

報 文

持続可能な骨材生産を目指した

省力・低環境負荷型露天採掘システムの統合と連携^{※)}大 塚 尚 寛^{※※)} 齊 藤 貢^{※※※)}

1. はじめに

21世紀初頭における人類最大の課題といわれる“地球温暖化”の防止対策として、今後あらゆる産業分野において、CO₂(二酸化炭素)排出量削減の取り組みが重要な課題となることが想定され、骨材産業分野においても、CO₂排出量削減は至上命題になるものと考えられる。そのため、原石採掘時に重機から排出されるCO₂量や破碎・選別、製品運搬で排出されるCO₂量を算出するツールを開発し、露天採掘および骨材生産に伴って発生するCO₂の排出削減に関するLCA(ライフサイクルアセスメント)手法を確立することが、低炭素社会づくりに貢献する上で重要と考えられる。

一方、地域との共生を前提とした“持続可能な開発”を継続するためには、環境への影響を十分に考慮した環境調和型・低環境負荷型の露天採掘システムを構築する必要がある。また、碎石生産に代表される骨材産業は、従来から設備産業とも呼ばれ、重厚長大産業の典型であり、IT(情報技術)の活用や省力化・無人化が遅れている分野である。そのため、今後急速に進む少子・高齢化に伴う労働力不足に対応するには、旧来型のローテク産業から各種のITを活用したハイテク産業への転換が不可欠である。

そこで、本研究では、骨材の採掘・生産において、地域との共生を前提にした“持続可能な開発”を継続するための環境調和型露天採掘方式への転換と、少子・高齢化、人口減少社会の到来に伴う労働力不足への対応を目指して、最新のITを活用した省力・低環境負荷型の露天採掘システムを構築することを第1の目的とした。また、地球温暖化防止の一環として、露天採掘および骨材

生産に伴って発生する温室効果ガスであるCO₂の排出削減に関するLCA手法を確立することを第2の目的とした。

2. 研究方法

研究方法は、最新のITを活用した省力・低環境負荷型の露天採掘システムの構築と、露天採掘および骨材生産に伴って発生するCO₂の排出削減に関するLCA手法の確立に大別される。

2.1 ITを活用した省力・低環境負荷型露天採掘システムの構築

システムの構築の基本コンセプトは、つぎのとおりである。

- ①GPSを搭載した重機の使用による省エネ・高効率・最適化採掘法の開発
- ②環境調和型露天採掘計画立案機能の具備
- ③安全性および合理化の追求
- ④自然環境の保全
- ⑤周辺地域の生活環境の保全
- ⑥地域計画との整合性
- ⑦次世代型跡地利用法の提案

まず、①については、既存の採掘用重機にGPSを搭載することによって、省エネ稼働や高効率・最適化採掘を可能にするシステムの開発を行った。また、②～⑦については、筆者らのこれまでの研究成果^{1)～10)}を活用するとともに、技術的に確立された既存システムを利用することで、信頼性のある成果を得ると同時に、開発にかかる時間とコストを抑えることを基本とした。

※) コンクリートサステナビリティに関するシンポジウムⅣ(平成29年3月15日、東京大学)で一部講演

※※) フェロー会員 会長 岩手大学理工学部システム創成工学科社会基盤・環境コース 教授 工学博士

※※※) 学術会員 理事 岩手大学理工学部システム創成工学科社会基盤・環境コース 准教授 博士(工学)

(2)

2.2 露天採掘および骨材生産に伴って発生するCO₂排出量削減に関するLCA手法の確立

露天採掘においては、森林伐採・剥土・穿孔・小割・積込・運搬等の各作業工程に応じた各種の重機が使用されており、各重機が排出するCO₂の総量である現場全体のCO₂排出量を最小化することが重要である。そこで、各重機に搭載するGPS受信機により稼働機械の位置確認を行い、作業工程を「見える化」して採掘現場全体の最適化を図るとともに、CO₂総排出量をリアルタイムに算出・評価できるツールを開発した。また、破碎・選別工程や製品の運搬過程で排出されるCO₂を算出するツールを開発した。これらのシステムを統合することで、LCA手法の確立を行った。

3. 研究結果

3.1 ITを活用した省力・低環境負荷型露天採掘システムの構築

3.1.1 地形情報リアルタイム取得システムの構築

露天採掘場の稼働切羽は、採掘に伴い日々その形状が変化するため、地形測量を頻繁に行う必要がある。そこで本研究では、図1に示す現有の地上型3Dレーザースキャナーとトータルステーションを用いて、採掘切羽の状況を連続的・自動的に地形測量を行い、地形情報をリアルタイムにデジタルデータ化できるシステムを構築した。

3.1.2 露天採掘場で稼動する重機のリアルタイム位置情報取得システムの開発

露天採掘における剥土・穿孔・小割・積込・運搬等の各作業工程で使用されるブルドーザー、クローラードリ

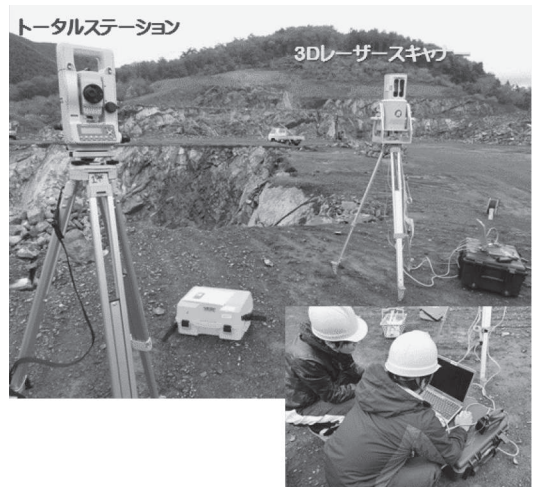


図1 地形情報リアルタイム測量システム

ル、パワーショベル、ホイールローダ、原石ダンプ等にGPSを搭載し、各機械の稼働位置やサイクルタイムを「見える化」して把握できるシステムの開発を行った。

図2は、本研究で開発したリアルタイム位置情報取得システムである。原石ダンプトラックにモバイル型GPSを搭載し、これをタブレットPC (iPad) とBluetoothによるペアリングを行うことで、オペレータが運転席に設置したタブレットPCのモニター上で、原石トラックの走行・運搬軌跡をリアルタイムに把握できるシステムとした。

3.1.3 採掘場内の無線LAN環境の構築

3.1.2で構築したシステムからの位置情報データを作業管理室に設置したホストPCに飛ばし、採掘場内の稼働重機を一元管理するシステムを構築するために、採

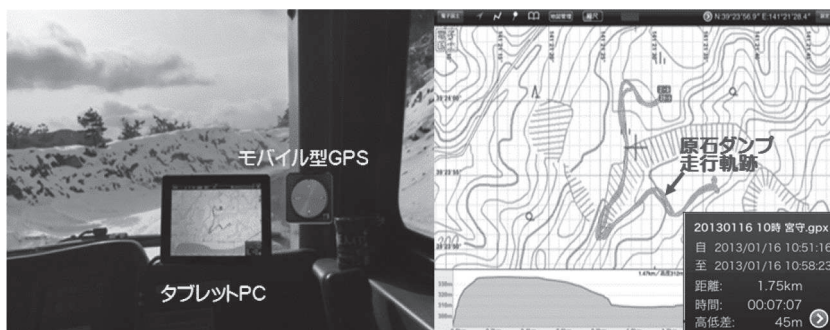


図2 リアルタイム位置情報取得システム

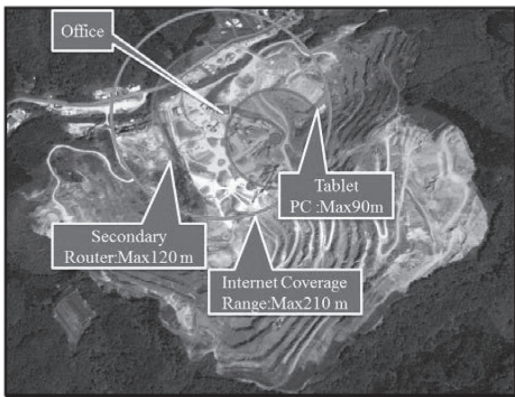


図3 採掘場内の無線LAN環境の構築



図4 デジタル無線機を用いた位置情報管理システムのイメージ



図5 デジタル無線機を介して転送した原石ダンプトラックの走行軌跡

掘場内の無線LAN環境の構築を試みた。

図3は、事務所のホストPCと採掘場内に設置した無線ルーターを接続し、セカンダリーのWiFiルーターとタブレットPCが接続可能な範囲を調べた結果を示したものである。ホストPCとセカンダリーWiFiルーターとの接続限界距離は、約120mであった。また、セカンダ

リーWiFiルーターとタブレットPCの接続限界距離は、90mであった。したがって、ホストPCとタブレットPCの接続限界距離は、210mである。この範囲内であれば、3.1.2で構築したシステムを用いて、露天採掘場内で稼働している重機に搭載したGPSからの位置情報データを利用して、稼働位置やサイクルタイムを「見える化」

(4)

して把握できるシステムが構築できた。¹¹⁾

3. 1. 4 デジタル無線機を用いた位置情報管理システムの検討

3. 1. 3 で構築した採掘場内のWiFi環境では、室内用WiFiルーターを使用したため、接続可能距離が最大で210mしかなく、採掘場全体をカバーするWiFi環境を設定することは困難であった。そこで、電波法の改正により、2022年11月30日をもって現在使用されているアナログ無線機が使用できなくなり、デジタル無線機が導入されることに着目し、デジタル無線機を用いた位置情報管理システムの検討を行った。

図4は、デジタル無線機を用いた位置情報管理システムのイメージを示したものである。原石ダンプの運転席にGPS受信機を設置し、これにデジタル無線機を接続して、位置情報をGPS衛星を介してホストPC上の地形図上に投影できるシステムを構築した。¹²⁾

図5は、このシステムを利用して、採石場内で稼働する原石ダンプトラックの走行軌跡を、運転席に設置したGPS受信機で取得した位置情報をデジタル無線機を介して、作業管理室に設置したホストPCのディスプレイ上に表示した例を示したものである。

3. 2 “持続可能な開発”を実現するための環境調和型露天採掘方式の開発

3. 2. 1 露天採掘場周辺の動植物分布のデータベース化システムの構築

貴重な動植物への影響の軽減、生態系の基盤となる植生の回復、地域景観保全等を目指した環境調和型・低環境負荷型の露天採掘システムを構築するために、新規採掘場およびその周辺についての調査結果をGIS（地理情報システム）を利用してデータベース化するシステムを構築した。¹³⁾

図6は、採掘場周辺の動植物分布を、地形情報を基盤としてデータベース化した例である。(a)は、採掘場計画地および周辺の3Dモデルである。(b)と(c)は、本データベースに入力した地形分類図と表層地質図の高解像度画像に位置情報を与えたものである。(d)と(e)は、数値地図5mメッシュから作成した標高図と傾斜角図である。また、(f)は、現地調査で確認できた昆虫類のデータと調査行った位置を示している。(g)は、対象地域の植生分布データにラベルを付けたものである。

(h)は、計画地の3Dモデルの上に植生分布をオーバーレイしたものである。

このように、採掘場周辺の動植物分布を、GISを用いてデータベース化し、可視化することが可能になった。

3. 2. 2 景観保全を考慮した露天採掘計画立案システムの構築

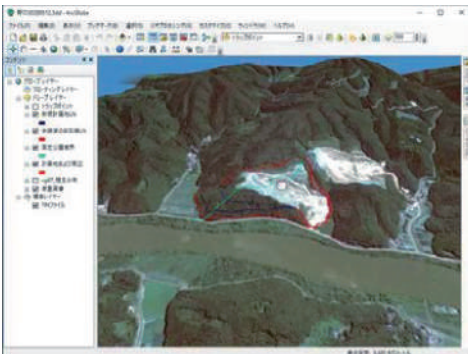
現地の臨場感を体験できるような全方位スクリーン呈示の景観評価実験法を開発し、この評価システムにパノラマVR（Virtual Reality）画像を使用して、シミュレーション評価が現地評価として機能するかについて検証した。

図7は、全方位スクリーン呈示による景観評価実験の様子を示す。全方位スクリーンで全周を囲い、各スクリーンの上部にプロジェクターを設置して、上部からパノラマ写真・VR画像を投影した。この方法により、極めて臨場感の高い景観評価実験が可能となった。また、現地で撮影した360°方位のパノラマ写真と、VRSで現地景観を再現した360°方位のVR画像を用いた全方位評価実験を行い、得られた各結果と現地評価結果を比較した結果、全方位呈示型評価実験結果の信頼性とVRの有効性を検証できた。¹⁴⁾

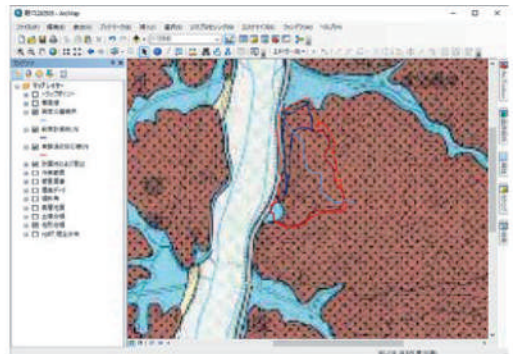
3. 3 露天採掘および骨材生産に伴って発生するCO₂排出量削減に関するLCA手法の確立

図8に、骨材採掘・生産過程におけるCO₂排出量の『見える化』と、製品運搬過程におけるCO₂排出量削減システムの概要を示す。CO₂排出量の「見える化」およびCO₂排出量削減システムには、一般的な表計算・グラフ作成ソフトウェアであるExcel（Microsoft社）と、地理情報システムソフトウェアのArcGIS（ESRI社）を利用した。第1段階目のCO₂排出量の「見える化」は、それぞれの事業所がデータ入力し、リアルタイムで結果が確認できるシステムとした。出力結果を確認し、CO₂排出量の削減が必要と判断した場合は、第2段階目のCO₂排出量削減システムを利用する。CO₂排出量削減の検討過程は、最もCO₂排出割合の多い製品運搬過程とし、本研究では、大学でデータ解析を行った後、結果を各事業所へフィードバックするシステムとした。¹⁵⁾

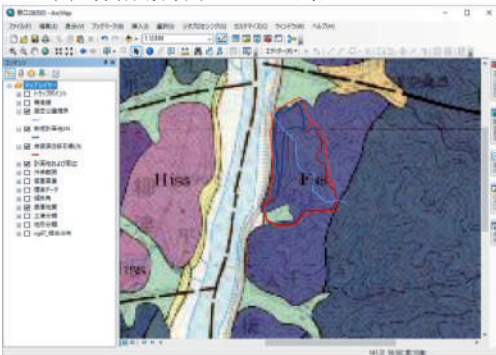
表1に、CO₂排出量算出シートを示す。CO₂排出量算出シートでは、製品生産・運搬の各過程におけるCO₂排出原単位の算出が行え、各過程の生産効率を比較検討す



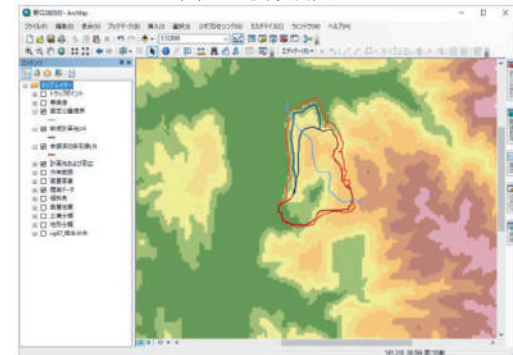
(a) 採掘場計画地および周辺の3Dモデル



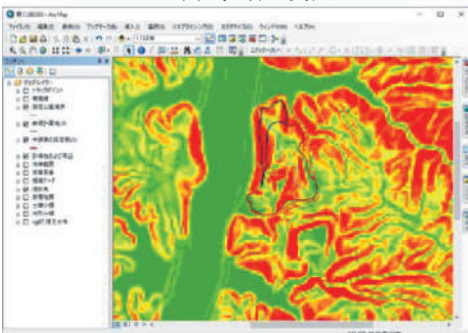
(b) 地形分類図



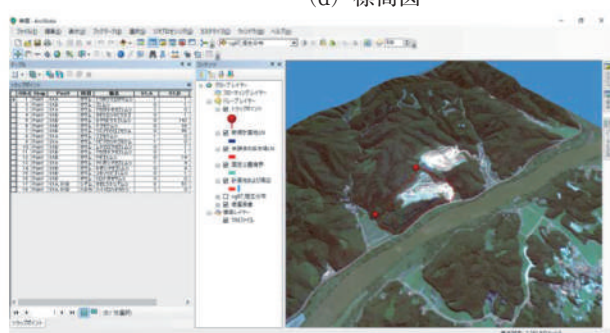
(c) 表層地質図



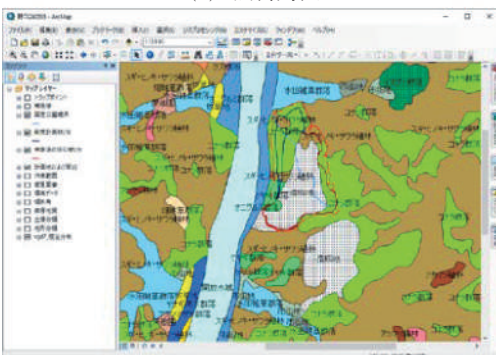
(d) 標高図



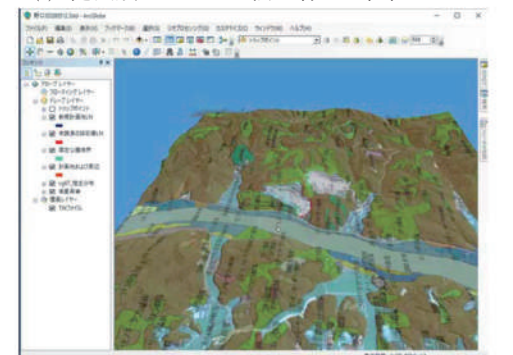
(e) 傾斜角図



(f) 昆虫類のデータと調査行った位置



(g) 環境省第6、7回自然環境保全調査結果



(h) 計画地3Dモデル上に植生分布をオーバーレイ

図6 動植物分布のデータベース化

(6)

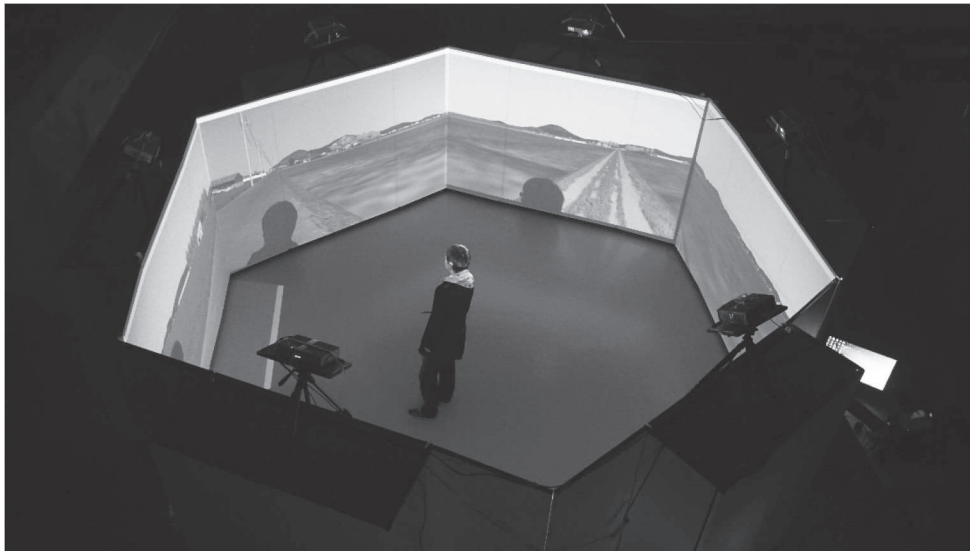


図7 全方位スクリーン呈示による景観評価実験

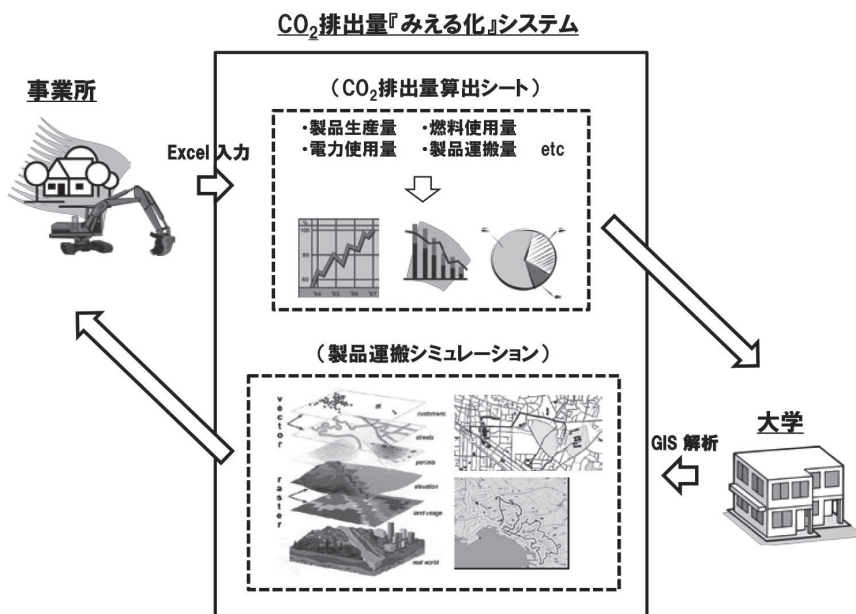


図8 CO₂排出量の「見える化」システム

るツールとしても活用可能である。作成したCO₂排出量算出シートの使用を確認するため、東北地方で稼働中の碎石事業所5社に東日本大震災前後の2010年と2011年の実際のデータを入力してもらい、操作手順の確認とCO₂排出量の算出結果やグラフ変換等の動作確認を行った。

図9に、基本情報の入力により自動的にグラフ化され

る例として、CO₂排出量と製品生産量の経月変化例を示す。

以上のシステムを利用することで、骨材生産・運搬過程におけるCO₂排出量削減に関するLCAを行うことが可能となった。¹⁶⁾

表1 CO₂排出量算出シート

製品出荷量 砕石場稼働日数		[t] [日]			
生産過程					
		軽油量 [ℓ]	CO2排出量 [t-CO2]	原単位(分母製品) ×10 ⁻³ [t-CO2/t]	
剥土・掘削	ブルドーザ				
	バックホウ				
	その他				
	小計				
穿孔	油圧クローラドリル				
	空圧クローラドリル				
	その他				
	小計				
小割	油圧ブレイカ				
	その他				
	小計				
原石積込	ホイールローダ				
	バックホウ				
	その他				
	小計				
原石運搬	原付ダンプ				
	ダンプトラック				
	ホイールローダー				
	ベルトコンベア				
	その他				
製品積込	小計				
	ホイールローダー				
	バックホウ				
	その他				
その他	小計				
軽油使用料合計					
破砕プラント	電気使用	電気使用量[kWh]			
		燃料使用量[ℓ]			
	燃料(重油)使用				

事業所情報
使用機械
1月
2月
3月
4月
5月
6月
7月
8月
9月
10月
11月
12月
年間集計結果

[illegible]

4. まとめ

本研究では、最新のITを活用した省力・低環境負荷

型の露天採掘システムの構築と、露天採掘および骨材生産に伴って発生するCO₂の排出削減に関するLCA手法の確立を行った。

(8)

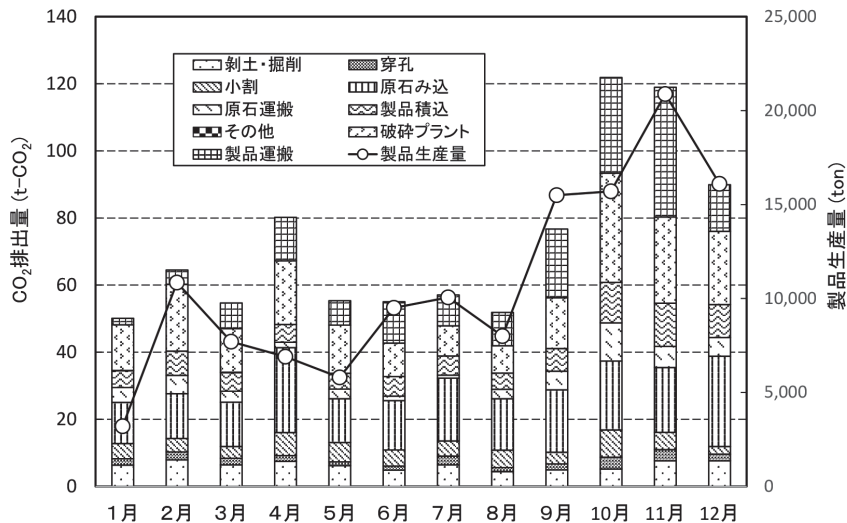


図9 CO₂排出量と製品生産量の経月変化

本研究で得られた結果は、つぎのとおりである。

(1) ITを活用した省力・低環境負荷型露天採掘システムの構築

- ①地上型3Dレーザースキャナーとトータルステーションを用いて、採掘切羽の状況を連続的・自動的に地形測量を行い、地形情報をリアルタイムにデジタルデータ化できるシステムを構築した。
- ②採掘場で稼働する重機にGPSを搭載し、各重機の稼働位置やサイクルタイムを「見える化」して把握できるシステムを開発した。
- ③採掘場内の稼働重機を一元管理するシステムのために、採掘場内の無線LAN環境の構築を行った。
- ④デジタル無線機を介して、採掘場内で稼働する重機の位置情報を作業管理室のホストPCに転送できるシステムを開発した。

(2) “持続可能な開発”を実現するための環境調和型露天採掘方式の開発

- ①採掘場周辺の動植物分布を、GISを用いて地形情報を基盤としてデータベース化し、可視化できるシステムを構築した。
- ②現地景観の臨場感を体験できる全方位スクリーン呈示の景観評価実験法を開発し、この評価システムにパノラマVR画像を使用することにより、シミュレーション評価が現地評価として機能することを検証した。

(3) 露天採掘および骨材生産に伴って発生するCO₂排出量削減に関するLCA手法の確立

- ①ExcelとArcGISを利用して、骨材採掘・生産過程におけるCO₂排出量の『見える化』システムおよび製品運搬過程におけるCO₂排出量の削減を検討できるシステムを構築した。
- ②骨材生産・運搬過程における基本情報を入力することにより、CO₂排出量が自動的にグラフ化され、CO₂の排出削減に関するLCAが可能となる手法を確立した。なお、本システムを、より実用的なシステムにブラッシュアップするためには、骨材事業場におけるさらなる実証試験が必要であると考えている。

終わりに、本研究に協力された本学工学研究科博士前期課程デザイン・メディア工学専攻修了のアイサジャン・ローズアジ修士、北條駿太修士、アイグリ・サッター修士に感謝の意を表する。また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金【課題番号：24561000および15K06635】の助成を受けて行われたものであることを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 大塚尚寛、関本善則：露天採掘に伴う景観変化の予測と評価、資源と素材、109巻、3号、p.203～208、(1993)

- 2) 大塚尚寛、関本善則：露天採掘が周辺地域の風体系に及ぼす影響、資源と素材、109巻、11号、p.897～902、(1993)
- 3) 渡邊知子、大塚尚寛、齊藤 貢：地形改変をう開発地域周辺の風向・風速変化予測、資源と素材、116巻、4号、p.253-258、(2000)
- 4) 大塚尚寛、阿部拓馬、齊藤貢：環境保全を考慮した碎石資源ポテンシャルティー評価システムの構築、骨材資源、38巻、150号、p.62-72、(2006)
- 5) 外薮貴彦、大塚尚寛、志田 寛、齊藤 貢：景観を考慮した露天採掘場の開発計画立案システムの構築、骨材資源、38巻、151号、p.131-140、(2006)
- 6) 外薮貴彦、大塚尚寛、志田 寛、齊藤 貢：露天採掘場の景観評価方法の信頼性の検討、資源と素材、122巻、12号、p.589-595、(2006)
- 7) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、阿部洋祐：森林表土を利用した露天採掘跡残壁の植生基盤造成に関する基礎的研究、Journal of MMIJ、123巻、6,7号、p.329-335、(2007)
- 8) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤貢、鳴海貴之：露天採掘跡残壁の自然回帰型修復緑化法の開発と評価システムの構築、骨材資源、39巻、155号、p.149-159、(2007)
- 9) 大竹照光、大塚尚寛、齊藤 貢、阿部洋祐：露天採掘跡残壁の自然回帰型修復緑化における緑化シミュレーションを用いた自然回帰度評価、Journal of MMIJ、124巻、3号、p.166-172、(2008)
- 10) 齊藤 貢、大塚尚寛、大塚清伸、越谷 信：露天採掘跡地の廃棄物最終処分場への転用可能性評価システム、骨材資源、42巻、165号、p.1-10、(2010)
- 11) アイサジャン・ローズアジ、大塚尚寛、齊藤 貢、小野寺祥記：採石場におけるGPSを登載した原石ダンプトラックの稼働管理システムに関する検討、碎石の研究、29巻、p.14-18、(2014)
- 12) アイサジャン・ローズアジ、大塚尚寛、齊藤貢、採石場内稼働重機のリアルタイム位置情報取得システムの開発：碎石の研究、30巻、p.20-24、(2015)
- 13) アイグリ・サツタル、大塚尚寛、齊藤 貢：ICTを活用した露天採掘場周辺の動植物分布のデータベース化システムの検討、資源・素材2016（盛岡）、企画発表「グリーンアジアのための国際資源人材育成」、(2016)
- 14) 北條駿太、大塚尚寛、齊藤 貢：全方位スクリーン呈示による露天採掘場の景観評価、碎石の研究、30巻、p.25-32、(2015)
- 15) Naohiro Otsuka, Mitsugu Saito : Development of the visualization system of carbon footprint on the aggregate supply in the reconstruction from the Great East Japan earthquake, Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety 2013, Singapore、(2013)
- 16) Aishajiang Rouzaiji, Naohiro Otsuka : Study of LCA (Life Cycle Assessment) Method on the Reduction of CO₂ Emissions in Aggregate Production, 2nd International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering、Barcelona, Spain、(2015)