

英語で地学の授業を行う試み IV

— 系外惑星，その発見と意味 —

おか もと よし お
岡 本 義 雄 (非常勤講師)

抄録：系外惑星の発見手法に関する地学授業を英語で行う試みを実施した。英語を用いた地学授業は筆者の本校における4回目の試みとなる。授業は他の恒星系に属する「系外惑星」の探査方法の導入から始めた。これには重力法とトランジット法の2つの主要な手法がある。本授業で主にトランジット法を扱った。NASAによる教室用の授業資料を実習に用いた。まず最初に手法の説明のために2011年AGU秋季大会での、専門家による解説の動画を視聴した。補足説明に続いて実習を行った。実習はKeplerミッションで得られた系外惑星による恒星の光量変化のグラフを読み取る作業を行った。生徒はグラフから、1) 惑星の公転周期の読み取り 2) 惑星の半径の推定 をそれぞれ行った。この実習を通じて生徒は惑星探査の背景や手法を理解することができた。最後にこの惑星探査と関連する事項、すなわち宇宙における知的生命体の存在とそれに遭遇できる可能性について議論を行った。生徒からの授業アンケートの解析からはこの授業の当初の目的の成功が読み取れた。さらにこの授業の改良点などについて最後に補足した。

キーワード：系外惑星，Kepler衛星，トランジット法，英語，地学，実習

1. はじめに

2019年4月から6月末まで、思いがけなく附属高校天王寺校舎の地学を2年ぶりに教える機会を得た。高Ⅰ，高Ⅱの地学基礎と高Ⅲの地学を担当した。地学基礎では火山と火成岩，高3では天文の分野を担当した。その高Ⅲの地学で、以前から附属高校で何度か試行した，地学を英語で教える試みを本年度も実践したので，その報告をここで行いたい。本授業で扱った「系外惑星」とはそもそも，我々の太陽系以外の恒星系に属する惑星を言う。しかしその発見に至る過程は大変な困難を極めた。その困難をくぐりぬけ，人類最初の系外惑星の発見は1995年 Queloz & Mayor によりもたらされた。その詳細は彼らが *Nature* に書いた論文に詳しい。筆者も高Ⅲの本授業の冒頭で詳しく紹介した。

ところが，この系外惑星探査が今年（2019年）のノーベル物理学賞に輝いた。本稿もそれに刺激されて寄稿を思いついた。たまたま附属高に呼ばれて，試験的に行った授業で紹介した手法が，4ヶ月後にノーベル物理学賞を取ったのは，筆者にとって晴天の霹靂であり，まさに Serendipity であった。この授業の機会を与えていただいた井上広文副校長

はじめ、筆者を暖かく迎えていただいた附属高校のスタッフの皆様にはまずはお礼を述べたい。

2. 授業の概要

1) 授業概要

高3地学の天文の授業は、恒星の基礎からHR図の作成と解釈に始まり、星の一生、銀河と宇宙論の一部に触れる流れとした。また惑星の視運動とケプラーの法則も扱った。途中、6月上旬には大阪教育大学名誉教授の定金晃三先生から「すばる望遠鏡の観測でわかったこと」というタイトルで、先生の研究グループの研究を特別講義していただく機会も得られた。これは定金先生の研究グループの研究成果として数年前に*Nature*に載った宇宙のLi（リチウム）の起源に関する画期的な論文の研究内容（Tajitu, Sadakane 他, 2015）で、生徒も星の進化で宇宙の元素の起源に触れたあとであり、とても興味をもって取り組んでくれた。

さてこの一連の授業では筆者の天文教育におけるポリシーである、本物の観測データを用いた実習を取り入れることを重視した。特に星と銀河の距離測定に関わるテーマ（宇宙における「距離のはしご（distance ladder）」と呼ばれる）では、年周視差からの恒星の距離測定、セファイド変光星を用いた小マゼラン銀河の距離測定、楕円銀河のスペクトル線の赤方偏移を用いた距離測定（ハッブルの法則の検証）などの実習を行った。いずれも米国の天文雑誌*Sky & Telescope*の古い号に乗ったlaboratory exercisesの連載記事から実習用の資料を作成した。またそのほかに恒星分類の基本図であるHR図の作成、天球上の惑星の軌道運動の描画なども行った。

これらの実習資料は年周視差法、HR図と惑星運動を除いていずれも英語表記であり、できるだけその表記を訳すことなくそのまま授業でも用いた。その一連の流れの中で、6月末の期末試験前に以前から一度英語による授業を試みようと思っていた「系外惑星探査」の実習を取り上げた。

これはすでに以前に附属高校の授業で行っていた同種の実習を、初めて英語を用いて行う試みである。また本実践の試みのあと、タイの科学高校（KVIS, Kamnoetvidya Science Academy）に赴任して行った特別授業でも、本実践の内容をほぼそのままタイの高校生にも授業実践し、生徒に歓迎された。授業を見学されていた大学のアドバイザーからも大変興味深いと絶賛をいただいた。

本校における授業の概要は以下のとおり、

対象：高Ⅲ地学選択 生徒在籍 37名 うち出席 35名

日時：6月25日（木）3, 4限 地学教室

内容：系外惑星の探査手法とその意味

使用言語：英語（あとのアンケートや諸連絡のみ日本語とした）

系外惑星の探査法をPPT（パワーポイント）で解説するとともに配布資料を基にできるだけ生徒に考えさせることを重視した。PPTにはNASAをはじめとする研究機関の教育用

の動画や資料をまとめた（本稿末に一部を紹介）．なお、本論では当日用いた PPT のスライド原文をそのまま紹介する．投稿直前に、本校英語科の乾まどか教諭から、授業で用いたスライドに関してふさわしい表現への修正コメントをいただいたので、それを各スライドの脚注として記す．原文をそのまま紹介するのは、本校における英語授業の試みが4回目、タイの科学高校における英語での授業が2カ月×3年間の経験を経ても、なお、筆者の英語力では、このような限界があることを残すことも、同様の試みを考える方々にとっては意味があると考えたからである．なお、筆者の英語経験や英語力の詳細は本集録の以前の号に、述べているのでそれを参照いただきたい（岡本、2015、2016）

2) 授業の詳細

さて、当日の授業内容の詳細に移る．

初めに、いかに系外惑星の発見が困難なできごとであるかに着目させたあと、現在5種類ある探査法を簡単に紹介．そのうちメジャーな重力法（Wobble 法、Radial Velocity 法ともいわれる）とトランジット法を中心に解説した．

時代順にまず重力法から手法の詳細の紹介を始めた．探査の成功の発端である *Nature* の（Queloz & Mayor,1995）の内容を *Nature* の表紙と論文タイトルなどをあげて紹介（巻末 PPT 資料 11、12 ページ）．惑星を持つ主星が惑星の引力によりごくわずかにふらつくこと．そのふらつきを主星の光のスペクトル分析からドップラー効果を用いて測定する．スペクトル変化は主星の視線速度方向の速度変化を示し、長い観測を通じて見事なサインカーブを描く．その論文の図（下の図1）を紹介して、さらにこの重力法をわかりやすく示す YouTube 動画（図2）も紹介．生徒は興味を持って理解してくれたようである．しかしこの授業のメインは次に述べる「トランジット法」である．

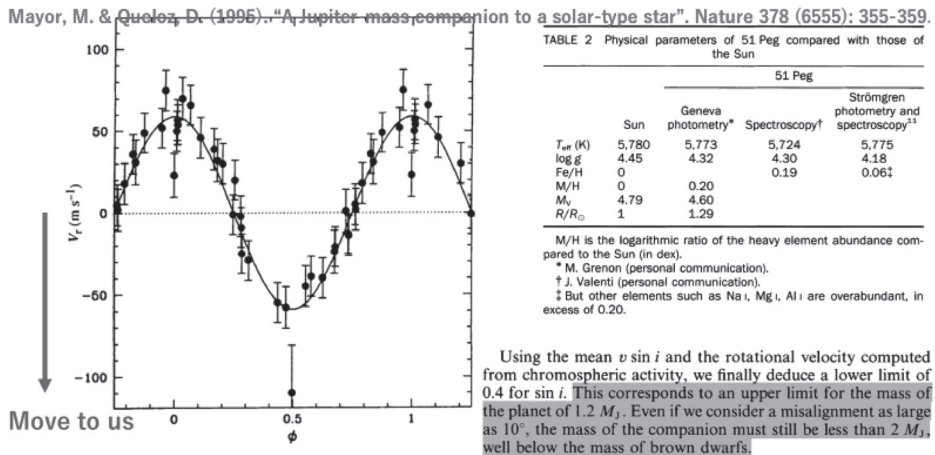
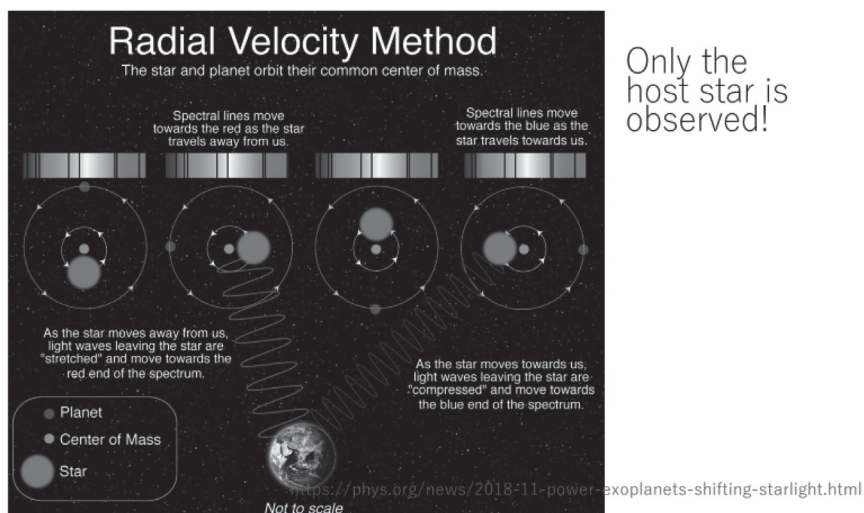


FIG. 4 Orbital motion of 51 Peg corrected from the long-term variation of the γ -velocity. The solid line represents the orbital motion computed from the parameters of Table 1.

図1. Queloz & Mayor,1995 の *Nature* 論文の図（筆者の PPT ではスライド番号 12）．論文には惑星の引力でふらつく主星の視線方向の運動を示す見事なサインカーブが描かれている．この論文の研究が 2019 年度ノーベル物理学賞を受賞した．



Only the
host star is
observed!

図 2. Wobble 法 (Radial Velocity Method) の説明図 (スライド番号 10).

「トランジット法」は「重力法」よりむしろ直截的に理解できる。小さすぎて見えない惑星の食による親天体（恒星）の光度変化を観測するという極めて単純な原理による。しかしその光量変化はきわめてわずかなため、成功は天体観測技術の進歩とリンクしている。NASA が 2009 年に打ち上げた Kepler 衛星はまさにこの系外惑星の発見という、純粋科学的な目的のために打ち上げられた。その後、集積されたデータをもとに、現在までに 4000 個を上回る数多くの系外惑星が発見されてきている。この手法について、本論では、私が直接説明をするのではなく、当日の授業に倣って、授業で用いた講演ビデオを用いた説明として再録してみたい (図 3)。

この講演は、2011 年 12 月にサンフランシスコで開催された American Geophysical Union (アメリカ地球物理学連合, AGU) の Fall Meeting でのものである。この年、私は本校の常勤最後の年（このあと 2 回リタイアする）で、その年に、たまたま当たった科研費でサンフランシスコまで行くことができた。12 月初旬のサンフランシスコはクリスマスを待つ飾り付けがとてもきれいだった。この年の春に 2011 年東北地方太平洋沖地震が起きて、日本の地震学者が大挙して、この学会で特設された東北地震の特別セッション (Part I から IV までであった) に参加し発表がなされた。私もそのセッションを聴いた。このときの講演の動画は今でも YouTube で公開されている (参考文献)。生徒にはいい意味でも悪い意味でも、典型的な日本人研究者の英語発表の例として動画で紹介した。もちろん、私も別の教育に関する常設セッションで、地震教材のポスター発表を行った。

それらのセッションに混じって NASA の Kepler Mission の報告が話題となり、たくさんの聴衆を集めていたのが Sagan Lecture と呼ばれた招待講演である。Sagan lecture は有名な米国の天文学者 Carl Sagan の名を冠している。筆者は偶然、現地でこの講演があることを知り、早めに会場に入った。講演者は当時、Kepler Mission の科学分野の責任者である Geoffrey W. Marcy (当時 UCB) であった。打ち上げ後 2 年足らず経過し Kepler Mission の、最初の成果の公式発表の場を兼ねていたので、他分野の研究者（この学会は地球科学を専

門とする研究者の集まり)の間でもかなりの話題になっていた。会場は詰めかけた研究者で満員、立ち見も出ていた。筆者は少し早めに会場に入ったので、座ってこの講演を聞くことができた (YouTube の動画 URL は参考文献に記述)。

司会者の紹介のあと、自信たっぷりに現れたジェフ (各ビデオに映る左の人) はまず、衛星打ち上げのシーンから動画で見せた。ロケット打ち上げにはスタッフがとてもナーバスになっていた。なぜならその前のロケットが打ち上げに失敗していたからという逸話から始まり、打ち上げ成功のシーンを解説した。スタッフも自分も思わず顔に涙が流れた (tears were running) と彼はいう。そのあと丁寧でとてもゆっくりとした国際学会標準の英語で、「トランジット法」の解説と Kepler 衛星の詳細を見せてくれた。もちろんこの講演は 60 分近くに及び、全部を見るには長いので授業では、冒頭の衛星の打ち上げシーンから図 3 で示す「トランジット法」の解説の部分のみを見せた。

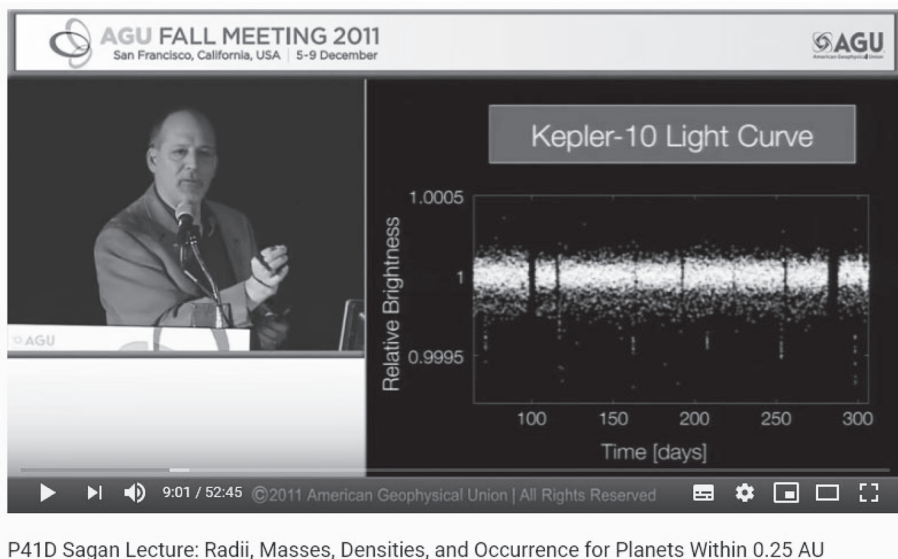


図 3. 授業に用いた講演ビデオ動画。YouTube より。右に実際の恒星 (Kepler-10 と名付けられた) の Kepler 衛星による生の観測データが示されている。

最初の図 3 のスライドで、恒星の生の光度曲線が示されている。たて軸が光度、横軸が時間経過を示す。Relative brightness = 1 の右に並ぶ、水平部分が平常状態の光度の変化を示す。上下に幅広く広がるのは、ノイズで光度が変化しているように見えていることを示す。光度曲線がところどころ暗く切断されているのは、観測中断によるデータ欠損を示す。ところが光度曲線のグラフから、下の方に落ちた光量の点が周期的に上下に並んで打たれている場所がある。これが見えない惑星による食を示す部分を示す。

この減光部分の時間軸を拡大すると図 4 のようになり、さらに短い周期の惑星の食による減光が見え始める。そしてそのグラフを再度時間方向に引き延ばすと、図 5 のように台形の凹みのように現れる (これは図のキャプションのように図 3 で見られる減光の惑星ではなく、さらに小さな惑星によるものである)。この恒星の光の減少量から、恒星の半径を仮定すると、それに対する惑星の半径が求まる (後述)。さらに右のスライドではター

ゲットの恒星を地上の望遠鏡からスペクトル観測することで、先に述べた重力法により惑星の質量が求まることも説明している。

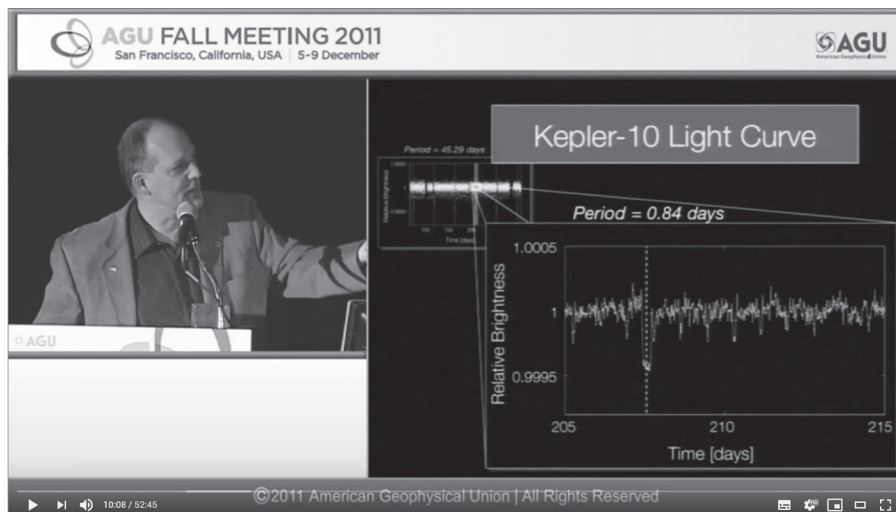


図4. 図3のグラフの一部を時間で拡大したところ。点線が図3の惑星による減光で、さらに短い周期の別の惑星による、周期的な減光が見えてくる。

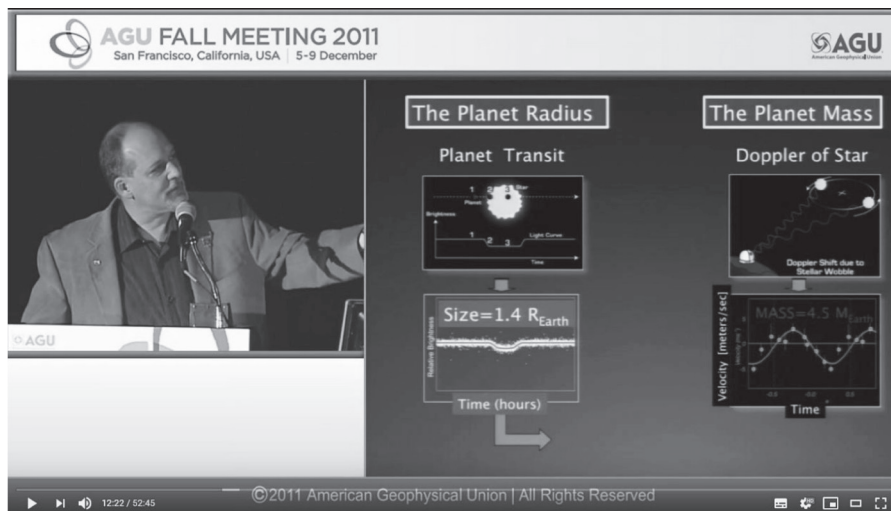


図5. 続くこのスライドでは、さらに時間軸を延ばした恒星の明るさの変化のグラフと、地上からの観測による惑星の質量の求め方にも言及している。なお、このグラフは上記図3のグラフを時間軸で引き延ばした結果発見された、さらに周期の短い地球サイズ（地球の半径の1.4倍と推定）の惑星による主星の光の減少を示す。

このあと講演ビデオを少し飛ばして、岩石惑星が発見されたあたりまでを流した。生徒も大変熱心に動画を見ていた。筆者も生で見た講演会場の盛り上がり思い出した。そのあたりでビデオ動画視聴を修了し、動画の説明の内容を問う、次のKepler衛星についての

基本的な質問を提示した。

Question 1

- What are the two basic methods to find exoplanets?
- Why were NASA staffs so nervous?
- How much diameter of Kepler telescope's main mirror?
- How wide is the angle of Kepler telescope CCD?
- How often does the camera record?

図 6. 筆者の PPT のスライド 15. 生徒への質問 1

上記動画で一応説明がなされていたが、英語でとまどう生徒も多かったので Kepler 衛星の詳細について、PPT でスライドを用意して、さらに詳細な解説を行った（巻末資料の PPT ファイルのスライド番号 16-18 を参照）。

ここでは、1) Kepler 望遠鏡が通常の望遠鏡とは異なり 10 度角（満月 20 個分の幅）の範囲を見ることのできる広視野なこと。2) 極めて感度の高い CCD を望遠鏡の焦点に置いていること、3) この CCD で 30 分おきに全視野を撮影すること。などの追加説明を行った。さらに下記のスライドを見せて、次の質問を投げかけた。

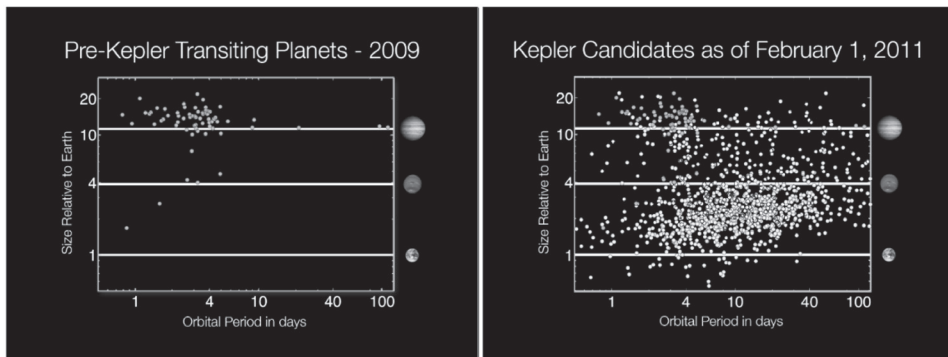


図 7. (スライド 21) 生徒への 2 つめの質問の対象となった図. 発見された系外惑星の半径（縦軸、単位は地球半径を 1 とする）と、主星からの距離を公転周期（横軸、単位は日）で示したもの。左側が探査の初期のころ（2009 年）。右が探査が進んだ 2011 年に同じ図を描いたもの（引用は NASA のサイト）。

Why were so many hot Jupiter(s) found in an early stage?

- Detection Bias?
- Super Neptune
- Super Earth!
- Super Moon!

図 8. スライド 22. 生徒への続きの質問

この観測の初期（2009 年）には公転周期が数日と短く（つまり、公転軌道が主星に極めて近い）、質量や半径の大きな惑星が多く発見された。これらは Hot Jupiter と命名された（図 7 左）。この原因を問う質問である。年を経過するごとに（2011 年）、やがて小さな、さらには公転周期の長い惑星も見つかっていく（図 7 右）。衛星が打ち上げられてからの観測期間を考えると、2009 年はまだ打ち上げ直後なので、長い公転周期の惑星はまだ見つかっていないという Detection Bias（検知バイアス）の可能性が高いが、それでも Hot Jupiter は我々の太陽系の惑星とは性格がまったく異なり、その成因は現在も議論されていることを紹介した。さらには惑星のサイズに合わせて Jupiter, Neptune, Earth の各サイズを表す用語が用いられることにも触れた。以上が授業前半の系外惑星発見の手法の詳細と関連事項の説明部分である。

その後休憩のあと、この手法を NASA が高校生向けに実習としてまとめている教材を用いて、系外惑星の半径や公転周期を求める生徒実習に移った。

3. 実習教材と授業のまとめ

i) 惑星発見手法の実習

この実習には NASA が高校生向けにまとめている Investigation: Transit Tracks というタイトルの PDF ファイルのうち、実習の解説ページと Kepler Mission で観測された、恒星の光量変化のグラフおよびデータ記載用の表のページを、ピックアップして実習資料として配布した。光量変化のグラフはカラーで印刷した（巻末資料参照）。

この実習プリントでは、系外惑星による光量変化が実際の誤差を含んだもの（図 3, 図 4）ではなく、実習しやすいように、モディファイされた模式図となっている（図 9）。このグラフから、まずわかりやすい惑星の公転周期を読み取る。図で光量が周期的に落ちている間隔を日単位で測定する。そしてそれを表（巻末資料）に記入する。次にその光量変化を読み取るが、縦軸は光量を%で、しかも小数以下の小さな量で読み取ることに注意。

Kepler-4b

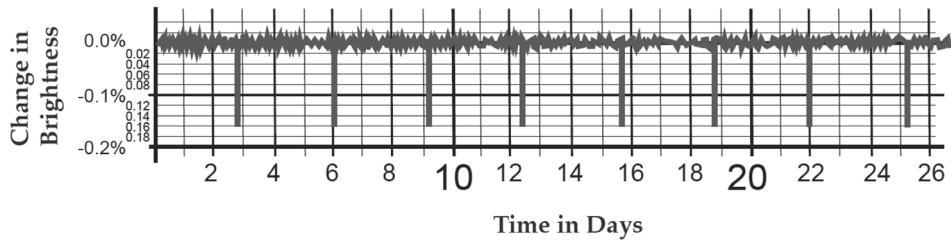


図9. 系外惑星の公転周期と半径の見積もり実習に使用したグラフの一部.

このグラフから、ターゲットの惑星の公転周期が、約3.2日、恒星の光の減少量が、0.16%であることが見いだされる。もし主星の大きさを太陽のサイズと仮定すると次の式から惑星の大きさが決定できる（巻末文献のPDFを参照）。

$$R_p = 10R_e \times \sqrt{Z} \quad \text{----- (1)}$$

R_p は求める惑星の半径、 R_e は地球の半径で通常1とする。 Z は光量の減少率（%）

この式(1)の意味は、光の減少量は惑星によって隠される部分の面積と、恒星全体の面積との割合になる（図10参照）。半径を求めようとすると面積から半径に直すためにルート（平方根）処理をしないとイケない。ここが生徒には少しわかりにくいと思ったので、次の図10のような説明ページをPPTに作った。

Let's try exercise!

• The host star radius
= same as sun

Earth=1

area= πr^2

area=25%

$\sqrt{25} \times 10 = 50$

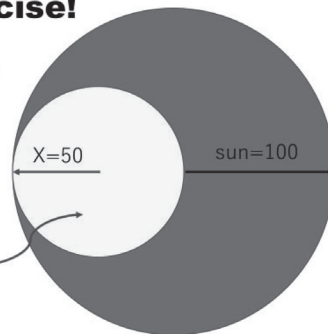


図10. スライド26. 惑星のサイズを求める式の導出過程（ \sqrt が出てくる意味）この図では地球の半径を1、太陽の半径を100として、仮に地球の50倍の半径の星があったときの光の減少量を考える。図より明らかなように、太陽の光量が面積比で25%だけ減少する。逆に我々は太陽の光の量を観測していて、その光量が25%減少したときに、その原因となった星の半径は上記の式で示されることを説明。

ただし、この式が使えるのは、主星である恒星の大きさが太陽の大きさにほぼ等しいという条件がつく。実際にこの資料にある恒星は、いずれも太陽の半径のプラスマイナス10%くらいの星なので（巻末資料の各恒星の質量のデータより）、この仮定はほぼ満たさ

れている。

実習ではグラフ 7 個について、生徒個々のスキルに応じて、2 個ないし 5 個くらいの数を測定できたようである。元の実習ではここから次に太陽と同サイズの恒星を仮定し、ケプラーの第 3 法則を用いて、惑星の公転半径を求める実習が続くが、本授業では時間の制限でこの作業は割愛した。

How to estimate the number of planets?

- Limited in nearby solar system.
- In a 10x10 degree view angle, we already found 4000 planets.
- So, this rate will be simply extended to whole universe ~360degree?
- -----?????
- We made some mistakes?
- What is a drawback of transit method?

図 11. スライド 31. トランジット法の欠点と惑星数に関連する問い。

最後に、この「トランジット法」の欠点に関することを生徒に質問した。期待される答えは、惑星の公転軌道の軌道面が視線方向に沿っていないと、恒星の光を遮れない。つまり宇宙にたくさんあるはずの惑星系のうち、ほんのわずかな条件の惑星系だけがこの方法で発見でき、惑星の大きさや公転周期を測れるのだということを生徒に理解してもらおうとした。この結果、宇宙に存在するはずの系外惑星の数は Kepler 衛星で発見される数よりはるかに多いはずだ。したがってこの宇宙に知的生命体が存在する可能性は極めて高いように思われる。だが、本当にそうなのか。

ii) 宇宙人に会えるか？

このもっとも重要な問いに答えるために、また生徒に宇宙への思いを馳せるための道しるべとして、「宇宙人に会えるか？」というテーマで議論をした。これにはまず知的生命体 (intelligent life) を構成する「生命」の定義から始めた。筆者の意見として、1) 自分のコピーを子孫として残すこと。2) 自分の身体をメンテする能力 (ホメオスタシス) の 2 つを併せ持つことを生命の定義とした。しかしそれでは、コンピュータウイルスはどうなるかという議論も行った。

Intelligent life?

- What is a definition of “life”?
- Limited within the earth type life!
- Habitable zone: existence of liquid water
- Rocky planet and moderate distance

註：2 行目 a definition → the definition

3 行目 意味が不明瞭 (筆者は多数予想される生命のタイプの中で地球型生命に限ると言いたい)

図 12. スライド 27. 生命の定義および知的生命体の可能性

今まではほんの10数年間で発見された系外惑星の数や、ハビタブルゾーン概念の説明し、さらに「トランジット法」の欠点を考慮すると、空間的には「宇宙人」つまりは知的生命体の存在は間違いないだろうという結論を提示した。

しかしここでもうひとつの問題が出てくる。それは時間的流れという問題である。この古くて新しい問題は昔、Drakeが提案したDrake方程式（1961年）がよく表している。下記がその方程式である。以下Wikipediaの記述を引用する。

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L \quad \text{----- (2)}$$

各パラメータは、

名前	定義
R_*	人類がいる銀河系の中で1年間に誕生する星（恒星）の数
f_p	ひとつの恒星が惑星系を持つ割合（確率）
n_e	ひとつの恒星系が持つ、生命の存在が可能となる状態の惑星の平均数
f_l	生命の存在が可能となる状態の惑星において、生命が実際に発生する割合（確率）
f_i	発生した生命が知的なレベルまで進化する割合（確率）
f_c	知的なレベルになった生命体が星間通信を行う割合
L	知的生命体による技術文明が通信をする状態にある期間（技術文明の存続期間）

といったような値である。

これを生徒に考えさせた。この式で計算される **N 、すなわち我々が今、会える可能性のある宇宙人の数は** 知的生命の存在の可能性（つまり空間的分布）×我々が遭遇する可能性（文明の継続期間、つまり時間分布）の形をとっている。この **N** が1以上であることは自明である（スライド34）。なぜなら我々が現在すでに存在するから。しかし **N** が2以上の可能性はどのくらいあるのか。つまりこれは全宇宙を対象に構築された「**出会い系サイト!**」に現在登録している宇宙人の数だという比喩を提供した。

前半の項は恒星が存在するとして、その恒星が惑星系を持つ確率や、その惑星系に生命や知的生命が誕生する確率を計算している。しかし最後の項 **L** の意味するところは前半とは大きく異なる。つまり空間的には多数の知的生命がこの宇宙には存在する可能性があるが、時間的にはその知的生命体は137億年という宇宙が誕生してきたからの膨大な時間軸のどこかにランダムに配置される。そこで我々がたまたま文明を築いている時間と、それらの知的生命体が築く文明の継続時間との重なるの可能性を、宇宙の年齢との比較で考えさせた。これが我々が他の知的生命体が構成する文明との出会える確率に相当する。これは電話帳を多数、机の上に積んで、その中の偶然選んだ1ページが、他の電話帳で選んだどこかのページの高さと同じ確率の問題となると指摘した。

Conclusions

- If you want to meet an intelligent life living in the other exoplanets,
- We need to keep our civilization as long as possible.
- We need to avoid the world war, environmental crisis and diseases which are the fatal risks for our civilization.
- We must seek a peaceful and cooperative future.

図 13. スライド 35 未来に向けた結論.

そこから我々が「宇宙人」に出会えるためにはどうすればいいのか？これを生徒に考えさせて、この授業のまとめとした。

Closing remarks

- Thank you so much for your cooperation of my three months class!
- See you again!

Stay hungry!
Stay foolish!

By Steve Jobs

註：1行目 Thank you very much for your cooperation in my class for three months! が適当

図 14. スライド 36 最後に生徒への3カ月間の挨拶.

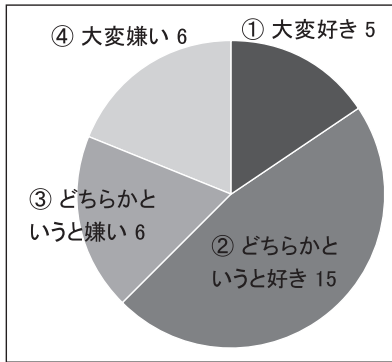
この授業は3カ月間という短い筆者の授業の終わりも意味したので、最後のしめくくりの言葉としてMy most favorite phraseのSteve Jobsの「Stay Hungry ! Stay Foolish!」と結んだ。その後に授業アンケートを生徒に渡して、次に示すアンケートを受け取り終了した。

4. アンケートなどによる授業評価

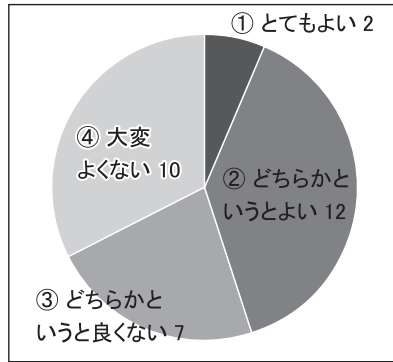
授業の評価を例年どおり、授業後アンケートにより行った。アンケートの回収総数は32名。そのうち有効回答が30名であった。男女別は男子11名、女子19名である。その結果は次のとおり。数字は人数を示す。

1. はクラスと性別を問う質問で、省略。以下アンケートの質問と回答の円グラフを順に示す。

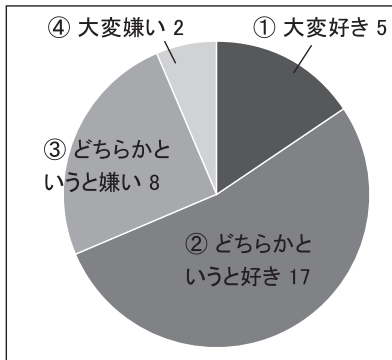
2. あなたは英語が好きですか？



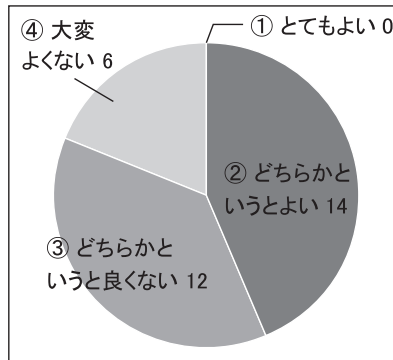
3. あなたの英語の成績は？



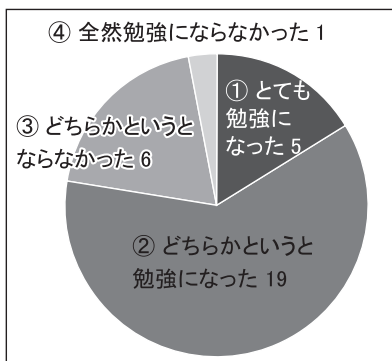
4. あなたは地学が好きですか？



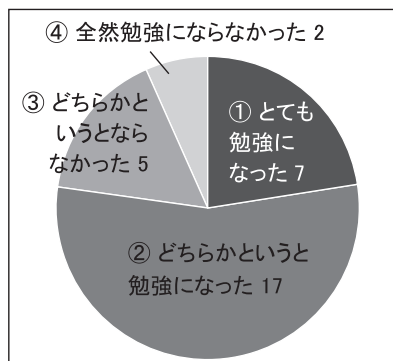
5. あなたの地学の成績は？



6. 今回の授業を英語で行ったことについては、**英語**の勉強になりましたか？



7. 今回の授業を英語で行ったことについては**地学**の勉強になりましたか？



8. 今回の授業でもっとも関心を引いた内容を1つだけ挙げてください？

- ・宇宙に文明がある。 ・ Drake の式 ・ Intelligent lives
- ・ Alien ・ Stay hungry Stay Foolish まとめ方がよかった (2人).

- ・宇宙の出会い系サイト
 - ・地球外生命（4人）
 - ・星の見つかり方の限度の話
 - ・宇宙人の話（2人）
 - ・惑星の大きさの計測
 - ・地球以外の生命体に会えるかも
 - ・（我々の文明が）長く生きれば生きるほど文明が見つかる可能性が高まる。
 - ・生命の定義
 - ・Planet の発見方法
 - ・文明が重なるか
 - ・望遠鏡の見える範囲が広いこと。
 - ・ロケットのブースター発射
9. 今回の授業でもっとも印象的だった英語（単語 or 表現）を1つだけ挙げてください？
- ・ Hot Jupiter（2人）
 - ・ revolution（2人）
 - ・ nervous（4人）
 - ・ Exoplanet
 - ・ dimming（2人）
 - ・ cockroach
 - ・ reasonable（2人）
 - ・ estimate
 - ・ radius（2人）
 - ・ radii
 - ・ velocity method
 - ・ transit（2人）
 - ・ revolution “公転” 革命だけしか知らなかった。
 - ・ need to keep our civilization as long as possible
 - ・ Stay Hungry ! Stay Foolish!（2人）
10. 今回の授業で特に難しかった点があれば、記述してください。
- ・前半の英語ラッシュ
 - ・単語と計算の説明
 - ・さいごの方、文明や出会い系のところがむずかしかった
 - ・英語のビデオの英語がむずかしかったです。
 - ・初めの動画
 - ・文明がズレてること
 - ・英単語が難しかったです。
 - ・ところどころ単語の意味が分からなかった。
11. 今回の授業で何か気付いた点や、感想などを自由に記述してください。
- ・英語の授業でぜったい分からないと思ってたけど、分かりやすくある程度理解できてうれしかったです。
 - ・割と内容のわかるような内容だったので英語でよかったなと感じた（原文ママ）
 - ・地学全体に難しかったけど、たのしかったです。Thank you so much!
 - ・先生のような授業がほかにもっと増えればよいと思った。
 - ・科学の授業は英語でやった方が楽しいと思った。
 - ・地学が高3になって難しくなったのを英語で聞いて少し混乱した。けれど図が多くて何とかわかった。
 - ・できるだけ理解しようとがんばった。ニュアンスは分かった。
 - ・Stay Hungry Stay Foolish 自分も好きです
 - ・Thank you for teaching!!
 - ・先生だけが英語で話すより、生徒も英語で話すのが大事ではないかと思った。
 - ・英単語の言いかえを日本語で説明するより、中学英語などに変えてくれるとうれしいなと思いました。

アンケート結果からは、生徒のかなりポジティブな反応が得られた。授業中の筆者の感想としても生徒はかなり好意的にかつ熱心に授業に取り組んでいたようである。もちろんアンケートには少しも勉強にならなかったという生徒も数名いたことには留意する必要があるが、

授業に同席して授業内容を始終みていただいた、本校英語科教諭の乾まどか先生と、た

またま授業当日、米国から来られて本校に滞在中であった、本校姉妹校 ASMSA (Arkansas School for Mathematics, Sciences and the Arts) のベティ先生にも、授業終了直後に大変好意的なコメントをいただいた。

5. 議論

この授業の前半部で、惑星系をどのように探すかという方法論を紹介した。最初に実用化した方法は前述したとおり Queloz & Mayor (1995) による、Wobble Method あるいは重力法と呼ばれる手法である。この手法の理解には、物理で習う「ドップラー効果」の概念が基本となる。高三生とはいえ、物理でこの効果を履修していない生徒には、内容は少し難しいかもしれない。

またこの手法以前には、恒星のふらつきを幾何学的方法で観測して惑星が見つかったという報告が 1960 年代になされた (Piet van de Kamp による地球に近い恒星バーナード星に、惑星が存在するという報告)。しかしこの報告は観測した望遠鏡の機械的誤差を、恒星の動きと勘違いしたと現在では考えられている (文献 URL 参照)。これは系外惑星の発見がいかに難しいかを示すエピソードでもある。一度は系外惑星を初めて発見したと小躍りした Kamp が皮肉にも亡くなった年である、1995 年にくだんの重力法による最初の発見があった。このような天文学史の興味深い巡り合わせも本授業の前に紹介できれば、より効果的であったかも知れない。

次に本授業での主要テーマである、トランジット法であるが、この手法にも原理的な問題が残る。この手法では、惑星系の公転軌道面が我々の視線方向にほぼ平行に近くないと観測できない。つまり惑星による主星の食が生じない場合は、いくら恒星系に惑星が存在しても当然ながら発見が無理となる。What is a fundamental drawback of this method? これは生徒にも質問をして考えさせた。ある生徒が正解を答えたと記憶する。従って、宇宙に存在する系外惑星の数は、Kepler Mission で報告されている数よりはるかに多いことが想像される。これが最後に述べた宇宙人はいるか?あるいは会えるか?という質問につながる。生徒にとって宇宙人の問題は大変興味のある問題であり、本授業はそのような興味への一つの回答を与える内容となる。この部分についてはさらに授業の内容や用いるデータ、および議論の手法を改良する必要があると考えている。

授業全般の議論として、手法の説明を専門家による講演ビデオにたよる方法を初めて取り入れた。国際学会の標準的な英語で研究者にはわかりやすいのだが、専門用語の知識のない生徒にはかなり難しかったことが予想された。したがってビデオ視聴のあとに、筆者による追加説明を加えたが、この点は、何人かの生徒がやはり難しいと指摘している。

授業で用いたデータは NASA の高校生用の授業向け資料を抜粋してそのまま用いた。英語授業を意識したからであるが、一般の授業向けにはやはり難しく、日本語の解説も必要になるだろう。さらに恒星の明るさの変化のグラフを用いたが、これも実際の観測データとは異なる。グラフは実習用にかなりモディファイされている。生徒によってはその元データとの違いを気にする生徒もいると思われる。専門家の観測データがいかに観測誤差を含むものであるかは、科学教育の根幹に関わるとても興味深い部分でもあるが、そのあたりの詳細は本実践では省略せざるを得なかった。

6. 終わりに

この授業で視聴した2011年のビデオの講演の主、Geoffrey W. Marcyは、当時Kepler Missionの科学分野の最高責任者であり、積極的なNASAの広報も兼ねていた。まさに飛ぶ鳥を落とす勢いの研究者としてのキャリアの絶頂にあった。本来なら今年のノーベル物理学賞をQueloz & Mayorとともに分け合うに十分な業績と経歴の持ち主であった。しかし、本講演の数年後の2014年、長年に渡る大学院女子学生などへのセクハラの実事が表面化し、大学を追われることになる。まさに「好事魔多し」を地で行く展開となったのは、当日の彼の素晴らしい講演を、生で感動しながら聞いた私としてもとても残念である。もちろん授業ではこの事実は生徒には伏せていたが、

現在、Kepler 望遠鏡の次世代を担う探査衛星 TESS が2018年に打ち上げられ、2年間の観測を継続中だという。衛星の設計はMIT（マサチューセッツ工科大学）がGoogle社の資金援助の基に建て、NASAが打ち上げを実行したという（Wikipediaより）。白鳥座方向にターゲットを絞っていたKepler衛星とは異なり、TESS衛星は2年をかけて、全天を掃天し、さらなる系外惑星を探すのだという。

2019年ノーベル物理学賞をこの種の研究が受賞したことは、これもまた意義深い。こんな日常生活にも軍事目的にも何の役にも立たない、単なる宇宙における知的生命体探査（ありていにいえば宇宙人に会いたい！）という、純粋な知的好奇心に基づく研究が科学における最高の栄誉だと評価されたということだ。さらにその次世代計画になおも予算をつける度量が、米国にはまだ残っていたということである。数年のうちに公開されるであろうTESSの研究成果を今から楽しみに待ちたい。

最後に本授業に際し、終始有益な示唆をいただいた大阪教育大学名誉教授定金晃三先生、当日の授業を見学し、適格なコメントをいただいた、大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎英語科の乾まどか教諭、米国ASMSA（Arkansas School for Mathematics, Sciences and the Arts）Japanese InstructorのElizabeth Brown（ベティ）先生にお礼を申し上げます。また本校地学科の三輪孝夫先生、実習助手の三橋礼氏には授業の資料収集にご協力いただきました。授業に参加した高校3年生の岡田美鈴さんからは授業ノートの提供をいただきました。さらにタイの高校（Kamnoetvidya Science Academy, KVIS）のアドバイザーのDr.Thanit Pewnim先生から、その後のタイでの授業についての暖かい励ましと有益なコメントをいただきました。なお、本論は当初公開予定がなかったため、当日の授業のメモも少なく、パワーポイントや配布資料と生徒の当日のノート、記憶に頼って書いているので、不正確な部分もあることをご了承ください。本論が同種の授業を志す方の何かの参考になれば筆者の望外の喜びです。

<参考文献>

M.Queloz & D.Mayor : A Jupiter-mass companion to a solar-type star, *Nature* **378**, 355-359(1995)

Akito Tajitsu, Kozo Sadakane, Hiroyuki Naito, Akira Arai, & Wako Aoki : “Explosive lithium production in the classical nova V339 Del (Nova. Delphini 2013)” , *Nature* **518**, 381-384 (2015)

岡本義雄：タイと日本の高校生のための神戸・淡路の震災モニュメントへの英語野外巡検の試み，*附属天王寺中・高研究集録 No.57*，149-166，2015

岡本義雄：英語で地学の授業を行う試み Part2 -ある火星年代記-，*附属天王寺中・高研究集録 No.58*，117-141，2016

高Ⅲ授業で以前に，日本人研究者の英語発表ということで紹介した 2011AGU FallMeeting の講演ビデオ URL：<https://www.youtube.com/watch?v=D1BCLMRNkSM>

授業で使用した，2011AGU Sagan Lecture (Geoffrey W. Marcy) の講演ビデオの URL：
<https://www.youtube.com/watch?v=avjAbQJk4EQ>

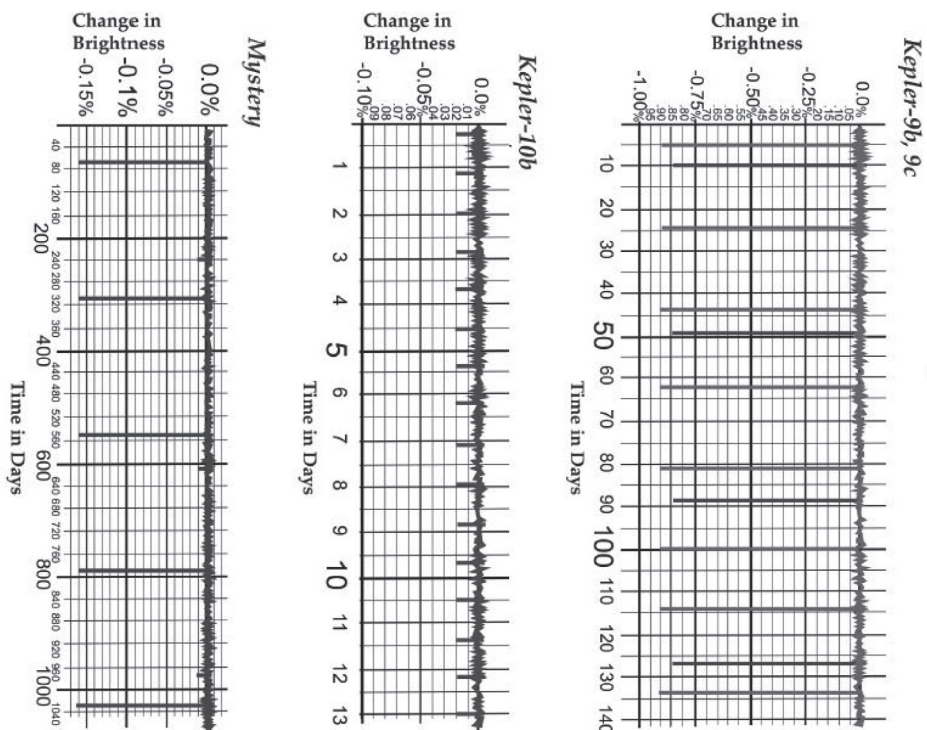
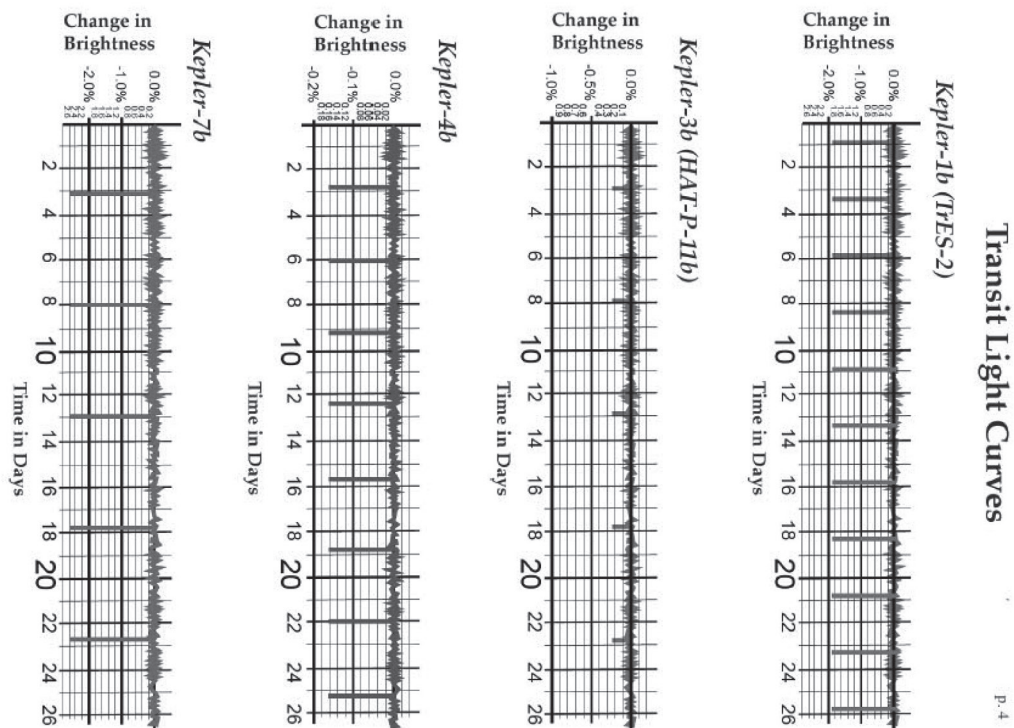
NASA の Kepler Mission の実習教材 pdf：<https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/tt-apr-13-2011.pdf>

パワーポイントに用いた，NASA が公開の動画資料：<https://www.nasa.gov/content/kepler-multimedia>

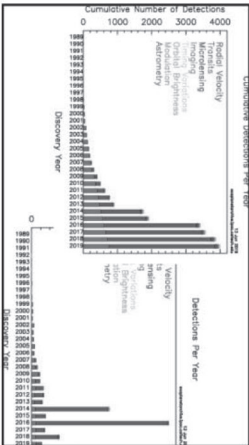
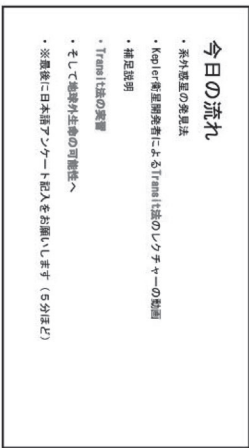
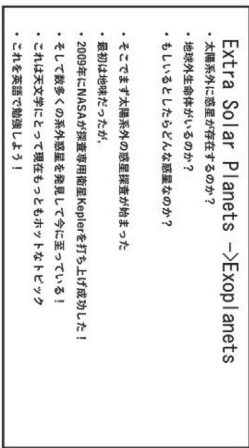
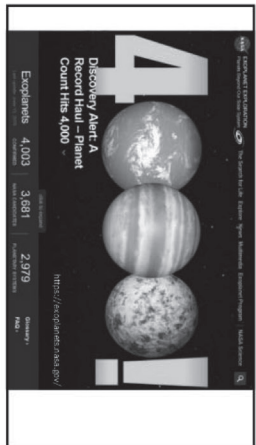
MIT の次世代衛星 TESS のサイト：<https://tess.mit.edu>

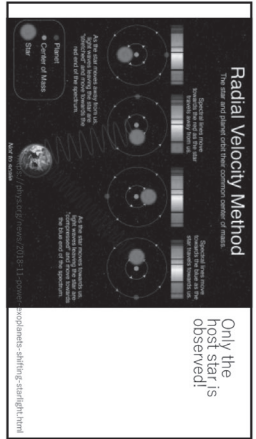
Piet van de Kamp による 1963 年の Barnard 星における系外惑星発見談（論文ではなく学会発表）の詳細：<https://blogs.scientificamerican.com/observations/50-years-ago-an-astronomer-discovered-the-first-unambiguous-exoplanet-or-so-he-thought/>

資料1. 実習用グラフ (参考文献の tt-apr-13-2011.pdf より抽出, 原文はカラー)



当日の授業用 PPT（筆者作成，原文はカラー，引用元はそれぞれのスライドに記入）

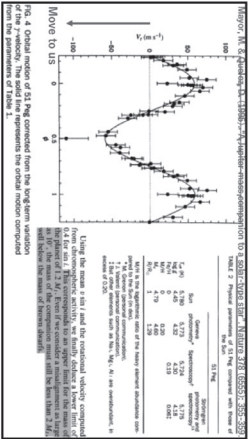




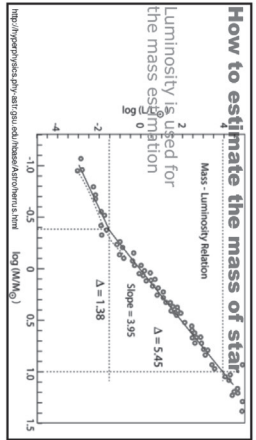
10



11



12



13

Transit method: tutorial video!

- 2011 AGU/American Geophysical Union) Fall Meeting in San Francisco
- There are many sessions about the 2011 Tohoku earthquake.
- Sagan Lecture (Geoff Marcy@UCB)
- I was sitting in the room!

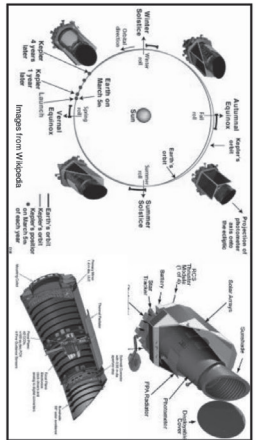
Let's watch the video!

14

Question 1

- What are the two basic methods to find exoplanets?
- Why were NASA staffs so nervous?
- How much diameter of Kepler telescope's main mirror?
- How wide is the angle of Kepler telescope CCD?
- How often does the camera record?

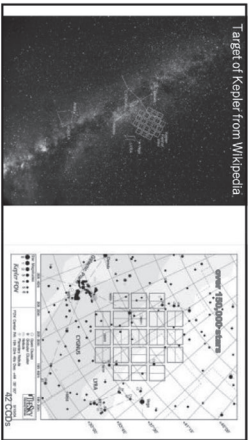
15



16



17



18

A Geoscience class lectured in English IV

— Extra-Solar Planets, Discovery and Its Meaning —

OKAMOTO Yoshio (Part-time teacher)

Abstract : We carried out a special class about the survey of exoplanet teaching in English. This class was the fourth attempt to teach geoscience classes in English for the author in this school. The course begins with an introduction of the methods to detect exoplanets, which are the planets belonging to the other stars beyond our solar system. There are two fundamental methods; the wobble method and the transit one. Our class treated mainly as the following transit method. NASA already provides a teaching exercise for secondary-school; we used this lesson. At first, a video at the AGU fall meeting 2011 explaining the transit method by a specialist introduced the technique, and then a practical activity was carried out. The practice consists of several lessons using the light curves of exoplanets, which were derived from the Kepler mission. Our students measure 1) the orbital periods of planetary revolution from the dimming period, and estimate 2) the size of them from the dimming amount on the light curve, respectively. Through this exercise, our students can understand the method detail and the background of scientific principle. Moreover, we discussed some exciting episodes, including the possibility of encountering another intelligent life. The questionnaire result shows a successful conclusion of our class. Finally, we discussed the future of our method.

Keyword : Exoplanets, Kepler mission, Transit Method, Exercise, Earthscience