

小水深人工リーフ天端上を通過する波の変形

—数値計算モデルの検証—

沖 和 哉*・村上 啓 介**・間 瀬 肇***

天端水深が極めて浅い人工リーフが設置された海域は、波浪予測計算を行うには厳しい条件であり、このような地形上を通過する波を統一的に精度よく予測できる数値モデルが必要となる。本研究では、小水深人工リーフが設置された海底地形での波浪変形計算を行い、また実験結果との比較を行って、数値モデルの検証を行った。入射波高が小さい場合には、いずれのモデルも比較的良好に実験結果と一致したが、入射波高が大きい場合には計算が不安定になる場合があった。また、人工リーフ背後から汀線付近にかけては一致の程度がよくなかった。これは、用いられている砕波モデルおよびそのパラメータが原因の一つであると考えられる。

1. 緒 言

波浪・高潮対策施設を設計する場合、数種の対策工を組み合わせた複合防護工法が用いられることが多い。対策工を検討する際には、海岸環境や景観への配慮も重要である。潜堤・人工リーフを設置すると、天端上の水深が極めて浅くなり、それを越えると水深が再び深くなるといった複雑な海底地形となる。従って、対策工を設計するにはこうした複雑な地形上の波を統一的に精度よく予測できる数値モデルが必要となる。

従来提案された数値モデルの主な適用例は、一様勾配海浜や一様水深上に設置された潜堤を通過する波浪変形など比較的単純な海底地形に対するものであり、天端上水深が極めて浅い地形での例はあまりなく、複合防護工法にみられるようないくつかの海岸構造物を有する複雑な地形での検討は十分ではない。

本研究は、現在発展が著しい幾つかの数値計算モデルを用いて、天端水深が非常に浅い人工リーフが設置された海底地形での波浪変形計算を行い、また実験結果との比較を行って、数値モデルの検証を行うものである。

2. 数値計算モデル

本研究で用いる波浪予測モデルは、浅海域における波浪の基本的な変形を考慮可能な Madsen ら (1992) の拡張型 Boussinesq モデル、Wei ら (1995) の fully nonlinear Boussinesq モデルおよび Navier-Stokes 方程式を解く VOF 法モデル (CADMAS-SURF, 沿岸開発技術研究センター, 2001) の計 3 種類である。以下に、それぞれのモデルの概要を述べる。

(1) Madsen ら (1992) の拡張型 Boussinesq モデル

Madsen ら (1992) は、適用範囲が浅海域に限定されていた Boussinesq 方程式の分散項に対して補正項を加えることにより、ある程度深い海域にまで適用が可能な拡

張型 Boussinesq 方程式を導いた。本研究で用いた数値モデルは Madsen ら (1997) に基づいている。移流項に 2 次精度の風上差分を用い、数値計算の安定性を確保するために 1 周期毎に水面波形にフィルターをかけた。砕波減衰として surface roller モデルを用いた。後に示す計算では岸側境界は水深 2 cm の一様水深部を設けて無反射境界とし、沖側境界では造波位置から 2 波長区間において斜面からの反射成分をダンピングさせて無反射造波境界とした。

(2) Wei ら (1995) の fully nonlinear Boussinesq モデル

Wei ら (1995) は、Nwogu (1993) の手法にならって鉛直方向の任意地点における水平速度と水面変動を従属変数に用いて、fully nonlinear Boussinesq model を導いた。Nwogu (1993) のモデルと比較すると、自由表面での境界条件において非線形性についての近似がなされていない。本研究で用いた数値モデルは、高次精度の予測子修正子法を用いており、安定して数値計算を行うために 1 周期毎に水面波形にフィルターをかけた。砕波減衰に関しては位置と時間の関数である渦動粘性項を用いた減衰モデル、汀線付近の移動境界についてはスロットモデルを用いた。計算領域境界には無反射境界を実現するためにエネルギー減衰帯を設置した。造波ソースを用いて任意の地点より波を入射させることが可能である。具体的な数値計算モデルは Kennedy ら (2000) に詳しい。

(3) 数値波動水路 (CADMAS-SURF)

数値波動水路 (CADMAS-SURF) は 2 次元非圧縮粘性流体の Navier-Stokes 方程式と連続の式をボラスモデルに基づいて拡張した式を基礎方程式とし、自由表面解析モデルとして VOF 法を採用したモデルである。このモデルは海域施設の耐波設計の実務に適用することを目的として作成され、自由表面が多価関数となる複雑な流れにも適応できる。計算領域境界あるいは領域内の造波ソースにより入射波を与えることが可能で、計算領域境界では、無反射モデルとして Sommerfeld の放射境界とエネルギー減衰帯の 2 つが採用されている。また、乱

* 正会員 工修 京都大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻

** 正会員 工博 宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科

*** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

流モデルとして高 Re 型 2 方程式 $k-\varepsilon$ モデルが用いられている。

それぞれの波浪予測モデルより得られた結果を次に示す実験結果と比較し、その予測精度について比較検討した。

3. 水理実験の概要

(1) 実験装置

図-1 は実験装置の概要を示したものである。2 通りに水位を変化させて実験を行った。海底勾配は $1/20$ で、沖での水深が 42.5 cm の場合を水位条件 A、 40.0 cm の場合を水位条件 B とする。護岸の堤脚水深はそれぞれ 0 cm および -2.5 cm である。図中の W1~W6 は容量式波高計を示している。W1 と W2 は入射波および反射波の計測用に設置し、W2 は斜面先端部、W3 は人工リーフ沖側の法先部、W4 は天端中央、W5 はリーフ岸側の法先部、W6 は水深が 5 cm の地点にそれぞれ設置した。

(2) 実験条件

水路左端の造波装置により規則波を入射させた。実験に用いた入射波高および周期を表-1 に示す。caseA1~caseA4 では水位条件 A を、caseB1~caseB4 では水位条件 B をそれぞれ用いた。これらの実験には、浅水変形、人工リーフによる反射、砕波、波の再生および波の再砕波などの現象が混在し、特にリーフ上の水深が非常に浅いことから波浪予測計算を行うには厳しい条件となっている。

4. 計算結果と実験結果との比較

先に示した 3 種類の数値予測モデルを用いて得られた結果と実験結果との比較を行う。Madsen らおよび Wei らのモデルでは、計算時間間隔は入射波周期の $1/100$ とし、格子間隔は沖側の一定水深域での入射波長の $1/50$ とし、計算を行った。CADMAS-SURF では、安定して数値計算が行えるよう、時々刻々の時間刻み幅が自動的に設定される。格子間隔は、水平方向に 2.5 cm 、鉛直方向に 1.0 cm とした。

ここで、それぞれのモデルで独自に用いられている主なパラメータについて説明する。まず、Madsen らのモデ

表-1 実験条件

	Wave Height (m)	Wave Period (sec)
caseA1	0.02	1.5
caseA2	0.03	2.0
caseA3	0.04	1.5
caseA4	0.06	2.0
caseB1	0.03	1.5
caseB2	0.03	2.0
caseB3	0.05	1.5
caseB4	0.05	2.0

ルにおいて、分散性に関するパラメータは $B=1/15$ とし、砕波に関するパラメータは $\phi_b=20$ 、 $\phi_0=10$ および $t_{1/2}=5$ とした。Wei らのモデルにおいて、スロットモデルに関するパラメータは $\lambda=50.0$ 、 $\delta=0.02$ とし、砕波に関するパラメータ $\eta^{(1)}$ の係数は 0.35 とした。CADMAS-SURF においては、差分スキームを DONOR-0.2 とした。それぞれのモデルのパラメータの詳細に関しては先に示した文献を参照されたい。

(1) 水位の時系列変化

実験により得られた水位時間変動 η について、各数値モデルによる計算結果と比較した。まず、天端水深が 6.9 cm の条件 (caseA1~caseA4) の主な結果について示す。caseA1 についてみると、波高計 W2 および W3 ではいずれのモデル結果とも実験結果とよく一致していた。波高計 W4~W6 における結果を図-2(a)~(c) に示す。それぞれの結果において、波高計 W2 での入射波振幅 a_0 で無次元化してある。実線が計算結果を、点線が実験結果をそれぞれ表している。W4 ではどのモデルも位相および大きさともに実験結果とほぼ一致している。W5 において、Wei らのモデルおよび CADMAS-SURF による結果は高周波変動が強めに出ている。また CADMAS-SURF による結果では水位変動が大きい。W6 ではいずれのモデルの結果も水位の最大値とその位相に関してはある程度再現できているが、細かい分裂波までは再現できない。全体を通して、Madsen らのモデルは弱非線形の仮定に基づいているため、高周波成分が小さい。caseA2 の条件では、波高計 W2 および W3 ではいずれのモデル結果とも実験結果と一致していた。Madsen らのモデルによる結果では W4~W5 においても実験結果をよく再現していたが、図-3 に示すように W6 では水位のピークを定量的に表せていない。Wei らのモデルによる結果では、W4 および W5 においてピークの位相は再現できているものの、高周波変動がかなり強く出ている。W6 においては Madsen らのモデルによる結果と同様に、ピークの水位が再現できていない (図-3)。CADMAS-SURF による結果では、人工リーフ周辺で波の非線形性により滑らかな波形が得られていなかった

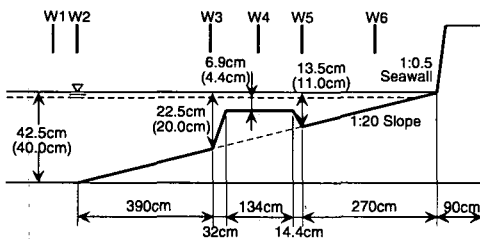
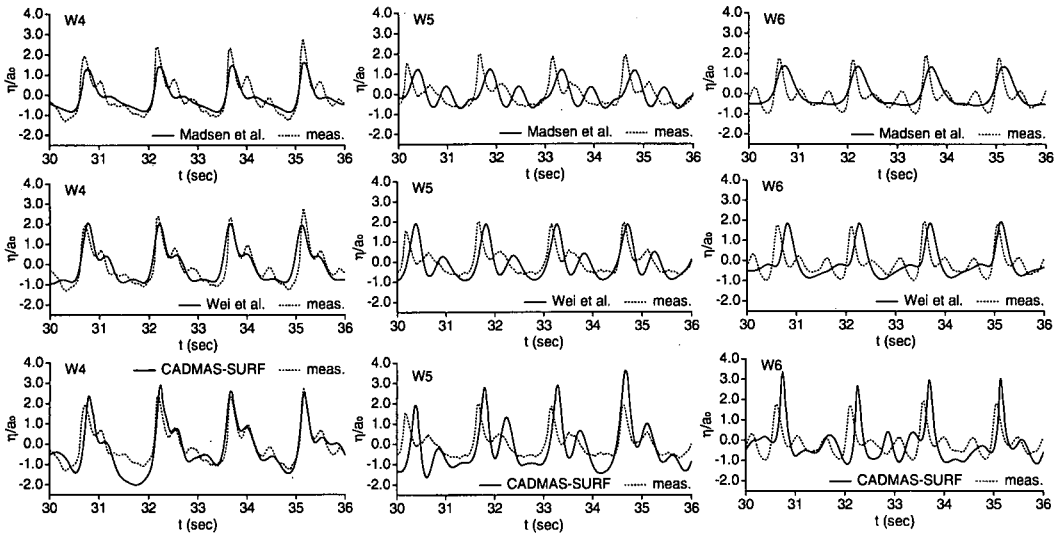


図-1 実験装置概要



(a) W4 における水位変動

(b) W5 における水位変動

(c) W6 における水位変動

図-2 水位変動 (caseA1)

が、全体的な傾向は実験結果と概ね一致していた。また、図-3 に示すように W6 においては他のモデルに比較して実験結果との一致の程度が良好であった。caseA3 の結果についてみると、caseA1 の結果とよく似た傾向を示していた。W6 における結果を図-4 に示す。caseA4 では、Wei らのモデルおよび CADMAS-SURF による結果では、実験結果と比較するとやや高周波成分が強くなっていた。また、図-5 に示すように CADMAS-SURF による結果でも水位のピークがやや小さくなっている。caseA1~caseA4 の実験結果において、セットアップによって岸に近づくにつれ平均水位が上昇しているが、どのモデル結果もそれをよく再現している。

次に、天端水深が 4.4 cm の条件 (caseB1~caseB4) の結果について述べる。入射する波浪は浅水変形により波高が増大し、天端上での波高と天端水深が同程度となるために数値計算を行うには非常に厳しい条件となっている。Wei らのモデルではこれらの条件では安定した解が得られなかった。Madsen らおよび CADMAS-SURF のモデルでは計算可能であったが、天端水深が 6.9 cm の条件での結果と比較すると、一致の程度はよくなかった。特に、岸に近い波高計ほどその傾向が顕著であった。

(2) 波高分布

caseA1~caseA4 の平均波高の空間分布を図-6 に示す。■が実験結果、実線が Madsen らのモデル、点線が

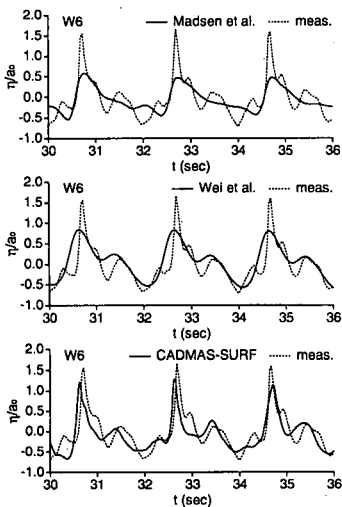


図-3 水位変動 (caseA2)

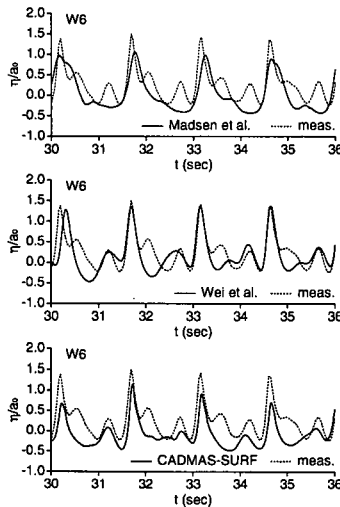


図-4 水位変動 (caseA3)

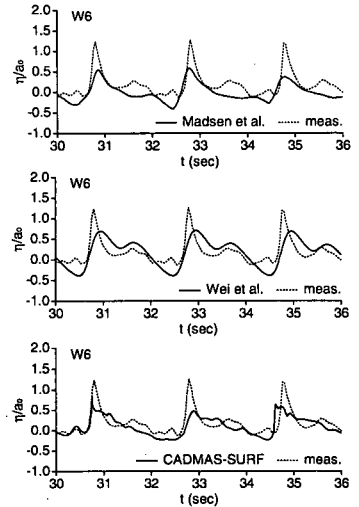
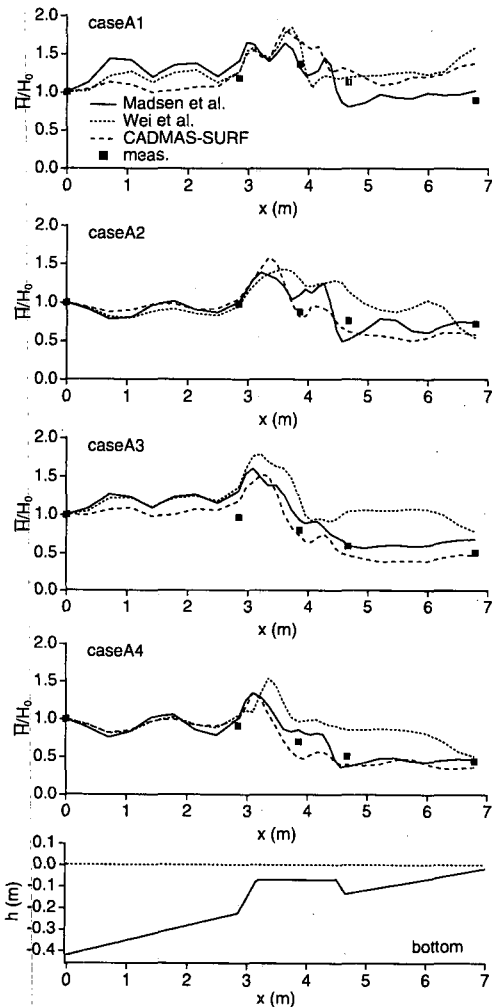
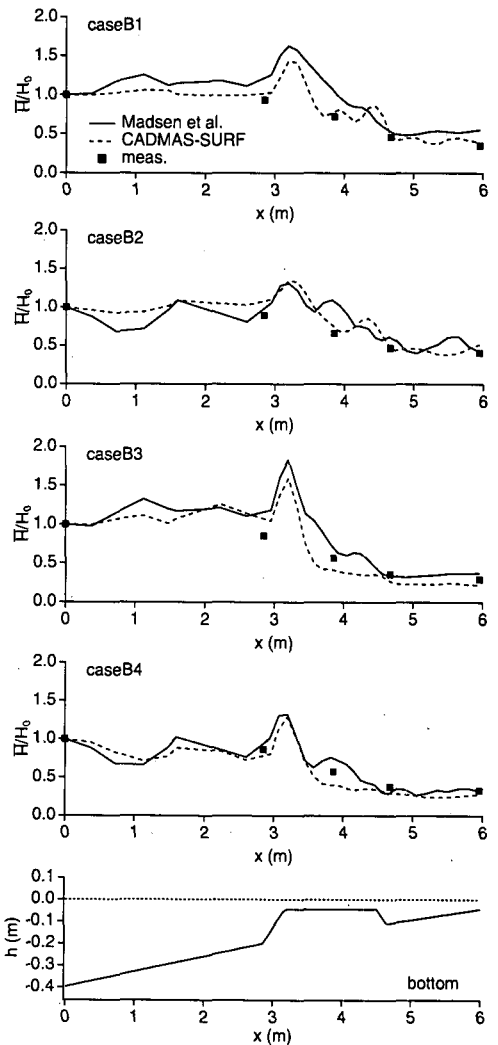


図-5 水位変動 (caseA4)

Weiらのモデル、破線がCADMAS-SURFによる結果をそれぞれ表している。縦軸は各々の結果におけるW2での平均波高で無次元化した平均波高 $\bar{H}/H_0$ 、横軸は斜面法先を原点として岸向きを正とした水平方向距離 x である。まず、沖側からみてみると、斜面法先(W2)から人工リーフ沖側法先(W3)までは実験において波高計を設置していないため、計算結果との比較ができないが、それぞれの計算結果どうしはほぼ一致している。また、岸からの反射によって節と腹ができる様子が現れている。W3における波高は、caseA3では実験結果がやや小さいが、他の条件ではよく一致している。次に人工リーフ天端付近についてみてみると、どのモデル結果も定性的にはある程度再現できているものの、波高の大きさはモデルにより異なっている。人工リーフ背後から岸に至る領域では、Weiらのモデルによる結果では、実験結果および他のモデルによる計算結果に比較してかなり大きな値



図—6 波高分布 (水位条件 A)



図—7 波高分布 (水位条件 B)

となっている。その原因の一つとして、碎波モデルによる碎波減衰が適切に再現できていないことが考えられる。

次に、caseB1～caseB4での平均波高の空間分布を図—7に示す。周期が短いcaseB1およびcaseB3の条件において、Madsenらのモデルによる結果では波高が大きく出ていたが、CADMAS-SURFによる結果は概ね良好に実験結果と一致していた。

(3) スペクトル

各波高計設置位置におけるスペクトルについて、実験結果と計算結果を比較した。ここでは特徴的な結果のみについて示す。caseA1におけるW4でのスペクトル密度 $S(f)$ を図—8に示す。どのモデル結果もピークにおけるスペクトル密度はよく一致している。また、CADMAS-SURFによる結果では、ピーク周辺以外のスペクトル密

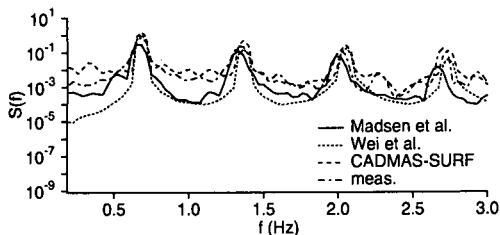


図-8 スペクトル (caseA1, W4)

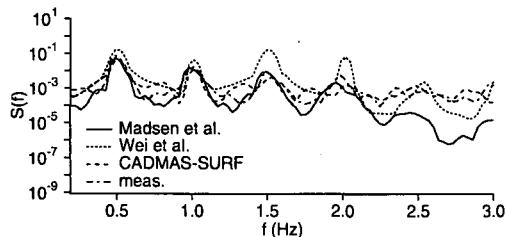


図-10 スペクトル (caseA3, W5)

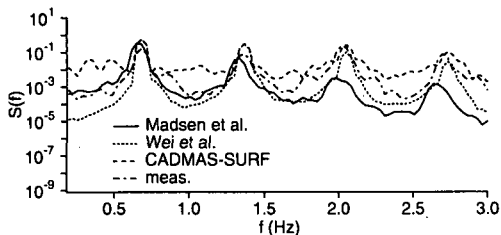


図-9 スペクトル (caseA1, W6)

度も実験結果とよく一致していた。W6では、図-9に示すように、Madsenらのモデルによる結果では、弱非線形型のモデルであるために高周波数領域での実験結果との一致の程度が他のモデルと比較してよくない。CADMAS-SURFによる結果では基本周波数付近でピーク周辺以外のスペクトル密度が大きい。

水位変動の結果において、Weiらのモデルの結果では高周波変動が強い場合があったが、スペクトルの結果においても同様であった。その一例として、caseA3でのW5における結果を図-10に示す。Weiらのモデル結果では、ピーク周波数は一致しているものの、スペクトル密度の大きさは実験結果とは大きく外れている。

その他の条件におけるスペクトルを比較した結果、基本周波数におけるスペクトル密度の大きさは、本研究の範囲ではどの条件、どの波高計位置においても各計算結果と実験結果はよく一致していた。それぞれのモデルについては、Madsenらのモデルでは高周波領域での一致の程度がよくなかった。Weiらのモデルでは基本周波数以下のスペクトル密度が小さくなり、高周波数でのスペクトル密度のピークが大きくなる傾向にあった。また、CADMAS-SURFではピーク周辺以外でのスペクトル密度の値が大きかった。

5. 結 語

本研究では3種類の数値計算モデルを用いて一様勾配斜面上に小水深人工リーフが設置された海底地形上に規則波が入射する場合の波浪変形計算を行い、実験結果と

の比較を行った。得られた結果は以下の通りである。

入射波高が天端水深よりも小さい場合には、いずれのモデルも波高計W4付近までは比較的良好に実験結果と一致した。入射波高が天端水深と同程度あるいはより大きい場合には計算が不安定になる場合があり、Weiらのモデルでは解が得られなかった。また、波高分布、エネルギー分布についての計算結果と実験結果との比較においても、人工リーフの背後から汀線付近にかけての一致の程度がよくなかった。これは用いた碎波モデルおよびそのパラメータがそもそも一様勾配斜面上でのもので、本研究のような複雑な地形条件では碎波減衰をよく再現できなかったためと考えらる。従って、これらの海域における数値予測を行う場合にはモデルの適用に関して何らかの工夫が必要であり、さらには護岸への打ち上げも含めた計算のできるモデルの作成が必要である。

本研究の一部は日本学術振興会特定国派遣研究者事業(デンマーク工科大学、村上啓介)の補助によるものであり謝意を表する。

参 考 文 献

- 沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・開発, 296 p.
- Kennedy, A. B., Chen, Q., Kirby, J. T. and Dalrymple R. A. (2000): Boussinesq Modeling of wave transformation, Breaking, and runup. I: 1D, *J. Waterway, Port, Coast., and Oc. Engrg.*, Vol. 126, No. 1, pp. 39-47.
- Madsen, P. A., and Sørensen, O. R. (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly varying bathymetry, *Coastal Engrg.*, Vol. 18, pp. 183-204.
- Madsen, P. A., Sørensen, O. R. and Schäfer H. A. (1997): Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part 1. Model description and cross shore motion of regular waves, *Coastal Engrg.*, Vol. 32, pp. 255-287.
- Nwogu, O. (1993): A alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation, *J. Waterway, Port, Coast., and Oc. Engrg.*, Vol. 119, No. 6, pp. 618-638.
- Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T. and Subramanya R. (1995): A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves, *J. Fluid Mech.*, Vol. 294, pp. 71-92.