

金星大気探査計画について*

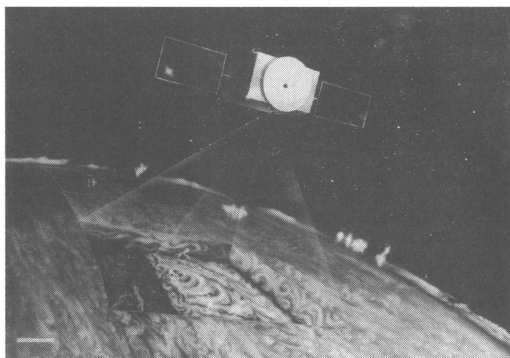
今村 剛**・松田佳久***・中村正人***
 山中大学****・金星探査計画ワーキンググループ

1. はじめに—惑星気象学の幕開け

本稿では宇宙科学研究所(以下、宇宙研)を中心として現在進められている金星探査計画について紹介させていただきたい。この計画は、金星の大気・表層環境の解明を目指して1998年に設けられた金星探査計画ワーキンググループ(主査:小山孝一郎宇宙研教授)による2年半の検討の後、2001年1月に宇宙理学委員会に提案された。

一般に基礎科学的な目的の衛星計画は、全国共同利用機関である宇宙研が所内外約30名の専門家で構成する宇宙理学委員会に、まず全国の関係研究者(理学および工学を含む)から成るワーキンググループの設置を要求するところから始まる。ここで何年間か検討を行ったものが同委員会に提案され、審査される。この審査で採択されたものが宇宙研から概算要求され、数年間の製作・試験期間を経て打ち上げられることになる。今回提案された金星探査計画は、科学的意義と実現可能性に関する宇宙理学委員会の厳しい審査を経て2001年5月に採択され、2002年4月から開発を始めるべく概算要求されることとなった。

この計画は惑星気象ミッションとして立案されたものである。すなわち、衛星の構成やオペレーションは大気大循環に関わる大気現象の観測のために最適化されている。これまでの惑星探査では気象観測は組成や同位体比などの観測に付随する形でしか行われておら



第1図 分厚い金星大気を近赤外線で立体的に透視する探査機の想像図。この図では、明け方の上空から渦巻く雲や雷や地表面を観察している。雲海の彼方の白い噴水のようなものは雷雲と電離層をつなぐ放電現象、金星の縁で水平にたなびいているのはオーロラや上層大気の化学的発光現象(池松均氏による)。

ず、惑星気象の研究は断片的なデータに基づく極めて不確実性の多い議論を余儀なくされてきた。そのために金星やタイタンの大気の高速回転や、火星の砂嵐、木星の縞模様や大赤斑など、惑星気象の本質的な謎の多くが未解決のまま残されている。大気圏で生起する波動や渦の力学構造を解明するためには、地球の気象研究においては常識であるように、グローバルに多地点で、立体的に、なおかつ連続的に気象データを取得する必要がある。そこで本計画では、金星を周回する気象衛星を用い、後述の「近赤外の窓」を利用して第1図のように金星の厚い大気層を立体的に透視する。

惑星気象の解明に乗り出していくことは、単に気象学の研究対象の拡大にとどまらない。現在の地球のみを対象とした事例研究的な気象学を、より普遍的な気象学へ質的に発展させることが可能となる。たとえば、

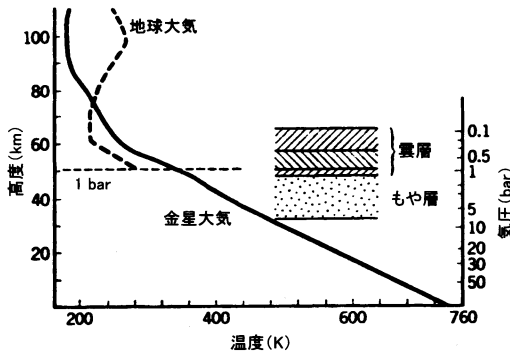
* On the Venus atmospheric orbiter project

** Takeshi Imamura, 宇宙科学研究所 (E-mail ima@bochan.ted.isas.ac.jp).

*** Yoshihisa Matsuda, Masato Nakamura, 東京大学大学院理学系研究科.

**** Manabu D, Yamanaka, 神戸大学大学院自然科学研究科.

© 2001 日本気象学会



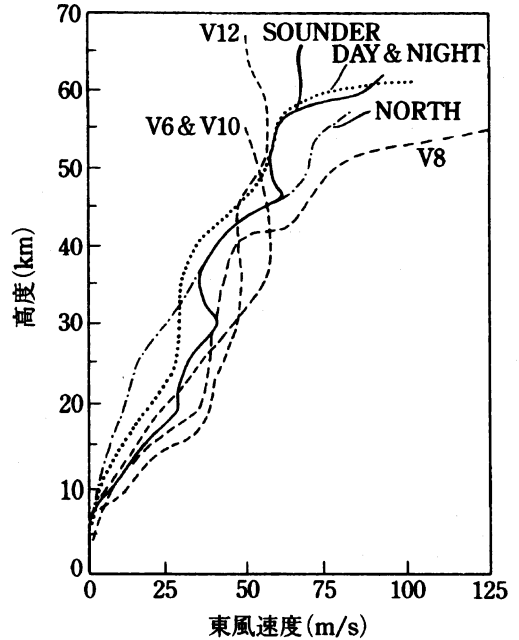
第2図 金星大気温度の高度分布. 右側のスケールは対応する気圧を示す. 比較のため, 地表面を1気圧に合わせて地球大気温度分布も示した. 金星の高度45~70 kmには濃硫酸の雲が分布する(松田・松野, 1980).

異なった大気量や大気成分, 異なった自転速度の下に, 他の惑星でどのような気象現象が展開しているかを研究することは, 気象学の普遍化のために是非必要である. このことにより, 地球の気象学をより大きな枠組みの中に位置付けることが可能となり, 地球の過去や未来の気候の研究にも大きく貢献すると思われる.

2. 金星気象の問題

私たちの地球と大きさや太陽からの距離の点で最も似ている惑星である金星の環境は, 第2図で示すように, 高温で濃密な二酸化炭素大気(地表で470°C, 91気圧)を濃硫酸の雲が厚く覆う, 地獄のような世界である. 自転速度は極めて遅く, その周期は243地球日である. このような惑星の大気大循環は, 地球の気象学の単純な応用では理解され得ない. 根本的な理解に到達するためには, まず惑星規模の大気運動と, より小さな様々な擾乱成分の分布を, とともに明らかにする必要がある.

金星の表面付近の異常な高温は温室効果によるものと考えられているが, 金星大気にはそれ以上に特異な現象が知られている. 第3図に示すように, 金星では対流圏上部に自転と同じ方向の高速帯状流が存在し, スーパーローテーションと呼ばれている. あらゆる緯度帯で風速は地表面から高度70 kmの雲頂高度まで単調に増大し, 低緯度における最大風速100 m/sは自転速度の60倍に相当する. スーパーローテーションは約40年前に紫外線による地上観測によってアルベド模様の4日周期の変化として見出され, その後 Mariner や



第3図 プロープ投下により測られた金星の東西風の鉛直分布. V6, V8, V10, V12は旧ソ連の Venera シリーズ, Sounder, Day, Night, North は米国の Pioneer Venus によるものである (Schubert *et al.*, 1980).

Pioneer Venus, Venera など米ソの探査機による雲頂模様の近接撮影やプロープ投下によって存在が確認された. 金星同様に自転が遅い土星の衛星タイタン(周期16地球日)にも同じような高速帯状流が存在することが示唆されており, 自転の遅い惑星に普遍的な現象である可能性がある. 固体部分の自転が西向きに周期243日, 公転周期が224.7日なので, 金星の1太陽日は117日となる. このように加熱源の移動が遅い場合の大気循環は昼側で上昇, 夜側で下降という夜昼間対流になると予想されるが, 実際には自転の60倍という帯状風が存在する. なぜ夜昼間対流が存在しないのか, また帯状流の巨大な角運動量はどこからもたらされているのかという問題について, いくつかの先駆的研究がなされてきたが, 帯状流に重なる子午面循環や非軸対称擾乱の観測が進んでいないために解明には至っていない. この問題の経緯については松田(2000)に邦文の解説がある.

東西風のみならず子午面循環も謎に包まれている. 地球では南北半球にそれぞれ3細胞の循環が存在するが, 回転の遅い金星では違っている可能性がある. 紫

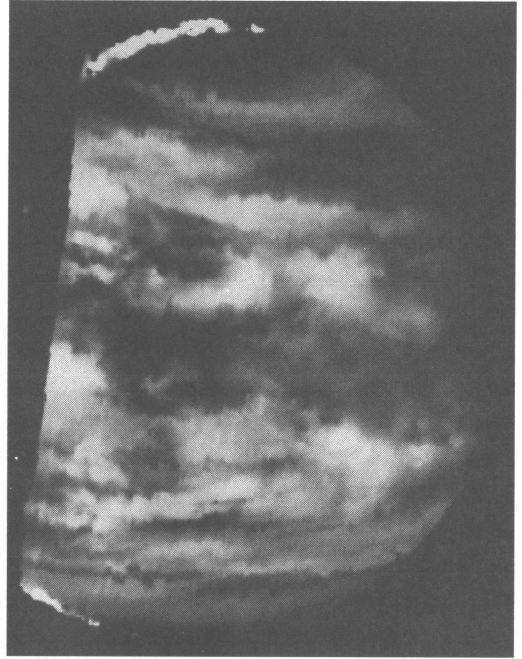
外光で見える雲頂付近の様子が極向きにドリフトすることから、雲頂高度では高緯度まで達する直接循環の存在が示唆されているが、さらに低い高度領域では観測が行われていない。鉛直シアーが大きく成層度が急激に変化する中・高緯度の雲層レベルでは傾圧不安定が起こる可能性があり、間接循環の存在も否定できない。また金星では加熱層が雲頂付近と地表面に分離していることから、雲層レベルの循環が雲層内で閉じていて、その下に多数のセルが積み重なっている可能性も指摘されている。

このような惑星規模あるいは総観規模の現象に加え、水平スケールが数百 km 以下のメソ気象についても多くの問題が提起されている。紫外光で雲頂付近の濃淡模様を撮影すると、赤道域の真昼側に300~1000 km の細胞状構造が多数観察される。雲層の維持に深く関わる現象であることは疑いないが、このような巨大な構造が何に由来するのかは、そもそも硫酸雲の雲力学が分かっていないために謎のままである。また、金星の紫外画像には内部重力波とおぼしき波状構造もしばしば観察される。地球と同様に金星でも大気圏全体が内部重力波の影響下にあることが予想されるが、限られた伝播方向の波状構造が繰り返し現れるなど、その振舞いは不可思議である。メソ気象に属する現象として雷放電も挙げられる。高温で乾いた金星大気中では地球の雷のような氷晶による電荷分離機構は考えにくい。これまでに多くの光学および電波観測が雷の存在を示唆している。いかなる気象現象が金星の雷を引き起こすのかという問題は、大気電磁気学の常識を覆す可能性を秘めている。

以上のように金星の気象については初歩的な理解さえ得られていない。その原因としては、光学観測の可能な範囲が雲頂以上に限られていたことと、より下層のデータは単発的な直接観測プローブによるものに限られていて波動や渦の時空間構造を捉えられなかったことが挙げられる。地球で行われているように夥しい数のプローブを継続的に投入できれば良いが、今のところそのようなアプローチは現実的でない。なお、これまでの観測については Arizona 大学出版の Venus および Venus II (Huntel *et al.*, 1983; Bougher *et al.*, 1997) にまとめられている。

3. 金星気象解明のシナリオ

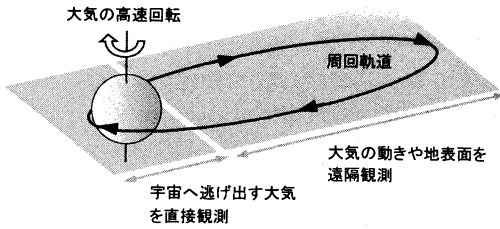
このような問題意識に基づいて私たちは、周回衛星から雲層を透視する気象衛星計画を立案した。ここで



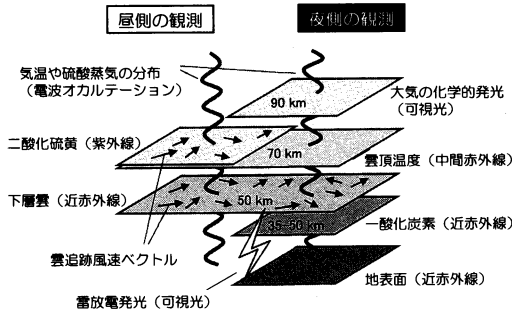
第4図 木星探査機 Galileo が金星の近くを通過した際に波長 $2.3 \mu\text{m}$ で撮影した金星の夜側。明るい部分では雲が薄いため下層大気の熱放射が漏れ出している (Carlson *et al.*, 1991)。

は1980年代後半に発見された「近赤外の窓」(波長 $1.0 \cdot 1.7 \cdot 2.3 \mu\text{m}$)を利用する。この波長域では、二酸化炭素や水蒸気による吸収や大気分子によるレイリー散乱が弱く、また雲粒で散乱される際のエネルギー消散が小さい。そのため下層大気や地面からの熱放射は大気圏外まで漏れ出し、太陽光は下層まで侵入する。1990年に木星探査機 Galileo が金星近傍を通過する際に近赤外の窓で夜側を撮影したところ、第4図に示すように、それまで紫外光などで観察されていた模様とは全く異なる構造が確認された。このような観測からは、高度50 km 付近の雲層下部の構造や、さらに下層の微量気体の分布を導出できる。

本計画では主テーマとして「スーパーローテーションの維持機構」「子午面循環の構造」「雲生成と雷放電機構」「メソ気象サーベイ」を掲げている。(この他に、宇宙空間へ大気が逃げ出す過程や、活火山検出による火成活動レベル解明といった研究も行うが、本稿では述べない。)これらの研究を可能にするために以下のような観測方針をとる。



第5図 金星周回軌道の概念図。



第6図 金星周回衛星からの気象観測の概念図。
多波長で複数の高度面の現象を同時に可視化することによって3次元的に観測領域を覆う。

3.1 グローバルな連続観測

惑星スケールの気象の時空間構造を把握するために、広い範囲を連続的に観察したい。そのために、惑星探査は極軌道という「常識」を捨て、第5図のように低緯度を大気の高速回転と同じ方向(西向き)に周回する長楕円軌道(近金点300 km, 遠金点10金星半径, 周期21時間)を採用する。衛星は大半の時間を5~10金星半径の遠距離で過ごし、このような位置から金星全体を継続的に眺める。また遠金点付近では大気の回転と同期していて静止衛星的であり、平均風に押し流される雲構造や微量気体の詳細な変動を連続的に観察できる。このようにして得られるデータセットには、空間的・時間的なスペクトル解析や、雲追跡による全球的な風速場導出など、私たちが慣れ親しんでいる気象解析手法をそのまま適用できる。

3.2 多波長同時観測による立体構造の把握

大気運動の3次元構造を把握するために、第6図のように異なる波長域で複数の高度面を同時に撮像する。3次元情報を得ることで初めて、子午面循環の構造、擾乱の鉛直伝播、不安定モードなどが明らかになり、さらにはスーパーローテーションを引き起こす角

運動量フラックスの定量的評価などが可能になる。

主力である近赤外の窓における撮像対象は、昼側では高度45~70 kmの雲層全体からの太陽散乱光(1.0 μm)、夜側では下層大気からの熱放射であり(1.0・1.7・2.3・2.4 μm)、いずれも雲層下部(高度約50 km)に由来する微細構造の可視化が主目的である。この領域の雲は、上層(60~70 km)のエアロソールと違って、地球の雲と同様に大気運動に伴う凝結雲であると考えられている。このような雲の水平分布には様々な大気現象が反映されるはずである。小規模な雲パターンを追跡することによって水平風速場も得られる。また、複数の波長のデータから雲塊ごとの雲粒サイズも推定する。

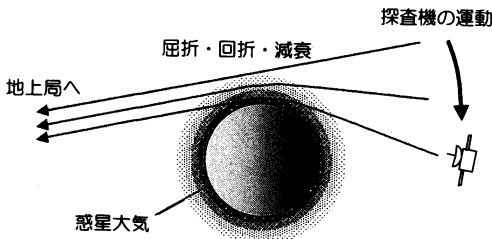
近赤外の窓のうち、2.4 μm 付近で一酸化炭素(高度35~50 km)が強い吸収を示すことを利用して、その水平分布も得る。一酸化炭素は上層の光化学で作られたあと大気の運動によって下層に運ばれると考えられるので、その分布は子午面循環や非軸対称擾乱の構造を強く反映すると期待される。

これらに加え、中間赤外撮像(10~12 μm)により雲頂温度を、紫外撮像(280 nm)により雲頂付近の二酸化硫黄分布を、それぞれ可視化する。雲頂温度分布からは擾乱に伴う気温や雲頂高度の変動を読み取る。下層に起源を持ち雲頂まで運ばれてくる二酸化硫黄の観測からは、擾乱に伴う鉛直運動がわかるほか、濃淡パターンを追跡することによって水平風速場も得られる。さらに上層の大気運動を可視化するために、酸素分子・原子の化学的発光(551・558 nm)も観測する。上層大気で卓越すると考えられる夜昼間対流の変動や内部重力波などの情報が得られるだろう。

雷発光の観測(777 nm)は、大気深部の対流活動の強さや雲粒の物性といった、やや異色な情報を与える。今回の観測では地球における平均的規模の1/10の雷発電が雲の下で発生した場合でも検出できる性能を達成し、放電の時空間分布を明らかにする。赤外や紫外での気象観測と対応づけることにより、金星の雷はどのような擾乱に伴って生じるのか、どのような性質を持つ雲塊で電荷分離が起こるのかといった問いに答える。

3.3 高空間分解能によるメソ気象観測

撮像観測では10~20 kmの空間分解能を達成し、メソ気象擾乱のサーベイ観測を行う。近赤外の窓で可視化する凝結雲のパターンは、内部重力波や熱対流に伴う鉛直風を敏感に反映するはずである。地球と違って



第7図 電波オカルテーションの概念図。探査機が惑星の背後に隠れる時と背後から出てくる時に、探査機から送信されて地上局へ届く電波の周波数や強度の変動を調べて、惑星大気の鉛直構造を探る。

惑星全体が雲に覆われた金星では、このような擾乱をグローバルに遠隔観測することが可能である。網羅的な観測によって予想外の新現象の発見も期待される。内部重力波や対流細胞の時空間分布と惑星スケール擾乱の位相関係に注目し、グローバルからメソスケールに至る3桁にわたる階層間の相互作用を明らかにする。

3.4 電波オカルテーションによる鉛直微細構造の検出

撮像観測の対象となる全高度面を縦に貫く形で、第7図のような電波オカルテーションの手法によって大気の鉛直構造をモニターする。得られる物理量は、気温、乱流強度、硫酸蒸気濃度などである。鉛直波長が短い(数 km)波動の鉛直伝播を捉えることは、撮像観測だけでは困難だが、電波オカルテーションの高い鉛直分解能(1 km 以下)をもってすれば可能である。手法そのものは古典的だが、撮像による水平微細構造の観測と相補的に用いることによって、3次元構造把握のために前例のない有効性を発揮する。

4. 実行計画

衛星は2007年初めに宇宙研の M-V ロケットで打ち上げられた後、地球をめぐる待機軌道に投入され、2007年6月に地球を離脱、太陽の周りを1周したあと2008年に地球近傍を通過して軌道を変え、2009年9月に金星周回軌道に入る。衛星の姿勢は3軸制御され、数分から数時間ごとの撮像時には衛星の姿勢を調節して撮像機器を金星に向ける。気象観測のための観測機器は以下のとおりである。

- ・近赤外カメラ1：波長 $1.0\ \mu\text{m}$ 、視野16度、 1024×1024 画素、SiCCD 素子

- ・近赤外カメラ2：波長 $1.7/2.3/2.4\ \mu\text{m}$ 、視野16度、 1040×1040 画素、PtSi 素子
- ・中間赤外カメラ：波長 $10 \sim 12\ \mu\text{m}$ 、視野16度、 240×240 画素、ボロメータ素子
- ・紫外カメラ：波長 $280/360\ \text{nm}$ 、視野16度、 1024×1024 画素、SiCCD 素子
- ・雷発光・大気光カメラ：波長 $777/551/558\ \text{nm}$ 、視野16度、 8×8 画素、光電子増倍管
- ・高安定発振器(電波オカルテーションで使用)

これらの他に、宇宙へ逃げ出す大気を観測するためのプラズマ観測器や磁力計も搭載される。観測機器の多くは2次元素子を用いたカメラであり、東大・東北大・宇宙研・極地研が中心となって開発が進められている。2002年に衛星のプロトモデル製作に入ることを目指している。

計画を成功に導くためには、ハードウェアの開発だけでなく、観測と理論研究の有機的な結合が不可欠である。画像データから大気運動を読み取るには放射輸送や雲物理の理論を正しく適用する必要があり、また不完全な気象データから角運動量フラックスなどを定量的に見積もるには波動理論を援用した解釈が必要となる。さらに、擾乱の詳細な力学構造はどうなっているのか、大循環を決める基本パラメータは何か、高速回転は安定なのか、などの問いに答えるためには、大気大循環モデルを用いた研究とのフィードバックが欠かせない。現在既にワーキンググループには理論研究の立場からも多くの研究者が参加している。このように観測と理論の強力な結合のもとに進められる本計画は、21世紀の気象学の始まりを飾るに相応しい一大プロジェクトである。

最後に、金星探査の機運が国際的に盛り上がってきていることにも触れておきたい。金星探査は米国の Magellan 計画を最後に10年以上途絶えているが、この間に欧米や日本で新たに多くの探査計画が練り上げられた。その中では、金星気候の変遷や惑星の分化といった最終的な理解に到達するために、大気組成、地面組成、同位体比、大気の流出、大気力学、雲の動態といった様々な研究課題が検討されている。本提案は、この国際的な役割分担の中で、特に大気力学および雲の動態の解明という一翼を担う。また本提案の次の一手として、金星の低高度(20~30 km)を長期間浮遊する気球計画が宇宙研を中心に検討されている(矢島ほか、2001)。この計画は、大気運動について気象衛星と相補的な直接観測を実施するほか、大気組成観測や地

表面撮像など多くの可能性を開くものである。このような国内外の将来計画の先駆けとして、まずはここに紹介した探査計画を必ずや実現し、成功に導かねばならない。

[付記]

将来の金星探査への国際的な取り組みについて議論する国際会議が、2001年10月15～17日に宇宙研で開催される。本稿で紹介した金星大気探査計画も主要議題の一つとなる。この会議の詳細も含め、本計画の最新情報については次のWebページを御覧いただきたい。

<http://www.ted.isas.ac.jp/~venus>

参 考 文 献

- Bougher, S. W., D. M. Hunten and R. J. Phillips, Eds., 1997: Venus II, Univ. of Arizona Press, Tucson, 1362pp.
- Carlson R. W., K. H. Baines, Th. Encrenaz, F. W. Taylor, P. Drossart, L. W. Kamp, J. B. Pollack, E. Lellouch, A. D. Collard, S. B. Calcutt, D. Grinspoon, P. R. Weissman, W. D. Smythe, A. C. Ocampo, G. E.

Danielson, F. P. Fanale, T. V. Johnson, H. H. Kieffer, D. L. Matson, T. B. McCord and L. A. Soderblom, 1991: Galileo infrared imaging spectroscopy measurements at Venus, *Science*, **253**, 1541-1548.

Hunten, D. M., L. Colin, T. M. Donahue and V. I. Moroz, Eds., 1983: Venus, Univ. of Arizona Press, Tucson, 1143pp.

松田佳久, 松野太郎, 1980: 金星大気の日四循環, *科学*, **50**(5), 285-293.

松田佳久, 2000: 惑星気象学, 東京大学出版会, 204pp.

Schubert, G., C. Covey, A. Del Genio, L. S. Elson, G. Keating, A. Seiff, R. E. Young, J. Apt, C. C. Counselman III, A. J. Kliore, S. S. Limaye, H. E. Revercomb, L. A. Sromovsky, V. E. Suomi, F. Taylor, R. Woo and U. von Zahn, 1980: Structure and circulation of the Venus atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **85**, 8007-8025.

矢島信之, 井筒直樹, 本田秀之, 後藤 健, 佐藤英一, 今村 剛, 赤澤公彦, 富田信之, 2001: 惑星気球の可能性について, 宇宙科学シンポジウム(第1回), 宇宙科学研究所, 213-220.



特定非営利活動法人第3回世界水フォーラム事務局よりお願い

2003年3月16日から23日にかけて京都、滋賀、大阪の琵琶湖・淀川流域で開催される第3回世界水フォーラムの成功に向けて、同フォーラム運営委員会の開催、同フォーラムに関連したシンポジウムや講演会等の開催など、水フォーラムに関連する事業を幅広く行い、広く国民一般に対して水の重要性の認識を高め、今後の水に関する世界の諸活動を促進し、もって水に関する国際協力に寄与するため、第3回世界水フォーラム事務局は東京都より特定非営利活動法人の認証を受け、本年4月3日より活動を正式に開始しました。

これらの活動にあたり、事務局の活動にご賛同いただき、お力添えを頂ける多くの方々の参加が是非とも必要であり、下記の通り正会員の募集を行いたく、入会についてご検討いただけますようお願い申し上げます。

記

1. **活動期間**: 平成13年4月3日～平成15年度(未定)
2. **年会費**: 1万円 (入会金は必要ありません。年度当初ごとに年会費の入金依頼を実施させていただきます)
3. **特典**: ニュースレターの配布。世界水フォーラムに関連したシンポジウムや講演会等への優先的な招待等。
4. **その他**: 定款および入会申込書については下記連絡先へお問い合わせください。
5. **連絡先**: 〒102-0083 東京都千代田区麹町2丁目2番4号 麹町YTビル5F
第3回世界水フォーラム事務局

担当: 西田

Tel: 03-5212-1645, Fax: 03-5212-1649