

無線通信を用いた食品オーブン庫内の遠隔加熱環境計測システム：デルタシグマ A/D コンバータを用いた熱電対温度測定の精度評価

辻岡 哲夫, 溝口達也, 長岡亨, 児玉飛翔, 伊與田浩志

Citation	電子情報通信学会技術研究報告, 116(123): 93-97
Issue Date	2016-07
Type	technical report
Textversion	publisher
Rights	Copyright © 2016 by IEICE.

Self-Archiving by Author(s)
Placed on: Osaka City University Repository

無線通信を用いた食品オープン庫内の遠隔加熱環境計測システム

～ デルタシグマ A/D コンバータを用いた熱電対温度測定の精度評価 ～

辻岡 哲夫[†] 溝口 達也[†] 長岡 亨[†] 児玉 飛翔[†] 伊與田浩志[†]

[†] 大阪市立大学 大学院 工学研究科 〒 558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138

E-mail: †tsujioka-H28@info.eng.osaka-cu.ac.jp

あらまし 調理科学の分野において、食品オープン庫内の加熱環境をリアルタイムに高精度に得たいという需要がある。筆者らは無線を用いた温度・湿度計測装置を開発し、食品と一緒に焼成することで、食品の自体あるいはその近傍の加熱環境を取得することを検討してきた。これまでは、熱電対アンプを採用し、熱電対のチャンネル数だけの A/D 変換器を備え、経済的な問題と基板面積の占有面積の大きさが問題となっていた。本稿では、技術進展が著しいデルタ・シグマ A/D 変換器を採用した場合の熱電対温度測定の精度について評価する。また、冷接点補償のための温度測定を ADC 内部温度ではなくコネクタに埋め込んだ白金測温抵抗体 Pt100 で行うことで測定精度の改善を図り、実験によりその効果を確認する。

キーワード 食品オープン, 温度センサ, 湿度センサ, 高温・高湿度

Remote Measurement System of Heat Environment in Industrial Food Processing Ovens in Wireless Communications

– Evaluation of Accuracy and Reliability of Thermocouple Measurement with Delta-Sigma A/D Converters –

Tetsuo TSUJIOKA[†], Tatsuya MIZOGUCHI[†], Akira NAGAOKA[†], Kazuma KODAMA[†], and
Hiroyuki IYOTA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Osaka City University
3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-8585 Japan

E-mail: †tsujioka-H28@info.eng.osaka-cu.ac.jp

Abstract There is a large demand of real-time measurement of thermal environment parameters in food processing ovens in the food science fields. The authors have developed some measuring device of dry- and wet-bulb temperatures, and have been investigated on acquisition of the thermal environment near the target food placed in a oven together. In the previous measuring device, the authors employed many thermocouple amplifiers on a circuit board, therefore there were some problems of expensive, large and so on. In this report, we have employed two delta sigma A/D converters with enhanced technologies and have evaluated their performance. We also examine the improvements of accuracy of temperature at the cold junctions by using Pt100 sensor devices between connectors of the thermocouples.

Key words Food processing oven, temperature sensor, humidity sensor, high temperature and high humidity

1. はじめに

近年の加工食品の需要増加は著しく、これを支えるための食品工場における大量調理・大量生産のための効率化技術は必要

不可欠となっている。更なる効率化・経済化を進めるためには、熟練技術者を必要としない調理機器の運用・管理が求められる。図 1 に、食品オープン庫内の加熱環境計測と自動制御について示す。図 1 (a) は従来方式であり、スキルを有した職人が、調

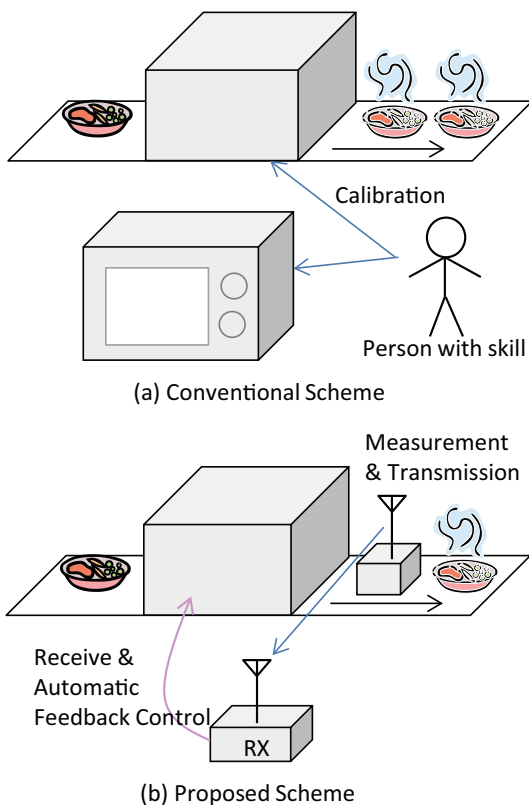


図 1 食品オープン庫内の高精度な加熱環境計測と自動制御

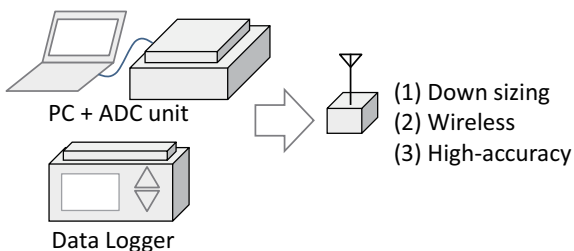


図 2 測定の遠隔化による要求項目の変化

理後の食品の品質をチェックしながら、食品オープンを手動で調節する。一方、図 1 (b) は遠隔加熱環境計測システムである [1], [2]。無線通信による計測データ送信を採用し、ケーブルレスでリアルタイムな計測が行える。食品工場では、立地条件（外気温、外湿度）やオープンメーカーの違いによる補正が求められる。そこで、食品と一緒に測定装置を焼成し、食品のすぐ近傍の加熱環境を計測することで、オープンの庫内の位置ごとに、標準レシピからのずれを調べることができる。この結果は、必要に応じて食品オープンの制御に自動反映させ、完成食品の高品質化が達成できる。測定は口バストかつ高精度に行う必要がある。

図 2 に測定の遠隔化による要求項目の変化について示す。これまでは、大型の A/D 変換ユニットを PC に接続し、有線で加熱環境を定期的に確認していた。最近では、可搬型のデータロガーの活用により利便性が増しているが、有線による測定であることに変わりはない。計測技術が進むにつれ、今後の要求項目としては「小型化」「無線」「高精度化」の重みが増すことが予想される。

表 1 温度測定センサ

測温センサ	計測可能範囲	誤差	特徴
白金測温 抵抗体Pt100	L: -200~100°C M: 0~350°C	A: ±0.15~0.35°C S: ±0.05~0.14°C	高精度 高価
K型熱電対	-200~1000°C	クラス1: ±1.5°C クラス2: ±2.5°C	安価 誤差が大きい 冷接点補償が必要 ノイズが多い
T型熱電対	-200~300°C	クラス1: 0.5°C クラス2: 1.0°C	

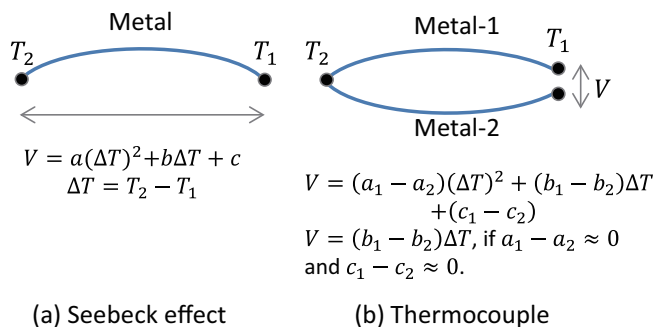


図 3 ゼーベック効果と熱電対

高温・高湿度な食品オープン庫内の温度を測定するには、熱電対を用いることが主流である。熱電対の測定精度の向上には、冷接点温度 [3] ~ [7] の正確な測定 [8] が必要となる。これまで、熱電対アンプに内蔵された温度計の測定値を信用し、その測定値を冷接点温度としてきたが、高精度測定のためには、外部温度計を追加してより冷接点に近い位置で測定した方が優れた特性が得られる。本稿では、外部温度計として、Pt100 白金測温抵抗体を用いた場合の加熱環境温度の測定値がどのように変化するか、実験的に調査した結果を報告する。

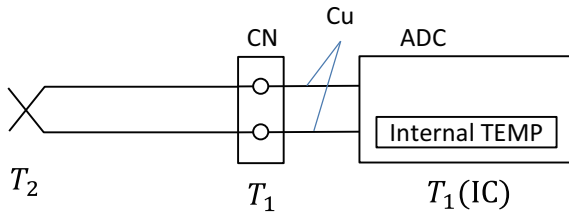
2. 熱電対計測の高精度化

温度測定センサについて、表 1 に整理する。広く使われている測温センサとして、白金測温抵抗体 Pt100 と熱電対が挙げられる。白金測温抵抗体は誤差が小さい特徴を有するが、測温範囲が狭く、また、高価であるため、10 チャネル近い測温には不向きである。一方、熱電対は、クロメルとアルメルを素線とした K 型の場合、1000 までの計測が可能であり、安価である。しかし、ゼーベック効果による起電力を用いるため、雑音が大きく、計測後に雑音除去などの処理が必要とされる。また、冷接点補償も必要となり、これらの要素が高精度化の妨げとなっている。

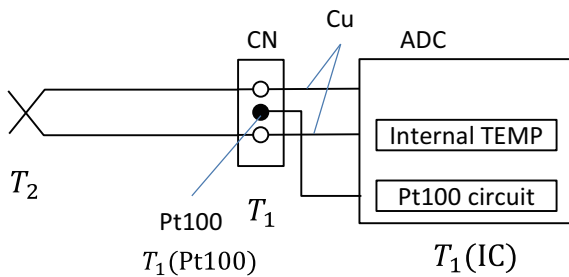
図 3 は、ゼーベック効果と熱電対について説明している。ゼーベック効果 (Seebeck effect) とは、金属線の両端に温度差があるとき、その温度差によって起電力が生じる現象である。図 3 (a) のように、測定点 (左側) の温度を T_2 、冷接点 (右側) の温度を T_1 とするとき、温度差 $\Delta T = T_2 - T_1$ の n 次関数の起電力 V が発生する。2 次関数で近似すると、 $V = a(\Delta T)^2 + b\Delta T + c$ となる。係数 a, b, c は金属ごとに異なる。2 種類の異なる金属を図 3 (b) のように結線した場合、ゼーベック効果により、2 種類の金属のそれぞれで異なる起電力が発生する。今、相性のよい特別なペアの金属を選んだとき、2 次と 0 次の係数が 0

表 2 熱電対アンプとデルタ・シグマ A/D 変換器

熱電対の起電力計測方法	長所	短所
熱電対アンプ + 12bit ADC	使用方法がシンプル	増幅回路が必要
24bit $\Delta \Sigma$ ADC	ADC内部に定電流源を内蔵 マルチプレクサを内蔵 直接ADCできる(増幅回路不要)	使用方法が複雑



(a) Use of Internal Temperature



(b) Use of External Temperature

図 4 冷接点温度補償の高精度化

となり、1 次式の関数に基づいた起電力 $V = (b_1 - b_2)\Delta T$ が発生し、温度差 ΔT と起電力 V が比例関係となる。 $b_1 - b_2$ の比例係数は大きいことが望ましい。このような条件を満たすペアの金属対を熱電対と呼び、高温下の温度測定を経済的に実現する。

熱電対による起電力は微弱であり、K 型熱電対の場合でおよそ $40.7\mu V/^\circ C$ である。 $\Delta T = 200$ の場合であっても、 $8.14mV$ にしかならない。したがって、熱電対を用いて温度測定を行う場合、高精度なアンプ（熱電対アンプ）が不可欠である。ここで高精度とは、増幅率が正確で、リニアリティに優れていることを意味する。これまで熱電対アンプとして、オペアンプや AD595 のような専用 IC が利用されてきたが、外装部品が多く、「小型化」「高精度化」の要求に対する課題となっていた。

この解決策の一つはデルタ・シグマ A/D 変換器（ADC）の利用である。分解能 24 ビット、フルスケール 1.2V の場合で、 $71nV/LSB$ であり、熱電対アンプを介さないで直接 A/D 変換しても差し支えない感度性能を有している。内部のデシメーション処理はデジタルフィルタで計算されるため、リニアリティも確保される。このことから、今後の熱電対計測の主流となる方式であるといえる。最近リリースされたデルタ・シグマ ADC では、温度計測用を前提とした品種が多く、Pt100 用の定電流源や IC 内部温度の測定機能を標準で搭載している。

先に述べた通り、高精度な熱電対を用いた温度測定において

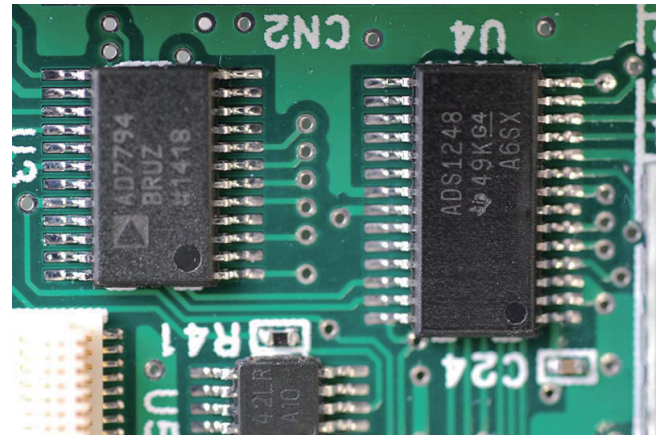


図 5 評価に用いたデルタシグマ A/D 変換 IC

は、ノイズの除去と、冷接点温度の担保が重要となる。ノイズの除去については、デジタル信号処理による LPF などに対応が可能である。ここでは冷接点温度の計測について議論する。図 4 にデルタ・シグマ A/D 変換器を用いた場合の冷接点温度補償の高精度化について示す。図 4 (a) のように、ADC の内部温度計を活用する方法について考える。熱電対の素線（クロメルとアルメル）は基板上のコネクタ（CN）に接続される。長さは短い銅線（Cu）の配線を経て、ADC に入力される。CN 温度 T_1 と ADC の内部温度 $T_1(ADC)$ が等しい場合は、Cu によるゼーベック効果は発生しないが、温度差がある場合は、Cu によるゼーベック効果により、誤差が発生することになる。このように、真の冷接点温度 T_1 を正確に知ることができないと、測定誤差が生じる。しかし、外部温度計を用いて T_1 そのものを測定することができれば、精度を高められる。

図 4 (b) は、白金測温抵抗体 Pt100 を外部温度計として用いて T_1 の値を測定する場合である。なお、 T_1 の値そのものは測れないので、その直近の温度 $T_1(Pt100)$ を測定することになる。通常は、真の値 T_1 と測定値 $T_1(Pt100)$ が等しくなるように、サーマルブロック（Thermal Block）でコネクタ周辺温度の均一化の対策を行う。

3. 評価実験

3.1 実験基板

デルタシグマ A/D 変換器を用いた熱電対温度測定の精度評価を行う。評価に用いた A/D 変換器は、図 5 に示すように、ADS1248 と AD7794 であり、4 層の PCB 上に実装して評価した。なお、結果の精査の不十分さにより、本稿では AD7794 の結果については割愛する。ADS1248 は 4 対の差動 AD 入力端子を具備し [9]、3 対を熱電対で使い、1 対を白金測温抵抗体 Pt100 で用いる。Pt100 は熱電対コネクタ（4P の PH コネクタ）の隙間に 2 個設置し、冷接点温度の高精度測定を試みる。設置の様子を図 6 に示す。Pt100 の設置の高さは、基板からの輻射熱の影響を受けないように注意しながら、コネクタの中央の側面を測温するように固定した。実際にはシリコングリスなどを塗布して、コネクタと Pt100 を熱結合させるのが望ましいが、本稿の実験では実施していない。

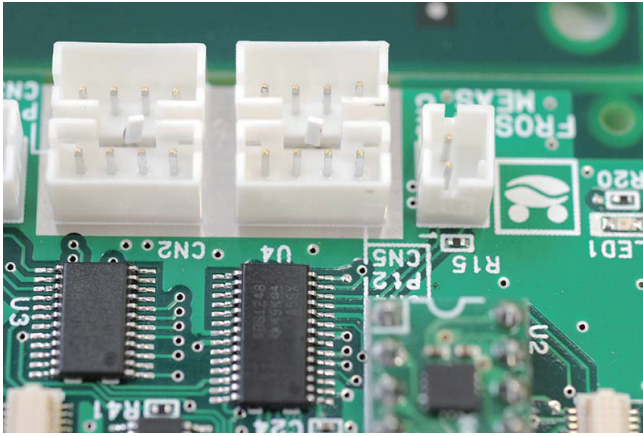


図 6 冷接点温度の高精度測定をするために熱電対コネクタの間に配置した Pt100 温度センサ

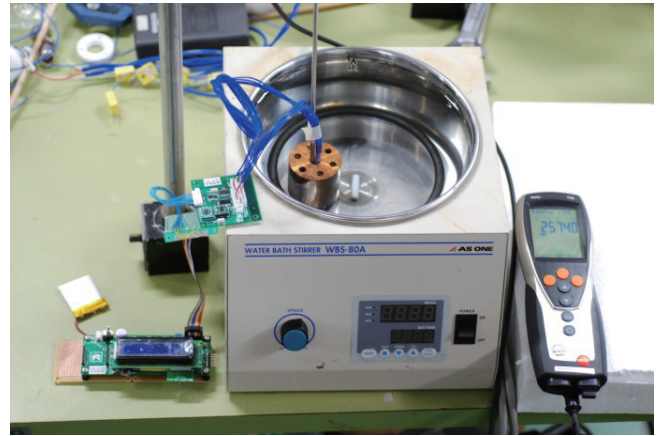
熱電対温度測定は遠隔で実施し、測定データについては、920MHz 帯特定小電力無線 (STD-T108) を経由して周辺に設置されたパソコン受信機で受信した。通信距離は数メートルであったため、今回はパケットロスはほぼ発生することはなかった。

3.2 食品オープン庫内の温度変化測定

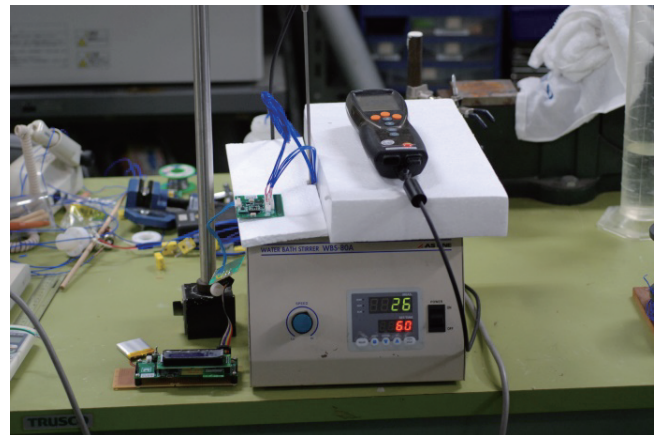
測定対象の食品オープンとして、スチームコンベクションオープンを用いた。ホットエアモードで動作させ、水蒸気が入っていない状態で予熱し、熱電対の測定点を出し入れた。図 7 (a) は ADC 内蔵の温度計の値を用いて冷接点補償を行った測定温度の値である。時刻 0 秒から 240 秒までの間に、合計 3 回、庫内に測定点を移動させた。図 7 (b) は 2 種類の冷接点温度 (ADC 内部温度と Pt100 温度) の差である。おおむね、Pt100 の測温値の方が ADC 内部温度よりも約 0.7 低い値を示した。オープンのドアを開けた瞬間に温度差が開く傾向があるが、ドアを開いたときに熱風が漏れ、露呈している ADC の方がその影響 (温度上昇) を受けやすく、Pt100 をコネクタの中央の影の部分に設置されており気流温度の影響を受けにくいと考えられる。熱風が当たらないようにアイソレーションすれば対策できる。図 7 (c) は ADC 内蔵の温度計の値と Pt100 温度の測定結果である。ドアを開けたときに熱風が当たり、温度上昇していることがわかる。このことは、図 7 (b) での考察の結果を裏付けている。

3.3 熱電対雑音とデルタ・シグマ A/D 変換器の関係

最後に、熱電対雑音が、24 ビットの分解能を有するデルタ・シグマ A/D 変換器に与える影響について調べる。おおむね 20 ~ 60 の範囲で、1 単位で任意の保温温度を設定できるウォータバスを用い、一定温度を計測中の A/D 変換値の分布 (ゆらぎ) を測定した。ウォータバスを含む実験系の写真を図 8 に示す。約 3L の水中に熱電対の先端を沈め、高精度温度計 testo 社 735 をリファレンス温度計と用い、同時にほぼ同じ箇所に沈めて温度を測定する。ウォータバス中の温度むらが少ない条件 (ヒータが OFF で外気温と平衡になっている状態) でリファレンス温度と熱電対測定温度を比較した。



(a) Setup.



(b) In the experiment.

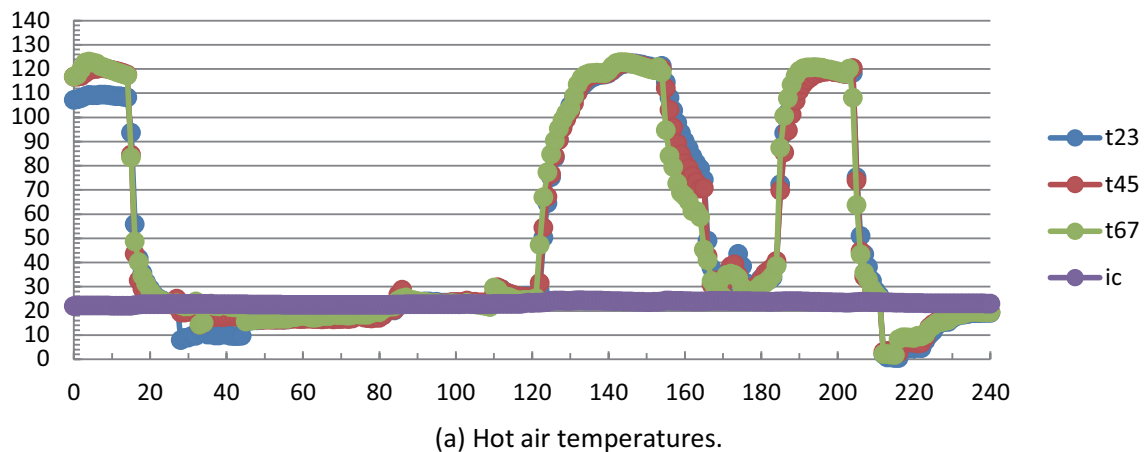
図 8 ウォータバスを用いた実験系

リファレンス温度との差については、ADC 内蔵温度計の値を冷接点温度とした方が小さくなったが、この結果については後日再度吟味する。

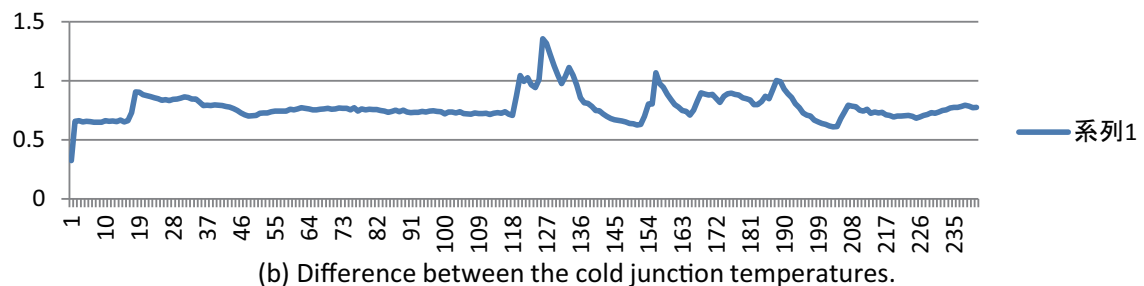
A/D 変換値の分布については、温度計測サンプリング数 100 における分散は 5870 ~ 7868LSB²、標準偏差は 76 ~ 88LSB であった。分解能は 7lnV/LSB であるため、温度換算時の標準偏差は 0.13 ~ 0.15 となった。この値は十分小さいようには見えないため、デジタル信号処理により、高速に収束・安定化するような工夫が必要と考えられる。

4. おわりに

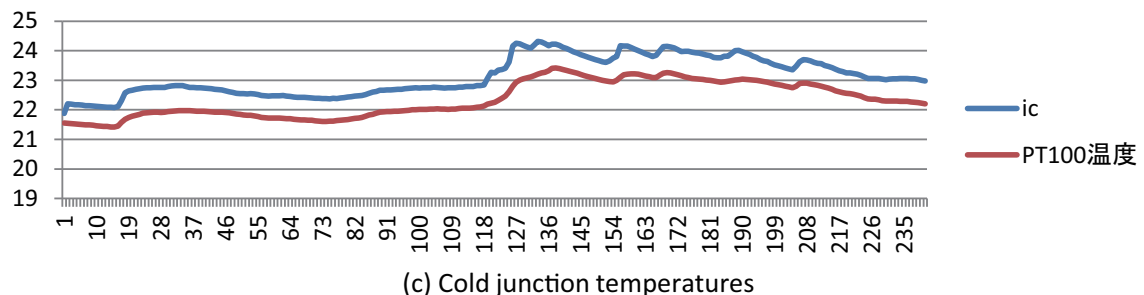
本稿では、920MHz 帯特定小電力無線を用いた食品オープン庫内の遠隔加熱環境計測システムについて、高精度化のため、デルタ・シグマ A/D 変換器の使用を検討し、実験的な精度評価を行った。白金測温抵抗体 Pt100 を用いた冷接点の温度測定については、ADC 内部温度よりも約 0.7 低い値を示した。熱電対雑音がデルタ・シグマ A/D 変換器に与える影響については、標準偏差 0.13 ~ 0.15 の揺らぎとなることがわかった。今後の課題として、2 種類の ADC の比較評価などが挙げられる。謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 15K06114 「高温高湿度の高度利用のための湿度測定法と精度評価技術に関する研究」の助成を受けて行われました。関係者各位に感謝申し上げます。



(a) Hot air temperatures.



(b) Difference between the cold junction temperatures.



(c) Cold junction temperatures

図 7 食品オープン庫内の温度変化の測定結果

文 献

- [1] 辻岡 哲夫, 森川 暉大, 児玉 飛翔, 伊與田 浩志, “食品と一緒に焼成してオープン庫内における加熱環境を測定可能なワイヤレス温度・湿度センサの開発,” 信学技報, vol. 115, no. 304, CS2015-56, pp. 65-69, 2015 年 11 月.
- [2] Yasin Karan, “Wireless measurement of thermocouple with microcontroller,” Proc. 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 120-123, May 2015.
- [3] Anish Mukherjee, Debarghya Sarkar, Arijit Sen, Debangshu Dey, Sugata Munshi, “An analog signal conditioning circuit for thermocouple temperature sensor employing thermistor for cold junction compensation,” Proc. 2013 International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded System (CARE), pp. 1-5, Dec. 2013.
- [4] Anan Fang, Xiaoli Ye, An Chen, Xiaoling Xu, Rong Yu, “Using Operational Amplifiers to Realize the Compensation of Thermocouples,” Proc. 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, vol. 1, pp. 774-777, Aug. 2008.
- [5] M. Zlatanovic, M. Dukic, I. Popovic, Z. Zirojevic, “Compensation of thermocouple reference junction temperature variation by a silicon temperature sensor,” Proc. 1997 21st International Conference on Microelectronics, vol. 2, pp. 557-560, Sept. 1997.
- [6] Guo Wei, Xin Wang, Jinwei Sun, “Signal processing method with cold junction compensation for thermocouple,” Proc. I2MTC '09, pp. 1458-1462, May 2009.
- [7] Quansheng Duan, “Research of a cold end temperature compensation for thermal couple,” Proc. 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp. 921-924, Aug. 2009.
- [8] “The development of high-accuracy microprocessor based thermocouple calibrator,” Proc. 2005 IEEE International Conference on Information Acquisition, June 2005.
- [9] 温度センサ向け 24 ビット A/D コンバータ (ADS1246, ADS1248, ADS1248), available: <http://www.tij.co.jp/jp/lit/ds/symlink/ads1247.pdf>