リニアメントの断裂系としての特性とその評価

井上大榮^{*1}, 水落幸広^{*2}, 桜田裕之^{*3}

Geological Characteristics of "Lineament" and its Evaluation on Fractured System

Daiei INOUE^{*1}, Yukihiro MIZUOCHI^{*2} and Hiroyuki SAKURADA^{*3}

Key words : リニアメント lineament, 評価 evaluation, 断層 fault, 破碎幅 fractured width

Abstract

Recently, the relationship between lineaments and fracture systems has been discussed by some statistic approach. In this study, the criterias for the interpretation of lineaments using Landsat TM, Spot and aerial photograph imagery are proposed for the detection of fractured zones through lineaments. In order to clarify this criteria which are divided into 6 ranks, ranging from A to F, the six sites including USA are studied.

Field evidence shows that many lineaments coincide with faults or joints and it's probability of the coincidence between lineaments and faults or joints is restricted by the length of lineaments. The lineaments length of the 100 percent probability to coincide lineaments with faults or joints agree with the linear part which is called fractal distribution in the relationship between lineaments length and frequency.

In addition, the relationship between lineaments criteria and the width of the fractured zones have a good harmony. High ranking lineaments are very useful in the interpretation of geological structures.

1. はじめに

地質に関するリモートセンシングには、スペクトル解析による岩相判別とリニアメント解析による地質構造解析の2つの流れがあり、後者は判読で得られたリニアメントからその地域の断裂系を把握するのに用いられている。特に石油・非鉄金属や地熱などの資源探査においては、広域地質構造を把握するために衛星画像や空中写

真を利用したリニアメントによる地質解析が行われている¹⁾。また、土木地質分野においてもリニアメント判読が活断層^{2),3)}や断裂系調査⁴⁾に用いられている。

しかしながら、具体的な構造物の設計などに対して、活断層を対象とするもの^{2),3)}を除いては、リニアメントそのものの成因を個々に議論した例は少なく、統計的相似性から断裂系との関係を論じているのが現状である⁵⁾。従来、リニアメントは地質構造解釈の手段として用いられているが、それが現地においては、どのような地質現象と対応するかについての研究例は極めて少ない。このため、リニアメントと地質的特徴との関係を明らかにし、リニアメントの評価方法を確立することを目的として、リニアメントの判読方法について評価基準を作成し、多くの地点に適用し、その結果を現地調査で検証した。調査は以下の項目にまとめられる。

^{*1} ㈲電力中央研究所 我孫子研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko Research Laboratory

^{*2} 住友金属鉱山(株)資源事業部 Sumitomo Metal Mining Co., Ltd., Mineral Resources Division

^{*3} 住鉱コンサルタント(株)札幌支店 Sumiko Consultants Co., Ltd., Sapporo Branch

- ①リニアメント判読の基準作成 (ランク区分)
- ②6地域におけるリニアメントと地質構造の対応関係の調査
- ③リニアメントのランクと断層破碎幅の関係

リニアメント判読にはランドサット TM 画像を用い、さらに、ランドサット TM 画像では検出限界に近い長さ 5~10 km より短いリニアメントについては、スポット画像や空中写真を用いた。

2. リニアメントの定義とその特性

2.1 リニアメントの断裂系としての性質

リニアメントは、地形の“不連続”点が直線上に配列する場合に認識される。この用語は HOBBS⁶⁾によって主に地形用語として提唱されたが、A. G. I.⁷⁾によれば、線状に配列する地形形状が地質構造に支配されたとする考え方が強くなり、ほぼ定着するようになった。しかしながら、我々が認識できる不連続地形の直線的な配列は浸食作用や構造運動等によって形成された形態であって、断裂系にコントロールされた地形のみを判読しているわけではない。断裂系のほかに層理面や片理面などの不連続面によって地形がコントロールされている場合もあり、その区別の指標を得る必要がある。

山口・長谷⁵⁾は、リニアメントと断裂系の関係をリニアメントの長さ (L) と頻度 (N) が両対数で直線関係になる区間が断裂系の規模別頻度分布の特性と類似していることから、リニアメントから対象地域の断裂系の長さ別頻度分布が推定できるとした。また小島・大野・亀谷⁸⁾や佐藤・市川⁹⁾は、岩盤中の割れ目に関して、割れ目の幾何学的な分布や性状についてフラクタルの性質が成り立つことを示している。大野・小島¹⁰⁾はランドサット画像や空中写真でのリニアメントの長さ L と頻度 N が岩盤中の割れ目と同様のフラクタル次元の直線になることを示している。このように、リニアメントと断裂はその統計的相似性においては類似した性質を有することが報告されている。

2.2 リニアメントの断裂としての検証例

判読されたリニアメントと地質的特徴との関連性について確認された例をいくつか紹介する。

①星野・松野¹¹⁾、星野・長谷¹²⁾は、従来、東西性の1本の断層と考えられていた神縄断層が南北性のリニアメントに分断されているとし、現地調査でリニアメントに対応する断層の存在と切断関係を確認した。②村岡・長谷¹³⁾は、定向性のあるリニアメントと現地での小断層との対応を調査した。その結果、九州北部更新世玖珠層 (湖成) ではランドサット画像、レーダ画像、空中

写真でのリニアメントの方向と地表での小断層とが極めて良い対応が見られたのに対して、八幡平鮮新世~更新世玉川溶結凝灰岩では良い対応関係が見られなかったとしている。さらに、③山口ほか¹⁴⁾は秋田県小安温泉付近での断層密度の計測でリニアメントが断層密度の極大値を示す部分に通過することを示したが、この付近では破碎帯を伴うような断層は認められなかったとして、リニアメントは節理の密集帯を反映したものと結論づけた。

3. 断裂系評価のためのリニアメントの判読基準

3.1 リニアメント判読の要素

一般に、リニアメントとして判読される地形形状の不連続点の地形要素としては、直線谷・屈曲谷・屈曲尾根・鞍部・孤立丘・段差地形・直線崖などが挙げられる。

リニアメントの判読過程には、①使用する画像の種類、②縮尺および分解能、③個人差などに影響を受けることがあり、客観的なデータとしての取扱いが困難である。山口・長谷⁵⁾はランドサット画像、空中写真、レーダ画像によるリニアメント抽出結果の比較検討から、画像の種類 (①) が解析結果にどのように反映されるかを検討し、最適な画像縮尺 (R) と分解能 (S) の関係 (②) を示した。本研究の判読基準作成に際して、 R と S の関係を目的に応じて選定するようにし、また、上記の③の問題点については抽出環境を一定にし、複数の人間による判読によって個人差を減じた。

ランドサット画像の判読は、分解能の問題から上記の地形要素のすべてを識別できるわけではない。また、太陽光による陰影によって立体感が得られているが、あくまでも2次元平面の情報であり、季節によって太陽高度が異なるために山岳地域などの急峻な地形ではレーダ画像と同様な疑似的なリニアメント^{15),16)}も観察されることがある。そこで、直線谷とそれ以外の“不連続”地形を判読上の地形要素とした。判読に当っては、直線谷や不連続地形を境にしての肌理や高度差の有無、ならびにリニアメントの系統性 (リニアメントの方向性や形態の類似性) を重視した。

これに対して、スポット画像および空中写真の判読では高度が誇張されることによる効果があるものの、3次元情報であることから、上記の地形要素は判読可能であり、直線谷や不連続地形および系統性を要素としてリニアメント判読基準を作成した。

3.2 リニアメントの評価方法

リニアメントの評価は、従来、判読者の主観によって明瞭、不明瞭といった区分がなされている場合が多い。

表-1 リニアメントの評価(ランク区分)基準表

ランク	地質現象	リニアメントの明瞭度	リニアメントの連続性	利用方法
A	地質構造線など	明瞭な直線的な長い谷が連続的に配列し、谷を境にして地形要素による肌理が明瞭に異なったり、地形の高度差などの変化が明瞭に認められる。さらに明瞭な直線的な谷とともに地形的な不連続が明瞭に判読される。	配列の規則性が明瞭に確認されるもの。同一系統と考えられるリニアメントが単独で30km以上、断続しながら総延長100km以上に及ぶもの。	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; text-orientation: upright;"> ランドサットTM画像 スポット画像 空中写真 </div> </div>
B	大規模断層	明瞭な直線的な比較的長い谷が連続的に配列し、谷を境にして地形要素による肌理が異なったり、地形の高度差などの変化が認められる。さらに明瞭な直線的な谷とともに地形的な不連続が判読される。	配列の規則性が明瞭に確認されるもの。同一系統と考えられるリニアメントが単独で30km未満5km以上、断続しながら総延長100km未満50km以上に及ぶもの。	
C	中規模断層	直線的な谷が連続的に配列し、谷を境にして地形要素による肌理が異なったり、地形の高度差などの変化が不明瞭ではあるが認められる。さらに直線的な谷とともに地形的な不連続が不明瞭ではあるが判読される。	配列の規則性が、不明瞭ではあるが確認されるもの。同一系統と考えられるリニアメントが単独で5km未満3km以上断続しながら総延長50km未満10km以上に及ぶもの。	
D	小規模断層卓越節理の集合体	直線的な谷が判読されるが、谷を境にして地形要素による肌理が異なったり、地形の高度差などの変化が認められない。また、地形的な不連続が局所的に判読される。*空中写真では、直線的な谷が比較的連続的に判読され、また、尾根鞍部が複数、連続的に配列する。	配列の規則性が、不明瞭ではあるが確認されるもの。同一系統と考えられるリニアメントが単独で3km未満で、断続しながら総延長10km未満のもの。	
E	小規模断層卓越節理	直線的な谷と尾根鞍部が複数、連続的に配列する。リニアメントを境にして、地形の高度や肌理に明瞭な差が認められない。認められる場合はDランクに位置づける。	リニアメントが単独で2km程度。また断続しながら総延長5km未満のもの。	
F	卓越節理地層境界	直線的な谷または尾根鞍部が連続的に配列する。リニアメントを境にして、地形の高度や肌理に明瞭な差が認められない。	リニアメントが単独で1km程度。同一系統と考えられるリニアメントが、近傍に判読されない。	

しかしながら、リニアメントと断裂系の関係を明らかにするには、リニアメントの標準化が必要である。そこで、リニアメントの有する「明瞭度」と「連続性」からランクづけを行った。明瞭度は地形的な不連続性に重点を置き、リニアメントを境にしての肌理や高度の差の有無から判断した。また、連続性はリニアメントの単独での長さや構造地質学的な側面からその系統性を考慮した長さから判断した。以下の議論ではリニアメントの長さ(もしくはリニアメント長)は単独での長さを示し、ランク区分においては単独もしくは複数のリニアメントの長さの総和を用いている。明瞭度と連続性を主な要素としたリニアメントのランクづけの基準を表-1に示す。この評価基準は主としてランドサットTM画像ではAランクからCランクを、スポット画像ならびに空中写真ではBランクからFランクを判読できるようになっている。

4. リニアメントとその地質的特徴との関係

リニアメントの成因は、これまでは経験から断裂系に求めている。しかしながら、どのようなリニアメントが断裂系に一致するかについての具体的な検討例は少ない。このため本研究では、前述したリニアメント判読基準から得られたランクを基に、リニアメントの成因について現地検証を行った。

図-1 調査地域位置図

- 1: アリゾナ州モレンシー地域 2: ユタ州ビーバー地域
 3: 北海道中南部地域 4: 青森県北西部地域
 5: 新潟県東南部地域 6: 岐阜県東南部地域

4.1 検証方法

現地検証は、まずはじめに露頭条件の比較的良好な海外の半乾燥地域2地域で実施し、次に、わが国の4地域でその適用性を検討した(図-1)。日本列島は植生が多く、浸食作用が卓越し、地質学的に変動帯であるとい

う「場」を考慮する必要があり、わが国で適用が可能かどうかの現地検証調査が不可欠である。検証に当っては、次のような基準を設けた。

①リニアメントが断層と対応する場合： リニアメント沿いに断層の露頭を1カ所以上確認することを条件とする。リニアメント沿いとはその両側約50 m以内とし、また、断層の走向はリニアメントの走向と15°以内で一致するものとした。また、現地調査以外に既存の地質図で現地を確認していると記載されている断層に一致する場合も断層とした。

②リニアメントが節理と対応する場合： リニアメント沿いに節理の集合帯の露頭を1箇所以上確認することを条件とする。本論では節理は単独のものを示すのではなく、節理の集合体（節理群）として扱う。①と同様に、リニアメント沿いとはその両側約50 m以内とし、また、主要な節理の走向はリニアメントの走向と15°以内で一致するものとした。

③リニアメントが岩相境界と対応する場合： リニアメントを境にして両側の岩相が異なり、地質構造に差が認められず、岩相境界がリニアメントと同方向を示し、なおかつ①の断層や②の節理が認められないことを条件とする。

④リニアメントと地質との関係が不明とする場合： 露頭がない場合や露頭があっても上述の①から③に示すリニアメントと対応する地質現象が認められない状態をいう。

4.2 リニアメント判読結果と分布の特徴

検証地域としての海外の2地域のうち、モレンシー地域ではランドサットTM画像（分解能30 m、縮尺約10万分の1）、ビーバー地域では空中写真（縮尺約2万分の1）を用いてそれぞれ目視で判読を行い、各リニアメントについて前述した評価方法で評価を行った。

さらに、日本国内の以下の4地域を対象に同様の評価基準を用いて判読し、現地検証を行った。判読はスポット画像（パングロモード、分解能10 m）のオリジナルフィルム（縮尺40万分の1）を拡大し、5万分の1の縮尺の画像を用いて目視判読で行った。

なお、わが国で対象とする地域については、導水路トンネルもしくは道路・鉄道トンネルの精密な地質データを有する地域を選定したため、地下の断裂データを主体に、地表踏査により地表の断裂データを追加してリニアメントと地質構造との関係を検討した。

①米国アリゾナ州モレンシー地域

②米国ユタ州ビーバー地域

③北海道中南部地域

図-2 各地域のリニアメント長別頻度分布

1: アリゾナ州モレンシー地域 2: ユタ州ビーバー地域

3: 北海道中南部地域 4: 青森県北西部地域

5: 新潟県東南部地域 6: 岐阜県東南部地域

B~F: 評価基準での各ランクの対応範囲

④青森県北西部地域

⑤群馬県北西部地域

⑥岐阜県東南部地域

それぞれの地域のリニアメント頻度分布を図-2に示し、以下に各地域の地質構成とリニアメント頻度分布の特徴を述べる。図-3に1例として米国ユタ州ビーバー地域のリニアメント判読図（一部）を示す。

①米国アリゾナ州モレンシー地域

調査地域の地質は、中央部に先カンブリア紀の花崗岩および花崗閃緑岩とそれを貫く白亜紀のモンゾナイト斑岩および花崗斑岩が分布し、周辺部に先カンブリア系を不整合に覆ってカンブリア紀から白亜紀の珪質砂岩、石灰岩および頁岩が分布する¹⁷⁾。

ランドサットTM画像（縮尺10万分の1）で判読されたリニアメントは総数38本で、Bランク2本、Cランク13本、Dランク23本である。リニアメント長別頻度では約3~3.5 kmに最頻値がある。

②米国ユタ州ビーバー地域

調査地域は、ベースンアンドレンジとコロラド平原の境界部に位置し、ワサッチ構造線の南方延長部に当る。地質は、主として新第三紀中新世の火山岩類ならびに鮮新世から更新世の扇状地性堆積物からなる。新第三紀火山岩類は火山性陥没構造に関連した流紋岩から石英安山岩質の溶岩類および同火砕岩、凝灰岩類で構成される¹⁸⁾。

空中写真（縮尺約2万分の1）で判読されたリニアメ

図-3 ユタ州ビーバー地域のリニアメント図(北半部)

- 1: 断層に一致するリニアメント
 - 2: 節理および小断層に一致するリニアメント
 - 3: 岩相境界に一致するリニアメント
 - 4: 成因不明のリニアメント
- リニアメント上の数字は整理番号

ントは総数54本で、Cランク8本、Dランク9本、Eランク20本、Fランク17本である。リニアメント長別頻度では約1.7 km に最頻値がある。

③北海道中南部地域

本地域の地質は、先白亜系および白亜系の輝緑岩、輝緑岩質凝灰岩、砂岩、頁岩、チャートを主体としている。地質構造は西フェルゲンツの構造で、全体に北北西—南南東方向の走向を示し、同方向の褶曲構造と断層ならびに胴切りのな東北東—西南西方向の断層が発達する¹⁹⁾。

スポット画像でも、上述の2方向のリニアメントが主に判読され、特に中央部を縦断する北北西—南南東方向の系統的なリニアメントが特徴的で、連続性が良く、Bランクに評価される。しかしながら、長いリニアメン

トは別系統のリニアメントで分断されているために、連続性に欠けることがある。判読されたリニアメントは総数134本で、Bランク2本、Cランク9本、Dランク12本、Eランク21本、Fランク90本である。リニアメント長別頻度では約1 km に最頻値がある。

④青森県西北部地域

本地域は新第三紀グリーンタフ地域に属し、安山岩質および流紋岩質溶岩・同火砕岩類ならびに泥岩・硬質頁岩から構成される。地質構造は南北から北西—南東方向の走向を示し、東に傾斜する単斜構造からなる²⁰⁾。

スポット画像では地域西部で南北方向、地域東部で北東—南西方向のリニアメントが卓越する。比較的連続性の良いリニアメントは、地域中央部の北西方向のリニアメントと地域西部の南北方向のリニアメントであり、Cランクに評価される。判読されたリニアメントは総数74本で、Cランク2本、Dランク2本、Eランク9本、Fランク61本である。リニアメント長別頻度では約1.2 km に最頻値がある。他の地域と比べて連続性のあるリニアメントが少なく、Bランク以上のランクの高いリニアメントもない。

⑤群馬県西北部地域

本地域は、主に新第三紀の安山岩質および流紋岩質火砕岩類ならびにそれらを貫く石英閃緑岩・石英斑岩から構成される²¹⁾。これらは東北東—西南西方向および北西—南東方向の断層で分断され、ブロック化し複雑な地質構造を呈する。

スポット画像では、東北東—西南西方向と東西から西—北西—東南東方向のリニアメントが卓越し、前者の方が比較的連続性も良い。地域中央部に発達する同方向のリニアメントはCランクに評価される。判読されたリニアメントは総数95本で、Cランク8本、Dランク5本、Eランク8本、Fランク74本である。リニアメント長別頻度では約1.4 km に最頻値がある。

⑥岐阜県東南部地域

本地域は中生代の花崗岩類および流紋岩類(溶結凝灰岩類)から構成される²²⁾。本地域では比較的大規模な系統的な断層が発達し、地域東部に南北方向、地域西部に北東—南西方向、地域北西部に北北東—南南西および北西—南東方向の断層群が交差する地域に当る。

スポット画像においても同様な方向のリニアメントが明瞭に判読され、これら主要なリニアメントはA～Bランクに評価される。判読されたリニアメントは総数111本で、Aランク1本、Bランク4本、Cランク6本、Dランク8本、Eランク15本、Fランク77本である。リニアメント長別頻度では約1.8 km に最頻値があるが、

表-2 リニアメント成因調査結果 []: 各地域の各ランクでの%

	総本数	リニアメントランク					
		A ランク	B ランク	C ランク	D ランク	E ランク	F ランク
断層節理に一致するリニアメント							
(1)アリゾナ州モレンシー地域	26[68]	-	2[100]	13[100]	11[48]	-	-
(2)ミシシッピ州ヒューバー地域	36[67]	-	-	8[100]	5[56]	12[60]	11[64]
(3)北海道中南部地域	35[26]	-	2[100]	8[89]	4[33]	10[48]	11[12]
(4)青森県北西部地域	19[26]	-	-	2[100]	2[100]	4[45]	11[18]
(5)新潟県南東部地域	23[24]	-	-	3[38]	3[60]	-	17[23]
(6)岐阜県南東部地域	53[48]	1[100]	4[100]	6[100]	7[88]	9[60]	26[34]
岩相境界に一致するリニアメント							
(1)アリゾナ州モレンシー地域	-	-	-	-	-	-	-
(2)ミシシッピ州ヒューバー地域	10[19]	-	-	-	2[22]	4[20]	4[24]
(3)北海道中南部地域	15[11]	-	-	-	-	1[4]	14[16]
(4)青森県北西部地域	19[26]	-	-	-	-	2[22]	17[28]
(5)新潟県南東部地域	-	-	-	-	-	-	-
(6)岐阜県南東部地域	10[9]	-	-	-	-	1[7]	9[11]
成因不明のリニアメント							
(1)アリゾナ州モレンシー地域	12[32]	-	-	-	12[52]	-	-
(2)ミシシッピ州ヒューバー地域	8[14]	-	-	-	2[22]	4[20]	2[12]
(3)北海道中南部地域	84[63]	-	-	1[11]	8[67]	10[48]	65[72]
(4)青森県北西部地域	36[49]	-	-	-	-	3[33]	33[54]
(5)新潟県南東部地域	72[76]	-	-	5[62]	2[40]	8[100]	57[77]
(6)岐阜県南東部地域	48[43]	-	-	-	1[12]	5[33]	42[55]

他の地域に比べて連続性の良いリニアメントが多い。

図-2に示すように各地域の頻度分布は対数正規分布に近似でき、両対数ではほぼ直線上に並ぶ区間が見られる。この直線から外れるリニアメント長が短い区間は、リニアメントの判読限界を示していると考えられる。判読限界には、画像の持つ分解能と判読に用いた縮尺から決定されるものと、リニアメントが地形上の不連続点の配列であることから1つの地形上の不連続があってもリニアメントとしては認識できない点から決定されるものがある。直線から外れる区間はそれらが複合したものと考えられるが、現段階ではその区別はなされていない。

これに対して、直線になる区間では各直線はランドサット TM 画像で判読したモレンシー地域を除きほぼ一定のばらつき内で一致していると考えられる。モレンシー地域とその他の地域との違いは、他地域では縮尺5万分の1もしくは2万分の1、モレンシー地域では10万分の1の画像を用いたことによる画像の種類の違いを反映したものと考えられる。

4.3 リニアメントの成因に関する現地検証結果

リニアメントの検証結果を表-2に一覧表としてまとめ、図-4に成因別の頻度分布として示した。

①米国アリゾナ州モレンシー地域(図-4(a))

本地域では4 km以上の長さのリニアメントの100%

が断層に一致し、そのすべてがCランク以上に属する。また、Dランクでは約50%が断層に一致した。

②米国ユタ州ビーバー地域(図-4(b))

本地域では2.4 km以上の長さのリニアメントの56%が断層に、38%が節理にそれぞれ一致し、その大半がCランク以上に属する。2.4 km未満では、56%が断層もしくは節理に、25%が岩相境界にそれぞれ一致する。リニアメントの検証結果の一部を図-3に示す。

③北海道中南部地域(図-4(c))

本地域では3.0 km以上の長さのリニアメントの91%が断層に一致し、その大半がCランク以上に属する。また、2.0 km以下では岩相境界に一致する割合が高い。本地域は層理面を持つ急傾斜な層状岩盤、凝灰岩や頁岩などのやや軟質な岩石と輝緑岩などの硬質な岩石が分布することから、比較的短いリニアメントは差別浸食による岩相の違いを反映していると考えられる。

④青森県北西部地域(図-4(d))

本地域では2.4 km以上のリニアメントの86%が断層に一致し、Dランク以上ではすべて断層に一致した。また、2.4 km未満ではその27%が岩相境界に一致し、他地域に比べて高い率である。本地域は他の地域に比べて、地層が新第三紀と新しく、火山岩溶岩を主体としていることや地層の傾斜が緩いことから、他の地域に比較して2.4 km以上の長さのリニアメントが極めて乏しく、

図-4 各地域のリニアメント成因別頻度分布

a: アリゾナ州モレンシー地域 b: ユタ州ビーバー地域 c: 北海道中南部地域
d: 青森県北西部地域 e: 新潟県東南部地域 f: 岐阜県東南部地域
1: 断層に一致 2: 節理に一致 3: 岩相境界に一致 4: 不明

直線性に富んだリニアメントが少なく、岩相境界を示すリニアメントが多い特徴を有する。

⑤群馬県北西部地域 (図-4 (e))

本調査ではトンネルデータのみを利用しているため、節理や岩相境界とリニアメントの対応の比較はできなかった。リニアメントデータはトンネル周辺に分布しているものを集計していることで、ランクに対して断層に一致する割合がやや不規則である。トンネルを横断するリニアメントのみに着目すると、20本のうち16本が断層と一致する。

⑥岐阜県東南部地域 (図-4 (f))

本地域では2.6 km 以上の長さのリニアメントの86%が断層に一致し、その大半はDランク以上のランクに

属する。他の地域に比較して頻度分布の形が異なり、さまざまな長さのリニアメントが分布している特徴がある。また、Fランクのリニアメントにおいても約30%が断層に一致しており、他の地域のFランクよりも割合が高い傾向がある。

4.4 リニアメントの成因

現地調査の結果から、リニアメントはその多くが断層もしくは節理に一致していると言える。この確率はリニアメントの連続性(長さ)に規制されており、図-5に示すような曲線が描ける。曲線からリニアメントが断層もしくは節理に一致する確率が50%を越えるリニアメント長は空中写真で1.7 km, スポット画像で2.3 km, ランドサットTM画像で3.0 km程度である。また、確

図-5 断層および節理に一致するリニアメントのリニアメント長と断層および節理に一致する確率

- 1: アリゾナ州モレンシー地域 (ランドサット TM 画像)
 2: ユタ州ビーバー地域 (空中写真)
 3: 北海道中南部地域 (スポット画像)
 4: 青森県北西部地域 (スポット画像)
 5: 新潟県東南部地域 (スポット画像)
 6: 岐阜県東南部地域 (スポット画像)
 C~F: 評価基準での各ランクの対応範囲

率が100%になるリニアメント長は空中写真で2.5 km, スポット画像で3.0 km, ランドサット TM 画像で4.0 km 程度である。大野・小島¹⁰⁾は割れ目の長さ分布でフラクタル分布に当るのが超過確率で50%より小さい部分(平均値よりも大きい割れ目)であることを示したが, 本研究の地域ではこの値は空中写真およびスポット画像では2.2~3 km, ランドサット TM 画像で4 km であり, 断層もしくは節理に一致する確率が100%を越える値とほぼ整合的である。このことは, 図-2の頻度分布において直線区間の規模のリニアメントは断層もしくは

節理にはほぼ一致すると推定できる。しかしながら, 直線区間でのばらつきの評価が必要であり, 今後の問題としてばらつきの評価が残されている。

また, 調査結果を地層別に区分してまとめると表-3 ようになる。結晶質岩地域(先カンブリア紀~第三紀)は火山岩地域(新第三紀)に比べて, 長いリニアメントから短いリニアメントまで広く分布し, 長いリニアメントほど断層に一致する確率が高い。また, 火山岩地域は結晶岩地域に比べて, 岩相境界に一致するリニアメントが多い。このことは, 古い時代の地層(特に結晶質岩)が分布する地域は, 断層の活動が繰り返して生じているために破碎規模が大きく, 断層が地形的に反映されやすいと考えられる。また, 火山岩地域では溶岩の流理面, 堆積岩地域(白亜紀)では地層の層理面に影響をうけ差別浸食が進み, 岩相境界に一致するリニアメントが比較的多いと考えられる。

5. リニアメントの長さ断層破碎幅の関係

断層と一致したリニアメントについて, 現地調査やトンネルデータで得られた断層破碎幅とリニアメント長との関係を図-6に示す。リニアメントランク区分と断層破碎幅は, 破碎幅とランク区分が両対数上で直線の良い相関を示している。おおむね, Bランクでは破碎幅20~60 m: 平均36 m, Cランクでは破碎幅3~25 m: 平均11 m, Dランクでは破碎幅1~10 m: 平均4 m, EおよびFランクでは破碎幅0.2~2 m: 平均0.7 m という結果になった。このことは, リニアメント評価表に基づくランク区分から断層の破碎幅をある程度推定することができることを示している。また, 地層別では, 先第三系の分布する地域での断層が数10 cm~数10 m のレンジの広い破碎幅を示すのに対して, 第三系の分布する地域

表-3 岩相の違いによるリニアメント成因の傾向 []: 各地域の各ランクでの%

ランク	結晶質岩類			堆積岩類			火山岩類		
	断層・節理	岩相境界	不明	断層・節理	岩相境界	不明	断層・節理	岩相境界	不明
A	1[100]	-	-	-	-	-	-	-	-
B	6[100]	-	-	2[100]	-	-	-	-	-
C	22[81]	-	5[19]	8[89]	-	1[11]	10[100]	-	-
D	21[58]	-	15[42]	4[33]	-	8[67]	7[64]	2[18]	2[18]
E	9[39]	1[4]	13[57]	10[48]	1[4]	10[48]	16[55]	6[21]	7[24]
F	43[28]	9[6]	99[66]	11[12]	14[16]	65[72]	22[28]	21[27]	35[45]
	102[42]	10[4]	132[54]	35[26]	15[11]	84[63]	55[43]	29[23]	44[34]

結晶質岩地域: アリゾナ州モレンシー+群馬県+岐阜県

堆積岩地域: 北海道 火山岩地域: ユタ州ビーバー+青森県

では、数 m 程度の破碎幅を示す断層が多い傾向が見られる。

断層破碎幅と断層長については、緒方ほか²³⁾は花崗岩地域においてトンネル通過地およびダム掘削面などで確認した断層の長さ (L) とその破碎幅 (T) の関係を次式で示した。

$$\log L = 0.68 \pm 0.32 + 0.87 \log T$$

この関係式をリニアメントから得られた破碎幅と比較すると、リニアメント長が 3 km 以上では比較的良好一致しているが、3 km 以下では破碎幅がやや小さくなる傾向がある。この原因としては、緒方ほか²³⁾で用いられたデータが断層長約 4 km 以上、断層破碎幅約 20 m 以上のものと断層長約 0.2 km 以下、断層破碎幅約 1 m 以下のものから相関を議論していること、また、3 km 以下では破碎幅が小さいと考えるよりも、3 km 以下の長さで同じ破碎幅では、リニアメント長が実際の断層長よりも長くなる傾向があることなどが考えられる。事実、判読では、3 km 以下のリニアメントを構成している地形は低次の谷を含んでいる場合が多く、連続して判読する際に浸食作用のみの谷を含む可能性がある。なお、上述の破碎幅は平均的な破碎幅を表していると考えられるが、断層タイプによって破碎様式の違いがあり、詳細な地質構造学的検討が必要である。

検証調査によって、評価基準でランク区分されたリニアメントのうち、E ランク以下のリニアメントについては断層と一致する確率が D ランクよりも格段に低く、断層に一致するものについても破碎幅が最大でも 2 m 以下であった。また、リニアメントのランクと破碎幅との関係についても、ランクが高くなる程破碎幅が大きくなることが明らかにされた。このことから、目的に応じた断層調査によって、各ランクのリニアメントに着目することで、有効な地質構造調査が可能である。C・D ランク以上のリニアメントを対象とした場合には衛星画像（ランドサット TM 画像もしくはスポット画像）を、E・F ランクを対象とした場合には空中写真を適切な縮尺で判読することでその評価が可能である。

6. ま と め

リニアメントの評価基準を作成し、現地調査および既存断層データから検証調査を行うことにより、次の結果を得た。

(1) 現地調査の結果から、リニアメントはその多くが断層もしくは節理に一致しており、その確率はリニアメントの連続性（長さ）に規制されている。リニアメントが断層もしくは節理に一致する確率が 100% になる

図-6 リニアメント長と断層破碎幅の関係

1: B ランク 2: C ランク 3: D ランク

4: E ランク 5: F ランク

図中の直線は、緒方・本荘の関係式²³⁾

リニアメント長は空中写真で 2.5 km、スポット画像で 3.0 km、ランドサット TM 画像で 4.0 km 程度である。

(2) 大野ほか¹⁰⁾が示したフラクタル分布になる超過確率で 50% より小さい部分は、本論の地域での断層もしくは節理に一致する確率が 100% を越える値とほぼ整合的である。頻度分布において直線区間の規模のリニアメントは断層もしくは節理にはほぼ一致すると推定できる。

(3) 結晶質岩地域（先カンブリア紀～第三紀）は火山岩地域（新第三紀）に比べて、長いリニアメントから短いリニアメントまで広く分布し、長いリニアメントほど断層に一致する確率が高い。また、火山岩地域は結晶岩地域に比べて、岩相境界に一致するリニアメントが多い。

(4) リニアメントランク区分と断層破碎幅の関係は、破碎幅とランク区分が両対数上で良い相関を示している。このことは、リニアメント評価表に基づくランク区分から断層の破碎幅をある程度推定することができることを示唆している。

(5) 各断層調査のレベルに応じて、各ランクのリニアメントに着目することによって、有効な地質構造調査が可能である。C・D ランク以上のリニアメントには衛星画像（ランドサット TM 画像もしくはスポット画像）を、E・F ランクでは空中写真を適切な縮尺で判読することでその評価が可能である。

謝辞 本研究に当って、現地調査に同行していただき、
 討論していただいた(株)電力中央研究所 本荘静光主任研
 究員・千木良雅弘博士に感謝します。また、データ収集
 ならびに現地調査に同行していただいた住鉱コンサルタ
 ント(株) 根本 徹・長瀬真央・中島英俊の各氏に感謝し
 ます。

参 考 文 献

- 1) 水落幸広・角南基亮・丸山裕一 (1988) : 資源探査にお
 ける衛星画像判読・解析手法の再検討, 日本測量調査技術協
 会誌 APA, No. 39 - 12, pp. 79 - 83
- 2) 土木学会・原子力土木委員会 (1985) : 原子力発電所地質
 ・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手
 法報告書 第二編 地質調査法, pp. 4 - 17
- 3) 岸 清・桑原 洋・澤田臣啓 (1985) : 福島県浜通り地方
 の地質, 電力土木, No. 194, pp. 24 - 32
- 4) 越谷 信・長江亮二・大上和良・森田安彦 (1991) : 南部
 阿武隈山地花崗岩体中の断裂系と地下水, 応用地質, vol.
 32, No. 4, pp. 23 - 39
- 5) 山口靖・長谷紘和 (1983) : 多様な画像によるリニアメン
 ト頻度の解析——レーダ画像の屋久島地域への適用例につ
 いて——, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 22, pp. 4
 - 13.
- 6) HOBBS, W. H. (1904): Lineaments of Atlantic Border
 Region., Bull. Geol. Soc. Amer., Vol. 15, pp. 483 - 506
- 7) American Geological Institute (1980): Glossary of Geology
 "lineament", p. 380
- 8) 小島圭二・大野博之・亀谷裕志 (1987) : フラクタル的な
 岩盤評価の可能性, 昭和62年度日本応用地質学会研究発
 表会講演論文集, pp. 53 - 56
- 9) 佐藤邦明・市川正憲 (1987) : 岩盤フラクチャーのフラク
 タル次元と水理特性の相関, 土と基礎, Vol. 35, pp. 13 -
 18
- 10) 大野博之・小島圭二 (1988) : 岩盤中の割れ目系にみられ
 るフラクタル, 応用地質, Vol. 29, No. 4, pp. 11 - 18
- 11) 星野一男・松野久也 (1974) : アーツ映像より見た南関東
 の断裂系——とくに南北性断裂について——, 地質ニュース,
 No. 235, pp. 1 - 13
- 12) 星野一男・長谷紘和 (1977) : 神縄断層を切る南北性断層
 について, 地質学雑誌, Vol. 83, pp. 62 - 64
- 13) 村岡洋文・長谷紘和 (1980) : 陥没カルデラに由来する環
 状地形構造の評価, 地質ニュース, No. 311, pp. 7 - 29
- 14) 山口靖・長谷紘和・村岡洋文 (1984) : リモートセンシ
 グからのリニアメント解析の問題点, 日本地質学会 第91
 年学術大会講演要旨, pp. 503
- 15) 山口靖 (1984) : リニアメント解析における低俯角 SAR
 画像の照射方向の効果, 日本リモートセンシング学会誌,
 Vol. 4, pp. 5 - 15
- 16) 吾妻高志 (1986) : SLAR 映像とその地質判読における有
 効性, 石油資源開発(株)研究報告, No. 3, pp. 36 - 82
- 17) LINDGREN, W. and BOUTWELL, J. M. (1905): Descrip-
 tion of The Clifton Quadrangle, Arizona, U. S. Geological
 Survey, scale 1 : 62,500
- 18) MACHETTE, M. N., STEVEN, T. A., CUNNINGHAM,
 C. G. and ANDERSON, J. J. (1984): Geologic Map of The
 Beaver Quadrangle, Beaver and Piute Counties, UTAH,
 U. S. Geological Survey Miscellaneous Investigations
 Series Map I-1520, scale 1 : 50,000
- 19) 井上大榮・田中和広 (1986) : 日高帯中を通過するトン
 ネルの事前地質調査と掘削結果, 北村信教授記念地質論文集,
 pp. 113 - 121
- 20) 日本鉄道建設公団青函建設局 (1989) : 青函トンネル地質
 図, 53p.
- 21) 日本道路公団東京第二建設局 (1986) : 関越トンネル工事
 誌 (資料編), 52p.
- 22) 日本道路公団名古屋建設局 (1978) : 恵那山トンネル工事
 誌 (資料編), 37p.
- 23) 緒方正虎・本荘静光 (1981) : 電力施設の耐震設計にお
 ける断層活動性の評価, 応用地質, Vol. 22, No. 1, pp. 67 -
 86

(1992年2月24日受付, 1992年4月21日受理)