

熱赤外リモートセンシング画像を用いた津波災害と竜巻被害の把握

Detection of Tsunami and Tornado Damage Using Thermal-Infrared Remote Sensing Images

11TM0344 花田 大輝
Daiki HANADA

指導教員 山崎 文雄

SYNOPSIS

In this study, detection of building damage was carried out from the aerial thermal infrared (TIR) images taken over Tsukuba City on May 8, 2012 (two days after the tornado hit) in the daytime and nighttime. The TIR and temperature gradient images were extracted for each building footprint, and were compared with the damage status extracted from a visible aerial image. It was confirmed that the temperature characteristics of non-damaged and damaged buildings show some difference. From the cumulative distribution of the average temperature and temperature gradient within each building footprint, those for collapsed buildings were found to be in a narrower range than that of non-damaged buildings. It is expected that aerial thermal infrared images can provide useful information in early damage detection, especially at nighttime.

1. はじめに

2011年3月11日、東北地方太平洋沖を震源とするM9.0の非常に強い地震が発生し、津波によって広範囲にわたり甚大な人的・物的被害が生じた。また、2012年5月6日には茨城県、栃木県の複数の箇所において発生した竜巻により、被害範囲は狭いものの多くの物的被害と、一部では人的被害も発生した。このような災害の発生予測は極めて難しく、発生後の早期警報と、迅速な緊急対応が重要となる。我国の災害把握にはリモートセンシング画像が多く用いられており、地上からのアクセスが困難な地域や被害が広範囲に及ぶ場合などに大きな力を発揮している¹⁾。観測機器は衛星、航空機、ヘリコプター、無人機等、様々なプラットフォームに搭載され、観測対象の規模によって使い分けることが可能である。災害による被害の把握は、可視画像による目視判読が容易であるが、多くの画像が太陽光に依存するため夜間においては撮影することが難しく、空白の時間が生じてしまう。一方、熱放射を観測する熱赤外センサは太陽光に依存せず、昼夜関係なく利用することが可能であるため空白の時間をなくすることができる²⁾。平常時とは異なる温度分布・特性によって、津波湛水域や建物の瓦礫化などの被害を把握できるといえる。

本研究では、衛星熱赤外画像を用いた東北地方太平洋沖地震における津波湛水域把握と、空撮熱赤外画像を用いたつくば市竜巻被害の把握について試みるが、本要旨ではつくば市における竜巻被害について取り上げる。昼夜それぞれの熱赤外画像による建物の表面温度分布により、被害建物の把握を試みる。まず、空撮可視画像から建物輪郭を作成し、目視により建物被害を判読する。次に熱赤外画像から建物輪郭内における表面温度を抽出し、さらに温度勾配を計算する。これらの画像を可視画像と組み合わせて用い、被害程度との関係を把握する。また建物輪郭内の平均温度・平均温度勾配を計算し、被害程度ごとの累積分布図を作成することで、被害建物の温度特性を把握する。

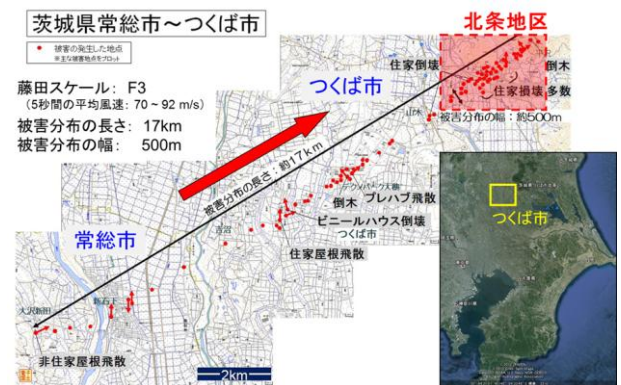


図1 気象庁による竜巻被害詳細図³⁾ (一部加筆・修正)

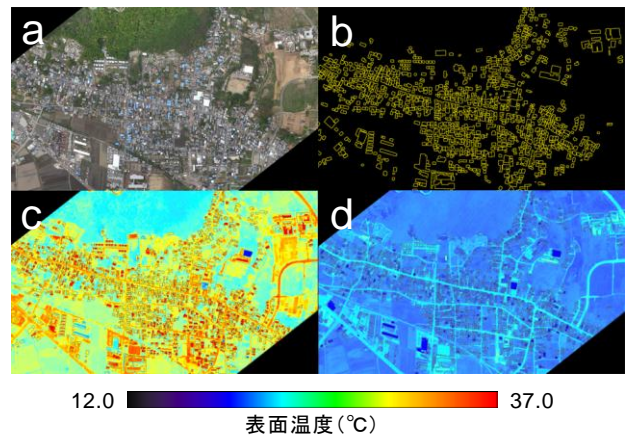


図2 a: つくば市北条地区における昼間可視画像, b: 可視画像から作成した建物輪郭データ, c: 昼間熱赤外画像, d: 夜間熱赤外画像.

2. 使用データ

本研究では、茨城県常総市からつくば市にかけて発生した竜巻の被害把握を行う。対象地域としては、被害の大きかった北条地区を取り上げる（図1）。竜巻発生後に撮影した熱赤外面像による温度分布の空間変動を見ることにより被害を把握する。今回、昼夜の熱赤外面像および昼間の可視画像の撮影をスカイマップ(株)に委託し、小型ヘリコプターから高度460mでほぼ垂直に撮影した。撮影された画像を図2に示す。図2a, 2cは、竜巻発生より2日後の5月8日の14:00頃に撮影した昼間可視画像、熱赤外面像の一部切り出したもので、解像度はそれぞれ0.25 m/pixel, 1.54 m/pixelである。図2dは、同日の19:30頃に撮影した夜間熱赤外面像である。図2bは図2aから作成した建物輪郭データであり、昼夜それぞれの熱赤外面像と組み合わせて用いることにより建物被害の把握を行う。

3. 研究手法

熱赤外面像の参照データを作成するために、可視画像から建物一棟ごとの被害判読を行った。ArcGISを用いて、スカイマップ社が撮影した昼間可視画像とゼンリンのGISデータを参照して建物輪郭データを作成した。次に、それぞれの建物の屋根における被害状況を、空撮可視画像から表1に示す基準に従い無被害、一部損壊、半壊、大規模半壊、全壊の5つのレベルに目視により分類した。この数値は、内閣府で実際に用いられている基準⁴⁾を参考に、独自に定めたものである。なお、ブルーシートが掛けられている箇所も損壊面積として計算している。

建物輪郭内の被害に着目するために、熱赤外面像から輪郭内の温度分布を抽出する。また、温度分布の空間変動を見るため、建物輪郭内における温度勾配⁵⁾を計算した。温度勾配の計算に用いるウインドウサイズは3x3 pixelであり、温度勾配が大きいほど隣接するピクセルとの温度の差が大きくなることを示す。これらを用いて、温度分布と被害との関係を建物ごとに検討する。

また、建物（屋根）被害と屋根表面温度との関係を把握するため、被害区分ごとの平均温度・平均温度勾配の累積分布を作成する。ArcGISを用いて、建物輪郭内におけるそれぞれの平均値を算出する。ArcGISにより生成されるdxfファイルから、建物被害ごとに建物平均温度・平均温度勾配の累積分布を作成する。

4. 検討結果

4.1 可視画像による被害の目視判読結果

図3に北条地区の建物被害判定結果を示す。図3を見ると、被害の大きい建物が連続して分布しており、竜巻の経路を概ね推定することができる。なお、この結果は建物の屋根の状況のみで被害を判断しているため、側面に大きな被害を受けているものの、無被害と判定されている建物がいくつか存在する。また、ブルーシートを損壊面積としているため、つくば市が発表している被害判定結果とは結果がやや異なっている。しかし、本研究では屋根の被害・温度状況が大きく影響してくるため、この結果を建物被害データとして用いることとする。無被害地域であるArea 1、および被害地域であるArea 2について検討を行う。

4.2 無被害地域における建物の表面温度特性把握

図4aは、図3におけるArea 1について拡大した可視画像であり、図4bはその目視による被害判読結果である。昼夜の各熱赤外面像から建物輪郭内の温度を抽出し、可視画像と重ね合わせたものを図5に示す。また、温度勾配を計

表1 目視による建物被害判定基準

建物被害	一部損壊	半壊	大規模半壊	全壊
屋根損壊率R $R = \frac{\text{屋根損壊面積}}{\text{屋根面積}}$				
	0% < R ≤ 20%	20% ≤ R < 50%	50% ≤ R < 70%	R ≥ 70%

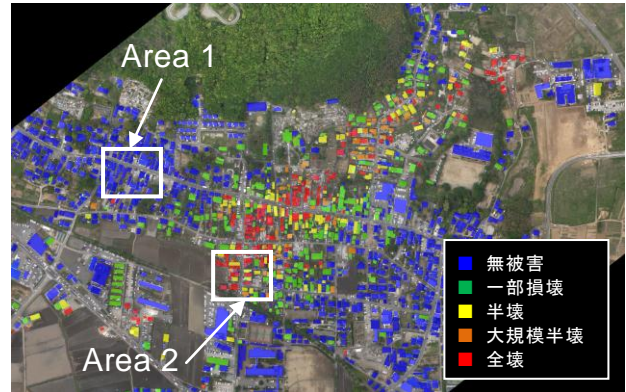


図3 目視による被害判読結果

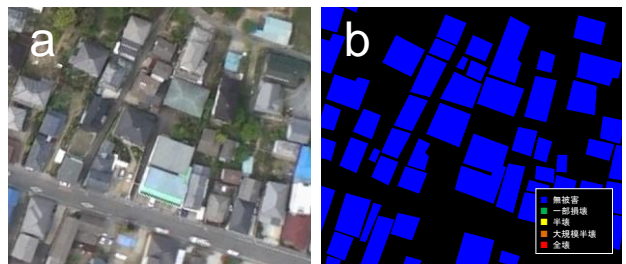


図4 a: 無被害地域における空撮可視画像, b: 同地域における被害判読結果

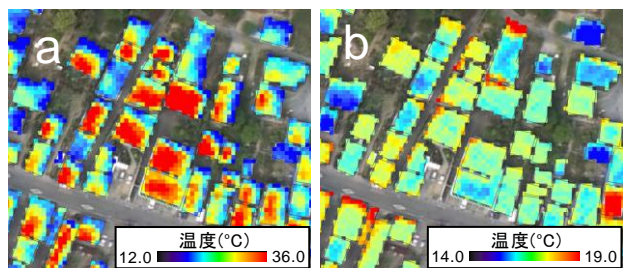


図5 無被害地域における建物表面（屋根）温度, a: 昼間, b: 夜間。

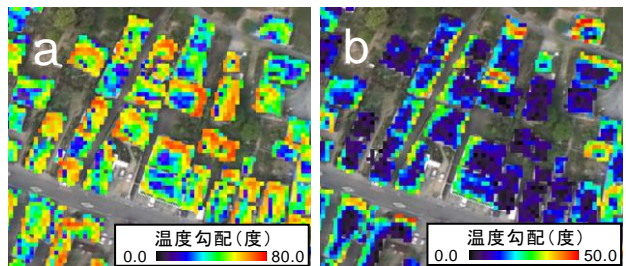


図6 無被害地域における建物表面（屋根）温度勾配, a: 昼間, b: 夜間。

算した結果を図 6 に示す。なお、可視画像と熱赤外面像は解像度が異なり、建物の位置が完全には一致しないため一部建物以外のピクセルも含んでいる。

図 5a の建物輪郭内における昼間温度画像を見ると、高い温度と低い温度の建物が混在しているが、全体的に高い温度のものが多くわかる。一方図 5b の夜間温度画像では、ほとんどの建物において温度の差が無くなり、全体的に似た温度となっていることがわかる。また、昼間において低い温度を示す建物は、夜間においても温度が低いままであることがわかる。

図 6 は温度勾配画像である。温度勾配の計算では隣接ピクセルとの差分により計算するため、建物以外のピクセルを含んでいる場合温度勾配が大きくなることもある。図 5a の昼間における温度勾配画像を見ると、ほとんどの建物の外周部が黄色からオレンジ色の比較的高い値で示され、周囲との温度変化が大きいことが分かる。これは、建物周囲と屋根では材質が異なるためであるといえる。図 6b の夜間の温度勾配画像では、いくつかの建物の輪郭付近が道路や植生の影響を受けて赤く示されており、材質が異なることによる影響であることが分かるが、これら建物外周部の影響はここでは無視するものとする。夜間では、多くの建物が紫色で示す低い値を示しており、建物輪郭内の表面温度が昼間より均質であることがわかる。

4.3 被災地域における建物の温度特性把握

次に、竜巻による被害の大きい図 3 の Area 2 について検討を行う。図 7-9 は、同様の方法で作成した可視画像、表面温度画像、温度勾配画像である。この地域は、可視画像から分かるように、倒壊したり、屋根にブルーシートが掛けられ被害を受けたことを示す建物が多い。図 8a の昼間における建物の表面温度画像を見ると、比較的被害の少ない建物は温度が高いが、倒壊した建物、ブルーシートが掛けられた建物は温度が低くなっていることが分かる。図 8b の夜間における温度画像では、無被害地区の事例と比較して温度が下がっていることが分かる。また、昼夜通して全体的に温度が低くなっており、被害のある建物は被害の無い建物と比較して温度特性が異なることが確認された。

図 9a の昼間における温度勾配画像を見ると、全体的に紫から青で示された温度変化の低い建物が多く見られる。また、建物外周部に温度変化が大きい箇所が少ないことが分かる。これは、建物の崩壊により瓦礫がもとの建物輪郭外に広がり、周囲との温度差が小さくなったことが挙げられる。また、屋根が崩壊して鉛直方向から見える範囲に太陽が当たらなくなり温度上昇が抑えられた、さらに解像度の低い熱赤外面像では多くのものがミクセル (Mixed-pixel) 化し、均一となったことも要因として挙げられる。とくにこの特性は図 9b における画像左上の建物群で顕著であり、全域が低い値で表示されている。この建物は可視画像を見てもわかるように、建物が崩壊して瓦礫が周囲へと広がり、土と良く似た状態となっていることが確認できる。現地調査からも、これらの瓦礫は砂埃を多くかぶっており、土のような表面の状況にあることを確認している。建物崩壊時におけるこのような特性を利用することにより、熱赤外面像を用いて、災害時における建物被害を迅速に把握できる可能性が示された。

無被害建物の事例においても夜間の温度勾配画像では建物輪郭全面に変化のない建物がいくつか確認できるが、表面温度画像を見るとその温度特性は異なっており、これらの 2 種類の画像を用いることで建物被害を判断できる可能性がある。また、夜間では温度変化の幅が大幅に減少する

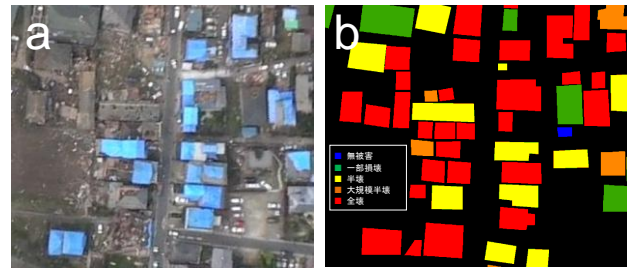


図 7 a: 被災地域における空撮可視画像, b: 同地域における目視被害判読結果。

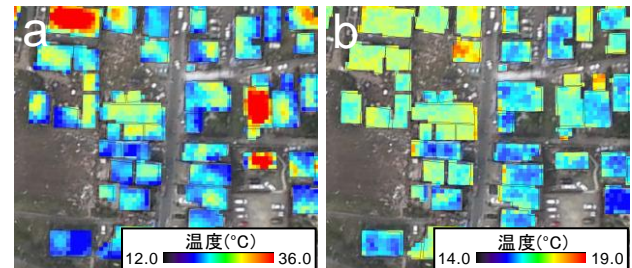


図 8 被災地域における建物表面 (屋根) 温度, a: 昼間, b: 夜間。

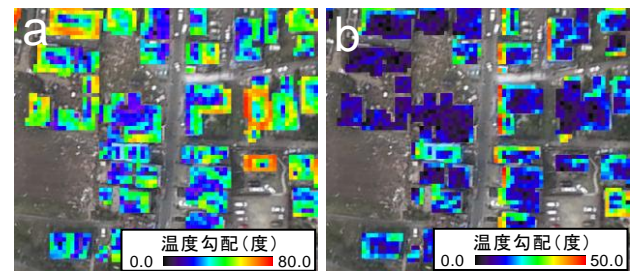


図 9 被災地域における建物表面 (屋根) 温度勾配, a: 昼間, b: 夜間。

ため、表示範囲を狭めるなど、より定量的に評価する方法を検討する必要がある。

4.4 被害レベルごとの建物平均温度・勾配の累積分布

図 10 は、昼夜それぞれの建物輪郭内の平均温度を計算し、被害レベルごとに平均温度の累積分布を描いたものである。図 11 は、昼夜それぞれの建物輪郭内における温度勾配の平均による累積分布である。なお、温度勾配の単位は角度である。また、被害レベルごとの建物総数を表 2 に示す。ここでは北条地区以外の建物も数に含めている。

図 10a の昼間における累積分布を見ると、無被害の建物は 20℃から 40℃の範囲にわたって広く分布していることが分かる。被害を受けた建物は 25℃から 34℃の狭い範囲で表示されており、被害の程度が高くなるほど平均値が低下し、それぞれの平均値を中心に温度が密集する傾向にあることが分かる。全壊の建物に関してはさらに狭い範囲示され、平均値が無被害建物と比較して 2℃ほど低下していることが確認できる。これは、ブルーシートによる表面温度の低下や、屋根が瓦礫化することによって太陽光による熱が伝わりづらくなり温度上昇が抑制されたこと、また竜巻や建物崩壊時の多量の砂埃によって表面が覆われたためであると考えられる。解像度が高い熱赤外面像であれば、瓦礫の温度分布は空間的にばらつくと考えられるが、今回用いた空撮熱赤外面像の解像度は約 1.54m であるため、多くの瓦礫がミクセル化し、温度分布が均一となったといえる。

図 10b の夜間における累積分布を見ると、昼間のものと比較して範囲が大幅に狭まり、ほとんどの建物が 15°C から 17°C 付近の範囲に密集していることがわかる。全壊の建物に関しては、他の累積分布と比較してグラフの立ち上がりがやや遅く、狭い範囲で示されていることがわかる。夜間における被害を受けた建物の累積分布は、平均値にほとんど違いは確認されなかったものの、昼間と同様に表示範囲がやや狭くなる傾向が確認された。

図 11a の昼間の温度勾配平均では、被害のある建物は図 10a の昼間における平均温度の事例と比較してやや広く分布しているが、概ね類似した分布特性を持つことがわかる。一方図 11b の夜間における温度勾配平均では、図 10b の夜間における平均温度の事例と比較して低い値に多くが密集しており、分布特性が異なることがわかる。これらの累積分布も温度平均によるものと同様に、被害のある建物は無被害の建物と比較してやや範囲が狭くなる傾向が確認された。しかしながら、夜間における被害の有無による差異はわずかなものであり、1 つの要素から被害を評価することは極めて難しい。表面温度画像、温度勾配画像、可視画像など複数の画像を総合的に考慮することにより、昼夜を問わず定量的に被害を評価する可能性が示唆される。

5. まとめ

本研究では、2012 年 5 月 6 日につくば市に被害を与えた竜巻の 2 日後に取得した空撮熱赤外画像を用いて、建物被害の把握を試みた。まず建物輪郭データを作成し、事後空撮可視画像から建物被害を目視判読した。熱赤外画像から建物の表面温度を抽出し、さらに温度勾配を計算した。無被害地区と甚大被害地区の建物の温度画像、温度勾配画像を比較することによって、両者の温度分布の違いを検討した。その結果、無被害建物では表面温度が全般的に高く個別の差異が大きいのにに対し、被害建物では温度が下がり、個々のばらつきも小さい傾向にあることが確認された。建物屋根の表面温度は、材質、色、傾斜、日照条件により大きな影響を受けるが、温度画像と温度勾配画像を組み合わせることで、とくに被害が屋根に現れる竜巻や台風による被害把握への利用が期待される。

被害レベルごとに建物輪郭内の平均温度・平均温度勾配の累積分布を作成した結果、昼夜ともにそれぞれの被害建物分布は平均値付近に密集し、一様に近い値を取ることが確認された。これは屋根の崩落により太陽光による熱が伝わりづらくなり表面温度上昇が抑えられた、また瓦礫や砂埃などによる影響、熱赤外画像の低い解像度によるミクセル化などの影響であるとの結論に達した。

今後の課題として、温度画像、温度勾配画像、累積分布による屋根の温度特性を総合的に判断し、定量的な被害把握方法を構築する必要がある。屋根の温度特性を把握することで、事前可視画像と事後熱赤外画像を比較し、温度分布から建物上面の被害を判定する方法を構築したいと考えている。また、今回は建物に注目したが、道路は材質が均一で連続しているため被害把握がより容易であると考えられる。これらの被害把握手法の構築により、今後の災害において、とくに夜間における空撮熱赤外画像を用いた迅速な被害把握へと繋げていきたい。

【参考文献】

- 1) 三富創, 松岡昌志, 山崎文雄: 最近の地震災害の空撮画像を用いた建物被害地域の自動抽出の試み, 土木学会論文集, No. 703/I-59, pp. 267-278, 2002.

表 2 被害レベルごとの建物棟数

	無被害	一部損壊	半壊	大規模半壊	全壊
建物棟数	1474	208	112	62	146

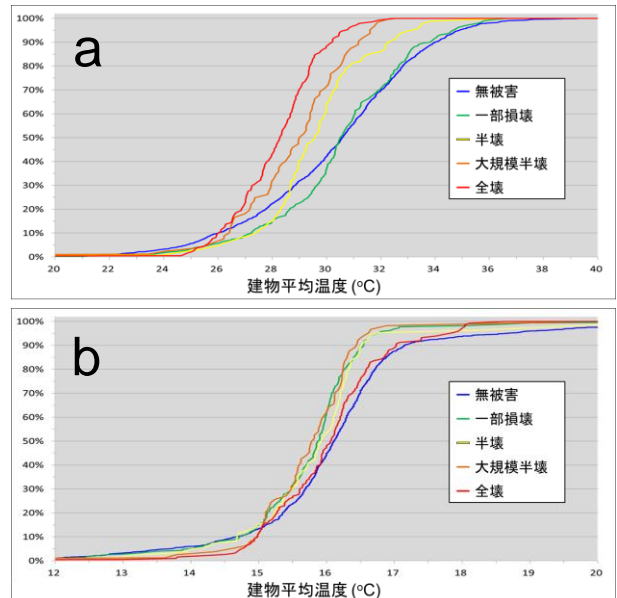


図 10 被害レベルごとの建物輪郭内における平均温度の累積分布, a: 昼間, b: 夜間。

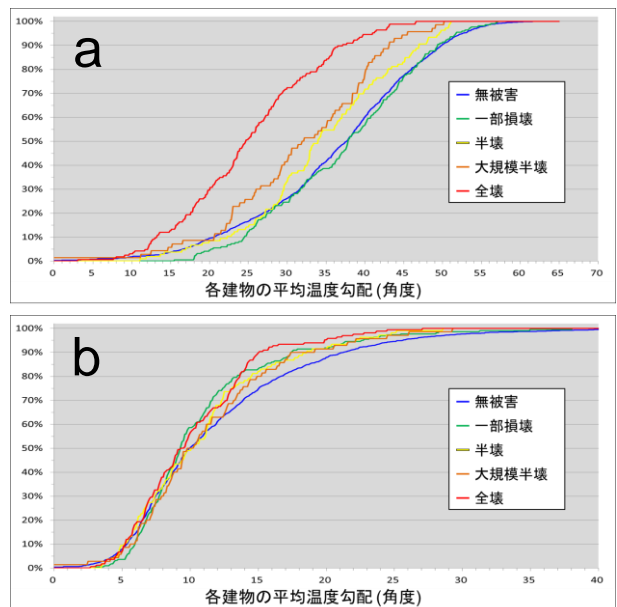


図 11 被害レベルごとの建物輪郭内における平均温度勾配の累積分布, a: 昼間, b: 夜間。

- 2) Hanada, D., and Yamazaki, F.: Detection of the flooded area by tsunami using satellite thermal infrared images, 32nd Asian Conference on Remote Sensing, Paper No. 229, CD-ROM, 6p, 2011.
- 3) 気象庁: 平成 24 年 5 月 6 日に発生した竜巻について (報告), URL: <http://www.jma.go.jp/jma/press/1206/08b/toppu120608.html>
- 4) 内閣府: 災害に係る住家の被害認定基準運用指針, URL: <http://www.bousai.go.jp/hou/pdf/shishinall.pdf>
- 5) ArcGIS resource center, How Slope works, URL: <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z000000vz000000/>