후쿠시마와 동일본 지역 내 담수어의 활성 세슘 오염 현황

미즈코 코시아키 & 쿠보 히데야

시가대학교 위험연구센터

주제: 보존

환경 모니터링

위험인자

어류학

수신

2012년 3월 13일

승인

2013년 4월 5일

간행

2013년 4월 29일

교신 및 자료 요청은 다음 주소로 실시할 것:

T.M. (ecofish77@yahoo.co.jp

이 논문은 방사성원소인 세슘 137 (Cs134를 포함한 준 Cs137)의 후쿠시마 및 동일본 지역 내 담수어 오염에 관한 개요를 2011년 일본 수산성이 간행한 데이터를 기반으로 작성한 것이다. 후쿠시마 원자력발전소 북부 및 서부 지역에서 담수어 오염이 상당히 높게 확인되었다. 예를 들어, 아유 (Plecoglossus altivelis)의 평균 활성 세슘 (준 Cs137) 오염 수준은 발전소에서 북서쪽으로 20~40km 지점에 위치한 마노 강에서 2,657Bq/kg으로 나타났다.

발전소에서 서쪽으로 70~150km 떨어진 아이주 지역 내 아가노 river basin에서는 생물학적 축적 현상이 발견되었다. 육식어류인 Salmondae의 활성 세슘 (준 Cs137) 농도는 초식어류인 은어에 비해 두 배 정도 높게 나타났다. 은어의 활성 세슘 (준 Cs137) 오염은 동일본 전역에서 관측되었다. 심지어 발전소에서 남서쪽으로 400km 떨어진 시즈오카 현에서도 오염 현상이 어느 정도 확인되었다.

이러한 막대한 규모의 후쿠시마 원자력발전소 사고로 인해 6천만 명이 거주하는 동일본 내 광범위한 지역이 오염되었다[[1]](#endnote-1). 담수어 소비는 인간을 포함한 담수 생태계 생물로의 방사성 핵종을 전달하는 수중 통로라는 점에서 중요한 부분을 차지하고 있다[[2]](#endnote-2). 그러므로 담수어종 내 오염물질의 수생 생물축적은 심각한 문제가 된다[[3]](#endnote-3)[[4]](#endnote-4). 유럽 내 국가들은 체르노빌 사고로 인한 어류로의 방사성 핵종 전이를 연구했다.[[5]](#endnote-5), [[6]](#endnote-6), [[7]](#endnote-7). 벨라루시, 러시아 연방 및 우크라이나의 경우 해당 국가 내 수역 오염이 더욱 높게 나타났기 때문에 보다 많은 주의를 기울였다[[8]](#endnote-8),[[9]](#endnote-9). 그러나 후쿠시마의 경우 2011년 담수 생태계 오염에 관한 정보가 거의 없는 상태이다. 그러므로 이 논문은 일본 수산청이 발행한 2011년 데이터를 기준으로 후쿠시마와 동일본 지역의 활성 세슘 137 (준 Cs137)에 관한 내용에 초점을 두었다[[10]](#endnote-10).

결과

후쿠시마 현 내 오염도가 높은 지역. 후쿠시마 현은 일본 큐슈 섬 북동부에 위치하고 있다 (그림 1). 산악지형으로 인해 하마도리, 나카도리 및 아이주 (동쪽에서 서쪽으로) 세 지역으로 구분된다. 하마도리는 태평양을 접하고 있는 해안지역이며 아부쿠마 고원을 기준으로 나카도리 (중앙 분지)와 분리되어 있다. 가장 서쪽에 위치한 아이주는 중심부에 아이주 분지가 위치한 산악지역이다. 세 곳의 국립공원, 한 곳의 준 국립공원, 그리고 11개 현 지정 공원 등 후쿠시마 현 전역에는 여전히 자연자원이 풍부하다. 이 산은 아부쿠마강과 아가강과 같은 많은 강의 수원 및 분지로부터 뻗어져간다. 아부쿠마 고원은 토종 삼림 청개구리 (Rhacophorus arboreus)와 도룡뇽 (Hynobius lichenatus, Hynobius nigrescens)와 같은 풍부한 지역 내 야생동물과 현 공원으로 지정되어 있다. 은어 (Plecoglossidae: Plecoglossus altivelis altivelis), 연어 (Salmonidae: Oncorhynchus masou, Salvelinus leucomaenis) 및 잉어 (Cyprinidae: Tribolodon hakonensis, Cyprinus carpio, Carassius.sp)등이 민물 어업 및 낚시에서 아주 인기 많은 어종이다.

후쿠시마 원자력발전소는 하마도리에 위치하고 있다. 동쪽으로는 태평양, 서쪽으로는 아부쿠마 고원이 위치하고 있기 때문에 발전소 남북 지역의 오염도가 상당히 높다. 리다테 마을과 다테 시 등이 속한다. 마노강 상류는 리다테 마을과 미나미-소우마 시를 가로질러 흐른다. 사고 2개월 후 일본 국토교통성에서 마노강을 조사하였다[[11]](#endnote-11). 2011년 5월 29일 마지마교에서 측정한 미나미소마 시 마노강의 바닥면 오염도는 Cs134: 6,900 Bq/kg, Cs137: 7,800 Bq/kg였다. 하류 지역 및 다테 시 아부쿠마 지역의 경우 오염도다 보다 높게 나타났다. 사고 2개월 후 환경성에서 다테 시 아부쿠마강을 조사하였다. 2011년 5월 24일 타이쇼교에서 측정한 다테 시 아부쿠마강의 바닥면의 오염도는 Cs134: 11,000 Bq/kg, Cs137: 12,000 Bq/kg였다. 2011년 5월에서 9월 사이 위의 강 또는 지류에서 포획한 은어, 연간 및 초식성 동물의 방사성 세슘 (준 Cs 137)의 오염 수준을 측정하였다. 마노강에서 포획한 종의 세슘 생물축적은 평균 2,657 Bq/kg (n=3, 중간값 2,900 Bq/kg, 범위 1,770 - 3,300 Bq/kg)였으며 다테 시 아부쿠마강의 강은 평균 1,770 Bq/kg (n=11, 중간값 1,170 Bq/kg, 범위 650 - 2,080 Bq/kg)였다.



그림 1. 후쿠시마 현 수자원 체계 푸른색으로 나타난 부분이 수자원 체계이다: 아가강 분지는 후쿠시마 서편에, 아부쿠마강은 후쿠시마 중앙에 위치하고 있다. 녹색은 산맥 또는 고도 1,000m 이상의 고원을 표시하며 노란색은 원자력발전소 사고로 인해 오염이 심하게 이뤄진 지역이다. 윈도우 2000/XP/VISTA/7용 GIS 소프트웨어 MANDARA 버전 9.35 (저작권: 1992–2011 Tani Kenji)를 사용하여 지도를 제작하였다.

아가강 분지의 생물축적 (서부 후쿠시마). 아가강 분지는 서부 후쿠시마의 아이주 지역 전체를 감싸고 있다. 아가강은 아이주 지역을 관통하여 동해 지역으로 흐른다. 원자력발전소에서 서쪽으로 70km 넘게 흐르고 아부쿠마 고원과 오오우 산맥 모두가 사이에 있기 때문에 Cs137 오염 수준은 마노강과 아부쿠마강 지역에 비해 낮게 나타났다. 사고 2개월 후 후쿠시마 현에서 아이주 지역의 아가노강 (아가강 분지)과 아이주 남부 지역을 조사하였다[[12]](#endnote-12). 2011년 5월 27일 미야코교에서 측정한 아이주 지역의 아가노강 바닥 토양 오염도 조사 결과는 Cs134: 29 Bg/kq, Cs137: 33 Bq/kg로 나타났고 2011년 5월 27일 타지마교에서 측정한 미나미-아이주 지역의 아가노강 오염도는 Cs134: 29 Bq/kg, Cs137: 34 Bq/kg로 나타났다. 아가강 분지의 경우 어류의 생물축적 결과가 제대로 분석되었다. 그림 2는 분지에서 포획한 세 가지 어종의 준 Cs137 오염과 생물축적 결과를 보여주고 있다 (즉, Plecoglossidae (Plecoglossus altivelis n=18), Cyprinidae (Tribolodon hakonensis n=25, Cyprinus carpio n=5, Carassius sp. n=11) 및 Salmonidae(Oncorhynchus masou n=12, Salvelinus leucomaenis n=13), 2011년 4월 - 11월 사이).

 Kruskal - Walls 시험결과 p = 0.05의 유의도에서 p = 0.008 ≤ 0.05를 나타내기 때문에 활성 세슘 오염 수준을 기반으로 한 세 어군 사이에서 차이가 존재함을 충분히 증명할 수 있다. 초식성인 Plecoglossidae의 중간값은 세 어군 중 가장 낮은 수치를 보였다 (n=18, 평균 50.64 Bq/kg, 중앙값 5 46.00 Bq/kg, 범위 12.00–90.00 Bq/kg). 잡식성 어종인 Cyprinidae의 중앙값은 Plecoglossidae에 비해 1.6배 (n=41, 평균값 79.80 Bq/kg, 중앙값 72.00 Bq/kg, 범위 15.00–210.00 Bq/kg), 육식성인 Salmonidae의 중앙값은 1.9배 (n=25, 평균값 96.24 Bq/kg, 중앙값 89.00 Bq/kg, 범위 17–200 Bq/kg)높게 나타났다.



그림 2. 아가강 분지 내 서식 중인 각 어종에서 발생한 활성 세슘 (준 Cs137)의 오염 범위를 표시하는 오차 그래프. 상자 그래프는 해당 데이터의 4분면 범위 사이를 보여준다. 각 상자에 있는 막대는 중앙값을 의미한다.

동일본 전역에 넓게 퍼진 오염. 후쿠시마 현 남서쪽에는 칸토 지역이 있으며 대도시 지역인 도쿄현, 이바라키현, 토치기현, 군마현, 사이타마현 및 치바현 등으로 구성되어 있다. 이 지역에는 일본 최대의 유역 중 하나인 토네 유역 (16,840km2)이 있다. 그러므로 온천, 강 및 지류가 많은 것은 물론 관개어로 및 도시 상수체계 등 수자원 네트워크 밀도 또한 높게 나타난다. 담수어종은 모든 형태의 수자원 체계에 서식한다. 그 결과 담수오염 수준은 담수 생태계의 환경오염에 관한 지표가 될 수 있다. 등위선 지도 (그림 3)는 2011년 5월에서 9월 사이 포획된 은어 (Plecoglossus)의 현별 평균 오염수준을 나타내고 있다.발전소로부터의 거리와 오염 수준 사이의 관계. 발전소로부터의 거리와 담수어의 준 Cs137 오염 수준 사이의 상관관계를 확인하였다. 각 현내 주요 도시와 원자력발전소 사이의 거리와 관련하여 준 Cs137 오염 수준에 관한 역회귀분석 결과에 따라 다음과 같은 방정식을 도출한다. Y=27339.822-1 x -75.13 (Y = 세슘, X = 발전소와 각 현 내 주요 도시간의 거리, Signif F = 0.009 < 0.05, 수정된 R 제곱 0.50). 원자력발전소 반경 100km 이내 지역의 경우 은어의 활성 세슘 오염 수준은 200 Bq/kg 이상, 100 - 200km 이내 지역의 경우 60 - 200 Bq/kg로 나타났다. 도쿄가 포함되는 200 - 300km 이내 지역의 경우 20 - 60 Bq/kg로 나타났다. 그러므로 담수어종의 오염이 동일본 내 모든 현으로 확장되었다고 추정할 수 있다. 오염도는 발전소에서 남서쪽으로 400km 떨어진 시즈오카현까지 퍼진 것으로 확인됐다.



그림 3. 등위선 지도는 동일본 내 각 현에서 2011년 5 - 9월 사이에 포획한 은어 (Plecoglossus)의 평균 활성 세슘 (준 Cs137) 오염도를 보여준다. 각 등위선의 중앙점은 현 내 주요 도시이다. 윈도우 2000/XP/VISTA/7용 GIS 소프트웨어 MANDARA 버전 9.35 (저작권: 1992–2011 Tani Kenji)를 사용하여 지도를 제작하였다.

토의

일본의 담수체계는 발달된 논, 관개수로 및 도시 상수도 등 그 밀도가 상당히 높다. 그러므로 담수어종의 오염도는 유역 전역은 물론 농업용수 및 도시용수 체계 등과 같은 모든 형태의 용수 체계로 퍼져나갔을 것이라 생각해야 한다. 등위선 지도는 오염 성향을 상당히 잘 보여주고 있다. 담수어종의 오염도만으로는 생물죽적 경로에 관한 데이터 및 지식을 확보하기엔 부족하다. 그러므로 각 어종별로 생물축적을 감시하고 보다 넓은 지역을 조사해야 할 것이다. 이 논문에서는 역회귀분석을 통해 거리와 오염도 사이의 관계를 확인하였다. 그 결과 후쿠시마 사고로 인한 준 방사성 세슘 137의 영향력은 체르노빌과 비교할 때 심각하지 않은 것으로 보인다. 그러나 세슘이 제한된 지역 내 수자원에 집중되는 현상을 보이기 때문에 체르노빌에 비해 오염도는 더 높을 수 있다. 작은 웅덩이에 진흙이 들어 있는 논에 세슘 137이 포함되어 있다. 또한 세슘 137은 밀도가 높은 관개수로 및 도시 용수체계를 통해 전파 및 집중될 것이다. 예를 들어, 원자력발전소로부터 남서쪽으로 200km 떨어진 도쿄도 카시와 시의 키타시와교에서 2011년 11월 1일 측정한 타이쇼강 바닥 토양의 오염도는 Cs134: 4,335 Bq/kg, Cs137: 5,456 Bq/kg로 높게 나타났다.[[13]](#endnote-13). 그러므로 담수 생태계와 인간의 건강에 미치는 오염도에 관한 사항을 면밀히, 그리고 지속적으로 관찰해야 한다.

방법

2011년 담수어종의 방사성 세슘 데이터는 방사성 물질에 관한 긴급 식량 조사 매뉴얼에 기반하여 각 현 별로 분석이 이뤄졌다[[14]](#endnote-14). 이 매뉴얼은 긴급 상황에서 식량 안전을 위해 오염도가 높은 것으로 정의한 음식의 섭취를 피하기 위한 것이다. 그러므로 정확한 데이터 수집을 목적으로 하지 않는다. 그 결과 이 데이터는 세슘 134와 세슘 137을 구분하지 않았다. 그렇기 때문에 준 Cs137에 대해 이 논문에서 다룬 분석값에는 Cs134가 포함되어 있다. 담수어 내 방사성 세슘 오염도 측정을 위해 게르마늄 반도체 장비를 사용하였다. 측정 시간은 10분에서 1시간 사이였다. 보정은 주 단위로 Cs137에 대해서만 실시하였다. 방사성 세슘의 범위는 Cs137 회귀 방정식에만 적용되었다. Cs134가 상대적으로 많이 포함된 경우 수치는 과다 추정되었다. 담수어 표본은 식량 안전 긴급 정책을 통해 각 현 별로 수집했다. 조사에서 관측소별로 5 - 10kg의 어류를 수집하였다. 젖어 있는 상태의 어류를 사용하여 측정하였다. 은어와 작은 어류의 경우 전체 몸 크기를, 큰 물고기의 경우 음식으로 사용되는 부분을 측정하였다.

Acknowledgments

This paper was as part of the water risk research project at Center of Risk Research of Shiga University. Thankful that Mr. Shigeki Komori (WWFJapan) advised us for improvement of this paper.

Author contributions

T.M. wrote the main manuscript text and prepared figures. All authors reviewed the manuscript.

Additional information

Competing financial interests: The authors declare no competing financial interests. License: This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

How to cite this article: Mizuno, T.& Kubo,H.Overview of active cesium contamination of freshwater fish in Fukushima and Eastern Japan. Sci. Rep. 3, 1742; DOI:10.1038/srep01742 (2013).

1. 정보 모니터링 및 환경 방사성 수준, MEXT와 DOE 공중 모니터링, 일본 교육과학문부성, http://radioactivity.mext.go.jp/en/list/203/list-1.html (2013). [↑](#endnote-ref-1)
2. Joanna, B. et al. Radiocesium in Fish from the Savannah River and Steel Creek: Potential Food Chain Exposure to the Public. Risk Analysis Vol. 21, No.3, 545–559 (2001). [↑](#endnote-ref-2)
3. McCreedy, C. D., Jagoe, C. H., Glickman, L. T. & Brisbin Jr, I. L. Bioaccumulation of cesium-137 in yellow bullhead catfish (Ameiurus natalis) in habiting an abandoned nuclear reactor reservoir. Environmental Toxicology and Chemistry 16, 328–335 (1997). [↑](#endnote-ref-3)
4. Rowan, J. R. & Rasmussen, J. B. Bioaccumulation of radiocesium by fish: The influence of physicochemical factors and trophic structure. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science 51, 2388–2410 (1994). [↑](#endnote-ref-4)
5. Hakanson, L., Anderson, T. & Nilsson, A. Caesium-137 in perch in Swedish lakes after Chernobyl-present situation, relationships and trends. Environmental Pollution 58, 195–212 (1989). [↑](#endnote-ref-5)
6. Ugedal, O., Forseth, T., Jonsson, B. & Njastad, O. Sources of variation in radiocesium levels between individual fish from a Chernobyl contaminated Norwegian lake. Journal of Applied Ecology 32, 352–361 (1995). [↑](#endnote-ref-6)
7. Elliott, J. M. et al. Sources of variation in post-Chernobyl radiocesium in fish from two Cumbrian lakes (north-west England). Journal of Applied Ecology 29, 108–119 (1992). [↑](#endnote-ref-7)
8. 체르노빌 주변 어류의 방사성 오염에 관한 장기 조사. RYABOV I N Vol 79, 112–122 (2002). [↑](#endnote-ref-8)
9. 체르노빌 사고 후 환경적인 결과 및 그 완화: 체르노빌 포럼 전문가 그룹 '환경'의 20년에 걸친 경험 보고서. 비엔나: IAEA (2006). [↑](#endnote-ref-9)
10. Results of the inspection on radioactivity materials in fisheries products, Fisheries Agency, http://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/index.html (2012). [↑](#endnote-ref-10)
11. Urgent radionuclides monitoring report in public water system area of Fukushima prefecture (in Japanese), Ministry of Environment, http://www.env.go.jp/water/ suiiki/urgent/result201106.pdf (2011). [↑](#endnote-ref-11)
12. Urgent environmental radionuclides monitoring report in public water system area of Fukushima prefecture at 4/6/2011(in Japanese), Fukushima Prefecture, http://www.pref.fukushima.jp/j/koukyouyousuiikimonitaring.pdf (2011). [↑](#endnote-ref-12)
13. Final report of the highly contamination spot in Kashiwa city (in Japanese), Ministry of Environment, http://www.env.go.jp/press/press.php?serial514647 (2012). [↑](#endnote-ref-13)
14. The survey manual "Guide: Emergency Preparedness for Nuclear Facilities", Nuclear Safety Commission, June, 1980-final revised in 2010 (2010). [↑](#endnote-ref-14)