

食品長期海上輸送のためのコンテナ内部状況 リアルタイム監視システムの開発事例

畑中勝守*・和田雅昭**・戸田真志**・鈴木充夫*

(平成 21 年 5 月 19 日受付/平成 21 年 9 月 15 日受理)

要約: コンテナを用いた食品の長期海上輸送では, 不適切な空調により食料品に荷傷みが発生したとしても発生状況の特定が困難であり, 責任の所在が不明確な場合が多く, トレーサビリティや食の安全に関わる問題を有している。そこで本研究では, センサネットワーク技術を用いたリアルタイム温湿度計測システムを開発し, コンテナによる長期海上輸送における空調状況を衛星通信とインターネット経由で監視する簡易技術を開発した。このシステムを実際のコンテナに搭載し, 2008 年 11~12 月の期間, 東京・ドバイ航路にて実証実験を行った。その結果, シンガポール港における積み替え時においてコンテナ内部の異常な温湿度上昇を検知するなど, 提案するシステムが異常検知に効果的であることが確認できた。しかし, イリジウム衛星によるデータ通信では通信エラーが連続して発生する場合もあり, 対策が必要なことを確認した。

キーワード: コンテナ, リアルタイム監視, センサネットワークシステム, 衛星通信

1. はじめに

少子高齢化時代を迎えたわが国では, 農水産物マーケットが縮小し一次産業従事者の所得減少と産業維持力の低下が危惧されている。一方, 人口増加やグローバル化により海外マーケットは今後拡大するであろうとの観測から, 農林水産省は農水産物や加工食品の新たな販路拡大を目的に海外輸出促進事業を展開している¹⁾。これを受け, 平成 16 年頃より農水産物の輸出額は 10% 以上の高い伸び率を示しており, 加工品のみならず原材料としての農水産物の輸出も活況を呈してきている²⁾。

輸出増加に伴いコンテナ需要は世界的に高まっており, 平成 19 年現在, 国内コンテナ取扱総数はおよそ 2 千万 TEU (twenty-foot equivalent units, 20 フィートコンテナ換算の個数) に達し, 昨今のアジア地域の経済発展に伴い国内の取扱量も増加傾向にあるとされている³⁾。このうち, 農水産物の輸送には冷凍コンテナを用いる場合が多いが, 船舶への積み替え時における電断などによりコンテナ内部の急激な温湿度変化による荷傷み発生が危惧されるなど, 温度管理や湿度管理が重要であるとされている。また近年, モーダルシフトにより二酸化炭素排出削減など環境負荷に配慮し, トラック, 鉄道, 船舶を組み合わせ合わせた輸送が増加してきており, 積み替えによる荷傷み発生回数も増加するものと予想される。しかし, 内部状況変化を把握できない限り荷傷みの発生状況や原因を特定することはできない。この対策のため, 近年, コンテナ内部状況をリアルタイム監視するための技術開発や研究が盛んである。例えば, 国土交通省はアメリカ合衆国・国土安全保障省 (DHS) と共

同で船荷のコンテナを追跡するシステム Marine Asset Tag Tracking System (MATTS) の実証実験を行っている⁴⁾。この技術は, 荷主の倉庫で IC タグを取り付けた後, 港を經由して目的地に到着するまでの位置情報などをリアルタイムに把握できるのが特長とされており, iCONTROL 社 (米国) が開発した専用 IC タグ iTAG と mLOCK と呼ばれる機器を使用している。IC タグは GPS (全地球測位システム) の測位機能, モーション・センサー, ログ自動記録機能などを備えるとされており, トレーサビリティにおける新規技術として期待されている。しかしながら, これら技術は未だ開発途中であり信頼性に関する検証が始まったばかりである (国土交通省の実証実験は 2008 年 8 月から実施)。また, 同様の取り組みとしてコンテナ自体にセンサを組み込み遠隔操作により設定温度変更を可能にする機能を付加したロボットコンテナ技術⁵⁾ や, 加速度センサにより振動を計測し果物の商品価値に影響を与える状況を解析し輸送環境を改善するための研究なども行われている⁶⁾。しかし, こうした研究開発や実用化の提案では, 一般的に機材が高価であり更なるコスト削減が望まれている。このため, システムに導入される機材は特注品ではなく低価格の市販品を流用できることが望ましい。そこで本研究では, コンテナ内部状況を監視するために多種多様なセンサを自由に導入可能なセンサネットワークを実現するため, 筆者らが開発した汎用センサプラットフォーム⁷⁾ を用いたコンテナ内部状況監視システムを開発することとした。また, コンテナ内部監視では, 可能な限りリアルタイムに情報を取得することが望ましい。これは, データロガー形式のセンサのように, 後日, コンテナ内部の異常を

* 東京農業大学 国際食料情報学部国際バイオビジネス学科

** 公立はこだて未来大学 システム情報科学部情報アーキテクチャ学科

確認するのではなく、迅速に異常を知り、異常があれば直ちに輸送を請け負う業者へ連絡し対応を要求するなどの利用が想定できるためである。このため、本研究では、イリジウム通信衛星を利用したデータ送信を検討し、リアルタイム監視システムとして技術開発することとした。しかしながら、本研究では、先ずシステムの基盤技術の確立が最優先事項であると考え、リアルタイムならではの機能（例えば異常検知に対する自動警告などの応用技術）の検討は、基盤技術確立後の検討事項と位置付けた。このため本論では、本研究が目指すシステムの概要と、試作したシステムを実際に装備して行ったアラブ首長国連邦ドバイ市への長期海上輸送実験について報告することとし、異常検知における自動警告などの応用は今後の課題として構想のみの記述にとどめた。

2. システム概要

本研究では、コンテナ内部状況監視のためのセンサに安価な市販品を利用しコストを抑え、また状況に応じた仕様変更が容易なセンサネットワークシステムを開発する。このため、センサネットワークを掌握するセンサプラットフォームとして、筆者らが開発した“マイクロキューブ”⁷⁾を採用する。マイクロキューブはRENEASAS製H8マイコンをCPUに持つCPUボードと、各種センサのインターフェースに対応可能な拡張ボードを組み合わせたスタックアップ型ボードコンピュータとして構成されている。拡張ボードにはシリアルポート、USBポート、Ethernetポートなどが用意されており、あらゆる種類のセンサと接続可能な仕様になっている。また、CPUボードの組み込みソフトウェアにはオープンソースのTCP/IPプロトコルスタックを実装しており、その仕様はホームページにて公開している⁸⁾。このため、先行する他の研究開発によるシステムのように、仕様変更が困難なことや特殊仕様による高コストなどの問題点を軽減できる特徴を有している。

本研究で開発したセンサネットワークシステムでは、有線LANにてマイクロキューブとセンサを接続し、コンテナ内部情報を取得する。これは、必要に応じ仕様変更が可能な柔軟なセンサネットワークとするためであり、今回はネットワーク対応型の温湿度センサのみを用いて試作したが、ネットワーク対応でないセンサであっても、別途マイクロキューブを用意しセンサに接続することで容易にLANに組み込むことができる。また、GPSによりコンテナ位置（緯度・経度）ならびに計測時刻を取得する仕様とした。これは、コンテナ位置がリアルタイムに把握できることで、積替えなどによりコンテナ内部環境が劇的に変化するであろう状況が位置情報から推測できると考えたためである。なお、電断への対策として無停電電源装置（UPS）を導入した。

センサにより取得された情報は、マイクロキューブにより電子メールとして送信される。その際、データ通信には海上輸送を想定しイリジウム通信衛星システムを用いた。また、データ送信間隔は、リアルタイム性を考慮し10分に設定した。図1にイリジウム通信用制御装置と接続したマ

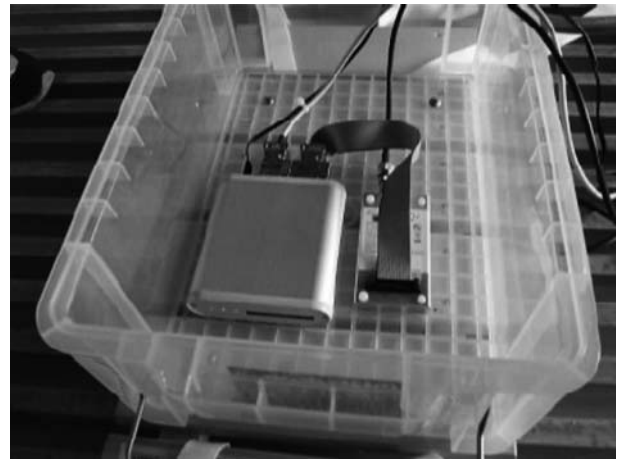


図1 汎用センサプラットフォーム・マイクロキューブとイリジウム通信衛星用制御装置の写真

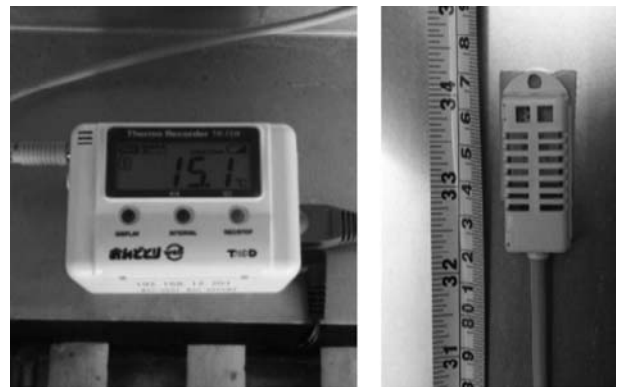


図2 コンテナ内部に設置した温湿度センサ写真
(左：制御部、右：センサ部)

マイクロキューブの写真を、図2にコンテナ内部に設置した温湿度センサの写真を、図3に実験に使用したコンテナとその外部に設置したイリジウムアンテナおよびGPSアンテナの写真をそれぞれ示す。なお、図3のアンテナは、コンテナにとっては規格外の突起物であり、積み替え時に破損が懸念される。しかし、日本国内で利用が認可されているアンテナ仕様には、例えばパッチ型アンテナなどのような薄く平らな形状のものがないため、図3のようにコンテナ外部壁面に鉄板を溶接しアンテナを設置した。

一方、送信されたデータを蓄積し管理や監視を行うため、インターネット上にWebデータベースサーバを構築した。電子メール形式で送られたデータは、イリジウムの電子メールサーバを経由し指定したメールサーバに送信されるが、データベースサーバは5分間隔でメールサーバにアクセスし計測データをデータベースに格納する。データベースサーバはコスト削減を図るため、CentOS、PostgreSQLとApacheのオープンソースを用いて構築し、データ収集や蓄積された情報をWebで確認するためのソフトウェア群はPHP言語を用いて独自開発した。また、Google Maps APIにより地図を用いた位置表示ソフトウェアも併せて



(a) システム開発に使用したコンテナ

(b) コンテナ外部のアンテナ設置
(左: イリジウム, 右: GPS)

図 3 コンテナの外観写真とアンテナ設置

開発し、それぞれのソフトウェアは一般的な Web ブラウザと携帯電話にも対応させた。なお、これまでの本研究の検討から、イリジウム衛星による通信ではデータ送信から受信までに要する時間は最大 30 秒程度であり、異常検知をセンサ側ではなくデータベースサーバ側で行っても、リアルタイム性に支障はないと考えられる。これらは今回の検討では実装していないが、データ異常の検知と自動警告の機能はデータベースサーバ側にて極めて容易に構築可能であり、本研究がデータベースサーバを用いる理由の一つでもある。

3. 実証実験と考察

(1) 国内航路における予備実験

国際航路にて検証を行う前の予備実験として、開発したシステムを搭載したコンテナを用い、2008 年 10 月 27 日～11 月 14 日の期間、横浜・苫小牧の往復航路にて実証実験を実施した。図 4 に Google Maps API を用いて描画した実証実験のコンテナ軌跡を示す。なお、コンテナはコンテ



図 4 Google Maps API を用いたコンテナ軌跡の描画例

表 1 横浜・苫小牧航路のデータ通信状況

	通信可能数	通信数	エラー発生率
往路	274	154	44%
復路	356	223	37%

ナ船で輸送の際に複数ブロック状に積み上げるため、データ送信のためのイリジウムとの通信や GPS 受信に障害が発生するものと危惧される。このため、実際の輸送では、本システムを搭載したコンテナを最上部に積載するように、輸送会社に依頼した。表 1 に、実験により得られたイリジウムデータ通信の通信エラー発生状況を示す。表 1 より、イリジウムによるデータ通信のエラーは 40%程度と高いが、海上などコンテナの天空が見通せる場所では大きな障害とならないことを確認した。また、データ送信間隔は 10 分であったため平均的には 1 時間に 3 回以上データ通信が可能であったと考えられる。なお、データを確認したところ、平均データ送信時間間隔は 17 分 40 秒、1 時間以上データ通信が行われなかった回数は 3 回、データ通信の最大遅延時間は 1 時間 40 分であった。通信悪化と思われる状況はいずれも陸上であったことから、陸上でのコンテナ保管状況とデータ通信との関係を確認する必要があり、今後の検討課題であることが分かった。

(2) ドバイへの長期海上輸送実験

開発したシステムの実証実験のため、2008 年 11 月 25 日～12 月 22 日の期間にてアラブ首長国連邦ドバイ市への長期海上輸送実験を実施した。コンテナは、東京・大井埠頭から国内の港（清水、名古屋、神戸）を經由し、バンコック、シンガポールへと送られ、シンガポールで積み替えられた後、クアラルンプールを経て 26 日後にドバイ港に送られた。この間のコンテナ軌跡を Google Maps API により描画した例を図 5 に、携帯電話向けの描画例を図 6 に示す。なお、この実験では、コンテナに米、味噌、醤油などを搭載し 2°C に温度設定した。温湿度センサは冷却ユニット側壁面に 2 個設置し、同時にコンテナ内部の温度変化の検証のため温度データロガー (TidbiT) を 20 個設置した。温湿度センサならびに温度データロガーの配置図を図 7 に



図 5 Google Maps API によるドバイへの軌跡作図例 (2008 年 11 月 25 日~12 月 22 日のコンテナ軌跡)

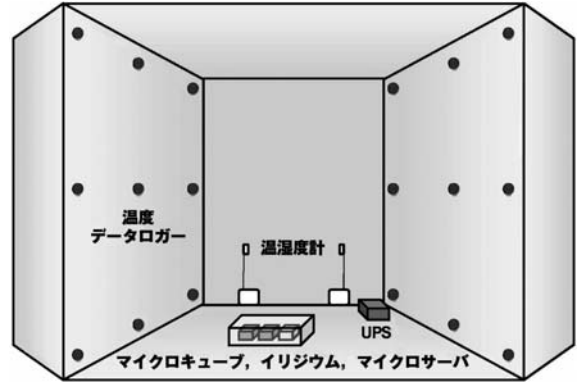


図 7 コンテナ内部の機器設置概念図

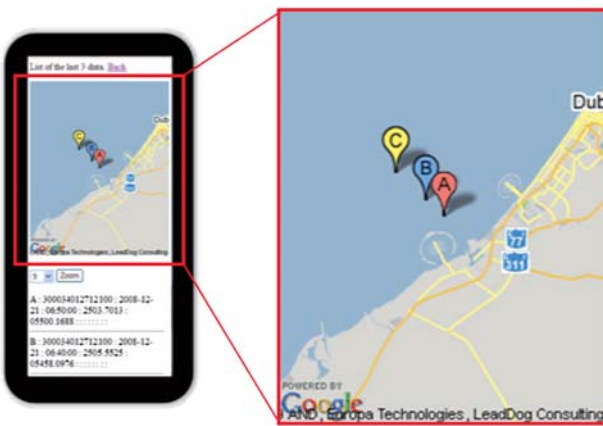
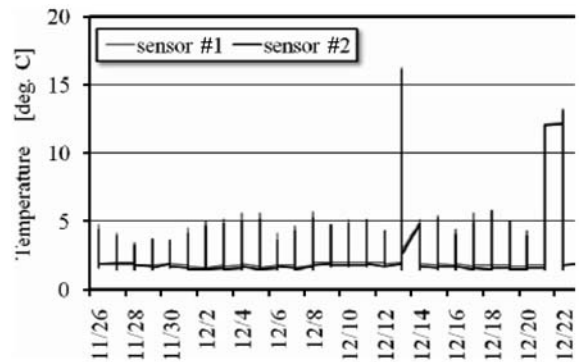


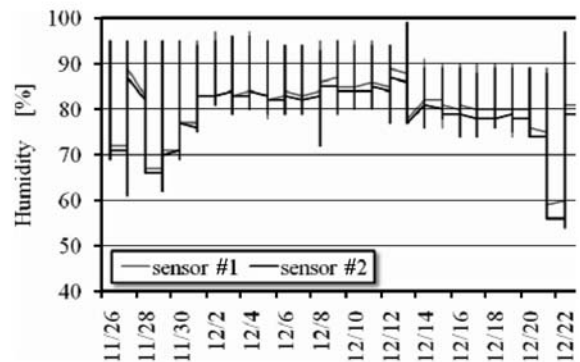
図 6 Google Maps API による携帯電話用コンテナ位置表示の例 (注: ドバイ入港直前の 2008 年 12 月 22 日 6:50AM (UTC) の様子, 図中の A~C は 10 分間隔のコンテナ位置を表す。)

示す。図のように、3 次元的な温度分布を検証するため、温度ロガーを左右の壁面に 18 個 (3 列×3 段) 設置し、冷却ユニットからの冷気吹き出口と外気の 2 ヶ所にそれぞれ 1 個づつ設置した。また、図 7 のマイクロサーバとは HTTP により温湿度センサのデータを取得するために用意した Micro Linux ボードコンピュータである。

図 8 に、実験にて得られた温湿度センサの温度ならびに湿度のグラフを示す。図 8 に示すとおり、二つのセンサに差異はほとんど見られないものの、温度、湿度とも一日に 2 回程度激しく変動している。これは、冷却ユニットの問題であったことが後日判明したが、モニタリングにより冷却ユニットの性能特性を知ることができ、コンテナ内部状況監視の意義が確認できた。また図 8 では、設定温度が 2°C であるにもかかわらず 2008 年 12 月 13 日に室温が 16.2°C まで急上昇している。これは、シンガポールにおいてコンテナの積み替えが行われ一時的に電断があったためである。図 9 は Google Maps API によるシンガポール港の衛星写真であり、白線は入港時 (12 月 8 日) から出港時 (12 月 13 日) までのコンテナ軌跡を表している。図 9 の軌跡が示す通り、コンテナは船より降ろされコンテナヤードにて



(a) 温度グラフ



(b) 湿度グラフ

図 8 取得されたセンサデータ

留置された後、再度港に運ばれ積載された様子がうかがえる。以上から、GPS によるトラッキングもまたコンテナの状況を推測する上で有効な情報であることがわかる。なお、UPS を搭載したため数時間程度の電断はシステムの動作に支障が無いことが確認でき、また、電断による異常は 1 時間程度と短時間であったため、コンテナに積載された食料品に荷傷みなどの被害は発生しなかった。

温湿度センサの検証のため、図 7 のように温度ロガーを 3 次元的に設置し温度を記録した。温度ロガーの記録と温湿度センサの記録に特段の差異は認められなかったが、図

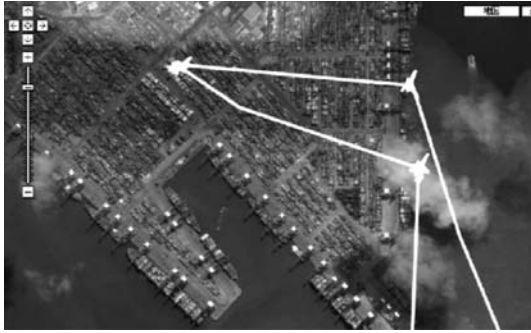


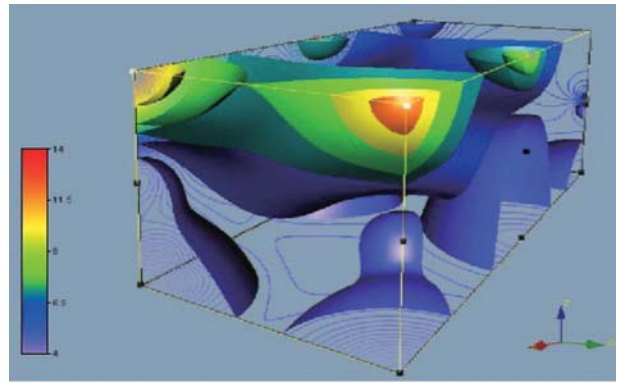
図 9 シンガポール港の衛星写真と 2008 年 12 月 8 日～13 日のコンテナ軌跡 (Google Maps API による表示)

表 2 ドバイ航路の通信状況

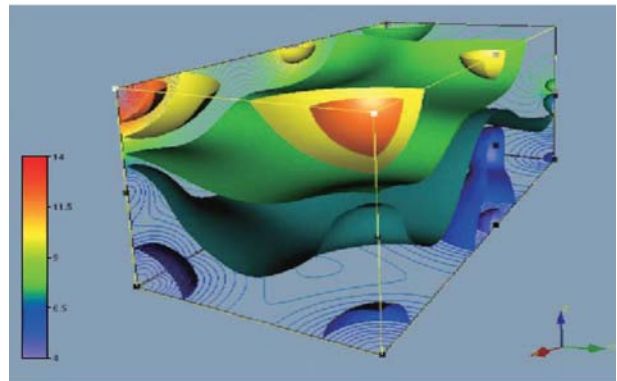
Port	可能数	通信数	エラー率
TOKYO	79	40	49%
TOKYO-SHIMIZU	48	23	52%
SHIMIZU	47	20	57%
SHIMIZU-NAGOYA	55	30	45%
NAGOYA	58	37	36%
NAGOYA-KOBE	74	45	39%
KOBE	49	27	45%
KOBE-BANGKOK	899	402	55%
BANGKOK	61	36	41%
BANGKOK-SINGAPORE	302	168	44%
SINGAPORE	803	165	79%
SINGAPORE-MALAYSIA	12	2	83%
MALAYSIA	85	32	62%
MALAYSIA-DUBAI	967	371	62%
DUBAI	156	87	44%
平均	3,695	1,485	60%

8 と同様、温度ロガーの記録にもシンガポールにおける異常温度上昇が記録されていたため、コンテナ内部の 3 次元的温度分布について詳細な分析を行った。図 10 は 12 月 13 日 10:45～11:00 (UTC) までの 15 分間の温度等値面の時間変化を可視化ソフト (Voxler, GoldenSoftware 社製) により 3 次元的に描画したものである。図 10 より、外気と思われる高温の空気が冷却ユニット側の壁面上部から流入し、時間の経過とともにコンテナ全体に伝搬したことが分かる。図 10 の温度分布の状態では温湿度センサを設置した冷却ユニット側壁面下部の温度は 7°C 程度であるが、それ以降、流入した外気がコンテナ内部に行きわたりコンテナ内部の温度が 16°C 以上に上昇したものと考えられる。なお、高温部分は天井部分の両極にのみ見られるが、これは中央部分の温度を計測していないためである。

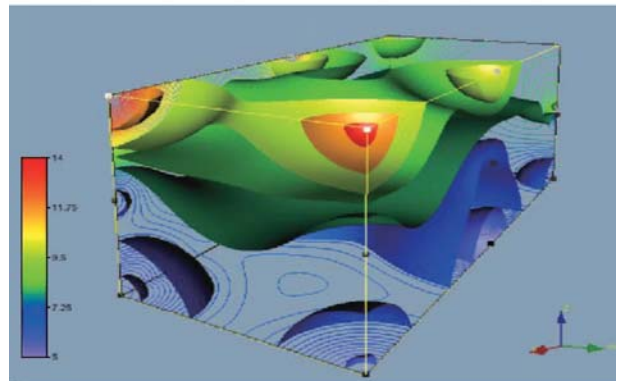
次に、イリジウムによる通信状況の結果を表 2 に示す。予備実験と同様、本システムを搭載したコンテナはコンテナ船に積載する際、最上部に積載するよう輸送会社に依頼し通信性能の向上を期待したが、通信エラー発生率は平均



(a) 10:45 の温度等値面



(b) 10:55 の温度等値面



(c) 11:00 の温度等値面

図 10 2008 年 12 月 13 日のコンテナ内部の温度変化、注：図の手前がコンテナ冷却ユニット側の壁面を表す。

で 60%と国内予備実験よりも悪い結果となった。特に、シンガポールからドバイまでの間では通信エラー発生率は最大 83%、平均で 69%と高い。これは、東京からシンガポールまでの平均エラー発生率が 51%であり比較的好条件であったと推測できることから、シンガポールで積み替えられた後のコンテナ積載位置に問題があったものと推測される。また、ドバイ港にてコンテナが降ろされた後の発生率が 44%と国内予備実験と同程度までに回復したことから、イリジウム通信衛星を用いたデータ送信では、アンテナの設置も含めた通信状況向上のための検討が必要であることがわかった。さらに、シンガポールのコンテナヤードに留

置された期間(12月8日~13日)では、平均通信時間は47分程度、最大では4時間20分の遅延が発生し、2時間以上通信が途絶える状況が18回発生するなど通信状況が著しく悪化した。これは、コンテナ留置の際、通信を阻害する障害物がアンテナ近傍に存在したためと推測できるが、データ送信方法にも問題があることが分かった。すなわち、本システムでは、データ送信に失敗しても再送信処理は行っており、10分後のデータ送信を待つよう設計している。しかし、この方法では連続して送信エラーが発生しても対応しないことになり問題である。データ送信が2時間以上にわたり途絶える状況はリアルタイム監視とは言えないことから、積載する食品などの要件を加味し、一定時間以上データ送信に失敗した際には、送信が成功するまで繰り返しデータを再送するエラー処理の検討が必要であり、本研究における重要な今後の課題の一つであることが分かった。

4. おわりに

コンテナを用いた長期海上輸送における荷傷み発生状況の把握のため、センサネットワークを用いたコンテナ内部状況監視システムとして、汎用センサプラットフォーム・マイクロキューブとイリジウム通信衛星を用いたシステムを試作した。本システムは、すべてのソフトウェア群がオープンソースで構成されており、市販のセンサを自由に導入できるシステムであることから、先行する他の研究開発によるシステムよりもコストを削減でき仕様変更の柔軟性に優れたシステムであると考えられる。また、単純比較はできないものの、今回本研究で試作したシステムは総額で20万円未満であったことから、他のシステムに比べ十分に安価であると考えられ、低コストが本システムの最大の特徴であると言える。しかしながら、リアルタイム監視を目的としたデータ送信においては、データ送信エラーの対策が重要な課題であることが確認された。この対策のため、今後は一定時間間隔以上でデータ送信に失敗した場合には、成功するまで繰り返しデータ送信を行うよう組み込みソフトウェアの改良を行いたいと考えている。また、通信状況はアンテナの位置と遮蔽物との関係により悪化することが予想されるなど、リアルタイム監視のためのデータ

通信状況の把握においても課題が確認された。この対策として、電界強度を測定しアンテナ設置位置の適正を再検討するとともに、通信状況が悪化する遮蔽物との距離や間隔なども明らかにしていきたいと考えている。また、今後はリアルタイム監視の必要性を具体化するため、内部状況の異常を自動的にユーザに警告する機能を、データベースシステムにおいて開発していく所存である。さらに、本提案システムの柔軟性を活かし、荷傷みのもう一つの主要因であるエチレングス濃度測定や、加速度センサ導入による振動測定を行うなど、内部状況の測定値と食品の荷傷みの関係を考察し実用化に向けた検討を継続して実施していきたいと考えている。

謝辞：本研究は、農林水産省「平成20年度新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」(研究代表者：伊藤龍秀、株式会社ドーコン、H19~H21)の補助を得て実施されました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省、農林水産物・食品の輸出促進について、農林水産物等の輸出促進対策、http://www.maff.go.jp/j/export/pdf/meguzi_200903_01.pdf, 2009.
- 2) 農林水産省、我が国農林水産物・食品の総合的な輸出戦略(概要)、http://www.maff.go.jp/j/export/e_senryaku/pdf/sanko_data01.pdf, 2008.
- 3) 国土交通省総合政策局情報管理部情報安全・調査課交通統計室、平成19年港湾統計(年報)、<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/01/annual/nenpou0.pdf>, 2008.
- 4) 国土交通省港湾局港湾経済課、報道発表資料：サプライチェーンにおける海上貨物追跡タグシステム(MATTS)の実証実験の実施について、http://www.mlit.go.jp/report/press/port02_hh_000006.html, 2008.
- 5) 株式会社ランテック、GPS動態温度監視システム、<http://www.runtec.co.jp/service/jr.php>
- 6) 徳田正樹・廣瀬正純・川口和晃・小笠原温・椎名武夫、ナシ海外輸出実証試験(第2報)、大分県産業科学技術センター平成19年度研究報告、pp.30-33, 2007.
- 7) 和田雅昭・畑中勝守・上瀧實、ラビッドプロトタイピングのための汎用ボード“マイクロキューブ”の設計と活用、情報処理学会研究報告、2008-UBI-18, pp.33-40, 2008.
- 8) 和田雅昭、マイクロキューブホームページ、<http://www.fun.ac.jp/~wada/microcube/index.html>, 2006.

A Development of the Real-time Monitoring System for Internal Air Conditions of Container for Long-Term Marine Transport of Foods

By

Katsumori HATANAKA*, Masaaki WADA**, Masashi TODA** and Mitsuo SUZUKI*

(Received May 19, 2009/Accepted September 15, 2009)

Summary : Since the immediate detection of the damage to foods due to inadequate control of air condition in container is not an easy task and responsibility for any trouble is usually unclear, the transportation of agricultural products overseas from Japan is known to have problems concerned with traceability and food security. In order to find a solution to this problem, the authors have developed a real-time monitoring system of internal air conditions of container through satellite communication and the Internet using sensor network technologies for long-term marine transport of agricultural products. In this paper, we report on the experiment of marine transportation to Dubai from Tokyo in the period of November to December, 2008. Throughout the experiment, it is validated that the present system is one of the most cost-effective real-time monitoring systems and the system could successfully detect a rapid change of temperature and humidity of the container in transshipment at Singapore Port. However, a series of data communication errors often occurred and it was understood that improvement in establishing stable data communication by Iridium satellite must be one of the important future subjects of this study.

Key words : container, real-time monitoring, sensor network system, satellite communication

* Department of International Bio-Business Studies, Faculty of International Agriculture and Food Studies, Tokyo University of Agriculture

** Department of Media Architecture, School of Systems Information Science, Future University-Hakodate