

研究委員会 コンクリートの生産・供給・施工システムの革新に関する研究委員会

野口 貴文*1・細田 暁*2・千々和 伸浩*3・青木 涼*4・塚 孝司*5

要旨：近未来社会において、コンクリート関連業界をサステイナブルな社会の構築に資する業界へと転換することを目的として、コンクリートの生産・供給・施工システムに焦点を当て、業界の転換の阻害要因を明らかにするとともに、資源が急激に減少する時代におけるサステイナブルな社会を構築するためのコンクリート技術とシステム、コンクリート産業を取り巻く社会環境の変化（人口減少）に対応する次世代サプライチェーンのあり方、および次世代施工システムや社会状況の変化に適合する生コンクリートの生産・供給システムの革新に関する検討を行い、それぞれについて具体的な提言を行った。

キーワード：資源枯渇, 人口減少, CO₂, 規格・基準, 供給・販売, 製造・運搬, 強靱化, 品質確保

1. はじめに

コンクリートに関わる技術は、長い時間をかけて、セメントの製造技術の高度化・省エネ化、コンクリートの製造・施工技術の効率化、混和材の多様化、化学混和剤の高性能化、コンクリートの高性能化、そしてこれらを支える法制度・規格・基準・指針類の整備に支えられ、進歩を遂げてきた。それに伴い、コンクリートを用いる構造物の設計・維持管理体系や施工方法、並びに構造計算手法も著しく発展してきたが、現在においてもなお、建設分野、特にコンクリートの生産・供給・施工分野は、労働集約型産業の域を脱し切れていない。加えて、工場で製造された半製品状態の生コンクリートには、最終的な利用場所である建設現場に運ばれて最終製品である構造物となるという独特のマテリアルフローや日本特有の取引システムが存在する。将来、コンクリート関連業界において、生産・供給・施工分野の技術的発展、サステイナブルな社会構築への貢献、および生産効率の高い資本集約型産業への転換が求められることを考えると、固定化した従来の技術・システム・制度・商習慣は、それらの阻害要因になることは明らかであり、社会の急激な変化に対応するための変革が必須となる。

そこで、本研究委員会では、将来において、コンクリート関連業界を労働集約型から資本集約型へと転換するとともに、サステイナブルな社会の構築に資する業界とするための提言を行うことを目的として、特にコンクリートの生産・供給・施工システムに焦点を当て、①資源が急激に減少する時代におけるサステイナブルな社会を構築するためのコンクリート技術とシステムに関する検討(WG1)、②コンクリート産業を取り巻く社会環境の変

化（人口減少）と次世代サプライチェーンのあり方の検討(WG2)、および③次世代施工システムや社会状況の変化に適合する生コンクリートの生産・供給システムの革新に関する検討(WG3)を行い、コンクリート産業の今後の方向性を明確にするとともに、具体的な対応に向けた提言を行った。委員会名簿を表-1に示す。

表-1 委員会名簿

役職	氏名	所属
顧問	塚孝司	日本サステイナビリティ研究所
委員長	野口貴文	東京大学
幹事	WG1 主査	細田暁 横浜国立大学
	WG2 主査	千々和伸浩 東京工業大学
	WG3 主査	青木涼 會澤高圧コンクリート
委員	閑田徹志	鹿島建設
	木ノ村幸士	大成建設
	國枝陽一郎	首都大学東京
	古賀裕久	土木研究所
	小林寿子	東日本旅客鉄道
	齋藤淳	安藤ハザマ
	清水義宗	コンクシッドシステム
	鈴木敏夫	建材試験センター
	田村雅紀	工学院大学
	並木憲司	大林組
	西村正	GCP ケミカルズ
	早川友幸	セメント協会
	藤野和雄	東日本高速道路
	間瀬利明	国土技術政策総合研究所
	武藤正樹	建築研究所
吉森和人	全国生コンクリート工業組合連合会	

2. 生コンクリートの生産・供給システムの課題と革新に向けた提案

2.1 活動目的と成果の概要

コンクリートの生産・供給を規制する各種システム

*1 東京大学 大学院工学系研究科 教授 博（工） （正会員）

*2 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 教授 博（工） （正会員）

*3 東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授 博（工） （正会員）

*4 會澤高圧コンクリート（株） アイザワ技術研究所 所長（正会員）

*5 日本サステイナビリティ研究所 代表 工博（フェロー会員）

(JIS 及び建築基準法等)を調査分析し、それらの規制項目の本質的意味を明らかにして、それらが社会変化や対応すべき技術発展の阻害要因になっていないかを分析した。その上で、様々な社会変化や技術発展状況等から、阻害要因の緩和策を検討し提案する。

2.2 JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の製造方法に関する課題と提案

2.2.1 製造設備で規定されるミキサ及び運搬車

(1) 技術発展の阻害要因

北海道札幌市近郊において平成 10 年から事業を展開しているネットワーク型の小型自動化プラントを使用した生コンクリートの製造運搬システムを例にとり、本システムの運用上課題となった JIS A 5308 の製造設備で規定されるミキサ及び運搬車について調査を行った。このシステムは、ネットワーク型の小型自動化プラントを多数展開し、同時多発する小規模建築物用基礎の生コンクリート納入現場に、網羅的に対応することを狙った事業モデルである。小型自動化プラントは材料の貯蔵と計量設備で構成され、生コンクリートの練混ぜと運搬はトラックミキサを採用している。

平成 12 年建築基準法第 37 条の改正に伴う告示第 1446 号の規定により、主要構造物に使用されるコンクリートは、JIS A 5308 以外のものは国土交通大臣の認定を得ることが必要となった。この法改正により、それまで JIS 外生コンでも使用可能であった一般的な木造戸建住宅の基礎においても適用されることになり、本システム運用上の大きな課題となった。JIS では、練混ぜは固定ミキサ、運搬車はトラックアジテータに限定しているためである。

(2) ミキサと運搬車に関する JIS 規定の変遷

JIS A 5308 は、1953 年(昭和 28 年)に ASTM を参考に制定され、その後 2019 年 3 月の改正まで 14 回の改正(追補)が行われてきた。1953 年(昭和 28 年)の制定では、ミキサは固定ミキサとトラックミキサ、運搬車はトラックミキサとトラックアジテータのそれぞれ 2 種類が規定されていたが、1978 年(昭和 53 年)の改正でミキサ及び運搬車ともトラックミキサが削除され、ミキサは固定式、運搬車はトラックアジテータの 1 種類と限定された。トラックミキサがミキサの種類と運搬方法から削除された理由は、当時においてトラックミキサが全国的なミキサの分布でも非常に少なくなったことが原因であり、トラックミキサの練混ぜ性能上の問題ではないことが改正時の解説文から推測される。

(3) 阻害要因の緩和策の提案

トラックミキシング方式は、ASTM 規格として現在でも欧米諸国で広く運用されおり、コンクリートの練混ぜ及び運搬性能に問題はないものと推測される。よって、JIS A 5308 のミキサ及び運搬車に関する製造規定を制定

時の規定に戻し、トラックミキサを再度規定することを提案する。

トラックミキシング方式が JIS に規格化されると、将来の生コンクリート工場数の減少・集約化に伴って生じると懸念される「供給空白地域」への有効な対策となる可能性が高い。1.5 時間以内とする現行 JIS の運搬時間規定を超える地域へ生コンクリートを供給しなければならない場合には、トラックミキサを使用した建設現場でのドライミックス方式の採用が必要になるものと予想される。

2.2.2 材料の計量で規定される計量方法

(1) 技術発展の阻害要因

全国の生コンクリート工場で汎用的に使用できる混合セメントは高炉セメント B 種に限られており、その他の混合セメントを使用したコンクリートが使用されることは非常に少ない。CO₂ 排出量の低減のためにも構造物に必要な性能に応じて、混合セメント A 種、B 種および C 種を選択できれば、混合セメントの使用率を増やすことができると考えられる。

全国の生コンクリート工場の既存設備を活用し、需要に応じて混和材料の置換率を適宜変化できることが望ましいが、JIS では異なる材料、例えばセメントと混和材料の累加計量を認められておらず、混和材料単独の計量装置を設備していない生コンクリートプラントでは、適用できない状況となっている。

(2) 累加計量に関する JIS 規定の変遷

JIS A 5308 における材料計量に関する規定の変遷を調査した。初版(1953 年)では、「セメントを重量で計るときは、他の材料を計るのに使う容器と区別して計らなければならない。」と規定されている。第 1 回改正(1968 年)で「セメント・骨材・水および混和材料は、それぞれべつべつの計量器によって計量する。」と規定が変更された。また、第 1 回改正時に執筆された規格解説論文によると、「やむを得ない場合には、フライアッシュとセメントの累加計量も認められることになっている。」とされていることから、当時はセメントと混和材料の累加計量を認める運用がなされていたようである。

その後、第 4 回改正(1985 年)及び第 7 回改正(1993 年)において、骨材ならびに水についての累加計量が認められるようになったが、セメントと他の材料との累加計量は JIS 制定当初から認められていない。

(3) 阻害要因の緩和策の提案

コンクリート構造物の性能確保と CO₂ 排出量低減を両立させるために、生コンクリート工場が有する既存設備を利用して、混和材料による普通ポルトランドセメントの置換率を適切に変化させたコンクリートの製造方法(多品種少量製造)を以下に提案する。

1) 高炉セメント B 種の貯蔵設備に混和材料単味を貯蔵する。

従来、高炉セメント B 種を貯蔵していた貯蔵設備に、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを混和材料として貯蔵する。そうすると、既存の多くの生コンクリート工場で、普通ポルトランドセメントと混和材料を練混ぜ時に混合できるようになり、必要な性能に合わせて混和材料の置換率を適宜変化できるため、混和材料の使用量の拡大が期待できる。また、セメント工場での高炉セメント B 種の製造が不要となる。そのため、セメント工場への高炉スラグ微粉末の運搬や普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の混合に伴って発生する CO₂ の排出低減効果も期待できる。

2) セメントと混和材料の累加計量を JIS 規定で可能とする。

セメントと混和材料がそれぞれ所定の精度で計量でき、印字記録等の確認が可能であれば、個別計量、累加計量に関わらず、同じ品質のコンクリートが製造できるものと考えられる。よって、累加計量を認める JIS 規定の改正を提案する。なお、単用量が極端に異なる材料を累加計量する場合は、既存の設備では材料単独についての計量精度を確保することが困難な場合があることから、計量器の計量精度を満足できる範囲で混和材料の置換率を決定する必要がある。

2.2.3 運搬で規定される運搬時間

(1) 技術発展の阻害要因

生コンクリートの需要と供給（出荷量と工場数）は、1990 年をピークにそれ以降減少が続き、近年の実質 GDP 成長率の鈍化、建設投資の低迷や人口減少に影響を受けて生コンクリート需要は低位で推移している。今後も需要の低迷が続けば、将来において工場の閉鎖を余儀なくされ、生コンクリート需要の少ない地域においては、「供給空白地域」の発生を招くことが危惧される。将来において生コンクリート産業の使命ともいえるべき「安定供給」を遂行するためには、現行 JIS で規定されている運搬の制限時間の延長が必要である。

(2) 運搬の制限時間に関する JIS 規定の変遷

生コンクリートの 1.5 時間の運搬時間の制限は、JIS 初版(1953 年制定)の「練りませと運搬」において規定された。初版以降、生コンクリートの運搬時間についての改正は行われていないが、これまで運搬時間が不明確であったため 2013 年の追補改正では、生コンクリート生産者の責任範囲を考慮した運搬時間を明確化し、2014 年の改正では、運搬時間を「運搬時間は、生産者が練混ぜを開始してから運搬車が荷卸し地点に到着するまでの時間とし、その時間は 1.5 時間以内とする」と定義し、運搬時間の限度は、購入者と協議のうえ変更することがで

きるとしている。

(3) 阻害要因の緩和策の提案

1) 将来の生コンクリート工場数の推計(2045 年まで)

将来の生コンクリート工場数の推計を図-1 に、推計プロセスを図-2 に示す。生コンクリートの工場数は、2015 年実績の 3,406 から 2045 年には 2,769 にそれぞれ約 20%減少すると推計される。

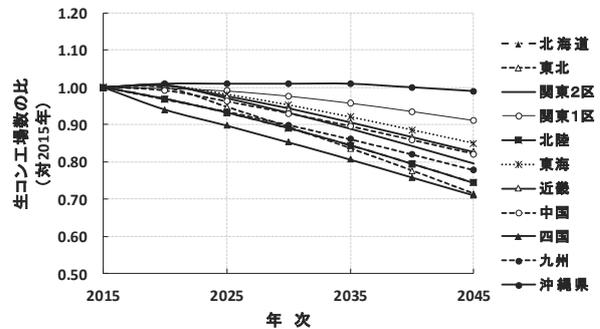


図-1 将来の生コンクリート工場数の推計(地区平均)

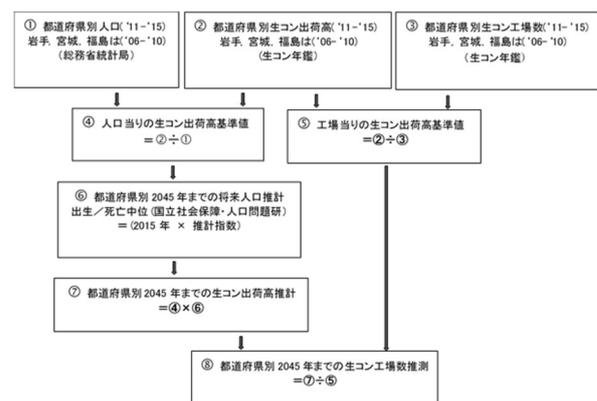


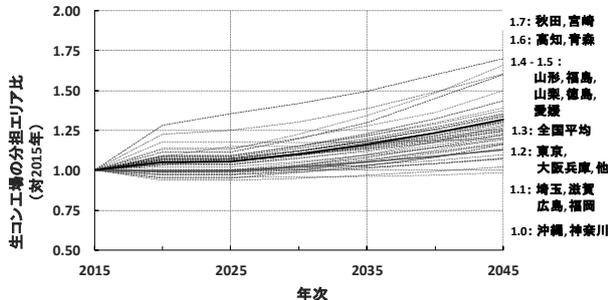
図-2 将来(2045 年まで)の生コンクリートの出荷高及び工場数の推計プロセス

2) 遅延性の化学混和剤(減水剤遅延形など)の適切な活用による運搬時間の延長

都道府県別の推計生コンクリート工場数と可住地面積から将来の生コンクリート工場の供給エリアを試算した結果を図-3 に示す。将来の生コンクリート工場の供給エリアは年々増加し、2045 年における供給エリアの拡大を 2015 年に対する比で示すと、全国平均では 1.3 倍に、大都市圏以外では 1.5 倍以上となる地区が現われ、生コンクリートの運搬時間が現行 JIS の 1.5 時間を越える地区が発生することが推測される。

その対策として、遅延性の化学混和剤(減水剤遅延形など)の適切な活用によって運搬時間を現行の 1.5 時間から 3 時間程度までに延長することを提案する。近年、化学混和剤技術の発展は著しく、生コンクリートの凝結時間の調整を含め、フレッシュ性状を損なうことなく運搬時間を延長することは可能であると思われる。化学混

和剤を適切に活用し、生コンクリートの運搬時間を延長できる環境（規格・基準・規準）を整備することにより、「安定供給」を維持しつつ工場の集約化を図り、需給バランスの健全な生コンクリート産業を再構築することが可能になると考える。



図一三 将来の都道府県別生コンクリート工場の供給エリアの推計

2.3 建築基準法によるセメント系新材料の適用の課題と提案

(1) 基準法におけるコンクリートの適用に関する現状
建築物を設計、施工するに際し、日本では建築基準法（以下基準法と呼ぶ）を中心とする法律の体系があり、これらを遵守する必要がある。コンクリートは、基準法第 37 条の内容を詳細に明記した告示第 1446 号に定める指定建築材料であり、適合する規格として JIS A 5308 レディーミクストコンクリートが指定されているが、適合しないコンクリートでも大臣認定を取得することで、基準法に則り工事に使用することができる。ここで適合とは、レディーミクストコンクリート工場から出荷された際に JIS マークが表示されたものに加え、当該 JIS 規格の内容に当てはまると認められるものが含まれる。

コンクリートに関して基準法 37 条第二に示される大臣認定を取得するためには、一般にはレディーミクストコンクリート工場が特定され、使用される原材料、配合、品質管理方法などが厳密に定められていることが前提条件となる。JIS A 5308 の範囲を外れる品質、例えば高強度のコンクリートを使用する場合には大臣認定が必須となる。また、基準法 37 条に基づくコンクリートの大臣認定は、JIS A 5308 をベースに審査を行うことが原則となる。

基準法 37 条に基づく大臣認定を受けるコンクリートの代表例が高強度コンクリートや高流動コンクリートである。このような大臣認定を受けるには、各指定性能評価機関が定める建築材料の品質性能業務方法書に従い、コンクリートの品質基準に関わる材料特性、その統計的データ内容など、相当量の認定資料が必要となる。従って、大臣認定を取得するには、数多くの事例の蓄積があり、相当程度に大臣認定までの審査過程がルーティン化されている高強度コンクリートにおいてでさえ、要する

コスト、労力、時間についての申請者の負担は大きい。

(2) 指定建築材料でないセメント系新材料の適用について

セメント系新材料の主要構造部材等への適用について、例えば土木分野で適用が進んでいる超高強度繊維補強コンクリートを建築物の主要構造部材等に用いようとする場合には、粗骨材を含まないことからコンクリートではないと判断される可能性が高いため、基準法第 37 条の第二号による大臣認定を受けることは難しいと考えられる。基準法第 37 条の大臣認定が取得できなければ、一般建築物の主要構造部材等に普遍的にこれら新材料を適用する道は事実上閉ざされていると言える。

しかし、これら新材料を主要構造部材等に使用できないということではなく、個別建物ごとの性能評価が必要な基準法第 20 条によるルートを取ることも可能である。これは、基準法 37 条の指定建築材料に含まれない新材料を建築物に使用すべく、基準法第 37 条に基づく大臣認定とは別に基準法第 20 条に特例として設けたものである。基準法第 20 条によるルートでは、60m を超える高層建築物では必須となる「個別建物」の性能評価において、当該建物を適用対象に限定した構造材料を含めて審査することで使用できるように設けられた。従って、このルートでは、当該建築物の地震時における時刻歴応答解析を行うことが前提となり、一般に確認申請に際し時刻歴応答解析を行わない中低層建物でこのルートを取ることは、通常に比べ過大な設計となることが考えられる。

(3) 基準法における新材料の適用に関する課題と提案

前述の繊維を用いたセメント系新材料のように、指定建築材料以外を建築物の主要構造部材等に用いることには、法規上の制限が大きい。指定建築材料を対象とする基準法 37 条第二に関し、大臣認定を受けるための性能評価の方法については、よく整備されているのに対し、指定建築材料でないセメント系新材料を用いるための性能評価の方法は必ずしも確立されているとは言えず、今後の環境整備の必要性が大きいと考えられる。高層建物や免震建物などを除く、時刻歴応答解析による構造性能評価が必ずしも適当ではないと考えられる一般建物案件に適用することを念頭に、指定建築材料に含まれないセメント系新材料について、材料単体での性能評価と大臣認定の枠組みについての合理的な体系を構築し、新たな展開を可能とすることが重要となる。

3. 資源が急激に減少する時代において持続可能な社会を構築するためのコンクリート技術とシステム

3.1 活動目的と成果の概要

我が国の明治以降の近代化、第二次世界大戦後の復興、

及び昭和時代の高度成長期においてコンクリートのインフラが果たした役割が極めて大きいことは言うまでもない。平成はデフレーションの時代と総括することも可能と思われるが、阪神・淡路大震災、東日本大震災や相次ぐ豪雨災害等で国土や社会の脆弱性が浮き彫りになった時代でもあった。これからの令和以降の時代において、我が国はさらに様々な危機に直面すると思われる。その中で、確実に襲いかかり、社会の様々なシステムの大転換を余儀なくされると思われるのが、資源の問題である。これまでふんだんに人類が浪費してきた様々な資源が急激に減少するステージに入り、極端な場合は早期に枯渇することも懸念される。ここでは、この人類が直面する最大級の課題と言っても過言ではない資源の問題を念頭に置き、厳しい制約条件の中で、強靱で豊かな、サステナブルな社会を構築するために、コンクリートが果たすべき役割、コンクリートに求められる技術とそれを活かすためのシステムについて調査分析した結果を示す。

3.2 資源の観点からの我が国の現状分析

3.2.1 セメント原料としての石灰石や骨材の動向

(1) セメント原料としての石灰石

石灰石の用途は、セメント用、コンクリート骨材用、道路用、鉄鋼用、石灰用などがある。石灰石鉱業協会の公表資料によれば、2016年度、石灰石は日本全国で年間約1億4千万トン出荷されており、セメント用に44.1%、コンクリート骨材用に21.3%、道路用に2.3%、鉄鋼用に13.8%、石灰用に6.6%が使用されていた。

資源エネルギー庁の埋蔵鉱量統計調査結果によると、2009年時点の可採鉱量は271億トンであり、石灰石鉱業協会の公表資料から計算した2009年度から2016年度までの平均生産量は1億4千万トンであった。そのため、近年の生産量が継続した場合の可採予想年数は約186年（2016年基準）となり、約200年後には石灰石は枯渇する概算となる。我が国の石灰石は、地理的条件から純度の高い高品質であり、それによって副産物・廃棄物のセメント原料としての活用も可能になっている。唯一自給可能な貴重な鉱物資源である石灰石をセメント原料として有効に活用し、強靱で長寿命なインフラを建設することにより、サステナブルな社会を目指すことは、我が国の技術者たちの使命と言ってよいであろう。

(2) 骨材

骨材は原材料単価が安い、輸送コストが大きいという側面がある。したがって、地産地消が理想であるといえる。骨材事情は地域によって異なるが、天然骨材資源の乏しい近畿、中国、四国地方などでは、過去、瀬戸内海産の海砂に大きく依存してきた。しかし、近年多くの県で海砂の採取が禁止され、さらに2007年4月から中国が砂の海外輸出を禁止したため、骨材の逼迫度は高まっている。近年は川砂利や陸砂利・山砂利に代わり、砕

石への依存度が増加する傾向が見られる。骨材事情が逼迫してきていることはデータからも明らかであり、この状況は世界各国でも顕在化しつつある。骨材資源の節約と、様々な骨材を用いた場合のコンクリートの品質確保と構造物の耐久性確保に関するコンクリート技術が求められる。

3.2.2 資源枯渇・減少の問題と炭素価格¹⁾

コンクリートの材料に限らず、あらゆる資源について枯渇・減少の懸念がある。資源の消費を抑制することは人類のサステナビリティのために不可欠である。そのため的手段として、適切な炭素価格を導入すれば、世界規模での低炭素経済を実現できると考えられる。税収は大幅に向上し、他の税金を削減することもできるであろう。

特に、炭素税の導入は、企業が設備投資を行うことから喫緊の問題である総需要の不足を軽減し、税収を増やし、環境を改善すると考えられている。自主的協定による場合でも、炭素価格を導入していない国に対して国境で課税し、炭素排出削減に協力できるようにすればよく、こうした税制はWTOでも法的に認められると考えられる。

ただし、単純に炭素税を導入すべきではなく、基幹産業の健全な発展等も含め、バランスの取れた賢明な仕組みづくりが求められる。また、CO₂排出を抑制するための技術開発・革新が重要性を増すのは言うまでもない。

グリーンファンドは、温室効果ガス排出を抑制したり、起こった影響に適応するための資金を賄うもので、発展途上国がそうしたことを行う経済的負担を軽減するための基金である。先進国が炭素価格の導入によって得た収入のうち、たとえば20%程度でもグリーンファンドに回せばよい。豊かな国々は貧しい国々が自主的協定に加わり、炭素価格を他の国々と同等に設定した場合にのみグリーンファンドから資金を提供することにすれば、私たちがプラネタリーバウンダリーの範囲内で生きていくことは可能になる。

3.2.3 電力の安定供給と水力発電の役割

サステナブルで安定的な電力供給は我が国に限らず、文明社会を維持する上で必須である。化石燃料の急激な減少が襲い掛かるこれからの時代においては、我が国も、国土条件、技術力、グローバルな経済動向等をにらみながら、時代に応じた電源のベストミックスを模索する必要がある。

太陽光・風力は装置が働く時間が少なく、火力発電や原子力発電に比べて希薄なエネルギーであり、バックアップ電源なくして独力では消費者に安定した電力を送ることができない。現状でもすでに、80GW程度の電力の最大需要に対して、供給設備は2.7倍程度と極めて多くの過剰設備を抱えている状況であり、火力発電の採算が悪化する問題も生じている。問題の本質を明らかにし、合理的な対応が求められる

る。

資源の制約条件が極めて厳しくなることと、深刻な CO₂ 問題等により、将来、我が国では原子力発電の適切な活用と水力発電の増強が不可欠であると考えられる。2018 年 9 月に発生した北海道全土のブラックアウトは、泊発電所が稼働していれば生じなかった可能性が高いが、世論では原子力発電の話題をすることすら許容されない空気が蔓延しており、現実社会をマネジメントするための冷静な議論がまずは求められると言えよう。

水力発電は、純国産エネルギーであり、少しの改良により現在の水力の何倍もの潜在力を引き出せるため、我が国が積極的に投資すべき分野である。以下に、竹村公太郎氏の主張をまとめる²⁾。

- ・河川法第一条の目的に「エネルギー活用」を加え、半分程度しか貯まっていなかったダム湖の水位を上げたり、多目的ダムの運用を変更して、エネルギーを活用すべき。
- ・日本のコンクリートダムは極めて強靱につくられており、半永久的に純国産のエネルギーを与えてくれる。
- ・既存のダムの嵩上げにより、水源地域に払っていただく犠牲も極めて小さく、電力増が可能。

竹村氏の試算では、日本のダムの潜在的な発電能力を引き出せば、電力需要の 30%程度を供給可能とのことである。

3.3 資源の節約と持続可能な社会のためのコンクリート建造物の強靱化

資源が急減していく時代においては、資源の節約は当然であるが、新設する建造物や膨大な既設建造物の強靱化・長寿命化の重要性はこれまでより格段に高まる。長寿命なインフラの建設は、ストック効果により社会の生産性向上にも多大な寄与をする。本委員会では、建築、鉄道、道路構造物、舗装における資源の節約と強靱化の取組みについて調査して取りまとめた。

3.3.1 サステイナブルな建築システム

巨大地震や地球温暖化問題に起因する安定した資源環境保全への防備が急務となっている。首都直下地震や南海トラフ沖地震など、特定災害後の建築物に関するがれき発生量や復旧回復性等の分析がされ始め、その程度に応じた社会・経済システムをも含む予防保全策と事後回復策の実効性が問われている。現状、発災後から課題となる建築物等からの災害がれきの処理に関しては、東日本大震災で 2200 万トン越の量が発生したのに対し、首都直下地震ではその 5 倍程度、南海トラフ地震では 11 倍程度と甚大な発生量が想定されており、災害がれきの迅速処理や有効利用が、早期の復旧・復興に向けた鍵となり、その取組み自身がサステイナブルな建築システムの要因として認識されつつある。

東日本大震災では、災害がれきのうち無機系材料に関しては、埋込み材やコンクリート用材料等へ積極活用さ

れ、土地利用と資源循環の双方に影響する環境インパクトを積極的に軽減する役割も示されたが、建築躯体への利用拡大にはまだ課題は多い。今後の新たな対策に、災害に対応できる建築物と都市基盤全体の機能やシステムの保全性を高めることは命題となることから、未然防止的な対処を可能とする仕組みとして、建築物と都市全体の維持保全システム全体に対する頑強性 (Robustness) や冗長性 (Redundancy)、更にはリスクと同義で捉えられる脆弱性 (Vulnerability) や、それらを含む広義の回復性 (Resilience) に関わる様々な対策を具体化する必要があり、これらの最新動向を調査し、取りまとめた。

3.3.2 強靱で耐久性に優れた資源を節約する鉄道システム

大地震に対して強靱で、耐久性に優れた鉄道構造物とし、かつ化石資源の消費の減少にも貢献する JR 東日本のサステイナブルな鉄道システムを構築するための革新的な取組みをまとめた。

新潟県十日町市・小千谷市の、水力を電源とした JR 東日本信濃川発電所は、千手発電所・小千谷発電所・小千谷第二発電所の 3 発電所の総称で、宮中取水ダム、3 つの調整池(浅河原調整池・山本調整池・山本第二調整池)、河岸段丘の高低差を利用した水路トンネルにより、信濃川水系から取水した水を利用し発電している。ここで発電した電気は、首都圏や上越線、新幹線の電車や鉄道施設などに送られ、毎日の朝夕のラッシュアワーの需要増に対して調整池の水位を上昇することで対応している。JR 東日本の使用電力の 20%程度を担っており、1931 年以降の水力発電開発において建設されたコンクリート構造物が、現在でもクリーンエネルギーを供給し続けており、供用しながら維持管理できる維持管理性にも配慮した冗長性も備えた総合システムからは、我が国のサステイナビリティを考える上で学ぶことが多い(図-4)。



図-4 JR 東日本信濃川発電所

阪神淡路大震災以降の鉄道コンクリート構造物の耐震補強の変遷、革新的な耐震補強工法の技術開発や、新設構造物の耐震性を大幅に向上するための取組みを行っている。また、環境負荷低減と ASR 抑制対策を兼ねた高炉セメントやフライアッシュの利用促進を含めた、新設構造物の長寿命化と、既設構造物の大規模改修を行っている。

3.3.3 道路コンクリート構造物の品質・耐久性確保システム

山口県が構築したコンクリート構造物のひび割れ抑制・品質確保システムは、施工の基本事項の遵守が達成される仕組みに基づいて、施工記録を蓄積したデータベースを設計・施工段階で活用し、実構造物でのひび割れ抑制に成功し、表層品質全体の向上も確認された革新的なシステムである。同様のシステムが群馬県でも構築されており、各地域のコンクリート構造物の長寿命化、産官学の技術者の技術力向上、技術基準類や工事成績評定等のシステムの継続的な改善などが期待される。

山口システムを応用する形で、東北復興道路の品質・耐久性確保の先駆的な取り組みが推進されている。凍結抑制剤を大量散布する供用環境で、特に道路橋 RC 床版の上面からの土砂化を含む深刻な劣化が顕在化しており、**図-5** に示す高耐久化のための対策の立案と、ひび割れ抑制対策、施工の基本事項の遵守がシステム化され、試行工事で実践されている。凍結抑制剤を散布する環境では、複合劣化を防止するために高炉セメントあるいはフライアッシュの活用が不可欠であり、環境負荷低減と耐久性向上を兼ね備えたシステムである。

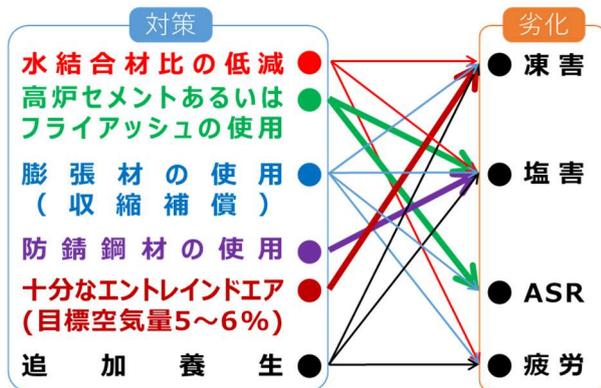


図-5 RC床版の高耐久化対策（東北復興道路）

3.3.4 コンクリート舗装の現状と今後に期待される役割

我が国ではアスファルト舗装の割合が極めて高いが、石油資源の節約や維持管理費の削減のニーズからコンクリート舗装の長所が見直され、今後その割合が増える可能性が高い。

高速道路でのコンクリート舗装のシェアは約 7%程度（2016.12 現在）である。高速道路では、我が国初の高速道路である名神高速道路のトンネル部で初めてコンクリート舗装が採用されて以来、各種試験施工やそこで得られた課題に対する技術・施工法の開発を経て、コンポジット舗装（**図-6**）に示す連続鉄筋コンクリート版+アスファルト舗装）というコンクリート舗装とアスファルト舗装の両方の長所を兼ね備えた道路舗装が開発され、新東

名高速道路及び新名神高速道路に大々的に施工された。本委員会では、コンポジット舗装の開発の経緯について取りまとめた。その中で、コンクリート舗装のすべり抵抗性の向上や、騒音・粉塵の問題の解消についての取組みを整理した。さらに、コンクリート舗装の耐久性が高いという利点とアスファルト舗装のすべり抵抗が高く、騒音・振動が少ないという利点を兼ね備えたコンポジット舗装の開発経緯をまとめた。

また、アスファルト舗装、コンポジット舗装、コンクリート舗装の特徴を整理し、コンクリート舗装に関する技術的課題についても整理した。

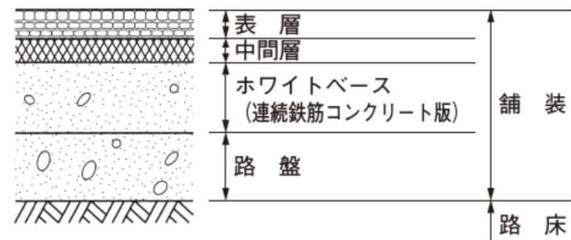


図-6 高速道路のコンポジット舗装の構成

3.4 コンクリート解体材・再生骨材の活用によるヴァージン資源の延命

過去には、コンクリート構造物を解体する際に発生した解体材の処分場不足が社会問題となり、解体材の再利用が研究された。その結果、コンクリート解体材の再利用率は 99%以上と高水準に達している。ただし、そのほとんどが路盤材への再利用であり、今後も引き続き高い再利用率を維持できるかが課題である。一方、骨材の状況を見ると、地域によっては良質なヴァージン資源を十分に確保することが難しく、他地域から輸送した資源を活用している。持続可能な社会を構築するには、コンクリート解体材を再生骨材としてコンクリートに再利用することが重要と考えられる。

再生骨材を用いたコンクリートに関しては、JIS が整備されるなど技術面では検討が進んでいるが、実際の活用は十分ではないのが実情である。そこで、再生骨材の活用をはかるためのヒントを得る目的で、海外諸国における廃棄物に関する法整備や、再生骨材に関する技術基準、活用事例等を調査して我が国の状況と比較した。その結果次のような知見を得た。

欧州では、廃棄物枠組指令（2008/98/EC）に基づき 2020 年までに建設廃棄物の 70%以上を再利用、リサイクル及び回収するとした目標を設けている。また、再生骨材の有効利用を図るインセンティブとして、欧州各国では埋立税を導入している。2017 年 12 月時点で、EU 加盟国 28 カ国中 24 カ国で埋立税が導入されており、18 カ国で種目によって埋立て禁止令を施行している。ただし、

埋立税の税率は、国や州・地方自治体、また種目によっても様々である。

再生骨材に関する海外の技術基準では、再生骨材と天然骨材の混合使用を想定した記述が一般的であり、コンクリートを使用する環境や強度ランクに応じて混合率を変更するなどの規定がある点で、再生骨材コンクリートとヴァージン材を用いたコンクリートを明確に区別している我が国の基準と異なっている。

再生骨材の活用状況については、海外各国でも我が国と同様に路盤材としての活用が大部分で、構造物への活用は限られているものと考えられる。

3.5 サステナブルな社会のためのコンクリート分野における情報の活用

世界各国がしのぎを削る中で、生産性を向上し、サステナブルな社会を構築するためには、情報の活用と、重要な情報のデータベース化が必要である。

本委員会では、コンクリート分野における情報の活用の事例について調査し、取りまとめた。

コンクリート生産性向上検討協議会におけるフレッシュコンクリートの情報の電子化とその活用による検査の合理化や、その制度化を視野に入れた試行工事が行われており、その状況を取りまとめた。

山口県のひび割れ抑制システムは、適切な施工が行われた施工記録を蓄積したデータベースを活用することで、事前の温度応力解析を不要にした生産性向上の側面もある。質の高いデータベースの構築と利活用によるメリットについて取りまとめた。

トレーサビリティを実現するシステムの一つとして、IC タグを用いた生コンクリート品質管理システムがあり、半製品として納入する生コンクリートの品質の証明や、責任所在の明確化を実現することで安心・安全を提供できる可能性について取りまとめた。

4. 人口減少がコンクリート供給体制に与える影響に関する仮想的検討

4.1 本検討の目的

今日、人口減少/高齢化率の増加、都市への人口集中と地方の過疎化、IT をベースとした遠隔コミュニケーション技術・自動化運転・AI 技術の台頭など、これまでと全く異なる社会状況が迫りつつある。コンクリートは、これからも主要建設材料であり続けられると思われ、コンクリートの生産・供給システムの在り方は、未来の国土の形にも深く関係すると考えられることから、仮想的に設定した未来の状況において、コンクリート生産・供給体制がどうあるべきか検討することとした。未来は必ずしも現在の延長線上にあるわけではなく、国土計画的な意思や災害、海外情勢など、様々な要因に応じて形を変えていく。従ってここでは未来像を絞った形での検討

は行わず、可能な限り客観的に収集した情報に基づき、それから導かれる可能性を検討することによって、今後の在り方を議論する手掛かりとすることとした。

4.2 人口動態による生コン需要の推移が供給システムに与える影響

人口動態が変化した未来におけるコンクリート供給の在り方について、生コンクリート(以下、生コン)需要の推移に着眼し調査を行った。まず建設投資と人口の相関性、現状の生コン工場の分布および出荷実績を分析し、将来の変動予測評価のベースを構築した。これを元に、GIS を用いた北海道を対象とする将来の人口動態に伴う供給システムへの影響推定を行い、供給形態の在り方についての定量的な手法の可能性を示した。

4.2.1 人口動態と建設投資

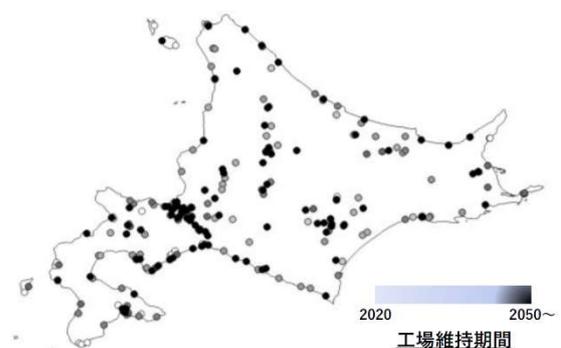
人口動態と建設投資の相関性を明らかにするため、共に統計データおよび推定予測について文献調査を行った。その結果、人口動態は主に地方圏から3大都市圏への人口の流入で説明されることや、経済不況による流入の停滞、東京圏以外の都市圏での人口変動が落ち着きつつあることが明らかとなった。建設投資額は1995年より減少傾向が続いており、成長割合では3大都市圏の方が減少傾向を示していることもわかった。今後の人口は出生率によるものの2100年までに、1/4-1/2程が減少、市区町村の現人口が少ないほど減少が加速する傾向が予測された。建設投資は2018年で頭打ちになるが、人口推移を加味すると、これ以上の落ち込みになると考えられる。

4.2.2 生コンクリート工場分布と出荷実績

生コン供給における地理的特徴と出荷量実績を明らかにするため、生コン工場分布と各地域における工場稼働率マップを検討した。特に地方の工場の操業率が1割を割る現状に対して、人口減少に伴うコンクリート需要減への対応が喫緊の課題であることが示された。

4.2.3 人口動態が生コンクリート供給形態に与える影響

人口動態に伴う生コン需要の変化が供給インフラ(生コン工場)へ与える影響について検討した。人口については、国土強靱化における方針として集約化および地方分



図ー7 工場分布推定図(比較的緩やかな人口減少、収益1/4減で工場が閉鎖していくというシナリオ)

権化の両方が掲げられているが、ここではコーホート法による中庸的な予測結果を参照して実施した。対象地は北海道に限定し、人口あたりのコンクリート需要と、工場維持に必要な出荷を変数として、複数のシナリオで検証を行った。その結果、北海道においては人口分布が均一傾向に向かうことから、地方の需要割合は増大し、輸送距離が増大する可能性が示された(図-7)。北海道全体での需要は大幅に減少すると考えられることから、経営維持に直面する生コン工場は多く、インフラ維持の観点から国レベルでの対策が必要なことも示された。

4.3 プレキャストコンクリート供給体制への影響

人口減少に対応した生産性向上の一つの策として、プレキャストコンクリート(以下 PCa コンクリート)に期待が集まっている。そこで PCa コンクリートが、将来のコンクリートの供給体制に与える影響について考察した。なお、PCa コンクリートは製品種類ごとに団体・協会が設立されており、全体像を把握することが難しいため、インターネット上の公開情報だけに基づいて分析した。

4.3.1 プレキャストコンクリートの現状

セメント出荷量の需要部門別販売高から、PCa コンクリートの占める割合は 1960 年代から現在に至るまで、10%台半ばで安定的に推移していることが分かった。レディーミクストコンクリートが 1960 年代初頭から 1990 年までに、約 5%から約 70%まで大きくシェアを伸ばしていることを考えると、PCa コンクリートでは 1960 代までに製造技術の大革新がなされたものと思われる。

4.3.2 企業の規模、団体・協会への加入状況

調査から全国で企業数 822 社、1335 工場の存在が確認され、うち 20%ほどの工場では JIS 認証登録が確認できなかった。また 75%の企業の保有工場数は 1 つだけであり、5 工場以上を保有する企業はわずか 4%であった。

またこの業界では製造品目ごとに業界団体が形成されているが、半数以上の企業がいずれの団体にも加入していないことも明らかになった。

4.3.3 工場の立地状況

工場が、需要の大きい地点の近傍に立地するとすれば、人口密集地や建設投資の大きい都道府県に工場が集中するはずである。しかし、分析の結果からはそのような傾向は見られず、道路延長と高い相関性を示す結果となり、道路延長 909km に対して 1 工場程度が存在するという全国に共通した関係がみられた(図-8)。工場への原料搬入や製品出荷は主にトラック輸送と考えられることから、道路交通網の発達した場所に工場を立地することは優位に働くと推測される。また道路建設およびその近傍における建設工事が需要を喚起している可能性も指摘できる。

4.3.4 プレキャスト化率の向上に向けた提案

生産性向上への取り組みの一つとして PCa コンクリー

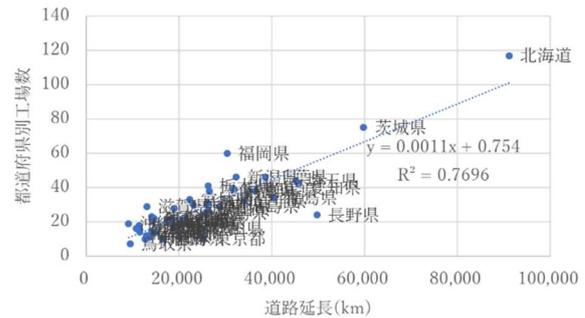


図-8 都道府県別工場数と道路延長の関係

トが着目されているものの、技術的な成熟度は既に高いレベルに達しており、現場のプレキャスト化比率はベストミックスに到達している可能性は高い。ここから更に状況を改善するための施策として、製品品目の異なる工場の交流による革新誘導、製造品目に柔軟性を持たせることによるコンクリート・サプライチェーンや工場経営の安定、レディーミクストコンクリートを出荷できる PCa コンクリート工場による供給体制の補完、レディーミクストコンクリートと PCa コンクリートの両方の認証を取得しやすくするための措置などが考えられる。

4.4 社会形態変化が販売体制に与える影響

生コンクリートの共販体制は戦後復興、高度経済成長の膨大なニーズに対して、所定の品質のコンクリートを所定の納期で納めることを可能とし、国土形成に大きく貢献してきた。しかし今後の人口減少に伴い、建設需要の量や分布も大きく変化する可能性がある。ここでは将来の人口分布形態として、集約型社会と分散型社会の二つの極端な形を想定し、どのような生コンの販売形態が優位になるか、その中で国土の強靭性を担保するためにどのような措置が考えられるかを検討した。

4.4.1 想定する都市形態とその特徴

集約型社会では、インフラを集中的整備することが可能であり、インフラを効率的に整備・維持管理することができる。ただし高い密集度ゆえに再開発が困難であったり、災害発生時のダメージが大きくなったりする懸念がある。他方の分散型社会は、IT 技術を駆使して、分散居住しながら、仮想空間や自動運転技術などを通じて人や物を交換する。薄く広く人口が分配されるため、局所での災害発生による被害が小さくて済むなど、国家としての災害耐性は高まると考えられるが、インフラの利用効率率が下がり、維持管理コストが高まる懸念がある。

4.4.2 建設需要密度と販売形態

販売形態に強い影響を及ぼす一つのファクターは建設需要の密集度である。密集度が極端に低い場合、複数の工場が成立しえず、自ずと非共販体制で少数の工場が製造と販売を担うことになる。ここから少し需要密度が

高まった状態では、複数工場間が成立し競争が始まるものの、競争は厳しく、安定化を期して共販体制が取られるようになる。更に需要密度が高まると、共販体制に所属せずとも、個別経営で成立する工場も発生し、共販/非共販の共存体制が生じる。ただし、生コンには出荷時間の制約があり、一工場の商圏は狭く、相互の商圏重複度も大きくないことから、非共販型の工場は近隣の共販型の工場をアンチテーゼにした技術的独自性を打ち出すことによって共存が図られていると考えられる。更に人の集積が進み、局所の需要密度が高まるようになり、工場の商圏が完全に重なるようになると競争は激化する。価格調整範囲が小さく、技術的独自性が際立ちにくいという生コンの性質から、原材料調達コストを下げられる大工場への集約が進むと考えられ、変化への対応が柔軟な非共販型の工場が優位にたつものと推測される。

4.4.3 想定される販売体制の中での強靱性確保

需要密度という観点からは、主に市場原理に基づくものであるため、これに国土の強靱性を絡めていくための措置を検討した。需要密度が極めて低い分散型社会の場合は、非共販型での供給が卓越すると考えられる。ただし拠点工場にトラブルが生じると、広域で供給がストップすることになるため、冗長性を確保しつつ効率的に商圏を確保するための方策として、サイトプラントによる供給のような形が有効になる可能性がある。一方、需要密度が極めて高い集約型社会の場合は、拠点工場のトラブルは深刻な事態につながる。市場原理に導かれた一工場への集約ではなく、あえて複数工場が共存できるような形、すなわち非共販業者間で協定を結ぶなど、共販に近い体制を確保する必要がでてくると考えられる。

5. おわりに

コンクリート産業の基本は成熟していると言えるだろう。材料は極めてシンプルである。セメント、水及び骨材を練り混ぜてコンクリートを製造し、使用現場まで輸送し、打設・締固め・養生すれば硬化コンクリートができ上がる。所定の強度を得るための配合も難しい話ではない。ただ、単純な材料であるが故に、少しの条件の違いがその品質にばらつきを発生させる「弱点」を有している。こうした背景から、あれこれ制約をつけて品質確保と言ってきたわけである。本来、材料も構造も要求される性能は決まっているはずであるから、「箸の上げ下ろし」まで事細かに指示する「規定」は不要であるはずである。にもかかわらず、「あせい、こうせい」と、多くの指示がある。関連する多くの規格や基準を作成してきた。ところが、一旦そうしたものができ上がると、技術的なチャレンジに対して今度はそれらが障害となり、実用には多くのエネルギーとコストがかかる。

各種の技術やシステムに関する規格・基準の根拠は、最終的には法律まで遡る。法律は、各省庁の仕事の範囲を定める設置法にまで繋がる。当然、社会的背景が変わればこれらを変える必要があるが、それが適切に行われているとは言い難く、挑戦者の戦意を失わせる。省庁間の所掌の切り分けも問題を複雑にする。一方で、周到的な積み重ねがカタストロフィーを防ぐ上で重要な役割を果たしていることも事実である。したがって、問題が起きた場合の多くの対応は弥縫策となる。弥縫策のパッチワークは益々問題を複雑にし、新たなバリアを発生させる、という負の循環に入ってしまう。つまり、何であっても、事象を体系的に捉えなければ、適切な対応ができないことになる。現在、人類が抱える問題は、体系化による問題の整理と、それらに対する有効な対応が最も重要になっているのであるが、業界としてそうした意識は希薄であり、ずるずると「変わらない力」が肥大化していく。

本研究委員会では、そのような視点で検討を始めたが、議論を進めるうちに、コンクリート・建設分野でまだ十分認識されていないが、今後それらが大きな壁となる問題も明らかになってきた。将来に亘って社会のサステナビリティを確保するためには、地球温暖化や資源の枯渇の問題に加えて、日本の人口減少問題にどのように対応するかが、大きな課題となることが明らかになり、それらとコンクリート・建設産業との関わりを直視することの重要性を認識した。改めて言うまでもなく、我々は社会の要求に基づいてインフラ等を整備するのであるから人口問題は極めて深刻となる。人類史上経験のない危機的な事態が生まれ始めている。その対応も、弥縫策とも言えないレベルに終始している。

こうした背景から、本研究委員会では、身近にあるバリアの例とそれらに対する解決策としての提案と、資源枯渇を踏まえたサステナブルな社会のための技術とシステムの検討、そして人口減少によってコンクリート産業で何が起こるかについての仮想未来の検討を実施した。しかし、当然ではあるが、いずれも不十分である。今後、近未来社会における問題の根幹を明確にして、様々な社会的要求を踏まえて適切に舵を切るためのシステムを先ず構築する必要があることを強調しておく。そうしたシステムの存在が「革新」を生む。

参考文献

- 1) ジョセフ・E・スティグリッツ：宇沢先生が生涯をかけて教えてくれたこと 一人間と地球のために経済学者は何をすべきか、宇沢弘文傑作論文全ファイル、東洋経済新報社、2016
- 2) 竹村公太郎：「水力発電が日本を救う」、東洋経済新報社、2016