石炭資源探査技術の動向—新しい石炭地質学—

村 岡 次 郎*

Introduction to Modern Coal Exploration Technology — Modern coal geology —

Jiro MURAOKA*

Abstract

Coal geology is induced from the general geologic phenomena investigated in coal exploration and researches relevant to coal. Therefore coal geology has been progressing in accordance with coal mining and utilization. Progress of coal geology in Japan was impeded its progress in 1960s due to declining domestic coal mining and influence of misunderstood cyclothemic concept in most of researches. However, a few geologists tried to investigate the deeper areas, far beyond economical exploration, by means of depositional modeling of the already developed areas.

Recent progress in coal geology in the world established basin analysis with depositional modeling and verified the origin of coal-bearing formations to deltaic environments, not to cyclothemic, except some of the intermontane lacustrine coal basins. Research of Recent peat swamps and interpretation of geophysical exploration have significantly contributed to the progress.

For coal exploration, especially the Tertiary coal-bearing formations, basin analysis by means of measuring the directions of paleocurrents is impossible due to scarcity of sandstone outcrop where the direction of paleocurrent can be measured. Instead of such a method, the lithofacies coding method is more practical both in logging with a specially designed work sheets and in analysis of the basin with depositional modeling.

Key words: coal exploration, basin analysis, depositional modeling, lithofacies coding method

キーワード: 新しい石炭資源探査技術, デルタ堆積物, 泥炭地, 堆積盆解析, 炭相コード法, 堆積モデル

I. はじめに

日本の石炭資源探査技術は、1960年代から国内石炭産業が斜陽化してきたにもかかわらず、次の条件の下に涵養されてきた。

- ・探査対象炭田: 国内炭田の狭隘な自社鉱区から、海外の大型の石炭堆積盆に変わった。
- ・探査発注者: 自社から他社のコンサルタント、あるいは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) や国際協力事業団 (JICA) 等の国策

* コスモ資源コンサルタント株式会社

* COSMO Resources Consultant Co., Ltd.

に基づく技術協力ベースのコンサルタントに変わった。

・教育・研究機関：石炭地質学講座は北海道大学・九州大学ともになくなり、地質調査所などの研究機関においても専門研究者が極端に減少した。

とりわけコンサルタントベースの探査には守秘義務が課せられ、成果を学術的な面でまとめて、石炭地質学へ昇華するのが困難になった。その結果学術誌に掲載される論文は1970年代以降は激減し、日本の石炭地質学は研究機関で実施される分野、および技術協力ベースのプロジェクトを除いて表舞台から退いている。一方海外においては1970年代のエネルギー危機を契機に、石油企業が多数石炭資源の開発に参入してきた。彼等は石油開発で蓄積した技術をもって短期間に広大な鉱区を探査し、成果を公表して石炭地質学の著しい発展をもたらしている。特筆される技術は堆積盆解析と物理探査成果の解釈と利用である。また同時に多数の研究機関も現世堆積物の研究、ならびに夾炭層を堆積学的に研究して成果を発表している。

現在日本は石炭を約1.2億t/年輸入している。将来この量は増加しても減少はあり得ないであろう。そのためには進んだ技術を有する探査・開発技術者が不可欠であり、特に次世代の技術者の養成が必要である。また国際技術協力に当たっても進んだ技術が要求される。この目的で現在の世界の動向を考慮した新しい石炭地質学について述べ、次世代が石炭地質学へ関心を深め、石炭開発を指向するのを期待したい。

II. 新しい石炭地質学

1) 石炭資源探査技術と石炭地質学の関係

石炭資源は普通次の作業フローで探査される(表1)。この際に普遍的な地質現象が理解できれば、それを考慮して次の段階の探査をより有効に展開できる。したがって普遍的な地質現象、すなわち石炭地質学の理解が必要となる。

通常予察では主要ルートのマッピングとロギングを行なう。その結果を解析して堆積盆の特性を認識し、開発の可能性があると判断されれば、

次の段階の探査を計画する。例えば非常に厚い炭層露頭が発見されても、予察段階で炭層堆積盆が狹隘、もしくは地質構造が複雑と結論されれば開発は困難と判断される。そして以降の多額の資金を要する準精査、精査段階の探査作業を無駄に実施する危険を防げる。むしろ石炭地質学には上述の探査以外の石炭組織学等の広い分野を含んでいることは論を待たない。

2) 日本の石炭地質学の歴史

学術誌に掲載された石炭地質関係の論文を基に、石炭地質学の歴史を簡単に顧みる。1920年代には産業の勃興に相応して国内炭田の開発が進み、層序記載論文が数次にわたって発表された(今井, 1924, 1925; 長尾, 1925, 1926, 1927)。当時の採掘は人力依存の柱房採掘方式が主であった。以降各地の炭田の地質図が発行された。

第2次大戦後の石炭増産期には機械化長壁採炭方式が普及した。この開発には炭層状況と地質構造について高い精度の探査が必要となり、組織的な剥土法による地表調査とともに試錐が多く用いられるようになった。この成果が詳細な層序や地質構造、さらには成因にも論及した論文として発表された(田代, 1951; 高尾, 1952; 坂倉, 1954)。また総括的な石炭地質学の教科書(坂倉, 1964)が出版された。

1932年に米国のWellerとWanlessがプラットフォーム炭層堆積盆では、夾炭層が下から海成層、汽水層、陸成層、炭層と規則的に堆積している現象を堆積輪廻(cyclothem)として発表した(Wanless and Weller, 1932)。この仮説はDuff et al. (1967)のCyclic Sedimentationの中に詳しく説明してある。これを田代(1952)が日本に紹介し著しい影響を与え、以降夾炭層の堆積現象を堆積輪廻を導入して記述した論文が多数発表された。これらの論文の堆積輪廻の扱いは以下のように分けられる。

- ・夾炭層の堆積現象をすべて堆積輪廻として解釈した(佐々, 1952; 庄司, 1960; 馬淵, 1962; 下河原, 1963; 柴岡, 1964; 手島, 1971; 高橋, 1979ほか多数)。
- ・海成層の夾在に限定して使用した(菊地, 1963;

表 1 石炭資源探査技術と石炭地質学の関係。

Shimoyama, 1984)。

- ・適用に疑問を呈した（江口ほか，1953；坂倉，1954）。
- ・あえて無視した（松下，1952，1971；松下ほか，1966）。

1960年代に石炭産業の斜陽化が始まり，この対策として石炭産業合理化のもとに機械化による高能率採炭方式が導入され，炭量の残存する深部開発の時代になった。深部探査のためには大深度試錐が必要であるが，経済的に制限される。それを補うために，既開発区域の地質現象から敷衍して深部の炭層状況を予測する技術が必要になった。おりしも堆積学が体系化し，Potter and Pettijohn (1963) を参考にして探査技術者も堆積学の応用が可能になった。1966年に最後の石炭地質学会が「石炭の堆積環境」の題目で開催された。探査実務者は堆積モデルからデルタ堆積環境を示唆する発表を行ない，堆積輪廻の適用を否定した（村岡，1966；相原，1966など）。だがほとんどの参加者は堆積輪廻説を礼賛した。故坂倉勝彦博士のみがその適用に疑問を呈して探査実務者の見解を支持した。

1970年代になって，米国では多数の研究者が夾炭層がデルタ環境で堆積したことを堆積モデルを描いて立証した。特に Horne *et al.* (1978) がアパラシア堆積盆を対象にした研究で積極的に堆積輪廻を否定し，夾炭層がデルタ堆積物であることを示した。この経緯は Rahmani and Flores (1984) に詳しい。日本では藤井 (1988)，村岡・藤井 (1988) がこれらの新しい文献を紹介した。

堆積輪廻説は当時世界を風靡したが，米国等では探査技術者に先がけて多数の研究者がこれを否

定・止揚して石炭地質学を大きく前進させた。しかしながら日本では，この説の矛盾を理解し，新しい炭地質学の実践に参加したのは少数に限られ，石炭地質学の進展が停滞したといえよう。

3) 新しい石炭地質学の基礎

石炭資源探査は，調査密度を大にすれば，ほぼ正確に資源の質と量について三次元の解明ができる。しかしここに石炭地質学を導入し，既知の普遍的地質現象を参考にすれば，質と量の微細な変化の原因を理解して，それ以降の探査に最適な方法を立案できる。特に予察段階で堆積盆の性格を理解して，以降の探査方針を決定することが最も重要である。この見方から新しい石炭地質学は次に述べる研究と技術の上に成り立つと考える。

1. 現世の泥炭地とデルタの研究

〈熱帯の泥炭地〉

現世の泥炭地の研究者は主に寒冷地の泥炭を対象にし，熱帯では分解が激しいために泥炭は形成されないと思われていた。事実1960年代の泥炭資源量の統計（坂口，1974）では高緯度帯が圧倒的に多く，熱帯では僅かな資源量しか予想されていなかった。ところが地磁気の遷移からアパラシア堆積盆は形成当時には熱帯に位置した事実が判明した（Seyfert and Sirkin, 1979）。また多数の研究者（Cameron *et al.*, 1985；Esterle and Ferm, 1985；Donaldson *et al.*, 1985；Cohen *et al.*, 1989ほか）が熱帯や温帯の泥炭地を調査して，そこに厚い，しかも低灰分の泥炭層が分布していることを証明した。これらの研究は従来潜在的に考えられていた「泥炭は高灰分であるから，低灰分が主な石炭の先駆体ではあり得ない」という常識をも覆した（McCabe, 1984）。

表 2 営力の異なるデルタの例。

Delta	波浪	海流	堆 積 物	デルタの発達方向
Mississippi Senegal	弱 強大	弱 強大	河川～分流間内湾の砂と泥 砂堆～砂丘の砂主、一部泥	沿岸に直角、鳥趾状デルタ 沿岸に並行

〈泥炭地の形態と地化学的性質〉

Cecil *et al.* (1985) が、現世の泥炭地とアパラシア堆積盆を関連させた研究から、古気候と立地がもたらす地化学的条件により泥炭地がドーム型とプラナー型に区別され、堆積作用に差が生じる現象を明らかにしている。この説明は探査技術者が有する炭層の形態と質の知見に合致する。例えば低灰分の炭層中に凝灰岩層が挟まれる例が多いのは、炭層がドーム型泥炭地に由来したために泥炭地の表面が水位上にあり、水で懸濁・運搬される粘土の混入が防がれ、大気から供給される火山灰のみが堆積した結果と解釈される。また高灰分炭層はプラナー型泥炭地に由来し、泥炭の分解が進んで灰分と硫黄分が蓄積され、同時に表面が水位近くにあったために粘土分が増水期に搬入されたためと解釈される。

〈泥炭の組成〉

上述の現世の泥炭地の研究は、泥炭地は植物体が絡み合ってマット状に発達したものが主で、流木が主ではないことを明らかにしている。このことは炭層の削剥 (washout) 現象の観察から同意できる (Muraoka and Yamamoto, 1992)。すなわち粗粒砂岩が下位の炭層を挟む地層を削剥 (washout) して堆積している所では、炭層の上位の地層は無論、下位の地層までが激しく削剥されている。しかし炭層は屈曲あるいは折り畳まれながら、数mも削剥してきた粗粒砂岩の中に延びているものがある。また炭層を覆っている地層が広範に削剥されていても炭層はほとんど削剥を受けていない所が多い。

これは炭層が泥炭層であった際に柔軟ながら削剥に抵抗できるマット状の組織を有し、単体の流木の集合ではないことを示している。従来石炭は植物が現地堆積したものか、あるいは移動堆積したものかが石炭地質学者の重要な論争の議題であった。しかし石炭組織学や植物化石等の研究

(Teichmuller, 1989) などを除けば、炭層の実態の観察を無視した実証に乏しい議論であったといえよう。

〈泥炭地を形成するデルタとテクトニクス〉

探査対象の炭層は、山間堆積盆の湖成層に堆積したものの一部を除いて、ほとんどがデルタに堆積したものと帰結されるようになった。米国ユタ州の炭層堆積盆のように (Lawrence, 1982), 造山帯-夾炭層-バリアー砂体 (barrier sand body) -海成層と配列している場合には、典型的な内湾の沿海デルタとしてモデル化し易い。しかしデルタの研究は緒についたばかりの状況であり、しかもデルタは多様な立地条件を反映して、著しく多様な形態をなすのがわかってきた。例えば海岸の波浪と沿岸海流の強度が異なると、表2のように堆積物や形態に著しい差が生じる。

さらに立地場所のテクトニクスは、デルタの成長に対して沈降の速度と量、碎屑物の供給、分布形態等最も重要な影響を与えるものと考えられる。特に東南アジアの沿岸部に多い、沿岸に平行する隆起帯によって外洋から遮断された湖沼に形成されるデルタは、常時潮の干満の影響を受け、またテクトニクスによって隆起帯の上下動が変化すれば容易に海侵を受ける環境下にある。夾炭層の間に挟まれる海成層や汽水層はユースタティックな海水面の上下動のみではなく、このような局地的テクトニクスを考慮する必要がある。

2. 物理探査の応用

石油資源探査用に開発された物理探査機器が小型化されて、石炭資源探査に広く用いられるようになった。石炭資源探査は、小規模・山地が多い・1,000 m 以浅を対象とするなどの理由で、容易に運搬して実施できる小型機が必要である。現在実用化されている物理探査法は試錐孔の物理検層と反射法地震探査である。他の探査法は未だ試験段階であろう。

〈物理検層〉

小口径試錐であるために、石油探査の大口径で実施される多様な測定は不可能である。しかし小口径で可能な比抵抗、電気抵抗、密度、自然 γ 、孔径測定は汎用機器があつて普及している。さらにニュートロン、音波伝播速度の測定も行なわれる。これらの検層記録の解析は、試錐の補正やノンコア試錐の採用による探査費の通減等の他に、堆積物の物理的反応を認識して行なう堆積作用の解析に用いられる。将来小口径の傾斜検層が実用化すればさらに高度な解析が可能になるう。

〈反射法地震探査〉

戦後海底炭田の探査に反射法地震探査が実施されていたが、本格的には NEDO が 1980 年代から開始した国内炭基礎調査と海外地質構造等基礎調査の海上と陸上の探査に導入され実用化が進んだ。元来大深度の石油探査に用いられるシステムを、比較的浅部の探査に改良し、地質構造ならびに岩相についての情報が三次元で得られるようになった。この情報は地震反射波という物理情報であることを理解し、探査技術者が正しい解釈を行なう必要がある。

3. 堆積作用の解析

探査技術者は、現世の泥炭地やデルタの研究は専門研究者に依存し、物理探査は解析と解釈に限って相当する。しかし堆積作用の解析は直接遂行する必要がある。堆積物は、例えばフリシュ、モラッセ、深海、湖、河川などその堆積の場や環境が、現世の堆積物では実証が難しくても幾多の研究から帰納されている。さらに第 2 次大戦後堆積学が体系化され、現世の堆積物ではデルタ (Coleman and Prior, 1980) と河川 (Miall, 1981) の研究、古期の堆積物ではアパラシア堆積盆をはじめとする世界各地の炭層堆積盆の研究 (Horne *et al.*, 1978; Donaldson *et al.*, 1985 など) が公表された。この結果、一部の湖成山間堆積盆を除くほとんどの炭層堆積盆はデルタ環境下に堆積したものと結論されるようになった (Rahmani and Flores, 1984)。

III. 堆積盆解析

1) 堆積盆解析 (basin analysis) について

Potter and Pettijhon (1963) の堆積盆解析は、堆積構造、例えば斜交葉理等から古流系の方向を測定して、堆積物の供給ならびに堆積方向を解析し、堆積盆の発達を堆積モデルを描いて表現する。この方法を夾炭層に応用するには次のような問題がある。

- ・古流系が測定できる砂岩層は、ほとんどが河川堆積物であり、河川の蛇行、または河川の中の位置によって流れの方向が著しく変化する。そのために同一砂岩層について多数の露頭の測定値が必要になる。さらに露頭は三次元に観察できなければならない。
- ・新生代の夾炭層は普通露頭が乏しく、特に砂岩層の露頭は少ない。また砂岩層は多数夾在され、それぞれの古流系に差があるのが普通である。
- ・試錐探査が主となるが、小口径であるために傾斜検層が不可能である。
- ・反射法地震探査ではデルタ堆積物の複雑な堆積構造の検出は困難である。

したがって、古流系測定を主とする堆積盆解析の方法を夾炭層の解析に導入するのは困難である。

2) 堆積物の岩相コード法とコードの組み合わせが示す堆積相

上記の問題を解決して堆積モデルを作成するために、Miall (1981) の岩相コード法 (lithofacies code) の採用が最も現実的であり、さらに記載の個人差をなくして、データベース化が可能となる。Miall は河川堆積物の堆積相 (facies) を主要な岩相 (lithofacies : 堆積物の構成と成層形態) と堆積構造をもって区分し記号化している。

記号は主堆積物の粒度を G (礫), S (砂), F (シルト, 泥) の大区分として表わし、堆積物の主成分と副成分の関係、成層形態、堆積構造および化石等を加味した補助記号をもって成り立っている。そしてこれらの記号の組み合わせが示す堆積物の供給営力と堆積環境を解釈している。例えば SI は低角斜交葉理の発達する砂岩層で、スコアファイル、クレヴァススプレイ、アンチデュー

表 3 層序記録ワークシート.

Coal basin:		Borehole/outcrop No.:		Geologist:		Date:		No:			
Thick- ness (m)	Depth -to (m)	Grain size		Colour	Grain		Sedimentary structure			Dip °	Remarks
		Major	Detailed		Sphericity	Sorting	Bedding	Lamination	Base of unit		

Code

Grain size					
Major				Detailed	
Uncon- solidated	G: gravel	Con- solidated	Cg: conglomerate	b: boulder, c :cobble, p: pebble, g: granule	
	S: sand		St: sandstone	c: coarse, m: medium, f: fine, vf: very fine	
	F: silt, mud, clay		Ft: siltstone, mudstone, claystone	s: silt, m: mud, c: clay, g: gritty mud	
	E: soil		C: coal, Cb: carbonaceous mudstone	h: high quality, l: low quality	
Sphericity	r: rounded, st: subrounded, sa: subangular, a: angular, p: platy			Lamination	t: trough, p: planar (steep), l: planar (low angle), h: horizontal, r: ripple
Sorting	w: well sorted, p: poorly sorted			Base of unit	g: gradual, s: scouring, e: erosion
Bedding	b: alternations by banding, l: alternations by lamination, m: massive				
Remarks	m: molluscan fossil, b: bioturbation, p: plant leaf, tt: tree trunk, cm: coaly matter, cf: coal fragment, q: quartzose, v: tuffaceous, fe: ferruginous concretion, ca: calcareous concretion, si: siderite, py:pyrite, ↑: fining upward, ↓: coarsening upward, cl: mud clast, sl: slumping, dis: distortion, sh: shearing, dc: desiccation crack etc.				

表 4 岩相コードと対応する堆積環境.

Grain size				Grain	Sedimentary			Remarks	Facies and interpretation of sedimentary environment	
Cg	St	Ft	C/Cb		Bed.	Lami.	Base			
c-g c-f c-f f-vf m-f m-f c-vf	c-m s-m			sa, p sa-r, p sr-r r, w r, w r, w sr-r, p	b b b b-l t-l, r m t-l, r m	t-p t-p, r t-p-l l-h, r t-l, r t-l, r t-l	e, s e, s s g s s s	tt, cm, cf, fe, cl, sl tt, cm, cf, q, fe, ↑, cl, sl b, tt, cm, cf, q, ↑, fe, cl b, cm, p, ↑, dis b, p, cm, q, ↓, sl, dis m, b, cm, q, fe, ↓, dis b, cm, q, fe, ↑, sl	Fluvial, flood plain, molasse Fluvial channel Fluvial channel-lower unit Fluvial channel-upper unit Delta front Barrier bar Natural levee	Fan-UD UD LD LD LD LD UD-LD
	m-vf s-m	s-m	C/Cb	sr-r, w w l	b-l l l	l-h h h	g g g	b, cm, fe, ca, ↑, dis b, cm, p, fe, ca, ↑ p, tt, cm, v, ca, p, dis	Crevascing Interdistributary, mud flat Marsh, peat swamp	LD-UD LD (UD) LD-UD
	f-vf f-vf	s-m s-m s-m	Cb	, w , w , p	b-l b-l l	t-h l-h l-h	s g g	m, b, cm, p, ca, py, ↑, dis m, b, cm, fe, ca, si, dis cm, ca, sl, dc	Abandoned channel Tidal flat Mud drape (incumbent on the floor)	LD LD LD-UD
b-p c-g	c-vf m-f vf	s-m s-c m-c	C/Cb C/Cb	a-sa, p sr, w sr, w r, w	m b m b-l l	t t-p l-h l-h h	e s g g g	tt, cm, cl, sl b, cm, cf, tt, fe, ↑, cl b, cm m, b, p, cm, fe, ca, dis m, b, p, cm, fe, ca, dis clay coagulation	Detritus Fluvial channel River mouth, delta front Interdistributary bay (moderate clastics) Interdistributary bay (clastics starved)	Fan Lacustrine Lacustrine Lacustrine Lacustrine

UD: upper delta LD: lower delta

ンとして堆積したものと解釈している。彼は約 20 の記号群によって河川堆積物が網羅できると述べている。

この方法を夾炭層に適用し、観察と記載に個人差がなく、かつ記載漏れを少なくできるように考案したのが表 3 である。それらの記号の組み合わせ

せが示す堆積相を表4に示す。夾炭層が多様であるのは、それが堆積したデルタが多様であるから当然であろう。また筆者が経験した炭層堆積盆はごく一部のものに過ぎないであろう。したがって探査対象の夾炭層に最も適合するよう逐次変更を加える必要がある。

3) 堆積物のコード法の留意事項

堆積物が厚く、変化なく連続していれば問題はないが、例えば夾炭層に多く発達している砂岩と泥岩が竊伏層理や葉理で互層している場合には、それらの個々を記録しても労力に比して効果は乏しい。これらは分流間低地 (interdistributary bay) に堆積した自然堤防溢流堆積物 (crevasse splay) ～分流間低地堆積物と考えられている。そのためにコード法で表現する単位はむしろ単一の地層ではなく、同じ堆積環境の堆積物と考え、互層区間は互層として量比の変化を記録すべきであろう。そのためには地層の境界について、削剥面あるいは浸食面を介するか、または時間的間隔があったか、連続的であるかを観察して、同一堆積相が連続している区間を決定しなければならない。

4) コード法を利用した堆積物の解析

〈対比〉

対比は地質学的に積極的に連続性を論証できる地層の対比を基にしなければ、以降の地質構造解析や炭層の対比ができないのは明らかである。従来は厚い炭層を基準として、炭層のみを対比する例が多かったが、炭層自体が著しく変化する例が多い事実を知れば、広域の対比を炭層のみで行なうのは問題である。コード法を使って地層の岩相と堆積相を明らかにすれば、最も広域に分布する堆積相から局地的な堆積相までの序列が明確になり、また互いの堆積相の分布関係が判明する。その結果単一地層よりも格段に規模の大きい堆積相としての対比が可能になる。

〈堆積モデルの作成〉

対比が堆積相によって実施されると、特定の層準、例えば主要炭層を基準にして上下や周囲の堆積相の分布が断面図および平面図に堆積モデルとして描ける。断面図上では、デルタフロント砂体

→河川堆積相→自然堤防溢流相→分流間低地堆積相→泥炭地相と連続的に変化する状況が明らかになろう (デルタのプログラデーション)。平面図上では、炭層堆積の場に変化していく自然堤防溢流堆積相～分流間低地堆積相と、それらの境界を画すバリアー砂体または分流堆積相～自然堤防堆積相の分布が描ければ、対象炭層の分布範囲が確定できる。さらにその分布範囲内の区域で、炭層のはさみ (parting: 夾在される碎屑物層) の厚さや枚数などの変化を追跡すれば、同一炭層の堆積の場の上下動 (これは下位の堆積相の圧密沈下の差およびテクトニクスがもたらす堆積の場の傾動)、あるいははさみを供給した旧河川の流路が判明し、古地理図を復元して検証できる。

〈堆積モデル作成の時期〉

精査終了段階では、所定のグリッド試錐が終了してデータが最大に利用できるのも当然作成できるであろう。しかし普通は初期調査の段階で地表踏査を行ない露頭を観察する。その時点で堆積相を判定して作業仮説としての堆積モデルを作成すれば、次期調査の計画にあたって探査の必要箇所、方法ならびに密度を論理的に検討でき、探査を効率的に成功に導き得よう。したがって、経験に富む技術者は予察段階でプロジェクトに参加して堆積モデルについての正しい判断へと導くべきであろう。

謝 辞

新しい石炭地質学を導入した石炭資源探査は、現在 NEDO の実施する海外地質構造等調査 (日本マレーシア石炭共同探査・中部サラワクプロジェクト)、および JICA の実施するタイ王国での石炭探査・評価調査で、検討を加えながら実行に移している。この実行に共同している住友石炭鉱業 (株) の伊藤公彦氏、三井鉱山エンジニアリング (株) の島 健彦、木下和郎、河口雄三の各氏および多数の若手石炭資源探査技術者に感謝する。中添 亮博士には常に討議して頂いた。

故坂倉勝彦博士には夾炭層の堆積作用に注目して探査に活用することをご指導いただいた。この研究がそれに応えられれば幸いである。

文 献

- 相原安津夫 (1966): 石狩炭田砂川地区の炭層の消長と堆積環境. 釧山地質学会研究討論会資料, 7-15.
- Cameron, C.C., Esterle, J.S. and Palmer, C.S. (1985): The geology, botany and chemistry of selected peat-forming environments from temperate and tropical latitudes. *Int. J. Coal Geol.*, **12**, 105-156.
- Cecil, C.B., Stanton, R.W., Neuzil, S.G., Dulong, F.T., Ruppert, L.F. and Pierce, B.S. (1985): Paleo-climate controls on Late Paleozoic sedimentation and peat formation in the central Appalachian Basin. *Int. J. Coal Geol.*, **5**, 195-230.
- Cohen, A.D., Raymond, R.Jr., Ramirez, A., Morales, Z. and Ponce, F. (1989): The Changuinola peat deposit of northwestern Panama; A tropical, domed, back-barrier coal forming environment. *Int. J. Coal Geol.*, **12**, 157-192.
- Coleman, J.M. and Prior, D.B. (1980): *Deltaic sand bodies*. AAPG, Education Course Note Series #15, 171p.
- Donaldson, A.C., Renton, J.J. and Presley, M.W. (1985): Pennsylvanian deposystems and paleoclimates of the Appalachians. *Int. J. Coal Geol.*, **5**, 167-193.
- Duff, P.McL.D., Hallam, A. and Walton, E.K. (1967): *Cyclic sedimentation. Development in sedimentology*. Elsevier Pub.Co., 280p.
- 江口元起・庄司力偉・鈴木舜一 (1953): 常磐炭田における炭層堆積状態の研究 その1 茨城県磯原町付近一. 地質学雑誌, **59**, 99-109.
- Esterle, J.S. and Ferm, J.S. (1985): On the use of modern tropical domed peats as analogues for petrographic variation in Carboniferous coal bed. *Int. J. Coal Geol.*, **16**, 131-135.
- 藤井敬三 (1988): 石炭の成因. 燃料協会誌, **67**, 293-305.
- Horne, J.C., Ferm, J.C., Crucchio, F.T. and Baganz, B.P. (1978): Depositional models in coal exploration and mine planning in Appalachian Basin. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, **62**, 2379-2411.
- 今井半次郎 (1924): 石狩炭田に於ける夾炭第三紀層 (石狩統) の層位地質学的研究 (其の一〜九). 地学雑誌, **36**, 133-157; 195-217; 253-275; 328-348; 419-427; 519-527; 571-584; 637-657; 702-724.
- 今井半次郎 (1925): 石狩炭田における夾炭第三期層 (石狩統) の層位地質学的研究 (其の十). 地学雑誌, **37**, 31-44.
- 菊地秀夫 (1963): 三池炭田の層序と堆積環境に関する研究. 釧山地質, **13**, 8-19.
- Lawrence, D.T. (1982): Influence of transgressive-regressive pulses on coal-bearing strata of the Upper Cretaceous Adaville Formation. *Utah Geol. and Mineral Survey, Bull.*, **118**, 32-49.
- 馬淵精一 (1962): 釧路炭田古第三系に関する堆積並びに造構造史的考察. 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, **56**, 1-42.
- 松下久道 (1952): 堆積上からみた九州炭田の炭層. 地質学雑誌, **58**, 324-325.
- 松下久道 (1971): 九州炭田堆積盆地生成の1考察. 松下久道教授記念論文集第1集, 1-16.
- 松下久道・高橋良平・浦田英夫・小原浄之介・北条凱生 (1966): 石炭の堆積環境の再検討. 釧山地質学会研究討論会資料, 77-85.
- McCabe, P.J. (1984): Depositional environments of coal and coal-bearing strata. *Spec. Pub. int. Ass. Sediment.*, **7**, 13-42.
- Miall, A.D. (1981): *Analysis of fluvial depositional systems*. AAPG, Education Course Note Series #20. 75p.
- 村岡次郎 (1966): 美唄炭田付近の美唄層の炭層堆積について. 釧山地質学会研究討論会資料, 1-6.
- 村岡次郎・藤井敬三 (1988): たい積盆解析. 石炭技術研究所編: 石炭探査技術の動向と展望調査報告書. 石炭技術研究所, 48-67.
- Muraoka, J. and Yamamoto, F. (1992): Splitting of the coal seam. *Abst. 29th Int. Geol. Cong.*, **3**, 826.
- 長尾 巧 (1925): 九州古第三紀層の層序 (其一〜八). 地学雑誌, **38**, 115-130; 263-269; 317-323; 369-373; 457-461; 596-603; 663-671; 706-712.
- 長尾 巧 (1926): 九州古第三紀層の層序 (其九〜十七). 地学雑誌, **39**, 86-91; 139-154; 191-198; 356-360; 416-425; 456-467; 501-512; 592-604; 655-674.
- 長尾 巧 (1927): 九州古第三紀層の層序 (其十八〜二十三). 地学雑誌, **40**, 7-23; 83-89; 143-155; 193-215; 278-288; 344-353.
- Potter, P.E. and Pettijohn, F.J. (1963): *Paleocurrents and basin analysis*. Springer-Verlag, 296p.
- Rahmani, R.A. and Flores, R.M. (1984): Sedimentology of coal and coal-bearing sequence of North America: A historical review. *Spec. Pub. int. Ass. Sediment.*, **7**, 3-10.
- 坂口 豊 (1974): 泥炭地の地学. 東京大学出版協会, 329p.
- 坂倉勝彦 (1954): 石狩炭田の造構造史について (1, 2). 釧山地質, **4**, 170-177; 229-240.
- 板倉勝彦 (1964): 石炭地質学. 技術書院, 218p.
- 佐々保雄 (1952): 北海道における炭層の堆積状態の2・3について. 地質学雑誌, **58**, 326-327.
- Seyfert, C.K. and Sirkin, L.A. (1979): *Earth history and plate tectonics*. Harpers Row Publishers, 600p.
- 柴岡道夫 (1964): 石狩炭田における堆積小輪廻と炭層の発達. 燃料協会誌, **43**, 798-509.
- 下河原寿男 (1963): 夕張炭田の形成とその地質構造の発展. 北海道炭田技術会地質部会, 石炭地質研究, 第5集, 243.
- Shimoyama, T. (1984): Sulphur concentration in

- the Japanese Palaeogene coal. *Spec. Pub. int. Ass. Sediment.*, **7**, 361-372.
- 庄司力偉 (1960): 日本の夾炭層に発達する堆積輪廻の成因について (1, 2). *地質学雑誌*, **66**, 660-674; 733-741.
- 高橋良平 (1979): 石炭層の生成と変遷. *燃料協会誌*, **58**, 102-110.
- 高尾彰平 (1952): 石狩炭田 (特に夕張炭田) に於ける幌内層の層序と地質構造に関する研究. 北海道炭鉱技術会地質部会, 石炭地質研究, 第2集, 214.
- 田代修一 (1951): 石狩炭田の地質構造に関する一考察. 北海道炭鉱技術会地質部会, 石炭地質研究, 第1集, 64.
- 田代修一 (1952): 炭層の堆積と沈積輪廻. *地質学雑誌*, **58**, 529-536.
- Teichmuller, M. (1989): The genesis of coal from the viewpoint of coal petrology. *Int. J. Coal Geol.*, **12**, 1-87.
- 手島 淳 (1971): 炭層の生成機構. 松下久道教授記念論文集, 187-200.
- Wanless, H.R. and Weller, J.M. (1932): Correlation and extent of cyclothems. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **43**, 1003-1016.
- (1996年10月22日受付, 1996年12月16日受理)