マルチエージェントモデルによる潮干狩り行動の 数値シミュレーションに関する研究

－「海の公園」における数値モデル－

正員 村井基彦* 正員 藤原 奨**
正員 山中亮一*** 正員 井上義行*

A study on the numerical simulation of the seashell-digging human action in a seaside park by
Multi-Agent Model
- Model for UMINOKOUEN -

by Motohiko Murai, *Member* Susumu Fujiwara, *Member*
Ryoichi Yamanaka, *Member* Yoshiyuki Inoue, *Member*

Summary

When we use ocean space for human activities, we should consider sustainability and allowable human impacts. After the 1960's, we have lost 90 percent or more of the tideland of Tokyo-bay by the reclamation. "Uminokouen" is one of the artificial seashore parks developed in 1988 at the southeast of Yokohama and is well known as a relaxation place for the citizens. Over 20,000 people visit there for seashell-digging (SHIO-HIGARI) in a holiday in the spring. It is easy to understand that the human impact is quite large to an ecosystem of living bivalves in the park. Actually, the most part of living bivalves which are grew up after the last summer or autumn disappeared during the season. In this paper, we propose a computational model which predicts the human action of seashell-digging at this park using a multi-agent-algorithm. Comparing the simulation result with the actual data, the staying time of the visitors agrees well. Then, we investigate the relation among the initial spatial distributions of the bivalves, the spatial distributions of the amount of the caught short-neck clam and the trace of the visitors. Then we predict the human impact in the best weekend for the seashell-digging and examine the sustainability of the relaxation park.

1. 緒言

大都市近傍の内湾に於ける干潟を有する海浜公園はアメニティの場としての価値が高く、ゴールデンウィーク期間を中心に、潮干狩りを目的とした観光客が多数訪れる。この多数の観光客の潮干狩りが当該域のアサリ類の現存量に与える多大なインパクトの実体が、著者らの観測調査¹⁾²⁾³⁾⁴⁾から明らかになりつつある。本研究では海浜公園での潮干狩り行動について、マルチエージェントモデルに基づいた数値シミュレーション手法を提案する。また、その数値モデルを「海の公園」に適用し、潮干狩りシーズンを通しての、潮干狩り行動が当該海浜域の貝の現存量の空間分布に与える人為インパクトの推定を試みた。

2. 潮干狩りの数理モデル化

本研究では、マルチエージェントモデル⁵⁾に基づいて、潮干狩り客の行動をモデル化し、潮干狩り客の実際の行動を再現することを試みた。マルチエージェントモデルとは、それぞれ異なった判定アルゴリズムなどの特徴を持った多数のエージェントにより人工社会を構成するモデルであり、それらのエージェントの相互作用により、個々のエージェントのモノリシックなモデル化では再現が難しい複雑な現象の再現を試みるモデルである。

それぞれのエージェントは、それぞれの行動にとって必要な情報を収集し、個々の判断基準に照らし、主体的・自立的に行動を決定する行動ルールが設定されるが、単純なルールを持つエージェントであっても、それが多数同時に相互作用を展開すると、その結果は必ずしも自明ではなく、しばしば直観に反して予想もしない全体像が浮かび上がることもあると言われている。本研究においては、エージェントはシミュレーション中の潮干狩り客を指し、多数の潮干狩り客をシミュレーションすることで潮干狩り全体のモデル化を行った。

* 横浜国立大学大学院

** アクセンチュアテクノロジーソリューション

*** 徳島大学大学院

り地点」の満たすべき条件とは、「採掘目標水深」「許容水深」および「混雑度」の3点である。エージェントは移動地点の現時点での水深が「採掘目標水深」±「許容水深」の範囲にあり、かつその地点の周辺で既に潮干狩りをしているエージェントの数が一定値（「混雑度」）よりも少ない場合に、その地点で「潮干狩り」を開始する。

「潮干狩り地点」に移動するまでは、以下のいずれかを選択して潮干狩り客は移動する。

1. 現在いる地点の水深より、周辺の深い水深の方へ移動する。
2. 潮干狩りをしている人の多い方へ移動する。
3. 人の少ない方へ移動する。
4. 移動方向を変更せずに移動する。

また、移動先や現在地が「目標水深」+「許容水深」よりも深い地点にいる場合には、陸地を探索し近い陸地に向かって移動する。したがって、潮干狩りの地点への移動に際しては、他の移動の場合と異なり、目標地点を持たない。

2.1.4 潮干狩りのモデル化

次に「潮干狩り」のモデル化について説明する。潮干狩りでは、アサリを採掘する「時間」「面積」「深さ」を設定する。「時間」については、潮干狩り時における定点からのビデオ映像を解析ならびに筆者らの検討⁶⁾から、土を掘り起こしアサリの有無を確認するまでの一連の動きを1分と仮定した。「面積」に関しては11cm四方程度と仮定したが、これは本計算モデルにおける1メッシュの50分の1の面積に相当する。また、「深さ」に関しては1回の掘る作業につき1cm~10cmでランダムに設定するものとし、アサリの深さ方向の分布は地表部分が最大で地表下10cmで0となるような直線的に減少する分布とした。これは実際の海浜においてもアサリが地表下10cm以深では生存数が少ないことを反映させたモデルである。この条件で当該地点においてエージェントはアサリを採掘し、一回ごとに現時点でのアサリの採取状況の判定を行う。採取状況の判定は

- 現時点で採掘している積算深さが海底下10cmになっているか
- 今のアクションで、採掘した採取量が3g(約1個)以下になっているか

とし、いずれにも該当しなければ、その地点での「潮干狩り」は順調として、同地点での「潮干狩り」を継続する。また、これらのいずれか一方でも該当した場合は、採取不調とみなし、「潮干狩り」を中断し「潮干狩り地点」へ移動するモードに切り替わる。ただし、シミュレーションにおいて現存量が減少することにより当該域での潮干狩りが不調な場合は、エージェントは現在地の直近のエリアを依然として潮干狩りの適地と判断し、即座に当該域で潮干狩りを再開する可能性がある。実際に潮干狩りを行う場合にはアサリが少ない場合にはその地点とは少し離れた地点で再開することが自然である。そこで、潮干狩りのビデオから20人の動きを追跡し、Fig.3を得た。本モデルにおいての次の地点探索への最低移動時間としてこの結果を用いた。このとき、当該地点のアサリの現存量は常に採捕された分を反映させるので、すでにエージェントによってアサリが採取された場所の現存量は少なくなる。このようにして、Fig.1の③と④の行動を何度か繰り返すことにより、エージェントはアサリを採捕する。

Fig. 3 Cumulative distribution function of transportation time

これらを繰り返しながら、エージェントのアサリの採捕量（積算採捕量）が入場前に設定した目標採捕量を超えるか、最初に潮干狩りを行ってから6時間が経過すると、潮干狩りを止めて「帰路」モードへと進む。6時間という時間制限に関しては、実際の潮干狩りに関するアンケート結果と現場での観察から、最初に潮干狩りを行ってから6時間以上の回答がほとんど無かったことを反映させている。なお、潮干狩り客は日没後（18:30）も無条件で潮干狩りを止めて「帰路」モードへと進むことにした。「帰路」モードでエージェントは、直ちに潮干狩りを終了し、浜辺の拠点への移動を始める。浜辺の拠点に到達後は、公園の退場口を目標地点として移動を行い、公園の退場口に到達した時点で、公園から退場したとみなす。

2.2 地勢情報の取得

2.2.1 陸上の地勢情報の取得

潮干狩り客の移動を考える上で、対象海域及び公園の地勢の情報は非常に重要である。本研究では陸上の地勢情報の取得は、電子地図のSuper Mapple Digital Ver.4の地図画像を利用した。具体的には、本研究で対象域とした海の公園の敷地を含む800m×880mの範囲について、Super Mapple Digital Ver.4の縮尺1/2300、文字情報なしの地図画像（Fig.4）からビットマップファイルを取得する。このとき、対象範囲の画像は980×1073のビットマップで描かれているので、格子空間は画像の1ピクセルを1メッシュとして、0.82mの格子間隔となる。各ピクセルのRGB値から「海」「砂浜」「芝生」「道路」「建物」「線路」の6つの構成物に地勢を分類し、潮干狩り客は海、砂浜、道路には入ることができ自由に動くことができるが、芝生、建物、線路は立ち入れないものと仮定した。また、潮干狩り客の入退場口を海の公園の磯浜、柴線臨時、磯浜の3駐車場とシーサイドライン海の公園柴口、南口の2駅の合計5箇所6地点に設けた。

2.2.2 海底地形マップ

干潟域の地形に関しては水深分布計測を行い³⁾、その水深データを計測時刻と観測日の潮位変化及び気圧変化で補正することで、標準水深分布データを取得した。本研究モデルではこの水深分布を用いて、構成物の海の部分に標準水深として入力した。この標準水深は、0cmを横須賀の平均海面（基本水準面から+110cm）としている。Fig.5に標準水深分布を示す。なお、Fig.5の右の黒

Fig. 4 A map surrounding 'UMINOKOEN'

Fig. 5 Seabed topography of "UMINOKOEN"

く塗りつぶしてある海の部分の水深は-500cmとし、その他の部分は陸上として+500cmとした。また、その他の構造物については+500cmとした。シミュレーションでは潮汐についても考慮しており、時間とともに海面の周期的な干満が起こるようにしている。よって、水深は時々刻々と変化し、「水深(t)」=「標準水深」+「潮汐の水位(t)」として計算している。なお、潮汐の水位(t)は主要40分潮を考慮した水算式に基づく潮位を用いた。

2.3 アサリの初期空間分布

アサリの生息域は一般的に水深、干出時間、地形、地質等に依存すると言われている⁹⁾。本研究で開発した数値モデルでは簡単のため、平面空間を干出時間によって場合分けをし、水深および地形(傾斜、曲率)に依存するとして、初期空間分布を作成することにした⁸⁾。地質に関しては、本研究室で実施した粒度分析調査²⁾によると、観測定点上において粒径に大きな違いが見られず、アサリの生息に適する粒径の範囲内またはそれに近い値で

Fig. 6 Comparisons of the quantity of the clams among our investigation and the estimation

Fig. 7 Initial condition of a spatial distribution of clams in our model

あったことにより、今回は、考慮しないこととした。そこで、本研究室で行われているアサリの現存量の定点調査のデータ、水深データから、調査定点の水深とその水深における傾斜、曲率、および個体数を算出した。ゴールデンウィーク中の状況を再現するため、春先の現存量の定点調査のデータ(2005年3月15日)を使用している。初期空間分布の作成方法にあたっては

- 干出時間による分類分け：①干出時間が0時間の場所(パターンA)、②干出時間が0~1時間の場所(パターンB)、③干出時間が1時間以上の場所(パターンC)。
- 地形データによる分類分け：水深、傾斜、曲率

それぞれの組み合わせに関して個体数に関する正規分布関数を作成し、それらの関数を最小二乗法で組み合わせることで、地形データから初期分布のデータを作成することとした⁸⁾。得られた結果をFig.6に求められた $F(z,y)$ の計算値と観測値との比較を示す。これを見ると、比較的良好に分布状況を推定出来ていることが分かる。また、この推定式に基づいたアサリの平面分布をFig.7に示す。

3. 再現性の検証

前節で示した初期条件などを用い、村井ら⁶⁾⁷⁾で示した潮干狩り行動のアルゴリズムに基づいた数値シミュレーションを行った。ここではその検証結果を示す。

3.1 計算条件とシミュレーション結果

まず、各潮干狩り客に対し、初期データとして、以下のパラメータが設定される。設定内容は以下のとおりである。

- ・入場時間 (06:00~18:00)
- ・入退場口の場所 (駐車場あるいは駅の出入口)
- ・採掘目標水深 (0cm, 10cm, 30cm, 50cm)
- ・採掘目標水深に対する許容範囲 (6~15cm)
- ・目標採捕量 (100g~2000g)

入場時間は、海の公園の柴口・磯浜・柴線臨時駐車場の入庫の時刻別データ、およびシーサイドライン海の公園駅柴口・南口の降車の時刻別データによるものとする。また、入退場口の場所はシミュレーション上では任意の場所を設定できるが、本研究においては駐車場あるいは駅の出入口付近とし、柴口・磯浜駐車場と海の公園駅柴口・南口駅の各一ヶ所および柴線臨時駐車場の二ヶ所の計六ヶ所とした。採掘目標水深については、アサリを採掘するにあたって潮干狩り客がどの程度の水深を目標にするかというもので、アンケート調査結果を基に、25%を0cm、35%を-10cm、31%を-30cm、9%を-50cmとした。

また、すでに述べたように本モデルでは採掘目標水深に対する許容範囲を設定する。例えば、採掘目標水深が-30cm、採掘目標水深における許容範囲が15cmとすると、潮干狩り客は水深-45cm~-15cm(-30cm $\pm$ 15cm)の範囲で潮干狩りをしようとするようになる。これは潮干狩り客の状況を撮影したビデオにおいて、浜辺(水深0cm)から潮干狩り客の膝の高さ程度の水深で潮干狩りをしていることが見られた為、このように設定した。また、各潮干狩り客の目標採捕量については海の公園での2005年の3月から横浜市公園条例(アサリ採捕量は1人2000gまで)と、過去4年間のアンケート結果と条例を基に、潮干狩り客全体の15%を100g、45%を500g、25%を1000g、10%を1500g、5%を2000gとなるように設定した。なお、シミュレーションにおける時間刻みは2秒としている。

これらの条件の下に潮干狩り客に関するシミュレーションを行った。以下にシミュレーション結果の例をFig.8に示す。浜辺のドットは拠点を表しており、潮干狩り客は干潟域ならびに水深の浅い海域の点で表現されている。これを見ると、潮干狩り客が汀線の時間的な移動とも汀線付近およびその沖側へ移動して行く様子が良くわかり、一般的な潮干狩りの行動形態¹⁾を再現している。

3.2 一日の滞在時間

過去4年間のアンケート結果(滞在時間)とシミュレーション結果をFig.9に示す。本シミュレーションにおいて潮干狩り客の滞在時間とは、海の公園に入場してから公園を退場するまでの時間を示している。シミュレーションにおいては潮干狩りの終了要件は、潮干狩りでの採捕量が目標採捕量に到達した場合、潮干狩り開始から6時間を経過した場合、日没を迎えた場合としている。したがって、シミュレーション中において6時間以上の滞在時間があるものは、潮干狩りを6時間で強制的に終了した割合(滞在時間は6時間を越える)と考えてよい。これを見ると、両者の滞在時間の分布の傾向はほぼ一致しており、潮干狩り客の滞在時間に関して、本モデルは実現象を良く再現できている可能性

Fig. 8 Change of the spatial distributions of the SHIO-HIGARI visitors in one day

Fig. 9 Comparison of staying times of SHIO-HIGARI visitors

が高いことが確認される。

3.3 潮干狩り客の空間分布

次に, Fig.10に潮干狩り最盛期に撮影された写真とシミュレーションのスナップショットを示す。これを見ると, 潮干狩り客が海岸線と垂直に帯状の分布をなしている様子が伺える。この傾向は本シミュレーションモデルにも現れており, 本シミュレーションモデルにおける潮干狩り地点の探索モデルが, 実現象を良く捉えていることがわかる。

また, Fig.11にシミュレーション結果のスナップショットと航空写真を並べたものを示す。シミュレーション結果での入場者数は, 航空写真と入場者数が近いと考えられる 5000 人とした。シミュレーション結果の浜辺の拠点(浜辺上の点)の広がり具合を観察すると, 海の公園北側では浜辺の奥の方まで拠点が広がり, 中央付近での拠点は海岸線に沿うように薄く広がり, 南側では北側ほどではないが浜辺の奥のほうに広がる傾向が伺える。航空写真からもその傾向は伺え, 浜辺の拠点の展開の様子が良くシミュレートされていることがわかる。

また, 実際に潮干狩りをしていると思われる海中での人数分布については, シミュレーションでは密度の濃いエリアが, 北側の汀線の沖に広く, そこから少し離れた中央の北側付近の沖に小さめに, 南側の汀線の沖に細長く展開していることがわかる。Fig.12に航空写真から海側にいる潮干狩り客の人数をカウントした結果を示す。これを見ると, 人数の比較的多いエリアが, 公園内の北側の沖に広がりをもって, 中央付近の北よりの沖に小さめに, 南側では北側ほどの密度ではないが細長く分布している様子が伺え, 定性的にその分布の様子が良く一致していることがわかる。これらの結果から, 海の公園全体における浜辺の拠点および潮干狩りを行われている場所の空間分布の再現に関しても本モデルの有効性が高いことが伺える。

3.4 長期間の潮干狩り影響に関する検証

このモデルを用いて, 潮干狩りの最盛期を含む 2006 年 4 月 1 日から 5 月 30 日までの 60 日間におけるシミュレーションを行った。この期間の潮汐を考慮し, また潮干狩り客の入場タイミングは, シーサイドライン・駐車場データを元に入力を行った。総入場者数は 226,569 人である。実行条件には一般入場者に, 採捕量制限 10kg で水深制限無く潮干狩りを実行する人のモデルを 1 日当たり 50 人ずつ加えている。これは, 当該海域においては採

Fig. 10 Snapshots of a spatial distribution of SHIO-HIGARI visitors

Fig. 11 Simulation result and an aerial photograph

Fig. 12 Spatial distribution of population density analyzed from the aerial photograph

Fig. 14 Spatial distribution of remained clams (60 days after)

(A) Simulation result

(B) Investigation result

Fig. 13 Change of the amount of the clams per square meter in 60 days

捕制限を遵守しない者が定常的にいることを模倣的に反映させるためである。また、アサリの初期分布は2006年のものを使用した。Fig.13にシミュレーションにおける単位面積当たりの60日間の現存量推移 (A) と、現存量調査の全観測地点合計による単位面積当たりの現存量の実測値の推移 (B) を示す。両者の縦軸のスケールに大きな差があるが、これは調査地点が潮干狩り活動の中心となる潮間帯を中心としたエリアに分布しているのに対し、シミュレーションにおける単位面積あたりの平均値の算出においては、初期の現存量の極めて少ないと推定されている水深の深いエリアや海浜近くのエリアも含めた計算対象域の全体の面積で除しているためである。Fig.13の (A) の結果を見ると、計算領域における現存量減少率は43 %となり、60日間における総採捕量は約63tに相当する。一方、(B) の実測値の結果を見ると、4月か

ら5月にかけての減少率が39 %となり、本モデルによるアサリ採捕量率と観測値によるアサリ採捕量率がほぼ一致する結果が得られた。このことから、本モデルによる当該域での潮干狩り期間におけるアサリ採捕量の総量に関する推定は極めて精度が高いことが確認できた。

次に60日後のアサリの現存量空間分布のシミュレーション結果をFig.14に示す。これを見ると、公園の北側の一帯と南側の観測地点付近での減少が目立つのに対し、中央付近では減少は少なく比較的現存量が残っている様子が確認できる。この結果は、元々中央付近でのアサリの初期量が他の場所よりも多いと推定されていることも要因の1つに挙げられるが、中央付近の浜辺付近の海底傾斜が比較的急で遠浅なエリアではないこと、駐車場や駅から遠いことで潮干狩り客が少なく、潮干狩りの負荷が小さくなったと考えられる。そこで、公園の北側・中央・南側それぞれのエリアでの現存量調査における個体数の推移との比較を行う。Fig.15にそれらの図を示す。これをみると、現存量は全体的には個体数は3月以降減少し、7月～9月にかけて増加傾向が見られることがわかる。なお当該海域では年間を通して稚貝の放流などは実施していない。殻長別に調べると5月以前の減少傾向は殻長2cm以上の親貝の減少が原因であり、初夏～秋口の個体数の増加は5mm～10mmの稚貝の自然増加によることがわかる⁷⁾。全くの自然の状態であればアサリは1年で2.5cmほどに成長し最大の大きさが5cm程度となりその寿命は数年～7・8年と言われていることから、3月以降の個体数の減少は潮干狩りという人為的なインパクトによるところが大きい。ここで調査エリア別にみると、確かに公園の中央エリア付近での現存量の最小数となる時期が、北エリアおよび南エリアよりも約1ヶ月遅れていることが確認され、中央エリアでは他のエリアではほとんど無くなっている親貝が5月の段階で残っていたことが調査データから確認できた。これらのことは、本シミュレーションモデルの実現象の再現性を十分に示すもので、その有効性を確認出来た。

4. 結 言

本研究では、アサリの現存量の定点調査、水深分布計測、潮干狩り客のビデオ観測、アンケート調査、航空写真等のデータを基に、

Fig. 15 Change of the amount of the clams per square meter by our observation

潮干狩り客の行動をモデル化し、実際の行動を再現することとシミュレーション結果に基づき、潮干狩りによるアサリ採捕量分布予測モデルを開発するというを目的とした。以下に本研究の結論を述べる。

1. アサリの生態特性を考慮した新しい現存量空間分布の推定方法を考案した。
2. 入場時から退場時までの潮干狩り客の行動特性の詳細なモデル化を行い、潮干狩り客の滞在時間においてアンケート調査との定性的な一致を得た。また、潮干狩り客の分布、拠点の分布などを精度良く再現することができた。
3. 最盛期後のアサリ現存量の減少率について、現地観測結果と計算結果は概ね一致し、本モデルが採捕量を精度良く予測できることを確認した。
4. アサリの潮干狩りによる採捕負荷は空間的に一様ではなく、南エリアと北エリアで特に負荷がかかり、中央エリアではその影響が遅れて現れることがシミュレーションから確認でき、現存量の調査においてもその傾向は顕著に観察された。その影響因子としては、水深分布特性と入退場口からの距離が挙げられる。

本研究では、海の公園におけるアサリ採捕量分布モデルの開発を行った。本モデルを用いることで干潟海域における潮干狩りによるアサリ個体数への量的なインパクト並びにその影響の空間的な偏在性を検討することが可能となる。特に本海域のように稚貝の放流などを行わない自然な状況（現状）でありながら潮干狩りの適地として多数の訪問があるような都会周辺の海浜公園においては、ここで想定される潮干狩り活動の空間的な偏在性を考慮することで、合理的で極端でない採捕量規制や禁猟エリアの設定を検討することが可能となるものと考えられる。今後は、さらに人々の集団心理を適用したモデル、天候などを考慮したモデル、また他の干潟・海域に適用できるモデルへの拡張の検討を行いたい。

謝 辞

駐車場利用台数のデータを提供していただいた（財）横浜市臨海環境保全事業団様、シーサイドライン利用者数データを提供していただいた横浜新都市交通株式会社様、心から御礼申し上げます。この場を借りて感謝の辞を述べさせていただきます。

参 考 文 献

- 1) 山中亮一、村井基彦、井上義行、藤原奨、木下祐介「人為インパクトが海底生態系に及ぼす影響（第1報）－潮干狩りと人工干潟の生物量－」日本造船学会講演会論文集 第3号、pp.131-132、2004
- 2) 山中亮一、村井基彦、井上義行、藤原奨、栗山陽太郎「人為インパクトが海底生態系に及ぼす影響（第2報）－「海の公園」における貝類現存量の周年変化－」日本造船学会講演会論文集 第4号、pp.131-132、2004
- 3) 山中亮一、村井基彦、井上義行、藤原奨「人為インパクトが海底生態系に及ぼす影響（第3報）」日本造船学会講演会論文集 第5号、pp.105-106、2005
- 4) 山中亮一、村井基彦、井上義行、佐藤雅哉、青野達彦：人為インパクトが海底生態系に及ぼす影響（第四報）－「海の公園」における条例施行とアサリの現存量変動との関連性－、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第2 E号、pp.99-100、2006
- 5) 山影 進、服部 正太：コンピュータのなかの人工社会、共立出版株式会社、2002
- 6) 村井基彦、広林隆志、山中亮一、井上義行：海浜公園における潮干狩り行動の数値シミュレーションに関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第2 E号、pp.101-104、2006
- 7) M.Murai, H.Takashi, Y.Ryoichi and Y.Inoue: A Prediction of a Human Action on Seashell-digging at a Seaside Park based on a Multi-Agent Simulation Model, 3rd conf. Monitoring and Management of Visitors Flows in Recreational and Protected Areas, pp.109-111, 2006
- 8) M.Murai, Y.Funaki and R. Yamanaka: A Study on an Analysis of an Annual Change of Distribution of Short-necked clam in a Tideland Considering Huge Human Impact, OCEANS2008, 2008
- 9) 「潮干狩り」 原田知篤著（文葉社、2004）