

乱流モデルによる非定常泥水流の流動解析

衛 藤 俊 彦*・福 嶋 祐 介**

海底溪谷や大きな湖底で発生する泥水流は、多量の土砂を輸送し、沿岸域での漂砂や溪谷の地形変化に影響を与える。上流からの土砂の供給が連続的である場合定常な泥水流が形成され、上流からの土砂の供給が十分でない場合非定常な泥水流が形成される。非定常な泥水流の流動特性を明らかにするため、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて数値解析を行った。最大厚さ、流下速度などの解析結果を実験結果と比較することにより、解析の妥当性を検討した。さらに、計算結果を用いて流速ベクトル場、等濃度線を表示し、泥水流内外の流れの特徴を明らかにした。

1. 序 論

均一な水中に砂を浮遊した泥水が流入するとき、その密度差により泥水流が形成される。泥水流は海底溪谷や大きな湖底で発生し、沿岸域の砂や濁度物質を深部に運搬する機構の一部を担っていると考えられる (Inman ら, 1976; Parker, 1982)。斜面上流からの土砂の供給が連続的である場合、定常な泥水流が形成され、上流からの土砂の供給が十分でない場合、非定常な泥水流が形成される。後者の場合、泥水流は全体として傾斜サーマル状の流動形態をとると考えられる。一定な傾斜角 θ をもつ斜面上の非定常な泥水流を模式的に図-1 に示す。上流から流入してきた泥水が、全体として非定常なフロント部を形成しながら流下する。

非定常な泥水流は、塩水や温度差などに起因する密度差を伴う保存性傾斜サーマルと類似の流れである。一方、泥水流では粒子の沈降性のために、乱流強度が小さくなると浮遊状態を維持できず、粒子が沈降しサーマルから離脱するため、負の浮力の総量が流下に伴い低減する。

泥水流については Parker ら (1987) や Garcia (1990) によって実験的研究が行われた。福嶋・Parker (1985) はスクリップス海底溪谷での泥水流 (Inman ら, 1976) について、層積分法を用いた数値解析により検討した。衛藤・福嶋 (2001) は $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて、定常な泥水流の流速分布と濃度分布を数値的に求めた。また、衛藤・福嶋 (2002) は保存性の傾斜サーマルを対象として $k-\epsilon$ 乱流モデルによる数値解析を行い、傾斜角 30° での流動場の特徴を調べた。

本研究では、非定常な泥水流の特性を明らかにするため、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて数値解析を行う。その解析結果より流下速度、最大厚さの流下方向の変化を求め、福嶋ら (1999) および福嶋・今田 (2000)

の実験結果と比較を行う。また泥水流内部の流動機構を解明するため流速ベクトル場、等濃度線を求める。

2. 泥水流の基礎方程式

数値解析手法は基本的に衛藤・福嶋 (2002) と同様である。すなわち、基礎方程式として連続式、 x, z 方向のレイノルズ方程式、乱流運動エネルギー k の方程式、分子粘性逸散率 ϵ の方程式を用いた。ただし、泥水流では土砂粒子の輸送を扱う必要があり、粒子の沈降性を考慮した乱流拡散方程式を塩分の拡散方程式の代わりに用いた。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + (u + w_s \sin \theta) \frac{\partial c}{\partial x} + (w - w_s \cos \theta) \frac{\partial c}{\partial z} \\ = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。ここで、 c は土砂の体積濃度、 u, w は x および z 方向の流速成分、 w_s は土砂粒子の沈降速度、 D は分子拡散係数である。また、 ν_t は渦動粘性係数であり、 k と ϵ を用いて次のように表す。

$$\nu_t = c_\mu k^2 / \epsilon \quad \dots\dots\dots (2)$$

σ_t, c_μ は $k-\epsilon$ 乱流モデルのモデル定数である (衛藤・福嶋, 2002)。

以上の基礎方程式をパタンカー (1985) の SIMPLE 法を用いて離散化を行い、数値解析を行った。

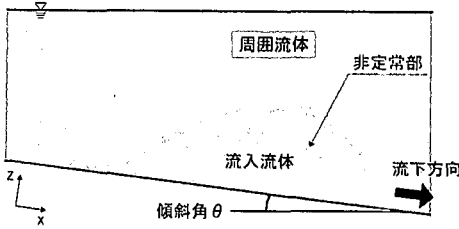


図-1 泥水流の模式図

* 学生会員 工修 長岡技術科学大学大学院工学研究科エネルギー・環境工学専攻
** 正 会 員 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系

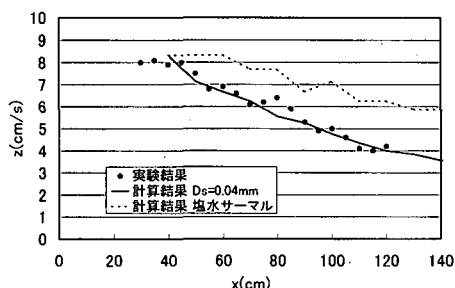


図-2 サーマルの流下速度の流下距離に対する変化 $\theta=10^\circ$ (福岡ら, 1999)

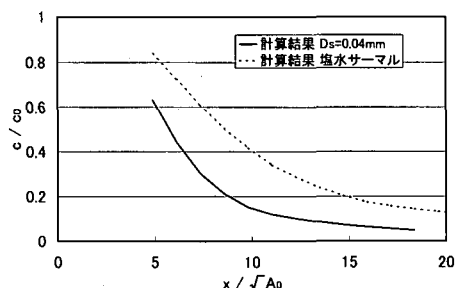


図-4 サーマルの最大濃度の流下距離に対する変化 $\theta=10^\circ$ (福岡ら, 1999)

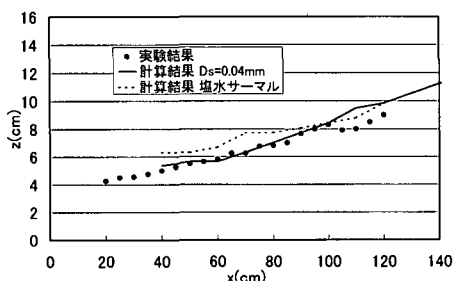


図-3 サーマルの最大厚さの流下距離に対する変化 $\theta=10^\circ$ (福岡ら, 1999)

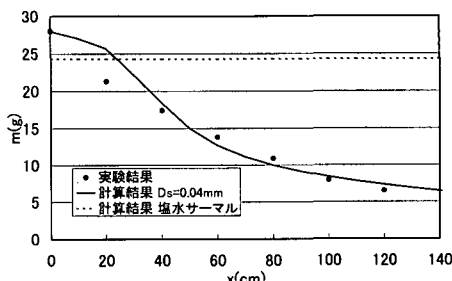


図-5 サーマルの浮遊粒子総量の流下距離に対する変化 $\theta=10^\circ$ (福岡ら, 1999)

3. 非定常な泥水流の解析結果

3.1 実験の概要

非定常な泥水流の数値解析の妥当性を検証するため、実験結果と比較を行った。比較に用いたのは、福岡ら (1999) と福岡・今田 (2000) の実験である。以下に実験の概要をまとめる。

福岡ら (1999) の実験は長さ 370 cm、高さ 40 cm、幅 15 cm の矩形アクリル製水槽で行われた。水槽は角度 10° で傾斜している。土砂粒子の代わりに比重 4.37 の硫酸バリウム粒子を用いた。上流端には引き上げ式のゲートをもつボックスが設置され、水槽内には淡水が、ボックス内には 1 l の硫酸バリウム混合水が満たされる。ゲートを引き上げるにより傾斜サーマルが発生され、水槽側方からビデオ撮影され、画像解析により傾斜サーマルの流下速度、最大厚さが逐次求められた。実験では非定常流が対象とされているため、誤差を最小限にするために同じ実験条件で 5 回ずつの測定が行われた。5 回の測定結果の平均値が実験結果とされた。サーマルの流下後、水路床上に沈降堆積した硫酸バリウムの重量が測定されている。また上流のボックス内に堆積した硫酸バリウムの重量の差からサーマルとして流下した粒子

の重量が算出された。

福岡・今田 (2000) の実験は長さ 200 cm、高さ 100 cm、幅 30 cm の矩形アクリル製水槽に、幅 15 cm のアクリル製の傾斜板を角度 30° で固定した装置を用いて行われた。実験および測定の方法は福岡ら (1999) と同様である。数値計算に用いた粒子の沈降速度はストークスの式で求めた。

3.2 傾斜角 $\theta=30^\circ$ の場合の比較

以上の実験と比較するため、実験と同じ水理条件を計算条件として数値解析を行った。硫酸バリウム粒子は広い粒径分布を持ち、代表的な粒径を明確に特定できない。このため、粒径を変化させて計算を行い、浮遊粒子総量の流下方向の変化が実験結果と一致するような粒径を求めた。その結果、粒径 $D_s=0.04$ mm が得られた。また非保存性の重力流である泥水流と比較するため、保存性の傾斜サーマルとして、同じ総浮力をもつ塩水サーマルの計算も行った。

図-2 から 5 に実験結果と計算結果を比較したものを示す。黒丸で福岡ら (1999) の泥水流の実験結果を示し、実線で泥水サーマルの、破線で塩水サーマルの計算結果を示す。図-2 は流下速度の流下距離に対する変化を示したものである。福岡らの実験結果は実線の計算結果とよく一致している。泥水サーマル、塩水サーマルの両方の流下速度は次第に減少する

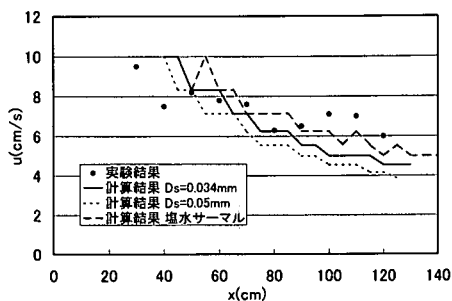


図-6 流下速度の流下距離に対する変化 $\theta=30^\circ$ (福嶋・今田, 2000)

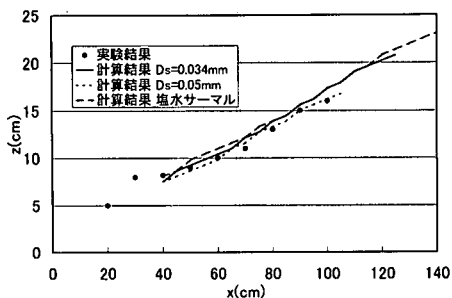


図-7 サーマルの最大厚さの流下距離に対する変化 $\theta=30^\circ$ (福嶋・今田, 2000)

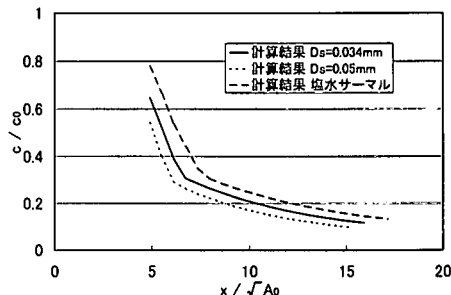


図-8 サーマルの最大濃度の流下距離に対する変化 $\theta=30^\circ$ (福嶋・今田, 2000)

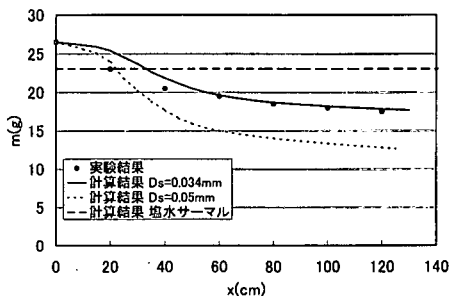


図-9 サーマルの浮遊粒子総量の流下距離に対する変化 $\theta=30^\circ$ (福嶋・今田, 2000)

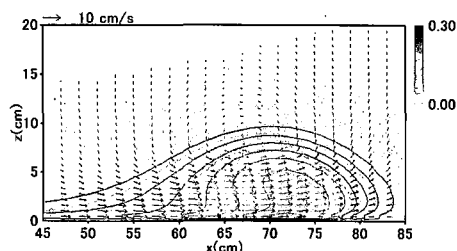
が、泥水サーマルの方が減少が早い。塩水サーマルの総浮力が一定なのに対し、泥水サーマルでは粒子の沈降により総浮力が減少するためである。図-3は最大厚さの流下距離に対する変化を示したものである。実験及び2種類の数値計算とも最大厚さは流下距離に対して、一次関数的に(直線的に)増加しており、ほぼ一致している。塩水サーマルと泥水サーマルとで顕著な差は見られない。図-4はサーマル内の最大濃度を流下距離に対して示したものである。横軸は流下距離を初期面積の平方根で無次元化し、縦軸は濃度を初期濃度で基準化している。濃度は実験では測定されていない。塩水サーマル、泥水サーマルとも濃度は流下とともにかなり早く減少する。しかし、泥水サーマルでは粒子の沈降性のため、塩水サーマルに比べ早く減少している。図-5はサーマルの負の浮力の総量を流下距離に対して示したものである。塩水サーマルでは浮力総量は流下距離に対して変化せず一定である。一方、泥水サーマルでは負の浮力の総量は流入後に次第に減少してゆく。また粒径を調整した結果、計算値と実験値はほぼ一致していることが確認できる。

3.3 傾斜角 $\theta=30^\circ$ の場合の比較

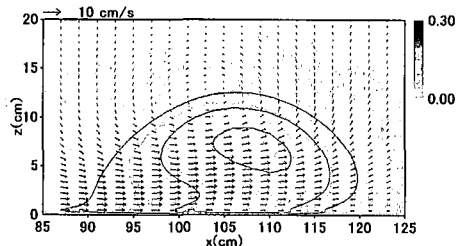
傾斜角 $\theta=30^\circ$ の場合の計算結果を福嶋・今田

(2000) の実験結果と比較したのが図-6から9である。この場合も粒子総量の流下方向の変化の計算結果が実験結果と一致するように硫酸バリウムの粒径を定めた。この結果 $D_s=0.034$ mmを得た(実線で示す)。粒径の違いによって泥水サーマルの諸量がどのように変わるかを確認するため、 $D_s=0.05$ mmの粒径(点線)でも計算を行った。また、この傾斜角でも負の浮力が等しい塩水サーマル(破線)の計算も行った。

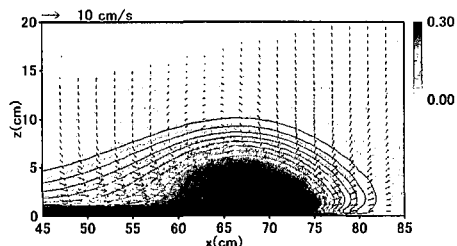
図-6は流下速度の流下距離に対する変化である。実験結果(黒丸)と実線は流下距離50-80 cmの区間ではほぼ一致している。しかしその前後の区間ではあまり一致していない。これは計算が想定した初期の流動と実際に実験で生じた流動とが違っていたためと考えられる。流下速度の減少は、塩水サーマルが最も小さく、泥水サーマルでは粒径が大きいほど減少が早いことがわかる。図-7は最大厚さの流下距離に対する変化を示したものである。最大厚さは流下距離に対し線形的に増加しており、実験と3種類の計算とであまり差が大きい。図-3の傾斜角 $\theta=10^\circ$ の場合と比較すると、この図のほうが最大厚さの増加率が高い。これは Beghin ら(1981)の塩水サーマルの実験結果と一致する。図-8は最大濃度の流下



(a) 泥水サーマル $D_s=0.04$ mm, $x=80$ cm



(b) 泥水サーマル $D_s=0.04$ mm, $x=120$ cm



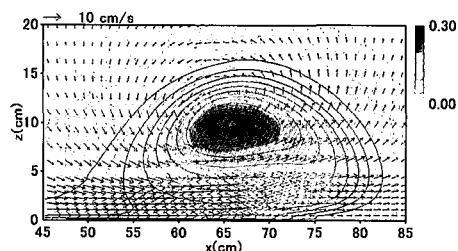
(c) 塩水サーマル $x=80$ cm

図-10 流速ベクトル, 等濃度線図 ($\theta=10^\circ$)

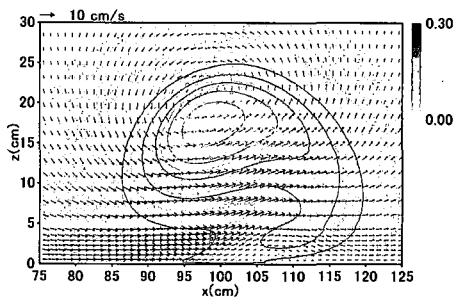
距離に対する変化である。横軸, 縦軸は図-4 と同じにした。 $\theta=30^\circ$ の場合も $\theta=10^\circ$ と同様, 粒子の沈降性のため, 基準化した最大濃度は粒径が大きいほど無次元距離に対して早く減少する。 $\theta=10^\circ$ と比較すると, 塩水サーマルでは $\theta=30^\circ$ のほうが濃度の減少は小さい。これは傾斜角が大きいほど流下速度が大きく, 速く流下するため沈降の影響が小さく現われるためと考えられる。また, 流下速度が大きいこととで乱れが大きく, 底面付近で再浮上の効果も加わっていると推定される。図-9 は粒子総量の流下距離に対する変化である。粒径が大きいほど沈降速度が大きくなるため, 総量が大きく減少する。また, $\theta=10^\circ$ の場合に比べて, 粒径が大きい $D_s=0.05$ mm でも総量はあまり減少しないことがわかる。

3.4 サーマルの内部機構

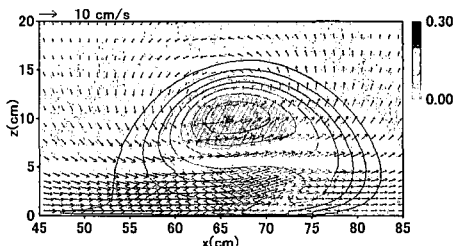
サーマルの内部機構の解明のため, 計算結果を基に流速ベクトル図と等濃度線図を描いた。図-10 は, 傾斜角 $\theta=10^\circ$ で, 粒径 $D_s=0.04$ mm の泥水サーマル



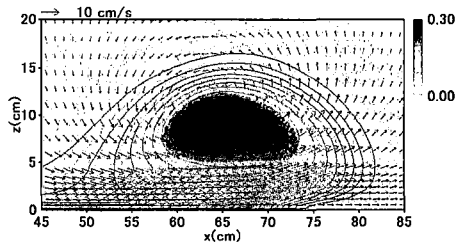
(a) 泥水サーマル $D_s=0.034$ mm, $x=80$ cm



(b) 泥水サーマル $D_s=0.034$ mm, $x=120$ cm



(c) 泥水サーマル $D_s=0.05$ mm, $x=80$ cm



(d) 塩水サーマル $x=80$ cm

図-11 流速ベクトル, 等濃度線図 ($\theta=30^\circ$)

の流下距離 $x=80$ cm (a) と $x=120$ cm (b), さらに塩水サーマルの流下距離 $x=80$ cm の場合 (c) の流速ベクトル図と等濃度線を重ねて描いたものを示す。また, 図-11 は, 傾斜角 $\theta=30^\circ$ で, 粒径 $D_s=0.034$ mm の泥水サーマルの流下距離 $x=80$ cm (a) と $x=120$ cm (b), 粒径 $D_s=0.05$ mm の泥水サーマルの流下距離 $x=80$ cm (c), さらに塩水サーマルの流下距離 $x=80$ cm の場合 (d) の流速ベクトル図と等濃度線を

描いたものである。

図-10 では、何れのサーマルもほぼ半楕円形に近い形状をしている。流速ベクトルはサーマル下部で流下方向へ向き、前部で流下方向上向きの巻き上げ流れ、サーマルの上部で流下方向と逆向き、サーマル後部では流下方向下向きのベクトルがあることを示し、全体としてサーマルを覆う循環流を形成している。循環流の中心はサーマル上部でやや後部にある。また両者の流速ベクトルの大きさには顕著な差は見られない。等濃度線を見ると、サーマルの後方で尾を引いたような形状を成しており、これは泥水サーマルに比べて塩水サーマルのほうが大きい。濃度はサーマルの中心部において最も大きくなっており、泥水サーマルに比べて塩水サーマルのほうが大きな濃度である。

図-11 では $\theta=10^\circ$ と同様に、サーマルは半楕円形の形状をしている。流速ベクトルはサーマルの周囲を囲む循環流の形成が見られ、その形成は $\theta=10^\circ$ に比べて顕著である。長さによって最大厚さが大きく、同じ流下距離で比べると $\theta=10^\circ$ の場合より 1.5 倍以上も大きい。これは傾斜角が大きい場合、周囲水をより多く連行するためである。等濃度線はサーマルの中心付近で最も高濃度となっており、底面付近では比較的小さくなっている。このことは周囲水が先端下部より連行・混入していることを示唆する。流下距離が等しい、(a)、(c)、(d) を比べると塩水サーマルが最も濃度が大きく、濃度が最も小さいのは $D_s=0.05\text{ mm}$ の場合であることがわかる。

4. 結 論

非定常な泥水流の流動特性を明らかにするため、 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いて数値解析を行った。計算は傾斜角が $\theta=10^\circ$ と 30° の 2 種類の場合について行い、塩水サーマルの計算も行い比較した。その結果、傾斜角の違いによって、流下速度、最大厚さ、最大濃度、総浮力の流下方向の変化特性が異なることが良好に説明できた。また、流速ベクトルと等濃度線を描くことで、傾斜角が異なることにより、サーマル周辺の流動特性あるいは混合特性が若干異なること、サーマルの形状が大きく異なることが計算された。この理

由は傾斜角が異なることで密度成層の効果が異なるためであり、今回の範囲の傾斜角であれば、特別な工夫をしなくとも (Turner, 1979) 標準の $k-\epsilon$ 乱流モデルでこのような特徴を再現できることがわかった。このように、傾斜角の違いによる泥水サーマルの流動特性の変化を乱流モデルを用いた数値解析で明確にできた。

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (C) (課題番号 13650565, 研究代表者福嶋祐介) の補助を受けた。ここに記して、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 衛藤俊彦・福嶋祐介 (2001): 海底溪谷で発生する泥水流の $k-\epsilon$ 乱流モデルによる流動解析, 海岸工学論文集, 48, pp. 461-465.
- 衛藤俊彦・福嶋祐介 (2002): $k-\epsilon$ 乱流モデルによる保存性傾斜サーマルの数値解析, 水工学論文集, 46 巻, pp. 1043-1048.
- パタンカー, S. V. 水谷幸夫・香月正司訳 (1985): コンピュータによる熱と流れの数値解析, 森北出版.
- 福嶋祐介・Gary Parker (1985): 自己加速する泥水流に関する研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 253-257.
- 福嶋祐介・萩原達司・坂本充男 (1999): 固体粒子浮遊による傾斜サーマルの流動特性, 水工学論文集, 43 巻, pp. 893-898.
- 福嶋祐介・今田昌運 (2000): 粒径分布をもつ固体粒子浮遊による傾斜サーマルの解析法, 水工学論文集, 44 巻, pp. 909-914.
- Beghin, P., E. J. Hopfinger and R. H. Britter (1981): Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries, Jour. Fluid Mech., Vol. 107, pp. 407-422.
- Garcia, M. (1990): Depositing and eroding sediment driven flows: turbidity currents, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, Project Report No. 306, 179 p.
- Inman, D. L., C. E. Nordstrom and R. E. Flick (1976): Currents in submarine canyons: an air-sea-land interaction, Annual Rev. of Fluid Mech., Vol. 8, pp. 275-310.
- Parker, G. (1982): Conditions for the ignition of catastrophically erosive turbidity currents, Marine Geology, Vol. 46, pp. 306-327.
- Parker, G., M. Garcia, Y. Fukushima and W. Yu (1987): Experiments on turbidity currents over an erodible bed, J. of Hydraulic Research, Vol. 25, No. 1, pp. 123-147.
- Turner, J. S. (1979): Buoyancy effects in fluids, Cambridge Univ. Press, 161 p.