

# 多角形カルデラの再発見と浅熱水性金鉱床

古宇田 亮<sup>1)</sup>・坂上 勝彦<sup>2)</sup>・浦井 稔<sup>3)</sup>・佐藤 功<sup>4)</sup>・宮崎 芳徳<sup>5)</sup>  
 Kouda RYOICHI Katsuhiko SAKAGAMI Minoru URAI Isao SATO Yoshinori MIYAZAKI  
 津 宏治<sup>6)</sup>・田村 秀行<sup>7)</sup>・小野 雅敏<sup>8)</sup>・小出 仁<sup>9)</sup>  
 Koji TSU Hideyuki TAMURA Masatoshi ONO Hitoshi KOIDE

## 1. はじめに

ブームだそうである。たしかに 円高 原油安がこれほどになると 銅・鉛・亜鉛などの基礎金属だけでは鉱業はもうお手上げという他ない。連動して値下がりしたとは言っても 金の価格は まだはるかに高い。で 金掘しが世界的にはやる。大は巨大石油資本から小は隣のおかみさんに至るまで どういうわけか 金が注目されている。近年 世界的に急速に進歩した金鉱床探査の中でも カルデラに伴う浅熱水性金鉱床については 昔から知られているばかりでなく 今も 有望なものの一つである。

ところで カルデラは景観が美しいので 観光地としてのほうが良く知られているだろう。紅葉の美しい十和田湖 霧の幻想につつまれた摩周湖 リゾートホテルが並ぶ洞爺湖畔など。しかし 火山爆発や地震 山崩を生じて危険な所もある。阿蘇カルデラの噴火や 加久藤カルデラのえびの地震のように、一方 カルデラのまわりは温泉の宝庫でもあるので この面でもなじみが深い。カルデラの美しさ 危うさ 経済的価値の高さは 実は一連の地質現象を基にしたものであって そこには 一本に結ばれた「糸」がつづいている。その「糸」を数百 km 上空の宇宙空間を飛ぶ人工衛星から眺めると どのように見えるのだろうか。人工衛星による地球観測が盛んな現在 宇宙から見たカルデラは 特異で見易いターゲット 目印である。宇宙からカルデラの謎に迫るのも面白い。

カルデラができた原因については多くの研究がある(荒牧 1983)。地質現象としてのカルデラの原因を追究すること(成因論という)も大切であるが 基本的な事実の認識として カルデラがどんな形態をもち どこに分布するかを明らかにする作業は 全てに先行する。藤田(1973)は 日本の多くの 陥没が多角形状をしており 火山活動に陥没が先行する場合が多く このような陥没が極めて多数 分布することを明らかにした。カ

ルデラの多くも 広い意味の火山性陥没に属しており 同様の作業が実証的に行われる必要がある。衛星画像は分布を調べるために有効であろう(村岡 他 1980)。

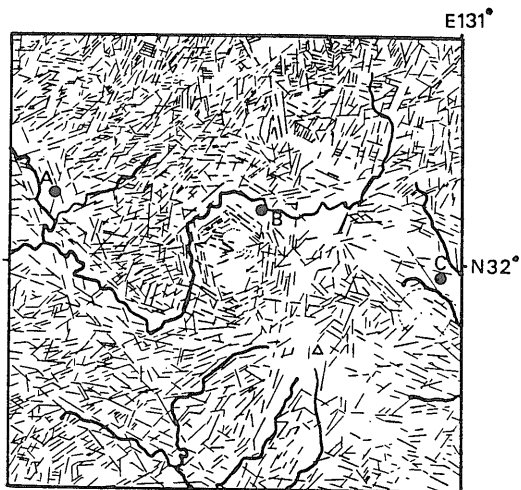
地表踏査や空中写真にくらべて人工衛星の画像は広域を同時に鳥瞰でき 反復して同じ地域を撮影できる利点がある。そのうちでも ランドサット画像は解像度も高く いくつかの異なるスペクトル帯に分けたデジタル・データとして与えられるので 計算機による画像処理がし易く 地質学的にも利用価値が高い。本稿ではランドサット画像によって明らかになったカルデラ形状とその応用について みることにしよう。

## 2. リニアパターンの抽出

従来使われてきたランドサットの MSS 画像からリニアメントを得る場合 一般には画像判読という立場で行われることが多い。これは専門家による主観的差異が顕著になる短所がある。一方 計算機によるリニアメントの自動抽出の試みもいくつかなされてはいる。しかし 計算機による方法は重要な構造が抜けることが多く 十分とはいえない。リニアメントの方向性は出せても 各線分をどのように切断するのか 又はつなげるかという総合的判断を含む知的作業は 画像処理だけでは大変困難である。画像処理の専門家の立場によると「自動抽出」とは 地質学的専門の積み重ねを無視した方法であり 不当であるという(田村)。むしろ 画質改善によって判読法を改良した方が良い。MSS 画像に対しては線検出に良好な Vanderbrug オペレータとラブラン処理を組み合わせた選択的画像鮮鋭化法(SIS法: 田村 他 1984)で 画質をリニアメント抽出向きに改善し 無差別に線の配列のみを全て抽出する手法が効果的であることが明らかにされている(古宇田 他 1984)。

1985年から分解能 スペクトル帯共に MSS より優れたTM画像が入手できるようになった。このTM画像の解析には SIS 法(選択的画像鮮鋭化法)による画質改善

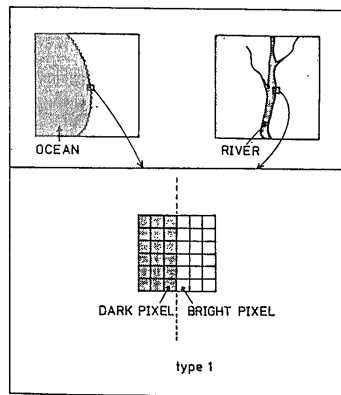
1) 地質調査所鉱床部 2) 7) 8) 電子技術総合研究所 3) 4) 6) 地質調査所物理探査部 5) 地質調査所地殻熱部  
 9) 地質調査所環境地質部



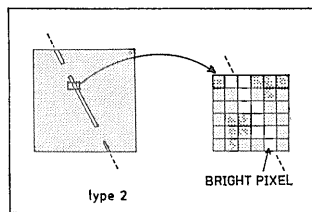
RIVER  
● CITY  
MT. KARAKUNI  
△ KARAKUNI

10 km

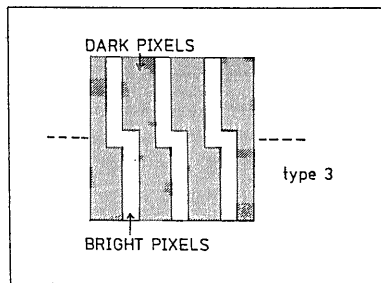
図1 ランドサット5号のTM画像から抽出した加久藤カルデラとその周辺のリニアパターン。  
A:大口市 B:えびの市 C:小林市



Pixels relation type 1.



Pixels relation type 2.



Pixels relation type 3.

図2 画素関連 (PXR) のタイプ1~3

がきわめて有効であることがわかった (Kouda 1986).  
そこで 事例として 南九州の加久藤カルデラのTM画像に SIS 法による画質改善を実行し スペクトル帯に対して HSI 変換を施して 構造を観察した. 50万分の1相当のTM画像から解析した結果の一例を図1に示す. 地質その他の説明は 古宇田 他 (1984) を参照されたい.

ここで用いたリニアメント解析手法を略述すると

(A) 画素と画素の連なり (pixels relation: PXR) が線状になるものすべてを抽出する. 画素数20以上の並びを採用する.

(B) Pixels relation は 色調・輝度差によって区分される画素の (連続的) 集合であり 線状になるものは次の5種類に分類される (図2).

- [1] 色調・陰影境界: 海岸線や山陵・溪谷等
- [2] 明・暗並行線: 線的な稜・溝地形等
- [3] [1] や [2] の屈曲部: ずれ断層に伴う河川の折れ曲がり等
- [4] 孤立点も含む切れ切れの線状模様
- [5] 多数の画素群や画素関連 (pixels relation) をまとめた線状模様.

以上のうち [4] と [5] は いわゆる 画像判読に属するものであって 判読者の主観を反映することが著しい. ただし どんなに主観的要素が強としても 事実と見ざるを得ぬものもある. ここでは まず [1]

~[3] の手法で無作為に線状模様を抽出し 次いで [4]~[5] を加えた総合的判読結果を得ることにした. 図1は [1]~[3] による 判読者によらない 再現性の高い結果であって すべての線状模様を平等化したため同じ線幅で表現している. そのため 重要と思われる線状模様も 重要でないと思われるものもすべて平等に扱われているので 客観性は高くなっているが見にくい. 図3は [4]~[5] の判読を加味し 特に線幅 (画素数) の大きいものや 長い 延長性のあるものに太い線を割り当てている. また多数のタイプ [2] の線が並行に並んだ線状模様を強調して示している.

図1は無差別な線状模様の抽出のため 必ずしも 100% 全ての線が地下構造を反映したりニアメントか否か疑わしい. ただし 経験的に言ってかなり多くが地質構

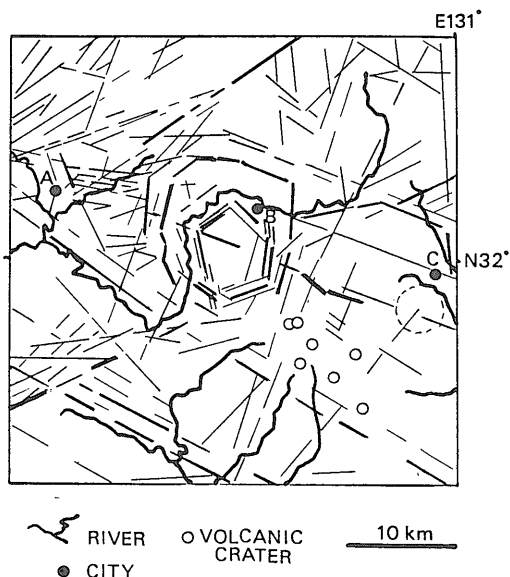


図3 図1及びTM疑似色彩画像から解析したリニアメント。  
A：大口市 B：えびの市 C：小林市  
太い直線は主な構造と解釈している。

N30W～N50Wの方向に入っているためこの方向のリニアメントは判読し難い。また それに直交するN40E～N60Eの方向は 逆に日照で強調されるため 比較的 多くリニアメントが抽出される。図4・aは その事情をみごとに示している。これを除いて 画像データと現場検証で一致しないのは N20E～N40E方向のリニアメントが画像データ中にやや少ない点である(図4を20°づつに区分すれば大体一致する)。あるいは この時の画像の見易さのためかもしれない。N20E～N40Eを除けば だいたい良い一致を示すとよいだろう。

なお 使用したTM画像は1985.10.22撮影「日南」である。

### 3. 多角形カルデラの再発見

荒牧(1968)は加久藤盆地の詳細な地質学的研究と それを含むカルデラの総括的考察(荒牧 1969 1983)で 加久藤カルデラのモデルを概略次のようにたてている。即ち 加久藤カルデラは えびの市を中心とする重力異常帯にはほぼ調和的であり えびの地震の震源分布を含む範囲に分布する。カルデラ外壁は侵食による後退で円形に拡張しており カルデラ生成時の噴出物は Bouguer 異常により Briggs の方法で求めた質量欠損(田島・荒牧 1980:ほぼ十和田カルデラと同じ)からみて横山(1969)の仮説が成立する。つまり カルデラを形成したマグマ溜りは現在の加久藤カルデラの外形と同じ大きさではなく はるかに小さく 現在のカルデラ縁を境界とするピストンシリンダー型の陥没は考えにくい。これは温泉ボーリングによっても確認される。

以上のモデルは これとは別に 加久藤カルデラを更に南東方に拡大して北西―南東に30km以上の長径で伸長した大型の霧島カルデラ(Matsumoto 1963)とする仮説を棄却するに足りる。カルデラの形の量的側面はある程度説明付けられるが 一方 形の質的内容は逆に不明確になる。形態に関して ここで問題とするのは 円形か角形か 地下構造を反映する形か 単なる地表の

造を反映すると思われる。図3は解釈が入るため 現地実証が必要である。少なくとも この地域に関しては 大部分が地質構造線であることがわかってきた。たとえば 加久藤カルデラ外郭の線状模様と 外郭西方の外に広く分布する黒岡山火山岩類中の断裂方向とは良い一致を示し また直線的なタイプ[1]の陰影境界と断層やリニアメントが一致するなどである。現場で確認された断層と衛星で推定したリニアメントが一致する場合も確実に存在する。露頭の制約から100%立証できるはずはないが 多くの露頭で立証できることは母集団においても正しいと判断せざるを得ない。

図4は 加久藤カルデラ西部の画像判読による全てのリニアメントのうち 現場検証区域を抜き出したもののローズダイアグラム(図4のa)と現場検証による割れ目方向(図4のb)を示している。図4は10°づつ区切っている。ランドサット画像の場合 日照方向がおよそ

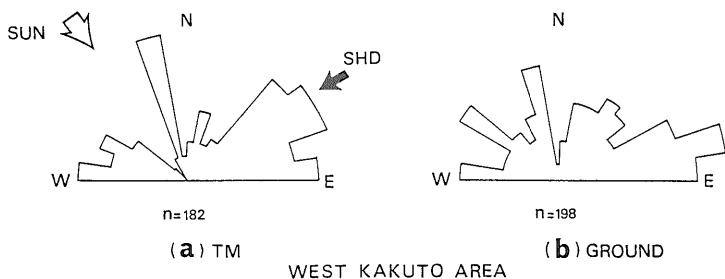


図4 加久藤カルデラ西部のTMリニアパターン検証。

(a) 図1のうちカルデラ西部のリニアパターン走向ヒストグラム(ローズ図)。白矢印は太陽照射方向で 頻度が低い。

黒矢印は太陽照射に直交する方向で 頻度が高い。

(b) (a)に対応した現場検証による断層系走向ヒストグラム。

降水・風化・侵食等による地形変形のみかである。

これはモデルの可否とも関わる。

筆者らは「事実であっても概念的に矛盾するものは棄却する」のではなく、事実なら受け入れることにし、もし概念と事実が矛盾するならその概念の方に疑問を持つべきものとする。重要な事は事実そのものであろう。

加久藤カルデラの内外に出現するリニアメント群の集合は6角又は5角形状に見える(図3)。これはOide(1968)の提唱した「4角形又は多角形状を示す第四紀カルデラ」説を復活させる実証結果であり「再発見」と呼んでよいものであろう。少なくとも環状のカルデラではあっても円形とはいいいにくい。なだらかな曲面で構成されると見ることでできない。侵食によるカルデラ縁の拡張と仮定された円形化が考えられたにもかかわらずそれに調和しないこの事実は何を意味するか。また単なるカルデラ縁のみでなく内外に並行するリニアメントが発達する点が新しく注目される。

これらのリニアメントとカルデラとが無関係で偶然だということはあり得るだろうか。たとえば加久藤カルデラ内の西部の縞状模様は霧島火山の噴火による熔岩流が押し寄せて来た時の前進波面群とする考えもある(荒牧1968)。これも事実であるがなぜ通常見られるように扇形に広がらず直線的になるのだろうか。表面的な事実の中に深い真実が隠されているようである。熔岩流による「しわ」の更に西側の火山灰層に「しわ」の走向とほぼ一致しリニアメントとも一致する断層谷地形が観察できた(古宇田他1984)がこれも「偶然」と考えると原因不明になってしまう。そうではなく必然の糸が引かれていると見なす方が合理的である。そのために他のカルデラ地形も比較しよう。

#### 4. 地形図・湖底図との一致

「円形陥没」の代表例とされる秋田県田沢湖の地形概況を図5に示す。図5では湖底等高線を10mおきに白黒で塗り分け陸上等高線は100mおきに白黒で塗り分けて見易くしている。原図は国土地理院発行5万分の1地形図である。湖底線の北向北西向南西向の壁は明らかに直線的に切り立った平板の構造を持っており屈曲部は折れ曲がりに近い。これを円で近似することには無理がある。2万5千分の1地形図では更に折れ曲がり明瞭である。なお湖底の平坦部のうち北西にあるものは火口丘を思わせる突起であり中央～南東は窪地である。この湖底の平坦部の外形をみる限り突起部を無視すればほぼ鋭角で折れ曲がる



図5 田沢湖の地形概況。

湖底等高線は10mおき陸上等高線は100mおきに白黒塗りわけしている。右下のバーは1km。

5角形とみなしうる。湖岸線の形態は東部の乱れをどう解釈するかで5角形又は6角形とみることができる。

田沢湖の湖底等高線が示す縁辺の線の構造にはほぼ並行する構造が周囲の陸上地形等高線に明らかに読みとれるであろう。これはランドサットTM画像にも良く現れている。2万5千分の1地形図では屈曲の鋭角さが更によくわかるのでこれらが地下構造等を反映したリニアメントであることが容易に推定できよう。

同様の手法を支笏湖(図6)洞爺湖(図7)十和田湖(図8)にも適用した。やはり多角形状が観察できる。Oide(1968)説はこの検証によっても成立している。陸上地形は侵食によって細かい出入りがあるため何が原地形を残すかについて解釈の差があるかもしれない。ただし100mおきの等高線なら大略的構造がある程度見て取れる。一方湖底線は侵食の影響がそれほど強くなく原地形の形態をある程度保存していると考えることができる。

これまで了解されたものとして使ってきたが原地形とは拡張(湖底は縮小)する前のカルデラの形態である。湖底地形に再び注目すると図5で湖底縁の壁のなす角度は急な北東部で37°中間的な南西部で26°程度が平均的であって極めて急である。水中では2~3°の傾斜があっても容易にスライディングがおこる。実際湖底の大部分は堆積物が充満して平坦化されている。湖底縁の壁には局所的に急崖になった所や露頭とみられる突起もあり原地形に近いものであろうと予想される。そこで原地形に近いと仮定を置くならば次の奇妙な問題点が生じる。



図 6  
支笏湖の地形概況。  
湖底等高線は 10m おき 陸上等高線は 100m  
おきに 白黒塗りわけしている。右下のバーは  
1 km.

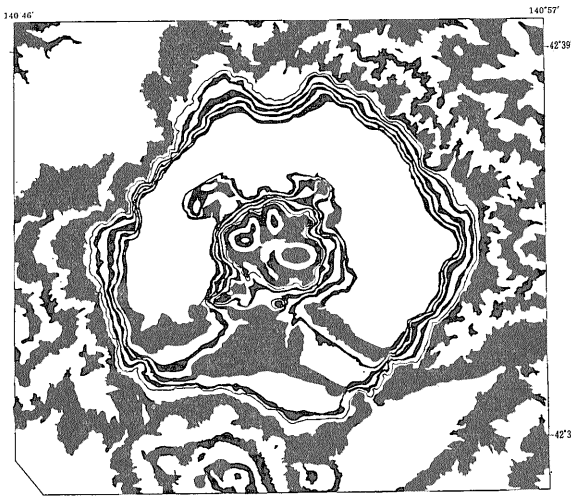


図 7  
洞爺湖の地形概況。  
湖底等高線は 10m おき 陸上等高線は 100m  
おきに 白黒塗りわけしている。右下のバーは  
1 km.

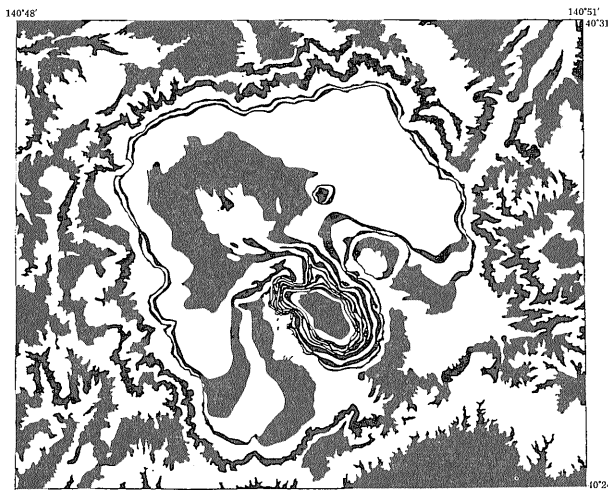


図 8  
十和田湖の地形概況。  
湖底等高線は 10m おき 陸上等高線は 100m  
おきに 白黒塗りわけしている。右下のバーは  
1 km.

1) 田沢湖が爆裂火口であり 湖の外形が火口そのものであるとすれば なぜ5ないし6角形状の直線的外壁をもつのであろう。なぜ円形に近い楕円状にならないのか。また なぜ陸上地形と調和的になるのか。

2) 田沢湖がピストンシリンダー型陥没であるとすれば なぜもっと急斜面にならないのか。より広域的陥没盆地が一般にそうであるように 70-90°の急崖になっているほうがふさわしくないか。

3) 陥没がより広域構造的断層に沿って発生するとすれば なぜ縁辺では陸上まで亀裂が伸びないのだろうか。

4) もし田沢湖が外因による盆地 たとえば隕石によるクレーターであるとすれば なぜ5ないし6角形状を示すのか 又 陸上地形に放射状リニアメントを発達させないのか。更に 湖底の中央火口丘的な盛上がりをどう説明するのか。

これらの問題は図6～8においても同様である。加久藤カルデラが 地下ではじょうご状に縮小する可能性を先に指摘したが ここにも同様の問題があるだろう。加久藤カルデラの場合は 湖が完全に埋め立てられた結果と見なされるので 田沢湖との比較はむずかしいが 重力異常図や震源分布 温泉ボーリングなどにより 同様の推定が成立する。そして 多角形状のリニアメントは断層を反映すると考えられるもの 大きな落差を伴う断層である可能性はほとんどない。これらの問題を解明するために 多角形状を呈するリニアメント集合の意味を議論する必要がある。

## 5. マグマ貫入と構造的断層による カルデラ形成論

画像情報の重要性は 面的情報を残りなく示す点にある。これは 事実が明確になることであるが 注意を喚起してほしいのは 二通りの事実が明確になる点である。すなわち 道路があった 断層が見えた という 明らかな事実がわかる点と 森林におおわれて岩相判別が困難である等のわからない事実も その原因とともに明確になることである。前者はわかりやすいが 後者はわかりにくいかもしれない。わかる点がわかったと書くことは手易い。

しかし わからないことをわからなかったと明確に述べることの重要性は案外見逃され易い。それどころか わかっていないはずにもかかわらず 「推定」によって

「わかった」ことにしなければ無意味な分野も多い。いくつかの測点をつないだ等高線図によるものや 地質図 地球化学図などは 本当に事実としてわかっていることはごく一部にもかかわらず 残りの部分もわかったかのように表現しなければならない。この方が わかり易いと思う人もいるだろうが 推定部分が推定であることが明らかでない限り 立論の根拠としては 実は大きな困難がある。画像情報には このようなごまかしが許されない。

多角形状のカルデラのリニアメントは周辺地域のリニアメントと調和的だといっても すべて同じであるわけではない。ここに一つの糸口があらう。図1で 加久藤カルデラ西側を構成するリニアメント群の多くは 周辺の NE NNE NNW NW 方向の構造と良く一致するが 外壁を構成するリニアメント群のうち 特に顕著な NNE 又は WNW に近いリニアメントは非調和的である。従って 画像判読に解釈の要因も加味した図3ではカルデラの多角形状が強調される。

実際の画像から 図1のように無差別な線構造をいさなり判読することほとんど不可能である。画像そのものは図1に抽出した範囲より広い地域をみているため 画像全体から受けるリニアメントの傾向を捉えつつ 最初は偏った見方で解釈してしまう。第一印象としてはむしろ 図3に近い。これは 人間の脳の認識が高度な瞬間的画像情報処理能力を持っていることを意味するが 脳は固体素子の集合である計算機のように瞬間的な大容量処理を全て正確に高速演算できるほどは優れていない。そのため 多くの見落としや見誤りが生じる。これが 通常のいわゆる写真判読の長所でもあり短所でもあった。

ここで採用した方法は 図1のような無差別抽出を前提に 解釈要素 (pixels relation: type [4]~[5]) も取り入れた図3を導く手法のため 少なくともこの画像の範囲内では 実態をかなり正確に反映すると考えられる。もちろん 異なる画像から線状模様を抽出すれば 異なるパターンが抽かれる。図9は図1とは異なる時期 (1980年10月30日「鹿児島」) に異なる条件 (図1は高度700kmから午前10時14分頃 図9は高度900kmから午前10時00分頃) で撮影された画像のデジタル処理結果を元としている。分解能も 図9の約80mまで (MSS) に比して図1は約30m (TM) と高い。それぞれ太陽高度が異なるため地形の陰影のうち良く見えるものと 見えにくいもので差がでてしまう。このような差を考えても 図1と図9の相当する場所 (たとえば加久藤カルデラ) におけるリニアメントの様子は 似ていると言えるだろう。

図9の場合は20万分の1地形図相当に引伸ばしたMS

S画像から解析しており 図1を50万分の1地形図相当のTM画像から解析したのは分解能の程度をほぼ同様にして比較する目的があった。従って TM画像の20万分の1地形図相当の引伸ばしからリニアメントを抽出すると 図1よりはるかに大量で詳しいリニアメント図が得られる。

画像の選択の仕方でもリニアメントの細部が異なるものの概略の傾向はどの画像を比較しても同じである。これについては 空中写真やSAR画像でも既に確認している(古宇田 他 1984)。

図3を作成するにあたって 特に留意した点は pixel-s relation type [4]~[5] すなわち 抽出されるリニアメントの並びや延長性であった。このように並行性 又は延長性が見られるリニアメント群は 構造的な断裂 又はその反映と考えることが可能である。加久藤盆地のような新期火山岩地帯では これ以外の たとえば砂丘の連なりのような地表のみに限定できるモデルを考えることができないので 構造的断裂を示唆すると考えてよいだろう。その外形が多角形状(4~6角形状)でじょうごのように中心に閉じる向きのあることは このカルデラ火口の形成に 爆裂や陥没のみにとどまらない構造的活動があったことを強く示唆するだろう。

Koide & Bhattacharji (1975) は カルデラ形成に対してマグマ陥入による応力割れ目の数値実験結果を示しに開いたじょうご型割れ目が発達するモデルをたてている。この数値実験では2次元断面モデルを基本とし軸対称の立体的構造まで推定できる。そのため それまでに考えられてきた円環状カルデラの定義に従って地層を水平的には等方均質と仮定し(垂直的には不均質でよい) 円環状割れ目と放射状割れ目からなるカルデラの陥没構造モデルを提案している(Koide & Bhattacharji 1975)。

しかし 脆性破壊領域では 岩石破壊試験が一般的に示しているように 必ずしも割れ目の形は曲線にならずむしろ概略としては直線又は直線の折れ線等で近似できる場合が多い。数値実験では垂直断面で断裂を直線近似しており 地表下浅所の天然の事実から考えて 直線近似の方が 合理的な場合が多いだろう。であれば 地表では破壊が脆性的なため 直線の組み合わせで断裂が出現することは合理的といえよう。多角形状を呈するカルデラの形はまさにそれに相当する。

なぜ4~6角形が多いかについて類似で考察してみよう。水の多い地表が干からびた時 地表土(砂)が収縮する。しかし地表の大きさは限られているため 粘土の強い結合エネルギーによる凝縮によって 地表はいくつかに分断される。よく知られている亀の甲形をした

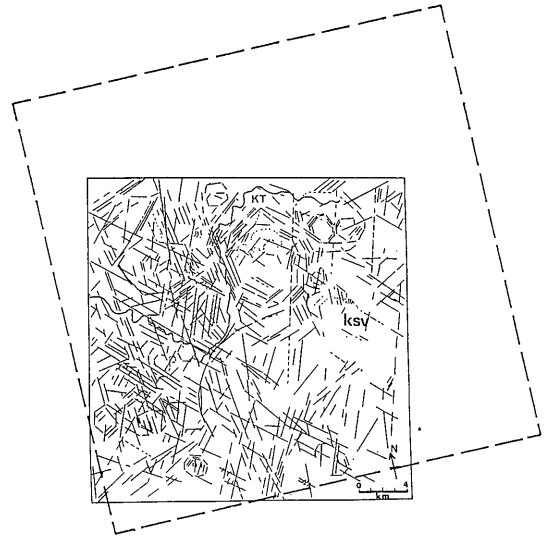


図9 ランドサット3号のMSS画像から抽出したリニアパターン。  
破線は図1に対応。

乾痕・干裂(contraction polygon 又は mud crack)である。乾痕は 空気にさらされて乾燥した証拠として扱われる。乾痕は orthogonal random (regular/irregular) orthogonal oriented 及び non-orthogonal に分けることができる(Lachenbruch 1962)。一つ一つの多角形は  $90^\circ$  (平面を4分する) と  $120^\circ$  (平面を3分する) の角のものが多いようである。

乾痕は収縮による多角形生成の例であるが もし 観測者がひとつの角形片にのっていたとして 角形片の縁辺を見渡すなら 隣接する角形片が相対的に離れていくことに気付くであろう。

これは Koide & Bhattacharji (1975) の中でマグマの上昇による応力で 陥没中心からみて周囲が断裂を境に遠ざかることに相当している。後者は局地的拡張であるが 相対的には同様の運動である。この水平的移動もほんの少しの距離を動いてしまえば力学的に安定するので止まる。乾痕とカルデラとはサイズが違いすぎる(乾痕は数mm~数m; カルデラは数km~数10km)ので 類以上は言えないものの 力学的安定を求めて断裂が走る点で 本質的に同じ物理現象である。

平面は円で区分することはできない。平面をまとまりのあるいくつかの単位に 区分しようとすれば  $90^\circ$  で4分するか  $120^\circ$  で3分する組み合わせが合理的であろう。 $90^\circ$  は平面を4角形に区分し  $120^\circ$  は6角形になる。この他に  $60^\circ$  で6分すれば3角形に分離できる。 $90^\circ$  と  $120^\circ$  の組み合わせで5角形にすることもできる。

乾痕では 一般に 3 角形のもの少ない。カルデラにおいても 3 角形のもの存在するかもしれないが あまり聞かない。60° くらいの鋭角に分断するにはより大きな仕事が必要なのであろう (図10)。

つまり カルデラ形状が 4~6 角形を呈するという事は 平面分割の安定性のためであり それは上昇するマグマによる応力で生じた地表における局所的張力場が力学的に安定になるために必要ということになるだろう。

カルデラが なぜ火山噴出による地下空間の質量欠損又は減圧から陥没に至る過程で考えられるようになったかの歴史的考察は省くとして 爆裂火口からの類推があったであろうことは想像に難くない。裏磐梯山やサン・トリニ島のような火口が穴であることは事実である。ただスケールが小さいこと 爆裂以外に 陥没も生じているとは考えにくい点などの根本的違いがあろう。逆に 陥没カルデラ 例えば鹿児島湾始良カルデラ縁には桜島火山が 陥没後に現在活動している。洞爺カルデラ縁の有珠岳の噴火はほんの10年前である。加久藤カルデラ縁には霧島火山 田沢カルデラ縁には駒ヶ岳のような活動が知られている。大量の火山噴火が広域的陥没の直接的原因と主張するための障壁は意外に大きい。従って 多くのカルデラ陥没は Koide & Bhattacharji (1975) の提案した生成機構で説明されなければならない。

一方 加久藤カルデラの荒牧モデルも又 この生成機構で説明できる。上に開いたじょうご型火口になるのは上昇するマグマの押しによる応力でじょうご型に脆性割れ目が発達するためである。この局地的伸張場の発生で地表は分断される。分断は力学的安定を求めて行われ 断裂は合理的空間分割を求めて行われる。この時 多数の並行割れ目が発生する。衛星画像に出現する 5~6 角形状のリニアメント群は その反映 又は そのものであろう。

このような多角形は その場所に既に存在した構造の影響を受けるであろうし 広域的応力場の影響も受けるだろう。多角形状のリニアメントが広域的構造と良い相関があるのはこのためと説明される。また 局所的な力学的安定が存在すれば カルデラ形成に伴う断裂のあるものは 広域的 局所的な既存構造に必ずしも制約されない。加久藤カルデラのリニアメント群が 背景の広域的構造の傾向とはやや異なる特徴をもつのもこの故であろう (図3と4)。カルデラが多角形状を示す理由としては すでに存在する構造や いわゆる“広域応力場”に規制されることは 2 次的であって 地表下浅所へのマグマの貫入・上昇こそ 本質的原因をなすと考え

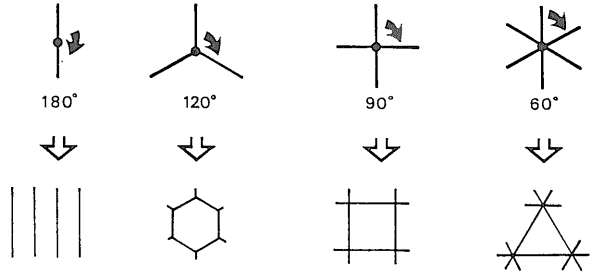


図 10 正多角形による規則的平面分割の全種類。

られるのである。

## 6. 南九州の金鉱床分布と多角形リニアパターン

世界的にみて カルデラや貫入岩に相関する浅熱水性鉱床が多数報告されている。米国中西部の代表的浅熱水性金鉱床は 特に再生カルデラと強い結びつきがあることで知られている (Steven et al. 1974)。この浅熱水性鉱床を生じたものは 鉱化溶液と称される地下高温水が断裂等に規制されて流れ その途中で化学的環境が変化することが原因であろうと永らく考えられてきた。これは仮説であって 現場を実時間で確認したものではない。ただ 近年 阿蘇山周辺の温泉ボーリングで金鉱床が発見されたり 米国の現世カルデラ外郭の地熱ボーリングでモリブデンに富む溶液が見つかる等の事実がわかってきた。あながち 仮説のみにとどまるものではないかもしれない。

もし浅熱水性鉱床がカルデラと関係があるなら 鉱床形成にあずかる地下高温水の流通路としての断裂系と関係しなければならぬ。そのような断裂系は カルデラを構成する多角形リニアパターンに近いか あるいは そのものであろう。そこで 現在までに知られている浅熱水性金鉱床のまわりに多角形リニアパターンが存在するのではないかという予想ができる。図11は ランドサット衛星のMS S画像から抽出した南九州のリニアパターンである (古宇田 他 1984)。前述した方法で多角形状のパターンがいくつかみられる。明らかな現世カルデラと 浅熱水性金鉱床に伴われると見られる多角形状が観察された。見易くするために 更に抽出した解釈図が図12である。ここには 金鉱床は近くはないが 顕著な多角形状を示すものも抽出してある。この



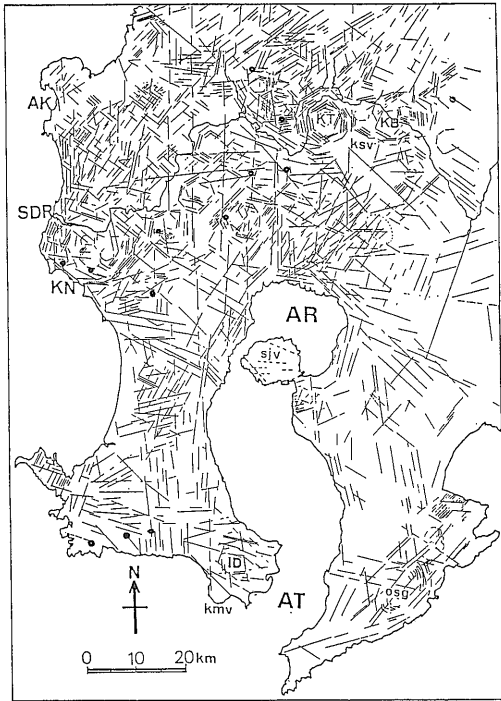


図 11 ランドサット3号のMSS画像から抽出した南九州のリニアパターン。

- AK: 阿久根    AR: 始良    AT: 阿多
- ID: 池田湖    KB: 小林    Kmv: 開聞岳
- KN: 串木野    Ksv: 霧島山    KT: 加久藤
- Osg: 大隅花崗岩    SDR: 川内川
- Sjv: 桜島

方法は 金鉱床に関係すると見られる構造を 面的に推定できるため 鉱物資源の探査と評価・解析に有効である。

衛星リモートセンシングによる方法は広域的な平面情報を わかるものとわからないものに 明確に分けて残りなく抽出する。この方法は 他の手段をもって代替することは不可能な 利用価値の高い情報である。これに対してボーリング 地質調査 地化学分析 物理探査等従来の方法ではいずれも測点 又は測線上の情報しか得られない。平面図・等高線図にまとめることが多いが測定された少数の点以外は推定値でしかない。つまり わからないところも わかったかに表現されてしまう。実際には 測定しない点で大いに推定と異なることは 資源探査分野ではおなじみである。これに反して 衛星リモートセンシングによる方法は すべての点が測定されるため わからない所は“はっきり”わ

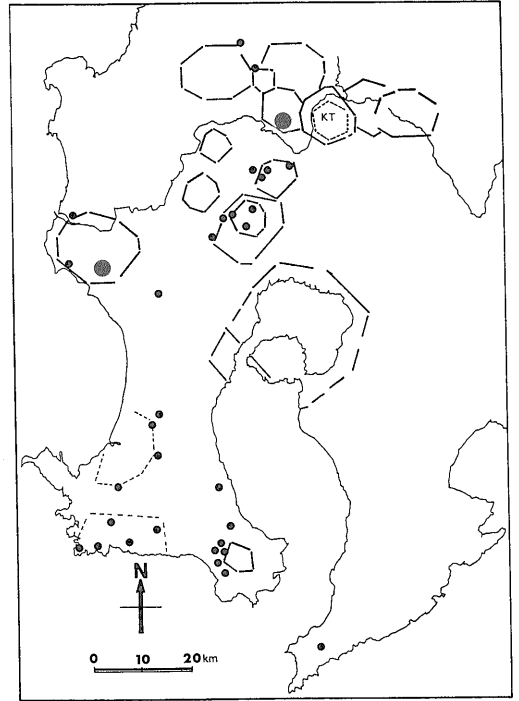


図 12 図11の解析図。

KT: 加久藤 黒丸は浅熱水性金鉱床 大実線によりかこまれた多角形がカルデラに対応する。

からないことが確認できる。一見 どうでもよいことに見えるかもしれないが この違いは大変重大である。また 衛星リモートセンシングのデータは 空中写真によっても代替できない。空中写真は 一般にはデジタルデータでなく 同時に同一条件で広域を撮影できず 赤外領域等のマルチスペクトル性に欠けている。

このように 衛星リモートセンシングによる方法は従来の手法で代替できない 新しい方法である。今後この分野が大いに発展することを望むものであるが 応用面では ここにあげたカルデラと浅熱水性鉱床の探査が重要であろう。

### 7. 終わりに

宇宙からの観測によれば 日本の多くのカルデラに特徴的のリニアメントがみられる。これは爆裂火口としてのクレーターと明確に区別できる地形的特徴であろう。画像情報や地表調査等観察可能な証拠だけで真実を伝えようとするにはあるいは限界があるかもしれ

ない。ただ 画像情報は 何がわかっていないかについて その事実と原因を明らかにする点で非常にユニークであるといえる。わかっていない事実の中に 本当の真実が隠されていることはいくつもあるからである。単純な 一分野の事実だけで 原因から結果へ直結することには大きな陥穽があるだろう。「Aの原因はBである」と言い切った方が ものごとが明確になったように思い込む人もいるだろうし 断定による単純化が科学だと信じている人もいるだろう(多分そうではない)。しかし 限られた証拠を多くの分野で収集し かつ その間の整合性をとろうとすれば 必ずしも単純に割り切ることができないものもいくつかあろう。

我々がここで扱ったカルデラは数kmから2~30km以下の径の火山性のものであり、このようなカルデラが 上昇するマグマによる局所的伸張場の空間分割と力学的安定の結果によるとする小論のモデルが正しいとすれば 多角形の構造 それも4~6角形という形態が脆性破壊の場における安定した形態であり 本質的だということになるだろう。

では カルデラのうち 外形が ほぼ 円形に近いと考えられているものはどう説明できるだろうか。おそらく その多くは再考する必要がある。特に衛星画像による再検討は重要である。それでも円形とせざるをえないものがあればどうするか。火山性でないものは考察の対象としないことにしても 爆裂火口の大きなものか あるいは巨大なため変形が脆性ではなく 延性的にレオロジカルに進行するような機構が考えられるだろう。カルデラのサイズの違いによる形態の差異は今後の重要な問題である。これらは しかし 本当に事実なら 数も少ないと思われるので 例外としても良いのではないだろうか。少なくとも日本の島弧変動におけるカルデラの典型的形態は4~6角形状と言うべきであらう。

謝辞：本研究は科学技術振興調整費による「リモートセンシング技術の利用実証に関する研究」の成果の一部をとりまとめたものである。地質調査所 小川克郎地殻熱部長 星野一男燃料部長 長谷紘和地殻熱探査課長には 全般の御指導と適切な御批判を仰いだ。東京大学 荒牧重雄教授 新潟大学 藤田至則教授 山形大学 生田慶司教授には カルデラと陥没にまつわる多くの有益な御批判と御助言をいただいた。陥没総研における討論等(藤田編 1986)は 本稿形成論の検討に大いに有効だった。地質調査所 地殻熱部 村岡洋文氏 山口靖氏には御討論いただいた。本稿及び本図は岸井範子氏 安部貴子氏 三神亮子氏の忍耐強いタイピングと製図なくしては完成しなかった。以上の方々へ厚く感謝の意を表する次第です。

## 文 献

- 荒牧重雄(1968) 加久藤盆地の地質——えびの・吉松地域の地震に関連して——。地震研究所彙報 vol. 55, pp. 241-257.
- 荒牧重雄(1969) カルデル学説に関するいくつかの問題。火山 第2集 vol. 14, pp. 55-76.
- 荒牧重雄(1983) 日本のカルデラの成因に関するいくつかの問題。鉱山地質特別号 第11号「黒鉱・島弧・縁海」 pp. 139-154.
- 藤田至則(1973) 日本列島の成立・グリーンタフ造山。築地書館(東京) 257p.
- 藤田至則(1986) 後期中世代~現世における陥没の形態とその発生機構に関する総合研究(陥没総研)。文部省科学研究費総合研究(A)報告書 No. 1 105p.
- KOIDE, H. and BHATTACHARJI, S. (1975) Formation of fractures around magmatic intrusions and their role in ore localization. Econ. Geol., vol. 70, pp. 781-799.
- KOUDA, R. (1986) Remote sensing, cauldrons, and structural control of Kuroko deposits. Intern. Seminar on Kuroko deposits, Openfile report No. 20, Geological Survey of Japan, 27p.
- 古宇田亮一・小川克郎・嶋崎吉彦・佐藤壮郎・小野雅敏(1984) ランドサット MSS 画像のデジタル処理による九州南部の地形・地質構造解析。日本リモートセンシング学会誌 vol. 4, pp. 321-340.
- LACHENBRUCH, A. H. (1962) Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 70, 69p.
- MATSUMOTO, T. (1963) Caldera, volcanoes, and pyroclastic flows in Kyushu. Bull. Volcanologique, ser. 2, tome 26, pp. 401-413.
- 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.
- OIDE, K. (1968) Geotectonic conditions for the formation of the Krakatau-type Calderas in Japan. Pacific Geology, vol. 1, pp. 119-135.
- STEVEN, T. A., LUEDKE, R. G. and LIPMAN, P. W. (1974) Relation of mineralization to calderas in the San Juan volcanic field, Southwestern Colorado. Journal of Research, U. S. G. S., vol. 2, pp. 405-409.
- 田島広一・荒牧重雄(1980) 霧島火山周辺の Bouguer 異常。地震研究所彙報 vol. 55, pp. 241-257.
- 田村秀行・坂上勝彦・舟久保登・小野雅敏・中山勝矢・小川克郎(1984) 地形判読のためのランドサット画像強調法。日本リモートセンシング学会誌 vol. 4, pp. 137-149.
- 浦井 稔・古宇田亮一・佐藤 功・津 安治(1985) ランドサット MSS 画像の線状模様抽出とカラー表示。日本リモートセンシング学会誌 vol. 5, No. 4, pp. 279-292.
- 横山 泉(1969) カルデラの構造に関する考察。火山 第2集 vol. 14, pp. 77-83.