

# 地球科学におけるトランス・サイエンスの諸問題

吉岡直人

深田地質研究所

Trans-scientific issues in the Earth sciences

YOSHIOKA Naoto

Fukada Geological Institute

要旨：1972年にワインバーグが提唱した、トランス・サイエンスという概念は、「サイエンスに問うことができるが、サイエンスでは答えることが出来ない問題群」とされる。ワインバーグは原子炉の安全性の問題など、いくつかの例を挙げているが、本稿は、地球科学にこの概念を当てはめた場合、どのような問題が考えられるか、若干の考察を試みた小論である。地震予知、地球温暖化をはじめとする地球環境問題、原発立地問題などがこれに当たると考えられる。これらの問題を解決するには、専門家と、一般大衆との双方向の会話、議論が大切である。

キーワード：トランス・サイエンス、地震予知、地球温暖化、原発立地問題、対話型コミュニケーション

Abstract: The concept of “Trans-Science”, which was proposed by A. M. Weinberg in 1972, is “the questions which can be asked of science and yet *which cannot be answered by science*”. Weinberg showed some examples such as the safety problem of reactors. I will here try to apply the “Trans-Science” to some issues in the Earth sciences. The problems of earthquake prediction, environmental issues such as warming of the Earth and site selection of nuclear reactors would be involved in this concept. In order to solve these problems, dialogic communication between experts and public must be required.

Keywords: trans-science, earthquake prediction, warming of the Earth, site selection of nuclear reactors, dialogic communication

## 1. はじめに

ちょうど本稿を執筆していた時（2017年9月現在）、1977年に東海地域判定会が発足し、1978年に大規模地震対策措置法が成立して以来続けられてきた、「東海地震の予知体制」が、40年ぶりに見直されることになった、というニュースが飛び込んできた。「明日起きても不思議ではない」という警句とともに登場した「東海地震」は、ついに（と言うべきか、幸いにも、と言うべきか）40年間起こらず、むしろ現在では、東南海地震、

南海道地震、さらには日向灘をも巻きこんだ、南海トラフ沿いの連動型超巨大地震が発生するのではないかと言う説が取り沙汰されるようになっていく。

これら一連の動きは、2011年3月11日に発生した、マグニチュード（Mw）9.1（理科年表に依る）の東北地方太平洋沖地震の経験から、大きな影響を受けてのものであることは明らかである。「地震予知」というものが、これまで考えられてきた以上に困難であることを、あの地震によって思い知らされただけでなく（たとえば、日本地震

学会, 2012 ; 吉岡, 2016), 科学が社会に与える影響の大きさを無視できないこと (たとえば, 戒厳令に匹敵する「警戒宣言」の発令など) をも考慮せざるを得なかったことも事実であろう。

この一例でも明らかなように, 現代の科学技術は, 社会の動きや考え方と深く結びついており, 社会から独立して進めることが出来ないものとなっている。工学 (エンジニアリング) はもともと社会との結びつきが強いものであるが, 理学 (サイエンス) といえども一昔前とは異なり, 社会の動向を無視して進められるものではなくなっている。この変化は, 科学技術の進展が人々の生活に恩恵をもたらし, 明るい未来を約束するものとされていた 1960 年代のアポロ計画に象徴される時代が終焉し, 有害物質の蓄積や大気汚染といった公害の問題が取り沙汰されはじめた, 1970 年代以来のものである。この時代に, 科学への疑問の噴出という転換があったのである (小林, 2007)。この点に関して, 科学の進展とともに問題が複雑化し, 科学のみでは答えが出せない状況が多くなってきたためであるという指摘がある。米国オークリッジ研究所の所長であった, 核物理学者ワインバーグはこのような問題をトランス・サイエンス (超科学) と名づけ, 早くからこの問題への対処を指摘してきた。

本稿では, 地球科学におけるそのような問題に焦点を当て, 若干の考察を加えることを試みてみたい。

## 2. トランス・サイエンスとは何か

本論に入る前に, ワインバーグの提唱したトランス・サイエンスとは何か, を概観しておこう。

ワインバーグ (Alvin M. Weinberg, 1915 年 4 月 20 日 - 2006 年 10 月 18 日) は, 原子爆弾を開発

したマンハッタン計画に参加した核物理学者であり, 1955 年から 1973 年の間, オークリッジ国立研究所 (Oak Ridge National Laboratory, テネシー州) の所長を務めた。オークリッジ国立研究所は, ロスアラモス国立研究所とともに, マンハッタン計画を推進した研究所の一つであるが, 戦後はアメリカ最大の科学研究所となり, 原子力開発や核物理学研究の世界的中心の一つとなっている。ただし, ワインバーグは広島投下の原子爆弾・リトルボーイの開発に携わったことを後悔し, 「日本国民に深くお詫びしたい」と語った最初の米国人とされる。また彼は, 原子力発電にも, その放射性廃棄物処分の困難さなどのために反対していたという (川本, 2011)。

彼は 1972 年に, 「Science and Trans-Science」 (Weinberg, 1972) という論文を, 文科系の総合雑誌である, *Minerva* に発表した。核物理学者であるワインバーグが文科系の雑誌に投稿したためか, 彼をよく知っている研究者も, その論文を (そしてトランス・サイエンスの概念も) 知らない人が多いという (小林, 2007)。それはともかく, その論文の中で, 彼は科学と社会の関係の問題を論じ, 「科学に問うことはできるが, 科学によって答えることが出来ない問題群 (questions which can be asked of science and yet *which cannot be answered by science*)」 (斜体は原文のまま) を, トランス・サイエンス (trans-science) と呼ぶことを提唱した。「トランス」とは, transcend すなわち, 「超越」である。

彼がトランス・サイエンスの例として示したものには, 非常に微量な放射線による突然変異誘発率の問題 (ハツカネズミの実験でこれを 95% の信頼度で確かめようとする, 80 億匹のハツカネズミが必要となるため, 事実上不可能) とか, 原子力発電所の安全性の問題 (安全性を確かめる

には、数千の原子炉をつくり、たとえば1万年間運転しないと安全率は確認できない) とか、あるいは、「フーバーダムを壊滅させ、それによってインペリアルバレーの一部を洗い流すような破壊的な地震」といった、非常に稀にしか起きない事象の問題群がある。

また原子炉にも関係するが、工学的問題の多くは、トランス・サイエンス的であると述べている。大規模構造物がその一例で、実際に試作品を作って実験をする訳にはいかず、限られたデータで製作や運転に踏み切らざるを得ない「工学的判断 (engineering judgement)」が必要で、これは真の意味で科学的な解答ではない、という意味でトランス・サイエンスである、という訳である。なぜなら、この「工学的判断」というのは厄介な代物で、およそ明確に定義できる性質のものではないからである。工学的専門家の「相場判断」のようなものであるから、問題によっては、専門家できえ、意見が異なることも稀ではない。

では、科学が明確な答えを出してくれない、トランス・サイエンス的な状況で意思決定が求められる場合、どうすればいいのか? 専門家の中で意見が分かれる問題に対しては、専門家は意思決定を独占するべきではなく、利害関係者や、一般市民 (public) をも巻き込んで討議し、意思決定をすべきである、というのがワインバーグの主張である。これを彼は *adversary procedure* と書いているが、日本語にすると、「敵対者手続き」とでも訳することになるだろうか。ともかく、問題となっている事柄に関係する科学者だけではなく、一般市民をも含んだ論争、議論の場が提供されねばならないという。(これに関しては後に詳述する。)

この点に関して、彼は興味ある例を挙げている。それは原子力発電所の設計に関する、アメリカとソ連 (論文が書かれた 1972 年当時はまだソ

ビエト連邦であった) の違いである。アメリカでは、一般市民がその議論に加わることにより、とても起こりそうもない出来事 (unlikely event) までももっともらしさを獲得し、その結果、原子炉は安全システムと緊急システムがすべてのテクノロジーを統治 (dominate) したような状況であると言う。これに対してソ連では、一般市民はこの種の科学技術的議論に参加することも、情報を得ることも許されていないので、当時のソ連の加圧水型原子炉には格納容器が設置されていなかったという、信じがたいことが起きていたのである。このことは、社会の制度 (民主主義か、一党独裁の共産主義か) が、科学的判断に決定的な違いをもたらす、ということの意味する。典型的なトランス・サイエンスの問題であるためである、と言えるだろう。(ただし、アメリカのスリーマイル島原発事故は、1979 年であり、チェルノブイリの事故は 1986 年、福島事故は 2011 年であって、いずれもワインバーグの論文の後に起こったことも、今では考慮しなければならないだろう。「とても起こりそうもない出来事」が実際に複数回起こった後で、彼は同じ表現を用いたであろうか?)

### 3. 地球科学におけるトランス・サイエンス的諸問題

それでは、私たちが関わっている地球科学における、トランス・サイエンス的問題にはどのようなものがあるだろうか?

先にも述べたように、工学的判断を求められる問題は、多くの場合、トランス・サイエンス的問題であるので、ここでは、どちらかと言えば理学的問題とされてきた問題について、考えてみたいと思う。

### 3.1 地震予知

本稿の最初の部分で述べたように、「東海地震」の予知体制は、40年ぶりに抜本的に見直されることとなった（詳しくは、福和，2017 など参照）。

ことの発端は、1976年に石橋克彦氏が地震学会で発表した「東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾大地震について—」（石橋，1976）と題された論文である。これを受けて国会で地震学者が証言するなど、社会問題化し、1977年には「東海地域判定会」、1978年には「大規模地震対策特別措置法（大震法）」が制定された。茂木（1998）は当時を振り返って、次のように述べている。「ほとんどの地震専門家は、現段階では確度の高い地震予知はむずかしいこと、地震予知はまだ研究開発途上の問題であるという意見をくりかえし述べていたのである。（中略）こういう確度の高い短期予知に慎重な意見が強かったにもかかわらず、政府（気象庁、国土庁）は予知を前提とした大震法を成立させ、しかも、警戒宣言が発令されると、きわめて大きな社会活動への影響を与えるにちがいない強い対応措置をとることを決めて、今日にいたっている。」

以来40年間、「東海地震」は発生しなかったこと、そしてこの体制が最近、見直されるに至ったことは既に述べたとおりである。

2011年の、いわゆる東日本大震災が地震学界に与えた衝撃は測り知れないものがあつたが、川勝（2012）は、「トランスサイエンスの領域にしながら『科学で解決できる』と信じてことに当たっていることに、研究者・地震学界の苦悩の始まりがあるのではなからうか」と述べている。

私は前稿（吉岡，2016）で、「しかし科学は必ず進歩するものである。『地震予知は困難だが、困難と不可能を混同していけない。ありとあらゆる

努力をすべきだ』は、元予知連会長であった大竹政和氏の言葉である。（中略）『地震予知』という、この困難な課題に向って、今後ともあらゆる可能性を探っていくことは、今後地震学を担っていく者に課せられた重要な課題の一つではないかと思う」と述べた。この思いは今も変わっていないが、少なくとも現時点では、「地震予知」はトランス・サイエンス的な性格を色濃く持っていると言わざるを得ない。

### 3.2 地球温暖化問題

専門家の意見が一致しない、というのがトランス・サイエンスの特徴の一つだとすれば、地球環境問題の一つである、地球温暖化の問題も、トランス・サイエンスの典型例かもしれない。

図1は、1981年～2010年の平均気温からの差を1891年からプロットしたものである（気象庁ホームページより）。これを見ると、確かにこの100年余りの間の温度上昇は続いているようにみえる。

しかし、これに対しても様々な理由で懐疑論が出されている（例えば深井，2015）。そもそも、現代はともかく、100年前の「世界の年平均気温」の統計的処理には無理があるのではないか、という議論はもっとものように思える。

また、地学的証拠から、数万年単位で繰り返されたとされる氷河期・間氷期の温度変化（もちろん、この100年間の温度変化よりはるかに大きい）を考慮すると、果たして100年程度の観測で、全体の傾向が判断できるのか、という疑問も残る。

また、この温度上昇が正しいとしても、その原因を、二酸化炭素を主とした、人為的な温室効果ガスに求めることに反対の意見も多数存在するようである。太陽活動の影響、宇宙線の影響、地球内部の活動、磁気圏の活動などが原因

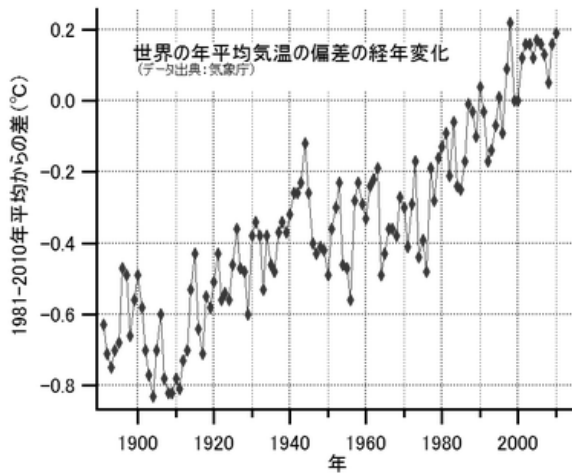


図1 世界の年平均気温の偏差の経年変化 (1891~2010年) (気象庁)。

と主張する懐疑論である（例えば，Khilyuk and Chilingar, 2006；Chilingar et al., 2007 など）。

赤祖父（2008）は，ここ 100 年程度の温度上昇の原因を，全てを二酸化炭素という温室効果ガスに求めるのではなく，産業革命以前から続いている，小氷期からの回復過程の影響が大きく，二酸化炭素の影響があったとしても，それは全体の 6 分の 1 程度ではないか，と述べている。（ただし，二酸化炭素原因説に懐疑的な研究者も，二酸化炭素の排出量を制限すべきであることには否定的ではない者が多いようだ。）

### 3.3 原子力発電所立地問題

先に述べたように，ワインバーグは原子力発電所の安全性に関して，トランス・サイエンス的な問題を指摘している。原子力発電の技術的な側面は，完全に科学的な問題であるが，安全の上にも安全を考慮した個々のシステムが，同時に一挙に故障することがありうるか，という問題には，科学は答えをだせない，と言う意味で，トランス・サイエンスであるというのである。

これに加えて，地球科学的な観点から，原子

力発電所の立地問題を考えてみたい。「立地」と言う問題は，地球科学者に課せられた課題であるからである。特に地震・津波多発国である日本においては，考えておかなければならない問題であろう。

まず，活断層の評価の問題がある。これは純粹に「科学（サイエンス）」の問題であるように思われる。実際に地形判読や，トレンチ調査などの作業は地球科学者の手でおこなわれている。しかしながら，ある断層がどこまで伸びているか，近傍の断層と繋がっているか，あるいは立地予定地（さらには既設敷地内）に伸びている亀裂は活断層か，といった問題は，専門家の意見が分かれることも稀ではない。北陸電力志賀発電所，日本原子力発電敦賀発電所，東北電力東通発電所をめぐる敷地内断層の議論は記憶に新しい。政治的な判断はさておきとして，科学のみでは明確な答えが出せない場合が多いのではないか？その意味では，これも少なくとも現時点ではトランス・サイエンスと言えらるであろう。

また，津波の評価の問題もある。東日本大震災では「想定外」の津波が発生し，東京電力福島第一原子力発電所に重大な事故を引き起こした。この一事を見るだけでも，先に述べた「地震予知」とともに，トランス・サイエンスといえるのではないだろうか。

また，最近，日本海側の津波の想定が問題となっている（島崎，2016）。国（国土交通省「日本海における大規模地震に関する調査検討会（委員長：阿部勝征東大名誉教授）」）が出した日本海における津波の想定高は，小さく見積もりすぎている，と島崎氏は主張している。国も島崎氏も科学的計算式を用いて議論しているが，用いている式に違いがあり，双方の主張は隔たっているのである。端的に言えば，島崎氏が述べているように，「地震発生前には，断層面積や断層の長さが

正確には推定できない」のである。活断層の評価の問題と同様に「科学的」には容易に答えが出せない問題と言わざるを得ない。最終的な判断は、それを判断する個人の経験や、性格まで関係するかもしれないし、政治的な要素も入り込んでくるだろう。その意味でもやはり、トランス・サイエンスと言えるのではないか。

もちろん、原子力発電所の立地という問題は、地球科学的な観点以外の様々な要素が入り組んだ複雑な問題であり、最終的には「工学的判断」、「政治的判断」、「経済的判断」などのもとに決定がなされてきた。その意味でも、この問題はトランス・サイエンスと考えるべきであろう。

#### 4. トランス・サイエンスの問題解決法と科学者の役割

既に述べたように、トランス・サイエンスの問題に関しては、専門家は意思決定を独占すべきではなく、利害関係者や、一般市民（public）をも巻き込んで討議し、意思決定をすべきであるというワインバーグの見解があることを紹介した。ここではこの点をもう少し詳しく見てみよう。

ワインバーグは「科学の共和国（republic of science）」と「トランス・サイエンスの共和国（republic of trans-science）」という言葉を用いてこの問題を論じている。「科学の共和国」とは、科学者のみで構成される国家であり、その市民は科学的業績で評価され、その内部で議論が戦わされ、批判が飛び交うという閉じた空間である。われわれが、学会や論文査読（ピア・レビュー、ピアとは仲間という意味）で経験する、あの世界である。科学（サイエンス）の問題は、この閉じた空間の内部で解決でき、その結果と成果が社会に報告・還元される。ワインバーグは「この共和国

への一般市民の参加は混乱を引き起こすだけである」とまで述べている。

しかし、問題が一旦トランス・サイエンスになると、「トランス・サイエンスの共和国」で問題の解決が図られねばならない。その共和国の住民は、科学技術者という専門家だけではなく、一般市民、政治家、法律の専門家などが含まれる。ここでは、科学技術に無知な一般市民（素人）の発言も許されるのである。また、許されなければならないのである。

では、トランス・サイエンス的な問題に遭遇した場合の科学者の役割は何であろうか？まず、科学（サイエンス）とトランス・サイエンスの境界を見定めることである。言い換えれば、科学の限界を認めることとも言えるかもしれない。これは、その分野の科学者にとっては、容易なことではないだろう。あるいは認めたがらないだろう。（私自身も含め、「地震予知」に関する地震学者の考えはそれに近いのかもしれない。）

その境界を見定めたうえで、出来る限り、トランス・サイエンス的な問題を、サイエンスの問題として解決できるように研究を進めることがまず第一に科学者に求められる役割であろう。

そしてそれが実現するまでは、トランス・サイエンス共和国の住人の一人として振舞うべきである。すなわち、これまで、一般市民と科学者の関係とみなされてきた、科学者から一般市民への知識の伝授という、一方向のコミュニケーション（これを一般市民の知識の欠如を補うと言う意味を込めて「欠如モデル」と呼ぶらしい）だけではなく、逆向きに、一般市民の懸念や疑問、不安、期待、要求などを専門家に伝え、双方向的なコミュニケーションを確立することが求められているという（小林，2007；平川，2012）。

先に述べた、地球科学におけるトランス・サ

イエンス的な諸問題においても、地球科学者にはこの姿勢が求められるだろう。

## 5. あとがき

東日本大震災のあと、地震学に携わってきた者の一人として、「科学」とは何かという問題を考えさせられてきた。その中で、「トランス・サイエンス」という言葉に巡り会い、ワインバーグが1972年に書いたという論文の原典を読んだ。まことに難解な英文であり、私の英語読解力では十分理解できたかどうかは疑わしい部分もある。柴谷(1973)、小林(2007)、平川(2011)など、ワインバーグの上記論文を引用している文献に大いに助けられた。

考えてみると、理学としての地球科学にも、トランス・サイエンス的な部分が少なくないことに気付かされる。上に挙げた例以外にも沢山あるだろう。われわれがサイエンスと考えて進めてきた研究は、実はトランス・サイエンスの色彩が強い分野も少なくないと思われる。

もちろん「科学でもまだ分かっていないこと」は地球科学の分野に限らず、山ほどあることは言うまでもない。だから、これらの問題はすべてトランス・サイエンスの問題か、というところではない。科学者にしか解けない問題も多い(純粋な理学の問題や、数学などを見ると明らかである。「餅は餅屋」という側面は確かに存在する)。ただ、問題の解明のための科学が、人々の生活や健康、人生そのものに影響を及ぼすようになると、科学は科学者だけに任せて置けなくなる。

日本では、公害問題に端を発し、1995年の阪神淡路大震災、理工系エリートが関わった地下鉄サリン事件、高速増殖炉もんじゅの火災事故、1999年のJCO事故などが、一般市民の、科学、

科学者への信頼を喪失させる一連の出来事となった。そしてそれにとどめを刺したのが2011年の東日本大震災と、これによって引き起こされた福島第一原子力発電所の大事故だった。

英国では1986年発生したBSE(牛海綿状脳症)とその後の処置(人間には感染しないとされたが、実際にはヤコブ病感染者が現れた)の問題が、科学への不信を生み、これが契機となって一般市民の科学への参加、科学者と一般市民間のコミュニケーションが大きく進んだと聞く。遺伝子組み換え技術を用いた食物に関する、一般市民の反安全性論争も、この点で大きな役割を果たしているようだ(小林, 2007)。

世界でもこの流れの中で、1999年に「科学と科学知識の利用に関する世界宣言(ブタペスト宣言)」が世界科学会議(155ヶ国、参加者約2000人)で宣言された。これは“政府、市民社会、産業界の科学に対する強力な関わりと、科学者の社会の福利への同じく強力な関わりの必要性”という認識から、「社会における、社会のための科学」という位置づけが確認されたものである。

これら大きな流れの中で、科学者と一般市民の、双方向の対話型コミュニケーションが始まっているようだ(小林, 2007; 平川, 2012)。サイエンス・カフェ、コンセンサス会議など、ここで詳しく述べる余裕はないが、新しい試みも始められているようである。

トランス・サイエンスがこれだけ大きな存在となってきた現代においては、科学者と一般市民、社会との関係を常に考えつつ、研究をすすめる時代になったといえよう。

1972年という早い時代に、このことに警鐘を鳴らしたワインバーグの慧眼には、頭が下がるばかりである。

文献

- 赤祖父俊一 (2008) : 正しく知る地球温暖化, 誤った地球温暖化論に惑わされないために, 誠文堂新光社, pp.310.
- Chilingar, G.V., O.G.Sorokhtin and L.F. Khilyuk, (2007) : Response to W. Aeschbach-Hertig rebuttal of 'On global forces of nature driving the Earth's climate. Are humans involved?' by L.F.Khilyuk and G.V.Chilingar", *Environmental Geology*, 52 (5), 1567-1572.
- 深井 有 (2015) : 地球はもう温暖化していない : 科学と政治の大転換へ, 平凡社新書, pp.255.
- 福和伸夫 (2017) : 南海トラフ地震、予知前提の防災見直し 不確実な情報を対策にどう活かすか? <https://news.yahoo.co.jp/byline/fukuwanobuo/20170927-00076236/>
- 平川秀行 (2011) : 3・11以降の科学技術コミュニケーションの課題 — 日本版「信頼の危機」とその応答, 「もうダメされないための『科学』講義」(光文社新書)に収録. 151-209.
- 石橋克彦 (1976) : 東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾大地震について—, 日本地震学会予稿集, 30-33.
- 川勝 均 (2012) : トランス・サイエンスとしての地震予知・長期予測, 「地震学の今を問う」日本地震学会モノグラフ, 第1号, 53-54.
- Khilyuk, L.F. and G.V.Chilingar (2006) : On global forces of nature driving the Earth's climate. Are humans involved?, *Environmental Geology*, 50 (6), 899-910.
- 川本 稔 (2011) : 戦後日本の原子力発電計画に対する一人の米国人物理学者の諫言, <http://www.owaki.info/icus/Weinberg.html>.
- 小林傳司 (2007) : トランス・サイエンスの時代, NTT出版, pp.288.
- 茂木清夫 (1998) : 地震予知を考える, 岩波新書, pp.254.
- 日本地震学会 (2012) : 地震学の今を問う (東北地方太平洋沖地震対応臨時委員会報告), 日本地震学会モノグラフ 第1号, pp.171.
- 柴谷篤弘 (1973) : 反科学論, みすず書房, pp.312.
- 島崎邦彦 (2016) : 最大クラスではない日本海「最大クラス」の津波一過ちを糾さないままでは「想定外」の災害が再生産される, 科学, 86 (7), 653-660.
- Weinberg, A. M. (1972) : Science and Trans-Science, *Minerva*, 10 (2), 209-222.
- 吉岡直人 (2016) : 「地震予知」再考 —これまでの歴史と個人的総括—, 深田地質研究所年報, 17, 57-72.