1.1 宇宙天気の社会影響

石井　守（情報通信研究機構　電磁波研究所　宇宙環境研究室）
（2020 年 3 月 18 日受付、2021 年 5 月 31 日公開）

宇宙天気とは、主に太陽の活動を源とする地球近傍宇宙および大気への影響をさし、特に我々の生活に影響を与える諸現象をさすことが多い [1]。太陽は生命の活動・維持に必要な熱や光を供給する一方、生命にとって危険な X 線・紫外線などの電磁波、高エネルギー粒子、あるいは太陽風と呼ばれる高速のプラズマ流を噴出する。

電磁波は地球の大気と光化学反応を起こし、大気上部が電離し電離圏を形成する。これにより、波長が短く生命に悪影響を及ぼす電磁波のほとんどは地上までは届かない。また、太陽風は地球磁場および電離圏と相互作用することで複雑な様相を示す。太陽風中の太陽由来の磁場が北向きの時には、地球磁場は防護壁として働き、地球近傍への影響は限定的である。一方南向きの時には太陽由来の磁場と地球磁気圏の間で磁気再結合が生じて太陽風のエネルギーが地球近傍まで到達する。特に、太陽フレアおよびそれに伴う高エネルギー粒子やコロナ質量放出（Coronal Mass Election; CME）、コロナホールから放出される高速の太陽風、およびフィラメント放出に伴う太陽風などによる地球及び生活に与える影響が大きいことが知られている。

太陽フレアに伴う電磁波、高エネルギー粒子および CME の伝搬速度はそれぞれ異なることから、地球および社会への影響は時間差をもって現れる。電磁波は光速で地球に到達するためフレア発生後 8 分程度で影響が表れる。高エネルギー粒子は 30 分から 2 日程度後、CME の影響はその速度によるが 2～3 日後に発生することが多い。

電磁波による影響を図 1 に示す。X 線や紫外線は電離圏の比較的低高度にある D 領域の電子密度を増加させる。この領域は中性大気密度が高いため、中波・短波等を吸収し伝搬を妨げる。これによりこれらの周波数を使った通信・放送の利用を著しく妨げる（Dellinger 現象、あるいは Radio Black out）。また、太陽からの電磁波は非常に広帯域に及ぶため、衛星測位信号および航空管制レーダの使用が困難になる事例も報告されている。これらの現象は、太陽が見えている範囲、つまり昼側で発生することが特徴である。

続いて、高エネルギー粒子による影響を図２に示す。高エネルギー粒子は宇宙空間での有人活動時には人体被ばくを引き起こす可能性があり、また、人工衛星等飛翔体の電子回路上の信号エラーを起こすことで誤作動の原因になると考えられている。大気圏内でも国際線の航空機高度では地上に比べて被ばくの危険性が高まることが知られている。また、極域を中心に電離圏 D 領域の電子密度増加を

[1] 米国 NOAA は“Space Weather refers to variations in the space environment between the sun and Earth (and throughout the solar system) that can affect technologies in space and on Earth.”と定義 (https://www.regions.noaa.gov/central/index.php/noaas-space-weather-prediction-center-space-weather-toolkit/)

引き起こし、短波帯を中心に通信・放送の利用が制限される（極冠域吸収 Polar Cap Absorption : PCA）。

CME の影響を図３に示す。CME の影響により人工衛星に帯電現象が発生し、衛星の機能低下あるいは運用の停止が発生する可能性がある。また、極域の磁力線に沿って磁気圏・電離圏間に電流が生じ大規模なオーロラが発生するとともに、地下誘導電流（Geomagnetically Induced Current; GIC）が発生、送電網および給電システムに影響を与える。オーロラは中性大気を加熱・膨張させ低高度衛星の軌道に影響を与えるほか、電離圏嵐を発生させ、電離圏の乱れによる衛星・地上間あるいは電離圏を利用した通信・放送の利用低下などが発生する。特に電離圏遅延の変化による衛星測位精度の劣化や、シンチレーションによるロック損失発生での利用制限等も発生する可能性がある。

電離圏は地表に近いことから、太陽活動等の影響の他、台風や前線等の気象や地震等の影響を受けて変動している。これら気象現象が原因となる電離圏擾乱は太陽フレアの発生には関連せず発生する。代表例としてはプラズマバブルとスポラディック E 層が挙げられる。これらの例を図４に示す。

プラズマバブルは磁気赤道を中心に日の入り後に南北に対称に発生する電子密度の低い領域である。プラズマバブル内を通過する衛星測位信号は想定される電子密度モデルとの差が大きくなり測位精度の劣化を引き起こす。また、プラズマバブルの境界付近では電子密度の空間変化が非常に大きいため電波のシンチレーションが発生し、地上において安定した受信ができないために衛星測位の利用が制限されることがある。

スポラディック E 層（Es 層）は、高度 100km 付近の電離圏電子密度が局地的に増加する現象をさす。Es 層は D 領域とは反対に短波および超短波の反射を高め、想定以上に伝搬距離を延ばすことが知られている。このために遠隔地で同じ周波数帯を用いているシステムに干渉し利用の不具合を発生させることが知られている。

以下の章において、これらの現象と社会への影響についてより詳細に説明していく。

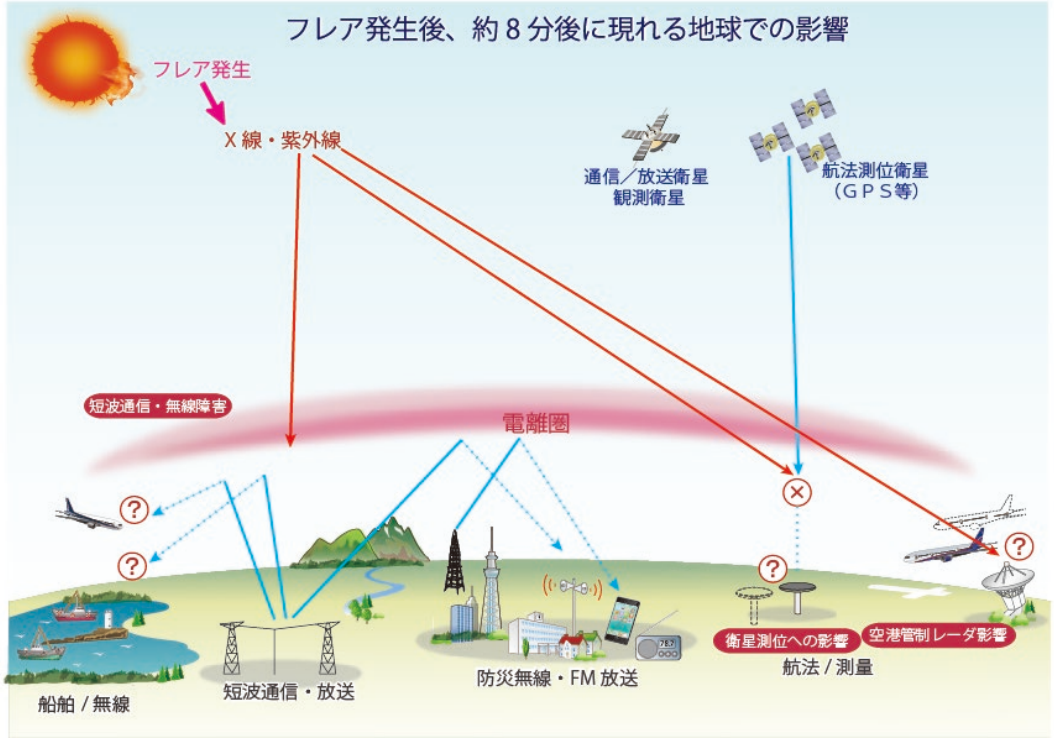

図 1. 電磁波による社会インパクト

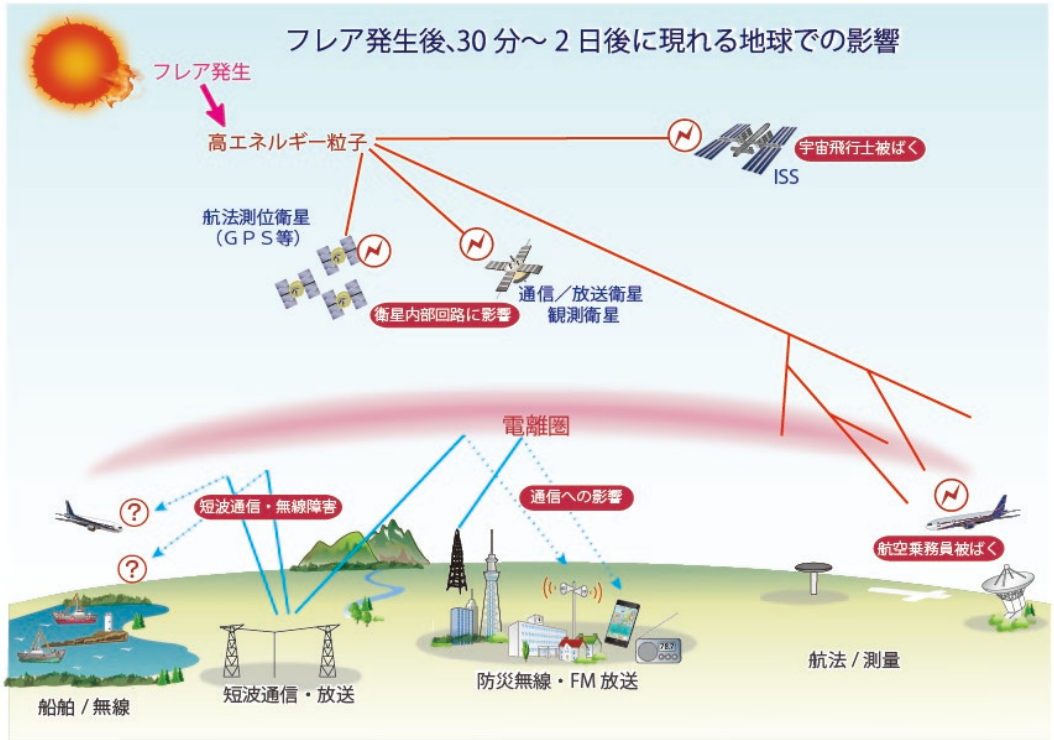

図 2. 高エネルギー粒子による社会インパクト

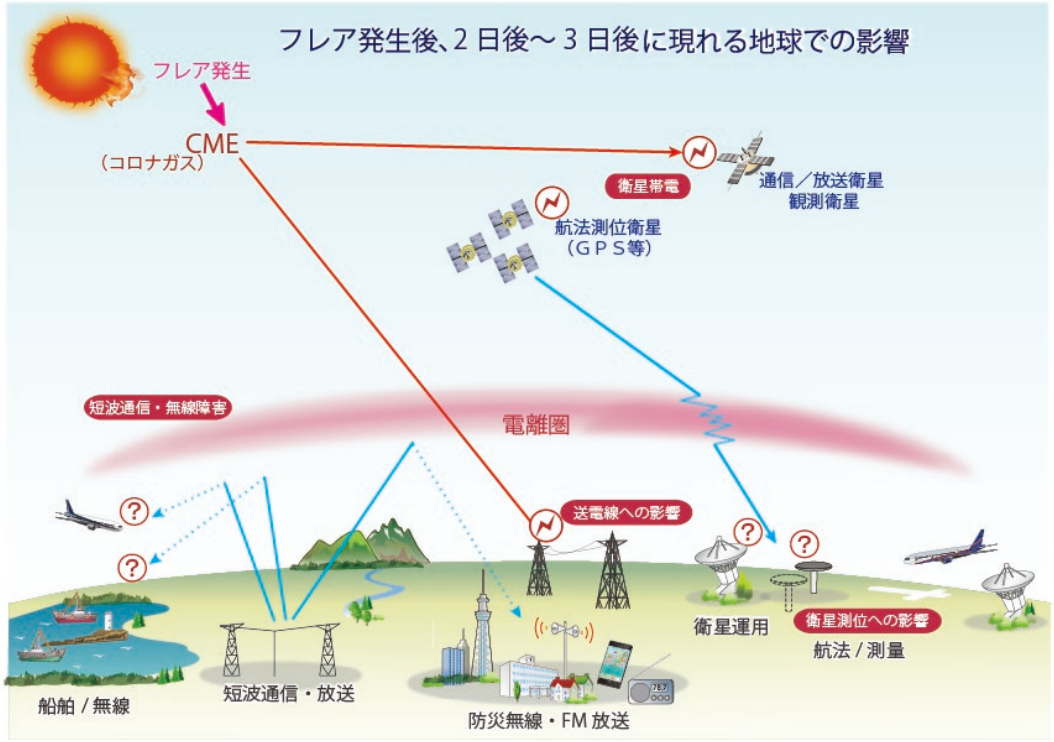

図 3. CME による社会インパクト

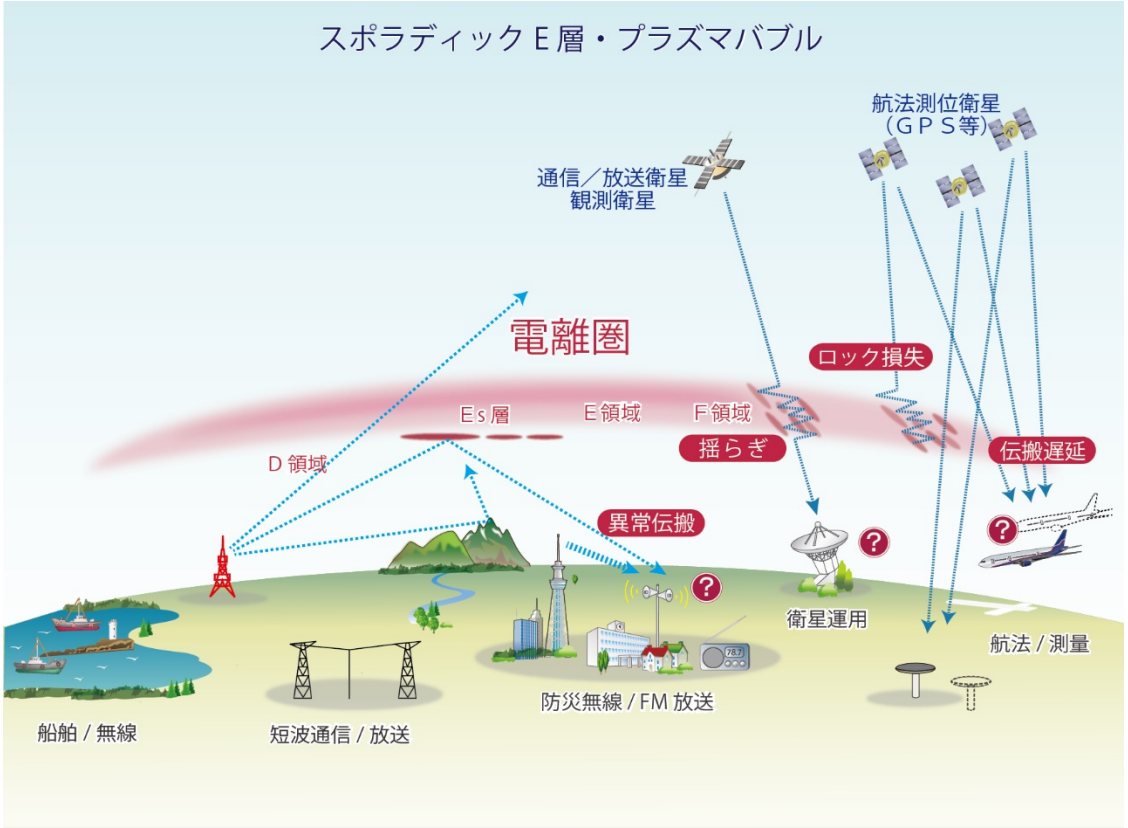

図 4. 太陽フレアに起因しない宇宙天気現象による社会インパクト