

複雑系としての海洋波浪の特性

中 島 光 雄

1. はじめに

海洋環境のうち、沿岸域の潮流、海流などの流れ、水温、波浪、漂砂、海浜変形などの海象現象の特性を解明することは、沿岸域海洋生態系、海浜、干潟、海岸構造物などの、沿岸環境に対する海象の影響を解明する上で重要である。近年、東京湾の三番瀬の埋め立て問題や長崎県諫早湾の干拓問題に示されるように、沿岸域における開発が沿岸生態系へ与える影響を予測することが重要な課題となっている。

海洋生態系は非常に複雑なシステムであり、気圧、風、気温などの気象現象、潮流、海流、沿岸流などの流況、波浪、水温、漂砂、海浜変形などの海象現象、有機物質、窒素やリン、溶存酸素などの水質、プランクトンやバクテリア、魚などの生物、これらの様々なシステムが、複雑に相互作用しながら海洋生態系が成り立っている。沿岸域の埋め立てや港湾整備に伴う海洋生態系への影響を予測するためには、気象、海象、水質、生物などの各システムの特性とそれらの相互作用を複合的、総合的に評価する視点が必要である。

このような目的のためには、海洋現象を様々な時空間スケールの現象の全体から成り立つ複雑系として捉えることが重要であると考え。中島(2002、

2003)は、海洋現象を複雑系として捉えるという視点にたって、気象、海象のスペクトル解析データを基にして、様々な時空間スケールをもつ気象現象と海象現象との相互作用に着目し、複雑系としての海洋システムの特性を明らかにした。本報告では、中島(2003)の報告をさらに発展させて海洋波浪の特性について複雑系という視点から考察を行なった。

2. 海洋波浪のスペクトル特性

海洋の波浪は、異なった周波数成分、方向成分をもつ多くの成分波からなると仮定することによって、海洋波浪のエネルギースペクトル特性を周波数スペクトル、方向スペクトルといった物理量で表わすことができる。ここでは特に風波の周波数スペクトルの構造について考察する。

海洋波浪のうち風波の周波数スペクトルでは、ピークより高周波側に平衡領域といわれるスペクトルの減衰域があり、平衡領域では周波数の $-4 \sim -5$ 乗で減衰することが良く知られている。また、風波の発達や減衰においても、その周波数スペクトルの平衡領域では、この勾配を保ちながら、自己相似形になることが知られている。これは風波のエネルギースペクトルの自己組織化として実験や観測などではよく知られている。しかしながら、

風波のエネルギースペクトルの自己組織化の力学的メカニズムは現状では不明な点が多い。

風波のエネルギースペクトルは、風からの成分波毎のエネルギー入力(Sin)、主として砕波による成分波毎のエネルギー消散(Sds)、そして、非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達(Snl)のバランスで定まる。しかしながら、エネルギースペクトルの形状が何によって決まるのかは不明な点が多い。風からのエネルギー入力については、理論的にはまだ未解明な部分が多いが、実験や観測などから、ソース関数(Sin)の形状はほぼ特定されている。また、非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達(Snl)は、Hasselmann(1962)によって重力波の4波共鳴非線形相互作用によるエネルギー伝達がSinやSdsと同程度に重要であることが理論的に示されている。最も分かっていないのが、砕波によるエネルギー消散Sdsのメカニズム

であり、これは、理論的にも観測や実験などからも不明な点が多い。Phillips(1985)は、Sin、Sds、Snlがほぼ同じオーダーと仮定して次元解析から、風波のエネルギースペクトルの平衡領域の勾配が周波数の -4 乗になることを示した。

中島ら(1992)はこの仮定を基にSdsのソース関数を決めて、波浪モデルの構築を行なった。また、このモデルは、Sinは最も実測値と合うように調整されたソース関数を用い、SnlについてはHasselmann et al.(1988)によるdiscrete interaction近似を用いている。この近似計算では重力波の4波共鳴非線形相互作用によるエネルギー伝達を直接計算していることが大きな特徴である。

実際に波浪モデルで計算した周波数スペクトルの発達の様子を図1に示す。周波数スペクトルのピークより高周波数側の平衡領域は周波数の -4 乗で減衰していることが分かる。また、風波の発達や減衰においても平衡領域の勾配は常に周波数の -4 乗となるように自己相似形を保つことが分かる。すなわち風波は連続的な成分波から構成され、そのエネルギースペクトルは自己相似形を保ちながら、発達、減衰をし、自己組織化をすることが分かる。

中島(2003)は、波浪モデルによる数値計算結果と乱流の統計理論を基に、風波のエネルギースペクトルの自己組織化の力学的メカニズムとして現象の2次元性と非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達が重要な役割を果たしていることを考察した。

3. 等方性乱流におけるエネルギースペクトルの自己組織化

巽(1986)は、乱流の統計理論(修正0-4次キュ

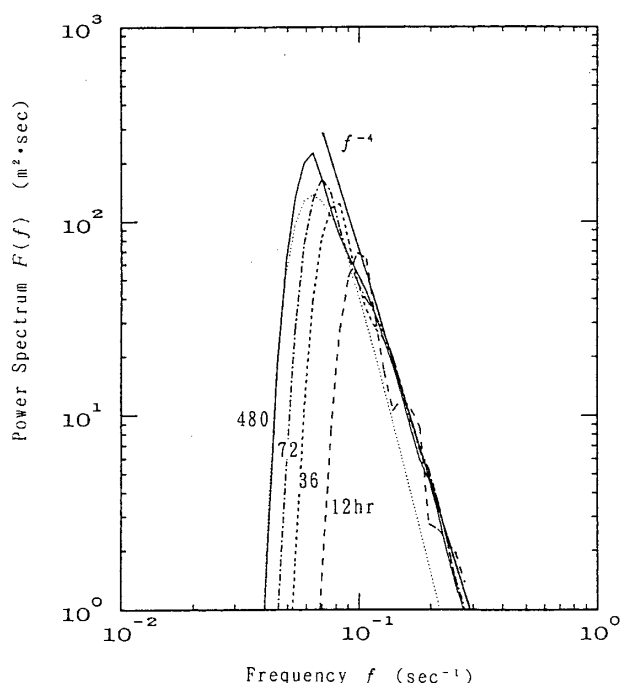


図1. 風波の周波数スペクトルの発達
(12、36、72、480時間後)

複雑系としての海洋波浪の特性

ムラント近似理論)を基に3次元等方性乱流のエネルギースペクトル、2次元等方性乱流のエネルギースペクトルの生成機構について詳細な解析を行なっている。

乱流の統計理論(修正0-4次キュムラント近似理論)によれば、3次元等方性乱流のエネルギースペクトルの慣性平衡領域は波数の $-5/3$ 乗で減衰する。これはKolmogorovの $-5/3$ 乗則としてよく知られ、このエネルギースペクトルは、気象や海象における乱流現象でもしばしば観測される。このエネルギースペクトルの慣性平衡領域の形成のメカニズムとして、3波の非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達(順カスケードメカニズム)が重要な役割を果たしている。すなわちこのエネルギー伝達によって小さな波数成分からより大きな波数成分へと成分波間のエネルギーの再配分が起こり、これによってエネルギースペクトルの慣性平衡領域は波数の $-5/3$ 乗で減衰することが示唆される。

また、同じ乱流の統計理論(修正0-4次キュムラント近似理論)によれば、2次元等方性乱流のエネルギースペクトルの慣性平衡領域は波数の -3 乗で減衰する。このようなエネルギースペクトルは、気象や海象現象で地球の自転効果によって現象が2次元的となる場合にしばしば観測される。このエネルギースペクトルの慣性平衡領域の形成のメカニズムとして、3波の非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達(逆カスケードメカニズム)が重要な役割を果たしている。すなわちこのエネルギー伝達によって大きな波数成分からより小さな波数成分へと成分波間のエネルギーの再配分が起こり、これによってエネルギースペクトルの慣性平衡領域は波数の -3 乗で減衰することが

示唆される。

2次元等方性乱流では、3次元等方性乱流に比較して、エネルギースペクトルの慣性平衡領域におけるエネルギーの減衰がかなり大きくなる。これは3波の非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達が、2次元等方性乱流では3次元等方性乱流とは異なり、逆カスケードメカニズムになっていることが大きな要因であると推察される。

乱流を渦の運動と考え、また、渦が一様に運動すると仮定すれば、この結果は周波数スペクトルでも同様な結果となる。3次元等方性乱流のエネルギースペクトルの慣性平衡領域では、周波数の $-5/3$ 乗で周波数スペクトルは減衰をする。また、2次元等方性乱流のエネルギースペクトルの慣性平衡領域では、周波数の -3 乗で周波数スペクトルは減衰をする。ここでどちらの場合でも3波の非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達がエネルギースペクトルの慣性平衡領域の形状を決めるのに重要な役割を果たしていることが注目される。

巽(1984, 1986)は乱流の統計理論におけるエネルギースペクトルの生成機構の物理的意味を詳細に論じている。3次元等方性乱流では、粘性が0のときエネルギー消散率は有限値となるが、エンストロフィは無限大となる。すなわち渦糸の伸縮によってエネルギー消散が支配的になる。一方、2次元等方性乱流では、粘性が0のときエネルギー消散率は0になるが、エンストロフィは有限値となる。この場合は、渦糸の伸縮はないのでエンストロフィ消散が支配的となる。この結果エンストロフィを減少させるように成分波間でエネルギーの伝達が生じる。

このことをやや定性的に論じれば、渦と渦の間

のエネルギーのやり取りと考えることが出来る。

3次元等方性乱流では、エネルギー消散が支配的となり、大きい渦がより小さい渦へと順カスケードメカニズムによって崩壊して最後は粘性によって散逸しながら周波数スペクトルの慣性平衡領域の勾配は周波数の $-5/3$ 乗の形状を保ちながら自己相似形で発達、減衰をする。一方、2次元等方性乱流では、渦は粘性で散逸することがないので、エンストロフィ消散が支配的となり、小さい渦が合体してより大きな渦へと逆カスケードメカニズムによって、周波数スペクトルの慣性平衡領域の勾配は周波数の -3 乗の形状を保ちながら自己相似形で発達、減衰をする。2次元等方性乱流を2次元の渦糸群の統計力学として記述したOnsager (1949)のモデルでは同符号の渦糸が互いに集まってより大きな渦糸を作る傾向があることが示されている。また、Kraichnan (1967)によって、2次元乱流では、3次元乱流とは逆に、小さい渦から大きい渦に向かってエネルギー伝達、すなわち逆カスケードメカニズムが起こることが示された。したがって乱流の周波数スペクトルの慣性平衡領域の周波数依存性は、非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達と現象が卓越する空間次元によって決まることが示唆される。すなわち現象の卓越する空間次元によって、非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達のカスケードメカニズムが異なり、2次元では逆カスケードメカニズム、3次元では順カスケードメカニズムが支配的になる。この結果、3次元乱流よりも2次元乱流で周波数スペクトルの慣性平衡領域の勾配が大きくなることが示唆される。

4. 風波のエネルギースペクトルの自己組織化

中島 (2003) は、風波のエネルギースペクトルの平衡領域の形成メカニズムについて、波浪モデルで再現されたエネルギースペクトルと非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達、および、乱流の統計理論を基に考察を行なった。この結果、風波のエネルギースペクトルの平衡領域の形成に現象の2次元性、および、重力波の4波共鳴非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達が重要な役割を果たしていることが示唆された。

乱流の統計理論(修正0-4次キュムラント近似理論)によれば、3次元等方性乱流のエネルギースペクトルの慣性平衡領域は波数の $-5/3$ 乗で減衰する。このエネルギースペクトルの慣性平衡領域の形成のメカニズムとして、3波の非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達(順カスケードメカニズム)が重要な役割を果たしている。また、同じ乱流の統計理論(修正0-4次キュムラント近似理論)によれば、2次元等方性乱流のエネルギースペクトルの慣性平衡領域は波数の -3 乗で減衰する。このエネルギースペクトルの慣性平衡領域の形成のメカニズムとして、3波の非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達(逆カスケードメカニズム)が重要な役割を果たしている。

波浪モデルによって風波の周波数スペクトルを再現したところ、エネルギースペクトルの平衡領域は周波数の -4 乗で減衰することが分かった。また、この計算結果では、重力波の4波共鳴非線形相互作用によって逆カスケードメカニズムが起こり、風波の周波数スペクトルの平衡領域の形成に、非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達

が重要な役割を果たしていることが分かった。すなわちこのエネルギー伝達によって大きな周波数成分からより小さな周波数成分へと成分波間のエネルギーの再配分が起きている。このことと乱流の統計理論(修正0-4次キュムラント近似理論)から、風波の周波数スペクトルは、現象の2次元性と重力波の4波共鳴非線形相互作用による逆カスケードメカニズムによって、風波のスペクトルの平衡領域の形状が決まることが示唆された。

風波のエネルギースペクトルは、個々の波の連なりとしての波群のエネルギースペクトルを意味する。すなわち、風波の波群の内部において、現象の2次元性と重力波の4波共鳴非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達によって、大きい周波数の成分波からより小さい周波数の成分波へエネルギーの再配分が起こる。これによって波群は徐々に自己相似構造をもつようになり、この結果として風波の波群のエネルギースペクトルは自己相似構造を保ちながら自己組織化すると推察される。

5. 風波における組織的構造の生成と崩壊

ここでは、鳥羽(1984, 1987)、中島(1981)の研究結果を基にして風波の形成メカニズムの素過程について考察する。

鳥羽(1984)は、風洞水槽による実験結果から、風波の形成メカニズムの素過程について報告している。それによれば、風波上で間欠的に組織的な気流の剥離渦が生成される。また、これに伴って波面には気流と水との非線形相互作用の結果として剥離泡が生じる。この剥離泡の内外で運動量の交換が行なわれる。この運動量の交換によって風

波は発達すると考えられているがこの詳しいメカニズムについてはまだよく分かっていない。

一方で風から波への運動量の輸送が過剰になるとその運動量を抑制するメカニズムも存在する。すなわち風波上で生成された気流の剥離渦は、間欠的にその組織的構造を保ちながら風波上層の気流へ貫入してやがて崩壊する。その過程で風から波への過剰な運動量の輸送が抑制される。また、風から波への運動量の輸送が過剰になり、波高が増大したときに、波面が砕波して気流を水中に取り込み、風から波への運動量を水中に輸送する。このとき水中においても間欠的に組織的な渦構造が生成される。水中に輸送された運動量は主に組織的な渦構造の生成に費やされ波高の増大にはほとんど寄与しないと考えられる。

ここで重要なことは風から波への運動量の輸送は気流の剥離とそれによる波面の剥離泡を介して運動量の交換という強い非線形相互作用によって風波が発達する考えられること、また、他方で気流や水面下の間欠的な組織的構造の生成、崩壊は、風から波への過剰な運動量の輸送を抑制して自己調節していることである。風波のこのような構造を鳥羽(1987)は砕波調節と名付けている。また、鳥羽(1984)は、風波の形成メカニズムの素過程はこのように本質的に強い非線形現象であるために、風波は乱流的要素を強く含み、この結果、風波に一種の統計的相似構造が成立しているであろうと考察している。

中島(1981)による波面上の乱流場を可視化した研究結果によれば、波面上の気流が剥離しない場合には、間欠的に3次元的な組織的構造の生成、崩壊が起こる。また、気流が剥離する場合は、2次元的な剥離渦が間欠的に剥離層から波面上へ飛

び出し、波面上に渦塊の生成、崩壊が間欠的に認められる層があることが分かった。

このような波面上の乱流場の間欠的な組織的構造の生成と崩壊は平板乱流境界層におけるバースティング現象と類似の現象である。この現象は波面上に過剰に蓄積された運動量を波面から上層へ輸送するために起こるある種の自己調節作用であると考えられる。

この自己調節作用は風波の卓越する空間スケールや時間スケールを規定すると考えられ、風波のエネルギー Spektral の自己相似構造を規定するものではないと考えられる。

6. 風波のカオスの遍歴とホメオカオス

ここでは風波における組織的構造の生成と崩壊のメカニズムについて複雑系におけるカオス結合系の研究を基に考察を行う。

金子(1996)はカオス結合系という複雑系について研究を行なっている。この研究ではカオスの性質をもつ素子を結合して素子の非線形性や素子間の非線形相互作用の強さを変えてカオス結合系の振る舞いを数値計算によって調べている。このカオス結合系は、要素間の非線形相互作用が局所的ではなく大域的となっており、このようなカオス結合系を大域結合マップと称している。多くの非線形要素が保存則などによる制限をうけて発展する場合は平均場を通じた大域的な非線形相互作用が重要な役割を果たすと考えられる。この研究結果からカオス素子の非線形性と素子間の大域的相互作用の強さによってカオス結合系が以下の4つに分類されることが分かった。

- ①完全に引き込んで振動するコヒーレント状態
- ②各要素が全くばらばらに振動する状態

③少数のクラスターに分かれて秩序的に振る舞う状態(秩序相)

④クラスターが秩序と無秩序の状態を交互の繰り返す状態(部分秩序相)

この研究で興味深いのは④の部分秩序相の存在である。部分秩序相では、カオス結合系は秩序と無秩序の状態が交互に現れる。そしてこのような秩序的な組織的構造の生成と崩壊の状態を繰り返しながら動的な安定性を維持している。このような複雑系における秩序と無秩序を繰り返す状態、あるいは、秩序的な組織的構造の生成と崩壊を繰り返す状態をカオスの遍歴と呼び、カオスの遍歴という動的な多様性の中で安定性を維持する機構をホメオカオスという。

風波は、風と波との強い非線形相互作用の結果として、秩序的な組織的構造の生成と崩壊を間欠的に繰り返しながら、あるいは、秩序と無秩序の状態を繰り返しながら、自己調節をしつつ動的安定性を維持する。これは複雑系におけるカオスの遍歴を繰り返しながら動的安定性を維持するホメオカオスと同じ機構と考えられる。

7. 複雑系としての海洋波浪の特性

これまでの結果を基に海洋波浪が複雑系としてどのような特性をもつのかを考察する。

風波は、風と波との強い非線形相互作用の結果として、秩序的な組織的構造の生成と崩壊を間欠的に繰り返しながら、あるいは、秩序と無秩序の状態を繰り返しながら、自己調節をしつつ動的安定性を維持する。これは複雑系におけるカオスの遍歴を繰り返しながら動的安定性を維持するホメオカオスと同じ機構と考えられる。

次に風波の時系列的な動態について個々の波か

らどのように統計的なエネルギースペクトルの自己組織化が行なわれるのかを考察する。

風波は砕波調節という自己調節作用によって秩序的な組織的構造の生成と崩壊を間欠的に繰り返しながら動的安定性を維持する。この自己調節作用は風波の卓越する空間スケールや時間スケールを規定すると考えられる。

さらに個々の波の連なりとして波群が形成される。この波群内部においては、現象の2次元性と重力波の4波共鳴非線形相互作用による成分波間のエネルギー伝達によって、大きい周波数の成分波からより小さい周波数の成分波へのエネルギーの再配分が起こる。これによって波群は徐々に自己相似構造をもつようになり、この結果として風波の波群のエネルギースペクトルは自己相似構造を保ちながら自己組織化する。

風波は成分波間の非線形相互作用によるエネルギーの再分配によって自己組織化を行なうが、この時の非線形相互作用によるエネルギーの再分配はその風波自体のスペクトルの全体の形状に依存する。すなわち風波は部分と全体が密接に関係しながら自己言及的に自己組織化を行なう。

海洋の風波の構造はこのような複雑系としての特性を有している。風波に限らず気象、海象現象のメカニズムの解明には、このような複雑系としての視点をもつことが重要であると考えられる。

参考文献

- Hasselmann, K. (1962) On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part I. General theory. *J. Fluid. Mech.*, 12, 481-500.
- Hasselmann, K. (1968) Weak interaction the-

ory of ocean waves, Basic Developments in fluid dynamics (M. Holt, Ed.) New York, 2.117-182.

Hasselmann, S. and K. Hasselmann (1981) A symmetrical method of computing the non-linear transfer in a gravity wave spectrum. *Hamb. Geophys. Einzelschriften, Reihe A: Wiss. Abhand.*, 52, 138P.

金子邦彦 (1996) 複雑系のカオスのシナリオ、朝倉書店、123-180.

中島光雄 (1981) 波面上の乱流に関する研究、日仏海洋学会.

中島光雄他 (1992) 球面座標系波浪モデルの開発 (第2報)、日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 277-278.

中島光雄 (2002) 海洋複雑系環境情報システムに関する研究、目白大学人間社会学部紀要, 2, 365-380.

中島光雄 (2003) 海洋複雑系環境情報システムに関する研究、第II報、目白大学人間社会学部紀要, 2, 365-380.

Phillips, O.M. (1958) The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves. *J. Fluid. Mech.*, 4, 426-434.

Phillips, O.M. (1985) Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind generated gravity waves. *J. Fluid. Mech.*, 156, 505-531.

巽友正 (1984) 乱流と渦運動、数理科学NO.250, 5-12.

巽友正 (1986) 乱流の統計理論、乱流現象の科学—その解明と制御、東京大学出版会, 165-221.

鳥羽良明 (1984) 海の乱流における渦構造、数

理科学NO.250、4、38-47.

鳥羽良明(1987)風波の相似則とその周辺、ながれ

6-2、日本流体力学会、5-12.

The WAMDI group (1988) The WAMmodel-A
third generation ocean wave prediction
model. J.Phy.oceanogr.,18,1775-1810.

ABSTRACT

Characteristics of Ocean Waves as the Complexity System

Mitsuo NAKAJIMA

In this report, consideration was performed from the viewpoint of the complexity system about characteristics of wind waves.

As a result of the strong nonlinear interaction of winds and waves, wind waves maintain dynamic stability, carrying out self-regulation, repeating generation and collapse of order organization structure intermittently. It is considered to be the same mechanism as the homeochaos which maintains dynamic stability, repeating the chaotic itinerancy in the complexity system. Its self-regulation action is considered to specify the space scale and time scale in which wind waves dominate.

Furthermore, wave groups are formed as a sequence of each wave. In the inside of wave groups, the energy re-distribution of component waves takes place by the nonlinear energy transfer of component waves. And wave groups come to have self-similarity structure gradually, consequently the self-organization of the energy spectrum of wind waves is carried out, maintaining self-similarity structure.