

沿岸域における有機懸濁物質の沈降過程のモデル化

Study on Settling Model of Suspended Organic Matter in Coastal Region

日比野忠史¹・西村尚哉²・駒井克昭³・松永康司⁴

Tadashi HIBINO, Hisaya NISHIMURA, Katsuaki KOMAI and Yasushi MATSUNAGA

In order to simulate the ecosystem at semi enclosed coastal region, the settling model considering the biological, chemical, physical process is developed. The processes of settling down and biodegrading of suspended organic matter are investigated by using the sediment traps data, these traps were installed vertically in Hiroshima bay estuary. In this investigation, the properties (Chl-a, POC, PON etc.) of the suspended organic matter trapping at several depths were analyzed and the settling velocity and the organic matter's density are cleared.

1. はじめに

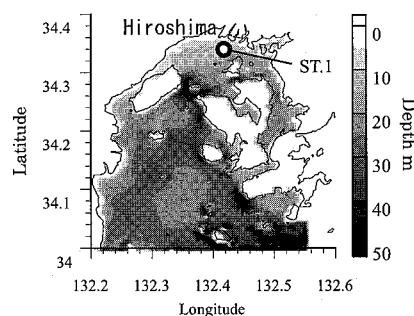
広島湾のような閉鎖性の強い海域の海底には有機物を多量に含んだ泥が多く堆積している。このような海底堆積泥は底層流などによって巻き上げられることにより海中に栄養塩を溶出するなど水環境に与える影響は大きいと考えられる。特に貧酸素水塊の形成や栄養塩の生成に大きく寄与している底泥は、沈降後、数ヶ月から数年かかって分解されることが明らかとなっている(永尾ら, 2005)。今後、効率的・効果的な自然環境の保全施策を実施するためには、海域に流出する有機物や一次生産等により生成され、海底に沈降、堆積する有機物の動態を把握する必要がある。しかし、一次生産によって生成された有機物の沈降・堆積に至る過程には、不明な点が多いのが現状である。本研究では2005年度の広島湾周辺海域におけるセディメントトラップを用いた有機物の沈降調査結果から、粒径・土粒子密度に着目して有機懸濁物質の沈降過程に影響を与える要因を検討し、デトリタス等が土粒子等に付着して形成される有機懸濁物質の分解を伴った沈降過程を明らかにする。この結果を利用し、現在測定されている広島湾では清掃船による運行経路上での表層 Chl-a、濁度、塩分、水温および定点での年4回の塩分・水温プロファイルを用いて海底へ沈降、堆積する有機懸濁物質量を推定することを試みる。

2. 海中に浮遊する有機懸濁物質の特性

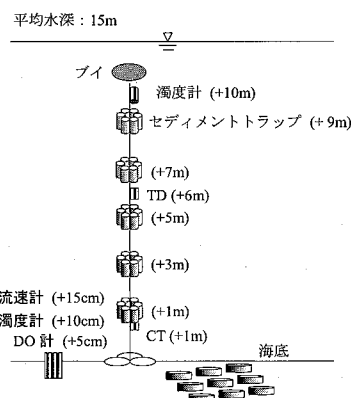
(1) セディメントトラップ調査の概要

海中に浮遊する有機懸濁物質の沈降量を把握するため、太田川の河口に位置するST1(図-1(a))において、2005年6月～10月の間、セディメントトラップ(沈降物捕集

筒)および水質調査を行なった。水質調査では濁度計(compact-CLW)、DO計(compact-DOW)、塩分・水温計(compact-CT)および水温・水深計(compact-TD)を図-1(b)に示す水深に設置した。セディメントトラップは約2週間毎に回収・再設置を行い、捕集された懸濁物質については懸濁態物質(SS)、粒度分布、クロロフィル-a(Chl-a)、フェオフィチン(Phaeo.)、懸濁態有機炭素(POC)と懸濁態有機窒素(PON)含有量の測定を行った。



(a) 調査地点



(b) セディメントトラップおよび流況調査機器の設置状況

図-1 観測地点と設置機器

1 正 会 員 博(工) 広島大学准教授大学院工学研究科
2 学生会員 広島大学大学院工学研究科
3 正 会 員 広島大学助教大学院工学研究科
4 正 会 員 工(修) 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所

(2) 一次生産起源の懸濁物質の性状

懸濁粒子の密度・粒径を決定する要因として、懸濁粒子に付着した有機物の量が影響を与えていると考えられる。ここでは、懸濁態粒子の密度、粒径の性状変化を把握するための基礎となる植物プランクトン量(Chl-a量)と有機懸濁物質の性状との関係について検討を行う。本観測ではトラップ設置期間が数週間にわたるため、Chl-aにPhaeo.を加えた量を植物プランクトン量として考察している。海底でトラップされる懸濁粒子は海底での濁度の増大とともにフラックスが大きくなっており、海底で捕捉される懸濁態粒子が底層で形成される高濁度層起源であることがわかっている(佐々倉ら, 2005)。

図-2には6月～10月までの7期間に図-1(b)に示す5層のトラップに捕集された(a)Chl-a+Phaeo.含有量,

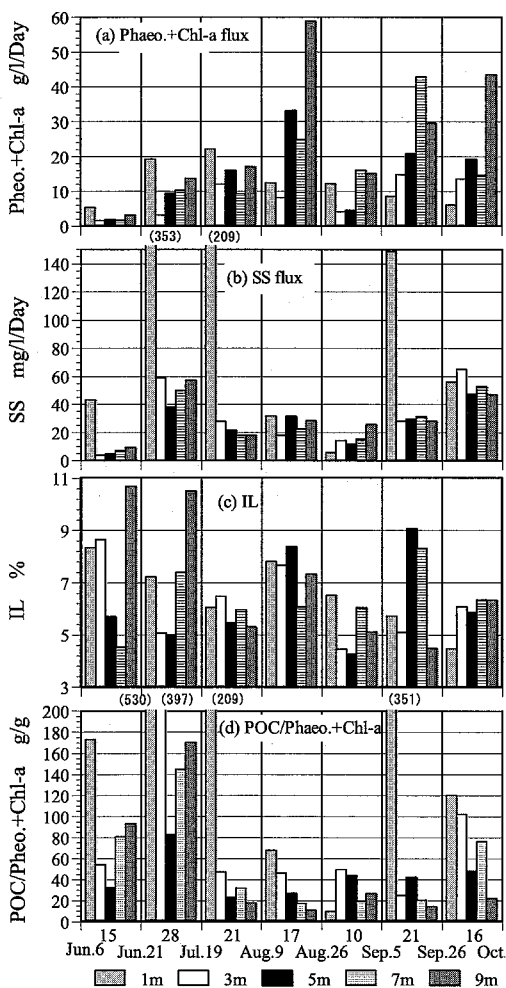


図-2 トラップ捕集物中の(a)Chl-a, Phaeo.含有量, (b)SS, (c)IL, (d)C/Chl-a比(2005年の観測結果, 月日は設置と回収日, 中央の数字は設置日数, 凡例の長さは海底からの高さ, ()内の数値は軸を超えたデータ値)

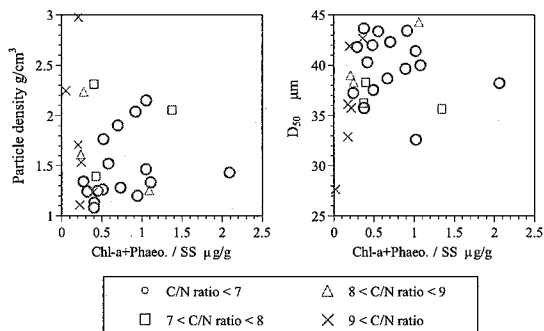


図-3 SS中のChl-a量と懸濁粒子の密度・粒径の関係

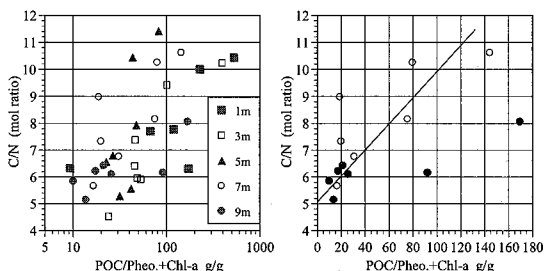


図-4 C/Chl-aとC/Nの関係(右図は表層(9m, 7m)を抽出)

(b)SS, (c)有機物含有量(IL), (d)C/Chl-a比の変化が示されている。観測点の水深は15m(潮差4m)であり、海底上の9m層は大潮干潮時に水面から約1mの深さになる。海底(1m)層でSS量は海底に形成される高濁度層からの供給が約9割を占めている。海面表層～中層, 特に9m層では6月から8月に向かってChl-a+Phaeo.量が增大しており、一次生産が活発になっていくことがわかる。さらに、成層消滅(9月20日頃)後から中～下層に到達するSS量およびChl-a+Phaeo.量が増加していくことがわかる(高御堂ら, 2006)。懸濁物質に含まれる有機物量は4～10%の範囲で変動している。7月中旬以降にはILはChl-a量に依存しているが、それ以前にはChl-a以外の有機物が多く含まれていることがわかる。一次生産が活発な7月中旬から9月頃までのChl-aに対する炭素量(POC)は表層で10～20程度, 中～下層で20～40程度の値となっている(図-2(d))。ちなみに、東京湾でのC/Chl-a比は10～30程度で季節変動している(吉田・石丸, 2007)。

(3) 有機懸濁物質内に含まれるクロロフィルの量

図-3には沈降物捕集調査において捕集された全水深での沈降泥を対象として、懸濁粒子濃度(SS)中に含まれている植物プランクトン量(Chl-a+Phaeo.量)と懸濁粒子の密度および中央粒径(D_{50})との関係が示されている。図では測定されたC/N比別(7以下を○, 7～8を□, 8～9を△, 10以上を×)で表している。懸濁態粒

子密度は懸濁物質中の Chl-a 量が大きくなるにしたがって減少する傾向、粒径は増大する傾向が見られる。これらは、懸濁物質中の Chl-a 量が增大することによって微細土粒子に付着する密度の小さい有機物の占める割合が増え、粒子の密度が低下するためであると考えられる、土粒子に付着する有機物量が増加することによって粒径が増大し、逆に懸濁粒子密度は低下する。C/N 比が 8 以上の比較的分解が進んだ懸濁態粒子(△, ×)では、この傾向が顕著に表れている。しかし、C/N 比が 8 未満の新鮮な懸濁態粒子では相関が見られなくなる。これは分解が進んだ有機懸濁物質では Chl-a の付着が制限(Chl-a も分解)され、土粒子の密度・粒径に近づくのに対し、新鮮な有機懸濁物質には Chl-a が付着しやすく、土粒子の性質よりも Chl-a の性質が現れると考えられる。有機物の付着が少ない、または C/N 比が 7~8 程度の値以上となる分解が進んだ懸濁態物質では Chl-a 量から密度および粒径の推定が可能である。

図-4 に C/Chl-a と C/N の関係を示した。C/N 比の増大に伴って有機泥中に含まれる Chl-a 量が小さくなる傾向がある。特に、海面表層にある C/N 比が 7 程度までの新鮮な有機懸濁物質では C/N 比と Chl-a 含有量に線形な関係があり、Chl-a 量から新鮮な有機懸濁物質の C/N 比を推定できることが示唆される。

3. 有機懸濁物質の沈降過程の把握

有機懸濁物質の沈降速度は沈降粒子の密度と粒径に依存することが考えられる。また、有機懸濁物質は沈降過程において分解が起こり、有機懸濁物質の密度および粒径を変化させることになる。本章では有機懸濁物質の沈降過程における有機物の分解に伴う密度、粒径の変化の特性を把握する。

(1) 沈降過程での有機懸濁物質の性状変化

沈降物捕集調査により捕集された懸濁物質について、設置高さによる捕集物の性状の水深方向への変化について検討を行う。図-5 にセディメントトラップで捕集された懸濁物質の中央粒径 D_{50} 、粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の粗粒含有量、懸濁態有機炭素(POC)と懸濁態有機窒素(PON)の比(C/N 比)の水深方向への変化を示す。図には 7 回の観測値の平均と最大値、最小値が示されている。各値とも季節的な変動はあるものの水深方向へ分解を伴った変化をする傾向が見られる。 D_{50} は表層において大きく、深くなるにつれて小さくなる傾向が見られ、それに対応して粗粒分の割合も小さくなっている。また、C/N 比は上層において最も小さく、中~底層で大きくなる傾向が見られる。上層における C/N 比の値は 4~8 程度であり、これは海域における一般的なプランクトンの構成比である 6.625(Redfield 比)に近い値である。

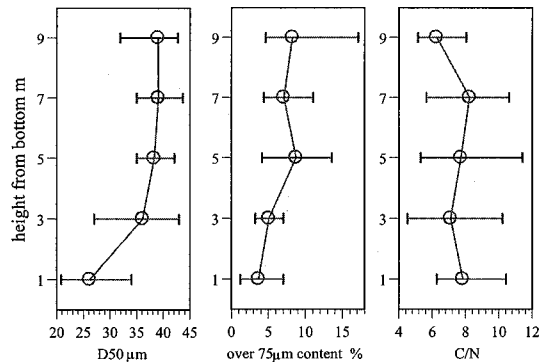


図-5 捕集物の中央粒径、土粒子密度、C/N 比の水深方向の変化(7 回の観測値の平均を○、最大値~最小値を—で示している)

が、中層以深ではその沈降過程において有機物の分解が進行するために、C/N 比が 6~11 程度に大きくなっている。

(2) 粒子密度・粒径の変化と沈降速度

a) 見かけの(平均)沈降速度

鉛直速度と沈降速度の和を懸濁物質の見かけの沈降速度 w' とし、海水中有機懸濁物質濃度、粒度分布が捕集期間中において一様であることを仮定すると、見かけの沈降速度は周辺海水中有機懸濁物質濃度 C_0 と沈降フラックス F を用いると(1)式で表すことができる。

$$w' = \frac{F}{C_0} = \frac{R - C_0 V}{AT} \frac{1}{C_0} \quad (1)$$

ここに、 R : 捕集器内の粒状物量、 C_0 : 周辺海水に含まれる浮遊粒状物濃度、 V : 捕集器容積、 A : 捕集器開口部断面積、 T : 垂下時間である。

b) 沈降過程における有機懸濁物質の変化特性

有機懸濁物質の沈降速度が変動する要因として、一次生産の活発化により微細土粒子に付着する有機物量が増大することや有機物の分解などにより、懸濁態粒子の密度、粒径が変化することが挙げられる。

図-6 に現地調査により得られた沈降速度と捕集された懸濁態粒子の D_{50} との関係を示している。一般に懸濁態粒子の沈降速度は粒径が大きくなるにつれて増大する

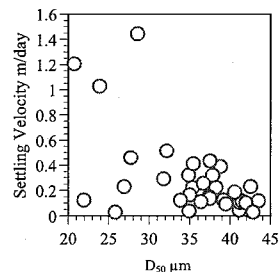


図-6 懸濁態粒子の中央粒径と沈降速度の関係

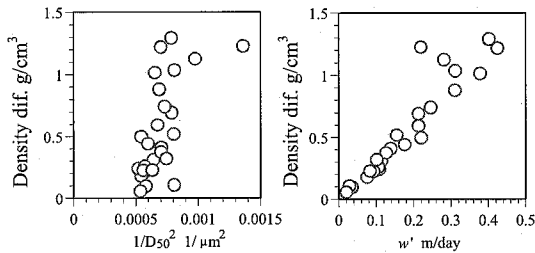


図-7 中央粒径、沈降速度と海水と懸濁態粒子の密度差の関係

ことが言われている。しかしながら、図-6の結果からは粒径が大きくなるにつれて沈降速度が減少する傾向あることがわかる。

捕集された有機懸濁物質の密度は直接測定することが困難であるため、ここでは以下の方法を用いて懸濁態粒子の密度を推定した。沈降速度はストークス則に従うとして、沈降速度は以下の式によって表した。

$$w = \frac{4g}{135} \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} d^2 \quad (2)$$

ここに、 ρ_s : 沈降粒子の密度、 ρ : 海水密度、 d : 沈降粒子の粒径、 μ : 海水の粘性係数である。(2)式の w に捕集物から算出した見かけの沈降速度 w' 、 d に捕集された粒子の中央粒径 D_{50} を代入することで粒子と海水の密度差 ρ_e を算出した。

$$\rho_e = \rho_s - \rho = \frac{135\mu \cdot w'}{4gD_{50}^2} \quad (3)$$

沈降粒子の中央粒径と見かけの沈降速度から算出された沈降粒子と海水の密度差と $1/D_{50}^2$ 、 w' との関係を図-7に示した。実測値を用いて表した $1/D_{50}^2$ は密度差に関わらず一定の値(0.0007)を示しているため、(3)式から密度差は沈降速度に対し、比例関係が求められる。図-7においてもこの関係が認められており、沈降速度は沈降粒子と海水の密度差によって線形的に求められる。

4. 有機懸濁物質沈降のモデル化

有機懸濁物質の沈降速度は沈降粒子と海水の密度差に大きく依存していること、沈降過程において有機物は分解され懸濁物質の密度、粒径が変化すること、有機物の種類によって分解速度が異なること、さらに、粒径と密度の間には負の相関があり、懸濁粒子の密度は有機物が付着して粒径が大きくなったものほど密度が低下するという特性を利用して懸濁粒子の沈降過程についてモデル化を行う。

(1) 沈降過程のモデル化の概念

一次生産により生成された有機物は無機物から構成される微細土粒子と付着することによって沈降すると仮定する。モデルの考え方は以下の通りである。

- ① 沈降形態は土粒子と土粒子に付着する有機物量とその性状によって変動する。
- ② 懸濁粒子中の有機物はその沈降過程における分解、無機化によって性状が変化する。
- ③ 有機物の分解に伴った性状の変化は懸濁粒子の密度・粒径の変化に代表される。
- ④ 沈降速度は懸濁態粒子の密度、粒径と海水密度によって決定される。

(2) 沈降過程における懸濁態粒子性状の変化

有機懸濁物質の沈降過程における分解量の算出は、植物プランクトンの分解・無機化に関する Multiple-G モデル ((4), (5) 式, POC と PON については分解性の違いにより 3 つの fraction に分画, Joseph T. Westrich and Robert A. Berner, 1984) を用いる。

$$C_T(t) = C_1[\exp(-k_{C,1}t)] + C_2[\exp(-k_{C,2}t)] + C_3[\exp(-k_{C,3}t)] \quad (4)$$

$$N_T(t) = N_1[\exp(-k_{N,1}t)] + N_2[\exp(-k_{N,2}t)] + N_3[\exp(-k_{N,3}t)] \quad (5)$$

ここに C_T は植物プランクトン中の全有機炭素量、 N_T は植物プランクトン中の全有機窒素量、 C_{1-3} は植物プランクトン中の有機炭素量、 N_{1-3} は植物プランクトン中の有機窒素量、 k は分解速度パラメータ、添字 C , N は炭素、窒素、添字 $1 \sim 3$ は fast-labile fraction, slow-labile fraction, refractory fraction を示している。広島湾での有機懸濁物質内に占める各 Fraction の割合を表-1 に示している (永尾ら, 2005)。各有機物の fraction の分解による時間変化量を算出し、そのときの C/N 比の変化を求めた。ここでは、一次生産起源の有機物の C/N 比は Redfield 比の 6.625 とし、表-2 に示す好気条件下での分解速度パラメータを用いている。ただし、分解速度パラメータは (6) 式を用いて観測温度における値に変換されている。

$$k^{Temp} = \alpha \cdot k^{OC} \quad (6)$$

$$\alpha = \exp(0.0697 \cdot Temp)$$

計算された C/N 比の時間変化を図-8 に示す。有機物生成直後の小さな C/N 比では分解が速く、90 ~ 100 日で 10 程度まで C/N 比が上昇することがわかる。

セディメントトラップに捕集された有機懸濁物質の C/N 比と図-8 から、捕集された有機物の生成後からの経過日数を推定した。推定時間 (C/N 比) に対する D_{50} と有機泥密度の変化を図-9 に示した。補足された有機懸濁物質の粒径は有機物生成後の有機物の分解に伴った減少、粒子の密度は有機物の分解に伴った傾向を示しており、妥当な結果を示している。図-9 の関係から中央粒径 D_{50} 、有機懸濁物質の密度 ρ_s の時間変化を (7)、

表-1 一次生産起源の有機懸濁物質内に占める各 Fraction の割合

	C_1	C_2	C_3	N_1	N_2	N_3
Fraction の割合 (%)	50	16	34	67	11.3	21.7

表-2 各 Fraction に対する分解速度パラメータ (0°C, 好気条件)

	CARBON			NITROGEN		
	$k_{C,1}$	$k_{C,2}$	$k_{C,3}$	$k_{N,1}$	$k_{N,2}$	$k_{N,3}$
1/year	23	0.6	0.0025	19	0.64	0.089

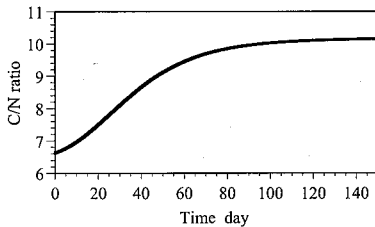


図-8 C/N 比の時間変化

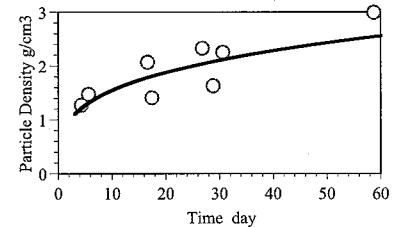
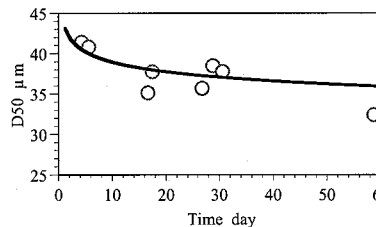


図-9 懸濁粒子の粒径・密度の時間変化

(8) 式のように定式化した。(7), (8) 式を (2) 式に代入することで沈降速度を求めることができる。

$$D_{50} = D_{50b} \cdot t^{-0.045} \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho_s = \rho_{sb} \cdot t^{0.28} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 D_{50b} は初期中央粒径、 ρ_{sb} は初期粒子密度、 t は時間 (day) である。

5. おわりに

- (1) 測定された懸濁粒子濃度中に含まれる植物プランクトン量の増大に伴い懸濁粒子の密度は減少、中央粒径は増大する傾向が見られる。また、海面表層の新鮮な有機懸濁物質で C/N 比と Chl-a 含有量が線形な関係が見られ、Chl-a 量から新鮮な有機懸濁物質の C/N 比が推定できることが示唆される。
- (2) 粒径が大きいと沈降速度は小さくなる。また、懸濁粒子と海水の密度差と沈降速度は線形関係であり、沈降速度は密度差の影響が支配的である。
- (3) 懸濁粒子中の Chl-a 量が増大することによって懸濁粒子中の有機物が占める割合が増え、土粒子に付着することで粒径は増大、粒子の密度は低下する。
- (4) 沈降物捕集調査により捕捉された懸濁物質質量から算出される仮の沈降速度と測定した中央粒径をストークス則に代入することで土粒子密度を算出できた。また、

分解に伴う C/N 比の変化から、捕集された有機物の生成後からの経過日数を逆算し、粒径と算出された土粒子密度の時間変化を定式化することで、沈降過程における懸濁粒子の性状変化が沈降速度に与える影響を考慮したモデルを構築することができた。

参 考 文 献

- 佐々倉諭・日比野忠史・高御堂良治・村上和男・松本英雄 (2005): 広島湾における有機懸濁物質の沈降特性, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 911-915.
- 高御堂良治, 永尾謙太郎, 日比野忠史, 松本英雄 (2006): 海面清掃船に設置された自動水質測定装置を用いた有機懸濁物質の沈降・堆積量の把握, 海岸工学論文集, 第 53 巻 (2), pp. 1156-1160.
- 永尾謙太郎・日比野忠史・松本英雄 (2005): 広島湾における有機物の変動解析と栄養塩生成形態の把握, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 916-920.
- 日比野忠史・村上和男・松本英雄 (2005): 底泥内での間隙水の動きと浮泥層の形成機構, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 961-965.
- 吉田健一・石丸 隆 (2007): 東京湾における植物プランクトン群集の変遷, 2007 年度日本プランクトン学会春季シンポジウム
- Joseph T. Westrich and Robert A. Berner (1984): The role of sedimentary organic matter in bacterial sulfate reduction: The G model tested, *Limnol. Oceanogr.*, 29 (2), pp. 236-249.