



横幹的視点からの環境問題へのアプローチ - 境界を越えた問題の解決に向けた知識の統合 -

安岡 善文*

Transdisciplinary Approach to Environmental Problems - Integration of Knowledges toward the Solution of Transboundary Problems -

Yoshifumi YASUOKA*

Abstract— Environmental problems such as global warming, deforestation or loss of biodiversity are highly transboundary. Solving the problems, therefore, requires knowledges from different scientific disciplines including physics, chemistry or biology, and requires integrating them. Transdisciplinary science and technology are ways to integrate knowledges from different disciplines, however, methodologies integrating them are not established yet. This review paper summarizes transdisciplinary characteristics of environmental problems, and introduces approaches to solve the problems with a focus on global warming.

Keywords— environmental problems, global warming, IPCC, transdisciplinary approach, interdisciplinary approach

1. はじめに

2007年の科学技術面での大きなニュースの一つとして、IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) がノーベル平和賞に選ばれたことが挙げられる。このニュースに関連して、地球温暖化が人間活動による影響であることが確からしい、ということがIPCCの第4次報告書で初めて示された[1]。この結論を得るまでにはIPCCが発足した1988年から20年の月日を要した。地球大気に熱赤外領域の電磁波を吸収するガスが存在することを示したJ. Tyndallの説(1859年)、また、このガスの影響で地球が温暖化する可能性を示したS. Arrheniusの説(1896年)の発表から実に100年あまりの歳月を必要としたことになる[2]。現象が如何に複雑で原因を特定することが難しかったかを示すものである。

俯瞰的研究、学際的研究など、複数の学問分野にまたがる研究の方法論が議論されるようになったのは環境の汚染や劣化が顕在化してからである。水俣病、イタイ

イタイ病、四日市喘息などの公害型問題に端を発した局所・地域規模での環境問題も、その対応に長い時間を要した。特定の地域で発生した現象にもかかわらず因果関係を特定することは容易ではなかった。

地域規模にせよ地球規模にせよ、環境問題では、様々な要因や変数が複雑にからむために従来からの単独の学問体系のみによって因果関係を特定し、さらに問題解決にまで導くことが難しい。今日我々が抱える問題の多くが同様の難しさを抱えているといえる[3, 4]。これは学問分野が、それぞれ独自の論理体系を美しく構築するために境界条件を狭く設定してきたことが原因の一つであろう。学問の細分化とも言われている。境界条件が狭くなると、その境界条件を越えて発生する現実の問題に単独で対応することは難しい。境界条件を越えて、複数の分野にまたがる問題を解決するための手段として俯瞰的研究、学際的研究または横断的研究の推進が求められてきた理由はここにある。実際、異分野の研究者が連携することにより、問題を明確にし、その解決に向けての道筋を明らかにしてきた例も少なくない。地球規模での温暖化問題に対処するための国際的な枠組みであるIPCCなどの活動は良い例であろう。

このように問題の解決に向けて複数の学問分野が連携する努力が進められている一方で、複数の学問分野の知識をどう集約化し、どう構造化するか、学問体系の再

*国立環境研究所 〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関1-4-2 大同生命霞ヶ関ビル 7F

*National Institute for Environmental Studies, 7F Daido Seimei Kasumigaseki Bldg., 1-4-2 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0013, Japan

Received: 29 January 2008, 4 March 2008

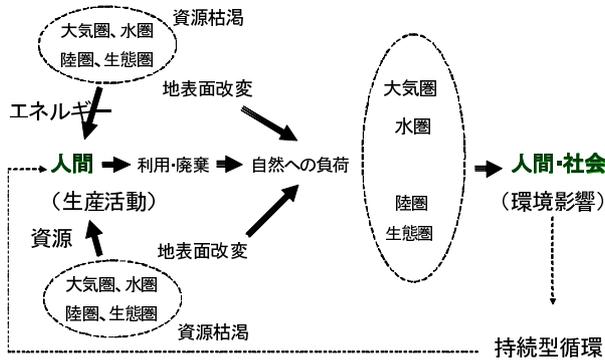


Fig. 1: 環境問題における循環の構造

構築は必ずしも進んでいない [5, 6]。最大の理由は、それぞれの学問分野における知識の体系やその境界条件を越えて既存の学問体系をつなぐ方法論が確立していないことにある。環境研究は、その発端から問題解決のために複数の学問分野の連携を前提とした俯瞰的、学際的な研究分野であったことから、他の分野に比較し分野間連携が進んでいるといえる。しかしながら、複数分野を包括した学問体系が確立しているとはいえない。特に、環境研究分野において横断型科学技術をどう位置づけるのか、まだ模索の段階にある。

本稿では、環境問題の解決を目指した研究における学問の再構築について検討する。まず、環境問題の特性を概括し、次に、従来の学問分野の境界を超える環境科学技術の方法論を検討する。さらに、地球温暖化を例に挙げて環境問題に取り組む上で必要とされる横断型科学技術の役割について検討する。

2. 環境問題の特性

2.1 人間活動を起点とする環境問題

環境問題は、人間の生産活動に起因して発現する自然圏（大気圏、水圏、陸圏、生物圏）と人間・社会圏への負の影響として捉えることができる。人間は我々を取り巻く自然圏から天然資源やエネルギー資源を得て、これらを使って生産活動を行い、その生産物を利用して生存する。その結果としての環境の改変と廃棄物の生成・放出が自然圏に影響を与え、さらには人間・社会圏に影響を及ぼす。Fig. 1にはこの影響の流れを、人間活動を始点として示した。Fig. 1における矢印は系間の影響を表わしたものであり、矢印の方向へ影響を及ぼす。また、Fig. 1では、最終的な影響を受ける側としての人間・社会圏が終点として示されている。さらに、図面構成上の理由から、人間が資源やエネルギーを受け取る自然圏

と、人間の生産活動による影響を受ける自然圏が分離して描かれているが、これらは同じ自然圏を表わす。

人間活動が環境に与える影響、即ち環境の改変と廃棄物の生成・放出は、直接的にまたは自然圏を介して間接的に人間・社会圏に及ぶが、自然圏の容量が十分に大きく影響を吸収できる場合には問題は発生しない。環境問題は、人間の生産活動による負の影響が増大して、自然圏、さらには人間・社会圏が被害を受けたときに発生する。例えば、人間活動により廃棄物としてのCO₂が大気中に放出されてきたが、この量が少なかった時代には、CO₂増加による生態系や海洋に及ぼす影響は無視できるものであった。

Fig. 1で注意すべき点は、最終的な影響を受ける人間・社会圏が、影響に対応して行動するために、起点としての人間活動に影響を及ぼす循環（フィードバック）系を構成することである。環境問題は、この循環の全体もしくは一部に不具合が生じた状態といえよう。地球規模での環境問題は、人間の生産活動による影響がこの循環系を非可逆的に壊す可能性が出てきたところに深刻さがある。

2.2 循環不全としての環境問題

環境問題を解決するためには、上記の循環を安定化させなければならない。このためには循環のプロセスを理解すること、また、この循環のプロセスを安定化させることが必要となる。前者は主に環境科学の役割であり、後者は環境技術と環境政策の役割といえよう。では、具体的にはどのような手順が必要であろうか。循環プロセスの理解には、Fig. 1に示した矢印について、関連する変数（パラメータ）を同定、計測して、その過程を記述し、モデル化することが第一歩となる。また、プロセスの安定化には、矢印に沿って環境技術や政策などを適用し、さらにその効果（変数の変化や感度）を評価しなければならない。

ここで、循環の安定性を評価するに際しては、時間空間の境界条件に注意する必要があることを付記しておく。1年の時間スケールで考えるのか100年のスケールで考えるのか、また、日本の中だけで見るのか、世界で見ると見るのか、によって循環の安定性の評価は異なる。さらに、自然現象と人間活動起因の影響の切り分けも重要である。地球の変動には、人間活動に関係のない、地震や火山活動など自然現象に起因する変動（地球科学的変動）も影響を与える。人間活動に起因する変動にとっては、地球科学的な変動はバックグラウンドとしての変動といえる。この二つを分離することも環境問題の性格を明らかにする上で重要である。冒頭に示したIPCCの第4次報告書は、地球温暖化が地球科学的な変動ではなく、人間活動に起因するものであることを、確率的にではあるが、明示したことに価値があるといえよう。

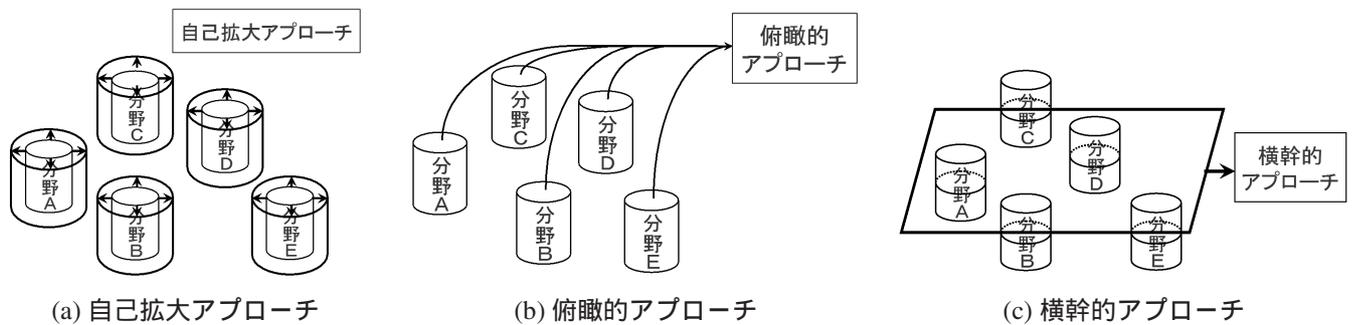


Fig. 2: 学問の境界を越えるための手段

2.3 分野の境界を越える環境問題

Fig. 1 に示されるように、人間の生産活動は自然圏と人間・社会圏に影響を及ぼしながら循環することから、その影響は必然的に複数の圏をまたぐ。このために、必要となる知識や関係する変数は複数の圏に関するものとなり、時空間のスケールも多様なものとならざるを得ない。例えば、環境分野で把握することが必要とされる変数の特徴を挙げてみると、

- 変数の種類の多様性（物理，化学，生物学変数から社会学変数まで）
- 変数の空間スケールの多様性（局所，地域から全地球まで）
- 変数の空間領域の多様性（大気，海洋，陸域から人間・社会圏まで）
- 変数の時間スケールの多様性（短期的なものから長期的なものまで）
- 変数の状態の多様性（負荷量や状態量から影響・反応量まで）
- 計測・調査手法の多様性（遺伝子解析，化学分析，物理計測から社会調査まで）

などが挙げられる [7]。環境研究では、これらの次元やスケールが異なる多様な変数を取り扱う知識と手法が要求される。

例えば、温暖化のリスク評価を考える場合、CO₂ 増加による直接間接の影響（リスク）を陸域生態系，海洋，人間・社会等の異なった分野において統一した基準で評価しなければならない。温暖化問題のみならず，化学物質などによる環境リスク問題も同様な性格を有しており，物質増加一単位当りの影響を分野横断的に評価する手法が必要となる。

3. 境界を越えた知識の再構築

環境科学技術の使命は，Fig. 1 における循環を健全に廻すことにあるといえるであろう。前節で示した環境問

題の特性から，環境科学技術が従来からの単一の学問分野の境界を越えたものとなることは明らかである。では，従来の学問分野の境界を越えた学問の再構築をどう進めれば良いのであろうか。

学問分野の従来の境界を越えて知識を統合するには3つの方法が考えられる。

- ① 従来の個別学問分野の境界を広げる自己拡大アプローチ
- ② 複数分野の知識をつなぐ俯瞰的（学際的）アプローチ
- ③ 複数分野の知識に共通な概念や方法論をつなぐ横幹的アプローチ

①は従来の学問分野が，環境に関する新たな知識を加えることにより境界の拡大をはかるものであり，境界を越えた知の統合とは厳密には異なる。一方，後者②，③は従来の複数分野の知識をつなぐものである。Fig. 2 には，3つのアプローチの違いを模式的に示した。ここでは，環境問題の解決に向けて異分野の知の統合が重要であることから，後者2つのアプローチについて，知識の統合方法を検討する。

3.1 俯瞰的（学際的）アプローチ

複数の分野にまたがった研究をつなぐ時，具体的にそこで何が流通するのであろうか。ここでは，分野間での情報の流れに着目する。さらに，情報を，

$$\text{情報} = \text{データ} * \text{モデル（知識）}$$

と定義することにより知識統合の手法を説明する。ここで，記号*は組み合わせを示す。この定義は，同じデータであってもデータを理解するモデル（知識）が異なると異なった情報を生み出すことを表現している。複数の研究者が同じデータを持ったとしても，その研究者が持つモデルや知識が異なると異なった情報を引き出すことは良くあることである。研究分野を考える場合においても，一つの学問分野で利用されるデータの種類やモデルには共通かつ固有なものが多い。このことから上記の

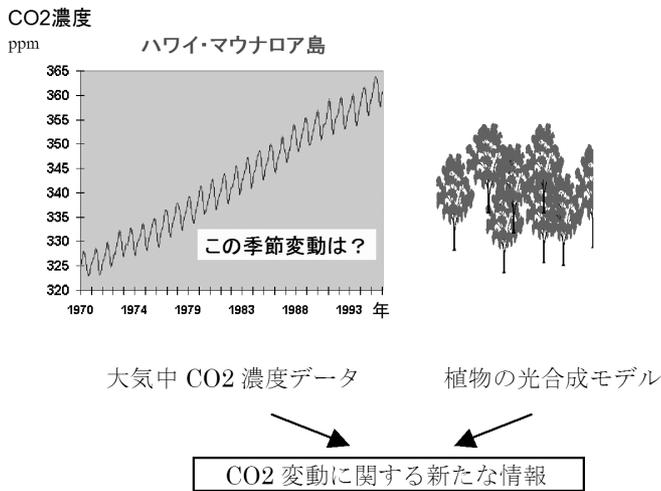


Fig. 3: 俯瞰的アプローチによる新たな情報の獲得の例

定義を一つの学問分野を特徴づける鍵として使用することが可能であると考えられる。

俯瞰的アプローチでは、一つの学問分野でのデータやモデル（データ A、モデル A）が別の分野での知識（データ B、モデル B）と結びつくことにより、新たな分野の情報（例えば、情報 C = データ A * モデル B）を生成する。一例として、俯瞰的アプローチによる温暖化に関する新たな情報の展開例を示す。Fig. 3 には、マウナロア山で観測された大気中の CO₂ 濃度データを示したが、このデータに見られる季節変動は、研究の結果、主に植物の光合成に起因することが明らかとなった。すなわち、CO₂ 濃度の季節変動（大気科学分野データ）は、光合成により大気中の CO₂ が植物に吸収されるという事象（植物学、または生態学分野におけるモデル）により説明することができ、生態系の機能が全球の CO₂ 変動に関与する、という新しい情報が生み出された。この地球環境研究分野の新たな情報は、さらに他の分野に展開され、大気科学分野や植物学分野の新しいモデルを生成する。また新たなデータ収集手法の開発につながる。

俯瞰的アプローチは、複数分野のデータやモデルが組み合わさって新たな情報を生成し、それが関連分野での新たなデータやモデルの獲得を促すという螺旋的な展開を生み出すことに特徴があるといえる。

3.2 横幹的アプローチ

横断型科学技術の定義、意義等については、すでに数多く述べられていることから、ここでは繰り返さない（本学会誌の Vol.1 および Vol.2 を参照されたい）。複数の研究分野を横断的に見るという点から、広義には、横断型科学技術も俯瞰的（学際的）科学技術の一つといえる。

前項で導入した情報 = データ * モデル の考え方から俯瞰的アプローチと横幹的アプローチの違いを説明してみよう。俯瞰的アプローチでは、データとモデルの分野横断型間での組み合わせは自由であるのに対し、横幹的アプローチでは、異なる分野間で流通するモデルは共通であるか、もしくは類似性が高い。例えば、一つの分野で利用されている情報 A をデータ A * モデル A とするとき、このモデル A が他の分野のデータ B と組み合わせさせたときに生成される情報 C（データ B * モデル A）がその分野にとって有用であれば、モデル A の展開は横幹的アプローチとなる。また、二つの異なる分野で類似したモデル M と M' が利用され、情報 A = データ A * モデル M と、情報 B = データ B * モデル M' がともに有用であれば、モデル M とモデル M' の構造を分析することにより新たなモデル M'' の展開を図ることができる。これも横幹的アプローチといえる。

統計学は基本的なモデルは共通であるが、生物学や農学の分野における固有のデータと接することにより生物統計学また農業統計学といった新たな発展を遂げた。また、両分野で展開されている新たな統計的なモデルや手法を抽出することにより、統計学の体系を展開することができた。統計学のみならず計測工学、制御工学、システム工学など複数の分野で共通に取り入れられて研究が進められている研究分野は多い。これらは横幹的アプローチの対象である。複数の分野で共通に使われているモデルや概念、手法を抽出することによりそのモデルや概念を展開し、その再構築を図ることが横幹的アプローチの特徴といえよう [6]。

4. 環境問題解決に向けた横幹科学技術のアプローチ - 温暖化問題へのアプローチ

本節では、環境問題の解決に向けた研究における横幹的アプローチの具体例として、本稿冒頭に挙げた IPCC の活動について紹介する。IPCC は、気候変動に関する科学的な判断基準の提供を目的としており、特に、地球温暖化に関する科学的知見の集約と評価を行うことを使命として 1988 年に設立された政府レベルのパネルである。約 5 年に一度の割合で発行される評価報告書は、温暖化についてその時点で得られる最新且つ信頼できる研究成果を基にした評価結果を提供する。2007 年に第 4 次報告書が発刊された [8]。

IPCC では、温暖化ガス濃度の変動とそれに伴う気温上昇等の気候変動を共通の軸として、温暖化に関する物理学、化学、生物学、また農学、林学、土木工学等の分野におけるデータを横断的に評価している。

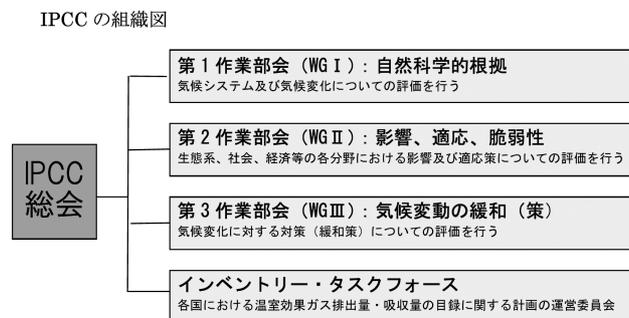


Fig. 4: IPCC の組織と作業部会の使命 (IPCC 第 4 次報告書より)

4.1 IPCC の活動における横幹的アプローチ

IPCC では、3つの作業部会 (WG1-3) において、気候変動に関する科学技術的な知見の評価、取りまとめ、情報提供を行ってきた (Fig. 4)。3つの作業部会の役割は以下の通りである。

WG1 (自然科学的根拠): 気候システム及び気候変動に関する科学的知見の評価

WG2 (影響・適応・脆弱性): 気候変動に対する社会経済システムや生態系の脆弱性、気候変動の評価

WG3 (緩和策): 温室効果ガスの排出抑制及び気候変動の緩和策の評価。

IPCC はあくまで研究結果の評価を行うことを目的とし、それぞれの研究は各分野の研究者が行なう。しかしながら、ここで横幹的な視点から注意すべきことは、WG1-3の各分野の研究者はIPCCへの入力を意識し、温暖化の評価という共通の基準で観測やモデルの開発・統合を行った、という点である。研究者が共通の基準で研究を進め、そしてIPCCは共通の基準で研究結果の評価を行うことにより人間活動と地球温暖化の間の因果関係を明らかにしようとした。

4.2 温暖化の計測とモデル化における横幹的アプローチ

ここでは少し具体的にその過程を紹介する。冒頭に述べたようにIPCCの第4次報告書の最大のポイントは、長期的な観測と、観測データに基づく複数のモデル計算結果の確率的な評価により、「地球温暖化の要因として人間による化石燃料の使用の可能性がかなり高い (very likely; 90%以上の確率)」と結論づけたことであろう。自然起源の要因のみを組み込んだモデルと、人為起源の要因と自然起源の要因の両方を組み込んだモデルの複数の評価・予測結果を比較して上記の結論を得た。この結論のベースとなった観測データの収集には、地上観測や衛星観測を含めて、大気、海洋、陸域生態系の各分野において共通する手法が使われた。

ここでは広域計測手法であるリモートセンシングを例にとって横幹的アプローチを紹介する。リモートセンシングでは、人工衛星等を利用することにより陸域、海域、大気域を対象として様々な変数の広域分布を計測することができる [9]。例えば、人工衛星 NOAA に搭載された広域観測センサ AVHRR は、分解能が 1km と粗いが全球を高頻度できる観測センサであり、しかも 30 年以上の継続性を有することから広域地球変動を観測するセンサとして貴重な情報を提供してきた。これまでに全球スケールでの地表面/海面温度分布や、植生分布や雪氷分布、さらには生物生産量分布、大気中のエアロゾル分布など温暖化の評価に不可欠なデータが数多く生成されている。

リモートセンシングは、物質が有する固有の分光特性に着目することにより一つの計測モデルを提供する。植生学や海洋学、また大気化学など個別の分野が対象とするデータは異なっても、分光特性に基づいた計測モデルは共通であり、リモートセンシングは陸域、海域、大気域で共通した次元やスケールで多様な変数に関する情報を提供する。その意味で、リモートセンシングは前節 3.2 で示した横幹的アプローチの典型例の一つといえよう。そして、リモートセンシングによる長期・広域観測データが IPCC における温暖化の評価に重要な役割を果たしたことは間違いない。

一方、温暖化の評価・予測においても、大気、海洋、陸域生態系のモデルを統合するための手法の開発や最適化が図られた。モデリング手法においてもその基本にある連続性や運動に関する方程式 (モデル) は分野に共通なものである。IPCC では WG2 及び WG 3 においても、関連する個別分野における影響や被害の予測、緩和策の効果予測に同様なモデル化手法が適用されている。例えば、WG2 では、生態系、水循環・資源、農林業などの異なった分野において温暖化ガス濃度の上昇と気温の上昇という共通の視点からその影響評価についての検討が行われた。

これらの成果が個別の学問分野が独立して研究を進めていては得られなかったものであることは間違いない。温暖化現象の解明とその対策立案に向けて各分野において横断的な観測やモデル化を行った結果である。これらの方法論は、複数分野にまたがった科学技術の展開であり、共通のデータ収集手法やモデル構築を異なった分野に展開することにより新たな情報を生み出している、という点で横幹的アプローチといえる。

5. まとめ

環境問題は、「人間の生産活動から発生するという人間が根源的に抱える問題である」、「自然圏、人間・社会

圏にまたがる複雑な因果関係を有する問題である」「解決しなければ人類の将来に大きな脅威を与える問題である」という特性を有する。この特性の故に、環境科学技術は、極めて複雑な問題を何が何でも解決しなければならない、という宿命を負う。その意味で、環境科学技術は最初から解くべき課題が与えられている、というこれまでは無かった科学技術の様式ともいえる。問題発見型の従来の科学技術と対比して、問題解決型の研究といわれる所以であろう。

学問分野が細分化することにより、学問の境界を超えての知識の流動性が低下し、分野を越えた問題の解決が難しくなっている今日、俯瞰的、学際的また横断的に科学技術をつなぐための新たな知識の構造化が求められる。横断的アプローチはその一つの方法である。歴史が浅く十分に方法論が確立していないことも事実であるが、分野を超えた問題は山積しており、学問としての体系化を進めるとともに、具体的な応用への展開を示すことが急がれる。

参考文献

- [1] 気象庁編：IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約（日本語訳），2007，<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>

- [2] S. W. ワート（増田，熊井訳）：温暖化の“発見”とは何か，みすず書房，2003。
[3] M. ギボンズ（小林訳）：現代社会と知の創造，丸善ライブラリー，1997。
[4] T. S. クーン（中山訳）：科学革命の構造，みすず書房，1971。
[5] 吉川弘之：巻頭言「横断の使命」，横断，Vol.1，No.2，p. 1，2007。
[6] 木村英紀：横断型基幹（横断）科学技術とは何か，横断，Vol.1，No.2，pp. 4-8，2007。
[7] 安岡善文：環境計測における横断型基幹科学技術の構築，計測と制御，Vol.42，No.3，pp. 101-106，2004。
[8] 文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省編：IPCC 第4次報告書統合報告書（日本語訳），2007。
[9] 安岡善文：次世代リモートセンシング技術への期待，計測と制御，Vol.43，No.11，pp. 809-814，2004。

安岡 善文



1947年10月2日生まれ。1970年東京大学工学部計数工学科卒業，1975年東京大学大学院博士課程修了（計数工学専攻，工学博士）。同年環境庁国立公害研究所（現国立環境研究所）入所，環境情報部，総合解析部等を経て，1996年より地球環境研究センター総括研究管理官。1998年より東京大学生産技術研究所教授。2007年4月より独立行政法人国立環境研究所理事。日本写真測量学会，計測自動制御学会，環境科学会，米国電気電子工学会（IEEE）等の会員。2002-2004年日本リモートセンシング学会会長。
