金星にプレートテクトニクスはあるだろうか

川上紳一*・金折裕司**・早川雅彦***

Plate tectonics on Venus?

Shin-ichi KAWAKAMI*, Yuji KANAORI** and Masahiko HAYAKAWA***

Abstract Over the past decade a large volume of radar altimetry, gravity anomaly, and geological data on Venus have been collected from Earth-based radar observation and many space probes. There has been much speculation on the tectonic features of Venus. We reviewed some basic data on geology and tectonics on Venus and discussed possible tectonic features on the basis of comparative planetological disciplines. There are now ample evidences to suggest that global tectonics of Venus differs significantly from that of the Earth. Although there are several continents on Venus, distinct topographical difference between ocean and continent is not observed. Gravity field and topography of Venus have good correlation with each other. A large compensation depth of the gravity anomalies and thin elastic lithosphere of Venus suggest that continents must be supported by dynamical forces caused by convective mantle flows. If plate tectonics has not operated in Venus, heat transfer mechanisms in the venusian lithosphere must be dominated by hotspot volcanism. Some basic features on the present tectonic environment of Venus can be applicable to that of the early Earth. Studies on global tectonics of Venus have great implications for the understanding of tectonic history of the Earth.

はじめに

今、金星のテクトニクスが非常に注目されている。半径や質量で比較すると、金星は太陽系の惑星の中で最も地球に似た天体である。金星は地球とほぼ同じ化学組成をもち、その大局的な内部構造は地球とかなり似ていると考えられる。金星と地球を比較すると、次のような疑問が生ずる。金星にもプレートテクトニクスはあるのだろうか？ 地球と金星でテクトニックな運動形態が異なるとすれば、何がその相違を生じさせたのだろうか？ また、金星の地殻やそこで起きている地質現象は地球とまったく別なものだろうか？ 地球の地質学や地球物理学的研究によってもたらされた法則や常識は、他の天体

に対してどの程度普遍的なものなのだろうか？

金星は月について明るく輝く天体であり、宵の明星や明けの明星として人々に親しまれている。地表で 90 気圧にも達する濃い大気と、その中に浮かぶ厚い雲で全面を覆われているため、表面地形やそこで起こっているテクトニックな活動様式については、これまではまったく想像の域を出なかった。1978 年 5 月に地球を飛び立ったアメリカのパイオニア金星号は、その年の 12 月に金星に到達した後、長期にわたり金星を周回し、グローバルな表面地形や重力異常の探査を行った。ソ連も金星探査にはかなり力をいれており、数多くの探査機を金星に送り込んでいる。このように米ソの活発な金星探査によって、金星で起こっているテクトニクスについて研究するための材料が急激に増えてきている。さらに詳細な地形や地殻の構造を探査するために、アメリカは 1989 年 4 月に、探査機マゼランを打ち上げた。この探査機によって、金星のテクトニクスの解明が飛躍的に進むことが期待されている。

1989 年 10 月 26 日受付。1990 年 2 月 19 日受理。

* 岐阜大学教育学部地学教室。Department of Earth and Planetary Science, Gifu University, Gifu 501-11, Japan.

** 岐阜大学教養部地学研究室。Department of Geological Science, Gifu University, Gifu 501-11, Japan.

*** 名古屋大学理学部地球科学教室。Department of Earth Science, Nagoya University, Nagoya 464-01, Japan.

第1表. 金星探査の歴史.

探査機	年月	探査機の タイプ	結果
マリナー 2 号	1962 年 12 月	フライ バイ	34833 km まで接近
ベネラ 4 号	1967 年 10 月	母船 着陸船	燃え尽きる 夜側の地表 に衝突
マリナー 5 号	1967 年 10 月	フライ バイ	4100 km ま で接近
ベネラ 5 号	1969 年 5 月	母船 着陸船	燃え尽きる 夜側の地表 に衝突
ベネラ 6 号	1969 年 5 月	母船 着陸船	燃え尽きる 夜側の地表 に衝突
ベネラ 7 号	1970 年 12 月	母船 着陸船	燃え尽きる 夜側の地表 に衝突
ベネラ 8 号	1972 年 7 月	母船 着陸船	燃え尽きる 昼側の地表 に軟着陸
マリナー 10 号	1974 年 2 月	フライ バイ	5700 km ま で接近
ベネラ 9 号	1975 年 10 月	軌道船 着陸船	昼側の地表 に軟着陸
ベネラ 10 号	1975 年 10 月	軌道船 着陸船	昼側の地表 に軟着陸
パイオニア 金星号(1号)	1978 年 12 月	軌道船	レーダー 観測
パイオニア 金星号(2号)	1978 年 12 月	母船 着陸船	燃え尽きる 表面に衝突
ベネラ 11 号	1978 年 12 月	フライ バイ 着陸船	25000 km まで接近 昼側の地表 に軟着陸
ベネラ 12 号	1978 年 12 月	フライ バイ 着陸船	25000 km まで接近 昼側の地表 に軟着陸
ベネラ 13 号	1982 年 3 月	フライ バイ 着陸船	昼側の地表 に軟着陸
ベネラ 14 号	1982 年 3 月	フライ バイ 着陸船	昼側の地表 に軟着陸
ベネラ 15 号	1983 年 10 月	軌道船	レーダー観測
ベネラ 16 号	1983 年 10 月	軌道船	レーダー観測
ベガ 1 号	1985 年 6 月	気球 着陸船	大気の観測 軟着陸
ベガ 2 号	1985 年 6 月	気球 着陸船	大気の観測 軟着陸

第2表. ソ連着陸船の着陸地点.

着陸船	緯度	経度	コメント
ベネラ 8 号	-10°	335°	アフロディーテ大陸西部
ベネラ 9 号	32°	291°	ベータ地域北東部
ベネラ 10 号	16°	291°	ベータ地域中央部
ベネラ 11 号	-14°	299°	ベータ地域南東部
ベネラ 12 号	- 7°	294°	ベータ地域南東部
ベガ 1 号	8.1°	176.9°	アフロディーテ大陸東部
ベガ 2 号	-7.5°	179.8°	アフロディーテ大陸東部

*マイナス符号は南緯

金星のテクトニクスを明らかにすること自体、地球型惑星の研究にとって、欠くことのできないきわめて大きな意義をもつことは言うまでもない。金星のテクトニクスは、地球のテクトニクスの理解においても大変注目すべきものである。種々の探査によって得られた金星の地形や地質構造から、そのテクトニクスがかなり詳細に検討できるようになった今日、上述の問いにある程度答えられる状況になったと言える。本論では、金星のテクトニクスについて、どの程度研究が進んでいるか、最近の研究の動向を紹介するとともに、地球のテクトニクスの研究とどう関わるのかなどについて考察する。

金星の探査史

1957 年、ソ連の人工衛星の打ち上げ成功で、20 世紀の宇宙時代が始まった。金星探査は頻繁に行われ、米ソあわせて 20 機以上の探査機が金星へ向かった(第 1 表)(COLIN, 1980)。アメリカは、1962, 67, 73 年にそれぞれパイオニア(Pioneer)2, 5, 10 号によるフライバイ(flyby)探査を行った。また、1978 年には 2 機のパイオニア金星号を打ち上げた。パイオニア金星号は、大気へ突入してその構造や化学組成を調べるプローブ(Probe)と軌道船(Pioneer Venus Orbiter, 以後略して PVO と表す)から構成されていた。PVO はレーダーを用いた遠隔探査で表面地形を調べ、その軌道のゆらぎから重力異常の測定を行った。

ソ連は 1961 年以来、数多くの探査機ベネラ(Venera)およびベガ(Vega)を金星に送り込み、1967 年には探査機を地上へ降下させるのに成功している(第 2 表)(MOROZ, 1981; SURKOV *et al.*, 1986b)。1983 年 10 月に金星に到着したベネラ 15, 16 号は、翌年 7 月にかけて金星の北半球のレーダー探査を行った。ベガ 1, 2 号は 1985 年 6 月に金星に接近して気球と着陸船を落下させたあと、ハレー彗星探査に向かった。

一方、地上からのレーダー観測は 1960 年代に始め

第3表. 地球と金星の比較.

	金星	地球
太陽からの距離(天文単位)	0.72	1.00
質量(M_E^*)	0.816	1.00
密度 ** (g/cm^3)	3.9	4.03
半径(km)	6051	6371
磁気モーメント(M^{***})	$<5 \times 10^{-5}$	1.00
自転周期(日)	243	1.00
表面温度(K)	740	280
表面での大気圧(気圧)	90	1.0
赤道での重力(cm/s^2)	887	978
脱出速度(km/s)	10.4	11.2
回転軸の傾き **** ($^\circ$)	-2.6	23.45

* : $m_E = 5.973 \times 10^{24}$ kg(地球質量)

** : 0気圧における密度

*** : 地球を1とする(8×10^{15} tesla m^3)

**** : 公転軸と自転軸のなす角, 負符号は地球と逆方向の回転を示す.

られた. プエルトリコのアレシボ(Arecibo)に設置されている直径 300 m のアンテナを用いたレーダーシステムをはじめ, 4 地点で観測が行われた(RUMSEY *et al.*, 1974; GOLDSTEIN *et al.*, 1976, 1978; CAMPBELL *et al.*, 1976, 1979; CAMPBELL & BURNS, 1980). これらを用いて広範囲の表面探査ができるようになったのは 1970 年代後半になってからである.

地球と金星の相違

金星の地形やテクトニクスについて考える場合, まず地球と金星の相違点を明確にしておく必要がある. 第3表に地球と金星の大きさや質量, 表面の状態などの違いを示した(清水, 1986). 大きさや質量からすると, 金星は地球をほんのひとまわり小さくしたに過ぎない. しかし, 地表の環境は, 両者でかなり異なっている. 金星は地球より太陽に近く, 受け取る太陽エネルギーが大きい上に, 厚い大気をまとっている. この大気は主に二酸化炭素からなり, 水蒸気はきわめて乏しい. 金星の表面温度は大気の温室効果によって 740 K にも達している. 地球と金星の大気圏の物理化学的性質の差は, 二つの天体の形成とその後の 46 億年の歴史のなかで出現したものであり, この差が独特のテクトニクスを生じさせているのかもしれない.

金星のテクトニクスに関して重要な点は, 表面温度が高いこと, 水(H_2O)の存在しないことである. 表面温度が高いと岩石は流動しやすくなるので, 金星表面には剛体的に振舞うリソスフェアが存在しない可能性がある. 高い表面温度はリソスフェアの密度を小さくし, 負の浮力によるリソスフェアの沈み込みを生じさせないことも

考えられる. また, H_2O が存在すると岩石は流動しやすくなる. 金星には海が存在せず, 大気中の水蒸気も微量であることから, 金星の岩石の力学的性質も地球のものとは大きく異なる見込みがある(WEERTMAN, 1979). 金星に水圏が存在しないことは地球で起こるような侵食や風化が進みにくいことを示唆している. 金星では, 地球と異なった化学的風化作用が起こっているのかも知れない.

金星の地形

1. 地形概説

金星の表面は厚い大気と雲に覆われていて, 直接表面を見ることはできない. 地上や金星の周りを回る軌道船から金星表面にレーダーで電波を照射することにより, 地表から戻って来る信号をもとに表面の探査が行われている. レーダーによる遠隔探査から得られる情報は次のようなものである(詳しくは, HAGFORS, 1970; MCGILL *et al.*, 1983 などを参照). 軌道船から照射したレーダー電波が地表で反射して戻って来るまでの時間間隔から, 反射点の高度が求まる. 信号の波形変化から反射面の粗さ(roughness)が推定できる. 地表での反射率は表面物質の空隙率によって異なることから, 表面を覆っている物質が何であるかも, ある程度推定できる. 金星の地形や表面の凹凸は, 地上からのレーダー観測, パイオニア金星号の PVO とベネラ 15, 16 号によるレーダー観測によって得られている(例えば, CAMPBELL & BURNS, 1980; CAMPBELL *et al.*, 1983; PETTINGILL *et al.*, 1980, 1982; MASURSKY *et al.*, 1980; BARSUKOV *et al.*, 1986; BASILEVSKY *et al.*, 1986).

地球からの初期のレーダー観測では, レーダー反射能の特に高い地域が二つ認められ, アルファ地域, ベータ地域という名前がつけられた(GOLDSTEIN, 1965). アルファ地域の南西部には, 特に反射能の高い部分があり(Eve という地名がつけられた), 金星の経度座標の基準として使われている. ちなみに金星の自転は逆行のため, 経度は東向きに測られている. 地上からの観測では, アンテナの径が大きいほど空間分解能が高くなる. アレシボのアンテナでは空間分解能が ~ 2 km であるが, 観測可能な地域は金星の赤道面を中心とした部分に限られ, 全表面積の 30% である.

図版 I に PVO によって得られた金星のグローバルな地形図を示す. この地形図の分解能は水平方向が約 100 km, 高低差約 100 m である. 地域によってかなり標高差があり, 特徴的な地形を呈する地域には, ギリシア神話に出て来る女神などに由来する地名がつけられて

第1図. 金星の地名. GREELEY(1987)による. 等高線の間隔は1 km.

いる。第1図に各地域の名称を示した。

金星には二つの大きな大陸がある。赤道付近に東西に長く分布するアフロディーテ大陸(Aphrodite Terra)と、北半球の高緯度に分布するイシュタル大陸(Ishtar Terra)である。

アフロディーテ大陸は、地球の南米大陸ほどの大きさをもつ。金星の平均半径(中心から地表までの距離のモード値)よりも4000 mも突出した山岳地域が3カ所あり、それぞれオブダ地域(Ovda Regio), テチス地域(Thetis Regio), アトラ地域(Atra Regio)と名づけられている。この大陸の南には細長い峡谷, アルテミス峡谷(Artemis Chasma)がある。

一方のイシュタル大陸には、東部に金星の最高峰であるマクスウェル山脈(Maxwell Montes), 西部にラクシュミ平原(Lakshmi Planum)がある。平原といっても周囲の平原よりも標高はかなり高く、ラクシュミ平原を取り囲むようにフレイヤ山脈(Freyja Montes), アクナ山脈(Akna Montes)が分布している。

惑星の表面起伏の全体像を特徴づけるものに、標高と頻度の関係を図示したヒブソグラムがある(PETTENGILL *et al.*, 1980; HEAD *et al.*, 1981)。地球と金星のヒブソグ

ラムを第2図に示す。地球の場合には2つのピークが認められる。ひとつは大洋底の平均深度を示す-4000~-5000 mで、もうひとつは陸地の平均標高を示す900 mあたりである。このような2つのピークをもつ分布は、大陸地殻と海洋地殻の差を反映しており、究極的には地球のプレートテクトニクスを反映していると考えられる(HEAD *et al.*, 1981; PHILLIPS *et al.*, 1981)。金星はユニモーダルな分布を示す(PETTENGILL *et al.*, 1980)。金星の地形は、標高をもとに、(1)低地(lowland, 地表全体の27%), (2)緩やかに起伏した平原(rolling upland, 65%), (3)高地(highland, 8%)に分けられている(MASURSKY *et al.*, 1980)。

2. ベネラ 15, 16号による高分解能レーダー観測

1983年に打ち上げられたベネラ 15, 16号は、金星の極を周回する楕円軌道を取り、北極から北緯30度までの地域を1~2 kmの水平分解能でレーダー観測を行った(BARSUKOV *et al.*, 1986; BASILEVSKY *et al.*, 1986; IVANOV *et al.*, 1986; BASILEVSKY & HEAD, 1988)。このような空間分解能でみると、それまで緩やかな平原と考えられていた大陸以外の地域も、複雑な地形を呈していることが分かってきた(第3図)。新たに確認された特徴的

第2図. 火星, 地球, 金星のヒストグラム. GREELEY (1987) による. 比較のため, 火星の場合も示した. 火星でも金星と同様ピークは一つである.

第3図. イシュタル大陸周辺のレーダーイメージ. 中央部(a)がラクシュミ平原. (b)マクスウェル山脈, (c)フレイヤ山脈, (d)アクナ山脈, (e)ダヌ山脈(Danu Montes), (f)と(g)は巨大なカルデラ, コレット(Colette)とサカジャウェア(Sacajawea). 視野のスケールは横方向(経度方向)が 3300 km, 縦方向(緯度方向)が 2000 km. ソ連 Vernadskiy Institute 提供.

な地形として, テッセラ(tessera), リッジベルト(ridge belt), コロナ(corona)がある(BASILEVSKY *et al.*, 1986). これらの分布を第4図に示す(BASILEVSKY, 1989).

イシュタル大陸周辺地域やその南東部には, 広くテッセラ(tessera)と名づけられた地域が分布している. そこにはリッジ(山)とトラフ(谷)が複雑にいりみだれて分布しており, タイルを敷きつめたような形態をしてい

第4図. 金星の北緯30度以北のテクトニックマップ。BASILEVSKY(1989)による。

るので、パーケイターレン(parquet terrain)と呼ばれた。その後、正式な学名としてテッセラと名づけられた。テッセラはギリシア語でタイルを意味している。

金星で最も標高の低いアタランタ平原(Atalanta Planitia)では、第5図に示すように、細長いリッジが南北に密集して走る地域が確認された(BASILEVSKY *et al.*, 1986)。このような地域はリッジベルト(ridge belt)と名づけられている。リッジベルトは長さ数100 km、幅

数10 kmで、広い部分では幅100 km以上に達するところもある。一本のリッジの長さは100~200 kmも連続し、隣り合うリッジ間の距離は10~15 kmである(SUKHANOV & PRONIN, 1989)。

この探査で明らかにされた金星に特徴的な地形として、コロナ(corona)と名づけられた、同心円状の山と谷からなるリング状地形がある(BASILEVSKY *et al.*, 1986)。直径は約200 kmから600 kmで、イシュター

第5図. アタランタ平原のレーダーイメージ. ソ連 Vernadskiy Institute 提供.

ル大陸の周辺には 30 個ほど確認されている。コロナの周辺には縞状を呈するレーダー反射能の明暗が認められ、溶岩流地形であると解釈されている (BASILEVSKY, 1989)。コロナは火山性の巨大地質構造であると思われるが、詳しい実体や成因は今後の興味深い課題である。

3. 地殻の形成年代

金星の表面に衝突クレーターが存在する可能性は、地上からのレーダー観測やパイオニア金星号のレーダー観測によって指摘されていた (例えば, SCHABER & BOYCE, 1977; CAMPBELL & BURNS, 1980; MASURSKY *et al.*, 1980)。ベネラ 15, 16 号の探査によって、金星の表面の 25% を占める北緯 30 度以北の地域には、直径約 10 km 以上のクレーターが 139 個確認された (IVANOV *et al.*, 1986)。最大のクレーターの直径は約 130 km である。クレーターの形態には、おわん型、中央丘型、マルチリング型などがあり、月や水星、火星のクレーターとよく似ている。HARTMANN (1983) のモデルをもとに、クレーターの存在度から年代が推定され、地殻の形成年代として 5~10 億年という年代が得られている (IVANOV *et al.*, 1986)。

金星の重力分布

惑星の内部を探るには、慣性モーメント、重力異常、地震波の伝わり方などを調べる必要がある。地震学的方法は最も有効であるが、金星の場合には重力異常のデータが、我々の手元にある唯一の直接的な情報である。

惑星内部に質量異常があると、その及ぼす引力によって惑星を周回している衛星の軌道運動に乱れが生じる。パイオニア金星号の PVO と地球との通信電波のドップラー効果による周波数変化を利用して、軌道のわずかな乱れを検出し、重力場の決定が行われている。PHILLIPS *et al.* (1979) は、この方法で初めて金星のグローバルな重力異常を明らかにした。

PHILLIPS & LAMBECK (1980) は、金星ではグローバルスケールにおいて、地形と重力に顕著な相関が認められることを指摘した。重力と地形の相関は、その後の研究によってさらに詳しく調べられた (SJOGRÉN *et al.*, 1980, 1983, 1984; REASENBERG *et al.*, 1982; ESPOSITO *et al.*, 1982; BOWIN, 1983; BILLS & KOBRICK, 1985)。第 6 図

第6図. 地形から計算された重力異常と測定された重力異常の比較。(A)地球と火星の場合 (PHILLIPS & SAUNDERS, 1975). 地球では、地形と重力異常に相関は認められない。火星では、相関のある地域(1と4)とない地域(2と3)がある。また、その絶対値の地域性も非常に大きい。1:ヘラスベーズン(Hellas basin)とイシディスベーズン(Isidis basin), 2:クリセ低地(Chryse lowland)とアマゾニス低地(Amazonis lowland), 3:タルシス高地(Tharsis plateau region), 4:クレータの多い平原。(B)金星の場合(SJOGREN *et al.*, 1983). a:ベータ地域, b:アトラ(Atla)地域, c:アフロディーテ大陸, d:テラス(Tellus)地域, e:ベータ地域の北に広がる低地, f:アフロディーテ大陸の北に広がる低地, g:高地, h:経度0度, 緯度0度の周辺の地域。地形と重力異常には相関が認められるが勾配は場所ごとにより変化している。

に地球と金星の標高と重力の関係を示す (PHILLIPS & SAUNDERS, 1975; SJOGREN *et al.*, 1983). 地球では、波長の短いスケール、すなわち局所的または広域的なスケールでは、地形と重力異常に正の相関があるが、グローバルスケールでは相関はみられない。しかし、金星や火星ではグローバルスケールで顕著な正の相関が読み取れる。後述するように、このことは金星のテクトニクスを論じる上で大変重要な意味をもっている。

金星の地質

1. 地質概説

レーダー電波の反射特性からみると、金星は月や火星に比べ反射率が高い (HEAD *et al.*, 1985; GARVIN *et al.*, 1985). このことから、金星の地表の約75%は基盤岩が露出しており、月や火星のように惑星表面全体を覆う厚いレゴリスの層(衝突などによって形成された岩片や砂塵からなる表層)は、存在しないと考えられる。GARVIN *et al.* (1985)によると、レゴリスの層は、金星の平

第7図. K/U-K ダイアグラム. ベネラおよびベガ着陸地点で得られたデータは地球の地殻を構成する岩石の測定値のばらつきの範囲内にプロットされる。

均標高より 2~3 km 高い地域に比較的広く分布しているらしい。この標高に対する大気温度圧力領域で、炭酸塩の分解反応が起こるという推定もあり (McGILL *et al.*, 1983; GARVIN *et al.*, 1985), 金星における化学的風化作用を考察する上で、興味深いデータである。

ベネラ 15, 16 号のレーダー観測によって、レーダー反射能の高いスポット状の地域の分布も詳しく分かってきた(第4図)。このような地域は探査の行われた地域全域に分布しているが、特にイシュタル大陸周辺部やラクシュミ平原のリッジベルト内に集中していることがわかる。レーダー反射能の高い地域は、比較的新しい溶岩の流れた火山だと考えられる。

溶岩流と思われるレーダー反射能の縞状模様を呈する地域、火山体と解釈されているドーム状地形などが、いたるところに分布していることから、金星の地殻のかなりの部分は、火成岩起源であると考えてよいであろう。

2. ベネラおよびベガの着陸地点近傍の地質

ソ連の探査機、ベネラ 8, 9, 10, 13, 14 号およびベガ 1, 2 号は、金星表面に軟着陸し、軌道船からの探査と相補的な探査を行っている。ベネラ 8 号は 1972 年、アフロディーテ大陸の西に着陸した。ベネラ 9, 10 号は 1975 年にベータ地域に着陸した。これらの探査機は、 γ 線スペクトロメーターと密度計を搭載しており、表面物質の密度や放射性元素の存在度を分析した。また、1982 年に金星に到達したベネラ 13, 14 号には蛍光 X 線分析計が搭載されており、表面物質の化学分析を行った。探査機に搭載されたテレビカメラは地表の様子を捉えた。1985 年には、ベガによってアフロディーテ大陸の北東部が探査された。

ベネラ 8, 9, 10 号およびベガ 1, 2 号の γ 線スペクトロメーターによる、放射性同位元素の存在度の推定

第4表. ベネラ 8, 9, 10 号およびベガ 1, 2 号によって測定された放射性元素の存在度(wt. %).

探査機	U ($\times 10^{-4}$)	Th ($\times 10^{-4}$)	K	K/U ($\times 10^4$)
ベネラ 8 号	2.2 ± 0.7	6.5 ± 0.2	4.0 ± 1.2	1.82
ベネラ 9 号	0.60 ± 0.16	3.65 ± 0.42	0.47 ± 0.08	0.78
ベネラ 10 号	0.46 ± 0.26	0.70 ± 0.34	0.30 ± 0.16	0.65
ベガ 1 号	0.64 ± 0.47	1.5 ± 1.2	0.45 ± 0.22	0.70
ベガ 2 号	0.68 ± 0.38	2.0 ± 1.0	0.40 ± 0.20	0.59

第5表. ベネラ 13 号, 14 号の蛍光 X 線分析結果.

	ベネラ 13 号	ベネラ 14 号	ベガ 2 号
SiO ₂	45 ± 3	49 ± 4	45.6 ± 3.2
TiO ₂	1.6 ± 0.4	1.2 ± 0.4	0.2 ± 0.1
Al ₂ O ₃	16 ± 3	18 ± 3	16 ± 1.8
FeO	9 ± 2	9 ± 2	7.7 ± 1.1
MgO	11 ± 6	8 ± 3	11.5 ± 3.7
CaO	7.0 ± 1.0	10 ± 1.2	7.5 ± 0.7
K ₂ O	4.0 ± 0.6	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.08
MnO	0.2 ± 0.1	0.16 ± 0.08	0.14 ± 0.12

値を第4表に示す (SURKOV, 1977, 1983; SURKOV *et al.*, 1987). 第7図にはカリウムとウランの存在度を示した。この図には比較のため、地球の岩石の分析値や炭素質隕石の分析値も示されている。金星の表面物質のウランやカリウムの存在度は、地球の地殻を構成する岩石の存在度と同程度であり、金星の地殻物質もマンタルの分化の産物であることを示唆する。蛍光 X 線分析による、ベネラ 13, 14 号およびベガ 2 号の着陸地点で採取された岩石の主要元素組成を第5表に示す (SURKOV, 1983; SURKOV *et al.*, 1983, 1984, 1986a). このような元素組成をもつ岩石として、玄武岩が挙げられている。

第8図. ベネラ 9, 10, 13, 14 号着陸地点のパノラマ写真. Vernadskiy Institute 提供.

第8図に示すように、ベネラのテレビカメラの捉えた金星の表面の様子は、地上の風景とまったく異なったものであった(FLORENSKY *et al.*, 1977a, b, c, 1983a, b; SURKOV *et al.*, 1984; GARVIN *et al.*, 1984). 金星の表面は岩盤が露出しているか、比較的大きなレギスで覆われている。ベネラ 14 号の捉えた着陸地点近傍の地表は、表面が滑らかで、板が何枚も重なったような岩盤で覆われており、レギスはほとんど存在していない。ベネラ 9 号や 10 号の着陸地点でも、視野の約

50% は基盤岩で覆われている。これらの探査機の着陸地点の表面の様子がよく似ていることは大変興味深い。金星の表面に広く岩盤が露出していることは、レーダーを用いた遠隔探査の結果とほぼ符合している。

金星のテクトニクス

金星の表面地形や重力異常についての情報が増えるたびに、金星のテクトニクスについて多くの研究者によって議論されている(PHILLIPS & MALIN, 1984). 主な問題

点は次のような問いに集約できる。(1)地球の中央海嶺や海溝に対応する地形が金星にもあるか、(2)金星の大陸がどのようなメカニズムで形成されたのか、(3)金星の地殻熱流量の輸送形態はどうであるか、(4)金星の内部構造、ダイナミクスと物質分化の様式はどのようなものであるか。本章ではこれらについて議論しながら、金星のテクトニクスや内部ダイナミクスを考えて行くことにする。

1. プレートテクトニクスはあるか？

1980年代初期のPVOによるグローバルな表面地形の観測データの発表が契機となって、金星にプレートテクトニクスがあるかどうかに関する大論争が展開された(例えば、PHILLIPS, 1983)。

これまでに多くの研究者によって、地球の中央海嶺や海溝に対応するような地形を捜す試みがなされている(ARVIDSON & DAVIES, 1981; KAULA & PHILLIPS, 1981; PHILLIPS *et al.*, 1981; HEAD *et al.*, 1981; SHARPTON & HEAD, 1985, 1986; HEAD & CRUMPLER, 1987; CRUMPLER & HEAD, 1988)。1980年代初頭に得られた地形データからは、中央海嶺や海溝に対応するような地形は見いだせなかったが(ARVIDSON & DAVIES, 1981; SHARPTON & HEAD, 1985)、データの空間分解能がよくなって、アフロディーテ大陸に、地球の海嶺軸にみられるような対称な地形が存在し、発散型プレート境界とよく似ていることが指摘されている(HEAD & CRUMPLER, 1987)。また、アフロディーテ大陸の南部に、地球のアフリカ大陸と南米大陸のように、地形が相補的になっている地域があり、金星にも大陸の移動がある可能性も指摘されている(MOROTO *et al.*, 1989)。KAULA & MURADIAN(1982)やBRASS & HARRISON(1982)は、金星にプレート運動が作用しているにしても、地形からはプレート運動があるかどうかを判定することは困難であろうと論じている。金星の地形が、地球のプレート生成や消滅と同様な機構で形成されているかどうかは、今後の研究に待たねばならない。

ベネラ 15, 16 号の探査で、金星の表面には複雑に入り組んだリッジやトラフからなる地域や褶曲山脈が存在することから、水平圧縮によるテクトニクスや大陸形成が卓越していると推察される。地殻を圧縮変形させた原動力が何であるかは分かっていないが、金星の表面積が一定に保たれている場合には、他の地域にかなり大きな発散性のテクトニックな地域が存在しなくてはならない。SCHABER(1982)、HEAD & CRUMPLER(1987)、KOZAK & SCHABER(1989)は、アフロディーテ大陸、ベータ地域、アタランタ平原のリッジベルトを、発散性のテクト

ニクスが起きている地域であるとしている。以上のような議論から、地球と同様に金星でも水平方向のテクトニックな運動が支配的であるように思われる。

2. 大陸はなぜ存在するか？

惑星の表面に何等かの原因で大きな山や山脈が形成されたとしても、それを維持する力が作用していない限り、内部が塑性流動して平坦になってしまう。今、固体惑星の表面に高い山岳地域や大陸が存在するとすれば、それを維持するメカニズムが存在することを意味する。

地球では、海と陸の標高差は顕著で、大陸は海洋底より数 km も盛り上がっている。氷山が海に浮いているのと同様に、地球の大陸の下には密度の小さい物質がマントル深くまで突き出して、アイソスタシーが成立している。しかし、地球の場合は単純ではない。地球の内部が均質であれば、このような地球の表層の影響を補正した形は、回転平衡の地球楕円体になるはずであるが、実際の地球はそうにはなっていない。地球ではポテンシャル面(ジオイド)の起伏量は高々 100 m 程度であるが、その成因は大問題となっている(CHASE, 1979; ANDERSON, 1982; CAZENAVE *et al.*, 1989)。原因として、地球内部の密度の不均質性や核-マントル境界の起伏などが考えられているが、これらはもとをたどれば、マントル対流などの内部のダイナミックな運動によって生じたものである。

火星のタルシス地域には、いくつかの巨大火山体があって、火星の高地を形成している。火星ではリソスフェアが厚く、流動性に乏しいため、山体の荷重によって生じるリソスフェア内部の応力が、その弾性によって支えられていると考えられる(TURCOTTE *et al.*, 1981; BANERDT *et al.*, 1982)。

金星のヒプソグラムをみると地球のようにバイモーダルな分布がみられない。また、地球ではアイソスタシーが成り立っているため、地形とジオイドに相関がないが、金星ではよい相関がある。この違いは、金星の大陸地殻を維持する機構が、地球とまったく別のものであることを意味する。金星では温度が高いため、火星のように厚い弾性的性質をもつリソスフェアが存在する可能性は小さい。以上のことから、金星の大陸を維持する機構として、内部のダイナミックな運動(マントル対流)が挙げられる。実際、金星の重力異常の補償深度を推定すると、平均 100 km 程度であり、ベータ地域やアフロディーテ大陸では 300 km に達する。このことは、上部マントル全体が大陸の生成と存続に重要な役割を果たしていることを意味している。

(a)イシュタール大陸周辺のテクトニクス

第9図. イシュタル平原北部のレーダーイメージ。CRUMPLER *et al.* (1986)による。上図：ベネラ 15, 16号によって得られたデータによるレーダー画像の等積投影図。下図：アレシボのアンテナで得られたレーダー画像(メルカトル図法)。

イシュタル大陸はオーストラリア大陸と同程度の大陸である。この地域は初期のレーダー観測でも、アクナ、フレイヤなどの山脈に、山脈の走向と平行な帯状のパターンが認められ、大規模な褶曲構造が存在するのではないかと考えられていた(MASURSKY *et al.*, 1980)。1980年代に行われた地上からのレーダー観測によって、この地域の空間分解能が3 kmまで高められ、イシュタル大陸の山脈の走向に沿って、レーダー反射能の高い地域と低い地域が縞状構造をなしていることが確かめられた(CAMPBELL *et al.*, 1983)。縞状構造は長さ数100 kmもあり、10~20 kmごとに帯状に配列している。CAMPBELL *et al.* (1983)や SOLOMON & HEAD(1984)は、これらを、反射能の高い地域を山(背斜)、低い地域を谷(向斜)であるとし、平行に走る多くの褶曲山脈であるという解釈を下している。CRUMPLER *et al.* (1986)は、地上からの新たな観測データとベネラ 15, 16号のレーダー観測のデータの比較検討を行った。第9図に、ベネラ 15, 16号とアレシボのアンテナで得られたラクシュミ平原のレーダーマップの比較を示す。図中

のA, B, Cで示された領域の詳細および地質構造の解釈を第10図に示す。これらの地域には、褶曲、衝上断層、走向ずれ断層と思われるような構造がみられ、彼らは、イシュタル大陸の山脈が造山山脈であり、この地域が圧縮性のテクトニックな場に置かれていることを示した。

マクスウェル山脈の東側の地域の地形や地質構造については、VORDER BRUEGGE & HEAD(1989)によって明らかにされている。標高は西側のマクスウェル山脈で高く(11 km)、東ほど低くなっており(4 km)、重力異常から推定される地殻の厚さも西部で100 km、東部で50 kmとかなり異なっている。マクスウェル山脈の走向に沿って、多数の褶曲軸が走っているが、地殻構造はかなり複雑で、単なる東西圧縮によって形成されたものではないらしい。

BANERDT(1986)は、金星のリソスフェアを弾性球殻とみなし、表面の起伏によって生じる荷重変形と重力異常を考慮して、リソスフェア内の応力場を推定している。それによると、金星の重力(質量)異常の大部分は、アイソスタシーが成り立っているか、マントル対流の上昇流によってダイナミックに支えられていると考えられる。しかし、イシュタル大陸周辺だけは例外で、大陸中心へ向かう圧縮応力場が卓越しており、ここでは厚い地殻の下に密度の大きいマントル物質が存在していることを示唆している。SJOGREN *et al.* (1984)によると、この地域の重力異常の補償深度は 150 ± 30 kmである。

(b) アフロディーテ大陸周辺のテクトニクス

アフロディーテ大陸は、金星の赤道付近に東西に長く伸びた南アメリカ大陸ほどの大きさの大陸である。ここでは、中央部にアルテミス、ディアナ、ダリなどの峡谷が断続的に分布しており、地球の大陸のリフトに対応するものではないかと提案された(SCHABER, 1982)。その後、CRUMPLER *et al.* (1987)はPVOと地上のレーダーシステムで得られたデータを解析し、アフロディーテ大陸の長軸の方向と斜交する何本かの断層または断裂帯によって分断されている可能性を指摘した。CRUMPLER & HEAD(1988)はこの断裂帯の走向に沿う地形断面図が、地球の中央海嶺のように軸対称であることから、断裂帯が地球の海洋底の断裂帯と同様なものであるとみなした(第11図)。最近GRIMM & SOLOMON(1989)は、断裂帯の走向が地球の断裂帯のように、単一回転軸のまわりの剛体回転で説明できるかどうかを検討し、CRUMPLER & HEAD(1988)の提案に対し、否定的な見解を発表している。

一方、MORGAN & PHILLIPS(1983)や KIEFER *et al.* (1986)によると、アフロディーテ大陸はマントル対流

の上昇域にあたり、たくさんのホットスポットの火山活動によって、地形が高まっていると解釈されている。しかし、HERRICK *et al.* (1989)によると、この地域の重力異常は大変複雑であり、アフロディーテ大陸の形成過程は単純ではないらしい。彼らは、PVOの軌道トラックに沿った地形と重力のデータをもとに、エアリーモデルを用いて重力異常の補償深度を計算している。得られた

補償深度は西部(経度 $70 \sim 105^\circ$)では約 50 km と浅く、東部へ向かうほど深くなり、経度 $140 \sim 200^\circ$ あたりでは 200~300 km に達している。東部では地形と重力の相関がよくない。このことから、アフロディーテ大陸は活発なマンテル対流またはプリュームの上昇地域であるとしても、ホットスポットの活動度や活動時代に地域性がある、東部と西部の地殻構造の違いが生じたの

ではないかと考えられる。BANERDT(1986)の解析によると、アフロディーテ大陸のオブダ地域のテクトニックな環境はイシュタル大陸とよく似ている。アフロディーテ大陸がKOZAK & SCHABER(1989)や HEAD & CRUMPLER(1987)の主張するような一連の発散型プレート境界であるとするれば、上記のような大きな補償深度の違いを説明することは困難であろう。今のところマントルプリュームモデルの方が都合がよさそうであるが、簡単なモデルでこの地域の地形や重力異常の複雑さを説明することはできそうにない(SOLOMON & GRIMM, 1988)。

(c) ベータ地域周辺のテクトニクス

ベータ地域は、東西 2000 km, 南北 2500 km の楕円形をした高地で、金星の平均半径よりも 5 km 突出している。初期の地上からの観測では、この地域に 2 つのレーダー反射率の高い領域が確認され、それぞれテア(Theia)とレア(Rhea)という名前がつけられた。その後の観測によって画像の分解能が 10 km 程度まで向上し、これらは巨大な成層火山であると解釈されている(SAUNDERS & MALIN, 1977)。パイオニア金星号のレーダー観測データから、ベータ地域に南北に走る帯状の構造が見いだされた(MASURSKY *et al.*, 1980)。MASURSKY *et al.* (1980)はベータ地域がリフトであり、テアとレアはそれに付随する火山であるという解釈を下している。さらに、MCGILL *et al.* (1981)はこの地域をアフリカのリフトバレーと比較している。

1983 年には地上からの観測によって分解能が 2 km にまで高められ、この地域がリフト系とそれに伴う成層火山からなることが明確となった(CAMPBELL *et al.*, 1984)。また、リフトに付随する帯状のパターンが認められ、正断層系であると考えられている(CAMPBELL *et al.*, 1984)。同様な構造をした地域は、アフロディーテ大陸のダリ峡谷、ディアナ峡谷などでも見いだされており、SCHABER(1982)はこのような峡谷が全球的に帯状に分布することを指摘し、金星にも地球のそれに匹敵する規模のグローバルなリフトシステムがあるのではないかと論じている。

ベータ地域は金星で最も重力異常が大きい地域としても注目されている(SJOGREN *et al.*, 1980, 1983)。この地域の重力異常は、ESPOSITO *et al.* (1982)、GOLDBERG & REASENBERG(1985)や REASENBERG *et al.* (1982)によって詳しく解析されている。それらによると、重力異常の補償深度は 300 km 以上もあり、マントルプリュームの上昇域に相当すると考えられる。これは地形から導かれた解釈と一致している。

(d) 褶曲構造の成因とリソスフェアの力学的性質

レーダー観測で認められた金星のテクトニックな地形として、(1)ベータ地域のリフトと断層系、(2)イシュタル大陸周辺の帯状の褶曲構造、(3)アタランタ平原のリッジベルトがある。このような地質構造は金星のテクトニックな変動の産物であり、その成因や変形を生じさせた力の性質を探る意義は大きい。また、変形構造の形態は、地殻やリソスフェアのレオロジカルな性質を反映しており、金星の表層の力学的状態を探る上で重要な情報を含んでいる。

金星のリソスフェアの変形モデルとして最も単純なものは、弾性や粘弾性の平板の圧縮による褶曲、引っ張りによる地塁、地溝の形成モデル(例えば、BIOT, 1961)が挙げられる。SOLOMON & HEAD(1984)は、このようなモデルを用いて金星の縞状地形の解析を行っている。このモデルで間隔 10~20 km の縞状パターンを生じさせるには、弾性的な振舞いをするリソスフェアの厚さが数 km でなければならない。変形に必要な応力は 100~200 MPa とかなり大きいことになる。

ZUBER(1987)や BANERDT & GOLOMBEK(1988)は、金星の内部構造モデルとして厚さ 10 km の玄武岩質層とその下のカンラン岩質マントルを仮定し、そのレオロジカルな層構造を考慮して、リソスフェアの変形を解析した。この場合、流動性に富む下部地殻が、相対的に変形しにくい上部地殻とマントルにはさまれたサンドイッチ構造をとると期待される。このようなリソスフェアが変形すると、観測されているような帯状の褶曲やリフトが形成される。これらのモデルによると、弾性的な挙動をする部分は表層数 km のみである。変形を生じさせるのに必要な応力は、およそ 500 MPa であると推定されている。今のところ金星のリソスフェアの構造は明らかにされていないが、どのモデルでも表層の弾性的性質をもつ層の厚さが数 km 程度であることは注目に値する。

一方、金星のリソスフェアを変形させる力が何によって引き起こされるかを、変形構造から明らかにすることは困難である。金星の場合には、地球と同様に水平方向の引っ張り力や圧縮力が卓越していることは大変示唆に富む。水平方向の変形を起こさせる原動力としては、マントル対流による引きずりや大陸斜面における上部リソスフェアの重力不安定が挙げられる(BASILEVSKY *et al.*, 1986)。PHILLIPS(1986)によると、マントル対流の引きずり応力によってリソスフェアの上部を変形させることができるか否かは、リソスフェアの下に粘性の低い層が存在するかどうか依存する。このような層が存在しなければ、対流運動に伴って 100 MPa 程度のせん断応力を上部地殻に作用させることが可能であろう。また、金星の

リソスフェアが ZUBER (1987) や BANERDT & GOLOMBEK (1988) のようなレオロジカルな構造をしている場合、大陸斜面では、流動しやすい下部地殻がすべり面となつて上部地殻に地滑り性の変形が生じうるであろう (SMREKAR & PHILLIPS, 1988)。

実際の金星では、どのようなメカニズムで変形が生じたかは、現段階では明らかではない。マンテル対流の引きずり説では、対流運動の形態を反映して、地域によって変形構造が異なることが期待される。また、上部リソスフェアの不安定すべり説では、大陸斜面に沿って褶曲地域が存在することが期待される。金星リソスフェアの変形様式に地域性がみられることから、リソスフェアの力学的性質や熱的構造に地域性が存在する可能性がある。

3. 熱輸送形態とテクトニクス

惑星のテクトニクスは、惑星内部で発生した熱を地表に輸送する過程を反映している (HEAD & SOLOMON, 1981; SOLOMON & HEAD, 1982; 藤井, 1986)。これまでの惑星探査によれば、地球型惑星のリソスフェアにおける熱輸送の形態は、(1) リソスフェアの熱伝導、(2) 火山活動に伴う内部からの高温物質の直接噴出、という 2 つのタイプに分けることができる。後者は火山活動の形態によって、ホットスポットでの火山活動と、プレートテクトニクスに伴う海嶺でのプレート生成に分けられる。月や火星、水星では、リソスフェアにおける熱伝導によって熱が地表へ運ばれている。木星の衛星イオでは、活発な火山活動によって熱いマグマが地表へ流出することで熱が輸送されている (川上, 1989)。地球ではプレートテクトニクスによる、プレート生成、移動、沈み込みが熱輸送の 70% を担っている (SCLATER *et al.*, 1980)。

金星に地球と同じだけ熱源が存在しているとなると、期待される表面の熱流量は 66 mW/m^2 と推定される (TURCOTTE, 1989)。金星の熱流量がリソスフェアの熱伝導で運ばれているとすると、熱輸送量 (q_c) は

$$q_c = k \Delta T / H$$

で与えられる。ここで $k (= 3 \text{ mW/m K})$ は熱伝導率、 $\Delta T (= 900 \text{ K})$ は地表とリソスフェア下部の温度差、 H はリソスフェアの厚さである。 $q_c = 66 \text{ mW/m}^2$ とすると $H \sim 40 \text{ km}$ となる。この値は、重力異常から推定されるリソスフェアの厚さよりかなり小さい。このことは、イオと同様に金星の熱輸送のかなりの部分が、火山活動によって運ばれていることを示唆している。逆に、リソスフェアの厚さを、重力異常から推定されている値 ($H \sim 100 \text{ km}$) にすると、火山活動による熱流量は全体の 90% 以上になる。

内部に蓄積された熱が高温のマグマが地表に流出することで運ばれている場合、その熱流量 (q_{ad}) は

$$q_{ad} = \rho (C_p \Delta T + L) dl/dt$$

で与えられる。ここで、 ρ はマグマの密度、 C_p は比熱、 ΔT はマグマ源と地表との温度差、 L は融解の潜熱、 dl/dt は表面の更新速度 (cm/年) である。金星の半径を R とすると、一年当りのマグマの噴出量は $V = 4\pi R^2 dl/dt$ で与えられる。今、金星の熱流量から V を推定すると、 $V = 200 \text{ km}^3/\text{年}$ となる (TURCOTTE, 1989)。金星やイオのように、内部の熱を多くのホットスポットにおける火山活動によって輸送している天体のテクトニクスは、ホットスポットテクトニクス、ヒートパイプテクトニクスと呼ばれている。

ホットスポットモデルでは、物質移動サイクルは次のように考えられている。まず、金星の深部で発生した玄武岩質マグマが、ホットスポットから地表へ流出していく。ホットスポットでの火山活動が地質時代を通して継続すると、金星の玄武岩質の地殻が次第に厚くなる。しかし、金星の表面温度が高いため、地球のようなプレートの沈み込みは考えにくい (ANDERSON, 1981)。下部地殻まで埋没した玄武岩質地殻は、やがてエクロジャイトへ相転移して、まわりのマンテルに比べて密度が大きくなるであろう。この部分が地殻からはがれてマンテル深部へ沈んでいく。金星では表面温度が高いため、玄武岩-エクロジャイトの相転移の深さは $60 \sim 80 \text{ km}$ であると推定されている (GREEN & RINGWOOD, 1972)。

アフロディーテ大陸の東部やベータ地域は、マンテル対流の上昇流域に対応しており、活発なホットスポットの活動によって、新しい地殻が生成されている地域であろう。一方、地殻が厚く圧縮応力が卓越しているイシュタール大陸では、下部地殻がエクロジャイト相に転移しており、大規模にはがれて沈み込んでいるのではないだろうか。玄武岩-エクロジャイト相転移面が金星の地殻とマンテルの境界であるとなると、地殻の厚さは $60 \sim 80 \text{ km}$ と推定される。

4. マンテル対流

地球のプレートテクトニクスの原動力は、マンテル対流によって稼働されており、中央海嶺でのプレートの生成や沈み込み帯での潜り込み自体が、対流現象の一環であると考えられている。地球の長波長のジオイドの起伏、ホットスポットでの火山活動、地球内部の地震波速度の不均質性や異方性の原因は、マンテル対流に求められている (例えば、HAGER *et al.*, 1985; CAZENAVE *et al.*, 1989; WOODHOUSE & DZIEWONSKI, 1989; 川上, 1984)。逆に、惑星内部の不均質性から、マンテル対流の運動形

態について探ることができる(例えば, TANIMOTO & ANDERSON, 1984; 本田, 1988).

地球のジオイドの起伏や内部の不均質性には, 球面調和展開係数*の2次の波長が卓越しており(例えば, CHASE, 1979; MASTERS *et al.*, 1982), マントル対流の流れのパターンを反映しているとされている. 金星では, 地球と異なり長波長の地形と重力異常の相関が高く, 球面調和展開係数でみると, 両者のスペクトルは大きく異なっている(KAULA, 1984). 金星の長波長の重力異常やジオイド起伏の性質は, 地球のものとは大きく異なっているものの, その成因は内部のダイナミクスを密接に反映したものであろう.

金星の重力異常や地形は, 3次以上の球面調和展開係数が大きく, 2次の係数は小さくなっている(KIEFER *et al.*, 1986). 特に2次の係数は, グローバルな運動形態を反映していると考えられるので, この違いは重大な意味をもっている. 金星で3次以上の球面調和展開係数が卓越していることは, 大陸の分布形態に起因している. 最も大きな大陸であるアフロディーテ大陸とイシュタル大陸は軸対称に分布しているわけでも, 片側の半球に集中しているわけでもない. スペクトルの特徴はこのような大陸の分布を反映したものであるが, そこでは, マントルプルームの上昇域や下降域に対応していると考えられている(BANERDT, 1986). 金星の対流の上昇流として, 規模の小さいプルームが数多く存在している可能性は, 2次の係数が高次の係数に比べ著しく小さいことから示唆される.

最近, 計算機の性能および数値計算の技術が進歩し, 地球(惑星)マントルの3次元球殻対流計算が行われるようになった(BERCOVICI *et al.*, 1989 a, b). 対流の3次元の形態は, 球面効果と内部の熱源分布によって決まっている. BERCOVICI らの計算によると, 地球のプレートテクトニクスの形態的特徴は, マントルの対流運動によって形づけられている. また, 内部に熱源がたくさんあるほど, マントルプルームの上昇流域がたくさん発生する傾向があり, マントル内部に熱源の80%が存在することと, 地球にホットスポットが存在することとは無関係ではない. 金星には地球よりたくさんホットスポットが分布していると考えられるので, 金星マントルには, 地球マントル以上に放射性元素が存在していることが考えられる.

* 時間軸上の変動は, フーリエ級数によって, 異なる周期をもつ正弦波の和に分解することができる. 同様に, 標高や重力ポテンシャルのような球面上の関数は, 異なる波長をもつ球面調和関数(Spherical harmonic function)の和に分解できる. この時の展開係数を球面調和展開係数と言う. その値はフーリエ級数展開の場合と同様の意味をもつと考えてよい.

地球では, U, Th, Kなどのインコパチブル元素は花崗岩質の上部地殻にきわめて濃集している. 金星では, 花崗岩質地殻は存在しないことや, ベネラやベガの着陸地点の岩石の放射性示素の存在度からみて, 金星マントルにはかなり放射性元素が分布していると推察される. 放射性元素の存在度からみても, 金星にホットスポットがたくさんあることが期待され, BERCOVICI *et al.* (1989a, b)の結果と符合しているように見える.

プレートテクトニクスの比較惑星学的意義

1960年代に確立されたプレートテクトニクスによって, 地球上のさまざまな現象が統一的に理解できるようになり, プレートテクトニクスのパラダイムにそって地震や火山の研究をはじめとし, 地殻変動論, 海洋底地質学, 造山論などの発展は著しいものがある. 最近では, VLBI(Very Long Baseline Interferometry)などの宇宙技術を導入して, プレート運動の精密な計測が行われ, プレートテクトニクスの検証と精密化が進められている. このように, 近年, 地球のテクトニクスの現象論的な理解はかなり進んできているが, プレート運動の原動力や, マントル対流のような運動学的な側面や, なぜ地球ではプレートテクトニクスが作用しているのかといった, 根本的な問題に対する理解は依然として十分とは言えない.

一方, 近年惑星形成論が急激に進歩し, 原始太陽系星雲内で惑星がどのようにして形成されたかに関する理解が進んだ. 微惑星の集積で成長した地球の初期状態や, 初期の大規模な分化に関する研究も進み, どのような筋道で地球が進化してきたかを調べるのが, 重要な研究テーマになりつつある. プレートテクトニクスは, 過去2億年の固体地球の運動モデルとしては十分成功をおさめているが, それ以前にも現在と同様なプレートテクトニクスが作用していたか否かについては, 推察の域を出ない. これは, 地球史の過去に遡るほど, プレーートの幾何学的形態や運動形態を読み出すための地質学的な記録が乏しくなることによる. 特に, 25億年以前の始生代の岩石や地層が分布する地域はきわめて限られており, 40億年より古い地殻は発見されていない(例えば, KRÖNER, 1981; KAWAKAMI & MIZUTANI, 1984). 従って, 地球の初期の状態やテクトニクスを調べるためには, 他の惑星に記録されている太陽系の初期状態や, プレートテクトニクスの比較惑星学的検討が, 大きな意味をもつことになる.

金星は地球とほぼ同様な大きさをもっているため, 両者のテクトニクスの違いを比較することの意義はきわめ

て高い。また、現在の金星は初期の地球の状態といくつか類似した側面をもっている。地球のテクトニクスの理解において、金星のテクトニクスからもたらされる重要な三つの視点について指摘する。

1. 「変形するプレート観」へ向けて

最近、地球のテクトニクスの研究において、「剛体的なプレート観」から「変形するプレート観」への転換が指摘されている。従来の研究では、プレートは剛体的な振舞いをすると仮定されてきた。最近では、リフトの形成や沈み込み帯でのプレートの変形やテレーンのアクリーションなど、大陸リソスフェアのレオロジカルな性質を考慮した、プレートの変形過程の研究が注目されるようになっている(MOLNAR, 1988; 嶋本, 1989; 竹下・山路, 1989)。

金星の表面には、リフトや褶曲が普遍的に認められ、リソスフェアの変形過程の研究の宝庫とみなすことができる。最近、HOFFMAN & RANALLI(1988)は、始生代の海洋地殻のレオロジカルなモデルを考察している。彼らの提案した、始生代の海洋地殻のレオロジカルな構造から期待されるリソスフェアの変形モデル(flake tectonics model)は、金星にもあてはめられるという指摘があり、注目に値する(KOZAK & SCHABER, 1989)。金星の地殻の変形構造がリソスフェアの塑性変形の産物であるとすれば、変形するプレート論に対する天然の実験結果として、貴重な研究材料を提供するはずである。

2. 初期地球のテクトニクス

初期地球において、現在と同様なプレートテクトニクスが作用していたかどうかは、長い間論争になっている(例えば、KRÖNER, 1981)。嶋本(1989)はプレートテクトニクス成立のためのレオロジカルな要因として、(1)流動的アセノスフェア、(2)大きい摩擦強度、(3)非常に小さい海嶺の引っ張り強度、(4)沈み込み境界の軟化、(5)比較的厚いリソスフェア、を挙げている。このうちいずれが欠けても、理想的なプレートテクトニクスは作用しないと考えられている。初期地球のテクトニクスが現在のプレートテクトニクスと異なると主張する根拠には、次のようなものがある。初期の地球にはU、Th、Kなどの熱源に加え、集積時に内部に大量の熱が蓄積されたため、内部の温度は現在よりも高かったことになる。内部の温度が高いとリソスフェアは薄くなる。従って、現在の地球のような、負の浮力が働く剛体的なリソスフェアは形成されないと考えられる。このような状況は金星の状況と類似している。

WATSON(1978)によれば、始生代の高変成度地域の変成度から推定されるリソスフェアの温度勾配は、現在の

地球のリソスフェアの値と同程度である。このことは、初期地球では始生代の大陸リソスフェアの伝導による熱輸送が、主要な熱輸送過程ではなかったことを示唆している。WATSON(1978)の得た結果は、地球の歴史の初期ほど熱源がたくさんあったことや、高温の超塩基性火成岩であるコマチアイトの噴出(GREEN, 1975)と矛盾しているように見える。しかし、イオや金星のように、高い熱輸送率がホットスポットなどでの活発なマグマの噴出で賄われている場合、厚いリソスフェアの存在と高熱流量は矛盾する事柄ではない(KAWAKAMI & MIZUTANI, 1984; 川上, 1989)。初期地球には、現在の金星のようにたくさんのホットスポットが存在したのではないだろうか？

初期地球のテクトニクスを考える場合の最大の問題は、海洋リソスフェアと大陸リソスフェアの分化がいつ生じたかである。もし、初期にはこの分化が生じていなかったとすれば、コマチアイト、高変成度地域や、始生代に安定化した大陸リソスフェア(BOYD *et al.*, 1985; TAKAHASHI, 1989)は、当時の地球マントルと地殻を代表していると考えられる。すでに海洋リソスフェアと大陸リソスフェアの分化が進んでいたとすれば、始生代の地殻やリソスフェアの生成環境を明確にする必要がある。いずれにしても、海洋リソスフェアと大陸リソスフェアの分化過程は、今後の初期地球の研究の最重点課題であろう。

3. 比較惑星テクトニクス

これまでの地球型惑星の探査によって、惑星の表面地形や重力異常、熱輸送形態などの知見が急速に増えてきている。金星ではホットスポットによる熱輸送が卓越している可能性が高いという点で、木星の衛星イオと類似点が見いだせる。一方、水平方向の引っ張りや圧縮によるリソスフェアの変形が顕著である点では、地球とよく似ている。地球型惑星の代表である、金星、地球、火星で、テクトニックな運動や熱輸送形態、大陸の形成過程とその維持機構がまったく異なっていることは、大変興味深い。金星と地球のような大きな固体惑星では、そのテクトニクスの比較検討はまだ始まったばかりである。わが国でも近い将来、飛翔体(ロケット)による惑星探査が行えるようになるので、この分野が今後急速に発展することが期待される。地質科学のビッグプロジェクトとして学術深層ボーリングが注目されている(新妻, 1989)。21世紀に向けてさらに長期的な展望にたてば、飛翔体を用いた惑星地質探査も、地質科学のビッグプロジェクトとしてクローズアップされることが期待される。

謝辞 ブラウン大学 J. W. HEAD 教授とアリゾナ州立大

学 R. GREELEY 教授には、金星のレーダー画像を提供していただくと同時に多大なご支援を受けた。惑星地質研究会の小森長生氏には NASA およびソ連の探査で得られた写真を入手することで協力していただいた。愛媛大学の竹下 徹博士には、初期の粗稿を読んでいただき、有益なコメントをいただいた。これらの方々に感謝の意を表する。

文 献

- ANDERSON, D. L., 1981 : Plate tectonics on Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 309-311.
- , 1982 : Hotspots, polar wander, Mesozoic convection and the geoid. *Nature*, **297**, 391-393.
- ARVIDSON, R. E. and DAVIES, G. F., 1981 : Effects of lateral resolution on the identification of volcanotectonic provinces on Earth and Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 741-744.
- BANERDT, W. B., 1986 : Support of long-wavelength loads on Venus and implications for internal structure. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 403-419.
- and GOLOMBEK, M. P., 1988 : Deformational models of rifting and folding on Venus. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 4759-4772.
- , PHILLIPS, R. J., SLEEP, N. H. and SAUNDERS, R. S., 1982 : Thick shell tectonics on one-plate planets : applications to Mars. *Jour. Geophys. Res.*, **87**, 9723-9733.
- BARSUKOV, V. L., BASILEVSKY, A. T., BURBA, G. A., BOBINNA, N. N., KRYUCHKOV, V. P., KUZUMIN, R. O., NIKOLAEVA, O. V., PRONIN, A. A., RONCA, L. B., CHERNAYA, I. M., SHASHKINA, V. P., GARANIN, A. V., KUSHKY, E. R., MARKOV, M. S., SUKHANOV, A. L., KOTELNIKOV, V. A., RZHIGA, O. N., PETROV, G. M., ALEXANDROV, YU. N., SIDORENKO, A. I., BOGOMOLOV, A. F., SKRYPNIK, G. I., BERGMAN, M. YU., KUDRIN, L. V., BOKSHEIN, I. M., KRONROD, M. A., CHOCHIA, P. A., TYUFLIN, YU. S., KADNICHANSKY, S. A. and AKIM, E. L., 1986 : The geology and geomorphology of the Venus surface as revealed by the radar images obtained by Veneras 15 and 16. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, D378-D398.
- BASILEVSKY, A. T., 1989 : The planet next door. *Sky & Telescope*, **77**, 360-368.
- and HEAD, J. W., 1988 : The geology of Venus. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **16**, 295-317.
- , PRONIN, A. A., RONCA, L. B. and KRYUCHKOV, V. P., 1986 : Styles of tectonic deformation on Venus : analysis of Venera 15 and 16 data. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, D399-D411.
- BERCOVICI, D., SCHUBERT, G. and GLATZMAIER, G. A., 1989a : Three-dimensional spherical models of convection in the Earth's mantle. *Science*, **244**, 950-955.
- , ——— and ———, 1989b : Influence of heating mode on three dimensional mantle convection. *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 617-620.
- BILLS, B. G. and KOBRICK, M., 1985 : Venus topography : a harmonic analysis. *Jour. Geophys. Res.*, **90**, 827-836.
- BIOT, M. A., 1961 : Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **72**, 1595-1620.
- BOWIN, C., 1983 : Gravity, topography, and crustal evolution of Venus. *Icarus*, **56**, 345-371.
- BOYD, F. R., GURNEY, J. J. and RICHARDSON, S. H., 1985 : Evidence for a 150-200 km thick Archean lithosphere from diamond inclusion thermobarometry. *Nature*, **315**, 387-389.
- BRASS, G. W. and HARRISON, C. G. A., 1982 : On the possibility of plate tectonics on Venus. *Icarus*, **49**, 86-96.
- CAMPBELL, D. B. and BURNS, B. A., 1980 : Earth-based radar imagery of Venus. *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 8271-8281.
- , ——— and BORIAKOFF, V., 1979 : Venus : further evidence of impact cratering and tectonic activity from radar observations. *Science*, **204**, 1424-1427.
- , DYCE, R. B. and PETTENGILL, G. H., 1976 : New radar image of Venus. *Science*, **193**, 1123-1124.
- , HEAD, J. W., HARMON, J. K., and HINE, A. A., 1983 : Venus : identification of banded terrain in the mountains of Ishtal Terra. *Science*, **221**, 644-647.
- , ———, ———, and HINE, A. A., 1984 : Venus : volcanism and rift formation in Beta Regio. *Science*, **226**, 167-170.
- CAZENAVE, A., SOURIAU, A. and DOMINH, K., 1989 : Global coupling of Earth surface topography with hotspots, geoid and mantle heterogeneities. *Nature*, **340**, 54-57.
- CHASE, C. G., 1979 : Subduction, the geoid, and lower mantle convection. *Nature*, **282**, 464-468.
- COLIN, L., 1980 : The Pioneer Venus program. *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 7575-7598.
- CRUMPLER, L. S. and HEAD, J. W., 1988 : Bilateral topographic symmetry patterns across Aphrodite Terra, Venus. *Jour. Geophys. Res.*, **93**, 301-312.
- , ——— and CAMPBELL, D. B., 1986 : Orogenic belts on Venus. *Geology*, **14**, 1031-1034.
- , ——— and HARMON, J. K., 1987 : Regional linear cross-strike discontinuities in western Aphrodite Terra, Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 607-610.
- ESPOSITO, P. B., SJOGREN, W. L., MOTTINGER, N. A., BILLS, B. G., and ABBOTT, E., 1982 : Venus gravity : analysis of Beta Regio. *Icarus*, **51**, 448-459.
- FLORENSKY, C. P., BASILEVSKY, A. T., BURBA, G. A., NIKOLAEVA, O. V., PRONIN, A. A., VOLKOV, V. P. and RONCA, L. B., 1977b : First panoramas of the venusian surface. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, **8th**, 2655-2664.
- , ———, ———, ———, ———, SELIVANOV, A. S., NARAYEVA, M. K., PANFILOV, A. S., and CHEMODANOV, V. P., 1983b : Panorama of Venera 9 and 10 landing sites. In *Venus* (HUNTEN, D. M., COLIN, L., DONAHUE, T. M., MOROZ, V. I., eds.), 137-153, Univ. Arizona Press, Tucson.
- , ———, KRYUCHKOV, V. P., KUSMIN, R. O., NIKOLAEVA, O. V., PRONIN, A. A., CHERNAYA, I. M., TYUFLIN, YU. S., SELIVANOV, A. S., NARAYEVA, M. K., RONCA, L. B., 1983a : Venera 13 and Venera 14 : sedimentary rocks on Venus? *Science*, **221**, 57-58.
- , RONCA, L. B. and BASILEVSKY, A. T., 1977a : Geomorphic degradations on the surface of Venus : an analysis of Venera 9 and Venera 10 data. *Science*, **196**, 869-871.
- , ———, BURBA, G. A., NIKOLAEVA, O. V., PRONIN, A. A., TRAKHTMAN, A. M., VOLKOV, V. P. and ZAZETSKY, V. V., 1977c : The surface of Venus as re-

- vealed by Soviet Venera 9 and 10. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **88**, 1537-1545.
- 藤井直之, 1986: 他の惑星の火山現象. 火山 2, **30**, 特別号, S209-S219.
- GARVIN, J. B., HEAD, J. W., PETTENGILL, G. H. and ZISK, S. H., 1985: Venus global reflectivity and correlations with elevation. *Jour. Geophys. Res.*, **90**, 6859-6871.
- , ZUBER, M. T. and HELFENSTEIN, P., 1984: Venus: the nature of the surface from Venera panoramas. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 3381-3399.
- GOLDBERG, Z. M. and REASENBERG, R. D., 1985: Venus gravity west of Beta Regio. *Icarus*, **62**, 129-142.
- GOLDSTEIN, R. M., 1965: Preliminary Venus radar results. *Radio Sci.*, **69D**, 1623-1625.
- , GREEN, R. R. and RUMSEY, H. C., 1976: Venus radar images. *Jour. Geophys. Res.*, **81**, 4807-4817.
- , and ———, 1978: Venus radar brightness and altitude images. *Icarus*, **36**, 334-352.
- GREELEY, R., 1987: *Planetary landscapes*. 275 p., Allen & Unwin, Boston.
- GREEN, D. H., 1975: Genesis of Archaean peridotitic magmas and constraints on Archaean geothermal gradients and tectonics. *Geology*, **3**, 15-18.
- and RINGWOOD, A. E., 1972: A comparison of recent experimental data on the gabbro-garnet granulite-eclogite transition. *Jour. Geol.*, **80**, 277-288.
- GRIMM, R. E. and SOLOMON, S. C., 1989: Tests of crustal divergence models for Aphrodite Terra, Venus. *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 12, 103-12, 131.
- HAGER, B. H., CLAYTON, R. W., RICHARDS, M. A., COMER, R. P. and DZIEWONSKI, A. M., 1985: Lower mantle heterogeneity, dynamic topography, and the geoid, *Nature*, **313**, 541-545.
- HAGFORS, T., 1970: Remote probing of the moon by infrared and microwave emissions and by radar. *Radio Sci.*, **5**, 219-227.
- HARTMANN, W. K., 1983: *Moons and planets*. 509 p., Wadsworth, Belmont.
- HEAD, J. W., and CRUMPLER, L. S., 1987: Evidence for divergent plate-boundary characteristics and crustal spreading on Venus. *Science*, **238**, 1380-1385.
- , PETERFREUND, A. R., GARVIN, J. B. and ZISK, S. H., 1985: Surface characteristics of Venus derived from Pioneer Venus altimetry, roughness and reflectivity measurements. *Jour. Geophys. Res.*, **90**, 6873-6885.
- and SOLOMON, S. C., 1981: Tectonic evolution of the terrestrial planets. *Science*, **213**, 62-76.
- , YUTER, S. E. and SOLOMON, S. C., 1981: Topography of Venus and Earth: a test for the presence of plate tectonics. *Am. Sci.*, **69**, 614-623.
- HERRICK, R. R., BILLS, B. G. and HALL, S. A., 1989: Variations in effective compensation depth across Aphrodite Terra, Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 543-546.
- HOFFMAN, P. F. and RANALLI, G., 1988: Archaean oceanic flake tectonics. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 1077-1088.
- 本田 了, 1988: マントル対流論の現状. 地震 2, **41**, 271-282.
- IVANOV, B. A., BASILEVSKY, T., KRYUCHKOV, V. P., and CHERNAYA, I. M., 1986: Impact craters of Venus: analysis of Venera 15 and 16 data. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, D413-430.
- KAULA, W. M., 1984: Tectonic contrasts between Venus and the Earth. *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 35-37.
- and MURADIAN, L. M., 1982: Could plate tectonics on Venus be concealed by volcanic deposits? *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 1021-1024.
- and PHILLIPS, R. J., 1981: Quantitative tests for plate tectonics on Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 1187-1190.
- 川上紳一, 1984: マントルの非均質性と地球の進化. 科学, **54**, 93-103.
- , 1989: 木星の衛星イオの潮汐加熱, 内部構造, 火山活動. 火山 2, **34**, 213-229.
- KAWAKAMI, S. and MIZUTANI, H., 1984: Geology and geochemistry of Archaean crust: implications for the early history of the Earth. *J. Earth Sci. Nagoya Univ.*, **32**, 49-99.
- KIEFER, W. S., RICHARDS, M. A., HAGER, B. H., and BILLS, B. G., 1986: A dynamic model of Venus's gravity field. *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 14-17.
- KOZAK, R. C. and SCHABER, G. G., 1989: New evidence for global tectonic zones on Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 175-178.
- KRÖNER, A., 1981: *Precambrian Plate Tectonics*. 781 p., Elsevier, New York.
- MASTERS, G., JORDAN, T. H., SILVER, P. G. and GILBERT, F., 1982: Aspherical Earth structure from fundamental spheroidal-mode data. *Nature*, **298**, 609-613.
- MASURSKY, H., ELIASON, E., FORD, P. G., MCGILL, G. E., PETTENGILL, G. H., SCHABER, G. G. and SCHUBERT, G., 1980: Pioneer Venus radar results: geology from images and altimetry. *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 8232-8260.
- MCGILL, G. E., STEENSTRUP, S. J., BARTON, C. and FORD, P. G., 1981: Continental rifting and the origin of Beta Regio, Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 737-740.
- , WARNER, J. L., MALIN, M. C., ARVIDSON, R. E., ELIASON, E., NOZETTE, S. and REASENBERG, R. D., 1983: Topography, surface properties, and tectonic evolution. In *Venus* (HUNTEN, D. M., COLIN, L., DONAHUE, T. M., MOROZ, V. I., eds.), 69-130, Univ. Arizona Press, Tucson.
- MOLNAR, P., 1988: Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. *Nature*, **335**, 131-137.
- MORGAN, P. and PHILLIPS, R. J., 1983: Hot spot heat transfer: its application to Venus and implications to Venus and Earth. *Jour. Geophys. Res.*, **88**, 8305-8317.
- MOROTO, R., MIZUTANI, H. and FUJIMURA, A., 1989: Continental drift on Venus? *Proc. 22th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 152-158.
- MOROZ, V. I., 1981: The atmosphere of Venus. *Space Sci. Rev.*, **29**, 3-127.
- 新妻信明, 1989: 地質科学の将来と陸上學術ボーリング—學術ボーリングは地質科学のビッグプロジェクトたりうるか—. 地質雑, **95**, 603-614.
- PETTENGILL, G. H., ELIASON, E., FORD, P. G., LORIOT, G. B., MASURSKY, H. and MCGILL, G. E., 1980: Pioneer Venus radar results: altimetry and surface properties. *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 8261-8270.
- , FORD, P. G. and NOZETTE, S., 1982: Global surface radar reflectivity. *Science*, **217**, 640-642.
- PHILLIPS, R. J., 1983: Plate tectonics on Venus? *Nature*, **302**, 655-656.

- , 1986 : A mechanism for tectonic deformation on Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1141-1144.
- , KAULA, W. M., MCGILL, G. E. and MALIN, M. C., 1981 : Tectonics and evolution of Venus. *Science*, **212**, 879-887.
- and LAMBECK, K., 1980 : Gravity fields of the terrestrial planets : long-wave length anomalies and tectonics. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **18**, 27-76.
- and MALIN, M. C., 1983 : The interior of Venus and tectonic implications. In *Venus* (HUNTEN, D. M., COLIN, L., DONAHUE, T. M., MOROZ, V. I., eds.). 159-214, Univ. Arizona Press, Tucson.
- and ———, 1984 : Tectonics on Venus. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **12**, 411-433.
- and SAUNDERS, R. S., 1975 : The isostatic state of Martian topography. *Jour. Geophys. Res.*, **80**, 2893-2897.
- , SJOGREN, W. L., ABBOTT, E. A., SMITH, J. C., WIMBERLY, R. N. and WAGNER, C. A., 1979 : Gravity field of Venus : a preliminary analysis. *Science*, **205**, 93-96.
- REASENBERG, R. D., GOLDBERG, Z. M. and SHAPIRO, I. I., 1982 : Venus : comparison of gravity and topography in the vicinity of Beta Regio. *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 637-640.
- RUMSEY, H. C., MORRIS, G. A., GREEN, R. R. and GOLDSTEIN, R. M., 1974 : A radar brightness and altitude image of a portion of Venus. *Icarus*, **23**, 1-7.
- SAUNDERS, R. S. and MALIN, M. C., 1977 : Geologic interpretation of new observations of the surface of Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 547-550.
- SCHABER, G. G., 1982 : Venus : limited extension and volcanism along zones of lithospheric weakness. *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 499-502.
- and BOYCE, J. M., 1977 : Probable distribution of large impact basins on Venus : comparison with Mercury, and the moon. In *Impact and explosion cratering* (RODDY, D. J., PEPIN, R. O. and MERRILL, R. B., eds.), 603-612, Pergamon, New York.
- SCLATER, J. G., JAUPART, C. and CARLSON, D., 1980 : The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **18**, 269-311.
- SHARPTON, V. L. and HEAD, J. W., 1985 : Analysis of regional slope characteristics on Venus and Earth. *Jour. Geophys. Res.*, **90**, 3733-3740.
- and ———, 1986 : A comparison of the regional slope characteristics of Venus and Earth : implications for geologic processes on Venus. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 7545-7554.
- 嶋本利彦, 1989 : 岩石のレオロジーとプレートテクトニクス. 科学, **59**, 170-181.
- 清水幹夫(訳), 1986 : 金星・地球・火星. 図説われらの太陽系 4, 78 p., 朝倉書店(MOORE, P., HUNT, G., NICOLSON, I., CATTERMOLLE, P., 1983 : *The atlas of the solar system*, Mitchell Beazley, London).
- SJOGREN, W. L., BILLS, B. G., BIRKELAND, P. W., ESPOSITO, P. B., KONOPLIV, A. R., MOTTINGER, N. A. and RITKE, S. J., 1983 : Venus gravity anomalies and their correlations with topography. *Jour. Geophys. Res.*, **88**, 1119-1128.
- , ——— and MOTTINGER, N. A., 1984 : Venus : Ishtar gravity anomaly. *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 489-491.
- , PHILLIPS, R. J., BIRKELAND, P. W. and WIMBERLY, R. N., 1980 : Gravity anomalies on Venus. *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 8295-8302.
- SMREKAR, S. and PHILLIPS, R. J., 1988 : Gravity driven deformation of the crust on Venus. *Geophys. Res. Lett.*, **15**, 693-696.
- SOLOMON, S. C. and GRIMM, R. E., 1988 : Tectonic activity on Venus. *Nature*, **331**, 305-306.
- and HEAD, J. W., 1982 : Mechanisms for lithospheric heat transport on Venus : implications for tectonic style and volcanism. *Jour. Geophys. Res.*, **87**, 9236-9246.
- and ———, 1984 : Venus banded terrain : tectonic models for band formation and their relationship to lithospheric thermal structure. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 6885-6897.
- SURKOV, YU. A., 1977 : Geochemical studies of Venus by Venera 9 and 10 automatic interplanetary stations. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 8th*, 2665-2689.
- , 1983 : Studies of Venus rocks by Veneras 8, 9, and 10. In *Venus* (HUNTEN, D. M., COLIN, L., DONAHUE, T. M. and MOROZ, V. I., ed.). 154-158, Univ. Arizona Press, Tucson.
- , BARSUKOV, V. L., MOSKALYOVA, L. P., KHARYUKOVA, V. P., KEMEURDZHIAN, A. L., 1984 : New data on the composition, structure, and properties of Venus rock obtained by Venera 13 and Venera 14. *Jour. Geophys. Res. Suppl.*, **89**, B393-B402.
- , KIRNOZOV, F. F., GLAZOV, V. N., DUNCHEENKO, A. G., TASTSY, L. P. and SOBORNNOV, O. P., 1987 : Uranium, Thorium, and Potassium in the venusian rocks at the landing sites of Vega 1 and 2. *Jour. Geophys. Res. Suppl.*, **92**, E537-E540.
- , MOSKALYOVA, L. R., KHARYUKOVA, V. P., DUDIN, A. D., SMIRNOV, G. G. and ZAITSEVA, YE., 1986a : Venus rock composition at the Vega 2 landing site. *Jour. Geophys. Res. Suppl.*, **91**, E215-E218.
- , ———, SHCHEGLOV, O. P., KHARYUKOVA, V. P., MANVELYAN, O. S., KIRICHENKO, V. S. and DUDIN, A. D., 1983 : Determination of the elemental composition of rocks on Venus by Venera 13 and Venera 14 (preliminary results). *Jour. Geophys. Res., Suppl.* **88**, A481-A493.
- , SHCHEGLOV, O. P., RYVKIN, M. L., SHEYNIN, D. M. and DAVYDOV, N. A., 1986b : The water vapor content profile in the venusian atmosphere according to the results of experiments from Vega 1 and 2. *Jour. Geophys. Res. Suppl.*, **89**, E219-E221.
- TAKAHASHI, E., 1989 : Speculations on the Archean mantle : missing link between komatiite and depleted garnet peridotite. *Jour. Geophys. Res.*, in press.
- 竹下 徹・山路 敦, 1989 : 流動的な大陸リソスフェア : 剛体プレート論の終えん. 日本地質学会第 96 年学術大会講演要旨, 417.
- TANIMOTO, T. and ANDERSON, D. L., 1984 : Mapping convection in the mantle. *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 287-290.
- TURCOTTE, D. L., 1989 : A heat pipe mechanism for volcanism and tectonics on Venus. *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 2779-2785.

- , WILLEMANN, R. J., HAXBY, W. F. and NORBERRY, J., 1981: Role of membrane stresses in the support of planetary topography. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 3951-3959.
- VORDER BRUEGGE, R. W. and HEAD, J. W., 1989: Fortuna Tessera, Venus: evidence of horizontal convergence and crustal thickening. *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 699-702.
- WATSON, J. V., 1978: Precambrian thermal regimes. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A228**, 431-440.
- WEERTMAN, J., 1979: Height of mountains on Venus and the creep properties of rock. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **19**, 197-207.
- WOODHOUSE, J. H. and DZIEWONSKI, A. M., 1989: Seismic modelling of the Earth's large scale three-dimensional structure. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A328**, 291-308.
- ZUBER, M. T., 1987: Constraints on the lithospheric structure of Venus from mechanical models and tectonic surface feature. *Jour. Geophys. Res. Suppl.*, **92**, E541-E551.

(要 旨)

川上紳一・金折裕司・早川雅彦, 1989: 金星にプレートテクトニクスはあるだろうか. 地質雑, 96, 297-318. (KAWAKAMI, S., KANAORI, Y. and HAYAKAWA, M., 1989: Plate tectonics on venus? *Jour. Geol. Soc. Japan*, **96**, 297-318.)

金星の地質やテクトニクスに関する重要なデータについてレビューし, その比較惑星学的議論を行った. 金星のテクトニクスは地球のプレートテクトニクスとはまったく異なっている. 金星にも大陸地殻が存在するものの, 地球のような明確な海と陸の区別は存在していない. 金星の重力異常は地形との相関が高い. その補償深度が深いこと, および金星には厚いリソスフェアが存在する可能性が低いことは, 金星の大陸や重力異常がマントル対流によってダイナミックに保持されていることを意味する. 金星ではプレートテクトニクスが作用していない場合, 熱を地表へ輸送するメカニズムとして, ホットスポットによる熱輸送が重要な役割を果たしていることになる. 現在の金星のテクトニク環境は, 初期地球のそれと類似性が認められる. 金星テクトニクスを解明することは, 地球のテクトニクスの根本的な理解に大変貴重な示唆を与える.

第 I 図版 金星の表面地形(NASA 提供).