

潮流と海浜流による干潟の地形変化に関する数値計算

Numerical Study of Topographic Changes of Intertidal Flat due to Tidal and Coastal Currents

鵜崎賢一¹・栗山善昭²・坂本 光³

Ken-ichi UZAKI, Yoshiaki KURIYAMA and Hikari SAKAMOTO

A three-dimensional numerical model to simulate topographic changes of intertidal flats of sand and cohesive sediments like mud due to tidal and coastal currents was applied to the field of the Shirakawa Intertidal Flat in the Ariake Sea. Numerical results showed good agreements qualitatively with observed results with regard to topographic changes around the mouth of river. They also showed that the simultaneous calculation of tidal and coastal currents including the wave-current interaction and the consideration of mud content were very important to simulate topographic changes of intertidal flats. Finally, the sediment budget around the mouth of river were calculated and the results showed almost good agreements with the estimation by using filed data. These results show the validity of this model to calculate sediment transports and topographic changes of intertidal flats.

1. はじめに

干潟は、内湾の水質改善や生態系維持という点で非常に重要な役割を果たしていることから、近年では全国各地で人工干潟の造成が行われるようになった。人工干潟の動的安定性を保ち、その形状を維持・管理していくためには、干潟の地形変化を予測する手法を確立する必要がある。鵜崎ら（2007）は、内山（2004）が開発した潮流による凝集性土砂の輸送モデル「WD-POM」を用い、有明海の白川河口干潟における底質輸送とその空間的収支の算定を行った。計算結果は、静穏時の潮位、底層の潮流速、SS濃度に関して、中川（2003）の観測結果と良好に一致し、静穏時にはこのモデルによって凝集性土砂の巻上げと輸送をある程度精度よく計算できることがわかった。

しかしながら山田ら（2007）は、白川干潟の底質輸送について潮流と白川からの土砂供給が支配的要因であると結論付けながらも、潮間帯上で流速や濁度の時系列を比較すると、台風時に高波浪が継続して発生した時にもそれらの値が非常に大きくなることも指摘している。とくに満潮の高波浪時には大きな底質輸送と地形変化が生じるものと考えられ、そうした場合には潮流だけでなく風波による巻き上げと海浜流による輸送も考慮する必要があると考えられる。加藤ら（2004）や黒岩ら（2007）は、波による海浜流の駆動力と平均流の方程式を用いた3次元の地形変化モデルを提案し、計算結果について定性的

な検討を行っている。しかしながら、干潟は対象としておらず、潮流との重合計算も行っていない。また、波浪場と流れ場を同時に計算する際には、波と流れの相互作用をより精確に考慮する必要があると考えられる。Grantら（1979）は、この相互作用によって底面せん断応力が増加することを指摘しており、とくに漂砂量を計算する場合などにはこの作用をより精確に考慮する必要がある。そこで鵜崎ら（2008）は、Newbergerら（2007a, b）が提案した、波と流れの相互作用をさらに渦度の形で取り込んだbody force termと碎波による流れの駆動力項からなるwave forcing termを波浪モデルとともにWD-POMに導入し、潮流と同時に海浜流の計算が可能となるようにモデルの改良を行なった。さらに、砂質干潟から泥質干潟まで適用できるように、Bailardの漂砂量モデルと含泥率の導入を行なった。そして検証計算を行ない、改良モデルの妥当性を検証した。しかしながら現地適用を考えると、最終的に現地データによるモデルの妥当性の検証は必要不可欠である。

そこで本研究では、改良モデルを白川河口干潟に適用して実際の地形変化の再現性を検証するとともに、干潟の地形変化の計算における潮流と海浜流の重合計算ならびに含泥率の導入の重要性について検討を行った。また、干潟上の土砂収支を算定して、栗山ら（2004）による算定結果との比較検討を行ない、現地データによる総合的な検証を行なった。

2. 数値計算の概要

図-1に、有明海と白川河口干潟を対象とした計算領域を示す。まず大領域として、有明海の外にある橘湾の沖合いを開境界とした有明海全体の計算を行い、得られた潮位データを線形補間して小領域の境界条件として与え

1 正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 沿岸土砂管理研究チーム 特別研究員
2 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 沿岸土砂管理研究チーム チーム・リーダー
3 (株)ブライア・コンサルタント エンジニアリング部

た．各領域において，図に示すように x 軸， y 軸を設定した．大領域の境界潮位は，中川（2003）によって調節された調和定数をもとに潮位を計算して与えた．図中に白色の実線で示された四角は，栗山・橋本（2004）による深淺測量の範囲である．以降の本文中では，この範囲を解析領域と呼ぶこととする．St.Aは中川（2003）による観測点を示す．小領域の計算では，栗山ら（2004）を参考に，白川河口の時々刻々の汀線位置において河川流量を流速に換算して与え，さらに流量をもとにして流出土砂フラックスならびに凝集性土砂の濃度を与えた．計算期間は，大領域・小領域ともに2001年10月25日から11月9日までの15日間とし，計算開始から12時間を助走計算とした．図-2に，現地の含泥率の空間分布を示す．小領域の計算では，現地の含泥率データを各メッシュ毎に与えて底面における凝集性土砂の鉛直フラックスに乗じた．また，漂砂量フラックスについては1から含泥率を引いた値に乗じた．初期地形データは2000年8月の深淺測量データを用いた．また，現地データを参考にして，砂に関しては粒径0.25mm，密度2.65g/cm³，凝集性土砂に関しては密度1.20g/cm³とした．表-1に計算条件を，表-2に計算内容を示す．Run 1として，荒天時を対象とした潮流と海浜流の重合計算を行った．またRun 2，3として，河川流量を変えて潮流のみの計算を行ない，Run 4としてとして海浜流のみの計算を行った．さらに含泥率についての感度分析として，Run 5，6：含泥率 $\gamma=0$ ，Run 7，8： $\gamma=1.0$ を行った．波浪場の計算にはエネルギー平衡方程式を用い，熊本港における計算期間中の高波浪時のデータを参考に，沖側開口部において x 方向に一様に波高1.5m，周期6.0s，入射角45°の入射波を与えて行った．

3. 計算結果と考察

(1) 波浪場と流れ場に関する計算結果

図-3 (a)，(b) に，Run 1における干潮時（潮位 = -2.2 m）と満潮時（潮位 = +2.0m）の波高分布を示す．図から，汀線の移動と地形変化に伴って，波浪場が大きく変化していることがわかる．とくに，熊本新港より汀線側での波高変化が著しく，この領域でwave forcing termが時空間的に大きく変動していることが推察できる．図-4 (a)，(b) に，上げ潮時（潮位 = -0.25m）と下げ潮時（潮位 = +0.10m）の断面平均流速分布を示す．上げ潮時は，水深が大きい領域から東向きに強い流れが侵入し，河口周辺でも東向きの流れが生じている．一方，下げ潮時には沖側境界付近で南西方向あるいは一部で北西方向の流れが生じている．河口周辺部は北と南寄りにやや発散傾向で沖向き流れが生じているが，これは河口周辺部の地形による影響だと考えられる．

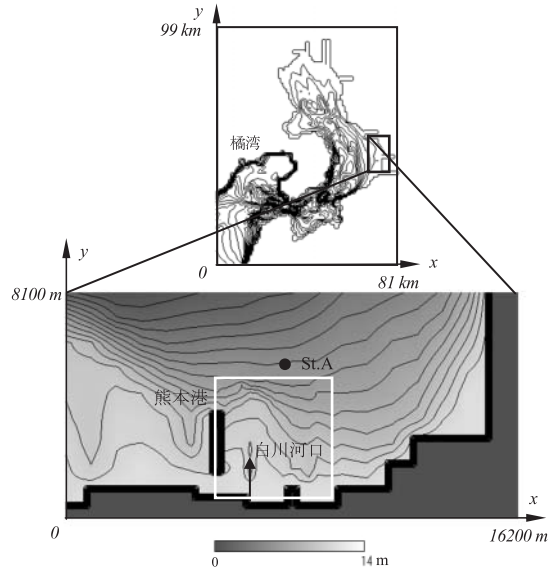


図-1 現地計算の計算領域

表-1 計算条件

		大領域	小領域
格子数	nx	90	55
	ny	110	28
	nz	11	6
格子間隔	dx	900m	300m
	dy	900m	300m
時間間隔	dt	0.5s	0.1s

表-2 計算内容

	考慮する流れ	考慮する底質	河川流量	含泥率
Run 1	海浜流＋潮流	砂＋凝集性土砂	$q = 400\text{m}^3/\text{s}$	
Run 2	潮流	砂＋凝集性土砂	$q = 20\text{m}^3/\text{s}$	
Run 3	潮流	砂＋凝集性土砂	$q = 200\text{m}^3/\text{s}$	
Run 4	海浜流	砂＋凝集性土砂	$q = 200\text{m}^3/\text{s}$	
Run 5	海浜流＋潮流	砂	$q = 400\text{m}^3/\text{s}$	$\gamma = 0.0$
Run 6	潮流	砂	$q = 20\text{m}^3/\text{s}$	$\gamma = 0.0$
Run 7	海浜流＋潮流	凝集性土砂	$q = 400\text{m}^3/\text{s}$	$\gamma = 1.0$
Run 8	潮流	凝集性土砂	$q = 20\text{m}^3/\text{s}$	$\gamma = 1.0$

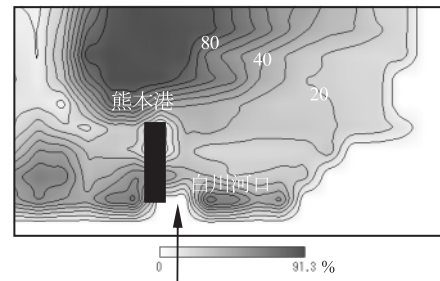


図-2 含泥率の空間分布

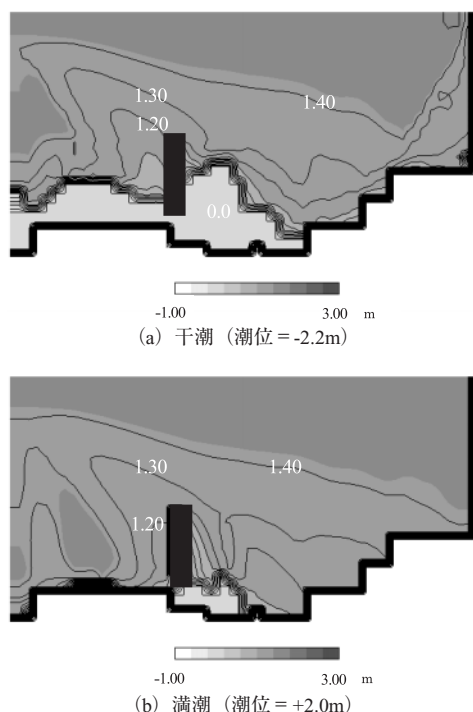


図-3 潮位変動による波浪場の変化 (Run 1)

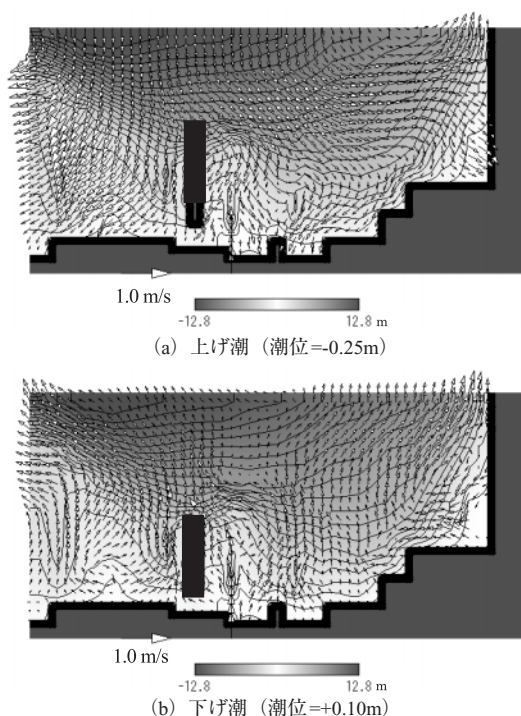


図-4 潮位変動による流れ場の変化 (Run 1)

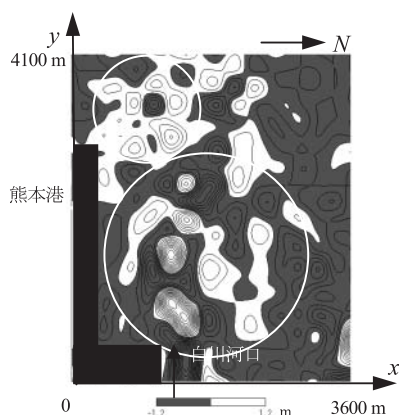
(2) 河口周辺部の地形変化の再現性

図-5 (a), (b), (c) に, 2000年8月と2002年6月の深

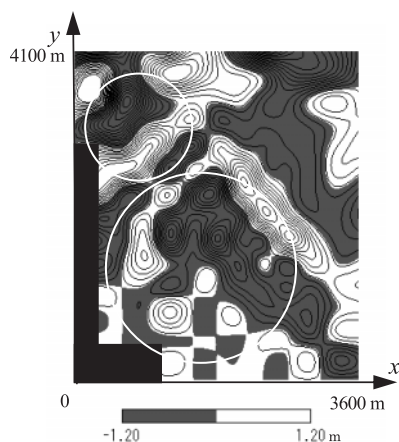
浅測量データから得られた解析領域内の地形変化量と Run 1, 2 の計算結果から求めた地形変化量の空間分布, ならびに下げ潮最強時の底層の流速ベクトルをそれぞれ示す. (b) は, 15日間の荒天期間を年間2回と仮定し, 荒天期間は Run 1, それ以外の静穏期間は Run 2 の計算結果を用いて算定された2年間の総地形変化量である. (c) におけるコンター線は水深を示している. 以降の図において, 白色は堆積領域を, 灰色は侵食領域を示し, コンター間隔は0.10mとした. (a) において, 河口から沖合いに向かって周期的に侵食・堆積領域が形成されていることがわかる. 図-1の初期地形からもわかるが, この周期的な地形変化は, 2000年8月の地形が滞筋の蛇行等によって周期的な高低を有する構造であることに起因していると考えられる. また, 熊本港の先端付近では緩やかな堆積領域が広がる一方で, 河口より北側の領域では侵食領域が広がっている. 領域全体で地形変化量の平均を求めると負値となり, 全体としては侵食傾向にある. (b) においても, 大きな白円で示すように, やや不明瞭ではあるものの河口近傍において周期的な堆積・侵食領域が認められる. 河口周辺部の地形はテラス状になっており, 沖に向かって凸型をした三角形の縁辺に沿ってやや急な水深変化が生じている. そうした箇所では流れが急に緩やかとなり, 河口から供給された土砂が流れの減速域で堆積が生じている. このことは (c) において確認することができる. また, 小さな白円で示すように, 値としては (a) よりもやや少ないものの, 熊本港先端部付近で堆積領域が広がっている. 領域全体の平均変化量は負値であり, 侵食傾向である. 最大侵食・堆積量についてもオーダーとしては両者はほぼ一致しており, 定性的には, 計算結果は実測結果をほぼ良好に再現していると判断できる. 但し, (b) では河口北側では僅かながら堆積傾向の領域が認められるが, (a) ではほぼ侵食傾向であり, この部分では実測結果と計算結果が一致しない. この原因については, 今後さらに詳細に検討していく.

(3) 潮流と海浜流の重合計算が地形変化に与える影響

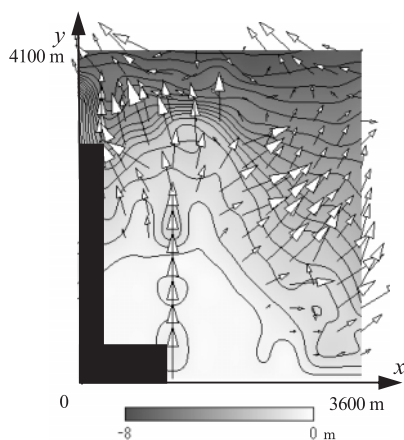
図-6に, Run 2, 3, 4の計算結果から求めた2年間の地形変化量の空間分布を示す. (b) は, 図-5 (b) の場合と同じ荒天期間の仮定を行い, 荒天期間において Run 3と4の計算結果を線型に足し合わせ, それ以外の期間に関しては Run 2の結果を用いて算定した地形変化量分布である. 図-5 (b) では侵食領域が多いのに対して, (b) では比較的堆積領域が広がっている. これは戻り流れの存在と, さらに汀線近傍のセットアップの増大によって戻り流れが強化されることで, 冲向きの底質輸送が大きくなるためであると考えられる. また, 河口部からの滞筋にそって周期的な侵食・堆積パターンは明瞭には認められない. 図-5 (a), (b) と図-6の比較から, 潮流と海浜流



(a) 深浅測量データによる地形変化量の空間分布 (2000.8-2002.6)



(b) 計算結果による地形変化量分布 (Run 1, 2)



(c) 計算結果による流れ場 (Run 1, 2)

図-5 解析領域内の地形変化量と流れ場の空間分布

の重合計算が、現地干潟の地形変化を再現する上で非常に重要であることがわかる。

(4) 含泥率が地形変化に与える影響

図-7 (a), (b) に、Run 5, 6とRun 7, 8の計算結果が

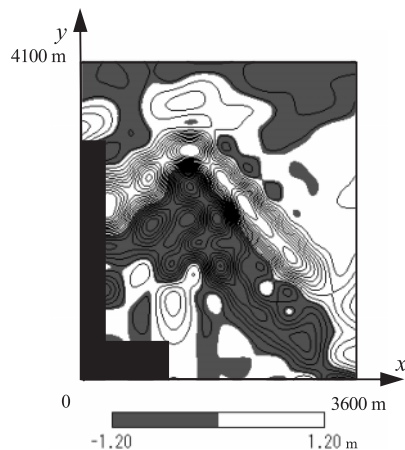


図-6 計算結果による地形変化量分布 (Run 2, 3, 4)

ら、図-5 (b) の算定と同様に荒天期間を仮定して求めた地形変化量の分布を示す。(a)においては、河口直後の侵食・堆積領域と、テラス縁辺の堆積領域が確認でき、図-5 (b) と類似したパターンになっていることがわかる。最大侵食量についても、コンターから判断して図-5 (b) とほぼ一致した値となる。一方 (b) においては、侵食・堆積パターンが大きく異なり、その絶対値もコンターから判断して非常に小さくなることがわかる。図-2から、解析領域周辺は含泥率が低く、その地形変化の大部分は砂によるものであると考えられ、(a) の方が図-5 (b) の再現計算の結果と類似した結果となることは妥当である。これらの図から、含泥率によって地形変化量の計算結果は大きく変化するため、適切な含泥率の元で計算を行うことが必要であるということがわかる。

(5) 河口周辺部の土砂収支

図-8 (a), (b) に、栗山ら (2004) が深浅測量データをもとに算定した、1993年以降の大規模出水がない場合の土砂収支と計算結果による土砂収支をそれぞれ示す。各フラックスは、各断面における漂砂量・凝集性土砂の積分フラックスの時系列データから、図-5 (b) の算定と同様の仮定を用いてRun 1, 2の結果から求めた値であり、凝集性土砂と砂の輸送量の合算値である。まず、(a) では波による沿岸漂砂量として Q_L を算定しているのに対して、(b) では潮流による沿岸方向の輸送量も含まれていることから、 Q_L の値に関して差異が生じる。また、(a) では Q_V 、 Q_L 以外の輸送量として Q_0 を定義しているのに対し、(b) では単純に沖側境界の冲向きフラックスと定義しているため、 Q_0 についても差が生じる。従って Q_V に関してのみ両者を比較すると、両者の符号は一致して侵食傾向であり、値としてもオーダー的には一致することがわかる。このことから、改良モデルによる地形変化量の計算は定性的な範囲で妥当であると言える。

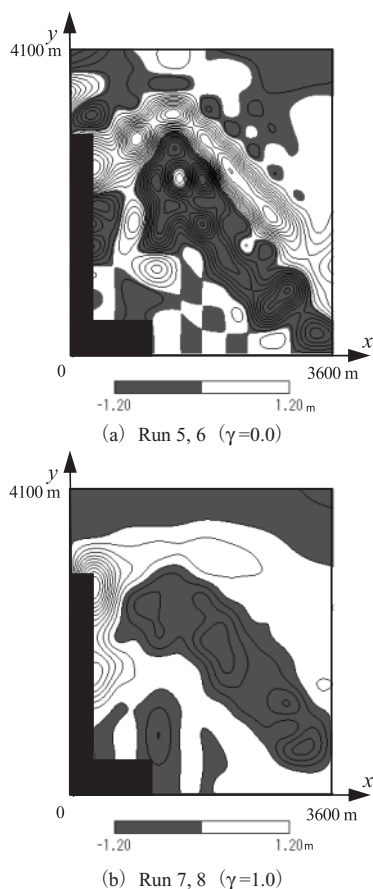


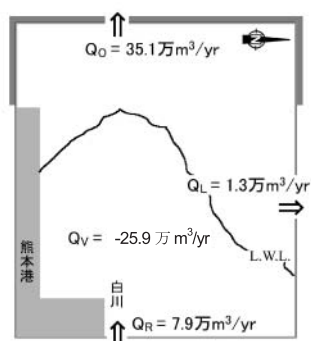
図-7 含泥率に関する地形変化量分布の比較

4. 結論

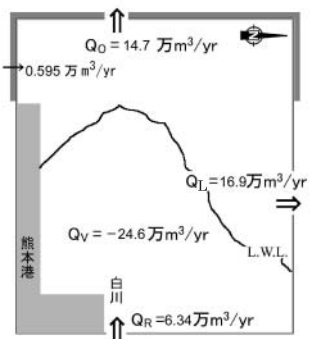
潮流と海浜流による砂と凝集性土砂の3次元地形変化モデル「WD-POM」を有明海の白川河口干潟に適用し、現地データとの比較検討を行った。計算結果は現地データによる地形変化量の分布と定性的にほぼ一致し、干潟上の土砂収支についても、栗山ら(2004)が深淺測量データから算定した値とオーダーとして一致することがわかった。また、干潟の地形変化を再現するためには、潮流と海浜流の重合計算、ならびに含泥率の考慮が重要であることがわかった。

参考文献

- 鶴崎賢一・栗山善昭(2007)：白川河口干潟における凝集性土砂の土砂収支に関する数値計算，海岸工学論文集，第54巻，pp.456-460。
- 鶴崎賢一・栗山善昭・坂本 光(2008)：潮汐と風波による干潟の底質輸送と地形変化に関する数値計算，海岸工学論文集，第55巻，pp.451-455。
- 内山雄介(2004)：拡張対数則を導入した干出・冠水スキームの開発と3次元 σ 座標モデルへの適用，港湾空港技術研究所報告，第43巻，第4号。



(a) 栗山ら(2004)による土砂収支
(1993年以降の大規模出水がない場合)



(b) 計算結果による土砂収支

図-8 解析領域における土砂収支量の比較

- 加藤 茂，山下隆男(2004)：広域海浜流・漂砂モデルによる冬季日本海沿岸での海浜変形シミュレーション，海岸工学論文集，第51巻，pp.511-515。
- 栗山善昭・橋本孝治(2004)：熊本県白川河口干潟における土砂収支，港湾空港技術研究所資料，No.1074。
- 黒岩正光，口石孝幸，松原雄平，砂川真太郎(2007)：準3次元海浜流モデルを用いた3次元河口砂州形成数値シミュレーション，海岸工学論文集，第54巻，pp.686-690。
- 中川康之(2003)：有明海における底泥輸送現象のモデル化，港湾空港技術研究所報告，第42巻，第4号。
- 山田文彦・坂西由弘・山口龍太・蒲原さやか・穴井広和・小林信久・玉置昭夫・多田彰秀(2007)：潮汐位相平均を用いた潮間帯上の底質輸送フラックスの時間変動特性，海岸工学論文集，第54巻，pp.626-630。
- Bailard, J.A., 1981, An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach., *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, No. C11, pp. 10938-10954.
- Grant, W. D. and O. S. Madsen (1979)：Combined wave and current interaction with a rough bottom, *J. Geophys. Res.*, 89, 1797-1808.
- Newberger, P. A. and J. S. Allen (2007a)：Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive-equation model for application in the surf zone：1. Formulation, *Jour. Geophys. Res.*, 112, C08018, doi：10.1029/2006JC003472.
- Newberger, P. A. and J. S. Allen (2007b)：Forcing a three-dimensional, hydrostatic, primitive-equation model for application in the surf zone：2. Application to DUCK94, *Jour. Geophys. Res.*, 112, C08019, doi：10.1029/2006JC003474.