

# 降雨量推定を目的とした ひずみゲージを用いた雨滴の運動エネルギー測定を試み

香川 直己<sup>\*†</sup>      高橋 蓮<sup>\*</sup>      林 良成<sup>†</sup>

An attempt to measure kinetic energy of raindrops using strain gauges for rainfall estimation

Naoki KAGAWA<sup>\*†</sup>    Len TAKAHASHI<sup>\*</sup>    Ryona HAYASHI<sup>†</sup>

## ABSTRACT

In recent years, disasters caused by localized torrential rains of short duration due to linear precipitation belts have frequently occurred. Therefore, we are considering the early detection of localized heavy rainfall to the extent that a disaster occurs by sound information from a distant place, and as a preparation, we are trying to know the relationship between rain sound and rainfall. In this paper, we report on a prototype sensor for measuring the kinetic energy of raindrops using strain gauges, which is mounted on multiple sensor nodes and is intended to be distributed in the field to estimate rainfall.

キーワード：降雨量，推定，音響情報，ひずみゲージ，センサネットワーク

**Keywords:** Rainfall, estimation, acoustic information, strain gauge, sensor networks

## 1. まえがき

近年、線状降水帯に起因する局所短時間の集中豪雨による災害が頻繁に発生している。そこで、我々は遠方からの音情報で災害が発生する程の局所的豪雨を早期に検出することを考えている。ただし、本手法を有効にするためには、現場の音と遠方の音の関係、さらには、降雨強度と現場の音の関係など、明らかにしなければならない因果関係が多く存在する。

そこで、まず、降雨強度と現地の音の関係を明らかにすることから始めている。さらに一か所ではなく、センサネットワークを用いて複数の地点で降雨強度と音を同時継続的に観測することにより、両者の相関関係、さらに、遠方の音との相関関係も明らかになると期待している<sup>1)</sup>。

降雨強度と音の関係に関する先行研究として、金属面上で発する雨音の強度と雨滴の粒径が比例の関係

であること、および、雨滴の終端速度と雨滴粒径に関係があることを明らかにし<sup>2)</sup>、この雨滴粒径を用いて降雨強度を推定することが可能であることを示したものが<sup>3)</sup>。この研究は、音のエネルギーと雨滴粒径の関係より雨滴個数を推定し、さらに、それを用いて降雨強度を推定している。しかしながら、この場合、雨滴の音エネルギーは雨滴が衝突する物質に依存すると推定される。

本稿では、現地に設置するセンサノードに搭載し降雨量を推定することを目的とした、ひずみゲージを用いた雨滴の運動エネルギーの計測センサを試作したので報告する。

## 2. 開発センサの原理と構造

ひずみゲージを弾性体と捉えれば、そこに弾性エネルギーを蓄える事ができるといえるため、ひずみゲージに雨滴が衝突した際に、雨滴の持つ運動エネルギーの一

\*スマートシステム学科

†大学院電子・電気工学専攻

部がひずみゲージに弾性エネルギーとして蓄えられる。

そこで、水滴がひずみゲージに衝突した際に示す抵抗値の変化を捉え、そこから、ひずみゲージの弾性エネルギーを求め、さらに雨滴の持つ運動エネルギーを導出することを基本原理とする。

試作した降雨センサは荷重測定ロードセルの原理を応用して、4枚のひずみゲージとブリッジ回路で構成をした。同一特性の4枚のひずみゲージでブリッジ回路を組み、3枚のひずみゲージは歪まないように基板上に固定し、残りの1枚のひずみゲージを検出端として雨滴が当たるようにした。検出端のひずみゲージに雨滴が衝突した際のブリッジ電流を検出する。

製作したセンサの構造を図1に示す。ひずみゲージの実装は、回路パターンを切削により作成した両面電子回路基板上に表面実装で行っている。

ブリッジ電流はADコンバータ付きの検出アンプ(HX711)によりデジタル信号として出力される。HX711の制御およびデータ取得はマイクロコントローラ(Arduino nano)を介してシリアル接続されたホストコンピュータ(PC)で行われる。

検出端のひずみゲージは曲げに対する感度が高く、かつ、確実に元の位置への復元が行われるように突出の長さを決定している。また、検出端のひずみゲージに水滴が留まらないように、撥水性の良い素材のフィルムをゲージの先端に貼り付け、更にその先端を尖らせた。雨滴はこのフィルムに衝突させる。

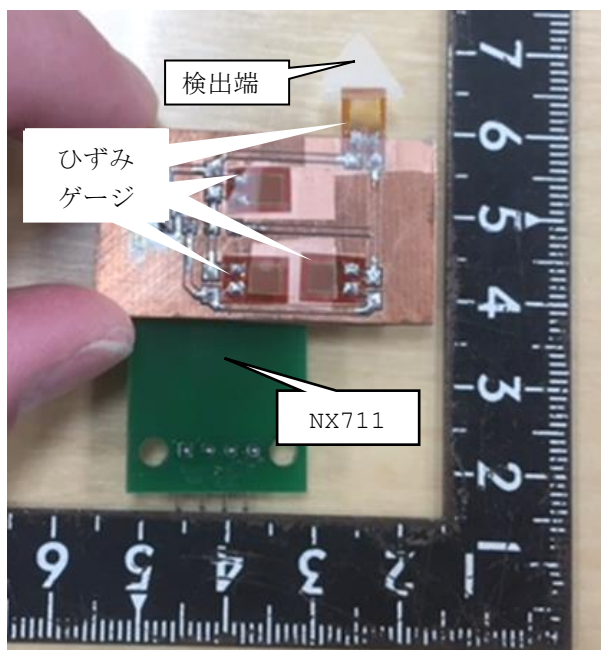


図1 ひずみゲージを用いた試作センサ

Fig.1 Prototype sensor using a strain gauge.

### 3. 開発センサの基本特性の同定

#### 3. 1 ひずみゲージのばね定数の取得

雨滴が衝突した際にひずみゲージに蓄えられる弾性エネルギーを推定するためには、使用するひずみゲージのばね定数を把握する必要がある。そこで光学機器で用いられるマイクロメータヘッドと精密天秤ばかりを用いて、センサに用いるひずみゲージのばね定数を推定した。

図2に測定の様子を示す。精密天秤ばかりの上皿上にステージを設け、そのステージ面とマイクロメータヘッドに検出端の先端部を挟み、マイクロメータヘッドで徐々に押し込み、マイクロメータヘッドの押し込み量と、精密ばかりの指示値を記録した。併せてひずみゲージの抵抗値も測定し、無理なく曲げが掛かっていることを確認しながら押し込みを進めた。

図3に押し込み量に対する精密天秤ばかりの指示値とひずみゲージの抵抗値の関係を示す。抵抗値は直線的に変化しており、無理なく曲げが掛かっていると推定される。精密天秤ばかりの指示値も概ね直線的である。このグラフの傾きから測定対象のひずみゲージのばね定数は、約16[N/m]と推定される。

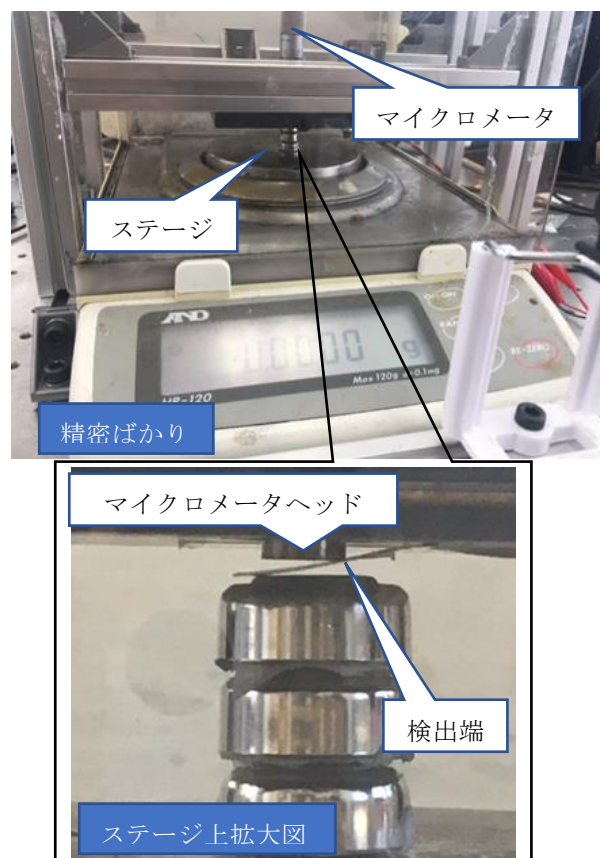


図2 ばね定数推定のための測定の様子

Fig.2 Measurement for spring constant estimation.

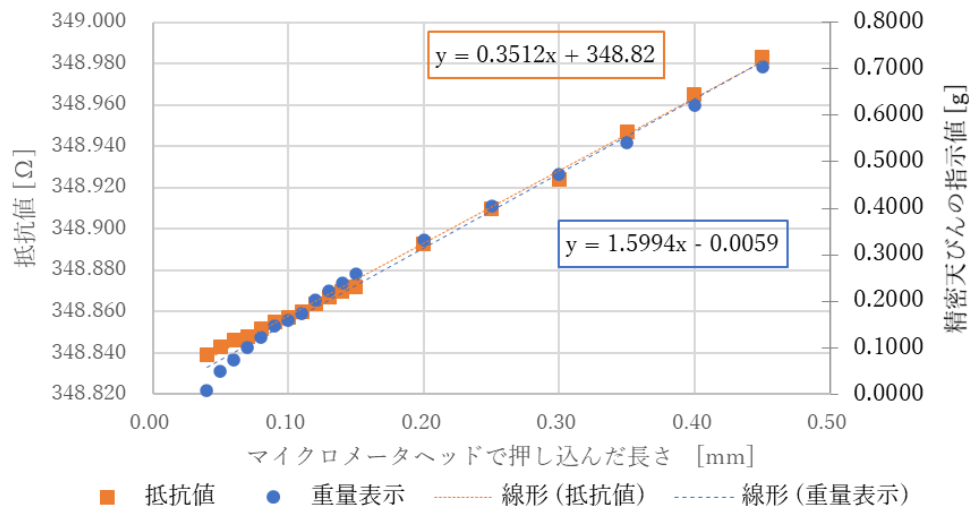


図3 使用したひずみゲージの曲げと荷重の関係（丸印、右軸）および、曲げと電気抵抗の関係（四角印、左軸）

Fig.3 Relationship between bending and load (circle, right axis) and relationship between bending and electrical resistance (square, left axis) of using strain gages.

### 3. 2 検出アンプの性能評価

次に、検出アンプ（HX711）の特性を評価した。評価方法は前項の構成と同様であり、これに図 1 の形態で設置し、AD 変換結果をマイクロコントローラ経由で PC に記録した。測定結果を図 4 に示す。横軸はマイクロメータヘッドの押し込み量、たて軸は検出アンプの出力値の質量換算値であるが、絶対量の信ぴょう性は低く、傾向の目安として利用している。

図 4 の結果より、マイクロメータヘッドの押し込

みに対して検出アンプ（HX711）は、指示値に至るまで線形特性があることが明らかになった。

### 4. 落下水滴の運動エネルギーの推定実験

#### 4. 1 実験方法

センサの静特性が明らかになったことを受けて、落下する水滴の運動エネルギーの推定実験を行った。

実験は、320mm の高さからスポイトを使って水滴を落下させ、それを当該センサの検出端に衝突させた。衝突時の AD 変換値の変化分から図 4 の関係を用い

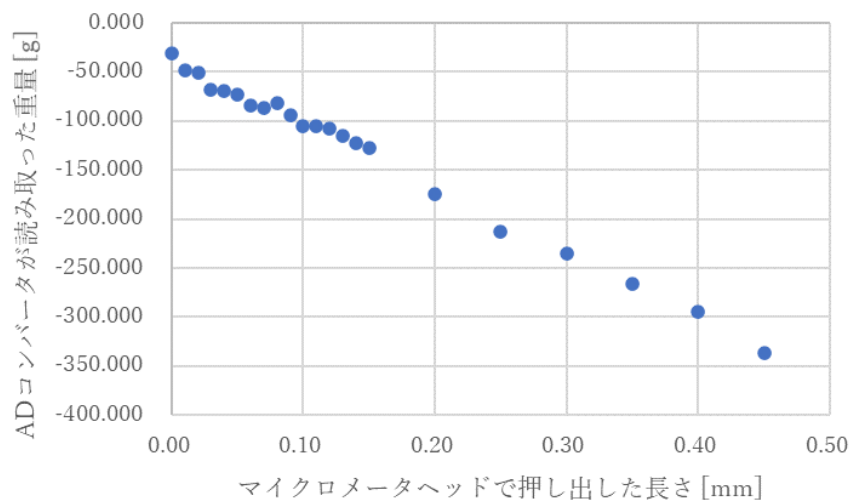


図 4 使用したひずみゲージの曲げと検出アンプボード（HX711）の出力値の関係

Fig.4 Relationship between strain gauge bending and the output value of the detection amplifier (HX711).

て、曲げ（押し下げ）の量を推定し、さらに、図3の結果より求めたバネ係数を用いて、水滴衝突時の弾性エネルギーを算出した。

一方、検証のために落下中の水滴の位置と速度から運動エネルギーを推定することも同時に行った。図5に測定の様子を示す。落下する水滴をカメラのスロー機能で撮影し、図6に示す様に画像処理を用いて位置を推定した。その結果からカメラ設定の、720p, 240fpsから落下速度を算出した。また、水滴の重さは前出の精密天秤ばかりで測定し、これらの情報から測定端への衝突時の運動エネルギーを推定した。

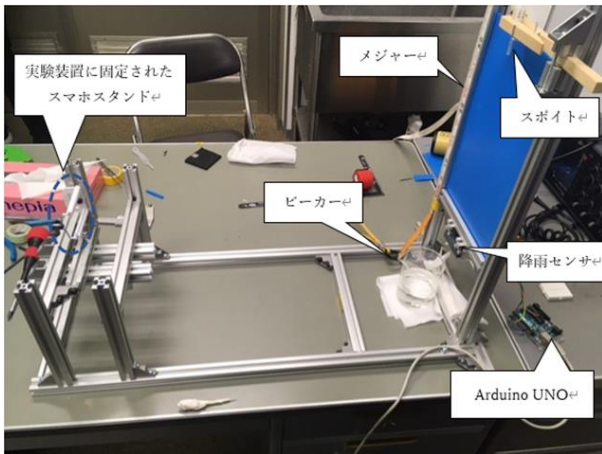


図5 落下する水滴の運動エネルギー推定のための実験環境

Fig.5 Experimental environment for kinetic energy

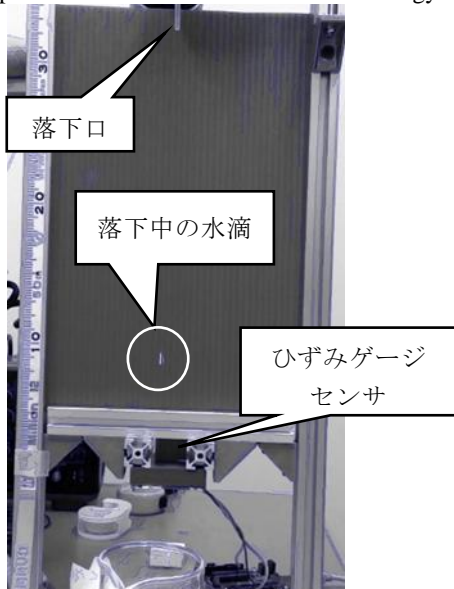


図6 画像処理でエッジ検出を行った落下する水滴の様子の一例

Fig.6 An example of falling water droplets with edge detection by image processing.

## 4.2 実験結果

図7に測定結果の一例を示す。動画撮影との同期が取れないため、AD変換器からの出力を記録しながら滴下をさせたため、横軸の時刻はデータファイルのタイムスタンプとなっている。この結果の場合は、40分34秒でわずかな反応が現れている。同時に撮影した画像のタイムスタンプと照合して、この時刻に水滴が検出端に衝突したと推定した。

この測定を複数回実施し、変動量の平均値から弾性エネルギーを推定した結果、 $5.40E-9$ [J]となった。一方、画像解析から推定される速度から推定した運動エネルギーは $1.10E-4$ [J]となり、運動エネルギーが全て弾性エネルギーに変換されたとした場合、極めて大きな差を生じた。

## 4.3 考察

開発したセンサの弾性エネルギーから推定した滴下した水滴のエネルギーと水滴の落下速度から推定したエネルギーの間に大きな乖離が生じたと考えられる原因として、センサに使用したADコンバータのサンプリングレートが水滴の衝突の物理現象の変動速度に追従できていないことが考えられる。これによりアンダーサンプリングが生じ、変位の最大値近辺の値を取りこぼしていることが推定される。

よって、今回使用したセンサボードHX711に搭載されたものよりサンプリングレートが高いADコンバータを選定する必要があるが、そのためには、水滴が衝突した際のひずみゲージの振動等の物理的変位の連続的な変化を観測することができる測定を行い、変動周期等を検証する必要がある。

## 5. まとめと今後の展望

ひずみゲージを用いて雨滴の運動エネルギーを計測することを試みた。結果として、信ぴょう性のある測定にはなっていない。この原因については、HX711のAD変換の時間分解能が低いことが挙げられる。HX711のサンプリングレートは10Hzであるため、ひずみゲージからの出力信号の時間変化に対してアンダーサンプリングしている可能性は否めない。試験的にサンプリングレートが1kHzの計装アンプを用いて滴下試験を行ったところ、図8に示すような減衰振動を記録することができた。この結果を足掛かりとして、最適なサンプリングレート、計測法さらには雨滴のエネルギーの算出手法を追求する予定である。

また、運動エネルギーから弾性エネルギーへの変換効率も精度低下に起因している可能性がある。このことについてもひずみゲージ衝突時の水滴の振舞いを精査した上での精度の高い衝突モデルの作成が望まれる。

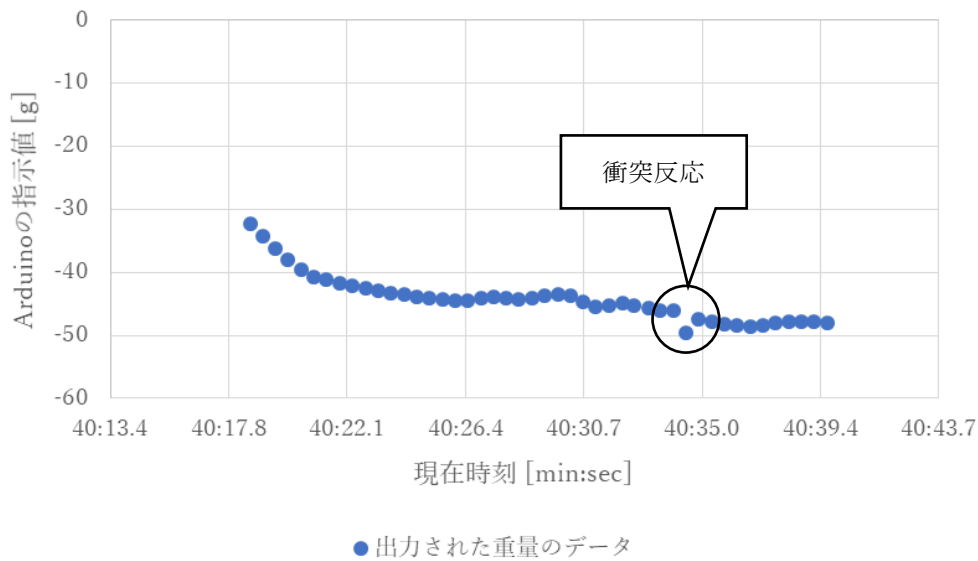


図7 一滴の水滴の衝撃に対する開発したセンサの反応

Fig.7 Reaction of the developed sensor to the impact of a single water drop.

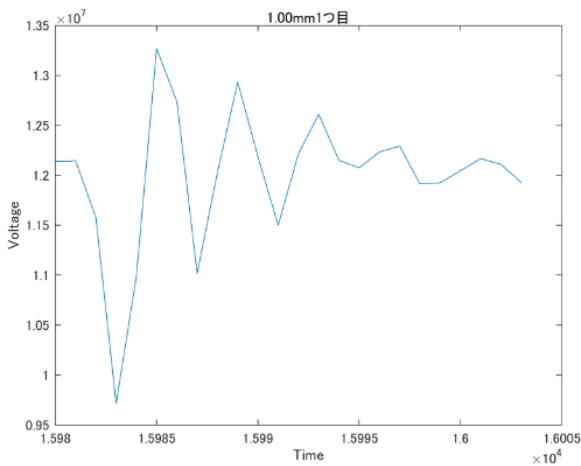


図8 サンプリングレート 1kHz で取得した滴水のひずみゲージへの衝撃信号の一例

Fig.8 An example of impact signal of a drop of water on a strain gage acquired at a sampling rate of 1 kHz.

当該雨滴センサに関しては、今後、これらの仮説を明らかにし、高精度化に向けた対応を進めてゆく予定である。

但し、豪雨発生域から離れた遠方で得られる情報は、豪雨発生域の複数の局所情報に何らかの要因が加わったものの組み合わせである。そこで同時刻における、遠方から得た音と各局所地点での情報の関係が明らかにする必要がある。この関係の調査には、遠方から得た局所地域の音と降雨強度を含む様々な情報を同

時に収集する必要があるため、センサネットワークを用いることを考えている。

このセンサネットワークは、山等の広い範囲を細かい設置間隔かつ、長期間のデータ欠損を可能な限り少なくすることが目的であるため、2つの機能が必要となる。

1つ目の機能はメッシュ型ネットワークである。メッシュ型は、自動経路制御とマルチホップの2つの特徴を有している。自動経路制御は、ある経路で通信障害が発生しても別の経路に切り替えて通信を行うことである。マルチホップは、通信端末自体が中継器としての機能を持つことで、直接電波が届かない場所にある通信端末と中継器を介して通信を行うことである。そのためメッシュ型は、障害物等で直接通信が出来ない状況や、ある中継器が故障した際に、他の通信可能な中継器を介した通信が可能である。

2つ目の機能はソフトウェアの転送が可能なことである。センサを長期間使用する際にセンサの校正及び補正が必要になるが、山等の人が立ち入りにくい場所で測定を行うため、回収することが困難である。そのため校正用のセンサボードを搭載したドローンを用いて現地での校正を行い、補正を行うプログラムを、データを収集しているネットワークを用いてエンドデバイスに転送することで遠隔でセンサの校正を行うことを考えている。

現在、温度、湿度、気圧、紫外線等のセンサを搭載したセンサボード群を、図9に示すように、Zigbee規格[4]のDigi XBee@3 Zigbee3.0(XBee@)と、マイクロコ

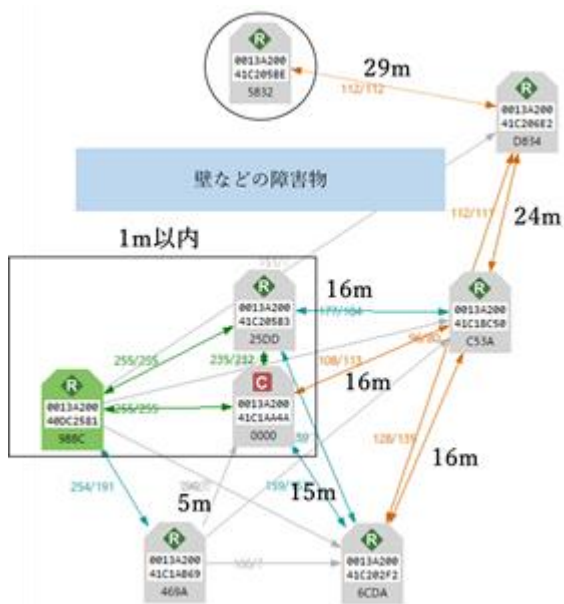


図 9 運用試験中のマルチホップセンサネットワークの概略図

Fig.9 Schematic diagram of a multi-hop sensor network under operational testing .

ントローラ mbed LPC 1768 を用いてマルチネッネットワーク化し、気温、湿度等の試験的なマルチセンシングを行っている。本稿で述べた雨滴センサも、このセンサ群に加え、試験運用を行うことをめざす。

#### 参考文献

- [1] 高橋蓮, 林良成, 香川直己, 森田翔太, 山之上卓, 金子邦彦: 音響センサネットワークを用いた降雨量推定に向けた雨音の分析, 第29回 SICE 中国支部学術講演会講演論文集, pp. 59-60, Nov.2020
- [2] 林 尚志, 鶴田泰士, 石川忠晴: 音を利用した雨量計の試作とテスト, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.985-990, (1997)
- [3] 石川忠晴, 林 尚志, 鶴田泰士: 雨滴音と雨粒諸元の関係に関する可視化実験, 可視化情報学会誌, Vol.18, No.69, pp.141-148 (1998)
- [4] Zigbee – Zigbee Alliance  
<https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>