの図の縦軸はいずれも速度向上率であるが、横軸はリファインの有無によって異なる。なお、図 5 は顕著に速度向上率が頭打ちになっているが、もともと解析規模が小さいためであると考えられる。



中央断面の音圧レベル 表面の速度ポテンシャル  
 図 1 モデル B1 (解析結果)

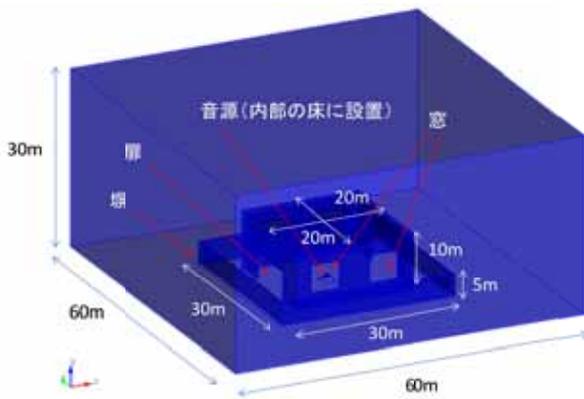


図 2 モデル C2

表 3 解析モデルのメッシュ規模

解析モデル	要素数	節点数
B1	6,000,000	1,030,301
B1R	48,000,000	8,120,601
C2	2,184,299	389,312
C2R	17,474,392	3,016,928

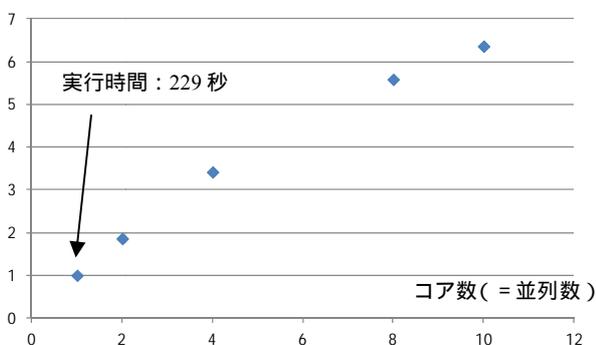


図 3 並列処理性能の計測結果 (UV2000, B1)

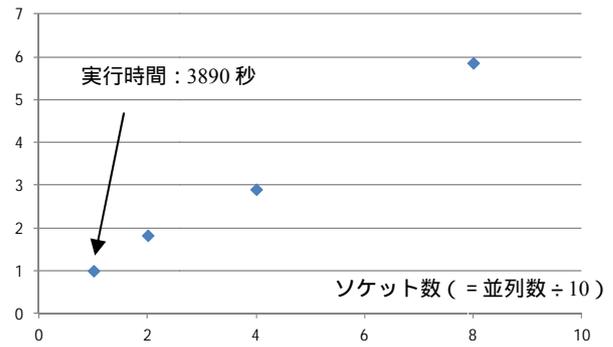


図 4 並列処理性能の計測結果 (UV2000, B1R)

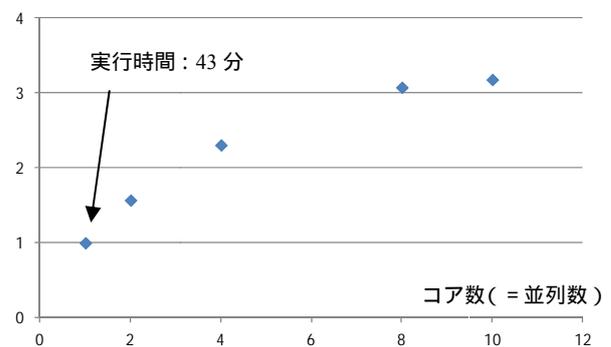


図 5 並列処理性能の計測結果 (UV2000, C2)

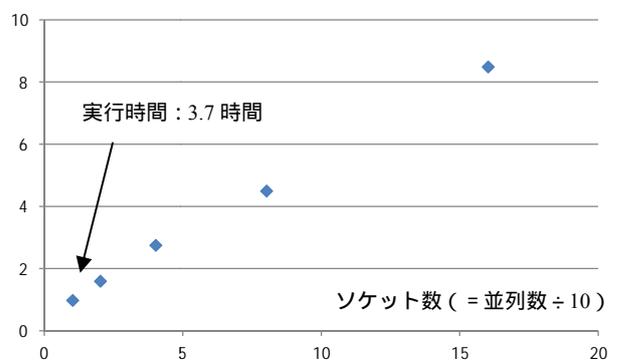


図 6 並列処理性能の計測結果 (UV2000, C2R)

## 4.2. FX10 における大規模並列

4.1 節と同様に B1, C2, C2R モデルで調査した結果を図 1 から図 3 に示す。B1R モデルはメモリ不足のため同程度のスケールで実施できなかったため、大規模計算として別途実施し、プログラム全体の実行時間と、そのうちの入力、計算、出力の所要時間を表 4 にまとめた。

表 4 からは、ソルバーに関する並列性能は高いものの、収束が速くモデルが大きい問題ではこれ

まで並列化について考慮していなかった出力部分がボトルネックになっていることが読み取れる。実際の問題では反復回数がこの例よりもずっと多く、ソルバーの所要時間が圧倒的であるためこれまでは顕在化していなかった。このようなソルバー以外の部分のボトルネックについても、費用対効果を見極めて対策を検討したい。

## 5. まとめ

Advance/FrontNoise の大規模並列性能は現時点でも良好であり、大規模問題に対して並列性能を十分活用できることが期待できる。ただし、問題設定によってはソルバー以外の部分の並列性能が課題になる可能性が判明した。

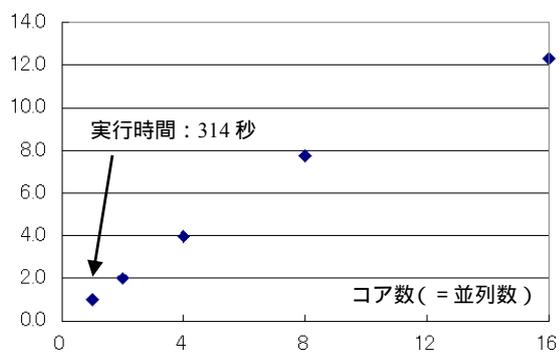


図 1 並列処理性能の計測結果 (FX10, B1)

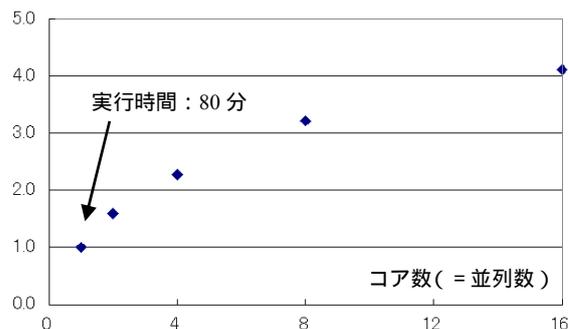


図 2 並列処理性能の計測結果 (FX10, C2)

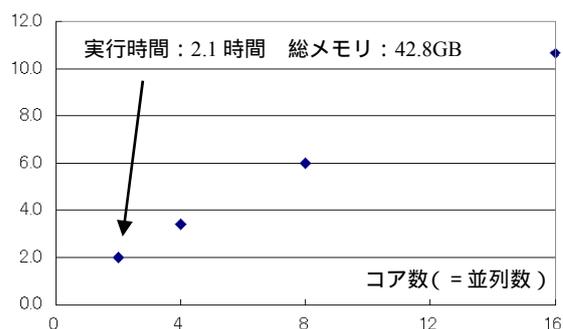


図 3 並列処理性能の計測結果 (FX10, C2R)

表 4 並列処理性能の計測結果 (FX10, B1R)

#nodes	#CPUs/node	#CPUs	反復回数	全体 [s]	入力 [s]	ソルバー [s]	出力 [s]
12	1	12	261	875	0.5	769	46.4
12	8	96	287	191	0.7	117	62.5
12	16	192	318	147	1.2	81.3	53.9
24	8	192	318	125	0.6	65.3	52.4
24	12	288	319	102	0.9	48.9	46.2
24	16	384	294	110	12.2	41.0	60.8
36	8	288	319	96.7	0.6	44.5	46.4
36	12	432	292	85.2	0.9	32.2	46.7
36	16	576	332	99.5	1.2	30.4	62.0

**参考文献**

- [1] 松原聖, 桑原匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の現状”, アドバンスシミュレーション, Vol.15 (2013).
- [2] 松原聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の解析手法”, アドバンスシミュレーション, Vol.15 (2013).
- [3] 松原聖, 桑原匠史, 戸田則雄, 大西陽一, 大家史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise を利用した連成解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.15 (2013).
- [4] 松原聖, 桑原匠史, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の解析事例”, アドバンスシミュレーション, Vol.15 (2013).
- [5] 松原聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の透過音解析機能”, アドバンスシミュレーション, Vol.16 (2013).
- [6] 松原聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise による流れを伴うダクト開口端反射率の評価(第1報)”, アドバンスシミュレーション, Vol.17, (2013).
- [7] 松原聖, 尾川慎介, 大家史, 出浦智之, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise Ver. 4.3 の機能追加”, アドバンスシミュレーション Vol.18 (2014).
- [8] 松原聖, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の構造音響強連成による減衰を含む透過音の解析”, アドバンスシミュレーション, Vol.18 (2014).
- [9] 松原聖, 末光啓二, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise の時間領域解析機能およびその並列処理性能”, アドバンスシミュレーション Vol.18, (2014).
- [10] 加藤國男, 大家史, 松原聖, “船舶居住区騒音を対象とした構造音響連成解析手法”, アドバンスシミュレーション, Vol.18 (2014).
- [11] 松原聖, 大家史, 尾川慎介, “音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise”, アドバンスシミュレーション, Vol.20 (2014).
- [12] Satish Balay *et al.*, *PETSc User Manual*, Argonne National Laboratory (2015).

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。)