

過去の氣候變動과 炭酸가스

南極의 얼음에 갇혀있던 氣溫과 炭酸가스의 記錄, 地球계도의 변화, 구름의 영향과 氣候變動의 增幅 등 21世紀의 氣候·溫暖化 增幅은 어떻게 될 것인가? 다음은 日本 東北放射線科學센터의 千葉廉氏가 「原子力工業」誌 2月號에 發表한 내용이다

탄산가스 (CO₂) 문제에 대해서 세계적으로, 갑자기 논란의 대상이 되고 있다. 대기중의 CO₂는 계속 증가하고 있으며, 2050년경에는 배로 증가하여 지구의 평균기온이 3±1.5°C 상승할 것으로 예고되어 있다.

과거 100년간에 대기중의 CO₂농도는 280에서 350ppm까지 25% 증가하였으며, 지구의 평균기온은 0.5~0.7°C 상승했다. 이 수치로만 보면 온실효과가 나타나고 있는 듯이 보이지만, 「실제로 기온은 변동하고 있어서, 이 정도로는 자연변동의 범위를 넘었다고는 할 수 없다. CO₂가 증가하면 온난화한다는 예측은 옳지만, 이미 그 징후가 나타나고 있다고는 단언할 수 없다」는 견해도 제기되고 있다.

1940년대부터 1970년대에는 소빙하기가 온다고 할 정도로 기온이 계속 저하하였지만, 그 원인도 불명확하다. 따라서 1990년대에는 지구의 평균기온이 내려갈 가능성도 부정할 수 없다고 하니, CO₂가 지구온난화의 원인이라는 이론에 대해 회의적인 의견도 있다.

지구물리적인 현상의 설명이 환경에 관한 것이 되면 하나 하나의 프로세스가 올바른 것이며, 상황증거에 의거한 것인지, 아니면 가정에 의한 것인지 비전문가로서는 모르는 일이 많다. 정량적인 관계를 알면 프로세스에 가정이 있더라도 이런 의문은 상당히 납득할 수 있는 것이 된다.

최근에 과거의 기후변동을 정량적으로 설명할 수 있는 데이터가 발표되고 있다. 이것은 차세대에 온난화가 실제로 일어날 것을 시사하고 있다고 생각되는 매우 흥미있는 것으로서 本稿에서는 이를 중심으로 하여 論하고자 한다.

1. 南極의 얼음에 갇혀있던 氣溫과 炭酸가스의 記錄

빙하의 얼음을 술잔에 넣으면 얼음 속에 갇혀있던 몇만년 전의 공기가 얼음이 녹음에 따라 딱딱 소리를 내며 나온다. 남극대륙부, 평균기온 영하 55.5°C의 빙하위에 있는 소련 보스톡기지의 빙하에 구멍을 뚫어 2,083m의 얼음의 중심부가

채집되었다. 이것은 과거 16만년 동안 내려쌓인 눈이 굳은 것으로서 이 얼음의 샘플을 프랑스에 가져가 얼음속의 중수소를 분석하여 과거 16만년 동안의 기온을 알아내었다.

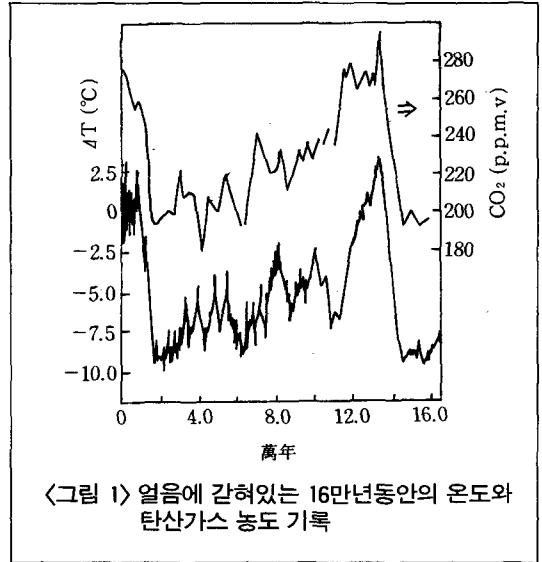
중수소를 함유한 물(DHO)은 보통의 물(H₂O)보다 무겁기 때문에 증발 비율이 온도에 따라 약간 다르다. 따라서 빙하 속의 중수소 비율을 정밀 측정하면 눈이 내렸을 때 해면의 온도를 알 수 있다.

또 같은 샘플에서 간혀있는 공기에 포함된 CO₂의 농도를 측정해 봄으로써 그림1과 같이 온도와 CO₂농도는 똑같이 변화하고 있음을 알았다. 횡축은 연대로서 0이 현재이며, 오른쪽으로 감에 따라 고대로 거슬러 올라간다. 오른쪽 끝은 16만년전에 상당한다. 종축 왼쪽은 온도로서 현대 온도와 차이로 표시되어 있고, 오른쪽은 공기 속의 CO₂농도로서 ppm단위로 표시되어 있다.

얼음을 1m 간격으로 분석하여 빠진 부분은 8m, 온도의 오차는 20%라는 극히 질이 높은 데이터이다. CO₂측정은 수백년의 평균치로서 측정점은 66점, 2,000~4,500년의 간격이다. 약 2만년전 유럽북부와 미대륙북부는 대빙하에 덮혀있어서 그림1 데이터의 수분이 증발한 해면의 온도는 지금보다 약 10°C 낮았음을 알 수 있다.

그림1을 보면 온도가 높은 온난기에는 CO₂도 많았으며, 한냉기에는 CO₂도 적었다. 온도와 CO₂농도는 평행하여 오르내리고 있다. 이것은 공기 속의 CO₂농도 감소가 과거의 대빙하시대를 초래했음을 암시한다. 과거의 데이터는 장래의 기후 변화를 예측하는데 어떤 예시를 하는가.

과거의 연대를 정하기 위해서는 얼음중심부의 깊이와 시간의 관계를 정해야 한다. 보스톡의 얼음 중심부 시간 스케일은 빙하의 흐름과 퇴적속도로 구해지는 것으로서 방사능의 감쇠와 같이 시간의 절대스케일은 없다. 즉, 논리적으로 계산하여 깊이 몇 m의 곳이 몇만년전에 대응한다는 식으로 결정된 것이다. 이 시간의 스케일이 올바른지 아닌지, 확실한 시간을 알고 있는 데이터와 비교해



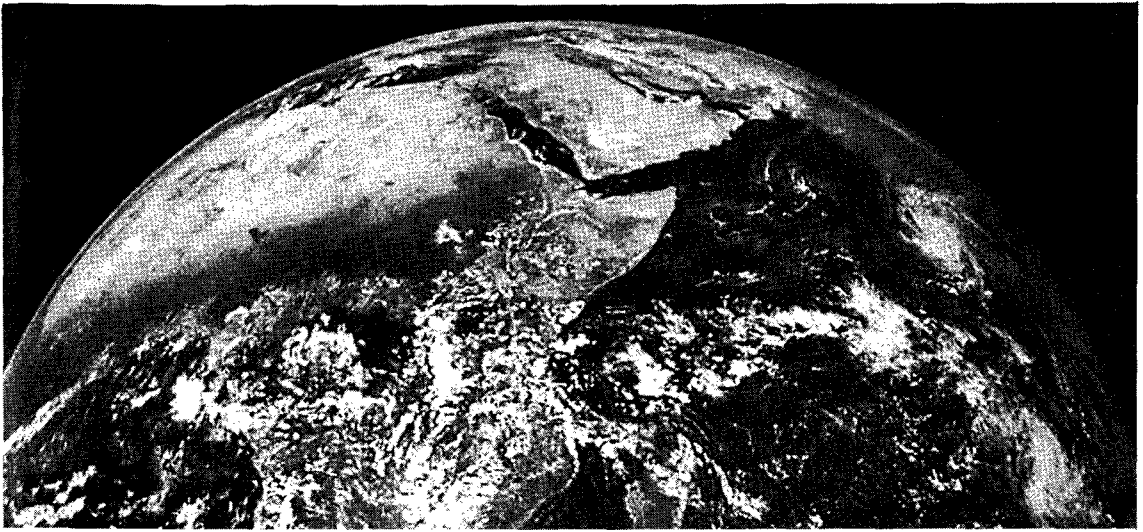
〈그림 1〉 얼음에 갇혀있는 16만년동안의 온도와 탄산가스 농도 기록

볼 필요가 있다.

한랭으로 인해 大陸氷床이 많아지면 해수의 ¹⁸O가 증가하고, 또 수온이 저하하면 생물 외피의 ¹⁸O가 증가하므로 ¹⁸O의 同位體比를 측정하면 해면온도의 정보를 얻을 수 있다. 대서양 해저 퇴적물의 ¹⁸O에서 온도를 정해, 중심부의 깊이방향은 ¹⁴C, ²³⁵U, ²³⁸U 계열붕괴의 방사능비로 절대시간을 정한 표준적인 고대의 온도와 연대를 보스톡연대와 비교하면 산과 골짜기의 위치는 아주 잘일치하므로 시간의 스케일은 신뢰할 수 있음이 나타나 있다.

과거 16만년간 대빙하시대를 사이에 두고 남반구와 북반구에서 기후는 거의 동시에 변동하고 있었음을 알 수 있다. 그러나 자세히 보면 그보다 전의 빙하기 길이가 보스톡이 약 2만년임에 비해 ¹⁸O는 1만년으로 이 부분은 시간스케일의 오차 가능성이 있다.

보스톡의 온도는 해저의 퇴적물과 같이 생물에 의한 연구과정을 거치지 않은 직접적인 데이터이다. 그만큼 불확정 요소가 적기 때문에 산과 골짜기는 날카롭게 보인다. 빙하기에서 온난기로의 변화는 급격하게 보이지만, 자세히 보면 몇천년 걸려 있음을 알 수 있다.



2. 地球軌道の變化

태양계의 혹성중 목성은 다른 혹성에 비해 현저하게 무거우므로 지구의 궤도는 목성 중력의 영향을 받아 약간 변화한다. 현재 자전축의 기울기는 23.7°이지만, 이것은 21.5°에서 24.5°까지 4만1천년의 주기로 변동한다. 지구 타원궤도의 일그러짐과 偏心率의 변화에는 10만년의 주기가 있으며, 이 사이 지구와 태양의 거리는 1,800만km 이상 변화한다.

또 현재는 지구가 태양에 접근하면 북반구가 겨울이지만, 1만년 전에는 남반구가 겨울일 때에 접근해 있었다. 近日點의 변동주기는 1만 9천년이고, 이밖에 2만3천년의 歲差運動周期가 있어서 이런 주기가 겹쳐 高緯度지방의 일사량이 변화하면 고위도지방의 기후가 크게 변화할 것이 예상된다. 자전축의 기울기가 적어지면 여름에 고위도의 온도가 올라가지 않으므로 겨울에 내려 쌓인 눈이 녹지 못한다. 시원한 여름이 계속되면 빙하가 발달하게 된다.

미란코비치는 유고슬라비아 베오그라드대학의 물리학자로서 북위 55~65도의 일사량 변화가 과거의 빙하시대를 초래했다고 결론을 내리고, 과거

로 거슬러 올라가 65만년간의 지구궤도 변화에 대한 계산을 시작하여 1920년에 첫 논문을 발표하였다.

이 이론은 대기대순환에 의한 기상의 변화는 복잡해서 북위 65도의 일사량만으로는 도저히 정할 수 없다는 이유로 기상학자들로 부터 신뢰를 받지 못했다. 미란코비치는 더욱 계산을 계속했는데 1940년에 나치 독일군의 침입에 의해 베오그라드가 전화에 휩쓸려 연구가 중단되었다.

빙하시대의 원인으로 지구궤도의 변화를 믿게 된 것은 미란코비치가 처음으로 이 이론을 발표한 지 50년후인 1970년대에 전세계의 해저퇴적물이 채집되어 ^{18}O 의 同位體比에서 과거의 온도변화를 알았고, 미란코비치의 太陽照度曲線의 북위 55도와 65도의 여름 일사량이 내려갔을때 한랭화가 일어나고 있다는 명료한 기후와의 상관관계를 알고나서 부터이다. 지금은 지구궤도의 변화는 빙하기와 온난화 반복진동의 일종의 페이스메이커로 인식되고 있다.

보스톡의 얼음 중심부의 데이터를 보면 온도와 CO_2 가 주기적으로 변화된 것으로 보인다. 보스톡의 논문 저자는 온도의 스펙트럼분석을 하여 주기를 계산하고, 지구궤도 변화의 주기와 비교해 보

았다. 데이터에서는 10만7천5백년, 4만5천7백년, 2만5천1백년의 주기가 나타났다. 궤도변화의 주기는 10만년, 4만1천년, 2만3천년, 1만9천년이고, 시간스케일의 어긋남과 주기의 겹치는 오차를 고려하여 1만9천년을 빼면 거의 일치한다.

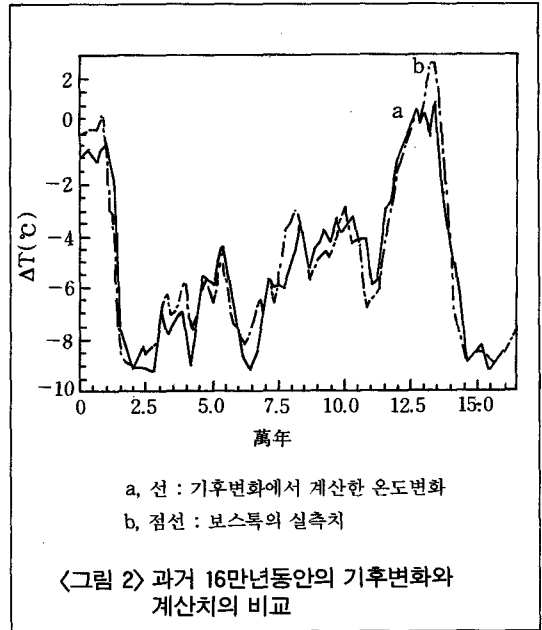
CO₂와 기온과는 평행하여 궤도변화와 기온에도 상관이 있다. 궤도변화가 계기가 되었음을 추측할 수 있고, 왜 CO₂가 줄었는지, 기온의 변화와 어느 쪽이 먼저인지 가설을 만들 수 있으나 지금 현재까지 진실은 알 수가 없다.

심해의 湧昇流가 있는 곳에서는 영양이 풍부함 심해수가 공급되어 플랑크톤이 잘 자란다. 해양의 플랑크톤이 증가하면 해수 속의 CO₂를 소비하여 공기중에서 공급되어 대기중의 CO₂가 감소된다. 이 플랑크톤의 일부는 해저에 가라앉는다. 해양의 생물생산량과 해저의 특정 플랑크톤 침전물과의 관계를 대서양에서 조사하여 이 관계를 이용해 빙하시대의 해저퇴적물에서 해양의 생산성을 구하면, 대서양 전체에서는 현대 보다도 생산량이 40% 많았음을 알 수 있었다. 이것은 대기중의 CO₂감소비율과 일치하며, CO₂변동-湧昇流에 의한 흡수설을 지지하는 것으로 보인다.

3. 보스톡의 温度와 計算의 比較

보스톡 얼음의 중심부로 부터 얻은 CO₂농도에서의 온실효과와 지구궤도의 변화에 의한 온도변화를 이론적으로 계산하여 측정된 과거 16만년간의 기온변화를 재현시킨 논문이 있다. 궤도변화에 의한 기온에의 영향은 북위 65도의 7월, 남위 78도 연평균, 남위 60도의 11월 일사량, 또 고위도 지방을 뒤덮은 얼음을 채취해 여기에 온실효과를 첨가하여 기온의 변화를 계산하면 결과는 그림2와 같이 온도변화의 실측치를 잘 재현할 수 있다.

그러나 이 계산은 기온변화를 전부 이론적으로 계산하여 실측치와 비교한 것은 아니다. 지구전체가 받는 일사량의 변화는 과거 100만년간에 0.3%밖에 차이가 없다. CO₂는 2만년전의 190ppm



에서 온난기의 280ppm까지 증가해 있다. 이에 따른 온실효과의 크기는 0.6도라고 평가하고 있다. 실측치의 변화에 맞추기 위해 상기 각각 원인의 온도변화를 따로따로 이론적으로 계산하여 각각에 계수를 곱해 실측치에 가장 잘 맞도록 계수를 정했다.

이것은 상기 각각의 요인이 기후변화에 미치는 영향의 크기를 조사한 것이 된다.

여기에서 10도나 되는 보스톡의 빙하기와 온난기의 온도차이를 설명하기 위해서는 계수를 크게 잡아야 한다. 그림2에서는 온실효과계수를 13으로 잡고 있다. 이것을 그대로 순수하게 해석하면 CO₂의 온실효과에 의한 영향이 여러가지 원인에 의해 13배로 확대된 것을 의미한다. 여러 파라미터를 바꿔보아도 CO₂에 의한 온실효과의 계수는 7~14가 된다.

이 논문의 저자는 「미지의 원인에 의한 장기 피드백이 작용하여 온도변화가 증폭된다」는 생각을 하고 있다. 최근에 이 「미지의 원인」의 공백을 메우는 구름의 효과가 위성의 데이터에서 밝혀진 것이다.

4. 구름의 影響과 氣候變動의 增幅

낮게 드리워진 두꺼운 구름은 태양광과 지구로부터의 방사를 동시에 차단하므로 차감 마이너스가 커서 따뜻해지지 않는다. 이에 비해 얇은 구름은 태양광은 통과하기 쉽지만, 지구의 방사를 흡수하여 지표를 따뜻하게 한다. 태양광에 의한 지표의 가열에 대해 구름은 냉각과 온실효과라는 두 가지 상반된 작용을 갖고, 실질효과는 이 두가지 차이에 의해 결정된다. 반드시 구름이 있기 때문에 따뜻해지지 않는다는 말은 아니다. 각각의 크기는 구름의 종류, 양, 지표의 온도에 따라 다르므로 일반적으로 평가하는 것은 곤란하다. 하층의 두꺼운 구름의 경우는 태양광의 반사가 크고, 냉각효과가 크기 때문에 새털구름과 같이 얇고 높은 고도에 나타나는 구름일수록 온실효과가 크다.

기후모델에서는 대기권을 많은 부분으로 나누어 그 중에서 수증기의 양을 정해 구름이 될 수 있는 비율을 구해 거기에서 구름에 의한 방사의 균형을 계산하고 있는데, 구름의 효과는 실측의 정보부족 때문에 모델에 따라 $+1W/m^2$ 에서 $-34W/m^2$ 까지 산포가 있고, 오차가 크기 때문에 기후와 기후의 변화를 연구할때 애로사항의 하나로 되어 있었다.

최근에 스페이스셔틀에서 발사된 위성에서 관측된 구름의 데이터 해석결과가 발표되어 지금까지 불확정 요소가 많았던 구름의 영향에 대해 정량적인 데이터를 얻을 수 있게 되었다. 해석이 끝난 것은 1985년 4월분 뿐이지만, 7월, 11월 및 1986년 1월분은 예비적인 데이터가 보고되었다.

전지구 평균적인 구름의 효과는 맑은 하늘과 대비하여 가열을 플러스, 냉각을 마이너스로 나타내면,

- 태양광의 흡수 $-44.5W/m^2$
- 적외선방사 $+31.3W/m^2$
- 차이 $-13.2W/m^2$ 의 냉각이었다.

해석이 완료되지 않았기 때문인지 아닌지는 모르겠으나 차이가 $-13.2W/m^2$ (1986년 1월)이었

다. 이들 수치는 해석이 진행됨에 의해서 계절에 따라 또는 연도에 따라, 다소 변할 가능성도 있을 것이다.

CO₂로 환산하여 2배 증가일 때의 온난화는 기후모델에 의한 시뮬레이션에서는 $+4W/m^2$ 정도이고, 이에 따르면 평균기온이 3도~5도 상승한다. 구름의 효과는 전지구에서 평균하면 $-13.2W/m^2$ 이 되어 CO₂ 온실효과의 3~5배 냉각효과를 갖음을 의미한다.

기후대, 또는 위도에 의한 구름의 영향에 대해 평균 에너지收支는,

- a) 열대에서는 거의 0
- b) 북위 15도부터 남위 15도 사이에서는 평균해서 겨우 마이너스
- c) 해양의 中緯度, 高緯度에서는 30도 이상으로 크게 마이너스가 된다. 태평양과 대서양에서는 마이너스가 특히 커서 -50에서 $-100W/m^2$
- d) 캐나다와 북극 등 얼음이 많은 영역에서는 플러스가 된다.

중, 고위도지방의 해양은 층운과 폭풍 때문에 마이너스가 크다.

빙하시대는 기온은 열대, 아열대에서는 2°C, 중위도에는 5°C, 고위도에서는 10°C로 지금보다 낮았던 것으로 추정된다. 북반구에서 남쪽으로 흐르는 해류가 찬바다물을 남쪽으로 옮겨 남북방향의 온도경사가 커져 층운과 폭풍(사이클론)의 빈도가 커져 맑은 하늘에 비해 구름의 효과가 $-50W/m^2$ 인 지대가 남쪽으로 이동하여 에너지수지가 제로에 가까운 영역을 감소시켜 한랭화를 증폭시켰다고 생각된다.

관동지방은 현재의 북해도 북부 근처의 기후였을 것이다. 위도에서 10도 기후대가 남쪽으로 움직이는, 즉 북위 45°에서 35°로 이동하면 마이너스의 영역이 넓어져 연간 계속되면 북반구에서 $-3W/m^2$ 냉각될 것으로 계산된다. $-3W/m^2$ 의 냉각은 2~3°C의 평균기온 저하를 초래한다. CO₂가 감소되어 기온이 내려가면 기후대가 남쪽으로 이동해 더 기온을 내리는 플러스의 피드백이



된 것으로 추정된다.

CO₂ 40% 감소에 의한 온도강하를 0.6°C로 전망하고 남극의 얼음에 나타난 해면온도 저하 10°C를 설명하기 위해 미지의 증폭률을 약 10배로 하고 있는데, 여기서는 지구의 평균기온을 생각하자. 필자는 평균기온으로 0.6°C는 너무 적다고 생각된다.

CO₂ 2배 증가시의 온도상승은 ~3°C, 과거 100년간의 온도상승 0.5~0.7°C가 CO₂ 25% 증가에 의한 온실효과와 모순되지 않는다면, CO₂ 40% 감소라면 2°C 정도의 기온저하가 있어도 이상하지 않을 것이다. 여기에 기후대의 남하에 의한 구름의 효과에 의해 2~3°C의 기온저하를 추가하면 빙하시대 평균기온의 저하 4~5°C가 된다. 이런 수치는 앞으로의 연구에 의해 조금은 변할 것이다. 또 다른 새로운 팩터도 나올 것이다. 그러나 제일 근사치라고는 하지만, 지금까지 정량적으로 설명할 수 없었던 빙하시대의 기온저하가 실측치에 의거 설명할 수 있는 범위에 들어간 의미는 크다.

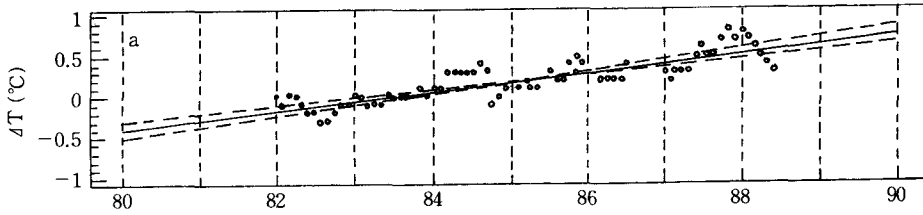
5. 21世紀의 氣候 · 温暖化는 增幅될 것인가

그러면 21세기는 어떻게 될까? 남극기온의 경

사가 적은 해는 아열대상공의 고기압이 전체적으로 북부에 편중된 것을 경험으로 잘 알고 있다. 온실효과로 따뜻해지면 북방기온의 상승이 커서 남방기온의 경사는 적어진다. 이것을 확대 해석하면 온실가스가 증가하여 온실효과에 의한 기온상승이 있으면 중위도 기후대는 북상한다. 아열대의 온도영역이 확대되면 구름의 효과는 생각과 보은의 수지 0에 가까운 영역이 증가하여 온난화가 증폭될 가능성이 높다.

바다는 열용량이 크고, 또 태양광의 흡수율이 크므로 바다의 영향이 크다. 바다는 혼합을 위한 시간의 지연이 생각되지만, 최근 인공위성에서 관측된 해양표면의 온도는 이미 상승을 시작했다는 보고가 나왔다. 남북 60°의 위도 사이에 2.5°의 간격으로 구획지워진 해상온도를 관측하여 1982년부터 1988년사이에 매월 200만회 이상의 측정치가 계산되었다. 이 결과는 그림3과 같이 지구의 대양은 매년 약 0.1°씩 온도가 상승하고 있음을 알았다. 이것은 종래의 선박이나 부표 측정치의 2배에 가깝다. 특히, 태평양과 대서양에서 현저하다고 한다.

氷河期에서 間氷期로 기후의 이동이 상당히 진전되었을 무렵인 약 1만천년전 북극과 북미동부는 일전하여 다시 추워졌다. Younger-Dryas 진동이라고 불리고 있다. 1만7백년전 이 寒期는



〈그림 3〉 인공위성에서 관측된 1982년부터 1988년 6월까지의 해양표면 월평균 온도변화

갑자기 끝났고, 북대서양과 그 주변의 기후는 놀랍게도 20년이라는 단기간에 격변한 것을 그린랜드의 얼음분석으로 알았다. 이때 그린랜드남부의 기온은 몇도쯤 상승하여 심한 변화는 50년간이었고, 눈의 수분이 증발한 해면온도는 7°C 상승했다.

이것은 남극의 얼음으로는 분석할 수 없으므로 북대서양 부근의 국지적인 것으로 생각되고 있다. 이런 국지적인, 또 피드백이 작용했다고 생각되는 급격한 기온변화에 대해 현재의 평형상태를 추적해 가는 기후는 모델이 충분하지 않을지도 모른다는 지적도 있다.

6. 結 論

보스톡의 데이터는 1987년말, 구름의 효과는 1989년 2월, 해양의 온도상승이 발표된 것은 1989년 4월이었다. CO₂의 온실효과를 조사하고 있는 동안에 가까운 과거에 발생한 최대의 기후변동·빙하시대의 기후가 가장 근사치와 정량적으로 풀려 그것이 장래 기후변동의 이해와 관련됨을 알았으며, 매우 재미있고 자극적인 것이었다.

1만5천년전의 빙하시대는 충분한 연구와 조사도 할 수 있는 시대이며 그다지 먼 시대도 아니다. 네안델탈인이 유럽에 출현한 것은 8만년전이고, 4만년전에 그 유적도 소실되었다. 3만5천년전에는 현대인의 선조가 나타났다. 고대인의 흥망이 기후변동 때문이라고 한다면 이해하기 쉽지만 보

스톡의 데이터로는 알 수 없다.

지금까지의 서술내용으로 보아 온난화는 실제로 진행될 가능성이 크다. 6천년전부터 4천백년경까지의 고온기는 평균기온이 2~3°C 높고 climatic optimam이라 불리고 있었는데, 최적기후였던 것은 일부지역 뿐이므로 지금은 hypsithermal이라고 한다.

고대사의 책을 보면 지금부터 5,500년전 슈멜에서 문명이 발생했다. 楔形文字가 처음으로 출현한 것은 BC3100년경이다. BC 2350년경 점토판에 쓰여진 대차문서에서 그 무렵 보리는 뿌린 씨앗의 80배 수확이 있었고, 사람은 맥주를 마시고, 가축에게도 곡물을 줄 수 있었다. 그리고 250년후 수확은 20배로 떨어져 버렸다. 최적기온의 시대는 끝나 있었다. 중세 유럽에서는 수확이 2~3배, 풍작이라도 5~6배였다는 문명이 발생했을 무렵의 메소포타미아는 놀랄만큼 풍요로웠다. 바빌론과 앗시리아의 흥망과 바벨탑의 전설은 풍요로운 지역이 기후가 나빠져 사막화되어 가는 과정에서 민족간의 생존을 위한 격렬한 전쟁이었을 것이다.

현재 세계의 인구는 각기 지역의 환경이 허용하는 한도선에 가깝다. 21세기의 super hypsithermal은 기후가 좋아지는 곳도, 나빠지는 곳도 있을 것이다. 그러나 기후의 변화에 대응하는 인구의 재분배는 따라가지 못하고 있다. 민족의 대이동과 그것을 저지하기 위한 새로운 분쟁의 시대인가?