

ブイロボットの観測資料による舞鶴湾の熱収支*

地 迫 良 一**

要 旨

1975年7月から1977年4月まで、舞鶴湾に設置された気象庁の海洋観測用ブイロボット2号機で得られた観測資料を用いて、舞鶴湾での日々の熱収支成分を計算し、月別の値と年間量を求めた。

海面に入る純放射量（太陽放射の正味量と海面の有効赤外放射量との差）は、7月に最大値を、12月に最小値をそれぞれ示した。蒸発による潜熱輸送量と顕熱輸送量との和は、7月に最小値を、12月に最大値をそれぞれ示した。

純放射量と潜熱輸送量および顕熱輸送量との差引量は、3月下旬から4月上旬にかけてと、9月下旬から10月上旬にかけてを境にして、それぞれ正の値と負の値になり始めて、年変化をしている。その差引量は、7月に $11 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{month}$ 前後の最大値を、12月に $-10 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{month}$ 前後の最小値をそれぞれ示した。

年間では、入る熱量が損失熱量よりも多く、若狭湾に比べて対馬暖流の影響を受けにくい。

1. まえがき

日本海の熱収支成分の変化で短期間のものを扱った例はいくつかあるが、年内変化を扱った例はアルドシナ(1957)と宮崎(1952)のものがある。これまでの熱収支成分の計算では、雲量、太陽放射量、海面温度等は、気候学的平均図や沿岸の観測値を参考として求められている。

1975年7月から1977年4月までの間、第1図に示す点にブイロボットが設置された。舞鶴湾は、日本海に面した若狭湾の西部の丹後海に付属した湾で、図のように東西に分かれている。ブイロボットの概形を第2図に示す。ブイロボットは、直径6mの円形で、海面上5mに風向計、風速計、気温計、湿度計を備え、海面下0.5m（海面温度用）と10mには水温計を備えている。また、気圧計も備えている。

風速は、3杯風速計による10分間平均値である。水温と気温は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、湿度は $\pm 5\%$ 、気圧は $\pm 0.5 \text{ mb}$ の精度がある。これらの観測値が、毎日6時間ごと（03, 09, 15, 21 JST）に舞鶴海洋気象台で自動的に無線で受信されてタイプ印字された。

これらの気象要素の日平均値と、舞鶴海洋気象台で得られる日々の雲量と全天日射量の観測値を用いて、日々の熱収支成分を計算し、月別の値と年間量を求めた。

2. 熱収支成分の計算方法

熱収支の計算は、

$$Q_t = Q_s - Q_b - Q_e - Q_c$$

なる式で行なった。ここで、 Q_s は海面に達する直達と散乱の太陽放射の正味量、 Q_b は海面の有効赤外放射量、 Q_e は海面での蒸発による潜熱輸送量である。また、 Q_c は海面と大気との対流による顕熱輸送量である。 Q_t は熱収支の差引量であり、海面をとおして水に貯えられる貯留熱で、水中での流れによる熱混合フラックスも含まれている。

(1) 太陽放射の正味量 Q_s

太陽放射の正味量は、

$$Q_s = Q_{so} (1 - r)$$

と表わされる。ここで、 Q_{so} は舞鶴海洋気象台での全天日射量の観測値 ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{day}$) である。気象台からブイロボットまでは直線距離で約 5 km なので、 Q_{so} を適用できる。

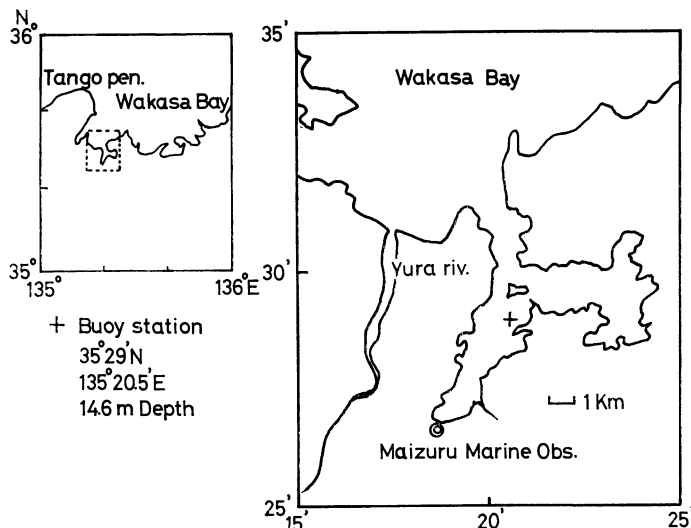
r は、太陽放射に対する水面のアルベドである。シフコフ(1952)による、全短波放射に対する月別・緯度別の水面のアルベドから、北緯 30 度と 40 度の値の平均値

* Air-Sea Heat Budget in Maizuru Bay with the Data of the Ocean Data Buoy.

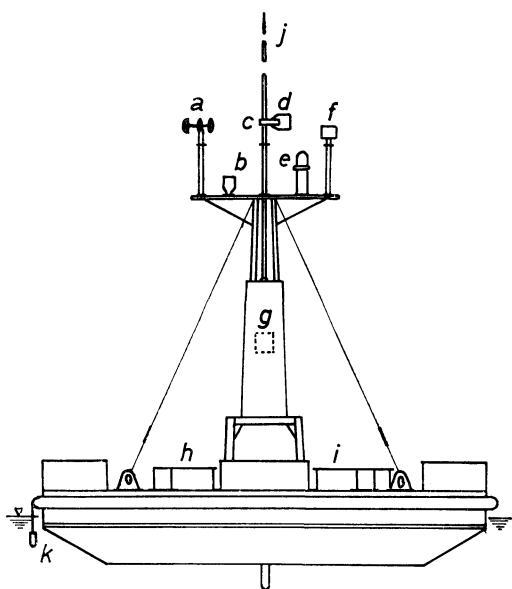
** R. Chisako, 舞鶴海洋気象台。

——1977年11月7日受領——

——1978年2月13日受理——



第1図 舞鶴湾の地形図とブイロボットの位置.



第2図 ブイロボットの概形.

a; 風速計, b; コンパス, c; 気温計, d; 風向計, e; 灯器, f; 湿度計, g; 気圧計, h; 蓄電池収納部, i; 電子機器収納部, j; アンテナ, k; 水温計.

を用いた. シフコフによるアルベドを第1表に示す.

(2) 海面の有効赤外放射量 Q_b

海面の有効赤外放射量は, 気温, 海面温度, 雲量に関係する.

Berljand (1952) による式は,

$$Q_b = s\delta\theta_w^4(0.39 - 0.058\sqrt{e_a})(1 - kc) + 4s\delta\theta_w^3(T_w - T_a)$$

と表わされる. ここに, s は黒体放射と海面放射との比であり, 海水の場合は完全黒体とみなして 1.0 とした.

δ はステファンボルツマン定数で 5.67×10^{-5} ($\text{erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{K}^4$), θ_w は絶対温度で表わした海面温度, e_a は海面上 5 m の蒸気圧 (mb), c は雲量 (0~1.0), k は緯度による係数で 35°N では 0.65 である. また, T_w と T_a はそれぞれ海面温度と気温である.

(3) 蒸発による潜熱輸送量 Q_e

塩水が飽和蒸気圧に及ぼす影響については Sverdrup (1951) の式があり,

$$f_s = f_a(1 - 0.00053 s)$$

と表わされる. ここに, f_s は塩分 s ‰ なる海水の飽和蒸気圧であり, f_a は淡水での飽和蒸気圧である.

丹後海における表面の塩分の観測値(舞鶴海洋気象台, 1955~1957)によると, 舞鶴湾口付近での平均値は月別では 25.8~33.8 ‰ の範囲を示し, f_s が f_a に比べて

第1表 太陽放射に対する水面のアルベド (シフコフ, 1952 による)。

緯度 \ 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
40°N	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.11	0.12
30°	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09

第2表 1976年の気象要素観測値の月平均値。

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W_s (m/s)	4.2	4.3	3.9	4.1	3.3	2.7	2.9	3.0	2.9	3.6	4.0	4.3
P (mb)	1019.8	1020.6	1019.7	1018.5	1012.5	1009.9	1010.3	1010.3	1012.6	1016.5	1021.4	1020.0
H (%)	85	85	84	82	85	89	88	90	88	86	87	84
T_a (°C)	4.0	6.3	7.1	12.2	16.8	20.6	24.7	25.3	20.4	16.2	10.2	6.6
T_w (°C)	10.6	9.4	10.1	12.8	16.7	21.1	24.2	26.5	23.1	20.2	16.2	13.4
T_{10} (°C)	13.8	11.7	10.3	9.6	14.8	18.0	20.6	25.1	24.0	20.8	17.5	—
e_a (mb)	6.92	8.31	8.61	12.17	16.62	21.85	27.44	29.11	21.44	16.10	11.04	8.22
e_w (mb)	12.51	11.60	12.12	14.58	18.72	24.48	29.63	34.02	27.75	23.24	18.14	15.06
c (1/10)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	0.7	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7
$T_w - T_a$ (°C)	6.5	3.1	3.0	0.6	-0.1	0.5	-0.5	1.3	2.7	4.0	6.0	6.8
$e_w - e_a$ (mb)	5.59	3.30	3.51	2.41	2.10	2.63	2.19	4.91	6.31	7.14	7.10	6.84

W_s ; 風速, P ; 気圧, H ; 相対湿度, T_a ; 気温, T_w ; 海面温度, T_{10} ; 10m水温, e_a ; 蒸気圧, e_w ; 海面の飽和蒸気圧, c ; 雲量, $T_w - T_a$; 海面温度と気温との差, $e_w - e_a$; 海面との蒸気圧差。

第3表 a 1976年の熱収支成分計算値の月別値 (Kcal/cm²・month) と年間量 (Kcal/cm²・year)。

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年間量
Q_s	5.62	5.70	8.03	11.35	13.15	10.84	14.40	11.78	9.46	6.97	4.36	4.12	105.78
Q_b	5.03	3.33	3.51	2.43	2.19	1.43	1.11	1.65	2.81	3.59	4.62	5.29	36.99
Q_e	4.83	3.18	3.37	2.42	2.19	2.09	1.83	3.28	3.75	5.34	5.51	5.68	43.47
Q_c	3.73	2.09	1.66	0.53	0.78	0.00	-0.13	0.40	1.12	1.96	3.01	3.79	18.94
$Q_s - Q_b$	0.60	2.37	4.52	8.92	10.96	9.41	13.29	10.13	6.64	3.38	-0.26	-1.17	68.79
$Q_e + Q_c$	8.56	5.27	5.03	2.95	2.97	2.09	1.70	3.68	4.87	7.30	8.51	9.47	62.40
Q_t	-7.96	-2.90	-0.51	5.97	7.99	7.33	11.59	6.45	1.77	-3.92	-8.77	-10.64	6.40

Q_s ; 太陽放射の正味量, Q_b ; 海面の有効赤外放射量, Q_e ; 潜熱輸送量, Q_c ; 顕熱輸送量, $Q_s - Q_b$; 純放射量, $Q_e + Q_c$; 潜熱輸送量と顕熱輸送量との和, Q_t ; 純放射量と潜熱および顕熱輸送量との差引量。

第3表 b ボーエン比 R の月平均値と年平均値および蒸発量 E の月別値 (mm/month) と年間量 (mm/year)。

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
R	0.78	0.72	0.38	0.34	0.21	-0.05	0.14	0.07	0.35	0.36	0.56	0.68	0.38
E	82.9	55.1	58.2	41.8	38.0	36.3	31.7	56.6	64.3	92.0	92.9	97.5	747.3

約2%低い。したがって、

$$e_w = 0.98 e_o$$

と表わせる。ここに、 e_o は海面温度 T_w における淡水での飽和蒸気圧であり、 e_w は T_w における海面の飽和蒸気圧である。以下の計算には上の式の e_w を用いた。

蒸発量と蒸発による潜熱輸送量の式には、係数の違いにより種々ある。ここでは、風がない場合も考慮した舞鶴海洋气象台 (1972) の式を用いた。それは、試作した蒸発皿を用いて海洋や沿岸での観測値から求めた実験式である。蒸発量 E (mm/day) と蒸発による潜熱輸送量 Q_e (cal/cm²・day) は、それぞれ、

$$E = 0.08(e_w - e_a) W_s + 0.7$$

$$Q_e = 4.68(e_w - e_a) W_s + 40$$

と表わされる。ここで、 W_s は風速 (m/s) である。

(4) 対流による顕熱輸送量 Q_c

顕熱輸送量は、海面温度と気温との差や風速に関係するが、先の潜熱輸送量 Q_e を用いると、

$$Q_c = R Q_e$$

と表わされる。ここに、 R はボーエン比 (1926) であり、

$$R = 0.66 \frac{P}{1000} \cdot \frac{T_w - T_a}{e_w - e_a}$$

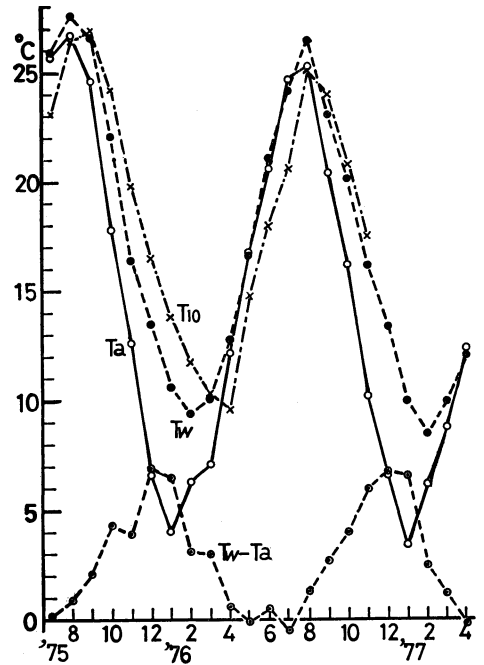
と表わされる。 P は気圧 (mb) である。

3. 結果

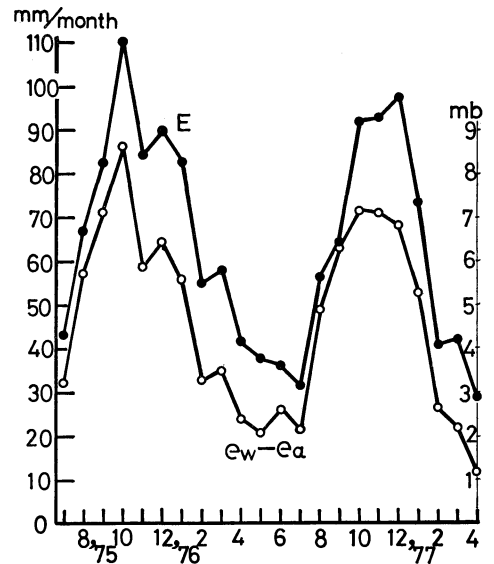
第2表には、1976年の気象要素観測値の月平均値を、第3表には、熱収支成分の計算値の月別値と年間量を示す。

第3図は、気温、海面温度、10m水温 (途中から欠測)、および、海面温度と気温との差の月平均値をそれぞれ示す。気温と海面温度は、8月に、それぞれ26°C前後と27°C前後の最高値を示した。また、気温は1月に、海面温度は2月に、それぞれ4°C前後と9°C前後の最低値を示した。海面温度と気温との差は、12月と1月に6.5°C前後の最大値を、4月から7月にかけて0°C前後の最小値を、それぞれ示した。

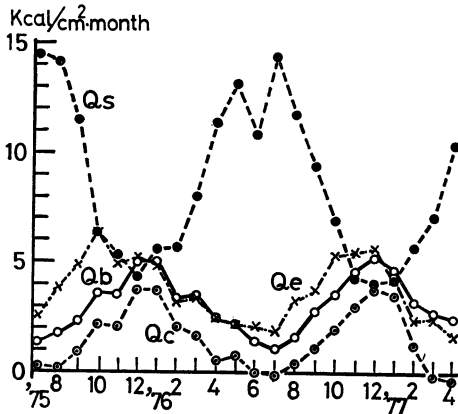
海面温度と10m水温を比べると、9月上旬から中旬にかけてと3月上旬から中旬にかけて、両者が等しくなる時期があり、9月から3月までは海面温度が10m水温よりも低い。若狭湾の沿岸部では9月から3月まで下層ほど暖かくなる状態が見られる (舞鶴海洋气象台, 1974) ことが、舞鶴湾にも当てはまることわかる。1952年



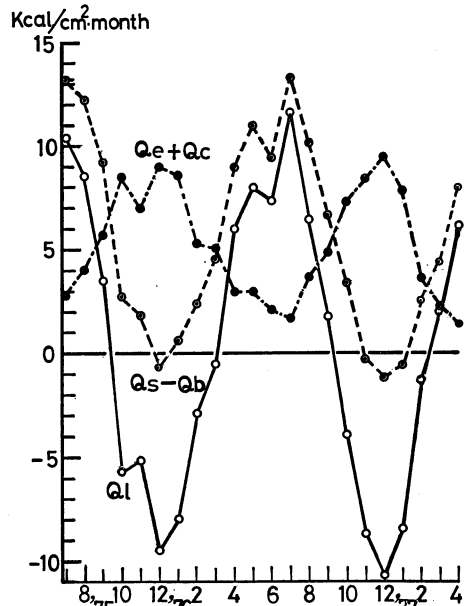
第3図 気温 T_a 、海面温度 T_w 、10m水温 T_{10} 、および、海面温度と気温との差 $T_w - T_a$ の月平均値。



第4図 海面の飽和蒸気圧と海面上5mの蒸気圧との差の月平均値 $e_w - e_a$ (mb)、および、蒸発量の月別値 E (mm/month)。



第5図 太陽放射の正味量 Q_s 、海面の有効赤外放射量 Q_b 、潜熱輸送量 Q_e 、および、顕熱輸送量 Q_c の月別値。



第6図 純放射量 $Q_s - Q_b$ 、潜熱輸送量と顕熱輸送量との和 $Q_e + Q_c$ 、および、それらの差引量 Q_l の月別値。

1961年まで舞鶴東湾で行なわれた観測では、塩分濃度は年間を通じてほとんど変化がない。したがって、上のような状態は水温に関してだけ不安定状態である。

第4図は、海面の飽和蒸気圧 e_w と海面上5mの蒸気圧 e_a との差(蒸気圧差)の月平均値と月別の蒸発量を示す。蒸気圧差は、8月から1月にかけて大きく、2月から7月にかけては小さい。蒸発量は、10月から1月にかけて多く、4月から7月にかけては少ない。蒸発量には、10月下旬から現われる上空の寒気と、それに伴う季節風の影響が大きい。

第5図は、太陽放射の正味量 Q_s 、海面の有効赤外放射量 Q_b 、蒸発の潜熱輸送量 Q_e 、および、顕熱輸送量 Q_c を示す。 Q_s は、7月に約 $14.5 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{month}$ の最大値を示し、12月に約 $4 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{month}$ の最小値を示した。また、6月は、梅雨の曇天の多いせいで5月よりも少ない値を示した。 Q_b 、 Q_e 、 Q_c は暖候期に低い値を示し、寒候期に高い値を示して、いずれも Q_s とは逆の変化を示した。

第6図は、海面に入る純放射量 $Q_s - Q_b$ と、海面から大気中へ失う潜熱輸送量と顕熱輸送量 $Q_e + Q_c$ 、および、それらの差引量 Q_l を示す。純放射量すなわち海面に達する太陽放射の正味量と、海面の有効赤外放射量との差は、7月に約 $13 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{month}$ の最大値を、12月に約 $-1 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{month}$ の最小値をそれぞれ示した。

潜熱輸送量と顕熱輸送量との和は、7月に最小値を、12月に最大値をそれぞれ示した。

純放射量と潜熱輸送量および顕熱輸送量との差引量

は、7月に $11 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{month}$ 前後の最大値を、12月に $-10 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{month}$ 前後の最小値をそれぞれ示した。その差引量を旬別にみると、9月下旬から10月上旬にかけて負の値となり始め、3月下旬から4月上旬にかけて正の値となり始める。すなわち、海面温度と10m水温が等しくなる時期からやや遅れたこれらの時期を境にして、年変化をしている。

熱収支にあずかる各成分の年間値を用いると、差引量 Q_l は海流作用によって出入りした熱量になる。1976年の場合、それは、 $6.4 \text{ Kcal/cm}^2 \cdot \text{year}$ で、入り込む熱量が失う熱量よりも多いことを示した。

若狭湾の調査(舞鶴海洋气象台他、1955~1957, 1959~1965)のうち、舞鶴湾口付近の月平均水温と1976年の舞鶴湾内の水温とを比べると、年平均では海面温度は約 0.9°C 、10m水温は約 1°C それぞれ湾内の方が低い。

舞鶴湾では、恒流および潮流は $0.1 \sim 0.2$ ノットである(舞鶴海洋气象台、1960)が、これは若狭湾の流速の約5分の1である。

以上のことから、舞鶴湾は、若狭湾に比べて対馬暖流の影響は受けにくく、わずかながら水温が低い。このことは、海面に入る熱量が失う熱量よりも多いことによっ

て補償されていることになる。

一方、アルドシナが、日本海を緯度・経度で2度ごとの区画に分けて行なった計算のうち、35~37°N・134~136°Eの区画の年間の収支量は、計算式の係数等の違いはあるが、約-25 Kcal/cm²・yearである。この区画は、山陰沖から若狭湾およびその北方海域を含み、対馬暖流の流路を含んでいる。そのため、年間では失う熱量が入り込む熱量よりも多い分が対馬暖流のもたらす熱で補償されていることになる。

4. あとがき

現在、日本近海に気象庁の海洋観測用パイロボットが展開されている。その開発段階で試作されたパイロボット2号機は、日本海に設置されて種々の成果を上げてきた。2号機の最後の観測資料をまとめるにあたり、これまでパイロボットの保守等に御協力をいただいた、舞鶴海洋気象台の海洋課ならびに清風丸の諸氏に感謝の意を表する。

文 献

赤松英雄, 1973: 日本海南部海域における冬期の海

洋・大気間の熱交換量について, 海と空, 48, 131~143.

橋本祐一, 1973: 若狭湾西部(丹後海)における海況の一般的特性, 海と空, 49, 69~84.

神戸・長崎・舞鶴各海洋気象台海上気象課, 気象研究所海洋研究部, 1975: 日本海西部海域における海気熱交換と海況の短期変動の研究, 気象庁研究時報, 27, 37~54.

Budyko, M.I., 1973: 気候と生命(上), 内嶋善兵衛・岩切敏訳, 東京大学出版会.

舞鶴海洋気象台海上気象課, 1972: 日本海の上気象, 気象庁技術報告, 80, 1~62.

舞鶴海洋気象台海洋課, 1974: 若狭湾(I), 沿岸海洋研究ノート, 11, 143~150.

—, 1974: 若狭湾(II), 沿岸海洋研究ノート, 12, 81~86.

—, 1975: 若狭湾(III), 沿岸海洋研究ノート, 12, 145~149.

—, 1976: 若狭湾(IV), 沿岸海洋研究ノート, 13, 45~47.

当舎万寿夫, 1973: 日本海における熱収支, 気象研究ノート, 115, 117~192.

Woodrow, C. Jacobs, 1942: On the Energy Exchange between Sea and Atmosphere, J. Mar. Res., V, 37~66.

気象学会および関連学会行事予定

行 事 名	開 催 年 月 日	主 催 団 体 等	場 所
日本気象学会 昭和53年総会・春季大会	昭和53年 5月23日~25日	日本気象学会	気象庁
WMOシンポジウム「成層圏成分の変化に関する地球物理学的状態とその影響」	昭和53年 9月26日~30日	国際気象機構 WMO	トロント(ヨーク大学)
山の気象シンポジウム	昭和53年 6月17日		気象庁
第15回理工学における同位元素研究発表会	昭和53年 6月27日~29日		国立教育会館
第15回自然災害科学総合シンポジウム	昭和53年10月20日~21日		九州大学記念講堂