

日本海における巨大 Freak wave 出現時の気象・海象特性と その発生原因

安田孝志* ・森 信人**・中山晋一***
赤羽 透****・吉元博文

1. 緒 言

Freak wave は波高が単に有義波高 $H_{1/3}$ の 2 倍を超える波として定義されるが、その本質は突出した波高を持って単独で出現し、Rayleigh 分布の枠内では必ずしも捉えられない点にある。勿論、例外もあるが、線形狭帯仮定の下での波とは様相を異にしており、その実態の解明が急がれている。しかしながら、波高が 10 m を超えるような Freak wave (ここでは、巨大 Freak wave と呼ぶ) については観測例も少なく、波形や統計的特性だけでなく発生原因や発生条件にも未解明な点が多い。

このため、安田ら (1993) は、山形県由良沖の波浪観測データを用いて冬春季節風下で波高が 12 m を超えるような Freak wave が発生することを示し、それまで Freak wave の発生原因とされて来た『異なった方向からの波の交差やうねりと風波の重畳など』以外の極めて一般的な条件下でも Freak wave が出現することを明らかにした。しかしながら、対象データが限られていたことに加え、気象・海象条件との関係や Freak wave の出現確率に対する検討になお不十分な点があった。特に、気象条件との関連については何ら検討されておらず、このため、気象条件と密接な関わりを持ち、風域場の急変などを原因とする異常波浪との関係が不明のまま残されていた。勿論、有義波高に対して定義される異常波浪と最大波高の有義波高に対する比に関する Freak wave とは本来無関係であり、異常波浪の発生と巨大 Freak wave を直接結び付けることは出来ないが、共に異常性を持つ点では共通しており、巨大 Freak wave 出現時の気象条件を基に両者の関係について検討する必要がある。

そこで本研究では、1987 年 1 月～1990 年 7 月の間に実施された連続観測期間中の巨大 Freak wave に着目し、この間の気象・海象特性を調べることによって、これら

の巨大 Freak wave の発生条件および出現確率を明らかにするとともに、発生原因についても検討を行う。

2. 観測と巨大 Freak wave の概要

ここで用いる観測データは、運輸省船舶技術研究所の『浮遊式海洋構造物の開発研究』によって得られたものである。波浪観測は前報 (安田ら, 1993) で述べたように山形県由良沖の水深約 40 m の海底に設置された 3 台の超音波式波高計によって行われ、そこに係留された POSEIDON 号 (吉元・加藤, 1992) 上の風向・風速計によって海面上 10 m の風向・風速の連続記録も同時に得られた。約 3 年半の観測期間中に実施された連続観測の回数が少なく、かつこの間の巨大 Freak wave がすべて捕捉されている訳では必ずしもないため、これらより巨大 Freak wave の母集団分布を推定することには無理がある。むしろ、連続観測によって巨大 Freak wave を含む長時間の統計的定常データが得られておれば、これらより巨大 Freak wave を含む波高の母集団分布を推定でき、Rayleigh 分布との比較も出来て都合が良い。そこで、巨大 Freak wave を捕捉した連続観測データより 20 時間以上のもので 5 ケースを選び、これらを解析対象データとした。なお、連続観測中、巨大 Freak wave は複数個出現しているが、それらの最大のもを各ケースにおける巨大 Freak wave と扱っている。

データ長と H_{max} の変動性の関係から、連続データを 30 分単位にブロック化し、各ブロックごとの平均風速 \bar{U} 、平均風向 $\bar{\theta}$ 、 $H_{1/3}$ 、 H_{max} 、スペクトル諸量を求めた。表-1 は、上述のようにして選んだ巨大 Freak wave を含む連続観測データの番号と連続観測時間 (Period)、この間のゼロダウン波の個数 (N)、さらに各連続データごとの巨大 Freak wave 出現時 (30 分単位ブロック) および出現測点での諸量を示したものである。ここで、データ番号 Y 871124 の Y は YURA, 87 は 1987 年, 11 は 11 月, 24 は観測開始日の 24 日を示し、これによって連続観測開始年月日がわかる。これより、いずれの連続観測時間も 20 時間を超え、その間のゼロダウン波の数もほぼ 1 万を超えており、波高の母集団分布を調べるには十分な数と言える。また、いずれの Freak wave も風向がほぼ

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 岐阜大学大学院 工学研究科 (日本学術振興会特別研究員)

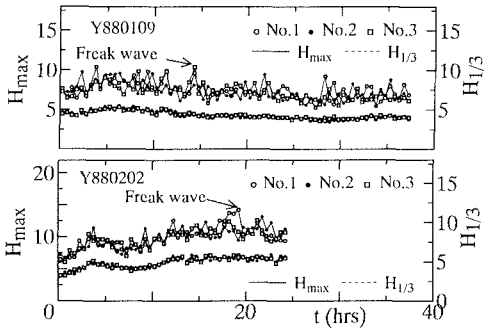
*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科

**** 名古屋道路エンジニア (株)

***** 工修 運輸省船舶技術研究所 海洋開発工学部

表-1 巨大Freak wave出現時の気象・海象諸量

Data code	Period (hrs)	N	\bar{U} (m/s)	$\bar{\theta}$ (deg)	$H_{1/3}$ (m)	H_{max} (m)	$H_{max}/H_{1/3}$	$T_{1/3}$ (s)	$(ka)_{1/3}$	Skewness	GF
Y871124	23.5	10613	12.99	296.3	5.06	11.30	2.23	10.25	0.106	0.292	0.901
Y871217	22.0	9770	19.28	295.3	7.35	14.73	2.00	11.24	0.133	0.306	0.762
Y880109	37.5	18535	13.38	292.4	4.44	10.41	2.34	9.09	0.115	0.245	0.865
Y880202	24.5	10184	16.62	292.8	6.40	14.22	2.22	10.49	0.129	0.381	0.745
Y881214	30.0	15615	15.63	226.5	5.28	11.16	2.11	10.60	0.105	0.262	0.727
Y900125	23.5	11249	17.24	275.6	4.79	9.56	2.00	9.74	0.110	0.110	0.763

図-1 連続観測中の30分単位の最大波高 H_{max} と有義波高 $H_{1/3}$ の時間変化

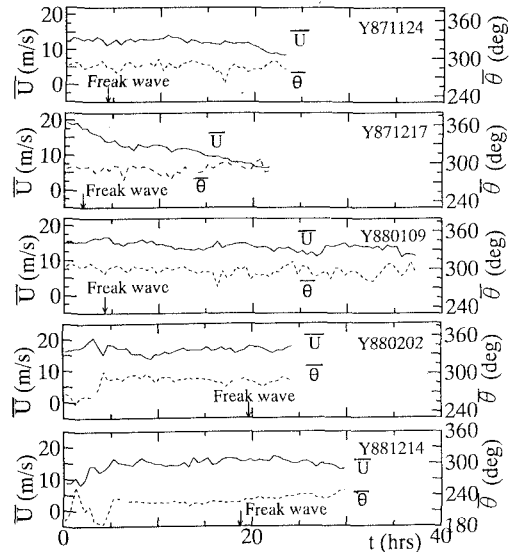
WNWの冬期の強風下で生じており、 $H_{1/3}$ の値も最低でも4.44 mであることから、巨大Freak waveは冬期季節風下で十分発達した波浪条件下で生じることがわかる。

このようなFreak waveの出現状況を見るため、図-1に代表例としてY880109およびY880202における3測点での $H_{1/3}$ および H_{max} の観測開始時刻からの時間変化を示す。これから、 $H_{1/3}$ は時間的・空間的にほとんど変化せず、5 m前後の値を保っているが、 H_{max} は時間だけでなく測点によっても大きく変動しており、巨大Freak waveの出現が $H_{1/3}$ のみでは決まらないことがわかる。このように、巨大Freak waveは有義波高が長時間にわたってほとんど一定の状況下で生じており、その発生は有義波高の値とは無関係である。確かに、有義波高が7 mを超えるような異常波浪時に10 mを超える巨大波の出現頻度が増大することは間違いないが、これによって巨大Freak waveの出現頻度は増すわけではなく、巨大Freak waveが一定の有義波高の下で出現している事実からすれば、その出現と異常波浪の発生とは無相関と考えるべきであろう。

3. 巨大Freak wave発生時の気象・海象特性

3.1 気象特性

巨大Freak wave出現時の気象特性を明らかにするため、まず、上述の表-1の5ケースの連続観測中の平均風速 \bar{U} および平均風向 $\bar{\theta}$ の時間変化について検討する。図-2は、それぞれの連続観測開始時刻からの \bar{U} および

図-2 連続観測中の30分単位の平均風速 \bar{U} および平均風向 $\bar{\theta}$ の時間変化と巨大Freak waveの出現時間

$\bar{\theta}$ の時間変化と巨大Freak waveの出現時間を示したものである。 \bar{U} や $\bar{\theta}$ の値は、細かく変動しているが、Y871217を除いたいずれのケースにおいても風速は8 m/s~20 m/s、風向はほぼSSW(202.5°)~NW(315°)の範囲に分布している。風速の低下が大きいY871217について見ても、風向はWNW方向にほぼ一定しており、いずれの巨大Freak waveもほぼ一方向風と言って良い冬期季節風下で生じていることがわかる。

ついで、こうした由良沖での風速・風向とこの時の気圧配置との関係を調べ、日本海全域における気象特性について検討するため、連続観測期間を挟んだ前後3日から4日間の気圧配置の変化について調べた。図-3はこれら5ケースについて巨大Freak wave出現時前後の定時(12時間毎)天気図から求めた気圧配置を示す。いずれも西高東低の典型的な冬型の気圧配置となっているが、Y871124、Y880202およびY881214は、低気圧が日本海を北上し、北海道付近で急速に発達してオホーツク海に抜け、さらに発達して西高東低になったものである。これに対し、Y871217およびY880109は、オホーツク海

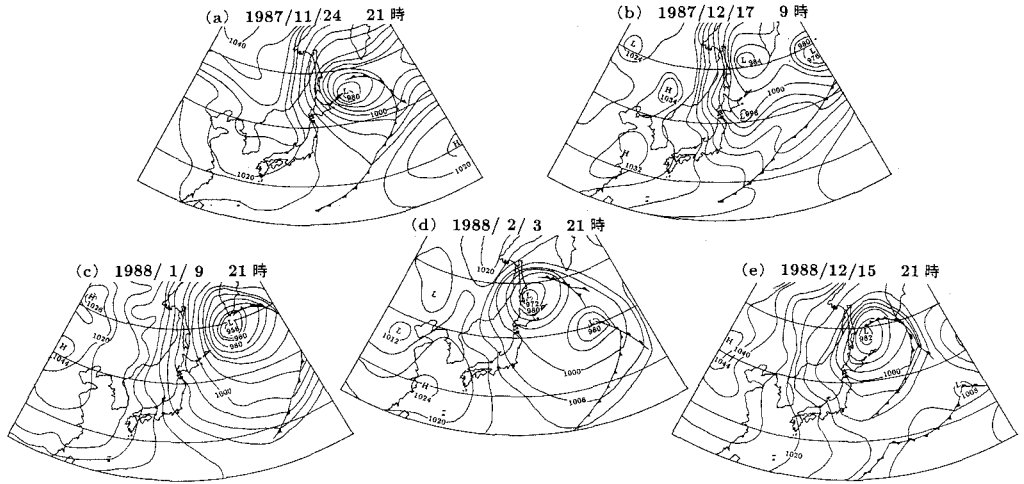


図-3 巨大 Freak wave の出現前後の気圧配置

において発達した低気圧がさらに発達を続けながらベーリング海に向かうものであり、前者と同様に西高東低の気圧配置となっている。以上のいずれの場合にも日本海を覆う西高東低の安定した等圧線の分布が見られ、日本海全域にわたって上述の図-2 に示したような安定した風向や風速が長時間にわたって続くと考えられる。

以上示したように、巨大 Freak wave 出現時の日本海での気象条件は安定した西高東低の気圧配置下のものであり、異常波浪を発生させるような複数個の低気圧による風向・風速の急変は見られない。いずれの場合も駒口(1993)が言うところの異常波浪を発生させる気象条件には該当しておらず、日本海における巨大 Freak wave は冬型の安定した気圧配置の下で生じると言ってよい。

3.2 海象特性

ここでは、上述の気象条件下での有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ に加え、平均波向 θ_m の時間変化、さらに方向分布や周波数スペクトルのべき乗則について調べ、巨大 Freak wave 出現時の海象特性を明らかにしたい。

図-4 は表-1 の5 ケースについて3測点での $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ の時間変化および $H_{1/3}$ に対する定常性検定によって定常と測定された区間を示したものである。この場合、測点による差異や上述の図-2 の \bar{U} や $\bar{\theta}$ に見られるような細かい変動は見られず、風速・風向の変動に比べて $H_{1/3}$ や $T_{1/3}$ の変動は極めて小さいが、風速の平均的なトレンドには対応している。この結果、一定風速下では図中に示すような定常区間が現れ、そこでは平衡状態の波浪の場が形成されていると判断される。

図-5 は、3 測点データより橋本ら(1993)の拡張最大エントロピー原理法によって計算した方向スペクトルに基づく平均波向 θ_m の時間変化を前述の図-2 に示した平均風向 $\bar{\theta}$ とともに示したものである。Y 881214 を除

いたいずれの場合も波向きは風向とほぼ一致しており、日本海の高波浪の特色が良く現れている。また、平均波向きの時間変化は、風向きに比べてさらに安定しており、いずれのケースにおいても連続観測期間中ほとんど一定であり、一方向波浪場が保たれていることがわかる。

図-6 は、同様にして計算した巨大 Freak wave 出現時の方向分布を示す。いずれの場合も、ほぼ上述の平均波向きを中心を持つ単峰型の方向分布となっており、このときの波浪場が多方向からの波の合成によっているの

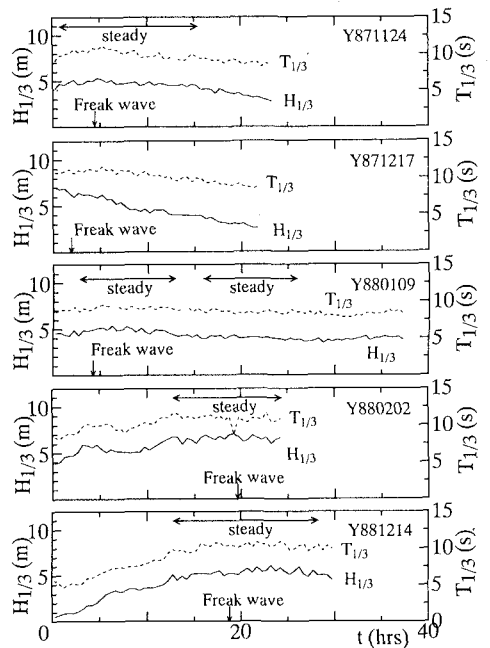


図-4 連続観測期間中の $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ の時間変化と定常性検定による定常区間

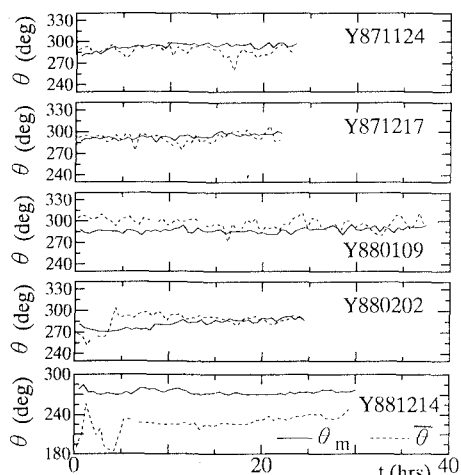


図-5 連続観測中の平均波向 θ_m と平均風向 $\bar{\theta}$ の時間変化

ではなく、一定方向からの波によっていることがわかる。これによって、巨大Freak waveは冬期季節風下のWからWNWの波向が長時間にわたって卓越する波浪場において出現することが明確になったと言える。

図-7は、各ケースにおける巨大Freak wave出現時の周波数スペクトルを比較するとともに、 f^{-4} および f^{-5} のべき乗則と比較したものである。これから、いずれも平衡状態にある風波における f^{-4} に従っており、周波数スペクトルからも巨大Freak waveが平衡スペクトルを持つ波浪条件下において出現することがわかる。

以上示したように、日本海のようなほぼ閉じられた海域を、定常一様風と見なせる冬期季節風が長時間吹き続けた場合、単峰型の方向分布を持つ平衡状態にある波浪場が必然的に形成される。このような波浪場に出現するFreak waveは、従来言われてきたような2方向からの交差やうねりと風波の重畳、流れによる屈折などによるものではないことは確かである。

4. 巨大Freak waveを含む波高の母集団分布

これまでの検討によって、巨大Freak waveが安定した西高東低の気圧配置の下での冬期季節風下で出現し、その出現に何ら気象的・海象的に特異性を必要としないことが明らかとなった。さらに、その出現確率もRayleigh分布に従うのであれば、その出現に何ら特異性は存在せず、従来法で取り扱えることになる。しかしながら、緒言で述べたように、巨大Freak waveの本質は必ずしもRayleigh分布に従わない点にあり、その出現確率を明らかにすることは極めて重要である。このため、各ケースごとの定常区間内の全てのゼロダウン波高は巨大Freak waveを含めて同一の母集団に属すると考え、

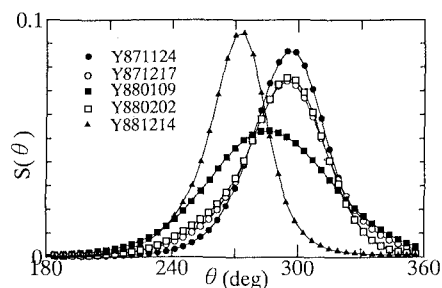


図-6 巨大Freak wave出現時の観測波の方向分布

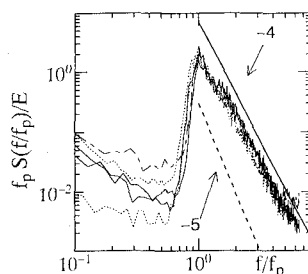


図-7 巨大Freak waveの出現時の方向スペクトルとべき乗則 (f^{-4} , f^{-5}) の比較

その母集団分布を明らかにするとともに、Rayleigh分布との関係について検討する。

前述の図-4に示したように、10時間以上の定常区間を持つケースはY871124, Y880109, Y880202およびY881214の4ケースであり、ゼロダウン波の数はいずれも4,000以上であることから、母集団分布の推定には十分と判断される。図-8は、それぞれの定常区間内の全波高より求めた超過確率分布の比較をRayleigh分布と併せて示したものである。 $(H/H_{1/3})^2 \leq 3$ の領域ではいずれのケースにおいてもRayleigh分布を下回っているが、 $(H/H_{1/3})^2$ が3を越える付近からケースによる差異が見られるようになる。すなわち、Y881214は依然としてRayleigh分布を下回っているのに対し、他の3ケースはいずれもRayleigh分布を上回るようになる。これは、一般に言われていることとは逆に、Rayleigh分布が高波高に対してむしろ過小評価となり、Rayleigh分布を母集団分布として仮定することには問題があることを示している。また、4ケース中3ケースの巨大Freak waveがRayleigh分布による出現確率を上回って出現している事実は、巨大Freak waveの出現確率がRayleigh分布には必ずしも従わないことを示すものであり、緒言で述べたFreak waveの出現確率に関する本質的特性を裏づけるものと言える。

このように、巨大Freak waveを含めた高波高がRayleigh分布に必ずしも従わない原因としては、このと

きの観測波が定常一様風下の平衡波浪場におけるものであることを踏まえれば、これまで著者ら (1992) が示してきたように高次の非線形干渉である可能性が高い。そこで、Y 871124 のケースについて、上述の図-7 に示した観測波の平衡スペクトルを初期スペクトルとする線形波および4次以上の非線形干渉を評価した不規則波列の波高の超過確率を求め、観測値と比較した。図-9 はその結果であり、線形波では Rayleigh 分布を若干下回るのに対し、非線形干渉を考慮した場合には観測波のものよりも高波高の発生確率が增大することがわかる。これは、これまでの著者らの結果に符合するものであり、高次干渉によって Freak wave を含む高波高の出現確率が增大することを示している。したがって、高波高の出現確率が Rayleigh 分布を上回る波浪場においては、高次干渉の影響が無視できず、巨大 Freak wave 発生の有力な原因となる。特に、ここで対象としているような冬季節風下の波浪場においては高次干渉以外に原因は見当たらず、外に巨大 Freak wave の発生原因を考えることは出来ない。なお、高次干渉下の超過確率が観測結果を上回る理由については、数値シミュレーションが保存系の下で行なわれているのに対し、観測波は 10 m/s を越える強風下にあることから、砕波の影響が考えられる。砕波の影響については別途検討されており (安田ら, 1994)、高次干渉によって高波高の出現確率は増大するが、砕波のために結果的に波高は Rayleigh 分布の枠内に留まる。

5. 結 語

山形県由良沖での長時間連続観測データの解析結果より、波高が 10 m を超える巨大 Freak wave 出現時の気象・海象特性だけでなく、その発生原因および発生条件についても明らかにした。その結果、日本海での巨大 Freak wave は、異常気象や異常波浪の発生とは直接関係せず、西高東低の安定した冬型の気圧配置の下で長時間にわたり一定風速 (10 m/s 以上)、一定風向 (W~NW) の季節風が吹き続け、有義波高が 4 m 以上、波向きが風向きにほぼ一致した単峰型方向分布を持ち、周波数スペクトルが f^{-4} 則に従う平衡波浪場において出現することが明らかとなった。さらに、10 時間以上の定常区間を持つ連続データより波高分布を調べ、巨大 Freak wave が Rayleigh 分布の枠を超えて出現することを明らかにするとともに、高次干渉によって高波高の出現確率が増大することを示し、その発生原因が高次干渉にあることを明らかにした。このような非線形干渉の影響は一方波列において最も強くなるため、冬季節風のような強い一方向風が長時間持続し、波が十分に発達して来る平衡状

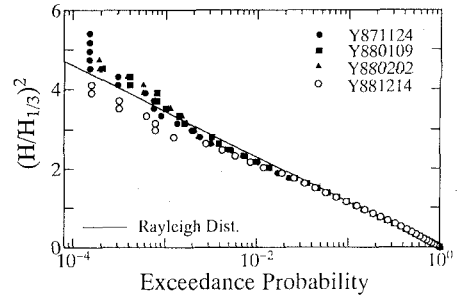


図-8 巨大 Freak wave を含む $H_{1/3}$ の定常区間データによる波高の超過確率と Rayleigh 分布との比較

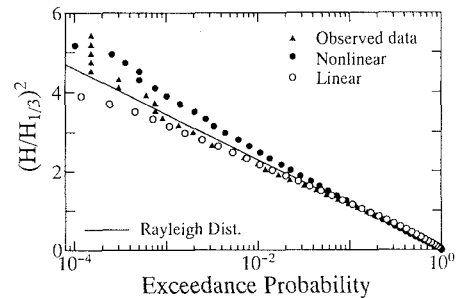


図-9 波高の超過確率に及ぼす非線形干渉の影響

態においては、非線形干渉によって巨大 Freak wave が発生し易くなり、注意が必要となる。

最後に、本研究で用いた拡張最大エントロピー原理法のプログラムは運輸省港湾技術研究所の橋本典明主任研究官に提供して頂いたものであり、深謝する。また、本研究は文部省科学研究費一般 C (06650559) および特別研究員奨励費、さらに造船学術研究推進機構からの交付金による成果であることを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 駒口友章 (1993): わが国沿岸における異常波浪とその予知に関する研究, 京都大学博士論文, 211 p.
- 橋本典明ら (1993): 方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEM) の拡張, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 136-140.
- 安田孝志・森 信人・吉元博文 (1993): 山形県由良沖の 3 測点同時観測データに基づく Freak wave の特性, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 91-95.
- 安田孝志・伊藤一教・森 信人 (1992): 一方不規則波列の波高分布に及ぼす非線形干渉の影響について, 土木学会論文集, No. 444/II-18 (83-92).
- 安田孝志・森 信人・川口浩二・多田彰秀 (1994): 一方波列の波高分布に及ぼす非線形干渉と砕波の影響について, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 31-35.
- 吉本博文・加藤俊司 (1992): 浮遊式海洋構造物の実海域実験: VII. 設計値と実測値, 船舶技術研究所報告別冊, pp. 109-140.