

黒田眞一 著

「2方程式乱流モデルを用いた長大橋非定常空気力の数値計算」への討議・回答

(土木学会論文集, No.654/I-52 2000年7月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

平野廣和 (中央大学)

Hirokazu HIRANO

これからの橋梁工学での風工学の分野における数値流体解析 (CFD) の進むべき道を示している興味深い論文と言えるのではないかと思います。特に、長大橋の非定常空気力を扱ったことには、大きな意義があると思います。

しかし、CFDを中心に研究している読者へ情報不足であったり、また風洞実験を中心として研究している読者へ誤解を招くような可能性がある表現が本論文の中に見受けられます。具体的な項目を以下に示しますので、それに対する著者のお考えをご教示いただければ幸いです。

1. 乱流モデルを用いた場合の諸係数について

乱流モデルを用いた場合の諸係数に関し、どのような理由で各数値を決定されたかについての記述が少ないように思われます。乱流モデルの場合、係数の取り方によっては解が異なることが多いので、各係数がどのような過程を経て決定されたのが論文の読者として最も知りたいことのひとつではないでしょうか。

例えば、本論文中の $a_1 = 0.31$ と決められています。この値はどのような理由で決められたのでしょうか。さらに、その他の係数に関しては各種の文献を引用する形で数値が決められています。本論のような剥離・再付着を伴う問題への適用性に関して、これらの係数の決め方の妥当性ならびに汎用性に関して説明をしていただきたいと思えます。

2. 比較すべき実験と解析とで基本的な断面形状が違っていることについて

長大橋箱桁断面 (偏平六角形断面) への適用に関しては、解析において高欄・地覆の形状は考慮されておりません。しかし、比較された Matsuda らの風洞実験においては、高欄・地覆を考慮した形の模型が用いられています。一般に、箱桁断面の空力安定性を論ずる場合には、高欄等の影響は無視できないと思われます。よって、高欄・地覆を省略した断面で解析を行った場合には、同じ形状のもとで行った風洞実験結果と比較

することが一般的ではないでしょうか。

そこで、本論において、高欄・地覆等を省略して解析した結果と高欄・地覆を考慮した形の模型を用いた風洞実験結果とを比較されたことの理由とその妥当性に関してお示しください。

3. 3章、4章で扱った問題について

本論の3、4章で扱った平板や翼型に関する解析の部分では、確かに解析コードの適切さや数値解析的に厳しい条件の振動翼型に対する本手法の有効性が示されており、大きな意義があることと思えます。しかしながら、翼型の場合、基本的に前縁で剥離・再付着現象が生じないことと、4章で扱った振動翼の問題が橋梁断面で扱う振動現象と本質的に異なるように思われます。よって、本論の主目的である長大橋非定常空気力の予測手法の検証問題として、ここで扱った問題は不十分ではないでしょうか。長大橋箱桁断面の場合は、平板や翼型と異なり、前縁での剥離・再付着現象が生じるので、翼型よりむしろ、矩形柱断面¹⁾を扱うべきではないかと思われます。

4. 流れの3次元性について

乱流モデルを用いての2次元解析ですが、流れの3次元性²⁾を評価する必要はないでしょうか。

例えば、本論文中の5.(1)において、橋梁断面の後方での平均圧力係数や変動圧力係数は風洞実験値とよく対応した結果が得られていますが、変動圧力の位相差に関してはあまり対応が取れていないように思われます。このようなことから、物体表面の圧力を正確に得るには、流れの3次元性を考察する必要があるのではないのでしょうか。

5. 静的空気力について

本論の手法では、無次元風速が大きくなるに従って、実際の解析において断面を動かす時の加振振動数は小さくなります。無次元風速が大きくなる場合、振動成分に比べて静的な流れ場が支配的になると思われます。

そこで、静的な空気力に関しても、解析結果と風洞実験結果とを比較され、その妥当性を検討されたでしょうか。

以上、同様な研究を行っている立場から、疑問を言う形で討議を起こさせてもらいました。CFDを研究している読者を初め耐風工学を研究している読者らに何らかの有益な情報が得られれば幸いです。

参考文献

- 1) 平野廣和, 渡邊茂, 丸岡晃, 佐野健一: 断面辺長比4の矩形断面の空力特性に関する2次元・3次元数値流体解析, 土木学会論文集, Vol.598/I-44, pp.401-411, 1998.7
- 2) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原睦人: 広範囲なReynolds数域での円柱まわりの2次元及び3次元数値流体解析, 土木学会論文集, Vol.591/I-43, pp.139-150, 1998.4

(2001.1.19 受付)

▶ 回答者 (Closure)

黒田眞一 (石川島播磨重工業 (株))

Shinichi KURODA

討議事項1について

本論文で用いたモデル定数の中に著者が恣意的にその値を定めたものはひとつもなく、すべて、 $k-\omega$ SST乱流モデルの開発者であるMenter¹⁾が用いた値をそのまま使用しています。御質疑頂いた $a_1 = 0.31$ という値に関してですが、これは、もともとはBradshawら²⁾が2次元境界層において乱流せん断応力が近似的に乱流エネルギーに比例することに着目し、その比例定数を $a_1 = 0.3$ としたことに基づいています。この比例定数 a_1 は最も標準的な乱流モデルである $k-\epsilon$ モデル等に用いられるモデル定数 C_μ の値の決定にも使用されているものです ($\sqrt{C_\mu} = -\overline{u'v'}/k = a_1$)。

$k-\omega$ SSTモデルは基本的に $k-\epsilon$ モデルと $k-\omega$ モデルのハイブリッド・モデルですが、Menter自身、 $k-\omega$ SSTモデル中で、 $k-\epsilon$ モデルと $k-\omega$ モデルのモデル定数を変更することは基本的にしていません。唯一、 σ_{k1} だけは例外で、この値はMenterにより $k-\omega$ SSTモデル用にチューニングされた値となっていることは本論でも述べました。しかしながら、Menter自身、適用する流れ場によって $k-\epsilon$ モデルおよび $k-\omega$ モデルのモデル定数の値を変えろということは一切していません。

$k-\omega$ SSTモデルの剥離・再付着を伴う問題への適用性に関しましては、Menter¹⁾が、Driver³⁾の逆圧力勾配流れ、および、バック・ステップ流れを扱っておりますので、そちらを参照して下さい。

討議事項2について

Matsudaら⁴⁾の実験は、本論の研究が始まる以前に行われたものであり本論の数値計算の検証を目的としたものではありません。したがって、高欄・地覆のない形状に対する実験は行われておりません。高欄・地覆のない形状に対する実験結果と比較すべきとご指摘には著者も同意いたしますが、それらの実験結果がないため高欄・地覆のある形状の実験結果で代用し

ました。

平成12年4月から「風工学における数値解析と風洞実験の相互利用に関する研究小委員会」(土木学会構造工学委員会)の活動が開始されたことなどもありまして、今後は数値計算の検証のための風洞実験というものも増えてくると考えられますが、本論での研究が行われた当時はまだ橋梁分野における流れの数値計算と風洞実験との関係はそれほど密接なものではなかったため、仕方がなかったと思います。

討議事項3について

本論の3章で平板境界層とNACA4412翼型まわりの流れを扱いましたのは、本論でも述べましたように、 $k-\omega$ SSTモデルが適切にコード化されているかどうかを確かめるためです。ある乱流モデル(本論では $k-\omega$ SSTモデル)の適用性を評価しようというわけですから、自分が計算した結果が本当に何々モデルによる結果であると言っているのかどうかをまず確かめておくことは当然のことです。本論中でも述べましたが、このNACA4412のケースは、Menter¹⁾の解析結果によれば、Jones-Launder $k-\epsilon$ モデルおよびWilcox $k-\omega$ モデルでは翼後縁での剥離が捉えられず、 $k-\omega$ SSTモデルのみが実験結果とよく一致する速度分布を与えたとされるケースです。そこで、本論のコードを用いた計算結果が実験結果と一致するかどうかを確かめることにより、 $k-\omega$ SSTモデルが適切にコード化されているかどうかを確認することにしました。

次に、本論の4章で振動翼型を扱いましたのは、本論の中でも述べましたように、大振幅の振動問題に対する本解析法の適用性を確認するためです。著者の知る限り、橋梁断面に関する大振幅非定常空気力の計測結果は存在しませんので、代わりに大振幅で運動する翼型の実験を計算対象としました。

本論で翼型の計算よりも先に矩形柱断面を扱うべき

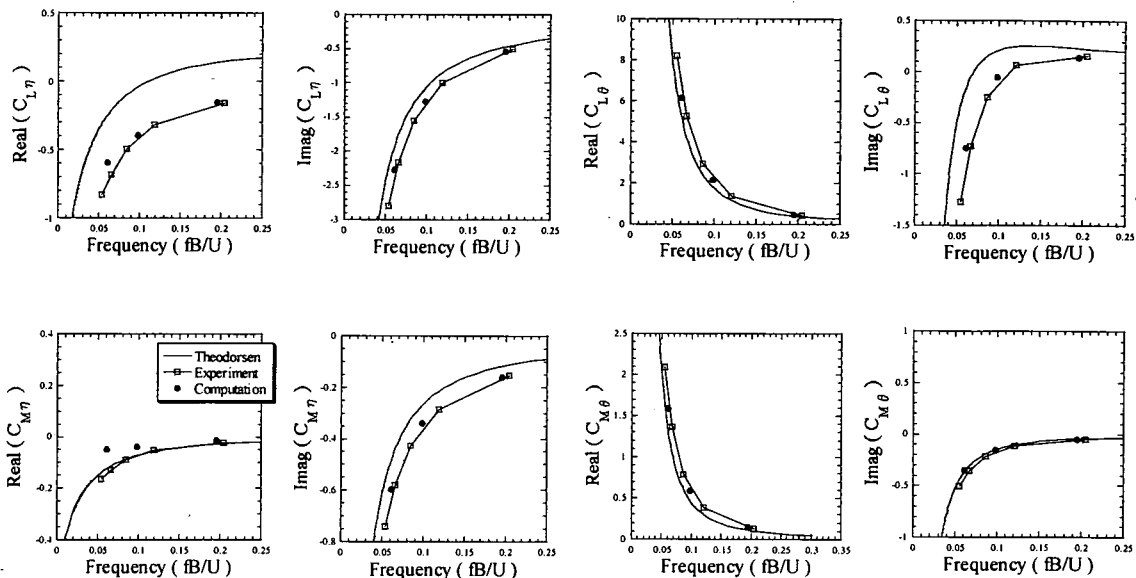


図-1 非正常空気の比較 矩形柱 $B/D = 20$; $\alpha = 0 \text{ deg}$, $\eta/B = 0.025$, $\theta = 2 \text{ deg}$
 (計算: Kuroda⁵⁾, 実験: 上島, 松田, 杉本⁶⁾)

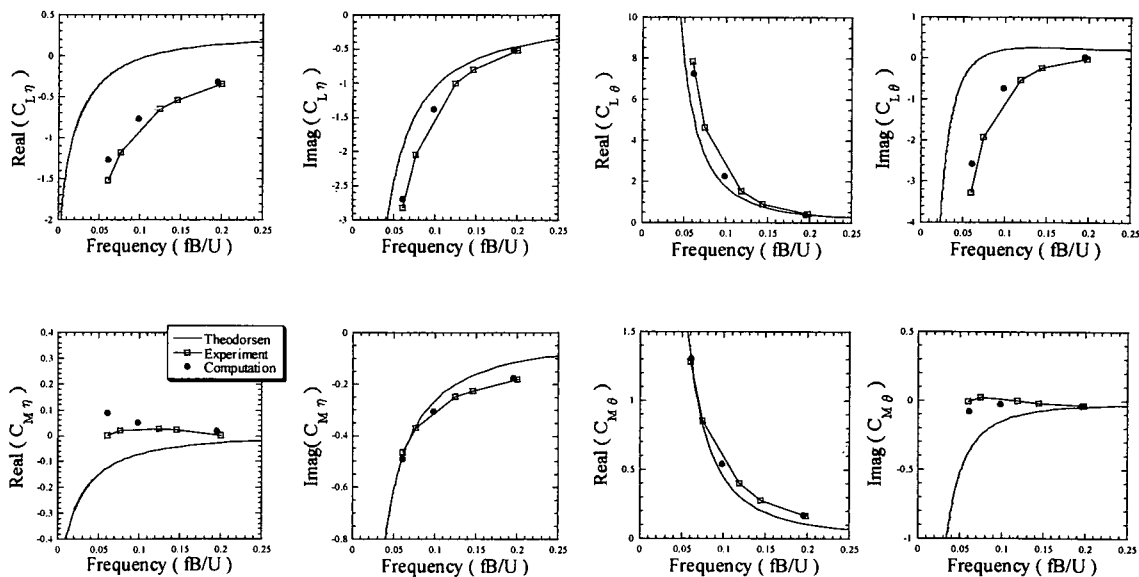


図-2 非正常空気の比較 矩形柱 $B/D = 10$; $\alpha = 0 \text{ deg}$, $\eta/B = 0.025$, $\theta = 2 \text{ deg}$
 (計算: Kuroda⁵⁾, 実験: 上島, 松田, 杉本⁶⁾)

であるというご指摘には必ずしも同意しかねますが、断面辺長比 5, 8, 10, 20 の矩形断面柱の非正常空気の予測に本論で用いた計算法を適用した結果⁵⁾がありますので、それを図-1 から図-4 に示します。空気力係数の定義は原論文で用いたものと同じです。同図では、本計算結果を、上島ら⁶⁾が一樣流中で行った実験の結果と比較しています。断面辺長比 5, 8, 10, 20 のそれ

ぞれの矩形断面柱に関する非正常空気力は本論での手法を用いて比較的精度よく予測されたと言ってよいと考えます。

討議事項 4 について

著者自身、もちろん流れの 3 次元性は重要な問題だと考えます。しかしながら本研究は、数値計算による

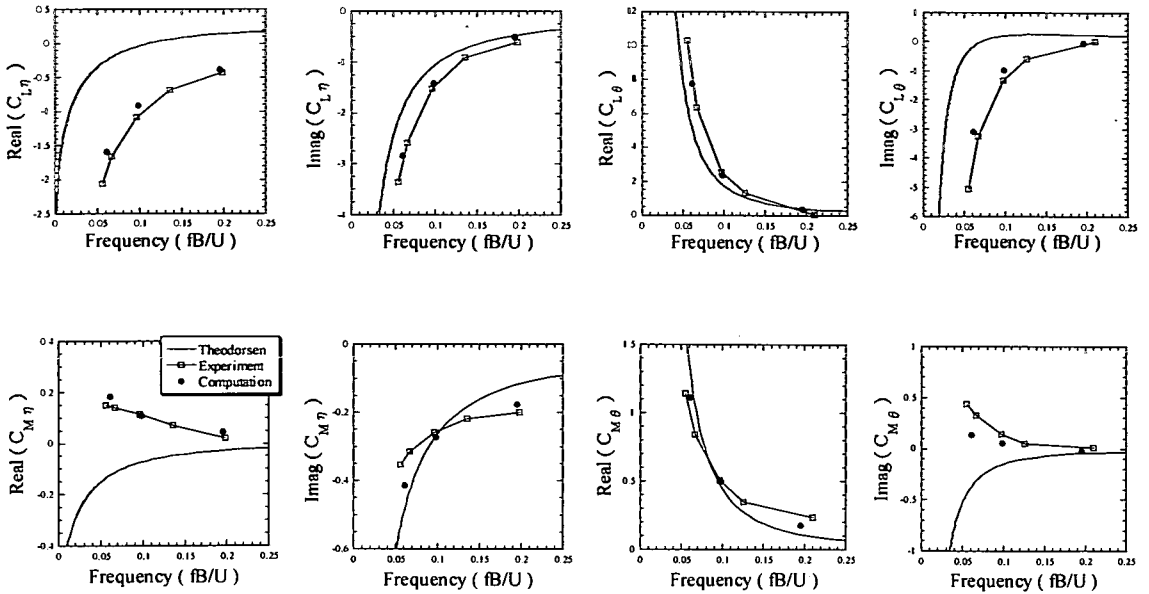


図-3 非定常空気力の比較 矩形柱 $B/D = 8$; $\alpha = 0 \text{ deg}$, $\eta/B = 0.025$, $\theta = 2 \text{ deg}$
 (計算: Kuroda⁵⁾, 実験: 上島, 松田, 杉本⁶⁾)

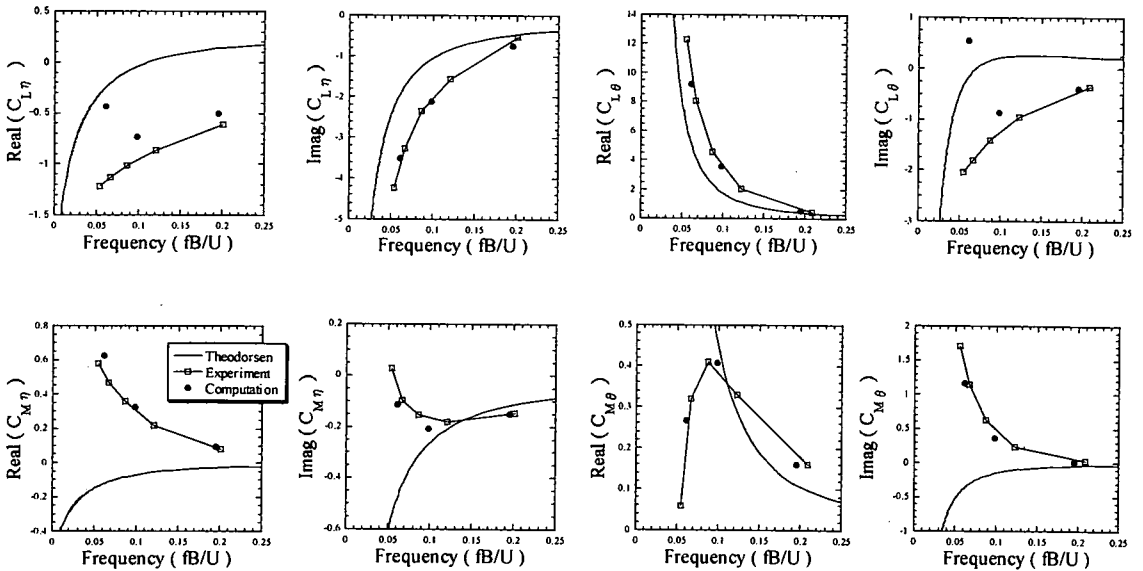


図-4 非定常空気力の比較 矩形柱 $B/D = 5$; $\alpha = 0 \text{ deg}$, $\eta/B = 0.025$, $\theta = 2 \text{ deg}$
 (計算: Kuroda⁵⁾, 実験: 上島, 松田, 杉本⁶⁾)

非定常空気力予測の第一段階として、まず計算負荷の小さい2次元RANS計算に限定して、その予測性能の調査を行ったものです。本論での結果から3次元性について言及することは、推測の域を出ないこととなり適当ではないと考えます。

また、「橋梁断面の後方での平均圧力係数や変動圧力係数は風洞実験値とよく対応した結果が得られていま

すが、変動圧力の位相差に関してはあまり対応が取れていない」とのご指摘についてですが、橋梁断面の後方では変動圧力係数(振幅)は非常に小さいのです(原論文の図-16, 17参照)。橋梁断面各における非定常圧力の非定常空気力への寄与を考えれば、変動圧力係数(振幅)の大きな橋梁断面前方で位相分布も精度よく予測されている(原論文の図-18参照)ことが非定常

空気力の予測にとって重要なのであって、振幅の小さい橋梁断面後方での位相分布の予測精度にそれほど重要な意味があるようには思えません。さらに、変動圧力係数の大きな橋梁断面前方とそれが非常に小さい断面後方とは、実験結果から得られた位相の信頼性も必ずしも同じではないように思います。

討議事項 5 について

まず、「静的な流れ場が支配的になる」というご指摘に関して思うところを述べます。確かに、無次元風速が十分に大きければ、空気力の物体の運動により誘起される成分の振幅あるいは位相差のいずれかは非常に小さくなると考えられます。しかし、通常の耐風設計で必要とされる無次元風速の範囲に限った場合、それらが無次元風速の増加とともに単調に減少するということは一概には言えないのではないのでしょうか。また、非常空空気力の予測という観点で言えば、この必ずしも大きくはない、物体の運動により誘起される空気力の成分を精度よく捉えることが重要となります。そして、この運動により誘起される成分を予測すること、固定された物体まわりの流れを予測することとは完全には同じではないと考えます。

静的空気力の計算結果はございますので、御参考にて、本論で計算対象とした偏平六角形断面に関する静的 3 分力の計算結果を Matsuda ら⁴⁾の風洞実験結果と比較して図-5 に示します。計算格子は原論文において非常空空気力の予測に用いたもの(原論文の図-14)と同一です。風洞模型には高欄・地覆がありますが、計算では考慮されていません。レイノルズ数は実験、計算ともに桁幅 B を基準にして $Re_B = 1.1 \times 10^7$ です。

計算結果の揚力係数とモーメント係数は実験結果のそれらとよく一致しているといつていいと考えます。抗力係数は、計算値が実験値よりも小さい値を示しています。しかしながら、抗力そのものの実験値と計算値との差は、揚力の実験値と計算値との差と同程度かそれ以下です。抗力係数が大きな値を示すのは桁高で無次元化しているためです。

参考文献

- 1) Menter, F. R. : Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal, Vol.32, No.8, pp.1598-1605, 1994.
- 2) Bradshaw, P., Ferriss, D. H. and Atwell, N. P. : Calculations of Boundary-Layer Development Using the Turbulent Energy Equation, Journal of Fluid Mechanics, Vol.28, part 3, pp.593-616, 1967.

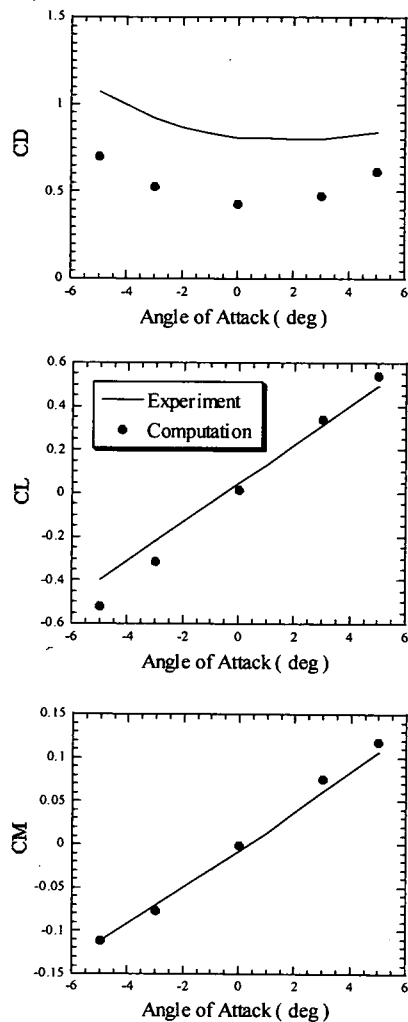


図-5 静的空気力の比較 長大橋桁断面
 $Re_B = 1.1 \times 10^7$ (実験: Matsuda et al.⁴⁾)

- 3) Driver, D. M. : Reynolds Shear Stress Measurements in a Separated Boundary Layer, AIAA 91-1787, 1991.
- 4) Matsuda, K., Cooper, K. R., Tanaka, H., Tokushige, M. and Iwasaki, T. : An investigation of Reynolds number effects on the steady and unsteady aerodynamic forces on a 1:10 scale bridge deck section model, in Proc. 10th Int. Conf. on Wind Engineering (Larsen, A. et al. ed.), Balkema, Rotterdam, pp.971-978, 1999.
- 5) Kuroda, S. : Numerical Computations of Unsteady Flows for Airfoils and Non-airfoil Structures, AIAA 2001-2714, June 2001.
- 6) 上島秀作, 松田一俊, 杉本高志: 乱流中における橋桁の非常空空気力特性, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集 I-B50, 2000 年 9 月.

(2001.8.21 受付)