

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25730137

研究課題名(和文) マルチエージェントを用いた工業地帯における熱エネルギー統合システムの開発

研究課題名(英文) Inter-process Heat Integration using Multiagent System for Industrial Complex

## 研究代表者

木村 直樹 (Kimura, Naoki)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00432857

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：化学プラント間エネルギー統合のため、情報の抽出・調整プロトコルの確立、統合案作成アルゴリズムを検討した。

マルチエージェントシステム上に実装しシミュレーションを行なった結果、いくつかのエネルギー統合案(省エネ化案)を得ることが出来た。統合案の中には、各プラントに均等にメリットがあるものもあれば、一部のプラントにはメリットがあり、逆に別のプラントにはデメリットがある案など、種々の結果が含まれている。プラント間での利益分配により、工業地帯全体の熱エネルギー効率向上の可能性を示すことが出来た。

研究成果の概要(英文)：In order to achieve heat integration among chemical plants, information extraction, coordination protocol and algorithm for making heat integration plans have been investigated. Implementation of these respects into a multiagent system, which has been built up to design energy saving heat exchanger networks for a single chemical plant, was carried out. As a result of simulation, several heat integration plans were obtained. Some plans have conflict of interest among plants. Profit sharing among plants brings large economic and environmental profit by heat integration.

研究分野：プロセスシステム工学

キーワード：熱エネルギー統合化 化学プラント情報の抽出 化学プラント情報の交換 調整プロトコル

### 1. 研究開始当初の背景

「チャレンジ25」の名の下にCO<sub>2</sub>削減に向けた取り組みが展開されている。しかし、オイルショック以降の各企業の熱心な取り組みにより、日本の工業界においては、個々のプラントがすでに限界近くまで省エネ化されている。そのため、これまでの省エネ化手法では、これ以上の改善は難しいと言われている。工業地帯では、数多くの化学プラントが隣接して建設され、コンビナートを形成し、原料や化学（半）製品の輸送を効率化しているが、加熱/冷却ユーティリティ（加熱スチームや冷媒等）の面では、共有すら行なわれていない。近年、NEDO および千代田化工建設（株）が中心となり、水島コンビナートなどにおいて企業の枠を超えたエネルギーの地域統合システムが構築されている。ところが、地域統合案を作成するためには、個々の化学プラントから詳細な設計・性能・運転情報を収集・分析しなければならないが、次に挙げるように情報開示が難しいために、エネルギーの相互融通が困難である。

(1) 製造プロセスに関するライセンス契約上の秘密保持義務のため、設計・運転等の情報開示・交換が出来ない。

(2) 品質や製造コスト等、企業の競争力に関わる情報のため、開示・交換が出来ない。

そこで本研究では、代表者らが構築してきたマルチエージェントシステムを用いて情報を管理し、熱エネルギーの統合化のために必要な情報のみを抽出・交換することで、工業地域全体の最適化を図ることとする。

### 2. 研究の目的

化学工業分野における一層の省エネ化を図るため、近接する化学プラント間での企業の枠を超えた熱エネルギー統合化（=相互融通，heat integration）システムが必要である。本研究では、エージェントのコミュニケーション機能と情報管理機能、協調機能を利用して、各企業の持つ詳細な設計情報・運転情報等の秘密を保持しつつ、最適な熱エネルギー統合案の検討を行うフレームワークを構築する。

本研究の具体的な目的・課題は以下の4点である。

- (1) 「化学プラント間エネルギー統合のために必要な情報」の抽出
- (2) 「化学プラント間調整プロトコル」の確立
- (3) 「化学プラント間でのエネルギー統合案作成アルゴリズム」の検討
- (4) 「化学プラント間エネルギー統合案の評価手法」の検討

### 3. 研究の方法

図1に本研究課題で構築するシステムの概要を示す。代表者らは、マルチエージェントを用いた熱交換器網設計支援システムを構築してきた。これまでに構築してきたシステム

は、図中の上部または下部に破線で記した範囲であり、単一のプラントに対する省エネ化案を導出することが出来る。本研究課題では、そのマルチエージェントシステムを複数連結し、新たにコーディネータエージェントを設置することで、プラント間の熱統合案の導出を行なうことが出来るようにした。システムの拡張にあたり、目的に掲げた4項目を検討・実装する必要があり、以下に述べるような検討を行なった。

(1) 化学プラント間エネルギー統合のために必要な情報の抽出：

化学プラントには、設計情報や運転状態、経済性など多岐に渡る情報が存在する。プロセス流体の流量、温度、圧力、組成（物性）などの具体的な運転状態そのものの情報は、各企業の競争力に直結するため開示することは難しい。一方で、熱エネルギー統合化のためには、それらの具体的な情報がすべて明らかである必要はなく、プロセス流体の流量や組成から決定される熱容量（CP 値）と温度のみ分かればよいと言える。また、これらの情報を交換するための情報記述方式として、化学プラント用のXML文書型定義に取り組んだ。定義したXML形式を用いて情報を記述することにより、各プラントのシステムが異なっても柔軟な

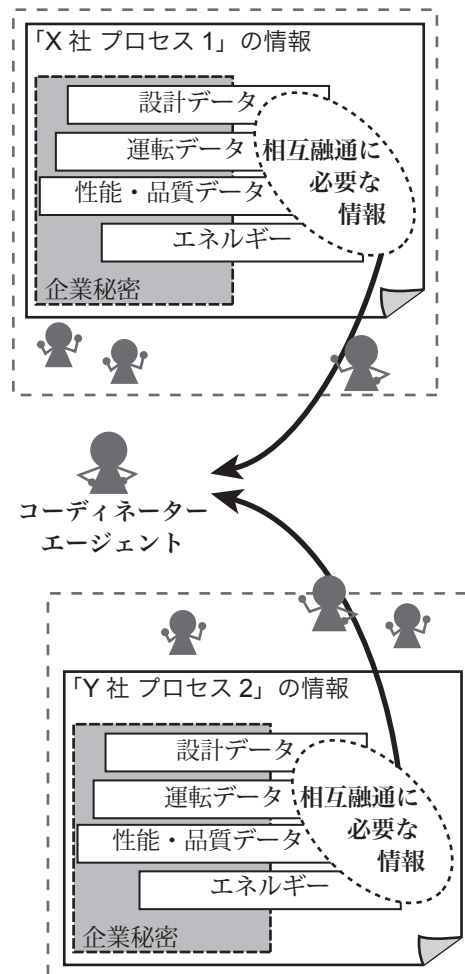


図1：マルチエージェントを用いたシステムの概要

情報交換が可能になると期待でき、人間・コンピュータ双方の読み書きが容易なXMLを用いることにより、研究やシステム開発段階の作業効率も確保することが出来る。

- (2) 化学プラント間調整プロトコルの確立：プラント毎に設けるマネージャエージェントの役割とそれらのマネージャエージェント間の調整を行うコーディネータエージェントの役割を検討し、実装を行った。
- (3) 熱エネルギー統合案の作成アルゴリズムの検討：

コーディネータエージェントから提案される調整案に対して、プラント毎に設けたターゲティングエージェントにおいて、自プラントの調整を行いコーディネータに返答する機能を検討・実装した。

- (4) 化学プラント間エネルギー統合案の評価手法の検討

上記3点の検討・実装を行なうと、シミュレーションにより、いくつかのエネルギー統合案(省エネ化案)を得ることが出来る。これらの案を評価する手法を検討した。

#### 4. 研究成果

図2に本研究課題で検討した化学プラント間調整プロトコルに基づく交渉の一例を示す。コーディネータとプラントA、B、Cそれぞれのマネージャエージェント間で種々のメッ

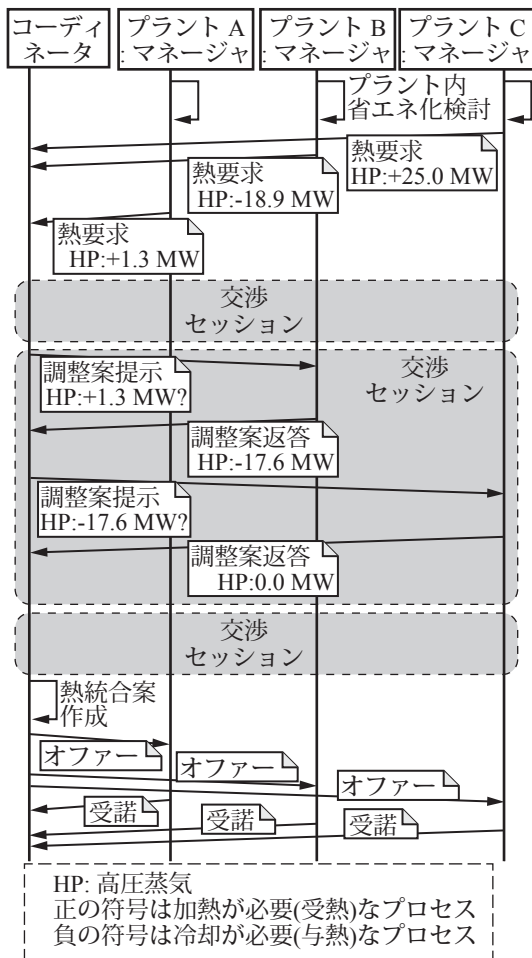


図2：化学プラント間調整プロトコルによる交渉の一例

セージ交換により交渉を行なう。まず、熱エネルギー統合化を考慮せずにプラントごとに個別に省エネ化検討を行なう。各プロセスはプラント内省エネ化検討結果に基づいて、他プラントと熱交換の可能性があるものを「熱要求」メッセージとしてコーディネータに送信する。コーディネータは受信した熱要求に基づいて、交渉セッションを開始する。図2の交渉セッションでは、プラントAの熱要求(高圧蒸気を1.3MW欲しい)に対して対応可能か、コーディネータがプラントBのマネージャに調整案を提示する。プラントBでは、マネージャと配下のエージェントが調整案に対する対応案を検討し、返答を作成する。図2では「高圧蒸気 17.6MW 供給可能(=18.9+1.3)」であることを返答している。この返答に対してコーディネータはプラントCのマネージャに「高圧蒸気を17.6MW使用しないか」打診を行なう。同様にプラントCのマネージャと配下のエージェントが検討した結果、打診された17.6MWを使用することを返答する。ここで3プラント全てと交渉を行い、融通可能な用役(ここでは高圧蒸気のみ)のバランスが取れたので、熱統合案を1つ作成することができ、交渉セッションを完了する。同様にして、プラントBやプラントCから発せられた熱要求メッセージに基づいた交渉セッションを行なうことにより、複数の熱統合案を作成することが出来る。

表1に対象とした3プラントからなる3P-1問題の本手法適用前の用役使用量およびコストを示す。プラントA~Cまでであり、排ガス、高圧蒸気、冷水が使用されている。表中の上段の数字は用役使用量(単位はMW)であり、+の符号は用役を消費していることを示す。-の符号はその用役を発生させていることを示す。表中の下段のカッコ付きの数字は年間用役コスト(k£/年)を示している。表1では、それぞれのプラントが独自に用役を消費し、一切のエネルギー統合が行なわれていないため、用役の使用はすべて+(消費)であり、3プラント合計で年間約300万ポンドの用役コストが掛かっていることになる。

表1：3P-1問題における各プラントの用役使用量および用役コスト(エネルギー統合前)

用役名	プラント名			合計
	A	B	C	
排ガス		+1.65 (165)		+1.65 (165)
高圧蒸気	+1.30 (104)		+25.00 (2,000)	+26.30 (2,104)
高圧蒸気(融通)				0 (0)
冷水	+22.80 (228)	+19.50 (195)	+36.50 (365)	+78.80 (788)
合計コスト	(332)	(360)	(2,365)	(3,057)

表2にエネルギー統合案の1つを示す。高圧

蒸気（融通）は、プラントBで発生させた高圧蒸気をプラントCで全量消費し、プラントCは不足分（6.1MW）の高圧蒸気を用役プラントから供給していることを示す。なお、プラントBでは冷水で冷却していた過剰熱を用いて高圧蒸気を発生させ、蒸気を売却しているため、冷水コストの大幅削減と蒸気売却益を得ている。この結果、プラントAは統合前と変化はないが、プラントBは年間210万ポンドの利益となり、プラントCは年間76万ポンドのコスト増となっている。

表2：3P-1問題における  
エネルギー統合案1

用役名	プラント名			合計
	A	B	C	
排ガス		+1.65 (165)		+1.65 (165)
高圧蒸気	+1.30 (104)		+6.10 (488)	+7.40 (592)
高圧蒸気 (融通)		-18.90 (-2,268)	+18.90 (2,268)	0 (0)
冷水	+22.80 (228)	+0.60 (6)	+36.50 (365)	+59.90 (599)
合計コスト	(332)	(-2,097)	(3,121)	(1,356)

表3にエネルギー統合案2を示す。本統合案は図2の交渉例として示した案である。統合案1と比較して、プラントBで発生させた高圧蒸気をプラントAでも使用している。従って、プラントAでも年間コストが上昇しているが、プラントCの年間コストは統合案1に比べて5万ポンドほど抑えられている。

表3：3P-1問題における  
エネルギー統合案2

用役名	プラント名			合計
	A	B	C	
排ガス		+1.65 (165)		+1.65 (165)
高圧蒸気			+7.40 (592)	+7.40 (592)
高圧蒸気 (融通)	+1.30 (156)	-18.90 (-2,268)	+17.60 (2,112)	0 (0)
冷水	+22.80 (228)	+0.60 (6)	+36.50 (365)	+59.90 (599)
合計コスト	(384)	(-2,097)	(3,069)	(1,356)

統合案1, 2のどちらも、プラントAおよびプラントCが大幅な損を被ることになり、3プラント間のコンセンサスを得ることは出来ないため、このエネルギー統合案を実現することは出来ない。プラントBの利益の一部をプラントAやプラントCに誘導することができれば、本統合案が実現可能であると考えられる。いくら誘導すればよいかは、経営的判断や各社間の交渉次第のため、本研究課題の範囲外と考える。しかし、3プラント合計で年間170万ポンドの経費削減を達成することができるため、統合案を採用する利益は大きい。加えて、過剰熱を冷却していた冷水や、用役プラントで発生させていた高圧蒸気の使用量を

を大幅に削減できることで、温室効果ガスの排出量削減にも寄与することが出来ると考えられる。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① N. Kimura, T. Kaya, S. Miyamoto, Y. Tsuge, "Inter-process Heat Integration by Coordination among Agent Systems for Heat Exchanger Network Design," *Computer Aided Chemical Engineering*, 査読有, Vol. 37, 2015, p. p.1163-1168  
doi:10.1016/B978-0-444-63577-8.50039-5

[学会発表] (計 6 件)

- ① S. Miyamoto, N. Kimura, Y. Tsuge, "Improvement in Design of Heat Exchanger Network by Strategy Switching", The 3rd Joint Symposium of Kyushu Univ.-Shanghai Univ.-Yeungnam Univ. on Chemical Engineering, 2016年1月29日, 九州大学(福岡)
- ② S. Miyamoto, N. Kimura, Y. Tsuge, "Strategy Switching Mechanism for Design of Heat Exchanger Networks, The 28th International Symposium on Chemical Engineering, 2015年12月5日, 済州(韓国),
- ③ N. Kimura, T. Kaya, S. Miyamoto, Y. Tsuge, "Inter-process Heat Integration by Coordination among Agent Systems for Heat Exchanger Network Design, 12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2015年6月4日, コペンハーゲン(デンマーク)
- ④ T. Kaya, N. Kimura, Y. Tsuge, "Improvement of Simplification Algorithm for Heat Exchanger Networks for Large-Scale Process," The 27th International Symposium on Chemical Engineering, 2014年12月6日, クアラルンプール(マレーシア)
- ⑤ K. Kobayashi, N. Kimura, Y. Tsuge, "Extension of Heat Exchanger Network Design Support System for Retrofit of Existing Plant," The 27th International Symposium on Chemical Engineering, 2014年12月6日, クアラルンプール(マレーシア)
- ⑥ N. Kimura, K. Yasue, K. Kobayashi, Y. Tsuge, "Coordination Mechanism within the Multiagent Framework for Inter-process Heat Integration," The 6th International Conference on Process Systems Engineering (PSE Asia 2013),

2013年6月27日クアラルンプール（マレーシア）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 直樹 (KIMURA, Naoki)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：00432857