

報 告

資源循環型ものづくりを実現するための  
学術的指針—地球温暖化対策を主対象に—



平成23年（2011年）8月8日

日 本 学 術 会 議

機械工学委員会

生産科学分科会

この報告は、日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会での審議結果を取りまとめ、公表するものである。

### 日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会

委員長	古川 勇二	(第三部会員)	職業能力開発総合大学校校長
幹事	帯川 利之	(連携会員)	東京大学生産技術研究所教授
	藤本 隆宏	(第一部会員)	東京大学大学院経済学研究科教授
	岸浪 建史	(第三部会員)	釧路工業高等専門学校校長
	柘植 綾夫	(第三部会員)	芝浦工業大学学長
	木村 文彦	(第三部会員)	法政大学理工学部教授
	青山 藤詞郎	(連携会員)	慶應義塾大学理工学部長
	新井 民夫	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	有信 睦弘	(連携会員)	東京大学監事
	稲崎 一郎	(連携会員)	中部大学総合工学研究所教授
	井上 孝太郎	(連携会員)	科学技術振興機構上席フェロー
	上田 完次	(連携会員)	産業技術総合研究所理事
	圓川 隆夫	(連携会員)	東京工業大学教授
	大園 成夫	(連携会員)	東京大学名誉教授
	木内 学	(連携会員)	木内設計事務所長
	國井 秀子	(連携会員)	リコーITソリューションズ株式会社取締役会長
	小林 敏雄	(連携会員)	日本自動車研究所副理事長
	清水 伸二	(連携会員)	上智大学理工学部教授
	須賀 唯知	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	鈴木 宏正	(連携会員)	東京大学先端科学技術研究センター教授
	高田 祥三	(連携会員)	早稲田大学理工学院教授
	中島 尚正	(連携会員)	学校法人海陽学園校長
	西脇 信彦	(連携会員)	東京農工大学名誉教授
	森 和男	(連携会員)	産業技術総合研究所
	森脇 俊道	(連携会員)	摂南大学理工学部長

報告の作成にあたり、以下の方に御協力いただきました。

間瀬 俊明 デジタルプロセス株式会社取締役相談役

報告の作成にあたり、以下の方々に分科会に出席いただき個別のコメントをいただきました。

桑原 輝隆 科学技術政策研究所 所長

小豆畑 茂 日立製作所 執行役常務・研究開発本部長

# 要 旨

## 1 作成の背景

地球温暖化現象は人類が経験したことがない重要課題として世界的に取り上げられている。人類の種々の活動が温暖化現象に影響することが明らかになりつつあるが、なかでも人類の生活に利便性をもたらしてきた工業製品などの「もの」の製造・使用・廃棄に係る炭酸ガス排出の影響が大きいことも資源エネルギー庁等から指摘されている。しかしながら「もの」の製造において、温暖化現象に及ぼす共通の認識と定量的な評価基準が未だ確立されていないため、産業分野ごとに取り組みの姿勢に差異があり、また特定の産業分野に限っても企業ごとにも差異がみられる。産業界では環境会計に準拠した取り組みが一般化しつつあるが、利用者は、「もの」の使用が地球温暖化に影響しているかもしれないとの意識が醸成されつつあるが、確固たる認識が確立されている状況にはない。したがってこのままの状態を放置しておけば、「もの」に起因する地球温暖化が増すことはあっても減少することはないと考えられる。そこで日本学術会議機械工学委員会生産科学分科会は、「もの」の製造に最も関係が深い分科会として、学術の視点から「もの」が温暖化に及ぼす影響を体系的に整理し、「もの」の製造と使用に関する学術的指針を提案する。

## 2 現状及び問題点

地球温暖化現象を抑止するには、「もの」の製造と利用の制限が考えられるが、反面、「もの」の利便性と市場経済性を損なうこととなる。「もの」の利便性を享受してきた人類の長い歴史からすれば、「もの」がもたらす利便性・市場経済性と、「もの」が必然的に消費するエネルギーと排出する温暖化ガスとを最適にバランスさせることが肝要であると考えられる。このことが温室効果ガスの中で特に二酸化炭素に着目し、その発生を抑制することを目的とした「低炭素社会の実現」を掲げてきた背景でもある。しかし真に低炭素社会を実現するには、市場が要求する「もの」の製造と利用を前提に、その消費エネルギーの最少化を図りながら、初期資源を最少かつ最大に再活用する「資源循環型ものづくり」の学術的指針の確立を目指さなければならない。従来、このような学術的指針の検討が明確にはなされてこなかった。

## 3 日本学術会議の対応と生産科学分科会の視点

取りまとめに当たっての基本的な考えは、人類史上最大の問題とされている地球温暖化現象は、その科学的解明が未だ完全にはなされたとは言えないものの、二酸化炭素を中心とする温室効果ガスの急増に起因し、これが近年に見る化石燃料の大量燃焼に主として起因していると判断できることが社会的に合意されてきている事にある。

資源の採掘と素材への転換過程、素材の人工物や工業製品への変換過程、およびこれらの使用・廃棄・回収・再生過程において二酸化炭素の発生は避けられないが、これを最少化するには、人工物や工業製品の製造・使用・廃棄・回収の全ライフサイクルを通しての総合的な省エネルギー化を図ることが基本である。言い換えれば、ライフサイクルの各過

程で必要な変換および使用エネルギー最少の拘束条件下で、素材の利用を最少化し、かつその再生の最大化を達成する必要がある、ここに「素材とエネルギーを含めた資源循環型ものづくり」の原則があると考えられる。

しかし実際には、特定の人工物や工業製品は、異なったメーカーが複雑に相連携し製造しているのが実態であり、一つのメーカーが全ての製造プロセスを統一的に処理しているわけではない。結果として関連する各メーカーは、低価格化という経済原則に則って供給する体制にあるため、「素材とエネルギーを含めた資源循環型ものづくり原則」を容易に適用できる状況にはないと考えられる。例えば、自動車の車体のリサイクルの際、鉄と銅が混在すると製錬で銅を取り除くことが出来ず、機械的に選別せざるを得ず、その選別を容易にするための設計が必要で、回収エネルギーではなく回収価格が優先されているのが実態である。

このような観点から本報告では、先ずはその素材選択、製品設計、製造、回収が一体的に実施可能な工業製品やその構成要素に限定した産業分野についての適用を検討対象とする。具体的には“使い捨てカメラ”などの産業分野が想定される。

他方、我が国の場合、供給される一次エネルギー源の約50%は石油が占め、二次エネルギー消費では、ものの生産にエネルギーを利用する産業部門、家庭や職場などで直接エネルギーを利用する民生部門、輸送にエネルギーを利用する運輸部門に分類すると、石油ショック時では産業：民生：運輸が4：1：1であったのが、2006年度では2：1：1に変化し、産業部門は概ね横ばいの状況にある。

産業部門のエネルギー消費比率は、鉄鋼、化学、窯業土石、紙・パルプの素材分野が全体の7割、残りの3割が人工物・工業製品の加工変換業である事実を考慮すると、素材分野では、その生産と再生における所要エネルギーの観点から総エネルギーの最少化を科学的に解明する必要がある。人工物・工業製品は、それらが民生・運輸部門で長期に使用されることを考慮すれば、その生産と再生における所要エネルギーのみならず、使用における所要エネルギーを考慮して総エネルギーの最少化を科学的に解明することが必要である。

#### 4 報告の内容

日本学術会議生産科学分科会は、凡そ3年間にわたり「資源循環型ものづくり」に関して以下の検討・調査・報告を行ってきた。

- (1) 我が国ものづくり産業が直面している課題と対応策
- (2) これを学術的立場から解決していく上での本分科会の視点
- (3) 地球温暖化抑止を実現していく上で、「資源循環型ものづくり」は重要な施策の一つであり、その科学的考え方を示すとともに技術的および科学的課題を整理して提案した。
- (4) 「資源循環型ものづくり」の達成には、製品設計にコンバージングテクノロジー (CTs) の適用、事前評価には拡張ライフサイクルアセスメント (LCA) の適用、そして製造にはファクトリーフィジックス (FP) の適用が重要であることを指摘し、それぞれの概要と学術的指針を示した。

最後に、この報告書が、今後、以下の様々な活動に活用されることを切望する。

第一には、第4期科学技術基本計画が標榜するグリーンイノベーションを実現する上で、本報告書をものづくり分野の検討において積極的に活用いただきたいこと。

第二には、ものづくりに関わる産業界においては、本報告に対して今後更なる技術的要望を提案すべきこと。

第三には、学会・大学・研究者においては、本報告の方針に則り各分野での研究開発に鋭意努力しつつ関連学術・技術分野との情報交換を怠ることなく資源循環型ものづくり科学の確立に寄与すべきこと。

第四には、行政においては、低炭素社会の実現を掲げる我が国の施策にあって、循環型ものづくりが肝要な産業技術分野であるとの認識の下で、この分野の研究開発に対する特段の理解をいただきたいこと、などである。

## 目 次

1	はじめにー従来の検討経緯と本報告の位置づけ	1
2	学術的立場からの生産科学分科会の視点	2
(1)	化石燃料の大量燃焼に起因する地球温暖化	2
(2)	初期素材およびエネルギーの最少化、かつ素材およびエネルギー再生の最大化	2
3	ものづくり産業界が直面している課題	5
(1)	ものづくり産業界が直面している課題と対応の枠組み	5
(2)	ものづくり産業が直面する技術的課題とその具体的な対応	5
4	資源循環型ものづくり科学を構築する上での必要事項	8
(1)	資源循環型ものづくりに向けた社会ビジョンの構築	8
(2)	資源循環型ものづくりの地域性の視点	8
(3)	資源循環型ものづくりに必要な IT システム	9
(4)	資源循環型ものづくりの具体的対象技術	10
(5)	資源循環型技術・製品の開発・普及における留意点	10
(6)	資源循環型ものづくり科学を構築する上で大学への期待と課題	11
(7)	資源循環型ものづくり人材の育成	12
5	資源循環型ものづくり設計に対する収斂技術 (CTS) の適用	13
(1)	収斂技術の発祥	13
(2)	資源循環型ものづくりにおける収斂技術の適用	13
6	資源循環型ものづくり評価に対する拡張ライフサイクルアセスメントの適用	16
(1)	ものづくりシステムにおける資源循環の考え方	16
(2)	資源循環型ものづくりに対する拡張ライフサイクルアセスメントの適用	17
7	資源循環型ものづくりに対するファクトリーフィジックスの適用	21
(1)	資源循環型ものづくりと経営科学	21
(2)	ファクトリーフィジックス (FP) と変動低減活動としての TPS	21
(3)	我が国ものづくり産業における FP の展開	23
(4)	資源循環型ものづくりに対する FP 適用の考え方	24
8	まとめ	26
	<参考文献>	27
	<参考資料 1> 分科会等の活動記録	28
	<参考資料 2> ファクトリーフィジックスについて	29

## 1 はじめにー従来の検討経緯と本報告の位置づけ

日本学術会議は平成22年4月に提言「日本の展望ー学術からの提言2010ー」を取りまとめ広く社会に公表している[1]。その中で、現在、世界が直面している主要な地球環境問題の第一の要因としては、工業や農業などの生産活動と家庭生活のいずれにおいても、大量のエネルギー消費があげられ、人類の活動のエネルギー源として主に用いられている石炭、石油などの化石燃料の大量の燃焼は、大気中での二酸化炭素量を大幅に増大させ、地球全体の気候の温暖化という、予期せぬ結果を招いたと考えられていると報告している。これを受けて地球環境問題分科会では、金属生産の技術開発と環境対策の推進、循環型社会の構築とリサイクル技術の推進、資源確保を支援する研究体制と人材育成の推進、エネルギーについては、再生可能エネルギーや原子力など非化石エネルギー技術の開発、徹底的な省エネルギー、独立分散型エネルギーの開発・普及などが課題であると指摘している[2]。これらに先立って日本学術会議では19期に「循環型社会と環境問題特別委員会」を設置し、平成17年6月に対外報告「循環型社会形成への課題ー“もの活かし大国”に向けてー」を報告し[3]、循環型社会形成には、温暖化以外の資源の有限性や経済的安定性など、その重要性を認識しつつ、リサイクルに先立って、まずは廃棄物の発生量抑制（リデュース）の徹底が重要であることを指摘している。そのために拡大生産者責任を求めているが、循環型ものづくりとそのあり方自体については言及していない。

本生産科学分科会が所属している機械工学委員会が平成22年4月に発出した報告「機械工学分野の展望」[4]においては、学術としての機械工学の課題の一つとして、ものづくりのプロセスには、社会の持続性との調和、それらを利用する人々との意思疎通が必要であり、ハーモナイゼーションとしての学術を取り込むことが必要であると指摘している。また、設計・生産・加工・計測・使用・廃棄・回収などの「ものづくり分野」は、機械工学だけではなく、あらゆる学術分野の成果を統合し、新しいものを創造していくための学術の構築に関する多角的な議論の成果が、2008年9月に発出された報告「21世紀ものづくり科学のあり方」[5]として集約されていると報告している。

しかし従来の本分科会報告では、工業製品を中心としたものづくりが自然環境に及ぼす影響の重要性について指摘してきたものの、近時のものづくり産業が直面している状況を配慮したものづくりのあり方に対する学術的検討が不十分であり、とりわけ自然環境と調和したものづくりの開発・製造・使用・廃棄・回収・再生の全ライフサイクルに対する具体的な学術的指針を明示していない。そこで21期日本学術会議生産科学分科会においてはこの点に絞って検討を進め、その中間的とりまとめに対して「CO<sub>2</sub>削減に向けたものづくり戦略」に関するシンポジウムを平成22年3月に、また最終報告案に対して広く専門家・関係者等からの意見を聴取した。本報告書は、これら踏まえて成果を取りまとめている。

## 2 学術的立場からの生産科学分科会の視点

### (1) 化石燃料の大量燃焼に起因する地球温暖化

取りまとめに当たっての基本的な考えとしては、人類史上最大の問題とされている地球温暖化現象は、その科学的解明が未だ完全にはなされたとは言えないものの、二酸化炭素を中心とする温室効果ガスの急増に起因し、これが近年に見る化石燃料の大量燃焼に主として起因していると判断できることが社会的に合意されてきていることを前提としている[6]。地球温暖化と人の経済活動との関係については多くの調査・研究が行われ、必要な対策も議論されてきた。地球持続可能性の視点から地球温暖化抑制を目指し、世界各国が協調して温室効果ガス排出の削減に取り組もうとする国際的な取り決めが1990年代から議論され[7]、近年に至り科学的観点から人類の活動が気候変動に有意の影響を与えているという知見も報告されている[8]。

### (2) 初期素材およびエネルギーの最少化、かつ素材およびエネルギー再生の最大化

天然資源の採掘と素材への転換過程、素材の人工物や工業製品への変換過程、およびこれらの使用・廃棄・回収・再生過程において二酸化炭素の発生は避けられないが、これを最少化するには、人工物や工業製品の製造・使用・廃棄・回収の全ライフサイクル<sup>1</sup>を通しての総合的な省エネルギー化を図ること、すなわち各過程で必要な変換および使用エネルギー最少の拘束条件下で、素材の利用を最少化し、かつその再生の最大化を達成する必要がある。このことが「素材とエネルギーを含めた資源循環型ものづくり」の原則である。

しかし実際には、特定の人工物や工業製品は、異なったメーカーが複雑に相連携し製造しているのが実態であり、一つのメーカーが全ての製造プロセスを統一的に処理しているわけではない。結果として関連する各メーカーは、低価格化という経済原則に則って供給する体制にあるため、「素材とエネルギーを含めた資源循環型ものづくり原則」を容易に適用できる状況にはないと考えられる。例えば、自動車の車体のリサイクルの際、鉄と銅が混在すると製錬で銅を取り除くことが出来ず、機械的に選別せざるを得ず、その選別を容易にするための設計が必要で、回収エネルギーではなく回収価格が優先されているのが実態である。

このような観点から本報告では、先ずはその素材選択、製品設計、製造、回収が一体的に実施可能な工業製品やその構成要素に限定した産業分野についての適用を検討対象とする。具体的には“使い捨てカメラ”などの産業分野が想定される。

他方、我が国の場合、供給される一次エネルギー源の約50%は石油が占め、二次エネルギー消費では、ものの生産にエネルギーを利用する産業部門、家庭や職場などで直接エネルギーを利用する民生部門、輸送にエネルギーを利用する運輸部門に分類すると、石油ショック時では産業：民生：運輸が4：1：1であったのが、最近（2006年度）では2：1：1に変化し、産業部門は概ね横ばいの状況にある[9]。

---

<sup>1</sup> 以下、本報告書では、「ライフサイクル」とは、人工物や工業製品のライフサイクルを意味することとする。

産業部門のエネルギー消費比率は、鉄鋼、化学、窯業土石、紙・パルプの素材分野が全体の7割、残りの3割が人工物・工業製品の加工変換業である事実を考慮すると、素材分野では、その生産と再生における所要エネルギーの観点から総エネルギーの最少化を科学的に解明する必要がある。これまでもその生産と再生における所要エネルギーの観点から総エネルギーの最少化を科学的に解明するとともに、現実的な技術開発が種々取り組まれてきている。この問題については、日本学術会議材料工学委員会から報告され[10]、現在も引き続き検討されていることから、本委員会での検討の対象とはしない。

他方、人工物・工業製品は、それらが民生・運輸部門で長期に使用されることを考慮すれば、その生産と再生における所要エネルギーのみならず、使用における所要エネルギーを考慮して総エネルギーの最少化を科学的に解明することが必要である。この課題が本分科会の主たる対象域にあることから、21期における本分科会での主要な課題として取り上げ検討してきた。基本的な視座としては、「人工物・工業製品を対象とした資源循環型ものづくりの原則は、それらの製造に使用する初期素材とエネルギー量が最少、その利用ならびに回収プロセスにおけるエネルギー消費が最少、そして回収品をエネルギー消費最少の下で、素材に最大限再生する」こととした。

具体的な検討結果は、図1に示すように、

- ① 人工物・工業製品の開発・設計において資源循環型ものづくりを達成するためには、  
現有技術を最適に選択・組み合わせ活用すること、すなわち収斂技術(CTs、  
Converging Technologies)を徹底すること、
- ② 資源循環の評価尺度として、従来のライフサイクルアセスメント(LCA、Life Cycle  
Assessment)を拡張して適用すること、
- ③ 世界から部材の調達を含めた製造・出荷過程にファクトリーフィジックス(FP、  
Factory Physics)を拡張して適用し、ロジスティクスに関わる資源循環を具現化す  
ること、

が不可欠であることを指摘している。

また上記①～③に関わる資源循環型ものづくりを支援できる科学の考え方、従来の検討が不足であった①ものづくりにおける収斂技術、②拡張ライフサイクルアセスメント、および③ファクトリーフィジックスについて、その学術的あり方を提言している。

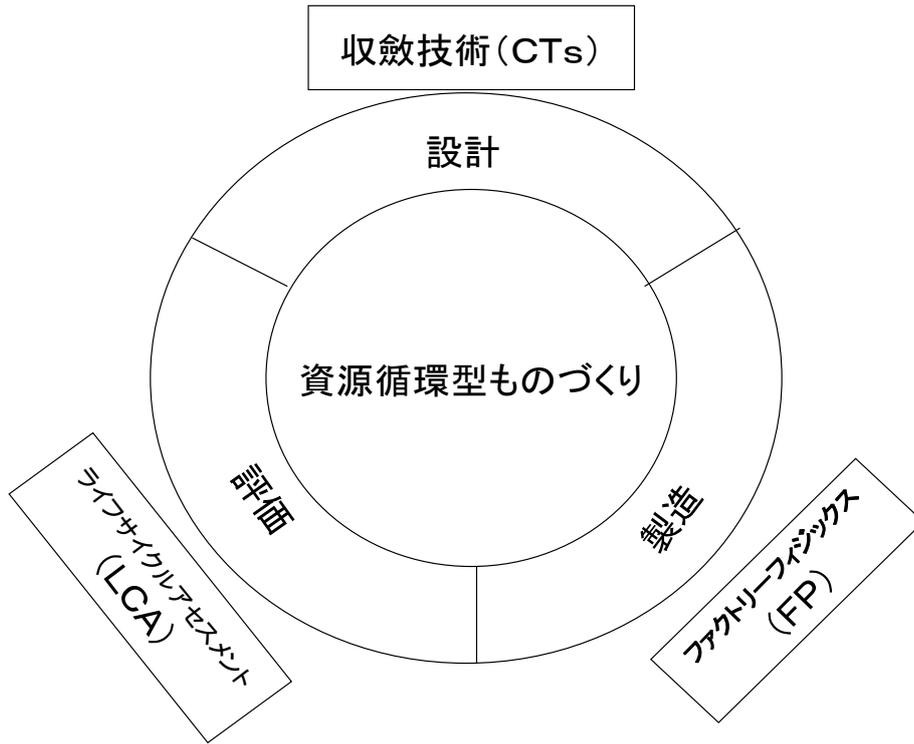


図1 資源循環型ものづくり生産に用いる方法論

### 3 ものづくり産業界が直面している課題

#### (1) ものづくり産業界が直面している課題と対応の枠組み

最近、ものづくり産業界が直面している課題の中で最も注目すべきことは、ものづくりの開発・製造・販売に関わる地域が、ローカルからグローバルへと広がり、またその活動方式がクローズドからオープンへと広がってきていることである。この変化は、20世紀に先進国が享受してきた機械文明を発展途上国にも急速に広め、その恩恵に浴せる効果をもたらしてきたが、同時に二つの新たな問題を引き起こしている。

第一に膨大量の機械化は、化石エネルギー使用量の急増、二酸化炭素発生量の増大を招き、結果として地球温暖化現象をもたらし、これが生態系にも影響を及ぼしてきたため、日本学術会議においても、生物の多様性維持の必要性が論じられている[11]。

第二に機械文明の世界的画一化が、永年培ってきた民族に固有の文明を喪失させかねない状況をもたらし、結果として民族の豊かさとは何かを基本的に議論する必要があるとの意見がみられる。この点については本報告では立ち至っていないが、今後、人文社会分野の専門家を交えての本格的検討が必要である。

従って今後は、自然環境との調和と文化の多様性をも配慮した工業製品の開発を意図し、そのグローバルでオープンな開発・製造・使用を基本的な枠組みとすることに日本のものづくり産業が果たすべき役割は大きいと考える。現実的にはこの枠組みの下で、自然環境に調和し、かつ市場が求める工業製品を設計・製造していくことが経済的付加価値を生むことになるので、当該製品の使用実態を設計へフィードバックし市場要求に迅速に対応できる設計循環を推し進めることが大事である。

また自然環境と民族文化との共生を目指したものづくりにおいては、持続性社会の構築が前提であることは論を待たない。その実現には、工業製品の開発・製造に並行して、地球上の工業製品の総量・総利用量を一定限度に制限する必要があり、そのためには、工業化によって享受できる人間社会のサービスのあり方を、先進国と後進国、富者と貧者の観点から抜本的に検討する必要がある。

以上に述べたものづくり産業界が直面する課題と対応の枠組みについて、先ず関係する経営者、技術者、研究者、行政が共通に認識し、この枠組みの下でそれぞれの役割を間違いなくかつ迅速に達成していくことが我が国のものづくり力の向上、ひいては世界における豊かさの実現、さらには自然環境と調和したものづくりがもたらす低炭素社会の実現に繋がるものと考えらる。

#### (2) ものづくり産業が直面する技術的課題とその具体的な対応

自動車を例に挙げれば、先進国市場では更なる快適性や利便性向上に対する使用者の嗜好と欲求が一段と高まっている。そのため、その設計において、本来の機械構造物に、機能の高度化や複雑化を支えるための電子制御、あるいは制御用組込みソフトウェアが広範に適用される時代になった。その結果、元来、自然科学に基づく動作原理により技術化されてきた自動車のメカニズムは、顧客としての人間の肉体・精神・感性に一層フ

イットさせるだけでなく、表1に示すように「劣化しない、バラつきがない」などの利点をもたらしている。他方、組み込みソフトウェアは人間が人工的に構築するものであるので、設計者の見落としや矛盾のある仕様が発生しやすく、故に設計者が構想した範囲の動作は模擬できるものの、それ自体では自然界の挙動を完全に代替することは不可能な場合が多い。さらに最近、組み込みソフトウェアの規模が巨大化しており、信頼性や品質確保に大きな問題を内包することとなった。

他方、今後の工業製品の方向は、機械・電気電子・ソフトウェアが一体化したインフォメカトロニクス化することが必然であるから、ハード・ソフトを一体的に考えなくてはならない。換言すれば、インフォメカトロニクスの開発プロセスと支援ツールの構築、さらにはその品質保証が重要な研究開発課題となっている。

表1 自動車における機械（メカニズム）と組み込みソフトウェアの違い

	機械(メカニズム)	ソフトウェア	機械とソフトウェアの相違に関する備考
実体	ある(目で見える)	ない(目でみえない)	実体のあるなしにより製品の品質管理手法が異なる。
基礎となる理論	材料力学、機械力学、熱力学、流体力学の4力学を基にメカニズムの挙動を方程式表現する。	離散数学、記号論理学を基にアルゴリズムのルールや約束事を人工的に定式化する。	メカニズムは継承可能だが、ソフトウェアは基本OSが変わると継承できない場合が多い。
機能の経年特性	腐食、疲労、破壊により経年劣化する。	経年劣化しないが、陳腐化はある。	メカニズム劣化は自然現象に基づくので予測可能、ソフトウェア劣化はないが故障を予測できかねる。
品質	必ずバラつきがあるので、公差解析、田口メソッドなどの手法で管理する。	一つだけ作るのでバラツキがない。	機械では製品品質が、ソフトウェアでは設計品質がより重要である。
欠陥を表す言葉	市場不具合、クレーム等	バグ、ウイルス等	ソフトウェアでは生物用語が使われるなど機械とは位置づけが異なる。
製造単位	量産	単品	両者間で開発と量産コストの配分が異なる。

また最適化の観点からは、これまで、個々のインフォメカトロニクス製品を地道に改善していくことで個の最適化を実現してきた。しかし複雑化するインフォメカトロニクス製品を、個々の改善活動を積み上げながらグローバルに展開するといった方法は困難になりつつあり、代わりに優れたシステム思考が有効な手段となってきた。しかしシステム化という概念をもともと持ち合わせなかった日本にとってシステム思考の弱さは認めざるを得ない。複雑さを増すあらゆるものづくりにおいて、自然科学に限らず社会科学や人文科学も含めた広範なシステム思考をどのように取り入れ、製品やプロセスに

反映するかが課題である。

さらに単体のインフォメカトロニクスから、ものづくりシステム全体に拡張してソフトウェアの影響を概観すれば、生産システムのみを挙げても NC(Numerical Control)、CAD/CAM(Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing)、FMS(Flexible Manufacturing System)、CIM(Computer Integrated Manufacturing)というようにソフトウェアを伴った形で大規模に展開され、現在ではその重要性はものづくりコストの数％に及ぶことが多い。しかし本報告においては、ものづくり全体に占めるソフトウェアの位置づけと効果に関わる検討が未了であるので、これについては将来課題として残すこととした。

## 4 資源循環型ものづくり科学を構築する上での必要事項

### (1) 資源循環型ものづくりに向けた社会ビジョンの構築

資源循環型ものづくりを掘り下げて考えれば、「民生・運輸部門における人工物・工業製品は長期に使用されるため、それらの製造に使用する初期素材とエネルギー量が最少、その利用ならびに回収プロセスにおけるエネルギー消費が最少、そして回収品をエネルギー消費最少の下で、素材に最大限再生し、結果として温室効果ガスをはじめとする廃棄物量、化石資源使用量、レアメタルを中心とする金属使用量を最少化するシステムの構築」を指すことになる。とりわけ総エネルギー最少化の科学構築に向けては、生産と再生に加えて使用の過程が対象となる。それらの科学、技術、産業の育成は、社会全体の中長期ビジョン、そこに至るシナリオ、およびそれを実現するための具体的開発課題とロードマップをセットとして策定し推進することによって初めて可能となる。この場合、素材・エネルギーに関わる総エネルギーを最少化していくには、それらの製造と再生のプロセスを科学的に解明することが不可欠であるのに対して、機能が高度化・複雑化したインフォメカトロニクス等については、快適性や利便性を求める使用者の嗜好・欲求の面に併せて、使用者の省エネルギー意識の高揚に向けた社会的合意形成が不可欠である。この二つの作業は人類に多くの問題を投げかけるが、環境・エネルギー・資源などに関するいわゆる課題解決型技術の創出に対しては世界の関心が高く社会的合意が得られやすいと期待でき、顧客の限りない欲求を充足するための市場経済に基づく欲求充足型技術開発に比べて実現しやすいとも言えよう。ただし、そのためには正しい知識の形成・普及が不可欠である。一般にイノベーションは課題の把握、価値の発見から始まるが、資源循環型ものづくりイノベーションの達成については既にその枠組みが明示されてきているので、国としてのイノベーションの強化という点からも取り組みやすいと考えられる。

また資源、エネルギー、環境に対する負荷軽減は、個体の製品や技術を基本としながらも、最終的には全体の総和としての議論が必要である。その際、個から全体に向けての考え方は、個の積分で表現される全体、個の構成要素の互換性や標準性を考慮した全体、さらに例えば、新たな社会システムとしての全体が考えられ、これらを考慮した資源循環型ものづくり科学を構築していく必要がある。

### (2) 資源循環型ものづくりの地域性の視点

資源循環型ものづくりを世界的に導出していくには学術からの発信が不可欠であるが、その産業を発展・定着させていくためには、先ずは成熟国と発展途上国の合意がなくてはならない。とりわけ世界総人口の急増にあって、発展途上国の近代化と生活水準向上に対する要望、すなわち人工物と工業製品の活用要望を成熟国が理解し、同時に成熟国は途上国に多い未利用のバイオマスや太陽光エネルギーの開発などを積極的に進め、途上国と成熟国間の合意に基づく資源循環型ものづくりを進めていかなければならない。日本は資源が乏しいが、東南アジア、アフリカ、南米などに膨大な生産ポテンシャルがあるバイオマスの利用、大陸の広大な砂漠や乾燥地を利用した太陽光発電システ

ムなど、国内だけに終始してはならない重要な技術・産業の土壌が海外にあることも忘れてはならない。

このような立脚点からすると、今後は以下のような地域性を考慮した資源循環型ものづくりが発展すると考えられる。

- ① 市場および生産拠点として重要なアジアを始めとした、開発途上国、急進国にも展開可能な資源循環型技術、産業を育成すること。
- ② 発展途上国の活性化に役立つ資源循環型技術、産業を開発すること。

省エネルギーと環境対応に関して日本は多くの優れた技術を有するが、自動車産業など早い時期から国際市場を志向してきた一部の産業を除き、国内の小さな市場で激しい競争を続けるだけで、その優位性が国際市場で活かされていないものが多い。①のような視点で世界的に優位に立つためには、計画段階から国際市場を目指し、戦略的技術・製品の開発、国際標準化、そのための海外への戦略的技術移転、さらにはグローバル市場・グローバル生産拠点に適合した製品・技術にするための国際共同研究を志向すべきである。これには、当然個々の企業の努力が求められるが、それだけで成功するのは難しい。学・官の協力による国際課題解決などの幅広い分野でのリーダーシップの発揮と日本に対する信頼感の醸成、人材や技術ネットワークの構築、国際的に活躍できる日本人材の育成など、そのための環境を整えておくことが欠かせない。

### (3) 資源循環型ものづくりに必要な IT システム

資源循環型ものづくりにおいて、IT化、モジュール化、システム化の変化に対応するには以下の課題が重要である。ITシステムには、その内部に高い技能を可能な限り形式知化し埋め込み、モジュール化については適切なインターフェースを確保した上で、設計段階でのすり合わせを徹底し、モジュール内に固有の機能をコンピテンシーとして隠蔽し、システム化については、構成要素個々の最適化を追求する中で、自然科学に留まらず、社会科学や人文科学も含めた全ての領域でのシステム思考を徹底し、包括的にマーケティングから製品へ、更にサービスに反映する。

これらの課題解決を通して地球環境との共生システムを具現化し、真の資源循環型ものづくりを世界に提供することが我が国ものづくりの喫緊の課題である。具体的には、機械・電気電子・ソフトウェア融合型のインフォメカトロニクスの増加に対応するため、それらを統一的に扱える開発・生産システムの理論研究とプロセスの構築が必要になっている。

とりわけソフトウェアに対する要求仕様の作成に関しては、従来のソフトウェア工学だけでは律しきれない実情に鑑み、今後、社会科学、人文科学、その他の科学知見を総合し、ソフトウェアを対象にした新しい要求工学と品質工学を研究開発していく必要があると考えられる。またそれらの課題に対応できる道具として、グローバルな標準を目指した、機械・電気電子・ソフトウェアからなるインフォメカトロニクスの設計支援ツールの開発と提供そして普及が極めて重要課題である。

ただし社会全体としての IT インフラ化とサービス化が進行する環境下で、組込みソ

ソフトウェアに焦点を当てた議論のみでものづくりの方向性を示すことは、その全貌を予測していく上で過ちを犯しかねないと懸念する。トータルなシステムのなかのものづくりは、全体最適から来る個々の機器への要求仕様の整合性、妥当性に基づき、インターフェイスの標準化、ソフトウェアのプラットフォーム化、全体最適のためのソフトウェア開発プロセス改善としてソフトウェアプロダクトライン工学等が重要課題であることを提案する。

#### (4) 資源循環型ものづくりの具体的対象技術

資源、エネルギー、環境に対する負荷を軽減可能な技術・産業としては以下のようなものが期待される。

- ① 化石資源代替および省化石資源発電技術：原子力発電、水力発電、太陽光発電、風力発電、廃棄物・バイオマス発電、高効率発電電等
- ② エネルギーおよび資源生産性向上技術：高付加価値製品の高効率製造等
- ③ 運輸エネルギーの改善：省エネ省資源型都市交通システム、低燃費自動車、高効率物流システム等
- ④ 低環境負荷、省エネ・省資源製品の開発技術：省エネ・高燃費製品、長寿命製品等
- ⑤ 炭素固定技術：自然メカニズムの利用（森林の保全、砂漠緑地化）、二酸化炭素の分離・貯留等
- ⑥ リサイクル、リユース技術：わが国から発信している 3 R (Reduce、 Reuse、 Recycle) 技術の拡充等
- ⑦ 農林水産業の革新技术：省エネ、節水、節農薬、節肥料、節飼料の農林水産行等

産業部門が循環型社会の構築に関し果たしうる役割は、生産過程の改善、いわゆるプロセス・イノベーションにプラスしてプロダクト・イノベーションの視点が欠かせない。すなわち、人工物・工業製品の全ライフサイクルを通じてエネルギー・資源消費の少ない材料・部品・機器を生産・消費過程での下流側に提供することである。さらに、それらの優れた部材、部品を標準化することが重要である。

また、情報機器・システム、IT の循環型社会の構築に果たす役割は大きい。我が国の IT 機器の電力消費量は、2025 年には 2006 年の 5 倍以上、総電力量の約 20 パーセントに達すると言われており、その省電力は不可欠である。他方、IT の利用により、プロセスの合理化、無駄な試作や生産の削減、物流の制御・削減などによる大幅な省エネが期待される。

#### (5) 資源循環型技術・製品の開発・普及における留意点

開発・普及すべき技術・製品は、「生産・消費活動全体を通じて環境負荷の軽減、エネルギー資源の消費量の削減に真に効果があること」が必要不可欠である。今日、エコを謳っている工業製品の中には、この点で不明確なものがないとはいえない。たとえば、

プラスチック廃棄物を分離、回収し材料として再利用するシステムには、それを単純に燃料として利用する方法に比べて総エネルギー収支が劣る特性のものもあるとの試算もある。従って個々のプラスチック特性を十分に評価した上での慎重な適用を行わないと、回収を普及しようとする制度自体が、実害をもたらしたり、後々正当なものまで受け入れられないような環境を作り上げてしまう恐れがある。この程度のものでよいと研究者や企業が思い込む、モラルダウンも心配される。市場の拡大によって今後の改善が期待できる開発段階にあるものは、その時点では必ずしも「真に効果がある」必要がないこともあるがその説明が必要であり、政府の普及支援などもその目的が環境・エネルギー・資源問題への寄与なのか産業・技術の開発支援なのか明確にすべきである。

生産・消費活動全体を通じて、環境への負荷やエネルギー・資源の収支をもれなく、客観的に、正確に評価することが必要である。この評価には、ライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）が適用されることが多い。しかしながら、LCAは開発後十数年を経てかなり平準化されてはきたが、依然として企業を始めとした評価者ごとの恣意性があり、また新しい製品の環境への負荷やエネルギー・資源消費量の全体を捉えきれないため過小評価する傾向がある。それ故さらなるLCA手法、適用手順の厳密化、標準化がなされ、特定の製品を誰が評価しても同一の数値データが得られるようにする学術的追求が必須である。

例えば実際の製造現場では、手間がかかる割には確度が今ひとつであるLCAの適用よりも、むしろ利益や税金などを除いたコストが使用資源や所要エネルギーを代替しているので、コストのみで当該製品の環境評価を行っている場合が多い。この評価法によれば普通は最大値を示すことになるので、LCA評価とコスト評価を組み合わせた総合的評価法を確立することが現実的であろう。いずれにしろより正確な評価法の開発と関連データの開示によって、人工物・工業製品が環境に及ぼす影響を正確に予測できるようにすることが望まれる。これについては6章で述べることとする。

#### (6) 資源循環型ものづくり科学を構築する上で大学への期待と課題

資源循環型ものづくり技術の研究開発には、息の長い基礎研究と時としてハイリスクの研究が必要であり、また、多彩かつ潜在力の高い研究人材を有するなど企業にはない特徴を持つ大学・国研を積極的に活用することが強く求められる。1970年代以降の日本の産業発展に苦しんだアメリカは、大学や国立研究所等と産業界がタイアップしてIT、バイオなど今日隆盛の産業の基礎を切り開いてきた。同様に我が国においても、この15年間、産学連携による技術開発が盛んに進められてきたが新産業を革新するには至っていない。大学や国立研究所等は、運営方法によっては、多分野の研究者が協力しての学際研究、さらには世界中の研究機関との共同研究なども可能であり、資源循環型ものづくり分野において大きなブレークスルーが期待できる。その半面、ニーズの把握、技術評価、現場経験、コスト意識、期限意識など不足しているものをカバーすることが必要である。また組織や資金面で、大規模研究の推進や最新設備の整備などを工夫する必要

もあろう。日本学術会議における生産科学部門を中心に、従来、生産学術連合会議<sup>2</sup>やエコデザイン学会連合<sup>3</sup>などが組織され、ものづくり分野の環境問題に対処してきている。今後、これらを中心に一層の産学官連携による循環型ものづくりに関わる研究の促進が必要である。

#### (7) 資源循環型ものづくり人材の育成

以上に述べた資源循環型ものづくりの実現に向けては、その方向性と枠組みを理解して実行できる人材育成が不可欠である。そのためには我が国の現在の教育システムを抜本的に見直し、初中等教育段階から資源循環を視座としたものづくり教育を導入するとともに、高等教育においては資源循環の視点からの職業教育を一般教育に併せて教えていく制度改革が必要である。

すなわち、ものの利便性を享受する上で、資源循環型ものづくりに関する社会的常識と合意の醸成、資源循環型ものづくりを実施していく上でのプロセスとプロダクトに関わる技能者・技術者の育成などについて国としての教育方針を明確にすべきである。

既に文部科学省においては、教育における職業意識と実践的職業能力の涵養などについて提言しており、また日本学術会議からの「日本の展望—理学・工学からの提言—」[12]に報告されている研究と教育の一体的な推進、21世紀型科学技術リベラルアーツ教育、および教育体制の改革とイノベーション人材育成などを基本としつつ、資源循環型ものづくり教育にブレークダウンしていく必要がある。このためには、今後ものづくり産業界の積極的な参加を得て、行政のさらなるリーダーシップの下で、大学工学系等が方針を策定して実施していくことが希求される。

---

<sup>2</sup> [www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/~arai/mcj/](http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/~arai/mcj/)

<sup>3</sup> [www.ecodenet.com/unioneco/](http://www.ecodenet.com/unioneco/)

## 5. 資源循環型ものづくり設計に対する収斂技術（CTs）の適用

### (1) 収斂技術の発祥

収斂技術（コンバージングテクノロジー、CTs；Converging Technologies）という用語は、米国の国立科学財団（NSF）が2002年に“Converging Technologies for Improving Human Performance” [13] を、さらに2005年に“Managing Nano - Bio - Info - Cogno Innovations：Converging Technology Society” [14] を発表して以来、広範に使用されるようになった。とりわけ後者はNBIC（エヌビック）として知られるようになった。これらを要約すれば、収斂技術とは以下のように定義できる。

#### ・収斂技術(米国の場合)：

ナノ、バイオ、情報、認知科学のように、これまでそれぞれ独立に研究されてきた学術成果から、その必要な部分のみを特定目的のために取り出して組み合わせ、例えば人間の障害を改善し能力を向上するという劇的な新技術を創出すること。一般的に定義すれば、特定目的を達成するために2つ以上の異種の科学技術の必要部分を取り出して組み合わせる技術（図2）。

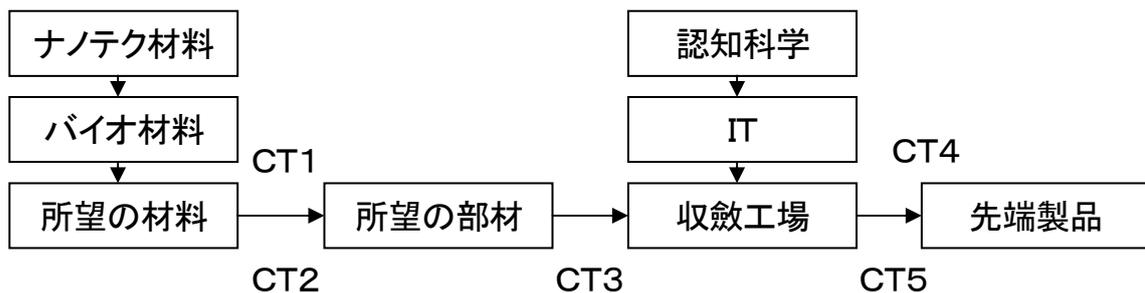


図2 収斂技術(米国の場合)の考え方

他方 EU では、2003年に「欧州社会の未来を形づくる収斂技術：Converging Technologies-Shaping the Future of European Societies」を公表している[15]。それによれば、以下のように定義できる。

#### ・収斂技術（EUの場合）：

共通目標の追求において、お互いに実現能力を与え合う広領域技術と知識体系。

### (2) 資源循環型ものづくりにおける収斂技術の適用

これらを受けて本分科会にて検討した結果、収斂技術を以下のように定義することとした。

- 1) 先端科学型収斂技術：先端科学(IT、BT、NT等)を特定技術の開発目的に合わせて選択・統合し、従来に無い劇的な新技術を創出すること。科学的意味合いが強く、アメリカに優位性が高い。

2) 先端工学型収斂技型：既存の先端技術と科学を特定技術の開発目的に合わせて選択・統合し、総合的技術組み合わせと改良により、技術社会要望に応える新技術を創出すること。現実の技術的意味合いが多く、日本に優位性が高い。

前期報告では、2)の事例としてハイブリッドカーを取り上げ、既存の内燃機関、電気モーター、協調制御を組み合わせ、高燃費で自然環境を害さず、かつ車としての従来機能を維持するという社会要望に応じていることを説明し、その一般化としては、次世代ものづくり技術開発の正確なロードマップに基づき、ものづくり科学知見を統合する手法として収斂技術の有効性を報告したが、その具体的手順については掘り下げていなかった。

この点について今期にて検討した結果、ものづくり企業で実現してきている我が国の収斂技術は、図3のようにまとめることができる。

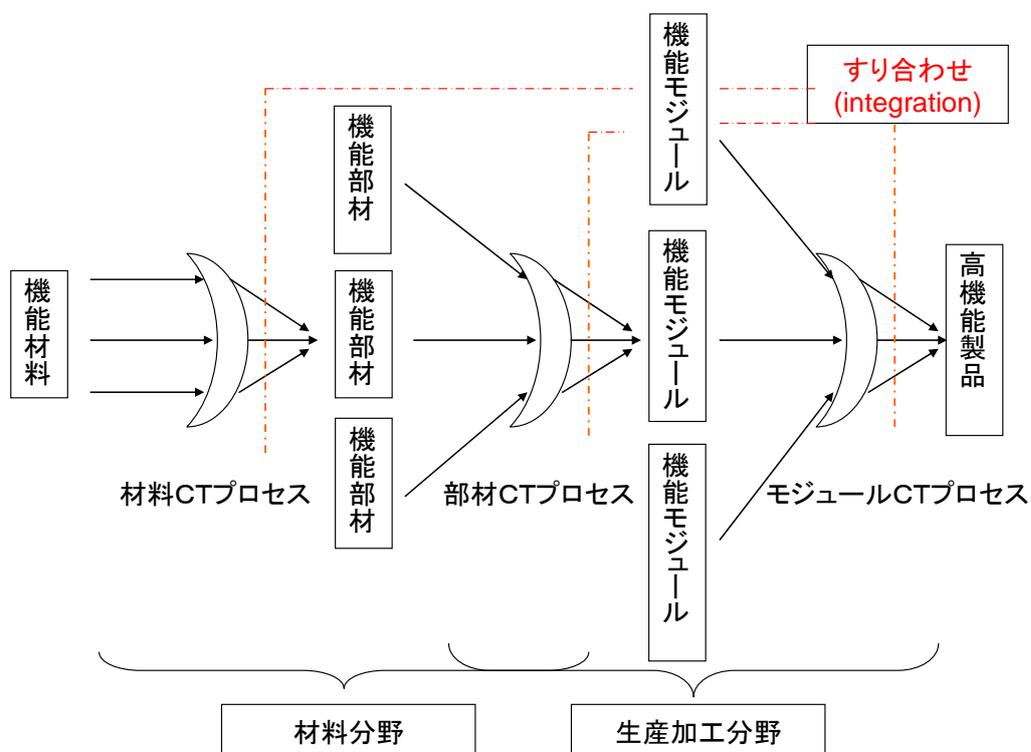


図3 日本における収斂技術の考え方

すなわち、インフォメカトロニクスのごとき高機能製品の仕様を特定し、その仕様に焦点を合わせて機能モジュールを、それぞれの機能モジュールの仕様に合わせて機能部材を収斂させていく設計・製造手法である。しかし何をどのように選択的に収斂させていくかの評価基準については、企業現場では最少原価が基準となっているが、未だ学術的な基準についての検討はなされていないと言えよう。そこで本分科会としては、図4に示すように、特定製品の全ライフサイクルを通しての総価値（LCV）を最大化するとともに、それが環境に与える総負荷（LCEL）を最少化することを収斂技術にける選択基準とすることを提案する。今後、このような基準に従って具体的な資源循環型ものづく

りにおける収斂技術の適用が展開されることを期待している。

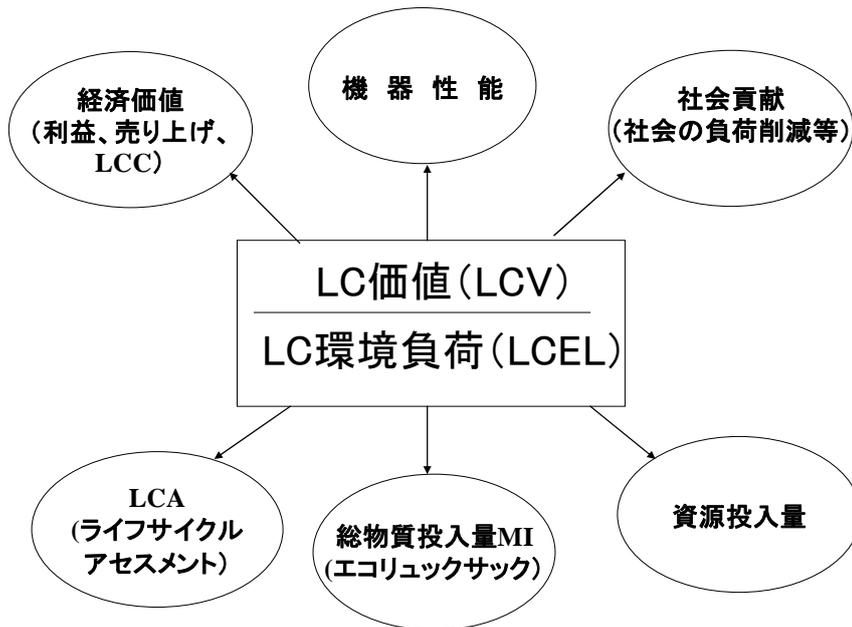


図4 資源循環型ものづくりにおける収斂技術基準の考え方

## 6 資源循環型ものづくり評価に対する拡張ライフサイクルアセスメントの適用

### (1) ものづくりシステムにおける資源循環の考え方

ものづくりシステムにおける資源循環は、製品あるいはプロセスの視点から把握され、その双方におけるバランスの良い循環が求められる（図5）。狭義の生産活動だけではなく、エネルギー・素材生産から、製品流通・回収も含めた大きな資源循環の最適化が課題である。現実には、経済や社会課題も関連して複雑であるが、学術的・技術的な観点から可視化・モデル化し、資源生産性を原理原則から改善していくことは重要である。

個別の技術開発や新製品の効果を可視化するためには、個別のプロセスや製品使用の効果を積み上げて資源・エネルギーの循環を積算していく必要があるが、このためには関連する原単位データベースの体系的整備など体系的な研究開発が重要である。3章で述べたように自動車の電動化の影響など、製品・プロセス革新の影響を長期的・大域的に評価するためには、社会・経済的側面も取り入れたシステムエンジニアリング的アプローチも必要とされる。

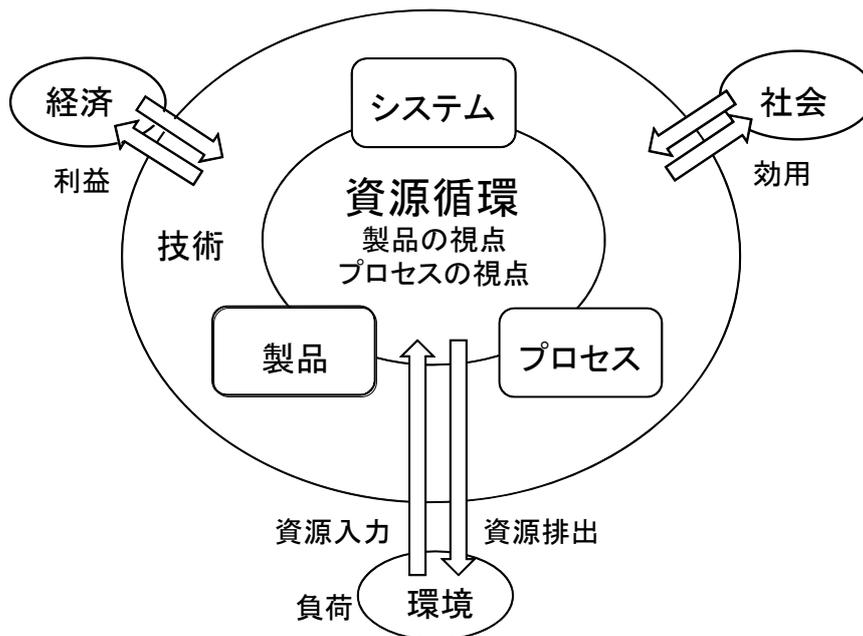


図5 資源循環における製品とプロセスの視点

資源循環の効率化は、純粹に物理的なプロセス要素技術のレベルから、人工的なシステム技術のレベルまで、様々なレベルで可能である。どのレベルをとってもそれだけで要求される効率化を実現することは困難である。図6に示すように様々なレベルの技術の戦略的統合が強く求められている。様々なレベルの技術をブレイクダウンし、ものづくりの現状から、重要な課題を抽出すると以下の通りである。

- ・製品の過度な複雑さの排除：市場経済原則に基づき、顧客の要望を聞き入れ過ぎるが

ために、不要な機能が付加されている場合が多い。よって要求適合製品、品質制御、寿命制御が必要。

- ・製品の基盤性能の向上：世界市場で省資源・省エネルギーで利用できる製品は、高信頼性、超軽量化、システム安全である必要。
- ・製造プロセスの極限的効率化：製造プロセスでの資源・エネルギーを最少化するためには、製造の局所化、間接的な無駄削減、プロセス連携が必要。
- ・資源循環の高度化：3Rの徹底、ゼロエミッション化、資源循環のグローバル化が必要。
- ・サービス提供の仕組み：最終的には製品を無駄に保有するのではなく、製品機能を利用できればよいので、サービス効用の最大化が必要。
- ・社会構造を変革する製品機能：資源循環を達成できる新しい付加価値の創出（例：電気自動車）、標準、インフラ整備が必要。

技術の進展と共に、経済的あるいは社会的要求に応じて、製品は自然に高機能化し、よって複雑化する。効用は向上するが、同時に環境負荷も増大する。環境効率は良くても環境負荷の絶対量は増加する。この悪傾向を断ち切ることが、資源枯渇などに対応する方策として重要である。そのためには、より単純化された製品でより高度な効用を発揮できるような革新的な技術により、環境負荷と効用の比率を向上させるしかない。ここにもものづくり技術、とりわけ設計技術・システム化技術に対する学術的な要求がある。

### 事例：自動車の場合

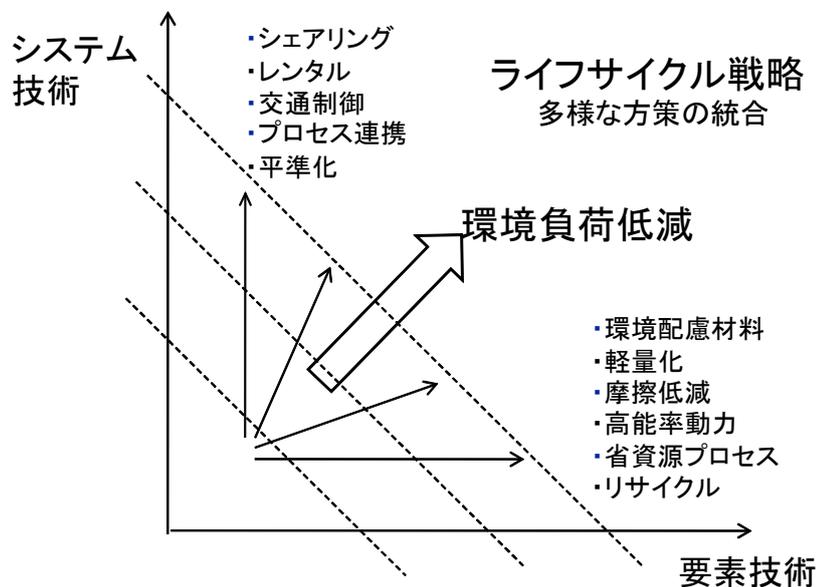


図6 システム技術と要素技術の戦略的統合

#### (2) 資源循環型ものづくりに対する拡張ライフサイクルアセスメントの適用

資源循環型ものづくりにおいては、顧客に物としての製品を提供することを目的とするのではなく、顧客に機能を提供することで顧客が価値を感じることができるようにする

ることを目的とする必要がある。機能の提供は、有形の製品と無形のサービスを統合することにより行われる。

このような例として、企業における印刷機能を考えよう。従来は、各部署がそれぞれ複写機やプリンタなどの機器を購入し使用していた。その場合、各部署で紙やトナーの補給を行わなければならない。また、使用量が多い部署も少ない部署も存在するので、ある部署では機器がいつも待機状態であるのに、ある部署では印刷待ちが起こることもある。これに対して、例えば、メーカーが顧客企業の各フロアに機器を設置しトナーや紙の供給サービスも行うものとする。ユーザは、PCで印刷ジョブを起動し、手近な機器のところに行きICカードをかざすと印刷物が得られる。このような機能提供により、ユーザは、機器のところまで行く手間は少し増すが、機器のメンテナンス等を気にすることなく何時でもどこでも印刷物を手に入れられるようになる。一方、メーカーは、機器の最適配置により、より少数の機器で印刷機能に対するユーザのニーズを満たすことができるようになる。すなわち、製品の提供から機能の提供へものづくりの概念を変えることによって、製品の提供だけを考えていたのでは実現できない、ユーザ満足度の向上と、コストおよび環境負荷の削減が達成できる可能性がある。さらに、製品を機能提供側であるメーカーが所有しメンテナンスも実施する場合は、部品リユースや製品リユースを実現しやすくなり、さらなる環境負荷の低減も可能になる。

以上の例で分かるように、資源循環型ものづくりを実現するためには、機能提供方法を含めたビジネス設計を行い、それに基づいて製品ライフサイクル管理の方法を計画する必要がある。すなわち、製品設計の前に、製品・サービスのライフサイクル設計を考える必要がある。図7はこのようなライフサイクル設計の概念を示したもので、本報告ではこれを「拡張ライフサイクルアセスメント」と定義する。拡張ライフサイクル設計では、まず、ビジネスモデルとライフサイクル戦略を検討する。さらに、達成すべき環境目標を定め、製品・サービスのコンセプトを決定するとともに、環境負荷低減のためのライフサイクルオプションを選択する。以上により製品・サービスのライフサイクル全体の構造と管理方針が決まるので、これを拡張ライフサイクルシステム設計と呼ぶ。

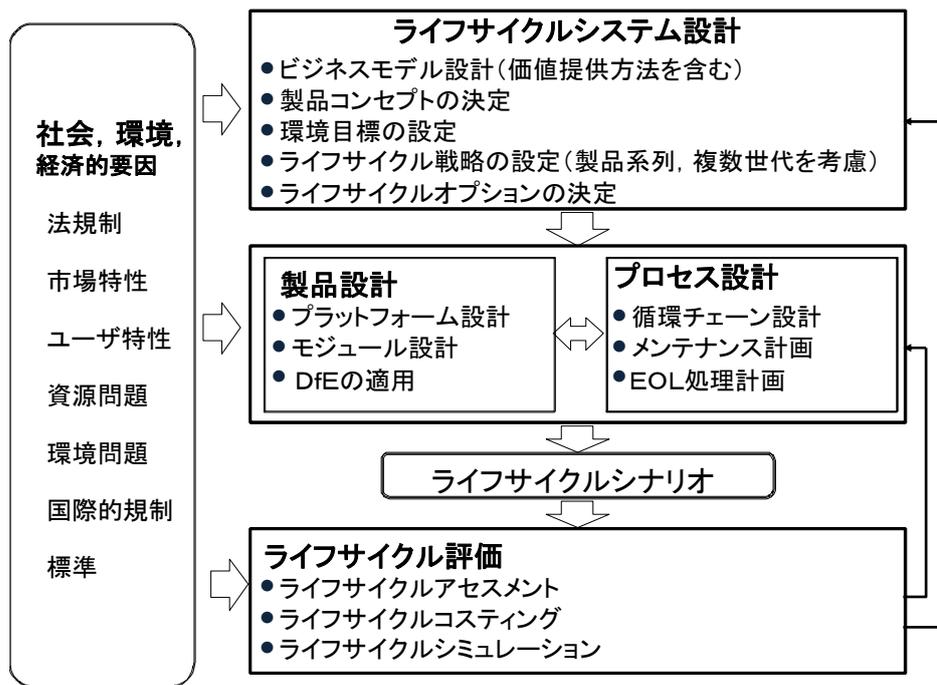


図7 拡張ライフサイクル設計の流れ

次に、拡張ライフサイクルシステム設計に基づいて、その実現に必要な製品設計とプロセス設計を行う。製品設計では、DfE(Design for Environment)により例えば分解性や分別性などを高めるだけでなく、プラットフォーム共通化設計やモジュール共通化設計により、製品系列間あるいは製品世代間のリユースを可能にすることも必要となる。また、プロセス設計では、製造段階だけでなく、流通販売、使用、回収、さらにEoL(End of Life)の各段階で環境効率を高めるための運用管理計画を行う。中でも、EoL 段階での処理を拡張ライフサイクル設計と整合させて管理することは効率的な循環の実現に不可欠である。また、多くの製品では、使用段階での運転とメンテナンスの統合最適化は拡張ライフサイクルを通じた環境負荷とコストの低減に大きく寄与する。

製品設計とプロセス設計によって、製品・サービスの拡張ライフサイクルの詳細が決まる。これを拡張ライフサイクルシナリオと呼ぶ。ところで、拡張ライフサイクル設計で注意すべきことは、リユースやリサイクルなどのライフサイクルオプションの採用が、環境負荷削減の方策として常に適切とは限らないという点である。例えば、使用中の省エネ性能の改善が限界に近付いているような製品の場合は、リユースなどによる循環を考えるより、メンテナンスを重視して長期使用を図る方が適している。拡張ライフサイクル設計は複雑系の問題であるので、設計した拡張ライフサイクルシナリオを総体として評価してみないと、当初設定した環境、コスト等の目標を達成しているかどうか分からない。そこで、このような評価を実施するのが拡張ライフサイクル評価である。これまで、製品のライフサイクルを通じた環境負荷やコストの評価のためにLCAやLCCの技術が開発されてきているが、これらは、1製品の1回のライフサイクルの評価である。

しかし、循環型ものづくりビジネスを評価するためには、顧客に提供される製品・サービスを総体として、循環の効果を含めて評価する必要がある。このためには、LCA、LCCに加えて、例えばライフサイクルシミュレーションなどの技術が重要となる。

以上のように、拡張ライフサイクル設計技術は資源循環型のものづくりシステムの構築のための中核技術といえる。これらに関しては、近年ライフサイクルエンジニアリングの分野で多くの研究がなされている。特に、DfE や LCA の分野では、多くの研究がなされている。また、最近では、製造プロセスにおけるエネルギー効率の改善についても活発な研究がなされるようになってきている。しかし、既に述べたように、拡張ライフサイクル設計は複雑系の問題であり、これらの要素技術を単純に組み合わせただけでは、効率的なライフサイクルを実現できない。したがって、拡張ライフサイクル設計の中でも特に拡張ライフサイクル全体の設計を行う拡張ライフサイクルシステム設計と拡張ライフサイクルシナリオの総合的な評価を行う拡張ライフサイクル評価技術の確立が必要とされるが、これらに関する研究は未だ多くない。裏を返せば、このことが、現実の世界で必ずしも多くの循環型ものづくりシステムが生まれていない理由とも考えられる。一方で、循環型ものづくりの実現は、資源枯渇と環境問題の深刻化にともない緊急の課題となっており、システム的アプローチによる拡張ライフサイクル設計技術の確立に向けた研究を加速する必要がある。ものづくりに関わる学会・大学・研究者は産業界の具体の環境対応要望を真摯に受け止め、以上に述べた循環型ものづくりの学術的方針に基づき、各研究分野での具体的展開を図って欲しいと要望する。併せてものづくり産業界が地球温暖化抑止の重要な一つの方向として資源循環型ものづくりを捉え、その実現に向けた方法論の一つとして拡張ライフサイクルアセスメントの考えを積極的に適用して欲しいと要望する。

## 7 資源循環型ものづくりに対するファクトリーフィジックスの適用

### (1) 資源循環型ものづくりと経営科学

ものづくりにおける経営科学のスコープは、特定の作業を対象としたテイラーの科学的管理法から、その対象を作業からライン、工場、そしてその上流である設計・開発、さらに調達から物流、販売、サービスまで含めたサプライチェーンと製品ライフサイクル全体に渡るものになってきた。そこでの経営目標も、作業の効率化から、製品の多品種化や寿命の短縮化といった市場の変化に対応して、いかに効果的・効率的に顧客価値を提供できるかの競争に推移してきた。近年、これに加えて顧客への価値提供に際しての資源制約が加わり、現在では、製品・サービスそのものの省エネ等の環境へのやさしさ、そしてその提供過程でのカーボンフットプリントのように環境対応度が顧客にとっての価値となりつつある。

資源循環型ものづくりを実現するための経営科学の基本は、①源流管理、および、②見える化にある。①はライフサイクル工学あるいはライフサイクルデザインとも言い換えられる。源流、すなわち、設計・開発の初期段階で品質・コストだけでなく3R（我が国が提唱する環境対応ものづくり思想で、資源のReduce、Reuse、Recycleを指す）を可能にするDfE(Design for Environment)等の対応がなされていなければ、いくら下流で対応しようにも限界がある。この点については前述したように本分科会における検討結果として、収斂技術および拡張ライフサイクルエンジニアリングを適用できる可能性について提案してきた。②については、調達から販売、リサイクルまでの“ものと情報の流れ”の見える化であり、具体的にはSCM(Supply Chain Management)やグリーンロジスティクス(Green Logistics)である。これにより同じ価値を提供する上での無駄な輸配送や在庫を極小化することができる。

残念ながら従来②については、関連した多くの手法やスケジューリング等のモデルの下での最適化などの個別理論はあっても、統一的な科学的理論は体系化されてこなかったと言える。そこで、狭義のものづくりである工業製品製造を対象に最近展開されているファクトリーフィジックス(FP :Factory Physics) [16]に着目し、リーンマニュファクチャリングの源泉である我が国発のTPS(Toyota Production System)をファクトリーフィジックスの観点から見直し、資源循環型ものづくりを達成する上での「ものと情報の流れ」の見える化への適用可能性、さらに世界諸地域の文化まで遡及することによって、ボリュームゾーン市場への適用可能性を以下に提案する。

### (2) ファクトリーフィジックス(FP)と変動低減活動としてのTPS

FPは我が国ものづくり関係者の間では余り知られていない状況にあると思われるので、その概要について付録に示した。

FPは、これまで理論不在であった生産マネジメントにサイエンス思考を持ち込むことを企図したものである。現在の生産パラダイムであるリーン、その元祖であるJITあるいはTPSについても、これまで経験論や事例に基づく逸話的な解説がほとんどを占め、一部の特殊な運用法の問題を除いて理論に基づく内容の論理的な説明はされてこなか

った。

FP の理論は、図8に示すように、生産における TH（時間当たりスループット、生産高）、WIP（仕掛在庫）、そしてわが国では通常リードタイムと呼ばれる CT（サイクルタイム、以下リードタイム）の間には、 $TH=WIP/CT$  という関係が成立するということが基礎をおいている。同じ TH を確保するために、改善活動によって CT を十分小さくすることによって WIP を抑えることができればリーン（lean）なものづくりであるが、例え CT が大きくてもそれに対応した WIP を適切に持てばファット（fat）ではあるが TH を確保できるというものである。そしてこの CT を決めるのが、内部変動の大きさと能力に対する負荷の大きさである負荷率  $u$  である。

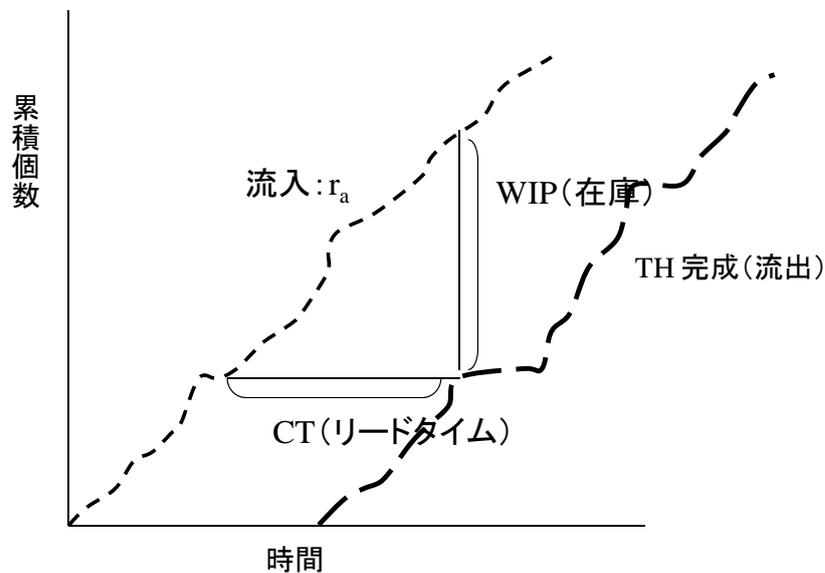


図8 THとWIP、CTとの関係

FPによって、TPSの一つの大きなねらいを変動低減活動として体系化し、負荷率  $u$  を1に近づけることのも目標も正当化することができる。ここで変動とは、外部市場の需要変動に加えて、生産内部で起こるオペレーションの変動、故障（突発故障やチョコ停）や不良、そして段取替や調整といった内部の変動をいう。FPでは、このような内部の変動が大きい（故障による停止や段取時間が大きいほどその変動は大きくなる）ほど、その二乗に比例してリードタイムが延長し、それに伴う在庫も増加し、さらにこれに乗ずるかたちで能力に対する負荷である負荷率の関数である  $u/(1-u)$  が作用して、リードタイムが加速的に延長するというメカニズムを理論的数式で示している。言い換えれば、変動をゼロに近づけるという前提がない限り、能力に対する負荷が高くなるにつれ、急速に延長するということを意味する。

製造現場の知見と経験が高い我が国においては、限りなく製造に関わる変動をゼロにすることを目指した改善を志向してきたと言える。この現場の努力のもと国内生産が主であった時代には負荷率が1を目指し近づけるマネジメントが、我が国に大きな強みをもたらした。しかしながら、製造拠点が世界に分散してきたグローバル時代にあっては、

その日本的生産方式を世界に一律に適用することは凡そ困難になっている実態を認識しなければならない。

TOC（制約理論）で著名な E. ゴールドラットは、上述の内部の変動のことをマーフィーと呼び、マーフィーの存在を否定するような不良ゼロ、故障ゼロを目指す改善活動にばかり目をやり、一方でマーフィーの存在を前提とした最適化やリスクマネジメントが疎かになっている事実を指摘している[17]。

すなわち、ゴールドラットのみならず世界が暗黙的に合意しているように、製造活動にはマーフィーが必然的に存在し、変動は必ずあり得るとの前提を我が国製造業も持つべきである。さもなければ我が国製造業はグローバル化を志向できず、今後、グローバル化したものづくりに対応できなくなる懸念がある。換言すれば、「マーフィーの否定は非現実的である」と捉えるべきである。このことは我が国製造業が、緻密かつ網羅的な現場改善をしながらそれらを企業収益に結び付けられず、さらには企業活動全体での最適化やリスクマネジメントが弱いという事態を招き、総合的に日本企業の競争力低下をきたしてきた一つの要因にもなっていると考えられる。

一方、このような不良ゼロ、故障ゼロを目指した改善活動が現場で機能するというのは、我が国固有の文化に根ざした他国では容易には真似できない強みでもある。しかしながら、この現場の強みは、あいまいでも現場が動くという反面、標準化や普遍化が苦手ということにもつながる。個々のオペレーションには優れているが、例えば、現場レベルでの5Sに始まる「目で見える管理」は得意であるが、系列を除いてサプライチェーン全体という広範囲でもともと見えにくい対象の見える化やSCMになると、途端に無頓着か弱くなる。日本の強みと言われる技術においても、日本の技術者は要素技術ばかりに目が行き、システム化技術が弱いという指摘されることもこれと同根であろう。

また普遍化が苦手という点については、我が国の自動車産業の実践をベンチマークして体系化することによって米国がリーン生産方式に普遍化したのであって、日本企業がなしたものではない。そこに含まれるコンカレントエンジニアリングやサプライチェーンという概念についても同様である。また全社的品質管理（TQC）のコンテンツや推進の仕方も、企業の実践ベストプラクティスを積み重ねることによって形成されたといっても過言ではない。その積み重ねが米国に移動し、やがてシックス・シグマとして体系化・標準化されてきた経過を認識しなければならない。

今後はこれらの弱みを克服しながら日本の強みをうまく生かすことが、我が国のものづくり競争力を回復できる重要な道の一つであろう。

### (3) 我が国ものづくり産業におけるFPの展開

上記に加えて、最近では生産設備そのものがターンキーソリューション化され、改善や熟練を極小化できる傾向も進みつつある。製品設計においても、PCに代表されるモジュール化や、自動車ではプラットフォーム化や軽量化にもつながる部品点数の削減によって、コスト削減とともに「つくり易さ」が増してきている。加えて、日本国内であっても、半導体のように技術の変化が激しい製品にあっては、時間をかけて変動低減活動

に傾斜するあまりスループット（生産高）を確保できないことで機会損失に至り、そのうちに次の技術に移行してしまうという事例も出てきている。

上記の状況を総合的に考慮するに、生産する国や文化の違い、技術の変化スピードを考慮して、製造における変動低減活動と、FPに基づくリードタイムの実力に応じた適正な在庫を持つことでスループットを確保するというアプローチを戦略的に使い分けることが求められてこよう。

さらにもう一つの流れとして、設計開発から製造まで含めたものづくりを考えると、現在の製品を実現する上でソフトウェアの占める割合が著しく増加している。基本的に繰り返しのないソフトウェア工程に対しては、今のところFPは適用できない。一方でJITの改善低減活動は可能である。その本質は、源流管理であり、現にTPSでは、標準作業の延長である工程での「自工程完結」から、開発の「自工程完結」の活動が始まっている。すなわち、ソフトウェアについても、変動低減活動に持ち込むことによって日本の強みが発揮できる可能性は大きいと思われる。

例えばソフトウェア版のFPともいえるものに、SPLE(Software Product Line Engineering)がある。特に組込ソフトウェア開発の生産性に関して全体最適を図る開発手法であり、ひとつのアーキテクチャーで実装できる製品グループをひとつのプロダクトラインとして、ソフトウェアの再利用を体系立てる手法である。共通部分のコア資産をもとに機種毎の変動部分を実装する製品開発を分離し、ソフトの大規模化、短納期化に対応し、また品質向上、価格性能向上を目指したものである。

SPLEを有効活用するためには、品質工学など多様な学術を包含し、上流工程での要求工学や標準化を含めた総合的取り組みが重要になってくる。前述のようにこれらはこれまで日本人があまり得意としなかったところであり、今後、意識して強みである飽くなき探究心を引き出すような対策が求められよう。

#### (4) 資源循環型ものづくりに対するFP適用の考え方

製品設計を所与とした上での環境負荷低減という立場からFPを考えると、変動の大きさから同じスループットを確保するために、必要となるリードタイムや対応する在庫を定量化できることで、ものづくりのリーン度、あるいはファット度を定式化したものと言える。資源循環型ものづくりを目指すには、変動を削減するアプローチが必要となり、その変動削減活動としてのTPSは正にリーンなものづくりの典型例として位置つけることができる。

しかしながら、現実にはTPSを実践するには困難を伴い、これまでの経験上それは国の文化や文化に根ざした人的資源の制約により、不可能な場合が多い。その意味ではFPは、そこに至るアプローチとして実力に見合う合理的管理方式も提言している。例えば、ファット度が高い、すなわち実力を伴わない段階でかんばん方式を採用すると生産現場は大混乱するが、そこではCONWIP(Constant Work in Process)という方式が提案されている。完成品が1個完成するとカードが外れ、1個原材料を投入することで、仕掛在庫(WIP)を一定に保つという方式である。CONWIPの在庫量を減らして行く、CONWIPの

適用を全工程から各工程へと範囲を狭めるという制御を実力向上に伴い実行することによって、かんばん方式に近づけ、リーン度を高めるという取り組みを可能にする。一方、FPは資源循環型ものづくりの観点からは、時間観点から資源の生産性の理論であり、面積生産性等の視点がなくその点の理論的補強が必要であろう。

加えて、在庫という観点だけでなく、使用資源やエネルギーの低減を図るためには、FPに加えて、マテリアルフローコスト会計(MFCA)やトータルプロダクティブマネジメント(TPM)のアプローチを採用する必要がある。MFCAは、工程ごとに負のコスト(ロスコスト)を定量化し、工程全体の負の製品コストを「見える化」する環境管理会計手法である。廃棄物を作るためにかけたコスト(負の製品コスト)をマテリアルコストだけでなく、前工程で投入したシステムコストと呼ぶ労務費や減価償却費、エネルギーコストも含めて定量化される。環境負荷低減の立場からは、発生した廃棄物をいかにリサイクルするかだけでなく、廃棄物やそのために消費されたエネルギーや資源そのものを発生させないためのものづくりの着眼点を与えるマネジメント・ツールである。

一方、TPMは、ものづくりに関与するあらゆるロスを「見える化」し、その削減を図ることで生産効率の極大化を狙いとした組織的改善活動である。ロスを“見える化”するという点では、MFCAとTPMは大変親和性が高いが、同時にTPMにおけるロスには、発生ロスに加えて理想状況から発掘される機会ロスも含まれていることが異なる。またMFCAが改善の余地や効果の大きさを示すがそのための改善方法ではないことに対して、TPMはロスを削減するための多くの方法論や「しかけ」を提供するものである。

なお、TPMにおいて設備に関連した指標として設備総合効率(OEE)がある。これは故障時間に加え、段取・調整時間(停止ロス)、チョコ停や速度低下(性能ロス)、不良(不良ロス)を負荷時間から除いた正味に付加価値を生み出している時間比率である。これにFPの枠組みを持ち込むことによって、同じ可動率(OEE)であっても、チョコ停よりもドカ停の方がリードタイムを大きく延長させるというような知見が引き出せ、今後、資源循環型ものづくりの生産側からの理論付けに寄与できるであろう。

以上のようにグローバル視点からの資源循環型ものづくりの達成には、FPに改善活動によるリーンを目指した時間的視点とMFCAやTPM等の手法を組み入れた上で、ものご設計と製造のみならず、それらの移動過程の最適化理論の構築が不可欠であろう。その視点から関連の学会・大学・研究者にあっては、FPを一つの重要な参照知見として各自の担当分野の研究を進めて欲しいと考える。

## 8 まとめ

以上に日本学術会議生産科学分科会として凡そ3年間をかけて検討してきた「資源循環型ものづくり」に関して報告した。その概要は以下である。

- 1) 我が国ものづくり産業が直面している課題と対応策
- 2) これを学術的立場から解決していく上での本分科会の視点
- 3) 地球温暖化抑止を実現していく上で、「資源循環型ものづくり」は重要な施策の一つであり、その科学的考え方を示すとともに技術的および科学的課題を整理して提案した。
- 4) 「資源循環型ものづくり」の達成には、製品設計にコンバージングテクノロジー (CTs) の適用、事前評価には拡張ライフサイクルアセスメント (LCA) の適用、そして製造にはファクトリーフィジックス (FP) の適用が重要であることを指摘し、それぞれの概要と学術の方向性を示した。

最後に、この報告書が、今後、以下の様々な活動に活用されることを切望する。

第一には、第4期科学技術基本計画が標榜するグリーンイノベーションを実現する上で、本報告書をものづくり分野の検討において積極的に活用いただきたいこと。

第二には、ものづくりに関わる産業界においては、本報告に対して今後更なる技術的要望を提案すべきこと。

第三には、学会・大学・研究者においては、本報告の方針に則り各分野での研究開発に鋭意努力しつつ関連学術・技術分野との情報交換を怠ることなく資源循環型ものづくり科学の確立に寄与すべきこと。

第四には、行政においては、低炭素社会を掲げる我が国の施策にあつて、循環型ものづくりが肝要な産業技術分野である認識の下で、この分野の研究開発に対する特段の理解をいただきたいこと、などである。

## <参考文献>

- [1] 日本学術会議、提言「日本の展望—学術からの提言 2010」、2010年4月5日
- [2] 日本学術会議、日本の展望委員会 地球環境問題分科会、報告「地球環境問題」、2010年4月5日
- [3] 日本学術会議、循環型社会と環境問題特別委員会、循環型社会形成への課題—もの活かし大国 に向けて—、報告、2005年6月
- [4] 日本学術会議、機械工学委員会、報告「機械工学分野の展望」、2010年4月5日。  
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/period-20.html>
- [5] 日本学術会議、機械工学委員会 生産科学分科会、報告「21世紀ものづくり科学のあり方」、2008年9月18日。
- [6] 日本学術会議「持続可能な社会のための科学と技術に関する国際会議 2010」、2001年12月。
- [7] 気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書、1998年。  
[http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/kpeng\\_j.pdf](http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/kpeng_j.pdf)
- [8] IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書技術要約、2007年。  
[http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc\\_ar4\\_wg1\\_ts\\_Jpn.pdf](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_ts_Jpn.pdf)
- [9] 資源エネルギー庁、日本のエネルギー事情、  
[www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-in-japan](http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-in-japan)
- [10] 日本学術会議、材料工学委員会、報告「材料工学分野の展望」、2010年4月5日
- [11] 日本学術会議、統合生物学委員会、提言「生物多様性保全と持続可能な利用—学術分野からの提言—2010年2月25日。
- [12] 日本学術会議、日本の展望委員会 理学・工学作業分科会、提言「日本の展望—理学・工学からの提言」、2010年4月5日
- [13] NSF, Converging Technologies for Improving Human Performance, 2003
- [14] NSF, Managing Nano - Bio - Info - Cogno Innovations : Converging Technology Society, 2005
- [15] Converging Technologies - Shaping the Future of European Societies, 2003
- [16] W. J. Hopp and M. L. Spearman, Factory Physics, third ed. McGraw-Hill, 2008
- [17] Eliyahu M. Goldratt and Jeff Cox. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. second ed., The North River Press, 1992

<参考資料 1> 分科会等の活動記録

(1) 分科会

第1回会議	平成21年6月19日
第2回会議	平成21年10月9日
第3回会議	平成22年1月22日
第4回会議	平成22年3月12日
第5回会議	平成22年5月27日
第6回会議	平成22年9月17日
第7回会議	平成22年11月11日
第8回会議	平成23年2月4日
第9回会議	平成23年7月7日

(2) シンポジウム

第1回	平成22年3月12日
第2回	平成23年7月7日

## <参考資料 2> ファクトリーフィジックスについて

### 1. ファクトリーフィジックス (FP : Factory Physics) の概要

テイラーの標準という概念の考案によるものづくりの効率のための革新以来、多くの生産に関わるマネジメント・計画手法が考案、実践されてきた。それらは多品種化や製品ライフ短縮に伴う市場の変動との戦いの歴史でもあった。その中でここ20年以上も現在の生産パラダイムの位置を占めているのはリーン(lean)であると言える。これは1980年末に、米国を中心にわが国自動車産業、中でもTPS(トヨタ生産方式)、あるいはJITをベンチマークし、経営手法として普遍化することによって生まれたものである。

しかしながら、リーンあるいはJITという名もとに普及が進むにつれて、経営手法として導入すると、多くの場合失敗するか、JITの本質的なものが抜け落ちた形骸化したものに陥ることを欧米の多く企業が経験することになった。一方で、JITの後述する変動低減活動としての体質改善を時間をかけて忠実に実践することによって、適切な在庫をもたずに短期的には折角の生産量を確保出来ないような現実も出てくるようになった。

そこで登場するのがHopp & SpearmanによるFactory Physics(以下、FP)である。manufacturing scienceを標榜するFPは、これまでJITを含めて多くの手法が提唱、流行してきたが、理論が不在であったことを指摘している。生産における内なる変動(故障、段取等)に着眼し、これに待ち行列理論を適用することによって生産マネジメントを定式化したものであり、変動を認めた上での最適化やマネジメントを提唱したものである。

FPの主題は、生産におけるTH(時間当たりスループット、生産高)、WIP(仕掛在庫)、そしてわが国では通常リードタイムと呼ばれるCT(サイクルタイム、以下リードタイム)の間には、定常状態では待ち行列理論でリトルの公式と呼ばれる、次の関係が成立するというものである。

$$TH = \frac{WIP}{CT} \quad (1)$$

ここで、WIPはリトルの公式における系内人数、CTは系内滞留時間に相当し、THは到着率であり、到着率と退出率が定常状態では等しくなるという仮定に基づいている。

リードタイムCTは、後述するように純粋な加工時間に加えて、変動や負荷率(utilization)に決まってくるものであり、式(1)に基づきこれに対応した適切なWIPをもつことで、ねらいのTHを確保しようということがFPの基本である。WIPを抑えCTを短く出来ればlean(リーン)なものづくりであるが、一方、そのような実力がなくても長いCTに対応したWIPをもてば、fat(ファット)ではあるが同じTHを得ることができる。WIPを抑えることばかり考えると、THを損なってしまう、というものである。

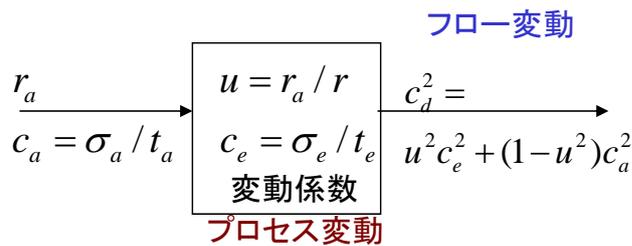
式(1)そのものは経験的にも知られていることであるが、FPの最大の貢献は、ものづくりの実力を評価するためのWIPとTH、CTとの関係を理論的に導き出したこと、そしてCTを工程内の変動から、次のように定式化したことであると考えられる。

$$CT = CT_q + BT + MT + t_e \quad (2)$$

$t_e$  は後述の変動も含めた平均加工時間、 $CT_q$  は変動および負荷率によって増幅される待ち時間、 $BT$  はロット化待ち時間、 $MT$  は運搬時間である。そして、ここで重要なのは  $CT_q$  であり、キングマンの公式と呼ばれる次式によって求められるというものである。

$$CT_q = \left( \frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left( \frac{u}{1-u} \right) t_e \quad (3)$$

$C_a$  は原材料（前工程からの仕掛）の到着時間間隔の変動係数、 $C_e$  は加工時間の変動係数であり、 $u$  は、到着率（時間当たりの原材料の到着数）を  $r_a$ 、時間当たりの加工能力（数）を  $r$  とすると、 $u=r_a/r$  で定義される負荷率である。すなわち、リードタイムは変動が大きいほど、そして変動がゼロでない限り、能力に対する負荷が高くなるにつれ、急速に延長するということを意味する。



付図 1 変動の定義と各種パラメータとの関係

式(3)において、フロー変動である  $C_a$  は、例え第 1 工程への原材料供給が一定で 0 であっても、プロセス変動  $C_e$  によって増幅され、 $C_e$  に収束する。また  $C_e$  は、加工時間の自然な変動  $C_0$  に加えて、故障や不良といった予期できない変動 (preemptive outage)、段取換えや工具交換といった計画的な停止 (non-preemptive outage) によっても増幅される。

まず故障による影響について示すと、下の式のようになる。

$$c_e^2 = c_0^2 + A(1-A) \frac{m_r}{t_0} + c_r^2 A(1-A) \frac{m_r}{t_0} \quad (4)$$

ここで  $m_r$ ,  $m_r$  はそれぞれ MTBF（平均故障時間間隔）、MTTR（平均修復時間）であり、 $A$  は、 $A=m_r/(m_r+m_r)$  で定義される可動率 (availability) である。 $t_0$  は加工時間のみの変動を考えたときの平均加工時間であり、 $C_0$  はその変動係数、 $C_r$  は修復時間の変動係数である。

例えば、 $t_0=10$  分で  $C_0=0.4$  の場合を考えよう。 $m_r=9$  時間、 $m_r=1$  時間とすると、 $A$  (可動率)  $=0.9$  である。このとき  $C_r$  を 0 としても、式(4)から  $C_e=0.837$  となる。式(4)から同じ可動

率であっても、チョコ停のように  $m_t$  が小さい方が変動の増大への影響が小さいことがわかる。また、能力に対する負荷である  $u$  を 0.95 として ( $t_e = t_0/A = 11.1$  であり、 $C_a = C_e$  を仮定)、この結果を式(3)に代入すると、 $CT_q = 148$  分となる。さらに  $BT = MT = 0$  としても、式(2)から、正味のリードタイムである加工時間 10 分のジョブが、最終的にはその 16 倍の  $CT = 159$  分となることが推計される。

一方、段取、工具交換によっても変動が増幅し、リードタイム延長が加速される。段取時間を  $t_s$ 、その段取時間そのもののバラツキ、標準偏差を  $\sigma_s$ 、バッチサイズを  $N_s$  とすると、そのときの変動係数  $C_e$  は、次式ようになる。

$$t_e = t_0 + \frac{t_s}{N_s}$$

$$\sigma_e^2 = \sigma_0^2 + \frac{\sigma_s^2}{N_s} + \frac{N_s - 1}{N_s^2} t_s^2 \quad (5)$$

$$c_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{t_e^2}$$

例えば、上の例と同じく  $t_0 = 10$  分、 $C_0 = 0.4$  とし、 $t_s$  (段取時間) = 100 分、 $N_s$  (バッチサイズ) = 100 個、 $\sigma_s$  (段取時間の変動) = 0 のときには、段取時間の大きさが直接的に効いて  $C_e = 0.975$  となる。故障のときと同様な条件のもとで  $CT$  を推計すると、 $CT_q = 199$  分、 $CT = 210$  分となる。このように故障とは異なり、段取という計画的な休止であっても、大きく変動が増幅され、結果的にリードタイムを延長させることがわかる。

ちなみに、故障と段取を同時に考えた場合について考えると、 $t_e = 12.1$ 、 $\sigma_e^2 = 186$  となり、 $C_e^2 = 1.27$  となることから、 $CT_q = 292$  分、 $CT = 303$  分となり、正味の平均加工時間の 30 倍以上のリードタイムとなる。

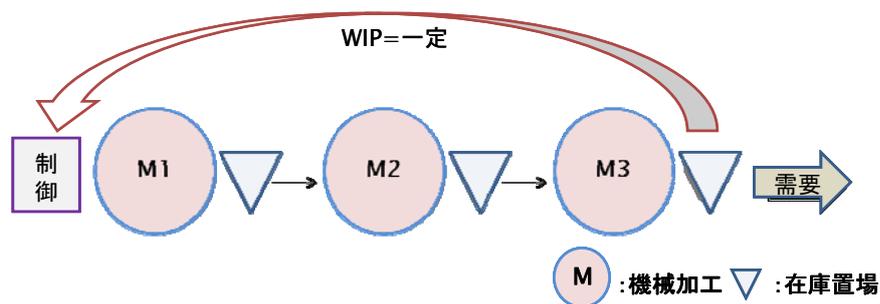
このように、工程内の故障といった確率の変動だけでなく段取時間のような計画された休止も加えて変動が増幅し、これに負荷率が加速する原理によってリードタイムが延長されるメカニズムを定式化されている。さらにこれにより、後述するように TPS、JIT の目指すところが変動低減活動にあり、それによりリードタイム、在庫を抑えるというロジックが理論的に解明されることにもなる。

以上のような TH と WIP、CT の関係と、種々の変動から、TH を守るために、変動そのものをなくすというよりも、以下の 3 つのバッファの使いわけによって対処されるべきということが主張されている。

- 1) 在庫余裕
- 2) 能力余裕 (負荷率を下げる)
- 3) 時間余裕

加えて、MRP 等の push 型の生産計画手法に対して、pull 方式の方が WIP を抑制する効果があるとして、完成品が 1 個完成すると (カードが外れ)、1 個材料を投入することで、WIP (仕掛在庫) を一定に保つ CONWIP (Constant Work in Process) と呼ばれる方式の活用が推奨されている。これは代表的 pull 方式であるかんばん方式の簡易版とも言えるが、

製品群や部品群に対しても適用できる点ではさらに簡易化された方法と言えよう。



付図2 CONWIP

## 2. F Pと変動低減活動としてのTPS

F Pはまだ日本のものづくりではほとんど知られていない状況にあるが、これまでF Pを紹介したときに、必ず受ける質問がある。それは「これまでわれわれは、能力に対する負荷率  $u$  を 100%に近づけることが目標であり努力してきた。ところがF Pでは、それが否定されている (CTを延長させる)。これはどういうことか?」というものである。式(3)からわかるように、 $u$  を上げるといことは  $C_d$  や  $C_0$  といった変動がゼロに近いという条件のもとで正当化される。実際はゼロに近くてもゼロではなく、その場合  $u$  を 1 に近づけるということは、変動が起こった場合に現場がその火消しに走りまわっている状況が頻発しているということ、その代償で成立しているのではなかろうか。それは現場が強い日本では可能であっても、海外では通用しない。

前節でも述べたように、これまで理論不在であった生産マネジメントにF Pは、scienceを持ち込むことを企図したものである。現在の生産パラダイムであるリーン、その元祖であるJITあるいはTPSについても、これまで経験論や事例に基づく逸話的な解説がほとんどを占め、一部の特殊な運用法の問題を除いて理論に基づく内容の論理的な説明はされてこなかった。

F Pを用いることによって、TPSの1つの大きなねらいを変動低減活動として体系化することができる。そして、上述の  $u$  を 1 に近づけることの目標も正当化することができる。ここでは、TPSの構成要素を、(1)平準化生産、(2)標準作業の徹底、(3)異常の顕在化による強制的体質強化(かんばん枚数の削減、まず在庫は諸悪の根源)、として、それぞれF Pの変動および負荷率、可動率との関係を考えてみよう。

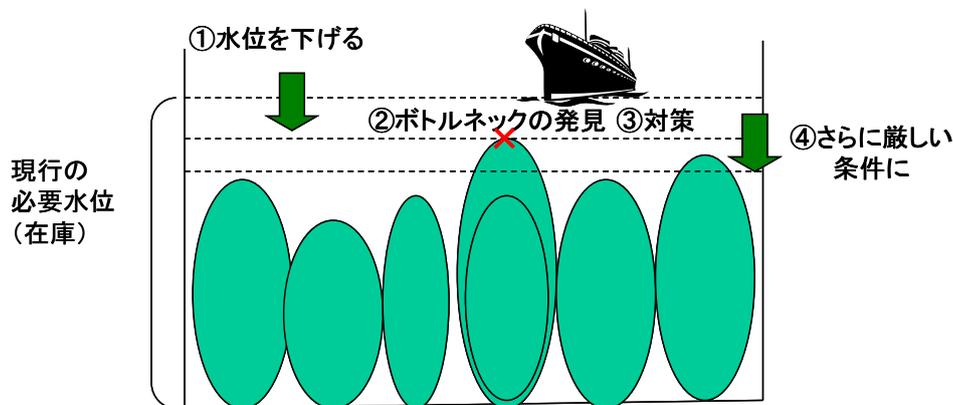
「平準化生産」とは、多品種にわたる最終車両組み立てラインにおいて、一品種の投入間隔を一定にすることで混流生産(1個流し)にするものであり、投入される部品の立場からは  $C_d=0$  にする外部からの変動の凍結に相当するものである。また3種の最終製品A、B、Cの生産量が2:1:1という単純な例で説明すれば、ABACというサイクルでラインに投入することで、例えばある工程での加工標準時間が品種によって異なっても、ABACのサ

イクルでは同一になり、 $C_0=0$  を可能にする。

2番目が「標準作業」の徹底である。標準作業とは作業順序と作業方法を一義的に定めて文書化したものであり、ある工程の作業者および作業時間の繰り返しごとのバラツキと作業者ごとのバラツキを極小化する手段である。すなわち、 $C_0$  を極小化するものであると言い換えることができる。

そして最後が「異常の顕在化による強制的体質強化」である。工場の操業を船の航行に喩えた在庫削減の例を用いて説明しよう。付図3に示すように、航行に必要な水位が在庫に相当する。在庫は本来、故障や不良、そして欠品等の変動から守るためにその存在意義がある。ここでは①それをまず下げることによって、異常、弱いところ、あるいはボトルネックを顕在化させるというストイックな方法である。②下げれば、どこかでこれまでの水位を決めていたボトルネックが顔を出し、船は座礁する。③すると、直ちにラインをストップさせても対策をとる。④次に、さらに水位を下げると、今度は別のボトルネックが顕在化され、これを繰り返すことによって在庫削減とともに体質強化を図ろうというものである。

これはとりもなおさず  $C_0$  の削減に相当するものである。顔を出したボトルネックが設備故障であれば、設備信頼性を高める対策がとられる。これは式(3)における可動率  $A$  を高め、さらには  $m_f$  を増大させ  $m_r$  を下げることによって  $C_0$  を下げることにつながる。また、不良であれば工程能力を高め、欠品であればシングル段取等の段取時間の削減によって  $C_0$  をゼロすることを目指すのが体質強化のねらいと考えることができる。



付図3 船の航行に喩えた異常の顕在化による強制的体質強化のロジック

以上のように、TPS は  $C_a$ 、 $C_0$ 、 $C_e$  といった変動をゼロにすることを目指した変動低減活動として帰結させることができる。これを通して工程や設備能力を最大限に活用する負荷率  $u$  を向上する取り組みを可能にできるし、リードタイム、WIP を抑えた上で TH を確保するリーンな体制が実現できることになる。

このような体制を構築し維持するには、よく「トヨタだからできる」という指摘があるように、問題解決や問題発見への感受性や「カイゼン魂」をもった従業員の存在と企業風

土が不可欠である。ましてやその途上で一時的な生産性低下にも耐えながらストックに継続するという時間のかかることでもある。このような部分が抜け落ちた経営手法としての JIT を、FP ではロマンチック JIT と呼んでいるように、本来の JIT は一朝一夕でできるものではなく、そのギブアップ宣言により、FP が生まれたとも言える。

それでは、なぜ日本のものづくりで JIT が生まれ、そして今後もものづくりの競争優位のリーディングエッジとして本物 JIT は君臨できるのであろうか。

### 3. 日本文化とわが国ものづくり

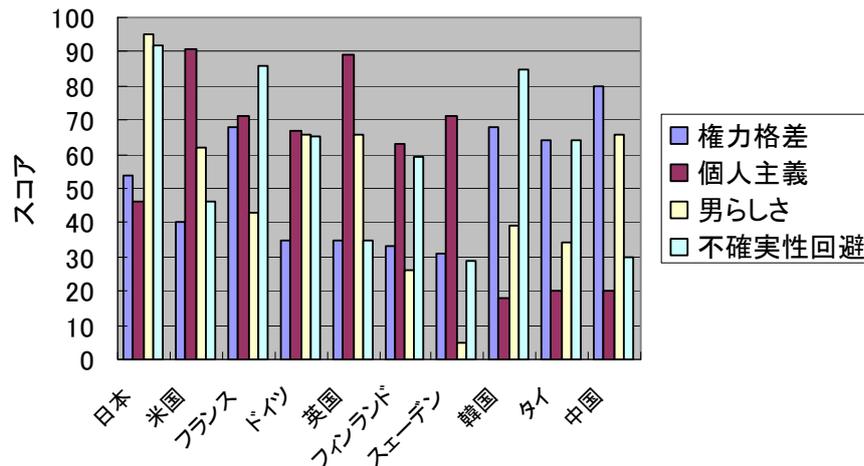
TPS が工場の中、そして外の変動をゼロにする変動削減活動であることを確認したが、TPS ではなくてもわが国のものづくりでは、工程の中の変動である不良や故障ゼロへ向けた改善活動は広く一般的に行われている。さらに遅れである納期遵守率には特に敏感で、99.9%でもさらに不十分という海外では考えられない高さになっている。このような現場における変動を許さないという性向は、わが国固有の文化にその源泉があるのではなかろうか。

国の文化の研究で知られる G. ホフステードによれば（『多文化世界』、有斐閣、1995）国の文化は、

- ① 権力格差 (PDI: Power Distance) ; 部下の上司への依存性、
  - ② 個人主義 (IDV: Individualism) ; 個人個人の結びつき度合、
  - ③ 男らしさ (MAS: Masculinity) ; 男女の役割分担の明確さ、
  - ④ 不確実性の回避 (UAI: Uncertainty Avoidance) ; あいまいに対する不寛容さ、
- の4次元で測定できるとし、日本を含む世界約50ヶ国にそれぞれの国の4つの次元のスコアを与えている。

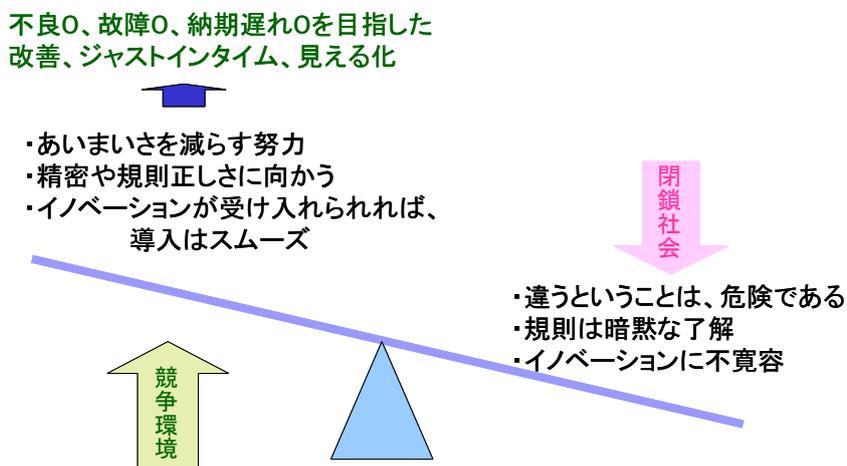
この文化次元の抽出と国へのスコア付けは、1970年頃に世界のIBMの社員に対する調査から得られたものであるが、現在に至るまで様々な研究者による再検証や、母集団の異なる対象等の追実験等を通して妥当性が今でも担保されているものである。加えて、ホフステードは、インターネット等の新技術が出現しても国の文化は収斂しない、そして何より重要な示唆は、この文化と有効な経営理論や手法には相性があり、例え、ある国で成功した経営手法も文化の異なる国では無効か、害をもたらす等、マネジメント手法と文化とのインタラクションを考慮することの必要性を指摘している。

付図4は、日本を含む世界10ヶ国の4次元の文化スコアの違いを示したものである。わが国の特徴として、男らしさ、不確実性回避が強く、権力格差、個人主義は中位（欧米に比べては、集団主義であるが、アジア諸国と比べれば個人主義）であることがわかる。加えて、そのパターンは、アングロサクソン、北欧は無論のこと、中国に代表されるアジアの近隣諸国とも大きく異なる。



付図4 文化の4次元のスコアの国による比較

4つの次元の中でビジネスや消費者行動に最も影響を与えるとされているのが、不確実性回避である。高不確実性回避の特徴として、「神経質でそわそわしている」、「忙しくしてないと気がすまない」の他、付図5の左に示すように、「あいまいさ（変動）を減らす努力がされる」、「精密さや規則正しさの方向に自然に向かう」、「イノベーションも、受け入れられれば導入はスムーズ」といった特徴が挙げられる。これこそ他国では真似できない不良、故障、遅れ等の変動ゼロを目指した改善努力の源泉と考えられる。



付図5 マーフィーを容認しない日本文化

他方で付図5の右側に示すように、オープンさに欠けた閉鎖社会にも陥りやすいという弱点も併せもつ。付図5のタイトルにあるマーフィーとあるのは、日本の改善アプローチをベンチマークしてそれを乗り越えるものとして考案された TOC（制約理論）で著名な E. ゴールトラットが用いた言葉で、生産の現場で厄介なこと、すなわち、故障、不良、遅れといった変動を意味する。ゴールトラットは、日本の改善アプローチをベンチマークする

一方で、次のような2点について批判、指摘をしている。

- ① 改善の対象として、企業のゴール (making money) を決めている制約条件の概念が不在 (例えば、付図3の例では在庫削減という対象は企業のゴールからはあくまで間接的なものである)。
- ② 実際に変動をゼロにするのは不可能であり、なのに変動の存在を認めた上で最適化を図るような運用ロジックがない。

このような観点がなく、ただひたすら変動ゼロを追求する改善活動だけに専心すること、すなわちマーフィーを容認しないことを前提に発展してきた日本のマネジメントに対する欧米先進研究の批判である。

①は絨毯爆弾的な組織的改善をしながらそれらが企業の収益に直結しない、そして②は最適化やリスクマネジメントが弱いという日本企業の弱点を見事に言い当てていると考える。しかしながら、一方、マーフィーの否定した変動ゼロを目指した改善活動ができるというのは、他国では真似のできないわが国ものづくり独自の強みである、といことの証とも言える。その意味では、維持することは無論であるが、上述の①、②の弱みを克服しながらうまく生かすことが、今後、ものづくりの競争力をさらに高めるために求められることであろう。

さらにこの高不確実性回避文化は、ものづくりとの係わりで言えば、後述する技術主義、「仕上げ」の美学、「匠の技」や飽きなき探求心を求める「・・・道」等の源泉でもあると思われる。

ところで、ここで注意が必要なのは、日本の高不確実性回避は、モノや時間といったものも見やすいものに対してであり、イデオロギーや思想、概念的な対象に対しては、むしろ寛容で、相対主義の文化であると言われる。海外の文物を無批判に受け入れる、社会を固定化する思想にしばられない等の特徴が挙げられる。このことについての日本文化論は多く存在するが、例えば、司馬遼太郎は“普遍的な思想よりも、技術にはしる日本文化”とあって、この二面性を指摘している。

ものづくりとの関係で言えば、あいまいでも現場が動くという反面、標準化が苦手、普遍化が苦手ということにもつながる。個々のオペレーションは優れていて、例えば、現場レベルでの5Sにはじまる「目で見える管理」は得意であるが、系列を除いてサプライチェーン全体という広範囲で“もともと見えにくい”対象の「見える化 (visibility)」、SCM (サプライチェーンマネジメント) になると、途端に無頓着か、弱くなる。SCM については見える化の手段であるITの活用に問題があり、それは標準化が苦手ということに起因しているのかも知れない。

また普遍化が苦手という点については、リーン生産方式そのものも米国がわが国自動車産業の実践をベンチマーク、体系化することによって生まれたものであり、日本自体の普遍化によるものではない。さらにその中に含まれるコンカレントエンジニアリングやサプライチェーンという概念についても同様である。また品質管理のTQC (全社的品質管理) の推進の仕方やそのコンテンツも、企業の実践ベストプラクティスを積み重ねることによって形成されたといっても過言ではない。それが米国行きシックス・シグマになるとそのコ

ンテンツそのものがあたかも商品のように標準化されたものとなって行くのである。

なお、日本人がなぜモノに対して高不確実性回避文化で、思想やイデオロギーに対しては逆に寛容であるかについては、内田樹氏による『日本辺境論』（新潮新書、2009）に求めることができるかも知れない。それは、華夷秩序における「辺境人」が日本人のメンタリティであり、起源から遅れ相対的劣位の感情からくるいつも未完成という不安・感性から、仕上げの美学、不良や故障を許さない飽くなき探究心が育まれた。一方、思想やイデオロギーについては、いつも「世界の中心」がどこかにあり常に外から新しいものを受け入れることに慣れ、バブル崩壊前に Japan as No. 1 と言われた頃に経験したように、先行者の立場から普遍化し他国を糧道するような状況になると思考停止に陥るというものである。あくまで私見であるが、このような解釈もできるのではなかろうか。[了]