コンクリート骨材の地産地消による
環境負荷量の低減に関する研究

2020 年 3 月

愛媛大学大学院
理工学研究科
氏家　勲

目次

第 1 章　緒言 1
第 2 章　調査概要 3
2.1　概説 3
2.2　調査方法 3
2.3　製造過程の選定 5
2.4　環境負荷量の算出 6
2.4.1　生コンクリート製造過程における CO_2排出量の原単位の設定 6
2.4.2　骨材製造過程における CO_2排出量の原単位の設定 6
2.4.3　骨材輸送過程における CO_2排出量の原単位の設定 6
2.4.4　愛媛県の各生コンクリート工場の年間製造量の算出 6
2.4.5　愛媛県の各生コンクリート工場の年間使用骨材量の算出 7
2.4.6　生コンクリート製造過程における CO_2排出量の算出 8
2.4.7　骨材製造過程における CO_2排出量の算出 8
2.4.8　骨材輸送過程における CO_2排出量の算出 9
2.4.9　コンクリート製造工程における CO_2排出量の算出 11
2.5　愛媛県産骨材使用における環境負荷量の算出 11
第 3 章　調査結果及び考察 133
3.1　概説 13
3.2　アンケート結果 13
3.2.1　使用骨材の種類 13
3.2.2　使用骨材の産地・製造業者 16
3.3　コンクリート製造過程ごとの環境負荷量の算出結果 17
3.3.1　骨材製造過程における CO_2排出量の算出結果 17
3.3.2　骨材輸送過程における CO_2排出量の算出結果 18
3.3.3　生コンクリート製造過程における CO_2排出量の算出結果 21
3.4　コンクリート製造における CO_2排出量の算出結果 22
3.5　愛媛県産骨材使用による環境負荷量の算出結果 25

3.5.1　各生コンクリート工場の使用骨材プラントの変換 25
3.5.2　骨材の地産地消による輸送過程における CO_2排出量の算出 25
3.6　骨材の地産地消による CO_2排出量と実状値の比較 27
3.7　環境負荷低減方策の提案 29
第 4 章　結言 31
参考文献 32

第 1 章

緒言

近年,二酸化炭素（以下，CO_2と称す)，メタン，亜酸化窒素などの大気中温室効果ガスが主な原因である地球温暖化が環境問題として取り上げられている．大気中温室効果ガスの増大により,過去 100 年間で平均気温は約 0.5℃上昇し，今後 100 年間でさらに数℃程度上昇すると推測されている．地球温暖化の原因である大気中温室効果ガスのうち約 75%を占め，最も影響を与えている CO_2の濃度は過去数百年にわたって 280ppm 程度であった[1]が，18 世紀半ばから上昇を始め，特にここ数十年で急激に増加している．これは，動力などの燃料として石炭や石油が大量に使われるようになったためである．

急速に拡大していく地球温暖化問題に対し，政府や民間企業では，様々な対策が行われている．政府の取り組みとして，エコ減税など環境に付加価値を有している製品には，特典を与えるなど国全体で CO_2排出量削減に取り組んでいる．また,「CO_2排出量見える化」システムが開発され，製品のライフサイクルを通じた温室効果ガス排出量を明らかにし，企業や消費者の意識を高めることで排出削減につなげようとする試みが盛んになっており，ハンバーガー製造の分析で，牛の曖気による CH_4の排出量まで含めた驚くべき試算結果も報道されている．民間企業でも，低炭素社会を目指した取り組みが行われている．日本郵便では，手紙やはがきといった郵便物の配達用として電動二輪車を，郵便局間輸送を行う際はハイブリッド車および天然ガス車を導入するなど環境に考慮した取り組みを徹底して行うことにより，CO_2排出量の削減に努めている[2]．

その中で，多くのエネルギーが必要とされる生コンクリート製造では，セメント製造における廃棄物処理技術または産業副産物の有効活用など，低炭素社会に貢献しようとする取り組みもある．しかし，製品自体の製造においては，需要の低迷もありほとんどの生コンクリート工場で環境を考慮したシステムの構築が進んでいないのが現状である．コンクリートの重要性が低下すると懸念される意見が多いが，コンクリートは国土の開発・整備には不可欠なものであることは確かである．

コンクリートの体積の約 70%は砂や砂利などの骨材が占めており，コンクリートの施工性や硬化後の性能は骨材の特性に支配される要素が大きい．そのため，コンクリートの品質を確保するために良質な骨材を使用することは大変重要である．近年，良質な天然骨材資源の枯渇化が進んでいる．また，自然環境保全の観点から骨材の採取や採掘が抑制されている．実際に，川砂利については河川護岸の浮き上がりや橋梁基礎の洗堀などの問題から徐々に採取の規制がされるようになり，主要な河川で採取が原則禁止されることとなった．愛媛県では,「瀬戸内海の環境保全に関する愛媛県計画」に基づき，H18 より海砂は採取禁止とされている[3]．コンクリートの性能維持のため，経済性も考慮し，骨材を九州地方などの愛媛県外からの移入に頼っていることが愛媛県砕石業界で課題となっている．特にコンクリートの乾燥収縮によるひび割れは骨材の品質が大きく影響することが指摘されている[4]．H18 から H28 までの 10 年間で愛媛県産砕石の出荷量が半分以下[5]となっているのが現状であり，県外産の骨材を使用することで長距離間の輸送が強いられ，トラックや船舶からより多くの CO_2 が排出されることになる．

それに伴い，環境側面を踏まえた製造工程を検討していかなくてはならないのが現状である．その第一段階として生コンクリート製造に関わる環境負荷の現状を調査する．本研究では，愛媛県の生コンクリート工場で，コンクリートを製造するまでの工程ごとに排出される環境負荷量を算出し，愛媛県外産の骨材を使用している工場について，愛媛県産骨材のみを使用することにより，コンクリート製造における CO_2 排出量の削減が可能であるかを調査した．また，地産地消を行う上で愛媛県産の骨材の課題に関しては、既往の研究により成果がある乾燥収縮を低減することができる銅スラグ(以下，CUS と称す)及びフライアッシュ(以下，FA と称す)，収縮低減剤，膨張材を混和することにより，乾燥収縮を低減できるのか検討した．

第 2 章

調査概要

2.1　概説

第 2 章では，本研究の調査方法及び環境負荷量の算出，骨材の地産地消による環境負荷量の算出について記載する．

2.2　調査方法

2017 年に愛媛県にある 57 生コンクリート工場に対し，骨材の種類，岩種、区分，産地，製造業者，使用割合の 6 項目について愛媛県生コンクリート工業組合によって実施されたアンケートを基にし，すべての項目について回答がある工場を分析した．そのうち，越智諸島に工場をもつ 5 つの工場については，愛媛県の骨材プラントからの陸上輸送距離と，広島県の骨材プラントからの陸上輸送距離の差異が小さく，骨材の地産地消の観点から本研究の趣旨と異なるため分析対象外とした．アンケート項目のうち使用割合については，骨材最大寸法 20mm の場合と 40mm の場合の回答があるが，全て最大寸法 20mm と仮定し，本研究の調査項目とする．また，2017,2018 年の愛媛県生コンクリート工場における生コンクリート年間製造量のデータから年間製造量が明らかになっている工場を有効データとして，有効データ数を 38 工場とした．さらに年間製造量が確認された愛媛県生コンクリート工業組合外工業組員の 4 工場を有効データとし計 42 工場の生コンクリート製造工程における 1m^{3}当たりの CO_2排出量の算出を行う．地域別で生コンクリート工場を選別すると，東予地域は 13 工場，中予地域は 8 工場，南予地域は 21 工場である．CO_2排出量算出の有効データとする工場の一覧を**表 2.1** に示す．以下各工場名を指定した番号で記す．また，有効データとみなさない愛媛県にある生コンクリート工場とその理由を**表 2.2** に示す．

表 2.1　工場の一覧

番号	東予地区	番号	中予地区	番号	南予地区
1	安藤工業㈱セメント事業部	14	愛媛菱光コンクリート工業㈱	22	(株)キクノ生コン事業部八幡浜工場
2	協和生コン㈱	15	四国生コン㈱	23	㈱西田興産　大洲工場
3	藤岡生コン㈱	16	大協コンクリート工業㈱	24	㈱西田興産　長浜工場
4	㈱キクノ生コン事業部西条工場	17	大和生コン㈱松山工場	25	久保興業㈱　本社工場
5	大和生コン㈱今治工場	18	レッツ太平洋生コンクリート㈱	26	久保興業㈱　南宇和工場
6	泉陽生コン㈱	19	春日川内共同生コン(株)	27	エヒメ生コン㈱
7	㈲新居浜ブロック工業所	20	中予砕石㈱	28	㈱ブリッジカンパニー
8	飛鷹生コンクリート㈱	21	(株)キクノ生コン事業部松山工場	29	八幡浜生コンクリート㈱
9	今治小野田レミコン㈱			30	九四生コン㈱
10	㈱今治生コン			31	建協生コンクリート工業㈱
11	越智生コン㈱			32	日吉綜合建設㈱
12	大和生コン㈱西条工場			33	北宇和生コン㈱
13	三星生コンクリート㈱			34	野村生コン㈱
				35	㈲三栄生コン
				36	南予生コン㈱
				37	栄南産業㈱
				38	㈱御荘生コン
				39	愛南小野田レミコン㈱
				40	㈱しろかわ宇和工場
				41	㈱しろかわ城川工場
				42	(株)キクノ生コン事業部宇和島工場

表 2.2　対象外工場とその理由

対象外工場	理由
伯方生コンクリート㈱	越智諸島
大島生コン㈱	越智諸島
㈲小川レミコン	越智諸島
㈲マツシン	越智諸島
㈱向井工務店	越智諸島
崎山生コンクリート	出荷量不明
市坪生コン	出荷量不明
共同生コンうわじま	出荷量不明
伊予アサノコンクリート	出荷量不明
石鎚生コン㈱	アンケート未回答
川上区生コン㈱	アンケート未回答
(同)ダイザン	アンケート未回答
㈱日景生コン川内工場	アンケート未回答
㈱日景生コン松山工場	アンケート未回答
愛媛生コン㈱	アンケート未回答

2.3　製造過程の選定

セメント及び骨材の製造・輸送過程における CO_2 排出量算出の概要図を**図 2.1** に示す．生コンクリートを製造する際，セメントに係る CO_2 排出は，セメント製造工場でセメントを製造する過程，セメント製造過程からセメント SS まで海上輸送する過程，セメント SS から生コンクリート工場まで陸上輸送する過程がある．また，骨材に係る CO_2 排出は，骨材を製造する過程，骨材プラントから工場まで骨材を輸送する過程，工場で生コンクリートを製造する過程，製造した生コンクリートをミキサ車で建設現場まで配送する過程において CO_2 が排出される．骨材プラントから工場まで骨材を輸送する過程については，トラックを使用し陸上輸送のみの場合と，船舶で海上輸送を行い，陸揚げし，工場まで陸上輸送する，もしくは工場が陸揚げ場と隣接し船舶で海上輸送を行った後，陸揚げし，陸上輸送が極端に少ない場合の 3 つの輸送過程がある．本研究では，コンクリート骨材における地産地消による CO_2 排出量の低減を目的とするため，上記の過程のうち骨材を製造する過程，骨材プラントから工場まで骨材を輸送する過程，工場で生コンクリートを製造する過程に限定し，各生コンクリート工場における 1m^3 当たりの CO_2 排出量の算出を行う．

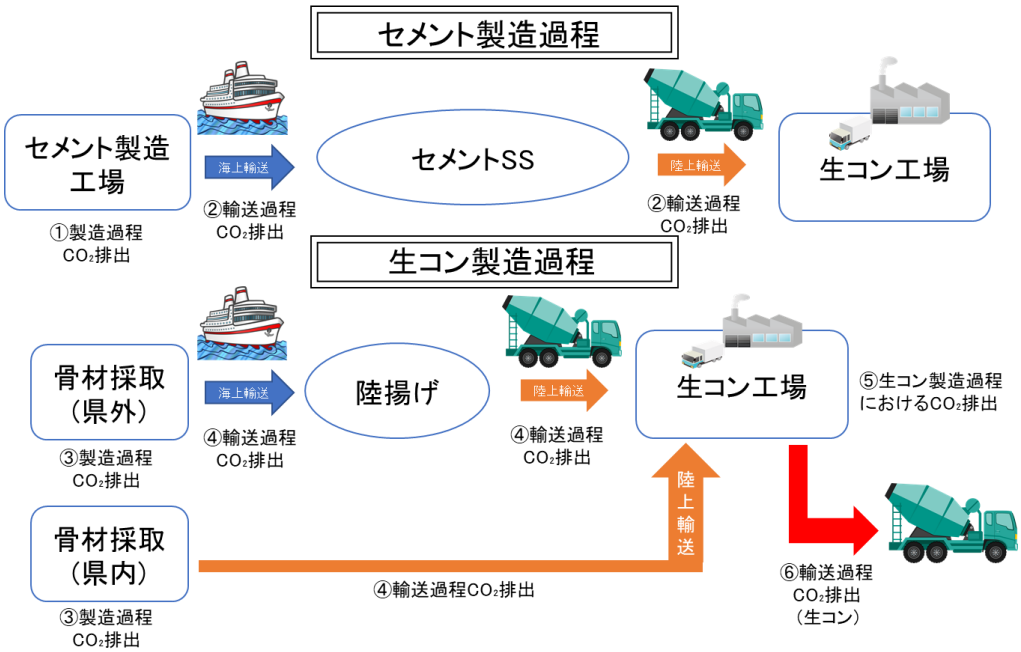

図 2.1　生コンクリート製造における CO_2 排出の概要図

2.4　環境負荷量の算出

環境負荷物質として CO_2 を取り上げ，生コン製造工程における原単位を設定する[6]．本研究では，骨材を製造する過程，骨材プラントから工場まで骨材を輸送する過程,工場で生コンクリートを製造する過程における 1m³当たりの CO_2 排出量の算出を行い，以上 3 過程を合計したものをコンクリート製造工程における 1m³当たりの CO_2 排出量とする．CO_2 排出量の算出過程は工場番号 14 を一例として以下に示す．

2.4.1　生コンクリート製造過程における CO_2 排出量の原単位の設定

生コンクリート 1 m³当たり製造過程における CO_2 排出量の原単位は「香川県の建設に関わる物質フロー研究会」において報告されている 3.10 kg/t とする[6]．

2.4.2　骨材製造過程における CO_2 排出量の原単位の設定

骨材 1 t 当たり製造過程における CO_2 排出量の原単位は「香川県の建設に関わる物質フロー研究会」において報告されている 5.46 kg/t とする[6]．

2.4.3　骨材輸送過程における CO_2 排出量の原単位の設定

骨材 1 t 当たり輸送過程における CO_2 排出量の原単位は「香川県の建設に関わる物質フロー研究会」において報告されている値とする．骨材輸送過程における CO_2 排出量の原単位は表 2.3 に示す．

表 2.3　骨材輸送過程における CO_2 排出量の原単位[6]

区分			単位	原単位
輸送	船舶(最大積載量)	1500t級	kg-CO_2/km・t	0.0752
	ダンプトラック	ディーゼル10t		0.117

2.4.4　愛媛県の各生コンクリート工場の年間製造量の算出

H29・30 に各生コン工場の年間出荷数量の調査を実施した．その二年間の工場別生コンクリート年間出荷数量（m³）を平均したものを使用する．表 2.4 に

工場番号 14 の H29,30 年度の出荷数量と二年間の平均値を示す.

表 2.4　工場番号 14 の出荷数量（m³）

No.	会社名	H29年度出荷数量(m³)	H30年度出荷数量(m³)	出荷数量平均(m³)
14	愛媛菱光コンクリート工業㈱	44343	38551	41447

2.4.5　愛媛県の各生コンクリート工場の年間使用骨材量の算出

本研究では，各生コンクリート工場の年間製造量のうち生コンクリートの体積の 70%を年間使用骨材量（m³）と仮定し，総骨材量を算出する．**表 2.5** に工場番号 14 の年間使用骨材量を示す．**表 2.4** で示した二年間の平均出荷数量のうち体積の 70%を年間使用骨材量と仮定するため，工場番号 14 の年間使用骨材量は 29012.9 m³となる．また，各生コンクリート工場が使用する骨材の物性のうち表乾密度はすべて同一のものと仮定し，細骨材の表乾密度は 2.60 g/cm² とする．細骨材率についてもすべて同一のものと仮定し，細骨材率は 45%とする．以上の条件より，単位細骨材量は 819 kg/m³，単位粗骨材量は 1001 kg/m³ となる．そして，各生コンクリート工場の産地による使用割合を基に，産地ごとの単位細骨材量(kg/m³)を算出した．粗骨材に関しては，年間使用骨材量(kg)から細骨材量を引いたものを各生コンクリート工場の年間使用粗骨材量（kg）とした．産地ごとの単位粗骨材量も同様に算出した．単位細骨材量，単位粗骨材量と各生コンクリート工場の年間出荷数量を基に，愛媛県の各生コンクリート工場の年間使用骨材量を算出した．**表 2.6** に工場番号 14 の細骨材および粗骨材の産地ごとの単位骨材量を示す．

表 2.5　工場番号 14 の年間使用骨材量

No.	14	会社名	愛媛菱光コンクリート工業(株)	
出荷数平均 m³		41447	骨材量 m³	29012.9

表 2.6　工場番号 14 の産地ごとの単位骨材量(kg/m³)

No.	14	会社名	愛媛菱光コンクリート工業(株)				
細骨材産地	東温市山之内　愛媛砕石			粗骨材産地	東温市山之内　愛媛砕石		
割合	60	細骨材量	491.4	割合	100	粗骨材量	1001
細骨材産地	北九州市小倉南区　三菱マテリアル(株)			粗骨材産地			
割合	40	細骨材量	327.6	割合		粗骨材量	

2.4.6　生コンクリート製造過程における CO_2 排出量の算出

生コンクリート 1m³当たり製造過程の CO_2 排出量は，生コンクリートの製造に要した電気使用量で算出する．しかし，既往研究[2)]により，生コンクリート製造に要した電気使用量のみを算出することができず，事務所等に要した使用量も含めて算出しなければいけないことが報告されている．よって，生コンクリート製造過程における CO_2 排出量は各生コンクリート工場で差異がないものとし，使用する CO_2 排出量は，「香川県の建設に関わる物質フロー研究会」において報告されている既定値の 3.10 kg/m³を用いる．

2.4.7　骨材製造過程における CO_2 排出量の算出

骨材 1 t 当たり製造過程の CO_2 排出量は，骨材プラントにおける消費電力や消費燃料等に起因する．しかし，2.4.6 と同様に，骨材製造に要した電気使用量のみを算出することが難しく，事務所等に要した使用量も含めて算出しなければいけないため，各骨材プラントで骨材製造に要した電気使用量を同一なものとし，既定の原単位を用いて骨材製造における CO_2 排出量を算出する．使用する原単位は，5.46 kg/t を用いる．また、スラグ骨材の製造過程の CO_2 排出量は 0 kg/m³とする．単位骨材量（t/m³）と骨材製造における CO_2 排出量の原単位 5.46 kg/t の乗算により算出する．表 2.7 に工場番号 14 の使用する骨材の製造における CO_2 排出量を示す．

表 2.7　工場番号 14 の使用骨材製造における CO_2 排出量

No.	過程	単位	排出量
14	骨材製造過程のCO_2排出量	kg/m³	9.9

2.4.8　骨材輸送過程における CO_2 排出量の算出

骨材プラントから生コンクリート工場までの骨材輸送過程（海上輸送もしくは陸上輸送）における CO_2 排出量を算出する．輸送行程については Google マップを使用し，陸上距離は推奨された内，一般道路のみの最短輸送距離，海上輸送では最短航海距離をプロットして測った． また，往路に加え，復路（回送分）も考慮することとし，復路の CO_2 排出率は往路の 0.6 倍とする．輸送方法は一律陸上輸送では 10 t 積ダンプトラック，海上輸送では最大積載量 1500 t の船舶を使用するものとした．また，骨材プラントに生コンクリート工場を有する場合，陸揚げ場に生コンクリート工場が隣接されている場合については陸上輸送距離を 0m とする．**図 2.2** は工場番号 14 が使用する愛媛砕石株式会社の砂岩をトラックで輸送する過程の陸上輸送距離の測定の様子である．骨材プラントである愛媛砕石株式会社から工場番号 14 までの陸上距離を測定する場合，**図 2.2** のように，ルートが 3 パターン推奨される．その中で，一般道路のみを経由し，かつ最短時間のルートを本研究の有効輸送距離データとする．骨材輸送距離，骨材輸送過程における CO_2 排出量の原単位を用いて骨材輸送過程における CO_2 排出量を算出する．原単位は，**表 2.3** の原単位を使用する．**表 2.8** に工場番号 14 の産地ごとの骨材輸送距離と CO_2 排出量を示す．また，**図 2.3** は工場番号 11 が使用する大分県津久見市大分太平洋鉱業株式会社の石灰砂を輸送する過程の海上距離測定の様子である．船舶を使用した海上輸送では**図 2.3** のように港から陸揚げ場までの海上輸送ルートを推定し，プロットしてその距離を測定する．

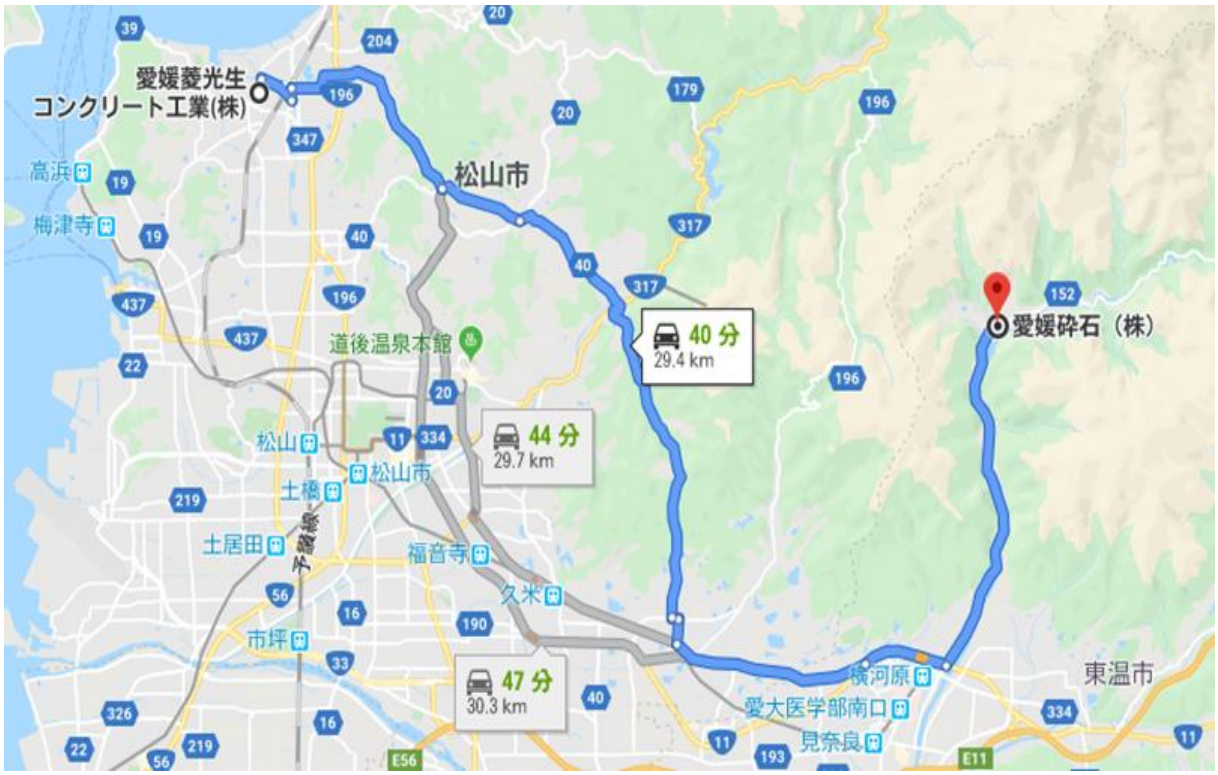

図 2.2　陸上輸送距離測定の様子　　Google マップ

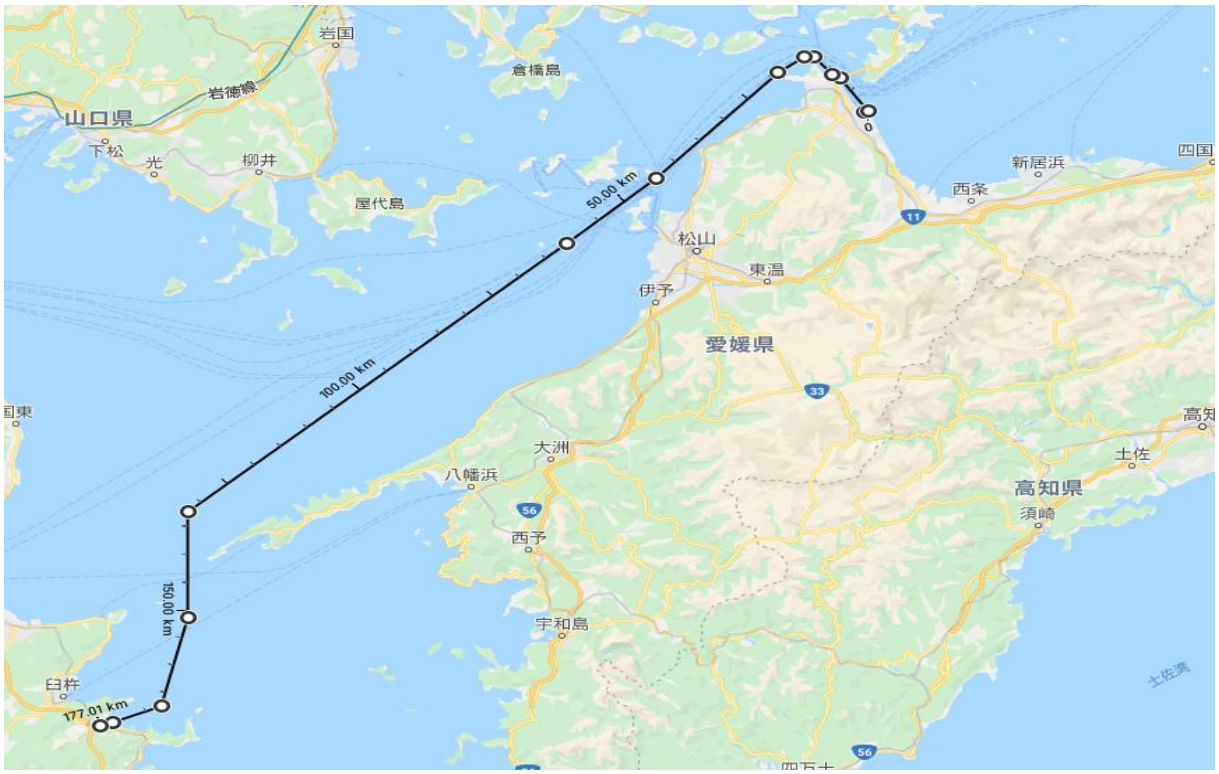

写真 2.3　海上輸送距離測定の様子　　Google マップ

表 2.8　工場番号 14 の骨材輸送過程における CO_2 排出量

Ｎｏ.	過程	単位	排出量
14	骨材輸送過程のCO_2排出量	kg/m³	16.8

2.4.9　コンクリート製造工程における CO_2 排出量の算出

骨材を製造する過程，骨材プラントから工場まで骨材を輸送する過程，工場で生コンクリートを製造する過程における 1m³当たりの CO_2 排出量の算出を行い，以上 3 過程を合計したものをコンクリート製造工程における CO_2 排出量とする．よって，工場番号 14 のコンクリート製造工程における CO_2 排出量は 3.1kg/m³+9.9 kg/m³+16.8 kg/m³=29.8kg/m³となる．**表 2.9** に工場番号 14 のコンクリート製造工程における CO_2 排出量を示す．

表 2.9　工場番号 14 のコンクリート製造工程における CO_2 排出量

No.	過程	単位	排出量
14	骨材製造過程のCO_2排出量	kg／m³	9.9
	骨材輸送過程のCO_2排出量		16.8
	生コン製造過程のCO_2排出量		3.1
	コンクリート製造におけるCO_2排出量		29.8

2.5　愛媛県産骨材使用における環境負荷量の算出

環境負荷物質として CO_2 を取り上げる．愛媛県産骨材のみ使用の場合，骨材製造過程，生コンクリート製造過程における 1m³当たりの CO_2 排出量は県外産骨材使用時と同じ値になる．しかし，骨材プラントから生コンクリート工場に骨材を輸送する過程において，輸送距離が異なり，船舶輸送を必要としないものとするため 1m³当たりの CO_2 排出量に差異が生じる．愛媛県産骨材使用における環境負荷量の算出においては，骨材プラントから生コンクリート工場に骨材を輸送する過程のみの 1m³当たりの CO_2 排出量を算出する．算出方法は愛媛県外の骨材プラントから骨材を移入している工場のみ，愛媛県内の骨材プラントから移入するものと仮定し，その陸上距離を算出する．陸上輸送における CO_2 排出量の原単位は**表 2.3** に記載している 10ｔ積ダンプトラックを使用した場

合の値を採用する．また，各生コンクリート工場に対する愛媛県内の骨材プラントの選定に関しては，生コンクリート工場が一部愛媛県内の骨材プラントから移入を行っている場合，その骨材プラントの骨材の使用割合を 100%と仮定しその陸上輸送距離を測定する．また，すべての骨材を県外の骨材プラントから移入している場合，その生コンクリート工場から最も陸上輸送距離が近い骨材プラントを選定し，その陸上輸送距離を算出する．いずれも県外の骨材プラントからの移入を 0%と仮定し，船舶輸送を使用しないものとする．以上の条件より愛媛県産骨材使用における CO_2排出量の算出を行う．**表 2.10** に工場番号 14 が愛媛県産骨材のみを使用した場合の CO_2排出量を示す．

表 2.10　工場番号 14 の愛媛県産骨材のみ使用による CO_2排出量

No.	過程	単位	排出量
14	骨材製造過程のCO_2排出量	kg/m³	9.9
	骨材輸送過程のCO_2排出量		10.2
	生コン製造過程のCO_2排出量		3.1
	コンクリート製造におけるCO_2排出量		23.2

第 3 章

調査結果及び考察

3.1　概説

第 3 章では，本研究のアンケート調査結果及び環境負荷量の算出結果，環境負荷低減方策の提案について記載する．

3.2　アンケート結果

2017 年に実施されたアンケートを項目ごとに分析する．3.2.1 では，各生コンクリート工場のそれぞれ使用している骨材の種類を示す．3.2.2 では，愛媛県生コンクリート工場における使用骨材の産地・製造業者を示す．

3.2.1　使用骨材の種類

愛媛県にある生コンクリート工場の 56 工場に対し使用骨材の種類について 2017 年にアンケートを実施した．細骨材，粗骨材それぞれの骨材種類の内訳を図 3.1，図 3.2，図 3.3 に示す．細骨材に関しては骨材種類の内訳及び骨材種類の詳細内訳も記載する．

図 3.1 に示すように，愛媛県の生コンクリート工場が使用する細骨材のうち 65％は砕砂，23％が海砂や山砂などの砂，残りの 12％が銅スラグや高炉スラグなどのスラグ骨材である．最近，新たな要求性能として話題になっているコンクリートの乾燥収縮問題への方策として,全国的に石灰石が注目されているが，愛媛県でもその傾向が見られ，細骨材種類の詳細内訳では，図 3.2 より，一番多く使用されているのは石灰岩の砕砂で 26％であった．石灰岩を使用する目的としては，海砂の採取禁止による骨材の代替として使用，アルカリ骨材反応がなく，スランプが出やすい，流動性の向上，特に，単位水量を低減し，乾燥収縮を抑えることでひび割れを低減するなど，生コンクリートの品質を高めるためである．また，瀬戸内海の生態系や環境保全の観点から愛媛県では H18 年より海砂採取は禁止となっているにもかかわらず，細骨材種類の詳細内訳では 21％と全体で 3 番目に使用されている．愛媛県で使用されている海砂は，すべ

て山口県や九州地方などの愛媛県外から移入されているものである．海砂を使用する目的は，品質面では，細骨材粗粒率の安定化，ワーカビリティー・ポンパビリティーの向上，ブリーディング量の低減など生コンクリートと製造するために必要な性能を確保するためである．また，価格・供給が安定していることも海砂を使用する目的となっている.生コンクリートを製造するにあたって，そのような性能を維持するために，愛媛県では採取禁止となった海砂を併用せざる負えないことが，海砂が内訳の 22%を占める要因である．

粗骨材種類の内訳は，**図 3.3** に示すように，砂岩 37%，石灰岩 33%，輝緑岩 17%，安山岩 8%，石英斑岩 5%となっており，すべて砕石を使用していることが確認できた．これは愛媛県における河砂利の枯渇が原因であると考える．

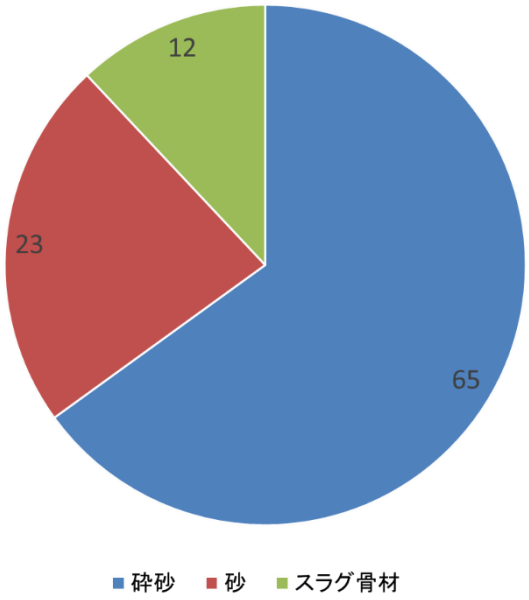

図 3.1　細骨材種類の内訳（2017 年）

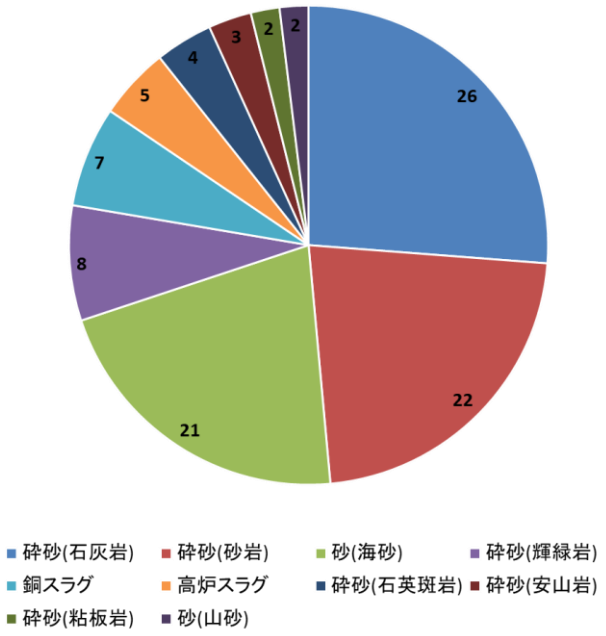

図 3.2　細骨材種類の内訳（詳細）（2017 年）

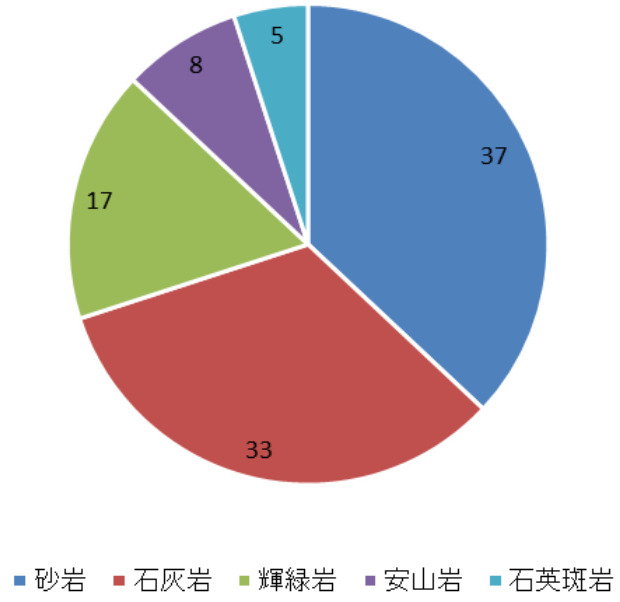

図 3.3　粗骨材種類の内訳（2017 年）

3.2.2 使用骨材の産地・製造業者

表 3.1 に愛媛県内の骨材産地・製造業者の一覧表，**表 3.2** に愛媛県外の骨材産地・製造業者の一覧表を示す．愛媛県生コンクリート工場が使用する愛媛県内の骨材プラントは半数以上が東予地域・中予地域であった．そのため東予地域にある生コンクリート工場では骨材を愛媛県内の骨材プラントから移入する傾向が見えた．また，県外産の骨材の骨材を移入する場合，東予地域では広島県福山市で製造するスラグ骨材や，広島県呉市で採れた砕石を移入しており，比較的海上距離が近い骨材プラントから移入しているのが確認できた．一方，南予地域では骨材の製造業者が東予・中予地域に比べ少なく，ほとんどの南予地域の生コンクリート工場は骨材を大分県津久見市などの九州地方の骨材プラントからの移入に頼っていることがわかった．

表 3.1　愛媛県内の調査対象骨材産地

骨材産地	製造業者
西条市小松町新屋敷	常盤砕石(株)
愛媛県西条市	(株)トーヨー砕石
西条市丹原町田滝	協和生コン(株)砕石工場
東温市山之内	(株)相原組
新居浜市阿島	西日本砕石(株)
新居浜市磯浦	住友金属鉱山(株)
今治市桜井	燧灘建設工業㈱
東温市山之内	愛媛砕石(株)
久万高原町	(有)大宝砕石工業
久万高原町	中予砕石(株)
大洲市菅田町	松浦建設(株)
喜多郡内子町	久保興業(株)
大洲市菅田町	谷本産業(株)
西予市城川町	南予砕石工業(株)
西予市三瓶町	西南砕石工業(株)

表 3.2　愛媛県外の調査対象骨材産地

骨材産地	製造業者
大分県津久見市	戸高工業社
大分県津久見市	大分太平洋鉱業(株)
大分県津久見市	日鉄鉱建材(株)
大分県津久見市	日鉄住金鉱化(株)
大分県津久見市	日鉄鉱業(株)
大分県津久見市	大分鉱業(株)
大分県佐伯市蒲江	(株)三原産業
大分県佐伯市蒲江	(株)市原商事
大分県蒲江沖	(株)大盛砂利
北九州市小倉南区	三菱マテリアル(株)
福岡県西区	博多海砂販売協同組合
北九州市	北九州砂採取販売協同組合
福岡県玄界灘	
広島県呉市	中国物産(株) 蒲刈砕石
広島県福山市	JFEミネラル(株)
山口県蓋井島	(株)日本骨材
高知県檮原町	檮原砂利

3.3　コンクリート製造過程ごとの環境負荷量の算出結果

3.3.1 に骨材製造における CO_2 排出量の算出結果，3.3.2 に骨材輸送過程における CO_2 排出量の算出結果，3.3.3 に生コンクリート製造過程における CO_2 排出量の算出結果を記載する．また，各生コンクリート工場の H29・30 年度の生コンクリート出荷数量の平均値を**図 3.4** に示す．

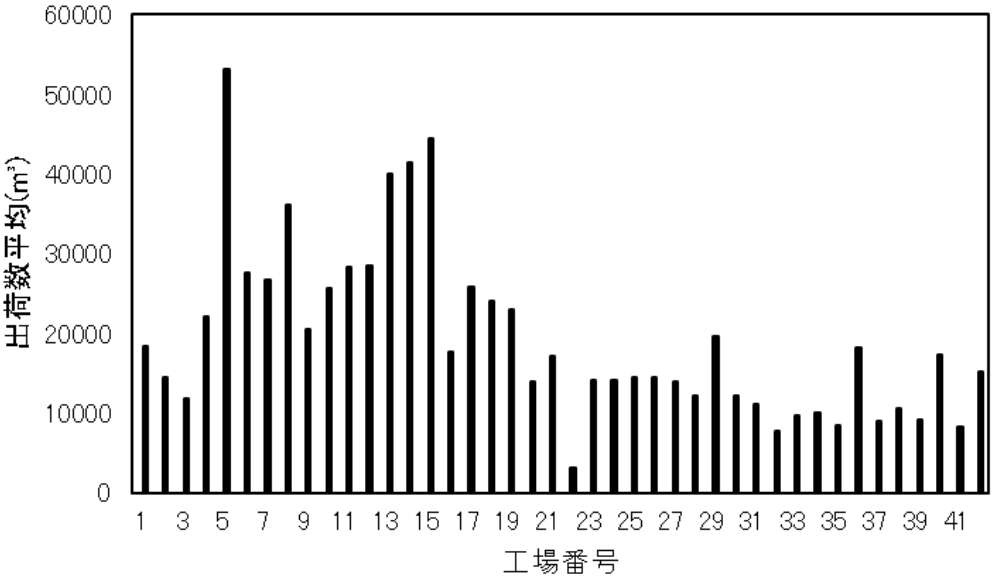

図 3.4　出荷数平均

3.3.1　骨材製造過程における CO_2 排出量の算出結果

図 3.5 に各生コンクリート工場の骨材製造過程における CO_2 排出量を示す．また，**表 3.4** に東予，南予，中予の地域別の各生コンクリート工場の骨材製造過程における CO_2 排出量の合計値と平均値を示す．地域別一工場当たりの骨材製造における CO_2 排出量は東予，中予，南予の順に多いことがわかった．42 工場の中で最も骨材製造における CO_2 排出量が多いのは工場番号 5 の 477859kg であり，最も少ないのは工場番号 22 の 30556.4kg であった．工場番号 5 は 42 工場のなかで最も年間出荷量が多いため，骨材製造過程における CO_2 排出量が最も多い結果となった．工場番号 22 の同様に，骨材製造過程における CO_2 排出量が最も少なくなった理由が言える．すべての生コンクリート工場の骨材製造過程における CO_2 排出量は同一のものと仮定しているため，年間の CO_2 排出量は各生コンクリート工場のコンクリート製造量に添う結果となった．

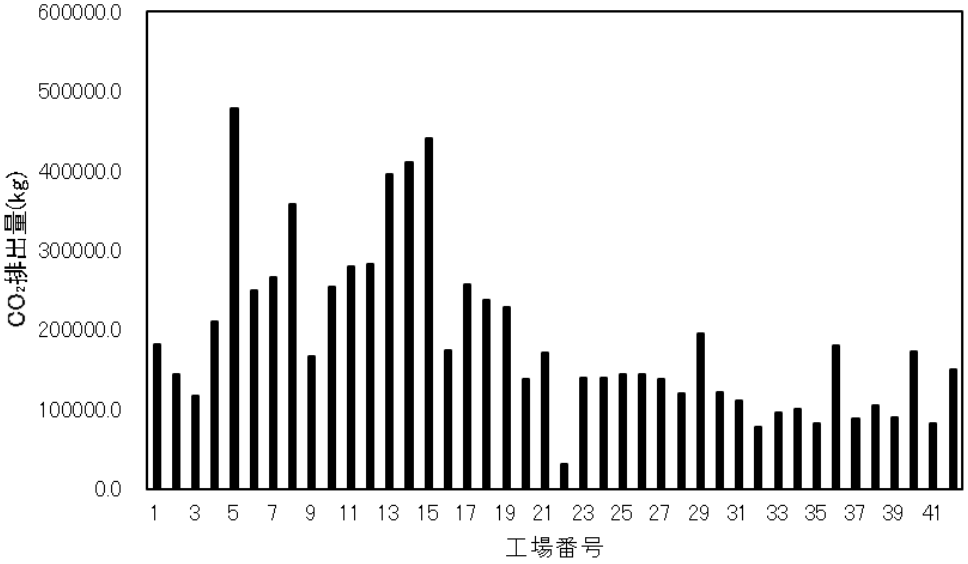

図 3.5　工場別骨材製造過程における CO_2 排出量(kg/年)

表 3.3　地域別骨材製造過程における CO_2 排出量の合計値と平均値

地域	地域ごとのCO_2排出量(kg/年)	1工場当たりのCO_2排出量(kg/年)
東予	3379571.1	259967.0
中予	2056467.6	257058.5
南予	2509140.2	119482.9

3.3.2　骨材輸送過程における CO_2 排出量の算出結果

図 3.6 に各生コンクリート工場の骨材輸送過程における CO_2 排出量を示す．また，図 3.7 に東予，南予，中予の地域別の各生コンクリート工場の骨材輸送過程における CO_2 排出量の平均値を示す．また，図 3.8，図 3.9 に細骨材・粗

骨材それぞれの愛媛県内産と県外産の使用量を示す.

42 工場の中で骨材製造過程における CO_2排出量が最も多いのは工場番号 38 の 47.5kg/m^{3}であり，最も少なかったのは工場番号 3 の 2.2kg/m^{3}であった．工場番号 38 は全細骨材・粗骨材ともに大分県津久見市の大分鉱業(株)から移入している．海上輸送距離 211km，陸上輸送距離が 3.8km であり船舶輸送が起因する CO_2排出量が 46.2kg/m^{3}と大部分を占めている．これにより骨材輸送過程における CO_2排出量が最も多い結果となった．また，工場番号 3 は全細骨材・粗骨材ともに愛媛県西条市丹原町のトーヨー砕石(株)から移入している．陸上輸送距離が 6.4km であり，骨材輸送過程における CO_2排出量は 10 t 積ダンプトラックによる輸送が起因する CO_2排出量の 2.2kg/m^{3}のみである．工場番号 38 は工場番号 3 の約 21.6 倍の CO_2排出量であり大きく差が生じる結果となった．**図 3.8**，**図 3.9** より，県外産の細骨材を約 50%，粗骨材を約 40%使用している本県では，そのことが大きく影響し骨材輸送分の CO_2排出量が大きくなったといえる．

地域別の各生コンクリート工場の骨材輸送過程における CO_2排出量では，東予，南予，中予における一工場当たりの CO_2排出量を比べると南予，中予，東予の順に多いことがわかった．最も骨材輸送過程における CO_2排出量が多い結果となった南予地域は 21 工場のうち 9 工場が愛媛県外産骨材のみを使用していることがアンケートの結果よりわかった．また，21 工場すべて愛媛県産骨材のみを使用している工場はなく，使用骨材の一部またはすべて愛媛県外産骨材であった．したがって，21 工場すべてが骨材を輸送する際，船舶を利用していることが骨材輸送過程における CO_2排出量が最も多くなる結果の要因となっている．また，3 地域のうち骨材輸送過程における CO_2排出量が最も少ない東予地域では，13 工場のうち 1 工場だけ愛媛県外産骨材のみを使用しており，その工場以外は愛媛県産骨材の使用割合が高い傾向であった．そのため，長距離の船舶輸送を必要とせず，愛媛県内の骨材プラントから陸上輸送のみを行い骨材を移入しているためこのような結果になった．また，南予地域と比べ東予・中予地域は骨材プラントが多く存在し比較的短距離の陸上輸送で骨材の移入を行っていることも南予地域が東予・中予地域より骨材輸送過程における CO_2排出量が多い要因であると考えられる．

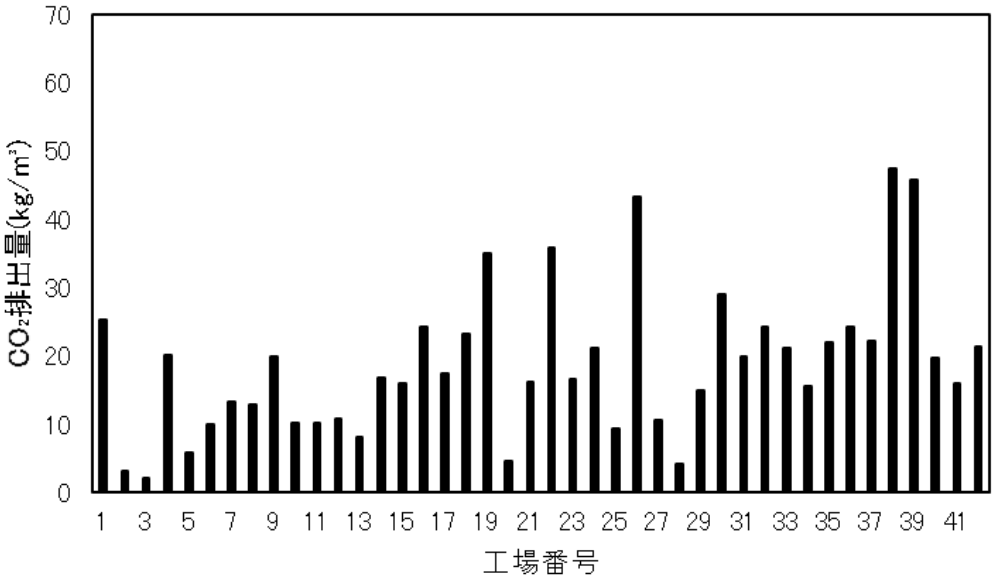

図 3.6　工場別骨材輸送過程における CO_2 排出量(kg/m³)

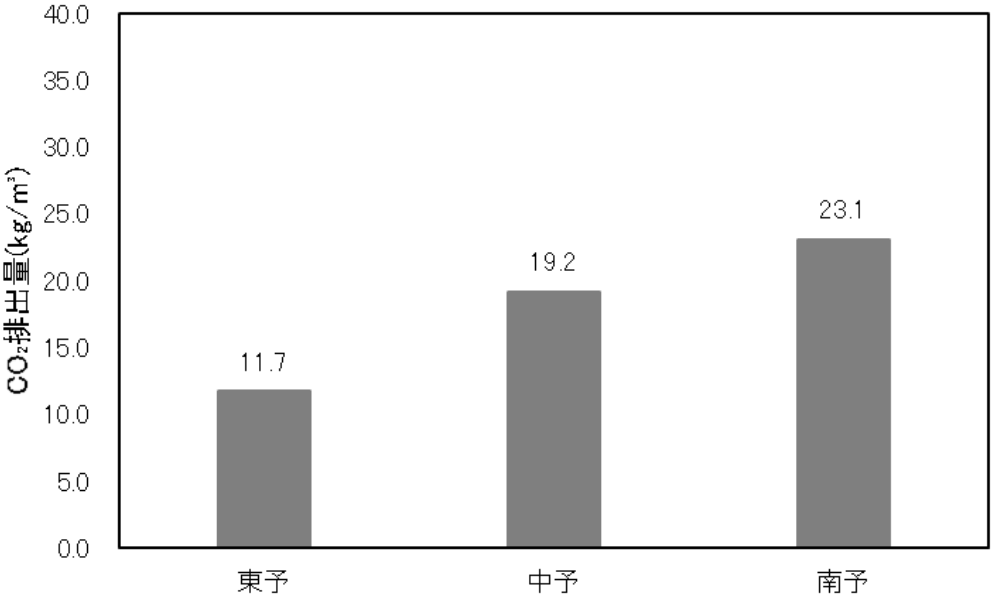

図 3.7　地域別骨材輸送過程における CO_2 排出量の平均値

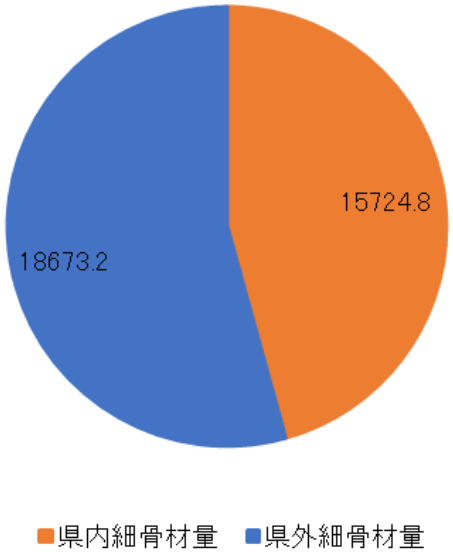

図 3.8　愛媛県内・県外の細骨材使用量(kg/m³)

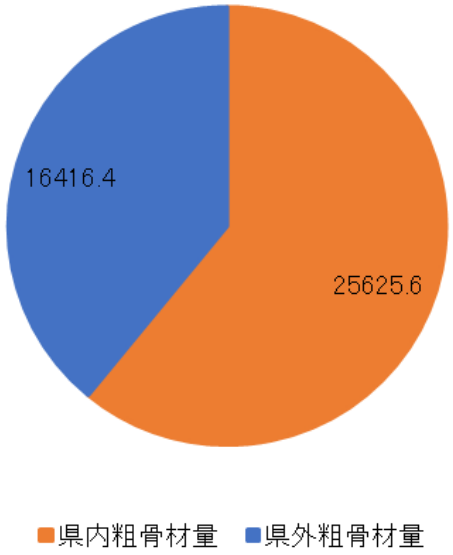

図 3.9　愛媛県内・県外の粗骨材使用量(kg/m³)

3.3.3　生コンクリート製造過程における CO_2 排出量の算出結果

生コンクリート 1m³当たり製造過程の CO_2 排出量は，生コンクリートの製造

に要した電気使用量で算出する．しかし，既往研究[2)]により，生コンクリート製造に要した電気使用量のみを算出することができず，事務所等に要した使用量も含めて算出しなければいけないことが報告されている．よって，生コンクリート製造過程におけるCO_2排出量は各生コンクリート工場で差異がないものとし，使用するCO_2排出量は，「香川県の建設に関わる物質フロー研究会」において報告されている既定値の 3.10 kg/m^{3}を用いる．

3.4　コンクリート製造におけるCO_2排出量の算出結果

3.3.1 の骨材製造における CO_2排出量の算出結果，3.3.2 の骨材輸送過程における CO_2排出量の算出結果，3.3.3 の生コンクリート製造過程における CO_2排出量の算出結果を生コンクリート工場ごとに合計したものを各生コンクリート工場のコンクリート製造が起因する CO_2排出量とし，**図 3.10** に示す．また，**図 3.11** に東予，南予，中予の地域別の各生コンクリート工場のコンクリート製造における CO_2排出量の平均値を示す．また，**図 3.12**，**3.13** に 1m^{3}当たりのコンクリート製造における過程ごとの CO_2排出量を示す．

図 3.10 より，コンクリート製造を起因とする CO_2排出量が最も多いのは工場番号 38 の 60.5kg/m^{3}であった．最も少なかったのは工場番号 3 の 15.2kg/m^{3}と約 4 倍の開きがあり，工場間の差異は大きいことが分かった．影響因子として骨材の輸送形態が考えられ，主に愛媛県外産の骨材を使用している南予地域の CO_2排出量が**図 4.11** を見ても突出して大きい．コンクリート製造全体の CO_2排出量増大に遠方地区からの骨材輸送過程が明らかに起因しており，骨材選定時に愛媛県産骨材を積極的に使用するなど留意する必要がある．

図 3.12 より，本研究対象としたコンクリート製造過程のうち骨材輸送過程が約 6 割の CO_2排出量を占めていて，最も CO_2を排出する過程であることが確認できた．

図 3.13 より，骨材製造過程ではスラグ骨材を使用している工場で 8.1kg/m^{3}と最小値であり，スラグ骨材を使用していない工場では 9.9kg/m^{3}の排出量であり工場間で 1.8kg/m^{3}の差異が生じているだけであった．骨材輸送過程では **4.3.2** で記載した通り，工場間で排出量の差は 44kg/m^{3}であり，コンクリート製造で工場間の差異が最も大きくなる工程であることがコンクリート製造過程で

CO_2排出量を比較することにより確認できた.

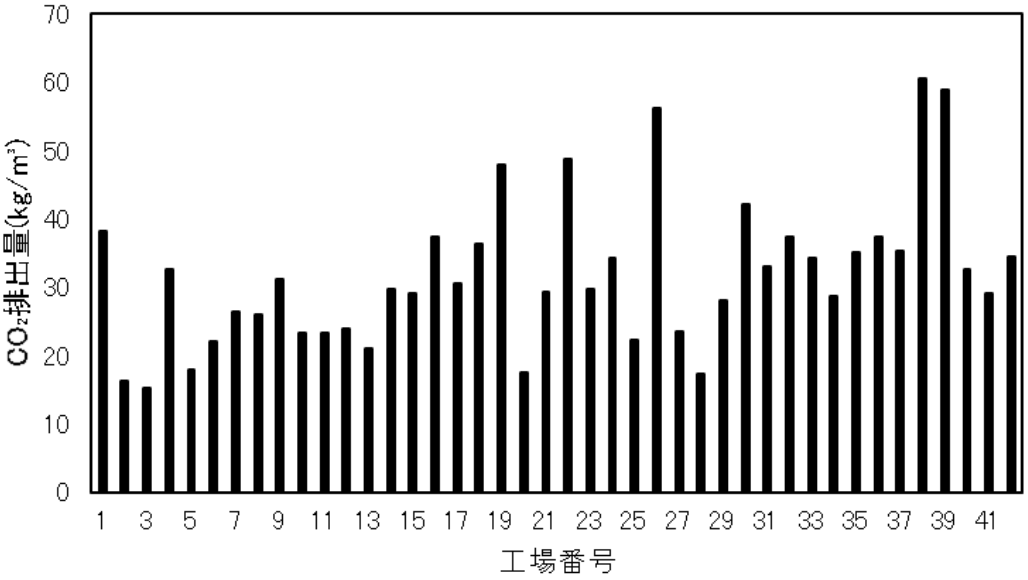

図 3.10　工場別コンクリート製造における CO_2排出量(kg/m³)

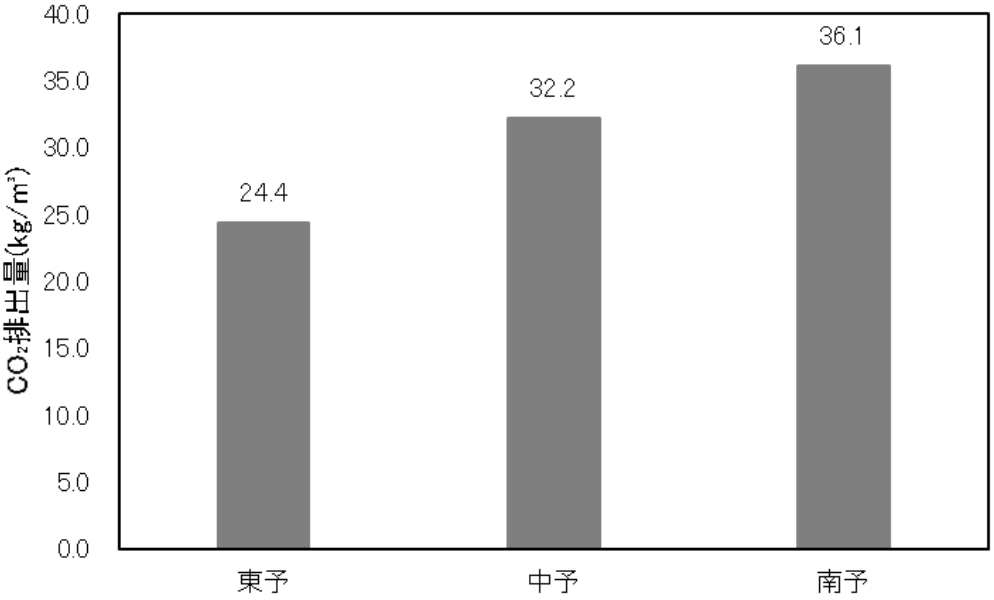

図 3.11　地域別コンクリート製造における CO_2排出量の平均値

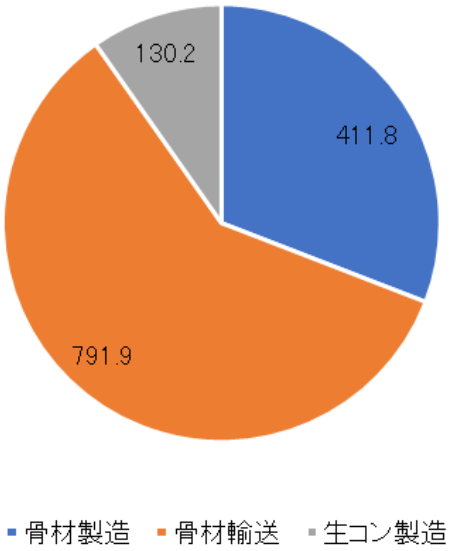

図 3.12　1m³当たりの CO_2 排出量

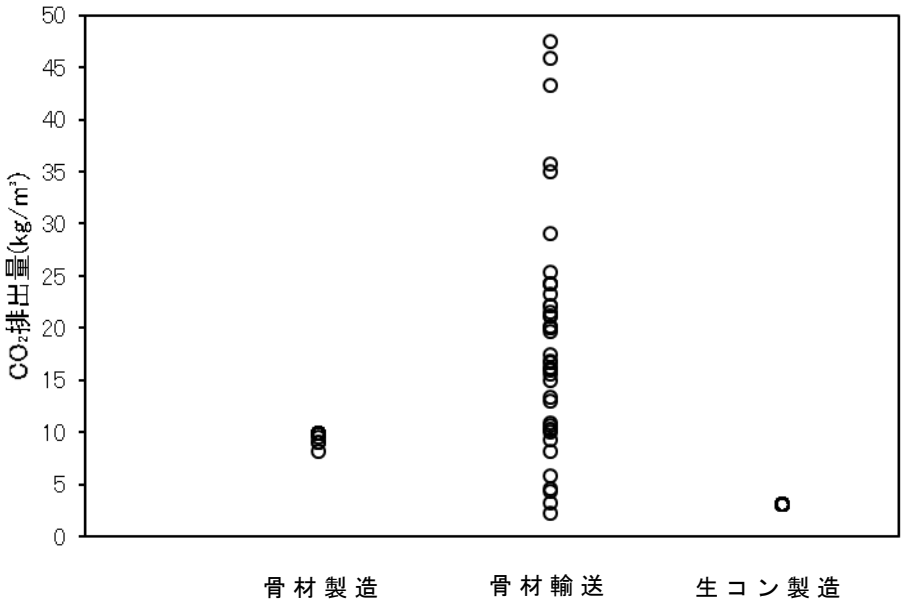

図 3.13　過程ごとの CO_2 排出量

3.5　愛媛県産骨材使用による環境負荷量の算出結果

3.5.1 に，各生コンクリート工場が使用する愛媛県外産の骨材の使用割合を 0 と仮定し，愛媛県産の骨材のみ使用する際，愛媛県内の骨材プラントを選定した結果，3.5.2 に，愛媛県内のみの骨材プラントから移入を行った際の骨材輸送過程における CO_2排出量の算出結果を記載する．骨材製造過程，生コンクリート製造過程における CO_2排出量は，愛媛県産骨材のみ使用すると仮定しても算出結果は変わらないため CO_2排出量は 3.3.1，3.3.3 で算出した値と同じものとする．

3.5.1　各生コンクリート工場の使用骨材プラントの変換

愛媛県内の骨材プラントは**表 3.1** に記載しているものに限定し選定を行う．また，愛媛県産骨材のみを使用している生コンクリート工場に関しては，その実状値を地産地消による CO_2排出量とする．2.5 の骨材プラントの選定を基に各生コンクリート工場の使用骨材プラントの変換を行う．

3.5.2　骨材の地産地消による輸送過程における CO_2排出量の算出結果

愛媛県産骨材のみを使用した場合の各生コンクリート工場の骨材輸送過程における CO_2排出量を**図 3.14** に示す．また，**図 3.15** に東予，南予，中予の地域別の各生コンクリート工場の骨材輸送過程における CO_2排出量の平均値を示す．**図 3.14** より，愛媛県産骨材のみを使用した骨材輸送を起因とする CO_2排出量が最も多いのは工場番号 39 の 28kg/m^{3}であった．最も少なかったのは工場番号 28 の 1kg/m^{3}であり，工場間の差異は実状値の 45.3kg/m^{3}と比較すると約 6 割小さくなった．愛媛県産骨材のみを使用することにより，愛媛県外からの遠距離間の船舶輸送を起因とする CO_2排出量が 0 になったため，愛媛県外産の骨材を使用していた生コンクリート工場では CO_2排出量を低減することができた．また CO_2排出量を地域別で比べると，東予と南予で 4.1kg/m^{3}であり，工場間の差異は実状値の 11.7kg/m^{3}と比較すると約 3 倍小さくなることがわかった．

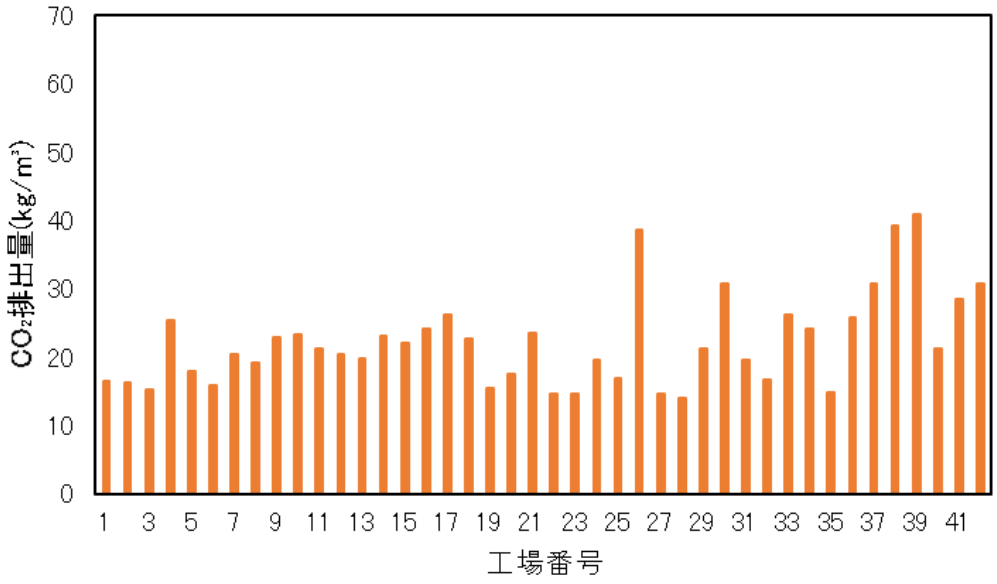

図 3.14　工場別愛媛県産骨材のみ使用した CO_2 排出量(kg/m³)

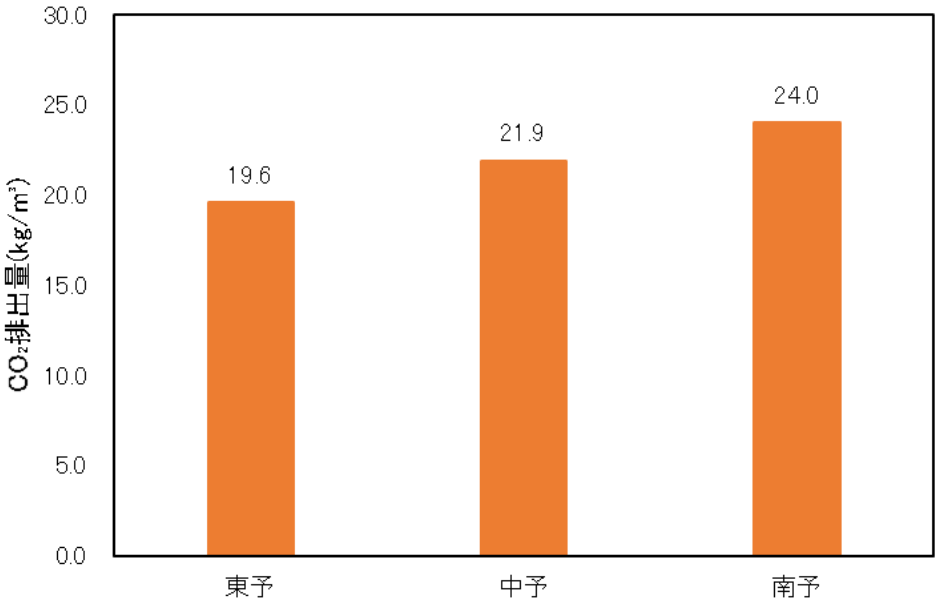

図 3.15　地域別愛媛県産骨材のみ使用した CO_2 排出量の平均値

3.6　コ骨材の地産地消による CO_2 排出量と実状値の比較

図 3.16 に各工場のコンクリート製造における CO_2 排出量の実状値と愛媛県産骨材のみ使用した場合のコンクリート製造における CO_2 排出量の比較を示す．また，**図.17** に地域別のコンクリート製造における CO_2 排出量の実状値と愛媛県産骨材のみ使用した場合のコンクリート製造における CO_2 排出量の比較，**図 3.18** に愛媛県全体で見た $1m^3$ 当たりのコンクリート製造における CO_2 排出量の比較を示す．

図 3.16 より，愛媛県外産の骨材を移入していた工場は，使用骨材すべてを愛媛県内産の骨材にすることで CO_2 排出量を低減することが確認された．また，**図 3.17** より，愛媛県産骨材の使用割合が比較的多い東予地域の工場より，愛媛県外から骨材の移入を多く行っている中予・南予地域の方が骨材の地産地消による CO_2 排出量の減量が多いことが確認できた．愛南町などの南宇和郡周辺にコンクリート製造所を構える工場は，使用骨材の約 9 割以上を愛媛県外から骨材を移入しており，骨材の地産地消により大幅に CO_2 排出量の低減を確認することができた．しかし，依然として突出して CO_2 排出量が多い．愛媛県内の骨材プラントが南予地域，特に宇和島市より南に位置する愛南町などの地域に存在せず，骨材の地産地消を行っても長距離の陸上輸送を強いられることがその要因として考えられる．

図 3.18 より，愛媛県全体でみると $1m^3$ のコンクリートを製造する際，愛媛県内の骨材のみ使用すると CO_2 排出量は約 $400kg/m^3$ 低減することを確認できた．平均して一工場で $1m^3$ のコンクリートを製造するのに約 $31kg/m^3$ の CO_2 を排出することから約 13 工場分の CO_2 排出削減に貢献することと等しい結果である．

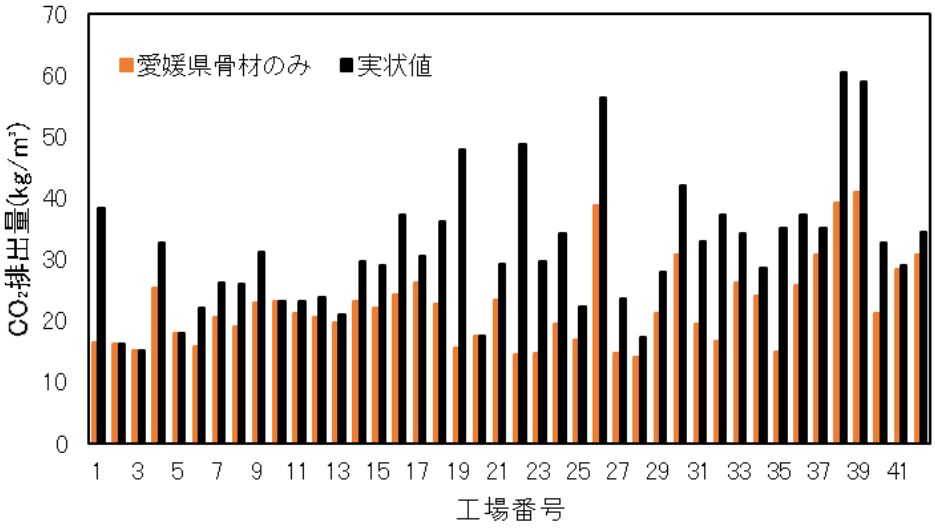

図 3.16　CO_2排出量の比較

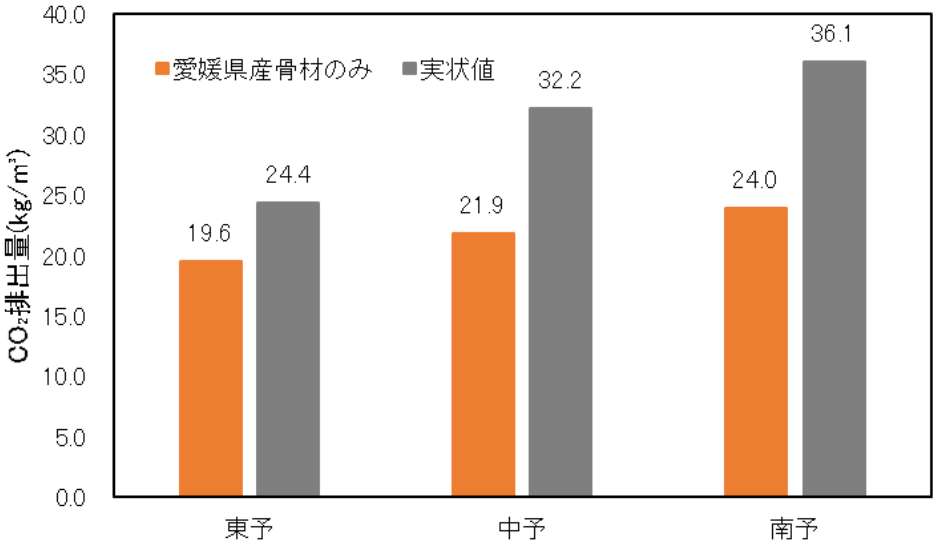

図 3.17 地域別 CO_2排出量の比較

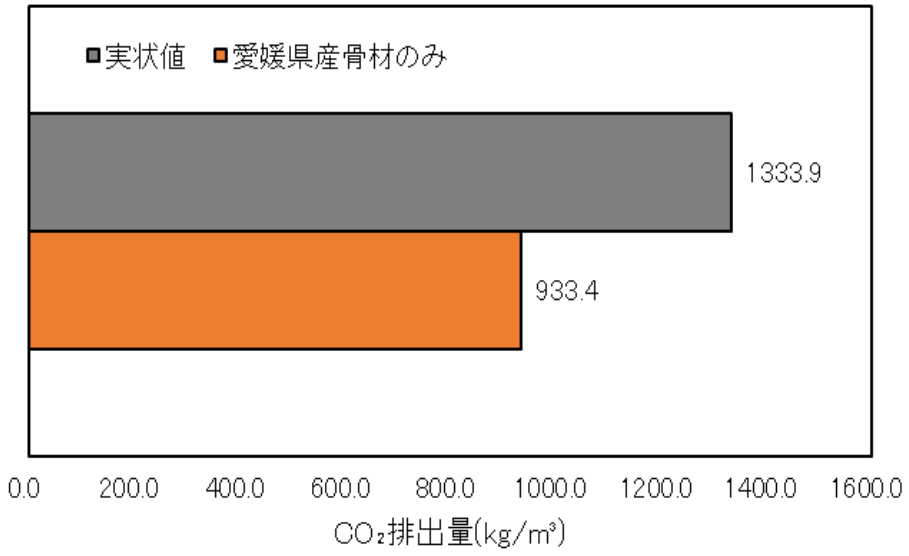

図 3.18　愛媛県全体のコンクリート製造における CO_2 排出量

3.7　環境負荷低減方策の提案

コンクリート製造における CO_2 排出量を低減するには，骨材輸送の短縮が最も効率的であることが分かった．つまり，海上輸送を必要としない愛媛県内産の骨材を使用することである．そのためには，県外産を購入する目的，あるいは要求品質が何であるかを明確にし,県内産での満足度を評価する必要がある．一例をあげると，コンクリートの乾燥収縮を県内産骨材の組み合わせで低減度合いを確認する，乾燥収縮を低減するとされている材料の混和によりその効果を確認する，船舶輸送とのコスト面での比較などである．

現在の骨材選定はどの工場も品質とコストを最優先する傾向がある．実際愛媛県では海砂の採取禁止以降，天然骨材に代わる品質の良い骨材を使用するため大分県津久見市を代表とする九州地方からの石灰骨材の移入，山口県や北九州などの海砂の移入を行う工場がほとんどである．この良質な県外産の骨材に代わるものとして製造時の CO_2 排出量が少ない高炉スラグ微粉末やフライアッシュ，シリカフォームなどの産業廃棄物を大量に使用し，コンクリートの性能を満足なものとする配合設計を確立することで CO_2 排出量を低減することが可能になる．愛媛県では，住友金属鉱山株式会社が新居浜市を拠点とし産業副産物である高炉スラグを製造している．その高炉スラグを細骨材に置換し使用している工場もあるが，広島県呉市などから船舶を使用し高炉スラグを移入して

いる工場もある．しかし，愛媛県ではこの高炉スラグの使用割合がまだ少なくCO_2排出量を低減するために満足できるものとは言えない．そのため愛媛県内に新たに高炉スラグを製造できる製鉄所の開拓をすることにより，愛媛県内産の高炉スラグと砕石をミックスした骨材の安定供給の推進を図る．そして，性能を満足なものとするコンクリートを製造するとともに骨材輸送過程におけるCO_2排出量を減らすことでコンクリート製造を起因とする CO_2排出量の低減を目標とする「低炭素型のコンクリート」を開発する必要があると考える．

第 4 章

結 言

本調査結果をまとめると，愛媛県におけるコンクリート製造に関わる環境負荷の現状は以下のとおりである．

① 愛媛県内の生コンクリート工場が使用する細骨材種類の内訳では，約半数を愛媛県外の石灰骨材と海砂で占めていることが確認できた．また，粗骨材は約 40%を愛媛県外産の砕石を使用していることが確認できた．

② 愛媛県全体の 1m^{3}当たりのコンクリートを製造することによる CO_2排出量は平均して約 31kg/工場であり，約 60%が骨材の輸送によるものである．中でも九州産の石灰骨材を多く移入している影響が最も大きい．また，工場間で差異が認められ，最大と最小では骨材輸送が主要因となり，約 4 倍の開きが生じている．

③ 骨材の地産地消を行うことにより，コンクリート製造における CO_2排出量は愛媛県全体で約 400kg/m^{3}低減することが可能であることを確認できた．また，工場間の差異は，最大と最小で 45.3kg/m^{3}であったのに対し，骨材の地産地消を行うことにより 27kg/m^{3}となり約 60%小さくなったことが確認できた．

④ 東予・中予・南予の地域別のコンクリート製造における CO_2排出量を比較すると南予が突出して多いことが分かった．影響因子として骨材の輸送形態が考えられ，骨材プラントが少ない南予では使用骨材の 90%以上を愛媛県外の遠方地区から移入していることが確認できた．骨材の遠距離間輸送がほかの地域と比べ CO_2排出量の増加に影響している．

参考文献

1） 日本材料科学会編：先端材料シリーズ　地球環境と材料，裳華房，1999.11

2） 吉田満広，川原勝：生コン工場における CO_2 排出量の試算と削減方策の提案，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.78-82，2010.9

3） 愛媛県：瀬戸内海の環境の保全に関する愛媛県計画，2016.11

4） 井上真澄，山崎新太郎，猪狩平三郎，岡田包儀：各種粗骨材の品質がコンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.65，No.1，pp.261-267，2011.3

5） 愛媛県砕石工業組合：砕石骨材の出荷状況（砕石動態四半期報，H18 年～H28 年）公表用　http://www.ehime-saiseki.jp/download/

6） 香川県庁土木部：総合評価方式におけるコンクリート起源 CO_2削減評価マニュアル，2019.7