

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その62 ～金星の雲層に現れる巨大な渦の正体に迫る～

今井 正亮¹, 高木 征弘², 安藤 紘基², 佐川 英夫²

(要旨) 金星探査機「あかつき」に搭載された2 μm カメラIR2によって、分厚い雲層内部の濃淡が熱赤外線シルエットとして可視化されています。多数の特徴的な雲構造が存在する中で、今回我々が着目したのは、緯度20°付近に中心を持つ数千kmスケールの巨大な渦構造です。金星大気大循環モデルAFES-Venus GCMを用いた数値モデリングによって、観測された渦と定性的によく似た現象の再現に成功しました。本稿では、GCMの結果から渦の形成に関わる力学不安定や、雲の濃淡コントラストを生み出すメカニズム、そして渦の背後にある雲層高度における大気の時空間変動について考察した内容を紹介いたします。なお、本研究の詳細につきましては、Icarus誌にて出版されました論文 [1] を併せてご確認ください。

1.「あかつき」IR2が捉えた特徴的な渦

金星は全球が厚い硫酸雲に覆われており、紫外線および可視光による観測で見ることができるとは言えない世界は昼面側の雲頂高度 約65～70 kmの雲だけです。しかし、金星の夜面側を近赤外線領域で観測すると、主に下層(約45～50 km)と中層(約50～56 km)の雲層内部の構造が雲の光学的厚さの違いから捉えられます。これは、雲の下にある高温な地表および大気からの赤外放射が、下層および中層の雲によって吸収されるため、このような雲コントラストの時・空間変動は、大気中で起こる雲の化学・微物理、そして大気力学を反映したものと考えられます。これまで金星の夜面の中・下層雲及びその高度の大気は、地上望遠鏡、Galileo探査機のNIMS、Venus Express探査機のVIRTISなどの赤外観測を通じて研究されてきました。しかし、金星雲層内部で起こる諸現象の包括的な理解のためには今もってなお観測が不足しています。

日本の金星探査機「あかつき」は、2015年12月の

金星周回軌道への再投入以降、赤道近傍の軌道から複数波長によるグローバルな撮像観測を行い、さまざまな時空間スケールでの雲構造の研究が新たに可能となりました。搭載されている2 μm カメラ(IR2)は、1.735, 2.02, 2.26, 2.32 μm の波長帯で観測を行うことができ、CO₂吸収が強い2.02 μm 帯は雲頂高度の計測に、CO₂の“窓領域”に対応しているその他の波長帯は、より深い大気の観測に利用されています。CO₂の“窓領域”を用いた金星の夜面画像には、多様なスケールの雲構造やその顕著な時間変動が捉えられていますが、本研究では、そのなかでも図1に示すような北緯20°・東経18°付近に暗い“目”を持つ水平方向2000 km規模の渦構造に注目しました。この暗い部分は、地表からの赤外放射が厚い雲によって遮られている領域で、北緯20～30°にわたって白く伸びる(雲が薄い)帯状の領域が渦に巻き込まれることで、明瞭な渦状のコントラストを形成していると考えられます。

先行研究 [2] では、この構造は「キノコ型」のメソスケール渦とされていましたが、本研究ではより大規模な総観スケールの渦構造の中心部としてこの雲構造を再解釈します。また、比較的南北対称な構造が多い金星には珍しく、南半球に類似する顕著な渦構

1. 東京大学 大学院理学系研究科 天文学教育研究センター

2. 京都産業大学 理学部

mstk-a.imai@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

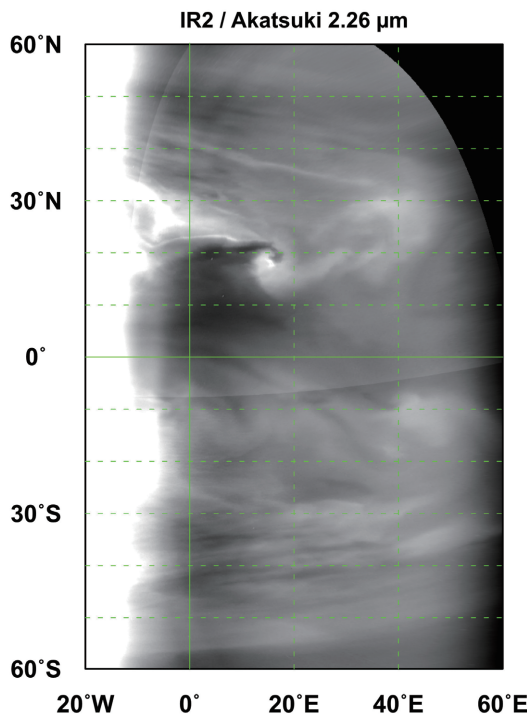


図1: 2016年5月7日04時03分33秒 (UTC) に金星探査機「あかつき」搭載IR2の2.26 μ mフィルターで取得された金星夜面北半球に写る渦状の雲構造。スーパーローテーションは東風として(右から左に)吹いている。

造が見られない点は特筆すべき特徴です。赤道を超えて北半球の渦と接続するような斜めの雲構造が存在している点からは、赤道をまたぐ大気の流れが示唆されます。このような渦構造は、大気中の流体力学的不安定によって形成されている可能性があります。IR2画像にはこの構造の形成や消滅を追跡できるような継続的なデータは存在しておらず、渦の寿命など時間発展に関する情報は限られていました。

そこで本研究では、金星大気大循環モデル (AFES-Venus GCM) によるシミュレーション結果を調べIR2によって観測されたものと類似する特徴を示す渦について、その構造および形成過程の詳細を数値的に解析しました。使用したGCMは、放射による加熱・冷却過程を単純化し、雲物理や化学過程を含まない力学モデルではありますが、スーパーローテーションに代表される金星の大気大循環のみならず、“cold collar”と呼ばれる極域の大気構造であったり、下層から中層雲に見られる縞状の雲構

造、Rossby-Kelvin不安定性によって励起される惑星波、さらに上層大気の熱潮汐波など、金星大気における諸現象を現実的に再現することに成功しています。

本稿では、モデルの詳細については既発表の文献 [1]および関連研究に譲ることとし、紙面の都合および本現象の全体像を読者が把握しやすくするため、まず本現象に関する概要を整理した後に、個別の考察をモデル結果との比較を交えながら展開します。

2. 渦形成の全体像

はじめに、AFES-Venus GCMの解析によって明らかになった渦の形成に関する一連のプロセスについて、図2を用いて概説します。本現象の鍵となるのは、南北両半球において総観規模の渦 (Vortex) と中緯度ジェット (Jet) が約30日で交互に現れる準周期的な変動です。異なる半球において、成長中の渦と減衰中の渦が共存し、それらが結びつくことによって、赤道を越える南北方向の角運動量 (AM) の輸送が生じます。その結果、減衰中の渦が存在する半球では中緯度ジェットが強化され、この強化された中緯度ジェットが順圧不安定を引き起こし、新たな渦を形成する、というのが基本的なメカニズムです。

図2では、南北両半球における渦および中緯度ジェットの準周期的な変動を6つのPhaseに分けて整理し、このうち1周期の前半分に当たる4つのPhaseを模式的に示しています。なお、模式図の最初と最後に示されている Phase 1と1' は南北が入れ替わっているだけで基本構造は同一です。また、以降の議論では、モデルで用いている座標系 (地球型) に従い、自転とスーパーローテーションが実際とは逆向きの西→東 (図中では左→右) である点に留意してください。Phase 1では、南 (北) 半球の中緯度ジェットが強化されつつあり、同時に北 (南) 半球の渦が成長中 (減衰中) の状態にあります。この状態は、例えば後述するGCMの結果 (図4) の28日目付近に対応します。北半球の成長中の渦は、減衰中の南半球の渦の東に位置し、両者の結びつきが南東方向への赤道越えの水平風を生じさせています。この風によって角運動量が北半球から南半球へと輸送され、南半球の中緯度ジェットを強化する一方、北半

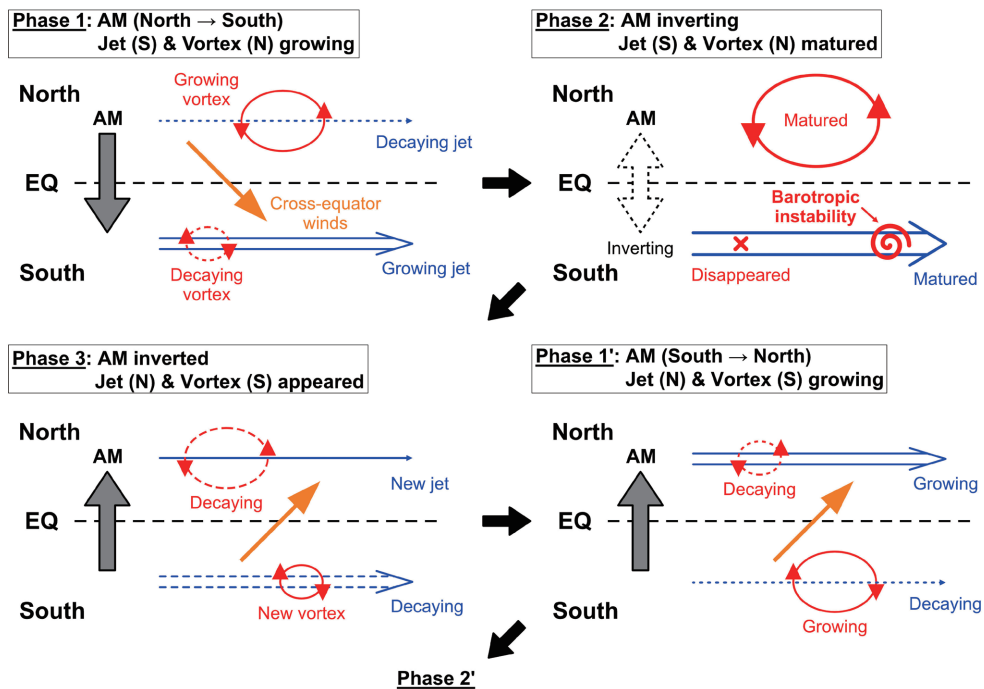


図2: 北半球および南半球における渦と中緯度ジェットの準周期的な変動を示す模式図。赤い円は渦、青い矢印は中緯度ジェット、オレンジの矢印は赤道を越える水平風を示す。灰色の矢印は角運動量 (AM) の輸送方向を表しており、時間と共に Phase 1, 2, 3, そして1'... の順に進行する。

球側のジェットは減衰していきます。続くPhase 2では、南 (北) 半球の中緯度ジェットと北 (南) 半球の渦がそれぞれ成熟 (消滅) した状態、すなわち一連の変動におけるターニングポイントに達しており、このPhase 2以降では角運動量の輸送方向が反転します。このとき、南半球では成熟した中緯度ジェットによって緯度30°付近で東西風の南北シアーが増大し、順圧不安定が発生します。Phase 3では、Phase 2で発生した順圧不安定によって南半球に新たな渦が出現し、成長していきます。この新しい渦は北半球の既存の渦よりも東側に位置しており、今度はこれらの渦が結びつくことで、角運動量が南半球から北半球へと輸送され、北 (南) 半球の中緯度ジェットの強化 (弱化) が生じます。そしてPhase 3に続くPhase 1'では、Phase 1と同様の構造が南北を入れ替える形で再び現れ、以後も準周期的に変動が繰り返されることになります。

3. 渦とジェットの準周期変動と南北運動量輸送

前章で概説した南北両半球で交互に現れる渦構造と中緯度ジェットの関係について、GCMの出力結果を用いた詳細な検討を行いました。図3には、北半球の渦が成熟する時期 (Phase 2) およびその前後5日間 (Phase 1および3) における渦の配置が示されています。これにより、渦は南半球側で北半球の渦に対して西側から東側へと移動していることが確認され、また両半球の渦が赤道を挟んで接続されることで、南北方向の赤道越えの風が形成されている様子が分かりました。さらに、図4にて東西風 (a)、ポテンシャル渦度(PV)の極大値 (b)、および南北運動量フラックス (c)の時間変化を示します。東西風速分布からは、緯度30°付近において、北半球・南半球で交互に中緯度ジェットが発達していることが分かります。また、PVの極大値が北緯・南緯20°-30°付近で30日周期で変動しており、これが渦の形成に対応してい

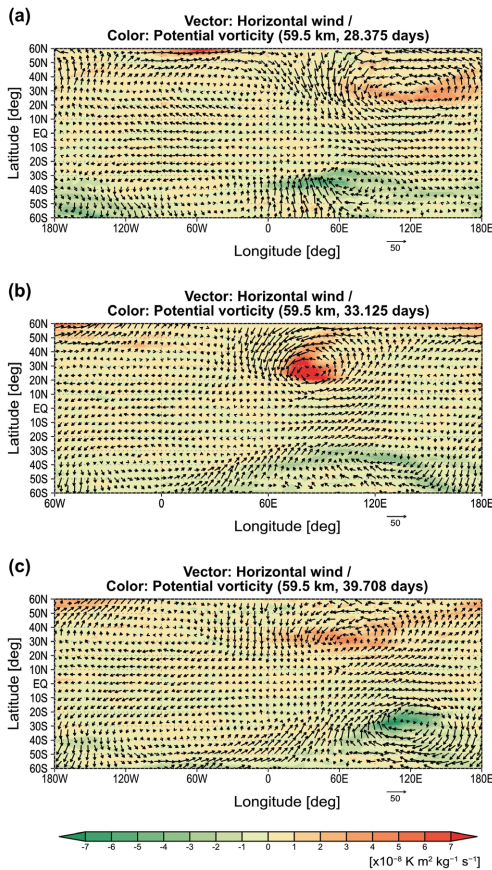


図3: 59.5 km高度におけるポテンシャル渦度 (PV) および水平風のスナップショット。(a) 北半球で渦が成熟する約5日前, (b) 成熟時, (c) 約5日後。

ることが読み取れます。例えば、29～35日目には北緯25°-30°でPVがピークを示し、この時期に南半球の中緯度ジェットが強化され、北半球のジェットは弱化していることが確認できます。

加えて、南北運動量フラックス $(\overline{u'v'} \cos \phi)$ により、渦の形成と中緯度ジェットの強弱に関係する運動量の南北輸送が明瞭に示されました。ここで、 $(\overline{\quad})$ は東西平均を、 u' および v' はそれぞれ東西風および南北風の東西平均からの偏差を、 ϕ は緯度を表しています。特に、南北60°にわたる広い緯度帯で運動量が一方に輸送されており、これが対向する半球のジェット形成を駆動していることを示唆しています。これらの結果は、渦と中緯度ジェットの時間変動が密接に連動しており、準周期的な大気構造の振動の一端を担っていることが分かります。

4. 順圧不安定による渦形成

本研究では、金星の中層雲高度 (GCM内で約60 km) に準周期的に出現する総観規模の渦が、中緯度ジェットの南北シアーに起因する順圧不安定によって発生している可能性について検証を行いました。GCMで得られた南北風のシアー構造に基づく線形安定性解析により、渦の成長時間および東西スケールを定量的に評価しました (詳細は原論文のSection 4.3参照)。解析の結果、最も成長しやすいモード (most preferred mode) の成長時間 (e-folding time) は約4.3日と見積もられました。これは、モデル内で渦が成長する10-15日の期間で初期振幅が7-20倍まで成長する計算となり、実際にモデル内の渦周囲の最大風速が > 20 m/sになることと良く一致します。また、この成長モードで見積もられる東西スケールは約9300 kmと計算され、これはGCMやIR2観測で得られた渦のスケール (約5500 km) のおよそ2倍です。観測されている渦はいずれも低気圧性の渦であり、線形安定性解析で得られたスケールが低気圧と高気圧の合わさった1波長分のスケールであると考え、こちらも整合的な値となっています。

順圧不安定の他に、傾圧不安定も渦形成メカニズムの候補として考えられますが、GCMの結果では、渦周辺では南北方向の熱輸送がほとんど見られなかったことから、本現象で見られる総観規模の渦は主に順圧不安定に由来すると結論づけられました。

5. 渦が作る雲構造

金星の2 μ m帯における観測画像では、赤道付近に暗い (雲が厚い) 領域、低緯度から中緯度にかけて明るい (雲が薄い) 帯状構造が頻繁に見られます [3]。また、先行研究 [4] では、IR2で観測された渦列 (vortex street) は、こうした明るい帯の南北方向の移流によって可視化された現象であると解釈されており、本研究の結果もこの解釈とよく一致します。

一方、GCMで再現された成熟期の渦構造には、観測雲構造の新たな理解につながる示唆が含まれていました。図5に示されるように、渦の東側には極方向かつ上向きの風、西側には赤道方向かつ下向き

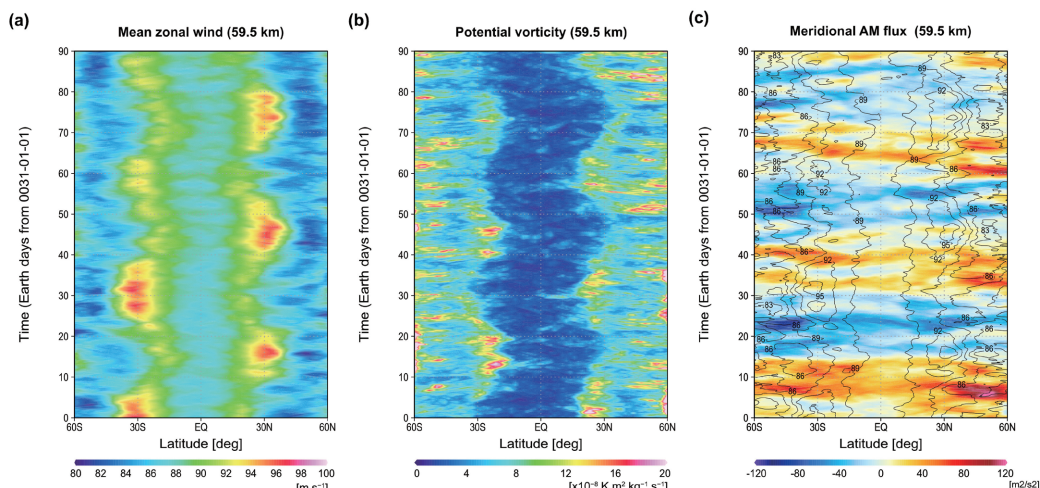


図4: 高度59.5 kmにおける (a) 東西平均東西風, (b) 各緯度におけるPV (ポテンシャル渦度) の絶対値の最大値, (c) 南北運動量フラックスの時間変化。

の風が存在しており, IR2観測における暗い (雲が厚い)・明るい (雲が薄い) 領域の東西コントラストと対応しており, すなわち, 上昇流によって雲粒が形成・増加し, 下降流によって蒸発・減少することで雲の濃淡が形成されている可能性が考えられます。そこで, 渦に伴う鉛直風による断熱膨張・温度低下の効果を考慮して雲の光学的厚さ変化を定量的に見積もりました (詳細は原論文 Appendix A 参照)。具体的には以下の2ケースを想定して評価を行いました。

- Case 1: 渦が高度55–65 kmに存在し, H_2SO_4 の質量分率が85% (モル濃度51%)
- Case 2: 渦がより低い高度50–60 kmに存在し, H_2SO_4 の質量分率が100% (モル濃度100%)

その結果, 最大30 mm/sの上昇流により空気塊が鉛直に移動し (約1.6 km), 断熱的に最大14 K程度の温度低下が引き起こされると見積もられました。この温度変化から飽和蒸気圧の変化を通じて雲の質量増加を算出し, 粒径や硫酸密度, Mie散乱消散係数に基づいて光学的厚さ変化 $\Delta\tau$ を求めた結果, Case 1では $\Delta\tau \leq 0.01$ とIR2で観測された雲コントラスト ($\Delta\tau \sim 10$) を説明するには不十分でした。一方, Case 2では $\Delta\tau \sim 6$ (mode 2粒子のみと仮定) まで達し, さらに下降流による雲の蒸発効果を加味すると観測されるコントラストを十分に説明し得ることが示されました。Case 2はGCM内で得られた渦の存在高度を5 km下方に仮定したものです。

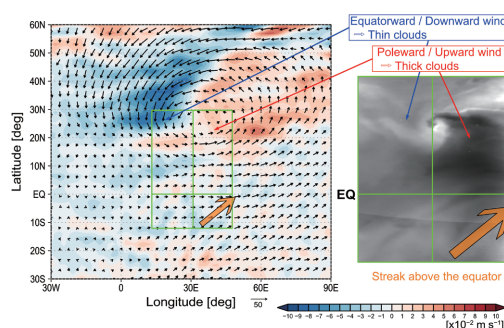


図5: (左) GCMで再現された渦構造。カラーマップは鉛直風を表す。(右) IR2/あかつきが観測した渦状の雲構造。観測された画像の経度方向を反転させることで, GCMと同じ座標系になるよう調整済み。

が, モデル内の大気安定度プロファイル等を現実の金星大気との比較に照らせば, 非現実的な想定ではありません。

以上のことから, 渦に伴う鉛直風が雲の形成・蒸発に大きく寄与していることがあり, 南北移流とともに, 鉛直風の効果が渦状雲構造の形成に本質的な役割を果たしていることが示唆されました。なお, 前述した通り渦は順圧不安定によって生成されますが, 渦周囲の鉛直流に関しては等温位面上の断熱運動によって説明が可能です。渦の中心からみて東西の南北・鉛直方向の風とポテンシャル温位の分布を調べたところ, 高度50–65 kmでは, 等温位面 (断熱面) が低緯度ほど低くなっており, 緯度20°–50°の間

ではその傾斜が急になっています。これは、東西平均された東西風が温度風バランスにあるため、渦の中心付近である北緯約 30° ・高度59.5 km付近では、南北風がほぼ等温位面に沿って吹いており、赤道方向(極方向)への風がその傾斜面を下降(上昇)することで、渦の西側(東側)に下降流(上昇流)を作っていると考えられます。

6. まとめと今後

金星探査機「あかつき」に搭載されたIR2が捉えた金星夜面に見られる特徴的な渦状の雲構造は、総観規模の低気圧性渦に対応すると考えられます。本研究では、AFES-Venus GCMを用いてこの渦を再現し、その構造と時間変化および成因を詳細に解析しました。モデル中で渦は高度約60 kmに出現し、東側で上昇流、西側で下降流を伴っており、IR2観測画像との比較から、このような鉛直風がそれぞれ雲の厚い(暗い)・薄い(明るい)領域に対応しており、スパイラル状の雲構造は鉛直風と南北風による移流の両方によって形成・強調されていることが示唆されました。

さらに、この渦は中緯度ジェットと密接に関連しており、北半球と南半球の間で約30日周期で交互に出現することが明らかになりました。この準周期的な変動は、南北半球に存在する成長中の渦と減衰中の渦が赤道を越えて結びつくことで南北角運動量輸送を作り、減衰中の渦が存在する半球の中緯度ジェットを強化し、その結果、順圧不安定によって新たな渦が生成されるという一連のプロセスによって説明

されます。

以上の成果は、金星の雲層中で発達する大規模な渦構造の背景にある力学メカニズムの全体像を初めて示したものと いえます。しかしながら、現時点では渦の発生位置(特に南北半球間の東西方向のズレ)を決定づける理論的な枠組みや、スーパーローテーションや惑星規模の波動との関係性についての理解は十分ではなく、今後のさらなる理論的・数值的な探究が必要とされます。また、この変動現象がどの程度長期的に安定して継続するのかや、中緯度ジェットや渦の寿命、そして渦周辺のエアロゾルや雲粒子の分布といった点について観測的に明らかにしていくことも重要な研究課題です。こうした課題に取り組むには、1か月規模の連続観測を含む詳細なデータの蓄積と、雲化学やエアロゾル物理も考慮したモデルの発展が鍵を握ります。著者としては、今後も地上望遠鏡による分光観測などを活用し、「あかつき」観測以降の継続的なデータ取得と、数値シミュレーションとの統合的な比較を通じて、金星大気の力学構造に対する理解を一層深めていく所存です。

参考文献

- [1] Imai, M. et al., 2025, *Icarus* 433, 116523.
- [2] Limaye, S.S. et al., 2018, *Earth Planets Space* 70, 24.
- [3] Peralta, J. et al., 2019, *Icarus* 333, 177.
- [4] Horinouchi, T. et al., 2023, *Geophys. Res. Lett.* 50, e2022GL101633.

著者紹介

今井 正堯



東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター特任助教。北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻博士課程修了。博士(理学)。産業技術総合研究所特別研究員、京都産業大学日本学術振興

会特別研究員(PD)を経て、2023年4月より現職。専門は惑星気象学。地上望遠鏡や金星探査機「あかつき」観測データを用いた観測の研究を主軸とし、現在は東京大学の6.5 m赤外望遠鏡をチリに建設するTAO計画に従事。