

実践①－1 言語活動を生かした探究的な活動の授業モデルの提案

－領域横断的な探究活動を通して言語活動を重視させた授業の実践－

1 はじめに

東日本大震災をきっかけとし、理科教育の在り方についても改めて大きな問いが投げ掛けられている。例えば、地震の発生に伴って観測された多領域にわたる複雑な自然現象を解明する必要性が高まる中にあるのは、地震、津波、放射線等に関するより正しい知識や理解が求められている。物理・化学・生物・地学の4領域からなる理科については、各領域相互の関連性や系統性を大切にしながら、科学的な自然観とともに、科学的に探究する能力と態度を育てることの重要性が、これまで以上に大きくなると予想される。

平成20年1月の中央教育審議会答申では、PISA調査の分析結果から、「科学的証拠を用いること」に比べ、「科学的な疑問を認識すること」や「現象を科学的に説明すること」が課題として指摘されている。また、新学習指導要領の科目構成および内容等については、「探究的な学習を重視し」「自然科学の複数の領域を学び」「自然を探究する能力や態度を高めることができるよう」改善するとされている。さらに文部科学省の「言語活動の充実に関する指導事例集」において、「科学的な思考力や判断力を育成する観点」については、「生徒一人一人にじっくり考えさせるとともに、グループで協議させた後、自らの考えをまとめさせること」が挙げられている。

以上のことを踏まえ、言語活動の充実を図りながら、領域横断的な視野をもち、探究する能力を育むことを目指した授業実践について研究する。

2 研究の目的

(1) 領域横断的に視野を広げる観点から

「自然科学の複数の領域」をバランスよく授業で取り扱うことは、決して容易なことではない。しかし、本来の自然現象とは、各領域の内容が複雑に絡み合っており、深く自然を理解するためには、領域の境界に捉われず、総合的な視野をもって考察することが求められる。

そこで本研究では、領域を横断するような総合的な視野で、論理的に自然を探究する思考力を培うことを目的とした探究活動の在り方について研究する。具体的には、物理で学習した基礎的な知識を復習する中で、地学領域で扱われる地球や環境問題まで対象を広げ、探究心や問題意識を高めるような授業展開を研究する。

(2) 言語活動の充実を図る観点から

教員による一方向的な講義形式の学習とは異なり、生徒の能動的な参加を取り入れた学習法の総称をAL（アクティブラーニング）といい、能動的に学習することによって、認知的能力、倫理的能力、社会的能力、教養、知識、経験を含めた汎用的能力の育成を図ることができるとされている。そのALの先駆的な実践で知られる元越ヶ谷高校（埼玉県）教諭の小林昭文によれば、学習形態の違いによる学んだ内容の「平均定着率」は「講義は5%、読書は10%、視聴覚は20%、演示は30%、グループ討論は50%、自らの体験は75%、そして他人に教えることは90%」になるという研究結果が示されている。

そこで、言語活動を充実させ、科学的な対話力の向上を目指す観点から、生徒が意見交換をしながら考えをまとめ、協調的に学習し、表現する機会が多くなるような授業展開を研究する。加えて、講

義形式に偏らず、基礎知識の確認に終始しないように配慮する。

(3) 探究する能力を育む観点から

生徒の探究する意欲を喚起しその力を育むために、提供された観測事実やデータを活用しながら思考する過程を重視した活動を研究する。その際、結論を知識として植え付けるような展開にならないようにするため、得られた観測事実に対して、数々の研究者が現在も挑み、統一的な見解に至っていないような現象や問題を積極的に扱うようにする。

3 研究の方法

(1) 探究活動で取り上げる課題・題材

本研究では、地学領域における磁場に関連した二つの探究活動に取り組んだ。

題材の一つとして、統一的な理解が得られているような内容である「極域電離層電流による地磁気の変動」を取り上げた。具体的には「太陽起源の粒子が地球へ降下→超高層大気でのオーロラ発光と電子密度の増加→電離層電流による磁場の発生→地表での地磁気変動」という現象を扱った。この題材では、応用としての「右ねじの法則」の復習のみに終わらず、自然現象の探究には多種多様な観測の組み合わせや協力が重要であることを強調した。

もう一つの題材として、未解明な要素を多く含む内容である「太陽活動度と地球環境の因果関係」について取り上げた。具体的には「スベンスマルク効果」として知られている「太陽活動の低下→太陽磁場や太陽風の弱まり→太陽磁気圏内の地球大気に到達する宇宙線粒子の増加→宇宙線粒子により形成される雲の増加→地球の寒冷化」という現象を扱った。この題材では磁場の役割や放射線の理解を深めるとともに、未解明な環境問題に対しての問題提起につなげた。さらに、このような理論に到達するには天文学、地球物理学、地球化学等と領域横断的に考えることが不可欠であることを強調した。

(2) 探究活動の進め方

言語活動の充実を図り協調的な学習を深めるため、どちらの題材の活動においても、東京大学の大学発教育支援コンソーシアム推進機構が推奨する「知識構成型ジグソー法（ジグソー法）」を取り入れて授業を展開した。ジグソー法とは、あるテーマについて複数の視点で書かれた資料を担当に分かれて読み、自分なりに納得できた範囲で説明を作って交換し、交換した知識を統合してテーマ全体の理解を構築したり、テーマに関連する課題を解いたりする活動から学ぶ、協調的な学習方法である。

具体的には、まず、4人一組の班を編制し、各班内でA～Dの各資料の担当を割り当てた。次に、各資料の担当者のみからなる班を編制し、それぞれの班で与えられた資料を読み、意見交換しながら資料中の設問を考えさせ、資料の内容について理解を深めさせた。その後、最初の4人の班に再び戻り、持ち寄ったA～Dの4種の資料を参考に、新たな課題に対して4人で話し合いながら協調して考えさせ、最後に自分の考えを表現させた。このような手法を用いることで、各生徒に自分しか持ち合わせない担当の資料に対して責任をもたせるようにして、より積極的に協調させる環境を整えた（図1）。

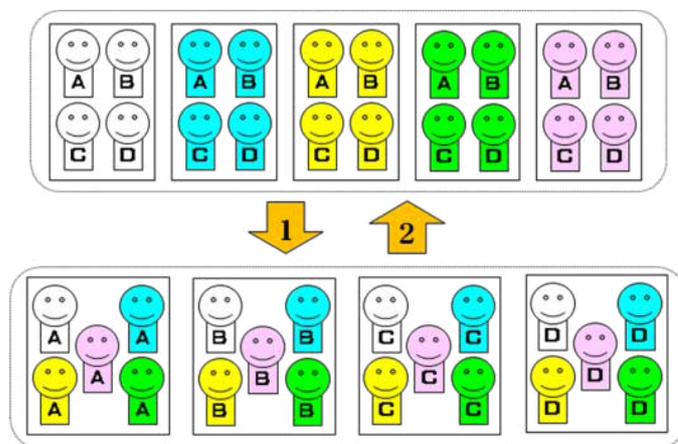


図1 ジグソー法の班編制

4 研究の内容

(1) 極域電離層電流による地磁気変動についての探究活動

ア 実施クラス

2年理系（物理選択）の2クラス（男子31人+女子9人のクラスと、男子19人のクラス）

イ 授業展開

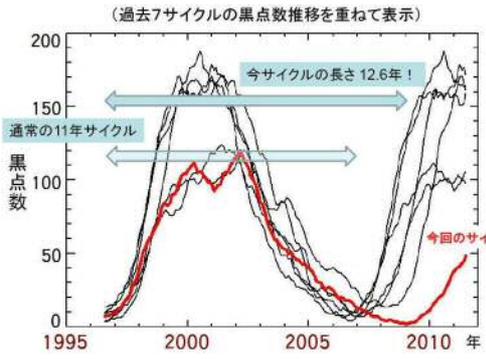
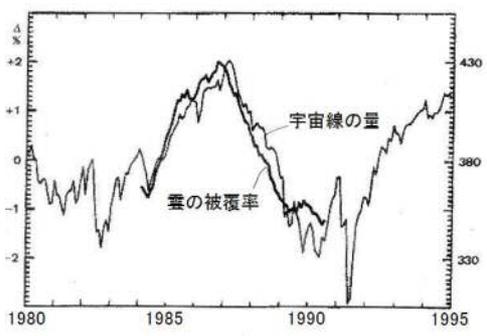
| 過程 | 指導内容 |
|------------|---|
| 導入 2分 | 本時の流れを説明し、4人一組の班を編制させ、各班内で4種類の資料A～Dの担当者を決めさせる。 |
| 展開① 15分 | <p>資料A～Dの各担当だけからなる別の班に分かれさせる。各担当の資料を読ませ、資料に示されている【問】にその班で協力して取り組ませながら、理解を深めさせる。</p> <p>【資料A】スカンジナビア半島北部で、地磁気の南北成分が時間変動することを示す、磁力計観測網のデータ（図2）（資料1）</p> <p>【資料B】電流の周囲での磁場、および磁場の重ね合わせを示す、エルステッドの実験の説明（資料2）</p> <p>【資料C】地磁気変動が捉えられた地点の上空で、同時刻にオーロラが輝いていたことを示す、探査衛星（POLAR）によるオーロラ画像（図3）（資料3）</p> <p>【資料D】オーロラの発光領域内で電子密度の増加を示す、レーダー観測のデータ（資料4）</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="379 913 817 1377"> </div> <div data-bbox="911 927 1406 1326"> </div> </div> <p>図2 磁場の南北成分の観測例 「IMAGE」 http://space.fmi.fi/image/</p> <p>図3 探査衛星のオーロラ画像 「Polar Visible Imaging System」 http://vis.physics.uiowa.edu/vis/</p> |
| 展開② 15分 | 授業の始めの班に戻らせる。班内で、資料A～Dのそれぞれの内容について発表させるとともに、各資料に関する理解を深めさせる。次に「2000年1月10日19時に、どのような現象がどこで起きていたと考えられるか」という課題について、A～Dの資料を参考にしながら「地磁気、電流、オーロラ、電子密度」の語句を用いて、協力して論理的に考えさせる。 |
| 展開③ 15分 | 各班内での話し合いから自分の考えをまとめ、文章で表現させる。まとめた考えの発表を通して、現象に対する理解を深めさせる。 |
| まとめ 3分 | まとめとして、実社会と電離層電流との関連について触れる。具体例として、電離層電流は、強いときには数千万アンペアにも達し、地上の送電線に異常誘導電流を発生させ、変圧器やブレーカーの機能を麻痺させることを紹介する。また、誘導電流が石油パイプラインに流れ、腐食の進む原因になったり、パイプの温度を上昇させて周囲の生態系を乱したりすることなども紹介する。さらに、大学などの研究現場においても、自然現象の解明には多種の観測データを組み合わせる協力が重要であることを強調する。 |

(2) 太陽活動度と地球環境の因果関係についての探究活動

ア 実施クラス

2年理系（物理選択）の2クラス（男子31人+女子9人のクラスと、男子19人のクラス）

イ 授業展開

| 過程 | 指導内容 |
|------------|---|
| 導入 5分 | 何の情報も与えない状態で、「地球温暖化について説明しなさい」という設問に対する生徒の考えを記述させる。 |
| 展開① 2分 | 本時の流れを説明し、4人一組の班を編制させ、各班内で4種類の資料A～Dの担当者を決めさせる。 |
| 展開② 12分 | <p>資料A～Dの各担当だけからなる別の班に分かれさせる。各担当の資料を読ませ、資料に示されている【問】にその班で協力して取り組ませながら、理解を深めさせる。</p> <p>【資料A】近年における太陽活動の周期の異変について説明する資料（図4）（資料5）</p> <p>【資料B】太陽活動度と太陽磁場の変動との相関を示すデータ（資料6）</p> <p>【資料C】太陽磁場が宇宙線の侵入を妨げる役割について説明する資料（資料7）</p> <p>【資料D】地球に到達する宇宙線の量と雲の量の相関を示すデータ（図5）（資料8）</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図4 近年の太陽活動の周期 「国立天文台ひのでホームページ」 http://hinode.nao.ac.jp/index.shtml</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図5 宇宙線量と雲量の相関変動 「Svensmark & Friis-Christensen, (1997)」</p> </div> </div> <p>同時に、資料Dの担当班の生徒と他の班の希望者には、簡易的な霧箱により資料Dの雲の発生の理解を深める実験を見せて、理解を深める一助とする。</p> |
| 展開③ 12分 | 授業の始めの班に戻らせる。班内で、資料A～Dのそれぞれの内容について発表させるとともに、各資料に関する理解を深めさせる。次に「2013年以降の太陽活動と地球環境について、考えられること」という課題について、A～Dの資料を参考にしたが「周期、活動度、磁場、雲」の語句を用いて、協調して論理的に考えさせる。 |
| 展開④ 12分 | 各班内での話し合いから自分の考えをまとめ、文章で表現させる。まとめた考えの発表を通して、現象に対する理解を深めさせる。 |
| まとめ 7分 | 「スベンスマルク効果」に対する反論や、残されている問題点について紹介する。また、このような理論に到達するには、天文学、地球物理学、地球化学等との領域横断的な考え方が不可欠であることを強調する。その上で改めて、地球温暖化について思ったこと、考えたことをまとめさせる。 |

5 研究結果のまとめと今後の課題

(1) 地磁気変動に関する探究活動について

本研究では、「思考・判断・表現」の観点について評価を試みた。「2000年1月10日19時に、どのような現象がどこで起きていたと考えられるか」という課題に対して、まず「地磁気、電流、オーロラ、電子密度」という四つの語句を適切に用いていけば状況Bとした。さらに、概ね論理的に順序立てて説明できていけば状況Aとした。その結果、状況A、B、Cの生徒の各比率は15%、73%、12%であった。次に、状況Aと判断された生徒の記述の中から2例を紹介する。



図6 探究活動の様子

- ・オーロラが発生したことで電子密度が高くなり、それにより大きな電流が流れやすくなったので、地球の北極周辺で西向きの電流が流れた。その電流によって地磁気が乱れ、本来北向きの磁場が弱まり南向きの磁場が強くなった。
- ・太陽風がスカンジナビア半島上空にぶつかり、大気中の粒子が電離され電子密度が濃くなりオーロラが発生することで電流が流れた。地磁気が南向きに強まったため、電流は東から西向きに流れた。

(2) 太陽活動度と地球環境に関する探究活動について

同様に「思考・判断・表現」の評価の観点から、「2013年以降の太陽活動と地球環境について、考えられること」という課題に対して、四つの語句「周期、活動度、磁場、雲」を適切に用いていけば状況Bとし、概ね論理的に順序立てて説明できていけば状況Aとした。その結果、状況A、B、Cの生徒の各比率は62%、29%、9%であった。次に状況Aと判断された生徒記述から2例を紹介する。

- ・以前予想していた太陽の活動周期と異なり、近年は太陽の活動の停滞が続いている。太陽の活動が低下すると太陽の磁場が弱くなり、地球を含む太陽系全体に降り注ぐ宇宙線が増える。すると、地球では雲の量が増え、日光が以前よりも地球表面に当たる時間が短くなる。そして、この状況が続くと地球全体が寒冷化する可能性がある。
- ・太陽の活動度の周期が予想から大きく外れて低くなっている。太陽の活動度が下がると黒点の数が減り、磁場が弱くなる。磁場が弱くなると、守られていた宇宙線などの粒子が地球に降り注ぐ。宇宙線が増えると、雲ができやすくなり、雲は地球の温室効果に大きな影響を与える。

(3) 生徒による事後アンケートについて

下の四つの表は、探究活動後に、生徒に行ったアンケートの集約結果である。

| ① 生徒同士で、一緒に考えたり、教え合ったりすることによって、課題に対する理解は深まりましたか？ | |
|--|-------|
| 大いに、理解が深まった | 38.2% |
| どちらかと言うと、理解が深まった | 47.3% |
| どちらとも言えない | 12.7% |
| どちらかと言うと、理解は深まらなかった | 0.0% |
| 理解は深まらなかった | 1.8% |

表-1

| ② 「ジグソー法」を「講義形式の授業」と比べると、より意欲的に学びましたか？ | |
|--|-------|
| ジグソー法の方が、より意欲的 | 52.7% |
| 講義形式の授業の方が、より意欲的 | 7.3% |
| 同じくらい意欲的 | 40.0% |

表-2

| -③ 人に説明することには、意欲的ですか？ | |
|-----------------------|-------|
| 意欲的である | 25.5% |
| どちらかと言うと、意欲的である | 41.8% |
| どちらかと言うと、意欲的ではない | 23.6% |
| 意欲的ではない | 9.1% |

表-3

| ④ 日頃の学習活動において、人に教えること、人から教えられることは、よくありますか？ | |
|--|-------|
| 教えることも、教えられることも、よくある | 25.5% |
| 教えることはよくある | 16.4% |
| 教えられることはよくある | 41.7% |
| 教えることも、教えられることも、あまりない | 16.4% |

表-4

生徒同士で協調的に学習することによって、約 85% の生徒が理解の深まりを体験できたと答えている（表-1）。また、今回のジグソー法では、多くの生徒が意欲的に学習に取り組むことができ、積極的に話し合っている様子が見受けられた（表-2）。一方で、自分の担当以外の資料について、自分なりに読み込む時間がほしいとの声も聞かれたことから、より深い理解を求める生徒には時間が不足していたことが考えられる。

また、人に説明することに対しては、7割弱の生徒が「意欲的である」「どちらかと言うと、意欲的である」と答えている（表-3）。しかし、授業や自主学習など日頃の学習活動において、教える側としての自らの活躍を認識している生徒は4割程度しかいない（表-4）。生徒が潜在的にもつ学び合う意欲を、日頃の学習活動において積極的に引き出せるような展開について、今後も検討していきたい。

(4) 今後の課題

言語活動の充実を図るジグソー法を活用し、領域横断的な課題に対する探究活動に取り組むことは、視野の広い探究心や問題意識を喚起することのみならず、協調的な学習の意義を深めることにも、効果的であったと考えられる。また、数式的な問題演習で能力を発揮していた生徒と、今回の協調学習で達成度の高い結論を導き出した生徒とは、必ずしも一致していないことが見受けられた。学び合いによる学習効果を引き出すということだけでなく、生徒の能力や可能性を引き出すなどのさまざまな観点からも、言語活動の充実を図る協調学習を取り入れることは、意義深いと考えられる。

一方で、ジグソー法では、扱う題材によっては、自分の担当以外の資料に対して、より深い理解を補うための事後の対策が必要となる場合も想定される。各資料での設問は、生徒の話し合いのきっかけづくりとなるばかりでなく、資料の内容に対する生徒の理解の度合いを確認できる指標となるため、状況に応じて教師が助言をすることも効果的である。また生徒の個人の評価が所属する班の評価に直結しないよう、まとめの文章は生徒に個人で考え表現させることも、留意すべき点である。

また予想に反し、地磁気変動に関する探究活動の方が、生徒には難しく感じられたようであった。その要因としては、グラフや図を読み取る力がより高度に求められたことが挙げられる。改めて、グラフや図の読み取り能力を育むことの重要性を考えさせられた。さらに今後は、より積極的に領域横断的な視野を広げ、研究活動としての素養や理解を深めるために、インターネット等を利用して生徒が自ら観測データを収集して、自然現象の再現性を確認するような実習活動も取り入れていきたい。

参考文献・資料等

- 『高等学校学習指導要領解説理科編』（文部科学省 2009）
- 『言語活動の充実に関する指導事例集』（文部科学省 2012）
- 『太陽の科学』NHK ブックス（柴田一成 2010）
- 『太陽活動の謎』NHK サイエンス ZERO 取材班＋常田佐久（NHK 出版 2011）
- 『太陽に何が起きているか』文春新書（常田佐久 2013）
- Svensmark, Henrik; Friis-Christensen, Eigil. “Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships”. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics* 59 (11): 1225-1232. (1997)
- AL 学習 <http://d.hatena.ne.jp/a2011+jyugyoukenkyu/>
- ジグソー法 <http://coref.u-tokyo.ac.jp/>
- IMAGE ネットワーク <http://space.fmi.fi/image/>
- POLAR 衛星データ <http://vis.physics.uiowa.edu/vis/>

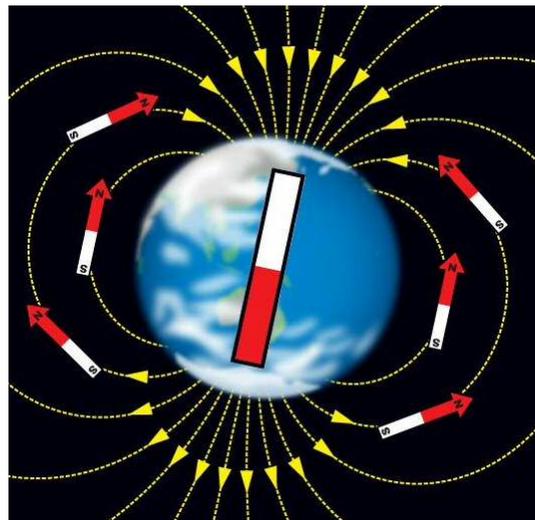
資料1 「極域電離層電流による地磁気変動についての探究活動」の資料A

地磁気は、地球により生じる磁場(磁界)です。

35億年前の岩石にも地磁気のなごりが見つけられていることから、地磁気は地球の歴史(46億年)のかなり早い時期からあったと考えられています。

地表の地磁気の向きは、地球の内部に棒磁石のようなものがある場合とそっくりであり、地球の内部の様子が明らかになってきた20世紀中頃に、地磁気の成因は地球の内部にあると、考えられるようになりました。

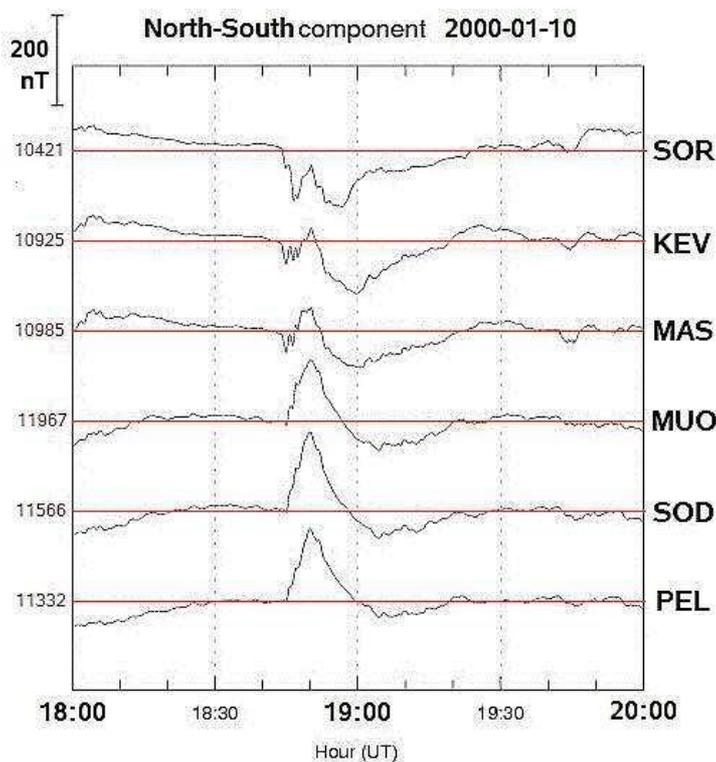
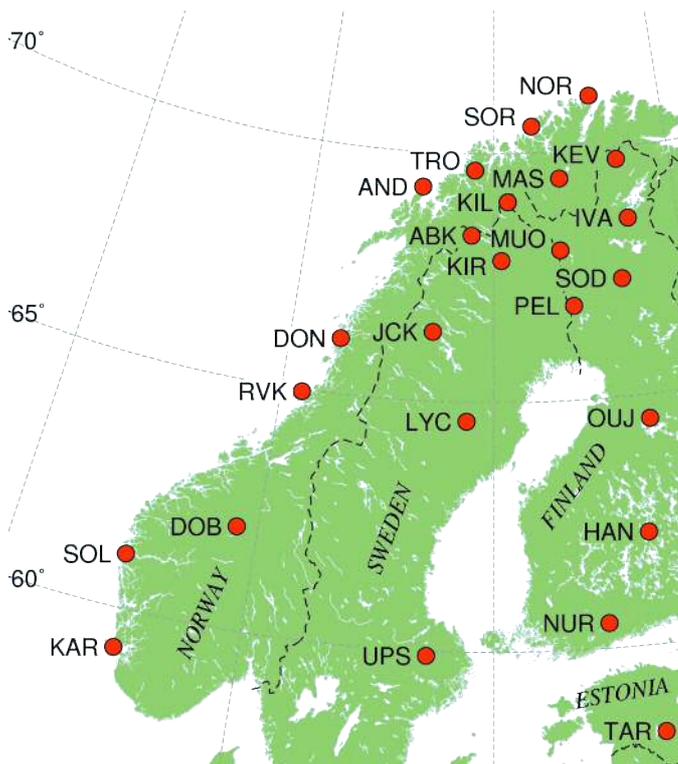
地磁気は向きと大きさを持つ量(ベクトル)で、その向きも強さも場所によって異なります。例として、現在の日本における地磁気の強さは約46000 nT (nは 10^{-9} , Tは磁束密度を表す単位)です。地球上での地磁気の分布を見ますと、極地方で大きな値を示し、赤道付近の低緯度地方で小さな値を示す傾向があり、約25000 nT (南米付近)から65000 nT (南極付近)になります。



【引用】理科年表オフィシャルサイト
<http://www.rikanenpyo.jp/index.html>

左下図のように、北欧のスカンジナビア半島の各地には、地表での地球磁場を計測する磁力計が設置されています。観測例として、図中の6つの観測点 SOR (Sørøya), KEV (Kevo), MAS (Masi), MUO (Muonio), SOD (Sodankylä), PEL (Pello) での、2000年1月10日の18~20時における磁場の南北成分の観測データが、右下図です。各観測点での磁場の南北成分の平均値(約11000 nT)が赤線で示され、正(グラフの上向き)の変動は、北向きの磁場が強まることを、負の変動は南向きの磁場が強まることを表しています。このように、地磁気の強さは、時々刻々変化しています。

【問】 現在での北極側は、磁石のN極ですか、それともS極ですか？



【引用】 International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects <http://space.fmi.fi/image/>

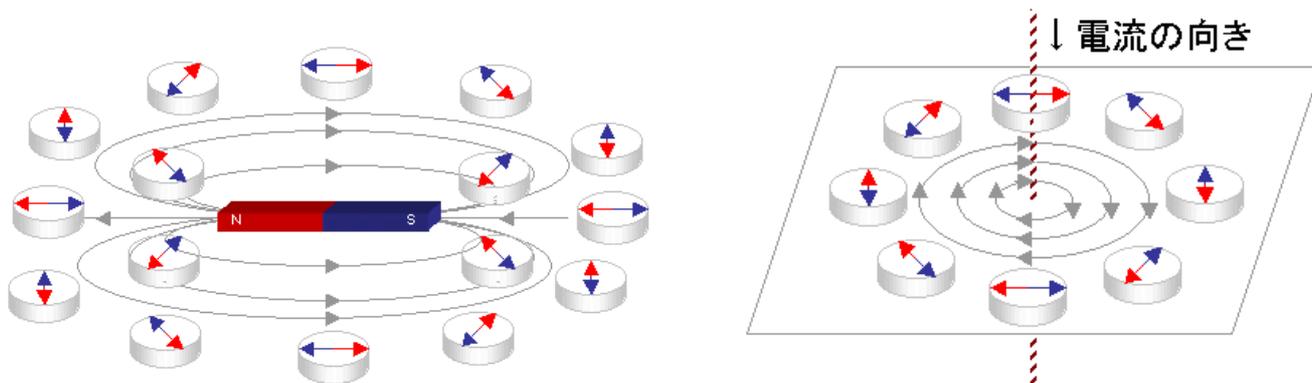
資料2 「極域電離層電流による地磁気変動についての探究活動」の資料B

磁場(または磁界)は、どのようなところに生じるのでしょうか。

磁場は、磁気を帯びた磁極が、磁気力を受けるような空間のことです。言い換えれば、磁極に磁気力を及ぼす働きをもつ空間のことです。

磁場の向きは、方位磁針のN極が指し示す向きであり、磁力線の矢の向きで表され、また、磁場の強さは、磁力線の密度で表されます。

磁場や磁力線の空間分布は、方位磁針の向きや砂鉄の模様などから見るすることができます。



【引用】 ネットの学校 Hello School <http://www.hello-school.net/>

マクスウェルがまとめた電磁気学によると、磁場の生じる場所は、

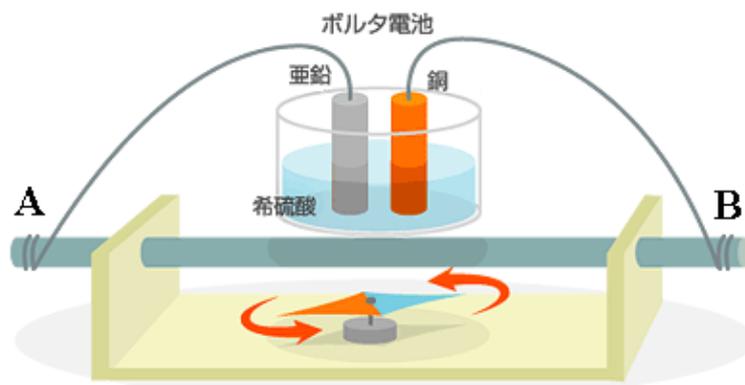
- ① 磁気を帯びた磁極の周囲 (左上図)
- ② 右ねじの法則で知られるような、電流の周囲 (右上図)
- ③ 時間変動する電場の周囲

が考えられます。

複数の磁場を生じる要因が重なると、「磁場の重ね合わせ」が起こります。

例として、1820年にエルステッドは、公開実験の準備をしていて、電線に電池から電流を流すスイッチを入り切りしたときに、その近くに偶然にも方位磁石が置いてあって、北を指していた磁針が少し変化したことに気がきました。

これは、北向きの地球の磁場に、電流による磁場が重なりあったものです。



【引用】 TDK マガジン

<http://www.tdk.co.jp/techmag/index.htm>

【問】 上の実験図において、B→Aの向きが、南→北の向きです。

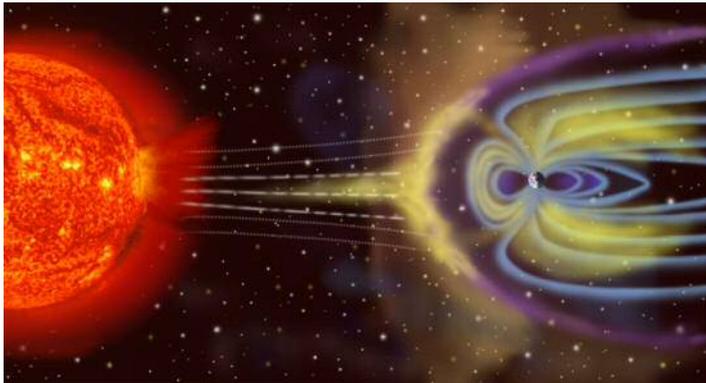
導体棒AB間に電流が流れると、上から見て反時計回り(図の矢印の向き)に、わずかに方位磁針が動きました。電流が流れた向きはA→BそれともB→Aですか？

資料3 「極域電離層電流による地磁気変動についての探究活動」の資料C

オーロラの源は、地球から約1億5千万kmも離れた太陽から、やってきます。

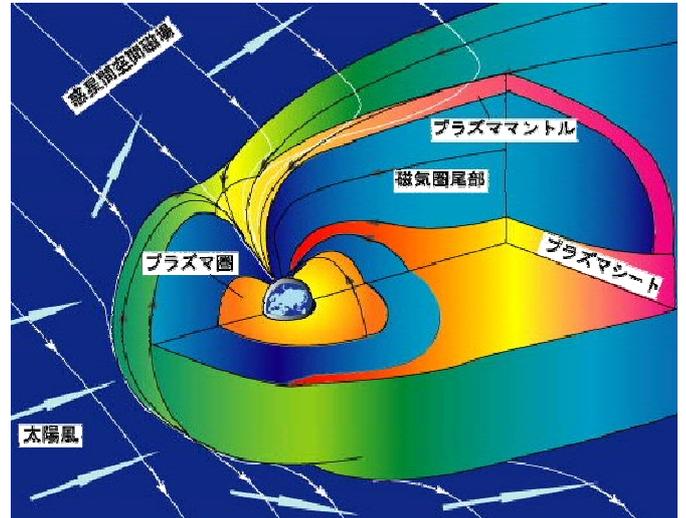
太陽は、光や熱だけではなく、電子や陽子などの電離した粒子(プラズマ)も大量に放出しています。この太陽からの電子などの粒子の流れは、太陽風と呼ばれ、激しいときには秒速800kmにも達します。

太陽からの粒子の流れが、地球に到達すると、地球磁場が粒子の侵入を阻止し、粒子を受け流します。ところが太陽風の粒子は、地球の磁場の隙間を通るように侵入し、太陽と反対側にあるプラズマシートと呼ばれる滞在しやすい場所に溜まった後に、地球の磁場に沿って、地球大気へと降り注いでいきます。



【引用】 Magnetosphere

<http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetosphere>



【引用】 Space and Planetary Research Group, ISAS

<http://sprg.isas.jaxa.jp/main.html>

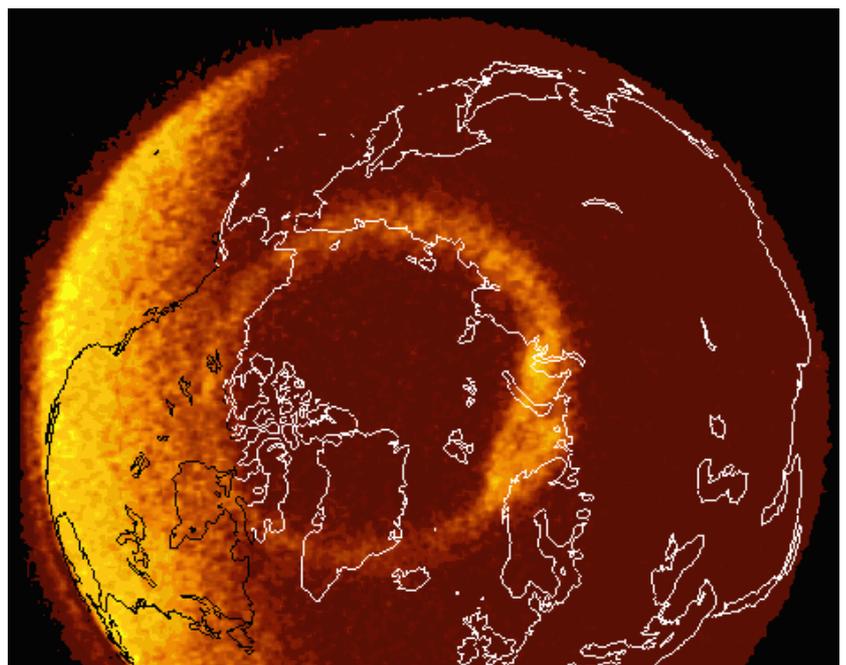
この地球に降り注ぐ粒子が、地球の酸素や窒素の大気粒子と衝突すると、衝突された大気粒子はエネルギーを得て光を放ちます。これがオーロラです。

プラズマシートから地球の磁場に沿って、太陽起源の粒子が降り注ぐため、プラズマシートの根元の位置に相当する北極や南極周辺の限られた領域の上空で、オーロラはリング状に現れます。

オーロラは、太陽と地球のつながりが生み出す輝き、宇宙規模の壮大な自然現象なのです。

2000年1月10日19時03分に探査衛星POLARから得られた画像が、右図です。北極点近くを中心とした円が、オーロラが光っている場所を示しています(左半分の明るい部分は、太陽光の照射によるものです)。

【問】 どのような国や地域が、オーロラ観測に適していると考えられますか？



【引用】 Polar Visible Imaging System

<http://vis.physics.uiowa.edu/vis/>

資料4 「極域電離層電流による地磁気変動についての探究活動」の資料D

オーロラの色は、どのように決まるのでしょうか。

太陽を起源とする粒子が、地球の上空に降り注いできて、酸素や窒素の大気粒子と衝突すると、衝突された大気粒子が光を放ちます。これがオーロラの光です。

オーロラの色が違うのは、高度によって大気中の原子・分子の種類とその密度が異なることと、降り注ぐ粒子のエネルギーが違うからです。

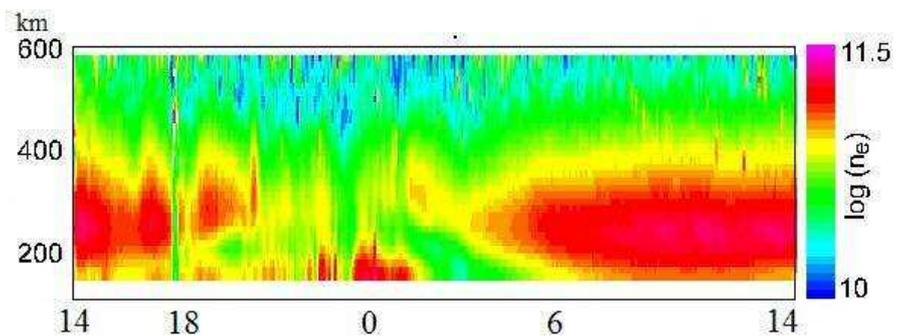
酸素は赤色と緑色を、窒素はピンク色と青色の光を放ちます。衝突された大気粒子は、エネルギーの高い不安定な状態（励起状態）になり、それが安定な低いエネルギーの状態（基底状態）に戻るときに、余分なエネルギーを光として放出します。衝突したときに放出するエネルギーの量（光の色）は、大気の種類によって異なります。

高度 500km 付近では、酸素原子の密度が高いため、赤色が発光しやすく、200~500km の中間高度では、酸素と窒素が発光した赤と青と緑が混じり、緑白色に。高度 100km 付近では、窒素が発光する青と赤が混じったピンク色や紫色となります。

また、より高いエネルギーの粒子が地球に降り注ぐと、より低い高度まで侵入して大気粒子と衝突し、より低い高度でのオーロラ発光を生じさせます。

地球の大気粒子と降下粒子が衝突すると、オーロラの光が放たれるだけでなく、大気粒子の電子が弾き飛ばされ電離するので、電子の数が増えます。つまり、オーロラが光っている大気中では、帯電した粒子の密度が高くなっていて、その周囲よりも大きな電流が流れるようになります。

右図は、ある日の地上からのレーダー観測による、電子の密度の高度分布です。縦軸は高度、横軸は時刻で、赤色ほど電子の量が多いことを示しています。昼では、太陽からの紫外線などの影響で、大気粒子が電離され、高度 200~300km 付近を中心に電子密度が上昇しています。一方で、0 時を中心とする夜では、降下粒子によって大気が電離され、比較的、低い高度でも電子の密度が上昇しています。



【引用】 EISCAT and the High Latitude Ionosphere
<http://www.mps.mpg.de/en/projekte/eiscat/>



【引用】 National Geographic
<http://www.nationalgeographic.co.jp/>



【引用】 Wikipedia
<http://ja.wikipedia.org/wiki/>

【問】 高度 200km 以下の大気中を電流が流れやすい状態になるときは、どのようなときですか？

資料5 「太陽活動度と地球環境の因果関係についての探究活動」の資料A

太陽活動の激しさは、約11年という周期で繰り返してきました。

これまでの11年周期からは、次の活動ピークは2011年の予想でした。

ところが、2011年になっても活動がピークに達しないで、これまで正確であった11年周期が、長くなって狂い始めたような観測データが得られています。

過去にも、太陽活動の11年周期が狂った期間があります。太陽活動が活発になると、太陽表面にシミのように見える黒点の数が増えることが知られています。

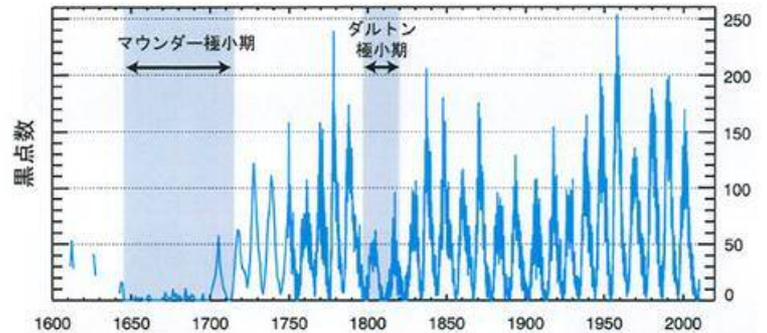
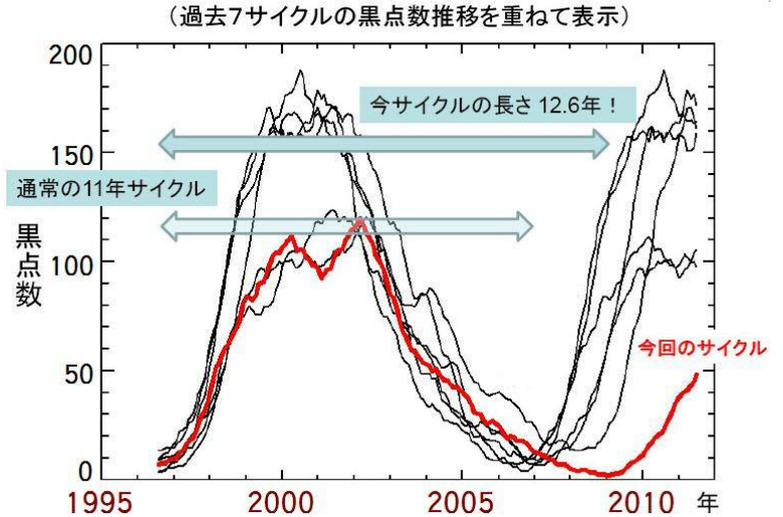
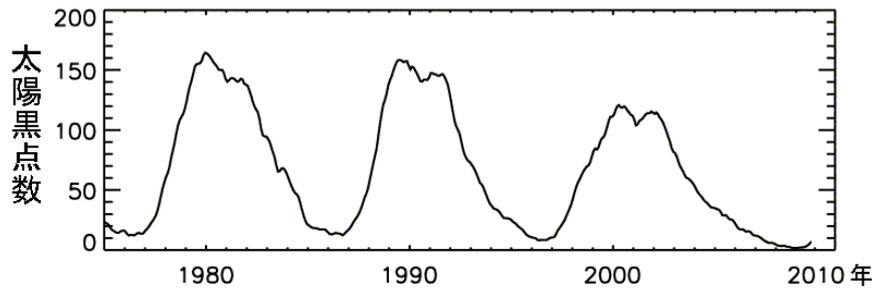
ガリレオが初めて黒点を観測し始めて以来、これまでに観測されてきた期間の中で、1600年代後半から約70年間にわたり、太陽活動度が極めて低かった期間があります。この期間は、発見者の名前から「マウンダー極小期」と呼ばれています。この頃の太陽活動の周期は約14年でした。また、1800年代前半の約30年間に、太陽活動度が極めて低かった「ダルトン極小期」と呼ばれる期間があり、この頃の太陽活動の周期は約13年でした。

大阪府立大学の青野准教授の調べによると、「マウンダー極小期」の京都では、桜の開花が遅くなっていることが古文書からわかり、そのことから、この期間に平均気温が2℃近くも低くなっていたことが算出されました。

同じ頃のイギリスのロンドンでは、テムズ川が凍っていたことを記す絵画も残されています。

【問】この数年に異変が起きていること、また今後予想されることは、何ですか？

【全図の引用】国立天文台ひのでホームページ
<http://hinode.nao.ac.jp/index.shtml>

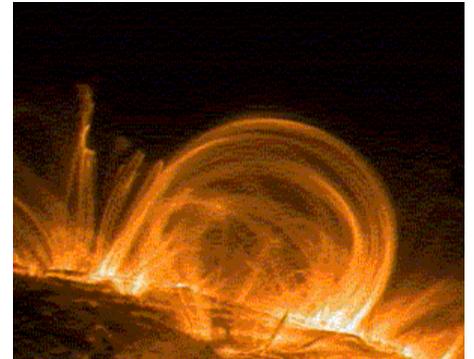
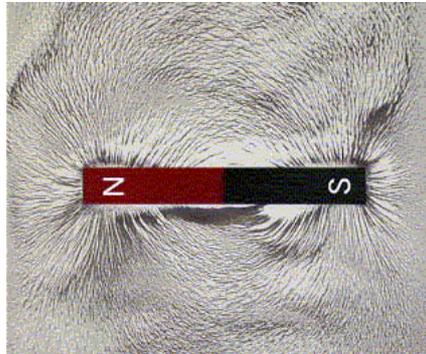


資料6 「太陽活動度と地球環境の因果関係についての探究活動」の資料B

太陽活動の激しいときには、太陽表面の黒点の数が増えます。黒点とは、太陽の表面で活動が最も活発な部分であり、人間の目に黒く見えるのは、周囲の部分より温度が低いからです。黒点は、出現したり消滅したりして、数が周期的に変化しています。

磁石の周りに砂鉄をまくと、磁場の様子を表す磁力線の曲線を見ることができます。

太陽を探査衛星などで観測すると、太陽表面にも磁力線のような曲線が多数見られます。この多数の曲線は、太陽の表面のいたる所に、磁場があることを示しています。まさに太陽は磁石の星なのです。これこそが、太陽活動の根源です。



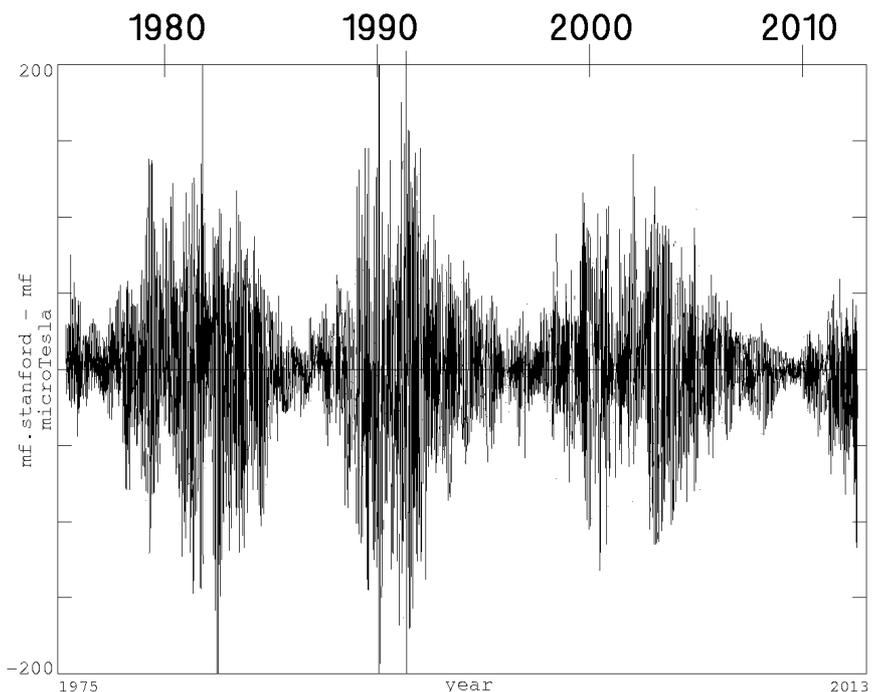
【引用】 国立天文台ひのでホームページ <http://hinode.nao.ac.jp/index.shtml>

太陽の磁力線に沿って粒子（太陽風）が流れ出しています。太陽磁場の強さは、黒点の無い太陽表面でも、地球の百倍。激しく活動する黒点では、地球の一万倍にも達します。この磁場が生成されるのは、太陽の内部です。

太陽磁場の強さは、太陽活動度を表す黒点の数と比較してみると、一致するように変動していることがわかります。つまり、太陽活動が活発なときには、太陽の磁場が強くなっていると考えられます。

一方で、太陽の活動が活発になっても、太陽が放つ光の量には、ほとんど変化がないこと（変動幅0.1%）が、観測から分かっています。

【問】 太陽活動が衰えると、何がどのように変化すると考えられますか？



太陽磁場の強さの変動

【引用】 WSO - The Wilcox Solar Observatory
<http://wso.stanford.edu/#Magnetograms>

資料7 「太陽活動度と地球環境の因果関係についての探究活動」の資料C

皆既日食のときに、まぶしい太陽の本体が隠されたときに見られるコロナ（太陽の大気）。そのコロナに見られる筋状の模様から、宇宙空間に広がる太陽の磁場の様子を、見るすることができます。また宇宙空間で太陽を観測する探査衛星からも、太陽から広がる磁場や太陽風の様子が捉えられています。

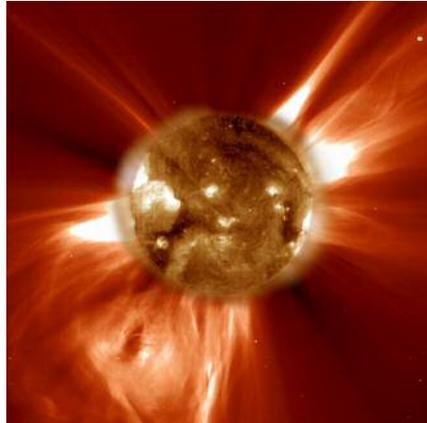
地球にも同様に磁場があり、その磁力線は南北に分布しています。地球の磁場に比べ、太陽の磁場は、複雑な分布をしています。



皆既日食でのコロナの様子

【引用】国立天文台

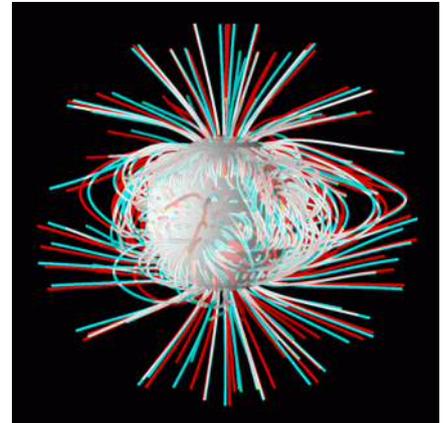
<http://www.nao.ac.jp/astro/gallery/sun.html>



探査衛星による太陽観測

【引用】National Geographic

<http://www.nationalgeographic.co.jp/science/>

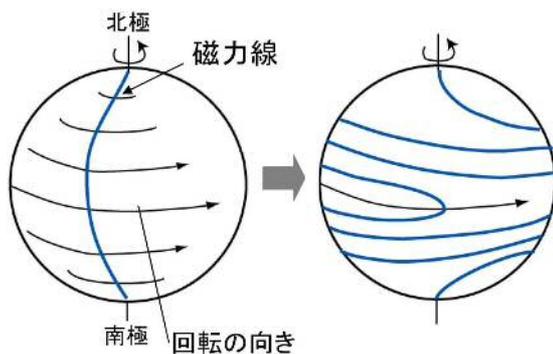


太陽磁場の計算モデル

【引用】K.Hayashi

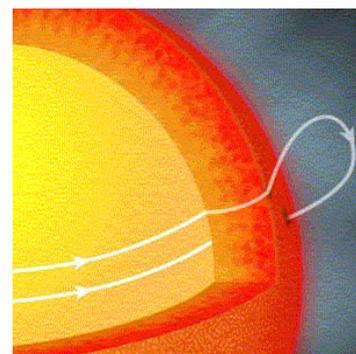
http://sun.stanford.edu/~keiji/keiji_j.html

ガスで覆われている太陽の自転は、赤道付近で速く、両極で遅くなっています。そのため、内部を南北に貫く磁力線は、東西に引き伸ばされるようになり、太陽に巻き付く様な構造になります。磁力線には、密度にムラがあり、その一部の軽い部分が太陽表面に浮かび上がります。この浮かび上がった磁力線の断面が黒点です。つまり黒点は、太陽内部で作られた磁場が、太陽表面に飛び出している場所なのです。黒点の数は、太陽活動が活発になると増加することが知られています。



太陽内部での磁場の様子

【引用】国立天文台ひのでホームページ <http://hinode.nao.ac.jp/index.shtml>



黒点での磁場の様子

地球の磁場は、地球の外から到来する粒子に対して、侵入を阻止するバリアのような役割をしています。

地球を含む太陽系の惑星は、太陽磁場や太陽風によって包み込まれています。地球磁場と同じように、この太陽の磁場や太陽風が、バリアの役割をして、太陽系外から降り注ぐ粒子（宇宙線など）の侵入を妨げて、地球を含む太陽系の惑星を守っています。

【問】もし、太陽の磁場が弱まると、どのようなことが起きると考えられますか？

資料8 「太陽活動度と地球環境の因果関係についての探究活動」の資料D

人工衛星で観測された地球を覆う雲の量のデータを用いて、デンマーク国立宇宙センターのヘンリック・スベンスマルク教授は、地球を覆う雲の量と、宇宙から地球に降り注ぐ宇宙線の量との間に、相関があることを発見しました。

宇宙線とは、遙かかなたの宇宙で、一生を終えた星が爆発したときに放たれる、放射線の一種です。宇宙線は、長い時間をかけて、宇宙を旅して、太陽系そして地球に到達します。

「霧箱」と呼ばれる装置を用いると、到達した放射線の飛跡を見ることができます。霧箱は、蒸気の凝結作用を用いて放射線や荷電粒子を検出するための装置であり、1897年にチャールズ・ウィルソンが発明しました。

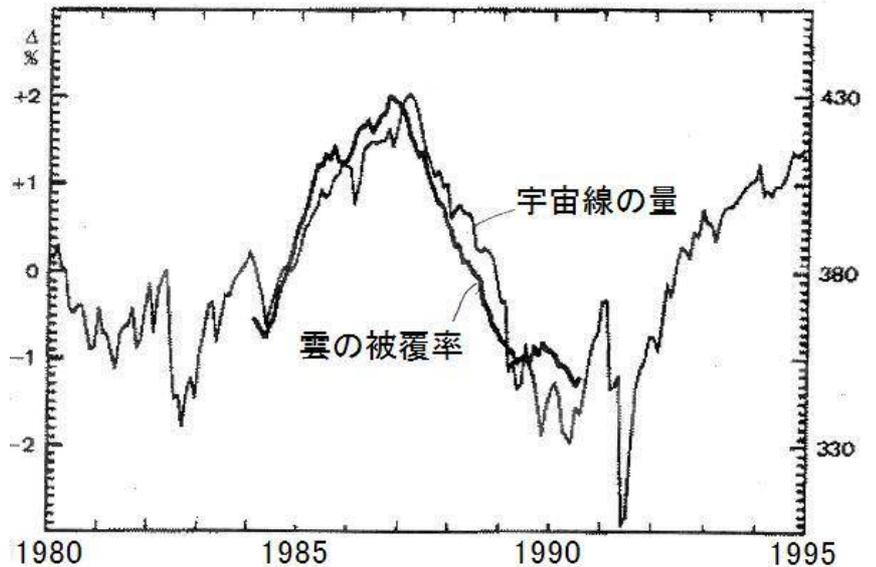
過度に飽和している蒸気中に、放射線や荷電粒子が入射すると、その軌道上にある窒素や酸素の気体分子と衝突して、その電子を跳ね飛ばし(電離させ)、イオンができます。水分子は極性をもつので、このイオンに引きつけられます。ゆえに、放射線の軌道に沿って、電離した気体分子が核となって、気体分子が集まり、液滴となって雲ができます。したがって、放射線の通った飛跡が、筋状の飛行機雲のように見ることができます。

気体を含むことのできる最大の蒸気量を「飽和蒸気量」と呼びます。気体の温度が下がると、飽和蒸気量は減少し、気体中に留まらなくなった蒸気は液滴となります。ただし、液滴となるためには、中心となる核が必要です。通常は、大気中の細かい塵(ちり)や埃(ほこり)が核の役割を果たします。青空に伸びる飛行機雲は、飛行機のエンジンから噴き出す排気ガスの小さな塵を核にして、大気中の水分が次々とくっついて出来ていきます。

【問】雲の量は、どのようなときに増えると考えられますか？

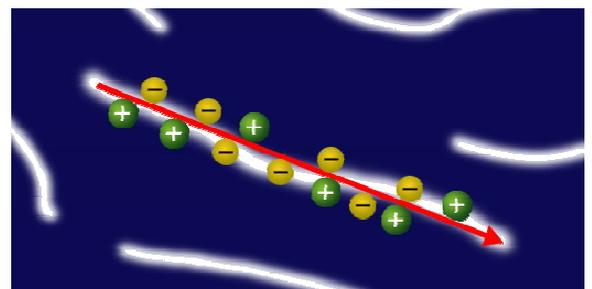
【参考文献】

Svensmark, Henrik; Friis-Christensen, Eigil (1997). "Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar-climate relationships". *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 59 (11): 1225-1232.



宇宙線量と雲量の相関変動

【引用】 Svensmark & Friis-Christensen, (1997)



放射線の飛跡

【引用】 拡散霧箱の原理

<http://www.kiribako-rado.co.jp/genri-m.html>