

# 20億年前の隕石孔？

## —論争のフレダフォート環状構造(南アフリカ)—

奥山(楠瀬) 康子<sup>1)</sup>

### 1. はじめに

近年、太陽系惑星の探査が進み、宇宙からの“お客様”である隕石の働きが、地球に住む私たちに改めて認識されたように思う。専門家からお茶の間まで巻き込んだ、恐竜の絶滅と白亜紀/第三紀境界イベントについての議論は、一つの例であろう。

ところで、隕石の落下の跡である隕石孔は、付加体堆積物をはじめ海成の地層の占める割合の高い日本列島にとって、見つけることのかかなり難しい地質構造と言っていだらう。このすぐれて大陸的な地質構造を、1993年9月5日、今回の南アフリカ巡検の一環として見学することができた。それはフレダフォート環状構造(Vredefort Structure, またはフレダフォート・ドーム, Vredefort Dome)—今から20億年前に形成された、インパクト・クレーターらしきものの中では世界最古の構造の一つであると同時に、その成因について多くの議論がなされてきた、謎の環状構造でもある。

フレダフォート環状構造は、南アフリカ最大の都市ヨハネスバーグの南西約160 kmにある(第1図)。地形的な高まりに縁どられた半円状の構造は、人工衛星からもはっきりわかり、南東側の半分が若い地層(約2億年前の地層であるカルー系)におおわれているものの、月のクレーターとくらべても遜色ないような、いかにもインパクト・クレーターらしい形であるという。

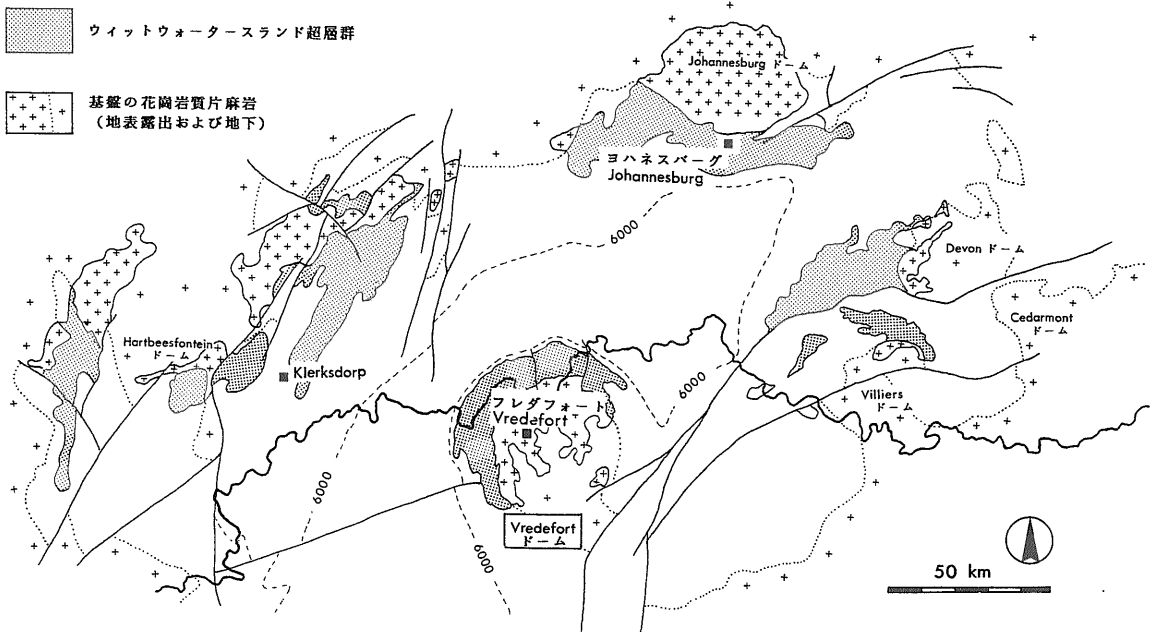
構造の半円状をなす部分では、地層の規則的な配列が認められるという。第2図に、フレダフォート環状構造の地質略図と模式的な断面を示す。図か

らわかるように北西側の構造外縁から中心部に向けて、約23億年前のトランスバール超層群に始まり、ウィットウォーターランド超層群にいたる堆積岩類が、若いものほど外側に整然と配列している。これら堆積岩類の内側に「浮島」のように分布している片麻岩類は、より外側に分布するOuter Granite Gneiss (OGG)と、内側のInlandsee Leucogranofels (ILG)に分けられている。さらにILGの中心部付近には、超苦鉄質岩が小規模に露出している。構造の主要部分を構成する以上の岩石は、アルカリ花崗岩類、閃長岩類、斜方輝石グラノファイアー、そして後に述べるシュードタキライトに貫かれている。こうした構造は、現在から約20億年前におこった変動—フレダフォート・イベント—で形成された。環状構造の外形などはインパクトで生成したとの考えに合うかのようにであるが、その南東側の半分が見えないこともあって、成因はなかなか結論づけられなかった。1987年には環状構造の中の町Parys(第2図参照)で、フレダフォート構造を意識した国際シンポジウム「International Workshop on Cryptoexplosions and Catastrophes in the Geologic Record」が開かれたくらいである(注1)。

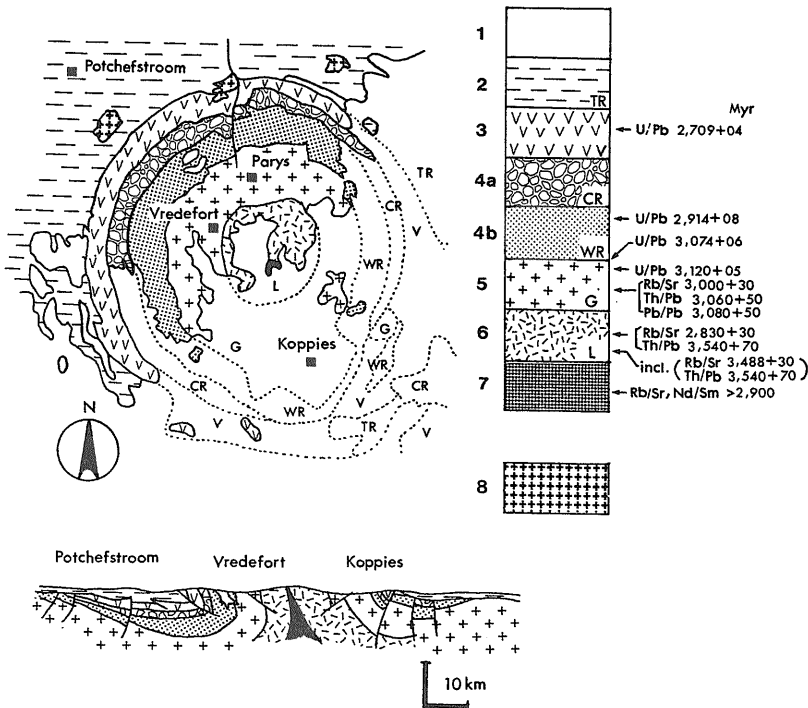
ちなみに、今回現地以案内をいただいたRodger J. Hart博士はインパクト派、Wolf U. Reimold博士は反インパクト(内因)派の「論客」で、ともにフレダフォート構造の成因について多数の論文を出しておられる。参考のため、インパクト・反インパクト両派の主張を、Reimold(1993)にもとづいて第1表にまとめた。

1) 地質調査所 地質標本館

キーワード：フレダフォート(Vredefort)環状構造, crust-on-edge configuration, シュードタキライト, コーサイト, スティショバイト, インパクト・クレーター



第1図 フレダフォート環状構造(フレダフォート・ドーム)とその周囲のウィットウォータースランド堆積盆. Pretorius(1986)から作成. 地質構造を示すために, ウィットウォータースランド超層群の深度6,000 mの等深線(破線)と, ウィットウォータースランド超層群の基底(点線)を記した. 図の範囲には, 基底片麻岩類が持ち上がったドーム状構造が周囲に多数認められる. 内因説によれば, フレダフォート構造もこうしたドーム状構造の一つであるとされる.



第2図

フレダフォート環状構造の地質略図と断面図. 地質図と断面図はMartini(1992)によるものを簡略化. 地質凡例: 1. カル系, 2. トランスバール超層群, 3. ペンタースドープ超層群, 4. ウィットウォータースランド超層群(4a. セントラル・ランド層群, 4b. ウェスト・ランド層群), 5. Outer Granite Gneiss, 6. Inlandsee Leucogranofels, 7. 超苦鉄質岩, 8. アルカリ花崗岩類・閃長岩類. 放射年代は, de Wit et al. (1992)によるコンパイルにもとづく. Inlandsee Leucogranofelsについては, 苦鉄質片麻岩包有岩についての年代データ(incl.)も併せて示す.

第1表 フレダフォート環状構造の成因についてのインパクト・反インパクト(内因)説の要約

	インパクト説	内因説
形態	環状(形成後の変形あり)	元来非対称, 多角形状
構造	"Crust-on-edge"構造, 縁部は逆転構造, 中心部は著しい隆起, 周囲を環状断層が囲む	"Crust-on-edge"構造は北部のみ, 南半分では地質構造はほぼ水平
変形の範囲	全域(若い地層による被覆の下を含め). ただし, 高温(>500°C)状態への隕石落下のため焼き鈍しされている	顕著な変形は北半分に限定. 変形は「フレダフォート不連続面」で最大で, 中心部ではむしろ弱い(中心部に変形の痕跡ありとする研究者もいる)
変形の回数と年代	隕石落下による変形は一回, 2.00-2.15 Ga. (Walraven and Elsenbroek, 1991 および Bischoff, 1992による議論と返答)	複数回(3ステージ, もしくはそれ以上). 2.4-2.2 Ga, ~2.0 Ga および 1.4-1.1 Ga (文献は本文参照)
衝撃を示す微小変形組織	石英の層状構造(planar deformational features), シャッターコーン構造	ともに真の層状構造, シャッターコーン構造ではない(Reinold, 1990)
シュードタキライト	衝撃角礫岩(インパクト・メルトとの解釈もある)	形成は3回にわたる. 隕石落下下では説明困難
斜方輝石グラノファイアー	インパクト・メルト(隕石落下の衝撃により発生したマグマ)	ブッシュフェルト期の火成活動の産物
コーサイト, スティショバイト	隕石落下による衝撃変成鉱物	隕石落下の衝撃によらずとも生成可能と解釈
形成の要因	隕石の落下による.	上部マントルに及ぶ歪速度の高い変形運動, CO <sub>2</sub> に富む深部ガスの爆発的噴出 など

## 2. "Crust-on-edge configuration"

繰り返しになるが, フレダフォート環状構造の北西側では, 外縁から中心部に向けて年代が古くなるような堆積岩類の配列が認められている(第2図). この部分では, 地層の傾斜はきわめて急で, ところにより逆転している(写真1). 石英質砂岩(quartzite と呼ばれている)が高い割合を占めるウィットウォーターズランド超層群が分布するため, 外縁部は地形的な高まりをつくる.

内側の片麻岩類では, 地質構造は一転して緩やかになるという. 環状構造の内側ほど年代が古いという傾向は, 片麻岩類にも認められるようで, 放射年代の最大値は構造的な下位の ILG のほうが古く求められている(Hart et al., 1981, 第2図). OGG も ILG も花崗岩質片麻岩が大部分を占めるが, 少量の堆積岩起源あるいは苦鉄質火山岩起源の片麻岩も認められているという. 変成度は, OGG では角閃岩相, ILG ではグラニューライト相に達し, 構造中心部に近い ILG では約900°Cにのぼる平衡温度が記録されているという(Schreyer, 1983). さらにその近くに超苦鉄質岩(蛇紋岩化したハルツバージャイト, Hart et al., 1990a)が分布するわけである.

こうした積み重なりを, 中心に向かって上部地殻



写真1 逆転し急傾斜した Hospital Hill Quartzite(ウィットウォーターズランド超層群の最下部層). 斜交層理が発達し, その見かけの傾斜に対する関係から, 地層の逆転が判明している.

の表成岩類から下部地殻の変成岩類, そして上部マントルにいたる岩石が露出していると考え, "crust-on-edge configuration"と呼んでいる. このうちウィットウォーターズランド超層群以上の堆積岩類と, その構造的な下位の片麻岩類の関係は, 広域的な地質データからも問題がなさそうである. さらに深部について, Hart et al. (1990b)は, OGG と ILG の不連続な境界面(フレダフォート不連続面)が, 上部・下部地殻の境界であるコンラッド面にあ

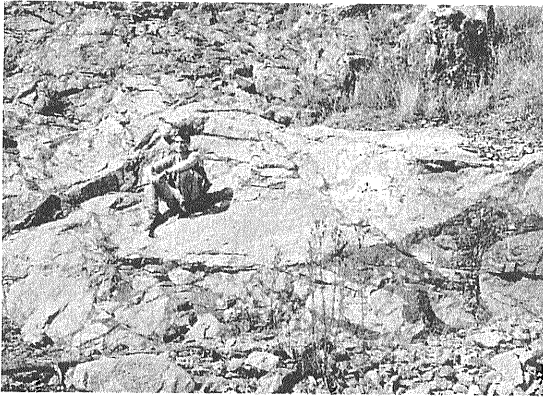


写真2 花崗岩質片麻岩(Outer Granite Gneiss)中にネットワーク状に発達するシュードタキライト(黒色部)。Otavi. 露頭に腰をおろしているのは、巡検のリーダー C. de Ronde 博士。

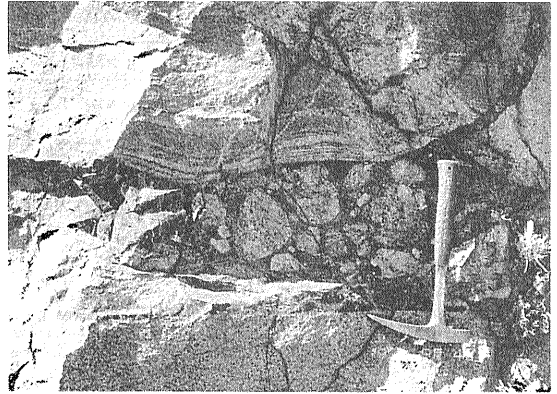


写真3 シュードタキライトが多数の丸い花崗岩質片麻岩塊を包有する。Otavi.

たとえと提唱している。深層反射や空中磁気探査等のデータからは、相当する不連続面が、環状構造周辺のウィットウォーターズランド超層群の基底下約 8 km の深度に、広域的に認められるという (Corner et al., 1990)。このように、フレダフォート構造のトラバースが、この地域の地殻深部に至る地質構造を見せているというのは、本当たらしい。

### 3. シュードタキライトは3回できた？

フレダフォートは、「シュードタキライト」という岩石名が最初に提唱された模式地であることでも知られている。シュードタキライトの特徴と成因については、高木(1991)のレビューをごらんいただきたい。

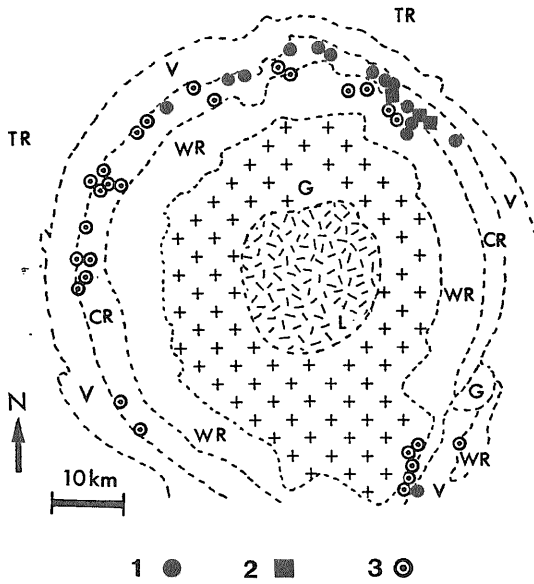
フレダフォートはさすがに模式地だけあって、たとえば、当日我々が最初に訪れた Otavi のシュードタキライトは、写真2のように見事なものであった。ここのシュードタキライトは、周囲の淡いピンク色を帯びた(カリ長石の色の色)花崗岩質片麻岩中に、大小無数の黒色の脈をなしていた。脈の中には、周囲の花崗岩質片麻岩が様々な大きさの丸っこい岩塊として包有されており、岩塊は複数の脈が会合して太くなるところに集まる傾向があった(写真3)。シュードタキライトは、花崗岩質片麻岩のなかの変位の小さな割れ目を埋めるようにできているように思われた。シュードタキライトが包有する岩塊は、ほとんど周囲の壁岩起源であるという話で、事実、Otavi ではほとんどすべて花崗岩質片麻岩で

あった。こうした産状は、フレダフォートのシュードタキライト脈が著しい岩盤変位と破碎物質(あるいはメルト)の移動を伴わずに形成されたことを示している。

さらに著しい特徴は、シュードタキライトが環状構造の広い範囲にわたって発達することであろう。斜方輝石グラノファイアー以外の、環状構造を構成するすべての岩型中に生成しているという話であり、本当にいたるところにあるのであった。場所的には、とくにフレダフォート不連続面に沿って分布が集中する傾向があるという。

シュードタキライトの成因については、いろいろな産地で、メルトであるか著しい破碎によるものか、議論がなされてきているが、フレダフォートのものは破碎作用の産物と考える研究者が多いらしい。この破碎作用の原因は、インパクト起源説ではもちろん隕石落下の衝撃ということになるだろう。ところが話が単純でないのは、シュードタキライトの形成は野外関係から複数回起こったと考えられ、年代データもそれを裏づけていることである (Reimold et al., 1990; Hart et al., 1991)。シュードタキライトの細脈が、やはりインパクトの別の証拠とされるシャッターコーン・クラックによって切られる野外関係も、認められている。現地で実際に見たときの奇異な気持ちは、忘れられない。どちらがインパクトに直接結びついた証拠なのだろう？ 隕石が2個(以上)落ちた？ まさか！

この点についての込み入った議論は、現地ではなかなかフォローしきれなかったが一案内のお二人



第3図 フレダフォート環状構造でのコアサイト，スティショバイトおよびその石英仮像の分布。Martini(1992)を簡略化。1. コアサイトの産地，2. コアサイト+スティショバイト組み合わせの産地，3. 石英仮像の産地。地質単元の略号は，第2図に同じ。

は、お客(?)の我々そっちのけですぐワアワアと議論を始めるので—要するに、シュードタキライトはフレダフォート・イベント以前の造構運動によって広域的に生成していた模様であり、そして、イベント後の年代を示すものについては実際に若い年代のおりの時期に出来た可能性もあるし、その時期の火成活動による若返りの可能性もあるということらしい。イベントより古い年代のシュードタキライトについては、第2図に示した各種の岩石の“重なり”，すなわちカープバル剛塊の地殻から上部マントルにいたる地質構造を形成した広域的衝上運動と関連させて、積極的に解釈する研究者たちもいる(de Wit et al., 1992)。それにしても、このシュードタキライトに隕石落下に関係してできたものがたしかにあることは、コアサイトやスティショバイトが例外なくシュードタキライトにともなわれて産出している事実から、まずまちがいないであろう。

#### 4. 衝撃変成作用の証拠が全域にあるのか？

コアサイトとスティショバイトはともに  $\text{SiO}_2$  の

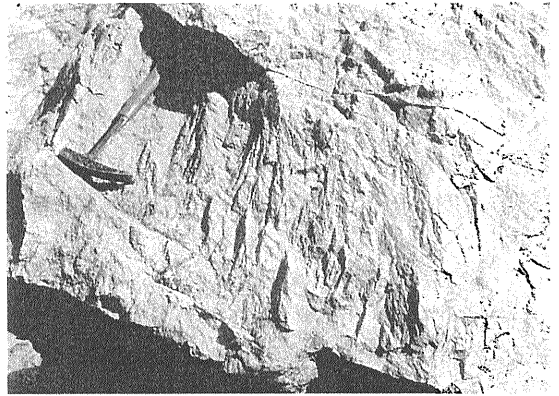


写真4 Hospitai Hill Quartzite 中に発達するシャッターコーン・クラック。

高圧相で、この組み合わせはいろいろな隕石孔から見つかっており、インパクトを鉱物学的に示す指標といて差し支えないであろう。フレダフォート構造では、シュードタキライトの細脈の中に限ってこれらの鉱物が見つかっており、とくに北縁部のウィットウォーターズランド超層群の石英質砂岩中のシュードタキライトに産するものは、この地域からの最初の発見として知られている(Martini, 1978, 第3図)。北縁部のウィットウォーターズランド超層群には、他にもきれいなシャッターコーン・クラック(写真4)や、砂岩の石英粒子に「planar deformational features」と呼ばれるほぼ平行な割れ目が走るなど、衝撃変成に特有とされる微細組織が発達することが知られており、「衝撃」があった事実についてはあまり問題がないようである。一方それより中心部では、全体の構造は比較的緩やかで、インパクトの「証拠」らしい著しい変形構造に欠けるきらいがあった。そこで第1表のように、内因説をとる研究者は、シャッターコーン・クラックや planar deformational features といわれているものは、似て非なる別の組織であると主張してきた(たとえば Reimold, 1990)。そして北縁部の変形については、ここで歪み速度が最大になり変形速度のきわめて大きな、非対称の造構運動を考えることで説明しようとしてきた(たとえば Colliston, 1990)。

これにたいして Martini(1992)は、コアサイトやスティショバイトだけでなく、その仮像をなす石英の分布に注目し、この二種類の鉱物が当初かなり広い範囲で形成されていたことを明らかにした。構造南東部での試錐試料からもこういった鉱物と石英仮

像が見つかり、衝撃変成作用が北部の延長と考えられる環状構造全体に及んだらしいことはほぼ確定的と思われる。仮像石英は、構造の中心部へ向かって再結晶を進め、多角形状石英集合体へと変化していくという。Martiniはこの現象を構造中心部ほど相対的に温度が高い、より深部にあった物質が分布しているとし、これはインパクトの後の隆起(ドミング・アップ)の結果であると解釈している。

コーサイトやスティショバイト、あるいはそれ由来する石英仮像は、片麻岩類分布域の中央部からは見つかっていない、しかし、最も中心を占めるILGでは、以前から多角形状石英からなる石英プールや、極微細な斜長石・アルカリ長石の集合からなる向きの揃ったドメインが広く見いだされている。Schreyer(1983)はこれを、衝撃変成で花崗岩質片麻岩類の石英・長石中にできた非晶質物質(diaplectic glass)が、焼き鈍し再結晶したものと考えた(ただし、衝撃の原因は隕石落下ではないとしている)。衝撃後の再結晶は、Martiniも、フレダフォートに特徴的な現象としている。この二人の研究者の見解は、衝撃変成作用の原因についての解釈は異なるが、衝撃イベント直前までフレダフォート地域が高温型の、著しい変形を伴わない変成作用(Bischoff, 1982; Hart et al., 1991)のもとにあったために、衝撃変成に特徴的な数々の構造が再結晶したという見方では一致している。

このように、衝撃変成鉱物や衝撃を示唆する微細構造の分布から、約20億年前の衝撃イベントが、若い地層の下に隠れている部分を含め、環状構造全体に及んだことは確からしい。特にコーサイトやスティショバイトの生成を合理的に説明できない限り、内因説はどれも旗色が悪そうである。内因説は主に詳細な地質学的データを論拠に論じられているようであるが、筆者には、「…だから、インパクトではない」という主張はなされるものの、かわりの生成機構を説得力ある形で提示するところまではなかなか到達していないように思われた。内因説をとるかインパクト説をとるかというのは、低確率ではあるが現在も起こり得るイベントとしてとらえるか、始生代には何か特別のことが起こったというセンスで考えるかの問題かもしれない。

## 5. おわりに

この話は、南アフリカ巡検の話を手紙ニュースに特集するに当たって、急遽まとめたものです。筆者自身は始生代もインパクトも専門でない上に、現地入りしてまもなくの時差ぼけた頭で話を聞いていたため、R. J. Hart, W. U. Reimold 両博士という格好のお二人に案内していただいたにもかかわらず、現地で多くのことを学ぶチャンスを逃してしまったという感想を持っています。特に W. U. Reimold 博士が現地で配布して下さった資料は、この話をまとめるに当たって文献その他を探すための格好の道案内となりました。何分にも自分の日頃の研究テーマとは異なった対象ですので、知識が浅く、文献の内容の理解に間違いがある可能性はあります。それはひとえに筆者の責任であることを明記しておきます。

最後になりましたが、休日にもかかわらず親切に現地を案内して下さった R. J. Hart, W. U. Reimold 両博士と、巡検リーダーとして私たちを引っ張って下さった鉱物資源部 C. de Ronde 博士に感謝して、一文の結びとさせていただきます。

注1) プロシーディングスは、雑誌 *Tectonophysics* の第171巻として刊行されている。

## 文 献

- Bischoff, A. A. (1982): Thermal metamorphism in the Vredefort Dome. *Trans. Geol. Soc. South Africa*, **85**, 43-57.
- Bischoff, A. A. (1992): Discussion on 'Geochronology of the Schurwedraai Alkali Granite and associated nepheline syenite and implications for the origin of the Vredefort Structure'. *South African Jour. Geol.*, **95**, 76-77.
- Colliston, W. P. (1990): A model of compressional tectonics for the origin of the Vredefort structure. *Tectonophysics*, **171**, 115-118.
- Corner, B., Durrheim, R. J. and Nicolaysen, L. O. (1990): Relationships between the Vredefort Structure and the Witwatersrand Basin within the tectonic framework of the Kaapvaal Craton as interpreted from regional gravity and aeromagnetic data. *Tectonophysics*, **171**, 49-61.
- de Wit, M. J., Roering, R., Hart, R. J., Armstrong, R. A., de Ronde, C. E. J., Green, R. W. E., Tredroux, M., Peberdy, E. and Hart, R. A. (1992): Formation of an Archaean continent. *Nature*, **357**, 553-562.
- Hart, R. J., Welke, H. J. and Nicolaysen, L. O. (1981): Geochronology of the deep profile through Archaean basement at

- Vredefort, with implications for early crustal evolution. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 10663-10680.
- Hart, R. J., Andropoli, M. A. G., Smith, C. B., Otter, M. L. and Durrheim, R. (1990a): Ultramafic rocks in the centre of the Vredefort structure: possible exposure of the upper mantle. *Chem. Geol.*, **83**, 233-248.
- Hart, R. J., Andropoli, M. A. G., Tredoux, M. and de Wit. (1990b): Geochemistry across an exposed section of Archaean crust at Vredefort, South Africa: With implications for mid-crustal discontinuities. *Chem. Geol.*, **82**, 21-50.
- Hart, R. J., Andropoli, M. A. G., Reimold, W. U. and Tredoux, M. (1991): Aspects of the dynamic and thermal metamorphic history of the Vredefort cryptoexplosion structure: Implications for its origin. *Tectonophysics*, **192**, 313-331.
- Martini, J. E. J. (1978): Coesite and stishovite in the Vredefort Dome, South Africa. *Nature*, **272**, 715-717.
- Martini, J. E. J. (1992): The metamorphic history of the Vredefort dome at approximately 2 Ga as revealed by coesite-stishovite-bearing pseudotachylites. *Jour. Metamorphic Geol.*, **10**, 517-527.
- Nicolaysen, L. O. and Reimold, W. U. (ed.) (1990): Proceedings of the 1987 Cryptoexplosion Workshop, Parys, 1987. *Tectonophysics*, **171**, pp. 422.
- Pretorius, D. A. (1986): 1:500,000 map of the Witwatersrand Basin-Surface and subsurface geology and structure. *Geol. Soc. South Africa*.
- Reimold, W. U. (1990): The controversial microdeformations in quartz from the Vredefort structure, South Africa—A discussion. *South African Jour. Geol.*, **93**, 645-663.
- Reimold, W. U. (1993): A review of the geology of and deformation related to the Vredefort Structure, South Africa. *Jour. Geol. Education*, **41**, 106-117.
- Reimold, W. U., Jessberger, E. K. and Stephan, T. (1990):  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of pseudotachylite from the Vredefort structure, South Africa. *Tectonophysics*, **171**, 139-152.
- Schreyer, W. (1983): Metamorphism and fluid inclusions in the basement of the Vredefort Dome, South Africa: Guidelines to the origin of the Structure. *Jour. Petrol.*, **24**, 26-47.
- 高木秀雄(1991): 地震の化石-シュードタキライト. *地質ニュース*, no. 437, 15-25.
- Walraven, F. and Elsenbroek, J. (1991): Geochronology of the Schurwedraai Alkali Granite and associated nepheline syenite and implications for the origin of the Vredefort Structure. *South African Jour. Geol.*, **94**, 228-235.
- Walraven, F. and Elsenbroek, J. (1992): Authors' reply to discussion by Bisschoff, A. A., *South African Jour. Geol.*, **95**, 77-78.
- 
- OKUYAMA-KUSUNOSE Yasuko (1994): Astrobleme of 2 billion years ago? —Field excursion to the controversial Vredefort Structure, South Africa.
- 
- 〈受付: 1994年1月7日〉

## クルーガー公園の動物たち

石原 舜三

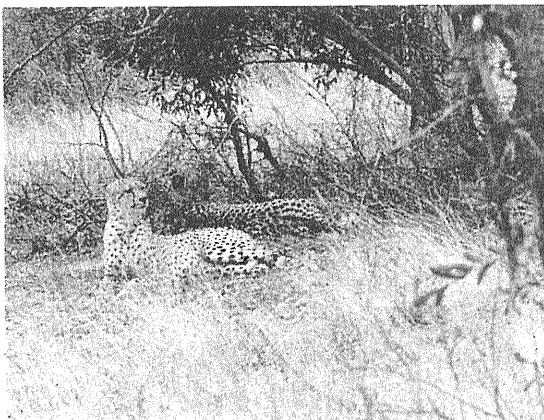


写真1 チェータの夫婦(300 mm レンズ)



写真2 木に住むアガマとかげ(300 mm レンズ)