

強震動の二重スペクトル比を用いた Q_S 値の空間的変動の推定

泉谷恭男¹・池谷太輔²

¹正会員 理博 信州大学教授 工学部社会開発工学科 (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1)

²信州大学大学院工学系研究科博士前期課程 (〒 380-8553 長野市若里 4-17-1)

2つの地震の際の2つの観測点での強震記録の二重スペクトル比を用いることによって、ある特定の経路に沿って伝播するS波の、単位行程あたりの平均的な減衰の大きさを調べることが出来る。観測点の組合せを変えると伝播経路が変わるため、減衰の大きさも変化する。いろいろな経路に沿って求められた減衰の大きさを満足するように、S波の減衰に関する Q_S 値の空間的な変動を推定することが出来る。愛知県をほぼ東西に横切る地殻内での Q_S 値は、中央部分で大きく、両側で小さい。東側の Q_S 値の小さい領域には中央構造線(M.T.L.)が通過しており、西側の Q_S 値の小さい領域は伊勢湾から敦賀湾に至る断層帯である。 Q_S 値の空間的変動は地殻構造の不均質性と密接に関連しているものと考えられる。

Key Words : Q_S -value, double spectral ratio, spatial variation, strong ground motion, Median Tectonic Line, K-NET

1. はじめに

強震動の主要部分を構成するS波の減衰について調べることは、将来の大地震の際の強震動を予測するために重要である。一般に、S波の減衰に関する Q_S 値を推定するためには、多数の地震による多数の観測点での強震記録を解析して、震源特性、伝播経路特性、観測点特性を同時に推定するインバージョン手法が用いられる^{1)~6)}。このようにして得られる Q_S 値は、解析された地震の震源と観測点を含む、比較的広い地域における平均的な(見かけの)値である。

1995年に発生した兵庫県南部地震以後、K-NET⁷⁾を初めとする強震観測網の整備が推進され、大量の質の高いデータが利用できるようになってきた。このようなデータを用いると、広い地域における平均的な Q_S 値ばかりではなく、 Q_S 値についての細かい地域性について調べることが出来る。筆者らは前論文^{8),9)}において、強震動の二重スペクトル比を用いることによって、ある特定の経路に沿った平均的な Q_S 値を推定する方法を提案した。またその方法を用いて、九州南部の火山下を通る経路における Q_S 値について調べた結果、東北地方や関東地方で得られている Q_S 値に比べて1/2~1/3の値でしかないことを見出した。

前論文^{8),9)}を発表して以来、この方法は幾つかの地域において Q_S 値の詳細を調べるために応用されている^{10),11)}。その一方で、火山下ではない「普通の場合」において Q_S 値の空間的変動を定量的に検出することが果たしてこの方法で可能であろうかとの疑問も提出

された。この疑問に答えるべく、愛知県付近で発生した2つの地震の記録に二重スペクトル比法を適用することによって、 Q_S 値の空間的変動を評価することを試みた。ここにその結果を報告する。かなり広い地域における平均的な Q_S 値ばかりでなく、 Q_S 値の空間的変動に関する情報は、将来の大地震に伴う強震動予測を実施する際に有用であろう。

なお、本論文で扱っている「 Q_S 値」は「内部減衰に関する媒質の真の定数」というような物理的に厳密な意味を持っているわけではない。内部減衰や散乱などの要因が複合して、結果的にS波の振幅(スペクトル)が距離とともに減衰することを表現するための一つのパラメータとして用いていることを、まず最初に断っておく。

2. データおよび解析

1997年3月16日に愛知県東部で発生した地震と1998年4月22日に滋賀・岐阜県境で発生した地震の際に、愛知県内の4つの観測点で得られた強震記録を解析した。表-1に示した震源位置とマグニチュードの情報は気象庁による。震源断層の走向(ϕ)、傾斜角(δ)、すべり角(λ)は長周期地震記録のモーメントテンソルインバージョンによって求められた値である^{12),13)}。また、観測点としては、表-2に示すように、K-NET⁷⁾の津島(AIC003)、名古屋(AIC004)、豊田(AIC009)、作手(AIC010)を選んだ。図-1の上図は、2つの地震の

表-1 地震の震源と発震機構

Event	Date	Time	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M	$\phi(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$
E ₁	1997/03/16	14:51:39.1	34.925	137.528	39	5.8	164	37	-68
E ₂	1998/04/22	20:32:48.6	35.165	136.570	10	5.4	12	55	103

表-2 観測点リスト

Station Code	Latitude (°N)	Longitude (°E)
AIC003	35.1700	136.7433
AIC004	35.0602	136.9766
AIC009	35.0780	137.1494
AIC010	34.9669	137.4266

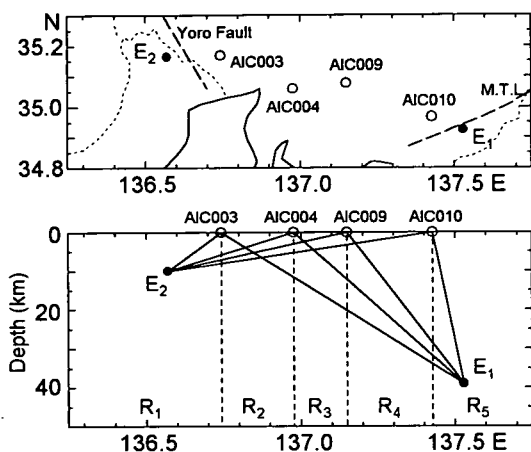


図-1 震源と観測点

震央と4つの観測点の位置を示しており、それらはほぼ一直線に並んでいる。また図-1の下図は、2つの地震の震源を含む鉛直断面の模式図である。2つの震源と4つの観測点を結んでいる直線は、本研究において仮定したS波の伝播経路を示している。R₁~R₅はこの断面内の5つの領域を示しており、本研究においては、これらの領域間でのQ_S値の変動について調べる。

解析したデータは、2つの地震の際の4観測点での水平動2成分、計16個の加速度記録である。観測波形の例を図-2と図-3に示す。各観測点におけるNS成分の記録であり、最大加速度値を付記した。また、図中の破線はP波及びS波の到着時刻を結んだものであり、S波速度はほぼ3.5 km/sであることが分かる。

S波到着から5秒間の加速度記録についてフーリ

エスペクトルを求めた。この際、バンド幅0.4 HzのParzen ウィンドウを用いてスムージングした。更に、NS成分、EW成分のスペクトルの二乗和の平方根をとった後、対数軸上で等間隔な16個の周波数帯域内で平均した。スペクトル値を平均するための周波数帯域は、10^{0.1i-0.45} ~ 10^{0.1i-0.35} Hz; (i = 1 ~ 16)とした。これより低周波数帯域ではノイズが大きく、S/Nが良くない。また、これより高周波数帯域になると、地震波の入射方向の変化による地盤の応答の変化が無視できなくなり、二重スペクトル比をとることによって地盤の影響を経験的に除去するという本研究の前提が成立しなくなる恐れがある。これらのことを勘案して、取り扱う周波数帯域を定めた。

以上の手順で得られたスペクトルを用いて、6通りの観測点の組み合わせ毎に二重スペクトル比を求め、前論文⁹⁾の式(4)に示されたΔt*を求めた。更に、図-2と図-3に示した結果に基づいてS波速度を3.5 km/sと仮定し、伝播経路に沿った単位行程あたりのS波の平均的な減衰を表すQ_S⁻¹値に換算した。得られたQ_S⁻¹値を図-4に細線で示す。観測点の組合せによって求められるQ_S⁻¹値はかなり変化しており、Q_S⁻¹値が負になる場合もある。低周波数帯域におけるほどQ_S⁻¹値の変動が大きいのは、低周波数帯域ほどQ_S値が小さいために、そのちょっとした変化がQ_S⁻¹値の大きな変化となって現れるためと考えられる。

震源から射出されるS波のエネルギーは射出方向によって異なる。この影響を取り除くため、震源でのS波の放射パターンの補正を施した。この際、震源からのS波の射出方向は震源と観測点とを結ぶ直線の方角であると仮定し、SH波とSV波の放射パターンの二乗和の平方根を補正值として用いた。最近、強震動予測モデルにおいて、放射パターンの周波数依存性を導入する試みもあるが¹⁴⁾、ここでは周波数依存性は考慮していない。Δt*の定義(前論文⁹⁾の式(4)より、周波数依存性の無い放射パターンの補正を行うとΔt*は1/fに比例して変化し、Q_S⁻¹値も同様に化する。図-4の太線は放射パターンの補正後のQ_S⁻¹値である。観測点の組合せの違いによるQ_S⁻¹値の違いは補正前に比べるとやや小さくなっているものの、まだかなり大きく、Q_S⁻¹値が負になる場合もそのままである。

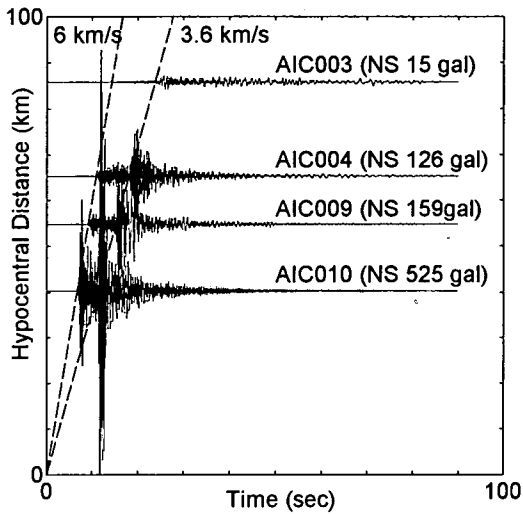


図-2 地震 E₁ の観測記録 (NS 成分)

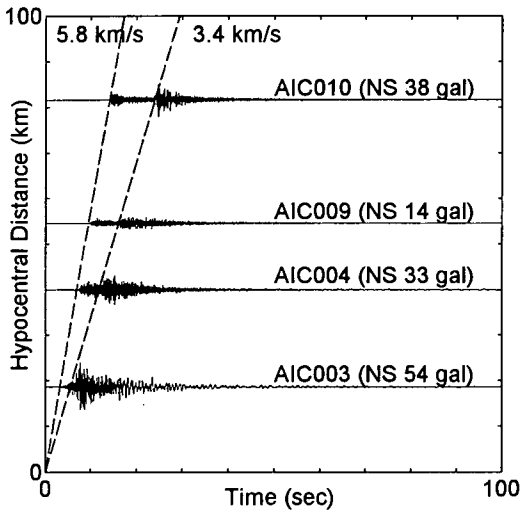


図-3 地震 E₂ の観測記録 (NS 成分)

Q_s^{-1} 値が負になるということは、単純に考えれば、遠い観測点ほど振幅が大きいことを意味し、地震波は伝播距離とともに減衰するという常識と一見矛盾する。しかし後に述べるように、これは Q_s 値が空間的に変動していることに起因する見かけの現象である。 Q_s^{-1} 値が伝播経路の違いによって変わるというこの現象を利用して、 Q_s 値の空間的変動を推定することが出来る。

3. 平均的な Q_s 値

Q_s 値の空間的変動を推定する前に、先ずこの地域における平均的な (見かけの) Q_s 値について考察する。

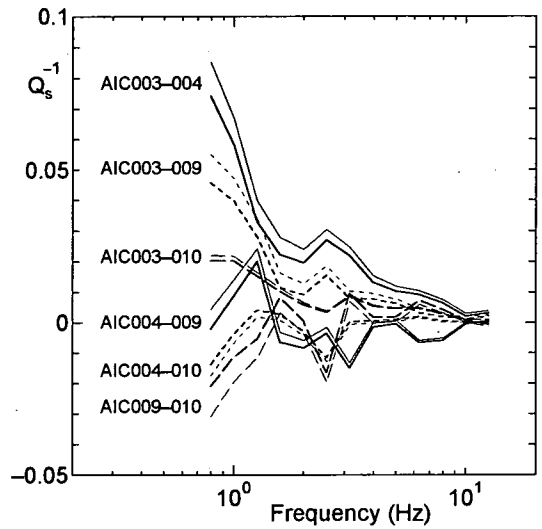


図-4 観測点の組合せ毎の Q_s^{-1} 値。細線：放射パターンの補正無し、太線：放射パターン補正済み

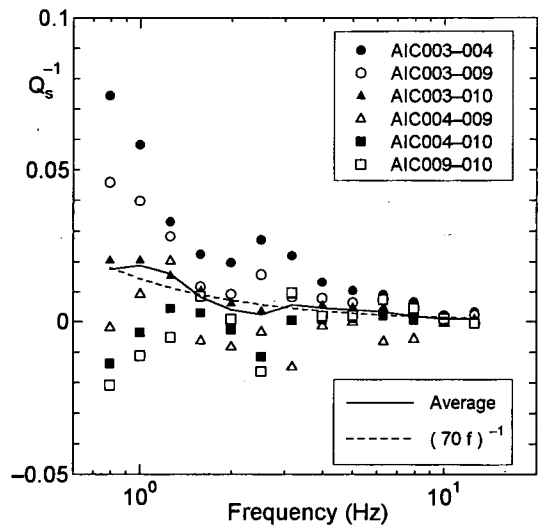


図-5 観測点の組合せ毎の Q_s^{-1} 値とそれらの平均値

図-5 における各シンボルは、観測点の組合せ毎の Q_s^{-1} 値であり、図-4 の太線に対応している。すべての観測点の組合せによる Q_s^{-1} 値を平均すると図-5 の実線になる。これは、図-1 に示された鉛直断面内の全経路における単位行程あたりの S 波の平均的な減衰を表し、点線で示された

$$Q_s^{-1} = (70f)^{-1} \quad (1)$$

によってほぼ近似できる。これを関東地方や東北地方において得られている Q_s 値^{2)~5)} と比較したのが図-6 である。愛知県における平均的な (見かけの) Q_s 値

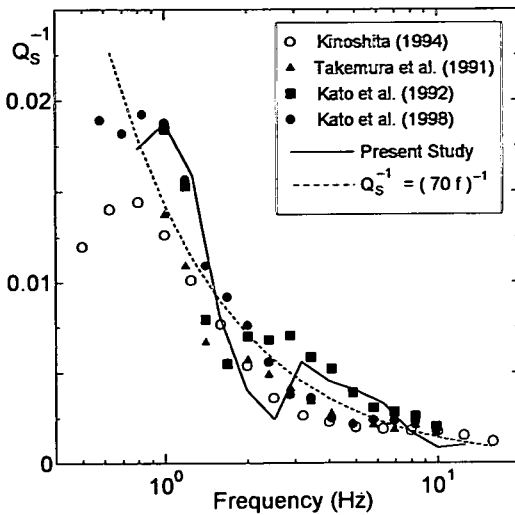


図-6 Q_S^{-1} 値の比較

は、関東地方や東北地方で得られている値と殆ど同じと言えるであろう。

インバージョン手法^{1)~6)}によって得られる Q_S 値は、図-5におけるパラツキをランダムノイズとみなして平均化した場合に求まる値に相当している。個々の伝播経路に注目することなく、多くのデータを同時に解析して減衰効果を平均化するので、図-5の場合のように Q_S^{-1} 値が負になるというような奇妙な現象は現れない。その意味でインバージョン手法は Q_S 値を求めるための安定した方法であると言えることが出来る。しかしその一方で、 Q_S 値の空間的変動に関する貴重な情報を捨ててしまっていることも事実である。

4. Q_S 値の空間的変動

図-1 に示すように、2つの地震の震源を含む鉛直断面を $R_1 \sim R_5$ の5つの領域に分け、それぞれの領域内での Q_S 値を求めてみる。

前節で述べたように、この地域全体としての平均的な Q_S 値は70f程度なので、各領域内の Q_S 値も f に比例するものとして、 $Q_k f$ と仮定する。ここで k は領域番号を表し、 Q_k は領域毎の定数である。非常に単純なモデルに基づく解析ではあるが、データ数が少ないことを考えると、あまり複雑なモデルを考えてパラメータ数を増やすことには意味がない。

ある一組の Q_k ($k=1\sim 5$) が与えられた場合、観測点と震源を結ぶ波線ごとに各領域内での Δt^* を求めてその総和をとる。2つの震源と2つの観測点の組み合わせに対する4つの波線についての Δt^* を求め、それを

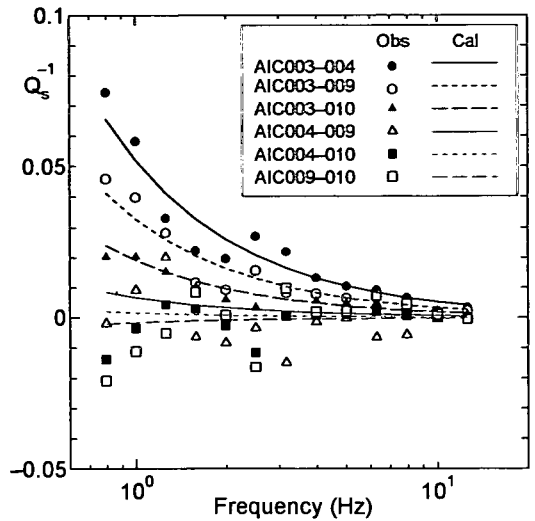


図-7 観測点の組合せ毎の Q_S^{-1} の観測値と計算値。 Q_S 値の空間的変動を考慮した場合。

Q_S^{-1} 値に換算する。こうして得られた見かけの Q_S^{-1} 値を図-5に示された観測値と比較し、観測値を最もよく説明できる Q_k の組を求める。 Q_k を20~100の範囲で10ずつ変化させながら最適な Q_k を求めた。 Q_S^{-1} の観測値を最もよく説明できる Q_k を用いた場合の Q_S^{-1} の計算値が観測値とともに図-7に示されている。最適な Q_k は領域 R_1, R_2, R_5 では20、領域 R_3, R_4 では100であった。

図-7に見られるように、これらの Q_k を仮定すると、観測点の組合せによっては Q_S^{-1} 値が負になるという現象も、ある程度説明できる。たとえば AIC009と AIC010の組み合わせについて考えてみる。図-1を見ると、 E_1 -AIC009および E_2 -AIC010の経路の方が E_1 -AIC010および E_2 -AIC009の経路よりも長い。しかし、後者の経路の方が Q_S 値の小さい領域 (R_1, R_2, R_5) を、より長い距離通過している。そのため後者の経路での減衰の方が大きくなり、見かけの Q_S^{-1} 値が負になったわけである。

Q_k がもっと極端に空間的に変動する場合を仮定すると、 Q_S^{-1} 値を更に負値とすることも可能である。しかし、現在使用できるデータには限りがあり、あまり極端モデルを仮定しても意味がない。今回は、二重スペクトル比法によって Q_S 値の空間的変動の推定が可能であることを示すに止めた。

さて、Hashida¹⁵⁾ は、多くの地震についての震度分布のデータのインバージョンにより、震度で表現した場合の地震動の減衰について調べ、地殻内における Q 値の地域変化についての検討を行った。その結果を見

ると、本研究で用いた測線に沿って、西から Low Q - High Q - Low Q となっている。これは、領域 3 と 4 では Q_S 値が大きく、その両側では Q_S 値が小さいという本研究結果と調和的である。

また、観測点 AIC010 付近においては中央構造線 (M.T.L.) が本研究の測線を横切っている^{16),17)}。中央構造線による破碎帯が、本研究で推定された領域 R_5 における Low Q_S の原因である可能性が大きい。一方、領域 R_1 と R_2 における Low Q_S の原因としては、養老断層系の存在が考えられる^{16),18)}。

5. まとめ

一般によく用いられるインバージョン手法によって求められる Q_S 値は、広い地域内での平均的な (見かけの) 値であり、実際の Q_S 値は空間的にかなり変動している可能性がある。二重スペクトル比法を用いると、 Q_S 値の空間的変動を推定することが出来る。

現時点では未だにデータが不足しているため、任意の地域で二重スペクトル比法を用いて Q_S 値の空間的変動を推定することは難しい。しかし、地方自治体、気象庁、KiK-net¹⁹⁾ 等の強震観測網が更に整備がされつつあり、 Q_S 値の空間的変動を多くの地域で調べることもやがて可能になるであろう。

Q_S 値の空間的変動は、単に S 波の減衰特性の空間的变化というばかりでなく、地殻構造の空間的变化 (例えば、アスペリティの空間的分布) とも関連がある可能性も考えられ、将来の大地震に伴う強震動予測のためにも調査する意義が大きい。

謝辞： 科学技術庁防災科学技術研究所の K-NET データを使用させていただきました。記して感謝します。

参考文献

- 1) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, Vol.39, pp.579-593, 1986.
- 2) Takemura, M., Kato, K., Ikeura, T. and Shima, E.: Site amplification of S-waves from strong motion records in special relation to surface geology, *J. Phys. Earth*, Vol.39, pp.537-552, 1991.
- 3) Kato, K., Takemura, M., Ikeura, T., Urao, K. and Uetake, T.: Preliminary analysis for evaluation of local

site effects from strong motion spectra by an inversion method, *J. Phys. Earth*, Vol.40, pp.175-191, 1992.

- 4) Kinoshita, S.: Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of the southern kanto area, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.1387-1396, 1994.
- 5) 加藤研一, 武村雅之, 八代和彦: 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, 地震 2, Vol.51, pp.123-138, 1998.
- 6) 山中浩明, 中丸明子, 栗田勝実, 瀬尾和大: 表層の地盤特性を拘束条件にした S 波スペクトルのインバージョンによるサイト特性の評価, 地震 2, Vol.51, pp.193-202, 1998.
- 7) 防災科学技術研究所: K-NET のホームページ (<http://www.k-net.bosai.go.jp/>).
- 8) 泉谷恭男: 二重スペクトル比による霧島付近の Q_S 値の推定, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, B57, 1998.
- 9) 泉谷恭男: 強震動の二重スペクトル比から推定した九州南部における Q_S 値, 土木学会論文集, No.640/I-50, pp.225-230, 2000.
- 10) 加藤研一: K-NET 強震記録の二重スペクトル比に基づく九州南部の減衰評価, 日本建築学会学術講演概要集, 1999.
- 11) 鶴来雅人, 香川敬生: 2 重スペクトル比を用いた近畿地方における伝播経路特性の震源距離依存性, 地球惑星関連学会 1999 年合同大会, Sg-003, 1999.
- 12) 菊地正幸: EIC 地震学ノート (<http://www.eic.eri.utokyo.ac.jp/EIC/>).
- 13) Fukuyama, E., Ishida, M., Horiuchi, S., Inoue, H., Hori, S., Sekiguchi, S., Kawai, H. and Murakami, H.: NIED seismic moment tensor catalogue January - December, 1998, *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, Vol.193, pp.1-35, 1999.
- 14) Pitarka, A., Somerville, P., Fukushima, Y., Uetake, T. and Irikura, K.: Simulation of near-fault strong-ground motion using hybrid Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, pp.566-586, 2000.
- 15) Hashida, T.: Three-dimensional seismic attenuation structure beneath the Japanese Islands and its tectonic and thermal implications, *Tectonophys.*, Vol.159, pp.163-180, 1989.
- 16) 活断層研究会: 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 1991. 日本の地震活動, 1997.
- 17) 蔦建群, 栗林栄一, 栗津裕之: 東三河地域の地震動に対する中央構造線の影響, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.97-100, 1999.
- 18) 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会編: 日本の地震活動, 1997.
- 19) 防災科学技術研究所: KiK-net のホームページ (<http://www.kik.bosai.go.jp/>).

(2001. 9. 5 受付)

SPATIAL VARIATION OF Q_S -VALUE ESTIMATED FROM DOUBLE SPECTRAL RATIO OF STRONG MOTION RECORDS

Yasuo IZUTANI and Daisuke IKEGAYA

Spatial variation of Q_S -value can be estimated using double spectral ratio of strong motion records. Q_S -value estimated at the central Aichi Prefecture is high relatively to that in the eastern and western parts of Aichi Prefecture. Median Tectonic Line passes through the eastern part and an active fault zone exists in the western part, which is supposed to be the cause of the low Q_S . The spatial variation of Q_S -value may be closely related to the heterogeneity of the crustal structure such as asperity distribution in the crust.