

低価格IoTデバイスを活用した切削監視システムの構築

栗毛野裕太*, 谷山清吾*

Development of Cutting Process Monitoring System Using Low-Cost IoT Devices

Yuta KURIGENO and Seigo TANIYAMA

生産現場へのIoT(Internet of Things)導入のモデルとして、低価格なIoTデバイスやオープンソースソフトウェアを活用した切削監視システムを構築した。工作機械(マシニングセンタ)の加工中の振動加速度および主軸モータ負荷を安価なIoTシステムで監視することで、マシニングセンタの運転状況や切削状態等の切削監視が可能となった。本システムの特徴はカメラと画像処理を活用した点であり、生産設備を改造することなく、低コストでIoT導入が可能となる。そのため、工作機械だけでなく、様々な生産設備への展開が期待される。

Keyword : IoT, カメラ, 切削監視, 画像処理

1. 緒言

近年、様々なモノに通信機能を付加し、相互に情報をやり取りさせるIoT(Internet of Things)が注目されている。

製造業では、IoTによる生産設備の稼働状況監視に加えて、今後は生産現場の様々なデータを取得・解析することで、加工品質の向上や不良品の早急な原因究明等が期待されている¹⁾。

そのため、県内企業へのIoTの普及が急務となっているが、最近では、低価格IoTデバイスや直感的にプログラミング可能なオープンソースソフトウェアが開発され、初心者でも低コストでIoTを試すことが可能となった。例を挙げると、福岡県工業技術センターでは、IoT導入支援キットを開発し、無料で公開している²⁾。

しかし、IoTによる解決手法や実現性についての事例やノウハウが乏しく、IoTをどのように生産現場に導入すべきか悩んでいる県内企業が多い。

さらに製造業を営む企業では、工場内に多種多様な工作機械を保有しており、工場全体にIoTを導入するためには導入コストを抑えなければならず、県内企業へのIoT普及が遅れている一因となっている。

そこで、本研究では、県内企業からの相談の一つである切削監視についてIoT導入モデルとして取り組み、低価格で手軽に導入可能なIoTデバイスを活用した監視システムを構築し、その有用性について検討した。

2. 監視対象とセンサの検討

2.1 実験方法

表1に示すように、監視対象およびセンサについて、導

入コストとサンプリング周波数を考慮し、低価格なIoT切削監視システムと親和性の高いパラメータを検討した。

いずれの監視対象についても、数十～数百kHz程度のサンプリング周波数の高い高精度なデータを取得するためには、高性能なセンサや解析装置が必要となり、導入コストが必然的に高くなる。特に力や音(AE)に関して、測定に高いサンプリング周波数を要するため、導入コストが高い。

しかし、振動加速度や画像、電圧に関しては、データのサンプリング周波数が劣るものの(振動加速度、電圧:数十～数百Hz程度、画像:30fps程度)、数百円から数千円程度の低価格なセンサやカメラが販売されている。

そこで、マシニングセンタの切削監視の対象として、加速度(加工中の振動加速度)、電圧(主軸モータ負荷)を監視することとした。

次に、加工中の振動加速度および主軸モータ負荷を切削監視に適用可能かどうかを検証するため、マシニングセンタ(三井精機工業(株)、型式:VS5A)を用いて表2の切削加工条件で切削加工実験を行った。切削長100mmの側面切

表1 監視対象とセンサの検討

監視対象	センサ	導入コスト	サンプリング周波数	判定
力	切削動力計	数十万円～ 数百万円	低～高 (数十kHz程度)	×
音 (AE波)	AE センサ	数十万円～ 数百万円	高 (数百kHz程度)	×
振動 加速度	加速度 センサ	数百円～ 数万円	低～高 (数十kHz以下)	○
画像	カメラ	数千円～ 数十万円	低～高 (数千fps以下)	△
電圧	データ ロガー	数千円～ 数万円程度	低～高 (数kHz以下)	○

*生産技術部

表2 切削加工条件

加工方法	側面切削
切削工具の詳細	形状：スクエアエンドミル
	材質：ハイス
	工具径：直径10mm
	刃数：2枚刃 ねじれ角：30°
被削材	S55C(生材)
加工条件	切削速度：60m/min
	送り速度：0.1mm/tooth
	切込み量 (工具軸方向)：10.0mm (工具半径方向)：1.0mm
その他	セミドライ加工

削加工を5回ずつ行い、加工中の振動加速度、主軸モータ負荷、逃げ面摩耗幅を測定した。加工はエンドミル刃先の逃げ面摩耗幅が0.2mm以上に達するまで繰り返した。

振動加速度および主軸モータ負荷の取得には、それぞれ加速度計(リオン(株)、センサの型式：PV-97C、アンプの型式：SA-02A4)とデータロガー(グラフテック(株)、型式：GL7000)を使用した。これらの装置は高精度にデータを取得できるものの、合計数百万円程度である。

2. 1. 1 振動加速度

エンドミル等の回転工具の断続切削を詳細に監視するには、少なくとも数kHz以上の高周波数域の振動加速度を監視する必要がある³⁾。しかし、IoTとして複数の工作機械に適用するには、現実的ではない。

そこで、工作機械全体の揺れ、あるいは機械構造系内の特定部分の振動を含む数十Hzから数百Hzの振動加速度、特に低価格なセンサでも測定可能な100Hz程度の周波数を対象とした。加速度センサをマシニングセンタ主軸頭に固定し、被削材を切削する直前から、切削が終了するまで約25秒間のデータを取得している。

2. 1. 2 主軸モータ負荷

ロードメータは、主軸モータ負荷を示す計測器であり、定格出力を100%としたときの出力比を示す。この計測器は、一般的な工作機械に内蔵されている。

使用したマシニングセンタには、アナログのロードメータが内蔵されているが、主操作盤を改造し、前述したデータロガーを用いてロードメータ電圧を直接記録した。

得られたロードメータ電圧は、主軸モータ負荷と比例関係があるため、主軸モータ負荷として使用することが可能となる。

2. 1. 3 逃げ面摩耗幅

図1にエンドミルの逃げ面摩耗幅測定の模式図を示す。加工終了後、デジタルマイクロスコープでエンドミルの逃げ面摩耗幅を1枚の刃先に対して3点測定した。逃げ面

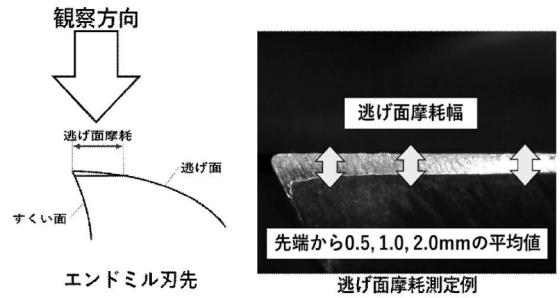


図1 逃げ面摩耗幅測定の模式図

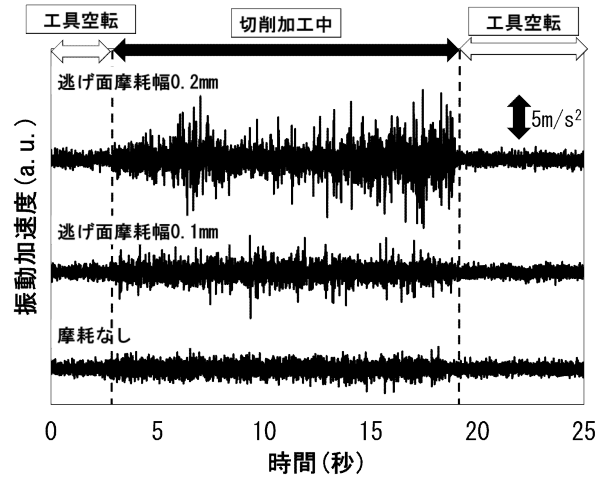


図2 逃げ面摩耗幅と振動加速度の関係

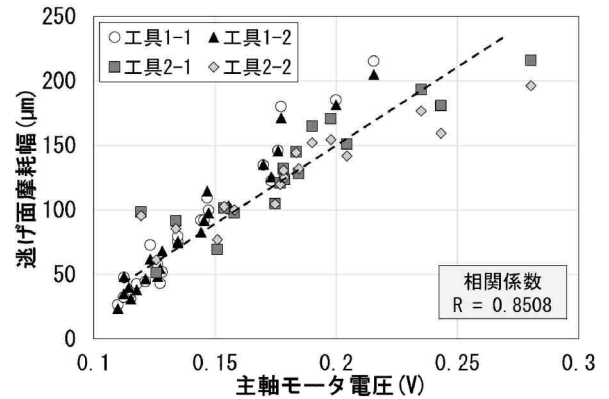


図3 逃げ面摩耗幅と主軸モータ負荷の関係

摩耗幅は、2枚刃エンドミル2本分の計4回測定した。

2. 2 実験結果

2. 2. 1 振動加速度

図2に逃げ面摩耗幅と振動加速度の関係を示す。縦軸に切削加工中の振動加速度、横軸に時間を示す。

逃げ面摩耗が進行するにつれて、加工中の振動加速度が大きく変化した。工具摩耗による加工状態によって切削加工中にマシニング主軸頭の振動加速度が変化すると考えられ、100Hz程度の周波数域の監視でも明確な差が得られた。

2. 2. 2 主軸モータ負荷

図3に逃げ面摩耗幅と主軸モータ負荷の関係を示す。

グラフの縦軸は逃げ面摩耗幅、横軸は無切削時と切削加工時の主軸モータ負荷を示す。図3に示すように、主軸モータ負荷の上昇によって、逃げ面摩耗幅が増加することが確認され、直線近似で相関係数は0.85程度となった。

2. 3 監視対象とセンサの検討に関するまとめ

以上の結果より、加工中の振動加速度および主軸モータ負荷を監視対象として採用した。

主軸モータ負荷に関しては、工作機械全般に内蔵されるロードメータを活用することで、簡単に切削監視が可能となった。振動加速度に関して、加速度センサを別途工作機械に取付ける必要があり、固定や取付け位置の調整が必須となる。

そこで、より県内企業へ展開しやすい主軸モータ負荷を主なパラメータとし、振動を二次的なパラメータとして採用した。なお最近では、主操作盤モニタ上に主軸モータ負荷が数値やグラフとしてデジタル表示される工作機械が多く、工作機械を改造するとメーカー保守外となる恐れがあるため、本研究では工作機械を改造することなく、カメラを用いて主軸モータ負荷を監視するシステムを構築することとした。

3. 切削監視システムの構築

3. 1 システムの構成

図4にシステムの外観および図5にシステムの構成を示す。カメラを用いた監視システムを検討するため、主操作盤モニタに主軸モータ負荷がデジタル表示される小型マシニングセンタ((株)静岡鐵工所、型式:DT-30N)を用いてシステムを構築し、後述する実証実験についても小型マシニングセンタを使用した。

このシステムは、2つのデバイスで構成されており、概算2万5千円程度(デバイス1:1万円程度,デバイス2:1万5千円程度)である。

図5に示すように、デバイス1は、マシニングセンタ主軸頭に設置されており、内蔵された各種センサで加工中のデータを取得し、Bluetoothによる無線通信によってデバイス2に送信する。バッテリーで駆動しており、有線による電源供給が困難な環境でも対応可能となる。

デバイス2はマシニングセンタ外側に設置されており、

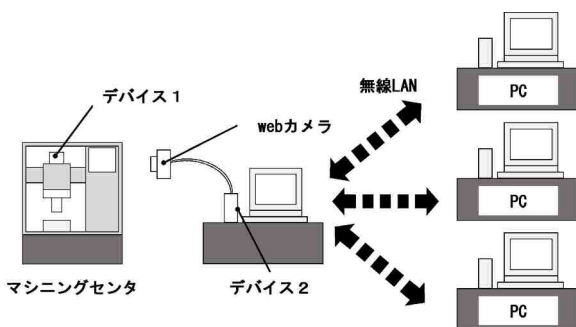


図4 システムの構成

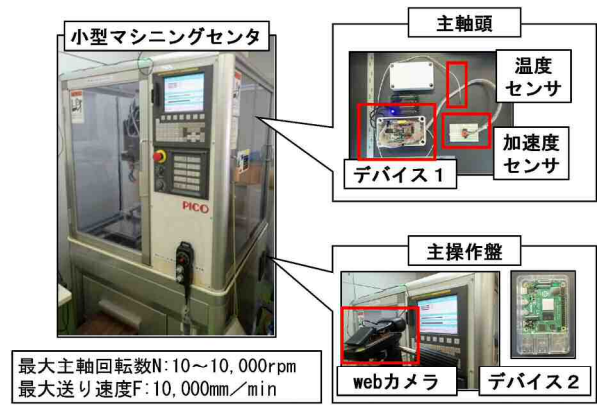


図5 切削監視システムの外観

カメラによって主操作盤に表示される主軸モータ負荷を撮影し、撮影画像を数値データとして処理する。加えて、デバイス1から送信されたデータと併せて、得られたデータをグラフ表示する。構内無線LANにも接続されており、別のパソコンからデバイス2に接続することで、得られたデータを監視することが可能となる。

3. 2 デバイス1の詳細

表3に各デバイスの詳細を示す。デバイス1については、低価格なIoTデバイスであるESP32を使用し、Arduino IDEを用いて開発した。マシニングセンタ主軸頭に固定された2種類のセンサによって、加工中の振動加速度および温度を取得する。

加速度センサは、切削加工時の主軸頭の振動加速度、温度センサは、主軸モータの温度を取得する。

温度に関して、前節で監視対象として検討していないが、切削加工時間に伴って主軸モータ温度が長期的に上昇することが想定されるため、加速度センサと同様、二次的なパラメータとして採用した。

振動加速度について、0.5秒間に100サンプル、温度について0.5秒間に10サンプルのデータを取得し、デバイス内

表3 デバイスの詳細

デバイス名	詳細
デバイス1 (ESP32-DevKitC)	加速度センサ (ADXL345) 測定周波数: 100Hz (±16g) 分解能: 31.25mg 温度センサ (MCP9600) 熱電対: K型・線径φ0.32mm 常用限度温度: 400度 分解能: 0.0625°C 無線通信: Bluetooth 4.2
デバイス2 (Raspberry Pi 4 Model B)	webカメラ (C505) 画素数: 1280×720 フレームレート: 30fps 無線通信: 無線LAN (2.4GHz帯) Bluetooth 5.0

部で収集したデータを平均化し、デバイス2に送信する。

3. 3 デバイス2の詳細

デバイス2は、福岡県工業技術センターが開発したIoT導入支援キットを参考としており、Raspberry Piとwebカメラを使用し、主な開発言語はpythonとした。加えて、オープンソースソフトウェアであるNode-LEDを用いて開発した。Node-LEDは、直観的にプログラミング可能であり、簡単に監視画面作成が可能となる。画像処理に関しては、オープンソースソフトウェアであるOpenCVを使用した。

デバイス2は、接続されたwebカメラによって、マシニングセンタ主操作盤のモニタを0.1秒おきに撮像する。

図6に主軸モータ負荷の数値化について模式図を示す。まず、元画像から主軸モータ負荷が表示される棒グラフの領域をグレースケール化処理および二値化処理を施した。

図6に示される主軸モータ負荷模式図のように、棒グラフは最大200%の主軸モータ負荷まで表示されており、無負荷（主軸モータ負荷0%）の場合には全て黒色で表示される。

切削加工等で主軸モータ負荷が生じた場合には、グラフが変動し、黒色のピクセルが減少する。

そこで、あらかじめ無負荷時の黒色ピクセル数を数えておき、その後、画像から黒色ピクセル数の変化を画像処理によって取得し、割合を(1)式を用いて計算させることで画像データを数値化した。実際に主操作盤に表示される主軸モータ負荷と相違なく、数値化することができた。

$$LM = 200 \times (1 - 1/C1) \times C2 \dots (1)$$

LM (%) : 主軸モータ負荷

C1 (px) : 無負荷時の黒色ピクセル数

C2 (px) : 画像から得られたの黒色ピクセル数

図7にデバイス2で表示される監視画面、図8に主軸モータ負荷グラフ拡大図を示す。図8は、図7で示された点線部の拡大図となる。

デバイス2に収集された各データは、図7に示されるように、設定したしきい値によって表示色に変化する円形状のメータおよび時系列に表示される折れ線グラフとして監視画面に表示される。この監視画面は、構内無線LANを通じて別のパソコンから遠隔監視することが可能である。

監視画面に表示されたメータに関して、しきい値によって表示色を変えることで、視覚的な警告を行うことが可能となる。

例えば、主軸モータ負荷を例に挙げると、主軸負荷100%以下の場合は青色表示、100%から150%の場合は黄色表示、150%から200%の場合は赤色表示となる。

また、監視画面に表示されたグラフに関しては、主軸モータ負荷の変化を示している。

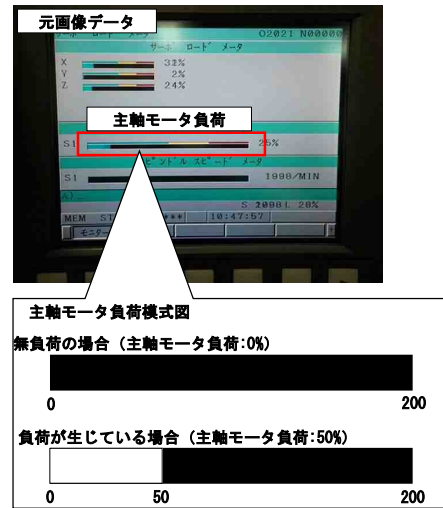


図6 主軸モータ負荷の数値化の模式図

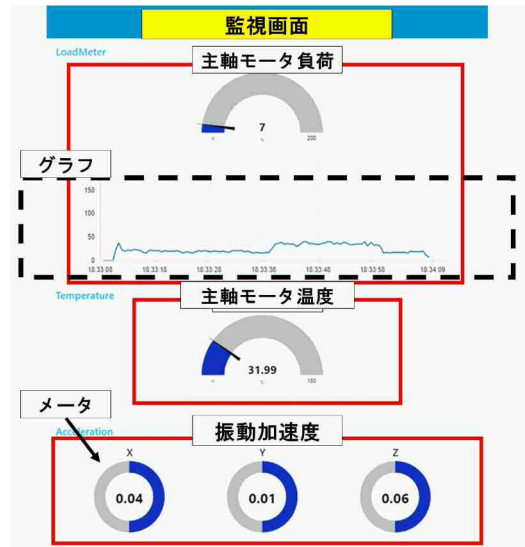


図7 実証実験の監視画面

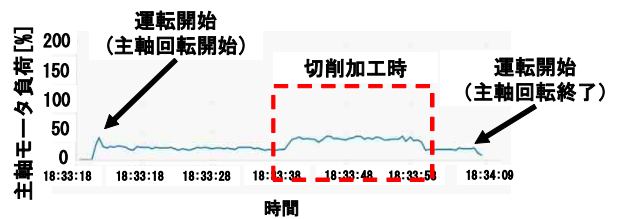


図8 監視画面（主軸モータ負荷グラフ）拡大図

横軸が時間、縦軸が主軸モータ負荷を表しており、工作機械の運転状況、切削加工時に、どの程度主軸モータ負荷が生じるかを監視することが可能となった。

4. 実証実験

4. 1 実験方法

前述した小型マシニングセンタを使用し、被削材としてアルミ材（A5052）を用いた。それ以外の切削加工条件は、表2と同様の条件とした。摩耗なしの工具、逃げ面摩耗幅0.02mmの工具、逃げ面摩耗幅0.2mmの工具を用いて、切削

加工を行い、工具摩耗による加工状態の差が検出可能かどうか検討した。

4. 2 実験結果および考察

4. 2. 1 加工中の振動加速度

図9に逃げ面摩耗に伴う最大振動加速度の変化を示す。

逃げ面摩耗幅の増加に伴い、加工中の最大振動加速度が増加する傾向が得られた。

逃げ面摩耗幅0.2mmのエンドミルを用いた切込み量過大の加工は、Y軸方向（切込み方向）に切込み量を1mm増やした際のデータであるが、Y軸の振動加速度の最大値が変化したために、その違いを検出できたと考えられる。

しかし、低価格なセンサであるため、データのばらつきが大きく、課題が多い。実際には固定方法によっても大きく測定値が変化すると考えられる。また、どの程度の切削加工条件まで監視可能か検討する必要がある。

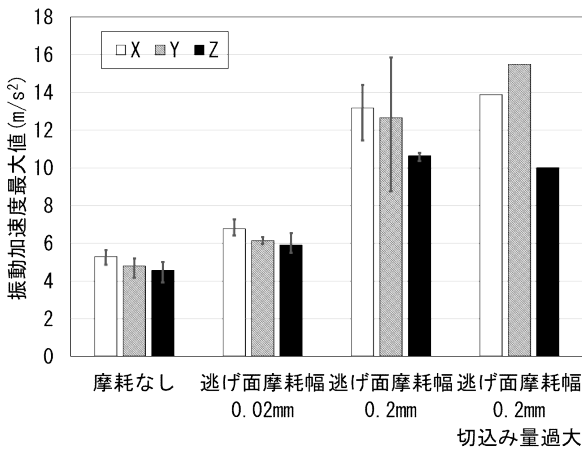


図9 逃げ面摩耗に伴う振動加速度の最大値の変化

4. 2. 2. 主軸モータ負荷

図10に切削加工時の逃げ面摩耗と主軸モータ負荷の変化および図11に逃げ面摩耗に伴う主軸モータ負荷の最大値の変化を示す。

図10に示されるように、主軸モータ負荷の変化によって、マシニングセンタの運転状況が確認できた。また、切削加工時の主軸モータ負荷の変化によって、工具摩耗や切込み量による加工状態の変化が確認された。

そこで、図11に示すように主軸モータ負荷の最大値を監視し、所定のしきい値を設定し、警告を発する機能を付加させることで切削監視の可能性が示唆された。

5. 結 言

低価格IoTデバイスやオープンソースソフトウェアを活用した切削監視システムを構築し、加工中の振動加速度および主軸モータ負荷に基づいた切削監視システムを検討したところ、以下の結果が得られた。

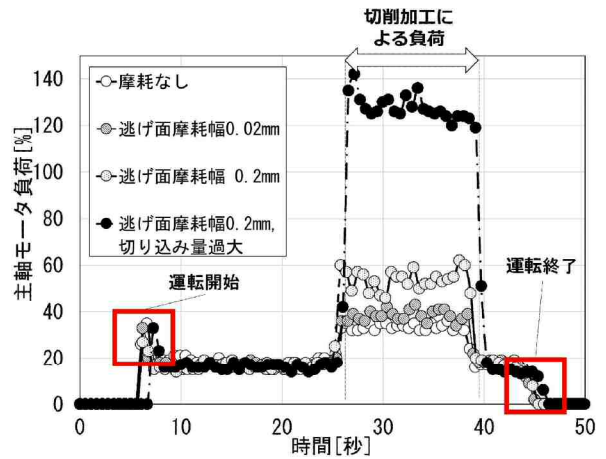


図10 加工時間に伴う主軸モータ負荷の変化

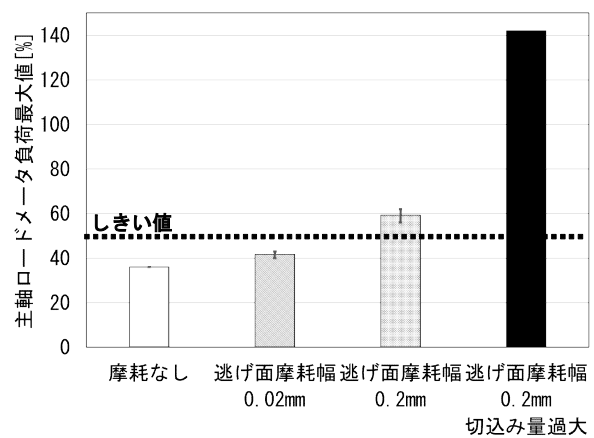


図11 逃げ面摩耗に伴う主軸モータ負荷の最大値の変化

- (1) 工具の逃げ面摩耗幅を設定し、その値に達した際の振動加速度および主軸モータ負荷をしきい値とすることで、切削監視が可能と判断された。
- (2) カメラと画像処理を用いて工作機械の主操作盤を監視することで、簡単にIoT化が可能となった。工作機械1台につき、約2万5千円程度の低価格なコストでIoT化が可能となった。
- (3) 構築したシステムでは、手軽に低価格で、様々な生産設備の監視への適用が期待できる。カメラと画像処理によって、生産設備を改造することなく、IoT化の導入が可能となった。今後は、機械学習を用いてモニタ上の数値やアナログ計測器の監視を検討している。

参 考 文 献

- 1) ミーリングハンドブック, 切削油技術研究会, 56-57 (2018)
- 2) 林宏充, 川畑将人, 奥村克博, 吉村 賢二: 福岡県工業技術センター研究報告, 29, 41-44 (2019)
- 3) 切削加工の基本知識, 小坂弘道, 63, (2007)

