

技術原理とエネルギー

増子 昇*

Technology Principle and Energy
Noboru Masuko

Synopsis : “Magical thinking” is suggested that this thinking does not include theoretical connection between object and behavior. It is true that the modern technology has been developed based on experimental science. However, every technological method was produced not only from clear science evidence but also partly from trials and errors. Technologies produced from experiments still need a scientific evidence in order to avoid being “magical thinking”. Without scientific basis, the modern technology would not advance. It may be self-evident but does not mean that “Advancement of science is everything for new technology”. Science and technology have had close relationship since twentieth century, though they are independent each other originally and developments of technology need engineers not scientists. From the point of energy technology view, differences between scientific principles by scientists and technological principles by engineers are discussed.

Key words : science fiction; technology fiction; magical thinking; technological evaluation; technological problem; energy.

1. 序言

目的と行為との間に論理的な結び付きのない考え方を魔術的思考法 (magical thinking) と言う。現代の技術は実験科学の基盤に支えられることによって進歩発展してきたことは事実であるが、技術手段の総てが科学的に明晰な背景から生まれている訳ではなく、依然として試行錯誤 (trials and errors) を主要な方法論の一つとしている。しかし経験から生まれた技術でもそれが魔術的思考法に陥らない為には、科学的な裏付けを獲得することが必要であり、科学的基盤を獲得しなければ、現代では技術の進歩発展は無い。このことはほとんど自明といって良いが、しかし決して「科学が先行すれば技術が自然に生まれる」と言うことを意味してはいない。科学と技術とは20世紀に入って密接な関係を持つようになったが、元々は独立の営為であり、技術の発展は科学者がいなくても起こるが、技術者がいなければ起こらない。ここではエネルギー技術と言った分野に焦点を置いて、科学者のよって立つ科学原理と技術者のよって立つ技術原理との違いを取り上げて考察する。

2. SFとTF

サイエンスの原理に照らしてみると不可能であるが、人間に夢を与えてくれるものをサイエンス・フィクション (SF) と呼び、サイエンスの原理には背かないので、作る

気になれば作れるかもしれないのだが、技術者の永年の経験から見て実現はしないものをテクノロジー・フィクション (TF) と呼ぶ事にする。このテクノロジー・フィクション (TF) という言葉は、20年前に渡辺が作った言葉で¹⁾、「技術創話は楽しい社会寓話、技術者ならきっと一度は見た夢の物語である。21世紀産業を育てる原点ともなるだろう」と書かれている。ここではフィクションに力点を置き、サイエンス・フィクション (SF) の対語として、技術原理から見てできそうも無いこと、と言う意味で使う。かつてはSFやTFと思われたものが、100年経って見るとありふれた技術になっている例は幾らでも探し出せる。技術予測で難しいのは、TFと本物の技術とをどのように区別するかということになる。かつて19世紀の終わりに行われた未来予測は半分当たって、半分当たっていない。材料に過大の期待を寄せたものが当たらず、からくり (作動原理) に期待したものが当たっている。勿論SFは実現していない。

火から動力を取り出す装置が発明された後で生まれた熱力学が科学原理の一つとして承認され、永久機関の成立が否定されたことによって、人類の昔からの夢であった「無限の動力」は科学原理に反する魔術となり、SFとなった。

漫画のドラえもんに出現する夢は無限の動力の他に、時間の逆行、物体の寸法変化、物体の瞬間移動などがあり、はっきりとしたSFの例である。銅を金に変える錬金術はSFであるが、炭素をダイヤモンドに変えることは技術になる。しかしCRTボックスの中に閉じ込められた現代のバー

* 千葉工業大学教授, 第15・16期日本学術会議会員, 工博
東京大学名誉教授

チャル世代がSFと事実とを峻別する知恵を失いつつある事が心配になる。さらにSFにあこがれた昔の少年が今日の技術世界を造って来たのに対して、TFと現実の区別がつかなくなった現在の少年が技術をベースにする社会を衰退させてしまうかもしれない、と言うことが杞憂に終われば仕合せである。

科学研究という営為は、Aという行為がもたらす結果を明晰に予測し、提示することであり、事実を明らかにする新しい発見が仕事になる。この枠の中にいる限り、世俗的な価値とは独立であり、自己のパラダイムの中に沈潜することが許される。これに対して技術では、ある目的Bを達成するために、多くのAのリストから最適のものを選び出して、社会的に有用なものを発明し、生産することが仕事になる。技術は道具、建造物、機械、装置等を製造するという明白な目的を持つので、社会的評価の対象になり、技術の担い手である当事者にとって妥当であるか（当否）、社会に対して受け入れられるか（適否）という評価に耐えねばならない。このように科学と技術は異なる営為であるから、科学がいくら進んでも技術者がいなければ技術は生まれなし、発展しない。

技術者は魔術思考に陥らないために、科学者と同じように科学原理を理解していなければならない。さらに技術が成立するかどうか（成否）の見通しを立てるために、技術原理とでも言うべきものを理解せねばならない。技術原理に逆らうものは、たとえそれが実現可能であっても現実には使われることの無いTFとなる。一方現在は技術原理と考えられるものに逆らって、TFの既成の壁を打ち破る仕事が達成できれば、新しい技術原理が生まれ、技術の世界に於ける革命となる。技術の歴史を見ると、このような技術革命の後に新しい科学原理が生まれた事例を数多く数える事ができる。

SFを判定する基準、すなわちサイエンスの原理、は科学の中で揺るぎない位置を獲得しており明解である。所属するパラダイムが明示されていないエッセンス・サイエンスから生まれる魔術思考はSFとして厳密に排除されなければならない。一方TFを判定する基準、すなわち技術原理は、多分に経験的な要素を含んでいるために、あまり明解とは言えない。にもかかわらず技術の隘路を予測し、成否を判定することを科学原理だけに依存することは無駄が多い。ここではエネルギーの未来技術と言われるものの中に潜むTFの要素を明らかにするため、技術原理の幾つかを例を挙げて提示する。

エネルギーからパワーを引き出す変換装置は、技術の一般的な性格を持ち、作動原理と材料とから成り立っている。作動原理が科学原理には逆らわない事が明白な場合には、すなわちSFでなければその装置を造ることはできる。しかしその作動原理を一般化された技術として実行する上で、適切な材料を準備できないと判断される場合にはTFとなる。

かつてはTFでしか無かったものが、どのようにして実用技術になったのかという歴史を知る事は、この判断の助けになる。いかなる問いのもとで、いかなる方法がそれを実現に導いたのかと言う技術の流れが大切である。大方の場合まず既存の材料を使って作動原理の証明がなされ、しかる後に材料の進歩が装置を発展させると言う経過をたどる。この意味で材料の進歩無しには技術の発展は無いということもまた一つの技術原理として良い。

新素材ブームの時代には、“新しい素材が新しい作動原理を準備する”と言う元気のよい宣言がなされた。この時代の蓄積は我国の技術を疑いも無く発展させたが、酸化物高温超伝導体をもってしても、この材料から新しい作動原理が生まれたと言うことは起こっていない。ここで述べた、材料の進歩が作動原理の証明された技術を改良し発展させる、という技術の世界の歴史的な性格は健在ということであろう。先に述べたTFの壁を作動原理の面で破る、という意味での技術の革命を起こす新素材は生まれなかったが、知られている作動原理を可能にする新規な材料のお蔭で、材料に基づくTFの壁が打ち破られることは期待できる。

3. 技術評価

技術評価は成否（feasibility）、当否（acceptability）、適否（suitability）の3つの観点からなされる。技術原理は成否を判断する基準を提供する。

技術は社会的に目的を持った行為であるから、その開発に当たっては単に成否を問うだけでは不十分である。まず行為の当事者（個人もしくは団体）がその技術を実行することによって何らかの満足（利潤、奉仕、等）を得なければ

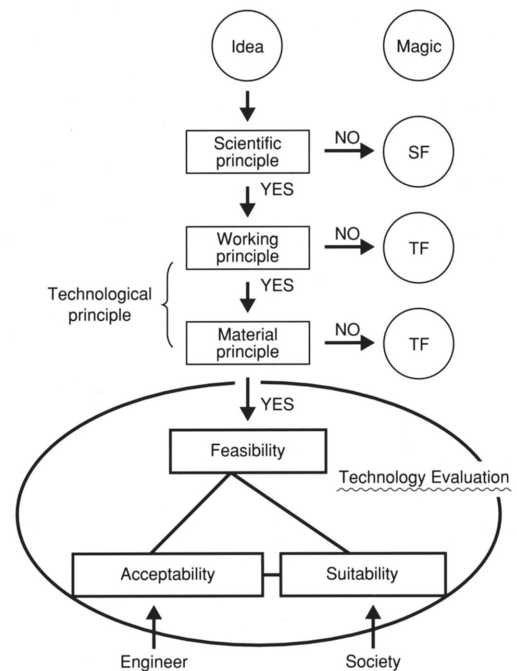


Fig.1. Technological principle and Technology evaluation.

ばならず、さらに実行に伴うコストを負担する妥当なメカニズムの存在が必要になる。当否を問えば当、すなわち当事者がそれを受容しなければならない。

さらに社会の側にもその技術を受容する誘因が働くこと、すなわち適否を問えば適、でなければならない。軍事技術におけるABC兵器（Atomic：原子力兵器、Bio：生物兵器、Chemical：化学兵器）のように条約で禁じられるべき反社会技術は、技術的には成であり、もし法律で禁じられなければ、当事者に大きな利益をもたらすかもしれないので当否を問えば当であるが、適ではない。

このように技術は単に成否だけでは無く、当否、適否と併せて評価されるべきものである。当否、適否、は社会の歴史と文化に大きく依存する。現代では技術の問題と言えばこちらの観点から論じられることが多いが、それは別の機会に譲り、ここでは成否に焦点を絞り、以下その判断の基準となる技術原理と言うものを考えることにする。ここまでの議論をFig. 1に整理して示した。

例えば炭酸ガスを水素で還元してメタンガスにすることは成であるからSFではない。技術評価でいえば原料水素の資源をどこから調達するのかによって、適にもなるし否にもなる。どのような規模で、どのような場所で、どのような社会的背景から来るコスト負担で実行するのかと言う事が無いと実行の当事者が現れないと言う意味では、当否を問えば当ではない。しかし水素を太陽電池電力を使って海水から電解で造る、と言うことになると意味が出てくる。海水電解で塩素を出さずに酸素を出す電極が開発され、メタンガス合成触媒に高性能なものが発見されれば²⁾、TFではなくなる可能性が生まれる。

かつて我国で300萬トンを越える苛性ソーダを生産した水銀法電解は、水銀の使用が社会的に適当でないとして、通産省の水銀等汚染対策推進会議で1973年に否定され、1987年までに非水銀法への製法転換が完了した。はじめは既存のアスベスト隔膜法が使われたが、このことを契機として生まれたイオン交換膜法が成功し、現在では350萬トンを越える生産の総てをイオン交換膜法で生産している。この方法の作動原理は古くから電気化学の教科書に載せられているもので、デモンストレーション的な実験は可能であった。長年材料の面からTFと思われていたが、電解槽温度95℃、0.2mm厚みの膜で仕切った片側は塩素飽和高濃度食塩水、片側は40%苛性ソーダ、3kA/m²の電流密度で、電流効率95%以上を保証し、3年以上の寿命のあるイオン交換膜という新しい機能材料を生み出すことで技術的成功がもたらされた。

4. 技術原理

a：科学がなくても技術は生まれる。

新しい技術（蒸気機関）が生まれて、新しい概念（エネ

ルギー）が生まれる。人間は火を照明、料理、冶金、窯業に利用したが、今で言うエネルギーという形で利用するようになったのは蒸気機関発明以後のことである。蒸気と言う動力の媒体が生まれて、はじめて熱を力に変えることができるようになった。ネガティブ・フィードバックによる制御機構を持った蒸気機関の発明は、後にエネルギーの科学（熱力学）およびサイバネチクスと言う二つの新しい科学を生み出した。

b：エネルギーと動力（パワー）とは異なる。

エネルギーはジュールという単位で測り、パワーはワットという単位で測る。われわれは「単位の異なる量を足したり、引いたりすることは出来ない」という原則の上にサイエンスというものを組み立てている。ジュールで計れる量は蓄積可能でも、ワットで計る動力は発生と同時に消費されねばならず、蒸気の蓄積を考えた技術者はいなかった。

c：エネルギー（燃料、原子力）から動力（蒸気、電気）を取り出すには、変換装置（単位の異なる量への変換）が必要であり、その効率は必ず1より小さい。

自然に起こるプロセスではエントロピー生成速度は必ず正 (>0) である。電気エネルギーと呼ばれるものは正確にはエネルギーの時間微分すなわち動力の形で供給される。運動エネルギーと同じ性格を持っており、熱力学的にはエクセルギー100%のエネルギーである。エントロピー生成とエクセルギー損失とは同じ意味を持つ概念である。

d：技術は規模に応じて最適の出力範囲を持っている。

人間が自分の動力（定常出力50W）だけをたよりに生存した狩猟社会は数万年、畜力（3/4kW）から風車（15kW）、水車（200kW）の利用に至る農業社会は数千年、蒸気動力（船用タービン：10⁴kW）から電子動力（原子力発電；10⁶kW）に至る工業社会が数百年、コンピュータによって拓かれた情報社会が数十年。動力の単機出力が2桁上がる毎に技術をベースにする時代区分の存続期間が1桁づつ小さくなる。おそらく動力発生装置の単機出力が現在の原子力発電のレベルを越えることはTFで、将来起こりそうもない。現代を特徴付けるマルチメディア技術は、過去のストックをフローに変えることで成り立っているが、時代区分を担うにはその時代に何をストックしたかが問われる。

e：一旦成立した技術は与えられた外部条件に適合するように最適化され、特殊化する。

例えば輸送機械を支持する機構としては浮力、反力、揚力があり、それぞれ適当な速度範囲を有している³⁾。このように技術の進歩と言うものは、様々な与えられた条件の下での特殊化であり、そこに要求される材料は時には矛盾するような幾つかの特性を総合的に満足させなければならない場合が多い。

f：最大出力は変換装置内部と外部負荷とのインピーダンスが適合したときに得られる。

エネルギー変換装置は出力最大を狙って運転され、装置

の内部条件から決まる動特性と動力を利用する側の要求する動特性（外部条件）とのマッチングが大切である。例えば熱エネルギーから動力を取り出すための変換装置における最大出力Wは、カルノー効率を使うと、 $[W=q_H (1-T_L/T_H)]$ として与えられる (T_H , T_L はそれぞれ高温および低温熱溜の温度, q_H は高温熱溜から供給される熱量)が、準静的過程では動力を生み出すことは出来ない。Fig. 2に示したように熱溜めと装置の境界の間に熱伝達を実行するための温度差を設定すると、熱機関の出力をカルノー効率の示す最大値のままにしておいても、全体としてのエネルギー出力の最大値は $[W=q_H (1-\sqrt{T_L/T_H})]$ となる事をCurzon and Ahlborn (1975) が巧みな方法で示した。Fig. 2には白鳥の教科書⁴⁾ に準じてこの式を導く手順を示してある。この手順は、通常のインピーダンス・マッチングの考え方と同じであり、動力を獲得する為に変換効率には犠牲を払ってでも、出力を最大にする条件が鍵となる。ある大きさを持つ装置を作れば、その出力を最大にする運転条件で操作することが通常の考え方である。高温での熱の漏れ方としては T^4 に比例する輻射による損失が無視できなくなるため、伝熱での損失だけを考えているこのモデルは成立しなくなり、熱機関の高温側の温度を限度を越えて大きくしても得られる変換効率はむしろ低下することが起こる⁴⁾。

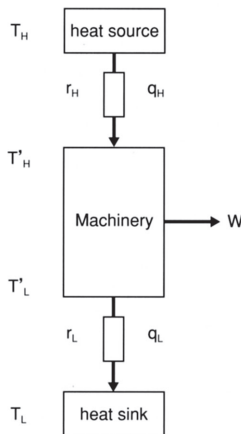


Fig.2. Maximum output under consideration of unavoidable heat transfer.⁴⁾

g：大型連続反応装置の反応密度の上限は $10^6 \text{kcal/m}^3 \text{hr}$ 程度である。

牧島は制御を必要としない化学反応（小銃の薬莖内での爆発、原子爆弾）や、小型反応装置の反応密度は、Table 1に引用するように、大型連続化学反応装置のそれより $10^6 \sim 10^7$ 以上大きいことを示した⁵⁾。連続反応装置を制御するには熱の出し入れを制御しなければならない。このため実用装置では、無制御で反応させるときよりも桁も下の反応密度しか実現できない。牧島はさらにTable 2に引用するように、大型連続化学反応装置の反応密度の上限は $10^6 \text{kcal/m}^3 \text{hr}$ 程度であるという経験則を示した。近年の高出

力リアクターについて、この規則の成立を確かめた表を用意する時間が無く、原論文からの引用で済ませているが、製鋼用のUHP電気炉等でもこの規則は成立している。さらに牧島は反応装置に対して、二次元リアクターと三次元リアクターとを区別をし、電気化学反応装置（二次元リアクター）は、高炉のような三次元リアクターに比べると敷地面積当たり反応効率は極端に悪い事を指摘している。1日1万トン生産するのに、鉄の高炉の炉床面積は 150m^2 、アルミニウムの電解槽床面積は $180,000 \text{m}^2$ 必要である。また触媒反応のような Kinetic Reactor では省資源と省エネルギーの両立が可能であるが、多くの冶金反応炉のように熱力学的平衡条件で反応の推移が規定されてしまうPotential Reactor では省資源と省エネルギーとはトレードオフの関係になる。

Table 1. Reaction densities of reaction apparatuses.⁵⁾

反応装置	反応密度 ($\text{kcal/m}^3 \cdot \text{hr}$ に換算)
重油、微粉炭ボイラーの1例	$2 \sim 5 \times 10^5$
都市ガスバーナー	$\sim 10^7$
直流アーク	4×10^8
小銃	$\sim 10^{13}$
ターボジェット	2.7×10^8

Table 2. Reaction densities of large continuous reaction apparatuses.⁵⁾

大容量化学反応装置	反応密度 ($\text{kcal/m}^3 \cdot \text{hr}$)	物質流束 ($\text{個/cm}^2 \cdot \text{sec}$)
ボイラー(WIF型)	1.25×10^5	1.58×10^{18}
Winkler ガス化炉	1.6×10^5	3.3×10^{17}
Fausser 重油ガス化炉	5.3×10^5	1.4×10^{18}
Koppers 微粉炭ガス化炉	1.0×10^6	3.0×10^{18}
溶鉱炉(500t)	2.2×10^5	4.0×10^{17}
大形カーバイド炉	9.0×10^5	7.3×10^{17}
大形アルミ電解槽	1.1×10^6	3.1×10^{18}
アンモニア合成塔(Fausser)	4.4×10^5	4.5×10^{18}
セメントロングキルン	2.7×10^4	4.4×10^{16}

h：一次資源における存在比の低いものは価格が高い。

Fig. 3は市販純金属素材の価格と地球上で得られる資源の中の存在比との関係を示したもので、存在比が低いものは、分離抽出に要する仕事のために結果として価格が高い事を示している。半導体用シリコン単結晶は例外で、超高純度による付加価値が附いている⁶⁾。この図もTFの判定基準の一つとして使える。この図を見ると海水ウラン3ppbからウラン回収を図ることは、ウラン235の同位体分離よりも困難な課題である。非鉄精錬技術者はこの図に示される壁を打ち破ることを夢見ている。

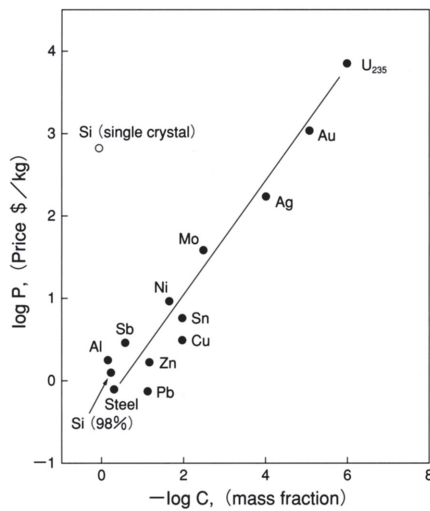


Fig.3. Relationship between pure metal prices and resource abundance.

i: 装置は寿命を持つ。

人工物は自然に機能回復したり、合目的的に自己改造を行うことはなく、一方的に劣化の方向に変化する。この劣化は作動原理の預かり知らない所で起こり、システムを破壊する。作動原理は陳腐化は起こしても決して劣化はしない。しかし材料はどうしても避けられない外界との相互作用の結果として劣化し、このため装置は寿命（自然寿命）を持つ。技術の発展とは昨日生産されたものを今日は古くする事を意味するのだとすれば、装置の持つ機能寿命は技術発展の時代には本質的に短くなるので、自然寿命まで材料が利用されることは珍しいことかもしれない。しかし社会資本構造物などでは、長寿命そのことが基本的な機能であり、防食技術がこれからの材料技術の一つの主要な課題となる。

j: 材料が技術の鍵を握る。

エネルギー変換装置の作動原理については、現在ほとんど出尽くしており、前でも再三言及したように、開発の鍵は材料に渡されている。一方で材料はサイエンス原理に支配されるので、技術者の願望とは独立に、おのずから限界を持っている。技術者にできることは多くの場合、材料の持つ限界を認識して、良い選択をするという受け身の立場に立たされる事が多い。材料技術は作動原理と異なり、サイエンス原理の新しい発見に依存する所が大きいため、科学者と技術者との役割分担があいまいになり、結果としてどちらも中途半端になる危険のある領域でもある。

5. 技術課題とTF

現在我国は技術立国を目指して、自主技術開発を重要施策に掲げている。未来工学研究所が1997年に公表した第6回科学技術庁技術予測調査の結果 [2025年の科学技術；（'97.08.18.発行）] の中にも、将来の技術課題が多方面の分野にわたって調査されている。将来を語るには、歴史を評価

することから始めなくてはならないが、技術者の経験が集約した技術原理がそのための枠組みを提供してくれる。この中でエネルギー関連技術に関する項目についての感想の形で、技術課題とTFとの関連を考察する。

この予測での設問の語尾は、(a) 開発される、(b) 実用化される、(c) 普及する、の3種になっている。この中で、(a) は成否が定かでないもの、すなわちSFもしくはTFかもしれないもの、(b) には作動原理の成否をいえば成であるが、材料の観点でTFになるかもしれないものと、適否、当否が定まらないものを含む、(c) は材料を含めて成否、適否共にクリアーされているが当否が定まらないもの、というような明瞭な区分のもとに設問が組み立てられていれば回答を出しやすいのだが、設問を作った側が何を問題として意図しているのか理解に苦しむものも多く見られる。中には、日本人特有のトンチ問答的やりとり、すなわち何が問われているのかわからないままに語呂合的に回答が出される、というものまである。

誰が見てもSFという設問は、「反物質の製造・貯蔵技術とそれによるエネルギー源が開発される。」というもの1件だけであるが、この設問に対する実現しないという回答率がわずかに47%という所を見ると、回答者の中には魔術と科学の区別がつかない人も混ざっているようである。私にはTFとしか思えない課題としては、「核融合発電炉が開発される」、「宇宙太陽発電システムが開発される」という2件があるが、実現しないという回答は前者で28%、後者で17%に過ぎない。実現するとかしないとかの根拠を、どの観点から述べればいいのか判らないということでもある。例えば高温ガス炉（HTGR）自身が材料の面からTFになっているのに、それを前提とする「熱化学分解法による水素製造プロセスが実用される」という設問がどのような意味があるのかが見えてこない。

原子力エネルギーは原子爆弾の形で実証されたように、莫大な量を一度に発生させることができる。しかしこのエネルギーを制御された形で動力に変換するには、リアクターと呼ばれる大型連続反応装置を必要とする。そうなれば、「中・小型で安全性の高い熱電併給原子炉が開発される」という課題はTFになる。原子力リアクターから動力としての電力ではなく、エネルギーとしての燃料（例えば水素）を直接取り出す試み、およびその製鉄への応用（原子力製鉄）がどのように企画され、どのように運用され、どのように挫折したのか、という歴史をきちんと整理し、そこから将来に向けての技術開発の指針を引き出しておかねばならない。このようなエネルギーという問題は量の支配する技術の問題であるから、技術原理という視点が必要になる。この技術原理はそれぞれの技術分野に蓄えられている暗黙知（tacit knowledge）に源泉を持つものであり、技術課題というものを考えるときの基準となる枠組みを提供してくれるものである。

技術評価にも論理的な枠組みを備えた「技術」が必要になって来ており、ある狭い分野の専門家が半ば魔術的に託宣を

下す時代ではなくなっていることが痛感される。

文 献

- 1) 渡辺茂：テクノロジーフィクション，(1980) 日刊工業新聞社
- 2) 橋本功二他：材料と環境 '97講演集 (1997.5) T101, 腐食防食協会
- 3) 赤木新介：日本機械学会誌, 95 (1992), No.878, 62~65
- 4) 白鳥紀一, 中山正敏：熱物理学, (1995), 52, 朝倉書店
- 5) 牧島象二：工業化学雑誌, 64 (1961), 1719~1921
- 6) 増子昇, 中村崇：資源・素材学会秋季大会分科会資料E-1, (1992)

