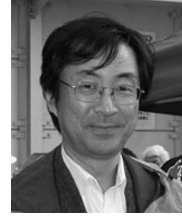


巨大通信衛星網による 天文観測への影響

大石 雅 寿¹・鹿野 良 平²

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ¹masatoshi.ohishi@nao.ac.jp, ²ryouhei.kano@nao.ac.jp



大石



鹿野

最近、地球周回軌道に夥しい数の非静止衛星群を打ち上げ、全世界に高速インターネット接続を提供するメガコンステレーション計画が進められている。天文観測への影響を感じた国際天文学連合は2019年5月、懸念を表明する声明を公表した。日本天文学会としてもその影響を憂慮し、まず会員間で本件について情報共有を図ることとした。本稿では、光赤外、電波、太陽観測にどのような影響が想定されるのかを評価した結果を示す。特に光赤外線領域では常時200-600基の衛星が2-7等に見えることから、深刻な影響が生じる可能性がある。

続々と打ち上がる巨大衛星通信網 (Mega Constellation)

最近世界では、非静止軌道に配備した非常に多数の衛星から成る巨大衛星通信網 (Mega Constellation) を介した高速インターネット通信サービス計画が複数進められている。これらは、世界中にレイテンシーの小さな高速 (~1 Gbps) 接続サービスを提供しようとするもので、実現すれば喜ぶ人々はいらぬだろう。2019年2月末に打ち上げが始まったGoogle傘下の企業によるOneWebシ

ステム¹⁾はその先駆けであり、2019年5月末から打ち上げが始まったSpaceX社によるStarlink²⁾はより大規模な計画となっている。表1に、いくつかの巨大衛星通信網についての技術諸元を示す。

注目すべきは、その衛星数である。OneWebは合計約4,500基、Starlinkは合計約12,000基を利用する計画になっている。個々の衛星はそれほど大きくなく、Starlinkの場合、衛星サイズは3×3×0.2 mの直方体に7×3×0.05 mの太陽光発電パネルが接続され、その重量は200-250 kgとされている。SpaceX社は自社の打ち上げ衛星Falcon 9

表1 主な巨大衛星通信網の技術諸元³⁾。軌道高度の略称は以下の通り：LEO (Low Earth Orbit), MEO (Medium Earth Orbit), VLEO (Very Low Earth Orbit)。↓は宇宙→地球, ↑は地球→宇宙方向の発射を意味する。O3bは、O3nB, O3blとO3b mPOWERと呼ばれる3つの衛星群から構成されている。

| システム名 | OneWeb | Starlink | Telesat | O3b |
|--------------|--|---------------------------------|---|---|
| 衛星機数 | LEO: 1,980 MEO: 2,560 | LEO: 4,425 VLEO: 7,518 | 117 | O3nB: 24, O3bl: 16, O3b mPOWER: 7 |
| 軌道高度 (km) | LEO: 約1,200 MEO: 約8,500 | LEO: 約1,150 VLEO: 約340 | 極軌道: 1,000 傾斜軌道: 1,248 | 8,062 |
| 利用周波数帯 (GHz) | 10.7-12.7 (↓), 12.75-13.25, 13.8-14.5 (↑) | 10.7-12.7 (↓), 14.0-14.5 (↑) | 17.8-18.6, 18.8-19.3 (↓), 27.5-29.1, 29.5-30.0 (↑) | 17.8-18.6, 18.8-19.3 (↓), 27.5-29.1, 29.5-30.0 (↑) |
| 遅延 (ms) | 50以下 | LEO: 25-35 | 30-50 | 150以下 |
| 通信速度 (bps) | LEO: 50 M MEO: 2.5 G | LEO: 1 G | 1 G | 1 G |

を用い、一度に60基の衛星を打ち上げる。その第一弾の打ち上げが2019年5月24日に行われた。これらの衛星は、超低地球周回軌道 (Very Low Earth Orbit) から中地球周回軌道 (Medium Earth Orbit) をそれぞれの軌道上でほぼ等間隔に配置されるようになる。

打ち上げ直後には、衛星群があたかも隊列を組んで移動する様子が世界各地で観測され、その様子を撮影した動画がインターネットに流れていた。

天文関係者から続々と上がる懸念の声

一方、天文関係者の間では、Starlinkの打ち上げ以降、大きな懸念が持たれるようになった。そのきっかけになったのは米国Lowell天文台が撮影したショッキングな画像である (図1)。

この画像はStarlinkを意識して撮像したのではなく、NGC 5353/4に出現した超新星を撮影中に偶然得られたものである。2019年5月24日の打ち上げ直後であり、Starlink衛星群がばらける前で衛星の間隔が十分ではなかったため、多数の斜線という形で撮像に対する妨害となってしまったのである。

12,000基のStarlink衛星が全て打ち上がると、常に上空に200基ほどの衛星が見えることが判明した。国際天文学連合はその知らせを受け、すぐに動いた。そして、2019年6月3日には懸念を示す声明を発表した⁵⁾。

その後、国内外の天文関係機関が続々と同様の声明を出した。国立天文台は2019年7月9日に「通信衛星群による天文観測への悪影響についての懸念表明」を公表した⁶⁾。海外では、米国国立電波天文台 (NRAO)⁷⁾、米国天文研究大学連合 (AURA)⁸⁾、Square Kilometre Array (SKA)⁹⁾、さらには、英国王立天文学会¹⁰⁾ や米国天文学会¹¹⁾ も声明を出した。国立天文台による声明をNHKが異例の声明として大きく取り上げて全国ニュースで報じた。その余波は本稿執筆時点でも及んで

おり、国立天文台にはマスメディア各社からの取材申し込みが続いている。

光赤外天文観測への影響

さて、図1の衛星群はその後どのように見えているのであろうか？ 2019年7月から8月にかけて米国のアマチュア天文家が観測した結果がインターネットに公表されている。それをChandra X-ray CenterのJonathan McDowell氏がまとめて図示したのが図2である。Starlink衛星の可視での等級が2-7等であることが分かる。アマチュア天文を含む天文研究者にとってこのような等級の天体は極めて明るく、今後の光赤外観測の妨害となり得ることは明白である。現在建設が進んでいるLarge Synoptic Survey Telescope (LSST) では、Starlink衛星網が完成すると、どの画像にも複数の衛星が映り込むと予想されており、大変頭を痛めていると聞く。ハワイ観測所のすばる望遠鏡に設置されたHyper Suprime-Cam (HSC) による撮像にも大きな影響が及ぶと考えられる。

2019年11月11日にはStarlinkの第2回打ち上げがあった。その直後である11月18日に南米チリにあるセロ・トロロ天文台 (Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO)) で行われたDark Energy Cameraを用いた撮像観測画像には、衛星による斜線が何本もくっきりと写っていた。同天文台のClara Martinez-Vazquez氏は“I am in shock.”とメディアの取材に答えている¹³⁾。

以下に述べる電波の場合と異なり、可視光や赤外線領域における光害を規制する国際機関は存在しない。今後のことを考えると、国連などにおける国際的な規制策定が喫緊の課題となるだろう。

電波天文観測への干渉防止策

現代の私達の暮らしは、様々な電波利用によって支えられている。誰もが持っているといって良い携帯電話はその代表であるし、衛星放送の出現は全国各地で同じテレビ番組が視聴することを可能に

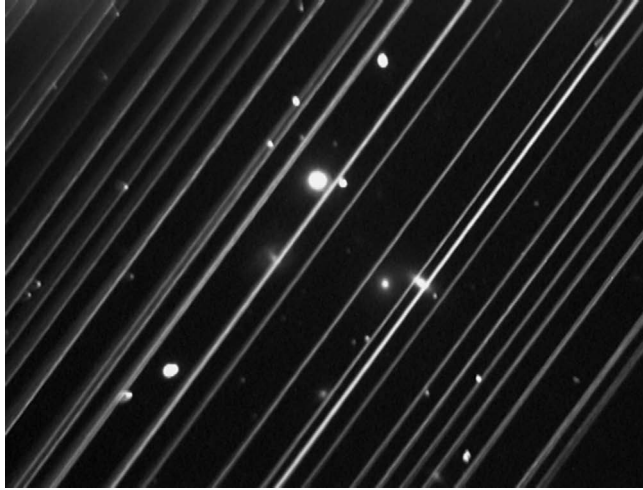


図1 NGC 5353/4に出現した超新星を撮影中に偶然撮影されたStarlink衛星列による“妨害”. 60基の衛星群を打ち上げただけでこのような妨害が生じる例である⁴⁾. Credit: Victoria Girgis/Lowell Observatory.

した. 一方電波は空間を伝搬するため, その周波数や電力を含め, 使い方をきちんと規定しないと混信(干渉)が生じてしまう. 電波は容易に国境を越えて伝搬するため, 電波資源の利用に当たっては国際電気通信連合(International Telecommunication Union (ITU))が策定する国際ルールに準拠して各国の電波法などが作られている.

表1には, メガコンステレーションが通信のために用いる電波帯域に関する情報を掲載している. コンステレーション側が用いる10.7-12.7 GHzのすぐ下に電波天文観測が保護を求める権利が与えられている10.6-10.7 GHzバンドがある. この電波天文バンドに干渉を起こさないための技術検討は欧州で詳細に行われており, その結果はECC Report 271¹⁴⁾にまとめられている. それによると, 電波天文観測を適切に保護するためには, メガコンステレーション衛星の送信機にフィルター(High Pass Filter)を装着すると共に, 電波天文バンドに隣接するチャンネルである10.7-10.95 GHzを使用しない, という技術要件が得られている. メガコンステレーションは様々な国の上空を通過するため, その運用のためには世界中の国から運用免許を得なければならない. 日本の電波行政を

司る総務省でも電波天文をメガコンステレーションから保護するための検討が2019年秋に行われ, 欧州のECC Report 271で得られた要件をそのまま適用することが確認されている.

留意しなければならないのは, 欧州における検討結果は, 現在メガコンステレーション側が提出している運用条件(表1)の場合にのみ適用されることである. 衛星数が増えてくると, 当然, その制約条件の再検討が必要となってくる.

太陽観測への影響

軌道高度にもよるが, Starlinkの地上からの見かけの大きさはおおよそ数秒角となり, 太陽を光赤外観測する際の影響は, そのサイズの影が太陽像内に写り込むことである. その頻度は, 太陽の視直径が0.5度とそう大きくないので, 12,000基の衛星の場合でも, 全面観測で25分に1基程度, 黒点周辺領域(“活動領域”)を拡大した観測で6時間に1基程度と試算される. また, 遠方銀河の観測に比べれば露光時間は短いため, 1撮像の中の衛星の影は, 視野を縦断するほど線状に広がるというより, 点状もしくは少し伸びた棒状になる程度と思われる. しかし, 偏光観測などのように,

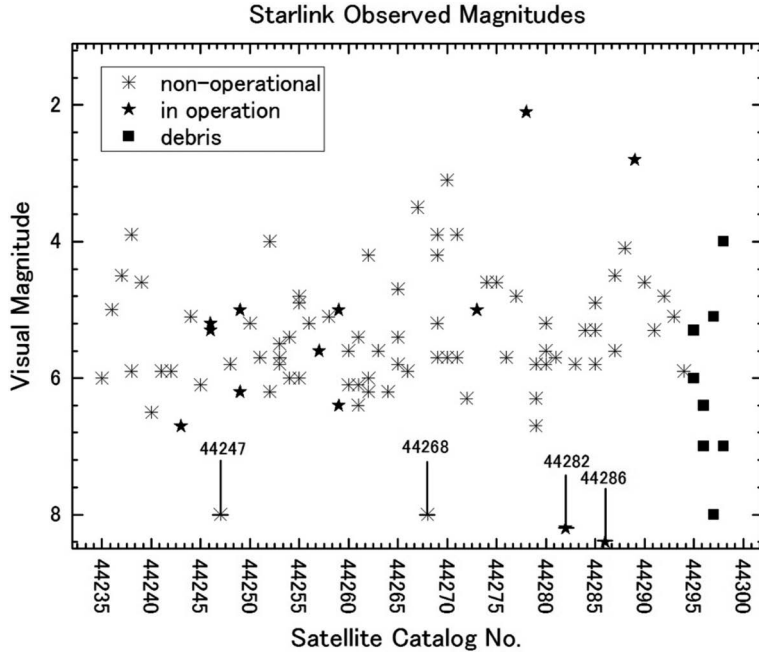


図2 Starlink衛星の実視等級の実測例。横軸は衛星番号、縦軸は観測された実視等級である。星印(★)は運用中、アスタリスク(*)は未運用の衛星を意味する。黒い四角(■)はデブリである。バーで示している衛星については等級がきちんと測定できなかった。図は、米国のアマチュア天文家が測定してVisual Satellite Observer's Home Page¹²⁾に公開したデータに基づいてChandra X-ray CenterのJonathan McDowell氏が作成したものを改変したもの。

連続した複数の撮像で生成される観測データもあるため、結果、観測不可の領域が無視できないほど広がる可能性もあり、懸念している。

一方、電波観測は太陽でも様々な周波数で行われている。国内観測については、マイクロ波での広域スペクトル観測（観測周波数：上限9 GHz）や、野辺山電波ヘリオグラフ（観測周波数：17 GHzと34 GHz）は、辛うじて通信周波数帯から外れており、日本も参加していて太陽も観測できる国際共同電波干渉計・アルマ望遠鏡（ALMA）の観測周波数（30-950 GHz）との干渉もないようだ。しかし海外においては、この通信周波数を含む広域スペクトルを観測対象として、太陽専用および太陽観測可能な電波干渉計が複数運用され（VLA, EOVS, CSRH）、さらに計画もされており、これらの観測では通信電波の影響が強く懸念される。

衛星数の増加や通信帯域の拡大などの今後の動向は、太陽観測の面でも充分注視する必要がある。

最近の動きと今後に向けて

2019年10月中旬になってStarlinkが衛星を30,000基追加する計画であることが公表された¹⁵⁾。衛星を打ち上げる前段階として、その計画をITUに登録する義務があるため、情報が公開されることになったのである。30,000基が仮に全て打ち上げられると、Starlinkだけで総計約42,000基になる。これは、これまでに打ち上げられた衛星総数である約8,500基のほぼ4倍に相当する。12,000基の場合ですら常に200基が上空に見えると予想されているのだから、42,000基の場合はその3倍である約600基が常に上空に見えていることになる。これは、特に光赤外観測に対して大きな妨害となり得る。

このような事態を踏まえ、米国天文学会は2020年1月のホノルル大会においてSpaceX社の代表を招いた特別セッション“Challenges to Astronomy from Satellites”を開催した¹⁶⁾。セッションでは、衛星打ち上げコストの低減に伴って衛星打ち上げの産業化が始まっていること、CTIOを例として何基の衛星が見えるかに関するシミュレーション結果の提示、電波天文観測への影響と国際規制の現状、SpaceXとして反射光を抑える努力をしていることとどの程度の明るさに見えるのかを知るために天文学関係者に対する協力を要請する、といった発表があった。広視野観測では複数の衛星が視野に入るためにゴーストも生じてしまうこと、赤外線観測では地平線より上にある衛星が全て見える可能性があるため大きな影響が懸念されるとのコメントも出ていた。

天文観測と衛星利用の共存を図っていくためには、双方の考え方をお互いに理解することが必須であり、このような胸襟を開いた協議の場が平和的解決に向けた出発点となるだろう。2020年1月初旬に打ち上げられたStarlink衛星60基のうち1基(STARLINK-1130、国際識別子は2020-001BL)には反射防止コーティングが施されているので、日本各地から観測してその等級を測定してSpaceX側に通知するのも良いだろう。日本天文学会としても、同様の観点から日本社会に両者の平和的共存を訴えていくことが重要な活動となるだろう。

参考資料

- 1) <https://oneweb.world>
- 2) <https://www.starlink.com>
- 3) http://www.soumu.go.jp/main_content/000631389.pdf
- 4) <https://iau.org/public/images/detail/ann19035a/>
- 5) <https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann19035/>
- 6) <https://www.nao.ac.jp/news/topics/2019/20190709-satellites.html>
- 7) <https://public.nrao.edu/news/nrao-statement-commsats/>

- 8) <https://www.aura-astronomy.org/news/aura-statement-on-the-starlink-constellation-of-satellites/>
- 9) <https://www.skatelescope.org/news/ska-statement-on-satellite-constellations/>
- 10) <https://ras.ac.uk/news-and-press/news/ras-statement-starlink-satellite-constellation>
- 11) <https://aas.org/press/aas-issues-position-statement-satellite-constellations>
- 12) <http://satobs.org>
- 13) https://www.newscientist.com/article/2223962-spacexs-starlink-satellites-are-interfering-with-astronomy-again/?fbclid=IwAR0jBR3nga3HRmTAyH_WO4kv2-NCCXeiuQsEUGZ_zoronLYg4CkpBijGaQ
- 14) <https://www.ecodocdb.dk/document/1032>
- 15) <https://spacenews.com/spacex-submits-paperwork-for-30000-more-starlink-satellites/>
- 16) <https://aas.org/posts/opportunity/challenges-astronomy-satellites-invites-abstracts>

(URLの最終閲覧日は全て2020.01.22)

Impacts by Mega-Constellations to Astronomical Observations

Masatoshi OHISHI and Ryouhei KANO

National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Recently, mega constellation projects have launched a large number of satellites to non-geostationary orbits, which aim to provide high-speed Internet access to the entire world. In May 2019, the International Astronomical Union, which found possible impact on astronomical observations, issued a statement expressing its concern. The Astronomical Society of Japan is also concerned for such impact and would like to share the projects as well as their effects with all the members. This article presents the results of an evaluation of expected effects on optical/infrared, radio, and solar observations. Particularly in the optical/infrared region, 200 to 600 satellites will always be visible with 2 to 7 magnitude, which may impair observations seriously.

注) VLAはthe Very Large Array, EOVSAはthe Expanded Owens Valley Solar Array, CSRHはthe Chinese Spectral Radioheliographの、それぞれ略称である。