

LANDSAT 衛星による温排水モニタリングの実用性

水鳥雅文*・坂井伸一**・仲敷憲和**

1. はじめに

大容量臨海発電所の集中立地化に伴い、近年温排水の拡散域も広域に及ぶ例が多い。従来、温排水のモニタリングは船舶による測定によって行われているが、この方法では調査水域が拡大すると経費や所要時間の増大などを招くため、広域モニタリングをより迅速かつ安価に行える手法の開発が必要とされている。

人工衛星によるリモートセンシング技術は、広域的、周期的な情報を瞬時に、かつ安価に観測できるという利点がある。特に、LANDSAT 衛星は、表-1 に示すように他の観測衛星に比べ高い空間分解能の熱赤外センサー (TM) に搭載していることから、温排水モニタリングへの適用可能性が最も高い衛星と考えられる。

本研究は、LANDSAT 衛星による温排水モニタリングの有効性と実用上の問題点を明らかにすることを目的としたものである。

表-1 現在稼働中の人工衛星・熱赤外センサーの諸元

衛星名称	LANDSAT	NOAA	MOS-1	GMS
搭載センサー	TM	AVHRR	VTIR	VISSR
熱赤外波長域	10.4~12.5 μ m	11.5~12.5 μ m	11.5~12.5 μ m	10.5~12.5 μ m
空間分解能	120m	1,100m	2,700m	5,000m
観測幅	約185km	約3,000km	約1,500km	南緯50°~北緯50° 東経90°~西経170° (静止衛星)
観測周期	16日(昼、夜)	毎日(昼、夜)	17日(昼、夜)	
温度分解能	約0.5K	約0.12K	約0.5K	約0.5K

2. 実用上の検討課題

衛星リモートセンシングによる温排水モニタリング手法について予想される主な検討課題は、以下のように整理される。

- (1) 大気効果の影響
- (2) 海面状態等の変化による放射率への影響
- (3) 船舶による観測と衛星センサーによる観測との

測定方法の相違による影響

- (4) 衛星画像上のノイズ等の影響
 - (5) 雲の存在による海面情報の取得状況への影響
- (3) について補足すると、この影響は空間的相違と時間的相違に基づくものに分けられる。前者は、主に船舶による測定範囲と衛星センサーの視野との不一致、および両者の測定水深の相違 (船舶による観測では海面下 0.3~0.5 m 層の水温を、衛星センサーでは厚さ 20~30 μ m 程度の表皮水温を測定している。) 等に伴うものが考えられる。後者は、両者の観測時間や時刻の不一致に伴う誤差などである。

本研究では、まず海域特性の異なる3箇所の火力発電所前面海域を対象に、LANDSAT/TM 画像と衛星の飛来に同期した現地観測結果との照合から、LANDSAT/TM による海面水温分布観測の有効性を主として前述の(1)~(4)の観点から検討する。

次に、(5)の観点から1987、88兩年度を対象に、主要臨海発電所前面海域において雲の影響の少ない TM 画像が得られる確率 (以下、測得率と呼ぶ) を調べ、定期的に実施される温排水モニタリングへの適用性を考察する。

3. 海面水温分布観測の有効性

3.1 現地観測の内容

対象海域は、不規則な流れの卓越した外海域に面したA発電所、大規模内湾域に面したB発電所、ならびに潮流の卓越した内海域に面したC発電所の各前面海域であり、A発電所で1回、B発電所で2回、C発電所で5回、合計8回の同期観測を実施した。表-2 には各観測日における気象・海象状況等を示す。

測定は曳航式水温計を用い、海面下 0.3 m 層を中心に1~3セキの観測船によって実施した。観測時間帯は、衛星飛来時刻前後30分~1時間程度である。

3.2 ノイズ成分除去のための画像処理方法

TM 画像上にはラインスキャンノイズや点状のノイズ成分が存在する。本研究では、こうしたノイズ成分を除

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部

表-2 各観測日の気象・海象状況

ケース No.	対象発電所	年 月 日	環境水温 (°C)	気 温 (°C)	湿 度 (%)	風 速 (m/s)	日 射 量 (mj/m ² ・h)	天 気	波浪状況
①	A 発電所	88. 11. 8	16.5	11.3	55.0	2.4	—	晴れ	平穏
②	B 発電所	85. 11. 21	17.5	8.9	64.0	1.2	—	快晴	平穏
③	〃	89. 12. 2	16.0	5.5	57.0	1.5	—	快晴	平穏
④	C 発電所	89. 7. 25	23.4	29.3	59.7	0.7	2.51	晴れ	平穏
⑤	〃	89. 11. 14	21.0	12.9	47.7	3.4	1.21	晴れ	平穏
⑥	〃	89. 11. 30	18.2	9.3	45.0	9.0	1.14	快晴	白波あり
⑦	〃	89. 12. 16	16.3	9.8	65.3	2.0	1.18	晴れ	平穏
⑧	〃	90. 1. 17	13.1	7.5	43.9	1.9	1.20	快晴	平穏

去し、より正確な海面水温情報を抽出するため、以下に述べるような 2 次元デジタルフィルターを用いた 2 段階の画像処理方法を検討した。

- (1) 陸域をマスキング処理した TM 画像 (Band 6) について 1 ライン毎にサンプリングした画像情報を作成し、7 ライン×3 ピクセルの領域に対して、図-1 に示すような重みを持つデジタルフィルターをかける。
- (2) (1) の処理の施された画像に対し、3 ライン×3 ピクセルの領域で平滑化処理 (単純平均) を行う。
- (3) ただし、フィルターの領域がマスキングされた範囲にかかる場合は、原データのままとする。

図-2 に、ノイズ除去処理結果の例として A 発電所前面海域の画像を示す。ラインノイズおよび点状ノイズとも比較的良く除去されており、後述するように実測結果との整合性も良く、ここに示した画像処理方法はノイズ

成分除去のための有力な方法の一つと判断される。ただし、局所的な高温領域や水温急変部では水温情報を平滑化させ過ぎる事例もみられ、注意を要する。

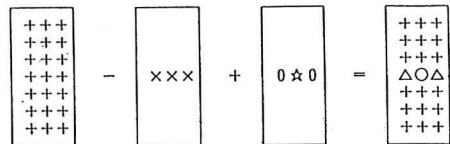
3.3 現地観測結果との比較

現地観測を実施した 8 ケースすべてについて 3.2 に示した画像処理を行った TM 画像上の CCT 値 (以

下、TM データと呼ぶ) を説明変数に、実測水温データを目的変数とした単回帰分析を行った。

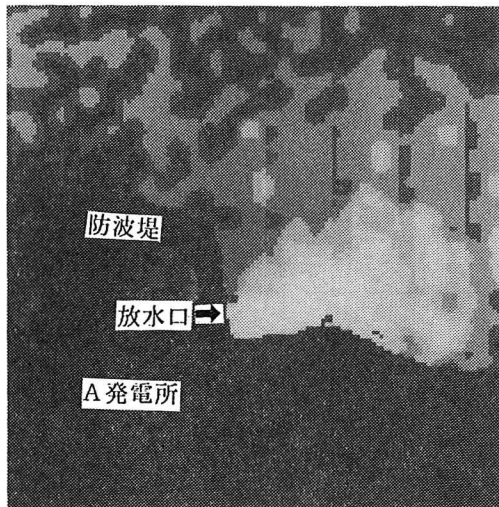
その結果、0.73 から 0.98 の相関係数値が得られ、両者の間にはすべてのケースについて高い相関関係が認められた。また、水温推定精度の目安となる残差平均は、0.25~0.55°C の値を示した。

得られた回帰式の傾きは、TM データによって判断できる海面水温 (海面下 0.3 m 層で代表) の分解能を示すが、その平均は 0.53°C、標準偏差は 0.056°C となっ

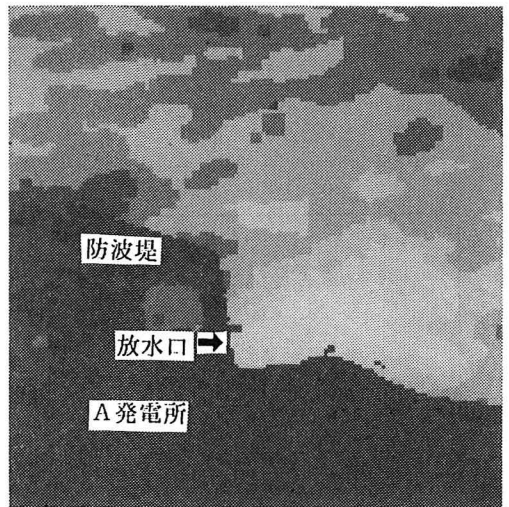


$$+ : 1/21, \times : 1/7, \star : 3/7, \Delta : -2/21, \bigcirc : 1/3$$

図-1 ラインノイズ除去フィルターの重み



(1) 原画像 (陸域をマスキング)



(2) ノイズ除去処理後

図-2 ノイズ除去のための画像解析の一例 (A 発電所)

た。標準偏差が比較的小さいことから、地点や季節等による水温分解能の変化は少ないものと判断される。

一方、切片をみると、その平均は -45.8°C 、標準偏差は 5.9°C となり、傾きの場合とは逆に比較的大きい変動を示した。以下に、こうした切片の変動要因について考察する。

図-3 は、いずれも11月に観測され、気象・海象状況も比較的似かよった3地点のケースについて、TM データと実測データとの相関関係の比較を示す。3地点のデータはほぼ同一直線上に分布しており、本結果から地理的条件の影響は認められない。

図-4 は、C発電所前面海域で実施した5ケースの相関関係の比較を示す。11月14日、11月30日および1月17日の3ケースについてはほぼ重なり合っているのに対し、7月25日および12月16日の2ケースは他の3ケースとは離れて分布している。

これらの2ケースと他のケースとの気象・海象条件の相違点としては、湿度が比較的高いことが挙げられる。これは、大気効果の影響と関連して考えることもできるが、こうした地上近くの気象条件のみから判断することはむずかしい。また、7月25日のケースのみに限定すれば、日射量の多さや気温が水温よりも高いなどの特徴も認められるが、今回の検討では夏季のケースがこの日だ

けであるため、明確には判断しにくい。

一方、海上風およびそれに起因する風波の影響について検討するため、前図中において、11月14日と11月30日を比較する。この両日は、風速および風波の状況が異なり、他の水温・気象条件は似通ったケースである。しかし、本結果からは両者の間に顕著な相違はみられず、風や風波の影響は認められなかった。

こうした切片の変動要因としては、一般的に2章で述べた(1)~(3)等の影響が考えられるものの、今回の検討では明確な結論を得ることはできなかった。またこうした点から、現時点で TM データを海面水温へ変換するためには、何らかのシートルスデータを必要とするものと考えられるが、相対的な水温差の情報を必要とする温排水モニタリングにおいては、前述のほぼ一定した海面水温分解能が得られることの方が重要であろう。

次に、前述の回帰分析結果をもとに求めた水温分布画像と実測された海面水温分布との比較を示す。図-5 は B 発電所、図-6 は C 発電所の例である。B 発電所の場合には、高温域や水温急変部において画像解析結果は実測結果に比べ平滑化されている傾向はあるものの、低温域を中心に温排水の拡散パターンは良く一致している。C 発電所の場合についても、両者は非常に良好な一致を示している。

こうした傾向は、今回検討したすべてのケースについて認められた。

4. TM 画像の測得率

4.1 対象画像

1987年4月~1989年3月までの2年間に測得された TM 画像の内、表-3 中に示す 57 臨海発電所を含む

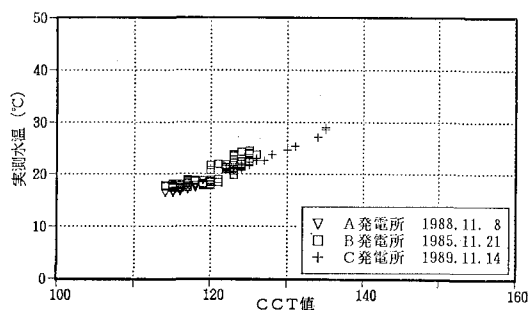


図-3 TM データと実測水温との相関の比較
(地点による相違)

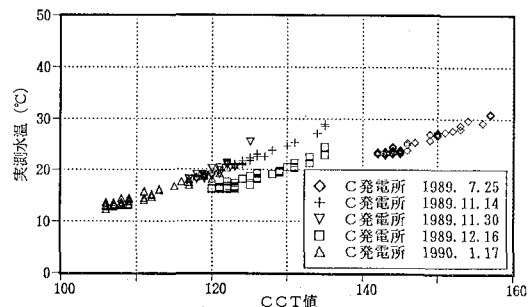


図-4 TM データと実測水温との相関の比較
(季節および波浪状況による相違)

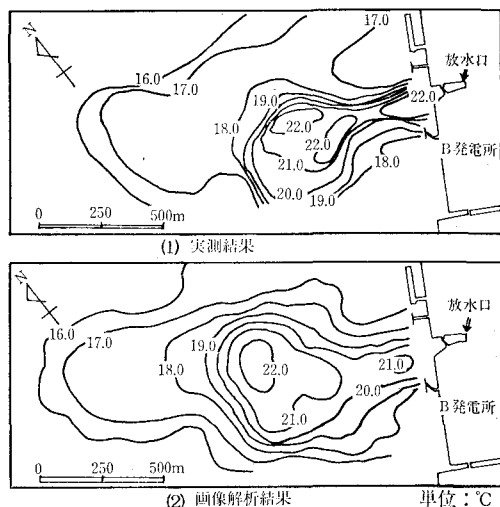
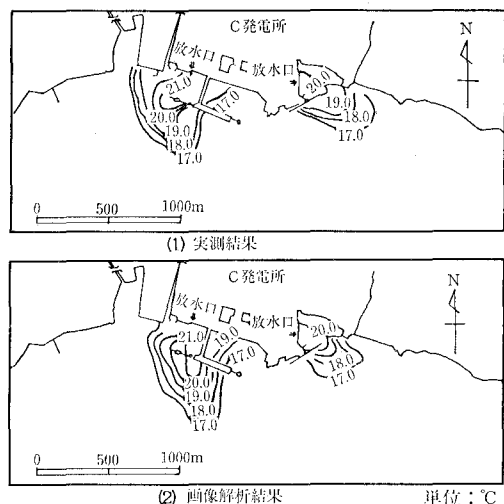


図-5 海面水温分布の比較 (B 発電所, 1989. 12. 2)



図—6 海面水温分布の比較(C 発電所, 1989, 12. 16)

のを対象に、収集・解析した。表—3 中には各発電所を含む対象画像のパスおよびロウを併記している。

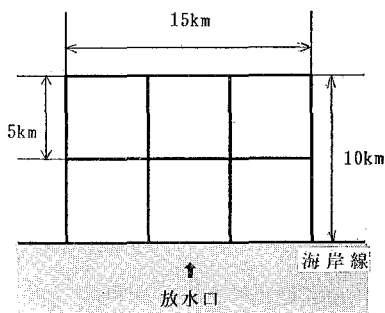
4.2 測得率の評価方法

測得率の評価方法は以下のとおりである。

まず、5×5km の正方形の区画を1単位として、これを各発電所放水口を中心として沿岸方向に3メッシュ、沖合方向に2メッシュ配置した図—7に示すような評価区域を設定する。

そして、雲の有無を1メッシュ毎に判断し、雲量0の場合2点、雲量20%以下の場合1点、それ以外を0点と与え、6メッシュの合計点を全画像数×6(メッシュ数)×2(点数)で除して各発電所の測得率を求める。

なお、互いに隣接する発電所の内、評価区域が大きく重なるものは1つの区域で代表させた。また、富津、横須賀、御坊の各発電所では、画像中のその位置の関係から評価メッシュ数が6に満たなかった。各発電所の平均評価メッシュ数は、各々5.1、2.0、2.75であった。



図—7 測得率の評価区域

4.3 調査結果

表—3 に、算出された各発電所の測得率を、季節別、年度別および両年度通算についてそれぞれ示す。これらの結果より次のような特徴が認められた。

(1) 季節的特徴

全体的には春期が最も高く、夏期が低い傾向を示した。夏期が低いのは、晴れた場合でも積雲が発生しやすく快晴率が低いためと考えられる。秋期がそれほど高くないのは、今回の評価で秋期に良く見られる絹雲などを熱赤外線を吸収し利用の妨げになると判断した影響があることも考えられる。また、冬期は関東地方で高く、日本海側で低い傾向がみられた。

(2) 年度別特徴

87年度と88年度の測得率は、どちらも27.0%で変わらないが、地域別にみると両年度でかなりの差が認められた。

(3) 地域的特徴

九州地区、特に西部の発電所の測得率が最も高く、続いて東京湾沿岸を中心とする関東地区が高い値を示した。逆に低い地域は、日本海側に面した発電所であった。このした傾向は、日本の気候特性と良く一致している。

(4) 全体的特徴

両年度通算の測得率は、最高が38.0%、最低10.8%、全体平均が27.0%となった。LANDSAT 衛星の観測周期は16日であるから、概ね2～3か月に1回の割合で雲の影響の少ない TM 画像が得られることが明らかとなった。

ただし、前述のように今回算出された測得率は、季節的、年度的、ならびに地域的にかなりのバラツキを持っており、定期的あるいは計画的に実施されるような温排水モニタリングに活用する上では十分留意しておく必要がある。

5. おわりに

以上の結果より、LANDSAT 衛星によるリモートセンシング技術は、海表面における温排水拡散域を広域的に同時性を持って把握するという点で有効であり、現行の船舶による調査とともに温排水モニタリングを実施する上での一つの手段として活用することができるものと判断される。

なお、本研究は、通商産業省資源エネルギー庁の委託((財)海洋生物環境研究所からの再委託)により実施したものである。また、現地観測の実施に当たっては、関係電力会社をはじめ、三洋水路測量隊および関東東京久栄の方々に、解析作業に当たっては中日本航空隊および(株)電力計算センターの方々に多くの御協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

表-3 主要臨海発電所前面海域での TM 画像測得率

No.	発 電 所 名	対象シーン (パス-ロウ)	季 節 別 (両年度通算)				年 度 別 (年度)		両年度全平均
			春 期	夏 期	秋 期	冬 期	1987	1988	
1	泊原子力発電所	108-030	28.3	0.0	15.8	28.3	9.2	31.9	19.6
2	苫東厚真火力発電所	107-030	28.0	19.2	4.6	31.3	27.8	12.3	20.8
3	八戸火力発電所	107-032	36.4	12.5	4.6	41.7	29.0	17.2	23.7
4	女川原子力発電所	106-033	32.2	23.3	18.0	35.2	28.0	25.7	27.0
		107-033							
5	新仙台火力発電所	107-033	34.8	34.2	0.0	54.2	39.3	19.6	30.5
6	福島第一原子力発電所	107-034	26.9	25.0	21.1	26.9	32.7	15.4	24.9
		106-034							
7	福島第二原子力発電所※	107-034	30.1	28.3	21.1	28.7	36.8	15.2	27.0
8	広野火力発電所	106-034							
9	東新潟火力発電所	108-034	30.0	0.0	10.0	15.0	5.0	26.5	14.9
10	柏崎・刈羽原子力発電所	108-034	20.0	0.0	21.7	20.8	5.8	29.9	16.9
11	東海原子力発電所※	107-035	38.6	35.0	22.2	38.5	36.5	30.4	33.8
12	東海第二原子力発電所								
13	鹿島火力発電所	107-035	13.9	25.4	7.5	35.2	19.3	21.8	20.4
		106-035							
14	姉崎火力発電所※	107-035	36.4	31.7	25.0	49.0	31.7	39.2	35.1
15	袖ヶ浦火力発電所								
16	富津火力発電所◎	107-035	35.4	30.3	28.6	43.8	32.3	37.2	33.9
17	大井火力発電所	107-035	36.4	35.8	27.8	45.8	38.9	32.8	36.2
18	扇島火力発電所※	107-035	37.1	30.0	21.3	47.9	32.5	35.3	33.8
19	横浜火力発電所								
20	磯子火力発電所	107-035	34.0	29.5	19.6	46.9	31.0	34.1	32.2
21	横須賀火力発電所◎	107-035	15.2	10.0	3.7	15.6	28.6	39.7	33.6
22	浜岡原子力発電所	108-036	44.2	35.7	20.8	37.5	28.3	41.7	34.5
23	富山新港火力発電所	109-034	60.0	36.5	18.2	2.8	31.8	21.4	26.9
		109-035							
24	新名古屋火力発電所※	109-036	40.0	8.6	30.3	8.3	21.9	21.9	21.9
25	知多火力発電所								
26	知多第二火力発電所								
27	武豊火力発電所	109-036	33.3	7.7	31.1	18.1	25.0	20.5	23.0
28	渥美火力発電所	109-036	30.0	6.3	35.6	30.6	30.7	20.2	25.8
29	四日市火力発電所	109-036	40.0	5.5	33.3	5.6	23.4	19.9	21.8
30	尾鷲・三田火力発電所	109-036	18.3	20.8	31.8	16.7	25.0	22.0	23.6
31	敦賀原子力発電所	110-035	41.0	31.0	26.2	6.3	26.9	24.1	25.6
		109-035							
32	美浜原子力発電所	110-035	51.9	28.4	18.3	6.3	26.8	22.5	24.8
		109-035							
33	大飯原子力発電所	110-035	37.5	25.0	17.6	15.8	23.3	23.5	23.4
34	高浜原子力発電所	110-035	34.4	25.0	13.0	10.0	20.0	20.1	20.0
35	宮津エネルギー研究所	110-035	34.4	11.7	19.4	11.7	12.5	25.5	18.5
36	多奈川火力発電所	110-036	35.4	29.2	26.9	11.7	23.8	27.0	25.2
37	海南火力発電所	110-036	39.6	29.2	25.0	0.0	28.3	15.7	22.5
38	御坊火力発電所◎	110-036	13.4	12.0	14.1	3.8	6.5	16.2	10.8
39	堺港火力発電所	110-036	38.5	29.2	26.9	20.0	30.0	26.0	28.2
40	姫路第二火力発電所	110-036	33.3	30.0	25.0	10.0	23.3	25.0	24.1
41	相生火力発電所※	110-036	22.2	20.6	35.4	28.6	21.8	32.2	26.7
42	赤穂火力発電所	111-036							
43	竹原火力発電所	111-036	0.0	11.1	41.7	42.9	20.8	30.8	25.6
44	坂出火力発電所	111-036	0.0	11.1	47.6	33.3	19.0	30.8	24.7
45	玉島火力発電所	111-036	0.0	8.3	52.4	38.1	19.6	33.3	26.2
46	島根原子力発電所	111-035	11.5	20.7	35.3	10.0	25.0	12.9	19.2
		112-035							
47	下松火力発電所	112-037	32.6	27.1	41.7	60.3	28.7	49.7	38.0
48	新小野田火力発電所	112-037	24.1	13.6	40.3	45.2	19.0	38.9	28.0
49	下関火力発電所	112-037	23.1	13.6	27.8	35.7	14.8	33.9	23.5
50	伊方原子力発電所	112-037	17.9	27.5	37.2	38.1	24.8	36.3	30.0
		111-037							
51	新大分火力発電所	112-037	18.5	24.2	23.6	57.1	26.9	32.8	29.5
52	新小倉火力発電所	112-037	22.2	12.1	29.2	27.4	14.4	29.4	21.2
53	玄海原子力発電所	113-037	50.0	1.0	63.9	30.6	50.0	26.0	37.6
54	松浦火力発電所	113-037	50.0	0.0	55.6	25.0	43.3	25.0	33.9
55	大村火力発電所	113-037	70.8	5.2	47.2	16.7	47.8	26.0	36.6
56	松島火力発電所	113-037	67.7	2.1	55.6	12.5	46.7	27.1	36.6
57	川内火力発電所	113-038	56.3	33.3	28.7	16.7	44.4	25.5	34.7
平 均 値			31.9	19.9	26.5	27.3	27.1	27.1	27.0

単位: % ◎: 評価メッシュ数が6に満たなかった発電所 ※: 同一区画で評価した発電所

参 考 文 献

宇宙開発事業団地球観測センター編 (1986): 地球観測データ
利用ハンドブック—ランドサット編—改訂版一, 財団法人
リモートセンシング技術センター, pp. 1-1-6-81.
杉森康広 (1983): 海洋のリモートセンシング, 共立出版, 275

p.
辻内順平 (1981): 応用画像解析, 共立出版, 434 p.
藤村貞夫・花泉 弘 (1982): 熱赤外リモートセンシングによ
る温度推定, 計測と制御, Vol. 21, No. 11, pp. 14-19.
藤村貞夫 (1983): 熱赤外面像からの温度推定における問題,
第9回リモートセンシングシンポジウム資料, pp. 153-156.