

並列計算機による航空機翼端渦の数値シミュレーション

伊藤 良三* 高梨 進**

Parallel Computation of a Tip Vortex Induced by an Aircraft Wing

by

Ryozo ITO*

DAIKO DENSHI TSUSHIN, Ltd.

and

Susumu TAKANASHI**

National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

Three dimensional Navier-Stokes simulations about the wing of the Boeing 747-200 have been carried out using a parallel vector computer called "NWT" at the National Aerospace Laboratory, Japan. The main objective of this study is to simulate the wing-tip vortex.

The governing equations are 3-D Reynolds-averaged thin-layer Navier-Stokes equations which are discretized by finite volume method with a TVD upwind scheme. The C-O type of grid around the wing has been decomposed equally into 24 subdomains. Parallelization has been done by means of sharing the load of computation for each subdomain to each PE. Computation using a grid with 11-million grid-points shows an existence of a strong tip vortex induced by the wing.

1. はじめに

ボーイング747の様な巨大な航空機の主翼で発生する翼端渦はその後方を飛行する航空機にとって脅威であり、実際にこれが原因と思われる事故も多数報告されている¹⁾。この様な渦の挙動を解析することは、航空機を設計する上で重要な課題の一つであり、近年の計算機の高速度に伴い、数値計算による解析もこのための有効な手段となりつつある。筆者らは航空宇宙技術研究所で稼働中の並列ベクトル計算機「NWT」を用い、ボーイング747-200の主翼で発生する翼端渦の数値シミュレーションを試みた。

2. CFDコード

コードはレイノルズ平均薄層近似 Navier-Stokes方程式を有限体積法で解くものである。対流項の計算には三次精度のTVDスキームを適用している。時間積分においては局所時間刻みを用い定常解を求めている。乱流モデルとしてはBaldwin-Lomax のものを用いている。またこのコードは流れ場が複数のサブドメインに分割された問題にも適用できる。詳細は参考文献2、3を参照のこと。

3. 計算格子

C-O型の格子(図1)が主翼のみの周りに文献4の方法で生成された。格子点数は、主流方向に577、スパン方向に97、翼面(またはwake面)から離れる法線方向に193である。翼根部の翼弦長を1としたとき、法線方向の最小間隔は 3.0×10^{-5} で、wakeにおける主流方向の最大格子間隔は0.02である。また、外部境界は翼面から7.0の距離に位置し、流出境界は翼端の後縁から4.1下流に位置する。この格子を24個のサブドメインに等分割し、次節で述べる様にサブドメインとPEを1:1に対応させる方法で並列計算を行った。ドメインは、格子を主翼、wake上面、wake下面に3等分し、更にそれぞれをスパン方向に8等分することに依って分割された。また、格子点数がシミュレーションのために十分かどうかを確かめるために、上記の格子を一方向に付き半分の点数に間引いた格子(289X49X97)を用意した。以下、前者を「密な格子」、後者を「粗な格子」と呼ぶ。

4. 並列化の方法

並列化は、一つのサブドメイン内の流れ場の計算を1台のPEに担当させる方法で行われた。この方法は単純明快なので、並列化のためのコードの改修は最低限の労力で済む。図2に示す様に、各サブドメインの

* 大興電子通信株式会社
**航空宇宙技術研究所

辺縁部分の数値流束の値を計算するためには1イターレーション毎に隣接したサブドメイン内の数値流束の値を参照しなければならず、ここでPE間のデータ転送が生じる。この方法の短所は、サブドメインの格子点数と位置関係、また、使用するPE台数が変わる毎に、PE間のデータ転送を担当するサブルーチンを書き直さなければならないことである。今回の格子の様に位置関係が単純な場合は書き直しの労力は軽微なものだが、エンジン付きの輸送機の様に複雑な形状の場合はサブドメイン間の位置関係が複雑になるため、手作業ではコーディングに誤りが生じやすく、デバッグに時間が掛かってしまう。このため、サブドメインの格子点数と位置関係、使用するPE台数を記述したファイルを読み込んで自動的にPE間のデータ転送サブルーチンを生成するプログラムを用意し、より複雑な形状での計算に備えている。

5. 計算結果

一様流のマッハ数0.80、主翼の迎角 6.72° 、翼根部の翼弦長を1としたレイノルズ数 5.76×10^6 の条件で計算を行った。使用したPEの台数は24である。

コード及び格子の妥当性を検査するために、NASA Ames Research Centerにおいてボーイング社により行われた風洞実験の結果⁵⁾と計算結果を比較した(図3)。計算と実験の翼面上の圧力分布は、翼根から離れるにつれて良く一致する様になる。この傾向は、実験が翼胴モデルについて行われたのに対して、計算は翼のみについて行われたことに依るものと考えられる。粗な格子と密な格子に依る圧力分布に顕著な差異は無く、少なくとも翼面上の圧力分布を求める目的に対しては双方の格子の点数は十分であると考えられる。

図4は、計算結果を元に作成された流線を、計算格子と重ねて描いたものである。流線の始点は翼端の後縁に位置し、終点は計算格子の流出境界上に位置する。粗な格子に依るものと密な格子に依るものを比較すると、流線が半時計回りの渦を描きながら次第に翼根の方向に移動して行く点については同じであるが、渦の巻き方は大きく異なっている。粗な格子の結果では、格子のまばらな領域に流線が進むにつれて渦の直径が大きくなって行くのに対し、密な格子の結果では、格子の密度に依らず渦の直径はほぼ一定である。実験との比較も必要だが、翼端渦のシミュレーションを行うには、少なくともこの「密な格子」程度の格子点の密度が必要であろうと考えられる。このことは、平面図と側面図をみても良くわかる(図5)。

6. 並列化に依る計算の高速化

24台のPEを用いたとき、密な格子で1万回のイターレーションを行うのに1PE当たり35,465秒のCPU-timeを要した。このCPU-timeのうちPE間のデータ転送にかかった時間は351.3秒、つまり全体のCPU-timeの約1%に過ぎず、並列化の効率が非常に高いことがわかる。並列化の効率を調べるには、同じ計算を1台のPEで実行したときと、複数のPEで並列実行したときとでCPU-timeを比較すべきだが、粗な格子でさえ格子点数が多すぎて計算を1台のPEで実行することはできない。そこで、さらに間引いた格子(145x25x49)を作成し、いろいろなPE台数で計算を実行してみた。この格子では、24台のPEで並列化することに依って1台のPEのときと比較して22.3倍計算が高速化されることが分かった。図6に200回のイターレーションを行ったときのCPU-timeとPE台数の関係を示す。

文献3の様に二次元PE配列を使い、サブドメインの中をさらに並列化すれば計算はさらに高速化される筈だが、使用するPE台数が多くなると計算開始までジョブが長時間待たされて、ジョブのターンアラウンドという観点からは不利なので今回は行っていない。

7. 結び

サブドメインとPEを1:1に対応させる方法で並列化されたマルチドメイン用のCFDコードを使って、ボーイング747-200の主翼から誘起される翼端渦のシミュレーションを試みた。約1100万点の格子点から成る格子に依って、明瞭な翼端渦を捕らえることができた。今後の課題として、航空機の離着陸時に相当する、より低速・高迎角の条件でシミュレーションを行うことが望まれる。

参考文献

- 1) Lee, Tacheng and Lan, C. E., "Navier-Stokes Calculation of Wing Wake Structure," AIAA Paper 94-1882-CP, 1994.
- 2) 橘、高梨: 複雑な形状の航空機まわりの流れの数値計算, NAL SP-10, 1989.
- 3) 伊藤、高梨: 領域分割法による航空機形状まわりの遷音速流の並列計算, NAL SP-27, 1994.
- 4) Eriksson, L. E., "Generation of Boundary-Conforming Grids Around Wing-Body Configurations Using Transfinite Interpolation," AIAA Journal, Vol. 20, No. 10, 1982, pp. 1313-1320.
- 5) Tinoco, E. N., private communication, 1989.

図1 計算格子 (a のみ「粗な格子」)

- (a) 上半分の図
- (b) 翼断面 (側面)
- (c) 翼断面 (正面)

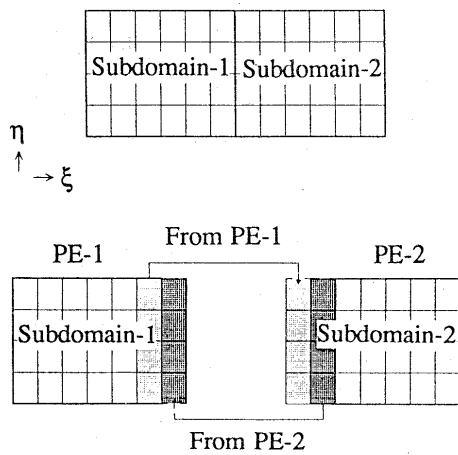
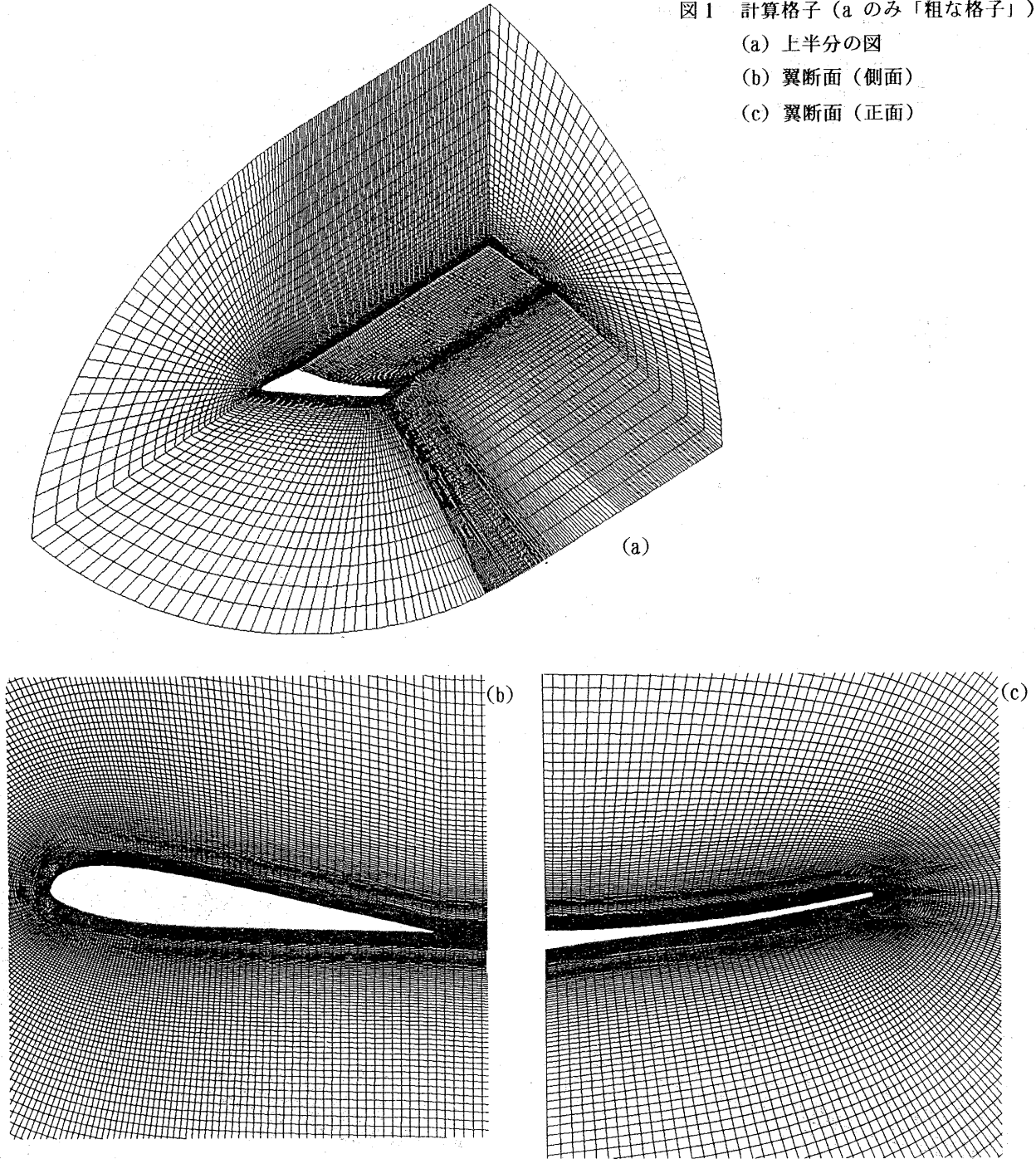
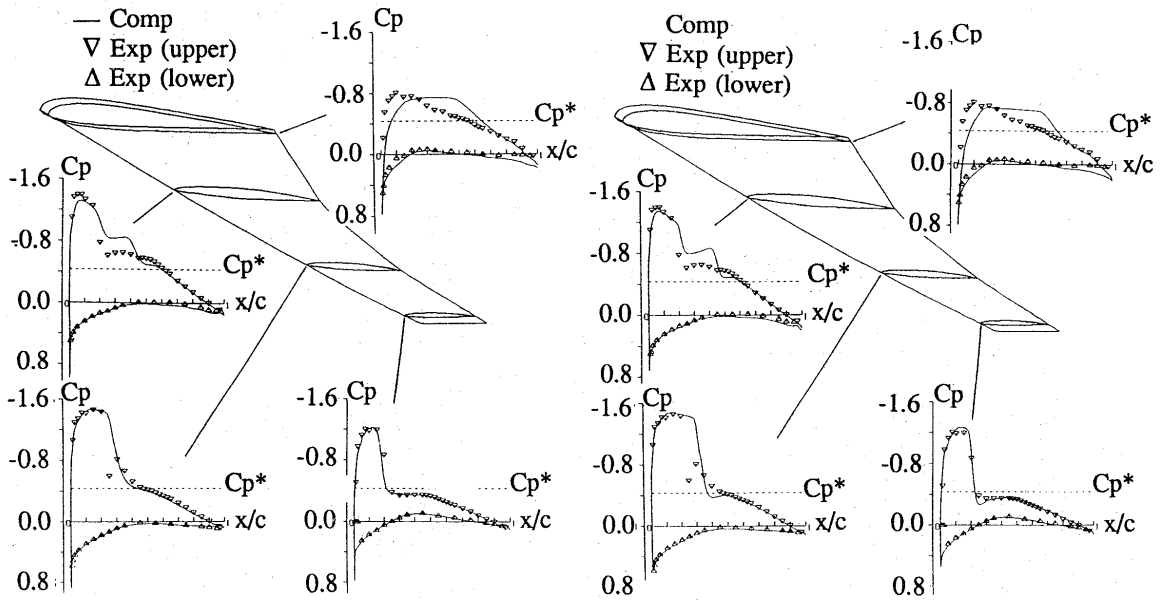


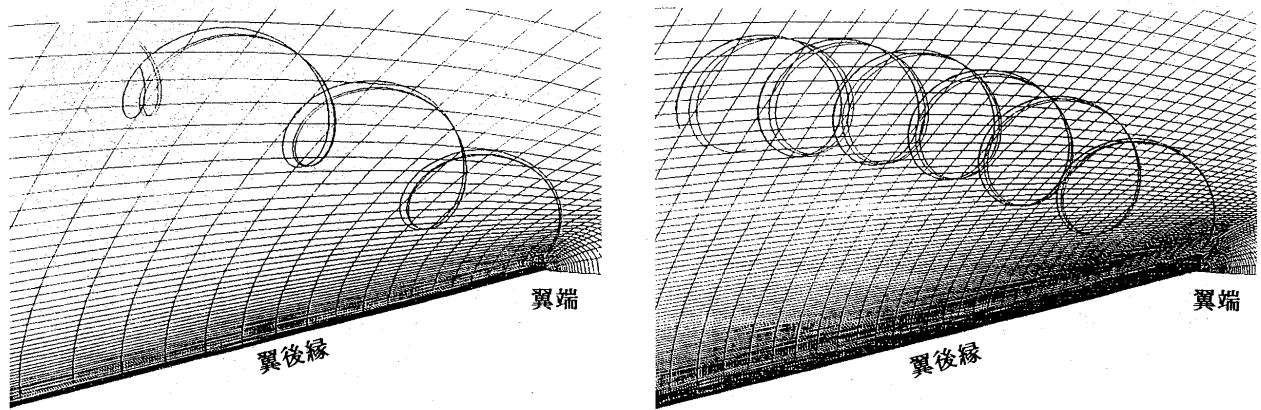
図2 PE間のデータ転送



(a) 粗な格子

(b) 密な格子

図3 翼面上のCp分布の、風洞実験との比較

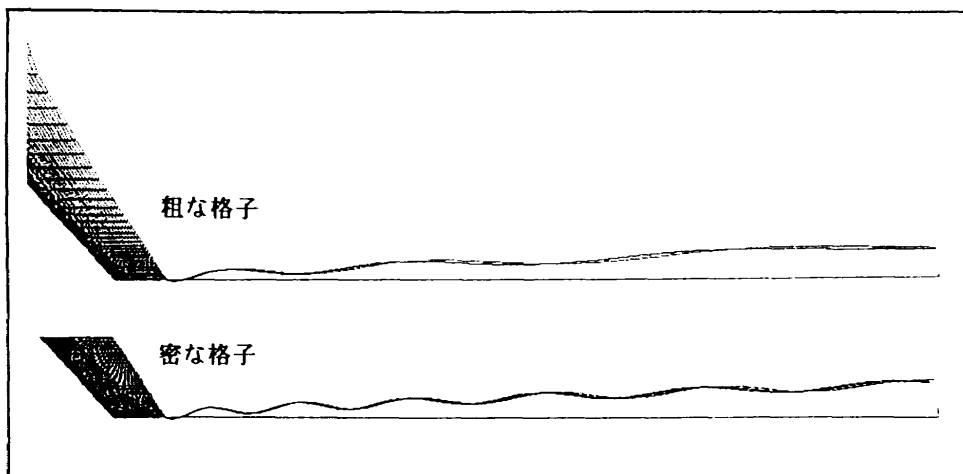


(a) 粗な格子

(b) 密な格子

図4 翼端の後縁から発した流線の正面図

平面図



側面図

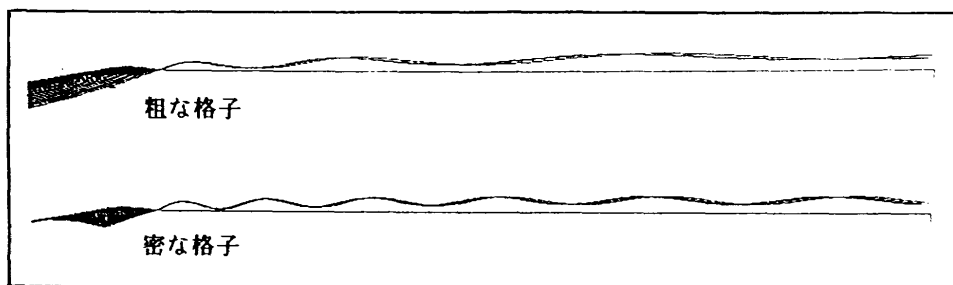


図5 翼端の後縁から発した流線の平面図と側面図

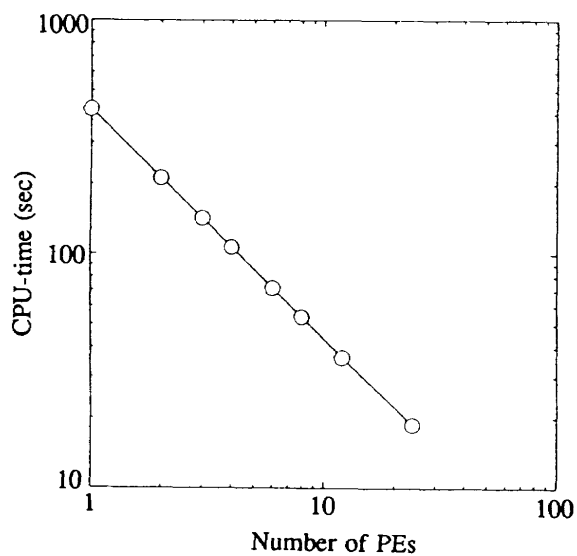


図6 CPU-time とPE台数の関係

